

当代水电科技

Contemporary Hydropower Technology

2026 年第 3 卷 第 2 期

主办单位：新加坡聚知刊出版有限公司

国际刊号 ISSN: 3060-8570 (O)

3060-8767 (P)

发行周期：月刊

出版日期：25 号

官 网：<http://www.juzhikan.cn/>

地 址：152 BEACH ROAD#11-05 GATEWAY

EAST SINGAPORE (189721)

邮 箱：info@juzhikan.asia

编 委 会

主 编：张朝利

编 委：赵 钊

责任编辑：陈丽媛 李 楠

美 编：李 飞

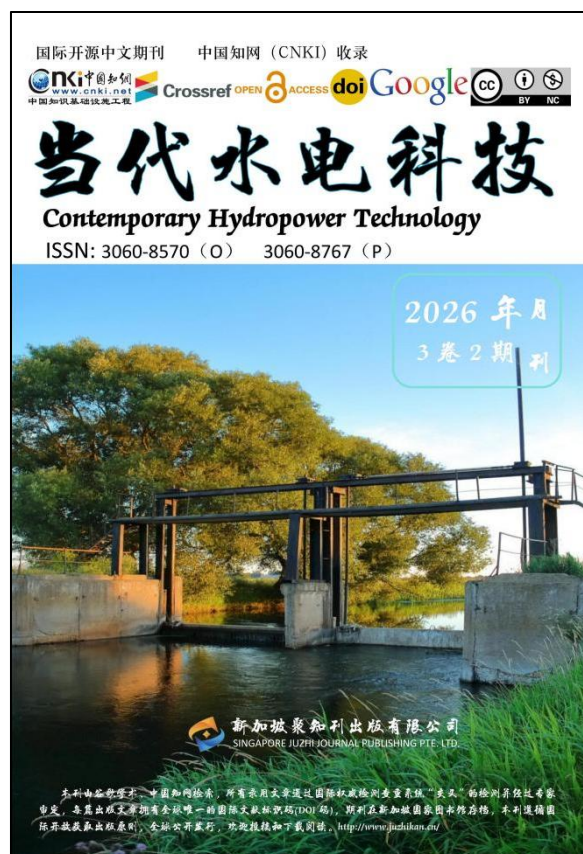
定 价：S\$ 5.40 ￥30.00

本刊声明

本刊所载的所有文章均不代表本刊编辑部观点；作者文图责任自负，如有侵犯他人版权或者其它权利的行为，本刊概不负连带责任。

读者有权在任何媒介以任何形式复制、发行本刊文章。亦可修改、转换或以本刊文章为基础进行创作。在分享及使用本刊文章时，使用者必须注明原文作者及出处并标注对本刊文章所进行的修改。关于本刊文章版权的最终解释权归 juzhikanpress 所有。下载打印请上官网数据中心 juzhikan.cn。

警告著作权人：稿件凡经本刊使用，如无电子版或书面的特殊声明，即视为作者同意授权本刊及本刊网络合作媒体进行电子版信息网络传播。



《当代水电科技》本刊长期以来注重质量，编排规范，选稿较严格，学术水平较高，深受高校教师及科研院所研究人员青睐。本刊为开源 (Open Access) 期刊，出刊的所有文章均可在全球范围内免费下载，中国主流数据收录。

本刊关注水电工程技术最新研究进展的国际开源中文期刊，刊登的内容主要围绕水利工程、地下水研究、水环境污染与防治，建筑给排水，节水与养水、建筑工程、水文水资源、水利工程设计与管理、工程技术、农田水利、自动控制、新能源系统与设备、人工智能与传感技术、电力自动化、电力设备、系统解决方案等，促进行业交流与展示，为推动国内外水电工程技术和科学技术发展服务。

本刊是一本由同行评审的高要求、高水准的学术期刊出版物，编者鼓励与本刊相关的、有理论和实践贡献的来稿。

目 录

◆电力技术◆

基于用户画像的电力员工安全素养评估系统设计与实现 叶峰豪 张楠 喻召杰	1
钢管防腐中频加热系统功率因数优化研究 方铁牛 方子文	8
浅谈变压器温升试验 王文浩 郑文文 徐小博	12
新能源风电场电气自动化控制技术的应用 毕伟杰 屈春花 赵祥凯 田波 石峰	15
电力工程建设中的智能化技术研究 李庆峰	18
发电厂高效电机的选型与能效提升路径研究 张鹏	21
高效电机改造助力发电厂碳减排的技术路径 林小凯	24
多协议低压电力采集软件设计 周鹏	27
光伏场站间谐波产生机理与新型滤波装置抑制策略 王闯	30
夏季基准电力负荷预测改进灰色模型及其应用 赵竞哲	34
风电塔筒环焊缝 UT 检测信号特征与缺陷识别 张羽	38

◆机电工程◆

基于物联网技术的电气设备远程监控与故障诊断系统设计 曹俊杰	41
智能电气自动化系统中的数据安全与隐私保护研究 姚云飞	44
基于 PLC 技术的电气工程自动化控制分析 张朋华 梁灏霖	47
核级电缆用交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺优化 曹波	50
承荷探测电缆聚四氟乙烯绝缘制备工艺探讨 葛仁友	53
聚丙烯绝缘电缆生产制造的若干问题探讨 胡君臣	56

◆水资源规划◆

智慧水利系统架构与关键技术研究 赵博雅 杨帆	59
大规模水利水电工程对水资源的综合利用研究 马健胜	62
河湖生态修复与水资源高效利用协同路径研究 成智 林林	65
水文水资源管理在水利工程中的有效应用 田雨	68
阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期积雪参数与洪水特征的关联性研究 钟超	71

◆水利工程◆

农业节水灌溉智能控制系统改造实践 方鑫	74
农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理 周志兴	77
城乡供水项目水土保持方案编制要点 李艳平	80
抽水蓄能电站混凝土施工技术及其质量控制探讨 李燕子	83
复杂地质条件下水利隧洞施工支护技术优化研究 钟超文	86
电气工程领域中的信息技术集成研究 林学文	89
水利工程中隧洞引水测量控制的技术研究 张凯 李奉育 刘林	92
GNSS-RTK 与全站仪联合测量在河道断面监测中的精度优化研究 彭李阳	95
深埋隧洞断层破碎带突泥涌水灾害机理与综合控制技术研究 ——以滇中引水工程香炉山隧洞桩号 DL I 3+570~3+680 涌水突泥为例 和超 郭勇	98

脉冲电沉积制备纳米晶镁合金涂层的显微组织演变与耐蚀机制研究 谢中柱	101
鄂尔多斯市风积沙地区渠道工程施工技术与质量控制 樊爱丽	104
数字赋能视角下 BIM 技术在水利工程数字化建设中的核心作用探析 范媛	107
水泵站房及钢柱的施工方法 卢涛 陶家兵	110
水利工程规划设计阶段风险与防控路径探讨 宁德奇	113
水利堤防的施工设备和施工方法 谢水根 谢红伟 庄耀海	116
弱膨胀性泥岩大断面隧道的施工方法 徐广松 徐海童 王思文	119
中长期市场下梯级水电运行风险分析方法研究 燕恒	122
八罗田水库左岸低临谷渗漏防渗处理措施初探 杨澄坤	125
大直径顶管穿越地层过程中对周围土体的影响 赵鑫	128
既有填方工程薄条形帮宽结构及其施工方法 职瑞 江晓星 蒋成伟	131
小型农田水利设施建设管护问题与对策——以宣威市某农业水价综合改革项目为例 朱莉	134
河道生态治理工程施工技术与实践 张金鹏	137

◆ 施工工程 ◆

基于规范化管理的水库安全生产运行体系构建与实践 秦玉盼 王文龙 李飞飞	140
绿色建筑理念下建设工程施工管理优化路径探析 杜军平	143
地震对市政桥梁结构性能的影响及加固措施 缪章杰	146
水利水电施工管理中的进度控制与优化策略 蔡关敏	149
水利工程汛期应急处置措施研究 江晓星 骆伟	152
水利工程施工管理和维修养护存在的问题及对策 林林	155
水利施工中混凝土施工技术的应用和管理分析 刘胜军	158
高烈度地震区地下水工洞室群抗震韧性评估及加固技术 杨杉杉	161
基于改进 A* 算法的电缆布局方法研究 陈杰 宁芊	164
农用地土壤重金属污染现状及修复研究 汪羿之	168

基于用户画像的电力员工安全素养评估系统设计与实现

叶峰豪¹ 张楠² 喻召杰²

1 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东东莞, 523129;

2 南网数字运营软件科技(广东)有限公司, 广东深圳, 518000;

摘要: 针对电力企业安全生产中人为因素导致事故频发的问题, 本文设计了一种基于用户画像的员工安全素养评估系统。通过整合人资、工作管理、安全学习及培训考试等多源数据, 构建了包含 18 项标签的用户画像体系, 并建立涵盖安全知识、能力、意识及工作资历的四维安全素养评估指标体系。采用 CRITIC 法客观计算指标权重, 实现量化评分与等级划分。系统通过数据采集、清洗、动态评估及可视化展示(如雷达图、趋势分析), 为员工提供个人素养诊断, 为管理者提供部门整体分析工具。实际应用表明, 该系统能有效消除主观偏差, 实现安全素养的精准评估与动态监测, 为电力企业安全管理提供了数据支撑和决策依据。

关键词: 电力员工; 安全素养; 用户画像; 系统设计与实现

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.001

引言

安全生产一直以来都受国家和企业的高度重视, 国家和企业不断颁布和修订相关安全法律法规, 规范安全生产的相关问题, 强化企业主体安全监管责任, 强调建设本质安全型企业。电力企业作为社会公众型企业, 为社会经济运行提供基础保障, 其安全生产关

系到千家万户、关系到国计民生^[1]。随着本质安全理论在电力企业的实践和研究, 人因要素逐渐成为造成安全事故的主要因素之一, 而人员的安全素养是反映人因安全的重要指标之一^[2-4]。员工安全素养评估是企业安全文化建设的重要组成部分, 是安全工作的内容之一, 是电力企业安全生产的前提, 提高经济效益的基础^[5,6]。因此, 对电力员工安全素养评估研究很有必要。

国内外相关学者对安全素养评估开展了大量研究。而安全素养指标的构建和提取是研究安全素养评估的关键, 因此大部分研究都先围绕评估指标构建出发^[7]。吴声声和宋守信等人^[8]结合冰山模型建立了电力企业员工的胜任力模型, 模型中包含如安全知识、安全制度规章、安全操作技能等 12 个指标。张景钢与谭允祯^[9]将企业职工的安全素质描述为一个多层次、多因素的复杂系统, 该系统可以划分为业务素质、安全教育、安全意识和身体素质四个维度, 并涵盖文化程度、身体状况、责任感、安全规章了解程度等十个指标。Tiju 等人^[10]对电力公司员工安全的影响因素进行研究, 研究表明个人因素、安全气候因素和工人的健康状况与安全事故显著相

关, 年龄、岗位和教育经验显著影响电力员工的安全行为, 安全参与、安全知识、安全培训可以减少安全事故的发生。Esteban-Lloret 等^[11]对数百起安全事故进行分析后, 指出绝大多数的电力事故都是由于员工操作不严谨、安全意识欠缺而引起的, 因此员工的安全素养与员工的安全能力和安全意识有很大关系。Shi Juan^[12]在评估电力员工不安全行为中指出, 员工的安全意识、身体健康、安全知识和情绪管理能力很大程度上影响不安全行为的发生。但目前研究构建的评估指标体系中往往存在较多主观指标, 需要人为进行打分, 或指标需要填写相关量表进行测量, 造成指标数据获取困难、评估周期过长、评估结果存在主观性等问题; 其次, 评估系统往往仅输出单一评估结果, 缺乏数据之间的关联分析, 难以安全管理提供深入洞察法分析。

随着大数据等技术的发展, 用户画像技术展现出广阔的应用前景^[13]。该技术通过整合用户不同维度的相关信息数据生成一系列标签, 可以更加客观具象的表示用户, 从而能够有针对性的为用户提供相关服务。用户画像技术目前已被广泛应用于电子商务^[14]、图书馆^[15]、健康医疗^[16]等领域。在企业人员管理方面, 闫泓序等人^[17]基于用户画像技术构建了员工离职预测模型, 最终得到了三种类型的离职员工画像, 以此驱动人力资源管理业务。杨柳等人^[18]利用员工标签化信息和绩效等数据构建员工画像, 并基于随机森林实现人岗匹配评估。魏孔鹏等人^[19]通过采集学生各种行为数据, 通过构建用户画像

模型实现对学生综合素质的评估。然而，用户画像技术在电力企业人员安全管理，特别是电力员工安全素养评估领域的应用研究鲜见相关公开文献。

针对安全素养评估指标研究的不足和用户画像在电力企业人员安全管理方面应用的缺乏等问题，本文通过采集员工多维度客观行为数据，构建了一套客观、全面、智能的员工用户画像标签体系，并基于该用户画像标签设计与实现了电力员工安全素养评估系统，便于管理者直观了解员工安全素养状况，有效支撑电力企业安全管理决策。

1 电力员工用户画像构建

用户画像是对目标群体的抽象化表示，通过搜集用户的人口统计特征、行为数据等多维度信息进行统计分析，挖掘用户的特征并抽象出一个标签化的用户模型^[20]。通过为电力员工构建用户画像，可以全方位多维度的展

示员工各方面能力和素养，而企业管理者和领导可以直观快速的了解员工各个方面情况，及时发现存在安全缺陷的员工，可以从源头避免安全事故发生。

1.1 画像数据采集及处理

为了建立全面科学的电力员工用户画像，首先根据相关文献、企业相关安全文化管理文件^[21-24]和实际业务系统情况综合确定标签数据，在标签选取时需满足客观性、科学性、可操作、可量化等原则。本文的员工数据来源主要包括：人资系统、工作管理系统、安全学习活动系统、考试培训系统，标签数据均为客观数字化的标签，可以直接从业务系统中获取得到。标签涵盖员工的知识、技能、意识、工作表现等多个方面，可以较为全面的反映员工的安全素养，各数据的基本情况如表 1 所示。

表 1 用户画像数据基本情况

数据来源	标签数据
人资系统	性别、年龄、工龄、专业、学历、岗位、部门
工作管理系统	工作开票次数、知识类违章次数、技能类违章次数
安全学习活动系统	安全咨询学习时长、安全咨询学习篇数、安全活动参与次数
考试培训系统	安规考试成绩、理论培训学时、理论培训考核情况、实操培训学时、实操培训考核情况

由于各标签数据需要从各个不同的业务系统采集，原始数据会不可避免地出现数据冗余、缺失和标准不统一等问题，因此在采集数据后还需要对数据进行数据清理和数据集成等操作^[25]。本文采用了 Python 语言编写数据处理程序，运用正则表达式、数据转换函数等技术对来自不同来源的数据进行清洗，去除重复、错误和无效的数据，并进行格式统一和标准化处理。具体来说，在采集数据后，首先检查数据的完整性，确保用户画像各个重要字段 100%全覆盖，若出现缺失，则剔除记录或联系业务部门进行补全；由于数据由多个数据源采集得到，数据可能存在重复且数据格式不同，还需对数据

进行标准化和去重操作，如培训时长各个系统统计单位不统一，最终将数据单位统一为小时；此外，还需对各统计标签数据合理性进行验证，如考试分数不在 0~100 之间，违章次数过多等，若出现错误，则排查是否统计或数据源出错。通过对数据的系统化清洗，可确保后续构建的员工用户画像标签真实可靠，便于后续评估模型的构建。

1.2 用户画像构建

结合电力企业员工特点以及相关系统数据调研，最终构建共包含 4 种标签类型的 18 个具体标签的用户画像标签体系，具体标签和标签值如表 2 所示。

表 2 用户画像标签体系

标签类型	标签名称	标签值	含义及重要性
基本信息标签	性别	男/女	反映员工的静态属性，是员工用户画像的基本标签
	年龄	X 岁	
	工龄	X 年	
	专业	变电/配电/输电等	
	部门	XXX	
	学历	硕士及以上/本科/大专/高中	
	职称	初级/中级/高级/无	

考试培训行为标签	安规成绩	X 分	记录员工参与培训和考试的动态数据；直接反映员工的学习能力、知识掌握程度和职业发展潜力
	理论培训学时	X 时/月	
	理论培训考核成绩	X 分	
	实操培训学时	X 时/月	
	实操培训考核成绩	X 分	
安全学习行为标签	安全咨询学习时长	X 小时/月	记录员工自主学习行为，反映员工的安全意识，推动企业的安全文化建设
	安全咨询学习篇数	X 篇/月	
	安全活动参与次数	X 次/月	
工作行为标签	工作次数	X 次/月	记录员工在实际工作中的表现，反映员工的综合能力
	知识类违章次数	X 次/月	
	技能类违章次数	X 次/月	

其中，性别、年龄、专业等员工基本信息标签可以从人资系统中直接获取，而安规成绩、安全咨询学习时长、工作次数等行为标签需要从原始数据中统计员工最近一个月的各项行为数据。

2 安全素养评估模型构建

安全素养评估模型的构建是实现电力员工精准化安全管理的关键环节。本章基于前文构建的用户画像标签体系建立“指标筛选-权重计算-结果评估”的三阶段评估模型框架。该模型将员工的静态属性和动态行为数据相结合，并充分考虑了不同专业或部门之间的差异性，保证了评估的客观性和科学性，为后续系统实现奠定了理论基础。

2.1 评估指标构建及量化

为了多维度多层次客观地对员工安全素养进行评估，本文基于构建的用户画像标签体系选取部分影响员工安全素养的标签并按照目标层、准则层、指标层的结构构建评估指标体系，目标层即为最终的评价内容—电网作业人员的安全素养，准则层分为四大维度：安全知识 B1、安全能力 B2、安全意识 B3、工作资历与经验 B4，指标层指标为用户画像标签体系中的部分标签，如图 1 所示。

安全知识是指可以通过学习等手段获得和掌握的用于预防、应对各种风险事故的知识^[26]，能有效减少事故灾害的发生，确保生命和财产的安全^[27]。主要依据员工每月参与安规考试的平均成绩 C1、理论培训时长 C2、理论培训成绩 C3、知识类违章次数 C4 四项指标来评估员工安全知识的表现。

安全能力则是指员工从事某一岗位应该掌握的完成工作的能力，能确保员工安全正确的完成工作任务^[28]。主要从员工的实操培训时长 C5、实操培训成绩 C6 以及

技能类违章次数 C7 进行评估。

安全意识是指人在思想上对安全生产的认知和态度，安全意识的高低也决定了员工面对突发状况能否采取正确措施的能力，是安全素养中必不可少的一个层面^[29]。安全意识主要参考员工安全咨询的阅读篇数 C8 安全咨询学习时长 C9 以及安全活动的参与度 C10。

工作资历与经验是指员工经过长时间工作积攒的经验和能力，资历和经验越丰富的员工，其安全素养也越高^[30]。主要评估指标包括员工的月度参与工作次数 C11、工龄 C12、职称 C13、学历 C14。



图 1 电力员工安全素养评估指标体系

其中安规考试成绩 C1、理论培训成绩 C3、实操培训成绩 C6 等指标可以直接得到 0-100 分的量化结果，但理论培训学时 C2、知识类违章次数 C4、职称 C13、学历 C14 等指标取值范围并不统一，需要采用最大最小归一化或类别赋分对指标进行量化。

对于培训学时、安全活动参与次数、工作次数指标，虽然指标本身是一个量化值，但取值范围并不是 0-100，因此需要对指标进行归一化，将指标结果归一化至 0-100 内。通过式（1）将上述指标最大最小归一化至 0-100 区间内。

$$y = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

式中，y 为量化后的指标值， x_i 为指标值， $x_{\min}$ 为

同一部门员工内该指标的最低值或根据实际情况设置该指标的最低值, $x_{\max}$ 为同一部门员工中该指标的最大值或依据实际情况设置该指标的最大值。

而对于职称、学历、违章次数等指标值是依据相关业务情况通过指定赋分表将定性指标转换为定量指标, 如表 3、表 4、表 5 所示。

表 3 职称赋分表

职称	高级	中级	初级	无
分值	100	90	80	70

表 4 学历赋分表

学历	硕士及以上	本科	大专	高中	高中以下
分值	100	90	80	70	60

表 5 违章次数赋分表

违章次数	0	1	2	3 次及以上
分值	100	80	60	0

2.2 指标权重计算

经过对数据的清洗和预处理后, 数据的质量和可靠性有一定的保障, 因此在确定指标权重时, 指标数据本身也具有参考价值, 若不同员工同一指标的数据波动性较大, 说明该指标具有很好的区分性, 因此该指标权重也应较大。本文采用了 CRITIC 法来确定各评估指标权重, CRITIC 法是从指标数据出发, 综合考虑了指标数据的变异性和冲突性^[31]。在计算前需要对各指标数据进行归一化处理, 变异系数计算公式如式 (2) 所示。

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{p-1}} \quad (2)$$

式中, p 表示指标样本数量, x_{ij} 表示第 j 个样本的第 i 个指标值, $\bar{x}_i$ 表示第 i 个指标的平均值。冲突系数如式 (3) 所示。

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{j=1}^p (x_j - \bar{x})(y_j - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{j=1}^p (x_j - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{j=1}^p (y_j - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中, x 、 y 表示两个不同的指标, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 表示对应指标的均值, ρ_{xy} 则表示指标 x 和指标 y 之间的相关系数, R_x 表示指标 x 的冲突系数。

最终可以得到 CRITIC 法计算指标权重公式如式 (4) 所示:

$$W_i = \frac{S_i \sum_{j=1}^p (1 - \rho_{ij})}{\sum_{i=1}^n S_i \sum_{j=1}^p (1 - \rho_{ij})} \quad (4)$$

指标层数据可以直接从用户画像标签体系中获得, 依据式 (4) 可以计算出指标层各指标的权重。之后依据式 (5) 可以计算出准则层各指标值, 再依据式 (4) 可以得到准则层各指标的权重。

$$y_j = \sum_{i=1}^n W_i x_i \quad (5)$$

式中, y_j 为准则层指标值, n 为该准则层指标对应指标层的指标数量, W_i 为指标层各指标权重, x_i 为指标层各指标值。

考虑到不同专业或部门在工作和培训方面存在差异, 指标数据会呈现较大的离散性, 会影响指标权重的合理分配。因此, 在实际应用中以专业或部门为单位单独计算各自的指标权重。表 6 为某专业依据专业相关员工的指标数据计算得到的指标权重。

表 6 评估指标客观权重

准则层	准则权重	指标层	指标权重
安全知识	0.3472	安规考试成绩	0.3528
		理论培训学时	0.1522
		理论培训考核成绩	0.3891
		知识类违章次数	0.1059
安全能力	0.2475	实操培训学时	0.1947
		实操培训考核成绩	0.5271
		技能类违章次数	0.2782
安全意识	0.1401	安全咨询学习时长	0.3729
		安全咨询学习篇数	0.4973
		安全活动参与度	0.1298
工作资历与经验	0.2652	工作次数	0.5345
		工龄	0.1604
		职称	0.1263
		学历	0.1788

2.3 安全素养评估结果计算

确定各指标的权重后, 对获取的员工指标数据后, 依据式 (5) 可以计算得到该员工准则层各指标值, 再依据式 (6) 可以计算得到最终的安全素养评分值。

$$z = \sum_{i=1}^m \omega_i y_i \quad (6)$$

式中, z 为安全素养评分值, m 为准则层指标数量, ω_i 为准则层各指标权重, y_i 为准则层各指标值。

最终, 依据安全素养量化值确定对应的安全素养等

级,具体对应关系如表 7 所示。可以方便管理人员根据员工不同的安全素养等级针对性的实施不同的安全管理策略。

表 7 电力员工安全素养等级对应表

等级	优秀	良好	中等	一般	差
分值	90-100	80-90	70-80	60-70	60 以下

3 系统设计与实现

3.1 系统架构设计

基于用户画像的电力员工安全素养评估系统架构如图 2 所示,主要包括数据源层、数据处理层、数据应用层等三层。

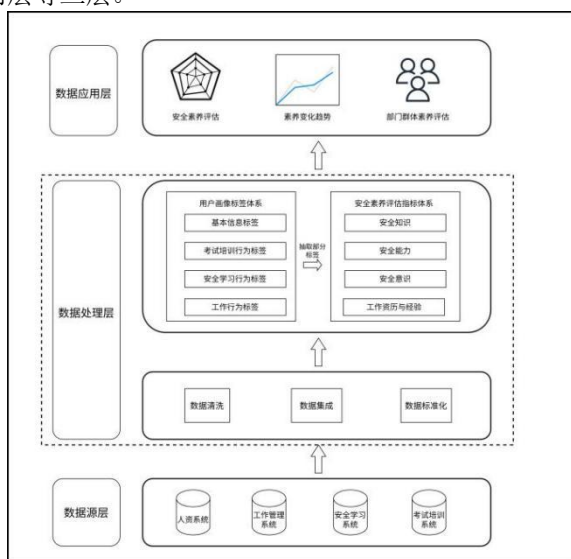


图 2 系统架构图

数据源层为各个业务系统的数据库,也是整个系统的数据来源,主要包括人力资源系统、工作管理系统、安全学习系统、考试培训系统。

数据处理层主要实现对原始数据的采集和处理,系统每日使用 DataX 数据同步技术从各业务系统中采集相关数据并导入达梦关系型数据库中,采集完数据后运用正则表达式、数据转换函数等技术对来自不同来源的数据进行清洗,去除重复、错误和无效的数据,并进行格式统一和标准化处理,经过统计聚合等操作可以得到各用户画像标签并构成用户画像标签体系。之后,抽取部分用户画像标签构建安全素养评估指标体系。

数据应用层主要实现对安全素养评估模型的构建以及安全素养结果的可视化展示,首先编写 Python 脚本基于前一层构建的评估指标体系实现对指标量化、权重计算以及安全素养评估,并将结果借助 FineBI 等可视化工具将数据转化为直观的图表和报告,进行可视化展

示,便于员工和管理者了解当前安全素养现状。

3.2 系统开发相关技术

本系统采用 B/S 架构进行设计与开发,用户可以直接通过 Web 浏览器访问服务端提供相关服务。系统后端选用 SpringBoot 框架进行开发,该框架提供了完善的依赖管理和自动配置能力。前端选用 Vue 框架实现,通过组件化开发构建响应式用户界面。数据库选择国产达梦关系型数据库,用于存储采集和处理后的结构化数据。系统部署在 Linux 系统上运行,采用 Nginx 作为前端 Web 服务器实现请求代理和负载均衡。用户可以通过浏览器直接访问系统并提供相应服务。

此外,为了保障系统和数据的可靠性和安全性,系统还通过使用 RocketMQ 消息队列确保数据传输的可靠性和实时性,以提供一致的数据使用标准。建立严格的数据访问控制机制,基于角色和用户对数据的访问和操作权限进行精细管理,确保数据的安全性和隐私性。建立数据质量监控机制,对数据的完整性、准确性、一致性进行定期检查和修复,并制定数据质量标准 and 规范,确保数据的可靠性。基于 xxl-job 建立定时调度任务,每日固定时间进行数据同步和数据更新,并确定不同数据的更新频率,对于基本信息等变化不大的数据,可以定期批量更新,而对于工作和学习等实时性要求较高的数据,采用实时或准实时更新。

3.3 系统实现

系统主要用户分为普通员工和部门领导两类。对于普通员工,其个人安全素养评估界面如图 3 所示,使用雷达图显示其安全素养各个维度的得分,并可以与自己过去月份的安全素养表现进行对比,可以直观反映安全素养各个方面的表现,便于员工及时发现自己的缺陷和不足。同时,在界面右边给出安全素养的总体得分、部门排名以及变化,便于激励员工保持或努力。



图 3 个人安全素养评估情况

系统会每日更新员工各画像标签数据,从而可以实现动态评估员工安全素养,便于员工和管理者即使发现不足,进行改进。此外,系统给出了员工近半年来的安全素养与学习情况的变化趋势,如图4所示。可以反映员工是否真正学习到了知识,提高自身安全素养。



图4 安全素养与学习情况变化趋势

而部门管理者更加关注整个部门整体的安全素养表现,其安全素养评估界面输出如图5中标注的红框所示,可以按照日期范围、部门、人员进行多条件数据查询统计。右下角部分,管理者可以直观看到部门整体安全素养各维度表现情况和变化趋势,了解部门优缺点,可以针对性的进行安全学习教育。

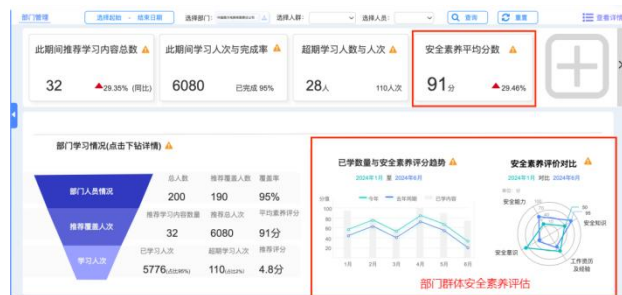


图5 部门整体安全素养评估界面

4 总结

针对安全素养评估指标存在较多主观指标以及用户画像在电力企业安全管理领域应用的缺乏,本文设计并实现了基于用户画像的电力企业员工安全素养评估系统,通过采集员工基本信息、工作、学习、考试等方面的客观行为数据,经过数据清洗和处理后构建电力员工用户画像标签体系。基于此标签体系构建了包含安全知识、安全能力、安全意识、工作资质和经验的四个安全素养评估维度,并使用CRITIC法计算各评估指标权重,可以计算得到安全素养各维度及最终的评估结果。并基于数据设计相关系统和可视化界面便于员工和管理人员直观了解安全素养现状,便于电力企业进行安全文化建设。

未来研究可以进一步丰富用户画像标签体系,如融

合员工可穿戴设备的生理传感等数据,可以更加准确实现对电力员工的安全素养评估。

参考文献

- [1] 蔡弘衍,程胜,易明,等. 基于本质安全的电力安全管理体系构建[J]. 劳动保护, 2024, (03): 93-5.
- [2] 严登宏,张敏,曾荣俊,等. 电力员工的不安全行为产生原因及防范对策[J]. 云南水力发电, 2023, 39(07): 258-60.
- [3] 姜浩楠. 基于SEM的电力施工人员不安全行为影响机制研究[J]. 中国设备工程, 2021, (05): 61-3.
- [4] 唐凯,田方圆,杨鹏飞,等. 场景化培训视角下的安全素质评价模式研究[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(05): 854-61.
- [5] 陈成,黄奎文,何邦权,等. 电力企业安全文化建设路径探究[J]. 电力安全技术, 2024, 26(06): 4-6.
- [6] 张玉宏,侯宇宁,周龙,等. 基于“互联网+”的电力员工安全技能素质提升方案[J]. 中国高新技术企业, 2017, (03): 163-5.
- [7] 张凤乾. 试述企业安全文化与员工安全素质的培养[J]. 决策探索(中), 2019, (08): 12-3.
- [8] 吴声声,宋守信,张若思. 电力企业员工安全责任力模型构建[J]. 生产力研究, 2011, (03): 152-4.
- [9] 张景钢,谭允祯. 企业职工安全素质模糊综合评价及应用[J]. 山东煤炭科技, 2006, (01): 47-8.
- [10] BABY T, MADHU G, RENJITH V R. Occupational electrical accidents: assessing the role of personal and safety climate factors[J]. Safety Science, 2021, 139: 105229.
- [11] ESTEBAN-LLORET N N, ARAGÓN-SÁNCHEZ A, CARRASCO-HERNÁNDEZ A. Determinants of employee training: impact on organizational legitimacy and organizational performance[J]. The International Journal of Human Resource Management, 2018, 29(6): 1208-29.
- [12] SHI J, CHANG D, KHATTAK H A. Assessment of power plant based on unsafe behavior of workers

rs through backpropagation neural network model [J]. Mobile Information Systems, 2022, 2022: 1-12.

[13] 王世奇, 刘智锋, 王继民. 学者画像研究综述 [J]. 图书情报工作, 2022, 66(20): 73-81.

[14] 师奥翔, 张洁. 基于改进RFM模型的电商用户价值分类的研究 [J]. 计算机技术与发展, 2022, 32(12): 123-8.

[15] 王晓玲. 基于青年群体用户画像的公共图书馆服务模式研究 [J]. 图书与情报, 2024, (05): 114-22.

[16] 张艳丰, 高靖超, 洪闯. 在线医疗社区健康焦虑用户关联数据挖掘与群体画像分类研究 [J]. 情报科学, 2024, 42(06): 121-31.

[17] 闫泓序, 余顺坤. 基于画像的员工离职预测模型研究 [J]. 中国管理科学, 2024, 32(09): 303-12.

[18] 杨柳, 史彩计, 周璇, 等. 基于员工画像与岗位特征模型的绩效结果评估系统设计与实现 [J]. 电脑知识与技术, 2024, 20(12): 63-6.

[19] 魏孔鹏, 谷洪彬, 李啸龙. 学生综合素质评价的用户画像构建研究 [J]. 计算机时代, 2020, (03): 96-8.

[20] 李锐. 用户画像研究述评 [J]. 科技与创新, 2021, (23): 4-9+12.

[21] 孙志春, 李巍, 张艳亮. 电力企业安全生产管理评价模型研究 [J]. 电力安全技术, 2021, 23(09): 5-9.

[22] 国家电网有限公司技术学院分公司. 电力企业员工安全基础知识 [M]. 中国水利水电出版社: 2021. 103.

[23] 吴倩, 朱帅, 时佳伶. 构建教育培训与评价体系增强电力企业员工职业素养 [J]. 中国电力教育, 2014, (31): 14-6.

[24] 廖书长. 基于安全生产风险管理体系的电力企业员工培训需求分析 [J]. 中国电力教育, 2021, (03): 22-4.

[25] 郑雪薇, 邓贵斌, 李冰楠, 等. 基于用户画像技术的师范生数字素养教学策略研究 [J]. 数字教育, 2024, 10(02): 33-9.

[26] LI W, ZHOU L, HAO J, et al. Dynamic simulation and control strategy exploration of the unsafe behavior of coal mine employees [J]. Resources Policy, 2023, 86: 104067.

[27] 崔彤, 田青, 朱俊, 等. 一线生产员工安全知识与应用研究 [J]. 航天工业管理, 2019, (04): 67-70.

[28] PATYK M, NOWAK-SENDEROWSKA D. Occupational risk assessment based on employees' knowledge and awareness of hazards in mining [J]. International Journal of Coal Science and Technology, 2022, 9(1).

[29] 杨东, 杨依轩, 徐瑞, 等. 电力员工安全意识、大五人格和不安全行为的关系研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(08): 129-37.

[30] 李国良, 姚子暘, 杨晓严, 等. 基于前因因素的建筑工人安全行为评价模型与应用 [J]. 安全与环境工程, 2024, 31(02): 62-70.

[31] 韩一鸣, 徐鹏飞, 官建锋, 等. 基于改进CRITIC-熵权法的电网发展经营综合评价体系研究 [J]. 机电信息, 2023, 18: 1-7+11.

钢管防腐中频加热系统功率因数优化研究

方铁牛¹ 方子文²

1 4303211981****353X

2 4303212007****0219

摘要: 中频感应加热设备的加热速度快、排放小、占地小、换型快等优点,在石油天然气输送钢管行业中普遍使用。现阶段国内中频加热电源制造商主要聚焦于 400V 低压进线的小型并联谐振式中频电炉的研发生产。这类设备优势在于可直接接入工业标准电压网网络实现多设备共享,且具备显著的成本优势。然而在防腐钢管生产过程中,由于管材规格(直径 $\varnothing 2620\text{--}\varnothing 323.9$,壁厚 30mm-9.5mm)的频繁切换,导致系统功率因数波动明显(0.99-0.35),不仅造成能源浪费,还会引发电网电压波动。为解决这一问题,本研究通过优化传统并联谐振中频感应加热系统,开发出适用于 1500KW 中频电源的功率因数提升方案,经实际生产验证取得显著节能成效。

主要研究内容包括:

- (1) 解析感应加热基础理论及工作原理,重点研究负载补偿电路的运行机制。
- (2) 设计对比实验,量化分析钢管规格变化时固定/动态补偿电容对功率因数的影响。
- (3) 开展节能验证,测试不同管材参数下调整谐振电容容量的节能效果。

关键词: 电磁感应加热; 并联谐振; 谐振补偿电容; 阻抗匹配

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.002

1 绪论

感应加热在钢管外层防腐中的优势主要体现在将钢管直接进行加热。这种方法改善了工人的工作条件,并且使钢管的升温速度更快,温度控制更加精确且加热均匀。由于钢管没有直接接触加热线圈,不易在钢管表面造成划痕,同时对钢管表面的各种污染也小,为后续工艺和质量提供了保证,因此感应加热技术在钢管防腐行业应用非常广泛。使用中频感应加热时,只需要更换与钢管直径相匹配的感应线圈,而不必进行预热,即可开始生产。该技术便于使用,操作简便,操作工人经过简单培训,就可以进行操作,在生产过程中具有明显的优势。感应加热圈可以直接安装在钢管传送辊道中,生产时钢管连续穿过感应加热线圈,安全可靠,同时大大提高了空间的利用率和生产效率。感应加热设备主要由主机电源、谐振电容、感应加热线圈、水冷装置及水冷电缆组成,整体结构简单,维修方便,现场适应性强,只需添加简单的控制元器件即可完成自动化控制升级改造。

在国家双碳目标重压下,节能减排技术受到国家和企业日益重视。感应加热设备的电能使用效率很高,感应熔炼炉和感应透热炉对坯料的实际加热效率可达 55%,而火焰炉和其他实验炉的加热效率仅约为 30%^[1],其节能优势尤为明显。

1.1 研究的意义

并联谐振中频炉历经 40 年发展已形成成熟技术体系,凭借其高效节能特性在钢管外防腐行业广泛应用。在我国,防腐钢管在油气和水的输送上需求量很大。当前,生产这些防腐管道的企业多采用中小功率低压线并联谐振中频感应电源。然而,由于钢管的直径和壁厚变化范围大($\varnothing 2620\text{--}\varnothing 322.9\text{mm}$ 、30-9.5mm),加热所需的中频功率也随着直径和壁厚由大变小而减少,从 1500KW 降至 400KW。此外,功率因数由 0.99 降至约 0.35,这不仅增加了企业的生产成本,还影响到整个供电系统的稳定性和电压质量。在不增加企业加投资的情况下通过钢管口径和壁厚的变化动态调整并联谐振电容的容量来提高设备功率因素。

随着环保要求提升和电力基础设施完善,发展高效感应加热技术,改变制造行业耗能高的现状,符合当前发展形势,对制造业节能减排具有重要意义。针对应用广泛的并联谐振系统开展节能研究具有显著经济效益。

1.2 研究的主要内容

对于生产防腐管道的厂家目前绝大多数使用的是中小功率并联谐振中频感应电炉,由于口径和壁厚变化大($\varnothing 2620\text{--}\varnothing 322.9\text{mm}$ 、30-9.5mm),中频功率随着口径和壁厚从大到小、由厚到薄,钢管表面加热所需要的功率也从 1500KW 减少到 400KW,由于中频感应加热设备是根据输出功率大小固定设计的,由于输出功率逐步下降,导致中频感应加热设备率因数也从 0.99 下降到

0.35 左右,不但增加了制造企业的成本,也影响到整个供电系统的稳定以及电压质量。在不增加企业加投资的情况下通过钢管口径和壁厚的变化,动态调整并联谐振电容的容量来提高设备功率因素。

这篇文章重点研究中频感应加热系统的并联谐振特性,主要从以下几个方面进行探讨:

(1) 解析感应加热基础理论及工作原理,重点研究负载补偿电路的运行机制。

(2) 设计对比实验,量化分析钢管规格变化时固定/动态补偿电容对功率因数的影响。

(3) 开展节能验证,测试不同管材参数下调整谐振电容容量的节能效果。

2 感应加热基础理论及工作原理

2.1 感应加热基础理论

电磁感应加热机制是基于法拉第电磁感应定律,当交变磁场

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (2-1)$$

穿过导体时产生感应电动势:

$$e = -N(d\Phi/dt) = -N\omega \Phi_m \cos \omega t \quad (2-2)$$

其有效值:

$$E = 4.44Nf\Phi_m \quad (2-3)$$

式中: N 匝数; f 频率; Φ_m 磁通量。

根据电磁感应原理,对线圈通于交变电流,就会产生相同频率的交变磁场,利用交流电对需要表面防腐处理的钢管进行感应加热的原理^[3]如图 2.1 所示,感应线圈(A)通入交流电产生交变磁场,在工件(B)中感应出涡流 i_2 ,通过焦耳热效应实现加热。

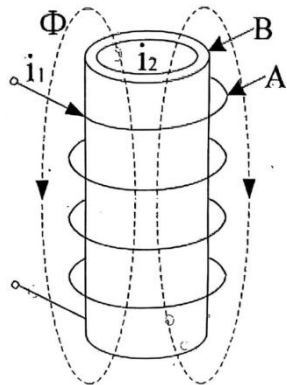


图 2.1 感应加热示意图

焦耳热效应公式:

$$Q = i^2 R t \quad (2-4)$$

i 电流; R 电阻; t 时间。

因此感应加热利用电磁感应原理,通过感应线圈把电能转换为磁场能,利用磁场将能量传递给被加热的金属工件,并在金属内部转化为热能,由于感应圈和被

加热工件不直接接触,所以电能传递过程中不存在能量损耗^[2]。

为了加快生产速度,就只能提高钢管的加热效率,那就只能使钢管中的感应电动势 e 最大化,由感应电动势公式(2-3)可知,提高感应电动势有两个方法:

(1) 只要增加钢管的交变磁通,就能增加钢管中流过的感应电流,那么就只能增加感应线圈中流过的电流。

(2) 提高电流的频率,频率控制能缩短加热时间,减少能量损耗^[4]。加热钢管的规格壁厚变薄、直径变小时,可以将中频频率提高,减少线圈电流,达到同样的加热效果;由于线圈电流减少,就会减少负载的无功损耗,提高功率因数。

2.2 感应加热的三大效应

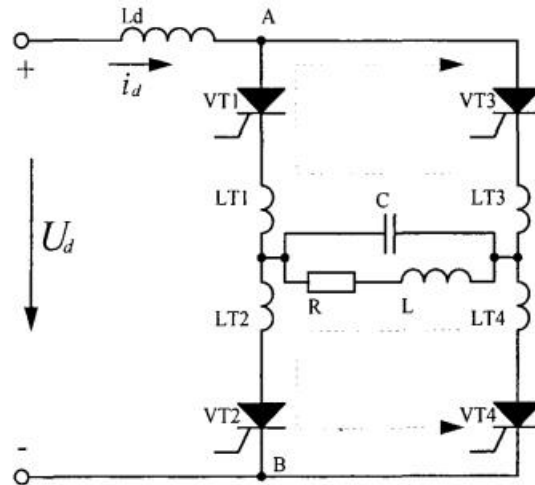
感应加热设备的三大效应。趋肤效应、临近效应和圆环效应^[2]。

感应加热是综合利用这几种效应的设备,无论表皮效应、临近效应和圆环形效应,都是由于加热线圈铜管中电流过交变电流时,在加热线圈铜管周围形成的交变磁场,从而在加热线圈铜管中产生自感电动势,迫使电流发生重新分布的结果^[5]。感应加热是通过电磁感应原理,是先将输入的电能为交变磁场的磁场能;再通过电磁感应,将交变磁场的磁场能转化为被加热钢管内部涡流的电能;最后,涡流在钢管中克服电阻做功,将涡流的电能转换为钢管的热能,来实现加热。

2.3 并联逆变电路的工作原理

在所有的逆变电路中,国内目前应用最大的是并联逆变电路,而且也是最基本的电路,因此,我们把它作为典型电路来讨论。

并联逆变电路的负载是一个谐振回路,它的谐振频率基本上略微高于中频电源的工作频率,工作略偏容性状态^[6]。其工作过程较仔细分析可分为四个过程。



2.4 并联逆变主电路

第一过程：如图 2.2 若先导通晶闸管 VT1、4，则电流 I_d 从 A 端经 VT1 到负载，再经 VT4 流向 B 端，这一阶段为中频交流电的正半周，电流的方向如图所示。此时补偿电容 C_n 两端充上了左正右负的电电压 U_a 。

第二过程：让晶闸管 VT1、4 导电半个周期，再发出触发脉冲，触发导通晶闸管 VT2、3，这时造成了四只晶闸管同时导通的“暂态短路”，但这并不会引起电源故障，因为直流电路中接有一个很大的滤波电感 L_d ，电流 I_a 不能突变。由于电容被四只晶闸管短接，其第一阶段充上的电压 U_a 就要放电，其电压极性，将促使晶闸管 VT1、4 的电流下降，而使晶闸管 VT2、3 的电流上升，直至 VT1、4 中的电流降为零，而 VT2、3 的电流上升为 I_d 。

第三过程：当换流结束后，电流经 VT2、3 反方向流过负载，电容器 C_n 两端的电压变为右正左负，此电压为第四阶段关断 VT2、3 做好准备，该阶段为中频电流的负半周。

第四过程：当晶闸管 VT2、3 导电半个周期后，再次触发 VT1、4，开始 VT2、3 与 VT1、4 的换流，其过程与第二阶段一样，所不同的是这次是将 VT2、3 中的电流换给 VT1、4，而使晶闸管 VT2、3 关断，回复到第一阶段的工作状态。

这二个半周中，负载电流 i_o 改变了方向，变成了中频交流电，如此循环往复，不断地向负载供应中频电能，使振荡持续进行。

2.5 并联逆变电路的触发引前方式

我们上面介绍了，晶闸管要能可靠关断，必须有一个触发引前时间 t_f ，其值为 $t_r + t_\beta$ ，由于 t_r 比 t_β 要小得多，因此引前时间 t_r 主要由 t_β 决定。换句话说，晶闸管所承受的反压时间 t_β 必须大于晶闸管本身的关断时间 t_q ，即 $t_\beta = K t_q$ 。式中： K 为安全系数，一般取 $K=1.5 \sim 2$ 。

上述条件是触发控制系统必须保证的。对于一个业已确定的晶闸管，其关断时间一定，那么 t_f 是否取大一点，不是更安全吗？是的，从安全的角度讲， t_f 大一些好。但是 t_f 过于大，将对负载端的功率因数产生不利的影响， $\phi = \gamma/2 + \beta$ 而 t_f 相对应的安全储备角 $\delta = \gamma + \beta$ ，所以若 t_f 选得大，意味着 ϕ 角增大，功率因数就要降低，从这一点出发 t_f 不能选得太大。考虑上述因素后，并联逆变电路的触发引前时间一般取 $t_f = 0.1 T_f$ ($T_f = \frac{1}{f}$)。

理论上可以使用它激方法，只要它激频率高于负载谐振回路的频率，并保证 $t_\beta > t_q$ 即可。这种控制方法对负载参数变化不大是合适的，但我们的负载随着钢管换型以后是变化的，像需要加热的防腐钢管由于规格不一，口

径从 1422 至 323.9、厚度由 30mm 至 6mm，所以我们在换型时改变它激频率，同时增减补偿电容来改变谐振回路的频率来适应它激频率。

2.6 负载谐振回路的频率特性

感应器与电容并联组成谐振回路，这种电路在某一频率下输入电流与电压相同，此时电路处于谐振状态。此时的频率称为此电路的固有频率。

在谐振时感应圈内的无功电流分量与有功电流分量之比为： $Q = \text{感应圈无功电流} / \text{感应圈有功电流}$ ， Q 常称为谐振电路的品质因素， Q 值越小，代表感应炉的无功电流越小，于是利用中频电容器补偿这部分无功功率时所需电容器的千乏数也越小，反之侧越大，以我公司新上中频 1500KW、1KHz 配套的中频电容容量为 10000Kvar 为例，得出 $Q \approx 7$ ，当这台设备的运行功率由于防腐钢管的口径和壁厚下降 500KW，感应炉的无功功率 3350Kvar。而设备的无功补偿电容容量固定不变，仍是 10000Kvar，那么此时设备处于严重的过补偿状态下运行，这也是造成设备功率因数被拉低的重要原因之一。

3 现场测试对比

3.1 现场测试

在某防腐钢管厂的现场测试中，对于一台正常工作的 1500KW 并联谐振中频电炉，其谐振电容容量为 10000Kvar，低压供电电压为 380V，频率为 1KHz。利用功率因数监测设备进行现场测量。生产规格为 1422*30mm 的钢管时，表面温度保持在 200℃，中频功率调至满载的 1500KW，功率因数达到 0.99；此规格生产完毕后，调换为 1016*22mm，钢管表面温度同样为 200℃，中频功率调到 1000KW，功率因数为 0.72；完成该型号后，再切换至 813*17.5mm，表面温度依然是 200℃，中频功率为 700KW，功率因数为 0.55；最后，切换至 406*12.5mm，钢管表面温度持续在 200℃，中频功率为 500KW，功率因数降低至 0.35。由于钢管的直径和壁厚有较大变化，运行功率的减少导致功率因数明显下降，进而拉低整个供电系统的有功功率，而无功功率损耗显著增加。

收集以上数据后，通过分析得出生产规格为 1016*22mm，运行功率 1000KW，谐振电容容量取值为 7000Kvar；生产规格 813*17.5mm，运行 700KW，谐振电容容量取值为 4900Kvar；生产规格 406*12.5mm，运行 500KW，谐振电容容量取值为 3500Kvar。

3.2 现场对比测试

根据湖南某钢管厂现场排产情况，利用我们得出的数据进行测试，设备不变，正常运行的 1500KW 并联谐

振中频感应加热设备, 谐振电容容量为 10000Kvar, 低压进线电压为 400V, 利用功率因数监测设备进行现场测试, 生产完该规格后换型为 1016*22mm, 钢管为表面温度为 200℃, 中频功率 1000KW 运行, 谐振电容容量减少 2000Kvar, 功率因数提高至 0.96; 生产完该规格后换型为 813*17.5mm, 钢管为表面温度为 200℃, 中频功率 700KW 运行, 谐振电容容量减少 4000Kvar, 功率因数为 0.91; 生产完该规格后换型为 406*12.5mm, 钢管为表面温度为 200℃, 中频功率 500KW 功率运行, 谐振电容容量减少 6000Kva, 功率因数为 0.94。

4 结论

在防腐钢管生产中, 钢管口径与壁厚的大幅变化 (Ø2620-Ø323.9、30-9.5mm) 导致中频感应电炉运行功率从 1500KW 降至 400KW, 功率因数从 0.99 骤降至 0.35, 能耗与供电稳定性问题显著。本课题针对 400V 低压进线并联谐振系统, 通过理论分析与现场实验, 提出动态调整谐振电容容量的节能方案。

研究表明, 钢管规格变化导致负载特性改变, 使谐振回路失谐, 功率因数降低。通过建立电容容量与功率因数的关系模型, 结合湖南胜利湘钢现场测试数据: 当生产规格从 1422x30mm 换型至 406*12.5mm 时, 未调整电容的功率因数从 0.99 降至 0.35; 而动态减少电容容量 (从 10000Kvar 降至 4000Kvar) 后, 功率因数回升至 0.94 左右, 验证了补偿策略的有效性。

将电容动态补偿技术针对性应用于变规格钢管加热场景, 提出基于实测数据的调整方法, 无需设备改造即可实现节能。该技术方案使企业年成本降低, 同时提升供电系统稳定性, 兼具经济效益与社会价值; 随着研

究的不断深入和技术的持续改进, 该技术将在感应加热领域发挥更大的作用, 推动行业的技术和可持续性发展。

目前研究局限于现有设备和现有的钢管规格, 随着管径朝大和厚度厚的方向发展, 未来可拓展空间更大, 结合智能算法开发自动补偿系统, 推动感应加热技术的智能化、节能化和高效化发展。

参考文献

- [1] 徐先泽, 肖雅静, 时千峰. 感应加热技术的应用及发展 [J]. 现代零部件, 2010 (3): 62-63.
- [2] 林渭勋. 可控硅中频电源 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983, 1-38、124-128.
- [3] 杨思俊, 朱伯年. 晶闸管中频电源基础知识 [M]. 杭州: 浙江科技出版社, 1989, 3-15.
- [4] Ohtoh N, O. M., Inoue T. A method for MPPT control while searching for parameters corresponding to weather conditions for PV generation systems. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006. 53(4): p. 1055~1065.
- [5] 潘天明. 现代感应加热装置 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996.
- [6] 管兴勇、陈建兴. 超音频电源 IGBT 驱动脉冲重合时间的控制 [J]. 电力电子技术, 2007.

作者简介: 方铁牛, 男 (1981-05-), 汉族, 湖南湘潭, 工程师, 本科学历, 主要研究钢管防腐中频加热系统功率因数优化研究方向。

方子文, 男 (2007-10-), 汉族, 高中在读, 主要学习钢管防腐中频加热系统功率因数优化研究方向。

浅谈变压器温升试验

王文浩 郑文文 徐小博

甘肃电器科学研究院, 甘肃天水, 741018;

摘要: 变压器温升会加速变压器的老化, 进而破坏绝缘性能。本文从设备参数、试验原理、试验前项目、试验数据验证展开, 得出结论: 短接法温升试验试验数据准确且有以下优势: 设备要求低、试验周期短、电源要求低、接线简单等特点。

关键词: 电力变压器; 温升; 短接法; 原理图; 温升曲线图

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.003

引言

变压器应用电磁感应原理, 使二次侧电压电流升高或降低, 满足电网中各种负荷电压等级的需求。在电压、电流转换过程中, 本身要消耗一部分能量, 这部分能量包括铁心损耗、铜损耗、附加损耗。这些损耗是绕组线圈存在电阻产生损耗, 磁场在铁心中交变反复磁化, 运动的磁畴与交变的磁场相比有滞后性, 导致磁畴往复运动互相碰撞产生损耗, 产生涡流损耗在铁心表面形成涡流。一旦损耗产生的热量超过变压器允许的温升限制, 绝缘会迅速老化, 缩短变压器的寿命。因此在变压器出厂时应该通过试验检测, 得出合理的温升限值。目前温升测试方法包括: 循环电流法: 在高低压侧加通过额定电流下的电压, 这种方法通过投入补偿, 达到额定损耗损耗, 试验过程复杂, 对补偿要求高。直接负载法: 主要应用在变压器容量不大的情况下, 在高压侧施加规定电压, 在低压侧施加规定电流, 当低压侧要求电流很大时, 要求电源容量很大, 对电源容量要求高, 因此此种试验方法有局限性。互相负载法: 此方法需要与一台变压器并联给样品施加额定励磁电压, 对并联施加电压的变压器要求较高, 试验成本相较其他方法较高, 通过两台变压器的不同变比测定确定样品的温升测量。短路法: 低压侧短接, 高压侧施加额定电流, 此方法试验接线简便, 对设备要求低, 成本小, 是一种普遍接线方法。零序法: 因需在零序回路中供电, 需要在绕组的一侧施加额定励磁, 使绕组中产生额定电流, 同时为使产生的电流形成回路, 两侧绕组应分别有零序回路给零序电流提供通道, 绕组磁势平衡后漏磁通常造成局部过热, YN联结中性点的电流等于3倍额定电流因此三相磁通的相序也是零, 此方法对设备要求较高。因此短路法是测定稳态温升的常用试验方法。短路法相较其他几种方法更简单, 实际中普遍采用, 本文将介绍此种方法下的温升

试验。

1 电力变压器的温升

温升试验前需要测量的项目有: 绕组电阻值阻, 空载负载损耗测量。下面是本试验主要涉及的仪器:

1.1 直流电阻测试仪

将高压侧线夹与低压侧线夹对应夹在变压器的高低电压侧, 进行测量, 双通道测量高低压数据。双通道直流电阻测试仪与传统电阻测试仪相比, 最大的优势是能同时测量高低压侧电阻, 缩短热态电阻测量时间, 快速测量出第一个热态电阻值, 在绘制温升曲线时更准确。

1.2 变压器试验系统

试验系统主要由中间变压器、补偿装置、功率分析仪组成。在试验时如何根据变压器选择中间变压器及补偿装置, 下面进行简单的论述。

中间变压器使被试变压器与发电机输出端电压一致, 中间变压器有多个容量与电压等级进行切换, 选择时应按照样品容量, 电压等级进行选择。在本次分析中由于被试样品容量较小, 施加电压低, 调压器完全能满足试验参数要求, 所以本次试验未投入中间变, 在此仅作介绍。在试验系统中对大容量的样品由于存在大量无功, 会降低电源的功率因数, 且单纯靠发电机来输出试验容量容量是十分不经济的, 因此采用配补偿电容器的形式来满足试验电源。但是, 此次分析不投入电容器组补偿的方式, 因考虑此次分析样品容量较小, 无功较低对电源不会有太大的影响, 功率因数也不会有明显的变化, 并且且增加补偿电容器后会使得成本升高, 回路变的更复杂, 因试验后需放电, 增加了试验的安全隐患以及操作复杂性。

1.3 直流电阻测量

应在各绕组的线端上测量。绕组接线为星型且无中性点的变压器测量线电阻, 星型接线有中性点引出测量

相电阻, 对中性点引线电阻所占比例较大的 yn 联结的变压器, 应测量其线电阻及中性点对一个线端的电阻, 接线为开口三角形联结时, 应测量首末端相电阻, 接线为三角形测量其线电阻。

1.4 空载损耗测量试验

在低压侧施加额定电压, 高压侧开路的。

1.5 负载损耗测量试验

给高压侧通变压器规定的额定电流, 低压侧短接。

1.6 变压器温升测试方法

依据 GB/T1094.2, 结合试验室实际情况以及短接法优势本次温升试验接线采用短接法, 并通过实际数据验证, 结合图推法, 得出变压器运行的温升值, 确定温升范围。

1.7 温升试验过程

第一阶段: 目的是测定顶层和油的平均温升, 在试验时通电流为额定电流 1.5 倍, 快速达到总损耗功率。试验时需要持续记录顶层油温和绝缘介质的温度, 该试验当顶层温升上升变化率不高于 1K/h 时达到稳定。并持续该状态 3H 以上, 方结束试验第一阶段。使用自动记录装置, 每隔一定时间间隔记录每个热电偶采集的温度值, 试验的结果取最后 1H 内读数的值, 并最后 1H 内温度读数取平均值。热特征参数实际取值需要通过第二阶段温升试验过程确定。

第二阶段: 顶层油温稳定后, 将 1.5 倍试验电流降到额定电流且持续通电 1H, 在此期间, 每 5 min 记录一次顶层、散热片和环境温度。通额定电流 1H 后, 断开电源并打开短接车, 投入电阻仪测量变压器高低压绕组线圈的热态阻值。

2 变压器温升的计算方法

2.1 液体平均温度

$$\theta_{om} = \frac{\theta_o + \theta_b}{2}$$

θ_o 油箱顶部的绝缘油温度 θ_b 底部绝缘油温度

2.2 绕组温升的计算

$$\theta_2 = \frac{R_1}{R_2} (235 + \theta_1) - 235 \quad (\text{对于铜})$$

$$\theta_2 = \frac{R_1}{R_2} (225 + \theta_1) - 225 \quad (\text{对于铝})$$

R_1 冷态电阻 R_2 热态电阻 θ_1 测量冷态电阻时的温度

2.3 电源快速断开时绕组温度外推法

将速切断电源后绕组温度和油平均温度作为试验估计值, 试验估计值一般取顶层油温度和底层油温温度的平均值, 外推法用于校正温升试验结果。取顶层油温升的 80%, 变压器容量低于 2500kV 的油浸自冷式变压器, 油箱外观有较为光洁的油箱或波纹状油箱或将散热管直接焊, 且高于环境温度的油平均温升。当不是以试验为目的时, 应采取作图法和回归分析法外推油平均温度。

电源断开瞬间在一段时间内记录到相当数量的离散数值, 这是作为外推法所必需数值的。绕组温升曲线图绘出, 第一步是通过外推法, 外推法是将电阻值变化转变为温度值变化。从图十一可看出绕组温度在开始几分钟内, 下降相当快, 然后便缓慢地下降。对于液体热时间常数非常大的变压器(主要指额定容量比较小的自冷变压器), 可以假定其液体温度变化渐近线是一条水平线。对试验电源断开后要求仍要求强迫液体循环冷却装置运行的大型变压器, 找出一条下降的渐近线, 在该渐近线上叠加初始变化较快的部分。横轴将时间间隔均匀的分布在线性直角坐标(见图一); 按照对应时间将连续记录的热电阻值一一标注在坐标上, 将各个孤立的点用弧线连接起来。用热电阻逐点增量 ΔR_i 描点, 作斜线 L, 通过斜线 L 在另一端可以推出断开电源后的热电阻值 R_2 。

热电阻 R 随时间 t 变化而变化, R - t 函数关系可以看成由常数部分 Ao 与随时间常数变化的 g 值。

$$R(t) = Ao e^{\frac{-t}{T_o}} + g e^{\frac{-t}{T}}$$

根据公式 $R(t) = Ao e^{\frac{-t}{T_o}} + g e^{\frac{-t}{T}}$ 和温升试验方法, 利用计算机软件, 将测量的热电阻值与测量时间间隔输入, 即可得到热电阻曲线图。

用拟合曲线 $R(t) = Ao e^{\frac{-t}{T_o}} + g e^{\frac{-t}{T}}$ 外推出的冷却曲线。

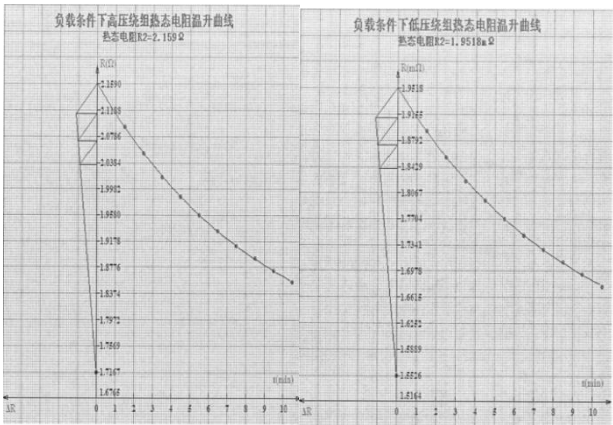
3 结果分析与验证

为了验证短接法温升试验的合理性, 本试验选用一台 500kVA, 电压比 10/0.4kV, 温升极限为 60K 的油浸式变压器, 开展此次温升试验验证。试验分三步骤, 首先测量温升试验前变压器绕组的电阻数据, 空载损耗、负载损耗。其次通变压器的规定的总损耗, 待顶层油温稳定后, 降至额定电流 1h, 并未维持 3h 后, 断开电源测量热态电阻, 最后根据冷热电阻绘制曲线得出温升限值。

热电阻数值、温升曲线图如图一、二。

高、低压绕组电阻测量		
测量时间	热电阻 R (Ω)	热电阻 R (Ω)
1min30s	2.093	1.892×10^{-3}
2min30s	2.053	1.856×10^{-3}
3min30s	2.016	1.823×10^{-3}
4min30s	1.986	1.796×10^{-3}
5min30s	1.958	1.770×10^{-3}
6min30s	1.933	1.747×10^{-3}
7min30s	1.911	1.728×10^{-3}
8min30s	1.892	1.711×10^{-3}
9min30s	1.873	1.694×10^{-3}
10min30s	1.855	1.677×10^{-3}
高压绕组电阻值 (Ω)	热态电阻 2.159	冷态电阻 1.814
低压绕组电阻值 (Ω)	1.951×10^{-3}	1.602×10^{-3}
高压绕组平均温升 ≤ 60K		45.2
低压绕组平均温升 ≤ 60K		52.0

图一 热态电阻



图二 温升曲线

经过试验数据及曲线分析,采用此方法的变压器温

升满足限制要求,整个过程清晰简便能够满足试验要求。

4 结束语

变压器在输电与配电线路中承担着电压、电流的转换,电力负荷的分配。变压器温升对变压器的绝缘、老化和安全有重要的指导意义,短路法对作为一种简便,试验电压低,操作方便,设备要求低,是常用的变压器试验方法。本文从标准温升试验方法短接法入手,对温升试验方法介绍,通过实际试验数据验证得出采用短接法有试验数据准确稳定、设备要求低、经济效益高、试验周期短、试验难度低易操作、对电源要求低,接线形式简单等特点。

参考文献

[1] 沈阳变压器厂. 变压器试验[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

[2] GB / T1094. 2—2013. 电力变压器第 2 部分: 液浸式变压器的温升[S]. 2013.

[3] JB / T501—2020. 电力变压器试验导则[S]. 2020.

[4] 王秀春, 徐国梁, 彭桂先, GB1094. 2-1996 中三种电源切断瞬间绕组温升的外推法比较[J]. 变压器 199 8. 35 (7) : 16-20.

作者简介: 王文浩, 1992. 5. 1, 男, 汉族, 甘肃甘谷县, 本科, 助理工程师, 主要从事高压电器产品试验技术的研究及检测方面的工作。

新能源风电场电气自动化控制技术的应用

毕伟杰 屈春花 赵祥凯 田波 石峰

华能内蒙古蒙东新能源有限公司，内蒙古赤峰，024000；

摘要：在全球能源结构向清洁低碳转型的大环境下，新能源风电场的高效稳定运行越来越依赖电气自动化控制技术。本文主要研究新能源风电场电气自动化控制技术的应用，分析风电场电气自动化控制的核心架构体系，对机组核心环节控制、并网调度控制、安全防护控制等关键技术的应用逻辑进行深入分析，探究自动化控制在提高风能利用效率、保证并网稳定性和加强运行安全方面的作用。通过对分层控制架构、核心控制策略及协同控制模式的系统梳理，为新能源风电场电气自动化控制技术的优化应用提供理论与实践参考，助力风电产业高质量发展。

关键词：新能源风电场；电气自动化；并网控制；安全防护

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.004

引言

风能属于清洁能源的重要组成部分，对于能源转型而言有着十分重要的地位。新能源风电场的规模化发展对运行控制的要求提高，电气自动化控制技术凭借高效信号处理和精确执行调控能力，成为解决风电场运行管控难题的核心支撑。该技术综合应用了多学科技术，实现了风电场运行全过程自动化控制。本文主要针对其应用维度展开论述，分析其架构组成和关键技术要点，给进一步的应用提供参考。

1 新能源风电场电气自动化控制的核心架构体系

1.1 分层分布式控制架构的构成逻辑

新能源风电场电气自动化控制核心架构为分层分布式，功能模块化划分，达到高效协同和信息准确传输。架构由上而下分成现场设备层、控制层和监控信息层。各层次之间依靠标准通信协议和传输链路来交换数据、发出指令。现场设备层是感知和执行终端，包括传感器、执行机构、智能仪表，分别对参数进行采集、对执行进行操作、对反馈的电能参数进行监测。控制层以可编程逻辑控制器为主，完成数据处理等任务，可以配置主、辅控制器分别控制不同的单元。监控信息层包含本地人机交互界面等，完成机组运行状态的监控、参数的设置、报警的处理以及数据的存储分析，为运维提供支持^[1]。

1.2 架构内通信网络的协同机制

通信网络给架构高效运行提供纽带，多层次、高可靠性的通信链路保证信息的实时传输。控制层内部用工业以太网或者现场总线进行高速数据交换，采用抗干扰强、延迟低的通信协议。控制层和监控信息层用工业以太网相连，用标准化的协议互相传递数据。风电场同集控中心或者电网调度之间经由光纤、无线通信等搭建起

远程传输链路。通信网络系统通过冗余设计来提高可靠性，保证自动化控制系统连续稳定的工作。

1.3 架构核心控制单元的功能定位

核心控制单元分为主控制器、机舱控制器、轮毂变桨控制器等，共同完成风电场全流程自动化控制。主控制器装在塔基柜里，是控制体系的中枢，汇集设备信号，实行全局控制，调度各个层次的通信。机舱控制器主要完成机舱本地控制，获取气象站数据，驱动偏航电机，检测环境参数，触发保护动作，管理辅助设备运行。轮毂变桨控制器经由滑环与机舱进行通信，按照主控制器的指令来调节叶片桨距角，从而提升风能捕获效率，在紧急状况下可以顺桨制动以确保安全。各个单元用标准化接口和协议来实现联动，形成控制闭环。

2 风电机组核心环节的电气自动化控制技术应用

2.1 变桨距自动化控制的应用逻辑

变桨距控制是新能源风电场提高风能利用效率、保证机组安全运行的关键部分，电气自动化控制技术依靠精确调节叶片桨距角，使风电场在各种风速下都能达到最佳的运行状态。在低风速工况下，自动化控制系统依靠传感器实时采集风速数据，经过控制器运算之后向变桨执行机构发出指令，使叶片桨距角接近 0° 的最佳攻角位置，从而增大叶片迎风面积来捕获更多的风能，配合发电机转矩控制实现最大功率点跟踪。当风速达到额定值的时候，控制系统会增大桨距角来限制叶片捕获的风能，防止发电机输出功率超过额定值，保证机组稳定运行。风速过高或者出现故障等紧急情况下，自动化控制系统立刻启动紧急变桨逻辑，把叶片桨距角驱动到 90° 的顺桨位置，利用空气动力学原理实现气动刹车，配合机械制动系统快速降低机组转速，保证机组结构安

全。变桨距自动化控制采取高速闭环控制策略,依靠实时的叶片角度信号反馈来不断修正控制指令,改善调节的精度和响应的速度,以满足风能资源动态变化的特性[2]。

2.2 偏航自动化控制的实现路径

偏航自动化控制技术就是根据风向的变化来调整机舱的方向,使风轮轴线始终对准来风方向,从而最大限度地提高风能的捕获效率,是新能源风电场电气自动化控制的重要组成部分。该技术利用风向传感器实时采集风向数据,将数据传给机舱控制器,控制器通过逻辑运算得出机舱需要转动的角度,然后驱动偏航电机带动机舱缓慢转动,达到对风调节的目的。自动化控制系统具备自动投入与退出的功能,在正常发电过程中不断对机舱的方向进行调整,从而提高风能的捕获效率;当停机或者出现紧急情况时停止偏航动作,防止由于无效能耗或者结构破坏引发的问题。为防止偏航过程中出现电缆缠绕的情况,控制系统加入了扭缆保护功能,通过检测偏航角度来控制解缆,当偏航角度达到设定阈值时,自动控制机舱反向旋转释放电缆,防止电缆损坏影响机组运行。偏航自动化控制依靠准确的风向跟踪以及智能的保护逻辑,给风电机组高效稳定运行提供保证。

2.3 机组启停与制动的自动化控制

机组启停、制动的自动化控制技术是保证新能源风电场安全运行的基础,用标准的控制逻辑使机组在各种工况下平稳过渡并加以安全防护。在启动控制上,自动化控制系统实时监测风速、电网状态等重要参数,当风速达到启动阈值并且电网状态满足并网要求时,自动执行启动程序,依次完成机械刹车释放、叶片角度调整、发电机转速提升等操作,利用软启动装置使机组平稳并网,不会对电网造成冲击。正常停机控制中,控制系统根据风速变化、电网调度指令等执行脱网操作,调整叶片角度到安全位置,启动机械制动使机组平稳停机。当发生超速、振动超限、电网故障等紧急情况时,系统立刻进入紧急停机状态,切断所有输出信号,旁路常规控制指令,启用气动制动和机械制动双重保护,迅速断开所有电气连接,直到人工复位前不允许机组重新启动。启停和制动控制过程依靠准确参数监测、快速指令响应来保证机组运行的安全性和稳定性。

3 风电并网与调度的电气自动化控制技术应用

3.1 并网过程的自动化控制策略

风电并网是新能源风电场实现电能输送的重要环节,电气自动化控制技术依靠精确的控制策略来保证并网过程平稳、安全,使风电机组输出的电能符合电网接入标准。并网准备阶段,自动化控制系统对发电机输出

的电压、频率、相位等参数进行实时监测,同时得到电网侧的电压、频率信息,经过逻辑运算得到并网参数。根据风电机组类型和运行工况,控制系统可以采用直接并网、软并网等不同的并网方式,软并网方式通过调节功率器件的导通角来实现电压的平滑上升,有效地抑制并网冲击电流,保护发电机和电网设备。并网过程中,控制系统实时监测并网电流、功率等参数,根据情况动态改变控制策略,保证并网过渡平稳,防止出现电压波动、频率偏移等问题。当电网出现故障的时候,并网自动化控制系统立即触发脱网保护,将风电机组从电网中脱离出来,防止故障蔓延到风电场内部设备上,保证机组和电网的安全[3]。

3.2 功率输出的动态调节控制

电气自动化控制技术依靠对风电机组功率输出的动态调节,使风电出力同电网负荷达成精确匹配,从而改善风电并网的稳定性和可靠性。控制系统实时采集电网负荷变化、风电出力波动等信息,根据风速预测数据用先进的控制算法调整风电机组运行参数。当电网负荷较大时,控制系统优化变桨距和发电机转矩控制策略,提高机组输出功率,尽可能满足电网电力需求;当电网负荷较小时,适当降低机组输出功率,防止电能过剩造成电网频率波动。根据风能资源的随机性、间歇性特点,控制系统采用功率平滑控制策略,和储能系统配合,在风电出力高峰时将多余电能储存在储能装置里,在出力低谷时释放储能电能,从而平抑风电出力的波动[4]。功率输出动态调节控制依靠准确的负荷匹配以及波动平抑,加强了风电在电网中的消纳能力,保证了电网的稳定运行。

3.3 远程调度与协同控制的应用

远程调度与协同控制技术依靠电气自动化技术,使风电场同电网调度中心之间高效联动,从而提高风电场运行的智能化程度以及调度的灵活性。风电场监控信息层利用远程通信链路同电网调度中心相联系,把风电场的运行状况,发电量,出力预估等数据实时上传,而且接收调度中心发出的负荷调节,启停控制等指令。自动化控制系统按照调度指令自动调节风电场的运行策略,对风电机组集群进行协同控制,保证风电场整体出力满足电网调度的要求。根据大规模风电场集群控制的要求,控制系统采取分层调度的方式,由风电场级控制器对各个机组进行协调,提高整体风能利用率,同时满足电网调度全局控制的要求。远程调度与协同控制技术的应用,实现了风电场运行的精细化管理、高效调度,提高了风电在电力系统中的协同运行能力。

4 风电场安全防护的电气自动化控制技术应用

4.1 设备状态监测与故障诊断自动化

电气自动化控制技术被应用到风电场设备状态监测与故障诊断中,可以提前预警运行风险、精准控制,降低运维成本,保证安全稳定的运行。控制系统安装各种监测设备,对关键部件的运行参数进行实时采集并上传到控制中心。控制中心用智能算法分析数据,找出异常特征,参数超阈值时发出报警、推送重要的信息。轻微故障可以远程调节参数进行在线处理,严重故障就触发停机保护^[5]。创建设备运行数据库可以追溯分析故障历史数据,为维修计划提供支持,提高维修的针对性与有效性。

4.2 电气系统安全防护控制

电气系统安全防护是新能源风电场运行核心保障,电气自动化控制技术用多重防护策略控制电气回路、设备绝缘、过电压等风险。控制系统集成了多种电气保护功能,可以实时监测参数,在出现异常的时候会触发保护机制来切断电源。对于户外环境,具备环境适应性防护功能,监测环境参数并启动辅助设备。同时利用冗余设计和绝缘监测来提高可靠性,给风电场提供全方位的电气保护。

4.3 应急处置的自动化控制机制

应急处置的自动化控制机制,用电气自动化技术实现风电场突发故障的快速响应和科学处置,减少损失,保证人员和设备的安全。控制系统预设应急流程,发生突发情况时自动启动响应流程,执行相关操作。记录处置中关键参数,用报警系统指导运维人员。重要的控制单元配备备用电源,在主电源断电时可以完成关键操作。该机制可以提高风电场对突发故障的应对能力,筑牢安全防线^[6]。

5 自动化控制技术与储能系统的协同应用

5.1 协同控制的核心架构与原理

新能源风电场中,电气自动化控制技术同储能系统相互配合使用,可以改善风电出力的稳定性,提高能源的利用效率。其核心架构以风电场控制体系为依托,把储能系统控制单元整合起来形成协同管控闭环,依靠风电场主控制器和储能系统控制器之间的通信联动,共享关键信息,给协同控制策略提供数据支持。核心原理就是实现风电出力与储能调节的精准匹配,高峰时储能系统吸收多余电能,低谷时释放储备电能,实现平滑稳定的输出,还可以参与电网辅助服务,提高电网的稳定性。

5.2 储能系统的自动化调度控制

电气自动化控制技术可以实现储能系统精细化调度控制,按照风电场的工况以及电网的需求来改变充放电的状态。利用风电、电网负荷预测的数据,用模型预测控制算法来制定出优化的调度计划,提前规划、精准调控充放电行为。实时监测储能设备参数,根据实时情况调节功率,防止过充过放。根据不同的储能布局采取分层调度的方式,消化风电的波动,减轻主网的压力。电网出现问题的时候,快速调节储能系统充放电状态,恢复频率和电压^[7]。

5.3 协同应用的运行优化效果

二者协同使用提高了新能源风电场运行优化的效果和综合效益。平滑控制风电出力,减小风能对电网的冲击,提高并网质量与消纳能力,减少弃风损失。储能系统参与到电网辅助服务当中来,提高电网的稳定性以及可靠性,从而带来额外的经济收益。协同控制技术来优化运行参数,实现资源的高效匹配,提高能源利用效率。通过自动化控制技术进行远程监控、故障诊断,减少运维工作量,提高效率。

6 结语

新能源风电场电气自动化控制技术贯穿于运行全过程,用各种技术手段提高风能利用率、运行稳定性、安全性,为风电产业规模化发展提供重要的技术支撑。该技术以后将会朝着更加精确的控制策略、更加高效的协同方式方向发展,并进一步的加以优化利用,有利于推动风电产业的高质量发展,促进能源结构的转变,从而达到可持续发展的目标。

参考文献

- [1] 白晓帅,李伟. 新能源开发中电气工程自动化节能措施应用[J]. 中国高新科技, 2022, (17): 40-41+44.
- [2] 阎诚. 考虑源荷不确定性的电力系统频率调控策略研究[D]. 东南大学, 2022.
- [3] 本刊. 上海电气风电入选中国数字化转型新范式项目[J]. 机械制造, 2022, 60(04): 35.
- [4] 赵梦阳. 抑制直流扰动下风电场暂态过电压的调相机配置方法研究[D]. 南京师范大学, 2021.
- [5] 李亚辉. 风电电气工程自动化中的问题及解决对策[J]. 电力设备管理, 2021, (02): 120-121.
- [6] 梁涛. 大规模风电并网条件下电力系统运行中电气自动化技术应用研究[J]. 自动化应用, 2020, (05): 87-88.
- [7] 曹敏健. 多运行场景下储能优化配置方法及实现策略[D]. 东南大学, 2019.

电力工程建设中的智能化技术应用研究

李庆峰

372523*****8437

摘要: 在能源转型与数字经济深度融合的背景下,智能化技术已成为推动电力工程建设提质增效、绿色低碳发展的核心驱动力。本文立足电力工程建设全生命周期流程,聚焦智能化技术在关键环节的应用逻辑。通过梳理行业发展现状与技术需求,剖析智能化技术与电力工程建设的适配性特征,探讨应用路径与实施要点,明确技术应用瓶颈并提出优化策略。

关键词: 电力工程建设;智能化技术;全生命周期;施工管控

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.005

引言

电力工程建设是能源体系构建的核心支撑,直接关系到能源安全与经济社会的稳定发展。当前,我国电力工程建设规模不断扩大,新能源项目占比持续提升,行业发展进入转型升级的关键阶段。传统电力工程建设模式依赖人工操作,存在效率低下、质量管控难度大、安全风险高等局限性,难以适应行业发展的新形势。智能化技术的快速发展为电力工程建设的转型升级提供了重要契机,其在提升建设效率、保障工程质量、降低安全风险等方面具有显著优势。

1 电力工程建设现状与智能化技术适配性分析

1.1 行业发展现状与技术需求

当前,电力工程建设行业正朝着规模化、集约化、绿色化方向发展。随着新能源电力项目占比提升,传统建设模式已难以满足复杂工程环境下的高效推进需求。在工程建设过程中,对精准规划、风险预判、高效管控等方面的技术需求日益迫切。传统依赖人工操作的模式存在信息传递滞后、资源配置不合理等问题,制约了工程建设的整体效率与质量。在此背景下,亟需引入先进技术突破行业发展瓶颈,为电力工程建设的转型升级提供有力支撑。

1.2 智能化技术核心特征与优势

智能化技术以大数据、人工智能、物联网、云计算等为核心,具备数据采集精准化、分析处理高效化、决策响应智能化、协同管控一体化等核心特征。在电力工程建设领域,其应用优势主要体现在多个方面。通过物联网技术可实现工程全要素的实时感知,确保数据采集的全面性与准确性。借助大数据分析能够挖掘工程建设中的潜在规律,为决策提供科学依据。人工智能技术可

实现施工流程的自动化管控,减少人工干预带来的失误。云计算则为海量工程数据提供安全可靠的存储与运算支撑,保障多部门、多环节的协同高效运作,显著提升工程建设的智能化水平。

1.3 技术适配性逻辑

智能化技术与电力工程建设的适配性体现在全生命周期的各个环节,形成了“需求牵引-技术支撑-效能提升”的核心逻辑。在工程规划阶段,智能化技术可适配复杂地形与环境的分析需求,提升规划方案的科学性。施工阶段,其能够适配多工序协同、风险实时监控的需求,保障施工过程的有序推进。验收与运维阶段,可适配质量精准检测、设备状态预判的需求,延长工程使用寿命。这种适配性并非简单的技术叠加,而是基于电力工程建设的核心需求,实现技术功能与工程环节的深度融合。

2 智能化技术核心应用场景与路径

2.1 前期规划阶段应用

在电力工程前期规划阶段,智能化技术为方案设计与可行性分析提供了有力支撑。通过地理信息系统与遥感技术的结合,可实现对建设区域地形地貌、水文地质、生态环境等基础信息的精准采集与分析。借助大数据技术整合区域能源供需数据、电网布局现状等信息,为工程选址、规模确定提供科学依据。人工智能算法可对不同规划方案进行模拟推演,评估方案的技术可行性、经济合理性与环境兼容性。这种智能化规划模式改变了传统依赖经验判断的局限,提升了规划方案的精准度与前瞻性。

2.2 施工过程管控应用

施工过程是电力工程建设的核心环节,智能化技术

的应用显著提升了施工管控水平。通过物联网技术在施工设备、材料、人员上的部署,可实现施工全要素的实时追踪与监控。大数据分析平台能够对施工进度、质量检测、安全隐患等数据进行实时整合与分析,及时发现施工过程中的异常情况。人工智能技术可实现混凝土浇筑、钢结构安装等关键工序的自动化施工,提升施工精度与效率。此外,数字孪生技术可构建施工过程的虚拟仿真模型,实现施工进度的可视化管控与多工序协同优化。这些智能化应用路径有效解决了传统施工管控中信息滞后、协同不畅等问题,保障了施工过程的安全、高效推进。

2.3 验收与运维筹备应用

在电力工程验收与运维筹备阶段,智能化技术提升了验收质量与运维筹备的科学性。采用无人机巡检、智能传感检测等技术,可实现对工程主体结构、设备安装质量的全方位、无死角检测。通过大数据技术整合施工过程中的质量检测数据、设备运行参数等信息,为验收工作提供全面、精准的依据。在运维筹备方面,智能化技术可构建设备全生命周期管理数据库,实现对设备运行状态的预判与预警。借助人工智能算法制定个性化的运维方案,明确运维重点与流程。这种智能化应用模式不仅提升了验收工作的效率与准确性,也为后续运维工作的高效开展提供了有力保障。

3 智能化技术应用关键问题

3.1 技术融合深度不足

当前,智能化技术在电力工程建设中的应用存在核心技术融合深度不足的问题。部分工程仅停留在单一技术的浅层应用,未能实现大数据、人工智能、物联网等多技术的协同融合。不同技术系统之间存在数据壁垒,导致数据共享与交互困难,难以形成全方位的管控体系。部分智能化技术与电力工程建设的具体环节适配性不足,技术功能未能充分发挥。例如,部分智能检测技术难以适应复杂的施工现场环境,检测精度受影响。技术融合不足不仅制约了智能化技术应用效能的提升,也增加了技术应用的成本,不利于智能化技术的大规模推广。

3.2 管理体系与协同机制缺失

智能化技术的应用需要完善的管理体系与协同机制作为保障,但当前电力工程建设领域相关体系与机制尚不完善。部分企业缺乏专门的智能化管理部门,对智能化技术应用的统筹规划不足。管理制度未能及时更新,难以适配智能化施工的管理需求,导致施工过程中出现

管理混乱的情况。在协同机制方面,建设单位、施工单位、监理单位等多方主体之间的信息共享与协同配合不足。各主体采用的技术标准与数据格式不统一,增加了协同管控的难度。管理体系与协同机制的缺失,严重影响了智能化技术应用的有序推进,降低了工程建设的整体效率。

3.3 复合型人才匮乏

智能化技术在电力工程建设中的应用需要既掌握电力工程专业知识,又熟悉智能化技术的复合型人才。当前,行业内此类人才严重匮乏,难以满足技术应用的需求。传统电力工程从业人员的知识结构较为单一,对智能化技术的理解与操作能力不足。高校与企业在复合型人才培养方面存在脱节,培养体系滞后于行业发展需求。人才培养机制不完善,现有从业人员难以得到系统的智能化技术培训,导致技术应用过程中频繁出现操作失误、维护不当等问题。复合型人才的匮乏成为制约智能化技术在电力工程建设中深度应用的重要瓶颈。

4 智能化技术应用优化策略

4.1 构建技术协同融合体系

为提升智能化技术融合深度,需构建完善的技术协同融合体系。加强大数据、人工智能、物联网等核心技术的整合研究,打破技术之间的数据壁垒,实现数据共享与交互。针对电力工程建设的不同环节,开展技术适配性优化研究,提升技术与工程环节的契合度。建立统一的技术应用标准,规范技术应用流程,确保不同技术系统的协同运作。鼓励企业与科研机构合作,开展智能化技术创新研究,开发适配电力工程建设需求的核心技术与设备。通过技术协同融合体系的构建,充分发挥智能化技术的综合优势,提升技术应用效能。

4.2 完善管理与协同机制

针对管理体系与协同机制缺失的问题,需及时完善相关制度与机制。企业应设立专门的智能化管理部门,加强对智能化技术应用的统筹规划与全程管控。结合智能化施工的特点,更新完善管理制度,明确各岗位的职责与工作流程。建立多方主体协同管控平台,统一技术标准与数据格式,实现建设单位、施工单位、监理单位等多方的信息共享与协同配合。加强各主体之间的沟通协调,建立常态化的协同工作机制,及时解决技术应用过程中出现的问题。通过管理体系与协同机制的完善,为智能化技术应用提供制度保障。

4.3 搭建人才培养平台

为解决复合型人才匮乏问题,需搭建多元化的人才培养平台。加强高校与企业的合作,建立产学研融合的人才培养模式,根据行业需求优化人才培养方案。高校应增设智能化技术与电力工程交叉学科,培养具备跨学科知识的专业人才。企业应完善内部培训机制,定期开展智能化技术培训,提升现有从业人员的技术水平。鼓励行业协会组织开展技术交流活动,促进人才之间的经验分享与技术互补。通过多元化的人才培养平台,加快复合型人才的培养与储备,为智能化技术的深度应用提供人才支撑。

5 智能化技术推动行业高质量发展展望

5.1 技术与绿色能源融合趋势

未来,智能化技术与绿色能源的深度融合将成为电力工程建设的重要发展趋势。随着新能源电力项目的不断增多,智能化技术将在风光储一体化项目、分布式能源项目等建设中发挥更大作用。通过智能化技术实现新能源发电功率的精准预测,提升新能源电力的消纳能力。优化储能系统的充放电控制,保障电网的稳定运行。推动电力工程建设与生态环境保护的协同发展,通过智能化技术降低工程建设对生态环境的影响。在此过程中,智能化监控系统还可对新能源设备的运行状态进行实时追踪,及时发现并处理故障,进一步提升新能源电力供应的稳定性与可靠性。这种融合趋势将进一步提升电力工程建设的绿色化水平,助力实现“双碳”目标,为能源结构优化升级提供坚实的技术支撑。

5.2 行业数字化转型方向

智能化技术将推动电力工程建设行业全面迈向数字化转型。未来,数字孪生、区块链等新兴技术将在电力工程建设中得到更广泛的应用。构建全生命周期的数字孪生模型,实现工程规划、施工、验收、运维等各环节的数字化管控,通过虚拟与现实的实时联动,精准把控工程建设的每一个细节。利用区块链技术保障工程数据的安全性与不可篡改性,提升工程管理的透明度与可信度,有效规避工程建设中的信息造假、责任推诿等问题。行业将逐步建立统一的数字化平台,实现资源的优化配置与高效利用,打破不同企业、不同环节之间的信息壁垒。数字化转型将彻底改变传统电力工程建设模式,提升行业的整体竞争力,推动行业高质量发展。

5.3 技术普及应用前景

随着技术的不断成熟与成本的降低,智能化技术在

不同规模电力工程中的普及应用前景广阔。不仅在大型骨干电网工程、新能源基地建设中得到广泛应用,也将逐步推广到中小型配电网工程、农村电力改造工程等领域,助力城乡电力基础设施均衡发展。政府将出台更多的政策支持智能化技术的推广应用,鼓励企业加大智能化技术投入,同时引导行业形成规范化的技术应用标准。行业内技术交流与合作将不断加强,促进先进技术与经验的共享,加速智能化技术的迭代升级。此外,智能化技术的普及还将带动上下游产业协同发展,形成完整的产业生态链。智能化技术的普及应用将全面提升电力工程建设的质量与效率,推动电力行业的整体升级,为能源体系的安全稳定运行提供有力保障。

6 结论

智能化技术已成为推动电力工程建设转型升级的核心驱动力,其在工程全生命周期各环节的应用具有显著的实践价值。本文通过分析电力工程建设现状与智能化技术的适配性,明确了技术的核心应用场景与路径。研究发现,当前智能化技术应用存在技术融合不足、管理体系缺失、人才匮乏等关键问题。针对这些问题,提出了构建技术协同融合体系、完善管理与协同机制、搭建人才培养平台等优化策略。未来,随着技术的不断成熟与普及,智能化技术与绿色能源的深度融合将成为趋势,推动电力工程建设行业实现数字化、绿色化转型。本文的研究成果为智能化技术在电力工程建设中的深度应用提供了理论参考,助力行业高质量发展。在实际应用中,需结合工程具体需求优化技术方案,充分发挥智能化技术的应用效能。

参考文献

- [1] 董合春,孙丰广,刘宾,等. 基于智能化技术的电力工程不同场景应用分析[J]. 中国科技信息,2025,(14): 61-63.
- [2] 黄建华. 智能化施工管理系统在电力工程项目中的实践[J]. 大众标准化,2025,(04): 178-180.
- [3] 卢华堂,丁鼎. 智能化技术在电力工程信息化建设中的应用研究[J]. 自动化应用,2024,65(S2): 111-113.
- [4] 王玮. 电力工程施工中智能化技术的集成应用与管理创新[J]. 流体测量与控制,2024,5(04): 91-94.
- [5] 戴蔚辰. 电力工程建设中的信息化与智能化技术应用研究[J]. 中国高新科技,2024,(02): 36-37+75.

发电厂高效电机的选型与能效提升路径研究

张鹏

福建大唐国际宁德发电有限责任公司，福建宁德，355000；

摘要：在双碳目标的引领下，发电厂作为能源消耗和碳排放的主要领域，提高电机能效成了节能减排的重要抓手。本文主要针对发电厂高效电机的选型及能效提升路径展开研究，根据发电厂辅机设备的运行特性，详细说明选型的核心逻辑和关键维度，从技术、管理、系统三个角度构建起能效提升路径体系，深入探究选型与能效提升的协同优化机制。研究目的在于，为发电厂开展科学选型奠定能效基础、借助多种途径提高能效水平给予理论及实践上的借鉴，助力发电行业达成能源利用效率改善及可持续发展目的。

关键词：发电厂；高效电机；选型；能效

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.006

引言

电机是发电厂能量转换和传递的主要设备，它被广泛地应用于给水泵、送风机、引风机、制粉机等各种辅机上，其运行效率直接影响到发电厂的厂用电率和总的能耗水平。随着电力行业对节能降耗的要求越来越高，高效电机由于自身具有低损耗、高转换效率等优点，正逐渐取代传统的低效电机成为行业升级的方向。选型作为高效电机应用的第一步，其科学性决定之后能效发挥的空间，合理的能效提升路径是挖掘电机节能潜力的保证。目前，发电厂在高效电机应用上需要确定适合自己工况的选型标准，创建出全方位的提高能效体系。本文就发电厂高效电机选型的关键要素、能效提升的多种途径展开研究，兼顾理论逻辑和实践指导性，给发电行业能效提高提供参考。

1 发电厂高效电机选型的核心逻辑与关键维度

1.1 选型的核心适配原则

发电厂高效率电机选型要以工况适配为原则，结合不同的辅机设备运行特性来建立选型逻辑。对给水泵、循环水泵等变负荷运行设备来说，在选型时要重视电机在宽调速范围内效率的稳定性，保证电机在部分负荷下仍然能保持较高的能效；送风机、引风机等恒转矩负载设备要优先考虑电机额定效率和启动性能，防止由于启动损耗大而导致整体能耗。同时在选择时还要考虑电机和设备的匹配情况，即功率、转速、安装尺寸等参数的准确匹配，防止出现大马拉小车或者超载的现象，从源头上减少能耗。另外还要根据发电厂的能源结构以及供电特性，选择适合电压等级和控制方式的高效电机，为之后的能效提升打下设备基础。

1.2 选型的关键影响因素

高效电机的选型要考虑技术特性、全生命周期成本、运行可靠性这三个主要因素。技术特性上，要重视电机的能效等级，损耗构成以及调速适配性，优先选用采用非晶合金铁芯，优化绕组设计等先进技术的产品，减小铁损和铜损；全生命周期成本上，选型不能仅看初期采购成本，还要考虑运行能耗成本，维护成本和使用寿命，通过综合测算保证选型方案的经济性；运行可靠性上，要根据发电厂高温，高湿，多粉尘的运行环境，选用散热好，绝缘好，抗干扰能力强的电机，防止设备故障导致机组不稳定运行。另外行业标准、政策要求也要作为选型的考虑因素，保证所选电机符合国家能效强制标准及行业规范。

1.3 选型的科学实施流程

发电厂高效电机选型要遵照系统化的执行流程，把工况调研到方案落地的全流程把控住。首先全面开展工况调研，准确采集各辅机设备的负载特性、运行时间、转速需求、电压等级等主要参数，建立工况数据库；根据工况数据进行能效模拟分析，对比不同种类、不同规格高效电机的运行效果，初步确定适配的产品范围；再进行技术经济性评价，以全生命周期成本测算为基础，结合能效潜力分析，确定最优选型方案；最后进行方案验证，采用样机试验或者同类项目案例参考的方式对选型方案的可行性、适配性进行验证，保证所选电机可以充分适应实际运行工况，发挥出最佳的能效水平。同时在选型时要增加技术部门和运维部门的配合，保证选型的技术先进性和运维的便利性。

2 发电厂高效电机能效提升的核心技术路径

2.1 电机本体优化技术应用

通过电机本体结构和材料优化升级,可在源头上降低能量损耗、提高效率。铁芯设计上用低损耗非晶合金材料代替传统硅钢片,减少磁滞损耗和涡流损耗,尤其适合于变频调速工况下高效率的电机;绕组设计上用高导电率材料和优化绕组结构来降低铜损耗,同时通过精确的绕组分段、布线设计改善磁场分布,减少杂散损耗。转子结构创新也是本体优化的重要途径,采用嵌入式转子或盘式电机设计,可以减小转子惯量,提高动态响应速度,满足发电厂变负荷运行的要求。另外优化电机的散热结构,采用高效的散热系统以及新型的绝缘材料,使电机始终处于最佳温度范围内运行,避免由于过热而造成效率下降,在延长电机使用寿命的同时保证能效的稳定。

2.2 变频调速与智能控制技术融合

变频调速技术是提高高效电机运行能效的重要支撑,通过改变电机供电频率来达到精确控制转速的目的,满足不同的工况下负载的需求。发电厂给水泵、风机等变负荷设备使用高压变频调速系统代替传统的液力耦合器调速,可以完全消除传动环节的机械能量损耗,大大提高电机和设备的整体运行效率。智能控制技术和融合应用,能够进一步挖掘能效提升潜力,基于机器学习的负载预测算法,实时捕捉负载变化规律,提前调整电机运行模式,实现按需供能;无传感器矢量控制技术依靠电机参数自检测和自适应补偿,在宽调速范围保持高效运行状态,削减参数漂移造成的能效损耗。另外搭建云端协同控制平台,将多台电机运行数据进行整合,采用全局优化调度来提高整体能效。

2.3 系统匹配与传动结构优化

高效率电机要发挥出最佳效能离不开同其它系统的精准匹配,优化电机同负载、传动设备之间的匹配关系可降低系统层面的能量损耗。在传动结构上采用高速电机直驱方式,取代传统的电机、减速器、负载的传动方式,去掉中间传动环节的能量损耗,特别适合大功率的给水泵等设备,电机与负载直接连接,提高整个系统的效率。对已有的设备实施节能改造时,应重点考虑电机与泵、风机等主机设备的参数匹配情况,采用改变叶轮直径、改进流道等手段,促使电机处于高效负荷范围之内。另外,改善供电系统与电机的匹配程度,应用无功补偿手段来提升功率因数,缩减电网损耗对电机能效产生的影响,创建起“电机-传动-负载-供电”全系统高效运作的体系。

3 发电厂高效电机能效提升的管理保障路径

3.1 全生命周期管理体系构建

创建高效电机全生命周期管理体系,把能效控制渗透到电机选型、采购、安装、运行、维护、报废的全过程。在采购环节上建立严格的供应商准入机制以及产品验收标准,保证所采购的高效电机满足选型要求及能效标准,在安装环节上采用专业的安装工艺及校准技术,保证电机与设备的准确对接,避免因安装不准确造成的能效损失,在运行过程中建立常态化的能效监测机制,实时监控电机运行参数,及时发现并处理能效异常问题,在维护方面制定个性化的维护方案,定期开展清洁、润滑、绝缘检测等维护工作,减少机械损耗和故障停机时间,在报废阶段开展能效评估和回收利用,实现资源的循环利用。经由全生命周期的精细化管理,发挥高效电机最大的能效潜能。

3.2 运维精细化与人员能力提升

运维精细化保障高效电机持续高效运转,建立以状态为基础的运维模式,利用在线监测设备获取电机温度、振动、电流、电压等运行数据,通过数据分析技术判断电机运行状态,做到预测性维护,防止过度维护或维护不足造成能效降低。加强运维人员专业能力培养,开展高效电机技术原理、选型标准、操作规范、维护技巧等培训,提升运维人员实操及解决问题的能力;建立技能考核与激励机制,推动运维人员自觉探索能效优化方法与路径。另外加强部门之间的协作,实现技术部门、运维部门、生产部门信息共享、联动配合,形成能效提升合力,保证各项运维措施的有效落实。

3.3 能效考核与激励机制完善

完善的能效考核和激励机制是高效电机能效提高的有力保证,以能效指标为考核体系的主要标准,把电机运行效率、能耗下降比例等指标纳入各部门、岗位的绩效考核范围,确定考核标准和奖惩办法。对于在能效提升工作中表现优秀的部门和个人,给予物质奖励和精神激励,调动全体员工参与能效提升的积极性;对没有达到能效考核标准的,分析原因,督促整改。另外设立能效提升专项基金,对高效电机技术改造、设备更新、人员培训等工作提供资金支持,保证能效提升措施的资金投入。依靠考核和激励的双重保障,营造出“人人重能效、人人促节能”的良好氛围,使发电厂高效电机的能效水平不断得到提高。

4 选型与能效提升的协同优化机制

4.1 选型阶段的能效预判与路径规划

选型与能效提升的协同优化要从选型阶段开始,把能效提升路径规划融入到选型决策当中。选型调研阶段,除采集工况参数外,还要结合现有能效提升技术的应用条件,预估所选电机的能效提升潜力,优先选择适配性强、能效提升潜力大的电机类型;技术经济性评价时,把能效提升措施的成本和效益算进全生命周期成本测算里,把选型方案和能效提升路径的契合度考虑进去。以适合变频调速的工况为例,在选型时选用变频适配性好的高能效电机,并且提前规划好变频调速系统安装调试方案,实现选型与后续能效提升技术的无缝对接。通过选型阶段的能效预估和路径规划,为之后的能效提高工作打下良好的基础。

4.2 能效提升对选型的反哺与优化

能效提升过程中的实践经验可以反哺选型工作,建立选型方案与能效提升效果的联动评价机制,定期对不同的选型方案下电机的能效进行总结,分析能效提升措施的实施效果以及适配性。对能效提升过程中出现的选型问题,如电机与工况不匹配、调速性能不能满足能效提升需求等,及时优化选型标准和流程;随着新型能效提升技术的使用,更新选型参数体系,把新的技术要求加入到选型参数中。以高速电机直驱技术应用经验为基础,改进大功率电机选型标准,增加转速适配范围、直驱兼容性等选型参数,提高选型方案的科学性、前瞻性。通过能效提升对选型的反哺,形成“选型-能效提升-选型优化”的良性循环。

4.3 协同实施的保障体系构建

建立选型与能效提升协同实施的保障体系,要从组织、技术、制度三个方面提供支持。组织上成立专门的协同管理小组,对选型和能效提升工作进行统筹协调,明确各职能部门的职责分工,防止出现工作断层;技术上创建共享技术数据库,汇集选型参数、工况数据、能效提升技术资料等信息,为协同决策赋予数据支撑,加强同科研机构、设备供应商的协作,引进先进的选型技术和能效提升方案;制度上制订选型和能效提升协同实施的管理办法,规范工作流程和衔接机制,明确协同评估的周期和标准。另外加强全员的协同意识培养,通过

培训宣传使相关人员认识到选型和能效提升协同的重要性,将协同理念融入到日常工作中,保证协同优化机制的正常运转。

5 结语

发电厂高能效电机选型及能效提升是降低厂用电率、实现节能降耗的主要途径,两者相互依存、相互促进。科学的选型为能效的提升打下了设备基础,多样的能效提升途径又给选型的价值最大化提供保障,而两者之间的协同优化更是实现整体能效突破的关键。本文从选型核心逻辑、关键维度入手,提出一个包含技术优化、管理保障的能效提升路径体系,探讨选型和能效提升的协同优化机制,形成起全方位多层次的研究架构。在实际运用当中,发电厂要依照自身设备特性以及运行工况,准确执行选型标准,灵活采用能效改善技术与办法,加强选型同能效改善的协作。随着新材料、新技术、新方法的不断出现,发电厂高能效电机的选型标准会越来越精准,能效提高的方法会越来越多样化,两者协同的机制也会更加完善,为发电行业实现绿色低碳发展提供更强大的支撑。

参考文献

- [1]金志刚.发电厂电机过电压的防护措施分析[J].集成电路应用,2023,40(10):204-205.
- [2]曹雅丽.全面提升电机能效助力“双碳”目标实现[N].中国工业报,2022-06-22(001).
- [3]何志瞧.基于高效永磁电机的大型发电厂辅机驱动系统关键技术研究及应用.浙江省,浙江浙能兰溪发电有限责任公司,2022-02-15.
- [4]曹雅丽.推广高效节能装备电机能效提升计划发布[N].中国工业报,2022-01-05(001).
- [5]中科三环:受益电机能效提升计划[J].股市动态分析,2021,(23):20-22.
- [6]刘俊伶.电机能效提升计划发布稀土永磁概念受追捧[N].证券时报,2021-11-24(A07).
- [7]李雁争.两部门发布电机能效提升计划加快淘汰落后电机[N].上海证券报,2021-11-23(002).
- [8]胡哲梯.工业电机能效提升环境影响与经济可行性分析[D].华南理工大学,2020.

高效电机改造助力发电厂碳减排的技术路径

林小凯

福建大唐国际宁德发电有限责任公司，福建宁德，355000；

摘要：在双碳目标的引领下，发电厂作为能源消耗和碳排放的主要主体，推进节能降碳改造是必然的选择。高效电机改造依靠明显的能耗削减潜力，变成发电厂碳减排的重要突破口。本文以高效电机改造助力发电厂碳减排为主题，对相关技术路线进行系统梳理和阐述。从高效电机本体升级、传动与控制环节优化、系统协同适配改造、智能运维保障体系构建等多方面来剖析各个技术路径的核心原理、实施要点以及碳减排作用机制。通过整合电机技术、控制技术、系统工程、智能管理等多领域成果，形成覆盖设备升级、控制优化、系统协同、运维保障的全链条技术体系，为发电厂利用高效电机改造达到碳减排目标提供全面、可行的技术参考，为电力行业绿色低碳转型提供有力支持。

关键词：高效电机；发电厂；碳减排

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.007

引言

电力行业是达成碳达峰、碳中和的重要领域，发电厂的碳减排对社会绿色转型有影响。电机是发电厂的主要动力设备，电机耗电比重高，电机系统能效提升是碳减排的重点。高效率电机改造是一项包括许多环节的系统工程，可以减少能耗，降低碳排放。目前有关技术的发展使改造路径越来越丰富。本文意在整理出改造助力发电厂碳减排的关键技术途径，分析其要点，为改造工作提供指导，促进电力行业高效低碳发展。

1 高效电机本体升级改造技术路径

1.1 高效电机选型与替代改造

高效电机选型与替代改造是高效电机改造的基础途径，关键之处在于挑选出符合高阶能效标准的电机来取代传统的低效电机，从电机运行能耗的源头入手，达成碳减排的目的。在选型时要根据发电厂各个场所的负载特性、运行工况和安装条件，有针对性地选择适合的高效电机，比如在风机、水泵等恒转矩负载场所，选用IE3及以上等级的异步高效电机，通过改进电磁设计、使用高导磁硅钢片等措施，可以大幅削减空载损耗和负载损耗，在需要高精度控制和节能效果的给水泵、压缩机等设备上，可采用永磁同步电机，依靠永磁材料的高磁能积特性，不需要励磁电流，可以减少励磁损耗，提高电机运行效率。替代改造不是简单的型号替换，还要对电机和负载设备进行适配性校核，保证电机额定功率、转速等参数和负载需求精准匹配，防止出现“大马拉小车”或者负载过载造成能效下降的情况，还要考虑电机

安装尺寸、接口标准等兼容性要求，保证改造后的系统稳定运行，通过提升电机本体能效直接减少能源消耗，降低碳排放。

1.2 电机核心部件优化改造

改造是在现有的电机上升级关键部件来提高效率，属于低成本、易实施的减排途径。定子绕组采用高效绝缘材料、优化结构，减小电阻和漏抗，减小铜损，用真空压力浸渍工艺提高绝缘和散热性能。提高负荷能够改善效率的稳定性。电机转子采用铸铜转子代替传统的铸铝转子，利用铜的高导电性来降低转子损耗、提高电机效率，在中低负载工况下节能效果明显；改进转子冲片结构，改善磁路利用情况，缩减磁滞、涡流损耗。改善电机通风系统，采用高效风扇，设计合理的通风结构，降低通风损耗，加强散热，防止电机过热造成能效下降、寿命缩短。对电机核心部件进行精准优化，不需要更换整个电机就能提高能效，降低发电厂的改造成本和碳排放。

1.3 特殊工况电机定制化改造

发电厂内有些电机工作于特别的工况，常规高效电机更换很难达到要求，定制化改造便是关键的技术手段。对高温工况电机，使用耐高温绝缘材料和高效的散热结构，提高耐高温性，防止绝缘老化和能效衰减；对高粉尘工况电机，改进电机密封结构，采用防尘轴承和防护涂层，减小粉尘磨损，保证运行精度和能效。根据变负载工况的电机，定制磁路和绕组结构，提高宽负载范围能效稳定性，防止轻载能效下降；对发电厂间歇运行设

备定制高效的轻载运行电机,根据不同的负载工况动态调整内部结构参数,达到不同负载工况下能效最优。根据工况需求做定制化改造,保证电机在复杂的环境下高效工作,给发电厂特殊场景的碳减排提供支持。

2 高效电机传动与控制优化技术路径

2.1 变频调速系统集成改造

变频调速系统集成改造通过改变电机供电频率来实现转速动态调节,使电机转速和负载需求相匹配,是发电厂电机系统节能降碳的主要控制技术途径。该技术路径核心就是把高压变频装置和高能效电机集成在一起,取代传统的节流调节或者液力耦合器调速方式,完全消除传统调速方式中存在的能量损耗。根据电机类型和运行工况选择合适的变频技术,大功率风机、水泵等设备采用高压变频调速系统,通过优化变频控制算法实现电机转速平滑调节与精确控制;中小型变负载电机采用低压变频装置,降低改造成本的同时保证节能效果。变频调速系统集成改造不仅可以降低电机非额定负载下的能耗,还能实现电机软启动,减小启动电流对电网的冲击,降低启动过程中的能量损耗和设备磨损;同时结合负载预测技术,提前调节电机转速,进一步提高能效和碳减排效果,尤其适合于发电厂中负载波动大的电机设备,如引风机、送风机、给水泵等。

2.2 高效传动装置配套改造

高效传动装置配套改造,用低效传动部件替换传统传动部件,减小电机与负载设备间能量传递损耗,提高传动系统能效,助力发电厂碳减排。传统的电机传动大多采用皮带传动或者液力耦合器传动,传动效率低、能量损耗大,因此高效传动装置的替换成为重要的改造方向。对于皮带传动系统,可用同步带代替V带,用同步带的非滑动传动特性提高传动效率、减少能量损耗;优化皮带轮设计提高传动精度、稳定性。对于采用液力耦合器传动的电机系统,可采用永磁耦合器代替传统的液力耦合器,利用磁场耦合来传递转矩,消除机械接触造成的能量损失,具有过载保护功能,提高系统运行的安全性;对于大功率设备,可以采用高速电机直驱改造,直接去掉中间传动环节,彻底消除传动损耗,大大提高传动系统效率。高效传动装置配套改造是在电机本体升级改造的基础上,从减少能量传递过程中损耗的角度入手,提高电机系统整体能效的一种措施,与电机本体升级改造相辅相成,增强发电厂的碳减排效果。

2.3 无功补偿技术协同应用

无功补偿技术协同使用,可以改善电机运行时的功率因数,降低无功功率传输过程中所消耗的能量,是高能效电机改造中帮助碳减排的重要辅助技术途径。电机在运行过程中要消耗一部分无功功率来建立磁场,从而造成功率因数下降,增大线路损耗和变压器损耗,降低整个电力系统的能效。因此,高能效电机的改造关键技术就是协同集成无功补偿装置。根据电机的运行特性及负载变化情况选择合适的无功补偿方式,对于连续运行的恒定负载电机采用固定电容补偿装置,对于变负载电机采用智能无功自动补偿装置,根据电机运行时功率因数的变化自动调整补偿电容的容量,及时补偿电机运行所需的无功功率。同时将无功补偿装置就近安装在电机侧,减少无功功率在线路中传输的距离,降低线路损耗。无功补偿技术和高能效电机配合使用,可以改善电机工作时的功率因数,削减无用的能量浪费,提升电力系统运作效能,进而缩减发电厂的碳排放量。

3 发电厂电机系统协同适配改造技术路径

3.1 电机与负载设备协同适配改造

电机与负载设备协同适配改造,属于高能效电机改造帮助发电厂实现碳减排的系统性技术途径,通过改善二者的匹配情况来提高系统运行能效。电机的能效发挥与负载设备的运行特性有关,要从系统入手进行改造。对于流体机械负载,改造高能效电机时优化负载设备设计、调整运行参数,使系统达到最佳能效;对于机械负载,优化传动比和运行节奏、联动调试,使电机高效运转,不降低能效,达到碳减排的目的。

3.2 多电机系统联动控制改造

多电机系统联动控制改造属于重要的碳减排技术途径,依靠改善多电机运行协调机制来优化系统总体能效。核心就是建立联动控制体系,依靠智能控制器加通信网络对电机实施实时监测并协同控制。根据负载情况来动态分配负荷,保证电机高效率工作;使用负荷预测技术提高系统的响应速度和能效稳定性;合理控制电机启停以及备用切换,减少损耗和冲击,提高碳减排效果。

3.3 电机系统与能源回收协同改造

电机系统与能源回收协同改造就是回收电机运行产生的余热、余能,实现能源梯级利用,提高能源利用效率,增强碳减排效果。该技术把高效率电机改造和能源回收技术结合起来,形成了节能与回收相结合的模式,

对高负荷电机采用高效散热系统收集余热。利用余热换热器把余热用来加热锅炉凝结水、厂房供暖等其他生产环节,减少额外能源消耗;对有再生制动功能的电机系统,如发电厂电梯、起重设备等,安装能量回馈装置,把电机制动能回馈到电网,实现能量回收再利用。同时改进电机系统运行参数,提高余能产生和回收效率,采用变频调速使电机制动产生更多的可回收能量,采用高效换热使余热回收利用率更高。电机系统同能源回收协同改造,达成能源循环利用的目标,从而缩减发电厂的能源耗费和碳排放量,拓宽高效电机改造的碳减排途径。

4 高效电机智能运维保障技术路径

4.1 电机运行状态智能监测改造

电机运行状态智能监测改造搭建智能监测系统,实时掌握电机运行参数和状态,为电机高效运行和碳减排提供保障,是高效电机改造的重要支撑技术路径。在电机的关键部位装设传感器来采集运行数据,然后通过无线通信将数据传送到智能监测平台;平台采用算法对电机的状态进行评价,发现异常后发出预警。对不同类型的电机定制监测指标体系,利用历史数据建立建能效基准模型,对比分析定位能效下降的原因。该改造可防止电机异常造成能效降低、碳排放上升,保证电机一直高效运行。

4.2 基于 AI 的电机能效优化调控

基于 AI 的电机能效优化调控用人工智能技术对电机的运行参数进行动态优化、精准控制,提高电机的能效和碳减排效果,是高效电机改造前沿技术路径。以电机历史、实时监测和负载需求数据为基础构建 AI 能效优化模型,用机器学习算法挖掘参数与能效、负载的关系;根据模型预测负载的变化情况,动态调整运行参数,使不同负载工况下能效最优。如用 PatchTST 模型预判负载变化,提前调整变频调速系统参数;用 AI 算法协同优化多电机运行参数。并且 AI 模型具有自学习功能,会依照电机的状态以及负载的特性来调节策略,从而保证能效优化的效果不会下降。该调控精准、智能,发挥高效电机节能潜力,提升发电厂碳减排成效。

4.3 电机全生命周期运维管理改造

电机全生命周期运维管理改造,创建全生命周期运维体系,保证电机从安装到报废的全过程高效运转,为

高效电机改造助力碳减排赋予长久保障。该技术路径包含安装调试、日常维护等各个环节,用标准化的流程和智能化的手段来提高运维质量。在安装调试阶段,根据能效优化的要求进行安装校准,保证电机与工作流:准确的匹配负载设备和控制系统;日常维护按照智能监测数据来进行预防性维护,定期对电机的主要部件进行清洁、润滑、检测,避免电机的能效降低;故障检修采用精准诊断技术找到原因,用高效的修复方案来减少停机和能效损失;根据电机技术和发电厂碳减排的需求,定期对电机系统进行技术改造,采用新的技术、新的设备。电机全生命周期运维管理改造创建长效保障体系,保证高效电机改造的碳减排成果稳固。

5 结语

高效电机改造给发电厂碳减排提供了多种系统技术路径,包括电机本体升级、传动和控制优化、系统协同适配、智能运维保障,各个路径互相配合,形成碳减排技术体系。在“双碳”目标下,发电厂要根据自身情况选择适配路径,实现精准改造和效益最大化。未来电机方面的技术革新会充实完善改造技术途径,超导电机技术,前沿的 AI 算法等会被应用于碳减量当中。另外需要加强技术融合创新,构建高效智能的节能降碳体系,推动发电厂绿色低碳转型,助力电力行业实现“双碳”目标。

参考文献

- [1] 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院;江苏省电力试验研究院有限公司;周勤勇;何泽家. “双碳”目标下新型电力系统技术与实践[M]. 机械工业出版社:2022. 294.
- [2] 姚宏. 工业企业碳中和与绿色发展[M]. 化学工业出版社:2022. 311.
- [3] 谭旭. 电力转型发展趋势下基于市场均衡模型的跨区输电影响评估[D]. 天津大学,2022.
- [4] 薛兆军,王军龙,毕可伟,武金玉,乔月平,常建杰. 碳减排背景下对生活垃圾焚烧发电厂扩容改造的技术分析[J]. 锅炉技术,2021,52(06):65-68+80.
- [5] 马彦伟. 火力发电厂循环水泵节能改造[D]. 大连理工大学,2019.
- [7] 王磊. 发电厂高压电机的节能变频改造[J]. 电子技术与软件工程,2018,(14):215.

多协议低压电力采集软件设计

周鹏

南京林洋电力科技有限公司，江苏省南京市，210000；

摘要：随着智能电网及现代化电力系统的发展，低压电力采集是电力监控、管理系统的一个重要组成部分。多协议低压电力采集软件能采集不同类型的电力设备，并对多种通信协议如 Modbus RTU/Modbus TCP/DL/T 645 等的支持，以实现不同厂家设备间的互相联调。本文分析多协议低压电力采集软件设计需求及软件模块，强调电力系统数据采集和分析的及时性、高效性，希望为电力设备故障的诊断、能源管理以及优化提供有力的技术支持。

关键词：多协议；低压电力采集；软件设计；系统集成

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.008

引言

低压电力采集软件属于智能电力系统的一部分，能对各种设备监控、数据采集、数据处理等，提升电力系统的可靠性及效率。由于各种不同电力设备品牌、型号的各异，所使用的通信协议也各不相同，要求电力采集系统的协议接口需有相应的兼容能力，支持多种品牌的设备接入。因此，迫切需要开发出一种能支持多协议、实时采集与处理并且能展示电力数据的软件，以用于支撑当前电力系统的监控。

1 多协议低压电力采集软件设计需求

1.1 功能需求

为了满足采集硬件和采集终端多种通讯协议要求（如 Modbus, M-Bus, DL/T 等），使终端能准确对接不同的电力计量设备以及电力通信网络并进行通讯，电力采集软件要具有各种通讯协议兼容性高，保证能接收到不同设备发送来的信息。软件要有参数灵活调整能力，根据不同情况采用不同的通讯协议、不同的设备等设置参数，应用到更广阔的领域，如智能家居、工业自动化和智能电网等。

1.2 安全性需求

数据安全问题也是低压电力采集软件设计中必须考虑的问题，软件要有数据加密功能，在数据传输过程中不能被篡改。而用户身份认证功能，只允许被授权的人进入系统中进行相关数据的操作，防止其他人恶意入侵和破坏。同时，具备日志记录和异常监测功能，每次动作都做过日志记录，任何一个异常都会自动写日志记录，方便后期对数据信息的追查。

1.3 可视化需求

可视化需求是为了给予用户直观清晰地展现用电数据的界面，展示方式包括图表、仪表盘、实时数据流等，辅助用户更好地掌握电能以及设备是否处于正常工作状态^[1]。再加上告警功能的应用，在电力数据异常时能及时通知相关人员，并进行处理，让用户根据自身情况设置告警条件，从而达到智能化管理的目的。

1.4 兼容性需求

由于各种不同厂商的不同类型设备会使用不同的接口协议和不同的数据格式上传相关信息，在低压电力采集软件中要做好对接的兼容性问题，无论品牌还是型号的电力计量设备，都能被该软件接收并兼容。另外，为保证数据采集的完整性，需要使软件适应于任何电力计量仪器，包含传统机械电表、智能电表等。基于统一软件平台，对不同类别的电表都可采集相关数据，还能对电表进行监控，当用户换表或者增加新设备时不必担心兼容性问题。

2 多协议低压电力采集软件模块设计

2.1 用户管理模块

用户管理模块主要是用来实现用户注册、用户认证、用户授权及操作日志等功能，此模块的设计是为了保证不同用户根据自己的权限使用系统的相关功能，加强系统的安全性和方便用户操作。此模块支持用户注册、登录、找回密码等功能，并使用双因素认证方式保障账户的安全性。用户按照不同角色进行分派权限，管理员有系统配置、用户管理、设备管理等权限；操作员对一些数据进行查看，对设备进行相关操作等；而访客就只能查看到系统中的部分数据^[2]。此外，还可以结合 RBAC 模型，针对每个用户，精细化分配其对应各个模块、各个数据、各个操作的权限，保证系统的安全性以及用户

行为的规范性。

2.2 数据采集模块

数据采集模块功能是从各类型电力计量设备和传感器实时采集电力数据,并对其进行预处理,对采集到的数据具有高效、准确和稳定的要求。由于电力设备和传感器类型多,数据采集模块可以使用 Modbus、DNP3、OPC、IEC61850 等多种通信规约来接入不同厂家的设备,实现对各种类型的数据的统采。采集到的数据按照实际数据情况选择使用定时任务或者事件驱动的方式进行采集,采集数据会暂存于高速缓存之中,在触发相关条件以后便将数据传输到中央数据库或者云服务器上(如图 1 所示)。同时,对采集数据进行检验,是否有异常数据出现,对于检验出来的异常数据也会进行排除。比如,检查采集数据是否超出了设定好的阈值范围,避免采集数据发生偏移情况,还能远程查看设备状态(设备在线/离线、通信情况、采集频率),便于设备管理。

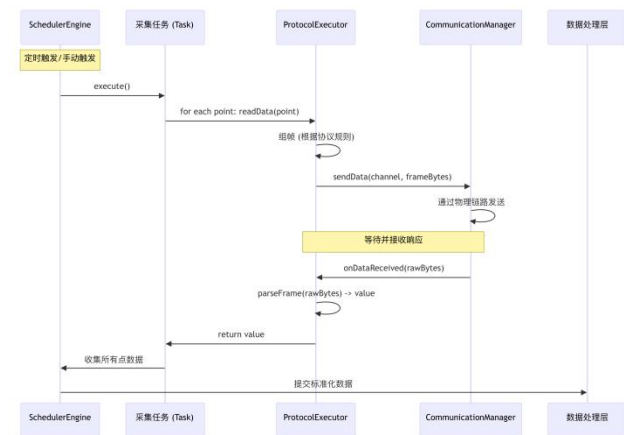


图 1 数据采集任务执行时序

2.3 数据处理模块

数据处理模块主要处理采集的原始电力数据,实现清洗、转换、分析、存储的过程,方便后面的展示以及报表。设计目标在于保证数据准确性、快速性、智能化,剔除掉不正常的的数据,填充上缺失数据,将数据整理到符合标准的数据格式。同时,把不同设备采集的数据格式统一成同一种格式,为后续的数据处理以及存储做好准备。对于实时数据能马上处理,如数据统计、趋势分析、实时告警等,对于以前的数据也能采用大数据方式批量处理和离线分析,并引入数据挖掘及机器学习算法,对电力数据进行深度分析。比如,基于时间序列预测模型的电力负荷预测、基于聚类分析的设备故障风险等,处理后的数据将根据不同数据属性存储到数据库中,如历史数据存储到时序数据库里、实时数据存储在缓存中,

数据库支持高效查询和检索,有效提高电力管理的精确度和准确率(如图 2 所示)。

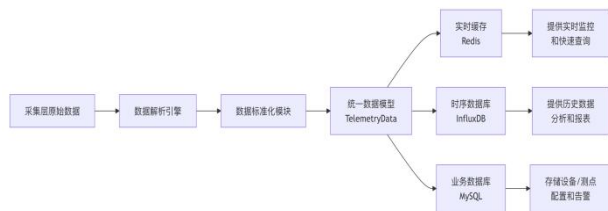


图 2 数据处理流程图

2.4 报表与图表生成模块

报表及图表生成功能位于系统前端显示部分,将处理过的电力数据制作成可视化的表格及图形展现给用户。用户根据自己的需要进行报表内容及格式自定义,并生成日报表、月报表、年报表、设备运行动态报告和能效分析报告等,将报表导出为 PDF 或 Excel 或者 CSV 格式,用于后续的分析与使用。此模块提供多种图表生成的选择,包括柱状图、折线图、饼图、热力图等,能针对电力消耗、负荷分布、设备健康状态等信息进行生成,方便用户对图表及报表的内容以及格式进行定制。针对不同需求使用不同的图表类型,如针对用户的上拉、下拉、点击查看大图/缩小图等行为都可以作出反馈。此外,根据时间、设备、区域等条件进行筛选,快速看到某段时间的数据,让用户更容易制定相关针对性的决策。同时,该模块提供大数据的趋势分析功能,自动生成电力使用的时间趋势图、负荷波动图等,比如自动生成历史高峰电耗报告,帮助用户分析是否存在异常波动,发现用电安全隐患及下一步工作准备情况;自动计算出单位时间内单位用户的负荷率,并进一步计算预计负荷率;按需提供未来 N 天或 M 周或 K 小时负荷曲线走势,也能提高管理效率。

2.5 告警与监控模块

告警与监控模块主要用来监测电力设备和电力系统的工作状态,根据具体的异常情况采取告警方式告诉用户,因此这一部分的设计目的是能实时有效地检测以及对于各种问题做出较为准确的判断与处理。系统能对电力设备的实时运行状态、负载情况以及功率因数等进行监测,如某项指标超过设定值,则系统发出告警,按照告警等级的不同,对问题进行详细处理^[3]。信息告警可由人工定时查看,警告告警以及严重告警触发流程均应分别制定,保证问题及时处理,快速响应,准确度更高。告警方式可采用一种多样化的形式,如发送短信告警、邮件告警、APP 告警通知等,从而让用户更加直观地了解到当前的具体状况。系统通过对用户自主选择添

加告警条件并设置其变化范围,以此来获得告警,在接收到提示后通过响应告警方式将收到的告警事件保存,并提供告警日志的功能,对一些故障事件产生的时间和故障等级等信息进行记录,方便后期的管理以及运维。

3 多协议低压电力采集软件的部署与维护

3.1 部署方案

系统部署包含硬件与软件的选型与配置、网络配置、最后的系统安装与调试。根据项目选用适当的硬件设备,如服务器、存储设备、终端设备等,服务器要有足够的算力、存储空间,能满足大流量数据的处理需求,网络要具有较高的带宽和极低的时延,保证数据能实时传送。在部署之前,要确定服务器已安装了合适的操作系统(如Linux或Windows Server),并按照要求安装相关的环境,如数据库(MySQL、PostgreSQL)、应用服务器(Apache Tomcat等)、相关依赖等,最后按顺序完成应用程序的安装与配置,包括数据采集处理模块和前端展示模块,通过自动脚本一次性将成批软件进行安装,并做相应适配;数据库连接、API配置等。部署完成后要对整个系统进行全面调试,各部分能正常工作,其中涉及性能测试、压力测试、并发测试等,确保系统可以在高并发、高负荷下保持稳定运行。同时,提供使用手册、技术文档和培训资料等,保证用户能正常使用。

3.2 远程维护与升级

为确保系统能长期稳定运行,需加强远程维护、升级,在不进行上门服务的情况下也能实现远程管理维护、故障排查,降低运维人员的现场工作量。同时,利用集中管理平台对系统进行远程升级,从集中管理平台下载升级包,经加密传输通道把升级包下发至各终端上,升级过程中先对当前运行情况进行备份,然后执行升级过程,根据实际需要采取自动升级与手动升级相结合的方式,实现定时自动升级,也可随时手动升级^[4]。对重要安全升级项优先推送,并设置强制升级项,促使安全补丁及时生效,利用监控、日志管理模块能实时了解当前业务的运行状况,并及时查看当前系统的各类日志,准确定位出问题点,进行相应调整与处理。对已出现的问题提供远程登录及修改手段,利用告警模块第一时间发现当前系统的异常状况,并能远程访问故障点进行诊断并修复问题。运维人员通过远程命令行或远程桌面的方式解决问题,减少运维人员现场工作的时间与成本。

3.3 数据备份与恢复

数据备份及恢复是系统维护重要环节之一,目的在于保证系统数据的安全性,防止由于系统故障、意外情况或人为因素造成的数据丢失。结合数据的重要程度和更新频率设定备份的层次,对重要系统配置项、数据库、应用数据的配置信息,要做全量备份加增量备份,每周做1次全量备份,每天或者每隔一小时做一次增量备份,备份要实时并具有时效性和完整性。同时,备份保存在本地服务器,或者存放在云存储、混合云存储,但是备份要保证可靠性和安全性,所有备份数据都需要加密存储,防止备份过程中产生泄密或被篡改的现象。在发生数据丢失或系统故障情况下,通过备份数据及时恢复,检验备份数据的完整度,使用自动化脚本恢复数据或是手工恢复备份数据到指定的系统位置上,检验和验证该系统是否正常。对于备份的任务需要实现自动化,利用调度程序定时运行,经常性地对备份做检查,对出现的问题及时通知,设置系统自动报警,当出现备份失败以及数据损坏时立刻让管理员处理。当遭受严重的灾难事故,如硬件的损坏或者自然灾害等,具备灾难恢复的办法,如多地备份、异地灾备中心等,以保证系统和数据均可以在不同的地方进行恢复,给用户带来稳定可靠的使用体验。

4 结束语

在多协议低压电力采集软件设计过程中,科学组织软件及硬件架构,并准确选择各种合适的规约,有助于提高采集的精度以及采样率。同时,系统的功能需要强大,并能兼容不同设备和系统,结合各种规约采集各项数据,有利于开展电力监测、管理、优化等工作,并运用数据传输加密和数据压缩,保证数据安全,有助于提高电力行业的管理水平。

参考文献

- [1] 王咏昭,李晓茹.基于低压电力线载波通信的用户用电信息采集方法[J].电气技术与经济,2024,(08):257-259.
- [2] 向奕同.电力用户低压采集成功率影响因素研究[J].农村电气化,2023,(05):87-89.
- [3] 杜晟磊,井含香,石家乐等.基于扩频技术的低压电力用户信息自动采集系统[J].自动化技术与应用,2023,42(03):112-116.
- [4] 曹东宁.影响低压电力线载波采集成功率的因素分析[J].通信电源技术,2021,38(02):214-216.

光伏场站间谐波产生机理与新型滤波装置抑制策略

王闯

中广核新能源辽宁有限公司, 辽宁沈阳, 110000;

摘要: 随着光伏产业规模化集群发展, 光伏场站并网引发的谐波问题日益突出, 尤其场站间谐波耦合交互严重威胁电力系统安全与电能质量。本文阐释光伏场站间谐波产生机理, 重点剖析逆变器非线性、场站间阻抗耦合及电网背景谐波激励等核心因素; 梳理现有滤波装置局限性, 提出主动滤波协同抑制、混合滤波优化配置及智能自适应滤波三类新型策略; 通过 MATLAB/Simulink 仿真验证策略有效性。研究为光伏场站集群谐波治理提供理论与技术支撑, 助力光伏高质量并网。

关键词: 光伏场站集群; 谐波耦合; 产生机理; 新型滤波装置

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.009

引言

双碳目标下, 太阳能开发规模持续扩大, 光伏场站成为新型电力系统核心组成。但光伏输出功率存在天然波动与间歇性, 核心设备逆变器为非线性负载, 易产生大量谐波。多场站集群并网时, 通过电网阻抗耦合导致谐波传播、叠加放大, 形成跨场站谐波污染, 不仅降低电能质量, 还可能诱发变压器过热、保护误动等故障, 威胁系统安全运行。

现有光伏谐波研究多聚焦单场站孤立治理, 对多场站谐波耦合机理与协同治理关注不足。传统无源滤波器 (PPF)、有源电力滤波器 (APF) 在应对集群复杂谐波与动态工况时, 存在抑制效能有限、适应性差、易谐振等问题。因此, 揭示场站间谐波产生与放大机理, 研发新型滤波装置及抑制策略, 是光伏集群并网领域的关键技术瓶颈。本文围绕该核心问题开展研究, 为多场站谐波协同治理提供解决方案。

1 光伏场站间谐波产生机理

光伏场站间谐波由多因素耦合产生, 核心诱因是光伏系统非线性, 同时受场站间阻抗耦合、电网背景谐波激励及运行工况波动影响, 形成复杂的谐波传播-放大机制。本节从逆变器非线性特性、场站间阻抗耦合效应、电网背景谐波激励及运行工况影响四方面, 剖析谐波产生与耦合机理。其整体作用机制如图 1 所示。

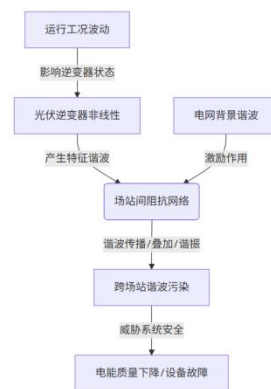


图 1 光伏场站间谐波产生与传播机理示意图

1.1 光伏逆变器非线性特性

逆变器是光伏交直流转换核心设备, 其功率开关器件的高频通断是谐波产生的主要根源。逆变器采用脉冲宽度调制 (PWM) 技术, 通过控制 IGBT 等器件通断调节输出参数, 因开关行为的离散性与非线性, 输出电流含开关频率及倍频特征谐波。

多场站集群运行时, 不同场站逆变器开关频率差异导致特征谐波频率不同, 这些谐波通过公共连接点 (PCC) 注入电网形成叠加; 若频率相近还会引发干涉, 导致局部谐波幅值放大。此外, 逆变器死区补偿偏差、开关器件非理想特性等, 会进一步加剧谐波畸变, 使谐波频谱更复杂。

1.2 场站间阻抗耦合效应

多光伏场站通过输电线路、变压器接入公共电网, 形成复杂阻抗网络, 场站间阻抗耦合是谐波传播放大的关键路径。场站输出阻抗、线路分布阻抗、变压器漏抗

及电网等效阻抗构成耦合阻抗矩阵，为谐波跨场站传播提供物理通道。

某一场站产生的谐波电流通过耦合阻抗流向其他场站，经逆变器、负载等反射折射后反复振荡；若谐波频率接近阻抗网络固有谐振频率，将引发串并联谐振，导致谐波幅值骤增。例如相邻场站阻抗匹配时，5 次谐波可能被放大数倍，超出电能质量限值。

1.3 电网背景谐波激励

电网背景谐波会干扰逆变器锁相环（PLL）的相位频率跟踪精度，导致调制信号畸变，引入额外谐波；同时改变场站运行工况，使开关动作偏离理想状态，增加谐波产生量。在背景谐波共同激励下，多场站形成谐波协同放大效应，加剧耦合复杂性并扩大污染范围。

1.4 运行工况影响

光伏场站输出功率、光照、温度等工况存在显著波动性，直接导致逆变器运行状态变化，影响谐波特性。光照突变时，光伏输出功率大幅波动，逆变器需调整开关频率、调制比等参数，使谐波频率与幅值呈现动态波动。

多场站地理分布不同，工况存在异步性。某一场站功率波动通过阻抗耦合影响周边场站，引发谐波动态耦合。光照稳定时谐波产生量平稳；清晨、傍晚等过渡阶段，光照频繁波动导致各场站功率异步变化，谐波呈现不规则波动，增加治理难度。

2 现有滤波装置的局限性

现有光伏谐波滤波以无源滤波器（PPF）和传统有源电力滤波器（APF）为主，在单场站治理中成效有限，面对多场站集群的复杂谐波环境（多频率叠加、动态工况、跨场站耦合），存在显著治理短板，无法满足规模化光伏集群需求。

2.1 无源滤波器的局限性

无源滤波器由电容、电感、电阻构成，通过调谐特定频率实现谐波分流，具有成本低、可靠性高的优势，但存在明显短板：一是频率针对性强，无法适配集群复杂谐波频谱；二是易与电网阻抗谐振，放大谐波；三是动态响应慢，无法适应工况波动；四是体积庞大，规模化应用经济性差。

2.2 传统有源电力滤波器的局限性

传统 APF 通过生成反向补偿电流抵消谐波，具有滤波范围广、响应较快的优势，但存在不足：一是单台补偿容量有限，无法应对多场站谐波叠加；二是多台并列运行易协同失调，引发二次污染；三是对电网阻抗变化适应性差，滤波效果不稳定；四是成本高，规模化应用受限。

3 新型滤波装置抑制策略

针对现有装置短板，结合场站间谐波产生与耦合特性，本文提出三类新型滤波抑制策略，实现对复杂谐波的精准高效治理。

3.1 基于主动滤波技术的协同抑制策略

该策略采用多台新型并联有源电力滤波器（SHAPF）构建分布式架构，通过协同控制实现联合治理。新型 SHAPF 优化拓扑结构，集成储能单元与宽频带模块，提升补偿容量与响应速度；同时构建分布式协同控制系统，通过实时通信实现多装置信息交互与协调运行。其架构如图 2 所示。

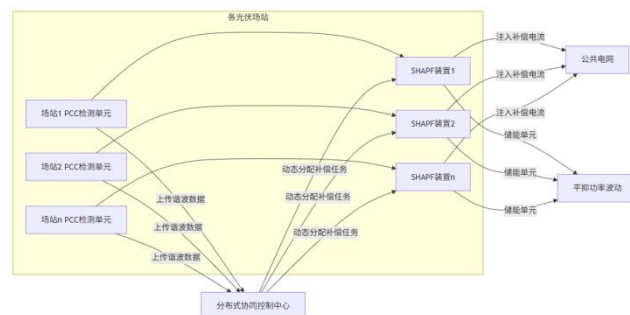


图 2 基于主动滤波的协同抑制策略架构图

具体流程：一是各场站 PCC 点部署检测单元，采集信号并提取谐波信息上传至控制中心；二是控制中心通过改进遗传算法动态分配补偿任务，避免重复与盲区；三是各 SHAPF 精准生成补偿电流，储能单元平抑功率波动，从源头减少动态谐波，实现全频谱精准抑制。

3.2 混合滤波装置的优化配置策略

混合滤波装置融合 PPF 低成本与 APF 宽频精准优势，通过拓扑与参数优化实现优势互补。核心是结合集群谐波特征与阻抗特性，设计装置拓扑与参数，确保全工况稳定运行。其典型拓扑结构如图 3 所示。

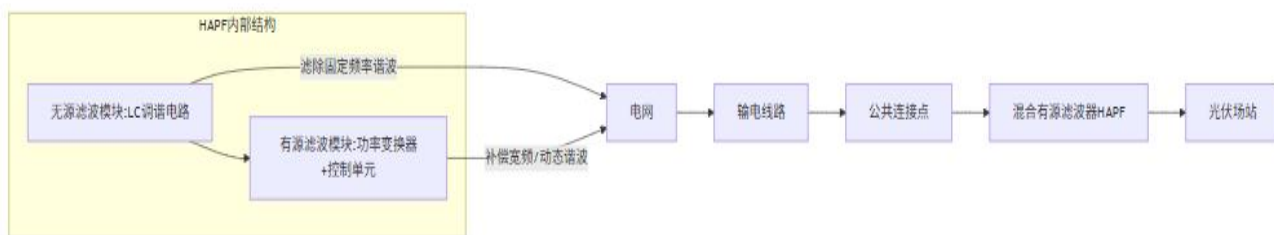


图3 混合滤波装置拓扑结构图

配置方案：一是场站出口部署调谐式 PPF 组，预滤除 5 次、7 次等主导特征谐波；二是公共连接点部署新型混合有源滤波器（HAPF），通过无源+有源串联拓扑，分别滤除固定频率与宽频间谐波；三是优化参数并引入阻抗匹配校验，规避谐振。该策略兼顾效能与经济性，适用于大规模集群。

3.3 智能控制的自适应滤波策略

该策略采用改进变步长最小均方（LMS）算法结合模糊控制优化滤波策略。改进 LMS 算法通过动态步长解决精度与速度矛盾，快速跟踪谐波动态变化；模糊控制模块根据工况与谐波特征实时调整补偿参数。装置集成电网阻抗在线检测模块，可预判谐振风险并自动调整参数，提升适应能力与治理稳定性。其控制逻辑如图 4 所示。

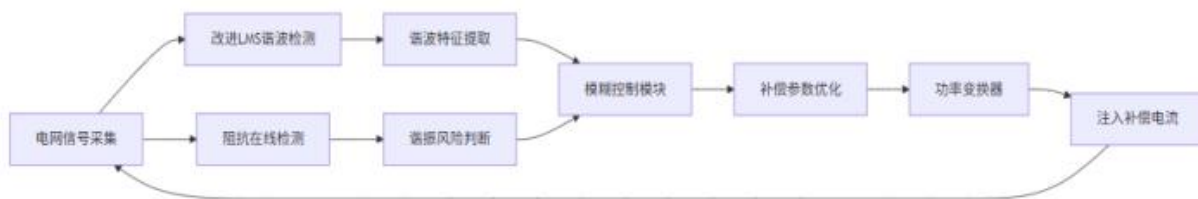


图4 智能自适应滤波策略控制逻辑图

4 仿真分析

4.1 仿真模型构建

为验证本文提出的新型滤波装置抑制策略的有效性，基于 MATLAB/Simulink 仿真平台，构建包含 2 个 100MW 级光伏场站的集群并网仿真模型。模型关键参数设置如下：光伏逆变器采用三相桥式 PWM 拓扑，开关频率为 10kHz，调制方式为空间矢量脉宽调制（SVPWM）；输电线路采用 π 型等效模型，长度 10km，电阻 $0.05 \Omega/\text{km}$ ，电抗 $0.3 \Omega/\text{km}$ ；电网等效阻抗为 $0.01+j0.05 \Omega$ ；分别配置传统无源滤波器、传统 APF 及本文提出的新型混合滤波装置（采用优化配置策略）作为对比组。仿真工况设置：额定光照强度 $800\text{W}/\text{m}^2$ （0~0.2s），0.2s 时光照强度突变至 $500\text{W}/\text{m}^2$ （模拟多云天气），电网电压等级 35kV，系统频率 50Hz，仿真

时长 0.5s。

4.2 仿真结果分析

仿真结果从谐波总畸变率（THD）和各次特征谐波幅值两个核心指标进行量化分析。未采取任何滤波措施时，光伏场站集群公共连接点的电流 THD 达 15.8%，远超 GB/T14549-93《电能质量公用电网谐波》规定的 5%限值，其中 5 次谐波幅值 1.2kA，7 次谐波幅值 0.8kA，存在严重的谐波污染。

采用传统无源滤波器时，电流 THD 降至 8.6%，5 次、7 次谐波幅值分别降至 0.5kA、0.3kA，但对 11 次及以上高次谐波抑制效果微弱，且因与电网阻抗耦合出现轻微谐振现象，导致 11 次谐波幅值从 0.2kA 升至 0.25kA；采用传统 APF 时，电流 THD 降至 6.2%，各次谐波幅值均有不同程度降低，但在 0.2s 光照突变瞬间，THD 骤升至 10.3%，动态适应性不足；

采用本文提出的新型混合滤波装置优化配置策略时, 电流 THD 降至 3.1%, 满足国家标准限值要求, 其中 5 次、7 次、11 次谐波幅值分别降至 0.15kA、0.1kA、0.08kA, 谐波抑制效果显著; 在 0.2s 光照强度突变时, THD 仅短暂升至 4.2%, 随后在 0.03s 内快速恢复至 3.1% 左右, 展现出优异的动态适应性。仿真结果充分验证了本文提出的新型滤波装置抑制策略的有效性与优越性, 能够实现光伏场站间复杂谐波的精准抑制, 显著提升电能质量。

5 结论与展望

本文深入分析光伏场站间谐波产生与耦合机理, 明确逆变器非线性为核心诱因, 阻抗耦合为传播路径, 背景谐波与工况波动为强化因素; 针对现有装置短板, 提出三类新型抑制策略; 仿真验证表明, 所提策略可显著降低 THD, 提升动态适应性, 效能优于传统装置。

未来研究可从三方面拓展: 一是优化新型滤波装置拓扑, 采用宽禁带器件提升功率密度与经济性; 二是开展光伏-风电-储能多能源协同场景的谐波治理; 三是引入数字孪生技术, 实现谐波实时监测、预测与精准调控, 推动治理技术升级, 保障新型电力系统安全运行。

参考文献

- [1] 周子翔, 赵世伟, 曹江华. 基于 ESO 的低载波比下 LC L-PMSM 电流控制策略[J]. 微电机, 2025(6).
- [2] 朱晓娟, 胡海涛, 陶海东, 等. 光伏并网系统的谐波不稳定产生机理及影响规律[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 9.
- [3] 尹代杰, 奚鑫泽, 高贯斌, 等. 三相不平衡光伏并网系统间谐波电流产生机理及控制研究[J]. 控制工程, 2024, 31(11): 2095-2103.

夏季基准电力负荷预测改进灰色模型及其应用

赵竞哲

华北电力大学(保定) 经济管理系, 河北省保定市, 071000;

摘要: 为适应新形势下的电力建设和管理, 近年来电网企业日益重视电网的规划工作, 在此背景下, 本文对某市电网进行负荷预测。本研究基于 2017 至 2020 年间某市电力负荷历史统计数据, 考虑到基准负荷的周期性和增长性, 提出了使用灰色模型 GM (1,1) 来预测 2020 年某市所有工作日的基准负荷曲线, 并对传统的灰色模型预测方法提出改进建议, 根据三点平滑法对历史数据做预处理, 重新预测, 最后将二者进行比较。根据预测, 某市的电力需求呈现出逐年上升的明显趋势。

关键词: 负荷预测; 灰色模型; 灰色模型改进; 三点平滑法

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.010

前言

在全球气候变暖背景下, 电网负荷调度常面临极端高温带来的巨大压力。随着我国经济与生活水平提升, 以空调为主的夏季降温负荷在部分地区已达总负荷的 30% - 50%, 成为夏季电力需求的主要构成。然而, 气候波动直接影响降温设备的启停, 使得城市电力负荷预测成为电力系统运行中的一项重要挑战。

夏季基准电力负荷预测对保障电网稳定尤为关键。目前研究主要围绕以下几个方向展开: 一是构建高精度预测模型, 基于统计学与机器学习方法, 如神经网络、支持向量机、决策树等, 利用历史负荷数据及相关因素(温度、湿度、时间、经济指标等)进行分析; 二是采用集成学习方法, 融合多种模型以提升预测的准确性与稳健性; 三是依托物联网与智能电表技术, 接入实时数据构建动态预测模型, 以应对负荷的实时波动与突发事件; 四是考虑可再生能源(如风能、太阳能)出力受气候影响的不确定性, 将其纳入预测体系, 进一步提高预测可靠性。

与此同时, 随着智能电网发展与新能源大规模接入, 配电网规划的重要性日益凸显。负荷预测作为电力系统规划、交易与调度的基础, 其精度直接影响电网安全与经济运行。在中长期负荷预测中, 灰色系统理论因其适用于“小样本、缺信息”系统而被广泛应用。然而, 传统灰色模型受不确定性因素影响较大, 预测精度有限。为此, 本文通过平滑处理原始数据中的异常值、优化初始值选取、并引入残差修正模型, 将残差与预测值叠加, 构建改进的 GM(1,1)灰色预测模型, 以提升预测准确性。

本研究基于某市地区电力负荷数据展开研究。该地区负荷受经济、生产活动与气象等多因素综合影响, 各

因素作用比例难以全面获取, 符合灰色系统特征。本文在建模过程中, 同时考虑了日基准负荷的时序稳定性、不确定因素及节假日效应, 最终得出该地区逐年基准负荷预测结果, 以期电力部门应对夏季负荷高峰、提升能源利用效率提供参考依据。

1 灰色模型

灰色系统理论是一种针对原始数据少、信息相对贫乏问题的解决方法。灰色系统理论旨在通过对于已知信息的研究, 凸显已知信息与系统的内在联系, 揭示系统运行和演化的规律。上述的特定系统称为灰色系统, 已知的部分信息为白色量, 未知量为黑色量, 系统内各种关系不明确的变量均为灰色变量。对于一个较少信息的原始数据序列, 灰色系统理论通常采用灰生成技术, 使得灰色信息变白。灰生产技术本质上是对数据的层次性和可比性的变换, 主要包括数值变换生成和层次变换生成等研究路线。其中, 数值变换生成是采用构造缓冲算子的方法, 对原数据序列进行处理, 可以减弱原始数据的随机波动, 提供数据序列的中间信息。层次变换生成是采用累加和累减生成的方法, 构建一个新的数据序列, 这种方法是在传统灰色模型中使用最为广泛的方法。

灰色模型 GM (1,1) 的工作原理是通过分析各因素之间的相互关系, 对原始数据进行生成和处理, 以寻找其变化规律, 并据此构建出有规律的数据序列和微分方程进行预测分析。该模型能够在有限且混乱的原始数据中寻找其内部趋势, 并在每一次的预测中对其进行修正。这意味着预测值是在动态过程中产生的, 这有助于揭示系统内部事物的连续发展和变化周期, 从而提高模型的预测准确性。灰色系统 GM (1,1) 模型是一个由单一变量的一阶微分方程组成的模型, 它在电力系统负荷预测

方面有着广泛的应用。

1.1 灰色系统 GM (1, 1) 模型的局限性

灰色系统 GM (1, 1) 预测模型具有精确度、计算方便、所需样本少等优点^[7], 但它仍然有其固有的限制, 以下是对这些局限性的详细概述。

灰色系统 GM (1, 1) 模型的预测过程主要是基于原始数据序列的累加, 进而构建微分方程, 并通过解决这些方程来获得预测结果。若原始序列中出现异常数值, 对预测结果的影响很大^[8]。此外, 还需要在下面的公式两侧进行导数计算

$$\hat{X}_1 = \left(x_0(1) - \frac{u}{\alpha} \right) e^{-\alpha k} + \frac{u}{\alpha} \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

得 $\frac{dX_0}{dt} = -\alpha X_0$ 。因此, 原始数据序列的增长速

$$\lambda = \frac{d^2 X_1}{dt^2} = -\alpha$$

度为。

在这个公式里, α 是一个恒定值。从给定的公式中, 我们可以观察到, 只有当原始数据序列的增长速度保持恒定时, 这个模型才能维持较高的预测准确性。在原始

$$x_0(k) = \frac{x_0(k-1) + 2x_0(k) + x_0(k+1)}{4} \quad (k = 2, 3, \dots, n-1)$$

上述公式不仅提高了当前数据的权重, 还避免了数值的过度波动。在计算两端点时, 我们可以使用公式:

$$x_0(1) = \frac{3x_0(1) + x_0(2)}{4}; x_0(n) = \frac{x_0(n-1) + 3x_0(n)}{4}$$

原始数据经过三点平滑处理, 降低了随机因素的影响。

1.2.2 改进初值选择

考虑到初值对模型预测准确性的作用, 本研究提供了一个创新的预测方程式。如果以数据的期望值作为起始条件, 可以得到一个新的预测方程:

$$\hat{X}_1(k+1) = \left(x_1(m) - \frac{u}{\alpha} \right) e^{-\alpha(k-m+1)} + \frac{u}{\alpha}$$

可以从 $1, 2, \dots, m$ 中挑选 m , 并通过对比预测数据来确定最理想的 m 值。然而, 在新的观测数据中, 通常会包含大量与未来相关的信息。因此, 从理论角度

$$\hat{\varepsilon}_1(k+1) \hat{\varepsilon}_0(k+1) \hat{\varepsilon}_0(k+1)$$

$$\hat{\varepsilon}_0(k+1) = \hat{\varepsilon}_1(k+1) - \hat{\varepsilon}_1(k) = \left(\varepsilon_0(i) - \frac{u}{\alpha} \right) (1 - e^{-\alpha}) e^{-\alpha k} \quad (k = i, i+1, \dots, n, i > 1)$$

通过将这一模型与 GM (1, 1) 模型叠加, 得到经过局部残差修正的 GM (1, 1) 预测模型

$$\hat{x}_0(k+1) = (1 - e^{-\alpha}) \left(x_0(1) - \frac{u}{\alpha} \right) e^{-\alpha k} + \delta(k-i) (1 - e^{-\alpha}) \left(\varepsilon_0(1) - \frac{u}{\alpha} \right) e^{-\alpha k}$$

$$\delta(k-i) = \begin{cases} 1, & k \geq i \\ 0, & k < i \end{cases}$$

序列数据增长速度较快的情况下, 模型的预测准确性可能会受到严重的干扰。

考虑到 x_1 的累加序列中只有一次累加, 并且是最旧的数据, 这使得该数据对未来的预测并没有太大的指导价值, 且其规律性也不是很强。如果传统的 GM (1,1) 模型计算出的预测值存在较大误差, 那么目前还没有找到有效的解决方案。灰色系统 GM (1,1) 模型的局限性使得其预测精度无法满足工程应用的需求, 因此有必要对该模型进行优化, 以提升预测的准确性。

1.2 关于灰色系统 GM (1,1) 模型的优化方案

1.2.1 对原始数据序列进行了平滑处理

考虑到原始数据序列可能存在的异常值和较高的增长率, 我们对这些数据序列进行了平滑处理, 目的是减少异常值的干扰并降低原始数据序列的增长速度。我们使用三点平滑法对原始数据进行了处理, 具体的操作步骤如下所述。

若原始序列按照公式展示, 那么滑动平均的计算方法为

看使用样本最后一个负荷值作为预测模型系数的初始条件是更加科学和合理的选择。

1.2.3 残差处理

鉴于基于原始数据构建的 GM (1, 1) 模型的预测结果可能存在较大误差, 我们对这些预测结果进行了验证, 并建立了 GM (1, 1) 残差模型, 通过将原始预测与残差结果叠加, 以提高预测的准确性。

残差项是指: $\varepsilon(k) = x_0(k) - \hat{x}_0(k)$ ($k = 1, 2, \dots, n$), 当局部残差 $k = i, i+1, \dots, n$ $i > 1$ 时, 可以计算出残差的数列: $\varepsilon_0(k) = \{\varepsilon_0(i), \varepsilon_0(i+1), \dots, \varepsilon_0(n)\}$ 。建立以事件响应函数为基础的 GM (1, 1) 预测模型后, 我们针对注册场所 ($0(k)$) 进行研究, $\hat{\varepsilon}_1(k+1) = (\varepsilon_0(i) - u/\alpha) e^{-\alpha k} + u/\alpha$ 。累减生成还原后, 得到一个预测面的模型

鉴于电力需求呈现出稳定的发展模式，在考虑基准负荷的周期性和增长性时，本研究使用 2017 至 2019 年某市市的电力负荷数据和同期的国家站数据，通过使用一阶一元灰色模型 GM (1,1) 进行建模，预测 2020 年某市基准负荷曲线。

2 算例分析

表 1 某地区 2001-2011 年历史符合数据

年份	2001	2002	2003	2004	2005	2006
历史数据/亿千瓦时	711.33	724.94	736.08	813.49	1093.07	1294.49
年份	2007	2008	2009	2010	2011	
历史数据/亿千瓦时	1487.61	1917.50	2125.20	2356.68	2826.92	

将原始数据进行三点平滑处理，处理结果如下表所示。

表 2 三点平滑处理后数据

年份	用电量/亿千瓦时	累计生成	紧邻均值生成
2001	711.33	711.33	
2002	724.94	1436.27	1073.80
2003	736.08	2172.35	1804.31
2004	813.49	2985.84	2579.10
2005	1093.07	4078.91	3532.38
2006	1294.49	5373.40	4726.16
2007	1487.61	6861.01	6117.21
2008	1917.5	8778.51	7819.76
2009	2125.2	10903.71	9841.11
2010	2356.68	13260.39	12082.05
2011	2826.92	16087.31	14673.85

2.1 传统 GM(1,1)预测模型

基于表 1 某地区 2001-2011 年统计的历史负荷数据为样本数据，首先使用传统的 GM(1,1)模型进行建模和预测，拟合结果如下图所示。

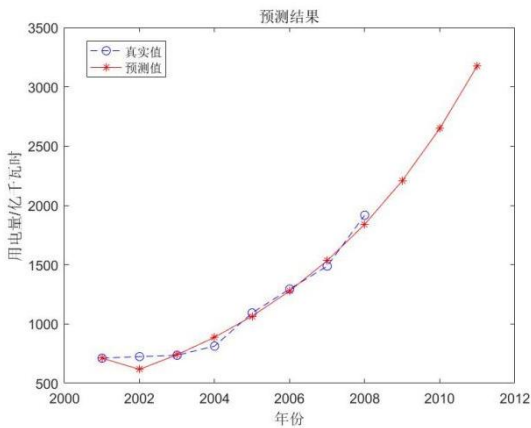


图 1 传统 GM(1,1)模型数据拟合结果

通过 GM(1,1)模型对 2001 年-2007 年的数据拟合可知，传统 GM(1,1)预测模型的拟合相对误差较大，部分

文章选取某地区 2001-2011 年历史负荷统计数据，采用改进 GM (1, 1) 模型对该地区进行电力负荷仿真实验。本文所采用预测模型为在原有传统灰色预测 GM (1, 1)基础上对原始数据采用三点平滑法进行预处理，降低随机因素的影响，提高预测准确性。该地区 2001-2011 历史负荷数据如下表所示。

超过 10%，平均相对误差为-1.72%，拟合效果一般。使用上述数据序列构建的预测模型对 2009 年、2010 年、2011 年的负荷进行预测检验，结果如下表所示。

表 3 GM(1,1)预测模型预测检验数据

年份	原始值	预测值	相对误差
2009	2125.2	2207.65	-3.88%
2010	2356.68	2648.51	-12.38%
2011	2826.92	3177.41	-12.40%

由上表可以看出，GM(1,1)预测模型对于 2009 年到 2011 年的负荷预测误差分别为 -3.88%、-12.38% 和 -12.40%，远大于模型对于 2001 年-2007 年的数据拟合平均相对误差。这说明传统的 GM(1,1)预测模型对于原始数据的拟合能力较为突出，但是对于未知数据的预测具有较弱的鲁棒性，其预测数据误差远大于拟合数据误差。

2.2 改进 GM(1,1)预测模型

改进模型先进之处在于，在根据历史数据对电力负荷进行预测前，先根据三点平滑法对原始数据进行处理，减少随机因素的影响。将数据进行三点平滑处理后的结果如下图所示。

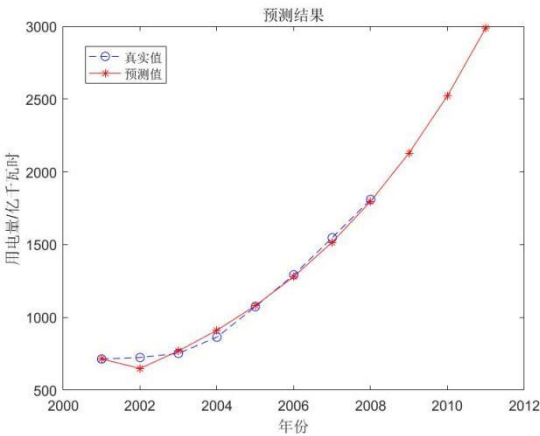


图 2 改进 GM(1,1)模型数据拟合结果

通过改进 GM(1,1)模型对 2001 年-2007 年的数据拟合可知,改进 GM(1,1)预测模型的拟合相对误差较小,仅有两年预测误差超过 10%,且其余误差均较小,平均相对误差为-1.17%,拟合效果较好。使用上述数据序列构建的预测模型对 2009 年、2010 年、2011 年的负荷进行预测检验,结果如下表所示。

表 4 改进 GM(1,1)预测模型预测检验数据

年份	原始值	预测值	相对误差
2009	2125.2	2129.26	-0.19%
2010	2356.68	2523.05	-7.06%
2011	2826.92	2989.68	-5.76%

由上表可以看出,改进 GM(1,1)预测模型对于 2009 年到 2011 年的负荷预测误差分别为-0.19%、-7.06%和-5.76%,与原始预测模型相比,该模型对于 2001 年到 2007 年的数据拟合平均相对误差的差值较小。这说明该模型相对于传统的 GM(1,1)预测模型对于原始数据的拟合能力更加突出,其预测数据误差与拟合数据误差较小。

2.3 预测结果对比

上文单独分析了传统 GM(1,1)预测模型以及基于三点平滑法对数据进行预处理的改进 GM(1,1)预测模型的预测效果,下面将两种预测模型的预测结果进行对比分析,从而评价预测模型的优劣。

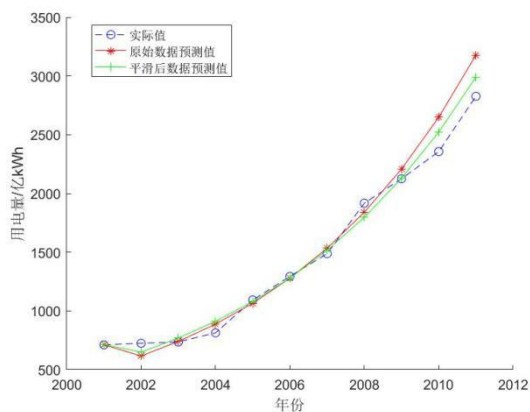


图 3 传统 GM(1,1)模型与改进 GM(1,1)模型数据拟合结果对比分析

从上图可以看出,整体上改进 GM(1,1)预测模型的预测数值与实际数值的偏差均小于传统 GM(1,1)预测模型,说明基于三点平滑法的数据预处理这一改进方法具有一定的效果。但两种预测模型对 2002 年数据的预测均出现较大偏差,需要在以后进一步作出改进。

3 总结

本文从实际出发以南方某市为例,针对其历年电力负荷统计数据及逆行分析处理。在传统 GM(1,1)预测模型的基础上,针对灰色系统负荷预测方法的局限性,提出对原始数据序列进行平滑处理、改进初值选择、残差处理的改进措施,建立改进灰色系统 GM(1,1)预测模型,最后使用实际算例进行仿真验证。得出的具体结论为,与直接用原始数据进行预测相比,将原始数据进行三点平滑处理后预测误差减小,预测结果明显好转。因此,对原始数据进行平滑处理是非常必要的。预测结果验证了本文提出的改进方法的优越性和可行性。

参考文献

- [1] 杨楠,李宏圣,袁景颜,等. 计及灰色关联度分析的中长期负荷灰色预测方法[J]. 电力系统及其自动化学报,2018,30(6):7.
- [2] 杨洋. 中长期电力负荷预测技术的研究与应用[D]. 中国科学院大学[2024-05-10].
- [3] 田珂,丁博,马文栋,等. 一种电力负荷预测混合模型研究[J]. 计算技术与自动化,2020(004):039.
- [4] 刘会家,管鑫,陈波,etal. 考虑主动需求的主动配电网负荷预测[J]. 电力系统保护与控制,2018,046(010):68-74.
- [5] 温纪营,冼钟业,陈凯,等. 电力负荷预测精准度的研究[J]. 光源与照明,2022(12):204-206.
- [6] 刘思峰,杨英杰. 灰色系统研究进展(2004—2014)[J]. 南京航空航天大学学报,2015,47(1):18.
- [7] 余健明,燕飞,杨文字,etal. 中长期电力负荷的变权灰色组合预测模型[J]. 电网技术,2005,29(17):4.

风电塔筒环焊缝 UT 检测信号特征与缺陷识别

张羽

中车兰州机车有限公司, 甘肃兰州, 730000;

摘要: 超声检测 (UT) 作为风电塔筒环焊缝缺陷排查领域的核心技术手段, 其检测结果的精度水平, 直接取决于对检测过程中各类信号特征的精准辨析与科学解读。本文系统梳理 UT 检测信号的基础构成要素, 深入剖析环焊缝常见典型缺陷所对应的 UT 检测信号特征, 针对性提出缺陷识别的优化实施路径, 进一步完善缺陷识别工作的保障措施, 最终为提升风电塔筒环焊缝缺陷的检出效率与准确率、切实保障风电设备长期稳定运行安全, 提供具备实践价值的技术支撑与理论参考。

关键词: 风电塔筒; 环焊缝; 超声检测 (UT); 检测信号特征; 缺陷识别

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.011

引言

风电塔筒环焊缝, 该部位长期暴露于户外复杂工况环境中, 持续承受风载荷作用、周期性振动冲击, 以及昼夜与季节交替带来的温度波动, 在多重外部作用叠加影响下, 易因焊接工艺执行过程中的参数偏差、焊缝部位长期应力集中等内在与外在因素, 滋生各类结构缺陷。超声检测 (UT) 凭借其超声波穿透能力强、检测精度高、对检测对象无损伤的技术优势, 已成为风电塔筒环焊缝缺陷检测领域的主流技术方式, 在行业内得到广泛应用与推广。因此, 明确 UT 检测中不同类型信号的本质特征、科学优化缺陷识别的逻辑与方法, 成为解决当前风电塔筒环焊缝 UT 检测难题、提升检测质量的关键所在。

1 风电塔筒环焊缝 UT 检测信号基础构成

1.1 缺陷信号

缺陷信号作为反映环焊缝内部缺陷存在与属性的关键信号载体, 其核心呈现出两大显著特征, 即稳定性特征与关联性特征。在超声波在环焊缝母材与焊缝金属内部传播的过程中, 缺陷信号所包含的核心参数, 包括信号波幅、信号频率以及信号传播时间, 始终保持相对恒定的状态。即便在检测操作过程中, 检测探头的移动速度出现细微波动, 或者耦合剂的用量存在少量差异, 缺陷信号的上述核心参数也不会产生明显的波动与变化, 能够持续稳定地被检测系统捕捉与记录。缺陷的横向尺寸与纵向尺寸, 会直接决定缺陷信号波幅的高低水平, 缺陷尺寸越大, 通常情况下所产生的缺陷信号波幅也相对越高。

1.2 背景杂波信号

背景杂波信号则主要表现出随机性特征与无关联性特征。从信号产生的来源来看, 背景杂波信号的产生来源具有较强的分散性, 并非由单一因素引发, 而是由多种复杂因素共同作用形成。其中, 主要的产生因素包括: 环焊缝焊接过程中焊缝成形不均匀, 导致焊缝金属内部组织存在细微差异, 引发超声波反射产生杂波; 母材金属晶粒相对粗大, 超声波在晶粒边界处发生不规则反射, 形成晶粒反射杂波; 以及在检测过程中, 超声波在检测探头与环焊缝检测界面之间发生反射, 产生界面反射杂波等。

2 风电塔筒环焊缝典型缺陷 UT 检测信号特征

2.1 未熔合缺陷的 UT 检测信号特征

从信号波幅来看, 未熔合缺陷的 UT 检测信号波幅整体处于中高区间, 既不会因缺陷反射能力过弱而呈现低波幅, 也不会因反射过于强烈而表现出极高波幅, 波幅水平相对稳定。从波形形态来看, 未熔合缺陷的 UT 检测信号波形形态规则, 无明显的杂乱波动, 多呈现出单峰结构或双峰结构, 且在信号波形上无明显的杂波叠加现象, 波形轮廓清晰可辨。当检测人员操作检测探头沿环焊缝的长度方向缓慢移动, 对未熔合缺陷所在区域进行连续检测时, 未熔合缺陷的 UT 检测信号出现的位置具有连续特征, 不会产生跳跃式的位置变化, 能够持续稳定地在检测波形图中呈现。

2.2 气孔缺陷的 UT 检测信号特征

气孔缺陷主要是在环焊缝焊接过程中, 熔池中的气体未能及时溢出, 最终被凝固的焊缝金属包裹而形成的

缺陷，其在环焊缝内部多为圆形或椭圆形，且分布相对零散，无固定的分布规律。受这一结构特点影响，气孔缺陷对应的 UT 检测信号，表现出与未熔合缺陷明显不同的特征：在信号波幅方面，气孔缺陷的 UT 检测信号波幅整体处于偏低区间，这是因为气孔多为空心结构，超声波与气孔接触时，仅有气孔的内壁表面会产生反射，反射面积相对较小，导致反射信号的能量较弱，表现为波幅偏低。这一信号特征的形成，与气孔多为圆形或椭圆形、在焊缝中分布零散的结构特点直接相关，超声波与不同气孔接触时，反射面积差异较小，因此信号呈现出“小而散”的显著特点。

2.3 裂纹缺陷的 UT 检测信号特征

裂纹缺陷多是在环焊缝焊接后，受焊接残余应力、设备运行过程中应力集中等因素影响，焊缝或母材金属内部产生的线性开裂缺陷，其在环焊缝内部多呈线性延伸形态，裂纹表面粗糙且不规则，导致超声波反射界面复杂。从波形形态来看，裂纹缺陷的 UT 检测信号波形多呈多峰叠加结构，由于裂纹表面粗糙不规则，超声波在裂纹表面的不同位置会发生多次反射，形成多个反射信号，叠加后呈现出多峰形态；部分裂纹缺陷的检测信号还伴随有明显的旁瓣，进一步增加了波形的复杂性，与其他类型缺陷的波形形态有显著区别。当检测探头沿裂纹的延伸走向缓慢移动时，随着探头位置的变化，超声波与裂纹接触的深度也随之改变，因此裂纹缺陷检测信号的传播时间会随裂纹深度的变化而逐渐改变，呈现出连续渐变的特征；而信号波幅则会呈现出先上升至峰值、再缓慢下降的趋势，当探头移动至裂纹的最深部位或最宽部位时，超声波反射面积最大，信号波幅达到峰值，随后随着探头远离该部位，反射面积逐渐减小，波幅也随之缓慢下降。

3 风电塔筒环焊缝 UT 检测缺陷识别优化路径

3.1 强化信号预处理，削弱背景杂波干扰

首先可采用信号滤波技术，根据不同类型背景杂波信号的频率特征，选择适配的滤波方式，实现对杂波信号的针对性过滤。对于由母材晶粒反射产生的高频杂波信号，可采用低通滤波技术，设定合理的滤波频率阈值，将频率高于阈值的高频杂波信号过滤掉，同时保留缺陷信号中具有实际意义的中低频成分；对于由检测界面反射产生的低频杂波信号，则可采用高通滤波技术，过滤掉频率低于阈值的低频杂波，避免其与缺陷信号叠加，影响缺陷信号的识别。其次，需采用信号归一化处理技

术，对不同检测场景下采集到的 UT 检测信号进行标准化处理。由于在不同的检测批次、不同的检测时段，检测环境（如温度、湿度）、检测设备状态可能存在细微差异，导致相同缺陷在不同场景下产生的检测信号基准存在偏差，不利于信号的对比与辨析。通过信号归一化处理，可将不同场景下的检测信号统一转换至相同的信号幅度基准与频率基准，消除因检测环境细微差异导致的信号对比偏差，让不同场景下的缺陷信号特征具有可比性，进一步突出缺陷信号的核心特征，降低杂波干扰带来的识别难度。

3.2 建立信号参数关联逻辑，提升缺陷定性精度

首先需全面梳理不同类型典型缺陷（如未熔合、气孔、裂纹）的物理属性，与对应的 UT 检测信号核心参数（如波幅、衰减速度、传播时间、探头位置）之间的对应关系，构建“缺陷属性—信号参数”关联矩阵。例如，在判断缺陷类型时，可将“信号波幅高低”与“信号衰减速度”作为核心判断指标，形成组合判断逻辑：波幅中高、衰减缓慢，多对应未熔合缺陷；波幅偏低、衰减快速，多对应气孔缺陷；波幅偏高、衰减缓慢，多对应裂纹缺陷。在判断缺陷的深度与分布范围时，则可将“信号传播时间”与“检测探头位置”作为核心关联参数，结合超声波在环焊缝金属中的传播速度，通过公式计算得出缺陷的埋藏深度；同时根据探头移动过程中缺陷信号出现的连续位置范围，判断缺陷在环焊缝长度方向上的分布范围。通过上述关联逻辑的梳理与应用，形成一套标准化的信号参数判断体系，检测人员可依据该体系，结合实际采集到的信号参数，逐步推导缺陷的类型、深度与分布范围，减少因个人经验差异导致的主观判断误差，提升缺陷定性的精度与一致性。

3.3 适配环焊缝结构，调整检测技术参数

首先需根据环焊缝的实际厚度，优化超声波探头的角度与频率。对于厚度较大的环焊缝，需选择角度相对较小的探头，确保超声波束能够穿透焊缝全厚度，覆盖焊缝内部的关键区域，避免因探头角度过大导致超声波束无法到达焊缝深层，引发缺陷漏检；对于厚度较小的环焊缝，则可选择角度稍大的探头，提升超声波束在焊缝内部的反射效率，便于捕捉浅层缺陷信号。其次，需结合环焊缝的焊接坡口形式，调整超声波的传播路径。通过改变探头在环焊缝表面的放置位置与倾斜角度，优化超声波束在焊缝内部的传播方向，确保超声波束能够精准指向焊缝易产生缺陷的区域（如坡口根部、焊缝层

间),减少因焊缝不规则部位(如坡口边缘)对超声波束的阻挡与反射,降低额外杂波的产生,让缺陷信号能够更清晰地被检测系统捕捉,进一步提升缺陷识别的准确性。

4 风电塔筒环焊缝 UT 检测缺陷识别保障措施

4.1 制定标准化检测与识别规范

首先需明确 UT 检测信号采集环节的技术参数标准。具体包括:检测探头的移动速度标准,明确探头移动的最大与最小速度范围,避免因探头移动过快导致信号采集不完整,或移动过慢影响检测效率;耦合剂的使用标准,规定耦合剂的类型、浓度,以及涂抹的均匀度与用量要求,确保超声波能够顺畅地在探头与焊缝之间传播,减少界面反射杂波的产生;检测系统的参数设置标准,明确超声波的发射频率、增益水平等系统参数的设定范围,避免因系统参数设置不当导致信号失真或杂波增多。其次,需规范 UT 检测信号辨析与缺陷定性的操作流程。明确信号辨析的步骤,规定需先进行信号预处理、再开展信号参数分析的操作顺序;同时明确不同信号特征对应的缺陷判断依据,例如,明确不同波幅区间、不同衰减速度所对应的缺陷类型范围,不同传播时间对应的缺陷深度计算方法等,形成标准化的判断流程与依据体系。通过上述标准化规范的制定与执行,可确保所有检测人员在开展工作时均有章可循,有效提升缺陷识别工作的规范性与稳定性,减少操作与判断过程中的人为误差。

4.2 强化检测人员能力培养

首先需聚焦检测人员的信号特征辨析能力提升,开展针对性的技术培训。培训内容需涵盖:风电塔筒环焊缝 UT 检测中缺陷信号与背景杂波信号的核心差异,帮助人员清晰区分两类信号;不同典型缺陷(未熔合、气孔、裂纹)UT 检测信号特征的详细解读,结合波形图讲解各类缺陷信号的波幅、衰减速度、波形形态等特征的具体表现;信号预处理技术与信号参数关联逻辑的原理与应用方法,让人员不仅掌握操作步骤,更理解背后的技术逻辑,能够在实际工作中根据具体情况灵活应用。其次,需开展模拟实操训练,提升检测人员应对复杂场景的能力。搭建模拟不同环焊缝结构(不同厚度、不同坡口形式)、不同缺陷类型与分布情况的训练场景,让检测人员在模拟场景中开展 UT 检测操作,练习信号采

集、预处理、辨析与缺陷定性的全流程操作;同时设置包含大量背景杂波的复杂模拟场景,训练人员在杂波干扰较强的情况下,精准捕捉缺陷信号、辨析信号特征的能力。通过理论培训与模拟实操训练的结合,可全面提升检测人员的专业能力,确保其能够熟练掌握缺陷识别的优化方法,准确应对实际检测工作中的各类场景,为提升缺陷识别准确率提供可靠的人员保障。

5 结语

风电塔筒环焊缝 UT 检测工作的核心,在于精准把握各类检测信号的本质特征,科学优化缺陷识别的逻辑与路径,同时依托完善的保障措施,确保识别方法能够稳定落地。通过系统明确 UT 检测信号的基础构成,厘清缺陷信号与背景杂波信号的核心差异;深入剖析未熔合、气孔、裂纹等典型缺陷对应的 UT 检测信号特征,为缺陷定性提供清晰依据;优化“信号预处理—参数关联—技术适配”的缺陷识别路径,有效削弱杂波干扰、提升识别精度;完善“标准化规范—人员能力培养”的保障措施,确保优化路径稳定执行,可切实提升风电塔筒环焊缝 UT 检测的缺陷识别准确性。这一技术逻辑体系,既为风电塔筒环焊缝缺陷排查工作提供了清晰的技术方向,也为风电设备长期稳定运行安全筑牢了关键的检测防线,最终实现了 UT 检测技术逻辑与风电塔筒环焊缝检测实际需求的高度契合,具备重要的实践价值与应用意义。

参考文献

- [1] 祖平文,许帅,张向军,等.风电机组塔筒焊接缺陷在线修复技术[J].设备管理与维修,2023,(12):113-116.
- [2] 杨昊.风电塔筒的可靠性分析与检测技术研究[D].沈阳工业大学,2023.
- [3] 王康技,何康.风电塔筒的焊接和表面缺陷对防腐蚀的危害及修整方法[J].材料保护,2019,52(08):166-170+185.
- [4] 华绪银.反向平衡法兰风电塔筒制作工法[J].中国新技术新产品,2020(09):60-62.
- [5] 王冠,李晨,张雪,许红,王鑫,迟绍宁.风电塔筒地脚螺栓断裂失效分析[J].现代制造技术与装备,2019(11):88-90.

基于物联网技术的电气设备远程监控与故障诊断系统设计

曹俊杰

421127196807090812

摘要: 随着工业智能化加速, 电气设备作为核心基础设施, 其运行稳定性关乎生产安全与效益。传统监控与故障诊断方式有响应滞后、精度低、成本高等弊端, 难以满足运维需求。物联网技术为解决问题提供路径, 通过协同架构实现电气设备状态实时采集、传输与诊断。本文梳理了基于物联网的电气设备远程监控与故障诊断系统核心技术体系, 包括感知层、网络层、应用层相关技术; 分析了系统应用现状与案例; 探讨了技术瓶颈与挑战; 展望了未来趋势, 为相关研究与实践提供参考。

关键词: 物联网; 电气设备; 远程监控

DOI: 10. 69979/3060-8767. 26. 02. 012

引言

在工业 4.0、智能电网等战略推动下, 电气设备应用场景更复杂、运行负荷提升, 对运维管理智能化、精细化要求更高。电气设备长期运行受环境、机械、电气等因素影响, 易出现绝缘损坏、线路短路等故障, 若不及时处理会有严重后果。统计显示, 工业领域因电气设备故障致停产损失占比超 35%, 传统定期检修模式难预判潜在故障, 还存在过度或不足维修问题, 造成资源浪费与安全隐患。物联网技术以万物互联为核心, 通过感知设备、网络传输与智能分析平台, 实现物理实体与虚拟网络融合, 为电气设备远程监控与故障诊断提供新技术范式。基于物联网的监控与诊断系统能实时采集设备运行参数, 传输至远程监控中心, 用智能算法分析数据, 实现故障早期预警、定位与诊断, 提升运维效率、降低成本。近年来, 该领域成研究热点, 相关技术与方案不断涌现。本文将从核心技术、系统设计、应用现状、现存问题及未来趋势等方面全面综述基于物联网技术的电气设备远程监控与故障诊断系统。

1 基于物联网的电气设备远程监控与故障诊断系统核心技术体系

基于物联网的电气设备远程监控与故障诊断系统通常采用感知层-网络层-应用层的三层架构, 各层通过核心技术的协同配合, 实现从设备状态感知到故障诊断决策的全流程闭环管理。各层核心技术的选型与优化直接决定系统的运行性能、可靠性与适用性。

1.1 感知层技术: 设备状态信息采集基础

感知层是系统神经末梢, 核心功能是实时准确采集电气设备运行与环境参数, 为故障诊断提供数据支撑。

其技术包括传感器技术、数据采集模块设计及数据预处理技术。

传感器是核心器件, 要依电气设备类型与监控需求选择。常用传感器有: 电流传感器(如霍尔、罗氏线圈传感器)、电压传感器(如电压互感器、电容分压式传感器), 采集电气运行参数; 温度传感器(如热电偶、红外、光纤温度传感器), 监测关键部位温度; 振动传感器(如压电式、磁电式), 检测旋转设备振动信号; 绝缘传感器(如局部放电、介损传感器), 评估绝缘性能。近年来, 微型化、高精度、低功耗传感器成主流, 如 MEMS 振动传感器, 适用于嵌入式感知节点部署。

数据采集模块负责采集、转换与初步处理传感器信号。为保证实时性与准确性, 采用高性能微处理器(如 STM32、ESP32)与高精度 ADC, 支持多通道同步采集, 采样频率可灵活调整。同时, 模块需进行 EMC 设计, 降低电磁干扰影响。

数据预处理技术是重要环节, 通过去噪、滤波、校准、压缩等操作, 去除原始数据噪声与冗余信息, 提升数据质量, 减轻后续压力。常用去噪算法有卡尔曼滤波、小波变换、中值滤波等, 数据压缩以无损压缩为主, 如霍夫曼编码、LZW 编码等, 确保关键信息不丢失。

1.2 网络层技术: 数据传输的关键支撑

网络层是系统传输通道, 负责将感知层采集的设备状态数据传至应用层, 再将应用层控制指令反馈至感知层。其核心需求是实现数据可靠、高效、实时传输, 需根据应用场景的网络环境、传输距离等选合适通信协议与传输方式。

物联网通信协议分有线与无线两类。有线通信传输稳定、带宽大、抗干扰强, 适用于固定设备等场景。常

用协议有以太网、RS-485、Modbus RTU/TCP等。其中，以太网高带宽、高速率，用于监控中心与本地网关通信；RS-485结构简单、成本低、传输远，用于工业感知节点与网关连接；Modbus兼容性强，用于设备数据交互。

无线通信部署灵活、无需布线、适应性强，适用于移动设备等场景。常用技术有：低功耗广域网（LPWAN）技术，如LoRa、NB-IoT等，传输远、功耗低、接入量大，用于大规模分布式电气设备远程数据传输；短距离无线通信技术，如Wi-Fi、蓝牙、ZigBee等，Wi-Fi带宽大、速率高，用于近距离大数据量实时传输；ZigBee低功耗、低速率、自组网强，用于工业多节点协同感知与传输；5G低延迟、高带宽、海量连接，适用于实时性要求高的场景。

为实现互联互通，网络层需部署网关设备，负责协议转换、数据汇聚与转发。网关是感知层与应用层桥梁，能对数据标准化处理，统一传至应用层平台，还支持远程管理维护，提升系统兼容性与可扩展性。

1.3 应用层技术：故障诊断与智能决策核心

应用层是系统大脑中枢，负责分析网络层传输数据、诊断故障，提供可视化监控界面与决策支持。应用层技术包括数据存储与管理、故障诊断算法、监控平台设计。

数据存储与管理是应用层基础，处理海量设备运行数据，含实时、历史、故障数据等。因数据多样海量，采用分布式存储架构，结合关系型（如MySQL、Oracle）与非关系型（如MongoDB、Redis）数据库优势：前者存结构化数据，后者存非结构化数据，有存储量大、读写快、扩展性强等优势。此外，数据管理要实现备份、恢复、安全等功能，确保数据完整安全。

故障诊断算法是核心技术，决定诊断精度与效率，分传统与智能两类。传统算法基于信号处理与故障机理分析，通过分析设备参数信号提取故障特征，与预设阈值或模式对比诊断故障，常用算法有傅里叶变换等，适用于简单故障，对复杂故障精度低且对人员专业要求高。智能算法基于人工智能，能自动学习设备模式，实现复杂故障自动诊断与预警，是研究热点，常用算法有机器学习（如SVM等）、深度学习（如CNN等）。例如，CNN可精准识别电机故障，LSTM可实现早期预警。融合多源数据的算法能提升诊断精度、降低误判率。

监控平台设计是重要载体，为用户提供可视化界面、预警通知、诊断报告、运维管理等功能。平台采用B/S或C/S架构：B/S无需安装客户端，部署灵活、维护方便，适用于多用户远程访问；C/S界面交互好、响应快，适用于本地实时监控。平台界面应简洁直观，展示设备

运行参数等信息，支持数据曲线分析等功能。同时，可集成移动终端提醒，实时推送故障信息，实现快速响应。

2 基于物联网的电气设备远程监控与故障诊断系统设计与应用现状

基于物联网技术的电气设备远程监控与故障诊断系统的设计需结合具体应用场景的需求，优化三层架构的技术选型与功能配置，实现针对性的监控与诊断。目前，该系统已广泛应用于工业生产、智能电网、轨道交通、新能源等多个领域，形成了一系列典型的应用案例。

2.1 系统设计原则与典型架构

系统设计需遵循可靠性、实时性、可扩展性、经济性原则。可靠性是核心要求，可选用高可靠性设备、优化拓扑结构、采用冗余设计确保系统稳定运行；实时性要求快速采集、传输与处理数据，需优化采集频率、选低延迟协议、用高效算法；可扩展性要求支持设备增加、功能升级与技术迭代，采用模块化设计、标准化接口降低扩展成本；经济性要求合理选技术方案与设备，降低建设与运维成本。典型系统架构由感知节点、本地网关、通信网络、云平台（应用层）与用户终端组成。感知节点采集设备运行参数，本地网关汇聚处理数据后传至云平台，云平台实现数据存储等功能，用户终端远程监控与运维。如工业电机监控系统，感知节点采集电流等参数，经ZigBee传输至网关，网关通过以太网传至云平台，云平台用LSTM算法分析实现预警诊断，运维人员通过手机APP查看状态。

2.2 不同领域的应用现状

在智能电网领域，基于物联网的电气设备监控与故障诊断系统用于变压器等设备运维。如针对变压器，部署传感器采集数据，用NB-IoT传输，云平台结合方法与算法精准诊断，提升运维效率、降低损失、保障电网安全。在工业生产领域，系统用于电机等关键设备监控。如某汽车零部件加工厂采用电机监控系统，采集数据，用Wi-Fi传输，用CNN算法分析，减少故障停机时间、降低运维成本、提升生产效率。在轨道交通领域，系统用于列车电气设备监控与诊断。因运行环境复杂、安全要求高，采用5G传输，结合智能诊断算法确保精度与实时性。如某城市地铁采用监控系统，采集数据，用5G传输，用SVM算法分析实现预警定位，保障安全运行。在新能源领域，系统用于光伏逆变器等设备监控。如光伏电站，采集数据，用LoRa传输，云平台分析实现故障诊断与状态评估，提升运维效率与发电效益。

3 现存问题与挑战

尽管基于物联网技术的电气设备远程监控与故障诊断系统已取得显著进展,但在技术应用与系统设计中仍存在诸多问题,制约其进一步发展与普及。感知层方面,传感器精度与可靠性有待提升,复杂工业环境易使传感器性能下降、数据出现偏差,部分高精度传感器成本高,难大规模部署,且不同厂家传感器接口不统一,数据采集兼容性差。网络层上,通信稳定性与安全性面临挑战,无线通信在复杂环境中易出现数据传输问题,影响实时性;有线通信布线难、维护成本高。同时,物联网设备接入多,数据传输易遭网络攻击,威胁系统安全与数据完整。应用层里,故障诊断算法存在不足,现有智能诊断算法泛化能力差,多源数据融合诊断技术不成熟,算法运算效率有待提升,难以满足海量数据实时分析需求。系统方面,标准化与兼容性不足,物联网技术在该领域未形成统一标准体系,不同厂家系统存在差异,形成信息孤岛,且与传统运维管理系统兼容性差,增加集成成本与难度。此外,系统建设与运维成本高,限制了在中小企业的普及应用。

4 未来发展趋势

针对当前存在的问题与挑战,结合物联网技术的发展趋势,基于物联网的电气设备远程监控与故障诊断系统未来将朝着以下方向发展。

一是感知层的智能化与高精度化。未来将研发更多适用于复杂工业环境的高可靠性、低功耗、低成本传感器,如基于光纤传感、量子传感的新型传感器,提升数据采集的精度与稳定性;同时,感知节点将集成边缘计算功能,实现数据的本地实时处理与分析,减少网络传输压力,提升系统的实时性。

二是网络层的高速化、低延迟化与安全化。随着 5G、6G 技术的普及,将实现数据的高速、低延迟传输,支持高清视频监控、设备远程控制等更复杂的应用场景;同时,将加强网络安全技术的应用,如区块链技术、加密技术、身份认证技术等,保障数据传输与设备运行的安全性;此外,将推动通信协议的标准化,提升系统的兼容性与互联互通能力。

三是应用层的诊断算法优化与智能化升级。将研发具有更强泛化能力的智能诊断算法,如基于迁移学习、联邦学习的算法,实现不同设备、不同故障模式的通用诊断;加强多源数据融合诊断技术的研究,结合大数据、

人工智能、数字孪生等技术,构建设备的数字孪生模型,实现设备运行状态的虚拟仿真与故障的精准预测;同时,提升算法的运算效率,采用 GPU、FPGA 等硬件加速技术,满足海量数据的实时分析需求。

四是系统的标准化与集成化。未来将推动行业标准的制定,统一硬件接口、通信协议、数据格式等,实现不同系统之间的互联互通;加强系统与传统运维管理系统、企业 ERP 系统的集成,构建一体化的智能运维管理平台;同时,通过技术创新降低系统的建设与运维成本,开发适用于中小企业的轻量化系统方案,推动系统的普及应用。

五是绿色化与节能化。在系统设计过程中,将更加注重节能降耗,采用低功耗的传感器、通信设备与硬件模块,优化系统的电源管理方案;同时,通过智能诊断与精准运维,减少设备的过度维修,延长设备的使用寿命,降低能源消耗与环境影响,实现绿色低碳运维。

5 结论

基于物联网技术的电气设备远程监控与故障诊断系统通过感知层、网络层与应用层的协同作用,实现了电气设备运行状态的实时监控、故障的早期预警与精准诊断,显著提升了运维效率,降低了运维成本,为电气设备的智能化运维提供了有效路径。当前,系统已在智能电网、工业生产、轨道交通等多个领域得到广泛应用,但在传感器精度、通信稳定性、诊断算法泛化能力、系统标准化等方面仍存在不足。未来,随着传感器技术、通信技术、人工智能技术的不断发展,系统将朝着感知智能化、网络高速安全化、诊断精准化、系统标准化的方向发展,为工业智能化进程提供更强有力的支撑。相关领域的研究人员与企业应加强技术创新与合作,攻克技术瓶颈,推动系统的标准化与普及应用,实现电气设备运维管理的全面智能化升级。

参考文献

- [1] 尚珂. 基于物联网的电气设备远程监控与故障诊断系统设计[J]. 电脑校园, 2025(22).
- [2] 杜丹跃. 基于物联网的机电系统远程监控与故障诊断[C]//全国绿色数智电力设备技术创新成果展示会. 汕尾汇能综合能源服务有限公司, 2024.
- [3] 陈西林, 田林, 吴咏蔚, 等. 基于物联网的电气设备智能故障预测与诊断系统: 202510412295[P][2025-12-29].

智能电气自动化系统中的数据安全与隐私保护研究

姚云飞

410181198605157577

摘要: 随着工业 4.0 的深度推进, 智能电气自动化系统已成为现代工业生产与能源管理的核心支撑。该系统通过海量数据的采集、传输、存储与分析实现智能化决策, 但数据在全生命周期中面临的泄露、篡改、窃取等安全风险, 以及用户隐私信息泄露的隐患, 严重制约了系统的健康发展。本文基于智能电气自动化系统的架构特性, 深入剖析数据安全与隐私保护的核心痛点, 梳理当前主流的防护技术, 提出涵盖数据全生命周期的一体化防护策略, 为提升智能电气自动化系统的数据安全防护能力提供理论参考与实践指引。

关键词: 智能电气自动化; 数据安全; 隐私保护

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.013

引言

在数字化转型浪潮下, 智能电气自动化系统融合先进技术, 广泛应用于关键领域。该系统打破传统信息孤岛, 实现设备互联互通与协同调度, 通过挖掘多维度数据提升生产效率等。但数据作为核心资产, 在全生命周期面临诸多安全威胁, 如工业控制系统受攻击、隐私信息泄露等。数据安全与隐私保护成行业焦点, 虽学者有大量研究, 但因系统架构复杂等因素, 现有防护方案存在不足。因此, 深入研究相关技术、构建防护体系意义重大。本文将从系统架构与数据特性出发, 分析风险, 梳理技术, 提出策略并展望未来。

1 智能电气自动化系统架构与数据特性

1.1 系统架构

智能电气自动化系统采用分层架构设计, 通常可分为感知层、网络层、平台层与应用层。感知层作为数据采集的前端, 主要由各类传感器、智能仪表、控制器等终端设备组成, 负责采集设备运行参数、环境数据、能源消耗数据等海量实时数据; 网络层承担数据传输的核心功能, 通过工业以太网、无线传感网络、5G 等通信技术, 实现感知层与平台层、应用层之间的数据交互; 平台层是系统的数据处理与存储中心, 通过云计算、边缘计算等技术对采集到的数据进行清洗、整合、分析与存储, 为上层应用提供数据支撑; 应用层则根据不同的业务需求, 实现智能监控、故障诊断、优化调度、能耗管理等具体应用功能。各层级之间紧密关联、数据交互频繁, 形成了一个复杂的有机整体。

1.2 数据特性

智能电气自动化系统的数据具有显著的行业特殊

性, 主要体现在以下几个方面: 一是海量性, 系统中大量终端设备实时采集数据, 数据规模呈指数级增长, 形成了海量的工业大数据; 二是实时性, 为保障系统的精准控制与高效调度, 数据的采集、传输与处理需满足严格的实时性要求, 尤其是在电力调度、智能制造等关键场景中, 数据延迟可能导致严重后果; 三是异构性, 数据来源广泛, 涵盖结构化数据(如设备参数)、半结构化数据(如日志文件)与非结构化数据(如监控图像), 数据格式与类型复杂多样; 四是敏感性, 数据中包含大量敏感信息, 既包括企业的生产工艺、设备运行状态等商业机密, 也包括用户的用电习惯、身份信息个人隐私, 一旦泄露将造成严重损失; 五是关联性, 各层级、各设备产生的数据之间存在紧密的关联关系, 数据的完整性与一致性对系统决策的准确性至关重要。

2 智能电气自动化系统数据安全与隐私保护风险分析

2.1 感知层风险

感知层是系统数据采集的源头, 其安全风险主要源于终端设备的脆弱性与部署环境的开放性。一方面, 部分智能终端设备(如传感器、智能仪表)由于成本限制, 硬件配置较低, 缺乏完善的安全防护机制, 容易遭受恶意入侵、篡改与控制。例如, 攻击者可通过伪造传感器数据, 导致系统做出错误的控制决策; 另一方面, 感知层设备多部署在户外或工业现场等开放环境中, 物理防护不足, 设备易被窃取、破坏或替换, 造成数据采集中断或虚假数据注入。此外, 终端设备之间的通信多采用传统的工业通信协议(如 Modbus、DNP3), 这些协议缺乏加密与身份认证机制, 数据传输过程中易被监听与窃取, 泄露敏感信息。

2.2 网络层风险

网络层作为数据传输的核心通道，面临着数据泄露、篡改、拦截与拒绝服务攻击等多重风险。随着智能电气自动化系统与互联网的融合，网络边界逐渐模糊，外部攻击向量显著增加。攻击者可利用网络漏洞侵入系统网络，拦截传输中的数据，如企业的生产调度数据、用户的用电数据等；通过篡改数据内容，破坏数据的完整性，影响系统的正常运行；发起拒绝服务攻击，占用网络带宽与系统资源，导致数据传输中断，系统瘫痪。此外，网络层中存在的网络拓扑混乱、访问控制策略不完善等问题，也为攻击者提供了可乘之机，进一步加剧了数据安全风险。

2.3 平台层风险

平台层集中了大量的数据存储与处理设备，是数据安全与隐私保护的核心环节，其风险主要体现在数据存储安全与数据处理安全两个方面。在数据存储方面，若存储设备缺乏完善的加密保护机制，或访问控制策略不严格，攻击者可通过非法访问存储系统，窃取或篡改海量敏感数据；存储设备的硬件故障、软件漏洞也可能导致数据丢失或损坏。在数据处理方面，平台层采用的云计算、大数据分析等技术涉及多用户数据的共享与协同处理，若缺乏有效的数据隔离机制，可能导致不同用户之间的数据泄露；数据处理过程中产生的中间数据若未得到妥善管理，也可能成为隐私泄露的源头。此外，平台层的管理权限混乱、日志审计不完善等问题，可能导致安全事件发生后无法及时追溯，增加了安全风险的管控难度。

2.4 应用层风险

应用层直接面向用户与业务场景，其风险主要源于应用程序漏洞、用户操作不当与隐私保护机制缺失。部分应用程序在开发过程中未严格遵循安全开发规范，存在代码漏洞、权限管理不严等问题，攻击者可利用这些漏洞侵入应用系统，窃取用户隐私信息或篡改业务数据；用户操作不当，如弱密码、密码泄露、随意授权等行为，也会为攻击者提供非法访问的机会；此外，部分应用在服务过程中过度收集用户数据，或未对用户数据进行脱敏处理就进行共享与使用，严重侵犯了用户的隐私权益。例如，智能用电系统若未对用户的用电数据进行有效保护，可能导致用户的生活习惯、居住规律等隐私信息泄露。

3 智能电气自动化系统数据安全与隐私保护主流技术

3.1 数据加密技术

数据加密技术是保障数据安全的核心技术之一，通过对数据进行加密处理，可确保数据在传输与存储过程中即使被窃取，攻击者也无法获取有效信息。根据加密场景的不同，数据加密技术可分为传输加密与存储加密。传输加密主要用于保障网络层数据传输的安全性，常用技术包括对称加密（如 AES、DES）与非对称加密（如 RSA、ECC）。对称加密具有加密效率高、运算速度快的特点，适用于海量实时数据的传输加密；非对称加密具有密钥管理便捷、安全性高的优势，常用于密钥交换与身份认证。在智能电气自动化系统中，可采用对称加密与非对称加密相结合的方式，既保障数据传输的效率，又提升加密的安全性。存储加密则用于保障平台层数据存储的安全性，常用技术包括文件加密、数据库加密等。通过对存储的数据进行加密处理，可防止非法访问存储设备导致的数据泄露。

3.2 身份认证与访问控制技术

身份认证与访问控制技术用于规范系统访问行为，防止非法用户与设备侵入系统，是保障系统安全的第一道防线。身份认证技术通过验证用户或设备的身份信息，确保其合法性，常用技术包括密码认证、生物特征认证（如指纹、人脸）、密钥认证、多因素认证等。在智能电气自动化系统中，针对不同的访问主体，可采用不同的身份认证方式。例如，对管理员采用多因素认证（密码+U盾+生物特征），提升身份认证的安全性；对终端设备采用密钥认证，确保设备接入的合法性。访问控制技术则在身份认证通过后，根据预设的访问策略，限制用户或设备对系统资源的访问权限，常用技术包括基于角色的访问控制（RBAC）、基于属性的访问控制（ABAC）等。RBAC 通过将用户分配到不同的角色，根据角色赋予相应的访问权限，具有易于管理、灵活性高的特点，适用于用户类型相对固定的场景；ABAC 则根据用户、资源、环境等多维度属性动态判断访问权限，适用于智能电气自动化系统中异构设备多、访问场景复杂的需求。

3.3 数据脱敏技术

数据脱敏技术是保护用户隐私的关键技术，通过对敏感数据进行处理，使其在保留数据可用性的同时，无法识别原始信息，从而防止隐私信息泄露。常用的数据脱敏技术包括屏蔽、替换、加密、匿名化等。屏蔽技术通过隐藏敏感数据的部分字段（如将身份证号的中间几位替换为*），实现数据脱敏；替换技术将敏感数据替换为虚构的非敏感数据，确保数据格式与原有数据一致，

适用于数据测试、培训等场景；加密脱敏通过对敏感数据进行加密处理，需要时通过解密获取原始数据，兼顾了数据安全性与可用性；匿名化技术则通过删除或替换数据中的个人标识信息，使数据无法关联到具体的个人或企业，适用于数据共享与公开场景。在智能电气自动化系统中，针对用户的用电数据、企业的生产数据等敏感信息，可根据数据的使用场景，采用相应的数据脱敏技术，在保障数据应用价值的同时，保护隐私权益。

3.4 入侵检测与防御技术

入侵检测与防御技术用于实时监测系统中的恶意行为，及时发现并阻断攻击，保障系统的正常运行。入侵检测技术通过收集系统的日志数据、网络流量数据等，采用特征匹配、异常检测、机器学习等方法，识别系统中的入侵行为，并发出告警。根据检测范围的不同，可分为主机入侵检测系统（HIDS）与网络入侵检测系统（NIDS）。HIDS 部署在终端设备或服务器上，监测主机的运行状态与操作行为；NIDS 部署在网络节点上，监测网络流量中的异常行为。入侵防御技术则在入侵检测的基础上，具备主动阻断攻击的能力，通过对网络流量进行实时过滤、拦截恶意数据包，防止攻击行为对系统造成破坏。在智能电气自动化系统中，可构建分布式入侵检测与防御体系，覆盖感知层、网络层、平台层与应用层，实现对系统全链路的实时监测与防护，提升系统的抗攻击能力。

4 智能电气自动化系统数据安全与隐私保护一体化防护策略

在数据采集阶段，加强感知层终端设备安全防护，进行身份认证与加密配置，采用安全通信协议加密传输数据，确保数据真实完整、防监听窃取。数据传输阶段，构建安全网络通道，采用 VPN 等技术保障网络层传输安全，优化拓扑结构、加强访问控制，防非法数据流入流出。数据存储阶段，对存储设备加密保护，采用分布式存储等技术，建立严格访问控制策略，对敏感数据分级存储，加强审计管理。数据处理阶段，采用数据隔离等技术，加强处理平台防护、修复漏洞，防数据泄露。数据销毁阶段，采用安全销毁技术，确保数据彻底删除。结合分层架构，构建感知层、网络层、平台层、应用层防护的多层次体系。感知层加强终端物理防护与配置，定期检测升级；网络层部署安全设备，监测网络行为、

阻断攻击；平台层加强核心设备防护，采用安全软件、建立审计机制；应用层加强程序安全开发测试、修复漏洞，规范用户访问。各层级协同形成防护网络，提升整体防护能力。

技术防护是基础，安全管理与制度建设是关键。一方面，健全管理制度，明确职责、规范流程，制定应急预案、开展演练。另一方面，加强人员管理，开展培训、提升技能，建立准入离岗制度、规范账号权限。此外，加强合规管理，遵守相关法律法规，保护隐私权益。

随着攻击技术升级，需推动技术创新与融合应用。加强新兴技术在数据安全领域研究，如用人工智能精准识别预测入侵，用区块链保障数据完整可追溯，用边缘计算减少传输量、降风险。加强产学研合作，推动成果转化，提升防护技术水平。

5 结论

智能电气自动化系统的数字化、智能化发展为工业生产与能源管理带来了巨大变革，但也使数据安全与隐私保护问题日益凸显。本文通过分析智能电气自动化系统的架构与数据特性，梳理了系统在感知层、网络层、平台层与应用层面面临的各类数据安全与隐私保护风险，介绍了数据加密、身份认证与访问控制、数据脱敏、入侵检测与防御等主流防护技术，并提出了涵盖数据全生命周期的一体化防护策略。该策略通过完善数据全生命周期管控、构建多层次安全防护体系、加强安全管理与制度建设、推动技术创新与融合应用，可有效提升系统的数据安全与隐私保护能力，为系统的健康发展提供保障。

参考文献

- [1] 张秦萌. 人工智能背景下电气自动化升级改造分析[J]. 黑龙江科学, 2025, 16(22): 135-137.
- [2] 李松林, 李明. 电气工程自动化控制现状及智能化技术的有效应用分析[J]. 中国设备工程, 2025, (22): 28-30.
- [3] 陈阳. 智能技术在电气工程自动化控制中的应用探讨[J]. 能源与节能, 2025, (11): 294-296+299. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2025.11.088.
- [4] 曹建斌. 基于人工智能技术的电气自动化控制策略探析[J]. 中国电子商情, 2025, 31(21): 127-129.

基于 PLC 技术的电气工程自动化控制分析

张朋华¹ 梁灏霖²

1 福建理工大学土木工程学院, 福建福州, 350118;

2 国网石家庄市鹿泉区供电公司, 河北石家庄, 050200;

摘要:随着工业 4.0 理念的深度渗透, 电气工程自动化已成为现代工业生产的核心支柱, 而可编程逻辑控制器 (PLC) 技术凭借其高可靠性、强抗干扰性及灵活扩展性, 逐步取代传统继电器控制模式, 成为电气工程自动化控制的核心技术支撑。本文从 PLC 技术的基本原理与核心特性出发, 系统分析其在电气工程自动化控制中的应用场景、实现路径及优化策略, 结合实际工程案例探讨 PLC 技术在提升控制精度、降低能耗及强化系统稳定性方面的实践价值, 并展望 PLC 技术与物联网、人工智能等前沿技术融合的发展趋势, 为电气工程自动化控制领域的技术升级与创新应用提供理论参考与实践借鉴。

关键词: PLC 技术; 电气工程; 自动化控制; 工业自动化; 技术应用

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.014

在工业生产智能化转型的浪潮中, 电气工程作为能源传输、设备驱动及生产调控的关键系统, 其自动化水平直接决定了工业生产的效率、质量与安全性。传统电气工程控制模式以继电器-接触器控制为主, 存在接线复杂、灵活性差、故障排查困难及难以适应复杂控制逻辑等弊端, 已无法满足现代工业对高精度、高柔性及高可靠性控制的需求。PLC 技术作为一种专为工业环境应用而设计的数字运算操作电子系统, 通过可编程的存储器实现逻辑运算、顺序控制、定时、计数和算术运算等功能, 并通过数字或模拟式输入/输出控制各类机械或生产过程, 其出现彻底改变了电气工程控制的技术格局。本文基于 PLC 技术的核心优势, 深入剖析其在电气工程自动化控制中的具体应用, 旨在为相关领域的技术研发与工程实践提供有益参考。

1 PLC 技术的基本原理

PLC 的核心结构由中央处理单元 (CPU)、存储器、输入/输出 (I/O) 模块、电源模块及通信接口模块组成。其工作原理遵循“循环扫描”模式, 主要包括三个阶段: 输入采样阶段、程序执行阶段及输出刷新阶段。在输入采样阶段, PLC 通过输入模块读取现场传感器、按钮等输入设备的状态信号, 并将其存入输入映像寄存器; 在程序执行阶段, CPU 按照从上到下、从左到右的顺序逐条执行用户编写的控制程序, 根据输入映像寄存器中的数据进行逻辑运算与数据处理, 并将运算结果存入输出映像寄存器; 在输出刷新阶段, PLC 将输出映像寄存器中的状态信号通过输出模块转换为实际控制信号, 驱动执行器 (如电机、电磁阀等) 动作, 完成一次控制循环。

PLC 的控制程序采用梯形图、功能块图、指令表、结构化文本等多种编程语言, 其中梯形图因与传统继电器控制电路图相似, 上手难度低, 成为工业现场应用最广泛的编程语言。通过编程软件编写的控制程序存储在 PLC 的用户存储器中, 可根据实际控制需求灵活修改, 无需改动硬件接线, 极大提升了控制系统的灵活性与可扩展性。

2 PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用场景

2.1 电机控制

电机作为电气工程中的核心动力设备, 其启动、调速、制动及保护控制直接影响整个生产系统的稳定性与能效。传统电机控制采用星-三角启动、自耦变压器启动等方式, 存在启动电流大、调速精度低、能耗高等问题。PLC 技术通过与变频器、伺服驱动器等设备配合, 可实现电机的软启动、变频调速、正反转控制及多电机同步控制, 有效降低启动电流对电网的冲击, 提升调速精度与能源利用效率。

例如, 在机床设备的主轴电机控制中, PLC 通过接收数控系统的速度指令, 控制变频器输出相应频率的交流电, 实现主轴电机的无级调速, 调速范围可达 0-3000r/min, 调速精度误差小于 $\pm 0.5\%$; 在流水线传送带的多电机同步控制中, PLC 通过采集各电机的转速反馈信号, 采用 PID 调节算法调整变频器输出频率, 确保多台电机的转速同步误差控制在 $\pm 1\text{r/min}$ 以内, 提升了流水线的生产稳定性。此外, PLC 还可通过编程实现电机的过载保护、短路保护、缺相保护等功能, 当电机出

现异常时,及时切断电源并发出报警信号,保障设备与人身安全。

2.2 电力系统控制

在电力系统中,PLC 技术广泛应用于变电站自动化、配电系统监控及电力设备保护等环节。传统电力系统控制依赖人工操作与模拟控制装置,存在响应速度慢、控制精度低、故障处理不及时等问题。PLC 技术通过采集电压、电流、功率因数等电力参数,实现对变压器、断路器、隔离开关等电力设备的自动控制与状态监测,构建智能化电力控制系统。

在变电站自动化控制中,PLC 作为间隔层控制单元,可实现对变压器的有载调压、断路器的分合闸控制、无功补偿装置的投切控制等功能,同时通过通信模块将电力参数与设备状态上传至站控层监控系统,实现变电站的无人值守运行;在配电系统监控中,PLC 通过安装在配电线路上的传感器采集电流、电压、温度等数据,实时监测线路负载情况,当线路过载或出现故障时,自动切断故障线路并切换至备用线路,确保配电系统的连续供电。此外,PLC 还可通过编程实现电力系统的故障录波与故障诊断功能,为故障排查与系统恢复提供数据支持。

2.3 工业自动化生产线控制

工业自动化生产线是电气工程自动化的典型应用场景,其涉及多台设备、多个工序的协同工作,对控制系统的同步性、协调性与灵活性要求极高。PLC 技术作为生产线的控制核心,可实现对生产流程的顺序控制、逻辑控制及工艺参数调节,确保生产线的高效运行。

在汽车零部件生产线中,PLC 通过接收传感器的位置信号与光电开关的检测信号,控制机械臂、传送带、机械手等设备的动作顺序,实现零部件的上料、加工、装配、检测等工序的自动化完成。例如,在发动机缸体装配生产线中,PLC 控制机械臂按照预设路径抓取缸体并放置在加工工位,通过控制加工设备的刀具进给速度、切削深度等工艺参数,完成缸体的钻孔、镗孔等加工工序,同时通过视觉检测系统采集加工后的尺寸数据,与预设标准值进行对比,不合格产品自动剔除,合格产品进入下一工序,整个生产过程无需人工干预,生产效率提升 30%以上,产品合格率达到 99.5%以上。此外,PLC 还支持生产线的柔性化生产,通过修改控制程序即可快速切换生产产品型号,适应多品种、小批量的生产需求。

2.4 智能家居与建筑电气控制

随着智能家居与智能建筑的快速发展,PLC 技术在

建筑电气工程中的应用也日益广泛,主要涉及照明控制、空调控制、安防监控及电梯控制等环节。传统建筑电气控制采用手动开关控制,存在能耗高、控制不便、安全性低等问题。PLC 技术通过与传感器、执行器及通信设备配合,实现建筑电气系统的自动化与智能化控制。

在照明控制中,PLC 通过光线传感器采集室内光照强度,结合人体感应传感器检测室内人员情况,自动调节照明灯具的开关与亮度,当室内光照强度达到预设值或无人时,自动关闭灯具,实现节能目的,相比传统照明控制可节能 20%-30%;在空调控制中,PLC 通过温度传感器采集室内温度,与预设温度进行对比,控制空调机组的启停、制冷/制热模式切换及风速调节,确保室内温度维持在舒适范围内,同时通过分时控制与分区控制功能,降低空调系统的能耗。

3 PLC 技术在电气工程自动化控制中的优化策略

3.1 控制程序优化

控制程序是 PLC 实现控制功能的核心,程序的合理性与高效性直接影响控制系统的运行性能。在程序编写过程中,应遵循模块化编程原则,将复杂的控制逻辑分解为多个独立的功能模块,如启动模块、运行模块、保护模块、报警模块等,每个模块单独编写、调试,便于程序的维护与修改。同时,应优化程序结构,减少不必要的逻辑运算与循环语句,缩短程序执行周期,提升控制系统的响应速度。

例如,在多电机控制程序中,可采用中断服务程序处理电机的紧急停止、故障报警等优先级较高的任务,确保紧急情况下系统能够快速响应;在顺序控制程序中,采用状态转移图(SFC)编程方式,清晰展现各工序的逻辑关系,降低程序的复杂度。

3.2 硬件配置优化

硬件配置的合理性直接影响 PLC 控制系统的稳定性与可靠性。在硬件选型过程中,应根据电气工程的控制需求、工作环境、负载特性等因素,选择合适型号的 PLC 主机、I/O 模块、电源模块及通信模块。对于复杂控制系统,应选择具有足够存储容量、运算速度快、扩展能力强的大型模块化 PLC;对于恶劣工业环境,应选择具有良好防护等级、抗干扰能力强的工业级 PLC 模块。同时,应优化 I/O 点配置,合理分配输入/输出点数,避免 I/O 点冗余或不足;在接线过程中,应遵循强弱电分离、信号线屏蔽等原则,减少电磁干扰对系统的影响;对于重要设备的控制,可采用双 PLC 冗余配置,当主

PLC 出现故障时, 备用 PLC 自动切换投入运行, 确保系统的连续运行。此外, 还应加强硬件设备的维护与管理, 定期检查 PLC 模块、传感器、执行器等设备的运行状态, 及时更换老化、损坏的部件, 延长设备使用寿命。

3.3 通信网络优化

随着电气工程自动化控制系统的规模不断扩大, 分布式控制已成为主流趋势, 通信网络的稳定性与实时性至关重要。在通信网络设计过程中, 应根据系统的控制要求、设备分布情况等因素, 选择合适的通信协议与网络拓扑结构。对于近距离、小范围的控制系统, 可采用 RS485 总线、Profibus-DP 等通信协议, 构建星形或总线型网络; 对于远距离、大范围的分布式控制系统, 可采用 EtherNet/IP、Profinet 等工业以太网协议, 构建环形或树形网络。同时, 应优化通信参数设置, 合理调整通信波特率、数据位、校验位等参数, 确保通信数据的传输速率与准确性; 采用通信冗余技术, 如双网冗余、链路冗余等, 提高通信网络的可靠性, 避免因通信链路故障导致系统瘫痪。

3.4 能耗优化

在电气工程自动化控制中, 能耗控制是降低生产成本、实现绿色生产的重要途径。PLC 技术可通过优化控制策略, 实现能源的高效利用。例如, 在电机控制中, 采用变频调速技术, 根据负载变化调整电机转速, 避免电机在额定转速下空载或轻载运行, 降低电机能耗; 在照明控制中, 采用声光控、人体感应等智能控制方式, 实现人来灯亮、人走灯灭, 减少无效照明时间; 在空调控制中, 采用变频空调与温度分区控制相结合的方式, 根据室内人员分布与温度需求, 精准调节空调运行状态, 降低空调系统能耗。

同时, PLC 可通过采集电力参数、设备运行数据等信息, 建立能耗监测与分析系统, 实时监控系统的能耗情况, 识别能耗异常点, 为能耗优化提供数据支持。例如, 通过监测变压器的负载率、功率因数等参数, 合理调整变压器的运行方式, 提高变压器的运行效率; 通过监测生产设备的能耗数据, 分析设备的能耗特性, 优化生产工艺与设备运行参数, 降低生产过程中的能耗。

4 PLC 技术在电气工程自动化控制中的发展趋势

4.1 与物联网 (IoT) 技术深度融合

物联网技术的发展为 PLC 技术带来了新的发展机遇, PLC 作为工业现场的控制核心, 将与物联网技术深度融合, 实现工业设备的互联互通与智能化管理。通过在 PLC 中集成物联网模块, 可将工业现场的设备状态、运行数据、环境参数等信息实时上传至云平台, 实现设备的远程监控、故障预警、远程维护等功能。

4.2 与人工智能 (AI) 技术结合

人工智能技术的崛起为 PLC 技术的升级提供了新的方向, PLC 将与人工智能技术结合, 实现控制系统的自主学习、智能决策与自适应控制。通过在 PLC 中嵌入人工智能算法, 如神经网络、模糊控制、遗传算法等, 可使控制系统具备自主学习能力, 能够根据生产过程中的数据变化自动调整控制参数, 优化控制策略, 适应复杂多变的生产环境。

5 结论

PLC 技术作为电气工程自动化控制的核心技术, 凭借其高可靠性、强抗干扰性、灵活扩展性等核心优势, 在电机控制、电力系统控制、工业自动化生产线控制、智能家居与建筑电气控制等多个领域得到了广泛应用, 有效提升了电气工程自动化控制的精度、效率与稳定性, 降低了能耗与维护成本。通过控制程序优化、硬件配置优化、通信网络优化及能耗优化等策略, 可进一步提升 PLC 控制系统的运行性能与应用效果。

参考文献

- [1] 王战源. 基于 PLC 技术的电气工程及其自动化控制分析[J]. 中国航班, 2024(12).
- [2] 崔欢. 基于 PLC 技术的电气工程自动化控制分析[J]. 数字通信世界, 2025(3).
- [3] 夏明. 基于 PLC 技术的电气工程及其自动化控制研究[J]. 安家, 2024(6): 0223-0225.
- [4] 伍博然. PLC 技术在电气工程自动化控制中的应用研究[J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024(003): 000.
- [5] 纯志刘. 电气工程及其自动化控制中 PLC 技术的应用研究[J]. 水电科技, 2024, 7(9): 100.
- [6] 王雅娴. 电力系统电气工程自动化中 PLC 自动控制技术的运用探讨[J]. 科技资讯, 2025(4).

核级电缆用交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺优化

曹波

远程电缆股份有限公司, 江苏宜兴, 214251;

摘要: 核级电缆交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺, 直接关联材料绝缘性能与服役周期, 优化此工艺对保障核设施安全平稳运行具备关键价值。本文围绕提升绝缘材料交联均匀性、降低老化损耗的核心目标, 借助调控辐照剂量、辐照温度、气氛环境等关键工艺参数, 揭示各参数对交联聚乙烯绝缘性能的作用机制, 明确工艺最优配置方案。实验结果显示, 经优化的辐照交联工艺, 能够实质性强化材料的热稳定性、机械强度及耐辐射性能, 契合核级电缆的严苛使用标准。该优化方案为核级电缆绝缘材料工业化生产提供技术支撑。

关键词: 核级电缆; 交联聚乙烯; 辐照交联工艺; 工艺优化; 绝缘材料

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.015

引言

核设施服役环境严苛, 核级电缆作为核心传输组件, 其绝缘性能紧密维系设施整体安全。交联聚乙烯凭借优异绝缘效能与较高机械强度, 成为核级电缆绝缘材料的主流选择; 但传统辐照交联工艺常存在交联均匀性不足、老化损耗偏高的问题, 限制材料性能充分释放。立足这一现状, 本文围绕核级电缆用交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺优化展开研究, 借助剖析关键工艺参数对材料性能的作用规律, 明确工艺最优配置方案, 为强化核级电缆绝缘可靠性筑牢技术基础, 同时衔接后续工艺试验与性能验证相关研究。

1 核级电缆交联聚乙烯绝缘材料及辐照交联工艺背景

核设施运行环境呈现高温、高辐射、高湿度等典型特点, 对各类配套部件的可靠性与耐久性施加了极高要求。核级电缆作为核设施内电力传输及信号传递的核心载体, 其运行稳定性紧密维系着整个核设施的安全运转; 绝缘层作为核级电缆的关键构成, 肩负隔绝电流、保护导体的核心职责, 其性能优劣直接决定电缆的使用寿命与安全等级。基于此, 核级电缆绝缘材料需兼具优异绝缘性能、耐辐射性能、热稳定性及机械强度, 方能适配核设施的严苛运行场景。

交联聚乙烯是当前核级电缆绝缘材料的主流选项之一, 对比传统橡胶、聚氯乙烯等绝缘材料而言, 其拥有更高绝缘电阻、更低介质损耗及更强耐化学腐蚀能力, 可更充分契合核设施对绝缘材料的核心诉求。伴随核工业的持续发展, 核级电缆的安全冗余标准逐步提升, 交联聚乙烯绝缘材料的应用范畴也随之拓展, 成为保障核

设施电力系统平稳运行的关键材料支撑。

辐照交联工艺是优化交联聚乙烯材料性能的核心路径, 其原理为借助高能射线作用促使聚乙烯分子产生交联效应, 形成三维网状结构, 进而大幅强化材料的热稳定性、机械强度与耐老化性能^[1]。对比化学交联等其他工艺路径, 辐照交联工艺不必额外添加交联剂, 可切实规避添加剂对材料纯度及绝缘性能的干扰, 加之工艺过程可控性强、产品性能一致性优, 故而普遍用于核级电缆交联聚乙烯绝缘材料的生产加工环节, 构成核级绝缘材料制备的关键工艺节点。

2 核级电缆交联聚乙烯绝缘材料辐照交联工艺现存问题分析

核级电缆交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺在实际工业化生产中, 辐照剂量分布不均制约产品品质的首要症结。这一问题的产生, 源于辐照设备射线强度天然存在的空间分布差异, 叠加电缆绝缘层自身具备的厚度属性, 使得材料不同区域实际承接的辐照剂量呈现明显不均衡状态。剂量偏低的区域, 聚乙烯分子交联反应难以充分发生, 无法构建起完整致密的三维网状结构, 直接导致材料热稳定性与机械强度等核心指标无法达到核级使用标准; 而剂量偏高的区域, 分子会出现过度交联现象, 这不仅会导致材料脆性显著增强、韧性大幅衰减, 还会让材料在后续的电缆加工弯折、敷设拖拽等操作中易产生微裂纹, 甚至在长期服役过程中出现破损, 进而动摇绝缘性能的稳定基础, 埋下安全隐患。

辐照过程中的环境控制偏差, 同样是影响工艺稳定性与产品性能的突出问题。在部分生产场景中, 辐照操作仍普遍于常温常压的空气环境内开展, 空气中的氧气

在射线激发下，极易生成大量氧化自由基。这类自由基会主动与聚乙烯分子发生氧化反应，不仅会干扰交联反应的正常进程，还会催生小分子杂质。这些杂质会直接降低绝缘材料的纯度，造成绝缘电阻回落、介质损耗攀升等问题，更会加速材料的老化降解进程，大幅缩减核级电缆的服役周期^[2]。除此之外，辐照环境温度的大幅波动，会直接扰动交联反应的速率与程度，导致同一批次甚至同一段电缆的绝缘材料性能出现较大差异，进一步放大产品性能的离散性，影响生产稳定性。

辐照后工艺处理的不完善，以及工艺参数适配性的不足，也会对最终产品品质形成显著制约。在部分生产流程中，经辐照处理的交联聚乙烯材料往往未经过充分的后处理工序，残留的自由基在后续储存、运输及实际使用阶段仍会持续发生反应，导致材料性能逐步漂移，无法长期维持稳定状态。与此同时，辐照过程中生成的低分子挥发物若未及时清除，会在材料内部形成微小孔隙，这些孔隙成为绝缘性能的天然薄弱环节，在核设施高辐射、高温、高湿度的严苛环境下，极易诱发局部放电等安全风险。再者，现有工艺参数体系缺乏针对性，针对不同厚度、不同直径等规格差异的核级电缆绝缘材料，尚未建立起精准参数调控方案，导致工艺通用适配性薄弱，难以稳定产出符合核级规范的高品质产品。

3 核级电缆交联聚乙烯绝缘材料辐照交联工艺优化方案

针对前文剖析的工艺症结，优化方案以“精准调控、环境适配、流程补全”为核心导向，形成覆盖辐照全流程的系统性改进路径，助力材料性能稳定提升。针对辐照剂量分布不均这一核心问题，优化关键在于达成剂量精准调控与全域均匀覆盖的双重目标。具体可通过优化辐照源的空间布局实现，即根据电缆绝缘层的直径规格，动态调整辐照源的排列间距与发射角度，使高能射线形成均匀的辐射场，确保射线能够无死角覆盖电缆绝缘层的各个部位；同步引入高精度实时剂量监测设备，该设备可对辐照过程中的剂量分布实施动态溯源，通过多点数据采集构建剂量分布图谱，一旦监测到局部区域剂量偏离预设范围，便自动反馈至控制系统，精细化调整辐照源位置或电缆传输速率，从源头规避局部剂量偏低或过高的问题^[3]。对于不同厚度的绝缘层，进一步采用分层梯度辐照策略，先对表层开展低剂量预辐照，促使表层分子初步交联形成稳定结构，再逐步加深辐照深度并微调剂量，确保内层材料也能获取足量且均衡的辐照

剂量，保障整体交联反应充分且一致，强化材料性能的稳定性的。

针对环境控制偏差问题，优化核心思路聚焦搭建惰性恒温的闭环辐照环境，通过全流程环境管控消除外界因素对交联反应的干扰。为实现这一目标，在辐照腔体内部采用“真空置换-氮气填充”的双步精细化气体处理流程：先借助真空泵抽离腔体内残留空气，再充入高纯度氮气作为保护气，通过多次循环置换彻底清除残留氧气，从源头遏制氧化自由基生成，阻断氧化反应对交联进程的不良影响；同时氮气的惰性特质可形成天然隔热屏障，减少外界温度波动对腔体内部环境的干扰。与此同时，在腔体外部增设智能恒温调控系统，依托分布式温度传感器实时采集腔体内不同区域的温度数据，与加热装置构建动态联动调节机制，通过PID调节算法精准把控温度变化，将辐照环境温度稳定在适配交联反应的适宜区间，严格控制温度波动幅度。此外，辐照前后需对腔体实施严格的密封性能检测，采用压力衰减法验证密封可靠性，同时实时监测腔内保护气体浓度，确保其始终维持在合理范围，全方位提升环境稳定性，为交联反应提供持续稳定的外部条件。

针对辐照后处理欠缺与参数适配性不足的问题，需从流程补全与体系构建两方面推进优化。在后处理流程方面，经辐照后的材料先送入专用恒温保温箱完成熟化处理，通过精准调控保温温度与时长，为残留自由基提供充分的反应条件，促使其完全消耗，从根本上降低后续使用过程中的性能漂移风险；熟化完成后，随即采用真空脱气工艺，在特定温度与真空度条件下，持续抽离材料内部因交联反应产生的低分子挥发物，避免微小孔隙的形成，保障材料内部结构的致密性。在参数适配体系构建方面，针对不同规格的核级电缆绝缘材料，开展系统性工艺试验，积累不同绝缘层厚度、直径对应的辐照剂量、传输速率、保护气体流量等关键参数数据，搭建标准化工艺参数数据库，明确各规格产品的最优参数组合^[4]。实际生产中，可依据电缆规格直接调用数据库中的对应参数方案，同时预留参数微调空间，结合每批次产品的性能检测结果（如交联度、机械强度等），动态优化参数设置，增强工艺的通用适配性与稳定性能，实现不同规格产品的高效优质生产。

4 辐照交联工艺优化后绝缘材料性能及应用成效

辐照交联工艺经系统性优化后，核级电缆用交联聚

乙烯绝缘材料的核心性能实现实质性跃升,为核设施严苛工况下的稳定运行提供关键材料保障。热稳定性维度,依托精准剂量调控与恒温惰性环境的双重加持,材料内部形成均匀致密的三维网状交联结构,耐热效能大幅提升;即便在核设施常见的高温工况下长期服役,也不会轻易发生软化、变形或熔融现象,始终维系规整稳定的结构形态,彻底扭转了传统工艺中因局部交联不足导致的耐热短板或过度交联引发的脆化问题,实现全区域耐热性能的均衡统一。机械强度层面,均匀交联结构赋予材料更优异的拉伸韧性与抗撕裂能力,在电缆加工阶段的弯曲、拖拽、裁切等一系列操作中,不易产生微裂纹或表面破损;后续敷设与长期使用过程中,更能有效抵御外界机械冲击、挤压等外力作用,从根源上规避了因机械损伤诱发的绝缘失效风险,显著提升电缆使用过程中的结构完整性。

耐辐射与抗老化性能的精准强化,使交联聚乙烯绝缘材料更能适配核设施高辐射、多腐蚀、温湿度波动剧烈的复杂服役环境。优化工艺通过惰性环境的精准构建,从源头阻断了氧化反应的发生路径,大幅削弱了高能射线激发下氧化自由基对聚乙烯分子链的破坏作用,让材料在长期高辐射暴露下的分子结构稳定性显著增强,性能衰减速率得到有效放缓,彻底杜绝了传统工艺生产的材料在辐射环境中易出现的快速老化、变脆、开裂等共性问题。经实际服役场景验证,材料外观始终保持规整状态,无明显老化变色痕迹,内部交联结构持续维持致密完整,绝缘电阻、介质损耗等核心绝缘性能指标始终稳定维系在核级标准规定的合格区间内,显著延展了核级电缆的实际服役周期^[5]。与此同时,材料对核设施内湿度剧烈波动、酸碱介质侵蚀、高温蒸汽持续冲刷等多重恶劣条件的耐受能力同步提升,即便处于多因素耦合的极端复杂环境中,仍能持续发挥稳定可靠的绝缘核心功效,进一步降低了极端工况下因材料性能失效引发的安全隐患。

工艺优化带来的性能突破,在实际生产与核设施应用场景中均展现出显著的实践价值与应用成效。生产环节,标准化的参数适配体系与稳定的工艺环境,大幅缩减了产品性能的离散性,合格产出率显著提高,有效减少了因性能不达标造成的原料浪费与返工损耗;同时稳定的工艺流程降低了生产过程中的能耗与人工调试成本,显著提升了核级电缆绝缘材料的工业化生产效益。应用于核设施后,采用优化后绝缘材料的核级电缆,运

行可靠性实现质的提升,在反应堆周边、高温蒸汽区域等关键部位的长期服役中,未出现任何因绝缘失效导致的电力传输中断、信号紊乱或安全告警等故障,切实保障了核设施电力系统与控制信号传输的平稳高效。这一成效不仅降低了核设施的维护频次与运维成本,更筑牢了核设施安全运行的第一道防线,使核级电缆的安全冗余得到进一步强化,精准契合核工业对关键部件“高可靠、长寿命、强适配”的严苛规范,为核工业高质量发展提供了重要技术支撑。

5 结语

本文聚焦核级电缆用交联聚乙烯绝缘材料的辐照交联工艺优化开展研究,首先系统梳理了材料及工艺的应用场景与价值,进而深度剖析了实际生产环节存在的辐照剂量分布不均、环境控制偏差、后处理流程欠缺等核心症结,在此基础上靶向提出剂量精准调控、惰性恒温环境搭建、后处理流程补全及参数适配体系构建等优化路径。实践验证结果显示,经优化的工艺能够实质性强化绝缘材料的热稳定性、机械强度、耐辐射性等核心性能,同时明显提升生产合格产出率、压缩成本投入,为核设施安全平稳运行筑牢可靠支撑。后续研究可依托现有优化成果,进一步精化不同规格产品的工艺参数设置,推动该优化工艺在核级电缆生产中的规模化应用,为核工业关键部件的性能保障夯实根基。

参考文献

- [1]陈雅波.辐照交联聚乙烯材料的形状记忆行为研究[D].北京化工大学,2023.
- [2]徐杰,付栋梁,李广富,等.导电型辐照交联聚乙烯发泡材料的制备及其性能[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2022,43(02):90-94.
- [3]古振宏.交联聚乙烯在供电通信电缆中的应用研究[J].塑料科技,2021,49(05):111-114.
- [4]沈晰,布仁孟都.改进核级电缆材料对核电运行安全性的影响[J].电工技术,2020,(12):66-67+69.
- [5]成琦,冯佩云.交联聚乙烯电缆绝缘材料热老化作用下引发电树枝特性研究[J].江苏建材,2025,(05):31-33.

作者简介:曹波,1979年4月生,工程师,远程电缆股份有限公司技术研发部副部长;从事电力电缆及新能源系列电缆的研究、开发和应用。

承荷探测电缆聚四氟乙烯绝缘制备工艺探讨

葛仁友

江苏华能电缆股份有限公司，江苏高邮，225699；

摘要：对承荷探测电缆绝缘层的制备工艺进行了探讨，包括聚四氟乙烯材料的选择、环氧树脂的涂覆、增强纤维的填充和浸渍、绝缘层与铜导线间的屏蔽等。研究发现，聚四氟乙烯材料与环氧树脂具有很好的相容性，经过涂覆处理后，绝缘层表面形成一层致密、光滑、平整的均匀薄膜；通过环氧树脂和增强纤维的复合，可以实现聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的良好绝缘；采用浸渍工艺，可以将环氧树脂均匀地浸渍在聚四氟乙烯绝缘层中，增加聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的机械强度，从而有效地保证了电缆绝缘层和铜导线间的电气连接；聚四氟乙烯材料可以在环氧树脂中溶解，但其溶解程度受聚四氟乙烯材料自身性能、树脂种类和环氧树脂表面处理方式等因素影响。

关键词：承荷探测电缆；聚四氟乙烯；绝缘制备工艺

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.016

引言

为了提高承荷探测电缆的绝缘性能，使其具有优良的耐腐蚀性能，对聚四氟乙烯绝缘材料的表面进行化学处理和表面改性是很有必要的。目前，国内外学者对聚四氟乙烯绝缘材料表面化学处理及改性主要是通过通过在聚四氟乙烯绝缘材料中加入一些助剂来实现的。如：在聚四氟乙烯绝缘材料中加入硅烷偶联剂可以使其在高温高压下具有较好的抗腐蚀性和附着力；在聚四氟乙烯绝缘材料中加入少量硅烷偶联剂和活性稀释剂可以使其在高温高压下具有良好的耐腐蚀、耐老化、耐臭氧性能。采用上述方法制备的聚四氟乙烯绝缘材料虽然可以满足承荷探测电缆对绝缘性能的要求，但在制备过程中仍存在问题，如：制备过程中未采用合适的表面处理剂，无法获得具有较高表面疏水性和附着力的聚四氟乙烯绝缘材料，影响了承荷探测电缆对绝缘性能的要求。

1 聚四氟乙烯结构与特性

聚四氟乙烯是一种聚四氟乙烯树脂，分子中含有四个氟原子和一个碳原子。聚四氟乙烯分子主链呈链状，分子之间以共价键相连接，在链节上的氢原子与其它氟原子相连形成的碳氢键键与碳碳双键相连，因此聚四氟乙烯是一种含碳量比较高的聚合物。由于聚四氟乙烯分子中的四个氟原子均位于碳碳双键的碳原子上，因此其分子结构为线型，这种线型结构决定了聚四氟乙烯材料具有特殊的疏水性、电绝缘性及耐化学腐蚀等特性。同时由于聚四氟乙烯材料具有较高的粘度，这就导致了其表面具有较强的附着力，因此它是一种应用比较广泛的高性能绝缘材料。

2 制备工艺

2.1 聚四氟乙烯材料的选择

承荷探测电缆需在复杂工况下兼具优异的绝缘性能与机械承荷能力，因此绝缘材料的选型是工艺核心环节。本工艺以聚四氟乙烯（PTFE）树脂为主要原料，充分利用其耐高温、耐化学腐蚀及高绝缘电阻的特性，保障电缆运行稳定性。为适配不同场景下的使用需求，需结合不同型号 PTFE 树脂对应的环氧树脂配方差异进行针对性选型，选取 E-51 型与 E-44 型两种环氧树脂作为 PTFE 树脂的配套基材，其中 E-51 型环氧树脂具备更好的流动性，便于后续涂覆成型，E-44 型环氧树脂则拥有更高的交联密度，可提升绝缘层机械强度。将两种环氧树脂按照 4:1 的质量比例混合，采用高速分散搅拌设备进行搅拌，搅拌转速设定为 750r/min，搅拌时间控制在 25min，期间每隔 5min 停机观察混合均匀度，确保两种树脂充分融合，形成无颗粒、均质化的试样材料，为后续绝缘层制备提供稳定基材。

2.2 环氧树脂的涂覆

涂覆工序的核心目标是构建均匀致密的基础绝缘层，需在前期混合树脂的基础上优化材料体系与工艺参数。先将混合均匀的 E-51 与 E-44 型环氧树脂，按每 100g 树脂添加 20g 无碱玻璃纤维的比例加入增强材料，所选无碱玻璃纤维直径为 10 μ m、长度 5-8mm，可显著提升绝缘层的抗拉伸与抗开裂性能。添加后采用双螺杆搅拌设备进行二次搅拌，搅拌转速提升至 1100r/min，搅拌时间延长至 35min，确保玻璃纤维均匀分散于树脂体系中，避免出现团聚或分布不均的问题。搅拌完成后，采用刮刀涂覆方式将混合料均匀涂覆于预制载体表面，涂覆厚度精准控制在 1.0-1.5mm，涂覆速度保持 1.5m/min

的匀速状态,防止涂层厚薄不均。涂覆完成后,将试样放入鼓风烘箱进行阶梯式固化处理,先以 $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升至 110°C ,保温2h,再升温至 170°C 保温3.5h,最后自然冷却至室温,通过梯度升温固化确保树脂充分交联,提升涂层与载体的附着力及结构致密性。

2.3 增强纤维的填充和浸渍

为进一步强化绝缘层的机械承荷能力与结构稳定性,需开展增强纤维的填充与浸渍处理。选取高模量玄武岩纤维作为增强体,先对其进行表面改性处理,采用质量分数为1.5%的硅烷偶联剂KH-560溶液浸泡35min,取出后在 110°C 烘箱中干燥1.5h,通过改性提升纤维与PTFE材料的界面结合力,减少界面缺陷。随后将PTFE树脂与改性后的玄武岩纤维按质量比5:1的比例混合,借助浸渍缠绕设备将PTFE树脂均匀裹覆在纤维表面,缠绕张力控制为6N,确保裹覆层厚度一致且无褶皱。裹覆完成后,将试样放入真空烘箱进行固化处理,真空度设定为 -0.09MPa ,固化温度 150°C ,保温时间4h,真空环境可有效排出材料内部气泡,提升绝缘层致密度。固化完成后,先对试样进行外观筛选,剔除表面存在裂纹、气泡、缺料的不合格品,合格试样将进入后续性能初步检测环节,重点排查绝缘层的外观完整性与基础附着性能。

2.4 绝缘层与铜导线间的屏蔽

屏蔽处理是保障电缆信号传输稳定性的关键,可有效抵御外部电磁干扰。本工艺采用铜线缠绕屏蔽方式,选取直径 0.12mm 的无氧铜丝,因其具备优异的导电性能与柔韧性,可确保屏蔽效果与缠绕贴合度。缠绕过程中,控制铜线缠绕节距为 8mm ,缠绕密度为每厘米10圈,同时保持缠绕张力均匀稳定,避免铜丝断裂或松动。缠绕完成后,采用高压喷涂设备对试样表面进行环氧树脂涂覆封装,喷涂所用树脂为低黏度改性环氧树脂,喷涂压力设定为 0.4MPa ,喷涂厚度控制在 $0.4\sim 0.6\text{mm}$ 。涂覆后将试样放入烘箱进行屏蔽层固化,固化温度 135°C ,保温时间2.5h,固化完成后,铜线与聚四氟乙烯绝缘层之间形成一层致密、光滑、平整的均匀薄膜,该薄膜不仅可固定铜线屏蔽层,还能进一步提升绝缘层与铜导线间的界面结合强度,实现绝缘与屏蔽的双重功效。

2.5 聚四氟乙烯材料与铜导线间的屏蔽

为构建双重屏蔽防护体系,进一步提升电缆抗干扰能力,需开展聚四氟乙烯材料与铜导线间的二次屏蔽处理。先将经前期涂覆处理后的聚四氟乙烯绝缘基材精准套置于铜导线表面,确保基材与铜导线同轴度偏差不超过 0.1mm ,避免因偏心导致局部绝缘厚度不足。随后采

用真空浸渍工艺进行环氧树脂浸渍处理,浸渍设备选用真空度可达 -0.095MPa 的真空浸渍罐,浸渍树脂选用固化收缩率低的环氧固化体系,可确保树脂充分渗透至基材与铜导线的间隙中。浸渍过程分两次进行,每次浸渍时间为2min,两次浸渍间隔15min,间隔期间将试样取出置于通风处沥干表面多余树脂,避免树脂堆积形成局部厚点。二次浸渍完成后,将试样放入烘箱进行最终固化,固化工艺参数设定为 155°C 保温3h,升温速率控制为 $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$,确保浸渍树脂完全固化,形成结构稳定、屏蔽效果优异的双重屏蔽绝缘结构。

3 结果与讨论

研究表明,经过表面处理后的聚四氟乙烯绝缘层表面,形成了一层致密、光滑、平整的均匀薄膜,具有良好的抗腐蚀性能。

环氧树脂涂覆的结果表明,环氧树脂的涂覆量越大,聚四氟乙烯绝缘层表面越光滑,与铜丝间的粘合强度也越高。经环氧树脂涂覆处理后的聚四氟乙烯绝缘层表面,通过增强纤维填充和浸渍工艺,可以实现聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的良好绝缘。当增强纤维填充量为20%时,聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的机械强度达到最大值。

聚四氟乙烯材料在环氧树脂中溶解,但其溶解程度受聚四氟乙烯材料自身性能、树脂种类和环氧树脂表面处理方式等因素影响。当聚四氟乙烯材料在环氧树脂中溶解后,可以与环氧树脂形成互穿网络结构,增加了聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的机械强度。在上述研究基础上,进行了承荷探测电缆绝缘层制备工艺的改进研究。

3.1 绝缘层结构设计

为保证电缆的电气性能,对绝缘层的结构设计提出了更高要求。绝缘层厚度不能太薄,否则在电缆敷设时,电缆内部就会产生应力集中现象,容易造成电缆因机械应力而产生损坏;绝缘层厚度也不能太厚,否则在电缆敷设时,由于电缆外皮受到的应力较大,就容易产生剥离现象。

1、对于单层绝缘层结构的承荷探测电缆,可采用单面涂覆方式,即在绝缘层表面涂覆一层环氧树脂。环氧树脂的粘度相对较高,在涂覆过程中会出现从内部向外部流的现象。因此需要采用合适的固化体系和固化温度,才能保证涂覆后环氧树脂均匀地渗透到聚四氟乙烯表面。同时,固化后环氧树脂会形成一层光滑、平整的薄膜。

2、为了防止环氧树脂在聚四氟乙烯表面发生剥离现象,需要采用合适的固化体系和固化温度。若固化体

系选用不相容性材料(如聚酯树脂)或固化温度过高(如80℃以上),会造成环氧树脂在聚四氟乙烯表面发生剥离现象。双面涂覆方式可保证环氧树脂在聚四氟乙烯表面形成一层光滑、平整的薄膜,同时也能保证在电缆敷设时不会产生剥离现象。

3.2 涂覆工艺

为保证环氧树脂的均匀渗透,需要在涂覆过程中对环氧树脂的固化时间进行精确控制。通常环氧树脂的固化时间会随着温度的升高而缩短,当温度高于20℃时,固化时间将会延长到10~30 min。因此在涂覆前需要根据固化温度进行预热,并在固化前控制好涂覆厚度,以保证环氧树脂在聚四氟乙烯表面形成一层光滑、平整的薄膜。预热时间过长或涂覆厚度过厚都会影响环氧树脂的固化速率,进而导致电缆的电气性能降低。为了避免上述问题,一般采用双轴挤出机对环氧树脂进行涂覆。涂覆时要保证挤出机的转速、流量以及涂覆压力等参数能够精准控制,才能保证环氧树脂均匀地渗透到聚四氟乙烯表面。

3.3 涂覆层厚度

根据目前国内市场的情况,绝缘层的厚度通常为1.2~1.5 mm,一般厚度为0.5~0.8 mm,这样可以保证在电缆敷设时,其表面不会受到外界应力而产生机械损伤。单层或二层绝缘层结构的电缆,可采用二面涂覆方式;三层绝缘层结构的电缆,可采用三面涂覆方式。对于单层绝缘层结构的承荷探测电缆,其绝缘层厚度不能太薄;对于双层或三层绝缘层结构的承荷探测电缆,其绝缘层厚度应满足以下要求:单层或二面涂覆方式时,不应低于1.5 mm;三面涂覆方式时,不应低于2 mm。为了提高三面涂覆方式的导电性能,可以在其表面涂覆导电介质。例如在聚四氟乙烯表面涂覆导电聚酯薄膜或石墨粉等导电填料。同样地,三面涂覆方式也可用于双层或三面涂覆方式中。

3.4 浸渍工艺参数

1、浸渍时间。浸渍时间对环氧树脂涂层的附着力影响很大,如果浸渍时间过短,则涂层中未被浸渍的树脂与环氧树脂间的接触面积就很小,造成附着力较差;如果浸渍时间过长,则会使环氧树脂因溶胀而向下流动,影响涂层的附着力。浸渍时间与绝缘层厚度和厚度均匀性有关,其中绝缘层厚度决定于涂层的机械强度;而绝缘层厚度均匀性主要取决于涂覆层与被涂覆层间的紧密接触和结合程度。此外,对环氧树脂涂层来讲,固化

程度也是一个重要指标。为了保证环氧树脂涂层和铜导体良好的电气连接,适当缩短浸渍时间,有利于提高环氧树脂涂层和铜导体间的紧密接触程度;而过长的浸渍时间会使涂层中未被浸渍的树脂与环氧树脂间接触面积增大,从而影响环氧树脂涂层与铜导体间的结合。

2、浸渍温度。环氧树脂涂覆和环氧树脂浸渍过程中,需要采用合适的浸渍温度。在一般情况下,固化后的聚四氟乙烯绝缘材料,其内部存在较大的自由体积,如果浸渍温度过高,树脂分子链运动加剧,容易在树脂基体内部形成气泡;反之,若浸渍温度过低,则会降低环氧树脂的交联密度,影响浸渍质量。因此,在浸渍过程中要合理控制浸渍温度。环氧树脂浸渍的最佳温度为120℃左右,当浸渍温度为120℃时,此时环氧树脂分子链运动加剧、分子链间作用力增强,固化后的聚四氟乙烯绝缘材料内部会形成大量气泡。当气泡受到外力作用时就会发生破裂,从而导致环氧树脂在聚四氟乙烯绝缘材料中的有效渗透面积减少。

4 结语

本文针对承荷探测电缆绝缘层的制备工艺进行了探讨,研究结果表明,聚四氟乙烯材料与环氧树脂具有很好的相容性,经过涂覆处理后,绝缘层表面形成一层致密、光滑、平整的均匀薄膜;采用环氧树脂和增强纤维的复合,可以实现聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的良好绝缘;采用浸渍工艺,可以将环氧树脂均匀地浸渍在聚四氟乙烯绝缘层中,增加聚四氟乙烯绝缘层与铜导线间的机械强度,从而有效地保证了电缆绝缘层和铜导线间的电气连接。

参考文献

- [1]李玉庆,关丽丽,陈发心.低损耗纵孔聚四氟乙烯绝缘同轴电缆的研制[J].光纤与电缆及其应用技术,2019(4):20-23,35. DOI:10.19467/j.cnki.1006-1908.2019.04.006.
- [2]倪世博;王超;袁常俊;柳伟岸;刘东升;慕呈祥.小型微孔聚四氟乙烯绝缘半柔软射频同轴电缆组件[J].中国标准化,2018.
- [3]张晶波;陶士芳;程欢;朱元忠;宣维刚.整体型微孔聚四氟乙烯绝缘工艺初探[J].光纤与电缆及其应用技术,2011.

作者简介:葛仁友(1975.11-),工程师,江苏华能电缆股份有限公司技术中心副主任。

聚丙烯绝缘电缆生产制造的若干问题探讨

胡君臣

扬州光明电缆有限公司，江苏高邮，225652；

摘要：研究通过分析聚丙烯绝缘电缆生产制造环节，明确原料改性工艺与工艺适配性不足、绝缘层成型质量控制难度大两大核心问题。针对这些问题，研究采用原料特性系统分析、多组分协同改性体系构建、工艺参数优化与在线监控结合的方法，同时搭建全流程成型质量管控体系，涵盖工艺重点锚定、多参数协同监控与动态调整及质量追溯数据分析。研究形成从原料改性到成品制造的全链条优化方案，为提升聚丙烯绝缘电缆生产质量提供技术支撑。

关键词：聚丙烯；绝缘电缆；生产制造

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.017

引言

聚丙烯因轻量化、高绝缘性等优势在电缆绝缘材料领域应用日益广泛，但其固有低温脆性与耐电痕性缺陷及生产工艺适配难题，导致现有生产环节频繁出现绝缘层开裂、厚度不均等质量问题，制约行业发展。基于此，研究聚焦聚丙烯绝缘电缆生产核心痛点，以原料改性与工艺适配优化、全流程质量管控为核心改进思路，旨在提出针对性解决策略，提升生产稳定性与产品可靠性。

1 聚丙烯绝缘电缆生产制造存在的问题

1.1 原料改性与工艺适配性不足

聚丙烯本身存在低温脆性显著与耐电痕性较差的固有缺陷，设计师与生产者需通过共聚、填充、共混等改性手段提升其绝缘性能与力学性能以满足电缆实际使用需求，但在生产实践过程中原料改性环节极易出现两大突出问题：其一为改性配方精度欠缺，这一问题会直接导致绝缘层在低温环境下发生开裂现象，或是在高温高电场工况下出现加速老化的情况；其二为改性原料与挤出工艺的适配性偏差，聚丙烯改性料的熔融指数、熔体强度与常规挤出设备的螺杆转速、模头温度等关键参数无法实现精准匹配，进而容易造成挤出过程中熔体出现断裂、破裂的状况，使得绝缘层表面产生麻点、气泡等各类缺陷，最终影响电缆绝缘层的整体均匀性。

1.2 绝缘层成型质量控制难度大

聚丙烯绝缘电缆的绝缘层主要依靠挤出成型工艺制备，该核心环节的质量控制工作存在诸多明显难点。首先，聚丙烯熔体的热稳定性本就较弱，在挤出过程中若温度控制措施不当，过高的温度会引发原材料发生热降解反应，导致绝缘层的机械强度与电气绝缘性能同步下降，而过低的温度则会造成熔体流动性不足，最终引

发绝缘层厚度不均匀的问题；其次，挤出速度与牵引速度的协同性难以实现精准把控，两者之间的速度一旦出现不匹配的情况，就会引发绝缘层产生竹节状变形或是拉伸过度的现象，进而导致绝缘层厚度偏薄的问题；此外，冷却定型环节容易产生温差应力，由于聚丙烯材料的热收缩率相对较高，若冷却水温与挤出温度之间的温差过大，绝缘层就会因快速收缩而产生内部应力，这类内部应力会使电缆在长期使用过程中极易引发绝缘层开裂，最终降低电缆的整体使用寿命。

2 聚丙烯绝缘电缆生产制造策略

2.1 优化原料改性体系，提升工艺适配性

2.1.1 原料特性的分析

在聚丙烯绝缘电缆的生产制造过程中，工程师需以优化原料改性体系为核心抓手，切实提升原料与生产工艺的适配性。要实现这一目标，工作人员需先系统分析聚丙烯基材的分子结构特性与加工性能瓶颈，须知聚丙烯作为半结晶性聚合物，其结晶度、分子量及分布情况、支链结构等关键指标直接影响熔体流动性、力学性能与耐热稳定性，因此工程师需借助差示扫描量热法、凝胶渗透色谱等专业分析手段，精准测定原料的熔融温度、结晶速率以及分子量等核心参数，为改性体系的科学设计提供扎实的基础数据支撑；同时工作人员要重点关注原材料中低分子量组分的含量与杂质分布情况，因为这类物质极易导致加工过程中出现熔体破裂或绝缘层缺陷的问题，所以必须通过原料预处理工艺，诸如干燥过滤、纯度提升等手段，确保原料质量完全满足改性环节的使用需求。

例如，工程师需借助差示扫描量热法（DSC）测定聚丙烯基材的结晶度范围为25%~35%、熔融温度160~170℃、结晶速率0.8~1.2℃/min，通过凝胶渗透色

谱 (GPC) 精准测定数均分子量 $3.5 \times 10^4 \sim 5.5 \times 10^4$ 、分子量分布指数 2.0~3.0, 这些核心参数为改性体系的科学设计提供扎实的基础数据支撑; 同时工作人员要重点关注原材料中低分子量组分含量需控制在 0.5% 以下、杂质粒径不超过 $5 \mu\text{m}$, 因为这类物质极易导致加工过程中出现熔体破裂或绝缘层缺陷的问题, 所以, 要通过原料预处理工艺, 采用热风循环干燥方式在 $80 \sim 90^\circ\text{C}$ 条件下干燥 4~6 小时, 搭配 $5 \mu\text{m}$ 精度的熔体过滤装置进行纯度提升, 确保原料质量完全满足改性环节的使用需求。

2.1.2 构建多组分协同改性体系

基于原料特性的分析结果, 工作人员需构建多组分协同改性体系, 以此破解工艺适配性不足的限制: 针对聚丙烯熔体流动性不足的问题, 可引入低分子量聚乙烯或乙烯-辛烯共聚物作为增塑剂, 通过降低熔体粘度提升挤出成型效率, 但需严格控制增塑剂的添加量, 避免因过度增塑导致绝缘层力学性能下降; 为增强绝缘层的耐热老化性能, 需添加受阻胺类光稳定剂与酚类抗氧剂, 这类物质可通过捕获自由基中断氧化链式反应, 显著提升电缆在高温环境下的使用寿命, 其添加比例需根据原料氧化诱导期的测试结果优化确定; 针对绝缘层表面粗糙度超标的问题, 可添加纳米级二氧化硅或碳酸钙作为成核剂, 通过细化晶粒尺寸改善绝缘层表面光洁度, 其添加量则需通过熔体流动速率与表面粗糙度的联合测定进行标定。

例如, 针对聚丙烯熔体流动速率 (MFR) 低于 $1.5\text{g}/10\text{min}$ 导致的流动性不足问题, 可引入低分子量聚乙烯 (LMWPE) 或乙烯-辛烯共聚物 (POE) 作为增塑剂, 其中 LMWPE 添加量控制在 1%~3%、POE 添加量控制在 2%~4%, 通过降低熔体粘度使 MFR 提升至 $2.5 \sim 3.5\text{g}/10\text{min}$, 进而提升挤出成型效率, 同时需通过拉伸试验验证绝缘层拉伸强度不低于 20MPa 、断裂伸长率不低于 300%, 避免因过度增塑导致力学性能下降; 为增强绝缘层的耐热老化性能, 需添加受阻胺类光稳定剂 (HALS) 与酚类抗氧剂复配体系, 其中 HALS 添加量 0.3%~0.5%、酚类抗氧剂添加量 0.2%~0.4%, 这类物质可通过捕获自由基中断氧化链式反应, 使电缆在 120°C 老化条件下的氧化诱导期从 40min 提升至 120min 以上, 显著提升高温环境下的使用寿命, 其添加比例需根据原料氧化诱导期的测试结果优化确定; 针对绝缘层表面粗糙度 R_a 超 $0.8 \mu\text{m}$ 的问题, 可添加纳米级二氧化硅或碳酸钙作为成核剂, 成核剂粒径控制在 20~50nm, 添加量通过熔体流动速率与表面粗糙度的联合测定进

行标定, 一般为 0.5%~1.2%, 添加后可使绝缘层表面粗糙度 R_a 降至 $0.3 \mu\text{m}$ 以下, 细化晶粒尺寸改善表面光洁度。

2.1.3 工艺适配性的提升

工艺适配性的提升还需实现工艺参数优化与在线质量监控。在挤出成型环节, 工程师需根据改性后原料的熔体流动特性, 分段调整挤出机各区段的温度, 确保熔体实现均匀塑化; 螺杆转速需与牵引速度协同控制, 维持 1:1.05~1:1.1 的线速比, 避免绝缘层出现偏心问题; 冷却水槽温度需严格控制在 $40 \sim 60^\circ\text{C}$, 防止因冷却速度过快导致绝缘层内残留应力。在线监测环节, 需集成激光测径仪、红外光谱仪与 X 射线衍射仪等设备, 实时监测绝缘层的直径偏差、洁净度分布以及改性剂的分散均匀性等关键指标, 当检测数据超出工艺窗口范围时, 系统需自动触发工艺参数修正程序。在此过程中, 还需建立改性原料分批次追溯系统, 详细记录每次原料改性时的改性剂添加量、加工工艺参数以及成品性能测试数据, 为持续优化改性体系提供全面的数据支撑, 最终形成从原料改性到产品制造的全链条工艺适配性提升体系。

2.2 构建全流程成型质量管控体系

2.2.1 锚定工艺重点

相关单位需在聚丙烯绝缘电缆生产制造过程中构建全流程成型质量管控体系, 该体系的构建需依托标准化作业框架推进实施, 此框架要以电缆绝缘层成型的关键工序, 诸如挤出、交联、冷却等, 作为核心管控节点, 明确各工序的操作规范与质量标准。其中挤出工序需严格规定熔体温度波动范围、螺杆转速与牵引速度的匹配关系; 交联工序则需精准设定辐射剂量或化学交联剂的添加精度; 冷却工序需合理控制水温梯度与冷却时间。通过编制标准化作业文件并开展全员培训, 保证操作人员全面理解并统一执行质量管控要求, 为全流程管控奠定坚实基础。

例如, 挤出工序需严格规定熔体温度波动范围 $\pm 2^\circ\text{C}$ 、螺杆转速波动 $\pm 3\text{r}/\text{min}$, 牵引速度与螺杆转速的匹配偏差不得超过 $\pm 2\%$, 绝缘层厚度偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内; 交联工序若采用辐照交联方式, 需精准设定辐射剂量 $25 \sim 35\text{kGy}$, 辐射均匀性变异系数不超过 8%, 若采用化学交联方式, 需控制交联剂 DCP 添加精度 $\pm 0.1\%$, 交联温度控制在 $180 \sim 190^\circ\text{C}$ 、交联时间 15~20min, 确保交联度达到 70%~80%; 冷却工序需合理控制水温梯度与冷却时间, 采用三段式冷却水槽, 水温分别设定为 70°C 、 55°C 、 40°C , 水温梯度控制在 $10 \sim 15^\circ\text{C}/\text{段}$, 冷却时间总计 20~30min, 确保绝缘层冷却后结晶均匀, 残留应力

不超过 3MPa。

2.2.2 引进多参数协同监控与动态调整系统

全流程质量管控体系构建的核心要点在于引进多参数协同监控与动态调整系统,该系统需集成温度传感器、压力传感器、激光测径仪等在线检测设备,实时采集挤出机各区温度、熔体压力、绝缘层直径等关键工艺参数,再通过数据采集系统将各类参数传输至中央控制台,控制台内预设质量预警模块。当参数偏离工艺窗口时,系统需自动触发报警并向操作端发送调整指令,操作人员则需根据指令及相关指标及时调整工艺参数。同时,系统要完整记录参数调整时间、调整幅度以及调整后的质量数据,形成闭环控制回路。

例如,温度传感器分别安装在挤出机各区段缸体、机头及交联设备关键位置,测量精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,实时采集温度数据;压力传感器安装在挤出机机头熔体通道,测量范围 0~50MPa、精度 $\pm 0.1\text{MPa}$,实时采集熔体压力;激光测径仪安装在冷却水槽出口,测量范围 0~50mm、精度 $\pm 0.01\text{mm}$,实时采集绝缘层直径;在线绝缘电阻测试仪通过高压电极与电缆导体形成回路,实时检测绝缘电阻值不低于 $1\times 10^{12}\Omega\cdot\text{m}$ 。各类参数通过数据采集系统以 10Hz 的频率传输至中央控制台,控制台内预设质量预警模块,当熔体压力偏离设定值 $\pm 5\text{MPa}$ 、温度偏离 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 、直径偏离 $\pm 0.1\text{mm}$ 或绝缘电阻低于阈值时,系统需自动触发声光报警并向操作端发送调整指令。操作人员需根据指令及时调整工艺参数,如熔体压力过高时可适当提升均化段温度 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 或降低螺杆转速 $5\sim 10\text{r/min}$,直径偏小时可提升牵引速度 $2\%\sim 3\%$ 。

2.2.3 质量追溯与数据分析

全流程质量管控体系的持续优化依赖于完善的质量追溯与数据分析机制,每批次电缆生产完成后,需通过条码识别系统将原料批次信息、工艺参数、在线检测数据与成品性能测试结果进行关联绑定,建立完整的质量追溯数据库;质量管理部门需定期对数据库数据进行系统分析,识别质量波动的主要来源,借助鱼骨图、帕累托图等专业工具定位问题根本原因,针对根本原因制定针对性改进措施,通过小批量试验验证改进效果,最终将有效改进措施纳入标准文件,形成持续优化的良性循环。

例如,通过条码识别系统可将原料批次信息、挤出机编号、操作人员编号、各工序工艺参数、在线检测数

据与成品性能测试结果进行关联绑定,其中成品性能测试包括拉伸强度、断裂伸长率、绝缘电阻、击穿电压(不低于 25kV/mm)等项目,建立完整的质量追溯数据库。质量管理部门需每周对数据库数据进行系统分析,采用鱼骨图从人员、设备、原料、工艺、环境五个维度识别质量波动的主要来源,借助帕累托图定位问题根本原因,如通过分析发现 30%的质量问题源于原料水分含量超标、25%源于螺杆转速波动。针对根本原因制定针对性改进措施,如原料干燥时间从 4h 延长至 6h、对螺杆传动系统进行定期润滑维护,通过小批量(500m/批次)试验验证改进效果,当改进后原料水分含量稳定在 0.05%以下、螺杆转速波动降至 $\pm 1\text{r/min}$ 时,将有效改进措施纳入标准文件。同时每月开展一次质量复盘,总结管控体系运行效果,优化工艺窗口参数,形成持续优化的良性循环。

3 结束语

总体来说,聚丙烯绝缘电缆生产质量的提升核心在于实现原料改性与工艺的精准适配及全流程质量的闭环管控。研究提出的多组分协同改性体系与全流程质量管控方案,有效破解了现有生产中的核心痛点,为行业提供了可落地的技术路径。这些优化策略不仅能够提升产品稳定性与使用寿命,更推动了聚丙烯绝缘电缆生产从经验型管控向数据驱动型管控的转型。未来可进一步探索改性剂长效性提升与智能化监控系统的深度融合,为高性能聚丙烯绝缘电缆的规模化生产提供更全面的技术保障。

参考文献

- [1] 夏云海,黄上师,余欣,等. 110kV 接枝聚丙烯绝缘电缆运行温度提升可行性分析[J]. 电线电缆,2025,68(10):36-40. DOI:10.16105/j.dxdl.1672-6901.20250072.
- [2] 罗玉鹤,白文博. 改性聚丙烯电缆绝缘材料性能研究进展[J]. 塑料助剂,2025,(05):66-70.
- [3] 张涛,刘源禧,张晋源,等. 氧化锆对共混聚丙烯电缆绝缘料力学及电气性能的影响[J]. 工程塑料应用,2025,53(08):189-197.

作者简介:胡君臣(1966年09月—)工程师,扬州光明电缆有限公司副总经理。

智慧水利系统架构与关键技术研究

赵博雅 杨帆

河南黄河水文勘测规划设计院有限公司，河南省郑州市，450000；

摘要：本文聚焦于智慧水利系统，深入探讨其架构与关键技术。首先阐述智慧水利系统的定义、内涵、架构组成要素及设计原则，为系统构建提供理论基础。接着详细分析物联网、大数据与云计算、人工智能、地理信息系统（GIS）等关键技术智慧水利中的应用。最后介绍智慧水利系统在水资源管理、防洪减灾、水利工程管理等方面的实际应用。研究表明，智慧水利系统凭借先进技术，能有效提升水利管理的效率和决策的科学性，为水利事业的可持续发展提供有力支撑。

关键词：智慧水利；系统架构；关键技术；水利应用

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.018

水利事业是国民经济和基础产业，在保障社会稳定、促进经济发展等方面发挥着重要作用。随着信息技术的飞速发展，传统水利管理模式面临诸多挑战，难以满足日益增长的水利需求。智慧水利作为水利信息化发展的高级阶段，融合了物联网、大数据、人工智能等先进技术，为水利事业的发展带来了新的机遇。通过构建智慧水利系统，能够实现对水利信息的全面感知、高效传输、智能处理和科学决策，提升水利管理的精细化、智能化水平。因此，深入研究智慧水利系统架构与关键技术具有重要的现实意义。

1 智慧水利系统架构概述

1.1 智慧水利系统的定义与内涵

智慧水利系统属于结合现代信息技术的综合平台，其目的在于对水利信息全方位感知、快速传输、深入剖析并智能应用。此系统把水利业务需求当作核心驱动力，整合各种涉水数据资源包括工程设施状况、水资源分布情形以及生态环境品质，实现资源共享与协同作业，为科学决策提供可靠的资料支持，经由部署多种传感装置和监测设备，可以精准得到重要指标数值例如水位变动情况、流速动态表现、水质参数以及气象要素等等，进而形成覆盖全部地域范围内的细致观测网络结构，依靠先进网络通信技术手段，各个分散节点之间的相互连接不断优化改善，使得它们之间能够开展实时互动交流并完成即时更新操作，彻底解决以往那种存在大量孤立现象的问题局面，明显改进整体运行效能及应对紧急事态的能力水平。运用大数据、人工智能等先进技术，可以对大规模水利数据执行深入分析和智能挖掘，提炼出潜

在的价值信息并形成知识体系，进而给水利工程给予智能化的诊断、精准预测以及科学决策支撑，依照用户需求导向原则，把智慧水利平台的各项功能板块和服务资源汇总起来，向政府部门和社会公众供应量身打造又便捷高效的信息服务方案，切实符合各类应用诉求^[1]。

1.2 智慧水利系统架构的组成要素

智慧水利系统架构主要由感知层、网络层、平台层和应用层组成。其中，感知层是基础环节，负责水利信息的采集工作，包括各种传感器、监测设备以及摄像头等装置，在水利工程设施上普遍设置这些终端，水资源分布区里也常见它们的身影，并且在水环境监控点周围同样存在部署现象；可以实时得到诸如当前水位高度、流速流量状况、水质参数情况以及气象条件数据等相关信息反馈，而这一层级所采用的末端设备必须具备较高精确度测量水平、较强稳定性保障措施及低能耗特点才能够达到相关要求标准。网络层起到关键作用作为载体来完成从感知到平台之间的信息交互任务分配给它使用的方法主要包括了有线/无线两种形式比如光纤接入方式还有 Wi-Fi 连接技术或者 GPRS 模块再者就是 4G/5G 技术并且还应该符合高速率传输短时延处理信息安全等方面的基本需求才可以称得上合格。平台层则是整个体系中的中枢神经所在之处，着重关注于水利大数据存储管理方面的工作内容进行业务逻辑运算并实施智能分析决策功能实现过程当中都会涉及到的内容都被包含进来。它包括数据存储系统、数据处理系统与数据分析平台经由整合、清洗、挖掘及分析海量水利相关数据，提炼关键信息并形成知识图谱，给决策层给予

精准支撑,该平台属于智慧水利体系的重要构成部分,必须具备较高的弹性扩展性能,较强稳定性以及高效能特性,才能应对不断增长的数据处理需求,应用层级为系统的末端表现形式,主要任务是把各个功能模块和服务接口推送到用户端口当中去。

1.3 智慧水利系统架构的设计原则

设计智慧水利系统架构的时候要遵守这些原则,智慧水利系统应该采用开放的体系结构和标准接口,这样方便和其他系统集成以及数据共享,还要能接受不同硬件设备和软件系统的接入,从而符合不断发展变化的信息技术和水利业务需求,智慧水利系统要有很高的可靠性,在各种复杂环境里都能稳定工作,所以在设计的时候要用冗余设计、容错技术之类的办法来提升它的可靠度和可用性,智慧水利牵涉很多敏感信息和重要数据,像水资源数据,水利工程数据等等,所以必须重视安全。在系统架构设计阶段,要结合加密算法、权限管理等技术手段来保障数据安全和用户隐私,在水利行业信息化进程加快且信息技术持续革新的背景下,智慧水利平台需要不断地完善自身功能模块并扩大服务覆盖范围。采用模块化与分层化的开发策略能够极大地增强该系统的扩展性及适应能力。

2 智慧水利系统关键技术分析

2.1 物联网技术在智慧水利中的应用

物联网技术是智慧水利系统的支柱性支撑手段,把各种各样的传感装置和监测设备接入互联网平台之后,就可以做到对水利工程设施、水资源状态以及水环境参数展开即时的监督与远程调节,它的主要作用就是依靠遍布在水利基础设施里的多种类感知节点包含水位计、流量表和压力传感器等,来搜集并传送运行数据,进而快速察觉到也许潜藏的问题或者隐患,并给予运维决策以科学参考,在这个技术支持之下,可以全方位获取区域内的水资源数量、品质及其时空分布信息变动走向的数据情况,从而为达成高效的利用与精细管理奠定坚实的基础。通过在河流、把水质监测设备和气象观测装置部署到湖泊、水库之类的水域当中去,就能够做到对水环境质量参数实施即时采集,并且凭借数据分析来给予早期污染预警的服务项目,从而给水资源管理决策赋予科学依照,依靠物联网技术创建水利设施远距离管控平台—集合泵站启动停止调度以及闸门开启关闭控制等

功能模块的运作系统,有益于改进水利工程运作效能并改善其维护水平^[2]。

2.2 大数据与云计算技术在智慧水利中的应用

大数据与云计算技术为智慧水利系统数据处理和存储给予了很强的支持。大数据技术可以针对大量的水利数据执行采集、储存、分析及挖掘,从而提炼出有用的信息和知识,而云计算技术能够给予灵活的计算资源和存储资源,契合智慧水利体系对于运算和存储的要求。大数据和云计算技术在智慧水利中的应用主要是利用云计算技术创建起水利大数据存储平台,把庞大的水利数据集中起来并加以妥善保管,凭借数据仓库、数据湖之类的技术手段来整合并清洗这些水利数据,进而提高数据的质量及其可用性。采用大数据分析技术对水利数据展开深入探究和发掘,比如进行趋势剖析,关联剖析,聚类剖析之类的操作,以此找出水利系统的运作规则以及潜藏的问题,并为水利经营决策赋予科学依照。依靠云计算超强的运算性能,可以快速完成水利模型仿真运算工作,例如洪水演进预测、水资源调配方案评判等。这样的技术手段不但使模型运行速度和结果准确度有了极大提升,而且给水利工程设计规划以及维护管理给予了有力支撑。利用大数据处理能力结合可视化工具来呈现大量的水利数据信息,开发出面向行业用户的专属服务功能模块等也成为可能。在此基础之上公共服务供给水平得到了改善,效果明显。

2.3 人工智能技术在智慧水利中的应用

人工智能技术是智慧水利系统实现智能化的重要技术之一,它能够模仿人类的智能行为,对水利数据进行自动分析与处理,从而完成对水利系统的智能诊断、预测以及决策支持。人工智能技术在智慧水利中的应用主要表现在以下几点上,水利数据智能分析,采用机器学习、深度学习等方法来对水利数据执行智能分析和挖掘工作,比如水质预估、洪水预报、水资源优化调配之类的事情,以此提升水利数据分析的速度及其准确度水平;水利设施智能诊断,经由对水利设施运作状况所获取的数据加以分析并实施训练,进而创建起一个智能诊断模型,这样就可以做到针对水利设施出现故障时做出判断,并对其健康程度予以评价,在此过程中及时察觉设备发生故障或者存在安全隐患的情况,然后给予有关人员以参考意见作为其开展维护管理工作的根据。水利

决策智能化支持系统依靠人工智能技术构建分析模型,为防汛调度、水资源优化配置等核心领域提供科学依据,经由研发专门的设备实现对水利工程设施的有效巡查、精准维修以及动态监测,从而提升行业的运行效率并保证作业安全。

2.4 地理信息系统 (GIS) 技术在智慧水利中的应用

地理信息系统 (GIS) 技术是基于地理空间数据的信息系统,它能够对地理空间数据进行采集、存储、分析以及可视化展示。在智慧水利中, GIS 技术的应用主要体现在以下几个方面: 水利空间数据管理利用 GIS 技术可以对水利空间数据进行管理和维护, 如地形数据、水系数据、水利设施数据等, 从而实现水利空间数据的共享和协同。水利规划与设计运用 GIS 技术, 针对水利工程的选址、布局、规模等情况展开分析并加以评价, 为水利工程的设计工作给予决策上的支持。依靠地理信息系统 (GIS) 技术搭建起来的水利灾害预警及应急响应平台, 采用仿真建模手段针对洪水、干旱这类水文事件展开全面评估, 并及时公布灾情数据, 以辅助决策进程。该系统经由可视化途径展现水资源分布特点以及其动态发展走向, 在流域综合治理规划制定和执行成效监测方面给予科学依据和技术支持^[3]。

3 智慧水利系统的应用与实践

3.1 水资源管理中的智慧水利系统应用

在水资源管理中, 智慧水利系统能够实现对水资源的全面监测、合理调配以及有效保护。水资源监测与评价: 利用智慧水利系统实时监测水资源数量、质量及分布情况, 并对水资源承载能力及其利用率进行评估, 从而为科学开发利用水资源提供依据; 水资源调配: 依靠智慧水利系统来优化调配水资源, 依照水资源供给需求状况合理安排分配用水量, 提升水资源使用效率并保证其可持续性发展; 水资源保护: 借助于智慧水利系统加强对水资源的保护工作, 在日常运行过程中持续监控水环境品质变化情况, 及时察觉并处理各种可能发生的水污染事件, 以维护好水资源生态环境。

3.2 防洪减灾中的智慧水利系统应用

防洪减灾是水利工作的一项重要任务, 智慧水利系统能够为防洪减灾提供支持。洪水监测与预警, 借助于智慧水利系统, 实时监测洪水发生、发展的状况, 并及

时发布洪水预警信息, 从而给防洪减灾决策给予支撑。防洪调度决策, 依靠智慧水利系统对洪水展开模拟并加以分析, 进而制订出科学合理的防洪调度方案来, 使得水库、堤防等防洪工程得以优化运作, 提升防洪减灾的能力水平。应急救援指挥, 凭借智慧水利系统达成对防洪减灾应急救援工作的指挥和调动目的, 做到快速调配救援力量以及物资以提高应急救援效率的效果^[4]。

3.3 水利工程管理中的智慧水利系统应用

水利工程属于水利事业的关键基础设施, 智慧水利系统可以提升水利工程的经营水平并改善运行效率, 工程安全监测借助智慧水利系统对水利工程开展即时监测, 尽早察觉工程存在的安全隐患, 给水利工程的维护和管理给予依照。工程调度与运作管理利用智慧水利系统针对水利工程执行优化调度及运作管理, 从而改进水利工程的运作效率和效益, 工程建设经营管理经由智慧水利系统对水利工程的创建过程实施全程监督与管理, 进而保证水利工程的创建品质和速度。

4 结束语

智慧水利系统是水利信息化发展的重要成果, 它集合了物联网、大数据分析技术、人工智能以及地理信息系统等前沿手段来对水资源展开管理决策提供支持性作用。它的核心功能在于依靠全要素感知、高速传输数据信息处理与智能化应用这些协同工作的部分去实现水利工程精细化管理水平的提高, 并且促使整个行业朝着高质量的方向迈进。伴随信息技术持续革新迭代并且业务需求处于动态变化当中, 这一领域正逐步走向更高性能水平及更好集成度的技术升级路径之中; 展望未来将会更加关注于创新技术创新路线, 在区块链技术、边缘计算和虚拟现实等方面寻找跨域融合的新模式, 从而进一步加强平台整体效能表现并拓宽其应用场景范围。

参考文献

- [1] 林运东, 张龙, 刘勇. 智慧水利现状与发展展望[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(04): 162-164.
- [2] 余启成. 智慧水利工程异构数据整合方法研究[J]. 水利水电快报, 2024, 45(08): 113-117.
- [3] 吴家梅. 智慧水利信息化系统在水利工程中的应用[J]. 黑龙江粮食, 2022, (09): 76-78.
- [4] 连彬, 魏忠诚, 赵继军. 智慧水利关键技术与应用研究综述[J]. 水利信息化, 2021, (05): 6-18+31.

大规模水利水电工程对水资源的综合利用研究

马健胜

332526*****5153

摘要:在水资源供需矛盾加剧与水生态保护需求提升的双重背景下,大规模水利水电工程作为水资源调控核心基础设施,其综合利用效能直接关乎区域水安全与可持续发展。本文立足新时代水利发展理念,梳理工程与水资源综合利用的内在关联,剖析工程在水资源调配、节约集约利用及水生态维系中的核心作用机制,探究影响综合利用效益的关键制约因素,构建适配不同区域特征的优化框架。通过多维度研究,为提升工程水资源综合利用水平、完善水安全保障体系提供理论支撑与实践指引。

关键词:大规模水利水电工程;水资源综合利用;水资源调配

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.019

引言

水资源是支撑经济社会发展与维系生态平衡的基础性自然资源,也是战略性经济资源。当前,我国区域水资源时空分布不均问题突出,加之工业化、城镇化进程加快,水资源供需矛盾日益凸显,水安全保障面临严峻挑战。大规模水利水电工程凭借其蓄水、调水、发电等综合功能,成为统筹解决水资源短缺、优化水资源配置的关键抓手。新时代背景下,水利发展已进入高质量发展阶段,对水资源综合利用提出了更高要求,不仅强调水量的合理调配,更注重水生态的保护与修复。

1 大规模水利水电工程与水资源综合利用的核心关联

1.1 工程水资源调控核心属性

大规模水利水电工程的核心属性之一便是水资源调控,其通过水库蓄水、渠道输水等设施,实现对天然水资源时空分布的人工干预。这种调控能力贯穿于水资源循环的关键环节,能够有效缓解降水季节不均、区域分布失衡带来的水资源供需错配问题。在枯水期,工程可释放蓄水补充河道径流,保障生产生活用水需求;在丰水期,通过拦蓄洪水,减少洪涝灾害损失的同时,储存宝贵的水资源。此外,工程的调控作用还体现在对水资源质量的间接改善上,通过减缓水流速度,促进水中污染物的沉降,提升水体自净能力。

1.2 水资源综合利用内涵与导向

水资源综合利用的内涵随着时代发展不断丰富,新时代背景下,其已不再局限于传统的供水、灌溉、发电等单一功能的叠加,而是转向以水安全为核心,统筹兼顾经济、社会、生态三大效益的多元化利用模式。其发

展导向更加注重水资源的节约集约利用,强调在满足经济社会发展用水需求的同时,最大限度减少对水生态环境的破坏,实现水资源的可持续利用。

1.3 工程与利用协同发展逻辑

大规模水利水电工程建设与水资源综合利用之间存在着紧密的协同发展逻辑。工程建设是水资源综合利用的重要载体,为实现水资源的多元利用提供了基础设施保障;而水资源综合利用的需求则为工程建设指明了方向,推动工程功能的不断完善与优化。在协同发展过程中,工程建设需以水资源综合利用规划为指导,根据区域水资源禀赋与利用需求,科学确定工程的建设规模、功能定位与运营模式。

2 大规模水利水电工程在水资源综合利用中的核心作用机制

2.1 时空均衡调配机制

大规模水利水电工程通过构建跨区域的水资源调配网络,形成了有效的时空均衡调配机制。在时间维度上,工程借助水库的蓄水能力,将丰水期多余的水资源储存起来,在枯水期按需释放,有效弥补了天然降水的季节差异,保障了全年水资源的稳定供应。在空间维度上,通过引水渠道、输水管道等设施,将水资源丰富区域的水量输送至水资源短缺区域,实现了水资源在不同流域、不同区域之间的优化配置。这种时空均衡调配机制能够有效缓解区域水资源供需矛盾,提高水资源的利用效率。

2.2 节约集约利用赋能机制

大规模水利水电工程通过多种途径赋能水资源的节约集约利用。一方面,工程的建设与运营推动了灌溉、

工业用水等领域的节水改造。在农业灌溉方面,依托工程的输水系统,配套建设高效节水灌溉设施,减少了输水过程中的渗漏损失,提高了灌溉用水效率;在工业用水方面,工程提供的稳定水源为企业开展水循环利用、节水技术改造创造了条件,促进了工业用水重复利用率的提升。另一方面,工程运营过程中形成的水资源管理体系,能够强化对水资源利用的监管,推动水资源利用定额制度的落实,引导各行业树立节水意识。

2.3 水生态修复驱动机制

大规模水利水电工程在水生态系统完整性维系与修复方面发挥着重要的驱动作用。工程通过科学的调度运行,能够保障河道基本生态流量,避免因水资源过度开发导致的河道断流、湿地萎缩等问题,维系水生态系统的基本功能。对于受损的水生态区域,工程可以通过生态补水的方式,改善区域水文条件,促进水生生物栖息地的恢复,提升水生态系统的稳定性与多样性。

3 大规模水利水电工程水资源综合利用的关键制约因素

3.1 规划与水资源禀赋适配不足

大规模水利水电工程规划设计与区域水资源禀赋适配性不足是制约水资源综合利用效益发挥的重要因素。部分工程在规划阶段,对区域水资源的总量、时空分布特征、水质状况等基础条件调研不够充分,导致工程建设规模、功能定位与实际水资源禀赋不相匹配。有的工程过度追求供水、发电等经济功能,忽视了区域水资源的承载能力,导致工程运营过程中出现水资源供需失衡的问题。还有的工程在规划设计中对不同季节、不同年份的水资源变化考虑不足,使得工程在极端水文条件下难以有效发挥调控作用。

3.2 多目标调度效率协同瓶颈

大规模水利水电工程通常承担着供水、发电、防洪、生态保护等多重目标,多目标调度下水资源利用效率的协同提升面临诸多瓶颈。不同目标之间往往存在一定的矛盾与冲突,例如,防洪调度需要在汛期提前腾出库容,可能会影响供水与发电的水量;而发电调度追求水量的稳定输出,又可能与生态流量保障产生冲突。当前,部分工程的调度体系尚未形成有效的多目标协同机制,调度决策多基于单一目标优化,难以实现各目标之间的平衡。

3.3 运营对水生态潜在影响

大规模水利水电工程运营过程中对流域水生态环

境的潜在影响,是制约水资源综合利用的另一关键因素。工程运营改变了天然河道的水文情势,包括水流速度、水位变化、径流过程等,这些变化可能会影响水生生物的生存环境,导致部分水生生物栖息地破坏、种群数量减少。同时,工程拦蓄可能会导致河道泥沙淤积,影响河道行洪能力与水质状况,进而影响水生态系统的稳定性。此外,工程运营过程中产生的水温变化、水体分层等问题,也可能对下游水生态环境产生不利影响。虽然工程建设过程中会采取相应的生态保护措施,但部分措施的有效性有待长期检验,且随着运营时间的推移,新的生态问题可能不断涌现,进一步制约水资源的可持续利用。

4 大规模水利水电工程水资源综合利用的优化路径构建

4.1 规划设计优化策略

基于区域水情的工程规划设计优化是提升水资源综合利用水平的基础。首先,要加强区域水资源调查评价工作,全面掌握区域水资源禀赋特征,包括水资源总量、时空分布、水质状况以及水资源承载能力等,为工程规划设计提供精准的数据支撑。其次,要坚持以水资源综合利用规划为引领,统筹兼顾经济、社会、生态效益,科学确定工程的建设规模与功能定位,确保工程建设与区域水资源禀赋相适配。同时,要注重规划的前瞻性与灵活性,充分考虑气候变化、经济社会发展等因素对水资源利用的影响,预留工程功能拓展空间。此外,还应加强规划设计过程中的公众参与与专家论证,提高规划设计的科学性与合理性。

4.2 运营调度模式优化

构建多维度水资源高效利用的工程运营调度模式优化路径,是提升水资源综合利用效率的关键。一方面,要建立健全多目标协同调度机制,通过构建科学的调度模型,量化各目标的优先级与权重,实现供水、发电、防洪、生态保护等多目标的平衡优化。另一方面,要加强水资源预测预报体系建设,整合水文、气象等多源数据,提升预测预报的精准度与时效性,为调度决策提供有力支撑。同时,要推动运营调度的智能化发展,利用大数据、物联网、人工智能等技术,实现调度过程的实时监测、动态调控与精准管理。此外,还应加强跨区域、跨部门的调度协同,建立健全调度信息共享机制,提升水资源调配的整体效能。

4.3 生态友好技术体系完善

完善水生态友好型工程建设与运营技术体系,是实现水资源利用与生态保护协调发展的重要保障。在工程建设阶段,要推广应用生态友好型建设技术,减少工程施工对周边生态环境的破坏。例如,采用生态护岸技术替代传统硬质护岸,保护河道岸线生态系统;建设鱼类增殖放流站与生态廊道,保障水生生物的洄游通道。在工程运营阶段,要优化生态流量调度技术,根据不同季节、不同水生生物的生长需求,科学确定生态流量下泄方案,保障河道生态系统的基本功能。同时,要加强水质监测与净化技术的应用,建立健全水质监测网络,及时掌握水体水质变化情况,采取有效的水质净化措施,提升水资源质量。此外,还应加强生态修复技术的研发与应用,对受损的水生态区域进行针对性修复,提升水生态系统的稳定性。

5 大规模水利水电工程水资源综合利用的保障体系搭建

5.1 协同管理机制构建

构建跨区域跨部门的协同管理机制是保障大规模水利水电工程水资源综合利用顺利推进的重要前提。由于水资源具有跨流域、跨区域流动的特性,大规模水利水电工程的水资源利用往往涉及多个行政区域与多个部门。因此,需要建立高层次的协同管理机构,统筹协调各区域、各部门之间的利益关系,明确各主体的职责与分工。同时,要建立健全协同管理规章制度,规范管理流程,保障管理工作的有序开展。此外,还应建立信息共享平台,实现水文监测、水资源调度、水质状况等信息的实时共享,提升协同管理的效率与精准度。通过协同管理机制的构建,打破区域与部门壁垒,形成管理合力,保障水资源综合利用规划的顺利实施。

5.2 动态监管体系完善

完善智慧水利技术支撑下的动态监管体系,能够为大规模水利水电工程水资源综合利用提供有力的技术保障。要依托智慧水利建设,整合大数据、物联网、卫星遥感等先进技术,构建覆盖工程建设、运营调度、水资源利用、水生态环境等全流程的监测网络。通过实时监测工程运行状态、水资源调配情况、水质变化以及水生态环境状况,及时发现问题并发出预警。同时,要建立健全监管数据分析与应用机制,对监测数据进行深度挖掘与分析,为水资源综合利用决策提供数据支撑。此外,要加强监管执法力度,对违反水资源管理规定的行为进行严肃查处,保障水资源综合利用各项措施的落实

到位。动态监管体系的完善能够提升水资源管理的精细化水平,保障工程水资源综合利用效益的持续发挥。

5.3 资金与政策保障优化

优化多元化资金保障与政策支持体系,是大规模水利水电工程水资源综合利用的重要支撑条件。在资金保障方面,要建立政府主导、社会参与的多元化资金投入机制,加大政府财政投入力度,同时积极引导社会资本参与工程建设与运营。要完善水资源价格形成机制,通过合理的水价调整,引导各行业节约用水,提高水资源利用效率,同时为工程运营维护提供稳定的资金来源。在政策支持方面,要加强相关法律法规体系建设,完善水资源管理、水生态保护等方面的规章制度,为水资源综合利用提供法律保障。要出台相关的激励政策,鼓励企业开展节水技术研发与应用,推动水资源循环利用。此外,还要加强政策宣传与解读,提高全社会对水资源综合利用的认识与支持,营造良好的政策实施环境。

6 结论

大规模水利水电工程作为水资源调控的核心基础设施,在水资源综合利用中发挥着不可替代的作用。本文通过对工程与水资源综合利用核心关联、作用机制、制约因素、优化路径及保障体系的系统研究,明确了二者协同发展的内在逻辑,厘清了影响工程水资源综合利用效益的关键问题。研究表明,通过优化工程规划设计、完善运营调度模式、构建生态友好技术体系,同时搭建跨区域跨部门协同管理机制、智慧化动态监管体系及多元化资金政策保障体系,能够有效提升大规模水利水电工程水资源综合利用水平。

参考文献

- [1]王琰青,白浩宇.水利水电工程农村移民安置点旅游开发优势、面临问题及对策[J].乡村科技,2022,13(20):65-68.
- [2]王艳.水利水电施工管理的创新对策探索[J].黑龙江水利科技,2017,45(11):121-122.
- [3]吴金川,王梦帆,杨慧莉.水利水电工程环境监测与施工环境保护对策[J].河南水利与南水北调,2016,(05):106-107.
- [4]肖同霞.水利水电工程施工中的质量控制方法和技术创新[J].城市建设理论研究(电子版),2024,(20):202-204.
- [5]余国伟.水利水电施工全过程的造价控制与管理分析[J].四川水泥,2015,(10):218.

河湖生态修复与水资源高效利用协同路径研究

成智 林林

淮安市淮安区河道湖泊管理所/淮安市淮安区淮河入海水道堤防管理所, 江苏淮安, 223200;

摘要: 河湖作为水资源的核心载体与生态系统的重要组成部分, 其生态健康与水资源高效利用直接关系到区域可持续发展。当前, 水资源短缺与河湖生态退化的双重困境, 凸显了二者协同推进的必要性。本文基于生态系统服务理论与水资源优化配置原理, 界定河湖生态修复与水资源高效利用的核心内涵, 分析二者协同关系的内在逻辑与现实制约, 从规划统筹、技术融合、政策保障、管理创新四个维度, 构建系统性协同路径, 为破解水资源供需矛盾、维系河湖生态平衡提供理论支撑与实践指引。

关键词: 河湖生态修复; 水资源高效利用; 协同机制; 路径优化

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.020

引言

水资源是人类生存发展的基础性资源, 河湖生态系统则承担着调蓄径流、净化水质、维护生物多样性等多重生态服务功能。随着工业化与城市化进程加快, 水资源过度开发、污染物排放超标等问题导致河湖水量减少、水质恶化、生态功能退化, 而水资源利用效率偏低进一步加剧了供需矛盾, 形成“生态退化—资源浪费”的恶性循环。在此背景下, 单一的生态修复或水资源利用优化措施已难以从根本上解决问题, 推动二者协同发展, 实现生态效益与资源效益的双赢, 成为流域治理与水资源管理的核心议题。

目前, 国内外学界对河湖生态修复与水资源高效利用的研究多集中于单一领域: 生态修复研究侧重水质净化、栖息地重建等技术应用, 水资源高效利用研究聚焦于节水技术、配置优化等实践探索, 而关于二者协同关系与路径的系统性研究相对薄弱。部分研究虽提及协同重要性, 但缺乏对内在机制与实操路径的深度剖析。基于此, 本文立足二者协同的内在逻辑, 梳理制约因素, 构建科学可行的协同路径, 为区域河湖治理与水资源可持续利用提供新思路。

1 核心概念界定

1.1 河湖生态修复

河湖生态修复是指通过人工干预与自然恢复相结合的方式, 修复受损的河湖水文情势、水质状况、生物栖息地及生态系统结构, 恢复河湖生态系统的自我调节能力与核心服务功能, 实现河湖生态系统的健康稳定。

其核心目标并非单纯恢复原始生态状态, 而是构建与区域社会经济发展相适配的、可持续的河湖生态系统, 兼顾生态完整性与服务实用性, 涵盖水文连通性修复、水质净化、水生生物群落重构、岸线生态化改造等多个维度^[1]。

1.2 水资源高效利用

水资源高效利用是指在水资源总量约束下, 通过技术创新、管理优化、结构调整等手段, 以最低的水资源消耗获取最大的经济、社会与生态效益, 实现水资源的优化配置与循环利用。其核心要义在于打破“粗放式利用”模式, 兼顾水资源的供需平衡与高效循环, 涵盖农业、工业、城市生活等全领域节水, 以及再生水、雨水等非常规水资源的资源化利用, 最终构建“取一用一耗一排一回”的闭环水资源利用体系。

2 河湖生态修复与水资源高效利用的协同关系

2.1 协同的内在逻辑

河湖生态修复与水资源高效利用是相互支撑、相互促进的有机整体, 二者的协同性源于生态系统与水资源系统的内在关联。一方面, 河湖生态修复是水资源高效利用的基础。健康的河湖生态系统能够提升水资源调蓄能力, 通过水生生物与微生物的净化作用改善水质, 为水资源的高效利用提供优质水源保障; 同时, 生态化的河湖岸线与水文连通性结构, 可减少水资源蒸发与渗漏, 提升水资源的天然利用效率。另一方面, 水资源高效利用是河湖生态修复的保障。高效的水资源配置能够减少对河湖生态用水的挤占, 保障生态基流, 为生态修复提

供稳定的水文条件；而节水技术与循环利用模式的推广，可减少污染物排放，降低河湖生态承载压力，加速生态修复进程^[2]。

二者的协同发展能够打破“生态修复依赖水资源供给、水资源利用挤占生态空间”的矛盾格局，形成“生态修复提升水资源质量与利用潜力，高效利用为生态修复提供支撑”的良性循环，实现生态效益、经济效益与社会效益的统一。

2.2 协同的核心价值

从生态维度看，协同发展能够维系河湖生态系统的完整性与稳定性，恢复生物多样性，提升区域生态韧性，增强河湖对气候变化与人类活动的适应能力。从资源维度看，协同可优化水资源配置结构，提升水资源利用效率，缓解水资源短缺压力，拓展水资源供给渠道，实现水资源的可持续利用。从社会经济维度看，协同发展能够改善区域人居环境，提升水资源保障能力，支撑农业、工业等产业高质量发展，推动区域社会经济与生态环境的协调进步。

3 二者协同发展的现实制约因素

3.1 规划缺乏统筹性，协同机制缺失

当前，河湖生态修复与水资源高效利用多由不同部门分管，生态修复多归属于生态环境、水利部门，水资源利用则涉及水利、农业、工业等多个领域，部门间存在职能分割、权责不清的问题。相关规划制定缺乏统筹衔接，生态修复规划往往忽视水资源利用效率目标，水资源利用规划则对生态需求考虑不足，导致二者在目标、任务、措施上难以协同。同时，缺乏跨部门的协同决策机制与联动执行机制，信息共享不及时、资源调配不协调，进一步加剧了二者的脱节。

3.2 技术融合不足，适配性有待提升

现有技术体系中，河湖生态修复技术与水资源高效利用技术多处于独立发展状态，缺乏针对性的融合创新。生态修复技术多聚焦于水质净化、栖息地重建，对水资源循环利用的适配性考虑不足；节水技术与循环利用技术则侧重提升利用效率，忽视对河湖生态系统的影响。例如，部分节水技术虽降低了水资源消耗，但可能改变区域水文情势，对河湖生态基流产生间接影响；而生态修复技术的应用若缺乏水资源高效利用技术的支撑，可能导致水资源浪费，影响修复效果的可持续性。此外，

技术推广应用的成本较高、适配性不足，也制约了二者的协同落地^[3]。

3.3 政策保障体系不完善，激励约束不足

相关政策法规多针对单一领域制定，缺乏专门的协同发展政策体系。生态修复领域的政策侧重生态保护目标，对水资源高效利用的激励措施不足；水资源管理领域的政策则以节水约束为主，对生态修复的支撑力度不够。同时，缺乏有效的激励机制，企业、社会组织等参与协同发展的积极性不高；约束机制不健全，对过度开发水资源、破坏河湖生态的行为处罚力度不足，难以形成刚性约束。此外，生态补偿机制不完善，跨区域、跨部门的生态补偿标准不统一，影响了协同发展的公平性与可持续性。

3.4 管理能力不足，监测评估体系滞后

河湖生态与水资源管理的信息化水平不高，缺乏统一的监测网络平台，对河湖水文情势、水质状况、生态功能及水资源利用效率的监测数据不精准、不全面，难以以为协同决策提供科学支撑。同时，监测评估指标体系不完善，现有指标多单一指向生态修复或水资源利用，缺乏能够反映二者协同效果的综合性指标，无法准确评估协同发展水平与存在的问题。此外，管理人才队伍建设滞后，缺乏兼具生态修复与水资源管理专业知识的复合型人才，制约了协同管理能力的提升。

4 河湖生态修复与水资源高效利用协同路径

4.1 统筹规划布局，构建协同决策机制

以流域为单元，编制一体化协同发展规划，将河湖生态修复与水资源高效利用纳入统一规划框架，明确协同发展的总体目标、阶段性任务与重点举措，实现规划目标、空间布局、实施时序的衔接统一。建立跨部门协同决策机制，整合水利、生态环境、农业、工业、自然资源等部门职能，成立专门的协同管理机构，负责统筹协调各项工作，打破部门壁垒。完善信息共享机制，搭建统一的数字化管理平台，整合监测数据、规划方案、实施进度等信息，实现跨部门、跨区域信息实时共享，为协同决策提供数据支撑。同时，建立公众参与机制，通过听证、公示等方式，广泛吸纳社会各界意见，提升规划的科学性与可行性^[4]。

4.2 推动技术融合创新，强化技术支撑能力

聚焦二者协同需求,加强关键技术融合创新,构建“生态修复—高效利用”一体化技术体系。在生态修复领域,研发适配水资源循环利用的技术,如生态净化与再生水回用结合技术、水文连通性修复与水资源调蓄优化技术等,提升生态修复过程中的水资源利用效率;在水资源高效利用领域,推广对河湖生态友好的节水技术,如农业节水灌溉技术、工业循环用水技术、城市雨水资源化利用技术等,减少水资源利用对河湖生态的影响。加强产学研合作,鼓励科研机构、企业联合开展技术攻关,降低技术应用成本,提升技术适配性与可操作性。同时,建立技术推广机制,通过示范引领、技术培训等方式,加快先进技术的落地应用,为协同发展提供坚实技术支撑。

4.3 完善政策保障体系,强化激励约束作用

构建专门的协同发展政策体系,出台针对性的法律法规与政策文件,明确二者协同发展的责任主体、权利义务与实施路径,将协同发展要求纳入相关考核体系,形成刚性约束。完善激励机制,对积极参与河湖生态修复与水资源高效利用协同实践的企业、社会组织给予资金补贴、税收减免等优惠政策,鼓励社会资本投入协同发展项目;建立生态补偿机制,统一跨区域、跨部门生态补偿标准,对为生态修复牺牲经济利益的区域给予合理补偿,平衡各方利益。强化约束机制,加大对过度开发水资源、破坏河湖生态行为的处罚力度,严格落实水资源总量控制、取水许可、排污许可等制度,倒逼相关主体转变发展模式,践行协同理念^[5]。

4.4 创新协同管理模式,提升管理服务水平

搭建一体化监测评估体系,整合现有监测资源,构建覆盖河湖水文、水质、生态功能及水资源利用效率的全方位监测网络,统一监测标准与技术规范,提升监测数据的精准性与时效性。建立综合性评估指标体系,设计能够反映生态修复效果、水资源利用效率及二者协同水平的指标,定期开展评估工作,及时发现问题并优化调整协同举措。加强人才队伍建设,培养兼具生态修复、水资源管理、信息技术等专业知识的复合型人才,通过人才引进、岗位培训等方式,提升管理队伍的专业能力。同时,推行市场化管理模式,鼓励通过特许经营、政府

购买服务等方式,引导社会力量参与河湖生态修复与水资源高效利用,提升协同管理的专业化、市场化水平。

5 结论

河湖生态修复与水资源高效利用的协同发展,是破解水资源供需矛盾、维系河湖生态健康、推动区域可持续发展的必然选择。二者存在紧密的内在关联,相互支撑、相互促进,但当前仍面临规划统筹不足、技术融合不够、政策保障不完善、管理能力滞后等现实制约。通过构建统筹规划、技术融合、政策保障、管理创新“四位一体”的协同路径,能够有效打破发展壁垒,形成协同发展的良性循环,实现生态效益与资源效益的统一。未来,随着生态文明建设的深入推进与科技创新的不断突破,河湖生态修复与水资源高效利用的协同发展将迎来更广阔的空间。后续研究可进一步聚焦协同机制的量化分析、跨区域协同治理模式的创新等方向,结合数字化、智能化技术的应用,不断完善协同路径,为河湖生态保护与水资源可持续利用提供更精准、高效的理论与实践支撑,助力实现人与自然和谐共生的现代化。

参考文献

- [1]莫汝雪.樟江的生态修复与优化建设[J].黑龙江水利科技,2025,53(05):164-167.
- [2]栾广新,钱湛.洞庭湖生态修复工程:防洪与生态恢复的协同优化[J].湖南水利水电,2024,(03):77-79.
- [3]俞建全.关于石羊河“一河一策”水生态保护治理措施的思考[J].农业科技与信息,2022,(16):29-32.
- [4]韩全林,游益华,万骏.空间划定多要素的重叠性对河湖管理保护的影响分析[J].水利发展研究,2022,22(02):1-5.
- [5]陈永强.生态水利技术在宁夏国土空间生态修复中的应用建议[J].农业与技术,2019,39(23):127-128.

作者简介:成智,性别:男,出生日期:1980年2月2号,民族:汉,籍贯:江苏淮安,职称:工程师,学历:本科,研究方向:水利生产运行。

林林,性别:女,出生日期:1982年10月6号,民族:汉,籍贯:江苏淮安,职称:工程师,学历:本科,研究方向:水利生产运行。

水文水资源管理在水利工程中的有效应用

田雨

河南省许昌水文水资源测报分中心，河南许昌，461000；

摘要：水文水资源管理是水利工程体系的重要组成，其科学水平的好坏直接影响到水资源开发利用的效率和可持续性。本文从现代水文水资源管理技术在水利工程全周期应用框架出发，对立体化监测体系、精细化模拟技术、智能化决策系统在水利工程的规划设计、建设施工以及运行维护等阶段如何结合使用展开论述。研究表明，以多源信息融合、模型仿真推演、人机协同决策为特点的现代化管理方法，可以明显提高水利工程在资源配置、风险防控、综合效益等各方面的工作。最后，针对目前所面临的技术瓶颈和管理挑战，本文从基础理论创新、技术融合应用、体制机制完善等角度提出了未来发展的建议。

关键词：水文监测；水资源配置；水利工程；智慧决策

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.021

水利工程是支撑经济社会发展的基础性基础设施，它的规划建设、运行管理水平直接关系到水安全保障能力以及水生态健康状况。水文水资源管理对水循环过程进行系统的观测、分析、预测和优化调节，给水利工程提供科学依据和技术支撑。在全球气候变化与人类活动双重影响越来越明显的情况下，传统水文水资源管理模式对于极端事件频发、用水竞争加剧等新挑战已经暴露出很多不足。因此必须要在深刻认识水文规律的基础上，实现管理理念的创新和技术的进步。本文主要目的在于系统整理出现代水文水资源管理技术体系，并研究该体系在水利工程中的创新应用模式，给水利工程综合效能的提升提供理论依据和实践指导。

1 现代化水文监测技术体系的构建与应用

1.1 多维立体监测网络建设

当代水文监测已经形成了天、空、地三方面立体观测的局面。卫星遥感技术，尤其是合成孔径雷达和高光谱成像技术，实现了对大范围流域地表水文要素全天候、周期性的监测，可以很好地获得土壤湿度、水体范围、积雪覆盖等关键参数。无人机平台装有各种传感器，给局部重点区域和突发水事件应急提供灵活高效的高分辨率监测能力。地面监测网络采用自动化、智能化水文气象站、流量监测设备、水质在线分析仪等设备，长时间得到点尺度上准确的资料。北斗卫星导航系统高精度定位、形变监测的功能，又提高了重要水利工程施工安全状态的实时感知能力^[1]。多维、多尺度的协同观测体系，给水利工程建设及运行赋予了时空连续、要素完备的数据根基。

1.2 多源数据融合与质量控制

海量异构监测数据的价值挖掘要依靠高质量控制和深度融合的技术。对原始数据中噪声、异常、缺失等问题要建立标准化的质量控制流程，用统计分析、物理机制检验等方法综合对数据进行清洗和修复。数据融合技术利用时空插值、数据同化等方式把卫星遥感反演得到的面状信息、无人机获取的高分辨率信息和地面站点的点状实测信息融合起来，得到时空连续、精度更高的水文要素场。以卡尔曼滤波、集合卡尔曼滤波等算法为基础的数据同化技术，可以改善水文模型的状态变量和参数，提高模拟预报的准确性。在流域范围内创建统一的数据中台，把气象、水文、地质、生态、社会经济等各方面的信息整合起来，形成标准的数据资源池，是开展重大水利工程科学决策的前提。

2 水文水资源模拟与系统优化技术

2.1 分布式水文模型与水动力模型

基于物理机制的分布式水文模型，已经成了分析复杂下垫面条件下水文过程的主要手段。该类模型把流域单元划分得比较细，考虑地形、土壤、土地利用等下垫面要素的空间异质性，可以模拟降水入渗、产流、汇流等水文循环过程，评价气候变化和人类活动对水资源形成和转化的影响。水力学中一维、二维、三维水动力模型被广泛地用于河道整治、洪水演进模拟、溃坝分析等。HEC-RAS、MIKE、Delft3D等商业或者开源的模型，可以对复杂的边界条件下的水流运动进行高精度的模拟，给堤防的设计、蓄滞洪区的规划等提供直接的技术支持。当前的发展趋势是构建气象、水文、水动力、水质、泥沙的集成模型系统，用数字孪生流域的形式实现

物理流域的虚拟映射,为水利工程调度提供“四预”能力。

2.2 水资源多目标协同配置与优化调度

水资源系统包含供水、灌溉、发电、防洪、生态、航运等多重目标,各种目标之间存在竞争关系。因此水资源的优化配置和水利工程的联合调度属于典型的多目标、多约束的复杂系统决策问题。以非支配排序遗传算法、强度帕累托进化算法为代表的多目标进化算法,可以求出这类问题的帕累托最优前沿,揭示不同目标之间的权衡关系。在此基础上,用多属性决策理论来决定满足的方案。系统优化方法在水库群联合调度、跨流域调水工程运行中起到关键的作用,利用建立起来的系统化仿真优化模型,在满足各种约束条件的基础上,可以达到最大化整体综合效益的目的^[2]。经过实践证明,科学的优化调度可以大大提高水资源系统的供水保证率、发电效益,还可以兼顾下游的生态用水需求,实现经济、社会、生态效益的协调统一。

3 智能决策支持系统与风险管理

3.1 数字孪生驱动的智慧管理平台

数字孪生技术给水利工程精细化、智能化的管理开辟了新的道路。该技术把建筑信息模型、地理信息系统、物联网传感网络、核心机理模型、数据分析算法融合在一起,创建起与物理实体动态同步、双向交互的虚拟映射系统。在工程管理实践当中,这类平台可以实时地汇集大坝结构安全、库区水文气象、流域用水需求等诸多动态的数据,并且促使水动力学、结构力学这些专业模型实施即时的仿真以及预测性推演。这就使管理人员可以对工程运行状态做持续的健康诊断、异常辨识、风险预警。大型水利枢纽依靠数字孪生综合管控系统,可以有效地实现防洪、兴利、生态等多目标调度,并且可以模拟预演极端灾害情景,从而大大提高决策的科学性、前瞻性、主动性。

3.2 水文风险的精细化量化评估

在全球气候变暖的大背景之下,极端水文事件发生的频率和强度呈上升趋势,因此系统性风险管理就变得非常重要。风险量化就是对灾害形成链条进行分析,考虑致灾因子发生概率、承灾体的空间暴露程度和固有的脆弱性水平。利用先进的概率统计的方法,例如 Copula 函数,可以刻画暴雨、洪峰等多种致灾因素联合分布的关系;借助蒙特卡洛等随机模拟方法,就可以得到大量的符合统计规律的可能极端事件情景集。这些工作给科

学复核水利工程设计标准、客观评价其目前和未来防洪抗旱能力提供定量分析的基础和依据。

3.3 基于预警预报的应急响应体系

建立高效的应急管理体系是风险防控的最后一环,它的实现要依靠准确的预警预报和科学的决策调度。现代预警系统把气象数值预报和分布式水文模型有机地结合起来,发展耦合预报技术,目的在于提高山洪、中小河流洪水和城市内涝等灾害的预见期,同时提高预报的时空精度。应急响应时的地理信息系统、物联网实时监测、多源信息融合、智能路径优化算法组成了指挥调度平台的主要部分。该类系统可以动态地评估灾情,并可视化展示出来,可以智能地生成出人员避险转移和抢险资源调配的最佳方案,极大地提高了灾害应对的协同效率和处置效果,最大程度地保障了人民生命财产安全^[3]。

4 水利工程规划阶段的水文水资源论证

4.1 水资源长期供需态势与承载阈值分析

规划阶段的水资源论证为工程合理性打下基础。论证工作要系统地评价规划水平年在气候变化、流域用水演变等众多因素共同影响下的来水情势,科学预测区域生活、生产、生态的需水总量及过程。根据分布式水文模型和未来气候情景,可以对水资源量的长期变化趋势进行预测。同时需要定量评估区域水资源承载力,确定工程取水量的上限,保证开发利用强度不超过水资源可持续利用阈值,论证时需要全面考虑丰水期、平水期、枯水期等不同来水频率情况下供需平衡的状态。

4.2 基于水文计算的关键工程参数确定

水文分析和计算是确定工程规模及主要参数的主要技术支撑。对长系列历史水文资料进行频率分析,可以得到满足设计标准的设计洪水和径流系列。在此基础上进行径流调节计算,就可以科学地确定水库的正常蓄水位、死水位、防洪库容、兴利库容等主要工程参数。施工期设计洪水、水库回水、泥沙淤积等专项水文计算直接关系到工程枢纽布置、施工导流方案和水库淹没处理范围,是工程设计不可缺少的输入。

4.3 多目标协同的选址与规模决策支持

工程选址和规模的最终确定要依靠多方案的综合比较。用水动力、泥沙、水质等数学模型来模拟不同的工程布局方案对上下游洪水位、流场结构、河床演变、生态环境的综合影响。建立包含经济、社会、生态环境等各方面指标的评价指标体系,用多目标决策分析的方

法,对各个方案效益、成本、风险及影响做量化权衡。最后从技术可行、经济合理、社会可接受、环境影响等各方面综合考虑,选择出综合效益最大、风险最小的推荐方案。

5 水利工程建设与运行期的水文水资源管理

5.1 施工期的水文安全保障

在工程建设的时期,水文预报和实时监测对保证施工的安全起着非常重要的作用。对施工导流、围堰防护等环节做精细化、短历时的高频次水文预报。建立施工区水情自动监测预警系统,随时掌握水位、流量的变化情况,给突发性洪水的应对提供决策支持,保证施工人员、设备的安全^[4]。同时要控制施工期废污水的排放,监测其对下游水质的影响,采取环境保护措施。

5.2 运行期的优化调度与适应性管理

工程投入使用以后,主要任务就是根据实时的水文信息以及预报进行优化调度。包括:根据中短期水文气象预报制定发电计划、供水计划和防洪预泄方案;在汛期根据雨情、水情发展动态调整防洪调度指令,在保证防洪安全的基础上尽可能实现洪水资源化利用。在枯水期需要协调各用水部门的矛盾,保证生活用水和基本生态用水优先。应对气候变化带来的不确定性,应该加入适应性管理理念,对调度规则进行滚动修订,根据长期水文情势的变化和新的需求来调整工程运行方式。

6 生态水文调控与工程可持续运行

6.1 生态流量保障与调度

维护河流健康属于水利工程可持续运行的重要内涵。确定并保证适合的生态流量(基流、脉冲性洪水等)。采用水文学法、水力学法、生境模拟法等确定各个河段、不同时期的生态流量过程线。在水库调度中把生态流量目标当作硬性约束或者优化目标,通过优化泄流过程,模拟自然水文情势,满足下游水生生物繁殖、迁徙、河道形态维持等基本生态需求^[5]。生态调度实践,如三峡水库进行生态调度试验促进鱼类自然繁殖已经取得较好的成效。

6.2 水环境效应调控

水利工程建设与运行会改变河流原有的水文情势,从而对水温、水质、泥沙输移、营养物质通量等造成复杂的影响。需要监测、模型模拟来评价这些影响。

在调度中可采取相应的措施来调节,分层取水设施可以缓解水库下泄低温水对农业灌溉、鱼类的影响,优化泄流时间和方式,促进库区水体交换、改善水质,多沙河流采用调水调沙等调度方式,协调水沙关系,减少库区淤积、冲刷下游河道。

7 结论与展望

7.1 结论

水文水资源管理现代化发展,把水利工程全生命周期的决策方式系统地重新构造起来。核心就是建立天地协同的立体化监测网络,实现水循环要素的全域实时感知,依靠机理模型和大数据驱动的融合模拟,提高对复杂水系统的解析预见能力,集成数字孪生和智能算法来建立决策支持系统,大大增强调度和风险应对的精准响应。经过实践检验,这一感知、模拟、决策的闭环技术体系,成为应对气候变化和高强度人类活动双重挑战、实现水资源综合效益优化的关键支撑,效能提高要依靠技术链路系统整合与深化。

7.2 展望

未来的水文水资源管理要从三个方面寻找突破,从理论上讲要攻克变化环境下极端水文、生态水文、地下水循环等关键过程的模拟机理难题,降低不确定性。从技术上来说,把人工智能、新型传感、数字孪生同传统水文模型深度融合,发展出新一代智能水管理工具。从机制上加快创建全要素的国家水网监测体系、标准化模型平台、开放的数据环境,同时推进适应智慧管理要求的专业人才培养、技术标准、协同机制建设,给水安全战略实施提供坚实支撑。

参考文献

- [1]唐成勇,胡家彬,汪洋.水文水资源管理在水利工程中的应用研究[J].水上安全,2025,(19):94-96.
- [2]臧冬伟,王璐,徐明,等.水文监测数据在水资源管理中的应用策略研究[J].水上安全,2025,(19):100-102.
- [3]冯文娟.河流水文过程变化对水资源调配的影响研究[J].水上安全,2025,(18):130-132.
- [4]高阳.水文水资源标准化管理在水利工程中的实践应用研究[J].水上安全,2025,(17):30-32.
- [5]高阳.水文水资源管理在水利工程除险加固过程中的应用分析[J].水上安全,2025,(15):141-143.

阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期积雪参数与洪水特征的关联性研究

钟超

新疆维吾尔自治区阿勒泰水文勘测中心, 新疆阿勒泰, 836500;

摘要: 针对阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期内, 洪水灾害频发, 且灾害成因与积雪状态动态变化关联极为紧密的问题, 专项开展积雪参数与洪水特征的关联性研究。通过明确积雪参数对洪水特征的影响路径与内在规律, 为该区域融雪洪水的前期预判与主动防控工作提供科学依据, 进而保障区域生态系统的稳定发展, 维护居民生产生活的安全有序。

关键词: 阿勒泰地区; 阿尔泰山脉; 融雪期; 积雪参数; 洪水特征; 关联性

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.022

引言

阿勒泰地区阿尔泰山脉地处高纬度、高海拔的特殊地理区域, 该区域的融雪期以春季为主要时段。在这一时期, 山地积雪的逐步消融, 既是区域地表水资源与地下水资源补给的重要来源, 同时也是引发融雪型洪水灾害的核心诱因, 二者呈现出相互关联又相互制约的关系。基于这样的区域现状与现实需求, 开展阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期积雪参数与洪水特征的关联性研究, 对提升该区域融雪洪水的综合防控能力, 具有重要的科学意义与实践价值。

1 阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期核心积雪参数梳理

1.1 积雪厚度与分布范围

积雪厚度是量化积雪总量、评估积雪资源规模的基础参数, 其数值大小直接反映积雪的积累程度。在阿尔泰山脉融雪期内, 受地理条件差异影响, 不同海拔高度、不同坡向区域的积雪厚度, 呈现出显著的空间异质性。其中, 高海拔区域因气温更低、积雪消融更慢, 积雪厚度普遍大于低海拔区域; 阴坡因日照时间短、接收太阳辐射少, 积雪厚度也优于日照充足、辐射较强的阳坡, 这种厚度差异直接决定了区域内积雪的总储量规模。积雪分布范围则用于表征积雪覆盖的空间广度, 其覆盖形态与范围大小, 主要受地形条件(如山地起伏、河谷走向)与区域气候特征的共同制约, 在阿尔泰山脉区域整体呈现“山地密集、河谷稀疏”的典型特征。

1.2 积雪密度与含水率

积雪密度指单位体积内积雪所具有的质量, 是衡量

积雪紧实程度与含水量潜力的关键指标。进入阿尔泰山脉融雪期后, 随着气温逐步回升, 原本松散的积雪会在温度作用下逐步压实, 积雪密度也随之逐步升高。积雪密度与融水量存在直接关联, 密度越大, 单位厚度积雪中包含的固态水量越多, 积雪消融后可转化的液态水量也相应越多, 进而直接影响积雪的整体消融速率。积雪含水率则特指积雪中液态水所占的比例, 是反映积雪消融进程的重要参数。在融雪期前期, 气温回升幅度较小, 积雪消融程度较轻, 含水率普遍处于较低水平; 进入融雪期后期, 气温持续升高, 积雪消融进程不断加剧, 积雪中的液态水占比也随之升高。

1.3 积雪消融速率

积雪消融速率是指单位时间内, 积雪厚度减少的数值或积雪储量降低的规模, 是衔接积雪参数与洪水形成的核心桥梁参数, 直接决定了融雪径流的产生节奏。在阿尔泰山脉融雪期内, 积雪消融速率的变化并非恒定, 其数值大小主要受三大因素影响: 一是气温条件, 气温水平与消融速率呈正相关, 气温越高, 积雪吸收的热量越多, 消融速率就越快; 二是光照条件, 阳坡因日照时间长、光照强度充足, 积雪吸收的辐射热量多于阴坡, 消融速率也显著高于阴坡; 三是风力作用, 适度的风力可加速积雪表面的热量交换与水分蒸发, 对积雪消融起到辅助推动作用。

2 阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期洪水核心特征分析

2.1 洪水发生时间特征

阿勒泰地区阿尔泰山脉的融雪洪水, 其发生时间并非随机, 而是具有显著的季节性与规律性, 整体集中于

春季积雪消融最为旺盛的时段,这一规律与区域气温回升、积雪消融的周期高度契合。该区域融雪洪水的具体发生时间,并非固定不变,而是受当年春季气温回升速度的直接影响:若当年气温回升速度较快,积雪消融进程会相应提前,融雪洪水的发生时间也会随之提前;若当年气温回升速度平缓,无明显骤升现象,积雪消融进程则会放缓,洪水发生时间也会相应推迟。此外,若在融雪期内叠加降雨天气,会打破洪水发生的常规时间规律,形成“融雪+降雨”的复合型洪水,这种洪水不仅会导致洪水发生时间进一步提前,还会延长洪水的整体持续时长,增加灾害应对难度。

2.2 洪水流量与峰值特征

在阿尔泰山脉融雪期内,融雪洪水的流量变化呈现“渐进增长、骤降缓慢”的典型过程特征,这一特征与积雪消融的节奏高度同步。在融雪初期,气温回升幅度有限,积雪消融速度较慢,地表径流量增长平缓,洪水流量也随之逐步上升,增长过程较为温和;进入融雪旺盛期,气温大幅升高,积雪消融速度达到峰值,地表径流量快速累积,洪水流量也随之快速增长至最大值,即洪水峰值,峰值流量的大小可直接反映洪水灾害的强度等级,峰值越高,灾害破坏力越强;进入融雪后期,区域内积雪储量因持续消融而大幅减少,地表径流量逐步降低,洪水流量也随之逐步下降,且流量下降的过程相较于增长过程更为缓慢,这一特点直接导致融雪洪水的整体持续时间较长,对区域的影响周期也相应延长。若在融雪期内叠加降雨,雨水会直接补充地表径流,使洪水流量峰值大幅升高,同时缩短峰值出现的时间,加剧洪水灾害的强度。

2.3 洪水影响范围特征

阿尔泰山脉融雪期洪水的影响范围,并非均匀分布,而是主要受区域地形条件与积雪分布格局的双重制约,整体呈现“核心区域集中、周边区域分散”的特征,其核心影响区域集中于阿尔泰山脉的山麓地带及河谷沿线地带。其中,山麓地带因地势相对平缓,且是周边山地积雪消融径流的主要汇集区域,径流在此集中后易形成大范围洪水,影响范围较广;河谷地带虽有河道作为径流疏导通道,但受河道宽度、深度及淤积情况限制,疏导能力存在上限,当径流量超出河道疏导能力时,洪水易漫溢至河道两侧,影响周边的天然草地、农田耕地及居民聚居点。而高海拔山地区域,因人口分布稀少、人类活动痕迹较少,且地表植被以耐寒草原为主,洪水在此区域的影响范围相对较小,主要对区域内的生态系

统(如草原植被、土壤结构)产生影响,对人类生产生活的直接威胁较低。

3 阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期积雪参数与洪水特征的关联机制

3.1 积雪厚度、分布范围与洪水流量、影响范围的关联

积雪厚度与洪水流量之间,存在显著的正相关关系,二者变化趋势高度一致。当积雪厚度越大时,区域内积雪的总储量相应越多,在相同消融速率条件下,积雪消融后可形成的地表径流量也随之增大,进而推动洪水流量持续上升,洪水峰值也会相应升高,洪水灾害的潜在强度随之增强;反之,当积雪厚度较小时,区域积雪总储量有限,融雪后形成的径流量也相对较少,洪水流量与峰值则会相应偏低,灾害强度也随之减弱。积雪分布范围与洪水影响范围之间,同样存在紧密的关联,二者的空间匹配度较高。当积雪分布范围越广,尤其是在山麓地带与河谷周边区域的积雪覆盖面积较大时,融雪后地表径流的汇水面积会随之扩大,径流汇集量也相应增多,洪水漫溢的范围会进一步拓宽,灾害影响的区域也随之扩大;若积雪分布主要集中于高海拔山地,受地形限制,融雪径流难以大范围汇集成灾,洪水影响范围则会受到明显限制,灾害影响程度也相应降低。

3.2 积雪密度、含水率与洪水峰值、发生时间的关联

积雪密度、积雪含水率与洪水峰值之间,均呈现正相关关系,二者共同决定洪水峰值的高度与出现节奏。当积雪密度较高、含水率较大时,单位体积积雪中包含的总水量(固态+液态)更多,且其中液态水占比高,积雪消融后可快速转化为即时地表径流,无需额外的固态水融化时间,这会显著加快地表径流量的增长速度,不仅使洪水峰值的数值大幅升高,还会缩短峰值从开始形成到达到最大值的时间,即峰值出现时间提前。此外,若在融雪期内,积雪密度与含水率未按常规节奏变化,而是出现提前升高的情况,会直接推动积雪消融进程整体提前,进而导致融雪洪水的发生时间也相应提前;同时,高密度、高含水率的积雪消融速度快、持续时间短,也会使洪水峰值的持续时长相应缩短,最终形成“高峰值、短持续”的特殊洪水特征,增加洪水灾害的突发性。

3.3 积雪消融速率与洪水流量变化、峰值时间的关联

积雪消融速率是影响洪水流量变化趋势、决定洪水

流量动态特征的核心驱动因素,其变化直接主导洪水的形成节奏。当积雪消融速率较快时,单位时间内可转化的液态水量大幅增加,地表径流量也随之快速增长,洪水流量会呈现“快速上升”的趋势,洪水峰值的出现时间也会相应提前,且峰值流量的数值会更高,洪水灾害的突发性和强度也随之增强;当积雪消融速率保持平缓时,单位时间内转化的液态水量稳定且有限,地表径流量增长速度缓慢,洪水流量也呈现“缓慢上升”的趋势,洪水峰值的出现时间会相应推迟,峰值流量的数值也偏低,灾害风险相对较低。在阿尔泰山脉融雪期内,气温骤升是导致积雪消融速率突然加快的主要诱因,这种骤升会引发“突发性峰值”,洪水流量在短时间内急剧升高,灾害应对难度极大;而若气温保持持续温和的回升趋势,积雪消融速率会维持在稳定水平,洪水流量变化也相应平缓,峰值持续时长会进一步延长,可大幅降低洪水的突发风险,为灾害应对预留充足时间。

4 阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期积雪参数与洪水特征关联研究的实践应用价值

4.1 为融雪洪水预判提供科学依据

掌握阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期积雪参数与洪水特征的关联机制,可构建“积雪参数监测-洪水特征预判”的联动体系,为融雪洪水的前期预判提供坚实的科学依据。通过部署专业监测设备,实时跟踪积雪核心参数(如积雪厚度、积雪消融速率等)的动态变化数据,结合二者的关联规律,可精准推算出融雪洪水的发生时间、预测洪水流量峰值的大致数值,以及洪水可能影响的空间范围,有效避免传统预判方式中存在的滞后性问题。这些预判结果可直接为区域防汛管理部门提供决策支撑,助力其提前制定针对性的防汛计划,科学调配防汛物资(如沙袋、抽水设备)与防汛人员,大幅提升融雪洪水预判工作的精准度与前瞻性,为后续防控工作奠定基础。

4.2 助力优化洪水防控措施

基于积雪参数与洪水特征的关联规律,可打破“一刀切”的传统洪水防控模式,实现防控措施的精准化与差异化优化。在实际防汛工作中,若通过监测发现区域内积雪厚度偏大、积雪分布范围较广,结合关联规律可预判洪水流量与影响范围会相应增大,此时可提前开展河谷堤防加固工程,修补堤防薄弱部位,同时清理河道内的淤积物(如泥沙、杂物),提升河道的洪水疏导能力,减少洪水漫溢风险;若监测数据显示积雪消融速率

突然加快,结合关联规律可预判洪水峰值会提前出现且强度较高,此时可优先组织山麓及河谷周边居民的转移工作,同步搬运粮食、农机等重要物资,最大限度减少洪水灾害造成的人员伤亡与财产损失,实现“因参数施策、因风险防控”的优化目标。

4.3 保障区域生态与生产生活安全

依托阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期积雪参数与洪水特征关联研究的成果,可提升融雪洪水防控的精准性与有效性,进而从生态保护与民生保障两个维度,为区域发展提供安全支撑。在生态保护层面,精准的洪水防控可减少洪水对区域河谷天然草地、农田耕地的冲刷与淹没,避免植被退化、土壤侵蚀等生态问题,保护阿尔泰山脉山麓区域生态系统的结构稳定与功能完整,维护区域生态平衡;在民生保障层面,通过前期精准预判与及时防控措施,可有效避免洪水对居民聚居点的威胁,保障居民的生命安全与房屋、财产安全;同时,稳定的防汛效果可为区域农业生产(如春耕播种、作物生长)与畜牧业发展(如草场利用、牲畜放牧)提供稳定的环境,减少洪水灾害对生产活动的干扰,推动区域生态保护与经济发展的协调统一。

5 结语

阿勒泰地区阿尔泰山脉融雪期积雪参数与洪水特征的关联性研究,从实际价值来看,该研究既能够保障阿尔泰山脉周边区域生态系统的稳定发展,也能够维护居民生产生活的安全有序,为该区域科学应对融雪洪水灾害、实现生态保护与经济发展协同推进的可持续发展目标,提供有力支撑。

参考文献

- [1] 张良祥, 张建楠. 冰天雪地转化成金山银山的产业发展途径: 以黑龙江省冰雪装备设备为例[J]. 知与行, 2017(10): 50-59.
- [2] 吴天明. 我国冰雪产业发展路径选择[J]. 冰雪运动, 2018(03): 41-47.
- [3] 王帅, 陈洪. 新质生产力赋能冰雪产业高质量发展研究[J]. 沈阳体育学院学报, 2024, 43(04): 110-116+130.
- [4] 郭晓雨, 张慧妍, 李新月. 黑龙江省冰雪旅游产业结构升级路径研究[J]. 对外经贸, 2024, (06): 100-103.
- [5] 袁沫汐, 文佐时, 何利杰, 李鑫鑫, 赵林. 中国温带草地物候对气候变化的响应及其对总初级生产力的贡献[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 354-376.

农业节水灌溉智能控制系统改造实践

方鑫

彭阳县水务局，宁夏回族自治区固原市，756500；

摘要：本文聚焦农业节水灌溉智能控制系统改造实践，以彭阳县水务局的工作为背景，深入探讨了改造的必要性、关键技术、实施步骤及应用效果。通过对传统灌溉系统存在问题的分析，阐述了智能控制系统改造的重要意义。详细介绍了传感器技术、通信技术、自动控制技术等改造中的应用，以及系统改造的具体流程。经实践验证，改造后的智能控制系统有效提升了水资源利用效率，降低了灌溉成本，为农业可持续发展提供了有力支持。

关键词：农业节水灌溉；智能控制系统；系统改造；水资源利用

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.023

引言

农业作为用水大户，其灌溉用水效率直接关系到水资源的可持续利用。传统农业灌溉方式存在水资源浪费严重、灌溉均匀性差等问题，已难以满足现代农业发展的需求。随着信息技术的飞速发展，智能控制系统在农业节水灌溉领域的应用成为解决上述问题的有效途径。彭阳县水务局积极响应国家节水号召，开展农业节水灌溉智能控制系统改造实践，旨在提高水资源利用效率，促进农业现代化发展。

1 传统农业节水灌溉系统存在的问题

1.1 灌溉效率低下

传统灌溉系统多采用人工操作或定时控制，无法根据作物实际需水情况进行精准灌溉。在灌溉过程中，往往存在过度灌溉或灌溉不足的现象，导致水资源浪费严重，同时也影响作物生长。例如，一些地区采用大水漫灌的方式，水分在田间大量蒸发和渗漏，实际被作物吸收利用的水量仅占灌溉总量的30%-40%。

1.2 缺乏实时监测

传统灌溉系统缺乏对土壤水分、作物生长状况等信息的实时监测手段，管理人员难以准确把握田间实际情况。这使得灌溉决策只能基于经验判断，缺乏科学性和准确性。当遇到干旱或降雨等特殊天气情况时，无法及时调整灌溉方案，容易导致作物受灾。

1.3 自动化程度低

传统灌溉系统的操作主要依赖人工，劳动强度大，且容易出现操作失误。例如，在大型农田中，人工开启和关闭灌溉设备需要耗费大量时间和精力，而且很难保证灌溉的均匀性。此外，人工操作也无法实现对灌溉过程的精确控制，难以满足现代农业精细化管理的要求^[1]。

2 农业节水灌溉智能控制系统改造的必要性

2.1 提高水资源利用效率

水资源是农业生产不可或缺的重要资源，而提高水资源利用效率一直是农业发展中的重要课题。农业节水灌溉智能控制系统在这方面发挥着不可替代的作用。该系统能够实时收集土壤水分、气象条件等多方面的数据，通过这些数据精准分析作物在不同生长阶段的需水量。基于这样的分析结果，系统可以自动对灌溉量和灌溉时间进行调整，从根本上避免了传统灌溉方式中常见的水资源浪费现象。传统灌溉往往凭借经验进行，要么灌溉不足影响作物生长，要么灌溉过量导致水资源流失，而智能控制系统的应用则完美解决了这一问题。通过这种精准的灌溉方式，水资源的利用效率能够得到显著提升，通常可以达到70%至80%的水平，这在很大程度上减少了农业生产过程中的用水消耗。尤其是在一些水资源相对匮乏的地区，这种高效的水资源利用方式更是保障农业生产持续进行的重要支撑，让每一滴水都能在作物生长过程中发挥最大的作用。

2.2 提升农业生产效益

农业生产效益的提升是每个农业从业者追求的目标，而农业节水灌溉智能控制系统的改造和应用在这一过程中扮演着重要角色。智能控制系统的投入使用，让灌溉工作实现了自动化和精准化的转变。不再需要人工手动操作灌溉设备，系统能够根据作物的生长需求自动完成灌溉任务，而且每一次灌溉都能精准地满足作物对水分的需求。这种精准的灌溉方式为作物创造了适宜的生长环境，让作物在每个生长阶段都能获得充足且不过量的水分，从而有效促进作物的生长发育。作物生长状况良好，其产量自然会有所提高，同时品质也能得到改善，比如果实的口感、营养成分等都会更优。除此之外，自动化的灌溉方式大大减少了人工投入，降低了人工操

作成本。而且,智能控制系统在运行过程中对灌溉设备的能耗控制更为合理,避免了不必要的能源浪费,进一步降低了农业生产的成本。成本的降低与产量、品质的提升相结合,使得农业生产的经济效益得到了显著提高,让农业从业者获得了更多的收益。

2.3 推动农业现代化发展

农业节水灌溉智能控制系统在现代农业信息化进程中占据关键位置,对转变农业生产模式作用显著,能让农业管理更趋智能与精细。将这一系统与其他农业信息技术融合运用,可全方位监测农田环境,还能对相关条件进行合理调控,为农业的可持续发展筑牢根基^[2]。

在农业现代化推进过程中,这类智能控制系统的改造与落地,是改变传统耕作方式的重要抓手。它突破了过去粗放式管理的局限,通过精准的数据分析和自动化操作,让灌溉、施肥等环节更贴合作物生长需求,既提高了生产效率,又减少了资源浪费。

把该系统与土壤监测、气象预警等技术结合,能构建起覆盖农田全周期的管理网络。实时掌握土壤墒情、作物长势等信息,及时调整生产策略,不仅能降低自然风险对农业生产的影响,还能推动农业生产朝着更科学、更环保的方向发展,为农业现代化的长远发展注入持续动力。

3 农业节水灌溉智能控制系统改造的关键技术

3.1 传感器技术

传感器是智能控制系统获取田间信息的关键设备,主要包括土壤水分传感器、气象传感器、作物生长传感器等。土壤水分传感器能够实时监测土壤含水量,为灌溉决策提供准确数据;气象传感器可监测气温、湿度、光照、风速等气象参数,帮助系统根据气象条件调整灌溉策略;作物生长传感器则可以监测作物的株高、叶面积等生长指标,进一步优化灌溉方案^[3]。

3.2 通信技术

通信技术用于实现传感器与控制中心之间的数据传输,确保系统能够实时获取田间信息并进行远程控制。常用的通信技术包括有线通信和无线通信。有线通信具有稳定性高、抗干扰能力强等优点,但施工难度大、成本高;无线通信则具有安装方便、灵活性强等特点,如 ZigBee、GPRS、LoRa 等无线通信技术在农业节水灌溉智能控制系统中得到了广泛应用。

3.3 自动控制技术

自动控制技术是智能控制系统的核心,通过对传感器采集的数据进行分析和处理,实现对灌溉设备的自动

控制。控制系统可以根据预设的灌溉策略,自动开启或关闭水泵、阀门等灌溉设备,调节灌溉流量和压力,确保灌溉的精准性和均匀性。同时,系统还具备故障诊断和报警功能,能够及时发现和处理灌溉设备的故障,保障系统的正常运行^[4]。

4 农业节水灌溉智能控制系统改造的实施步骤

4.1 系统规划与设计

启动改造前,需对农田展开全面勘察。了解地形是平原、丘陵还是山地,明确土壤类型及保水、渗透性能,掌握作物种植布局与生长阶段特点。这些数据是制定改造方案的基础。

结合农业生产需求规划方案时,要确定传感器安装位置与数量,确保能精准采集土壤墒情、空气温湿度等数据;依据作物类型和土壤条件选择灌溉设备,确定安装点位以保证灌溉均匀;根据农田情况设计通信网络拓扑结构,选择合适通信技术保障数据传输;依据作物需水规律等制定控制策略;挑选性能、兼容性和稳定性达标的硬件与软件平台。

4.2 设备安装与调试

设备安装严格按设计方案进行。土壤墒情传感器按土壤类型确定埋设深度,空气温湿度传感器装在通风、无阳光直射处,灌溉设备对准作物根部且接口密封,通信设备选在信号好的位置并做好防护^[5]。

安装中,施工人员要检查接线、线路布置和设备固定情况。安装完成后全面调试,测试传感器数据准确性,检验通信系统 24 小时以上的稳定性,查看控制设备运行是否符合设定。及时解决调试中出现的问题。

4.3 系统集成与测试

将各子系统集成,统一接口、数据格式和通信协议,搭建通信平台实现传感器、通信设备与控制中心的互联互通。

集成后进行全面测试,包括功能测试,检查数据采集、远程控制等功能是否正常;性能测试,看系统在大量数据传输和多设备运行时能否满足需求;可靠性测试,模拟恶劣环境和长时间运行检验稳定性。还需模拟不同灌溉场景,验证系统灌溉策略的合理性与控制准确性,优化改进发现的问题。

4.4 人员培训与系统交付

对系统管理人员和操作人员开展培训。向管理人员传授系统架构、软件操作、数据管理和异常处理知识;教操作人员系统日常操作、设备维护及故障处理技巧,如清理传感器、检查接口、排查线路问题等。

培训采用理论加实操的方式,结束后进行考核。考核合格后交付系统,提供完整资料并现场演示,完成手续后系统正式投入使用,技术人员初期定期回访,保障系统顺利运行。

5 农业节水灌溉智能控制系统改造的应用效果

5.1 水资源节约效果显著

就水资源节约而言,改造后的智能控制系统凭借精准灌溉的优势,从根本上改变了传统灌溉方式中水资源浪费严重的问题。通过对彭阳县多个农田区域的长期监测,相关数据清晰地表明,相较于过去的灌溉模式,这套智能控制系统能够让水资源的消耗量减少三成到五成。这种显著的节水效果,不仅缓解了农业生产中水资源紧张的局面,更极大地提升了每一滴水在农业生产中的利用价值,让有限的水资源发挥出了更大的作用。

5.2 作物产量和品质提升

在作物生长方面,精准灌溉模式为各类作物营造了更为适宜的生长条件,有力地推动了作物的生长进程。采用智能控制系统后,作物在株高增长、叶面积扩展以及根系发育等多个生长维度上,都展现出了明显优于传统灌溉方式的态势。良好的生长状态直接带动了作物产量与品质的双重提升。以某块试点农田为例,种植的小麦在产量上实现了百分之十到十五的增长,而且产出的农产品在品质上也有了明显改善,口感、营养成分等方面都更符合市场需求,这使得这些农产品在市场竞争中占据了更有利的位置,受到了消费者和收购商的青睐。

5.3 降低劳动强度和成本

智能控制系统的应用,还在很大程度上减轻了农户的劳动负担,同时降低了农业生产的整体成本。由于系统实现了自动化运行,原本需要人工完成的大量灌溉操作被机器所替代,农户无需再像以前那样频繁地进行人工浇水、开关设备等工作,劳动强度得到了有效缓解。不仅如此,系统的精准控制能力,让灌溉设备的运行更加高效,减少了不必要的能源消耗,同时也降低了设备因不当使用而造成的损坏概率,使得设备维护方面的支出有所减少。从实际统计情况来看,引入智能控制系统之后,单是灌溉环节的人工费用就降低了一半以上,再加上设备维护成本的下降,整体农业生产成本得到了有效的控制,让农户在生产过程中获得了更多的实惠。

这些变化不仅体现在具体的数字上,更深入地改变了农业生产的模式。水资源的高效利用,让农业生产更

加可持续,即使在水资源相对短缺的地区,也能通过科学的灌溉方式保障作物生长;作物产量和品质的提升,直接提高了农业生产的经济效益,增强了农业产业的竞争力;而劳动强度和成本的降低,则让更多农户从繁重的体力劳动中解放出来,有更多精力去学习先进的农业技术,进一步推动农业生产向智能化、精细化方向发展。可以说,农业节水灌溉智能控制系统的改造应用,是农业发展历程中的一次重要进步,为实现农业高质量发展奠定了坚实基础。

6 结论与展望

6.1 结论

彭阳县水务局开展的农业节水灌溉智能控制系统改造实践取得了显著成效。通过对传统灌溉系统的改造,引入先进的传感器技术、通信技术和自动控制技术,实现了灌溉的精准化、自动化和智能化。改造后的系统有效提高了水资源利用效率,提升了作物产量和品质,降低了劳动强度和成本,为农业可持续发展提供了有力保障。

6.2 展望

尽管农业节水灌溉智能控制系统改造取得了一定的成果,但仍存在一些问题需要进一步解决。例如,传感器的精度和可靠性有待提高,通信网络的覆盖范围和稳定性需要加强,系统的智能化水平还需进一步提升。未来,应加大对农业节水灌溉智能控制系统的研发投入,不断完善系统功能,提高系统的性能和可靠性。同时,加强与其他农业信息技术的融合,实现农业生产的全面智能化管理,为农业现代化发展做出更大贡献。

参考文献

- [1]丁宝民.智能化节水灌溉技术在农田水利工程中的应用研究[J].水上安全,2025,(07):93-95.
- [2]韩立美,张英伟.数字化在农业水利工程中的应用[J].中国信息界,2023,(06):24-26.
- [3]陈井根.现代农业机械化在农业种植技术中的作用与应用分析[J].农业开发与装备,2025,(06):182-184.
- [4]李雪艳.基于信息化技术的农田灌溉工程建设管理优化措施与要点[J].南方农机,2025,56(10):188-190.
- [5]李惠钧,李双冰.基于移动互联网的智能灌溉系统设计与开发[J].山西农经,2017,(23):114.

农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理

周志兴

内蒙古河套灌区水利发展中心乌拉特分中心, 内蒙古巴彦淖尔, 015000;

摘要: 农田水利工程是保证农业生产稳定、提高水资源利用效率的重要基础设施, 渠道作为水资源输送的主要载体, 其设计是否科学、施工是否规范直接关系到整个工程的效果。本文主要研究农田水利渠道设计与施工管理的技术细节, 从渠道线路选型、断面设计、防渗设计等设计环节, 施工准备、基础处理、主体施工、质量控制等施工管理环节进行深入分析, 加入现行规范中少量数据, 为提高农田水利渠道工程建设质量提供技术参考。

关键词: 农田水利; 渠道设计; 施工管理; 技术细节; 防渗处理

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.024

引言

农田水利渠道工程担负着灌溉用水输送、排水防涝等任务, 建设质量好坏直接影响到农业生产灌溉保障能力以及水资源合理调配。目前我国农田水利工程建设逐渐向精细化、标准化方向发展, 现行《灌溉与排水工程设计标准》(GB 50288-2018) 对渠道设计与施工的技术参数、质量要求做了明确的规定。在实际工程中, 渠道设计细节偏差或施工管理疏忽都会引起渠道渗漏、坍塌、淤积等问题, 不仅会降低水资源利用率, 还会增加工程维护成本。因此, 对渠道设计及施工管理的关键技术细节进行深入剖析, 落实现行规范的要求, 对提高农田水利工程的效益有重要的现实意义。

1 农田水利渠道设计的关键技术细节

渠道设计是工程建设的前提, 要根据区域地形地貌、水文地质、灌溉需求等实际情况, 准确把握各个环节的技术要点, 保证设计方案的可行性、经济性。

1.1 渠道线路选型细节

线路选型直接影响渠道输水效率及工程投资, 主要原则为短、直、平, 避开不良地质区域, 减少工程量及后期维护难度^[1]。在细节控制上首先要对区域地形进行精确测量, 用 1:500 的地形测量比例尺来保证测量数据的准确性, 为线路优化提供基础依据。平原地区渠道线路应尽量沿等高线布置, 避免坡度过大引起水流冲刷渠道; 丘陵山区应优先利用自然地形, 采用隧洞、渡槽等交叉建筑物连接, 深挖段深度不宜超过 5m, 高填段高度不宜超过 3m, 超过需要做专项稳定性验算。同时线路要避开软土、沼泽、断层等不良地质区, 如果不能避

开, 则在设计中要明确地基处理方案, 如换填垫层、夯实加固等。此外, 渠道线路要靠近灌溉区, 缩短输水距离, 减少输水损失, 一般要求渠道末端到最远灌溉地块的距离不超过 500m, 保证灌溉及时。

1.2 渠道断面设计细节

农田水利渠道常用的断面形式包括梯形、矩形、复式及阶梯形等, 不同形式各有适用场景。梯形断面因施工简便、适应地形能力强, 广泛应用于土质渠道, 其边坡系数需严格按土质与水深分级确定, 水深 $\leq 3\text{m}$ 的挖方渠道可参考规范标准选用最小边坡系数, 如稍胶结的卵石土质无论水深多少均为 1.00, 黏土、重壤土在水深 $< 1\text{m}$ 和 $1\sim 2\text{m}$ 时为 1.00, 水深 $2\sim 3\text{m}$ 时为 1.25, 轻壤土、沙壤土则需提升至 1.50~1.75, 沙土更需达到 1.75~2.25; 若水深 $> 3\text{m}$ 或地下水位较高, 需通过稳定分析计算确定边坡系数, 机械开挖或寒冷地区渠道可按规范数值或稳定分析结果选用, 刚性衬砌渠道边坡系数可小于衬砌前土质稳定系数。矩形断面适用于地形狭窄或岩石地基区域, 其优点是断面紧凑、输水效率高, 但对地基承载力要求较高, 需在底部设置防滑垫层, 避免侧向位移。深挖方渠道宜采用复式或阶梯形断面, 渠底以上每隔 $5\text{m}\sim 10\text{m}$ 应设宽度不小于 1.0m 的马道, 边坡系数需经稳定分析确定, 堤顶以下边坡设计安全系数应符合现行行业标准《碾压式土石坝设计规范》SL274 要求; 渠岸以上高边坡系数需结合土质条件等进行稳定分析, 安全系数符合《水利水电工程边坡设计规范》SL386 规定^[2]。

断面尺寸参数需结合流量与流速经水力计算确定, 填方及半挖半填渠道边坡系数按填方高度分级控制: $\leq$

3m 时依土质选内外坡最小系数（黏土、重壤土 1.00~1.25，中壤土 1.25~1.75 等），>3m 需稳定分析，>5m 宜设 1.0m 宽马道。岸顶超高按规范设计：1-3 级渠道需论证，4-5 级可用公式 $F=xhs+0.2$ 计算；弯道特殊工况需叠加 $F=BV^2/(gR)$ 增加值。浑水渠道超高需考虑淤积，填方>3m 预加沉降；衬砌超高 0.3~0.8m（行洪渠道取高值），5 级渠道不小于 0.1m。堤顶宽度按灌区规模及功能确定，引洪淤灌渠道断面设计同浑水渠道。

1.3 渠道防渗设计细节

渠道渗漏是农田水利工程中普遍存在的一个问题，它既浪费水资源又造成地下水位升高，从而引起土壤盐渍化，所以防渗设计在渠道设计中是关键环节。防渗材料的选择要根据工程地质、气候条件、经济成本等来确定，常用的防渗材料有混凝土、浆砌石、土工膜等。混凝土衬砌防渗设计中需要把控的细节有混凝土强度等级、衬砌厚度、伸缩缝设置等。按照现行的规范，渠道混凝土衬砌的强度等级不应低于 C15，小型渠道的衬砌厚度为 6cm 到 8cm，中型渠道的衬砌厚度为 8cm 到 12cm。伸缩缝的设置间距要根据气温条件和混凝土浇筑长度来确定，缝内应填充沥青杉木板、聚氨酯密封膏等防水材料，保证防渗效果。土工膜防渗设计要选用符合标准的聚乙烯土工膜，土工膜铺设要保证平整，拼接处用热焊接方式，焊接强度不小于母材强度的 80%，土工膜上下应铺设保护层，防止土工膜被刺破。此外在渠道进出口、转弯处等应力集中区域需要加强防渗处理，增大防渗层厚度或者采用复合防渗材料，防止水流冲击造成渗漏。

1.4 配套建筑物设计细节

渠道配套建筑物有进水闸、分水闸、节制闸、渡槽、涵洞等，其设计好坏关系到渠道运行的好坏。进水闸设计时，闸室尺寸要根据设计流量来定，闸孔宽度应和渠道底宽相匹配，闸门用铸铁或钢闸门，启闭设备采用手动或电动启闭机，保证启闭灵活。分水闸应设于渠道分支处，其设计流量应按分支渠道的灌溉要求来定，闸室结构要与主渠道相适应，并设消能设施，防止水流对分支渠道的冲击。节制闸用来调节渠道水位和流量，位置应选在地势平坦、水流稳定的地方，闸室上下游应设置渐变段，防止水流紊乱。渡槽、涵洞等交叉建筑物的设计要保证过流能力满足设计要求，同时保证结构稳定，

渡槽槽身采用混凝土或钢筋混凝土结构，壁厚根据跨度确定，加强防渗处理。

2 农田水利渠道施工管理的关键技术细节

施工管理是保证设计方案落地、保证工程质量的重要环节，要从施工准备、基础处理、主体施工、质量控制等全过程把控技术细节，严格按照设计要求和现行规范施工。

2.1 施工准备阶段细节管理

施工准备阶段的细节管理对施工进度、质量有着直接的影响，主要包含技术准备、材料准备、场地准备等环节。从技术准备方面讲，要组织施工技术人员对设计图纸进行深入熟悉，开展技术交底工作，重点确定渠道断面尺寸、边坡坡度、防渗要求等关键技术参数，同时进行现场勘测，核实线路走向、地形地貌等与设计图纸的一致性，若存在偏差要及时沟通调整。在材料准备方面要严格把控原材料质量，混凝土、钢筋、土工膜等主要材料必须具备出厂合格证和检验报告，进场后需要进行抽样检测，混凝土强度等级、土工膜厚度等指标要符合设计要求。场地准备时应清除施工范围内杂草、树木、淤泥等障碍物，平整施工场地，修建临时施工道路及排水设施，保证施工场地排水畅通，防止雨水淤积影响施工^[3]。同时要合理布置材料堆放场地，将水泥、钢筋等材料分类堆放，做好防潮、防晒工作，防止材料变质损坏。

2.2 基础处理阶段细节管理

渠道基础是渠道主体结构的基础，基础处理质量好坏直接影响到渠道的稳定性，需要重点控制地基开挖、夯实、换填等环节。地基开挖时必须严格按照设计断面尺寸进行开挖，采用分层开挖的方式，每层开挖深度不应大于 1.5m，避免超挖或欠挖，对土质较差的地区要设置临时支护设施，防止边坡坍塌。开挖完成后，地基要进行平整和夯实，夯实用蛙式打夯机或压路机，夯打次数不少于 3 遍，夯实后的地基承载力应符合设计要求^[4]。若地基为软土、沼泽等不良地质，需做换填处理，换填材料采用粉质黏土、砂砾石等优质材料，换填厚度不小于 0.5m，换填后分层夯实，保证换填层密实度。地基处理完成后，应立即进行渠道垫层施工，为后续主体施工提供平整的基础。

2.3 主体施工阶段细节管理

渠道主体施工包含渠道衬砌、边坡防护、配套建筑物施工等环节,必须按照设计要求和施工规范控制细节,保证施工质量。混凝土衬砌在施工时应分层浇筑,每层厚度不宜大于 50cm,在浇筑过程中用插入式振捣器振捣密实,振捣时间控制在 20s 到 30s 之间,避免出现蜂窝、麻面等质量问题。衬砌施工完毕后应及时进行养护,养护采用覆盖土工布洒水养护的方式,养护时间不少于 14 天,保证混凝土强度正常增长。土工膜防渗衬砌施工时,先将渠道基层平整压实,去除尖锐杂物,然后铺设土工膜,土工膜铺设应从渠道底部向边坡铺设,铺设过程中需拉紧绷直,避免出现褶皱,拼接处采用热焊接,焊接完成后需进行充气检测,保持 5-10min 无泄漏即为合格。土质边坡防护施工时,可采用植草砖、浆砌石等防护措施,植草砖铺设要平整,缝隙用水泥砂浆填充密实;浆砌石防护需采用坐浆砌筑,砂浆强度等级不宜低于 M7.5,石块之间应错缝搭接,搭接长度不小于 10cm,保证砌筑结构的稳定性。

2.4 施工质量控制细节管理

施工质量控制要贯穿于整个施工过程之中,建立完善的质量检查制度,重点把控关键环节的质量检测。地基处理完成后要检测地基承载力、密实度等指标,检测合格后方可进入下一道工序;混凝土浇筑过程中要抽样制作混凝土试块,每浇筑 100m³ 混凝土制作 1 组试块,每组 3 块,用于检测混凝土抗压强度;土工膜铺设完成后要对焊接缝进行全面检测,检测比例不低于 10%,发现泄漏及时补焊。同时要加强对渠道断面尺寸、边坡坡度、纵坡等几何尺寸的检测,用全站仪、水准仪等仪器进行测量,断面尺寸偏差控制在±5cm 以内,边坡坡度偏差控制在±3° 以内,纵坡偏差控制在±0.1%以内。

施工过程中要做好施工记录,详细记录施工时间、材料用量、施工人员、检测数据等信息,保证施工过程可追溯,发现质量问题要及时停工整改,整改合格后才能继续施工^[5]。

3 结语

农田水利工程中渠道设计与施工管理的细节控制,是提高工程质量、效益的重要环节。设计阶段要准确把握线路选型、断面设计、防渗设计、配套建筑物设计等关键环节,保证设计方案符合实际条件和现行规范要求;施工阶段要严格落实施工准备、基础处理、主体施工、质量控制等全过程细节管理,保证施工质量。只有把细节管理渗透到渠道设计和施工的全过程之中,才能有效地减少渠道渗漏、坍塌、淤积等现象的发生,提高水资源的利用率,保证农业生产稳定发展。未来,随着农田水利工程技术的发展,应加强设计和施工细节的研究,推广应用新型防渗材料和施工技术,不断提高渠道工程建设的精细化程度。

参考文献

- [1] 王国良. “双碳”目标下石峡乡农田水利工程施工设计中的关键问题与解决方案[J]. 能源与环境, 2024, (06): 158-160.
- [2] 孔宁宁. 农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理[J]. 当代农机, 2023, (03): 44-45.
- [3] 冉小丽. 浅谈农田水利工程中的渠道设计与施工管理[J]. 新农业, 2022, (04): 91.
- [4] 赵金宏. 农田水利工程中的渠道设计与施工管理路径探索[J]. 农业科技与信息, 2022, (03): 85-87.
- [5] 姜楠, 张芳, 李欢, 等. 农田水利工程设计中的渠道设计与施工管理[J]. 南方农业, 2021, 15(21): 200-201.

城乡供水项目水土保持方案编制要点

李艳平

郴州市水电建设公司，湖南郴州，423000；

摘要：城乡供水项目属于线型加局部的点型工程项目，管道等线型区域穿越地形地貌及土地利用现状多样，防治难度较大；水厂等点型区域土石方开挖量较大，涉及边坡等较多，水土流失隐患较大。本文分析了工程特点、项目组成及相应的水土保持问题，并提出了水土流失防治的相关措施。

关键词：城乡供水工程；水土流失；防治；措施

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.025

1 城乡供水工程建设背景

部分供水水厂区建厂较早，现有处理工艺设施较简陋，投产年限较长，设备老化，需对厂区进行升级改造。但部分水厂因位置限制，或者取水点位于河道下游，水质难以保证，为了保证居民用水安全，水厂的问题急需进一步解决。

城区配套管网建设时间较早，管网升级改造工程未全部完成，许多区域由于管径偏小导致流量偏小，压力不足；现有供水管网的管材大部分为铸铁管和UPVC管，大都使用年限过久，管道老化严重，爆管频发，影响水质水压。

部分偏远水务集团目前尚未完成各个数据采集平台上数据的整合，不能将调度系统、地理信息系统、营业收费系统、办公自动化系统等数据相互共享，未开发建立水力模拟系统及科学调度系统、水务智能系统等二次应用系统。必须尽快进行信息化工程建设，提高供水管理服务信息。信息化建设是促进和带动水务现代化、提升水务行业社会管理和公共服务能力、保障水务可持续发展的必然选择。需进一步增加信息采集，完善水质在线检测系统，通过对各类关键数据的实时监视和智能分析，再提供分类、分级预警，且利用短信、光、警报声等通知相关负责人，同时给予相应的处理结果辅助决策建议，以更加精细和动态的方式管理水务运营系统的整个生产、管理和服务流程，使之更加数字化、智能化、规范化，从而达到“智慧”的状态。

2 城乡供水工程特点

城乡供水项目属于线型工程加局部的点型工程项目，属于较为复杂的水土保持项目。线型工程布局跨度较大、呈线状分布，管道敷设过程中会扰动和破坏地表植被，造成土地裸露，加重管道沿线的土壤侵蚀和水土流失，影响区域生态环境的可持续发展^[1]；边坡工程和

基础工程土石方量较大，一般有弃方；交通运输等施工条件相对较差，需设置施工便道；征占地面积较大，需要临时占地、临时设施较多，一般会涉及到拆迁。点型工程呈点状分布，一般设有封闭围挡措施，对周边影响较小；交通、给排水条件相对较好，主体一般设计有绿化排水措施；根据选址及竖向设计，部分项目能够达到土石方平衡，部分项目存在大量的借方或弃方。

3 城乡供水工程项目组成

城乡供水项目一般主要由取水工程、净水水厂、配水管线等组成。

取水工程主要是利用管道将水源从河道引接至水厂，主要分为取水头部、取水泵站及输水管。取水头部一般置于河道水流深槽，一般采用两侧进水方式，进水窗口设拦污格栅。原水自流管一般有两根，基本采用钢管，水流通过原水自流管进入到取水头部。取水泵站基本建设于河岸边，设置取水泵房、配电间及值班室，一般吸水井与泵房合建，设置多台水泵，互为备用。

净水水厂主要设置有（1）办公生活区：主要用于厂区建成后工作人员日常办公的区域，区域的单体建筑物主要包括食堂、综合楼等，一般周边设置有绿化种植，与生产区相隔开，尽可能减少生产区对其产生的影响，形成一个独立、干净的办公区域。（2）生产区，主要包括常规处理区、深度处理区、污泥处理区等。其中常规处理区是核心处理区域，主要单体包括预处理池、格栅预臭氧接触池、絮凝沉淀池、气水反冲洗滤池及反冲洗泵房、清水池及吸水井、送水泵房等。深度处理区单体主要为后臭氧接触池、生物活性炭滤池和臭氧制备车间。污泥处理区的单体主要包括浓缩池、贮泥池、污泥脱水机房等，生产过程中产生的污泥经此区域处理后运输至厂外。（3）厂区内自用水管接自清水池的出水总管，呈环状布置，部分自用水管兼作消防水管。厂区

内雨水结合道路竖向标高和地形地势,通过明沟级管线下排接入厂外排水沟渠或市政雨水管道。污水经厂区化粪池处理后进入市政污水管道。反冲洗废水排入回收水池,反冲洗废水回用至前端,排泥水排入排泥池,经浓缩脱水处理后泥饼外运。(4)厂区路网按功能分区和建筑物、构筑物使用要求联络城环状,以满足消防及运输要求。(5)进厂道路起点一般接现有市政道路,终点接水厂,根据需求设置相应的宽度或者车道。

配水管线主要就是从水厂将处理后的水源通过配水管网(一般会配置检修阀门井、排气阀井、排泥阀井与湿井等建筑物)输送到设计需水区域。考虑到水压问题,部分项目中途需要二次加压,故需新增加压泵站,泵站一般设置加压泵房、管理用房、门卫室、仓库、补氯间、收费服务用房等,主要设备是变频泵。

4 城乡供水项目涉及的水土流失相关问题

4.1 水土流失类型及形式多样,防治困难

取水头部属于点型区域,主要涉及河道施工,可分为围堰施工及水下作业。围堰施工一般试用于水深较浅,水流缓慢的情况,占地面积相对较大,拆除过程中土石方可能随水流进入河道影响河道水质或者行洪。水下作业,扰动面积相对较小,但施工技术要求较高,挖出的土尽量由砂泵抽升到后部回填沟槽,尽量缩短沟槽晾槽时间,避免回填土的远距离搬运。

水厂区基本属于点型区域,一般位于城市边缘的高地,因此施工过程中涉及边坡开挖、基础施工、场地平整等土石方量较大,一般都需要配套建设建厂道路等,因此施工过程中若防护不当,在水力及重力侵蚀作用下,极容易形成边坡崩塌、滑坡等水土流失灾害。

工程区供水管网沿线跨越的地形地貌以及土地利用现状多样,使得工程建设中产生的水土流失类型形式多样,增加了防治难度。如平原和丘陵区主要的水土流失类型为水力侵蚀,水土流失主要形式为施工过程中裸露面的溅蚀、面蚀,开挖料的崩塌、滑塌、面蚀、沟蚀,弃渣的溅蚀、冲刷和崩塌等;山区的水土流失类型则包括风力侵蚀、重力侵蚀等,水土流失形式涉及爆破、消坡后形成斜坡产生的面蚀、沟蚀、落石、崩塌,填方段产生的面蚀、沟蚀等等^[2]。

4.2 水土保持防治措施

4.2.1 水土保持防治分区

水土保持防治分区主要根据项目组成及功能进行分区,一般分为取水口区、净水水厂区、配水管线区等三个一级分区;取水口区可分为取水头部、输水管线、

临时堆土区等三个二级分区,净水水厂区可分为构筑物区、道路及绿化区、施工生产生活区、临时堆土区、进场道路等二级分区,配水管线区分为管道作业带区、加压泵房区、施工便道等二级分区。

4.2.2 水土保持措施设计

(1)取水口区取水头部属于点型工程,一般设于河底淹没或者半淹没的区域,施工过程中主要采用围堰进行施工,建议做好围堰的填筑与拆除工作,围堰填筑应有充分的土石方来源,尽量利用水厂区开挖产生的土石方,避免自行设置取土场进行围堰的填筑,围堰拆除的过程中应注意减少土石方进入到河道中影响河道水质或者行洪。若采用水下作业,则建议施工单位严格按照施工组织设计进行施工,避免预挖水下沟槽产生回淤弃土或者回填土工作量大,尽量采用综合作业船铺管,沟槽由水泵高压水冲挖,挖出的土由砂泵抽升到后部回填沟槽,使得沟槽晾槽时间减少至短,取消回填土的远距离搬运。取水头部主要是做好施工方案及施工组织,不再新增水土保持防护措施。

针对取水口输水管线区,建设前期需要进行表土剥离运送至空闲地段进行堆置防护,后期回填至管线区域进行植被恢复;建设后期对占用林地、草地、耕地等区域进行场地平整,占用耕地的区域进行复耕,占用林地、草地等区域栽植水土保持林草。针对临时堆土区域,施工过程中尽量将表土及一般土石方分开堆置,及时做好临时临时拦挡、覆盖、排水、沉沙等临时性防护措施;建设后期主要进行翻松平整,然后根据占用地类进行复耕或者栽植水土保持林草。

(2)针对水厂构筑物区,施工过程中应该做好基坑坡顶及坡底截水沟、沉砂池、集水井、临时抽排措施、基坑边坡临时覆盖等临时防护措施,及时将基坑雨水抽排至场内排水沟中,避免雨水直接冲刷裸露边坡造成崩塌、滑坡等水土流失灾害。针对道路及绿化区,建设前期应剥离表土运至临时堆土区进行堆置防护,后期回填至景观绿化区域进行覆土平整绿化;根据总平面及竖向设计,若场地存在边坡,应设置截洪沟、综合护坡、沉砂池等永久措施以及临时拦挡、覆盖、排水等临时防护措施,及时将边坡上游雨水直接排出项目区或者排入项目区排水体系中;后期根据水厂区排水设计图,及时铺设雨水管网、配套建设雨水检查井等,及时将雨水排至河道或者其他天然水系中。针对施工生产生活区,建设前期剥离表土运至临时堆土区进行堆置防护,后期回填至景观绿化区域进行平整绿化;施工过程中主要做好区域临时截排水体系。针对临时堆土区,建设前期剥离

表土进行堆置防护,后期回填至景观绿化区域进行平整绿化;施工过程中主要做好堆土区域的临时拦挡、覆盖、排水、沉沙等临时性防护措施。针对进场道路区,施工过程中主要做好坡脚或者坡顶截排水沟、坡脚临时拦挡、坡面临时覆盖等临时性防护措施,后期做好边坡覆绿等植物措施。

(3) 针对配水管线区管道作业带区,对未占道路路面的管道区域,建设前期应进行表土剥离(与一般土方分开,表土位于一般土方下方或者表土位于开挖区域外侧),施工过程中应根据管道地形条件进行临时防护,后期回填至管道区域经场平后进行植被恢复或者复耕;占用道路路面的区域主要做好一般土方堆置过程中的临时防护措施,后期主要进行道路路面恢复。针对配水管线区加压泵房区,一般都选在较平缓区域,主体设计已经考虑了景观绿化区域场地平整、表土开挖及回填、外围截排水沟及沉砂池等工程措施,景观绿化等植物措施;方案一般新增表土堆置区临时拦挡、覆盖、排水、沉沙等临时性防护措施。针对配水管线区施工便道区,应做好上边坡截水沟、坡脚排水沟、填方边坡坡脚挡护等工程措施,做好施工过程中临时拦挡及覆盖等防护措施,做好后期边坡覆绿等植物措施。

4.2.3 弃渣的合理处理

若项目存在弃方,首先,应开展弃渣综合利用调查,制定综合利用方案,明确综合利用途径、方向等,对综合利用涉及需要设置堆存场地的,应设置拦挡、截排水等有效的防护措施。弃渣通过公共资源交易平台转让的,应明确交易方式、市场消耗能力^[2]。

项目场地附近若存在合法消纳场,建设单位或者土方施工单位可以跟消纳场签订弃渣协议,施工过程中产生弃渣及时运至消纳场进行堆置防护,可以避免弃渣造成的水土流失灾害。若附近存在建设项目(工期基本一致)需回填土方,则可与相邻建设项目达成土方运输协议,及时将本项目弃渣运至相邻项目进行回填。若项目周边不存在合法消纳场或者在建需回填土方项目,本项目建设单位应该选择合法的弃渣区域,弃渣场选址应经相关管理部门及土地权属单位(个人)确认,落实用地可行性。禁止在河湖管理范围(含水库淹没区)内设置;禁止在对公共设施、基础设施、工业企业、居民点等有重大影响区域设置。下游一定范围内有敏感因素的,应进行论证且论证结论能够支撑选址合规要求。同时弃渣场要素信息应全面准确,弃渣堆置方案合理,恢复方向可行。4级及以上弃渣场应进行勘察^[2]。应结合本项目的弃渣情况委托相关单位进行弃渣场设计,经过论证

报批后可以弃渣,施工过程中应要求施工单位严格按照弃渣场设计进行施工,确保弃渣场安全稳定,避免产生崩塌、滑坡、泥石流等水土流失灾害。

4.2.4 借方的合理处理

若项目存在借方,应明确借方方案。项目场地附近若存在合法消纳场并且消纳场土石方能够满足场地回填需求,则建设单位或者土方施工单位可以跟消纳场签订购土协议,施工过程中可以及时从消纳场购买土方运至场地进行回填。若项目附近存在建设项目(工期基本一致)需要弃方,则可与相邻建设项目达成土方运输协议,及时从相邻项目运输土方到场地内进行回填。若项目周边不存在合法消纳场或者在建需外弃土方项目,建设项目应该选择合法的取土区域。取土位置应明确。禁止在崩塌和滑坡危险区、泥石流易发区内设置取土场。涉及河湖管理范围的,应满足《中华人民共和国防洪法》、《中华人民共和国河道管理条例》等相关法律法规要求^[2]。同时应结合本项目的取土情况委托相关单位进行取土设计,经过论证报批后可以取土,取土过程中施工单位应严格按照取土场设计进行施工,确保弃土边坡安全稳定,避免产生崩塌、滑坡、泥石流等水土流失灾害。

5 结语

城乡供水项目属于线型、点型相结合的项目,经常伴随开挖回填边坡、取土与弃渣等,同时跨度较大,地形较为复杂,水土流失影响较大,因此防护难度相对较大。

方案编制过程中编制单位应多次进行实地踏勘并与建设单位、设计单位进行详细沟通,明确项目概况及建设特点,识别出项目水土流失重点区域、部位及水土保持防护重点与难点,制定切实可行的水土保持防护措施,以此指导施工。同时应给建设单位宣传水土保持相关知识,增强水土保持理念,由建设单位组织成立水土保持小组,业主、监理、施工单位等各司其职,执行、验收好水土保持方案的每一个环节,确保水土保持方案的功效能真正发挥出来^[3],有效控制水土流失,避免崩塌、滑坡等水土流失重大灾害。

参考文献

- [1] 陈兰等输油管道工程特征及其水土流失防治措施[A], 2015, 32(03): 15-19.
- [2] 水利部办公厅关于印发生产建设项目水土保持方案审查要点的通知(办水保[2023]177号)
- [3] 潘君燕浅析线型工程建设中涉及的水土保持问题[C], 陕西水利 2014 年科技专刊

抽水蓄能电站混凝土施工技术及质量控制探讨

李燕子

中国水利水电第十一工程局有限公司，河南郑州，450000；

摘要：抽水蓄能电站是清洁能源体系的核心组成部分，兼具调峰填谷、储能备用、应急调频等关键功能，其工程建设质量直接决定电站运行的安全性、稳定性与耐久性。混凝土结构作为电站挡水大坝、输水隧洞、地下厂房等核心构筑物的主体材料，受施工环境复杂多变、结构受力条件严苛、运行工况交替变化等多重因素影响，对施工技术精度与质量管控水平提出了极高要求。本文结合抽水蓄能电站工程建设的典型特性，系统梳理混凝土施工的关键技术要点，深入剖析质量控制的核心环节与优化路径，结合实际工程案例验证技术应用成效，为同类工程的施工技术优化与质量管控提升提供理论参考与实践借鉴。

关键词：抽水蓄能电站；混凝土施工技术；滑模施工

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.026

引言

在双碳战略推进背景下，抽水蓄能电站凭借大容量储能、高可靠性、长寿命优势，成为构建新型电力系统、保障能源安全的关键设施。近年来，我国抽水蓄能电站建设进入规模化、高难度阶段，工程规模扩大，复杂地质施工挑战加剧。混凝土因强度高、耐久性好、可塑性强，被广泛用于电站关键部位，其施工质量是保障电站安全高效运行的核心。与常规水利水电工程相比，抽水蓄能电站混凝土施工有显著特殊性与复杂性：一是水位变幅大，对混凝土抗渗、抗裂及抗冻融性能要求高；二是施工环境严苛，山区峡谷地形险峻、气候多变，制约混凝土施工各环节；三是结构形式多元，不同结构受力特性与施工技术要求差异大。因此，深入研究其混凝土施工核心技术，构建全流程质量控制体系，对保障工程质量、提升电站可靠性与经济性有重要意义和价值。

1 抽水蓄能电站混凝土施工关键技术

1.1 施工前期准备技术

施工前期准备是保障混凝土施工质量的前提基础，主要涵盖施工总体布置、原材料制备与混凝土配合比优化三大核心环节。在施工总体布置方面，需结合工程地形地貌特征与施工进度需求，科学规划施工平台、供水供电系统、物料运输道路及混凝土拌和站等关键设施的布局。例如，某抽水蓄能电站上下库大坝施工中，在坝顶区域搭建专用施工操作平台，配置 2 套智能滑模设备及配套卷扬机提升系统，同步布设 DN100 主供水管网与坡面 PVC 花管洒水系统，实现混凝土养护全覆盖；同时配备 150kW 应急柴油发电机组，保障极端天气下

施工供电稳定，为后续施工的顺利推进奠定了坚实基础。

原材料制备环节需严格执行质量管控标准，重点把控水泥、骨料、外加剂等核心材料的性能指标。针对抽水蓄能电站混凝土高抗裂、高防渗的核心需求，优先选用低热硅酸盐水泥，降低混凝土水化热峰值，减少温度裂缝风险；采用级配连续、颗粒圆润的骨料，降低骨料空隙率，提升混凝土密实度。在外加剂选型与应用方面，创新采用 VF 防裂剂与玄武岩纤维双掺技术，构建微膨胀补偿收缩+纤维拉结增韧的双重防裂体系，经试验验证，可使混凝土极限拉伸值提升 20% 以上，有效抑制早期裂缝的产生与发展。混凝土配合比优化需结合不同工程部位的功能需求开展针对性试验，确定合理的水胶比、胶凝材料用量及外加剂掺量；例如高水头输水部位混凝土需重点提升抗渗等级至 W12 以上，大体积混凝土则需优先控制水化热温升，确保内外温差不超过规范限值。

1.2 核心施工工艺技术

滑模施工技术：在大坝面板混凝土施工中，滑模技术因具备施工效率高、混凝土表面平整度好、连续浇筑无施工缝等优势，成为主流施工工艺。施工前需完成坡面修整与验收，确保坡面平整度偏差控制在 50mm 以内，随后通过精密测量放样，精准界定浇筑范围与滑模运行轨迹。滑模系统采用卷扬机同步牵引方式，遵循从中间块向两侧推进、分两序跳仓浇筑的原则，单块面板连续浇筑完成后立即转入下一块施工，避免出现施工缝缺陷。施工过程中需严格控制滑模提升速度（通常为 1.5-2.0m/h），确保与混凝土浇筑、振捣节奏协同同步；振捣作业采用插入式振捣器，振捣深度控制在 30-50cm，

振捣频次以混凝土表面泛浆、无气泡逸出为宜,避免出现漏振、过振导致的蜂窝、麻面、空洞等质量缺陷。

堆石混凝土施工技术:作为一种低碳环保型施工技术,堆石混凝土凭借水泥用量少、水化热低、施工效率高、工程造价低等优势,在抽水蓄能电站主坝施工中逐步推广应用。湖北平坦原抽水蓄能电站率先将小粒径堆石混凝土技术应用于主坝建设,通过开展多组工艺性试验,确定合理的堆石级配(粒径 5-30cm)与自密实混凝土配合比;采用 AI 图像识别技术实时检测堆石摊铺粒径分布与空隙率,确保堆石空隙率控制在 35%-40% 的合理范围。浇筑施工遵循先堆石、后灌浆的原则,先采用大型机械进行堆石摊铺与碾压密实,再浇筑高流动性自密实混凝土填充堆石空隙,形成密实均匀的整体结构。该技术的应用不仅大幅缩短了主坝施工工期,还降低了 30% 以上的水泥用量,实现了质量、效率与环保效益的协同提升。

止水施工技术:止水结构是保障混凝土构筑物防渗性能的关键防线,需严格把控各环节施工工艺质量。在面板张性缝、压性缝等关键部位,先铺设 2-3cm 厚水泥砂浆垫层,采用挖槽法或贴层法施工,确保垫层密实平整、表面光滑。止水带安装需精准定位,采用专用钢质固定夹具进行固定,间距控制在 50-80cm,防止混凝土浇筑过程中出现移位、变形;止水带接头部位采用热硫化焊接方式,焊接温度控制在 200-220℃,焊接完成后进行气密性试验,确保接头无渗漏。混凝土浇筑完成后,及时对缝面进行清理、干燥处理,采用聚脲弹性涂层进行封闭防护,提升止水结构的耐久性与防渗可靠性。

1.3 养护与防护技术

混凝土养护是抑制早期裂缝产生的关键环节,需结合环境温度、湿度条件及工程部位特性,制定差异化养护方案。常规部位采用全覆盖洒水养护方式,通过坝顶主供水管网与坡面 PVC 花管形成立体洒水系统,每块面板单独设置控制阀门,确保养护水分均匀充足;养护周期不少于 28 天,高温季节需每 2-3 小时洒水一次,避免混凝土表面水分快速蒸发产生塑性收缩裂缝;寒冷季节采用保温被+塑料薄膜双层覆盖措施,必要时采用蒸汽养护,防止混凝土受冻破坏。

对于水位变化区、溢洪道等受水流冲刷、冻融循环作用强烈的特殊部位,需加强后期防护处理。采用聚脲弹性涂层进行防护处理,施工前需对混凝土表面进行打磨、除尘、干燥处理,确保表面平整度偏差不大于 2mm;

涂层涂刷宽度不小于 25cm,厚度控制在 2.0-3.0mm,涂刷过程中采用湿膜测厚仪实时监测厚度,确保涂层均匀连续。针对施工过程中已产生的裂缝,需根据裂缝宽度与深度采取针对性处理措施:缝宽大于 0.2mm 的结构性裂缝采用化学灌浆+聚脲涂层封闭的复合处理方案,缝宽不大于 0.2mm 的非结构性裂缝采用环氧砂浆进行表面封闭处理,确保混凝土防渗性能不受影响。

2 抽水蓄能电站混凝土质量控制核心环节

2.1 施工过程质量控制

施工过程质量控制需构建事前预防、事中控制、事后核查的全流程闭环管控体系。事前预防阶段重点开展技术交底与人员培训,针对滑模施工、止水安装等关键工艺召开专题技术研讨会,明确质量控制要点、技术参数与验收标准;对施工人员进行岗前培训与实操考核,确保具备相应的技术能力。事中控制阶段需加强施工现场巡查与智能化监测,采用温度传感器、应变传感器等设备实时采集混凝土浇筑温度、内部温升、应力应变等数据,例如在大体积混凝土浇筑过程中,通过布设分布式温度监测系统,控制混凝土内外温差不超过 25℃;借助 AI 视频监控系统对施工过程进行实时研判,提前预判振捣不密实、养护不及时等质量风险,并发出预警提示。

关键工序质量控制需严格执行三检制(自检、互检、专检)验收制度:钢筋制安前需清理表面铁锈、油污等杂质,钢筋焊接接头需按规范要求抽样进行力学性能试验,合格率需达到 100%;混凝土浇筑前需全面检查模板平整度、刚度、支撑稳定性及止水装置安装质量,验收合格后方可签发浇筑令;浇筑过程中需控制振捣深度与频次,避免漏振或过振;滑模提升过程中需安排专人实时检查混凝土表面质量,发现蜂窝、麻面等缺陷及时进行修补处理。

2.2 裂缝防控质量控制

裂缝是抽水蓄能电站混凝土结构的主要质量隐患,按成因可分为结构性裂缝与非结构性裂缝,其中非结构性裂缝占比达 95% 以上,主要包括塑性收缩裂缝与温度收缩裂缝。裂缝防控需采取材料优化+施工管控+养护强化的综合措施:一是材料层面,通过优化混凝土配合比,选用低热水泥、掺加复合防裂剂与纤维材料,从源头上提升混凝土抗裂性能;二是施工层面,严格控制混凝土入仓温度,高温季节采用预冷骨料、加冰拌和、冷水搅拌等措施,将入仓温度控制在 15℃ 以下;大体积混凝土

采用分层浇筑（分层厚度 2-3m）、布设冷却水管等方式，加速水化热散发；三是养护层面，延长早期养护周期，确保混凝土强度增长阶段表面湿度充足，避免因体积收缩产生裂缝。

针对结构性裂缝，需从设计优化与施工管控两方面协同防控：设计阶段合理设置分缝分块，在结构受拉区域设置张性缝，受压区域设置压性缝，选用高弹性、高耐久性的填料填充缝隙；施工阶段严格控制坝体堆石填筑质量，采用大型振动碾分层碾压，确保坝体压实度符合设计要求；待坝体沉降稳定（沉降速率小于 0.5mm/月）后再进行面板混凝土施工，避免坝体不均匀沉降导致面板产生结构性裂缝。

2.3 质量监督与验收管理

建立健全层级分明的质量监督管理体系，实行项目经理为第一责任人，质量副经理、安全总监为直接责任人，各施工班组、质检部门协同配合的管理机制，明确各层级、各岗位的质量职责与考核标准。施工过程中，加强对原材料、构配件的进场检验验收，每批次材料均需提供出厂质量合格证明，按规范要求抽样复检，不合格材料严禁进场使用；对混凝土试块进行标准养护与同条件养护，定期检测混凝土抗压强度、抗渗等级等性能指标，确保符合设计要求。

分部分项工程验收需严格遵循相关规范标准与设计要求，隐蔽工程必须经监理单位、建设单位联合验收合格，并签署验收记录后，方可进入下道工序施工；单位工程完工后，需组织专业检测机构对混凝土结构的外观质量、尺寸偏差、强度等级、抗渗性能、内部缺陷等指标进行全面检测评估，确保各项指标符合设计与规范要求。同时，建立质量问题追溯与闭环整改机制，对检测发现的质量缺陷，明确整改责任人、整改措施与整改时限，整改完成后进行复核验收，避免同类质量问题重复发生。

3 工程案例应用分析

浙江天台抽水蓄能电站是国内单机容量最大（350MW）、额定水头最高（700m 级）的抽水蓄能电站之一，工程建设面临高水头压力作用与日均 15℃ 剧烈温差变化的双重技术挑战。为解决混凝土抗裂防渗难题，工程采用低热硅酸盐水泥+VF 防裂剂+玄武岩纤维的双掺防裂技术方案，在大坝面板施工中应用智能滑模系统，

并配套建立智能化温度监测与精准养护体系：通过布设 120 余个温度传感器实时监测混凝土温度变化，根据监测数据动态调整养护洒水频次与保温措施。该技术方案的应用，成功打造了国内首个低热水泥堆石坝面板工程，实现了百米级面板混凝土零裂缝的突破，混凝土抗渗等级达到 W14，大幅提升了结构的耐久性与防渗可靠性，为高水头抽水蓄能电站混凝土施工提供了宝贵经验。

湖北平坦原抽水蓄能电站下库主坝施工中，创新性采用小粒径堆石混凝土施工技术，通过与科研单位联合开展专项试验研究，优化确定了堆石级配与自密实混凝土配合比参数；引入 AI 图像识别技术与智能压实监测系统，实现堆石摊铺质量与混凝土浇筑过程的实时管控。该电站主坝首仓堆石混凝土顺利浇筑完成，标志着国内首座小粒径堆石混凝土主坝施工取得关键性突破。与传统混凝土施工工艺相比，该技术不仅使施工工期缩短 20%，还减少了 30% 的水泥用量，降低了水化热排放与工程投资，实现了工程质量、施工效率与生态环保效益的协同提升，为低碳化抽水蓄能电站建设提供了新路径。

4 结论与展望

抽水蓄能电站混凝土施工技术与质量控制是保障电站安全稳定运行的核心要素，直接关系到工程建设质量与长期运行效益。本文通过系统分析得出以下核心结论：一是施工前期准备需聚焦施工布置优化、原材料质量管控与配合比精准设计，为后续施工质量奠定基础；二是核心施工工艺需结合不同结构特性选型应用，滑模技术、堆石混凝土技术等新型工艺的合理应用可显著提升施工质量与效率；三是质量控制需构建全流程闭环管控体系，重点强化施工过程管控、裂缝防控与验收管理；四是智能化技术与新型材料的融合应用，是提升混凝土施工质量与管控水平的重要方向。

参考文献

- [1] 王新龙. 大体积混凝土施工质量控制与裂缝防治技术在抽水蓄能电站中的应用研究[J]. 城市情报, 2024 (24).
- [2] 余雪祥, 朱小飞. 惠州抽水蓄能电站水道混凝土施工质量控制[J]. 水力发电, 2010(9): 36.
- [3] 余雪祥, 朱小飞, Yu, 等. 惠州抽水蓄能电站水道混凝土施工质量控制[J]. 水力发电, 2010. DOI: CNKI: SUN: SLFD. 0. 2010-09-007.

复杂地质条件下水利隧洞施工支护技术优化研究

钟超文

岑溪市河长制工作站, 广西岑溪, 543200;

摘要: 复杂地质条件制约水利隧洞施工, 其不确定性易致支护结构失稳、围岩变形等风险, 影响工程安全与建设效率。本文以复杂地质水利隧洞施工支护为研究对象, 先明确支护技术优化内涵, 再剖析当下施工支护存在的技术适配性不足、动态调控滞后、协同效能欠缺等问题, 最后提出地质-支护协同匹配优化、动态智能调控系统构建、分阶段差异化支护技术优化、多工法协同支护体系完善等策略, 后两项细化三级实施要点。研究成果可为复杂地质下水利隧洞施工支护安全高效开展提供技术参考, 提升支护结构可靠性与经济性。

关键词: 复杂地质; 水利隧洞; 施工支护; 技术优化

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.027

引言

水利隧洞是水资源调配、防洪减灾工程的骨干建筑物, 常穿行于断层破碎带、软弱夹层等地质构造之中。该类区域围岩力学性质差异大、应力分布不均, 施工过程中地质条件动态变化, 传统的支护技术不能保证工程的安全, 容易造成工期延误、经济损失等问题。开展支护技术优化研究, 对提高工程抗风险能力、保证施工安全、降低成本有重大意义。目前学界大多集中于单一技术的改进, 缺少地质和支护体系间的相互考虑, 优化策略的系统性不强。

1 复杂地质条件下水利隧洞施工支护技术优化的内涵

复杂地质条件下水利隧洞施工支护技术优化的核心内涵, 是以地质动态演化特征为依据, 坚持地质适配、动态调控、安全高效、经济合理为核心目标, 从支护理念、技术体系、施工工艺、调控机制四个方面进行全方位的革新, 使支护结构与围岩应力动态平衡。它不是单一技术局部改进, 而是地质勘察、支护设计、施工实施、动态监测全流程的优化, 强调用精准勘察数据做支撑, 结合施工动态反馈形成闭环优化体系, 兼顾支护承载性能和施工可操作性, 达到安全、效率、效益三者的协同统一, 提高工程抗风险能力、综合效益。

2 复杂地质条件下水利隧洞施工支护存在的关键问题

2.1 支护与地质适配性不足

目前水利隧洞施工支护设计大多依靠前期地质勘

察数据, 使用标准化支护方案, 未能有效地适应复杂地质条件多样性和动态性。穿越断层破碎带时, 传统的喷锚支护不能很好地约束围岩的松散坍塌; 在高应力硬岩区, 刚性支护结构由于应力集中容易产生开裂; 软弱夹层地段, 柔性支护的承载能力稍显不足。同时部分工程没有进行针对性的地质专项勘察, 对隐蔽的地质缺陷认识不足, 造成支护技术选型错误, 加大了支护结构与地质条件的适配矛盾, 增加了支护失稳的风险。

2.2 动态监测的调控滞后

复杂地质条件下, 隧洞施工过程中围岩应力和变形是动态变化的, 必须依靠实时监测数据来进行支护调控。但是目前大多数工程的监测系统存在很多缺陷: 一是监测指标单一, 多关注围岩表面变形, 缺少对围岩内部应力、支护结构内力等核心指标的全面监测; 二是监测设备精度不高, 数据传输存在延迟, 不能准确捕捉地质和支护体系的动态变化; 三是调控机制被动, 多在出现明显支护失效迹象之后才采取补救措施, 缺少基于实时监测数据的预判性调控。该种“监测滞后-调控被动”的模式造成支护体系不能及时适应地质条件的变化, 易引起围岩过度变形、支护结构破损等问题。

2.3 多工法协同效能不足

复杂地质条件下, 单一支护工法不能满足工程安全要求, 多采用喷锚、钢拱架、管棚、注浆加固等多工法组合支护。但是目前工程实践当中, 多支护工法的运用存在“简单叠加”的情况, 缺少系统的协同设计和施工组织。各支护工法的施工时序不合理, 注浆加固未完成就进行喷锚施工, 造成加固效果不能充分发挥; 各支护

结构的受力协同性差,钢拱架与喷层连接不牢固、管棚与围岩的粘结强度不足,造成荷载分布不均,部分支护结构过早承担过多荷载而失效。

3 复杂地质条件下水利隧洞施工支护技术优化策略

3.1 地质精准勘察适配优化

以支护技术同地质条件的适配性分析,以地质精准勘察为根基,创建起“勘察-设计-选型”的协同适配体系。首先优化地质勘察技术方案,用宏观勘察和微观探测相结合的组合勘察模式,宏观层面用高分辨率地质遥感、高精度地质雷达进行大范围地质分区和隐患初步排查,微观层面用钻孔取芯、声波测试、地质雷达近距离扫描等方式精确探测隐蔽地质缺陷的分布范围和规模,建立包含地质参数、应力分布的三维地质信息模型,实现地质条件的可视化、精准化表征。其次,根据三维地质模型,实施支护技术差异化选择,对断层破碎带,使用管棚注浆加固+钢拱架+喷锚的组合支护技术,通过注浆填充裂隙增强围岩的整体性;对高应力硬岩区,使用柔性喷层+预应力锚杆的支护技术,用柔性喷层的变形协调性和预应力锚杆的主动承载性来释放围岩应力;对软弱夹层,使用注浆加固+大间距钢拱架+钢筋网喷锚的支护技术,提高支护结构的承载能力和抗变形能力。最后创建支护参数动态优化数据库,将不同复杂地质区域的工程案例数据、现场试验数据、数值模拟结果相结合,对不同地质分段的支护强度、间距、施工时序等参数实施迭代优化,保证支护技术同地质条件精准匹配,削减支护失稳风险。

3.2 实时监测智能调控构建

以动态监测和调控机制滞后的问题分析,创建起“全指标监测-数据智能分析-精准调控”的动态智能调控系统。一是完善监测指标体系,建立围岩表面变形、内部应力、支护结构内力、环境参数(温度、湿度)的全维度监测网络,在断层破碎带、软弱夹层等重点风险区增加监测点位,使用高精度光纤传感、无线传感、智能传感节点等先进的监测设备,实现监测数据实时采集、无线传输和云端存储,保证数据传输的时效性、完整性。二是搭建智能数据分析平台,集成大数据挖掘、机器学习(LSTM神经网络等)技术,根据历史监测数据和地质演化规律,建立地质条件与支护体系动态演化的预测

模型,用实时监测数据与预测模型的对比分析,准确预判支护体系的稳定性状况,提前发现潜在风险隐患并发出预警信号。三是建立主动调控机制,根据智能分析结果和预警等级来制定分级调控方案,在监测指标接近预警阈值的时候自动发出调控指令,通过改变支护参数、优化施工时序、增加支护结构等措施来实现支护体系的动态适配。

3.3 分阶段差异化支护优化

3.3.1 施工准备阶段预设优化

施工准备阶段属于支护技术优化的前置环节,主要依据精准地质勘察数据开展支护预设优化,为后续施工支护提供科学依据。首先,根据三维地质信息模型,采用风险分级评估方法(模糊综合评价法等)划分出高、中、低风险区域,确定出高、中、低风险区域的边界范围和地质特征,对各个等级区域分别制定出不同的支护预设方案,详细地说明各个区域的支护工法选型、核心参数(喷层厚度、锚杆长度等)、材料规格和施工重难点控制要求。第二阶段对支护材料的适应性优化,按照地质条件下的力学要求和环境特点研发、选用高性能支护材料。高腐蚀地质环境用耐腐型纤维增强喷混凝土和环氧涂层锚杆,高应力区域用高强度预应力中空注浆锚杆,软弱围岩用高韧性喷混凝土,提高支护材料与地质环境的适配性。最后利用三维数值模拟软件(FLAC3D)以及室内相似模型试验,对预设的支护方案进行可行性、安全性验证,模拟不同地质条件下支护结构的受力、变形情况,分析极端地质工况下支护的响应,根据模拟结果迭代优化支护参数,保证预设方案可以应对施工地质风险。

3.3.2 施工过程动态支护优化

施工期间地质条件的动态变化是决定支护效果的重要因素,需要根据施工实时反馈信息来开展支护动态优化,保证支护体系一直适应地质演化状态。一是创建施工地质编录及实时反馈体系,安排专业的地质人员跟随隧道开挖施工的全过程,利用数字化编录的方式,随时记载围岩揭露状况,对比分析实际地质条件与前期勘察数据的差别,及时对三维地质模型进行修正,给支护改良给予最新的地质依据。第二,对地质条件突变区域(如突遇断层、大范围软弱夹层),实施应急支护优化,事先制定多套应急支护方案,配备应急支护设备和专用材料,一旦发现不良地质,立即启动应急响应,采用临

时钢拱架快速支护、超前小导管注浆加固等应急措施控制围岩变形,待围岩稳定后,根据修正后的地质数据优化永久支护方案。三是改进支护施工工艺,根据不同的支护工法技术特点和地质适配要求,改进施工工艺参数,喷锚施工采用湿喷工艺,优化喷射压力和角度,提高喷层密实度和粘结强度;钢拱架安装采用激光定位技术,保证安装精度和垂直度;注浆施工采用分段注浆、压力控制注浆工艺,准确控制注浆量和注浆压力,提高加固效果。

3.4 多工法协同体系完善

3.4.1 协同支护体系系统设计

打破多支护工法“简单叠加”的传统模式,根据地质条件和工程安全需求,对协同支护体系进行系统设计,使各个工法的功能相互补充、受力相互协调。首先确定各种支护工法的功能定位和协同逻辑,构建超前加固、初期支护、二次支护递进式的协同支护体系:超前支护以管棚、超前小导管注浆加固为主,提前约束前方围岩变形,为开挖创造安全环境;初期支护以喷锚、钢拱架联合支护为主,快速形成承载结构,承担施工期主要围岩荷载;二次支护以模筑混凝土、钢筋混凝土为主,进一步提高支护体系的长期稳定性,保证隧道运营安全。其次,优化各支护工法施工时序及参数匹配关系,用FLAC3D、MidasGTS等数值模拟软件计算各支护结构受力时序特征及承载比例,确定合理的施工间隔时间,超前注浆加固完成后养护72h以上,保证注浆体强度达标后再进行初期支护施工,精准匹配各工法参数,根据围岩破碎程度优化喷层厚度与钢拱架间距比值,根据围岩应力大小确定锚杆长度与预应力值,保证各支护结构协同受力、荷载均匀分布。最后建立协同支护设计验证体系,通过现场载荷试验、原型结构测试、室内模型试验等方式对协同支护体系的承载能力、抗变形能力、稳定性进行全方位的验证,根据验证问题对设计方案进行优化,保证其科学可靠。

3.4.2 协同支护施工精细管控

加强多工法协同支护施工的精细化控制,从组织、设备、质量三个方面建立控制体系,全面保证协同支护体系的实施效果。一是制定协同施工组织方案,明确开挖、注浆、喷锚、钢拱架安装等各施工班组的职责分工和协作流程,建立跨班组每日协同沟通会议制度,及时协调解决施工衔接过程中出现的问题,保证各支护工法

施工衔接顺畅、有序推进,防止施工干扰和工序脱节。二是优化施工设备的配置与协同控制,使用智能化、一体化施工设备,比如全自动喷锚机器人、钢拱架安装台车、精准注浆设备等来提高施工精度和效率,利用物联网技术实现多设备的同步作业和精准配合,如喷锚机器人与钢拱架安装台车的轨迹协同控制,保证喷层与钢拱架贴合。三是创建全流程协同支护质量控制体系,制订各个支护工法的质量验收标准和检测流程,采取超声波无损检测、钻孔取芯检测、锚杆拉拔试验等方式,对支护结构的施工质量实施全面、动态的检测,重点加强对各支护结构连接部位(钢拱架与喷层粘结处、锚杆与围岩锚固端)的质量控制,设置关键质量控制点,严格把控施工过程质量。

4 结论

复杂地质条件下水利隧洞施工支护技术优化,是保证工程安全高效建设的关键举措,核心就是创建起以地质动态演化为依据的全流程闭环优化体系。目前支护存在技术适配性差、动态调控滞后、协同效能低等问题,影响工程的安全和效益。本文提出的地质-支护协同适配、动态智能调控、分阶段差异化支护优化、多工法协同体系完善等策略,可以提高支护的适配性、调控的精准性、体系的整体性,分阶段、多工法细化优化使策略更加具有可操作性。

参考文献

- [1]郭领兵.水利工程隧洞喷锚支护及衬砌加固施工技术[J].科学技术创新,2024,(23):183-186.
- [2]代龙.水工隧洞衬砌与喷锚支护加固设计及施工分析[J].江西建材,2024,(09):162-164.
- [3]陆焱刚.水利枢纽导流隧洞进口段锚喷联合支护施工技术[J].水利技术监督,2024,(08):259-262.
- [4]李富强,康波.水利水电工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工技术研究[J].中国高新科技,2024,(14):139-141.
- [5]张生武.水利工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工[J].科学技术创新,2024,(07):161-164.

作者简介:钟超文(1981-),男,汉族,广西梧州岑溪市人,大专学历,助理工程师,研究方向:水利水电施工技术。

电气工程领域中的信息技术集成研究

林学文

362227*****1533

摘要：随着信息技术的快速发展，传统工程领域的技术升级与模式创新愈发依赖多学科融合。电气工程作为能源产业的核心支撑领域，在绿色低碳转型与智能化发展进程中，面临着效率提升、精准管控等诸多挑战。信息技术的集成应用为破解这些难题提供了有效路径。本文结合电气工程发展现状，梳理信息技术集成的核心逻辑，分析集成过程中的关键技术与核心问题，探索适配的集成模式，为推动电气工程数字化转型、提升行业发展质量提供理论与实践参考。

关键词：电气工程；信息技术；集成应用；数字化转型；关键技术

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.028

引言

在能源转型与智能制造的时代背景下，电气工程作为支撑国民经济发展的基础性领域，其发展质量直接关系到能源安全与产业升级。当前，电气工程领域面临着传统技术效率低下、管控精度不足、绿色转型压力大等诸多挑战。信息技术的快速发展为解决这些挑战提供了新的思路，其与电气工程的深度集成已成为行业发展的必然趋势。信息技术集成能够推动电气工程实现智能化升级，提升运行效率与安全水平，助力绿色低碳发展。本文围绕电气工程领域中的信息技术集成问题展开研究，梳理集成的理论基础与技术体系，分析实践应用场景与关键问题，提出相应的发展模式与保障策略，旨在为推动两者深度融合提供有益参考。

1 电气工程与信息技术集成的理论基础

1.1 电气工程的特性与趋势

电气工程是涵盖能源生产、传输、转换及应用的综合性工程领域，具有系统复杂性、运行连续性、安全要求高等核心特性。其核心功能围绕能源的高效利用与可靠供应展开，涉及发电、输电、变电、配电及用电等多个环节。当前，在能源革命与智能制造的双重驱动下，电气工程正朝着智能化、绿色化、轻量化的方向发展。传统依赖经验的运维模式逐渐被精准化管控替代，高耗能设备不断被节能型产品升级替换，分布式能源与智能电网的融合成为重要发展方向。这一发展趋势要求电气工程领域引入更先进的技术手段，以适应新时代的能源发展需求。

1.2 信息技术的内涵与特征

信息技术是以计算机技术为核心，涵盖信息采集、传输、处理、存储与应用的技术体系。其核心内涵在于

通过对各类信息的精准把控与高效利用，实现对复杂系统的优化管控。信息技术具有数字化、网络化、智能化、泛在化等应用特征。数字化实现了信息的量化表达与精准传递，网络化构建了信息交互的高效通道，智能化提升了信息处理的自主决策能力，泛在化则扩大了信息技术的应用覆盖范围。这些特征使得信息技术能够打破传统技术的时空限制，为跨领域的技术融合提供基础支撑，也为其与电气工程的集成奠定了技术前提。

1.3 集成的内在逻辑与适配性

电气工程与信息技术的集成并非简单的技术叠加，而是基于双方功能互补的深度融合。其内在逻辑在于以电气工程的实际需求为导向，借助信息技术的优势弥补传统电气工程在信息处理、精准管控等方面的不足。从适配性来看，电气工程的系统复杂性需要信息技术提供高效的数据分析与协同管控能力，其运行连续性要求信息技术具备稳定可靠的信息传输与处理功能，其安全高要求则需要信息技术构建完善的风险预警与防控体系。两者的适配性体现在技术功能的互补性、应用场景的契合性以及发展目标的一致性上，这种适配性是实现两者高效集成的关键基础。

2 核心技术体系

2.1 数据采集与传输技术集成

数据采集与传输技术是信息技术在电气工程中集成应用的基础环节。在电气工程中，需要对发电功率、输电电压、设备温度、电流变化等各类运行参数进行实时采集。通过集成传感器、智能仪表等数据采集设备，能够实现对这些参数的精准捕捉。在数据传输方面，通过融合工业以太网、无线传感网络等技术，构建稳定高效的传输通道，确保采集到的数据能够及时传递至管

控中心。这种集成应用打破了传统电气工程数据采集滞后、传输不顺畅的问题，为后续的数据分析与决策提供了及时、准确的数据支撑，保障了电气工程系统的稳定运行。

2.2 人工智能与大数据集成路径

人工智能与大数据分析技术的集成是提升电气工程智能化水平的核心路径。大数据分析技术能够对电气工程系统产生的海量运行数据进行深度挖掘，梳理数据背后的关联规律，识别系统运行中的潜在问题。人工智能技术则基于这些分析结果，实现对电气工程系统的自主决策与智能调控。例如，通过集成机器学习算法，能够对设备的运行状态进行预判，提前发现设备的故障隐患；借助智能决策模型，能够根据能源供需变化自动调整发电与配电方案。这种集成路径实现了电气工程从“被动运维”向“主动预判”的转变，大幅提升了系统的运行效率与管控精度。

2.3 物联网与云计算协同管控

物联网与云计算技术的集成构建了电气工程的协同管控体系。物联网技术通过在电气设备、传输线路等关键节点部署感知设备，实现对整个电气工程系统的全方位感知，形成“万物互联”的运行监测网络。云计算技术则为海量感知数据提供了高效的存储与处理平台，能够实现对多区域、多环节电气系统运行数据的集中管控与协同分析。通过两者的集成，管控人员能够远程实时掌握整个系统的运行状态，实现对不同区域电气设备的协同调度。这种协同管控体系打破了传统电气工程分散管控的局限，提升了系统的整体运行效率与协同作战能力。

3 实践应用场景

3.1 智能电网中的集成实践

智能电网是电气工程领域信息技术集成的重要应用场景。在智能电网建设中，通过集成数据采集、大数据分析、物联网等多项信息技术，实现对电网运行状态的实时监测、精准调控与智能优化。在发电环节，能够实现对新能源发电功率的精准预测，提升新能源电力的消纳能力；在输电环节，通过在线监测技术及时发现线路隐患，保障输电安全；在配电环节，借助智能决策系统实现负荷的合理分配，提升配电效率；在用电环节，通过智能电表与用户交互，引导用户合理用电。信息技术的集成应用让智能电网具备了自我修复、灵活互动等功能，推动了电网的智能化升级。

3.2 设备全生命周期数字化管理

信息技术的集成实现了电气工程设备全生命周期的数字化管理。从设备的研发设计阶段，通过数字化建模技术构建设备的虚拟模型，优化设计方案；在生产制造阶段，借助智能制造技术提升设备的生产精度与质量；在运行维护阶段，通过传感器实时采集设备运行数据，结合大数据分析预判设备故障，制定精准的维护方案；在报废回收阶段，通过数字化记录实现设备材料的追溯与循环利用。这种全生命周期的数字化管理模式，打破了传统设备管理中各阶段相互割裂的局面，提升了设备管理的精细化水平，降低了设备的运维成本，延长了设备的使用寿命。

3.3 工业互联网下运维升级

在工业互联网背景下，信息技术集成推动了电气工程运维的智能化升级。通过将电气设备与工业互联网平台对接，实现运维数据的集中管理与共享。借助远程监测技术，运维人员无需现场值守即可掌握设备运行状态；利用智能诊断系统，能够自动识别设备的故障类型并给出相应的解决方案；通过移动端应用，运维人员可以实时接收故障预警信息，及时开展运维工作。这种智能化运维模式改变了传统运维依赖人工巡检、效率低下的现状，提升了运维的及时性与精准性，降低了运维过程中的人力成本与安全风险，保障了电气工程系统的稳定可靠运行。

4 关键问题与优化方向

4.1 多技术融合的兼容性问题

在电气工程与信息技术集成过程中，多技术融合的兼容性与协同性问题较为突出。不同技术体系在数据格式、通信协议、接口标准等方面存在差异，导致技术之间难以实现顺畅对接。部分传统电气设备的硬件接口较为陈旧，无法直接与新型信息技术设备兼容，增加了集成的难度。同时，不同技术在运行过程中的协同性不足，可能出现数据传输延迟、决策指令执行偏差等问题。为解决这些问题，需要加强技术标准的统一建设，研发适配不同技术体系的接口转换设备，优化技术融合的架构设计，提升多技术融合的兼容性与协同性。

4.2 数据安全与隐私保护瓶颈

数据安全与隐私保护是信息技术集成过程中面临的重要技术瓶颈。电气工程系统的运行数据包含大量敏感信息，这些数据在采集、传输、处理过程中，容易面临被窃取、篡改、泄露的风险。随着集成技术的不断深入，数据交互的频率与范围不断扩大，安全风险也随之增加。当前，数据安全防护技术的发展速度与集成应用

的需求不完全匹配,缺乏完善的安全防护体系。为突破这一瓶颈,需要加强数据加密技术、身份认证技术、访问控制技术的研发与应用,构建全流程的数据安全防护体系,明确数据安全责任,保障电气工程数据的安全与隐私。

4.3 专业人才培养体系建设

面向信息技术集成的电气工程专业人才短缺问题制约了集成技术的推广应用。当前,电气工程领域的传统人才往往缺乏信息技术相关知识,而信息技术领域的人才对电气工程的核心原理与运行机制了解不足,跨学科复合型人才严重匮乏。现有人才培养体系中,跨学科课程设置较少,实践教学环节与实际集成应用需求脱节,无法满足行业发展对人才的要求。因此,需要优化人才培养体系,增设跨学科融合课程,加强校企合作,搭建实践教学平台,提升学生的跨学科应用能力。同时,加强对现有从业人员的继续教育,提升其信息技术应用水平,构建完善的人才培养与储备体系。

5 发展模式与保障策略

5.1 政企协同的发展模式构建

构建政府引导与市场驱动相结合的集成发展模式是推动电气工程信息技术集成的重要路径。政府应发挥引导作用,出台相关扶持政策,加大对集成技术研发的资金投入,搭建跨领域的技术交流平台,完善相关行业标准与规范。市场应发挥驱动作用,以企业为主体,围绕市场需求开展集成技术的研发与应用,通过市场竞争激发企业的创新活力。政企协同能够实现资源的优化配置,政府为市场提供良好的发展环境,市场为政府政策的落实提供实践载体。这种发展模式能够有效推动集成技术的产业化应用,加速电气工程领域的数字化转型进程。

5.2 协同创新与标准体系完善

跨领域协同创新机制与技术标准体系的完善是保障集成技术健康发展的关键。应搭建高校、科研机构、企业之间的协同创新平台,加强跨领域的技术交流与合作,集中优势资源攻克集成技术中的核心难题。在协同创新过程中,注重技术成果的转化与应用,将科研成果快速转化为实际生产力。同时,加快完善技术标准体系,统一数据格式、通信协议、接口规范等关键技术指标,消除技术壁垒。技术标准体系的完善能够规范集成技术

的应用流程,提升集成技术的可靠性与安全性,为集成技术的推广应用提供保障。

5.3 风险防控与长效保障

建立信息技术集成应用的风险防控与长效保障措施是确保集成工作持续推进的重要支撑。应建立完善的风险评估机制,定期对集成技术应用过程中的安全风险、技术风险、市场风险进行评估,及时发现并处置潜在风险。针对不同类型的风险,制定相应的防控预案,提升风险应对能力。同时,构建长效保障机制,加强对集成技术应用的跟踪监测,及时解决应用过程中出现的问题。加大对集成技术研发的持续投入,鼓励企业开展技术创新,提升集成技术的先进性与稳定性。通过风险防控与长效保障措施,为电气工程信息技术集成的持续健康发展提供有力支撑。

6 结论

本文围绕电气工程领域中的信息技术集成问题展开系统研究,梳理了两者集成的理论基础,明确了集成的内在逻辑与适配性。分析了信息技术集成的核心技术体系,包括数据采集与传输、人工智能与大数据、物联网与云计算等关键技术的集成路径。探讨了智能电网、设备全生命周期管理、工业互联网下运维升级等实践应用场景,展现了信息技术集成的应用价值。剖析了集成过程中存在的多技术兼容性、数据安全、人才短缺等关键问题,并提出了政企协同发展、完善协同创新与标准体系、建立风险防控与长效保障等优化策略。

参考文献

- [1] 邝艳苹. 电气工程自动化信息技术关键及其节能设计要点[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(08): 175-177.
- [2] 林戊. 电子信息技术在电气工程中的应用分析[J]. 专用汽车, 2023, (01): 39-41.
- [3] 郑庆强, 韩波, 韩玉勇, 等. 电气工程自动化信息技术及其节能设计分析[J]. 信息记录材料, 2022, 23(09): 168-170.
- [4] 胡春鹏. 电气工程自动化信息技术及节能措施的研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(04): 256-257.
- [5] 刘婉旭. 电气工程自动化信息技术及其节能设计与分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(03): 83-84.

水利工程中隧洞引水测量控制的技术研究

张凯 李奉育 刘林

江苏省水利科学研究院，江苏南京，210017；

摘要：引水隧洞是水利枢纽工程核心组成部分，其施工测量精度直接决定工程结构稳定性、贯通质量及运行安全性。但隧洞施工环境封闭、通视条件差、作业空间受限，导致传统测量技术精度衰减、效率偏低，增加了测量难度。为破解此技术瓶颈，本文以某水库引水隧洞工程为研究对象，开展施工测量控制技术体系构建与优化研究。整合 GNSS 测量、精密水准测量及三维激光扫描技术，构建多源数据融合的综合测量控制体系；结合导线测量与陀螺定向技术，优化贯通测量流程与参数。本研究旨在提升引水隧洞施工测量精度与可靠性，为同类水利隧洞工程高质量施工提供技术参考。

关键词：水利工程；引水隧洞；控制测量

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.029

引言

水利工程在国民经济与社会发展进程中占据关键地位，科学规划与建设水利设施，可有效缓解区域水资源短缺矛盾，显著提升水资源配置与利用效率。引水隧洞作为水利工程体系的核心输水构筑物，承担着跨区域长距离输水、优化水资源时空分布的重要职能，其施工质量直接决定整个水利枢纽工程的运行安全与结构稳定性。开展科学规范的施工控制测量工作，是保障引水隧洞施工精度、提升工程建设效率的核心技术手段，对保障工程整体质量、推动区域经济可持续发展意义重大。

1 隧洞引水施工控制测量

引水隧洞施工是水利工程建设的关键环节，对测量精度有着严苛要求。尽管此类隧洞施工线路相对较短，但施工过程易受地质条件、工程属性等多重因素制约，测量数据的精准性与可靠性直接决定隧洞贯通质量，若数据失真或精度不足，将对工程整体贯通效果造成严重影响。

测量方案的制定需严格依托工程实际工况，并指派专人全程负责管控。具体实施流程需遵循以下步骤：一是科学布设洞内控制测量网，为后续施工测量提供基准依据；二是在隧洞贯通过程中，同步开展贯通结果的精准检测，实时掌握施工偏差；三是若检测发现数据偏差超出规范阈值，需立即暂停贯通施工，待完成偏差纠正并复核合格后，方可恢复作业。

在此基础上，相关技术人员需结合工程特点优化设计测量方案，明确测量流程与技术标准，确保施工人员严格依照方案开展作业，从技术层面提升引水隧洞施工控制测量精度，保障工程建设有序推进。

2 引水隧洞施工控制测量

引水隧洞施工中，控制测量是保障工程质量的核心技术环节，作用关键。其核心是依据施工设计要求，确保双向开挖在贯通面精准对接，需严格遵循技术规范管控横向与高程贯通误差，保障贯通精度达标。从工程实践看，施工控制测量主要涵盖洞外与洞内两大范畴，二者协同构成完整测量控制体系。

2.1 平面控制测量

引水隧洞施工中，控制测量是保障工程质量的核心技术环节，核心是依据设计要求确保双向开挖在贯通面精准对接，严格管控横向与高程贯通误差以保障精度达标。工程实践中，控制测量分为洞外与洞内两类，协同构成完整体系。其中洞外控制测量核心是测定洞口控制点平面位置，为地下工程设计、开挖导向及精准贯通提供基准。早期受技术限制，洞外控制多采用直接定线、三角网等传统方法，存在精度不足、成本高、适用范围窄等缺陷；随着测量技术发展，现阶段广泛采用全站仪布设导线并利用其光电测距功能开展工作，可满足隧洞贯通平面控制需求，且精度与效率显著提升。

2.2 高程控制网的注意事项

引水隧洞施工中，控制测量是保障工程质量的核心技术环节，核心目标是依据设计要求实现双向开挖的贯通面精准对接，严格管控横向与高程贯通误差以保障精度达标。工程实践中，控制测量分为洞外、洞内两大类别，二者协同构成完整的测量控制体系。其中，洞外控制测量的核心任务为测定洞口控制点平面位置，为地下工程设计、开挖导向及精准贯通提供基准依据。受早期技术条件限制，洞外控制多采用直接定线、三角网等传

统方法,此类方法存在精度不足、成本偏高、适用范围受限等缺陷;随着工程测量技术发展,现阶段已广泛采用全站仪布设导线,并依托其光电测距功能开展洞外控制测量作业。

2.3 隧洞洞内控制测量

洞内控制测量主要包含平面与高程两类,与洞外控制体系协同保障隧洞贯通精度:

2.3.1 洞内平面控制测量(导线测量)

需结合开挖进度有序布设导线,以洞口控制点为起点测定坐标。隧洞施工环境复杂、干扰因素多且作业时效性强,中小型隧洞一般仅布设施工导线与基本导线。施工导线边长 30~50m,沿洞轴线布设;基本导线边长 100~150m,需与施工导线协同规划,且精度等级高于施工导线。

2.3.2 洞内高程控制测量(水准测量)

作业原理与洞外水准测量基本一致,受洞内环境限制,视线长度宜控制在 50m 以内。若以洞顶板作为水准点,观测时需倒置水准尺,以尺底顶紧点位标志。

引水隧洞施工中,控制测量是保障工程质量的核心技术环节,核心是依据设计要求确保双向开挖在贯通面精准对接,严格管控横向与高程贯通误差以保障精度达标。工程实践中,控制测量分为洞外与洞内两类,协同构成完整体系。其中洞外控制测量核心是测定洞口控制点平面位置,为地下工程设计、开挖导向及精准贯通提供基准。早期受技术限制,洞外控制多采用直接定线、三角网等传统方法,存在精度不足、成本高、适用范围窄等缺陷;随着测量技术发展,现阶段广泛采用全站仪布设导线并利用其光电测距功能开展作业。

2.4 洞内测量注意事项

引水隧洞施工中,控制测量是保障工程质量的核心环节,核心目标是按设计要求实现双向开挖贯通面精准对接,严控横向与高程贯通误差。实践中控制测量分为洞外、洞内两类,协同构成完整体系。洞外控制核心为测定洞口控制点平面位置,为地下工程设计、开挖导向及精准贯通提供基准;早期采用直接定线、三角网等传统方法,存在精度不足、成本高、适用范围窄等缺陷,现阶段已广泛采用全站仪布设导线并利用其光电测距功能。

3 施工挖掘中的测量

引水隧洞施工控制测量是质量保障核心,旨在实现双向开挖精准贯通,严控横、高程贯通误差,分为洞外、洞内两类体系。洞外控制以测定洞口控制点平面位置为

核心,早期传统方法存在诸多缺陷,现广泛应用全站仪导线及光电测距技术。

3.1 施工挖掘的方向选择

引水隧洞施工中,控制测量是保障工程质量的核心环节,其核心目标是依据设计要求实现双向开挖的贯通面精准对接,并严格管控横向与高程贯通误差。该测量工作分为洞外、洞内两大类,二者协同构成完整的测量控制体系。其中,洞外控制以测定洞口控制点平面位置为核心,为地下工程设计、开挖导向及精准贯通提供基准;早期采用的直接定线、三角网等传统方法存在精度不足、成本偏高、适用范围受限等缺陷,现阶段已广泛运用全站仪布设导线并依托其光电测距功能开展作业。

3.2 中线与腰线的测定

洞内中线测定需先于洞口开挖面布设中线桩,以此为基准开展掘进作业;掘进过程中,每推进 20m 需在隧洞顶部埋设中线里程桩,既便于桩体保存,也可保障后续作业有序开展。隧洞岩壁上以 10m 为间隔布设一组腰线,腰线高程随中线里程动态调整,且始终与隧洞地坪高程线保持平行。中线与腰线的布设精度直接决定隧洞掘进方向的准确性,需严格按照规范流程实施。

引水隧洞施工中,控制测量是保障工程质量的核心环节,核心目标是按设计要求实现双向开挖贯通面精准对接,严控横向与高程贯通误差。实践中控制测量分为洞外、洞内两类,协同构成完整体系。洞外控制核心为测定洞口控制点平面位置,为地下工程设计、开挖导向及精准贯通提供基准;早期采用直接定线、三角网等传统方法,存在精度不足、成本高、适用范围窄等缺陷,现阶段已广泛采用全站仪布设导线并利用其光电测距功能。

3.3 隧洞掘进方向的对策

引水隧洞施工中,控制测量是保障工程质量的核心技术环节,核心目标为依据设计要求实现双向开挖贯通面精准对接,严格管控横向及高程贯通误差。实践中,控制测量分为洞外与洞内两大体系,二者协同构成完整的测量控制架构。其中,洞外控制以洞口控制点平面位置测定为核心,为地下工程设计、开挖导向及精准贯通提供基准支撑;早期采用的直接定线、三角网等传统方法,存在精度不足、成本偏高、适用范围受限等短板,现阶段已广泛应用全站仪导线布设及光电测距技术替代。

4 提高引水隧洞测量精度的建议

结合当前引水隧洞施工发展趋势,实践中对测量精度的要求显著提高,施工单位需结合水利工程项目实际需求,针对性采取措施提升测量精度。基于工程实践经验,核心抓手在于强化施工控制测量工作——作为保障工程质量的核心技术环节,其核心目标是依据设计要求实现双向开挖贯通面精准对接,严格管控横向及高程贯通误差。实践中,控制测量分为洞外与洞内两大体系,二者协同构成完整测量控制架构:洞外控制以洞口控制点平面位置测定为核心,为地下工程设计、开挖导向及精准贯通提供基准支撑;早期采用的直接定线、三角网等传统方法存在精度不足、成本偏高、适用范围受限等短板,现阶段已广泛采用全站仪导线布设及光电测距技术替代,有效提升了测量精度与作业效率。

4.1 严格内控工作

需结合水利工程项目特性及施工要求,科学优化洞内控制测量设计,确保工程设计与施工全过程符合技术规范,为工程顺利实施提供保障。同时,应定期开展施工人员专项培训,强化其安全意识与规范作业理念,确保严格按设计方案执行。在洞内控制测量设计与实施中,需明确要求施工人员采用三联脚架法作业;若三角高程等级达到二等及以上,必须采取精度提升措施,保障测量数据精准可靠。

4.2 开展监测工作

精度保障需贯穿施工全流程,具体措施如下:施工前,责任单位应指派专业人员开展测量设备专项检测,重点核查设备安装到位情况及是否存在松动、偏移等问题,发现隐患需立即更换设备,且更换工作须在隧洞施工启动前完成,避免影响整体进度。施工过程中,一方面需结合水利工程项目特性及施工要求,科学优化洞内控制测量设计,确保工程设计与施工全过程符合技术规范;另一方面应强化开挖监测工作,当开挖至规定距离时及时增设导线以保障开挖准确度,若发现数据异常需立即复核重测,确保数据真实可靠。同时,需定期开展施工人员专项培训,强化其安全意识与规范作业理念,确保严格按设计方案执行;洞内控制测量实施中,需明确要求采用三联脚架法作业,若三角高程等级达到二等及以上,必须采取精度提升措施,保障测量数据精准性。

4.3 估算隧洞洞内控制的方法

隧洞洞内控制测量数据估算需重点把握以下核心要点:其一,隧洞开挖至规定距离时,需精准完成导线估算;其二,平面控制测量估算宜采用等边直伸型导线,

以提升估算效率与准确性;其三,控制测量应优先选用长边布设,确保满足作业最高精度标准;其四,若洞内存在混凝土衬砌,需及时开展精度估算,且在贯通误差分配过程中重点关注衬砌状态,保障其处于最佳状态以严控施工质量;其五,三角高程测量需严格按施工方案执行,必要时指派专人定期巡检,减少违规操作,确保数据估算精准。

全流程精度保障措施:施工前,专业人员专项检测测量设备,核查安装及松动、偏移等隐患,问题设备须在施工前更换,避免影响进度。施工中,优化洞内控制测量设计,确保符合技术规范;强化开挖监测,规定距离增设导线保障开挖准确度,数据异常立即复核重测;定期培训施工人员,强化规范作业理念;洞内控制测量采用三联脚架法,三角高程达二等及以上等级时,采取针对性精度提升措施。

5 结语

综上,水利工程建设为系统性工程,各环节需严守规范精准落实。引水隧洞施工控制测量精度至关重要,直接关乎工程安全质量与效益实现,施工单位需高度重视,结合经验与实际,严守规范细化技术环节,科学开展测量并配套落实对策。

核心要点与保障措施:洞内测量数据估算需把握五点:开挖至规定距离精准估算导线;平面控制优先采用等边直伸型导线;控制测量选用长边布设保障高精度;有混凝土衬砌时及时估算精度,贯通误差分配关注衬砌状态;三角高程测量严守方案,必要时专人巡检防违规。全流程保障:施工前专项检测设备,隐患设备前置更换;施工中优化洞内控制设计、强化开挖监测(规定距离增设导线、异常复核)、定期培训人员,洞内控制采用三联脚架法,三角高程达二等及以上时提升精度。未来水利施工实践发展将推动相关工作持续突破。

参考文献

- [1] 范志峰. 水利工程中引水隧洞施工控制测量的技术要点[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(07): 71-73. DOI: 10.13726/j.cnki.11-2706/tq.2025.07.071.03.
- [2] 赵智. 水利工程引水隧洞施工贯通测量和智能预测研究[J]. 经纬天地, 2023, (04): 13-16.
- [3] 胡浩明. 水利工程中引水隧洞施工控制测量的研究[J]. 珠江水运, 2022, (21): 24-26. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2022.21.006.
- [4] 席文欢. 超长引水隧洞贯通测量技术的应用研究[J]. 建材与装饰, 2019, (06): 282-283.

GNSS-RTK 与全站仪联合测量在河道断面监测中的精度优化研究

彭李阳

新疆兵团勘测设计院集团股份有限公司, 新疆乌鲁木齐, 830000;

摘要: 本文针对河道断面监测工作中传统测量手段存在效率与精度受限的状况, 深入钻研了全球导航卫星系统实时动态定位技术与全站仪联合测量技术的集成应用及精度改良。文章开篇阐明了两种技术的关键工作机理及其互补特性; 进而研究了该联合技术应用到河道断面监测在提高数据可靠性、作业成效与应对复杂情形方面的多方面意义; 通过谋划联合测量的协同作业架构、创立数据融合与质量把控模型, 探究了提升整体测量精度的关键技术途径。GNSS-RTK 与全站仪的协同运用, 能够切实弥补单一技术的缺陷, 大幅提高河道断面监测成果的精准度与可信度, 为水文剖析、防洪整治及河道管控提供更优良的数据支撑。

关键词: GNSS-RTK; 全站仪; 联合测量; 河道断面监测; 精度优化; 数据融合

DOI: 10. 69979/3060-8767. 26. 02. 030

引言

河道断面监测作为水文观测、河床演变剖析、防洪工程规划与水资源管控的基础工作, 其测量数据的精准度与可信度直接影响相关决策的科学性。惯用的断面测量方式, 如单纯采用全站仪, 在通视状况优良区域精准度高, 然而存在作业效能欠佳、对复杂地貌适应能力不够等弊端。而以 GNSS-RTK 为典型代表的卫星定位技术, 虽说可以高效地得到绝对坐标, 但在信号遮挡状况严重的河道陡岸、桥下或是林木密集区域, 其准确性与稳定性会明显下滑。因此, 探寻使 GNSS-RTK 与全站仪实现有机结合, 全面发挥彼此长处, 成为增强河道断面监测总体性能的有效办法。本研究着眼于深度钻研两种技术的联合应用原理, 剖析它们的协同效益, 并着重聚焦精度优化这一核心目的, 为实际工程项目提供全面的技术借鉴与理论支撑。

1 GNSS-RTK 与全站仪联合测量的技术原理

1.1 GNSS-RTK 技术的基本原理

GNSS-RTK 技术凭借载波相位差分原理来实现, 它利用基准站接收卫星信号, 求解载波相位观测值跟已知坐标之间的误差修正信息, 再经数据链实时传送给流动站。流动站一边接收卫星发出的信号, 一边接收修正数据, 实施实时差分运算, 进而在动态状况下达成厘米级乃至毫米级的平面与高程定位精度。该技术的关键长处在于能够自主、快捷地获取测点在统一大地坐标系下的

三维坐标, 不需要点与点之间通视。

1.2 全站仪技术的基本原理

全站仪是一种融合光电测距与电子测角功能的地面测量器具, 其工作机制是借助发出并接纳反射回来的光波(红外或激光)来测定斜距。同时利用精密光栅或编码器度量水平角和垂直角, 利用测站点既定的坐标及方位, 整合观测得到的角度与距离, 就能够算出目标点的三维坐标^[1]。全站仪的测量精度达到极高水准, 特别是高程方向上的相对精度展现出明显优势, 然而其作业过程对测站与目标点之间的光学通视存在严格依赖。

1.3 联合测量的协同工作机理

联合测量的协同原理呈现为优势互补与准则统一, 首先凭借 GNSS-RTK 技术迅速、无妨碍地布置控制网并获取测站点在统一坐标系中的高精度坐标, 在 GNSS 信号欠佳的局部地段。将这些已测定好坐标的点作为全站仪测站或后视方向的基准, 借助全站仪开展碎部断面点的测量。通过共享同一空间参照, 把全站仪测得的相对坐标成果顺畅转换到绝对坐标系当中, 以此实现全域无盲区、高成效、高精度的数据覆盖。

2 联合测量技术在河道断面监测中的应用意义

2.1 显著提升数据获取的可靠性与完整性

河道地貌繁复, 往往同时具备宽阔水面与植被葱郁、陡立的岸坡, 联合技术方案支持在开阔区域借助

GNSS-RTK 迅速测定水面边界与滩涂,在遮蔽地带换用全站仪进行精准测量。这种动态的转换保证了不论环境怎样变动,皆可选用当前最恰当的测量办法,进而保证了整个断面数据收集的完整性和不同区段数据精准度的可靠性,防止了因信号中断或视线受阻造成的数据丢失。

2.2 有效提高外业作业的整体效率

传统全站仪断面测量要多次移站且需维持烦琐的通视条件。在复合测量时,GNSS-RTK 可快速构建稀疏的控制体系,全站仪能够在该框架内自主设站,不必与远处控制点实现通视,显著简化了测量流程^[2]。GNSS-RTK 可以自主完成大部分空旷区域的测量任务,降低了全站仪的设站频次,两者同步或交替作业,能够极大缩减外业工期,降低工作强度。

2.3 增强对复杂监测环境的适应性

河道监测往往面临着动态水流、变化气候以及复杂地貌的考验,联合技术强化了系统的抗干扰性。当微风引起水面小幅晃动、干扰全站仪对准棱镜时,可以采用 GNSS-RTK 开展水面点测量;当河岸树木对卫星信号形成部分遮挡时,可借助全站仪从附近开辟测站实施补充测量。这种彼此备份、灵动组合的能力,让测量工作得以坦然面对各类不利环境状况,确保项目按质按时完成。

3 河道断面监测中联合测量的精度优化研究

3.1 优化联合测量的协同作业模式设计

河道地形测量精度保障工作,发端于一套严密、合理的实地测量方案设计。在正式测量工作开启前,务必开展周全的实地勘察,全方位考量河道地形的复杂状况(例如陡岸、浅滩)、两岸植被的疏密与高低对信号造成的遮挡情形,以及或许存在的多路径效应干扰区域。凭借踏勘的结果,应预先筹划两种核心测量技术的最优布局方案:针对 GNSS-RTK 技术而言,应在地势偏高、视野宽广且远离强反射界面的稳固之处建立基准站,还需用心设计流动站的行驶轨迹,争取以最大效能覆盖尽量多的可测区域,并且在地图上确切标定受桥梁、密林等作用的 GNSS 信号“盲区”范围。针对全站仪测量而言,需要在它的可视范围之内,挑选能最大程度覆盖上述 GNSS 盲区的若干关键测站位置。

该设计遵循的核心准则是达成两种技术的长处互补与顺畅衔接,全站仪测站的布置必须保证让 GNSS 盲

区获得有效的、无缺漏的测量覆盖,而且相邻测站之间要规划充足的重叠测量范围,从而借助重复观测开展数据自我核验,及时找出粗差^[3]。最为关键之处在于,在 GNSS-RTK 与全站仪这两种测量手段的范围重合区域里,一定要硬性要求采集一定数量(通常不少于总测量点数的 5%)的公共特征点。这些公共点形成了后期把两套独立坐标系下的观测数据进行高精度整合与归一的“控制骨架”,还是客观评估与审定整个测区最终成果精度的直接凭据,借助这种具备前瞻性、突出冗余与校验的作业安排,从根源上为获取高精度、高稳定性的河道地形数据筑牢了稳固根基。

3.2 建立严密的数据融合与处理模型

数据融合是聚合多源观测成果、创建高精度无缝地形模型的关键技术步骤。其首要的操作是达成坐标系的统一,鉴于全站仪测量所得的是以测站为原点的局部极坐标系数据,需借助其测站点和后视定向点这两个在全局坐标系中已由 GNSS-RTK 精准测定的控制点,实施严格的三维坐标转换,把全站仪的全部局部点成果整体、严谨地换算到与 GNSS-RTK 数据相符的全球或地方坐标系下,这是保障所有数据空间基准一致的基础。

当坐标系完成统一后,融合的关键方向转变为消除残存的系统性偏差。借助于在重叠地带布置的公共点阵列(例如,在河岸硬质堤坡上布置的 20 个标记点),能够精准算出两套数据在这些点上的平面坐标差值和高程差值,对这些偏差数值开展统计剖析。要是能够甄别出显著的趋势性误差,就能够搭建一个小范围的网格修正模型,对全站仪数据区域开展更进一步的精准校准。针对水位波动剧烈的河道水面地段,应当考量 GNSS-RTK 测量水面点和全站仪测量水边线时因时间差引发的水位变动。需要引入同步或准同步的水文观测站水位资料,依照测量时间戳,对水面点的高程开展动态校正,把不同时刻测量的水面高程归并到同一基准水位面上。凭借这一系列从全局到细节、从静态到动态的缜密数据处理,才可以最大程度地消除因测量手段、观测时段不同而产生的系统误差与矛盾,最终融合生成一个高精度、高一致性的完整河道数字地形模型。

3.3 实施全程动态的质量控制与精度评定

设立并施行一个贯穿测量全进程的、可溯源的质量把控体系,是保证并改善河道地形测量精确性的基础。

在数据收集的现场阶段,质量把控必须为实时并主动的。针对 GNSS-RTK 流动站而言,工作者需始终监控接收机的固定解情形、卫星数目,一旦察觉到精度指标超出范围或出现浮点解。该测点必须马上重新测量,针对全站仪而言,应在现场对关键地物点实施多测回观测,同时即时算出测回差,要是超出限差,同样要现场重新作业,这种“边测边检”的做法,可在源头消除大量粗差。

在室内资料处理与成果评判阶段,质量把控变得更为系统与深入。除了运用预设好的公共点来进行两套数据融合的内部符合精度查验外,应当在测区内额外布置一定数量(通常占总点数的 5%—10%)、未参与任何计算流程的独立检查点。这些检查点得采用精度更优的办法(例如更高层级的 RTK 测量或精密水准)进行测定,用于对最终融合后的地形数据成果实施外部检验^[4]。最终的精度评定报告书,切不可仅仅局限于给出仪器标称精度,而是要依据所有检查点的实测值和成果值之间的偏差,统计运算出体现整个测区成果实际可靠性的整体精度指标,如平面点位中误差。只有借助这种从实时流程监控到最终成果校验的闭环质量保证,所有的技术革新与数据融合程序才具有现实意义,所提交的测量成果的精准度才具备客观的、量化的可靠性。

4 总结

两种技术的结合实际上是卫星绝对定位技术与地面相对极坐标测量技术的优势互补,其协作工作原理为创建全域高精度、高效率的测量体系筑牢了理论根基。从应用价值角度而言,该联合技术极大提高了数据稳定性、作业成效与环境适应能力,是化解复杂河道监测难题的有效办法。在精度提升维度,研究表明需凭借科学的协同作业模式规划、严谨的数据融合处理架构以及全程动态的质量管控机制,才能够把技术联合的长处转变为最终成果精度的切实提高。在未来,伴随装备智能化与数据处理自动化程度的更深层次提升,GNSS-RTK 与全站仪的结合会更为紧密且高效,在智慧水文、数字孪生河道等新兴领域展现出更大的效能。

参考文献

- [1] 陈洪良. 全站仪和 GNSS-RTK 联合在数字测图中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(3): 3.
- [2] 杨志文. 全站仪和 GNSS-RTK 联合在数字测图中的应用初探[J]. 机械管理开发, 2018, 33(4): 3.
- [3] 康蛇龙. GNSS-RTK 联合数字测深仪在河道地形测量中的应用[J]. 水科学与工程, 2022(5): 77-79.
- [4] 许天一. GNSS 定位技术在水下测绘中的应用分析[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术, 2023(5): 3.

深埋隧洞断层破碎带突泥涌水灾害机理与综合控制技术 研究——以滇中引水工程香炉山隧洞桩号 DL I 3+570~ 3+680 涌水突泥为例

和超¹ 郭勇²

1 云南省滇中引水有限公司, 云南昆明, 650000;

2 云南省滇中引水工程建设管理局, 云南昆明, 650000;

摘要: 随着我国西部大开发与“十四五”水利规划的实施, 深埋长隧洞工程在复杂地质条件下的建设日益增多, 突泥涌水灾害成为制约工程安全与进度的关键难题。本文以香炉山隧洞 DL I 3+570~3+680 段突泥涌水事件为工程背景, 系统开展了断层破碎带地质条件下突泥涌水灾害机理分析, 提出了“地质预报先行、清淤封闭同步、灌浆固结为主、排水降压为辅、结构加固协同、动态调控贯穿”的综合治理技术体系。通过超前地质探测、分段高压灌浆、反滤排水系统、止浆墙结构优化及智能监测等手段, 实现了高压富水断裂带条件下隧洞围岩稳定与渗流控制。工程实践表明, 该体系在突泥涌水治理中表现出良好的适用性、可靠性与经济性, 可为类似深埋隧洞地质灾害防治提供理论支持与技术参考。

关键词: 深埋隧洞; 突泥涌水; 断层破碎带; 灌浆固结; 动态调控; 灾害治理

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.031

1 引言

1.1 研究背景与意义

近年来, 随着我国水利水电、交通、能源等重大基础设施向西南高山峡谷区域延伸, 深埋长隧洞工程面临的地质条件日趋复杂。突泥涌水作为隧洞施工中最具破坏性的地质灾害之一, 具有突发性强、水量大、携渣量大、持续时间长、治理难度高等特点, 严重威胁施工人员安全、设备安全与工程进度。据统计, 我国近五年在建隧洞工程中, 约 30% 遭遇过不同程度的突水突泥灾害, 其中断层破碎带、岩溶通道、富水软弱围岩段是灾害高发区。因此, 开展深埋隧洞突泥涌水灾害机理与综合治理技术研究, 具有重要的理论价值与工程实践意义。

1.2 国内外研究现状

国内外学者在突水突泥机理、预测预报、治理技术等方面开展了广泛研究。在机理方面, 多聚焦于水力劈裂、渗透失稳、颗粒迁移等物理过程; 在预报方面, 超前地质钻探、物探技术(如 TSP、地质雷达)、微震监测等逐步成熟; 在治理方面, 灌浆堵水、排水降压、结构加固等传统方法不断优化, 注浆材料、工艺参数、智能调控等方面也取得新进展。然而, 针对高压富水断层破碎带这一特殊地质条件, 仍缺乏系统性的治理技术体系与动态调控机制, 尤其在工程实践中如何实现“预报

—治理—监测—调整”一体化流程, 仍需进一步探索。

1.3 研究内容与方法

本文以香炉山隧洞突泥涌水治理工程为案例, 采用理论分析、现场试验与工程验证相结合的方法, 开展以下研究:

- (1) 分析断层破碎带地质特征与突泥涌水成因机制;
- (2) 构建“预报—治理—监测”三位一体的综合治理技术体系;
- (3) 阐述关键工艺参数与施工控制要点;
- (4) 通过效果检测与工程反馈, 验证治理效果并提出优化建议。

2 工程概况与地质条件分析

2.1 工程背景

香炉山隧洞为某调水工程关键线路, 地质条件极端复杂, 2021 年 2 月 26 日, 1#支洞下游掌子面 DL I 3+681.5 处发生突泥涌水, 初始为渗水, 随后发展为持续性涌水携渣, 最大涌水量约 120m³/h, 携带碎屑物约 800m³, 导致掌子面坍塌、设备淹埋, 施工中断。

2.2 地质条件与灾害特征

该段段围岩为灰白~灰黄色大理岩, 微风化, 岩质较坚硬; 围岩呈厚~中厚层结构, 局部块状结构, 岩

体总体较完整,局部因陡倾裂隙切割,完整性差,部分岩体较破碎,有轻微掉块现象;洞室总体呈潮湿状,局部渗滴水或线状出水;该段围岩类别为III2类。掌子面揭露一次级断层,主断带宽约1m,断层带物质成分为碎裂岩~碎块岩夹碎粉岩,原岩为大理岩及石英片岩,受构造挤压迹象明显,局部有泥化现象,围岩性状差,地下水沿断层破碎带产生渗透破坏,造成突泥涌水及围岩垮塌。

2.3 灾害成因初步判断

(1) 地质因素: 断层破碎带物质松散、胶结差,为突泥提供物源;

(2) 水文因素: 富水断裂带形成高压水头,水力梯度大;

(3) 施工因素: 开挖扰动打破围岩一水压平衡,诱发渗透失稳。

3 突泥涌水综合治理技术体系构建

3.1 治理原则与总体思路

坚持“以堵为主、堵排结合、先固后挖、动态调控”原则,形成以下治理流程:

地质预报→清淤封闭→灌浆固结→排水降压→结构加固→效果检测→补充治理

3.2 超前地质预报与风险评估

采用TSP303地震波探测与地质雷达扫描相结合,初步探明前方30m范围内岩体破碎程度与含水特征。根据预报结果,将DL I 3+680~3+720段划为高风险区,制定专项施工预案。

3.3 清淤与临时封闭技术

清淤采用“机械开挖+人工修整”方式,铺设洞渣道路,设专人监测涌渣体变形。在DL I 3+659处浇筑C30混凝土挡渣墙(宽2m、高3.1m),墙基与边墙设置砂浆锚杆($\phi 25\text{mm}$, $L=2\text{m}$),增强抗滑移与抗倾覆能力。渣体表面铺设 $\phi 6@15\times 15\text{cm}$ 双层钢筋网,喷射50cm厚C25混凝土,形成封闭壳层。

3.4 灌浆固结与排水降压系统

灌浆孔: $\phi 89\text{mm}$,孔深10~20m,孔距 $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}$,梅花形布置;浆液类型:普通水泥浆(水灰比0.6~1:1)与水泥—水玻璃双浆液(体积比1:1);注浆压力:0.5~1.0MPa(初期),2.5~5.0MPa(补充灌浆);分段长度:5~10m,采用下行式分段注浆。

在拱顶与侧墙布置 $\phi 110\text{mm}$ 泄水孔,外偏 $20^\circ\sim 25^\circ$,孔内设反滤包与孔口阀门,将前方水体引至后方

排水沟,降低掌子面水压力。

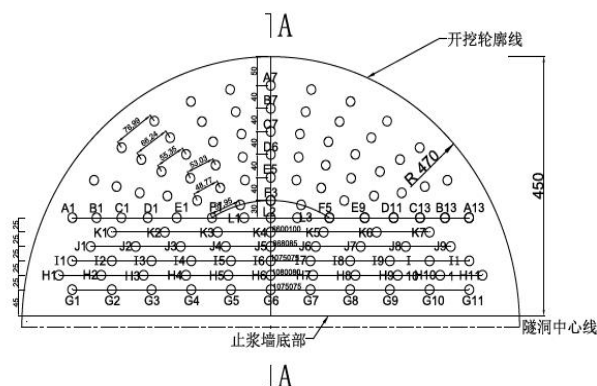


图 1DLI3+670 处钻孔灌浆布置示意图 (横断面)

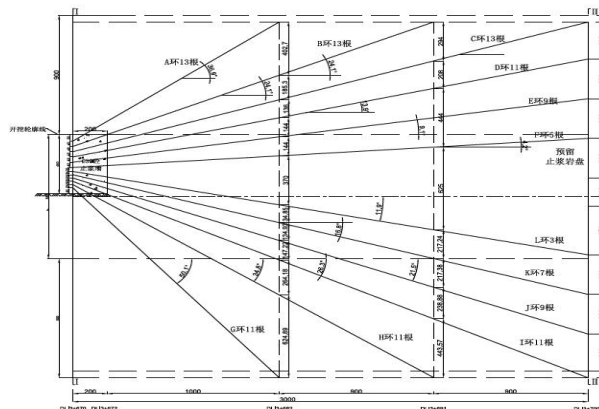


图 2DLI3+670 处钻孔灌浆布置示意图 (纵断面)

3.5 止浆墙结构优化与底板加固

在DL I 3+672处浇筑C30止浆墙(宽2m、高4.5m),墙后渣体表面采用0.5m厚C30混凝土封闭,防止浆液外漏。针对注浆过程中底板开裂问题,采用I20a工字钢($L=10\text{m}$,间距1m)与 $\phi 8@15\times 15\text{cm}$ 双层钢筋网加固,重新浇筑50cm厚C30混凝土。

3.6 灌浆效果检测与补充治理

通过 $\phi 91\text{mm}$ 取芯孔检测发现,隧洞下部围岩注浆效果不佳,存在富水断裂带。随即增设 $\phi 110\text{mm}$ 排水孔,拆除部分挡渣墙,在DL I 3+665~668段浇筑3m厚C30止浆墙(下墙),并进行扰动灌浆,压力提升至2.5~5.0MPa,确保下部围岩固结。

4 施工工艺与动态调控机制

4.1 分区分步施工组织

采用“竖向分层、横向分块”施工策略,先处理下部富水区,再逐步向上推进。每循环进尺不超过3m,全程实施变形与渗压监测。

4.2 灌浆工艺控制要点

(1) 钻孔顺序: 先外围后内部、先下部后上部;

(2) 浆液调配: 根据出水情况动态调整水灰比与胶凝时间;

(3) 压力控制: 采用“低压慢灌—逐步升压”模式, 避免劈裂围岩;

(4) 结束标准: 灌浆压力达到设计值且吸浆量小于 2L/min。

4.3 动态监测与预警系统

布设多点位移计、渗压计、视频监控装置, 实时采集围岩变形、水压变化与施工影像数据。设定变形速率 $\geq 2\text{mm/d}$ 、水压上升 $\geq 10\%$ 为预警阈值, 触发应急预案。

4.4 应急预案与协同决策机制

建立“项目部—监理—设计—勘察”四方应急联动机制, 遇异常情况立即停工、撤离、会商, 调整治理参数或工艺。

5 治理效果评价与工程启示

5.1 治理效果检测

通过取芯、压水试验与物探复测, 表明: 围岩完整性显著改善, 岩体波速提高 18%; 渗水量由 $120\text{m}^3/\text{h}$ 降至 $5\text{m}^3/\text{h}$ 以下; 掌子面稳定, 具备继续开挖条件。

5.2 技术经济性分析

本方案虽初期投入较大(灌浆材料、设备、人工), 但避免了长期停工与设备损失, 总体工期较传统方法缩短约 45 天, 经济效益显著。

5.3 工程启示与推广建议

(1) 深埋隧洞施工应强化超前地质预报与风险评估;

(2) 灌浆堵水需结合地质条件灵活选择浆材与工艺;

(3) 动态监测与多方协同是灾害治理成功的关键;

(4) 建议推广“智能灌浆系统”与“地质灾害预警平台”, 提升治理效能。

6 结论

本文以香炉山隧洞突泥涌水治理为例, 系统阐述了断层破碎带条件下突泥涌水灾害的成因机制, 构建了以“地质预报、灌浆固结、排水降压、结构加固、动态调控”为核心的综合治理技术体系。工程实践表明:

(1) 采用分段高压灌浆与反滤排水相结合, 能有效控制高压富水断裂带渗流;

(2) 优化止浆墙结构与底板加固措施, 可提升整体抗渗与承载性能;

(3) 全过程动态监测与协同决策机制, 是实现安全高效治理的重要保障。

该体系可为类似深埋隧洞突泥涌水灾害防治提供系统性的技术参考, 具有较好的推广应用价值。

参考文献

- [1] 吴辉, 张微, 徐鹏. 复合地层隧洞涌水突泥处置技术研究[J/OL]. 水利水电快报, 1-5[2025-12-13]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1142.TV.20251031.1639.002>.
- [2] 郭悦宝. 高原隧道富水断层破碎带段突泥涌水分析及处治技术[J]. 铁道建筑技术, 2025, (09): 184-188.
- [3] 贺兴和. 水工隧洞断层破碎带坍塌处理技术研究[J]. 江西建材, 2025, (06): 262-264.
- [4] 徐传江. 引水隧洞突泥涌水灾害处理施工技术研究[J]. 四川水利, 2025, 46(02): 60-63.
- [5] 李建贺, 牛利敏, 王帅, 等. 深埋隧洞穿高压富水断层涌水突泥分析与处置技术[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(10): 149-156.
- [6] 戴澄, 余洁, 叶国平. 引水隧洞工程施工突涌水灾害处理技术研究[J]. 建筑安全, 2025, 40(08): 51-54.
- [7] 康与超, 王青松. 复合地层隧道突涌水灾害机理及治理研究[J]. 北方交通, 2025, (01): 91-94. DOI: 10.15996/j.cnki.bfjt.2025.01.023.
- [8] 喻久康, 童蕾, 严俊, 等. 深埋长隧洞穿越富水断层带涌水突泥风险预判与处理措施研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S2): 371-378. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2024.S2.058.
- [9] 钟黎阳. 隧道断层破碎带涌水突泥地质灾害处治技术研究[J]. 工程机械与维修, 2023, (05): 104-106.
- [10] 段江鹏, 舒建梅, 李培富, 等. 隧洞突泥涌水灾害处理施工[J]. 云南水力发电, 2023, 39(04): 136-140.
- [11] 杨超, 邹永木, 李磊, 等. 深大断层破碎带隧道突水突泥机理研究[J]. 工业建筑, 2023, 53(03): 173-179. DOI: 10.13204/j.gyjzG22061409.
- [12] 马业钜. 断层破碎带隧道突水治理措施研究[J]. 西部交通科技, 2023, (02): 150-152+199. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2023.02.045.

作者简介: 和超(1989.01), 男, 云南维西人, 工程师, 本科, 主要从事水利水电工程建设管理工作。

郭勇(1987.01), 男, 云南镇雄人, 高级工程师, 本科, 主要从事水利水电工程建设管理工作。

脉冲电沉积制备纳米晶镁合金涂层的显微组织演变与耐蚀机制研究

谢中柱

太原学院，山西太原，030032；

摘要：镁合金凭借低密度（ $1.74\text{g}/\text{cm}^3$ ）与高比强度优势，在航空航天、汽车轻量化及电子封装领域具有不可替代的应用价值，但其 2.37V （vsSHE）的低标准电极电位导致其在潮湿、含盐等环境中易发生严重腐蚀，极大限制了工程应用。

关键词：脉冲电沉积；纳米晶镁合金涂层；工艺参数优化；显微组织表征；耐蚀机制；晶界扩散抑制

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.032

1 背景与意义

1.1 镁合金在工业领域的应用现状与挑战

镁合金的轻量化特性为各行业“节能降耗”提供了核心支撑：在航空航天领域，每减重 1kg 可使飞行器燃油效率提升 0.7% ，波音 787 客机采用镁合金构件后整机减重约 15% ；在汽车领域，镁合金零部件可使车身重

量降低 $10\%-15\%$ ，每车每年可减少 CO_2 排放约 80kg ；在电子领域，镁合金外壳兼具电磁屏蔽（屏蔽效能 $>40\text{dB}$ ）与散热（热导率 $>150\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）性能，已广泛应用于高端服务器机箱。

1.2 镁合金改性技术的发展与局限

当前镁合金表面改性技术可分为三类，但其性能短板明显（表 1 所示）：

表 1-镁合金表面改性技术对比

改性技术	涂层厚度 (μm)	耐蚀周期 (NSS 试验)	结合强度 (MPa)	核心局限
化学转化膜	1-5	$<50\text{h}$	5-8	厚度薄、易划伤
激光熔覆	50-200	150-200h	30-40	热应力开裂、成本高 ^[6]
传统直流电沉积	10-50	80-120h	8-15	晶粒粗大、孔隙率高

脉冲电沉积技术可有效弥补上述不足：通过调控脉冲参数，涂层厚度可精准控制在 $20\text{-}80\mu\text{m}$ ，结合强度突破 20MPa ，且耐蚀周期远超传统技术，是当前最具工业化潜力的镁合金防护技术之一^[1]。

2 脉冲电沉积制备纳米晶镁合金涂层的基本原理

2.1 脉冲电沉积工艺的技术特点与参数协同效应

脉冲电沉积的核心工艺参数包括电流密度（ J ）、脉冲频率（ f ）、占空比（ D ），三者协同影响涂层微观结构与性能：

电流密度（ J ）：决定离子还原速率。 J 过低（ $<1.0\text{A}/\text{dm}^2$ ）时，成核率低，易形成粗大晶粒； J 过高（ $>3.0\text{A}/\text{dm}^2$ ）时，电极表面局部过热，导致涂层出现针孔、裂纹。本研究确定最优 J 为 $1.5\text{-}2.0\text{A}/\text{dm}^2$ ，此时离子还原速率与成核速率平衡，涂层致密性最佳。

脉冲频率（ f ）：控制晶核生长时间。 $f<500\text{Hz}$ 时，脉冲间隔过长，晶核有足够时间长大； $f>1000\text{Hz}$ 时，

电流切换频繁，易产生极化损失，降低沉积效率。最优 f 为 800Hz ，此时每周期成核-生长时间匹配，晶粒尺寸稳定在 30nm 左右。

占空比（ D ）：即导通时间与脉冲周期的比值。 $D<30\%$ 时，沉积效率低，涂层厚度不均； $D>50\%$ 时，关断期不足，离子补充不充分，易形成孔隙。最优 D 为 40% ，此时涂层沉积效率达 85% 以上，孔隙率 $<0.5\%$ 。

2.2 电沉积过程中的晶粒细化机制

脉冲电沉积的晶粒细化遵循“高过饱和成核-短时间生长”机制，具体过程可分为三阶段：

1. 导通期：瞬时高过饱和成核

脉冲导通时，高电流密度使电极表面 Mg^{2+} 快速还原，界面处 Mg^{2+} 浓度瞬间降至临界值以下，形成“高过饱和状态”。根据经典成核理论，过饱和度 ΔC 与成核率 N 满足 $N \propto \exp(-K/\Delta C^2)$ （ K 为常数），高 ΔC 使成核率呈指数级提升，大量纳米级晶核同时生成，抑制单一晶核的优势生长^[1]。

2. 关断期：离子补充与晶界稳定

脉冲关断时，电解液本体中的 Mg^{2+} 通过扩散向电极表面补充，缓解浓差极化；同时，已生成的晶核表面原子重新排列，晶界结构趋于稳定，减少缺陷（如空位、位错）的产生。此阶段可避免传统直流电沉积中“边成核边长大”的问题，确保晶粒尺寸均匀。

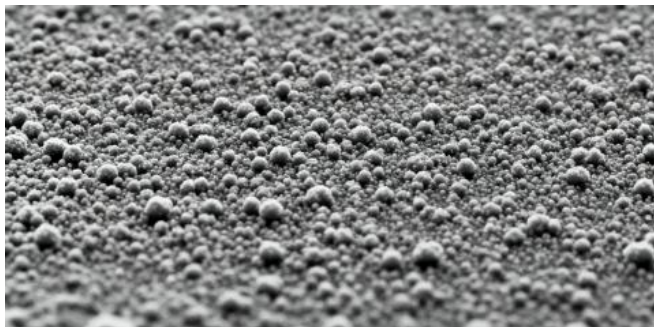


图 1a：优化工艺下纳米晶镁合金涂层的 SEM 表面形貌图

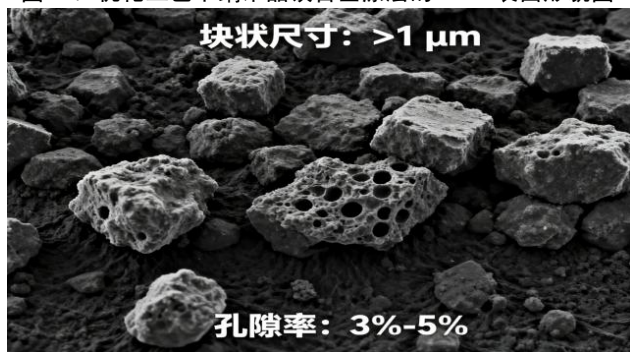


图 1b：传统直流电沉积涂层的 SEM 表面形貌图

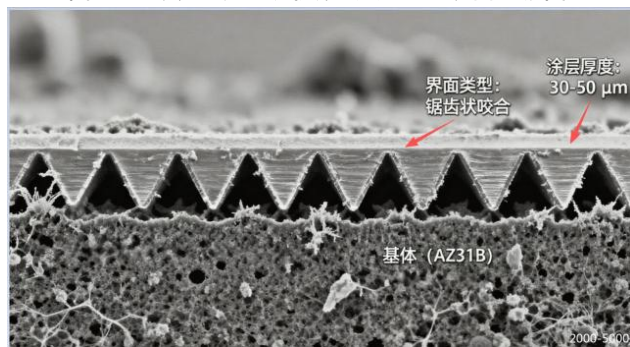


图 1c：纳米晶镁合金涂层与 AZ31B 基体的 SEM 截面形貌图

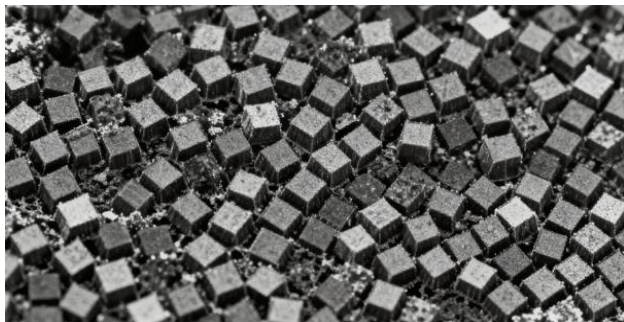


图 2a：纳米晶镁合金涂层的 TEM 明场像

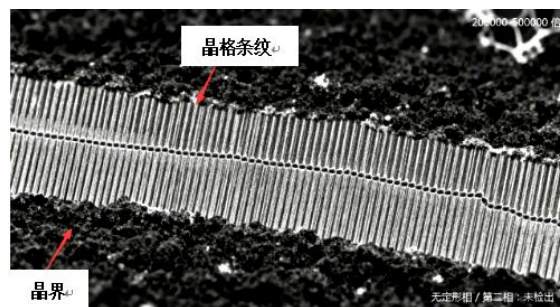


图 2b：纳米晶镁合金涂层的高分辨 TEM (HRTEM) 图像

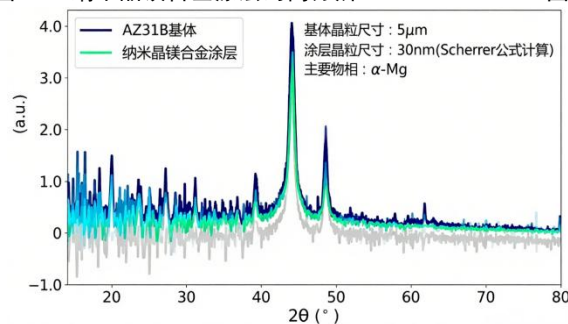


图 3 AZ31B 基体与纳米晶镁合金涂层的 XRD 对比图

3 纳米晶镁合金涂层的材料制备与显微组织表征

3.1 实验材料与涂层制备流程

3.1.1 实验材料

基体：AZ31B 镁合金（成分：Al3.0%、Zn1.0%、Mn0.3%，余量 Mg），尺寸为 50mm×30mm×5mm，作为阴极。

阳极：采用高纯镁板（纯度 99.95%），以避免处理中阳极溶解引入杂质。

电解液：0.6mol/L $MgSO_4$ + 0.1mol/L EDTA + 0.05mol/L Na_2SO_4 （导电盐），用 H_2SO_4 或 NaOH 调节 pH 至 5.5，温度控制在 45℃^[1]。

3.1.2 制备流程

1. 基体预处理：依次进行“砂纸打磨（400#→800#→1200#）→丙酮超声除油（15min）→3% HNO_3 酸洗（30s，去除氧化膜）→去离子水冲洗→吹干”处理，确保基体表面洁净、无残留药液、无氧化膜。

2. 脉冲电沉积：采用双电极体系，电极间距 5cm，设定工艺参数（ $J=1.8A/dm^2$ 、 $f=800Hz$ 、 $D=40\%$ ），沉积时间为 60-120min，控制涂层厚度为 30-50μm。

3. 后处理：沉积完成后，样品用去离子水冲洗，60℃真空干燥 2h，避免表面氧化。

3.2 显微组织表征技术的应用与结果分析

本研究采用“多尺度表征体系”，从涂层试样的表面、截面、晶体结构三个维度解析涂层显微组织及其对性能

的影响:

3.2.1 扫描电子显微镜 (SEM) 表征

涂层 SEM 表面形貌观察显示: 优化工艺制备的涂层表面呈“均匀颗粒状”密集覆盖, 颗粒尺寸约为 50-100nm (图 1a), 无明显岛状凸起或凹陷出现; 传统直流电沉积涂层表面则呈相对离散的“块状堆积”形貌, 颗粒尺寸 $>1\mu\text{m}$, 且存在高分数明显孔隙 (图 1b)。

截面形貌观察发现: 涂层与基体界面呈典型的连续、均匀的等边三角形“锯齿链状结合” (图 1c), 这种机械咬合结构可有效提升两相结合强度和抗裂性; 截面内无分层、微裂纹出现, 说明涂层内部结构致密度高^[1], 力学性能均匀稳定。

3.2.2 透射电子显微镜 (TEM) 表征

TEM 明场像显示 (图 2a), 涂层中晶粒呈均匀的等轴状, 尺寸约 30nm, 晶界清晰可见; 经高分辨 TEM (HRTEM) 进一步观察 (图 2b), 晶界处原子排列有序, 无位错堆积或无定形相产生, 说明晶粒发育生长过程中缺陷较少, 结构稳定性较高^[5]。

4 纳米晶镁合金涂层的耐蚀性能提升及机制探讨

4.1 纳米晶涂层耐蚀性能的实验验证

采用电化学测试与盐雾试验相结合的方式, 系统评价涂层耐蚀性能:

4.1.1 动电位极化测试

试样置入浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液中, 采用三电极体系 (涂层为工作电极, 饱和甘汞电极为参比电极, 铂片为辅助电极) 进行测试, 扫描速率 1mV/s:

基体 AZ31B 的腐蚀电位 (E_{corr}) 为 -1.52V, 腐蚀电流密度 (I_{corr}) 为 120 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$;

纳米晶涂层的 E_{corr} 数值提升至 -1.45V, I_{corr} 值降至 9.8 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 耐蚀性能获得显著提升, 约为基体的 12 倍^[1]。

4.1.2 电化学阻抗谱 (EIS) 测试

电化学阻抗谱 (EIS) 测试参数为: 频率范围 10⁻⁵-10⁻²Hz, 扰动电压 10mV。

测试结果显示, 涂层的阻抗弧半径远大于基体, 且随浸泡时间 (0-48h) 延长的变化较小;

4.2 耐蚀机制: 晶界调控与腐蚀介质扩散抑制

纳米晶镁合金涂层的耐蚀性能提升, 核心源于“微观结构-腐蚀行为”的协同作用, 具体机制可分为三方面:

4.2.1 高密度晶界的物理屏障效应

涂层内大量晶界 (密度约 10¹⁵m⁻²) 形成“三维网络结构”, 当腐蚀介质 (如 Cl⁻) 由表面向基体内渗透时,

需绕晶扩散而非穿晶扩散, 扩散路径延长 3-5 倍。TEM 原位腐蚀观察显示, Cl⁻在晶界处的扩散速率仅为穿晶扩散的 1/10, 且晶界处无明显腐蚀产物堆积, 说明晶界未成为腐蚀薄弱区^[5]。

4.2.2 晶界的化学吸附与钝化效应

纳米晶涂层的晶界具有高表面能 (约 1.5J/m²), 可优先吸附溶液中的 OH⁻, 形成薄而致密的 Mg(OH)₂钝化膜, 可降低外层 Mg 浓度, 减缓 Cl⁻反应侵蚀。X 射线光电子能谱 (XPS) 分析证实, 晶界处形成了富 Mg(OH)₂的钝化膜^[5]; 该钝化膜隔绝、阻碍 Cl⁻向内迁移与 Mg 基体进一步反应, 形成“晶界吸附-钝化膜防护”的双重屏障。

参考文献

- [1] 王浩, 李红, 张勇. 镁合金表面脉冲电沉积纳米晶涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(15): 220501-220510. (DOI: 10.11896/cldb.22050101)
- [2] Ye M, He X, Wang H T. Preparation and Corrosion Resistance of Ni-Co Alloy Coatings by Electrodeposition[J]. Guangdong Chem Ind, 2021, 48(16): 63-64. (DOI: 10.13536/j.cnki.issn1001-6813.2021-016-021)
- [3] Zhao H Y, Weng D, Lu J L. Preparation and Corrosion Resistance of W-Co Alloy Coatings by Electrodeposition[J]. J Liaoning Univ Sci Technol, 2020, 43(06): 401-404. (DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2020.06.005)
- [4] Sun Q Q, Cao B Y, Zhou C S. Pulsed Electrodeposition of Ni-Cu Alloy Cubic Nanocrystals and Their Electrocatalytic Hydrogen Evolution Performance[J]. Chem J Chin Univ, 2020, 41(06): 1287-1296. (DOI: 10.7503/cjcu20200152)
- [5] Zhang L, Li J, Wang X. In-situ Observation of Corrosion Behavior of Nanocrystalline Mg Coatings by TEM-Electrochemistry Coupling[J]. Corros Sci, 2022, 201: 110987. (DOI: 10.1016/j.corsci.2022.110987)
- [6] 接勤, 杜鑫明. 镁合金激光熔覆铝涂层显微组织和耐蚀性分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2021(24): 135-137. (DOI: 10.13487/j.cnki.imce.019496)
- [7] 周红欣. 镁合金支架表面复合涂层的制备及耐蚀性能[J]. 中国医疗器械信息, 2023, 29(09): 71-73. (DOI: 10.15971/j.cnki.cmdi.2023.09.022)

鄂尔多斯市风积沙地区渠道工程施工技术与质量控制

樊爱丽

鄂尔多斯市水利局保障中心，内蒙古鄂尔多斯，017000；

摘要：鄂尔多斯市风积沙地区渠道工程施工受土质特性制约，存在建设推进受阻、质量不稳定、使用寿命短等问题，文章围绕该区域施工核心难点开展深度分析，详细阐述适配风积沙的施工技术要点，制定贯穿施工全流程的质量控制措施，为国内同类型风积沙地区渠道工程建设提供有效参考。

关键词：鄂尔多斯市；风积沙地区；渠道工程；施工技术；质量控制

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.033

引言

鄂尔多斯市风积沙地区气候与地理条件特殊，水资源分布与区域发展、生态保护的用水需求存在适配差距，渠道工程作为衔接水资源与需求端的关键载体，成为该地区基础设施建设的重点内容。无论是保障农业生产的稳定灌溉，还是维系流域生态的基础补水，亦或是统筹区域内的水资源合理调配，都离不开渠道工程的高效支撑，其对该地区经济社会稳步发展与生态环境平衡，起着不可替代的保障作用。不同于常规土质区域，鄂尔多斯市风积沙地区的渠道工程建设，面临着风积沙带来的特殊挑战。风积沙颗粒松散无胶结、遇水易沉降、抗剪强度低，这些物理力学特性与常规工程土质差异显著，从工程开挖到后续施工，每一个环节都需应对风积沙带来的不确定性，传统渠道施工技术与质量控制方式，难以适配该地区的建设需求。若忽视风积沙的特性，仍沿用常规施工思路，既无法保障渠道工程的施工进度，更难把控工程质量，增加建设成本，工程建成后无法正常发挥输水功能，既浪费建设资源，又无法满足区域水资源调配与生态保护的核心需求。因此，探索适配该地区风积沙特性的渠道工程施工技术，搭建科学可行的质量控制体系，对确保渠道工程建设质量、充分发挥工程价值，具有十分重要的意义。

1 鄂尔多斯市风积沙地区渠道工程施工的核心难点

1.1 基础处理难度大

基础处理是渠道工程施工的首要环节，其质量直接决定后续工程结构的稳定性，而在鄂尔多斯市风积沙地区，渠道基础处理面临极大难度，这一难度主要源于风积沙自身的物理特性。风积沙的核心特性之一是颗粒松

散，颗粒之间不存在明显的胶结性物质，整体呈松散堆积状态，结构稳定性极差。更为关键的是，风积沙遇水后物理力学性能会发生显著变化，易出现沉降现象，严重时甚至会发生液化，导致基础承载能力大幅下降，难以稳定达到渠道工程设计所需的承载力标准，给基础处理工作带来极大挑战。若在施工过程中，未能采取科学有效的措施处理风积沙基础，导致基础处理质量不达标，工程投入运行后，隐患会逐步显现。随着渠道长期输水与外部环境影响，基础易发生不均匀沉降，这种沉降会传递至渠道衬砌结构，导致衬砌出现开裂、变形等问题，严重破坏渠道工程的结构完整性，影响工程正常运行。

1.2 边坡防护风险高

渠道边坡是渠道工程的重要组成部分，承担着维持渠道形态、保障输水安全的重要作用，而在风积沙地区，渠道边坡防护面临极高风险，风险主要来自风积沙低抗剪强度特性与外界环境的双重影响。风积沙的抗剪强度普遍较低，在外力作用下易发生滑动变形。当渠道开挖后，边坡处的风积沙失去原有土体的支撑，仅依靠自身颗粒间的摩擦力维持稳定，在自重作用下，极易发生坍塌、溜坡等问题；同时，该地区风力较大，开挖后的边坡风积沙颗粒易被风力侵蚀，进一步加剧边坡的不稳定性，增加防护难度。尤其在特殊天气与工程运行关键时段，边坡防护风险会进一步提升。例如，在降水天气中，雨水浸润边坡风积沙，会降低颗粒间的摩擦力，导致边坡稳定性急剧下降；在渠道输水初期，边坡受输水过程中水体的浸润作用，同样会出现稳定性下降的情况。为应对这些风险，需额外设计并采取针对性的防护措施，这不仅增加了施工的技术难度，更加大了施工过程中的质量管控压力。

1.3 防渗施工适配性差

防渗施工是保障渠道工程输水效率、减少水资源浪费的核心环节,而风积沙地区渠道防渗施工的核心问题,在于常规防渗技术与风积沙基层的适配性差,难以达到理想的防渗效果。风积沙具有孔隙率大、透水性强的特性,颗粒间存在大量微小孔隙,水分易通过这些孔隙快速渗透,常规防渗材料与施工工艺难以应对这一特性。例如,常规防渗材料在铺设过程中,难以与风积沙基层表面紧密贴合,基层表面的松散颗粒易导致防渗层出现局部空鼓;同时,风积沙基层在受力或环境变化时易发生微量变形,而常规防渗材料的延展性不足,易随基层变形出现剥离、开裂现象,导致防渗层失效。防渗层失效后,渠道输水过程中会出现严重渗漏问题,大量水资源通过渗漏流失,不仅降低渠道的输水效率,造成水资源浪费,还会进一步浸润渠道基础与边坡,加剧基础沉降、边坡坍塌等问题,形成恶性循环,严重影响渠道工程的功能发挥与使用寿命。

2 鄂尔多斯市风积沙地区渠道工程适配施工技术要点

2.1 渠道基础处理技术

在基础处理的核心环节,需优先对风积沙基础进行压实处理,压实处理的关键在于选择适配风积沙特性的压实设备,避免因设备不适配导致压实效果不佳。同时,需精准控制两个核心施工参数:一是压实含水率,需根据风积沙的颗粒级配,确定最优含水率范围,确保压实过程中风积沙颗粒能充分咬合;二是压实遍数,需通过试验确定合理的压实遍数,既保证基础密实度达标,又避免过度压实导致基础结构破坏,通过科学压实提升基础密实度与承载力。针对局部风积沙基础承载力不足的区域,仅依靠压实处理无法达到设计要求,需采用换填改良技术进行处理。具体操作中,需将该区域内部分松散、承载力差的风积沙开挖移除,替换为承载能力强、稳定性好的改良填料,替换后需对填料进行压实处理,确保换填区域与周边风积沙基础衔接紧密、承载力一致,进一步增强基础整体稳定性。

2.2 渠道边坡开挖与防护技术

在渠道边坡开挖环节,需摒弃一次性开挖至设计深度的传统方式,采用分层开挖的施工方式,通过分层开挖控制边坡开挖过程中的稳定性。具体施工中,需严格控制每层开挖的深度,避免开挖过深导致边坡局部失稳;同时,需根据风积沙的抗剪强度,确定每层开挖后的边坡坡度,确保坡度符合稳定性要求,从开挖方式上避免

坍塌、溜坡问题发生。边坡开挖完成后,需立即开展防护施工,避免间隔时间过长,导致边坡在风力、重力作用下出现变形。防护施工可采用土工格栅加筋风积沙的技术方案,将土工格栅铺设于边坡风积沙内部,通过土工格栅的拉力作用,增强风积沙颗粒间的约束,提升边坡的抗滑能力;同时,需在边坡表面铺设防护层,防护层可有效阻隔风力对边坡风积沙的侵蚀,抵御雨水对边坡的冲刷,进一步保障边坡长期稳定性。

2.3 渠道防渗施工技术

首先,需选用与风积沙特性相适配的防渗材料,这类材料需具备良好的延展性与贴合性,能适应风积沙基层的微量变形,同时具备优异的防渗性能,阻隔水分渗透。其次,防渗层铺设前,需对风积沙基层进行彻底清理,移除基层表面的松散颗粒、杂质与浮土,采用平整设备对基层进行平整处理,确保基层表面平整、密实,为防渗层铺设提供良好基础,避免因基层不平整导致防渗层破损。在防渗层铺设环节,需严格控制施工质量,铺设过程中需精准控制防渗材料的铺设张力,避免张力过大导致材料拉伸破损,或张力过小导致材料出现褶皱;同时,需重点管控防渗材料的拼接质量,确保拼接处紧密贴合,无缝隙、无空鼓,防止水分从拼接处渗透。防渗层铺设完成后,需及时覆盖保护层,保护层可有效防止风积沙颗粒穿刺防渗层,同时抵御阳光暴晒、外力撞击等外界因素对防渗层的破坏,保障防渗层长期发挥作用。

3 鄂尔多斯市风积沙地区渠道工程质量控制措施

3.1 施工前质量管控

首先,需开展风积沙土质专项检测工作,检测工作需覆盖施工区域内不同地段的风积沙,重点检测风积沙的颗粒级配、含水率、抗剪强度、承载力等核心指标,通过检测明确该区域风积沙的具体特性,为后续施工技术选择、施工参数设定提供精准依据,避免施工方案与实际土质脱节。其次,需对施工方案的适配性进行严格审核,审核重点聚焦基础处理、边坡防护、防渗施工三个核心技术细节,判断方案中选用的技术是否适配风积沙特性,施工参数设定是否符合土质检测结果,确保方案具备科学性与可操作性,符合风积沙地区渠道工程施工要求,杜绝因方案不合理导致质量问题。最后,需加强对施工人员与施工设备的管控。针对施工人员,需开展专项技术培训,重点讲解风积沙特性、适配施工

技术与质量管控要点,提升人员的技术熟练度与质量意识;针对施工设备,需在施工前对压实设备、铺设设备等核心设备进行性能校验与维护保养,确保设备性能达标,能满足施工技术要求,保障施工准备工作充分、到位。

3.2 施工中质量管控

施工中质量管控是渠道工程质量控制的核心环节,需全程跟踪施工过程,及时发现并整改质量偏差,确保各工序质量达标,需从工序巡检、材料管控、环境管控三个方面落实。首先,需建立关键工序巡检机制,将基础压实、边坡开挖、防渗层铺设等直接影响工程质量的工序列为关键工序,安排专业技术人员对这些工序进行实时巡检。巡检过程中,需详细记录施工参数,如压实遍数、开挖坡度、防渗层拼接质量等,对比参数与设计要求的差异,若发现偏差,需立即要求施工班组整改,确保工序质量始终符合设计标准。其次,需加强施工材料质量管控,施工材料是保障工程质量的基础,需对进场的各类材料进行严格质量检验,包括压实设备的性能参数、防渗材料的防渗性能、防护材料的强度等,检验合格后方可允许材料投入使用,坚决杜绝不合格材料进入施工环节,从源头保障工程质量。最后,需重点管控施工环境对质量的影响。鄂尔多斯市风积沙地区大风、降水天气较多,这些天气会对施工质量产生不利影响,例如大风天气易导致风积沙扬尘,影响防渗层铺设质量;降水天气易浸润风积沙基础与边坡,降低其稳定性。因此,遇此类天气时,需及时采取应对措施,如大风天气搭建遮挡设施,降水天气设置排水系统,避免环境因素影响施工质量。

3.3 施工后质量管控

施工后质量管控是渠道工程质量控制的收尾环节,核心目标是验证工程整体质量,消除潜在隐患,为工程后续维护提供依据,需从专项检测、问题整改、档案建立三个维度推进。首先,工程完工后,需组织专业检测团队,对渠道工程质量开展专项检测,检测内容需覆盖工程核心质量指标,包括渠道基础的承载力、边坡的稳定性、防渗层的防渗效果等,通过专业检测数据,验证工程质量是否达到设计标准与使用要求,判断工程是否具备投入运行的条件。其次,针对专项检测中发现的质

量问题,需制定针对性的整改方案,明确整改责任人、整改措施与整改时限,确保每个问题都有对应解决方案;整改完成后,需对整改部位再次开展检测,验证整改效果,直至问题彻底消除,避免隐患遗留,确保工程质量全面达标。最后,需建立完整的工程质量档案,档案需系统记录施工全过程信息,包括施工前的土质检测报告、施工方案、施工中的工序巡检记录、材料检验报告、施工后的专项检测数据与整改记录等,确保档案信息完整、准确,为渠道工程后续的维护、检修工作提供详细依据,保障工程长期稳定运行。

4 结语

鄂尔多斯市风积沙地区渠道工程的建设质量,始终与风积沙特性带来的施工难点深度绑定,基础、边坡、防渗三大环节的难题并非独立存在,一处处理不当便可能引发连锁问题,直接关乎工程能否顺利推进与长期使用。破解这些难题,关键在于摒弃传统施工思维,将“适配风积沙”作为核心原则,针对不同施工环节的特性选择对应技术,让基础处理、边坡防护、防渗施工均能贴合风积沙的物理力学特点,从技术层面扫清工程建设的核心障碍。而技术落地的效果,离不开全流程质量控制的支撑。施工前做好充分筹备、施工中抓好实时管控、施工后落实整改验证,才能让适配技术真正发挥作用,切实规避坍塌、渗漏等隐患。最终,通过技术与管控的协同发力,渠道工程既能高效实现输水功能,满足区域用水与生态保护需求,又能拥有稳定的使用寿命,为该地区水资源高效利用与基础设施长远发展筑牢根基。同时也为国内同类风积沙区域渠道工程建设,提供技术与管控层面的可借鉴经验。

参考文献

- [1] 吴春新,张言辉,刘美佳,等.多层合采油藏层间干扰规律研究及应用:以渤海南部中轻质油藏为例[J].科学技术与工程,2023,23(30):12936-12941.
- [2] 阳晓燕,王龙,吴晓慧,等.渤海南部薄互层油藏层系调整界限实验研究及应用[J].石油地质与工程,2022,36(01):62-67.
- [3] 高胜利,高纪杨,魏雪珂.鄂尔多斯盆地延长组地层底面古构造定量化演化及其石油地质意义[J].科学技术与工程,2024,24(05):1782-1788.

数字赋能视角下 BIM 技术在水利工程数字化建设中的核心作用探析

范媛

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司，新疆乌鲁木齐，830000；

摘要：针对水利工程数字化建设推进过程中，普遍存在的信息协同效率不足、全流程管控能力薄弱等突出问题，从数字赋能的视角出发，开展 BIM 技术在其中核心作用的探析工作。该探析工作的推进，通过充分发挥 BIM 技术自身的核心优势，这些优势具体包括信息集成能力突出、三维可视化效果显著等，实现水利工程从前期设计到后期运维的全流程数字化管控，进而助力水利工程数字化建设实现质量提升与效率优化，推动工程数字化转型落地。

关键词：数字赋能；BIM 技术；水利工程；数字化建设；全流程管控

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.034

引言

在数字技术深度赋能基础设施建设的行业背景下，水利工程作为重要基础设施类型，正逐步向数字化建设方向转型。数字化建设已成为提升水利工程建设质量、保障工程长期运行安全的关键发展方向，对水利工程高质量发展具有重要意义。BIM 技术作为数字赋能理念落地的核心工具之一，具备打破信息壁垒、整合建设全流程数据的能力，可针对性解决传统模式的短板。基于这样的行业现状与技术优势，探析 BIM 技术在水利工程数字化建设中的核心作用，对推动水利工程数字化转型进程、提升工程建设与管理水平，具有重要的现实意义与行业价值。

1 水利工程数字化建设的核心需求

1.1 信息集成与协同需求

水利工程建设是一项系统工程，涉及多个参与主体，具体涵盖设计单位、施工单位、运维单位等不同参与方，各参与方在工程不同环节会产生大量数据信息。这些数据信息类型多样，需通过有效方式实现信息的集成与多方协同。此类需求的核心指向，在于打破工程各环节之间存在的信息壁垒，消除信息流通的阻碍。将设计阶段的施工图纸、施工阶段的技术参数、设备采购与安装阶段的设备信息等各类数据，进行统一整合与归类，形成完整的信息体系。确保工程各参与方，均可根据工作需求实时获取所需数据，同时实现数据的同步共享，避免因信息碎片化导致的决策判断偏差，进而大幅提升各参与方之间的协同工作效率，保障工程推进节奏。

1.2 全流程数字化管控需求

水利工程的生命周期具有连贯性，从前期的方案设计、初步设计，到中期的施工建设、竣工验收，再到后期的长期运维，整个流程环节紧密关联，前一环节的质量直接影响后一环节的推进。因此，水利工程数字化建设需实现全流程的数字化管控，覆盖生命周期的每一个关键阶段。此类需求的核心聚焦点，在于将设计、施工、验收、运维四个核心阶段，全面纳入统一的数字化管理体系当中，打破阶段间的管理壁垒。通过数字化手段实时监测各阶段的关键指标，包括施工进度推进情况、工程建设质量达标情况，以及各环节的安全保障指标，实现“设计-施工-运维”三个核心阶段数据的无缝贯通与实时联动，避免因各阶段管理脱节引发的工程风险，保障工程全生命周期稳定推进。

1.3 复杂结构可视化与风险预判需求

水利工程的核心构筑物（如大坝、输水渠道、水闸等），其空间结构普遍具有复杂性，内部构造与部件关联关系繁琐。传统的二维图纸仅能通过平面视角呈现结构信息，难以精准、直观地展示复杂结构的细节特征，同时在图纸解读过程中，易遗漏潜在的工程风险，为后续建设与运维埋下隐患。此类需求的具体体现，在于借助数字化技术手段，实现工程复杂结构的可视化呈现，通过三维或多维视角，清晰展示构筑物的内部构造、各部件的空间分布关系，让结构细节一目了然。同时，依托数字化技术整合的工程数据，提前预判工程建设与运行中的潜在风险，例如施工过程中可能出现的结构偏差、运行阶段可能存在的结构安全隐患等，通过提前预判与

干预,降低安全事故与工程故障的发生概率。

2 BIM 技术适配水利工程数字化建设的核心特性

2.1 信息集成与协同特性

BIM 技术的核心载体为三维数字化模型,这一载体具备强大的信息整合能力,可将水利工程全生命周期产生的各类数据,进行系统性整合。具体而言,能够将设计阶段的图纸信息、施工阶段的技术参数、运维阶段的设备运行数据等,全部纳入三维模型当中,形成统一、完整的工程信息数据库,避免数据分散存储导致的信息流失。同时,该技术支持工程各参与方,基于同一三维模型开展工作,各参与方可根据自身权限实时访问模型中的数据,同时将自身工作产生的新数据同步更新至模型,实现信息的实时同步与共享。这一特性可有效打破传统建设模式下的信息壁垒,精准适配水利工程数字化建设中的信息集成与协同需求。

2.2 全流程数据贯通特性

BIM 技术可实现水利工程“设计-施工-运维”全生命周期的数据贯通,打破阶段间的数据传递障碍,形成数据闭环管理。在设计阶段完成的三维模型及关联数据,无需经过格式转换或信息筛选,即可直接传递至施工阶段,作为施工单位制定施工方案、管控施工进度、优化施工流程的核心依据,减少数据传递中的信息损耗。在施工阶段,工程的实际进度数据、质量检测数据、安全监测数据等,可实时更新至 BIM 模型当中,这些数据可直接作为工程竣工验收阶段的核心参考,提升验收效率与精准度。当工程完成验收后,包含全生命周期数据的 BIM 模型及关联信息,可直接移交至运维单位,为运维阶段的设备监测、故障排查与处理提供数据支撑,精准适配水利工程全流程数字化管控需求。

2.3 三维可视化与模拟分析特性

BIM 技术具备构建水利工程三维可视化模型的核心能力,通过数字化建模,可精准还原大坝、渠道等复杂构筑物的实际结构,不仅能呈现外部形态,更能清晰展示内部的钢筋布置、管线走向等细节,全面呈现各部件的空间关联关系,彻底替代传统二维图纸的局限,让工程结构信息直观易懂。同时,该技术支持基于三维模型开展多类型模拟分析工作,例如施工流程的动态模拟、构筑物结构受力情况的模拟、极端天气下工程运行状态的模拟等。通过模拟分析,可提前发现模型设计与实际

施工的冲突、结构受力的薄弱环节等潜在风险,精准适配水利工程复杂结构可视化与风险预判的核心需求。

3 BIM 技术在水利工程数字化建设中的核心作用

3.1 赋能设计阶段:提升设计精准度与适配性

在水利工程设计阶段,BIM 技术可通过多维度数据整合与建模,为设计工作提供精准支撑。首先,技术可整合工程所在地的地形数据、水文数据、气象数据等基础环境信息,将这些信息融入三维设计模型,精准呈现工程构筑物与周边自然环境的适配关系,避免设计方案与实际环境脱节,确保设计符合工程建设的环境条件。其次,基于构建的三维模型,可开展结构部件与管线的碰撞检测工作,提前发现设计中存在的结构冲突(如构件位置重叠)、管线交叉等问题,在设计阶段即可完成优化调整,减少后期施工阶段的设计变更,降低工程成本与工期损耗。最后,技术支持参数化设计模式,设计人员可通过调整核心参数(如构件尺寸、材料性能),快速生成不同的设计方案,同时实时对比方案差异,提升设计方案的精准度与优化效率,为水利工程数字化建设奠定坚实的设计基础。

3.2 赋能施工阶段:实现施工过程数字化管控

在水利工程施工阶段,BIM 技术可推动施工过程从传统人工管控向数字化管控转型。第一步,将设计阶段的三维设计模型,转化为适配施工需求的施工模型,在模型中融入施工工艺、进度计划等信息,结合进度计划生成施工进度的动态模拟,直观展示工程推进节奏。施工过程中,实时采集实际进度数据,与模拟进度数据进行对比分析,当出现进度滞后问题时,系统可及时发出预警,提醒施工单位调整计划。第二步,基于施工模型建立质量与安全动态监测体系,将混凝土浇筑的强度检测数据、施工设备的运行状态数据等,实时更新至模型,管理人员可通过模型实时掌握质量与安全情况,及时发现质量不达标或安全隐患问题。第三步,通过模型可视化交底,将施工细节(如构件安装位置、管线铺设路径)以三维形式展示给施工人员,替代传统文字与图纸交底,让施工人员精准理解施工要求,减少现场施工偏差,全面提升施工阶段的数字化管控水平。

3.3 赋能运维阶段:保障工程长期稳定运行

在水利工程运维阶段,BIM 技术可依托前期设计与施工阶段积累的模型数据,构建专业化的运维管理平台,

为工程长期运行提供保障。一方面,在运维管理平台中,可实时接入水利工程关键部位的监测数据,例如大坝的渗流数据、渠道的水位与流量数据、核心设备的运行参数等,当监测数据超出预设安全阈值时,平台可立即发出预警信号,提醒运维人员及时处理,避免故障扩大。另一方面,平台可详细记录设备的日常维护信息、故障发生时间与原因、故障处理流程与结果等,形成完整的设备运维档案,支持设备从采购、安装到报废的全生命周期管理,为设备维护计划制定提供数据依据。此外,还可基于 BIM 模型模拟极端水文条件(如暴雨、洪水)下的工程运行状态,提前预判工程可能面临的风险,制定针对性应急方案,保障水利工程长期稳定运行。

4 BIM 技术在水利工程数字化建设中的应用效能保障条件

4.1 完善数据标准与共享机制

数据标准与共享机制是保障 BIM 技术有效应用的基础,需从两个方面推进完善。一方面,制定统一的水利工程 BIM 数据标准,明确工程设计、施工、运维各阶段的数据格式要求(如数据存储格式、传输格式)、数据分类规则(如结构数据、设备数据的分类),以及数据存储规范,确保各阶段、各参与方产生的数据可互通、可兼容,避免因数据标准不统一导致的信息无法共享问题。另一方面,建立专门的 BIM 数据共享平台,在平台中规范各参与方的数据访问权限(如设计单位可修改设计数据、施工单位可查看设计数据并上传施工数据)、数据更新流程,确保数据在传递过程中的及时性与准确性,避免因数据混乱、传递延迟影响 BIM 技术的应用效能。

4.2 强化专业技术与人才支撑

专业技术与人才是 BIM 技术在水利工程中落地应用的核心保障,需通过两项措施强化支撑。一是加强水利工程相关从业人员的 BIM 技术培训,培训内容需结合水利工程行业特性,涵盖 BIM 软件操作、模型构建、数据整合与分析等实用技能,同时提升从业人员的 BIM 技术应用意识,让设计、施工、运维人员充分认识技术价值,确保相关人员可熟练运用 BIM 技术开展日常工作,避免因人员操作能力不足导致技术闲置。二是积极引进 BIM 技术专业人才,尤其是具备水利工程专业知识与 BIM 技术能力的跨领域人才,组建专业化技术团队。团队需负责解决 BIM 技术应用中的技术难题(如

模型与工程实际的偏差调整、多技术融合中的适配问题),为 BIM 技术在水利工程数字化建设中的顺利落地,提供坚实的人才与技术支撑。

4.3 推动技术与工程场景深度融合

技术与场景的适配性,直接决定 BIM 技术的应用效能,需从两个方向推动深度融合。一方面,结合水利工程的实际情况,包括工程建设规模(如大型水库、中小型渠道)、构筑物结构特点(如重力坝、拱坝),以及工程自身的数字化建设需求,定制化开发 BIM 技术的应用功能,避免盲目套用通用功能导致技术与工程场景脱节,确保开发的功能可精准解决工程实际问题(如大型大坝的结构监测功能、渠道的输水效率优化功能)。另一方面,推动 BIM 技术与其他数字技术的融合应用,例如将物联网技术的实时监测数据接入 BIM 模型,实现模型数据与现场实际数据的实时联动;结合大数据技术对 BIM 模型中的全生命周期数据进行分析,挖掘数据价值,为工程决策提供支撑。通过多技术融合,进一步提升水利工程数字化管控水平,最大化发挥 BIM 技术的应用效能。

5 结语

数字赋能视角下,BIM 技术凭借自身信息集成与协同、全流程数据贯通、三维可视化与模拟分析三大核心特性,精准对接水利工程数字化建设的信息集成、全流程管控、复杂结构可视化及风险预判需求,在工程设计、施工、运维全生命周期中发挥关键赋能作用。该技术可有效解决传统水利工程建设模式下信息碎片化、协同不畅、阶段脱节等短板,显著提升工程数字化管控的精准度与效率。通过完善统一的数据标准与共享机制、强化专业技术与人才支撑、推动技术与工程场景深度融合,可进一步保障 BIM 技术的应用效能,助力水利工程数字化建设实现质量与效率的双重提升,为水利工程行业的数字化转型与高质量发展,注入持续的数字动能。

参考文献

- [1] 杨建虎, 崔凯. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2021(20): 117-119.
- [2] 胡艳华. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用研究[J]. 科学与信息化, 2021(8): 12.
- [3] 周易成. 数字化测绘技术在水利工程测量中的应用[J]. 黑龙江科学, 2021, 12(8): 110-111.

水泵站房及钢柱的施工方法

卢涛 陶家兵

南京市江宁区横溪街道水务站，江苏南京，211100；

摘要：针对水泵站房中倾斜钢柱定位困难、安装稳定性差，以及因需等待下部混凝土结构强度增长而导致的屋盖施工工期长等问题，本文提出了一种创新的分节施工与主动临时支撑技术。该方法将倾斜钢柱设计为一节柱、二节柱和三节柱，通过分节吊装与连接完成主体安装。其核心在于：首先，在第一混凝土承台内预埋带可调节螺杆的锚栓支架，并通过特制的调节螺母与调节座，精确地将倾斜的一节柱调整并固定在设计姿态；随后，在安装二节柱、三节柱及屋盖主桁架的过程中，分别在关键节点设置临时支撑杆与由立杆、钢架平台及可切割胎架板组成的主动临时支撑架。该支撑体系在施工阶段独立承担屋盖荷载，实现了钢柱安装、屋盖吊装与下部混凝土承台强度发展的并行作业。研究表明，该施工方法有效解决了异形倾斜钢柱的精准定位与稳定安装难题，并通过荷载路径的临时转移，打破了传统工序对关键线路的制约，显著缩短了整体施工工期，对类似复杂空间钢结构工程具有重要参考价值。

关键词：水泵站房；倾斜钢柱；可调锚栓；分节安装；临时支撑；工期优化

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.035

1 背景技术

水泵站房施工过程中，一般需要施工钢柱对屋盖进行支撑，对于一些特殊的站房，出于空间利用率或艺术性的考虑，需要将钢柱的底部设置成倾斜布置的结构，而倾斜布置的钢柱存在定位困难和安装困难的问题。而在安装屋盖时，需要考虑前序施工结构的稳定性，即需要等待相邻三跨地下空间结构浇筑完毕并达到强度后方能回填土，然后吊装屋盖桁架，以保证屋盖施工过程中，钢柱具备足够的稳定性对屋盖进行支撑，这样将导致施工工期延长，特别是当前序施工进度产生滞后，后续的屋盖将难以如期施工。

综上所述，现有技术中存在倾斜钢柱定位、安装困难的问题，还存在屋盖施工工期过长的问题。

2 技术方案

基于此，有必要提供一种钢柱的施工方法以及站房的施工方法，其具体技术方案如下。

一种钢柱的施工方法，其特征在于，所述钢柱包括依次连接的一节柱、二节柱和三节柱；所述一节柱朝向外侧倾斜，所述二节柱包括与一节柱同向倾斜的第一段以及呈竖向布置的第二段，所述三节柱朝向内侧倾斜，使钢柱呈向外凸起的状态；所述施工方法包括：

S1、浇筑第一混凝土承台，并在第一混凝土承台内预埋锚栓支架，所述锚栓支架包括多个向第一混凝土承

台外伸出的螺杆；

S2、在锚栓支架上安装一节柱，使螺杆穿过一节柱的底板，并在螺杆上设置分别压紧于底板两侧的螺母，调节各螺杆上螺母使一节柱朝向外侧倾斜；

S3、在第一混凝土承台上方浇筑第二混凝土承台，使一节柱的端部部分向外露出；

S4、吊装二节柱，使二节柱与一节柱的露出端连接；所述二节柱的两侧对称连接有牛腿，并在牛腿与第二混凝土承台之间安装临时支撑杆；

S5、不浇筑外包混凝土且不拆除临时撑杆、或在一节柱的露出端以及二节柱的第一段浇筑外包混凝土并拆除临时支撑杆后，吊装三节柱，使三节柱与二节柱的端部连接，并在三节柱的顶板与第二混凝土承台之间安装临时支撑架。

进一步的，所述在第一混凝土承台内预埋锚栓支架的过程包括：

S11、浇筑承台垫层，并在承台垫层内预埋第一埋件和第二埋件，多个第一埋件环绕成矩形状，多个第二埋件布置于矩形外侧；

S12、在第一埋件上分别焊接角钢；

S13、将锚栓支架焊接于角钢上；所述锚栓支架包括多个螺杆和矩形框，所述螺杆底端焊接有连接板，使连接板与角钢焊接，所述矩形框依次与多个螺杆焊接；

S14、在第二埋件上焊接第一斜撑，并将第一斜撑与矩形框焊接，使第一斜撑对锚栓支架进行斜向支撑；

S15、浇筑第一混凝土承台，并预留部分螺杆向第一混凝土承台外伸出。

进一步的，在浇筑第一混凝土承台时预埋第三埋件，使第三埋件位于一节柱的阴角处；在调节各螺杆上螺母使一节柱朝向外侧倾斜之后，在一节柱与第三埋件之间安装第二斜撑。

进一步的，所述螺母包括位于底板上方的固定螺母和位于底板下方的调节螺母；所述调节螺母与底板之间设有调节座；所述调节座包括座体和调节块，所述座体内设有容纳螺杆穿过的光孔，座体的表面设有调节槽，所述调节槽的底壁为弧形；所述调节块包括与底板相抵的第一平面、以及与调节槽的底壁滑动配合的第一弧面，使调节块相对调节槽的底壁滑动时改变第一平面的倾斜度；调节各螺杆上螺母的高度使一节柱朝外倾斜的过程包括：

S21、拧动各螺杆上的固定螺母，为底板预留调节空间；

S22、将底板调节至设计状态的高度和倾斜度；

S23、拧动各调节螺母，带动各调节座移动至移动块的第一平面与底板的底部相抵；

S24、拧紧固定螺栓。

进一步的，所述一节柱的端部连接有第一定位板，所述二节柱的端部连接有第二定位板，所述第一定位板与第二定位板对齐且第一定位板和第二定位板分别与固定板栓接。

一种站房的施工方法，包括：

T1、按照上述任一项所述的施工方法施工钢柱；

T2、吊装主桁架，将主桁架与三节柱连接，并利用临时支撑架支撑主桁架；

T3、吊装次桁架，将次桁架固定在相邻的主桁架之间；

T4、吊装次桁架之间的杆件，完成屋盖的安装；

T5、待混凝土达到设计强度后，卸载临时支撑架，将屋盖的荷载转换至柱顶。

进一步的，所述临时支撑架包括四根立杆、斜杆、钢架平台和定位胎架；四根立杆分别通过第三埋件固定在第二混凝土承台上，且相邻立杆之间连接有多根斜杆；所述钢架平台安装于立柱顶部；所述定位胎架包括固定于钢架平台上的定位柱、以及以竖向布置的方式固定在

定位柱上的胎架板；当主桁架压覆于胎架板上后，在胎架板上焊接卡板，使卡板位于主桁架两侧对主桁架进行限位。

进一步的，卸载临时支撑架时，等高度多次切割胎架板，每次切割量控制在 5~10mm，直到切除某一段胎架板后屋盖不再产生向下的位移，最后拆除剩余的临时支撑架。

3 附图说明

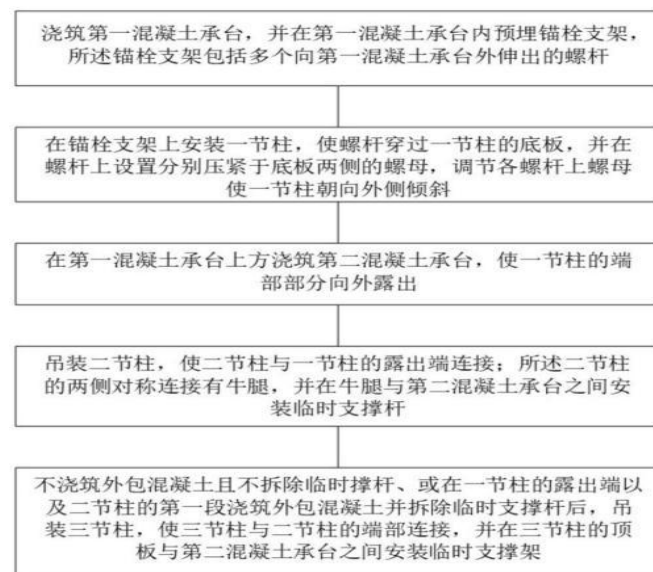


图 1 为钢柱的施工流程图；

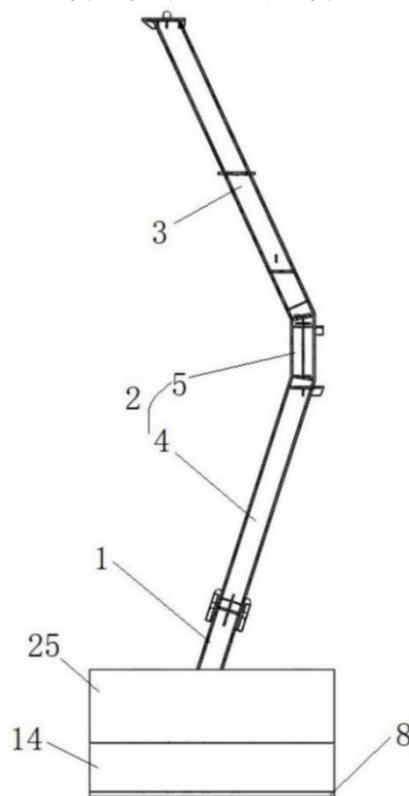


图 2 为钢柱的结构示意图；



图3 为站房的施工流程图:

4 有益效果

1.所提供的一种钢柱的施工方法, 分层浇筑混凝土承台, 在浇筑第一混凝土承台时预埋锚栓支架, 将钢柱分为三节并将一节柱固定在锚栓支架上, 利用螺杆和螺母对一节柱的程度进行调节, 保证一节柱能够精确的调节至设计倾斜状态; 浇筑第二混凝土承台使一节柱部分露出, 利用第二混凝土承台固定一节柱, 保证一节柱安装的稳定性; 从而保证了钢柱的安装精度以及安装的稳定性。

2.所提供的一种钢柱的施工方法, 在施工二节柱后

利用临时支撑杆对二节柱进行支撑, 在对二节柱进行外包浇筑后安装三节柱, 并利用临时支撑架对三节柱进行支撑, 提高钢柱的稳定性, 避免钢柱在施工过程中倾倒。

3.所提供的一种钢柱的施工方法, 在调节一节柱的倾斜度时, 利用调节座上的调节块对底板进行支撑, 提高支撑面积, 避免受力分布集中而造成局部破坏, 从而避免一节柱失稳导致安装精度无法满足设计要求。

4.所提供的一种站房的施工方法, 无需等待所浇筑的承台达到强度即可进行屋盖施工, 施工过程中利用三节柱的临时支撑架对屋盖进行支撑, 钢柱本身不受屋盖的荷载, 当施工完成且下方结构达到强度后再将荷载转移至钢柱, 保证施工过程中钢柱不受屋盖荷载的影响, 缩短了施工工期。

参考文献

- [1] 徐岗, 费祥. 垂吊式钢支架平台泵座基础梁加固施工技术[J]. 中国水能及电气化, 2020(6).
- [2] 周烨. 钢管混凝土柱在水电站厂房结构中的应用[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2013.
- [3] 申世久. 外环河综合治理工程中金属结构的安装方案探析[J]. 工程机械与维修, 2021(6).
- [4] 李林浩, 曾旻冬, 李宁, 等. 一种预制泵房的施工方法: 中国, CN116335235B[P]. 2023-10-17.
- [5] 范崇仁. 水工钢结构(第5版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [6] 庞启彪. 江水泵房施工组织设计及钢板桩围堰施工技术[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2000, 22(4): 108-112.

水利工程规划设计阶段风险与防控路径探讨

宁德奇

德宏州水利电力勘察设计院，云南德宏，678400；

摘要：随着我国水利建设规模不断扩大，水利工程在规划设计阶段面临的风险因素日益复杂多样，涵盖自然环境、技术条件、经济因素及政策法规等多个方面。本文基于系统工程与风险管理理论，对水利工程规划设计阶段可能存在的主要风险进行分类分析，并提出防控路径，为水利工程管理部门和设计单位提供了参考依据。

关键词：水利工程；规划设计；风险识别；防控策略；系统管理

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.036

水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，其规划设计阶段直接关系到工程的经济性、安全性和可持续发展水平。近年来，随着水利工程建设项目日益大型化、复杂化，规划设计阶段的不确定性风险对工程整体效益产生了明显影响。传统设计管理模式在面对环境变化、技术更新以及政策调整时，风险预判能力有限，导致项目周期延长、投资增加甚至安全隐患产生。因此，系统分析规划设计阶段风险并制定科学有效的防控路径，成为水利工程高质量发展的重要保障。

1 水利工程规划设计阶段风险防控的重要性

水利工程规划设计阶段是整个工程建设的基础环节，其质量直接影响工程安全性、经济性和可持续性。若在此阶段忽视风险防控，可能导致设计方案不合理、成本超支、施工难度增加甚至工程事故的发生。科学有效的风险防控，有助于提前识别潜在问题，优化工程方案，合理分配资源，降低不确定性对工程目标的影响。同时，通过建立风险管理机制和预警体系，可以提高设计单位对自然环境、技术、经济及政策等多方面因素的应对能力，确保工程按期、高质量实施。此外，风险防控有助于提升公众信任度和社会支持，为水利工程顺利审批与实施提供保障。在当前大型水利工程日益复杂、技术更新迅速的背景下，规划设计阶段的风险防控已成为保障工程安全、提高经济效益、促进可持续发展的关键环节。

2 水利工程规划设计阶段主要风险类型及原因

2.1 自然环境风险

水文气象条件是水利工程规划设计的重要自然基础，任何水文气象的不确定性都可能对工程设计产生影响。例如，降雨量、径流量和洪水频率的变化直接影响

水库容量、坝体设计及排洪系统规划。如果设计阶段未充分考虑极端气候事件，可能导致工程安全隐患或运行效率下降。此外，气温变化、蒸发量波动及冰冻条件的不确定性也会增加工程设计的复杂性。地质与地形条件的不确定性是水利工程规划设计阶段的核心风险之一。地下岩层结构、土质性质、断层分布及滑坡、泥石流等地质灾害隐患，均可能影响工程选址、坝基处理和施工方案制定。如果地质勘察资料不充分或勘察方法存在局限性，设计方案可能存在偏差，进而增加工程成本和安全风险。

在规划设计阶段，环境保护与生态约束逐渐成为必不可少的考虑因素。水利工程可能对水体生态、湿地保护、植被覆盖及生物栖息地造成影响。若未充分评估生态环境承载能力或未遵循环保法规，可能引发环境治理风险、审批延误或社会舆论压力，从而影响项目进度和成本控制。

2.2 技术与工程风险

工程方案设计的不合理性是规划阶段常见风险，包括方案结构布局不合理、功能设计不足或安全冗余不足。方案设计缺陷可能在后续施工阶段被放大，导致施工难度增加、施工周期延长或后期运行问题频发。随着水利工程技术不断发展，规划设计中会引入新型材料、智能监测系统或信息化设计工具。然而，新技术若缺乏充分验证或应用经验不足，可能存在施工适应性差、成本增加或安全保障不足的风险。工程设计高度依赖计算模型和参数设定，任何参数误差或模型假设偏差都可能对设计结果产生显著影响。例如，水流动力学模型、坝体稳定性分析模型及水库调度模型的不准确，会导致工程容量不足、溢洪风险增大或安全系数不足。

2.3 经济与投资风险

水利工程规划设计阶段对成本预测具有不确定性,包括材料价格波动、施工工艺调整及工程量测算偏差等因素。成本偏差不仅影响项目投资回报,也可能导致后期资金紧张,影响工程按期完成。大型水利工程通常需要多渠道融资支持,资金筹措不稳定或投资回报预期偏差会增加项目整体风险。在规划设计阶段,若未充分评估投资方风险承受能力或资金安排的可行性,可能导致项目停滞或调整设计方案,从而增加经济损失。

2.4 政策法规及社会风险

水利工程涉及多项政策法规,如水利建设规范、环境保护法及土地管理规定。政策法规的变化可能对设计方案、审批流程和工程实施带来不确定性,增加规划阶段风险。例如,新环保要求可能要求重新评估生态影响或修改施工方案。公众关注度高的水利工程可能引发社会舆论压力或居民抗议。规划设计阶段若未充分开展公众参与和信息公开,容易导致项目争议、审批延误或补偿成本增加,形成潜在社会风险。

2.5 管理与组织风险

水利工程规划设计涉及多方参与单位,包括设计院、监理单位、业主及政府部门。若各方沟通不畅或责任划分不明确,可能导致设计方案重复修改、信息滞后或冲突增多,从而延误项目进度。部分设计单位缺乏系统的风险管理机制,对潜在风险识别不充分,缺少有效的预警和应对措施。这会导致风险在规划阶段累积,进入施工阶段后难以消除,增加工程安全及经济风险。

3 水利工程规划设计阶段风险评估方法

在水利工程规划设计阶段,科学的风险评估是防控策略制定的重要前提,有助于全面识别潜在问题并量化其影响。

3.1 定性分析方法

定性分析方法适用于初期信息不充分的情况下,通过专家经验和判断对风险进行初步识别和排序,为后续量化分析提供基础。① 德尔菲法:通过多轮专家问卷调查与反馈,汇总专业意见,对规划设计阶段可能出现的风险进行识别和排序,适用于初期不确定性高、数据不足的项目。② 专家评估法:依托工程管理、设计及技术专家的经验,对风险发生概率和影响程度进行判断,为风险优先级划分提供参考,便于制定初步防控策略。

3.2 定量分析方法

定量分析方法通过数值化手段对风险进行量化评估,可以直观展示风险严重性和优先级,为设计优化和决策提供科学依据。① 风险矩阵法:将风险发生概率与影响程度建立矩阵模型,直观显示各类风险的严重性和优先处理顺序,便于快速决策。② 层次分析法(AHP):通过构建风险因素层次结构模型,对不同风险因素进行权重分配和综合评价,实现风险量化排序,为设计优化提供依据。③ 模糊综合评价法:结合模糊数学理论,将定性评价与定量分析相结合,处理规划设计阶段信息不确定性,提高评估的科学性和精确性。

3.3 风险动态监测与预测方法

动态监测与预测方法能够实现风险的实时跟踪和趋势分析,有助于提前预警并及时采取防控措施,从而降低潜在损失。利用实时数据采集、信息化监控和预测模型,对规划设计阶段的风险进行动态跟踪和趋势分析,实现风险的早期预警与及时干预,提高整体防控水平。

4 水利工程规划设计阶段风险防控路径

水利工程规划设计阶段是工程建设的基础环节,也是风险集中显现和可控性最强的时期。由于自然条件复杂、技术方案多样、投资规模大以及政策法规和公众参与等因素影响,规划设计阶段潜在风险种类繁多、交互性强。因此,构建系统化、科学化的风险防控路径,对于确保工程安全、经济性和可持续发展至关重要。

4.1 强化风险识别与信息基础建设

风险识别是规划设计阶段防控的首要环节。水利工程规划设计单位可通过强化风险识别和信息基础建设,可将潜在风险前移控制,提高规划设计阶段的可控性,为工程顺利实施奠定基础。科学、全面的风险识别不仅可以提前发现潜在问题,还能技术优化和管理决策提供可靠依据。为实现这一目标,首先应建立完善的数据基础,将历年水文气象资料、地质勘察结果、生态环境调查和工程施工记录进行系统整合,形成统一、可靠的数据库。其次,针对规划设计阶段的不确定性,需采用定性定量相结合的方法,对潜在风险进行分类、分级分析,包括自然环境、技术工程、经济投资及政策社会等多个方面。定性方法可通过专家评估、德尔菲法识别风险类型,而定量方法如层次分析法(AHP)和模糊综合评价法可以对风险概率和影响进行量化排序。此外,信息管理系统应实现数据实时更新和共享,确保设计单位、业主及监管部门掌握最新风险信息,避免因信息不

对称导致的决策失误。

4.2 加强技术论证与设计方案优化

技术方案的科学性和合理性是降低规划设计阶段风险的核心因素，水利工程规划设计阶段，通过科学论证与方案优化，可以有效降低设计阶段的技术风险，为后续施工和运行提供稳固基础。在防控路径中，应坚持多方案比选与科学论证相结合的原则，从安全性、经济性、环境适应性及施工可行性等方面对不同设计方案进行综合评估。针对关键结构及重要参数，应加强模型计算和校核验证，确保水文计算、结构设计及调度方案准确可靠。对于新技术和新材料的应用，应严格评估其成熟度和适用性，通过试验或类比工程进行验证，避免因技术不成熟导致施工困难或安全隐患。此外，应优化设计方案的灵活性，预留调整空间，以应对未来水文气象变化、地质条件不确定性及政策调整等因素。设计优化还应充分考虑成本控制和资源合理利用，平衡安全性、经济性和环境影响，使方案既符合技术标准，又具可操作性和可持续性。

4.3 完善风险管理制度与组织协同机制

水利工程规划设计中，通过完善制度和强化组织协同，可以将风险防控贯穿规划设计全过程，避免风险积累和后续传导，提高工程整体安全性和可控性。首先，应将风险管理纳入项目管理体系，明确风险识别、评估、应对及反馈的责任主体，形成制度化、常态化的管理机制。其次，应建立跨部门、跨单位的沟通协调机制，确保设计单位、监理单位、业主及主管部门在信息共享、风险研判及方案调整方面保持一致。对于重大技术或安全风险，应设立专项评审和决策程序，确保应对措施科学、及时。制度建设还应包括风险预警和责任追溯机制，针对潜在问题进行持续跟踪，并在必要时采取纠正措施。此外，应注重多学科人才配置，通过专业团队协作提升风险判断和控制能力。通过完善制度和强化组织协同，可以将风险防控贯穿规划设计全过程，避免风险积累和后续传导，提高工程整体安全性和可控性。

4.4 统筹政策、经济与社会因素的综合防控

水利工程规划设计阶段的风险不仅来源于技术层面，也与政策法规、经济投资及社会公众密切相关。因此，应将政策、经济和社会因素纳入防控体系。首先，需密切关注国家及地方水利政策、环保法规及土地管理要求，确保设计方案合法合规，降低政策调整带来的不

确定性。其次，在经济层面，应开展详细的投资评估和成本预测，充分考虑材料价格波动、施工工艺调整及潜在支出，建立预算弹性和资金备用机制，以应对不可预见的经济风险。同时，应注重社会公众参与和信息公开，尤其是涉及生态保护区、居民聚居区的水利工程，通过广泛征求意见和反馈，降低舆论压力和社会争议。政策、经济和社会因素的统筹不仅能够提升规划设计科学性，还能增强项目可接受性，为工程顺利审批和实施提供保障。

4.5 多方协同与动态监测机制

多方协同和动态监测是风险防控路径的重要补充。水利工程涉及设计单位、业主、施工方、监管部门及公众利益相关者，单一主体难以全面掌控风险。因此，水利工程规划设计单位应建立跨单位信息平台，实现风险信息、设计方案及监测数据共享，并定期开展联合评审与协调会议，形成协同决策机制。同时，应利用信息化技术和监测系统对规划设计阶段关键风险进行动态跟踪和趋势预测，包括水文、地质及环境参数变化。实时监测可以发现潜在问题，及时调整设计方案或施工计划，从而降低风险扩散。通过多方协同与动态监测，风险防控路径能够在规划设计阶段形成闭环管理，不仅提高设计科学性，还为施工及运营阶段提供持续风险控制保障。

5 结语

水利工程规划设计阶段是工程建设的重要基础环节，其风险管理水平直接影响工程安全性、经济性和可持续发展。水利工程规划设计阶段风险复杂且多样，科学的识别、评估与防控至关重要。设计单位应采取科学的防控措施，包括强化风险识别、技术方案优化、完善管理制度、统筹政策经济因素及多方协同等，通过系统化、科学化和动态化的风险防控措施有效降低工程不确定性，提高规划设计质量，为后续施工和运行阶段奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 雒和. 农田水利工程规划设计存在的问题及对策探析[J]. 中国科技纵横, 2023, 3: 90-92.
- [2] 胡静. 水利工程设计阶段造价风险分析[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 8: 169-172, 176.
- [3] 杨晓燕. 水利工程风险评估与应对策略[J]. 农村经济与科技, 2025, 9: 102-104, 119.

水利堤防的施工设备和施工方法

谢水根¹ 谢红伟² 庄耀海³

1 常州市新北区奔牛镇农村工作办公室, 江苏常州, 213131;

2 常州市武进区水利局, 江苏常州, 213100;

3 常州新美水务集团有限公司, 江苏常州, 213000;

摘要: 一种水利堤防的施工设备和施工方法, 施工方法包括如下步骤: S10: 利用挖泥船(110)获取疏浚土、采用水泥搅拌机配制水泥浆; S20: 将配置好的水泥浆与疏浚土按照一定的比例进行搅拌调制形成水泥土; S30: 将水泥土输送至水利堤防(200)上采用分层式填充浇筑。本方法使用疏浚土作为工程原材料, 既利用了目前浪费严重的疏浚土资源, 又节省了宝贵的土地资源; 避免了疏浚土被外抛至其他水域从而导致环境污染, 为环境保护作出了贡献; 由于水利堤防工程与疏浚工程一般距离不会相隔很远, 通过较为成熟的管道泵送技术几乎可以实现“就地取材”, 节省了大量的劳动力成本和运输成本。

关键词: 水利堤防; 施工设备; 施工方法

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.037

1 背景技术

近年来, 我国沿海主要港口工程疏浚总量不断攀升, 这些工程产生了大量的疏浚土。这些疏浚土大多沦为废弃物被外抛到指定水域, 这一处理方式不仅浪费了疏浚土资源, 更有可能对该水域水资源造成二次污染。目前, 我国土地资源越来越紧张, 如何将疏浚土这一资源利用起来成为该方向的热门研究课题。优化疏浚土利用将为环境、社会经济等方面带来可观效益。

2 技术方案

提出一种水利堤防的施工方法和施工设备, 由于采取了如下技术特征而能够实现上述技术目的, 并带来其他多项技术效果。

一种水利堤防的施工方法, 包括如下步骤:

S10: 利用挖泥船获取疏浚土、采用水泥搅拌机配制水泥浆;

S20: 将配置好的水泥浆与疏浚土按照一定的比例在拌和装置内进行搅拌调制形成水泥土;

S30: 将水泥土输送至水利堤防上采用分层式填充浇筑。

在该技术方案中, 本方法以疏浚工程中开挖出来的疏浚土作为主要原料之一, 将疏浚土与设计配合比的水泥浆按照一定比例充分搅拌混合后形成水泥土, 通过泵送管道等现有水泥土输送填筑系统输送至附近水利堤

防工程处进行分层填筑, 加高加宽水利堤防, 从而达到利用疏浚土资源、避免疏浚土弃置导致的环境污染的目的; 本方法使用疏浚土作为工程原材料, 既利用了目前浪费严重的疏浚土资源, 又节省了宝贵的土地资源; 避免了疏浚土被外抛至其他水域从而导致环境污染, 为环境保护作出了贡献; 由于水利堤防工程与疏浚工程一般距离不会相隔很远, 通过较为成熟的管道泵送技术几乎可以实现“就地取材”, 节省了大量的劳动力成本和运输成本。

另外, 根据本方法的水利堤防的施工方法和施工设备, 还可以具有如下技术特征:

在本方法的一个示例中, 所述步骤 S30 包括: 每层按照指定的厚度铺筑水泥土;

采用蛙式打夯机夯实。

在本方法的一个示例中, 所述蛙式打夯机夯实包括: 先采用平板振动器拖平, 然后用蛙式打夯机以先外圈后中间的顺序夯实。

在本方法的一个示例中, 在每层按照指定的厚度铺筑水泥土之前还包括: 对老层水泥土进行刨毛、清扫并保持其湿润性。

在本方法的一个示例中, 在每层按照指定的厚度铺筑水泥土之前还包括: 前一层水泥土铺筑料初凝前加铺后一层水泥土铺筑料, 且从拌和到夯实结束不超过 2 小时。

在本方法的一个示例中,每层水泥土的指定厚度为 20cm~40cm,采用蛙夯机夯实 4~5 遍。

在本方法的一个示例中,在每层按照指定的厚度铺筑水泥土之前还包括:水泥土铺压成型后,表面应先铺覆一层指定厚度的湿土,然后再洒水养护。

在本方法的一个示例中,所述指定厚度的湿土为 3cm~5cm,洒水养护 3~5 天。

在本方法的一个示例中,当水利堤防的长度较长时,应分段铺设水泥土,且各段在接头处应放缓坡度,刨毛搭接铺筑。

本方法的另一个目的在于提出一种水利堤防的施工设备,包括:挖泥船,配置为抽取河谷内的疏浚土;

拌和装置,具有水泥浆进料口、疏浚土进料口、拌和腔以及输出端口,所述水泥浆进料口、疏浚土进料口和所述输出端口与所述拌和腔相连通,所述拌和腔配置为搅拌疏浚土与水泥浆;其中,所述水泥浆进料口与水泥搅拌机相连通,所述疏浚土进料口用于输入所述疏浚土,所述输出端口通过管道输送至水利堤防上。

3 附图说明

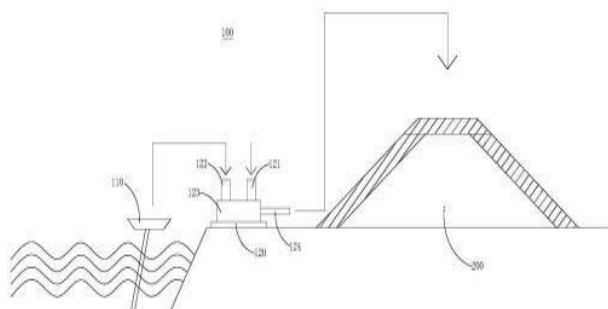


图 1 为实施例的水利堤防的施工设备的施工示意图:

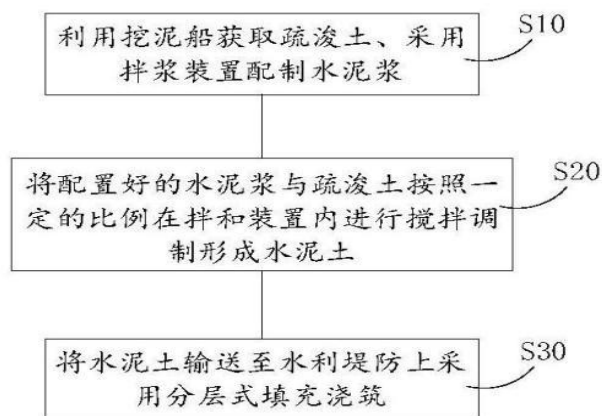


图 2 为实施例的水利堤防的施工方法的流程图。

附图标记列表: 施工设备 100; 挖泥船 110; 拌和装置 120; 水泥浆进料口 121; 疏浚土进料口 122; 拌和腔 123; 输出端口 124; 水利堤防 200。

4 具体实施方式

根据本方法第一方面的一种水利堤防 200 的施工方法,如图 1 和图 2 所示,包括如下步骤:

S10: 利用挖泥船 110 获取疏浚土、采用水泥搅拌机配制水泥浆;

S20: 将配置好的水泥浆与疏浚土按照一定的比例在拌和装置 120 内进行搅拌调制形成水泥土;

S30: 将水泥土输送至水利堤防 200 上采用分层式填充浇筑。

本方法以疏浚工程中开挖出来的疏浚土作为主要原料之一,将疏浚土与设计配合比的水泥浆按照一定比例充分搅拌混合后形成水泥土,通过泵送管道等现有水泥土输送填筑系统输送至附近水利堤防 200 工程处进行分层填筑,加高加宽水利堤防 200,从而达到利用疏浚土资源、避免疏浚土弃置导致的环境污染的目的;本方法使用疏浚土作为工程原材料,既利用了目前浪费严重的疏浚土资源,又节省了宝贵的土地资源;避免了疏浚土被外抛至其他水域从而导致环境污染,为环境保护作出了贡献;由于水利堤防 200 工程与疏浚工程一般距离不会相隔很远,通过较为成熟的管道泵送技术几乎可以实现“就地取材”,节省了大量的劳动力成本和运输成本。

在本方法的一个示例中,所述步骤 S30 包括:每层按照指定的厚度铺筑水泥土;

采用蛙式打夯机夯实;

简言之,先在堤坝上铺设一层水泥土层,然后由蛙式打夯机夯实,重复上述步骤直至完成堤坝的加高加宽施工。

在本方法的一个示例中,所述蛙式拓夯机夯实包括:先采用平板振动器拖平,然后用蛙式打夯机以先外圈后中间的顺序夯实,这种夯实的方式可以使得水泥土层更加地可靠。

在本方法的一个示例中,在每层按照指定的厚度铺筑水泥土之前还包括:对老层水泥土进行刨毛、清扫并保持其湿润性,以便铺筑新的水泥土层与旧的水泥土层之间结合的更加牢固。为了尽量缩短水泥土的铺压时间,在本方法的一个示例中,在每层按照指定的厚度铺筑水泥土之前还包括:前一层水泥土铺筑料初凝前加铺后一层水泥土铺筑料,且从拌和到夯实结束不超过 2 小时。

在本方法的一个示例中,每层水泥土的指定厚度为

20cm~40cm,采用蛙夯机夯实4~5遍。

在本方法的一个示例中,在每层按照指定的厚度铺筑水泥土之前还包括:水泥土铺压成型后,表面应先铺覆一层指定厚度的湿土,然后再洒水养护;也就是说,在水泥拌和后应随铺筑、随压实,并及时加强养护。优选地,所述指定厚度的湿土为3cm~5cm,洒水养护3~5天;

在本方法的一个示例中,当水利堤防200的长度较长时,应分段铺设水泥土,且各段在接头处应放缓坡度,刨毛搭接铺筑;

也就是说,由于水利堤防200施工长度较长,会增加施工难度,而且也会对于水泥土的强度有影响,分段铺设水泥土,每段再按照分层铺筑,这种方式会大大降低施工难度,而且能够避免应力集中造成堤防的损坏。

根据本方法第二方面的一种水利堤防200的施工设备100,包括:

挖泥船110,配置为抽取河谷内的疏浚土;

拌和装置120,具有水泥浆进料口121、疏浚土进料口122、拌和腔123以及输出端口124,所述水泥浆进料口121、疏浚土进料口122和所述输出端口124与所述拌和腔123相连通,所述拌和腔123配置为搅拌疏浚土与水泥浆;其中,所述水泥浆进料口121与水泥搅拌机相连通,所述疏浚土进料口122用于输入所述疏浚土,所述输出端口124通过管道输送至水利堤防200上。

施工设备100还包括:完成疏浚土料的灌装的挖机,挖机主要实现将疏浚土转运至拌和装置120,拌和腔123由进料斗和计量回转装置组成,进料斗底有让土料在动

力作用下自动向下输送的叶片结构,叶片通过动力装置拨动,叶轮以不同的转速控制土料的输送速度进而调节拌合土量。

土料灌装过程中,挖机灌装要做到进料斗中始终有土料,确保叶轮转动能饱和输送,这样就能保证进入拌合桶的土流量是连续稳定的,达到设计配合比。

水泥浆配制采用全自动拌浆系统制配水泥浆,水泥和水完全按设计的配合比自动精确加注,高速搅拌。

水泥土拌和采用搅拌装置进行,连续加料连续出料,效率高;双向强制式拌合,拌合均匀;加土加水泥浆分别按设置的配合比精确加注;加料口无限设置,可以根据土质及设计水泥土强度要求加注其它多种固化材料。

水泥土输送使用管道泵送系统。由于水泥土的流动性较好,在现有技术的支撑下,用简单导槽和挖机配合基本能将水泥土送达整个填筑场地,能满足绝大部分水利堤防200工程的水泥土输送填筑。

参考文献

- [1] 闫旭. 水利堤防工程施工技术要点研究[J]. 黑龙江科学, 2017, 8(20): 2. DOI: CNKI: SUN: HELJ. 0. 2017-20-060.
- [2] 乔建成, 王金东, 陈武, 等. 关于水利堤防工程施工技术的研究[J]. 中国设备工程, 2021, 000(006): 8-9. DOI: 10. 3969/j. issn. 1671-0711. 2021. 06. 004.
- [3] 冷艳霞. 试探究堤防护岸工程施工技术在水利工程中的应用[J]. 中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术: 00080-00080[2026-01-04].

弱膨胀性泥岩大断面隧道的施工方法

徐广松 徐海童 王思文

南京长山建设有限公司, 江苏南京, 225000;

摘要: 弱膨胀性泥岩大断面隧道的施工方法, 包括以下步骤: 步骤 S1: 确定弱膨胀性泥岩大断面隧道的工程特性; 步骤 S2: 模拟泥岩受自身孔隙水影响发生膨胀的现象, 选择若干种隧道施工方法, 利用数值模拟分析确定最优施工方法; 步骤 S3: 采用数值模拟分析方法, 确定最优施工方法的施工工艺参数; 步骤 S4: 在隧道现场布置监测断面测点, 并对隧道现场进行量测, 根据现场监测数据分析弱膨胀性泥岩大断面隧道围岩及支护结构的变化规律, 并将现场监测数据与数值模拟的结果进行对比, 验证最优施工方法及施工参数的安全性与可行性。本方法用工程特性分析、数值模拟分析和现场监测分析相结合的方法, 得出有助于实际工程施工的结论和建议。

关键词: 弱膨胀性; 泥岩; 大断面; 隧道; 施工方法

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.038

1 背景技术

随着国家对西部地区规划和发展等一系列战略的实施, 我国西部地区客运专线铁路也得到了迅速发展。但受西部地区复杂地形地貌等多方面因素的影响, 客运专线铁路经常需要在复杂地质环境条件下修建不同的隧道, 其中, 在隧道修建时遇到泥岩、膨胀岩、黄土以及冻土等这些复杂施工问题也越发显著, 特别是对于一些在泥岩等软弱围岩地质条件下修建的高速铁路隧道, 其隧道围岩稳定性在这些地质条件下较差, 如果不能采取有效的施工开挖方法将极有可能给隧道施工带来严重的危害, 从而给今后隧道运营带来安全问题。同时, 对泥岩等软岩地质条件下的隧道, 受工程地质条件、不同施工方法和施工参数等影响, 隧道开挖之后的围岩应力平衡状态受到了较为严重的破坏, 从而会导致围岩及支护结构可能处于不稳定状态, 围岩及支护结构一旦发生失稳将会危及整个隧道施工安全性, 特别是泥岩具有一定膨胀性, 泥岩隧道开挖断面大, 从而造成泥岩隧道施工难度增加、施工稳定性变差, 从而给隧道施工造成较大损失。因此, 对于泥岩等软岩地质条件下, 影响隧道施工稳定性等关键问题的解决, 可为后期类似工程可能遇到的问题及解决措施提供参考。

2 技术方案

提供一种室内试验、数值模拟试验和现场监测相结合, 确定了隧道最优施工方法和最优施工参数的弱膨胀性泥岩大断面隧道的施工方法。

弱膨胀性泥岩大断面隧道的施工方法, 包括以下步骤:

步骤 S1: 确定弱膨胀性泥岩大断面隧道的工程特性;

步骤 S2: 根据弱膨胀性泥岩大断面隧道的工程特性, 模拟泥岩受自身孔隙水影响发生膨胀的现象, 选择若干种隧道施工方法, 利用数值模拟分析每种施工方法进行施工时, 对各种施工方法进行施工稳定性评价, 然后基于数值分析得出的结果, 确定用于弱膨胀性泥岩大断面隧道的最优施工方法;

步骤 S3: 采用数值模拟分析方法, 对确定的最优施工方法的施工工艺参数进行了数值模拟研究, 确定了最优施工方法的施工工艺参数;

步骤 S4: 在隧道现场布置监测断面测点, 并对隧道现场进行量测, 根据现场监测数据分析弱膨胀性泥岩大断面隧道围岩及支护结构的变化规律, 并将现场监测数据与数值模拟的结果进行对比, 验证最优施工方法及施工参数的安全性与可行性。

进一步地, 所述步骤 S1 中弱膨胀性泥岩大断面隧道的工程特性通过对所施工隧道泥岩进行强度特性试验和膨胀率特性试验, 根据试验结果分析确定。

进一步地, 对所施工隧道泥岩进行强度特性试验的具体过程为:

S111: 以所施工隧道泥岩, 按照岩石试验规程, 将泥岩试样加工成尺寸为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的岩样, 并将其端面打磨平缓, 去掉密度差异较大的岩样, 选择至少

三个岩样作为试验标准岩样；

S112: 在天然状态下, 对所选择的试验标准岩样进行单轴压缩试验, 得出试验标准岩样的泥岩应力—应变曲线；

S113: 对比每个试验标准岩样的泥岩应力—应变曲线, 得出泥岩各岩样的单轴抗压强度最大值, 然后计算试验标准岩样的平均强度；

S114: 根据现有单轴抗压强度分级标准, 得出所施工隧道泥岩的膨胀性。

进一步地, 所述对所施工隧道泥岩进行膨胀率特性试验的具体过程为：

S121: 对所施工隧道进行地质勘察, 得出所施工隧道地质的自由膨胀率值；

S122: 根据现有膨胀性软岩分级指标, 对该地质条件下泥岩的膨胀性进行判定。

进一步地, 所述步骤 S2 中, 采用剪胀角近似模拟泥岩受自身孔隙水影响发生膨胀的现象。

进一步地, 所述步骤 S2 中, 选择的隧道施工方法包括两台阶法、三台阶法、CD 法和双侧壁导坑法。

进一步地, 所述步骤 S2 中, 对比分析各种施工方法的施工稳定性的具体过程为：

S21: 选择 Mohr-Coulomb 本构模型作为膨胀岩本构模型, 并利用 Midas GTS NX 进行研究分析；

S22: 采用 Midas GTS NX 提供的“钝化”和“激活”功能, 用“钝化”功能来模拟隧道开挖, 而用“激活”功能来模拟隧道支护；

S23: 根据不同隧道的施工方法的施工工序进行数值分析, 其中隧道每次的开挖进尺为 2m, 相邻台阶或导洞的施工错开 4m 进行开挖；而初支结构喷混和钢拱架、临时支护结构喷混和钢拱架均在在一个施工步同时添加, 且整体滞后隧道开挖一个步骤；而仰拱开挖和拆除临时支撑各为单独的一个施工步骤, 且仰拱初支喷混滞后仰拱开挖一个步骤, 仰拱二衬滞后仰拱初支一个步骤；

S24: 以隧道开挖完成后的围岩位移及受力情况、支护结构位移及受力情况、围岩应力与塑性区分布作为各施工方法施工稳定性的评价指标；

S25: 对比各施工方法中围岩位移及受力、支护结构位移及受力、塑性区分布的情况, 综合考虑加快施工

进度、节约材料、降低施工复杂程度, 在确保施工安全、稳定和不误施工工期的前提下, 选择施工稳定性最优的施工方法为用于弱膨胀性泥岩大断面隧道的施工方法。

进一步地, 所述步骤 S3 中, 采用数值模拟分析方法, 对确定的最优施工方法的施工工艺参数进行了数值模拟研究的具体过程为：

S31: 构建台阶高度和台阶长度的数值分析模型, 在模型四周添加 X 轴、Y 轴方向的水平约束以及模型底部 Z 轴的竖向约束, 其中 X 轴负方向为隧道开挖方向；

S32: 针对构建的构建台阶高度和台阶长度的数值分析模型, 采用 Midas GTS NX 提供的“钝化”和“激活”功能, 用“钝化”功能来模拟隧道开挖, 而用“激活”功能来模拟隧道支护；

S33: 针对构建的台阶高度数值分析模型, 以台阶高度为单一变量, 根据围岩位移及受力情况、支护结构位移及受力情况、围岩应力与塑性区分布三个评价指标, 对不同台阶高度的施工稳定性进行对比, 确定最优的台阶高度；

S34: 针对构建的台阶长度数值分析模型, 以台阶长度为单一变量, 根据围岩位移及受力情况、支护结构位移及受力情况、围岩应力与塑性区分布三个评价指标, 对不同台阶长度的施工稳定性进行对比, 确定最优的台阶长度。

进一步地, 所述步骤 S4 中, 对隧道现场布置监测断面测点包括隧道拱顶沉降和净空收敛测点、围岩与初衬压力测点、钢拱架轴力测点、二次衬砌自动化监测点、分层沉降测点；

所述隧道拱顶沉降和净空收敛测点用于监测隧道位移情况；

所述围岩与初衬压力测点用于监测围岩与初衬压力情况；

所述钢拱架轴力测点用于监测钢拱架轴力情况；

所述二次衬砌自动化监测点用于监测二次衬砌受力情况；

所述分层沉降测点用于监测分层沉降情况。

进一步地, 所述步骤 S4 中, 所述将现场监测数据与数值模拟的结果进行对比的内容包括：位移对比、围岩压力对比、钢拱架轴力对比、分层沉降对比。

3 附图说明

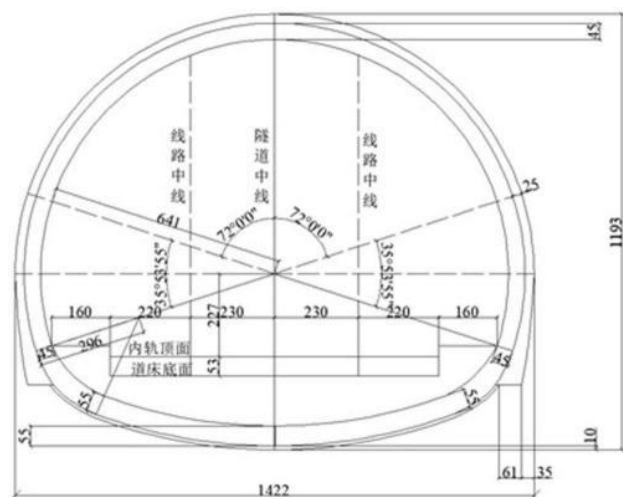


图 1 为实施例隧道的横断面设计图

4 有益效果

1、通过对弱膨胀性泥岩大断面隧道工程特性及施工方法进行数据模拟分析,能够确定隧道所在地质情况,从而获得不同施工方法的施工稳定性,进而判断该隧道的最优施工方法;

2、采用了 Midas GTS NX 对不同施工参数进行了研究分析,即分析了不同台阶高度及台阶长度下的围岩变形、围岩应力和喷混结构应力等变化规律,能够获得最优施工方法中的最优施工参数;

3、结合现场监测，对基于数值模拟确定的隧道施

工方案的施工稳定性态进行跟踪监测,得出经数值模拟分析确定的施工方法和施工参数在现场达到了安全快速施工的效果,从而验证了数据分析获得最优施工方法及其参数的安全性和合理性;

4、采用室内试验、数值模拟试验和现场监测相结合的分析方法,研究了在不同施工方法和施工参数下的弱膨胀性泥岩隧道开挖过程中围岩及支护结构的施工稳定性问题,确定了隧道最优施工方法和最优施工参数;并结合现场监测,对基于数值模拟确定的隧道施工方案的施工稳定性态进行了跟踪监测,验证了建议方案的安全性,用工程特性分析、数值模拟分析和现场监测分析相结合的方法,得出有助于实际工程施工的结论和建议。

参考文献

- [1] 吕春雷, 石洪超, 王金宝, 等. 弱膨胀性泥岩大断面隧道的施工方法: CN202311456905. 5 [P]. CN117386379 A [2026-01-04].
- [2] 蒋晓军. 高速公路膨胀性泥岩隧道施工技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2018(3): 3. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2018.02.058.
- [3] 鲁得文. 高速公路膨胀性泥岩隧道施工技术研究 [D]. 兰州交通大学, 2014.
- [4] 李丰奎. 高速公路膨胀性泥岩隧道施工技术研究 [J]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2023.

中长期市场下梯级水电运行风险分析方法研究

燕恒

贵州黔源电力股份有限公司，贵州贵阳，550002；

摘要：梯级水电在能源系统中占据重要地位，是支撑能源供给体系稳定运行的关键组成部分。在中长期市场环境的约束与影响下，梯级水电的运行面临双重核心目标。其一为保障能源供给的稳定性，满足社会经济发展对电力资源的基本需求；其二为实现市场效益的最大化，适配市场环境下的资源配置规则。双重目标的叠加，使得梯级水电运行风险呈现出更强的复杂性，同时不同风险之间的关联性也显著提升。文章围绕中长期市场场景下梯级水电运行风险分析方法展开系统性探讨，探讨过程遵循清晰的逻辑框架，结合方法落地应用的实际需求，提出保障方法有效应用的具体方向。相关内容可为精准识别梯级水电运行过程中的各类风险提供思路，为科学评估不同风险的影响程度提供可行路径，最终助力梯级水电在中长期市场环境中实现安全、稳定的运行。

关键词：中长期市场；梯级水电；运行风险；风险分析方法；风险评估；风险识别

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.039

引言

中长期市场具有显著的场景特征，周期长是其首要特征，市场运行周期覆盖较长的时间跨度；影响因素多是其另一核心特征，涵盖经济、政策、能源供需等多个维度。这些特征决定了中长期市场对能源生产主体的运行会产生深度且持续的影响。其中，市场价格的周期性波动、交易规则的阶段性调整，均会直接作用于能源生产主体的运行策略与效益水平，成为影响其稳定发展的关键变量。梯级水电区别于单一水电站，其核心运行模式是依托流域内多座水电站的联动协作，实现水资源与能源的高效转化及输出。在此基础上，还需应对市场环境带来的新增变量，市场交易的规则约束、交易对手的履约能力，以及政策层面的环保要求、能源调控导向等，均成为影响其运行的重要因素。当前，在中长期市场环境下，梯级水电运行的风险管控仍存在短板，核心问题集中于风险识别与风险评估两个环节。风险识别环节存在不全面的问题，部分新增风险或关联风险未被纳入识别范畴；风险评估环节存在不精准的问题，无法准确衡量风险的影响范围与严重程度。这两大问题直接导致风险应对措施制定与实施存在滞后性，无法及时匹配风险演变节奏。此类滞后性会引发多重负面影响，不仅会降低梯级水电的发电效益，破坏能源供给的稳定性，还可能因风险应对不当，打乱流域水资源的调度节奏，加剧流域内发电、防洪、生态等多目标间的调度矛盾。基于此，深入研究中长期市场下梯级水电运行风险分析方法，破解风险识别与评估中的技术难题，已成为保障梯

级水电有效适配市场环境、实现安全与高效协同运行的重要研究课题。

1 中长期市场下梯级水电运行风险分析方法的核心定位与要求

1.1 核心定位

中长期市场下，梯级水电运行风险分析方法的核心定位，是为梯级水电运行风险的全流程管控提供科学、可靠的技术工具。该定位要求方法需实现两大维度的有效衔接，一方面需深度契合中长期市场的场景特性，准确把握市场环境下风险的产生逻辑与表现形式；另一方面需充分遵循梯级水电的运行规律，包括多电站联动规则、水资源调度逻辑等。通过双向衔接，方法需实现风险覆盖的全面性，既不可遗漏市场环境下新增的交易风险、价格风险，也不可忽视水文波动、设备故障等传统风险。同时，通过该方法的实际应用，需将原本模糊、抽象的风险，转化为可系统分析、可定量衡量的具体对象，为后续风险应对策略的制定、风险管控措施的落地提供精准且可靠的依据，避免风险应对的盲目性。

1.2 基本要求

为保障风险分析方法的实用性与科学性，方法应用需满足两大基本要求，二者相互补充、缺一不可。第一为全面性要求，全面性是避免风险遗漏的核心前提。方法需构建多维度的风险分析框架，将可能影响梯级水电运行的风险全部纳入分析范畴，具体涵盖市场维度、水文维度、设备维度、政策维度等。通过多维度覆盖，确

保每一类风险均能被识别与评估,避免因某一维度的缺失,导致关键风险被遗漏,进而引发风险管控漏洞。第二为适配性要求,适配性是确保分析结果贴合实际的关键。方法需充分适配中长期市场“长周期”的核心特征,不可仅聚焦于单一时间节点的风险状态,而需具备捕捉风险演变趋势的能力。通过追踪风险在整个市场周期内的变化轨迹,分析风险强度、影响范围随时间推移的演变规律,确保最终输出的分析结果能够精准匹配梯级水电中长期运行的实际需求。

2 中长期市场下梯级水电运行风险分析的关键方法要点

2.1 风险识别环节方法要点

风险识别是梯级水电运行风险分析的首要环节,该环节需以“多维度梳理+关联分析”为核心方法,实现风险的全面、精准识别。在多维度梳理层面,核心逻辑是按风险来源的类别,对梯级水电运行风险进行系统性拆解,确保每一类风险均有明确的归属与界定。具体而言,市场维度需聚焦与市场交易相关的风险,重点关注市场价格的周期性波动风险、交易对手的履约违约风险等;水文维度需聚焦与水资源相关的风险,重点关注流域来水总量的丰枯波动风险、来水时序的错位风险等;设备维度需聚焦与硬件设施相关的风险,重点关注电站机组的故障停机风险、输电线路的损坏停运风险等;政策维度需聚焦与制度规则相关的风险,重点关注环保政策的调整风险、能源调控政策的变动风险等。在关联分析层面,核心逻辑是打破单一维度风险的孤立认知,分析不同维度风险之间的相互作用与影响关系。通过梳理风险之间的触发与传导路径,明确某一维度风险发生后,可能引发的其他维度风险,避免因孤立识别风险,导致对风险复杂性的认知偏差,确保风险识别结果更贴合实际运行中的风险特征。

2.2 风险评估环节方法要点

风险评估是梯级水电运行风险分析的核心环节,该环节需以“量化测算+趋势预判”为核心方法,实现风险影响的精准衡量与未来演变的科学预判。在量化测算层面,核心逻辑是将抽象的风险转化为可量化的指标,通过指标测算明确风险等级。首先需结合中长期市场特征与梯级水电运行需求,选取适配的风险评估指标,指标需能够准确反映风险的发生概率与影响程度。其次需结合中长期市场的完整周期,对各类风险的发生概率、影响范围及损失程度进行精准测算。最后根据测算结果,

将风险等级划分为高、中、低三个层级,通过等级划分实现风险的可视化呈现,便于直观掌握不同风险的严重程度。在趋势预判层面,核心逻辑是基于历史与预测数据,推导风险在中长期周期内的演变方向。需充分整合两类数据,一类是历史运行数据,包括历史水文数据、历史市场交易数据等;另一类是未来预测数据,包括市场趋势预测信息、流域水文情势预测信息等。基于两类数据的综合分析,预判各类风险在不同时段的演变趋势,尤其需关注不同维度风险的叠加效应,如预判某一时间段内流域来水偏枯风险,与市场电力价格走高风险叠加后,对梯级水电效益与供给能力的综合影响,为提前制定针对性的风险应对策略提供科学支撑。

3 中长期市场下梯级水电运行风险分析方法应用的保障方向

3.1 强化数据支撑能力

数据是风险分析方法有效应用的基础前提,数据的完整性与精准性,直接决定风险识别的全面性与风险评估的准确性。因此,需优先构建多源数据整合体系,打破不同数据来源的壁垒,实现数据的集中汇聚与统一管理。该体系需同步收集多类关键数据,包括中长期市场的交易价格数据、交易量数据,流域内的水文实时监测数据、历史水文数据,梯级水电各电站的机组运行数据、设备维护数据,以及相关的环保、能源调控等政策文件信息。同时,需建立数据动态更新机制,确保各类数据能够实时反映最新情况;建立数据质量核查机制,排查并修正数据偏差,确保数据精准可靠,从根本上避免因数据缺失或偏差,导致风险识别不全面、风险评估结果失真的问题。

3.2 优化方法动态调整机制

中长期市场环境 with 梯级水电运行条件均处于动态变化之中,市场规则可能随政策导向调整,水文情势可能随气候特征变化,这些变化均会导致梯级水电运行风险的类型与特征发生改变。基于此,需建立风险分析方法的动态调整机制,避免方法固化导致的分析滞后。调整机制需明确定期评估与优化的周期,在每个周期内,需结合三方面因素开展方法优化:一是中长期市场规则的更新情况,新增或调整的规则需对应新增或优化风险分析维度;二是流域水文情势的变化特征,水文规律的改变需对应调整水文风险的识别与评估方式;三是过往风险应对的实际效果,根据应对效果验证方法的合理性,对存在偏差的环节进行修正。通过持续优化,确保风险

分析方法始终适配梯级水电的实际运行场景。

3.3 推动多主体协同应用

梯级水电的运行并非单一主体可独立完成,其涉及多类主体的协同配合,包括梯级水电发电企业、电力市场交易机构、流域水资源管理部门等,不同主体掌握不同维度的风险信息,具备不同的风险管控职责。因此,需推动风险分析方法在多主体间的协同应用,打破单一主体的信息壁垒与分析局限。一方面需建立风险信息共享机制,推动各主体将自身掌握的风险数据与信息实时共享,确保风险分析所需的信息全面完整;另一方面需建立分析结果互通机制,各主体基于统一的分析方法开展风险分析后,及时互通分析结果,共同研判整体风险态势。通过多主体协同,整合各主体的优势资源,提升梯级水电运行风险的整体管控效率与效果。

3.4 中长期市场下梯级水电运行风险分析方法应用的协同保障细化

推动风险分析方法在多主体间的协同应用,需以清晰的权责界定为前提,首要任务是明确各参与主体在协同过程中的权责边界。通过边界界定,清晰划分不同主体的工作范畴与责任归属,既避免出现多个主体权责交叉、重复履职的情况,也防止出现部分协同环节无人负责、权责空缺的问题,为协同应用的有序推进奠定基础。在数据共享层面,各主体需按职责分工主动输出核心信息,为风险分析提供全面数据支撑。其中,梯级水电发电企业需发挥运行数据供给核心作用,主动共享两类关键数据,一是梯级水电各电站的设备运行数据,涵盖机组运行参数、故障记录等;二是梯级水电的发电调度数据,包括调度计划、出力调整记录等,通过两类数据为风险识别提供硬件状态与运行过程层面的支撑。电力市场交易机构需承担市场信息传递职责,及时同步与风险分析相关的市场信息,重点包括两方面内容,一是中长期市场规则的更新信息,确保规则调整后风险分析维度可同步优化;二是市场价格波动的预测信息,涵盖价格变动趋势、影响因素等,通过两类信息补充市场维度的风险数据,完善风险分析的数据体系。流域管理部门需履行流域信息共享责任,主动共享与梯级水电运行相关的流域信息,核心包括两类内容,一是流域水文实时监

测数据与历史水文数据,为水文维度风险识别提供依据;二是流域水资源调度计划,明确水资源分配原则与调度节奏,通过两类信息完善水文风险与生态风险相关的数据,进一步提升风险识别的全面性。

4 结语

中长期市场下梯级水电运行风险分析方法,是一项需多环节协同支撑的系统性技术体系,需构建“定位与要求-关键方法-应用保障”相互衔接、相互支撑的完整框架。其中,精准的核心定位与明确的基本要求,为风险分析方法的构建与应用提供方向指引,确保方法不偏离梯级水电风险管控的核心目标;全面的风险识别方法与科学的风险评估方法,是整个分析体系的核心内容,通过两大环节方法的精准应用,可实现风险的全面识别与精准衡量;强化数据支撑、优化动态调整、推动多主体协同,是保障方法有效落地的关键,为方法的实用化与长效化提供坚实支撑。通过规范应用该风险分析方法,可帮助相关主体全面掌握梯级水电运行风险的来源、影响程度及演变趋势,为制定针对性的风险应对措施提供科学依据。这不仅能够助力梯级水电更好地适配中长期市场环境,在保障能源供给稳定的同时提升发电效益,也能为流域内能源资源与水资源的协同调度提供支撑,进而维护整个电力能源系统的稳定运行。

参考文献

- [1]于淳蛟,张璐.水库中长期径流预报及短期优化调度研究[J].陕西水利,2024,(02):45-47.
- [2]林志友,张立飞,吴巧等.集合预报在南盘江流域中长期径流预报中的应用研究[J].大坝与安全,2022,(03):42-45+64.
- [3]贾本军.水电站水库特性解析与隐随机优化调度方法研究[D].华中科技大学,2022.
- [4]廖一铭,马光文,朱燕梅,等.不同场景下风光接入对梯级水电站日运行规律影响[J/OL].中国农村水利水电,1-17[2025-05-17].
- [5]陈实,唐国登,刘艺洪,等.基于条件风险强化学习的梯级水光蓄联合优化调度[J/OL].电力建设,1-14[2025-05-17].

八罗田水库左岸低临谷渗漏防渗处理措施初探

杨澄坤

保山市大型灌区管理中心, 云南保山, 678000;

摘要: 八罗田水库位于保山市隆阳区芒宽乡, 是一座以灌溉和供水为主的中型水利工程, 在区域农业生产和水资源配置中具有重要作用。受特殊地形地貌及复杂工程地质条件影响, 水库左岸存在明显的低临谷渗漏风险, 对工程安全运行和水资源利用效率构成潜在威胁。本文在系统梳理八罗田水库左岸工程地质与水文地质条件的基础上, 重点分析左岸单薄河间地块及断裂构造对邻谷渗漏形成的控制作用, 结合勘察钻孔、压水试验及地下水位实测成果, 对左岸低临谷渗漏机理进行综合判识。在此基础上, 围绕防渗边界划定、防渗底界确定及防渗处理深度控制等关键问题, 对帷幕灌浆防渗方案的适用性与合理性进行论证, 并提出相应的工程建议。研究认为, 因地制宜采用以帷幕灌浆为主的防渗处理措施, 能够在技术可行性与经济合理性之间取得较好平衡, 对类似低临谷型水库防渗设计具有一定借鉴意义。

关键词: 八罗田水库; 低临谷渗漏; 工程地质; 水文地质; 防渗处理

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.040

前言

水库渗漏问题是制约水利工程安全运行和综合效益发挥的重要因素之一, 尤其在地形起伏大、邻谷发育明显的山区河谷型水库中更为突出。低临谷渗漏通常表现为库水通过单薄分水岭、断裂破碎带或高透水岩层向邻近低洼河谷排泄, 其形成机制复杂, 隐蔽性强, 若处理不当, 可能引发库区水量损失、下游河谷地下水异常抬升, 甚至诱发渗透破坏等工程地质问题^[1]。

八罗田水库地处怒江右岸老街子河下游河段, 左岸紧邻怒江这一区域最低排泄基准面, 库区蓄水位与邻谷水位之间存在显著水头差, 加之左岸山体局部厚度不足、构造条件复杂, 使得低临谷渗漏问题具有典型性和代表性。通过系统总结八罗田水库左岸低临谷渗漏的形成条件及防渗处理思路, 不仅有助于提升本工程防渗设计的科学性和针对性, 也可为类似地质条件水库的渗漏防治提供参考。

1 工程概况与左岸渗漏问题背景

1.1 水库工程概况

八罗田水库总库容约 558 万 m^3 , 兴利库容 488 万 m^3 , 设计供水量 887 万 m^3 , 设计灌溉面积 6.62 万亩, 是区域重要的农田灌溉与供水工程。水库正常蓄水位为 956m, 运行期间需长期维持较高水头, 对坝址区及库岸稳定性和防渗安全提出了较高要求。

1.2 左岸低临谷渗漏问题的提出

水库左岸紧邻怒江河谷, 其江面高程约 750m, 为

区域最低排泄基准面。正常蓄水位与怒江水位之间高差较大, 形成显著的水力梯度。左岸局部山体宽度仅 13~17m, 地形条件极为单薄, 具备形成邻谷渗漏通道的先天条件, 是工程防渗设计中的重点与难点。

2 左岸工程地质条件分析

2.1 地形地貌特征

左岸低矮垭口位于近库尾位置, 西侧为库区, 东侧为向怒江倾斜的冲沟与陡坡地形。地表坡度普遍在 $26^\circ \sim 35^\circ$ 之间, 冲沟发育明显, 虽未发现稳定泉点出露, 但为地下水径流提供了潜在通道^[2]。

2.2 地层岩性及构造条件

左岸主要出露奥陶系上统上蒲缥组 (O_3p) 粉砂岩、泥页岩等岩性, 整体透水性为中等。局部受 F3 断裂控制, 断裂倾向西、倾角较陡, 破碎带宽度约 1~3m, 岩体破碎程度高, 局部透水性显著增强。断裂以东发育三叠系白云质灰岩和灰质白云岩, 岩溶现象较为明显, 构成潜在的高透水通道, 对邻谷渗漏具有重要控制作用。

3 水文地质条件与渗漏机理分析

3.1 地下水赋存特征

钻孔揭露结果表明, 左岸山体地下水位整体埋深较大, 多数测点地下水位低于正常蓄水位, 局部甚至低于怒江河床高程。这一特征说明, 库区左岸地下水系统以接受库水补给为主, 具有明显的向邻谷排泄趋势。

3.2 渗漏通道及水力联系

在高水头条件下,库水沿岩体裂隙、断裂破碎带及局部可溶岩层向怒江方向运移,形成以“库水—地下水—邻谷排泄”为主的渗漏模式。该模式以缓慢渗流为主,不易产生集中渗透破坏,但会造成持续性水量损失,必须通过工程措施加以控制^[3]。

4 防渗处理原则与总体思路

4.1 防渗处理的基本原则

针对八罗田水库左岸低临谷渗漏具有隐蔽性强、渗流路径分散且受地形与构造共同控制的特点,防渗处理应坚持系统治理与重点控制相结合的基本原则。一方面,应从库岸整体防渗安全出发,通过构建连续、完整的防渗体系,对左岸潜在渗漏通道进行整体封闭,避免出现局部处理导致的渗流绕越现象;另一方面,应重点关注单薄河间地块、断裂破碎带及中等透水岩层等关键部位,采取有针对性的防渗措施,提高防渗效果的可靠性和稳定性^[4]。同时,在防渗设计中需兼顾工程运行的长期性,充分考虑水位反复涨落条件下岩体渗透特性的变化,确保防渗体系在不同运行工况下均具备持续有效的控制能力。

4.2 防渗体系的总体布置思路

在总体思路,左岸防渗处理应以正常蓄水位为控制基准,防渗线沿正常蓄水位以上5~10m范围布设,并在坝端及库岸关键部位实现顺接,形成闭合连续的防渗屏障。通过将绕坝渗漏与低临谷渗漏统一纳入同一防渗体系,可有效提高防渗系统的整体协同性,避免分散治理带来的重复投资或防渗盲区。同时,结合左岸不同地段的地形起伏和地质条件变化,防渗措施在平面和深度方向上均体现出灵活性和适应性,为后续施工组织 and 运行管理提供良好条件。

此外,在防渗总体思路制定过程中,还应充分结合后期运行监测与维护需求,预留必要的监测与补强条件,为水库长期安全运行提供技术保障^[5]。

5 防渗边界与防渗长度的确定

5.1 防渗边界划定的工程原则与依据

防渗边界的合理划定是构建左岸整体防渗体系的前提条件。结合八罗田水库左岸地形条件、地层分布及地下水径流特征分析,防渗边界以封闭左岸单薄河间地块为核心目标,遵循“顺地形、控渗流、保整体”的工程原则。在具体布置上,将左岸绕坝渗漏与低临谷渗漏统一纳入同一防渗体系进行考虑,使防渗线在坝端与库岸防渗结构自然衔接,避免形成渗流绕越通道。同时,

防渗线总体沿正常蓄水位以上5~10m范围布设,有利于在正常运行工况下充分覆盖潜在渗漏区段,并兼顾施工条件与运行安全。

5.2 防渗长度确定的技术逻辑分析

防渗处理长度的确定以地下水位分布特征和渗流控制范围为主要依据。通过对左岸钻孔揭露地下水位与正常蓄水位关系的综合分析,选取地下水位与正常蓄水位956m高程交汇位置作为防渗处理的控制终点,确保防渗体系在纵向上完整封闭主要渗流通道。结合地形平距换算及勘察成果推算,左岸防渗处理总长度约为983m,能够有效覆盖左岸主要渗漏敏感区段^[6]。该防渗长度设置既避免了防渗范围不足导致的渗漏风险,也防止防渗线过度延伸引起的工程量增加,体现了防渗设计在安全性与经济性之间的合理平衡。

6 防渗底界与防渗深度控制

6.1 防渗底界判定标准的技术依据

防渗底界的合理确定是确保防渗体系有效性和经济性的关键环节。结合八罗田水库左岸钻孔压水试验成果及岩体结构特征分析,左岸岩体整体以中等透水为主,但局部受断裂构造及层间裂隙影响,透水率存在一定离散性^[7]。设计中以 $q < 5Lu$ 作为相对隔水层判定标准,能够较好反映岩体渗透性能的整体控制水平;在构造影响显著、裂隙较为发育的局部地段,适当采用 $q < 10Lu$ 作为控制指标,有利于避免防渗底界过度加深,兼顾工程安全与投资控制。同时,防渗底界统一深入相对隔水层以下约5m,可有效削弱可能存在的残余渗流通道,提高防渗体系的整体可靠性。

6.2 防渗深度分段控制的合理性分析

受左岸地形起伏和地层结构变化影响,防渗深度沿线差异较大,最小深度约为20m左右,局部最大深度可超过百米。针对这一特点,防渗设计采用分段控制思路,根据不同地段岩性组合、透水特征及水头条件,合理调整防渗深度,避免“一刀切”式设计带来的资源浪费。在低水头、透水性相对较弱地段,适当控制防渗深度即可满足安全要求;在构造破碎或透水性增强区域,则通过加深防渗底界和加强灌浆控制,确保渗流得到有效截断。该分区分段的防渗深度控制方式,有助于提高工程整体防渗效果,同时增强设计方案的科学性和可实施性。

7 防渗处理方案比选与技术论证

7.1 帷幕灌浆方案的适用性分析

结合八萝田水库左岸工程地质及水文地质条件分析,左岸渗漏主要表现为中低强度、分散型邻谷渗漏,其渗流通道以岩体层间裂隙、构造破碎带及局部中等透水岩层为主,未发现大规模集中渗流或渗透破坏迹象。在此背景下,帷幕灌浆通过向裂隙和孔隙中注入浆液,能够有效降低岩体整体渗透系数,延长渗流路径,削弱水力联系,具有良好的针对性和适应性。同时,帷幕灌浆施工灵活,可根据不同地段岩性变化和透水特征进行分段、分级控制,便于动态调整施工参数,确保防渗效果^[8]。

7.2 与防渗墙方案的技术经济比较

地下连续混凝土防渗墙在高水头、大渗漏风险工程中具有较强的防渗能力,但其施工工艺复杂、施工周期长,对场地条件和施工组织要求较高,且工程造价相对较大。结合八萝田水库库尾段水头较低、渗漏强度有限的实际情况,防渗墙方案在技术上虽可行,但存在“防渗能力富余、经济性不足”的问题。相比之下,帷幕灌浆在满足防渗安全要求的前提下,能够显著降低工程投资和施工风险,更符合本工程“安全可靠、经济适用”的设计原则。

7.3 施工可行性与技术控制要点论证

从施工条件看,左岸防渗线沿线地形相对连续,具备布置单排帷幕灌浆孔的条件,孔距控制在1.0~1.5m范围内,可形成连续有效的防渗帷幕。通过施工前开展灌浆试验,合理确定浆液配比、灌浆压力及分序加密方式,可进一步提高帷幕的均匀性和完整性。综合技术可行性、施工风险控制及工程经济性分析,采用帷幕灌浆作为八萝田水库左岸低临谷渗漏防渗处理的主要方案,具有充分的技术依据和实践合理性。

8 防渗处理效果与工程意义

通过在八萝田水库左岸实施以帷幕灌浆为主的防渗处理措施,可有效切断或显著削弱库水经单薄分水岭、断裂破碎带及中等透水岩层向怒江低临谷方向的渗流通道,从整体上降低左岸邻谷渗漏强度。防渗体系形成后,库区地下水位分布将趋于稳定,有利于减少库水长期无效损失,提高水库蓄水利用率和供水保障能力^[9]。同时,渗流路径被有效控制,可减轻左岸山体局部岩体软化和水力劣化风险,对维护库岸稳定及防止潜在渗透变形具有积极作用。从工程管理角度看,该防渗处理方案技术成熟、施工可控、维护要求相对较低,兼顾了工

程安全性与经济合理性,为类似低临谷地形条件下水库防渗设计和运行管理提供了可复制、可推广的实践经验。

9 结论

八萝田水库左岸低临谷渗漏问题是在特殊地形、水文地质及构造条件共同作用下形成的典型工程地质问题。通过系统分析渗漏机理,并在此基础上合理确定防渗边界、防渗深度和防渗处理方案,采用以帷幕灌浆为主的防渗措施,能够在保障工程安全的同时兼顾经济性和可实施性。本文的研究与实践经验表明,针对低临谷型水库渗漏问题,应坚持系统分析与分区治理相结合的思路,为类似工程提供可借鉴的技术路径。

参考文献

- [1]王鹏飞.基于灰色关联分析的水库大坝防渗加固施工评价研究[J].水利科技与经济,2025,31(12):105-109+115.
- [2]向耕.多维防渗施工技术在水利工程堤坝施工中运用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(33):205-207.
- [3]龙俊杏.水库帷幕灌浆技术的防渗效果分析及优化[J].水利科技与经济,2025,31(11):110-115.
- [4]万家好.水库水位对防渗墙加固土坝的影响研究[J].云南水力发电,2025,41(11):62-65.
- [5]李闯.数字化监测下橡胶防渗体在水库渗漏通道封堵中的动态响应[J].中国轮胎资源综合利用,2025,(11):117-119.
- [6]李昕洁,姬浩翔,李金妹.浅谈小型水库大坝除险加固技术和防渗处理措施[J].中国设备工程,2025,(21):220-223.
- [7]旦朝金.水库除险加固工程中塑性混凝土防渗墙技术的应用[J].黑龙江水利科技,2025,53(11):124-127.
- [8]郝凯.深厚砂卵石区新建水库工程渗漏问题的勘察方法及防渗措施研究[J].现代工程科技,2025,4(20):57-60.
- [9]葛洲,韩云云,邱立波.小型水库土坝渗流稳定分析及防渗加固设计[J].黑龙江科学,2025,16(20):134-137.

作者简介:杨澄坤(1978.4-),男,汉族,云南保山市人,大学本科,副主任,高级工程师,研究方向:水利工程建设管理、概预算。

大直径顶管穿越地层过程中对周围土体的影响

赵鑫

陕西建工集团股份有限公司, 陕西省西安市, 710000;

摘要: 随着城市更新不断发展, 大直径顶管技术应用越来越广泛。复杂环境及地质条件对控制顶管穿越地层扰动要求不断提高。通过研究大直径顶管施工平衡理论, 分析土体变形规律及成因并探讨切实可行的大直径顶管造成土体变形控制手段, 有助于工程实践中降低大直径顶管施工中对周围土体的影响。

关键词: 顶管施工; 泥水平衡; 土压力

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.041

我国目前已从初始化发展的加速期转变为初始化存量发展阶段, 随着城市更新取代以前的大拆大建, 在城市建成区进行地下管网施工已越来越普遍。非开挖施工技术正在加速崛起, 其中具有代表性的顶管技术, 依靠其成本相对较低、对现状环境影响小等优点正在被大量采用。

非开挖顶管技术是借助于主顶油缸的顶推力, 将掘进机从工作井始发, 直至穿越土层到接收井的管道施工技术, 同时为解决顶推力不足问题可以相应增加中继间提升单体顶进长度。我国在长期的实际应用阶段中, 不断提升顶管管径, 增加顶进距离, 使顶管技术的应用场景更为广泛。

当前, 应用最为广泛的是圆形顶管技术, 但相关理论还不够完善, 施工中大多依赖于工程经验。但顶进过程中顶管机械及顶进管道对土层影响大, 水文地质情况的不同, 顶管对周边建筑物的影响也呈现出较大差异性。需要进一步研究大直径顶管顶进过程中减小对土体扰动的相关工程技术措施, 该研究对顶管技术的进一步发展具有较大的实践意义。

1 顶管技术发展情况

1.1 国外技术的发展

世界上首次提出顶管技术是在 1892 年, 在麻省理工学院的第十届新英格兰铁路建设者 (Roadmaster) 学术会议上由 Clarkz 工程师推出相关方法^[1]。

顶管技术的实际应用是在 1896 年, 当时修建了一条穿铁路的管涵, 美国北太平洋铁路公司 (Northern Pacific Railroad Company) 成为首次应用该工程的企业。有了一定经验之后, 工程师 Griffin 推动了美国多个穿铁路的顶管项目顺利实施。

因顶管技术的优越性, 欧洲国家自 1930 年代开始尝试应用该技术, 到 1960 年代顶管技术已经相当成熟^[2]。1960 年代, 日本首先在亚洲应用液压油缸顶管技术, 顶管的直径也来到了 600mm。为了适应日本地理环境的限制, 顶管技术在日本得到了较大发展, 小口径顶管技术不断成熟。

1.2 我国顶管施工技术的发展

北京地区是我国率先采用顶管技术的城市, 1953 年为顺利实施穿越京包铁路的相关项目引入了顶管技术。

随后, 顶管技术开始在我国不断发展应用, 1981 年就实施了甬江顶管隧道, 该隧道长度 581m, 直径来到 2600mm, 项目取得了成功。1984 年我国开始尝试机械顶管技术, 土压平衡、泥水平衡这些技术正是在该时期得到了一定的发展。

随着我国大型基础设施建设项目的不断增多, 顶管技术开始实现跨越式发展, 西气东输工程上, 在 2002 年就曾成功实施了 3600m 长, 23~25m 深的复杂地层顶管工程^[3]。

在我国基建的引领下, 目前, 我国的顶管技术已经达到了国际领先水平。管材适用范围、掘进形状、地层适应性、掘进方式以及以泥浆润滑为代表的辅助施工技术都在快速发展与迭代。

2 大直径顶管施工平衡理论

2.1 泥水平衡原理

顶管机在始发之后, 泥水平衡顶管机借助于刀盘上的水力切削力实现对泥土的切削, 再由泥浆泵抽排弃土, 掘进过程中不断在掌子面注入泥浆, 实现土压与水压的平衡。

采用泥水平衡顶管工艺,主要是适应地层水文地质条件,适用范围广,对软土、高压地层都能实现较好的掘进。泥浆则是为了保持掘进面土体稳定,能够实现较小的周围土体扰动。同时,泥水平衡所需推力相对较低,同等条件下可以延长顶推距离,长距离顶管能减少工作井数量,降低对环境的影响。施工中产生的渣土采用泥浆泵抽排,不用采用吊车等机械,安全性更高。同时,较大的井口直径能够保证足够的空气流通,降低了有限空间作业风险。

但泥水平衡顶管技术抽排的泥浆处理技术还不够完善,泥浆处置难度较大,大口径顶管中该问题则更为突出。泥浆的制备还需消耗大量水资源,节水措施还有待进一步完善^[2]。

大直径顶管对工作井作业场地要求也较高,复杂的设备结构也增加了工作井的尺寸及吊装难度,施工中各环节的牵制因素较多,需做到较好的施工规划和管理才能起到较高的工程效益。

2.2 土压平衡原理

在水文地质条件满足的条件下,采用土压平衡原理,土仓内采用压力及螺旋输送机进行排土作业,和泥水平衡原理相比,其在渣土处理方面更为简单。因此,采用该原理的顶管机结构更为简单,对施工场地的适应性也更高,场地布置更为灵活。所以,土压平衡技术成为了顶管施工的首选技术。

土压平衡顶管机的机头土仓压力可以实现自主调节,排土体积和掘进体积能够实现平衡,施工中需要掌握土压在合理范围内。实践上,对于粘性土,最终沉降及隆起现象需要时间恢复,操作上对土压力的控制尤为重要。

土压平衡技术能够在浅埋地层中实现有效掘进,其最小覆土厚度可以达到管径的 0.8 倍,适应性较强。

2.3 气压平衡原理

顶管过程中对机头土仓压力采用气压加以平衡,实现掘进面稳定的方式即为气压平衡。气压多采用压缩空气,管道将压缩空气输送进工作面,实现与掌子面土层及水压的平衡。气压还起到疏干地下水的作用,降低地下水对掘进的影响。

根据气压的不同,主要有全气压顶管、局部气压顶管之分。全气压需要作业人员处于气压环境下实现作业,

局部气压则仅在掌子面施加气压,人员操作面为常压状态,相比之下安全性更高。

气压平衡顶管的适用范围需保证土体具有较小的渗透系数,而且顶管机较为复杂,占地较大,施工场地的灵活性受到限制。气压平衡技术专业性强,对地层影响较大,压缩空气会造成掘进面土体压缩,对周围土体影响较大。

3 土体变形成因分析

顶管施工产生的土体变形成因包括应力干扰及地层损失。摩阻力的增加对应力有利,地层损失则有正常和异常两种类型。掘进过程中,并不能完全避免地层损失,但借助于技术措施能降低损失值。技术措施得当,能够避免异常损失。

地层损失一方面是因开挖面造成地层损失。受顶管技术原理影响,顶进过程中,土体排出的同时需泥浆实现临时支护,泥浆固化具有时间效应,使得开挖面存在松散现象,无法实现理论上的绝对平衡。推力的增加会增加土体应力,产生挤压作用,进一步地出现地表隆起现象。与此相反,推力减小,土体表现为向管道方向移动,地面产生沉降现象。所以,施工阶段控制压力相对平衡是关键因素。

已顶进管道环向空隙也会造成地层损失。由于主顶机械、泥浆以及中继间等多种因素影响,环向空隙难以避免。受技术原理限制,机头直径比管道外径大,顶进过程中势必产生环向空隙,当空隙不能及时得到有效填充时就会导致地层损失。同时,补浆在施工中也较为重要,不讲不及时会造成土体中水向周边扩散,出现地层损失。

顶管机在顶进过程中需和作业面土体进行接触,顶管机上会造成土体黏结,开挖断面均匀性受到影响,不均匀的开挖面空隙未得到及时有效填充就会加大地层损失。管节与周围接触土体之间注入泥浆能够降低阻力,对周围土体的影响也随之降低。

方向修正也会造成土体损失。较多或大幅度的纠偏,需要借助于千斤顶施加不均衡的顶力,势必造成环向各位置土体受到的挤压力不均衡,空隙大的一次就更容易产生地层损失。所以,纠偏需遵循“勤纠偏、小纠偏”的原则,并控制好顶进方向。

进出洞时也会使得周围土体或者水体出现流失,容易产生地层损失。因此要严格规范进出洞操作,降低水

土流失。

顶进过程中,每节管节顶进完成均需回撤千斤顶,以便于安装下一节待顶进管节,回撤千斤顶会使顶推力短暂降低,土压力会使得管道后移,从而出现掌子面土体松动,容易出现地层损失。

4 土体变形一般规律

顶管施工和盾构施工所引起的土体变形具有相似性。概括起来,可以将顶管施工过程中所产生的土体变形分为:顶进前方土体变形阶段;施工中土体沉降阶段;施工结束后土体固结沉降阶段^[4]。

在顶进前方土体变形阶段,往往是推力比土压力要大,以实现顶管前进,前进方向的力容易造成地面隆起。这种隆起现象随着埋深增加而降低。所以,顶管施工过程中,对于前方土体松软或无支护措施土体,超挖或退管现象明显。当前方土体应力释放之后,则会出现掌子面土体下沉,造成地面沉降。

顶进过程中,土体的应力不断产生变化,地面下沉效应也相应增加。机头掘进产生的端面与管道周之间的空隙,在土体自重的作用下,会被土体充填,产生支撑作用,逐步实现管道周围土体稳定。施工阶段,需要加强该空隙的填充,采用注入泥浆的措施加以缓解。

顶管过程中,土层持续性的受到扰动,扰动过程中产生的较大孔隙水压力,使得土体产生临时沉降,即一次固结。顶管结束之后,孔隙水压力不断得到释放,土体在自重作用下不断沉降,即次固结沉降。在一定时间之后,沉降即趋于稳定。

5 大直径顶管造成土体变形控制手段

5.1 合理的设备选型

管径越大所产生的地面沉降越明显,主要是因为管道占用体积增加,挖掘土壤增加,对土层扰动也随之增加,这种扰动和管径是成正比的。在顶管设计阶段,需要在管径需求与工程实际中寻求平衡,合理降低管道直径,以期减小顶管机机头尺寸。

同时,顶管机在选用时要控制机头外径与管道直径的差异,降低掘进时空隙大小,掘进过程中也要加强泥浆注入。

5.2 合理的围护结构拆除措施

洞口围护结构拆除将造成土层损失,该阶段需要合理操作。有效的措施包括在东门周边一定范围内进行渗漏水调查。若有渗漏水情况,可以采用泥浆封堵,再在拆除范围进行压密注浆,实现堵漏。

5.3 控制泥水压力及出泥量

泥水平衡顶管技术在控制掌子面稳定性方面具有一定优势,在监测到顶进前方出现地表隆起时需要采取降低顶推压力的措施加以控制。当监测到顶进前方出现地面沉降时,需要增加顶推压力加以控制。

就工程实践来看,穿越顶层往往具有不均匀性,所以在顶进过程中顶推力等顶进参数需做实时调整,所以相应的顶推力监测就非常必要。

5.4 顶进方向控制

纠偏会造成土体过大的扰动,过程实践中需要采取措施保证顶进轴线的正确,降低纠偏频次、减少每次纠偏量。当导向及操作系统融合性较差时,需要采取人工手段加以干预。

6 总结

论文针对大直径输水管道顶管的相关技术及工程实践进行探讨,介绍了国内外顶管技术的发展情况,对大直径顶管施工平衡理论展开分析,揭示土体变形一般规律,提出了大直径顶管穿越顶层过程中有效控制土体变形的工程措施。对大直径顶管施工实践具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 郑翥鹏,周耿坚,黄钺,等.基于HSS模型预测曲线顶管施工对建筑物沉降的影响[J].厦门大学学报(自然科学版),2025,64(06):1041-1047.
- [2] 张永杰,张新宇,陈剑华,等.顶管管节在复杂偏转模式下的应力响应与变形机制研究[J].现代隧道技术,2025,62(05):172-182.
- [3] 贾尚华,陈辉.顶管下穿影响下老旧大型污水箱涵保护技术研究[J].现代隧道技术,2025,62(S1):981-988.
- [4] 毛宇飞,郭增辉,李金明,等.近海富水软弱地层顶管施工触变泥浆配比优化及减阻性能研究[J].水利水电技术(中英文),2025,56(S2):342-350.

既有填方工程薄条形帮宽结构及其施工方法

职瑞¹ 江晓星² 蒋成伟³

1 南京市江宁区秣陵街道水务管理服务站, 江苏南京, 211100;

2 南京市江宁区湖熟街道水务管理服务站, 江苏南京, 211100;

3 南京市江宁区江宁街道水务管理服务站, 江苏南京, 211100;

摘要: 一种既有填方工程薄条形帮宽结构及其施工方法, 属于岩土工程技术领域, 该施工方法包括以下步骤: S1: 根据帮宽体宽度确定锚固加固件的规格参数、数量及位置; S2: 搭建临时平台进行锚固加固件的施工; S3: 在既有填方工程边坡从上至下施工锚固加固件外侧连接的沿纵向水平铺设的连接件; S4: 立模浇筑施工, 由下向上按梯度浇筑帮宽体。提出的帮宽结构及其施工方法能够解决宽度小于 2m 较窄帮宽体的各高度梯层稳定性和整体稳定性, 避免了传统的填筑施工压实困难、施工高风险、必须满足最小填筑宽度等问题, 并具有施工简单、经济、环保等特点, 利于该结构及施工方法的推广使用。

关键词: 填方工程; 薄条形; 帮宽结构; 施工方法

DOI: 10. 69979/3060-8767. 26. 02. 042

1 背景技术

既有填方工程帮宽的需求在工程实践中经常遇到, 传统的帮宽施工方法有: 一、在既有填方边坡上挖台阶, 在外侧进行填筑帮宽; 二、在既有填方边坡上设置收坡支挡结构, 在支挡结构内侧填筑帮填体; 三、在既有填方边坡坡脚设置加固结构, 在加固结构内侧进行挖台阶帮宽填筑; 四、采用混凝土进行浇筑帮宽等。

传统施工方法存在以下问题: 当帮宽的宽度小于 2m 时, 传统施工方法一、施工方法三填筑施工困难, 大型施工机械无法采用, 只能采用小型机械, 施工效率低、斜坡施工安全风险大、帮宽填筑压实困难、质量难以保证, 既有填方边坡挖台阶影响既有工程的稳定性, 且帮宽的宽度必须满足一定的技术要求, 此外, 当帮填宽度较小, 现有传统施工方法一至四的帮宽结构整体稳定性均较差, 特别是在地震作用下, 小于 2m 的薄条形帮宽体的稳定性难以保证。

故提出一种合理的既有填方工程薄条形帮宽结构及有效的施工方法具有重要意义, 且应具有施工方便、设计简单、经济、环保和利于推广应用等特点。

2 技术方案

既有填方工程薄条形帮宽施工方法, 包括以下步骤:

S1: 在既有填方工程边坡上根据帮宽体宽度确定锚固加固件的规格参数、数量及位置;

S2: 在确定好的所述锚固加固件位置搭建临时平台进行所述锚固加固件的施工, 所述锚固加固件按照 15-35° 水平夹角固定在所述既有填方工程边坡, 在纵向和竖向分别按照设计间距均匀设置;

S3: 在所述既有填方工程边坡从上至下施工所述锚固加固件外侧连接的用于给所述锚固加固件施加反向拉力的连接件, 设置在同一高度的相邻所述连接件沿纵向首尾交错搭接, 从上至下固定完所述连接件后, 将所述连接件向上翻转, 临时安置在所述既有填方工程边坡上;

S4: 立模浇筑施工, 由下向上按梯度浇筑所述帮宽体: 先将所述帮宽体浇筑至所述锚固加固件高程, 在所述帮宽体初凝至终凝前, 将所述连接件平铺在所述帮宽体浇筑平面并拉紧所述连接件, 在所述帮宽体浇筑平面间隔设置固定棒用来固定拉紧铺平的所述连接件。

3 附图说明

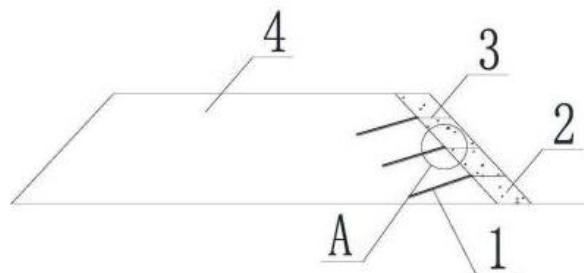


图 1 是本方法的横向剖面图

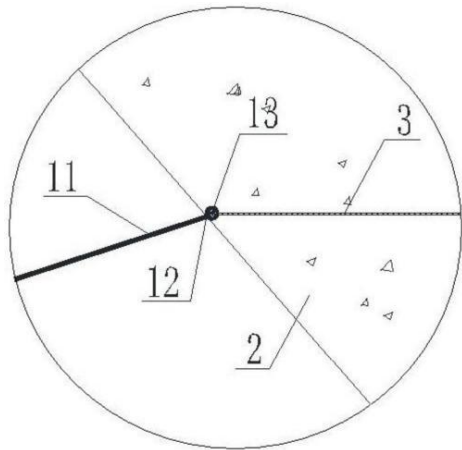


图2是图1中A节点放大图:

图中示出构建和对应的标记为: 1-锚固加固件, 11-注浆锚杆, 12-环形孔, 13-纵向钢筋, 2-帮宽体, 3-连接件, 4-既有填方工程。

4 具体实施方式

如附图 1-2 所示, 提供了一种既有填方工程薄条形帮宽施工方法的实施例, 包括以下步骤:

S1: 在既有填方工程 4 边坡上根据帮宽体 2 宽度确定锚固加固件 1 的规格参数、数量及位置, 具体为:

对帮宽体 2 进行整体稳定性和各梯层稳定性进行计算检验, 检算内容包括:

$$F' L = \sum n_i f_{Li} \quad (1)$$

$$f_{Li} \leq f_c \quad (2)$$

$$f_{Li} \leq f_j \quad (3)$$

$$f_{Li} \leq f_{mi} \quad (4)$$

$$f_{mi} = w_i \mu \quad (5)$$

式中 $F' L$ 为锚固加固件提供总水平拉力, kN; n_i 为第 i 层锚固加固件数量, 个; f_{Li} 为第 i 层单个锚固加固件提供的水平拉力, kN; f_c 为连接件的材料抗拉强度, kN; f_j 为钢筋的抗拉强度, kN; f_{mi} 为第 i 层连接件与帮宽体间的摩擦力, kN; w_i 为第 i 层连接件上方的帮宽体重力, kN; μ 为连接件与帮宽体间的摩擦系数。

根据每个锚固加固件 1 埋入的锚固段长度和直径可以算出其能提供的拉力大小, 计算多个锚固加固件 1 的拉力得出总水平拉力, 边坡安全系数一般要求不小于 1.25, 通过计算帮宽体 2 在没有设置锚固加固件 1 时达到安全系数 1.25 需要的力来确定保证帮宽体 2 稳定性的总水平拉力的大小, 即通过锚固加固件 1 提供的总水平拉力 $F' L$ 不低于帮宽体 2 维持稳定系数不低于 1.25 时的力来保证结构的稳定性。

在满足公式(1)至(4)条件下, 根据 f_{Li} 进行锚固加

固件 1 规格参数与数量的确定, 规格参数包括锚固加固件 1 的埋入锚固段长度、直径及材质。先预设锚固加固件 1 的数量和规格参数, 通过上述公示(1)至(4)进行计算检验, 如果计算出的 f_{Li} 过大, 预设参数的锚固加固件 1 实际提供的拉力值难以满足要求, 根据公式(1)增加锚固加固件 1 数量 n_i ; 或者根据计算出的 f_{Li} 选择适合长度和直径的锚固加固件 1。

确定好锚固加固件 1 的数量和规格参数后进行位置确定, 使锚固加固件 1 在既有填方工程 4 边坡在纵向和竖向上均匀分布。

S2: 在确定好的锚固加固件 1 位置搭建临时平台进行锚固加固件 1 的施工, 锚固加固件 1 按照 15-35° 水平夹角锚固在既有填方工程 4 边坡, 在纵向和竖向分别按照设计间距均匀设置。

锚固加固件 1 由注浆锚杆 11 和纵向钢筋 13 组成, 注浆锚杆 11 按照不同高度间隔纵向成排埋入到既有填方工程 4 中, 注浆锚杆 11 采用直径 20-32mm 的螺纹钢制作, 长度不小于 4m 且进入既有填方工程 4 和帮宽体 2 的潜在圆弧滑动面以内不小于 2m, 注浆锚杆 11 埋入既有填方工程 4 边坡的外端露出部分加工成环形结构, 通过焊接形成环形孔 12, 环形孔 12 尺寸不小于纵向钢筋 13 直径; 纵向钢筋 13 穿过注浆锚杆 11 外端的环形孔 12, 安装在注浆锚杆 11 的外侧, 纵向钢筋 13 采用直径 20-32mm 的钢筋制作, 纵向钢筋 13 之间可采用焊接或套筒固定的形式进行接长。环形结构用于固定纵向钢筋 13, 为纵向钢筋 13 提供锚杆拉力, 环形结构要有足够的强度, 在受力时不会被拉开, 所以采用焊接增加强度。纵向钢筋 13 穿过环形孔 12 将排布在同一高度的注浆锚杆 11 连接起来。

S3: 在既有填方工程 4 边坡从上至下施工锚固加固件 1 外侧连接的用于给锚固加固件 1 施加反向拉力的连接件 3, 设置在同一高度的相邻连接件 3 间沿纵向首尾交错搭接, 相互交错搭接部分不小于 0.2m, 从上至下固定完不同高度的连接件 3 后, 将连接件 3 向上翻转, 临时安置在既有填方工程 4 边坡上。连接件 3 提前与内侧的锚固加固件 1 连接, 便于后续帮宽体 2 未达到设计强度时可以方便施工并快速实现连接件 3 在帮宽体 2 中铺设和固定, 连接件 3 向上临时固定在既有填方工程 4 边坡上从而可以不影响下部帮宽体 2 的浇筑施工。

连接件 3 与内侧锚固加固件 1 的纵向钢筋 13 连接, 连接件 3 采用土工格栅或钢筋网结构, 采用土工格栅时要使用玻璃纤维材质以外的土工格栅, 土工格栅穿过纵向钢筋 13 反包长度不小于 0.3m 且采用固定棒用来固定

土工格栅。连接件3采用钢筋网结构时,钢筋网间距不大于30cm,钢筋网钢筋直径不小于12mm;钢筋网与纵向钢筋13采用间隔绑扎或焊接连接,绑扎或焊接点间距不大于50cm。

连接件3竖向均匀设置,在帮宽体2中竖向间距不大于3m,竖向设置排数不小于2排。

同一高度安装的锚固加固件1的注浆锚杆11纵向间距设置为3-8m,竖向间距设置与连接件3竖向间距一致,竖向相邻两排间的注浆锚杆11可交错布置。通过外端设置的纵向钢筋13与连接件3相连,即可实现连接件3与锚固加固件1的有效连接,又可大幅减小注浆锚杆11的纵向设置数量,从而节省工程投资。

S4:立模浇筑施工,由下向上按梯度浇筑帮宽体2:先将帮宽体2浇筑至锚固加固件1高程,在帮宽体2初凝至终凝前,将连接件3平铺在帮宽体2浇筑平面并拉紧连接件3,在帮宽体2浇筑平面间隔设置固定棒用来固定拉紧铺平的连接件3。

立模施工紧邻地面的帮宽体2至设置在最下方的锚固加固件1高程,帮宽体2埋入非基岩地面以下,深度不小于0.3m,在浇筑的帮宽体2初凝至终凝前,将临时安置在既有填方工程4坡面的连接件3转至水平铺设,在帮宽体2中拉紧铺设连接件3,并在帮宽体2中间隔插入固定棒用来固定连接件3,连接件3固定前应拉紧铺平,拉紧力控制在5-10kN/m。

帮宽体2埋入非基岩地面以下的深度不小于0.3m利于帮宽体2的稳定性,连接件3拉紧铺平后间隔设置固定棒来固定,可以增加连接件3与帮宽体2之间的摩阻力,拉紧力5-10kN/m可使连接件有效张开拉直,并对锚固加固件1具有一个初拉力作用,从而帮宽体2成型后具有一定的预应力,帮宽体2与既有填方工程4之间不会形成施工变形缝,避免了地表水的下渗,增加了帮宽体2的稳定性。连接件3在浇筑面方向水平满铺,因无法搭建施工平台,固在倾斜的帮宽体2外对连接件3施加比较大的张拉力比较困难;再者,对连接件3施加大的张拉力同时也要增加锚固加固件1的拉力,但是实际效果并未因提升张拉力而得到明显提升且浪费了锚固加固件1和连接件3的设置强度而产生配置浪费。

不同高度浇筑的帮宽体2必须在终凝前完成连接件3施工才能使同一高度的帮宽体2梯层间具有较好的摩阻力和较好的整体性,连接体3才能更好地实现对帮宽体2拉稳作用,从而增加帮宽体2的稳定性。

帮宽体2采用流态土浇筑,流态土浇筑成型后单轴

饱和抗压强度不小于550kPa。流态土为“水泥、石灰、粉煤灰等改善土体性能、增强土体强度的固化剂+土体+水”一起搅拌形成具有较好流动性且自密成型强度较高的一种拌合材料,流态土施工不需要碾压能自密实达到较高强度,且成本低,通常为混凝土的1/4-1/3。连接件3在帮宽体2中间隔设置固定棒于帮宽体2中插入固定,连接件3与帮宽体2之间为面接触传力,故可有效实现非混凝土结构的流态土非集中传力,故流态不需要太高的强度,从而具有较好的经济性。

锚固加固件1设置在稳定的既有填方工程4边坡内,为帮宽体2分层提供水平稳定力,从而帮宽体2可以实现各高度梯层稳定性和整体稳定性,特别是在较窄的帮填宽度时具有极为有效加固稳定作用;帮宽体2采用流态土通过流动性立模浇筑施工,避免了较窄帮填时的压实困难、施工高风险等问题,并且强度高;通过竖向均匀设置的连接件3,实现帮宽体2与既有填方工程4连接成一个整体,连接件3把锚固加固件1的锚固力按照各高度梯层传递至帮宽体2,解决了帮宽体2的各高度梯层稳定性和整体稳定性。

上述施工过程必须先施工锚固加固件1,从而实现后期各梯度帮填体2在初凝前铺设连接件3,否则后期施工锚固加固件1没有施工平台搭建的场地。

5 有益效果

提供的一种既有填方工程薄条形帮宽结构及其施工方法,提出的帮宽结构可以解决较窄帮宽体的各高度梯层稳定性和整体稳定性,避免了传统的填筑施工压实困难、施工高风险、必须满足最小填筑宽度等问题,并具有结构简单、经济、环保等特点;本发明提供的施工方法明确了施工顺序和施工要点,可以实现帮宽结构的快速、高质量控制;该施工方法操作简单、能保证帮宽体的各高度梯层稳定性和整体稳定性的控制,利于该薄条形帮宽结构的推广使用。

参考文献

- [1]王定顺.中川铁路路基帮宽段复合地基承载特性及既有路基变形研究[D].兰州交通大学[2025-12-25].
- [2]张兆喜.论铁路既有线高填方路基帮宽安全质量控制[J].城市建设理论研究:电子版,2013,000(014):1-3. DOI:10.3969/j.issn.2095-2104.2013.14.222.
- [3]李玉玲,张永奎.浅析保证路基工程质量的技术措施[J].黑龙江交通科技,2011(11):19-19. DOI:10.3969/j.issn.1008-3383.2011.11.013.

小型农田水利设施建设管护问题与对策——以宣威市某农业水价综合改革项目为例

朱莉

宣威市龙场镇农业农村发展服务中心，云南宣威，655403；

摘要：小型农田水利设施是保障农业稳定生产和提升农业水资源利用效率的重要基础工程，其运行状况直接关系到农业增产增效和农民用水成本控制。近年来，随着农业水价综合改革不断推进，小型农田水利设施在建设标准、计量方式和管理模式等方面发生了显著变化，但在实践中仍普遍存在“重建设、轻管护”的问题，部分工程在投运后运行效率下降、设施损坏率上升，影响了改革政策效能的持续发挥。本文以宣威市龙场镇农业水价综合改革项目为例，系统梳理项目建设内容和运行特点，深入分析小型农田水利设施在建设及后期管护中面临的主要问题及其成因，从完善制度机制、健全管护体系、强化农民参与和提升信息化管理水平等方面提出针对性对策建议，以为类似地区推进农业水价综合改革和提升小型农田水利设施管护水平提供实践借鉴。

关键词：小型农田水利设施；农业水价综合改革；运行管护；计量灌溉；宣威市

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.043

前言

小型农田水利设施作为我国农田水利体系的重要组成部分，具有数量多、分布广、服务对象分散等特点，在保障粮食安全、促进农业可持续发展方面发挥着基础性作用。特别是在山区和半山区地区，小型水池、输配水管道、阀井和出水设施等工程，往往承担着农田灌溉的主要功能，其运行状况直接影响农业生产稳定性。长期以来，我国农田水利建设在一定程度上存在“重建设、轻管理”的倾向，工程建成后管护主体不清、经费不足、责任落实不到位等问题较为突出，导致部分设施“建得成、用不好、管不久”^[1]。

农业水价综合改革正是在这一背景下逐步推进，其核心在于通过完善用水计量设施、合理制定水价机制、健全运行管理体系，引导农民节约用水，实现工程良性运行与水资源可持续利用的双重目标。宣威市近年来依托省级水利专项资金和水利发展资金，积极推进农业水价综合改革项目建设，在工程技术和管理模式上进行了探索，但从项目运行实践看，小型农田水利设施在后期管护方面仍面临多方面现实挑战。系统总结这些问题并提出改进对策，对于巩固改革成果、提升工程综合效益具有重要现实意义。

1 宣威市龙场镇农业水价综合改革项目建设概况

1.1 项目区基本情况

宣威市龙场镇农业水价综合改革项目主要分布于

黄村、勺姑村和龙场村等区域，项目区农业生产以粮食作物与经济作物相结合为主，对稳定灌溉条件依赖程度较高。受地形起伏较大、耕地分布零散等因素影响，项目区长期以来主要依靠小型农田水利设施进行补充灌溉，灌溉条件直接关系到农作物稳产增收。通过实施农业水价综合改革项目，在原有水源条件基础上对灌溉设施进行系统整合和改造，有利于提升区域农田灌溉保障水平和水资源配置效率，为农业生产稳定发展提供基础支撑。

同时，项目区农业用水以季节性灌溉为主，用水高峰集中，对输配水设施运行稳定性和调度能力要求较高。推进农业水价综合改革，有助于通过规范用水秩序和优化灌溉方式，缓解用水矛盾，提升有限水资源的配置效率，为区域农业可持续发展创造良好条件。

1.2 主要建设内容与技术特点

从工程建设内容看，项目围绕水源控制、输配水系统完善和末端计量设施建设展开，整体技术路线以提高用水计量精度和运行管理水平为目标。在黄村、勺姑村项目中，通过对原有阀室进行拆除重建，集中布设流量计、过滤器和控制阀门，实现灌溉水量的统一计量和调控；同步铺设 PE 输配水管道并设置减压设施，提升系统运行的安全性和稳定性。龙场村项目重点对原有输水管道进行埋管改造和破损管道重建，并配套建设阀井、阀室和预付费计量设施，使灌区逐步具备计量到户和规范管理的技术条件，为后续运行管护和水价机制落实奠

定了工程基础。

2 小型农田水利设施建设与管护中存在的主要问题

2.1 建设与管护责任衔接不够顺畅

在小型农田水利设施建设过程中,工程实施阶段通常由水利部门统一组织,建设管理职责相对清晰,但在工程竣工并投入运行后,建设责任向运行管护责任转移的衔接环节仍较为薄弱。部分项目在验收移交时,未对设施产权归属、管护主体和具体责任进行系统明确,导致后期运行中出现“有人用、无人管”的现象。尤其是在村级层面,对设施管护多停留在应急维修层面,缺乏常态化巡查和预防性维护,影响了工程整体运行效益和使用寿命^[2]。

2.2 运行管护经费保障不足

小型农田水利设施运行维护具有持续性和长期性特点,但现阶段管护经费保障机制仍较为薄弱。尽管农业水价综合改革通过计量收费方式回收部分运行成本,但受农业用水季节性强、用水量波动大等因素影响,水费收入规模有限,难以覆盖设施维修、设备更新和技术服务等全部支出。在部分项目区,管护经费仍主要依赖临时性财政补助,资金保障缺乏稳定性,制约了设施日常维护和规范管理的持续开展。

2.3 农民参与度和用水组织作用发挥不足

在部分小型农田水利设施项目区,用水管理仍以行政推动为主,农民在设施运行管护中的参与程度相对较低。一些用水合作组织或村级管水组织运行机制不够健全,民主协商和自我管理功能发挥有限,未能充分调动农民参与用水管理和设施维护的积极性。农民更多被动接受用水安排和缴纳水费,对设施管护的责任认知不足,影响了农业水价综合改革“共建共管”目标的实现^[3]。

2.4 信息化管护水平有待进一步提升

随着农业水价综合改革推进,小型农田水利设施在计量和监控方面逐步引入信息化手段,但整体应用水平仍有提升空间。部分项目虽然安装了IC卡水表和监控系统,但在数据整合、分析应用和运行调度方面功能发挥不充分,管理方式仍以人工巡查和经验判断为主。信息化设备在提升管理效率、降低运行成本方面的潜力尚未完全释放,影响了小型农田水利设施管护工作的精细化和科学化水平。

3 小型农田水利设施管护问题产生的原因分析

3.1 制度设计与基层治理能力之间存在落差

从制度层面看,农业水价综合改革对小型农田水利设施运行管护提出了较为系统和规范的要求,但在基层实施过程中,相关制度设计与实际治理能力之间仍存在一定差距。一方面,部分政策文件更侧重原则性要求,对管护主体职责划分、具体操作流程和责任追究机制规定不够细化,导致基层在执行过程中缺乏明确抓手^[4]。另一方面,村级组织在人员配备、专业能力和管理经验等方面相对薄弱,难以完全承担起设施长期规范化管护的任务,制度要求在基层层面存在落实不到位的情况。

3.2 小型农田水利设施公益属性与经济属性矛盾突出

小型农田水利设施兼具公益性和生产性双重属性,其运行管护既需要稳定的资金投入,又难以完全依靠市场化方式实现成本回收。在农业水价综合改革推进过程中,水价水平受农民承受能力和农业收益制约,水费收入有限,难以覆盖设施全生命周期内的维护和更新成本。同时,如果过度依赖财政补助,又容易削弱用水主体的责任意识和参与积极性,形成“等、靠、要”的心理预期。这种公益属性与经济属性之间的内在矛盾,是当前小型农田水利设施管护问题长期存在的重要原因之一。

3.3 管护主体协同机制不健全

在实际运行中,小型农田水利设施管护涉及乡镇政府、村级组织、用水合作组织和农户等多个主体,但各主体之间的协同机制尚不完善^[5]。部分地区存在职责交叉或责任空档现象,出现问题时容易相互推诿,影响管护效率。同时,用水合作组织在部分项目区运行不规范,组织功能发挥不足,未能有效承担起协调用水关系和参与设施管护的职责,导致管护工作更多依赖行政推动,缺乏稳定的内生动力。

3.4 技术条件提升与人员能力建设不同步

随着农业水价综合改革深入推进,小型农田水利设施在计量、控制和监测等方面的技术水平不断提高,但基层管护人员对新设备、新系统的操作和维护能力提升相对滞后。一些信息化设施在建成后未能得到充分利用,仍沿用传统管理方式,技术优势未能有效转化为管理效能。人员能力建设与技术条件提升不同步,制约了信息化、精细化管护模式的落地实施,也是当前管护问题反复出现的重要原因。

4 完善小型农田水利设施建设管护的对策建议

4.1 健全管护责任体系,明确权责边界

在推进小型农田水利设施建设过程中,应坚持“权责对等、建管同步”的原则,将管护责任落实作为工程建设的重要组成部分。在项目竣工验收和资产移交阶段,应同步完成设施产权界定和管护主体确认,明确乡镇政府、村集体、用水合作组织及农户在设施运行管护中的职责分工,避免因权责模糊导致后期管理缺位^[6]。通过制度文件或管护协议形式,将巡查频次、维护内容和责任追究机制加以固化,使小型农田水利设施管护由临时性安排转变为制度化、规范化管理,为工程长期稳定运行提供制度保障。

4.2 完善多元化运行管护经费保障机制

针对小型农田水利设施运行维护资金不足的问题,应在农业水价综合改革框架下,构建多渠道筹措、合理分担的管护经费保障机制。在科学核定农业灌溉用水价格的基础上,明确水费收入主要用于设施日常运行维护和必要更新,逐步形成“以水养水、以费促管”的良性循环^[7]。同时,应统筹财政补助资金和村集体经济支持,对计量设施校验、关键节点维修和信息化系统维护等公益性较强的支出予以重点保障,增强管护资金来源的稳定性和可持续性,避免因经费不足影响设施运行效果。

4.3 强化用水组织建设,提高农民参与水平

在小型农田水利设施运行管护中,应充分发挥用水合作组织和村级水管组织的桥梁纽带作用,通过完善组织章程和运行规则,推动农民参与用水管理和设施管护。通过民主协商方式确定用水计划、水费收取和管护责任分担机制,引导农民由单纯的用水对象转变为管护主体之一^[8-9]。同时,应结合农业水价综合改革政策,加强对农民的宣传引导和技术培训,增强其节水意识和管护责任意识,使农民在制度认同和实际行动上都成为小型农田水利设施长期运行的重要支撑力量。

4.4 推进信息化管护应用,提升管理精细化水平

在现有计量和监控设施基础上,应进一步加强信息化手段在小型农田水利设施管护中的应用,通过整合用水计量数据和运行监测信息,提高设施运行状态分析和异常情况预警能力。逐步减少对人工巡查和经验判断的依赖,提升管护工作的科学性和精准性^[10]。同时,应配套开展基层管护人员信息化操作和设备维护培训,增强其对智能化系统的理解和应用能力,确保信息化管护措施真正落地见效,为农业水价综合改革的持续推进提供技术支撑。

5 结论

总体来看,宣威市龙场镇农业水价综合改革项目在工程建设和计量设施配置方面取得了积极成效,但小型农田水利设施运行管护仍是制约改革成效持续发挥的关键环节。通过完善制度设计、健全经费保障、强化农民参与和提升信息化管理水平,能够有效提升小型农田水利设施的运行效益和使用寿命,为农业水价综合改革的深入推进提供坚实支撑。

参考文献

- [1]高力强.乡村振兴背景下农田水利设施长效管护机制构建与实践研究[J].农业科技创新,2025,(35):63-65.
- [2]何旭东.高标准农田建设中的水利设施配套研究[J].当代农机,2025,(09):103-104.
- [3]孙军红,冯锡涛,韩志刚,等.农田水利工程“1+N”管护模式的探索与实践[J].海河水利,2025,(09):39-43.
- [4]吴志旻,刘静.不同小型农田水利设施管护模式对水稻生产率的影响研究[J].农业技术经济,2025,(10):91-111.
- [5]李荣.乡村振兴背景下农村居民参与农田水利设施管护意愿的影响因素研究——基于安庆市52个村庄调研数据的实证分析[J].安徽农业科学,2025,53(13):174-177+180.
- [6]刘毅添.乡村振兴背景下广东佛冈县农田水利项目运维体系构建[J].农业工程技术,2025,45(19):60-61.
- [7]王莉,李依恒,赵富强,等.智慧赋能与多元联动:河南省小型水利设施协同治理创新研究[J].南方农机,2025,56(S1):89-92.
- [8]冯社广.山东聊城农田水利设施现状调查与优化路径研究[J].中国果业信息,2025,42(05):81-83.
- [9]王少平,林冬梅.浅析小型农田水利工程管护中存在的问题及对策[J].农业科技创新,2025,(14):69-71+74.
- [10]蔡志良,蒋益,张兴,等.农田水利运行管理问题及对策探析[J].水利技术监督,2025,(05):101-103.

作者简介:朱莉(1980.2-),女,汉族,云南宣威市人,大学本科,农业水利工程高级工程师,研究方向:小型农田水利设施及小型饮水工程。

河道生态治理工程施工技术与管理实践

张金鹏

平原县前曹镇政府, 山东省德州市, 253113;

摘要:河道生态治理工程是改善水生态环境、提高水系综合功能的重要措施, 它的效果好坏很大程度上取决于科学合理的施工技术和全过程的管理。本文主要对目前主流的河道生态治理技术体系进行了梳理, 包括改善基底条件的基础处理技术、恢复生物多样性生态修复技术、满足人文需求的景观构建技术, 以及对各项技术的应用要点和适用条件的分析。同时论文从管理实践的角度, 着重阐述了施工组织设计、质量控制、风险防控、多部门协同等关键环节的有效策略。通过对于实践案例的分析来为类似工程的规划、设计、实施提供一种综合性的参考框架, 并期望可以推动河道生态治理工程走向精细化、系统化的方向, 进而使生态效益、社会效益、工程效益三者有机地结合。

关键词:河道生态治理; 施工技术; 生态工程; 水环境

DOI: 10. 69979/3060-8767. 26. 02. 044

河道水系属于重要的自然生态廊道和水资源载体, 对于维持区域生态平衡、保障社会经济发展有着不可取代的作用。但是长期以来高强度的人类活动干扰和环境污染, 造成许多河道出现水体富营养化、生物多样性降低、自然形态渠化等一系列生态退化问题, 生态服务功能明显减弱。在这种情况下, 以生态系统原理为指导的河道生态治理就成为了恢复河流健康、促进人水和谐的重要途径。这类工程具有多目标、多学科交叉的特点, 项目的成功实施要依靠多种环境工程、水利工程、生态学等技术方法的应用, 但更重要的是依靠整个项目的精细化管理。因此, 深入研究并系统总结出河道生态治理的关键技术、施工要点以及相匹配的管理模式, 有很重要的现实意义。本文从工程实践出发, 通过对技术体系和管理实践进行综合分析, 给提高河道生态治理项目的科学性、有效性提供理论依据和实践指引。

1 河道生态治理工程施工技术概述

1.1 工程技术特点

河道生态治理工程是多目标的, 它既要恢复水系的生态功能, 又要改善水质、稳定水流。生态治理工程同常规水利工程相比, 更加突出生态优先原则, 重视自然恢复与人工干预相融合。主要技术特点体现在如下几个方面: 尊重自然水系形态, 使用生态化的材料, 嵌入生物栖息地的构建, 考虑水文动力学和生态需求的双重约束。这些特点决定施工技术的特殊性与复杂性, 必须要有精细化设计的方案。

1.2 主要施工技术分类

河道生态治理工程一般会使用多种施工技术, 按功

能划分主要分为基础处理技术、生态修复技术、景观构建技术这三类。基础处理技术有清淤疏浚、护岸固堤、河道整形, 为生态修复创造物理条件; 生态修复技术有植被种植、水生生物放流、微生物修复, 目的是重建生态平衡; 景观构建技术有亲水平台建造、生态步道修建, 实现生态与人文的融合。这几种技术互相配合就构成了一套完整的治理系统^[1]。

2 基础处理技术及其应用

2.1 清淤疏浚技术

清淤疏浚是河道治理的基础工序, 可以改善底质水质, 给生物的栖息创造条件。传统的机械清淤容易造成底泥二次污染, 需要使用环保型疏浚设备和技术。非开挖式的清淤(比如水力冲挖)能减少扰动, 在控制清除深度和范围方面有较好的精确性, 可以避免过度的干预。另外, 清淤前要开展沉积物评价, 区分出污染底泥与生态友好底泥, 然后分别对待或利用。深水区可以用气动潜水员配合小型清淤设备的方式提高作业的安全性。

2.2 护岸固堤技术

护岸固堤技术要按照河道特点选择合适的类型。生态护岸用植被、堆石、木桩等自然材料, 既稳固了岸坡, 又给生物提供栖息地。用植被护岸时, 要选择耐水湿、根系发达的植物, 合理配置层次结构; 块石护岸应该采用物理嵌合而不是胶结的方式来保持岸坡的自然演变。近些年透水混凝土, 生态袋技术在临时性防护上效果不错, 达到工程要求并且利于后期的生态改造。护岸施工时要控制好坡度以及材料的厚度, 避免出现崩塌或者过硬的情况, 从而影响到生态连通性。

2.3 河道整形技术

河道整形即恢复自然蜿蜒形态,提高自净、蓄洪能力。传统的裁弯取直做法要慎重考虑,因为会引发上游雍水、下游冲刷。生态整形要考虑流量调节、弯道形态优化、滩涂再造,创造多样化的水生栖息地。施工时要创建三维测量系统,实时监测河道的变化,根据河道的变化及时调整挖泥船的作业路线,达到设计的形态^[2]。尤其在生态敏感区,可设置生态缓冲带,减小施工对原生物的影响。

3 生态修复技术及其应用

3.1 植被种植技术

在河道生态系统中植被对于保持系统结构、功能完整性起着基础性的作用。科学地构建多层次、多物种的植物群落,是提高河道自净能力、增强生态稳定性的主要方法。物种筛选要立足本土,首选具有耐淹污能力、较强适应性以及一定观赏价值的乡土植物,保证群落的可持续性。从工程技术上来说,主要是采用客土回填、基质改良等方式改善根际环境,促进根系定植,同时设置检查设施方便后期监测养护。生态设计要按照梯度分布的原理,以水域到陆域的次序来布置水生、湿生、中生植物带,构成连续渐变的廊道。该复层种植模式不仅能有效地固土护岸,而且可以为各种生物提供更加多样化的栖息环境,生态效益远远高于单一物种的线性种植。

3.2 水生生物修复技术

水生生物群落依靠复杂的摄食、分解、共生等生态过程,一起形成水体内部重要的净化系统。建立这样的修复体系要合理设计食物网结构,还要优化生物的空间布局。底栖动物(螺、蚌)可直接分解有机碎屑,滤食性生物(蛤、牡蛎)能有效滤除悬浮颗粒,鱼类的加入可以调节种群数量的平衡。开展生物操纵的时候,投放之前要实施严格的评判,包含物种的本地适应性和投放数量的合理计算,防止外来物种入侵。在湿地、沼泽等生态节点要协同配置滤食者、分解者(微生物)以及各级消费者,形成功能互补的多点净化网络,从而系统性地提高水体对营养盐和有机污染物的承载能力和去除效率^[3]。

3.3 微生物修复技术

微生物是生态系统中的分解者,对污染物的转化以及物质循环起着基础性的作用。微生物修复技术主要是投加复合功能菌剂,有目的地加强水体的自然净化过程。这些菌剂含有经过驯化的特异性菌株,可以有效地降解水体和底泥中有机污染物。工程应用中,菌剂投加点位

应集中到污染的核心区,即重污染底泥表层或者排污口附近,并调节水力条件(流速、溶解氧)来保持微生物的活性。对修复期间微生物群落结构和功能变化进行监测,是评价修复效果的重要的生物学依据。经过适宜的菌剂激活、群落培养后,水体微生物系统的代谢活力以及污染物降解能力一般可以得到提高,从而逐步促进水体生态系统向健康状态演进。

4 景观构建技术及其应用

4.1 亲水平台设计

亲水平台是人与自然的联系纽带,要考虑到可达性以及多功能性。常见的有 Floating pontoon、阶梯式、无障碍爬梯等。水下平台到岸坡的高度差可以分层设置,每层台阶处设置生物龛道,给水下生物提供停留的空间^[4]。材料选择要考虑耐久性、过敏性,防腐木材、钢结构覆铝塑板等比较受欢迎。施工时要注意水体过渡处理,防止溢流影响下游生态。

4.2 生态步道建设

生态步道要使用交织结构材料、自然起伏的路线,与周边景观、水系相协调。木板石板草绳复合铺设,既有稳定又具生态,渐湿性修建时搭建低水位平台、露出岸线的木桩群落,形成动态的水陆交错带。步道边缘可以嵌入磁吸式的镶嵌板,方便以后的维护更换。从生态步道可以提高大众水文生态素养的角度来说,生态步道可以间接的降低对一线生物的干扰。

5 工程管理关键环节

5.1 施工组织设计

科学合理的施工组织方案是保证工程顺利进行的前提。应当确定各个阶段的任务分工,选取合适的施工设备,改善作业流程。根据生态治理工程的特点,需要考虑枯水期施工、夜间施工和生态缓冲。制定鱼类洄游季停工计划,设置化学污染处理隔离带,移动式 ja 是厂严格执行污染物排放标准。用 BIM 技术做可视化模拟,可以提前找到进度冲突和技术问题。

5.2 质量控制体系

生态治理工程的质量控制应该从源头上抓起,包括材料采购、施工过程和结果监测。建立多级检测网络,重点检测非典水质指标、底泥交换量、生物指标。采用多点采样的方式对种植的植被根系发育进行评价,用水下摄影的方法对底栖生物的覆盖率进行监测。定期组织专家飞行检查既可以节约资源,又可以保证质量。在隐蔽工程验收阶段要进行无破损检测,保证隐蔽工程符合设计要求。

5.3 安全与风险管理

施工环境复杂多变,所以要建立完善的安全生产体系。水上作业要配备救生船、通信设备,岸坡施工使用固定式安全网,危险区域设警示标志。生态风险防控十分重要,设置导流装置以减小施工对生物的影响,收购临时受扰动物并转移安置。制定应急预案,防的对象有极端天气(洪水、台风)、设备故障、环境污染事故,每个预案都要指定负责的部门和处理的步骤。

5.4 三方协调机制

生态治理工程牵涉林业、水利、环保等部门,创建协调机制十分重要。可以采取联席会议的方式,就跨部门问题进行协商解决。签订还款协议,确定各方责任,指定专人跟进^[5]。以争议水域治理为例,水利部门出技术方案,环保部门审生态影响,属地政府管后续。依靠信息共享和决策透明来形成工作合力。

6 成功案例分析

德州市平原县在马颊河治理上采取的是“精准清淤、生态护岸、复合植被”的综合性生态治理措施,效果明显。技术上强调低环境影响和生态功能提升,清淤作业采用专用设备尽量减少底泥扰动,配合使用生物技术抑制污染物扩散,护岸工程创新性地使用柳木桩和多孔石材相结合的柔性结构,在保证岸坡安全的前提下,为水生生物创造了栖息、繁殖的微环境,植被修复按照自然演替规律,根据水位变化梯度种植多层次复合植物群落,提高河道自净能力和景观多样性。

项目管理上创建起全过程一体化的智慧运维模式。用无人机进行空间巡查,通过移动终端完成数据的实时传输与处理,极大地提高了监管效率和响应速度。经过治理,马颊河水体感官和化学需氧量等主要指标明显改善,水生生物种类逐渐丰富,区域生物多样性得到恢复,该河段也成为生动的环境教育场所,提高了沿岸居民和青少年的生态保护意识。该案例表明,把生态工程技术同现代精细化管理深度融合,才是实现河道长治久清、综合效益提高的保证。

7 挑战与发展方向

虽然河道生态治理工程有所进展,但是仍然存在受突发污染冲击时生态系统的脆弱性、长期维护资金缺乏、公众参与度低、极端气候事件频发带来的设计不确定性等问题。未来的发展方向有智能监测技术的应用,利用物联网设备对生态参数进行实时监测,多学科交叉研究,深入探究生态和水动力的耦合机制,公众参与新模式的探索,开展生态银行等激励机制,生态韧性设计理念的

推广,提高工程对极端条件的适应能力^[6]。尤其对生物培养床这样一种新型、小型化以及智能化的技术,在技术上有提高,对生态硬件(生物培养床)的创新研究以及生物膜的再生应用都有极大的促进作用。

8 结论与展望

8.1 结论

本文系统地研究了河道生态治理工程的施工技术体系和管理实践途径。研究表明,此类工程的成功实施要依靠基础处理、生态修复、景观构建三大技术类别的协同使用,生态护岸、复合植被群落构建、微生物修复等关键技术对恢复河道生态功能起着决定性作用。从管理层面来说,建立覆盖施工组织、质量控制、风险防控、多部门协调的全过程精细化管控机制,是保证工程实现预期生态效益的重要保证。案例表明,生态化施工技术和智慧化管理模式融合之后,可以有效地改善工程的总体效果和可持续性,给类似河道治理项目给予了可资参考的实践经验。

8.2 展望

对于未来河道生态治理,仍存在极端气候适应性、河道治理的长效运维资金和公众参与度不够深等问题。后续发展中应更加重视智能监测技术同生态模型的融合应用,从而达成对河道健康情况的实时感知以及预测预警。同时还要加强多学科交叉的研究,在生态水文过程耦合机理、新型生态材料等方面寻求突破。除此之外,积极探索“生态银行”、社区共管等新的机制,引导社会力量参与治理与管护,将是提高工程韧性和综合价值的主要方向,使河道生态治理走向智能化、社会化、可持续化。

参考文献

- [1] 梁雅铭. 河道治理工程中生态护坡的应用及设计[J]. 大众标准化, 2025, (09): 152-154.
- [2] 查道平, 李刘欢. 城市河道中原位生态治理工程施工技术应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (03): 76-80.
- [3] 张天乐. 河道生态综合治理工程生态护坡的设计研究[J]. 水上安全, 2024, (24): 46-48.
- [4] 赵馨. 河道工程中常用的生态治理技术及具体措施探析[J]. 价值工程, 2024, 43(33): 59-62.
- [5] 李力. 城镇河道防洪建设与生态治理的探索[J]. 陕西水利, 2023, (08): 63-65.
- [6] 周贯奎. 某平原河道生态综合治理工程中护岸设计要点[J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(07): 84-85.

基于规范化管理的水库安全生产运行体系构建与实践

秦玉盼 王文龙 李飞飞

昌吉回族自治州水利管理总站, 新疆昌吉, 831100;

摘要: 水库安全生产运行管理是保障流域防洪安全、供水安全和生态安全的核心环节。本文系统梳理了水库安全生产运行管理的三大核心工作板块: 强化日常监管以保障工程安全, 落实防汛举措以应对汛期风险, 以及强化风险防控意识以实施常态化隐患排查治理。通过对照国家及地方现行的多项技术规范、管理办法与工作通知, 本文详细阐述了各项工作的具体内容、执行标准与操作要求, 旨在构建一个系统化、规范化、全链条的水库安全管理实施框架。文章以新疆某州水库管理实践为背景, 对当前水库安全生产运行管理的关键任务、制度依据与操作要点进行了归纳与总结, 以期同类地区水库的规范化、标准化安全管理提供系统性参考。

关键词: 水库安全; 运行管理; 日常监管; 防汛责任; 风险管控; 标准化

Construction and Practice of a Reservoir Safe Production Operation System Based on Standardized Management

QIN Yupan WANG Wenlong LI Feifei

Changji Hui Autonomous Prefecture Water Resources Management General Station, Changji, Xinjiang 831100, China;

Abstract: Safe production operation management of reservoirs is a crucial element in ensuring basin flood control security, water supply security, and ecological security. This paper systematically outlines the three core operational components of reservoir safe production management: strengthening daily supervision to ensure project safety, implementing flood prevention measures to address risks during flood seasons, and enhancing risk prevention awareness to conduct regularized hidden hazard investigation and management. By referencing multiple current national and local technical specifications, management measures, and operational directives, this paper elaborates on the specific content, execution standards, and operational requirements for each task, aiming to construct a systematic, standardized, and full-chain implementation framework for reservoir safety management. Against the backdrop of reservoir management practices in a prefecture in Xinjiang, this paper summarizes the key tasks, institutional foundations, and operational essentials of current reservoir safe production operation management, with the goal of providing a systematic reference for the standardized and safety management of reservoirs in similar regions.

Key words: eservoir safety; operation management; daily supervision; flood prevention responsibility; risk prevention and control; standardization

DOI: 10. 69979/3060-8767. 26. 02. 045

引言

水利工程作为一项利国利民的民生工程, 其安全稳定运行事关人民生命财产安全、经济社会可持续发展与社会大局稳定^[1]。随着工程运行年限增长及极端气候事件频发, 水库安全管理面临日益严峻的挑战^[2]。为提升水库安全管理效能, 国家与地方各级水行政主管部门相继出台了一系列法规、技术标准与管理文件, 对水库安全监测、日常维护、防汛应急、风险防控等各个环节提出了明确且细致的要求^[3]。本文旨在依据《水库大坝安全监测管理办法》《小型水库监测技术规范》《土石坝安全监测技术规范》《混凝土坝安全监测技术标准》等一系列现行有效文件, 结合工作实际, 系统论述水库安全生产运行管理的主要工作内容、技术标准与实践要求, 构建一个清晰、完整的管理工作体系, 以推动水库安全管理向更加规范化、制度化和精细化的方向发展。

1 构建系统化的日常监管体系, 夯实安全运行基础

日常监管是确保水库长期安全稳定运行的基石, 其核心在于制度的严格执行与流程的规范操作^[4]。

1.1 严格执行安全监测制度

依据《水库大坝安全监测管理办法》(水运管〔2024〕347号)、《小型水库监测技术规范》(SL/T828-2024)、《土石坝安全监测技术规范》(SL/T551-2024)、《混凝土坝安全监测技术标准》(GB/T51416-2020)等文件, 必须系统开展大坝水位、坝体位移、渗流、气象及视频等项目的监测。水库管理单位需明确各项监测的固定频次, 建立健全数据采集、整理与分析流程, 确保能够及时发现工程异常状况, 并依据规范要求采取相应的预警与处置措施。

1.2 规范开展日常维修保养

工程设施的完好性是安全运行的前提。应参照《新疆公益性水利工程维修养护项目管理工作手册》、《土石坝养护修理规程》(SL210-2015)、《混凝土坝养护修理规程》(SL230-2015)等技术规程,定期对水库大坝的坝顶、坝坡、各类监测设施及启闭设施等进行全面的检查、保养与维修,建立维修养护台账,确保工程设施始终处于良好的技术状态。

1.3 分级实施巡视检查工作

巡视检查是发现表面隐患的重要手段。应严格按照《小型水库巡视检查工作指南》开展:日常巡查:由水库管理单位或巡查责任人进行,重点检查工程和设施运行状况,汛期每日至少1次,非汛期每周至少1次,初蓄期应加大频次。防汛检查:由主管部门及防汛责任人在汛前、汛中、汛后组织,每年不少于3次,重点检查大坝安全、设施运行及防汛准备工作。特别检查:在遭遇洪水、地震或发现大坝异常时,由主管部门或管理单位立即组织,必要时可邀请专家参与。

1.4 全面推进标准化管理

按照《新疆维吾尔自治区水利工程标准化管理评价细则》要求,各水库需结合实际,全面编制“管理手册、工作手册、制度手册”三个手册。此项工作^[5]是实现管理规范化的关键载体,必须按计划加快推进,以满足水利工程运行安全的长期需要。

1.5 完善工程注册登记与安全鉴定

依据《水库大坝注册登记办法》,及时完成新建或改建水库的注册登记及信息变更。同时,严格执行《水库大坝安全鉴定办法》,建立常态化安全鉴定机制,明确首次鉴定与定期鉴定的时间节点,特别是在经历特大洪水、强烈地震等事件后,必须及时组织专门的安全鉴定。

2 落实全链条防汛责任体系,筑牢汛期安全防线

防汛工作是水库安全管理重中之重^[6],必须构建责任清晰、预案完备、响应迅速的防御体系。

2.1 压实“三个责任人”职责

汛前必须明确并公布各水库的政府责任人、主管部门责任人和管理单位责任人^[7],参照《小型水库防汛“三

个责任人”履职手册》等文件开展培训,确保责任人熟知职责并能有效履职。责任人变动需及时履行书面告知程序。

2.2 健全预案方案体系

在每年汛期前,必须完成《水库大坝安全管理应急(防汛抢险)预案》、《汛期调度运用方案》、《雨水情监测预警预报方案》、《年度蓄水计划》、《水库调度规程》、《防洪抢险应急预案》及《水库大坝地震应急预案》等各类预案方案的编制、更新与审批工作,形成一套系统、可操作的应急响应指导文件。

2.3 强化汛期调度与信息管理

严格按照规范要求编制和执行汛期调度运用方案,明确水库防洪能力、调度权限与职责。坚持实行水库运行情况“日报告、周报告、旬报告”制度,严格执行24小时值班值守规定,确保信息报送渠道畅通、内容准确、时效性强,坚决杜绝信息报送中的各类问题。

3 强化风险防控与隐患治理体系,实现安全关口前移

树立主动防控意识,构建常态化隐患排查治理机制,是防范和化解重大安全风险的根本路径^[8]。

3.1 全面推行风险管控“六项机制”

按照水利部《水利安全生产风险管控“六项机制”实施工作指南》要求,水库管理单位必须全面建立并落实风险查找、研判、预警、防范、处置、责任等六项机制^[9]。2025年底前要建立事故隐患报告奖励制度,实现“六项机制”全覆盖,并将重大事故隐患判定标准纳入监管人员必修培训内容。

3.2 深入开展安全隐患排查治理

对照《水利水电工程危险源辨识与风险评价导则》(SL/T843-2025)、《水利水电工程生产安全重大事故隐患判定导则》(SL/T842-2025)及《自治区水库安全隐患排查问题评级标准》等,坚持“全覆盖、零容忍、严执法、重实效”原则,深入开展安全隐患排查,建立问题清单和整改台账,实行闭环管理,实现标本兼治。

3.3 专项强化地震灾害风险防范

认真贯彻关于水库防震减灾工作的系列文件要求。水库管理单位需深入学习《水库大坝震后安全检查技术

指南》，掌握震后影响范围估计、检查启动条件、险情分级及各类报告编制要求。在此基础上，结合工程实际，修订完善地震应急预案，并定期组织演练^[10]。要制定专项检查方案，将地震隐患排查纳入常态化工作，确保年度检查全覆盖。特别是高烈度区水库，必须抓好抗震复核，并将溃坝洪水风险图、应急疏散路线图等纳入安全管理公示内容。

3.4 明确险情处置与加强培训演练

水库管理单位必须明确管涌、渗水、漏洞、裂缝、漫溢等各类大坝重大险情的具体处置措施。同时，紧密结合“安全生产月”等活动，定期组织防洪、抗震、消防等实战化应急演练，并加强水库周边安全宣传，特别是暑期防溺水宣传，全方位提升安全防范能力与公众安全意识。

4 结论

水库安全生产运行管理是一项贯穿工程全生命周期、涉及多环节、多主体的系统性工程。本文系统梳理了以强化日常监管、落实防汛举措、强化风险防控为核心的三大工作体系，详细阐述了各项工作的具体内容、执行标准与文件依据。实践表明，只有严格遵循国家及地方的技术规范与管理要求，将制度落实到每一个监测项目、每一次巡视检查、每一份预案编制和每一处隐患整改中，才能构建起坚实可靠的水库安全屏障。未来，仍需持续推进标准化管理建设，深化风险管控“六项机制”的应用，强化新技术、新方法的融合，不断提升水库安全管理的规范化、精细化与智能化水平，从而持续

保障水库工程的安全稳定运行，充分发挥其综合效益。

参考文献

- [1]王海宇. 耿庄水库建设质量控制与安全运行管理[J]. 水利技术监督, 2024, (4): 9 - 10.
- [2]杨军, 杨德玮, 董凯, et al. 基于溃坝洪水演进模拟的动态应急转移路线实现方法[J]. 河南科学, 2021, 39 (12): 7.
- [3]陈丽媛, 杨阳, 纪君娜. 水库大坝安全管理中的问题和解决措施研究[J]. 中国设备工程, 2022, (5): 2.
- [4]徐云乾, 袁明道, 史永胜, et al. 广东省小型水库安全运行管理标准化探索实践与长效机制思考[J]. 大坝与安全, 2023, (4): 12 - 6.
- [5]任晓磊, 张心欣, 王永亮, et al. 河北省小型水库工程概况及标准化建设现状[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23 (2): 457 - 63.
- [6]赵文博. 河口村水库抢险调度与措施[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51 (10): 2.
- [7]水利部进一步规范小型水库防汛“三个责任人”“三个重点环节”工作[J]. 水利技术监督, 2020, (02): 272.
- [8]切实增强忧患意识防范化解灾害风险确保江河水库安澜和群众生命财产安全[J]. 河南省人民政府公报, 2019, (11): 25.
- [9]郭键. 以“六项机制”助推佛子岭水库安全管理提质增效[J]. 工程建设与设计, 2024, (2): 255 - 7.
- [10]袁远亮. 凉山州地震应急救援管理工作实践研究[J]. 中国应急救援, 2018, (06): 54 - 8.

绿色建筑理念下建设工程施工管理优化路径探析

杜军平

陕西煤业化工实业集团有限公司，陕西西安，710065；

摘要：在双碳目标与城乡建设低碳转型的战略背景下，绿色建筑已成为建筑业高质量发展的核心方向。施工阶段作为建筑全生命周期资源消耗与环境影响的关键环节，其管理效能直接决定绿色建筑理念的落地成效。本文基于绿色建筑节能、节水、节材、节地、环保的核心要求，系统剖析当前建设工程施工管理在绿色理念渗透、技术集成应用、全流程管控等维度存在的突出瓶颈，从组织架构、技术融合、过程管控、保障机制四个维度提出针对性优化路径，为推动建设工程施工管理向绿色化、精细化转型提供理论支撑与实践范式。

关键词：绿色建筑；施工管理；优化路径；低碳转型

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.046

引言

全球气候变化与生态保护需求推动绿色发展成为产业转型的核心共识，建筑业作为资源密集型产业，其施工阶段消耗全国 30% 钢材、25% 水泥，且产生 40% 建筑垃圾，其绿色转型对双碳目标实现具有关键支撑作用。绿色建筑以全生命周期可持续发展为核心，要求施工管理在兼顾传统质量、进度、成本目标的基础上，实现资源高效利用与环境友好的协同。

我国绿色建筑规模持续扩大，2024 年底城镇新建绿色建筑占比达 92%，但高星级占比仅 38%，重设计轻施工、重认证轻实效现象普遍存在。传统施工管理以成本与进度为核心，难以适配绿色建筑多元要求，导致技术应用不足、资源浪费与环境污染等问题。因此，基于绿色建筑理念优化施工管理路径，是推动建筑业高质量转型的迫切需求。

1 绿色建筑理念下施工管理的核心要求与现存问题

1.1 核心要求

绿色建筑理念对施工管理的要求贯穿项目施工全流程，其核心内涵可概括为四节一环保：其一为节能管控，需优化施工机械设备能源消耗结构，积极推广新能源装备应用，降低施工阶段碳排放强度；其二为节水管理，构建雨水收集与施工废水深度处理回收利用系统，最大限度降低对市政公共用水的依赖度；其三为节材增效，通过施工材料精准规划、周转材料循环利用等技术路径，降低材料损耗率，提升建筑垃圾资源化利用水平；其四为节地规划，科学布局施工场地，缩减临时用地占用面积，降低对周边生态环境的扰动与破坏；其五为环境保护，严格管控施工扬尘、噪声、污水及固体废弃物

等污染物排放，最大限度弱化施工活动对周边生态环境的负面影响。

1.2 现存问题

组织管理体系存在结构性缺陷。多数项目尚未建立专业化的绿色施工管理组织架构，各部门绿色管理职责界定不清晰，导致绿色施工目标难以有效分解并落实至具体岗位。部分企业缺乏系统性的绿色施工专项管理制度，未将环保绩效、资源利用效率等核心指标纳入项目绩效评价体系，管理人员与施工班组的绿色施工意识普遍薄弱，难以形成全员参与、全程管控的绿色管理氛围。

技术集成应用深度不足。尽管 BIM、物联网等数字化技术在绿色建筑领域的应用率逐步提升，但普遍存在重硬件堆砌、轻软件协同的现象，技术应用呈现碎片化特征，未形成协同效能。例如，BIM 技术多局限于施工建模可视化应用，其在施工进度模拟、资源动态优化、施工冲突预判等核心应用场景的价值未充分释放；新能源装备与节能施工技术推广滞后，传统高耗能机械设备仍占据主导地位，绿色施工工艺的应用范围与深度均存在显著不足。

过程管控缺乏动态协同性。施工过程中对资源消耗、环境排放等核心指标的监测多采用事后静态统计模式，缺乏实时动态监测与预警系统支撑。部分项目为追赶施工工期，存在刻意规避绿色施工要求的行为，如违规夜间施工产生噪声污染、简化扬尘防控措施等，导致实际环境绩效与设计目标出现较大偏差。与此同时，绿色供应链管理体系尚未健全，对建材供应商的绿色资质审核流于形式，对进场建材的环保性能检测不到位，从源头制约了绿色施工质量的提升。

保障支撑机制尚不健全。政策激励与约束机制存在

双重缺失,部分地区绿色建筑专项补贴政策落实不到位,对绿色施工的正向激励作用有限,同时对违规施工、超标排放等行为的处罚力度不足,难以形成有效约束。企业层面缺乏系统化的绿色施工人才培养体系,现有管理人员对绿色建筑技术标准、碳排放核算方法等专业知识掌握不扎实,难以满足绿色施工管理的专业化需求。此外,绿色施工评价体系的应用流于形式,未建立计划—执行—检查—改进的闭环管理机制,导致绿色施工质量难以实现持续提升。

2 绿色建筑理念下施工管理的优化路径

2.1 构建协同高效的绿色施工组织体系

优化组织架构设计。建立以项目经理为核心的绿色施工领导小组,明确技术、质量、安全、物资等各职能部门的绿色管理权责,将四节一环保目标细化分解至各岗位,形成横向到边、纵向到底的责任体系。推行绿色顾问+项目经理双轨管理机制,绿色顾问负责绿色施工技术方案审核、绿色绩效动态评估等专业工作,项目经理统筹协调日常管理与资源配置,构建权责清晰、协同联动的绿色管理闭环。

健全制度保障体系。编制针对性的绿色施工专项方案,明确施工各阶段的绿色技术要求、监测标准、考核指标及整改措施。建立并有效运行 ISO14001 环境管理体系,将碳排放强度、建筑垃圾资源化率、水资源重复利用率等核心指标纳入项目绩效评价体系,与班组薪酬分配、个人奖惩直接挂钩,形成正向激励机制。加强全员绿色施工培训,定期开展绿色工艺实操演练、碳排放核算方法、环保法规等专项培训,同步通过案例宣讲、现场观摩等方式强化管理人员与施工人员的绿色发展意识。

2.2 推动绿色技术集成与创新应用

深化数字化技术与绿色施工的深度融合。以 BIM 技术为核心载体,构建覆盖设计、施工、运维全生命周期的数字化管理平台。借助 BIM 三维建模技术模拟施工全流程,优化构件尺寸参数与安装节点设计,减少现场切割加工与返工整改带来的材料浪费;融合 GIS 技术开展施工场地三维规划,优化材料运输路线与临时设施布局,降低运输能耗与土地占用率。依托物联网技术部署能耗监测终端、扬尘在线监测仪、噪声传感器等设备,实时采集能源消耗、环境排放等核心数据,通过平台数据分析识别高耗能、高排放环节,实现绿色施工动态管控与精准调控。

推广应用绿色施工技术与节能装备。节能维度,优

先推广太阳能光伏系统、地源热泵等新能源装备,为施工临时办公区、生活区提供供电供暖服务;对现有施工机械进行节能改造,逐步替换为电动挖掘机、纯电动渣土车等新能源设备,降低施工阶段碳排放强度。节水维度,结合场地地形地貌设计雨水收集模块,配套建设施工废水处理系统,处理后的水资源用于混凝土养护、车辆冲洗、场地降尘等环节;全面推广感应式节水器具,从用水终端减少水资源浪费。节材维度,大力推广装配式施工技术,通过 BIM 技术精准预制构件,将现场损耗率控制在合理范围;建立周转材料全生命周期管理台账,实现脚手架、模板等材料的标准化维修、分级复用;搭建建筑垃圾现场处理平台,对废弃建材进行破碎筛分,再生骨料用于场地硬化、道路垫层等二次工程,提升资源循环利用水平。环保维度,优先选用低噪声施工设备,对高噪声工序采取隔声罩、减振垫等降噪措施;构建围挡喷淋+裸土覆盖+湿法施工+雾炮降尘的立体扬尘防控网,确保扬尘排放符合相关标准要求。

2.3 实施全流程动态化绿色管控

强化施工前期规划管控。施工准备阶段,在原有施工组织设计基础上,编制专项绿色施工方案,明确各工序的绿色技术要点、环境控制标准及应急处置措施。建立绿色建材合格供应商名录与数据库,优先选用获得绿色建材认证、再生成分含量高的建材产品,对供应商开展绿色资质审核与动态评估,构建全链条绿色供应链体系。借助 BIM 技术开展施工进度可视化模拟,优化工序衔接逻辑,将环保材料养护、废弃物分类回收等绿色工序合理嵌入进度计划,预留充足的绿色施工时间,规避工期压力对绿色施工质量的负面影响。

加强施工过程动态协同调控。推行精益绿色建造理念,通过价值流分析识别施工过程中的非增值环节,优化施工流程,减少材料二次搬运、工序重复作业等带来的资源浪费。对混凝土浇筑、土方开挖、构件安装等关键工序实施重点管控,同步落实配套绿色措施,如混凝土浇筑阶段采用节水养护工艺,土方作业阶段严格执行湿法施工要求。建立绿色施工三级响应机制应对不确定性因素,针对资源消耗波动等常规问题,通过资源弹性储备及时化解;针对技术参数偏差等中度干扰,启动替代技术方案库;针对重大环境风险事件,激活业主、设计、施工、监理多方协同平台,重新协商调整工期与资源调配方案。

健全施工后评价与持续改进机制。严格参照《绿色施工评价标准》(GB/T50640-2010),从环境保护、节材、节水、节能、节地五个维度构建量化评价指标体系,

开展绿色施工效果专项评价,精准分析实际绩效与设计目标的偏差原因。项目竣工后组织开展绿色施工后评估工作,系统总结绿色施工中的成功经验与不足,将成熟的管理模式、技术方案转化为企业级标准规范。依托 PDCA 循环管理模式,持续优化绿色施工管理体系,实现管理水平的迭代升级。

2.4 建立全方位保障机制

强化政策与市场双重保障。主动对接国家及地方绿色建筑相关政策,积极争取绿色施工专项补贴、税收减免等政策支持。推动建立绿色建筑工程保险制度,探索推行环境污染责任保险,降低绿色施工的风险成本。加强与政府监管部门的常态化沟通,严格执行环保法律法规与行业标准,对违规施工、超标排放等行为实施零容忍处罚,形成正向激励+反向约束的双重机制。

构建专业化人才培养体系。推动建立绿色项目管理职业资格认证制度,聚焦施工管理与绿色技术融合需求,培养兼具施工管理经验、绿色技术知识、碳排放核算能力的复合型人才。企业建立内部培训+外部交流+实践锻炼的三维培养模式,定期组织内部专项培训,邀请行业专家开展绿色施工技术与管理专题讲座,选派骨干人员参与绿色建筑示范项目实践,提升管理人员的专业素养。鼓励施工人员参与绿色技能竞赛、工艺创新评选等活动,提升绿色施工实操水平。

推动行业协同与绿色文化建设。构建建筑企业、设计单位、建材供应商、科研机构四方协同创新平台,联合开展绿色施工新技术、新材料、新工艺的研发与应用。积极参与绿色建筑行业交流峰会、示范项目观摩等活动,推广优秀项目的绿色施工管理经验。培育企业绿色施工文化,通过企业内网、宣传栏、班前会等多种渠道开展绿色发展理念宣传教育,结合典型案例展示绿色施工的经济效益与环境效益,增强全员绿色发展责任感,营造人人参与绿色施工、事事践行绿色理念的良好氛围。

3 案例分析

某绿色产业园项目总建筑面积 20 万 m²,为省级绿色施工示范工程,该项目全面践行绿色建筑理念,构建了全流程绿色施工管理体系。组织管理层面,成立绿色施工领导小组,推行绿色顾问+项目经理双轨制,将建筑垃圾资源化率 $\geq 85\%$ 、碳排放强度降低 20%等指标纳入绩效评价体系;技术应用层面,搭建 BIM+物联网数字化管理平台,实现资源消耗与环境指标的实时监测,

大力推广装配式施工技术与太阳能光伏系统,预制构件现场损耗率控制在 3%以内,太阳能光伏系统年发电量超 10 万度,满足项目 30%的临时用电需求;过程管控层面,建成日均处理能力 50 吨的雨水回收系统,回用水资源用于混凝土养护与场地降尘,同时建立三级环境风险响应机制,有效规避了环境污染问题;保障机制层面,开展绿色施工专项培训 12 场,参训人员超 300 人次,成功争取地方绿色建筑专项补贴,构建了涵盖 15 家供应商的绿色供应链体系。项目竣工后,实际建筑垃圾资源化率达 90%,施工阶段碳排放较传统工艺降低 25%,较计划目标提升 5 个百分点,达成经济效益、环境效益与社会效益的协同耦合。该项目的实践表明,通过组织、技术、过程、保障四维协同优化路径,可有效提升绿色建筑施工管理水平,推动绿色理念从设计阶段向施工环节的有效落地。

4 结论与展望

绿色建筑理念下的建设工程施工管理优化是多维度、全流程的系统工程,需突破传统管理局限,实现组织架构、技术应用、过程管控、保障机制协同升级。构建高效绿色施工组织体系、推动绿色与数字化技术融合、实施全流程动态管控、建立全方位保障机制,可提升施工管理绿色化、精细化水平,实现资源利用、环境保护与工程质量提升的统一。未来,伴随数字化技术升级与绿色建筑标准完善,施工管理优化将呈智能化、协同化、标准化趋势。企业应聚焦绿色技术创新与应用,推动前沿技术与绿色施工管理融合,提升精准性与高效性;行业需加快构建评价与认证体系,完善协同机制,推广优质经验;政府应强化政策引导与监管,构建绿色发展格局,助力建筑业高质量低碳转型。

参考文献

- [1]刘钊.绿色建筑工程现场文明施工管理的路径探析[J].建材发展导向,2025,23(15):133-135.
- [2]吴生海,徐广舒,羌晨晨."双碳"背景下绿色建筑发展路径探析[J].绿色中国,2025(1):160-162.
- [3]袁涛,范家旗,李豪,等.低碳节能大趋势下绿色建筑节能减排技术探析[J].陶瓷,2024(002):000.

作者简介:杜军平,1980 年 12 月,本科,甘肃礼县人,工程师单位:陕西煤业化工实业集团有限公司,研究方向:建设工程管理。

地震对市政桥梁结构性能的影响及加固措施

缪章杰

339005*****0312

摘要: 市政桥梁是城市交通网络的关键枢纽,其结构稳定性直接影响地震灾害后的生命救援与城市功能恢复。地震作用下,地震波传导、场地条件差异等因素易导致市政桥梁出现构件损伤、连接失效等问题,进而引发结构性能衰减甚至整体垮塌。本文结合市政桥梁结构特点与地震作用机理,系统分析地震对桥梁关键结构的影响规律,梳理新型加固材料与工艺的应用要点,提出针对性加固策略与优化建议,为提升市政桥梁抗震性能、保障城市基础设施地震安全提供理论与技术参考。

关键词: 地震;市政桥梁;结构性能;影响机理;加固措施

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.047

引言

市政桥梁在城市基础设施体系中占据核心地位,承担着保障区域交通畅通的重要职能。地震灾害作为突发性强、破坏性大的自然灾害,往往会对市政桥梁结构造成严重损毁,进而导致交通中断,影响灾后救援工作的顺利开展与城市功能的快速恢复。当前,国内外学者已围绕地震作用下市政桥梁结构性能开展了一系列研究,但在复杂场地条件下的影响机制、新型加固技术的适用性等方面仍存在不足。本文旨在深入探究地震对市政桥梁结构性能的影响,提出科学合理的加固措施,为提升市政桥梁抗震能力提供有力支撑。

1 地震作用下市政桥梁结构的受力机理

1.1 地震荷载传递与作用形式

地震荷载的传递始于地震波与场地土的相互作用,随后通过桥梁基础传递至上部结构。地震波主要分为纵波和横波,纵波引发结构的轴向拉伸与压缩变形,横波则导致结构产生水平方向的剪切与弯曲变形。不同类型地震波的传播速度、振幅存在差异,其组合作用会使桥梁结构承受复杂的动态荷载。地震荷载的作用形式具有瞬时性、随机性和复杂性等特点,会随地震等级、震中距、场地条件等因素发生变化。明确地震荷载的传递路径与作用形式,是分析桥梁结构地震响应、开展抗震设计与加固的基础。

1.2 桥梁结构特性对地震响应的影响

市政桥梁的结构特性直接决定其地震响应的强弱程度。桥梁的跨度尺寸会影响结构的自振周期,大跨度桥梁的自振周期较长,易与长周期地震波产生共振,加剧结构损伤。桥梁的结构形式也会改变地震响应规律,

梁桥、拱桥、斜拉桥等不同类型桥梁的传力路径存在差异,对地震荷载的抵抗能力也各不相同。此外,桥梁构件的截面尺寸、材料强度、配筋率等参数,会影响构件的承载能力与变形能力,进而影响桥梁整体的地震响应。合理优化桥梁结构特性,可有效降低地震作用对结构的不利影响。

1.3 场地条件对地震受力的差异影响

不同场地条件下,市政桥梁的地震受力存在显著差异。坚硬场地的土层密实度高、刚度大,地震波传播过程中能量衰减较慢,易使桥梁承受较大的地震荷载;软弱场地的土层松散、承载力低,地震作用下易发生液化、沉降等现象,导致桥梁基础失稳,进而引发上部结构破坏。地形地貌也会影响地震受力,山地、河谷等区域的地震波易产生反射、折射,使桥梁局部承受更大的应力集中。开展场地条件对桥梁地震受力的差异分析,可为不同场地环境下的桥梁抗震设计提供针对性依据。

2 地震对市政桥梁结构性能的核心影响

2.1 主体构件损伤与性能衰减

主体构件是市政桥梁承载能力的核心保障,地震作用下易发生各类损伤并伴随性能衰减。桥梁梁体易出现裂缝、混凝土剥落等损伤,裂缝会降低梁体的整体性与抗剪能力,混凝土剥落则会导致钢筋暴露锈蚀,进一步削弱梁体承载性能。桥墩作为桥梁竖向承重与抗侧移的关键构件,地震作用下易产生弯曲裂缝、剪切裂缝,严重时会发生墩柱折断、倾斜等破坏。桥台也可能出现台身裂缝、台后填土沉降等问题,影响桥梁的整体稳定性。主体构件的损伤演化会逐步加剧结构性能衰减,威胁桥梁安全。

2.2 连接节点失效与破坏特征

连接节点是保障桥梁结构整体性的关键部位，地震作用下易发生失效并呈现特定破坏特征。梁端与桥台的连接部位易出现支座损坏、锚固失效等问题，支座损坏会导致梁体支撑不稳定，锚固失效则可能引发梁体滑移、落梁等严重破坏。桥墩与基础的连接节点易产生应力集中，出现裂缝、混凝土破碎等损伤，影响荷载的有效传递。此外，桥梁拼接部位的连接节点也可能因地震作用发生脱离、开裂，破坏桥梁的连续性。连接节点的失效往往会导致桥梁结构整体受力体系崩溃，加剧破坏程度。

2.3 附属结构损伤的连锁影响

附属结构虽不直接承担主要荷载，但地震作用下的损伤会产生连锁反应，影响桥梁整体性能。桥面铺装易因地震产生裂缝、破损，影响行车安全性，同时破损部位可能导致雨水渗透，加剧主体构件的腐蚀。伸缩缝易发生变形、堵塞，影响梁体的自由伸缩，进而在地震作用下产生额外应力。护栏、防撞墙等附属构件的损坏，不仅会失去防护功能，其散落的构件还可能撞击主体结构，造成二次损伤。附属结构损伤的连锁影响会进一步削弱桥梁结构性能，增加灾后修复难度。

3 市政桥梁抗震加固的核心原则与要求

3.1 安全与经济平衡原则

抗震加固设计需严格遵循安全与经济平衡的核心原则。安全性是加固设计的首要前提，加固后的桥梁应能有效抵抗预期地震荷载，保障结构稳定与使用安全，避免因加固不足导致地震时发生破坏。同时，需兼顾经济性，合理选择加固材料与工艺，优化加固方案，控制加固成本，避免过度加固造成资源浪费。在实际设计过程中，应通过多方案比选，在满足抗震安全要求的基础上，最大限度降低加固工程的投资与运营维护费用，实现安全性能与经济效益的协调统一。

3.2 针对性与兼容性要求

抗震加固方案需满足针对性与兼容性的双重要求。针对性要求加固设计需结合桥梁的结构类型、损伤状况、场地条件等具体情况，针对结构薄弱环节制定个性化加固措施，确保加固效果直达问题核心。兼容性要求加固措施与桥梁原有结构体系相协调，不会破坏原有结构的受力平衡，同时兼顾桥梁的使用功能与外观风貌。此外，加固方案还应考虑后期维护的便利性，确保加固后的桥梁能够长期稳定运行，降低后续维护成本。

3.3 新技术适用性与可靠性评估

在抗震加固中应用新型技术时，需重点开展适用性与可靠性评估。适用性评估需结合桥梁的实际工况，分析新型加固技术是否符合桥梁的结构特点、损伤类型及场地环境，避免因技术选型不当导致加固失效。可靠性评估需通过试验验证、数值模拟等方式，检验新型加固材料的力学性能、耐久性及新工艺的施工质量稳定性，确保加固后的结构能够长期承受各类荷载作用。同时，还应考虑新型技术的施工难度与成本，为技术的推广应用提供科学依据。

4 市政桥梁新型加固材料与工艺

4.1 高性能复合材料应用

高性能复合材料因其优异的力学性能与耐久性，在市政桥梁加固中得到广泛应用。碳纤维复合材料具有强度高、重量轻、耐腐蚀等特点，可通过粘贴、缠绕等方式应用于梁体、桥墩等构件的加固，有效提升构件的抗弯、抗剪能力，尤其适用于对加固空间和自重有严格限制的桥梁结构。玻璃纤维复合材料成本相对较低，加工工艺简便，适用于中小跨度桥梁的加固修复，能改善构件的受力状态，延缓损伤发展，在老旧桥梁维修改造工程中应用优势显著。玄武岩纤维复合材料兼具环保性与力学性能优势，在恶劣环境下的稳定性更强，可用于特殊场地条件下的桥梁加固。合理选用高性能复合材料，结合构件损伤程度优化加固施工工艺，能显著提升加固效果与结构耐久性。

4.2 装配式加固工艺要点

装配式加固工艺凭借施工便捷、工期短、对交通影响小等优势，成为市政桥梁加固的重要发展方向。该工艺的核心要点包括预制加固构件的标准化设计、精准加工与质量控制，需严格依据桥梁原有结构参数进行定制化生产，确保预制构件能够与原有结构完美匹配。在连接环节，需采用可靠的拼接技术，如高强螺栓连接、灌浆套筒连接等，保障预制构件与原有结构的连接牢固性，避免出现连接失效问题。施工过程中，需严格控制吊装精度与施工顺序，配备专业的吊装设备与监测仪器，实时把控施工质量，减少对桥梁正常通行的干扰。装配式加固工艺可有效提升施工效率，降低施工难度，适用于城市核心区域交通繁忙路段的桥梁加固工程，能最大程度降低加固施工对城市交通的影响。

4.3 智能加固系统构建

智能加固系统结合传感技术、数据处理技术与加固技术，实现对桥梁结构的实时监测与主动加固，是桥梁

抗震加固领域的重要发展趋势。该系统的构建需整合各类高精度传感器,如应变传感器、位移传感器、加速度传感器等,对桥梁结构的应力、应变、位移等关键参数进行实时采集与传输。通过数据处理平台对监测数据进行分析,精准判断结构的受力状态与损伤发展趋势,及时预警潜在的结构安全隐患。基于监测结果,智能加固系统可通过主动控制装置自动调整加固力度,实现针对性的动态加固。智能加固系统不仅能提升加固效果的精准性,还能为桥梁的长期健康监测提供连续、可靠的数据支撑,推动桥梁加固技术向智能化、精细化方向发展。

5 不同损伤类型的加固策略优化

5.1 主体构件损伤加固策略

针对主体构件的不同损伤类型,需结合构件受力特点与损伤程度优化制定针对性的加固策略。对于梁体裂缝,需先对裂缝类型、宽度及延伸范围进行详细检测,再采用压力灌浆技术填充裂缝,恢复梁体整体性,后续通过粘贴复合材料或增设加固钢板等方式增强梁体承载能力。对于桥墩裂缝与破损,可根据损伤严重程度采用外包混凝土、外包钢或粘贴纤维复合材料等加固方式,提升桥墩的抗弯、抗剪能力,防止损伤进一步发展。对于桥台沉降与裂缝,需先处理台后填土问题,采用注浆加固、换填压实等方式提升填土密实度,再对桥台结构进行修补与加固。主体构件加固需注重施工质量控制,严格把控材料配比与施工工艺,确保加固层与原有构件紧密结合。

5.2 连接节点失效加固方案

针对连接节点失效问题,需结合节点类型与失效模式制定科学合理的加固方案,确保加固后节点性能满足抗震要求。对于支座损坏,应先拆除受损支座,及时更换高性能抗震支座,如铅芯橡胶支座、高阻尼橡胶支座等,增强支座的承载能力与位移适应能力,优化支座锚固方式,采用高强锚固螺栓提升锚固可靠性,防止支座脱落。对于桥墩与基础连接节点损伤,需清理节点破损部位,采用外包钢加固、注浆加固等方式修复节点裂缝,增强节点的刚度与承载能力,保障荷载的有效传递。对于梁端与桥台连接部位,可增设限位挡块、防落梁装置等限位装置,限制梁体的水平位移,防止落梁破坏。连接节点加固需确保节点的传力路径清晰,提升节点的抗

震性能与整体性,保障桥梁结构的协同受力。

5.3 全桥整体性能提升措施

为提升全桥整体抗震性能,需从结构体系优化、关键部位加固、附属结构协同等多维度制定综合加固措施。可通过优化桥梁结构体系,调整结构刚度分布,增设辅助支撑构件,避免局部应力集中,提升整体受力协调性。增设消能减震装置是提升全桥抗震性能的有效手段,如在梁端、桥墩等关键部位设置金属阻尼器、摩擦阻尼器等阻尼器,通过阻尼器的塑性变形消耗地震能量,降低结构地震响应。同时,需对桥梁附属结构进行同步加固,修复破损的桥面铺装、伸缩缝、护栏等,更换老化失效的附属构件,避免附属结构损伤引发连锁反应。全桥整体加固需统筹考虑各部位的加固效果,进行整体抗震性能验算,确保加固后桥梁整体抗震能力达到设计标准,实现整体性能的协同提升。

6 结论

本文系统探究了地震作用下市政桥梁结构的受力机理,明确了地震对桥梁主体构件、连接节点及附属结构的核心影响规律。梳理了市政桥梁抗震加固的核心原则与要求,分析了高性能复合材料、装配式加固工艺及智能加固系统等新技术的应用要点。针对不同损伤类型,提出了针对性的主体构件加固策略、连接节点失效加固方案及全桥整体性能提升措施。研究表明,科学合理的加固设计与技术应用能够有效提升市政桥梁的抗震性能。未来可进一步深入研究复杂地震工况下的桥梁结构响应机制,推动新型加固技术的创新与优化,为保障城市市政桥梁地震安全提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1] 朱立烽,单继栋.高性能混凝土在市政桥梁抗震设计中的应用研究[J].江西建材,2025,(03):123-125.
- [2] 李永红.市政桥梁设计中减隔震设计要点分析[J].现代物业(中旬刊),2020,(07):50-51.
- [3] 赵文.市政桥梁设计中减隔震设计要点分析[J].绿色环保建材,2019,(09):99+102.
- [4] 李炼.隔震设计技术在市政桥梁设计中的应用研究[J].运输经理世界,2022,(16):86-88.
- [5] 赵晓博.市政桥梁中有关减隔震技术设计应用分析[J].建筑,2025,(07):115-118.

水利水电施工管理中的进度控制与优化策略

蔡关敏

云南省昭通市昭阳区水务局，云南昭通，657000；

摘要：水利水电工程作为国家基础设施建设的核心组成部分，其施工进度直接关联工程效益发挥、投资回收及区域水资源调配与能源保障能力。进度控制是施工管理的关键环节，当前行业内虽已逐步引入现代化管理手段推进进度管控，但仍面临计划与实际脱节、风险应对不足等诸多问题。本文基于水利水电施工进度控制的现实场景，剖析当前管理现状与核心问题及负面影响，深入探究问题产生的主观、客观及技术成因，进而提出针对性的优化策略，为提升水利水电施工进度管控水平、保障工程顺利推进提供实践参考。

关键词：水利水电施工；进度控制；管理现状；成因剖析；优化策略

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.048

引言

水利水电工程施工具有地域跨度大、施工环境复杂、技术要求高、涉及主体多元等显著特征，施工周期普遍较长，进度管控难度远超一般建设工程项目。随着我国水利水电事业向高质量发展转型，对工程施工的效率与质量提出了更高要求，进度控制作为统筹施工全流程、协调各类资源的核心抓手，其重要性愈发凸显。合理的进度控制能够保障工程在既定工期内完成建设任务，有效降低施工成本，避免因工期延误引发的一系列连锁问题。当前，在实际施工过程中，受自然条件、资源配置、技术应用等多重因素影响，进度控制往往难以达到预期效果，工期延误、资源浪费等现象时有发生。基于此，梳理水利水电施工进度控制的现状，精准识别其中存在的核心问题，深入分析问题成因并构建科学有效的优化策略，成为当前水利水电施工管理领域亟待解决的重要课题。

1 水利水电施工管理中进度控制的现状与问题分析

1.1 水利水电施工进度控制的现状

当前水利水电施工进度控制已逐步摆脱传统经验式管理模式，朝着标准化、数字化方向发展。多数大型水利水电工程项目已引入项目管理软件，实现进度计划的数字化编制与初步跟踪，部分项目尝试运用 BIM 技术、大数据分析等现代化手段，对施工进度进行可视化管理与动态监测。行业内已形成较为基础的进度控制流程，从项目前期的进度计划编制，到施工过程中的进度

检查与调整，再到项目竣工后的进度复盘，形成了初步的管理闭环。在政策层面，相关部门陆续出台了一系列关于水利水电工程施工管理的规范与标准，对进度控制的责任主体、管理要求等作出了明确规定，为进度控制工作的开展提供了制度保障。但从实际施工场景来看，进度控制的精细化程度仍存在明显不足，不同规模、不同地域的项目之间进度管理水平差异较大，小型项目仍较多依赖传统管理方式，进度计划的编制与执行缺乏有效的数据支撑，数字化技术的应用深度和广度有待进一步提升。

1.2 进度控制存在的核心问题

进度计划编制的科学性与针对性不足，成为制约进度控制效果的首要问题。部分项目的进度计划编制仅依据类似工程经验，未充分结合项目所在地的地质条件、气候特征、施工资源禀赋等实际情况，导致计划与实际施工存在较大偏差，难以发挥指导作用。进度计划的细化程度不够，仅明确了主要施工阶段的工期要求，对各分项工程、分部工程的进度节点缺乏精准规划，导致施工过程中出现工序衔接不畅、作业面闲置等问题。施工过程中的进度监控机制不完善，监控频率与监控深度不足，难以实时掌握各施工环节的进度推进情况。部分项目的进度检查流于形式，未能及时发现进度偏差并分析偏差原因，导致小的进度滞后逐渐积累，最终引发严重的工期延误。资源配置与进度计划的协同性不足，人力资源、机械设备、材料物资等资源的供应节奏与施工进度需求不匹配，时常出现资源短缺或资源闲置的情况，严重影响施工进度推进。

1.3 进度问题造成的负面影响

进度问题直接导致工程工期延误，进而引发投资成本的大幅增加。工期延误使得施工企业需要承担额外的人工费用、机械设备租赁费用、材料保管费用等，同时还可能面临业主方的索赔，显著提升了工程建设成本。进度滞后会打乱工程建设的整体节奏，影响后续工程的开工与推进，对于具有防洪、抗旱、发电等公益属性的水利水电工程而言，工期延误可能导致工程无法及时发挥社会效益，难以有效应对自然灾害，影响区域水资源安全与能源供应稳定。进度失控还可能引发施工质量问题，部分施工单位为追赶工期，可能会简化施工工序、降低质量管控标准，导致工程质量隐患增加，影响工程的使用寿命与运行安全。

2 水利水电施工进度控制问题的成因剖析

2.1 主观因素

管理主体的进度控制意识薄弱，对进度控制的重要性认识不足，是导致进度控制问题频发的核心主观因素。部分项目管理人员将工作重心过度集中在施工质量与安全管理上，忽视了进度控制对工程整体效益的影响，未能建立健全进度控制责任体系，导致进度控制工作缺乏有效的组织保障。决策层面的失误也会直接影响进度控制效果，部分项目在施工方案选择、资源配置决策等环节，未进行充分的论证与分析，仅凭主观经验作出判断，导致决策与实际施工需求不符，引发进度滞后。施工团队的专业能力不足，相关技术人员与管理人员缺乏系统的进度管理知识与技能，难以编制出科学合理的进度计划，也无法有效开展进度监控与调整工作。

2.2 客观因素

水利水电工程施工对自然环境的依赖性强，自然环

境因素成为影响进度控制的重要客观因素。项目所在地的气候条件复杂多变，暴雨、洪水、台风、严寒、酷暑等极端天气现象，会直接导致施工中断，影响施工进度。地质条件的不确定性也会对施工进度产生显著影响，施工过程中若遇到复杂的地质构造、地下水位过高、岩土体稳定性差等问题，需要调整施工方案，增加施工工序，进而延长施工工期。政策法规的调整与变化也可能影响施工进度，如环保政策收紧、土地征用政策调整等，可能导致施工手续办理延迟、施工范围受限，影响工程的正常推进。此外，材料物资与设备供应的不确定性也会制约进度推进，水利水电工程所需的部分材料与设备具有特殊性，生产周期长、运输难度大，若供应商出现生产故障、运输受阻等问题，会导致材料设备无法按时进场，影响施工进度。

2.3 技术因素

施工技术方案的合理性与先进性不足，是导致进度控制问题的重要技术因素。部分项目采用的施工技术方案较为传统，未能充分利用新技术、新工艺、新设备，导致施工效率低下，无法满足进度计划的要求。施工技术与实际需求不匹配，部分技术方案在理论上可行，但在实际施工过程中，受施工环境、资源条件等限制，难以顺利实施，需要频繁调整方案，影响施工进度。技术创新与应用不足，对于施工过程中遇到的复杂技术难题，缺乏有效的技术突破手段，导致施工停滞不前。此外，技术交底工作不到位，施工人员对技术方案的理解不透彻，在施工过程中容易出现操作失误，引发质量问题或安全事故，进而导致施工中断，影响进度推进。技术检测与验收工作不规范，检测流程繁琐、验收标准不统一，导致部分施工工序完成后无法及时通过验收，影响后续工序的开展，延误施工进度。

表 1 水利水电施工进度控制问题成因分类及可控性分析

进度控制问题成因类别	具体成因内容	可控性
主观因素	进度控制意识薄弱；决策失误；团队专业能力不足；参建主体沟通不畅	可控制
客观因素	极端天气；地质条件复杂；政策法规调整；材料设备供应不确定	部分可控
技术因素	技术方案传统滞后；技术与实际需求不匹配；技术交底不到位；检测验收不规范	可控制

3 水利水电施工进度控制的优化策略

3.1 优化进度计划编制体系

构建基于项目实际的进度计划编制流程，强化计划编制的前期调研工作，全面收集项目所在地的地质勘察资料、气候数据、资源供应信息等基础数据，为计划编

制提供精准的数据支撑。采用分层分级的计划编制模式，结合工程规模与施工特点，编制总进度计划、阶段进度计划、分项工程进度计划及周进度计划，明确各层级进度计划的节点要求与责任主体，实现进度计划的精细化管理。引入先进的计划编制方法与工具，充分利用网络

计划技术、关键路径法等,精准识别施工过程中的关键工序与关键节点,合理安排各工序的施工顺序与搭接时间,提升进度计划的科学性与可行性。建立进度计划的动态调整机制,定期对进度计划的执行情况进行复盘,结合实际施工进度与外部环境变化,及时调整计划内容,确保计划始终与施工实际相匹配。加强进度计划的论证与审批流程,组织技术、管理、施工等多方人员对进度计划进行充分论证,确保计划的合理性与可操作性。

3.2 构建全流程进度监控与预警机制

建立覆盖施工全流程的进度监控体系,明确监控主体、监控内容、监控频率与监控方法,实现对施工进度的实时跟踪与动态管理。利用数字化技术提升监控效率,引入 BIM 技术、大数据分析平台、物联网等现代化手段,构建可视化的进度监控平台,实时采集施工过程中的人员、设备、材料等关键数据,实现对各施工环节进度推进情况的精准监控。设定科学合理的进度预警指标,结合进度计划的节点要求,明确各阶段的进度偏差预警阈值,当实际进度偏离计划进度达到预警阈值时,自动触发预警机制。建立分级预警响应机制,根据预警等级的不同,明确相应的处置流程与责任主体,确保预警信息能够得到及时响应与处理。加强进度监控数据的分析与应用,定期对监控数据进行汇总分析,精准识别进度偏差的原因,为进度调整提供科学依据。强化监理单位的监控职责,提升监理人员的专业素养与责任意识,确保监控工作的客观性与有效性。

3.3 优化资源配置与协同管理

建立资源配置与进度计划的协同机制,根据进度计划的节点要求,精准测算各阶段的人力资源、机械设备、材料物资等资源需求,制定科学的资源配置方案,确保资源供应与施工进度需求精准匹配。优化人力资源配置,结合施工工序的技术要求,合理调配施工人员,明确各岗位的职责与工作任务,加强施工人员的技能培训与管理,提升施工人员的工作效率。加强机械设备的统筹管理,合理规划机械设备的进场、使用与维护计划,确保机械设备的正常运行,提高机械设备的利用率。建

立材料物资的供应链管理体系,与优质供应商建立长期稳定的合作关系,加强材料物资的采购、运输、存储等环节的管理,确保材料物资能够按时、按质、按量进场。构建多方协同管理平台,加强建设单位、施工单位、监理单位、设计单位等各方的沟通协调,实现信息共享、问题共解,提升施工过程的协同效率。建立健全责任追究与激励机制,明确各参建主体的责任,对进度控制成效显著的团队与个人给予激励,对因责任落实不到位导致进度滞后的进行追责。

4 结论

水利水电施工进度控制是保障工程顺利推进、提升工程效益的核心环节,当前行业内进度控制工作虽已取得一定进展,但仍存在计划编制不科学、监控机制不完善、资源配置不协调等诸多问题,这些问题的产生是主观、客观、技术等多方面因素共同作用的结果,不仅会导致工期延误、成本增加,还会影响工程质量与社会效益。优化水利水电施工进度控制,需要从进度计划编制体系入手,构建科学精准的计划管理模式,同时搭建全流程的进度监控与预警机制,实现对进度的实时管控。通过优化资源配置与协同管理,提升各方协作效率,保障资源供应与进度需求匹配。强化风险防控与应急处置,能够有效降低各类风险对进度的影响。一系列优化策略的实施,能够显著提升水利水电施工进度控制水平,保障工程在既定工期内高质量完成,推动水利水电事业持续健康发展。

参考文献

- [1] 杨永聪. 基于标准化管理的水利工程施工进度控制措施[J]. 中国标准化, 2025, (16): 208-211+215.
- [2] 梁健康. 水利工程施工监理质量和进度控制对策[J]. 工程建设与设计, 2025, (15): 270-272.
- [3] 薄文明. 水利工程施工监理质量与进度控制[J]. 河南水利与南水北调, 2025, 54(07): 57-58.
- [4] 张恒. 水利水电工程管理及施工质量控制分析[J]. 城市建设, 2025, (05): 37-39.

水利工程汛期应急处置措施研究

江晓星 骆伟

南京市江宁区湖熟街道水务管理服务站, 江苏省南京市, 211100;

摘要: 汛期是水利工程的安全运行受到考验的时候。本文以水利工程汛期应急处置为中心, 系统地分析了目前存在的各种风险类型以及产生的原因, 并对应急处置的主要环节和实施途径做了深入的研究。论文从监测预警体系的建设、应急响应机制的优化、工程调度与抢险技术的应用这三个方面展开论述, 提出完善多源监测网络、建立智能预警系统、加强协同指挥机制、优化防洪调度策略、推广先进抢险技术等具体的做法。进一步加强风险防控基本建设、完善法律法规标准体系、加强科技人才支撑等几个方面提出系统的改进意见。经由研究得知, 创建起科学完备、反应敏捷、处置高效的现代化应急处置体系, 乃是改进水利工程汛期安全保障水平的关键支撑。

关键词: 水利工程; 汛期安全; 应急处置; 风险控制

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.049

在全球气候变暖、极端天气事件频发的情况下, 水利工程在汛期所遭遇的风险变得越发繁杂多样。洪水漫顶、结构渗漏、边坡失稳、设备故障等各种风险交织在一起, 对应急处理工作提出了更高的要求。科学有效的应急处置措施可以最大程度的减少灾害造成的损失, 保证工程的安全运行。目前应急处置工作还存在着监测预警精度不够、响应协同效率不高、技术支撑能力不强等问题。本文主要对水利工程汛期风险特征进行系统的分析, 从监测预警、应急响应、工程抢险等重要环节出发, 研究现代化应急处置体系的建立途径。通过完善技术手段、改进工作机制、加强保障措施来提高水利工程应急处置能力, 给水利工程应急处置能力的提高提供理论参考和实践指导。

1 水利工程汛期风险识别与评估

1.1 主要风险类型分析

水利工程在汛期运行中会遇到各种风险的挑战。第一种是洪水漫溢风险, 由于极端降雨造成入库流量大于工程设计标准, 会造成坝顶溢流或者堤防溃决^[1]。其次就是渗透破坏风险, 坝体渗漏、坝基管涌等现象在长期高水位运行下容易造成土体结构失稳。第三种就是边坡稳定风险, 当遭遇强降雨和水位的较大变化的时候, 库岸、坝肩等区域就容易发生滑坡或者崩塌等地质灾害。第四就是设备运行风险, 泄洪设施、监测设备、供电系统等在恶劣的环境中很容易出现故障, 直接影响工程的安全调控能力。这些风险因素互相联系, 会引发风险连锁反应, 大大加大应急处置的复杂程度。

1.2 风险形成机制与评估方法

风险形成是由自然因素和工程因素共同造成的。气候条件的变化会增大降雨强度, 改变降雨的时空分布情况, 直接增加洪水的发生概率。地质构造复杂, 岩土体

力学性能变化等工程地质条件都会影响工程结构稳定性。工程设计标准不足、施工质量控制不严、运行维护不到位等人为因素都会降低工程抗风险的能力。风险评估要创建多指标评价体系, 把风险出现的可能性, 损失的程度, 应急处置的难易程度等要素综合起来。使用层次分析法、模糊综合评价法等量化评估方法, 根据历史灾情数据和实时监测信息来实现风险等级的科学划分, 从而为分级分类的应急处置方案的制定提供依据。

2 监测预警体系现代化建设

2.1 立体化监测网络构建

创建天地水一体化的综合监测体系。在工程结构关键部位布置智能传感器阵列, 实时采集变形、渗流、应力等各方面的参数。使用无人机、水下机器人等移动监测平台对工程表面、水下状态做动态巡检和应急探测。结合卫星遥感技术开展大范围的地表形变监测和水文气象观测。利用物联网架构进行监测数据的自动采集、上传和云端汇总, 创建数据资源中心。制定统一的数据交互协议来保证不同来源的不同形式的监测数据可以被有效的整合共享, 为风险识别提供全面的数据基础。

2.2 智能预警模型构建

研发利用多源数据融合的智能预警模型。建立物理机理与数据驱动方法相结合的混合预警算法, 利用深度学习技术挖掘风险演化的规律。创建动态阈值预警机制, 依照工程运行状况、环境改变趋向来实施预警指标的即时改善。进行情景模拟开发, 对不同等级风险下的工程应对效果作出评价。健全预警分级标准体系, 确定各个预警级别所对应的启动条件和处置要求。创建模型训练及改良平台, 不断累积预警案例数据, 从而持续改善预警模型的准确性以及适应性。

2.3 预警决策支持系统

建立智能化预警决策支持系统。集成监测数据、预警模型、应急预案等各方面信息来建立统一的决策支持系统。开发可视化展示功能,实现监测数据、预警信息、资源分布的三维动态展示。建立智能推送机制,以预警等级为依据来产生处置建议,并把有关责任方推送到相应的地方。完善预警会商研判流程,创建多方参与的在线会商平台。创建预警效果评价模块,用预警准确率、响应时效性等主要指标来定量评估。依靠系统不断改进,改善预警信息的及时性、准确性以及决策支持水平。

3 应急响应机制优化与实施

3.1 协同化指挥体系建设

创建跨部门的应急指挥机构。在政府的统筹下整合水利、应急、气象等多部门力量组成联合指挥部,实行统一指挥、分级负责的运作方式。创建总体预案、专项预案和现场预案三级预案体系,对各种险情的响应流程和处置标准作出规定。创建数字化的指挥平台,使监测预警、资源调度、处置进展等各种信息可以实时共享,并且可以可视化地展示出来。定时做跨部门实战演习,检验预案是否有效,改进协调机制。设立多学科专家咨询委员会,实行重大险情会商制度,给应急决策提供智力支持,使指挥系统科学高效的运转。

3.2 资源保障体系优化

创建多元化的应急资源储备网。创建政府主导、企业配合、社会参与的三级储备体系,改善物资储备的区域分布和结构安排。利用物联网、区块链技术对物资采购、储存、调配、使用等全过程实施追溯、动态管理^[2]。创建智能仓储管理系统,对物资数量、质量状况、有效期实施实时监测,保证重要物资一直处在可用状态。健全社会动员机制,制订应急物资征用补偿标准,调动市场主体参与的积极性。加大专业应急队伍装备投入,更新抢险设备,提高物资供给的准确性、及时性。

3.3 智能调度机制完善

建立智慧化的应急资源调度系统。将地理信息系统、交通路网、资源分布等多源数据融合起来,创建出动态的资源态势图。用人工智能算法创建智能调度模型,按照险情等级、资源需求、交通情况等要素来产生最好的调配方案。创建分级响应调度机制,确定各个响应级别所具有的资源调配权限以及流程。加强应急运输保障能力的建设,规划专门的运输通道,配备特种运输装备。健全调度效果评价机制,对每次应急调度的时效性、经济性进行评价反馈,不断改进调度策略,提高资源调配的效率和准确性。

4 工程调度与抢险技术应用

4.1 精细化的防洪调度策略

创建详细的预见性防洪调度模式。根据水文气象滚动预报来进行调度预演,改善水库群协同调度方案。洪水来临之前进行科学预泄,为拦蓄洪水预留库容。在洪水过程中采用削峰、错峰等调度手段,充分发挥工程体系的防洪作用。创建多目标协同优化模型,平衡防洪、供水、生态等各方面需求。采用数字孪生技术创建调度推演平台,对各种调度方案的效果展开模拟并加以比较。完善上下游协调机制,达到流域防洪统一调度管理目的,在保证防洪安全的基础上提升水资源综合利用率。

4.2 现代化抢险技术体系

健全现代抢险技术体系,就渗漏险情研发速凝膏浆、柔性防渗毯等新质材料,并借助水下机器人实现快速精准封堵。边坡失稳问题推广应用微型桩快速加固法、土工合成材料增强法等。结构故障处推广模块化快速修复、应急启闭装置。推进抢险设备的智能化更新,用无人控制机械、智能投物设备、自动化建筑机械设备等先进设备。制定统一的标准化技术流程,规范不同的险情处理方法,用技术创新提高抢险作业的效率 and 安全性^[3]。

4.3 技术应用与能力建设

加强抢险技术的应用以及专业能力的培养。建立抢险技术标准体系,确定各类险情的处置要点和质量要求。建设抢险技术案例库与专家决策系统来给现场处置提供技术支撑。健全技术培训体系,用实战演练提高人员的技术水平。促进产学研用协同创新,加快科技成果转化应用。建立技术装备维护更新制度,保证抢险装备处于良好状态。加强国际技术交流合作,引进先进抢险技术,不断提高我国水利工程抢险技术水平和应急保障能力。

5 应急处置体系长效机制建设

5.1 法规标准体系的系统完善

健全水利应急法规标准体系,修订完善水利工程安全管理有关法律,明确各方在应急处置中所享有的权利和应承担的责任。制定专项应急管理条例,规范监测预警、应急响应、抢险救援、恢复重建等各个流程的工作。创建包含设计、施工、运行、维护、应急处置全过程的规范标准。推动流域层面应急协同立法,创建跨行政区域、跨职能部门的应急联动以及信息共享机制。完善社会力量参与应急工作的激励机制和保障措施,用加强法规宣传和执行监督的方式来提高应急工作规范化、法治化程度。

5.2 科技支撑体系的创新发展

加大智能感知、精准预警、快速抢险这些关键技术

的研发力度,攻克科技难题,提高应急处置的科技含量。加大大数据、人工智能、物联网等新一代信息技术同应急领域的融合应用。创建应急科技创新平台,加快科技成果的转化与推广。健全专业人才培养体系,支持高校开设相关专业,培养既懂技术又善管理的复合型人才。健全常态化培训机制,通过实战演练来提高从业人员的专业水平。创建国家级应急专家智库,给重大险情的科学处置提供技术决策支持。

5.3 能力建设与协同机制优化

持续推进应急能力系统化建设,建立覆盖各层面的专业培训体系,定期开展技能培训、实战演练。完善跨部门、跨区域的应急协作机制,确定联动流程和责任范围。加强专业队伍建设,配备先进装备,提高现场处置能力。健全应急预案的动态修订、演练评估机制。推进区域性的应急资源共享平台的建设,提高资源调配的效率。加强国际交流合作,学习借鉴先进经验。依靠系统性能力建设与机制改善,塑造起统一指挥、反应迅速、协调有力的应急工作格局,全方位提升应急处置的综合效能^[4]。

6 应急处置体系优化路径

6.1 智慧化建设推进

用数字化转型来提高应急处置的能力。创建水利工程数字孪生系统,达成物理实体同虚拟模型之间的即时交流以及相互影响。以数字孪生为基础做风险模拟、预案推演和效果评价,从而提高应急处置的预见性、准确性。创建智慧应急大脑,集成智能感知、分析决策、指挥调度等各方面功能,达成应急处置全流程可视化、智能化经营。推进应急指挥系统升级改造,达到态势自动感知、方案智能生成、资源最优调配的效果。经由数字化、智能化的改造之后,应急处置就由原先的经验决策转变为数据决策,由以前的被动应对变为主动防控。

6.2 系统化效能提升

从系统工程的角度来提高应急处置的总体效能。改善应急处置程序,创建起风险识别、监测预警、应急响应、灾后恢复的闭环管理机制。加强各部门、各个区域之间工作配合,建立统一指挥、反应迅速、协调有效的应急工作体制。健全应急保障体系,做好物资储备、队伍建设和经费保障工作。健全应急评估体系,定时做应急能力评估和预案实效评估。提高民众的应急能力、应急知识,促进社会参与。创建起全面的、有条理的、运

转高效的应急处置体系,不断提高应急处置的系统性、整体性、协同性。

7 结论与展望

7.1 结论

在气候变化的背景之下,创建起现代化的应急处置体系,是保证水利工程汛期安全的重要途径。创建智能化监测预警系统,可以提前对风险进行识别并准确预测;优化协同响应机制,可以大大提高应急决策的效率和资源调配的水平;完善工程调度与抢险技术体系,有利于有效地控制险情的扩大,并减少灾害造成的损失。健全法规标准、加强科技支撑、培养专业人才,是保证应急管理体系持续有效运转的基础。由传统的经验型为主向数据型、智能型转变,是提高水利工程汛期安全保障能力的必然选择。

7.2 展望

未来要从四个方面不断加强,技术融合方面要强化数字孪生、人工智能同应急管理的融合,攻克复杂环境智能感知、多源数据精准融合等技术难关。从机制创新角度而言,应当创建起高效的跨部门协同治理架构,探寻区块链技术的应用情形下的信任共享制度。韧性建设,流域尺度研究工程和非工程措施的最优组合来提高系统的适应恢复能力。社会参与,健全公众风险教育,发展市场化风险分担工具。通过不断的创新,使体系朝着智慧、协同、韧性这三个方向发展。

参考文献

- [1]刘思佳. 水利工程管理在防汛中的应用研究[J]. 价值工程, 2025, 44(19): 55-58.
- [2]韩小东. 水利工程汛期施工安全措施的研究[J]. 水上安全, 2025, (10): 49-51.
- [3]杨寅, 严行云, 徐浩, 等. 水利工程建设中安全度汛的风险评估与应对策略研究[J]. 水上安全, 2025, (03): 164-166.
- [4]水利部. 水利部印发《关于加强在建水利工程安全度汛工作的指导意见》的通知[J]. 中华人民共和国水利部公报, 2024, (01): 23-27.

作者简介: 江晓星, 出生年月: 1994.5, 性别: 女, 籍贯: 江苏南通, 学历: 研究生, 职称: 工程师, 研究方向: 水利工程管理、农田水利改革、防汛抗旱。

水利工程施工管理和维修养护存在的问题及对策

林林

淮安市淮安区河道湖泊管理所/淮安市淮安区淮河入海水道堤防管理所，江苏省淮安市，223200；

摘要：水利工程承担防洪排涝、灌溉供水与水资源调配等任务，施工阶段的管理水平决定工程实体质量与投用稳定性，运行阶段的维修养护决定工程耐久与风险可控。基层实践表明，部分工程仍存在方案与现场脱节、质量监管链条不完整、安全管理落实不到位，以及养护资金不足、模式粗放、责任不清和应急抢修衔接不畅等问题。围绕这些薄弱环节，本文提出面向全过程的改进思路，为同类工程的管护工作提供参考，并强调施工与养护协同是降低后期病害成本的重要路径。

关键词：水利工程；施工管理；维修养护；质量安全；管护体系

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.050

引言

在河道湖泊较多、堤防渠道分布广的地区，水利设施既关系防汛安全，也关系农业灌溉与城乡供水。随着工程建设规模扩大和既有工程进入集中养护期，单纯强调建设速度已难以满足安全与效益要求，施工管理与维修养护必须从分段管理转向连续管理。本文在梳理常见问题的基础上，结合基层可执行的做法提出对策，以便在不增加过多管理难度的前提下提升工程完好率与运行稳定性。通过问题与对策的对应分析，力求把管理要求转化为现场可落地的操作要点。

1 水利工程施工管理与维修养护的内涵及相互作用

1.1 施工管理与维修养护的基本内涵

施工管理是对建设全过程进行统筹管控的工作，重点抓方案组织、资源配置、质量控制、进度安排、成本核算与现场安全，核心是把关键工序做实、把材料与工法做到可追溯，从源头减少渗漏、裂缝、脱空等病害。维修养护是工程投用后的常态化管护活动，包含巡查检查、设施检修、隐患处置、专项维修与应急抢修等内容，强调早发现、快处置、稳恢复，通过持续的小修小补和及时的专项治理维持工程完好。

施工与养护相互影响。施工阶段如果地基处理、防渗构造、衬砌与伸缩缝等关键部位控制不到位，后期就会频繁出现渗漏与破损，养护只能被动补漏。反过来，养护做得细致，能够把薄弱点及时处置，避免小隐患拖成大病害，形成建设与运行一体的闭环管理^[1]。

1.2 协同管护的现实意义

协同管护首先体现在保障安全，堤防、闸站等设施

失稳或失灵可能造成洪水漫溢和内涝加剧。其次体现在提升效益，渠道防渗、泵站机电与闸门启闭状态良好，能够稳定发挥灌溉、供水与排水能力，减少水量损失与能耗。再次体现在维护河湖环境，施工阶段控制扰动与弃土管理，运行阶段结合生态护坡与巡查，可促进河道行洪与岸线稳定。

2 施工管理和维修养护的主要问题及成因

2.1 施工管理中的突出问题

部分项目施工方案前期调研不足，约三成以上方案存在模板化倾向，遇到地下水水位偏高、汛期水位波动或施工通道受限时，现场不得不反复调整工序，工期平均可能被动延长十天左右。与此同时，动态调整机制不完善，面对突发来水或地质变化，容易出现停工等待或抢工违规的两种极端。

质量监管方面，原材料准入与复检执行不严，质量抽检不合格案例中约四分之一与材料问题有关。隐蔽工程过程控制薄弱，地基压实、防渗构造等关键内容有时未做到验收合格再转序，后期渗漏和沉陷更难处置。第三方检测信用约束与复核不足时，数据偏差不易被及时纠正。安全管理方面，近半项目存在制度落实不到位现象，岗前培训覆盖不足六成，应急预案演练不够，遇到险情时处置容易拖延。成本与进度管控失衡也较突出，约四成项目出现不同程度超支，盲目压工期又会带来质量缺陷，形成赶工与返工交替的循环。

2.2 维修养护中的主要问题

养护资金不足且分配不均较为普遍，年均投入往往只占建设投资的百分之二到百分之三，低于较合理的百分之五以上水平，导致巡查频次下降和设备更新滞后，

约三成以上工程因资金紧缺难以及时开展防渗加固与机电维护。资金结构上容易向大型工程倾斜,中小型堤防、灌排渠道等基础性工程投入偏少,此类工程病害发生率可超过五成,成为安全薄弱点。

养护模式专业化程度不高,约六成工程仍以属地管理配合临时用工为主,人员技能不足使裂缝修补、渗漏处理与设备调试难以达到标准。巡查主要依赖人工经验,约四成隐患难以及时发现,重点部位监测设备覆盖不足两成,预警能力偏弱。责任体系不清晰也会影响效率,约三成以上纠纷源于权责模糊,病害处置中容易出现推诿。隐患排查与治理不闭合、应急物资储备更新不及时等问题,使汛期抢修更容易陷入被动。

2.3 问题成因的综合分析

理念层面,重建设轻养护的惯性仍在,一些单位缺少全寿命周期视角,设计与施工阶段对后期巡查通道、清淤便利与耐久材料考虑不足,约三成工程因此出现养护难度大、成本高的情况。制度层面,标准更新与责任追究机制不够细化,施工与养护监管资源分散,协同不足,整改容易各管一摊。技术与人才层面,数字化手段推广较慢,施工阶段建模管理应用不足四分之一,运行阶段监测平台覆盖不足百分之十五,基层复合型人才与专业养护人员缺口明显,约四成以上单位存在人才断层,精细化管护难以长期稳定推进^[2]。

3 提升施工管理与维修养护水平的策略与实施路径

3.1 施工方案实地调研与快速调整机制

提升施工管理的起点在于把方案做细做实。方案编制前应完成必要的踏勘和资料核对,掌握水文过程、地质结构、地下水位、汛期来水特征以及施工便道与料场条件,再据此确定导流、降排水、基坑支护、地基处理与防渗措施。方案要把关键工序控制点写清楚,把验收节点写明确,避免只写原则不写方法。现场管理中要建立快速调整机制,遇到水位变化、材料供应异常或设备故障时,能够组织技术人员和监理单位及时评估,在一天内形成可执行的调整方案并完成交底,减少停工等待和违规抢工。

例如,某地一段堤防加固工程最初按常规做大开挖换填,但踏勘发现堤脚地下水位高、周边道路承载能力有限,若直接开挖容易出现涌水和运输拥堵。项目部随即把工序调整为分段施工与分层加固,先完善临时排水与集水设施,再按分区铺设反滤料并分层碾压,导流设施同步到位。进入汛期前阶段河道水位短时上涨,现场启

动备选方案,将外坡作业转为堤顶和内坡附属设施施工,同时加设临时防浪措施,既避免了长时间停工,也确保关键部位在安全水位窗口内完成,投用后巡查未出现新的集中渗漏点。

3.2 质量监管闭环与材料全过程可追溯

质量控制要形成材料准入、过程见证、节点验收和结果复核的闭环。原材料进场应按批次复检,砂石级配、含泥量、钢筋力学性能、混凝土配合比稳定性等符合要求后方可使用,并把取样、检验结果与具体使用部位对应记录,做到问题可追溯。隐蔽工程必须强调过程旁站和节点验收,地基压实度、防渗构造、反滤层铺设、衬砌厚度与伸缩缝处理等内容要做到验收合格再转序。第三方检测要加强信用约束与复核比对,监管单位可通过抽检复检、数据对照与现场复核等方式提升客观性,避免只看报告不看实体。

比如,某灌排渠道衬砌工程在材料供应紧张时更换了砂源,外观差异不明显,但复检发现含泥量偏高,若直接使用容易导致强度波动和表面起砂。项目部依据材料台账迅速锁定堆场位置,暂停使用并更换合格材料,对已拌合的少量混凝土按规定处理,避免进入实体。施工过程中监理对垫层压实与底板整平进行过程验收,衬砌完成后又通过现场抽测厚度和外观检查,及时发现局部蜂窝麻面并补强。通水运行后渠道未出现大面积脱落,后期养护主要是常规清淤与伸缩缝维护,体现了施工阶段把关越严格,运行阶段越省心。

3.3 安全责任落实与应急处置能力提升

水利施工现场作业面分散,土石方、模板支架、机电安装和水上作业交叉,安全管理必须把责任链条和现场行为管住。各参建单位应把岗位安全责任细化到人,做到风险辨识有人做、作业许可有人签、隐患整改有人盯、闭环销号有人查。岗前培训要覆盖全员,围绕临时用电、机械伤害、动火作业、深基坑和高处作业等常见风险讲清操作要点,让一线人员知道怎么做才安全。应急处置要突出可操作性,预案中明确报警、撤离、物资调用和现场指挥分工,并通过季度演练把流程跑顺,把物资和设备保持在可用状态,力争把响应时间控制在十五分钟以内^[3]。

曾有一次,某小型闸站改造项目在围堰内作业时出现局部渗水加剧,现场还有临时用电设备运行。由于培训强调了渗水发展与触电风险的关系,班组按要求停止非必要作业并切断部分电源,由安全员组织人员撤离到安全区域,同时调集沙袋和土工布对渗水点进行封堵加

固。项目负责人按预案联络附近抢修力量与管理单位值守人员到场,短时间内完成围堰背水侧压脚处理并加强排水,险情得到控制。事后又把处置过程补充进风险清单,增加夜间巡查频次和水位观测要求,使后续施工在可控状态下推进。

3.4 成本进度质量统筹控制与简易信息化管理

成本、进度与质量是同一目标下的三项约束,任何单项失衡都会带来反作用。成本控制要抓预算和过程核算,关注材料价格波动,结合集中采购与稳定供货减少临时采购带来的冲击,同时通过工序优化降低返工浪费。进度控制要用科学计划组织施工,把关键工序和资源投入匹配起来,避免盲目加班赶工引发质量下滑或安全风险。质量与进度要联动管理,把验收合格作为节点完成的前置条件,杜绝未验收先转序。信息化支撑不必一开始就复杂,可先把每日产量、材料消耗、设备运转和验收记录做成电子台账,按周对账和纠偏,逐步提高管理透明度。

例如,某泵站机电更新项目工期紧、工序多,若按经验排班容易出现设备到场后无法安装或安装后返工。项目部开工前把土建、预埋、安装、调试和试运行按先后关系编成网络计划,并把关键节点与到货计划绑定。施工中每周进行成本和进度对账,发现某类金属材料价格上涨后,及时与供应商签订阶段性供货协议并调整到货批次,避免临时采购带来超支。质量方面把预埋件复核、绝缘测试和启闭试验作为节点验收内容,未通过则不进入下一步,最终项目按期完成,成本偏差控制在合理范围内,投运后故障检修次数明显减少。

3.5 养护资金保障、专业化队伍与监测预警协同发力

维修养护提升的关键是把资金、队伍、技术和制度一起做起来。资金上要建立稳定渠道,把养护经费纳入年度预算安排,逐步把投入比例提高到百分之五以上,并优化分配结构,向中小型堤防、渠道和泵站等基础工程倾斜,补齐薄弱环节。队伍上要推动专业化,可通过购买服务引入具备资质的养护队伍,日常巡查与专项维修分工明确,人员开展技能培训和持证上岗,确保裂缝修补、渗漏处理和机电保养符合工艺要求。技术上要从人工巡查为主转向人工加监测结合,在重点部位布设水位、渗压与位移等监测设施,配合无人机巡查、机械清淤和移动终端记录,提高发现问题的速度和准确性。制

度上要明确责任与考核,建立巡查频次、隐患整改率、工程完好率等指标,与经费使用和绩效评价挂钩,形成重实效的工作导向。施工与养护还要加强衔接,竣工移交资料要完整,养护发现的病害要能反向反馈到后续工程建设中,形成持续改进^[4]。

在某地中小型堤防和灌排渠道较为密集的区域,过去养护经费偏紧,巡查多靠经验,渗漏点往往在扩大后才被发现。后来通过调整预算结构,把更多资金投向堤脚、涵闸连接段等薄弱部位的日常巡查和小修小补,同时引入专业养护队伍负责裂缝修补、反滤料补充和闸门保养。重点险工段安装了简易水位和渗压监测装置,巡查人员用移动终端同步记录位置与照片,隐患信息可直接推送到处置人员。一次强降雨后监测数据出现异常波动,现场巡查随即发现背水坡有轻微渗水,养护队伍当天完成反滤料补强和排水沟清理,并对附近护坡进行修复加固。通过这样的闭环治理,隐患处置时间明显缩短,工程完好率稳步提升,汛期抢修压力也随之减轻,体现了专业化与适度智能化对基层管护的现实价值。

4 结束语

综上所述,施工管理决定工程先天质量,维修养护决定工程后天状态,两者必须协同才能长期稳定发挥功能。针对方案脱节、监管薄弱、资金不足和责任不清等问题,应从实地调研、质量闭环、安全演练、统筹管控与养护体系升级入手,把做法落到岗位、流程和台账上。基层实践中,坚持全生命周期理念,完善竣工资料移交和养护信息反馈,强化薄弱环节投入与专业队伍支撑,可在较低管理难度下提升工程完好率与防洪排涝能力,为地区水安全提供更加稳定的保障。

参考文献

- [1] 萍周. 水利工程施工管理和维修养护存在的问题及对策[J]. 水电科技, 2024, 7(6): 19. DOI: 10.33142/hst.v7i6.12516.
- [2] 刘建华. 水利工程施工管理存在的问题及对策[J]. Engineering Science Research & Application, 2025, 6(23).
- [3] 林燕. 水利工程维修养护存在的问题及对策[J]. 水电水利, 2021, 4(12): 47-48. DOI: 10.12238/hwr.v4i12.3484.
- [4] 王丹. 水利工程施工管理中存在的问题及改进措施[J]. 水上安全, 2024(16): 37-39.

水利施工中混凝土施工技术的应用和管理分析

刘胜军

临城县水务局, 河北邢台, 054399;

摘要: 本文以某县的抽水蓄能电站枢纽项目为例, 对混凝土施工技术的应用要点及管理展开分析。在实际案例基础上, 指出水利施工中混凝土施工技术的应用要重视材料、配合比设计、施工工艺的控制, 确保施工技术满足施工要求。为保证水利施工中混凝土施工质量与效率, 要做好设备、人员、施工过程、养护等各个环节的管理, 实现管理的精细化, 确保混凝土施工技术的应用效果。

关键词: 水利施工; 混凝土施工技术; 施工管理; 质量控制

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.051

在我国社会经济发展过程中, 水利工程发挥着不可替代的作用, 为我国工农业发展提供了极大支持。水利工程的质量与安全关系着附近居民、农田等安全, 以及附近居民与工业发展的用电保障, 但是在项目施工过程中混凝土的施工会直接影响工程安全, 因此必须做好混凝土施工的质量与安全控制, 从材料、配合比、施工工艺等全过程进行控制, 全面提升工程项目质量, 满足水利工程的质量与安全需求。

1 工程概述

某县的抽水蓄能电站枢纽是当地的重要基础项目, 项目建成后对当地的经济建设发挥着重要作用。该项目由上水库、水道系统等各个部分组成, 项目装机容量为1200MW, 装机为4台, 单机容量为300MW。永久性主要建筑物与永久性次要建筑物分别为1级建筑物、3级建筑物。本项目中的混凝土总工程量大约为68万 m^3 , 本项目的工程量较大, 具有较为复杂的结构, 因此对混凝土施工技术与管理提出较高的要求。

2 水利施工中混凝土施工技术的应用

2.1 原材料选择与配合比设计

2.1.1 水泥的选择

为对大体积混凝土的水化热温升进行有效控制, 满足项目的实际需求, 要求选择P·MH 42.5中热硅酸盐水泥。现在该水泥的优点是较低的水化热与后期强度增长稳定, 在完成混凝土施工后, 可以降低发生温度裂缝的风险^[1]。在水泥的进场过程中, 要对其进行检验, 检验的内容有强度、凝结时间等, 同时也要对水泥的水化热进行抽检, 保证水泥质量符合要求。

2.1.2 骨料的质量控制

在混凝土体积中骨料占到了70%-80%, 骨料会对混凝土的强度与耐久性等产生直接影响。选择质地坚硬的碎石作为粗骨料, 保证碎石的洁净。粗骨料从构件的尺寸与钢筋间距出发, 采取两级配或三级配组合, 确保堆

积密度达到最优, 减少水泥的使用量^[2]。对粗骨料的针片状颗粒含量与含泥量进行控制, 要求分别满足 $\leq 15\%$ 、 $\leq 1.0\%$ 的要求。在细骨料的选择过程中, 要求采用天然中粗砂或优质人工砂, 保证材料的质地坚硬与级配良好。细骨料的细度模数保持在2.4~2.8之间, 采用人工砂其中石粉含量要保持在6%~12%之间。

2.1.3 掺合料与外加剂

在本项目中选择的核心掺合料为粉煤灰(Ⅱ级或以上)和粒化高炉矿渣粉(S95级)。粉煤灰自身的优异性能, 可以对混凝土拌合物的质量进行改善, 提升混凝土在后期具有良好的抗渗性和抗硫酸盐侵蚀能力。矿渣粉的加入, 能让混凝土在应用中保持长期强度与耐久性, 在混凝土中粉煤灰与矿渣粉的掺入量分别为20%-30%、20%-30%。选择高效聚羧酸减水剂作为外加剂, 高效聚羧酸减水剂的减水率可以在25%, 即便在较低的水胶比下也可以发挥其性能^[3]。在外加剂的正式使用之前, 要与水泥与掺合料进行适应性试验, 确保在混凝土中具有较好的相容性。

2.1.4 配合比设计优化

为保证项目工程的混凝土施工质量, 确保水利工程在后期运行中的安全, 要求混凝土的配合比保持科学、经济、耐久与强度, 可使用绝对体积法确定比例。本项目中的混凝土为C30W8F150, 要求混凝土的各项指标符合要求。混凝土强度与耐久性的影响参数为水胶比(W/B), 从强度与耐久性出发, 采用的水胶比为0.40-0.45^[4]。为降低用水量需优选外加剂和砂率, 要求用水量控制在155 kg/m^3 。最佳砂率宜控制在28%-35%, 保证混凝土具有良好的密实性与流动性。

2.2 混凝土拌和、运输与浇筑

2.2.1 自动化拌和与精确计量

本项目进行自动化控制, 通过全自动计算机控制拌和站对混凝土进行生产, 确保混凝土的质量符合要求。使用电子传感器对材料进行计量, 确保各项材料的添加

偏差不宜超过 $\pm 1\%$ ，如果是粗骨料与细骨料，要求其控制在 $\pm 2\%$ 以内。

从搅拌机类型、容量等要求出发，确定拌和时间。强制式搅拌机拌和时间要保持在 90s 以内，让拌合物具有均匀的色泽，且不会发生分层与离析。施工在炎热的夏季，且运输距离较长时，需在搅拌过程中加冰或冷水，出机口温度不宜超过 28°C ^[5]。每盘混凝土的配料数据可在拌和站控制室实时监控，并做好记录，确保混凝土的各项参数符合要求。

2.2.2 运输方式与过程控制

本项目所在区域地形复杂，浇筑点比较分散，因此运输方案需保持灵活。使用混凝土搅拌运输车在水平与上坡运输混凝土，在运输过程中使用 2-4 r/min 的速度低速搅拌，避免在运输途中出现离析。对于深基坑部位可使用混凝土泵配合布料杆入仓的方式，泵送混凝土要保证平顺、牢固的泵管铺设。避免出现离析与坍落，要求混凝土需连续出机、入仓，当存在轻微离析时，则要在混凝土入仓前进行二次快速拌和。

2.2.3 系统化浇筑

在混凝土浇筑前，需使用高压水枪清洗岩基或老混凝土面，要让基面保持干净。在浇筑前需洒水湿润岩基或老混凝土面，且要避免上面存在积水。对模板与钢筋进行合理检查，要模板与钢筋的各项参数符合要求。在混凝土浇筑时要求浇筑匀速进行，采取分层振捣，分层厚度为 30-50cm，每层之间的间隔时间不宜超过 2h。高导热性的冷却水管需在浇筑过程中同步埋设，采用直径为 $\Phi 25\text{-}32\text{mm}$ 的 HDPE 管为冷却水管，冷却水管的布置呈网格状，规格为 $1.0\text{m} \times 1.0\text{m} \sim 1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 。本项目中施工缝属于薄弱环节，施工单位样控制施工工艺，在混凝土浇筑前需将表面浮浆清理干净，采取人工凿毛让表面保持粗糙。在浇筑前需对表面湿润 24h，将一层 20-30mm 厚的与混凝土同配比的水泥砂浆铺设在上面，提升混凝土与表面的结合力^[6]。

2.3 振捣与养护

2.3.1 振捣

振捣器的选择要符合项目需求，采用高频插入式振捣器，在振捣过程中遇到狭窄部位，需加入附着式振捣器。采用 $\Phi 30\text{mm}$ 、 $\Phi 50\text{mm}$ 、 $\Phi 70\text{mm}$ 的振捣棒，要求振捣棒的直径符合建筑要求。振捣棒的工作频率、每次插入振捣时间需分别控制在 $\geq 10000\text{ rpm}$ 、15-30s。振捣结束点要以混凝土表面不会出现浮浆与气泡冒出为标准。

在振捣过程中，振捣的原则为“快插慢拔、垂直插入、插点均匀、层层扣搭”。振捣棒与混凝土保持垂直，振捣过程中避免振捣棒与模板、预埋件接触。以梅花形

分布振捣点，在确定振捣间距时，要以振捣棒的有效作用半径为依据，大约为振捣棒作用半径的 1.5 倍以内^[7]。在对上层混凝土进行振捣过程中，要求插入下层已初凝的混凝土内 5-10cm，确保每层之间具有良好的结合性。为做好质量控制，预防缺陷，要求能控制好振捣速度与强度，避免发生过振、漏振。

2.3.2 养护

合理的养护工作是保证混凝土质量的关键所在，可以保证混凝土在后期运行过程中，减少出现开裂等各类问题。混凝土的养护在其终凝后开始，在遇到大风天气时，要在混凝土收光后及时覆盖。水工结构混凝土的湿润养护时间需控制在 28d 以上，当有抗冲磨、抗冻要求的混凝土部分时，要求养护时间要超过 60d。养护过程中需在混凝土上覆盖土工布、麻袋等，并能对其进行定期洒水，保证覆盖形成饱和状态。要对水库底板、消力池底板等进行蓄水养护，蓄水的深度能保持在 10-20cm。对于无法进行覆盖洒水的区域，可采用喷涂养护剂作业。对于大体积混凝土的养护过程中，混凝土内部与表面、表面与环境之间的温差是控制的要点，要求能将泡沫塑料板、多层草垫等覆盖在上面保温，当混凝土处于升温期时需在内部通水冷却降低核心温度。对不同深度点的温度进行自动监测，要求温度控制在 25°C 以内，当温度超过 25°C 时需进行内部冷却。

2.4 特殊气候条件施工与温控措施

在混凝土施工过程中当处于高温与低温季节时，要做好施工控制。在高温时期做好骨料降温工作，拌合时加冰冷却，浇筑可在夜间进行。在低温的环境下时需对骨料进行预热，养护使用蓄热法。

在对大体积混凝土进行温度控制时，需采取综合措施，为降低水化热需对配合比进行优化设计，将冷却水管预埋在混凝土内部，浇筑需分层进行，并加强表面保温保湿措施。混凝土内部与表面、表面与环境温差需合理控制，要求其温差控制在 25°C 以内，避免发生温度裂缝。

3 水利施工中混凝土施工管理措施

3.1 设备与人员管理

首先，施工设备的精细化管理。在对混凝土施工设备进行管理过程中，要对其全生命周期进行管理，确保设备保持稳定的、良好的工作性能。从本项目的实际情况出发，合理确定设备选型与配置。对设备的状态做好监控与维护，在设备的使用前要制定班前检查制度，并能严格执行，在检查时保持规范与合理，并对检查内容进行记录。按照设备使用手册，对设备进行定期保养与维护，比如计量传感器需定期校准，每季度校准 1 次，确保其误差控制在合理范围内。通过物联网监控终端的

应用,可与对设备参数进行全面监控,能及时发现设备故障并进行预警。制定应急预案,针对设备的突发故障进行处理,保证混凝土施工的稳定进行。

其次,施工人员的系统化管理。对施工人员进行系统管理,提升人员的综合能力,确保施工人员可以规范操作。特种作业人员持证上岗制度,并做好安全技术交底工作。针对管理及技术人员开展分级培训与考核,保证这部分人员的综合能力。系统培训作业人员,确保作业人员可以标准化、规范化施工。明确岗位职责,保证全体人员都能明确自身职责,落实岗位标准。

最后,原材料的可追溯性管理。为对原材料进行全过程管理,可构建全链条材料追溯体系,对原材料从源头到仓面进行全面管理,保证原材料的质量与安全。每一批次的材料入场前,需赋予二维码或RFID标签,标识要包括材料的各项信息。通过全过程信息关联,可以对每批次的材料进行识别与查询。通过原材料的追溯,可以在出现质量问题后及时对材料的源头与责任进行界定,提升供应商的质量意识,确保原材料质量符合要求。

3.2 全过程质量控制

首先,生产环节的精确控制。混凝土控制的源头是生产环节,也可以为后期混凝土施工与项目的运行提供保障。在拌合站要对混凝土中的各项材料进行精准计量,要求胶凝材料、粗与细骨料、外加剂的误差分别控制在 $\leq \pm 1\%$ 、 $\leq \pm 2\%$ 与 $\leq \pm 0.5\%$ 。出机口混凝土的坍落度、温度和含气量等参数,要求每2h对其检测1次,在检测过程中当发现坍落度超过标准后,需对用水量与外加剂掺量进行合理调整。

其次,输送与浇筑环节的连续性控制。对混凝土的运输过程进行监控,对混凝土运输过程中的时间、卸料时间等进行记录。混凝土开盘前需开展联合验收,确保模板支护稳定性、钢筋绑扎准确性。下料与平仓需有序稳定进行,下料高度要控制在2m以内,平仓人员需保持足够,均匀对混凝土进行摊铺,避免出现骨料堆积情况。

最后,振捣与成型环节的密实性控制。在保障混凝土结构密实性中振捣是关键所在,因此要防止发生漏振、过振的情况。振捣作业需保持标准化,明确振捣手负责的区域,并能做好振捣检查。混凝土表面不再显著下沉、出现均匀浮浆等是振捣质量评定的标准,同时要记录好振捣时间、责任人等。

3.3 精细化养护与智能化管理

混凝土施工的收官环节是养护,也是保障水利工程

质量的关键所在。在水利工程建好之后会承受水压、冲刷等影响,所以必须对混凝土进行精细化管理,确保混凝土的安全与质量。在标准化养护制度下,确保混凝土养护的规范性与可靠性。在对混凝土进行养护过程中,需针对项目具体情况确定养护时长,不能机械定位28d。在养护过程中,需做好防雨、防风与保温措施,避免混凝土出现裂缝。针对大体积混凝土、薄壁结构与复杂部位采取差异化的养护策略,保证养护的针对性。为对养护全过程进行监控与管理,要利用好传感器技术、物联网技术等,实现养护方案的动态化、精准化调整。完善养护管理方案,明确养护人员的职责,做好巡查与记录工作,并对养护记录情况进行存档。

4 结束语

综上所述,水利工程项目具有较强的综合性,涉及了材料科学、施工工艺等项目,属于复杂的、系统性工程。为保证水利施工混凝土质量,要求能控制好施工工艺流程,保证混凝土的耐久性与质量。同时,也要做好施工全过程的管理,确保施工各个环节的质量,确保混凝土施工各环节达到标准,让水利工程项目在建成之后可以发挥其作用,并能保证其安全性与质量。

参考文献

- [1]周轶.水利水电工程管理中混凝土施工的应用解析[J].建筑结构,2022,7(4):7.
- [2]秦松林.水利工程施工中混凝土裂缝控制技术及案例分析[J].数字农业与智能农机,2025(1):70-73.
- [3]钱桂花.水利施工中混凝土防裂缝施工技术应用分析[J].散装水泥,2024(5):85-87.
- [4]王钊.水利水电工程中大体积混凝土的应用与施工技术分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(1):4.
- [5]陈安英刘西洋完海鹰邓松邓满宇.在建高层建筑混凝土剪力墙置换加固设计与施工控制技术[J].四川建筑科学研究,2022,48(6):48-53.
- [6]李孝忠.水利水电施工中混凝土施工技术的应用[J].中国科技纵横,2023(13):112-114.
- [7]汪政权.水利水电施工中混凝土施工技术的应用分析[J].中州建设,2023(3):40-41.

作者简介:刘胜军,男,(1976.10-),毕业院校:河北水利电力学院,水利水电专业,工作单位:临城县水务局,农村饮水办公室副主任,当前职称:工程师,专技十级。

高烈度地震区地下水工洞室群抗震韧性评估及加固技术

杨彬彬

青矩工程顾问有限公司西藏分公司，西藏拉萨，850000；

摘要：地下水资源属于战略性资源，在能源供给、城乡供水保证以及生态系统维持等重要方面起着不可替代的作用。随着我国水利基础设施建设的不断推进，在地震高烈度区建成了许多水工洞室群工程并投入使用。此类工程一般都存在深度大、地质情况复杂、结构形式多样的特点，在强震作用下很容易受到严重的破坏甚至完全丧失功能，给人员的生命安全、财产的保护以及生态环境的可持续发展带来了极大的危险。因此，急需对高烈度地震区地下水工洞室群的抗震韧性展开系统评价，探究其在极端地震荷载影响下出现的损伤机理及破坏状况，进而给出相应的加强措施来改善整个抗灾效能并保证长久的使用可靠。目前国内外有关地下结构抗震性能的研究成果十分丰富，但是对复杂地质环境影响下的大规模洞室群综合评定方法及个性化优化方案还存在着明显的不足。

关键词：高烈度地震区；水工洞室群；抗震韧性评估；加固技术

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.052

引言

地震是自然灾害的一种重要表现形式，它由于具有很强的破坏作用，给人们的生命财产安全和基础设施稳定性造成了很大的危害。高烈度地震频发区，经常出现的强烈震动给各种建筑结构、工程设施的抗震性能提出很高的要求。作为水利系统的重要组成部分，地下洞室群在水资源调配、输水通道建设、水电能源开发等工作中起着不可替代的作用，并且具有防洪抗灾的功能。其运行状况直接影响到整个水利工程安全可靠程度和防灾减灾能力。由于地下洞室群大多处在地质状况繁杂、充满不确定性且存在断裂带附近或者高地应力分布的环境下，而且因为岩石属性存在较大差别等诸多因素的制约，在设计时会遇到诸多难题。同时这种结构具有多样化的特征，有交叉式的布局、超大的跨度以及边坡的特征等很多种形态组合方式。这些特点造成它在遭受强震的时候有特别的力学响应规律和可能的失效方式。传统的抗震设计思想只重视单个构件的强度、刚度分析，不能对洞室群全生命周期动态演化趋势及从初始状态到最终失稳阶段转变的过程做出准确的预测。在此情况下，对高烈度地震条件下地下洞室群体系进行系统的抗震韧性研究，并采用经济可行的技术手段提高其抗风险能力，已经成为目前水利工程建设领域急需解决的重要问题之一。

1 地下水工洞室群抗震韧性提升的重要性

从国家战略角度来讲，地下水工洞室群属于水资源

优化配置、清洁能源开发和防洪体系创建的关键基础设施载体，它的抗震性能同区域乃至全国水安全保障整体效能存在直接联系。高地震烈度频发区的关键洞室群一旦受到强震的破坏，就会造成供水中断、电力供应中断等一系列连锁反应，不但会扰乱工业生产和居民生活秩序，还会引起水库大坝失稳等次生灾害，给社会稳定和发展带来严重威胁。在这种情况下，提高这类基础设施抗震能力不但是保证极端自然灾害中核心水利设施安全运行的战略选择，也是区域可持续发展的重要基础。在实际的工程建设中，由于很多工程处于地质构造复杂、地震活动频繁的地区，地下空间开挖存在着诸多的技术难题以及高昂的建设成本。加强抗震设计可以有效地降低地震引发的结构损伤概率，也可以大幅度地减少运营期间由于功能丧失造成的经济损失，进而达到资源高效利用和长期稳定运行的目的。对已经投入使用但是设计标准较低的老项目进行科学的抗震水平评价，并实施有针对性的加固改造，可以弥补历史规划中存在的不足，保证其能适应未来复杂多变的自然环境变化，给长期可靠服务提供技术支持。

2 地下水工洞室群加固技术优化原则

2.1 以地质条件适应性为核心

地震高烈度区地质构造特征一般具有很强的复杂性，有断层破碎带、软弱夹层、高地应力区和岩性不均这些特殊的地质元素。根据以上区域的洞室群建设项目，加固设计方案要依靠详细的地质勘查资料来开展系统

的分析和综合评价。应当对不良地质体的空间分布范围、尺寸大小以及物理力学性质进行准确的探查,还要对它在强震作用下产生的动力响应规律进行探究。对于含断层破碎带的场地应采取注浆加锚固的方法提高结构的抗剪能力,并配合混凝土衬砌工艺来提高对软弱岩体的支撑能力;对于高应力区则要特别注意防范岩爆这类危险,把分步开挖、柔性支护的思想融入到施工计划当中去,防止刚性支撑造成应力聚集的问题。只有使加固措施准确地适应具体的地质条件,才能使工程的安全水平和长期运行效果得到提高。

2.2 以结构功能完整性为目标

地下水工洞室群是多单元集成的复杂工程系统,是由功能不同的各个功能模块组成,并通过内部通道实现有机整合。任何一个单元或者连接部位出现结构缺陷,都会对整个系统安全运行造成较大影响。根据上述特点,本文提出了一种系统的加固设计思路,其主要思想就是加强各个独立洞室的抗震能力,同时重视过渡区(进出口、交叉口、弯道、拐角等)、关键节点、附属设施等容易受到损害的地方的技术改进和提高。对于交叉区段,由于其特有的应力集中效应,在地震时容易造成裂缝的扩展或者局部失稳等问题,因此需要提高衬砌的承载能力、采用钢支撑或者使用高强度的新材料来提高承载能力。对核心设备基础要进行细致的动力学模拟分析,根据实际情况配装必要的减振装置,保证关键设备在极端条件下可靠工作。对地下水工洞室群及重要部位开展全方位的安全性评定和技术革新工作之后,既可有效削减自然灾害的危害程度,又能保证整个系统得以长久稳定地运作,防止因为局部出现故障而引发一系列的灾害事故。

2.3 以全生命周期经济性为考量

在高烈度地震区地下水工程洞室群加固项目中,由于资金投入量大,优化加固设计方案时要全面考虑短期建设成本和长期运维费用的关系,做全生命周期经济性分析。方案比选过程中要考虑到材料采购、施工安装等直接的经济支出,也要考虑到加固后的洞室群未来运营期间发生的维修保养费用、抗震减灾带来的间接效益、结构使用寿命延长所带来的附加价值。一些创新型加固技术、新型材料虽然初期投入大,但是由于具有很好的耐久性、简化了以后的管理程序或者大大提高了抗震性

能等优点,在综合评价中有可能表现出更高的经济回报潜力。必须警惕过度加固造成的资源浪费问题,在严格遵守抗震规范的基础上,依靠精细化的设计和高效的施工工艺,寻找技术创新和成本控制之间的最佳平衡点,达成技术先进性和经济可行性的统一,给科学决策赋予可靠的依据,并且改善工程项目综合效益。

3 基于抗震韧性提升的加固技术优化方案

3.1 基于地质体-结构体系协同作用的抗震加固技术

高烈度地震区的地下水工程洞室群抗震性能研究要兼顾结构自身力学特性和地质体稳定性,还要探究两者之间的协同作用机理。关键技术就是充分发挥围岩自身的承重能力,用科学的加固方法把地质介质变成与人工构筑物互相作用的有机整体,从而抵御地震载荷的作用。具体的技术路线如下,首先对可能受地震影响的区域做系统的地质力学参数测试和地应力场反演分析,得到洞室周边岩石的物理力学性质、初始应力分布特征和地震响应行为;在此基础上按照“主动强化加被动防护”的思想来制订施工方案,在具备较好完整性且具有一定强度的围岩地段,采用锚杆(索)支护、喷射混凝土等方式开展主动加固工作,提升材料弹性模量和塑性表现,进而削减地震引发的破坏风险;对于存在软弱破碎等地质缺陷的区域,利用注浆工艺改良岩体品质,联合钢拱架等辅助设施创建双重安全保障体系,明显加强整个抗灾能力及可靠程度。

3.2 基于功能韧性提升的多级减震与能量耗散加固技术

研究洞室群在地震作用下功能保持和快速恢复的关键技术,利用多级减振体系和能量耗散装置来抑制地震波传播、减小结构损伤,保证核心功能的稳定。研究包含以下步骤,用数值模拟技术对洞室群各个功能单元和关键节点进行地震响应分析,重点放在大型设备基础、交叉口和高边墙底部等容易损坏的区域上,给出承载力评价结果以及潜在的失效风险点;对高风险部位采取多层次防护措施,一级减震使用柔性隔离材料(橡胶隔震垫)放在洞室主体和围岩界面或者机械设备和支撑平台之间,利用它的非线性特性吸收外界震动能量,二级减震就是把衬砌内部或者连接处有塑性变形特性的耗能元件(金属屈服型装置)植入进去,在动态加载过程

中使能量有序地释放并转化。以水电站地下厂房为例,水轮机基座与楼板交接处设置铅芯橡胶支座,可以改善振动抑制效果;在高边坡洞室下段加装摩擦型钢支撑耗能模块,可有效控制岩土体水平位移和裂纹扩展速率。上述方法为复杂工程设施提供了系统化抗震设计方案。

3.3 基于监测预警与智能调控的动态抗震加固技术

针对洞室群在地震作用下的动态响应特点,采用实时监测技术和智能化算法创建起反馈控制机制,使加固方案得到自适应调整,大大提高工程系统整体抗震能力。首先在洞室群的关键部位(高边壁、交叉节点、重要设施基座等)布置各种类型的传感网络,有加速度计、位移传感器、应变片、压力检测器等,对地震动参数、结构变形数据、应力分布特征、渗流情况等进行准确的获取。利用物联网通信技术,把采集到的数据传送到云端服务器上,再用地质体、结构体系动力学仿真模型和损伤评价软件工具,对洞室群实际运行状况实施即时解析并发出警报。当监测指标接近或者超过安全阈值的时候,系统就会自动启动应急预案,对配置有可调节锚固装置的部位,用智能液压控制系统实时调节张紧力大小,平衡荷载分配、防止裂缝继续发展;安装有主动式消能减振模块的功能区,根据实际振动信号的变化动态调整阻尼系数或者弹性模量,提高能量耗散的效果。利用建筑信息模型(BIM)平台和信息技术,创建三维数字化双胞胎环境,将实验验证数据和理论推导结论综合起来,形成可视化的辅助决策支持系统,给灾害风险评价及应急处置策略制订赋予了科学支撑。该方法冲破了传统静态防护的思想,转而采取依靠感知驱动的动态反应办法,在保证安全性能的前提下达成资源的高效利用。

3.4 基于全生命周期性能提升的加固材料与施工工艺优化技术

提高洞室群抗震韧性关键技术,主要是加固材料性能优化和施工工艺精细化改进。通过对加固材料的成分组成和配比进行不断的调整,以达到高强度、高延展性、持久耐久性等目标,同时提高基底材料与加固材料之间界面的结合性能。高性能纤维增强复合材料(FRP)因为具有良好的性能,被广泛地用于支护结构的加固改造当中,特别适合于锚固件的安装、衬砌的修复以及裂缝的处理等等场景,对于水文地质情况比较复杂的区域,

一般选择具有较好防渗功能的注浆系统和专门的涂层技术。根据实际工程需要做有针对性的模拟分析和试验验证,保证设计方案安全可靠、满足要求。现场施工阶段重视全流程质量控制,使用先进的自动化设备准确控制钻孔位置偏差范围,用在线传感装置实时监测紧固情况,采用阶段性填充的方式分步推进灌注工作,配合超声波探伤等无损检测手段对核心部位的完整性进行评价,从而有效防止安全隐患的产生。按照模块化设计思想,对预制单元进行专业化加工,在工地快速拼装,从而加快整体进度,提高作业效率和成品质量。这些综合措施不但明显提高了加固系统综合防护能力及长期运行稳定程度,而且极大地延长了地下空间设施的服务年限,给其应对自然灾害、突发事件等提供重要的保障。

4 结语

高烈度地震区的地下水工程洞室群抗震韧性评价及加固技术研究有重大的现实意义和战略价值。本文主要研究提高该类结构抗震性能的主要途径,分析其对国家水资源安全、区域可持续发展的重要意义。从地质条件匹配性、结构承载能力优化、全生命周期经济效能三个方面给出一套系统的改善方案。根据地质环境适应性问题,提出了一种以岩石介质特性为基础的创新加固方法;为了提高结构稳定性,提出了能量耗散型防护体系,该体系将多功能减震装置与结构连接起来;同时建立了一个以物联网为核心的感知信息平台,从原来的静态监测变成了现在的动态预警,大大提高了灾害的应对速度;使用高强度复合材料,并采用精细的施工工艺,使工程的质量更加可靠,施工效率也得到提高。不但拓宽了传统岩土力学领域研究的范围,而且给新兴交叉学科发展提供实践支持。

参考文献

- [1]杜佳.中梁山膨胀围岩隧道衬砌结构力学性能分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025(6):173-177.
- [2]韩澍琦.不同截面形状隧道地震响应规律及结构抗震性能的研究[D].桂林:桂林理工大学,2024.
- [3]周鑫.地震作用下公路隧道箱型预制仰拱结构稳定性研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.

基于改进 A*算法的电缆布局方法研究

陈杰 宁芊

四川大学 电子信息学院 智能控制研究所, 四川成都, 610065;

摘要: 针对复杂建筑环境中电缆布局优化所面临的路径冗余、空间利用率低等难题, 本研究提出了一种基于 A*算法的高效系统化布线方法。该方法首先深入分析电缆敷设过程中的几何约束与工程规范, 构建以“至墙体距离”为关键度量的动态代价场, 以此引导路径搜索方向。同时, 通过引入改进的启发式函数对 A*算法进行增强, 有效平衡了路径长度与空间贴合度, 生成既满足工程约束又具备高空间利用率的最优路径。实验结果表明, 相较于传统的 A*、Dijkstra、BFS、最佳优先搜索及双向 A*等基准算法, 本方法在路径长度上平均缩短了 22.5%, 转弯次数显著减少约 9%, 大幅降低了布线成本与施工难度, 显著提升了布线效率与整体质量, 为复杂建筑环境下的电气布线提供了智能化解决方案。

关键词: 电缆布局; A*算法; 点云处理; 工程优化

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.053

1 约束条件分析与处理

1.1 约束条件分析

根据电缆敷设准则文件和实际工程电缆约束要求, 本文所规划的电缆所考虑的约束条件分为三类: 电缆转弯角度、电缆与建筑墙体模型的距离、电缆安装规范。具体为:

关于电缆转弯角度:

- (1) 电缆在水平方向前进时的转弯角度;
- (2) 电缆在水平方向前进发生高度变化时的爬坡角度。

关于电缆与建筑墙体模型的距离:

关于电缆的安装规范:

- (3) 电缆应优先靠近建筑墙体布置。
- (4) 电缆起终点距离阀门或仪表的距离;
- (5) 电缆发生方向变化时, 需满足的最小弯曲半径;
- (6) 同类别电缆应尽可能成束放置, 为其他类别电缆预留出足够空间。

1.2 约束处理处理

1.2.1 电缆前进方向

电缆在水平方向前进时, 转弯角度不能大于 90° 。电缆爬坡的角度只能是 30° 、 45° 、 60° 、 90° 。因此定义电缆的前进方向有六个, 转弯角度和爬坡角度为 90° , 且一次只能选择一个方向前进。

电缆的前进方向如图 1 所示, 红色方块表示当前节点, 绿色方块表示可以前进的节点, 灰色方块表示不可前进的节点。

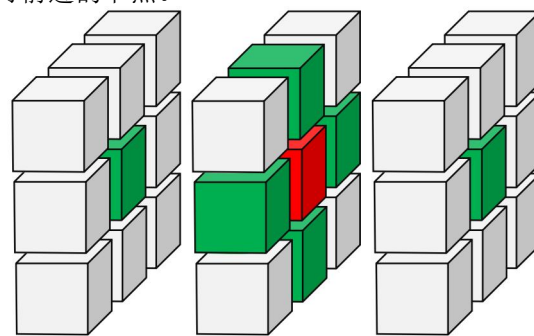


图 1 电缆前进方向示意图

1.2.2 起点和终点的计算

为满足电缆端点距阀门或仪表 3.5 米内的约束, 本文采用数据驱动的后处理策略确定起终点。首先从参数化数据库中提取设备全局坐标, 依据标识符与路径任务匹配, 并统一归一化为毫米单位以消除量纲误差。获得标准化设备坐标集 $D_{dev} = \{D_1, D_2, D_3, \dots, D_n\}$ 后, 通过在可布线空间 P_{free} 中执行最近邻搜索确定最佳映射点。设备点 D_i 对应的电缆端点 S_i^* 计算如下:

$$S_i^* = \arg \min_{p_i \in P_{free}} \|P_i - d_i\|_2 \quad (1)$$

该过程本质上是逻辑上的设备连接点投影至物理上可达的布线空间表面。公式 (1) 计算得到的 S_i^* 即为该设备在可布线网络中的实际接入点, 分别被定义为电缆路径的起点或终点。

1.2.3 空间分辨率的确定

电缆在转弯时应满足最小转弯半径这一约束条件影响着空间分辨率的大小。电缆弯曲半径示意图如图 2 所示。

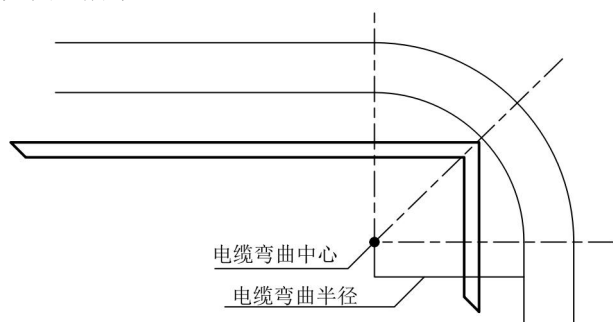


图 2 电缆弯曲半径示意图

为了同时满足电缆敷设时的最小弯曲半径要求,并保证电缆能够在单一网格内完成布置而不跨越多个网格,所采用的空间分辨率需符合如下要求:

$$r \times r_{\text{times}} + r \leq \Delta r \quad (2)$$

其中, r 为电缆外径 (10mm), r_{times} 为弯曲半径倍数 (取 10), Δr 为空间分辨率。由公式 (2) 可知, Δr 应不小于 110mm, 故本文选取的空间分辨率为 200mm。

2 空间建模与优化目标

2.1 模型离散化

为将模型分割为模型占用空间与可布线空间,首先对建筑墙体模型表面按一定密度进行点采样,随后计算轴对齐包围盒,考虑到电缆敷设需预留安全裕度以满足弯曲半径需求,将直径 24 米、高 40 米的圆柱形场景扩展为 26 米×26 米×46 米的规则立方体计算域,确保墙体边缘及顶部/底部区域存在有效可行路径搜索空间。

在该扩展域内,以 200 毫米的空间分辨率为步长生成均匀体素网格,通过最近邻欧几里得距离判别法将网格节点划分为模型墙体点集 P_{obs} 与可布线空间点集 P_{free} : 对于任意节点 P_i , 计算其与墙体采样点集中最近点的欧几里得距离 d_i , 若 $d_i < 200\text{mm}$ 则标记为模型墙体节点, 若 $d_i \geq 200\text{mm}$ 则标记为可布线空间节点。场景模型如图 3 所示, 分割后的模型点云如图 4 所示。

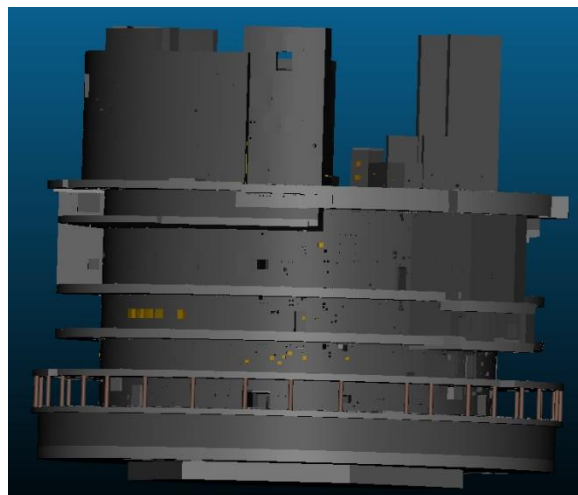


图 3 模型示意图

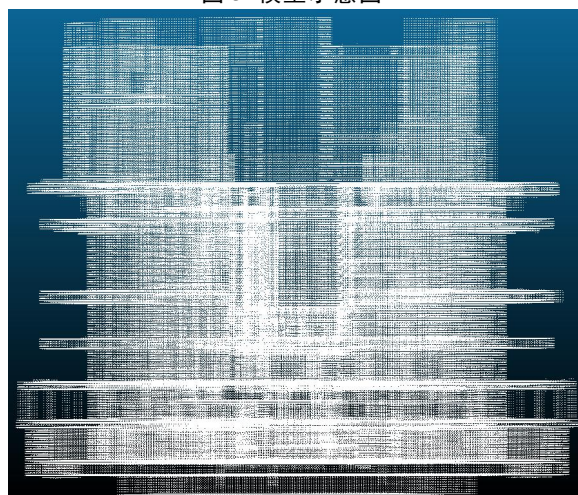


图 4 模型墙体点云

2.2 综合优化目标

2.2.1 电缆长度

在实际电缆网络部署中,总布线长度作为路径规划目标函数的核心变量,对工程造价、材料消耗及空间利用率具有决定性影响。最小化布线长度不仅是控制预算与实现资源集约化的关键,更能有效压缩解空间规模、降低算法复杂度,同时减少因冗余走线引发的电磁干扰、热累积及维护难题。此外,在受限空间中,紧凑的布线方案有助于提升通道利用率并改善负载均衡。因此,将总布线长度作为首要优化目标,兼具经济性、功能性与可扩展性,是电缆自动敷设路径规划的基础准则。鉴于此,本研究提出如下电缆长度计算公式:

$$L = \|P_i - P_{i-1}\|_2 \quad (3)$$

其中, P_i 表示当前节点, P_{i-1} 表示前一个节点。

2.2.2 电缆距离模型墙体的距离

在三维路径搜索中,将建筑墙体设定为优先依附面是一种高效的启发式策略。该策略基于“沿墙布线”的工程原则,引导算法优先探索结构边界区域,从而降低开放空间布线带来的支撑不足及施工成本风险。通过赋予邻近墙体节点更低的代价值,该策略显著缩小了有效搜索空间并提升收敛效率。同时,依托墙体良好的几何连续性,生成的路径更易满足弯曲半径与正交转角等工程约束。因此,这一建模方式实现了物理约束与算法设计的有机结合,增强了路径的可实施性。为此,使用如下公式计算电缆与墙壁的距离:

$$d_{\min}(p) = \min_{\phi \in \Phi_{\text{obs}}} \|p - \phi\|_2 \quad (4)$$

2.2.3 电缆成束敷设

利用同类电缆在功能与电气特性上的一致性,实施集聚成束协同布设是提升空间效率与经济性的关键策略。该策略不仅符合分类敷设与电磁兼容性规范,更能通过物理集成减少桥架占用截面,降低支撑材料用量并简化施工工序。在算法层面,将同类电缆视为耦合拓扑集合体,有助于构建多缆协同规划模型,同步优化共用段路由以避免冗余与干扰。为实现这一机制,本文引入节点属性优先级策略:当某节点被电缆选中后,自动提升其优先级,从而引导后续同类电缆优先复用该路径,最大化成束敷设效果。

2.3 改进 A* 算法估价函数

A*算法的核心思想是从起点出发,依次遍历当前节点的所有有效邻居节点。在遍历所有有效邻居节点的过程中,A*算法会为每个节点计算一个相应的代价值并从中选择代价值最小的节点作为下一步的路径节点。该代价值通过一个称为估价函数的评估公式进行计算,其形式如下所示:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (5)$$

公式(5)中的 $f(n)$ 表示当前节点的总代价值, $g(n)$ 表示起点到当前节点的实际代价值, $h(n)$ 表示当前节点到终点的估计代价值,在本文中,为了使电缆尽快朝着终点的方向前进, $h(n)$ 为当前节点到终点的欧几里得距离, $h(n)$ 的计算方式为:

$$h(n) = \|P - P_g\|_2 \quad (6)$$

公式(6)中, P 为当前节点, P_g 为终点节点。此外,本文结合综合优化目标对 $g(n)$ 进行了改进:

$$g(n) = \alpha L + \beta d_{\min}(q) + \gamma C \quad (7)$$

公式(7)中, L 为电缆长度, $d_{\min}(q)$ 为电缆到模型墙体的距离, C 为节点的优先级, α 、 β 、 γ 为权重系数,经过自定义空间的实验确定,在自定义空间进行电缆路径最佳搜索,最中确定, $\alpha = 0.25$, $\beta = 0.45$, $\gamma = 0.3$ 。

2.4 算法流程

至此,已完成对模型和算法的构建与优化。算法运行的流程图如图4所示。

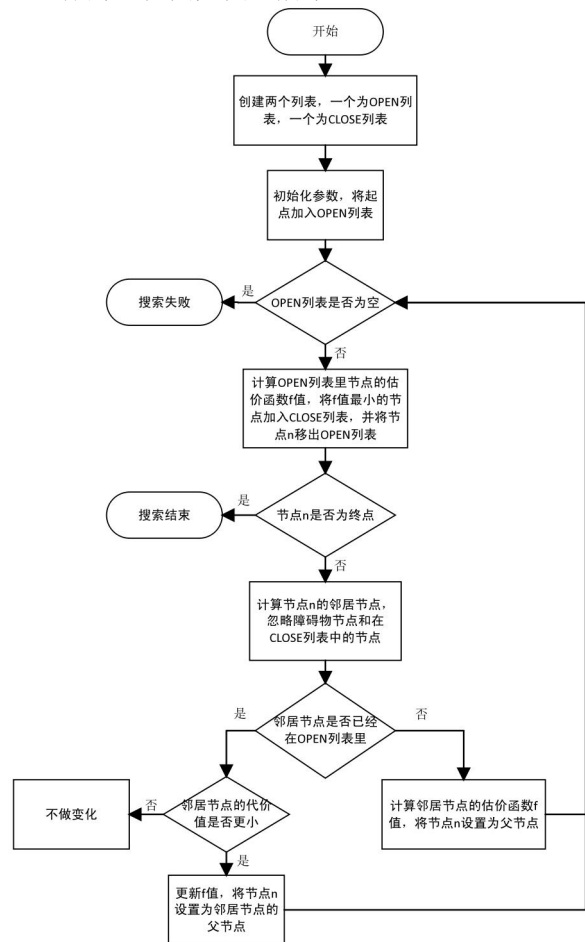


图5 算法流程图

2.5 算法实验

为了验证所提算法的有效性,实验在上述分割后的三维空间中进行,并与A*、Dijkstra、BFS、双向A*和Bestfirst算法对比。共规划26条电缆路径,表1的结果为布线性能的平均值。为了直观看出各种算法布线结果的效果,定义综合计算评价指标Cost的计算公式(13)为:

$$\text{Cost} = \varepsilon \times \text{节点数量} + \epsilon \times \text{电缆长度} + \theta \times \text{电缆距离墙体距} + \eta \times \text{转弯个数} + \mu \times$$

共享路径长度
(13)

公式 (13) 中， $\varepsilon + \epsilon + \theta + \eta + \mu = 1$ ，在本文中，节点数量、电缆长度、电缆距离墙体距离和转

弯数量指标都是越低越好，因此， $\varepsilon, \epsilon, \theta, \eta$ 取值分别为 0.4, 0.4, 0.3, 0.4，而共用路径段长度指标越大越好，因此， μ 为-0.5，最终 Cost 值越小，说明电缆布局效果越好。

表 1 算法对比结果

路径指标	A*	Dijkstra	BFS	Bestfirst	双向 A*	改进 A*
节点数量/个	9512	6604	6604	9046	9302	6172
电缆长度/mm	1897200	1315600	1315600	1804000	1855200	1268633
电缆至墙体距离/mm	226.05	877.08	294.12	243.22	256.46	202.11
转弯数量/个	4423	726	2687	3404	3687	2715
共享路径长度/mm	53619	49836	50535	50535	34037	53416
Cost	1382694.6	2241927.5	1087392.4	1361374.6	1445938.9	858531.4

实验结果表明，改进 A*算法在关键指标上显著优于基准算法：路径节点减少 10.59%，总长度缩短 22.5%，平均贴墙距离降低 49.72%。虽然因紧贴圆柱形障碍物轮廓导致转弯次数多于 Dijkstra 算法（后者最少为 726 次），但其共享路径长度显著高于其他算法且取得了最低综合代价值，证实了该算法在既定约束下具备最优的路径规划性能。

3 结论

针对大规模场景下的电缆自动布线难题，本研究提出了一种基于改进 A*算法的电缆布局方法。该方法首先对三维模型进行表面采样并生成点云，依据布线约束构建均匀网格；进而通过计算采样点与网格节点的距离，精准划分墙体结构与可通行区域。在此基础上，利用区域间距离场增强 A*算法的启发式函数，构建了具备三维感知能力的代价函数。实验表明，改进 A*算法在自定义环境中性能显著优于原始 A*、Dijkstra、BFS 及双向 A*等经典算法，

并在实际核岛工程中成功满足了严苛的工程约束。该研究不仅为复杂建筑项目提供了高效的布线解决方案，更证实了改进 A 算法在提升路径规划效率方面的巨大潜力及对多样化模型的优异适应性。

参考文献

[1]崔钰萍,郑国磊. 电缆布局设计技术研究进展综述[J]. 机械工程学报,2023,59(02):268-280
[2]牛蕊. 航空产品电缆的数字化布局分析[J]. 山东工业技术, 2016(1): 133-133
[3]丁川. 飞行器电缆布线数字化技术与系统开发[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017
[4]杜伯学, 李忠磊, 周硕凡, 等. 聚丙烯高压直流电缆绝缘研究进展与展望[J]. 电气工程学报, 2021, 16(2): 2-11
[5]李纯军. 基于 A*算法的多管线通道化自动敷设方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011

农用地土壤重金属污染现状及修复研究

汪羿之

中央民族大学 生命与环境科学学院, 北京, 100081;

摘要: 随着我国工业化、城镇化建设加快, 农用地土壤重金属污染问题正日趋严峻, 已成为使粮食安全、生态环境和人体健康面临威胁的重大环境问题, 本文对我国农用地土壤重金属污染的总体状况、空间分布特征以及主要污染源做了系统分析, 着重分析了镉、砷、铅、汞、铬等典型重金属的污染特点和环境风险。在现有的基础之上, 从物理、化学、生物及联合修复等方面, 整体梳理了目前主流土壤重金属修复技术的研究进展和应用状况, 研究所得表明, 我国农用地土壤重金属污染呈现“南的高北的低、东的高西的低”的空间格局, 污染来源复杂不一, 这里面工业活动、农业投入品和污水灌溉是主要污染途径, 不同修复技术都分别有优势和局限, 未来要往精确、环保、系统方向进步, 强化源头的管控以及技术集成创新, 创建符合我国国情的农用地土壤污染防治体系, 为农业可持续发展提供科学方面的依据。

关键词: 农业耕种土壤; 重金属造成污染; 安全利用

DOI: 10.69979/3060-8767.26.02.054

1 农用地土壤重金属污染现状与特征分析

1.1 污染总体状况与空间分布格局

我国农用地土壤的重金属污染呈现很明显的区域差别, 根据全国土壤污染详查的相关数据, 我国农用地土壤环境质量整体形势很严峻, 重金属点位产生超标情况的比例较高, 其中镉的点位超标率排第一, 从空间分布的相关情况来讲, 南方地区污染程度高于北方地区, 东部地区污染程度要比西部地区高。长江中下游流域、珠江三角洲、东北老工业基地、西南矿产资源富集区等是污染比较集中的重点区域, 此空间分布格局和各地区的地质背景、工业布局、农业生产方式等有着密切的关系, 南方地区由于土壤大多是酸性, 对重金属的活化、迁移有帮助, 并且历史上矿产资源开发活动频繁上演, 造成土壤中重金属累积的问题更突出了, 北方地区土壤大多是碱性的, 重金属活性相对来说比较低, 局部工业区和污灌区的污染问题也不能不重视。

1.2 主要污染源解析

农用地土壤重金属污染的来源复杂又多元, 主要包括工业、农业、交通方面的污染源和大气沉降等, 工业排放是造成重金属污染的主要出处, 有色金属矿采选、冶炼、电镀、化工等行业产生的废水、废气、废渣通过不一样的途径进入农田环境, 农业

投入品不合理的使用同样是重要因素, 长时间大量施撒含有重金属杂质的磷肥、部分有机肥以及含砷、汞等成分的农药, 造成重金属于耕层土壤中不断积聚。部分地区依旧有污水灌溉的历史问题存在, 工业废水和城市生活污水没有妥善处理就直接用于灌溉, 使大量重金属进入到农田里, 交通运输排出含铅颗粒物、燃煤和垃圾焚烧所产生的大气沉降等, 也对周边农田土壤造成一定的污染, 各类污染来源相互交织在一起, 形成了错综的污染成因网络。

1.3 典型重金属污染特征

土壤里不同重金属的地球化学行为以及环境效应应有显著差异, 镉是存在于农用地土壤中活性最强、危害最大的重金属之一, 容易被水稻等作物吸收, 在籽粒当中富集, 造成“镉大米”相关风险, 在南方一些地区, 砷污染较为明显, 其于淹水还原条件里活性增强了, 更易于被作物吸收掉。铅于土壤里的移动性比较差, 大多屯积在表层土壤, 但会经尘埃附着在蔬菜表面, 造成直接摄入的隐患, 汞在特定条件的时候可转化为剧毒的甲基汞, 而且通过食物链让生物放大发生, 铬污染主要来自皮革、电镀之类的行业, 六价铬有很强毒性且易迁移, 这些重金属的污染特点造成其环境风险和修复策略有所不同, 要实施针对性的管控举措。

2 土壤重金属修复技术原理与研究进展

2.1 物理修复技术及应用

物理修复技术一般借助物理办法来分离、去除或隔离土壤中的重金属，客土法与换土法属于比较彻底的修复办法，把污染土壤挖出来，用清洁土壤进行替换，可以很快降低土壤重金属浓度，只是工程的工程量大，所需成本高，而且要把挖出的污染土壤妥善处置好，说不定会造成二次污染。深耕翻土法把表层污染的土壤和深层清洁的土壤掺和在一起，使表层土壤重金属的浓度降低些，但这种方法只是起到了稀释污染的作用，并未切实把重金属去除掉，而且还可能使深层土壤里的潜在污染物被活化，电动修复技术依靠电场的作用推动重金属离子在土壤中迁移，在电极区富集而去除，对渗透性不好的黏质土有一定效果，然而所耗能量较多，对土壤理化性质带来较大的影响，当下大多还是处于研究和示范阶段。

2.2 化学修复技术及应用

化学修复技术运用向土壤中添加化学改良剂这一方法，改变重金属的形态、溶解度或迁移特性，化学固化/稳定化技术是目前应用颇为广泛的修复技术之一，经添加石灰、磷酸盐、生物炭等材料，把重金属转化为不溶、稳定的形态，降低其生物可给性。这项技术成本比较实惠、施工简便省事、见效快，很适合对大面积中轻度污染农用地实施风险管控，化学淋洗技术用淋洗剂将土壤当中的重金属溶解或络合出来，修复效果较好，但有破坏土壤结构和肥力的可能，淋洗液的处理及再利用也是大挑战，新型环境友好性修复材料的研发成热点了，好似改性生物炭、纳米材料、有机和无机复合材料等，这些材料在拉高修复效率的同时，尽可能降低对土壤生态系统的不良影响。

2.3 生物修复技术及应用

生物修复技术运用植物、微生物等生物体的生命活动，去除、转化和固定土壤里的重金属，植物修复途径主要是有植物提取、植物稳定和植物挥发之类，超富集植物的研究很受关注，我国在超富集植物资源的挖掘上有了重要成果，像东南景天能对镉、蜈蚣草能对砷进行较强的富集。但超富集植物普遍有着生物量小、生长迟缓等问题，对其实际应

用造成限制，微生物修复借助细菌、真菌等微生物对重金属开展吸附、沉淀、氧化还原等作用，一些功能性的微生物还可与植物形成共生关系，使植物的修复能力变强，动物修复依靠蚯蚓等土壤动物的活动对土壤理化性质加以改善，然而修复能力不是很突出，生物修复技术有成本低、对环境友好、不破坏土壤构造等长处，但一般修复周期都偏长，要与其他技术配合着使用。

3 修复技术集成与创新发展趋势

3.1 联合修复技术研究进展

单一修复技术一般难以契合复杂污染场地的修复需求，联合修复技术利用多种技术的共同协作，可加快修复进程、缩短修复周期、降低修复成本，化学 - 植物联合修复是有较多研究的联合修复模式，借助施加低剂量、环境友好的化学改良剂让土壤重金属活化或钝化，同时种超富集植物或者高生物量的作物，加大植物修复的效率。微生物 - 植物联合修复利用有特异功能的微生物提高植物对重金属的耐受性与富集能力，促进植物生长情况，物理和化学联合修复、生物和化学联合修复等在不同场景之中也呈现出良好应用前景，为使联合修复技术成功应用，需要基于对污染特征、土壤性质、修复目标和成本的系统研究，选出最理想的技术搭配和实施办法。

3.2 农业生态调控技术研究

农业生态调控技术利用调整种植制度、水分管理、施肥措施等农艺管理措施来实现，管控土壤理化性质以及重金属生物有效性，在保证农产品安全产出的同时，渐渐减少土壤重金属的风险，水稻 - 旱作轮作能通过改变土壤氧化还原方面的条件，管控砷、镉等重金属的活性。正确的水分管理，好似在水稻关键生育时期控制水分，能够使镉在水稻籽粒中的积聚量降低，给予有机肥、硅肥、石灰等改良剂，可对土壤性质加以改善，让重金属生物有效性降低，这些农艺措施花费少、操作容易、农民便于接受，是当下中轻度污染农用地达成安全利用的主要技术办法，未来要进一步推进农艺调控措施标准化、规范化的相关研究，搭建适合不同区域、不同种类作物、不同污染程度的农艺调控技术体系。

3.3 绿色可持续修复材料研发

开展高效、低成本、环境友好新型修复材料的研发工作是土壤重金属修复技术发展的重要方向,生物炭得益于自身来源广泛、成本较低、环境友好等好处,在土壤重金属修复里呈现出良好的应用潜力,采用物理、化学或者生物措施对生物炭加以改性,可以进一步加大其对重金属的吸附固定力度。纳米材料具有比表面积大以及反应活性高等特点,在土壤重金属修复这件事上有独特优势,但它的环境风险以及长期产生的效应仍需深入研究,有机-无机复合材料、功能化粘土矿物、工业副产品资源化利用等还是当下研究的热点主题,这些新型修复材料开展研发工作,不仅要关注修复效果,还要对其对土壤生态系统的影响进行评估,保证修复过程在环境方面的安全性,应强化修复材料标准化生产和质量方面的控制,带动其产业走向产业化。

4 修复技术应用中的挑战与对策

4.1 技术适用性与成本效益分析

各种修复技术都有其适用的条件和局限,在实际应用过程中面临技术适用性和成本效益的挑战,物理修复技术虽说起效快,但费用十分高昂,而且也许会破坏土壤生态功能,仅可用于小范围、重污染地段的应急补救,化学修复技术成本相对而言是比较低的,但修复效果长久稳定性有待验证,有污染情况反弹的可能性。生物修复技术是环境友好方面的技术,然而修复所经历的周期长,无法满足紧迫的农产品安全生产的要求,我国区域广大,土壤类型、气候情况、污染特性的差异比较大,一种技术难以普遍落实,有必要搭建完善的场地调查与风险评估体系,根据污染程度、土壤的属性、修复目标、经济方面的条件,挑选最相符的修复技术或技术组合,要强化修复技术成本效益方面的分析,开拓多元化的资金投入方式,削减修复成本,增进修复的效益。

4.2 长期稳定性与风险管控

土壤重金属修复要面对的关键之处在于修复效果的长期稳定性,好些类修复技术,特别是化学方面的固化/稳定化技术,其修复效果有可能随时间进展而发生改变,土壤 pH 值、氧化还原电位、有机质

含量等环境因子的变化,而且冻融作用、干湿交替情况、根系分泌物等都可能对修复效果稳定性造成影响。为使修复效果具有持久性,要建立起长期监测与评估的机制,定期对修复后土壤重金属的形态变化、生物有效性和生态方面的风险进行监测,要造就修复效果的预测模型,评定不同环境条件下修复效果的发展走向,在修复技术选择应用的过程中,要充分顾及修复效果的长期稳定性,优先采用环境相容性良好、效果长久的修复技术和材料,就已经修复好的土地,要依照风险评估结果规划合理的安全利用方案,杜绝修复效果回退和风险再次产生。

4.3 政策支持与监管体系建设

健全的政策法规和监管体系对推动土壤重金属修复工作起着重要保障作用,我国已经出台《土壤污染防治法》《土壤污染防治行动计划》等一整套政策法规,为土壤污染防治提供了法律方面的依据,但在实际开展过程中,仍有着标准体系不完善、监管能力不够、资金保障机制不健全等问题。未来要进一步使土壤环境质量标准、修复技术规范、效果评估标准等标准体系更完善,给修复工作提供技术类依据,要推进土壤环境监测网络的建设,加大监测能力,做到对污染场地的动态监管,应建立并完善修复工程全流程的监管体系,包括修复方案审查、工程实施监督、修复效果验收、后期跟踪监测等内容,应开拓多元化的资金筹集办法,囊括政府投入、企业负起责任、社会资本参与进来等,保障修复工作的资金到位,要强化公众参与以及社会监督的作用,使修复工作的透明度和公信力得到提高。

5 结论与展望

我国农用地土壤重金属污染的形势很严峻,呈现“南地势高北地势低、东地势高西地势低”的空间格局,工业排放、农业投入品加上污水灌溉是主要污染来源,农产品安全以及人体健康被镉、砷等重金属直接威胁,当下物理、化学、生物等修复技术各有好坏,其中化学固化/稳定化是应用广度最大的,生物修复对环境很友好,联合修复跟农业生态调控是不可忽视的发展方向。技术适用性、成本效益与修复效果长期稳定性依旧是实际应用当中的主

要挑战,应秉持源头管控,优先做好预防,开展精准和绿色化的修复技术研究,促使多技术开展集成创新,完善标准体系以及全过程监管,同时加强科技的支撑,做好人才的培养,建成政府、企业、社会多方参与的治理局面,有力治理农用地土壤重金属污染,不但可以保障粮食安全以及农产品质量,恢复土地应有的生产功能,还可使农田生态系统得以改善、提高碳汇能力,对耕地资源的保护、农业可持续发展和乡村振兴有着重大意义。

参考文献

[1]黄铭,陶艺,张茗.我国农用土壤重金属污染现状及修复技术探讨[J].广东化工,2024,51(17):148-1

49+147.

[2]赵彬,王亮,魏雨泉,等.我国农用地土壤重金属污染防治标准体系现状及展望[J].环境科学研究,2024,37(05):1092-1103.

[3]吕阳,廖育林,范美蓉.农用地土壤重金属污染成因、危害及修复策略[J].农村科学实验,2025,(16):64-66.

[4]方雁雄.农用地土壤重金属污染修复研究[J].皮革制作与环保科技,2023,4(18):135-137.

[5]刘善劼,何秉宇,邹嘉琪.农用地土壤重金属分布特征与污染分析[J].新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2022,39(02):219-228+241.