

电力工程电气隐蔽工程施工质量数字化管控技术研究

廖俊业

441381*****2413

摘要：电力工程作为能源传输与分配的核心载体，其电气隐蔽工程施工质量直接决定电网运行的安全性、可靠性与长期稳定性。传统“人工记录+事后验收”的管控模式，因数据真实性不足、过程追溯困难、风险预警滞后等问题，难以适配电气隐蔽工程“隐蔽性强、不可逆性高、系统影响大”的特性。本文聚焦电力工程电气隐蔽工程施工质量的数字化管控，首先剖析其特性，进而构建数字化管控技术框架，深入解析核心技术的应用逻辑，提出“前期准备-过程实施-后期运维”的落地路径，旨在通过数字化技术实现电气隐蔽工程施工的“全程可视、数据真实、风险预控、责任可溯”，为提升电力工程电气隐蔽工程质量管控效能提供理论支撑与实践参考。

关键词：电力工程；电气隐蔽工程；施工质量；数字化管控；技术框架

DOI：10.69979/3029-2727.25.08.093

引言

电力工程是国家基础设施的“动脉”，承担着能源优化配置与民生供电的关键职能。电气隐蔽工程作为电力系统的“隐形支撑”，涵盖电缆敷设、接地装置安装、母线槽预埋、二次回路接线等环节——这些工程完成后被后续结构覆盖，无法直接观察施工质量，却直接影响电网的长期运行。例如，电缆接头绝缘不良可能引发短路烧毁母线槽，接地电阻超标可能导致雷击设备损坏，其质量缺陷具有“隐蔽积累、突发爆发”的特征，是电气施工质量管控的重中之重。传统管控模式依赖人工巡检与事后验收，存在显著局限，随着电力工程向“精细化、智能化”转型，传统模式已无法满足“零缺陷、可追溯、预控型”的质量要求，亟需引入数字化技术，构建全生命周期的质量管控体系。本文围绕电气隐蔽工程施工质量的数字化管控展开系统研究，旨在破解传统痛点，实现质量管控的智能化升级。

1 电力工程电气隐蔽工程的特性

1.1 电气隐蔽工程的定义与核心类型

电气隐蔽工程是指施工中后续工序覆盖、无法直接观察质量的电气环节，其核心类型可分为四类：其一，电缆线路工程，包括电缆沟/隧道内电缆敷设、直埋电缆埋设，完成后被回填土或混凝土覆盖，关键质量点包括电缆弯曲半径、绝缘层完整性、接头安装工艺；其二，接地与防雷工程，涵盖接地极埋设、接地网焊接、避雷带敷设，质量取决于接地极间距、焊接质量、土壤电阻率；其三，母线槽与二次回路工程，如母线槽预埋、二

次电缆穿管、继电器接线，母线槽连接牢固度、二次回路绝缘电阻直接影响电力传输可靠性；这些隐蔽工程共同构成电力系统的“神经与血管”，质量缺陷的隐蔽性与系统性使其成为管控难点。

1.2 电气隐蔽工程施工质量管控的特殊性

相较于其他电力工程环节，电气隐蔽工程的质量管控具有三大特性：一是不可逆性，覆盖后若需检测或修复，必须拆除上层结构，造成材料、工期浪费，甚至影响电网运行；二是缺陷隐蔽性，部分缺陷在覆盖前难以通过常规检测发现，却在运行中逐渐发展为重大故障；三是影响系统性，隐蔽工程是电力系统的底层支撑，缺陷可能引发连锁反应——例如，电缆接头故障可能导致母线槽烧毁，进而影响整个变电站供电。这种特殊性要求管控必须“前置预防、过程严控、全程追溯”，而非“事后救火”。

2 电气隐蔽工程施工质量数字化管控技术的核心框架

2.1 框架的整体设计思路

框架遵循“需求导向、技术融合、价值赋能”原则：需求导向紧扣“隐蔽性、不可逆性、系统性”管控需求，聚焦“数据真实、过程可视、风险预控、全程追溯”目标；技术融合整合物联网、区块链、数字孪生、人工智能等技术，实现协同增效；价值赋能通过数字化提升管控效能，降低缺陷成本，保障电网安全。核心是将“人、机、料、法、环”要素数字化，构建“物理实体-数字

模型-管控决策”闭环，实现质量管控的智能化。

2.2 框架的层级架构与功能定位

框架分为五大层级，功能明确：（1）感知层（神经末梢）：通过物联网传感器、智能终端采集物理数据——如电缆沟温湿度传感器、接地极 RFID 标签、电缆接头智能仪表，实现“全面感知、精准采集”。（2）网络层（神经网络）：采用 5G、工业互联网、NB-IoT 等技术传输数据，确保低延迟、高可靠——如电缆温度数据通过 NB-IoT 上传，延迟 ≤ 1 秒。（3）数据层（大脑数据库）：采用云存储与本地存储结合，构建结构化与非结构化融合数据库，引入区块链确保数据不可篡改——如电缆敷设数据上链，生成唯一时间戳与哈希值。

（4）应用层（功能载体）：通过数字化平台实现实时监测、过程校验、远程验收、缺陷预警——如平台实时显示电缆温度，超阈值自动报警。（5）决策层（价值输出）：基于大数据与 AI 算法提供智能决策——如机器学习预测电缆接头故障高风险环节，数字孪生模拟接地网运行状态。

2.3 框架的技术集成逻辑

框架通过技术协同实现 1+1>2 效果：（1）物联网+区块链：物联网采集数据，区块链确保真实性——传感器数据实时上链，杜绝篡改。（2）数字孪生+大数据：数字孪生映射物理实体，大数据挖掘运行规律——模拟电缆温度分布，预测负载能力。（3）人工智能+实时监测：AI 分析实时数据，自动识别风险——计算机视觉识别电缆弯曲半径违规，平台报警^[1]。

3 关键数字化管控技术的应用解析

3.1 物联网感知技术：实现质量数据的实时采集

物联网是数字化的基础，通过传感器将物理参数转化为数字信号：（1）环境监测：电缆沟布置温湿度、有害气体传感器，实时预警湿度超标（ $>60\%$ ）或有害气体泄漏，保障电缆绝缘与施工安全。（2）设备监测：电缆表面安装光纤温度传感器，实时监测温度分布，避免局部过热老化；接地极安装接地电阻传感器，实时监控电阻值（ $\leq 4\Omega$ ）。（3）工艺监测：电缆接头制作时，智能压接钳记录压接压力与时间，确保连接牢固；二次回路接线时，回路电阻测试仪采集电阻数据，验证接线质量。物联网实现了数据“实时、精准、全面”采集，为管控提供可靠基础^[2]。

3.2 区块链存证技术：确保质量数据的真实性与可

追溯

区块链利用“不可篡改、可追溯”特性，解决数据造假问题：（1）数据上链流程：每完成一道工序（如电缆敷设、接地极焊接），智能终端自动采集时间、地点、操作人员、工艺参数，生成哈希值上链——如电缆敷设的型号、弯曲半径、绝缘值均上链。（2）不可篡改性：数据存储多个节点，篡改需修改 $>51\%$ 节点，成本极高，确保数据真实。（3）可追溯性：通过哈希值可追溯数据来源——如电缆故障时，可查询敷设时间、施工人员、绝缘测试值，定位责任。区块链让数据“不可伪造、全程留痕”。

3.3 数字孪生技术：实现质量管控的虚拟映射与预判

数字孪生构建物理实体的虚拟模型，实现“提前预判、动态优化”：（1）模型构建：基于设计图纸与施工参数，构建电缆线路、接地网的高精度虚拟模型——包括电缆走向、弯曲半径、接地极间距。（2）实时同步：物联网数据实时同步至模型——如电缆温度、接地电阻的变化在模型中实时反映。（3）预判优化：模拟电缆负载下的温度分布，预测载流量；分析接地网土壤电阻率变化，预测接地电阻增长趋势，提前降阻。数字孪生让管控从“事后处理”转向“事前预防”^[2]。

3.4 人工智能分析技术：实现质量风险的主动防控

AI 通过算法实现风险自动识别与预警：（1）机器学习预测：基于历史缺陷数据训练模型，识别高风险因素——如湿度 $>80\%$ +压接压力不足时，绝缘故障概率增 3 倍，重点监控。（2）计算机视觉识别：摄像头采集施工视频，AI 识别违规操作——如电缆弯曲半径不足、接地极虚焊，平台自动报警。（3）自然语言处理：分析监理日志、施工记录的文本数据，提取关键质量信息——如“电缆绝缘值偏低”自动关联施工环节，提醒关注。AI 让风险“主动识别、精准定位”。

4 数字化管控技术的实施路径

4.1 前期准备阶段：顶层设计与资源筹备

前期准备是基础，重点是“需求梳理、架构搭建、人员培训”：（1）需求梳理：组织各方梳理施工流程、关键节点、数据需求——如电缆敷设的关键节点包括型号检查、弯曲半径、绝缘测试，需采集对应数据。（2）架构搭建：根据需求选择物联网传感器、网络技术、数据存储方案、管控平台——如选用光纤温度传感器、5G

网络、阿里云存储、自主研发管控平台。(3) 人员培训: 针对施工、监理、管理人员开展工具使用培训——如施工人员学安装传感器、采集数据; 监理学平台验收; 管理学数据分析^[3]。

4.2 过程实施阶段: 实时管控与闭环管理

过程实施是核心, 重点是“数据采集、实时监控、验收闭环”:(1) 数据采集: 按设计要求采集关键数据——如电缆每敷设 100 米采集弯曲半径, 接地极每根采集埋设深度、焊接质量。(2) 实时监控: 平台实时显示数据, 异常自动预警——如电缆温度 75℃, 推送消息至施工、监理, 整改后上传照片解除预警。(3) 验收闭环: 隐蔽前施工单位提交数据, 监理平台审核, 通过后远程签署验收意见, 生成电子记录同步至各方。未通过则整改重新提交, 确保“零缺陷覆盖”。

4.3 后期运维阶段: 数据移交与价值挖掘

后期运维是延伸, 重点是“数据移交、状态监测、故障预判”:(1) 数据移交: 竣工后将施工数据整理为标准格式移交运维——如电缆敷设参数、接地极数据, 作为设备状态监测的基础。(2) 状态监测: 运维通过平台实时查看设备状态——如数字孪生模型显示电缆温度、接地电阻, 异常及时检修。(3) 故障预判: AI 分析运行数据, 预判故障——如电缆温度趋势预测寿命, 提前更换; 接地电阻增长趋势提前降阻。运维阶段实现“施工数据”向“运维资产”的转化^[4]。

5 数字化管控技术的实施保障体系

5.1 制度保障: 规范流程与明确责任

制度是基础, 重点是“流程规范、数据标准、责任制度”:(1) 流程规范: 制定《电气隐蔽工程数字化管控流程》, 明确各环节操作——如电缆敷设的“准备→传感安装→数据采集→监控→验收→上传→归档”, 责任主体、时间、标准清晰。(2) 数据标准: 制定《数字化数据标准》, 统一格式、内容、编码——如电缆型号编码、弯曲半径单位, 确保数据兼容。(3) 责任制度: 明确各方责任——建设单位管平台, 施工单位采数据, 监理单位审数据, 设计单位供数据。数据问题追责对应单位。

5.2 技术保障: 确保系统的稳定与兼容

技术是关键, 重点是“选成熟供应商、保系统稳定、

应技术风险”:(1) 供应商选择: 选有电力数字化经验的供应商, 熟悉电力标准, 提供适配方案。(2) 系统稳定: 采用冗余架构、备份策略——平台双机热备, 数据库异地备份, 网络多链路冗余, 避免故障。(3) 风险应对: 定期安全检测与升级——检测漏洞打补丁, 随技术发展升级平台功能^[4]。

5.3 人员保障: 培育复合型人才与提升技能

人员是核心, 重点是“引复合人才、提现有技能、建激励机制”:(1) 引入复合人才: 招聘懂电力与数字化的工程师, 负责系统运维与优化。(2) 提技能: 针对性培训——施工人员学数据采集, 监理学平台验收, 管理学数据分析。(3) 激励机制: 对数据准确、提改进建议的员工奖励, 提有效建议奖晋升。

5.4 文化保障: 营造数字化管理氛围

文化是软环境, 重点是“育数字化文化、强沟通协作、树标杆示范”:(1) 育文化: 内部宣传数字化重要性——如宣传减少缺陷、降低成本, 让员工从“要用”变“想用”。(2) 强协作: 建立跨部门例会——每月召开建设、施工、监理、供应商会议, 解决问题。(3) 树标杆: 选标杆项目推广经验

6 结论

电力工程电气隐蔽工程施工质量关乎电网安全, 传统管控模式已无法适配需求。本文构建了数字化管控框架, 解析了四大核心技术应用, 提出了“三阶段”实施路径与“四方面”保障体系。

未来, 随着 5G、AI、数字孪生技术发展, 管控将向“更智能、更精准、更协同”升级, 为电力工程高质量发展提供更强支撑。

参考文献

- [1] 王晓波, 范永学, 韩东兴, 等. 数字孪生技术在输变电工程中的应用分析与研究[J]. 浙江电力, 2023, 42(6): 105-111.
- [2] 傅遥, 韦婉, 廖得富. 输变电工程施工质量数字化监管体系研究[J]. 中国科技投资, 2023(34): 22-23.
- [3] 司海青, 冯杰婷, 何思宇, 等. 输变电工程数字化移交发展现状[J]. 电力勘测设计, 2023(8): 18-24.
- [4] 何旭章. 数字孪生技术在输变电工程中的设计与应用[J]. 光源与照明, 2024(10): 240-242.