

水利工程数字孪生平台的构建与关键技术

戴一平

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司，天津，300250；

摘要：本文聚焦水利工程数字孪生平台，阐述其在水利工程领域的重要意义与应用价值。详细探讨了该平台构建涉及的四个关键方面，包括数据采集与整合、模型构建与仿真、平台架构搭建以及平台应用与交互。深入分析各方面所运用的关键技术，揭示其如何助力实现水利工程的实时监测、精准模拟、科学决策以及高效管理，旨在为水利工程数字化转型提供理论与实践参考，推动水利行业高质量发展。

关键词：水利工程；数字孪生平台；关键技术；数据采集；模型构建

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.021

引言

水利工程作为关乎国计民生的重要基础设施，其建设、运行与管理的科学性和高效性一直备受关注。随着信息技术的飞速发展，数字孪生技术为水利工程的精细化管理和智能化决策带来了新的契机。水利工程数字孪生平台通过对物理实体的数字化映射，能够实时反映水利工程的状态、行为以及性能等信息，实现对水利工程全生命周期的精准管控。然而，构建这样一个复杂且功能强大的平台需要攻克诸多关键技术难题，深入研究这些技术对于推动水利工程数字化转型具有重要意义。

1 数据采集与整合——构建数字孪生平台的基石

1.1 多源异构数据采集技术

水利工程涉及的数据来源广泛，类型多样，包括传感器实时监测数据（如水位、流量、应力应变等）、地理信息数据（地形地貌、水系分布等）、工程设计文档数据以及历史运行记录数据等。针对这些多源异构数据，需要运用多种采集技术。例如，在传感器数据采集方面，要根据不同监测对象和精度要求，合理部署如光纤光栅传感器、超声波传感器、雷达水位计等各类传感器，并通过有线或无线通信方式将数据传输至数据采集终端。对于地理信息数据，可借助卫星遥感、无人机测绘等技术获取高精度的地形地貌图像，再通过地理信息系统（GIS）软件进行数据提取与处理。同时，利用光学字符识别（OCR）技术将纸质工程设计文档数字化，方便后续的数据整合与应用。

1.2 数据清洗与预处理

采集到的原始数据往往存在噪声、缺失值、重复值以及数据格式不一致等问题，需要进行数据清洗与预处理，以提高数据质量。通过数据清洗算法，识别并去除重复、错误的数据记录，对于缺失值采用合适的填充方法，如均值填充、插值法等进行补充。在数据格式统一方面，依据预先设定的数据标准规范，将不同来源的数据转化为统一格式，便于后续的存储与分析。例如，将各类传感器采集的时间序列数据统一为时间戳、监测值、监测点编号等标准格式，确保数据的一致性和规范性。

理，以提高数据质量。通过数据清洗算法，识别并去除重复、错误的数据记录，对于缺失值采用合适的填充方法，如均值填充、插值法等进行补充。在数据格式统一方面，依据预先设定的数据标准规范，将不同来源的数据转化为统一格式，便于后续的存储与分析。例如，将各类传感器采集的时间序列数据统一为时间戳、监测值、监测点编号等标准格式，确保数据的一致性和规范性。

1.3 数据整合与存储技术

经过清洗和预处理的数据需要进行有效的整合与存储，以便在数字孪生平台中实现共享和调用。采用数据仓库技术，将分散在不同数据源的数据按照主题进行分类整合，构建面向水利工程不同业务应用的数据集市。例如，针对水库调度业务，整合水位、入库流量、出库流量等相关数据形成水库调度数据集市。同时，选择合适的数据库管理系统进行数据存储，对于实时性要求高、读写频繁的数据，可采用关系型数据库（如MySQL、Oracle等）；对于海量的非结构化数据（如卫星遥感图像、视频监控数据等），则适合选用分布式文件系统（如Hadoop Distributed File System, HDFS）或对象存储（如Amazon S3）等进行存储，保障数据的高效管理与快速访问。

2 模型构建与仿真——数字孪生平台的核心支撑

2.1 水利工程物理模型构建

水利工程物理模型是对实际工程结构和水流运动等物理过程的数学抽象与描述。以大坝为例，通过建立结构力学模型，分析大坝在不同荷载（自重、水压力、地震力等）作用下的应力应变分布情况，为大坝的安全评估提供依据。在水流模拟方面，运用水动力学模型（如

纳维-斯托克斯方程），结合计算流体力学（CFD）方法，对水库、河道等水域的水流速度、水位变化、水流紊动等特性进行精确模拟，辅助水利工程的规划、设计与运行调度。这些物理模型的构建需要深入了解水利工程的基本原理、结构特点以及水力学特性，并结合实际工程参数进行合理的假设与简化，确保模型既能反映实际物理过程，又具有可计算性和实用性。

2.2 数据驱动模型建立

除了基于物理原理的模型，利用数据驱动的建模方法也是数字孪生平台的重要组成部分。通过收集大量的历史监测数据和实际运行数据，采用机器学习、深度学习等人工智能技术构建数据驱动模型。例如，利用神经网络模型对水库水位变化进行预测，通过对历史水位、降雨量、入库流量等多因素数据的学习训练，使模型能够准确捕捉数据之间的非线性关系，进而实现对未来水位变化的高精度预测。数据驱动模型可以有效弥补物理模型在某些复杂工况下的局限性，提高数字孪生平台对水利工程实际运行情况的预测能力和适应性。

2.3 模型融合与协同仿真

在实际应用中，单一的物理模型或数据驱动模型往往难以全面准确地描述水利工程的复杂行为。因此，需要将不同类型的模型进行融合，并开展协同仿真。例如，在洪水演进模拟中，将基于水动力学的物理模型与基于机器学习的数据驱动模型相结合，物理模型用于精确模拟洪水在河道中的流动过程，数据驱动模型则用于实时修正物理模型中的一些不确定参数（如糙率系数等），通过两者的协同作用，提高洪水演进模拟的准确性和时效性。同时，利用协同仿真平台，实现多个模型之间的数据交互和同步计算，为水利工程的多场景分析、风险评估以及优化决策提供有力支持。

3 平台架构搭建——数字孪生平台的系统框架

3.1 感知层设计

感知层作为数字孪生平台与物理水利工程连接的关键桥梁，有着不可替代的作用。它旨在精准且实时地感知与采集工程现场的各类数据，为此，合理布局传感器网络至关重要。在大型水利枢纽工程里，不仅要在大坝、水闸这些主体建筑物上精心安装结构安全监测传感器，时刻掌握其结构的受力、变形等情况，还得在库区、河道等周边区域广泛设置环境监测传感器，像气象传感器可捕捉温度、风速、降水等气象要素，水质传感器能检测水体酸碱度、含氧量等指标，全方位延伸感知触角。

同时，运用物联网技术，让传感器采集的数据经由网关设备接入网络，完成数据汇聚与传输。网关设备如同“交通枢纽”，保障数据有序、稳定地流向上层平台，使得感知层始终能高效地为平台提供实时、可靠的数据支持，为后续水利工程的精准管控筑牢基础。

3.2 数据层架构

数据层在数字孪生平台中处于核心地位，关乎海量数据的存储、管理与处理。构建其架构时，鉴于数据多样性、实时性和安全性等多方面要求，分层的数据架构模式是理想之选。原始数据层犹如数据的“收纳库”，负责收集存储感知层传来的各类原始数据，原汁原味地保留最基础的信息。接着，数据仓库层发挥关键作用，对原始数据展开清洗，去除错误、重复的部分，进行整合、分类，按主题梳理，进而构建起可供分析和应用的数据集市，让数据变得条理清晰、易于调用。而数据应用层则依据不同业务需求，提供诸如数据查询、深入分析以及可视化展示等服务，方便使用者获取信息。此外，为保障数据的完整性、保密性和可用性，数据层严格建立数据安全管理机制，运用数据加密让数据传输和存储更安全，访问控制防止非法访问，备份恢复则应对可能的数据丢失情况，全方位守护数据安全。

3.3 平台服务层功能实现

平台服务层是数字孪生平台的核心业务逻辑层，为用户提供各类功能服务。例如，提供数据可视化服务，通过图形化界面（如二维图表、三维模型等）直观展示水利工程的实时运行状态、监测数据变化趋势等，方便管理人员快速了解工程情况；提供分析决策服务，利用数据分析模型和算法，对水利工程的运行调度、安全评估、风险预警等业务进行分析，生成相应的决策建议供用户参考；提供模拟仿真服务，支持用户根据不同的工程方案和工况条件，开展水利工程物理模型和数据驱动模型的仿真计算，辅助工程规划、设计和优化。通过这些功能服务的实现，平台服务层将数据层的数据转化为有价值的信息和知识，为水利工程的科学管理和高效决策提供有力支撑。

4 平台应用与交互——数字孪生平台的价值体现

4.1 水利工程实时监测与状态评估

水利工程数字孪生平台在实时监测与状态评估方面发挥着至关重要的作用。它凭借先进的数据采集与整合技术，全面且持续地收集水利工程各环节的数据，涵

盖大坝的位移、渗流情况，水库的水位、库容变动，以及河道水流的流量、流速等关键参数。这些数据并非静态呈现，而是实时动态展示在平台上，管理人员能随时掌握工程的实时状态。一旦所监测的数据超出预设的正常范围，系统会依据精准的预警机制，迅速发出预警信息，确保相关人员能第一时间知晓异常情况。

不仅如此，平台还依托精心构建的物理模型和数据驱动模型展开深度分析。物理模型依据水利工程的力学原理、水动力学特性等科学理论，对工程结构受力、水流运动等进行模拟还原；数据驱动模型则借助海量历史数据挖掘规律。通过二者结合，全方位综合评估工程整体状态，精准判断是否处于安全运行状态，仔细排查潜在风险因素，进而给出贴合实际的维护建议与针对性措施，真正达成对水利工程的预防性维护，让精细化管理得以落地，保障水利工程长期稳定运行。

4.2 水利工程运行优化与调度决策

在水利工程运行优化与调度决策这一关键领域，数字孪生平台的模拟仿真功能展现出强大的优势。它能够针对各式各样的水利工程运行方案进行细致入微的模拟分析，提前预测各方案实施后可能产生的实际效果。

以水库调度为例，这是一个涉及多方面考量的复杂工作。借助数字孪生平台，可分别设定不同的泄洪流量、发电计划等多样化的调度方案。然后充分利用平台内置的水动力学模型，精准模拟水库中水流的复杂运动、水位的相应变化情况；同时运用数据分析模型，对发电量、下游防洪影响等诸多重要指标进行准确计算。通过这样全面且深入的模拟运算后，将各个方案所对应的各项指标进行横向对比分析，清晰地呈现出各方案的优势与劣势，进而从中挑选出最优的运行调度方案。如此一来，便能够实现水资源的科学合理分配与利用，让防洪、发电、灌溉等多个目标达到协同优化的良好状态，最大化地提升水利工程的综合效益，使其在经济、社会和生态等多方面都能发挥出最佳效能。

4.3 多部门协同与公众参与互动

水利工程的建设与运行关联着众多管理部门，并且与社会公众的利益息息相关，而数字孪生平台恰恰为各部门之间的协同合作搭建起了极为关键的统一信息共享和交互平台。如水利部门关注工程的水资源调配、防洪安全等方面；环保部门侧重于工程对周边水环境的影响；交通部门则会留意水利工程是否会对航道通行等产生影响。不同部门（如水利、环保、交通等）借助这一

平台，都能够实时获取水利工程全方位的相关数据，打破以往信息壁垒造成的沟通阻碍。基于这些共享数据，各部门可以开展联合分析，共同探讨并制定出更加科学合理的决策，显著提高跨部门协作的效率和科学性，避免各自为政导致的决策片面性。

同时，数字孪生平台还具备开放性的特点，它可以有选择地向社会公众开放部分数据以及可视化展示界面。公众通过这些渠道，能够直观地了解水利工程建设进程、运行状况等情况，从而增强公众对水利工程的认知与关注度。这种公众参与度的提升，有助于促进水利工程建设与社会发展相互协调、共同进步，营造良好的社会氛围，让水利工程更好地服务于大众，融入社会发展的整体格局之中。

5 结语

水利工程数字孪生平台的构建是一个复杂的系统工程，涉及数据采集与整合、模型构建与仿真、平台架构搭建以及平台应用与交互等多个关键环节，每个环节都需要运用相应的关键技术来保障平台的功能实现和性能优化。通过构建和应用数字孪生平台，能够显著提升水利工程的管理水平、运行效率和决策科学性，为水利行业的数字化转型和可持续发展注入强大动力。随着信息技术的不断发展和创新，水利工程数字孪生平台也将不断完善和拓展其功能，在未来的水利工程建设与管理中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 林运东, 张龙, 刘勇. 数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J]. 黑龙江水利科技, 2025, 53(03): 168-170.
- [2] 郎启庄, 郎启香, 高宽. 数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径探索[J]. 水利建设与管理, 2025, 45(01): 68-73.
- [3] 蒋乐龙, 吉斯琴图雅. 数字孪生技术在水利工程总承包项目管理应用探索[J]. 水利水电工程设计, 2022, 41(04): 30-34+56.
- [4] 申振, 姜爽, 聂麟童. 数字孪生技术在水利工程运行管理中的分析与探索[J]. 东北水利水电, 2022, 40(08): 62-65.
- [5] 张绿原, 胡露露, 沈启航, 谈震, 牛霄飞. 水利工程数字孪生技术研究与探索[J]. 中国农村水利水电, 2021, (11): 58-62.