

人工智能驱动水利施工进度管理优化

姚晓雯

华北水利水电工程集团有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8419

[摘要] 随着人工智能技术的迅猛发展，其在工程管理领域的应用为水利施工进度管理带来了革命性变革。本文聚焦人工智能赋能水利工程施工管理的机遇与挑战，首先梳理近年来人工智能技术的新突破，随后系统分析其在施工安全管理、质量控制、进度管理、成本管理等方面的具体应用，结合实际案例阐述技术实践效果，最后探讨人工智能在水利工程施工中的未来发展方向，为推动水利工程施工管理智能化升级提供参考。

[关键词] 人工智能；水利工程；施工管理；进度优化；智能技术

Artificial intelligence driven optimization of water conservancy construction progress management

Yao Xiaowen

North China Water Resources and Hydropower Engineering Group Co., Ltd.

[Abstract] With the rapid development of artificial intelligence technology, its application in the field of engineering management has brought revolutionary changes to the management of water conservancy construction progress. This article focuses on the opportunities and challenges of empowering water conservancy engineering construction management with artificial intelligence. Firstly, it summarizes the new breakthroughs in artificial intelligence technology in recent years. Then, it systematically analyzes its specific applications in construction safety management, quality control, schedule management, cost management, and other aspects. Combined with actual cases, it elaborates on the practical effects of technology. Finally, it explores the future development direction of artificial intelligence in water conservancy engineering construction, providing reference for promoting the intelligent upgrading of water conservancy engineering construction management.

[Key words] artificial intelligence; Water conservancy engineering; Construction management; Progress optimization; Smart Technology

一、引言

水利工程作为国家基础设施建设的核心组成部分，具有施工周期长、环境复杂、技术难度大等特点，传统施工管理模式常面临进度滞后、资源浪费、风险预警不足等问题。据水利部数据显示，2023 年全国在建水利工程中，约 35% 存在不同程度的进度延误，主要原因包括施工方案不合理、风险响应滞后、资源调配低效等。

人工智能技术的崛起为解决上述问题提供了全新思路。以机器学习、计算机视觉、物联网为代表的智能技术，能够实现施工过程的实时感知、精准分析与动态优化，显著提升管理效率。本文立足水利工程施工管理实际需求，深入探讨人工智能技术的应用路径，通过分析典型案例验证技术有效性，为推动

水利施工管理智能化转型提供理论与实践支撑。

二、近年来人工智能技术的新突破

2.1 深度学习算法优化

深度学习模型在特征提取与预测精度上实现突破，Transformer 架构与图神经网络（GNN）的融合应用，使复杂工程场景的数据分析效率提升 3 倍。例如，基于时空注意力机制的 LSTM 模型，在施工进度预测中对非线性工期影响因素（如天气突变、材料短缺）的捕捉准确率达 92%，较传统神经网络提高 20%；混合注意力模型，在 100 个水利工程样本训练后，对混凝土浇筑工序的工期预测误差缩小至 2.3 天，远低于行业平均 8 天的水平。

2.2 计算机视觉技术成熟

高分辨率图像识别与实时视频分析技术取得进展，基于 YOLOv8 的目标检测算法可在复杂施工环境中实现 98% 的人员、设备识别率，处理速度达 60 帧 / 秒，满足实时监测需求。三维点云重建技术结合激光扫描，能精准生成施工区域三维模型，误差控制在 $\pm 5\text{cm}$ 以内。在堤坝工程中，通过无人机采集的点云数据构建的模型，可成功识别出坝体表面细微裂缝（长度 $<30\text{cm}$ ），为及时修复提供了精准坐标。

2.3 数字孪生与物联网融合

数字孪生技术实现物理实体与虚拟模型的实时映射，通过物联网传感器（布设密度达 1 个 / 100m^2 ）采集温度、应力、进度等数据，构建动态更新的工程数字镜像。大型水利枢纽应用该技术后，施工状态可视化程度提升 70%，决策响应时间缩短至 2 小时以内。其数字孪生平台可模拟不同施工方案对工期的影响，在导流洞施工方案比选中，通过模拟优化减少了 3 次方案调整，节省工期 20 天。

三、人工智能在水利施工进度管理中的优化策略

3.1 进度管理优化

3.1.1 进度计划智能优化

基于遗传算法的进度排程模型，可自动平衡资源约束与工序逻辑，生成最优横道图。模型设置资源均衡系数、工期最短等多目标函数，通过 1000 次迭代计算得出最优方案。例如，泵站工程中，该模型可缩短关键线路工期，提高混凝土罐车的日均利用率，资源闲置率降低约 25%。

3.1.2 进度偏差动态预警

通过物联网采集实际进度数据，与计划进度对比分析，LSTM 模型预测未来 14 天进度偏差，准确率达 88%。系统设置黄色（偏差 5%-10%）、橙色（10%-20%）、红色（ $>20\%$ ）三级预警，红色预警时自动推送赶工建议。例如，在河道整治工程中应用后，进度延误预警提前量可从 3 天延长至 7 天，为调整施工方案争取充足时间，最大限度减少总工期延误。

3.1.3 工序衔接智能协调

利用知识图谱构建工序依赖关系库，包含“坝体填筑 - 防渗墙施工”“基础处理 - 上部结构”等 200 余对关键依赖关系，当某工序延误时，系统自动推演影响范围并生成补救方案。例如，在水利枢纽工程中，坝体浇筑若因暴雨延误，系统可在 10 分钟内提出调整灌浆工序的优化建议，通过增加夜间作业班次、调整资源分配，最终减少工期损失。

3.2 质量控制优化

施工质量控制是进度管理的重要保障，通过人工智能实现减少返工延误、提高施工效率、降低风险与成本，确保项目的顺利实施。

3.2.1 混凝土质量智能检测

利用超声波检测仪与深度学习模型结合，自动识别混凝土

内部裂缝与密实度缺陷。系统通过分析声波传播速度与反射信号，生成内部质量热力图，对深度 $\geq 5\text{mm}$ 裂缝的检出率达 99%，较传统回弹法提高 30%，检测效率提升 5 倍。例如，在堤坝工程中，该技术可在 7 天内完成 1.2 万 m^2 坝体检测，通过及时发现因振捣不足导致的蜂窝结构并返工处理，确保坝体防渗性能。

3.2.2 钢筋绑扎质量视觉检查

通过 BIM 模型与现场图像比对，计算机视觉系统自动校验钢筋间距、数量、保护层厚度。系统采用双目视觉技术还原三维尺寸，精度达 $\pm 2\text{mm}$ ，可识别漏绑、间距超标等 8 类问题。例如，在渡槽工程中应用后，钢筋施工质量合格率可提高约 10 个百分点，降低返工成本，同时缩短单元验收时间。

3.2.3 土方压实度实时监测

结合北斗定位与振动压路机传感器数据，采用神经网络算法推算压实度，生成压实质量热力图。系统可实时显示未达标区域，指导压路机精准补压。灌区工程应用该技术，土方压实达标率可提升约 15%，减少超压现象导致的资源浪费，同时缩短每公里渠道的土方施工时间。

3.3 成本管理优化

施工成本管理与进度管理相互依存、相互影响。通过智能化的成本管理，可以为进度管理提供经济支持、资源保障和决策依据，确保项目在规定的时间内高质量、低成本地完成。

3.3.1 成本动态预测模型

融合材料价格波动、人工效率、设备租赁等数据，XGBoost 算法实时更新成本曲线。模型纳入近 5 年的材料价格指数与气象数据，可预测不同施工阶段的成本趋势。例如，在灌溉工程中应用后，成本估算误差可控制在 3% 以内，较定额法降低约 8 个百分点，通过在钢筋价格突涨前提前储备降低成本。

3.3.2 材料消耗异常监测

通过 RFID 追踪材料出入库，异常检测算法识别超耗与浪费现象。系统设置材料消耗定额基线，当某工序消耗超出基线 10% 时自动预警。例如，渠道工程中，该系统若发现混凝土超耗，可追溯至配合比失误（砂率超标）等问题，通过及时调整挽回损失，同时避免因强度不足导致的返工。

3.3.3 劳务成本智能核算

基于人脸识别的考勤系统与工程量统计结合，自动计算各班组计件工资。系统对接 BIM 模型的工程量清单，按实际完成的混凝土方量、钢筋吨位等核算薪酬。水利工程应用后，可缩短劳务核算时间，降低数据误差率，及时发现虚报工程量的情况挽回损失。

3.4 安全管理优化

施工安全管理是进度管理的重要支撑，通过人工智能实现预防事故、提高效率、保障资源、维护信誉和合规运营，为项

目按时交付提供有力保障。

3.4.1 危险行为智能识别

在施工现场部署高清摄像头与边缘计算设备，采用 YOLOv8 算法实时识别未佩戴安全防护装备、违规操作等行为。系统可自动标记危险区域闯入、高空作业未系安全带等 12 类风险行为，并通过声光报警与手机 APP 推送预警信息。水库除险加固工程应用该系统后，较人工巡查可增加日均识别危险行为数量，提升安全隐患整改率，降低发生安全事故风险。

3.4.2 地质灾害预警系统

基于机器学习的滑坡、管涌预警模型，融合降雨量、土壤含水率、位移监测数据（采样频率 10 分钟 / 次），通过随机森林算法生成风险等级。系统设置三级预警阈值，当风险达二级时自动启动边坡加固设备，达一级时触发人员撤离程序。三峡库区某标段应用后，成功提前 48 小时预警 3 次小规模滑坡，通过提前转移设备与人员，避免经济损失超 500 万元，未造成人员伤亡。

3.4.3 设备运行状态监测

在启闭机、起重机等特种设备安装振动、温度传感器，采用异常检测算法识别潜在故障。系统构建设备正常运行的参数基线，当监测值偏离基线 15% 以上时自动预警。例如，水闸工程的监测系统对电机轴承温度异常的识别准确率达 95%，可提前预警重大设备故障，通过计划性维修减少停机时间，避免因设备突发故障导致的工期延误。

四、展望

4.1 技术融合深化

未来将实现人工智能与区块链、元宇宙技术的融合，区块链保障施工数据不可篡改，元宇宙构建沉浸式协同管理平台，预计到 2027 年，50% 以上的大型水利工程将采用“AI + 元宇宙”管理模式。例如，元宇宙平台可实现异地专家对施工难题的虚拟会诊，区块链存证的检测数据可直接作为验收依据，大幅提高管理效率。

4.2 自主决策能力提升

通过强化学习算法的持续训练，系统将具备自主制定施工策略的能力，减少人工干预。例如，智能调度系统可根据实时天气自动调整混凝土浇筑计划，决策响应时间从小时级降至分钟级。预计到 2030 年，水利工程关键工序的自主决策率将达到 60%，管理人员可将精力集中于战略层面的把控。

4.3 行业标准体系完善

需建立人工智能在水利施工中应用的技术标准，规范数据采集、模型训练、结果应用等环节。目前，水利部已启动《水利工程人工智能应用导则》的编制工作，预计 3 年内出台，将明确智能监测设备的布设规范、数据共享接口标准等内容，

推动技术应用标准化、规范化。

4.4 人才培养加速

高校与企业需构建深度产教融合机制，联合培养“水利工程 + 人工智能”复合型人才。在课程体系建设方面，建议在水利类专业核心课程框架中，增设《工程 AI 应用与算法设计》《智能监测技术与数据处理》《水利工程 BIM+AI 协同管理》等理论与实践结合的创新课程，系统教授机器学习在施工进度预测、智能传感器网络部署、无人机巡检数据解析等领域的应用方法。

企业端应建立常态化 AI 技能培训体系，每年组织 AI 技能培训，培训内容涵盖 Python 编程基础、水利工程大数据分析工具应用、施工场景 AI 模型搭建等实操模块。同时，双方可共建产学研实训基地，通过模拟水利枢纽工程全生命周期管理、河道治理智能施工等真实项目，开展实战化教学与技能演练。

五、结论

人工智能技术为水利工程施工管理带来了全方位革新，在安全监测、质量控制、进度优化、成本管理等领域的应用成效显著，不仅提升了管理效率，更降低了工程风险。从混凝土质量智能检测到进度偏差动态预警，从危险行为识别到成本动态预测，智能技术正在重塑水利施工管理模式。然而，技术应用仍面临数据孤岛、模型泛化能力不足、行业标准缺失等挑战。例如，不同项目的管理系统数据格式不统一，导致模型训练样本不足；部分山区工程因网络信号弱，物联网设备数据传输不稳定。未来需通过技术融合、标准制定、人才培养等措施，推动人工智能与水利工程深度融合，最终实现施工管理的全面智能化，为水利事业高质量发展提供有力支撑。

[参考文献]

- [1]周建春，李娜。数字孪生驱动的水利工程施工进度智能管控[J]. 水利学报，2022（05）：543-552.
- [2]王广斌，张洋。人工智能在工程管理中的应用研究综述[J]. 同济大学学报（自然科学版），2021（08）：1189-1198.
- [3]刘昌明，王红瑞。智慧水利的内涵与发展路径[J]. 水利水电技术，2022（03）：1-9.
- [4]张新天，李君。基于深度学习的水利工程施工质量缺陷识别方法[J]. 中国农村水利水电，2021（06）：145-149.
- [5]陈永灿，王富强。水利工程智能建造技术发展展望[J]. 水利学报，2020（10）：1173-1181.
- [6]何勇，聂相田。基于物联网的水利工程施工安全监测系统[J]. 人民黄河，2022（02）：135-139.
- [7]李锦华，刘全。人工智能在水利工程成本控制中的应用研究[J]. 中国水利，2021（11）：45-48.