

人工智能在建筑工程进度预测与风险预警中的应用探索

钟广州

湖北讯翔建设工程有限公司 湖北 恩施 445600

摘要: 人工智能 (AI) 技术凭借其强大的数据处理能力、模式识别能力和预测建模能力, 正逐步渗透到建筑工程管理的各个环节。本文聚焦于人工智能在建筑工程进度预测与风险预警中的应用, 系统梳理了当前主流AI技术 (如机器学习、深度学习、自然语言处理、计算机视觉等) 在该领域的研究进展, 深入分析了AI模型在进度预测精度提升、风险因素识别、动态预警机制构建等方面的优势与挑战。同时, 结合BIM (建筑信息模型)、物联网 (IoT)、大数据等新兴技术, 探讨了多源异构数据融合下的智能进度管理系统架构。最后, 本文提出了未来研究方向与实施建议, 旨在为推动建筑工程智能化管理提供理论支撑与实践路径。

关键词: 人工智能; 建筑工程; 进度预测; 风险预警; 机器学习; BIM; 智能建造

引言

进度管理是项目成功的关键指标之一, 直接关系到成本控制、资源调配与合同履约。然而, 传统进度管理多依赖人工经验判断和静态计划工具 (如甘特图、关键路径法CPM), 缺乏对动态变化的实时响应能力, 难以有效应对施工过程中频繁出现的扰动因素 (如天气突变、材料短缺、劳动力波动、设计变更等), 导致“计划赶不上变化”成为常态。近年来, 随着第四次工业革命的推进, 以人工智能为代表的新一代信息技术正深刻重塑工程建设行业。AI技术能够从海量历史数据和实时感知信息中挖掘潜在规律, 构建高维非线性预测模型, 实现对工程进度的动态推演与风险的早期识别。特别是在国家大力推进“智能建造”与“新型建筑工业化”的政策背景下, 将AI融入进度管理已成为提升工程治理能力现代化水平的重要突破口。

1 建筑工程进度管理的挑战与AI介入的必要性

传统进度管理依赖项目管理软件, 核心方法有关键路径法等, 但存在明显局限。计划制定后趋于静态, 难随现场变化灵活调整, 与实际脱节; 活动持续时间靠专家主观估算, 缺乏量化支撑易偏差; 忽略不确定性因素, 无法概率化建模风险, 难支持前瞻决策; 进度数据与其他业务系统割裂, 限制跨维度协同优化。建筑工程进度受多重因素影响, 复杂且不确定。外部环境如极端天气、政策调整等, 可能致供应链中断或施工暂停; 内部管理因素如劳动力效率波动、设备故障等, 影响工序节奏; 技术层面设计变更、工艺复杂等引发协调冲突; 人为因素如沟通不畅、决策滞后等, 放大扰动效应。这些因素相互耦合、动态演化, 传统线性模型难刻画其影响^[1]。面对这些复杂性, AI优势显著。机器学习与深度学习等具

备强大数据驱动建模能力, 能从历史数据中自动学习进度规律, 非线性建模捕捉多变量复杂关系, 反映现场动态本质。结合物联网实时数据, 可在线更新与滚动预测进度状态, 提升响应速度。还能量化评估风险, 构建预警机制, 提前干预。AI推动进度管理从“被动响应”向“主动预见”转变。

2 人工智能在进度预测中的关键技术与方法

2.1 数据基础: 多源异构数据的整合

人工智能模型的性能高度依赖于高质量、多维度的数据输入。在建筑工程领域, 可用于进度预测的数据来源广泛且类型多样。结构化数据包括BIM模型中蕴含的构件属性、施工工作分解结构 (WBS)、资源分配表以及历史项目的工期记录; 半结构化数据涵盖施工日志、监理周报、会议纪要等文本信息; 非结构化数据则来自现场监控视频、无人机航拍图像、工人可穿戴设备采集的行为与生理信号; 此外, 外部环境数据如气象预报、区域交通状况乃至宏观经济指标, 也可能间接影响施工效率。要充分发挥AI潜力, 必须对这些多源异构数据进行清洗、对齐、特征提取与融合。近年来, 知识图谱与嵌入表示技术被用于构建统一的语义空间, 将不同模态的数据映射到可计算的向量形式, 为后续建模奠定坚实基础。

2.2 主流AI模型及其应用

在进度预测任务中, 研究者根据问题特性选择不同的AI模型。早期研究多采用传统机器学习方法, 如支持向量机 (SVM) 适用于小样本高维场景下的单工序持续时间预测; 随机森林 (RF) 通过集成多棵决策树提升泛化能力, 能有效处理缺失值并识别关键延误因素; 梯度提升树 (如XGBoost、LightGBM) 因在结构化数据回归任务中表现优异, 已被广泛应用于大型基础设施项目

的整体工期预测。随着深度学习的发展,循环神经网络(RNN)及其变体LSTM和GRU因其对时间序列数据的天然适配性,成为建模工序间时序依赖关系的主流选择。例如,利用每日完成工程量序列训练LSTM模型,可有效预测剩余工期趋势。对于具有复杂逻辑约束的施工网络,图神经网络(GNN)提供了一种新颖视角——将施工任务抽象为图节点,逻辑关系作为边,通过消息传递机制学习全局进度状态,特别适合处理多专业协同场景^[2]。近期,基于自注意力机制的Transformer模型也展现出处理长序列并行施工数据的潜力,其并行计算优势有助于提升大规模项目预测效率。值得注意的是,单一模型往往难以兼顾精度与解释性,因此混合建模范式逐渐兴起,如将LSTM用于提取时序特征后输入XGBoost进行最终回归,或结合BIM几何信息与GNN实现物理-逻辑联合推演。

2.3 典型应用场景

人工智能在进度预测中的应用已从理论探索走向工程实践。在微观层面,模型可基于历史相似工序数据,精准预测新工序所需工时,辅助资源计划编制;在宏观层面,则综合考虑天气、劳动力、材料供应等多维因素,输出项目整体完工日期的概率分布,为合同谈判与风险管理提供依据。此外,AI还能实现关键路径的动态识别——在施工过程中持续更新各工序的实际进展与剩余时间,自动重算关键路径,指导项目经理优先配置资源至瓶颈环节。在挣值管理(EVM)框架下,AI可增强传统CPI(成本绩效指数)与SPI(进度绩效指数)的预测能力,通过分析历史偏差趋势,提前预警未来可能出现的成本超支或进度滞后,从而实现更主动的项目控制。

3 人工智能在风险预警中的应用机制

3.1 风险识别与分类

风险预警的第一步是准确识别潜在风险源。人工智能可通过无监督学习方法自动从海量非标注数据中发现异常模式。例如,利用K-means聚类算法对施工日志文本进行语义分组,可自动提炼出高频负面事件类别,如“混凝土浇筑延迟”或“钢筋验收不合格”;采用孤立森林(Isolation Forest)等异常检测算法,则能有效识别资源使用中的突变行为,如某日塔吊运行时长骤降80%,可能预示设备故障或调度失误。自然语言处理技术还可解析监理报告中的隐含风险信号,将非结构化文本转化为结构化风险指标,大幅降低人工筛查成本。

3.2 风险量化与传播建模

识别风险后,需进一步评估其发生概率及对整体进度的影响程度。贝叶斯网络(BN)因其显式的因果推理

能力,被广泛用于构建风险传播模型。通过定义风险事件间的条件概率关系,BN可计算某一初始风险(如材料涨价)引发连锁延误的综合概率。另一种思路是结合蒙特卡洛模拟与AI代理,在数字孪生环境中反复运行施工过程,统计不同风险组合下的工期分布,从而量化风险暴露水平^[3]。更前沿的研究尝试引入强化学习(RL),训练智能体在模拟环境中学习最优风险应对策略——例如,当检测到劳动力短缺风险时,智能体可自主决策是否启动加班机制、调配备用班组或协商工期延期,以最小化整体损失。

3.3 动态预警系统设计

一个高效的AI风险预警系统应具备闭环管理能力。系统首先通过部署在工地的IoT设备、BIM平台及企业ERP系统实时采集多源数据;随后利用自然语言处理与计算机视觉技术从文本日志和监控视频中提取风险特征;接着,预训练的AI模型对当前状态进行推理,输出风险评分与预警等级(如绿/黄/红);预警信息通过可视化仪表盘呈现,包括风险热力图、影响范围及推荐应对措施;最关键的是建立反馈机制,将实际发生的延误结果回流至模型训练流程,实现在线学习与持续优化,使系统越用越准、越用越智能。

4 多技术融合:构建智能进度管理生态系统

4.1 BIM+AI:从静态模型到动态推演

建筑信息模型(BIM)为AI提供了结构化的工程语义环境。传统BIM主要用于设计与碰撞检查,而与AI融合后,可升级为动态推演平台。通过将4D施工模拟(时间维度)与AI预测结果联动,系统不仅能展示计划进度,还能叠加实际进展与预测趋势,直观呈现偏差区域。当AI检测到某构件安装进度连续落后,可自动定位其在BIM模型中的空间位置,并关联责任工序与资源分配情况,辅助管理人员快速溯源。此外,系统还可生成可视化预警动画,模拟若不干预可能造成的后续连锁延误,极大提升决策的直观性与说服力。

4.2 IoT+AI:实时感知与边缘计算

物联网技术为AI提供了“感官”。部署在工地的各类传感器——如工人佩戴的GPS定位手环、混凝土养护温湿度探头、塔吊倾角与载荷监测仪——持续回传现场状态数据。这些高频数据流若全部上传云端处理,将面临带宽与延迟瓶颈。为此,边缘计算架构应运而生:在靠近数据源的边缘设备上部署轻量化AI模型,实现本地实时分析。例如,当塔吊传感器检测到异常振动,边缘AI可立即判断是否为超载风险,并在毫秒级内触发声光警报,避免事故发生。这种“端-边-云”协同模式既保障了响

应速度，又减轻了中心服务器负担。

4.3 数字孪生 (Digital Twin): 虚实映射的闭环管理

数字孪生代表了智能建造的高级形态，它通过构建物理工地的虚拟镜像，集成BIM、IoT、AI与高性能仿真引擎，实现全要素、全周期的虚实同步。在该框架下，AI不仅用于预测，更用于“试错”——管理者可在虚拟环境中模拟不同干预措施的效果，如增加夜班人力、调整施工顺序或更换供应商，观察其对工期与成本的影响，从而选择最优方案。数字孪生还支持自动生成优化建议，如“建议将A区模板拆除提前2天，以释放B区吊装通道”，并将执行结果反馈至模型，形成“感知—分析—决策—执行—学习”的完整闭环。

5 挑战与局限性

尽管人工智能在进度预测与风险预警中展现出巨大潜力，其大规模落地仍面临多重挑战。首先是数据质量问题，许多工程项目历史数据缺失、格式不统一或存在标注错误，而现场数据采集标准尚未普及，导致模型训练困难；同时，数据隐私与所有权争议也阻碍了跨企业数据共享。其次是模型可解释性不足，深度学习模型常被视为“黑箱”，工程师难以理解其预测逻辑，降低了信任度与采纳意愿。再者，工程场景本身具有高度独特性，每个项目在规模、地质、气候、合同条款等方面均存在差异，使得模型泛化能力受限，尤其在小样本条件下表现不佳^[4]。此外，人为主观因素如劳资纠纷、腐败行为等难以量化，进一步增加了预测难度。最后，组织与文化障碍不容忽视：传统工程企业数字化基础薄弱，管理人员对AI技术接受度低，且严重缺乏既懂土木工程又精通人工智能的复合型人才，制约了技术转化效率。

6 未来研究方向与实施建议

面向未来，技术层面应重点发展小样本学习与迁移学习方法，提升模型在新项目上的适应能力；同时探索可解释人工智能 (XAI) 技术，如SHAP值分析或注意力

可视化，增强模型透明度以赢得工程界信任；长远来看，构建面向工程建设领域的专用大模型，整合国家规范、标准图集、合同范本等专业知识，将是突破通用AI局限的关键路径。在系统层面，亟需推动BIM、IoT、AI、区块链等技术标准接口建设，打破信息孤岛；开发轻量化、模块化的AI插件，便于无缝集成到现有项目管理软件中；并鼓励建立国家级或行业级工程数据共享平台，为模型训练与验证提供高质量数据池。在管理层面，应将AI工具制度化纳入项目管理流程，形成“预测—预警—响应—复盘”的闭环机制；加强工程技术人员的AI素养培训，培养“AI+工程”协同思维；同时制定AI应用伦理准则与责任认定机制，防范算法偏见与误判带来的法律与声誉风险。

7 结语

人工智能正在深刻变革建筑工程进度管理的范式。通过融合机器学习、深度学习、计算机视觉等技术，AI不仅能够实现更高精度的进度预测，还能构建主动式、智能化的风险预警体系，从而提升项目韧性与可控性。然而，技术的成功落地不仅依赖算法创新，更需要数据基础、系统集成、组织变革与人才培养的协同推进。未来，随着智能建造生态的不断完善，AI有望成为工程管理的核心引擎，推动建筑业向高质量、高效率、高安全的方向转型升级。

参考文献

- [1]黄志恒,田仪帅,宁延.人工智能技术在项目进度预测中的应用与前瞻[J].科技管理研究,2025,45(21):177-185.
- [2]刘向东.基于人工智能的建筑工程进度管理系统设计与应用[J].江西建材,2023,(10):322-324.
- [3]沈立予,那威.信息化与AI赋能:建筑工程进度管理的智能革新[J].中国建设信息化,2024,(14):32-33.
- [4]池小龙.智能化工程管理技术在建筑工程管理中的应用研究[J].企业改革与管理,2025,(21):12-14.