

土木工程中的智能建造技术应用探索

韩晓丽

乌拉特中旗住房和城乡建设局 内蒙 巴彦淖尔 015000

摘要：智能建造技术以BIM等前沿技术为支撑，构建覆盖工程全生命周期的集成化体系，有全过程数字化、决策智能化等核心特征。其关键应用涵盖数字化设计、智能施工装备及智慧工地管理。但面临技术集成与标准化、成熟度与适用性、人才与成本等挑战。推进策略包括构建技术标准体系、加强技术研发创新、完善人才培养机制，以加速智能建造技术落地，推动土木工程行业高质量发展。

关键词：土木工程；智能建造；技术应用；智能施工；智慧工地

引言：在土木工程领域创新发展的浪潮中，智能建造技术凭借其强大的驱动能力，成为推动行业变革的核心力量。它以BIM、IoT、AI及大数据分析等前沿技术为基石，构建起覆盖工程全生命周期的集成化体系，实现从虚拟设计到实体建造的闭环管理。然而，智能建造技术在推进过程中面临技术集成、成熟度、人才与成本等诸多挑战。深入剖析其基本框架、关键应用、现存挑战，并探寻推进策略，对加速智能建造技术落地、推动行业高质量发展意义重大。

1 智能建造技术的基本框架

智能建造技术作为土木工程领域创新发展的核心驱动力，其基本框架以建筑信息模型（BIM）、物联网（IoT）、人工智能（AI）及大数据分析等前沿技术为支撑，构建起覆盖工程全生命周期（规划、设计、施工、运维）的集成化技术体系。该体系通过数字化手段实现工程信息的无缝传递与动态更新，形成从虚拟设计到实体建造的闭环管理，其核心特征可归纳为四个角度：（1）全过程数字化：以BIM技术为载体，建立三维可视化数字模型，集成几何信息、物理特性及施工参数，实现设计成果的数字化交付与施工过程的动态模拟，为各阶段协同作业提供统一数据平台。（2）决策智能化：依托机器学习算法对工程数据进行深度挖掘，构建风险预测、进度优化及资源调配等智能决策模型，通过实时分析环境参数、设备状态及施工进度，为管理人员提供科学决策依据，降低人为判断误差。（3）操作自动化：通过物联网技术连接施工机械与传感器网络，实现混凝土浇筑、钢结构焊接等关键工序的自动化控制，结合机器人技术完成高空作业、危险环境施工等高风险任务，显著提升作业精度与安全性。（4）管理精细化：基于数字孪生平台集成质量、安全、成本等多维度数据，形成动态可视化管控界面，通过实时监测与预警机制实现管理要素的精

准把控，优化资源配置效率，最终达成工程质量可控、施工安全可靠、建设周期缩短及综合效益提升的目标^[1]。

2 智能建造关键技术应用

2.1 数字化设计与仿真技术

基于建筑信息模型（BIM）的协同设计平台通过集成建筑、结构、机电等多专业模型，实现设计信息的实时共享与冲突检测，消除传统设计模式中的信息孤岛问题。参数化建模技术通过定义设计参数与约束条件，支持方案快速迭代与优化，结合性能化分析工具（如结构有限元分析、能耗模拟等），可对建筑物的力学性能、热工性能及环境适应性进行量化评估，为设计方案优化提供科学依据。虚拟建造技术通过构建三维施工过程模型，模拟施工工序、资源配置及空间冲突，提前识别设计缺陷与施工难点，例如通过施工动画模拟复杂节点的施工顺序，优化模板搭设方案，减少现场返工率。生成式设计技术依托算法与机器学习模型，在输入设计目标（如荷载要求、空间布局、材料成本等）后，自动生成多种优化方案，并通过多目标优化算法筛选最优解，显著提升设计效率与方案创新性，例如在桥梁结构设计中，生成式设计可快速生成满足力学性能与经济性要求的拓扑优化结构^[2]。

2.2 智能施工技术与装备

智能施工机器人通过集成高精度传感器、机器视觉与运动控制技术，实现高危、繁重作业的自动化替代。例如，焊接机器人通过激光定位与路径规划算法，完成钢结构节点的自动化焊接，焊接质量稳定且效率较人工提升3倍以上；喷涂机器人通过流量控制与表面识别技术，实现建筑立面的均匀喷涂，减少材料浪费；砌筑机器人通过机械臂抓取与定位系统，完成砖块的精准砌筑，适用于异形墙体施工。3D打印技术通过逐层堆积材料的方式，实现复杂结构的一体化成型，无需模板支护，例如

在混凝土建筑中,3D打印可快速构建曲面墙体或镂空结构,缩短施工周期并降低材料损耗。智能工程机械通过北斗定位、惯性导航与液压控制技术,实现挖掘、起重等设备的精确定位与自动作业,例如智能挖掘机通过传感器实时监测铲斗位置与土壤阻力,自动调整挖掘轨迹,提升施工精度;塔吊防撞系统通过无线通信与位置感知技术,实时监测多台塔吊的运行状态,避免碰撞事故。传感技术与物联网设备(如倾角仪、应力传感器、温湿度传感器等)的部署,实现施工过程的实时数据采集与传输,结合边缘计算与云端分析,对结构变形、设备状态及环境参数进行动态监测,为施工调控提供依据。

2.3 智慧工地与管理平台

基于物联网的智慧工地系统通过部署RFID标签、摄像头、传感器等设备,集成人员定位、设备监控、环境监测及安全预警等功能模块,实现施工现场的全面感知与透明化管理。例如,人员定位系统通过UWB技术实时追踪工人位置,结合电子围栏功能,防止误入危险区域;设备监控系统通过振动传感器与油温传感器,实时监测施工机械的运行状态,提前预警设备故障;环境监测系统通过粉尘传感器与噪声传感器,实时采集施工现场的环境数据,超标时自动触发降尘设备。大数据分析技术对施工过程中产生的多源异构数据(如进度数据、质量检测数据、成本数据等)进行清洗、挖掘与关联分析,识别影响工程效率的关键因素,例如通过分析混凝土浇筑时间与强度数据,优化养护工艺参数。智能项目管理平台以BIM模型为数据载体,集成进度计划、资源分配及质量管控等功能,通过数据驱动的方式实现进度-成本-质量的动态关联分析,例如通过对比实际进度与计划进度,自动生成资源调配建议;通过质量检测数据的实时上传,生成质量缺陷分布热力图,指导针对性整改,提升管理精细化水平。

3 智能建造技术应用挑战

3.1 技术集成与标准化问题

智能建造涉及建筑信息模型(BIM)、物联网(IoT)、人工智能(AI)等多技术域的交叉融合,但不同技术系统的数据接口协议、信息编码规则及传输标准尚未统一,导致数据在跨系统交互时需进行复杂转换,甚至出现信息丢失或格式错误,形成“数据孤岛”。例如,BIM模型中的构件属性数据与物联网传感器采集的实时监测数据因缺乏统一语义标准,难以直接关联分析,限制了数据价值的深度挖掘。此外,智能建造领域尚未形成覆盖全生命周期的技术实施规范,各参与方(如设计、施工、运维)在技术应用深度与范围上存在差异,导致系统集

成时需额外开发定制化接口,增加协同成本。传统工程管理模式以线性流程与经验决策为主,而智能建造要求实现数据驱动的动态优化与跨阶段协同,现有组织架构(如部门分工、权责划分)与流程设计(如审批链条、反馈机制)难以支撑实时决策需求,需通过流程再造与组织扁平化重构适配智能建造要求^[3]。

3.2 技术成熟度与适用性

部分智能建造技术(如生成式设计、施工机器人)仍处于实验室研发或小规模试点阶段,其核心算法、硬件稳定性及环境适应性尚未经过大规模工程验证。例如,生成式设计生成的优化方案可能因未充分考虑施工工艺约束(如模板搭设难度、机械操作空间)导致可施工性不足;焊接机器人在复杂钢结构节点作业时,可能因焊缝轨迹规划算法精度不足引发焊接缺陷。不同工程类型(如超高层建筑、地下隧道)与施工环境(如高温、高湿、强电磁干扰)对智能技术的性能要求差异显著,例如,物联网传感器在极端温度下可能因材料热膨胀系数不匹配导致测量误差超标;3D打印混凝土在低温环境中的凝结时间控制难度增加,需针对性调整材料配比与打印参数。技术方案的适用性研究需结合具体工程场景,通过长期数据积累与算法迭代优化,提升技术的工程化落地能力。

3.3 人才与成本制约

智能建造的复合型技术需求对人才知识结构提出更高要求,从业人员需同时掌握土木工程原理、信息技术(如编程、数据分析)及跨学科工具(如BIM软件、机器学习框架),但当前高校专业设置与职业培训体系仍以单一学科为主,导致复合型人才供给严重不足。例如,既熟悉BIM协同设计又具备AI算法开发能力的工程师稀缺,制约了智能设计平台的深度应用。新技术应用初期需投入高成本硬件设备(如智能机器人、高精度传感器)、软件授权(如BIM平台、数据分析工具)及系统集成费用,且技术迭代速度快导致设备折旧成本高。例如,施工机器人单台采购成本可达数百万元,而其作业效率提升带来的收益需通过长期规模化应用分摊,导致中小企业应用积极性受限。此外,智能建造项目的投资回报周期受技术成熟度、工程规模及管理水平等多因素影响,存在不确定性,进一步加剧企业投资顾虑。

4 推进智能建造技术应用的策略

4.1 构建技术标准体系

智能建造技术的规模化应用需以统一的技术标准体系为支撑。首先,应加快制定覆盖数据采集、传输、存储及分析全流程的标准规范,明确BIM模型的数据结构、

物联网设备的通信协议及AI算法的输入输出格式,消除跨系统数据交互壁垒。例如,定义BIM模型中构件的唯一编码规则与属性字段标准,确保设计、施工与运维阶段的数据无缝衔接;制定物联网传感器的精度等级与校准周期标准,保障监测数据的可靠性。其次,建立智能建造技术应用的评价体系,从技术成熟度、经济性、环境适应性等维度设定量化指标,为技术研发与工程选型提供参考依据。例如,针对施工机器人,可制定作业效率、故障率、能耗等评价指标,引导企业优化产品设计。此外,需推动传统工程标准(如结构设计规范、施工验收标准)与智能建造要求的衔接,例如在混凝土强度检测标准中增加基于物联网传感器的实时监测方法,在施工安全规范中纳入智能监控系统的部署要求,促进技术体系的融合发展。

4.2 加强技术研发与创新

智能建造技术的突破需紧密围绕工程实际需求展开。针对技术成熟度不足的问题,应聚焦关键技术攻关,例如优化生成式设计算法的约束条件处理能力,提升其生成的方案在施工工艺、成本可控性等方面的适应性;改进施工机器人的环境感知与路径规划算法,增强其在复杂施工场景(如狭窄空间、高空作业)中的自主作业能力。同时,推动产学研用协同创新,通过建立联合实验室、技术联盟等形式,整合高校、科研机构与企业的资源,加速技术成果从实验室到工程现场的转化。例如,高校可开展智能建造基础理论研究,企业提供工程场景与数据支持,共同开发适用于实际工程的解决方案。此外,建立智能建造示范工程,选择不同类型(如住宅、桥梁、隧道)与规模(如超大型、中小型)的工程,探索智能建造技术的差异化实施路径,总结可复制的经验模式。例如,在超高层建筑施工中示范智能塔吊防碰撞系统与混凝土浇筑质量实时监测技术的应用,在装配式建筑中验证BIM协同设计与智能生产线的集成效果^[4]。

4.3 完善人才培养机制

智能建造的复合型特征对人才知识结构提出更高要求。需构建多层次人才培养体系,针对在职工程技术人员,

开展智能化技能培训,例如开设BIM建模与协同设计、物联网设备操作与维护、AI算法应用等课程,提升其跨学科技术整合能力;针对高校学生,推动智能建造相关专业与课程的设置,例如在土木工程专业中增设智能建造方向,开设“建筑机器人技术”“智能施工管理”等课程,培养既懂工程原理又掌握信息技术的专业人才。同时,建立激励机制,通过薪酬倾斜、职业晋升通道优化等方式,吸引和留住复合型人才。例如,对具备智能建造技术背景的工程师在项目负责、技术评审等岗位选拔中给予优先权,激发其创新积极性。此外,鼓励企业与高校开展联合培养项目,通过实习基地、双导师制等形式,缩短人才从校园到工程的适应周期,为智能建造发展提供持续的人才保障。

结束语

智能建造技术作为土木工程领域创新发展的核心方向,其全生命周期集成化体系已展现出提升工程效率、质量与安全性的巨大潜力。然而,技术集成标准化滞后、部分技术成熟度不足及复合型人才短缺等挑战,仍制约着其规模化落地。未来需通过构建统一技术标准体系打破数据壁垒,依托产学研协同创新攻克关键技术瓶颈,并完善多层次人才培养机制夯实人才基础。唯有推动技术、管理与人才的协同进化,加速智能建造从试点示范向全行业渗透,方能实现工程建设模式的根本性变革,为行业高质量发展注入持久动能。

参考文献

- [1]梁腾飞.面向智能建造的土木工程专业升级改造路径分析[J].陕西教育(高教),2025,(09):36-38.
- [2]钟灵芳,陈忠源.基于新工科视域的智能建造专业教学改革研究[J].吉林农业科技学院学报,2023,32(03):74-77.
- [3]史小萌.智能建造专业背景下的基坑工程教学改革探索[J].中国多媒体与网络教学学报(上旬刊),2023(06):177-180.
- [4]姜楠,吴金国,隋伟宁.智能建造背景下土木工程学生职业素养新趋势[J].建筑与预算,2023(05):56-58.DOI:10.13993.