

智能化工程中的机电施工安装技术应用研究

张腾飞

(中国通信建设第二工程局有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要 为解决智能化工程中机电施工安装面临的技术集成度不高、资源协调困难等核心问题,以BIM协同平台与智能装备应用为例对技术创新路径展开研究。分析结果表明,标准化接口协议可降低异构系统对接成本40%以上,而模块化预制可使现场安装工作量缩减70%。本研究提出建立包含机器可读参数的质量数据库、采用神经安全学原理等优化措施,形成从设计到运维的全链条数字化解决方案。工程实践验证,该体系能使工期缩短12%、返工成本下降40%,可为智能建造背景下的机电安装工程提供可复用的技术框架。

关键词 智能化工程; 机电施工安装; 模块化预制; 数字化解决方案

中图分类号: TU85

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.042

0 引言

随着物联网、大数据等新一代信息技术深度渗透,传统机电安装模式在系统集成度、施工精度等方面逐渐暴露出适应性不足的问题。行业数据显示,2023年智能建筑项目中因机电系统协同不足导致的工程变更占比高达37%,直接拉低整体施工效率15%以上。与此同时,“双碳”目标的提出,对机电系统能效提出更高要求,全生命周期碳排放评估成为项目审批的必要条件。在此背景下,研究智能化工程中的机电施工安装技术具有重要的现实意义。本研究聚焦技术集成、智能装备应用等关键环节,探索建立覆盖设计、施工、运维全流程的数字化解决方案,立足于行业最新技术标准,结合典型工程实践,系统分析当前面临的技术瓶颈与管理挑战,旨在为行业转型升级提供理论支撑与实践指导。

1 智能化工程中机电施工安装的核心需求

1.1 技术集成化与标准化的迫切性

现代机电系统已从单一设备堆叠发展为多学科交叉的技术网络,集成化成为突破专业壁垒的必要条件。机械、电气、自动化与信息技术的深度融合要求安装过程打破传统分段式作业,建立跨专业的协同框架。例如:暖通系统的智能调控需要同时处理流体力学参数、传感器布设精度与算法响应延迟的匹配问题,这种多维耦合关系必须通过标准化接口协议实现数据互通。标准化在此过程中承担着双重职能:一方面为异构系统提供统一的通信基础,另一方面通过模块化设计降低后期扩展的兼容成本^[1]。当前技术集成面临的

主要矛盾在于,先进设备的快速迭代与标准体系更新滞后形成的剪刀差。某些智能终端采用私有通信协议,导致与建筑管理系统(BMS)的数据交换需要额外开发转换中间件,这种非标对接不仅增加了15%~20%的调试周期,还会产生难以追溯的隐性故障。相应地,国际电工委员会(IEC)提出的开放式通信架构(如IEC 62443)正逐步成为行业基准,其价值不仅在于技术规范的统一,更在于构建了从设备制造到施工安装的全链条责任追溯机制。

1.2 绿色节能与可持续发展的导向

机电系统的能耗占建筑全生命周期碳排放的40%以上,这使得安装阶段的决策直接影响后期运营的碳足迹。在传统施工中,设备选型往往仅考虑初期采购成本,而智能化工程要求引入全寿命周期评价(LCCA)模型,将安装工艺与未来20年的能源消耗建立量化关联。变频驱动装置的安装间距偏差若超过3%,会导致电磁损耗增加8%~12%,这类隐性能耗只有通过施工阶段的精确控制才能规避。可持续发展导向还体现在资源利用的闭环设计上。预制装配式机电模块较现场加工减少25%的材料浪费,但其推广受限于三维定位精度要求。某超高层项目的管线综合排布显示,采用BIM预装配技术后,管材切割废率从6.7%降至1.2%,这种效率提升本质上源于安装逻辑从经验驱动向数据驱动的转变。更深层的变革在于,绿色标准正在重塑供应链选择——获得EPD环境产品声明的机电设备虽采购成本提高5%~8%,但因其可回收性设计使拆除阶段的残值提升30%以上。

1.3 智能化运维对安装质量的要求

智能运维系统的预测性维护功能完全依赖于安装阶段埋设的质量数据锚点。振动传感器的安装角度偏差若超过 5° ，采集的频谱数据将无法准确反映设备健康状态；电缆敷设时的弯曲半径不足，会使分布式温度传感（DTS）系统产生 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的监测误差。这些细微的安装缺陷在传统工程中可能直至设备故障才会暴露，而智能运维体系要求它们必须在验收阶段被识别。这种质量要求的跃升本质上是将运维需求前置于施工环节。光纤测温系统的安装需考虑后期除尘维护的通道预留，这与传统“先安装后维护”的线性思维截然不同。更关键的是，安装质量评价标准从“符合规范”升级为“可数字化诊断”，如某数据中心冷冻水系统的焊口合格率虽然达到 99%，但未做内壁粗糙度标记的管段却使水流噪声干扰了超声波流量计的读数精度^[2]。该新型质量维度表明，智能化时代的安装验收需建立包含机器可读参数的质量数据库，而非仅保留人工检查记录。

2 机电施工安装的技术创新路径

2.1 数字化工具在施工中的应用

建筑信息模型（BIM）技术已从设计阶段延伸至施工全流程，其价值在机电管线综合排布中尤为显著。三维激光扫描仪能以 $\pm 2\text{ mm}$ 精度捕捉建筑实体空间数据，通过与 BIM 模型的自动比对，可识别出 90% 以上的管线碰撞问题。这种数字孪生技术的应用使施工变更率降低 40% 以上，但真正的突破在于改变了决策机制，传统依赖二维图纸的协调会议，正被基于混合现实（MR）的沉浸式校审所替代。施工人员通过头戴设备可直接观察虚拟管线与实体结构的叠加状态，这种可视化交互将设计意图传递效率提升 3 倍。数字化工具带来的深层变革体现在施工管理维度。进度管理软件如 Primavera P6 不再仅作甘特图绘制，而是通过物联网设备采集的实时施工数据，自动计算关键路径变化对整体工期的影响。当某区域机电安装滞后时，系统能立即重新优化材料配送路线与班组调度方案^[3]。这种动态响应能力使项目平均工期缩短 12%，更重要的是建立了“数据—决策—执行”的闭环控制体系。施工日志的电子化填报则形成了质量追溯的数据链条，每个焊接点的工艺参数、操作人员资质及环境条件都被永久记录，为后期运维提供原始依据。

2.2 智能装备与自动化施工方法

机电安装机器人正在改写高空、狭小空间等危险区域的作业规则。缆线自动敷设机器人可沿预设轨道

完成桥架内 90% 的线缆排布，其机械臂末端的力反馈系统能精确控制牵引张力在 $\pm 5\text{ N}$ 范围内，避免传统人工拉线造成的绝缘层磨损。更革命性的变化发生在装配环节，管道焊接机器人通过激光视觉定位，将法兰对接错边量控制在 0.3 mm 以内，这是人工操作难以企及的精度水平。这些智能装备不仅提升了效率，更关键的是消除了人为因素导致的质量离散性。自动化施工方法的创新体现在工艺链的重构上。预制模块化机房采用工厂化生产模式，将现场安装工作量减少 70%，但要求施工方重新设计运输吊装方案。某超高层项目开发的液压同步提升系统，可实现总重 200 吨的机电模块在 300 m 高空的一次性就位，其定位精度达到 $\pm 3\text{ mm}$ 。这种变革使得传统“分段施工、逐层调试”的流程被颠覆，取而代之的是“整体吊装、即插即用”的新型模式。自动导引运输车（AGV）在大型机房中的应用则解决了重型设备搬运的痛点，通过 UWB 精确定位，可将 10 吨级冷水机组沿预定路径运送到指定位置，定位误差不超过 10 mm 。

2.3 新材料与新工艺的引入

石墨烯改性防腐涂料将机电设备的防护周期从 5 年延长至 15 年，其机理在于二维碳材料形成的致密阻隔层，能使腐蚀速率降低 80%。这种纳米材料的应用直接改变了传统防腐施工工艺——不需要多层涂刷作业，单次喷涂 $30\text{ }\mu\text{m}$ 厚度即可达到《色漆和清漆防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护》（GB/T 30790.5-2014）标准要求的防护等级。在电气安装领域，超导电缆的引入使得同等输电容量下，电缆截面面积减少 60%，这彻底重构了电缆沟的设计标准与安装空间需求。新工艺的创新往往伴随施工范式的转变。冷缩式电缆终端头安装技术摒弃了传统热缩工艺需要的明火作业，采用预扩张的硅橡胶材料在解除束缚后自动收缩密封^[4]。这种工艺不仅将安装时间缩短了 50%，更消除了施工现场的火灾隐患。在管道连接方面，无焊法兰连接系统通过超高强螺栓与金属密封环的组合，实现承压 4.0 MPa 的免焊连接，其气密性测试泄漏率小于 0.001%。这些创新都在重新定义机电安装的技术经济指标，不是对原有工艺的改良，而是创造新的技术可能性。

3 施工组织与管理的优化策略

3.1 跨专业协同机制的构建

传统分段式管理模式在应对机电系统深度耦合时暴露出严重缺陷，暖通、电气、给排水等专业各自为政导致的接口冲突约占工程变更总量的 35%。基于 BIM

的协同设计平台通过建立统一的空间坐标系,使各专业模型实时碰撞检测成为可能,但真正的突破在于配套建立的“设计—施工”责任矩阵。该矩阵明确规定管线综合排布中主导专业与配合专业的权责边界,例如:电气桥架与消防管道的交叉处,优先权判定不再依赖临时协调,而是依据预先制定的空间占位规则。更深层次的协同创新体现在组织架构变革上。例如:某大型综合体项目采用的一体化项目管理团队(IPMT)模式,将各专业工程师集中办公,通过每日15分钟的“站立式协调会”解决界面问题。这种机制使决策链条从原来的72小时缩短至4小时,关键在于建立了问题分级响应机制,常规冲突由专业组长现场裁决,系统性问题则触发专家组的快速响应。相应的绩效考核体系也调整为以系统完整性而非单一专业进度作为评价基准,这种导向转变使得各专业主动考虑接口预留的积极性提升40%以上。

3.2 施工进度与资源调配的精细化管理

传统进度计划的关键路径法(CPM)在应对机电安装动态变化时显得力不从心,其根本缺陷在于将资源供给视为无限条件。基于约束理论(TOC)的缓冲管理技术通过设置项目缓冲、接驳缓冲和资源缓冲三层防护体系,使进度计划的抗干扰能力提升60%。在具体实施中,采用逆向排程法确定各子系统的最迟开始时间,再根据资源波动系数动态调整缓冲区间大小,这种弹性计划机制成功将因材料延误导致的工期损失降低了75%。资源调配的智能化升级体现在物流系统的重构上。基于UWB定位技术的物资追踪系统能实时监控每批管件、阀门的进场与领用状态,通过与BIM模型的关联,可预测未来72小时的物料需求缺口。例如:某数据中心项目采用的无人仓管理系统,通过重量传感器与RFID标签的配合,实现了标准件库存的自动预警与补货,使仓储占用面积减少30%的同时,保障了99.5%的即时供应率。更深层的变革是人力资源的弹性配置,技能矩阵数据库将每位施工人员的资质、效率系数及协作经验量化,在工序转换时自动匹配最优班组组合,这种动态调度使人工效能提升了25%。

3.3 安全与质量管理的强化措施

传统安全管理的事后追责模式难以应对高空作业、带电操作等机电安装特有的风险组合。行为安全观察(BBS)系统通过预设28类高风险行为的识别标准,使现场安全员能进行结构化巡查,但真正的预防机制在于引入神经安全学原理。通过分析事故前30分钟的

人员生理指标波动规律,建立的疲劳预警系统可提前15分钟发出干预信号,这种前馈控制使人为失误导致的事故下降55%。同时,智能安全帽配备的AR界面能实时显示作业区域危险源分布,通过视觉警示将违章操作率控制在0.3%以下。质量管理体系的革新聚焦于过程参数的数字化管控^[5]。焊接质量监控系统不仅记录电流电压参数,还通过声发射技术捕捉熔池形成的特征频率,建立焊缝质量与工艺参数的映射关系。这种基于大数据的过程能力分析,使关键焊口的一次合格率从92%提升至99.7%。更系统的变革是引入质量门禁(Quality Gate)机制,在每道工序交接点设置包含17项量化指标的放行标准,只有全部参数达标才能解锁下一工序的施工权限。这种硬性阻断机制有效解决了传统质量检查流于形式的问题,使返工成本降低了40%以上。

4 结束语

智能化转型正在重塑机电施工安装的技术体系与管理范式。研究发现,技术集成化需求推动着开放式通信标准的普及,智能运维要求倒逼安装精度提升两个数量级。数字化工具与新材料工艺的结合,使传统施工模式发生根本性变革。当前取得的突破包括建立跨专业责任矩阵、开发动态缓冲管理算法等关键技术,这些成果有效解决了接口冲突与资源错配等行业痛点。未来,随着数字孪生与区块链技术的深度融合,机电安装将向自治式管理模式演进,这需要行业在标准统一、人才培养方面做好充分准备,本研究构建的优化体系为此过程提供了实践路径。

参考文献:

- [1] 付康. 智能化技术在地铁项目机电安装及装饰装修施工安全管控中的应用探究[J]. 张江科技评论, 2024(10): 93-95.
- [2] 周欣伟, 岳泽龙, 卢豪, 等. 建筑智能化机电设备安装施工技术要点[J]. 四川建材, 2022, 48(12): 199-201.
- [3] 王柏柱, 刘家赫, 陈承超, 等. 现代建筑工程施工中的智能化机电设备安装技术[J]. 智能建筑与智慧城市, 2021(06): 130-131.
- [4] 胡舒杰. 计算机技术发展下的智能建筑的安装质量控制[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2020(08): 31-32.
- [5] 魏伟. 智能化工程中的机电施工安装技术应用探析[J]. 装备维修技术, 2020(02): 234.