

建筑施工现场智能化管理系统设计与应用研究

莫镕塵

深圳市鹏程辉宏科技有限公司，广东省深圳市，518000；

摘要：围绕复杂、开放与高风险特征的建筑施工现场，构建以感知—传输—计算—应用闭环为核心的智能化管理系统框架。研究在业务流程与数据要素梳理的基础上，给出分层架构、边缘计算、数字孪生与规则—模型混合决策的设计方法，阐述进度、质量、安全、成本与环境的协同管控机制，凝练标准、数据治理与安全保障要点，提出面向实施与迭代的评价与优化路径，并形成可复制、可移植与可审计的工程化做法。文章强调以事件驱动与统一数据底座支撑多方协同，引入离线容忍与可解释决策保障鲁棒性，构建从样板到放量的落地模式，为施工现场的效率提升与风险抑制提供方法支架。

关键词：建筑施工现场；智能化管理；物联网感知；数据治理；数字孪生

DOI：10.69979/3029-2727.25.01.070

引言

施工现场管理活动跨越多团队、多工种与多时空场景，信息链条长、不确定性强、执行约束密集，传统依赖人工巡检与纸质台账的方式难以支撑高频协同与透明化决策。伴随传感、边缘计算与移动终端普及，现场状态可被持续采集并实时计算，但若缺乏统一模型与标准，数据孤岛与流程断点仍会反复出现，智能化的价值难以兑现。研究以从数据到行动的闭环为主线，面向进度、质量、安全、成本与环境五类目标，提出系统设计原则、技术路径与治理机制，力求在合规与可审计的前提下实现效率提升与风险降低。文中构建业务对象与数据要素框架，给出分层架构与平台协同方案，阐释实施组织、评估指标与持续优化方法，为不同规模与不同类型项目提供可复用思路。

1 智能化管理系统的目标与总体架构

1.1 业务对象与数据要素梳理

现场管理的对象可抽象为人机料法环五类实体及其关系网络，对应的关键数据要素涵盖身份与资质、位置与轨迹、作业许可、工序进度、设备健康、材料批次与质保、合同计量、环境指标与风险事件^[1]。数据采集应明确采样频率、空间分辨率与精度边界，按价值密度进行分层：高频的安全状态与设备运行进入持续采样，质量实测、材料签收与隐蔽验收采用事件触发，降低冗余与误报。为打通跨专业协同，数据模型需以构件为最小业务单元，以楼层与作业面为空间单元，以任务单与检验批为流程单元，三者通过统一编码关联。编码规则

覆盖构件类型、位置、批次与状态，支持增量扩展与版本管理^[2]。半结构化数据通过词典与模板约束口径，保留原图与原文以便复核与训练。数据沿产生校验入湖分发归档的路径流动，附带时间戳与责任人形成可追溯链；隐私与合规模块对劳务实名、轨迹与影像实行脱敏存储与分级授权，满足最小必要原则^[3]。数据质量要从完整、准确、及时与一致四个维度约束，建立采集校核表与异常处置脚本；主数据管理对人、组织、设备、材料与构件等主实体给出唯一标识与生命周期状态，避免一物多码与口径漂移^[4]。为便于互联互通，应在进入项目之初确定对外共享清单与最小交换字段，采用标准时间与坐标基准，记录数据血缘与版本，使后续统计、索赔与审计可被复现。考虑现场环境多尘多水与遮挡复杂的特点，需在采集侧引入冗余与自检机制，同一事件可由不同源头交叉验证，如门禁与定位联合确认进出场，视频与吊载计量联合确认起重状态。数据保留策略区分热数据、温数据与冷数据，热数据驻留边缘与内存以支撑秒级响应，冷数据压缩入库以支撑追溯与训练，存储周期与访问权限随业务风险分级动态调整。

1.2 总体架构与功能模块划分

总体架构由感知层、网络与边缘层、平台层与应用层构成，以统一数据底座与数字孪生贯穿全链^[5]。感知层部署定位、识别与环境监测设备，网络与边缘层承担协议转换、近源计算、缓存与联动控制，平台层负责主数据管理、数据治理、服务编排、规则引擎与模型管理，应用层面向场景提供进度可视化、质量实测量、安全管控、设备运维、材料追溯与成本协同能力。系统交

互以事件为驱动,感知与业务产生的事件进入消息总线,经规则与模型共同判定后触发任务分发与联动处置;当网络不可用时,边缘节点保持最小可用功能并在恢复后断点续传。平台需具备自检、容错与回滚机制,关键链路配置冗余,计量与日志采用不可篡改存储以支撑审计。目标能力聚焦可观测、可决策与可执行。可观测要求状态、事件与指标被持续记录并可回放;可决策要求对红线违规、异常趋势与资源失衡给出分级告警与建议;可执行要求任务自动生成、责任到人与闭环跟踪。为避免黑箱,规则与模型的触发条件、阈值与置信度需可解释、可追踪、可调整。接口架构采用标准化开放接口与网关适配并行的策略,外连进度、合同、造价、财务与政府监管平台,内连塔吊、升降机、拌合站、试验室与劳务系统,统一身份认证与权限控制。为提升可移植性与复用度,平台模块化部署,支持按项目规模弹性伸缩与离线包下沉,移动端以表单、拍照与语音输入降低现场录入门槛。安全与隐私纳入系统设计基线,人员信息与影像数据实行最小必要访问与按需脱敏,重要数据分级备份与异地容灾,终端到平台全链路加密并落实访问审计。运维层面构建监控告警面板,关注设备在线率、消息堆积、接口延迟与任务积压,用以驱动容量扩容与架构调整,使系统在复杂工况下保持稳定运行。

2 关键技术体系与平台设计

2.1 感知层与边缘计算设计

感知层设计需在准确性、耐久与易维护之间取得平衡。定位可结合蓝牙、超宽带、视觉与二维码分层使用,环境监测以网格化布设并叠加风向、温湿与高差校核,视频采集在边缘侧完成目标检测、区域入侵与劳保识别以降低回传流量。对吊装、临边、洞口与高风险工序设置专用触发器,实现声光电联动和就地停机,减少决策延迟。边缘计算承担数据清洗、去重、异常值识别与局部决策,并对多源冲突进行仲裁。对同一事件的多个来源,按来源可信度、时序一致性与空间一致性进行投票合并;对缺测与漂移实施插补与校准策略。网络波动时保持最小可用功能,缓存关键事件与计量记录,恢复后按时序回放并校验完整性。传感器布点需开展可达性与遮挡分析,形成布点密度、安装高度、供电与防护等级的基线,明确巡检与更换周期。计量设备建立校准档案,记录漂移量与溯源编号。网关统一协议,把不同厂商设备的私有协议转换为标准消息,设备上线即完成身份注册与心跳监测,异常离线触发维护工单。为降低误报与漏报,算法侧采用规则与学习模型协同。规则覆盖硬性

红线与强制条款,保证刚性约束;模型承担图像与时序模式识别,用于发现隐蔽趋势与组合异常,输出应附带置信度与解释要素,由人工复核或自动二次验证决定处置层级。对隐私敏感图像在边缘进行模糊化处理,只上传目标框与特征摘要。考虑施工环境的粉尘、振动与强光干扰,硬件选型需满足防护等级与抗干扰等级要求,关键节点配置双电源与备用链路。运维策略采取分级响应与远程诊断,常见故障通过脚本自愈与模块热插拔快速恢复,难题通过远程协同定位根因,缩短停机时间并降低维护成本。

2.2 平台层与应用层协同机制

平台层以统一数据模型、主数据管理与元数据管理为核心,建立字段标准、字典口径与指标体系,确保跨项目可比与跨系统互联。数据治理流程覆盖采集校验、质量评分、血缘追踪与生命周期管理,异常数据进入隔离区,经复核修补后再入湖。围绕事件流构建服务编排,把任务单、检验批、变更单与报量单纳入同一工作流,事件到达即生成待办与责任链。应用层围绕四类核心场景组织能力集。进度场景对齐计划与实际,进行滚动计划与资源平衡;质量场景形成实测实量、缺陷闭环与关键部位旁站记录,建立缺陷画像与复发追踪;安全场景管理危险源清单、作业许可、人员资质校验与动态管控,形成分级告警与处置脚本;成本与材料场景实现计量计价一致性、耗用追溯与结算透明,联动合同条款。算法体系采取规则与模型协同。规则库沉淀法规条款、标准与企业红线,保证强约束不被突破;模型库聚焦模式识别与趋势预测,面向进度偏差、质量缺陷、风险积聚与材料异常给出概率判断。两者以可解释阈值与白名单机制约束应用范围,模型上线采用灰度策略,通过对照实验评估误报、漏报与收益,再决定放量。为实现数据驱动的行动闭环,系统在任务生成后自动匹配责任人、时限与处置脚本,移动端推送并追踪执行进度,逾期与拒绝执行进入升级路径。结果回填触发二次校核与经验沉淀,形成模板、清单与微知识,支持后续复用与培训。报表与看板以场景视角组织,支持下钻到构件与班组,历史轨迹可回放以复现实况。性能与安全方面,平台采用分区分层与冷热分离架构,关键指标实时计算与历史分析解耦;数据跨境与跨单位共享依据清单授权与脱敏策略执行,全链路加密并落实访问审计。通过这些机制,平台与应用协同稳定运行,并在不同规模项目间保持可移植性与可复用性。

3 应用落地、运维与治理体系

3.1 实施路径与组织保障

实施路径遵循样板先行、分层递进与并行迭代。项目入场前完成需求澄清、数据字典对齐与接口清单确认,样板区以最小可行范围验证编码、布点、流程与报表,固化作业指导与验收标准。随后按楼栋或区域滚动铺开,平台能力按模块开通,确保人员训练与制度配套同步到位。为避免一次性改造带来风险,旧流程与新流程设置过渡期与双轨运行,关键节点设置停等点与复核签认。组织保障方面,设置现场数字化经理与数据管理员,明确口径与变更流程;建立由建设、总承包、监理与专业分包组成的联合例会,统一问题受理、优先级与处置时限,形成从发现、派单、执行到验收的闭环。运维保障以备件库、校准计划与故障响应梯队为基础,关键设备采用双链路与双电源供给,发生异常时优先保障安全相关功能。为实现与既有系统的稳健集成,采用网关与数据中台策略,对外以标准接口对接进度、合同、造价与监管平台,对内汇聚塔吊、升降机、拌合站、试验室与劳务系统,避免点对点耦合造成的连锁改动。移动端以表单、拍照与语音输入降低录入门槛,任务看板与例检清单让执行落到班组层级。安全与隐私在实施阶段即作为边界条件,人员信息与影像数据设定保存期限与访问审计,涉密资料按区域与设备分级防护。为应对极端工况,定期开展韧性演练,模拟网络中断与设备失灵,检验离线容忍与恢复能力;对天气、停电与供应中断等外生冲击建立应急脚本与最小可行计划,保证核心生产不断链。项目层面设置里程碑评审,围绕数据质量、业务覆盖与用户满意度给出放量与优化决策。

3.2 绩效评估与持续优化框架

评估框架覆盖过程与结果两个维度。过程维度关注数据完整率、及时率、准确率与闭环率,结果维度关注工期偏差、质量缺陷复发率、安全事件发生率与成本偏差,配合里程碑进行趋势观测。指标口径在立项阶段确定并绑定责任部门,按周与按月滚动发布,支持下钻到作业面与班组,保证问题可定位、责任可落实。为避免指标僵化,引入场景化阈值与置信区间,对恶劣天气、设计变更与资源供应中断等外生因素进行校正。对算法驱动的判定设置人工复核阈值与负反馈渠道,误报与漏报进入复盘并修订阈值与样本,形成精度与成本的权衡曲线。跨项目对标以相似规模与工期进行同口径比较,避免不公平评估。持续优化依赖反馈回路与知识沉淀。系统把处置经验归档为模板与脚本,类似情境自动推荐

处置路径;把高频缺陷形成结构化条目,关联构件、工序与班组,用于培训与奖惩;把关键风险以清单固化到开工条件与隐蔽验收前提,减少重复错误。算法上线采用灰度与对照机制,先在小范围评估收益,再逐步放量。为保证长期可用与可移植,建立参数库、规则库与算子库的版本管理与回滚策略,按项目或区域维护差异化配置。平台定期开展容量与压力测试,关注消息堆积、任务积压与接口延迟,触发扩容与架构优化。通过这些机制,系统能力随项目推进不断进化,并在跨项目复制时保持可预期的成效。评价结果与激励约束挂钩,合同条款写入缺陷消减率、封样通过率与关键节点工期,形成以结果为导向的奖惩;同时设置改进豁免与复盘机制,鼓励在受控范围内进行工法与流程创新。面向后续项目,发布方法与参数白皮书,沉淀可复制的最小集,使推广具备明确的边界与成本预期。

4 结语

施工现场的智能化根本在于把数据与行动连成闭环。以分层架构与统一数据底座为基础,以边缘计算与数据治理保障实时与可靠,以规则与模型协同提供可解释的决策建议,再以组织制度确保执行与复盘。面向未来,应坚持开放接口与可移植策略,降低维护成本,推动与供应链、设备制造与运维服务的协同,让安全、质量与效率在约束下取得更稳健的平衡。通过样板先行、清单化验收与常态化演练,系统能力可随项目滚动升级,并在更大范围内可靠复制。

参考文献

- [1] 覃雪莲. 建筑工程管理中智能信息化技术应用分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (21): 49-51. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202521017.
- [2] 章陈瀑. 基于 BIM5D 技术的装配式建筑施工智能化研究[J]. 低碳世界, 2025, 15(07): 67-69. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2025.07.024.
- [3] 祁建明. 高层建筑智能化工程项目施工进度管理[J]. 大众标准化, 2025, (13): 159-161.
- [4] 田昱. 基于装配式建筑智能化的现场进度管理模型[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(13): 193-195. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.13.065.
- [5] 田昱. 基于装配式建筑智能化的现场进度管理模型[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(13): 193-195. DOI: 10.20080/j.cnki.ISSN1671-3362.2025.13.065.