

# 建筑工程智能质量管理技术浅析

张玲玲<sup>1</sup>, 钟维<sup>2</sup>, 卢智玲<sup>3</sup>, 韦永豪<sup>3</sup>, 廖守义<sup>1</sup>, 王小勇<sup>3\*</sup>

1. 柳州维兴建筑工程有限公司, 广西柳州
2. 四川同创建设工程管理有限公司柳州分公司, 广西柳州
3. 广西生态工程职业技术学院, 广西柳州

**摘要:** 针对当前建筑工程质量管理中存在的“信息孤岛”、事后追责困难及人工检测效率低等问题, 探究数字化技术赋能质量控制的有效路径。基于PDCA循环理论, 构建了融合BIM、物联网(IoT)及区块链技术的全生命周期智能质量控制模型。通过SPSS多元回归分析与蒙特卡洛模拟, 量化评估关键质控指标对工程缺陷率的影响, 并提出“检测-分析-反馈”闭环控制体系。实证研究表明, 该模式使材料抽检覆盖率提升至100%, 关键工序缺陷识别率提升至88%, 工程质量平均缺陷率从6.5%显著降低至3.5%。数据驱动的智能质量管理模式实现了从“被动纠错”向“主动预控”的转变, 显著提升了工程质量控制的科学性与经济效益, 为行业数字化转型提供了理论依据与实践范式。

**关键词:** 建筑工程; 智能质量控制; PDCA循环; BIM技术; 数字驱动; 区块链

## A Brief Analysis of Intelligent Quality Management Technology in Construction Engineering

Lingling Zhang<sup>1</sup>, Wei Zhong<sup>2</sup>, Zhiling Lu<sup>3</sup>, Yonghao Wei<sup>3</sup>, Shouyi Liao<sup>1</sup>, Xiaoyong Wang<sup>3\*</sup>

1. Liuzhou Weixing Construction Engineering Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi
2. Liuzhou Branch of Sichuan Tongchuang Construction Engineering Management Co., Ltd., Liuzhou, Guangxi
3. Guangxi Ecological Engineering Vocational & Technical College, Liuzhou, Guangxi

**Abstract:** This paper mainly elaborates on the theoretical framework, technical integration path and practical application effect of quality management technology in construction projects. Firstly, combining the PDCA Cycle and the whole-process quality management theory, it constructs an intelligent quality control model covering the whole life cycle of the project. Secondly, aiming at the limitations of traditional quality management, it puts forward an intelligent integration strategy of modern technologies such as BIM and the Internet of Things, forming a closed-loop system of “detection-analysis-feedback”. Finally, the effect of technology application is verified through

\* 第一作者简介: 张玲玲, 1985.12, 女, 汉族, 河北邯郸人, 本科, 学士, 工程师。毕业于西北工业大学土木工程专业, 主要从事土建、市政交通、桥梁工程施工技术及成果转化与应用等工作。

通信作者: 王小勇, 1971.04, 男, 汉族, 广西桂林全州人, 正高级工程师, 公路二级建造师, 广西生态工程职业技术学院专任教师, 主要从事交通土建、桥梁工程施工技术研究、教育教学、成果转化及应用工作。

基金项目: 2025年度广西生态工程职业技术学院自然科学基金项目: 基于 DeDoDe 的自监督计算机视觉结构损伤检测方法(2025KY03); 基于动态刚度的船-桥碰撞防护系统理论及装备研究(2025KY25)。

the analysis of typical cases. The research shows that the data-driven intelligent quality management mode can significantly improve the scientific and efficiency of engineering quality control, and provide a reference for the standardization and intelligent transformation of the industry.

**Keywords:** construction engineering; quality control technology; intelligent management; data-driven; PDCA cycle

## 1 引言

近年来,随着我国城镇化进程的深入,建筑工程行业保持高速增长态势。然而,工程质量安全问题依然严峻。据统计,2022年全国共发生质量事故326起,直接经济损失达48.6亿元,其中材料不合格(35%)和施工工艺缺陷(28%)是主要诱因。传统的质量控制模式主要依赖人工巡检和事后抽样,存在显著的滞后性。例如,2021年某省会城市高层住宅因混凝土强度未达标(设计C30,实测21.5MPa)导致拆除重建,损失高达12亿元。此类案例暴露了传统管理在全过程监控和风险预警方面的系统性缺失。目前,国外如英国已推行“AI+全程驻场”模式,利用无人机与图像识别生成缺陷报告;日本则通过严苛的“5S管理”与物联网环境监测,将混凝土强度达标率提升至98%。相比之下,国内虽然BIM应用率已达35%,但多局限于设计阶段的视觉展示,施工阶段应用率不足10%,且物联网设备仅在部分一线城市重点项目中通过试点应用(覆盖率<20%)。现有的研究多集中于单一技术的应用点,缺乏将多源异构数据(BIM模型、IoT传感、检测报告)整合于PDCA循环闭环体系的系统性研究。

本研究旨在构建“设计-施工-验收”全链条智能质量控制模型,通过技术集成解决“数据断层”痛点,并利用实证数据验证该模式在降低缺陷率、缩短工期及节约成本方面的实际效能。

### 1.1 数据支撑

根据住房和城乡建设部《2023年全国建筑工程质量安全报告》,2022年共发生质量事故326起,

直接经济损失48.6亿元,较2021年增长12%。其中,材料不合格(35%)、施工工艺缺陷(28%)及设计失误(18%)为三大主因。

2020-2022年期间,因工程质量问题导致的建筑倒塌事故年均增长9%,伤亡人数累计超500人。

### 1.2 典型案例分析

案例一:2021年某省会城市高层住宅项目因混凝土强度未达C30标准(实测强度仅21.5MPa),导致楼体结构开裂,最终拆除重建,经济损失达12亿元,并引发群体性维权事件。

案例二:2025年某跨江拱桥施工过程控制不严,合拢前发生垮塌事故,造成12人死亡、4人失踪。

## 2 当前质量控制状况分析

### 2.1 国外质量控制技术发展

(1) 欧洲模式:技术特点:英国推行“AI+全程驻场”质量管控模式,现场工程师(Clerk of Works)利用无人机巡检与AI图像识别技术,每日生成缺陷报告(如某伦敦项目发现砌体灰缝不合格点较人工检查增加40%)。

(2) 美国模式:独立检测体系:ASTM标准下,第三方实验室对材料进行全面检测(如钢材需通过拉伸、弯曲、冲击等6项试验),抽检覆盖率100%。

(3) 日本模式:精细化管控:推行“5S现场管理法”(整理、整顿、清扫、清洁、素养),某大阪项目通过物联网传感器实时监测混凝土养护环境(温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $\geq 90\%$ ),强度达标率提升至98%。法律约束:《建筑基准法》规定质量管

控单位对重大质量事故承担连带赔偿责任，倒逼技术投入。

## 2.2 国内质量管理技术现状与瓶颈

(1) 制度层面：权限受限：仅32%的项目允许施工、监理方参与设计优化。责任界定模糊：75%的质量事故中质量管理方被追责，但实际处罚率不足15%（最高人民法院数据）。

(2) 技术层面：BIM应用率仅35%，且多集中于设计阶段（施工阶段应用率不足10%）。物联网设备普及率低：仅一线城市重点项目配备实时监测系统（覆盖率<20%）。

(3) 人才层面：持证工程师占比不足40%，高级职称人员仅占12%。数字化技能缺失：仅28%的技术人员能熟练操作BIM软件。

## 3 研究目标与方法

### 3.1 研究目标

体系构建：建立“设计-施工-验收”全链条质量控制模型，覆盖12项核心指标（如材料抽检率、BIM应用深度等）。明确BIM、物联网等技术实施标准（如传感器布设密度 $\geq 1$ 个/100m<sup>2</sup>）。

技术验证：通过30个案例项目验证，目标将质量缺陷率从行业平均6.5%降至4.2%。开发AI辅助决策系统，实现质量问题自动识别（准确率 $\geq 85\%$ ）。

人才培养：设计“理论+实操+认证”培训体系，目标3年内持证人员占比提升至65%。

### 3.2 研究方法

(1) 定量分析法：基于全国50个项目的质量数据（2018-2023年），采用SPSS进行多元回归分析，证明材料抽检率每提高10%，缺陷率下降3.2%（ $R^2=0.76$ ,  $p<0.01$ ）。运用蒙特卡洛模拟预测：当BIM应用率从35%提升至60%时，设计变更成本可减少41%（置信区间95%）。

(2) 案例研究法：对比分析三类工程：住宅项目：重点验证实测实量技术（墙面垂直度合格率从82%提升至95%）；桥梁项目：测试物联网监测系统（索力偏差预警响应时间从24h缩短至2h）；

市政项目：评估BIM进度管理效果（工期延误率从18%降至7%）。

(4) 实验验证法：在某智慧工地建立实验区，对比传统管理与数字化控制效率：问题发现率：人工巡检32% vs AI巡检79%；响应速度：人工平均8h vs 系统实时预警。

## 4 理论基础与标准规范

### 4.1 质量控制的核心理论

(1) PDCA循环理论PDCA（计划-执行-检查-处理）循环是质量控制的核心方法论[1]，在建筑工程施工中具体表现为：

(2) 计划（Plan）：制定施工实施方案，明确质量控制关键节点（如某项目列出桩基垂直度偏差 $\leq 1\%$ 、混凝土坍落度控制范围 $\pm 20$ mm等45项指标）。基于BIM模型进行施工模拟，某商业综合体项目通过4D进度计划优化，减少工期冲突风险23%。

(3) 执行（Do）：材料抽样检测：按《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB 50204-2015），每100m<sup>3</sup>混凝土留样 $\geq 3$ 组，某桥梁项目因强度不达标（设计C40，实测C35）责令返工，避免后期结构隐患。

(4) 检查（Check）：实测实量：采用三维激光扫描技术检测墙面平整度（允许偏差 $\leq 4$ mm），某医院项目合格率从75%提升至92%。第三方检测：桩基静载试验加载值 $\geq$ 设计值的120%（某高层建筑项目3根桩基未达标，补桩费用超80万元）。

(5) 处理（Act）：质量问题闭环管理：某地铁项目因防水卷材搭接宽度不足（设计100mm，实测80mm），要求拆除重做并扣除工程款5%。

(6) 数据驱动：依托物联网平台实时采集数据（如混凝土养护温度监测频率1次/2h），某项目强度离散系数从0.12降至0.06。

### 4.2 国内外标准规范体系

国内标准解析：施工方案审核时限 $\leq 7$ 日，逾期视为默认（某项目因延迟审核导致工期索赔15万元）；材料进场验收不合格率阈值 $\leq 2\%$ ，超限需全

面复检。

量化指标：隐蔽工程验收一次通过率 $\geq 95\%$ ，某住宅项目通过红外热成像检测将空鼓整改率提升至98%。《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300-2013[2]：

分部分项验收：地基与基础工程需五方责任主体联合验收（某项目因检测数据不全被责令停工）；混凝土结构实体强度检测值 $\geq$ 设计值的95%（某厂房项目C30混凝土28天强度最低值28.2MPa，符合要求）。国际标准对比（ISO 9001:2015）[3]。

核心差异：风险预控：ISO 9001要求建立质量风险登记册（某国际项目每周更新风险等级，RPN值 $> 150$ 时触发预警）[4]，而国内标准侧重事后整改；持续改进：ISO标准强制要求年度管理评审（如某外资项目通过评审优化检测流程，效率提升40%），国内规范无此条款。融合实践：某跨国工程采用“双标并行”模式，将ISO 9001的风险管理框架与GB 50300验收标准结合，缺陷率下降18%。

## 5 质量控制技术体系构建

### 5.1 设计阶段质量控制技术

#### （1）图纸审核与优化技术

BIM协同审查：碰撞检测：某商业综合体项目通过BIM模型检测出机电管线与结构冲突23处[5]，优化后减少返工成本120万元。

合规性审查：依据《建筑设计防火规范》（GB 50016-2014），强制要求疏散通道宽度 $\geq 1.1\text{m}$ ，某医院项目整改违规设计5处，整改率100%。

#### （2）设计优化建议

某住宅项目通过BIM能耗模拟优化外墙保温厚度（从80mm增至100mm），年节能率提升15%；

结构计算复核：采用有限元分析软件（如ETABS）验证荷载分布，某桥梁项目调整支座布置，减少应力集中风险。

#### （3）设计变更控制

变更率阈值管理：设立设计变更率 $\leq 5\%$ 的硬性标准，某学校项目因超限（变更率8%）触发重新评审，减少无效变更6次；

经济性评估机制：重大变更需提交成本影响报告（如某厂房项目因桩基调整增加造价12%），监理方需签字确认后方可实施。

### 5.2 施工阶段质量控制技术

#### （1）材料检测与管理技术

抽样检测标准：钢材检测：按《钢筋混凝土用钢》（GB/T 1499.2-2018），每60t为一检验批，检测屈服强度（ $\geq 400\text{MPa}$ ）、抗拉强度（ $\geq 540\text{MPa}$ ）及伸长率（ $\geq 16\%$ ）；混凝土留样：每100m<sup>3</sup>留样 $\geq 3$ 组，某项目因留样不足被责令停工整改。

#### （2）智能溯源系统：

1) RFID芯片应用：某地铁项目通过芯片追踪钢筋生产批次，发现2批次假冒HRB400钢材（实测强度仅335MPa），直接退货并罚款30万元；

2) 区块链存证：某国际工程采用区块链记录水泥检测报告，实现10年可追溯。

#### （3）关键工序控制技术

1) 隐蔽工程验收：防水层验收：闭水试验时长 $\geq 48\text{h}$ ，某住宅项目发现渗漏点12处（标准要求 $\leq 3$ 处/1000m<sup>2</sup>），责令返工；钢筋绑扎验收：间距偏差 $\leq \pm 10\text{mm}$ ，保护层厚度合格率 $\geq 95\%$ ，某桥梁项目因保护层偏差超标（最大15mm）扣减工程款8%。

2) 工艺标准化管理：混凝土浇筑：分层厚度 $\leq 500\text{mm}$ ，振捣时间 $\geq 30\text{s/点}$ ，某项目强度达标率从82%提升至98%；焊接工艺控制：采用超声波探伤检测焊缝缺陷，某钢结构厂房项目一次合格率从75%提高至93%。

#### （4）实时监测与预警技术

物联网传感器部署：

1) 混凝土养护监测：实时采集温度（ $20 \pm 2^\circ\text{C}$ ）、湿度（ $\geq 90\%$ ）[6]，某项目强度离散系数从0.15降至0.06；

2) 塔吊安全监控：倾斜度阈值 $\leq 1.5^\circ$ ，某超高层项目预警3次，避免倾覆事故。

无人机巡检：

3) 某市政项目采用无人机检测高支模搭设质量，效率较人工提升4倍（单日覆盖面积5万m<sup>2</sup>）。

### 5.3 验收阶段质量控制技术

#### (1) 分部分项工程评估技术

1) 实测实量标准：墙面平整度：2m靠尺检测，允许偏差 $\leq 4\text{mm}$ [7]，某精装房项目合格率从75%提升至95%；楼板厚度：超声波检测仪测量，偏差 $\leq \pm 5\text{mm}$ ，某办公楼抽检5%点位，不合格点位返工率达100%。

2) 第三方检测验证：桩基静载试验：加载值 $\geq$ 设计值的1.2倍，某高层项目3根桩基承载力不足（沉降量 $> 40\text{mm}$ ），补桩费用超150万元；

3) 钢结构探伤：磁粉检测焊缝缺陷，某场馆项目发现未熔合缺陷12处，返工后通过率100%。竣工资料数字化管理

#### (2) 电子档案系统：

1) 某地铁项目实现检测报告、影像记录等资料100%电子化，调阅效率提升90%；

区块链技术保障数据不可篡改，某国际工程通过ISO 15489认证[8]。

#### 质量追溯机制：

2) 建立材料-工序-验收关联数据库，某住宅项目因楼板裂缝问题追溯至混凝土供应商，索赔50万元。

### 5.4 技术支撑体系与创新应用

#### 数字化技术集成

(1) BIM+GIS融合：某市政管廊项目通过BIM与地理信息系统（GIS）集成[9]，优化管线布局冲突17处，节约工期25天；

(2) 4D进度模拟：某医院项目动态调整资源计划，减少窝工损失80万元。

## 6 关键质量控制技术应用案例分析

#### 某智慧工地项目

(1) 技术应用：BIM+物联网集成：实时监测混凝土养护环境与结构应力，预警6次超标事件；

(2) AI巡检：缺陷识别率提升至88%，人工复核工作量减少50%。

(3) 效益数据：质量缺陷率从行业平均6.2%

降至3.5%；工期缩短18%（原计划480天，实际394天完成）；成本节约率12%（减少返工与罚款）。

失败案例：某厂房坍塌事故

(4) 问题溯源：材料检测漏洞：钢筋复检率仅10%（规范要求 $\geq 30\%$ ），屈服强度不足（实测320MPa vs 设计400MPa）；

(5) 质量失控：隐蔽工程验收记录缺失，混凝土浇筑振捣不充分（强度仅达设计值80%）。

(6) 教训总结：强制推行数字化验收留痕（区块链存证不可篡改）[10]；建立监理责任追溯机制（事故后追责3名监理工程师）。

## 7 技术应用效果量化分析

质量指标提升缺陷率对比：传统质量管理项目：平均缺陷率6.5%；数字化管理项目：平均缺陷率3（降幅41.5%）。验收通过率：隐蔽工程一次通过率从82%提升至96%；分户验收投诉率下降70%（从15%降至4.5%）。

经济效益评估：成本节约：BIM技术减少设计变更成本平均18%[9]（某项目节约200万元）；物联网监测降低返工损失约25%[6]。投资回报率（ROI）：某项目技术投入150万元，节约成本320万元，ROI达113%。

## 8 结论

建筑工程项目的质量控制技术革新，是行业迈向高质量发展的必由之路。本文通过理论与实践结合阐述，证明了数字化技术的显著效益，但技术落地仍需政策、市场与人才的协同推进。未来，随着AI、区块链等技术的深度渗透[10]，质量管理将逐步实现从“被动纠错”到“主动防控”、从“经验依赖”到“数据驱动”的跨越式转型。这一转型不仅关乎工程质量的提升，更是建筑业智能化、可持续化发展的核心支柱。当前，智能质量控制技术的推广仍面临人才短缺和标准不统一等挑战，未来研究方向应进一步提升图像识别在复杂施工环境下的准确性以及智能设备与现场工人的高效协作模式，从而推动加速行业数字化转型。

## 参考文献

- [1] Deming W E. Out of the Crisis[M]. Cambridge: MIT Press, 1986. (PDCA循环理论来源)
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程施工质量验收统一标准:GB 50300-2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2013.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. 质量管理体系要求:GB/T 19001-2016/ISO 9001:2015[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [4] 中国质量协会. 失效模式与影响分析(FMEA)实施指南[M]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [5] 张建平,刘强. 基于BIM的施工冲突检测与优化研究[J]. 施工技术,2021,50(12):45-50.
- [6] 周红波,黄宏伟. 基于物联网的混凝土养护实时监测系统开发[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(2):89-95.
- [7] 吴志强,李国强. 三维激光扫描技术在建筑工程质量检测中的应用[J]. 测绘科学,2019,44(7):123-128.
- [8] British Standards Institution. BS EN ISO 19650-1:2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works[S]. London: BSI, 2018.
- [9] 王要武,张智慧. BIM技术在现代工程管理中的应用研究[J]. 土木工程学报,2015,48(6):1-10.
- [10] 王伟,陈建国. 区块链技术在工程监理数据存证中的应用探索[J]. 工程管理学报,2022,36(3):1-5.