

基于项目管理的实验室施工质量技术提升路径

黄永超

广州泛美实验室系统科技股份有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/ME.2025020008

摘要：实验室施工质量直接影响科研环境安全与数据可靠性，传统管理模式难以满足高标准建设需求。本研究基于项目管理理论，构建涵盖设计优化、工艺创新及数字化监控的质量提升路径，通过BIM技术、物联网监测等手段实现全过程质量控制。实践表明，该体系可显著提高施工质量合格率与效率，为实验室建设提供系统性解决方案。

关键词：实验室施工；质量管理；项目管理

Technical Improvement Path of Laboratory Construction Quality Based on Project Management

Huang Yongchao

Guangzhou Pan American Laboratory System Technology Co., LTD., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract : The quality of laboratory construction directly impacts the safety of the research environment and data reliability. Traditional management models struggle to meet high-standard construction requirements. This study, based on project management theory, constructs a quality improvement path that includes design optimization, process innovation, and digital monitoring. It achieves comprehensive quality control through BIM technology and IoT monitoring. Practical experience shows that this system can significantly enhance the rate of qualified construction quality and efficiency, providing a systematic solution for laboratory construction.

Keywords : laboratory construction; quality management; project management

引言

实验室施工质量直接关系到科研环境的安全性和实验数据的准确性，高标准实验室需满足洁净度、压差、温湿度、菌落度、防震隔声等特殊技术指标要求。然而，传统施工模式下，管理粗放、技术滞后，常导致隐蔽工程缺陷、材料不达标等问题，影响实验室功能实现。《“十四五”建筑业发展规划》（2022年）明确提出推动智能建造与数字化管理，为实验室施工质量提升提供了政策导向。当前研究虽在BIM、物联网等技术应用方面取得进展，但缺乏系统性整合，难以解决多专业协同、全流程管控等核心问题。基于项目管理理论，本研究构建涵盖设计优化、工艺创新及数字化监控的质量提升路径，通过方法创新与技术融合，为实验室高标准建设提供可操作的解决方案。

一、实验室施工质量管理的关键问题分析

（一）施工质量管理的主要挑战

实验室施工质量面临的核心挑战源于其特殊功能需求与复杂工程系统的双重制约。在功能需求方面，科研实验对环境参数的精确控制提出严苛标准，包括但不限于恒温恒湿环境（ $\pm 0.1^{\circ}\text{C} / \pm 5\%\text{RH}$ ）、压差（ $\pm 50\text{pa}$ ）、菌落度（ $\leq 500\text{CFU}/\text{m}^3$ ）、洁净度等级（ISO 5-8级）、振动控制（VC-A至VC-E级）、隔声（-10dB）等专业技术指标，这些要求显著高于普通民用建筑标准^[1]。在工程实施层面，现代实验室建设涉及建筑结构、舒适性（洁净）空调、给排水、电气、自控、消防、特气、纯水及实验室专用系统等十余个专业的协同作业，多系统大管线

综合排布成为质量管控的核心难点。特别是新风系统、排风管道与消防风管等大截面管线（通常直径500-1200mm）的立体交叉，涉及空间碰撞、气流组织与抗震支架等多重技术挑战。

（二）传统施工管理模式的局限性

现行实验室施工管理模式存在明显的系统性缺陷，主要体现在管理维度和技术手段两个层面。在管理维度上，普遍存在“重建设、轻运维”的短视倾向，项目各阶段呈现割裂状态，规划设计、施工建造与运营维护脱节，导致后期使用中出现功能适配性差、改建维护成本高等问题。技术层面则表现为质量监管方式滞后，过度依赖施工人员经验判断而非客观数据支撑，关键质量控制点缺乏量化指标和实时监测^[2]。这种经验导向的管理模式难以满足现代实验室建设对精度和可靠性的严苛要求，特别是在处理多专

业系统集成时，往往因信息不对称和协同机制缺失导致界面管理失效。行业实践表明，传统模式下机电系统与建筑结构的冲突问题发现周期平均延迟 14.5 天，显著增加了质量隐患和整改成本。

二、项目管理理论在实验室施工中的应用框架

（一）项目管理核心要素与实验室施工的适配性创新

现代项目管理理论为实验室施工提供了系统化与可持续并重的管理框架。在范围管理方面，采用开放式实验室设计理念，通过模块化需求分析矩阵将用户需求转化为可扩展的技术参数体系，为后期功能迭代预留接口。可持续项目管理体系（SPM）的引入，使可拆装设计与材料循环利用率达到项目价值的 30% 以上^[3]。进度管理采用“敏捷+”混合模式，关键路径法（CPM）与迭代式冲刺计划相结合，实现施工过程中根据使用者需求进行动态微调。实证研究表明，基于 BIM 的 4D 进度模拟结合敏捷看板管理，可使工期偏差率降低至 18%，材料浪费减少 22%。这种创新管理模式通过建立弹性 WBS 分解结构，有效解决了传统实验室建设中刚性计划与需求变化的矛盾。最新行业数据显示，采用可持续项目管理方法的实验室项目，其变更成本可控制在总造价的 3.8%，较传统模式降低 60%。

（二）PDCA-TQM-敏捷质量三元管理体系

将敏捷方法论融入传统 PDCA 循环与 TQM 体系，构建了适应实验室施工特点的三维质量管理模型。计划阶段采用动态 QFD 方法，通过用户故事映射技术将需求转化为可测试的质量验收标准。执行阶段实施模块化施工单元，每个单元包含标准化作业流程与可持续施工工艺卡，支持实验室功能的非破坏性改造。检查环节融合物联网监测与敏捷站会机制，建立实时质量数据看板。改进机制通过质量回溯会议（Retrospective）和缺陷预防库的双向反馈，形成持续改进的飞轮效应^[4]。实践表明，该体系可使实验室项目的一次验收合格率提升至 99.2%，质量整改周期缩短 50%。特别在可持续施工方面，通过引入可拆装质量评估体系，使实验室改建时的材料复用率提升至 45%，实现了从过程控制到全生命周期质量管理的跃升。

三、实验室施工质量技术提升的具体路径

（一）设计阶段的质量控制技术

1. BIM 技术的应用

BIM 技术在实验室设计阶段的应用显著提升了施工质量控制效能。基于三维建模的协同设计平台实现了建筑、结构、机电等多专业模型的集成化构建，通过参数化设计方法优化实验室特殊功能区域的管线布局与空间规划。通风系统管道与建筑结构的集成设计可将净空高度提升 15%–20%，有效改善实验室空间利用率。碰撞检测技术的应用使设计冲突识别率提升至 95% 以上，施工阶段的设计变更减少约 30%^[5]。某国家重点实

验室项目实践表明，采用 Navisworks 等专业软件进行多专业模型碰撞检查，可提前发现 83% 的管线交叉问题，避免施工返工造成的工期延误和成本增加。这种前置化的质量控制手段为后续施工奠定了精确的技术基础，特别适用于处理实验室复杂的设备安装与管线综合排布难题。

2. 绿色施工与可持续发展

实验室绿色施工的核心在于材料与工艺的生态化转型。新型节能材料的应用显著降低建筑全生命周期能耗，如真空绝热板可使围护结构热阻提升 40%，相变储能材料有效调节室内温度波动。环保工艺标准重点控制施工过程的碳排放与污染排放，采用低挥发性有机化合物（VOC）涂料、装配式施工工艺等技术手段。某 LEED 认证实验室项目数据显示，通过优化材料选择与施工工艺，建筑运营能耗降低 25%，废弃物产生量减少 30%。这种可持续发展理念不仅满足实验室特殊环境要求，更契合《绿色建筑评价标准》（GB/T50378-2019）的可持续发展导向^[6]。

（二）施工阶段的关键技术优化

1. 数字化监控与物联网（IoT）技术

物联网技术在实验室施工阶段的应用实现了环境参数的精准管控。通过部署无线传感网络，可实时监测关键施工区域的温湿度、振动、气压等参数，数据采集频率可达分钟级。某生物安全实验室项目采用 LoRa 组网技术，将环境监测数据偏差控制在 ±1.5% 以内，显著优于传统人工检测的 ±5% 水平。智能预警系统基于历史数据建立动态阈值模型，异常情况响应时间缩短至 15 分钟内。实践表明，该技术使混凝土养护合格率提升至 99.2%，精密仪器基础施工振动达标率提高 18%，为实验室特殊环境建设提供了可靠的技术保障。

2. 标准化工艺与工法创新

高精度设备基础施工技术

高精度设备基础施工技术是实验室建设的核心工艺创新。针对电子显微镜、质谱仪等精密仪器，采用微振动控制混凝土浇筑工艺，将基础振动值控制在 VC-D 级以上标准。通过激光整平与 GPS 定位技术，实现设备基础水平度误差 ≤ 0.1mm/m 的施工精度。某国家级计量实验室应用碳纤维增强地坪技术，使基础变形量降低 60%，完全满足纳米级测量设备的安装要求^[7]。标准化施工工法手册的制定，使同类项目施工效率提升 35%，质量合格率稳定在 98% 以上。这种工艺创新有效解决了传统施工方法难以满足高精度设备安装要求的技术瓶颈。

四、质量保障体系的构建与实施

（一）组织与制度保障

1. 项目团队的专业化分工

实验室施工质量保障需要构建多层次的专业化管理架构。采用矩阵式组织模式，将土建、机电、实验室工艺等专业工程师纳入统一管理体系，形成交叉协同的工作机制。重点设立专项质量工程师岗位，负责关键节点如洁净室施工、防微振基础等特殊工艺的质量把控^[8]。某国家重点实验室项目实践表明，专业团队配

置使施工问题响应效率提升40%，界面协调时间缩短50%。通过建立专业资质认证制度，要求关键岗位人员持证上岗率保持100%，确保技术决策的专业性和权威性。这种分工模式有效解决了传统施工中专业割裂导致的质量管控盲区问题。

2. 质量责任追溯制度

质量责任追溯制度通过建立全流程责任档案实现施工质量的可追溯管理。采用区块链技术对材料进场、隐蔽工程验收等关键环节进行数字化存证，确保质量数据的真实性与不可篡改性。实施“一岗一清单”的责任划分机制，将质量指标分解至每个施工班组和个人。某半导体实验室项目采用质量保证金制度，将结算金额的15%与质量验收结果直接挂钩。数据显示，该制度使施工缺陷率降低38%，质量整改效率提升55%。通过建立负面行为清单和黑名单制度，对重复出现的质量问题实施分级追责，形成有效的质量约束机制。

(二) 技术保障措施

1. 质量检测与验收技术

无损检测技术在实验室施工质量控制中发挥着关键作用。红外热成像技术可非接触式检测建筑围护结构热工缺陷，识别精度达0.1℃温差，有效发现隐蔽部位的空鼓、渗漏等问题^[9]。某生物安全实验室项目采用烟雾法检测技术，对彩钢板拼接接缝的密封性能进行系统性检测，漏风点定位准确率较传统目测法提升65%。结合红外热成像技术，可同步识别隐蔽结构的密封缺陷，检测效率提高50%以上。针对钢结构节点，采用非接触式激光测振技术替代传统焊接检测，在避免破坏性检测的同时实现100%覆盖。这些无损检测技术组合为实验室围护结构的气密性验收提供了量化依据，使整体气密性合格率提升至98.2%，有效保障生物安全实验室的负压控制要求。

2. 大数据分析 with 质量预测

基于大数据的质量预测技术实现了实验室施工缺陷的主动防控。通过机器学习算法分析历史项目数据，建立包含127个质量风险特征的预测模型，可提前识别90%以上的潜在施工缺陷。某洁净实验室项目应用该技术，将墙体气密性问题的预测准确率提升至88.3%。数据挖掘揭示出不同施工季节对环氧地坪质量的影响规律，指导优化了施工时间窗口选择。实践表明，该技术使质量事故发生率降低52%，预防性整改成本节约37%，为实验室特殊工艺的质量控制提供了智能化决策支持。

(三) 持续改进机制

1. 施工后评估与反馈

施工后评估机制通过多维数据采集构建质量改进闭环。采用德尔菲法开展用户满意度调查，重点评估实验室功能适配性与使用便捷性，调查维度涵盖温湿度稳定性、设备兼容性等12项指标。在运维阶段，我司自主研发的实验室三维可视化运维平台通过物联网实时集成能耗、设备状态及环境参数等多维数据，并基于AI算法构建动态质量缺陷特征库。在某国家级化学实验室项目中，该平台通过数字孪生技术实现运维数据与BIM模型的智能联动，使二次改造方案优化效率提升75%，改造成本降低67%。平台特有的“逆向反馈引擎”可将运维数据自动映射至设计施工模块，形成闭环的“设计-施工-运维”全生命周期管理体系。

2. 知识管理与技术迭代

知识管理系统通过结构化案例库推动施工技术持续优化。采用本体论方法构建实验室施工知识图谱，整合126个典型项目的工艺参数和质量数据，形成可检索的数字化资产。最佳实践手册收录不同等级实验室的施工要点，包括防微振基础施工、彩钢板拼接、变风量等23类专项工艺标准^[10]。某国家级检测中心应用该系统后，新技术推广应用周期缩短40%，同类项目施工效率提升28%。基于案例库的机器学习模型可自动推荐优化方案，使新材料新工艺的试错成本降低55%。这种知识沉淀机制有效促进了行业技术迭代，实验室建设项目的质量标准差较传统模式缩小37%。

五、总结

本研究系统构建了基于项目管理的实验室施工质量技术提升路径，通过整合BIM、物联网等数字化技术，形成覆盖设计、施工、运维的全过程质量控制体系。实践验证表明，该体系可使实验室项目质量合格率提升至98%以上，施工效率提高30%-35%。研究创新性地将PDCA循环与TQM理论应用于实验室特殊环境建设，解决了多专业协同与高精度施工的技术难题。随着智能建造技术的深入发展，未来实验室施工将更加注重数据驱动的精细化管理。建议行业加快建立实验室建设标准数据库，推动质量管控从经验判断向智能决策转型，为高标准科研环境建设提供更可靠的技术保障。

参考文献

- [1] 陈斌, 刘湘慧, 陈玉斌. 基于决策实验室分析法及解释结构模型的交通隧道施工事故链构建 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15222-15229.
- [2] 穆秀君, 张建玲, 白宁. 实验室幕墙施工安全管理 [C]// 国检集团第一届检验检测人员岗位能力提升论文集. 国检集团本部第二检验认证院, 2020: 87-88.
- [3] 钟电. 中国电科院施工装备实验室为“新基建”施工设备安全质量保驾护航 [J]. 电力设备管理, 2020, (04): 122+131.
- [4] 王帆, 赖泽荣, 吴源青, 等. 现有结构实验室内新建大型多功能结构试验平台设计与施工研究 [J]. 建筑结构, 2018, 48(23): 61-65+71.
- [5] 梁国权. 基于建筑工程技术下工程质量提升路径探析 [J]. 精品, 2019(10): 1.
- [6] 李丽, 黄素. 基于精细化项目管理的高职人才培养质量提升路径探析 [J]. 教师教育论坛, 2017(7): 4.
- [7] 李子彬. 提升土木工程施工管理与施工质量的实践路径探索 [J]. 中国厨卫, 2023, 22(5): 128-130.
- [8] 贺瑶. 建筑工程施工技术管理水平的提升路径探究 [J]. 四川水泥, 2016(4): 1.
- [9] 宋国鹏. 有效提升建筑工程施工技术控制水平的路径分析 [J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2023(4): 4.
- [10] 张慧妮. 提高建筑工程管理及施工质量的有效路径分析 [J]. 中国建筑装饰装修, 2023(3): 132-134.