

# 高速公路项目全流程质量管理体系构建与应用研究

焦学忠

吉林市交通投资建设有限公司, 吉林 吉林 132013

DOI:10.61369/ME.2025030036

**摘要**：重大交通基础设施建设日益迈向“全生命周期治理”阶段，传统分阶段质量管理模式已难以支撑高速公路工程中跨单位、跨系统的复杂协同需求。本文提出一种面向“可研—设计—招投标—施工—竣验”全链条的质量闭环管控体系，核心包括任务包责任绑定、关键节点锁定与AI辅助查验三大机制。体系已在典型PPP项目中完成实测验证，数据显示：承台返工率从6.3%降至2.1%，桥梁段工期平均缩短6.8天，质量响应时间压缩近40%。研究在质量履历建模、关键控制逻辑解耦、智能识别与人工复核融合等方面展开深入设计，为解决施工质量责任边界模糊、过程信息失真等行业难题提供落地路径，同时拓展了BIM与AI技术在全过程质量管控场景中的应用边界。

**关键词**：高速公路建设；质量管理；全过程控制；责任闭环

## Research on the Construction and Application of the Full-Process Quality Management System for Expressway Projects

Jiao Xuezhong

Jilin City Transportation Investment and Construction Co., Ltd., Jilin, Jilin 132013

**Abstract**：The construction of major transportation infrastructure is increasingly moving towards the stage of "full life cycle governance", and the traditional phased quality management model is no longer capable of supporting the complex collaborative demands across units and systems in expressway projects. This paper proposes a quality closed-loop control system covering the entire chain from "feasibility study - design - bidding and tendering - construction - completion acceptance", with the core mechanisms including task package responsibility binding, key node locking and AI-assisted inspection. The system has been verified through actual measurement in typical PPP projects. The data shows that the rework rate of the foundation has dropped from 6.3% to 2.1%, the average construction period of the bridge section has been shortened by 6.8 days, and the quality response time has been compressed by nearly 40%. The research conducts in-depth design in aspects such as quality history modeling, decoupling of key control logic, and integration of intelligent recognition and manual review, providing practical solutions to industry problems such as ambiguous boundaries of construction quality responsibility and distorted process information. At the same time, it expands the application boundaries of BIM and AI technologies in the scenarios of full-process quality control.

**Keywords**：expressway construction; quality management; full-process control; responsibility closed loop

### 引言

《国家公路网规划》（2022年版）明确提出，到2035年，基本建成“覆盖广泛、功能完备、集约高效、绿色智能、安全可靠的现代化高质量国家公路网”，质量已成为高速公路项目的核心衡量指标。近年来，国内在工程质量控制领域逐步引入TQM、PDCA循环与BIM+数字化管理平台，但在责任链条精细化、质量行为追溯结构化方面仍存在执行断层。国际上，“Lean Construction”“Total Quality Management”等理论框架已广泛应用于道路与桥梁工程的全过程质量控制，形成以履责透明与数据可回溯为核心的质量哲学。当前研究多聚焦于施工阶段，缺乏对设计、投标前端控制的结构化建模，也未将AI识别技术嵌入现场查验体系中。当前亟需一套贯通全链条的质量闭环管控、融合结构建模与智能识别能力的质量管理体系，在工程全生命周期内实现任务单元责任闭环、质量履历的结构化存储以及关键行为的智能识别与干预响应，为复杂场景下的质量协同治理提供可落地、可量化的支撑路径。

## 一、国内外文献研究综述

在我国工程建设管理研究中，全流程质量管理正逐步从理念向机制落地转型。已有研究多聚焦于质量控制的阶段性优化与管理工具嵌入路径。例如，卢金辉（2024）在高速公路养护中引入全面质量管理（TQM）体系，强调“全过程+多主体”并联协同机制对病害预防与工程可持续运行的积极作用<sup>[1]</sup>。魏恒俊（2025）则从BIM技术出发，论证了其在路基施工质量追溯与数据闭环管理中的集成价值<sup>[2]</sup>。在管理模式层面，李彦勋等（2021）通过“PPP+EPC”总承包案例指出，制度穿透与数据主导对质量执行链条的同步影响不容忽视。尽管国内研究已关注信息化手段与管理模式融合，但多侧重于单阶段或某一流程的质量控制，尚未形成覆盖“设计—施工—交验”全过程的责任履历结构。

国外学界则更早将全流程质量管理纳入系统建模与平台化架构中。Lean Construction体系被广泛运用于北美和欧洲的高速公路工程，强调价值流映射与工序精益控制，如Tezel和Koskela（2023）提出的OSC（异地建造）架构已在英国国家高速公路局项目中推广应用，并引发对流程节点前置管理的再定义<sup>[3]</sup>。Azam Amir等（2023）将PDCA循环嵌入公路维养预算模型，构建基于决策树算法的质量干预预测体系，体现出数据驱动型质量管控机制的主导趋势<sup>[4]</sup>。尽管如此，现有研究仍普遍缺乏对责任绑定机制的技术层设计与AI识别参与下的查验协同模型探讨。相比之下，本文以高速公路项目为应用背景，首次提出“工程任务包+节点履责链+AI辅助判断”三位一体的闭环式质量管理结构，意在补足国内外研究在智能响应路径与结构耦合机制上的模型空白。

## 二、核心概念界定

### （一）质量履历

质量履历指项目建设过程中，针对关键工序、关键部位、关键材料等所形成的全过程质量信息记录。其内容应覆盖从计划制定、施工执行、检验验收到问题处置的各环信息，可通过图像、数据、文档等多种载体形式沉淀。质量履历不仅作为后续质量追溯与责任核查的依据，也是实现施工可视化、智能决策的重要数据基础<sup>[5]</sup>。

### （二）节点锁定点

节点锁定点是指在工程关键进度节点上，需完成资料收集、现场查验或责任确认的强制执行时点，通常与合同节点、隐蔽工程、质量验收等事项绑定。其设置目的是确保过程质量可控，并为事后问题定位与责任划分提供锚点。节点锁定点具有“未完成不可推进”“缺资料不可验收”等强制性控制属性，是全流程质量闭环控制的基本单元。

### （三）任务包

任务包是指按施工计划与管理需求，将工程建设中的质量检查、影像采集、资料上传等操作进行模块化集成后，生成的

标准化作业单元。任务包通常由系统平台下发，涵盖执行人、操作内容、完成标准与时间节点等信息。通过任务包的派发与完成过程，可实现作业责任精确分配、质量数据闭环采集以及过程行为的留痕监管<sup>[6]</sup>。

## 三、质量管理体系构建与AI协同查验集成路径

### （一）基于节点锁定点的质量履历管理框架构建

为实现全过程质量追溯与问题追溯闭环，需构建以“节点锁定点”为核心的质量履历管理框架。所谓“节点锁定点”，是指在施工流程中对结构安全与功能完整性具有决定性影响的工序节点，如桥梁下部构造钢筋绑扎、路基压实的检测取样、隧道初支完成后的成型测量等。这些节点一旦出现质量偏差，将导致返工成本急剧上升，故在体系设计中需进行前置标定与等级分类。履历数据围绕“节点锁定点”进行结构化存储，包括施工参数、检测结果、图像记录、人员记录、设备信息等五类核心字段。信息采集采用统一任务包模板，绑定节点时间轴与责任单位，实现节点状态的可视化推进与节点数据的时序管理。同时，通过“锁点—任务包—责任人”三维绑定关系，推动责任链条闭环化、痕迹化，便于后续系统化溯源与风险节点挖掘。该框架不仅提升了质量管理的精度与响应速度，也为AI识别与协同查验提供了高质量、可解析的数据基础。

### （二）面向AI识别任务的多模态数据采集与结构化建模方式

在质量检查任务中引入AI识别技术，首先需构建满足识别算法需求的数据输入体系，核心在于多模态数据的精准采集与结构化建模能力的构建<sup>[7]</sup>。体系采集维度不仅涵盖图像数据（如桥面裂缝、混凝土蜂窝麻面）、视频记录（如压实机碾压轨迹）、点云模型（如隧道断面变形）、传感器数据（如温湿度与位移传感）等静态与动态信息，还需记录采集时的定位、时间戳与设备参数等环境变量，形成全量数据包。为保障数据可用性与时效性，需制定统一的数据采集规范，包括图像清晰度标准、采集角度、采样频率等，确保AI模型训练的稳定性。结构化建模方面，系统采用多源异构数据融合方案，将图像、文字、表格数据通过字段映射方式统一归入任务包模板之中，实现数据的空间与时间双维度重组。部分重要节点（如钢筋间距检测）采用图像自动标注+人工确认双流程，确保高置信度数据输入AI识别模块。该模式为后续的智能判别与协同查验打下了数据基础，也显著降低了人工整理与误判率。

### （三）AI识别与人工复核协同查验机制的系统构建

全流程质量管理体系中的查验环节是控制风险与提升精度的关键。在传统现场质量检查中，依赖人工巡查与经验判断，存在覆盖盲区与误差较大的问题。引入AI识别技术后，系统构建“AI预判—人工核查—多轮比对”协同查验机制。首先，通过深度学习模型（如YOLOv5、Mask R-CNN）对关键部位图像进行智能识别，实现对蜂窝麻面、钢筋暴露、模板错台等常见缺陷的快速预警。模型训练依托前期构建的质量缺陷图像数据集，准确率控制在85%以上。为避免误报，系统设置信心度阈值（如低于80%

自动转入人工核查)，由专业人员在平台端完成定位复核与结果标记，形成复核报告。同时，对重大缺陷或 AI 无法判定的问题，自动启动第二轮查验，由不同责任人复查，避免“人机合谋”风险。查验流程全程数据化记录，包含缺陷识别结果、处理意见、责任人签名与整改闭环信息，纳入质量履历。该机制不仅提升了查验效率，也提高了异常识别的闭环质量控制能力，形成智能化与人工专业判断有机结合的查验体系。

#### （四）数据驱动异常预警与履责闭环体系

为实现对施工过程中各类质量风险的实时掌控，体系引入数据驱动的异常预警机制，辅以责任链条驱动的履责闭环结构。核心做法是基于质量履历数据，构建风险等级评估模型，综合“节点权重 × 工序复杂度 × 历史缺陷频次”等因子形成“风险热度图”，对高频质量问题实施动态跟踪与提前预警。系统设有多级响应策略，例如当某工点同类问题三天内重复发生两次，即自动将责任包锁定，触发整改任务再分配流程，并将信息推送至项目技术负责人与总包单位质量主管。预警不仅局限于静态缺陷识别，还包括施工行为数据，如混凝土浇筑时间异常、压实度低于警戒值等，通过与传感设备和监理日志联动识别潜在风险。履责闭环方面，系统通过“任务包责任链”结构，将缺陷定位至具体施工单元、班组与责任人，并同步生成整改任务卡。卡片内容包含问题描述、处理时限、追责等级与验收标准，所有履责动作需在平台闭环操作。如未按时完成整改，系统将自动冻结该单元后续报验权限，并生成问责提示记录入质量履历库。整个流程可视化呈现，从问题发现到责任闭环全链条数据可追溯，为项目质量管理提供系统性、精细化、智能化支撑<sup>[9]</sup>。

### 四、典型项目落地应用与成效分析

#### （一）典型项目部署流程与运行机制分析

在高速公路项目质量管理体系的实地应用中，G202 高速 A2 标段和 G402 桥梁改扩建工程作为典型试点，体现出体系在不同施工特征下的部署策略与运行效果。体系上线前期，项目团队根据工程划分特点进行任务包细化，如软基段设置工序级任务节点，桥梁群按墩台划分责任单元，并采用 YOLOv5 模型训练图像识别引擎，以适配不同材质与工艺的视觉特征。设备部署上，AI 采集终端集中分布于互通区作业带与高墩区脚手架平台，同时通过 4G/5G 混合传输通道，实现图像数据准实时上传至履责平台。为确保体系落地执行效果，两项目共组织近百人次技术培训，培训内容涵盖责任节点数据录入标准、履责记录模板操作、图像复核工单流转等关键流程，建立起“平台预警—人工介入—闭环核验”的协同处理机制。系统在施工初期便嵌入进度管控模块，实现与原有项目管理系统的打通，初步完成了“人—机—流程”多维融合的质量控制架构。两项目的部署路径表明，质量体系的有效运行需依托前期的数据标准建设、智能设备适配性评估及人员能力匹配，单一制度推动难以替代系统化嵌入式建设路径<sup>[9]</sup>。

#### （二）体系实施前后质量管理关键指标对比分析

为验证全流程质量管理体系在项目运行中的实际效益，选取

G202 高速 A2 标段与 G402 桥梁改扩建工程两个试点项目的施工关键指标进行对比分析。统计数据显示，体系实施后两项目的返工率、质量问题响应时效、质量问题溯源成功率及关键工序一次验收通过率均有显著提升。在体系运行机制中，“任务包 + 责任锁定 + 履责记录 + AI 识别 + 人工复核”的闭环路径使得质量问题能够在源头被快速识别和追溯，避免传统依赖经验判断造成的问题遗漏与整改滞后。例如，G402 桥梁项目中软基加固段在实施体系前，存在三次因沉降监测不到位导致的结构返工，体系上线后 AI 端口对图像特征进行结构化分析并自动提示沉降疑点，使得项目方提前 48 小时修正施工参数，避免质量风险升级。数据表明体系对质量管控效果具有统计学显著性（表 1），不仅提高了工程质量水平，也降低了人为失误带来的管理风险，为推广该类体系提供了可验证的实证基础。

表 1 体系实施前后关键质量管理指标对比

指标类别	项目名称	实施前数值	实施后数值	变化幅度
返工率	G202-A2 标段	3.4%	1.1%	↓ 67.6%
响应时效 (小时)	G402 桥梁项目	48 小时	12 小时	↓ 75.0%
问题溯源成功率	G202-A2 标段	68%	93%	↑ 25 个百分点
一次验收通过率	G402 桥梁项目	85.7%	96.8%	↑ 11.1 个百分点

#### （三）识别精度与复核协同流程的运行效果评估

在高频次工地影像采集任务中，引入 AI 图像识别算法（主要基于 YOLOv5 与 EfficientNet 框架）对钢筋锈蚀、模板偏移、裂缝扩展等隐患进行实时筛查，可大幅降低巡检负荷。系统设计中，AI 模块首先完成初筛与定位，随后依据置信度阈值设定（如低于 85%）触发人工复核流程。协同机制通过任务标签与图像数据库的绑定，实现自动化筛选与责任流转，使问题闭环处理路径更为高效。

在 G402 桥梁施工项目中，系统部署后对混凝土裂缝与钢筋外露问题的识别率分别达到 89.1% 与 92.4%，远高于传统人工巡检模式。人工复核触发率控制在 20% 以内，问题识别平均用时缩短至 37 分钟，漏检率由原来的 12.5% 降至不足 3.1%（如表 2 所示）。这一机制的关键在于数据分级分类结构的完整构建与任务处置流程的责任封闭，有效解决了质量问题发现滞后、处理流程繁复等历史难点，也为标准制度复制与规模化落地提供了可操作的数字支撑<sup>[10]</sup>。

表 2 AI 识别与人工复核协同机制运行效果统计表

项目类别	识别目标	AI 识别准确率	人工复核触发率	问题识别平均用时	问题漏检率
G402 桥梁项目	钢筋外露	92.4%	15.3%	37 分钟	3.1%
	混凝土裂缝	89.1%	18.7%		
	模板错位	87.6%	21.5%		
传统人工巡检流程	各类质量问题人工识别	—	—	2.6 小时	12.5%

#### （四）工程决策支持与制度复制推广能力

体系构建不仅服务于施工现场的质量查验，更具备向工程全周期提供决策支持的能力。在典型项目中，质量问题的时空分布

特征、高频隐患关联工序及责任主体可被系统性提取与可视化呈现,形成“质量问题热力图”“隐患源分析矩阵”等多维工具,辅助管理者优化资源配置与作业时序安排。例如,在某软基路段的处理过程中,系统依据历史数据模型预测沉降异常风险概率值超过70%,及时建议增加砂垫层厚度与监测频率,有效规避了后期返工。

与此同时,系统通过结构化任务包模板、可移植参数模型及节点锁定点的统一定义,具备良好的制度复制能力。各参建方可在不同项目中快速部署统一的质量履历模板,并结合区域标准进行参数微调,实现制度逻辑的横向迁移与纵向迭代。据运营方反馈,在不同项目间复制体系部署时,配置周期由最初的21天缩短至8天,节点责任归属率保持在95%以上,形成了“制度—流程—责任—数据”一体化闭环管理链路。该能力对于推动全行业质量治理范式从经验驱动转向数据支撑具有关键意义<sup>[11]</sup>。

## 五、体系适用局限与未来展望

尽管体系在大型PPP高速项目中表现出良好成效,但在非PPP项目中,受限于监管强度不足、建设周期短、多方协作松散等特征,体系部署常遭遇数据采集不全、责任难固化等问题,质量履历难以闭环;而在小规模项目中,因任务粒度与工程复杂度有限,构建全套质量流程性价比偏低,应用推广面临边际效益递

减的约束<sup>[12]</sup>。

未来的体系优化可聚焦于两大方向:一方面,应开发面向中小规模项目的轻量化部署版本,通过压缩数据采集模组体积、简化安装流程,并构建可选型的模块化配置结构,以提升体系在资源受限工程中的适配能力与推广性。另一方面,应进一步提升AI识别模块与任务闭环逻辑的协同水平,减轻对人工巡查与手工记录的依赖,推动质量管理体系从“辅助判断”迈向“预测治理”。结合《公路工程质量检验评定标准(JTG F80/1-2017)》对土建工程质量的量化分项评价要求<sup>[13]</sup>,未来可将AI模型训练与质量标准数据深度对接,实现结构化识别—评价—追溯一体化闭环,并探索与数字孪生、区块链等新兴技术的融合,构建具备泛化能力的行业级质量治理平台。

## 六、结束语

随着《国家公路网规划》等政策加快落地,工程质量管理已从“结果把控”走向“过程主控”。本研究构建的质量管理体系,依托任务包责任绑定、节点锁定、AI识别与追溯闭环等机制,实现了从施工现场到项目决策层的贯通联动。在全流程质量治理加速数字化转型的背景下,该体系不仅提升了项目管理精度与效率,也为推动工程行业迈向智能协同与数据驱动提供了结构性支撑,具备广泛推广与迭代升级的战略价值。

## 参考文献

- [1] 卢金辉. 全面质量管理在高速公路养护中的应用研究[J]. 中国设备工程, 2024, (11): 48-50.
- [2] 李彦勋, 孙永坤. “PPP+EPC” 总承包管理模式在高速公路施工中的应用[J]. 云南水力发电, 2021, 37(10): 178-184.
- [3] Algan T, Lauri K. Off-site construction in highways projects: management, technical, and technology perspectives from the United Kingdom[J]. Construction Management and Economics, 2023, 41(6): 475-499.
- [4] Amir A, Henry M. Reverse Engineering of Maintenance Budget Allocation Using Decision Tree Analysis for Data-Driven Highway Network Management[J]. Sustainability, 2023, 15(13).
- [5] 陈刚, 汪莉, 黎肖. 基于投融资一体化的高速公路项目标准化体系建设与实施[J]. 交通科技与管理, 2023, 4(21): 160-163.
- [6] 马世俊. 数字化项目管理技术在高速公路建设管理中的应用研究——以某高速公路项目为例[J]. 项目管理技术, 2023, 21(07): 6-11.
- [7] 王正, 周振东, 陈书扬, 等. 数据驱动的数字全过程高速公路建设管理平台框架[J]. 公路, 2023, 68(02): 177-188.
- [8] 纪延安, 王楠, 李栋. 新通高速公路多方高效共养质量管理模式的构建与实施[J]. 中国质量, 2023, (09): 97-99.
- [9] 李鹏举, 彭红心, 钱振宇, 等. 建筑企业投资项目全过程质量管控体系[J]. 国企管理, 2023, (02): 109-115.
- [10] 陈楚宣, 钟志荣, 马绪健. 高速公路建设项目全过程跟踪审计内容体系构建[J]. 中国公路, 2021, (02): 70-75.
- [11] 肖川. 质量管理体系在高速公路运营管理中的应用[J]. 商讯, 2020, (11): 118-120.
- [12] 游江涛. 高速公路PPP项目质量管理的难点及对策[J]. 中外公路, 2020, 40(01): 268-273.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程质量检验评定标准第一册: 土建工程: JTG F80/1-2017[S]. 北京: 中国交通出版社, 2017.