

市政道路交通安全设施全生命周期管理优化研究

赖苹芳

龙岩顺康建设工程有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i2.12968

[摘要] 随着城镇化进程加速,市政道路交通安全设施的安全性与耐久性面临严峻挑战,传统碎片化管理模式导致的设施老化、事故频发及运维低效问题日益凸显。本文以龙岩市公安局交通警察支队道路交通标线维护项目为实践基础,引入全生命周期管理理论,构建涵盖规划设计、施工质量控制及运维决策的一体化管理体系。通过实证分析发现,当前设施管理存在设计阶段材料选型盲目、施工质量控制依赖人工经验、运维阶段缺乏动态响应机制等核心问题。针对这些痛点,研究提出"预防-控制-养护"全链条优化策略,结合公路安全设施专业承包资质及实践数据,研发抗老化材料选型模型、智能化施工检测技术及基于交通流量的动态养护算法。实证结果表明,该策略可使设施全生命周期延长30%以上,事故率降低约25%,运维成本节约28%,显著提升了市政道路交通安全设施管理的科学化与精细化水平,为智慧城市交通系统建设提供了具有行业指导价值的创新解决方案。

[关键词] 全生命周期管理; 市政道路交通安全设施; 动态养护; 智能化检测; 成本效益分析
中图分类号: TU99 **文献标识码:** A

Research on the Optimization of Life Cycle Management of Municipal Road Traffic Safety Facilities

Pingfang Lai

Longyan Shunkang Construction Engineering Co., Ltd.

[Abstract] With the acceleration of urbanization, the safety and durability of municipal road traffic safety facilities are facing severe challenges. The aging of facilities, frequent accidents, and inefficient operation and maintenance caused by traditional fragmented management models are becoming increasingly prominent. This article is based on the road traffic marking maintenance project of the Traffic Police Detachment of Longyan Public Security Bureau, introduces the theory of full lifecycle management, and constructs an integrated management system covering planning and design, construction quality control, and operation and maintenance decision-making. Through empirical analysis, it is found that there are core problems in current facility management, such as blind material selection in the design stage, reliance on manual experience for construction quality control, and lack of dynamic response mechanisms in the operation and maintenance stage. In view of these pain points, the whole chain optimization strategy of "prevention control maintenance" was studied and put forward, and the anti-aging material selection model, intelligent construction detection technology and dynamic maintenance algorithm based on traffic flow were developed in combination with the professional contracting qualification and practical data of highway safety facilities. The empirical results show that this strategy can extend the entire lifecycle of facilities by more than 30%, reduce accident rates by about 25%, save operation and maintenance costs by 28%, significantly improve the scientific and refined level of municipal transportation facility management, and provide innovative solutions with industry guidance value for the construction of smart city transportation systems.

[Key words] Full lifecycle management; municipal transportation facilities; dynamic maintenance; intelligent detection; cost-benefit analysis

引言

市政道路交通安全设施作为城市运行的关键载体,其管理

效能直接关乎人民生命财产安全与城市运行效率^[1]。随着交通流量持续增长及智慧城市建设和推进,传统分段式管理模式逐渐

暴露弊端:设计阶段缺乏前瞻性导致设施先天不足,施工环节质量控制依赖人工经验造成隐患,运维阶段被动响应致使小问题演变为大风险。据行业统计数据,约65%的城市交通设施在服役5年后即出现功能性衰减,由此引发的二次事故占交通类事故总量的38%以上。为破解这一系统性难题,本文创新性引入全生命周期管理理论,构建涵盖规划设计、施工质量控制、智能运维决策的全链条管理框架。通过整合工程管理与交通安全交叉学科视角,结合公路安全设施专业承包资质企业的实践数据,提出“预防-控制-养护”三维优化策略。研究采用文献分析法梳理理论脉络,运用实证建模技术构建动态养护决策模型,通过成本效益对比验证策略有效性,旨在为市政道路交通安全设施管理提供兼具理论深度与实践价值的创新解决方案,推动城市交通系统向精细化、智能化方向升级。

1 市政道路交通安全设施管理现存问题分析

1.1 设计阶段系统性缺陷。市政道路交通安全设施设计阶段存在两大深层矛盾:材料选型科学依据不足与标准化体系缺位^[2]。在材料应用层面,部分地区为控制初期投资,采用未通过全生命周期成本验证的低端材料。以热熔标线为例,某些项目选用仅满足短期反光标准的廉价玻璃珠,其夜间视认性在2年内衰减达85%,迫使频繁复划形成恶性循环。更严峻的是,材料环境适应性研究缺失导致系统性失效,如南方多雨地区未选用耐酸雨腐蚀的合金钢护栏,3年锈蚀率达67%,直接威胁防撞性能。标准化缺失则表现为设计单位对规范解读的随意性,同一城市不同路段护栏高度相差30cm,标志牌版面信息优先级混乱,这种“碎片化设计”不仅破坏城市空间秩序,更因视认连续性中断增加18%-25%的追尾事故风险。某新一线城市因未建立统一的交通设施设计参数库,5年内重复改造费用累计超2亿元,凸显设计阶段系统性缺陷对全生命周期效益的深远影响。

1.2 施工质量控制技术滞后。施工质量监管体系滞后性体现在三个维度:检测手段原始化、工艺衔接断裂化、质量责任模糊化^[3]。传统标线厚度检测仍依赖针刺法,该方法抽样率不足3%且破坏路面结构,某省道改造工程因此漏检85%不达标路段,通车后3个月内标线脱落率达52%。施工工艺衔接漏洞更具破坏性,如路面铣刨作业未预留标线附着层构造深度,导致新划标线在重载车辆作用下2个月内剥落40%;护栏立柱基础浇筑与路基沉降期错位,引发立柱倾斜率达12%。这种“分段负责”的施工模式导致质量责任真空,如某跨线桥防撞桶安装工程,因未建立施工全过程质量追溯链,通车后半年内23%的防撞桶因固定螺栓松动移位。智能化监管缺失导致过程质量控制失位,如未引入BIM技术进行施工预演,某互通立交标志牌安装出现5处视距遮挡问题。数据显示,采用人工经验判断的施工项目,质量缺陷返修成本占总投资的18%-25%,而集成智能检测系统的项目该比例可降低至5%以下,凸显技术滞后对经济效益的严重侵蚀。

1.3 运维管理被动化困境。运维管理呈现显著的“事件驱动型”特征,其核心症结在于预防性维护机制的缺失与数据价值的深度沉睡。养护决策仍主要依赖人工巡检报告,某二线城市数据

显示,76%的护栏维修工单由交通事故触发,而基于结构健康监测的主动干预不足3%。这种被动模式导致设施劣化路径未被阻断,如某隧道反光标线因未建立亮度衰减预警模型,完全失效后才启动更换,期间发生追尾事故4起。数据孤岛现象进一步加剧运维低效,交通监控视频、设施巡检记录、气象数据等分散在交警、城管、气象等7个系统,形成“数据烟囱”。以信号灯养护为例,因未融合降雨天数与电缆绝缘性衰减数据,某沿海城市年均发生信号灯短路故障412起,直接经济损失超300万元。更严峻的是,缺乏全生命周期效益评估模型,如未建立车流量-设施损耗-养护成本的动态关联,导致养护预算分配与实际情况存在35%的偏差。这种“头痛医头”的运维模式,使设施平均服役周期比理论值缩短40%,严重削弱市政资产的综合效能。

2 全生命周期管理理论框架构建

2.1 全生命周期管理理论框架设计。本文构建的全生命周期管理框架以“预防-控制-养护”为主线,形成闭环管理系统^[4]。理论框架由三个核心模块构成:前端预防模块基于多源数据建立材料环境适配性模型,通过参数化设计生成定制化设施方案;过程控制模块引入BIM技术进行虚拟建造,结合物联网传感器实现施工参数实时校准;后端养护模块建立设施健康度评估体系,运用数字孪生技术预测性能衰减轨迹。该框架突破传统分段管理思维,将设施生命周期划分为“设计冗余期-施工窗口期-运维黄金期”三个阶段,通过模块化设计实现各阶段的平滑衔接。以护栏设计为例,框架要求在设计阶段即植入全周期成本函数,综合考虑材料腐蚀速率、碰撞概率等参数,生成兼顾安全性和经济性的最优解。

2.2 技术实现路径创新。技术实现路径围绕“数据驱动、智能感知、动态决策”展开。在设计阶段,开发基于机器学习的材料选型系统,输入当地气候、交通流量等12维数据,即可生成个性化设施配置方案。施工阶段研发智能检测机器人,集成三维激光扫描与图像识别技术,实现标线厚度、护栏垂直度等参数的100%全检。运维阶段构建数字孪生平台,通过无人机巡检数据与BIM模型实时比对,自动生成养护工单。以标线养护为例,系统可结合车流量热力图与标线反光系数衰减模型,精准定位优先养护路段。某试点项目数据显示,该技术路径使设计迭代周期缩短60%,施工缺陷率下降82%,运维响应速度提升4倍。

2.3 效益评估机制构建。建立包含经济效益、社会效益、环境效益的三维评估模型。经济效益评估采用全生命周期成本法,对比传统管理与优化策略下的总成本现值;社会效益评估引入交通冲突指数、事故率下降率等指标;环境效益则量化碳排放减少量与资源利用率提升值。以某地级市试点项目为例,优化后设施全生命周期成本降低28%,其中设计阶段节约15%,施工阶段节约20%,运维阶段节约35%。事故率下降带来的间接经济效益达1.2亿元/年,碳排放减少量相当于新增绿地12公顷。评估机制还引入动态权重调整算法,可根据城市发展战略实时优化效益评估维度,为管理决策提供科学依据。

3 实证研究

3.1 案例背景与问题诊断。XX道路作为连接城市核心区与物流园区的交通动脉,日均车流量达8.2万辆,其中重型货车占比35%。经前期评估发现,该路段交通设施存在三重典型问题:标线因未采用耐候性材料,2年内反光系数衰减至规范值的45%;护栏立柱因施工期未考虑路基沉降,倾斜率达12%;信号灯电缆因缺乏智能监测,年均短路故障14次。传统管理模式,年均设施维护成本达480万元,其中重复修复费用占比42%。为验证全生命周期管理框架的有效性,研究选取该道路3公里示范段开展实证,覆盖设计优化、智能施工、动态运维全环节。

3.2 优化策略实施过程。针对市政道路交通安全设施老化、事故频发等问题,本文实施“三位一体”系统性优化方案:在材料选型层面,创新采用纳米级陶瓷反光材料与锌铝镁合金护栏,经多轮环境模拟实验验证,新型标线反光寿命突破5年大关,护栏耐腐蚀性能较传统镀锌材料提升70%;施工工艺升级聚焦精准化与智能化,通过BIM技术构建三维施工模型,预先规避管线冲突等隐患,配合3D激光摊铺设备实现标线厚度 $\pm 0.2\text{mm}$ 的纳米级控制,立柱基础植入智能沉降监测桩,将施工效率提升40%;运维机制重构则构建“监测-预警-处置”闭环,部署边缘计算节点实时解析车流视频与传感器数据,生成设施健康度云图谱,当护栏实时冲击力超过阈值时自动触发三级预警机制,使质量缺陷率下降至2.3%,形成“设计-建造-运维”全链条质量管控体系。

3.3 效益分析。通过成本效益对比,优化后全生命周期成本呈现显著下降趋势:初期投资增加15%,但运维阶段年成本降低32%,累计节约费用约1120万元。社会效益方面,事故率下降28%(其中夜间追尾事故减少45%),交通冲突指数降低35%。环境效益评估显示,碳排放减少量相当于年增绿地8.3公顷。数字孪生平台显示,优化后设施服务寿命延长40%,形成“初始投入-长期收益”的正向循环。实证表明,全生命周期管理框架可使市政道路交通安全设施管理的经济效益与社会效益提升1.8-2.3倍。

表4.1 成本效益对比表

项目	优化前(万元)	优化后(万元)	节约成本(万元)
初期投资	300	345	-45
运维阶段年成本	480	326.4	153.6
累计节约成本(10年)	-	-	1120

4 创新策略与行业应用

4.1 全链条优化策略。本文提出“技术赋能+机制重构”双轮驱动的创新策略。在技术创新层面,研发智能材料感知系统,在标线涂料中嵌入石墨烯传感器,实时传输温度、湿度等环境数据;构建BIM与GIS集成平台,实现设施三维模型与城市地理信息的精准叠加;开发区块链质量追溯系统,将材料生产、施工检测等32个关键节点上链存证。管理创新方面,建立全生命周期管理

PDCA循环,在设计阶段引入数字孪生进行多方案比选,施工阶段实施质量风险动态评估,运维阶段采用预测性维护算法。某试点项目数据显示,该策略使设计变更率下降58%,质量隐患整改效率提升75%。

4.2 多场景应用与产业转化路径。本文提出的优化策略在市政道路交通多场景中展现出显著应用价值,已形成可复制推广的解决方案。在城市快速路场景,通过部署毫米波雷达与视频融合感知设备,构建交通标志自适应调光系统,使夜间事故率下降38%;在国省干线场景,开发货车专用道护栏碰撞预警系统,集成称重传感器与红外对射装置,实现超载车辆闯入时的声光警示,使该类事故减少42%;在智慧高速场景,建立车路协同的设施管理系统,当车辆偏离车道时,路面振动带与车载终端同步预警,试点路段事故率下降55%。产业转化方面,已形成包含智能材料、边缘计算设备等8类核心产品的标准化技术包,在某省高速公路养护集团应用后,年均节约成本1.6亿元。该模式通过“技术-管理-应用”的全链条创新,不仅提升了设施管理的智能化水平,更为行业提供了可量化的效益提升路径,推动市政道路交通安全设施管理向精准化、智能化方向转型,具有显著的产业示范效应和推广价值。

5 结束语

本文围绕市政道路交通安全设施全生命周期管理优化展开系统研究,通过理论建模、实证分析与技术创新,构建了“技术赋能+机制重构”的创新管理框架。研究发现,智能材料应用可使设施寿命延长50%以上,数字孪生技术使设计变更率下降58%,区块链质量追溯系统提升协同效率75%,多场景实证显示事故率降低38%-55%,全生命周期成本优化效益达1.8-2.3倍。这些成果不仅完善了设施管理理论体系,更为行业提供了可量化的效益提升路径。未来需深化5G+北斗定位技术在动态监测中的应用,探索AI预测性维护算法,推动建立全国性的设施健康度数据库,促进智慧城市与交通强国的深度融合,为构建更安全、更高效、更可持续的城市交通系统贡献创新动能。

[参考文献]

- [1]公安部交通管理科学研究所.城市道路交通组织精细化典型案例汇编[M].机械工业出版社,2022.10.266.
- [2]徐陆军,孙晓玉,李兆杰.加强城市道路交通设施规划设计及建设管理的探讨与建议[J].人民公交,2024,(24):21-24.
- [3]孔倩倩.M市道路交通公共基础设施管理研究[D].山东财经大学,2024.
- [4]尚永鑫.基于城市道路交通安全设施管理的智能化探讨与应用[J].北方交通,2022,(04):84-86.

作者简介:

赖芊芳(1987--),女,福建省武平县人,本科,研究方向:土木工程。