

高速公路养护工程的质量控制与全生命周期价值评估

张 林

山东高速聊城发展有限公司 山东 聊城 252000

摘 要：高速公路养护工程的质量控制与全生命周期价值评估是提升路面资产运营效率的核心议题。本文在界定养护工程质量控制内涵及其特殊性的基础上，系统梳理了材料工艺、施工监控、验收缺陷等关键环节的控制要点，进而构建了涵盖经济成本、使用效益与风险暴露的三维价值评估框架。质量控制并非孤立的技术行为，而是通过影响养护后的性能衰变速率与服务寿命，直接决定全生命周期净现值的动态变量。基于此，本文提出预防性养护策略优化与信息化智能监测联动等实施路径，旨在为养护决策从“经验导向”转向“价值驱动”提供理论支撑。研究认为，唯有将质量管控嵌入全周期价值核算体系，方能实现有限养护资源的最优配置与长期路网效益的持续释放。

关键词：质量控制；全生命周期价值；高速公路养护；性能衰变；价值评估

引言

截至“十四五”中期，我国高速公路通车里程已突破 18 万公里，路网规模稳居世界首位。然而，伴随着大规模建设期的落幕，既有公路资产正集中步入养护维修的高峰阶段。养护工程不再仅仅是修补破损的“被动响应”，而是关乎巨额公共投资能否持续产生回报的战略性管理活动。实践表明，养护工程的质量水平参差不齐，部分路段即便投入大量维修资金，其使用性能仍在短期内显著下滑，由此引发的重复养护成本、交通延误损失乃至安全风险，构成了巨大的隐性资源浪费。这一现象暴露出当前养护管理体系中的一个深层缺失：质量控制和价值评估长期处于割裂状态——前者聚焦于施工期间的技术指标达标率，后者则停留在粗放的年度预算分配层面，缺少对“质量行为如何影响长期价值”的系统性刻画。近年来，交通运输部大力推动公路养护管理高质量发展，明确提出构建“基于性能与寿命周期的养护决策体系”。在此政策导向下，从全生命周期视角重新审视养护工程的质量控制，已不再是学理上的纯思辨，而是亟待落地的实践课题。

1 高速公路养护工程质量控制理论基础

1.1 质量控制的内涵与原则

质量控制，在一般工程语境中，指为达到质量要求所采取的作业技术和活动，其核心在于消除不合格品的产生并维持过程稳定性。然而，将这一概念移植至高速公路养护工程时，必须进行内涵的重构。养护工程的质量控制不应被窄化为“竣工检验时的合格率统计”，而应被理解为贯穿材料选择、施工操作、工艺参数、环境

适配以及后期性能跟踪的全链条闭环管理。其基本原则可概括为三条：第一，预防性原则，即通过事前标准化与事中实时反馈，将质量隐患消灭于未然，而非依赖事后检测筛选；第二，系统性原则，即养护质量是设计、材料、设备、人员、环境等多变量交互作用的结果，任何单一环节的优化均无法弥补系统的短板；第三，可追溯性原则，即每一道工序、每一批次材料、每一次调整均应留下可查证的数据痕迹，为后续质量溯源与责任界定提供依据。

1.2 养护工程的特殊性

相较于新建高速公路，养护工程在质量控制方面呈现出鲜明且复杂的特殊性。其一，作业界面受限。养护施工通常需要在不完全中断交通的条件下进行，作业区狭窄、施工窗口期短，这直接压缩了常规质量检验的时间与空间，使得一些需要较长静置或养生周期的工艺（如水泥混凝土面层修复）面临更大的质量波动风险。其二，基底条件非均匀。既有路面经过多年运营，其内部结构已存在不同程度的隐性损伤、材料老化与不均匀沉降，这种“灰色底质”使得养护层与旧路面的界面结合质量远难于新建时的基层处理，而现行规范中的统一性指标往往难以充分反映这种个体差异性^[1]。其三，环境与荷载耦合作用剧烈。养护施工往往受季节气温、湿度及交通荷载的共同干扰，若质量控制未能针对具体路段的气候特征与轴载谱进行动态调整，则养护后的早期损坏（如车辙、裂缝反射）将大幅提前出现。上述特殊性共同决定了，养护工程的质量控制不能照搬新建项目的管理模板，而必须发展出具有针对性、适应性与前瞻性的控制哲学。

2 养护工程质量控制的关键环节

2.1 材料与工艺控制

在材料端,质量控制的重心应从“进场抽检合格”延伸至“服役性能匹配”。具体而言,沥青混合料、改性乳化沥青、纤维增强材料等的选择,不仅要满足现行规范的基本物理力学指标,更应结合路段所处的气候分区、交通等级及既有路面剩余寿命进行适配性验证。例如,对于重载交通占比高的路段,抗车辙性能的动态蠕变指标应成为更严格的约束参数,而非仅依赖针入度与软化点等常规值。在工艺端,养护工程涉及摊铺、碾压、接缝处理、养生等工序,每一道工序的工艺参数(温度、速度、碾压遍数、间隔时间)均需依据实时环境温度、层厚及材料特性进行精细化设定,并辅以现场快速检测手段进行即时校核。尤应指出的是,工艺控制中的“标准化”与“柔性化”需达成辩证统一:标准化确保基本质量的底线,而柔性化则允许现场工程师在合理范围内调整参数以应对突发环境变化,这种双轨控制策略是应对养护特殊性的有效途径。

2.2 施工过程监控

传统的“旁站监理+事后钻芯取样”模式在养护工程中暴露出明显的滞后性与样本稀疏性,难以捕捉施工过程中的瞬时异常。为此,过程监控需要向实时化、连续化与可视化方向升级。一方面,应推广使用红外温度扫描、压实度连续检测仪、激光纹理仪等快速无损检测设备,对摊铺温度均匀性、压实度分布及表面构造深度进行全覆盖式动态监测,并将监测数据与预设的控制界限进行实时比对,一旦出现超差趋势即触发预警与纠偏指令^[2]。另一方面,过程监控不应仅停留在物理指标层面,还应应对关键工序的时间节点(如开放交通前的冷却时间、粘结层的破乳时间)进行严格记录与统计分析,建立工序间隔与最终强度之间的统计相关关系。此外,施工日志的数字化与结构化也是过程监控中不可忽视的环节,它将零散的现场信息转化为可追溯、可回溯的数据资产,为后续质量评定与问题诊断提供第一手依据。

2.3 验收与缺陷管理

现代质量管理理念认为,验收应同时承担“质量信息反馈”与“缺陷风险预判”的双重角色。在验收内容上,除常规的平整度、抗滑性、密实度、厚度等竣工指标外,还应增加对养护界面结合状况、层间黏结强度以及微观裂缝发育程度的抽检,因为这些隐性状直接决定养护工程在未来数年内的性能衰变速率的快慢。在缺陷管理层面,应建立分层级的缺陷分类体系,将缺陷划分

为结构性与功能性、突发性与渐发性、可修复性与不可修复性等类别,针对不同类别制定差异化的处置时限与修复策略。尤为重要的是,验收与缺陷管理必须与后评估阶段贯通,即验收记录中的各项数据应作为后续使用性能监测的基线参照,当养护路段在实际运营中出现早期损坏时,可快速逆向追溯至验收数据的对应维度,从而判断该损坏是源于施工质量不足、验收遗漏还是荷载环境超预期,为质量责任的划分与改进措施的制定提供证据链支撑。

3 全生命周期价值评估框架

3.1 价值评估的概念与模型

全生命周期价值评估,在高速公路养护领域,并非简单的“建养总费用加总”,而是一个将时间维度、效益维度与风险维度统一纳入的综合评判体系。其基本理念是:养护方案的价值不仅取决于初期投入成本的高低,更取决于该方案所能提供的长期使用性能水平、延长服务寿命的能力以及在整个寿命周期内触发额外成本(如大修、重建或事故损失)的概率。数学上,可采用扩展的净现值(NPV)模型作为基础框架,将养护工程的效益量化为用户时间节省、车辆运营成本降低及行驶安全性提升等可货币化指标,将成本量化为直接施工成本、交通管制成本、日常小修费用及末期处置成本,并将各期成本和效益按社会折现率折算至基准年^[3]。然而,仅有NPV模型尚不充分,因为养护工程面临诸多不确定性(如材料老化速率的变异性、交通增长率的波动、极端天气频率的改变),因此,价值评估应当引入概率化处理手段,如蒙特卡洛模拟或情景分析法,将输出结果表示为概率分布而非单一确定值,以更真实地反映养护方案在不同未来情景下的价值表现。

3.2 成本-效益-风险多维分析

将价值评估分解为成本、效益与风险三个维度,有助于揭示养护工程经济特性的内在结构。成本维度不仅包括建设期内的直接工程费、材料费、设备租赁费和人工费,还应纳入施工期间对正常交通流造成的延误成本——这一隐性成本在重载繁忙路段往往可达到直接施工费的数倍。效益维度则涵盖路面使用性能提升所换来的车辆行驶速度提高、油耗降低、轮胎磨损减少以及交通事故率下降等正外部性,这些效益并非均匀分布在寿命周期内,而是在养护后初期达到峰值,随后随性能衰减而递减,其总量取决于性能衰变曲线的形状及养护措施的耐久性。风险维度聚焦于养护工程“未达预期”的可能性及其后果,包括质量缺陷导致的提前破坏、材料供应中断引起的工期延误、极端天气造成的养生失败等,

这些风险事件不仅直接增加额外修复费用,更会通过交通干扰和用户投诉造成间接的社会成本损失。三个维度之间并非独立,而是通过养护方案的设计参数与施工质量水平紧密关联——高质量养护虽然推高初期成本,但可显著降低后期风险暴露并延长高效益持续期,从而在整体上提升净现值。

4 提升养护工程全生命周期价值的策略

4.1 预防性养护与决策优化

预防性养护在路面尚处于良好状态时采取微表处、稀浆封层、裂缝灌缝等低成本措施,以延缓衰变进程,其质量控制的核心在于时机选择与措施匹配。过早实施预防性养护,其效益尚未充分体现,造成资源浪费;过晚实施,则路面已进入结构损伤阶段,预防性措施将不再适用^[4]。因此,决策优化需要依托路面性能预测模型,结合路段的剩余寿命预估与经济分析,计算出最优养护时机与频率组合。在此过程中,质量控制的角色从“保证施工合格”升级为“保证预防措施的有效期满足设计预期”,即通过严格把控粘结强度、封层均匀性等关键指标,确保预防性养护的实际使用寿命与模型假设相吻合,从而将决策优化从理论推演转化为实际收益。

4.2 信息化与智能监测

基于物联网的传感器网络可以实时感知路面温度、应变、振动等响应信息,将养护后的服役行为转化为连续的数据流;无人机巡检与高精度图像识别技术能够快速发现表面裂缝、坑槽等病害的早期征兆;而基于大数据分析的性能衰变预测模型,则可以从历史养护数据中挖掘出质量指标与长期性能之间的非线性关系。将这些信息化手段与全生命周期价值评估平台相整合,可以构建“监测-诊断-预测-决策”的闭环系统:监测数据输入模型后,动态更新该路段的价值评估结果,一旦预测显示当前养护方案的全周期净现值低于阈值,

系统即自动触发再评估与优化警报。这种智能化的管理范式,使得质量控制和价值评估从静态的“事后报告”演变为动态的“实时导航”,极大增强了养护管理的适应性与前瞻性。

5 结语

高速公路养护工程的质量控制与全生命周期价值评估,绝非两个可以分而治之的专业领域,而是同一管理硬币的正反两面。质量控制为价值评估提供了可靠的性能输入参数,而价值评估则为质量控制提供了经济合理性的判别尺度。脱离价值导向的质量控制容易陷入“为达标而达标”的技术主义窠臼,而脱离质量根基的价值评估则无异于空中楼阁。未来养护管理体系的升级方向,应当着力于打通二者之间的数据流与决策流,将每一笔养护投资的质量特征转化为货币化的价值增量,从而在有限的财政资源约束下实现路网整体效益的最优配置。当然,本文的论述侧重于理论框架与机制阐释,尚未涉及具体模型参数的标定与验证,后续研究可在实测数据积累的基础上,进一步量化质量指标与价值指标之间的弹性系数,以使该分析范式更具操作性与预测效力。

参考文献

- [1] 王选仓,马磊,李俊.高速公路沥青路面养护质量评价体系研究[J].公路交通科技,2022,39(5):12-20.
- [2] 刘朝晖,李盛,曹源.高速公路预防性养护时机与质量控制协同优化[J].交通运输工程学报,2023,23(2):45-56.
- [3] 陈景,汪海年,郑木莲.高速公路养护工程质量控制信息化技术应用[J].公路,2022,67(11):234-241.
- [4] 裴建中,张久鹏,马涛.养护工程缺陷管理对全周期成本的影响机理[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(1):15-24.