

Research on key nodes and Governance Logic of life cycle management of Expressway Construction

Zhongbo Zhao

Xinjiang Communications Investment Construction Management Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang, 830501, China

Abstract

as a typical project with high capital density, complex participants and large governance cycle span in the national infrastructure system, the full life cycle management ability of expressway construction directly affects the regional transportation supply efficiency, social and economic circulation speed and long-term asset value maintenance ability. This paper mainly focuses on the characteristics of the whole life cycle of highway construction, analyzes from four aspects: stage structure, key node identification, cross stage governance logic and digital tool system, and constructs the system framework of “value identification - Technology Governance - system closed loop - information return”, in order to provide theoretical reference and engineering enlightenment for highway project governance.

Keywords

highway construction; Life cycle management; Key nodes; Governance Logic

高速公路建设全生命周期管理的关键节点与治理逻辑研究

赵忠波

新疆交投建设管理有限责任公司，中国·新疆 乌鲁木齐 830501

摘要

高速公路建设作为国家基础设施体系中资金密度高、参与主体复杂、治理周期跨度大的典型工程，其全生命周期管理能力直接影响区域交通供给效率、社会经济流转速度与资产价值长期保持能力。本文主要围绕高速公路建设的全生命周期特征，从阶段结构、关键节点识别、跨阶段治理逻辑与数字化工具体系四个方面展开分析，并构建“价值识别—技术治理—制度闭环—信息回流”的系统框架，以期在高速公路项目治理提供理论参考与工程启示。

关键词

高速公路建设；全生命周期管理；关键节点；治理逻辑

1 引言

高速公路建设作为我国综合交通体系的重要基础，其生命周期呈现跨部门协同密集、投资规模庞大、运维周期长的典型特征。随着交通需求结构演变、区域经济网络扩张及“双碳”约束强化，高速公路管理模式正由以建造为中心的线性治理，向以全寿命价值创造为导向的系统治理转型。传统管理模式将前期决策、勘察设计、施工建设与运营维护割裂，导致信息不能跨阶段流动，风险在后期集中暴露，难以形成治理闭环。生命周期管理强调基于阶段耦合的逻辑，通过关键节点识别、责任链条重构与数字化工具嵌入，使建设行为能够兼顾工程性能、资产价值与社会效益，为实现高速公路高质量建设与可持续运营提供方法支撑。

2 高速公路建设生命周期的结构与价值演化

2.1 生命周期阶段划分与功能逻辑

高速公路项目生命周期通常包括前期决策、勘察设计、施工建设、竣工交付与运营维护五大阶段，部分地区将资产更新与改扩建纳入第二生命周期，以形成“建设—运营—再建设”的宏观演进链条^[1]。不同阶段具有不同功能定位与价值目标：前期阶段决策目标以社会效益与投资回收平衡为核心，强调交通需求预测、经济收益率与生态约束之间的协调；设计阶段则承担工程性能上限设定的作用，其关键在于材料寿命、结构冗余与施工可达性之间的均衡；施工阶段强调质量实现、工期控制与风险释放，是治理体系作用最集中、指标最容易因扰动而偏离的阶段；竣工交付阶段的功能不仅是工程形态完成，更是责任边界与运维机制的制度转移；运营阶段重在性能保持、服务提升与资产增值，是衡量生命周期治理是否成功的最终指向。生命周期管理的核心在于不将阶段割裂，而是在阶段之间建立信息与责任传导，使治理逻辑

【作者简介】赵忠波（1985-），男，中国山东菏泽人，本科，高级工程师，从事公路工程项目管理研究。

从线性推进转向循环反馈。

2.2 生命周期风险的分布规律与动态传导

生命周期内的风险呈现非均衡、时变与累积特征。前期决策阶段由于信息不完整,存在交通量预测偏差与投资规模偏置的系统性风险;设计阶段在技术假设、材料模型与耐久性计算方面可能形成潜在缺陷,若不通过校核试验量化,将在后期形成不可逆的结构衰退;施工阶段的不确定性则集中爆发,如地质变化、气候扰动、设备能力与施工组织偏差等,往往导致施工质量与设计预期产生偏离;运营阶段的风险则体现为荷载累积、腐蚀扩散及材料疲劳的时序效应^[2-3]。风险在不同阶段之间存在传导机制,例如软土地基在设计中忽略湿度与固结时间,会导致施工期沉降控制失效,进一步在运营期形成路面开裂和结构支撑衰退,使建设成本向长期养护成本迁移。生命周期治理的要点在于通过阶段耦合控制,实现风险在源头被识别、在中段被抑制、在后期被可视化,从而避免集中爆发。

3 高速公路建设管理中的关键节点识别与治理策略

3.1 投资边界约束与社会效益均衡机制

决策节点是高速公路全生命周期治理中影响最深远的环节,其功能不仅在于确定项目立项与投资规模,更在于为后续设计、施工与运营阶段设定可实现的目标空间。传统决策模式往往依赖中观层面的车流预测模型与静态经济评价指标,以净现值、投资回收期等财务量化指标作为立项依据。但在交通需求结构快速变化、区域产业布局频繁调整和新型交通方式不断出现的背景下,单一的预测模型难以准确刻画未来通行需求的波动幅度,易导致投资不足或过度建设,从而在长期运营中引发资金沉淀、收益下降或交通能力不足的问题。因此,决策阶段必须引入动态情景模拟、敏感性分析与跨区域交通网络弹性评价,以形成更具稳健性的决策框架^[4]。

在投资边界确定过程中,需将生态环境约束、碳排放成本、土地利用效率与社会影响因素纳入扩展成本体系,使投资评价从传统的工程经济逻辑转变为综合社会效益逻辑。决策节点的治理关键在于建立“前期决策—设计约束—运维反馈”的闭环结构,通过制度化问责机制将设计单位、建设单位与运营单位的绩效考核纳入前期决策质量评估范围,从而避免前端信息误判引发后端阶段的无效成本。在此基础上,现代高速公路决策应推动从“工程立项”向“区域发展战略工具”的治理定位转变,使高速公路建设成为推动区域产业集聚、优化资源配置与促进城乡融合发展的基础性平台。

3.2 寿命导向的结构配置与信息回流机制

设计节点是高速公路生命周期中技术含量最高、对长期性能影响最直接的环节,其治理价值在于通过结构体系、材料配置与设计假设的优化,实现工程实体性能上限的科学

设定。传统设计体系虽已形成标准化与规范化模式,但其局限在于偏重指标达标与施工经济性,而对材料老化、长期疲劳行为及环境侵蚀机制关注不足,使工程在运营期容易出现性能衰退快、维护成本高等问题。寿命导向设计理念要求将全寿命性能作为核心目标,通过长期车流谱、温度荷载组合、腐蚀环境等级与材料耐久模型构成综合参数体系。例如在路面结构中,应基于车辙发展模型及粘弹特性分析合理匹配沥青材料等级;在桥梁设计中,应将钢筋腐蚀扩散模型、应力幅值分布及疲劳极限概率纳入可靠性校核,从而形成工程性能与使用寿命的定量耦合关系^[5]。

除了设计参数本体的优化之外,更关键的治理逻辑在于构建运营信息回流机制,使设计假设不再停留于静态模型,而是能够在运营阶段通过监测数据获得动态验证。为此,设计阶段需预置监测接口布局、信息采集频率与数据格式标准,使结构健康监测系统能够无缝嵌入工程实体,实现“建设即监测、监测即校核”的技术闭环。在数字化工具支撑下,通过 BIM—GIS 融合平台与数字孪生模型,可将设计参数、施工工况与运营状态同步映射,实现结构行为的虚实联动与长期性能演化追踪。制度层面应强化设计单位的寿命责任机制,对因设计假设偏差导致的结构早期衰退建立责任追溯路径,以确保设计环节真正承担起生命周期治理的技术源头责任。

4 高速公路施工与交付阶段的动态治理机制

4.1 过程质量闭环与风险释放控制

施工阶段处于高速公路生命周期治理的执行中心,其核心任务不仅在于实现设计图纸的实体化,更在于在动态环境中控制质量偏差、吸收前期阶段可能累积的技术与组织风险。传统施工管理侧重事后验收与规范校核,忽视施工过程的动态波动性,使得质量偏差在阶段内难以及时发现,从而在竣工后表现为结构性能的不确定性。现代施工治理应以过程闭环管理为理念,通过实时监测、模型预测与反馈调节构建“目标—执行—验证—修正”的动态机制。例如,在软土地基处理中,采用预加载结合监测沉降曲线的方式,可根据固结速率与孔压消散特征动态调整荷载步序,避免因固结不足导致后期路基变形扩散;在隧道施工中,通过围岩分级实时识别、应力释放规律解析与支护参数迭代,可有效降低爆破扰动引发的围岩失稳风险。

施工治理的另一关键维度是质量责任链与数据可追溯体系的构建。材料性能、施工机具状态、工序衔接质量与环境因素均需纳入统一的质量评价体系,通过数字化工具实现信息同步采集与自动校核,从而避免人为经验“掩盖”质量波动。质量数据应建立跨主体共享机制,使监理单位、设计单位与建设单位均能基于同一数据源实现实时校核,形成施工行为的透明化治理结构。同时,施工阶段的风险释放应通过精细化组织管理来实现,包括对关键工序设定风险阈值、

建立动态调度机制、强化分包责任边界等,以防止因组织不协调导致工程节点性风险扩大。通过上述路径,施工节点能够实现质量偏差的即时反馈与风险的提前释放,使工程实体性能在施工阶段即得到有效保障。

4.2 性能量化评估与责任边界转移

竣工交付节点在高速公路生命周期中具有制度转换与责任重构的双重功能,其治理核心不在于“项目完成”,而在于是否能够在工程性能、质量责任与未来维护机制之间形成清晰的界面。传统交付模式往往依赖外观检查、局部指标测试和结构完整性评定,无法充分反映工程长期服役能力,使得部分潜在缺陷在运营期才逐步暴露,导致维护压力加剧甚至风险事件发生。因此,交付节点应从静态验收向性能导向评估转型,通过综合量化指标体系评估工程实体的长期耐久性与服务能力。

交付阶段的治理逻辑还体现在责任边界的制度化划分中。设计单位应对寿命预测误差承担相应责任,施工单位需对潜在工艺缺陷提供质量保证,运营单位则需在明确的性能基准下开展维护活动。通过绩效约束机制,可将责任主体在全生命周期中的行为纳入统一评价体系,使其激励方向与长期性能目标保持一致。与此同时,交付节点应通过信息回收机制,将施工过程数据、材料批次信息与现场测试结果纳入数字孪生平台,使工程的初始状态能够在虚拟模型中得到准确表达,为运营期性能仿真、病害预测与维护策略优化提供数据基础。最终,交付节点由单一质量认定环节转变为全生命周期治理的制度枢纽,使工程资产在进入运营阶段前即具备透明、可靠与可追溯的性能基础。

5 运营维护阶段的价值回流与生命周期治理工具体系

5.1 结构衰退模型与维护干预策略

高速公路运营阶段表现出典型的“荷载累积—材料损伤—性能衰退”链式机制,维护策略不能依赖经验判断与事后修补,而需基于寿命模型进行科学干预。路面系统中,车辙增长与裂缝扩展可通过PMS模型进行预测,并在适宜窗口实施薄层罩面或局部更换,而非待破坏发展到不可修复阶段再进行整体重构;桥梁结构中,通过腐蚀环境指数、钢筋失重率与疲劳累积函数计算剩余寿命,可在承载极限前进行补强,从而避免运营封闭造成的社会成本溢出。维护决策必

须综合经济、技术与交通社会属性,例如山区隧道的封闭会导致区域物流链断裂,从而产生间接损失,维护窗口需以社会成本最小化为准则,而非仅根据工程成本最小化。

5.2 生命周期治理的数字化与制度化实现路径

生命周期管理的现代实现依托信息系统与组织制度双轮驱动。在工具层面,BIM与GIS融合可将空间信息、材料参数与时间演化形成三维表达,实现设计参数、施工过程与交通状态的动态映射;数字孪生技术则通过传感器回流、车流识别与结构应力建模构成虚实联动体系,使结构性能在虚拟空间实时演化,从而实现预测性维护。在制度层面,传统竣工验收制度难以覆盖长期性能,应通过性能合同、运营评价与责任链约束实现长期激励,使设计单位对寿命预测负责、施工单位对潜在缺陷负责、运营单位对维护绩效负责。通过制度化的全生命周期成本核算框架,将工程投资、维护支出与社会成本纳入同一收益体系,从根源上打破“建设短视”与“养护失能”的惯性结构。

6 结语

高速公路全生命周期管理强调“阶段联动—责任闭环—信息回流—绩效导向”的治理逻辑,其核心不在单节点优化,而在跨阶段耦合控制。通过前期决策中投资边界约束、设计阶段寿命导向参数构建、施工阶段过程质量闭环与运营阶段预测性维护策略,可形成全链条价值最大化机制。未来研究应在两方面深化,一是材料老化、荷载谱与环境暴露的耦合模型,二是将数字孪生、风险评估与资产管理制度嵌入政策框架,从而推动高速公路建设治理体系的现代化与智能化。

参考文献

- [1] 游小聪,张佳琦,雷跃川.关于高速公路建设企业绩效考核体系建设的思考[J].财务与会计,2019,(14):82-83.
- [2] 马书红,王元庆,岳敏,等.高速公路建设管理现代化理论研究与实践探索[J].公路交通科技,2022,39(12):239-246.
- [3] 孙付春.“双碳”背景下零碳高速公路建设探索与实践[J].公路,2024,69(12):433-439.
- [4] 熊伟,肖一鸣,米日努尔·麦麦提江.高速公路建设促进共同富裕的效能与机制[J].同济大学学报(自然科学版),2025,53(1):151-158.
- [5] 曾俊伟,闫浩,钱勇生,等.耦合视阈下陇南高速公路建设对城镇化影响的研究[J].公路工程,2018,43(6):82-85.