

# 高速公路桥梁养护管理的现状与未来

葛 嵘

山西交投忻阜高速公路管理有限公司 山西 忻州 034000

**摘要:** 随着我国高速公路网络的持续扩展和交通荷载的不断增长,作为关键基础设施组成部分的桥梁结构正面临日益严峻的服役挑战。科学、高效、智能的桥梁养护管理已成为保障路网安全畅通、延长结构使用寿命、提升公共服务质量的核心环节。本文系统梳理了当前我国高速公路桥梁养护管理在制度体系、技术手段、资金保障及人员配置等方面的现状,深入剖析了存在的主要问题,包括检测评估体系不完善、信息化水平滞后、预防性养护理念薄弱、专业人才短缺等。在此基础上,结合国内外先进经验与新兴技术发展趋势,提出构建以“全生命周期管理”为核心、融合“智能感知—精准评估—科学决策—高效执行”闭环体系的未来发展方向,并从政策机制、技术创新、标准建设、人才培养等方面提出了具体对策建议。研究旨在为推动我国高速公路桥梁养护管理向精细化、智能化、绿色化转型提供理论支撑与实践参考。

**关键词:** 高速公路;桥梁养护;全生命周期管理;智能监测;预防性养护;BIM

## 引言

高速公路是国家综合立体交通网的骨干,而桥梁则是其不可或缺的关键节点。截至2024年底,我国高速公路总里程已突破18万公里,拥有各类桥梁超过100万座,其中特大桥梁数量居世界首位。这些桥梁不仅承载着巨大的交通流量,更是区域经济联动和社会稳定运行的重要保障。然而,随着时间推移,早期建设的桥梁逐渐进入老化期,加之超载运输、极端气候、材料劣化等多重因素叠加,桥梁结构安全风险日益凸显。在此背景下,如何构建一套科学、高效、可持续的高速公路桥梁养护管理体系,已成为交通运输领域亟待解决的核心课题。传统的“事后维修”模式已难以适应现代交通发展的需求,亟须向“预防为主、防治结合、智能驱动”的现代化管理模式转型。本文旨在全面审视当前我国高速公路桥梁养护管理的现实图景,识别瓶颈制约,并前瞻性地探讨未来发展方向与实施路径,以期为行业高质量发展提供智力支持。

## 1 高速公路桥梁养护管理的现状分析

### 1.1 制度与政策体系逐步完善

我国在高速公路桥梁养护管理领域的制度建设已取得显著进展。以《中华人民共和国公路法》和《公路安全保护条例》为基础,辅以《公路桥梁养护管理工作制度》《公路桥梁技术状况评定标准》(JTG/TH21)等一系列技术规范,初步形成了较为完整的法规与标准体系。交通运输部推行的“桥梁养护工程师”制度,要求对重要桥梁配备专职技术人员,并建立“一桥一档”的电子档案管理制度,有效提升了管理的规范性和可追溯性<sup>[1]</sup>。

同时,国家层面通过“国评”(国家公路网技术状况监测)将桥梁技术状况纳入地方政府和运营单位的绩效考核,强化了责任落实。更为重要的是,《交通强国建设纲要》明确提出推进基础设施全要素、全周期数字化的战略方向,为桥梁养护管理的现代化转型提供了顶层设计指引和政策驱动力。

### 1.2 技术手段呈现多元化趋势

当前,桥梁检测与评估技术已从过去依赖人工目测和简单量具的初级阶段,逐步迈向多技术融合的综合诊断模式。常规巡检仍是基础,但已普遍辅以裂缝宽度仪、回弹仪、钢筋锈蚀检测仪等便携设备,提高了现场判断的准确性。对于存在疑点的结构,专项无损检测技术如超声波、地质雷达、红外热成像等被用于探测混凝土内部空洞、钢筋锈蚀或预应力损失等隐蔽病害。在部分重大工程中,还会通过静动态荷载试验验证桥梁的实际承载能力。尤为引人注目的是,以苏通大桥、港珠澳大桥为代表的特大型桥梁已部署结构健康监测系统(SHM),通过布设大量传感器实时采集位移、应变、振动、温湿度等关键参数,实现对结构状态的连续监控。尽管如此,这类高成本、高复杂度的监测系统在数量庞大的中小型桥梁中普及率极低,且普遍存在数据利用率不高、分析模型不成熟、系统运维困难等问题,尚未形成规模化应用效应。

### 1.3 资金投入与保障机制尚不健全

桥梁养护资金主要来源于车辆通行费收入和地方财政拨款,理论上具有一定保障。然而在实际操作中,资金使用效率不高、结构失衡的问题较为突出。一方面,

养护预算编制往往缺乏精细化测算,导致资金分配与实际需求脱节;另一方面,由于预防性养护的效益具有长期性和隐性特征,难以在短期内体现政绩,因此常常被边缘化,资金优先用于应急抢修或新建项目。行业调研数据显示,我国高速公路桥梁预防性养护投入占养护总经费的比例不足20%,远低于发达国家40%至60%的平均水平。这种“重治轻防”的投入导向,不仅大幅推高了后期维修成本,也使部分老旧桥梁长期处于“带病运行”状态,埋下安全隐患。更深层次的问题在于,缺乏长效、稳定、可预期的资金保障机制,使得养护工作难以实现系统性规划和可持续推进。

#### 1.4 人才队伍专业化程度有待提升

桥梁养护是一项高度专业化的技术工作,涉及结构力学、材料科学、检测技术、信息技术等多个学科交叉的领域。然而,当前基层养护队伍的整体素质与这一要求存在明显差距。一线人员普遍存在年龄结构老化、学历层次偏低、系统培训不足等问题,多数仅具备施工或维修经验,缺乏对结构行为机理的理解和病害成因的科学判断能力<sup>[2]</sup>。与此同时,高校土木工程教育体系与行业实际需求存在一定脱节,复合型、创新型技术人才供给不足。这种人才断层直接制约了先进检测设备的有效应用、数据分析结果的准确解读以及科学养护方案的制定与实施,成为制约行业高质量发展的关键瓶颈。

## 2 当前面临的主要问题与挑战

### 2.1 检测评估体系标准化与精准化不足

现有技术状况评定标准(如JTG/TH21)虽提供了分级框架,但在病害量化、权重分配、承载力折减等方面仍依赖经验判断,主观性强。不同检测单位采用的方法、设备、判据不统一,导致评估结果可比性差。此外,对隐蔽病害(如预应力损失、混凝土碳化深度)的检测精度有限,难以支撑精准维修决策。

### 2.2 信息化与数字化水平滞后

尽管“一桥一档”已基本实现电子化,但多数系统仅为静态信息存储,缺乏动态更新与智能分析功能。BIM(建筑信息模型)、GIS(地理信息系统)、IoT(物联网)等技术尚未有效集成,无法形成“数字桥梁”底座。数据采集碎片化、格式不统一、共享机制缺失,严重阻碍了大数据分析 with 智能预警的应用。

### 2.3 预防性养护理念落实不到位

“重建设、轻养护”“重维修、轻预防”的思维惯性依然存在。许多管理单位将养护视为成本支出而非资产保值增值手段,倾向于在结构出现明显病害甚至功能失效后才介入。这不仅大幅增加后期维修成本(研究表明,

预防性养护投入1元可节省后期维修5-10元),更可能因突发险情导致交通中断甚至安全事故。

## 2.4 全生命周期管理理念尚未贯通

当前养护管理多聚焦于运营阶段,与规划、设计、施工阶段脱节。设计阶段未充分考虑后期检测与维护的便利性(如检修通道缺失),施工质量缺陷在运营期中暴露,增加了养护难度与成本。缺乏从“摇篮到坟墓”的全链条数据贯通与责任追溯机制,难以实现真正的LCC(全生命周期成本)最优。

## 3 未来发展方向:迈向智能化、精细化、绿色化

### 3.1 构建全生命周期桥梁养护管理体系

未来的桥梁养护管理必须打破阶段壁垒,建立起覆盖规划、设计、施工、运营直至退役全过程的全生命周期管理体系。在规划与设计阶段,应大力推行“可检可维”设计理念,将后期养护需求前置,例如预留传感器安装位置、设置便捷的检修平台和通道。在施工阶段,可通过嵌入微型芯片或二维码等方式,对关键材料批次、施工工艺参数进行全程记录,形成不可篡改的质量追溯档案<sup>[3]</sup>。进入运营阶段后,基于历史建造数据与实时监测信息,构建结构性能衰减预测模型,动态调整养护策略,实现精准干预。在桥梁接近服役末期时,还应对其剩余价值进行科学评估,探索构件再利用、材料回收等绿色退役路径。通过BIM+GIS平台整合各阶段数据,最终形成一座物理桥梁对应一个唯一、连续、可追溯的数字资产,为全生命周期管理提供坚实支撑。

### 3.2 推进智能感知与数字孪生技术深度融合

随着传感技术、通信技术和人工智能的飞速发展,桥梁养护正迎来智能化革命。未来,低成本、高耐久性的新型传感器(如光纤光栅、MEMS微机电系统)将广泛应用于中小桥梁,结合无人机自动巡检、水下机器人探测等手段,构建“空一地一水”一体化的智能感知网络。在此基础上,通过构建桥梁的数字孪生体,实现物理世界与虚拟世界的实时映射与交互。该数字孪生平台不仅能同步结构状态、环境荷载、交通流等多源异构数据,还能利用机器学习算法(如长短期记忆网络LSTM、图神经网络GNN)对海量监测数据进行深度挖掘,自动识别异常模式、预测剩余使用寿命,并生成个性化的养护建议。管理者可以通过三维可视化界面直观掌握桥梁健康状态与风险等级,从而做出更加科学、高效的决策。浙江某高速公路试点的“桥梁数字孪生系统”已成功提前预警支座异常位移,充分验证了该技术路径的可行性与优越性。

### 3.3 强化预防性养护与绿色养护实践

预防性养护应从理念倡导走向制度化实践。未来需基于结构性衰减规律与经济性分析,科学确定各类桥梁的最佳干预时机,避免“过早”或“过晚”养护造成的资源浪费或风险累积。同时,大力推广绿色养护技术,如应用具有自修复功能的智能混凝土、长效防腐涂层、碳纤维复合材料加固等,不仅能显著提升结构耐久性,还可减少维修频次、降低资源消耗与碳排放,契合国家“双碳”战略目标<sup>[4]</sup>。此外,必须建立完善的养护效果后评估机制,对实施后的预防性措施进行长期跟踪监测与效益分析,形成“实施—评估—优化”的闭环,持续提升技术方案的适用性与经济性。交通运输部启动的“绿色公路”示范工程,已将桥梁预防性养护作为核心考核指标,为行业树立了标杆。

### 3.4 完善政策机制与标准体系

技术的落地离不开制度的护航。未来应加快修订《中华人民共和国公路法》等相关法律法规,进一步明确桥梁全生命周期养护的责任主体、资金来源与保障机制。在资金管理上,可设立预防性养护专项资金,并推行“以奖代补”等激励政策,引导地方加大投入。针对当前技术标准碎片化的问题,亟须制定统一的行业标准,涵盖智能监测系统的数据接口规范、数字孪生模型的构建准则、AI评估算法的验证方法等,为技术规模化应用扫清障碍。同时,应深化市场化改革,鼓励具备资质的第三方专业机构参与桥梁检测评估与养护施工,通过市场竞争提升服务质量和效率,形成政府监管、市场运作、社会参与的多元共治格局。

## 4 实施路径与对策建议

### 4.1 加强顶层设计与统筹协调

建议由交通运输部牵头,联合住建、工信等部门,制定《国家桥梁基础设施安全提升行动计划》,明确2025–2035年发展目标、重点任务与保障措施。建立跨部门协同机制,打通数据壁垒,推动“交通一张图”与“城市信息模型(CIM)”对接。

### 4.2 加大科技创新与示范引领

设立国家级桥梁智能养护重点研发专项,支持传感器微型化、边缘计算、数字孪生引擎等关键技术攻关。

遴选一批典型高速公路(如京沪、京港澳)开展“智慧桥梁养护示范区”建设,形成可复制、可推广的技术路线与管理模式。

### 4.3 推动标准体系与人才培养双轮驱动

加快编制《公路桥梁数字孪生技术指南》《智能监测系统建设规范》等标准。改革高校土木工程专业课程体系,增设“智能基础设施运维”方向;建立“校企联合实训基地”,开展在职人员数字技能提升培训。推行“注册桥梁养护工程师”执业资格制度,提升职业吸引力。

### 4.4 创新投融资与绩效评价机制

探索发行基础设施REITs(不动产投资信托基金)用于桥梁养护;引入PPP模式吸引社会资本参与。建立以“结构安全、通行效率、碳减排”为核心的多维绩效评价体系,将评价结果与养护资金拨付挂钩,倒逼管理效能提升。

## 5 结语

高速公路桥梁养护管理正站在由传统向现代转型的历史关口。面对基础设施老化、交通需求升级、技术革命浪潮的多重挑战,唯有坚持系统思维、创新驱动与制度保障并重,才能构建起安全、高效、韧性、绿色的桥梁养护新生态。未来,随着人工智能、物联网、新材料等技术的深度融合,桥梁将不再是沉默的混凝土结构,而是具备“感知、思考、响应”能力的智能生命体。这不仅将极大提升我国交通基础设施的安全保障水平,更将为全球桥梁养护管理贡献中国智慧与中国方案。

## 参考文献

- [1]李敬树.高速公路桥梁养护管理现状及对策分析[J].工程建设和设计,2021,(04):227–228.
- [2]杨森,王延民.高速公路桥梁养护管理要点及技术状况评定研究[C]//《中国建筑金属结构》杂志社有限公司.2024新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(二).山东东青公路有限公司;2024:124–125.
- [3]陈榜庭.高速公路桥梁养护技术研究[J].运输经理世界,2024,(20):129–131.
- [4]许家烁.高速公路桥梁养护与管理问题研究[J].运输经理世界,2024,(19):145–147.