

桥梁养护技术在交通工程中的实践分析

樊海超

河南交通投资集团有限公司洛阳分公司 河南 洛阳 471000

摘要：桥梁作为交通基础设施网络的关键节点，其结构安全与服役性能直接关系到区域路网的通行效率、公众出行安全乃至社会经济的稳定运行。随着我国公路桥梁总量持续增长，大量早期建设的桥梁已进入或即将进入病害高发期，加之日益繁重的交通荷载与复杂多变的自然环境侵蚀，桥梁养护工作面临着前所未有的挑战。本文旨在系统梳理桥梁养护技术体系，深入分析预防性养护、矫正性养护及应急养护三大类别的核心内涵与关键技术，并结合当前智能化、数字化的发展趋势，探讨BIM、无人机巡检、智能传感等前沿技术在桥梁全生命周期管理中的实践应用。通过剖析典型案例，总结成功经验，最后对桥梁养护技术的未来发展方向进行展望，以期提升我国桥梁养护管理水平、保障交通基础设施安全长效运营提供理论参考与实践指导。

关键词：桥梁养护；预防性养护；矫正性养护；BIM技术；智能检测

引言

我国公路桥梁总数已突破百万座，这些桥梁不仅是连接城乡、贯通东西的交通动脉，更是国家综合立体交通网的重要组成部分。然而，辉煌的建设成就背后，是日益凸显的养护压力。混凝土碳化、钢筋锈蚀、支座老化、伸缩缝失效、钢结构疲劳开裂等病害频发，若不及时干预，将加速结构性能退化，轻则影响行车舒适性与桥梁使用寿命，重则可能引发灾难性安全事故，造成巨大的经济损失和社会影响。在此背景下，传统的“事后维修”模式已难以适应现代交通工程高质量发展的需求。桥梁养护的理念正经历着从被动应对向主动预防、从经验判断向数据驱动、从单一维护向全生命周期系统管理的根本性转变。科学、规范、高效的养护技术不仅是延长桥梁使用寿命、保障其安全服役的核心支撑，更是降低全生命周期成本、提升路网整体韧性的关键所在。因此，系统性地研究和分析桥梁养护技术在交通工程中的具体实践，具有极其重要的现实意义与战略价值。

1 桥梁养护技术体系的分类与内涵

现代桥梁养护技术体系是一个多层次、多维度的综合系统，根据养护目标、介入时机和技术手段的不同，可将其划分为预防性养护、矫正性养护和应急养护三大类别。

1.1 预防性养护 (Preventive Maintenance)

预防性养护是指在桥梁结构尚未发生明显功能性损坏或结构性损伤之前，或在病害处于萌芽、轻微阶段时，采取一系列主动、前瞻性的保护措施，旨在延缓病害的发生与发展，维持桥梁的良好使用状态，从而推迟或避免大规模、高成本的矫正性养护或重建工程。其核

心思想是“防患于未然”，追求的是长期经济效益的最大化。预防性养护的主要技术包括：（1）表面防护处理：如对混凝土结构涂刷渗透型防腐涂料、硅烷浸渍剂，形成保护层，有效阻隔水分、氯离子等侵蚀性介质的侵入，延缓混凝土碳化和钢筋锈蚀进程^[1]。（2）裂缝封闭与注浆：对于宽度较小（通常小于0.2mm）的非结构性裂缝，采用环氧树脂胶泥进行表面封闭；对于较宽或深层裂缝，则采用低压注浆技术，填充裂缝内部，恢复结构的整体性和耐久性。（3）支座与伸缩缝的精细化维护：定期清理伸缩缝内的杂物，更换老化失效的橡胶密封条；对板式支座进行脱空调整，对盆式支座更换密封圈和防尘罩，确保其正常工作性能。（4）桥面防水系统修复：及时修补破损的桥面铺装层和防水层，防止雨水下渗侵蚀主梁结构。

1.2 矫正性养护 (Corrective Maintenance)

矫正性养护，也称修复性养护，是指当桥梁结构已经出现明显的功能性缺陷或局部结构性损伤，但尚未危及整体安全时，所采取的旨在恢复或部分恢复其原有承载能力和使用功能的修复与加固措施。这是传统养护工作的主要内容，具有针对性强、技术复杂度高的特点。矫正性养护的关键技术包括：（1）结构加固技术：其中以碳纤维增强复合材料（CFRP）应用最为广泛。通过高性能环氧树脂将碳纤维布或板粘贴于梁体受拉区，利用其高强、轻质、耐腐蚀的特性，显著提升构件的抗弯、抗剪承载力。该技术施工便捷，对交通干扰小，已成为梁桥加固的主流方案。其次体外预应力加固技术，在桥梁主梁外部增设高强度钢绞线或精轧螺纹钢，并通过锚固系统和转向块施加预应力。这种方法能主动卸载

原结构内力,有效改善裂缝和挠度,特别适用于大跨径或严重下挠的梁桥。还有增大截面法在原有构件外部浇筑新的混凝土并配置钢筋,直接增大构件的截面尺寸和配筋量,从而提高其承载能力。此方法原理简单,但会增加结构自重,适用于墩柱等竖向承重构件。(2)病害处治技术:如对钢筋锈蚀区域进行凿除、除锈(达到Sa2.5级),再用环氧砂浆或聚合物混凝土进行修补;对混凝土剥落、露筋部位进行修复等。

1.3 应急养护(Emergency Maintenance)

应急养护是指在桥梁遭遇地震、洪水、船舶撞击、火灾等突发性灾害事件后,为迅速恢复交通、防止次生灾害发生而采取的紧急响应与临时处置措施。其首要目标是保障生命财产安全和交通基本畅通。应急养护的技术要点包括:(1)快速检测与评估:利用无人机搭载高清摄像头和红外热成像仪进行快速巡检,识别结构变形、位移和潜在损伤;采用冲击回波法、雷达扫描等无损检测技术,快速探查混凝土内部缺陷^[2]。(2)临时加固与支撑:搭建贝雷梁、钢支撑架等临时承重体系,对受损部位进行支撑,确保结构在短期内的稳定性。(3)交通管制与疏导:根据评估结果,立即实施限载、限速或封闭交通等管制措施,并制定合理的绕行方案。

2 桥梁养护的关键支撑技术

无论是哪种养护类型,都离不开一系列关键支撑技术的保障,它们是精准诊断病害、科学制定方案、高效实施作业的基础。

2.1 桥梁检测与监测技术

这是桥梁养护的“眼睛”。现代检测技术已从传统的人工目视、敲击,发展为以无损检测和智能监测为核心的综合体系。

2.1.1 无损检测技术:

(1)超声回弹综合法:用于检测混凝土强度,精度可达 $\pm 5\text{MPa}$ 。(2)地质雷达(GPR):高频电磁波探测桥面铺装层脱空、内部钢筋分布等,深度分辨率高。(3)磁粉/渗透探伤:用于检测钢结构焊缝及母材的表面裂纹。

2.1.2 荷载试验技术

通过静载或动载试验,实测桥梁在控制截面的应力、应变和挠度,是评定桥梁实际承载能力的最直接、最可靠的方法。

2.1.3 无人机智能巡检

近年来,低空无人机技术在桥梁养护领域异军突起。交通运输部已于2026年发布《低空无人机应用公路桥梁巡检技术指南(试行)》,标志着该技术走向规

范化。无人机可高效、安全地覆盖人工难以到达的区域(如高墩、索塔、梁底),结合AI图像识别算法,对裂缝、剥落等表观病害的识别准确率高达98%,极大提升了巡检效率与安全性。

2.1.4 结构健康监测系统(SHM)

在特大桥梁上布设应变计、加速度计、位移计、温湿度传感器等,实现对桥梁关键部位受力状态和环境参数的24小时不间断实时监测,为长期性能评估和预警提供数据支撑。

2.2 全寿命周期管理与智慧管养平台

桥梁养护的最高境界是实现全寿命周期的精细化、智能化管理。这依赖于先进的信息化平台。

2.2.1 BIM(建筑信息模型)技术

BIM技术贯穿桥梁的设计、施工、运维全过程。在养护阶段,基于BIM构建的“数字孪生”桥梁模型,集成了几何信息、材料属性、历史检测数据、养护记录等全生命周期信息,实现了“一桥一档”的可视化管理。管理人员可通过轻量化BIM模型,直观查看构件信息、历史病害演变,为养护决策提供精准依据。

2.2.2 BIM+GIS集成平台

将宏观的地理信息系统(GIS)与微观的BIM模型相结合,构建智慧管养平台。管理者可在GIS地图上宏观掌握辖区内所有桥梁的分布与技术状况,点击任一桥梁即可调取其详细的BIM模型和养护档案^[3]。这种模式已在梅州市等地成功应用,有效解决了信息孤岛问题,大幅提升了管理效率。

2.2.3 数据驱动的养护决策

智慧平台通过对海量检测、监测数据的挖掘与分析,运用机器学习算法,可以预测桥梁性能的退化趋势,评估不同养护方案的长期效益与成本,从而生成最优的、个性化的养护策略,真正实现从“经验决策”到“数据决策”的跨越。

3 桥梁养护技术的实践案例分析

3.1 潜江市“EPC+养护”模式

湖北省潜江市在公路桥梁消危行动中,创新性地采用了区域化长周期“EPC+养护”(设计-采购-施工+养护)新模式。该项目涉及69座桥梁,通过将设计、施工与长达数年的养护责任捆绑,有效解决了传统模式下设计、施工与后期养护脱节的问题。该模式强调从源头上保证工程质量,并促使承包商在施工阶段就充分考虑后期的可检、可修、可养性,从而实现了全寿命周期成本的最优化。此项目成功入选交通运输部干线公路危旧桥梁改造工程组织管理类典型案例,为全国提供了可复制

的“潜江方案”。

3.2 虎门二桥BIM智能养护平台

作为世界级跨海集群工程，虎门二桥在建设之初就规划了BIM建养一体化信息平台。运营后，该平台整合了巡检、监测、养护等多源数据，实现了基于BIM模型的数据交互整合与养护决策支持。通过该平台，管理者可以清晰掌握大桥的“健康档案”，对索夹滑移、主缆腐蚀等关键风险点进行重点监控，养护工作从被动响应转向主动预防，显著提升了这座超级工程的运维管理水平。

3.3 技术应用案例：碳纤维加固技术的标准化

针对碳纤维加固技术应用日益广泛但标准缺失的问题，由温州市牵头编制的《公路混凝土桥梁预应力碳纤维索加固技术规程》于2025年通过专家评审。该规程填补了行业空白，对材料性能、设计计算、施工工艺、质量检验等环节进行了系统规范，标志着该项先进技术从工程实践走向了标准化、规范化应用，为全国范围内的推广应用奠定了坚实基础。

4 桥梁养护技术的发展趋势与展望

面向未来，桥梁养护技术将在国家战略和科技革命的双重驱动下，呈现出以下发展趋势：

4.1 全面智能化与自动化

人工智能（AI）、大数据、物联网（IoT）等技术将进一步深度融合于桥梁养护全过程。未来的桥梁将拥有更强的“自感知、自诊断、自决策”能力。智能巡检机器人、水下机器人将与无人机协同，构建立体化的“空-天-桥-水”一体化检测体系。AI算法不仅能自动识别病害，还能精准预测其发展路径，并自动生成最优养护方案。

4.2 深度绿色化与低碳化

在国家“双碳”战略引领下，桥梁养护将更加注重绿色低碳。一方面，研发和应用更多环保型养护材料，如水性防腐涂料、可再生骨料混凝土等；另一方面，通过精准化、预防性的养护策略，最大限度地延长桥梁使用寿命，减少因大修或重建带来的资源消耗和碳排放，实现养护工作的可持续发展^[4]。

4.3 高度集成化与标准化

以BIM为核心的智慧管养平台将成为行业标配，实

现从单桥管理到区域桥梁群管理的跨越。同时，各类先进养护技术（如无人机巡检、碳纤维加固、体外预应力等）的应用规程和标准体系将日趋完善，推动整个行业向更高质量、更高效率、更低成本的方向迈进。

4.4 强化韧性与安全保障

面对日益频发的极端气候事件和复杂的运营环境，未来的桥梁养护将更加注重提升结构的“韧性”——即在遭受灾害后快速恢复功能的能力。应急养护预案将更加科学、精准，储备的应急技术和装备将更加先进，确保国家交通大动脉在任何情况下都能保持基本畅通。

5 结语

桥梁养护是一项复杂的系统工程，是保障国家交通基础设施安全、高效、长寿命运行的战略性任务。本文通过对桥梁养护技术体系的梳理、关键技术的剖析、实践案例的总结以及未来趋势的展望，得出以下结论：首先，必须牢固树立全寿命周期管理理念，将预防性养护置于优先地位，实现从“治病”到“保健”的根本转变。其次，要大力推动技术创新与应用，特别是以BIM、无人机、智能传感为代表的数字化、智能化技术，是破解当前养护难题、提升管理效能的关键抓手。再次，成功的养护实践离不开管理模式创新，如“EPC+养护”等一体化模式，能够有效整合资源，实现全链条责任闭环。最后，面向未来，桥梁养护必须与国家“双碳”战略和高质量发展目标同频共振，走智能化、绿色化、标准化的发展道路。唯有如此，我们才能守护好这一座座连接过去与未来的“钢铁脊梁”，让它们在新时代继续安全、稳健地承载起国家繁荣与人民幸福的重任。

参考文献

- [1]梁海平.精细化管理在道路桥梁养护中的技术路径[J].中国建筑金属结构,2025,24(17):172-174.
- [2]杨龙兴.高速公路桥梁养护与维修加固施工技术研究[J].工程建设与设计,2025,(10):146-148.
- [3]吴梅玲,王欣阳.公路桥梁养护技术中存在的问题及对策研究[J].科技与创新,2025,(09):146-148+152.
- [4]蔡有兴.桥梁养护中材料性能改进与应用技术研究[J].交通科技与管理,2024,5(23):179-181.