

高速公路桥梁与隧道病害检测与维护研讨

普永华

昭通高速工程试验检测有限公司 云南昭通 657000

摘要：高速公路作为我国经济发展与区域联通的动脉，其桥梁与隧道设施肩负着巨大的交通压力与安全责任。随着服役年限的增加与环境负荷的加剧，高速公路桥梁与隧道逐渐暴露出多种病害问题。本文围绕当前桥梁与隧道的常见病害类型，系统探讨了检测技术手段及维护管理策略，旨在为行业从业者提供参考依据，提升设施运营的安全性及经济性。

关键词：高速公路；病害检测；维护措施

一、高速公路桥梁与隧道病害现状

我国高速公路桥梁与隧道数量位居世界前列，结构类型涵盖梁式桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥以及山岭、城市、河底隧道等多种形式，运行环境跨越寒冷、潮湿、干热、盐渍等复杂气候带。这种庞大体量与复杂条件，使得桥隧设施病害呈现多样化、复杂化发展趋势。桥梁常见病害包括混凝土表面裂缝、碳化引起的耐久性下降、钢筋锈蚀导致截面削弱、支座老化变形影响受力传递，以及伸缩缝损坏带来的行车冲击感增加等问题。而隧道则多表现为衬砌渗漏水、纵横裂缝扩展、结构沉降变形、衬砌剥落与空鼓、以及排水系统堵塞失效等典型病害。近年来，随着高速公路车流量大幅增加、重载运输压力持续加剧，桥隧设施病害的发生频率和严重程度明显上升，特别是在沿海、山区和冻融交替地区，环境侵蚀与疲劳损伤加速结构劣化，对运营安全与结构寿命构成直接威胁。此外，部分早期建造的桥隧设施受限于当时设计标准较低，材料性能退化明显，老龄化问题突出，如上世纪90年代修建的一批桥梁已普遍面临承载力不足与病害频发的挑战。针对这一现状，亟需通过提升检测频率、采用先进检测技术手段，实现桥隧病害的早发现、早预警、早治理，进而保障我国高速公路交通大动脉的安全畅通与可持续运行。

二、高速公路桥梁与隧道病害检测技术

1. 视觉检测法

视觉检测是桥隧病害识别中最基础且应用最为广泛的手段，主要依赖检测人员通过目视观察、拍照、摄像及现场记录等方式，对结构表面的裂缝、剥落、锈蚀、渗漏水等病害特征进行直观判别。根据2023年交通运

输行业统计，超过65%的桥梁和隧道初步病害发现，仍主要依靠人工视觉检测完成。该方法操作简便、设备要求低、成本较为低廉，适用于大范围巡查和周期性筛查任务，特别是在桥面系、隧道内衬和构件接缝等区域的快速检测中表现突出。然而，视觉检测结果在很大程度上依赖于检测人员的经验与专业水平，不同检测人员之间可能存在结果偏差。此外，视觉检测对隐蔽性病害，如内部空洞、深层裂缝、钢筋锈蚀及衬砌背后的脱空问题，往往无法做到有效判断，存在一定局限性。因此，视觉检测一般作为病害检测的第一道防线，需与无损检测、传感监测等精密技术联合应用，形成“粗筛+精查”的检测策略，以显著提升整体检测精度和病害诊断的可靠性。

2. 无损检测技术

无损检测技术在桥梁与隧道病害诊断中日益发挥关键作用，已成为检测体系中不可或缺的重要环节。在不损害或不影响被检测对象使用性能的前提下，采用射线、超声、红外、电磁等原理技术仪器对材料、零件、设备进行缺陷、物理、化学参数检测。例如，超声波检测不仅可用于裂缝深度判定，还可评估混凝土密实度；而地质雷达技术则在隧道衬砌背后空洞、含水层探测中效果显著。在部分山区隧道中，地质雷达探测发现的背后脱空长度达到数十米，及时避免了结构塌落事故的发生。电磁感应检测技术，凭借其快速、无损的特点，被广泛用于桥梁钢筋锈蚀分布评估。红外热成像则能够捕捉结构表面微弱热差，揭示潜在的脱空与剥离病害。尽管无损检测设备成本较高、操作技术要求较强，但其在重大工程结构病害预警、定位与定量评估中的作用愈加突出，

已成为桥隧设施病害诊断的“精准利器”，为结构健康管理提供了坚实技术支撑，如图1。

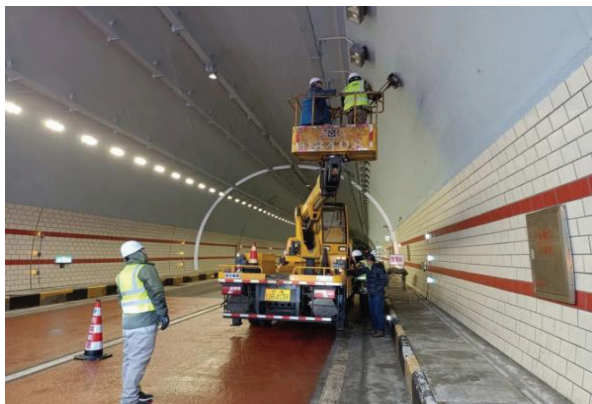


图1 高速公路隧道病害检测现场

3. 智能传感与监测系统

随着物联网和大数据技术的发展，智能传感与监测系统在桥隧病害检测中的应用不断拓展，推动检测手段由周期性走向实时化、由人工走向自动化。通过布设应变计、加速度计、位移传感器、渗压计等多类型传感器，能24小时不间断地采集桥梁变形、隧道收敛、振动响应等关键数据，实现结构状态的动态监测。例如，在部分特大型桥梁上，布设的光纤应变传感系统有效监测了长期疲劳应力变化，为预防疲劳破坏提供依据。隧道中，渗压计和位移计可实时反映衬砌背后水压力与收敛变形趋势，及时预警渗漏或结构失稳风险。此外，数据通过无线网络实时传输至监测平台，配合大数据分析 with AI算法，可自动识别病害异常信号，实现远程管理。虽然智能监测系统建设投入较大，但其在提高检测精度、延长设施寿命、降低运维成本等方面的价值日益显现，使病害检测工作的效率得到显著提高，特别适用于长寿命、重要性等级高的桥隧设施的健康管理体系中。

4. 无人机与机器人检测技术

近年来，无人机与机器人检测技术迅速崛起，为桥梁与隧道病害检测提供了全新的解决方案。无人机凭借其灵活机动、覆盖范围广的优势，广泛应用于桥梁高空部位与隧道内壁的图像采集、三维建模和热成像检测。例如，对于跨江大桥的主缆与塔柱，无人机可高效完成常规巡检中难以触及部位的裂缝、锈蚀检测，显著提升检测效率与安全性。隧道领域，履带式检测机器人能够自主行走于隧道内部，携带高清摄像头、激光扫描设备，实现衬砌裂缝自动识别和变形数据采集，一些机器人还能在潮湿、狭窄环境下作业，适用于排水系统或覆土隧

道检测。水下检测机器人则有效解决了桥梁墩台浸水部位的检测难题，为水中结构病害诊断提供支持。随着技术进步，无人机与机器人检测正由辅助手段逐步向主流检测技术演变，尤其在提高检测自动化水平、降低人员风险、拓展检测空间范围方面，展现出强劲发展潜力。

三、高速公路桥梁与隧道维护研讨

1. 桥梁病害维护对策

桥梁病害维护是保障公路网络安全运行的核心环节。针对桥梁裂缝、剥落、锈蚀等常见病害，应采取“预防性维修+及时性处治”的策略。对表面裂缝，一般采用环氧树脂灌缝法进行封闭，防止雨水渗入加剧劣化；对于钢筋锈蚀和混凝土剥落，采取除锈、加固和表面修复材料补强措施。例如，部分地区对重载桥梁采用碳纤维布加固法，有效提高承载能力，延长服役年限。对于跨江、跨海桥梁，其主缆、索塔等结构部位易受腐蚀，应定期实施涂装保护和防腐蚀系统升级。近年来，越来越多桥梁维护工作引入结构健康监测结果，实现按需维修，减少盲目大修。此外，对老旧桥梁病害严重、经济性修复效果不佳的情形，还需评估整体更换或重建的可行性，以确保交通安全与投资效益最大化。

2. 隧道病害维护策略

隧道结构病害的维护策略侧重于衬砌修复、防水系统完善与地质灾害治理。渗漏水与衬砌开裂是隧道中最常见病害。隧道防排水系统维护至关重要，应定期清理排水沟、检查渗排水管道畅通情况，防止积水导致结构劣化。在软弱围岩地段，地层变形引起的衬砌收敛病害，需通过加设二次衬砌、钢拱加固等措施进行处治。针对隧道周边岩层病害的治理，可采用注浆加固技术进行综合处治。在实施加固作业前，需全面掌握隧道工程地质条件，通过科学注浆增强围岩力学性能，显著提升岩体承载能力。该技术不仅能有效充填衬砌背后空隙，确保衬砌结构均匀受力，防止衬砌变形或结构损伤，还能通过向围岩裂隙注入特制浆液，形成可靠防渗帷幕，防止地下水渗透，有效预防水害发生。近年来，部分长大隧道引入智能监测系统，实现病害早期预警，为维护决策提供数据支持，推动隧道运维向“预防性维护+智能化管理”方向发展。

3. 防腐与防水系统的改进

防腐与防水系统是保障桥隧结构耐久性的关键技术环节。桥梁方面，为应对氯离子侵蚀和碳化腐蚀，近年来广泛应用高性能涂料、防腐蚀钢材和外加剂改性混凝

土。如海滨、盐渍地区桥梁，采用锌铬底漆与氟碳面漆多层涂装体系，能显著延长钢结构使用寿命。隧道中，传统PVC、EVA防水板体系面临接缝老化和破损风险，目前正在向双层复合防水、喷涂型防水材料升级。例如，喷涂聚脲防水层因施工快捷、粘结性能优异，已在部分城市轨道交通隧道推广应用。对于已服役多年、渗漏问题突出的隧道，实施整体防水系统翻新和排水系统优化，是提升防渗效果的重要措施。综合来看，防腐防水系统的改进，不仅延缓病害发生，还直接关系到桥隧设施的全寿命周期成本控制和水平提升。

4. 结构加固与修复技术

结构加固与修复是桥隧病害治理的核心手段，其技术体系不断发展创新。对于受力不足或疲劳裂缝的桥梁，碳纤维布、钢板外包、粘贴钢筋等加固技术得到广泛应用，其中碳纤维加固以其高强轻质、施工便捷成为主流。在隧道领域，对衬砌裂缝、脱空、渗漏病害，常采用环氧树脂注浆、化学灌浆与衬砌加厚等方法实施修复。近年来，喷射混凝土与钢纤维混凝土材料也逐步应用于结构修复，提升耐久性与承载力。例如，某高速隧道通过喷射高性能混凝土，成功消除了收敛变形风险。此外，模块化预制加固构件和机械化施工装备的应用，使得结构加固作业效率大幅提高，施工安全性同步提升。未来，结合病害检测结果实施“靶向”加固，按照损伤分布优化修复范围，将成为桥隧结构修复技术的发展趋势。

5. 维护管理模式创新

随着高速公路网络规模扩大，桥隧维护管理模式正向智能化、系统化方向转型。传统以定期巡检、事后维修为主的管理方式，逐渐被“预防性维护+基于状态管理”模式所取代。例如，部分地区率先建立桥隧设施数据库，实现病害信息电子化、动态化管理，通过历史病害数据与检测结果分析，科学制定维护计划。智能监测系统的广泛应用，使得异常状态自动预警成为可能，提升了管理效率和应急处置能力。此外，采用“公私合营（PPP）”与“全寿命周期合同（LCC）”等新型运维模式，引入社会资本参与桥隧运维管理，促使维护工作质量与效益同步提升。未来，结合数字孪生、人工智能、大数据分析的“智慧养护”系统，将成为高速公路桥隧设施维护管理的主流方向，实现资源配置优化、成本控制和

结构安全保障的有机统一。

6. 绿色环保型维护措施

随着可持续发展理念深入人心，桥梁与隧道的维护工作也在向绿色环保方向转型。传统的维护材料和工艺存在能耗高、污染重的问题，近年来，绿色环保型材料和低碳工艺得到推广。例如，采用水性涂料替代溶剂型防腐涂料，不仅降低了VOC排放，还提升了施工安全性。在混凝土修复中，使用低碳矿物掺合料如粉煤灰、矿渣微粉，能有效减少碳足迹并提升耐久性。此外，部分地区在病害修复施工中采用循环利用废旧混凝土和钢材，降低了资源消耗和固废排放。施工过程中推广机械化、模块化作业，也有助于减少人工作业面带来的环境影响。尤其是在隧道内部维修时，采用低噪声、无尘作业设备，不仅改善了施工环境，还降低了对周边生态的干扰。未来，绿色环保理念将贯穿桥隧设施全寿命周期，成为病害维护措施升级和工程管理创新的重要方向。

结束语

高速公路桥梁与隧道病害检测与维护工作，是保障交通安全、提升设施耐久性与运营效率的核心环节。随着设施服役年限增长及使用环境复杂化，桥隧病害问题日益突出，亟需借助现代检测技术、智能化管理手段与绿色维护理念，推动养护管理体系升级与技术创新。未来，应加大对智能监测、机器人检测、绿色修复技术的研发投入，构建多维度、全过程的桥隧健康管理体系，为我国高速公路桥隧运营安全保驾护航。

参考文献

- [1] 田丰. 高速公路桥梁与隧道病害检测与维护研究[J]. 汽车周刊, 2025, (04): 70-72.
- [2] 严云专. 高速公路桥梁与隧道病害检测与维护措施[J]. 运输经理世界, 2024, (18): 136-138.
- [3] 彭涛, 李彭. 高速公路桥梁与隧道病害检测与维护措施[J]. 四川建筑, 2023, 43(01): 86-88.
- [4] 王文静. 高速公路桥梁与隧道养护管理的现状与对策分析[J]. 知识库, 2019, (08): 225.
- [5] 刘光阳. 高速公路桥梁与隧道养护管理现状与解决措施[J]. 汽车周刊, 2024, (11): 183-185.