

道路机场与桥隧工程中的安全监测与维护技术

张现友 史利继

山东省路桥集团有限公司 山东 济南 250013

摘要: 道路、机场、桥隧工程安全监测与维护技术涵盖多方面内容。道路工程包括结构安全监测,如自动化沉降监测等,及维护技术体系,如维护周期优化等;机场工程有设施安全监测,如落锤式弯沉仪评估道面承载力等,及维护技术体系,如跑道摩擦系数测试等;桥隧工程含桥梁与隧道结构安全监测,如北斗系统跟踪桥梁位移等,及维护技术体系,如体外预应力加固桥梁主梁、隧道衬砌裂缝碳纤维布加固施工等,这些技术保障了工程安全运行。

关键词: 道路工程; 机场工程; 桥隧工程; 安全监测; 维护技术

引言: 在交通基础设施建设蓬勃发展的当下,道路、机场、桥隧等工程的安全与稳定至关重要。各类工程因自身结构与功能特性,在安全监测与维护技术上既有独特之处,也存在共性需求。从道路的路基沉降监测到机场的道面承载评估,从桥梁的位移跟踪到隧道的围岩变形判断,精准监测是保障安全的基础,科学维护是延长寿命的关键。在此背景下,探索跨工程类型的安全监测与维护技术融合,构建通用技术平台、实现数据驱动决策,成为提升工程安全保障水平的重要方向。

1 道路工程安全监测与维护技术

1.1 道路结构安全监测技术

自动化沉降监测系统应用将全球导航卫星系统与静力水准仪组合布设,静力水准仪沿道路纵向分段安装获取差异沉降量,全球导航卫星系统测点布设于关键断面提供绝对位移数据,两类设备通过数据采集单元实现同步观测与融合分析,沉降数据通过无线通信模块实时传输至监测平台,系统依据沉降速率、累计沉降量及差异沉降比等指标分级设定动态预警阈值,当监测数据达到阈值时自动推送预警信息实现路基沉降状态的远程感知与分级预警。三维激光扫描技术通过高速激光测距获取路面表面高密度点云数据,经点云滤波与三维建模处理后实现对车辙深度、裂缝宽度及路面平整度的毫米级识别,基于图像识别的路面破损自动分类算法通过对采集的路面图像进行特征提取与像素级分割,能够准确区分横向裂缝、纵向裂缝、块状裂缝、龟裂及车辙等病害类型并同步完成病害位置定位与面积统计的自动化处理。流量传感器与液位计协同布设于排水管道关键节点及路基边沟位置,流量传感器监测水流速度与过水断面面积实时计算排水流量,液位计获取水位变化过程线,两类设备数据融合后可量化评估排水系统在不同工况下的泄流能力与运行状态,地下水水位变化通过水位观测孔进行

长期连续跟踪,监测数据反映地下水位升降幅度与变化规律,结合路基土体含水率与孔隙水压力参数分析地下水位波动对路基土体强度衰减及路基变形稳定性的影响机制。

1.2 道路维护技术体系

基于路面性能衰减模型的维护周期优化以路面使用性能指数、行驶质量指数及结构强度系数等指标为基础构建路面性能衰减曲线,通过回归分析确定路面性能衰变规律与关键转折点,结合不同养护措施的费用效益比在路面性能指标下降至预定阈值前科学确定预防性养护实施时机,实现维护周期与路面实际使用状态的精准匹配,微表处与稀浆封层技术的适用性对比从交通荷载等级、原路面状况、施工温度条件及使用寿命等维度展开分析,微表处适用于高等级道路与重交通路段且具备良好的抗滑性能与耐久性,稀浆封层适用于中低交通量路段且施工速度快成本较低,两者在乳化沥青性能指标与级配设计要求上存在显著差异^[1]。裂缝注浆材料性能对比围绕环氧树脂与水泥基两大类材料展开,环氧树脂类材料粘结强度高、固化收缩小且具备良好的渗透性与抗化学腐蚀能力适用于结构性裂缝与对粘结性能要求较高的部位,水泥基类材料与混凝土路面相容性良好、施工工艺简单且环保性能优越适用于非结构性裂缝与水泥混凝土路面日常养护,路面再生技术的工艺参数控制涵盖旧路面材料破碎粒径、级配组成、新料添加比例、再生剂用量及拌合温度等关键指标,通过室内配合比试验与现场试验段验证确定最优参数组合,确保再生层压实度、平整度及结构强度满足设计技术要求。极端天气下的快速抢修材料储备方案根据冻融、暴雨、高温等不同类型的极端天气条件确定储备材料种类与数量,储备材料涵盖冷补料、快硬水泥、速凝剂及应急排水设备等物资并建立定期轮换与动态补充机制,交通疏导与维护作业的协

同管理通过作业区交通组织设计、临时交通标志布设及可变信息板发布等方式实现维护作业与交通运行的协调控制,依据维护作业类型与占道范围合理设置警示区、过渡区与作业区,确保维护作业期间道路交通安全与施工效率。

2 机场工程安全监测与维护技术

2.1 机场设施安全监测技术

落锤式弯沉仪通过模拟飞机起降荷载作用于道面表面,测量道面在冲击荷载作用下的弯沉盆形态,反演计算道面结构层模量,实现对跑道、滑行道及停机坪道面承载力的动态评估,为道面结构性能衰减判断提供定量依据。光纤光栅传感器埋设于道面面层与基层界面处,实时监测道面在温度变化条件下产生的温度应力分布规律,获取温度梯度变化与应力集中位置的关键数据,为道面温缩裂缝预防提供监测支撑。导航灯光系统亮度衰减的在线监测通过在灯光回路中设置光强检测单元,持续跟踪进近灯、跑道边灯及滑行道灯的亮度输出值,当光强衰减至标准限值以下时系统自动识别故障灯具并生成维护工单^[2]。气象监测站数据与能见度预警模型的联动将跑道视程、风速风向及降水强度等实时气象参数接入预警平台,结合历史气象数据构建能见度预测模型,当能见度低于运行标准时自动触发预警信号并同步至空管与场务部门。分布式光纤传感技术沿给排水管道、消防管道及供热管道全线布设传感光缆,通过监测光纤沿线温度变化与应变分布特征实现对渗漏点的精准定位,将定位误差控制在数米范围内。

2.2 机场维护技术体系

跑道摩擦系数测试与橡胶去除工艺优化采用连续摩擦系数测试设备定期测定跑道表面抗滑性能,依据摩擦系数衰减规律确定橡胶去除作业时机,优化高压水射流与化学清洗组合工艺参数,在保证道面结构完整性的前提下有效清除着陆区橡胶沉积物。道面灌缝材料的耐候性对比研究选取聚氨酯、硅酮及改性沥青等不同材料,在相同气候条件下开展长期跟踪观测,对比材料在紫外辐射、冻融循环及温度交变作用下的粘结性能保持率与弹性恢复能力,为不同气候区域道面接缝养护提供材料选型依据。智能楼宇系统对空调、通风设备的能耗监测通过布设于设备层面的电量传感器与温湿度传感器,实时采集航站楼空调机组、新风机组及排风系统的运行参数与能耗数据,系统依据室内外温差及旅客流量自动调节设备运行台数与频率,实现能耗精细化管控^[3]。消防设施的定期压力测试与联动响应验证按照消防管网分区进行水压与气压测试,检查消防水泵启动压力值、稳压

泵运行状态及管网保压能力,同时验证火灾报警系统与消防设备的联动响应时间,确保消防设施处于随时可用状态。除冰雪设备的快速部署与作业效率评估针对扫雪车、吹雪机及除冰液喷洒设备建立设备调度机制,依据降雪量级与温度条件优化设备编组与作业流程,通过作业时间、设备出动率及道面开放时间等指标综合评估除冰雪效率。

3 桥隧工程安全监测与维护技术

3.1 桥梁结构安全监测技术

北斗卫星导航系统通过在桥梁主塔、主梁及桥墩等关键部位布设接收终端,实现对大跨度桥梁三维位移量的长期连续跟踪,获取桥梁在温度荷载、风荷载及车辆荷载作用下的空间变形规律。倾角传感器安装于桥墩及桥塔底部,实时监测桥墩倾斜角度变化速率,依据倾斜速率与累计倾斜量分级设定预警阈值,当监测数据超限时自动触发预警。光纤光栅传感器网络在桥梁主梁、拱肋、斜拉索及吊杆等关键构件表面或内部布设,形成分布式传感网络,构建关键构件应力分布实时映射图。振动特性分析通过对桥梁在环境激励下的加速度响应数据进行模态参数识别,获取桥梁自振频率、振型及阻尼比变化,依据模态参数异常变化定位结构损伤位置。位移传感器安装于支座上下座板之间,持续监测支座位移量与变形形态,识别支座脱空、偏位及滑动面卡阻等异常状态。伸缩缝堵塞程度的图像识别算法采用摄像头定期采集伸缩缝图像,通过图像分割与特征提取识别缝内杂物堆积面积与堵塞深度,评估伸缩缝工作状态。

3.2 隧道结构安全监测技术

多点位移计在隧道拱顶、拱腰及边墙位置沿径向埋设,通过测量不同深度测点间的相对位移量获取围岩内部收敛变形规律,判断围岩稳定性与支护结构承载状态。渗压计埋设于隧道仰拱下方及洞壁周边含水层位置,连续监测地下水压力变化过程,当水压突增或超过预设阈值时及时识别突水风险并发出预警。地质雷达采用高频天线沿隧道纵向连续扫描,获取衬砌厚度、背后回填密实度及钢筋分布图像,探测衬砌背后空洞位置与规模以及钢筋锈蚀程度。裂缝计跨越裂缝两侧安装,实时监测裂缝宽度动态变化趋势,记录裂缝在温度变化与车辆荷载作用下的张开与闭合过程^[4]。一氧化碳与能见度传感器布设于隧道中段及出口位置,实时监测隧道内空气污染物浓度与能见度值,监测数据联动风机控制系统自动调节风机启停与运行频率。分布式光纤测温系统沿隧道纵向布设传感光缆,实时监测隧道内温度场分布,当温度异常升高时依据升温速率与空间分布范围精准定

位火灾火源位置。

3.3 桥隧维护技术体系

体外预应力加固桥梁主梁的工艺参数控制涵盖体外束布置形式、转向器安装精度、张拉控制应力及锚固系统防护等关键技术指标,通过施工过程监测确保加固效果达到设计要求。隧道衬砌裂缝的碳纤维布加固施工要点包括裂缝封闭处理、基面打磨平整度、浸渍胶涂刷均匀性及碳纤维布粘贴压实度等环节,确保加固层与原结构协同受力。隧道排水盲管的定期疏通与反坡设置优化依据隧道渗水量与排水系统运行状况确定疏通频率,优化盲管纵坡坡度与反坡段设置方式,保障排水系统通畅。桥梁伸缩缝橡胶止水带的更换标准依据止水带老化程度、表面龟裂状态及密封性能衰减情况综合判定更换时机,确保伸缩缝防水功能有效。桥梁坍塌事故的快速抢修支架体系设计采用装配式钢结构支架与模块化支撑构件,依据坍塌结构形式快速组合形成临时支撑系统,为抢险作业提供安全作业空间。隧道火灾后的结构安全性评估与修复流程首先开展衬砌损伤范围与深度调查,评估混凝土强度衰减与钢筋性能退化程度,依据损伤分级结果确定拆除重建或加固修复技术方案。

4 跨工程类型的安全监测与维护技术融合

4.1 通用技术平台构建

不同工程类型所采用的传感器种类繁多,数据格式各异。构建统一协议的数据接口,能打破传感器间的数据壁垒,实现各类传感器数据的无缝对接与高效传输,为后续的数据整合与分析奠定基础,提升监测系统的整体效能。在数据产生源头附近设置边缘计算节点,可对异构数据进行初步筛选、清洗与转换。这不仅能减少无效数据传输,降低网络带宽压力,还能快速提取关键信息,为后续的深度分析提供高质量数据,提升监测响应速度。依据不同工程类型的数据敏感性与计算需求,合理分配私有云与混合云的存储和计算资源。敏感数据存储于私有云保障安全,大量计算任务借助混合云弹性资源,实现资源的高效利用与成本优化,满足复杂监测需求。采用微服务架构进行监测系统开发,将系统拆分为多个独立模块。每个模块负责特定功能,可独立开发、部署与维护。

4.2 数据驱动的维护决策支持

对各类工程长期积累的监测数据进行时间序列分析,挖掘数据随时间变化的规律。通过建立合适的预测模型,可提前预知工程结构性能的变化趋势,为维护决策提供前瞻性依据,实现预防性维护,降低突发故障风险。利用机器学习算法,结合大量历史监测数据与结构性能参数,构建结构剩余寿命评估模型。该模型能综合考虑多种因素对结构寿命的影响,准确评估结构剩余使用寿命,为制定科学合理的维护计划提供关键参考。构建桥隧工程的虚拟模型,并将其与实际监测数据实时映射^[5]。通过仿真分析,可模拟不同工况下工程结构的响应,提前发现潜在问题,评估维护措施效果,优化维护方案,提高桥隧工程维护的精准性与有效性。为机场设施创建数字孪生体,实时反映其运行状态。借助数字孪生体,可对机场设施进行虚拟调试、故障诊断与维护策略优化。

结束语:道路、机场、桥隧等工程的安全监测与维护技术各有特色且不断发展。从各类针对性监测技术到完善维护体系,再到跨工程类型的通用平台构建与数据驱动决策支持,实现了从局部到整体、从单一到综合的转变。这不仅提升了各工程自身安全保障能力,更推动了行业技术融合创新。未来,随着科技持续进步,这些技术将不断优化升级,为各类工程建设与运营提供更坚实的安全支撑,助力工程领域朝着智能化、高效化方向稳步迈进。

参考文献

- [1]梁睿,程龙,李青松.道路机场与桥隧工程中的安全监测与维护技术[J].时代汽车,2025,(14):193-195.
- [2]戴国帅,胥祥鹏,魏平.城市道路桥隧工程造价信息化建设探讨[J].中华建设,2025,(06):27-29.
- [3]宋建花.道路与桥隧工程施工安全管理研究[J].运输经理世界,2025,(09):114-116.
- [4]姚英德,向家顺.桥隧隧道工程施工安全评估监控技术研究[J].工程建设与设计,2021(4):113-115.
- [5]杜伟.桥隧施工过程中的危险源识别技术及评价研究[J].交通世界,2022(18):74-76+105.