

# 道路机场与桥隧工程中的安全监测与维护技术

张浩胜 尉伟星

山东东科工程检测有限公司

**摘要：**道路、机场与桥隧工程是现代交通网络的重要组成部分，对经济发展和社会进步具有深远影响。这些工程的安全性直接关系到公众的生命财产安全，因此，实施有效的安全监测与维护技术至关重要。本文概述了道路机场与桥隧工程的重要性，探讨了安全监测与维护技术的应用，包括地面沉降、路面状况、裂缝监测、交通流量分析以及智能化维护系统等。讨论了桥隧工程的安全风险、监测技术如结构健康监测、隧道变形监测等，以及维护策略，如病害治理、结构加固、防灾逃生系统等。

**关键词：**道路机场；桥隧工程；安全监测

**【DOI】** 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.13.064

## 引言

随着交通网络的不断扩展，道路、机场与桥隧工程在连接城市、促进区域发展方面发挥着越来越重要的作用。本文将探讨道路、机场与桥隧工程的安全监测与维护技术，分析其重要性，并提出相应的监测与维护策略，以期对相关领域的研究和实践提供参考。

### 一、道路机场与桥隧工程的重要性

道路机场与桥隧工程作为交通基础设施的重要组成部分，对于一个国家和地区的经济、社会稳定至关重要。它们不仅承载着人员与物资的运输任务，更是经济活动顺畅进行的动脉。优质的道路网络可以减少交通拥堵，提高运输效率，降低物流成本，从而促进地区经济的快速发展。而现代机场工程则是国际交流与合作的枢纽，它的建设和完善直接关系到区域的对外开放程度和竞争力。桥隧工程则解决了地形障碍对交通流动的限制，提供了更为直接、快速的通道，对于推动区域一体化和优化空间布局具有显著效果。

### 二、道路机场工程的安全监测与维护技术

#### （一）道路机场工程安全风险概述

道路机场工程作为交通系统的重要组成部分，其安全性直接关系到人民生命财产的安全和交通系统的稳定运行。安全风险主要包括基础设施老化、材料疲劳、设计与施工缺陷、自然灾害影响、运营过载等多个方面。基础设施老化可能导致承载能力降低，材料疲劳可能引起结构损坏，设计与施工缺陷可能导致结构在未达预期使用年限前发生故障。此外，自然灾害如地震、洪水、台风等可造成突发性损毁，而运营过载也会加速设施的损耗。这些安全风险需要通过科学有效的监测与维护技术进行管理，以确保工程安全、可靠、长期运行。

#### （二）安全监测技术

#### 1. 地面沉降监测

地面沉降监测是道路机场工程安全监测的重要组成部分。这一过程涉及对机场跑道、道路基础、桥梁基础等关键结构的稳定性进行持续观察，以评估其变形和沉降情况。监测方法包括传统的水准测量、GPS定位技术、地面穿透雷达和卫星遥感等。利用这些技术，可以精确获得沉降量的数据，对沉降速率和趋势进行分析，及时发现潜在的结构安全问题。此外，现代监测技术如InSAR（合成孔径雷达干涉测量技术）可以提供更为精确和连续的沉降监测结果，它通过分析卫星雷达信号的相位差异，能够监测到毫米级的地面变化。地面沉降监测对于及时预警工程安全风险、指导维护和加固工作具有重要意义。

#### 2. 路面状况监测

路面状况监测是确保道路机场工程安全的关键环节，主要目的是评估和管理路面性能，确保交通安全和舒适度。监测技术包括定期的视觉检查、自动化的车载路面检测系统以及各种非破坏性检测技术，如激光扫描、地面穿透雷达和声波反射法等。通过这些技术，能够获取路面平整度、裂缝、坑洼、车辙等信息，进行定量评估路面的损坏程度和服务性能。高级的监测系统，如三维激光扫描，能够在不影响交通的情况下快速地收集路面状况数据，为后续的维护决策提供依据。有效的路面状况监测有助于及时发现和修复路面问题，减少交通事故的发生，延长道路使用寿命，降低维护成本。

#### 3. 裂缝与结构损伤监测

裂缝与结构损伤监测是道路机场工程中至关重要的一环，它涉及对道路、机场跑道、桥梁等结构的定期检查，以评估裂缝发展、腐蚀情况及其他结构性损害。监测技术多样，包括但不限于目视检查、无损检测技术（如声波、电磁和红外热成像），以及基于传感器的实时监测系统。特别是，纤维光学传感技术因其高灵敏度和抗电磁干扰能力，在结构健康监测领域得到广泛应用。通过嵌入或附着在结构中的传感器，可以实时捕捉结构应变、温度变化和裂缝扩展，及时发现损伤并预测其发展趋势。此外，数字图像处理技术和机器学习算法的发展也使裂缝识别和损伤评估自动化和智能化成为可能。这些监测技术不仅可以减少因人为因素导致的检测误差，还可以提高检测工作的效率和精确性。通过定期和连续的裂缝与结构损伤监测，可以有效评估工程结构的完整性和安全性，为维修维护提供科学依据，从而确保交通基础设施的长期稳定与安全运行。

#### 4. 交通流量与行为监测

交通流量与行为监测对于道路机场工程的运营管理和安全维护至关重要。它涉及对车辆流量、行驶速度、行驶模式以及交通密度等关键指标的收集和分析，以实现交通状态的实时评估和管理。采用的技术手段包括传统的线圈车检器、红外感应器、超声波传感器，以及更先进的视频图像分析、雷达检测和无人机监视系统。视频图像分析技术能够通过算法识别车辆类型、计数和行为模式，而雷达检测则可以在各种天气条件下提供准确的交通流数据。无人机监视提供了一种灵活的监测手段，能够覆盖广阔区域，收集交通流量和事故现场信息。智能运输系统（ITS）的实施整合了这些监测技术，通过数据交换和分析，可以提高交通管理的智能化水平，提前预测和缓解交通拥堵，减少事故发生。此外，基于大数据和机器学习的分析模型能够从海量交通数据中提取有价值的信息，为交通规划、基础设施建设和交通政策制定提供科学依据。有效的交通流量与行为监测对于提高道路机场的运行效率、保障用户安全、优化资源分配以及促进可持续交通发展具有不可估量的价值。

### （三）安全维护技术

#### 1. 定期巡检与评估

定期巡检与评估是确保工程结构安全与功能性的关键安全维护技术。这一过程包括对桥梁、道路、隧道、机场跑道等基础设施进行系统的检查，以识别出现的损伤、裂缝、腐蚀或其他可能影响结构完整性和安全性的问题。定期巡检通常由专业维护团队使用先进的检测工具和技术执行，如无损检测设备、地面穿透雷达、三维激光扫描和机器视觉系统，它们可以提供关于结构状态的详细信息。此外，评估不仅包括实地检查，还涉及对收集到的数据进行详细分析，使用结构健康监测系统（SHM）和计算机辅助工程（CAE）软件模拟预测结构行为以及潜在的衰退趋势。这些信息有助于决策者制定维修计划，优化维护资源配置，并制定长期的维护策略。

#### 2. 应急处置方案

应急处置方案为工程结构在面临自然灾害、人为破坏、交通事故或其他突发性事件时的快速反应提供了框架和指南。该方案要求综合性的准备工作，包括制定详细的应急预案、资源分配、人员培训和演习等，以确保在紧急情况下能够迅速、有序地采取行动。应急预案中包括了关键基础设施的风险评估，识别潜在的薄弱环节，制定相应的加固和保护措施。资源分配确保了必要的人员、设备和物资能够在事件发生时被迅速调度和使用。此外，培训人员以应对各类紧急事件，并通过定期的演习来确保所有应急程序和流程的有效性和实用性。在应急处置执行过程中，通信协调机制的建立对于信息的快速传递和指挥调度至关重要。信息管理系统，如GIS和实时监控系统，能够提供及时的现场信息，帮助管理层做出决策。

#### 3. 长效维护策略

长效维护策略的核心在于确保工程结构能够在其设计使用寿命内，甚至更长时间内，保持预期的性能。这要求一个全面的、预防为主的维护计划，该计划基于对工程结构进行定期和系统的巡检与评估的基础上进行建立。长效维护策略涉及对材料老化、疲劳损伤、环境侵蚀等因素的长期监控和分析，以及基于这些数据预测未来的维护需求。关键是建立一个多周期维护计划，将日常维护、定期修理和大修计划结合起来，形成一个持续的维护周期。这种策略经常依赖于寿命周期成本分析（LCCA），以确定维护活动的最佳时间和频率，从而优化资金的使用效率。

#### 4. 智能化维护系统

智能化维护系统代表了利用信息技术、大数据分析 and 物联网（IoT）等现代科技手段对工程结构进行维护的前沿趋势。这些系统通过在结构中安装传感器网络，实时监测结构的状态，包括应力、变形、温度等关键参数。这些数据通过无线网络传输到中央处理系统，在那里它们可以被用来自动化地分析结构的健康情况，并预测未来的维护需求。智能化维护系统的一个重要组成部分是机器学习和人工智能算法，它们可以从历史数据中学习，并识别可能导致故障的模式。这种预测性维护方法不仅能够减少意外故障和延长设施寿命，而且可以显著降低维护成本，因为维护工作可以在必要时才执行，而不是基于固定的时间表。智能化维护系统还可以集成移动应用和云平台，使维护人员能够远程监控系统状态并接收维护警报。

### 三、桥隧工程的安全监测与维护技术

#### （一）桥隧工程安全风险概述

桥隧工程作为交通基础设施的重要组成部分，其安全性对公众安全和交通运输系统至关重要。桥梁和隧道的安全风险包括结构老化、材料腐蚀、设计缺陷、施工问题、过载载荷以及极端自然事件（如地震、洪水、台风）等多种因素。这些风险可能导致结构性能降低、使用寿命缩短甚至突发灾难性的结构损坏。此外，随着运营时间的增长，桥隧结构可能会出现混凝土碳化、钢筋锈蚀、支座老化、排水系统堵塞等问题，这些状况如果不及及时发现和处理，会逐渐恶化，增加安全隐患。如何有效识别和管理这些风险，是桥隧工程安全运营中的一项重大挑战。

#### （二）安全监测技术

##### 1. 结构健康监测系统

结构健康监测系统是桥隧工程安全监测的核心技术，其通过部署一系列传感器，例如应变计、加速度计、位移传感器等，连续或定期地收集关于结构响应的数据。这些数据通过有线或无线网络传输至监测中心，并利用专门的软件进行分析，以评估结构的当前状态并预测未来的性能。通过实时数据分析，可以及时发现结构的异常变化，如裂缝扩展、位移增大、振动加剧等，从而使得维护可以更为主动地进行，以预防性维修代替

紧急修复。结构健康监测系统的高级形式甚至可以集成机器学习算法，自动识别数据中的异常模式，预测潜在的问题，并为决策者提供维护建议。

## 2. 桥梁位移与振动监测

位移监测关注结构的静态变化，如桥梁的沉降、推移或扩张缝的变化，而振动监测则侧重于评估桥梁在交通荷载或风荷载等动态效应下的响应。通过高精度的位移传感器、GPS或激光测距仪，可以精确测量桥梁的位移量，而加速度计或速度计则用于捕捉桥梁的振动特性。这些监测数据不仅有助于了解桥梁在正常使用条件下的性能，还能在自然灾害发生后迅速评估结构的安全状况。通过对长期监测数据的分析，可以识别结构的长期趋势和周期性变化，进而预测未来可能出现的问题。

## 3. 隧道内部变形与裂缝监测

隧道内部变形与裂缝监测是隧道工程安全监测的重要组成部分，涉及使用多种传感器来实时跟踪隧道壁的变形和裂缝发展情况。这些传感器包括应变计、裂缝计、位移传感器以及激光扫描仪等，它们能够精确测量并记录隧道内部的微小移动和裂缝宽度的变化。隧道监测系统通常需要在恶劣的地下环境中稳定运行，因此传感器必须具备高抗干扰能力和长期稳定性。隧道内的变形监测数据有助于工程师评估隧道在地质作用、交通负荷以及其他外部影响下的结构行为。裂缝监测则专注于裂缝的发展速度和裂缝宽度的变化，这对于早期识别潜在的结构问题至关重要。

## 4. 环境与气象因素监测

环境与气象因素监测是桥梁和隧道安全监控中的一个关键方面，它关注的是环境条件对这些结构可能产生的影响。此类监测包括温度、湿度、风速、风向、雨量以及其他气象条件的测量，这些数据对于理解和预测结构性能至关重要。例如，温度和湿度的极端变化可以引起材料膨胀或收缩，影响结构的完整性；强风和降雨可能影响桥梁的稳定性和隧道的排水系统。通过安装气象站和环境传感器，可以实时监控这些条件，并将数据与结构监测系统集成，以便更全面地评估结构的健康状况。

### （三）安全维护技术

#### 1. 桥隧病害治理

桥隧病害治理是确保桥梁和隧道长期安全运营的关键技术之一，包含了对结构损伤、功能退化及安全隐患的系统诊断和修复措施。针对桥梁，病害常见于承载结构损伤、接缝松动、排水不畅、桥面铺装损坏等方面；而隧道病害则主要表现为衬砌裂缝、渗水、结构变形、内部装修脱落等问题。治理工作首先依赖于详尽的检测评估，包括使用非破坏性检测技术（如超声波、地质雷达等）和定期的视觉检查以确定损伤程度和病害范围。治理措施需根据病害类型制定，例如使用注浆、裂缝封闭、碳纤维加固等方法来恢复结构的承载力和延长其使用寿命。

#### 2. 结构加固与更新

结构加固与更新是延长桥梁和隧道等基础设施使用寿命、确保其安全性的必要手段。随着结构老化或当设计标准提高、使用需求变化，原有的结构可能无法满足当前的安全和服务要求，此时就需要进行加固或更新。结构加固通常包括增加新的支撑系统，使用预应力技术，以及应用新材料如碳纤维增强聚合物（CFRP）来提高结构的承载能力和抗震性。此外，还可能包括加厚或更换损坏的构件，以及应用外部预应力技术来减少构件的内力。更新工作则可能涉及完全替换老旧的桥面板、支座、伸缩缝等关键构件，或是对整个结构进行系统性的重建。在进行结构加固与更新时，必须考虑到施工对交通的影响，采取适当的交通管理措施，以最小化对公众的不便。同时，加固与更新工程的设计和施工必须基于精确的结构评估和先进的工程原理，确保施工质量，防止对结构造成进一步的损害。

#### 3. 隧道防灾与逃生系统

隧道防灾与逃生系统的设计与实施是确保隧道安全的关键措施。该系统包括一系列的设施和措施，旨在防止灾难发生，并在紧急情况下保护使用者的生命安全。防灾措施包括安装防火、防烟等设备，确保隧道内的空气质量可控，同时在隧道内设置灭火器、自动喷水系统等消防设施，以便在火灾初期迅速响应。逃生系统则涉及逃生通道的设计与布局，应急照明，指示标志和通信系统的设置，这些都是指导用户快速安全疏散的重要组成部分。更进一步，隧道内还需安装监控摄像头和传感器，以实时监测交通流量、车辆事故和火灾等情况。

### 结束语

道路、机场与桥隧工程的安全监测与维护是确保交通系统稳定运行的关键。通过实施先进的监测技术和维护策略，可以有效预防和及时发现潜在问题，从而减少事故发生风险。智能化维护系统的引入，更是提升了维护工作的效率和准确性。未来，随着技术的不断进步，有理由相信，道路、机场与桥隧工程的安全性将得到进一步提升，为人们的出行提供更加坚实的保障。

### 参考文献

- [1] 高旺生. 大型机场陆侧道路规划与设计实践[J]. 上海公路, 2023, (04): 168-172+213.
- [2] 邓广辉, 顾庆福, 林俊勇. 枢纽机场陆侧道路交通组织研究[J]. 城市道桥与防洪, 2023, (10): 54-56+15.
- [3] 雷斯尧. 考虑事故等级的桥隧工程风险与施工标准研究[D]. 中南财经政法大学, 2022.
- [4] 季宏昌. 施工标准体系对项目安全管理作用研究[D]. 中南财经政法大学, 2020.
- [5] 刘晓阳. 高速公路桥隧工程关键工序施工安全风险致因分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2020, (01): 48.