

# 桥梁结构健康监测系统设计与应用研究

赵鸣仲 徐 松

宁波正信检测科技有限公司 浙江 宁波 315000

**摘 要:** 本文聚焦桥梁结构健康监测系统, 深入探讨其设计原则、系统架构及关键技术。详细阐述传感器选型布置、数据采集传输等设计要点, 结合港珠澳大桥等实际案例, 分析系统应用效果。研究表明, 该系统通过实时监测桥梁应力、应变等参数, 能有效识别结构损伤, 为桥梁维护、寿命预测提供科学依据。优化后的系统在可靠性、实时性方面显著提升, 对保障桥梁安全运营、降低维护成本具有重要意义。

**关键词:** 桥梁结构; 健康监测系统; 应用研究

引言: 随着我国桥梁建设规模不断扩大, 截至2023年底公路桥梁达108.9万座, 大型桥梁占比持续增加。但桥梁服役期面临结构老化、荷载变化等问题, 传统人工巡检存在效率低、隐患难发现等局限。桥梁结构健康监测系统融合多学科技术, 可实时、长期监测桥梁状态, 及时捕捉损伤信息, 为桥梁科学养护提供支持。开展该系统设计与应用研究, 对提升桥梁安全管理水平、推动交通基础设施可持续发展意义重大。

## 1 桥梁结构健康监测系统概述

### 1.1 系统定义

桥梁结构健康监测系统 (BridgeStructuralHealthMonitoringSystem, 简称SHMS), 是综合运用传感器技术、通信技术、计算机技术和结构动力学等多学科知识, 对桥梁结构在环境、荷载、损伤等因素作用下的结构响应和工作状态进行实时、长期监测的智能化系统。通过对桥梁结构的应力、应变、位移、振动等物理量进行不间断测量与分析, 该系统能够及时捕捉桥梁结构的损伤和性能退化信息, 为桥梁的维护、维修、加固以及寿命预测提供科学依据。以我国桥梁建设现状为例, 截至2023年底, 全国公路桥梁已达108.9万座, 其中大型桥梁占比约12%。随着桥梁服役年限增长, 结构老化、病害增多等问题凸显, 传统的人工巡检方式存在效率低、检测范围有限等不足, 桥梁结构健康监测系统成为保障桥梁安全运营的重要手段。

### 1.2 系统组成与架构

桥梁结构健康监测系统主要由传感器子系统、数据采集与传输子系统、数据处理与分析子系统以及用户管理子系统四部分组成。传感器子系统作为系统的“感知器官”, 负责采集桥梁结构的各类物理信息, 常见的传感器包括应变传感器、位移传感器、加速度传感器、温度传感器等<sup>[1]</sup>。数据采集与传输子系统将传感器采集的数

据进行实时采集、编码, 并通过有线或无线网络传输至数据处理中心。数据处理与分析子系统则利用专业的算法和软件, 对采集到的数据进行分析处理, 提取结构特征参数, 判断桥梁结构的健康状态。用户管理子系统为管理人员提供直观的操作界面, 方便其查看监测数据、分析报告和预警信息。在架构设计上, 通常采用分层式架构, 分为感知层、网络层、平台层和应用层。感知层即传感器子系统, 网络层负责数据传输, 平台层进行数据存储和处理, 应用层面向用户提供服务。这种架构设计使得系统具有良好的扩展性和稳定性, 例如某跨海大桥的健康监测系统采用该架构, 实现了对长达32公里桥梁结构的全面监测。

## 2 桥梁结构健康监测系统设计原则

### 2.1 可靠性原则

可靠性是桥梁结构健康监测系统的核心要求。系统需保证在复杂的环境条件下, 如高温、严寒、强风、暴雨等极端天气, 以及长期的振动、腐蚀等因素影响下, 能够稳定、准确地运行。传感器、数据采集设备等硬件需具备高可靠性, 其平均无故障时间 (MTBF) 应不低于50000小时。同时系统应具备冗余设计, 当某一设备出现故障时, 其他设备能够自动接管工作, 确保监测数据的连续性。例如, 在某山区桥梁监测系统中, 采用双备份传感器和传输线路, 有效提高了系统的可靠性。

### 2.2 实时性原则

实时性要求系统能够快速采集、传输和处理数据, 及时反映桥梁结构的状态变化。数据采集频率需根据桥梁的类型、规模和重要程度进行合理设置, 对于大型桥梁, 应变、位移等关键数据的采集频率一般不低于10Hz, 加速度数据采集频率可达100Hz以上。在数据传输方面, 采用5G、光纤等高速通信技术, 确保数据能够在短时间内传输至数据处理中心。例如, 某城市高架桥健

康监测系统通过5G网络传输数据,从数据采集到显示的延迟时间小于1秒,能够及时发现桥梁的异常振动情况。

### 2.3 经济性原则

在系统设计过程中,需充分考虑经济性,在满足监测需求的前提下,合理控制成本<sup>[2]</sup>。传感器选型时,在保证性能的基础上,优先选择性价比高的产品;数据采集与传输方案的设计,需综合考虑建设成本和后期运营维护成本。例如,对于一些中小跨度桥梁,可采用无线传感器网络,相比有线传输方式,能够节省大量的布线成本。据统计,采用无线传感器网络可使系统建设成本降低30%-40%。

### 2.4 可扩展性与兼容性原则

随着桥梁结构健康监测技术的不断发展和桥梁运营需求的变化,系统需具备良好的可扩展性和兼容性。可扩展性要求系统能够方便地增加新的监测项目和传感器,如在桥梁加固或改造后,能够快速部署新的传感器进行监测。兼容性则要求系统能够与其他相关系统,如交通监控系统、桥梁养护管理系统等实现数据共享和交互。例如,某桥梁健康监测系统通过标准化接口,实现了与交通流量监测系统的数据融合,为桥梁运营管理提供了更全面的数据支持。

## 3 桥梁结构健康监测系统设计

### 3.1 传感器选型与布置

传感器的选型与布置在桥梁监测系统中起着至关重要的作用,直接关乎监测结果的准确性和有效性。在选型环节,必须紧密结合监测对象和目标,精准挑选合适类型与精度的传感器。比如,针对桥梁应力监测,光纤光栅应变传感器是理想之选,其测量精度能够达到 $\mu\epsilon$ 级,可精确捕捉桥梁结构微小的应力变化;而对于桥梁振动监测,压电式加速度传感器则表现出色,其频率响应范围在0.1Hz-1000Hz之间,能全面监测桥梁在不同频率下的振动情况。在传感器布置方面,需要全方位综合考虑桥梁的结构形式、受力特点和关键部位。以斜拉桥为例,其结构复杂,受力情况多样,传感器的布置需格外谨慎。通常,在主塔底部和中部应各布置2-4个应变传感器和位移传感器,以此实时掌握主塔的受力变形状况;在主梁跨中、四分点等关键位置,布置4-6个应变传感器和加速度传感器,可有效监测主梁的应力和振动情况;每根斜拉索则布置1个索力传感器,确保斜拉索的受力在安全范围内。通过这样科学合理的传感器布置,能够全面、准确地反映桥梁结构的受力和变形情况,为桥梁的安全运营提供有力保障。

### 3.2 数据采集与传输技术

数据采集技术在整个监测系统中占据着关键地位,其核心在于保证数据的准确性和完整性,为后续的分析与决策提供可靠依据。目前,常用的数据采集设备丰富多样,数据采集卡和分布式数据采集器便是其中的典型代表。数据采集卡主要适用于小规模、集中式的数据采集场景,它能够在局部范围内高效收集数据,具有操作简便、成本相对较低的优势。而分布式数据采集器则更适用于大型、分散式的监测系统,可同时对多个分散点进行数据采集,实现大范围的监测覆盖。在数据传输方面,可根据实际情况灵活选择有线或无线传输方式。有线传输,如光纤、以太网等,具备传输稳定、抗干扰能力强的显著优点,能够在复杂的环境中保证数据的准确传输。无线传输,如4G/5G、Wi-Fi、LoRa等,则以其安装方便、灵活性高的特点见长,适用于一些布线困难或需要快速部署的场景。以某长江大桥健康监测系统为例,该系统采用光纤和5G混合传输方式。光纤用于桥梁主体结构等关键部位的数据传输,确保数据的稳定性和可靠性;5G则用于一些移动监测设备或难以布线的区域,实现数据的快速上传。通过这种混合传输方式,确保了大量监测数据的稳定传输,为大桥的安全监测提供了有力保障<sup>[3]</sup>。

### 3.3 数据处理与分析方法

数据处理与分析在桥梁结构健康监测系统中扮演着至关重要的角色,是整个监测流程的关键环节。在获取采集到的原始数据后,首先要对其进行预处理。这一步骤涵盖去噪、滤波、归一化等操作,旨在消除数据中的干扰和误差,提高数据质量,为后续分析奠定坚实基础。接着,运用时域分析、频域分析、时频域分析等多种方法,深入挖掘数据背后的信息,提取桥梁结构的特征参数,像固有频率、振型、阻尼比等。这些参数能够直观反映桥梁结构的动态特性。另外,借助有限元模型开展结构仿真分析,将仿真结果与实测数据进行细致对比。通过这种对比,能够精准判断桥梁结构的健康状态。

### 3.4 预警与报警机制设计

预警与报警机制是保障桥梁安全运营的重要防线。根据桥梁结构的损伤程度和风险等级,设置不同级别的预警阈值。当监测数据超过阈值时,系统自动发出预警信号,并通过短信、邮件、声光报警等方式通知相关管理人员。预警级别一般分为三级,一级预警表示结构出现轻微异常,需加强监测;二级预警表示结构存在一定损伤,需进行详细检查;三级预警表示结构出现严重损伤,需立即采取措施进行处理。例如,某桥梁监测系统在检测到主梁应变超过设计限值的80%时,触发二级预

警,及时避免了事故的发生。

### 3.5 用户界面与管理系统设计

用户界面设计在桥梁结构健康监测系统中至关重要,需严格遵循简洁、直观、易用的原则,旨在为管理人员打造一个清晰明了的监测数据展示与操作界面。该界面功能丰富多样,涵盖实时数据显示,能让管理人员随时掌握桥梁的最新状态;历史数据查询功能,方便对过往数据进行追溯与分析;图表分析则能以直观的方式呈现数据变化趋势;预警信息提示可及时告知管理人员潜在的风险。管理系统同样不可或缺,它承担着对用户权限、监测设备、数据存储等多方面的管理职责。以用户管理模块为例,通过设置不同的权限级别,如普通用户仅能查看监测数据,而管理员用户具备系统设置和数据修改等更高权限,有效保障了系统的安全性和数据的准确性。

## 4 桥梁结构健康监测系统的应用研究

### 4.1 应用案例分析

以港珠澳大桥健康监测系统为例,该系统是目前世界上规模最大、技术最先进的桥梁健康监测系统之一。系统共部署了超过1500个传感器,涵盖应变、位移、加速度、索力、温度等多个监测项目。通过实时监测桥梁的结构响应和环境荷载,为大桥的安全运营提供了有力保障。在大桥通车后的运营过程中,监测系统成功发现并预警了多次异常情况,如某段主梁的局部振动异常,通过及时处理,避免了潜在的安全隐患。

### 4.2 监测数据处理与分析实例

以某预应力混凝土连续梁桥为例,对其监测数据进行处理与分析。在施工阶段和运营阶段分别采集桥梁的应变和位移数据,通过时域分析发现,在车辆荷载作用下,主梁跨中应变呈现周期性变化,最大值为 $80\mu\epsilon$ 。利用频域分析方法,提取桥梁的固有频率,发现运营3年后,桥梁的一阶固有频率从施工完成时的 $3.2\text{Hz}$ 下降到 $2.8\text{Hz}$ ,表明桥梁结构出现了一定程度的刚度退化。通过进一步分析,确定了刚度退化的原因主要是预应力损失

和混凝土收缩徐变。

### 4.3 系统性能评估与优化建议

对桥梁结构健康监测系统的性能评估主要从准确性、可靠性、实时性和经济性等方面进行<sup>[4]</sup>。通过与实际检测结果对比,评估系统监测数据的准确性;通过统计系统的故障次数和停机时间,评估系统的可靠性;通过测试数据传输和处理的延迟时间,评估系统的实时性;通过分析系统的建设和运营成本,评估系统的经济性。针对评估结果,提出优化建议。如对于数据准确性不足的问题,可通过定期校准传感器、优化数据处理算法等方式进行改进;对于系统可靠性不高的问题,可增加冗余设备和备份线路;对于实时性较差的问题,可升级通信技术和数据处理设备。通过不断优化系统性能,提高桥梁结构健康监测系统的应用效果和价值。

### 结束语

本研究系统完成了桥梁结构健康监测系统的设计与应用分析,通过合理的设计原则与技术方案,实现对桥梁结构状态的有效监测。案例应用表明,系统在预警桥梁异常、辅助维护决策上成效显著。面对复杂环境与新型桥梁结构,系统仍需在传感器性能、数据处理算法等方面持续优化。未来,随着智能技术发展,桥梁健康监测系统将朝着更智能、精准、高效的方向迈进,为桥梁全生命周期管理提供更强保障。

### 参考文献

- [1]王宪玉,李文奇,朱前坤,杜永峰.基于灰度分析的桥梁健康监测传感器异常检测[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(07):111-118.
- [2]宗跃然,左永辉,程勋煜.长大桥群结构健康监测系统设计研究及开发[J].城市道桥与防洪,2024,(05):15-17+10.
- [3]赵妍.公路桥梁结构定期检测中发现的典型病害分析[J].中国标准化,2023(10):188-189.
- [4]杜丽妹,刘京敏.对公路桥梁结构定期检测中发现的典型病害分析[J].市政技术,2022,34(03):169-170+173.