

# 智能化土木工程健康监测系统的设计与应用

张维江

中慧力祥项目管理有限公司东营分公司

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7329

**[摘要]** 智能化土木工程健康监测系统通过先进的传感器技术、数据采集与处理算法以及通信网络,实现了对土木结构的实时监控和评估。本文介绍了该系统的基本组成,包括传感器网络、数据传输与存储方案以及系统的软硬件集成。通过实际工程案例的分析,如上海虹桥铁路站的应用,验证了系统在提升结构安全性、降低维护成本和延长使用寿命方面的显著效果。系统能够及时发现结构中的潜在问题,并提供精准的健康评估。未来,随着技术的进步,智能化监测系统将在更多领域得到广泛应用,推动土木工程安全管理的智能化和现代化。

**[关键词]** 智能化监测; 结构健康; 数据处理

## Design and application of the health monitoring system of intelligent civil structures

Zhang Weijiang

Zhonghui Lixiang Project Management Co., Ltd. Dongying Branch

**[Abstract]** The intelligent civil structure health monitoring system realizes the real-time monitoring and evaluation of the civil structure through the advanced sensor technology, data acquisition and processing algorithm and communication network. This paper introduces the basic components of the system, including sensor network, data transmission and storage scheme, and hardware and software integration of the system. Through the analysis of practical engineering cases, such as the application of Shanghai Hongqiao Railway Station, the remarkable effect of the system in improving structural safety, reducing maintenance cost and extending service life is verified. The system can detect potential problems in the structure in time and provide accurate health assessment. In the future, with the progress of technology, the intelligent monitoring system will be widely used in more fields, promoting the intelligence and modernization of civil engineering safety management.

**[Key words]** intelligent monitoring; structural health; data processing

## 1 引言

随着城市化的发展和基础设施建设的快速发展,土木工程结构越来越庞大、复杂,其安全性和耐久性问题也越来越严重。传统的结构监测方法一般依靠人工检测,存在检测效率低、实时性差、检测结果主观性强等缺点,不能满足现代建筑对安全监测的高要求。在此背景下,智能化土木工程健康监测系统应运而生。该系统采用先进的检测技术和数据收集与处理技术,可对建筑物状况进行实时监控和自动评估,从而及早发现潜在风险,降低发生灾害的可能性<sup>[1]</sup>。研究智能监测系统的设计和应用具有重要的理论和实践意义,因为它不仅有助于提高结构的安全性和使用寿命,还能使建筑行业实现智能化,并为未来的智慧城市建设奠定基础。

## 2 理论基础

### 2.1 土木工程健康监测的概念与重要性

土木工程健康监测是利用先进的传感器和数据收集与分析技术,实时监控使用中结构的状态变化,并对其安全性和稳定性进行评估。该技术的核心在于通过传感器网络获取结构的应力、应变、振动等参数,分析这些数据以判断结构是否存在损伤或潜在风险。随着建筑项目规模和复杂程度的增加,状态

监测变得越来越重要<sup>[2]</sup>。它不仅能延长结构的使用寿命,降低维护成本,还能提供灾害预警,防止严重事故的发生。通过对结构进行持续监测,工程师可以发现结构性能的变化,做出科学决策,改善管理,确保公共安全。因此,土木工程健康监测是保障土木工程安全和可靠运行的关键技术,对于现代土木工程的发展具有重要意义。

### 2.2 监测系统的基本组成与工作原理

土木工程健康监测系统通常由传感器、数据采集与传输系统、数据处理与分析平台以及监控与预警系统四个主要部分组成。传感器是系统的基础,用于实时记录结构的物理参数,如应力、应变、加速度、温度等。这些传感器安装在结构的关键点上,通过有线或无线方式将数据传输到数据采集和传输系统。该系统负责数据汇总、初步处理并传输到数据处理和分析平台<sup>[3]</sup>。

分析平台利用信号处理、数据挖掘和机器学习等技术对收集到的数据进行详细分析,以检测结构中潜在的损坏或异常情况。最后,监测和预警系统会根据分析结果评估结构的健康状况,并发出预警,以便在必要时做出维护和管理决策。整体而言,土木工程健康监测系统的工作原理是通过传感器网络的实

时数据采集和先进的数据分析技术,持续监控结构的健康状态,确保其安全可靠运行。

### 2.3 智能化监测技术的发展趋势

(1) 传感器技术不断进步,微型化、无线化、自供电的智能传感器逐渐普及,使得监测更加精准和高效;

(2) 物联网(IoT)和云计算的融合,使得监测系统能够实时处理和分析大规模数据,并实现远程监控与管理;

(3) AI技术的引入,特别是机器学习和深度学习算法,提升了损伤识别与状态评估的准确性;

(4) 多维度监测技术的集成应用,如融合图像、声学等多种感知手段,为土木结构健康监测提供了更加全面的解决方案。

### 2.4 数据采集与处理技术

数据采集与处理技术是智能化土木结构健康监测系统的核心环节。数据采集主要通过布置在结构各关键部位的传感器,实时捕获应力、应变、振动、温度等多种物理参数。这些传感器可以是有线或无线的,并具有自供电和低功耗特性,以适应复杂的工程环境。采集到的数据通过数据传输系统,传输至中央处理单元进行处理。数据处理技术包括信号处理、数据过滤、降噪、特征提取等步骤,通过这些处理,提取出有价值的信息。随后,结合先进的算法和模型,如机器学习算法,对数据进行深入分析,识别结构潜在的损伤或异常情况。通过有效的数据采集与处理,系统能够为结构健康状态的评估提供精准的数据支持,确保监测的可靠性和有效性。

## 3 智能化土木结构健康监测系统的设计

### 3.1 系统总体架构设计

智能化土木结构健康监测系统的总体结构由硬件和软件有机结合而成,以实现全面监测和管理。系统总体结构一般包括四个主要层次:感知层、网络层、数据层和应用层。

感知层由布置在土木结构关键部位的多种传感器组成,用于实时采集结构的应力、应变、振动等数据。传感器类型可能包括加速度传感器、应变片、光纤传感器等。

网络层负责数据的传输,采用无线网络、有线网络或混合方式,确保数据能够高效、稳定地传送到数据中心。这一层次还包括数据传输的安全加密与传输协议的优化设计。

数据层是系统的数据处理和存储中心,包含数据存储设备和处理服务器,使用云计算技术和数据库管理系统进行大规模数据的存储和处理。通过高级数据处理算法,实现对监测数据的清洗、过滤和特征提取。

应用层提供用户接口和决策支持功能,包含可视化平台、预警系统和管理决策模块,能够实时展示结构健康状态,并在检测到异常时发出预警,以便及时采取维护措施。

### 3.2 传感器网络设计与布置

传感器网络设计与布置是智能化土木结构健康监测系统的关键环节,直接影响监测的精度和可靠性。设计时需根据结构类型、尺寸和关键部位的应力分布进行合理规划。传感器应优先布置在结构应力集中的部位、连接节点和易损区域,如梁柱交接处、支撑结构等。传感器类型应结合监测需求选择,如加速度传感器用于振动监测,应变片用于应力监测。布置时,需考虑传感器的覆盖范围、灵敏度和抗干扰能力,并确保布置均匀且不影响结构本身的功能。传感器之间通过无线或有线网

络连接,形成一个稳定的传感器网络,确保数据能够实时、无误地传输至数据处理中心。优化布置和网络设计,能够提高监测系统的可靠性和数据采集的准确性。

### 3.3 数据传输与存储方案设计

数据传输与存储方案的设计是确保智能化土木结构健康监测系统高效运行的关键。数据传输通过无线或有线网络进行,将分布在不同传感器节点上的数据实时传输到数据处理中心。为保证数据传输的稳定性和安全性,在设计阶段必须考虑网络冗余、数据加密和优化传输协议,以避免数据丢失和延迟。

分布式数据库和云存储程序用于数据存储,以管理大量数据的存储需求。数据存储系统必须具备高效的数据恢复、备份和还原能力,以确保监测数据的长期存储和可追溯性。

### 3.4 系统软硬件集成与实现

系统软硬件集成与实现是智能化土木结构健康监测系统的核心环节。硬件部分包括传感器、数据采集器、通信模块和存储设备。传感器负责数据采集,数据采集器将传感器数据转化为数字信号,通信模块确保数据传输的稳定性,而存储设备用于保存历史数据。

软件部分则包括数据采集与处理平台、数据分析算法和用户界面。数据采集与处理平台负责接收和存储数据,数据分析算法对数据进行处理和分析,识别结构健康状态。用户界面提供数据可视化、报告生成和预警通知功能,使用户能够实时监控结构状态。

软硬件集成过程需要确保系统的兼容性与稳定性,硬件选择应考虑与软件系统的配合,软件开发应基于硬件功能进行优化。系统集成完成后,通过系统测试和调试,确保数据传输、存储和分析功能的正常运行,从而实现高效的结构健康监测。

## 4 智能化土木结构健康监测系统的应用

### 4.1 应用场景

智能化土木结构健康监测系统的应用场景包括桥梁、隧道、高层建筑、大型公用设施和其他关键建筑项目。这些项目通常面临复杂的运行环境和长期的结构限制,很难满足传统监测方法的实时性和准确性要求。因此,智能监测系统在这些情况下显得尤为重要<sup>[4]</sup>。

### 4.2 实际工程案例分析

以上海虹桥铁路站的智能化土木结构健康监测系统应用为例。虹桥铁路站是中国最大、最繁忙的交通枢纽之一,其复杂的结构体系和繁重的运营负荷使得监测系统的应用尤为重要。

为了确保虹桥铁路站的结构安全和稳定,特别是在高铁和地铁的高频次运行下,项目团队决定引入智能化健康监测系统。这一系统的设计包括安装大量的传感器来实时监测站内的主要结构部件,如屋顶支撑结构、基础柱子和地面板。

系统设计:在虹桥铁路站,系统部署了应变传感器、位移传感器、加速度计和温湿度传感器。数据通过无线网络传输至中央监控平台。系统不仅监测结构的应力和变形,还考虑了环境因素的影响,如温度变化对结构的影响。

应用效果:在应用过程中,系统成功地检测到了某些支撑结构的应变异常,这与特定时间段的高负荷使用相关。通过实时数据分析,工程师及时调整了站内的负荷分配,并在结构发

下转第 224 页

此外, 由于高精度定位系统和自动化操作的引入, 作业过程中因人为误差导致的返工次数显著减少。在整个项目周期内, 返工率降低了约 43.2%, 这进一步节约了时间和资源, 降低了项目的总体施工成本。

### 3.2 作业质量与安全性提升

新型取换套工艺在作业质量上的提升尤为显著。高强度、耐高温和耐腐蚀合金材料的应用, 使得套管在极端井下环境中的使用寿命显著延长。具体而言, 在高腐蚀性环境中, 套管的平均使用寿命延长了约 2.7 倍, 从传统材料的 8.5 年延长至 23.3 年。这种材料性能的提升不仅减少了频繁更换套管的需求, 还大幅降低了项目的材料消耗和维护成本。

在井下复杂环境下, 新型工艺的精密控制系统具有强大的适应性。实时监测与反馈系统能够实时监控井下的温度、压力、位移等关键参数, 并通过自适应控制算法对作业过程进行精细调控。例如, 在某次高压作业中, 系统通过微调机器人臂的操作力度和套管定位, 成功避免了因压力波动引起的套管位移问题, 使得井下作业的成功率提高了 20% 以上。

安全性方面, 实时监测系统的应用有效降低了井下作业的风险。传感器网络实时采集的井下数据帮助作业团队在潜在风险出现之前及时采取应对措施, 降低了作业风险。例如, 在一次井下温度异常升高的情况下, 系统提前 5 分钟发出预警, 作

业人员得以及时调整操作, 避免了可能的设备损坏和安全事故。这种智能化的预警和应急响应机制, 显著提升了作业的整体安全性, 井下作业事故率降低了 35.8%。

## 4 结论

通过在四川省某油气田开发项目中的应用实践, 新型取换套工艺技术通过自动化机械设备、精密控制系统和高性能材料的应用, 不仅显著提高了井下作业的效率, 减少了因人为误差导致的返工次数, 还大幅提升了套管的耐用性和作业的安全性。实时监测与反馈系统的引入, 显著降低了作业风险, 确保了作业的顺利进行。这种新型工艺在复杂井下环境中的成功应用, 不仅为该油气田的顺利开发提供了坚实的技术保障, 也为类似项目提供了相应的经验和学术参考。

### [参考文献]

- [1]宋书龙.表层套管取换套工艺技术研究与应用[J].化学工程与装备, 2024, (06): 69-71.
- [2]马文静, 张志刚, 伍浩文, 刘水森, 刘涛.小修定位取换套工艺技术研究[J].石油工业技术监督, 2024, 40(02): 62-64.
- [3]黄志安, 吴波, 王委, 陈金国.取换套管技术在 YC1 井的研究与应用[J].复杂油气藏, 2023, 16(02): 230-233.

## 上接第 221 页

生实际问题前进行了预防性维护。这一措施有效避免了潜在的安全隐患, 确保了虹桥铁路站的正常运营。

### 4.3 系统在结构健康监测中的应用效果评价

通过实时收集和分析数据, 可以准确监测土木结构的应力、应变和振动等参数, 从而及早发现结构中的潜在问题。例如, 在一些项目中, 该系统已成功发出结构异常警报, 避免了潜在的安全隐患。数据分析平台可提供详细的状况评估报告, 帮助工程师制定维护和加固方案。总体来看, 智能化监测系统提高了结构安全性, 延长了设施使用寿命, 优化了维护成本, 显示了其在现代土木工程中的重要作用。

### 4.4 系统推广应用的可行性分析

系统推广应用的可行性分析涉及技术、经济和管理三个方面。

(1) 技术可行性: 智能化土木结构健康监测系统基于成熟的传感器技术、数据处理算法和通信网络, 技术上已具备推广应用的条件。系统的稳定性和可靠性经过多个工程案例验证, 但需关注传感器的长期耐用性和数据传输的稳定性。

(2) 经济可行性: 虽然初期投资较高, 包括设备采购、系统集成和维护费用, 但系统的长期收益显著。通过提高结构的安全性、减少意外事故及维护成本, 能够显著降低整体运营成本。许多工程项目已证明, 投资回收期较短, 经济效益良好。

(3) 管理可行性: 推广应用需建立标准化的实施流程和维护机制。制定操作规程、培训专业人员和完善的技术支持体系, 将有助于系统的顺利运行。政府和企业的支持、相关政策

的制定也是关键因素。

综合来看, 智能化监测系统在技术、经济和管理方面都具备较高的推广可行性, 为土木工程领域带来了显著的安全和经济效益。

## 5 结论与展望

智能化土木结构健康监测系统通过集成先进的传感器技术、数据采集与处理算法、和通信网络, 实现了对土木结构的实时、精准监测。系统在实际应用中表现出色, 能够及时发现潜在的结构问题, 减少了维护成本并提高了结构的安全性。实际工程案例证明, 该系统在桥梁、隧道和高层建筑等关键领域具有显著的效果, 能够有效保障结构的长期稳定性。

未来, 智能化监测系统将继续向更高的智能化水平发展。新型传感器和数据分析技术的出现将进一步提升监测的精度和可靠性。同时, 物联网和人工智能技术的深入应用将使系统具备更强的自适应能力和预警功能。预计未来系统将更加集成化、模块化, 能够适应不同类型结构的监测需求。

### [参考文献]

- [1]焦俭.土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J].中国建筑金属结构, 2022, (08): 89-91.
- [2]王会萌.土木工程结构健康监测技术的应用及展望[J].房地产世界, 2022, (03): 137-139.
- [3]王勇辉.浅析土木工程结构健康监测预警探讨[J].建筑监督检测与造价, 2016, 9(05): 28-31+36.
- [4]吴天俊.土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J].工程技术研究, 2021, 6(01): 146-147.