

基于传感器的结构健康监测技术

王宗鹏 栾云斐 李 鑫

青岛理工大学艺术与科学学院 山东 青岛 266000

【摘要】：当前，传统的结构健康监测（Structural Health Monitoring, SHM）技术正逐渐被最先进的智能监控系统和决策解决机制所取代，结构的可持续发展性进一步加强。损伤检测是 SHM 的重要组成部分，在智慧城市和大数据分析的时代，数据分析驱动的结构健康监测框架尚不成熟，实现高效率、实时在线损伤检测是一个亟待研究的重大问题。传感器系统对实时监测结构的损伤或衰退发挥着重要作用，先进的材料、设计工艺、传感器的长期传感能力、电磁干扰、传感器布置技术、数据采集和计算、温度、恶劣环境和能耗是与 SHM 传感器相关的重要问题。本文首先考察了当前 SHM 的研究进展，其次，综述了现有结构健康监测系统 Civionics 新学科研究中的各种传感器技术、传感器类别和传感器网络；最后，分析了前沿损伤检测技术中的挑战及开放的研究问题。

【关键词】：建筑结构；结构健康监测；传感器；损伤检测；文献综述

Summary of Research on Building Structure Health Monitoring Methods

Zongpeng Wang, Yunfei Luan, Xin Li

School of Art and Design, Qingdao University of Technology, Shandong Qingdao 266000

Abstract: At present, the traditional structural health monitoring (Structural Health Monitoring, SHM) technology is gradually being replaced by the most advanced intelligent monitoring system and decision-making solution mechanism, and the sustainable development of the structure is further strengthened. Damage detection is an important part of SHM. In the era of smart cities and big data analysis, the data analysis-driven structural health monitoring framework is still immature, and achieving high-efficiency, real-time online damage detection is a major issue that needs to be studied urgently. Sensor systems play an important role in real-time monitoring of structural damage or degradation. Advanced materials, design processes, long-term sensing capabilities of sensors, electromagnetic interference, sensor placement techniques, data acquisition and computing, temperature, harsh environments, and energy consumption are all related factors. Important issues related to SHM sensors. This paper firstly examines the current research progress of SHM, and secondly, summarizes various sensor technologies, sensor categories and sensor networks in the new research of the existing structural health monitoring system Civionics; finally, analyzes the challenges and openings in cutting-edge damage detection technologies research question.

Keywords: building structure; structural health monitoring; sensor; damage detection; literature review

引言

监测和评估土木工程基础设施的状况对一个国家的经济发展至关重要，他们也成为社会发展不可或缺的一部分^[1]。对于民用基础设施，如道路、桥梁、住宅建筑、大坝等，其中任何可能导致系统故障的威胁，最终都有可能造成生命财产的损失甚至是城市联系的中断。这意味着，如果能预测未来的损伤，将会降低危害发生的可能性，减少直接或间接的经济损失和死亡。实现这一目标的关键在于实时监控设施的状态并能识别结构中的损伤。在过去，损伤监测以无损监测和人工目测方法为主，但在面对结构整体及结构复杂的特殊部位的监测时，难以实现准确监测，存在一定缺陷。

在传统检测方法难以实现的条件下，SHM 系统的出现，为其提供了一个近实时在线损伤评估的新策略。SHM 是通过自动监测系统对工程结构实施损伤预测和健康评估策略的工具，是一个热门且不断发展的研究领域。SHM 使用传感系统及相关硬件和软件设施来监测工程结构的结构性能和运行环

境，涉及对结构进行随时间变化的观察，使用周期性采样的结构响应和来自传感器阵列的操作环境测量，然后评估结构的当前状态和未来性能。

“Civionics 新学科”最早由加拿大结构创新传感中心提出，源自土木工程领域实施电子技术的概念^[2]。通过合理的位置安装，传感器系统可以收集结构部件温度、湿度、挠度及应变等性能参数，后经过传感器网络将数据传至计算机接收处理，并实现可视化，最后经技术人员将监测数据与阈值进行比较，以诊断结构的变化。

综上，本文将基于对传感器系统的研究，探究传感器系统在 SHM 中的应用策略，对实现结构健康的高效监测提供支持。本文的其余章节组织如下：第一部分分析现有 SHM 系统 Civionics 新学科研究中的各种传感器技术、传感器类别，第二部分讨论传感器网络；第三部分总结当前 SHM 中传感器系统的挑战及开放的研究问题。

1 传感器系统

较早的基于传感器的结构监测技术主要应用于军事领域和飞机结构的健康状况检测领域^[3],经过几十年的进步,传感器结构健康监测技术在结构监测领域中应用广泛,基于各种特性的传感器也不断发展。

应变计传感器由支撑金属箔图案的绝缘性衬垫组成,用于监测物体结构的应变特性,以评估基础设施的当前状况和裂缝检测。常见的应变计传感器有电阻应变计传感器、振弦式应变计传感器和光纤 Bragg 光栅应变器^[4]。光纤 Bragg 光栅由短段光纤构成,通过反射特定波长的光,并在特殊设计的介质镜的折射中产生周期性变化来传输信号,是目前较为先进的应变传感器类型。Li 等人开发并试验了一种具有获得有效平均应变或宏观应变分布能力的分布式长规格光纤传感系统,并应用于民用基础设施钢结构弯曲状况的监测^[5]。光纤应变计传感器优点在于不受电压浪涌、射频干扰和电磁干扰的影响,但因为这种传感器会对温度和应变做出反应,所以光纤应变计传感器面临温度和应变之间的交叉灵敏度问题。

线性位移和位置测量传感器已用于测量地质滑坡、基础设施结构位移和设施裂缝损伤宽度的监测。类型包括线性可变差动变换器和直流差动变压器。线性可变差动变压器是一种用于线性位移测量的磁性位置传感器,由于其具有高分辨率、精度和良好的重复性,Navarro V 等人利用固定在桑托斯莫西略湖床立柱上振弦式裂纹监测器,监测并获得连续的裂缝张开数据^[6]。

热敏电阻器和电阻温度检测器是使用广泛温度监测传感器,以检测结构热胀冷缩背后的温度数据。柔性电阻温度检测器是最常见的温度检测传感器,广泛应用于监测与人类活动有关的温度变化中。Zhang 等人利用电阻温度检测器以监测沥青路面温度变化^[7]。环境传感器,即湿度传感器,用于监测结构或建筑物表面的相对湿度。结构的湿度通常与作为侵蚀性离子(如氯化物、硫酸盐、碳酸盐和铵)传输介质的水的进入有关。2001 年,瑞士的研究人员首次报告了使用光纤 Bragg 光栅传感器进行湿度传感的情况^[8-9]。

倾斜传感器广泛使用于基础设施,尤其是桥梁组件的旋转变化监测中。类型包括振弦式倾斜仪和电解式倾斜仪。Zhang F 等人在俄亥俄州和肯塔基州 Ironton-Russell 大桥顶部安装了一部振弦式倾斜仪以监测不同构件的旋转变化,并通过监测到的数据分析了发生的重要事件^[10]。

动态承重(WIM)传感器技术在桥梁健康监测和超重汽车执法中发挥着越来越重要的作用,动态称重系统用于获取重型车辆的静态和动态重量,以保护和管理桥梁、路面和其他基础设施。WIM 传感器类型主要有压电式 WIM 传感器、弯曲板 WIM 传感器、称重传感器 WIM 传感器、光纤 WIM 传感器等。

压电式 WIM 传感器类型是最便宜,但坚固性和精确性不如弯板式 WIM 传感器,弯板系统需要相当长的安装时间,且寿命不长。应变测量称重传感器系统比弯板系统更精确、更坚固,但也更昂贵。光纤 WIM 传感器是一种很有前途的路面监测新技术,Lydon,M 等人基于自蔓延光纤传感的优势,开发了第一个全光纤动态承重传感器^[11]。

超声波探伤仪主要是利用超声波漫反射为 SHM 提供一种全面的损伤检测策略,在结构裂缝损伤、腐蚀等监测中应用广泛。Kazakov,VV 研究了采用非线性调制裂纹检测方法的超声波探伤仪^[12]。光纤传感器具有重量轻、体积小、可嵌入性好、抗电磁干扰等优点,因此,它们长期以来被认为是一种理想的 SHM 传感解决方案。最近,Agarwal 等人提出了光纤超声波传感器水管裂纹检测的方法,他们表明,声波频率是裂纹尺寸的函数,可以通过能够捕获 100 kHz 频率声波检测到较大裂纹^[13]。

综上所述,本节总结了 SHM 中各种应用条件下的传感器及传感器类型,对部分传感器性能和在具体案例中的应用做了介绍。研究中调查并观察到,传感设备在数据传输、工作频率、功耗等方面可靠性取决于所使用的传感材料的质量和传感器技术。

2 传感器网络

传感器网络系统提供了在整个结构生命周期内将数据从传感器输出到服务器或基站的机会。传感器网络包括基于有线和无线传输网络。有线传感器网络系统在实际中应用较少,多应用于实验室实验,基于无线的传感器网络有许多功能,包括半载微处理器、传感能力、无线通讯和数据存储等。此外,能耗、成本问题是当前传感器网络需要持续优化的方向,面对通常由多个传感器节点组成的 SHM 系统,减少传感器能耗既可以更好进行实时监测,又可以减少维护费用。

2.1 有线传感器网络

有线传感器网络系统在实际中应用较少,但目前的几个 SHM 传感器仍然采用传统的有线数据采集系统,用于从许多结构位置收集数据。孙等人提出一种基于电力线的有线传感器网络,针对煤炭开采生产安全需求提出采用 Lon Works 技术的有线传感器网络系统基本组成结构^[14]。

2.2 无线传感器网络

无线传感器网络具有降低系统实现成本和提高数据处理效率的优点,成为传统有线传感器系统的有力替代品。无线传感网络是基于无线网络协议的结构健康监测系统的重要组成部分,它通过路由来组织网络中的无线传感器,并使所有传感器能够相互协作。一般来说,根据网络拓扑的标准,无线传感器网络可以分为单跳网络和多跳网络。

单跳网络中央服务器位于网络的中心,所有的无线传感器都在中央服务器周围。数据通过单跳直接传输到基站。这个网

络拓扑是非常简单和健壮的,一个节点的故障不会影响整个网络的运行。单跳网络中的数据包是逐个传输的,处理速度依赖于网关和中央服务器的性能。

多跳网络通过多跳通信将节点之间或传感器节点之间的数据传输到中央服务器,成为一种有吸引力的替代方案。多跳通信使用中间节点在不在直接无线电范围内的两个终端节点之间传输数据和命令。

3 当前 SHM 中传感器系统的挑战与开放的研究问题

(1) 到目前为止,实时或在线学习、识别和监控总体上已经部分实现,并有望取得进一步进展。同时,物联网框架被认为在尽可能减少传感器性能延迟方面发挥着至关重要的作用。

(2) 每个民用基础设施都具有独特的存在性和复杂性,结构和材料的不确定性需要精确检测技术。从目前的 SHM 角

度来看,新的传感器解决方案必须解决可扩展性和适应性问题。

(3) 尽管目前已经存在最先进的系统识别和损伤检测技术,但可以观察到,完全自动化的方法仍然不可实现。即使是以数据为中心的方法论,在实施的许多阶段也依赖于人工决策和交互,因此尝试将传感器技术与现有的机器学习相结合,是一个可行的方案。

(4) 随着连接设备数量的增加,物联网生态系统必须相互通信和交换信息。迄今为止,SHM 研究都是针对特定结构进行的,因此,发展可以为互操作性的数据开放标准是有必要的。

(5) 多功能 SHM 系统需要一个强大的数据管理系统。随着许多传感器 SHM 应用程序接收到的数据量和类型的不断增加,当前数据的存储容量面临较大压力。数据管理是社会关注较少的方面,同时还需确保制定数据的安全和隐私措施。

参考文献:

- [1] Mishra M, Lourenço P B, Ramana G V J J O B E. Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review [J]. 2022: 103954.
- [2] Mufti A A, Bakht B, Tadros G, et al. Civionics—a new paradigm in design, evaluation, and risk analysis of civil structures [J]. 2007, 18(8): 757-63.
- [3] Seidenman P, Spanovich D J, 王朝晖. 结构健康监控技术的发展现状[J].航空维修与工程. 2020, (08): 25-7.
- [4] Hassan M, Zain M, Hannan M, et al. Sensor placement technique and GUI System for monitoring the bridge girder [J]. 2010, 1(3): 583.
- [5] Li S, Wu Z, Zhou L J S, et al. Health monitoring of flexural steel structures based on distributed fibre optic sensors [J]. 2010, 6(3): 303-15.
- [6] Navarro V, Moya M, Asensio L, et al. Underwater Monitoring of the Cracks Found in Santos Morcillo Lake, Central Spain [J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, 36(1): 163-8.
- [7] Zhang L, Shi Y, Zhao Z, et al. Real-Time Monitoring System and Evaluation Method of Asphalt Pavement Paving Temperature Segregation; proceedings of the Transportation Research Congress 2016: Innovations in Transportation Research Infrastructure, F, 2018 [C]. American Society of Civil Engineers Reston, VA.
- [8] Giaccari P, Limberger H, Kronenberg P. Influence of humidity and temperature on polyimide-coated fiber Bragg gratings; proceedings of the Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, F, 2001 [C]. Optical Society of America.
- [9] Kronenberg P, Rastogi P K, Giaccari P, et al. Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings [J]. 2002, 27(16): 1385-7.
- [10] Zhang F, Norouzi M, Hunt V J, et al. Structural Health Monitoring System for Ironton-Russell Bridge, Ohio and Kentucky Phase 1. Substructure Construction [J]. Transportation Research Record, 2015, (2504): 159-67.
- [11] Lydon M, Robinson D, Taylor S E, et al. Improved axle detection for bridge weigh-in-motion systems using fiber optic sensors [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2017, 7(3): 325-32.
- [12] Kazakov V V. A nonlinear effect-based ultrasonic flaw detector for detecting cracks [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2008, 44(12): 832-5.
- [13] Soman R, Wee J, Peters K. Optical Fiber Sensors for Ultrasonic Structural Health Monitoring: A Review [J]. Sensors, 2021, 21(21).
- [14] 孙社文,孙秀芬,杨岭.基于 LonWorks 的煤矿井下电力线传感器网络[J].煤炭工程. 2009, (12): 19-21.