

# 桥梁健康监测系统综述

邓吉禄, 罗德康, 汤凯菱, 陈柏宏

重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2022年11月9日; 录用日期: 2022年11月29日; 发布日期: 2022年12月13日

## 摘要

随着国民经济的快速发展, 我国的基础设施建设得到蓬勃发展。桥梁作为国民生命财产安全的生命线, 关系到国民经济和人民生活可持续发展。在桥梁的长期运营过程中, 存在施工缺陷、材料老化、自然环境以及荷载作用等原因造成桥梁结构的可靠性逐渐下降, 而传统的检测方法不能完全满足现今桥梁管养需要, 因此对既有桥梁的健康监测迫在眉睫, 并且利用监测系统及时发现桥梁的安全隐患, 为桥梁安全运营提供保障。

## 关键词

监测系统, 传感器, 桥梁

# Summary of Bridge Health Monitoring System

Jilu Deng, Dekang Luo, Kailing Tang, Baihong Chen

Department of Architectural Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Nov. 9<sup>th</sup>, 2022; accepted: Nov. 29<sup>th</sup>, 2022; published: Dec. 13<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

With the rapid development of the national economy, China's infrastructure construction has been booming. As the lifeline of national life and property security, bridges are related to the sustainable development of the national economy and people's life. During the long-term operation of the bridge, the reliability of the bridge structure has gradually declined due to construction defects, aging materials, natural environment and load effects, while the traditional detection methods can not fully meet the needs of current bridge management and maintenance; therefore, it is urgent to monitor the health of existing bridges, and use the monitoring system to find the potential safety hazards of the bridge in time to ensure the safe operation of the bridge.

## Keywords

Monitoring System, Sensor, Bridge

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我国每年有大量的既有桥梁面临着维护与加固,据 2021 年统计结果显示我国现有公路桥梁 85.15 万座。在已有桥梁中,由于各种原因,四类、五类桥占到桥梁总数的约 13%,桥梁加固的任务十分繁重,每年国家都投入大量资金进行危旧桥梁的加固改造。在未来几十年的时间里,我国将面临大规模的桥梁老化现象,因此,对于既有病害桥梁的实时监测具有重大意义。桥梁健康监测不仅可以精准地掌握桥梁的实际运营情况,还可以根据反馈的数据进行实时评估,以便采取针对性的处理措施,从而确保桥梁在服役过程中的可靠性。

## 2. 国内外研究现状及评述

### 2.1. 国内外研究现状

桥梁健康监测能够实时采集数据并对其进行处理,从而确定结构损伤位置、评价桥梁健康状况以及预测承载力发展趋势。目前国内外常见的桥梁智能化健康监测系统主要由以下 3 部分组成[1]:

1) 传感子系统(基础部分):如图 1 所示,该子系统是监测系统所需的各种传感器组成的基础部分。主要研究方向为传感器精度、稳定性、传感器能源供给、寿命以及在传感器资源有限情况下的合理布置。

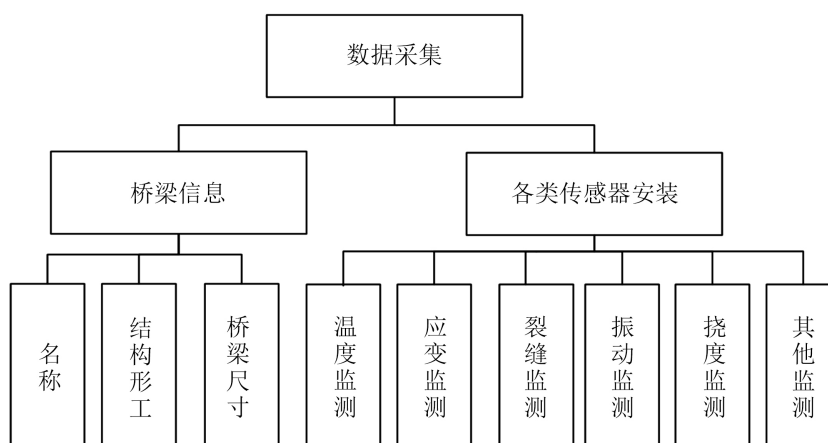


Figure 1. Schematic diagram of each component of the sensing subsystem

图 1. 传感子系统各组成部分示意图

2) 数据传输子系统(连接与存储):该子系统主要功能为传感器信号的转换和信号的远程传输,目前的监测系统基本都采用无线传输的方式。该子系统将传感子系统采集的信号经过转换后远距离传输至平台,平台对数据进行储存和展示,平台也可发出指令信号,无线传输至该子系统,实现对传感器和传输

系统相关参数的远程控制。减少传输过程中数据丢失率,提高数据传输效率是无线传输当前主要研究方向[2]。

3) 实时处理、损伤识别及状态评估子系统(以结构力学、物理等为依据的性能损伤识别,结构可靠性评价,强度储备分析):该子系统主要功能为实测数据的处理、分析和统计,对桥梁健康状况进行评价进而预测桥梁寿命,为桥梁维护提供依据。

上世纪八十年代欧美等国家和地区针对 Sunshine Skyway 斜拉桥、Benicia-Martinez 钢桁架桥等大跨度桥梁安装健康监测系统[3],对温度、应力、应变、位移、模态分析和材料的腐蚀等进行监测。美国的 Comondore Barry 桥安装了集低速应变计、高速应变计摄像机于一体的集成监测系统[4],加拿大联邦大桥(Confederation Bridge)重点针对环境侵蚀作用安装了健康监测系统[5],墨西哥为确定在 Tampico 斜拉桥当前动力特性以及使用寿命期间结构特性的变化安装了健康监测系统[6],挪威在主跨度 530 m 的 Skarnsunder 斜拉桥安装了监测系统[7]。由于历史原因,我国的结构健康监测发展相对较慢,最早是 20 世纪末在上海东海大桥、江苏苏通大桥、浙江杭州湾大桥及青岛海湾大桥上建立了健康监测系统。国内学者开始对健康监测进行研究,欧进萍[8]等进行新型智能材料和传感器的研究,任伟新[9]等进行桥梁结构损伤识别的理论研究,李爱群[10]等进行工程预警方面的研究。

近年来,国内外学者在健康监测研究方面成果斐然。2020 年, Wang [11]结合小波阈值去噪算法和 HHT 算法提出了一种时频分析方法。Kaloop [12]基于 WonHyo 大桥健康监测系统的实测应变数据,采用双重滤波和多项式预测方法准确识别了该桥的准静态位移和主频含量。Gorski [13]根据 Maxau-Rhine 大跨公路斜拉桥在日常交通条件下的多模态振动记录,对其动力特性的变异性进行了研究。Ni [14]提出了一种利用结构健康监测数据表征桥梁温度与伸缩缝位移之间回归模式的贝叶斯概率方法。Li [15]提出了用于估计大跨悬索桥伸缩缝与滑动支座累积位移的近似公式。Xia [16]提出了一种基于高斯过程元模型的模型修正方法。为解决对索力瞬时变化的监测, Zhang [17]提出利用拉索加速度响应的同步压缩短时傅里叶变换来识别斜拉桥拉索的瞬时张力,然后通过与现有方法进行了比较,采用数值方法证明了该算法在表征拉索瞬时张力方面的优点。Deng [18]提出了一种新颖的监测数据处理方法,有效地预测悬索桥吊杆的疲劳寿命。Kildashti [19]提出了一种基于固有模态函数(IMFs)的拉索损伤诊断方法。Daneshvar [20]提出了一种基于 ARARX 模型技术的桥梁结构损伤诊断方法。杨建喜[21]提出了一种联合卷积神经网络(CNN)和长短记忆循环神经网络(LSTM)模型的桥梁结构损伤识别方法。Tan [22]提出通过使用所识别的实测桥梁模态振型来诊断桥梁结构损伤。Zhang [23]提出了一种基于长轨距光纤布拉格光栅(FBG)应变传感器应变响应分形维数的公路桥梁损伤诊断方法。张安安[24]提出一种基于去噪自编码器和支持向量回归的铁路桥梁结构损伤诊断方法。

对目前桥梁健康监测的研究进行分析,结果如下[25]-[33]:

1) 当前桥梁健康监测研究已取得丰硕的理论和应用成果,但涉及较为全面的桥梁健康监测系统处于理论阶段,在实际工程应用中随着桥梁服役时间推移出现的各类问题层出不穷,应用方面仍处于起步阶段。

2) 桥梁健康监测系统价格高昂,大部分未得到大型项目支撑的桥梁结构健康监测系统仅限于数据的采集阶段,无法进行数据评估,对数据的分析、损伤定位等状态评估并无涉及。

3) 当前的桥梁健康监测系统针对性强,不适用于大部分的桥梁监测,对中小型桥梁方面研究较少,无法实现区域性监测网。

4) 准“一劳永逸”。虽然理论上可以达到一劳永逸,但是仍旧存在不足:传感器寿命有限;没有统一的、具备行业说服力的桥梁结构健康状态评价理论。

5) 科技含量高,多交叉学科互相渗透监测系统研发技术难度大。

## 2.2. 研究现状评述

综上所述,桥梁健康监测从上世纪八十年代发展至今,已经有了很多的研究成果,针对于大桥、特大桥的健康监测系统也已趋于成熟。但是,需要健康监测的桥梁不止是大桥、特大桥,还有数量庞大的中小桥。相对于大桥来说,中小桥结构相对简单,技术难度较低,理应安全性较高,对于新建桥梁来说,桥梁健康监测系统并不是必需品,但现存的中小桥,有很大一部分是“带病”工作的,对这部分桥梁来说,不可能全部拆除重建,除了结构严重损坏的桥梁,其他桥梁都会经过维修加固后继续使用,对加固后的桥梁来说,安装健康监测系统是有必要的。对于这类结构简单的中小桥来说,只要在结构关键部位的最大应力点进行精准布点监测,就足以反应结构健康状况了。显而易见,由于针对性不同和成本原因,目前的健康监测系统并不适用于中小桥。本论文研究的智能碳纤维板加固病害的桥梁的术后监测系统,将桥梁健康监测系统与目前较为流行的预应力碳纤维板加固技术相结合,以结构关键部位的应变为主要监测对象,简单有效、性价比高并且可以同时解决病害桥梁的加固和监测问题,适用于“带病”工作的中小桥,弥补了针对此类桥梁监测系统研究不足的短板。

## 3. 桥梁健康监测的意义

根据现行公路桥梁养护规范(JTG H11-2004)要求,对于桥梁一般每月不少于一次经常检查,最长不超过三年进行定期检查,对特殊结构还应进行特殊检查。桥梁检测往往有会中断交通,危险性大,成本高的缺点[34]。据有关部门统计,目前我国现有桥梁达到 85 万座。使用传统的人工检查方法,需要耗费大量的人力物力,还可能对桥梁的部分结构出现漏检情况。桥梁健康监测系统的原理就是利用各种监测设备在桥梁最可能出现破坏的部位对其应力、应变、挠度、振动特性等力学性能进行实时监测[35],利用采集到的数据对桥梁的耐久性、安全性,可靠度等进行评估和预测。从而对桥梁的安全状况及时准确的掌握,很好的解决了传统人工监测的不足。桥梁健康监测系统主要是借助高精密传感器来了解掌握能够反映桥梁所处环境及桥梁自身状态的某些信息,进而通过对这些信息分析来判断、评估桥梁的健康状态,从而达到指导桥梁运营维护、保障公共安全的目的。

我国对桥梁结构安全日益重视,近年来建设的很多特大桥在施工阶段就已经埋设了各种传感器,安装了桥梁全寿命健康监测系统。2021年3月1日发布的交通运输部办公厅关于印发《公路长大桥梁结构健康监测建设实施方案》的通知明确表示[36]:到2023年年底基本完成全国401座桥梁健康监测系统的建立,2024年6月底前正式投入运行。毋庸置疑,桥梁健康监测系统已经成为了一个行业热点。

## 4. 桥梁健康监测系统的组成

为了达到健康监测的目的,及时准确的反映桥梁安全状况。一个完整桥梁监测系统需要具备数据采集、数据储存、数据传输、数据评价、实时预警等方面的功能。因此,桥梁健康监测系统需要由传感器系统、数据采集与传输系统、评估系统等组成[37]。下面将对桥梁健康监测系统组成进行详细介绍。

### 4.1. 传感器系统

传感器系统作为整个健康监测系统最前端的子系统,对于整个桥梁健康监测系统起着尤为重要的作用。由于桥梁本身结构复杂、测点布置多、非线性的数据求解难度高[38],因此合理选择传感器、布置传感器的位置非常的重要,这也直接关系到系统后续的数据采集和分析工作。

### 4.2. 数据采集与传输系统

随着交通运输运力的不断增长,各级公路上的行车密度及车辆载重也日益增加,桥上通行的重载、



超载车辆是桥梁出现病害的主要原因之一。因此对过往车辆数据的采集是整个健康监测系统的重要环节并且数据采集与传输系统还应当具备准确性与及时性。

数据采集与传输系统是将传感器测量到的信号通过与之匹配的调理器滤波、放大，初始的电信号、光信号转化为数字信号，再借助综合监测网将数据传输到数据处理控制中心[39]。数据的采集与传输主要分为以下几个部分，首先将传感器的输出信号经过连续采集或间断采集的方式进行采集，然后再进行信号预处理。即将初始信号通过放大、滤波等方式转化为符合采集要求的标准化信号，并为数据加上时间标识码，保障信号的标准、有序，再进行信号传输工作。采集与传输是数据流转的枢纽，相当于承接传感器已经测量的数据，然后与数据储存，其正常运作是整个监测系统持续保持正常工作状态的前提[40]。

### 4.3. 数据处理与储存系统

由于桥梁长时间服役于复杂的自然环境中，而桥梁健康监测系统直接安装在桥梁上，受温度、气候、车辆噪声、灰尘等影响会对系统采集到的原始数据产生影响[41]。因此，对于数据的处理以及储存的结果将直接影响到后期系统的评估与决策。除了可以选用抵抗干扰能力强的传感器设备、硬件设施外，还可以采用科学的方法，如编程、神经网络等对传感器采集的原始数据进行过滤去噪、剔除异常数据，这对整个监测系统十分重要。否则全部是海量、自带干扰性的数据，无法对桥梁的安全状况进行正确判断。由此，数据处理功能体现在数据过滤处理、筛选等方面。

### 4.4. 评估与决策系统

在桥梁健康监测系统中，数据评估与决策系统作为监测系统的最后一个部分，将对桥梁结构的安全性进行判断，因此可以将它视作为“大脑”[42]。最终将监测信息成果汇集到了评估与决策系统，此时就需要依据相应的评判规则，发出准确的预警信号，并提出有效可行的维修养护建议。评估与决策是桥梁结构健康监测的最终目的，也是指导桥梁结构管养的重要依据。桥梁管养单位可以通过系统及时对桥梁进行交通管制，快速解决桥梁所存在的问题。

## 5. 健康监测系统在桥梁中的应用

### 5.1. 桥梁运营管理方面的应用

我们将监测系统运用在桥梁中，从而可以实现交通大数据在桥梁运营管理中的有效应用。通过传感器传输的数据，可以全面的记录公路桥梁上来往行驶车辆的数据，进而为桥梁的运营管理提供精准的数据支撑[43]。此外，桥梁监测数据还可以针对某一特定区域的路网状况，对车流量的变化进行分析，预测车辆具体流量和实时交通情况，评估桥梁带来的经济效益与社会效益[44]。

### 5.2. 桥梁安全管理方面的应用

在日常出行中，不少司机曾为在大雾、雨雪天气中行驶感到苦恼。利用桥梁监测大数据把各种路况数据和气候数据通过感知基站、利用多传感器通信网络、高效运算单元等技术，实时监测交通、环境、公路、车辆状况，自动采集环境和交通信息，并通过通信网络实时传输至云平台。同时，云平台整合气象部门等部门的数据信息[45]，从通信网络接收气象部门关于天气状况和道路状况变化的信息，经边缘计算分析后自动发布指令[46]。例如：采取主动式融雪化冰或自动喷淋等技术，来清除路面障碍，这样一来驾驶员再也不用为这些恶劣情况感到苦恼了。我们的交通部门还可以利用大数据对公路桥梁上班下班高峰时期的路况进行分析，预测易拥堵路段和其他有效信息，通过广播将实时道路状况分享至司乘人员的车载广播，使驾驶人可以提前得知信息从而对自己出行提前进行合理安排，不把宝贵的时间浪费在堵车

上。将交通大数据运用在高速公路安全管理方面,不仅可以有效避免高速公路堵车现象,还可以让司机在行车过程中感觉到满满的舒适感。

## 6. 桥梁健康监测存在的问题

近年来,桥梁的健康监测取得了飞速的发展并在很多桥梁上得到了应用,但缺乏对测得的海量数据的理论分析手段,导致监测系统在桥梁管养中的应用依然面临着诸多难题[47]:

1) 综述调研能力有限,目前桥梁健康监测还未形成比较完善的标准,比如统一国家、行业标准,很多研究团队、公司的研究成果都还处于理论、应用研究阶段。通过多方面的交流和信息共享,快速地形成一套国际或国家通用标准,才能促进桥梁健康监测系统的开发和应用;

2) 从桥梁健康监测总体组成部分中我们可以知道,传感器在设备的安装、保护、维修方面依然存在多种问题,并且在长期的使用过程中遭受到各方面的原因容易损坏,如何有效地从监测数据中找到失效的传感器并及时替换有待进一步研究;

3) 随着监测数据不断地丰富,如何充分利用这些数据对桥梁管养、建设进行指导是接下来健康监测系统发展的趋势。

## 7. 结论

桥梁健康监测系统是由传统的桥梁检测衍生出来的主要针对大型桥梁的一种管理方法[48],已经在很多桥梁上得到广泛应用与研究。本文在论述桥梁健康监测系统应用优缺点的基础上,详细分析国内外大跨桥梁结构健康监测系统应用现状,总结了桥梁健康系统的基本组成,在桥梁的管理和运营上的应用以及存在的一些问题,为桥梁健康监测系统的发展提供一些思路。

## 基金项目

重庆科技学院硕士研究生创新计划项目(项目批准编号:YKJCX2120614)。

## 参考文献

- [1] 俞姝颖, 吴小兵, 陈贵海, 戴海鹏, 洪卫星. 无线传感器网络在桥梁健康监测中的应用[J]. 软件学报, 2015, 26(6): 1486-1498.
- [2] 袁素梅. 结构健康监测的数据采集与损伤识别研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [3] 徐瑞峰. 远程桥梁健康监测系统中的应变检测研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2013.
- [4] Kclcu, E., Qin, X., Barrish Jr., R.A. and Emin Aktan, A. (2000) Information Technology and Data Management Issues for Health Monitoring of the Commodore Barry Bridge. *SPIE's 5th Annual International Symposium on Nondestructive Evaluation and HealthMonitoring of Aging Infrastructure*, Newport Beach, 2020. <https://doi.org/10.1117/12.387801>
- [5] Chueng, M.S., Tadros, G.S., Brown, T. and Dilger, W.H. (1997) Field Monitoring and Research on Performance of The Confederation Bridge. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **24**, 951-962.
- [6] Kaloop, M.R. and Li, H. (2009) Monitoring of Bridge Deformation Using GPS Technique. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **13**, 423-431. <https://doi.org/10.1007/s12205-009-0423-y>
- [7] Muria-Vila, D., Gomez, R. and King, C. (1991) Dynamic Structural Properties of Cable-Stayed Tampico Bridge. *Journal of Structural Engineering*, **117**, 3396-3416. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1991\)117:11\(3396\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1991)117:11(3396))
- [8] Bao, Y., Li, H. and Ou, J. (2014) Emerging Data Technology Instructural Health Monitoring: Compressive Sensing Technology. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **4**, 77-90. <https://doi.org/10.1007/s13349-013-0064-1>
- [9] 任伟新. 小波分析在土木工程结构中的应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [10] 李兆霞, 李爱群, 陈鸿天, 郭力, 周太全. 大跨桥梁结构以健康监测和状态评估为目标的有限元模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(5): 562-572.

- [11] Wang, X., Huang, S., Kang, C., Li, G. and Li, C. (2020) Integration of Wavelet Denoising and HHT Applied to the Analysis of Bridge Dynamic Characteristics. *Applied Sciences*, **10**, Article No. 3605. <https://doi.org/10.3390/app10103605>
- [12] Kaloop, M.R., Elbeltagi, E. and Hu, J.W. (2020) Estimating the Dynamic Behavior of Highway Steel Plate Girder Bridges Using Real-Time Strain Measurements. *Applied Sciences*, **10**, Article No. 4215. <https://doi.org/10.3390/app10124215>
- [13] Górski, P., Napieraj, M. and Konopka, E. (2020) Variability Evaluation of Dynamic Characteristics of Highway Steel Bridge Based on Daily Traffic-Induced Vibrations. *Measurement*, **164**, Article ID: 108074. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108074>
- [14] Ni, Y.Q., Wang, Y.W. and Zhang, C. (2020) A Bayesian Approach for Condition Assessment and Damage Alarm of Bridge Expansion Joints Using Long-Term Structural Health Monitoring Data. *Engineering Structures*, **212**, Article ID: 110520. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110520>
- [15] Li, G., Han, W., Chen, X., et al. (2020) Wear Evaluation on Slide Bearings in Expansion Joints Based on Cumulative Displacement for Long-Span Suspension Bridge under Monitored Traffic Flow. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, **34**, Article No. 04019106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001388](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001388)
- [16] Xia, Q., Xia, Y., Wan, H.-P., Zhang, J. and Ren, W.-X. (2020) Condition Analysis of Expansion Joints of a Long-Span Suspension Bridge through Metamodel-Based Model Updating Considering Thermal Effect. *Structural Control and Health Monitoring*, **27**, e2521. <https://doi.org/10.1002/stc.2521>
- [17] Zhang, X., Peng, J., Cao, M., et al. (2020) Identification of Instantaneous Tension of Bridge Cables from Dynamic Responses: STRICT Algorithm and Applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **142**, Article ID: 106729. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2020.106729>
- [18] Deng, Y., Zhang, M., Feng, D.-M. and Li, A.-Q. (2020) Predicting Fatigue Damage of Highway Suspension Bridge Hangers Using Weigh-in-Motion Data and Machine Learning. *Structure and Infrastructure Engineering*, **17**, 233-248. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1734632>
- [19] Kildashti, K., Alamdari, M.M., Kim, C.W., Gao, W. and Samali, B. (2020) Drive-by-Bridge Inspection for Damage Identification in a Cable-Stayed Bridge: Numerical Investigations. *Engineering Structures*, **223**, Article ID: 110891. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110891>
- [20] Daneshvar, M.H., Gharighoran, A., Zareei, S.A. and Karamodin, A. (2020) Early Damage Detection under Massive Data via Innovative Hybrid Methods: Application to a Large-Scale Cable-Stayed Bridge. *Structure and Infrastructure Engineering*, **17**, 902-920. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1777572>
- [21] 杨建喜, 张利凯, 李韧, 等. 联合卷积与长短记忆神经网络的桥梁结构损伤识别研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020(8): 1893-1902.
- [22] Tan, C., Zhao, H., Obrien, E.J., et al. (2020) Extracting Mode Shapes from Drive-by Measurements to Detect Global and Local Damage in Bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, **17**, 1582-1596. <https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1817105>
- [23] Zhang, L., Wu, G. and Cheng, X. (2020) A Rapid Output-Only Damage Detection Method for Highway Bridges under a Moving Vehicle Using Long-Gauge Strain Sensing and the Fractal Dimension. *Measurement*, **158**, Article ID: 107711. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107711>
- [24] 张安安, 邓芳明, 吴翔. 基于 DAE 和 SVR 的铁路桥梁损伤定位与识别技术[J]. 公路, 2020, 65(5): 111-116.
- [25] 周桂兰, 徐恺奇. 大跨径桥梁结构健康监测技术现状与发展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(4): 168-169.
- [26] 陈宇哲. 中小跨径桥梁健康监测系统设计及其应用[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [27] 何浩祥, 闫维明, 马华, 王卓. 结构健康监测系统设计标准化评述与展望[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(4): 154-160.
- [28] 季璇, 陈航, 陈仁进, 黄晓丹, 谭灵生. 基于 ZigBee 技术的桥梁监测数据采集系统关键技术研发[J]. 广州建筑, 2017(5): 27-30.
- [29] 刘玉贵. 我国建筑工业化的发展和思考[J]. 广州建筑, 2016, 44(3): 8-12.
- [30] 秦权. 桥梁结构的健康监测[J]. 中国公路学报, 2000(4): 40-45.
- [31] 周岳, 朱毅, 李高堂, 王焕新, 乔升访. 桥梁智能化健康监测研究现状分析[J]. 广州建筑, 2019, 47(4): 3-7.
- [32] 姚华, 杜松. 桥梁健康监测新技术应用[J]. 科学技术创新, 2019(7): 81-82.
- [33] 张启伟. 大型桥梁健康监测概念与监测系统设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2001, 29(1): 65-69.

- 
- [34] 王靖, 高贵军, 寇子明, 张昕, 薛政宇. 电阻应变式称重传感器迟滞性建模及实验研究[J]. 机电工程, 2021, 38(2): 191-197.
- [35] 樊涤非. 浅谈光电开关原理及应用[J]. 中国高新区, 2018(3): 129.
- [36] 中华人民共和国交通运输部. 公路长大桥梁结构健康监测系统建设实施方案[Z]. 2021.
- [37] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60-2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [38] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程技术标准: JTG B01-2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [39] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [40] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路桥梁加固设计规范: JTG/T J22-2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [41] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路桥梁加固施工技术规范: JTG/T J23-2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [42] 四川省住房和城乡建设厅. 混凝土结构加固设计规范: GB 50367-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [43] 交通部公路科学研究所. 公路工程质量检验评定标准: JTG F80/1-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [44] 陕西省公路局. 公路桥涵养护规范: JTG H11-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [45] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥梁承载能力检测评定规程: JTG/T J21-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [46] 交通部公路科学研究院. 公路桥梁技术状况评定标准: JTG/T H21-2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [47] 中交公路规划局设计院有限公司. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362-2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [48] 刘龄嘉, 周勇军, 张显军. 桥梁工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2013.