

# 中小型桥梁广域健康监测系统的研究

王文俊<sup>1</sup>, 潘静<sup>2</sup>, 吴佳晔<sup>3</sup>

(1. 山西省公路局, 太原 030006; 2. 四川升拓检测技术有限责任公司, 成都 610000;

3. 四川理工学院建筑工程学院, 四川 自贡 643000)

**摘要:**我国是桥梁大国,由于结构老化、运营管理以及建设质量等问题,近年来全国各地相继出现桥梁垮塌事故,造成了严重的人员伤亡和巨大的财产损失。为了保证既有桥梁的安全运营和尽可能延长其安全使用年限,对既有桥梁进行实时健康监测是非常必要的。由于桥梁健康监测系统投资、运营费用巨大和监测技术的不成熟,除少数特大型桥梁安装了监测系统,99%以上的大、中、小跨径的桥梁都处于监测系统覆盖的盲区。文章主要探讨中小型桥梁健康监测系统的现状及近年来的进展,提出了一种基于智能传感器的中小型桥梁广域健康监测系统结构。

**关键词:**健康监测;智能传感网络;桥梁结构

**中图分类号:**U446

**文献标识码:**A

桥梁是国家重要的基础设施,是确保交通畅通的咽喉,一旦出现安全事故,不但对人民的生命和财产安全造成重大损失,还可能导部分交通网络瘫痪,造成巨大社会影响,特别是生命线工程,影响尤为巨大。由于气候、环境等自然因素的作用和日益增加的交通流量及重车、超重车过桥数量的不断增加,桥梁结构随着桥龄的不断增长,结构的安全性和使用性能必然发生退化。根据全国公路普查资料,近几年来我国的危桥数量呈快速增长趋势,桥梁垮塌事故频发。然而,目前我国除了部分特大桥梁(单跨跨径在100米以上,总数约2000座,其中约140座装有健康监测系统)以外,占99.9%以上的大、中、小跨径的桥梁均没有任何安全监测系统。本文主要探讨中小型桥梁健康监测系统的现状及近年来的进展,提出一种基于智能传感器的中小型桥梁广域健康监测系统结构。

## 1 中小型桥梁健康监测现状

我国是桥梁大国,现有桥梁约60余万座,其中40%的桥梁使用年限在20年以上,三、四类桥大约占30%。近几年来,桥梁事故频发,今年七月,9天内就有4座桥梁垮

塌1座桥梁倾斜,表1列出了近五年来垮塌的部分桥梁。如此密集的桥梁事故,引起了社会各界的高度关注。

依据美英德等国经验,设计平均寿命为75年的桥梁实际使用寿命平均为40年左右。可以预见在未来的10到20年内,我国必将迎来大范围的桥梁老化现象,如不加控制,大部分桥梁将提前达到使用寿命。另一方面,我国桥梁设计标准较低,我国桥梁的设计承载能力分别为美英的68%和60%,桥梁需承受荷载效应规范设计值比美英规范设计值低40%和59%,施工时质量控制较弱,长期重建轻养,造成结构老化情况比国外更加严重。

此外,由于施工质量、巡检、养护等方面的原因,使得中小跨径桥梁的安全系数要低于大型桥梁。特别需要指出的是,超载对中小跨径桥梁的影响要远远大于对大型桥梁的影响。我们知道,桥梁的设计荷载是按照跨径、标准荷载等加以计算的。对于跨径较大的桥梁,其设计荷载也较大,因此即使有少量的超载货车,由于其它车辆的平均,其荷载率(实际荷载/设计荷载)也不会太高。但对于中小跨径桥梁,由于其设计荷载较低,1、2辆超载货车就可能超过桥梁的设计承载力。

收稿日期:2011-09-11

基金项目:四川省科技厅支撑项目(2009SZ0245)

作者简介:王文俊(1967-),女,山西文水人,高级工程师,主要从事公路养护工程技术方面的研究,(E-mail) wujy@scentralit.com

表1 近五年来垮塌的桥梁

事故桥梁	桥龄	事故桥梁	桥龄
沱江大桥	0年(2007年在建时出事)	海南万宁太阳河大桥	16年(1995-2011)
合肥一在建高架桥	0年(2011年在建时出事)	江苏滨海县通榆河大桥	17年(1994-2011)
汶川彻底关大桥	1年(2008-2009)	广东九江大桥200米桥面	20年(1987-2007)
重庆涪陵红泥桥桥面	12年(1998-2010)	河南栾川汤营伊河大桥	22年(1988-2010)
福建武夷山公馆大桥新疆库尔勒	12年(1999-2011)	吉林长春荣光大桥	22年(1989-2011)
孔雀河大桥	13年(1998-2011)	北京宝山寺白河桥	24年(1987-2011)
湖南株洲高架桥	14年(1995-2009)	伊春铁力市西大桥桥体	26年(1973-2009)
杭州钱江三桥引桥桥面	14年(1997-2011)	吉林锦江大桥	不祥(1970年代-2010)
山西吕梁兴县忻黑公路九龙大湾桥(1号桥)	不详(-2010)		

建立桥梁健康监测系统是保障桥梁安全运营和延长使用寿命的有效手段。桥梁健康监测系统利用长期安装在桥梁结构关键位置上的传感器实时监测、评估桥梁的结构状态,在自然环境、交通条件或运营状况严重异常时发出预警信号,为桥梁维护、维修与管理决策提供依据和指导,可在第一时间发现问题,有效避免恶性事故。

桥梁健康监测在上世纪80年代就引起了人们的注意,英国在 Foyle 大桥上建立了桥梁监测预警系统,此外还有挪威的 Skarnsundet 斜拉桥(主跨 530 m),美国的 Sunshine Skyway Bridge 斜拉桥、丹麦的 Great Belt East 悬索桥等,我国新建的一些特大型重要桥梁也引进了不同规模的桥梁健康监测系统,如香港的青马大桥、汲水门大桥和汀九大桥,上海的徐浦大桥、虎门大桥、润扬大桥等。这些特大型桥梁监测系统复杂庞大,监测项目众多,初期投资和运营成本都非常高,现在一套特大型桥梁健康监测系统报价在几百万,甚至上千万,大型桥梁健康监测系统也要几十万,中小型桥梁面广量大,多数管理单位难以承受。另一方面主管部门对中小型桥梁的重视不够,在技术力量、资金等方面的投入严重不足。因此,占我国桥梁总数 99% 以上的大、中、小跨径(跨度在 100 米以下)的桥梁几乎都没有安全监测系统,而发生的桥梁事故,全部出现在这些桥梁中。

目前中小型桥梁常规的检查措施基本上以人工检测为主,包括定检和日常巡检。这种被动的检测方法仅能对明显的桥梁问题做出判断,很难确定桥梁整体健康状况及损伤发展。业内公认比较有效的如外加荷载试验等检测方式,不但花费大,还需阻断交通,影响桥梁正常使用。此外荷载试验还会加深桥梁损伤。除非非常特别的情况,一般不常用。不仅如此,通过定期检查等方式仅能确定桥梁当时的健康状态,不能够有效保障此

后桥梁的安全使用。如美国密西西比河大桥虽然于 2005 和 2006 年分别对这座大桥进行过检查,当时并没有发现任何结构性的安全隐患,还是在 2007 年发生了垮塌。

## 2 桥梁健康监测系统的发展趋势

### 2.1 智能传感器

先进的传感器是获得桥梁信息的先决条件,多种传感器及测试手段的综合利用将有效的保证测量信息的完整性和可靠性。但测试精度高、价格昂贵的 GPS、激光、光纤传感器监测系统对于投资、运营收入有限的中小型桥梁管理单位来说监测系统可望而不可及。

智能传感器用于结构健康监测是近几年出现的一项新技术。智能传感器由传感器、微处理器、数据存储器和无线通信器和电源组成,具有局域组网和前端分析及处理数据能力。目前最著名的是伯克利发布的 Mote 和 Intel 公司开发的 Intel Mote 平台。智能传感器的核心是一种微小的、低成本、低功耗的计算机,计算机监控一个或多个传感器,通过无线通信方式与外界连接。它具有以下特点:

(1) 自组网,基于公共通信网络,构筑成本低。

(2) 可广域监测:从地域上扩展了监测系统的范围,一套监测系统可覆盖多座桥梁。

(3) 监测信号在监测现场进行实时处理,常用 FFT 变化、HHT 变换、小波变换等方法,一方面降低了控制中心与现场通信量,另一方面分担了控制中心数据处理负担。

(4) 测试信号全部前端数字化。

(5) 自带电源(太阳能电池+蓄电池)。

可以看出,这种可密集布置的低成本、高精度的智能传感器是构筑广域中小型桥梁健康监测系统的最佳选择。

## 2.2 桥梁损伤识别

中小型桥梁的健康检测大部分是通过常规定检项目的静态分析,如桥墩沉陷、构件应力状况和环境状态来评估桥梁状态。也有通过长期监测桥梁变形(如挠度)、应变(特别是静态平均值)等项目的监测来分析桥梁的健康状况情况。主要是由于挠度、应变的检测结果与设计值或校核值易于对比。这种方法对损伤的敏感度较差:挠度值是一个累计值,在损伤积累到一定程度才能明显反应,应变值只能反应局部情况,当测试位置偏离损伤部位较远时难以反映。另外测试成本较动力响应测试更高,有时还需要封闭交通测试,在实际应用中存在较大的局限性。

在特大型桥梁健康监测系统中常采用基于桥梁结构动力响应的损伤识别方法。主要包括以下方法:

(1)由结构频率的变化来进行损伤识别:测试简单易行,频率与测点位置关系无关,但对结构局部小损伤不太敏感,不能对损伤进行定位。

(2)基于振型变化的损伤识别方法:相对频率而言,振型包含更多的损伤信息,其变化对损伤较为敏感,可以确定损伤的位置。但对测试精度要求较高,需要布置较多的测点,高阶振型对结构损伤更敏感。

(3)基于经验模态分解(EMD)和随机减量技术(RDT)相结合的结构模态参数识别方法:对于环境随机激励非平稳振动信号模态参数的识别非常有效。

(4)小波变换:对信号的奇异点非常敏感,适合于分析非平稳信号,但小波基的定义非常关键。

(5)HHT变换:具有自适应性,即能分析稳态信号又能分析非平稳信号。

对于中小型桥梁而言,在自然环境荷载(地脉动、风荷载等)下,采用HHT(希尔伯特-黄变换)与RDT相结合的模式参数识别方法是非常有效的。

## 3 一种基于智能传感器的中小型桥梁广域健康监测系统结构

提出了一种基于智能传感器的中小型桥梁广域健康监测系统结构,如图1所示。该系统充分利用了智能传感器和无线通信网络,具有以下优势:

(1)范围广:不受信号线缆限制。

(2)分布式计算,集中处理:通过嵌入信号分析软件,可在智能传感器端对监测信号进行预处理,识别结构局部损伤,在控制中心服务器主要进行大规模的桥梁综合信息分析和数值模拟分析,更完整的判断桥梁整体健康状态。

(3)系统初期投资和运营成本低:单跨构筑成本可以降低为现有一般系统的1/5以下,通过对数据的预处理降低了系统数据通信量,从而降低了运营成本。

(4)系统扩展性强:监测系统的规模可动态变化,传感器节点的增加、减少不影响系统结构。

(5)综合监测:监测项目更丰富,可根据桥梁具体运营环境构筑个性化监测方案,也可结合桥梁日常运营管理,构筑桥梁综合监测系统,如通过载荷传感器对超重车辆进行识别处理。

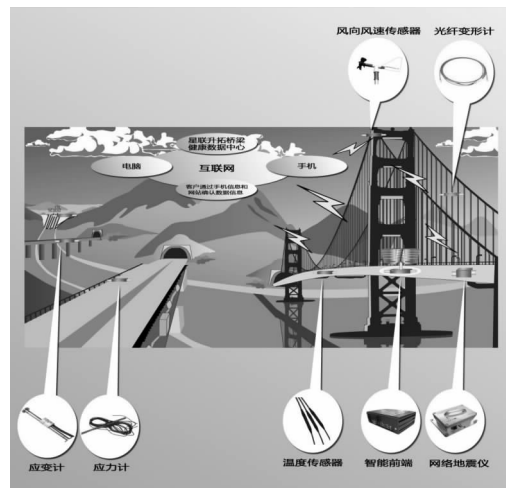


图1 基于智能传感器的广域桥梁监测系统

## 4 结束语

桥梁健康监测系统涉及多学科领域,是一项非常复杂的系统工程,目前尚处于起步阶段,没有成熟的技术规范和标准,构筑桥梁健康监测系统并不能一劳永逸。特别是针对中小跨径桥梁,由于受到预算、技术水平以及风险因素等的限制,使得该领域基本处于空白。

所以,还需要广大科研工作者和工程技术人员共同努力。充分利用现代科技成果,通过持续深入的研究、创新,以期在实际工程应用中不断的发展和完善。

## 参考文献:

- [1] 李鹏飞,吴大成.桥梁健康监测技术研究综述[J].预应力技术,2011(1):29-33.
- [2] 尤启蒙.中小型桥梁健康监测系统的发展现状及对策思路[J].科技资讯,2011(6):80.
- [3] 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,2001,29(1):65-67.
- [4] 谢慧才.结构健康监测新技术-智能传感网络[J].四川理工学院学报,2009,22(4):1-3.

- [5] 陆慧,沈庆宏,陈策,等.基于 Imote2 的 WSN 桥梁结构健康监测无线传输研究[J].现代电子技术,2010,33(21):30-34.
- [6] 费梁,刘立军,张连振.桥梁健康监测研究[J].黑龙江交通科技,2006(5):61-62.
- [7] JTG\_H11-2004,公路桥涵养护规范[S].
- [8] 项贻强,周畅,李毅,等.桥梁结构在线健康监测预警系统 II——损伤识别的信号分析及提取方法[J].交通科学与工程,2009,25(2):33-39.

## Study on Wide-area Health Monitoring System of Small and Medium-sized Bridges

WANG Wen-jun<sup>1</sup>, PAN Jing<sup>2</sup>, WU Jia-ye<sup>3</sup>

(1. Highway Bureau of Shanxi Province, Taiyuan 030006, Chian;

2. Sichuan Central Inspection Technology Co, Ltd., Chengdu 610000, Chian;

3. School of Architecture Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Sichuan Zigong 643000, Chian)

**Abstract:** There are a large number of bridges in China. In recently years, many places have happened bridge collapse accident which caused by aging, bad management, construction quality, and other issues. Those failures caused serious casualties and huge property losses. In order to ensure the safe operation of existing bridges and prolong their life, install health monitoring system is necessary. Because the investment of building bridge health monitoring system and operating costs are very large, and the monitoring technology is not very maturationally, more than 99% of the total number of large, small and medium-sized bridge are not covered with health monitoring system except a few super-sized bridges. This paper discusses the status and recently progress of health monitoring system of small and Medium-sized bridge, brings a structure of wide-area health monitoring system based on smart sensor for small and medium bridges.

**Key words:** bridge health monitoring system; smart sensor; bridge structure