

桥梁健康监测技术研究综述

李鹏飞 吴太成

(广东省建筑科学研究院 广东广州 510500)

摘 要:本文介绍了桥梁健康监测的基本含义、研究开发的紧迫性和意义,综述了其研究现状、存在的问题,并对进一步的研究进行了展望。

关键词:桥梁 健康监测 研究方法 综述

1 引言

从上世纪90年代至今,我国进行了大规模的公路和城市桥梁建设,桥梁总数达三十多万座,且每年都有一批结构新颖、形式多样的桥梁建成。作为生命线工程,其运营安全性受到了社会各界的高度重视,如何确保桥梁特别是大跨度桥梁的健康运营是桥梁研究领域又一热点。由于桥梁在运营过程中反复受到车载、风载等多种荷载的作用,同时受到如气候、材料老化、疲劳等不利因素的影响,不可避免地产生自然老化,损伤积累,严重的甚至会导致突然倒塌,西方发达国家的桥梁已有先例,2007年8月美国明尼苏达州公路桥的坍塌就是一个警示的标志。由此桥梁尤其是大型重要桥梁的健康监测越来越重要,通过监测可以及时发现结构隐患并采取措施,有效预防突发性灾难,而且可为桥梁结构的新理论、新技术的评估和验证提供数据依据。

2 桥梁健康监测的含义

桥梁健康监测的基本含义是通过通过对桥梁结构技术状况的监控与评估,为桥梁结构在特殊气候、交通条件下或桥梁运营状况严重异常时触发预警信号,为桥梁保养、维修与管理决策提供依据和指导。桥梁健康监测可以通过设置在桥梁中的数据采集系统自动采集桥梁的各个状态参数如荷载、温度、挠度、应变、振动特性等,采集到的数据经预处理后通过通信系统送到控制中心,经过数据系统分析处理得到桥梁的健康状况评估、损伤分析、剩余寿命评估、交通控制和维修决策等结论。因此,健康监测系统主要对以下几个方面进行监控:①桥梁结构在正常环境与交通

条件下运营的物理与力学状态;②桥梁结构在特殊气候、交通条件下或桥梁运营状况严重异常时的物理与力学状态;③桥梁重要非结构构件(如支座)和附属设施(如振动控制元件)的工作状态;④结构构件耐久性;⑤大桥工作环境,如桥址处的风速和风向、环境及结构的温度、湿度等。与传统的检测技术不同,大型桥梁健康监测不仅要求在测试上具有快速大容量的信息采集与通讯能力,而且力求对结构整体行为的实时监控和对结构状态的智能化评估。

3 桥梁健康监测的研究现状

从上世纪50年代开始,美国和其它一些国家相继建立了桥梁检测的一些标准,于是产生了第一代的桥梁安全检测。1971年,美国制定了国家桥梁检测标准(NBIS),提供了检测方法的细节、检测时间间隔和检测人员资格的统一的指导。随后世界各国在桥梁检测方面都有了很大的发展。但这种传统的桥梁安全检测是以人工方法为主,通过定期或非定期的现场检测,获得实测数据,通过计算分析得出检测结论。这种方法由于受传感器数量、测量条件、安装工艺等因素的影响,使得所检测的数据无论是从有限元或是动态规划的理论分析都是不尽充分的,而且数据采集相对不够及时,且是间断性的,不能够全面真实地反映桥梁的运行状况。因而很难给出科学准确的桥梁健康评估。

发达国家于上个世纪80年代中期开始各种规模的桥梁健康监测系统的建立。如英国在总长522m的三跨变高度连续钢箱梁桥Foyle桥上布设传感器,监测大桥运营阶段在车辆与风荷载作用

下主梁的振动、挠度和应变等响应,同时监测环境风和结构温度场。该系统是最早安装的较为完整的监测系统之一,它实现了实时监测、实时分析和数据网络共享。建立健康监测系统的典型桥梁还有挪威的Skarnsundet斜拉桥(主跨530m)、美国主跨440m的Sunshine Skyway Bridge斜拉桥、丹麦总长1726m的Faroe跨海斜拉桥和主跨1624m的Great Belt East悬索桥、英国主跨194m的Flintshire独塔斜拉桥以及加拿大的Confederation桥。墨西哥对总长1543m的Tampico斜拉桥进行了动力特性测试。瑞士在混凝土桥Siggenthal Bridge桥建设过程中安装了健康监测系统。我国自上个世纪九十年代起对一些大型重要桥梁上建立了不同规模的结构监测系统,如上海徐浦大桥、江阴长江大桥、郑州黄河大桥、钱江四桥(系杆拱桥,190m主跨)、南京长江一桥(128m主跨连续梁桥)、南京长江二桥(斜拉桥)、重庆大佛寺桥(斜拉桥)、湛江海湾大桥(斜拉桥)、滨州黄河大桥(斜拉桥)、

阳逻长江大桥(悬索桥)、长江2桥(斜拉桥)、晴川桥(下承式钢管混凝土拱桥)、润扬长江大桥结构安全健康监测系统等。香港青马大桥健康监测系统永久性地安装了800多个各种类型传感器用于监测桥梁的健康状态及使用状况。香港在汲水门斜拉桥上安装了270多个各种类型的传感器和数据采集与管理设备组成的监测系统来监测桥梁的运营状况及健康状态,对该系统所采集到的数据进行分析即可评价大桥的动力特性。

从已经建立的监测系统的监测目标、功能以及系统运行等方面看,这些监测系统具有以下一些共同特点:①通过测量结构各种响应的传感装置,获取反映结构行为的各种记录;②除监测结构本身的状态和行为以外,还强调对结构环境条件(如风、车辆荷载等)的监测和记录分析,同时试图通过桥梁在正常车辆与风荷载下的动力响应来建立结构的总体监测样本,并借此开发实时的结构整体性与安全性评估技术;③在通车运营后连续或间断地监测结构状态,力求获取大桥结

构连续、完整的信息(有些桥梁监测传感器在桥梁施工阶段即开始工作,并用于监控施工质量);④监测系统具有快速大容量的信息采集、通讯与处理能力,并实现数据的网络共享。这些特点使得大跨度桥梁健康监测区别于传统的桥梁检测过程。另外桥梁健康监测的对象已不再局限于结构本身,一些重要辅助设施的工作状态也已纳入长期监测的范围,如斜拉索振动控制装置等。

4 现阶段研究方法

基于结构振动的损伤识别方法(Damage Identification),其基本原理是结构的模态参数(固有频率、模态振型等)是结构物理特性(质量、阻尼和刚度)的函数,因而物理特性的改变会引起系统动力响应的改变。基于振动的结构动力响应检测方法是寻找与结构动力特性密切相关的动力参数,通过动力参数的变化来判断结构的健康状况,是对结构无损的损伤识别、评估方法(NDE)。这种损伤探测方法除了整体检测的优点外,对于大型土木工程结构,可以采用环境激励引起的结构振动对结构进行检测,从而实现实时监测。

4.1 动力无模型损伤识别方法

动力无模型损伤识别方法是通过分析比较直接从振动响应的时程或相应的傅立叶谱或其他变换(如小波变换)得到的特征量,从而识别损伤的方法。可分为:时域方法、频域方法以及时频分析方法。时域方法常用的有利用ARMA(自回归滑动平均)模型、使用扩展的卡尔曼滤波算法等一系列方法。频域方法常有傅立叶谱分析、多谱分析(信号高次矩的傅立叶变换)、倒谱分析(变换的变换,以傅立叶谱幅值平方的对数傅立叶逆变换应用最广)。时频分析方法有小波分析及Wigner-Ville分析,由于土木工程一般不会产生强的非平稳振动,因此该法很少用于桥梁损伤识别。

现阶段基于频域方法,将有关振动信息定义为相应损伤指标进行桥梁损伤识别主要有以下几种:

(1) 波形循环码 (Wave Chain Code) I_{wcc} : 采用完好结构的加速度频响函数 U 与损伤结构的加速度频响函数 U 的斜率差或者曲率差的绝对值是否大于 I_{wcc} 为判别损伤是否发生的依据。该指标能比较明显地反映频响函数的微小变化, 可以敏感地识别损伤但无法识别损伤位置。

(2) 适应模板法 (Adaptive Template Methods) I_{ATM} : 取完好结构的加速度频响函数 U_i 与损伤结构的加速度频响函数 W_i 之差的绝对值为常数且满足下式要求:

$$(1-\beta) U_i \leq W_i \leq (1+\beta) U_i \quad (1)$$

当 U_i 和 W_i 大于幅值门槛 Δ , β 小于某一定值时, 可认为 U_i 和 W_i 相同。用最小的 β 作为识别指标可以敏感地识别损伤, 但无法识别损伤位置。

(3) 信号保证准则 (Signature Assurance Criteria)

$$I_{SAC} = (U, W) = |U^T W|^2 / (U^T U W^T W) \quad (2)$$

I_{SAC} 指标识别局部损失引起的频响函数微小变化能力较差, 识别和定位效果均不理想。

研究表明: 当用于损伤定位的物理量不是局部量或者对于局部损伤不敏感或者不是位置坐标的单调函数时, 在无模型条件下直接进行损伤识别和定位, 很难保证识别精度。而基于模型的损伤定位识别方法, 有助于精确标定结构损伤程度, 受到国际学术界和工程界的特别关注。

4.2 动力有模型损伤识别方法

对于土木结构, 一般采用建立有限元模型进行识别, 目前常用的方法可分为两种:

(1) 基于模态参数的指纹识别方法

首先, 动测后进行模态参数识别、其次, 采用构造损伤指标 (指纹) 识别损伤。

(2) 直接进行系统识别

由模态参数确定刚度、质量、阻尼的变化从而识别损伤, 是参数估计的逆问题, 需要定义误差函数最小进行求解。

目前应用较多的是指纹识别方法。

5 桥梁健康监测研究存在的问题

就现在桥梁结构健康监测及诊断的研究水平

来看, 桥梁结构健康监测及诊断仍然存在以下几个问题:

(1) 由于桥梁结构不确定的诸多因素和复杂的工作环境对结构模态参数的敏感性会造成不利的影响, 因此目前桥梁结构的整体监测还存在着许多困难。为了解决这些问题, 最好把桥梁分成许多了结构, 通过各个了结构的模态参数变化来判断整个系统的工作状态。

(2) 目前对桥梁结构健康状态的评价缺乏统一的有效的通用的损伤量化指标, 并难以反映某个局部构件的损伤对整个桥梁的工作状态的影响情况。在基于振动的检测方法中, 主要应用结构的模态参数变化量来判断整个结构损伤程度以及是否存在损伤, 这样就要求测得的信号在损伤前后应该有较明显的差异, 能够准确地表示出结构的损伤及损伤程度。因此应该提出一种通用的损伤量化指标, 能够把结构的健康状况进行简单的分级量化。

(3) 传感器的优化布设是桥梁结构健康监测和诊断中的一个重要问题, 应该做到使用尽量少的传感器获取尽可能多的结构的健康信息。

(4) 由于人工神经网络的并行计算能力、自我记忆能力和自我学习功能以及很强的容错性与鲁棒性, 对于大型的非线性桥梁结构, 神经网络在结构的健康监测及诊断方面将会有很大的应用前景。

(5) 无线监测系统将是桥梁结构健康监测的重要发展方向。传统的监测系统需要布设大量的信号传输线, 从使用和维护方面考虑, 在桥梁上长期安装大量的测试线也是不现实的, 而无线监测系统不但可以大大降低安装费用, 避免信号线老化工作失效的麻烦, 还可以对那些不易接近的危险地段进行长期重点监测。

(6) 开发适合桥梁结构检测的专用传感器是桥梁检测问题中的关键。测量仪器的精度不够以及效率低是困扰桥梁检测的一大难题。

(7) 在线实时分析。把数值分析技术与现场测试结合起来, 使得它们可以适时地取长补短。

目前,关于桥梁健康监测技术研究集中在损伤探测和定位识别上,现有部分研究成果已经表明了一些识别指标和方法的可行性,但是大部分研究成果建立在模型试验或仿真分析的基础上,基于现实测量数据进行损伤识别的高灵敏性和抗噪声的识别技术距离工程实施还有一定距离。此外,健康监测系统需要大量传感器,传输、记录和数据处理设备,其硬件成本已经不低,由于经济和结构运行状态的原因,在整座桥梁所有自由度上安置传感器既不现实,也不经济,为降低结构健康监测系统的造价,传感器最优布点可以用相同数目的传感器获取最大的损伤信息量,因此出现了传感网络优化布设问题。通过尽可能少的传感器来获得最可靠最全面的桥梁健康状况信息,就是优化布设的目标。目前传感网络优化布设方法主要是建立在数学模型上的方法,有模态动能法(MI E法)、有效独立法(EI法),Guyan模型缩减法、奇异值分解法和基于遗传算法(GA)的优化方法。基于遗传算法的优化方法采用可控性和客观性指数来获得所有控制模式的累积性能值,以这些指数为优化指标,使控制器和结构之间有最大的能量传递,而且根据控制率使剩余模式的影响最小,具有良好的工程应用能力。清华大学土木系于2000年提出用广义遗传算法求大跨度悬索桥最优测点针对不同传感器类型和监测目的分别建立了由位移模态和曲率模态表示的3个fitness。结果表明,这种方法具有计算结果稳定可靠和收敛迅速的优点。针对识别损伤类型和位置以及损伤程度这一高水准高精度的损伤识别目标,确定传感器布置的最佳数量,搜索鲁棒性、抗噪性的传感网络最优布设,是现阶段健康监测的研究动向。

就目前研究而言,桥梁健康监测还存在以下几个方面的技术难题:

(1) 桥梁结构是由多种材料、不同构件组合而成的综合体系,由于各种不确定因素和复杂的工作环境导致动力特性测量精度低,给损伤识别造成困难。

(2) 测点数的不足限制了损伤检测与识别

的能力和精度,由于经济和结构运行状态的原因,在整座桥梁所有自由度上安置传感器既不现实,也不经济,因此出现了传感网络优化布设问题。优化布设的目的就是通过尽可能少的传感器来获得最可靠而全面的桥梁健康状况信息。

(3) 大型桥梁往往构件多,超静定次数较高,而且重载占桥梁荷载比重较大,使用荷载下某些构件的损伤导致结构指纹的变化受恒载应力和内力重分布等因素而发生扰动影响,导致大桥整体模态没有明显变化,给损伤识别定位技术提出了新的挑战。

6 研究展望

桥梁健康监测研究目前尚处于起步阶段,自动识别损伤的能力尚不具备。以下几个方面的技术问题需要进一步开展研究:

(1) 监测系统面临的两个问题是成本高和精度低。这些问题需要结合无线网络技术和传感网络优化布设方法的研究来解决。传感网络优化布设在航天器的动态控制与系统识别中得到广泛研究和良好的应用效果,但在桥梁健康监测系统中,由于桥梁工作环境和结构型式的复杂性,目前尚缺乏有效的传感网络优化布设方法。现阶段把模态保证准则、修正模态保证准则SVD比、模态动能、Fisher信息阵作为评价传感网络优化布设方法的5条量化准则。此外,需要研究传感器最佳数量和兼顾开展传感网络的鲁棒性、抗噪性和可视性研究。

(2) 研究适用性更强的损伤识别指标是桥梁健康监测的核心技术问题。在实际工程复杂的工况和损伤的多样性条件下,在现有研究的基础上,发展和建立可靠性强、灵敏度高、抗干扰性能良好的损伤识别指标,该指标不会发生错判和漏判损伤的现象,即使不能精确实现损伤定位,也具有很大的工程意义。

(3) 模态识别技术在环境参数变化的条件下的抗噪声性和识别精度研究。目前的抗噪声性和识别精度研究尚未考虑环境参数的变化,而环境因素对桥梁结构动力特性影响很大,这也是许多理论模型与工程实际应用结果不相吻合的主要

原因。由于桥梁运营使用造成的损伤和动力参数变化,往往淹没在由于环境温度变化、风基础沉降等引起的动力参数扰动中,给损伤识别的实现带来困难。因此,这个方向的研究应该予以足够的重视。

(4) 智能传感元件及其耐久性。智能传感元件,例如光栅光纤传感器用于监测系统有着良好的效果,在航空航天机械行业得到成功的应用,在桥梁监测中也具有可以预见的良好前景。目前一些专家学者正在进行探索性研究,在智能传感元件的相容、大应变和耐久性问题研究上,还有大量工作需要开展。

参考文献

- [1] 王岩松,冷曦晨. 桥梁健康监测技术研究与应用[J]. 吉林交通科技, 2005,1.
- [2] Muria Vila D., Gomez R., King C. Dynamics Structural Properties of Cable Stayed Tampico Bridge[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1991,117(1).
- [3] 孙晓燕. 桥梁结构健康检测技术研究进展[J]. 中外公路, 2006,4.
- [4] 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).
- [5] 韩大建,谢峻. 大跨度桥梁健康监测技术的近期研究进展[J]. 桥梁建设, 2002,6.
- [6] 邹晓光,徐祖恩. 大型桥梁健康监测动态及发展趋势[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2003,23.
- [7] 周智,欧进萍. 土木工程智能健康监测与诊断系统[J]. 传

感器技术, 2001,20(11).

- [8] 左云,陈明宪,赵跃宇. 桥梁健康监测及传感器的优化布置[J]. 公路, 2004,4.
- [9] 李宏男,李东升. 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断综述[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(3)
- [10] 高赞明,孙宗光,倪一清. 基于振动方法的汲水门大桥损伤检测研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4).
- [11] 裴强,郭迅,张敏政. 桥梁健康监测及诊断研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 4.
- [12] Yukikazu Yanaka, Shuichi Suzuki. Monitoring the Akashi Kaikyo Bridge: First Experiences, Satoshi Kashima. Structure Engineering International, 2001, (2).
- [13] Akira Todoroki and Shintaro Miyatani. Wireless Strain Monitoring by Impedance Change of Composite Materials[A]. Structural Health Monitoring[C]. Edited by Fu-kuo Chang, 2002.
- [14] Mita A. et al. Health Monitoring of Smart Structures Using Damage Index Sensors[J]. Smart structures and Materials, San Diego, 2002.
- [15] F Myroll, E Dibiagio. Instrumentation for Monitoring the Skarnsunder Cable-stayed Bridge[C]. Jon Krokeborg, Proceeding of the Third Symposium on Strait Crossing, Rotterdam. Balkema, 1994.
- [16] J M Caicedo, et al. Monitoring of Bridge to Detect Changes in Structural Health[A]. 2001 America Control Conference[C]. Arlington, Virginia, 2001.
- [17] 欧进萍. 土木工程结构用智能感知材料、传感器与健康监测系统的发展现状[J]. 高层论坛, 2005, 2(5).
- [18] 谢强,薛松涛. 土木工程结构健康监测的研究状况与进展[J]. 中国科学基金, 2001.
- [19] 董学武,张宇峰,徐宏等. 苏通大桥结构健康监测及安全评价系统简介[J]. 桥梁建设, 2006, 4.
- [20] 缪长青,李爱群,冯兆祥等. 润扬大桥结构健康监测系统设计研究[J]. 世界桥梁, 2006, 3.
- [21] 张敏,杨志芳,朱利明. 东海大桥桥梁结构健康监测系统设计研究[J]. 桥梁建设, 2006, 2.

(上接第23页)

表1 实时子结构拟动力实验结果

支座	桥墩顶	桥面的	桥面的	桥墩底
	部的最大位移	最大加速度	最大位移	部的最大弯矩
	mm	gal	mm	kN·mm
NR	46.8	40.78	218.2	294
HDR	40.3	33.52	192.6	244

4 结论

本文对新型高阻尼橡胶隔震支座的力学性能与对桥梁的隔震性能进行了实验研究。实验结果表明新型高阻尼橡胶隔震支座是速度相关型支座,加载频率对其等效水平刚度有较大的影响,但对其等效阻尼系数影响不大。通过分析精确的定量地验证了新型高阻尼橡胶支座对桥梁的减隔震效果。

参考文献

- [1] 袁涌,青木徹彦,山本吉久. 关于高阻尼橡胶隔震支座的

动力特性的研究[J]. 日本构造工学论文集, 2005.3,Vol. 51A:

- [2] 庄学真,沈朝勇,金建敏. 桥梁高阻尼橡胶支座力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2006.10,Vol26,No.5: 208-212.
- [3] Yuan, Y., Aoki, T. and Yamamoto, Y. Experiment Study of the Dynamic Behavior of high-damping-rubber bearing isolator[C] //the First International conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Nagoya, Japan 2005:505-511.
- [4] Nakashima, M., Kato, H. and Takaoka, E. Development of Real-time Pseudo Dynamic Testing[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 1992, 21:79-92.
- [5] Nakashima, M. and Kato, H. Experimental error growth behavior and error growth control in on-line computer test control method [C] // Building Research Institute, Ministry of Construction, Research Paper, 1987:123-130.
- [6] 邱法维,钱稼茹,陈志鹏. 结构抗震实验方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [7] Hirokazu, I., and Akira, I. Real-time Substructure Hybrid Earthquake Loading System for Super-high-damping Rubber Bearing[C] // the First International conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Nagoya, Japan 2005:401-408.
- [8] 范力,赵斌,吕西林. 拟动力试验中几个问题的讨论[J]. 结构工程师, 2006,10, Vol.22:50-53.