

·学科进展与展望·

重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的研究与应用

欧进萍*

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090)

[摘要] 本文重点介绍了我国,特别是哈尔滨工业大学近年来有关重大工程结构智能传感网络与健康监测系统的一些研究与应用成果。主要包括:光纤光栅应变和温度传感器、压电薄膜(PVDF)应变和裂缝监测传感器、疲劳累积传感器、形状记忆合金传感器等智能传感器研究与应用;无线传感器网络与无线传输技术及其工程应用;碳纤维筋式传感器与纤维增强-光纤光栅复合筋式应变传感器研究开发与应用;碳纤维和(或)纳米粒子填料形成的自感知水泥砂浆及其混凝土标准应变传感器的研究与开发;智能健康监测系统及其在海洋平台结构、混凝土坝面、大跨桥梁以及大跨空间结构等实际工程中的应用。最后,介绍了我国在重大工程结构智能健康监测领域方面研究立项的情况,并指出了进一步值得研究的一些问题。

[关键词] 重大工程结构,智能传感器,无线传感网络,健康监测系统,工程实际应用

1 前言

重大工程结构,诸如跨江跨海的超大跨桥梁、用于大型体育赛事的超大跨空间结构、代表现代城市象征的超高层建筑、开发江河能源的大型水利工程、用于海洋油气资源开发的大型海洋平台结构以及核电站建筑等,它们的使用期长达几十年、甚至上百年,环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应、疲劳效应与突变效应等灾害因素的耦合作用将不可避免地导致结构和系统的损伤积累和抗力衰减,从而抵抗自然灾害、甚至正常环境作用的能力下降,极端情况下引发灾难性的突发事件。因此,为了保障结构的安全性、完整性、适用性与耐久性,已建成使用的许多重大工程结构和基础设施急需采用有效的手段监测和评定其安全状况、修复和控制损伤。新建的大型结构和基础设施总结以往的经验教训,也在工程建设的同时增设长期的健康监测系统和损伤控制系统,以监测结构的服役安全状况,并为研究结构服役期间的损伤演化规律提供有效的、直接的方法。

结构健康监测已经成为世界范围内土木工程领域的前沿研究方向。

我国正处于大规模的土木工程和基础设施建设时期,许多世界瞩目的重大工程与基础设施已经建成或正在规划建设之中,如已经建成的三峡工程、正在建设的苏通大桥、渤海海域多座海洋平台和海底管线、2008年奥运会场馆等。我国政府、研究人员与工程技术人员十分重视这些重大工程结构长期服役的安全性和耐久性,并积极研究、开发和应用结构智能健康监测系统、实时监测其服役期间的安全状况以便避免重大事故的发生。同时,我国重大工程建设和安全运行的需求也为重大工程结构健康监测系统的研究、开发与应用提供了广阔的平台和前所未有的机遇。

2 智能传感器

2.1 光纤 Bragg 光栅传感器

Hill 于 1978 年制作了第一根光纤光栅(OF-BG)^[1],但直到 1989 年 Meltz 才真正推动了光纤光栅

* 中国工程院院士。
国家自然科学基金重大国际合作研究项目和国家“863”计划项目资助。
本文于 2004 年 11 月 3 日收到。

的发展^[2]。自此之后,人们逐渐认识到光纤光栅传感器的优点,并在土木工程中得到广泛应用^[3-8]。

由于土木工程结构长期健康监测的需求,自1999年光纤光栅传感器在我国得到了广泛的研究和应用。由于裸光纤光栅无法适应土木工程结构的粗放式施工要求,光纤光栅传感器封装工艺成为土木工程结构光纤光栅应用的关键问题。2000年以来,作者领导的课题组系统地研制开发了管式和片式封装光纤光栅传感器,并已进入工程应用和形成定型产品^[9]。大量的试验和理论分析表明,封装后的光纤光栅传感器的应变测试分辨率可以达到 $1-2\mu\epsilon$,温度测试分辨率可以达到 0.1°C ^[10]。李冀龙等^[11]还进一步研究了光纤光栅传感界面的影响以及界面应变传递误差的修正方法。

2.2 纤维增强聚合物-光纤光栅筋及其应变传感器

玻璃纤维加强塑料(GFRP)和碳纤维加强塑料(CFRP)具有很好的力学性能,直到破坏其应力应变关系均是线性的^[12]。纤维加强塑料(FRP)制作成筋(简称纤维筋)的弹性模量是钢筋的25%—70%,因此,纤维筋完全可以像钢筋那样用于混凝土结构中;此外,将光纤光栅应变传感器埋设在FRP筋中形成FRP-OFBG复合筋后,纤维筋对光纤光栅传感器可以起到很好的保护作用^[13]。FRP-OFBG复合筋(或简称FRP-OFBG筋)既可以作为受力筋,同时具有感知功能,成为具有自感知特性的纤维筋。作者领导的课题组已经研制出可以规模化生产的FRP-OFBG筋^[13]。通过试验,我们获得了在FRP筋上布设的引伸计应变读数和埋设在FRP中光纤光栅的波长变化量。结果表明,采用FRP封装光纤光栅应变传感器具有很好的传感特性。

2.3 压电薄膜传感器

监测结构的裂纹萌生与扩展是结构损伤定位和安全评定的最直接、有效的方法,因此,裂纹萌生和扩展的监测是健康监测领域的重要研究课题。作为一种感知聚合物材料,压电薄膜(PVDF)具有大变形能力、与基体良好的相容性、面监测、自适应复杂的结构形状、灵敏度高、响应快($>105\text{ Hz}$)等优点。具典淑等^[14]研究了PVDF的应变感知特性及其监测土木工程结构裂纹的有效性。试验结果表明,结构的应变变化将导致PVDF的电压线性变化,PVDF可以用作应变传感器,其灵敏系数可达 $1\text{ mV}/\mu\epsilon$;此外,PVDF覆盖的面裂纹萌生将使PVDF产生脉冲电压,由此信号可以判断结构的裂纹萌生。最近,PVDF已

经成为土木工程领域一类性能优良的监测传感器。

2.4 形状记忆合金传感器

形状记忆合金(SMA)是一种同时具有自感知、驱动和耗能特性的多功能材料,利用SMA的多功能特性可以实现土木工程结构的一些智能特性。Li等^[15]提出了具有自感知特性的SMA智能阻尼器和具有损伤自监测和自修复特性的智能土木工程结构,并试验研究了SMA的自感知特性、耗能特性和驱动特性。试验结果表明,SMA的电阻与其应变之间的关系是近似线性的,因此,SMA具有良好的感知特性;SMA在受限恢复时,可以产生很大的恢复力,因此,可以用于混凝土结构的损伤修复。

2.5 疲劳寿命丝(箔)传感器

疲劳效应是影响重大工程结构健康的主要因素之一。至今,承受变幅交变荷载的结构寿命预测仍是有待解决的难题。虽然一些理论,如结构累积损伤理论已经有一些比较成熟的方法用于疲劳寿命估计,但因缺乏可以信赖的实测数据(如疲劳载荷谱等)而难以用到实际结构中。

美国20世纪60—70年代提出了用类似于电阻应变片的简单元件来测试疲劳损伤的概念和方法^[16]。国内从1984年开始,在陶宝祺的领导下,南京航空航天大学、第629研究所、上海有色金属研究所、第702研究所等单位大力合作,经过8年的努力,研制出了疲劳寿命计^[17]。随后,南京航空航天大学的胡明敏等人对疲劳寿命计的性能进行了深入的研究,得到了最大电阻变化率6.3%、 $1800\mu\epsilon$ 下疲劳寿命大于106次、电阻变化率大于0.5%后离散度小于5%等的高性能疲劳寿命计,并研制了旨在提高疲劳敏感性的应变倍增器,为疲劳寿命计的实用化研究打下了基础^[18]。应用疲劳寿命传感器,作者领导的课题组建立了一套疲劳损伤监测与评定系统,并将其用于钢质导管架平台结构的疲劳损伤监测^[19]。

3 智能混凝土与碳纤维筋

3.1 碳纤维混凝土

美国Chung及其课题组首先发现了碳纤维水泥浆具有压敏特性,由此诞生了碳纤维智能混凝土^[20]。在上述工作的基础上,李卓球^[21]发现了在弹性范围内碳纤维混凝土的电阻是可逆的,而在弹塑性范围内或开裂后,其电阻是不可逆的^[22]。因此,根据碳纤维混凝土的电阻变化规律就可以预测其自身的损伤状况。近年来,碳纤维混凝土的制备

工艺、碳纤维表面处理技术、碳纤维混凝土的配合比及其压敏特性等得到了广泛研究^[23-25]。

最近,作者及其课题组提出并研究了碳纤维混凝土标准应变传感器。该应变传感器为 70mm × 50mm × 50mm 的棱柱体,沿其受力方向分别埋设 4 个电极,采用 4 电极法测量碳纤维混凝土的压敏特性。试验结果表明,碳纤维混凝土标准应变传感器的电阻变化率可以达到 30% 左右。

3.2 纳米混凝土

纳米材料因其独特的功能特性已经成为材料领域的热点研究方向。Li 等^[24]提出了在混凝土或砂浆中添加纳米 SiO₂、纳米 Fe₂O₃ 和纳米 TiO₂ 以形成纳米混凝土。由于纳米材料比表面积大、活性高,因此特别容易聚团而不能很好地在混凝土中分散。Li 等^[25]等研究了纳米料掺量分别为 3%、5% 和 10% (水泥重量)的纳米混凝土力学性能和感知功能及其微观结构。

试验结果表明,纳米材料可以有效增加砂浆的抗压和抗折强度;纳米砂浆的电阻随应变的增加而线性降低;对于添加纳米 Fe₂O₃ 和纳米 TiO₂ 的砂浆,纳米材料掺量越多,其电阻变化率越大,最大可以达到 60% 左右。因此,纳米砂浆具有良好的自感知特性,也可用作标准的应变传感器。

3.3 碳纤维筋

由于碳纤维筋具有良好的力学性能和耐锈蚀特性,碳纤维筋已经成为在腐蚀环境中服役的钢筋混凝土结构中钢筋的替代品^[26,27]。此外,碳纤维筋还具有自感知特性,即其电阻随应变的变化而变化,因此,碳纤维筋混凝土结构是具有自感知特性和良好耐久性的智能混凝土结构^[28]。

4 无线传感器网络

近年来,微电子机械系统 (micro electro-mechanical system, MEMS)、无线通信和数字电路技术的进步促进了尺寸较小并能在短距离通信的低造价、低能耗、多功能的无线传感器的发展^[29,30]。无线传感器由一个检测单元、处理单元、无线收发单元和电源组成。Kahn 等对加州 Berkeley 大学研究的所谓“智能灰尘”无线传感器在传感器尺寸和节能方面都进行了探索^[31],加州洛杉矶大学研制的无线传感器网络 (wireless integrated network Sensor, WINS)^[32]已经用于军事和工业领域。针对土木工程结构健康监测应用,Stanford 大学的 Lynch 和 Law 等提出了一种无线组块监测系统 (wireless modular monitoring systems,

WiMMS)^[33]。作者领导的课题组近期也研制开发出了适用于土木工程结构健康监测的无线加速度传感器网络^[34]。

4.1 用于结构健康监测的无线传感器局域网

欧进萍和李宏伟(2003)以及李宏伟等(2003)研究开发了一种用于海洋平台和其他土木工程结构健康监测的无线传感器局域网 (wireless sensor local area network, WSLAN)^[35]。该网络由两个子系统组成:一个是由无线节点和基站组成的本地无线采集系统,另一个是由计算机组成的远程控制系统。采用无线局域网协议和设备,通过无线接入点 (wireless access points, WAPs)将上述两个子系统连接起来。在实际应用中,本地无线采集系统将安装在远离中心海洋平台的各个独立的卫星平台上,中心海洋平台管理和监测 31 个独立的卫星平台,它能够通过基于 IP 协议的无线网络识别和控制各个子监测系统。

利用 WSLAN 测得结构的动力响应并将数据传给现场服务器,运行于现场服务器的软件将存储和分析所有需要传输的数据,从而大大减少传输数据量,以避免数据传输‘瓶颈’问题。远程监测中心通过无线局域网从各个本地采集系统获得数据,通过数据分析对结构的运行状态进行评价并将结果进行实时显示。

4.2 无线传感器局域网在结构模型振动台试验中的应用

根据综合分析,我们在实验室试验中采用了加州 Berkeley 大学研究开发的 MICA 系列无线传感器组成了一个无线传感器网络。该系列产品是加州 Berkeley 大学研发、美国 Cross Bow 公司生产的第二代无线传感器,目前世界上已有几百个研发组在利用这款产品进行着各种不同的研究和应用。该无线传感器集成有六种类型的传感器,包括光、声、温度、加速度、磁和发声(蜂鸣)传感器等。

无线传感器中的加速度传感器 ADXL202 是由美国模拟器件 (ADI)公司生产的集成式加速度传感器。它是将敏感器件与集成电路集成在同一芯片上的新一代加速度传感器,是一种基于多晶硅表面微加工技术的加速度电容传感器,可输出数字信号,其脉宽占空比与两根传感轴各自所感受到的加速度成正比。这些信号可直接传输给微处理器,而不需 A/D 转换或附加其他电路。

我们应用无线传感器局域网在实验室进行了两层结构模型的小振动台试验。试验中将三个无线加速度传感器分别布置在模型结构的第一、二层和振

动台面上,与该振动台和模型结构配置的有线加速度传感器位置相对应。试验中我们采用的无线传感器网络系统由3个无线传感器节点、一个基站和一台台式计算机构成。采集的数据以无线方式传输到基站,基站通过数据线与一台台式计算机的串口进行连接,进行检测数据的输入、存储和显示。振动台是 Quanser Consulting 公司制造的,地震输入为 El Centro 地震波,无线加速度传感器采集的模型结构加速度反应时程与有线加速度传感器采集加速度反应时程基本吻合。

4.3 深圳地王大厦环境噪声和加速度响应的无线传感器网络监测

欧进萍和李宏伟(2004)等应用无线传感器网络技术,针对超高层建筑结构的动态测试开发了一种

新型的测试系统,并将此系统应用到了深圳地王大厦的环境噪声和加速度响应测试。深圳地王大厦主体结构高 309.95m,桅杆顶高 383.95m;地面以上 69 层,加上设备层等,实际总共 81 层。在现场测试中,将无线传感器沿深圳地王大厦竖向布置在结构的外表面,测得了环境噪声沿建筑高度的分布以及结构的风致振动加速度响应。

5 工程应用

5.1 结构健康监测系统的基本框架

土木工程结构的智能健康监测系统至少包括如图 1 所示的四个功能模块。长期性、实时性和自动监测是结构健康监测系统的三个基本特征。

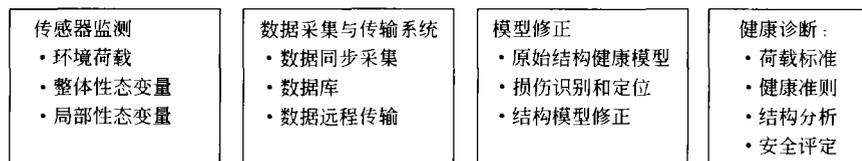


图 1 结构健康监测系统的基本功能模块

5.2 工程应用

(1) 海洋平台结构

渤海是我国海洋石油开发的主要区域之一。由于该区域位于重冰区,此区域的海洋平台结构遭受严重的冰激振动。20 世纪 60 和 70 年代,该区域曾有两座海洋平台在海冰作用下发生倒塌。80 年代以来,中国海洋石油总公司在平台结构上安装了一些监测设备,以监测冰荷载、冰压力和海洋平台结构的冰激振动响应。结合上述监测设备和监测数据,欧进萍等于 2001 年研究建立了渤海 JZ20-2MUQ 钢质导管架式海洋平台结构的在线健康监测系统,在线监测系统包括:环境和结构响应监测子系统、安全评定子系统和数据库子系统。

在国家“863”计划资助下,欧进萍及其课题组已经为渤海 CB32A 导管架式海洋平台建立了另一个健康监测系统。CB32A 导管架式海洋平台建于 2003 年,导管架的高度为 24.7m,设计水深为 18.2m。该健康监测系统包括 259 个光纤光栅传感器、178 个 PVDF 传感器、56 个疲劳寿命传感器、16 个加速度传感器和环境监测子系统,还包括 27 000m 信号传输线。

(2) 水利工程结构

1998 年以来,光纤传感器及其健康监测系统开始用于三峡的一些水利工程结构。蔡德所于 1998 年应用强度型光纤传感器研究开发了一套混凝土裂缝监测系统,并且分别应用到了三峡的一座临时船闸和古洞口面板堆石坝坝面裂缝的监测。1998 年 6 月 16 日和 7 月 30 日,两次监测结果均显示 2 路光纤距光时域反射器 71.5m 处出现 0.2mm 长的裂缝,人员到现场检测也证实了这一监测结果。

(3) 大跨度桥梁

目前,我国许多大跨度桥梁正在建设或规划建设。由于桥梁结构一般需要进行施工监控和成桥试验,将施工监控和成桥试验的临时传感器用于桥梁结构建成一段时间内的短期监测系统是我国许多大型桥梁常采用的方法。如主跨为 880m 的广东虎门大桥和主跨为 590m 的上海徐浦大桥都利用施工监控和成桥试验安装的传感器进行了运行期间短期的监测。

欧进萍及其课题组于 2001 年在两个钢筋混凝土桥上安装了光纤光栅应变和温度传感器以监测其施工阶段和服役期间桥梁结构的受力性能^[36]。课题组还建立了山东滨州黄河公路大桥智能健康监测系统,该系统能够自动地在线运行,并可以通过 In-

Internet 网络访问该桥的数据库,也可以通过 Internet 网操作和控制该系统的参数。

目前,我国正在规划建设中的大跨度桥梁大约有 10 座,其中某些重要的桥梁正计划安装智能健康监测系统,如主跨 648m 的南京长江三桥、主跨 1088m 的苏通大桥、主跨 1490m 的润扬大桥等。

(4) 大跨空间结构

深圳市民大厦的屋顶为长 486m、宽 156m 的网壳结构,跨中树状桁架支撑在塔上。瞿伟廉等在该结构屋顶部分安装了一套健康监测系统,该系统由传感器子系统和结构分析子系统组成,其中传感器子系统测量屋顶部分的风压和反应,结构分析子系统计算结构的反应并进行安全评定。传感器子系统包括光纤传感器、应变片、风速仪、风压计和加速度传感器,其中光纤传感器和应变片测量结构的应变反应,加速度传感器测量结构的位移和加速度反应,风速仪和风压计测量屋顶的风压分布。结构分析子系统在监测得到的结构反应的基础上,可以进行屋顶结构的损伤识别、模型修正和安全评定。所有监

测的信号均存储在数据库中,数据库通过局网和 Internet 网实现远程传输。

6 结 论

土木工程结构的智能监测系统包括智能传感器、数据处理、损伤识别和定位、健康诊断和安全评定及其集成系统等多个方面,具有明显的多学科交叉特征,需要多学科研究人员和工程技术人员的紧密合作。结构健康监测系统需要进一步重点研究的课题有:(1)传感器的耐久性和耐久性监测传感器研究;(2)无线传感器网络;(3)结构健康监测系统集成与工程应用;(4)结构健康监测系统标准验证模型;(5)结构健康监测设计指南与标准的结构健康监测系统。

我国正处于土木工程与基础设施建设的高峰时期,因此,我国已经、正在和计划建造的重大土木工程结构为健康监测系统的研究、发展与实施提供了广阔的空间和美好的前景。

参考文献较多,篇幅所限,略。

RESEARCH AND PRACTICE OF SMART SENSOR NETWORKS AND HEALTH MONITORING SYSTEMS FOR CIVIL INFRASTRUCTURES IN MAINLAND CHINA

Ou Jinping

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090)

Abstract In this paper, some recent advances on research, development and implementation of smart sensor networks and health monitoring systems for civil infrastructures in mainland China, especially in Harbin Institute of Technology (HIT), P. R. China, are summarized. The main contents include smart sensors such as optical fiber Bragg grating (OFBG) and polyvinylidene fluoride (PVDF) sensors, fatigue life gauges, shape memory alloy (SMA), self-sensing mortar and carbon fiber reinforced polymer (CFRP), wireless sensor networks and their integrated systems and implementations in practical infrastructures such as offshore platform structures, hydraulic engineering structures, large span bridges and large space structures. Finally, the relative research projects supported by the national foundation agencies of China are briefly introduced and some issues to be further researched are pointed out.

Key words civil infrastructure, smart sensor, wireless sensor network, health monitoring system, practical implementation