

结构健康监测

李宏男 等著

大连理工大学出版社
大连理工大学电子音像出版社

结构健康监测

Structural Health Monitoring

李宏男 等著

大连理工大学出版社
大连理工大学电子音像出版社

内 容 提 要

结构健康监测与损伤诊断是近年来土木工程及相关领域的热门研究课题,本书是根据作者们近年来在结构健康监测和损伤诊断方面的研究成果编辑而成,内容涉及有关的国内外研究进展、光纤光栅温度和应变监测、GPS 监测、压电智能传感器、动态参数识别、小波和神经网络损伤识别、载荷识别与模拟等内容。

本书可供土木建筑、工程力学和有关方面的科技人员及研究生参考。

结构健康监测

李宏男 等著

责任编辑:王佳玉 马英敏 责任校对:陈元素

封面设计:季 强

出版发行:大连理工大学出版社

大连理工大学电子音像出版社

地址:大连市甘井子区凌工路2号

邮编:116024

电话:0411-84708842(发行),81707464(技术支持)

传真:0411-84701466

邮购:0411-84707961

E-mail: dzcb@dutp. cn

http: //www. dutp. cn

印 制:大连海事大学印刷厂

幅面尺寸:140mm×203mm

印 张:9.75

字 数:229千字

出版时间:2005年1月第1版

印制时间:2005年1月第1次印制

ISBN 7-900645-03-9

定 价:38.00元

前 言

目前，世界各国土木工程事故频繁发生，如桥梁的突然折断、房屋骤然倒塌等，造成了重大的人员伤亡和财产损失，已经引起人们对于重大工程安全性的关心和重视。另外，一些既有桥梁和基础设施经过多年的使用，他们的安全性能如何，是否对人民的生命财产构成威胁，是亟待回答的问题。近些年，地震、洪水、暴风等自然灾害也对建筑物和结构造成不同程度的损伤；还有一些人为的爆炸等破坏性行为，如美国世贸大楼倒塌对周围建筑物的影响等。这些问题越来越引起人们的密切关注，在灾难到来之前对其预测并进行评估以趋利避害，成为目前的焦点。

因此，对结构性能进行监测和诊断，及时地发现结构的损伤，对可能出现的灾害提前预警，评估其安全性已经成为未来工程的必然要求，也是土木工程学科发展的一个重要领域。

结构安全性评估是在健康监测和诊断的基础上进行的，而健康诊断对于已经安装了监测系统的工程，只是监测系统的一部分。对于未安装监测系统的工程，仅需要在结构的各部分临时布设传感器进行测量，其余过程与监测系统基本相同。一般认为，健康监测系统应包括下列几部分：

1. 传感器系统，包括感知元件的选择和传感器网络在结构中的布置方案。
2. 数据采集和分析系统，一般由强大的计算机系统组成。
3. 监控中心，能够及时预警结构的异常行为。
4. 实现诊断功能的各种软硬件，包括结构中损伤位置、程度类型识别的最佳判据。

传感器监测的实时信号通过信号采集装置送到监控中心，进行处理和判断，从而对结构的健康状态进行评估，若出现异常，由监控中心发出预警信号，并由故障诊断模块分析查明异常原因，以便系统安全可靠地运行。

本书是根据作者们近年来在结构健康监测和损伤诊断方面的研究成果编辑而成，内容涉及有关的国内外研究进展、光纤光栅温度和应变监测、GPS 监测、压电智能传感器、动态参数识别、小波和神经网络损伤识别、载荷识别与模拟等内容。

书中部分成果得到了国家自然科学基金（50408031）、辽宁省科学技术基金重点项目（20042149）和面上项目（20032120）的资助，在此表示衷心感谢。

书中大部分内容是作者们近两年来公开发表过的研究成果，少部分内容是未公开发表的，很不完善，可能存在错误，敬请读者不吝赐教。

李宏男
2004 年 12 月于大连

目 录

- (1) 土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评
..... 李宏男, 李东升 (1)
- (2) 光纤健康监测方法在土木工程中的研究与应用进展
..... 李宏男, 李东升, 赵柏东 (24)
- (3) Advances of Structural Health Monitoring by Fiber Bragg
Grating Sensor
..... Hongnan Li, Liang Ren, Dongsheng Li (44)
- (4) GPS 在土木工程结构健康监测中的研究与应用进展
..... 李宏男, 伊廷华, 王国新 (81)
- (5) 压电智能传感结构在土木工程中的研究和应用
..... 李宏男, 赵晓燕 (105)
- (6) 小波分析在土木工程领域中的应用
..... 李宏男, 孙鸿敏 (125)
- (7) 完全埋入式封装的光纤光栅应变传递分析
..... 李东升, 李宏男, 王国新, 任亮 (140)
- (8) 光纤光栅传感器监测混凝土固化期收缩应变的实验研究 ...
..... 孙丽, 李宏男, 任亮 (156)
- (9) 光纤光栅温度传感器在地源热泵温度监测中的应用
..... 孙丽, 任亮, 李宏男, 李东升, 端木琳 (172)
- (10) FBG 应变传感器的动态特性及其应用范围
..... 孙丽, 李宏男, 朱彤, 任亮, 董汝博 (181)
- (11) Experiments on an offshore platform model by FBG sensors
..... Dongsheng Li, Hongnan Li, Liang Ren, Li Sun, Jing Zhou (199)

-
-
- (12) 基于小波分析和神经网络的框架结构损伤诊断方法
..... 李宏男, 孙鸿敏 (216)
- (13) 基于小波变换的结构模态参数识别
..... 伊廷华, 李宏男, 王国新 (246)
- (14) 采用 GPS 与全站仪对大跨斜拉桥进行变形监测
..... 李宏男, 伊廷华, 伊晓东, 王国新 (261)
- (15) 一种有效的结构动态参数识别方法
..... 刘丰年, 李宏男, 刘明 (274)
- (16) 砌体结构损伤检测的脉动法
..... 李宏男, 刘宁, 肖诗云 (282)
- (17) 广义小量分解法在载荷识别中的应用
..... 李东升, 李宏男, 郭杏林 (290)

(1)土木工程结构安全性评估、健康监测及诊断述评

李宏男 李东升

摘 要:阐述了土木工程结构的安全性评估、健康监测及诊断的必要性和迫切性,系统地论述了结构健康监测和诊断的概念、理论和方法,重点讨论了传感器的优化布置、损伤识别等健康监测中的关键问题,介绍了光纤等新型传感器的应用情况,最后指出了值得进一步研究的问题。

关键词:土木工程结构;安全性评估;健康监测;损伤诊断

1 前 言

目前我国土木工程事故频繁发生,如桥梁的突然折断、房屋骤然倒塌等,造成了重大的人员伤亡和财产损失,已经引起人们对于重大工程安全性的关心和重视。另外,我国有一大部分桥梁和基础设施都是在五六十年代建造的,经过这么多年的使用,他们的安全性能如何,是否对人民的生命财产构成威胁,这些都是亟待回答的问题。近些年,地震、洪水、暴风等自然灾害也对这些建筑物和结构造成不同程度的损伤,还有一些人为的爆炸等破坏性行为,如美国世贸大楼倒塌对周围建筑物的影响。这些越来越引起人们的密切关注,如果能在灾难到来之前对其预测,进行评估以趋利避害成为目前研究的焦点。就如 1994 年 1 月 17 日美国加州 Northridge 和 1995 年日本神户(Kobe)的大地震后,一些建筑物在遭受主震后,并未立即倒塌,但结构却已受到严重损伤而未能及时发现,在后来的余震中倒塌了^[1]。

因此,对结构性能进行监测和诊断,及时地发现结构的损伤,

对可能出现的灾害提前预警,评估其安全性已经成为未来工程的必然要求,也是土木工程学科发展的一个重要领域。

2 几个基本术语

安全性评估。通过各种可能的、结构允许的测试手段,测试其当前的工作状态,并与其临界失效状态加以比较,评价其安全等级。对于不同的结构,其重要程度不同,安全等级也应该有所差别。安全性评估与可靠性不同,可靠性为一种概率,为一种可能性,而安全性评估旨在给出确定的安全等级。

健康。在土木工程中,是指结构或者系统能够实现其预期功能的一种状态。

健康监测。所有的结构,无论自然的还是人工的,在其生命周期内都会累积损伤。健康监测是指利用现场的、无损的监测方式获得结构内部信息,分析包括结构反应在内的结构各种特征,以便了解结构因损伤或者退化而造成的改变^[2]。人们关心的是,结构损伤到什么程度才能危及其安全性能。因此,健康监测的一个目标就是在这个临界点到来之前提早检测出结构的损伤^[3],这是个实时在线监测过程。

健康诊断。是指结构在受到自然的(如地震、强风等)、人为的破坏之后,或者经过长时期使用后,通过测定其关键性能指标,检查其是否受到损伤。如何受到损伤,损伤位置,程度如何,可否继续使用及其剩余寿命等。损伤诊断可以从很多层面上来理解,但最基本的目标是简单的确认结构是否存在损伤。这个问题的统计模式识别模型一般是收集损伤前后系统的特征,比较新的模式是否偏离原始模式。实际上,问题很少如此简单,工作环境和条件的变化影响测得的信号。在此情况下,正常的工作范围很广,不能简单地因为环境的变化而认为有损伤。一般有两种方式来考察环境

的变化,一种是可以测出分别与环境和工作条件相关的量,参数化正常的工作条件。另一种方式是采用 Hoon Sohn 等提出的数据正规化技术,如搜寻表技术和自回归神经网络技术,用于区分环境工作条件变化和损伤的影响^[4]。

3 健康监测系统及其组成

结构安全性评估是基于健康监测和诊断基础上的。而健康诊断对于已经安装了监测系统的工程,只是监测系统的一部分。对于未安装监测系统的工程,仅需要在结构的各部分临时布设传感器进行测量,其余过程与监测系统基本相同。因此,下面主要介绍健康监测系统。一般认为健康监测系统应包括下列几部分^[5]:

传感器系统,包括感知元件的选择和传感器网络在结构中的布置方案。

数据采集和分析系统,一般由强大的计算机系统组成。

监控中心,能够及时预警结构的异常行为。

实现诊断功能的各种软硬件,包括结构中损伤位置、程度、类型识别的最佳判据。

传感器监测的实时信号通过信号采集装置送到监控中心,进行处理和判断,从而对结构的健康状态进行评估,若出现异常,由监控中心发出预警信号,并由故障诊断模块分析查明异常原因,以便系统安全可靠地运行。

4 传感器系统

4.1 传感器简介

传统振动测量采用的传感器有压电式力传感器、加速度传感器、阻抗传感器、应变片等,它们已广泛应用各类工程结构的实测中,这里不再赘述。

下面重点介绍新型的智能传感器,包括光纤传感器、压电材料、磁致伸缩材料制成的传感器等^[6-7]。其中光纤传感器由于质量轻、信息量大,可测量多种信号,无电磁干扰,易于分布埋入结构和构成网络等众多优点,日益受到各行业的关注。光纤等新型智能传感器在结构的健康监测和诊断中必将会发挥非常重要的作用。

光纤传感器按照是否对所测量的信号进行调制可分为:非本征型和本征型。非本征光纤不与结构一起变形,只起信号传输作用,由另外的装置对载波光进行强度调制获取信号。本征型光纤传感器不仅传输信号,也起传感作用,即通过光纤自身的光弹效应、双折射效应、磁光法拉第效应等把待测量调制为光的相位、偏振或者波长的变化。

Bragg(或者 FBG, Fiber Bragg Grating)光纤传感器^[8-13]的检测测量为波长变化,不受光强的影响,对环境干扰不敏感;输出线性范围宽,在 $\pm 10\ 000\ \mu\text{e}$ 内波长移动与应变有着良好的线性关系;测量动态范围只受光源谱宽限制;光栅长度只有几毫米,测量的分辨率高;易于实现波分多路复用,可实现多参数测量等众多优点,因而在实际中应用最多。通常用于测量应变、位移和温度。CF-BG 光纤传感器,用于测量位移^[14]。日本隧道施工中采用光纤传感器测量大体积混凝土养护过程中热量释放可能导致的温度应力大小和裂纹的产生。中国也在三峡工程的钢索中预制光纤用于检测钢索的应力和变形^[5]。Juan 等通过实验,研究了光纤传感器在实际结构中的安装问题^[15],将光纤传感器和普通应变片和位移计安装到钢梁上,用于比较安装方法及结构与光纤的固定界面的影响。尽管光纤已有了部分应用,但光纤在实际使用中还有一些复杂的具体问题,如光纤的埋入技术(包括强度、界面、工艺、粘接剂等),探测量(应力、应变等)与温度影响的分离等还需要解决,但无疑光纤在土木工程领域会有广阔的发展前景。

Fabry-Parot 光纤传感器也有部分应用,如:EFPI(Extrinsic Fabry-Perot Interferometers)光纤传感器用于测量应变^[16]。ES-PI(电子斑点模式干涉仪)^[17]和数字剪切干涉仪都是使用于无损检测的光学干涉技术。但由于 ESPI 的隔振要求极为严格,目前只能用在实验室内。Dirk 等探讨了其隔振技术和便携的可能性。

另外还有一些检测特殊量的光纤传感器,如光纤 pH 传感器^[18]用于检测混凝土由于各种化学变化,如硫酸盐的侵蚀,各种酸和基础的作用,酸化过程,钢筋腐蚀等造成的退化过程。采用耗散波谱技术布设传感器,去除 PCS 光纤的包层,换之以搀杂有 pH 敏感剂的甲奈包层。由石钨卤源发出的未经极化的白光射入单色器,在可见光波长范围内扫描,单色器的出射光进入光纤,在光纤末端测量吸收谱,因为 pH 的变化能够在吸收谱中体现出来。此法可用于早期测量结构的特定区域受环境的影响加速老化的迹象。Alexander 等将磁致伸缩传感器(MR 传感器)^[19]与电脑相连用于检测多层铝结构的裂纹,LFEC(低频涡流探针)通过使用磁致伸缩传感器可探测到 5MHz 直流。选择合适规格的电子元件,可使他们与标准的电脑接头功率和阻抗匹配,这样不必使用那些外部电源、放大器和调制器等昂贵的设备。进而开发了相应的软件 CANDETECT,在实际的铝结构上证明了该软件的内在敏感性和实用性。Glenn 等将磁致伸缩传感器固定在结构上,用于进行长期监测^[20]。

还有一些其它特殊类型传感器。如损伤指数传感器^[21],该传感器可以无线监测峰值应变、峰值位移、峰值加速度,吸收能量和累积塑性变形。记忆损伤指数的原理在于传感部分的纯塑性伸长导致电阻、电感、电容的变化。无线温度传感器^[22],NASA 用于无线监测航空器中热保护系统的温度,无限传感器集成在导热保护系统的射频识别芯片中,可通过手持扫描仪或者便携设备读出传

感器中的温度或者其他感兴趣的量。声光传感器^[23],一种独特的二维声光检测器,可直接将超声转化为可视图像,就如荧光屏可将X射线转化为可视图像一样,清晰度高,可以制造为大面积使用。

4.2 传感器布置方法

由于经济和结构运行状态等方面的原因,在所有自由度上安置传感器是不可能也是不现实的,因此,就出现了在 n 个自由度上如何布置 $m(m < n)$ 个传感器的优化问题。许多学者从不同角度提出了一些方法,崔飞等^[24]在桥梁中进行了卓有成效的研究,刘福强等^[25]给出了传感器优化布置的数学模型。目前采用的方法有:

模态动能法(MKE)。人们首先想到的是通过观察挑选那些振幅较大的点,或者模态动能较大的点(MKE方法)^[26],其缺点为依赖于有限元网格划分的大小。根据模态动能较大的原则,衍生了侧重点不同的许多方法,如:平均模态动能法(AMKE),计算所有待测模态的各可能测点的平均动能,选择其中较大者;特征向量乘积法(ECP),计算有限元分析的模态振型在可能测点的乘积,选择其中较大者。

有效独立法(EI法)。Kammer提出的有效独立法,是目前为止应用最广的一种方法^[27]。它从所有可能测点出发,利用复模态矩阵的幂等型,计算有效独立向量,按照对目标模态矩阵独立性排序,删除对其秩贡献最小的自由度,从而优化 Fisher 信息阵而使感兴趣的模态向量尽可能保持线性无关。

Guyan 模型缩减法。该方法也是一种较为常用的方法。它能较好地保留低阶模态,并不一定代表待测模态,O'Callahan^[28]和 Zhang^[29]基于上述限制分别提出改进缩减系统(IRS)和连续接近缩减方法(SAR)。

奇异值分解法。由 Park 和 Kim 提出,通过对待测模态矩阵

进行奇异值分解,评价 Fisher 信息阵,舍弃那些对信息阵的值无作用的测点。该方法不仅尽量使目标模态矩阵线性无关,而且提出了每一次迭代时舍弃测点的允许数目。

基于遗传算法(GA)的优化^[30-31]。采用可控性和客观性指数来获得所有控制模态的累积性能值,以这些指数为优化指标,以使控制器和结构之间有最大的能量传递而且根据控制律使剩余模态的影响最小。清华大学土木系^[24]在香港青马大桥的健康监测系统利用遗传算法寻找加速度传感器的最优布置,把其中测取的变形能作为遗传进化的适应值(Fitness),实际上是使测点远离各阵型结点。

Penny 等^[32]提出了评价各种传感器布置方法优劣的五条量化准则:模态保证准则 MAC(Modal Assurance Criterion),修正模态保证准则 ModMAC, SVD 比,模态所测动能, Fisher 信息阵的值。当然在传感器布置的最佳数量和鲁棒性、抗噪性等方面还有许多工作要做。

5 损伤检测

损伤检测基本上可以分为两大类:局部法和整体法^[2]。整体法试图评价整体结构的状态,而局部法则依靠成熟的无损检测技术对某个特定的结构部件进行检测,判断是否有损伤及损伤的程度。整体法和局部法在大型结构的损伤识别中结合使用效果较好,首先由整体法识别出损伤的大致位置,然后由局部法对该处的各部件进行具体的损伤检测。

5.1 整体检测方法

整体检测方法大致分为动力指纹分析法、模型修正与系统识别法、神经网络法和遗传算法。

5.1.1 动力指纹分析法或模式识别方法

依据原理,若结构发生损伤,其结构参数如质量和刚度会发生变化,从而引起相应的动力指纹发生变化。常用的动力指纹有:频率、振型、振型曲率、应变模态、频响函数、模态柔度矩阵、模态保证准则(MAC)和坐标模态保证准则(COMAC)等。按照此类方法,首先必须建立与动力指纹相应的结构健康和一系列先验预估的损伤对应的数据库,然后将发生损伤时的动力指纹与其比较,进而识别损伤。这类方法的缺点为敏感性不是很高,与所有潜在损伤情况相对应的数据库较难建立。有很多学者在此方面做了大量的工作,Monaco等采用频响函数作为指纹,将改变的频响函数作为一个有代表性的损伤指数^[33]。Ma等采用去除反射的频响函数(DTF)作为指纹,识别结构多点损伤^[34]。结构损伤改变去除反射的频响函数的相位,因而改变的去掉反射的频响函数可以作为一个有代表性的动力指纹或者损伤指数。Whittem等采用模态宏应变向量法作为指纹,理论表明模态宏应变向量作为损伤指数既准确又可靠,在损伤的部位或其附近非常敏感^[13]。清华大学提出了结构损伤识别的柔度法。Frank等采用 ODS 法将模态阵型和固有频率作为指纹,利用扫描式激光测震仪研究圆盘的动态特性(模态和固有频率)来确定缺陷^[35]。同时采用边界效应检测法(BED)处理 ODS 数据并解释因缺陷引起的边界效应和确定缺陷位置。Satoko 推导出拟牛顿法(Quasi-Newton Method)将刚度和质量作为指纹,用于识别结构在 earthquake 过后内部的不可见损伤^[36]。Xie 等利用小波分析算法^[37-38],提取能量分布作为损伤特征(指纹)。通过建立能量分布与损伤之间的关系,利用模式识别方法,来定位细微的损伤。避免了模态参数,如固有频率等对细微损伤的不敏感性,结果表明实际损伤位置与检测出的位置很接近。Gabe 等采用 ARMA 的系数作为指纹,依据 ARMA 能够自动完

成从数据收集到损伤监测的全过程的优点^[39],利用环境激励的数据,检测一个包含不同层次损伤的大型结构的损伤情况。通过环境激励测得的原始结构和损伤后结构的振动数据,计算 ARMA 的系数建立损伤指数。将得到的损伤指数按照分类算法组成特征向量,确定是否损伤以及损伤定位。Daniel 等将高频机械阻抗作为指纹,试验了基于高频机械阻抗技术的结构健康监视系统^[40]。其基本原理为对固定在结构表面的压电传感器施加高频激励(通常高于 30MHz),测量传感器的电流和电压而得到电阻,如果电阻发生变化,则结构变化,因而有损伤。采用仪器为 HP4194A 及他们自己开发的便携设备,通过两个实例(煤气管道和复合材料结构)证明了该方法的广泛使用性,高频机械阻抗实际上是结构的传递函数,对结构的微小损伤和表面缺陷很敏感。

5.1.2 横型修正与系统识别法

基本思想为通过动态试验测得的数据,如模态参数或者加速度时程数据来分析模型的刚度分布,然后将修正刚度后模型的反应所测数据比较,当两者基本吻合时,即认为此组参数为结构当前参数,根据模型刚度的变化来实现损伤的定位和损伤程度的评估。Allen 等提出顺序概率比实验方法(SPRT)^[41],用于监测如连接处有变化,测试结构是否有损伤。采用统计的方式识别,推导出结构时域响应的一个选定特征作为模型的预测。有两个基本假定:(1)模型能够预测特征,结构未受损伤;(2)模型不能够预测特征,结构已受损伤。在 SPRT 算法的原始公式中,特征被假定为高斯分布且设定了相应的阈值。但可能用于损伤的特征对分布的尾部敏感,而且其尾部不必满足高斯分布特征,此时通过 EVS(极值分布)模型化其尾部,可以设定 SPRT 算法的阈值而避免正常的假定。

5.1.3 神经网络法

神经网络以生物神经系统为基础,模拟人脑的功能。由许多处理单元(神经元)相互连接组成,按照一定的连接权获取信息的联系模式,根据一定的学习规则,实现网络的学习和关系映射。神经网络以其学习能力,非线性变换型和高度的并行运算能力,对新输入的泛化能力和对噪声的容错处理能力,对系统(尤其是非线性系统)的辨识等提供了一条非常有效的途径。在商业、金融、制造业、医学、通信、力学等领域得到越来越多的应用^[42-44]。高赞明等将神经网络分析方法用于香港汲水门大桥的健康监测中^[45]。Venkat 等采用小波分析和神经网络算法,通过将测得的原始结构和损伤后结构的振动数据比较,估计损伤发生的位置及程度^[46-47]。小波分析的优点是,它能在时域和频域内定位,可以提取突变发生的位置,而且因为模态形状变化的大小由损伤程度决定,它也可以预测结构的完整性。神经网络则通过一个映像小波分析中提取出的振动特征的函数来量化健康状态参数。William 等利用神经网络系统进行健康监测,采用一个压电传感器阵列模拟生物神经系统来测量结构的声发射和动应变^[48]。他们方法的优点在于将需要布设传感器的通道数由 N^2 减少到 $2N$ 个。当结构有瞬态损伤时,能够将传感器阵列的输出时间历程记录下来,然后通过组合逻辑准确地确定发生的位置。缺点在于没有神经网络或者回归技术难以抽取单个传感器的时间历程,而只能得到阵列的某行或者某列的加和值,其应用范围为大型复杂结构的裂纹和层解检测、动应变测量碰撞监测和损伤定位。Mannur 等采用压电陶瓷纤维和碳纳米管材料传感器的人工神经网络系统进行健康监测^[49]。压电陶瓷纤维的好处在于频带宽和相对的低成本,缺点在于产生的压电陶瓷电荷非常小。碳纳米管能够在在大应变处通过电化学过程产生电压,而局限在于产生速度慢,必须使用聚合电解质用于离子交换。