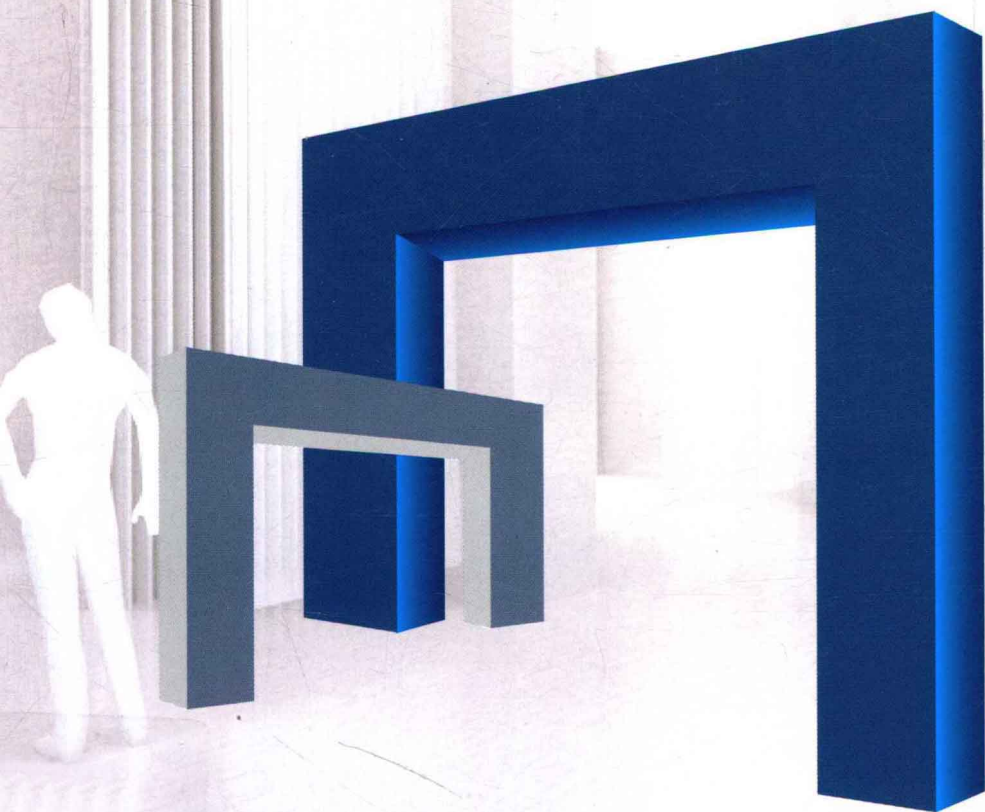




中国科学院教材建设专家委员会立项项目
土木工程科学研究暨研究生教学丛书

结构健康监测导论

姜绍飞 编著



科学出版社

中国科学院教材建设专家委员会立项项目
土木工程科学研究暨研究生教学丛书

结构健康监测导论

姜绍飞 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

土木工程结构健康监测是目前国内外研究的热点。本书是结构健康监测领域近些年的最新成果总结,书中全面、系统地论述了结构健康监测的概念、基本理论及其在土木工程实践方面的研究成果。

本书重点介绍了高层建筑、体育场馆、桥梁、堤坝、水库、地铁和隧道等重要土木工程结构的健康状态监测与安全评价,且在每章附有内容提要 and 问答题,有利于读者对内容的理解和整体把握。

本书可作为高等院校土木工程、工程力学专业高年级本科生及研究生的参考用书,亦可供铁道、水利、机械、航空、航天等领域的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构健康监测导论 / 姜绍飞编著. —北京:科学出版社,2013

(中国科学院教材建设专家委员会立项项目·土木工程科学研究暨研究生教学丛书)

ISBN 978-7-03-036268-1

I. ①结… II. ①姜… III. ①建筑结构-监测 IV. ①TU311.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 308631 号

责任编辑:祝元志 / 责任校对:耿 耘

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年4月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013年4月第一次印刷 印张:20

字数:400 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62135763-8228

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

对一些大型结构进行健康监测与安全评估,及时发现安全隐患,建立安全预警系统是近年来国内外学术界和工程界十分关注的热点问题。为了能够较为快速准确地对大型复杂结构进行健康监测与诊断,在目前传感器技术、测量技术以及信息技术研究飞速发展的基础上,结构健康监测系统已经进入了以知识处理为核心,数据处理、信号处理与知识处理相融合的智能发展阶段。但需要指出的是,由于实际监测受到外部环境干扰、仪器自身测量误差等各种因素影响,采集到的数据往往包含一定程度的噪声,增加了结构损伤识别与安全评价的难度;另一方面,对长期不间断监测产生的海量数据的分析处理技术也不完善,使得这些数据经常得不到及时有效地分析处理,最终成为数据垃圾。因此,如何开发有效的大型土木工程结构健康监测系统,以及如何合理有效地利用这些来自健康监测系统、含有噪声的海量数据,进而进行信号分析、特征参数识别、结构损伤识别与安全评估成为当前工程管理部门迫切需要解决的难题。

基于上述问题,同时也使从事相关研究的工作人员能够找到系统介绍结构健康监测理论的学习资料,以便更快地入门并深入展开研究,本书作者对结构健康监测理论与智能信息处理及其在工程应用方面的最新研究成果进行了归纳与总结,力图展现结构健康监测系统的概念与组成原理及其发展概况、传感器开发及布设技术、数据获取与传输技术、结构健康监测/检测技术、现代信号处理技术及应用、光纤传感监测技术、压电智能传感检测技术、GPS 检测技术、神经网络与数据融合技术、土木工程结构健康监测系统的设计标准与工程应用实例等方面的最新研究成果。本书重点介绍了结构健康监测的基本概念、监测系统的实现和如何运用智能信息处理技术进行结构健康状态评估,将工程科学理论与新兴的传感测试技术、现代智能信息处理技术有机地结合,为专家评估系统做出合理评价奠定坚实的基础,从而为准确判断结构的健康性态提供可靠依据。这些成果可对高层建筑、体育场馆、桥梁、堤坝和隧道等重要土木工程结构的日常维护、管理与防灾减灾起到实时监控和预测、预报的作用,因而具有较为重要的理论指导意义和工程实用价值。

书中部分成果得到了国家自然科学基金(项目编号:50408033、50878057、51278127)、国家“十二五”科技支撑计划(项目编号:2012BAJ14B05)、高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号:20093514110005)、福建省杰出青年基金(项目编号:2009J06027)、教育部科学技术研究重点项目(项目编号:208064)、福建省闽江学者特聘教授奖励计划、福建省教育厅重点项目、福建省高等学校新世纪优秀人

才支持计划、辽宁省高等学校优秀人才支持计划的资助,在此表示衷心感谢!

作者诚挚感谢所有为本书做出贡献的师长和朋友:哈尔滨工业大学的钟善桐教授、东北大学的刘之洋教授和张翊教授一直关注本书的出版,并提出了许多建设性的意见;大连理工大学的长江学者李宏男教授、同济大学的长江学者李杰教授、中南大学的长江学者任伟新教授、哈尔滨工业大学的长江学者李惠教授和张素梅教授、清华大学的韩林海教授、华中科技大学的长江学者朱宏平教授、暨南大学的余岭教授、沈阳建筑大学的刘明教授和贾连光教授等给予作者许多建议、鼓励和帮助。特别感谢作者科研团队中的吴兆旗副研究员(负责修改第四章)、方圣恩副研究员(负责修改第二、三章)、沈圣博士(负责修改第一、六章),还有博士生付春、曾建仙、麻胜兰、曾兴贵,硕士生杨晓楠、张立柱、张帅、张春梅、徐云良、姚娟、吕啸斐、杜权、张永强、胡春明、杨博、苏莹、林志波、林杰、杨娜、杨海、梁成礼、董利强、韩哲东、傅大宝、林美金、翁柳青、吴思瑶、沈清华、林冬勇和肖力,他们参加了本书的有关研究工作和部分资料的整理,书中很多计算结果和图表出自他们之手。特别是作者在美国、中国香港和新加坡进行科研合作研究期间,得到了 B. F. Spencer 教授、高赞明教授、倪一清教授、C. G. Koh 教授、J. G. Wang 教授热情的关怀和悉心指导,他们提供了许多宝贵资料和建议,作者在此表示由衷的敬意和感激。最后,特别感谢福州大学房贞政教授、陈宝春教授、祁皓教授、张和秋书记以及该校土木工程学院和科技处等的同仁的关心、鼓励和支持。还要感谢科学出版社的编辑们,他们为本书顺利出版付出了辛勤的劳动。

结构健康监测涉及现代传感测试技术、数据的采集与网络传输技术、数据信号的分析与智能信息处理技术、模式识别技术、土木工程材料/结构性能的演化与安全评价等多个学科门类。本书涉猎的范围较广,其中也参考了很多学者的研究成果和相关文献,这里一并对原作者表示感谢。书中的一些观点、方法仅为作者当前对这些问题的认识,随着科学技术的不断发展,这些观点与方法将会随着研究工作的不断深入而得到扬弃与改进。

鉴于作者的水平及经验所限,书中存在的缺点和不足之处在所难免,敬请读者批评斧正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 结构健康监测的基本概念	1
1.1.1 结构健康监测的定义	1
1.1.2 结构损伤的定义与特征	1
1.1.3 结构健康监测与无损检测的异同	2
1.2 结构健康监测系统的组成与基本原理	3
1.3 结构健康监测的主要研究内容	4
1.3.1 有限元建模技术	5
1.3.2 基于振动信息的结构损伤识别	5
1.3.3 传感系统	7
1.3.4 非线性结构系统识别	8
1.4 结构健康监测的发展与研究现状	9
1.4.1 大跨度桥梁	11
1.4.2 超高层建筑与空间结构	12
1.4.3 水利工程结构	13
1.4.4 海洋平台结构	14
1.5 结构健康监测展望	14
1.5.1 目前研究存在的问题	14
1.5.2 理论技术的发展趋势	15
1.5.3 结构健康监测技术的新应用领域展望	17
问答题	19
参考文献	19
第二章 数据获取与传输技术	23
2.1 激励方法	23
2.1.1 被动激励	23
2.1.2 环境激励	25
2.1.3 局部激励	25
2.2 传感器及布设方法	26
2.2.1 常用传感器	26

2.2.2 智能传感器	44
2.2.3 传感器最优布设方法	50
2.3 数据传输	59
2.3.1 有线传输	60
2.3.2 无线传输	60
2.3.3 互联网传输	61
问答题	63
参考文献	63
第三章 现代信号处理技术	66
3.1 傅里叶变换与自互谱法	66
3.1.1 傅里叶变换	66
3.1.2 短时傅里叶变换	67
3.1.3 自互谱法	68
3.2 Wigner-Ville 变换	70
3.3 小波分析	71
3.3.1 基本原理	71
3.3.2 工程应用	78
3.4 小波包分析	80
3.4.1 基本原理	80
3.4.2 工程应用	82
3.5 希-黄变换	85
3.5.1 希-黄变换基本原理	85
3.5.2 改进希-黄变换基本原理	88
3.5.3 工程应用	91
3.6 盲源分离	95
3.6.1 基本原理	95
3.6.2 主要算法	96
3.6.3 工程应用	99
3.7 结构健康监测与检测中的实测数据处理	99
3.7.1 应变	99
3.7.2 位移、速度与加速度	103
3.7.3 温度	107
3.7.4 风	108
3.7.5 其他测试物理量	110
问答题	111

参考文献	111
第四章 常用结构损伤检测技术	116
4.1 超声检测技术	116
4.1.1 基本理论	116
4.1.2 超声检测方法	119
4.1.3 工程应用	121
4.2 射线检测技术	122
4.2.1 基本原理和方法	122
4.2.2 照相检测	123
4.2.3 γ 射线检测、中子射线检测及特点	127
4.3 涡流检测技术	128
4.3.1 基本原理	128
4.3.2 阻抗分析法	128
4.3.3 工程应用	132
4.4 声发射检测技术	133
4.4.1 原理及特点	133
4.4.2 定位方法	135
4.4.3 检测仪器	137
4.4.4 工程应用	138
4.5 红外检测技术	139
4.5.1 基本原理	139
4.5.2 检测仪器	140
4.5.3 工程应用	141
4.6 基于振动的无损检测技术	142
4.6.1 基本原理	142
4.6.2 检测方法	143
4.6.3 发展概况	144
4.7 基于统计识别检测技术	145
4.7.1 基本原理	145
4.7.2 识别方法	145
4.7.3 识别流程	146
4.7.4 发展概况	147
问答题	148
参考文献	148

第五章 智能损伤检测技术	150
5.1 光纤健康监测技术	150
5.1.1 基础知识	150
5.1.2 基本原理	153
5.1.3 工程应用	154
5.2 压电智能传感检测技术	156
5.2.1 基本概念	156
5.2.2 基本原理	157
5.2.3 诊断方法	159
5.2.4 应用概况	160
5.3 GPS 监测技术	161
5.3.1 GPS 定位技术	161
5.3.2 GPS 中 RTK 技术	162
5.3.3 基于 GPS 的结构健康监测	164
5.4 神经网络技术	165
5.4.1 神经网络及原理	165
5.4.2 神经网络用于损伤检测的适应性、原理及应用	184
5.4.3 基于概率神经网络的结构损伤检测与定位	188
5.4.4 基于小波神经网络的结构损伤检测与定位	192
5.4.5 基于模糊神经网络的结构损伤检测与定位	198
5.4.6 基于粗糙集神经网络的结构损伤检测与定位	206
5.5 数据融合技术	219
5.5.1 基本理论	219
5.5.2 数据融合算法	224
5.5.3 数据融合用于损伤检测的适应性	229
5.5.4 基于小波包分解的数据融合损伤检测	230
5.5.5 基于小波分解与 PNN 的数据融合损伤检测	233
5.5.6 基于 FNN 和加权平均数据融合损伤检测	236
问答题	241
参考文献	241
第六章 结构健康监测系统与工程实践	248
6.1 结构健康监测系统的设计原则与标准	248
6.1.1 结构健康监测系统的设计原则	248
6.1.2 结构健康监测系统的设计标准	248
6.1.3 结构健康监测各个子系统的研究概况	250

6.2 桥梁结构健康监测系统设计	252
6.2.1 总体设计原则	252
6.2.2 实时监测内容的选择	253
6.2.3 主要参数的监测方法	255
6.2.4 大佛寺长江大桥	263
6.2.5 润扬长江大桥	268
6.3 超高层建筑结构健康监测系统设计	270
6.3.1 系统概述	270
6.3.2 系统组成	272
6.3.3 空间网架结构健康监测系统	274
6.3.4 广州新电视塔	280
6.3.5 高耸结构建造阶段环境振动测试与模态分析	283
6.4 隧道施工监测系统设计	289
6.4.1 超前地质预报	289
6.4.2 监控量测	290
6.4.3 隧道施工过程质量控制	290
6.4.4 施工监控实施方案	291
6.4.5 系统设计	296
6.4.6 工程实例	301
问答题	306
参考文献	306

第一章 绪 论

内容提要 本章主要对结构健康监测与结构健康监测系统的概念和组成部分进行简要介绍,同时对现今的结构健康监测的应用范围与发展趋势进行概况分析。

1.1 结构健康监测的基本概念

1.1.1 结构健康监测的定义

近年来,随着计算机软硬件技术、传感技术、数据传输技术、信号分析技术以及相关的力学理论和有限元分析等技术的迅速发展,在结构服役周期内对其健康状况进行不间断监测以保证结构的安全已成为可能。虽然迄今为止,结构健康监测 (Structural Health Monitoring, SHM) 尚无一个标准定义,但一般来说,结构健康监测是指利用现场的无损传感技术,通过包括结构响应在内的结构系统特性分析,达到识别结构损伤或退化的目的^[1,2]。此处所说的损伤包括材料特性改变或结构体系的几何特性发生改变以及边界条件和体系的连续性的改变。而保证体系的整体连续性对结构的服役能力有至关重要的作用。

一般来说,结构健康监测包括两个方面的内容:一是通过硬件采集数据,即通过定期采集结构布置的传感器列阵的响应数据并作分析;二是软件分析,即观察体系随时间推移产生的变化,作损伤敏感特征值的提取并通过数据信息处理来确定结构目前的健康状态,对于结构健康的长期监测,通过数据定期更新来评估在老化和恶劣服役环境下,工程结构是否有能力继续实现设计功能。

1.1.2 结构损伤的定义与特征

结构健康监测的对象是结构。结构损伤与结构健康是对立的概念,在对结构进行监测之前需要先讨论损伤的定义和基本特征,以便区分结构的损伤状态与健康状态。在土木工程中,健康是指结构或者系统能够实现其预期功能的一种状态。依据损伤力学关于从热力学中能量耗散过程不可逆的理论出发提出的一般损伤定义是“由于细观结构的缺陷(如微裂纹、微孔洞)引起的材料或结构的劣化过程,称为损伤”,而土木工程界对于结构损伤的普遍定义则是“结构在服役期内承载能力的下降”。前者是从材料微观层面出发揭示了损伤的本质,后者是从结构宏观层面出发指出了损伤的后果。综合两种定义,作者对于结构损伤的定义是“结构内力较

大处由于材料特性劣化导致结构的某种响应超出正常值”。该定义有两个重点：①一般情况下，结构内力较大部位应作为结构健康监测的重点部位，一定荷载下结构各个部分产生的内力总是大小不一的，当各部位采用的材料基本一致时，内力较大的部位承担的结构安全责任较大，该部位的材料特性劣化对于结构安全的影响也较大，而结构内力较小部位发生的材料劣化不仅对于结构安全性的影响比较小，相应的结构响应也较小，难以准确测量；②承载能力本身不能测量，但损伤后果的表现形式一般是可测量的，承载能力的下降一般会表现为结构某些特征响应发生变化，因此可以通过可测量结构响应来评估损伤。

根据上述定义，结构损伤具有以下三个特征。

(1) 结构层面的外在表现性：结构损伤必定会造成某种结构响应发生变化，且这种响应可被观察和测量，如果材料劣化并未导致结构响应变化或者这种变化很细微而现有测试技术无法捕捉，在结构层面上可认为无损伤。

(2) 局部性：通常，整个结构发生损伤的区域是局部的，在所有应力较大的部位中发生损伤的区域也是局部的。

(3) 分布不均匀性：通常，由于某种原因，某处出现结构损伤的概率总是大于其他部位，如混凝土开裂多发生在受拉应变较大处，混凝土中钢筋腐蚀通常发生在钝化膜破坏处。

1.1.3 结构健康监测与无损检测的异同

无损检测是一门研究在不破坏或损害受检对象的前提下，测定和评价物体内部或外表物理和机械性能及各类缺陷和其他技术参数的综合性应用技术。传统无损检测方法主要有目测法、渗透法、磁粉检测、电涡流检测、射线法和超声波检测方法。随着科学技术的发展，声发射、微波、红外、全息照相和光弹法等新的无损检测方法也不断应运而生。

结构健康监测技术和无损检测技术都是用来对结构或结构部件进行检测和性能评估的方法，结构健康监测技术借鉴了大量无损检测技术的方法，但两者之间还是有所区别的，主要的不同表现在以下几方面。

(1) 结构健康监测是利用已同结构材料集成在一起的功能元件实现对结构状态的监测，一旦功能材料集成进结构后，这些功能元件就被固定，只能被用来监测自身结构的安全。而无损检测方法则采用外部设备元件，进行结构的检测，检测的对象可多种多样。

(2) 结构健康监测主要强调监测的概念，而无损检测则强调检测的概念；监测的含义更多的是指对结构进行实时、在线的检测，而非事后的检测；而大多无损检测技术无法对结构进行实时、在线检测。

(3) 结构健康监测系统一般设备简单，易于实现，可进行大范围结构监测；而

无损检测系统一般设备复杂,检测区域有限,需要人工参与且校检工作较多。

(4) 无损检测技术不需要记录历史数据,其诊断结果在很大程度上取决于测量设备的分辨率与精度,而历史记录数据对于结构健康监测技术至关重要,其识别精度强烈地依赖于传感器与解释算法。

(5) 结构健康监测技术是一门新兴技术,有待进一步发展,无损检测技术则相对成熟。

1.2 结构健康监测系统的组成与基本原理

作为一门新兴的交叉学科,土木工程结构健康监测技术涉及建筑、结构、计算机、通信、信息、传感器、材料等众多学科,它利用各类传感器对结构的特征信息进行采集,然后用事先设计好的算法对采集数据进行处理,来预测结构的各种响应以及限定一些不利于结构正常运行的响应,从而形成一套适合结构安全运行和评定的监测系统。结构健康监测系统是集结构监测、系统辨识和结构评估于一体的综合监测系统。Housner 等人将结构健康监测系统定义为^[3,4]:一种从营运状态的结构中获取并处理数据,评估结构的主要性能指标(如可靠度、耐久性等)的有效方法^[5]。

目前的研究认为:健康监测系统的设计须遵循功能要求和效益(成本分析)两大准则^[6]。健康监测系统的设计首先应该考虑建立该系统的目的和功能,对于特定的结构,建立健康监测系统的目的是可以进行结构监控与评估,或是设计验证,也可以是研究发展。在实际应用中,监测系统的规模以及传感仪器和通信设备的配置还需要考虑投资的限度。

一般大型结构健康监测系统需对以下几方面内容进行监控:①正常荷载作用下的结构响应和力学状态;②结构在突发事件(如地震、意外大风或其他严重事故等)之后的损伤情况;③结构构件的耐久性,主要是监控构件长期疲劳、腐蚀等状况;④结构重要非结构构件和附属设施的工作状态;⑤结构所处的环境条件,如风速、温度和地面运动等。因此,结构健康监测不只是传统结构检测技术的简单改进,更是运用现代化传感设备与光电通信及计算机技术,实时监测服役阶段结构在各种环境条件下的响应和行为,获取反映结构状况和环境因素的信息,由此分析结构健康状态,评估结构的可靠性,为结构的管理与维护提供科学依据。在偶发事件发生后,可通过监测数据识别结构的损伤和关键部位的变化,对结构的安全性和可靠性做出客观的、定量的评估。

考虑以上要监测的内容,结构健康监测系统主要由 4 个子系统组成(图 1.1)^[7,8]:①传感器系统;②信息采集与处理系统;③信息通信与传输系统;④信息分析与监控系统。

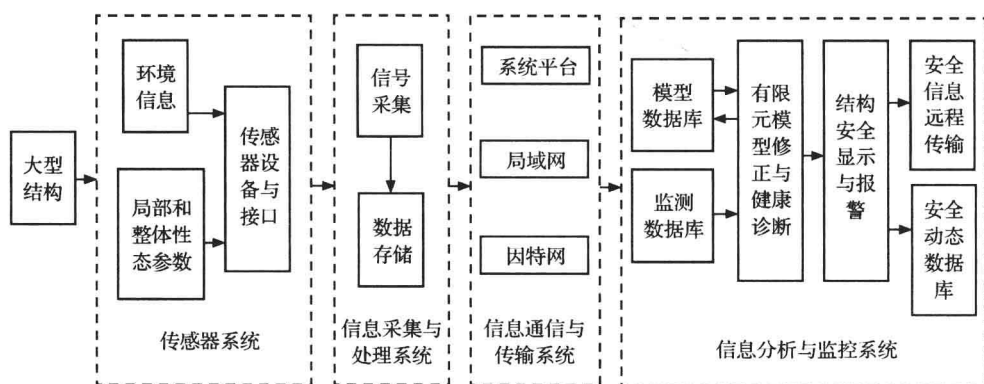


图 1.1 大型结构健康监测系统示意图

(1) 传感器系统。它主要通过传感器将待测的物理量转变为可以直接识别的电/光/磁信号。系统主要包括加速度计、风速风向仪、位移计、温度计、应变计、信号放大处理器及连接介质等。

(2) 信息采集与处理系统。它包括信号采集器及相应的数据存储设备等。系统安装于待测结构中,用于采集传感系统的数据并进行初步处理。

(3) 信息通信与传输系统。其作用是将采集并处理过的数据传输到监控中心。该系统包括网络操作系统平台、安全监测局域网和因特网等。

(4) 信息分析与监控系统。它主要由高性能计算机及分析软件组成。该系统将采集并处理过的数据传输到子系统,利用具备损伤诊断功能的软硬件分析接收到的数据,判断损伤的发生、位置和程度,对结构健康状况做出评估,如发现异常,自动发出报警信息。

一个结构健康监测系统的优劣主要由以下 3 个因素决定:①监测指标对于结构损伤的灵敏性,以及现有传感器在实际环境中对该指标的测量精度;②测点的空间分布,即传感器的最优布置,以及数据传输和采集设备的性能;③数据的可辨识性与系统的鲁棒性,即是否容易在测试数据中寻找到异常,以及系统在各种风险下的存活能力与正常工作能力。

1.3 结构健康监测的主要研究内容

结构健康监测的研究是一个多学科交叉的前沿研究领域,内容涉及材料、测控、力学、机械、新型通信等多个学科领域,国内外围绕该技术已开展了近 30 年的研究。目前,结构健康监测技术包括了诸如有限元建模技术、结构损伤识别理论、智能化的传感系统和信号处理技术等多项新技术。结构健康监测技术的发展和广

泛应用,对于我国规模庞大的基础设施的安全维护而言,具有重大的经济价值和社会效益:①实现实时或准实时的损伤检测,对结构出现的损伤进行定性、定位和定量分析,实现防患于未然;②对检测出来的损伤进行原因分析,提出维修建议;③对新建的结构在完工后使用前进行安全验证测试;④在结构突发事件之后对其进行剩余寿命评估;⑤通过对数据的分析和理论总结可以提高设计人员对于大型复杂结构的认识,为以后的设计和建造提供依据^[9]。

1.3.1 有限元建模技术

有限元方法是一种高效能、常用的计算方法。其基本思想是将连续的求解区域离散为一组有限个且按一定方式相互联结在一起的单元的组合体。由于单元能按不同的联结方式进行组合,且单元本身又可以有不同形状,因此可以模型化几何形状复杂的求解域。作为数值分析方法的另一个重要特点,有限单元法是利用在每个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数。单元内的近似函数通常由未知场函数及其导函数在单元的各个结点的数值和插值函数来表达,从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限元自由度问题^[10]。30多年来,有限元法的理论和应用都得到了迅速发展,但依然存在许多问题,例如精度问题、收敛性问题等。

1.3.2 基于振动信息的结构损伤识别

基于振动信息的损伤识别方法主要包括结构动力指纹方法、基于频率响应的方法、时间序列方法、基于模型修正的方法、智能优化算法、基于信号变换的方法和基于统计的方法等^[11]。

1. 基于动力指纹方法

结构发生损伤时,反映结构动力特性的动力指纹也随之发生变化,比如频率、振型、振型曲率、模态保证准则(MAC)和坐标模态保证准则(COMAC)、应变模态、柔度矩阵、动态残余力向量等,因此可以直接根据动力指纹的变化估计损伤。该方法无需反演,简单易行,适用于损伤识别的初步判断。

2. 基于频率响应的方法

直接利用实测频响函数(FRF)来进行损伤识别,可绕过测量模态数据,避免当模型相邻模态非常接近时固有频率和振型不容易识别的情况。Lin等^[12]通过构造实测FRF与原模型FRF之间的误差并使其最小化来修正模型的单元刚度和质量矩阵。Visser等^[13]对这种方法做了进一步研究。

3. 时间序列方法

时间序列分析^[14]是用随机过程理论和数理统计学的方法,研究随机数据序列所遵从的统计规律,以用于解决实际问题。这种方法的主要原理是利用结构振动响应在局部时间域上的特性或在一段时间域上的统计特性来识别结构的损伤。常用的方法有自回归模型(AR)、滑动平均模型(MA)和自回归滑动平均模型(ARMA)等。通过时间域数据的方法直接利用测试的时域数据,响应信号中与损伤有关的信号特征不会由于数据转换而被扭曲或滤掉。

时间序列方法的缺点:一是与损伤有关的一些信号特征可能被幅值较大而与损伤无关的信号特征所掩盖或淹没;二是如果激励源发生变化或者环境状态发生变化,识别损伤就比较困难。

4. 基于模型修正的方法

模型修正需要建立实验模型与理论有限元模型关于实测动态信息的目标函数。目标函数是关于结构的物理参数(刚度、阻尼和质量)的函数,通过修正物理参数使目标函数达到最小。目前采用的方法主要有优化矩阵修正法、基于灵敏度的修正法、虚拟变形法(VDM)和子结构修正方法等。

5. 智能优化算法

利用梯度(灵敏度)方法搜索时,常常由于目标函数的非线性和初值选取的不当,使模型修正陷入局部最优。而智能算法是从更广泛的范围内进行多点式搜索,可有效地防止优化陷入局部最优。智能算法主要包括遗传算法^[15,16]、模拟退火法、人工神经网络^[17]和支持向量机^[18]等方法。

6. 基于信号变换的方法

常用的基于信号分析的方法包括小波变换和 HHT 变换方法。

(1) 小波和小波包方法。小波分析可以同时兼顾信号的时域(空间域)和频域分析。小波变换作为信号处理的一种手段,已经作为一个新的数学分支被广泛地应用到健康监测和损伤识别中。传统的傅里叶变换属于纯频域的分析方法,它反映整个信号全部时间长度下的整体频域特征,但不能提供任何局部时间段上的频率信息,即无时域分辨能力。而小波变换在时频两域都具有表征信号局部特征的能力。基于小波变换的小波分析可利用一个可以伸缩和平移的可变视窗能够聚焦到信号的任意细节进行时频域处理,这样既可以看到信号的全貌,又可以分析信号的细节,还可以保持数据的瞬时特性。

(2) HHT 变换方法。Huang^[19] 提出基于经验模式分解(EMD)方法的 Hilbert 变换被称为 Hilbert-Huang 变换,简称 HHT。该方法被广泛地应用到结构损伤识别上^[20-22]。

7. 基于统计的方法

由于测试数据不完备、结构简化建模存在误差、测量噪声干扰等因素影响,结构损伤识别一般具有不确定性。为了更好地考虑模型中存在的 uncertainty,基于概率统计理论的修正方法得到了发展。Alvin 等^[23] 从有限元建模的角度,讨论了模型的误差分类及不确定性分析方法。Beck 等^[24-26] 对 Bayesian 模型修正方法进行了系统研究。Ramesh 等^[27] 用 Bayesian 估计的方法研究了不确定性误差在模型中的传递关系。

1.3.3 传感系统

1. 传感器的种类

传感器等功能器件是实现结构状态监控的核心部分,结构状态和环境的各类参数,都是由传感器加以感受的,而驱动器件的主要功能是辅助传感并对结构状态进行自适应控制。

结构健康监控系统中,对理想传感器器件的要求如下:

- (1) 具有优越的传感性能,包括灵敏度高、重复性好、频带宽、线性度好和迟滞性小。
- (2) 尺寸小、重量轻,易于同结构集成。
- (3) 功耗低或自带能量回收功能,可实现长期监测。
- (4) 具备智能传感功能以及自校验、自组织、自标定功能,可对监测数据进行部分数据处理。
- (5) 具备通信、组网能力,易于构建传感器网络。
- (6) 可在苛刻服役条件下可靠工作,包括高温、低温、高压、高真空、振动、冲击、辐照和电磁场等环境下都能可靠工作。

目前结构健康监控技术中常用的传感功能器件包括光纤传感器、压电传感器、疲劳寿命元件、电阻应变元件、形状记忆合金和碳纤维元件等。近年来无线智能传感网络的研究也日益引起人们的重视,但还没有一种传感元件完全满足结构健康监控系统的理想要求。

当前对功能器件的研究主要从两方面展开:一是对功能器件的性能进行优化研究,包括提高传感器器件的精度、稳定性、重复性和方向性等;二是研究减小功能器件的尺寸,以便于同工程结构集成。因此,突破现有功能元件的局限性来研究新