

石家庄经济学院学术著作出版基金资助

结构损伤识别 理论及其应用

JIEGOU SUNSHANG SHIBIE LILUN JIQI YINGYONG

◎ 袁 颖 周爱红 著



中国大地出版社

石家庄经济学院学术著作出版基金资助

结构损伤识别理论及其应用

袁 颖 周爱红 著
曹洪洋 周海辉 杜志军 参编

中国大地出版社
· 北 京 ·

内容提要

本书在结构动力学和有限元法的基础上系统介绍了结构损伤识别的基本理论、方法和应用。为了方便读者的学习和使用,本书给出了一些基本理论和部分应用实例的 MATLAB 计算程序和 ANSYS 计算程序。本书后四章内容是作者近几年来在结构损伤识别理论方面所取得的阶段性成果,其中遗传算法、神经网络和小波包变换在损伤识别中的应用是近些年研究的热点,并且对这些方法的应用给出了数值计算实例。

本书可以作为高等工科院校相关专业研究生的参考书,也可供从事结构动力分析、防灾减灾和防护工程、结构加固和疲劳寿命预测、结构损伤识别和健康监测、计算机软件研制开发教学和科研工作的广大教师以及科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构损伤识别理论及其应用 / 袁颖, 周爱红著. —北京: 中国大地出版社, 2008. 8

ISBN 978 - 7 - 80246 - 160 - 4

I. 结… II. ①袁…②周… III. 工程结构—损伤(力学)—研究 IV. TU312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 121157 号

责任编辑: 李 颖

出版发行: 中国大地出版社

社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号 100083

电 话: 010 - 82329127 (发行部) 010 - 82329008 (编辑部)

传 真: 010 - 82329024

网 址: www.chinalandpress.com 或 www.中国大地出版社.中国

印 刷: 北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 14.75

字 数: 334 千字

版 次: 2008 年 12 月第 1 版

印 次: 2008 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1—1000 册

书 号: ISBN 978 - 7 - 80246 - 160 - 4/F · 307

定 价: 35.00 元

版权所有·侵权必究

前 言

由于设计、施工、管理、环境腐蚀、自然灾害等原因,结构会发生老化、破损、裂缝等现象。结构一旦发生破坏,特别是大型结构,比如桥梁、大坝等,将对国民经济、社会稳定和人民的生命财产产生直接的重大威胁。因此,开展结构健康监测研究,是有重要的理论意义和实用价值。

结构损伤识别方法是结构健康监测系统的重要组成部分。基于振动测试技术的结构损伤识别方法是目前国内外研究的热点。本书以振动测试的模态数据(振型和频率)和结构动力时程响应数据(位移、速度和加速度)为基础,针对典型结构型式,开展了相关的数值模拟研究,以期能为结构损伤识别和实时健康监测提供理论基础。

结构损伤识别方法的研究涉及到的基础理论包括结构动力学、数字信号处理、结构振动测试技术、有限元理论、模态分析、最优化方法等,属于多学科知识的综合应用。想要在短时间内深入理解和掌握这些理论,并开展相关研究工作,有一定的难度。本书的一大特色是将损伤识别的基本理论与大型通用有限元软件 ANSYS 和大型数学软件 MATLAB 相结合,使读者不需要对这些基础理论深入掌握的基础上,能够通过这两个软件的实际应用,理解和掌握损伤识别的基本方法,并开展相关的数值模拟科研工作。

由于在数值模拟的过程中要针对特定的问题,编制相应的计算程序,并涉及到大量的矩阵运算。如果采用其他高级语言,比如 Visual C 或 Visual Fortran,不仅需要读者花费大量的时间和精力去学习这些语言的复杂语法,而且解决问题的效率也不高。为了避免这些情况,本书的损伤识别理论研究均是基于被称为第四代编程语言的 MATLAB 软件平台,并给出了许多 MATLAB 编程实例。另外,由于 ANSYS 软件对于大型结构的分析计算等十分方便,因此本书既给出了以 MATLAB 开发的程序(第 4 章),也给出了以 ANSYS 软件作为开发工具的命令流程图(第 9 章),所有程序都经作者调试通过并验证正确。

本书内容分为 9 章。第 1 章总结了国内外在该领域研究现状和发展动态;第 2 章至第 5 章介绍了结构动力学基础知识、结构动力计算的数值计算方法、有限元法的基本理论以及结构损伤识别的基本理论,并给出了一些基于 MATLAB 软件的程序;第 6 章至第 9 章是作者近几年的研究成果,主要是基于振动模态测试数据,开展的测试信息不完备和数据噪声条件下的结构损伤识别方法研究以

及基于结构动力时程响应数据,利用小波分析理论开展的结构损伤识别方法研究;后记部分指出了目前结构损伤识别和健康监测中存在的问题,并对其未来的发展方向做了展望。

本书在撰写过程中,学习、使用和参考了国内外大量的文献,论著以及部分网络材料,在此谨向原作者致以诚挚的谢意和敬意。

在本书的撰写过程中,周爱红副教授、曹洪洋副教授、周海辉和杜志军等同志给予了大力的支持,本科生贾国凯、安亚磊和郑伟等协助做了大量的辅助工作,在此深表谢意。由于作者水平所限和时间关系,本书在内容安排和各章节衔接上还有考虑不周之处,疏漏、错误和不妥之处也在所难免,欢迎读者批评指正。

袁颖
于石家庄经济学院
2008年5月

目 录

前 言	(i)
第 1 章 绪 论	(1)
1.1 结构损伤识别的意义	(1)
1.2 国内外基于振动测试的结构损伤识别的研究现状及评述	(3)
1.3 本书的主要内容	(16)
1.4 小 结	(16)
第 2 章 结构动力学基础及 MATLAB 的应用	(17)
2.1 运动微分方程的建立	(17)
2.2 结构的动力特性	(19)
2.3 振型叠加法	(22)
2.4 MATLAB 软件在振动分析中的应用	(29)
2.5 小 结	(40)
第 3 章 多自由度体系强迫振动的直接积分法	(41)
3.1 中心差分法	(41)
3.2 线性加速度法	(45)
3.3 Newmark - β 法	(47)
3.4 Wilson - θ 法	(51)
3.5 Runge - Kutta 法	(55)
3.6 状态方程法	(56)
3.7 精细时程积分法	(57)
3.8 小 结	(61)
第 4 章 有限单元法的基本原理及其程序实现	(62)
4.1 前 言	(62)
4.2 有限单元法的基本思路	(63)
4.3 弹性力学平面问题的有限单元法	(63)
4.4 杆系结构的有限单元法	(71)
4.5 有限单元法实施及 ANSYS 简介	(75)

4.6	基于 MATLAB 的有限元程序实例	(78)
4.7	小 结	(96)
第 5 章	结构损伤识别的基本理论和方法	(97)
5.1	结构损伤识别的理论基础	(97)
5.2	有限元模型缩聚和实测振型扩展	(99)
5.3	损伤识别方法简介	(101)
5.4	关于噪声的添加问题	(109)
5.5	小 结	(109)
第 6 章	基于残余力向量法和改进遗传算法的结构损伤识别研究	(110)
6.1	前 言	(110)
6.2	遗传算法	(111)
6.3	残余力向量法	(116)
6.4	遗传算法目标函数的建立	(117)
6.5	验证实例	(117)
6.6	结 论	(131)
6.7	小 结	(131)
第 7 章	基于有限元模型和不完备模态测试信息的结构损伤识别方法研究	(133)
7.1	引 言	(133)
7.2	基本理论	(134)
7.3	Levenberg - Marquardt 最小二乘算法	(135)
7.4	验证实例	(137)
7.5	需要说明的几个问题	(154)
7.6	结 论	(156)
7.7	小 结	(156)
第 8 章	基于广义回归神经网络的结构损伤识别方法研究	(157)
8.1	引 言	(157)
8.2	神经网络概述	(158)
8.3	影响基于神经网络的损伤识别方法的主要因素及本章的对策	(159)
8.4	验证实例	(168)
8.5	结 论	(181)
8.6	小 结	(181)
第 9 章	基于小波变换的结构损伤识别方法	(182)
9.1	概 述	(182)

9.2 小波的概念与性质	(183)
9.3 小波变换在结构损伤识别上的应用	(192)
9.4 基于小波包能量谱的结构损伤识别方法	(196)
9.5 验证实例	(198)
9.6 小波基函数和分解层数的选择	(203)
9.7 简支梁的 ANSYS 瞬态分析程序	(208)
9.8 基于小波包分解的 MATLAB 程序	(210)
9.9 结 论	(213)
9.10 小 结	(214)
后 记	(215)
参考文献	(217)

第 1 章 绪 论

1.1 结构损伤识别的意义

改革开放的近 30 年来,我国经济建设飞速发展,科学技术水平也在迅速提高,在诸多领域里取得了举世瞩目的成就。与此同时,随着综合国力的不断增强,国家在能源、交通、水利及工业与民用建筑等基础设施领域不断投入巨额资金,进行了大规模建设。有资料显示,我国每年仅建成的中高层建筑面积就在 1000 万平方米以上,一些标志性的超高层建筑也在不断的建成和规划中,比如,上海的金茂大厦(88 层,高 365 米)、环球金融中心(95 层,460 米)等,标志着我国的建筑水平已经进入了国际先进行列。在近 20 年里我国修建了大批铁路、公路桥梁。仅建成的永久性公路桥梁就达 22.4 万座。建成主跨在 200 米以上的桥梁 2100 座、主跨在 400 米以上的 30 座、主跨在 600 米以上的 12 座。在大跨径悬索桥、斜拉桥、拱桥等各种形式的特大型桥梁设计建设中取得了成功经验,具备了建造各类型桥梁的能力。新中国成立 50 多年来,党和政府对水利事业给予高度重视,国家进行了大规模的水利水电工程建设。全国有各类大坝 8.6 万余座,居世界首位。在实施西部大开发战略中,特别是西南地区的水电宝藏将得到加快开发,使得我国能源结构更趋合理。目前,我国正在和将要建设一批规模宏大的国家重大重点工程项目。如,三峡大坝、南水北调、西气东输、西电东送、京沪高速铁路等系列宏伟工程,为世人瞩目^[1]。

在看到我国能源、交通、水利和工业与民用建筑等领域取得巨大成就的同时,也应该对现役的基础设施状况有个清醒认识。一方面,随着科技的进步及未来人类的需求,土木工程结构和基础设施正向着大型化、复杂化方向发展。如大跨度桥梁、超高层建筑、大跨空间结构、大型水坝、核电站、海洋采油平台以及输油、供水、供气等管网系统,它们使用期都长达几十年,甚至上百年。在其服役过程中,由于环境荷载作用,疲劳效应、腐蚀效应和材料老化等不利因素的影响,结构不可避免的产生损伤累积、抗力衰减,从而使结构安全受到威胁,更为严重的是,有些结构的重要部件一旦发生损伤,它的破坏程度迅速发展,而在未及时发现的情况下,很快导致整个结构的毁坏,造成灾难性悲剧。

2004 年 2 月 14 日晚 7 点 30 分许,莫斯科德兰士瓦水上乐园的玻璃屋顶突然坍塌,随后一面墙也轰然倒塌,造成 40 多人死亡,110 多人受伤。事故原因一种可能的说法是:事故发生时,室外温度为摄氏零下 21 度,室内温度为摄氏零上 30 度,承压的玻璃钢金属结构在如此大的温差冲击下,加上当年焊接时残留的冷凝剂,招致金属迅速疲劳,进而无法承重而断裂。(图 1-1)

2004 年 5 月 23 日清晨巴黎戴高乐机场 2E 候机厅发生屋顶坍塌事故,造成包括两名

中国公民在内的 6 人不幸遇难，多名旅客和机场人员受伤。法国交通部引用事故调查报告说，候机厅水泥顶棚与圆柱形金属支柱连接处出现了穿孔。正是这一穿孔导致了拱形顶棚中的一个弧度结构出现了折痕。连接顶棚外部金属支柱和水泥顶棚间的金属构件因此也受到了影响。这一金属构件本来也负担着顶棚的重量，但弧度结构上的裂痕使这个构件逐渐穿过了顶棚，不再支撑数 10 吨重的顶棚，最终导致拱形顶棚发生坍塌。（图 1-2）



图 1-1 莫斯科德兰士瓦水上乐园屋顶坍塌

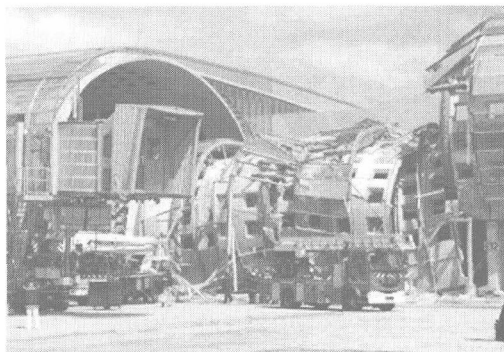


图 1-2 巴黎戴高乐机场 2E 候机大厅坍塌

2007 年 8 月 2 日北京时间 2 日 7 时 10 分据悉，美国明尼苏达州明尼阿波利斯市的一座桥梁发生坍塌，事故造成 13 人死亡，30 人受伤。（图 1-3）



图 1-3 美国明尼苏达州阿波利斯桥梁坍塌



图 1-4 湖南凤凰县堤溪段大桥垮塌

2007 年 8 月 13 日下午，湖南湘西自治州凤凰县境内凤大公路（湖南凤凰至贵州铜仁大兴机场）堤溪段大桥突然垮塌，造成 14 人死亡，22 人受伤，65 人失踪。（图 1-4）

从所列举的事故中可以看出，对于重要的现役建筑结构设施，其一旦发生破坏，后果非常严重，往往造成巨大的人员伤亡和财产损失。因此十分有必要采取一定的措施和技术手段对其进行监测诊断，预防事故的发生。

另一方面，在已有的建筑物中，旧有建筑占有很大比例，随着时间的推移，将有大量的建筑物达到或超过其设计基准周期。我国城镇现有建筑已超过 70 亿平方米，但其中 20 世纪 60 年代以前建成的占 50%，相当多的建筑已进入了中老年期，有近 35 亿平方米的

建筑物有可能出现质量问题,其中近10亿平方米急需维修加固才能正常使用。中国建筑设计科学研究院对我国建筑物耐久性的调查表明,由于设计、施工质量和管理方面的原因,其中绝大部分都存在着不同程度的破损。工业建筑的破损尤其严重,结构的使用寿命一般不能保证50年,多数在25~30年就必须进行大修或加固。

在第二次世界大战结束至今的60年时间,世界范围内,建筑行业大致经历了三个不同的发展时期,即战后恢复的大规模建设时期、新建与旧房改造并重时期以及目前强调的维修与现代化改造为主的第三个发展时期。英国1965年至1980年的维修改造项目逐年增加,1980年的检测、维修改造工程已占建设工程的2/3;美国截至1998年整个混凝土工程的价值约6万亿美元,而今后每年用于检测、维修改造或重建的费用预计将高达3000亿美元;英国每年用于钢筋混凝土结构检测与修复费用达200亿英镑;日本引以为自豪的新干线使用不到10年,就出现了大面积的混凝土开裂和剥蚀,今后用于检测和修复的费用将相当巨大。

此外,地震也引起结构的损伤。比如:1995年1月17日和1995年5月28日,在日本和俄罗斯先后发生大地震。1999年,土耳其和我国的台湾省先后发生了强烈大地震。2008年5月12日,我国四川省汶川县发生里氏8.0级强烈大地震。这些地震造成人员重大伤亡,同时一些建筑物变成废墟,一些建筑设施发生不同程度的损伤。特别指出的是如果水库或是水电站大坝一旦在地震作用下发生损坏将会引发更大的灾难,不仅造成巨大的经济损失,而且还会夺去许许多多的宝贵生命。

综上所述,为保障生命和物资财产的安全,减少重大经济损失,避免灾难性的悲剧发生;同时也为了对旧有建筑物进行合理维修、减少维护费用;而采取有效的技术手段及方法对现役土木工程结构及基础设施进行安全监控、健康诊断以及安全评估就显得尤为必要和迫切。其中损伤识别技术是最为关键性的环节。因此,开展针对工程结构的损伤识别技术研究有着十分重要的理论意义和现实意义。

1.2 国内外基于振动测试的结构损伤识别的研究现状及评述

损伤检测技术最先应用于机械、航空、航天工业上,随着振动理论、计算机技术、现代测试与信号处理技术的飞速发展,结构损伤识别的应用领域也在不断拓宽,并以其经济有效、可以反映结构整体性能、能够探测结构隐蔽部位缺陷的优点在土木工程结构等领域得到广泛应用。

结构损伤检测技术按检测目标可分为局部检测和整体检测两大类。局部检测方法都是一些可视或局部的试验方法,比如,X射线技术、声发射方法、超声波技术、远红外成像技术和无线电成像技术等,但是局部检测方法需要预先知道结构损伤的大体位置,并且要求检测仪器能够到达损伤区域,对于大型复杂结构,无法给出整体结构的损伤信息。为了解决整个结构特别是大型复杂结构的损伤识别问题,于是出现了整体检测方法。任何结构都可以看作是由刚度、质量、阻尼等物理参数组成的力学系统,结构一旦出现损伤,结构参数也随之发生改变。因此,结构参数的改变可以视为结构损伤发生的标志。利用损伤发

生前后结构参数特性的改变来诊断结构损伤的方法称为整体检测方法,本书后面所论述以及研究的基于振动测试的损伤识别方法特指整体检测方法。

结构损伤检测技术按测试方式又可分为:静态检测和动态检测^[2]。静态检测方法是直接测量结构及构件的尺寸、结构材料的强度和弹性模量(通常采用回弹法和取样试验法等手段),进行结构分析以确定结构的工作性能与可靠性水平的方法。目前我国已有的结构可靠性评价及损伤鉴定标准主要依据该方法。静态检测方法的测量数据较为准确、可靠,但由于工程结构一般体积大、构件多,且常有隐蔽部分,因此,静态检测往往工作量巨大,而且只能获得结构损伤的局部信息。而动态检测技术主要是为了弥补静态技术不足而发展起来的基于振动的检测技术。动力测试是最常用的一种整体检测方法和无损检测方法,因为损伤引起的结构参数变化会改变结构的动力特性,而动力特性的变化可以通过现场的动力试验测量得到。因此,自然就可以利用测量结构动力特性的变化来识别结构的损伤。结构动力检测比之静态检测较易实施,且能获得结构损伤的整体信息。但动态检测数据,尤其是振型测试数据的准确性有待于提高。

近二三十年来,基于振动测试的损伤检测方法,在土木工程领域应用得越来越广泛。本书的研究也是在振动测试的基础上开展的。

目前,常用的结构损伤识别方法大致可以分为以下几类:基于固有频率的结构损伤识别方法、基于振型的结构损伤识别方法、基于位移和应变类参数的结构损伤识别方法、基于刚度阵和柔度阵的结构损伤识别方法、基于模型修正的结构损伤识别方法、基于计算智能的结构损伤识别方法、基于小波分析的结构损伤识别方法、基于概率统计信息的结构损伤识别方法等。

以下将以基于动力测试的结构损伤识别方法为主,对常用的结构损伤识别方法作一综述。

1.2.1 基于固有频率的结构损伤识别方法

损伤使结构的刚度减小,导致频率的降低,这一现象直接推动了与频率相关的敏感参数在结构健康监测和损伤识别中的应用。

Cawley 和 Adams^[3]最早利用频率数据对结构进行损伤识别,作者通过特征值对结构物理参数的灵敏度分析,在结构只存在单处损伤的情况下,得出结构损伤前后,任意两阶频率变化的比值,只与损伤位置有关。Wang 和 Zhang^[4]假定结构模态特性对损伤不太敏感,但是一定范围内的频率响应却对损伤敏感,通过估计模态频率和频率响应互谱密度对结构刚度系数的灵敏度来识别结构损伤。

Stubbs^[5]等研究了利用共振频率识别结构损伤的灵敏度方法,通过单元损伤指标的灵敏度分析,使用广义逆方法进行了结构损伤定位研究。

Hearn^[6]等指出,结构损伤后,各阶频率变化按与最大频率变化归一化后,任意两阶频率变化的比值,是结构损伤位置的函数。

Penny^[7]等对结构的各种损伤情况进行了数值模拟,计算出由于模拟损伤引起的结构频率变化,然后在最小二乘意义下拟合模拟频率变化和实测频率改变,认为拟合误差最小的损伤情况是结构的实际损伤状态。

Friswell^[8]等通过假定结构的先验模型,使用先验模型计算各种损伤情况下结构前 n 阶频率的改变量,然后得到 n^2 个结构频率改变率。所有数据都不考虑误差的影响,并且实际的损伤情况包括在模拟损伤工况内时,可以正确地识别结构损伤。

Salawu^[9]评述了土木工程领域应用固有频率作为诊断参数的结构评估方法,对结构损伤与频率变化之间的关系进行了讨论。对那些限制振动测试在损伤识别和结构评估中成功应用的可能因素也进行了讨论。其结论表明:基于固有频率的损伤识别方法虽然存在一些局限,但对结构的常规评估还是有用的。Salawu 还指出,要对损伤进行较好的识别,固有频率变化达到大约 5% 水平是必要的。但是,仅仅是固有频率变化超过 5% 并不意味着一定存在损伤。应用频率进行损伤识别,当损伤发生在低应力区域时可能是不可靠的。另外,固有频率的变化对于惟一地确定结构损伤的位置可能是不充分的,这是因为两个不同位置的损伤程度相似的损伤可能引起相同的频率改变。

对基于频率观测的损伤识别方法研究发现,频率容易测量且与测量位置无关,而且测量误差较振型和阻尼的测量误差要小,因此使用基于频率观测的结构损伤识别方法具有简单易行的优点。但是,很多实践表明该类技术在应用上有一些不足^[10]: ①固有频率对结构早期损伤有时并不十分敏感,往往只能发现破损,而无法确定破损的位置。这是因为不同位置的损伤可能引起相同的频率变化; ②虽然当损伤的位置在结构的高应力区域时,利用固有频率的变化进行损伤识别比较可靠,但是当损伤位置在结构的低应力区域时,利用固有频率的变化将无法进行损伤识别; ③随着结构早期损伤量的减少,固有频率的变化是从低阶移向高阶的,而高阶固有频率的变化是很难获得的,所以,利用固有频率的变化无法识别结构的小损伤; ④频率是结构特性的全局量,对结构的局部损伤不敏感,而且采用频率作为敏感参数无法识别出结构对称位置的损伤,因此,如果单独使用结构频率的改变来识别结构损伤,会出现较大的识别误差。

1.2.2 基于振型的结构损伤识别方法

相对频率而言,振型的变化对损伤较为敏感,而且用此方法可方便地确定损伤的位置。很多学者在振型基础上提取出许多其他参数^[11],如 MAC、MSF、COMAC、COMSF、曲率模态等,这些参数都可以表征结构损伤前后的模态相关性。West^[12]可能是使用振型信息对结构损伤定位进行系统研究的第一个学者。他使用模态保证准则(MAC)来确定观测振型数据在损伤前后的相关性水平,在振型数据分块的基础上,根据 MAC 的分块计算结果来确定损伤位置。Yuen^[13]定义了振型、振型斜率的变化率,通过预测变化与实测变化相比较来确定损伤的位置。Pandey^{[14]~[16]}等利用结构有限元模型,将振型曲率的绝对变化作为损伤指针,取得了良好的识别效果。Fox^[17]用数值模拟和试验两种方法研究了由于损伤引起的试件梁的模态参数变化。得到的结论是 MAC 值对损伤的出现不敏感。虽然 MAC 值随着损伤的加大呈现有规律的降低,但是,由于试验和信号处理带来误差所导致的 MAC 降低在某些情况下比损伤引起的降低更为明显。Salawu 和 Williams^[18]对使用振型相对变化和振型曲率变化识别结构的方法进行了比较研究。结果表明,使用振型相对变化的方法一般不能很好地指示结构的损伤,模态的选择对识别结果有重要的影响,当使用受损伤影响最大的模态的 MAC 值识别结构损伤时,识别的效果最好。

结构振型对结构的局部变化较为敏感,可以用来确定结构模型误差和损伤的可能位置。然而振型的测量由于系统噪声和观测噪声的影响存在较大的测量误差,使得特征振型的变化常常被测量误差所掩盖,给基于振型的结构损伤识别方法在实际应用中造成很大的困难。另外,由于结构的测试受现场条件、测试仪器和测点布置的限制不可能太多,实际的观测振型数据是不完备的(包括自由度不完整和振型阶数不完备)。对于由结构损伤引起的局部刚度、变形等的变化,一般高阶模态会比较敏感,而高阶模态在桥梁结构中往往难以准确测量甚至根本无法测量。因此,基于振型的损伤识别方法一般需借助其他分析技术对计算模型数据和实测数据进行处理后进行损伤分析。

1.2.3 基于位移和应变类参数的结构损伤识别方法

Hajela 和 Soeiro^[19]对一些结构损伤识别技术进行了分类,将参数估计方法划分为方程误差方法、输出误差方法和极小偏差方法三大类,并且分别采用这三类方法,利用静态位移观测和动态观测数据估计了结构单元刚度的变化,而且还对大型结构提出了参数估计的子结构和降阶技术。

为了研究数据误差对识别结果的影响,一些学者在基于位移观测的结构损伤识别研究中引入了 Monte - Carlo 技术。Hjelmstad^[20]等首先使用 Monte - Carlo 方法系统地研究了观测噪声对参数估计算法的影响。

Banan 等^{[21][22]}研究了基于静态位移观测的参数估计方法,在文中使用基于梯度的约束非线性优化算法求解结构的本构参数,建立了静态位移参数估计的统一框架,提出了参数估计的力误差模型和位移误差模型,并且进一步研究了参数的分组方法、求解器初始值的选取和参数变量的尺度变换方法。

Nwosu^[23]等研究了 T 形管接头由于裂纹引起的应变改变,发现应变变化要比频率变化大的多,而且即使在远离裂纹的位置也能测量到。

Sanayei 和 Saletnik^{[24][25]}研究了利用静态应变观测数据的结构损伤识别问题,使用基于梯度的参数识别方法来估计结构截面特性。崔飞^[26]等探讨了基于静态应变及静态位移测量的结构损伤识别技术,为了解决观测信息有限和观测噪声对识别算法的影响,采用梯度法与 Gauss - Newton 法以及 Monte - Carlo 法相结合的方法提高了算法的鲁棒性。

1.2.4 基于刚度阵和柔度阵的结构损伤识别方法

在进行结构损伤诊断时,由于损伤多表现为刚度的下降,很自然地想到要利用刚度矩阵来判断结构损伤。Park 和 Lee^[27]运用损伤结构与未损伤结构之间的刚度误差来定位损伤,对于大的损伤,此方法非常有效。但 Gysin^[28]认为误差刚度矩阵法只有在包含了足够的振型,尤其是包含了那些对结构刚度矩阵影响较大的振型时,此方法才有效。

在利用结构刚度矩阵进行损伤识别的算法中,有限的低阶模态信息使刚度矩阵的近似误差较大,而利用柔度矩阵则可避免这一缺点。柔度矩阵与刚度矩阵是互逆的,柔度矩阵元素反比于固有频率。实际应用中一般只能测得结构最低的几阶模态与频率,以此来近似得出实际的柔度矩阵。

Lin^[29]提出了单位阵校验法(Unity Check Method),利用动力观测柔度阵与结构刚度

矩阵之间的广义逆关系,定义了柔度误差矩阵。

Pandey 和 Biswas^{[30]~[32]}基于结构观测柔度阵的变化,提出了结构损伤识别的柔度矩阵法。他们研究了简支梁、悬臂梁和两端自由梁等例子,对损伤如何影响柔度矩阵进行了深入的探讨。同年,Aktan 等建立了一种利用观测柔度阵作为状态指标的评定桥梁结构相对完整性的方法,通过两座桥梁的汽车静载试验,对比了观测模态柔度阵和静力变形柔度阵的不同,以此判断结构的损伤状态。

Denoyer 和 Peterson^[33]提出了一种根据不完整模态观测数据修正结构模型的方法。在估计得到残余柔度阵的基础上,使用模态观测数据形成结构的动力观测静力柔度阵,然后构造了一个只与观测自由度有关的静力柔度误差函数。同年,Denoyer 和 Peterson^[34]又建立了求解同样问题的另外一种算法,利用观测柔度阵和分析柔度阵建立了观测柔度误差函数,通过计算模态灵敏度,求解了结构损伤识别问题。

Alvin^[35]论述了从频率及模态信息中提取柔度矩阵的方法,一种是通过应力确定子结构的柔度,另一种为通过整体柔度矩阵来确定单元柔度矩阵。并用两个例子证明了该方法在损伤定位及有限元模型修正中的有效性。

李国强^[36]等从结构分析柔度阵出发通过求解最小二乘估计问题,得到了悬臂弯剪型结构的单元参数,这种方法所需模态阶数较少,对于弯曲型和剪切型结构仅需一阶模态,对于弯剪型结构也只需要两阶模态。

胡宁^[37]提出了一种结构损伤识别的柔度法。通过在结构的部件上施加单位荷载并获得其对应应变的方法,将整体结构的柔度信息、转化为结构中局部部件的刚度信息,只需前两阶振型信息,就可以有效地进行结构中损伤位置的判断。文中用一个十跨悬臂桁架进行了数值模拟研究,验证了该方法的有效性。

綦宝晖^[38]等在柔度矩阵法的基础上,构造了损伤识别的二次规划模型,提出了一种悬臂弯剪型建筑结构的损伤识别方法。通过一个悬臂弯剪型结构损伤识别的数值模拟表明,利用该方法只需低阶模态参数就可有效地识别结构损伤。

冯新^[1]建立了基于观测柔度阵的结构损伤识别方法。从观测柔度阵出发,提出了结构识别的部分特征结构分配识别模型,建立了识别问题的线性化、拟线性化和完全非线性算法,并通过对三种算法的对比研究,确定了用于结构损伤识别的完全非线性识别算法。将结构损伤识别的完全非线性算法与柔度投影法结合,利用频率观测数据较为精确的特点,使用混合法研究了数据误差条件下的损伤识别问题。

Bernal^[39]根据损伤前后柔度矩阵的变化提出了损伤定位矢量(DLVs)方法。损伤定位矢量(DLVs)是位置的函数,可由结构损伤前后柔度矩阵差值的奇异值分解(SVD)得到。通过 ASCE 标准结构的数值模拟计算表明,该方法既可识别单损伤又可识别多损伤,且不受结构类型的限制。同年,Gao^[40]利用模态扩充技术对损伤定位矢量方法(DLVs)进行了改进,提出了一种用于随机激励情况下的结构损伤识别方法,该方法利用自然激励技术(NExT)和特征系统实现算法(ERA)辨识了结构的模态参数,并通过模态扩充技术获得柔度矩阵,最后通过损伤定位矢量方法(DLVs)识别了结构的一处损伤和多种损伤两种情况,通过一个 40 自由度的 10 跨平面桁架的数值模拟验证了该方法的合理性。

由于结构的低阶频率和振型在柔度阵中占的分量较大,且结构的低阶频率和振型易于测量,所以探讨以低阶频率和振型为“特征参数”的结构损伤检测技术具有实际意义。结构柔度矩阵在低阶模态条件下包含了有关结构特性的丰富信息,为低阶模态条件下的结构损伤识别提供了一种新的有效途径。但是,对模态测试数据不完备和数据噪声下结构损伤识别柔度法的研究仍然比较少。为了充分利用柔度矩阵的低阶模态敏感特性,仍需进一步深入地开展基于柔度矩阵的结构损伤识别研究。

1.2.5 基于模型修正的结构损伤识别法

模型修正方法实际上是一种系统识别方法,主要是利用试验获得的结构振动响应数据对质量、刚度和阻尼矩阵进行修正得到一组新的矩阵,使其更好地与实测数据相匹配,即得到一个更精确的有限元模型的过程。基于模型修正的结构损伤识别法的基本思想是:通过采用某种特定的模型缩聚技术或向量扩充技术,使修正的模型和原始模型的自由度数相同,然后比较他们之间的差别来评估损伤的位置和程度的。模型修正法的目的是:通过修正质量、刚度和阻尼等结构特性矩阵,使修正模型的预测响应尽可能地接近结构的静力或动力观测响应数据。模型修正本质上是一个求解约束最优化问题的过程^[41]。不同的模型修正方法只是在基本方程和求解方法上有所差异,这些差异可以根据最优化目标函数、约束条件以及优化方法等几个方面来进行分类。一般可以分为:最优矩阵修正法 (Optimal Matrix Updating Methods)、灵敏度分析法 (Sensitivity - based Methods)、特征结构分配法 (Eigenstructure Assignment Methods) 和混合法 (Hybrid Matrix Update methods)。

1.2.5.1 最优矩阵修正法

最优矩阵修正法的基本原理是在特定的约束条件下,直接通过优化求解某一目标函数来求得修正的模态参数矩阵。其代表主要有最小范数理论和最小秩扰动理论。

Baruch 和 Bar Itzhack^[42] 和 Berman 和 Nagy^[43] 先后提出了最优矩阵修正法的一般形式,使用零模态力和特性矩阵的对称性作为约束条件,通过求解总体结构矩阵的扰动矩阵在 Frobenius 范数意义下的极小值问题而得到了结构特性修正矩阵。

Kabe^[44] 在修正有限元过程中,将保证结构初始荷载路径作为一种约束,引入了结构连接矩阵,使修正的有限元模型刚度矩阵保持了原有的稀疏性,使修正的结果更具实际意义。

为了保证结构特性矩阵的稀疏性, Kammer^[45]、Lim^[46]、Smith 和 Beattie^[47] 相继提出了矩阵投影法、逆牛顿法、子矩阵法等从不同的角度对这一问题进行了研究,使问题得到了一定程度的简化,提高了计算效率。但是,由于这些方法修正的只是整体特性矩阵,因此无法确定损伤单元的具体位置。

Chen^[48] 等为了解决修正的整体结构矩阵不易识别单元结构参数的缺点,提出了一种通过最小化结构特性扰动矩阵范数来进行结构损伤识别的方法。这种方法得到的是结构单元参数水平的修正结果,与前面的方法相比,有利于对结构损伤的位置和程度作出准确的判断。

Zimmerman^[49] 首先建立了基于最小秩扰动理论 (Minimum Rank Perturbation Theory, MRPT) 的结构损伤识别算法,这种方法不是将扰动矩阵的范数定义为最小化目标函数,

而是对结构扰动矩阵的秩进行优化以寻找满足约束条件的秩最小的修正矩阵。MRPT 方法是最优矩阵修正算法的一种重要的形式, Kaouk 和 Zimmerman^{[50][51]}、Zimmerman 和 Simmermacher^[52]、Zimmerman^{[53][54]} 等进一步发展了 MRPT 方法在结构识别中的应用。最优矩阵修正法经过不断发展, 虽然已经成功地解决了保证结构特性矩阵对称性、稀疏性、正定性的问题, 但是如何在数据误差和稀疏条件下准确识别单元结构参数仍未很好解决。

1.2.5.2 灵敏度分析法

灵敏度分析法就是利用测量参数(模态频率和振型)对结构参数(刚度、质量等)的导数来计算物理参数的变化, 从而进行模型修正的方法。可以分为试验灵敏度方法和解析灵敏度方法两种。试验灵敏度方法是通过模态正交关系得到固有频率和振型的灵敏度矩阵的方法, 而解析灵敏度方法通常是直接计算刚度和质量的灵敏度矩阵, 因此其需要模型缩减或向量扩充技术, 这样将会带来额外的误差, 对于噪声的影响和矩阵中参数变化较大的情况, 该方法将没有试验灵敏度方法敏感。

Chen 和 Garba^[55]、Haug 和 Chio^[56]、Norris 和 Meirovitch^[57] 都建立了各自的试验观测数据灵敏度算法。

Hemez 和 Farhat^[58] 提出了一种基于单元灵敏度的结构模型修正算法。

Alvin^[59] 对这种算法作了一定的改进, 提高了算法的收敛性, 并且引入了一个更加实际的损伤因子, 还从概率的意义对结构初始参数和观测数据作了统计置信度的估计。

Messia^[60] 等研究了单独采用频率灵敏度条件下的结构损伤识别问题。

Cherki^[61] 等基于观测模态参数对结构质量和刚度的灵敏度分析, 建立了一种利用不确定数据识别结构的方法。

灵敏度方法的好处是可以识别出结构单元的损伤程度, 缺点是灵敏度计算量特别大。如果能够对结构进行大致定位, 再采用灵敏度方法, 将会大大降低计算量, 这也是后面将要讨论的混合法的一种形式。

1.2.5.3 特征结构分配法

特征结构分配法的基本原理是通过合理选择虚拟控制系统中输出影响矩阵和反馈增益矩阵, 使增加虚拟控制后的结构动态特性与在结构上测得的动态特性一致, 从而对结构的有限元模型进行修正。

Zimmerman 和 Kaouk^[62] 首先使用特征结构分配技术研究了结构的损伤识别问题, 他们提出的部分特征结构识别算法提高了模态的可分配性、保持了修正模型的稀疏性。

Lim^{[63][64]} 总结了特征结构分配技术在结构识别中的应用, 并且建立了这种方法的统一框架。

Cobb 等^[65] 改进了常用的特征结构分配法, 使之适用于观测自由度不完整条件下的损伤识别问题。

结构识别的特征结构分配法通常需要在观测自由度完备的特征向量空间上进行, 不能方便地处理观测数据不完备情况下的结构识别问题。特征结构分配法一般不能保证刚度及阻尼扰动矩阵的对称性, 破坏了实际结构特性矩阵的对称特性。特征结构分配技术修正的是结构整体特性矩阵, 不易于进行结构模型误差或损伤的正确定位。