



基于振动测试的结构损伤识别

若干方法研究

JIYU ZHENDONG CESHI DE JIEGOU SUNSHANG SHIBIE
RUOGAN FANGFA YANJIU

刘 龙 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

基于振动测试的结构损伤识别

若干方法研究





基于振动测试的结构损伤识别 若干方法研究

刘 龙 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书研究基于摄动法的裂纹梁结构振动模态特性分析,将 HHT 变换方法、支持向量机算法和激光电视全息技术引入结构裂纹损伤识别领域中,提出可靠、实用且较高精度的结构损伤识别方法。

本书可供结构损伤识别研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于振动测试的结构损伤识别若干方法研究/刘龙编著. —上海:上海交通大学出版社,2014
(国际航运中心建设)

ISBN 978-7-313-10910-1

I. 基... II. 刘... III. 工程结构—损伤—振动测量 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 036473 号

基于振动测试的结构损伤识别若干方法研究

编 著:刘 龙

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:常熟市梅李印刷有限公司

开 本:787mm×960mm 1/16

字 数:143 千字

版 次:2014 年 4 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-10910-1/TU

定 价:38.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:8.25

印 次:2014 年 4 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-52661481

前 言

随着科学技术的进步和现代工业的快速发展,出现了很多大型复杂的工程结构。为了保证结构的正常使用、避免灾难性突发事件的发生、保证人民生命财产的安全,结构损伤监测技术研究日益成为工程领域内一个重要的研究课题。

近几十年来出现了很多针对不同的工程结构损伤问题的检测方法,基于振动测试的结构损伤识别研究正日益引起研究人员的重视。本书主要研究基于摄动法的裂纹梁结构振动模态特性分析,将 HHT 变换方法、支持向量机算法和激光电视全息技术引入结构裂纹损伤识别领域中,寻找可靠、实用且具有较高精度的结构损伤识别方法。

第 1 章在查阅大量相关文献的基础上,总结国内外基于振动检测的结构损伤识别方法的研究成果,指出其中存在的一些问题,并介绍了本书的内容安排。

第 2 章基于改进的裂纹损伤模型,应用摄动法研究裂纹梁的振动模态变化特性。提出改进梁结构裂纹损伤模型;建立了一阶、二阶摄动表示的裂纹梁振动特征方程,推导出裂纹简支梁特征值和模态振型的一阶、二阶摄动解析表达式,并进一步提出损伤 Euler-Bernoulli 梁振动模态的一阶、二阶摄动解析表达式。在此基础上,推导出了损伤结构振动特征方程摄动法计算的一般表达式,为定性和定量研究损伤对结构模态参数的影响提供了理论基础。以简支梁作为数值算例,验证了基于改进裂纹损伤模型的摄动法计算裂纹梁频率的可靠性。

第 3 章将 HHT 变换方法引入基于结构振动响应信号的裂纹损伤检测中。HHT 方法在处理非线性、非稳态信号方面有很大的优势,但在信号分解过程中有时会出现伪 IMF 分量和多成分分量混淆的情况。为了提高 HHT 方法处理信号的精度,提出了基于小波分析和 HHT 变换的结构损伤检测方法,通过比较 IMF 分量的瞬时频率和瞬时振幅来判断结构是否发生损伤。简支梁的仿真计算和 Benchmark 结构的实验结果都表明该方法对损伤检测是比较有效的。

第 4 章探讨了基于支持向量机算法的结构损伤诊断方法。支持向量机是一种基于统计学习理论的机器学习算法,在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出特有的优势。为了提高损伤识别精度,本书引入分类概率计算,提出了基于

支持向量机算法的结构损伤分步识别方法。通过对悬臂梁的数值仿真计算和简支梁的损伤识别对比研究,结果表明,这一方法可以减少计算的复杂性和网络学习工作量,从而节约损伤识别网络学习时间,提高识别精度。

第5章进行了悬臂梁损伤识别的实验研究。通过与悬臂梁实验结果对比,发现基于改进损伤模型摄动法的计算结果反映了损伤悬臂梁的频率变化规律,但在发生较大损伤时该方法计算精度还需要进一步提高。通过分析损伤前后悬臂梁的响应信号,发现基于小波分析和HHT变换的损伤检测方法对于悬臂梁损伤检测还是比较有效的。在添加随机误差的情况下,基于支持向量机算法的结构损伤分步识别方法能够较好地识别出悬臂梁裂纹的位置和深度。

第6章介绍了激光散斑干涉技术。为了提高散斑干涉条纹的处理精度,引入支持向量机算法对散斑干涉条纹图像进行分类,提出了基于激光电视全息技术和支持向量机的损伤识别技术,并进行了液晶面板的裂纹损伤识别实验。结果表明,该方法能够有效提高损伤识别精度,简化损伤识别过程,实现结构缺陷判断智能化。

第7章研究了基于支持向量机的材料疲劳寿命预测方法。支持向量机算法具有泛化性能好和适用于小样本问题等优点,比较适合结构疲劳寿命的预测。根据材料疲劳损伤的特点,提出了基于支持向量机算法的单轴疲劳寿命预测方法,即采用支持向量机算法模拟材料疲劳损伤演化过程,建立载荷、损伤参量和材料性能参量之间的对应关系,对材料疲劳损伤进行非线性累加,进而准确预测疲劳寿命,通过实验数据检验了该方法的精度。

最后,对本书的研究工作进行了总结,并探讨存在的问题和下一步需要深入研究的方向。

本书的出版得到上海自然科学基金(11ZR1414900)、上海市教委科研创新项目(12YZ118)的资助。

本书在编写过程中得到张建国、孟光、轩福贞等导师的指导,在此深表感谢。

囿于作者本人水平有限,所涉及的研究范围和深度都是不够的,还有很多问题有待进一步深入研究,书中存在的错误和不足敬请专家批评指正。

编 者

2014年2月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 结构损伤识别方法的分类	2
1.3 基于振动测试的结构损伤识别方法研究现状	4
1.3.1 引言	4
1.3.2 基于固有频率的损伤识别方法	5
1.3.3 基于模态振型的损伤识别方法	5
1.3.4 基于应变/曲率模态的损伤识别方法	6
1.3.5 基于模型修正的损伤识别方法	7
1.3.6 基于神经网络的损伤识别方法	9
1.3.7 基于支持向量机的损伤识别方法	9
1.3.8 基于小波分析的损伤识别方法	10
1.3.9 基于 HHT 的损伤识别方法	11
1.3.10 基于激光电视全息技术的损伤识别方法	12
1.3.11 其他损伤识别方法	13
1.4 本书的内容安排	13
参考文献	14
第 2 章 基于摄动法的裂纹梁振动模态研究	22
2.1 引言	22
2.2 基于摄动法的裂纹梁振动特征方程	23
2.2.1 Euler-Bernoulli 梁振动方程	23
2.2.2 Euler-Bernoulli 梁裂纹损伤模型	23
2.2.3 裂纹梁振动模态的摄动特征方程	26
2.3 裂纹简支梁特征方程摄动法求解	27
2.3.1 裂纹简支梁特征方程的一阶摄动法求解	27

2.3.2 裂纹简支梁特征方程的二阶摄动法求解	29
2.4 裂纹梁特征方程摄动法求解	31
2.4.1 裂纹梁特征方程的一阶摄动法求解	31
2.4.2 裂纹梁特征方程的二阶摄动法求解	32
2.4.3 根据正则化条件求解 α_{ii} 、 β_{ii}	33
2.4.4 裂纹梁特征值和模态振型的摄动表示	34
2.5 弹性损伤结构振动特征问题摄动法的一般方程	35
2.6 裂纹梁算例	37
2.6.1 裂纹简支梁仿真计算	37
2.6.2 损伤悬臂梁算例	44
2.7 本章小结	45
参考文献	46
第3章 基于HHT方法的结构损伤检测研究	48
3.1 引言	48
3.2 基于摄动法的裂纹梁强迫响应分析	49
3.3 HHT方法的基本原理	50
3.3.1 经验模式分解	51
3.3.2 Hilbert变换	53
3.3.3 HHT方法的特点	54
3.4 基于小波分析和HHT变换的结构损伤检测方法	56
3.5 损伤检测算例	56
3.5.1 简支梁仿真计算	56
3.5.2 Benchmark结构损伤检测算例	64
3.6 本章小结	69
参考文献	70
第4章 基于支持向量机的结构损伤识别研究	73
4.1 引言	73
4.2 支持向量机算法	74
4.2.1 完全线性可分情况下的分类算法	74
4.2.2 非完全线性可分情况下的分类算法	76

4.2.3 非线性可分情况下的分类算法	76
4.2.4 支持向量机多分类算法	77
4.2.5 支持向量机分类概率估计	77
4.2.6 支持向量机回归算法	78
4.2.7 支持向量机算法的特点	79
4.3 基于支持向量机的结构损伤分步识别方法	80
4.4 梁损伤识别算例	81
4.4.1 悬臂梁仿真计算	81
4.4.2 简支梁损伤识别算例	84
4.5 本章小结	86
参考文献	86
第 5 章 悬臂梁裂纹损伤诊断实验研究	89
5.1 引言	89
5.2 实验试件及设备	89
5.2.1 实验试件	89
5.2.2 实验设备	90
5.3 基于摄动法的悬臂梁频率计算	90
5.4 基于小波分析和 HHT 变换的悬臂梁损伤检测	92
5.5 基于支持向量机的悬臂梁损伤分步识别	97
5.6 本章小结	98
第 6 章 基于激光电视全息技术的结构损伤诊断研究	100
6.1 引言	100
6.2 激光电视全息损伤检测技术原理及特点	101
6.2.1 激光电视全息检测技术原理	101
6.2.2 激光电视全息检测技术的特点	102
6.3 基于激光电视全息和支持向量机的损伤检测技术	104
6.4 液晶面板损伤识别实验	105
6.4.1 液晶面板	106
6.4.2 实验设计	106
6.4.3 实验结果	107

6.5 本章小结	109
参考文献	109
 第7章 材料疲劳寿命的智能预测方法研究	111
7.1 引言	111
7.2 基于支持向量机的单轴疲劳寿命预测	113
7.3 单轴应变疲劳预测算例	115
7.4 本章小结	117
参考文献	117
 第8章 总结与展望	119
8.1 本书工作总结	119
8.2 研究展望	121
 名词索引	123

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着科学技术的进步和现代工业的快速发展,目前工程结构正在向大型化、复杂化、自动化和连续化方向发展,特别是在航天航空、海洋平台、桥梁建筑、军事装备等领域出现了很多大型复杂结构。这些大型工程结构的使用寿命长达几十年、甚至上百年,在复杂的服役环境中受到环境侵蚀、材料老化与荷载的长期效应、疲劳效应和突变效应等因素的耦合作用,将不可避免地引起结构强度降低和损伤累积,从而导致结构抵抗自然灾害甚至正常环境下工作能力的下降;如果不能及时采取措施,很可能导致整个结构的毁坏,引发灾难性的突发事件。

由结构损伤引起整个结构系统破坏的事件数不胜数。1988年4月28日,美国一架波音737客机,在夏威夷 2.4×10^4 ft (1 ft = 0.3048 m)高空突然断裂,事后查明是由壳体的裂纹引起的;而事故发生的6个月前,航空公司按技术要求对该机进行了全面检查和维修。2006年4月16日凌晨,深汕高速公路一座跨度16 m的空心板梁桥发生半幅坍塌事故,造成该路段双向交通封闭中断,幸未造成人员伤亡。当前某些建筑承包商为利润所驱动,在施工过程中偷工减料,擅自降低设计要求,致使工程质量的安全性受到严重的威胁。“9·21”台湾大地震中被毁房屋大部分是近年所建造的,国内也发生了重庆綦江虹桥垮塌、武汉未完工楼房倒塌等事故,造成了生命财产的重大损失。

另一方面,每年因结构老化、疲劳和腐蚀等而需要的维修费越来越高,这也迫切要求人们快速准确地发现结构损伤,以便及时采取相关措施,节省维修费用。因此,工程结构的损伤诊断研究有着广泛而深远的工程背景。

为了保证工程结构和人员的安全、减少经济损失,结构损伤识别技术的研究越来越受到重视,正日益成为工程领域内一个重要的研究课题^[1-3]。近几十年来,美、英、法、德、日等发达国家投入了大量的资金用于该领域的研究与探索,我国在攀登计划重大项目、自然科学基金等中也开展了高层建筑和大型桥梁结构损伤识别和

定位技术的探索^[4]。

经过各国专家、学者以及广大工程技术人员近 30 年的共同努力,结构损伤理论在深度、广度方面都取得了较大的发展,针对工程结构中出现的不同损伤问题提出了很多检测方法,下面将对结构损伤识别方法进行简要的介绍和分类。

1.2 结构损伤识别方法的分类

结构损伤可以定义为结构原有形态的破坏,在物理状态空间表现为刚度降低、柔度增大。根据对结构的影响,损伤可以分为线性和非线性损伤^[5]。

线性损伤表现为结构在初始状态为线弹性,当发生损伤后仍然保持线弹性的特性。结构模态特性的改变是由结构几何特性或者材料特性的改变而引起的,在线性损伤情况下,结构特性仍然可以通过线性运动方程进行模拟。非线性损伤定义为结构在初始状态为线弹性,当发生损伤后表现出非线性的特性。在振动作用下结构出现的一张一合的疲劳裂缝就是非线性损伤的例子,其他的非线性损伤还有发出咔嚓声的连接松动、聚合体表现出的材料非线性等。目前大多数研究的是线性损伤检测问题。

损伤识别研究可以分为 4 个层次^[6]:①首先探测损伤的存在,即判断结构是否发生了损伤,这是进行结构损伤诊断的基础;②如果结构发生了损伤,则进一步确定损伤发生的位置,这是结构损伤识别的核心,也是难点所在;③建立损伤量化指标,对损伤程度进行标定与评价,这是进行结构完整性评定及实施维修决策的依据;④损伤探测的最终目的,即在得到损伤发生的详细信息基础上,评估损伤对系统结构安全的影响,并预测结构使用寿命,进而采取有效的控制措施。评估结构的剩余使用寿命与断裂力学、疲劳寿命分析、结构设计评定等诸多学科有关,目前国际上损伤识别研究大多集中在前三个损伤识别层次上。

对于不同类型的结构损伤,研究人员提出了多种检测方法,其中包括声学法、染色渗透剂法、电涡流法、光纤图像分解法、硬度检测法、泄漏检测法、磁粉法、压强真空检测法、脉冲—反射法、射线成像法、超声波法、热学法和 X 射线法等^[7]。这些检测方法可以对结构的外观以及某些局部特性进行检测,检测结果直观,能在一定程度上反映结构的损伤状况。但这些方法大多要求事先知道损伤的大致位置,只能检测结构表面或附近的损伤,而且使用的仪器价格昂贵。另外,很难对结构进行实时在线监测,以全面掌握结构的健康状况;特别是对于一些比较复杂的大型结构,检测其损伤十分困难。这些方法在工程领域的应用受到了限制,发展能够应用

到大型复杂结构的整体实时检测方法已成为迫切的要求,在这方面基于结构振动的损伤识别方法具有很大的优势。

基于结构振动的损伤识别的基本思想^[8-9]是损伤的出现将引起结构物理特性(如刚度、质量、阻尼等)的变化,进而导致结构动态特性(如固有频率、振型等)的变化。因此,根据结构动态特性变化能够检测结构的损伤。可见,振动损伤检测本质上是一个系统识别问题,是结构动力分析的反问题。

基于振动检测的损伤识别方法有很多特点,主要表现在:

(1) 具有非破坏性、方便、快速和廉价等优点,对于大型工程结构,可以利用环境激励引起的结构振动来对损伤进行检测。

(2) 振动测试可以在结构处于工作状态下进行,实现实时监测。

(3) 易于把传感器安装在结构深处,可以用作振动诊断的信号类型多,量值变化范围大,而且又是多维的。

(4) 随着现代传感器技术、微电子技术、计算机技术的发展,使得数据采集、数据传输以及数据的实时分析处理技术得到提高,振动测试技术易于实现诊断系统的自动化、小型化和远程化。

因此,基于振动的结构损伤识别方法一直是国际学术界和工程界关注的热点。

自20世纪70年代以来,随着振动测试和分析技术的发展,国际上广泛开展了应用振动技术对机器设备与工程结构进行损伤诊断和监测的研究,先后多次召开了有关损伤诊断的学术会议,我国科研机构也先后开展了这方面的研究工作,取得了丰硕的科研成果。

但是该方法目前还存在一定的困难,进入实际应用还有很多研究工作要做,主要体现在以下几方面^[10]:

(1) 为有效进行损伤识别,有必要了解损伤对结构动力特性的影响,如局部损伤对整体结构动力特性的影响、对支撑条件的敏感性等。

(2) 复杂工作环境下实际结构存在较多的不确定因素,在实测噪声、环境条件的不确定性等影响下结构的动力特性测量精度偏低。

(3) 振动特征参数对结构损伤的识别灵敏度较低,尚未找到对损伤位置和程度均特别敏感的有效特征参数。

(4) 在模型误差、测量数据的不完整、局部损伤的不敏感性等因素的影响下,基于结构振动的损伤识别精度还需要进一步提高。

(5) 目前的研究大多是在梁、板等简单结构上进行的,对于拥有上百万个自由度而试验测点只有几百个的大型复杂结构,损伤识别需要进行的计算量很大。

(6) 基于结构振动的损伤识别方法往往要求提供结构的早期信息。

因此,基于振动检测的损伤识别方法是一种有着良好前景而又还未成熟的方法,必须进行更深入的研究。

1.3 基于振动测试的结构损伤识别方法研究现状

1.3.1 引言

对结构裂纹采用振动方法进行检测的研究工作可以追溯到 1978 年 Adams 等^[1]的研究工作,经过近 30 年的发展结构损伤识别的振动检测方法取得了很大的进展。Doebeling、Sohn 等^[12-15]对这些研究作了系统的回顾与总结,包括损伤的非线性响应特性、传感器的数目和位置的优化以及不同的损伤监测方法对比研究等等。总之,基于振动测试的损伤识别研究正在不断发展中。

基于振动检测的损伤识别方法大体上可分为 3 类:基于动力学模型的损伤识别方法、基于信号分析的损伤识别方法和基于人工智能的损伤识别方法。

基于动力学模型的识别方法^[16]从结构的数学模型出发(一般是有限元模型),研究损伤发生时结构模态特征参数的变化规律。所用的参数主要有固有频率、模态振型、应变/曲率模态、传递函数、灵敏度等。对于参数的选择,董聪等^[17]认为:由于结构损伤是局部现象,因此用于损伤直接定位的特征参数最好是局域量,且需满足 4 个基本条件:①对局部损伤敏感,且为结构损伤的单调函数;②具有明确的位置坐标;③结构损伤后,损伤标志量在损伤位置应出现明显的峰值变化;④损伤发生后,损伤标志量在非损伤位置或者不发生变化,或者发生变化的幅度小于预先设定的阈值。

基于信号分析的损伤识别方法是直接通过分析结构在动力荷载作用下的响应信号来获得结构损伤的信息,不需要知道结构的数学模型,特征量从振动信号的时程、频谱或时频分析中选择。此类方法通常是针对结构局部构件的检测,特别是不易用有限元方法建立损伤模型的复合材料构件。一般来说,直接测试得到的动态响应信号要经过处理才能提取出其特征参数。用于信号处理的方法是多种多样的,但其根本目的都是要提取出足够多的响应信息和获得足够高的信号损伤敏感度。总体来说该方法可分为两类:一种是在时间域上进行结构响应信号的分析;另一种是求得信号的某些非时域的特征值,如信号峰值、能量积分,然后再比较这些值来识别结构损伤。

基于人工智能的损伤识别方法^[18]包括基于神经网络、支持向量机的损伤识别方法、基于专家系统的损伤识别方法和基于模糊规则的损伤识别方法等。基于人工智能的结构健康监测与诊断系统有可能把目前广泛使用的离线、静态、被动的检查转变为在线、动态、实时健康监测与控制,结构安全监控的能力将产生质的飞跃。

下面介绍一些目前得到广泛研究的基于结构振动测试的损伤识别方法的研究现状。

1.3.2 基于固有频率的损伤识别方法

损伤的产生会使结构刚度下降、阻尼增加,这些都与固有频率的下降紧密相关。频率是工程中较易获得的模态参数,精度容易保证;另外,频率的整体辨识特性使测量点可以根据实际情况确定。目前基于频率的损伤识别方法已经应用于结构损伤诊断中。

Hearn 等^[19]利用频率变化的平方比对结构损伤定位,取得了一定成果。Messina^[20]、Williams 等^[21]提出了用多阶模态频率变化来识别损伤位置的**损伤定位准则(Damage Location Assurance Criterion, DLAC)**。Dilenaa^[22]、Douka^[23]等在识别对称结构中引入反共振频率;Xia 等^[24]提出统计方法结合频率和模态振型数据识别结构中的损伤。高芳清等^[25]以低阶振型和频率为特征参数,采用摄动方法对桁架结构进行裂纹诊断。王术新等^[26]研究了裂缝悬臂梁的振动特性,以频率为特征量对裂缝的损伤位置及程度进行了识别研究。

目前基于固有频率变化的损伤识别方法比较多,但在应用上还存在一些不足,主要表现在以下几方面:

(1) 固有频率对结构早期损伤有时并不十分敏感,对于轻微损伤和局部损伤探测较为困难。

(2) 有时频率测量提供的诊断信息不够,不同位置的损伤能引起某些阶次频率相近的变化,往往只能发现损伤,而无法确定损伤的确切位置。

(3) 不同位置的损伤对不同阶的频率影响是不同的,而精确地获得所有高阶固有频率的变化是很难的。

因此单纯依赖频率变化的损伤识别具有一定的局限性。

1.3.3 基于模态振型的损伤识别方法

虽然振型的测试精度低于固有频率,但振型包含更多的损伤信息,研究人员提出了很多利用振型变化识别结构损伤的方法。

West 等^[27-28]提出了模态可信度准则(Modal Assurance Criterion, MAC)来识别损伤发生的位置, Lieven 等^[29]又进一步扩展, 提出了坐标模态可信度准则(Coordinate Modal Assurance Criterion, COMAC)。MAC 利用振型的正交特性比较两个不同振型, 可用来计算损伤前后模态振型的关联系数。在实际应用时, 当 MAC 大于 0.9 时, 两模态振型相关联; 小于 0.05 时, 两模态振型无关。用来判别结构是否发生损伤时, 采用 COMAC 比采用 MAC 所需的测试工作量要少得多, 只需要在若干振动大的测点进行测量, 就可对结构的状态作出判断。如果用来判断振型对损伤的敏感程度, 则应当用 MAC。

Shi 等^[30]应用灵敏度系数和统计方法进行结构的损伤定位, 仅利用在实验中得到的前几阶模态振型进行损伤的识别, 并取得了较好的结果。Ko 等^[31]将 COMAC 与灵敏度结合起来对桁架结构损伤进行识别, 提高了识别精度。Ndambi 等^[32-33]则利用模态振型导数的变化进行混凝土梁的损伤诊断。高芳清和王凤勤^[34]提出了一种对结构损伤前后的模态变化量进行加权处理的方法, 能够实现对损伤的有效定位。

实际上, 上述基于振型变化的损伤识别技术在实际应用中都面临着测量振型不完整的问题, 不仅测量的振型个数少于分析模型的个数, 而且测量的自由度个数也少于分析模型的自由度数。同时, 结构测量噪声的存在也进一步影响了识别精度。当缺少受损伤影响较大的测量模态振型时, 该类技术将不能有效地识别结构损伤。

1.3.4 基于应变/曲率模态的损伤识别方法

对大多数模态振型, 在损伤位置处应变模态^[35-36]具有明显的峰值, 且峰值大小随损伤程度的增加而增加。采用应变模态的好处在于可以直接研究某些关键点的应变, 如应力集中问题、局部结构变化对变化区附近应变的影响问题。

相对于位移模态的测量, 应变测量技术的优点有很多: ①应变片质量小, 附加刚度小, 占用空间小且与被测试件黏结牢靠; ②增加防护层就可在液体介质中进行测量; ③对于旋转机械, 用集流环引出信号已是成熟技术, 因此它可以用于传感器不便进行的振动测量等。

曲率模态^[37-38]是应变模态的一种特殊形式, 基于曲率模态的损伤识别方法和基于应变模态的损伤识别方法本质上是一样的。曲率是位移的二阶导数, 反映了位移的变化率; 如果结构的某一局部出现损伤, 则这一部位的曲率变化应明显大于其他部位, 通过结构损伤前后曲率模态振型的改变就可以确定损伤的发生位置。

通常在结构振动中,低阶模态起主导作用,所以只需使用少量低阶曲率模态振型进行损伤定位;而低阶位移模态振型的测试精度容易保证,所以利用曲率模态振型进行损伤定位可以在工程中实现。

Pandey 等^[39]提出了曲率模态识别方法,用有限元梁模型验证了模态曲率振型的绝对变化是很好的损伤识别因子,具有较高的结构局部损伤定位能力,能够定性评估结构的损伤。Maeck 等^[40-41]描述了钢筋混凝土梁在无损伤和损伤状态下动力刚度的确定方法。他们利用实验得到的模态振型和特征频率直接计算由模态曲率和扭转率导出的动力刚度。该方法的优点在于不需要数值模型,但是为了识别更高阶模态必须有一个相对密集的传感器测量网络。Pei 等^[42]用曲率模态法识别了简支梁中的单位置和多位置损伤,对简支梁不同损伤工况的数值模拟结果表明了曲率模态法对结构损伤定位效果极佳,尤其对微小损伤更能显示其优越性。Farrar 等^[43-44]比较了应用位移、曲率振型指标等对 I-40 桥进行了损伤识别试验的研究结果,发现应变能指标识别损伤位置最好,曲率模态振型的改变次之,MAC 方法则不敏感。

目前国内研究人员也陆续将其应用于梁、板、混凝土、结构焊缝等的损伤识别中^[45-47]。但应用于实际还要受一定的限制,如:

(1) 在损伤部位会出现应力集中现象,而离损伤区域稍远一点的地方应力又下降至正常水平。应变片只有粘到损伤部位才能测量到损伤的发生;而在大型结构中,测量前就需要先验知识,否则不易测量。

(2) 应变片的精度会受到温度、湿度等周围环境的影响,长期检测的可靠性会受到影响。

(3) 此外,测量噪声等也进一步影响了应变测量系统的精度。

因此,应变/曲率模态应用于实际结构损伤识别,还需要进一步的研究。

1.3.5 基于模型修正的损伤识别方法

对工程结构进行理论建模时,由于某些条件的假设,所建立的模型不一定能够完全反映结构的动态特性。一般可以使用某些测试数据,如模态参数、加速度时程数据、频率响应函数等,通过约束条件优化,不断地修正、调整理论模型,使其响应尽可能地接近由测试得到的结构动态响应。当两者基本吻合时,即认为此组参数为结构当前参数,修正后的理论模型作为结构的数学描述——这就是结构模型修正技术^[48-50]。

模型修正法属于数学上的反演问题,由于测量模态较少,方程数少于未知数,