



博士后文库

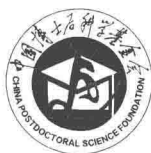
中国博士后科学基金资助出版

基于小波-分形的结构损伤检测 理论与技术

白润波 曹茂森 著



科学出版社



博士后文库

中国博士后科学基金资助出版

基于小波-分形的结构损伤检测 理论与技术

白润波 曹茂森 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点介绍了基于小波变换与分形理论融合的结构损伤检测理论和技术,其中主体内容为作者近五年的研究成果。全书共5章:第1章介绍了结构损伤检测的国内外发展现状,重点评述了以振型及其衍生量为动力特征建立的结构损伤检测理论与方法;第2章阐述了小波分析与分形理论相结合进行结构损伤检测的理论支撑和技术要点,并以数值模拟和物理试验为基本手段对结构损伤检测进行了实例分析;第3章探讨了结构典型损伤形式——裂缝的七种代表性数值模拟技术,以及含损伤结构模态分析和工作变形分析的计算及测试方法;第4章和第5章分别呈现了小波分析与分形理论融合进行梁类结构和板类结构损伤识别的新方法,重点阐述了基于高阶振型建立的对损伤敏感、抗噪能力强的结构损伤检测理论和技术。

本书可作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生和教师的参考书,也可供从事结构检测、评估、加固工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于小波-分形的结构损伤检测理论与技术/白润波,曹茂森著. —北京:科学出版社,2017.6

(博士后文库)

ISBN 978-7-03-052895-7

I. ①基… II. ①白…②曹… III. ①小波分析-建筑结构-损伤(力学)-检测 IV. ①TU311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 113301 号

责任编辑:陈 婕 纪四稳 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:陈 敬

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017 年 6 月第一次印刷 印张:9 1/2

字数:180 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《博士后文库》编委会名单

主 任 陈宜瑜

副主任 詹文龙 李 扬

秘书长 邱春雷

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

付小兵	傅伯杰	郭坤宇	胡 滨	贾国柱	刘 伟
卢秉恒	毛大立	权良柱	任南琪	万国华	王光谦
吴硕贤	杨宝峰	印遇龙	喻树迅	张文栋	赵 路
赵晓哲	钟登华	周宪梁			

《博士后文库》序言

1985年,在李政道先生的倡议和邓小平同志的亲自关怀下,我国建立了博士后制度,同时设立了博士后科学基金。30多年来,在党和国家的高度重视下,在社会各方面的关心和支持下,博士后制度为我国培养了一大批青年高层次创新人才。在这一过程中,博士后科学基金发挥了不可替代的独特作用。

博士后科学基金是中国特色博士后制度的重要组成部分,专门用于资助博士后研究人员开展创新探索。博士后科学基金的资助,对正处于独立科研生涯起步阶段的博士后研究人员来说,适逢其时,有利于培养他们独立的科研人格、在选题方面的竞争意识以及负责的精神,是他们独立从事科研工作的“第一桶金”。尽管博士后科学基金资助金额不大,但对博士后青年创新人才的培养和激励作用不可估量。四两拨千斤,博士后科学基金有效地推动了博士后研究人员迅速成长为高水平的研究人才,“小基金发挥了大作用”。

在博士后科学基金的资助下,博士后研究人员的优秀学术成果不断涌现。2013年,为提高博士后科学基金的资助效益,中国博士后科学基金会联合科学出版社开展了博士后优秀学术专著出版资助工作,通过专家评审遴选出优秀的博士后学术著作,收入《博士后文库》,由博士后科学基金资助、科学出版社出版。我们希望,借此打造专属于博士后学术创新的旗舰图书品牌,激励博士后研究人员潜心科研,扎实治学,提升博士后优秀学术成果的社会影响力。

2015年,国务院办公厅印发了《关于改革完善博士后制度的意见》(国办发〔2015〕87号),将“实施自然科学、人文社会科学优秀博士后论著出版支持计划”作为“十三五”期间博士后工作的重要内容和提升博士后研究人员培养质量的重要手段,这更加凸显了出版资助工作的意义。我相信,我们提供的这个出版资助平台将对博士后研究人员激发创新智慧、凝聚创新力量发挥独特的作用,促使博士后研究人员的创新成果更好地服务于创新驱动发展战略和创新型国家的建设。

祝愿广大博士后研究人员在博士后科学基金的资助下早日成长为栋梁之才,为实现中华民族伟大复兴的中国梦做出更大的贡献。



中国博士后科学基金会理事长

前 言

在土木、水利、机械、航空航天等多个领域,工程结构在长期服役过程中,会受到环境侵蚀、材料老化、动荷疲劳、人为破坏以及突变效应等不利因素的耦合作用,不可避免地会产生损伤。结构损伤的累积必然会削弱结构性能,降低结构的安全性,并可能引发灾害性突发事件。对结构早期的损伤进行检测,进而采取有效、及时的修补措施,既有利于降低维护费用,又能够保证结构可靠、安全运行,延长结构服役寿命。从 20 世纪 90 年代开始,计算机、信息和传感技术的交叉融合逐渐加强,为结构损伤检测理论和技术的发展带来了契机。目前结构损伤检测已成为具有重大科技价值且国内外亟须研究的课题。

基于振动理论和波动理论的结构损伤检测是结构损伤检测领域的两个主要分支,本书所涉及的内容是以振动理论为基础的结构损伤检测的一个前沿课题。以振动理论为基础的结构损伤检测的力学原理是:结构动力学参数(固有频率、振型、模态阻尼)是结构物理特性(质量、刚度、阻尼)的函数,损伤所致结构物理特性的改变必然会引起结构动力学参数的变化。因此,依据结构动力学参数的改变可以辨识结构损伤的发生及发展状况。与固有频率、模态阻尼等动力学参数相比,振型既能描述结构的整体力学特性,又能刻画结构的局部动力状态,因而在表征结构损伤方面具有特色和优势。迄今,以结构振型及其衍生量为基础,国内外学者已提出了一系列结构损伤检测方法,如模态保证标准判别法、坐标模态保证标准判别法、模态曲率法、模态应变能法等。这些方法各有优点,适用于一些特定的损伤检测情况,但也普遍存在抗噪能力弱、对轻微损伤不敏感等不足。

小波变换和分形理论是近期出现的应用数学工具。小波变换在消除噪声方面具有独特的优势,而分形理论在提取动力响应弱奇异特征方面能力突出,两者的优势融合为噪声环境下结构弱损伤特征的提取开辟了一个新途径。本书对小波变换与分形理论相结合的结构损伤检测进行了专门研究,提出了振型小波变换系数法、振型分形维迹线法等多个新的结构损伤特征量,为克服上述基于振动理论的结构损伤检测的不足提供了新理论、新方法和新思路。

本书研究小波变换与分形理论相结合的结构损伤识别理论与技术,其中主体内容为作者近五年的研究成果,科学重点是在理论分析、数值模拟和试验验证的基础上,发展小波变换与分形理论相结合的结构损伤识别理论与技术。全书共 5 章:第 1 章介绍结构损伤检测的国内外发展现状,重点评述以振型及其衍生量为动力特征建立的结构损伤检测理论与方法;第 2 章阐述小波分析与分形理论相结合进

行结构损伤检测的理论支撑和技术要点,并以数值模拟和物理试验为基本手段对结构损伤检测进行实例分析;第3章探讨结构典型损伤形式——裂缝的七种代表性数值模拟技术,以及含损伤结构模态分析和工作变形分析的计算及测试方法;第4章和第5章分别呈现小波分析与分形理论融合进行梁类结构和板类结构损伤识别的新方法,重点阐述基于高阶振型建立的对损伤敏感、抗噪能力强的结构损伤检测理论与技术。

本书是在国家自然科学基金重点项目“灾变条件下特高混凝土坝失效破坏的关键力学问题”(11132003)、中国博士后科学基金一等资助项目“基于多尺度高阶振型空间的结构损伤分形维动力表征”(2014M560386)、国家自然科学基金青年科学基金项目“由高频振动响应识别结构早期损伤的多分辨分形理论与方法”(51508156)、山东省自然科学基金项目“基于高阶振型的结构轻微损伤诊断关键理论与方法”(ZR2014EL034)等的支持下完成的,并参考了许多国内外同行发表的研究成果,在此深表谢意。

本书的出版得到了中国博士后科学基金的资助,在此表示衷心感谢。

结构损伤诊断是一个涉及材料、结构、力学、信息、传感、计算机等多学科交叉的、非常复杂的科学技术问题,该问题的若干方面仍处于研究和探索之中。本书侧重展现这一领域在应用基础研究方面的一些新发现和新进展,虽然作者力求无误,但书中难免有疏漏或不足之处,恳请读者批评指正,以期进一步完善。

作 者

2016年8月

目 录

《博士后文库》序言

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 结构损伤检测概述	1
1.2 基于振型的结构损伤检测方法发展评述	2
1.2.1 振型	2
1.2.2 模态曲率	5
1.2.3 模态应变能	7
1.2.4 模态柔度	9
1.2.5 振型小波变换系数	11
1.2.6 振型分形维迹线	12
参考文献	14
第 2 章 分形与小波融合的结构损伤检测	21
2.1 分形与分形维	21
2.1.1 分形理论基础	21
2.1.2 分形维	23
2.2 小波与小波变换	25
2.2.1 小波分析	25
2.2.2 à trous 小波算法	27
2.2.3 小波函数的选取	27
2.3 分形与小波的优势融合	30
2.3.1 分形与小波结合的数学基础	30
2.3.2 分形与小波结合的功能基础	31
2.3.3 分形与小波的结合方式	31
2.4 分形与小波结合的结构振动损伤特征提取	32
2.4.1 噪声对关联维的影响	32
2.4.2 关键子波关联维分析表征弱损伤	33
2.4.3 损伤检测数值模拟分析	34
2.4.4 损伤检测模型试验分析	38
参考文献	40

第3章 含损伤结构的模态计算与测试	42
3.1 裂缝的数值模拟方法	42
3.1.1 弹簧模拟法	42
3.1.2 刚度降低法	45
3.1.3 接触分析法	46
3.1.4 奇异单元法	48
3.2 结构模态分析	49
3.2.1 损伤结构计算模态分析	49
3.2.2 试验模态分析	51
3.3 结构工作变形分析	54
3.3.1 结构工作变形	54
3.3.2 工作变形测试	55
参考文献	57
第4章 梁类结构的损伤识别	58
4.1 振型分形维迹线法识别结构损伤	58
4.1.1 滑动窗法计算振型分形维迹线	58
4.1.2 波形分形维的几种近似定义	59
4.1.3 基于不同波形分形维定义的振型分形维迹线比较	61
4.2 基于仿射变换的高阶振型分形维迹线法	63
4.2.1 高阶振型用于损伤检测的优势	63
4.2.2 高阶振型用于损伤检测存在的问题	64
4.2.3 基于仿射变换的振型分形维迹线法	67
4.3 多振型融合的分形维迹线法	70
4.3.1 分形维迹线融合方法	70
4.3.2 梁损伤检测数值算例分析	71
4.3.3 梁损伤检测模型试验分析	76
4.4 尺度分形维迹线法	84
4.4.1 噪声对梁损伤检测效果的影响	84
4.4.2 噪声在小波变换下的特性	89
4.4.3 基于静态离散小波变换的尺度分形维迹线法	91
参考文献	98
第5章 板类结构的损伤识别	100
5.1 板损伤检测的分形维迹线曲面法	100
5.1.1 板的振型分形维迹线曲面法	100
5.1.2 基于板振型分形维迹线曲面的损伤识别	103

5.2 基于双树复小波降噪的板分形维迹线曲面损伤检测	115
5.2.1 噪声对板损伤检测效果的影响	115
5.2.2 基于双树复小波降噪的板分形维迹线曲面法	121
5.2.3 板损伤检测模型试验分析	122
5.3 板的尺度分形维损伤检测法	127
5.3.1 板振型尺度分形维迹线曲面损伤检测法	127
5.3.2 板损伤检测数值算例分析	129
5.3.3 模型试验的尺度分形维损伤检测分析	132
参考文献	137
编后记	138

第 1 章 绪 论

1.1 结构损伤检测概述

结构物在服役过程中会受到环境侵蚀、材料老化、荷载效应、人为破坏及自然灾害等不利因素的影响,不可避免地会产生腐蚀、疲劳、裂纹、磨损、变形等损伤。损伤必然会降低结构的安全性,并可能引发灾害性突发事件。对结构早期的损伤进行检测,进而采取有效、及时的修补措施,既有利于降低维护费用,又能够保证结构可靠、安全地运行,延长结构服役寿命。因此,对结构进行损伤识别,特别是进行结构无损检测在世界范围内都得到了极大关注,成为当前土木水利、机械、航空航天等领域的科技热点问题之一。

无损检测技术是一门综合性应用学科。它是在不损坏被检测对象的条件下,利用被检测对象的物理特性因缺陷的存在而发生变化的事实,测定其变化量,从而检测出结构的内部和表面是否存在缺陷,以及缺陷的大小、形状、位置和严重程度,在可能的情况下预测结构的剩余疲劳寿命。由此可以看出,结构损伤检测过程包括四个层次:①损伤判定,判断结构是否存在损伤;②损伤定位,确定损伤的几何位置;③损伤定度,评估损伤的严重程度;④损伤评估,预测结构的剩余使用寿命。

目前常用的结构损伤检测方法有目测法、超声波法、声发射法、射线法、光学法、电涡流法、磁通量泄漏法、渗透法、红外线法、动力法等,其中动力法是最基本、最常用的无损检测方法之一。目前,结构动力无损检测技术包括两大分支:波动理论支撑的局部性无损检测(wave-based local nondestructive damage detection, W-LDD)和振动理论支撑的全局性无损检测(vibration-global nondestructive damage detection, V-GDD)。W-LDD的基本力学原理是:结构的损伤能够改变弹性波的反射、透射、模态等传播特性,依据弹性波传播特性的改变可以辨识损伤的发生及发展状况。该类方法具有原理明晰、对弱损伤敏感、导波阵列可识别损伤形状、适用于长距离检测等优势,然而,其“局部性检测”特点,决定了预先知道损伤局部区域是将其有效应用于大型结构体的先决条件。预先知道了损伤区域,才能合理布置覆盖损伤的传感系统。但是,结构损伤检测又具有反问题属性,几乎不可能预先知道损伤局部区域。因此,虽然 W-LDD 具有诸多优势,但需要预先知道损伤局部区域在一定程度上限制了其适用性。

本质上, V-GDD 具有克服上述 W-LDD 局限性的潜力。V-GDD 的基本力学原理是: 结构动力学参数(固有频率、振型、模态阻尼)是结构物理特性(质量、刚度、阻尼)的函数, 损伤所致结构物理特性的改变必然会引起结构动力学参数的变化。因此, 依据结构动力学参数的改变可以判断结构损伤的发生及发展状况。鉴于结构动力学参数从全局反映结构的动力特性, 从而, “全局性检测”是 V-GDD 的基本特征。这一特征有效克服了 W-LDD 需要预先知道损伤局部区域的局限性。从这一角度, 可以说 V-GDD 比 W-LDD 在结构损伤检测实用性方面向前迈进了一步。

近年来, 很多学者在 V-GDD 领域开展了大量的研究工作, 建立了基于结构固有频率、振型、应变能、频响函数等多种损伤检测理论与方法。与固有频率、模态阻尼等动力学参数相比, 振型既能够描述结构的整体力学特性, 又能够刻画结构的局部动力状态, 因而在表征结构损伤方面具有特色和优势。目前基于结构振型及其衍生量已产生了很多结构损伤识别方法, 如模态保证标准判别法(modal assurance criteria, MAC)、坐标模态保证标准判别法(coordinate modal assurance criteria, COMAC)、模态曲率法、模态应变能法、振型小波变换系数法、振型分形维迹线法等。尤其是随着科学技术的发展, 一些现代量测设备, 如扫描式激光测振仪等已用来精确获得某些结构的振型, 使上述方法具备应用于实际工程结构损伤检测的可能。下面重点评述上述几种基于振型及其衍生量的结构损伤检测方法。

1.2 基于振型的结构损伤检测方法发展评述

基于结构振型及其衍生量的损伤检测技术已获得了广泛研究, 这些结构损伤识别指标包括振型、模态曲率、模态应变能、模态柔度、振型小波变换系数、振型分形维迹线等。下面分别对这些方法的国内外典型研究成果进行评述。

1.2.1 振型

模态振型是对应于结构固有频率的挠度变化模式, 它代表结构各部分之间相对的位移变化状态, 可以提供结构的空間位置信息。当结构局部位置发生损伤时, 模态振型会在损伤的附近区域出现变化, 由此通过损伤前后振型的变化有可能判定出结构的损伤状况。

Rizos 等^[1]基于一悬臂梁的模态振型对其上的裂缝进行了裂缝位置定位和裂缝深度的度量。Mayes^[2]利用一双连杆机械臂模态振型的变化情况来确定其上损伤的位置。总体来看, 单纯利用结构模态振型进行损伤诊断的文献较少, 更多的是利用如模态保证标准判别法(MAC)、坐标模态保证标准判别法(COMAC)等与振型关联的指标来进行损伤诊断。

Allemang 和 Brown^[3]首次用两个振型矢量集的相关性分析产生模态保证标准,并将其应用于损伤判断,MAC 可以定义为

$$\text{MAC}(u_r, d_r) = \frac{(\Phi_{u_r}^T \Phi_{d_r})^2}{(\Phi_{u_r}^T \Phi_{u_r})(\Phi_{d_r}^T \Phi_{d_r})} \quad (1-1)$$

式中, u_r 、 d_r 分别表示未损伤、损伤的结构状态; Φ_{u_r} 、 Φ_{d_r} 分别为未损伤、损伤结构的第 r 阶模态振型。MAC 能衡量振型向量的相关程度,当损伤未发生时, $\Phi_{u_r} = \Phi_{d_r}$, 则 $\text{MAC}(u_r, d_r) = 1$; 一旦损伤发生,由于模态振型的变化,则 $\text{MAC}(u_r, d_r) \neq 1$ 。MAC 值位于区间 $[0, 1]$, 由 0 至 1 表明由完全损伤过渡为无损。因此,MAC 值的降低可以作为损伤发生的标志。

West^[4]利用 MAC 计算结构的模态振型在损伤前后的相关程度,然后对模态振型分块,根据 MAC 的分块情况对结构损伤进行了识别。Salawu 和 Williams^[5]以一座混凝土桥为例,通过测试全桥在维修前后的模态数据,分析认为可以以 MAC 为 0.8 作为结构损伤与否的判据,当 MAC 小于 0.8 时,即认为结构发生了损伤。Fox^[6]开展了利用模态参数进行结构损伤定位的研究,通过对含损伤梁结构的分析表明,模态参数测试和数据分析处理所带来的误差足以淹没结构损伤所致的 MAC 值的变化。Allemang^[7]评述了 MAC 用于结构损伤识别时的效果及存在的问题。利用 MAC 进行损伤诊断的具体做法常常是计算损伤结构与各个模式的 MAC 矩阵,看其是否较好地满足正交条件,从而确定最接近的那个模式作为识别结果。但 MAC 指标容易受噪声的干扰,并且测试数据不完备时正交条件失效,再加上其计算量大、结果不直观等限制了 MAC 指标的实际应用。

此外,MAC 也无法进行损伤定位。为了确定结构中损伤的具体位置,Lieven 和 Ewins^[8]提出了改进的 MAC 准则,即坐标模态保证标准判别法(COMAC),用于损伤判断与定位,COMAC 定义为

$$\text{COMAC}(k) = \frac{\left(\sum_{r=1}^n |\Phi_{u_r}(k) \cdot \Phi_{d_r}(k)| \right)^2}{\sum_{r=1}^n \Phi_{u_r}^2(k) \sum_{r=1}^n \Phi_{d_r}^2(k)} \quad (1-2)$$

式中, $\Phi_{u_r}(k)$ 、 $\Phi_{d_r}(k)$ 分别为损伤前后 Φ_{u_r} 、 Φ_{d_r} 在 k 点的分量。COMAC 能衡量每个自由度上的模态相关关系。采用 $\text{COMAC}(k)$,只需选择若干个典型测点,测量其模态值即可,而不像采用 MAC,需要测量所有测点上的模态值。结构在发生损伤前后,对应在损伤位置或者临近损伤位置处节点自由度的振型值会发生改变,而远离损伤位置的节点自由度振型值则不会发生变化或者变化较小。因此,COMAC 值可以用来进行损伤识别。由于 COMAC 值直接与结构局部节点相关,所以该指标不仅可以判断结构是否发生了损伤,还可以确定损伤位置。COMAC 值位于区间 $[0, 1]$,当 COMAC 值为 0 时,表明损伤前后模态振型之间完全不相关,

结构完全损伤;当 $\text{COMAC}=1$ 时,表明损伤前后模态振型之间完全相关,结构无损伤;由 0 至 1 表明由完全损伤过渡为无损。

Kim 等^[9]的研究表明,COMAC 可用于判定损伤的发生,并能确定损伤的位置。Ko 等^[10]通过对钢框架结构的研究也证明 COMAC 可用于确定损伤的位置,若能选用恰当的模态振型进行计算,则结构损伤识别的效果会更好。Maia 等^[11]认为在自由边界条件下用 COMAC 进行损伤检测是可取的。Ndambi 等^[12]利用 MAC、COMAC 等来检测损伤,研究表明,MAC 可用于判定损伤是否发生,但不能进一步进行损伤定位,也不能说明损伤的程度;COMAC 可用于确定损伤的位置,但在一些情况下会出现误判。郭国会和易伟建^[13]研究了二跨连续梁的损伤识别问题,通过对损伤前后连续梁 MAC、COMAC 的对比分析表明,MAC 可以判定连续梁是否发生了损伤,但不能用于损伤定位和损伤程度度量;COMAC 可以进行损伤定位,但不能定量说明结构的损伤程度。梁博^[14]基于 COMAC 对网架结构进行了损伤识别,研究表明,COMAC 虽不能准确定位出网架结构上损伤杆件的具体位置,但能够识别出可能损伤的部位,从而缩小了需要进一步损伤检测的范围。Pandey 等^[15]的研究表明,MAC 和 COMAC 用于表征损伤的灵敏度均不高,原因是 MAC 在进行损伤检测时采用了测点平均,而 COMAC 采用了模态平均。Ho 和 Ewins^[16]对振型关联度分析的不同损伤指标进行了分析讨论,通过对悬臂梁数值模拟结果的分析表明,模态之间关联好坏的阈值可取为 0.9 和 0.1,有时也可取为 0.8 和 0.2;当用相关量与结构损伤程度建立定量关系时要谨慎,因为导致关联值较低的原因除了模型不正确外,还可能是量测数据中存在较多噪声、模态分析精度低、选择了不合适的自由度等其他因素。

近年来,Cao 等^[17]基于模态振型和静力变形研究了悬臂梁结构的损伤识别。安永辉和欧进萍^[18]提出了适用于简支梁结构的两种损伤程度识别方法,即整体振型的相关系数法和保证准则法,脉冲激励下的结果表明,两种方法能较准确地识别损伤单元的等效损伤程度,具有较强的抗噪能力。Jassim 等^[19]以悬臂梁为例,对相关损伤识别方法进行了综述,并指出:模态振型对于裂缝参数具有良好的敏感性,MAC 可有效判别损伤发生情况,而 COMAC 可以识别裂缝位置。

归纳分析可认为,振型这一损伤指标具有如下优点:作为位置坐标的单调函数,能够反映结构的局部特性,具有一定的空间精度;应用 MAC 可判断结构是否发生了损伤;COMAC 可进行损伤位置定位,利用 MAC 预先对模态进行灵敏性分析从而选择有效振型,可以提高 COMAC 的精度;MAC、COMAC 对自由边界效果最好。具有的不足为:振型由频响函数经模态分析得到,统计可变性较大;其获取需多点测试,受观测和系统噪声影响,精度难以保证;需要结构无损状态下的模态资料;MAC、COMAC 对低阶模态不灵敏,导致其值低于 1 的因素很多;MAC、COMAC 对弱损伤不够灵敏,抵抗噪声的能力也较差。

1.2.2 模态曲率

模态曲率是指对测量得到的结构振型曲线求两次导数(可采用数值微分方法)所得到的损伤识别指标。通常是以损伤前后模态曲率差值为损伤定位参数,如果结构出现损伤,损伤处的刚度会降低,那么该处的模态曲率差便会出现局部的突变。模态曲率的变化幅度随着损伤程度的增大而增大,因此可以根据模态曲率的变化确定损伤发生的位置和估计损伤的程度。

第 m 个节点第 i 阶模态的模态曲率定义为

$$\ddot{\phi}_i^j = \frac{\phi_i^{j-1} + \phi_i^{j+1} - 2\phi_i^j}{l_{j,j-1}l_{j+1,j}} \quad (1-3)$$

式中, $\ddot{\phi}_i^j$ 为第 i 阶模态在 j 节点的模态曲率; $l_{i,j}$ 为自由度 i, j 对应节点之间的距离; ϕ_i^j 为第 i 阶模态在 j 节点的坐标。

Pandey 等^[20]以悬臂梁和简支梁为研究对象,首次提出通过模态曲率来检测结构的损伤,研究表明,模态曲率对于局部损伤十分敏感,可以有效地发现损伤部位,也可估计损伤程度,并且指出高阶模态曲率与低阶相比对损伤更为敏感。Chance 等^[21]通过数值模拟和模型试验研究表明,梁结构的模态曲率比振型对损伤的识别更加敏感。Salawu 和 Williams^[22]研究指出,对于不同的损伤位置,不同阶次的模态曲率的敏感性有较大差别,选择用来损伤位置识别的模态的阶数是关键问题。Ratcliffe^[23]将 Pandey 等提出的模态曲率法进行进一步研究,发展了模态曲率和拉普拉斯变换相结合的不需要无损结构原型的损伤检测方法。Wahab 和 Roeck^[24]以一真实桥为例,通过试验测得了其前几阶模态,平均化处理求得曲率差值,较好解决了多位置损伤的识别问题。Sampaio 等^[25]研究指出,模态曲率法应用于高阶模态时损伤识别效果较好,而频响函数曲率法识别的整体效果较好。邓焱^[26]通过数值模拟分析了一个钢筋混凝土 T 形简支梁在无损及有损情况下的计算结果,有损伤时,模态振型的变化难以觉察,而模态曲率的变化却十分明显。Ho 和 Ewins^[27]采用振型斜率、模态曲率、模态曲率平方、弹性指数和模态振幅比等五种指标进行损伤识别,结果表明,对振型进行高阶求导的方法识别损伤的效果会更好,但测量结果若在量测效果比较差的位置或振型节点获得,识别效果则较差,在结构边界位置容易出现误诊。

近年来,Cao 等^[28]针对传统拉普拉斯算子计算得到的模态曲率容易受到噪声影响的缺点,提出了一种新颖的拉普拉斯算子和损伤识别算法,使损伤识别特征获得进一步增强。何钦象等^[29]以数值模拟的方法,利用高斯曲率模态差对薄板的损伤位置进行定位,并度量薄板的损伤程度,结果表明,曲率模态识别损伤的精度较高。张勇等^[30]的数值算例表明,模态曲率不易识别出振型节点附近的损伤。尚高峰等^[31]以海洋平台结构为研究对象,将其分解为若干子结构,基于模态曲率法并

结合模态应变数据,进行单构件及多构件的损伤识别,数值算例表明该方法具有良好的损伤判别及损伤定位能力。刘寒冰等^[32]针对多片简支梁桥自由度数较多引起的损伤识别判断困难问题,提出了一种利用模态曲率的损伤定位能力进行损伤区域判定,并通过神经网络进行损伤程度判定的方法,通过数值分析验证了方法的正确性。徐华东等^[33]开展了采用模态曲率对木梁结构损伤识别的研究,通过有限元数值模拟和模型试验的分析表明,通过模态曲率可以对木梁结构的损伤进行有效的定量分析。刘义伦等^[34]推导出了针对桥梁损伤检测的曲率模态公式,提出了曲率模态规范化的方法,并特别处理了曲率零点处的变化量,消除了曲率为零处的干扰,同时给出了损伤程度的估计公式,研究表明,该方法在传感器足够时可以得到与理论计算较为吻合的结果。聂彦平等^[35]以固支梁为研究对象,比较分析了曲率模态和柔度曲率对结构损伤的敏感性。谈志成等^[36]针对局部刚度具有不确定性的梁结构的损伤识别问题,通过虚拟分割方法和静力加载试验,提出了一种新型的加载工况及挠度处理方法,并求解线性方程组实现了结构真实局部抗弯刚度的评定,在刚度数据分析基础上,对在役梁结构进行模态识别,采用模态曲率进行损伤定位,识别效果良好。张坤^[37]以简支梁、三跨连续梁为算例,计算结构的模态曲率,通过观察模态曲率的突变识别出了结构模拟的损伤位置。李忠华^[38]分析了不同损伤工况下以各阶曲率模态、曲率模态变化率、即刻曲率模态损伤因子作为识别指标时弯坡刚构桥损伤识别效果的适用性和敏感性,并评价分析了各种指标的优缺点。尚鑫^[39]通过数值模拟,对比分析了模态曲率和模态曲率差对梁桥的损伤识别效果,发现模态曲率差曲线比模态曲率曲线携带的损伤信息更强烈,受单元长度划分影响更小;模态曲率和模态曲率差曲线所携带的梁的损伤信息随着模态阶数的增加而减弱;如果损伤点处于振型曲线的节点位置,那么难以反映损伤信息;对于模态曲率差指标反映损伤信息,需要结构无损伤的模态曲率信息,而模态曲率指标则不需要此信息。此外,尚鑫还研究了测点密度、噪声等对模态曲率差损伤识别效果的影响,并运用模态曲率振型的相对变化量对损伤程度进行了识别。Cao等^[40]发现模态曲率易受噪声影响,且该指标在多位置损伤识别方面存在困难,为此提出了应用小波变换和 Teager 能量算子进行损伤识别的方法,通过对含多裂缝损伤悬臂梁的数值模拟及模型试验验证了所提方法的有效性,该方法能有效识别出多位置损伤,且具有较强的抗噪能力。Ciambella 和 Vestroni^[41]提出了一种综合模态曲率指标与摄动求解的方法,该方法不仅能够区分微小裂缝和较宽裂缝,而且能够识别单一损伤和多位置损伤。Rucevskis 等^[42]提出了一种基于模态曲率对板类结构进行损伤识别的方法,该方法除了应用传统的中心差分算法,还综合使用了 Tikhonov 正则化技术和平滑函数,通过对一板结构的试验分析验证了方法的有效性。

因此,模态曲率这一损伤指标具有的优点为:损伤灵敏性比振型指标高;对于梁结构有明确的物理解释。具有的不足为:需要多点量测,测点间距要小;从振型到模态曲率为微分运算过程,容易引入计算噪声;获取精度难以保证;抵抗噪声干扰的能力较弱。

1.2.3 模态应变能

模态应变能是采用结构损伤前后的模态应变能变化进行损伤辨识,它将结构划分为一系列的单元,分别计算结构损伤前后每个单元的模态应变能变化率,部分模态振型会在结构损伤附近发生局部突变,故模态应变能在结构中的分布将发生变化,所以可以通过比较每一单元模态应变能的变化来进行结构损伤诊断。第 j 个单元在第 i 阶模态下的应变能定义为

$$E_{ij} = \phi_i^T K_j \phi_i \quad (1-4)$$

式中, K_j 为完好结构的第 j 个单元的单元刚度矩阵; ϕ_i 为单元 j 各个自由度下第 i 阶模态下的振型坐标值。

当考虑结构的前 m 阶模态时,单元模态应变能可以计算为

$$E_j = \sum_{i=1}^m \phi_i^T K_j \phi_i \quad (1-5)$$

Chen 和 Garba^[43] 最早提出通过计算损伤前后模态应变能的差值来实现损伤单元的识别。Lim^[44] 应用模态应变能法对一平面桁架进行了损伤识别,结果发现,有一些杆件对某阶振型的模态应变能值为零,那么就不能用这阶模态来识别这根杆件的损伤。Stubbs 等^[45] 将模态应变能应用于梁类结构损伤检测。Osegueda 等^[46] 通过对铝制悬臂梁和蜂窝状复合板的损伤试验研究认为,模态应变能可用于梁结构的损伤定位和损伤程度度量,而对于板类结构损伤识别效果较差。Carrasco 等^[47] 基于模态应变能对一空间桁架结构的损伤进行了定位和损伤程度定量研究,表明该方法能够识别出完全损伤和部分损伤。Shi 等^[48] 建议用每个结构单元在损伤前后的模态应变能进行损伤识别和定位。Farrar 和 Jauregui^[49] 以桥梁结构损伤检测为背景对五种典型的动力损伤指标进行了比较,认为模态应变能方法效果最佳。Cornwell 等^[50] 对梁和板进行了损伤检测,认为模态应变能够成功辨识较严重的损伤,当两个损伤具有不同损伤程度时,可以明确辨识损伤程度较大的一个,而对损伤程度较小的一个辨识效果不佳。Cornwell 等^[51] 还将研究扩展到二维板结构,认为模态应变能够有效地检测到刚度减小 10% 的局部损伤。Yoo 等^[52] 也用损伤前后模态应变能的变化对板进行了损伤检测。Sazonov 等^[53] 提出了基于模态应变能变化的可不参照无损结构基准模型的弱损伤检测方法。任淑芳和郭国会^[54] 利用摄动理论,以单元局部频率变化率和单元模态应变能比为损伤指标,通