

# 结构损伤检测的 智能方法

朱宏平 著

Smart Method of  
Structural Damage  
Detection



人民交通出版社  
China Communications Press

**Smart Method of Structural Damage Detection**

# **结构损伤检测的智能方法**

朱宏平 著

人民交通出版社

## 内 容 提 要

本书是作者十余年来在结构损伤识别与健康监测方面研究成果的总结,内容包括结构损伤检测智能技术的国内外研究现状,基于小波变换的结构模态参数识别方法,基于数字摄影测量技术和图像处理技术的结构动态位移监测方法,结构测量参数对结构损伤的敏感性,基于动力特性的结构损伤识别方法,以及基于波传播理论和压电阻抗技术的土木工程结构损伤识别方法。

本书系统性强,内容丰富且属学科前沿,理论性与实用性兼顾,可作为土建类专业技术与科研人员的参考资料,以及高校教师、研究生、高年级本科生参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

结构损伤检测的智能方法 / 朱宏平著. —北京: 人民交通出版社, 2009.3

ISBN 978-7-114-07640-4

I. 结… II. 朱… 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 (2009) 第 026346 号

书 名: 结构损伤检测的智能方法

著 作 者: 朱宏平

责任编辑: 岑 瑜

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×960 1/16

印 张: 11.75

字 数: 205千

版 次: 2009年3月 第1版

印 次: 2009年3月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-07640-4

印 数: 0001~2000册

定 价: 25.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

# 前 言

土木工程结构的安全直接关系到人民生命财产的安全,土木工程基础设施的正常运行关系到国民经济的正常运行。然而,土木工程结构在长达几十年,甚至上百年的服役过程中,环境侵蚀、材料老化和荷载效应、人为的或自然的突变效应等灾害因素的耦合作用将不可避免地导致结构的损伤累计和抗力衰减,从而使得抵抗自然灾害、正常荷载以及环境作用的能力下降,引发灾难性的突发事故。及时监测结构健康状况,对结构早期损伤进行维修,不仅能够显著降低维护费用,而且能够保证结构性能,延长结构寿命。因此,研究有效的损伤识别、健康监测、安全评定、损伤控制及修复技术,具有重要的社会与经济价值。

近年来,基于动态测量信息的土木工程结构健康监测的研究与应用受到了广泛的关注并取得了显著的进展,土木工程结构健康监测已成为目前国际上土木工程学科最活跃的研究领域之一。更为可喜的是,随着现代计算机技术、现代信息处理与分析技术和智能材料的发展,土木工程结构健康监测方面的研究已取得了阶段性的成果,但大型土木工程结构的特殊性(如结构的大型化和复杂化、材料特性以及约束条件的不确定性给结构物数学模型的建立带来的困难性),对大量数据和信息的适当选择、处理、分析和评价的理论研究和软件开发的相对滞后,以及由于工程结构/材料损伤的特殊和复杂性,结构损伤识别技术已成为了制约结构健康监测发展的关键因素之一。尽管国内外研究人员在基于动力特性的损伤识别方法方面取得了许多理论和试验进展,但是,在诊断结构的微损伤、弄清损伤演化规律、实现健康监测方面还存在一系列问题无法解决。其中一个关键问题是,结构早期程度较小的损伤对结构动力特性的影响很小,大量的研究表明,即使结构出现较大损伤,结构模态参数也可能没有明显变化,再加上噪声的影响,现有的许多方法就无法准确识别小损伤。近年来,以光纤传感器为代表的结构局部应变传感器得到了迅速发展,基于应变测量信息的结构损伤识别技术研究得到了国内外学者广泛的关注,尤其是,运用小波或小波包变换提取损伤特征被证明是一种行之有效的方法。智能材料具有传感,或者传感与驱动的双重功能,能够与土木工程结构融合在一起组成智能损伤检测与健康监测系统。其中,压电陶瓷 PZT (piezoelectric ceramic) 质量轻,对本体结构影响很小,可以粘贴在已有结构的表面或埋入新建结构的内部对结构进行监测,被证明

是一种非常有效的主动结构损伤检测与健康监测方法。

作者及其合作者围绕着大型土木工程结构的特殊性以及测量信息的复杂性和不确定性,对制约“土木工程结构损伤动力检测”实现的若干“关键基础理论问题”进行了探索与研究,形成了一套使用方便、适合于推广与应用的基于有限测量信息的复杂土木工程结构损伤检测系统,并在 100 多个重要土木工程结构中得到了应用,取得了重要的社会与经济效益。本书为作者在该领域十几年研究成果的总结,内容涵盖:精确而又简便获取结构动静态信息的测量技术与参数识别技术、测量参数对结构损伤敏感性的准确分析方法、传感元件的选取与优化布置、大量测量信息的适当选择、有限的测量参数与未知的结构损伤量间的关系、实际土木工程结构材料的离散性与随机性以及环境因素对损伤识别结果的影响等。

本书共分八章,详细论述了结构损伤检测智能方法的基本原理与实现技术,并通过试验与实例介绍了工程应用。第一章简述了结构损伤检测方法,并系统地论述了结构损伤检测智能技术的国内外研究现状;第二章介绍了基于小波变换的结构模态参数识别方法的基本原理,并实现了基于 Matlab 环境的软件开发;第三章提出并详细讨论了基于数字摄影测量技术和图像处理技术的结构动态位移监测方法,并实现了基于 Window 环境的软件开发,该系统考虑了土木工程结构现场的各种实际情况,运用非接触观测技术并结合现代数字图像处理技术,从而成功地实现了土木工程结构位移测量的高精度、低成本和操作的简便性;第四章以建筑结构为例运用波传播理论精确推导了结构测量参数对结构损伤的敏感性,得到了结构损伤敏感性的一般规律,为精确进行结构损伤定位与识别结构损伤大小提供了基础;第五章、第六章和第七章提出并详细论述了土木工程结构损伤识别的两步法,即利用结构损伤的敏感性规律进行结构损伤定位,再在确定的损伤区域内利用智能算法(神经网络方法、灰色方法以及遗传算法)识别结构损伤大小;第八章详细论述了基于波传播理论和压电阻抗技术的土木工程结构损伤识别方法,通过大量试验研究,该方法具有工作频率高,对结构初始损伤敏感、对外界环境影响免疫力强、具有传感与驱动的双重效应,因而具有可减少使用数量、不依赖模型分析,适宜于复杂土木工程结构、适宜在线监测等特点,具有识别结构微小损伤的能力,将成为识别土木工程结构微小损伤的有效手段。

作者所在课题组的主要成员赵文光教授、熊世树教授、文银平副教授、徐文胜老师以及作者的学生李林、王丹生、何波、史雅楠、翁顺、陈孝珍、陈晓强、尹涛、黄民水、张世顺、石灿峰等完成了大量的研究工作,他们都对本书的完成作出了重要贡献。本书内容的有关研究工作,先后得到国家自然科学基金、科技部科研

院所技术开发研究基金、教育部新世纪优秀人才资助计划、教育部优秀青年教师资助计划、中国高校博士点基金、教育部留学回国人员基金、湖北省自然科学基金、武汉市青年科技晨光计划,以及武汉市建设委员会研究基金等资助。在此特表示由衷感谢!

本书在大量理论、试验与工程应用研究工作的基础上,对结构损伤动力识别智能方法的一些理论与技术关键问题进行了探索,其中的一些论点与结论仅为作者当前对这些问题的认识,有待于进一步补充、完善、发展和提高;也限于水平与知识面的局限性,书中不免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

朱宏平

2008年12月于喻园

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 结构损伤检测的目的与意义 .....	1
1.2 结构损伤检测方法综述 .....	1
1.3 结构损伤检测智能方法现状 .....	8
本章参考文献 .....	15
<b>第2章 基于小波变换的结构模态参数识别方法</b> .....	24
2.1 概述.....	24
2.2 基本原理.....	25
2.3 MATLAB 环境下基于小波变换结构模态参数 识别的软件实现.....	35
2.4 试验验证.....	39
2.5 本章结论.....	46
本章参考文献 .....	46
<b>第3章 基于数字图像处理技术的结构动态位移监测</b> .....	48
3.1 引言.....	48
3.2 基于数字图像处理技术的结构动态位移监测 基本原理.....	49
3.3 系统构成.....	57
3.4 试验验证与工程应用.....	58
3.5 本章结论.....	71
本章参考文献 .....	72
<b>第4章 结构模态参数的损伤敏感性分析与损伤定位</b> .....	73
4.1 引言.....	73

4.2	模态参数敏感性分析	73
4.3	基于一阶振型斜率改变的结构损伤定位	79
4.4	基于一阶振型斜率改变的损伤定位数值算例	83
4.5	本章结论	90
	本章参考文献	90
<b>第5章</b>	<b>基于神经网络的结构损伤检测方法</b>	<b>92</b>
5.1	基于神经网络的结构损伤检测基本理论	92
5.2	基于神经网络的结构损伤检测试验研究	96
5.3	本章结论	106
	本章参考文献	106
<b>第6章</b>	<b>基于灰色理论的结构损伤定位</b>	<b>107</b>
6.1	灰色系统基本理论	107
6.2	基于灰色相关性的损伤定位理论	111
6.3	数值算例	116
6.4	本章结论	129
	本章参考文献	129
<b>第7章</b>	<b>基于改进遗传算法的结构损伤检测方法</b>	<b>131</b>
7.1	遗传算法的基本理论	131
7.2	基于改进多目标遗传算法的结构损伤大小识别理论	134
7.3	数值算例	143
7.4	本章结论	156
	本章参考文献	156
<b>第8章</b>	<b>基于压电阻抗的结构损伤检测方法</b>	<b>158</b>
8.1	基于压电阻抗的结构损伤检测基本理论	158
8.2	基于压电阻抗的钢梁损伤检测	166
8.3	基于压电阻抗的钢框架螺栓松动损伤检测	174
8.4	本章结论	179
	本章参考文献	180



# 第 1 章

## 绪论

### 1.1 结构损伤检测的目的与意义

我国是一个多自然灾害的国家,几乎每年都要发生地震、风灾、火灾和水灾等重大的自然灾害,这些自然灾害对土木工程结构的安全造成了严重的威胁。再加上土木工程结构和重大基础设施使用环境恶劣,随着使用时间的增长,由于环境荷载的作用、疲劳效应以及腐蚀和材料老化等不利因素的影响,结构不可避免地产生损伤积累和抗力衰减。一旦结构关键构件的损伤积累到一定程度,如没有被及时发现和处理,损伤将会迅速扩展,从而导致整个结构的毁坏。由于未能及时发现结构损伤而造成的悲剧数不胜数。以桥梁为例,早在 1967 年 12 月,西弗吉尼亚州的锡尔弗(Silver)桥垮塌,导致 46 人丧生<sup>[1]</sup>;另外,美国的塔科玛(Tacoma)海峡大桥<sup>[2]</sup>,我国重庆市綦江县的彩虹桥<sup>[3]</sup>,都发生过突然断裂的事件,造成了重大的人员伤亡和经济损失。因此,需要对结构的健康状况进行监测,及时发现结构的损伤,同时,尽早地发现结构损伤,可大大降低维护费用。基于上述原因,结构损伤检测在近几十年来一直是人们关注的热点,众多学者进行了这方面的研究。

### 1.2 结构损伤检测方法综述

结构损伤检测可采用外观目测、基于仪器设备的局部损伤

检测、基于静态测量数据的结构损伤检测和基于动态测量数据的结构损伤检测等方法,它们各有特点,适用于不同的工程实际。

### 1.2.1 外观目测法和基于仪器设备的局部损伤检测方法

外观目测法和基于仪器设备的局部损伤检测方法(如超声检测)属于传统的损伤检测方法,目前其检测理论及设备已相对成熟。外观目测的检测结果与检测人员的水平和经验密切相关,而且只能发现外部损伤,结构的内部损伤无法检测。超声检测法是应用最广泛的局部无损检测方法,超声波可以检测由于材料属性和裂缝引起的材料阻抗的变化。超声检测法的主要优点是可以检测远离结构表面的内部裂缝,并且确定裂缝位置。上述损伤检测方法均需要预先大致了解损伤的位置,并且结构中这些位置易于接近,检测所需的周期长,检测费用昂贵,会引起结构使用的中断,因此在实际工程中的应用受到了限制。

### 1.2.2 基于静态测量数据的结构损伤检测方法

结构的静态特性参数主要有结构静态位移、应变等。结构发生损伤时会引起结构刚度变化,从而使结构位移、应变等参数发生相应的变化,通过对结构位移、应变等的测量,分析上述参数相对于结构完好时的改变情况实现结构损伤检测。

静态测量信息量较少,基于静态测量数据的损伤检测方法的研究目前还处于发展阶段<sup>[4]</sup>。但由于基于静态测量数据的损伤识别只需使用结构的刚度特性即可对结构进行评估,而结构的静态测量数据与结构刚度有关,因此如果有足够的测量数据就不难推算结构刚度,从而对结构的损伤进行识别,识别的结果易于对结构损伤进行精确的定位,且具有较高的精度和稳定性,同时静态数据测试所需的设备相对较为便宜、测试精度较高,结构的精确变形或应变可以经济、准确地测得。因而基于静态测量数据的损伤识别方法是一种既未成熟而又具有广阔应用前景的损伤识别技术,在土木工程领域得到越来越多的关注。

1991年 Sanayei 等<sup>[5]</sup>提出了一种迭代优化方法,运用缩减技术缩减未测量位移,利用测量的静态数据识别结构的单元参数。其局限性在于它要求对于一组载荷,每次载荷作用下测量的位移自由度必须相同。Yam 等<sup>[6]</sup>通过构造板类结构挠度、挠度斜率及挠度曲率的损伤因子,对其进行敏感性分析,实现结构损伤的识别。Wang 等<sup>[7]</sup>研究了利用静态测量数据及频率变化,通过两步法进行结构损伤识别:首先运用损伤指标对结构损伤进行定位,然后运用迭代计算求解

非线性优化问题识别结构损伤的大小。Hjelmstad 等<sup>[8]</sup>利用结构的静态响应,通过待识别参数组的自适应算法对结构损伤进行识别,他们将未知数分为单元的基本参数和未测量的位移两部分,未测量的位移作为未知变量导致了算法的稳定性减小。Banan 等<sup>[9-10]</sup>将结构的损伤识别问题转化为以残余力误差和位移误差最小为优化目标函数的优化问题,并且研究了一种迭代算法求解该优化方程。

由于测量信息有限以及测量噪声的干扰,算法所建立的方程往往是一个病态的非线性方程。同济大学的崔飞等<sup>[11-12]</sup>通过梯度法与 Gauss-Newton 法以及 Monte-Carlo 法的综合运用有效解决了这一问题。他们首先建立桥梁结构的有限元模型,把当前结构模型中各单元的等效面积、惯性矩以及板壳单元的厚度作为待识别参数,建立静态位移、静态应变对待识别参数的灵敏度矩阵。然后,测量结构上某些部位的位移、应变以及低阶的振动模态参数,以此为基准与原先结构的分析结果进行比较,建立综合误差向量。最后,通过优化方法不断调整当前计算模型的参数,使结构响应与相应的试验值最大限度地吻合,从而得到结构参数变化的信息,实现桥梁结构的损伤判别以及承载能力的评估。张启伟等<sup>[13]</sup>提出了一种基于模型修正理论的结构损伤检测方法。首先给出一种利用结构振动模态数据修正结构刚度的算法,然后将这一方法推广为同时利用振动模态数据和静力位移测量值的损伤识别方法,运用缩阶的理论分析模型解决实测自由度不足的矛盾。蔡晶等<sup>[14]</sup>基于静态测量数据,提出了服役结构损伤探测及状态评估的概率分析方法,通过有限元法把结构离散成用基本参数及矩阵表示的分析模型,根据分析模型和实际结构间的误差定义,用 Gauss-Newton 法推导了在不完全测量情况下的两种参数识别方法。

目前,基于静态测量数据的结构损伤检测方法主要存在以下两方面的问题:第一,相对于基于动态测量数据的损伤检测技术而言,基于静态测试数据的损伤检测方法,由于可利用的测量信息少,难以得到理想的识别结果;第二,对于一个确定的结构而言,由于加载工况有限而导致在某个载荷工况作用下,对结构变形影响很小的那些损伤构件难以识别。

尽管利用静态测量数据进行损伤识别对测试条件、仪器的测量精度等要求较高,但近年来随着科学技术的发展,测量仪器的不断改进,上述问题已经在一定程度上得到了解决。同时,采用优化加载、优化算法、模型缩减法等手段,使得基于静态测量数据的损伤识别方法在测量信息量少、加载工况有限等条件下的损伤识别结果均可得到改善。由于静态测量数据精度高、稳定性好,因此基于静态测量数据的损伤识别方法的研究具有广阔的前景。

### 1.2.3 基于动力特性的结构损伤检测方法

由于结构振动特性是结构物理参数的函数,结构损伤即意味着结构物理参数的改变,而物理参数的改变必然引起结构振动特性的改变。通过安装在结构上的传感设备,对结构的振动进行实时监测,可以获得结构不同阶段的振动特性;对结构振动特性的变化进行分析及处理,有可能获得结构物理参数的变化情况,从而达到损伤检测的目的。利用结构的动力测试信号进行损伤检测能够获得结构的整体损伤状况,检测费用低,不需要中断结构的使用,相对于传统的损伤检测方法具有很大的优越性。另外,伴随着现代计算机技术的飞速发展及传感器技术、信号处理技术的进步,使得测试信号能够得到准确、快速的分析处理。因此,近几十年来,基于结构动态响应的损伤检测成为国内外研究的热点<sup>[4,15-16]</sup>。利用模态数据进行结构的损伤检测是运用最为广泛的方法,选择适当的模态数据或其导出值对于损伤检测的难易程度、损伤检测结果的正确性等具有至关重要的影响。

#### (1) 基于固有频率变化的损伤检测

Lifshitz 和 Rotem 早在 1969 年就提出了通过结构频率的变化进行损伤检测<sup>[17]</sup>。到目前为止,关于利用频率的改变来进行损伤检测已发表了大量的文献,Salawu 对利用频率的变化进行损伤检测作了全面的综述<sup>[18]</sup>。Tracy 和 Pardoen 研究了复合材料制作的简支梁发生分层时对结构固有频率的影响,结果表明当分层发生在跨中 1/3 范围内时,梁的前 4 阶固有频率变化率不超过 20%<sup>[19]</sup>。Cawley 和 Adams 在理论上推导得出结构在单损伤的情况下,损伤导致的两阶结构频率改变的比值,仅仅是损伤位置的函数,而与损伤程度无关<sup>[20]</sup>。Morassi 和 Rovere 通过使结构前几阶分析频率和测试频率相吻合,用优化算法对钢框架的切口损伤进行了损伤定位,指出在优化过程中设定一些合理的约束条件的重要性<sup>[21]</sup>。Stubbs 和 Osegueda 结合敏感性分析方法提出了利用结构的频率改变进行结构损伤位置和程度的识别方法<sup>[22-23]</sup>,即结构频率的变化可表示为模态刚度和模态质量的函数,模态刚度和模态质量的变化,用敏感性分析方法表示为结构参数的变化,最后通过对结构刚度敏感性矩阵广义逆与频率相对变化的乘积来得到损伤位置和损伤程度,还对所提出的理论进行了数值模拟和试验验证,试验结果表明,所有的损伤位置均得到正确的判别,但存在将一些未损伤单元误判为损伤单元的情况。大多数情况下判别的损伤程度大于实际值,但处于同一数量级,随着损伤程度的增加,判别的准确度也随之提高。Gardner-Morse 和 Huston 利用斜拉桥索固有频率的变化来估计索的张力,当估计值明显小于设计值时,表

明索发生了张力损失<sup>[24]</sup>。Askegaard 和 Mossing 长期研究了环境条件(如温度、湿度)对结构固有频率的影响,结果表明,当测量在每年的同一时间进行时,固有频率的变化很小<sup>[25]</sup>。一个简便的考虑环境因素对结构固有频率影响的方法是设定频率变化的阈值,当变化超过阈值时,有理由推测结构发生了损伤。另外,应尽量比较相似条件下的测试数据来减小环境因素影响。

结构的损伤必然造成结构固有频率的偏移,因此,利用固有频率的变化能够有效地检测损伤的发生。由于各阶频率对应振型各处的模态应力状态不同,因此,结构各阶频率对各处损伤的敏感性不同<sup>[26]</sup>。具体体现为,各阶频率对同一位置的损伤敏感性不同,另一方面,同一频率对各处损伤的敏感性也不同。研究表明,将频率作为损伤指标有一些难以克服的缺点:频率作为广义刚度和广义质量的瑞利商,反映的是结构整体动态特性,难以反映结构局部损伤,因此,用单一或少数不完整的频率数据难以获得结构损伤的空间信息<sup>[4]</sup>;高阶频率比低阶频率对损伤敏感,但对于大型复杂结构其高阶频率难以获得或难以准确识别<sup>[27]</sup>;对于对称结构,对称位置发生损伤引起的结构频率变化完全相同,从而不能确定损伤位置等。但用频率的改变量作为损伤指标,也有其值易于测量、相对于振型更为准确等优点<sup>[28]</sup>。

## (2) 基于振型变化的损伤检测

West 可能是第一个系统地利用振型信息进行结构损伤定位的学者<sup>[29]</sup>。利用振型变化的损伤识别多采用 MAC(modal assurance criteria,模态保证准则)<sup>[30]</sup>和 COMAC(coordinate modal assurance criteria,坐标模态保证准则)<sup>[31]</sup>。Salawu 对一实际桥梁修复前后进行了修复位置的判别,利用 MAC 能够判别出结构修复前后的动态特性发生了变化,利用 COMAC 判别了修复位置<sup>[32]</sup>。利用 COMAC 判别损伤位置的有效性与 COMAC 包含的振型是否反映了损伤及测点的位置有关,因此有可能出现漏判。Ndambi 等比较了利用频率、MAC、COMAC、柔度矩阵、模态应变能变化识别钢筋混凝土梁损伤的能力<sup>[33]</sup>。试验研究发现 MAC 的变化只能检测出结构发生了损伤,不能检测出损伤发生的位置,而且 MAC 并不随着损伤程度的加剧而单调变化,因此难以用来检测损伤程度。利用 COMAC 能检测出对称施加荷载处的损伤位置,但是对加载造成的损伤区域难以判别;对于非对称损伤,损伤位置难以得到判别。当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。Yuen 通过构造特征参数,即损伤状态下振型与相应特征值的比值减去未损伤状态下振型与相应特征值的比值,对单损伤情况下的悬臂梁作了数值研究,研究表明,利用一阶模态的位移特征参数能

够有效识别损伤<sup>[34]</sup>。Lam 等利用振型的变化与敏感性矩阵逆的乘积来初步判别结构损伤,然后构造与损伤程度无关的识别量,运用损伤特征匹配技术来进一步确定损伤位置<sup>[35]</sup>。Topole 和 Stubbs 利用特征方程和模态的正交性建立关于单元刚度矩阵损伤因子的线性方程组,求解刚度损伤因子<sup>[36]</sup>。该算法不需要结构的原始模态信息,但是需要估计结构的原始刚度矩阵和质量矩阵,可以利用任意阶模态的信息,不要求各阶模态连续。

### (3) 基于振型曲率变化的损伤检测

对于梁板式结构,主要是承担横向外力和由外力引起的弯矩,结构在弯矩作用下的曲率会由于结构损伤发生改变,因此,曲率的改变可作为损伤检测的信息。Pandey 等首先提出用损伤前后振型曲率变化的绝对值来判断损伤位置,即曲率变化最大处为损伤位置<sup>[37]</sup>。同时,振型曲率变化大小还和损伤程度有关,损伤越大,曲率变化越大,由此可鉴别损伤程度。Ratcliffe 研究了结构在小损伤情况下直接利用振型曲率难以判别结构损伤的情况,提出对判别点相邻点的振型二阶差分值进行三次多项式插值,然后计算判别点处插值函数和二阶差分的差,该值能够较好地反映梁结构的损伤大致位置<sup>[38]</sup>。

### (4) 基于残余力向量的损伤检测

残余力向量中非 0 元素的位置反映了与该位置相连的单元可能发生了损伤。利用残余力进行损伤定位的好处是只需要知道结构完好状态下的刚度矩阵、质量矩阵和发生损伤后结构的模态参数,而不需要知道损伤后结构刚度矩阵和质量矩阵的变化。Ojalvo 和 Pilon 用残余力来定位有限元模型的建模误差<sup>[39]</sup>。Ricles 和 Kosmatka 利用残余力法成功地对桁架结构损伤进行了定位<sup>[40]</sup>。实际工程中,由于测量误差的影响和结构质量、刚度分布不均匀,利用残余力法可能会引起损伤定位误差。为此,Zimmerman 和 Kaouk 提出利用矩阵行向量与振型向量的夹角是否为  $90^\circ$  来判别损伤位置,其判别效果比直接用向量内积是否为 0 更好<sup>[41]</sup>。周先雁等运用残余力法对钢筋混凝土试验框架模型的损伤进行了精确定位<sup>[42]</sup>。Kosmatka 和 Ricles 对空间桁架的试验研究表明,利用残余力法能够预测各种损伤工况下结构质量和刚度的变化<sup>[43]</sup>。Rao 等利用残余力向量构造目标函数,然后运用遗传算法进行损伤识别,并将该方法运用于平面桁架、悬臂梁和门式框架等不同的结构形式,取得了很好的效果<sup>[44]</sup>。

### (5) 基于结构柔度矩阵的损伤检测

结构损伤会导致结构柔度的增加,因此,结构柔度矩阵的变化可作为损伤检测的依据。利用柔度矩阵进行损伤检测有其优越性:一方面,由于在测试中结构的高阶模态难以准确获得,因此,很难得到较准确的结构刚度矩阵,而柔度矩阵

是刚度矩阵的逆矩阵,各阶振型随着相应频率的增大对柔度矩阵的贡献迅速减小,因此前几阶模态振型就可形成较准确的柔度矩阵;另一方面,相对于刚度矩阵来说,柔度矩阵对结构质量的变化不敏感<sup>[45]</sup>。

Lin 利用试验测试数据得到的柔度矩阵乘以分析模型的刚度矩阵,当结构没有建模误差时,得到的应该是一个单位阵,如果不是单位阵,可通过非 0 元素的位置来确定误差单元的位置,并利用该方法分别对桁架、简支梁、悬臂梁、带刚性臂的简支梁、带柔性臂的简支梁进行了建模误差检验。对于桁架结构检测结果很好;对于简支梁和悬臂梁,由于转动自由度的缩减,造成了误差指标向损伤单元的相邻节点扩散;对于带外伸臂的梁,误差指标扩展的程度与外伸臂的刚度有关<sup>[46]</sup>。Pandey 和 Biswas 利用结构损伤前后近似柔度矩阵差的变化规律,研究了悬臂梁、简支梁和自由梁的损伤检测,结果表明柔度矩阵差是良好的损伤检测指标,特别是当损伤位于高应力区域的时候,效果十分明显<sup>[47]</sup>。

#### (6) 基于损伤指标法的损伤检测

Stubbs 和 Kim 通过试验仔细观察发现:结构在损伤前后未损伤处的相对振型变化很小,而在损伤处的相对振型变化较大。由此提出假设,即结构在损伤前后各个单元模态应变能占整个结构的模态应变能比例不变<sup>[48]</sup>。根据该假设,推导出反映结构损伤位置的表达式,并用其对一箱形连续梁的损伤进行了检测。Wang 等对一座 5 跨预应力钢筋混凝土梁桥,采用上述方法进行了损伤数值分析,表明该方法对跨中区域出现的损伤能够正确检测,而对于支座区域的损伤则难以识别,研究认为这是由于支座区域的模态应变能较小的原因<sup>[49]</sup>。Cornwell 等将上述方法推广到了板式结构<sup>[50]</sup>。Ndambi 等对钢筋混凝土梁损伤识别进行的比较研究中发现,应用损伤指标法比 COMAC 能够更好地判别损伤位置,但对于损伤有一定扩展范围的情况难以判别<sup>[33]</sup>。

#### (7) 基于单元模态应变能变化率的损伤检测

Shi 等提出了单元模态应变能的概念,导出损伤单元损伤前后的模态应变能变化率很大,与损伤单元相邻单元的模态应变能变化率较小,而远离损伤单元的模态应变能变化率很小的结论,因此,可将损伤前后单元模态应变能的变化率作为损伤定位的指标,并成功地运用上述结论分别对一平面桁架和框架结构的损伤进行了数值分析和试验研究<sup>[51-52]</sup>。针对上述方法在损伤识别过程中需要完备的分析模态振型,而在实际计算中由于仅用部分模态振型而存在截断误差的问题,Shi 等方法作出了改进,导出了仅用部分低阶模态来确定结构损伤的方法,减小了模态截断所带来的计算误差<sup>[53]</sup>。

## 1.3 结构损伤检测智能方法现状

### 1.3.1 损伤检测中的神经网络方法

人工神经网络最初是为模拟人的大脑功能而提出来的。大脑是由生物神经元构成的巨型网络,是一种大规模的并行处理系统,它具有学习、联想记忆、综合等能力,并有巧妙的信息处理方法。人工神经网络也是由大量的、功能比较简单的神经元互相连接而构成的复杂网络系统,用它可以模拟大脑的许多基本功能和简单的思维方式。通过对网络进行训练,网络可以获得相关信息,并将信息存储在神经元的连接权值中。人工神经网络具有并行处理、容错性、鲁棒性等特点,现已广泛应用于金融、图像处理、数字通信、医疗、化学工程、土木工程等各个领域。利用神经网络进行损伤识别,多采用多层 BP 网络。BP 网络结构简单,学习、训练算法较为成熟,对多层 BP 网络,采用适当的权值和激活函数,可以对任意非线性映射进行任意程度的近似<sup>[54]</sup>。

Wu 等早在 1992 年就利用 BP 网络对一个三层剪切框架结构进行损伤识别,以对楼层加速度时程响应进行傅里叶变换得到的加速度幅值谱作为网络输入,正确地实现了特定楼层的损伤识别<sup>[55]</sup>。Elkordy 等对一个五层框架模型的各种损伤状况进行有限元分析建模,通过有限元分析得到的训练样本对神经网络进行训练,训练后的网络成功检测了实际框架结构的损伤<sup>[56]</sup>。这说明,用有限元分析得到的训练样本对网络进行训练是可行的。Barai 和 Pandey 对一座 21 根杆件的桁架桥用神经网络方法进行了检测,网络输入取为活动荷载沿着桁架的下弦杆匀速运动时下弦杆各个节点的位移响应,桁架的各个节点在损伤和未损伤状态下的位移必然不同,各个杆件面积(损伤状况)作为网络输出。网络测试结果表明,并不是网络的输入信息越多,网络的性能越好,适当选择测试节点的位置,一个节点信息作为输入的网络比多个节点信息作为输入的网络性能更好,这点在实际应用中有重要意义<sup>[57]</sup>。徐宜桂等采用神经网络对一钢筋混凝土梁进行损伤诊断,网络输入为单元各个节点处振型曲率相对于未损伤结构的变化值,不同的输出节点表示不同的损伤位置,各个输出节点的值表示损伤程度<sup>[58]</sup>。王柏生等就模型参数误差对用神经网络进行结构损伤识别的影响进行了理论分析、数值模拟及试验分析。理论分析表明,适当的构造输入向量,可以减小模型参数误差对结构损伤识别的影响;数值模拟表明,用神经网络进行结构损伤识别受模型参数误差影响很小,在训练神经网络时,10% 的模型参数误差是



可以接受的;试验分析验证了神经网络在有模型误差时的识别能力<sup>[59]</sup>。周仙通等对一个两层框架结构和香港青马大桥的一些结构参数,用优化方法和神经网络方法分别进行了识别,神经网络的输入参数取为结构频率。结果表明,两种方法都能够较好地识别出结构参数,并讨论了两种方法的优缺点<sup>[60]</sup>。郭杏林和陈建林采用结构低阶固有频率的变化作为特征参数,对结构的固有频率改变量进行相应处理,分别构造判断结构损伤位置和结构损伤程度的神经网络输入向量。通过首先判断损伤位置,然后识别损伤程度,可大大减小网络的训练样本数量<sup>[61]</sup>。

Masri 等直接利用时程数据和神经网络进行损伤识别。这种方法适用于结构的损伤状况难以预计,而不能获得损伤状况与相应响应的样本数据来对网络进行训练的情况,该方法的不足是测试信号的变化不能对应特定的损伤状况。采用时程数据作为网络的输入输出对网络进行训练,网络输入为相对位移和相对速度,网络输出为恢复力。在进行损伤检测时,将相对位移、相对速度输入训练好的网络,得到相应的网络输出,把网络输出与测试值比较,得到根均方误差,相对于参考结构,各种损伤情况根均方误差发生了变化,从而获知结构发生了损伤。损伤程度不同,根均方误差的大小也不同,从而可判别结构损伤的程度<sup>[62]</sup>,但由于在结构参数未知的情况下,是由结构激励和响应作为网络的输入输出,根均方误差的大小变化并不能直接对应相应的刚度减小或阻尼增加。Nakamura 等以 1995 年神户地震中受到损伤的 7 层钢结构建筑为研究对象,将修复后的结构视为未损伤状态,通过比较两种状态下损伤指标进行损伤识别<sup>[63]</sup>。对结构的每一层分别建立一个网络,用振动数据分别进行训练。网络输入采用层间位移和层间速度,网络输出取为恢复力,网络训练采用自适应网络随机搜索算法。网络测试结果表明,对于损伤较大的楼层,损伤后的网络输出与实测值的根均方误差相差明显大于损伤前的网络输出与实测值的根均方误差,说明结构发生了损伤。而对于损伤不明显的楼层,损伤后的网络输出与实测值的根均方误差与损伤前的网络输出与实测值的根均方误差相差不大。通过恢复力的相平面图(恢复力—层间位移),用最小二乘法可估计出层间刚度(椭圆长轴和水平轴的夹角)。由损伤前后的层间刚度改变值,获得刚度损失,该方法能够检测出刚度损伤大于 20% 的情况。比较刚度减小百分比和网络输出根均方误差变化百分比,明显后者比前者大很多,也就是说,神经网络方法是一个高敏感性的损伤检测方法。Masri 等对用于损伤检测的神经网络的权值进行了研究,发现满足映射关系的神经网络的权值矩阵非唯一性,通过神经网络连接权值的变化来获得结构参数的变化是不可能的,特定的网络权值并不和一定的结构参数相对应<sup>[64]</sup>。