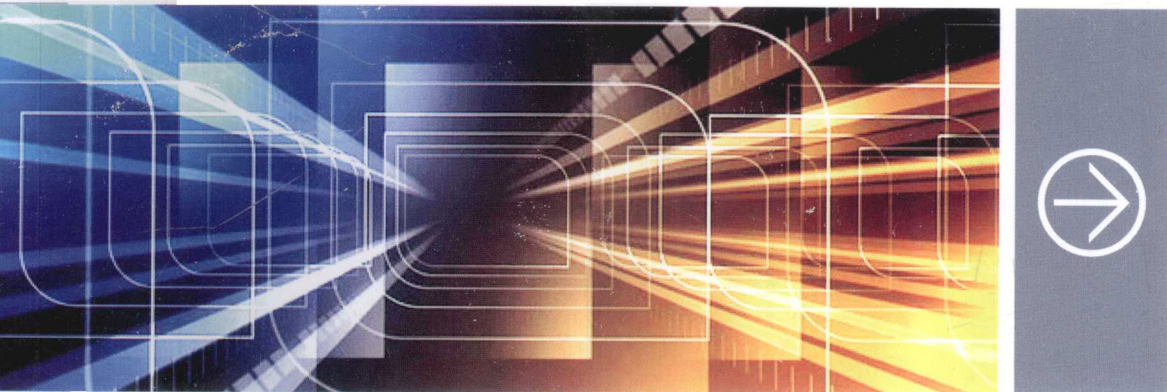


学术著作 · 工程安全防护理论与技术系列



# 既有人防工程损伤评估

## 理论与修复技术

白二雷 许金余 郑 飞◎著

JIYOU RENFANG GONGCHENG

SUNSHANG PINGGU

LILUN YU XIUFU JISHU

西北工业大学出版社

学术著作·工程安全防护理论与技术系列

# 既有人防工程损伤评估 理论与修复技术

白二雷 许金余 郑 飞 著

国家自然科学基金资助项目(51208507)

陕西省自然科学基金资助项目(SJ08E<sub>2</sub>10)

西北工业大学出版社

**【内容简介】** 本书以既有人防工程为研究对象,围绕其损伤评估理论和修复技术展开一系列研究。主要内容包括以下几部分:依据人防工程的结构特点,构建了基于模态分析的人防工程结构损伤诊断方法,分别以振型变化和模态应变能为指标对人防工程结构损伤进行诊断;改进了小波包分频算法,提出了基于小波分析的人防工程损伤评估理论;依据人防工程损伤诊断结果,研究了人防工程平时修复和战时抢修技术,提出了采用玄武岩纤维布对人防工程平时损伤进行加固;研制了抢修新材料——地质聚合物混凝土用于人防工程受损后的快速抢修。

本书可供从事人防工程、国防工程以及土木工程相关专业的研究和设计人员参考使用,也可供土木工程等专业的高校教师、研究生及工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

既有人防工程损伤评估理论与修复技术/白二雷,许金余,郑飞著. —西安:  
西北工业大学出版社,2016.8

ISBN 978-7-5612-4944-4

I. ①既… II. ①白… ②许… ③郑… III. ①人防地下建筑物—修缮加固  
IV. ①TU927

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 187803 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:12

字 数:178 千字

版 次:2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价:35.00 元

# 前 言

重大工程的安全性问题日益成为人们关注的热点问题,作为战时保障城市人民生命财产安全的重要物质基础——人防工程,在损伤累积下一旦发生溃塌,会给人民的生命财产造成极大的损失,因此对人防工程结构进行损伤评估并及时进行修复具有重要的经济与社会意义。

本书采用理论分析、数值模拟与实验验证的方法,构建人防工程损伤评估理论,提出人防工程平时加固及战时快速修复技术。在人防工程损伤评估理论方面:构造基于振型变化的损伤诊断标识量进行损伤预警和定位,采用神经网络方法对单位置损伤状态下的损伤程度进行识别,利用基于振型变化的损伤标识量对多位置损伤状态的可叠加性,提出多位置损伤程度识别的组合优化方法。对模态应变能进行改进,提出缩聚模态应变能的概念,构造基于缩聚模态应变能变化的损伤标识量进行损伤预警和定位,利用人工神经网络方法判别损伤程度。提出改进的小波包分频算法,利用小波包提取人防工程振动信号的特征方法,利用单点小波能量进行损伤预警,利用小波包能量组分变化率进行损伤定位,利用神经网络构建基于小波包能量特征的损伤程度判定。在人防工程修复技术方面,提出采用玄武岩纤维布加固人防工程的技术。经玄武岩纤维布加固后的 RC 梁频率下降明显减慢,且玄武岩纤维布的性价比较高,适合人防工程平时的加固。研制地质聚合物混凝土材料对受损后的人防工程进行快速修复。地质聚合物混凝土动态力学性能实验研究表明,地质聚合物混凝土具有优异的抗冲击力学性,且快硬早强,适合人防工程战时遭受打击后的快速抢修。

本书由白二雷、许金余、郑飞撰写,由赵国藩院士审校。张斌、颜祥程等参与了部分实验工作,罗鑫、任韦波等参与了部分内容的录入及图表的绘制工

作。在此向帮助完成本书的同志们表示衷心的感谢!

由于水平有限,书中疏漏及错误之处,衷心希望读者批评指正。

著 者

2016年4月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 国内外研究现状 .....	2
1.2 本书的研究思路及主要内容 .....	14
第 2 章 人防工程结构动力特性分析 .....	16
2.1 结构振动的特征值问题 .....	16
2.2 整体分析方法 .....	17
2.3 表征结构损伤的方法 .....	17
2.4 损伤对人防工程模态参数的影响分析 .....	23
第 3 章 基于振型变化的人防工程结构损伤诊断 .....	30
3.1 结构损伤诊断的标识量选取原则 .....	30
3.2 结构损伤诊断的模型误差问题 .....	31
3.3 基于振型变化的人防工程损伤诊断标识量 .....	34
3.4 基于神经网络与振型变化的人防工程结构损伤定量识别 .....	40
3.5 组合优化算法在人防工程多位置损伤定量识别中的应用 .....	48
第 4 章 基于模态应变能变化的人防工程结构损伤诊断 .....	52
4.1 模态应变能法进行损伤定位的理论分析 .....	52
4.2 结构损伤诊断的模型缩聚问题 .....	55
4.3 基于缩聚模态应变能的损伤定位 .....	59
4.4 基于智能算法的人防工程结构损伤定量识别 .....	64
4.5 基于振型变化与基于模态应变能变化方法的对比分析 .....	73

<b>第 5 章 人防工程振动模态试验研究</b> .....	75
5.1 试验模态分析概述 .....	75
5.2 人防工程试验模态测试方法的建立 .....	76
5.3 现场实测 .....	81
5.4 模态参数识别 .....	83
5.5 试验结果分析 .....	87
<b>第 6 章 基于小波分析的人防工程结构损伤诊断</b> .....	92
6.1 小波分析基本理论 .....	92
6.2 小波包分析的频率混叠 .....	98
6.3 人防工程振动信号损伤特征的提取 .....	102
6.4 基于小波包能量的人防工程结构损伤诊断数值模拟 .....	105
<b>第 7 章 小波分析检测钢筋混凝土梁损伤实验研究</b> .....	117
7.1 钢筋混凝土梁模型实验 .....	117
7.2 钢筋混凝土梁模态实验 .....	122
7.3 基于频响函数的 RC 梁损伤分析 .....	134
7.4 基于小波包分解的 RC 梁损伤分析 .....	137
7.5 利用连续小波变换揭示 RC 梁动力非线性特性 .....	142
<b>第 8 章 适应人防工程修复的新材料性能实验研究</b> .....	147
8.1 纤维布加固 RC 梁的抗弯力学性能实验研究 .....	147
8.2 地质聚合物混凝土的力学性能实验研究 .....	161
<b>第 9 章 本书主要结论及进一步研究的重点</b> .....	170
9.1 主要结论 .....	170
9.2 进一步研究的重点 .....	173
<b>参考文献</b> .....	174

# 第 1 章 绪 论

随着科技和社会的迅速发展,大型复杂的工程结构不断涌现,如超高层建筑、大跨度桥梁、大型水利工程、大型海洋平台等。这些重要的工程结构在服役期间,由于诸如外物碰撞、环境腐蚀、材料老化、荷载的长期效应和疲劳效应等众多因素的影响,将会不断累积损伤,结构的局部损伤可能会导致结构整体的迅速破坏,由此而造成重大的工程事故,给人民的生命财产带来巨大的损失。因此,建立重大工程结构的健康诊断方法是目前土木工程界亟须解决的问题。

人防工程是国防工程的重要组成形式,是保护人民生命财产安全,赢得战争胜利的战备设施之一。坚固的人防工程在战争中将起到隐蔽自己、消灭敌人、囤积物资、集结兵力和坚定民心、稳定战局的重要作用。人防工程不仅可以保护人民生命财产的安全,同时也可作为国防工程的补充部分,起到国防威慑力量的作用。我国早自 20 世纪 50 年代开始修建人防工程,60—70 年代以战备为目的修建了一批人防工程。1978 年厦门第三次全国人防会议确定人防工程要走“长期坚持、平战结合、全面规划、重点建设”的方针,又修建了一批人防工程。80 年代末,随着经济建设的迅速发展,高层、超高层建筑在全国各地拔地而起,人防工程建设逐步走向与城市建设相结合的道路。城市作为一个国家或地区政治、经济、交通、文化的中心,是战争中首先会遭受袭击的目标,人防工程是城市建设的重要组成部分,城市的安全防护是依托人防工程来实现的,没有设防的城市是“不完整的城市”<sup>[1]</sup>。如何提高城市的防御能力,避免或减轻各种危机情况下城市居民的生命财产损失,是当前亟待解决的问题。对已建人防工程结构进行实时、有效的监测,及时发现潜在问题,进而采取合理的补救措施,以及战时遭遇打击后实现快速抢修,对于保障战时人民生命财产安全具有重大意义。



## 1.1 国内外研究现状

传统的损伤检测方法是可视的或局部的试验方法,如超声波方法、磁场方法、雷达成像、涡流或温度场方法等<sup>[2]</sup>。这些方法都要求事先知道损伤的大概位置,且被检测部位是能够接近到达的,故这些方法通常都只能检测结构表面及其附近的损伤,且工作量大,耗费高,不能对结构的健康状况进行实时监控。因此,发展整体的与适合各种大型复杂结构的损伤诊断方法已成为土木工程界共同关心的热点问题。而基于振动的损伤诊断方法是解决这一问题的有效方法之一。随着现代模态测试和分析技术的日益精确和完善,基于振动的结构损伤诊断方法也迅速发展起来,并已开始被成功地应用于工程实践中,各国均投入了大量的人力、物力对此展开研究工作。例如,美国佛罗里达州的 Sunshine Skyway Bridge 上安装了 500 多个传感器用于健康监测。国内方面,香港青马大桥安装了大量的传感器和应变片来长期监测桥梁的安全性;欧进萍等人初步实现了渤海某平台结构的实时监控和安全评定工作<sup>[3]</sup>。

结构损伤诊断的基本原理是,利用结构物动态特性的改变来对结构进行整体性的检测和评估,以确定结构是否有损伤存在,进而判别损伤的程度和位置,以及结构目前的状况、使用功能和结构损伤的变化趋势。其基本原理是结构的损伤常会改变结构的物理特性,如质量、阻尼和刚度等,而物理特性的改变则会影响结构的模态参数以及动力响应,因此可以通过结构的物理参数、模态参数或动力响应来识别损伤的位置和程度。由以上概念和原理可知,结构损伤诊断包含 4 个方面内容:①损伤存在的判定;②结构损伤的定位;③结构损伤程度的标定;④损伤对结构可靠性的影响,即结构剩余寿命的评估。其中损伤定位和损伤程度标定是损伤识别问题的核心和难点。具体可根据识别机理和算法的不同,选择先定位后定量的两阶段方法,例如先用损伤指标法定位,再利用模型匹配法定量;或者选择同时定位和定量法,如采用模型匹配法和遗传算法相结合同时定位定量,也可采用损伤指标法的迭代策略同时定位定量。

结构的损伤诊断技术可以对结构进行整体检测,目前,该技术在航空航天、精密机械结构以及土木工程结构中的桥梁与海洋平台等方面具有广泛的

应用。一般来说,它具有以下优点:该类方法具有整体检测与识别的能力,并可借助有限元分析模型进行损伤识别,而对于桥梁等大型土木结构,还可以借助环境激励并利用动态分析技术对结构进行实时检测与识别。但是,基于结构动力特性的损伤识别技术在实际应用中仍有一些困难:①对于大型复杂的结构,其动力测量的数据量大且精度较低,同时存在测量误差、模型误差以及环境影响等等,这些因素的存在会使损伤识别变得很困难;②在实际应用中,一般情况下只能得到不完备的测量数据,如提取大型桥梁的模态数据时一般只能获取前十几阶或几十阶模态数据,而且只能将有限的传感器布置在结构的有限位置上,这些都造成了测量数据的不完备性,从而大大降低了识别精度及效果;③有些损伤识别方法需要提供结构早期的信息,早期信息的缺乏也会严重影响相关损伤诊断方法的使用;④在考虑测量误差等情况下,现有的损伤诊断技术对单损伤的识别效果较好,而对多损伤识别效果不稳定,易产生误判或误识别现象。总之,结构损伤诊断技术的发展尚不成熟,需要进行更加深入的研究。目前,关于结构损伤断技术可分为两类。一类是基于经典的模态域的损伤诊断方法,其数学基础为结构动力学+快速傅里叶变换,提取模态参数是一个核心问题;另一类是直接基于动力响应的损伤诊断方法,其中具有代表性的是基于小波分析的结构损伤诊断方法。

### 1.1.1 模态域下结构损伤诊断方法

模态域下的结构诊断方法可大致分为两类,即无模型损伤诊断方法与模型修正的损伤诊断方法。

由于结构振动的模态参数(比如频率、振型和模态阻尼)是结构物理参数(如质量、刚度和阻尼)的函数,因此结构物理参数的变化必然导致结构振动模态参数的变化,这就是结构损伤识别的基本原理。早期的损伤识别方法多集中于利用损伤前后频率的变化来判别损伤是否发生,后来逐渐发展到充分利用各种模态测试信息(如位移振型、应变振型和频响函数)对损伤进行精确定位和定量。如今,结构损伤识别技术已与现代模态测量技术和现代数值分析方法紧密结合,在机械、土木、航空、海洋等众多工程领域显示出其强大的生命力,结构损伤识别方法也呈现出一片繁荣的景象。按照是否采用线性模型假

设,损伤识别方法可以分为线性损伤识别理论和非线性损伤识别理论。由于线性振动理论已经相当完善和成熟,所以线性损伤识别方法是目前研究最多、应用最广的一类方法。按照是否采用原始结构的有限元模型,线性损伤识别理论又可分为无模型损伤识别方法和有模型损伤识别方法。有模型损伤识别方法即通常而言的模型修正法,因其既能对损伤定位又能求解出损伤程度而受到广泛的重视。损伤识别的模型修正法和单纯的模型修正技术有一些不同之处,主要表现为:①损伤识别中模型修正量通常都是明确的物理参量(如单元截面面积、弹性模量等),故损伤识别中的模型修正通常都是参数型修正。而单纯的模型修正技术一般包含矩阵型修正和参数型修正两种;②单纯的模型修正技术通常都以完好结构为对象,此时采用线性模型假设是比较合理的,而损伤识别中是否能采用线性模型假设还要依损伤大小等具体情况而定;③损伤识别中的模型修正都是建立在完好结构的有限元模型基础之上的,即在损伤识别之前就要先对原始结构的有限元模型进行精确的修正。

#### 1. 无模型损伤诊断方法

无模型损伤识别方法一般都只能完成判定损伤的发生和确定损伤的位置这两个任务。依据所采用模态信息的不同,又可细分为以下几种方法。

(1)频率改变法。由于结构振动的低阶频率信息更容易获得且精度很高,所以结构振动的频率信息被最早用于损伤检测中<sup>[4-6]</sup>。由于频率是一种全局物理量,单纯采用频率信息难以确定损伤位置,这对对称结构尤其如此。频率变化对损伤的灵敏度也不高<sup>[7]</sup>,结构发生小损伤甚至不会引起低阶频率发生明显的改变。

(2)振型改变法。振型改变法包括位移振型改变法和应变振型改变法两种。West在1984年首次系统地利用模态保证准则MAC(Modal Assurance Criteria)来确定航天飞机损伤前后的测试模态间的关系,并由此来定位结构的损伤<sup>[8]</sup>。Yuen通过对比实测振型的改变量和假设某单元损伤时的振型改变量来确定损伤位置<sup>[9]</sup>。Srinivasan和Kot指出振型比频率对损伤更敏感<sup>[10]</sup>。Nwosu和Swamidas等人发现结构损伤导致的应变振型改变远比频率的改变明显<sup>[11]</sup>。Chen和Swamidas以悬臂板为例说明应变振型适合于判断损伤位置<sup>[12]</sup>。Dong和Zhang等人指出用应变振型变化作为损伤定位指标比位移振

型灵敏度更高<sup>[13]</sup>。国内方面,李德葆和陆秋海等人为应变模态理论的完善和应用做出了贡献<sup>[14-16]</sup>,其他学者也做了相关的研究工作<sup>[17]</sup>。

(3)柔度矩阵改变法。相对于结构的刚度矩阵而言,采用质量归一化的振型,结构的柔度矩阵可以由前几阶频率很精确地得到,因此用柔度矩阵的变化来进行损伤定位的方法颇具实用价值。Aktan 等人用测量的柔度矩阵来判定桥梁的完整性<sup>[18]</sup>。Pandey 和 Biswas 用柔度矩阵的变化来判定损伤位置<sup>[19]</sup>,并用实验进行了验证<sup>[20]</sup>。还有其他学者也就此做了研究工作<sup>[21-24]</sup>,孙国和顾元宪对柔度阵法做出改进并将其应用于连续梁结构的损伤识别<sup>[23]</sup>。

(4)振型曲率或柔度曲率法。前面所述各种无模型损伤识别方法虽然不需要原始结构的有限元模型,但却仍然需要原始结构的模态数据,而有些年久的工程结构是没有这些原始资料的。对这些没有原始资料的结构便可以采用振型曲率或柔度曲率法来进行损伤定位。Pandey 等人发现振型曲率是一个良好的损伤定位指标<sup>[24]</sup>。Salawu 和 Williams 指出并不是每阶振型曲率都能很好地用于损伤定位,选择正确的模态对定位结果很重要<sup>[25]</sup>。Chance 等人指出用位移振型计算曲率有时会有很大的误差,他们使用应变振型显著地改善了损伤识别结果<sup>[26]</sup>。Zhang 和 Aktan 用柔度曲率法来识别损伤,结果表明柔度曲率是一个很灵敏的损伤指标<sup>[27]</sup>。国内也有不少学者对此做了研究和比较工作<sup>[28-33]</sup>。

无模型损伤识别方法的优点是不需要对结构进行有限元建模,从而避免了复杂的建模过程,其损伤识别结果也不受有限元模型精度的影响。其缺点是只能监测到测量区域及其附近的损伤情况,对离测量区域较远地方的损伤情况不能判定,要想监测结构整体的损伤情况,就必须在结构上平均密布大量的传感器,这是不现实和不经济的。另外,无模型的损伤检测方法不能对损伤程度做出精确判断,而损伤程度对于结构剩余寿命预估却是必不可缺的。

## 2. 模型修正的损伤诊断方法

基于有限元模型的结构损伤识别方法能够完成辨识损伤发生、确定损伤位置和求解损伤程度的三重任务,因此受到广泛的关注。其基本原理是对原始结构的有限元模型进行修正以使其满足结构损伤后测试的模态信息,模型的修正量即为结构的损伤量。典型的损伤识别模型修正法主要有以下几种。

(1)基于残余力向量的结构损伤识别方法。有很多种损伤识别方法都是从残余力方程出发来进行损伤识别的,因此将这类方法统一称为基于残余力向量的损伤识别方法。最小范数法<sup>[34-40]</sup>,最小秩法<sup>[41-45]</sup>,基于残余力方程的遗传算法<sup>[46-47]</sup>和其他方法<sup>[48-49]</sup>等都可以归结为此类。这类方法存在一个共同的缺点,就是获取残余力向量时需要完整的振型,对于测量不完整的情况则必须进行模型缩聚<sup>[50-62]</sup>,或振型扩充<sup>[63-69]</sup>。然而,已有的研究表明,单纯的振型扩展或模型缩聚技术对监测未测量区域处的损伤是无能为力的<sup>[59-66]</sup>,结构的损伤识别与振型扩展(或模型缩聚)是交织在一起密不可分的,只能同时加以解决。

(2)特征对灵敏度法<sup>[70-76]</sup>。结构的特征对(频率或振型)对结构单元参数的导数称为灵敏度,特征对的灵敏度方程本质上是对结构振动方程作了一阶近似的线性处理,由一阶灵敏度方程求解损伤程度将只需要解一个线性方程组。灵敏度方法的优点是不需要完整的测量振型,缺点是对有限元模型的精度依赖性很高,求解灵敏度矩阵时计算量很大,对结构大损伤的情况要用二阶灵敏度或迭代的算法来提高求解精度,这将进一步加大计算量。

(3)特征结构分配法<sup>[77-81]</sup>。其基本原理就是利用一个虚拟的反馈控制器来控制求解结构的剩余模态向量以使其最小化,进而得到修正的结构模型矩阵。Lim 和 Kashangaki 提出的最佳逼近特征向量法是这类方法的一个代表<sup>[79]</sup>。

(4)应变能量法<sup>[82-86]</sup>。振型与结构单元刚度矩阵的二次型被定义为单元应变能量,发生损伤的单元应变能量的变化最大,据此便可判定损伤位置,再通过分析应变能量的灵敏度即可求解损伤程度。由于求解应变能时必须用到完整的振型,所以应变能量法仍然摆脱不了需要进行振型扩展的缺点。

(5)损伤识别的混合方法<sup>[87]</sup>。其基本思想是首先充分利用各种测量信息来预先评估损伤区域,再单独利用频率信息来精确定位及定量。混合方法考虑了目前测试技术的局限性,能够在测量不完整和有噪声的情况下完成损伤识别的任务,具有一定的工程实用价值。

### 1.1.2 基于小波分析的结构损伤诊断方法

直接基于振动测试信号的结构损伤识别方法,避免了模态参数识别这一

中间过程,具有显著的优点。这类方法采用数字信号处理方法直接对结构响应信号进行分析和处理,根据信号参数的变化或统计,达到损伤识别的目的。常用的信号处理方法有傅里叶变换、小波变换、基于经验模态分解法(EMD)的 Hilbert-Huang 变换(HHT)等。

小波变换是继傅里叶变换后出现的一个新的数学工具,是建立在泛函分析、傅氏分析和调和分析基础上的新的信号分析处理方法,其基本思想是用一簇小波函数表示或逼近一个函数(信号),具有伸缩、平移和放大功能,在时域和频域上同时具有强大的局部化性能,能对不同的频率成分采用逐渐精细的采样步长,聚焦到信号的任意细节,被誉为分析信号的“显微镜”。另外,小波变换对信号的奇异点十分敏感,可以识别结构响应信号中存在的奇异性或突变信息,而这些信息往往反映了结构的损伤情况。因此可利用小波变换进行奇异信号检测、信噪分离和信号频带分析来提取损伤特征,确定结构的损伤情况。

基于信号的损伤识别技术具有直观、省时的特点,因而在土木工程结构在线健康监测中是可行的。作为不需要结构分析模型的直接损伤识别方法,可用解决前两个水平(Level 1 和 Level 2)的损伤识别问题,即确定结构出现损伤和损伤的位置。为了下一个水平的损伤识别,例如定量损伤程度,需与结构分析模型结合在一起来考虑。此外,基于信号的损伤识别方法,当传感器放置在损伤位置时能够有效地检测和识别损伤,但还需要进一步地研究,使它适用于损伤位置事先未知的更一般结构系统的可能性,以便基于小波分析的损伤识别方法能用于更广泛的实际工程。

总之,虽然损伤检测与识别的技术看起来很直观,但在实际应用中还存在比较大的困难。一是损伤是一个局部现象,对反映结构整体性能的特征参数影响不大;二是损伤识别在很多情况下要在“无监督学习”方式进行,即分析数据中不包括损伤结构数据的样本,有时甚至连完好结构数据的样本也没有;另外,环境因素的影响以及有限的测量点也是损伤检测与识别过程中不可忽略的因素。

### 1. 损伤预警

损伤预警就是判定结构在使用过程中是否存在损伤(Level 1),可以通过

结构响应信号进行判别,也可以通过反映结构整体特性的特征参数(如频率、振型、曲率、挠度等)的变化进行识别。Al-Khalidy 发表了大量采用小波分析进行损伤识别的文章<sup>[88-89]</sup>,主要研究目标是发展一种识别结构损伤变化的在线系统,以确保结构在恶劣环境荷载下的安全性。他们采用正交离散小波变换从噪声污染的观测信号中成功地分离出了疲劳信号。Robertson 等人<sup>[90]</sup>提出了从结构的输入、输出数据中提取脉冲响应函数(Markov 参数)的小波算法。输入数据和 Markov 参数可通过局部正交的 Daubechies 小波函数近似表示,从而使得卷积积分在小波域中很容易实现。采用从小波分析中提取的 Markov 参数进行结构的系统识别,获得状态空间模型的频率、振型和阻尼参数<sup>[91]</sup>,进而判定损伤是否存在。Kitada 提出了非线性结构系统动态的小波识别方法<sup>[92]</sup>,不对结构非线性特性作任何假设,就可以识别材料非线性的结构刚度和阻尼系数。还有其他一些研究者也致力于利用小波识别结构模态参数的研究,通过比较损伤前后的模态参数判定结构是否存在损伤<sup>[93-94]</sup>。

Deng 等人将有源传感器和小波变换引入健康监测之中<sup>[95]</sup>,研究中采用与飞机翼缘板相似的钢梁,承受冲击荷载。试验结果显示,经小波变换后的信号可以完全识别冲击荷载作用的时间、位置以及某一频段内的波速,同时还发现经小波变换后的信号较直接得到的波形信号更易识别损伤是否产生。程军圣等人采用连续小波变换的方法来提取滚动轴承故障振动信号的特征,在此基础上提出了一种滚动轴承故障诊断方法——尺度-小波能量谱比较法<sup>[96]</sup>。通过比较尺度-小波能量谱的幅值和形状变化,判定滚动轴承是否存在故障。王计生等人将小波分析和神经网络技术相结合,对刀具故障进行在线监测,可以对刀具的故障进行预警,预报损伤是否存在<sup>[97]</sup>。

## 2. 损伤位置的确定

识别损伤位置(Level 2)通常是通过识别结构局部是否存在损伤实现的。小波系数通常在裂缝周围表现出非规则性,这种特性有助于识别结构损伤位置。Liew 和 Wang 利用小波理论对横截面边缘具有不扩展开口裂缝的简支梁进行了识别<sup>[98]</sup>,并将特征值理论和小波理论进行对比,推导出裂缝梁的数学模型,提出了空间域的小波表达式。在空间域内系统信号可以表示为常数和所有水平下的小波分解之和,即

$$u(x, t) = a_0 + \sum_{j=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{2^j-1} a_{2^j+k} \psi(2^j x - k) \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (1.1)$$

式中,  $a_{2^j+k}$  为小波分解系数, 通过分析系数  $a_{2^j+k}$  的变化可以判定结构的状态。

Wang 等人研究了悬臂梁的横向裂缝问题<sup>[99]</sup>, 采用如下的新小波系数进行损伤识别:

$$C_{j,k} = \int_0^1 f(x) \psi_{j,k}(x) dx \quad (1.2)$$

式中,  $f(x)$  为  $x$  处的挠度。小波系数的突然变化意味着信号的局部突变, 且此突变发生在局部损伤附近。采用中跨带横向裂缝的钢梁进行了数值模拟和验证, 结果表明在裂缝附近小波系数具有明显的突变特性, 尤其是对于高尺度分解, 效果更为明显。这种基于小波的识别方法不需要任何材料特性信息, 也不需要知道结构的应力状态。

Wang 和 Deng 采用有限差分计算梁的挠度<sup>[100]</sup>, 在梁裂缝区域发现了旋量图的不连续性, 但挠度、弯矩和剪力曲线却是连续的。并通过降低均匀分布的信号点数目进行敏感性分析, 信号点从 1 024 个减少到 31 个, 发现当信号点数目减少到 15 个时, 将不可能识别裂缝。

Lu 和 Hsu 采用非均匀密度的弹簧来研究损伤识别<sup>[101-102]</sup>, 用小波变换分析弹簧的振动信号, 建立小波系数和密度变化之间的关系。具体采用 Vasilyev 等人<sup>[103]</sup> 提出的配置法得到小波系数, 选用 Mexican 小波进行研究, 它定义为

$$\psi(x) = (x^2 - 1) \exp(-x^2/2) \quad (1.3)$$

与先前所提到的<sup>[99-100]</sup> 相同, 在损伤区域附近小波系数发生了巨大变化。

Quek 等人采用压电传感器得到了梁的动态响应信号, 并用 Gabor 小波变换识别裂缝位置<sup>[104]</sup>。研究发现采集可靠的试验数据对于实践中准确地进行损伤定位是非常重要的。Gabor 小波函数是通过 Gaussian 分布函数得到的谐函数窗, 可表示为

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma_0}} \exp \left[ -\frac{(\omega_0/\gamma_0)^2}{2} \left( \frac{t-b}{a} \right)^2 + i\omega_0 \left( \frac{t-b}{a} \right) \right] \quad (1.4)$$

式中,  $\gamma_0 = \pi\sqrt{2/\ln 2}$ ;  $\omega_0 = 2\pi$ ;  $a$  是振动周期;  $b$  是 Gaussian 函数中心。因此信号  $f(t)$  的连续 Gabor 小波变换  $Wf_{a,b}$  与通常小波变换相似, 仅小波函数有所改



变。对损伤梁的弯曲波信号进行小波分解,小波系数的  $Wf_{a,b}$  的分布状况明确表示出冲击荷载发生时间和产生第一个微小反射波的谐频范围。同时,研究中采用了小波尺度的允许范围,它考虑了采样频率、滤波频率和信号长度等因素的影响,如果采样频率为  $1/\Delta t_s$ ,则对应的应用尺度为  $-2\log_2(2\Delta t_s)$ 。

Kim 等人采用 Gabor 小波识别简支梁的裂缝<sup>[105]</sup>,不仅能识别损伤位置,而且也能估计损伤程度。Gabor 小波也可以表示为

$$\psi(t) = e^{-t^2/2\sigma^2} e^{i\eta_0 t} \quad (1.5)$$

引入系数  $G_s = \sigma\eta_0$  称为 Gabor 形状因子,引入它以便得到适用于损伤识别的  $\psi(t)$  函数。当  $G_s = 0.5$  时, Gabor 小波也被称为 Morlet 小波。但研究发现,当采用 Morlet 小波时将使入射波和反射波之间产生小的相互干扰,因此采用  $G_s = 3.5$ 。在损伤程度估计方面,波的反射和传播采用如图 1.1 所示模型模拟,切口处的反射波大小  $C$  和入射波  $A$  之间的关系为

$$\frac{C}{A} = \frac{[2RQ(R^2 - Q^2) - i(1 - R^2Q^2)^2]}{2RQ(R^2 + Q^2) + (1 + R^2Q^2)^2} \quad (1.6)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} R &= \left(\frac{I_2}{I_1}\right)^{0.25} \\ Q &= \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{0.25} \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

采用式(1.7)可以将  $C/A$  与切口深度  $h$  之间关系用图形表示,发现表示入射波到达时间的小波脊可用来确定不同频率组分的波群速度,因此可用入射波和反射波的不同到达时间识别损伤位置。

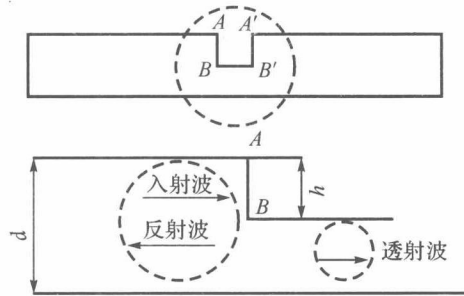


图 1.1 具有切口深度  $h$  的部分梁截面