



小波分析

在土木工程结构中的应用

任伟新 韩建刚 孙增寿 著

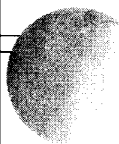
中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

小波分析在土木工程结构中的应用

任伟新 韩建刚 孙增寿 著

中国铁道出版社

2006年·北京



内 容 简 介

本书除介绍小波分析的基本理论和特点外,重点讨论小波分析方法在土木工程结构中的研究和应用。全书共分5章,内容包括绪论、小波分析理论基础、结构模态参数识别、结构损伤识别、小波有限元方法等。利用小波分析的时-频局部化特性,对基于小波的结构模态参数识别方法、结构损伤识别方法和小波有限元结构分析方法进行了详细的论述和分析,并附有相应分析实例,也包括了作者在这几个方面的研究成果。

本书可供从事土木工程结构研究的科技人员及高等院校师生使用,也可作为土木工程专业研究生教材,还可供铁道、水利、机械、航空、航天等相关专业人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

小波分析在土木工程结构中的应用/任伟新,韩建刚,
孙增寿著. —北京:中国铁道出版社,2006. 8
ISBN 7-113-07296-8

I. 小… II. ①任…②韩…③孙… III. 小波分
析-应用-土木工程-工程结构 IV. TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 081650 号

书 名:小波分析在土木工程结构中的应用

作 者:任伟新 韩建刚 孙增寿 著

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:刘红梅

封面设计:崔丽芳

印 刷:北京市兴顺印刷厂

开 本:880 mm×1 230 mm 1/32 印张:8.375 字数:251 千

版 本:2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2 000 册

书 号:ISBN 7-113-07296-8/TU·848

定 价:30.00 元

版权所有 侵权必究

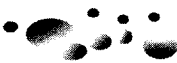
凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

编辑部电话 010-51873134

发行部电话 010-51873124



前 言



小波理论是近年来形成并且发展迅速的一种数学分析工具。它在科学技术领域引起了越来越多的关注和重视,在工程应用方面,特别是在信号处理、图像处理、模式识别、地震勘测、机械故障诊断与监控、分形、数值计算等领域,被认为是近年来在工具及方法上的重大突破。本书在系统介绍小波分析基本理论之后,利用小波分析的优点和特性,致力于用小波分析方法解决土木工程结构中的几个问题,即结构模态参数识别、结构损伤识别和小波有限元结构分析,促进小波变换这一新型分析方法在土木工程结构中的应用和发展。

全书共分5章。第1章论述了小波分析的发展以及在结构模态参数识别、结构损伤识别和结构分析等方面的研究和应用。

第2章介绍了小波分析基本理论,对连续小波变换、离散小波变换、多分辨分析和小波包分析进行了详细论述,并给出了常用小波函数的特性。

第3章论述了基于小波的结构模态参数识别方法,通过小波将信号变换到时—频域,给出了环境激励下结构振动响应数据小波变换的振幅、相位与特征频率及阻尼之间的关系,并给出了分析实例。

第4章论述了用小波分析进行结构损伤识别的方法。对曲率模态小波变换系数、小波能量变化率、小波能量分布向量等结构损伤指标进行了详细分析和论述,并给出了结构损伤识别的实施步骤和小波函数的选取原则。

第5章论述了小波有限元方法及其在结构分析中的应用。通过构造样条小波插值函数,建立了梁单元、平面问题单元、薄板单元和空间单元有限元列式。基于二类广义变分原理,建立了全域的多变量小波有限元法方程,求解了中厚板和弹性地基厚板问题。

本书是在作者近年来利用小波分析方法从事土木工程结构模态参数

识别、损伤识别和结构分析方面的研究成果基础上写成。博士生林友勤、徐晓霞、Jashi Bijiaya 和禹丹江等参与了部分研究工作,硕士生彭雪林、张笑华和陈志伟等参加了部分算例的分析计算工作。

鉴于作者知识和业务水平有限,书中难免存在一些错误和不妥之处,希望同行专家和读者在阅读本书过程中,提出宝贵意见。

作 者

2006 年 3 月

目 录

1 绪 论

1.1 小波简介	1
1.2 小波分析与结构模态参数识别	4
1.3 小波分析与结构损伤识别	7
1.4 小波分析与有限元	10
参考文献	14

2 小波分析理论基础

2.1 概述	19
2.2 傅立叶变换	20
2.3 小波变换	32
2.4 连续小波变换	44
2.5 离散小波变换	47
2.6 多分辨分析	49
2.7 小波包分析	52
2.8 小波分析的数值计算	57
2.9 本章小结	62
参考文献	62

3 小波与结构模态参数识别

3.1 概述	67
3.2 结构模态参数识别	67
3.3 环境振动结构模态参数识别	70
3.4 小波与结构模态参数识别	80

3.5 小波变换系数的模和相位	82
3.6 基于小波的环境振动模态参数识别	84
3.7 小波模态参数识别算例分析	87
3.8 本章小结	99
参考文献	100

4 小波与工程结构损伤识别

4.1 概述	102
4.2 结构损伤与结构损伤识别	103
4.3 基于小波的异常信号检测与识别	112
4.4 小波分析与结构损伤识别	118
4.5 基于模态振型小波变换的损伤识别	125
4.6 基于模态曲率小波变换的损伤识别	132
4.7 基于小波包能量的损伤识别	139
4.8 基于小波包能量分布向量的损伤识别	149
4.9 结构健康监测	158
4.10 小波在结构无损检测中的应用	170
4.11 小波降噪技术	176
4.12 小波函数的选择	185
4.13 本章小结	188
参考文献	189

5 小波在结构分析中的应用

5.1 概述	193
5.2 小波 Galerkin 法及其应用	196
5.3 样条小波有限元	205
5.4 小波插值函数及边界条件的处理	229
5.5 广义变量的小波有限元方法	240
5.6 小波随机有限元	247
5.7 本章小结	256
参考文献	257

1. 绪 论

1.1 小波简介

自从 1822 年傅立叶(Fourier)发表“热传导解析理论”以来,傅立叶变换一直是信号处理领域中最完美、应用最广泛、效果最好的一种手段。但是,傅立叶变换只是一种纯频域的分析方法,它在频域内的定位性是完全准确的(即频域分辨率最高),而在时域无任何定位性(或分辨能力),即傅立叶变换所反映的是整个信号全部时间下的整体频域特征,而不能提供任何局部时间段上的频域信息。相反,当一个函数用 δ 函数展开时,它在时间域的定位性是完全准确的,而在频域却无任何定位性(或分辨率),即 δ 函数分析所反应的只是信号在全部频率上的整体时间特征,而不能提供任何频率所对应的时间特征。实际中,对于一些常见的非平稳的信号,如音乐信号、地震波、探地信号等,它们的频域特性都随时间而变化,因此也可称它们为时变信号。对这一类时变信号进行分析,通常需要提取某一时间段(或瞬间)的频域信息或某一频率段所对应的时间信息。因此,寻求一种介于傅立叶分析和 δ 分析之间的并具有一定的时间和频率分辨率的基函数来分析时变信号,一直是信号处理界及数学界人士长期以来努力的目标。

为了研究信号在局部时间范围的频域特征,1946 年 Gabor 提出了著名的 Gabor 变换,之后进一步发展为短时傅立叶变换(Short Time Fourier Transform,简称 STFT,又称为加窗傅立叶变化)。目前,STFT 已在许多领域获得了广泛的应用。但由于 STFT 的定义决定了其窗函数的大小和形状均与时间和频率无关而且保持不变,这对于分析时变信号是不利的。高频信号一般持续时间很短,而低频信号持续时间较长,因此,人们期望对于高频信号采用窄时间窗,对于低频信号则采用宽时间窗

进行分析。在进行信号分析时,这种变时间窗的要求同 STFT 的固定时窗(窗不随频率发生变化)的特性是矛盾的,这表明 STFT 在处理这一类问题时已无能为力了。此外,在进行数值计算时,人们希望将基函数离散化,以节约计算时间及存储量。但 Gabor 基无论如何离散,都不能构成一组正交基,因而给数值计算带来了不便。这些是 Gabor 变换的不足之处,但恰恰是小波变换的特长所在^[1-8]。小波变换不仅继承和发展了 STFT 的局部化的思想,而且克服了窗口大小不随频率变化、缺乏正交的缺点,是一种比较理想的进行信号处理的数学工具。

小波变换的思想来源于伸缩与平移方法。小波分析方法的提出,最早应源于 1910 年 Haar 提出的规范正交基(这是一组非正则基)。1938 年, Littlewood-Paley 对傅立叶级数建立了 L-P 理论,即按二进制频率成分分组,傅立叶变换的相位变换本质上不影响函数的形状与大小。1965 年 Galderon 发现了再生公式,它的离散形式已接近小波展开,只是还无法得到组成一正交系的结论。1981 年 Stromberg 对 Haar 所给出的 Haar 系标准正交小波基的改进,证明了小波函数的存在性。1982 年 Battle 在构造量子场论中采用了类似于 Galderon 再生公式的展开形式。同时,著名的计算机视觉专家 Marr 在他的“零交叉”理论中使用的可按“尺度大小”变换的滤波算子,现在已成为“墨西哥帽”小波。这些工作和后来成为 Mallat 正交小波理论构造支柱的“多分辨分析”或“多尺度分析”有着密切的联系。

小波概念的真正出现应开始于 1984 年,法国地球物理学家 Morlet 在分析地震数据时提出了将地震波按一个确定函数的伸缩、平移系展开。随后,他和 Grossmann 共同研究,第一次把小波用于分析处理地质数据,提出了以他们名字命名的时间—尺度小波,即 Grossmann-Morlet 小波。1985 年, Daubechies、Grossmann 与 Meyer 共同进行研究,选取连续小波空间的一个离散子集,得到了一组离散的小波基(称为小波框架),而且根据小波框架的离散子集的函数,恢复了连续小波函数的全空间。1986 年,法国数学家 Meyer 成功构造出具有一定衰减性质的光滑函数,这个函数(算子)的 2 进尺度伸缩和 2 进整数倍数平移产生的函数系构成著名的 2—范数函数空间的标准正交基。这项成果标志小波分析新时期的到来。在这之后, Lemarie 和 Battle 又分别独立地构造得到了具有指数衰

减的小波函数。再后来 Meyer 和计算机科学家 Mallat 提出多分辨分析概念,成功的统一了此前 Stromberg、Meyer、Lemarie 和 Battle 的个别小波构造方法,同时 Mallat 还在多分辨分析的基础上简捷地得到了离散小波的数值算法,即现在的 Mallat 分解和合成算法,并将此算法用于数字图像的分解和重构。几乎同时,比利时数学家 Daubechies^[9-10] 基于多项式方式构造出具有有限支撑的正交小波基和对称双正交小波。Chui^[2] 和我国学者王建忠^[11] 基于样条函数构造出单正交小波函数,并讨论了具有最好局部化性质的尺度函数和小波函数的构造方法。

目前,小波在许多领域得到了广泛的应用。如 Mallat 将二进制小波变换用于图像的边缘检测、图像压缩与重构;Farge 将连续小波变换用于涡流的研究;Wickerhauser 将小波包的理论用于图像的压缩;Frisch 将小波变换用于噪声中的未知瞬态信号;Dutilleux 等将小波变换用于语音信号的分析、变换和综合;Kim 将小波变换用于时频分析;Beylkin 将正交小波变换用于算子及拟微分算子的化简;Bocry 等将小波变换的自适应性应用于解微分方程;彭玉华等将小波变换用于电磁场领域的若干问题研究等。在这些研究工作基础上,特别是数字信号和数字图像的 Mallat 分解和重构算法的确定,使小波分析的应用迅速波及科学研究和工程技术应用研究的几乎所有领域。编辑部设在美国的 Texas A&M 大学的国际杂志《Applied and Computation Harmonic Analysis》从 1993 年创刊之日起就把小波分析的理论和应用研究作为其主要内容,编辑部的三位主编 Chui、Coifman 与 Daubechies 都在小波分析的研究和应用中有独到的贡献。时至今日,小波分析的应用范围还在不断的扩大,许多科技期刊都刊载了与小波分析相关的论文,各个学科领域的地区性和国际性学术会议都有涉及小波分析的各种类型的论文、报告^[1-7]。

小波分析研究和应用范围的广度和深度,使得任何人都不可能完全了解小波分析的研究和应用的全部情况,而只能选择其中相关的内容进行跟踪、消化、展开深入研究并进行应用。总之,小波变换作为一种数学理论和方法在科学技术界引起了越来越多的关注和重视。在工程应用领域,特别是在信号处理、图像处理、模式识别、语音识别、量子物理、地震勘测、流体力学、电磁场、CT 成像、机械故障诊断与监控、分形、数值计算等领域,它被认为是近年来在计算工具及方法上的重大突破。小波理论也

是近些年形成和发展迅速的一种数学工具。基于小波变换的小波分析技术是泛函分析、傅立叶变换、样条分析、调和分析、数值分析等半个世纪以来发展完美的结晶,是正在发展的新的数学分支。可以预料,在今后数年内,它将成为科技工作者经常使用的又一锐利的数学工具,会极大地促进科技及工程应用领域的新发展。

1.2 小波分析与结构模态参数识别

模态测试与分析已经在航天、航空、航海、汽车、建筑、桥梁及水工结构等几乎所有和结构动态分析有关的领域中得到广泛地应用。模态分析的理论基础是在机械阻抗与导纳的概念上发展起来的。虽然机械阻抗的概念早在 20 世纪 30 年代就已经形成,但发展成为今天这样较为完整的理论及方法,却经历了较长的岁月。

模态分析技术从 20 世纪 60 年代后期发展至今已趋成熟。它和有限元分析技术一起,已成为结构动力学中的两大支柱。模态分析是结构动力学中的一种“逆问题”分析方法,它与传统的“正问题”方法(主要是指有限元方法)不同,是建立在实验(或实测)的基础上,采用实验与理论结合的方法来处理工程中的振动问题。目前这一技术已经发展成为解决工程振动问题的重要手段,在机械、航空、航天、土木、造船、化工等领域被广泛应用。近十余年来,模态分析理论吸取了振动理论、信号分析、数据处理、数理统计及自动控制理论中的有关“营养”,结合自身内容的发展,形成了一套独特的理论,为模态分析和参数识别技术的发展奠定了基础。

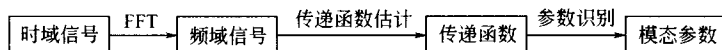
模态分析的经典定义是:将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换为模态坐标,使方程解耦,成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程,以便求出系统的模态参数。坐标变换的变换矩阵为模态矩阵,其每列为模态振型。由于采用模态分析的方法可以使方程数大为减少,从而大大节省计算机机时,减少了机器容量,降低了计算成本,这给大型复杂结构的振动分析带来了很大的好处^[12]。

从模态分析的定义可以看出,模态分析的目标是识别系统的模态参数,为结构系统的振动分析、振动故障分析和预报以及结构动力特性的优化设计提供依据。模态参数识别是系统识别的一个方面,即若用模态参

数来描述系统的特性,系统的参数为模态参数,此时的系统识别为模态参数识别。模态参数识别可以在频域进行,也可以在时域进行。频率的参数识别方法较多,如分量分析法、导纳圆辨识法、曲线拟和法、非线性优化辨识法等等。

时域的参数识别方法和频域识别方法不同,它无需将所测得的响应与激励的时程信号变换到频域中去,而是直接在时域中进行参数识别。它与频率法相比两者采用的分析路线不同,如图 1.1 所示。

频域法:



时域法:

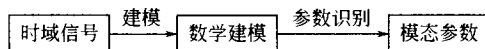


图 1.1 频域和时域识别分析路线

由于时域参数识别法无需将测试信号在时域与频域之间变换,这就避免了由数据变换(FFT 变换)而引起的截断误差,如泄漏等。时域法面临的主要问题是抗噪声干扰、分辨和剔除由噪声而引起的虚假模态以及模型的定阶等问题,围绕解决这些问题,近几年来发展出一系列的方法。这些方法虽然在一定条件下解决了一些问题,但又带来了新的问题。因此模态参数识别方法还在不断地发展和完善中。

传统的结构模态参数识别是建立在已知系统的输出和输入基础上来求得频域内的频率响应函数(Frequency Response Functions——FRFs)或时域内的脉冲响应函数(Impulse Response Functions——IRFs),从而实现对系统模态参数的识别。对实际结构而言,振动响应(输出)由安置在结构各部位的传感器记录得到,然而,工作环境条件下大型复杂结构的激励(输入)却不是那么容易可以实现的。虽然有一些专用的激振设备和相应输入—输出测试装置,但现场实验条件、结构的复杂性和实测数据质量等因素往往限制了这类专用激振设备的使用。一些重型的激振装置均很贵,势必增加了系统识别的成本,且用这种方法必须关闭结构或线路,这对使用繁忙的结构带来诸多不便。

环境激励(Ambient Excitation)是一种天然的激励方式,它无须贵重

的激励设备,不中断结构的正常使用,方便省时等。用环境激励引起的振动对结构进行模态参数识别,具有明显的优点:

- 直接从这些结构在工作中的振动响应数据识别出的模态参数更符合实际情况和边界条件;

- 利用实时响应数据和工作模态(Operational Modes)可以实现对结构的实时安全检测和监测;

- 结构振动主动控制中传感器采样的信号应该在实际工作时获取,控制模型应该与系统工作时情况相吻合,而利用工作中的振动响应数据识别出的结构模态模型可以用于控制模型修正。

环境振动试验时,由于此时仅仅有振动响应的输出数据,而没有测量真正的输入情况,此时的模态参数识别仅有输出数据的模态分析(Output Data Only Modal Analysis)或工作模态分析(Operational Modal Analysis)。自然环境振动条件下结构动力响应测试数据,具有幅值小、随机性强和数据量巨大的特点,给结构的模态参数识别带来很大的难度,也是一种挑战,需要应用一些特殊的系统识别和模态参数识别技术,已成为工程结构识别十分活跃的研究课题。美国 SADIA 国家实验室在 1995 年提出来了 NExT 法,并将该方法用于汽车轮机叶片在工作模态下的固有频率和模态阻尼测试^[13]。欧共体在 1997 年批准了以比利时鲁汶大学和英国帝国理工大学等为主提出的 EUROKE 项目,主要研究内容就是环境激励下的模态参数识别和结构损伤监测。他们分别以航天器、轿车及桥梁等为对象进行了研究,并提出了随机子空间识别方法^[14-16]。1997 年丹麦的 ASMUSSEN 等对 VESTVEJ 大桥进行了环境激励模态测试^[26]。最近几年来,直接采用环境激励下的振动响应数据进行模态参数识别,已经引起了各个研究领域中的学者的重视。

目前环境激励下结构的模态参数识别假设激励为白噪声,这是考虑到白噪声具有频率范围宽、能很好覆盖结构模态频率范围的特点,以及许多实际情况可以近似为白噪声,如稳定的气流对飞行器的激励、风对桥梁和建筑物的激励等,另外也便于结构响应的数值分析。此外,一般假定结构系统为线性的定常系统。然而,实际工程中很多环境激励不能近似成平稳激励,而时变系统的响应信号往往包含瞬态信号及时变的信息,对这种时变系统的参数识别问题,不仅要识别系统含有哪些频率成分,而且要

了解这些频率的时间特性。傅氏变换是一种时间域与频率域之间的全局性变换,以牺牲全部时间信息为代价而获得完美的频率分辨率,且变换是以信号平稳性假设为前提的,因此,基于传统谱分析的结构模态参数识别方法已无法解决这类问题。

为此,人们开始研究对环境激励更具有鲁棒性的方法。由于反映非平稳随机过程统计特性的指标是随时间变化的。结构响应信号的频率成分是随时间变化的,而信号在时间和频率二维平面的表示能够反映出频率成分随时间变化的特性。联合时-频域的模式参数识别方法就是通过时-频变换直接识别参数。

小波变换是一种时-频分析工具,它继承了傅氏变换以简谐函数来逼近任意信号的思想,但变换所用的函数族是一系列尺度可变的函数,这使得小波变换具有良好的时-频局部化特性,拥有一般谱分析所不具备的时域和频域同时定位的能力。因此,基于小波分析的结构模态参数识别具有显著的优点,这方面的研究刚刚开始。

1.3 小波分析与结构损伤识别

结构中的损伤可定义为“结构在服务期内其承载能力的下降”,承载能力的下降通常是由结构构件内部或构件之间连接出现损伤而引起的。对于处于自然环境中的实际工程结构,由于受使用荷载的作用和各种突发性因素的(如台风、地震、严重超载、火灾、爆炸等)影响,从服役开始就面临着一个损伤积累的问题。严格地讲结构的健康状态是不断地发生着变化。为了保证结构的安全,人们很早就意识到应在结构服役期充分了解结构的损伤状态及承载能力的变化,使损伤积累尚未达到威胁结构安全的程度之前就能够被检测出来。准确地识别出结构的损伤及对结构工作状态的正确评估,不仅关系到结构使用的安全,而且对于决定是否对结构进行维修,何时维修具有重要的意义。

结构损伤识别最早被应用于机械、航空领域。对于由连杆、轴承、齿轮等一系列零件组成的大型机械,人们很早就开始对它们进行结构故障诊断。后来在 20 世纪 60 年代初期,由于航空、军工的需要,结构的损伤检测发展起来,并发展了一系列的无损检测技术。80 年代以后,计算机

技术、信息技术和人工智能等学科的知识不断被应用到结构损伤检测中,人们不仅应用各种检测手段和检测工具在现场对结构进行测试,还应用各种理论方法在计算机上结合有限元计算对结构的损伤状态进行分析,来识别在现场无法察觉的结构损伤^[17-18]。

土木工程结构中的损伤检测发展,从国外来看,早期的工业与民用建筑的损伤出现率偏低,危害程度远没有机械结构那样高,而且一定程度的带伤工作是完全允许的,故而土木工程结构的损伤检测发展较慢,且多数工作属于结构可靠性评估。20世纪40年代到50年代,土木结构的损伤检测主要是对结构缺陷原因的分析 and 修补方法的研究,检测工作大多采用以目测为主的传统方法;60年代到70年代,开始注重对结构检测技术和评估方法的研究,多种现代检测技术被应用到土木结构中。80年代以来,土木结构的损伤检测进入了逐步完善的阶段,结构检测方面制定了一系列的规范和标准,结构损伤检测与基于有限元分析和智能评估的损伤识别相结合得到了迅速的发展。我国的土木工程结构损伤检测发展较晚,主要的研究也是在70年代以后,随着结构抗震、抗风研究的发展,才逐步开始结合可靠性评估和安全维修鉴定进行结构损伤检测的研究。在近几年,随着我国土木重大工程的兴建和近年来工程事故的增多,结构损伤检测得到了极大的重视,越来越多的人在从事这方面的研究。

为了能够及时地获得结构的健康状态信息,靠对结构偶尔进行的测量是无法满足要求的。健康监测对结构进行长期的在线监测,以实时、动态地了解结构性能,对结构安全性作出及时评估,因此,近年来国际上出现了针对重要工程结构的长期健康监测系统。长期健康监测系统是由安装在结构上的传感器和数据采集输出等软硬件设备组成的系统,它以结构的荷载、环境、响应等为监测对象,为及时地评价结构的健康状态提供了丰富的资料,可实时地通过现场安装的损伤检测仪器和计算机辅助完成的损伤识别技术对结构的健康状态作出评价。长期在线结构健康监测系统对硬件和软件都提出了更高的要求,大大推动了损伤检测和损伤识别技术的发展。

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。局部检测以各部分的局部状态为检测内容,通过对结构的局部部位进行集中检测,实现对结构缺损状况的了解,主要依赖经验目测以及成熟的无

损检测技术,例如无线电成像、光纤、X射线、声反射以及超声波技术。但这些传统的无损检测方法主要用于材料的检测,只能检测细部结构的一些损伤情况,往往用于已经对结构的某些构件或部位产生怀疑时,对这些结构构件或部位进行详尽地检测,而且一般也要求能触及被测构件。因此这些方法对大型复杂结构是不实用的,而且无法给出整体结构的受损程度信息。

整体检测则试图对整个结构进行结构反应信息的有效采集以及分析系统的处理来获得对整个结构状况的了解,其中包括结构的刚度、质量分布情况、结构的动力特性等等。另外,重大工程结构上布置的监测元件,既有局部检测元件,亦有整体监测元件。如进行位移、速度和加速度等监测的结构整体性态传感器和进行应力、应变、累积耗能、裂纹等监测的结构局部性态传感器。

结构损伤检测按测试方式又可分为“静力检测”和“动力检测”。传统的静力检测技术主要指在结构静力条件下的各种检测和一些无损检测技术,动力检测技术主要是为了弥补静力检测不足而发展起来的基于振动的检测技术。振动测量是最常用的一种整体检测方法,也是一种无损检测方法,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,自然地就可以利用测量结构动力特性的变化来识别结构的损伤。使用振动测试方法,可以在整体意义上检测结构的损伤。基于振动测试的损伤检测方法的研究,最初是在机械、航空和海洋工程中展开的,有些研究成果已经得到广泛应用,如:用其对飞船、飞机或正在运转的机械进行的在线故障检测,对早期故障进行的预报。近年来,振动测试的损伤检测方法,在土木工程领域也越来越受到关注。

动力破损评估法根据损伤诊断所依赖的不同工具大体上分为三类:基于动力学模型的诊断方法、基于信号分析的诊断方法和基于人工智能的诊断方法。基于动力学模型的诊断方法从损伤结构的数学模型出发,研究损伤对响应的变化规律。所用的动力参数主要有:频率、振型、模态曲率、应变模态、模态柔度、传递函数、功率谱、模态保证准则、能量传递比等^[19]。有的学者是利用结构损伤前后振动模态的改变和各阶模态对结构的灵敏度分析来实现诊断的;有的学者是从结构的有限元模型出发,采

用实验中得到的数据对模型中的刚度矩阵和质量矩阵进行相应的修改,他们认为结构损伤就发生在刚度矩阵和质量矩阵发生改变的地方;有的学者是依据结构模态参数推导各种结构损伤诊断指标。基于信号分析的损伤诊断方法是直接通过分析结构在动力荷载作用下的响应来得出结构损伤的信息,不需要知道结构的数学模型。小波分析在损伤诊断中的应用属于信号分析范畴^[20]。

李宏南等用小波包将结构在脉冲荷载作用下的振动响应进行分解,将各频率段的能量值作为识别损伤位置的依据,并将小波方法与神经网络方法结合起来进行损伤诊断^[21]。李洪泉等通过一座三层钢筋混凝土框架的振动台试验,利用小波多分辨率分析特点,将模型地震反应信号按不同频段分解,提取各频段的损伤信号特征。通过低尺度上小波系数发生突变来判断损伤的出现,同时利用尺度谱来识别损伤的位置^[22]。韩小林和骆英等将小波滤波用于基桩完整性检测,并应用于实际工程中,使基桩完整性检测的准确性和可靠性得到提高^[23-24]。向阳等用小波分析对混凝土超声检测和脉冲回波检测中的信号进行特征抽取,以第三阶尺度上的模极大值作为信号的特征向量来识别混凝土结构的缺陷^[25]等。

总之,小波分析被应用到结构损伤识别中,尤其是应用到土木工程结构中的研究更少,从研究方向来看,大多数都集中在某个局部领域,某类简单结构上,不具有推广性;从研究手段上来看,数值模拟研究较多,实验研究较少;从研究方法上看,从过去的单纯使用小波分析技术正在向把小波分析与其他方法相结合的方向发展^[26]。目前,小波在土木工程结构损伤识别中的具体应用及工程实现方面,还没有系统的理论研究和实现方法。作为一种新兴的时-频分析手段,小波在处理结构测试数据时具有极大的优势,可以预见其在结构健康监测系统中 and 结构损伤识别分析中有着广阔的发展空间和应用价值。

1.4 小波分析与有限元

20 世纪 60 年代,随着计算机科学技术的发展,在结构分析矩阵方法的基础上,诞生了有限元法。追溯历史,早在 1943 年,Courant 已应用了单元的概念^[27]。50 年代中期,阿吉里斯(Argyris)在研究复杂结构时,进