



小波分析 在土木工程结构损伤识别中 的应用

任宜春 著

湖南师范大学出版社



小波分析 在土木工程结构损伤识别中 的应用

湖南师范大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

小波分析在土木工程结构损伤识别中的应用 / 任宜春著. —长沙: 湖南师范大学出版社, 2010. 7

ISBN 978 - 7 - 5648 - 0254 - 7

I. 小… II. 任… III. 小波分析—应用—土木工程—工程结构—损伤(力学) IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 124911 号

小波分析在土木工程结构损伤识别中的应用

任宜春 著

◇责任编辑: 颜李朝

◇责任校对: 黄莉

◇出版发行: 湖南师范大学出版社

地址/长沙市岳麓山 邮编/410081

电话/0731. 88853867 88872751 传真/0731. 88872636

网址/http: //press. hunnu. edu. cn

◇经销: 湖南省新华书店

◇印刷: 长沙利君漾印刷厂

◇开本: 787 × 1092 1/16

◇印张: 11.5

◇字数: 233 千字

◇版次: 2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月第 1 次印刷

◇书号: ISBN 978 - 7 - 5648 - 0254 - 7

◇定价: 25.00 元

前 言

土木工程结构使用期长,在环境侵蚀、材料老化和荷载的长期效应、疲劳效应和突变效应等灾害因素的共同作用下将不可避免地出现结构系统的损伤累积和抗力衰减,极端情况下易引发灾难性的突发事故。因此,检测和诊断土木工程结构的健康状况,及时发现结构损伤,对可能出现的灾害进行预测,评估服役结构的安全性、可靠性、耐久性和适用性,已得到国内外科技和产业部门的高度重视,并已成为土木工程和防灾减灾领域的热点课题。

结构动力测试的损伤识别方法和数字信号分析技术相结合,正逐步成为工程结构健康检测的重要手段。土木工程结构现场测试精度低、结构模型的不确定性以及结构的非线性和时变性,使得已有的损伤识别方法在实际工程应用中难以获得较好的识别效果。研究适合于识别非线性和时变结构的损伤识别方法和具有较好抗噪能力、对模型误差不敏感的结构损伤识别方法是土木工程损伤识别研究的发展方向。

实际工程中很多的环境激励是非平稳的随机过程,响应信号的频率成分是随时间变化的。对于这种非平稳的时变信号,目前常用的频域或时域识别方法不能同时满足信号在时、频两域进行局部分析的要求,而这种要求却恰恰是处理非平稳信号最根本和最关键的技术。小波分析是近年来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、机械故障诊断和监控等领域,被认为是近年来在工具和方法上的重大突破。相对傅里叶分析,小波分析是将信号分解成不同平移和尺度因子的母小波或基函数之和,使小波分析具有不同的窗函数,具有良好的局部分析功能,可以发现其他分析方法所不能觉察到的信号不连续性和断点。将小波分析这一优秀的时频分析方法引入土木工程结构损伤识别中,有利于提高损伤识别的精确性和准确性,推动非线性系统和时变系统识别方法在土木工程结构损伤识别中的应用,推动大型土木工程结构健康监测体系进一步发展,避免重大灾害事故的发生。

本书共分为8章,第1章论述了小波分析的发展、结构损伤识别方法以及小波分析在工程结构损伤识别中的研究和应用。第2章介绍了小波分析的基本理论,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的论述。第3章介绍了结构多尺度动力方程和状态方程的多尺度分解,在此基础上分析了多尺度参数卡尔曼滤波方法、多尺度非线性最小二乘法和分频段加权最小二乘方法提高结构参数识别精度的原理。第4章论述了基于小波包能量特征向量的损伤识别方法。分析了结构动力响应的小波包能量特征向量和基于小波包能量特征向量的损伤识别原理以及损伤特征指标,并阐述了环境激励下的识别方法,给出了小波包基的选择和分解层次确定的原则。第5章论述了基于小波奇异性理论的结构损伤识别方法。介绍了信号奇异性的定义和性质以及小波变换识别奇异性的特性;利用结构振型识别了带裂缝简支梁和有局部刚度降低梁的损伤;利用结构动力响应识别了结构损伤发生的时刻;利用移动荷载作用下梁跨中响应识别了裂缝的位置和深度。第6章论述了基于 Morlet 复小波变换的结构瞬时模态参数识别方法,分析了钢筋混凝土梁的弱非线性振动,并利用 Morlet 小波变换识别梁的非线性振动。第7章论述了基于改进 L-P 小波的结构损伤识别方法。介绍了基于改进 L-P 小波的结构时变模态参数识别原理,并利用该原理识别地震作用下结构的损伤。第8章论述了基于小

波基函数的结构损伤识别方法。介绍了时变参数的小波展式,利用小波展式将时变结构的识别转化为小波系数的识别,再由识别的小波系数重构时变参数,从而识别结构损伤。

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参数识别和损伤识别的研究成果基础上写成。本书的研究工作得到了湖南省自然科学基金项目(07JJ6086)和湖南省科技计划项目(2008SK3051)的资助。本书获长沙理工大学出版资助。

鉴于作者的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。

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 小波分析简介	(1)
1.2 结构损伤识别	(4)
1.3 小波分析与结构损伤识别	(6)
第2章 小波分析基本理论	(10)
2.1 概 述	(10)
2.2 傅里叶变换	(10)
2.3 短时傅里叶变换	(11)
2.4 连续小波变换	(12)
2.4.1 定义	(12)
2.4.2 连续小波变换的时间-尺度特性	(14)
2.4.3 连续小波变换的时间-频率特性	(14)
2.4.4 连续小波变换的反演	(15)
2.5 离散小波变换	(16)
2.6 小波框架	(17)
2.6.1 小波框架的定义	(17)
2.6.2 信号的重建	(17)
2.7 多分辨率分析	(18)
2.7.1 多分辨率分析的空间剖分	(18)
2.7.2 双尺度方程	(20)
2.7.3 Mallat 算法	(22)
2.8 小波包分析	(24)
2.8.1 小波包的定义及性质	(25)
2.8.2 小波包的空间分解	(25)
2.8.3 小波包算法	(26)

第3章 基于多尺度理论的结构损伤识别	(28)
3.1 概 述	(28)
3.2 动态系统状态方程的多尺度变换	(29)
3.2.1 动态系统状态方程	(29)
3.2.2 信号的多尺度表示	(31)
3.2.3 状态方程的多尺度分解	(32)
3.2.4 噪声在小波分解下的特性	(34)
3.3 结构动力系统的多尺度损伤识别	(35)
3.4 多尺度参数卡尔曼滤波	(36)
3.4.1 卡尔曼滤波基本理论	(36)
3.4.2 参数卡尔曼滤波	(38)
3.4.3 多尺度参数卡尔曼滤波	(39)
3.5 多尺度非线性最小二乘辨识	(47)
3.5.1 框架结构模型的静力凝聚	(47)
3.5.2 积分算子变换法	(48)
3.5.3 多尺度非线性最小二乘辨识	(52)
3.6 分频段加权最小二乘辨识	(57)
3.6.1 结构动力系统多尺度分析	(57)
3.6.2 分频段加权最小二乘辨识	(61)
3.7 小 结	(68)
第4章 基于小波包能量特征向量的损伤识别	(70)
4.1 概 述	(70)
4.2 结构动力响应的小波包能量特征向量	(70)
4.3 基于小波包能量特征向量的结构损伤识别原理	(73)
4.4 基于小波包能量特征向量的损伤特征指标	(75)
4.5 环境激励下的损伤识别	(77)
4.6 小波包基的选择与分解层数的确定	(79)
4.7 小 结	(80)
第5章 基于小波奇异性理论的结构损伤识别方法	(81)
5.1 概 述	(81)
5.2 信号奇异性的有关定义和性质	(81)
5.3 用小波变换识别奇异点特征	(82)
5.4 检测奇异性的小波基的选择	(84)
5.5 利用振型识别梁的裂缝	(85)
5.5.1 含裂缝简支梁的识别	(85)
5.5.2 梁局部刚度降低所引起的损伤的识别	(92)

5.6 基于结构动力响应的损伤识别	(94)
5.6.1 损伤发生时刻的识别	(94)
5.6.2 移动荷载作用下梁的裂缝识别	(96)
5.6.3 移动荷载下的带损伤段简支梁的识别	(102)
5.7 小 结	(104)
第6章 基于 Morlet 小波变换的结构识别	(105)
6.1 概 述	(105)
6.2 Morlet 复小波变换	(105)
6.3 基于复小波变换的瞬态参数提取	(108)
6.4 单自由度线性系统的识别	(110)
6.5 多自由度线性系统的识别	(111)
6.6 非线性系统识别	(113)
6.7 钢筋混凝土梁非线性识别	(116)
6.7.1 钢筋混凝土梁非线性自由振动	(116)
6.7.2 钢筋混凝土梁动力测试	(119)
6.8 小 结	(126)
第7章 基于改进 L-P 小波的时变模态参数识别	(127)
7.1 概 述	(127)
7.2 改进的 L-P 小波函数	(127)
7.3 基于改进 L-P 小波的结构识别	(131)
7.4 利用地震记录识别建筑物动力特性	(140)
7.4.1 建筑物基本情况	(141)
7.4.2 地震记录及其分析	(141)
7.5 小 结	(146)
第8章 基于小波基函数的结构时变物理参数识别	(147)
8.1 概 述	(147)
8.2 时变参数的小波展式	(148)
8.2.1 时变参数的小波展式	(148)
8.2.2 小波函数和分辨深度的选择	(150)
8.2.3 时变函数的小波低频系数重构	(151)
8.3 单自由度时变系统辨识	(152)
8.4 多自由度时变系统辨识	(161)
8.5 小 结	(164)
参考文献	(166)

第1章 绪论

1.1 小波分析简介

信号分析的主要目的是寻找一种简单有效的信号变换方法,使信号所包含的重要特征能显示出来。自1822年 Fourier 发表“热传导解析理论”以来,傅里叶变换(Fourier Transform)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,变换是整个时域到整个频域的变换,它在频域内的定位性是完全准确的,而在时域无任何定位性,即变换反映的是整个信号全部时间下的整体频域特性,不能提供任何局部时间段上的频域信息。相反,当一个函数 δ 用函数展开时,它在时域的定位性是完全准确的,而在频域无任何定位性,即 δ 函数分析所反映的只是信号在全部频率上的整体时间特征,而不能告诉我们其中的某种频率分量出现在什么时候以及它的变化情况。而在许多实际应用场合,信号是非平稳的,其统计量是时变函数。只了解信号在时域或频域的全局特征是远远不够的,需要提取在某一时间段(或瞬间)的频域信息或某一频率段所对应的时间信息。

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里叶变换(Short Time Fourier Transform)。短时傅里叶变换是采用一个窗函数对信号的乘积运算来实现在某一时刻附近的加窗和平移,再进行变换来实现信号的时频表示。短时傅里叶变换在一定程度上改善了傅里叶变换无时间局部化能力的不足。时-频局部化的精细程度还反映在时-频窗形状上,低频信号的特点是在较大的时间范围内幅值变化慢,其频率范围窄,于是分析低频信号的时-频窗特点是时窗宽而频窗窄;高频信号的特点是在较小的时间范围内幅值变化快,其频率范围宽,于是分析高频信号的时-频窗特点是时窗窄而频窗宽。短时傅里叶变换窗的大小、形状不变,即时频分辨率都是固定的。受 Heisenberg 测不准原理限制,也受频率自身物理概念的限制,它们的时域分辨率和频域分辨率不可能同时达到最好,二

者的乘积有一个上限。由此可知,短时傅里叶变换只适合于分析所有特征尺度大致相同的各种过程,窗口没有自适应性,不适于分析多尺度信号过程和突变过程。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 Gabor 变换的不足之处,恰恰是小波变换(Wavelet Transform)的特长所在。小波变换不仅继承和发展了短时傅里叶变换的局部化的思想,而且克服了窗口大小不随频率变化、缺乏离散正交的缺点,是一种比较理想的进行信号处理的数学工具^[14]。

小波分析方法的提出,最早可以追溯到 1910 年 Haar 提出的 haar 函数,haar 函数本身虽然简单,但它的伸缩系却能构成平方可积函数空间 $L^2(R)$ 的规范正交基。1938 年, Littlewood-Paley 对级数建立了 L-P 理论,即按二进制频率成分分组, Fourier 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,现在成为“墨西哥帽”小波。这些工作和后来成为 Mallat 的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, Meyer 又成功构造出具有一定衰减性质的光滑函数,这个函数(算子)的二进尺度伸缩和二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,成功地统一了此前 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得到了简捷的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,比利时女数学家 Daubechies 利用离散滤波器的迭代构造了具有紧支集的规范正交基,将小波变换的内积运算转换为卷积运算,为小波理论的具体运用提供了理论基础。崔锦泰和中国学者王建忠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。

小波变换是傅里叶变换的发展,具有多分辨率分析的特点,在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,是一种窗口面积不变但其形状可变,时间窗和频率窗都可以

改变的时频局部化分析方法。与短时傅里叶变换的最大不同之处是其分析精度可变,它是一种加时变窗进行分析的方法。在时-频平面的高频段具有高的时间分辨率和低的频率分辨率,而在低频段具有低的时间分辨率和高的频率分辨率,这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点。

从信号处理的角度,小波变换是一种把信号或函数分解成不同的频率成分,然后用与其尺度相匹配的分辨率研究每个成分的工具。在数学上,小波变换可以看作是信号在一组正交小波基函数上的分解,而被称为小波基的函数可以通过一个原型小波的伸缩和平移得到。原型小波可以看作是一个带通滤波器,而原型小波的伸缩和平移(小波基)可看作是带通滤波器组,并且该带通滤波器组具有恒Q特性;在实现方法上,Mallat算法的实质是一种分析/综合倍频程滤波器组。

小波分析利用一个可以伸缩和平移的可变视窗能够聚焦到信号的任意细节进行时频域处理,既可看到信号的全貌又可分析信号的细节,并且可以保留数据的瞬时特性。时域响应信号经小波分析后其突变特征会更加明显,因此,小波分析非常适合于识别正常信号和反常信号间的细微差别。小波分析具有如下特点:

1. 基函数的灵活性。小波分析的基函数不是唯一的,只要满足所谓的“容许条件”即可,因而有许多构造小波的方法,形成了多种小波函数。例如 Haar 小波,样条小波等。不同小波具有不同的特性,可分别用来逼近不同特征的信号,以便得到最佳效果。与它形成明显对比的是,常用的傅里叶变换只用三角函数去逼近信号,没有选择余地。

2. 算法的快速性。多分辨率分析大大提高了小波分析的效率,人们易于从尺度函数和双尺度关系推导出小波系数,甚至不需要知道小波函数的解析表达式也可得到分析结果。尺度函数相当于低通滤波器,小波函数相当于带通滤波器。将信号用低通和带通滤波器进行分解,显然比用频率点分解快捷。频带分析从表面上看比频率分析粗糙,然而信号分析的目的,在许多情况下是提取信号的特征,没有必要知道每个点的信息。同时小波分析并不排除对细节进行分析的可能性,在需要时,可将频带细分下去,起到显微镜的作用。这一点是傅里叶变换无法比拟的。

3. 分析的双域性。小波分析是时频分析方法之一,能够完成时频分解。和短时傅里叶变换相比,它又具有优越的时域窗。在不确定原理的约束下,频率较低时,它具有较宽的时间窗,而在频率较高时,又具有较窄的时间窗,因而更适合信号分析。

4. 应用的广泛性。可分析平稳信号,也可分析非平稳信号;可分析周期信号,也可分析非周期信号,大大增强了它的应用范围。

5. 思想的深刻性。小波理论是建立在时变函数、复变函数、泛函分析、调和分析等近代数学理论基础上的,这些近代成熟的数学理论为小波分析提供了坚实的理论基础。小波分析的这些特点也正是它能迅速地得到广泛应用的原因。

小波分析的历史是数学家和工程师共同创造的,它从诞生伊始就与实际工程问题紧密联系在一起。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、机械故障识别与监控、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、傅里叶变换、样条分析、调和分析、数值分析等半个世纪以来发展最完美的结晶,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 结构损伤识别

大型土木工程结构的使用期限通常长达几十年乃至上百年。在其使用过程中,由于疲劳荷载、环境腐蚀、材料老化、构件缺陷等因素的作用,结构将逐渐产生损伤累积,从而使结构的承载能力降低,抵抗自然灾害的能力下降。当遇到地震、洪灾等灾难性荷载作用时,可能遭受极为严重的破坏,给国家和人民的生命、财产带来巨大损失,并带来极为恶劣的社会影响。进入 21 世纪后,已建和新建各类土木工程结构的状态退化和灾害事故已经成为举世瞩目的重大科技、经济和社会问题。我国有一大部分桥梁和基础设施都是在 20 世纪五、六十年代建造的,经过这么多年的使用,安全性能如何?是否对人民的生命构成威胁?这些都是亟待回答的问题。1994 年美国 Los Angeles 的 Northridge 发生地震时,一些建筑物在主震中并未倒塌,但是结构已经存在损伤而未能及时发现,在此后的余震作用下发生倒塌^[5]。因此,检测和识别土木工程结构的健康状况,及时发现结构损伤,对可能出现的灾害进行预测,评估服役结构的安全性、可靠性、耐久性和适用性,已得到国内外科技和产业部门的高度重视,并已成为土木工程和防灾减灾领域的热点课题^[6]。

对土木工程结构而言,损伤通常指结构系统材料和几何性质的改变,如:开裂、刚度退化、质量损失等,这些改变包括边界条件、结构节点连接等显著影响系统性能的变化。损伤本身有复杂的产生机理和表现形式,既有突变和缓慢变化之分,又有局部和整体之分。根据识别的深入程度,损伤识别方法大致可以分为四个层次:(1)识别结构是否出现损伤;(2)对结构损伤的定位;(3)识别损伤的严重程度;(4)对结构的安全情况做出评价和结构寿命估计。结构动力损伤检测方法一般定义为:利用结构动力响应的实测数据,通过系统识别技术判断结构参数的变化,从而判定结构是否有损伤、损伤的部位和程度^[7]。由于结构损伤实际上是结构性态的改变,因此结构损伤检测实质上是结构参数变化的检测,通过结构参数的这个变化来量化结构损伤程度。在检测方法上,结构损伤检测与结构性态检测并无差别,但后者求解的目标是结构当前的性态,而前者求解的目标是结构当前的性态与某一已知参考性态间的变化。

工程结构检测技术是近几十年来发展起来的一门新学科。它是一门适应工程实

际需要而形成的多学科交叉的综合学科。工程结构检测按检测目标可分为局部检测和整体检测两大类^[8]。局部检测的目的是通过对结构重点部位的详细检查,掌握结构局部的物理、力学状态的实际情况。除了目视检测,还包括利用染色渗透、 χ 射线、 γ 射线、光干涉、超声波和电磁学监测等技术对结构的某些局部进行定期检查以及将传感器(如光纤传感器)固定在结构重要部件中进行远距离检测。局部检测周期长、效率低、成本高、结果受主观因素影响较大并且需要预先知道损伤的大概位置。整体检测方法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从而获得对整个结构状态的了解,其中包括结构的刚度、质量分布情况和结构的动力特性等。工程结构检测按检测方式可以分为静力检测和动力检测^[7]。现场静力荷载实验是获取结构整体信息的一种比较稳健的测试手段,但工作量大且受到可测部位的局限,不适合大型复杂结构。基于动力测试的结构系统识别由于能够通过有限的测点信息获得对结构整体特性的较好把握而受到研究者的重视,它和高效率、高精度的数字信号分析技术相结合,正逐步成为工程结构健康检测的重要手段。

动力检测(识别)技术通过结构的动力响应测量信息反映结构的当前性态。描述结构性态的物理量有两类:结构的模态参数和结构的物理参数。结构的物理参数是对结构性态最直观的描述手段,而结构的模态参数间接反映了结构质量和刚度的分布。结构的物理参数包括结构的质量、阻尼和刚度;结构的模态参数包括结构的频率、振型和模态阻尼比。按检测目的分类,动力检测问题可分为结构模态参数识别和结构物理参数识别。按所依据的信息分类,动力检测问题可分为频域识别、时域识别和联合时频域识别。

动力损伤识别方法根据损伤识别所依赖的不同工具大体上分为三类:基于动力学模型的识别方法、基于信号分析的识别方法和基于人工智能的识别方法^[8]。基于动力学模型的识别方法从损伤结构的数学模型出发,研究损伤引起响应变化的规律。所用的动力参数主要有:频率、振型、模态曲率、应变模态、传递函数、功率谱、模态保证准则、坐标模态保证准则、能量传递比等^[9]。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识别的;有的学者是从结构的有限元模型出发,采用实验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,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识别指标,如结构损伤前后振型的二阶微分差异等。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来得出结构损伤的信息,不需要知道结构的数学模型。它以小波分析为工具,通过分析系统的时变性质来做损伤识别,由小波变换得到的谱图直接显示损伤的存在。基于人工智能的损伤识别方法包括基于神经网络的损伤识别方法、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。基于人工智能的结构健康监测与损伤识别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,将导致结构的安全监控和性能改善产生质的飞跃。

随着土木工程结构的大型化和复杂化以及损伤识别技术的不断发展,一些适合于土木工程结构的崭新的损伤识别方法相继出现,如子结构分析方法、统计分析方法、非线性分析方法、动静力参数联合识别方法等^[9]。子结构分析方法包括子结构柔度法、子结构传递邻域方法、自适应子结构和摄动法等。实际的土木工程结构涉及的自由度数量和未知参数数目急剧增加,其难度和收敛的计算要求也跟着增加。而结构的损伤可能只发生在结构的局部部位,此时采用子结构损伤识别方法对大型复杂结构系统的损伤检测和状态评估,是一种有效的方法;统计分析方法包括广义的贝叶斯统计方法、规则化方法和模糊统计逻辑方法等。统计分析方法是从统计的角度,考虑特征参数的不确定性及其统计分布特征,可利用相关的随机有限元模型分析研究特征值从而评估损伤,或利用谱密度估计的统计特性来获得模态参数的修正概率密度函数表达式来分析损伤;联合利用结构的静动力测试信息来进行有限元模型修正和损伤识别将使得识别结果更可靠。静力参数识别法因为施加静力荷载易为工程师接受,也是结构状态评估目前普遍使用的方法。静力参数主要有结构刚度(包括结构单元刚度)、位移、应变、残余力、材料参数如弹性模量、单元面积或惯性矩等;非线性分析方法是利用结构的非线性程度与损伤的关系来识别损伤的。

1.3 小波分析与结构损伤识别

20世纪80年代后期从信号领域发展起来的小波分析理论,作为一种新兴的数学理论形成和发展的时间并不长,但已形成了一套完整的理论:从其定义到构造方法,从连续小波到离散小波,从小波分解、重构到多尺度分析等,都有详细的数学描述。其理论的重要性及应用的广泛性引起了科技界许多领域的高度重视。随着小波分析理论的发展和成熟,小波分析在结构损伤识别中的应用越来越广泛。小波分析之所以在结构损伤识别中得到广泛应用,主要因为其具有以下三个特点:

(1)小波分析因为采用自适应窗口,在高频段具有高的时间分辨率和低的频率分辨率,而在低频段具有低的时间分辨率和高的频率分辨率,在时频两域能同时进行局部分析,被誉为信号的显微镜。

(2)离散小波函数可以构成一组函数基,通过小波分解,可将信号按小波基形式展开。正交小波基函数可以没有冗余地获得信号的局部信息,可以通过分解系数重构原信号。满足框架性的非正交小波基提供了对函数的冗余表示,也能完全刻画函数,并从函数的分解中重构该函数。其优点在于数值计算稳定,计算误差影响小,对于干扰的鲁棒性好。

(3)信号在不同尺度下的小波变换反映了信号在不同尺度空间中的信息。通过变换尺度,可得到具有多尺度分析的信息表达,获得更多的信息从而降低问题的不确定

性和复杂性。

小波分析利用一个可以伸缩和平移的可变视窗能够聚焦到信号的任意细节进行时频域处理,既可看到信号的全貌又可分析信号的细节,并且可以保留数据的瞬时特性。时域响应信号经小波分析后其突变特征会更加明显,因此,小波分析非常适合于识别正常信号和反常信号间的细微差别。在结构损伤识别中,某些线性连接点在损伤发生后变为非线性,导致结构固有频率和刚度的改变,进而使得结构的动力响应发生变化。利用小波变换分析结构损伤前后的时频域响应,可以确定诸如高次谐波、亚谐波以及混沌现象等非线性系统响应的动力学特性,进而检测结构的非线性^[10]。国内外学者对小波分析在动力学系统识别和损伤诊断方面的应用研究主要在以下几个方面展开^[11-12]:

(1) 利用结构响应的高频段小波系数突变或直接利用小波谱图识别损伤。Hou 等分别利用含有破损弹簧的简单结构数值模型和地震作用下的实际结构的响应信息,研究了小波高频系数突变点指示损伤出现的方法^[13]。Heria 和 Hou 对 Benchmark 框架模型在风荷载作用下的响应作离散小波变换,用细节小波系数出现突变点来识别损伤的发生,用突变点在空间的分布识别损伤的位置^[14]。Hong 等把模态振型进行连续小波变换,然后利用 Lipschitz 指数来判断损伤发生的位置。Lipschitz 指数通常被用来表征函数的区域规则性,而损伤会导致连续小波变换得到的系数最大值在靠近损伤位置处发生突变。结果显示,李氏指数不仅能够准确定位损伤的位置,而且能够评价损伤的程度,对一个带损伤的梁的实验模态分析也验证了这一点^[15]。任宜春等将 Lipschitz 指数方法用于识别移动荷载作用下简支梁的损伤识别^[16]。Pan 等利用双线性结构在地震作用下响应的离散小波变换高频系数突变点识别屈服和卸载时刻,并比较了窗口傅里叶变换、连续小波变换和离散小波变换的识别效果^[17]。Hani 等用板和梁的足尺试验证明了傅里叶变换从频率的降低可以识别出梁的疲劳损伤,但不能识别出板的损伤。而小波变换可以直接从谱图识别出两者的损伤^[18]。Wong 等对非线性系统在正弦荷载作用下的响应进行研究,发现从连续小波变换时-频谱图上能直接识别出一次谐波响应、倍谐波响应和混沌响应^[19]。李洪泉等通过一座三层钢筋混凝土框架的振动台试验,将模型地震反应信号进行小波变换,通过高频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^[20]。任宜春等利用改进的 L-P 小波函数对地震作用下结构响应进行分析,直接由小波谱图识别结构的时变性^[21]。

(2) 将结构响应小波包变换的各频段能量作为损伤指示因子。Sun 和 Chang 对一根三跨连续梁进行损伤识别数值模拟,基于结构响应小波包变换的各频段能量作为损伤因子指标,通过神经网络识别损伤^[22]。随后 Sun 和 Chang 提出了基于响应的统计特性和损伤因子的单边置信度建立损伤预警阈值^[23]。李宏男等提出了基于“能量-损伤”原理,综合利用小波包分析和神经网络的框架结构损伤识别方法,并将该方法应用于 ASCE 基准结构 Benchmark 框架损伤的识别,取得了令人满意的结果^[24]。Yan 和 Gao 用谐小波包将信号分解提取各频带能量因子,并求出损伤与无损伤信号之间的

Fisher 判别因子,将判别因子输入神经网络来识别损伤及其程度。诸小波包分解比 Db20 小波包分解在高频部分有更高的频率分辨率,且计算时间少,可以对噪声比较大的情况进行判别^[25]。郭建等应用小波包变换来对结构振动信号进行特征变换,提取结构损伤特征,通过采用耦合神经网络来实现多传感器信息融合与损伤模式分类^[26]。丁幼亮等为了消除小波包能量谱对结构激励的依赖性,提出了基于小波包脉冲响应函数的小波包能量谱来表征结构损伤状态^[27]。

(3) 利用复小波变换提取响应的瞬时频率和瞬时振幅从而识别结构参数。Ruzzene 等用复小波变换对线性系统的频率和阻尼进行识别,并用数值算例和对一座实桥在环境激励下的响应进行分析,证实了该方法的有效性^[28]。Staszewski 研究了利用复小波变换识别弱非线性结构参数的方法^[29]。Kijewski 等对 Morlet 小波变换的边界效应和频率分辨率进行了研究,提出了适合土木工程结构振动特点的小波函数选择和减少边界效应的方法^[30]。Lardies 等选用一类改进的 Morlet 小波对多自由度系统的各阶频率、阻尼和振型进行识别,该改进的 Morlet 小波可以有效地分离频率接近的成分。对一座高塔在环境激励下的响应先用随机减量技术提取自由振动响应,再用改进的小波提取其各阶瞬时频率和瞬时振幅从而识别高塔的模式参数^[31]。Le 等对 Morlet 小波、Cauchy 小波、Harmonic 小波三种复小波的特点进行了比较,并提出了减小边界效应和有效区分频率接近成分的小波参数选择方法^[32]。Yan 用 bootstrap 统计方法对基于复小波变换系统识别方法的不确定性进行了分析^[33]。伊廷华研究了基于小波脊线和小波骨架的结构模态参数识别方法,提出了基于自回归滑动平均模型的“预测延拓”方法,有效抑制小波边端效应^[34]。任宜春等基于 Morlet 复小波变化识别钢筋混凝土简支梁的弱非线性^[21]。

(4) 利用小波基函数展开进行系统识别。Yoshihiro 将非线性系统的切线刚度用尺度函数线性组合表示,用最小二乘法求出组合式中各系数,从而得到切线刚度和分段线性阻尼来识别系统的非线性行为^[35]。Ghanem 等将非线性系统的响应用小波函数基表达,利用小波函数时频局域化特性识别结构的非线性与时变性^[36-37]。Tsatsanis 将时变时序模型的系数展开为小波基函数的线性组合,进而识别时变系统参数^[38]。张拥军对线性时变系统建立了二维小波模型,进而对其进行了识别^[39]。Eykhoff 将系统脉冲响应函数转换为一组正交小波基函数上投影系数的辨识^[40]。郑军等提出一种基于非正交小波函数基的脉冲响应函数辨识方法,并证明了经过小波尺度变换后系统响应信噪比提高,从而大大提高了识别精度^[41]。

(5) 利用小波多尺度分析理论对系统进行识别。多尺度分析理论在不同尺度上对系统进行分析,它以小波变换作为连接不同尺度上信号的桥梁,将多尺度理论与系统估计、识别理论相结合,能获取更多的信息,降低问题的复杂性和识别的精确性^[42-43]。文成林提出一种基于多尺度模型和卡尔曼滤波的随机信号多尺度估计算法,获得比仅在原始尺度上运用卡尔曼滤波好的效果^[44]。孟鸿鹰将多尺度理论应用于地震波形反演中,改进了局部极小值问题,减小了计算量,提高了识别精度^[45]。徐长江等基于离