

新世纪建筑工程系列丛书

结构损伤检测与智能诊断

陈长征 罗跃纲 编著
白秉三 唐 忠



科学出版社

新世纪建筑工程系列丛书

结构损伤检测与智能诊断

陈长征 罗跃纲 编著
白秉三 唐 忠



科学出版社

2001

内 容 简 介

本书主要介绍先进的智能结构损伤诊断理论、方法与应用。全书共分 8 章,内容包括绪论、结构损伤检测技术、结构损伤诊断常用理论及方法、工程结构的损伤诊断、基于知识的结构损伤诊断专家系统、专家系统在结构损伤诊断中的应用、神经网络基本原理和基于神经网络的结构损伤智能诊断等。

本书可供从事土木工程、机械、冶金、航空、航天等研究的科技人员及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

结构损伤检测与智能诊断/陈长征等编著. -北京:科学出版社,2001
(新世纪建筑工程系列丛书)
ISBN 7-03-009098-5

I. 结… II. 陈… III. ①建筑结构-结构性能-损伤 ②建筑结构-结构性能-损伤-诊断 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 87688 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

源海印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 4 月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2001 年 4 月第一次印刷 印张:16 1/2
印数:1—2 000 字数:371 000

定价:33.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈北燕〉)

序

水库大坝、铁路和公路桥梁、高层建筑、船舶飞机、锅炉容器等这些重要的水利工程结构、土木工程结构、交通运输和机械结构,一旦由于损伤和隐患而发生故障,将对国民经济和人民的生命财产产生巨大的影响。可见,工程结构损伤的检测与诊断具有重要的社会意义。

目前,国内尚缺乏这一研究领域的学术著作,本书作者多年从事结构损伤及故障诊断的研究,具有丰富的实践经验,并取得了一定的研究成果,本书在此基础上撰写而成。本书针对工程结构的损伤与诊断这一重大课题,阐述了检测结构损伤的各种现代测试技术及诊断方法,介绍了基于知识的结构损伤诊断专家系统和基于人工神经网络的结构损伤智能诊断系统的原理、方法和计算机应用软件系统,引入了丰富的工程结构损伤与诊断的实例。本书内容丰富、逻辑性强、重点突出,具有较高的学术价值和实用性。相信本书的出版将对结构损伤诊断工程的发展起到积极的作用。

虞和济

2001年3月3日

前 言

工程结构中常常存在损伤,如梁、板、柱、壳等的裂缝,钢结构的开焊和压力容器爆炸等。以往工程结构的故障出现率和危害程度没有机械设备那样高,对大多数的工程结构而言,一定程度的带伤工作是完全容许的,故而现有的工作多半是属于结构可靠性评估,结构故障诊断尤其是智能诊断工作开展得还不深入。近年来随着我国经济的高速发展,大跨度桥梁、高层建筑、高速公路与铁路等应运而生,对这些有关结构的健康检测与诊断显得尤为重要。

国内目前还比较缺乏专门论述这一研究领域的学术著作。本书根据作者多年从事结构损伤及故障诊断研究取得的研究成果和总结其他同行专家在这一领域现有的研究成果而撰写,对促进这一领域工作的深入发展具有重要参考价值。本书主要论述先进的智能结构损伤诊断理论、方法与应用。全书共分8章,其中第一章论述了结构损伤诊断和检测技术的意义及发展动向;第二章论述了结构损伤的各种检测技术;第三章论述了结构损伤诊断常用的理论及方法;第四章论述了结构损伤诊断的特征参数以及一些损伤诊断的实例;第五章论述了基于知识的损伤诊断专家系统;第六章论述了专家系统在结构损伤诊断中的应用;第七章论述了神经网络的基本原理;第八章论述了基于神经网络的结构损伤智能诊断以及结构智能诊断系统的发展前景。

本书编撰分工如下:陈长征撰写第1章,第2章,第8章的8.1、8.2和8.3节;罗跃纲撰写第4章,第5章的5.4和5.5节,第6章的6.4、6.5和6.6节,第8章的8.4、8.5和8.6节;白秉三撰写第3章;唐忠撰写第5章的5.1、5.2和5.3节,第6章的6.1、6.2和6.3节和第7章。

东北大学虞和济教授在百忙之中对全书进行了详细的审阅,提出了许多宝贵的意见并给予了有益的指导,中国科学院院士闻邦椿教授提出了一些有益的建议,在此表示衷心的感谢。在本书的写作过程中,参考了一些国内外同行发表的研究成果和论著,由于时间仓促,有的没有来得及与作者商榷,在此对被引用研究成果的同行和作者表示诚挚的谢意。

鉴于作者知识和业务水平有限,撰写时间紧迫,加之基于知识和神经网络的结构损伤检测和诊断研究工作发展迅速,因此,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,我们将不胜感谢。

目 录

序

前言

1 绪论	1
1.1 结构损伤诊断的意义及发展	1
1.1.1 结构损伤诊断历史与发展	1
1.1.2 工程结构常见故障及诊断机理	3
1.1.3 结构损伤诊断方法	4
1.2 结构损伤检测技术的发展与动向	5
1.3 结构损伤的智能诊断	8
1.3.1 结构损伤诊断技术概述	8
1.3.2 工程结构损伤智能诊断的历史与现状	9
1.3.3 基于知识的结构故障诊断专家系统	12
1.3.4 结构故障诊断的神经网络专家系统	14
2 结构损伤检测技术	17
2.1 结构振动检测——试验模态分析	17
2.1.1 激振技术	17
2.1.2 试验模态分析过程	21
2.1.3 结构振动检测仪器系统	23
2.1.4 结构损伤振动检测的应用	25
2.2 结构损伤的超声波检测	29
2.2.1 超声检测仪器	29
2.2.2 超声波结构损伤检测实例	32
2.3 结构损伤声发射检测	44
2.3.1 声发射检测仪器	44
2.3.2 声发射检测传感器定位	47
2.3.3 声发射结构损伤检测实例	50
2.4 结构损伤的红外检测	55
2.4.1 红外检测技术原理	55
2.4.2 红外检测仪器	56
2.4.3 红外结构损伤检测实例	64
2.5 结构损伤的其他检测技术简介	68
3 结构损伤诊断常用的理论及方法	70
3.1 结构动力学基础	70
3.1.1 结构振动的特征值问题	70

3.1.2	模态向量的正交性	73
3.1.3	特征值问题求解方法	73
3.1.4	损伤结构的动力有限单元法模型	74
3.2	时间序列分析法	78
3.2.1	时序模型及其性质	78
3.2.2	模态参数辨识	83
3.3	灰色系统理论	87
3.3.1	灰色系统基本概念	87
3.3.2	灰色系统理论中的预测方法	88
3.3.3	灰色关联度分析	90
3.3.4	关联度用于故障诊断模式识别的数学过程	91
3.4	模糊诊断方法	93
3.4.1	模糊集合	93
3.4.2	隶属函数的确定	93
3.4.3	模糊模式识别方法	95
3.4.4	模糊关系与聚类分析	96
3.4.5	模糊变换与综合评判	97
3.4.6	模糊诊断的一般步骤	99
3.5	人工神经网络诊断方法	100
3.6	结构损伤特征提取的小波分析法	100
3.6.1	小波变换理论与应用	100
3.6.2	信号的小波消噪原理	104
3.6.3	小波分析在结构损伤诊断中的应用	105
4	工程结构的损伤诊断	109
4.1	结构损伤振动诊断的特征参数	109
4.1.1	固有频率	109
4.1.2	固有频率下降率	109
4.1.3	时序模型参数	109
4.1.4	传递函数和响应	110
4.1.5	振型特征	110
4.1.6	应变响应	110
4.1.7	惯性模量变化率	110
4.2	梁内裂纹损伤诊断和预测分析	111
4.2.1	梁的力学特性分析	111
4.2.2	计算机仿真分析——建立知识库	111
4.2.3	动态子结构法	114
4.3	钢筋混凝土梁裂纹损伤动态识别	116
4.3.1	钢筋混凝土梁实验振动信号的时序法处理	116
4.3.2	钢筋混凝土梁的故障对格林函数的影响	116
4.3.3	初诊因子的确定	118

4.4	轴类结构的损伤诊断	119
4.4.1	小型轧机万向接轴故障的动态测试	119
4.4.2	万向接轴损伤的时序分析	120
4.4.3	灰色关联度分析	123
4.5	结构联接部的损伤诊断	124
4.5.1	动态子结构分析	124
4.5.2	实验验证分析	126
4.6	板壳结构的损伤诊断	127
4.6.1	计算机仿真分析	127
4.6.2	模态仿真分析	129
4.6.3	灰色预测分析	131
4.7	钢包回转台大臂裂纹损伤诊断	132
4.7.1	动态有限元分析	132
4.7.2	钢包回转台大臂裂纹仿真	133
	附录 裂纹梁的裂纹深度、位置与频率的关系	138
5	基于知识的损伤诊断专家系统	142
5.1	专家系统的基本原理	142
5.1.1	专家系统概述	142
5.1.2	专家系统分类	143
5.1.3	专家系统的基本结构	143
5.1.4	损伤诊断与专家系统	144
5.2	知识的获取	145
5.2.1	知识的分类	145
5.2.2	知识的获取方式	146
5.3	知识的表示	148
5.3.1	知识表示方法	149
5.3.2	损伤诊断专家系统的知识表示	152
5.4	诊断推理机制	157
5.4.1	推理的基本概念	157
5.4.2	基于知识的诊断推理	160
5.5	建立专家系统的步骤	162
5.5.1	专业领域知识	162
5.5.2	建立专家系统的步骤	163
6	专家系统在结构损伤诊断中的应用	165
6.1	专家系统的开发	165
6.2	专家系统开发工具的选择	167
6.2.1	选择开发工具时需考虑的问题	167
6.2.2	开发工具的几项选择标准	167
6.2.3	已选用开发工具的测试与评价	169

6.3	专家系统开发工具	169
6.3.1	骨架系统	169
6.3.2	通用知识工程语言	170
6.3.3	专家系统开发环境	170
6.4	梁、板、壳等结构损伤诊断的专家系统 EDSBSES	171
6.4.1	EDSBSES 的体系结构	171
6.4.2	EDSBSES 的因素关系表	172
6.4.3	EDSBSES 中因素状态的模糊表达	173
6.4.4	EDSBSES 中的知识表达	173
6.4.5	EDSBSES 的知识库	174
6.4.6	EDSBSES 系统的推理过程及应用	175
6.5	铁路桥墩病害诊断的专家系统	176
6.5.1	DREPM-DP 的知识库系统	177
6.5.2	DREPM-DP 的推理及控制策略	179
6.5.3	DREPM-DP 的系统实现	179
6.6	核反应堆诊断系统	179
6.6.1	面向事故的知识	180
6.6.2	面向功能的知识	183
7	神经网络基本原理	185
7.1	神经网络性质与特点	185
7.1.1	神经网络的基本特征和性质	185
7.1.2	神经网络的识别能力	187
7.2	神经网络分类及原理	189
7.3	BP 网络	189
7.3.1	BP 算法及其改进	190
7.3.2	BP 网络结构的确定	193
7.3.3	BP 算法的修正	197
7.4	人工神经网络评述	199
7.4.1	人工神经网络的优点	199
7.4.2	人工神经网络的局限性	200
7.4.3	应用神经网络易出现的问题	200
	附录 神经网络学习源程序	201
8	基于神经网络的结构损伤智能诊断	209
8.1	神经网络智能诊断概述	209
8.2	计算智能方法与结构损伤诊断	210
8.2.1	计算智能的概念	210
8.2.2	遗传算法及其特点	210
8.2.3	神经网络的遗传算法优化	213
8.2.4	遗传算法的应用	215

8.3 结构损伤神经网络诊断.....	219
8.3.1 基于 BP 网络的结构损伤诊断	219
8.3.2 神经网络结构损伤定量识别	226
8.3.3 其他神经网络结构损伤诊断简介	230
8.4 神经网络与小波分析结构损伤诊断实例	233
8.5 基于神经网络的结构损伤诊断系统	236
8.5.1 结构故障诊断智能系统 NUDES 的整体结构	236
8.5.2 NUDES 系统的知识库	237
8.5.3 NUDES 系统的推理机制	238
8.5.4 NUDES 系统的学习、查询、解释功能及维护	238
8.5.5 NUDES 系统在钢梁和钢筋混凝土梁裂缝诊断中的应用	240
8.6 结构智能诊断系统的发展前景	243
参考文献	245

1 绪 论

1.1 结构损伤诊断的意义及发展

1.1.1 结构损伤诊断历史与发展

结构故障诊断,即对结构进行检测与评估,以确定结构是否有故障存在,进而判别故障的程度和方位,以及结构目前的状况、使用功能和结构故障的变化趋势等。

“结构”一词的范围很广,它不仅包括通常意义上的土木工程结构,也包括了连杆、轴承、齿轮等一系列零件所组成的机械结构,而各种建筑物、桥梁、海洋平台、水工结构、机器的支架和平台、机器的机架和基础、管道和容器等则都是工程结构。由于机械结构一般多处于转动、振动等动态环境中,可以称之为动态结构;而建筑物、桥梁、海洋平台和水工结构等工程结构则多处于相对静止的环境中,故可以称之为静态结构。依这两种结构对象的不同,也可以将结构故障诊断分为动态结构故障诊断和静态结构故障诊断。

结构故障诊断这一概念的提出和发展,首先来自动态结构的故障诊断,即机械设备的故障诊断,它是在 20 世纪 60 年代初期,由于航天、军工的需要而发展起来,以后又逐步扩展到其他领域。静态工程结构一般都比较复杂,受到的载荷和环境激励都具有随机性,所以工程结构的故障也较复杂,其故障诊断也就比较困难,需要采用某些特殊的技术和诊断方法。

与人们生活息息相关的结构是建筑结构,建筑结构工程中常常存在着表面缺陷或破损,如梁板的裂缝、火灾后混凝土的过火、钢结构的开焊等。这些肉眼可见的破损或缺陷容易引起人们重视,可及时诊断并采取措施加以修复和维修。近年来建筑行业突发事故频发,重者整座建筑物倒塌,表明实际上结构构件常常还存在着内部缺陷。这些肉眼不可见的潜在缺陷有时更具危险性,常常造成较大的经济损失。因此,如何能通过一定的监测手段就可以分析判断结构有否缺陷,它们可能在什么位置等就成为当前国际上一个研究热点。

在土木工程结构等一类静态结构的故障诊断方面,类似于动态结构故障诊断的工作开展得还不多,这主要是由于土木工程结构的故障出现率和危害程度远没有机械结构那样高。对大多数的工业民用建筑而言,一定程度的带伤工作是完全允许的,故而现有的工作多半是属于结构可靠性评估。这方面的工作,国外大体上可以分为三个阶段,20 世纪 40 年代到 50 年代为探索阶段,注重对建筑结构缺陷原因的分析和修补方法的研究,检测工作大多采用以目测为主的传统方法;60 年代到 70 年代为发展阶段,注重对建筑物检测技术和评估方法的研究,提出了破损检测、无损检测、物理检测等几十种现代检测技术,还提出了分项评价、综合评价、模糊评价等多种评价方法;80 年代以来,则进入完善阶段,这一阶段中制定了一系列的规范和标准,强调了综合评价,并引入知识工程,使结构可靠性评估工作向着智能化方向迈进,研究有限元分析的专家和研究结构检测的专家结合起来开

展工作,交流和推动了该领域的研究,而建筑行业中的研究尚少,因此探讨建筑结构缺陷识别的原理及其故障诊断方法具有重要意义。

我国在经历了地震、火灾和洪水等自然灾害的惨痛教训后,也开始重视对已有结构的诊断与评估工作,从70年代中期以后,开始开展抗震鉴定与加固。近年来,在“把建筑重点转移到现有企业的技术改造和改扩建上来,走内涵型为主的扩大再生产的路子”这一思想的指导下,新建建筑业已开始萧条,故而已有结构的诊断、评估与维修反而兴旺起来。已有建筑结构的可靠性评估受到重视,国内许多单位,如清华大学、原冶金工业部建筑研究总院等已展开了这方面的工作。

近年来连续六届的国际模态分析会议、连续五届的国际模态分析研讨会和连续三届的国际结构动力学模态会议上都发表了大量的有关研究论文,近年来发表的有关论文已有数百篇,研究涉及航天、机械、电子和建筑等行业。

预计,结构缺陷识别技术在建筑结构损伤监测诊断中的应用将侧重以下两方面:

(1)改进计算模型。

损伤识别可分为基于模型(Model-Based)的参数识别和无模型(Free-Model)的系统识别两类。要有效地进行损伤识别与定位,首先需要解决损伤标识量的选择问题,即决定以哪些物理量为依据能够更好地识别和标定损伤的程度与方位。用于损伤识别的物理量可以是全局量,如结构的固有频率等,但用于损伤直接定位(不依赖于有限元计算模型)的物理量最好是局域量,且需满足两个基本条件:一是对局部损伤敏感;二是位置坐标的单调函数。研究表明,当用于损伤定位的物理量不是局域量、或不满足上述两个基本条件时,在无模型的条件下进行损伤直接定位,则很难保证预测结果和实际结果之间存在一致的相合关系。由于损伤位置不同,同样程度的损伤会对不同阶的频率改变产生不同程度的影响:一些位置的损伤对某些低频成分的影响大些;另一些位置的损伤则对某些高频成分的影响大些;还有一些位置的损伤及其组合,对结构某些特定频率的改变影响不大。

基于模型的损伤定位方法有助于精确地标定结构的损伤程度,因此受到国际学术和工程界的特别关注。它通常要求解复杂的反演问题。研究表明,使反演结果惟一化可采用两种方式:加数学约束或加物理约束。考虑物理约束、借鉴专家的知识 and 经验对解决结构故障诊断问题十分重要,可以建立以人工神经网络为学习工具,知识库是可自主进化的智能型结构故障诊断系统的框架结构。

结构工程完成后,通过测试研究计算模型的误差及误差位置,积累经验用于以后的建筑工程设计。

(2)结构监测。

结构损伤通常不会影响结构的质量特性,但对结构的刚度特性和结构阻尼会产生一定程度的影响,因此,在假设结构质量特性不变时的结构模型修正技术同样可用来识别和定位损伤。对年久失修的危险建筑物进行定期巡检测试,根据测试结果和修正的基于动力学的结构损伤诊断模型或其他诊断方法,分析结构刚度的变化、结构阻尼的变化、特征值和特征向量的变化及各量变化的位置对损伤程度的影响;判定结构的安全程度。

应该看到建筑工程中应用结构损伤监测诊断技术是可行的,具有重要意义。根据建筑结构工程分析和测试发展水平来看,测试中较难保证准确地得到诊断需要的全部有效故障数据,即测试数据是不完备集。所以,目前应开展两方面工作:研究适用于建筑结构工程

的缺陷识别方法和完善振型测试手段。可以相信,结构缺陷识别技术一定能够在建筑工程的发展中发挥它应有的作用。

1.1.2 工程结构常见故障及诊断机理

工程结构应该具有足够的强度,在设计载荷的作用下必须严格保证安全而不产生破坏;工程结构应具有一定的刚度,在设计载荷作用下其变形不超过规定的限值;工程结构应该具有可靠的稳定性,在现场载荷长期作用下不发生突然失稳事故;某些特定的工程结构,例如水坝、管道和容器等也不允许有渗漏事故发生。从强度、刚度、稳定性和不泄漏等要求来看,工程结构的常见故障有:

- 结构的内部缺陷,包括材质本身的内在缺陷、设计和制造(包括安装)不当产生的隐患等;

- 疲劳和裂纹;
- 松弛和蠕变;
- 失稳;
- 腐蚀或磨损;
- 泄漏或渗漏。

结构故障诊断的机理比较复杂,迄今为止尚无一个比较明确的说法。一般认为工程结构发生故障就是与正常结构比较时,在某些方面发生了异常现象,这些现象表现在表征结构特性的各种特征参数上。结构的特性包括动态特性和静态特性、表面状态和形状大小、位移和环境条件等。那些能比较敏感地反映出结构的损伤和故障症状的特征参数被定义为征兆参数。故障诊断就是找出能够描述故障症状变化的征兆参数的信息,在线长期监测或周期性监测这些信息,从中提取信号,通过数据处理来发现或预报结构的故障和损伤。下面对几种结构故障的诊断机理进行简要说明:

(1) 结构内部缺陷的诊断机理。

结构的内部缺陷,像钢铁构件内部的空洞、组织疏松、夹渣、应力集中和过高的初应力等或混凝土构件内部的空洞、不均匀、夹有异物等等,在表面上都较难或不能发现,就要采用一些特殊的方法使这些缺陷产生表征它们存在和状态的信息,然后根据采集到的信号来判断这些缺陷的程度、位置和种类。不同的发生信号和采集信号的方法就构成了不同的诊断方法。

(2) 裂缝和疲劳的诊断机理。

裂缝的产生和发展是疲劳破坏的主要形式,完全可以采用结构内部缺陷的诊断原理来发现裂缝型故障。而裂纹产生和裂缝扩展时,在裂纹尖端都必然有声发射现象出现。某些金属材料在开裂时裂纹尖端还有光和热发生,诊断裂缝和疲劳的某些专用方法就是以这些特征为基础的;局部应力的升高和应力集中是裂纹产生的主要原因之一,所以应力监测也是监测裂缝的主要方法之一。

(3) 松弛和蠕变的诊断机理。

应力没有显著增大而位移-应变显著增大是松弛和蠕变的主要特性,因此应变监测或位移监测就成为诊断松弛和蠕变的主要方法。

(4) 失稳的诊断机理。

结构失稳的原因是构件本身具备失稳的条件(不稳定平衡),或在结构系统中的某些单元有失稳条件,而这些单元的失稳会造成整个系统的失稳。因此发现和监测这些失稳源点的变化就是失稳诊断的机理。结构系统是否会失稳与其结构特性有关,对结构特性中是否含有失稳因素的诊断也是失稳故障诊断和预防的重要原理之一。

(5)腐蚀或磨损的诊断机理。

结构的腐蚀或磨损表现为表面形状因侵蚀而变化,腐蚀下来和磨损下来的材料混入或化合入介质中是另一方面的特点,因此可以用对表面形状的监测或对介质作分析(光谱或铁谱分析)以实现腐蚀或磨损的诊断。

(6)泄漏和渗漏的诊断机理。

泄漏或渗漏除了具有裂缝或孔洞缺陷的故障特征之外,还有液体或气体从故障部位泄漏或渗透出来的特点,这一特点也为泄漏和渗漏的诊断提供了另一方面的诊断依据,也就是可以在容器外面检测是否有容器中的气体或液体存在来发现泄漏故障。

1.1.3 结构损伤诊断方法

结构损伤的识别是工程上十分重要,也是比较棘手的问题。例如,结构上不同位置的损伤的识别,同一位置不同深度裂纹的识别以及联接结构紧固程度的识别等等,都是结构损伤的典型例子。正确、快速地识别这些损伤,对保证结构的安全运行、预防事故的发生都有着重要的意义。常用的工程结构损伤故障诊断方法有:

- 振动诊断法;
- 声发射诊断法;
- 超声波诊断法;
- 射线诊断法;
- 光学诊断法;
- 涡流、磁粉诊断法;
- 泄漏诊断法;
- 红外诊断法。

以上各种诊断方法的特点、适用缺陷类型以及适用结构见表 1.1。

表 1.1 结构故障诊断方法

故障诊断方法	适用缺陷类型	基本特点	适用结构
振动诊断法	内、外部裂纹或损伤	利用结构动态参数对故障的敏感性,对结构的完整性进行检测与监测	适用于各种工程结构(梁、刚架、板、容器、管道、水坝、桥墩等)
声发射诊断法	活动性缺陷	对缺陷的萌生与扩展进行动态检测与监测	适用于各种工程结构,包括梁、刚架、板、容器、管道、水坝、桥墩等
超声波诊断法	表面与内部缺陷,管道腐蚀	速度快,对平面缺陷灵敏度高 对关键件在工作期限内进行在线监测	适用于各种工程结构,包括梁、刚架、板、容器、管道等,主要检验铸件和焊接件

续表 1.1

故障诊断方法	适用缺陷类型	基本特点	适用结构
射线诊断法	体积类缺陷,分散细小缺陷及表面缺陷	直观,灵敏度高	适用于各种工程结构,包括梁、刚架、板、容器、管道等,主要检验铸件和焊接件
光学诊断法	体积类缺陷,表层细微缺陷	不需用任何耦合剂,能以非接触方式对物体进行无损检测,对被测件要求低,并可用于非接触单面测试	适用于各种工程结构,尤其是在高温环境中或难以接近的工程结构
涡流诊断法	表面及内部缺陷	速度快,直观	适用于各种金属结构件
磁粉诊断法	表面缺陷,表面细微缺陷	灵敏度、精确度和可靠性均与荧光磁悬液有关	适用于各种导磁性工程结构件
泄漏诊断法	容器、管道裂缝	方法简单,但灵敏度受限制	主要用于容器、管道的泄漏位置诊断
红外诊断法	表面与内部缺陷及无缺陷区表面温度变化,容器和管道裂缝	非接触,可远距离操作。检验仪器结构简单,使用安全,可建立自动检测系统	适用于各种工程结构尤其是高温、难以接近的工程结构

1.2 结构损伤检测技术的发展与动向

重大工程结构,如重要的桥梁、大坝、河堤、高层建筑、高速公路与铁路等,在发生地震、飓风、洪水等自然灾害时会因年久失修而危机四伏;建筑结构中的梁板裂缝、火灾后混凝土的过火、钢结构的开焊以及结构件中存在的内部缺陷,往往具有很大的危险性,会使整座建筑物的倒塌,造成巨大的经济损失。这些有关结构健康问题是举世瞩目的重大科技、经济和社会问题。由于结构都是按照力学原理设计的,没有生命、没有智能,不能感知自然灾害的作用,不能作出适当响应保护自己,因此为了保障安全,设计者往往采用保守设计,即增大结构的尺寸与重量,从而增加人力、财力与资源的消耗。因此,如何通过一定的检测手段就可以判断结构的健康状况是当前国际上一个研究热点。

结构损伤诊断技术从结构的症状入手进行分析研究。结构症状由采集的信号分析得到。因此,信号采集技术是结构损伤识别的前提。只有采集到反映结构实际状态的信号,诊断的后续工作才有意义。正如信号领域所言,“进入的是垃圾,出来的必定是垃圾”,可见正确采集信号的重要性。信号采集技术包括信号的采集和放大,其中对传感器的研究是个重点。结构损伤检测中的传感器按功能分为振动传感器、声级计、声发射传感器、温度传感器等。随着监测系统的庞大化和复杂化,传感器的类型和数目都急剧增多。例如对大型桥梁结构监测,测点有几百个,相应的传感器也有几百个。众多的传感器形成了传感器群,这

就带来了传感器如何布局方面的研究。赫尔和斯瑞汉尔阐述了传感器合理分布的重要性。由于传感器的组合提供了设备不同类型、不同部位的信息,由此产生了信息融合。

检测到的结构损伤信号分析和处理方法是结构损伤识别的关键,也是理论研究的热点之一,它实际上就是结构损伤识别技术中的特征因子(敏感因子)提取技术。传感器采集的信号,称为原始信号,一部分可以直接利用,如频率、振型、温度和位移等,但大部分很难直接利用,如振动信号,虽然经过放大,由于含有噪声,一般从时域波形上很难反映问题,因此必须利用信号分析与处理技术去除噪声并把信号转化在不同的域内进行分析,才能得到更能敏感反映损伤状态的特征因子。滤波技术、频谱分析技术是传统的信号处理方法。近年来出现的数字滤波技术、自适应滤波技术、小波分析技术等大大丰富了信号处理技术的内容。以频谱分析的系列技术为例,如FFT分析、倒谱分析、短时傅里叶分析、威格纳分布等在传统的工程应用中占有非常重要的地位。傅里叶变换和倒谱分析对平稳信号的分析非常有效。为了对工程中广泛存在的非平稳信号进行分析,引入了短时傅里叶变换和威格纳分布,但二者对非平稳信号的分析能力不很理想。近年来出现的小波分析技术为此提供了强有力的工具。它不仅适合分析平稳信号,而且适合分析非平稳信号。从根本上讲,小波分析将有望取代传统的傅里叶分析技术。另外,近年来发展起来的分形几何技术,也为信号处理提供了崭新的手段。模糊技术的应用也丰富了信号处理的内容。由于特征因子提取的重要性,信号处理中每一种新技术在诊断中的应用,都是对诊断技术的一次重大推动。

智能结构检测系统应具有神经系统,可以感知结构整体形变与动态响应,局部的应力应变和受损伤的情况;应具有大脑,能实时地监测结构健康状态,迅速地处理突发事件,并自动调节和控制,以使整个结构系统始终处于最佳工作状态;还应具有生存和康复能力,在危险发生时能自己保护自己,并继续存在下来。

避免结构发生事故,延长结构的使用寿命,提高结构的可靠性、安全性是经济建设中无法回避的问题,这个问题的解决要靠广泛采用性能优异、准确可靠、方便实用的检测技术来实现,这种高技术的载体就是具有智能性的结构健康监测诊断系统。智能检测诊断系统的应用,能够解决现场专家不足的问题,早期发现结构潜在的缺陷,减少判断故障的时间,避免或减少事故的发生,对带伤结构的剩余寿命进行科学的评价,保证桥梁结构的安全性,从而创造巨大的经济效益和社会效益。

结构健康监测与智能诊断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,将导致结构安全监控和性能改善产生质的飞跃。鉴于此,等结构检测近年已引起世界各主要发达国家的极大重视,列为优先发展的研究领域和优先培育的21世纪高新技术产业之一。

我国在经历了地震、火灾和洪水等自然灾害的惨痛教训后,也开始重视对已有结构的检测与评估工作,从20世纪70年代中期以后,开始开展抗震鉴定与加固。近年来,在“把建筑重点转移到现有企业的技术改造和改扩建上来,走内涵型为主的扩大再生产的路子”这一思想的指导下,对已有结构的检测、评估与维修兴旺起来。已有结构的可靠性评估受到重视,国内一些单位已展开了这方面的工作。

国内外注重对建筑结构缺陷原因的分析和修补方法的研究;注重对建筑物检测技术和评估方法的研究;90年代以来,制定了一系列的规范和标准,强调了综合评价,并引入

知识工程,使结构可靠性评估工作向着智能化方向迈进。

结构的损伤首先表现为结构裂缝的出现和扩展。结构裂缝的存在,在某种程度上决定着结构的可靠性、使用功能及耐久性;评估与诊断结构的裂缝,不仅需要进行大量的理论推导与计算,而且也需要有大量的专家经验,而现场实际又缺乏这样的富有经验又有较深理论知识的专家;因而,结合人工智能发展的成果,汇集专家们的知识而构成的结构检测与评估的专家系统便成为这一领域的一个重要发展方向。

民用基础设施系统的检测与诊断,对于保障人民生命财产安全意义重大。由于它们尺寸巨大,并且时刻都暴露在恶劣环境之中,易受自然灾害的影响,结构损伤检测需要耗费大量人力财力。而智能结构健康监测系统能够实时监测与预报,节约了损伤检测与维护费用;自动化测量,保障了测量的可靠性;停工减少与可靠性增加,保障了桥梁结构的运营效率;大大降低了运营费用。大量事实证明,长时间使用或灾后造成的结构内部损伤很难发现;如果采用特定的结构损伤检测技术,及时地报告结构损伤状况,对整个社会带来的利益更是巨大,也能够为灾后维修与重建提供科学的数据。

目前结构检测技术向智能化方向发展,出现了结构健康智能监测诊断系统,这种系统思路较新,体系还没完全形成,从结构设计角度看,智能监测诊断系统是结构系统设计的一部分,所以智能监测诊断系统的目标是非常宏伟的,其后续研究内容丰富。这种系统的功能大致应该是:

(1)系统应具有实时监测功能,具有损伤趋势分析及预测的功能,对每次诊断结果进行汇总,给出其状态劣化曲线,正确评估结构的健康状况。

(2)系统应具有智能诊断功能,专业分析与自动诊断并存,实现对故障信息的自动分析和处理,以增强系统诊断的准确性和实用性。

(3)系统能够建立报警值,供以后诊断比较使用,并确定带伤结构的剩余寿命。

要解决的关键问题是结构健康检测系统的实现和损伤程度、位置和可靠性的确定。这是结构健康监测与诊断的核心,也是难点。结构损伤检测技术中的主要困难在于存在模型误差、测量误差、环境影响和测量数据的不完备等。由于这些因素的存在,使得许多识别方法变得无效,而神经网络具有很强的容错性、鲁棒性和泛化能力,无论是从直觉思维的要求还是从不确定性推理的要求上,辅之以遗传算法对神经网络进行优化,优化后的神经网络可以有效地解释结构状态的变化,即结构损伤的位置、程度和可靠性。

结构损伤通常不会影响结构的质量特性,但对结构的刚度特性和结构阻尼会产生一定程度的影响,因此在假设结构质量特性不变时的模型修正技术同样可用来识别和定位损伤。根据测试结果和修正的基于动力学的结构损伤诊断模型或其他诊断方法,分析结构刚度的变化、阻尼的变化、特征值和特征向量的变化及各量变化的位置对损伤程度的影响,判定结构的安全程度。

预期可能会在结构监测理论、技术进步和应用方面取得某些成果。理论方面:用神经网络和小波变换解决结构损伤信号处理问题,对信号进行预处理和故障特征提取,并通过一定的方法适当地增大神经网络的规模,以提高诊断精度,这样可以更适用于实际检测诊断。技术进步方面:建立一种智能诊断技术以实现自动诊断,这样的诊断技术和系统可以广泛应用于结构的检测与诊断,继续进行研究加以改进可以适用于水坝、河堤、建筑、高速公路与铁路等结构的检测和损伤诊断与评估,对保证这些设施的安全及质量具有十分重