

现代超声检测 信号处理技术

XIANDAI CHAOSHENG JIANCE
XINHAO CHULI JISHU

马宏伟 董明 齐爱玲 陈渊 著



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

现代超声检测信号处理技术

马宏伟 董明 著
齐爱玲 陈渊

华中科技大学出版社

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书针对轴类、焊接、铸造等关键零部件内部缺陷检测难题,基于声学、超声信号处理、人工智能等技术,深入地研究了超声仿真、缺陷信号降噪、特征提取与缺陷识别等方法,揭示了超声波在关键零部件中的传播特性和回波特性和,提出了强噪声背景下缺陷超声信号的提取和识别方法,有效解决了相关技术难题,应用效果良好。

本书立足于学科前沿,理论联系实际,内容翔实,图文并茂,可供从事超声无损检测等相关领域的科研和工程技术人员参考,也可作为高等院校机械工程、仪器科学与技术等相关学科专业研究生教材和数学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代超声检测信号处理技术/马宏伟等著. — 武汉:华中科技大学出版社,2021.5
ISBN 978-7-5680-7062-1

I. ①现… II. ①马… III. ①超声检测-信号处理 IV. ①TB553

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 089653 号

现代超声检测信号处理技术

Xiandai Chaosheng Jiance Xinhao Chuli Jishu

马宏伟 董 明 齐爱玲 陈 渊 著

策划编辑:张 毅

责任编辑:狄宝珠

封面设计:抱 子

责任监印:朱 玢

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:12.25

字 数:240千字

版 次:2021年5月第1版第1次印刷

定 价:68.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

随着《中国制造 2025》的深入实施，“智能制造”和“绿色制造”加快推进，尤其是高质量发展对制造质量提出了越来越高的要求，不仅要不断提高产品制造过程中的质量，而且还要有效提升设备运行过程中的安全性和可靠性，无损检测与评价技术任务艰巨，使命光荣，实现智能化、绿色化迫在眉睫。

超声无损检测技术以其检测灵敏度高、操作灵活方便、对材料无污染、对人体无伤害等显著特点，倍受人们青睐，在无损检测中占据极其重要的地位，在机械制造、冶金、电子、航空、航天、航海、石化、铁路、交通、建筑等工业领域中得到广泛应用。长期的无损检测与评价研究，使我们深刻认识到，大型装备关键零部件在制造中产生的固有缺陷，以及服役后的疲劳损伤都将成为其失效甚至发生重大事故的根源。因此，在制造过程中，控制关键零部件的内部缺陷，在运行过程中，检测关键零部件的内部缺陷和疲劳损伤，对其缺陷进行定位、定量和定性分析以及安全性评价，保证装备安全可靠运行具有极其重要的意义。

随着计算机技术、信号分析处理技术、微电子技术、人工智能技术等飞速发展，科研工作者将这些新技术与超声无损检测技术深度融合，诞生了超声无损检测新的研究方向，已经成为无损检测领域研究的热点。近年来，超声无损检测信号分析处理的新成果，使得超声无损检测如虎添翼，有效克服了传统超声检测的不足，大大提高了检测精度、可靠性和自动化程度，不仅在制造过程中保证了产品质量，而且在设备安全可靠运行监测方面发挥了非常重要的作用，同时，对提高检测效率、解放生产力产生了重要影响。

多年来，本书作者团队立足超声无损检测领域前沿，先后承担了多项国家自然科学基金项目、省部级重点科研项目以及企业委托的重点科研项目。以大型装备中的轴类、焊接类和铸造类零件内部缺陷为研究对象，基于声学、超声信号处理、人工智能等理论和方法，深入研究了超声仿真、缺陷信号降噪、特征提取与缺陷识别等关键技术问题，揭示了超声波在关键零部件中的传播特性和回波特性，解决了强噪声背景下缺陷超声信号的提取和识别难题。

本书第 1 章综述了超声检测前沿技术，归纳了超声仿真、超声信号去噪、特征提取和缺陷分类等相关技术的研究进展，提出了中国制造 2025 给超声无损检测领域带来的挑战。第 2 章研究了基于空间脉冲响应的超声声场仿真方法，计算了不同形状超声换能器的声场，提出了一种计算脉冲响应的快速算法，并且开发了声场

仿真软件。第3章研究了超声波与典型缺陷耦合的回波特性,揭示了超声波在介质中的传播机制。第4章研究了超声信号去噪技术,提出了基于小波分析的焊接缺陷超声信号去噪方法、基于EEMD的轴类零件超声信号去噪方法和基于自适应稀疏分解的铸钢超声信号去噪方法。第5章研究了超声信号的提取与识别技术,提出了基于WPT-KPCA的铸钢缺陷超声信号特征选择和基于SV的RBF网络铸钢缺陷智能分类算法、基于小波包变换的多尺度空间能量特征的焊接缺陷特征提取和基于群体智能优化SVM的焊接缺陷识别方法。

本书由马宏伟、董明、齐爱玲、陈渊共同完成。第1.1节由马宏伟、陈渊撰写,第1.2节由马宏伟、董明撰写,第1.3节由马宏伟、齐爱玲撰写,第2、3章由董明撰写,第4.1节由陈渊撰写,第4.2节由董明撰写,第4.3节由齐爱玲撰写,第5.1、5.2、5.3节由齐爱玲撰写,第5.4、5.5、5.6节由陈渊撰写。

本书在撰写过程中得到了西安科技大学、陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室、陕西省煤矿机电设备智能检测与控制科技创新团队的领导、专家教授和同学们的大力支持与帮助。本书的出版得到了华中科技大学出版社的大力支持。在此,一并表示衷心的感谢!

限于作者水平有限,加之超声无损检测技术的快速发展,书中错误与不足在所难免,敬请广大读者和同行批评指正。

作者

2021年1月于西安科技大学

目 录

1 超声检测技术研究	1
1.1 超声检测技术的研究进展	1
1.1.1 超声检测技术的发展	1
1.1.2 中国制造 2025 与超声智能检测的发展	2
1.2 超声声场仿真实论和发展现状	3
1.2.1 超声声场仿真的理论和现状	3
1.2.2 超声声场与缺陷耦合仿真技术研究进展	4
1.3 超声信号处理理论和发展现状	5
1.3.1 信号处理技术的理论和现状	5
1.3.2 信号特征提取技术	8
1.3.3 信号分类技术	8
2 基于空间脉冲响应的超声声场仿真研究	10
2.1 引言	10
2.2 脉冲波声场模型	10
2.3 脉冲响应函数计算模型	12
2.3.1 圆形换能器的声场	13
2.3.2 矩形换能器的声场	15
2.3.3 斜楔块下的声场	22
2.4 空间脉冲响应的快速计算	25
2.5 实验验证	28
2.6 本章小结	33
3 超声波与典型缺陷耦合的回波特性研究	34
3.1 引言	34
3.2 缺陷回波模型	34
3.3 探头振动特性	35
3.4 缺陷和超声波的耦合效应	36
3.5 探头振动特性的测量	38



3.6	缺陷回波实验	40
3.7	本章小结	45
4	超声信号去噪技术研究	47
4.1	基于小波分析的焊接缺陷超声检测信号去噪研究	47
4.1.1	小波阈值去噪法的原理和实验分析	47
4.1.2	基于改进阈值函数的提升小波变换去噪算法	56
4.2	轴类零件缺陷超声信号去噪算法研究	61
4.2.1	基于 EMD 的超声信号去噪	62
4.2.2	基于 EEMD 的超声信号去噪	69
4.3	自适应稀疏分解铸钢缺陷超声信号提取研究	72
4.3.1	信号的稀疏逼近	73
4.3.2	缺陷超声信号的稀疏分解	74
4.3.3	人工鱼群算法	78
4.3.4	基于改进人工鱼群优化的弱缺陷超声信号提取研究	81
4.3.5	数据采集系统的建立	84
4.3.6	实验研究与算法评估	85
4.4	本章小结	91
5	超声信号提取与识别技术	93
5.1	铸钢缺陷超声信号特征提取研究	93
5.1.1	采煤机铸钢件缺陷样本库的建立	93
5.1.2	缺陷超声信号的 WPT 能量特征提取	98
5.1.3	基于 WPT-KPCA 的缺陷超声信号特征选择	105
5.2	基于 SV 的 RBF 网络铸钢缺陷智能分类研究	112
5.2.1	RBF 神经网络	113
5.2.2	支持向量机	116
5.2.3	基于 SV 的 RBF 网络缺陷分类算法研究	120
5.2.4	SV-RBF 算法分类实验研究	124
5.3	基于多分类支持向量机的铸钢缺陷智能分类研究	130
5.3.1	机器学习与统计学习理论	130
5.3.2	支持向量机用于超声缺陷识别的可行性分析	133
5.3.3	基于多类支持向量机的分类算法	134
5.3.4	基于多分类器的缺陷分类算法研究	138

5.3.5	基于并行优化层次 SVM 缺陷分类研究	144
5.4	焊接缺陷超声信号特征提取研究	148
5.4.1	超声信号的小波包能量特征提取	148
5.4.2	焊接缺陷超声回波信号的能量特征提取实验	149
5.4.3	基于距离的类别可分性判据对特征提取进行评价	150
5.5	焊接缺陷超声检测智能识别研究	153
5.5.1	人工神经网络在焊接缺陷智能识别中的应用	153
5.5.2	基于支持向量机的焊接缺陷智能识别研究	158
5.5.3	基于 ν -SVM-LMC 的 RBF 神经网络焊接缺陷识别方法研究	166
5.6	基于群体智能优化 SVM 的焊接缺陷识别方法研究	169
5.6.1	基于粒子群优化 SVM 的焊接缺陷分类研究	169
5.6.2	基于蜜蜂算法优化 SVM 的焊接缺陷分类研究	173
5.6.3	人工蜂群优化 SVM-RBF 神经网络的焊接缺陷识别	178
5.7	本章小结	181
参考文献		183

华中科技大学出版社

1 超声检测技术研究

1.1 超声检测技术的研究进展

1.1.1 超声检测技术的发展

超声检测是国内外应用最广泛、使用频率最高且发展较快的一种无损检测技术。由于其具有检测灵敏度高、检测速度快、检测费用低、对人体无害、对材料无污染、适应性强等优点,在机械制造、冶金、电子、航空、航天、航海、石油化工、铁路、交通、建筑等工业领域中获得了广泛的应用,在物理学、电学、生物科学、医学等领域中也占据了重要的地位。

自1944年和1946年分别在美国和英国研制成功脉冲反射式超声波探伤仪,超声波探伤开始应用于工业检测领域。20世纪50年代,超声波探伤已广泛应用于世界先进工业国家的钢铁、机械制造和造船工业领域。20世纪60年代,德国等国研制出高灵敏度和高分辨率的超声波仪器,有效地解决了焊缝超声波探伤问题,使超声波探伤的应用进一步扩大。20世纪七八十年代,随着电子学和计算机技术的飞速发展,人工智能技术、自适应技术、机器人技术、相关技术、信息融合技术、激光技术和CAD/CAM技术等与无损检测技术有机结合,以实现复杂形面复合构件的超声扫描成像检测,是近年来国外复合材料构件无损检测领域研究的前沿课题;超声无损检测的数字化、自动化、图像化和智能化成为研究的热点,标志着超声无损检测的现代化进程。

超声相控阵检测技术的应用始于20世纪60年代,初期主要应用于医学超声成像领域。近年来,随着电子技术和计算机技术的快速发展,超声相控阵检测技术已逐渐应用于工业无损检测领域,如对汽轮机叶片(根部)和涡轮圆盘的检测、石油天然气管道焊缝检测、火车轮轴检测、航空材料检测、核电站检测、混凝土和复合材料检测等领域。另外,超声导波检测技术、TOFD检测技术、超声仿真软件的研究和应用,拓宽了超声检测技术的研究范围和应用领域,提高了超声检测的可靠性和效率。

超声检测技术的发展过程可以分为三个阶段,即超声探伤、超声检测和超声评价。近十多年以来,国外发达国家的超声无损检测技术,已逐步由超声探伤和超声

检测向超声评价过渡,并且向自动超声无损评价和定量超声无损评价的方向发展和应用。超声无损评价是超声检测发展的更高境界和必然趋势。

目前,超声无损检测技术正向以下几个方面发展。

(1) 超声无损检测技术将向数字化、自动化、图像化和智能化方向发展。

(2) 在若干领域向超声无损评价发展,使得超声检测内容有了新的内涵。如超声检测技术与断裂力学相结合,对重要构件进行剩余寿命预测;超声检测技术与材料科学相结合,对材料进行物理评价。

(3) 超声检测新技术的发展,如超声导波技术、空气耦合超声技术、电磁超声检测技术、激光超声检测技术、非线性超声技术、相控阵超声检测技术、TOFD 检测技术等。

(4) 高温条件下的检测明显增多,在线检测、动态检测增多。

(5) 现代信息处理与模式识别技术如数值分析法、人工神经网络、模糊控制、遗传算法以及虚拟仪器技术广泛应用于超声检测领域。

(6) 计算机仿真技术在超声检测领域的应用,一是利用计算机仿真技术建立超声检测缺陷信号特征信息库,为缺陷智能识别提供训练样本;二是超声检测仿真软件的开发,目前国外已有相关产品,如加拿大 UTTEX 公司的 Imagine3D 和法国原子能委员会的 CIVA。

1.1.2 中国制造 2025 与超声智能检测的发展

随着中国 2025 和德国工业 4.0 的全面推进,为应对装备制造业发展的新形势,确保质量为先,未来对机械装备智能检测与评估技术的需求将会越来越多。随着智能化不断深入,各种装备将向着高速、高功率方向发展,关键零部件的无损检测技术将面临新的挑战。超声检测是最便捷、最有效、最绿色的缺陷检测方法,超声检测将向着无损评价和定量无损评价方向发展,向着在役监测及检测大数据分析方向发展,向着计算超声学方向发展。2015 年我国也提出了以“创新驱动、质量为先、绿色发展、结构优化、人才为本”为核心思想的“中国制造 2025”发展规划,提出制造强国战略。质量是中国制造的基石,大型装备的安全生产将直接影响国民经济的稳步发展,而无损检测是大型装备质量控制的重要技术保障。

随着我国经济形式的不断深入发展,超声检测技术已在机械、石油、核电、航空、航天、兵器等领域得到了广泛应用,成为各行业必备的质量保持和监控手段。从采用超声波的类型来看,超声检测已发展了纵波、横波、表面波、兰姆波、导波、爬波等新方法;从耦合方式来看,又分为接触式、水浸式、空气耦合超声、电磁超声、激光超声等;从成像方式来看,包括 A 型、B 型、C 型、D 型、P 型、S 型、F 型、全聚焦 (TFM) 等成像方式;从声波激励与接收方式来看,已经从单阵元发展到线阵、面阵、

环形等多种形式的超声相控阵技术。

现阶段,随着计算机技术、人工智能技术的飞速发展,超声检测技术正在向着无损评价和定量无损评价方向发展,不仅探测缺陷的有无,还要对缺陷位置、大小、形状、走向等信息进行评价;向着在役监测及检测大数据分析方向发展,构建超声结构健康监测系统,对产生的大量监测数据进行分析和汇总,实现失效预测;向着计算超声学方向发展,从超声传播理论入手,研究超声波传播行为及声波与缺陷的耦合规律,建立超声检测系统数学模型,探索缺陷评价新方法。

(1) 向高可靠性方向发展

随着自动控制技术、计算机技术、传感器技术的发展,超声检测技术进入以计算机控制为核心的信息加工时代,以提高检测可靠性,排除人为因素,实现由无损评价向定量无损评价过渡。开发能够自动扫查、自动定位和自动跟踪检测对象的专用检测设备,对检测对象实现实时在线检测、对缺陷自动识别与评价等是以后的发展方向。

(2) 向多特征评价方向发展

随着无损检测向着无损评价的过渡,超声检测不仅要检测出缺陷的有无,还要对缺陷和材料的物理和力学性能进行自动评价。超声检测将不再局限于幅度、时间等特征参量,声学时域、频域特征参量将成为新的研究对象乃至成像依据。

(3) 向在役监测及检测大数据分析方向发展

超声结构健康监测在石化、压力容器等领域得到了应用,大量的监测结果能直接反映结构在役过程中的失效过程,对大量监测数据的汇总、处理是实现失效预测,提高结构使用安全的有效手段,研究缺陷检出之后的损伤评价,建立相关数据库有重要意义。

(4) 向计算机模拟检测方向发展

声学基础与计算机技术结合产生的超声检测模拟技术将会对传统超声检测工艺的制定提供快速参考,利用计算机仿真技术,可以不用通过制造人工缺陷试件即可获得各种缺陷信号,降低试验成本,对复杂超声检测系统进行计算机建模与仿真,研究声场的传播及声场与缺陷的耦合规律,得到超声检测参数与缺陷回波之前的定量关系,探索准确的缺陷识别与定位定量方法,具有重要的工程应用意义。

1.2 超声声场仿真理论和发展现状

1.2.1 超声声场仿真的理论和现状

制定完善有效的超声检测工艺,是获取正确超声回波信号的前提,超声探头是

超声发射和接收的基本单元,准确地得到超声探头发射的声场,可提高超声检测分辨率和可靠性。在超声检测工艺中,最重要的就是要根据零件的结构特点,选择合适的超声探头,并根据超声探头的特点分析缺陷可能出现的位置。研究超声探头的声场分布,主要是为了针对不同的检测对象、尺寸和形状,选择合适的探头(如探头类型、晶片大小、探头频率、激励信号等),并根据声场声压分布的特点制定无损检测工艺,帮助提高分析检测数据、缺陷辨识和评价的能力。

超声声场仿真方法主要有角谱法、瑞利积分法、多元高斯法、有限元法、空间脉冲响应法等。这些方法各有利弊,角谱法是使用了二维傅里叶变换,但需要对很多平面进行叠加,导致计算量大。多元高斯法基于近轴近似理论,在半近场内会出现较大误差,且当声束在界面上传播时,由于入射角的关系,可能会导致不满足近轴近似的条件,从而使多元高斯模型计算的结果产生较大误差。有限元法可以处理各种介质中的声场传播、反射和散射特性,但为了保证计算精度,有限元网格尺寸一般为 $\lambda/10$,甚至更小,超声波频率很高,波长很短,导致计算量很大。瑞利积分法研究连续波激励下的各种声场特性,在实际的工业应用中,施加到换能器上的大多都是脉冲信号,换能器工作在暂态状态,所以脉冲声场的分析受到更多的重视。

综合分析各种仿真方法的优缺点,为了提高声场仿真的精准性和高效性,以及斜楔块条件下小角度纵波探头的声场分布规律,研究基于空间脉冲响应的超声换能器声场仿真,对优化超声检测工艺、提高检测的可靠性和准确性意义重大。另外,声场特性为缺陷与声场耦合特征的研究奠定了基础。

1.2.2 超声声场与缺陷耦合仿真技术研究进展

超声检测通过分析声场与缺陷相互作用后的回波实现对缺陷的诊断和评价,在求解缺陷散射问题时,常用的方法包括解析法、半解析法和数值法。解析法以数学分析为基础,求解微分方程定解问题,只能应用于规则形状的缺陷。数值法以离散数学为基础,在计算精度和适应性方面有较大优势,但计算时间较长,数值方法主要有有限差分法、边界元法、弹性有限积分法和有限元法等,其中有限元法是一种完善和方便的分析工具,能够处理各种复杂的声现象和声行为,占有绝对主要的地位。但随着检测系统复杂程度的提高,特别是对大型复杂零件的仿真研究时,网格数量巨大,需要占用大量内存,耗费大量时间。

基于基尔霍夫(Kirchhoff)近似可以模拟超声波与边界或标准反射孔的相互作用,常用来建立各种体积类缺陷和裂纹类缺陷。基尔霍夫近似在粗糙表面上任意一点利用切平面代替曲面,表面的任何点都产生平面界面的反射,并把各点切平面上所有反射声场叠加。基尔霍夫近似先将缺陷离散,然后单独计算每个缺陷点的衍射回波,最后将各点效应叠加得到缺陷回波。基尔霍夫近似忽略了缺陷表面的

二次衍射表面波,不能计算裂纹尖端衍射产生的散射波。几何衍射理论 GTD(geometrical theory of diffraction)用来处理很多异形物体的散射问题或用数值计算解决散射和衍射的问题。几何衍射理论利用几何光学中光束的思想来解释复杂介质中的波动现象,声束在缺陷边界或端点时,依据衍射法则发生声束的衍射,即一条射线对应无数成圆锥状分布的衍射射线,圆锥轴线与边缘相切于入射点,圆锥半角等于声束入射角。由于衍射法则的影响,计算时要排除不能到达计算点的点源。

上述两种方法都是基于高频近似,仅适用于尺寸较大的缺陷。对于尺寸较小的缺陷,利用基于低频近似的玻恩近似可以准确模拟夹杂的缺陷回波。用量子力学中的积分方程代替传统的偏微分方程,来解决超声场散射的问题,通过精确迭代法求解积分方程,从而得到渐进的玻恩级数解。玻恩近似是取无限级数的第一项作为近似解,即用入射场取代散射体内的未知位移场,最终得到纵波和横波散射场的远场表达式。

1.3 超声信号处理理论和发展现状

1.3.1 信号处理技术的理论和发展

在超声检测中,噪声严重影响了检测结果的可靠性和质量。因此对超声检测回波信号进行去噪处理,保证所得缺陷信号的真实性显得十分重要。运用各种数字信号处理理论对超声信号进行处理和评价,已经成为超声检测方法研究的主要方向之一。现有商用超声检测系统的主要局限性并不在于硬件的优劣,而在于缺乏先进的信号处理和解释软件。目前超声无损检测用得最多的 A 型扫描探伤仪,在 A 型扫描探伤仪接收到的信号中,携带了大量关于材料特性与材料中缺陷的信息,但是这些信息并没有充分加以利用。对 A 型信号进行深入研究理解,不但能提高 A 型扫描探伤仪本身的检测能力,而且是超声成像等技术的基础。国际上,美国、德国、英国、日本等国家在超声信号处理方面的研究走在前列。从分析域角度看,当前用于超声无损检测的不单是时域分析,还有频域分析以及时频分析。

1. 时域或频域分析理论

常用的超声信号处理的时域或频域分析理论主要有信号平均、数字滤波、反卷积和频谱分析等。

信号平均包括空间平均、时间平均、频率平均和角平均等。这种技术适当改变探伤参数,使散射信号随机变化,而缺陷信号基本不变;这样将多个信号相加取平均值,就可提高信噪比。

滤波包括低通、高通、带通、复合滤波、匹配滤波、自适应滤波和中值滤波等。

反卷积的特性之一是能区分两个很近的信号,因此,反卷积主要用来提高 UT 的分辨率,但不能提高信噪比。而且时域反卷积的优点是分辨率依赖于信号的采集带宽,而不依赖于信号的带宽。但时域反卷积对换能器的线性度、信号之间的相关程度要求较高,而且速度慢,用傅里叶变换 2 秒钟完成转换的信号,时域反卷积一般需要 8~10 分钟。

频谱分析法最早由 Gericke 引入超声信号处理,20 世纪 80 年代初在实验室中已基本成熟。将信号进行傅里叶变换,观察其频率谱,有时还观察其相位。一般噪声比起大尺寸缺陷来,其背散射更强烈地依赖于频率,使噪声和缺陷信号的频率谱或相位谱出现差别,这给频谱分析提供了前提。在频谱分析中,使用窄脉冲探头,产生有着宽广频带的振动波,经过材料内部的调制,产生丰富的信息。而且宽带探头的频谱越平直,效果越好。与此相反,宽脉冲探头产生的脉冲相对来说频带较窄,信号的频域特征较难分析。噪声大时,频谱分析的效果显著下降,这就导致了后来的时频分析法的出现。

2. 时频分析理论

时频分析理论是时频局部化信号分析理论的总称。已有的时频分析理论很多,目前在超声信号处理领域较典型的有短时傅里叶变换、Gabor 变换、裂谱法、Wigner-Ville 分布和小波分析等。

(1) 短时傅里叶变换(short time fourier transform,STFT)与裂谱分析

为了提高噪声材料缺陷检测的信噪比,八十年代初提出了基于短时傅里叶变换的裂谱分析理论,即分离谱技术(split spectrum processing,SSP)。由于缺陷信号与散射噪声有不同频响性质,缺陷信号类似于一个冲击信号,故在换能器的频带内分布比较均匀;散射噪声在换能器频带范围内的分布有很大的随机性。SSP 使用宽带超声波换能器,先对信号进行 FFT 得到频谱,再将宽带频谱通过 N 个频带相互重叠的滤波器,采用傅里叶逆变换得到 N 个时域信号,将这些时域信号经过诸如最小化或极性阈值化处理,以择取有用的信息。

(2) Wigner-Ville 分布

Wigner-Ville 变换是典型的二次型时频表示,在满足时频边缘分布的条件下,可以理解为能量密度的分布,其时频分辨率较高,最大优点是该方法不受时间和频率的测不准关系的限制。由于信号的时频分析法能够明确表示信号的时变频谱特性,因而是分析时变非平稳信号的有力工具,然而,这也使它产生了一些缺点。首先,Wigner-Ville 变换计算起来非常复杂;其次,在超声无损检测中,由于多种模式的存在,使 Wigner-Ville 变换的结果中出现交叉项,这些交叉项有时会模糊真正的信号能量分布。

(3) 小波分析理论

多尺度小波去噪方法是小波分析在信号处理中的重要应用,其基本原理是利用小波变换的多分辨力将带噪声的信号分解到各个尺度上,根据缺陷信号和噪声在不同尺度上的性质表现分别处理,完成信噪分离。与裂谱分析和自适应滤波两种方法相比,采用小波变换,即采用恒定的中心频率-带宽比的滤波器组进行信号分解比裂谱分析更为恰当,且小波分析理论对噪声和信号不需要太多的先验知识,因此,小波分析在噪声材料超声信号处理、瞬态信号检测等方面得到广泛应用。

尽管小波分析在超声无损检测信号的噪声消除中表现出了优良的特性和广阔的应用前景,但是小波应用的参数选择问题尚未得到完善的解决,比如小波基的选择、小波分解层数的确定以及阈值的确定等问题,这些参数的选择大多是经验性的,尚未上升到严格理论水平。

3. 稀疏分解理论及其研究现状

从傅里叶变换到小波变换的基展开,它们在各自的适应范围内都实现了信号去噪的目的,虽然分析能力不断增加,但是还存在许多不足,例如:小波变换的时频窗口可变,时频局部化能力大大增强,但是不能分解处于同一频带中的多个正弦信号分量;它们都依赖于信号或噪声的统计特性,但实际应用中往往无法先验获知。

Mallat 和 Zhang 总结前人研究成果,于 1993 年提出了信号在过完备库(over-complete dictionary)上分解的思想。通过信号在过完备库上的分解,用来表示信号的基可以自适应地根据信号本身的特征灵活选取。为了得到信号的稀疏表示,基的构造必须使得基在信号组成的空间中足够的密。因此,基的正交性将不再被保证,此时的基也不再是真正意义上的基,而改称为原子(atom)。由这些原子组成的集合是过完备的,被称为过完备原子库。从数学上看,由于过完备性比独立性更自然,而稀疏表示是建立在过完备性基础上,因此稀疏性具有更稳健的建模假设。

但是目前信号的稀疏分解在信号处理中的实际应用很难被推广并产业化。阻碍其研究及应用发展的关键因素是信号稀疏分解的计算量十分巨大,计算时间在现有计算条件下令人无法忍受。由于 MP 算法比较简单容易理解,且最为常用,所以针对此种方法的研究开展得最广泛和深入。MP 算法的计算时间主要花费在每一步分解中求取最佳原子上。自从 Mallat 提出这种算法以来,求解每次匹配的最佳时频原子的参数一般采用牛顿法或者遗传算法等进行求解。采用牛顿法需要进行大量的内积运算,所以当所选择使用的时频原子库较大时,计算量也大。因而影响信号稀疏分解的实用性。如选择使用的时频原子库太小,则分解出的结果就不能满足信号稀疏表示的要求。MP 算法的每一步中,求取最佳原子的都是多参数的最优化问题。对此,可采用优化算法来提高计算速度。

1.3.2 信号特征提取技术

特征提取是缺陷智能分类的关键技术,目前超声缺陷识别主要分为两大类,一类是基于特征量的缺陷识别技术;另一类是利用采样得到的超声信号作为输入进行缺陷的识别。对于前者,特征量的选取是识别技术成功与否的关键因素之一,通过对原始信号数据进行变换,得到最能反映缺陷或材料性质的本质特征,所以在回波幅度、频谱无法直接反映这些本质特征的情况下,往往还需要借助超声回波的上升时间、下降时间、振动周期、峰度系数、空间幅度谱和倒谱等特征量,在研究人员的经验指导下得到确实反映缺陷性质的特征量,作为模式识别和人工神经网络的输入进行缺陷识别。目前对于特征量的选取没有任何理论依据,主要依靠研究人员的经验和对所研究问题的理解。对于后者,利用采样得到的超声信号,借助时频分析理论得到反映缺陷本征的特征向量作为网络的输入这种特征提取方法目前主要存在的问题是准确性有待提高。

为了避免在超声信号特征提取过程中研究人员的主观意志带来的影响,利用采样得到的信号采用时频分析理论得到特征量的方法有:求取检测信号与标准信号(无缺陷)相关函数的相关分析识别法;把缺陷本身看作一个信号处理器的自适应滤波法和系统脉冲响应识别法等。

1.3.3 信号分类技术

缺陷的智能识别就是在缺陷特征提取的基础上,利用模式识别的方法对缺陷进行自动分类。许多学者对此进行了多方面的研究,并针对不同的识别对象,提出了相应的识别方法,归纳起来主要有以下三种:统计分类方法、基于规则的分类方法和基于学习的分类方法。常见的分类方法有最小距离法、模糊分类法、神经网络分类法和支持向量机分类法等。

1. 模糊分类理论研究

传统的统计模式识别系统,在提取了缺陷有效的特征后,采用 K-近邻分类器、Fisher 线性判决规则等决策方法进行分类。但是由于通常的模式分布非常不规则,要求所用的模式识别方法在模式空间里形成各种非线性分割曲面。另外,由于在实际应用中信号还常常存在一些未知的背景噪声,这些都给传统的模式识别带来一定的困难。目前由于模糊分类和神经网络的准确识别能力以及自适应能力,在对缺陷进行识别中它们得到了广泛的应用。

2. 神经网络分类理论研究

神经网络是一种有效的模式识别方法,具有自组织和自适应学习功能,在

缺陷的智能识别方面国内外的学者都进行了大量的研究。

但是神经网络分类方法存在以下明显的缺点：

- ① 为了极小化总误差,学习速率应选取得足够小,导致网络学习过程比较慢。
- ② 加大学习速率会导致学习过程振荡从而收敛不到期望解。
- ③ 学习过程可能收敛于局部极小点或者误差函数的平稳段停止不前。

针对这种情况应考虑对 BP 神经网络进行改进或者变形处理。RBF 神经网络(radial basis function neural networks,RBF)在逼近能力、分类能力和学习速度等方面均优于 BP 网络,它是基于人脑的神经元细胞对外界反映的局部性而提出的,是一种性能良好的前馈型人工神经网络,具有较高的运算速度,特别是它较强的非线性映射能力,能以任意精度全局逼近一个非线性函数,使其在很多领域得到了广泛应用。

人工神经网络在对超声缺陷进行自动识别方面,获得了广泛的应用。但是由于人工神经网络没有专门的训练和学习函数来确定网络结构,隐层权值、阈值和节点数的确定在训练过程中存在很大的随机性。而且这种方法需要大量的训练样本,而实际应用中,这种前提条件通常得不到满足,当问题处在高维空间时尤其如此,这实际上是现有机器学习理论和方法中存在的一个根本问题。因此,如何优化网络结构,以及研究新的方法,从根本上解决以神经网络为代表的模式识别方法的缺陷是近年来机器学习领域研究的热点。

3. 支持向量机分类理论研究

1992 年到 1995 年,在统计学习理论的基础上 Vapnik 发展了一种新的模式识别方法——支持向量机(support vector machine,SVM),其基本思想可以概括为:首先通过非线性变换将输入空间变换到一个高维空间,然后在这个高维空间中求取最优线性分类面,而这种非线性变换是通过定义适当的内积函数来实现的。它在解决小样本、非线性及高维模式识别问题中表现出许多独特的优势,并应用于模式识别和函数拟合等领域。SVM 在手写数据库分类、人脸及 3D 图像识别、语音识别等方面都得到了较好的应用。

虽然统计学习理论和支持向量机方法中还有很多问题需要进一步研究,如核函数的选择问题,但多数学者认为,它们正在成为继传统模式识别和神经网络研究之后机器学习领域新的研究热点,并将推动机器学习理论和技术的飞速发展。