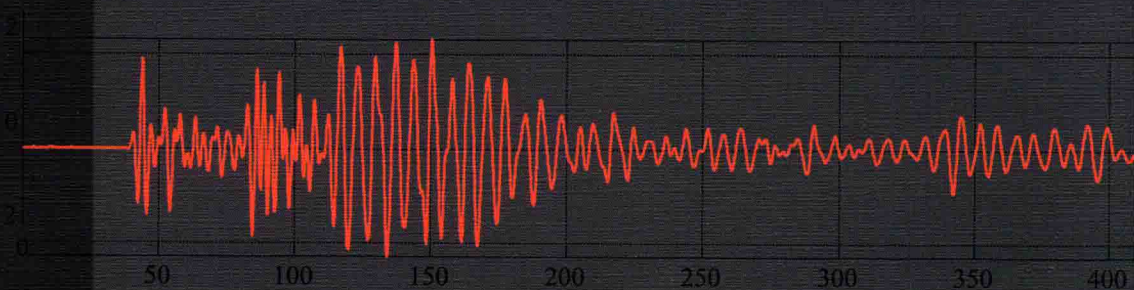


Research on Acoustic Emission
Processing Algorithm

声发射

• 于金涛 著

信号处理算法研究



化学工业出版社

Research on Acoustic Emission
Processing Algorithm

声发射 信号处理算法研究

• 于金涛 著



化学工业出版社

· 北京 ·

无损检测技术是控制产品质量、保证设备安全的重要手段之一，而声发射技术作为新型无损检测技术，对于在线实时监测具有非常广阔的应用前景。本书对于声发射技术进行了详细的阐述和分析，对于各种回收信号的收集与处理进行了详细的分析和对比，并以复合材料为例，对于信号处理和算法的研究与设计进行了详细的论述。

本书适宜从事无损监测的专业人士参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

声发射信号处理算法研究/于金涛著. —北京: 化学工业出版社, 2017.8
ISBN 978-7-122-29855-3

I. ①声… II. ①于… III. ①声发射-无损检验-信号处理 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 124646 号

责任编辑: 邢 涛

装帧设计: 韩 飞

责任校对: 吴 静

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 9½ 字数 124 千字 2017 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言



无损检测技术是控制产品质量、保证设备安全运行的重要手段之一。随着我国现代化建设事业的迅猛发展，无损检测理论研究和技术应用有了很大提高。我国相继建立了若干重点机构研究无损检测新技术、新方法、新理论，制定不同行业的无损检测规范、行业标准和国家标准。无损检测技术在保证产品质量和工程可靠性上，在国家重大工程安全运行和系统寿命评估方面发挥着越来越重要的作用。

在实际生产及使用过程中，想要完全避免材料或构件的各种损伤是不切实际的。因此，要定期的对部件进行检测，及时修复和替换受损或不稳定的部件，以保证结构在整个使用寿命期的安全。对于检测，传统观念采取的是在发现问题后进行修补的方法，要求在发现危及安全的缺陷后立即进行修复。而新的无损检测观念是预测并管理，要求能对可能发生的缺陷、故障进行预报，从而能在某一合适时间段内采取措施。这样才能在保证产品或结构安全的前提下，取得最大的经济效益。

随着现代工业和科学技术的发展，声发射（AE）技术的发展使这种新型的动态无损检测技术成为了可能。作为新兴的动态无损检测技术，声发射技术克服了传统无损检测技术的很多缺点。声发射检测技术是无损检测中的一种新方法，它可以提供连续的状态信息，适合于设备在线监控及早期破坏预警。通过声发射传感器采集声信号，再利用计算机信号处理系统对采集的声信号进行分析、转换、处理，以此为原理构成检测系统基于声发射技术的裂纹检测，通过监测构件裂纹生长过程中释放的能量，无需对构件施加激励，能够检测损伤的位置、类型及其变化过程。在使用中，只需要在构件合适的位置安装声发射传感器，非

常有利于部件的实时在线检测。利用声发射技术进行监测，可以在部件疲劳试验中及时地检测到损伤的产生、损伤的位置及损伤类型等信息，因此研究声发射检测技术，改进和提高部件损伤检测的效率和精度，对准确评估部件寿命及安全性是非常有意义的，而声发射检测技术的关键是声发射信号的处理算法。因此，本书不仅对相关的检测技术进行了原理和检测方法方面的介绍，同时着重对复合材料试件声发射信号处理算法进行了研究，相应的也介绍了一些常用的无损检测技术，注意反映当前国内外无损检测领域的最新动态和最研究成果，具体研究内容如下。

① 通过断铅模拟实验，研究了声发射信号在复合材料上的传播特性。对碳纤维材料试件和蜂窝材料试件进行了传播特性断铅试验，并且利用谐波小波包分析了声发射信号在各个频带上的衰减特性。

② 研究了基于经验模式分解和小波阈值去噪相结合的声发射信号去噪算法。在分析了经验模式分解去噪和小波阈值去噪优缺点的基础上，将二者结合，提出了 IMF-Wavelet 去噪方法，EMD-Wavelet 去噪方法和 Wavelet-EMD 去噪方法，实验结果表明，相比于经验模式分解和小波阈值方法，EMD-Wavelet 和 Wavelet-EMD 方法对于声发射信号去噪效果在信噪比高和信噪比低的情况下都比较稳定。

③ 研究了基于最小二乘支持向量回归的声发射源线性定位算法和基于多输出支持向量回归的声发射源平面定位算法。针对 LS-SVM 回归线性定位器的参数选择问题，设计了基于小生境粒子群算法的 LS-SVM 回归参数优化选择方法。利用断铅模拟实验数据对 LS-SVM 回归线性定位器和 M-SVR 平面定位器进行了测试，并且与神经网络定位器的结果进行了比较，验证了支持向量机定位器在定位精度上的优势。

④ 研究了基于谐波小波包分解和支持向量多分类器的声发射源类型识别算法。研究基于特征类间距离与类内距离的特征评价方法，给出特征评价指标。利用特征评价指标选择了适合声发射源类型特征提取的谐波小波包分解频带。研究基于层次支持向量多分类机的声发射源识别

方法，利用聚类算法来设计多分类器的拓扑结构，利用小生境粒子群算法对多分类机中的各个两分类机进行模型参数优化。最后利用碳纤维材料压断试验数据，验证了特征提取及声发射源类型识别方法的有效性和实用性，结果表明，谐波小波包特征提取方法有效地提取了声发射类型特征，在计算效率和特征区分度上均优于传统小波包特征提取方法，模型优化后 SVM 多分类器具有更好的整体性能，有效地解决了声发射源识别的小样本问题。

由于作者水平有限，书中不足之处请读者指正。

于金涛

2017. 5. 8



第 1 章	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	无损检测技术分析	3
1.3	声发射检测技术研究现状及分析	5
1.3.1	声发射检测技术概念	5
1.3.2	声发射信号采集处理系统	6
1.3.3	声发射信号分析技术	8
1.3.4	声发射信号去噪技术	12
1.3.5	声发射源定位技术	13
1.3.6	声发射信号特征参数提取技术	17
1.3.7	声发射源识别技术	19
1.4	存在主要问题	21
第 2 章	声发射信号传播特性实验研究	23
2.1	引言	23
2.2	谐波小波包分析原理	24
2.2.1	二进谐波小波原理	24
2.2.2	广义谐波小波原理	31
2.3	声发射信号传播特性分析	36
2.3.1	声发射波的传播原理	36

2.3.2	声发射信号传播实例分析	37
2.3.3	声发射参数衰减结果	43
2.3.4	声发射信号衰减的谐波小波包 分析	46
2.4	本章小结	51

第 3 章 声发射信号去噪算法研究 52

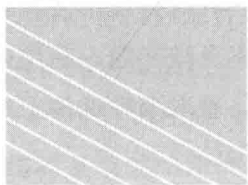
3.1	引言	52
3.2	小波阈值去噪原理	53
3.2.1	阈值函数选择及阈值优化	55
3.2.2	小波基函数的确定	57
3.3	经验模态分解及去噪原理	59
3.3.1	经验模态分解原理	59
3.3.2	经验模态分解的滤波特性	60
3.3.3	经验模态分解去噪原理	62
3.4	经验模式分解及小波结合去噪原理	64
3.4.1	IMF-Wavelet 去噪原理	64
3.4.2	EMD-Wavelet 去噪原理	65
3.4.3	Wavelet-EMD 去噪原理	65
3.5	去噪效果评价	65
3.6	仿真实验及分析	66
3.6.1	标准信号去噪实验	66
3.6.2	模拟 AE 信号去噪实例分析	71
3.7	本章小结	73

第 4 章 声发射信号智能定位算法研究 74

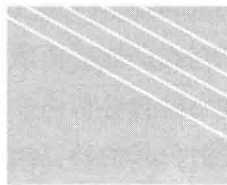
4.1	引言	74
4.2	基于最小二乘支持向量回归的声发射源 线性定位方法	75

4.2.1	最小二乘支持向量回归原理	76
4.2.2	基于粒子群算法的 LS-SVM 回归的参数优化	77
4.2.3	利用 LS-SVM 回归进行声发射源线性定位	81
4.2.4	声发射源线性定位实验分析	83
4.3	基于多输出支持向量回归的声发射源平面定位方法	86
4.3.1	单输出支持向量回归原理	87
4.3.2	多输出支持向量回归原理及算法	88
4.3.3	多输出支持向量回归算法仿真验证	90
4.3.4	声发射源平面定位实验与分析	92
4.4	本章小结	99
5.1	引言	100
5.2	基于谐波小波包分解的声发射信号特征提取	101
5.2.1	特征评价方法	102
5.2.2	谐波小波包分解特征提取步骤	103
5.2.3	谐波小波包分解频带确定	104
5.3	基于支持向量多分类器的声发射源类型识别	105
5.3.1	支持向量机分类原理	106
5.3.2	支持向量机多分类器设计	109

5.3.3	支持向量机模型参数优化	111
5.4	仿真分析及实验验证	115
5.4.1	基于小生境粒子群算法的 SVM 参数优化验证	115
5.4.2	压断实验	116
5.4.3	谐波小波包分解特征提取 验证	120
5.4.4	支持向量多分类器声发射源 类型识别验证	122
5.5	本章小结	125



≡ 第 1 章 ≡



绪 论

1.1 概述

随着现代科学和工业技术的迅速发展，工业现代化进程日新月异，高温、高压、高速度和高负荷，无疑已经成为现代工业的重要标志，但它的实现是建立在材料（构件）高质量基础上的。为了确保这些材料的质量，必须采用不破坏材料的形状，不改变其使用性能的检测方法，对产品进行百分之百的检测（或抽检），以确保产品的安全可靠，这就需要用到无损检测技术。无损检测技术以不损害使用对象的使用性能为前提，应用多种物理原理和化学现象，对各种工程材料、零部件、结构件进行有效的检测和测试。

作为新兴的动态无损检测技术，声发射技术克服了传统无损检测技术的很多缺点。基于声发射技术的裂纹检测通过监测构件裂纹生长过程中释放的能量，无需对构件施加激励，就能够检测损伤的位置、类型及其变化过程。在使用中，只需要在构件合适的位置安装声发射传感器，这非常有利于实现实时在线检测。利用声发射技术进行监测，可以在被检测对象疲劳试验中及时地检测到损伤的产生、损伤的位置及损伤类型等信息，因此研究声发射检测技术，改进和提高损伤检测的效率和精度，对准确评估被检测对象寿命及安全性是非常有意义的，而声发射检测技术的关键是声发射信号的处理算法，因此本书针对声发射信号处理

算法展开研究。

本书通过对多种材料试件进行断铅试验，获取衰减特性数据，利用能量和幅值参数分析了声发射信号的距离衰减特性。针对传统小波包分析存在的能量泄露、不同层分辨率不同、频带选取不灵活问题，利用谐波小波包分析声发射信号在各个频带上的衰减特性，获取两种试件上声发射信号的特征频带，为声发射传感器布置提供依据。

为解决声发射信号的去噪问题，针对小波去噪存在的去噪效果受信号特点及小波基函数的影响和只适用于高信噪比的缺点，研究基于经验模态分解和小波阈值去噪相结合的声发射信号去噪方法，包括 IMF-Wavelet 去噪方法，EMD-Wavelet 去噪方法和 Wavelet-EMD 去噪方法，这些方法利用 EMD 对信号的自适应分解特性及适合于低信噪比去噪的优点弥补小波去噪的不足，通过标准信号和断铅模拟声发射信号去噪性能对比表明，Wavelet-EMD 方法无论在高信噪比情况下，还是在低信噪比情况下，都具有较稳定的去噪效果。

为解决声发射源定位问题，针对基于神经网络智能定位方法中存在的局部最优、大样本、过学习及网络结构难以确定等缺点，研究基于最小二乘支持向量回归的声发射源线性定位方法和基于多输出支持向量回归的声发射源平面定位方法。该方法利用支持向量机在全局寻优、收敛速度及小样本预测上的优势弥补神经网络的不足，通过对碳纤维材料试件断铅定位试验结果表明，LS-SVM 回归线性定位方法和 M-SVR 平面定位算法均达到了一定的精度，并且在收敛速度和定位精度上都优于神经网络定位器，并且在小样本下更具优势。

为解决声发射源类型识别问题，研究基于谐波小波包特征提取和支持向量机多分类的声发射源识别方法。谐波小波包分解克服了传统小波包分解能量泄露、频带选取不灵活、不同层频率分辨率不同的缺点，更精确地提取了声发射源类型特征。利用聚类算法设计层次支持向量多分类器。通过试件压断试验声发射信号识别结果表明，谐波小波包特征提取方法有效地提取了声发射类型特征，在计算效率和特征区分度上均优于传统小波包特征提取方法，模型优化后 SVM 多分类器具有更好的整

体性能，有效地解决了声发射源识别的小样本问题。

针对支持向量机的模型参数优化问题，研究基于小生境粒子群算法的支持向量回归线性定位器和支持向量二分类器的参数优化方法。前者利用 k -遍历交叉检验来评价 LS-SVM 回归的泛化能力，优选的参数保证 LS-SVM 回归线性定位器的定误差最小。后者利用基于分类正确率和结构复杂度的评价函数评价 SVM 二分类器的分类性能，优选的参数保证分类识别率最高且分类器结构最简单。

1.2 无损检测技术分析

现代无损检测的定义是：在不损坏试件的前提下，以物理或化学方法为手段，借助先进的技术和设备器材，对试件的内部及表面的结构、性质、状态进行检查和测试的方法。

国外从 20 世纪 70 年代就开始研究无损检测方法，当时主要沿用了金属和合金材料的检测方法，经过大量的试验和理论分析，发现完全采用金属和合金材料的检测方法是不能解决复合材料无损检测问题的。进入 20 世纪 80 年代，开始研究复合材料无损检测的新技术、新方法。进入 21 世纪以后，随着科学技术特别是计算机技术、数字化与图像识别技术、人工神经网络技术和机电一体化技术的大发展，无损检测技术获得了快速发展。到目前为止已经研究了很多方法，包括目视法、渗透法、超声波法、X 射线法、计算机层析照相法 (CT)，热成像法、微波法、声发射检测法等。表 1-1 给出了常用无损检测方法的适用范围及优缺点比较。

表 1-1 常用无损检测方法对比

无损检测方法	优点	缺点	适用范围
目视法	成本低、速度快	人为因素大、只能检测表面宏观裂纹与损伤	表面宏观裂纹与损伤
渗透法	方法简单、速度快	需清洁工件、渗透油、存在污染	分层与表面贯穿裂纹

续表

无损检测方法	优点	缺点	适用范围
超声波	检测速度快、可靠、灵敏度和精度较高	操作较为复杂,必须经过专门培训,不同缺陷需使用不同超声探头	适用于检测脱粘、压陷、空隙、疏松、夹杂等内部缺陷而非损伤
X射线法	可以对整体结构进行监测,提供检测图像,能够实现实时检测	射线危害人体,需要专门培训,需要专门图像处理设备对检测图像进行处理	可以检测空隙、夹杂、贫胶等内部缺陷,可以检测表面裂纹、纤维断裂损伤
CT	空间分辨率高,实现直观的三维图像,精度高	需要专用的CT设备,成本非常高,检测效率低,无法实现大型构件的现场在线检测	可以检测夹杂、气孔等缺陷,可以检测裂纹、分层损伤
热成像法	提供全场图像	工件表面必须有很好的热吸收率,只能对薄复合材料构件进行监测	薄的复合材料构件的缺陷检测,无法实现损伤检测
微波法	操作非常简单、不需要预先处理、结果直观	仅能对大物理缺陷进行检测	较大的物理缺陷检测,不能对损伤进行检测
声发射	只需要安装声发射传感器,能实现动态、在线损伤检测	声发射信号通常比较微弱,噪声去除困难、需要研究有效的声发射源定位、识别方法	使用过程中产生的各种损伤及损伤的扩张情况

通过以上对比可以看出,各种无损检测方法各有优缺点和其适用范围,有些主要适用于被检测对象内部缺陷的检测,有些适用于部分缺陷和部分损伤的检测,有些需要昂贵的设备成本较高。综合分析结果表明,声发射技术无需对构件施加激励,只需在构件上适当的安装声发射传感器,能够在线检测损伤的位置、类型及其变化过程,是一种真正意义上的动态无损检测技术。但是声发射检测也存在一些问题,如声发射信号通常比较微弱,从背景噪声中提取出微弱的有用信号是关键,利用声发射信号进行损伤的定位、模式识别需要相应的有效处理算法。本书就是针对声发射检测中的关键技术问题——声发射信号处理算法展开研究,包括声发射信号去噪算法研究,声发射源定位算法研究,声发射源模式识别算法研究和声发射信号在复合材料部件试样上的传播、衰减特性分析。

1.3 声发射检测技术研究现状及分析

1.3.1 声发射检测技术概念

声发射 (Acoustic emission, AE) 是指材料内部或表面由于变形或者损坏而突然释放应变能产生的瞬态弹性波^[1,2]。声发射也被称作应力波发射 (Stress Wave Emission)。声发射源分为一次声发射源和二次声发射源两种类型, 一次声发射源指直接由于变形和断裂而产生的弹性波源, 如金属塑性变形、断裂、相变、磁效应以及表面效应产生的声发射源均为一次声发射源。二次声发射源指与变形和断裂没有直接关系的声发射源, 比如流体泄漏、摩擦、撞击、燃烧等产生的声发射源均为二次声发射源。

图 1-1 为声发射检测过程的基本原理框图, 当物体由于外界原因导致声发射现象发生时, 声发射波引起机械振动, 并且在物体表面传播, 声发射传感器将机械振动位移转化为电信号, 经过放大、滤波、信号处理后, 记录并显示声发射波的波形, 最后经过分析处理, 提取其特征参数, 评定声发射源的特性, 如源类型、源定位等。

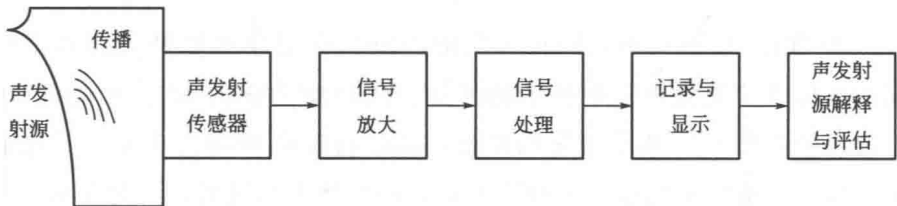


图 1-1 声发射检测过程框图

物体不同损伤类型将产生不同特性的声发射信号, 因此对损伤产生的声发射信号进行连续在线监测就可以实现对损伤的实时监测, 而不管损伤类型是否发生了变化, 因此声发射检测是一种动态无损检测技术。

与其他传统无损检测方法相比，声发射检测技术的优点如下^[3,4]。

① 与传统无损检测方法相比，声发射检测方法损伤检测灵敏度和精度高，可以达到零点几毫米数量级。

② 可以实现连续在线监测，并且可以多通道同时检测，检测效率高。

③ 对检测环境及被检测构件形状要求不高。可以实现在高低温、核辐射、易燃、易爆及有毒等恶劣环境下的检测，并且能够对其他方法不能检测的复杂形状的构件进行监测。

声发射检测技术也存在如下两方面的缺点。

① 材料特性对声发射波的特性影响很大，同时声发射信号往往比较微弱，而且很容易受到外界噪声的干扰。

② 声发射波传播过程中能量和幅值都会随距离衰减，遇到结构材料变化时可能会发生模式变换，在结构边缘可能会发生界面反射，声发射源信号到达声发射传感器时将发生很大的变化。

因此研究声发射信号在被测对象上的传播、衰减特性，研究声发射信号的滤波、去噪技术对于提高声发射源的定位及识别精度是非常有意义的。

1.3.2 声发射信号采集处理系统

20世纪50年代初，Kaiser在德国对声发射技术展开了深入的研究，这标志着现代声发射技术的开始。到目前为止的60多年时间里，声发射检测技术得到了飞速的发展，已经在工业现场实现了产品化应用。特别是近年来信息处理技术及微处理器技术的发展，大大推动了声发射采集处理系统及仪器的跳跃式发展。

① 国外研究现状 第一台商用声发射检测仪器由美国Dunegan公司于1965年推出，标志着声发射技术从实验研究阶段走向了现场应用阶段。声发射信号采集处理系统的硬件系统经历了模拟式、模拟数字混合式和全数字式三个阶段^[5]。

1965~1983年为第一阶段,是模拟式声发射仪器时代,此时声发射采集系统完全采用模拟电路,并且声发射信号处理主要采用基于参数分析的方法。模拟式声发射仪器虽然数据便于后续处理,但是集成度很低,容易受到外界干扰,可靠性差,已经基本淘汰。

1983~1995年为第二阶段,是模拟数字混合式声发射仪器时代,以美国PAC公司开发的SPARTAN-AT为代表。模拟数字混合式声发射仪器采用模拟电路实现信号采集,数字电路实现信号存储及处理功能,并且采用了并行处理技术,大大提高了实时性和可靠性。

1995年至今为第三阶段,是全数字式声发射仪器时代,以美国PAC公司的MIASTRAS2001^[6]和德国VALLEN公司的AMSY-5^[7]为代表,他们均采用全数字化技术,AMSY5采用专用的模块组合式结构和专用通讯总线,大大提高了通讯速率、兼容性和使用灵活性,MIASTRAS2001采用专门设计的AEDSP卡,可以实现参数计算、波形存储、定位和识别等功能。

近几年,数字式声发射检测系统在处理速度、存储能力和处理通道上得到了进一步的发展^[8]。如德国VALLEN公司2010年10月份推出了AMSY-6型全数字、全波形、强抗干扰声发射仪。VALLEN AMSY-6系统包括整个声发射检测所需组成。此系统专门为用户定制,包括传感器,前置放大器,采集卡,系统主机,PC机及软件,采集精度可以到18bit,采集速度可达40MHz。

② 国内研究现状 我国声发射仪器的自主研究开发工作始于1973年。沈阳电子研究所于20世纪70年代初研制出了我国第一台单通道声发射检测仪,用于金属材料拉伸声发射检测研究。长春试验机研究所于20世纪80年代初开发了36通道声发射源定位系统和基于声发射技术的旋转机械故障诊断系统。原劳动部锅炉压力容器检测中心于1995年研制出了2~64通道声发射检测分析系统,该系统采用了先进的C-AT总线,软件采用Windows操作系统。广州声华科技有限公司于2000年研制出了我国第一台全数字式多通道声发射检测系统,可以实现声发射信号分析和定位等功能^[9]。