基于声发射的缆索断丝识别及定位的研究

周文茜

2019年6月

中图分类号：

UDC分类号：

基于声发射的缆索断丝识别及定位的研究

作 者 姓 名 周文茜

学 院 名 称 自动化学院

指 导 教 师 王涛副研究员

答辩委员会主席 王军政教授

申 请 学 位 工学硕士

学 科 专 业 控制科学与工程

学位授予单位 北京理工大学

论文答辩日期 2019年6月

**Study of the identification and location of cable breakage based on acoustic emission**

Candidate Name： Wenqian Zhou

School or Department: School of Automation

Faculty Mentor: Associate Prof. Tao Wang

Chair, Thesis Committee： Prof. Junzheng Wang

Degree Applied: Master of Philosophy

Major： Control and Engineering

Degree by: Beijing Institute of Technology

The Date of Defence： June，2019

基于声发射的缆索断丝及定位的研究 北京理工大学

**研究成果声明**

本人郑重声明：所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知，文中除特别标注和致谢的地方外，学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得北京理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签 名： 日期：

**关于学位论文使用权的说明**

本人完全了解北京理工大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的,复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名： 日期：

导师签名： 日期：

**摘要**

随

**关键词**：声发射传感器；

**Abstract**

With

**Key Words**:  acoustic emission sensors ;

目录

[第1章 绪论 1](#_Toc1543607)

[**1.1 选题背景和意义** 1](#_Toc1543608)

[**1.2 缆索检测的研究概况** 1](#_Toc1543609)

[**1.3 声发射的研究概况** 2](#_Toc1543610)

[**1.3.1 声发射检测的研究现状** 2](#_Toc1543611)

[**1.3.2 基于声发射的损伤识别算法的研究现状** 4](#_Toc1543612)

[**1.3.3 基于声发射的损伤定位算法的研究现状** 5](#_Toc1543613)

[**1.4 本课题的研究意义及主要内容** 5](#_Toc1543614)

[**1.4.1 本课题的研究意义** 5](#_Toc1543615)

[**1.4.2 本课题的主要研究内容** 6](#_Toc1543616)

[第2章 声发射传感器的工作原理 8](#_Toc1543617)

[**2.1 声发射传感器的工作原理** 8](#_Toc1543618)

[**2.1.1 声发射传感器的工作原理** 8](#_Toc1543619)

[第3章 声发射全波形采集系统设计 9](#_Toc1543620)

[**3.1 硬件设计** 9](#_Toc1543621)

[**3.1.1 传感器供电电路** 9](#_Toc1543622)

[**3.1.2 信号调理电路** 9](#_Toc1543623)

[**3.1.3 FPGA及PCIe电路** 13](#_Toc1543624)

[**3.2 软件设计** 13](#_Toc1543625)

[**3.2.1 PCIe总线原理** 14](#_Toc1543626)

[**3.2.2 FPGA软件设计** 14](#_Toc1543627)

[**3.2.3 PC机软件设计** 15](#_Toc1543628)

[第4章 断丝识别及定位算法研究 17](#_Toc1543629)

[**4.1 识别算法研究** 17](#_Toc1543630)

[**4.1.1 声发射信号的频谱分析** 17](#_Toc1543631)

[**第5章 实验结果及分析** 18](#_Toc1543632)

[**5.1 实验装置** 18](#_Toc1543633)

[**5.1.1 实物展示** 18](#_Toc1543634)

[总结与展望 19](#_Toc1543635)

**第1章 绪论**

**1.1 选题背景和意义**

随着中国经济、科技 、交通的快速发展，全国各地越来越多的桥梁投入建设与使用。桥梁作为各种道路系统中的关键节点，其功能为跨越各种障碍，在交通运输中发挥了重要的作用。目前，我国桥梁建设正逐渐与国际接轨，桥梁跨径不断增大，桥型不断丰富，结构趋于轻量化，且越来越重视桥梁的美观性。

按照桥梁主要承重结构的受力体系可以将桥梁分类为梁式桥、拱式桥、刚架桥、悬索桥、和斜拉桥。其中，斜拉桥和悬索桥是目前大跨度桥梁可用的两种桥型。由于悬索桥需要昂贵的锚碇，除非具有良好的地质条件，一般是斜拉桥占优势[1]。斜拉桥具有跨越能力大，桥下净空大，梁身高度小，施工方便、桥型美观等优点，中国至今已建成各种类型的斜拉桥100多座[2]，在需要跨江、跨海、跨峡谷等的场合下，斜拉桥的身影随处可见。

由于桥梁结构在建造和使用的过程中可能会长期受到各种不利的影响，如环境的侵蚀，载荷的作用，加上结构本身的自然老化，这些损伤不断累积，在极端条件下有可能会导致灾害性事故的发生。因此为了保证桥梁结构的稳定、避免事故的发生，对桥梁结构建立有效的安全监测体系是十分必要的。缆索作为斜拉桥的核心承力部件，其强度直接关联到桥梁的安全。缆索的强度主要受其断丝程度的影响，因此，实现对于缆索的断丝的有效监测，及时对强度不够的缆索进行更换，是确保斜拉索桥安全和可靠性的重要手段[3]。

**1.2 缆索检测的研究概况**

目前用于缆索的检测方法有人工目测法、定期更换法、以及各种无损检测方法[4]。

人工目测法是靠人工先观察索体表面护套，以表面的情况决定是否需要打开锚固区或在某些部位凿开护套，了解内部缆索的断丝情况。该方法的准确率和效率都很低，且需要工人进行高空作业，存在有安全隐患。

定期更换法则是不论缆索损伤与否，定期对全部缆索进行更换，该方法会对资源造成巨大浪费，且更换过程中将会影响桥梁的正常使用。

对于无损检测方法，目前主要使用的方法包括漏磁检测法、磁致伸缩检测法、射线检测法、还有声发射检测法等。

漏磁检测法是通过外施磁场将被测缆索轴向磁化，磁化后的缆索会在缺陷处出现漏磁场信号，利用磁敏元件获取该漏磁场信号，即可获得有关缆索局部缺陷的信息，然后通过适当的信号处理，以达到对缆索局部缺陷定量检测的目的[5][6]。

磁致伸缩检测法是将缆索置于激励线圈和接收线圈中心，向激励线圈施以经过功率放大的脉冲信号，在缆索中将产生瞬态磁场，根据磁致伸缩效应，缆索将产生弹性形变，从而发出应力波，应力波沿着缆索传播，当遇到结构边界和损伤时，应力波发生反射，被接收线圈所捕获，通过对接收线圈接收到的反射波信号进行分析，即可判断出缆索结构的损伤情况[7]。

射线检测法则是基于X射线数字成像技术，利用X射线数字探伤仪，沿缆索轴向等分采集多幅图像，使用图像处理算法实现了缺陷的识别和提取[8]。

声发射检测法则是通过采集并分析缆索在断丝时释放出的声波来进行损伤识别和定位的方法，是近些年来发展起来的一种新型无损检测技术，作为一种被动检测方法，它能够被动地接受来自缺陷的声波信号，用于桥梁拉索结构时，仅需布设少量的传感器就能够对整个拉索进行全面的检测[9]。

**1.3 声发射的研究概况**

**1.3.1 声发射检测的研究现状**

当材料的内部结构发生不可逆转的变化时，例如由于老化、温度变化或外部机械力而引起裂纹形成、裂纹扩展、材料断裂时，材料会快速释放能量产生瞬态弹性波（声波）[10]，这种现象叫做声发射。基于声发射现象对应力材料发出的弹性波进行监测，即可得到材料的损伤情况。

声发射检测的基本原理如图1所示。其中引起能量释放的区域称为声发射源，声发射源发射的弹性波会在材料内传播，弹性波的传播实质是质点运动，当传播到达材料表面时，会引起材料表面质点的位移运动，质点的运动再传递到传感器的接触面，就可以被声发射传感器所探测[11]。



图1. 声发射检测基本原理图

对于声发射的正式研究开始于20世纪中叶，1950年，德国学者Kaiser在实验室观察到多种金属在变形中均会出现声发射，且声发射具有不可逆性，即材料被重新加载期间，在应力值达到上次加载最大应力之前不产生声发射，这种效应被称为Kaiser效应[12]，Kaiser的研究标志着声发射技术研究的开端。后来，Felicity在研究复合材料的声发射现象时发现，复合材料在重新加载时，声发射的不可逆程度与材料的损伤程度有关，即材料被重新加载期间，应力值达到稍小于上次加载最大应力时也会产生声发射，这种效应被称为Felicity效应[13]。1960年左右，美国学者Schofield和Tatro发现在金属塑性形变过程中产生的声发射主要由大量位错的运动所引起[14]，Tatro首次提出声发射可以作为诊断工程材料的工具，并预言声发射在无损检测方面具有独特的潜在优势。

1965年，世界上第一台商业化的声发射检测仪正式由美国的Dunegan推出，从1965年到1983年，所开发出的声发射检测仪都是靠纯模拟技术实现，被称为第一代声发射检测仪。第二代声发射检测仪出现于1983至1994年，以美国PAC公司的SPARTAN-AT为代表，开始引入微处理器，并将声发射系统模块化，部分数字化[15]。第三代声发射检测仪是在1994至2003年，美国DW、美国PAC和德国Vallen将声发射采集仪全面数字化，声发射传感器接收到的信号经过放大器放大之后使用模数转换器转换为数字信号，然后用数字电路硬件提取特征参数。第四代声发射检测仪则是从2003年出现至今，美国PAC公司引入高速、高精度ADC和高速总线传输接口，除了特征参数外，还可以记录下全部的原始波形，为声发射数据分析方法的改进和提升创造了条件。

国内的声发射检测技术研究开始于1970年左右，处于我国断裂力学发展的高峰期，声发射检测技术被期望用于对裂纹开裂进行预报和定位[16]，中科院沈阳金属研究所、航天部621所、机械部合肥通用机械研究所、武汉大学等都对声发射技术进行了研究[17]。1980年开始，人们开始尝试采用声发射检测技术进行压力容器的检测，并先后从美国PAC公司和德国Vallen公司引进了声发射检测设备，在各地一些检测场合中取得了成功的应用实例。在国内的声发射检测仪器设备制造方面，目前的仪器设备生产商有声华兴业公司、鹏翔公司、科海恒生公司等，均能够自主制造出声发射传感器和基于PCIE/USB总线传输的声发射高速采集仪等，达到了世界先进水平。如今，声发射检测技术在我国的在很多行业和部门，例如机械、冶金、石化、化工、航空航天、船舶、铁道、建筑等，都得到了广泛的应用。

**1.3.2 基于声发射的损伤识别算法的研究现状**

早期的声发射损伤识别方法主要是基于特征参数分析法，其中的特征参数包括事件计数、振铃计数、幅度、能量、上升时间、持续时间等，一般通过硬件获取[18]。Dunegan H L．等发现了声发射的事件计数与金属材料中的应力强度因子之间的关系，提出可以用声发射事件计数来得到工程结构体的断裂程度[19]。Brindley B J.等研究了声发射信号的振铃计数原理，该参数可用于确定塑性形变情况下的塑性区大小和缺陷大小[20]。Curtis G J.发现可以通过检测声发射的能量分布来检测铝合金搭接接头的结合强度[21]。Dilipkumar D.等提出了使用声发射信号的幅度分布来识别出材料的断裂[22]。

由于单个参数对于声发射信号特征的反映能力比较局限，一些学者开始研究使用多个声发射参数共同反映声发射信号特征的方法。Shiwa M.等使用声发射信号中上升时间和持续时间这两个特征参数的比值来区分薄膜断裂的机制[23]。国内学者沈功阳等将声发射的计数、幅度、能量、时间等参数进行了特征映射，可以成功地识别出不同的声发射信号源[24]。李家林等使用BP-Hamming组合网将声发射的6种特征参数作为输入，实现了材料裂纹形成、扩展、断裂三个阶段的识别[25]。

从第四代声发射检测仪开始，出现了基于全波形分析法的损伤识别方法，包括模态分析法、频谱分析法等。模态分析法是基于牛顿力学对声发射信号进行建模，从而获得波形与声发射源之间的明确关系的一种方法[26]。该方法由Gorman M R.等在1991年提出，将裂纹扩展时的声发射信号波形分离为弯曲波和扩展波的叠加，通过滤除弯曲波分量使裂纹的定位精度提升了一个数量级[27]。Mckenna S.等使用模态声发射法分析了碳纤维复合材料在拉伸和弯曲试验中获得的声发射波形[28]。国内学者邓艾东等研究了转子的碰摩中声发射波中的模态特征,为判断碰摩状态及识别碰摩信号与噪声提供依据[29]。

频谱分析法则是将声发射的时域波形信号转化为频域信号，用以反映声发射信号的特征。Mao Y.等对声发射波形信号进行了FFT，通过研究激光焊接过程中的声发射频谱的幅值波动性，实现了对焊接过程的检测[30]。Tian Y.等在局部放电的检测中，将局部放电产生的声发射信号进行了SDFT后作为输入量输入到BP神经网络中，较好的实现了局部放电现象的识别[31]。刘源等对铝平板超高速撞击的声发射信号进行了小波变换，使用小波能量分数作为损伤模式识别的特征参数，识别出了成坑和穿孔两种损伤模式[32]。

**1.3.3 基于声发射的损伤定位算法的研究现状**

声发射的损伤定位算法主要还是基于到达时间差算法来实现。通过在结构体的不同位置布置一系列传感器，同步采集各个传感器接收到的声发射信号，分析信号，获取声发射信号到达各个传感器的时间差后，由已知的声发射信号的传播速度以及各传感器的位置参数，即可计算出声发射源所在的位置。

由于声发射信号在传播过程中具有频散效应，即不同频率的信号传播速度不同，原始信号的传播速度无法统一表示，因此不能直接计算原始信号的到达时间差来获取位置，需要对原始信号进行一定的处理，方能用于对声发射源的定位。处理方法包括模态分析法、滤波法、以及时频分析法。

顾海贝等使用原始信号到达不同传感器的时间差作为神经网络的输入向量，利用了神经网络的非线性映射功能，实现了复合板材料的声发射源定位[33]。

焦敬品等基于模态分析，通过对声发射信号的产生和传播过程进行建模，实现了管道突发声发射源的定位[34]。Toyama N.等应用小波变换分离出了碳纤维复合材料声发射信号中的S0和A0两种兰姆波，通过对两种兰姆波的速度进行测量，实现了声发射源的高精度定位[35]。

**1.4 本课题的研究意义及主要内容**

**1.4.1 本课题的研究意义**

在结构体健康监测中，使用声发射技术有以下几个优点：

1、无损性[36]：由于不需要对结构体施加额外的力，也不需要改变结构体的内部结构，使用声发射进行检测时，不会对结构体原有的性能造成任何影响。

2、实时性[37]：相较于其他无损检测的方法，声发射检测最显著的一个特点就是，该方法是监测材料在损伤时产生的信号，而不是材料对外部激励的响应或者损伤之后的状态，因此在损伤发生之初就可以立刻探测到，适用于实时动态监控。

3、整体性[38]：声发射相较于其他方法的另一个优点就是用一个或若干个固定安装在物体表面上的声发射传感器可以检验整个物体。进行缺陷定位时不需要传感器在被检物体表面扫描，因此在被检物体表面难以接触或不可能完全接触时，比如检测埋入地下的物体、形状复杂的构件、较大或较长的物体时，使用声发射检测会尤为方便。

在对斜拉索桥缆索的检测中，不能对原有的缆索的承载情况产生影响，对检测的实时性有着比较高的要求，被检缆索长度较长，且位于高空，因此本文使用声发射技术进行缆索断丝检测。

在声发射信号的采集分析方式上，虽然对声发射信号特征参数的采集简单而快速，但特征参数毕竟只是对声发射信号某个特征的描述，对声发射信号的整体特征分析能力是有限的[39]，在进行特征参数分析时，外部条件的变化很容易影响分析结果。近些年来，随着硬件条件的飞速发展，声发射采集设备的采集速度、传输速度、采集精度、数据存储空间均有了较大的提升，声发射信号的全波形采集得以实现。基于全波形采集的分析方法由于包含了原始信号的全部信息，在分析结果的精确度上得到了很大的提高，因此本文选择对声发射信号的全波形进行采集。由于声发射信号往往会具有很宽的频带分布，且信号的幅值有时可能会十分微小，为此需要研制出一种高速、高分辨率的声发射信号采集设备。

对于损伤识别和定位算法，本文采用基于时频变换的算法，时频变换可以做到在尽可能地保留信号的原始特征的情况下，有效地剔除干扰噪声的频率分量。

在现有的损伤识别方法当中，基于模态分析法的识别算法虽然准确率较高，但所建立的模型依赖于被测缆索的材料和具体结构，一旦检测条件发生变化，只能重新构建算法；基于频谱分析法的识别算法对于被测缆索的材料和具体结构的依赖性较低，但是现有算法中所利用的特征信息有限，更容易出现误识别的情况。为此需要提出一种兼顾适应能力和准确率的识别算法。

在现有的利用时频分析进行损伤定位的方法当中，由于短时傅里叶变换窗函数长度固定，受海森堡测不准原理影响较为严重，而对于小波变换和希尔伯特黄变换而言，全波形采集的数据量又过于大导致算法的执行速度过慢。为此需要选择一种兼顾计算速度和准确率的时频分析方法。

**1.4.2 本课题的主要研究内容**

本文选择使用S变换作为时频分析方法，提出利用损伤信号的时频谱构建自动编码器，将损伤识别的问题转化为一个二维图像单分类问题，提高了算法的适应能力和准确率。

本文对两路信号经过S变换后的得到的时频谱做了互相关分析。

**第2章 声发射传感器的工作原理**

**2.1 声发射传感器的工作原理**

**2.1.1 声发射传感器的工作原理**

声

**第3章 声发射全波形采集系统设计**

**3.1 硬件设计**

本章主要介绍了声发射全波形采集系统各部分的硬件电路设计和关键器件选型。硬件电路主要包括传感器供电电路、信号调理电路、FPGA及PCIe电路。

**3.1.1 传感器供电电路**

传感器

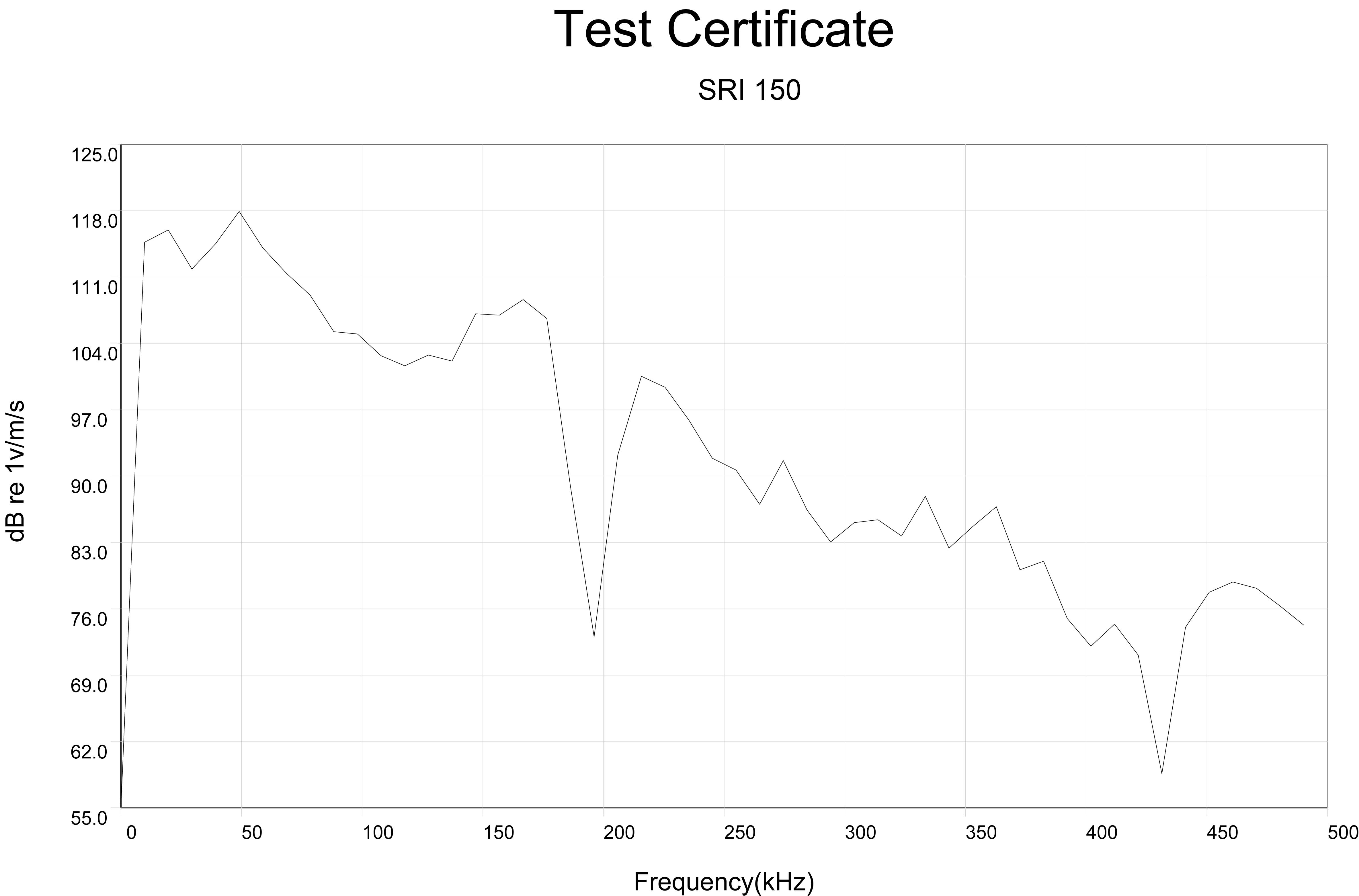


图4.1 SRI150型传感器灵敏度曲线

**3.1.2 信号调理电路**

为了尽可能减小噪声对分析结果的干扰，需要对传感器输出信号进行滤波。由于声发射信号本身频带分布较宽，为了避免信号失真，巴特沃斯滤波器以其良好的通带响应平坦性成为滤波器的合适之选。

n阶低通巴特沃斯滤波器表达式为：

n阶高通巴特沃斯滤波器表达式为：

在本系统中，滤波电路由一个四阶巴特沃斯高通滤波器和一个四阶巴特沃斯低通滤波器组成。其中，每个四阶巴特沃斯滤波器均由两个二阶巴特沃斯滤波器串联而成。所用二阶巴特沃斯滤波器的通用电路如图x所示：



图x 巴特沃斯滤波器通用电路结构

根据：

联立得到：

当需要进行高通滤波时，令：

则有：

令：

可化为巴特沃斯高通滤波器的标准形式，此时截止频率为：

当需要进行低通滤波时，令：

则有：

令：

可化为巴特沃斯低通滤波器的标准形式，此时截止频率为：

选择合适的阻容参数，最终设计滤波电路如图x所示，得到20k~400kHz的带通滤波器。

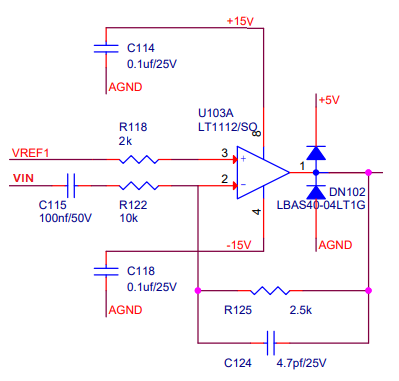


图3.2 二阶巴特沃斯高通滤波电路



图3.2 二阶巴特沃斯低通滤波电路

由于本系统所选模数转换器的输入范围为0~5V，因此为了将滤波后的信号范围调整为适合输入的信号范围，设计偏置和限幅电路如图x所示：



VREF1为AD9240提供的2.5V参考电压，VIN为滤波后的信号输入，电路中的C115起到隔绝直流参考电压的作用，双向二极管DN102进一步对输出电压进行0~5V的限幅。最终输入到模数转换器的信号值为VIN/4再加上2.5V的直流偏置。

所选用模数转换器为Analog Devices公司的AD9240，其主要参数如表x所示。

表x

……10MHz，满足香农采样定律。

**3.1.3 FPGA及PCIe电路**

所选FPGA的型号为XC6SLX45T，属于Xilinx Spartan 6系列，支持PCIe的IP核，其主要参数如表x所示。在本系统中使用了FPGA核心板，因此只需要进行供电接口和通讯接口的连接。

表 x

PCIe采用金手指的形式，其电路如图x所示



**3.2 软件设计**

系统软件整体数据流如图x所示：传感器输出信号经过滤波和偏置后，被AD9240转换为数字量，由FPGA内所编写的ad\_module模块通过14线并口进行读取，读取到的数据随后被放入FIFO中，所使用的xillybus开源硬核将把FIFO内的数据传送给xilinx官方提供的PCIe的IP核，通过其将数据发送到PCIe总线上，被驱动程序所读取。在linux系统下，用户通过打开并读取对应的设备文件，即可获取所采集的数据，并由上位机软件进行数据的分析和显示。



**3.2.1 PCIe总线原理**

声

**3.2.2 FPGA软件设计**

对AD9240的操作由FPGA内的ad\_module模块完成。包括提供AD9240工作的时钟信号、读取AD9240输出的数据、并将数据放入FIFO。





图x AD9240时序图

时钟信号是由FPGA内部的PLL锁相环模块来提供的10MHz的方波信号。根据图x的AD9240的时序图，为了防止读取时引脚电平正在发生变化导致读取出错，可在时钟信号的下降沿读取数据输出引脚的电平，得到AD9240输出的数据。由于xillybux在FPGA内和用户进行数据交换的接口为FIFO，将数据存入FIFO中，即可供xillybus进行取用。



FIFO的工作示意图如图x所示。其接口由数据输入、数据输出、输入时钟、输出时钟、输入使能、输出使能、满信号、空信号构成。其中，数据输出、输出时钟、输出使能由xillybus IP核进行控制；满信号和空信号则由FIFO本身提供。

从FIFO到PC机的数据流向如图x所示。在初始化完成后且FIFO非满时，将输入使能置位，ad\_module模块读取到输入使能置位，则会按照10M的输入时钟频率将数据持续放入FIFO中。当图中PC机的内存缓冲区有空闲时，FIFO内的数据就会被xillybus取走，并最终传输至PC机的内存中，由用户程序进行读取，使FIFO处于非满的状态。但如果PC机用户程序读取不及时，内存缓冲区将会被填满，FIFO则也会很快被存入的数据填满，导致输入使能置低，新采集到的数据无法存入而被丢弃。因此为了保证数据不丢失，PC机用户程序需要有很高的读取速度。



**3.2.3 PC机软件设计**

由于存储容量的限制，数据的存储不能持续进行，因此只有当信号电压值超过一定的门限时才会进行存储。而为了进行全波形采集，声发射信号到达门限时间点之前一段时间的信号也需要进行缓存。为了兼顾读取速度和波形的完整性，设计存储程序流程如图x所示。



为了尽可能提升程序的读取速度，图x的程序使用效率较高的C语言进行编写。

**第4章** **断丝识别及定位算法研究**

**4.1 识别算法研究**

**4.1.1 声发射信号的频谱分析**

声

**第5章 实验结果及分析**

**5.1** **实验装置**

**5.1.1 实物展示**

为

**总结与展望**

**总结**

随

**展望**

虽

1. 项海帆. 中国斜拉桥的发展前景[C] 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会年会. 1998.
2. 杨建喜. 混凝土斜拉桥换索工程施工控制的研究[D]. 东北林业大学, 2010.
3. 骆海强, 许凤旌. 桥料缆索疲劳断丝声发射监测[C]中国声发射学术研讨会. 2009.
4. 武芳. 基于漏磁原理的缆索断丝检测技术研究与实现[D]. 东南大学, 2014.
5. 钟小勇, 张小红. 便携式钢丝绳在线检测仪研究[J]. 仪表技术与传感器, 2012(3):24-26.
6. Jianxin C , Wei G . Study and development on detecting device of wire rope localized fault[C] World Congress on Intelligent Control & Automation. IEEE, 2002.
7. 林阳子, 武新军, 张宇峰, et al. 基于磁致伸缩技术的桥梁缆索损伤定位研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(6):109-112.
8. 陈慧, 姚恩涛, 田裕鹏. 基于X射线数字成像系统的缆索检测[J]. 无损检测, 2010(9):684-686.
9. 王平光. 桥梁拉索腐蚀损伤声发射监测及模式识别[D]. 2015.
10. Miinshion Huang，Liang Jiang，Peter K．Liaw el a1．，Using Acoustic Emission in Fatigue and Fracture Materials Research[J]，JOME，1998，1 1：50
11. Lysak M V. Development of the theory of acoustic emission by propagating cracks in terms of fracture mechanics[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 55(3):443-452.
12. 李孟源. 声发射检测及信号处理[M]. 科学出版社, 2010.
13. Ji H, Li Z. Experimental study on the relationship of kaiser and felicity effect in concrete material[J]. Applied Acoustics, 1997.
14. Net N. Acoustic Emission - Developments in PETROBRAS R&D Center in the Last Twenty Years[J]. E-journal of Nondestructive Testing(9).
15. Drouillard T F. A history of acoustic emission[J]. Journal of Acoustic Emission, 1996.
16. 耿荣生. 声发射技术发展现状——学会成立20周年回顾[J]. 无损检测, 1998(6):151-154.
17. 沈功田, 戴光, 刘时风. 中国声发射技术进展[C]// 中国声发射学术研讨会. 2004.
18. 吴占稳. 起重机的声发射源特性及识别方法研究[D]. 武汉理工大学, 2008.
19. Dunegan H L, Harris D O, Tatro C A. Fracture analysis by use of acoustic emission ☆[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1968, 1(1):105,IN23,111-110,IN24,122.
20. Brindley B J, Holt J, Palmer I G. Acoustic emission — 3 : The use of ring-down counting[J]. Non-Destructive Testing, 1973, 6(6):299-306.
21. Curtis G J. Acoustic emission energy relates to bond strength [J]. Non-Destructive Testing, 1975, 8(5):249-257.
22. Dilipkumar D, Gudimetla V S R, Wood W E. Amplitude-distribution analysis of acoustic emission[J]. Experimental Mechanics, 1979, 19(12):438-443.
23. M. SHIWA, T. KISHI, T. ISHIDA. ACOUSTIC EMISSION EVALUATION OF ARAMID REINFORCED ALUMINUM LAMINATE[J]. Nondestructive Testing & Evaluation, 1990, 5(4):249-261.
24. 沈功阳, 段庆儒, 李邦宪,等. 压力容器声发射信号的模式识别分析[C]// 全国声发射学术研讨会. 1999.
25. 李家林, 董云朝, 马羽宽. 声发射源特性的神经网络模式识别研究[J]. 无损检测, 2001, 23(6):231-233.
26. 陈积懋, 张颖. 模态声发射-无损检测诊断新工具[C]// '2000全国设备诊断技术学术交流会. 2000.
27. Gorman M R, Ziola S M. Plate waves produced by transverse matrix cracking[J]. Ultrasonics, 1991, 29(3):245-251.
28. Mckenna S, Eatock M. Modal analysis of acoustic emission signal from CFRP laminates[J]. Ndt & E International, 1999, 32(6):311-322.
29. 邓艾东, 童航, 张如洋,等. 基于模态分析的转子碰摩声发射特征[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(6):1232-1237.
30. Mao Y, Kinsman G, Duley W W. Real‐Time Fast Fourier Transform Analysis of Acoustic Emission during CO2 Laser Welding of Materials[J]. Journal of Laser Applications, 1993, 5:2/3(2).
31. Tian Y, Lewin P L, Davies A E, et al. Application of acoustic emission techniques and artificial neural networks to partial discharge classification[C]// Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. IEEE Xplore, 2002:119-123.
32. 刘源, 庞宝君. 基于贝叶斯正则化BP神经网络的铝平板超高速撞击损伤模式识别[J]. 振动与冲击, 2016, 35(12):22-27.
33. 顾海贝, 刘武刚, 孙飞,等. 基于神经网络算法的复合材料板声发射源定位[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(1):49-52.
34. 焦敬品, 吴斌, 何存富,等. 基于小波变换和模态分析的管道突发声发射源定位技术研究[C]// 中国声发射学术研讨会. 2004.
35. Toyama N, Koo J H, Oishi R, et al. Two-dimensional AE source location with two sensors in thin CFRP plates[J]. Journal of Materials Science Letters, 2001, 20(19):1823-1825.
36. Holroyd T J. Acoustic Emission — An NDT Technique Evolving into a Versatile Industrial Monitoring Method[J]. Measurement and Control -London- Institute of Measurement and Control-, 1997, 30(5):141-145.
37. Inasaki I. Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes[J]. Ultrasonics, 1998, 36(1-5):273-281.
38. 张昊, 杨京, 程建春,等. 利用支持向量机的磨削声发射监测技术[C]// 中国声学学会青年学术会议. 2013:153-154.
39. 纪洪广, 张天森, 张志勇,等. 无损检测中常用声发射参数的分析与评价[J]. 无损检测, 2001, 23(7):289-291.

肖瑛, 冯长建. 组合窗函数的短时傅里叶变换时频表示方法[J]. 探测与控制学报, 2010, 32(3):43-47.

吴耀军, 史习智. 小波变换时频特性的信号识别[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(8):1055-1058.

Daubechies I. The Wavelet Transform. Time-Frequency Localisation and Signal Analysis[J]. Journal of Renewable & Sustainable Energy, 2015, 36(5):961-1005.

Manevitz L M, Yousef M. One-class svms for document classification[J]. Journal of Machine Learning Research, 2002, 2(1):139-154.

Manevitz L, Yousef M. One-class document classification via Neural Networks[M]. Elsevier Science Publishers B. V. 2007.