上海交通大学硕士学位论文

基于频域构造时间序列分析的电源数据异常检测

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 硕士研究生 | ： |  |
| 学号 | ： |  |
| 导 师 | ： | 祝永新教授 |
| 申请学位 | ： | 工学硕士 |
| 学科 | ： | 集成电路工程 |
| 所 在 单 位 | ： | 电子信息与电气工程学院 |
| 答 辩 日 期 | ： | 2020年1月 |
| 授予学位单位 | ： | 上海交通大学 |

Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University for the Degree of Master

↑

（Times New Roman 小2号字）

DISSERTATION TEMPLATE FOR MASTER DEGREE OF ENGINEERING IN

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

↑

（Times New Roman 2号字加粗，题目太长时可用小2号字）

|  |  |
| --- | --- |
| Candidate： | □□□ |
| Student ID: | □□□□□□□□□□ |
| Supervisor： | Prof.□□□ |
| Assistant Supervisor: | Prof. |
| Academic Degree Applied for： | Master of Engineering |
| Speciality： | Circuits and System |
| Affiliation： | School of Microelectronics |
| Date of Defence： | Jan, 2010 |
| Degree-Conferring-Institution： | Shanghai Jiao Tong University |

↑

（Times New Roman 4号字）

**上海交通大学**

**学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文《×××》，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

**上海交通大学**

**学位论文版权使用授权书**

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

**保密**□，在 年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

**不保密**□。

（请在以上方框内打“**√**”）

学位论文作者签名： 指导教师签名：

日期： 年 月 日 日期： 年 月 日

基于频域构造时间序列分析的电源数据异常检测

摘 要

随着当今社会的不断发展，摄像头设备时时刻刻在记录和监督着社会的平稳发展。在目前备受关注的智慧城市中，智能监控也逐渐成为当前学术界和工业界研究的热点问题之一。随着人脸识别技术的逐渐推广，行人重识别技术因为其广泛的应用场景和研究意义而被大量学者和机构研究。

行人重识别在智慧监控和城市安全等领域有很大潜力。随着深度学习算法的迭代和优化，以及很多行人重识别相关的大规模公开数据集的出现，目前在可见光领域镜头下的行人重识别已经达到比较高的精度。然而相对于白天，夜间监控只能依靠红外摄像头来获取比较清晰的图像。事实上，红外监控在城市安全和室内监控等方面起着很大的作用。但是目前用于夜间监控的红外-可见光跨模态行人重识别的相关研究比较少，大多存在难以解决红外和可见光图像间跨模态差异的问题，在此领域依旧有很大的提升空间。针对红外-可见光跨模态行人重识别的识别精度差的问题，本文主要做出了以下几点研究：

首先，现有工作主要集中在使用两个模型分别提取红外和可见光行人的特征，然后通过共享权重的全连接层，以及相同的loss回归层进行分类和度量学习。然而通过实验和分析，我们发现使用两个模型分别提取两个模态的特征，对特征的拟合效果不如使用共享权重的模型进行特征提取。相对于文本-图像或文本-音频等跨模态识别，红外和可见光在二维上的相似度比较高，因此转成一维特征值后再进行对齐效果不够理想。本文提出了一个基于残差网络和垂直等分的跨模态行人重识别模型，该模型是一个简单有效地端到端的跨模态行人重识别模型，通过更关注模型的细粒度特征，在基本不增加模型参数量的前提下提高了精度。

其次，为了进一步减小红外和可见光两个模态的特征差异性，本文使用基于欧氏距离的均方差损失约束特征，同时提出多层损失约束函数，增强模型在细粒度特征提取时对共性特征的提取。同时，本文使用三角学习率进一步推动模型收敛。

最后，虽然当前跨模态行人重识别的公开数据集从几千张图片扩充到了几万张图片，但是相对于人脸识别的千万张图片的数据集，跨模态行人重识别数据集依然偏小，因此本文通过随机擦除图片上的部分区域，来对数据集进行进一步扩增，增强模型的鲁棒性。

实验表明，我们的模型在公开数据集SYSU-MM01和RegDB上分别达到了。。。。。。。

关键词（四号黑体）：3-5个关键词，按外延由大到小排列，建议采用EI标准检索词，四号宋体。学位论文、论文格式、规范化、模板

DISSERTATION TEMPLATE FOR MASTER DEGREE OF ENGINEERING IN SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

ABSTRACT

英文题目三号居中，全大写，每行左右两边至少留五个字符空格，Times New Roman加粗，段前段后0.7厘米。

“ABSTRACT”三号居中，Times New Roman加粗，段前段后0厘米。

ABSTRACT与摘要内容之间空一行。

摘要内容每段开头留四个字符空格，Times New Roman，四号字，1.25倍行距。

Shanghai Jiao Tong University (SJTU) is a key university in China. SJTU was founded in 1896. It is one of the oldest universities in China. The University has nurtured large numbers of outstanding figures include JIANG Zemin, DING Guangen, QIAN Xuesen, Wu Wenjun, WANG An, etc.

SJTU has beautiful campuses, Bao Zhaolong Library, Various laboratories. It has been actively involved in international academic exchange programs. It is the center of CERNet in east China region, through computer networks, SJTU has faster and closer connection with the world.

摘要内容与关键字之间空两行。

KEY WORDS: SJTU, key university, outstanding figure, beautiful campus

目 录

↑

（黑体3号字，段前0.7厘米，段后0；目录题目与条目之间空两行）

[第一章 正文文字格式 **错误!未定义书签。**](#_Toc251590708)

[1.1 论文正文 **错误!未定义书签。**](#_Toc251590709)

[1.2 字数要求 **错误!未定义书签。**](#_Toc251590710)

[1.2.1 硕士论文字数要求 3](#_Toc251590711)

[1.2.2 博士论文字数要求 3](#_Toc251590712)

[1.3 论文的主要内容与章节安排 3](#_Toc251590713)

[第二章 图表、公式格式 3](#_Toc251590714)

[2.1 图表格式 3](#_Toc251590715)

[2.2 公式格式 3](#_Toc251590716)

[2.3 引用说明 3](#_Toc251590717)

[2.4 本章小结 3](#_Toc251590718)

[第三章 其他格式要求 3](#_Toc251590719)

[3.1 页码 3](#_Toc251590720)

[3.2 页眉 3](#_Toc251590721)

[3.3 目录 3](#_Toc251590722)

[3.4 正文的层次安排 3](#_Toc251590723)

[3.5 打印要求 3](#_Toc251590724)

[3.5.1 页面设置 3](#_Toc251590725)

[3.5.2 字体 3](#_Toc251590726)

[3.5.3 字号 3](#_Toc251590727)

[第四章 结束语 3](#_Toc251590728)

[4.1 主要工作与创新点 3](#_Toc251590729)

[4.2 后续研究工作 3](#_Toc251590730)

[参 考 文 献 3](#_Toc251590731)

[附录**1** 3](#_Toc251590732)

[致 谢 3](#_Toc251590733)

[攻读硕士学位期间已发表或录用的论文 3](#_Toc251590734)

图 录

↑

（黑体3号字，段前0.7厘米，段后0；目录题目与条目之间空两行）

[图2-1论文页面设置图 3](#_Toc251150896)

[图2-2内热源沿径向的分布 3](#_Toc251150897)

表 录

↑

（黑体3号字，段前0.7厘米，段后0；目录题目与条目之间空两行）

[表2-1高频感应加热的基本参数 3](#_Toc251151029)

[表3-1论文的层次代号与说明 3](#_Toc251151065)

# 绪论

## 研究背景

### 商飞C919民航客机

在二十一世纪的今天，我国的经济发展势头迅猛，已经进入了经济发展的新时代，不再是改革开放初期百废待兴的情形，而是进入了改革的深水区。在这种形势下，为了进一步增强综合国力，提高国际竞争力，我国亟需完成的任务之一便是进行产业升级。当前我国的经济主体大部分仍是轻工业、加工业和小商品制造业等，这些产业利润低层次低，且缺乏国际影响力。相对之下，高科技产业、高端制造业等产业利润巨大且不可替代性强，具有很高的战略地位，掌握这些核心科技与技术能够使我国拥有更多的国际话语权，正是当今我国需要大力扶持的产业。航空制造业正是这种高层次产业之一。



图1-1 中国内地民用客机制造商比例分布图

Fig.1-1 Proportion distribution of civil airliner manufacturers in mainland China

研制和发展大型客机是建设创新型国家，提高我国自主创新能力和增强国家核心竞争力的重大战略举措。在经济全球化的背景下，世界各国的经济贸易往来非常频繁，这对远距离跨国、跨洋航空运输行业是十分有利的，即使在国内，远途出行的情况下，消费者也往往倾向于选择乘坐民航飞机出行，因此，民航飞机制造公司的订单量逐年递增。此外，大型民航飞机制造产业非常依赖国家的工业水平与高新科学技术，一架自主研发的大型民航客机不仅仅是一个国家轻重工业生产能力与高科技研发水平凝聚的结晶，是一个国家综合国力的体现，更是可以振兴国家的航空制造产业，为国家带来巨大的利润、外汇，增强综合国力，提高国家人民的生活水平。但是，由于大型民航飞机制造的技术壁垒存在，不管是国内市场还是国外市场，大型民航飞机的主要生产商均是空客公司与波音公司。如图1-1所示，空客与波音这两家外国公司垄断了国内的大型民航客机几乎95%的生产订单，所以为了不再每年耗费大量财力购买外国民航客机，也为了在大型民航客机制造领域不再受制于人，我国自主研发生产的一款大型民航客机C919就在万众瞩目中应运而生了，如图1-2所示。



图1-2 商飞C919民航客机

Fig.1-2 COMAC C919 civil airliner

C919大型民航客机由中国商用飞机有限责任公司（以下简称商飞）设计研发并生产测试。C919为国产中短程干线客机，座位数量为168座（基本型布局），拥有长达4075公里的标准航程，航程最大可达到5555公里，飞行时间可超过9万个小时，与空客A320、波音737属于同一级别的飞机。自主研发C919大型民航客机项目可以带来很大的收益，从政治的角度来说，可以提升我国的综合国力，提升我国在国际上的话语权等等；从经济的角度来说，可以节省采购进口外国公司民航客机的资金，节省巨量的外汇，还可以带动发展国内的民航客机产业链，创造大量的就业机会，拉动地区经济发展等等；从技术的角度来说，自主研发成功C919大型民航客机，实现从零到一的突破，这给国内航空行业内的科研人员、工程师、学者带来了许多宝贵的实践机会，可以启动大量基于民航客机各个方面的研究项目，并实际投入测试评估，以提升C919大型民航客机的综合性能。

### 大数据与机器学习

当今社会每天每时每刻都在产生巨量的信息与数据，这些巨量数据的量级一般是TB、PB级，在某些场景下甚至会出现EB级的数据量。至于这些巨量数据的来源则是分布在各行各业，它们以各种各样的格式存储在硬盘中，这些巨量数据就是大数据。大数据是互联网行业里的石油，在各行各业内部有着重要的战略地位，公司内部的大数据一般都会受到保护严禁外泄。这是因为在这些巨量数据里隐藏着的是同样巨量且宝贵的信息，上到天体运行规律，下到消费者消费习惯，大数据里蕴含的信息量无法用只言片语概括。但是在几十年前，受限于计算机的算力水平与数字通信传输能力，以及缺乏高效的分析算法，人们没有能力与条件处理分析数据量多至TB、PB级的大数据，更不用说挖掘出这些巨量数据中隐藏的宝贵信息。那个时期研究人员往往需要花费几周甚至月余的时间，使用经典数学统计方法分析这些巨量数据。这种情形直到通信与计算硬件水平趋于成熟的今天才得以改善，有了硬件的算力与传输支持，同时各种高效的机器学习算法如雨后春笋般涌现，大数据这才渐渐崭露头角，为人们的生产与生活增添极大的助力。

正如上文所说，只有能够处理大数据的硬件还不够，还需要合适且高效的算法支持才可以，近年来火热的机器学习领域中正存在着许多适合处理大数据的分析算法。机器学习是一门多领域交叉的学科，涉及概率论、统计学、逼近论、凸分析、算法复杂度理论等多门学科。机器学习是研究如何训练计算机使其能够模拟或者重现人类的学习行为，从而获取新的知识或技能，进而能够脱离人类达到能够自我不断优化所学知识的程度。大多数机器学习算法是基于统计和经验来训练计算机如何学习和分析，如果用于训练的数据量足够多，理论上可以得到一个在该数据领域具有很强学习与分析能力的模型，而且将分析巨量数据的任务交给算力强大的计算机来完成是十分适合的，可以收获很高的效率。因此，许多机器学习算法与大数据是相辅相成的一种关系。

C919大型民航客机的机载交流发电机电源在飞行过程中会产生TB乃至PB级的数据量，从这些电源数据中我们可以获得许多有价值的信息，例如飞机交流电源的各种工作状态就可以在这些电源信号数据中体现，通过有效的机器学习算法去分析这些巨量的电源信号数据，我们可以建立一种对机载交流发电机电源可能产生的异常的预警机制，从而对C919大型民航客机的飞行安全做出保障。

## 研究现状分析

本次课题依托于商飞C919大型民航客机的项目，以保障机载交流电源工作状态安全稳定为目的，聚焦于C919大型民航客机机载发电机电源品质参数的研究，采用大数据机器学习的方法来实现对机载发电机电源品质参数的实时异常检测与分析。

本次课题主要关注机载交流电源信号中频域的品质参数，即对电源信号的基波与谐波含量进行异常检测。在信号处理分析中，频域参数不同于时域参数，难以采用传统模拟电路直接检测分析，需要先进行时频转换后再进行分析处理。而且在异常检测的场景下，不仅仅需要获取频域参数，还需要获取这些参数对应的时域中的信息，因此，在信号的异常检测场景下，分析处理的对象一般是信号的时频数据。如图1-3所示即为时频数据的三维图像，从中既可以体现信号的时域特征，也可以获取其频域中的信息，非常适合异常检测的应用场景。

当前一般使用的是基于短时傅里叶变换（Short-Time Fourier Transform，STFT）的异常检测方法，这种方法虽然可以有效地分析电源信号中的频域参数，但存在着一些问题。

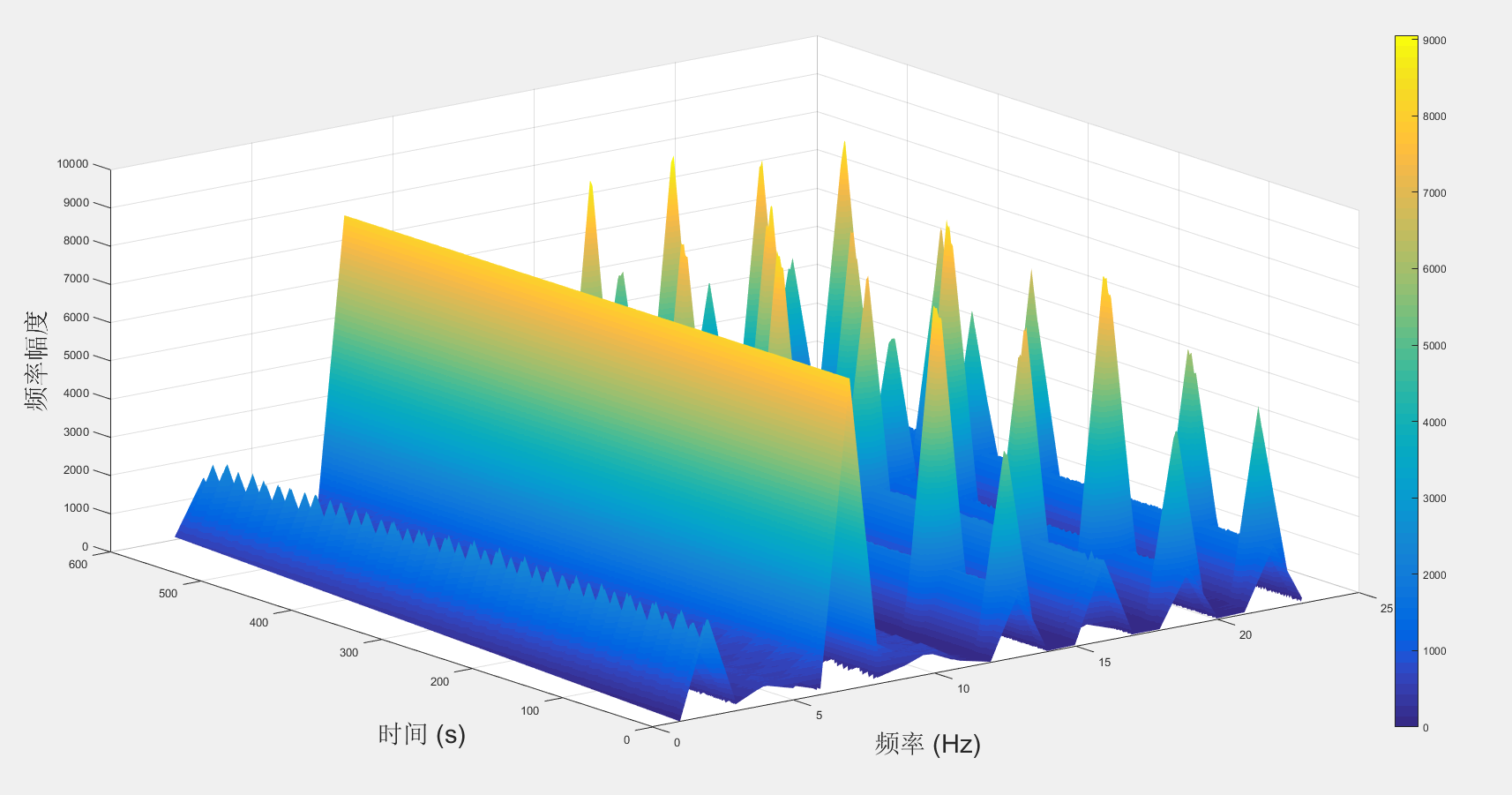


图1-3 三维时频分布图

Fig.1-3 3D time-frequency distribution map

首先就是这种方法的处理分析结果时效性非常差，它属于“事后”的分析检测，即其结果必定延迟于信号实际发生的时刻。因为它是对采样后的信号帧进行检测，再根据评价标准判断信号是否存在异常情况，这一检测机制就决定了其检测分析结果一定存在延迟，即使缩小信号帧的长度，延迟依然存在。我们知道，信息是具有时效性的，过期的信息即使再准确也一文不值，尤其是在涉及安全保障的异常检测场景下，检测结果的时效性更是需要得到保证，这个问题也是基于STFT异常检测方法的天生缺陷。而且从另一个角度来看，信号帧的长度不能过小，否则会导致时频转换后的频率分辨率过低，无法有效地分析频域参数。

其次是这种方法对电源信号数据的利用率很低，并没有发挥海量电源信号数据的真正价值，它只是对单一信号帧进行异常检测，并没有在一系列信号帧的检测结果之间建立关联。然而在实际生产环境中，电源大部分异常的出现并不是毫无征兆的，这些信号帧之间可能存在有价值的关联信息，如果能够加以利用，这对于电源信号异常检测场景将会是很有意义的。

基于以上两点当前异常检测方法的不足之处，本次研究提出了一种新的基于STFT与长短期记忆（Long Short Term Memory，LSTM）递归神经网络的实时异常检测方法。这种方法可以有效地解决当前基于STFT异常检测方法的检测结果不具备时效性的问题，同时也能够充分利用时频数据中隐藏的时域关联信息来提升检测结果的准确度。需要说明的是，这种基于STFT与LSTM的组合模型并不是本次研究首先提出的，将传统的STFT方法与最近表现良好的LSTM神经网络模型相结合，来用以处理时频数据的思路与【**文献们，标记参考文献**】不谋而合。但值得注意的是本次研究的应用场景是机载电源信号的异常检测，这与【**文献们**】研究声音信号的分类有着本质的区别，无论从研究目标和研究对象适用范围的角度，还是具体设计模型的结构来说，本次研究与【**文献们**】均有着很大的差异。

## 研究内容

### 课题研究目标

针对上文提出当前电源信号频域参数异常检测方法的不足之处，本次课题确定研究目标是设计并实现一种能够高速实时处理机载交流发电机电源信号数据的异常检测方法与模型，实现对电源品质参数进行高效、实时、可靠预测分析的功能，达到能够预警潜在故障、确保大型民航客机机载电气设备运行稳定与安全的效果。同时通过大数据机器学习算法手段，深入挖掘海量机载交流电源信号数据中隐藏的信息，建立机载交流电源异常工作状态知识库，解决电源数据频域相关参数的数据处理时间长、分析手段少、异常状态难定位等关键问题，为大型民航客机飞行过程提供有效的实时数据分析与异常定位工具。

本次课题在工程上的主要实现目标是完成依托项目总体平台中的一个模块，即机载交流电源信号处理分析实验平台中的电源品质参数实时异常检测模块的设计与实现，整体电源信号处理分析实验平台的设计框图如图1-4所示。



图1-4项目总体平台示意图

Fig.1-4 Schematic diagram of the overall platform of the project

### 课题研究内容

在介绍本次课题研究的主要内容之前，需要明确本次研究的对象及其适用范围。在上文对研究现状的分析中提到，本次研究的主要对象是机载交流电源的品质参数，且电源参数可分为时域与频域两类，时域参数包括电压与电流的幅值等，频域参数包括基波的偏移量与各次谐波的含量等等。看似需要检测的参数很多，但实际上，本次研究只需要关注频域中的参数即可，因为通过对频域中参数的检测，既可以获取电源信号的频域信息，又可以获取到其时域中的信息。比如时域中电压与电流的幅值发生变化，就会体现在频域中信号基波的频谱幅度值上，甚至时域中直流分量的变化也会在频谱中体现。因此，可以缩小研究对象的范围，将本次研究对象的电源品质参数简化到电源频域参数，具体参数主要是信号基波与各次谐波的频谱幅度值。

在明确了本次研究对象及研究范围之后，基于上文提出的课题研究目标，本次课题的主要研究内容是面向机载电源信号频域中频率参数的实时预测与异常检测方法，设计并实现一种基于短时傅里叶变换（STFT）与长短期记忆（LSTM）递归神经网络的频域中频率参数预测分析模型，对机载交流电源信号频域数据中基波及其各次谐波的频谱幅度值进行实时的预测与分析，实现对机载交流电源工作状态的监控。本次研究的具体内容主要分为四个部分。

[1] 设计与实现基于STFT与LSTM神经网络的实时异常检测方法与模型：从当前电源信号频域参数异常检测方法的不足之处出发，分析STFT与LSTM神经网络模型各自的优势与劣势，研究设计将二者相结合从而取长补短的模型结构，依据设计思想完成模型各个部分的具体实现。

[2] 实验验证基于STFT与LSTM神经网络实时异常检测模型的性能：实验验证超前不同单位时间预测分析模型的性能表现及其差异，然后从预测准确度、运行耗时等方面的实验结果说明本文设计的基于STFT与LSTM神经网络的实时异常检测模型，相较于当前基于STFT的异常检测方法的优越性。

[3] 时频处理模块的优化研究：针对STFT算法存在的不足之处，分析小波变换算法的优劣之处，研究小波变换替代STFT作为时频处理模块算法的可行性，同时实验验证小波变换与STFT在不同场景下的性能表现，最后分析在本次课题场景下选择STFT算法的原因。

[4] 时间序列实时预测模块的优化研究：一方面考虑优化LSTM神经网络模型预测结果准确度的方法，通过对模型输入数据的维度重构，使用多步长的LSTM神经网络模型来优化实验预测结果。另一方面研究分析其他基于预测的时间序列检测算法与模型，在本次课题的场景下进行实验验证并与LSTM神经网络模型对比。

### 课题研究意义

机载交流电源是飞机电源系统中最重要的部件，它的工作状态直接影响到整个飞机机载用电设备的运行状况和飞机自身的飞行安全。因此，研究飞机交流电源信号的异常检测技术具有十分重要的意义。本次研究的主要内容是C919大型民航客机机载交流发电机电源信号频域品质参数的异常检测，频域品质参数主要是基波与各次谐波的频谱幅度值含量，接下来简单介绍这两种品质参数的意义与重要性。

电源信号中的基波频率是机载发电机电源的主频率，也是机载电气设备用电的主频率，保证其值稳定的重要性不言而喻。飞机交流发电机电源的谐波属于噪声的一种，谐波含量应当维持在一个很小范围内，单次谐波含量应当小于基波标准频谱幅度值的4%。目前的机载交流电源普遍采用三相交流发电机供电，对于平衡的三相发电机而言，偶次谐波可以被消除，但是仍然存在若干含量较高的奇次谐波。如果基波频率值发生较大偏差，或者谐波含量超出其标准范围，就会影响到飞机交流发电机的电源质量，严重时会导致机载交流电源工作状态异常，电源输出异常信号，进而导致其他机载用电设备的工作异常，这对于大型民航客机来说后果是十分严重的。因此，研究一种面向机载交流电源信号频域品质参数的高效实时异常检测方法是十分必要的。

本次研究获得了许多成果，对异常检测相关的科学研究和工程生产也有着许多贡献。本次研究提出了一种面向频域频率参数的实时预测与异常检测方法，同时设计实现了一种基于STFT与LSTM神经网络的频域频率参数预测分析模型。经过本次研究对该模型进行理论分析与实验验证，最终的实验结果表明了该模型相较于当前其他异常检测模型具有较大的性能提升与优越性，优势主要有以下几点：

[1] 该模型的预测结果具有高可靠性。该模型在频域方面对基波与谐波等频率参数的预测结果有着较高的准确率，可靠性较高。

[2] 该模型的分析结果具有很高的时效性。由于采用预测的方式进行异常检测，从而能够做到真正的实时甚至超前的关键参数预测分析，有效地保证了异常检测结果的时效性，在对实时性要求较高的场景下具有很大的实用价值。



图1-5异常检测正反馈机制

Fig.1-5 Positive feedback mechanism for anomaly detection

[3] 该模型可以做到具有自优化的正反馈机制。所用到的深度学习神经网络结构，结合本次课题整体实验平台中的机载交流电源异常工作状态知识库，可以最大化地利用生产环境中采集到得海量机载交流电源原始信号数据，形成如图1-5所示的正反馈机制，从而使模型的性能表现越用越好。

[4] 该模型具有较强的泛化能力，可以推广应用在很多场景。该模型的适用范围不仅仅是本次课题所用的机载交流电源信号数据，大多数涉及时频域信号分析场景下的时频数据均能够适用，具有较强的泛化能力。

总的来说，本次研究提出并实现的基于STFT与LSTM神经网络的异常检测模型具有高可靠性、高时效性、正反馈自优化、泛化能力强等优越之处。

## 论文章节及内容安排

根据课题研究内容，将论文分为六个章节，其结构安排如下。

第一章为绪论。本章节首先介绍了本次研究机载交流电源信号频域品质参数异常检测的项目背景，介绍了我国自主研发C919大型民航客机的重要战略地位，以及大数据与机器学习相关的概念与技术特点，引出了本次研究的主要对象。接下来，通过分析阐述当前相关技术的研究现状，继而明确了本次研究的技术手段与主要目标。然后又介绍了本次研究的四点主要工作内容，以及本次研究的意义与贡献点。最后，阐述了本文的行文逻辑和组织结构，为下文研究问题求解做好铺垫。

（**TUDO**）

第二章为本次研究设计模型的理论基础介绍。按照设计模型的结构顺序，首先介绍了时域频域转换相关的理论基础，主要是快速傅里叶变换算法的运算原理与优势。接下来介绍了基础的循环神经网络原理与结构，然后引出对其变种优化结构长短期记忆模型（LSTM）的阐述，详细介绍了LSTM的内部单元结构与工作原理，以及其关键参数代表的含义。

第三章为本次研究提出模型的设计过程与设计思想。本章节首先介绍了电源信号频域品质参数的评价标准，然后详细介绍了当前广泛使用的阈值检测法，分析了其不能实时分析的不足之处。接下来从阈值检测法的这一痛点出发，以北京空气质量参数预测课题为例，详细阐述了基于LSTM的时间序列预测方法及其原理。然后顺延以上的分析思路，按照模型的结构顺序，详细介绍了本次研究提出模型的设计思想与该模型的具体结构。

第四章为对本次研究设计实现模型的实验验证及评估。本章节按照模型结构顺序，依次给出实验结果并作分析，并对最终的电源信号频域品质参数预测结果进行验证分析，评估本次研究设计实现模型的性能。

第五章为对比实验结果与分析。

第六章为结束语的总结与展望。总结了全文的主要的研究内容与创新点，并为后续深入研究提供思路与方向。

# 理论基础

本章主要内容是对本次研究理论基础的介绍与说明。在进行正式的研究工作之前，深入理解研究中涉及到的重要理论或模型的基本原理是十分有必要的。对相关理论基础进行底层原理程度的掌握，不仅仅是研究实验结果正确可信的基本保证，同时也是研究工作能否深入拓展的关键所在。因此，本章将对基于短时傅里叶变换与长短期记忆神经网络的异常检测方法中，涉及到的主要理论知识进行详细的阐述与分析。

## 快速傅里叶变换

傅里叶变换是研究时频转换问题的核心，通过它能把信号从时间域变换到频率域，进而研究信号的频谱结构与变化规律。对于数字信号而言，离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform， DFT）是数字信号分析的基本方法，是数字信号分析与处理中的一种重要变换。有限长信号序列x(n)的N点DFT为：

考虑x(n)为复数序列的一般情况，对某个值k，直接按照上式计算X(k)的一个值需要N次复数乘法与次复数加法，因此，计算X(k)的所有N个值，一共需要次的复数乘法运算与次的复数加法运算，当N的值足够大时，可以近似为，可见，DFT的乘法与加法运算次数均为。当N值较大时，DFT的总运算量将会相当大，这会极大地增加数字信号处理与分析的耗时。

在这种情形下，快速傅里叶变换（Fast Fourier Transform， FFT）算法应运而生，本文主要介绍基2FFT算法。基2FFT算法主要分为两类：时域抽取法FFT（Decimation-In-Time FFT， DIT-FFT）与频域抽取法FFT（Decimation-In-Frequency FFT， DIF-FFT）。

这里对时域抽取法FFT作简单介绍。DIT-FFT算法的核心思想是将DFT的原始计算公式【**DFT计算公式编号**】稍作变换，将式中的偶数项与奇数项分别提取出来，构造为两个新的多项式为与，则原始DFT计算公式变为：

其中与分别为与的点DFT，即：

由于与均以为周期，且，因此X(k)又可表示为：

这样，就将N点DFT分解为两个点DFT和【**上面最近的公式编号**】的运算。其中公式【**上面最近的公式编号**】的运算又被称为蝶形运算，蝶形运算符号如图2-1所示。



图2-1 蝶形运算符号

Fig.2-1 Butterfly symbol

由图2-1可见，完成一次蝶形运算需要进行一次复数乘法运算与两次复数加法运算。经过上述的一次奇偶抽取分解后，N点DFT的运算图如图2-2所示：



图2-2 8点DFT一次时域抽取分解运算流图

Fig.2-2 8-point DFT once time domain extraction and decomposition operation

由图可见，经过一次分解后，计算一个N点DFT共需要计算两个N/2点的DFT与N/2个蝶形运算，且如果当前N/2 > 2时还可以继续进行奇偶抽取分解的操作，以进一步缩减计算量。以8点FFT为例，其完整运算流程图如图2-3所示。



图2-3 8点DIT-FFT运算流图

Fig.2-3 8-point DIT-FFT operation flow graph

分析清楚FFT的计算过程后，就可以计算出N点FFT所需要的计算量。当时，一共有M级奇偶抽取分解操作，每一级都由N/2个蝶形运算构成，即每一级需要N/2个复数乘法运算与N个复数加法运算。因此N点FFT总运算量中复数乘法次数为：

复数加法次数为：

由此可知，N点FFT的复数乘法运算量与N点DFT的复数乘法运算量相比如下：

由上式可知，当N的值越大时，FFT的计算量相较于DFT的计算量会越发显著地减小，FFT的优势也越大。例如，当N=1024时，DFT的复数乘法运算次数近似为FFT复数乘法运算次数的205倍，可见FFT对DFT的改进效果是非常明显的，极大地缩减了进行傅里叶变换所需的计算量。

## 短时傅里叶变换

快速傅里叶变换算法是解决时频转换问题的重要数学工具，但是它仅仅适用于过程平稳的非时变信号分析，只能够分析信号的频域内容，对于非平稳的时变信号缺乏有效的时频域局部分析能力。为了解决傅里叶变换的这一缺陷，Dennis Gabor提出了基于加窗函数的短时傅里叶变换（Short Time Fourier Transform，STFT）方法【**可加参考文献**】。短时傅里叶变换是经典的线性时频分析方法，其基本思想是将整体不平稳的时域信号拆分开，看作是一系列近似平稳的信号帧的叠加，然后对每个信号帧分别做快速傅里叶变换，由此得到兼顾频域与时域信息的时频信号数据。其中拆分为信号帧的过程即是通过加窗函数实现的。

给定离散数字信号x(n)，在时域中用窗函数g(n)截取x(n)的局部信号帧，然后对截取下来的信号帧进行傅里叶变换，通过移动窗函数g(n)的中心位置，来得到不同时刻x(n)的频域信息。STFT的计算公式如下：

公式【**上式编号**】中窗函数g(n)的宽度尺寸L决定了STFT方法处理结果的频率分辨率。此处需要注意的是，在一次完整的STFT计算中，窗函数的种类与尺寸需要在计算之前确定，且确定之后一定不会发生改变，即截取信号帧的宽度尺寸是等长且固定的。可供选择的窗函数种类有很多，其中比较常见的有矩形（Rectangular）窗与海明（Hamming）窗等等。矩形窗是最简单的窗函数，也是被使用最多的窗函数，其窗函数图像如图2-4所示。



图2-4 矩形窗

Fig.2-4 Rectangular Window

矩形窗的优点是主瓣集中，频率分辨能力较高，缺点是旁瓣较高，可能会造成频谱泄漏的问题，海明窗可以解决矩形窗频谱泄漏的问题。海明窗是一种改进的升余弦窗，可以降低被截取的信号帧边缘处的斜率，使被截取的信号帧边缘更加平滑，从而降低频谱泄漏的影响。海明窗的窗函数图像如图2-5所示。



图2-5 海明窗

Fig.2-5 Hamming Window

## 循环神经网络

循环神经网络（Recurrent Neural Network，RNN）源自于1982年由Saratha Sathasivam 提出的霍普菲尔德网络。循环神经网络能够挖掘出隐藏在数据中的时序信息，这是因为从网络结构上来说，循环神经网络能够记忆之前数据中的信息，并用这些之前的信息来影响后面时刻的结点输出。如图2-6所示，图中左边是RNN模型没有按时间展开的基本单元结构图，与普通神经网络结构无太大差别；右边是按时间展开的多个基本单元组合而成的RNN网络结构示意图，这里按时间展开的含义实际上是将RNN基本单元进行链式重复。图中各符号的含义如下：x是RNN的输入；h是RNN的中间隐藏层；o是RNN的输出；L是网络模型的损失函数；y是训练集与验证集数据的标记；U是中间隐藏层与输入层之间的连接权值；V是中间隐藏层与输出层之间的连接权值；W则是不同RNN单元中间隐藏层之间的连接权值。由图2-6可以很容易地看出，循环神经网络每个隐藏层h(t)的输入，不仅仅包含当前时刻的输入x(t)，其实还包含上一个时刻的内部输出h(t-1)，也就是说，RNN的输入包含了之前时刻的部分历史信息。

正因如此，循环神经网络适合处理时间序列的数据，它在时序分析、语音识别、自然语言处理等方面都有着出色的表现。但是，循环神经网络存在一个缺陷，那就是它可以保存的历史信息是有限的，换句话说，它无法记住时间序列中很长时间之前的信息，无法利用这些很久之前但依旧重要有效的信息去帮助给出当前的决策输出。



图2-6 RNN结构图

Fig.2-6 RNN structure diagram

## 长短期记忆神经网络

由于RNN无法很好地保留时间序列中长期的信息，为了解决这一问题，长短期记忆（Long Short Term Memory，LSTM）循环神经网络被设计出来。LSTM神经网络能够记住很长时期之前的历史信息，所以在很多时间序列任务上，LSTM的表现比RNN要更好。

LSTM循环神经网络是RNN的一种延伸拓展结构。LSTM网络结构最早由Sepp Hochreiter 和Jürgen Schmidhuber 于1997年提出。LSTM是一个拥有三个“门”结构的特殊网络结构，这三个“门”分别是输入门、遗忘门和输出门。LSTM通过“门”来控制丢弃或者增加信息，从而实现遗忘或者记忆的功能。这里的“门”是一种使信息选择性通过的结构，由一个sigmoid函数和一个点乘操作组成。其中sigmoid函数的图像如图2-7所示。



图2-7 Sigmoid函数图像

Fig.2-7 Sigmoid function image

因为使用sigmoid函数作为激活函数，所以“门”的输出值在[0,1]的区间内，输出值为0代表历史信息完全被丢弃，输出值为1代表历史信息全部通过并保留。除了输入和输出之外，LSTM神经网络结构还会记录每一个时刻过后的状态信息。

LSTM神经网络的基本单元结构如图2-8所示。



图2-8 LSTM基本单元结构图

Fig.2-8 LSTM basic unit structure diagram

遗忘门的作用是决定要舍弃多少历史信息。遗忘门的输入有两个，分别是上一时刻的输出和当前时刻的输入，经过sigmoid函数激活后，遗忘门的输出值与上一时刻LSTM基本单元的状态向量进行点乘操作，来控制上一时刻状态的遗忘程度，最终得到一个被过滤后的上一时刻状态向量。

输入门的作用是确定在当前时刻LSTM基本单元的新状态向量中保留哪些信息，同时生成当前LSTM基本单元的新状态向量。输入门的输入也有两个，一个是上一时刻的输出，另一个是当前时刻的输入。但这里需要注意的是，输入门需要对这两个输入量使用两种不同的激活函数分别处理两次。这两种激活函数一个是sigmoid函数，另一个是tanh函数。Sigmoid函数之前已经介绍过，tanh函数的曲线图像如图2-9所示，由图可知，经过tanh函数激活后的输出值均在[-1,1]的区间内，这是不同于sigmoid函数的。其中sigmoid激活函数的作用是确定哪些是需要被更新进新状态向量中的信息，输出为被允许通过的新信息，tanh函数的作用是创建一个备选新状态向量用来添加进新状态向量中。之后就可以进行的更新操作，将与进行点乘操作后，再加上遗忘门的输出，就生成了当前时刻LSTM基本单元的新状态。



图2-9 Tanh函数图像

Fig.2-9 Tanh function image

输出门的作用是控制当前时刻LSTM基本单元的新状态中有多少信息被过滤掉。和输入门类似，它同样以上一时刻的输出和当前时刻的输入为输入，另外输入门中生成的新状态也是输出门的输入量。输出门同样通过sigmoid函数和tanh函数两种激活函数来过滤状态信息，首先利用sigmoid函数过滤保留与中有效的新信息，然后利用tanh函数调整的输出值范围至[-1,1]之间，最终将与调整后的相乘，从而生成当前时刻LSTM基本单元的新输出。

LSTM三个门输出量分别的计算公式如下：

上述公式中的各项W与b即为神经网络中需要被训练调整的模型参数。以上就是LSTM神经网络的基本结构与工作原理，本次研究中采用上述的标准LSTM神经网络结构。

## 本章小结

本章详细介绍了基于短时傅里叶变换与长短期记忆神经网络的异常检测方法中涉及到的一些理论基础，如快速傅里叶变换、短时傅里叶变换、循环神经网络和长短期记忆神经网络等。建立了开展本次研究工作所需的理论基础，为本次研究设计实现的异常检测方法提供了理论支撑依据，同时也为后续开展对该异常检测方法的优化拓展工作打下了一定的基础。

# 实时异常检测方法的研究设计与实现

本章的内容主要分为两个部分，一是阐述本次研究提出的基于STFT与LSTM异常检测方法的设计思想，从当前电源信号频域品质参数异常检测方法的缺陷出发，详细介绍针对当前缺陷的改进思路与关键技术。二是基于改进后电源信号频域关键参数异常检测方法设计一种新的异常检测模型，并对该模型的各部分结构与具体实现细节进行阐述。

## 实时异常检测方法的设计思想

### 基于STFT的频域异常检测方法

本次课题的主要研究对象是大型民航客机机载交流电源信号的电源品质参数，机载交流电源品质参数包括电源的电压偏差、电流偏差、电压波动和闪变（浪涌电流）、基波（频率偏差）、谐波含量等等，这些电源品质参数可以大致分为时域中参数和频域中参数两个部分，其中时域部分的电源品质参数的异常状态较为容易检测，当前也存在很多专门设计用于检测电压与电流等电源指标的硬件电路，这些硬件电路性能高效且检测结果直观。然而频域中的电源品质参数由于其属于频域的特性，传统电路结构难以直接从电源原始的时域信号中获取其频域信息。因此，若希望获取电源信号的频域信息以进行异常检测，一般都需要先进行傅里叶变换，将原始时域信号数据转换为信号的频域数据，再利用数学统计等方法分析信号的频谱进行异常检测。



图3-1平稳信号的波形及频谱

Fig.3-1 Waveform and spectrum of stationary signal

使用传统的快速傅里叶变换来处理原始的电源信号数据存在一些问题，其中一个主要问题就是傅里叶变换仅适用于过程平稳的信号。过程平稳的信号是指该信号所包含的所有频率分量，在进行傅里叶变换计算的时域范围内均匀分布，如图3-1所示。

与之相对应的是过程非平稳的信号，这种信号的频率分量在时域范围内分布不均匀，即信号中不同频率的成分在时序上出现和结束的时刻不同，但傅里叶变换的结果无法体现出这一不同，如图3-2所示。



图3-2 非平稳信号的波形及频谱

Fig.3-2 Waveform and spectrum of non-stationary signals

由图3-1及图3-2可以看出，这两种信号在频率成分上完全一致，且它们经过傅里叶变换后得到的频谱也几乎是一致的，但是这两种信号在时域上的波形是完全不一样的，各个频率分量成分出现和结束的时刻也均不一样，这一点在频谱中并未体现出来。所以，经典的快速傅里叶变换只适用于分析信号存在哪些频率分量的成分，却无法得到原始时域信号中这些频率分量成分出现的具体时刻信息，这是受时域及频域特性影响的，属于经典傅里叶变换无法避免的缺陷。然而在绝大多数的生产及研究环境中，被处理分析的信号往往是非平稳信号，在许多场景下，研究人员希望在分析信号频谱的同时，也能对信号中不同频率分量成分的出现结束时刻有所了解，希望能够获取信号出现变化的具体时刻。这样的需求非常多，比如分析实验生物电信号的场景，和本次课题中对电源信号频域参数异常检测的场景等等。

为了解决这一问题，目前最常见的方法是使用短时傅里叶变换（STFT）的方法。根据本文第二章中对短时傅里叶变换的原理的详细阐述可以知道，短时傅里叶变换弥补了经典快速傅里叶变换在应用上的不足之处。短时傅里叶变换可以得到原始信号的时频数据，即原始信号在时序上分段的频谱信息，进而对原始信号进行具体的分析。

回到本次课题的研究范围内，对于机载交流电源信号频域品质参数的异常检测，基于STFT的异常检测方法的具体工作流程如图3-3所示。根据选择的窗函数对电源信号进行截取分段，获取时序上连续的一系列信号帧，然后对这些信号帧分别做FFT运算，得到它们对应的频域数据。然后根据信号的频域数据统计机载交流电源信号基波与谐波的含量，与电源信号频域品质参数评价标准对比，计算频谱中的基波与谐波的频率幅度值是否超出阈值标准，从而判断该时刻的信号帧是否存在异常。



图3-3 基于STFT的异常检测流程

Fig.3-3 Anomaly detection process based on STFT

基于STFT的异常检测方法简单易行，且由于这种方法的机制是基于实际采样得到的信号数据进行处理分析，只要阈值标准给定，其检测的结果就一定是准确的，所以这种方法的检测结果准确率必定为100%，不会出现误报故障的问题，因此在当前被广泛使用。

但是正如本文第一章对课题研究现状分析中所阐述的，基于STFT的异常检测方法存在着一些弊端，最主要的就是其检测结果的时效性很差。这一点使得其检测结果在一些注重安全保障的场景下几乎失效，比如本次课题应用的机载交流电源异常检测场景。由于这种方法的机制是先采样后检测，虽然保证了100%的准确率，但是却失去了检测结果的时效性。即使STFT的窗函数的窗口尺寸选择得很小，比如截取50ms或者100ms的信号长度，再加上信号传输至服务器和算法分析处理的时间，最终的总延时也会比较大。况且退一步来说，即使再忽略数据传输与STFT的计算耗时，对于安全保障不容有失的机载电源来说这个延迟也是难以接受的。这属于该异常检测方法机制上的限制，无法避免和优化改进，因此寻找一种新的机制来替代是十分必要的。

基于预测的异常检测机制可以解决此种问题。如果可以实现对目标参数值的准确预测，那么就可以做到实时甚至超前的故障预警，从而留出足够的响应时间来执行下一步安全保障动作，将安全隐患降到最低。如图3-4所示，在异常检测场景下，我们更希望能够未雨绸缪，提前捕获异常状态并预警，从而规避风险降低损失；而不是在异常工况发生以后去亡羊补牢。而且如果预测的准确率能够满足需求，则可认为这种基于关键参数值预测的异常检测机制是有效可行的。



图3-4 检测结果延迟

Fig.3-4 Delayed test results

因此，本次研究的目的就是寻找一种能够对机载电源信号频域关键参数值进行有效预测的异常检测方法。

### 基于LSTM的时间序列预测方法

目前有许多可以对关键参数值进行预测的方法模型，这些方法和模型大多数是对时间序列数据进行预测计算，主要分为两大类，一类是基于经典数学统计模型，主要有差分整合移动平均自回归（Autoregressive Integrated Moving Average，ARIMA）模型、指数平滑算法Holt Winters以及卡尔曼滤波（Kalman Filter）等等。另一类则是基于最近发展迅猛的机器学习模型，主要是循环神经网络（RNN）模型及其相关变体模型，如长短期记忆（LSTM）神经网络模型。这里本文主要介绍基于LSTM的时间序列预测方法。

在介绍基于LSTM的时间序列预测方法之前，需要先介绍无监督学习与监督学习相关的内容。在机器学习中，按照标记的有无可以分为无监督学习和监督学习。无监督学习中使用的训练集与测试集是没有标记的，常见的无监督学习算法有主成分分析法、K-means聚类算法等等。监督学习中的训练集与测试集是有标记的，可以理解为模型有输出的期望值，并通过多轮训练模型不断调整模型内的结构参数，使模型输出能够最大程度地接近输出的期望值。应用广泛的神经网络与决策树都属于监督学习。

本次研究使用的LSTM神经网络模型属于神经网络中深度学习的扩展分支，同样在监督学习的范畴内，其训练接与测试集数据是需要具有标记项的，也就是需要有输出项。然而在直接获取的原始时间序列数据中，绝大多数是没有标记项的，需要根据研究内容人为地选择并添加标记项。以下以预测北京天气质量的案例为例进行说明。

表3-1 北京奥体中心某时段天气质量的原始数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 索引 | 时间  （2018/1/31） | PM2.5 | PM10 | NO2 | CO | O3 | SO2 |
| 1 | 16:00:00 | 49 | 82 | 90 | 0.9 | 6 | 10 |
| 2 | 17:00:00 | 47 | 80 | 90 | 0.9 | 5 | 10 |
| 3 | 18:00:00 | 46 | 91 | 91 | 1.3 | 5 | 28 |
| 4 | 19:00:00 | 60 | 95 | 85 | 2 | 6 | 38 |
| 5 | 20:00:00 | 52 | 91 | 81 | 1.9 | 5 | 30 |

从表3-1可见，获取的原始数据没有标记项。该案例研究的内容是预测空气质量参数中的PM2.5与PM10两种参数的具体数值，因此，需要将PM2.5与PM10这两个维度的数据提取出来作为标记输出，如表3-2所示。

表3-2 北京奥体中心某时段天气质量的中间数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 索引 | 时间  （2018/1/31） | PM2.5 | PM10 | NO2 | CO | O3 | SO2 | PM2.5 Out | PM10 Out |
| 1 | 16:00:00 | 49 | 82 | 90 | 0.9 | 6 | 10 | 49 | 82 |
| 2 | 17:00:00 | 47 | 80 | 90 | 0.9 | 5 | 10 | 47 | 80 |
| 3 | 18:00:00 | 46 | 91 | 91 | 1.3 | 5 | 28 | 46 | 91 |
| 4 | 19:00:00 | 60 | 95 | 85 | 2 | 6 | 38 | 60 | 95 |
| 5 | 20:00:00 | 52 | 91 | 81 | 1.9 | 5 | 30 | 52 | 91 |

只是提取目标维度数据列作为标记输出还不够，因为案例的目的是对空气质量参数PM2.5与PM10的具体数值做出预测，表3-2中的标记输出是每个采样时刻一一对应的实测参数值，而不是期望输出的预测值。由于期望的标记输出是预测性质的，是未来某个时刻的待输出参数值，且案例研究的对象是时间序列，因此可以使用未来某个采样时刻的真实测量记录值作为当前采样时刻的标记输出。将表3-2中的标记输出进行纵向向上的平移若干次，再舍去表格首尾包含缺失值的行记录数据，就可以得到适用的标记输出。如表3-3所示为超前一个采样时刻预测的已标记数据，表3-4所示为超前三个采样时刻预测的已标记数据。

表3-3北京奥体中心某时段天气质量的超前一位标记数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 索引 | 时间  （2018/1/31） | PM2.5 | PM10 | NO2 | CO | O3 | SO2 | PM2.5 Out | PM10 Out |
| 1 | 16:00:00 | 49 | 82 | 90 | 0.9 | 6 | 10 | 47 | 80 |
| 2 | 17:00:00 | 47 | 80 | 90 | 0.9 | 5 | 10 | 46 | 91 |
| 3 | 18:00:00 | 46 | 91 | 91 | 1.3 | 5 | 28 | 60 | 95 |
| 4 | 19:00:00 | 60 | 95 | 85 | 2 | 6 | 38 | 52 | 91 |

表3-4北京奥体中心某时段天气质量的超前三位标记数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 索引 | 时间  （2018/1/31） | PM2.5 | PM10 | NO2 | CO | O3 | SO2 | PM2.5 Out | PM10 Out |
| 1 | 16:00:00 | 49 | 82 | 90 | 0.9 | 6 | 10 | 60 | 95 |
| 2 | 17:00:00 | 47 | 80 | 90 | 0.9 | 5 | 10 | 52 | 91 |

表3-3中每个当前采样时刻对应的标记输出是未来下一个采样时刻的真实测量记录值，它同时也是当前采样时刻的预测期望值，表示当前采样时刻的输出是对下一采样时刻PM2.5与PM10具体数值的预测值，这样就可以实现提前一个时间单位的预测。同理，表3-4是提前三个采样时刻预测的数据集，即当前采样时刻输出的是对三个采样时刻后PM2.5与PM10具体数值的预测值。通过这种方法就可以将原始数据集调整为适用于实现预测功能的具有标记的数据集，而且不会改变数据集是时间序列的这一原有属性，其代价仅仅是损失了数据集尾部的若干行数据而已，损失数据的行数目与预测超前的位数相等。相对于原始数据集庞大的数据量，这种程度的数据量损失几乎可以忽略不计。

由本文第二章中对于LSTM神经网络模型的原理介绍可知，LSTM神经网络模型非常适合用来处理时间序列数据，结合本节介绍的内容不难想到，用LSTM神经网络模型对调整后有超前位标记的时间序列数据集进行多轮的训练，从理论上来说可以有较高的预测准确度。本次研究中时频处理之后获取的电源信号时频数据本质上也是一种多维度的时间序列数据，和本节案例中使用的北京某地某时段天气质量数据在形式上并无差异，因此理论上同样适用于案例中对关键参数值的预测方法，即可以在STFT处理后的时频数据基础上，利用LSTM神经网络对电源信号频域关键参数的数值进行预测，从而实现实时甚至超前的异常检测效果。具体的实验预测结果验证在本文第五章有详细的阐述。以上便是对基于LSTM的时间序列预测方法的简单介绍。

### 基于STFT与LSTM的实时异常检测方法

目前可以明确的是，基于STFT的异常检测方法存在着不具备时效性、数据利用率低等不足之处，但是通过STFT方法可以获取机载电源信号的时频数据。同时通过上一小节的介绍可以知道，LSTM神经网络模型十分适合用来处理时间序列， 在此基础上还可以实现对时间序列数据的预测功能。然而本次研究的对象是机载交流电源信号频域品质参数，是对频域中基波与谐波参数值的预测分析，因此无法直接使用LSTM神经网络模型来处理分析机载电源信号数据。



图3-5 基于预测的实时异常检测模型

Fig.3-5 Anomaly detection model based on prediction

基于以上研究思路不难发现，可以将STFT与LSTM这两种算法相结合来取长补短，来达到研究期望的效果。因此，本次研究提出了一种新的基于STFT与LSTM的实时频域参数异常检测方法。通过STFT得到的机载交流电源信号时频数据还有很大的挖掘空间，无论在是频域还是时域中，数据之间均存在着隐藏的关联信息。时频数据中包含了电源信号的频域信息，如目标参数基波与谐波的频率幅度值，频域中各个频率成分分量是相互关联的。而且时频数据又可以体现电源信号在时域中按时间顺序连续的变化情况。因此可以说电源信号的时频数据十分适合用LSTM神经网络模型来处理和分析，即在STFT获取时频数据的基础上，将时频数据中频域轴的各个频率项作为特征量，将时频数据中的时间轴作为索引，这样一来电源信号的时频数据就可以被理解为常见的多特征维度时间索引数据集，本质上也属于多维度的时间序列数据。如此便可以通过LSTM神经网络模型来实现对时频数据中关键频域参数值的超前预测，来达到本次课题实现实时甚至超前的异常检测的研究目的。

基于以上设计思想，本次研究设计了一种新的面向电源信号频域目标参数，基于预测机制的实时异常检测模型。模型的具体结构如图3-5所示，该模型主要分为时频处理、预测前数据预处理和时间序列预测模型三个部分，其中预测前数据预处理部分又由数据降维、数据清洗、数据归一化和数据标记四个部分组成。下一小节将对本次研究设计的模型结构进行详细的介绍，并对每个模块结构的实现进行说明。

## 实时异常检测模型的实现

本次研究提出的面向电源信号频域目标参数的实时异常检测模型结构如图3-5所示，接下来对该模型结构进行分模块的说明与实现。

### 时频处理

本次研究提出面向电源信号频域目标参数的异常检测模型的第一个部分是时频处理，这一部分的作用是将原始的机载交流电源信号数据转换为时频数据，具体采用的是短时傅里叶变换（STFT）方法。

在该部分STFT的实现中，本次研究选用的窗函数为矩形窗，窗口尺寸为500ms，即每次通过窗函数截取长度为500ms的原始机载交流电源信号帧进行快速傅里叶变换（FFT）运算。对于STFT来说，窗口尺寸参数值的选定十分重要，直接影响到时频数据在时域与频域两个方面的分辨率，进而影响到后续的预测结果。本次STFT窗口尺寸参数的具体数值是结合本次课题依托的整体实验平台实际情况来选定的，考虑因素主要有三点：一是考虑到整体实验运行流程中，对电源信号频域关键参数值的预测情况需要传输至总调度台显示，显示频率不宜过高，即采样截取信号帧的频率不宜过高，窗口尺寸不能过小；二是考虑到平台内各个部分的数据传输时间损耗，预测目标参数值的周期不宜过短，否则如果异常检测模块的实际处理时间小于数据收发时间，那么异常检测模块就会处在等待数据进入的空闲状态，资源会被浪费，这也要求窗口尺寸不能过小；三是为了达到对目标参数超前预测的效果，考虑STFT本身对信号帧进行FFT运算的固有延迟，窗口尺寸也不宜过大。因此窗口尺寸应当取适中的值，因此将窗函数的窗口尺寸选取为500ms。

通过STFT的处理，可以将原始电源信号电压-时间（V-t）数据转换为时频（F-t）数据。时频数据是一种二维的数据，也正是适用于神经网络模型的数据集形式。可以将时频数据中频域维度的各个频率项视为机器学习数据集中的特征向量，每个频率分量成分对应一个特征维度，而时频数据中时域维度的时刻序列则可以视为机器学习数据集中的索引项。

经过STFT得到的时频数据还不能直接输入LSTM神经网络模型里来进行训练，还需要对其进行一系列训练前的预处理操作。

### 训练数据预处理

对于机器学习任务来说，数据预处理是十分重要的，它在很大程度上影响了模型最后的结果。对于本次处理电源信号数据的任务来说，数据预处理的流程可分为：数据降维、数据清洗、数据归一化和数据标记四个部分。

训练数据预处理的第一步是数据降维。数据降维通常又被称为特征提取，在很多数据处理的任务中，需要被处理的数据都属于高维数据，具有非常多的特征数目。 在本次研究中，LSTM神经网络模型的输入是时频数据，其频率项的特征分量数目非常多，可至数万之多，如果不进行降维处理，直接进行分析通常会带来极大的计算量，一方面这会使后续的模型训练时间大大增加，另一方面，过多的特征数目会带来很大的噪声，影响模型的收敛和最终结果。因此，在直接对数据进行分析之前需要对先提取出高维数据的特征，在保证结果不受影响的情况下，尽可能地减小原始数据的维数。本次实验中通过STFT处理得到的时频数据量是十分庞大的，这是因为转换后时频数据中频域部分为完整的频谱，因此时频数据的维度太高。而且其中的绝大多数特征分量是我们不需要关心的，因此需要对这些完整的频域数据进行降维处理。

一般来说，降维算法有主成分分析法（Principal Component Analysis，PCA）、因子分析法（Factor Analysis，FA）、独立成分分析法（Independent Component Analysis，ICA）、奇异值分解法等等。以上这些降维算法适用于特征分量之间的关联性不易被显性发现的情形，其中最常用的是主成分分析法。

本次研究中使用的是电源信号的时频数据，其形式较为特殊，大多数特征维度的值固定为极小值，均可忽略不计。而且由于研究目的是进行基波及其高次谐波的异常检测，因此不需要使用上述这些具有普适性的降维算法，而是采用人工剔除筛选特征的方法来降维。这里我们只需要关注电源信号的基波与主要高次谐波即可，其中次数过高的谐波由于其含量过低可以被直接剔除，而且由于本次研究采用的是平衡三相发电机，所以偶次谐波也忽略并剔除，只保留基波和若干低次的奇次谐波即可。

训练数据预处理的第二步是数据清洗。对降维后的频谱数据进行检查和清洗是十分重要的，数据清洗分为去除重复数据和填补缺失值两部分。对于本次采用的电源信号频谱的时序串联数据，去除重复数据可以检查时间序列，以时间序列为索引，去除采样时刻相同的重复数据。然后检查原始数据中是否有缺失值，如果有，就采用k最近邻算法进行缺失值的填补。这里对于k最近邻算法不再重点介绍。

训练数据预处理的第三步是数据归一化。数据归一化又被称为数据缩放，本次研究使用的电源信号频谱数据的数值变化区间较大，既存在较大数量级的频率幅度数值，可至量级，同时也存在较小数量级的频率幅度数值，如量级。因此需要将频谱数据缩放到指定的区间中，以增强数据的稳定性，同时也便于后续模型的计算处理。本次研究采用的是常用的min-max归一化，又被称为离差归一化，具体做法是对数据清洗后的时频数据进行线性变换，将时频数据中各项频率的幅度值缩放为0和1之间的小数，其计算公式如下：

训练数据预处理的第四步是数据标记。这一步的作用是规范LSTM神经网络模型的输入输出维度，以及生成符合LSTM神经网络模型要求的输入数据。机器学习根据标记信息的有无，可以大致分为监督学习和无监督学习两类。其中监督学习可以分为分类和回归两类问题。本次研究的内容是对机载电源信号频域关键参数值进行有效的预测，这实际上属于回归问题。然而，本次研究使用的电源信号时频数据是没有标记信息的，无法直接用于LSTM神经网络模型训练，所以应当先对电源信号的时频数据进行标记。对于本次研究采用的电源信号时频数据来说，由于时频数据整体上是以时间序列为索引的，所以只需要把待预测的频率参数值特征序列前移若干个时间标度，然后得到的新特征序列就是数据集的标记信息。这部分的详细实现过程可以参考本章3.1.3小节中对时间序列的实时预测部分的阐述。

经过以上四个步骤处理之后的电源信号时频数据即为LSTM神经网络模型的输入数据，可直接用于LSTM神经网络模型的训练与最终测试。

### LSTM神经网络模型

本文使用的LSTM神经网络模型结构如图3-6所示。经过训练前预处理后的数据可以作为LSTM神经网络模型的输入，直接进入模型的第一层，即LSTM层。该模型中LSTM层的基础单元数目为50，激活函数使用的是前文介绍过的tanh函数。在LSTM层后面是三层全连接层与两层dropout层所共同组成的中间层，最后是一个神经元数目为5的全连接层作为最终的输出层，其中输出维度为5的原因是该模型每次对五个频率分量数据进行预测，分别为电源信号的基波与其4个高次谐波。



图3-6 LSTM神经网络模型结构图

Fig.3-6 LSTM neural network model structure diagram

实际上，如果把LSTM神经网络模型中的这些中间层移除，LSTM神经网络模型依然可以正常工作。然而，如果添加了这些中间层，模型最终的预测效果会更好。中间这些全连接层的作用是增加网络模型容量，提升模型复杂度。从深度学习的理论上来说，参数越多的模型复杂度越高、容量越大，这种模型由于具备复杂的网络结构，经过多次的训练，可以生成相较于单层网络更加准确、更加契合任务目标的网络模型，简而言之就是可以完成更加复杂的机器学习任务。换句话说，添加这些全连接层可以显著增强模型的性能，增加神经网络的层数是最简单的深度学习方法。但是，全连接层数目并不是越多越好。过多的中间隐藏层数目会带来收敛困难、计算量过大等等问题。其中计算量过大这个问题在如今已经不能算作是值得关注的问题，由于现在硬件机器算力的飞速进展，现在的机器算力已经足够胜任深度学习复杂网络模型的学习训练任务。尽管如此，层数过多的深度学习网络模型收敛困难的问题依旧存在因此，因此选取合适的中间隐藏层数目十分重要，这对LSTM网络模型性能的提升有很大的帮助。

除了全连接层以外，中间层还包括dropout层。Dropout层的作用是防止网络模型训练出现过拟合的问题。由于本次研究设计的LSTM神经网络模型采用了深度学习的理论方法，有着较多的中间隐藏全连接层，因此模型的复杂度很高，模型内的参数也非常多，在这种情况下，如果训练使用的数据量过小的话，网络模型很容易出现过拟合的问题。过拟合问题实际上是用过小的数据量训练过于复杂的网络模型，导致学习能力强大的神经网络模型“学过头了”，即过度依赖小数据集中的局部特征，泛化能力很差，陷入了类似梯度下降中局部最优的困境。过拟合问题的具体表现是在训练数据与验证数据上表现很好，预测准确率很高，但在测试数据上的预测结果很差，也就是泛化能力很差，无法普遍地应用在不同数据上，不具备实用性。这种结果显然是不能接受的，因此需要用到dropout层来解决训练中网络模型过拟合的问题。

a)标准神经网络结构 b)部分神经元被临时删除

a) Standard neural network structure b) Some neurons were temporarily deleted

图3-7 Dropout前后神经网络对比图

Fig.3-7 Comparison of neural networks before and after Dropout

如图3-7所示，dropout层的工作原理是根据设置的比例，在该层中随机临时删除掉给定比例的神经元，然后在临时删除神经元后的网络上进行后续训练步骤，具体是前向传播、反向传播与修改更新剩余神经元参数。之后就是重复该过程，先恢复之前临时删除的中间层神经元，然再随机临时删除并训练，对于训练后的神经元参数更新，未被选中临时删除的神经元进行参数更新，被选中临时删除的神经元不参与神经网络参数的更新。以上就是dropout层防止过拟合问题的工作原理，通过随机删除中间层的部分神经元，来降低网络模型与训练数据之前过高的契合度，增强模型的泛化能力，以此来防止过拟合问题。因此，在本次研究中的LSTM神经网络模型中设计增加若干dropout层以防止过拟合。

除了在图3-6中所展示的LSTM神经网络模型结构以外，模型中还有一些其他的部分需要实现，比如整体模型所使用的损失函数与优化器。

本次研究中LSTM神经网络模型使用的损失函数是均方误差（Mean Square Error，MSE）函数，其计算公式如下：

式中与分别为实际观测值与预测值。

模型的优化器使用的是强大的Adam优化器。Adam算法是一种可以替代传统随机梯度下降的一阶优化算法，它能基于训练数据迭代地更新神经网络权重。Adam最开始是由OpenAI的Diederik Kingma 和多伦多大学的 Jimmy Ba在2015年的一篇ICLR论文中提出的。Adam优化器具有计算高效、需要的内存少、擅长解决高噪声或高稀疏度问题等优点。

## 本章小结

本章主要介绍了本次研究提出的异常检测方法的设计思想与异常检测模型的具体实现。首先从当前FFT方法对过程非平稳的时变信号不适用的缺陷出发，介绍了当前常用的频域异常检测方法——基于STFT异常检测方法的具体原理，再从其检测结果时效性很差的缺陷切入展开思考，提出一种新的基于关键参数值预测的异常检测机制。接着通过介绍基于LSTM神经网络在时间序列上的预测方法，思考将STFT与LSTM结合来取长补短，设计并实现了一种新的面向机载交流电源信号频域关键参数异常检测的，基于STFT与LSTM神经网络的预测机制异常检测方法与模型。

# 实时异常检测模型的优化研究

## 时频处理的优化研究

本次研究设计实现的异常检测模型中，时频处理是第一个部分，同时也是非常重要的一个部分，它将原始机载交流电源信号数据转换为了电源信号的时频数据。时频数据是后续所有模块的原始数据集，时频数据的时域与频域分辨率以及数据本身的正确性等因素，都直接影响到了异常检测模型最终的预测结果。因此，对时频处理这一部分进行优化研究是十分有必要的。

本次研究采用短时傅里叶变换（STFT）方法作为时频处理的具体实现。除了STFT方法以外，常见的时频分析方法还有小波变换（Wave Transform，WT）、希尔伯特-黄变换（Hilbert-Huang Transform，HHT）等等。接下来对WT与HHT这两种常见时频处理方法进行介绍，同时结合STFT的相关内容，研究分析如何在本次课题实验的背景下对时频处理这一步骤选择最佳的处理方法。

### 小波变换

介绍小波变换之前，需要明确STFT方法的一个特性，那就是在一次STFT的运算中，其窗函数的窗口尺寸是固定的，不能改变。STFT的这一特性意味着通过它得到的时频数据的时域分辨率与频域分辨率是固定的，于是就会带来一个问题，这个窗口尺寸应该选取多大的值？在上文介绍模型实现的内容中提到，本次研究选取STFT窗口尺寸值为500ms，选取理由是结合具体课题实验环境考虑，然而需要考虑的不仅仅是实际实验环境因素，还需要考虑时域分辨率与频域分辨率的要求。

对于过程非平稳的时变信号来说，STFT窗口尺寸的选择是一个难题。如果窗口选择过窄，虽然时域分辨率很高，但是频域分辨率会很差；如果窗口选择过宽，就会有比较差的时域分辨率与较好的频域分辨率。值得注意的是，STFT中时域分辨率与频域分辨率这种此消彼长的现象恰恰是海森堡测不准原理的体现，即无法同时获取一个信号高时域分辨率与高频域分辨率的时频处理结果，这一现象是不能被避免的。虽然如此，对于非平稳的时变信号来说，信号中的高频区域适合使用窄窗口的窗函数，以降低频域分辨率为代价换取更高的时域分辨率；反之低频区域则适合使用宽窗口的窗函数，以降低时域分辨率为代价换取更高的频域分辨率。换句话说，我们期望窗函数的窗口尺寸应当是动态可变的，这才能最大程度地反映出非平稳过程时变信号的真实状态。

小波变换方法就实现了时频转换中动态的时频域分辨率。本文这里主要对连续小波变换（Continuous Wave Transform，CWT）的原理进行简单的介绍。CWT并不是窗口尺寸动态变化的STFT，事实上CWT并没有加窗截取信号的概念，甚至其替换了傅里叶变换的基函数。经典傅里叶变换的基函数是三角函数，而CWT将其替换为了具有波动性与紧支撑性的小波基函数。波动性是要求小波基函数形式上是一种波，即对其积分结果为0，既然是波那么就会具有一定的自身中心频率，通过与信号相乘并积分的过程，可以提取出频率与其自身中心频率相近的频率成分；而紧支撑性则意味着其仅在定义域中的一小部分不为0，其余部分均为0，相当于进行了加窗的操作。基于小波基函数的波动性与紧支撑性，不难发现其十分适合进行时频处理，通过对小波基函数进行时域中的平移，可以实现获取不同时刻信号频域信息的类似STFT的效果；通过对小波基函数本身进行参数控制的缩放，就可以实现小波宽度与自身中心频率成倒数，即可实现我们期望的高频窄波与低频宽波的动态自适应调整效果。以上即为对CWT原理的简单阐述，详尽的公式推导可以参考文献【**加参考文献**】。



图4-1 CWT时频转换结果

Fig.4-1 CWT time-frequency conversion results

因此，从时频域分辨率动态自适应调整的角度来说，CWT是优于STFT的。如图4-1所示为通过CWT处理的时频图像，CWT具体选用的是“cagu8”基函数。对非平稳的时变信号，CWT的时频转换结果体现了其动态自适应调整的特性，图中低频部分窄，意味着频率分辨率高；而频率越高，频带图像越宽，即频率分辨率越低，这与预期效果一致。图4-2是同一信号经过STFT处理后的时频图像，由图4-2可以看出，图中不同频率成分频带宽度相同，没有动态调整的效果。而且可以看出相邻频率成分的频带之间在时域中存在重叠的现象，这说明该时频数据的时域分辨率很低，相对应的是图4-2中所体现的所有频带都很细，即频域分辨率很高，这说明了本次STFT是牺牲了时域分辨率换取了很高的频域分辨率。



图4-2 STFT时频转换结果

Fig.4-2 STFT time-frequency conversion results

然而，CWT并不是一个完美的时频处理分析方法，它同样存在一些问题。比如，它虽然实现了时频域分辨率动态自适应调整，但仍旧没有摆脱海森堡测不准原理的约束，只是基于STFT做出了优化改进，与STFT同样不可能做到时域与频域高分辨率同时存在的效果。再比如，CWT与STFT一样都是需要进行先验选择的，在STFT中需要先验选择窗函数类型与其窗口尺寸，在CWT中则需要先验选择合适的小波基函数。如果选择了中心频率不合适的小波基函数，则可能会导致时频转换出现错误的结果，例如出现原本不存在的谐波成分。如图4-3与图4-4所示，即为与图4-1、图4-2使用同一信号的情况下，选用不合适的小波基函数导致的错误情形。图4-3选用了“shan”基函数，图4-4选用了“mexh”基函数，它们的中心频率各不相同，而且可见图4-3与图4-4中在某些时刻均出现了实际并不存在的谐波成分，意味着时频转换结果是错误的。



图4-3 shan基函数的CWT时频转换结果

Fig.4-3 CWT time-frequency conversion result of shan basis function



图4-4 mexh基函数的CWT时频转换结果

Fig.4-4 CWT time-frequency conversion result of mexh basis function

回到本次课题的研究中，基于以上分析内容与课题实验环境，本次研究选用了STFT作为时频处理步骤的实现方法，原因有两个：一是如同本文3.2.1小节中所阐述的，由于本次课题实验环境的影响，实验对时频数据的时域分辨率的精度要求不高，相反对频域分辨率有着较高的要求，通过STFT的固定窗口尺寸可以实现这一效果，而CWT则不受控制，在其转换结果频域分辨率低的时候，可能会影响后续LSTM神经网络模型的训练。二是STFT只需要先验选取窗函数类型与窗口尺寸，这相对于CWT需要选择小波基函数来说更容易选取，因为电源信号中的异常情况多种多样，信号波形情况难以确定，CWT的小波基函数难以选择，如果选错还可能会导致最终错误的结果。

### 希尔伯特-黄变换

## LSTM神经网络模型的优化研究

## 其他时间序列预测算法

## 实时异常检测方法的推广应用

# 实时异常检测模型的实验结果分析

## 实验说明

## 时频处理结果

## 数据预处理结果

## 神经网络模型训练结果

## 实验结果与分析

## 本章小结

# 总结与展望

参 考 文 献

↑

（黑体3号字居中，段前0.7厘米，段后0厘米，单倍行距，与参考文献内容之间空两行）

[1] 杨瑞林, 李力军. 新型低合金高强韧性耐磨钢的研究. 钢铁. 1999（7）: 41~45.

[2] Schinstock, D.E., Cuttino, J.F. Real time kinematic solutions of a non-contacting, three dimensional metrology frame[J]. Precision Engineering. 2000, 24(1): 70-76.

[3] 温诗铸. 摩擦学原理. 北京: 清华大学出版社. 1990: 296-300.

[4] 贾名字. 工程硕士论文撰写规范[硕士论文].上海: 上海交通大学. 2000.

↑

（参考文献内容小四号宋体，1.25倍行距，[标号]与作者姓名之间空一格，换行内容与作者姓名的第一个字母对齐。）

要求：

1、所有被引用文献均要列入参考文献中，必须按顺序标注，但同一篇文章只用一个序号。

2、博士学位论文的参考文献数一般不少于100篇，硕士学位论文的参考文献一般不少于40篇，其中外文文献一般不少于总数的1/2。参考文献中近五年的文献数一般应不少于总数的1/3，并应有近两年的参考文献。专业硕士学位论文的参考文献一般不少于20篇，其中外文文献一般不少于总数的1/2。参考文献中近五年的文献数一般应不少于总数的1/3，并应有近两年的参考文献。

3、教材、产品说明书、未公开发表的研究报告（著名的内部报告如PB、AD报告及著名大公司的企业技术报告等除外）等通常不宜作为参考文献引用。

4、引用网上参考文献时，应注明该文献的准确网页地址，网上参考文献和各类标准不包含在上述规定的文献数量之内。

5、本人在攻读本学位期间发表的论文不应列入参考文献。

6、序号应按文献在论文中的被引用顺序编排。换行时与作者名第一个字对齐。若同一文献中有多处被引用，则要写出相应引用页码，各起止页码间空一格，排列按引用顺序，不按页码顺序。

7、示例：

①期刊：[序号] 作者，题名，刊名，出版年份，卷号（期号），起止页码

②专著：[序号] 作者，书名，版本（第1版不标注），出版地，出版者，出版年，起止页码

③论文集：[序号] 作者，题名，见（英文用In），主编，论文集名，出版地，出版年，起止页码

④学位论文：[序号] 作者，题名，［学位论文］（英文用［Dissertation］），保存地点，保存单位，年份

⑤专利：[序号] 专利申请者，题名，国别，专利文献种类，专利号，出版日期

⑥技术标准：[序号] 起草责任者，标准代号，标准顺序号－发布年，标准名称，出版地，出版者，出版年度

附录1

↑

（黑体3号字居中，段前0.7厘米，段后0厘米，单倍行距，与附录内容之间空两行）

论文的附录依次为附录1，附录2……编号。附录中的图表公式另编排序号，与正文分开。

附录作为主体部分的补充，并不是必须的。

下列内容可以作为附录编于论文后

——为了整篇论文材料的完整，但编入正文又有损于编排的条理性和逻辑性，这一材料包括比正文更为详尽的信息、研究方法和技术更深入的叙述，对了解正文内容有用的补充信息等；

——由于篇幅过大或取材于复制品而不便于编入正文的材料；

——不便于编入正文的罕见珍贵资料；

——对一般读者并非必要阅读，但对本专业同行有参考价值的资料；

——某些重要的原始数据、数学推导、结构图、统计表、计算机打印输出件等。

↑

（附录内容小四号宋体，格式与论文正文一致，1.25倍行距）

致 谢

↑

（黑体3号字居中，段前0.7厘米，段后0厘米，单倍行距，与致谢内容之间空两行）

本文需要感谢……致谢内容：宋体，小四号（“论文正文”样式）。

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

↑

（黑体3号字居中，段前0.7厘米，段后0厘米，单倍行距，与内容之间空两行）

[1] 张三，李四. 已经发表一篇学术论文. XXXXXXX学报 （已录用）

（采用“参考文献内容”样式）