



摘要

电能质量是指引起用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差。由于非线性、冲击性和不对称负荷大量、快速使用，对电能质量产生严重的影响，破坏和污染了电能质量，产生电压暂降、电压暂升、电压中断、暂态脉冲和谐波等多种电能质量问题，给用户和供电方带来巨大的经济损失。同时以计算机和微处理器为核心的智能化精密设备对电能质量提出更高的要求，如何有效治理电能质量问题，改善电能质量成为电力行业研究的重点和热点。电能质量检测是治理和改善电能质量的前提和基础，只有快速、正确的检测与识别出电能质量问题才能采取正确的治理措施，改善电能质量，减少电能质量问题带来的损失。

首先介绍了电能质量的概念、分类、标准、产生原因、危害及其传统分析方法，然后针对电能质量扰动问题，提出基于 S 变换和智能算法的电能质量扰动识别方法，对于电能质量扰动中最为严重的电压暂降问题，提出了基于 S 变换和 GA-SVM 的电压暂降源识别方法，并在 DSP 平台和 Matlab 软件上实现电能质量扰动识别装置，具体研究内容如下：

(1) 在分析各种电能质量扰动基础上，提出基于 S 变换和智能算法的电能质量扰动识别方法。电能质量扰动主要包括谐波、电压暂降、电压暂升、电压中断、电压波动、暂态振荡、谐波暂升和谐波暂降等电能质量问题。首先通过仿真模型产生各种电能质量扰动信号，然后运用 S 变换对各电能质量扰动信号进行时频分析，提取到多个特征样本，最后分别运用关联向量机、神经网络、多分类支持向量机三种智能算法对特征样本进行训练及测试，输出电能质量扰动类型。测试结果表明，基于 S 变换和关联向量机的电能质量扰动识别方法能够快速、有效的识别出电能质量扰动信号类型，具有测试时间短、正确率高等优点，可应用于实时电能质量监测系统。

(2) 电压暂降是电能质量扰动中最为严重的电能质量问题，其产生的原因主要可分为短路故障、变压器投运和电动机启动，不同原因产生不同电压暂降，正

确识别电压暂降产生的原因对于电压暂降防治和治理具有重要意义。本文提出基于 S 变换和 GA-SVM 的电压暂降源识别方法, 首先利用 S 变换对各种电压暂降进行处理, 检测得到暂降幅值和暂降时间等多个特征样本, 然后运用遗传算法对特征样本进行优秀特征选取, 选取得到对电压暂降源识别具有重要贡献的特征样本, 最后通过多分类支持向量机来验证优秀特征样本有效性。经算例验证, 基于 S 变换和 GA-SVM 法的电压暂降源识别方法能够快速、有效识别出电压暂降产生的原因。

(3) 在分析国内外电能质量监测技术的基础上, 本文研制了一款基于 DSP 平台和 Matlab 软件的电能质量监测系统, 该系统主要用于电能质量扰动类型识别和基本电力参数计算。电能质量检测系统由 DSP 平台和 Matlab 软件构成, DSP 平台主要包括传感器、信号调理、AD 转换、串口通信及 DSP 系统等模块, 用于实现电力数据采集及基本电力参数计算。Matlab 软件通过仪器控制工具箱中的串口对象实现与 DSP 的串口通信, 当 Matlab 接收到 DSP 发送的电力数据后运行 S 变换和关联向量机等算法, 对电力数据进行分析及特征提取, 从而实现电能质量扰动类型识别。

关键词: 电能质量扰动; 智能算法; 电压暂降; 检测; 识别; 关联向量机

DETECTION AND CLASSIFICATION OF POWER QUALITY BASED ON INTELLIGENT ALGORITHM

ABSTRACT

The power quality is denoted by the deviation of voltage, current or frequency, which makes electric equipments not work proper. Due to the non-linear, fluctuating and unbalanced loads, many problems such as voltage sags, voltage swells, voltage interrupts, oscillation transients and harmonics, are produced. Those problems result in inestimable economic loss to consumers and providers. At the same time, some intelligent electrical devices stipulate more rigorous requirement for the power quality. The problem of how to improve the power quality becomes hotspot in the field of power quality. It is important to detect and analyze the power quality, which is the precondition and foundation for improving and governing the power quality.

The concept, classification, standards, causes and hazards of power quality are introduced in this paper, and they are followed by the traditional ways of the power quality. Aim at the problem of power quality disturbances, an approach based on S-transform and intelligent algorithm is presented in this paper, which identifies the classification of power quality disturbances. For the most serious problem in the disturbances, a method based on S-transform and GA-SVM is combined to classify the source of voltage sags. The classification system of power quality disturbances is achieved on the DSP and Matlab, the details are as follows:

(1) After analyzing the characteristics of every power quality disturbance, an approach based on S-transform and intelligent algorithm is presented in this paper. Power quality disturbances mainly include harmonics, voltage sags, voltage swells, voltage interrupts, flickers, oscillation transients, voltage sags with harmonic and voltage swells with harmonic. The signal of power quality disturbances is produced

by simulation models, features of every power quality disturbance extracted by S-transform are applied to relevance vector machine, support vector machine and neural network for automatic classification of the power quality disturbances. The results of experiment show that the approach based on S-transform and relevance vector machine can effectively detect and classify the power quality disturbances. This approach has the advantages of the short test time and higher correctness, and can be applied to real-time power quality detection system.

(2) Voltage sags are the most serious problems in power quality disturbances. The causes for voltage sags are the short circuit, the transformer energizing and the motor starting. It is significant to identify the source of voltage sags. A new approach based on S-transform, genetic algorithm and support vector machine is presented in this paper. Some characteristics related to voltage sags are extracted by S-transform. Genetic algorithm is used for optimizing the extracted feature, which can be utilized to effectively classify the voltage sags source with support vector machine. The experiment results confirm that this approach is efficient to classify the voltage sags source.

(3) A system used for classifying the power quality disturbances based on DSP and Matlab is proposed in this paper, after analyzing the technology of power quality detection system both at domestic and foreign. The system is composed of DSP and Matlab. DSP is mainly included sensor, signal processing, ad conversion, serial communication and DSP system, which is used for collecting the power data and calculating the essential parameter of power. Matlab can communication with DSP by the serial port, after receiving the power data, the algorithms such as S-transform and relevance machine are running on Matlab, which are applied to analyze and classify the power quality disturbances.

KEYWORDS: power quality disturbances; intelligent algorithm; voltage sags; detection; classification; relevance vector machine

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
目录	V
1 绪论	1
1.1 课题的背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 论文的主要研究内容	3
2 电能质量概述	5
2.1 电能质量定义	5
2.2 电能质量分类	5
2.3 电能质量标准	6
2.4 电能质量问题产生原因及危害	8
2.5 电能质量分析方法	9
2.5.1 时域仿真法	9
2.5.2 频域分析法	10
2.5.3 基于变换的方法	10
2.6 小结	11
3 电能质量扰动识别	12
3.1 S 变换	12
3.2 电能质量扰动模型	13
3.3 基于 S 变换的电能质量扰动检测及特征提取	18
3.3.1 电能质量扰动检测	18
3.3.2 电能质量扰动特征提取	21
3.4 基于智能算法的电能质量扰动识别	22
3.4.1 基于关联向量机的电能质量扰动识别	22
3.4.2 基于神经网络的电能质量扰动识别	26
3.4.3 基于多分类支持向量机的电能质量扰动识别	28
3.4.4 三种智能算法结果比较	29
3.5 小结	30
4 电压暂降源识别	31
4.1 电压暂降分类	31
4.1.1 短路故障引起的电压暂降	31

4.1.2 变压器投运引起的电压暂降	33
4.1.3 电动机启动引起的电压暂降	33
4.2 电压暂降检测及特征提取	34
4.2.1 基于 S 变换的电压暂降检测	34
4.2.2 电压暂降特征提取	38
4.3 基于 GA-SVM 暂降源识别	40
4.4 小结	43
5 电能质量监测系统	44
5.1 系统总体结构	44
5.2 电能质量监测系统硬件电路设计	45
5.2.1 数字信号处理器选择	45
5.2.2 信号调理电路	45
5.2.3 模数转换电路	46
5.2.4 数据存储器	47
5.2.5 串口通信电路	48
5.2.6 DSP 电源电路	48
5.3 系统软件设计	49
5.3.1 DSP 程序设计	50
5.3.2 Matlab 程序设计	50
5.4 小结	51
6 总结与展望	52
6.1 总结	52
6.2 展望	53
参考文献	54
攻读学位期间取得的研究成果	57
致 谢	58
浙江师范大学学位论文独创性声明	59
学位论文使用授权声明	59

1 绪论

1.1 课题的背景及研究意义

电能作为现代生活中最为重要的能源，它的使用程度已经成为了一个国家或地区发展水平的重要标志之一。近年来，由于国家一系列宏观调控政策出台，使得国内的电力事业得到了迅猛的发展，基本解决了电能的温饱问题。在工业生产方面，为了追求更高的生产效益，投入了大量的整流器、逆变器、电弧炉、电焊机等非线性和冲击性负荷，使得电网波形发生严重的畸变，产生了谐波、电压暂降、电压暂升、电压中断、电压波动等多种电能质量扰动问题，给生产和生活带来了许多严重问题。据调查研究发现，在众多的电能质量扰动问题中，电压暂降最为严重。由电压暂降引起的用户投诉占电能质量问题 80%以上^[1]，而且 80%服务器出现瘫痪和用户端 45%数据丢失都与电压暂降有关。同时，以计算机和微处理器为核心的精密仪器对电能质量提出了更高的要求，改善电网的电能质量变得至关重要，它对于电网和用电设备正常、稳定、安全、可靠、经济运行，提高工业生产效率，保障工业产品质量有着重要的意义。

电能质量检测与识别是治理和改善电网电能质量的前提与基础，只有快速、准确的检测出电网中的电能质量问题、识别其类型，才能及时的采取正确方法对电能质量问题进行治理。电能质量问题检测与识别，不仅有利于电网的改善与治理，它还可以减小由电能质量问题带来的经济损失，解决供电部门和用户之间的矛盾纠纷，甚至还可做为未来电力市场竞争的主要手段。

1.2 国内外研究现状

电能质量扰动是一类复杂的电能质量问题，它主要由谐波、电压暂降、电压暂升、电压中断、电压波动、暂态振荡、谐波暂升和谐波暂降等多种电能质量问题组成。由于电能质量扰动复杂性和危害性，使得电能质量扰动检测与识别成为电力行业关注的热点和研究的重点。文献[2]提出一种基于 S 变换模时频矩阵相似度的电能质量扰动识别方法，该方法首先通过建立各种电能质量扰动的标准模

时频矩阵,然后对比未知信号和各种电能质量扰动标准模时频矩阵之间相似度来确定电能质量扰动类别,该方法原理简单,能够识别出简单扰动,但很难实现复杂扰动类型识别。文献[3]提出基于复数小波相位信息的电能质量扰动和识别方法,通过利用复小波相位和模值信息来实现电能质量扰动检测、定位与分类,该方法原理简单,具有很好实时性,但抗噪能力不好。文献[4]提出基于 Teager 能量算子的电能质量扰动检测方法,通过利用 Teager 能量算子和小波变换相结合来实现电能质量扰动定位,该方法具有较高的时间分辨率。对于简单的电能质量扰动,有经验的专家和学者可以通过各种变换方法提取电能质量扰动特征来实现电能质量扰动检测与识别,但是如果扰动类型比较复杂或提取特征数据比较庞大,通过人为检测与识别电能质量扰动不仅浪费时间,而且不能保证识别正确率。随着遗传算法、模糊算法、专家系统、神经网络、支持向量机等智能算法的不断提出,为电能质量扰动检测与识别提供新的研究方向。文献[5-10]提出基于小波变换和模糊算法、神经网络、支持向量机等智能算法相结合的电能质量扰动识别方法,通过小波变换对扰动信号多尺度分析得到各扰动特征,然后结合智能算法进行识别。文献[11-17]提出基于 S 变换和神经网络、支持向量机等算法结合的电能质量扰动检测方法,利用 S 变换提取扰动特征,再通过智能算法进行识别。为研究不同特征对电能质量扰动识别效果影响,文献[18-19]通过遗传算法、主成分分析等算法,对提取到的各个特征进行讨论,选取对识别效果具体重要贡献的特征样本,并通过智能算法验证选取特征样本有效性。

电压暂降作为电能质量扰动中最为严重的电能质量问题,对其进行深入研究是非常有必要的。在电压暂降检测方面,文献[20-21]提出基于 Hilbert 变换的暂降检测方法,该方法能够检测出暂降幅值和暂降时间,但精度不理想。文献[22]提出基于短时傅里叶变换的暂降检测方法,由于短时傅里叶变换具有良好的时频分析能力,它能够准确的检测出电压暂降的幅值和暂降发生时间,但由于其时频窗大小固定,在分析瞬变信号时具有局限性。文献[23-26]提出基于小波变换暂降检测方法,由于小波变换具有良好多尺度分析能力,通过对信号进行分解和重构能够有效的检测出电压暂降发生的时间,但很难得到暂降的幅值和相位信息。文献[27-28]提出了基于 S 变换的电压暂降检测方法,S 变换是在短时傅里叶变换和小波变换基础上结合发展起来的方法,它克服了短时傅里叶变换窗口不易确定的

缺点,且在低频段频率分辨率高时间分辨率低,在高频段时间分辨率高频率分辨率低。S 变换能够准确的检测出电压暂降的幅值和暂降发生的时间,相对小波变换它具有更好的抗噪声能力,结果更加的直观。

电压暂降源识别包括电压暂降源的定位和电压暂降源的分类。目前,电压暂降源识别研究主要集中在暂降源定位方面,而暂降源分类研究相对较少。文献[29-33]提出基于事件的电压暂降源识别方法,根据电压暂降特征,判断电压暂降源位置,但很少提及暂降源的分类。文献[34]提出基于卡尔曼滤波的暂降源识别方法,该方法充分的考虑发各个事件引起的电压暂降,效果很好,但过程比较复杂。文献[35-36]提出小波变换和智能算法相结合的方法,该方法能识别出暂降源类型,但小波抗噪能力差,且提取特征较少。

在电能质量监测系统方面,国外的研究起步相对较早,有许多公司从事电能质量监测方面的研究,如美国的 Fluke 公司、PowerSight 公司、瑞士的 LEM 公司、德国西门子公司等,它们都已经成功研制了多款电能质量监测仪。这些电能质量监测仪,不仅可以实现多种电能质量准确监测与分析,而且还可实现信号波形实时跟踪、远程通信、人机交互和故障报警等功能。近年来,随着电能质量问题日益突出,国内在电能质量监测方面投入了大量的人力和物力,确实已经取得了不错的成果,但和国外同行相比还存在着不小差距,主要表现在电能质量监测系统功能、系统精度、稳定性、实时性、网络化程度及智能化程度等方面,还远远达不到实际发展需求,在电能质量监测方面我们还需要做大量的工作。

1.3 论文的主要研究内容

电能质量扰动和电压暂降源识别对于治理和改善电能质量、提高生产效率和解决矛盾纠纷具有重要的意义。本文主要围绕电能质量扰动识别、电压暂降源识别、电能质量监测系统研制三方面进行研究,主要内容如下:

(1) 本文首先简单介绍了电能质量定义、分类、标准及电能质量产生的原因和危害,然后对现有的电能质量检测与分析方法进行概括。

(2) 针对电能质量扰动问题,提出了一种基于 S 变换和智能算法相结合的电能质量扰动识别方法。首先对各电能质量扰动产生原因及仿真模型进行研究,仿真产生各种电能质量扰动信号。然后对电能质量扰动进行 S 变换,提取到各种扰动特征样本。最后分别运用关联向量机、神经网络和多分类支持向量机三种智能

算法对特征样本进行训练及测试，得到电能质量扰动类型。

(3) 对于电能质量扰动中最为严重的电压暂降问题，提出一种基于 S 变换和 GA-SVM 的电压暂降源识别方法。首先分析了电压暂降产生原因，构建 Simulink 仿真模型，产生各种原因引起的电压暂降信号。然后通过 S 变换的基频幅值曲线和 5 次谐波幅值曲线检测得到电压暂降幅值及暂降时间，研究各种暂降波形及特点，提取用来暂降源识别的多个暂降特征。运用遗传算法对提取的特征进行优化，选取最优特征样本，最后通过多分类支持向量机验证最优特征样本有效性。

(4) 研制一款基于 DSP 平台和 Matlab 软件的电能质量监测系统，主要用于电能质量扰动识别和基本电力参数计算。各种电能质量数据采集由 DSP 系统完成，而 S 变换、关联向量机等算法则在 Matlab 软件上开发实现。本文采用 TI 公司 TMS320F2812 作为 DSP 主控芯片，首先通过电流钳和电压互感器采样得到电流和电压信号，经过信号调理电路后将电流和电压信号转变成符合 AD 输入标准的信号，然后由 ADS8364 实现电流和电压信号模数转换，DSP 读取模数转换结果后，通过串口将数据发送给 Matlab，接收到数据后 Matlab 运行 S 变换，关联向量机等程序实现电力数据分析与识别。

2 电能质量概述

2.1 电能质量定义

一个理想的供电装置应该以恒定的频率和正弦波形,按照规定的电压和频率要求对用户进行供电。在正常情况下,三相电力系统中的各相电流和电压的幅值应该相同、相位相差 120° ,但是由于非线性负荷、冲击性负荷的大量和快速的使用,加之不完善调控手段、不合理的系统规划及各种故障,导致理想的供电装置是不存在的。为评价一个供电装置的优劣,为此提出电能质量的概念。普遍意义而言,电能质量是指供电部门给用户提供的交流电能品质。但目前为止,国内外对电能质量还没有一个统一和准确的定义。电能质量(Power quality)这个词最早出现在一篇关于美国海军电子设备电源规范的论文中。此外,在一些文献中也相继出现了“电压质量”,“电流质量”,“用电质量”以及“供电质量”等术语^[37]。“Power quality”这个术语被IEEE(Institute of Electrical and Electronics Engineers)标准化协调委员会正式采用,并做了比较专业的定义:合格电能质量是指,给敏感用电设备提供的电力和设置的接地系统是均适合于该设备正常工作的。而IEC(International Electro technical Commission)则提出了“EMC”这个术语,即供电装置正常情况下不中断和干扰用户使用电力的物理特性。

2.2 电能质量分类

电能质量问题主要可以分为暂态和稳态两大类。暂态电能质量问题通常以频谱和暂态持续时间为特征,可以分为振荡暂态、脉冲暂态、电压中断、电压暂降、电压暂升等电能质量问题。而稳态电能质量问题则以波形畸变为特征,包括谐波、间谐波、电压缺口、三相不对称、过电压、欠电压、噪声等电能质量问题。表 2.1 列出 IEEE 制定的关于电能质量种类及其特征^[38]。

表 2.1 IEEE 制定的关于电力系统中电能质量种类及其特征

种类		典型频谱成分	典型持续时间	典型电压幅值
	纳秒级	5ns 上升	<50ns	

电磁暂态	脉冲	微秒级	1 μ s 上升	50ns-1ms	
		毫秒级	0.1ms 上升	>1ms	
	振荡	低频	<5kHz	0.3-50ms	0-4pu
		中频	5-500kHz	20 μ s	0-8pu
		高频	0.5-5MHz	5 μ s	0-4pu
短时 电压 变动	中断		0.5-30 周波	<0.1pu	
	骤降		0.5-30 周波	0.1-0.9pu	
	骤升		0.5-30 周波	1.1-1.8pu	
长期 电压 变动	持续中断		>1min	0pu	
	欠电压		>1min	0.8-0.9pu	
	过电压		>1min	1.1-1.2pu	
电压不平衡			稳态	0.5-2%	
波形失真	直流偏移		稳态	0-0.1%	
	谐波		稳态	0-20%	
	间谐波		稳态	0-2%	
	陷波		稳态		
	噪声	带宽	稳态	0-1%	
电压波动		<25Hz	间歇	0.1-7%	
频率偏差			<10s		

2.3 电能质量标准

随着科学技术发展、计算机系统及微电子技术普及应用，对电能质量提出了更高的要求。如果电能质量的指标偏离允许值太大，不仅会影响用电设备的效率和使用寿命，甚至会引发严重的事故，影响人身安全。电能质量标准是保证电力系统安全经济运行、保护电气环境、保障电力用户正常使用电能的基本技术规范，是实施电能质量监督、推广电能质量控制技术、维护供电部门和用电部门双方合法权益的法律依据，它不仅考虑了电力系统的安全和经济运行，还考虑了用电设备的正常工作，将两面进行优化协调。迄今为止，我国已经制定并颁布的6项电能质量标准^[39]，它们主要包括：电压允许偏差、电压波动和闪变、电网谐波、

三相不平衡度、频率偏差、暂时过电压和瞬态过电压，具体如表2.2所示。

表 2.2 电能质量标准

标准编号	标准名称	允许限值	说明			
GB 2325—1990	电能质量 供电电压 允许偏差	(1) 35kV 及以上，正负偏差绝对值之和不超过 10% (2) 10kV 及以下三相供电， $\pm 7\%$ (3) 220V 单相供电， $+7\%$ ， -10%	衡量点为供电权分界或电能计量点			
GB 2326—2000	电能质量 电压波动 和闪变	电压变动 d 的限值和变动频度 r 有关： 当 $r \leq 1000h^{-1}$ 时，对于低压(LV)和中(MV)， $d=1.25\%-4\%$ ；对于高压(HV)， $d=1.0\%-3\%$ 当随机不规则的变动时，对于 LV 和 MV， $d=2\%$ ；对于 HV， $d=1.5\%$	(1) 衡量点为公共连接点(PCC) (2) P_{st} 的测量周期为 10min，取实测 95%概率大值； P_{li} 的测量周期为 2h，不得超标 (3) 限值分三级处理原则 (4) 提供预测计算方法，规定测量仪器并给出典型分析实例			
		闪变限值				
		系统电压等级		LV	MV	HV
		短时间闪变值 P_{st}		1.0	0.9	0.8
长时间闪变值 P_{li}	0.8	0.7	0.6			
GB/T 14549—1993	电能质量 公用电网 谐波	各级电网谐波电压限值(%)				(1) 衡量点为 PCC，取实测 95%概率大值 (2) 对用户允许产生的谐波电流提供计算方法 (3) 对测量方法和测量仪器做出规定 (4) 对同次谐波随机性合成提供算法
		电压/kV	THD	奇次	偶次	
		0.38	5	4.0	2.0	
		6,10	4	3.2	1.6	
		35,66	3	2.4	1.2	
		110	2	1.6	0.8	
注： ① 220kV 电网参照 110kV 执行 ② THD 为总谐波畸变						
GB/T 15543—1995	电能质量 三相电压 允许不平衡度	(1) 正常允许 2%，短时不超过 4% (2) 每个用户一般不得超过 1.3%	(1) 各级电压要求一样 (2) 衡量点为 PCC，取实测 95%概率大值或日累计超标不许超过 72min，且每 30min 中超标不许超过 5min (3) 对测量方法和测量仪器做出基本规定 (4) 提供不平衡度算法			

GB/T 155543 —1995	电能质量 电力系统 频率允许 偏差	(1) 正常允许 $\pm 0.2\text{Hz}$, 根据系统容量可以放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ (2) 用户冲击引起的频率变动一般不得超过 $\pm 0.2\%\text{Hz}$	对测量仪器提出基本要求																								
GB/T 18481 —2001	电能质量 暂时过电 压和瞬态 过电压	<p>(1) 正常工频过电压限值</p> <table border="1" data-bbox="514 394 892 793"> <tr> <td colspan="2">系统工频过电压限值</td> </tr> <tr> <td>电压等级/kV</td> <td>过电压限值 (p.u)</td> </tr> <tr> <td>$U_m > 252(\text{I})$</td> <td>1.3</td> </tr> <tr> <td>$U_m > 252(\text{II})$</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>110,220</td> <td>1.3</td> </tr> <tr> <td>35-66</td> <td>$\sqrt{3}$</td> </tr> <tr> <td>3-10</td> <td>$1.1\sqrt{3}$</td> </tr> </table> <p>(2) 操作过电压限值包括空载线路合闸、单相重合闸、成功的三相重合闸、非对称故障分闸及振荡解列过电压限值。</p> <table border="1" data-bbox="514 1003 892 1239"> <tr> <td colspan="2">操作过电压限值</td> </tr> <tr> <td>电压等级/kV</td> <td>过电压限值 (p.u)</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>2.0</td> </tr> <tr> <td>330</td> <td>2.2</td> </tr> <tr> <td>110-252</td> <td>3.0</td> </tr> </table>	系统工频过电压限值		电压等级/kV	过电压限值 (p.u)	$U_m > 252(\text{I})$	1.3	$U_m > 252(\text{II})$	1.4	110,220	1.3	35-66	$\sqrt{3}$	3-10	$1.1\sqrt{3}$	操作过电压限值		电压等级/kV	过电压限值 (p.u)	500	2.0	330	2.2	110-252	3.0	<p>(1) 暂时过电压包括工频过电压和谐振过电压。瞬态过电压包括操作过电压和雷击过电压。</p> <p>(2) 工频过电压</p> <p>$1.0(p.u.) = U_m / \sqrt{3}$。谐振过电压和操作过电压</p> <p>$1.0(p.u.) = \sqrt{2}U_m / \sqrt{3}$</p> <p>(3) 除统计过电压(不小于该值的概率为 0.02)外, 凡未说明的操作过电压限值均为最大操作过电压(不小于该值的概率为 0.0014)</p> <p>(4) 瞬态过电压还对空载线路分闸过电压、断路器开断关联补偿装置及变压器等过电压限值做出了规定</p>
系统工频过电压限值																											
电压等级/kV	过电压限值 (p.u)																										
$U_m > 252(\text{I})$	1.3																										
$U_m > 252(\text{II})$	1.4																										
110,220	1.3																										
35-66	$\sqrt{3}$																										
3-10	$1.1\sqrt{3}$																										
操作过电压限值																											
电压等级/kV	过电压限值 (p.u)																										
500	2.0																										
330	2.2																										
110-252	3.0																										

我国已经初步制定电能质量标准,但是与国外同类标准相比,还存在巨大的差距,我们的电能质量的标准体系还不是很完善。在工业生产中,一些电能质量指标是急需提出来的,但目前为止并没有做出任何规定,缺少电能质量指标的检测推荐方法和测量精度等的规定,并且有些指标的科学性和可操作性差,缺乏完整的技术指导和行业规程导则。所以,我们还需要不断的努力来完善电能质量标准体系。

2.4 电能质量问题产生原因及危害

在现代生产工业中,随着变频器、逆变器等非线性负荷大量使用,导致电网电压波形发生畸变,产生严重电能质量问题,带来巨大的经济损失。在电能质量检测与分析过程中,如果能够准确、快速的识别出电能质量问题产生的原因,对于电能质量问题的解决及处理有着至关重要的作用。电能质量问题产生原因主要

有以下几点:

(1) 自然原因引起。由于雷击、动物和风暴导致电缆损坏、传输线路及用电设备老化、绝缘污染等原因会引发电能质量问题,降低电力系统可靠性。

(2) 非线性和冲击性负荷大量、快速使用。由于逆变器、电弧炉、电焊机和大型马达等非线性和冲击性负荷大量使用,不可避免地向电力系统注入谐波成分,使电压波形发生畸变,产生严重的电能质量问题。

(3) 大负荷投运及启动。大容量电动机启动或变压器投运,都会引起公共连接点的电压发生突变,引起一些暂态电能质量问题。

电能质量问题不仅给人们的生活造成诸多的不便,给生产部门带来巨大经济损失,严重的还会引发人身安全事故。据调查发现,美国每年由于电能质量问题造成的经济损失就达到260亿美元,足见电能质量问题的危害性。电能质量问题对电力系统和电力用户带来的具体危害如下:

(1) 使电网元件产生附加损耗,引起用电设备发热,缩减使用寿命,甚至引发火灾。

(2) 导致电能计量仪器产生误差,给电力部门和用户带来巨大经济损失。

(3) 干扰精密仪器的正常工作或引发误动作,给生产部门带来巨大的损失。

(4) 高次谐波会对附近的通信设备进行干扰,降低通信质量,引发数据丢失。

2.5 电能质量分析方法

电能质量分析方法要求能够快速、有效的实现电能质量问题的检测、定位及识别。目前,主要的电能质量分析方法有时域仿真法、频域分析法和基于变换的方法。

2.5.1 时域仿真法

时域仿真法是比较常用的分析方法,它主要通过各种时域仿真软件对电能质量问题进行仿真研究。目前使用最多的仿真软件有TMTDC、EMTP、NETOMAC等暂态仿真软件和PSPICE、SPICE电力电子仿真软件。由于电力系统是由R, L, C元件构成的,利用这些仿真软件在求解微分方程时,通常采用改变阶数、步长、隐式梯形积分法,这样可以达到求解过程数值稳定、缩短分析时间的目的。采用时域分析方法的缺点最可模仿的最大频率范围由仿真步长选取决定,所示暂态过

程的频率覆盖范围必须是事先知道的。另外，在仿真开关状态时，会引起数值振荡，必须采用有效的方法用来抑制数值振荡的发生。

2.5.2 频域分析法

频域分析方法主要应用于谐波问题的分析和计算，主要包括频率扫描和谐波潮流计算。为解决非线性负载的动态特性问题，近年来又提出一种混合谐波潮流计算的方法，在常规的谐波潮流计算方法的基础上，利用EMTP等时域仿真软件对非线性负载进行仿真计算，求出各次谐波动态电流矢量，得到暂态谐波潮流解。频域分析法的优点是考虑到了非线性负载的动态特性，但计算量大，过程繁琐。

2.5.3 基于变换的方法

基于变换方法的电能质量检测是当前电能质量领域研究的热点和重点。目前，这些变换方法主要有：傅里叶变换、短时傅里叶变换、Prony分析、小波变换、S变换。

(1) 傅里叶变换

傅里叶变换具有正交、完备优点，它能够检测出平稳信号的频率、幅值及相位信息。由于算法简单、快速等特点，傅里叶变换在电能质量检测方面应用相当的广泛。但当检测信号频率和采样频率不一样时，便会出现频谱泄漏效应和栅栏效应，而且傅立叶变换是对信号进行整个时域积分，所得到结果是信号在整个时域内的平均，得不到信号的局部特征，它只能用来分析平稳信号，对于非平稳信号和非周期性信号，具有较大的误差。

(2) 短时傅里叶变换

为了克服傅里叶变换得不到信号局部特征这一缺点，Gabor提出了短时傅里叶变换，它的思想是：把不平稳信号分成许多个很小时间间隔，然后分别用傅里叶变换对各个时间间隔进行分析，确定其频率成分。由于其算法简单，在分析非平稳信号方面应用相当广泛，在暂态电能质量检测和谐波检测方面取得不错的成果。但当短时傅里叶用来分析含两个或两个以上信号成分时，很难选取一个合适的窗函数来满足不同的要求；其次，短时傅里叶的时频窗口大小是固定的，不能满足高频时频窗大、时窗小，低频时频窗小、时窗大的需求。因此，短时傅里叶变换只能用于分析信号分量小、特征尺度大致相同的过程，不适合多尺度和突变

过程。

(3) Prony分析

1795年, Prony提出用复指数函数的线性组合来描述等间距采样数据的数学模型, 形成了Prony算法^[40-41]。它是一种能够根据采样值直接算出信号频率、幅值、相位及衰减因子的分析方法, 可以对信号进行多尺度分解。Prony算法适用于分析平稳信号, 但对于非平稳、非线性信号却无能为力, 分析结果受到模型阶数影响较大、其抗噪声能力、实时性较差。

(4) 小波变换

小波变换是一种良好时频分析方法, 具有良好的时域-频域局部化特性, 克服了傅里叶变换方法和短时傅里叶变换方法的缺点。由于其强大的多尺度分析特性, 被广泛应用于电能质量扰动检测与定位^[42-43]、扰动信号数据压缩、扰动识别及建模和分析方面。但是小波变换结果和小波基的选择有很大的关系, 不同的小波变换得到的结果大不相同, 而且小波变换抗噪声能力差, 过程不够简便, 结果缺乏直观性。

(5) S变换

1996年, Stockwell提出了S变换, 它是在短时傅里叶变换和小波变换的基础上结合发展起来的方法, 具有良好的时频分析能力。首先S变换是连续小波变换的延伸, 它是对连续小波变换的一种相位修正。其次S变换的高斯窗口高度和宽度可以随频率变化, 克服了短时傅里叶变换窗函数长度不易确定的缺点。S变换的结果在时频表面上也比小波变换直观, 更易理解。S变换它能够提取信号的频率、幅值、相位及时间等特征信号, 它在谐波检测、电压暂降检测、电能质量扰动检测与识别方面已取得不错的效果。

2.6 小结

本章简单介绍了电能质量定义、分类及其标准, 然后分析了电能质量产生的原因及危害, 并研究了电能质量三种主要分析方法: 时域仿真法、频域分析法和基于变换的方法。

3 电能质量扰动识别

由于非线性、冲击性负载大量使用,电网的电能质量受到严重干扰,产生了电压暂降、电压暂升、电压中断、电压波动等电能质量扰动问题。电能质量扰动是电能质量问题中比较严重的问题之一,它不仅会给供电部门和用电部门带来大量的矛盾纠纷,而且会给生产部门带来巨大的经济损失。电能质量扰动识别是治理和改善电能质量的前提和基础,它不仅可以做为供电部门和用电部门解决矛盾纠纷的重要依据,而且还有利于区域配电系统的评估和合理治理方案的选择。

针对电能质量扰动问题,本文提出基于 S 变换和智能算法的电能质量扰动识别方法。通过 Matlab 仿真产生标准正弦、谐波、电压波动、电压暂降等电能质量扰动信号,用 S 变换检测得到各种电能质量扰动的特征样本,然后分别运用关联向量机、神经网络和多分类支持向量机对各个特征样本进行训练及测试,得到电能质量扰动类型。

3.1 S 变换

1996 年, Stockwell 提出了 S 变换^[44],它是一种可逆的时频分析方法,是在小波变换和短时傅里叶变换基础上结合发展起来的,具有良好的时频分析能力,能够很好的提取各种信号的幅值、频率、相位等特征信息。信号 $s(t)$ 的 S 变换定义如下:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi f(t-\tau)} dt \quad (3.1)$$

式中, $\psi(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi ft}$ 为高斯窗口, τ 为控制高斯窗口在时间 t 轴位置的参数。从式(3.1)可以发现, S 变换中的高斯窗口的大小可以随着频率变化,它克服了短时傅里叶变换窗口大小固定不变的缺点。

S 变换逆变换为:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau e^{j2\pi ft} df \quad (3.2)$$

S 变换可以看成是小波变换的一种相位修正, 它可以通过小波变换推导而来。假设信号 $s(t)$ 的小波变换定义如下:

$$W(a, d) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) w\left(\frac{t-d}{a}\right) dt \quad (3.3)$$

式中, w 为母小波; a , d 分别为伸缩参数和时移参数。如果将一个高斯窗函数和一个复向量的乘积定义成母小波, 即

$$w(t, f) = \frac{f}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi ft} \quad (3.4)$$

由式(3.3)和(3.4)便可以推导得到信号 $s(t)$ 的 S 变换。

虽然 S 变换是由小波变换发展得到的, 但是它克服了小波变换中高斯窗只能在固定时间位置进行伸缩的缺点, 使得高斯窗可以随意的平移和伸缩。

由于 $s(t)$ 的 S 变换和傅里叶变换 $X(f)$ 之间存在如下关系:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f+\nu) e^{-\frac{2\pi^2\nu^2}{f^2}} e^{j2\pi\nu\tau} d\nu \quad (3.5)$$

式中 $f \neq 0$ 。由(3.5)式就可以得到 S 变换的离散形式为:

$$S\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} e^{j\frac{2\pi mn}{N}} \quad (3.6)$$

信号 $s(t)$ 经 S 变换后得到一个复时频矩阵, 记为 S 矩阵, 它的列对应采样时间点, 行对应频率值。对 S 矩阵取模后得到 S 模矩阵, 其列向量表示某一时刻幅值随频率变化的情况, 而行向量表示信号某一频率处幅值随时间变化的情况。

3.2 电能质量扰动模型

在电力系统中常见的电能质量扰动主要包括: 谐波、电压波动、电压暂降、电压暂升、电压中断、暂态振荡、谐波暂降及谐波暂升等。本文通过 Matlab 构建仿真模型仿真产生标准正弦信号和各种电能质量扰动信号。仿真产生信号的基波频率为 50Hz, 采样频率为 6.4KHz, 其中各次谐波幅值、电压波动幅度、频率波动系数、扰动发生时间等参数都在一定范围内随机变化。

(1) 标准正弦信号

标准正弦信号指正弦信号的幅值和频率都是恒定的，其仿真模型为：

$$y = \sin(\omega_0 t) \quad (3.7)$$

式中 ω_0 为角频率， $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。标准正弦波形如图 3.1 所示。

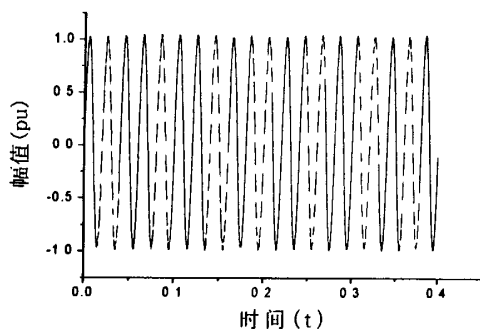


图 3.1 标准正弦信号

(2) 谐波

谐波是比较常见的电能质量扰动问题，它表示一个频率为基波频率整数倍的周期电气量。假设谐波信号中包含的谐波成分主要为 5 次、7 次和 11 次谐波，其仿真模型为：

$$y = \sin(\omega_0 t) + \alpha_5 \sin(5\omega_0 t) + \alpha_7 \sin(7\omega_0 t) + \alpha_{11} \sin(11\omega_0 t) \quad (3.8)$$

式中， α_5 、 α_7 、 α_{11} 分别为基波、5 次、7 次和 11 次谐波对应幅值，其中 $0.035 \leq \alpha_5, \alpha_7, \alpha_{11} \leq 0.14$ 。谐波仿真波形如图 3.2 所示。

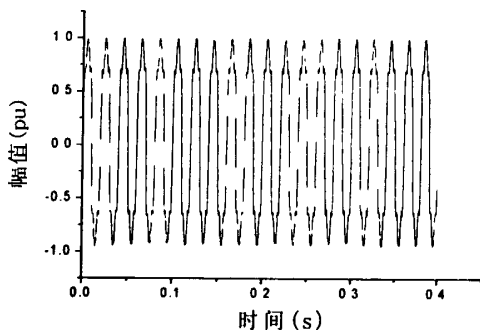


图 3.2 谐波信号

(3) 电压波动

电压波动是指电压在包络线内有规则变动的情况。假设电压波动仿真模型为：

$$y = (1 + \alpha \sin(\beta \omega t)) \sin(\omega_0 t) \quad (3.9)$$

式中，波动幅度 α 为0.08~0.22，频率波动系数 β 为0.1~0.5。其波形如图3.3所示。

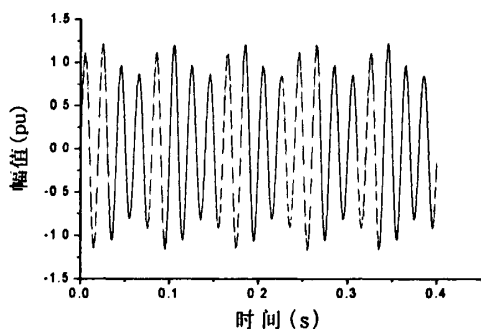


图 3.3 电压波动信号

(4) 电压暂升

电压暂升是指电压有效值在短时间内突然升至额定值的110%~190%，持续时间为0.5~30个周波。电压暂升仿真模型为：

$$y = (1 + \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2))) \sin(\omega_0 t) \quad (3.10)$$

式中， $0.9 \leq \alpha \leq 1$ ， $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$ ， $u(t)$ 为单位阶跃函数(下同)，其波形如图3.4所示。

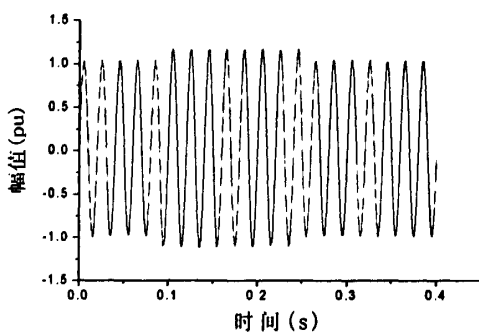


图 3.4 电压暂升信号

(5) 电压暂降

电压暂降是电能质量扰动中最为严重的电能质量扰动问题，它是指电压有效值快速下降为正常额定值的10%~90%，其持续时间为0.5~30个周波。电压暂降的仿真模型为：

$$y = (1 - a(u(t-t_1) - u(t-t_2)))\sin(\omega_0 t) \quad (3.11)$$

式中, $0.1 \leq a \leq 0.9$, $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$, 其波形如图 3.5 所示。

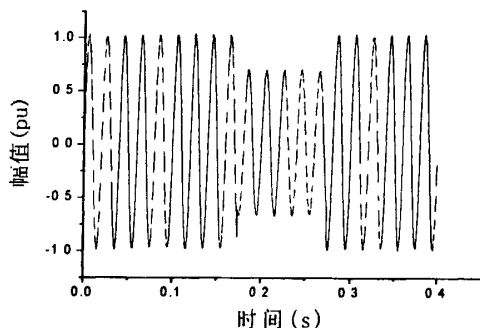


图 3.5 电压暂降信号

(6) 电压中断

电压中断是指电压有效值快速下降至正常额定值的 0~10%, 其仿真模型为:

$$y = (1 - \alpha(u(t-t_1) - u(t-t_2)))\sin(\omega_0 t) \quad (3.12)$$

式中, $0.9 \leq \alpha \leq 1$, $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$, 其波形如图 3.6 所示。

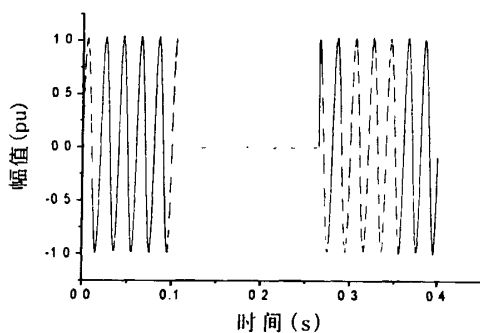


图 3.6 电压中断信号

(7) 暂态振荡

暂态振荡是指在稳态电压、电流上突然加入正、负性的非工频变化。暂态振荡仿真模型为:

$$y = (\sin(\omega_0 t) + \alpha e^{-(t-t_1)/\tau} \sin \omega_n (t-t_1))(u(t_2) - u(t_1)) \quad (3.13)$$

式中, $0.1 \leq \alpha \leq 0.8$, $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 3T$, $8ms \leq \tau \leq 40ms$, $300 \leq f_n \leq 900Hz$

其波形如图 3.7 所示。

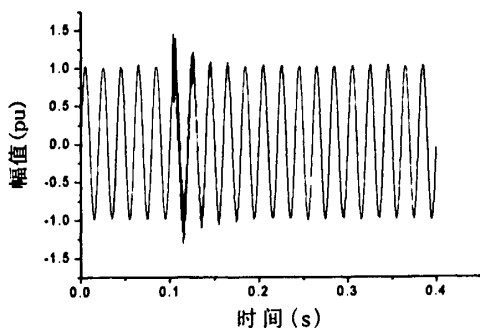


图 3.7 暂态振荡信号

(8) 谐波暂降

在实际的电力系统中,许多电能质量扰动问题并不是单一出现的,往往包含了两个或两个以上的电能质量扰动问题。假设含有谐波的电压暂降仿真模型为:

$$y = (1 - a(u(t - t_1) - u(t - t_2)))\sin(\omega_0 t) + \alpha_5 \sin(5\omega_0 t) + \alpha_7 \sin(7\omega_0 t) \quad (3.14)$$

式中, $0.1 \leq a \leq 0.9$, $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$, $0.035 \leq \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.14$, 它的仿真波形如图 3.8 所示

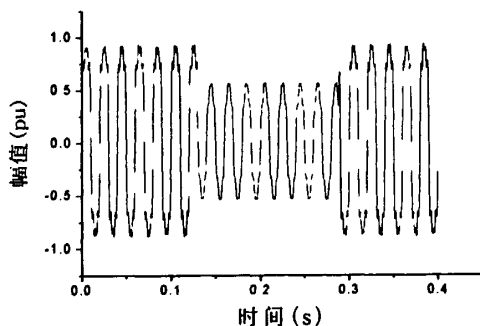


图 3.8 谐波暂降信号

(9) 谐波暂升

谐波暂升是指在电压暂升发生的同时,还包含有谐波成分。其仿真模型为:

$$y = (1 + a(u(t - t_1) - u(t - t_2)))\sin(\omega_0 t) + \alpha_5 \sin(5\omega_0 t) + \alpha_7 \sin(7\omega_0 t) \quad (3.15)$$

式中, $0.1 \leq a \leq 0.9$, $0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 30T$, $0.035 \leq \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.14$, 仿真波形如图 3.9 所示。

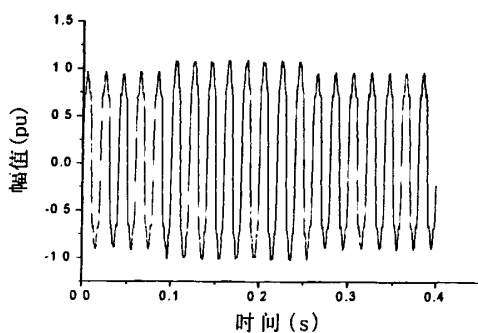


图 3.9 谐波暂升信号

3.3 基于 S 变换的电能质量扰动检测及特征提取

3.3.1 电能质量扰动检测

对标准正弦信号、谐波、电压暂降、电压暂升、电压中断、暂态振荡、电压波动、谐波暂降和谐波暂升进行 S 变换后得到 S 矩阵, 矩阵元素进行处理后可以得到如图 3.10-3.18 所示的结果。其中, (a) 为正弦信号或电能质量扰动信号; (b) 信号基频幅值曲线; (c) 信号时频等值曲线; (d) 信号最大频谱幅值曲线。

基频幅值曲线是通过 S 模矩阵中 50Hz 频率对应的行向量得到的, 对各种电能质量进行 S 变换后, 由式(3.6)可以得到信号基频幅值矩阵为:

$$U(f_0) = S(f_0, n) \quad n = 0 \sim N-1 \quad (3.16)$$

式中, $S(f_0, n)$ 为 S 模矩阵中基频所对应的行向量, n 为采样点, N 为采样点数。

信号最大频谱幅值是指 S 模矩阵中各个频率所对应行向量中幅值的最大值, 它可以通过式(3.17)确定。

$$MAXU(f_i) = \max(S(f_i, n)) \quad n = 0 \sim N-1 \quad (3.17)$$

式中, f_i 为离散化后的频率分量, $MAXU(f_i)$ 为 S 模矩阵中各个频率分量对应幅值最大值, $S(f_i, n)$ 为 S 模矩阵中各个频率所对应的行向量, n 为采样点, N 为采样点数。

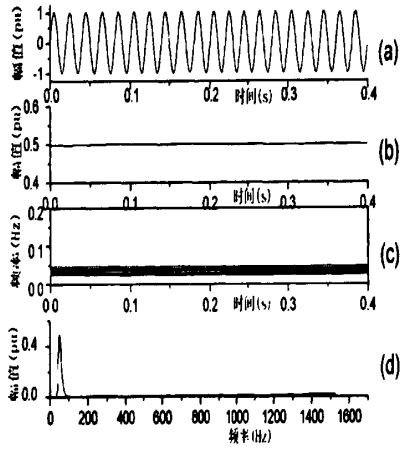


图 3.10 标准正弦信号

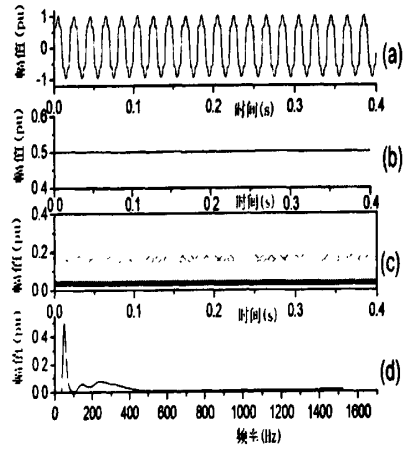


图 3.11 谐波

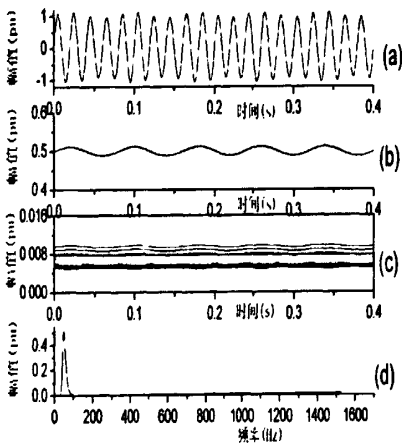


图 3.12 电压波动

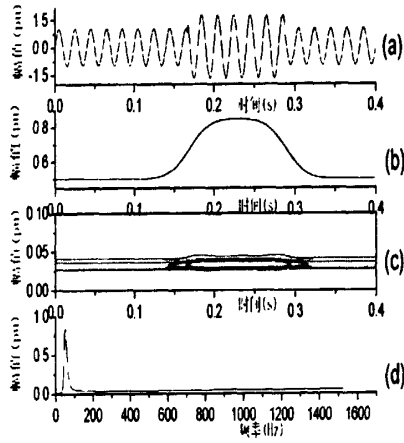


图 3.13 电压暂升

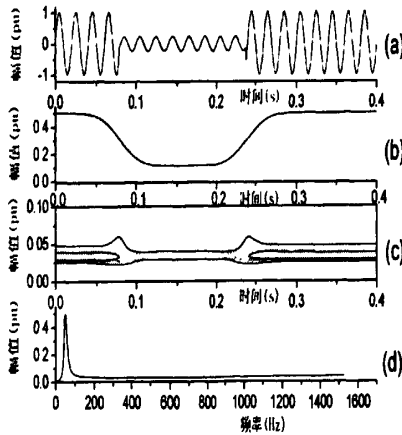


图 3.14 电压暂降

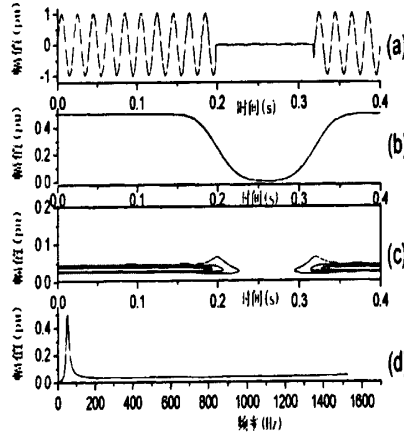


图 3.15 电压中断

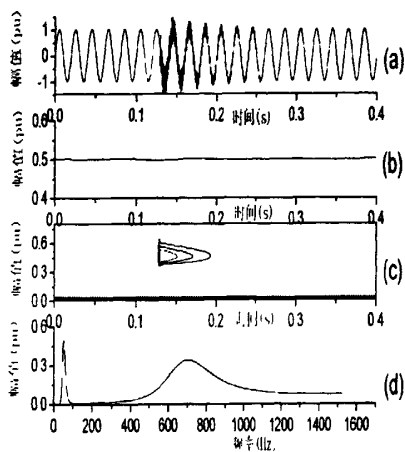


图 3.16 暂态振荡

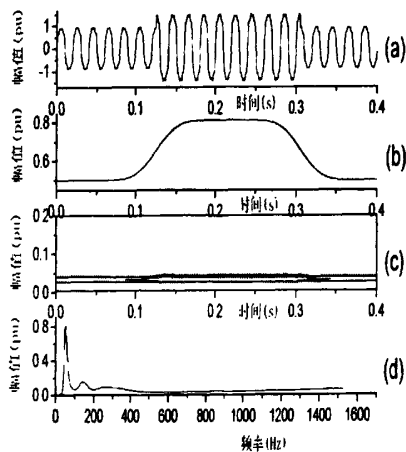


图 3.17 谐波暂升

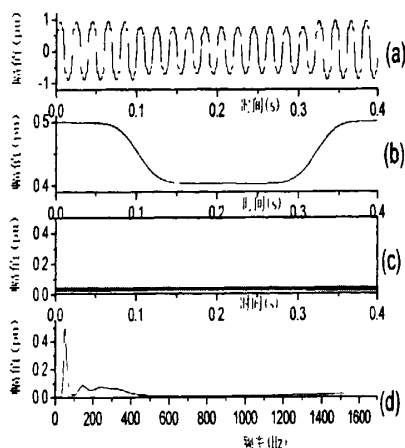


图 3.18 谐波暂降

对图 3.10-3.18 的基频幅值曲线进行研究可以发现, 不同信号基频幅值曲线具有不同的特征。标准正弦信号、谐波和暂态振荡的基频幅值曲线只有微小变化, 整个过程相对平稳; 但是电压暂降、电压中断、电压暂升的基频幅值曲线却存在明显下凹或上凸, 且可以通过基频幅值曲线来确定电压暂降或电压暂升的下降和上升幅值。时频等值曲线可以用来确定发生电能质量扰动时是否存在高频成分, 从曲线上可以清楚看到, 发生暂态振荡时高频段存在较大高频成分, 而其它类型的电能质量扰动高频成分相对较少。各扰动信号所含频率成分可以通过最大频谱曲线来确定, 在标准正弦信号、电压波动、电压暂降、电压暂升和电压中断中, 主要成分为基频, 而其它的扰动除了基频成分外, 还具有较高的高频成分。

3.3.2 电能质量扰动特征提取

电能质量扰动特征的提取是电能质量扰动自动识别的前提和基础,特征提取好坏直接影响识别的精度及速度。为了能够有效、快速的识别出电能质量扰动类型,可以从S变换结果中提取得到下面5种特征量用于后面的关联相量机、神经网络和多分类支持向量机训练及分类。

(1) 谐波畸变率 THD ,各次谐波有效值的平方和的平方根值与基波有效值的比值。谐波畸变率通常用来表示发生畸变的波动偏离正弦波形的程度,在这里用来表征扰动信号中所含谐波成分。由图3.10-3.18中的时频等值曲线和最大频谱曲线可以看出谐波、谐波暂升和谐波暂降信号中含有较大的谐波成分,而其它几种电能质量扰动所含谐波分量较小。提取S模矩阵中基波及2-10次谐波所对应幅值可以得到:

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + \dots + U_{10}^2}}{U_1} \quad (3.18)$$

式中, U_1 、 U_2 、 U_{10} 分别表示基波、2至10次谐波的幅值有效值。

当 THD 比较大时,可判断信号为谐波、谐波暂降或谐波暂升。

当 THD 较小时,可判断信号为电压暂降、电压暂升或电压中断。

(2) 波动幅度 λ ,指电压暂降下降幅度或电压暂升上升的幅度。由图3.10-3.18的基频幅值曲线可以发现,标准正弦信号、谐波及暂态振荡的基频幅值曲线整个过程相对平稳,而其它几种电能质量扰动在扰动发生时基频幅值曲线波动比较大。本文将发生扰动时间段的基频幅值均值与未发生扰动时间段的基频幅值均值的比值定为波动幅度 λ ,其计算公式为:

$$\lambda = \frac{\bar{S}(f_0, j)}{\bar{S}(f_0, i)} \quad j \neq i \quad (3.19)$$

式中, $\bar{S}(f_0, j)$ 为发生扰动时间段的基频幅值均值, $\bar{S}(f_0, i)$ 为未发生扰动时间段基频幅值均值。

根据电能质量扰动定义,当 $0.1 \leq \lambda \leq 0.9$ 时,即电压幅值下降到正常值的10%~90%,表示发生电压暂降;当 $1.1 \leq \lambda \leq 1.9$ 时,电压幅值上升为正常值的110%~190%,表示发生电压暂升;当 $\lambda \leq 0.1$ 时,电压幅值只有正常值的0%~10%,

表示发生电压中断。

(3) 基波幅值均值 \bar{U}_1 ，其计算公式为：

$$\bar{U}_1 = \frac{1}{N * V_n} \sum_{n=1}^N S(f_0, n) \quad (3.20)$$

式中， V_n 为信号标么值， N 为采样点数。

(4) 基波幅值波动次数 N_f ，本文定义波动次数 N_f 为基频幅值曲线上极值点的个数。从基频幅值曲线可以发现电压波动波动次数最多，其次是电压暂降、电压暂升、电压中断、谐波暂降和谐波暂升。

(5) 高频含量 U_H ，即各电能质量扰动信号的高频含量。从时频等值曲线中可以清楚发现暂态振荡在发生扰动时段，存在较大的高频成分，而其它扰动高频成分比较小，所以可提取高频段含量来区分暂态振荡和其它扰动，其具体计算公式为：

$$U_H = \frac{1}{(l+k+1) * V_n} \sum_{i=l}^k \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n S(f_i, j) \quad (3.21)$$

式中， V_n 为信号标么值， $S(f_i, j)$ 为高频段幅值， $i=l, \dots, k$ ($l=256, k=512$) 为高频段选取范围。

关于上面 5 个特征值可以通过程序自动提取得到，它们包含了各种电能质量扰动所特有的特征信息，能够很好的用于关联向量机、神经网络和多分类支持向量机的训练及分类。

3.4 基于智能算法的电能质量扰动识别

3.4.1 基于关联向量机的电能质量扰动识别

Tiping 提出的关联向量机^[45] (RVM) 是一种基于贝叶斯学习方法，它把高斯过程的贝叶斯推理方法应用到支持向量机中，结果是概率分布的形式，可用于函数回归与分类。类似于支持向量机，RVM 的输出模型为：

$$y(x; \mathbf{w}) = \sum_{j=1}^N \omega_j \phi_j(x_i) + \omega_0 \quad (3.22)$$

式中， $\phi_j(x_i)$ 为非线性核函数， ω_j 为模型的权值。

假设给定输入数据 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 和对应的类别标记 $t = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$, $t_i \in \{0, 1\}$ 。对 $y(x)$ 使用 Logistic sigmoid 连接函数 $\sigma(y) = \frac{1}{1 + e^{-y}}$, 并设 $P(t|x)$ 服从贝努利分布, 则数据集的似然函数为:

$$P(t|w) = \prod_{n=1}^N \sigma\{y(x_n; w)\}^{t_n} [1 - \sigma\{y(x_n; w)\}]^{1-t_n} \quad (3.23)$$

由于无法解析得到权值, 所以采用拉普拉斯的逼近法:

1. 假设已知 α , 求出“最大可能”权值 w_{MP} 。因为 $p(w|t, \alpha) \propto P(t|w)p(w|\alpha)$, 所以在 $p(w|t, \alpha)$ 上寻找最大的 w 等价于在 $P(t|w)p(w|\alpha)$ 寻找最大值, 即也等价于在:

$$\log\{P(t|w)p(w|\alpha)\} = \sum_{n=1}^N [t_n \log y_n + (1-t_n) \log(1-y_n)] - \frac{1}{2} w^T A w \quad (3.24)$$

上寻找最大值。式中, $y_n = \sigma\{y(x_n; w)\}$, $A = \text{diag}(a_0, a_1, \dots, a_n)$ 。

2. 拉普拉斯方法只是简单的对其对数后验函数进行二次逼近, 将等式(3.24)微分两次后得到:

$$\nabla_w \nabla_w \log p(w|t, \alpha)|_{w_{MP}} = -(\Phi^T B \Phi + A) \quad (3.25)$$

式中 $B = \text{diag}(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N)$ 是 $\beta_N = \sigma\{y(x_n)\}[1 - \sigma\{y(x_n)\}]$ 的对角矩阵。对式(3.25)右边取负号并求逆, 即得协方差矩阵:

$$\Sigma = (\Phi^T B \Phi + A)^{-1} \quad (3.26)$$

3. 超参数 α 可以用下式来更新得到:

$$\alpha_i^{new} = \frac{\gamma_i}{\mu_i^2} = \frac{1 - a_i \sum_{ii}}{w_{MP}^2} \quad (3.27)$$

式中, \sum_{ii} 是协方差矩阵的第 i 个对角线元素, μ_i 是第 i 个后验平均权。因此, 对新的预测值 x^* , RVM 的预测输出为 $w_{MP} \Phi(x^*)$ 。在优化过程中, 许多 a_i 的值都很大, 相应的权值为 0, 从而实现解的稀疏性。

对于二分类的 RVM, 它需要 8 个 RVM 来实现标准正弦信号及电压暂降、

电压暂升、电压中断、电压波动、暂态振荡、谐波、谐波暂降和谐波暂升 9 种电能质量扰动信号分类。基于 RVM 的电能质量扰动识别过程如图 3.19 所示。

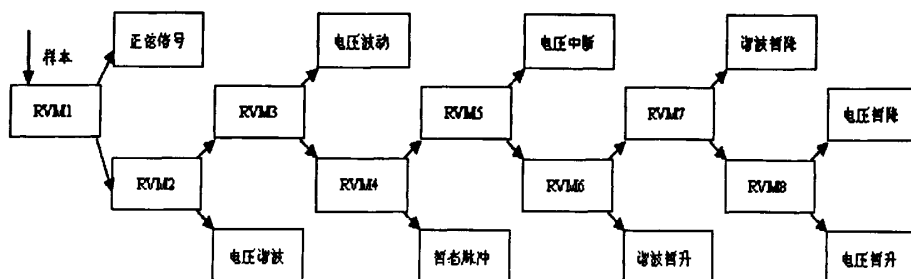


图 3.19 基于 RVM 的电能质量扰动识别过程

基于 RVM 的电能质量扰动识别主要包括样本训练和样本测试两个步骤。

(1) 样本训练

首先，用 RVM1 对 9 种电能信号进行分类训练，如果是标准正弦信号，则输出设为 1，否则为 0；然后用 RVM2 对剩下的 8 种电能扰动信号进行分类训练，如果是谐波则输出为 1，否则为 0；同理，可以用 RVM3、RVM4、RVM5、RVM6、RVM7、RVM8，来实现对其它电能质量扰动的分类训练。

(2) 样本测试

将测试样本输入到训练好的 RVM 中，根据输出结果进行电能质量扰动类型的识别，输出值大于 0 表示识别出对应的输出，小于 0 则表示为其它类型信号。RVM1 输出大于 0 对应样本表示为标准正弦信号，小于 0 对应样本表示为电能质量扰动信号，将输出结果小于 0 的测试样本输到 RVM2 中进行测试，输出大于 0 表示为谐波，否则为其它扰动信号。按照图 3.19 所示的电能质量扰动识别过程循环下去直到确定各扰动信号的类型。

通过 Matlab 仿真产生标准正弦及电压暂降、电压暂升、电压中断、电压波动、暂态振荡、谐波、谐波暂降和谐波暂升等电能质量扰动信号。信号的基波频率为 50Hz，采样频率为 6.4KHz，并在各扰动信号中加入 5% 的白噪声信号。扰动的起止时间、扰动幅度及振荡频率因子等参数都在一定的范围内随机变化。

为了观察电能质量扰动识别过程，对各电能质量扰动进行统一编号：1 正弦 2 谐波 3 电压波动 4 电压暂升 5 电压暂降 6 电压中断 7 暂态振荡 8 谐波暂升 9 谐波暂降，并且用不同的符号来表示不同的电能质量扰动。基于关联向量的电能质量扰动识别具体过程按照图 3.19 所示识别顺序对上面各电能质量扰

动信号进行识别，具体识别过程如图 3.20-3.27 所示。

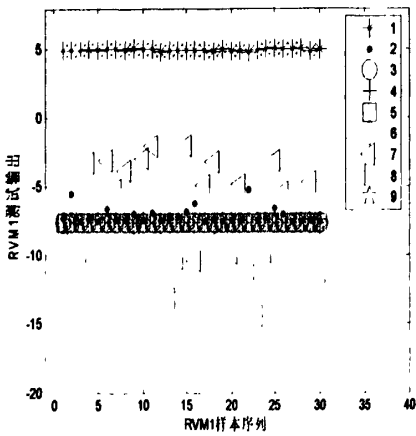


图 3.20 识别出正弦信号图

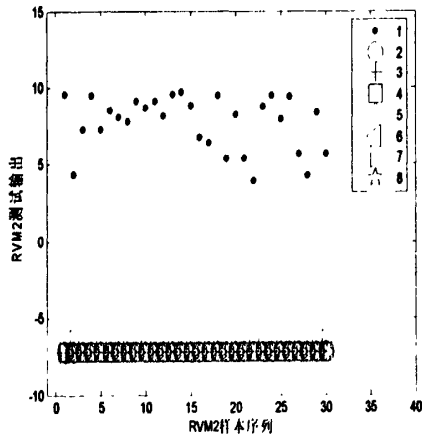


图 3.21 识别出谐波信号

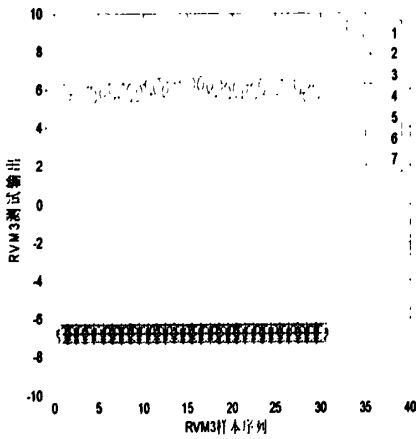


图 3.22 识别出电压波动信号

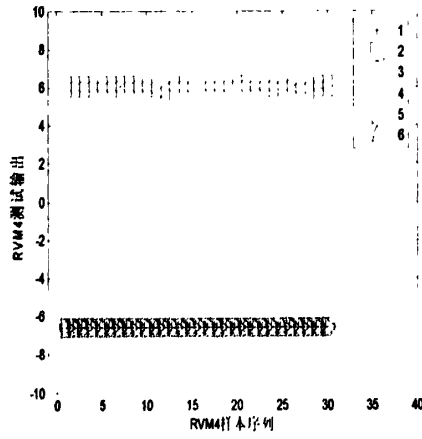


图 3.23 识别出暂态振荡信号

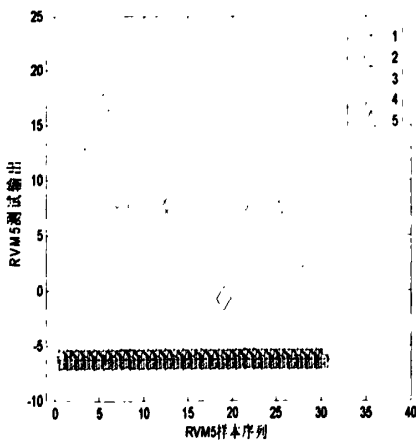


图 3.24 识别出电压中断信号

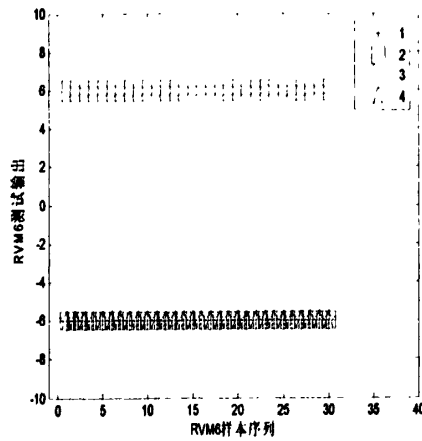


图 3.25 识别出谐波暂升信号

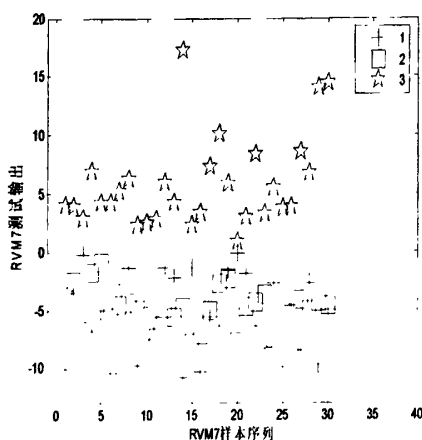


图 3.26 识别出谐波暂降信号

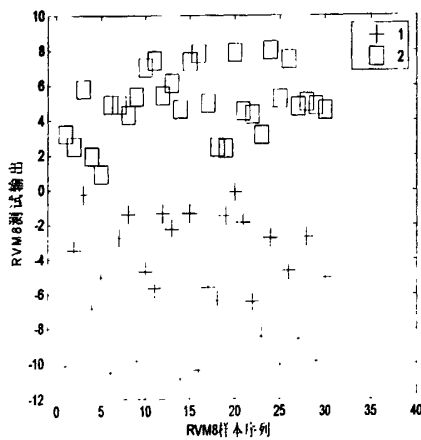


图 3.27 识别出电压暂降和电压暂升信号

通过判断输出结果的正负来识别电能质量扰动类型,从图 3.20-3.27 的电能质量扰动识别过程可以清楚的发现,基于关联向量机的电能质量扰动识别方法能有效识别出各种扰动信号,其正确率可达 98.51%。

3.4.2 基于神经网络的电能质量扰动识别

神经网络是对生物神经系统的简化和模拟,它是由大量简单神经元组合而成的非线性动态系统。单个神经元的结构和功能相对比较简单,但由大量简单神经元组合而成的系统却相当的复杂。神经网络具有非线性映射、并行分布处理、自适应学习能力、较好鲁棒性和容错能力等特点,被广泛应用于模式识别、预测、智能控制、信号处理等领域。目前为止,主要有多层感知器、自组织特征映射、RBF 网络、BP 网络、小波神经网络和模糊神经网络等十几种代表性神经网络模型。本文选用应用比较广泛的 BP 神经网络对电能质量扰动信号进行识别,运用 BP 神经网络对电能质量扰动识别主要包括网络训练及网络测试。

(1) 网络训练

网络训练它是由正向传播和逆向传播的反复交替的记忆训练过程,通过目标输出和实际输出的误差来调整权值的过程。为了实现电能质量扰动信号类别识别,必须进行网络训练。在网络训练中,隐含层神经元个数 n_2 和输入层神经元个数 n_1 初值通过下式确定:

$$n_2 = 2n_1 + 1 \quad (3.28)$$

本文输入层神经元个数为 5,即隐含层神经元个数设为 11,输出层神经元个

数为 4，隐含层神经元个数需要在神经训练的过程中不断的调整。

网络训练的输入样本和上一节关联向量机所用的输入训练样本相同，为实现正弦、谐波、电压波动、电压暂升、电压暂降、电压中断、脉冲振荡、谐波电压暂升和谐波电压暂降这 9 种电能质量扰动信号类别识别，网络训练目标定为 [0 0 0 0, 0 0 0 1, 0 0 1 0, 0 0 1 1, 0 1 0 0, 0 1 0 1, 0 1 1 0, 0 1 1 1, 1 0 0 0]，正弦信号对应输出为 0 0 0 0，谐波为 0 0 0 1，以此类推可以用 0 到 8 的二进制数来表示 9 种电能质量扰动信号。

(2) 网络测试

通过网络训练得到网络权值和偏差，将待识别的电能质量扰动信号特征值输入到训练好的网络中，便可以识别出电能质量扰动信号的类别。网络测试样本和关联向量机测试样本相同，由于篇幅原因下面列举部分测试样本及测试结果：

BP 神经网络测试样本：2 个正弦信号；2 个谐波信号；2 个电压波动；2 个电压暂升；2 个电压暂降；2 个电压中断；2 个脉冲振荡；2 个谐波电压暂升；2 个谐波电压暂降

BP 神经网络测试结果：

0.0000	0.0000	0.0008	0.0010	0.0032	0.0033	0.0001	0.0000	0.0019
0.0308	0.0303	0.0026	0.0028	0.0000	0.0000	0.0204	0.0581	0.8568
0.0114	0.0116	0.0104	0.0084	1.0000	1.0000	0.9993	1.0000	0.2271
0.0122	0.0122	0.9500	0.9581	0.0010	0.0010	0.9740	0.9972	0.0507

0.0011	0.0007	0.0015	0.0000	0.0000	0.0057	0.0004	0.9899	0.9866
0.9999	0.9997	0.9999	1.0000	0.9994	0.9961	0.9997	0.0274	0.0334
0.0004	0.0001	0.0000	0.9995	0.9977	0.9848	0.9994	0.0018	0.0025
0.0094	0.9893	0.9898	0.0326	0.0311	0.9950	0.9987	0.0168	0.0184

在测试结果中，每 4 维列向量对应一个输入样本的输出，电能质量扰动类型可以通过输出结果与训练目标对比确定。[0.0000 0.0308 0.0114 0.0122]是一组约等于 0 的输出结果，它与正弦训练目标[0 0 0 0]相一致，所以可以判定该结果对应输入信号为正弦信号，而输出结果[0.0008 0.0026 0.0104 0.9500]与[0 0 0 1]相对应，这与谐波设定目标相同，可以判定该输入信号为谐波。以此类推，可以判断出其它电能质量扰动类型。测试结果验证表明，基于神经网络的电能质量扰动识别方法正确率可达 97.4%。

3.4.3 基于多分类支持向量机的电能质量扰动识别

支持向量机(SVM)是在统计学理念中的 VC 维原理和结构风险最小化原理的基础上提出的一种机器学习方法。它克服了传统神经网络收敛性和实时性差的缺点,在解决非线性、小样本和高维模式识别方面表现出了特有的优势。

本文采用“one-against-rest”多分类支持向量机实现 9 种电能质量扰动识别,对于 9 种电能质量扰动分类问题,需要构建 9 个二分类器。样本训练时,第 j 个二分类器用第 j 类训练样本为正类,其余的为负类,可得到 9 个决策函数:

$$f^j(x) = \text{sign}[g^j(x)] \quad (3.29)$$

其中

$$g^j(x) = \sum_{i=1}^k a_i^j y_i K(x, x_i) + b^j \quad j = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (3.30)$$

式中, $K(x, x_i)$ 为核函数; x_i 为训练样本特征向量; y_i 为训练目标; a_i^j 为第 j 类拉格朗日乘子; b^j 为第 j 类阈值。

当有多个 $g^j(x) \geq 0$ 或没有一个 $g^j(x) \geq 0$ 时,出现了不可分类问题,为解决这类问题引入最大决策值法,将输入样本分到 $g^1(x), g^2(x), \dots, g^5(x)$ 最大值所于应的类别。

基于支持向量机的电能扰动识别也包括网络训练和网络测试两个步骤。

(1) 网络训练

设置多分类支持向量机中控制对错分样本惩罚程度的可调参数和径向基核函数的参数都为 1, 然后对相同的训练样本进行训练。在训练输出结果中, 标准正弦、谐波、电压暂降、电压暂升、电压中断、暂态振荡、电压波动、谐波暂降和谐波暂升对应的输出分别记为 [1 2 3 4 5 6 7 8 9], 如输入为正弦信号, 则输出为 1; 输入为谐波, 输出为 2; 输入为电压暂降, 输出为 3; 以此类推, 便可以识别出输入的电能质量扰动类别。

(2) 网络测试

将测试样本输入给训练好的 SVM 中, 输出的 [1 2 3 4 5 6 7 8 9] 9 种结果分别代表标准正弦、谐波、电压暂降、电压暂升、电压中断、暂态振荡、电压波动、

谐波暂降和谐波暂升 9 种电能质量扰动信号。表 3.1 列出了基于多分类支持向量机的电能质量扰动测试结果。

表 3.1 基于多分类支持向量机的电能质量扰动测试结果

电能质量扰动类型	正确识别个数	识别正确率(%)
正弦信号	30	100
谐波	30	100
电压波动	30	100
电压暂升	28	93.33
电压暂降	30	100
电压中断	30	100
暂态振荡	23	76.66
谐波暂升	30	100
谐波暂降	30	100

由表 3.1 测试结果可以发现, 基于多分类支持向量机的电能质量扰动识别方法, 它能有效识别出正弦信号、谐波、电压波动和电压暂降等电能质量扰动类型, 且具有较高的识别精度, 其总识别正确率可以达到 96.66%。

3.4.4 三种智能算法结果比较

本文分别用关联向量机、神经网络和多分类支持向量机对正弦、谐波、电压暂降、电压暂升、电压中断、暂态振荡、电压波动、谐波暂降和谐波暂升这 9 种电能质量的 270 个训练样本和 270 个测试样本进行训练及测试, 测试得到如表 3.2 所示结果。

表 3.2 三种方法测试结果

	测试方法及其正确率(%)		
	RVM	支持向量机	神经网络
正弦信号	100	100	100
谐波	100	100	100
电压波动	100	100	96.66
电压暂升	100	93.33	100
电压暂降	96.66	100	100
电压中断	96.66	100	96.66
暂态振荡	100	76.66	93.33
谐波暂升	100	100	100
谐波暂降	93.33	100	90
总识别率	98.51	96.66	97.4
训练时间(s)	0.018	0.016	3.5000
测试时间(s)	0.0094	0.015	0.0160

由表 3.2 识别结果可以发现, 基于关联向量机、支持向量机和神经网络三种方法的电能质量扰动总识别正确率分别为: 98.51%, 96.66%和 97.4%, 三种方法都具有较高的识别正确率。基于关联向量机方法能够准确识别出各种电能质量扰动类型, 且训练和测试时间很短, 具有较好实时性。基于多分类支持向量机方法在识别暂态振荡时存在一定的误差, 但总体识别效果还可以, 实时性也比较好。基于神经网络方法虽然也具有较高识别精度, 但容易陷入局部最小, 且训练时间较前两种方法都要长。基于关联向量机的电能质量扰动识别方法不仅识别精度高, 且具有较高实时性, 可应用于实时监测系统。

3.5 小结

针对电能质量扰动问题, 本章提出了一种基于 S 变换和智能算法的电能质量扰动识别方法。首先简单介绍了 S 变换和关联向量机原理, 运用电能质量扰动仿真模型产生各种电能质量扰动信号, 然后利用 S 变换得到基频幅值曲线、时频分布图和最大频谱幅值曲线, 提取出谐波畸变率、扰动幅度等特征样本, 最后分别运用关联向量机、神经网络和多分类支持向量机对特征样本进行训练及测试, 测试结果表明基于关联向量机的电能质量扰动识别方法具有较高识别精度和速度。

4 电压暂降源识别

电压暂降作为电能质量扰动中最为严重的电能质量问题,由于发生普遍性和危害严重性,已经引起越来越多的专家学者关注。电压暂降产生原因有很多种,不同原因产生的电压暂降对电力系统产生的影响和引发的损失也不相同,识别出电压暂降产生的原因,对于电压暂降治理和改善具有重要的意义。

电压暂降源高效识别的前提和基础是选取优秀的特征样本。优秀特征样本选取不仅可以提高电压暂降源识别的速度,而且还可提高电压暂降源识别精度。本文提出一种基于 S 变换和 GA-SVM 的电压暂降源识别方法,首先通过 S 变换提取得到暂降幅值和暂降时间等特征样本,然后利用遗传算法的全局搜索特性对特征样本进行搜索得到最优特征样本,最后通过多分类支持向量机验证特征样本的有效性。经仿真算法验证,该方法能快速、有效识别出电压暂降源类型。

4.1 电压暂降分类

电压暂降是指电压有效值在极短时间内快速下降至正常值的 90%-10%,典型的暂降持续时间为 0.5-30 个周波。电压暂降通常可以用电压暂降幅值和电压暂降发生时间两个特征量来描述。电压暂降幅值用来反映电压暂降下降的程度,常用发生电压暂降时电压有效值和正常电压有效值之比来表示。电压暂降发生时间是指从电压下降到一定的阈值后开始到恢复某阈值所经历的时间。

经研究表明,造成电压暂降的本质原因是流经系统电源阻抗的电流突然增大,造成电源阻抗分压增加,从而引起公共连接点电压暂降。电压暂降按产生原因可分为故障类暂降和非故障类暂降,故障类暂降主要由短路故障引起;而非故障类暂降是由变压器激磁涌流、电动机启动及其它大容量负荷投运等引起的。

4.1.1 短路故障引起的电压暂降

在供电和用电系统中,由于电缆损坏、雷电、动物、设备故障及绝缘污染等原因很有可能引起短路故障。当短路故障发生时,故障点附近节点电压会急剧下降,其恢复时间取决于故障清除时间。短路故障引起的电压暂降可以分为对称暂

降(三相短路故障)和非对称暂降(单相接地短路、两相短路及两相接地短路),其中三相短路故障引起的电压暂降最为严重,而单相接地故障引起的电压暂降最为普遍。构建短路故障 Simulink 仿真模型,通过改变仿真模型中短路故障类别、负载属性和线路属性来分别产生如图 4.1-4.3 所示波形,其中(a)为瞬时波形,(b)为有效值波形。

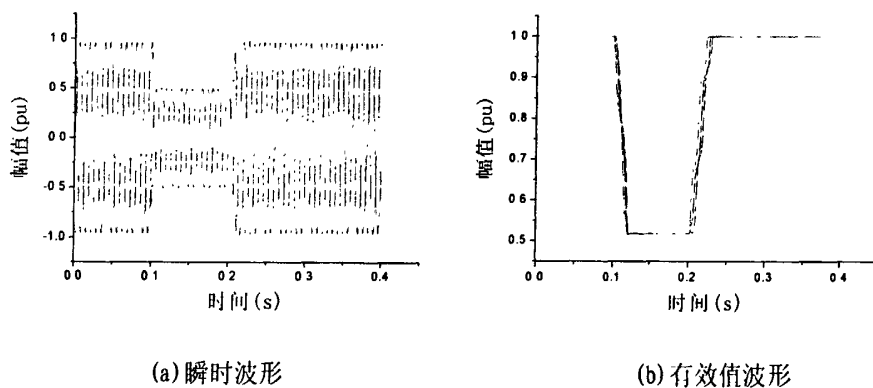


图 4.1 三相短路故障引起电压暂降

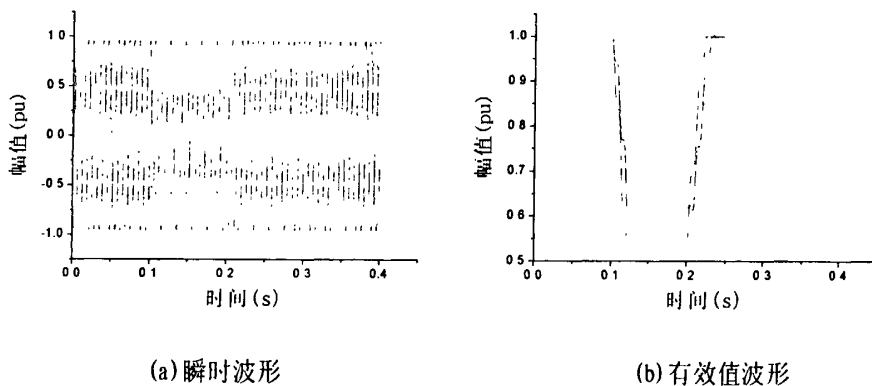


图 4.2 两相短路故障引起电压暂降

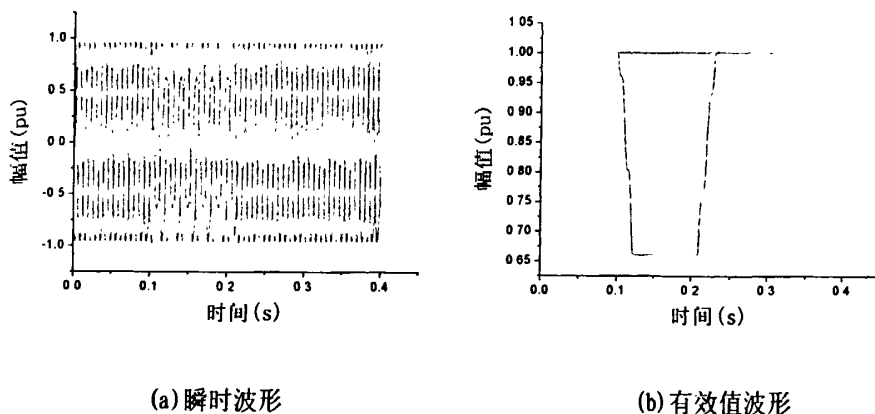


图 4.3 单相短路故障引起电压暂降

由分析可以得到，短路故障引起的电压暂降的主要特征有：

(1) 电压暂降在发生和恢复时刻的波形陡峭，突变点之间的电压幅值基本上保持不变，且暂降期间可能发生多次暂降。

(2) 三相短路故障引起的电压暂降是对称的，即暂降发生时幅值、相位基本相等；而其它两种短路故障引起的电压暂降是非对称的。

(3) 不同故障原因引起的电压暂降的程度和相角变化是不同的。

4.1.2 变压器投运引起的电压暂降

由于变压器铁芯的饱和效应，当变压器投入运行时会使变压器终端电压发生剧烈的变化，从而产生巨大的激磁涌流，激磁涌流通常为正常值的几十倍甚至几百倍。由于投运时变压器三相的初相角始终相差 120° ，所以变压器投运引起的电压暂降是不对称的。由于线圈铜损的原因，暂降电压恢复是个逐渐过程。小型变压器的电阻大，电抗小，达到稳态的周期短；而大型变压器由于电阻小，电抗大，需要几十个周期才能达到稳态。图 4.4 所示为变压器投运引起电压暂降瞬时波形和有效值波形。

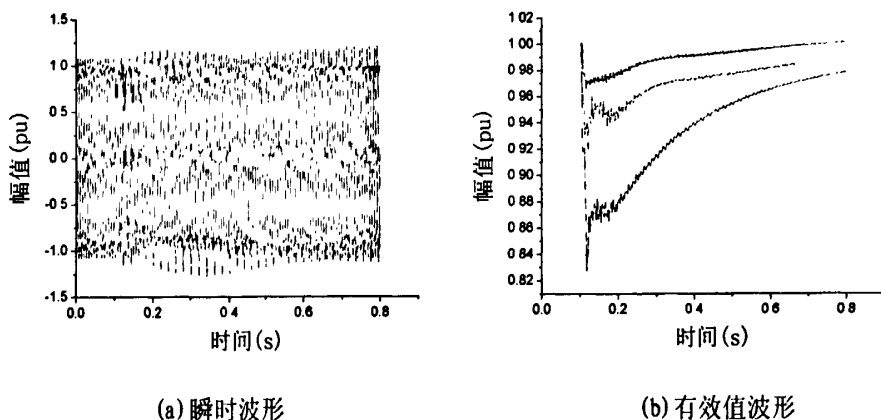


图 4.4 变压器投运引起电压暂降

变压器投运引起的电压暂降的主要特征有：

- (1) 变压器投运引起的电压暂降是不对称的。
- (2) 电压幅值在电压暂降开始时快速下降，并缓慢恢复。
- (3) 电压暂降过程中含有 2-5 次谐波，尤其是 2 次谐波。

4.1.3 电动机启动引起的电压暂降

电动机由于结构简单、运行可靠的原因，在工农业生产和日常工作中应用得

相当广泛。当电动机启动时，定子电流会急剧增加到正常电流的 2 至 8 倍，使系统阻抗上的分压增大，导致公共节点电压下压，从而引起电压暂降。电压暂降的程度取决于电动机的特性、局部电网容量、上级变压器剩余容量和启动方式及负荷等因素。由于电动机是三相对称负荷，由此引发的电压暂降也是对称的。图 4.5 所示为电动机启动引起电压暂降瞬时波形和有效值波形。

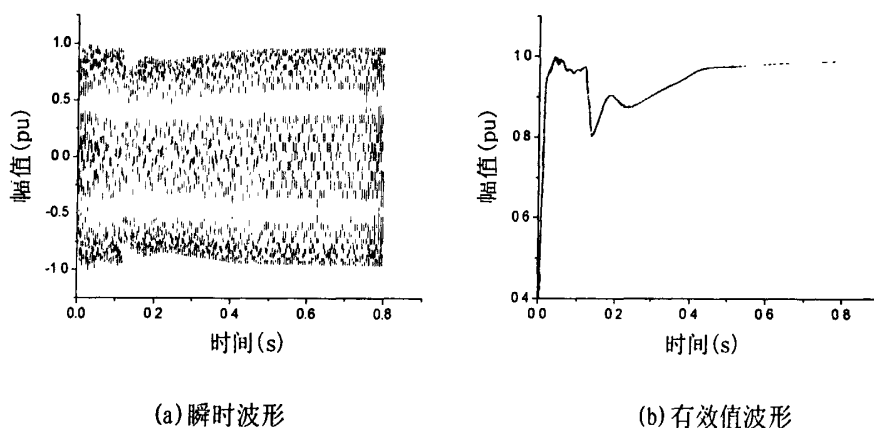


图 4.5 电动机启动引起电压暂降

电动机启动引起的电压暂降的特征为：

- (1) 电动机是三相对称负荷，引起的电压暂降是三相对称的。
- (2) 暂降发生时只有一次幅值的突变，且暂降恢复过程缓慢。

4.2 电压暂降检测及特征提取

4.2.1 基于 S 变换的电压暂降检测

由 Simulink 仿真模型分别产生短路故障、电动机启动和变压器投运引起的电压暂降。在仿真模型中，设置短路故障暂降发生时间为 0.1-0.2s、电动机启动为 0.15s、变压器投运时间为 0.1s。对短路故障、变压器投运和电动机启动引起的电压暂降信号进行 S 变换，处理得到如图 4.6-4.8 所示波形，其中(a)单相电压暂降信号，(b)基频幅值曲线，(c)5 次谐波幅值曲线。

5 次谐波幅值可以通过下式得到：

$$U(f_5) = S(f_5, n) \quad n = 0 \sim N - 1 \quad (4.1)$$

式中， $S(f_5, n)$ 为 S 模矩阵中 5 次谐波频率对应的行向量， n 为采样点， N 为采样点数。

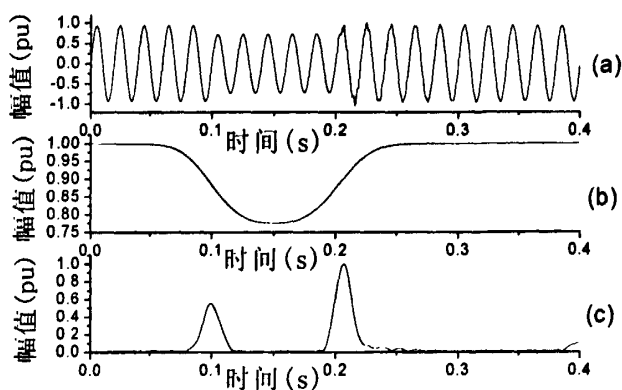


图 4.6 短路故障引起的电压暂降

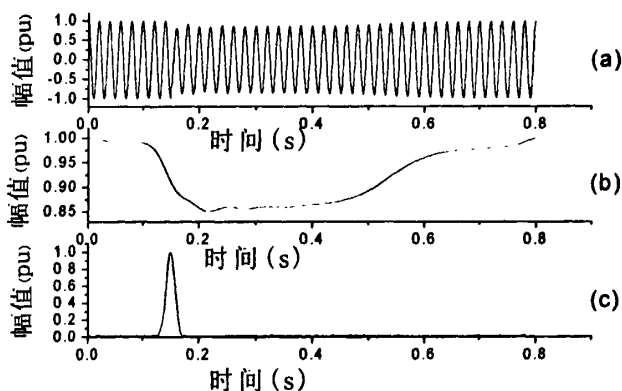


图 4.7 电动机启动引起的电压暂降

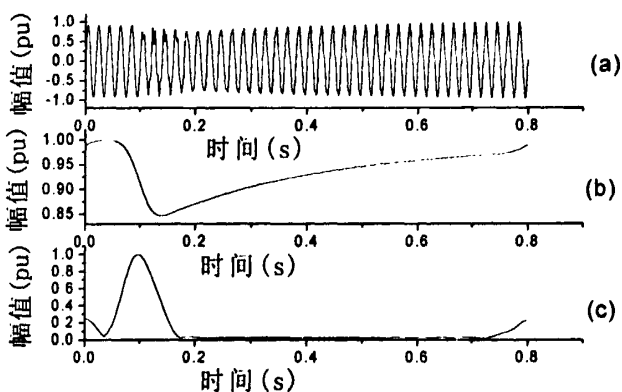


图 4.8 变压器投运引起的电压暂降

如图 4.6-4.8 所示,电压暂降幅值和电压暂降发生时间可以通过基频幅值曲线和 5 次谐波幅值曲线来确定。表 4.1 列出通过基频幅值曲线和 5 次谐波幅值曲

线得到的电压暂降幅值、电压暂降发生时间及其实际值。

表 4.1 各种原因引起电压暂降检测结果

暂降原因	实际发生时间(s)		测得发生时间(s)		暂降幅值(pu)
短路故障	0.1	0.2	0.0997	0.2069	0.78
电动机启动	0.15		0.1461		0.8568
变压器投运	0.1		0.0986		0.8471

由图 4.6-4.8 和表 4.1 的结果可以发现, S 变换可以准确、有效的检测出电压暂降幅值和电压暂降发生时间, 可以很好应用于电压暂降的特征提取。

在实际电网中, 电能质量问题比较复杂, 电压暂降发生的同时经常会有其它的电能质量问题产生, 不仅增加了电压暂降检测难度, 还会影响电压暂降检测的精度。对某电力公司采集到的电网实际信号进行 S 变换后得到如图 4.9-4.12 所示结果, 其中(a)实际电网波形, (b)信号基频幅值曲线, (c)高次谐波幅值曲线。

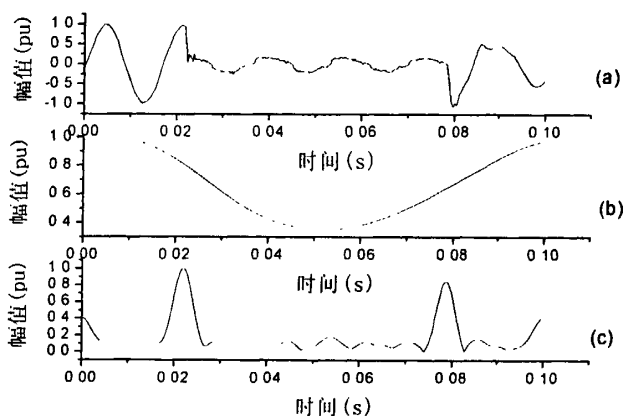


图 4.9 电网实际信号 1 检测结果

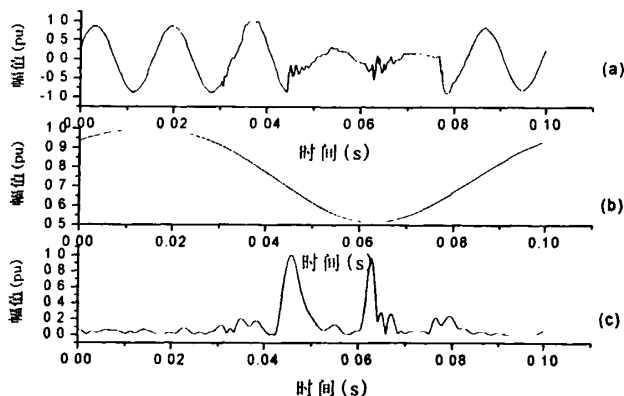


图 4.10 电网实际信号 2 检测结果

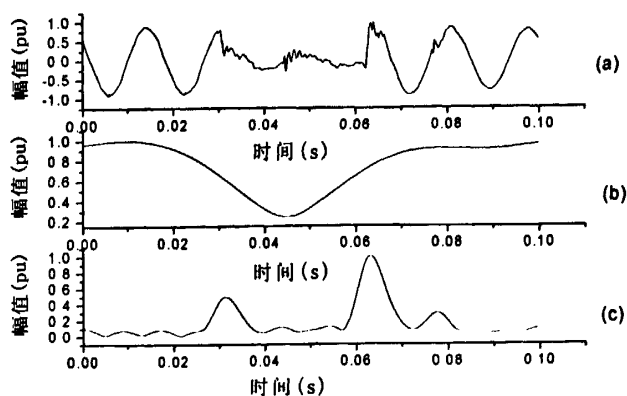


图 4.11 电网实际信号 3 检测结果

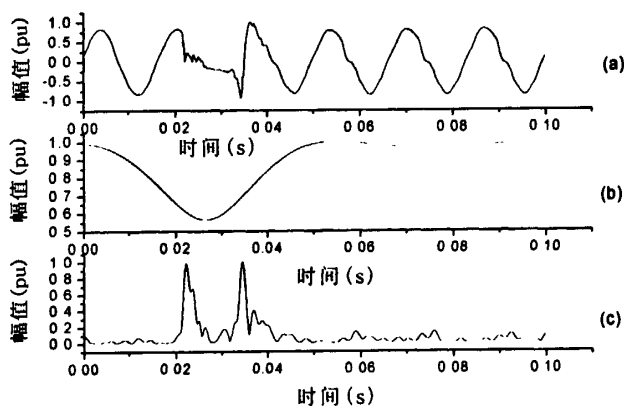


图 4.12 电网实际信号 4 检测结果

对图 4.9-4.12 所示的电网实际波形研究可以发现, 实际波形中除了存在电压暂降外, 还存在高频振荡、陷波、尖峰等多种电能质量问题, 说明了实际电网的复杂性。通过基频幅值曲线可以确定电压暂降幅值, 而高次谐波幅值曲线可以用来确定电压暂降和其它电能质量问题产生的时间。表 4.2 列出了 S 变换检测得到的电压暂降幅值和暂降时间。

表 4.2 实际电压暂降检测

序号	扰动时间(s)		暂降幅值(pu)	
实际暂降 1	0.0224	0.0786	0.329	
实际暂降 2	0.0456	0.0628	0.0798	0.515
实际暂降 3	0.0313	0.0632	0.0776	0.2435
实际暂降 4	0.0222	0.0345	0.5634	

4.2.2 电压暂降特征提取

为实现电压暂降源有效识别,提取出谐波增量、幅值突变次数、恢复斜率、暂降时间比、暂降恢复时间、暂降最小值、暂降恢复值和三相不平衡度等特征,各参数具体定义如下:

(1) 谐波增量

谐波是变压器投运引起暂降的一个重要特征,尤其是2次谐波,它可达到谐波总量的30~50%。因此,提取S模矩阵中基波和2次谐波对应的幅值,得到暂降发生前、后2次谐波增量,用来区分由变压器引起的电压暂降。

$$\Delta U_2 = \frac{U_{2sag}}{U_{1sag}} - \frac{U_{2pre}}{U_{1pre}} \quad (4.2)$$

式中 U_{2sag} 、 U_{1sag} 分别指暂降发生时2次谐波和基波的电压有效值; U_{2pre} 、 U_{1pre} 分别指暂降发生前2次谐波和基波的电压有效值。

(2) 幅值突变次数

当发生电压暂降时,暂降突变点附近会引起一定范围的频率变化。可以通过观测S模矩阵各频率幅值变化来确定幅值突变次数。通过提取S模矩阵5次谐波对应的幅值,来确定突变次数。短路故障引起的暂降幅值突变次数可达两次或两次以上;电动机引起的暂降只存在一次幅值的突变。如图4.13-4.14所示为短路故障和电动机启动引起电压暂降的5次谐波幅值曲线。

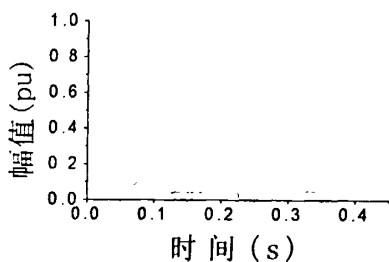


图 4.13 短路暂降幅值曲线

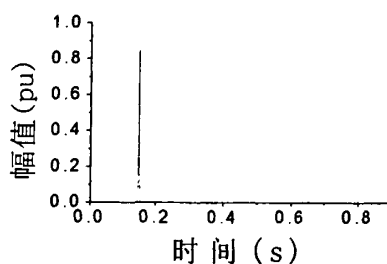


图 4.14 电动机启动暂降幅值曲线

由图4.13-4.14可见,5次谐波幅值曲线能够有效的反映电压暂降发生时幅值发生突变的次数。短路故障引起暂降会引起2次或以上的突变,而电动机启动引起的暂降只有一次突变。

(3) 恢复斜率

提取 S 模矩阵中基频对应幅值, 得到基频幅值曲线如图 4.15-4.17 所示。

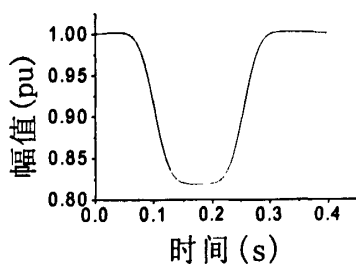


图 4.15 短路暂降基频幅值曲线

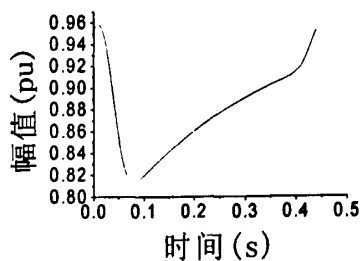


图 4.16 变压器暂降基频幅值曲线

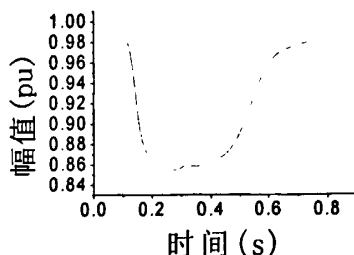


图 4.17 电动机暂降基频幅值曲线

由图 4.15-4.17 所示基频幅值曲线可以发现, 各种原因引起的电压暂降的恢复斜率存在差异。短路故障引起的电压暂降在恢复段波形比较陡峭, 斜率大; 而变压器投运和电动机启动引起的电压暂降在恢复段波形相对平滑, 斜率小。

(4) 暂降恢复时间

暂降恢复时间是指电压暂降从最低点恢复到正常值 90% 所需要的时间。暂降恢复时间可以从基频幅值曲线上求得。

(5) 暂降时间比

最低幅值持续时间是指电压下降到最低点后在一定范围内所持续的时间。由各电压暂降基频幅值曲线可以发现, 短路故障引起的暂降在突变点之间电压幅值基本不变, 其持续时间较长; 而变压器投运和电机启动引起电压暂降在下降到一定深度后便缓慢恢复, 持续时间相对较小。暂降时间比为:

$$\tau = \frac{T_w}{T} \quad (4.3)$$

式中 τ 、 T_w 、 T 分别指暂降时间比、最低幅值持续时间和暂降持续时间。

(6) 暂降最小值

暂降最小值是指发生电压暂降时有效值曲线上最低点电压幅值。电动机启动

和变压器投运引起的电压暂降幅值一般是正常值的 70%以上,而短路故障引起的暂降幅值可以是正常值 10-90%。

(7) 暂降恢复值

当电压暂降结束后,各相电压幅值并不会立即恢复为正常值。从各种电压暂降的有效值波形中可以发现,短路故障引起的电压暂降可以在短时间内恢复,而电动机启动和变压器投运引起暂降电压幅值有可能大于正常值,也有可能小于正常值。

(8) 三相不平衡度

三相不平衡度是衡量各种电压暂降是否是对称的物理量。由电压暂降仿真可以知道,电动机启动和三相短路故障引起的电压暂降是对称的,而变压器投运和其它短路故障产生的电压暂降是不对称的。根据对称分量法可求得正序、负序电压离散序列 $u_1(k)$, $u_2(k)$, 然后分别求出电压正序、负序的均方根值,便可求出三相不平衡度 ε_1 。

$$\varepsilon_1 = \frac{U_2}{U_1} \times 100 \% \quad (4.4)$$

式中 U_1 、 U_2 分别为正序和负序的均方根值。

通过程序自动提取得到 22 个特征,其中包括每相的谐波增量、恢复斜率、暂降时间比、暂降恢复时间、暂降最小值、暂降恢复值、突变次数及三相不平衡度。程序自动提取特征量部分规则为:突变次数,将 5 次谐波幅值归一化后提取幅值大于 0.5pu 的尖峰次数;暂降持续时间 T 为下降到 90%到恢复到 90%的时间段,当下降幅度小于 10%时,便认为不存在暂降,暂降时间取为 0,相应的斜率也为 0;暂降恢复时间为电压幅值在最低点处恢复到正常值的 90%所需要的时间。

4.3 基于 GA-SVM 暂降源识别

特征选取是指从总特征集合中选取部分对识别具有重要贡献的特征子集,其目的在于降低原有特征维数,提高识别正确率及识别速度。特征选取它并没有改变原来特征属性,而只是从原来的特征集合中选择部分重要的特征。

遗传算法是一种随机优化算法,具有很强全局搜索能力;支持向量机是一种优秀的模式识别方法,在小样本和非线性识别方面具有特定优势。本文首先利用

遗传算法从总特征集合中搜索得到一组特征样本，然后用多分类支持向量机进行训练及测试，将分类正确率做为遗传算法的评价依据，进行重复搜索得到最优特征，然后通过多分类支持向量机验证该方法有效性，电压暂降源识别过程如图 4.18 所示。

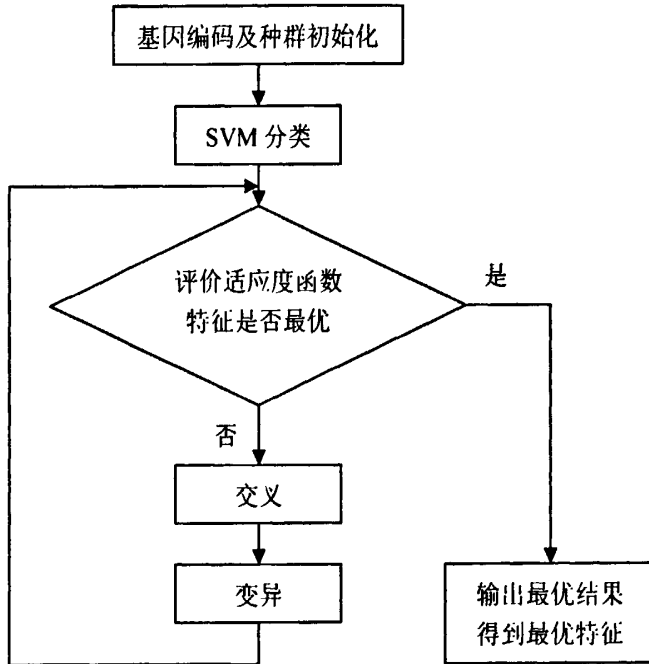


图 4.18 基于 GA-SVM 电压暂降源识别流程图

(1) 基因编码及种群初始化

先将 22 个特征按谐波增量、恢复斜率、暂降时间比、暂降恢复时间、暂降最小值、暂降恢复值、突变次数及三相不平衡度这个顺序排好，然后用二进制数 0 和 1 来对这些特征进行编码，得到一个长度为 22 的染色体，其中 0 表示不选取对应的特征，1 表示选取对应的特征。如染色体{1000010001000000100100}，表示选中原始特征中的第 1、第 6、第 10、第 17、第 20 个特征，其余的特征不选中。本文设置每代染色体个数为 40，运用随机函数产生 40 个染色体组成的初始种群。

(2) SVM 分类

按照编码规则对完整总样本集合进行删除操作，删除未选中的特征项，得到降维后的特征样本，然后将特征样本分为训练样本和测试样本，运用多分类支持向量机对训练样本和测试样本进行操作得到识别正确率。

(3) 评价适应度函数

适应度函数是用来区分群体个体好坏的标准,是遗传算法进化搜索的依据。适应度函数的好坏直接关系到遗传算法收敛速度及是否能够找到最优特征。

本文选用多分类支持向量机的识别正确率作为适应度函数评价标准。设多分类支持向量机的正确率为 $accurate$, GA 搜索目标就是寻求最大正确率,也就是求

$$f(x) = \frac{1}{accurate} \text{ 最小值。}$$

在利用遗传算法搜寻最优特征时,除了要考虑多分类支持向量机的识别正确率外,还要考虑被选特征个数,在相同识别正确率的情况下选择特征个数较少的特征,于是适应度函数最终定为:

$$f(x) = \frac{1}{accurate} * 100 + ones \quad (4.5)$$

其中,100表示正确率的权值,提高正确率在适应度函数中的比重; $ones$ 为选中特征个数,在相同识别正确率的条件下,选中特征个数少为优秀特征。

(4) 交叉

交叉操作是遗传算法中产生新个体的主要方法,经过交叉运算,可以提高遗传算法搜索能力。设定交叉概率为0.8,随机将个体进行两两配对,然后从随机配对的两个个体中随机选取特征数量。

(5) 变异

变异操作是遗传算法中产生新个体的辅助方法,使种群产生突变,跳出局部极值。设定变异概率为0.1,随机对某一位或几位基因进行变异操作,如某一位原来为0,经过变异操作后变成1;原来为1,经过变异后变成0。

(6) 结束条件

遗传算法结束搜索的条件为:达到初始设定的最大进化代数和适应度函数值基本没有变化。如果满足以上两个条件就停止搜索,得到最优特征;否则继续搜索。

由 Simulink 仿真产生各种电压暂降信号,提取每种电压暂降信号的22种特征。设置遗传算法的种群个数为40,交叉概率为0.8,变异概率为0.1,进化代数为100;设置多分类支持向量机中控制对错分样本惩罚程度的可调参数和径向基核函数的参数都为1。表4.3给出基于GA-SVM法搜索得到的部分优秀特征样本和对应识别正确率。

表 4.3 基于 GA-SVM 电压暂降特征选取和识别结果

优秀染色体	特征个数	适应度	识别精度(%)	运行时间(s)
0000011110100001100100	8	125.1875	85.33	0.016
1000011100000100100000	6	123.1875	85.33	0.015
0000111000100000110000	6	121.3846	86.67	0.015
0000011000001000100000	4	121.1875	85.33	0.000
0000101100000000100000	4	119.3846	86.67	0.000
0000101000000000100000	3	118.3846	86.67	0.000
1000111000000010100110	8	110.7397	97.33	0.016
0000111011001000100000	7	109.7397	97.33	0.015
0000111010001000100000	6	108.7397	97.33	0.000
0000111000000000100000	4	106.7397	97.33	0.000

如表 4.3 所示, 经 GA-SVM 法后可使原来 22 维特征样本降为 8 维, 7 维, 甚至 4 维, 大大的降低特征样本的维数。用 SVM 对原来 22 维特征样本进行识别可以得到最高识别正确率为 81.33%, 运行时间为 0.017s。由此可见, GA-SVM 法在降低特征样本维数的同时, 在一定程序上提高电压暂降识别正确率和减少运行时间。对表 4.3 研究可发现, 染色体中的第 5、6、7、17 个个体出现频率最高, 且对应识别正确率较高。由此可见, 第 5、6、7、17 对应的特征样本对电压暂降源识别贡献率最高。

4.4 小结

电压暂降是一种比较严重的电能质量扰动, 电压暂降产生的本质原因是电流急剧增大, 导致电源阻抗分压增加, 从而引发电压暂降。本节首先通过 Simulink 仿真模型产生各原因引起的电压暂降信号, 对各电压暂降产生的原因及特点做了简单介绍。然后运用 S 变换对各电压暂降信号进行时频分析, 得到电压暂降幅值和电压暂降时间, 并通过多种方法提取得到电压暂降 22 个特征样本, 运用遗传算法对特征样本进行优化, 选取出优秀特征样本, 最后通过多分类支持向量机验证选取样本的有效性。

5 电能质量监测系统

电能质量监测是治理和改善电能质量的前提和基础,研制一款电能质量监测系统,它不仅有助于电能质量正确检测与识别,而且还有助于区域电力评估和治理。为提高我国的电能质量监测水平,治理和改善电能质量,为用户提供安全稳定的电能,本文设计了一套基于 DSP 平台和 Matlab 软件的电能质量监测系统,主要用于电能质量扰动识别和基本电力参数计算。

Matlab 是一种运用比较广泛的信号处理软件。Matlab 语言比较简单,能够方便实现各种算法,且 Matlab 自带各种算法工具箱,大大减短算法开发周期。DSP 平台主要用于电力数据采集和基本电力参数计算,电力数据采集完后通过串口发送给 Matlab 软件,由 Matlab 实现对电力数据分析,然后运行关联向量机等算法实现电能质量扰动识别。

5.1 系统总体结构

电能质量监测系统主要由电流和电压传感器、信号调理电路、AD 模数转换、DSP 系统、Matlab 软件组成,其结构如图 5.1 所示。

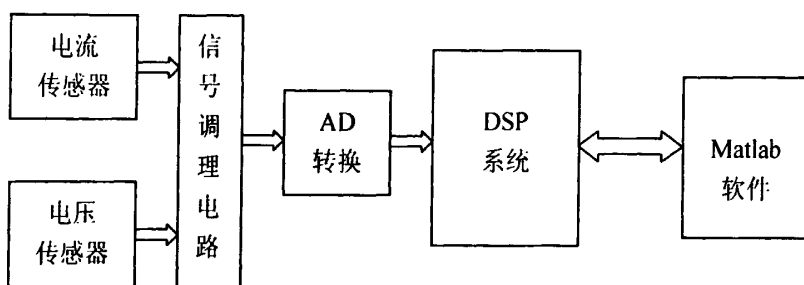


图 5.1 电能质量监测系统总体结构

由电压和电流传感器采集得到电压、电流信号,通过信号调理电路将电压、电流信号转变成符合 AD 输入标准的信号。对电力数据模数转换后进行基本电力参数计算和串口数据传输,Matlab 接收到串口发送的电力数据后,对电力数据进行分析 and 处理,从而实现电能质量扰动识别。

5.2 电能质量监测系统硬件电路设计

电能质量监测系统硬件电路主要由信号调理电路、AD 模数转换电路、串口通信、键盘和显示电路及 DSP 系统电路等组成。

5.2.1 数字信号处理器选择

一个理想的电能质量检测系统应该是具有高精度、高稳定性、高实时性等优点，系统的精度、稳定性和实时性不仅与系统所采用的算法相关，还与系统所采用处理器相关。本文为实现电能质量精确、稳定和快速监测，选用 TI 公司的 TMS320F2812 这款 DSP 芯片作为主控处理器。

TMS320F2812 是一款用于控制的多功能、高性能、高性价比的定点 DSP 芯片，它具有很强的数字信号处理能力，还具有强大的事件管理能力和嵌入式控制功能，适用于工业自动化控制、智能化仪器仪表及电机、电力电子技术应用和马达伺服控制系统等。

5.2.2 信号调理电路

根据实际测量需求，共有 6 通道信号调理电路，其中 3 路实现电压信号调理，另 3 路实现电流信号调理。电压信号由电压互感器采集得到，而电流信号由电流钳得到，电流钳可以按选定量程将电流转换成电压，本文选用 1A/1mV 量程档。信号调理电路按 AD 输入范围要求对电压和电流信号进行缩小或放大，并将电压和电流信号转换成单端输入信号，具体电路如图 5.2 所示。

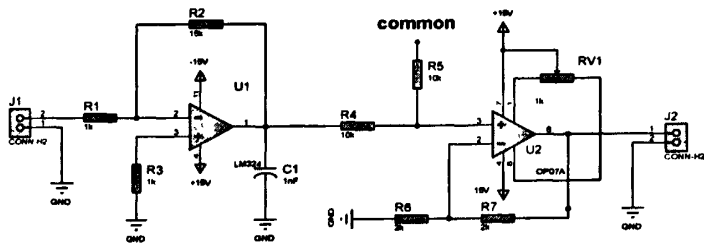


图 5.2 信号调理电路

J1 为信号输入端，R1、R2、R3 和 U1 主要实现电压和电流信号比例放大或缩小，放大和缩小倍数通过 R1 和 R2 调节实现。COMMON 与 ADS8364 电压参考输出端相连，用来稳定参考电压。R4、R5、R6、R7 和 U2 组成的电路将交流输出端相连，用来稳定参考电压。R4、R5、R6、R7 和 U2 组成的电路将交流信号转换成符合 ADS8364 输入的单端输入信号，其关系比例为：

$$U_{out} = \frac{R_6 + R_7}{(R_4 + R_5)R_6} (U_{in}R_5 + U_{common}R_4) \quad (5.1)$$

其中, U_{in} 为实现放大或缩小的电压和电流信号, U_{out} 为调理电路输出信号, 即 AD 输入信号, U_{common} 为 ADS8364 输出参考电压。

5.2.3 模数转换电路

模数转换电路将电压和电流等模拟信号转换成 DSP 能直接处理的数字信号。TMS320F2812 内部自带有 12 位分辨率的模数转换模块, 能满足多数场合需求。但在电能质量监测中, 存在大量的高次谐波, 12 位的模数转换还达不到测量的需求, 本文通过外扩具有 16 位分辨率的模数转换器 ADS8364 来实现电能质量信号模数转换。ADS8364 是由美国 TI 公司生产的 6 通道 16 位模数转换器, 它具有高速、低功耗等特点。ADS8364 采用 5V 电压供电, 但因为内部具有 3.3V 的缓冲电平, 它可以直接与 TMS320F2812 相接, 不需要电平转换。ADS8364 与 TMS320F2812 的连接示意图如图 5.3 所示。

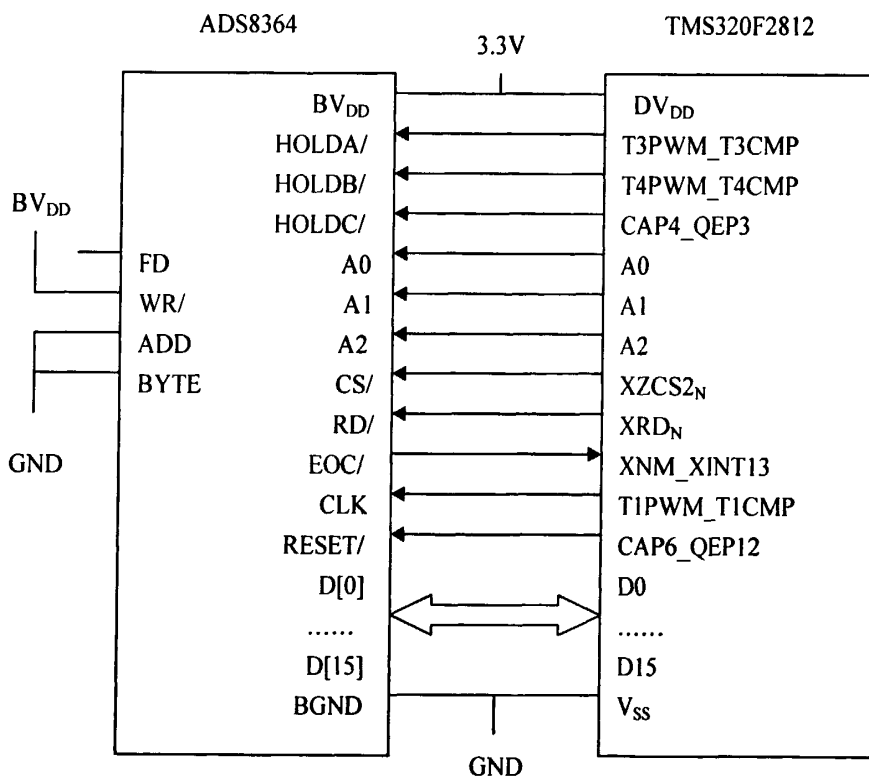


图 5.3 ADS8364 与 TMS320F2812 的连接示意图

如图 5.3 所示, TMS320F2812 中的 XZCS_{2N} 与 ADS8364 的片选端 CS 相连, ADS8364 的高位地址被映射在 TMS320F2812 的扩展总线存储空间 XINTF Zone2 上, A0、A1、A2 为 ADS8364 的低位地址控制端, 通过高位地址和低位地址可以确定各个通道地址, 其具体如表 5.1 所示。HOLDA、HOLDB、HOLDC 分别为 CHA0、CHA1、CHB0、CHB1、CHC0 和 CHC1 的触发端, 当其中任一有效时, 便开始模数转换, 转换结束后, EOC 呈低电平状态。如果 RD 和 CS 都有效, 便可以读取数据地址上的转换结果。

表 5.1 ADS8364 各个通道数据地址

通道	地址
CHA0	0x080000
CHA1	0x080001
CHB0	0x080002
CHB1	0x080003
CHC0	0x080004
CHC1	0x080005

5.2.4 数据存储

TMS320F2812 除内部集成 128K 的 Flash 和 18K 的 SARAM, 还具有外扩 1M 的存储器外部接口。本文选用外扩一片 512×16 位的高速异步静态 RAM 芯片 IS61LV51216, 来实现大容量数据和系统参数配置存储及数据掉电保护功能。IS61LV51216 与 TMS320F2812 接口示意图如图 5.4 所示。

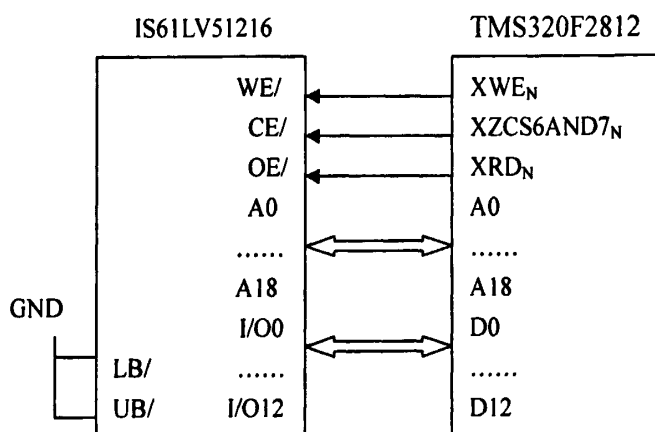


图 5.4 IS61LV51216 与 TMS320F2812 接口示意图

如图 5.4 所示, LB、UB 分别为数据存储器的低位和高位数据口控制端, 低电平有效, 有效时有能实现对数据存储器的读写操作。IS61LV51216 中的片选端 CE 端通过与 TMS320F2812 中的片选端 XZCS6AND7_N 相连, 将存储器地址映射在扩展总线存储空间 Zone7 上, 通过对 Zone7 进行操作便可实现数据存储与读取操作。

5.2.5 串口通信电路

DSP 系统采集好电力数据后, 通过串口将电力数据传送给上位机系统, 由上位机系统进行电能质量扰动分析。TMS320F2812 自带串行通信接口 SCI, 能方便实现串行通信。本文选用 MAX202 芯片来实现 EIA 和 TTL 电平转换, 以达到 RS-232C 通信标准, 另外 MAX202 芯片采用 5V 供电, 不能直接与 DSP 相连, 需进行电平转换, 电平转换工作由 74CBTD3384 芯片实现, 74CBTD3384 可以实现 3.3V 和 5V 两种电平转换, 其电路如图 5.5 所示。

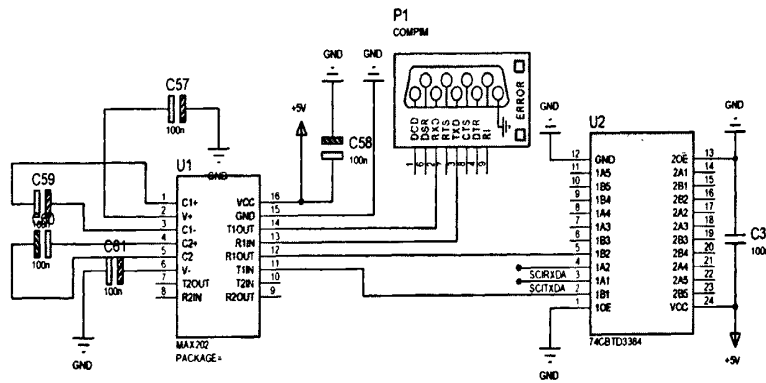


图 5.5 串口通信电路

5.2.6 DSP 电源电路

TMS320F2812 是一款采用双电源供电的 DSP 芯片, 内核电源为 1.8V, I/O 口为 3.3V。对于采用双电源供电的系统在考虑电源幅值大小的同时, 为了保证系统的稳定性和器件的使用寿命, 还得考虑系统的上电次序。为防止发生系统总线冲突, TMS320F2812 应该是 I/O 口先于内核供电。为满足双电源供电及供电的次序, 本文选用 TPS767D318 产生 3.3V 和 1.8V 的电压, 通过 3.3V 输出端控制三极管, 使它处于开关状态。当 3.3V 正常输出时, 三极管处于导通状态 1EN 端为低电平使能 1.8V 转换; 当三极管处于关断状态时, 1EN 为高电平, 禁止 1.8V

转换，具体电路如 5.6 所示。

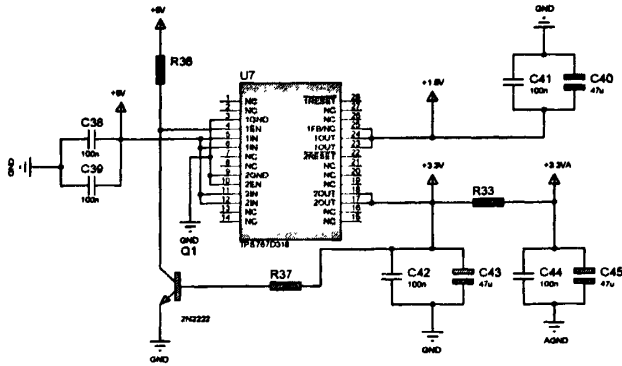


图 5.6 DSP 系统电源电路

5.3 系统软件设计

电能质量监测系统的软件设计主要包括 DSP 和 Matlab 两个部分，DSP 部分主要实现电力数据采集、电力数据传输及谐波、有功功率、无功功率、视在功率、电压有效值和电流有效值等基本电力参数计算。Matlab 接收到电力数据后运行 S 变换提取出总谐波畸变率、扰动幅度、基波幅值均值和基波幅值波动次数等特征值，然后用关联向量机对特征值进行训练及测试，最后输出电能质量扰动类型。电能质量监测系统程序流程如图 5.7 所示。

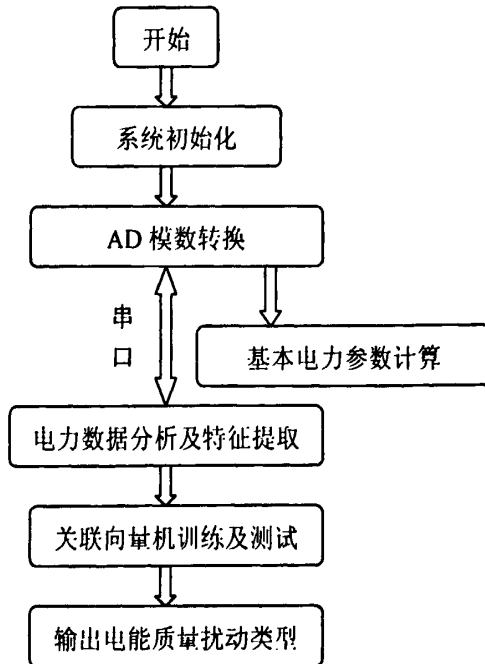


图 5.7 电能质量检测与分析系统程序流程图

5.3.1 DSP 程序设计

DSP 软件方面主要包括系统初始化、定时器控制、AD 模数转换控制、FFT 算法实现和 CMD 配置文件编写。首先对 TMS320F2812 系统、I/O 口、定时器和 AD 模数转换器进行初始化，设置系统时钟频率、I/O 口、定时器及 AD 采样频率等属性。然后开定时器，定时时间到启动 AD 模数转换，AD 转换结束触发系统外部中断，进入中断程序读取 AD 转换数据，数据采集完整后将数据通过串口发送给 Matlab 软件系统，并通过 FFT 等算法计算电力谐波、电压有效值、电流有效值、有功功率、无功功率和视在功率等基本电力参数。DSP 系统程序流程图及 ADS8364 程序流程图如 5.8 和 5.9 所示。

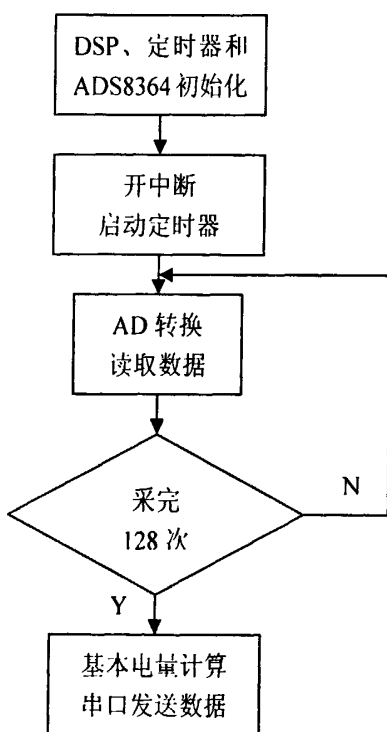


图 5.8 DSP 系统程序流程图

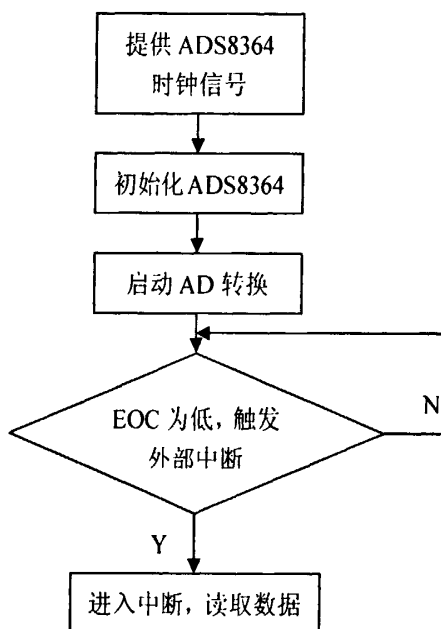


图 5.9 ADS8364 程序流程图

5.3.2 Matlab 程序设计

Matlab 软件主要实现电力数据接收、S 变换、特征提取和关联向量机等算法运行。Matlab 和 DSP 串口是通过仪器控制工具箱中的串口对象实现的，首先通过 serial 函数创建一个串口对象，通过 set 函数将串口对象的波特率、数据位、停止位和奇偶校验位等属性设置成同 DSP 的各种属性相同。用 fopen 函数打开串口，然后用 fwrite 和 fread 等函数实现对串口的读写操作，最后通过 fclose 来关

闭串口。Matlab 软件和串口程序流程图如 5.10 和 5.11 所示。

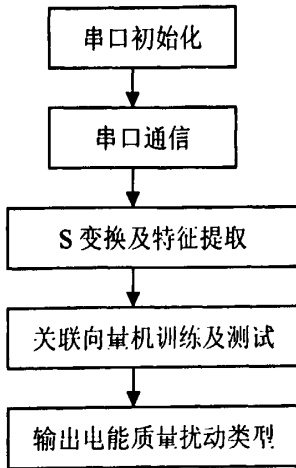


图 5.10 上位机程序流程图

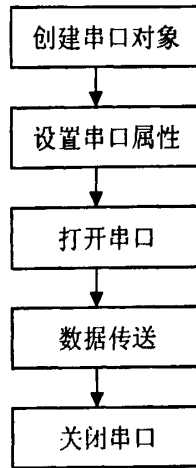


图 5.11 Matlab 串口通信原理

5.4 小结

本章从电能质量监测角度出发，提出一款基本 DSP 平台和 Matlab 软件的电能质量监测系统，实现电能质量扰动识别和基本电力参数计算。硬件电路部分，主要介绍了信号调理、AD 模数转换、串口通信、数据存储、DSP 系统电源等模块。软件设计方面分别从 DSP 软件设计和 Matlab 软件设计两方面进行研究。

6 总结与展望

6.1 总结

随着电力事业快速发展,电能质量问题日益受到关注,如何快速有效检测与识别出电能质量问题,成为当前电力行业急需解决的问题。对于电能质量扰动问题,本文提出了基于 S 变换和智能算法的电能质量扰动识别方法。针对电能质量扰动中比较严重的电压暂降问题,提出了基于 S 变换和 GA-SVM 的电压暂降源识别方法,并在 DSP 平台和 Matlab 软件上实现电能质量监测系统用来实现电能质量扰动识别和基本电力参数计算。本文主要内容和研究成果如下:

(1) 综述了电能质量基本知识,包括电能质量定义、分类、产生的原因和危害,并简单的概括了电能质量现有的检测与分析方法。

(2) 在分析各种电能质量扰动基础上,提出基于 S 变换和智能算法的电能质量扰动识别方法。通过 S 变换提取到电能质量扰动的特征样本,然后分别用关联向量机、神经网络和多分类支持向量机对特征样本进行训练及测试,得到电能质量扰动类型。

(3) 电压暂降是一种复杂的电能质量扰动,电压暂降产生的原因主要可分为短路故障、电动机启动和变压器投运。对于电压暂降问题,本文提出了一种基于 S 变换和 GA-SVM 的电压暂降源识别方法。首先通过 Simulink 仿真产生各种电压暂降,通过 S 变换检测得到电压暂降的暂降幅值和暂降时间及其它多个暂降特征,然后运用遗传算法对暂降特征进行优化,选取最优特征样本,最后通过多分类支持向量机验证最优特征样本的有效性。

(4) 在 DSP 平台和 Matlab 软件上研制一款电能质量监测系统,用于实现基本电力参数计算和电能质量扰动识别。DSP 平台主要用于实现电力数据采集和基本电力参数计算,而 Matlab 软件用来实现 S 变换和关联向量机等复杂算法开发。

6.2 展望

本文主要对电能质量扰动识别、电压暂降源识别及电能质量监测系统三个方面进行了研究，虽然取得了一定的成果，但还有一些方面需要进一步研究：

(1) 在实际电力系统中，电能质量扰动问题并不是单一的，往往存在多种电能质量扰动，如何在复杂扰动下以及实际电网中进行电能质量扰动有效识别有待于进一步研究。

(2) 电网传播过程中会引起一些电压暂降特征变化，深入研究不同电网环境下产生的电压暂降识别具体更多的实际意义。

(3) 在电能质量检测系统方面，本文所研制的电能质量监测系统，复杂的算法都是在 Matlab 软件上实现的，并没有真正的嵌入到 DSP 系统中去，在这方面可进一步做些研究。

参考文献

- [1]肖遥,李澍森.供电系统的电压下凹[J].电网技术,2001,25(1):73-77.
- [2]刘守亮,肖先勇,杨洪耕.基于 S 变换模时频矩阵相似度的短时电能质量扰动分类[J].电网技术,2006,30(5):67-71.
- [3]耿云玲,王群,何怡刚.基于复数小波相位信息的电能质量扰动的检测定位与分类[J].电工技术学报,2006,21(8):113-116.
- [4]黄文清,戴瑜兴.基于 Teager 能量算子的电能质量扰动实时检测方法[J].电工技术学报,2007,22(6):154-158.
- [5]Saroj K.Meher,Ashok K.Pradhan.Fuzzy classifiers for power quality events analysis[J].Electric Power Systems Research,2010,80(1):71-76.
- [6]Murat Uyar,Selcuk Yildirim.An effective wavelet-based feature extraction method for classification of power quality disturbance signals[J].Electric Power Systems Research,2008,78(10):1747-1755.
- [7]石敏,吴正国,徐裘.基于概率神经网络和双小波的电能质量扰动自动识别[J].电力自动化设备,2006,26(3):6-8.
- [8]Hu Guosheng,Zhu Fengfeng.Power quality disturbance identification using wavelet packet energy entropy and weighted support vector machines[J].Expert Systems with Applications,2008,35(1):143-149.
- [9]Sami Ekici.Classification of power system disturbances using support vector machines[J].Expert Systems with Applications,2009,36(6):9859-9868.
- [10]张全明,刘会金.最小二乘支持向量机在电能质量扰动分类中的应用[J].中国电机工程学报,2008,28(1):106-110.
- [11]C.N.Bhends,S.Mishra.Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and modular neural network[J].Electric Power Systems Research,2008,78(1):122-128.
- [12]Murat Uyar,Selcuk Yildirim.An expert system based on S-transform and neural network for automatic classification of power quality disturbances[J].Expert Systems with Applications,2009,36(3):5962-5975.
- [13]何为,杨洪耕.基于 S 变换和扩张神经网络的电能质量扰动分类[J].继电器,2007,35(5):64-67.
- [14]谷湘文,高培生,吴为麟.基于 S 变换和神经网络的电能质量多扰动分类识别[J].机电工程,2007,24(9):47-49.
- [15]B.K.Panigrahi,P.K.Dash.Hybrid signal processing and machine intelligence techniques for detection, quantification and classification of power quality disturbances[J].Engineering Applications of Artificial Intelligence,2009,22(3):442-454.
- [16]吕干云,程浩忠,汪晓东.基于 S 变换和多级 SVM 的电能质量扰动检测识别[J].电工技术学报,2006,21(1):122-125.
- [17]Mohammad E.Salem,Azah Mohamed.Rule based system for power quality

- disturbance classification incorporating S-transform features[J].Expert Systems with Applications,2010,37(4):3229-3235.
- [18]Z.Moravej,S.A.Banihashemi.Power quality events classification and recognition using a novel support vector algorithm[J].Energy Conversion and Management, 2009,50(12):3071-3077.
- [19]Serkan Gunal,Omer Nexih Gerek.The search for optimal feature set in power quality event classification[J].Expert Systems with Applications, 2009,36(7): 10266-10273.
- [20]孙素军, 李含善, 任永峰.基于 Hilbert 变换的电压凹陷检测方法[J].计算机应用技术, 2009, 4: 127-130.
- [21]袁帅, 佟为明.基于 Hilbert 变换和 dq 变换的电压暂降检测新方法[J]. 高电压技术, 2009, 25(5): 1220-1224.
- [22]赵凤展, 杨仁刚.基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J].中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34.
- [23]李军浩, 汪晓明, 王晶.基于小波变换模极大值的 SPD 故障诊断技术[J].高电压技术, 2006, 32(3): 40-41.
- [24]刘连光, 贾文双, 肖湘宁, 张宇.用小波变换和有效值算法实现电压凹陷的准确测量[J].电力系统自动化, 2003, 27(11): 30-33.
- [25]王克星, 宁政湘, 陈德柱.基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨别[J].中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34
- [26]Ozgur Gencer,Semra Ozturk.A new approach to voltage sag detection based on wavelet transform[J].Electrical Power and Energy Systems,2010, 32(2):133-140.
- [27]杨洪耕, 刘守亮, 肖先勇.利用 S 变换时频等值线图与幅值包络向量实现电压凹陷的分类[J].电工技术学报, 2006, 21(8): 76-79.
- [28]杨洪耕, 刘守亮, 肖先勇.基于 S 变换的电压凹陷分类专家系统[J].中国电机工程学报, 2007, 27(1): 99-104.
- [29]Seon-Ju Ahn, Dong-Jun Won,Il-Yop Chung.Determination of the Relative Location of Voltage Sag Source According to Event Cause[C].Denver:IEEE Power Engineering Society General Meeting,2004: 620-625.
- [30]Noraliza Hamzah,Azah Mohamed.A new approach to locate the voltage sag source using real current component[J].Electric Power System Research, 2004,72(2):113-123.
- [31]Kong Wei,Dong Xinzhou,Chen Zhe.Voltage sag source location based on instantaneous energy detection[J].Electric Power Systems Research, 2008, 78(11): 1889-1898.
- [32]Abbsa Khosravi, Joaquim Melendez.Classification of sags gathered in distribution substations based on multiway principal component analysis[J].Electric Power Systems Research,2009,79(1):144-151.
- [33]J.Mora-Florez,J.Cormane-Angarita. K-means algorithm and mixture distributions for locating faults in power systems[J].Electric Power Systems Research, 2009,79(5):714-721.
- [34]张波.电压暂降特征提取与扰动原因分析[D].中国电力科学研究院, 2005: 23-45.
- [35]Zheng Gang,Yan Xiaomei.Classification of voltage sag based on wavelet

- transform and wavelet network[C].Shanghai:Machine Learning and Cybernetics, 2004: 466-470.
- [36]Hao Xiaohong,Chen Wei.Identification of voltage sags in distribution system using wavelet and Artificial neural networks[C].Dalian:Sixth World Congress on Intelligent Control and Automation,2006: 1605-1609.
- [37]S.Herrraiz, G.T.Heydt. Power quality indices for aperiodic voltages and currents [J]. IEEE Trans.Power Delivery,2000,15:784-790.
- [38]刘锐.基于小波变换的电能质量扰动的研究[D].厦门大学,2006: 2-3.
- [39]程浩忠.电能质量[M].北京:清华大学出版社,2006: 7-8.
- [40]苟北, 陈陈.Prony 算法在电力系统负荷动态模型辨识中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(1): 21-24.
- [41]曹维,翁斌伟,陈陈.电力系统暂态变量的 Prony 分析[J].电工技术学报, 2000, 15(6): 56-60.
- [42]储焜, 马建伟.基于小波变换的电能质量扰动信号的检测[J].电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 34-36.
- [43]秦英林, 田立军, 常学飞.基于小波变换能量分布和神经网络的电能质量扰动分类[J].电力自动化设备, 2009, 29(7): 65-66.
- [44]R.G.Stockwell,L.Mansinha.Localization of the complex spectrum: The S transform[J].IEEE Transactions on Signal Process,1996,44:998-1001.
- [45]Michael E.Tipping.Sparse Bayesian Learning and the Relevance Vector Machine [J].Journal of Machine Learning Research,2001,1:211-244.

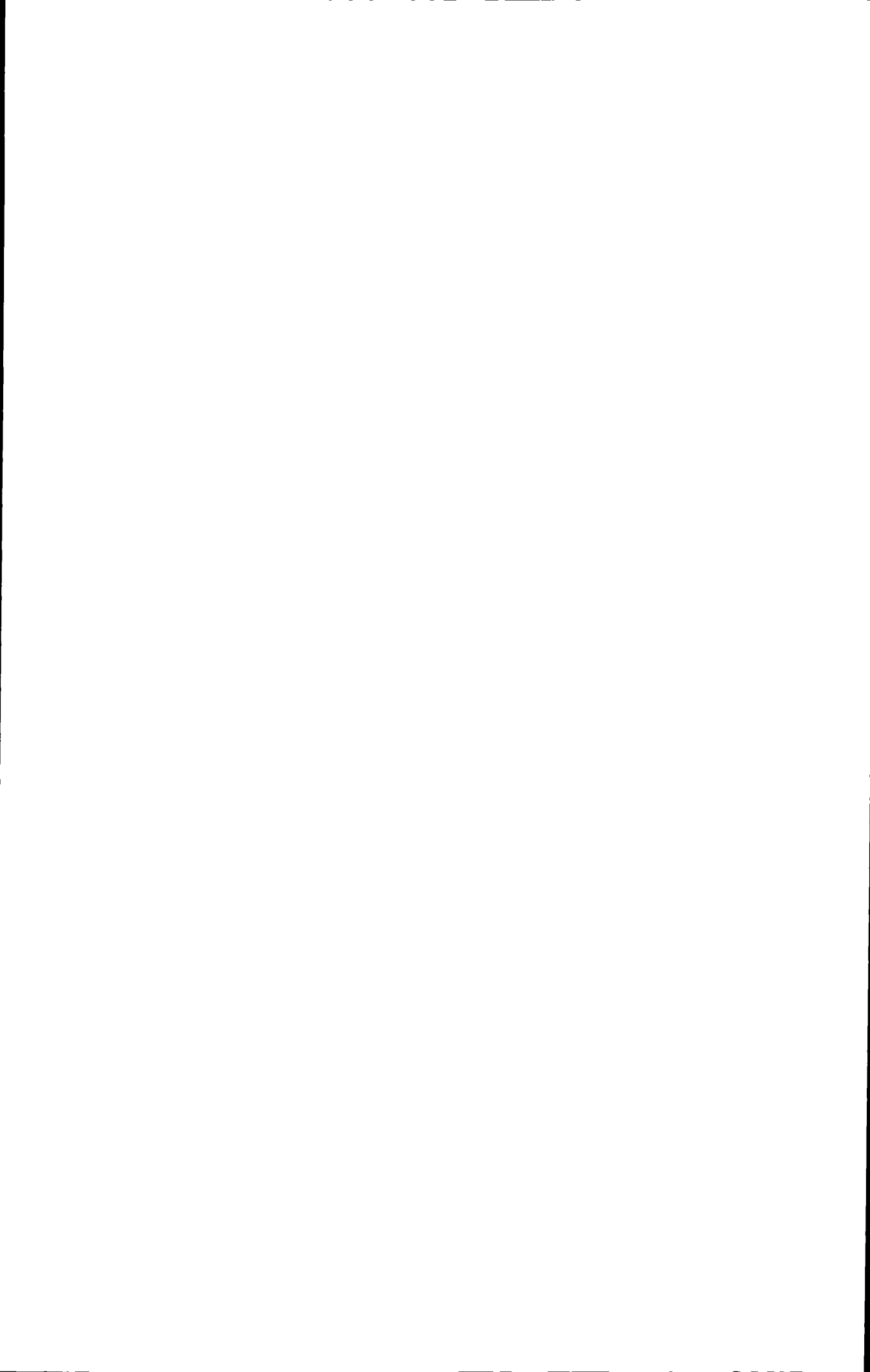
攻读学位期间取得的研究成果

论文发表情况:

- [1]基于单纯形优化谱估计的间谐波检测.河南机电高等专科学校学报, 2009, 17(4): 12-13.第一作者, 浙江师范大学.
- [2]基于 S 变换的电压凹陷特征检测.仪器仪表学报, 2009, 30(9): 441-442.第一作者, 浙江师范大学.
- [3]基于鲁棒锁相环的谐波环境下电能计量方法.电力自动化设备, 2009, 29(8): 79-82.第二作者(导师为第一作者), 浙江师范大学.
- [4]一种基于粒子群优化算法的间谐波分析新方法.电工技术学报, 2009, 24(12): 156-161.第二作者(导师为第一作者), 浙江师范大学.
- [5]基于多分类支持向量机的电压暂降源识别.电力系统保护与控制, 已录用(稿件编号 091743, 录用日期 2010-1-12), 第一作者, 浙江师范大学.
- [6]基于关联向量机和 S 变换的电能质量扰动识别.高电压技术, 已录用(稿件编号 20090803002, 录用日期 2010-1-19), 第二作者(导师为第一作者), 浙江师范大学.

参与科研项目:

- [1]浙江省自然科学基金项目: 计及负荷动特性的电压暂降源分类定位研究, 编号 Y1090182 (2010~2011), 负责电压暂降源识别算法及实现.
- [2]浙江省金华市科技计划项目: 便携式 DSP 电力谐波监测仪的研究与试制, 编号 2008-1-089 (2008.1~2009.7), 负责系统软硬件设计和实现.
- [3]浙江省级科技计划大学生创新创业孵化项目: 机电产品多功能温升测试仪, 负责人.



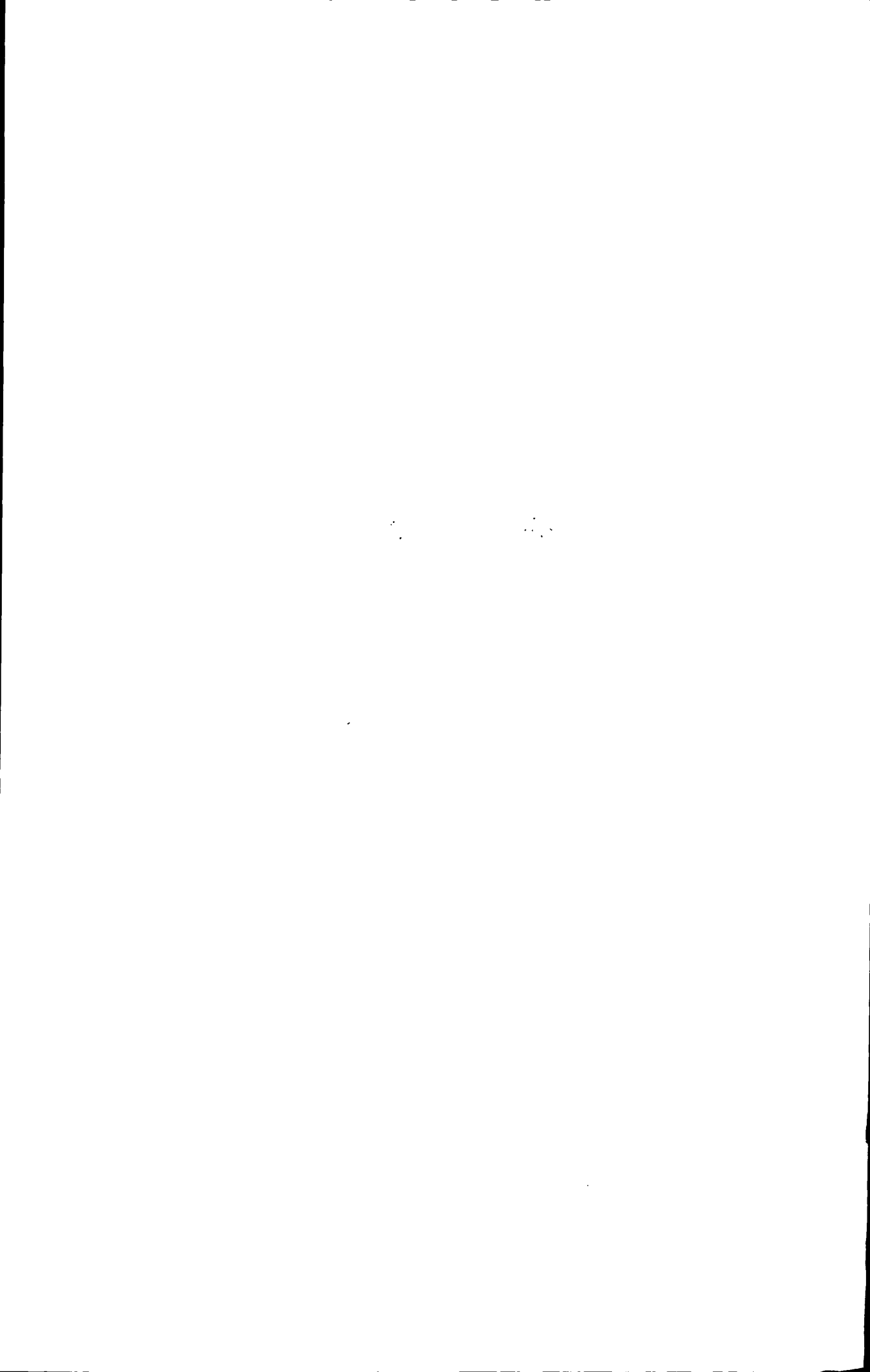
致 谢

本文的研究工作是在导师吕干云悉心指导下完成的。在读研期间，吕老师在学习和生活上给了我很大的帮助、支持和鼓励。吕老师渊博的学识、认真负责的态度、勤奋进取的精神和谦逊的品德使我受益匪浅，终身难忘。使我不仅学到了许多知识，更重要的是学到了踏实做人、认真负责的态度。在此，对吕老师致以崇高的敬意和衷心的感谢。

感谢所里的汪晓东、张浩然及前班主任许秀玲等老师，在我读研期间对我的帮助和指导。感谢邱杰凡、鲁娟、陈会羽等同学三年来对我学习上和生活上的帮助，和他们在一起生活和学习，使我的生活增添不少乐趣。

我还要感谢我的父母、妹妹及好友，他们在精神上和物质上给了我很大的支持，我将铭记在心。

再次感谢我的恩师吕干云。



浙江师范大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中除了特别加以标注和致谢的地方外，不包含其他人或其他机构已经发表或撰写过的研究成果。其他同志对本研究的启发和所做的贡献均已在论文中作了明确的声明并表示了谢意。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：方奇品 日期：2010年6月1日

学位论文使用授权声明

本人完全了解浙江师范大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关机关或机构送交论文的复印件和电子文档，允许论文被查阅和借阅，可以采用影印、缩印或扫描等手段保存、汇编学位论文。同意浙江师范大学可以用不同方式在不同媒体上发表、传播论文的全部或部分内容。

保密的学位论文在解密后遵守此协议。

作者签名：方奇品 导师签名：吕平云 日期：2010年6月1日

