

基于广义 S 变换和多级 SVMs 的动态 电能质量扰动辨识方法研究

摘 要

随着电力系统中非线性负荷的大量使用以及电力敏感设备的快速增长,动态电能质量问题成为电力部门与用户关注的焦点。准确检测和正确识别电能质量扰动是有效治理并保证电网电能质量的前提条件,也是电能质量研究的重要内容。

本文针对动态电能质量扰动问题,按照“扰动信号生成→提取特征→规则树分类→结果分析”的思路,实现了以广义 S 变换和多级 SVMs 算法为核心的动态电能质量扰动检测与辨识。主要工作如下:

1) 利用 MATLAB 编程实现了 9 种典型电能质量扰动波形的合成。然后提出一种基于广义 S 变换的扰动波形特征提取方法,推导了广义 S 变换的离散公式,利用广义 S 变换把动态电能质量扰动变换到相空间中,提取 7 种特征量。

2) 提出了一种多级 SVMs 分类方法,利用 LIBSVM 对 270 个扰动样本进行训练,然后利用模型对 180 个扰动测试样本进行分类。

3) 利用 NI USB-6009 采集卡进行实时数据采集,并用 LabVIEW8.6 的 G 语言编程实现了电能质量综合分析系统平台。

检测和辨识结果表明,本文提出的基于广义 S 变换和多级 SVMs 的动态电能质量扰动辨识方法,具有以下特点:1) 在动态电能质量扰动的检测上具有更灵活的时频聚焦性。不仅能有效地检测到电压幅值的瞬时变化,而且能准确判断频率的变化,特别是高次分量。

2) 辨识上,本文提出的多级 SVMs 分类方法训练速度快,分类准确率高。

关键词: 动态电能质量, 广义 S 变换, 支持向量机, 辨识

STUDY OF DYNAMIC PQDS IDENTIFICATION BASED ON GENERALIZED S-TRANSFORM AND MULTI-SVMS

ABSTRACT

With the widely use of nonlinear load and the rapid increasing of sensitive equipments in power system, more attention has been paid to the dynamic power quality problems both by the power utilities and consumers. Accurate detection and correct classification of the power quality disturbances (PQDs), as an important aspect of power quality issues, is not only the base of effective treatments to PQ problems, but also the powerful guarantee of a better power quality.

Following the idea of “PQDs signal synthesis → characteristics extraction → multi-SVMS classification → result analysis”, the paper achieves the detection and classification of dynamic PQDs which is based on Generalized S-transform (GST) and multi support vector machines (multi-SVMS). The main works are as follows:

1) Based on 9 typical PQD signals which are synthesized using MATLAB software, a characteristic extraction method based on GST is proposed. After deducing the GST formula of discrete time series, the typical PQD signals mentioned above are transformed into the phase space by GST. Then 7 types of Characteristic are extracted.

2) A multi-SVMS classification method based on binary tree is presented. After 270 PQD samples are trained using the LIBSVM classifier, 180 PQD samples are classified.

3) A general power quality analysis system which applies NI USB-6009 as data acquisition board is achieved using LabVIEW software.

Results show: 1) The method based on GST has a more flexible time-frequency localization characteristics, which can detect not only voltage instantaneous varies, but also PQDs frequency changes, especially high frequency components. 2) The method based on SVM can classify the PQDs effectively. Meanwhile it has an excellent performance on training speed and correct ratio.

Key Words: Dynamic Power Quality Disturbances, Generalized S-transform, SVMS, Identify

浙江工业大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提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研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名：张月月

日期：09年12月23日

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。本人授权浙江工业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。

本学位论文属于

1、保密口，在_____年解密后适用本授权书。

2、不保密口。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：张月月

日期：09年12月23日

导师签名：王晶

日期：09年12月23日

第 1 章 绪 论

1.1 本课题的研究背景和意义

电能是现代社会中使用最为广泛的一种能源,由发电厂、供电部门、电力用户三方共同保证质量的一种特殊产品(具有可被测量、预估、保证或改善的特征)。如今,电能作为商品走进市场,与其它商品一样,应讲求质量。

随着工业自动化和电力系统的深入发展,一方面,配电网中非线性负荷对电网的电能质量构成了严重的威胁;另一方面,配电网中如计算机等用电设备对系统干扰更加敏感,它们对电能质量提出了高可靠性和高可控性的要求^[1]。据美国电力科学研究院 Jane Clemmensen 估计,在美国每年和电能质量有关的问题造成的损失高达 260 亿美元,随着大量精密仪器和电子装置的使用,电力用户提高了对电能质量的认识,越来越多的用户向电力部门提出了高质量供电的要求。而诸如电压中断(Interruptions)、电压骤降(Voltage Sag)、电压骤升(Voltage Swell)、振荡暂态(Oscillatory Transients)等动态电能质量问题已成为当前研究的热点问题之一。因此,改善电能质量对于电网和电气设备的安全、经济运行,保障产品质量和科学实验以及人民生活生产的正常等均有重要意义^[2]。

动态电能质量扰动的检测和分类识别是电能质量各项分析研究工作的前提和基础,是不可缺少的重要环节。但由于动态电能质量问题发生有很大的随机性和不确定性,人们对其发生的原因、频次以及其对电力系统和用户的影响等情况了解还不够深刻。而现有的大部分电能质量监测分析仪器不具备对瞬时扰动和暂态扰动的跟踪和捕获能力,只具有简单的暂态电能质量事件记录功能,但是缺乏暂态波形分析和类型智能识别的能力,不能满足用户对暂态电能质量监测的要求。因此,动态电能质量问题成了电能质量问题的研究重点,寻求新的检测、识别和分类方法,在理论和应用方面具有重要的意义。

1.2 DPQ 的相关概念

1.2.1 定义

迄今为止,用什么样的词语来描述供电与用电(系统与负荷)双方的相互作用和影响还没有完全统一,人们还不能给出一个准确统一的定义。IEEE 标准化协调委员会给出了如

下电能质量的技术定义：合格电能质量的概念是指，给敏感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(在许多情况下，接地系统对电能质量有很大的影响，以往对其认识不足)，并正式采用“power quality”(电能质量)这一术语。但是国际电工委员会(IEC)并没有采用“power quality”这一术语，而是提出了使用“EMC”(电磁兼容)术语，指出和强调设备之间的相互作用和影响，以及电源和设备之间的相互作用与影响^[3]。

但人们对电能质量的技术含义却存在着不同的认识，甚至在电力研究者中关于电能质量的范畴、定义，以及质量下降的起因等许多方面还存在着分歧与争论，对生产实际中出现的诸多电能质量问题互相推诿。例如电力部门可能把电能质量定义为电压与频率的合格率，并且用统计数字来说明电力系统 99.9%是安全可靠运行的；电力用户则可能只是把电能质量定义是否向负荷正常供电；设备制造商常将电能质量定义为能使设备正常运行的供电特征，因此不同的部门和用户往往采用不同的电能质量指标。这就要求科研工作者和经营管理者继续深入分析和探索未被认识的问题，对电能质量加以细化和分类，制定出科学的符合生产实际的可操作的考核电能质量优劣的技术指标和评估方法，逐渐构成一个完整的质量管理体系。

1.2.2 电能质量问题的分类

理想的供电电压应该是纯正的正弦波形具有标称幅值和标称频率，并且三相对称。而由于从发电到用电各环节中的非理想因素的影响，施加到负载上的电压幅值、频率、波形中的一项或几项可能偏离标称值或标准状态。电压波形幅值和频率偏离标称值达一定的范围时，电力用户和电网的运行就会受到一定程度的影响和损害，就产生电能质量问题^[4]。

电力系统中主要的电能质量问题可分稳态和暂态两大类。稳态电能质量问题以波形畸变为特征，主要包括谐波、间谐波、陷波、噪声以及电压不平衡等；暂态电能质量问题通常是以频谱和暂态持续时间为特征，主要包括各种电能质量扰动现象，如间断、骤降、骤升、脉冲暂态和振荡暂态等。

参照美国电气和电子工程师协会 IEEE 第 22 标准协调委员会电能质量^[5]和其他一些国际委员会的推荐描述电能质量问题的术语主要包括如下。

1) 电压瞬变(Transients)

在两个连续稳态电压之间的一种持续时间极短的数量变化现象。电压瞬变按照电压波形的不同分为两类：电压脉冲暂态(Impulsive transient)：加在稳态电压上的任一单方向变动的电压非工频分量；电压振荡暂态(Oscillatory transient)：叠加在稳态电压上的同时包括

两个方向变动的电压非工频分量。

2) 电压骤降(Sags)

工频电压的均方根值下降到 0.1-0.9pu.范围内、持续时间为 0.5 个工频周期到 1 分钟的电压短期下降。

3) 电压骤升(Swells)

工频电压的均方根值上升到 1.1-1.8pu.范围内、持续时间为 0.5 个工频周期到 1 分钟的电压短期上升。

4) 短期断电(Interruption)

持续时间小于 1 分钟的一相或多相完全失去电压(小于 0.1pu.)的电压短期变动, 按持续时间分为两类:

瞬时断电(Momentary interruption): 持续时间为 0.5 个工频周期到 3 秒钟;

暂时断电(Temporary interruption): 持续时间为 3 秒钟到 1 分钟。

5) 欠电压(Under voltages)

电压幅值小于额定电压(通常在 0.8pu.至 0.9pu 之间)且持续时间大于 1min 的长期电压扰动。

6) 过电压(Over voltages)

电压幅值大于额定电压(通常在 1.1pu.至 1.2pu 之间)且持续时间大于 1min 的长期电压扰动。

7) 电压波动(Voltage fluctuations)

在包络线内电压的周期性变化, 或是电压幅值通常不超过 0.9pu.-1.1pu.范围内的一系列电压随机变化。

8) 电压陷波 (Notching)

由电力电子设备正常换相导致的周期性电压扰动。

9) 谐波(Harmonics)

含有工频基波整倍数频率的正弦波电压或电流。

10) 间谐波(Interharmonics)

含有工频基波非整倍数频率的电压或电流周期性分量。

11) 频率偏差(Frequency deviation)

系统电压或电流对额定频率的偏离。

表 1-1 给出了 IEEE 关于电能质量领域电磁现象的具体分类。对于稳态现象, 可利用

幅值、频率、频谱、调制、陷波深度和面积等描述特征；对于非稳态现象，可用上升率、幅值、相位移、持续时间、频谱、频率、发生率、能量强度等^[6]描述特征。

表 1-1 电能质量的分类

类别		频谱	电压幅值	持续时间	
瞬变	脉冲	纳秒级	5ns上升	< 50ns	
		微秒级	1 μ s上升	50ns-1ms	
		毫秒级	0.1ms上升	> 1ms	
	振荡	低频	< 5kHz	0-4 pu.	0.3-50ms
		中频	5-500 kHz	0-8 pu.	20 μ s
		高频	0.5-5MHz	0-4 pu.	5 μ s
短时变动	瞬时	断电	< 0.1pu.	0.5-30周波	
		电压骤降	0.1-0.9 pu.	0.5-30周波	
		电压骤升	1.1-1.8 pu.	0.5-30周波	
	暂时	断电	< 0.1pu.	30周波-3s	
		电压骤降	0.1-0.9 pu.	30周波-3s	
		电压骤升	1.1-1.4 pu.	30周波-3s	
	短时	断电	< 0.1pu.	3s-1min	
		电压骤降	0.1-0.9 pu.	3s-1min	
		电压骤升	1.1-1.2 pu.	3s-1min	
长期变动	持续断电		0.0 pu	> 1 min	
	欠电压		0.8-0.9 pu	> 1 min	
	过电压		1.1-1.2 pu	> 1 min	
电压不平衡			0.5%-2%	稳态	
波形畸变	直流偏移		0%-0.1%	稳态	
	谐波	0~100次	0%-20%	稳态	
	间谐波	0~6kHz	0%-2%	稳态	
	陷波	高频		稳态	
	噪声	宽带	0%-1%	稳态	
电压波动		< 25Hz	0.1%-7%	间歇	
工频变化				< 10s	

1.3 电能质量分析方法的研究现状

电能质量的分析和计算涉及对各种干扰源和电力系统的数学描述，需要开发相应的分

析软件和工程方法来对各种电能质量问题进行系统的分析,为改善电能质量提供指导。近年来,基于数字技术的各种分析方法已在电能质量领域中得到广泛应用,大致分为时域仿真方法、频域分析法和基于变换域的方法三种^{[7][8]}。

1.3.1 时域仿真方法

时域仿真方法是电能质量分析中的应用最为广泛的一种,最主要的用途是利用各种时域仿真程序对电能质量问题中的各种暂态现象进行研究^[7]。目前较通用的时域仿真程序主要有 EMTP, EMTDC, NETOMAC, ATP 等系统暂态仿真程序和 SPICE, PSPICE, SABER 等电力电子仿真程序两大类。影响电能质量的暂态现象除了脉冲暂态和振荡外,伴随着暂态过程还会出现电压骤降、骤升等现象。因此,利用暂态仿真程序可在如下电能质量领域开展研究^{[9]-[14]}:

- (1) 计算系统中出现的过电压,分析其对各种保护设备的影响。
- (2) 分析电容器投切造成的暂态现象。
- (3) 分析电力电子装置产生的陷波现象。
- (4) 分析电压波动造成的闪变现象。
- (5) 分析不正常接地引起的电能质量问题。
- (6) 分析电压骤降等电能质量问题对各种用电设备造成的影响。
- (7) 开发改善电能质量的新型电力电子控制器。

采用时域仿真的缺点是仿真步长的选取决定了可模仿的最大频率范围,因此必须事先知道暂态过程的频率覆盖范围。此外,在模仿开关的开合过程时,还会引起数值振荡^[14]。

1.3.2 频率分析方法

频域分析方法主要用于电能质量的谐波问题分析,包括频率扫描、谐波潮流计算等。频率扫描和谐波潮流计算在反映非线性负载动态特性方面有一定局限性,因此文献[15]又提出一种更精确的方法--混合谐波潮流算法。文献[16]改进混合谐波潮流算法进行研究,其算法优点是可详细考虑非线性负载控制系统的作用,因此可精确描述其动态特性。但缺点是计算量大,求解过程复杂。

1.3.3 基于变换的方法

基于变换的方法主要包括傅里叶变换方法、短时傅里叶变换方法、小波变换方法以及

近年来出现的 S 变换等。

1) 傅里叶变换方法

傅立叶变换(FT)是最常见的一种将时域特征和频域特征联系起来的工具,具有正交、完备等许多优点,而且有像 FFT 这样的快速算法,因此在电能质量分析领域中得到广泛应用。通过离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)对平稳信号进行频率分析,从而进行谐波分析,但在运用 FFT 时,必须满足以下条件^[17]:(1) 满足采样定理的要求,即采样频率必须是最高信号频率的两倍以上;(2) 被分析的波形必须是稳态的、随时间周期变化的。因此当采样频率或信号不能满足上列条件时,FFT 分析会产生“旁瓣”和“频谱泄漏”现象,给分析带来误差。目前,DFT 和 FFT 已经成为现代频谱分析和谐波分析的基础,改进的算法大大提高 FFT 方法的计算精度和速度。文献[18]中在分析 FFT 算法的频谱泄漏现象后,提出改进 FFT 算法,减小了频谱泄漏误差,降低了谐波之间的相互干扰。文献[19]在 V. Jain 和 T. Grandke 提出的插值算法修正算法,采用余弦窗进行插值,提高谐波分析精度。

由于傅氏变换是在整个时域内积分,去掉了非平稳信号中的时变信息,所以傅里叶变换只能适用于确定性的平稳信号(如谐波),难以充分描述时变非平稳信号。另外,傅里叶分析在时域的分辨率是不变的,因而不能在任意小的范围内确定频率。短时傅里叶变换(STFT)^[19]的基本思想是:信号划分成许多小的时间间隔,用傅里叶变换分析每一个时间间隔,以便确定该时间间隔存在的频率。虽然短时傅里叶变换在一定程度上克服了标准傅里叶变换不具有局部分析能力的缺陷,但一旦选定窗函数,则短时傅里叶变换的时频分辨率在整个时频平面就固定了,即时频网格等宽,不能适应非平稳信号中不同频率成分特性的分析。

2) 小波变换方法

1980 年, Morlet^[20]在分析地震数据时首次提出了小波变换。小波分析方法是一种窗口大小(即窗口面积)固定但其形状可改变的时频局部化分析方法。在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率,而在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率。正是这种对信号的自适应特性,小波被誉为“数学显微镜”。

由于小波变换的时频局部化的特点,尤其是暂态电能质量分析领域将具有 FFT, STFT 所无法比拟的优势。小波变换在暂态电能质量分析领域得到广泛应用,主要包括:

(1) 电能质量扰动检测。1994 年, S.Santos 首先在文献[21]提出小波变换是评估电能质量的有效方法。该文用 db4 和 db10 小波函数分别对电压骤降、平顶波和谐波畸变进行

小波变换,实现了对电能质量扰动的检测与时间定位。文献[22]提出了用 Coiflet 小波对电压骤降等典型暂态电能质量扰动进行检测,取得了较好的效果,通过多分辨率分析能够在适当的分解尺度上检测到扰动。文献[23]采用小波变换的奇异性检测进行多尺度分析,对暂态电能质量扰动信号的初始突变点进行精确的时域定位。

(2) 扰动的分类。文献[24]是最早以文章的形式发表的运用小波理论对扰动进行分类的文章。该文运用一非正交的二次样条小波将暂态波形进行小波变换,提取变换后的特征信号,再运用贝叶斯分类器来识别各种暂态。但该方法的实现过程却太过繁琐。文献[25]使用基于小波的隐 Markov 模型的参数最优化估计方法,正确率可达到 95.5%。文献[26]进一步改进了文献[25],提出时域内基于规则、频域内基于隐 Markov 模型的扰动分类方法。

(3) 电能质量扰动数据压缩^{[27]-[29]}。在电能质量扰动监测过程中,需要记录大量数据,占用较大的存储空间。由于信号在小波变换域能量集中于少数系数上,通过阈值处理后可把大量系数置为零,因此减少存储量,从而达到了数据压缩的目的。

虽然关于小波变换在电能质量中的应用及研究不断深入,但仍存在很多问题:a) 小波变换是线性的,信号经小波变换后得到的小波系数是由信号及噪声叠加而成,因此易受噪声影响。b) 小波计算量随小波尺度的增多而加大,使其实时性受到了制约。c) 结果缺乏直观性^[30]。

3) S 变换

S 变换(S-Transform, ST)是地球物理学领域的学者 Stockwell^[31]等人 1996 年提出的一种时频可逆分析方法,是对连续小波变换和短时傅立叶变换的一种组合和扩展。作为连续小波变换和短时傅立叶变换的发展,S 变换引入了宽度与频率成反向变化的高斯窗,具有与频率相关的分辨率。与 STFT、WT 等时频方法相比,S 变换有其独特的优点:信号 S 变换的时频谱分辨率与频率相关,不但有多尺度聚焦性,而且与其 Fourier 谱直接联系,保持频率的绝对相位;其基本变换函数不必满足容许性条件^[31]等。国内的高静怀^[32]教授在研究国外对 S 变换的基础,对 S 变换形式改进得到广义 S 变换。之后,各行学者纷纷开展了对 S 变换的研究。2005 年占勇^[33]首次将 S 变换应用在电能质量扰动,但到目前为止,国内关于 S 变换在电能质量方面的工作仍是寥寥无几。

S 变换在电能质量分析中大体可分两大部分,第一方式是直接利用 S 变换进行检测和分类。文献[27]利用样条小波对电能质量扰动数据进行压缩存储和重构,通过 S 变换时频等值线图对扰动进行检测和定位,提取幅值包络等特征,来实现分类识别。文献[34]通过

与离散小波变换(Discrete Wavelet Transform DWT)的对比,指出了 S 变换在短时电能质量扰动检测、定位、特别是特征提取和分类辨识方面的优势和潜力。文献[35]将 S 变换与卡尔曼滤波技术(Kalman Filtering)结合起来提取特征,提出了检测、分类短时电能质量扰动的完整方案。全惠敏^[36]等为了提高扰动定位的准确性,提出 S 模矩阵平方和的定位方法。刘守亮^[37]等充分利用 S 变换矩阵信息,提出了时频矩阵相似度的新方法,但检测复杂扰动的能力有待提高。赵凤展^[38]深入分析了广义 S 变换统计信息图,提出了高频和函数等特征量,为识别奠定了新基础。以上文献都从不同角度提取了 S 变换矩阵的特征进行检测、分类。

第二种方式是采用“S 变换特征提取+分类器分类识别”模式。文献[39]专门对应用 S 变换进行电能质量扰动分类进行了研究,利用 S 变换矩阵提取扰动信号标准偏差、振幅系数等特征量,利用该特征向量分别实现前向神经网络和概率神经网络的分类辨识,达到了一定的分类准确率,并且适当考虑了噪声的影响。文献[35]采用与上一篇文章类似的思路,即“数据预处理→特征提取→分类器分类识别”,提出了基于模糊逻辑的电能质量扰动识别系统。占勇^[33]等对 S 变换提取的信号特征进行分类,且用了在小样本、非线性等模式识别中具有优势的支持向量机作为分类器,考察了在 40dB~20dB 噪声水平下的分类效果,分类准确率较高。文献[40]利用 S 变换与 FCT(Forward Clarke Transformation)各自的特点,提取最大值等特征量,并在支持向量机中分类,取得了很满意的效果。赵凤展^[41]等从信号的 S 变换幅值矩阵中提取 5 种特征量,并借助规则树识别电能质量扰动。S.Mishra^[42]等把 S 变换和概率神经网络相结合,提高了电能质量的检测和分类能力。

以上文献对 S 变换应用于电能质量扰动分析做了开创性工作,但由于 S 变换窗口函数的形态固定,使其在应用中受到限制。Pinnegar^[43]等人对 S 变换进行了改造,用于地震信号与含噪声非平稳信号的处理。高静怀^[32]将改进的 S 变换应用于薄层的地震探测,陈学华^{[44]-[45]}等也提出的广义 S 变换,将其成功用于地震信号处理和时频滤波中。文献[46][47]把广义 S 变换引入电能质量的分析,实验结果表明其时频聚焦性强于 S 变换。广义 S 变换具有调节的参数,可得到更加灵活多变的窗函数,避免了 S 变换的时频分辨率变化趋势不变的问题,具有更高的适应性。信号在高频部分分解得更细致。由于其良好的时频特性,因而非常适合于进行电能质量扰动信号特征提取。但是可以看出,其应用研究处于刚起步的阶段,国内外关于该方面的研究文献目前屈指可数,且目前仅把广义 S 变换单一地作为信号特征提取地手段。实际上,广义 S 复时频矩阵本身就包含了信号幅值、相位等重要的特征信息随时间和频率的分布状况,因此充分利用这些信息对电能质量扰动进行

更简便和有效地检测、分类识别，都需要更进一步的工作。

1.3.4 人工智能的应用

近年来，人工智能技术发展迅速，分支众多，如人工神经网络、支持向量机和遗传算法，以及与不同特性的智能技术结合起来的技术，对电力系统的运行、监试、预测、控制和规划发挥更大的作用。其中，神经网络具有简单的结构和很强的问题求解能力，可较好地处理噪声数据，是分类识别的重要方法，但算法存在局部最优问题，收敛性较差，训练时间较长，可靠性有限的缺陷^[48]。而支持向量机(SVMs)因为有效地解决了小样本、高维数、非线性等的学习问题，克服了人工神经网络存在局部最优和训练时间较长等缺点。因此，在图像、语音、文字等多方面得到了广泛的应用^{[49]-[51]}。

2005年占勇^[33]等首次将SVM引入电能质量扰动分析中，利用S变换对电能质量提取特征，然后构造支持向量机分类树，开创了分类的新思路。“变换识别方法与支持向量机”结合方式受到广泛关注。吕干云^[52]等人又把S变换与多级SVMs结合起来，识别率达到了100%，但他取样本不具有通用性和泛化能力。宋晓芳和陈劲操^[53]利用成对分类方法对动态电能质量进行分类，比较了选取不同参数时的分类率，其分类的效果直接与参数的选择有关。李智勇^[54]采用相空间重构的方法提取了有用特征，然后根据特征的相似性逐一排除一类特殊的扰动，直至分类完毕。Przemyslaw^[55]等提出一种基于半径式函数网络和SVM神经网络的自动分类方法，用空间向量来提取有效的特征。张全明^[48]等为了降低计算的复杂性，提出最小二乘支持向量机方法并应用在电能质量扰动分类中。文献[56]用改进后的S变换来提取动态扰动的特征，输入支持向量树来分类，识别效果良好。

到目前为止，利用先进的数学变换和各种人工智能结合的方法进行检测和辨识已经普遍被认为有效的方法，但这方面在电能质量中的应用中的研究还不多，有待进一步的研究。

1.4 电能质量监测仪器现状

电能质量监测仪器是用来检测电网中电压、电流等参数的，获得及时、准确的各种扰动“源”信息，是分析、改善电能质量的首要条件。国内外种类繁多的电能质量监测仪器，按其发展来可以分为四代：指针式仪器、数字式仪器、微机化监测仪器、智能型综合监测仪器。

第一代：指针式仪器，如指针式电压表、电流表、功率表。具有原理简单、坚固耐用、容易生产、成本低的优点，因而目前仍在广泛使用。但是其机械结构和电磁结构不稳定性

和复杂性，精度较低、稳定性较差。

第二代：数字式仪器。这类仪表的输出信息是数字信号，比指针式仪表精度有了很大的提高，结果稳定直观。以微计算机、独立操作系统、各种标准总线结构为特征，可相互通讯、扩展式仪器和自动测试系统及相应测量技术得到快速发展。但电子线路复杂，不能自动适应测量环境。

第三代：微机化监测仪器。20世纪80年代以来，大规模集成电路技术一方面使得控制芯片运算能力大大增强，另一方面使得芯片体积大幅缩小，方便地植入仪器内部，从而使仪器具有判断、控制、存储、运算甚至更高的智能化特性，从而诞生了基于数字信号处理器和各种数字信号处理算法的微机化监测仪器。其优点：检测精度高、检测指标多、可进行在线实时测量；对谐波和暂态进行分析；数据通讯、统计分析和自动形成报表功能。微处理器还以强大的数据处理和控制能力完成数字滤波、误差补偿、故障检测、人机交互等一系列功能，充分发挥了微处理器的作用。

国外检测仪器的公司有美国的 FLUKE 公司、PowerSight 公司，瑞士的 LEM 公司等，其专用的电能质量分析设备体积大、专用功能太强，而且成本偏高，不利于在电力用户中大范围的推广使用；手持式和便携式设备是一种临时的故障诊断、排错和评估设备，难以实现全网的电能质量同步监测。国内的检测研究工作起步比较晚，但一些企业和研究机构取得了一些成效。以深圳领步科技有限公司、上海宝钢安大电能质量有限公司等为代表。目前，领步科技有限公司的 PQM 电能质量监测系列产品，可对频率偏差、电压偏差等进行同时监测，并具有实时录波、暂态事件记录、统计报表以及讯接口。但国内的电能质量监测设备仍然存在以下不足^[57]：

- (1) 由于采用各种计算机作为现场监测分析工具，导致设备成本偏高；
- (2) 设备配置的灵活性、通用性差，往往只能用于特定的操作环境；
- (3) 远程通信能力有限，不易实现远程监控、数据共享和长期评估及预测；
- (4) 对干扰的分类和故障的辨识能力有限，不具备智能分析功能，不能提供给用户可直接用于决策的信息；
- (5) 实时性差，时频分析手段落后，不具备对瞬时和暂态扰动的跟踪和捕获能力；
- (6) 现场设备不具备实时分析能力，大量采样数据都要传送给专门的分析工具去处理，导致对现场设备的存储容量要求很大。

第四代：智能型综合监测仪器。当前电能质量监测仪器逐渐向虚拟化、网络化发展。随着“网络就是仪器”的概念不断深入，电能质量在线监测仪利用网络实现电能质量的远

程监测和网络化管理, 诸如瑞士莱姆(LEM)公司等开发的 PQFlx 电能质量监测仪器已采用了虚拟仪器。据统计大约有 60% 的仪器仪表生产厂家都已采用虚拟仪器技术作为产品开发的重要手段。国内外学者纷纷展开了虚拟仪器的研究和实验, 采用先进的软、硬件技术、网络技术及各种数学方法, 取得了初步的实验性成果^{[58]-[60]}。

虽然电能质量问题的研究已逐渐成为当前的热点, 但相对国外而言, 国内对电能质量监测仪器的开发研制比较落后, 如何研发功能齐全, 通用性和扩展性强、开发和维护相对简单的电能质量监测仪器有待进一步研究。

1.5 本论文所做工作

通过上述对动态电能质量扰动检测与分类识别重要性的认识和现状的分析, 动态电能质量问题的快速、精确检测及高准确率的分类型别方法是保证良好电能质量的首要条件。因此, 本文主要内容如下:

(1) 对动态电能质量扰动检测与分类方法, 电能质量监测仪器进行综述。阐述了本课题的重要意义及必要性, 归纳本课题的研究现状及发展前景, 指出了存在的问题, 并比较各种检测方法在动态电能质量问题应用中的优缺点。

(2) 对国内电能质量标准的最新发展现状进行总结, 对各类动态电能质量扰动指标、起因、检测方法进行了论述。

(3) 提出基于广义 S 变换的动态电能质量扰动的检测方法。首先利用广义 S 变换把扰动信号变换到相空间, 分析扰动信号的广义 S 变换矩阵以及统计信息图, 提取与扰动频率、起止时刻、持续时间和扰动幅度等相关的特征量。

(4) 提出了基于多级 SVMs 的动态电能质量扰动分类方法, 借助广义 S 变换所提取特征量, 构造多级 SVMs 规则树(N-1 支持向量机实现 N 分类)对动态电能质量问题进行分析, 用 LIBSVM 训练样本数据, 得到应的模型并完成了 9 种扰动的分类。

(5) 在研究电能质量特征量及测量方法的基础上, 利用 NI USB-6009 采集卡实时采集数据, 最后用 LabVIEW8.6 的 G 语言编程搭建了虚拟环境的电能质量综合分析系统平台, 实现数据的实时分析、算法分析、波形显示、结果分析等功能。

第 2 章 电能质量的标准及指标

2.1 电能质量标准

电能质量标准是保证电网安全经济运行、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管理,推广电能质量控制技术,维护供用电双方合法权益的法律依据。目前,世界上工业发达国家都已经制定和颁布实施了符合本国情况的国家标准。并且随着经济一体化的发展,各国所制定的电能质量标准正在向国际专业委员会推荐标准靠拢随着国际贸易的发展和各国间技术交流的需要逐步走向国际化,为了统一各国的电气标准和规范,国际电工委员会(IEC)于 1973 年建立了第 77 技术委员会,该委员会的工作成果以 IEC 出版物 1000 的形式发表。其中,IEC/TC8 是关于电能质量供应系统方面。1992 年,欧洲共同体在 IEC 标准的基础上,颁布了一个电能质量标准,即《公用配电系统供电特性》,把电能作为一种产品,对中、低压配电系统用户供电端的电能质量作了较全面的规定。电压特性不是作为公用配电网中传导性干扰的电磁兼容水平,用户供电端的电能质量,即用电设备的抗扰限值来考虑的。

从 80 年代初开始,国家技术监督局(原国家标准局)将制定国家电能质量系列标准列为重点项目。我国 IEC/TC1 采用国际先进标准,先后制定并颁布了电能质量的六项国家标准^{[61]-[66]}:《供电电压允许偏差》(GB/T 12325-2008)、《电力系统频率允许偏差》(GB/T 15945-2008)、《电压波动和闪变》(GB 12326-2008)、《公用电网谐波》(GB/T 14549-1993)、《三相电压允许不平衡度》(GB/T 15543-2008)和《暂时过电压和瞬态过电压》(GB/T 18481-2001)。电能质量标准中频率取决于有功供求关系的平衡,电压取决于电网的无功运行状况,而后几项不仅与电力系统有关,而且受用户负荷特性的影响。

一般而言,总体上电能质量指标越接近额定值就是电能高质量的标志,但电能从生产到消费是一个整体,电力系统的发、输、配、用处于动态平衡之中,其中任何一个环节的引起的电能质量问题,都会对相关配电网络与设备以及电力用户的安全构成威胁。而要提高电能质量需要投入相当多的人力、物力以及财力,而且各种指标的控制技术也在不断发展和完善之中,所以电能质量指标和额定值的偏差是不可避免的。电能质量标准的制定任务,就是从当前(或近期发展)的技术水平出发,确定适当的电能质量指标偏差的允许值。制定的指标应满足以下三点:

- (1) 保证电力系统安全。
- (2) 保证用户电气设备的正常运行。
- (3) 超标时电力部门和干扰性用户，做一定的努力后仍能达标。

因此，只有当对标准的实质有清晰的理解后，才可能在实际工作中避免执行上的盲目性，减少或避免可能造成的损失。

2.2 稳态电能质量指标

电力系统中各种主要电能质量问题的特征指标、产生原因、后果及测量方法归纳如下。

2.2.1 电压偏差

电压偏差是指电压缓慢变化时，实际电压与系统标称电压之差，以百分数表示为：

$$\text{电压偏差 (\%)} = \frac{\text{实际电压} - \text{额定电压}}{\text{额定电压}} \times 100\% \quad (2-1)$$

电压偏差一般是由线路的电压损耗造成。电压偏差超标对用电设备和电网稳定以及经济运行有着严重的影响。国标 GB 12325-2008《电能质量供电电压允许偏差》规定，电压偏差允许值如表 2-1：

表 2-1 电压偏差允许值

额定电压	电压偏差允许值 ΔV
220V 单项	+7%, -10%
20KV 及以下	$\pm 7\%$
35KV 及以上	10%

2.2.2 频率偏差

系统频率总是处在变动的状态当中，运行频率不可避免地会偏离标称值，频率偏差的划定可以保证系统的可靠性和经济性。频率偏差定义为：

$$\text{频率偏差 (\%)} = \frac{\text{实际频率} - \text{标称频率}}{\text{标称频率}} \times 100\% \quad (2-2)$$

由于电力系统负荷不断变动，电源出力及其调节系统追随负荷变化又有一定的惯性，致使系统频率不可避免地偏离标称值，即产生频率偏差。因此，必须划出频率允许的偏差范围以确保系统运行的可靠性和经济性。国标 GB/T15945-2008《电力系统频率允许偏差》

规定，设备允许的频率偏差为±1%。

目前，频率测量的主要算法^[67]：

(1) 周期法：即零交法，通过测量信号波形相继过零点的时间宽度来计算频率。该方法概念清晰，易实现，但精度低，易受谐波、噪声和非周期分量的影响，实时性不好。

(2) 解析法：通过对信号观测模型进行数学变换，将待测量 f 或 Δf 表示为样本的显函数来估计，运算量大，精度较高。

(3) 误差最小化原理类算法：包括最小二乘算法、最小绝对值近似法、牛顿类算法、离散卡尔曼滤波算法，这些算法数学运算比较复杂，实时性差。

(4) DFT (FFT)类算法及其改进算法：在理想的模型下 DFT (FFT)类算法选择合适的参数能准确地计算出模型参数，考虑谐波和噪声的情况下其各类改进算法能在一定程度上减小测量误差，但存在增大计算量和时滞等缺点。

2.2.3 谐波

国际上公认的谐波含义为“谐波是一个周期电气量的正弦波分量，其频率为基波频率的整数倍”。由于谐波的频率是基波频率的整数倍数，常称为高次谐波。

标准中规定采用各次谐波含量及谐波总含量大小定量表示电力系统正弦波形的畸变程度。

(1) 谐波含有率(HR)： n 次谐波分量的有效值(或幅值)与基波分量的有效值(或幅值)之比。 n 次谐波电压含有率和电流含有率如式(2-3)和式(2-4)：

$$HRU_N = \frac{U_N}{U_1} \times 100\% \quad (2-3)$$

$$HRI_N = \frac{I_N}{I_1} \times 100\% \quad (2-4)$$

(2) 总谐波畸变率 THD：谐波总量的有效值与基波分量的有效值之比。谐波电压总含量和电压总谐波畸变率如式 2-5 和式 2-6：

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \times 100\% \quad (2-5)$$

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (HRU_h)^2} \times 100\% \quad (2-6)$$

根据 GB/T14549-1993 《公用电网谐波》的规定：各级电网谐波允许值如表 2-2。

表 2-2 电网谐波允许值

电网标称电压 (kV)	电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率(%)	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

关于工程实际中出现的对谐波问题的描述及其性质需明确下列几个问题^[68]:

(1) 谐波的次数必须为基波频率的整数倍，在一定的供电系统条件下，有些用电负荷会出现非工频频率整数倍的周期性电流的波动，为延续谐波概念，又不失其一般性，根据该电流周期分解出的傅立叶级数得出的不是基波整数倍频率的分量，称为分数谐波或间谐波。频率低于工频的间谐波又称为次谐波。

(2) 谐波和暂态现象：在许多电能质量问题中常把暂态现象误认为是波形畸变，暂态过程的实测波形是一个带有明显高频分量的畸变波形，尽管含有高频分量，但暂态过程和谐波却是两个完全不同的现象。暂态现象与系统的基波频率无关。谐波的电压电流波形基本保持不变，而暂态现象指电压电流波形每个周期都要发生变化。

(3) 短时间谐波：对于短时间的冲击电流，例如变压器空载合闸的激磁涌流，按周期函数分解，将包含短时间的谐波和间谐波电流，称为短时间的谐波电流或快速变化谐波电流，应将其与电力系统稳态和准稳态谐波区别开来。

(4) 陷波：换流装置在换相时，会导致电压波形出现陷波或称换相陷波，这种畸变虽然也是周期性的，但不属于谐波范畴。在大多数情况下畸变是周期性的，属于谐波的范畴。

谐波的测量一般使用 FFT、小波变换和 S 变换等方法。

2.2.4 三相不对称

在理想的三相交流电力系统中，三相电压有同样的数值，且按 A、B、C 顺序互成 120 度，这样的系统叫做三相平衡系统。实际上由于存在种种原因，实际电力系统并不是完全平衡的。不平衡因素可以归结为事故性的和正常性的两大类。事故性的不平衡是由于三相中的某一相(或两相)出现故障所致，例如一相或两相断线、单相接地故障等。正常性的不平衡则是由于系统三相元件或负荷不对称所致。其中三相负荷不对称是系统三相不平衡的

最主要因素。产生三相负荷不对称的主要原因是单相大容量负荷(如电气化铁路、电弧炉和电焊机等)在三相系统中的容量和电气位置分布不合理。

电力系统在正常运行方式下,电压的负序分量均方根值与正序分量均方根值之比定义为电压的三相不平衡度,表明了相电压或相电流对于三相电压或电流平均值偏移的最大值,公式如下:

$$\varepsilon_u = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (2-7)$$

在实际工作中,往往只知道三相电压的数值。在不含零序分量的三相系统中,只要知道三相电压 a , b , c , 即可由下式求出三相不平衡度:

$$\varepsilon_u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L}}{1 + \sqrt{3 + 6L}}} \times 100\% \quad (2-8)$$

$$\text{式中 } L = \frac{a^4 + b^4 + c^4}{(a^4 + b^4 + c^4)^2} \circ$$

在三相对称系统中,由于在某一相上增设了单相负荷而引起的三相电压不平衡度也可以按式 2-9 估算:

$$\varepsilon_u \approx \frac{S_L}{S_d} \times 100\% \quad (2-9)$$

式中 S_L 为单相负荷容量; S_d 为计算点的三相短路容量。

三相系统的不平衡工况对电力系统的发、输、变、配、用等设备的运行都有危害。在研究不对称的三相电力系统时,广泛使用对称分量法,即将任何一组不对称的三相相量(电压或电流)分解成相序各不相同的三相对称的三相相量。国标中规定:电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为 2%,短时不得超过 4%;接于公共连接点的每个用户,引起该点电压不平衡度允许值一般为 1-3%。

2.2.5 电压波动和闪变

电压波动(voltage fluctuation)为一系列电压变动或工频电压包络线的周期性变化。电压波动值为电压方均根值的两个极值 U_{max} 和 U_{min} 之差 ΔU , 常以其额定电压 U_N 的百分数表示其相对百分值,如式 2-10。

$$\Delta V = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_N} \times 100\% = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% \quad (2-10)$$

电压波动会引起部分电气设备不能正常工作。通常来说,对于像电子计算机等精密设备,因其容量小并能在相对耗资不大的条件下加设抗干扰设施而无须特别去关注。由于白炽灯的光功率与电源电压的平方成正比,所以受电压波动影响最大。当白炽灯电源的电压波动在 10%左右,并且在重复变动频率在 5-15Hz 时,就可能造成令人烦恼的灯光闪烁,严重时甚至会刺激人的视感神经,使人们难以忍受而情绪烦躁^[69]。

闪变(Flicker)是由于电压波动引起照明设备的照明波动而给人的主观感受。国标 GB12326-2008《电能质量电压允许波动和闪变》规定了电压波动允许值和闪变干扰允许值。表 2-3 列出了电压波动允许值。

闪变一般用短时间闪变值和长时间闪变值两个指标作为闪变严重度的判据。短时间闪变严重度可由下式求得:

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (2-11)$$

式中 5 个规定值 $P_{0.1}$ 、 P_1 、 P_3 、 P_{10} 、 P_{50} 分别为 10 分钟内瞬时闪变视感度 $S(t)$ 超过 0.1%、1%、3%、10%和 50%时间的觉察单位值。

国家推荐的闪变干扰允许值对照明要求较高的白炽灯 ΔV_{10} 为 0.4%, 而一般性照明设备 ΔV_{10} 为 0.6%。

表 2-3 电压波动允许值

$r/(\text{次}/\text{h})$	$d/\%$	
	LV、MV	HV
$r \leq 1$	4	3
$1 \leq r \leq 10$	3	2.5
$10 \leq r \leq 100$	2	1.5
$100 \leq r \leq 1000$	1.25	1

常用的电压波动的检测方法有整流检测法、有效值检测法和平方检测法。

2.3 暂态电能质量指标

面对现在日益复杂的电能质量扰动现象(瞬变、间谐波等),传统电能质量指标常常束手无策,无法提供正确而有用的信息。因此,针对暂态电能质量的局部性能,结合时域和频域的二维信息(时频分析)的分析方法,来精确的描述特征。具体内容如下:

电压骤降产生的主要原因:电力系统发生故障,如系统发生接地短路故障;大容量电

机的启动和负载突增也会导致电压骤降。图 2-1 是一个骤降幅度为 55% 的电压骤降，其特征量是幅值变化、持续时间与相位移动。

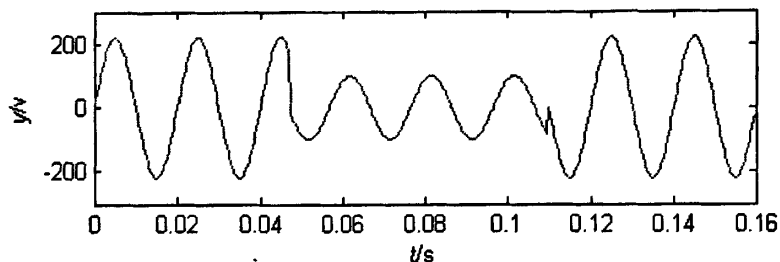


图 2-1 电压骤降扰动波形

电压骤升产生的主要原因：电力系统发生故障(例如单相对地故障情况下的非故障相电压)；大容量电机的停止和负载突降也是导致电压骤升的重要原因。其特征量是幅值变化、持续时间与相位移动。

电压中断产生的主要原因：系统故障、设备故障、控制误动、电压骤降发展成中断(如变电所重合闸)。其特征量是幅值、持续时间、瞬时值。

振荡暂态是指电压存其稳态时的一种突发的、高频的(高于基频)瞬时值双极性变化，如图 2-2。通常由电容器组等的投切所引起。其特征量是峰值上升时间、持续时间。

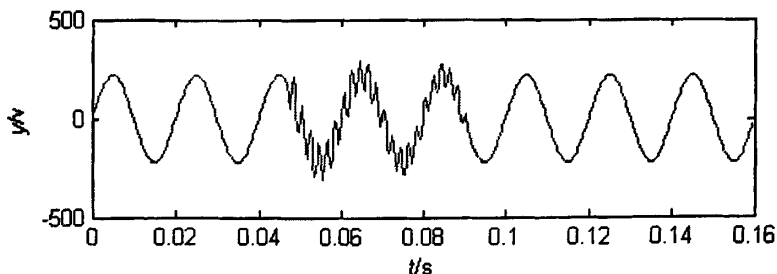


图 2-2 振荡暂态扰动波形

脉冲暂态产生的主要原因：由线路、负载和电容器组的投切、闪电、电击线路、感性电路开合等引起的，如图 2-2。由峰值、上升时间、持续时间三大指标特征量来描述，

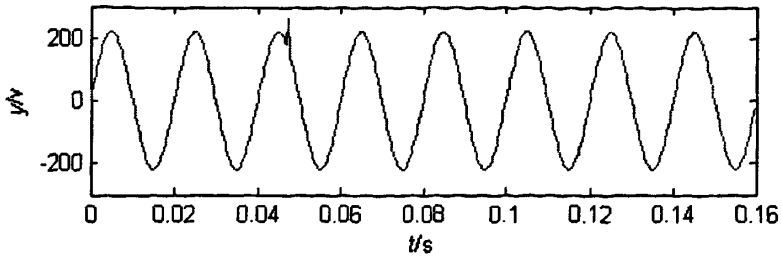


图 2-3 脉冲暂态扰动波形

暂态的电能质量的分析方法：均方根值法、缺损电压法、基于 dq 变换、基于小波变换的方法和近年来出现的 S 变换等。

2.4 本章小结

本章简介了对国内电能质量标准的最新发展现状,对各类动态电能质量扰动指标及起因以及检测方法进行了论述。

第3章 基于广义S变换的DPQ检测算法研究

3.1 广义S变换的基本原理

3.1.1 S变换

Stockwell^[31]提出新的非平稳信号分析和处理方法--S变换(ST),是一种可逆的时频分析方法,其思想是对小波变换(WT)和短时傅里叶变换(STFT)的扩展。S变换与短时傅里叶变换有着直接联系,短时傅里叶变换是信号 $h(t)$ 与经过时间平移、频率调制的窗函数的内积:

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)w(t-\tau)e^{-i\pi^2ft} dt \quad (3-1)$$

高斯窗函数 $w(t)$ 定义如下:

$$w(t) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2\delta^2}} \quad (3-2)$$

其中 δ 为时宽尺度因子,可调节 STFT 的时频分辨率。

将式 3-2 代入式 3-1, 得:

$$STFT(\delta, \tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\delta^2}} e^{-i\pi^2ft} dt \quad (3-3)$$

由于调节 δ 能改变高斯的宽度,得到具有不同分辨率的时频分布,但 δ 不是上式的独立变量,所以不能自适应地根据信息频率分布状况调节时窗的宽度,故定义如下:

$$\delta(f) = \frac{1}{|f|} \quad (3-4)$$

将式 3-4 代入式 3-3, 信号 $x(t)$ 的 S 变换公式如下:

$$ST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}\right) \exp(-i2\pi ft) dt \quad (3-5)$$

在 S 变换中,基本窗函数是由简谐波与高斯函数的乘积构成的,简谐波在时间域仅作伸缩变换,而高斯函数则进行伸缩和平移。与 STFT、WT 等时频方法相比,ST 的时频谱分辨率与频率相关,并与 Fourier 谱直接联系,保持频率的绝对相位;基本变换函数不必满足容许性条件^[31],而且有多尺度聚焦性等。目前,ST 在处理地震信号和航空发动机

的碰摩故障诊断等领域中已取得一些成果。

信号 $h(t)$ 可以由 S 变换 $ST(\tau, f)$ 很好的重构, 其一维连续 S 逆变换为 S 变换与傅里叶变换保持紧密的联系, 其时频谱与频率有关。利用傅里叶变换与卷积定理, 用式 3-5 推导出式 3-6, 利用快速傅里叶变换算法(FFT)实现 S 变换的快速计算。

$$s(f, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\alpha + f) \exp\left(-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}\right) \exp(i2\pi\alpha\tau) d\alpha \quad (3-6)$$

式中 $H(f)$ 是 $h(t)$ 的傅里叶变换谱, α 是平移频率, 它控制频域中高斯窗在频率轴上移动。

令 $f \rightarrow n/NT$ 、 $\tau \rightarrow kT$, 其中 T 为采样间隔, N 为总采样点数。对 $h(t)$ 进行采样得到离散时间序列 $h[kT]$:

$$H\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \exp(-j2\pi kn/N) \quad (3-7)$$

则 S 变换的离散表示形式为

$$ST(n, m) = \sum_{k=0}^{N-1} H\left[\frac{k+n}{NT}\right] \exp\left(-\frac{2\pi^2 k^2}{n^2}\right) \exp(i2\pi mk/N) \quad m, n, k=0, 1, \dots, N-1 \quad (3-8)$$

$$ST(n, 0) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h\left[\frac{k}{NT}\right] \quad (3-9)$$

离散 S 反变换为:

$$h[kT] = \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} S[m, n] \right\} \exp(j2\pi kn/N) \quad (3-10)$$

3.1.2 广义 S 变换

ST 窗口函数的形态固定, 因此在应用中受到限制。但由式 3-4 不难发现, 时宽尺度因子 δ 可以调节 STFT 的时频分辨率, 所以将其与时频平面中的频率联系起来, 定义如下:

$$\delta(f) = \frac{1}{\lambda|f|^p} \quad (3-11)$$

这样, δ 成为依赖频率 f 的函数, 具备了在时频平面上随着频率的变化自适应地调整时窗宽度的能力, 具有类似多分辨的特性。将式 3-11 代入式 3-5 式, 整理得广义 S 变换的表达式:

$$GST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{\lambda|f|^p}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\lambda^2|f|^{2p}(\tau-t)^2}{2}\right) \exp(-i2\pi ft) dt, \quad \lambda > 0, p > 0 \quad (3-12)$$

由测不准原理可知,时频分辨率不可能同时达到最高,时频分辨率可以通过参数 λ 和 p 调整。参数 λ 和 p 都具有改变时窗函数宽度和幅值的作用,但发挥的作用有所不同, p 主要是控制窗函数的脊(是窗函数最大值的连线)变化,而 λ 主要是改变窗函数的削减速度。 p 相同时,当 $\lambda > 1$ 时,时窗宽度随频率呈反比变化的速度加快,当 $\lambda < 1$ 时则减慢。 λ 相同时, $p < 1$ 时窗宽度随频率呈反比变化的速度增快,而时窗函数的脊递增比较减慢;当 $p > 1$ 窗宽度变化减慢;而时窗函数的脊递增快^[46]。

所以 $\lambda=1, p=1$ 时,得到S变换(式3-5)。由此可见S变换(ST)是GST的一个特例。

本文结合式3-6并利用FFT,推导了GST的离散公式:

$$GST[m, n] = \sum_{k=0}^{N-1} H[n+k] \exp(-2\pi^2 k^2 / \lambda^2 n^{2p}) \exp(j2\pi km / N) \quad (n \neq 0) \quad (3-13)$$

$$GST[m, n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H[k] \quad (n=0) \quad (3-14)$$

$$H[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \exp(-j2\pi kn / N) \quad (3-15)$$

根据式3-13~式3-15,结合以下步骤,MTLAB编程实现了GST算法。

(1) 计算 $h(t)$ 的快速傅立叶变换得到 $H[\frac{n}{NT}]$,把 $H[\frac{n}{NT}]$ 扩维到 $H[\frac{n+m}{NT}]$,其中 n 为频率采样点。

(2) 直接计算得到 $g(t, f) = \frac{\lambda |f|^p}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\frac{\lambda^2 |f|^{2p} (\tau-t)^2}{2})$ 的快速傅立叶变换形式:

$$G(n, m) = \exp(-2\pi^2 k^2 / \lambda^2 n^{2p});$$

(3) 按频率采样点计算 $H[\frac{n+m}{NT}]G(n, m)$;

(4) 计算 $H[\frac{n+m}{NT}]G(n, m)$ 的快速傅立叶反变换(IFFT),得到广义S变换谱 $GST[m, n]$ 。

通过GST对电能质量扰动进行分解,得到信号在相空间的复矩阵,复矩阵包含了相位信息和模值信息。其中,瞬时振幅(式3-16)、瞬时相位(式3-17)、瞬时频率(式3-18)。

$$GST(\tau, f) = |E_{GST}(\tau, f)| \exp[j\theta_{GST}(\tau, f)] \quad (3-16)$$

$$\text{其中, } E_{GST}(\tau, f) = \sqrt{\{\text{Re}[GST(\tau, f)]\}^2 + \{\text{Im}[GST(\tau, f)]\}^2}$$

$$\theta_{GST}(\tau, f) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[GST(\tau, f)]}{\text{Re}[GST(\tau, f)]} \right\}^2 \quad (3-17)$$

$$IF_{GST}(\tau, f) = \frac{\partial \theta_{GST}(\tau, f)}{\partial \tau} \quad (3-18)$$

3.2 DPQ 特征提取算法研究

电能质量扰动的信号主要包括电压信号和电流信号，本文仅以电压信号为例进行，电流信号的时频分析方法可以此类推。为了更清晰地表达特征量的选取，以电压骤降的特征量提取为例。

广义 S 复矩阵是一个时间-频率-幅值(t - f -GST)的三维空间，取模得到模时频矩阵(MTFM)，MTFM 细致地反映各种 PQDs 在幅值和频率分量上的变化。信号时频幅值 $\overline{GST}(t, f)$ 是时间和频率的二元函数称为信号的时频函数。由于电能质量扰动信号表现为幅值和频率的突变，也体现在模矩阵的对应元素中。如果对 $\overline{GST}(t, f)$ 在 t - f -GST 空间形成的三维曲面在任意时刻 $t=t_i$ 作横切面，平面的交线 $\overline{GST}(t, f)$ 就是信号在时刻 t_i 的 Fourier 频谱，由信号某一行元素来判断扰动的频率变化。对 $\overline{GST}(t, f)$ 三维曲面在任意频点 $f=f_i$ 作纵切面，是该信号中频率为 f_i 处在不同时刻的幅值分布，由同一行上的列元素可以判断电压幅值的变化和扰动发生时间。

图 3-1 为电压骤降经过 GST 后的分析结果。图 3-1a 为原始扰动信号；图 3-1b 是 GST 的等值曲线，即用能量的形式表示扰动的变化，把能量相同的点用连成线；图 3-1c 是基频幅值曲线，即在基频时扰动的幅值变化；图 3-1d 是 GST 的三维网格图，用可视化的三维立体模型较好的反映了 t - f -GST 三者能量分布关系，便于检测；图 3-1e 是 GST 最大频率曲线，表示各频率下扰动信号的 MTFM 行元素的极大值；图 3-1f 是频谱标准差曲线。

下面定义 $\overline{GST}(t, f)$ 的曲线，分析了各特征量的提取方法。

1) 等值曲线

等值曲线是将模时频矩阵投影到 t - f 平面上，用不同的颜色刻画能量分布，判断扰动变化。等值曲线全面表征信号从基频到高频相当宽的频带范围内幅值、频率特征的分布。图 3-1b 模矩阵的高频段的奇异点来确定扰动发生时刻。

2) 最大频率曲线

最大频率曲线(图 3-1e)表示各频率下扰动信号广义 S 变换幅值矩阵的行向量的极大值，反映扰动信号包含的频率分量。其几何意义是时频曲面在 f -GST 平面上投影的包络线。

公式如下:

$$\overline{\text{GST}}_{\max}(f_i) = \max(\overline{\text{GST}}(f_i, n)) \quad n=0 \sim N-1 \quad (3-19)$$

多分量特征 TF_1 是一个布尔变量, 它表征信号的主要频率分量是单频的还是多频的。 $\overline{\text{GST}}_{\max}(f_i)$ 曲线的波峰对应于信号的主要频率分量, 这些频率组成的序列用集合表示为 $F_x = \{f_0, f_1, \dots, f_i\}$, 其中 $f_i (i>0)$ 为信号的高频频率。若 $F_x = \{f_0\}$, 则信号为单分量信号, 多分量特征 $\text{TF}_1=0$; 若 F_x 是基频和其他高频频率的集合, 则信号为多分量信号, $\text{TF}_1=1$ 。实际计算中, 时频函数 $\overline{\text{GST}}(t, f)$ 是以基频为基值的归一化取值, 所以主要频率分量就是忽略信号中幅值低于基频幅值的 5% 的高频分量。对任意频点 $f_i \in [0, \infty)$, 若 $\overline{\text{GST}}_{\max}(f_i) > 0.05$, 则称 f_i 为主要频率分量。由图 3-1e 看出电压骤降只有在 $F_x = \{f_0\}$ 有峰值, 所以电压骤降是单分量即 $\text{TF}_1=0$ 。

3) 基频曲线

幅值曲线(图 3-1c)是取 MTFM 中基频时行向量, 相当于 $f=f_0=50\text{Hz}$ 平面与信号时频曲面 $\overline{\text{GST}}(t, f)$ 的交线。

$$\overline{\text{GST}}_{f_0}(t) = \overline{\text{GST}}(t, f_0) \quad (3-10)$$

基频幅值均值 TF_3 是信号基频幅值的数学期望, 即 $\text{TF}_3 = E[\overline{\text{GST}}_{f_0}(t)]$ 。

无扰动时信号的 TF_3 值为 1.0pu., 因此在观察期间若信号的 TF_3 值大于或小于表征扰动时的基波电压幅值上升或下降。电压骤降的 $\text{TF}_3 < 1$ 。

基频分量最小幅值 TF_4 代表信号的基频分量最小幅, 即 $\text{TF}_4 = \min_{0 \leq t < \infty} \overline{\text{GST}}_{f_0}(t)$ 。当有电压骤降扰动发生时, 特征量 TF_4 可以表征电压骤降幅值。

基频分量最大幅值 TF_5 与 TF_4 的定义相反, 用特征量 TF_5 表示信号的基频分量幅值的最大值, 即 $\text{TF}_5 = \max_{0 \leq t < \infty} \overline{\text{GST}}_{f_0}(t)$ 。

为了更准确地表征电压骤降/骤升幅值, 对特征量 TF_4 和 TF_5 进行如下修正^[41]:

(1) 对于含有电压骤降或电压中断的扰动, 首先要找到扰动信号广义 S 变换基频幅值曲线的最低点对应的采样点, 并设其为 p 点, 然后计算 p 点前后 1/4 周波时域采样信号的有效值。

$$M_p = \sqrt{\frac{2}{N_1} \sum_{m=p-\frac{N_1}{4}}^{m=p+\frac{N_1}{4}-1} x^2(mT)} \quad (3-11)$$

其中, 若 $p < \frac{N_1}{4}$, 令 $p = \frac{N_1}{4}$; 若 $p > N - \frac{N_1}{4}$, 则令 $p = \frac{N_1}{4}$ 。 N_1 为每基频周波采样点数, N 为总采样点数。 M_0 为未发生扰动时的有效值, 则扰动最低幅值 $TF'_4 = M_p / M_0$ 。

对于电压骤降信号, TF'_4 为骤降幅值, 并有 $0.1 \leq TF'_4 \leq 0.9$ 于电压中断信号, TF'_4 为中断幅值, 并有 $TF'_4 < 0.1$ 。

(2) 对于含有电压骤升的扰动, 同理先找到曲线的最高点对应的采样点 p , 来计算其时域有效值 M_p , 然后求骤升幅值。电压骤升幅值: $1.1 \leq TF'_5 \leq 1.8$ 。

(3) 对于含有闪变的扰动信号, 可由上面定义的 TF'_4 和 TF'_5 确定闪变包络线的极大值和极小值, 并有 $0.9 \leq TF'_4 \leq 0.99$ 且 $1.1 \leq TF'_5 \leq 1.8$

对于电压骤降、电压中断、电压骤升以及闪变扰动, 经有效值法修正得到的特征量 TF'_4 和 TF'_5 便可以表示电压骤降幅值和电压骤升幅值。

4) 频谱标准差曲线

频谱标准差曲线(图 3-1f)是各频率下扰动信号广义 S 变换幅值矩阵的行向量的标准差, 反映了各频率成分的时变特性, 由定义可知, 描述了该频率分量幅值在整个时间轴上关于均值的偏离程度。公式如下:

$$\overline{GST}_\Delta(f_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (S(f_i, n) - \overline{S(f_i, n)})^2} \quad n=0 \sim N-1 \quad (3-12)$$

由于 $\overline{GST}_\Delta(f)$ 是该频率分量幅值在整个时间轴上关于均值的偏离程度, 因此当信号基波幅值随时间变化较大时, $\overline{GST}_\Delta(f)$ 曲线在基频点 f_0 有明显的骤升。

基频频幅值时变特征 TF_2 是一个布尔变量, 表征扰动在基频频幅值随时间有显著变化。信号的 TF_2 特征通过频谱幅值标准差函数 $\overline{GST}_\Delta(f)$ 获得。若频谱幅值标准差曲线在基频处有最大的波峰, $\overline{GST}_\Delta(f) \delta_{f_0}$, $TF_2=1$, 否则为 0。式中, δ_{f_0} 为基频频幅值的允许波动范围。

高频时变特征 TF_6 表征信号是否有时变高频分量的布尔量。由广义 S 变换频谱幅值标准差曲线 M_p 高频时变特征 TF_6 。对任意 $f_i \geq 2f_0$, 若曲线在 $f=f_i$ 处有波峰, 则 $TF_6=1$, 否则 $TF_6=0$ 。即若曲线在高频分量处有波峰, 则该分量是时变信号。

设函数 $\overline{GST}_\Delta(f)$ 有极值, 即 $\overline{GST}_\Delta(f_m) = \max_{f_i \in F} \{\overline{GST}_\Delta(f_i)\}$ 。式中, F 为 $\frac{d\overline{GST}_\Delta(f)}{df} = 0$ 的

主要频率分量的频点组成的频率集合。若 $f_i \geq 2f_0$, 则 $TF_6=1$, 否则, $TF_6=0$ 。信号的 TF_6 值表征信号是否有暂态高频分量。

图 3-1f 所示的电压骤降的 $TF_2=1$, $TF_6=0$ 。

5) 高频幅值和函数 $\overline{GST}_h(t)$

在 t_i 时刻, 信号超过 2 倍基频的所有频率分量幅值之和称为信号在 t_i 时刻的高频幅值之和^[38], 高频幅值之和函数 $\overline{GST}_h(t)$ 是信号各时刻高频($f \geq 2f_0$)的幅值和, 对应的曲线称为高频幅值和曲线。即 $\overline{GST}_h(t) = \int_{2f_0}^{\infty} \overline{GST}(t, f) dt$ 。

高于两倍基频的所有高频率分量对应的幅值序列沿时间轴的累积和, 即各个离散时间采样点对应的高频频谱幅值之和, 其计算式为

$$GSA_n(mT) = \sum_{F \geq 2f_0} GST(n, m) \quad F = \frac{n}{NT} \quad (3-13)$$

相应的由高频幅值和函数 $\overline{GST}_h(f)$ 生成的曲线称为广义 S 变换高频幅值和曲线, 若曲线存在一个较大的尖峰, 则说明对应时刻发了突变, 求得 $GSA_h(mT)$ 极大值的个数。

电压骤降广义 S 变换高频幅值和曲线上有 2 个波峰, 该信号的特征量 $TF_7=2$ 。该波峰对应于电压骤降的发生时刻, 定位电压骤降的时间。

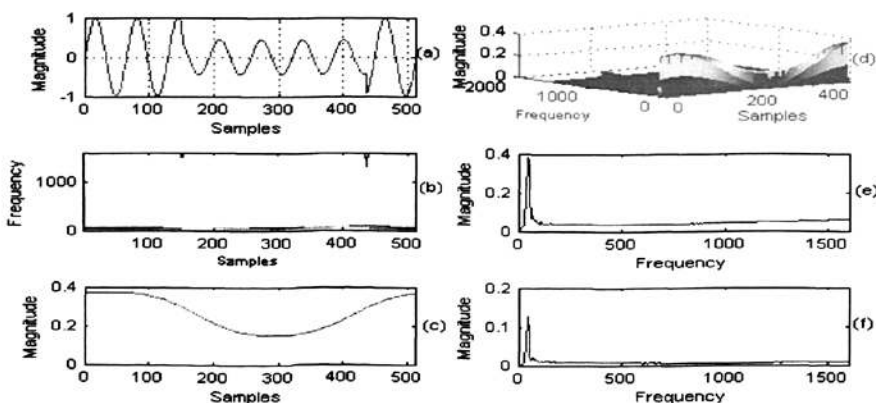


图 3-1 电压骤降的广义 S 变换分析结果。

- (a)是原始扰动信号、(b)是等值曲线、(c)是基频幅值曲线、
(d)是三维网格图、(e)是最大频率曲线、(f)是频谱标准差曲线。

3.3 结果与讨论

3.3.1 扰动建模

本文考虑电压骤降、电压骤升、谐波、脉冲暂态、振荡暂态、电压尖峰和陷波。信号模型如表 3-1^{[8][9]}所示。

表 3-1 电能质量扰动信号及正弦信号仿真模型

扰动类型	信号模型
正弦信号	$y(t) = \sin \omega_0 t$
电压骤降	$y(t) = \{1 - A[u(t-t_1) - u(t-t_2)]\} \sin \omega_0 t$ $0.1 \leq A \leq 0.9 \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 6T$
电压骤升	$y(t) = \{1 + A[u(t-t_1) - u(t-t_2)]\} \sin \omega_0 t$ $0.1 \leq A \leq 0.9 \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 6T$
谐波	$y(t) = \sin \omega_0 t + A_3 \sin 3\omega_0 t + A_5 \sin 5\omega_0 t + A_7 \sin 7\omega_0 t$ $0.02 \leq A_3, A_5, A_7 \leq 1$
间谐波	$y(t) = \sin \omega_0 t + A_3 \sin \beta_3 \omega_0 t + A_4 \sin \beta_4 \omega_0 t + A_7 \sin \beta_7 \omega_0 t$ $0.02 \leq A_3, A_4, A_7 \leq 1 \quad \beta_3, \beta_4, \beta_7 \text{任意非整数}$
脉冲暂态	$y(t) = \sin \omega_0 t + 2(t = 0.3)$
振荡暂态	$y(t) = \sin \omega_0 t + A e^{-c(t-t_2)} [u(t-t_1) - u(t-t_2)] \sin \alpha \omega_0 t$ $0.1 \leq A \leq 0.8 \quad 10 \leq \alpha \leq 15$ $5 \leq c \leq 10 \quad 0.5T \leq t_2 - t_1 \leq 3T$
陷波	$y(t) = \sin \omega_0 t - \text{sign}(\sin \omega_0 t) \sum_0^{10} A \{u[t - (t_1 + 0.02i)] - u[t - (t_2 + 0.02i)]\}$ $0.1 \leq A \leq 0.4 \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 6T$
电压尖峰	$y(t) = \sin \omega_0 t + \text{sign}(\sin \omega_0 t) \sum_0^{10} A \{u[t - (t_1 + 0.02i)] - u[t - (t_2 + 0.02i)]\}$ $0.1 \leq A \leq 0.4 \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 6T$

其中： A 为振荡幅度； $u(t)$ 为单位阶跃函数； t_1 和 t_2 分别是扰动开始和结束时刻； T 为一周波的时间； ω_0 为基波角频率； α 为波动频率相对系数； c 为振荡衰减系数。

3.3.2 结果及讨论

借助 Matlab7.1 编程产生扰动信号，基频为 50Hz，采样频率为 3.2kHz(即每周波采样 64 个点)，总采样点为 512 个。每种扰动信号产生 20 个仿真波形，其中参数是在规定范围内随机产生的，但为了比较 GST 和 ST 的变换结果，本次实验选取了固定的参数。并在仿真信号中加入信噪比 30dB 高斯白噪声

广义 S 变换的变换结果取决于窗函数的参数，图 3-2 是实验中的部分窗函数图。经过

实验比较, 本文选取窗函数的参数 $\lambda=1.6$, $p=1.06$ 为此次实验的最佳参数。在此参数下可获得较高的时间分辨率, 同时提高了频率分辨率。

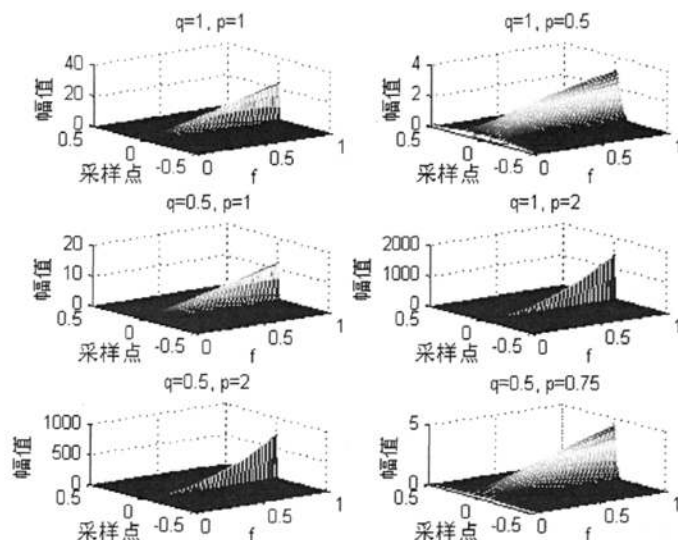


图 3-2 广义 S 变换的窗口函数图

1) 电压骤降

图 3-1 给出的电压骤降 GST 仿真结果, 为了进行对比分析, 图 3-3 列出相应的电压骤降 ST 仿真结果。

对比图 3-1 和图 3-3, 图 3-3b 中没有出现高频段奇异点。图 3-3c 中的电压下降比较平缓。因此, GST 加剧了电压突变的特征。特征量为 $TF_1=0$, $TF_2=1$, $TF_3<1$, $0.1\leq TF_4\leq 0.9$, $TF_5<1.1$, $TF_6=0$, $TF_7=2$ 。

电压骤升与电压骤降的 GST 变换结果是类似的。特征量为 $TF_1=0$, $TF_2=1$, $TF_3<1$, $TF_4>0.9$, $1.1\leq TF_5\leq 1.8$, $TF_6=0$, $TF_7=2$ 。

2) 脉冲暂态

图 3-4、图 3-5 为脉冲暂态的广义 S 变换和 S 变换的仿真结果, 曲线的分布与图 3-2 相同。

脉冲暂态图 3-4b 在脉冲发生时中高频部分出现明显奇异点, 图 3-5b 中无奇异点; 图 3-4c 基频曲线也有相对应的电压骤升, 图 3-4f 在基频和脉冲发生时电压有较大的变化。特征量为 $TF_1=0$, $TF_2=0$, TF_3 、 TF_4 和 TF_5 不定, $TF_6=0$, $TF_7=1$ 。

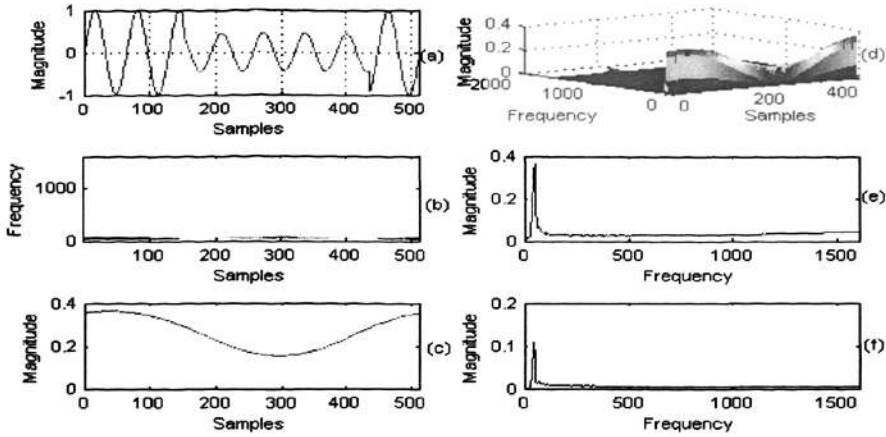


图 3-3 电压骤降的 S 变换结果

(a)是原始扰动信号、(b)是等值曲线、(c)是基频幅值曲线、
(d)是三维网格图、(e)是最大频率曲线、(f)是频谱标准差曲线。

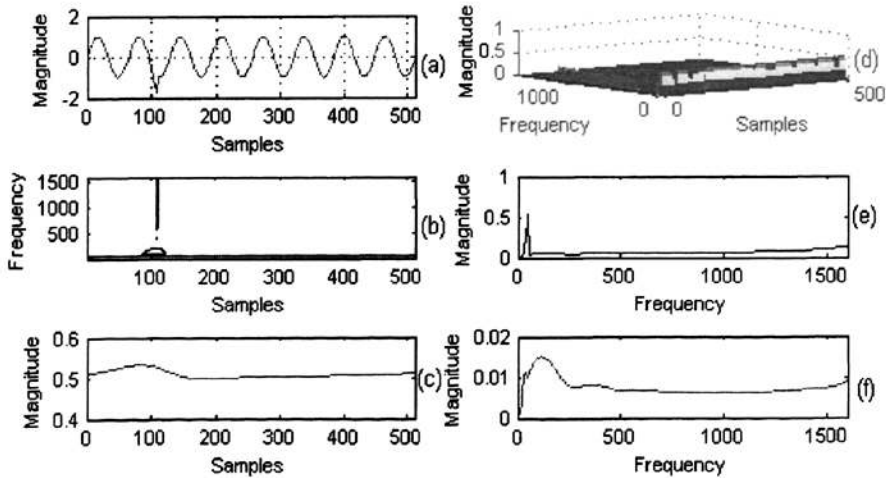


图 3-4 脉冲暂态的广义 S 变换结果

(a)是原始扰动信号、(b)是等值曲线、(c)是基频幅值曲线、
(d)是三维网格图、(e)是最大频率曲线、(f)是频谱标准差曲线。

3) 陷波

图 3-6、图 3-7 分别是陷波的广义 S 变换和 S 变换的仿真结果。

陷波的图 3-6e 在基频处有最大值，无其它频率下的扰动分量。图 3-6f 频谱标准差曲线上有多个局部最大值，表明在各个频率下分量的电压也是变化的。比较图 3-6b 和图

3-7b, GST 在陷波发生时中高频处会出现多对奇异点, 而图 3-7b 中完全检测不到奇异点。图 3-6c 可见的电压下降速度更迅速。特征量为 $TF_1=0$, $TF_2=0$, $TF_3<1-d$, TF_4 和 TF_5 不定, $TF_6=0$, $TF_7=M$ 。

电压尖峰的 GST 变换结果与陷波的类似。特征量为 $TF_1=0$, $TF_2=0$, $TF_3>1+d$, TF_4 和 TF_5 不定, $TF_6=0$, $TF_7=M$ 。

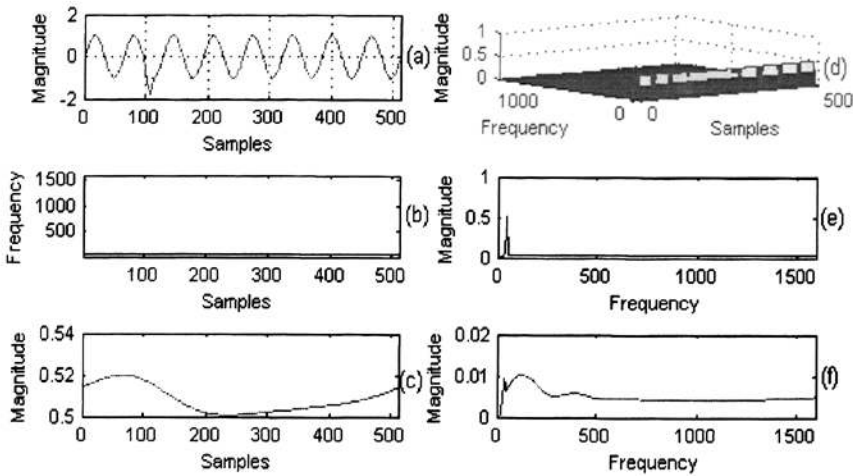


图 3-5 脉冲暂态的 S 变换结果

(a)是原始扰动信号、(b)是等值曲线、(c)是基频幅值曲线、
(d)是三维网格图、(e)是最大频率曲线、(f)是频谱标准差曲线。

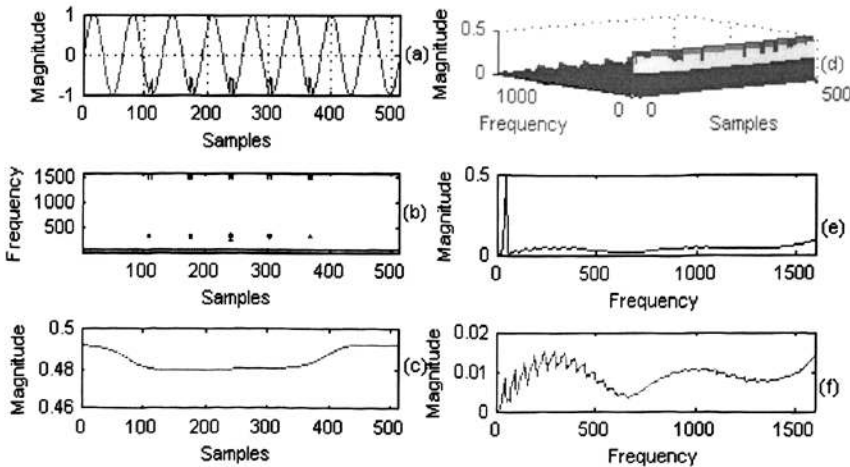


图 3-6 陷波的广义 S 变换结果

(a)是原始扰动信号、(b)是等值曲线、(c)是基频幅值曲线、
(d)是三维网格图、(e)是最大频率曲线、(f)是频谱标准差曲线。

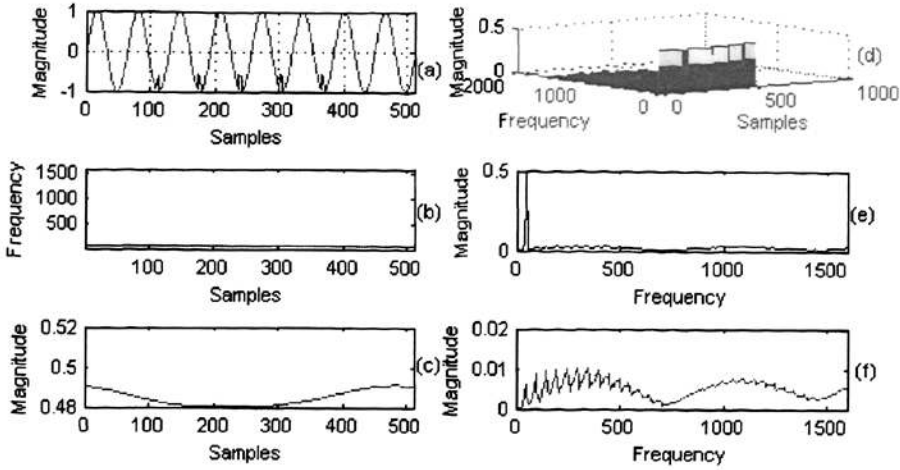


图 3-7 陷波的 S 变换结果

(a)是原始扰动信号、(b)是等值曲线、(c)是基频幅值曲线、
(d)是三维网格图、(e)是最大频率曲线、(f)是频谱标准差曲线。

4) 间谐波

图 3-8、图 3-9 为谐波的广义 S 变换和 S 变换的仿真结果。选取了含有 5.7 次, 15.4 次, 29.1 次谐波分量的间谐波。

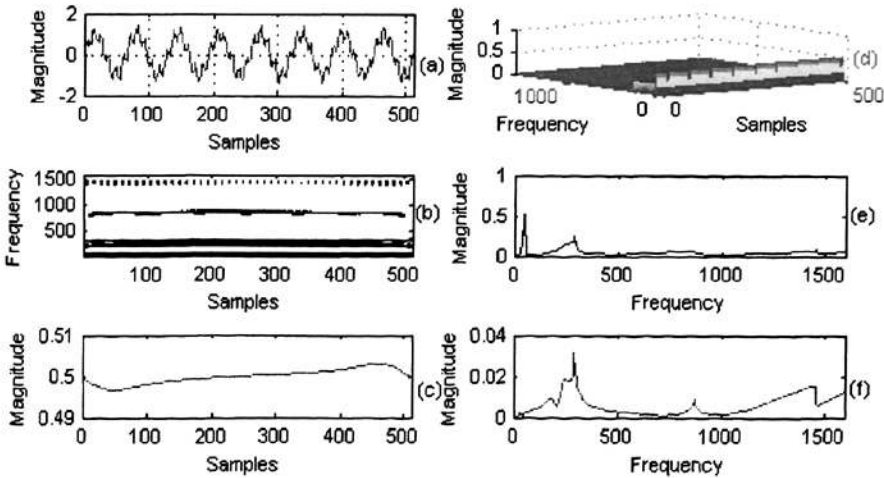


图 3-8 间谐波的广义 S 变换结果

(a)是原始扰动信号、(b)是等值曲线、(c)是基频幅值曲线、
(d)是三维网格图、(e)是最大频率曲线、(f)是频谱标准差曲线。

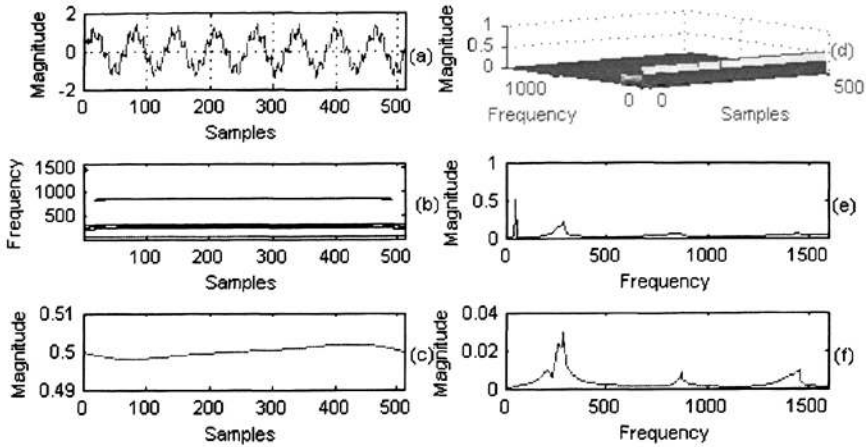


图 3-9 间谐波的 S 变换结果

(a)是原始扰动信号、(b)是等值曲线、(c)是基频幅值曲线、
(d)是三维网格图、(e)是最大频率曲线、(f)是频谱标准差曲线。

比较图 3-8b 和图 3-9b, GST 能检测到 4 组等值线, 而 ST 只能检测到 3 组曲线, 高次谐波 29.1 次完全不能检测到。都有 4 个波峰(分别在 50Hz、285Hz、870Hz 和 1455Hz), 这与等值线图 3-8b 完全吻合。

谐波与间谐波的区别在于谐波只含有基频整数倍的谐波分量, 而间谐波在非整数倍上也存在分量。其变换结果是类似的。特征量为 $TF_1=1$, $TF_2=0$, TF_3 、 TF_4 和 TF_5 不定, $TF_6=0$, $TF_7=0$ 。

5) 闪变

图 3-10 为闪变的广义 S 变换的仿真结果。

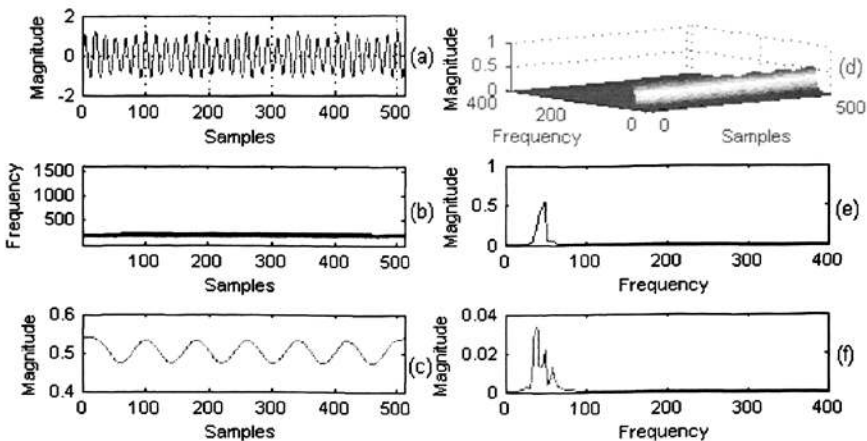


图 3-10 闪变的广义 S 变换结果

由于闪变 S 变换的结果与广义 S 变换一致, 所以不再重复。特征量为 $TF_1=0$, $TF_2=1$, TF_3 不定, $0.9 \leq TF_4 \leq 0.99$, $1.01 \leq TF_5 \leq 1.1$, $TF_6=0$, $TF_7=0$ 。

综上所述, 基于广义 S 变换的特征量提取方法能有效的检测到扰动的频率、幅值突变, 高频检测能力良好。

3.4 本章小结

本章首先对广义 S 变换的理论、定义及实现方法进行简单介绍, 推导离散数学形式。然后利用广义 S 变换对常见的动态电能质量扰动进行时频分析, 从不同角度提取相空间中频域和时域的有效特征, 提取的特征量与 S 变换进行比较。结果表明, 广义 S 变换通过调整窗函数的参数, 具备了更高的实用性和灵活性。在检测电压幅值变化和电压频率分量上, GST 其检测能力和分辨率明显强于 ST, 特别是对有高频扰动的信号 GST 的检测和定位优势更加明显。基于广义 S 变换的特征量为动态电能质量扰动的分类和辨识奠定了基础。

第 4 章 基于多级支持向量机的 PDQ 辨识研究

4.1 支持向量机

支持向量机(Support Vector Machine SVM)是从线性可分情况下的最优分类面发展而来,其基本思想是把低维空间中线性不可分的数据集映射成高维空间中线性可分的数据集,将低维空间中复杂的不容易分类的问题转化为高维空间中比较简单的分类问题^[49],是对推广能力的控制。

4.1.1 最优分类面

支持向量机的一个核心思想是及时调整判别函数使其最好地利用边界样本点的分类信息。首先考虑一个两类线性可分模式识别问题。设 n 个样本的训练集合为 (x_i, y_i) , $i=1, 2, \dots, n$, $x \in R^d$, $Y=\{-1, 1\}$ 是类别标号。 d 维空间中线性判别函数的一般形式为:

$$g(x) = w \cdot x + b \quad (4-1)$$

任意一个点 x_i 到超平面的距离可以表示为 $|w \cdot x + b| / \|w\|$, 点到原点的距离可以表示为 $|b| / \|w\|$ 。

在线性判别函数的情况下,我们需要确定出一个使得类间隔达到最大值的超平面,也称为最优超平面。分类间隔是指两类中间的距离,或者从分类超平面到两类样本中最近样本的距离的和,数量可能不止 2 个,由它们决定分类超平面,即确定了最优分类超平面,这些样本被称为支持向量(Support Vectors)。离分类超平面最近的样本且平行于分类超平面的两个超平面,我们将判别函数归一化使两类中所有样本都满足 $|g(x)| \geq 1$, 即离分类平面最近的样本 $|g(x)|=1$, 通过求 $\|w\|^2/2$ 的极小值获得分类间隔最大的优化超平面。而约束条件为:

$$y_i [w \cdot x + b] - 1 \geq 0 \quad (4-2)$$

满足上式是为保证经验风险为 0(没有错误的分类),而使分类间隔最大是要保证推广性的界的置信范围最小,从而使得测试时的真实风险最小。过两类样本

离最优超平面最近的点且平行于最优分类超平面的样本就被称为支持向量 (Support Vector)，它们支撑起了最优的分类平面。如图 4-1 所示，平面 H 为最优分类平面，H1 和 H2 上的点为支持向量。

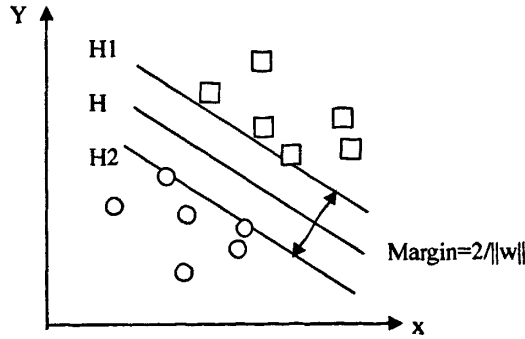


图 4-1 最优分类平面示意图

因此，求最优分类平面的问题可以归结为在约束式(4-2)条件下，求目标函数：

$$\phi(w) = \frac{1}{2} \|w\|^2 = \frac{1}{2} (w \cdot w) \quad (4-3)$$

为此可定义如下的 Lagrange 函数：

$$L(w, b, a) = \frac{1}{2} (w \cdot w) - \sum_{i=1}^n a_i \{y_i [(w \cdot x_i) + b] - 1\} \quad (4-4)$$

其中， $a_i > 0$ 为 Lagrange 乘子，把问题转化为对 w 和 b 求 Lagrange 函数的极小值。分别由 L 对 w 和 b 求偏微分，并分别令它们等于 0，就把原问题转化为简单的对偶问题。其约束条件：

$$\sum_{i=1}^n a_i y_i = 0 \quad (4-5)$$

其中 $a_i \geq 0$ ， a_i 求解下列函数的最大值：

$$Q(a) = \sum_{i=1}^n a_i^* - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n a_i a_j y_i y_j (x_i \cdot x_j) \quad (4-6)$$

若 a_i^* 为最优解，则

$$w^* = \sum_{i=1}^n a_i^* y_i x_i \quad (4-7)$$

因此,解向量有一个由训练样本集的一个样本集向量构成的线性组合。拉氏乘子不为 0,即支持向量机。支持向量机只是全体样本中很少的一部分。于是从训练集中得到了描述最优超平面的决策函数即支持向量机,从而决定分类功能。决策函数可表示为

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^n a_i y_i (x \cdot x_i) + b\right) \quad (4-8)$$

其中,sgn 为符号函数。由于非支持向量对应的均 a_i 为 0,因此,式中的求和实际上只对支持向量进行。

4.1.2 广义最优分类面

在讨论线性分类的基础上,进一步讨论非线性可分样本的分类问题,即广义最优化分类平面问题。在线性不可分的情况下,即某些训练样本不能满足式(4-2)的条件,为此在条件中添加一个松弛项 $\xi_i > 0$ 变成:

$$y_i [(w \cdot x_i) + b] - 1 + \xi_i \geq 0 \quad (4-9)$$

将目标改为求下式最小:

$$\phi(w, \xi) = \frac{1}{2} (w \cdot w) + C \left(\sum_{i=1}^n \xi_i \right) \quad (4-10)$$

决策函数式(4-8)实质上就是 x 和 x_i 的相似度。一般的情况下,需要函数 K 对任意两个样本向量 x 和 x_i ,它的返回值 $K(x, x_i)$ 就是描述两者的相似度的一个数值,这就是所谓的核函数(kernel)。对于难以线性分类的问题,待分类样本可以通过选择适当的非线性变换映射到某个高维的特征空间,使得在目标高维空间样本线性可分,从而转化为线性分类问题。Cover 定理表明,通过这种非线性转换将非线性样本映射到足够高维的特征空间,非线性可分的样本将极可能变为线性可分^[49]。如果这个非线性转换为 $\phi(x)$,则超平面决策函数式(4-8)改写为

$$f(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^n a_i y_i \phi(x) \cdot \phi(x_i) + b\right) \quad (4-11)$$

在上式中只涉及训练样本之间的内积运算,即在高维空间实际上只需进行内积运算,可以用原空间中的函数实现的,不必知道变换形式。根据泛函的有关理论,只要一种核函数 $K(x, x_i)$ 满足 Mercer 条件,它就对应某一变换空间中的内积。

因此, 在最优分类面中采用适当的内积函数(x, x_i)就可以实现某一非线性变换后的线性分类, 且没有增加计算复杂度。核函数存在性定理表明: 给定一个训练样本集, 就一定存在一个相应的函数, 训练样本通过该函数映射到高维特征空间的相是线性可分的。

4.1.3 核函数

常用核函数有: 线性核函数、多项式核函数、径向基函数和 Sigmoid 函数, 不同核函数对支持向量机分类精度有着不同的影响。表达式如下:

$$\text{线性核函数: } K(x, x_i) = a(x \cdot x_i)$$

$$\text{多项式函数: } K(x, x_i) = [a(x_i \cdot x_j) + b]^p$$

$$\text{径向基函数(RBF): } K(x, x_i) = \exp\left\{-\frac{|x_i - x_j|^2}{\gamma}\right\}$$

$$\text{Sigmoid 函数: } K(x, x_i) = \tanh(v(x_i \cdot x_j) + c)$$

RBF 函数不仅适用于非线性情况使用, 而且所需要样本较少、选择参数方便, 所以本文选择 RBF 函数。

4.2 SVM 算法

实际应用中分类问题往往多于两类, 基本的支持向量机已经不能满足。因此, 学者从两个方向提出了研究方案: 一个方向是将基本的两类支持向量机扩展为多类分类支持向量机, 即一个支持向量机通过求解该最优化问题“一次性”实现多类分类; 另一方向则将多类分类问题逐步转化为两类分类问题, 用多个两类分类支持向量机组成的多类分类器。前者虽然过程方便, 但计算量太复杂。所以后者应用比较广泛, 传统的多类分类算法有一对一、一对多、二叉树等算法。

4.2.1 一对多分类算法

一对多分类算法(One-against-Rest)是每次构造一个分类器, 把其中一类和余下的各类划分开。对于 k 类问题需要构造 k 个 SVM 子分类器。构造第 i 个 SVM 子分类器时, 将属于第 i 类别的样本数据标记为正类, 其他样本数据标记为负类

进行训练。

一对多方法的算法的优点：解决 K 个样本的分类问题，只需要训练 k 个两类分类 SVM，那么分类函数的个数少(k 个)，分类速度相对较快。但每个分类器的训练都是将全部的样本作为训练样本，这样需要求解 k 个 n 个变量的二次规划问题，因为 SVM 的训练速度随着训练样本的数量的增加而迅速减慢。因此，训练数目大，训练困难，并且存在大量不可分区域(如图 4-2 阴影部分)。

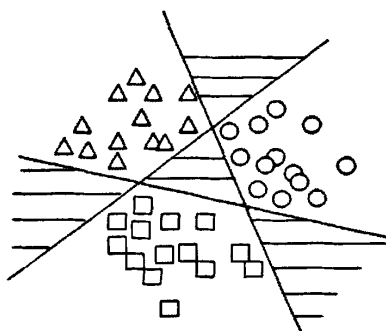


图 4-2 One-against-Rest 不可分区域示意图

4.2.2 一对一分类算法

一对一分类算法(One-against-One)每次只对两类进行分类，所以 k 类分类问题需要构造 $k(k-1)/2$ 个两类分类机。当对一个未知样本进行分类时，每个分类器都对其类别进行判断，并为相应的类别“投票”，最后得票最多的类别即作为该未知样本的类别。相对于一对多方法，虽然每个分类问题的规模却很小，学习的问题也比较简单，但随着 K 的增大， $k(k-1)/2$ 的数目会剧增导致速度太慢，并且存在大量不可分区域(如图 4-3 阴影部分)。

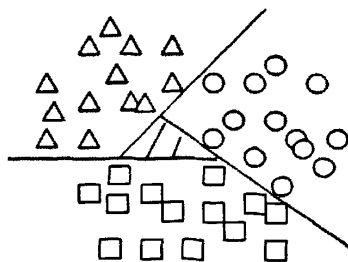


图 4-3 One-against-One 不可分区域示意图

4.2.3 二叉树分类算法

所谓二叉树分类是将所有类分成两个子类, 再将每个子类分别划分成两个次级子类, 依次类推, 直到所有的节点只含有一个类别为止。每个类是二叉树的叶子, 每个节点是二叉树的树杈, 这样就得到一个倒立的二叉树。

二叉树的分类结构主要分为两种^[50]: 一种是偏二叉树结构的分类算法。在每个内节点处, 由一类与剩下的类构造分割面(图 4-4); 另一种是近似完全二叉树结构的分类算法。在内节点处, 每次分割时类与类间的数量是不限定, 可以是多类和多类间的分割(图 4-5)。本文只考虑后一种情况, 即每次根据相似度分割只分割出一个类或多个类。

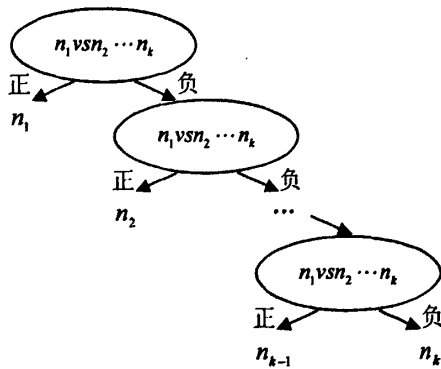


图 4-4 偏二叉树结构的分类算法结构图

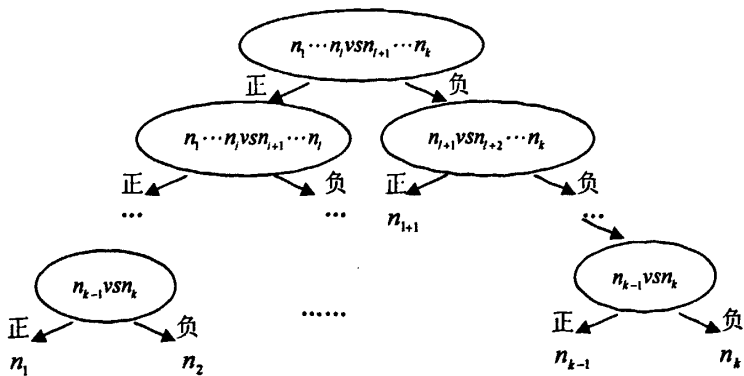


图 4-5 近似完全二叉树结构的分类算法结构图

二叉树方法克服了传统方法所遇到的不可分问题, 并且对于 K 类分类问题

只需构造 $K-1$ 分类器, 测试时并不一定需要计算所有的分类器判别函数, 从而可节省测试时间。但不同的二叉树结构, 会得到不同的分类模型, 对分类精度有一定影响, 并且这种影响有可能产生“误差累积”现象^[51], 若在某个结点上发生分类错误, 将会把错误延续下级节点, 即该结点后续下一级结点的分类就失去意义。因此, 选择合理的二叉树层次结构是二叉树必须解决的问题。

为了构造一个推广能力较好的二叉树分类结构, 本文提出基于聚类思想的构造二叉树分类的方法。采用了分裂层次聚类的思路, 先生成决策树的根节点, 最后生成决策树的叶子节点。按照特征量的聚类原则, 首先将训练样本集分裂成两个互不相交的子集, 根据这两个子集构造一个分类器, 然后每个子集再分裂成两个子子集, 具有同一父亲的子集之间又可构造一个子分类器, 如此下去直至所有的子集不能再分为止, 不能再分的子集为叶子节点也是样本的类别。利用该决策树可以实现的电能质量扰动信号的自动辨识。

4.3 结果与讨论

4.3.1 软件简介

本文使用台湾大学林智仁(Chih-Jen Lin)博士^[70]等开发设计的 LIBSVM, LIBSVM 是一个操作简单、使用简单、快速有效的通用 SVM 软件包, 可以解决分类问题、回归问题以及分布估计等问题, 其自带了线性、多项式、径向基和 S 形函数四种常用的核函数, 可以有效地解决多类问题、交叉验证选择参数等。而 LIBSVM 是一个开源的软件包, 不仅提供了 LIBSVM 的 C++ 语言的算法源代码, 便于科研工作者二次开发和移植, 还提供 Python、Java、MATLAB、LabVIEW 以及 C#.net 等各种语言的接口, 便于与其它软件的通信。

本文的运行环境是 MATLAB, 因此选用了带有 MATLAB 语言接口的 LIBSVM-mat-2.86 版本。

4.3.2 辨识步骤

辨识的分类步骤流程, 如图 4-6。

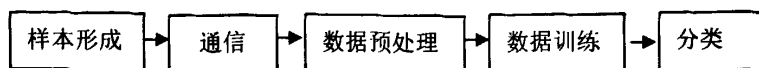


图 4-6 分类流程图

1) 样本形成

本文根据表 3-1 的扰动信号模型, 产生各类扰动信号 450 个, 其中训练样本 270 个。各样本采样时间为 8 个基频周期, 每基频(50Hz) 周波采样 64 点(即可检测到的信号最高频率为 3.2kHz)。为模拟不同的电能质量扰动信号, 令扰动的各参数(如扰动起止时间、幅值、初相角、持续时间、频率等)在允许范围内随机变化, 并给各扰动信号加入均值为 0 的白噪声, 产生信噪比分别 20dB、30dB 和 40dB 的扰动信号。

2) 通信

利用 VC6.0 在 MATLAB7.1 中编译生成 “.mexw32” 的可执行文件。配置完 LIBSVM 与 MATLAB 接口的界面, 如图 4-7。



图 4-7 通信设置界面

3) 数据预处理

产生的样本经广义 S 变换分析, 每个样本提取 7 个特征量, 这样整个训练样本集合是一个 270 行*7 列的矩阵, 按照 LIBSVM 软件包所要求的格式对数据集进行变换, 得到 270 行*8 列的矩阵, 并对数据进行归一化处理。同样, 对测试样本做同样的操作。

4) 数据训练

(1) 本文选择 LIBSVM 核函数为 RBF 核函数。

(2) 用交叉验证方法选择最佳参数 c 与 g , 参数选择过程如图 4-8。最后得到最优参数 $c=2^{15}$, $g=3.052$ 。

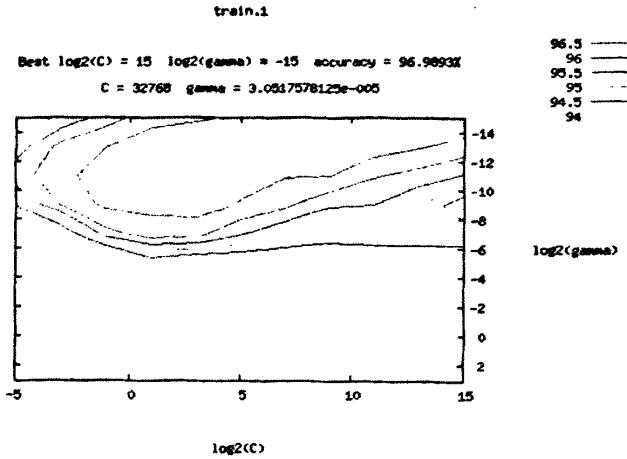


图 4-8 参数选择图

(3) 综合分析第三章提出的广义 S 变换提取的特征量，根据特征量的相似度进行聚类并构造的多级二叉树，决策树如图 4-9。基于广义 S 变换特征量的决策树是一种类似完全二叉树分类方法，从根节点开始分类。首先根据 $TF_3 * TF_2$ ，把集合分裂成理想信号和扰动两个互不相交子集，扰动子集后根据 TF_1 特征量分裂成多分频子集和单分频子集，以此类推直至所有子集只包含一个扰动。综上所述，用决策树对 9 种扰动进行了 4 级分类，共使用 8 个分类器。

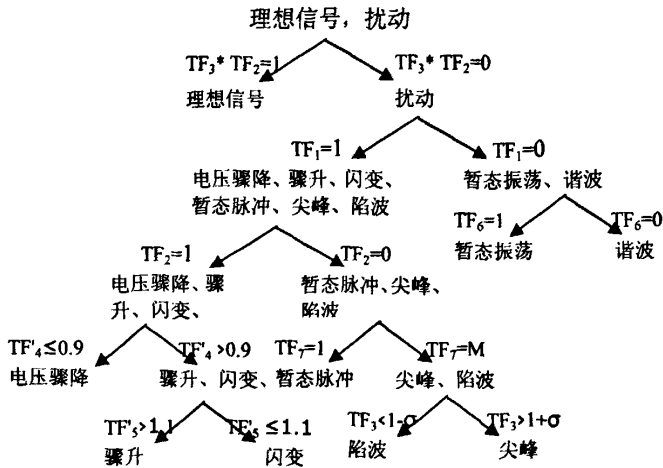


图 4-9 基于广义 S 变换特征量的扰动识别决策树

基于以上规则，设定 LIBSVM 的分类器，对扰动训练的数据集进行训练，获取支持向量机模型。

5) 分类

利用获取的模型对 180 个测试数据进行分类。

其中， σ 是用于区分噪声与尖峰或缺口扰动信号的阈值，从不同参数的噪声、尖峰与缺口各 50 个仿真信号的分析中得到的经验值是 $\sigma = 0.04$ 。

4.3.3 结果与讨论

基于辨识步骤再利用 LIBSVM 软件包实现了对 180 个扰动测试样本的分类，分类结果如表 4-1 所示。

表 4-1 电能质量扰动识别测试结果

识别正确率(%)	识别正确率(%)		
	40dB	30 dB	20dB
理想信号	100	100	98
电压骤降	99	98	97
电压骤升	99.5	96.5	93
瞬态脉冲	99	97	96
陷波	98	98	94.5
电压尖峰	99.5	96	95
暂态振荡	99	98	97
谐波	99	95	92
间谐波	100	98	93
闪变	98.5	96	91
平均值	99.15	97.25	94.65

由表 4-1 可见，不同噪声环境下、9 种不同类型电能质量扰动信号的识别率都较高。比较同一扰动在 40dB、30dB、20dB 的噪声环境下的识别率，40dB 环境下的识别率最高、30dB 环境下次之、20dB 环境下最低。比如，电压骤降在 40dB、30dB、20dB 环境下的识别率分别是 99%、98%和 97%。

实验结果表明，多级 SVMs 分类方法的识别效果良好，同时验证了基于广义 S 变换的 TF 特征量提取方法的有效性和抗噪性。

4.4 本章小结

本章先介绍支持向量机基本原理,然后用多级 SVMs 分类方法对动态电能质量扰动进行分类。利用基于广义 S 变换提取的特征量,对 270 个数据样本进行训练、聚类构造多级二叉树,最后 9 种动态电能质量扰动(180 个样本)的预测分类。结果表明,多级二叉树分类方法结构简单,样本少,分类准确率高。

第 5 章 基于 LabVIEW 综合电能质量分析系统

5.1 LABVIEW 简介

随着虚拟仪器技术不断发展, NI 公司提出了“软件就是仪器”的口号。在虚拟仪器系统中, 硬件仅仅是解决信号的输入输出, 软件才是整个仪器系统的核心。使用者都可根据不同需要, 来改变、增减仪器系统的功能, 修改应用软件完成不同任务。目前, 虚拟仪器技术主要应用于自动测试、过程控制和数据分析等领域、依托了功能强大的计算机处理单元和高速的数据总线, 利用 LabVIEW 和 Lab Windows/CVI 等软件平台, 构建与真实仪器类似的可视化面板, 通过面板上的虚拟控件控制底层硬件, 用软件来完成信号实时和事后分析、显示和存储, 及分析和统计结果^[58]。

LabVIEW 为虚拟仪器系统提供了理想的软件平台。不仅是一个功能比较完整的软件开发环境, 还具备语言的所有特性。LabVIEW 与传统高级编程语言最大的差别在于采用图形化编程方式, 这种独特的编程方式和高层次的数据分析与人机界面使得程序开发的面貌焕然一新。据统计, 使用 LabVIEW 开发虚拟仪器比使用基于文本的语言开发效率可以提高 10-15 倍, 程序的执行速度却几乎不受影响, 同时在信号处理等方面的强大功能是组态软件不可比的。

用 LabVIEW 编写的程序称为虚拟仪器 Virtual Instruments 程序, 简称 VI。它的界面和功能与真实仪器十分相像。一个 VI 由交互式用户接口、数据流框图和图标连接端口组成各部分功能如下^[59]。

VI 的交互式用户接口因为与真实物理仪器面板相似, 又称作前面板。前面板可以包含旋钮刻度盘开关图表和其他界面工具允许用户通过键盘或鼠标获取数据并显示结果。

VI 从数据流框图接收指令。框图是一种解决编程问题的图形化方法, 实际上是 VI 的程序代码, 编制 VI 程序时只要在功能模块中选择相应的图标, 并用线将它们连接起来, 以实现相互之间的数据传输即可构建出完整的流程图。

VI 模块化特性一个 VI 既可以作为上层独立程序, 也可以作为其他程序或

子程序的子程序当一个 VI 作为子程序时称作 SubVI。VI 图标和连接端口的功能就像一个图形化参数列表可在 VI 与 SubVI 之间传递数据。

LabVIEW 采用的是数据流编程模式，不同于一些基于文本的编程语言的线性结构：因为在 LabVIEW 中的执行顺序决定于功能模块之间的数据流动，因此它是能够同时运行多个 VIs 的一种多任务系统。

5.2 总体结构

本系统由硬件和软件组成，其中软件包括广义 S 变换、多级 SVMs 核心算法，以及 LabVIEW8.6 实现的系统平台。系统框架如图 5-1。

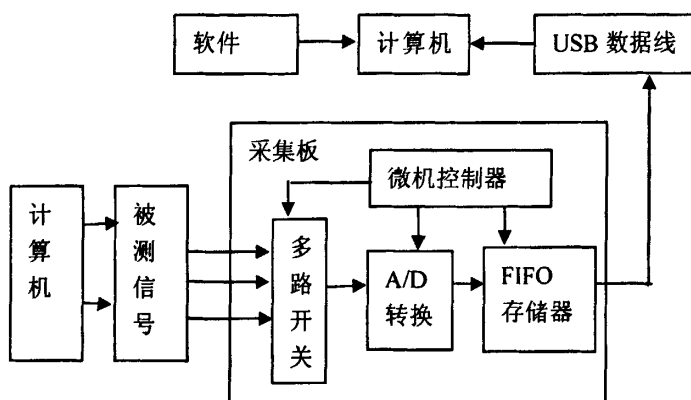


图 5-1 系统结构图

5.3 硬件设计

系统的硬件环境包括采集卡和笔记本电脑，如图 5-2。首先由 MATLAB 产生把各种类型的信号，传送给 DAQ 采集板，通过 D/A 转换，由 DAQ 板以 12.8KHz 的速率输出模拟信号，再由 DAQ 采集板把模拟信号转换成数字信号，通过先入先出(FIFO)存储器把数据传送到数据总线上。然后用 LabVIEW 编制相应的软件处理数据，从而实现传统仪器所完成的测量任务。

NI USB-6009 是一块 8 通道 14 位模数转换器的采集卡，其采样率可达 48 kS/s，8 路模拟输入，2 路模拟输出，14 位分辨率，12 条数字 I/O 线和 1 个计数器。还具有 ADC FIFO 存储器。它是“先进先出”式的存储器^[60]，可以保存 2048 次 AD 转换的结果。与传统的 AD 转换器相比，这种存储方式不必在每次 AD 转

换结束后马上取走数据，而是将数据缓存在 FIFO 内，等达到设定次采样次数后，将所有转换后的数据一次性读走。所以 FIFO 的结构大大降低计算机访问硬件的次数，大大提高软件执行的速度、极大地方便了程序的编写。考虑到 NI USB-6009 价位低、功能强大，能用于较为复杂的测量，已广泛的用于便携式测量和院校的实验室试验等。因此，本文采用了 NI USB-6009 采集卡。通过安装 NI-DAQmx 测量服务软件，Measurement & Automation 自动为该板卡编号为 1。其它设定如下：输入方式为模拟输入方式、单端共地输入，所以在程序中设备号为 1。

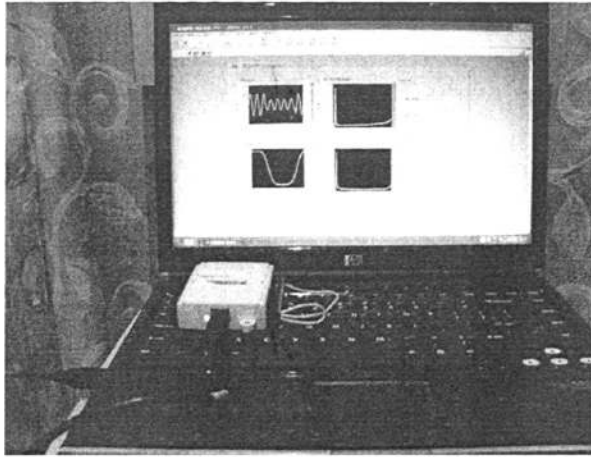


图 5-2 硬件结构图

5.4 软件设计

5.4.1 软件功能模块图

电能质量综合分析系统按功能分为测量、综合分析和统计分析三部分，具体的功能模块结构如图 5-3。

5.4.2 流程设计

系统的软件流程如图 5-4，大体分为数据采集和数据分析两大部分。第一部分程序在整个测量过程中处于运行状态，数据采集卡不间断地采集数据，数据处理模块(实时测量模块)每隔三秒处理一次从缓存区出来的数据，经过分析计算出各个指标，数据显示模块判断各个指标的数值是否超标，并在界面上提供相应的显示，在显示的同时各个指标的数据存入数据库，通过这个过程客户端实现对监

测点的实时监测。

第二部分程序和第一部分程序是并行执行的,但它主要采用事件结构进行编程。包括参数设置模块、录波模块、综合分析模块、统计分析模块。当没有事件发生时程序处于“睡眠”状态,它不占用系统的资源,只有当设定的事件发生时,程序才会运行。在本系统中采用了菜单选择去触发事件和程序中阈值触发事件的方式。只要选择菜单栏上相应按钮,相应的程序就会执行,实现相应的功能。这些功能子程序采用了动态调用的方式,这样平时这些程序在不占用系统的内存,节省了系统资源,有利于其它程序的正确执行。系统参数设置集中在参数子 VI 中,参数子 VI 是一个全局变量 VI,在其中设置的参数可以在整个系统中使用,使得参数的设置更加简单方便。自动录波还采用了阈值触发事件的方式,记录故障波形。

5.4.3 功能模块设计

5.4.3.1 测量

1) 参数设置

本系统使用编号 1-3 的模拟通道,并设置 1 通道连接 A 相、2 通道连接 B 相、3 通道连接 C 相来采集三相电压电压。基本参数的默认设置:额定电压 220V、额定频率 50Hz、采样频率 12.8KHz、采样点 128 个;触发设置:有效值高限 110%,低限 85%,频率限值 4%,不平衡限值 2%,闪变限值 1%,畸变率限值 8%、幅值限值 5%。图 5-5 是参数设置界面。

2) 实时测量

实时测量模块用来数据采集及显示采集信息,其前端面板如图 5-6。包括波形信息、各参数指标、故障报警。由图可知,切换通道号,可查看不同通道的信息;切换波形名称,显示的不同的波形,包括采集到的原始波形、电压的有效值波形、经 FFT 变换后的幅值图和相角图。波形下方是参数显示,左侧切换显示通道号,来显示不同的参数,包括频率偏差、电压偏差、三相不平衡度、谐波畸变率等基本指标。超过参数设置模块设定的限值时,报警灯报警,由绿色变成红色,同时系统开始录波。图 5-7 是对应的 VI 程序。

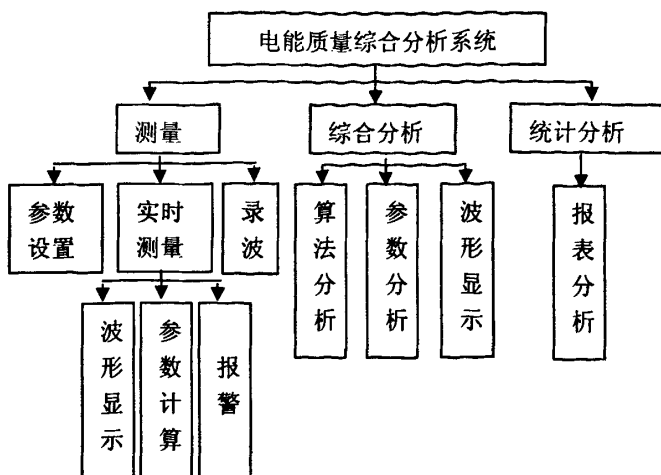


图 5-3 功能模块结构图

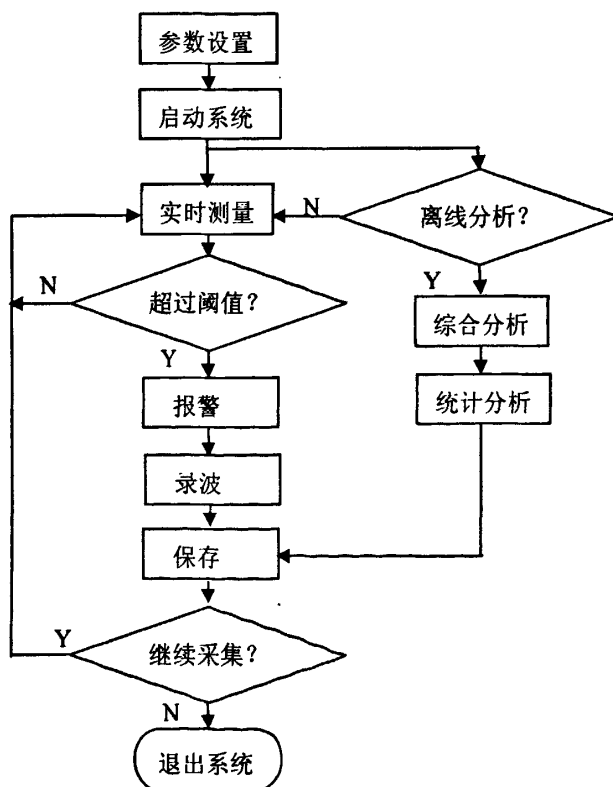


图 5-4 软件流程图

3) 录波

录波分自动录波和手动录波，系统默认是自动录波，录波的主界面如图 5-8。

手动录波即按键录波，只有设定启动方式后才会生效。启动方式分为“电压电流启动方式”、“开关输入变化启动”两种基本方式，也可选择“各项之间的逻辑关系”来设定复核型的启动方式。自动录波是系统自动触发事件，在实时测量过程中超过限值时，自动开始录波，并报警。图 5-9 是录波对应的 VI 程序。

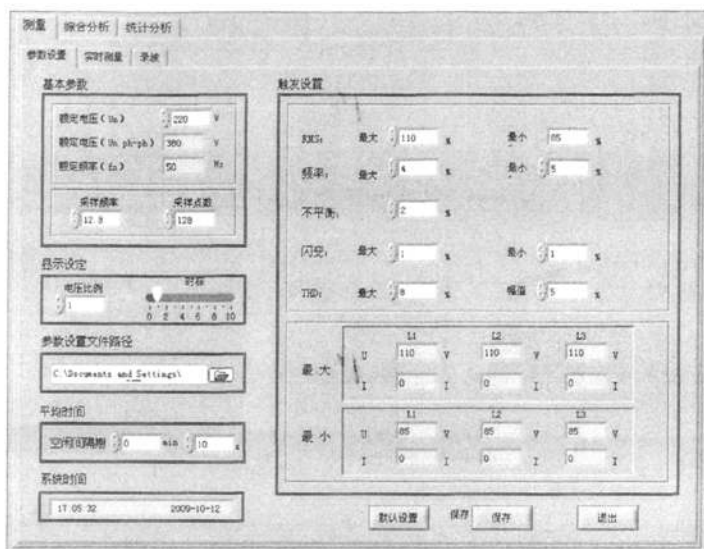


图 5-5 参数设置前端面板

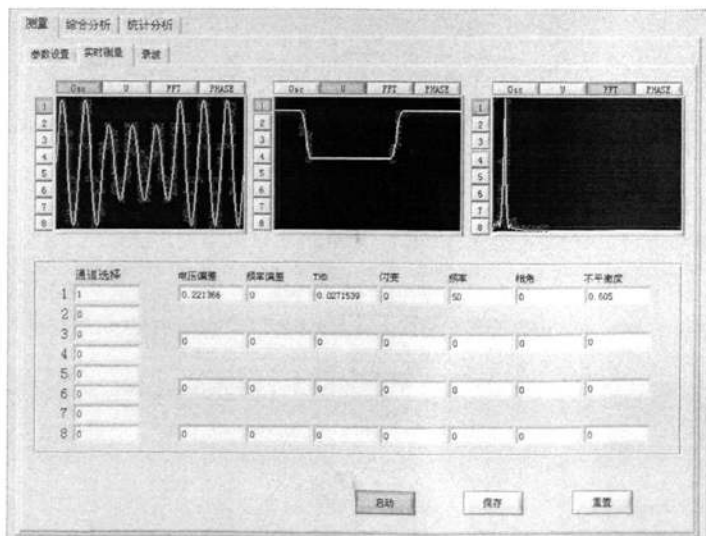


图 5-6 实时测量前端面板

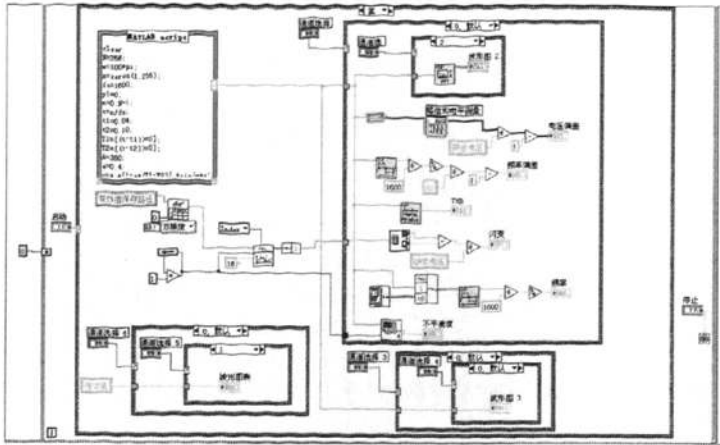


图 5-7 实时测量 VI 程序图

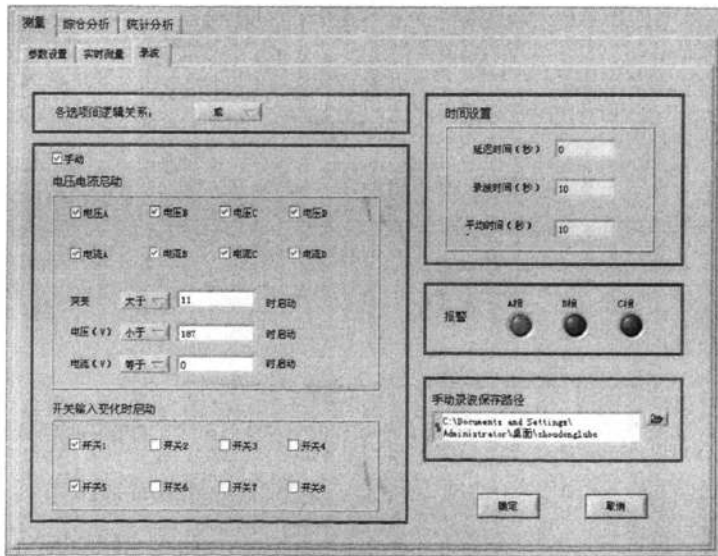


图 5-8 录波前端面板

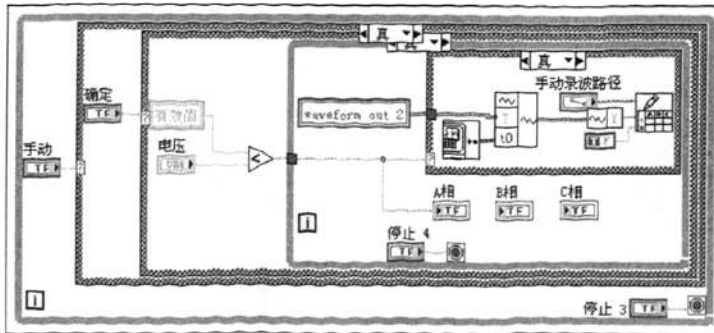


图 5-9 录波 VI 程序图

5.4.3.2 综合分析

综合分析是利用后台算法(广义 S 变换和多级 SVMs)对扰动进行分析。图 5-10 为综合分析界面。进行综合分析时,首先选择分析的扰动,然后单击综合分析按钮,以菜单触发事件的方式触发算法分析。综合分析完成后,显示广义 S 变换的结果图和参数分析结果。其中显示的波形包括原始波形、基频幅值曲线、最大频率幅值曲线、频谱标准差曲线,参数包括分类结果和参数指标。

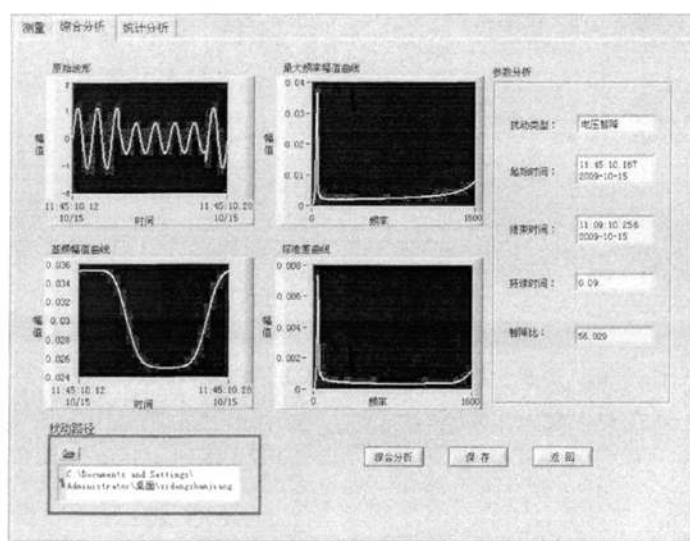


图 5-10 综合分析前端面板

5.4.3.3 统计分析

统计分析从统计学的角度分析电能质量扰动,使用户更好的了解电能质量状况。图 5-11 为统计分析界面。先设定选择故障类型、时间范围和显示方式(分类标准),就会显示相应的报表内容,然后填写测量站点信息。单击报表按钮,产生以报表形式显示统计结果。如查询某一时间段内电压骤降时,会显示骤降的起始时间、结束时间、骤降比例等指标。

5.5 结果与讨论

利用 MATLAB 模拟一个的电压骤降波形(式 5-1),由 DAQ NI USB-6009 采集数据,传送到电能质量综合分析系统进行分析。

$$y(t) = C\{1 - A[u(t-t_1) - u(t-t_2)]\} \sin \omega_0 t \quad (5-1)$$

其中, 电压幅值 $C=1V$ 、频率 $f=50Hz$ 、骤降比 $A=55\%$ 、 $t_1=0.047s$ 、 $t_2=0.133s$ 。

电压骤降的测量(实时测量、录波), 综合分析, 统计分析结果如图5-6~5-11。系统实时测量得到的参数: 电压偏差为0.221%、频率偏差为0%、谐波畸变率为0.027%、相角偏差为0%、不平衡度为0.605%。当系统监测到骤降发生时, 自动录下故障波并报警, 如图5-8。然后综合分析该电压骤降波形。分析结果如图5-10, 其基波曲线与故障波形的变化趋势是一致的, 最大频率曲线和标准差曲线与实际的一致。扰动识别类型为电压骤降, 与实际一致。参数分析: 骤降的相对于系统时间的起始时间 $t'_1=0.045s$; 骤降的相对结束时间是 $t'_2=0.134s$; 故障持续时间 $t'_2-t'_1=0.089s$, 误差为0.003s。结果表明, 识别的结果正确, 扰动的参数指标与设定值基本一致。

选当择统计的时间范围为2009年10月15日00时到2009年10月15日12时的电压骤降时, 统计结果显示该时间段的所有电压骤降, 如图5-11。结果表明, 电能质量综合分析系统统计结果正确, 并显示了扰动的参数。



图 5-11 统计分析前端面板

5.6 本章小结

本章用 LABVIEW8.6 构造了一个电能质量综合分析系统, 以 NI 公司的 DAQ 数据采集板和 PC 机为基础的采集环境, 并实现动态电能质量的数据采集、实时分析、分类、录波、统计分析等功能。电压骤降的仿真实验结果表明系统不仅有良好直观的人机界面, 而且监测、分析等综合性能良好。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

本文根据“扰动信号生成→特征提取→多级 SVMs 分类→LABVIEW 输出”的流程，设计和实现了电能质量综合分析系统。得出以下结论：

(1) 本文把广义 S 变换用于动态电能质量扰动的特征量提取和分析。结果表明，GST 在检测电压幅值变化上，可以清楚地反映出信号的时频域特性和奇异点位置，更准确检测出扰动起始的位置，其检测能力和分辨率明显强于 ST。在检测电压频率分量上，GST 不但能检测出各种整次谐波分量，而且对各种间谐波也具有很好的检测效果。特别是对有高频扰动的信号 GST 的检测和定位优势更加明显。

(2) 实现多级 SVMs 分类方法对动态电能质量扰动进行分类。在广义 S 变换提取特征量的基础上，对 270 个数据样本进行训练、聚类构造多级二叉树。最后，对 9 种动态电能质量扰动(180 个样本)的预测分类。结果表明，基于广义 S 变换特征量的多级二叉树结构简单，易于实现，噪声鲁棒性好，分类准确率高。

(3) 构造了基于 LABVIEW 的电能质量综合分析系统。首先，搭建以 NI 公司的 DAQ 数据采集板和 PC 机为基础的采集环境。然后，利用 G 语言编写系统人机界面，实现稳态电能质量的数据采集、实时分析、录波、统计分析等功能，并且对暂态电能质量事件进行捕获、分析、分类、统计。仿真和实验结果证明系统监测、分析中的综合性能良好。

6.2 展望

本文尽管在电能质量扰动检测和辨识方法的研究方面作了一些工作，也取得了一定的成果，但仍存在着很多不足。作者认为，至少在以下几方面值得继续深入研究：

(1) 本文中处理的电能质量扰动信号都是 MATLAB 生成，用 NI USB-6009 来采集。随着检测技术的综合电能质量分析系统的完善，采集大量现场实测数据，利用实际监测数据来验证和修正本文提出的算法是下一步的工作重点。

(2) 对广义 S 变换窗函数选择的方法有待进一步完善。

(3) 利用电能质量扰动辨识结果，需提出有效的电能质量治理方案，将是很有实用意义的研究工作，也将是作者下一步的主要研究内容之一。

(4) 本系统实现了基本参数的实时计算，对扰动进行自动识别和分类。目前只是单端功能实现，需向网络化方向进一步发展。

由于时间与本人水平的限制，所做的工作仍有很多不足之处，有待日后继续补充和完善，恳请各位专家、老师和同学批评指正。

参 考 文 献

- [1] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
- [2] 林海雪. 论电能质量标准[J], 中国电力, 1997, 3(25): 7-10.
- [3] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
- [4] R.C.Dugan, M.F.McGranaghan and H.W.Beaty, *Electrical Power Systems Quality*[M], McGraw-Hill, New York, 1996.
- [5] IEEE Std 1159. *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*[S]. IEEE, New York, USA, 1995.
- [6] 李晓萌. 动态电压调节器的性能改进及其新拓扑结构的研究[D], 硕士学位论文, 北京清华大学, 2004.6.
- [7] 胡铭, 陈衍. 电能质量及其分析方法综述[J], 电网技术, 2000, 24(2): 36-38.
- [8] 张斌, 刘晓川, 许之晗. 基于变换的电能质量分析方法[J]. 电网技术, 2001, 25(1):26-29
- [9] N.kolcio, J.A.Halladay, G.D. Allen et al. Transient Over voltages and Overcurrents on 12.47KV Distribution Lines: Computer Modeling Results[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993, 8(1): 359-366.
- [10] Styvaktakis Emmanouil, H.J.Bollen Math, Y H.Gu Irene. Classification of Power System Transients: Synchronised Switching[A]. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000*, 4(1): 2681-2686.
- [11] L.Tang, M.McGranaghan, R.Ferraro et al.Voltage Notching Interaction Caused by Large Adjustable Speed Drives on Distribution Systems with Low Short Circuit Capacities [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996, 11(3): 1444-1453.
- [12] G C.Montanari, M.Loggini, A.Cavallini et al. Arc-Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, 9(4): 2026-2036.
- [13] Frank E.Menter, Leonid Grcev. EMTP-based Model for Grounding System Analysis [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1994, 9(4): 1838-1849.
- [14] Mauricio Aredes, Edson H.Watanabe. New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995, 10(3): 1649-1656.
- [15] Adam Semlyer, Aurelio Medina. Computation of the Periodic Steady State in Systems With Non-linear Components Using a Hybrid Time and Frequency Domain Methodology[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1995, 10(3): 1498-1504.
- [16] 任志强, 楚冬青, 岳建平等. 基于改进遗传算法的配电网重构的研究[C], 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十三届学术年, 2007.10.
- [17] 张斌, 刘晓川, 许之晗. 基于变换的电能质量分析方法[J]. 电网技术, 2001, 25(1):26-29.
- [18] 薛葱, 杨仁刚. 基于 FFT 的高精度谐波检测算法[J]. 电机工程学报, 2002, 22(12): 106-110.
- [19] Zhang Fusheng, Geng Zhongxing, Yuan Wei. The Algorithm of Interpolating Windowed FFT for Harmonic Analysis of Electric Power System [J]. *IEEE Transactions on Power Dlivery*, 2001, 16 (2):

160-164.

- [20] J. Morlet, G. Arens, E. Fourgeau, and D. Glard. Wave propagation and sampling theory-Part I: Complex signal and scattering in multilayered media [J], *Geophysics*, 1982, 2 (47):23-27.
- [21] S.Santoso, E.J.Powers, W.M.Grady. Electric Power Quality Disturbance Detection using Wavelet Transform Analysis [C]. The IEEE SP International Symposium on Time- Frequency and Time-Scale Analysis, PITTSBURGH, PENNSYLVANIA, USA, 1998: 166-169.
- [22] Huang Shyh-Jier, Hsieh Cheng-Tao. Coiflet Wavelet Transform Applied to Inspect Power System Disturbance-Generated Signals [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38 (1): 204-210.
- [23] 李威, 王建颐, 冉启文等. 一种新的电力系统暂态波形检测方法[J], *电力系统自动化*, 2002, 26 (5):45-48.
- [24] D.Robertson, O.Camps, J. Mayer. Wavelets and Power System Transients[C]. SPIE International Symposium on Optical Engineering in Aerospace Sensing, SINGAPORE, 1994: 474-487.
- [25] J.Chung, E.J.Powers, W.M.Grady, et al. Electric Power Transient Disturbance Classification Using Wavelet-Based Hidden Markov Models [C]. 2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ISTANBUL, TURKEY, 2000: 3662-3665.
- [26] J.Chung, E.J.Powers, W.M.Grady, et al. Power Disturbance Classifier Using a Rule-Based Method and Wavelet Packet-Based Hidden Markov Model[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2002, 17(1): 233-241.
- [27] P.K. Dash, B.K.Panigrahi, P.K.Sahoo et al. Power Quality Disturbance Data Compression, Detection, and Classification Using Integrated Spline Wavelet and S-Transform[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003, 18(2): 595-600.
- [28] K Jeong Myong, Lu Jye-Chyi, Huo Xiaoming et al. Wavelet-Based Data Reduction Techniques for Process Fault Detection [J], *Technometrics*, 2006, 48(1): 26-40.
- [29] Ku Cheng-Tung, Wang Huan-Sheng, Hung King-Chu et al. A Novel ECG Data Compression Method Based on Nonrecursive Discrete Periodized Wavelet Transform [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2006, 53(12): 2577-2583.
- [30] 吕干云. 高速磁悬浮列车系统电能质量研究[D]. 上海交通大学博士学位论文, 2005.
- [31] RG Stockwell, L Mansinha, RP Lowe. Localization of the Complex Spectrum:The S Transform [J]. *IEEE Trans.On Signal Processing*, 1996, 44(4): 998-1001.
- [32] 高静怀, 陈文超, 李幼铭等. 广义 S 变换与薄互层地震响应分析[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(4): 526-532.
- [33] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(4): 51-56.
- [34] PK Dash, BK Panigrahi, G Panda. Power quality analysis using S-transform[J], *IEEE Trans. on Power Delivery*, 2003, 18(2): 406~411.
- [35] PK Dash, MV Cbilukuri. Hybrid S-transform and kalma filter approach for detection and measurement of short duration disturbances in power networks[J]. *Instrumentation and Measurement*, 2004, 53(2): 588~596.
- [36] 全惠敏, 戴瑜兴. 基于 S 变换模矩阵的电能质量扰动信号检测与定位[J], *电工技术学报*, 2007, 22(8): 120-125.
- [37] 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.
- [38] 赵凤展. 基于时频分析的电能质量扰动检测与识别方法的研究[D], 博士论文, 中国农业大学, 2006.6.
- [39] I WC Lee, PK Dash. S-transform-based intelligent system for classification of power quality disturbance signals[J], IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 800-805.
- [40] A. M. Gargoom, N. Ertugrul, W. L. Soong. A Comparative Study on Effective Signal Processing Tools for Optimum Feature Selection in Automatic Power Quality Events Clustering[A]. Fourtieth IAS Annual Meeting. 2005, 1: 52-58.
- [41] 赵凤展, 杨仁刚. 基于 S 变换和时域分析的电能质量扰动识别[J], 电网技术, 2006, 30(15): 90-94.
- [42] S. Mishra, C. N. Bhende, B. K. Panigrahi, Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using S-Transform and Probabilistic Neural Network[J], IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2008, 23(1): 280-287.
- [43] C R PINNEGAR, D W EATON. Application of the S transform to prestack noise attention filtering[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108 (89): 2422-2431.
- [44] 陈学华, 贺振华, 黄德济. 广义 S 变换及其时频滤波[J], 信号处理, 2008, 24(1): 28-31.
- [45] 陈学华, 贺振华. 改进的 s 变换及在地震信号处理中的应用[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(4): 449-453.
- [46] 王晶, 沈月月, 翁国庆, 徐爱亲. 广义 S 变换在电能质量扰动识别中的应用[J]. 电力系统自动化学报(已录用).
- [47] Wang Jing, Shen Yueyue, Wen Guoqing, et al. The Study of Generalized S-transform in Power Quality Disturbances Analysis[A], APPEEC 2009, 2009: 1255-1258.
- [48] 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.
- [49] 祁亨年. 支持向量机及其应用研究综述[J], 计算机工程, 2004, 30(10): 6-9.
- [50] 唐发明, 王仲东, 陈绵云. 一种新的二叉树多类支持向量机算法[J], 计算机工程与应用, 2005, 7(24): 24-26.
- [51] 陈增照, 杨扬, 何秀玲等. 基于核聚类的 SVM 多类分类方法[J], 计算机应用, 2007, 27(1): 47- 49.
- [52] 吕干云, 程浩忠, 郑金菊等, 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): 121-126.
- [53] 宋晓芳, 陈劲操. 基于支持向量机的动态电能质量扰动分类方法[J], 电力自动化设备, 2006, 26(4): 39-42.
- [54] 李智勇, 吴为麟, 林震宇, 基于相空间重构和支持向量机的电能扰动分类方法[J], 电力系统自动化, 2007, 31(5): 74-79.
- [55] Przemyslaw Janik, Tadeusz Lobos. Automated Classification of Power Quality Disturbances Using SVM and RBF Networks[J], IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, 2006, 21(3): 1663-1669.
- [56] Wang Jing, Shen Yueyue, Weng Guoqing. Study on the Classification Method of Power Quality Disturbances based on Generalized S-Transform and DMT SVM Classifier[A]. 2009 SUPERGEN Conference.
- [57] 莫俊雄, 徐义, 关于电能质量监测网的若干问题探讨[J], 电网技术, 2001, 25(7): 77-79.
- [58] 刘连光, 于晗, 肖湘宁等, 分布式电能质量在线监测系统设计与实现[J], 电力自动化设备, 2002,

22(1): 46-48.

- [59] 赵成勇, 高本锋, 贾秀芳. 基于 LabVIEW 的电能质量综合检测系统[J], 华北电力大学学报, 2006, 33(2): 63-67.
- [60] 姚刚, 基于 LabVIEW 的电能质量监测与分析系统[D], 硕士论文, 华北电力大学, 2004.
- [61] GB/T 12325-2008, 电能质量 供电电压允许偏差[S].
- [62] GB/ 5945-2008, 电能质量 电力系统频率允许偏差[S].
- [63] GB/T 4549-1993, 电能质量 公用电网谐波[S].
- [64] GB/T 15543-2008, 电能质量 三相电压允许不平衡度[S].
- [65] GB/T 12326-2008, 电能质量 电压允许波动与闪变[S].
- [66] GB/T 18481-2001, 电能质量 暂时过电压和瞬态过电压[S].
- [67] 谢小荣, 韩英铎. 电力系统频率测量综述[J], 电力系统自动化, 1999, 23(3): 54-58.
- [68] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M], 北京, 中国电力出版社, 2004.
- [69] 孙树勤. 电压波动与闪变[M], 北京, 中国电力出版社, 1998.
- [70] 林智仁, <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/>, 2009.8.

致 谢

在论文工作即将完成之际我由衷地感谢王晶副教授对我在攻读硕士学位期间的悉心指导和关怀。

我很庆幸能成为王晶老师的学生，在二年半的研究生阶段，她不仅在学习给予我极大的支持和指导，而且在生活上细心入微。她严谨的治学和对学生负责的态度是我学习的榜样。王老师指导下顺利完成硕士学位论文。在此表示我真诚由衷的感谢。

在本文工作中还得到了黄磊、黄淇翀等同学的无私帮助借此机会向他们表示感谢，另外感谢同门徐爱亲和原 609 实验室所有的老师同学，在学习、生活上给予的支持和帮助。

谨以此文献给我的家人和朋友，感谢你们对我一如既往的支持与关怀。

攻读学位期间参加的科研项目和成果

参加的科研项目

- [1] 网络化电能质量智能诊断系统的研究
- [2] 基于广义 S 变换的虚拟暂态电能质量分析仪的设计

录用和发表的论文

- [1] 王晶,沈月月,翁国庆, MATLAB/SIMULINK 在“电力系统分析”教学中的应用[J], 中国电力教育 2008 年研究综述与技术论坛专刊, 2008,6:174-176.
- [2] Wang Jing, Shen Yueyue, Xu Aiqin, Wen Guoqing, A Survey on Control Strategies of Dynamic Voltage Restorer. ICHQP08, 2008, 9 (ISBN: 978-1-4244-1771-1), 3/4.
- [3] Wang Jing, Shen Yueyue, Xu Aiqin, The Study of Generalized S-transform in Power Quality Disturbances Analysis[A], APPEEC 2009 Conference, 1255-1258.
- [4] Wang Jing, Shen Yueyue, Weng Guoqing, Study on the Classification Method of Power Quality Disturbances based on Generalized S-Transform and multi-lay SVM Classifier[A], 2009 SUPERGEN Conference, 1-4.
- [5] 王晶,沈月月,翁国庆,徐爱亲, 广义 S 变换在电能质量扰动识别中的应用[J], 电力系统及其自动化学报(录用).
- [6] 王晶, 徐爱亲,翁国庆, 沈月月, 动态电压恢复器控制策略研究综述, 电力系统保护与控制(录用).