

分类号_____

密级_____

UDC_____

编号_____

清 华 大 学

博 士 后 研 究 报 告

电网电能质量数据的分析处理方法研究

阳子婧

清华大学(北京)

2014年6月

1、电能质量监测数据清洗技术研究

DATA CLEANING FOR POWER QUALITY MONITORING

2、基于提升小波的电能质量扰动检测分析研究

ANALYSIS RESEARCH ON LIFTING WAVELET FOR POWER
QUALITY DISTURBANCE DETECTION

3、冗余提升小波变换在电能质量暂态事件分析中的研究

RESEARCH ON REDUNDANT LIFTING WAVELET TRANSFORM IN
POWER QUALITY TRANSIENT EVENTS ANALYSIS

4、基于小波变换的电能质量扰动识别的影响因素分析研究

INFLUENCING FACTORS ANALYSIS FOR DISTURBANCE
IDENTIFICATION OF POWER QUALITY USING WAVELET
TRANSFORM

博 士 后 姓 名: 阳 子 婧

流动站（一级学科）名称: 清华大学控制科学与工程

专 业（二级学科）名称: 控制理论与控制工程

合 作 导 师 : 曹军威（研究员）

研究工作起止日期 2012年7月——2014年6月

摘要

在当今社会，随着科技的快速进步和经济的持续发展，电力系统得到了广泛应用并对人们的生活产生日益重要的影响。电能质量作为现代电力系统中的一项重要课题，正受到越来越密切的关注和重视。然而，用户要求的不断提高以及供电环境的日渐复杂，使得电能质量问题正逐渐突显并日趋严重。为保证电力系统安全、稳定和可靠地运行，确保人们的正常生活以及国民经济的总体效益，需要对电能质量进行有效检测和分析评估，找到问题产生的根源，并最终给出有效的解决方案。针对由扰动引起的典型的暂态电能质量问题，报告结合扰动的非平稳特性以及电能质量原始监测数据的非一致性，研究了分别基于小波分析和数据清洗技术的电能质量扰动识别和统计分析方法。

数据清洗的目的在于：利用相关技术检测数据中存在的错误和不一致，对其予以剔除或者修正，从而提高数据质量。为对工程实际中的电能质量暂态事件进行准确的统计评估，根据分析目标，给出了电能质量监测数据清洗的具体实现步骤，通过三个实例分析论述了数据清洗技术在电能质量数据分析中的必要性。同时，结合“深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范”的项目实例，进行了基于数据清洗预处理的深圳各变电站暂态事件的统计分析，并得到了基于该统计分析的变电站的选点结果，进一步验证了数据清洗技术在电能质量监测数据预处理中的重要性。

根据提升小波变换可完全在时域进行而不再依赖于大计算量的卷积运算的特点，将基于提升框架构造的对称小波结合模极大值方法应用于电能质量暂态事件的扰动识别，通过电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型暂态事件的仿真实例分析，验证了提升小波分析在扰动检测中的有效性。针对小波变换中经常讨论的小波函数选取问题和扰动起止时间这一敏感因素，仍结合三种典型暂态事件的仿真实例，探讨了两者分别对于扰动识别结果的影响性。

冗余提升小波变换，通过引入 *à trous* 算法即逐层对滤波器相邻系数之间进行插值补零得以实现。相比提升小波变换，其由于去掉了剖分步骤而具有平移不变性和信息冗余性。基于这一特点，将冗余提升小波分析结合模极大值方法应用于电能质量暂态事件的扰动识别，探讨该方法在扰动检测中的分析效果。特别的，针对小波变换中另一经常讨论的分解尺度的选取问题以及扰动起止时间这一因

素，通过对电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型暂态事件的仿真实例分析，研究了两个因素分别对最终扰动识别结果的影响。

扰动的准确检测和高精度定位，对于电能质量问题的有效解决具有非常重要的作用和意义。在将经典小波、提升小波和冗余提升小波分别应用于电能质量扰动的识别并就三种方法的分析效果进行对比的同时，特别提出三个因素即小波分解尺度、扰动起止时间和冗余算法，借助三种典型暂态事件的仿真实例，详细研究了三个因素对电能质量扰动识别和检测的影响，并得到了有益的初步结论。

关键词：电能质量；经典小波；提升小波分析；模极大值方法；数据清洗技术；

Abstract

Nowadays, with the fast development of modern technology and economy, power system is getting widely utilized and also playing a very significant role in people's daily life. Power quality, as an important research topic of the power system, is attracting more and more attention. However, as consumers demanding higher power volume and the power supply system getting increasingly complex, the power quality problem is becoming prominent. To guarantee the safe, stable, reliable operation of power system as well as people's normal life and the overall benefit of national economy, it is in need make efficient detection and assesment for power quality just to find out the causes of this problem and offer effective solutions eventually. For the transient power quality problem that caused by disturbance, the paper investigates the wavelet analysis and data cleaning technology respectively for the disturbance identification and statistical analysis of power quality, only on the basis of the non-stationary property of disturbance and the inconsistency of the original monitoring data of power quality.

The goal of data cleaning is to detect errors and inconsistency in data with relative techniques, and then have them removed or modified in order to improve the data quality. For the sake of conducting appropriate statistical evaluation of practical power quality transient events, specific steps of cleaning for power quality monitoring data are provided based on the analysis aim, and the necessity of this technique in power quality data analysis is validated through three case studies. Meanwhile, by introducing an important project experienced during the postdoctoral time, the data cleaning based statistic analysis for transient events of all the substations in a big domestic city is implemented and the corresponding status analysis for these substions is provided, through which the importance of data cleaning technique in pre-processing for power quality monitoring data is furtherly validated.

According to the characteristic that the lifting wavelet transform can be completed totally in the time domain and independent of the convolution operation which takes lots of computing, the symmetrical wavelets constructed through the lifting scheme, together with the modulus maxima method are applied to the disturbance identification of power quality transient events, while the effectiveness of this approach is verified by simulation analysis of three typical transient events that are voltage swell, voltage sag

and voltage interruption. As for the wavelet selection problem that usually discussed in the wavelet transform and a sensitive factor i.e. the start and end time of disturbance, their respective impacts on the disturbance identification results are studied also through the simulation analysis.

The redundant lifting wavelet can be implemented through the *à trous* algorithm which is to make zero-padding between adjacent coefficients of filters layer by layer. Compared with lifting wavelet, the redundant lifting wavelet is of stationary property and signal redundancy due to eliminating the split step. Considering this, the redundant lifting wavelet combined with the modulus maxima method is applied to the disturbance identification of power quality transient events to discuss its effect in disturbance detection. Specially, the decomposition scale selection problem as well as the start and end time of disturbance are taken for simulation analysis of three typical transient events, so as to investigate their impact on final disturbance identification.

The accurate detection and location of disturbance is of great importance to efficient solution of power quality problem. Hence, in addition to applying the classic wavelet, the lifting wavelet and the redundant lifting wavelet to disturbance identification and making comparison analysis of these transforms, three factors i.e. the wavelet decomposition scale, the start and end time of disturbance, the redundant algorithm are especially proposed to explore their respective impact on power quality disturbance detection, while some conclusions are accordingly made through the simulation analysis of three typical transient events.

Keywords: Power quality, Classic wavelet, Lifting wavelet, Modulus maxima, Data cleaning technique

目 录

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 各章节安排	7
第 2 章 研究的理论基础	9
2.1 引言	9
2.2 电能质量	9
2.3 经典小波分析	11
2.4 提升小波分析	13
2.5 冗余提升小波分析	14
2.6 小波模极大值方法	16
2.7 数据清洗技术	17
2.8 本章小节	18
第 3 章 电能质量监测数据清洗技术研究	19
3.1 引言	19
3.2 数据清洗技术	19
3.3 电能质量监测数据高级分析	20
3.4 电能质量监测数据清洗	21
3.4.1 具体步骤	21
3.4.2 软件实现	21
3.5 实例验证	22
3.5.1 实例分析一	22
3.5.2 实例分析二	25
3.5.3 实例分析三	27
3.6 项目实例分析	29
3.6.1 项目背景简介	29

3.6.2 基于暂态事件统计分析的区域治理选点方案	29
3.7 本章小节	37
第 4 章 基于提升小波的电能质量扰动检测分析研究	39
4.1 引言	39
4.2 基于提升算法的小波构造	39
4.2.1 提升框架	39
4.2.2 基于插值细分的预测算子和更新算子设计方法	41
4.3 基于不同小波的扰动识别分析	43
4.4 不同起止时间下的扰动识别分析	46
4.5 本章小节	50
第 5 章 冗余提升小波变换在电能质量暂态事件分析中的研究	51
5.1 引言	51
5.2 冗余算法	51
5.3 分解尺度对分析效果的影响	52
5.4 扰动起止时间对分析效果的影响	56
5.5 本章小结	59
第 6 章 基于小波变换的电能质量扰动识别的影响因素分析研究	61
6.1 引言	61
6.2 算法对比分析	61
6.3 扰动定位精度的影响因素分析	65
6.3.1 小波分解尺度	65
6.3.2 扰动起止时间	67
6.3.3 冗余算法	75
6.5 本章小节	78
参考文献	79
博士后在站期间取得的研究成果	85
致 谢	87

第1章 绪论

1.1 研究背景与意义

在当今，随着社会的不断进步和经济的快速发展，电力系统在人们生活中的作用越来越重要，电能作为一种实用、清洁且易于传输和控制的能源，被广泛应用于国民经济生产的各个行业和领域，稳定优质的电能质量已成为国民经济快速发展的基本保证。因此，提供稳定、可靠和高质量的电能对于保障电网和电气设备安全经济地运行以及人民的日常生活具有十分重要的意义。然而，由于具有非线性、冲击性和不对称性的大型工业负荷的不断增加，特别是冶金、化工、半导体加工等领域大容量电力整流设备的大量使用，以及广大用户对供电要求的不断提高，电能质量问题逐渐突显并日益严重，已严重危害系统和其他用户设备安全经济地运行。同时，随着计算机、信息设备、精密仪器、高端制造业等对电源质量敏感设备的应用，电能质量问题越来越受到用户的密切关注。对敏感用户（例如半导体制造企业）而言，几十毫秒的电压暂降就可能对设备损坏甚至生产线停产，造成巨大的经济损失。

分析电能质量问题产生的原因，情况较为复杂，一般是由于电力系统遇到外来干扰或内部故障，或受到电网拓扑结构和敏感设备的用电特性等因素的影响。另外，在现代工业中，为实现节能和能量转换而广泛采用的各种电力电子装置，正成为电力系统新的主要谐波源。这些非线性负载所产生的谐波大量注入电网，使电压波形发生畸变；而所产生的各种非稳态扰动现象，则导致供电电压的波形出现频繁的随机变化，造成电能质量的明显下降。为保障电力系统安全、稳定、经济、可靠地运行，需要不断改善和提高整个电力系统的电能质量，从而为保持良好的电气环境、节能减排、促进相关产业的可持续发展以至最终提升国民经济的总体效益提供重要的技术支持。为实现这一目标，如何对电能质量进行有效检测，找到问题产生的根源，并对电能质量做出正确和全面评估，提供相应的解决方案，已成为电网电能质量亟待解决的难题。

1.2 国内外研究现状

针对电能质量问题，诸多研究围绕三个方面的内容展开：主要的分析方法可分为时域方法、频域方法和变换域方法三种^[1]。一是时域仿真方法。该方法主要通过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。二是频域分析方法。该方法主要用于电能质量中谐波问题的分析，利用常规谐波潮流计算，分析谐波在系统中的分布情况。三是变换域分析方法。例如短时傅立叶变换、短时 Fourier 变换、小波变换等。另外，也有研究对电能质量进行实时监测，实现在线或离线分析；或建立相应电力设备和用电设备的数学模型，对采集得到的电能质量信号数据进行综合分析；亦或针对不同的电能质量问题，提出改善电能质量的具体措施，进而对相应措施进行评估和优化。

在对电能质量数据进行分析处理的众多方法中，傅里叶变换是应用最为广泛也是最基本的分析方法。然而，傅里叶变换的实质是通过将信号与三角函数作内积运算，将时域信号转换为频域表示形式。由于内积运算可视为信号与三角函数之间相似性的一种度量，因此，对于实际中更为普遍的非平稳信号，基于三角基运算的傅里叶变换则不再能满足分析的需要。在研究过程中，小波分析以其自身的特点和优势，为电能质量的分析提供了一种极为有效的途径。

早在二十世纪初，小波分析的思想便已初步形成，即通过对某一函数进行伸缩和平移来生成 $L^2(R)$ 函数空间的一组基。1980 年，法国的地球物理工程师 Morlet 在分析地质数据时，首次提出了小波分析这一概念。1989 年，Mallat 将计算机视觉领域中的多尺度分析思想引入小波分析而提出多分辨分析理论。根据这一理论，对母小波进行伸缩和平移可使所得的分析小波具有大小可变的动态时频窗口。当尺度因子增加时，小波的时间窗变宽而频率窗变窄，频率分辨率提高，适用于较为平稳的低频信号的分析；当尺度因子减小时，小波的时间窗变窄而频率窗变宽，时间分辨率提高，适用于非平稳高频信号的分析。因此，小波以其在时域和频域出色的信号局部化表征能力而被称为“数学显微镜”。进而在多分辨分析的理论基础上和图像处理的应用研究中，Mallat 受到塔式算法启发，提出了著名的快速小波变换算法—Mallat 算法^[2]，其作用和地位相当于傅里叶变换中的快速傅里叶变换 (FFT)。这一重要研究使小波分析取得了突破性进展，并作为一种新兴的方法得到国内外众多学者的深入研究，广泛应用于信号分析、图像处理、计算机科学、语音识别与合成、地质勘探和机械设备故障诊断等领域。1992 年，

Coifman 和 Wickerhauser 在小波变换的基础上, 提出小波包分析^{[3]-[4]}, 通过分解滤波器同时对高频细节信号进行分解, 实现了更为精细的信号处理。

在上述理论基础上, 基于小波变换的电能质量的研究, 主要集中在信号数据的压缩、降噪、分类以及电能质量扰动的检测和定位等方面。在应用小波分析进行数据降噪方面, 主要有三种方法: 第一种是 1992 年 Mallat 基于信号奇异性提出的模极大值重构降噪方法^[5]。该方法利用信号和噪声在不同尺度上进行小波分解时有不同的奇异性(通过 Lipschitz 指数描述): 即信号的小波变换模极大值随尺度的增加而增大, 噪声的小波变换模极大值幅度及模极大值稠密度随尺度的增加而减小, 通过模极大值在不同尺度的传播特性判断这一模极大值点是由信号产生还是由噪声产生, 进而保留信号对应的模极大值点而去除噪声对应的模极大值点, 并采用交替投影算法对保留的模极大值点进行重构从而得到降噪后的信号。但交替投影算法计算量很大、程序复杂、收敛慢、不稳定的特点使得该方法的应用受到了一定的局限性。小波降噪的第二种方法是 Xu 于 1994 年提出的空域相关降噪法^[6]。该方法的原理在于: 信号的小波系数在尺度上有较强的相关性, 而噪声对应的小波系数在各尺度间没有明显的相关性。因此利用小波系数在不同尺度上对应点处的相关性来确定该系数对应于信号还是噪声从而进行取舍。该方法可用经过处理得到的小波系数直接重构信号而无需复杂的重构算法, 但由于要进行迭代而使计算量增大, 并且需要确定各尺度上的噪声能量和对噪声方差进行估计。第三种小波降噪方法是斯坦福大学以 Donoho 为首的一个学术群体提出的小波阈值降噪方法^{[7]-[9]}。其原理在于: 在满足光滑性和适应性这两个前提条件下, 根据信号和噪声在小波域中不同的形态表现, 即噪声系数的幅值随着尺度的增加很快衰减为零, 而真实信号系数的幅值随着尺度的增加基本不变; 同时, 信号主要集中在少数几个小波系数上, 幅值较大, 而噪声均匀地分布在所有的小波系数中, 幅值较小。因此, 应用软阈值函数和硬阈值函数, 选取通用阈值对经小波变换得到的小波系数进行非线性处理, 再由经处理的小波系数重构即得到降噪后的信号。小波阈值降噪法因其实现最为简单、计算量最小而得到了最广泛的应用。在应用小波分析实现数据压缩方面, 当电力系统发生故障时, 信号不再是平稳变化的工频正弦信号而是将发生突变。为记录完整的扰动信息, 通常需要采用较高的采样频率, 从而使得数据量急剧增加。当庞大的数据量向调度中心上传时, 不但会长时间占用数据通道, 而且极易造成数据通道的阻塞, 因此, 需要应用有效的方法来提取故障信号中的感兴趣成分以实现数据的压缩。利用小波变换分解和重构的特性, 通过对信号作小波变换使其能量集中于少数一些系数上, 然后确定阈

值对系数进行非线性处理将大量系数置为零而仅保留少量的非零系数，则可大大减少数据的存储量，从而达到数据压缩的目的^{[10]-[11]}。在应用小波进行扰动分类方面，Karimi 等提出一种基于小波的在线电压扰动监测方法，通过小波变换得到 PDFs 作为特征并结合误码率分析来识别事件的类型^[12]。Santoso 等论述了一种小波神经分类器，分别通过特征提取、基于学习向量的特征识别以及智能决策来实现对扰动的分类^[13]。Zhu 等研究了一种先通过小波变换获取能量分布作为特征，再生成规则基进行扩展模糊推理的电能质量扰动识别方法，并选取六种扰动验证该方法的有效性^[14]。为实现电能质量扰动的检测，Lin 等提出一种自适应小波神经网络，应用 Morlet 小波获取特征并结合自适应概率神经网络进行扰动识别^[15]。Brodzinski 等采用小波神经分类器实现了对电网电压暂态扰动的检测和分类^[16]。Uyar 等提出了一种基于小波范数熵的特征提取与 WNN 相结合的方法，用以实现对七种电能质量扰动的分类^[17]。Eristi 等采用小波分析和支持向量机，依次通过特征提取、序列前向选择和输入向量检测三个主要步骤来对电力系统的扰动进行分类^[18]。为实现对电能质量事件的分类，Eristi 等研究了一种分别由预处理、特征提取、分类和再分析四步组成的识别系统，并选用不同的电能质量事件对该系统的性能进行了测试^[19]。Milchevski 等采用两种离散小波变换以及具有二叉决策树的支持向量机实现了对七种不同扰动模型的检测和分类^[20]。Biswal 和 Mishra 首先应用调频率切片小波变换对电能质量扰动信号进行定位，再通过概率神经网络来对多种不同扰动进行分类，并将该方法与频率切片小波变换和希尔伯特变换的分析效果进行了对比^[21]。

在应用小波进行扰动检测和定位方面：目前，如何对电能质量进行有效的实时监测以及在线/离线分析是一个亟待解决的重点问题。在电力系统中，电能质量问题主要分为两类：稳态和暂态，其中暂态电能质量问题主要包括短时电压改变以及各种暂态现象。在工程实际中，短时电压改变正成为较为突出的典型电能质量问题，给用户的稳定和合格供电带来了严峻的考验。为此，需要对暂态电能质量扰动进行准确的判别，从而保证对用户的优质供电。当电压事件发生时，扰动将引起信号的突变，因此如何对信号的局部突变点进行有效检测成为扰动识别的关键。小波分析作为一种有效的时频分析方法，具有多分辨分析特性和出色的奇异性检测能力，因而可被用于对扰动的起止时间进行识别和检测。针对这一课题，诸多科研人员已展开广泛研究。Mallat 等最早论述了小波变换与信号突变点之间的关系以及如何通过小波变换模极大值来估计信号的奇异性^[22]。杨福生探讨了小波变换极大值在多尺度上的表现与 Lipschitz 指数间的关系，并给出小波变换在边

沿和瞬态检测中的应用实例^[23]。Gaouda 等提出一种在小波域对电力系统的不同扰动进行检测、分类和评估的系统化方法,并利用小波变换的局部化特性对噪声环境中的畸变时长进行测算^[24]。王晶等对小波理论在电力系统的暂态谐波分析、电能质量评估、奇异点检测与降噪、继电保护与故障定位、负荷预测等方面应用研究的主要成果进行了全面细致的总结^[25]。邓宏伟给出了采用小波变换对信号突变点进行定位的详细步骤,并通过分析和仿真结果验证了小波变换对非稳态扰动检测的效果^[26]。耿云玲对实数小波和复数小波在电能质量扰动信号检测和定位分析中的效果进行了探索,并提出基于离散小波变换的多尺度能量曲线方法以实现典型电能质量扰动信号的分类^[27]。王洪梅将小波变换模极大值方法用于信号的降噪和奇异点检测,并通过仿真分析验证了方法在应用中的有效性^[28]。Brodzinski 等提出一种小波神经分类器,用以实现对电力线电压暂态扰动的检测和分类^[29]。为有效分析扰动, Gao 引入一种基于小波的方法,通过计算所得的最大小波系数来获取电压导数的频域特性^[30]。Huang 和 Hsieh 应用 Coiflet 小波变换对包括振荡暂态、电压暂降、电压暂升、短时电压中断在内的电力系统扰动进行分析,并将该方法与傅立叶变换和 Morlet 小波变换的分析效果进行了对比^[31]。Gaouda 等提出一种系统方法用以在小波域对不同的电力系统扰动进行检测、分类和测量,进而采用阈值处理和小波重构对噪声背景下的电容器投切和电压暂降信号进行定位,并给出了误差估计^[32]。Gao 和 Ning 应用基于小波的多分辨分析对广域监测系统下的频率和电压导数进行分析,并就数值实验过程中小波函数和分解尺度的选取问题进行了讨论^[33]。Sadeghi 等提出一种算法用以识别电压暂降的发生时刻和位置,通过采用离散小波变换同时对正常和扰动信号进行分解并对比分析两者的细节信号差异来确定电压暂降的发生时刻^[34]。对于经典小波,其变换过程需通过卷积运算来实现,因而计算量较大,实时性较差;同时,新的小波的构造通常在频域进行,需要借助于傅里叶变换和较高的数学技巧,构造过程十分复杂,并且大多从数学的角度出发而并不十分适用于工程应用。针对经典小波的这些不足,1994年, Bell 实验室的 Sweldens 博士提出一种提升算法,用以构造具有紧支撑的小波和对偶小波函数^[35]。随后,他又提出基于懒小波变换、对偶提升和提升三步分解的提升小波变换,并给出了相应的快速算法^[36]。提升算法使得小波变换得以完全在时域进行,运算速度有了大幅提高,并且小波的构造更为灵活,因此得到诸多研究人员的密切关注,其在理论和应用领域的研究纷纷展开。曾黎玉等提出将小波阈值降噪和小波模极大值相结合的方法,较好地抑制了噪声并检测出信号中的畸变点^[37]。毛念奎等应用提升小波对经过帕克变换分区处理得到的电

能质量信号进行自适应变换, 从而实现扰动的检测定位、分类以及扰动程度的定量分析^[38]。周建萍等利用提升小波可在时域和频域表征信号局部特征的特点和其具有发现突变信号、处理非平稳时变信号的能力, 采用提升小波有效地检测出脉冲暂态和振荡暂态电压扰动中的奇异点, 并与傅里叶分析的结果进行了对比^[39]。陈珍萍采用自适应提升小波变换和支持向量机对电能质量扰动进行识别, 并设计了以 DSP 和 ARM 为核心的电能质量检测节点^[40]。许童羽等首先通过对信号进行希尔伯特移相处理获得含噪声扰动信号的包络, 再结合小波降噪方法和扰动定位算法, 实现了对扰动起止时间的有效定位^[41]。Min Li 等将 Daubechies (9/7) 提升小波用于电压暂降、瞬态扰动和谐波的检测, 并应用仿真结果验证了该方法在时域和频域出色的检测能力^[42]。为保证暂态信号分析微处理器实现的实时性, 王坤等采用提升 Haar 小波来提取电压暂降信号的奇异点, 并与传统 Haar 小波的分析效果进行了对比, 验证了提升 Haar 小波在分析中的优越性^[43]。Chen 引入复小波变换来对短时电能质量扰动进行检测、定位、量化和分类, 并给出了相应的仿真结果^[44]。Yilimaz 等提出基于提升的小波变换的电压扰动分析方法, 并通过仿真结果验证了采用提升的 Db4 小波在时频和频率均可有效捕捉五种典型电能质量事件的瞬时特征, 以及该方法相比经典小波变换能更快更有效信号地追踪信号的动态^[45]。Liu 等对经提升小波变换所得的小波系数求取小波熵来检测和定位暂态扰动, 并对提升的 Db2 小波和经典小波在计算量方面进行了对比分析^[46]。Chen 等将提升的 Db4 小波用于多种典型暂态扰动仿真信号起止时间的检测和定位, 并计算了仿真结果与实际值之间的误差^[47]。Zhou 等采用提升小波对电压暂降、电压暂升和短时电压中断信号的奇异性进行检测, 并对分别应用提升小波和傅立叶变换得到的仿真结果进行了对比分析^[48]。

1.3 各章节安排

报告以电网中的电能质量问题数据为研究对象，分别采用提升小波分析、数据清洗技术对电能质量暂态事件中的扰动识别问题和统计分析问题进行了探讨研究。各章节的具体安排如下：

1. 第一章：绪论。论述了课题研究的背景和意义，通过对国内外研究现状的分析和总结，提炼出本报告的主要研究内容。

2. 第二章：研究的理论基础。首先介绍了电能质量的基本概念及分类，其次分别给出了经典小波、提升算法、冗余提升小波分析、小波模极大值方法和数据清洗技术的基本理论。

3. 第三章：电能质量监测数据清洗技术研究。在已有数据清洗技术的理论上，探讨了电能质量监测数据清洗的实现方法，并分别通过三组典型的电能质量工程实际监测数据讨论了针对不同实例的数据清洗步骤，以及数据清洗作为一种有效的数据预处理手段在电能质量数据统计分析中的重要性。同时，结合“深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范”的项目实例，完成了基于数据清洗的变电站电能质量暂态事件的统计分析，并给出了相应的 220kV 和 110kV 变电站的选点结果，进一步验证了数据清洗技术在电能质量监测数据预处理中的必要性。

4. 第四章：基于提升小波的电能质量扰动检测分析研究。将基于提升框架构造的对称小波应用于三种典型电能质量暂态事件的扰动识别。针对提升小波变换中的小波函数选取问题以及扰动识别中的起止时间这一敏感因素，分别通过不同的仿真实例，讨论了两者的各自对于分析结果的影响。

5. 第五章：冗余提升小波变换在电能质量暂态事件分析中的研究。鉴于冗余提升小波的平移不变特性和信息冗余特性，将其应用于典型电能质量暂态事件的分析研究。针对变换过程中的分解尺度选取问题以及扰动起止时间这一敏感因素，分别通过不同的仿真实例，讨论了两者的各自对于分析结果的影响。

6. 第六章：基于小波变换的电能质量扰动识别的影响因素分析研究。结合经典小波、提升小波和冗余提升小波在理论基础上的异同性，应用仿真实例对三者电能质量扰动识别中的效果进行了对比分析；同时，为实现更精确的扰动定位，分别就小波分解尺度、扰动起止时间和冗余算法这三个因素对最终分析结果的影响进行了详细研究，并得到了有益的初步结论。

第2章 研究的理论基础

2.1 引言

随着电力系统在人类社会中的作用日益重要，稳定优质的电能质量已成为国民经济快速发展的基本保证。当正常供电受到扰动的干扰而无法被及时准确地检测到时，将给企业的运行和人们的生活带来严重影响，甚至造成经济效益和社会效益上的巨大损失。

针对扰动信号的突变性，具有出色时频分析能力和奇异性检测能力的小波变换是有效的分析工具。而提升小波变换作为一种更为快速有效的小波分析方法，则可完全在时域进行，并具有可实现原位计算和整数小波变换等特点。对于从监测终端采集得到的电能质量原始数据，其中可能含有不少不一致、错误或重复的数据；为实现对原始数据中有效数据的准确分析，数据清洗是一种十分必要的预处理手段。

作为报告的主要研究对象，本章对电能质量的相关理论予以了细致描述。而作为报告后续章节的研究基础，本章对小波分析以及数据清洗技术的基本理论进行了详细说明。

2.2 电能质量

电能质量，可解释为实际电压与理想电压之间的偏差（即广义偏差，包括幅值、波形、相位等），反映供电方对用户方供给的电力是否合格。IEEE 标准化协调委员会则正式采用“power quality”这一术语，并给出相应的技术定义：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均适合于该设备的正常工作。

电力系统中，电能质量问题主要分为两类：稳态和暂态。稳态电能质量问题主要包括三相电压不平衡、电压波动与闪变、电压偏移、频率偏移以及其他以波形畸变为特征的谐波、间谐波和陷波等现象；而暂态电能质量问题主要包括短时电压改变及各种暂态现象。一般来说，电网电能质量问题主要是由电网中的各种扰动信号引起的。其涵盖范围广泛，既有短时或短期的，也有长时或长期的；既

有幅值方面的问题，也有频率方面的问题。由 IEEE SCC 22 提出并已被 IEC 采纳的电能质量的分类如下表 2-1 所示^[49]：

表 2-1 电能质量分类列表
Table 2-1 Classification list of power quality

类别		主要频率成分	持续时间	电压幅值	
暂态	脉冲	纳秒级	5ns 上升沿	<50ns	
		微秒级	1us 上升沿	50us-1ms	
		毫秒级	0.1ms 上升沿	>1ms	
	振荡	纳秒级	<5kHz	0.3-50ms	0-4pu
		微秒级	5-500kHz	20us	0-8pu
		毫秒级	0.5-5MHz	5us	0-4pu
电压变化	短时	电压骤升	0.5 周期-1min	1.1-1.8pu	
		电压骤降	0.5 周期-1min	0.1-0.9pu	
		电压中断	0.5 周期-1min	<0.1pu	
电源频率波动	升高、降低		<10s		
电压波形畸变	直流偏移		稳态	0-0.1%	
	谐波	0-100 th	稳态	0-20%	
	间歇波	0-6kHz	稳态	0-2%	
	陷波		稳态		
	噪声	宽带	稳态	0-1%	

四种典型的电能质量扰动即电压暂升、电压暂降、短时电压中断和谐波的仿真信号如下图 2-1 所示：

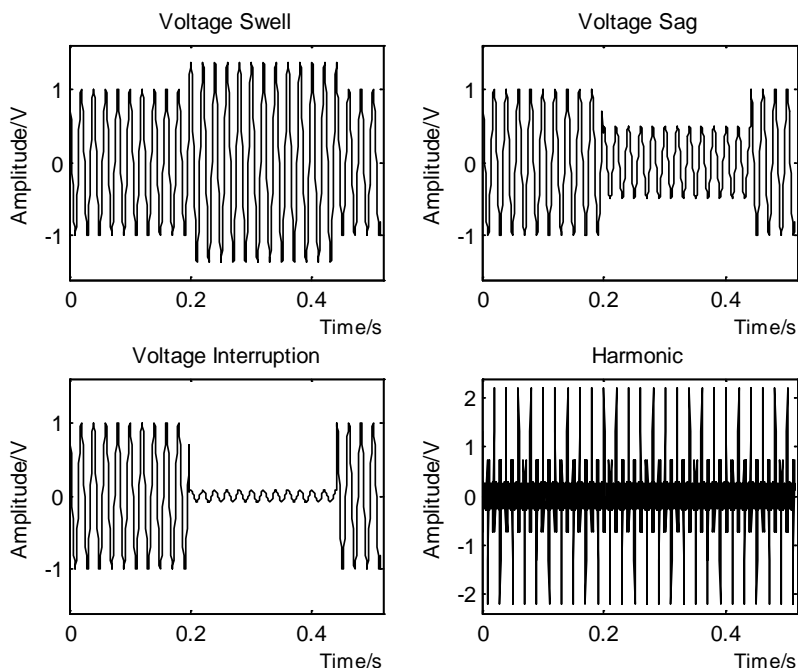


图 2-1 四种典型电能质量扰动信号

Fig. 2-1 Four typical disturbance signals of power quality

对上述典型电能质量暂态事件的信号进行仿真，考虑到理想电网中的电源电压一般为标准的工频（50Hz 或 60Hz）正弦信号，可给出仿真信号如下：

$$S(t) = \begin{cases} \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t + \varphi) & t \in (0, t_1) \cup (t_2, \infty) \\ A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot t + \varphi) & t \in [t_1, t_2] \end{cases} \quad (2-1)$$

式中， t 为时间， f_c 为工频， φ 为初始相位， t_1 和 t_2 分别为扰动开始和结束时间，扰动持续时间 $(t_2 - t_1)$ 介于半个周波（即 1/100s 或 1/120s）和 60s 之间， A 为幅值，对于电压暂升有 $A \in [1.1, 1.8]$ ，对于电压暂降有 $A \in [0.1, 0.9]$ 。

2.3 经典小波分析

由平方可积空间 $L^2(\mathbb{R})$ 上的某一特定函数 $\psi(x)$ 通过平移和伸缩的方式得到的函数族即为经典小波，其中，满足下式(1)容许性条件的 $\psi(x)$ 又称为母小波或基本

小波^[50]:

$$C_\psi = \int_R |w|^{-1} |\hat{\psi}(w)|^2 dw < \infty \quad (2-2)$$

1989年, Mallat 在多分辨分析的基础上, 借助塔式算法的启发, 提出了著名的快速小波变换算法—Mallat 算法: 通过分解高通和低通滤波器并结合隔二降采样过程对信号进行分解, 分别得到高频细节信号和低频逼近信号; 通过隔二升采样过程并结合重构高通和低通滤波器实现对信号的重构。其具体实现过程如下:

Mallat 分解算法:

$$c_{j+1,k} = \left\langle f_j, \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{n-2k} \varphi_{j,n} \right\rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \hat{h}_{n-2k} \langle f_j, \varphi_{j,n} \rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \hat{h}_{n-2k} c_{j,n} \quad (2-3)$$

$$d_{j+1,k} = \left\langle f_j, \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_{n-2k} \varphi_{j,n} \right\rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \hat{g}_{n-2k} \langle f_j, \varphi_{j,n} \rangle = \sum_{k \in \mathbb{Z}} \hat{g}_{n-2k} c_{j,n} \quad (2-4)$$

Mallat 重构算法:

$$c_{j,k} = \sum_{k \in \mathbb{Z}} h_{n-2k} c_{j+1,k} + \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_{n-2k} d_{j+1,k} \quad (2-5)$$

上式 2-3 至 2-5 中, \hat{h}_{n-2k} 、 \hat{g}_{n-2k} 为小波分解滤波器, h_{n-2k} 、 g_{n-2k} 为小波重构滤波器。其中, \hat{h}_{n-2k} 和 h_{n-2k} 为低通滤波器, 与尺度函数相对应; \hat{g}_{n-2k} 和 g_{n-2k} 为高通滤波器, 与小波函数相对应。四者共同构成了一个双通道滤波器组, 即信号 $f(t)$ 经 \hat{h}_{n-2k} 和 \hat{g}_{n-2k} 进行滤波再隔点采样得到分解信号, 然后经过隔点插零并且由 h_{n-2k} 和 g_{n-2k} 滤波得到重构信号。当四个滤波器满足正交(此时 h_{n-2k} 为 \hat{h}_{n-2k} 的倒序, g_{n-2k} 为 \hat{g}_{n-2k} 的倒序)或双正交(此时 g_{n-2k} 与 \hat{h}_{n-2k} 正交, h_{n-2k} 与 \hat{g}_{n-2k} 正交)的条件时, 可实现信号的完全重构。双通道滤波器组结构图如下图 2-2 所示:

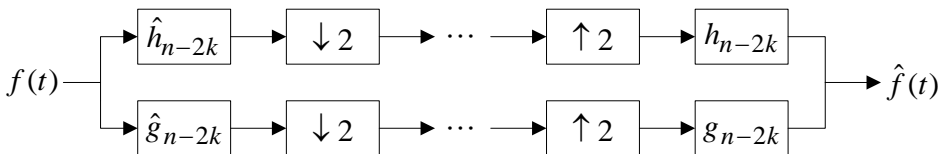


图 2-2 双通道滤波器组结构图

Fig. 2-2 Structure diagram of two channel filter banks

Mallat 快速算法的提出，使得二进离散小波变换在许多领域得到了极为广泛的应用。

2.4 提升小波分析

1996 年，Sweldens 博士在提升算法的基础上，提出基于懒小波变换、对偶提升和提升三个步骤的提升小波变换，亦称为第二代小波变换。提升小波变换的整个过程得以完全在时域进行而不再依赖于傅立叶变换^[8]，其正变换分解过程分为如下三步^[51]：

- (1) 剖分：将初始信号 x 分为偶样本 x_{Even} 和奇样本 x_{Odd} 两部分：

$$x_{Even}(i) = \{x(2i), i \in \mathbb{Z}\}, \quad x_{Odd}(i) = \{x(2i+1), i \in \mathbb{Z}\} \quad (2-6)$$

- (2) 预测：根据信号相邻样本之间的相关性，以偶样本结合预测算子 P 来预测奇样本 x_{Odd} ，并取预测误差为细节信号 d ：

$$d(i) = x_{Odd}(i) - P \cdot [x_{Even}(i)] \quad (2-7)$$

- (3) 更新：应用更新算子 U 对 d 进行更新并取代偶样本 x_{Even} 得到逼近信号 a ：

$$a(i) = x_{Even}(i) + U \cdot [d(i)] \quad (2-8)$$

其具体实现过程如下图 2-3 所示：

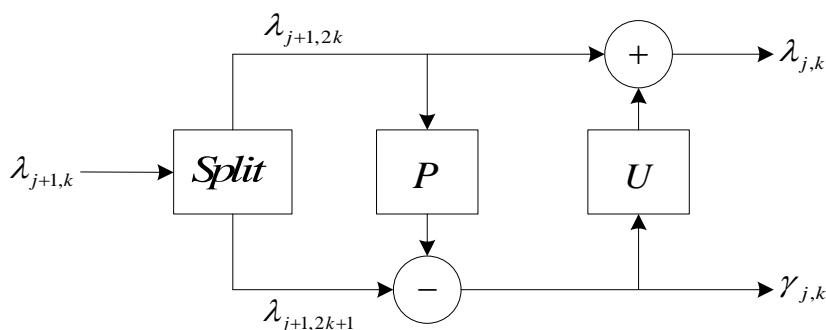


图 2-3 提升小波的正变换分解过程

Fig. 2-3 Forward processes of lifting wavelet transform

由于提升小波变换完全在时域进行，因此其逆变换重构的过程十分简单，仍分为三个步骤分别为：恢复更新、恢复预测和合并，即将信号流的方向反向并将原式中的运算符取反：

(1) 恢复更新

$$x_{Even}(i) = a(i) - U \cdot [d(i)] \quad (2-9)$$

(2) 恢复预测

$$x_{Odd}(i) = d(i) + P \cdot [x_{Even}(i)] \quad (2-10)$$

(3) 合并

$$x(2i) = x_{Even}(i), \quad x(2i+1) = x_{Odd}(i) \quad (2-11)$$

其具体实现过程如下图 2-4 所示：

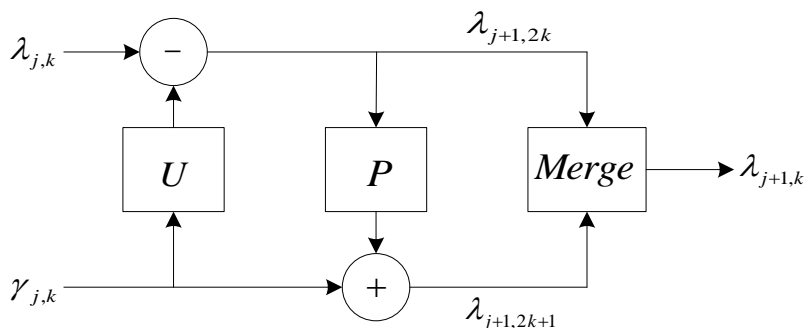


图 2-4 提升小波的逆变换重构过程

Fig. 2-4 Inverse processes of lifting wavelet transform

2.5 冗余提升小波分析

对信号进行提升小波分解时，将产生如下问题：

(1) 提升小波变换的第一步是进行剖分，而这实际上一个隔二采样的过程，得到的奇偶样本的长度均为原信号的一半。随着分解尺度的增加，样本的点数将越来越少，可提供的信息也将随之减少。

(2) 由于剖分是一个降采样过程，细节信号的采样率将不再满足奈奎斯特采样定理，因而将发生频率混叠，生成虚假频率成分。

(3) 由于剖分过程的存在，当原始信号延时奇数个样本点时，输出结果将发

生改变。因此，提升算法不具有平移不变性。

上述问题，均是由提升小波变换中的剖分这一步骤引起的。为此，可通过引入 *à trous* 算法^[52]即逐层对滤波器相邻系数之间进行插值补零来得到解决。对提升小波变换的多相矩阵表示形式作等效易位变换^[53]，去掉隔二采样步骤并对细节信号作复移位运算，则可得冗余提升小波的变换矩阵^[54]。据此可知冗余提升小波变换的正变换分解过程分为两步：

(1) 预测：

$$d(i) = x(i) - P \cdot [x(i)] \quad (2-12)$$

(2) 更新：

$$a(i) = x(i) + U \cdot [d(i)] \quad (2-13)$$

具体实现过程如图 2-5 所示：

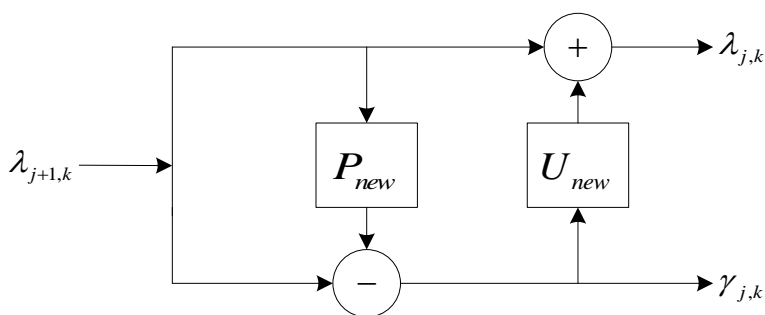


图 2-5 冗余提升小波变换的正变换过程

Fig. 2-5 Forward processes of redundant lifting wavelet transform

冗余提升小波的逆变换重构过程仍分为三步：即恢复更新、恢复预测和合并。恢复更新和恢复预测的实现方法与提升算法的相同，但是合并过程变为：对恢复更新和恢复预测分别得到的样本取平均：

(1) 恢复更新

$$x(i) = a(i) - U \cdot [d(i)] \quad (2-14)$$

(2) 恢复预测

$$x(i) = d(i) + P \cdot [x(i)] \quad (2-15)$$

(3) 合并

$$x(i) = \frac{1}{2} \cdot [x(i) + x(i)] \quad (2-16)$$

其具体实现过程如图 2-6 所示：

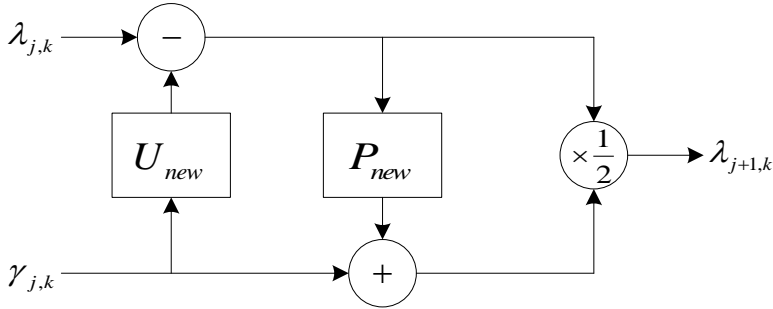


图 2-6 冗余提升小波变换的逆变换过程

Fig. 2-6 Inverse processes of redundant lifting wavelet transform

由于冗余提升小波变换去掉了剖分这一降采样步骤，因而分解得到的逼近信号和细节信号的样本长度与初始信号长度相同，可供分析的信息亦是冗余的。

2.6 小波模极大值方法

Mallat 在其论着中曾给出了应用小波分析检测信号奇异性的理论依据^[5]：对于满足一定条件的低通平滑函数 $\theta(x)$ ，其一阶导数 $\theta^1(x)$ 和二阶导数 $\theta^2(x)$ 均为满足容许性条件的小波，则 $L^2(R)$ 空间上的实函数 $f(x)$ 与 $\theta^1(x)$ 和 $\theta^2(x)$ 的小波变换可分别表示为：

$$W^1 f(s, x) = f * \theta_s^1(x) = f * (s \cdot d\theta_s / dx)(x) = s \cdot d(f * \theta_s)(x) / dx \quad (2-17)$$

$$W^2 f(s, x) = f * \theta_s^2(x) = f * (s^2 \cdot d^2\theta_s / dx^2)(x) = s^2 \cdot d^2(f * \theta_s)(x) / dx^2 \quad (2-18)$$

由式 2-17 和式 2-18 可知：小波变换 $W^1 f(s, x)$ 和 $W^2 f(s, x)$ 分别对应于函数 $f(x)$ 被 $\theta_s(x)$ 平滑后的一阶和二阶导数。对于尺度 s ， $W^1 f(s, x)$ 的局部极值对应

于 $W^2 f(s, x)$ 的过零点，亦为 $f * \theta_s(x)$ 的拐点，而 $|W^1 f(s, x)|$ 的局部极大值点则对应于 $f * \theta_s(x)$ 的突变点。因此，可通过小波模极大值来对信号中的突变点进行定位。

具体过程的详细说明如下图 2-7 所示：

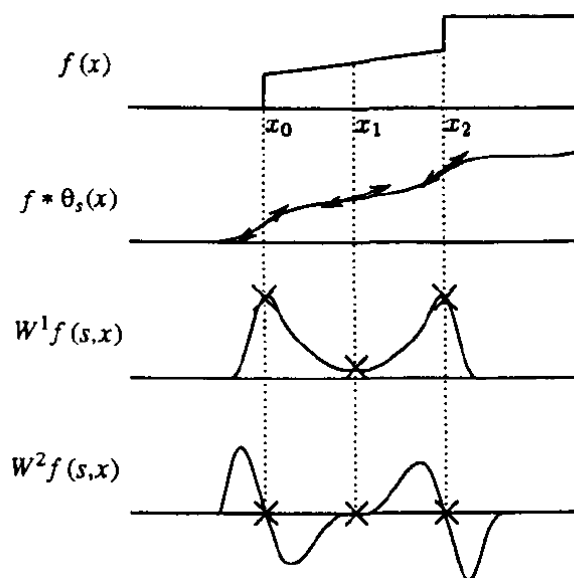


图 2-7 小波分析应用于信号奇异性检测的原理示意图

Fig.2-7 Schematic diagram of wavelet analysis for signal singularity detection

2.7 数据清洗技术

数据清洗是指将不一致的或错误的的数据从记录集、表格或数据库中检测出并进行修正的过程，其目的在于检测数据中存在的错误和不一致，对其予以剔除或者修正，从而提高数据的质量^[55]。数据清洗的原理在于：利用有关技术如统计分析、数据挖掘、模式规则等方法将“脏数据”转换为满足数据质量要求的数据。

在数据清洗方法上，一些研究机构提出了数据预处理、排序邻居、多次遍历数据清洗、基于领域知识的数据清洗、采用数据库管理系统的集成数据清洗等方法。针对属性清洗和重复记录清洗的方法分类如下图 2-8 所示^[56]：

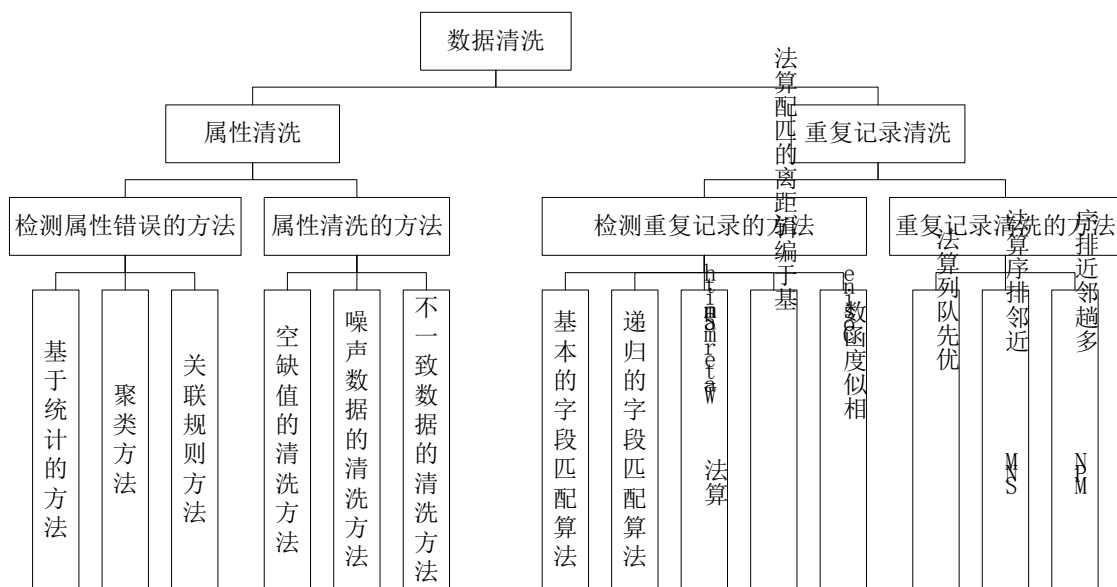


图 2-8 针对属性清洗和重复记录清洗的方法分类示意图

Fig. 2-8 Schematic diagram of methods classification aiming at field cleaning and duplicate records cleaning

2.8 本章小节

本章中，先后对电能质量、经典小波、提升小波分析、冗余提升小波变换、小波模极大值方法以及数据清洗技术的相关基础知识进行了详细论述，旨在为后续章节进行的课题研究打下良好的理论基础。

第3章 电能质量监测数据清洗技术研究

3.1 引言

随着电能质量问题得到高科技企业和电网公司越来越多的重视，大量电能质量监测系统得到部署和应用。目前，国内部分省网已陆续开始对电能质量监测系统的建设，有的已经初具规模。当前的建设模式主要分为两类：引进成熟系统和自主研发。上海、华北、云南等电力公司采用美国电科院成熟的 PQView3.2 平台和进行二次开发，并已相继建立网络化的电能质量监测平台；广东、浙江、江苏电力公司则采用自主研发模式，开发区域电能质量监测网。然而，基于监测数据的高级分析并未得到广泛应用，其重要原因在于这些数据没有得到有效的梳理。

为更好地支持高级分析应用，需要对电能质量监测数据进行整理和清洗，主要基于以下几个方面的原因：电能质量监测系统的开发人员不熟悉电能质量相关标准，将本不属于电能质量问题的事件进行了记录；电能质量监测系统的开发人员对输配电系统的运行原理缺乏了解，对关联事件进行了重复记录；由于通信等方面的系统错误，记录的部分数据可能存在不合理性或非一致性，需要剔除。

因此，本章提出数据清洗技术，将其应用于电能质量监测数据的清洗，给出了相应的具体步骤和软件实现。以深圳电网电能质量监测事件的具体数据为例，检验数据清洗技术在电能质量数据分析中的应用效果。同时，结合博士后在站期间重点参与的“深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范”工程项目，借助深圳市 2010 年至 2012 年三年间的电能质量监测数据，进行了基于数据清洗预处理的电能质量暂态事件统计分析，进一步验证了该技术在数据分析中的重要性。

3.2 数据清洗技术

电能质量监测数据高级分析的前提和基础是数据的正确性、一致性和有效性，这需要通过数据清洗（Data Cleaning）技术来实现。数据清洗是指将不一致的或错误的的数据从记录集、表格或数据库中检测出并进行修正的过程。由于用户的误输入、传输或存储过程中的出错等原因，数据集中可能存在非完整的、错误的或不相关的信息。因此，需要通过数据清洗，来有效识别、替换、修正或删除

这些“脏数据”，使该数据集与系统中其他的相似的数据集保持一致。

国外对数据清洗的研究最早出现在美国，是从对全美的社会保险号的纠错开始^[57]。随后美国信息业和商业的发展，有力推动了数据清洗技术的研究，并主要集中在检测及消除数据异常、检测及消除近似重复记录、数据集成和特定领域的数据库清洗四个方面。在国内，对数据清洗的研究起步较晚，目前主要应用于数据库、决策支持、数据挖掘和全面数据质量管理等领域，但对于商业性的数据库清洗工作则主要是针对各自的具体应用，理论性不强^{[58]-[59]}。而如何结合应用实际，运用有效的模型和方法对脏数据如不完整数据、错误数据和重复数据进行数据库清洗，从而提高数据质量，仍是有待深入研究的难点问题^[60]。

3.3 电能质量监测数据高级分析

电能质量监测数据为深入研究实际运行电网的电能质量问题提供了基础，当前已存在大量面向该类数据的分析和研究，按研究手段和应用目的可将这些研究分为两大类：一类是以数据统计为手段，以电能质量监测优化、评估和运行管理为目的的基础分析^{[61]-[63]}；另一类是以数据挖掘为手段，以从大规模、高维的电能质量监测数据中提取出隐藏的模式和规则，为电力系统规划和决策提供支持依据的高级分析^{[64]-[67]}。其中，电能质量监测数据高级分析的主要过程如图 3-1 所示。从图中可以发现：数据清洗是进行电能质量数据高级分析的前提和基础。

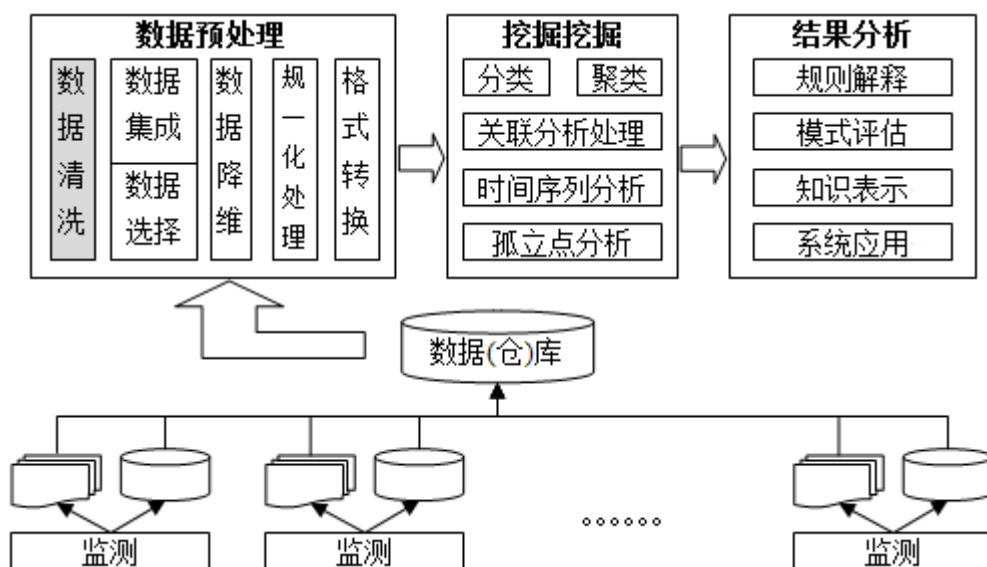


图 3-1 电能质量数据高级分析流程图

Fig. 3-1 Flowchart of advanced analysis for power quality

3.4 电能质量监测数据清洗

为说明数据清洗技术在电能质量数据分析中的重要性，本章重点以电能质量监测系统所记录的暂态事件的对应数据为例，对其进行具体的梳理和清洗。

3.4.1 具体步骤

针对电能质量问题，对采集到的监测数据进行清洗，可通过以下三个主要步骤来实现：

(1) 数据剔除：即将不符合电能质量暂态事件定义的数据予以剔除。根据由 IEEE SCC 22 提出并已被 IEC 采纳的电能质量的分类标准，将持续时间在半个周波到一分钟以内的电压变化（含电压暂升、电压暂降和短时电压中断）定义为电能质量暂态事件。因此，对持续时间在半个周波到一分钟范围以外的监测数据予以剔除。

(2) 事件统计：即对电能质量暂态事件的发生次数进行准确统计。目前，输、配电是通过三相交流电即由三个频率相同、电势振幅相等、相位差互差 120° 角的交流电路组成的电力系统来实现的。在统计过程中，为保证统计结果的准确性，将同一变电站的同一母线下在同一时刻发生的两相或三相的暂态事件均按照分析目标（即电压暂升、电压暂降或短时电压中断）记为零次或一次。

(3) 数据再处理：即对经过以上数据剔除和事件统计两个步骤的数据作进一步的处理。在预期分析目标的要求下，部分数据可能存在不合理性或非一致性。因此，需根据相关信息如事件的关联分析、用户需求等对监测数据进行再处理。

3.4.2 软件实现

数据清洗软件是实现行业中数据进行高效预处理的有力工具。近年来，市场上的数据清洗软件，既有商业开发的，也有由大学和研究机构开发的。而针对电能质量监测数据的相应软件的研发，目前还处于初步探索阶段。在本章中，开发了电能质量暂态事件分析软件（见图 3-2）；其中，数据清洗是其重要组成部分。

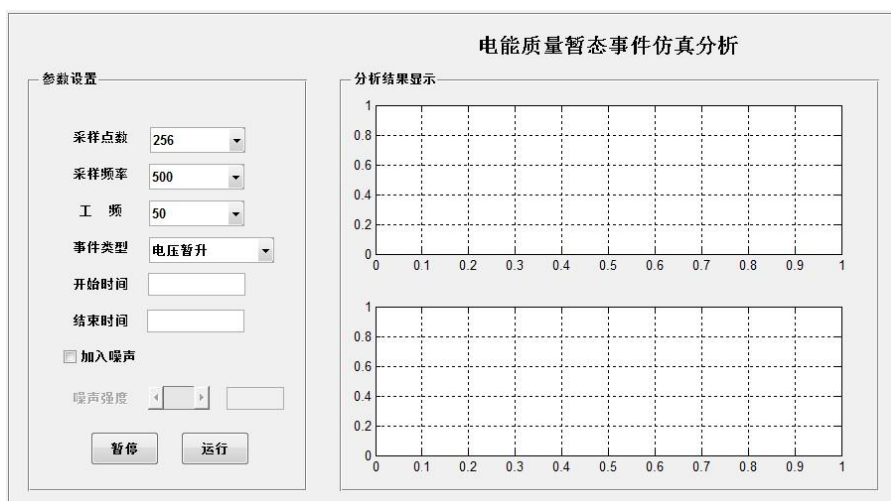


图 3-2 电能质量暂态事件分析软件实现

Fig. 3-2 Implementation of analysis software for power quality transient events

软件实现是基于美国 MathWorks 公司出品的 MATLAB 平台而开发。利用 MATLAB 的计算功能和友好的人机交互界面, 软件实现包括参数设置、数据清洗、小波分析、噪声分析等多个模块。

3.5 实例验证

本节根据深圳电网电能质量暂态事件的详细记录, 作出中心站的 ITI (CBEMA) 幅值—时间分布图。其中, CBEMA 曲线是由美国计算机和商用设备制造商协会 (CBEMA) 对电能质量的要求提出的电压容限曲线。ITI 曲线是美国信息技术工业协会 (ITIC) 在 CBEMA 曲线的基础上发展起来, 根据计算机等信息工业设备对暂态电能质量的抗扰度水平形成的。该曲线是目前评估暂态电能质量事件影响的一个重要依据, 被 IEEE 引用为美国标准^[68]。同时, 结合深圳市各级变电站的实际情况, 将电能质量暂态事件划分至 220kV 和 110kV 两级变电站下并分别进行统计分析。

3.5.1 实例分析一

在深圳电网的实际运行过程中, 电压暂降是十分突出的典型电能质量问题。由于电压暂降较为频繁地反生, 直接导致设备的损坏、企业生产的短时停运甚至用户的投诉。同时, 考虑到短时电压中断和电压暂降仅为额定电压幅值上的差别,

因此，本实例选取深圳电网某中心站 2010 年至 2012 年电压暂降和短时电压中断事件的详细记录，并采用如下步骤来实现对电能质量监测数据的清洗：

(1) 数据剔除。由于深圳电网规划在建的中心站有多个，因此首先将不属于该中心站的信息记录予以剔除。其次，将持续时间在半个周波和一分钟范围以外的数据进行剔除。最后，将电压暂升事件的对应数据进行剔除。

(2) 事件统计。由于三相电路的信息均被记录，为避免重复统计，将同一变电站的同一母线下在同一时刻发生的两相或三相的暂态事件均记为一次。

数据清洗处理前后的统计分析结果分别如下图 3-3 和下图 3-4 所示：

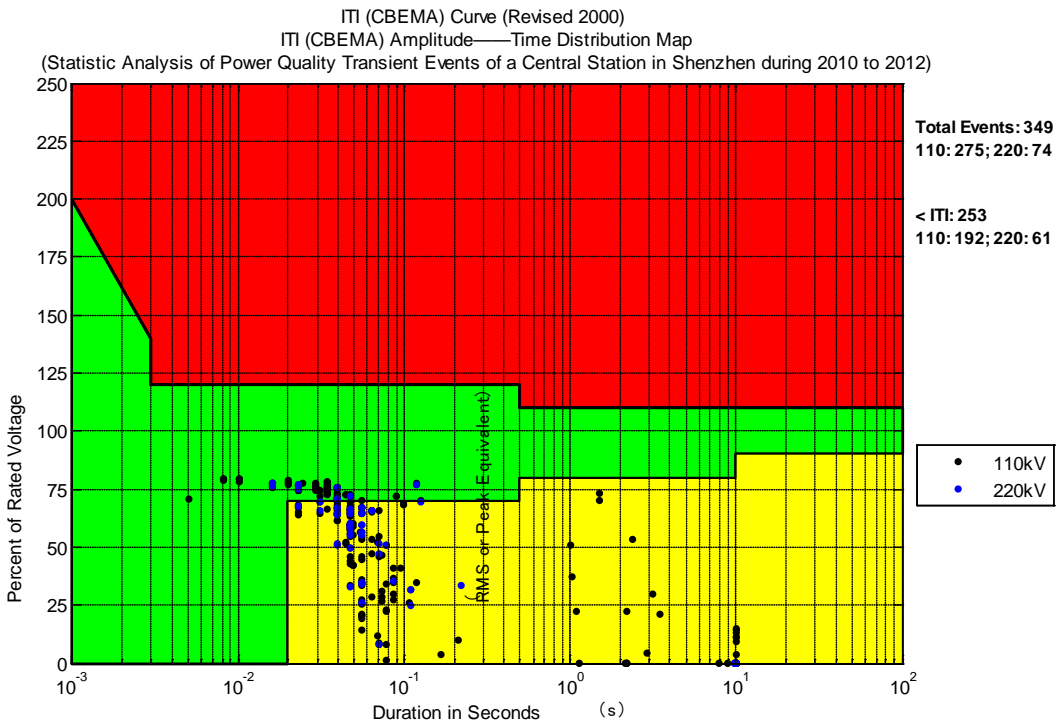


图 3-3 电能质量监测数据—清洗之前的统计分析结果

Fig. 3-3 Statistic results of monitoring data one of power quality before cleaning

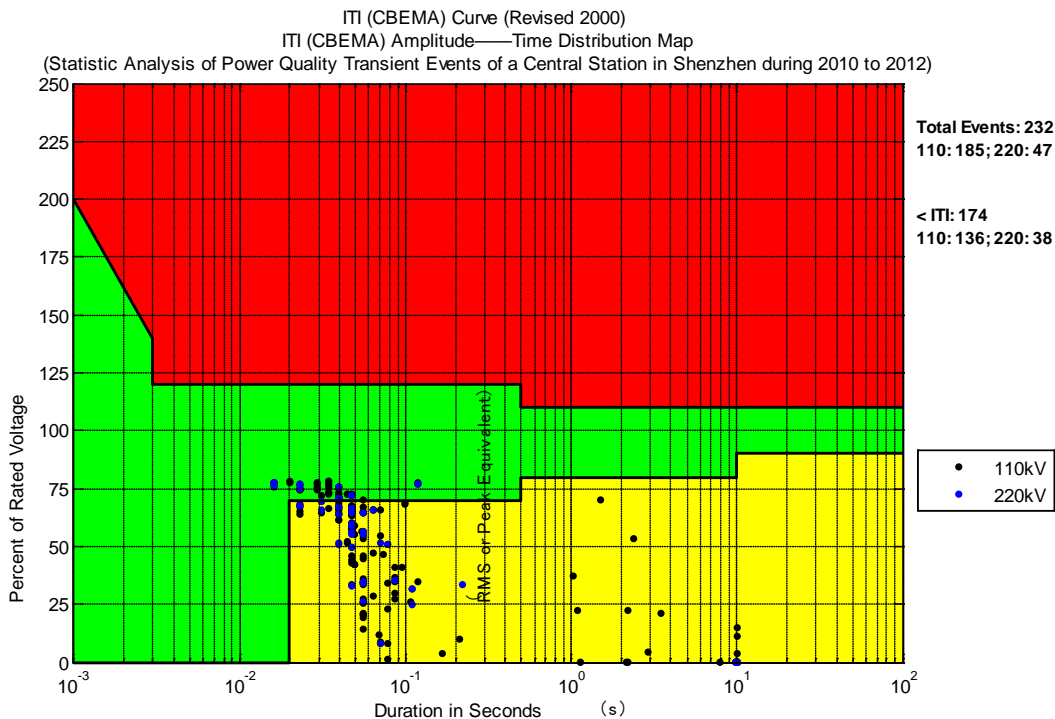


图 3-4 电能质量监测数据一清洗之后的统计分析结果

Fig. 3-4 Statistic results of monitoring data one of power quality after cleaning

图 3-3 和图 3-4 中的相关重要数据结果如下表 3-1 所示：

表 3-1 电能质量监测数据一清洗之后的对比分析结果

Table 3-1 Contrast analysis results of monitoring data one before and after cleaning

数据清洗	事件统计结果					
	事件总数	110kV	220kV	<ITI	110kV	220kV
之前	349	275	74	253	192	61
之后	232	185	47	174	136	38

从图 3-3、图 3-4 和表 3-1 中可知，由于采用了数据清洗技术，相比图 3-3 中 349 次的事件总数，图 3-4 中的事件总数减少为 232 次，而低于 ITI 的事件总数也由图 6-3 中的 253 次减少为图 3-4 中的 174 次，并且 110kV 和 220kV 下的暂态事件统计次数也呈现出一致的变化趋势。

3.5.2 实例分析二

考虑到电压暂升也是一种非常典型的暂态电能质量问题，因此，本实例选取深圳电网某中心站 2010 年至 2012 年电压暂升的详细记录作为实例进行分析。所采用数据清洗步骤与实例分析一中基本相似，只需将步骤（1）中剔除电压暂降对应的数据改为剔除电压暂降和短时电压中断对应的数据即可。对该实例中的数据进行清洗前后的分析结果分别如下图 3-5 和下图 3-6 所示：

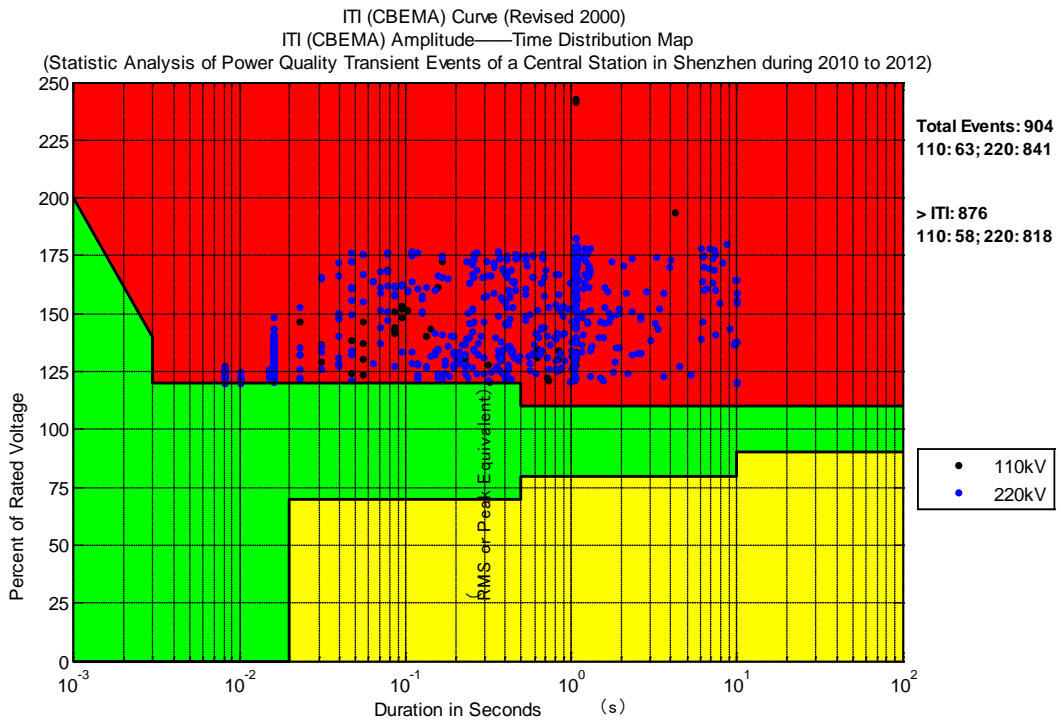


图 3-5 电能质量监测数据二清洗之前的统计分析结果

Fig. 3-5 Statistic results of monitoring data two of power quality before cleaning

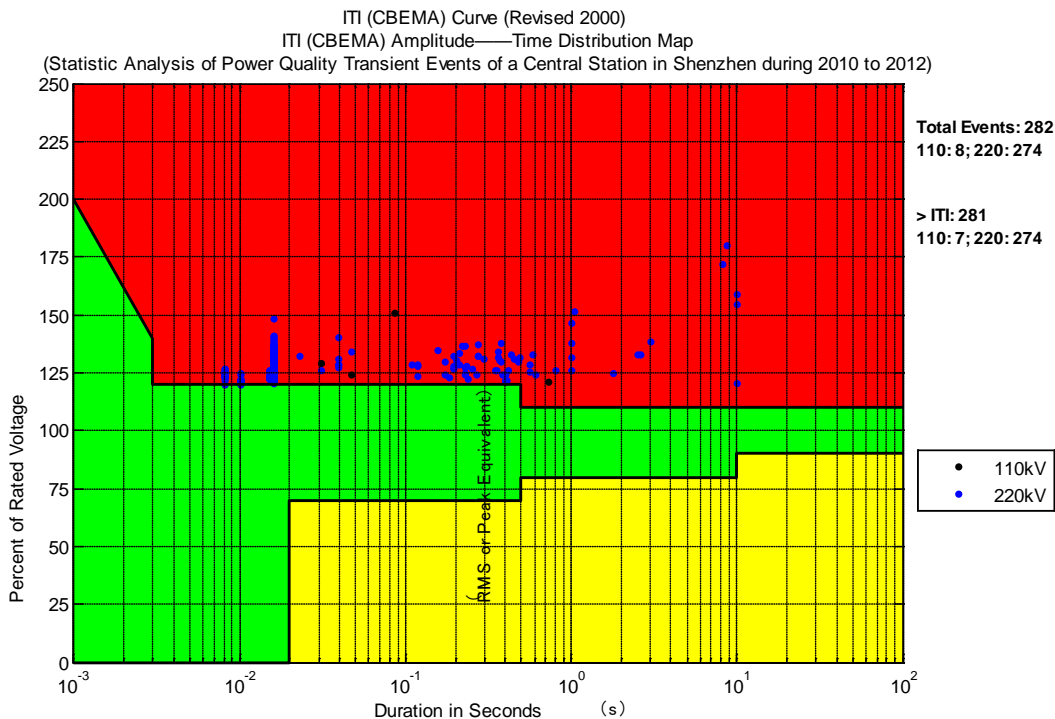


图 3-6 电能质量监测数据二清洗之后的统计分析结果

Fig. 3-6 Statistic results of monitoring data two of power quality after cleaning

图 3-5 和图 3-6 中的相关重要数据结果如下表 3-2 所示:

表 3-2 电能质量监测数据二清洗之后的对比分析结果

Table 3-2 Contrast analysis results of monitoring data two before and after cleaning

数据清洗	事件统计结果					
	事件总数	110kV	220kV	>ITI	110kV	220kV
之前	904	63	841	876	58	818
之后	282	8	274	281	7	274

从图 3-5、图 3-6 和表 3-2 可知, 由于采用了数据清洗技术, 相比图 3-5 中 904 次的事件总数, 图 3-6 中的事件总数减少为 282 次, 而高于 ITI 的事件总数也由图 6-5 中的 876 次减少为图 3-6 中的 281 次, 并且 110kV 和 220kV 下的暂态事件统计次数也呈现出一致的变化趋势。而本实例中出现的数据清洗前后统计结果差别较大的问题, 则是由对基于三相电路的事件类型的分类方法不同所引起的。

3.5.3 实例分析三

考虑更复杂的情形，本实例选取深圳电网某中心站 2010 年至 2012 年中电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种电能质量暂态事件的详细记录进行分析。数据清洗的具体实现步骤如下：

(1) 数据剔除。首先，将不属于该中心站的信息记录予以剔除。其次，将持续时间在半周波和一分钟范围以外的数据进行剔除。

(2) 事件分类。将经过步骤（1）处理后的数据划分为两类：一类为电压暂升事件，另一类为电压暂降以及短时电压中断事件，并分类分别做进一步的统计分析。

(3) 事件统计。将同一变电站的同一母线下在同一时刻发生的两相或三相的暂态事件均记为一次。

本实例中对数据进行清洗前后的分析结果分别如下图 3-7 和下图 3-8 所示：

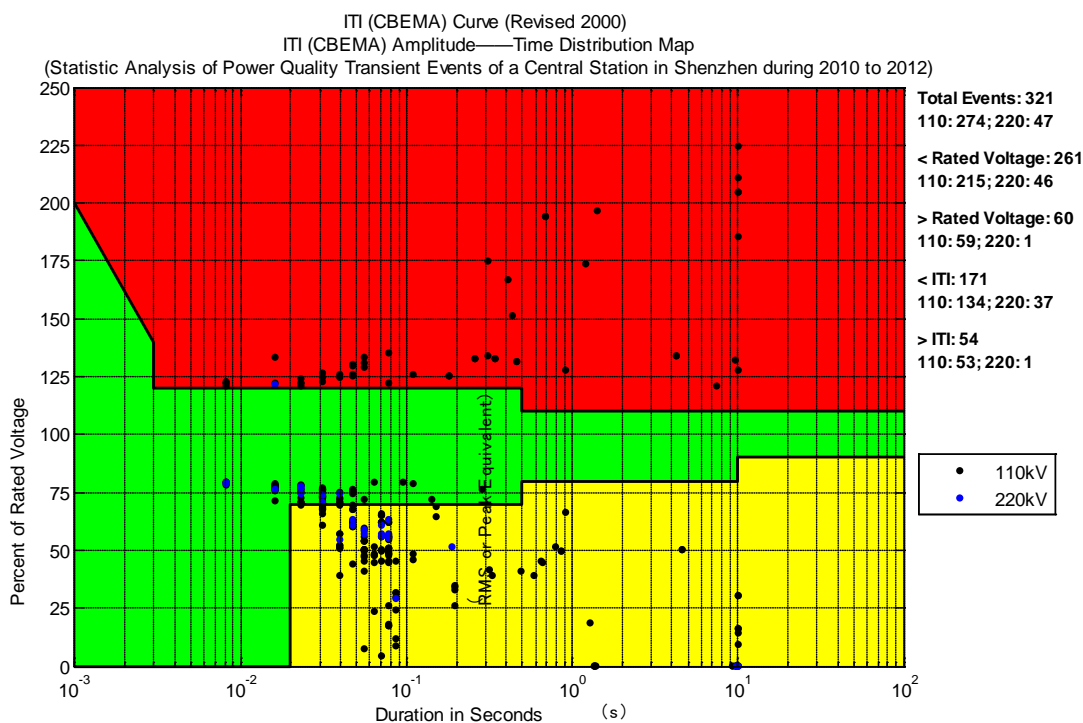


图 3-7 电能质量监测数据三清洗之前的统计分析结果

Fig. 3-7 Statistic results of monitoring data three of power quality before cleaning

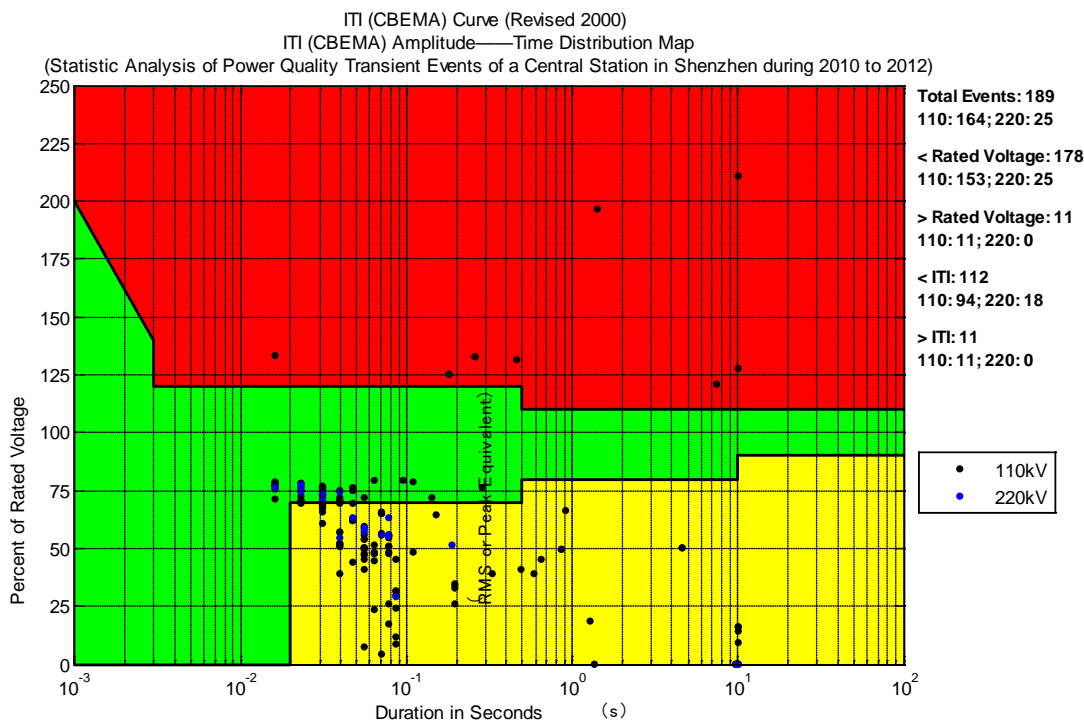


图 3-8 电能质量监测数据三清洗之后的统计分析结果

Fig. 3-8 Statistic results of monitoring data three of power quality after cleaning

图 3-7 和图 3-8 中的相关重要数据结果如下表 3-3 所示：

表 3-3 电能质量监测数据三清洗之后的对比分析结果

Table 3-3 Contrast analysis results of monitoring data three before and after cleaning

数据清洗	事件统计结果				
	事件总数	低于额定电压事件	高于额定电压事件	<ITI	>ITI
之前	321	261	60	171	54
之后	189	178	11	112	11

由本实例分析可知：表 3-3 中的五项统计指标即事件总数、低于额定电压事件、高于额定电压事件、低于 ITI 事件和高于 ITI 事件的次数在数据清洗后均比清洗前有所减少，并且各项指标下的 110kV 和 220kV 下的暂态事件统计也呈现出一致的变化趋势。通过以上三个实例分析可知：当预期分析目标不同时，所采用的数据清洗的具体实现方法也随之不同。但其共同之处在于：只有通过数据清洗，才能获得更为有效和准确的分析结果。

3.6 项目实例分析

3.6.1 项目背景简介

目前，在国内的大型城市电网中，随着具有非线性、冲击性和不对称性的大型工业负荷的不断增加以及大容量电力整流设备的广泛使用，电网电能质量问题正日渐突出，并已严重危害到系统和用户设备的安全经济运行。对于敏感用户（如半导体制造企业）而言，几十毫秒的电压暂降就可能导致设备损坏、生产线停产，从而造成巨大经济损失。

深圳市作为全国第四个负荷过千万的城市，其用电量甚至可与一个普通省份的用电量相比较。在这片 2020 平方公里的土地上，承载了 1315 万千瓦的负荷，其中绝大部分为高新技术企业。近年来，各类微电子、半导体、生物医药、精密制造等企业，以及医院、金融业、通信行业、大型数据中心等敏感用户均对深圳电网的供电电能质量提出了更高的要求。

在此背景下，“深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范”项目于 2012 年 7 月正式启动，并将历时两年至 2014 年 12 月结题完成。该项目的—个主要研究课题即为提出经济可行的区域电能质量综合治理方案。为圆满地完成这一课题，需要从深圳的实际情况出发，对整体和区域的供电情况进行调研和统计分析，了解各级供配电网所带负荷的类型和重要性，结合典型用户对供电电能质量的差异化需求，为电能质量的综合治理和示范区域的集中治理提供合理有效的依据。

3.6.2 基于暂态事件统计分析的区域治理选点方案

针对该项目，拟根据调研过程中掌握的实际情况，结合相关行业标准，对深圳市 2010 年至 2012 年近三年来电能质量暂态事件的监测数据进行全面的统计分析，并在此基础之上制定行之有效的区域治理选点方案。由于深圳市采用中心站模式即将全市的各个变电站分别划拨至不同的中心站进行分区管理（根据深圳供电局生产管理信息系统中的信息，目前已建有公明、欢乐、鲲鹏、马坳、梅林、鹏城、坪山、深圳、水贝、西乡、象山和紫荆等十多个中心站），因此，具体的统计分析过程采用以下两个递进的步骤来依次进行：

(1) 以中心站为单位对电压暂升、暂降事件进行统计，从中找出问题最为严重的 3-4 个中心站；

(2) 对重点中心站中的变电站按照电压等级等进行详细统计，找到问题较为严重的 3-4 个 110KV 变电站。

3.6.2.1 中心站暂态事件统计分析

在该步骤中，以中心站为单位，逐一对深圳市各个中心站内所有变电站（分为 220kV 和 110kV 两个电压等级）的电压暂升事件和电压暂降事件进行基于数据清洗技术的统计分析，从中找出问题最为严重的三至四个中心站。所得分析情况如下表 3-4 所示：

表 3-4 基于数据清洗的深圳市重点中心站电能质量暂态事件统计分析

Table 3-4 Statistic analysis based on data cleaning for power quality transient events of main center stations in Shenzhen

中心站	深圳	梅林	水贝	坪山	鹏城
< 额定电压	2253(598,1655)	1485(334,1151)	1412(441,971)	890(317,573)	499(427,72)
> 额定电压	419(250,169)	352(21,331)	282(8,274)	63(11,52)	336(336,0)
< ITI	2018(512,1506)	1293(268,1025)	1203(353,850)	714(254,460)	362(311,51)
> ITI	409(245,164)	351(20,331)	281(7,274)	62(11,51)	334(334,0)
超容限事件	2427(757,1670)	1644(288,1356)	1484(360,1124)	776(265,511)	696(645,51)
事件总数	2672(848,1824)	1837(355,1482)	1694(449,1245)	953(328,625)	835(763,72)

对表 3-4 中的统计结果进行详细分析，并结合电能质量监测数据作定性和定量分析，可得初步结论如下：

1、额定电压超过 IEEE 标准（500%）的电压事件统计：共计有一个中心站下的变电站发生过该类事件。即：梅林中心站下的 220kV 中航变电站发生过共计 131 次的该类事件；

2、额定电压较高（超过 250%）的电压事件统计：共计有两个中心站下的变电站发生过该类事件。分别为：坪山中心站下的 220kV 坪山变电站发生过共计 1 次的该类事件；深圳中心站下的 220kV 李朗变电站发生过共计 9 次的该类事件；

3、电压暂降事件发生次数最多的前三个中心站依次为：深圳中心站 2253（598，1655）、梅林中心站 1485（334，1151）和水贝中心站 1412（441，971）；

4、电压暂降事件低于 ITI 容限次数最多的前三个中心站依次为：深圳中心站 2018（512，1506）、梅林中心站 1293（268，1025）和水贝中心站 1203（353，850）；

5、电压暂升事件发生次数最多的前三个中心站依次为：深圳中心站 419（250，169）、梅林中心站 352（21，331）和鹏城中心站 336（336，0）；

6、电压暂升事件高于 ITI 容限次数最多的前三个中心站依次为：深圳中心站 409（245，164）、梅林中心站 351（20，331）和鹏城中心站 334（334，0）；

7、电压事件（含暂升、暂降和短时中断）发生次数最多的前三个中心站依次为：深圳中心站 2672（848，1824）、梅林中心站 1837（355，1482）和水贝中心站 1694（449，1245）。

3.6.2.2 变电站暂态事件统计分析

由于电压暂降事件为深圳电网电能质量中的一个重点问题，对该市目前所建的 162 个变电站（分为 220kV 和 110kV 两个电压等级）的电压暂降事件进行基于数据清洗技术的统计分析。同时，结合 3.6.2.1 节中的重点中心站的统计分析结果，得到问题较为严重的变电站的统计情况分别如下表 3-5、3-6 所示：

(1) 220kV 变电站：

表 3-5 基于数据清洗的深圳市 220kV 重点变电站电压暂降事件的统计分析

Table 3-5 Statistic analysis based on data cleaning for voltage sag of 220kV main substations in Shenzhen

变电站	< 额定电压	< ITI(CBEMA)	所属中心站	具体地理位置
220kV 李朗站	1093	1001	深圳	深圳市龙岗区布澜路珠宝工业园旁
220kV 中航站	795	779	默林	福田区中航路 46 号(福田供电局)
220kV 简龙站	562	505	深圳	深圳市龙岗区横岗镇水浸围村新园路二号
220kV 宏图站	374	348	马坳	龙岗区宝龙工业区宝坪路比亚迪厂旁边山边

(2) 110kV 变电站:

表 3-6 基于数据清洗的深圳市 110kV 重点变电站电压暂降事件的统计分析

Table 3-6 Statistic analysis based on data cleaning for voltage sag of 110kV main substations in Shenzhen

变电站	< 额定电压	< ITI(CBEMA)	所属中心站	具体地理位置
110kV 岐岭站	231	204	深圳	深圳市龙岗区平湖镇白鸽笼
110kV 樟树布站	208	179	深圳	深圳市龙岗区南湾街到办布沙路（沙湾关旁）
110kV 锦龙站	86	75	马坳	深圳市龙岗区龙岗街道赖屋村附近
110kV 长山坳站	68	61	鹏城	未知
110kV 水田站	73	53	鹏城	宝安区石岩街道办长城路

根据上表 3-5、表 3-6 的统计分析结果，建议以电能质量暂降事件发生次数最多的龙岗区 220kV 李朗站和福田区 220kV 中航站以及结合用户投诉和调研的结果选取的龙岗区 220kV 宏图变电站共计三个变电站作为重点区域；并考虑对所选变电站下的 10kV 线路做进一步的深入分析，为大型污染负荷和配电网电能质量综合治理装置设计提供参考和依据，以期最终有效解决重要负荷的电压暂降问题，实现区域电网的综合治理。

所选 220kV 李朗站、中航站以及宏图站下 10kV 母线情况为：

- (1) 李朗站：共计有 1M、2M、3M 和 4M 四条 10kV 母线；
- (2) 中航站：共计有 1M、2M、3AM 和 3BM 四条 10kV 母线；
- (3) 宏图站：共计有 1M、2AM 和 2BM 三条 10kV 母线。

对上述三个变电站下 10kV 母线上 2010 年至 2012 年三年的电能质量暂态事件分进行统计分析，得到相应的 ITI(CBEMA)图 3-9 至 3-16 如下：

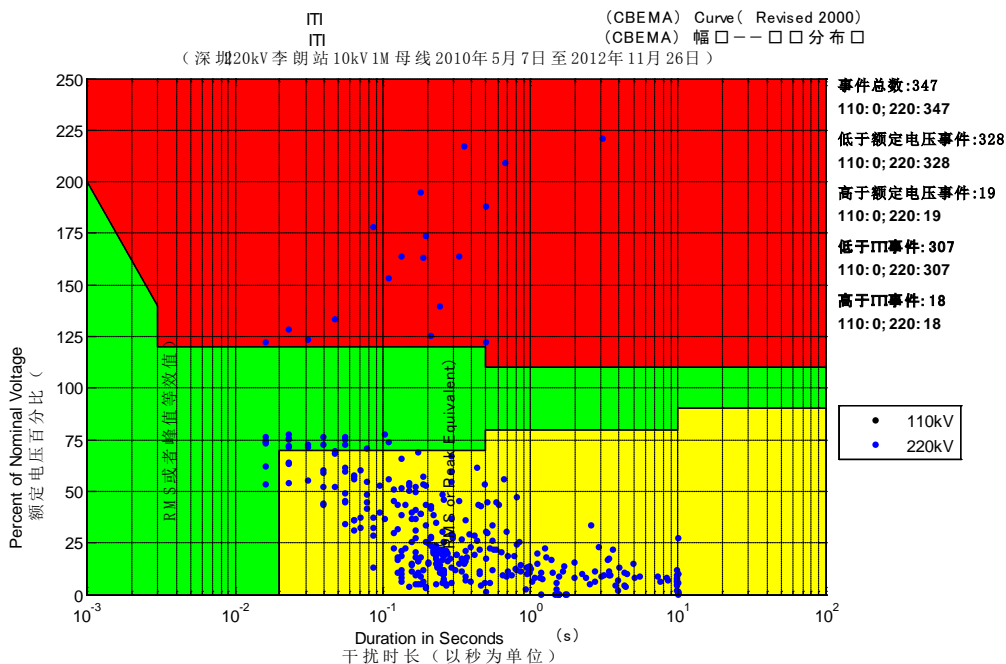


图 3-9 李朗站 10kV1M 母线的 ITI(CBEMA)图

Fig. 3-9 ITI(CBEMA) chart of 10kV 1M bus of Lilang substation

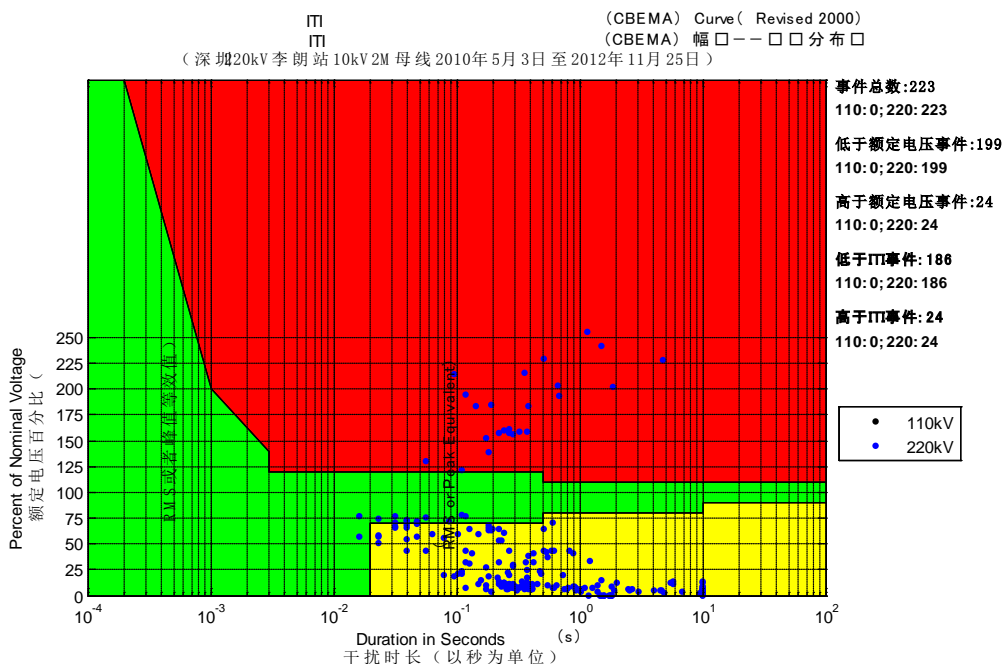


图 3-10 李朗站 10kV2M 母线的 ITI(CBEMA)图

Fig. 3-10 ITI(CBEMA) chart of 10kV 2M bus of Lilang substation

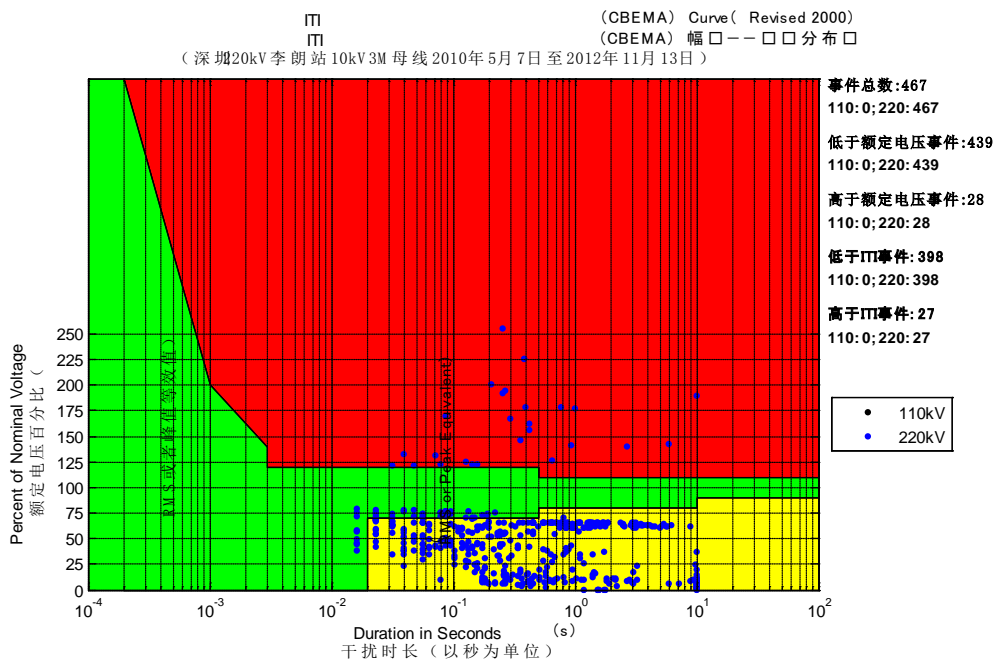


图 3-11 李朗站 10kV3M 母线的 ITI(CBEMA)图

Fig. 3-11 ITI(CBEMA) chart of 10kV 3M bus of Lilang substation

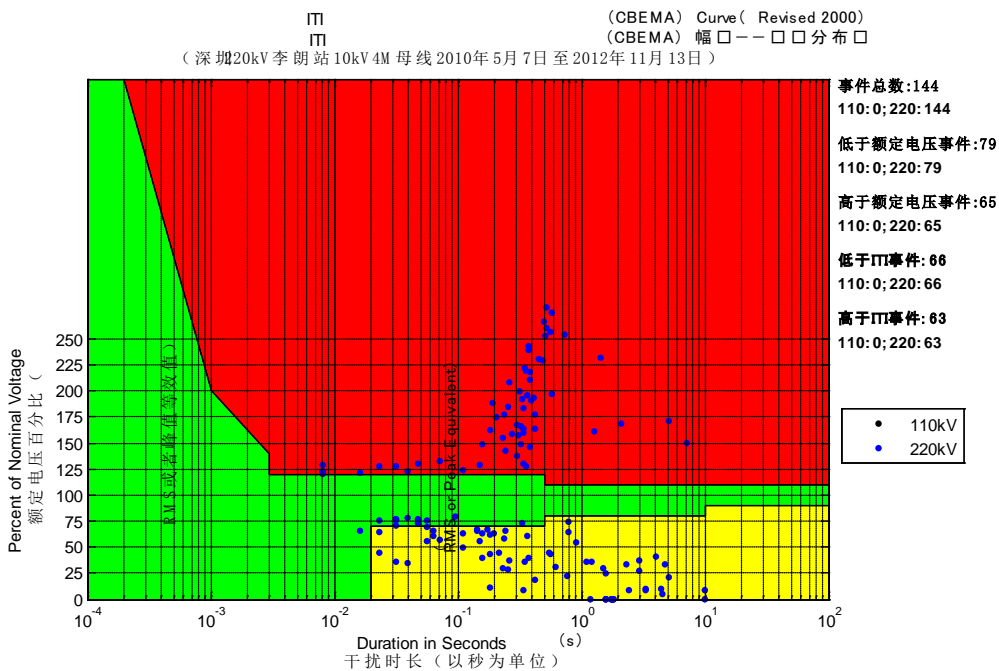


图 3-12 李朗站 10kV4M 母线的 ITI(CBEMA)图

Fig. 3-12 ITI(CBEMA) chart of 10kV 4M bus of Lilang substation

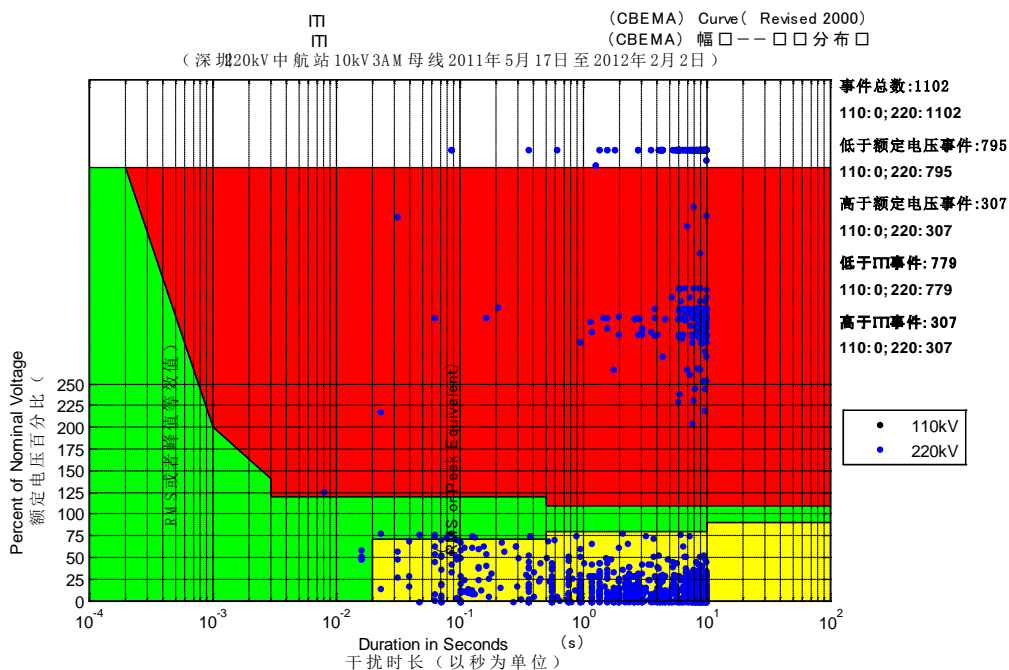


图 3-13 中航站 10kV3AM 母线的 ITI(CBEMA)图

Fig. 3-13 ITI(CBEMA) chart of 10kV 3AM bus of Zhonghang substation

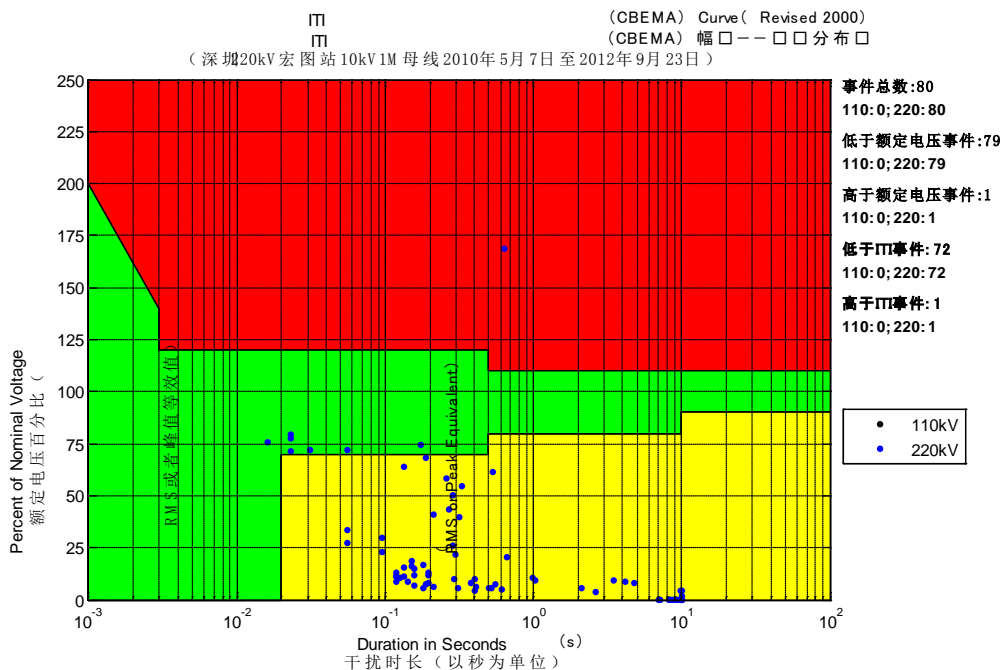


图 3-14 宏图站 10kV1M 母线的 ITI(CBEMA)图

Fig. 3-14 ITI(CBEMA) chart of 10kV 1M bus of Hongtu substation

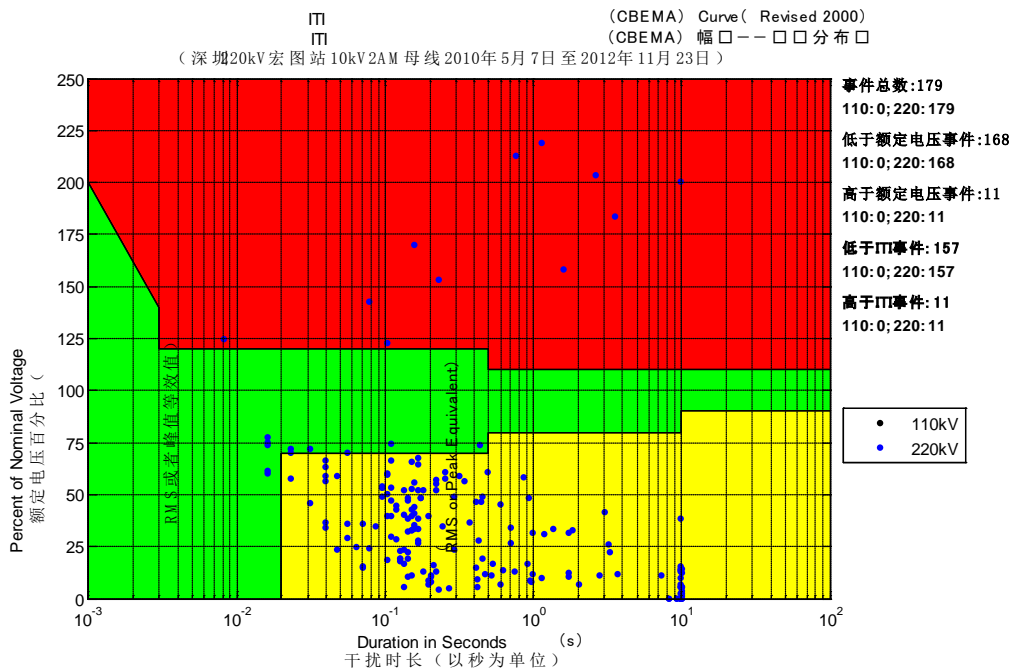


图 3-15 宏图站 10kV2AM 母线的 ITI(CBEMA)图

Fig. 3-15 ITI(CBEMA) chart of 10kV 2AM bus of Hongtu substation

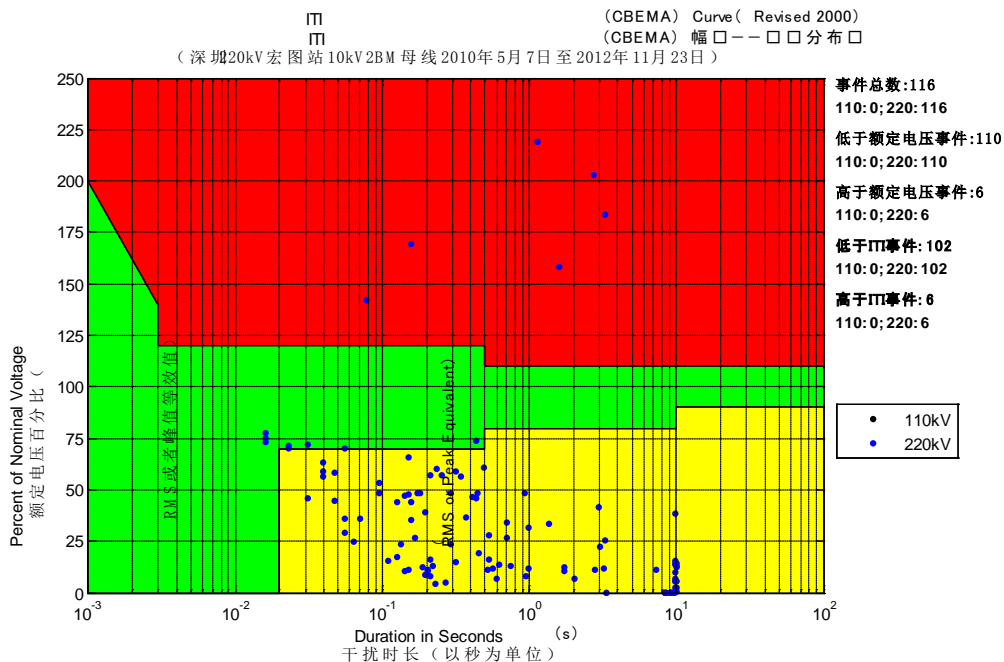


图 3-16 宏图站 10kV2BM 母线的 ITI(CBEMA)图

Fig. 3-16 ITI(CBEMA) chart of 10kV 2BM bus of Hongtu substation

上述三个变电站下各 10kV 母线上的 ITI(CBEMA)图中电压暂降事件的统计分析结果如下表 3-7 所示:

表 3-7 基于数据清洗的深圳市 110kV 重点变电站电压暂降事件的统计分析
Table 3-7 Statistic analysis based on data cleaning for voltage sag of 110kV main substations in Shenzhen

变电站	母线	<额定电压	<ITI(CBEMA)	所属中心站	具体地理位置
220kV 宏图站	1M	79	72	马坳	龙岗区宝龙工业区 宝坪路比亚迪厂旁 边山边
	2AM	168	157		
	2BM	110	102		
220kV 李朗站	1M	328	307	深圳	深圳市龙岗区布澜 路珠宝工业园旁
	2M	199	186		
	3M	439	398		
	4M	79	66		
220kV 中航站	1M	0	0	默林	福田区中航路 46 号(福田供电局)
	2M	0	0		
	3AM	795	779		
	3BM	0	0		

由所选的 220kV 李朗站、中航站和宏图站下 10kV 母线上的电压暂降事件的统计分析结果可知:中航站下的 10kV3AM 母线上发生的电压暂降事件最多,其中小于额定电压事件达到 795 次,而小于 ITI(DBEMA)的事件则达到 779 次。另外,由于宏图站下 10kV 的 1M 母线下的 F19 馈线和 2BM 母线下的 F20 馈线分别为曾有多次投诉记录的意法半导体制造(深圳)有限公司和深圳方正微电子有限公司的主要供电线路,为此应给予特别关注,其上小于额定电压的电压暂降事件分别为 79 次和 110 次,而小于 ITI(DBEMA)的事件分别为 72 次和 102 次。

3.7 本章小节

电能质量监测系统产生的海量数据由于多种原因在正确性和一致性等方面存在种种问题,甚至可能产生误导。若不能对电能质量监测数据进行有效的整理

和剔除，就无法准确反映实际电能质量问题的严重性。

因此，本章提出数据清洗技术并将其应用于电能质量监测数据的处理，以为今后进一步的高级分析应用奠定基础。结合深圳电网的实际情况，采集电能质量监测系统的相关数据，对其中的基础数据进行了深入研究，并通过实际案例分析得到的数据清洗前后的效果对比，验证了数据清洗的必要性，从而为工程实际中电能质量问题的进一步分析和治理提供了有益借鉴。

第4章 基于提升小波的电能质量扰动检测 分析研究

4.1 引言

电能质量是现代电力系统中的一项重要课题，正受到越来越广泛的关注和重视。其中，由扰动引起的短时电压改变是工程实际中经常出现的突出问题，因此，准确地识别扰动对于暂态电能质量问题的有效解决具有十分重要的意义。

提升小波变换，作为经典小波的延续和发展，可完全在时域进行而不必依赖于计算量较大的卷积运算，从而为算法的硬件实现提供了很好的基础和平台。同时，提升框架中对提升算子的自由选取，也使得小波的构造更为方便、灵活，可更好地满足实际分析的需要。

基于提升小波分析的上述特点，本章将其与小波模极大值方法相结合来实现对电能质量扰动的定位。在分析过程中，特别就小波函数选取和扰动起止时间这两个因素分别对扰动识别结果有何影响的问题，通过电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型电能质量暂态事件的仿真实例分析，进行了探讨性研究。

4.2 基于提升算法的小波构造

4.2.1 提升框架

引理^[35]：给定一组初始的有限双正交滤波器组 $\{h, \tilde{h}^0, g^0, \tilde{g}\}$ ，则通过如下步骤，可得到一组新的有限双正交滤波器组 $\{h, \tilde{h}, g, \tilde{g}\}$ 为：

$$\tilde{h}(w) = \tilde{h}^0(w) + s(2w)\tilde{g}(w) \quad (4-1)$$

$$g(w) = g^0(w) - s^*(2w)h(w) \quad (4-2)$$

式中， $s(w)$ 为三角多项式，也称为提升算子。由此可知：经过一步提升，滤波器 h 和 \tilde{g} 仍与提升前相同；而滤波器 \tilde{h} 和 g 将发生改变。

同理，给定初始的有限双正交滤波器组 $\{h, \tilde{h}^0, g^0, \tilde{g}\}$ ，则经过一次对偶提升，可得到一组新的有限双正交滤波器组 $\{h, \tilde{h}, g, \tilde{g}\}$ ：

$$h(w) = h^0(w) + \overline{s(2w)}g(w) \quad (4-3)$$

$$\tilde{g}(w) = \tilde{g}^0(w) - \overline{s^*(2w)}h(w) \quad (4-4)$$

式 4-4 中， $s^*(w)$ 为对偶提升算子。因此，经过一步对偶提升，滤波器 \tilde{h} 和 g 仍与提升前相同；而滤波器 h 和 \tilde{g} 将发生改变。

提升框架^[35]：给定一组初始双正交尺度函数和小波 $\{\varphi, \tilde{\varphi}^0, \psi^0, \tilde{\psi}^0\}$ ，则通过如下步骤，可得到新的双正交尺度函数和小波 $\{\varphi, \tilde{\varphi}, \psi, \tilde{\psi}\}$ 如下：

$$\psi(x) = \psi^0(x) - \sum_k s_k \varphi(x-k) \quad (4-5)$$

$$\tilde{\varphi}(x) = 2 \sum_k \tilde{h}_k^0 \tilde{\varphi}(2x-k) + \sum_k s_{-k} \tilde{\psi}(x-k) \quad (4-6)$$

$$\tilde{\psi}(x) = 2 \sum_k \tilde{g}_k \tilde{\varphi}(2x-k) \quad (4-7)$$

以上公式中，对 s_k 可任意选择。由式（4-5）可以看出：经过提升之后，尺度函数 $\varphi(x)$ 并未发生变化，因此，通过对 s_k 加以设计，就可以使经过提升后的小波函数具有某些期望的特性，如增加小波的消失矩阶数或使小波逼近特定的波形。

4.2.2 基于插值细分的预测算子和更新算子设计方法

小波变换的基本思想在于挖掘信号数据间的相关性从而构建信号的稀疏表征^[69]。2000年, Sweldens等在研究插值细分过程中的新样本预测问题时提出:当局部已知样本满足某一多项式关系时,选用合适的多项式将使预测得到的小波系数为零,并进而系统地讨论了应用线性细分、均值插值和B样条细分来获取动态节点数值的具体过程^[70]。线性插值和三次插值的实现过程如下图4-1所示:

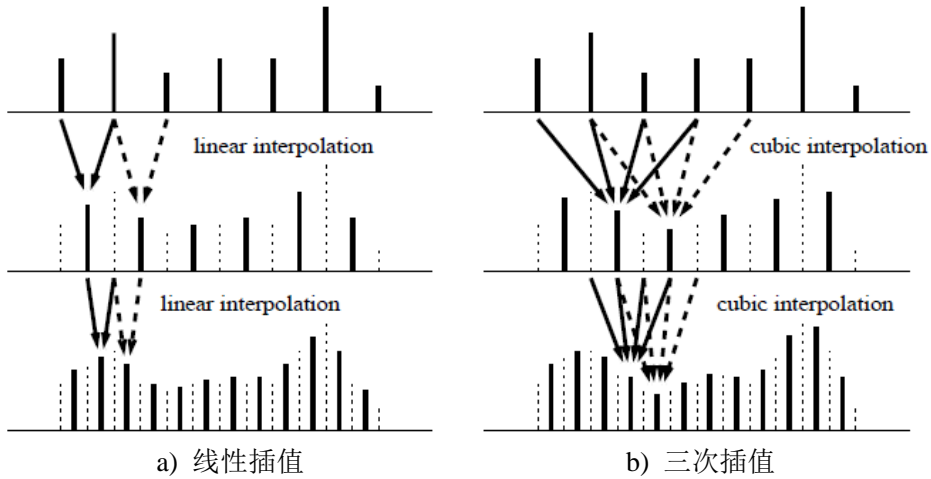


图 4-1 插值过程的示意图

Fig. 4-1 Diagram of interpolation process

Lagrange 插值多项式^[71]: 设函数 $y = f(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上有定义, 且已知在点 $a \leq x_0 < x_1 < \dots < x_N \leq b$ 上的值 y_0, y_1, \dots, y_N , 若存在一个次数不超过 N 的多项式 $L_n(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$, 使其满足:

$$L_n(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, N \quad (4-8)$$

则称 $L_n(x)$ 为 $f(x)$ 的 n 次 Lagrange 插值多项式, 称点 $x_i (i = 0, 1, \dots, N)$ 为插值节点, 称式 4-8 为插值条件, 并且有:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^N y_i L_{n,i}(x) \quad (4-9)$$

$$\text{式中 } L_{N,i}(x) = \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^N \frac{x - x_i}{x_k - x_i}。$$

根据 Lagrange 插值定理, 对于一个已知的插值点 x , $L_{N,i}(x)$ 是常数, 与函数值 y_i 无关, 插值点 x 对应的函数值是已知的 $N+1$ 个函数值 y_0, y_1, \dots, y_N 的线性组合。令 $P_i = L_{N,i}(x)$, x 处对应的函数值为 y , 则有:

$$y = \sum_{i=0}^N p_i y_i \quad (4-10)$$

由此说明: 新的函数值是由已知的一组函数值预测得到的。在插值细分过程中, 均是由已知样本点根据某一多项式来预测获取新的样本点处的样本值。在不考虑边界问题时, 令已知样本点为 x_1, x_2, \dots, x_M , 且各样本点对应的数值为 y_1, y_2, \dots, y_M , 其中 $M = 2m, m \in N$ 为样本点数。若所有的已知样本为等间隔均匀分布, x_k 为任意的起始位置, 则新的样本点 x' 位于该组样本点的中间位置为 $x' = x_k + (1+M)/2$, 从而可得预测算子的计算公式如下^[54]:

$$p_i = L_{n,i}(x) = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^M \frac{(M+1)/2 - i}{k - i} \quad (4-11)$$

对于更新算子的设计, 令其长度为 \tilde{M} ; 则当 $M \geq \tilde{M}$ 时, 将预测算子系数除以二便得到更新算子系数^[35]。

根据 Lagrange 插值算法, 分别取预测算子和更新算子的长度为 (2, 2)、(4, 4)、(6, 6) 和 (8, 8), 得到对应构造的四种小波如下图 4-2 所示:

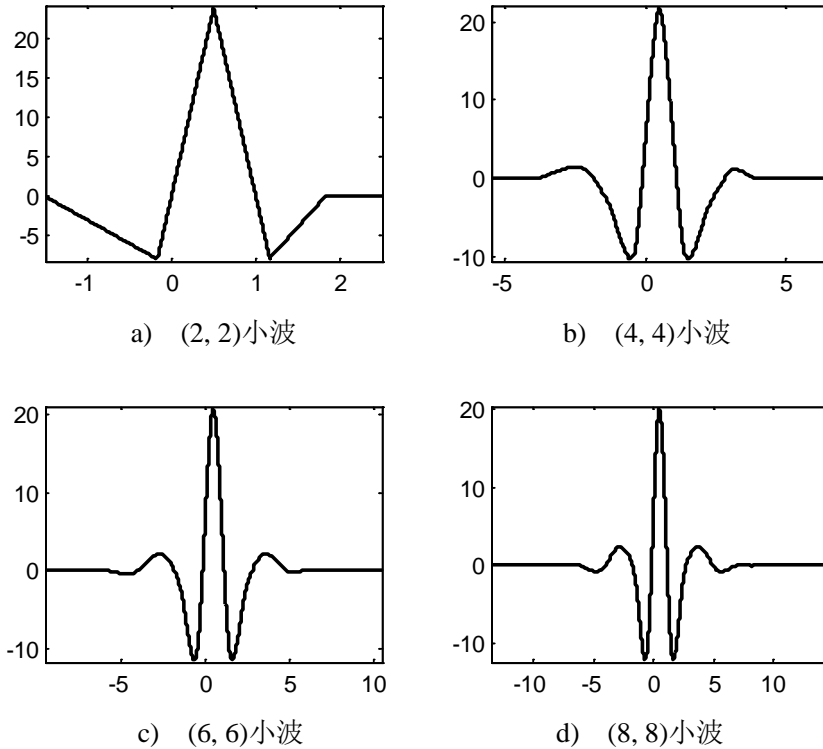


图 4-2 基于 Lagrange 插值算法构造的四种提升小波

Fig. 4-2 Four lifting wavelets constructed based on Lagrange interpolation

在插值细分算法中，新样本点的数值是通过对称地选用相邻的已知样本点构造插值多项式来求取的，并且选用的已知样本点数越多，构造的插值多项式的阶数就越高。而由插值细分算法构造的小波也具有对称性，如上图 4-2 所示。

4.3 基于不同小波的扰动识别分析

如上节所述，当选用不同长度的预测算子和更新算子时，对应构造的小波也具有不同的消失矩。而应用不同的小波对信号进行分析处理时，所得到的结果也很可能不尽相同。因此，本节拟采用不同的小波函数结合模极大值法分别对电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型电能质量暂态事件的仿真信号进行分析，并对比和探讨不同小波对扰动识别的影响。

在本章的仿真信号中，对 2.1 节式 (2-1) 中的各个参数依次取为： f_c 为 50Hz； φ 为 0； A 对电压暂升事件取为 1.35，对电压暂降事件取为 0.5，对短时电压中断

事件取为 0.06。

另外，为加强分析的可比性，考虑随机选取具有不同起止时间的三种典型暂态事件进行扰动识别分析。三种仿真信号的起止时间参数如下表 4-1 所示：

表 4-1 三种仿真信号的起止时间参数

Table 4-1 Start and end time parameters of three simulation signals

仿真信号	电压暂升	电压暂降	短时电压中断
开始时间(s)	0.3681	0.2506	0.5643
结束时间(s)	0.6424	0.4890	0.7057

基于上表 4-1 中参数的三种暂态事件的仿真信号如图 4-3 所示：

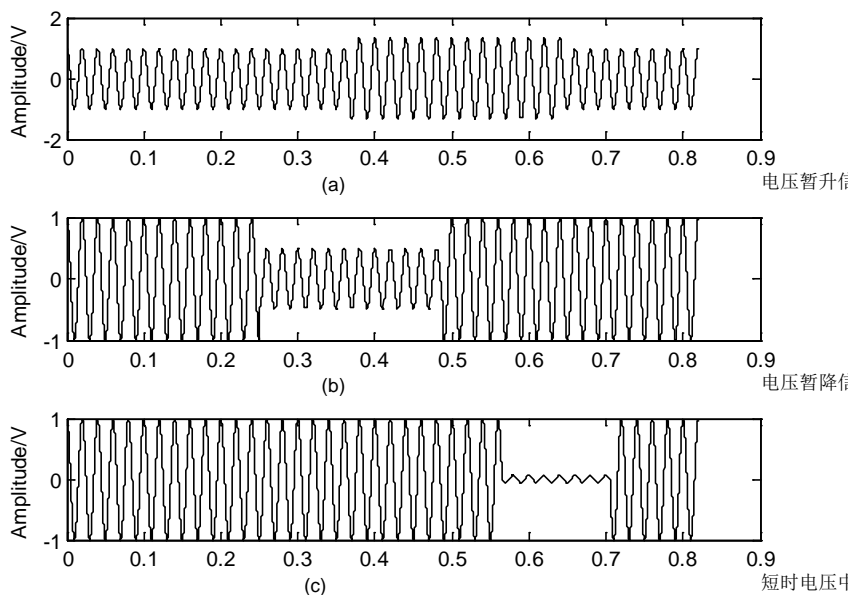


图 4-3 具有不同起止时间的三种典型电能质量暂态事件的仿真信号：

(a) 电压暂升信号；(b) 电压暂降信号；(c) 短时电压中断信号

Fig. 4-3 Three simulation signals of typical power quality transient events with distinct start and end time: (a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

从图 4-3 中可以看到：具有不同起止时间的扰动使理想电源电压发生了短时改变，并依次得到了电压暂升、电压暂降和短时电压中断的仿真信号，但从三个信号中均无法判别出扰动发生和结束的准确时间。

分别应用预测算子和更新算子长度为 (4, 4)、(8, 8) 构造的两种小波对上述三种暂态事件的仿真信号进行三层分解, 并取第一尺度下的细节信号进行模板大值分析来进行扰动定位, 得到相应的分析结果如图 4-4 和图 4-5 所示:

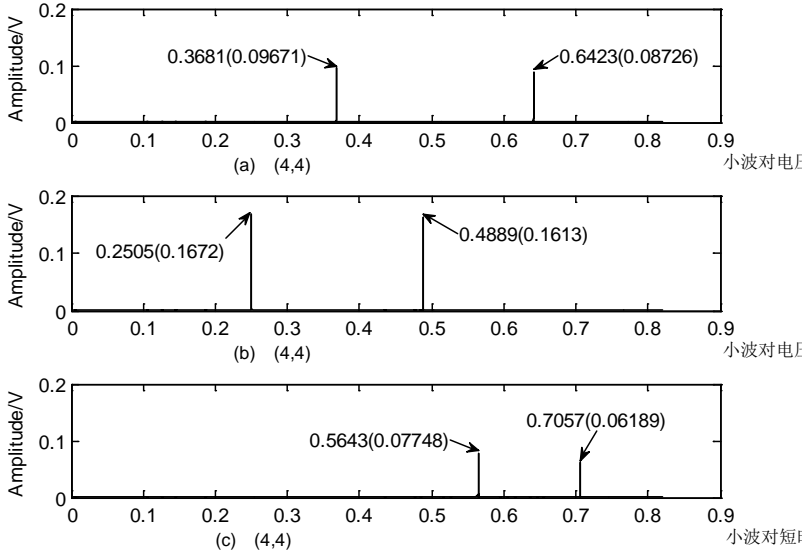


图 4-4 (4, 4)小波对三种暂态事件的分析结果

Fig. 4-4 Analysis results of (4,4) wavelet for three typical transient events

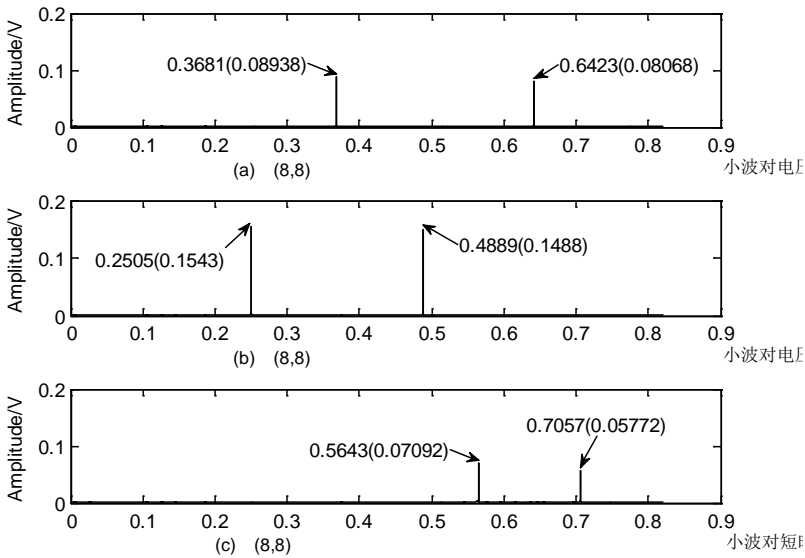


图 4-5 (8, 8)小波对三种暂态事件的分析结果

Fig. 4-5 Analysis results of (8,8) wavelet for three typical transient events

上图 4-4、图 4-5 中分析结果的重要数据如下表 4-2 所示：

表 4-2 (4, 4)、(8, 8)小波分别对三种暂态事件的扰动定位结果

Table 4-2 Disturbance location results of (4, 4), (8, 8) wavelets for three transient events

小波函数	仿真信号	开始时间(s)	幅值	结束时间(s)	幅值
(4, 4)小波	电压暂升	0.3681	0.09671	0.6423	0.08726
(8, 8)小波		0.3681	0.08938	0.6423	0.08068
(4, 4)小波	电压暂降	0.2505	0.1672	0.4889	0.1613
(8, 8)小波		0.2505	0.1543	0.4889	0.1488
(4, 4)小波	短时电压中断	0.5643	0.07748	0.7057	0.06189
(8, 8)小波		0.5643	0.07092	0.7057	0.05772

由表 4-2 析结果可知，应用预测算子和更新算子长度分别为 (4, 4)、(8, 8) 所构造的两种小波对扰动下的三种典型电能质量暂态事件进行分析，在对扰动起止时间的定位上，两者的分析结果完全一致；但在对扰动起止时间定位点的幅值上，两者的分析结果则完全不同；总体而言，应用 (4, 4) 小波获得的定位点幅值要大于应用 (8, 8) 小波获得的定位点幅值。由此可得到该仿真实例的初步结论为：(4, 4)、(8, 8) 小波在对扰动时间的定位上具有一致的分析效果，但在对定位点幅值上的分析效果则有所差别。

4.4 不同起止时间下的扰动识别分析

对扰动起止时间的准确判断是电能质量扰动识别中的重点问题。那么，发生和结束在不同时间的扰动对于其最终的识别难度和识别精度是否会有所影响呢？本节即针对这一问题，拟通过应用提升小波变换结合模极大值方法对电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型暂态事件的分析，探讨起止时间对最终扰动识别结果的影响。

在接下来的仿真实例中，考虑随机选取多个具有不同起止时间的扰动以进行对比分析。同时，为加强分析结果的可比性，任取一组扰动令其开始时间均相同而结束时间逐渐变化：令一组四个扰动的开始时间均为 0.2581s 而结束时间分别为 0.3215s、0.3225s、0.3235s 和 0.3245s，则根据式 (2-1) 可得到三种暂态事件在该组扰动下各自的仿真信号分别如图 4-6 至图 4-8 所示：

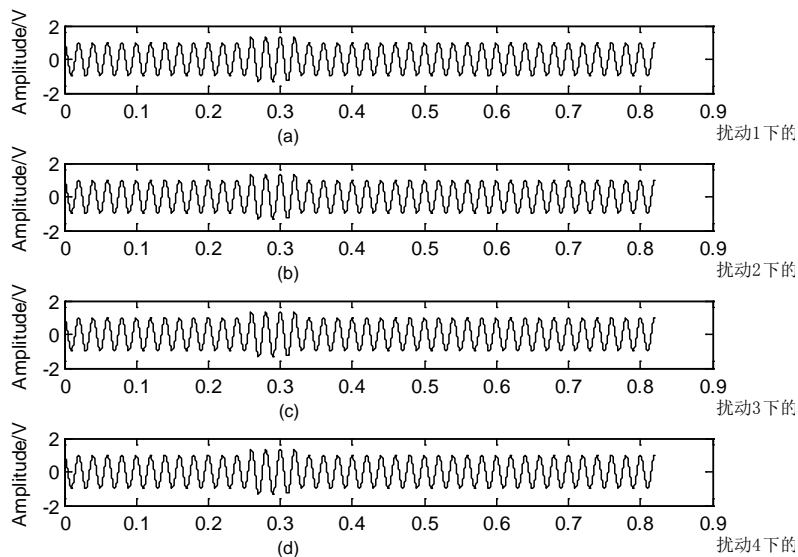


图 4-6 第一组扰动下的电压暂升仿真信号

Fig. 4-6 Simulated signals of voltage swell for the first group of disturbance

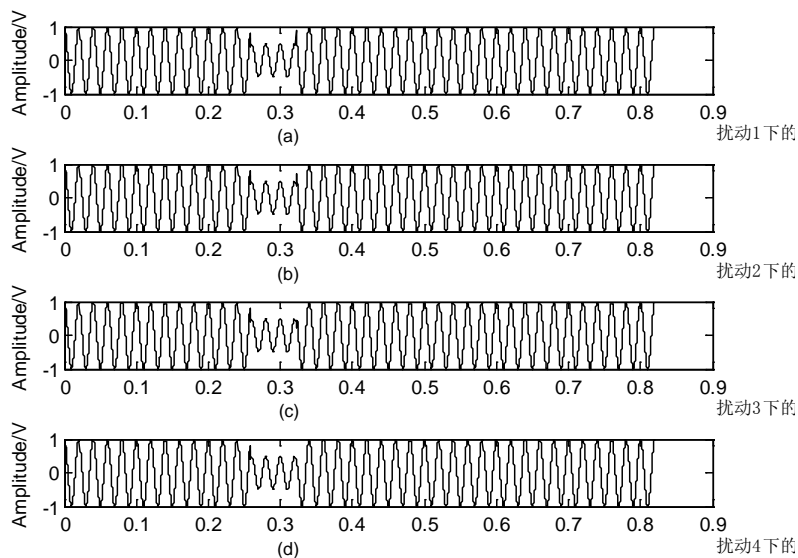


图 4-7 第一组扰动下的电压暂降仿真信号

Fig. 4-7 Simulated signals of voltage sag for the first group of disturbance

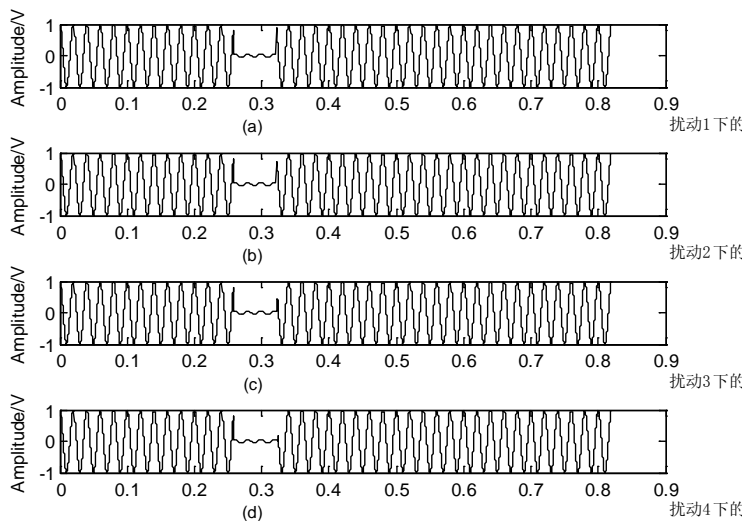


图 4-8 第一组扰动下的短时电压中断仿真信号

Fig. 4-8 Simulated signals of voltage interruption for the first group of disturbance

由图 4-6 至图 4-8 可以看到：对于该组四个扰动下的三种典型暂态事件，虽然在三个图各自的四个子图（a）至（d）中均可看到：在扰动发生时间信号突变的幅值有所不同，但仍无法准确判断该组四个扰动在发生时间上的差异。应用提升小波对三种暂态事件的仿真信号进行三层分解，并取第一尺度下的细节信号进行模极大值分析来实现扰动的定位，得到相应的分析结果如图 4-9 至图 4-11 所示：

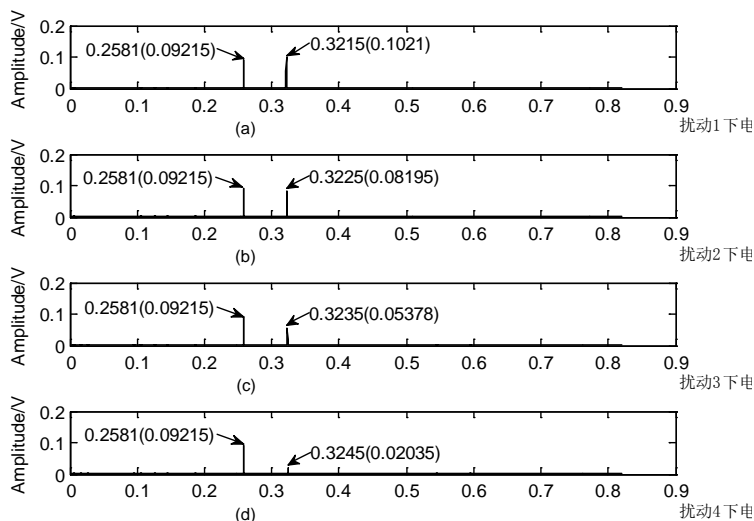


图 4-9 电压暂升仿真信号的第一组扰动识别结果

Fig. 4-9 Analysis results of simulated signals of voltage swell for the first group of disturbance

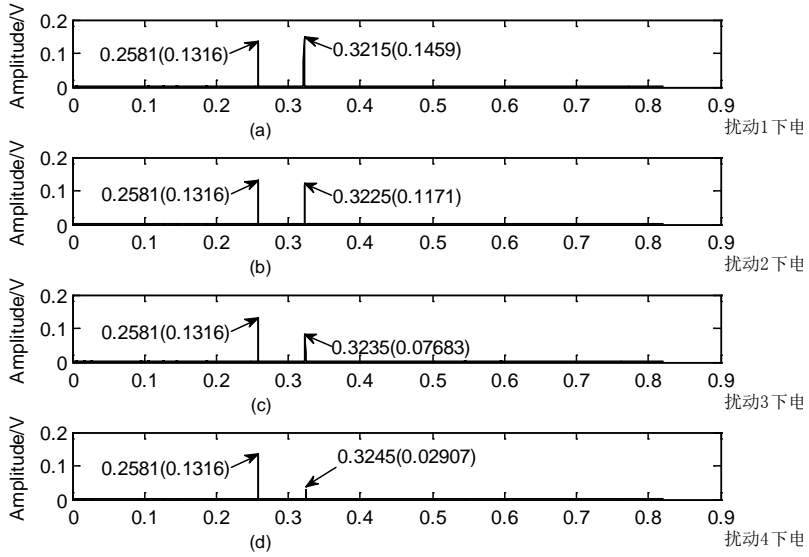


图 4-10 电压暂降仿真信号的第一组扰动识别结果

Fig. 4-10 Analysis results of simulated signals of voltage sag for the first group of disturbance

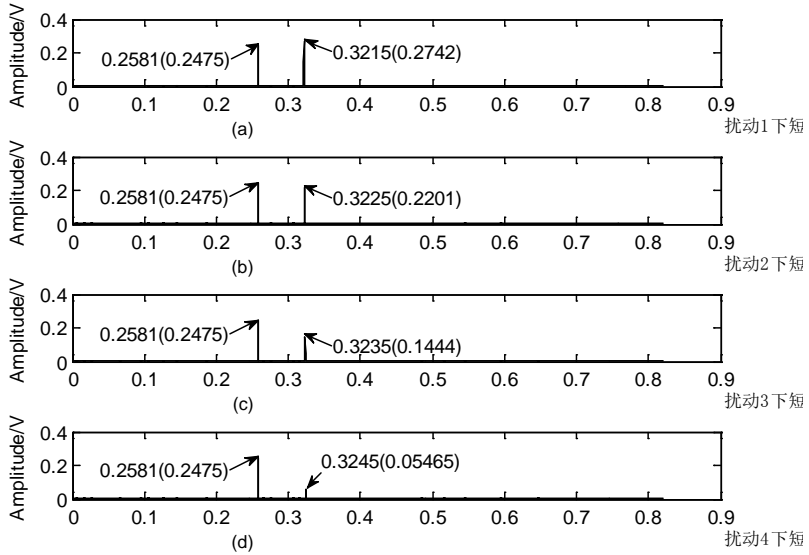


图 4-11 短时电压中断仿真信号的第一组扰动识别结果

Fig. 4-11 Analysis results of simulated signals of voltage interruption for the first group of disturbance

由图 4-9 至图 4-11 可知：通过提升小波结合模极大值法可准确检测出扰动的发生和结束时间。另外，对于电压暂升、电压暂降和短时电压中断这三种典型暂态事件，在对扰动时间的定位上，三者的分析结果一致：开始时间均为 0.2581s，结束时间均依次为 0.3215s、0.3225s、0.3235s、0.3245s；而在对开始和结束时间的定位点幅值上，三者则有所差别：对于同一个扰动下得到的定位点幅值，短时电压中断事件的最大，电压暂降事件的次之，电压暂升事件的最小。进一步讨论扰动起止时间对分析结果的影响，对于该组的四个扰动，三种暂态事件的定位点幅值呈现出一致的变化趋势，即随着扰动结束时间的向后推移，三者对结束时间 0.3215s、0.3225s、0.3235s、0.3245s 的定位点幅值均逐渐减小。

通过对本仿真实例的详细分析可以发现：

(1) 电能质量暂态事件的类型对最终的扰动定位精度没有影响，而仅对定位点的小波模极大值的幅值大小有影响。

(2) 扰动起止时间的变化可使定位点的幅值随之呈现出一定的变化趋势。在本实例中表现为：对于三种暂态事件，定位点的幅值均随着扰动结束时间的向后推移而逐渐减小。

4.5 本章小节

在本章中，采用提升小波结合模极大值的方法来对电能质量暂态事件中的扰动识别问题进行分析。在分析中，通过三种典型暂态事件的仿真实例，探讨了小波函数选取、扰动起止时间这两个因素各自对扰动识别结果的影响。在验证了基于提升算法构造的对称小波对电能质量扰动识别的有效性的同时，也分别从对扰动时间的定位和对扰动时间定位点的幅值这两个方面，得到了小波函数和扰动起止时间两者对于分析结果影响性的初步结论。

第 5 章 冗余提升小波变换在电能质量暂态事件分析中的研究

5.1 引言

当前，与人们日常生活和企业正常运行紧密相关的电能质量问题正日益突出和严重。为达到对电能质量的有效监测，对各种暂态事件的分析是项十分重要的研究课题。

冗余算法，作为针对提升小波变换非平移不变性和其分解过程中的频谱混叠问题而提出的改进方案，具有平移不变性和信息冗余性。通过对提升小波变换中的预测算子和更新算子逐层进行插值补零运算，即可实现冗余提升小波变换。

结合冗余提升小波变换的以上特点，本章将其与小波模极大值方法相结合并应用于电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种主要暂态事件的仿真信号的分析处理。进一步的，详细探讨了不同小波分解尺度和不同扰动起止时间这两个因素对最终分析效果的影响。

5.2 冗余算法

提升小波变换的多相矩阵表示形式如图 5-1 所示^[72]：

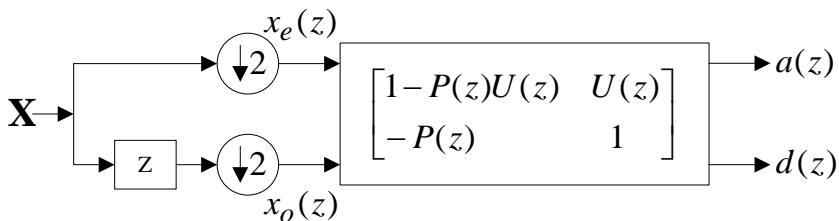


图 5-1 提升小波的多相矩阵表示形式

Fig. 5-1 Expression of multi-phase matrix for lifting wavelet

对图 5-1 作等效易位变换并去掉隔二抽样步骤，对细节信号进行复移位运算，

从而得到冗余提升小波的变换矩阵如式 5-1:

$$\begin{bmatrix} a(z) \\ d(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & zU(z^2) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -z^{-1}P(z^2) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X(z) \\ X(z) \end{bmatrix} \quad (5-1)$$

取 $P_{new} = z^{-1}P(z^2)$ 和 $U_{new} = zU(z^2)$ 分别为冗余提升小波的预测算子和更新算子, 则可得到冗余提升小波变换的正变换分解和逆变换重构过程, 具体可通过引入 *à trous* 算法来实现: 首先, 计算获取初始的预测算子系数 $P_{ini} = \{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 和更新算子系数 $U_{ini} = \{u_1, u_2, \dots, u_{\tilde{N}}\}$ (其中, N 和 \tilde{N} 分别为预测算子长度和更新算子长度); 然后, 对 P_{ini} 和 U_{ini} 进行插值补零得到 $P_{ini} = \{p_1, 0, p_2, 0, \dots, 0, p_N\}$ 和 $U_{ini} = \{u_1, 0, u_2, 0, \dots, 0, u_{\tilde{N}}\}$; 对于第 j 层分解, 在初始预测系数和更新系数之间插入 $2^j - 1$ 个零值, 逐层依此进行, 得到各个尺度下用于进行提升小波分解的不同的预测算子和更新算子, 从而实现冗余算法。经冗余提升小波分解得到各尺度下的低频逼近信号和高频细节信号的样本长度均相同, 且与初始信号的长度亦相同。

5.3 分解尺度对分析效果的影响

为探讨冗余提升小波变换在电能质量暂态事件分析中的有效性, 本节根据实际情况拟采用电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种最典型暂态事件的仿真信号来进行分析。在本章的仿真信号中, 对 2.1 节式 (2-1) 中的各个参数依次取为: f_c 为 50Hz; φ 为 0; A 对电压暂升事件取为 1.25, 对电压暂降事件取为 0.5, 对短时电压中断事件取为 0.05。

在小波分析中, 对分解尺度的选取一直是一个被重点讨论的问题。选用不同的分解尺度以及由此得到的对应的逼近信号和细节信号可能会对分析效果产生很大的影响。因此, 本节拟采用不同的小波分解尺度结合模极大值方法对三种典型暂态事件进行分析。

在接下来的分析中, 分别取第一尺度和第二尺度下的高频细节信号 d_1 和 d_2 进行对比, 以探讨不同分解尺度对三种典型电能质量暂态事件的扰动识别的影响。

(1) 电压暂升：令扰动的起止时间分别为 0.1235s 和 0.243s，得到分析结果如图 5-2 所示：

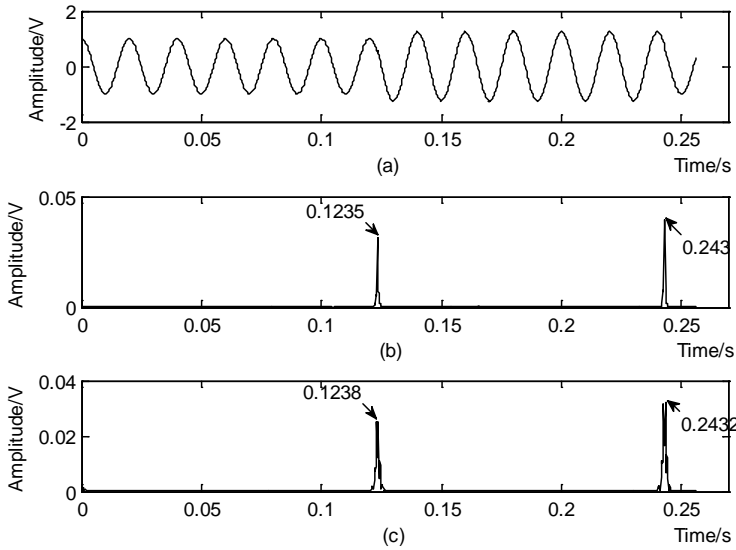


图 5-2 电压暂升事件分析：

(a) 电压暂升仿真信号的时域图；(b) d_1 的分析结果；(c) d_2 的分析结果

Fig. 5-2 Analysis of voltage swell event: (a) Time domain chart of voltage swell simulation signal; (b) Analysis result of d_1 ; (c) Analysis result of d_2

由图 5-2 可得 d_1 、 d_2 分别对扰动检测结果和与实际情况的相对误差，如表 5-1：

表 5-1 不同分解尺度对电压暂升事件的分析结果

Table 5-1 Analysis result of distinct decomposition scale for voltage swell event

	开始时间(s)	结束时间(s)	持续时间(s)
实际情况	0.1235	0.243	0.1195
d_1	0.1235	0.243	0.1195
相对误差	0	0	0
d_2	0.1238	0.2432	0.1194
相对误差	0.2429%	0.0823%	0.0837%

从表 5-1 中可以看出：两种分解尺度下的细节信号均可实现对电压暂升事件中扰动的检测。其中， d_1 对扰动的检测结果与实际情况完全相符，而 d_2 的分析结

果则与实际情况存在一定偏差，因此 d_1 的分析效果要好于 d_2 的分析效果。

(2) 电压暂降：令扰动起止时间分别为 0.05575s 和 0.1165s，得到分析结果如图 5-3 所示：

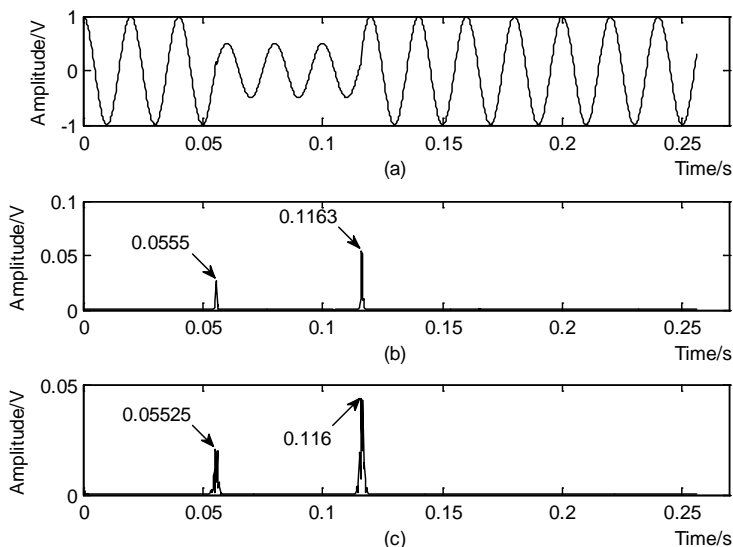


图 5-3 电压暂降事件分析：

(a) 电压暂降仿真信号的时域图；(b) d_1 的分析结果；(c) d_2 的分析结果

Fig. 5-3 Analysis of voltage sag event: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of d_1 ; (c) Analysis result of d_2

由图 5-3 可得 d_1 、 d_2 分别对扰动检测结果和与实际情况的相对误差，如表 5-2：

表 5-2 不同分解尺度对电压暂降事件的分析结果

Table 5-2 Analysis result of distinct decomposition scale for voltage sag event

	开始时间(s)	结束时间(s)	持续时间(s)
实际情况	0.05575	0.1165	0.06075
d_1	0.0555	0.1163	0.0608
相对误差	0.4484%	0.1717%	0.0823%
d_2	0.05525	0.116	0.06075
相对误差	0.8969%	0.4292%	0

由表 5-2 可知：两种分解尺度下的细节信号均能实现对电压暂降事件中扰动的检测。其中，对于扰动开始和结束时间的检测， d_1 的相对误差分别为 0.4484% 和 0.0823%，其精度要明显高于相对误差分别为 0.8969% 和 0.4292% 的 d_2 。

(3) 短时电压中断：令扰动起止时间分别为 0.0845s 和 0.12625s，得到分析结果如图 5-4 所示：

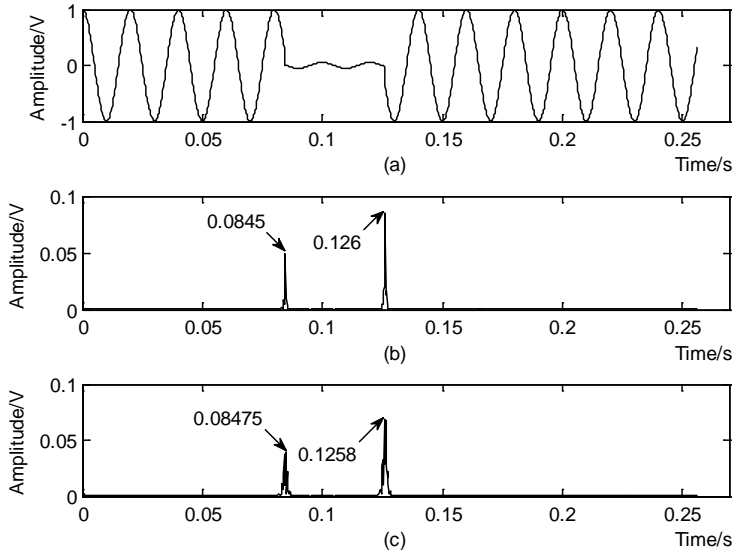


图 5-4 短时电压中断事件分析：

(a) 短时电压中断仿真信号的时域图；(b) d_1 的分析结果；(c) d_2 的分析结果

Fig. 5-4 Analysis of voltage interruption event: (a) Time domain chart of voltage interruption simulation signal; (b) Analysis result of d_1 ; (c) Analysis result of d_2

由图 5-4 可得 d_1 、 d_2 分别对扰动检测结果和与实际情况的相对误差，如表 5-3：

表 5-3 不同分解尺度对短时电压中断事件的分析结果

Table 5-3 Analysis result of distinct decomposition scale for voltage interruption event

	开始时间(s)	结束时间(s)	持续时间(s)
实际情况	0.0845	0.12625	0.04175
d_1	0.0845	0.126	0.0415
相对误差	0	0.198%	0.5988%
d_2	0.08475	0.1258	0.04105
相对误差	0.2959%	0.3564%	1.6766%

由表 5-3 可知：两种分解尺度下的细节信号均能实现对短时电压中断事件中扰动的检测。但在检测中， d_1 、 d_2 的分析结果都与实际情况存在一定偏差；其中，对于扰动起止时间和持续时间的分析， d_1 的相对误差分别为 0%、0.198% 和 0.5988%； d_2 的相对误差分别为 0.2959%、0.3564% 和 1.6766%。由此可得：在该事件的分析中， d_1 的效果要明显好于 d_2 。

综合上述对三种典型电能质量暂态事件仿真信号的分析结果可知：采用冗余提升小波分析方法，可以有效识别和检测出暂态事件中的扰动；另外，小尺度下的细节信号比大尺度下的细节信号具有更好的分析效果。

5.4 扰动起止时间对分析效果的影响

同第 3.4 节，针对“发生和结束在不同时间的扰动是否会对其最终的识别难度和精度有所影响”这一问题，本节拟采用冗余提升小波分析结合模极大值方法，通过对三种典型暂态事件即电压暂升、电压暂降和短时电压中断进行分析，来探讨冗余提升小波分析下起止时间对扰动识别结果的影响。

随机选取具有不同起止时间和持续时间的两组扰动如表 5-4 所示：

表 5-4 两组不同扰动的选取
Table 5-4 Selection of two distinct disturbances

	开始时间 (s)	结束时间(s)	持续时间(s)
扰动 1	0.137	0.177	0.04
扰动 2	0.091	0.2245	0.1335

同时，结合 5.3 节中得到的初步结论即小尺度下的细节信号具有比大尺度下的细节信号更好的分析效果，本节采用第一尺度下的高频细节信号 d_1 来对两组不同扰动分别为扰动 1 和扰动 2 进行识别和检测。分析结果如图 5-5 至图 5-8 所示：

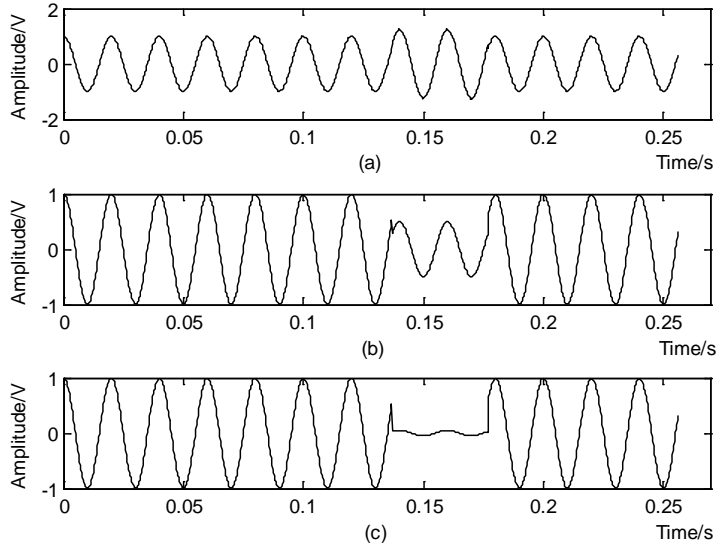


图 5-5 扰动 1 下三种电能质量暂态事件仿真信号的时域图:

(a) 电压暂升; (b) 电压暂降; (c) 短时电压中断

Fig. 5-5 Time domain chart of simulation signals of power quality transient events with disturbance 1: (a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

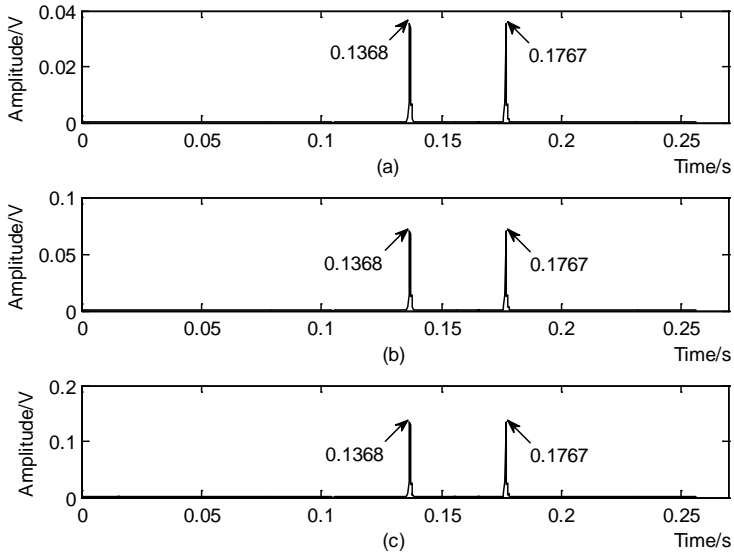


图 5-6 扰动 1 下三种电能质量暂态事件仿真信号的冗余提升小波分析图:

(a) 电压暂升; (b) 电压暂降; (c) 短时电压中断

Fig. 5-6 Analysis chart based on redundant lifting wavelet for simulation signals of power quality transient events with disturbance 1: (a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

从图 5-5、图 5-6 中可以看出：应用冗余提升小波变换对三种暂态事件中起止时间分别为 0.137s 和 0.177s 的扰动 1 进行识别，在对扰动起止时间的定位上，三种暂态事件的分析结果完全一致，均分别为 0.1368s 和 0.1767s；在对扰动起止时间的定位点幅值上，对于三种暂态事件，均有对开始时间的定位点幅值和对结束时间的定位点幅值大小十分接近，两个时间均易于识别。

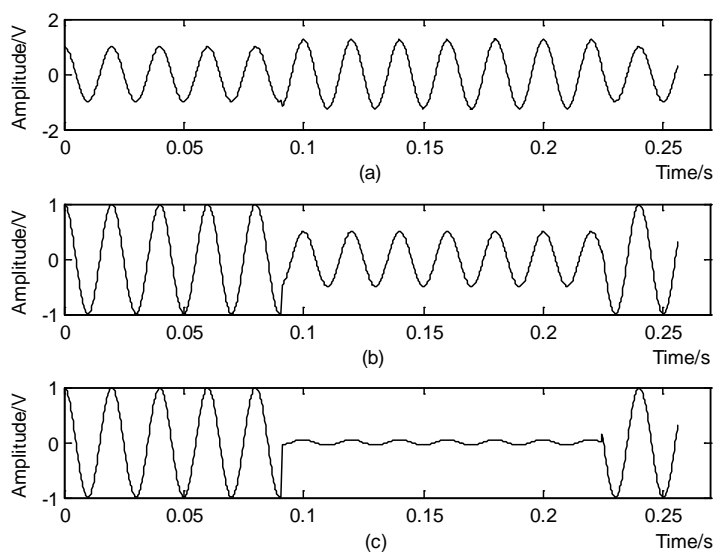


图 5-7 扰动 2 下三种电能质量暂态事件仿真信号的时域图：

(a) 电压暂升；(b) 电压暂降；(c) 短时电压中断

Fig. 5-7 Time domain chart of simulation signals of power quality transient events with disturbance 2: (a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

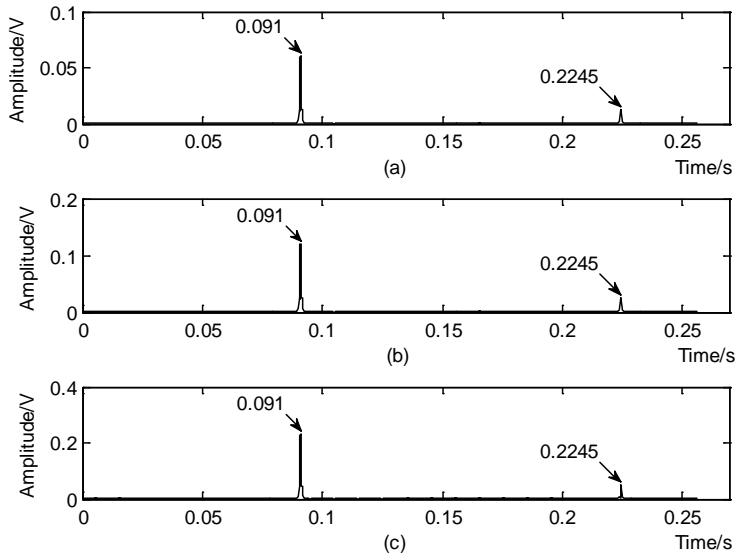


图 5-8 扰动 2 下三种电能质量暂态事件仿真信号的冗余提升小波分析图:

(a) 电压暂升; (b) 电压暂降; (c) 短时电压中断

Fig. 5-8 Analysis chart based on redundant lifting wavelet for simulation signals of power quality transient events with disturbance 2: (a) Voltage swell; (b) Voltage sag; (c) Voltage interruption

由图 5-7、图 5-8 中可知: 应用冗余提升小波变换对三种暂态事件中起止时间分别为 0.091s 和 0.2245s 的扰动 2 进行识别, 在对扰动起止时间的定位上, 三种暂态事件的分析结果仍完全一致, 均分别为 0.091s 和 0.2245s; 但在对扰动起止时间的定位点幅值上, 对于三种暂态事件, 均有对开始时间的定位点幅值和对结束时间的定位点幅值存在很大差距, 前者较大易于识别, 而后者相对较小, 不如前者易于识别。

综合上述分析结果可以推断: 扰动起止时间对于冗余提升小波分析对扰动的准确识别和检测具有一定的影响。

5.5 本章小结

暂态事件分析对于解决电能质量问题具有十分重要的意义。本章将冗余提升小波分析应用于典型暂态事件中扰动的检测和识别, 并通过仿真实例验证了这一方法的有效性。同时, 在分析过程中, 特别探讨了两个因素即小波分解尺度和扰动起止时间各自对最终扰动识别结果的影响, 结合仿真实例, 分别从对扰动时间

的定位和对扰动时间定位点的幅值这两个方面，得到了两个因素对于分析结果影响性的初步结论即：两个因素均能影响最终的分析效果，其中小尺度下的细节信号比大尺度下的细节信号具有更优的扰动检测效果；而不同的扰动起止时间将使得到的定位点幅值有所不同，从而对扰动识别的难易程度产生一定的影响。

第6章 基于小波变换的电能质量扰动识别的影响因素分析研究

6.1 引言

针对现代电力系统中的电能质量扰动识别问题，本章分别采用经典小波、提升小波和冗余提升小波并结合模极大值方法进行分析，对三种算法在扰动检测和识别中的效果进行了对比。考虑到扰动定位精度对电能质量问题有效解决的重要性，特别的，对于可能影响到扰动定位精度的因素例如小波分解尺度、扰动起止时间以及冗余算法，通过对典型电能质量暂态事件的仿真实例分析，探讨了三者各自对最终扰动识别和检测结果的影响性。

6.2 算法对比分析

由于经典小波、提升小波和冗余提升小波的变换过程不同，因此，本节拟采用三种变换并结合小波模极大值方法对暂态电能质量仿真信号进行处理，同时对三种变换在信号奇异性检测中的效果进行对比分析。

在分析中，分别选用电压暂升、电压暂降这两种典型暂态事件作为仿真实例。在本章中，为生成仿真信号，对式(2-1)中的各个参数依次取为： f_c 为50Hz， φ 为0， A 对电压暂升事件取为1.5，对电压暂降事件取为0.6。另外，在小波函数的选取上：对于经典小波，选用较为常用的dbN小波并取N为4；对于提升小波和冗余提升小波，为便于比较，取预测算子和更新算子的长度均为4，从而使构造的小波和db4小波具有相同的消失矩。

随机给定起止时间分别为0.2436s和0.3163s、0.1527s和0.2916s的两组扰动，并取第一尺度下的小波模极大值进行分析，得到结果如下图6-1至图6-4所示：

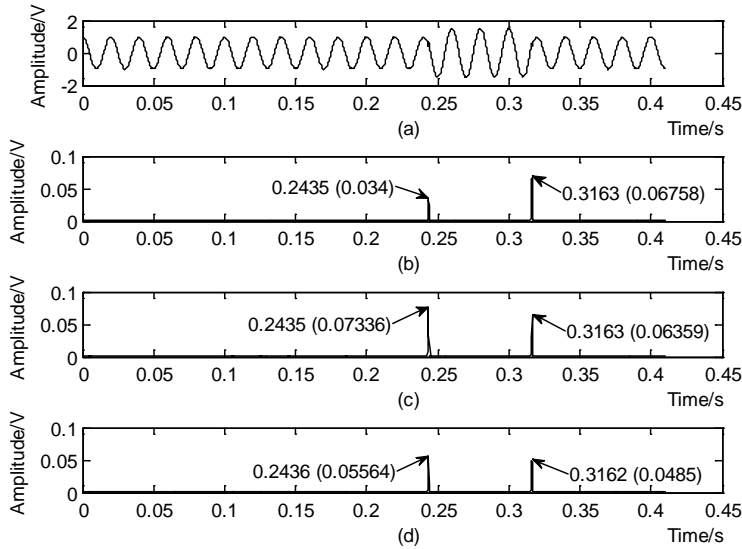


图 6-1 扰动 1 下电压暂升事件的小波分析：(a) 电压暂升仿真信号的时域图；(b) 经典小波的分析结果；(c) 提升小波的分析结果；(d) 冗余提升小波的分析结果

Fig. 6-1 Wavelet analysis of voltage swell for disturb 1: (a) Time domain chart of voltage swell simulation signal; (b) Analysis result of classic wavelet; (c) Analysis result of lifting wavelet; (d) Analysis result of redundant lifting wavelet.

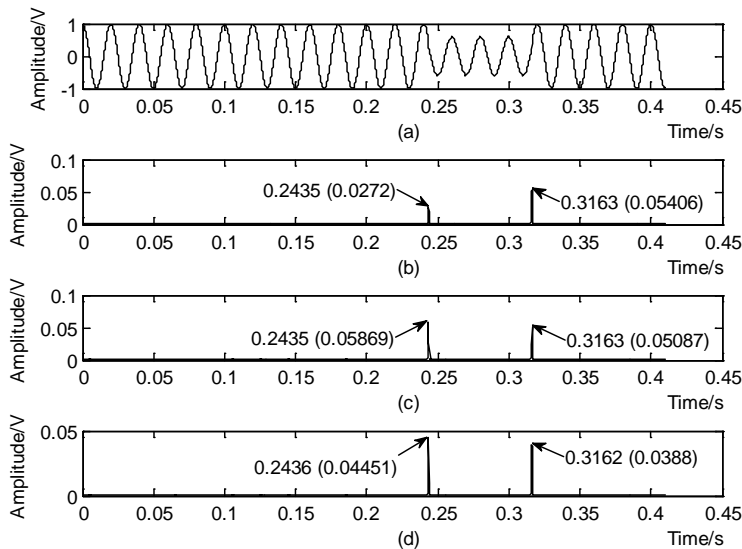


图 6-2 扰动 1 下电压暂降事件的小波分析：(a) 电压暂升仿真信号的时域图；(b) 经典小波的分析结果；(c) 提升小波的分析结果；(d) 冗余提升小波的分析结果

Fig. 6-2 Wavelet analysis of voltage sag for disturb 1: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of classic wavelet; (c) Analysis result of lifting wavelet; (d) Analysis result of redundant lifting wavelet.

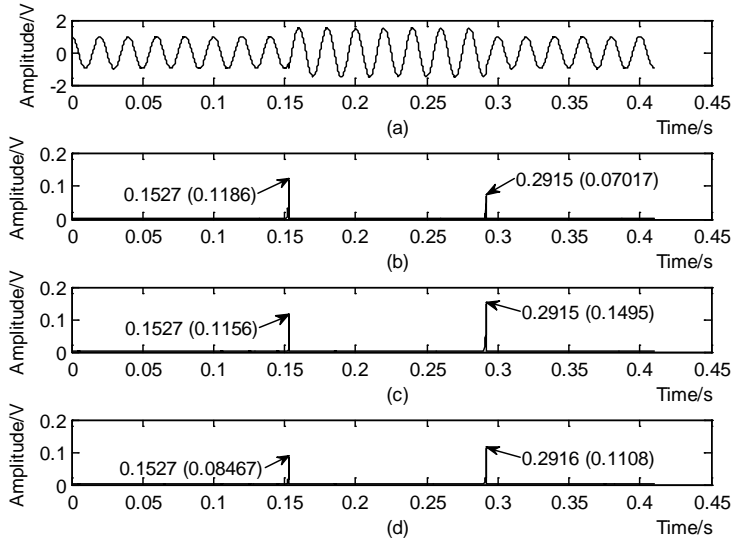


图 6-3 扰动 2 下电压暂升事件的小波分析：(a) 电压暂升仿真信号的时域图；(b) 经典小波的分析结果；(c) 提升小波的分析结果；(d) 冗余提升小波的分析结果

Fig. 6-3 Wavelet analysis of voltage swell for disturb 2: (a) Time domain chart of voltage swell simulation signal; (b) Analysis result of classic wavelet; (c) Analysis result of lifting wavelet; (d) Analysis result of redundant lifting wavelet.

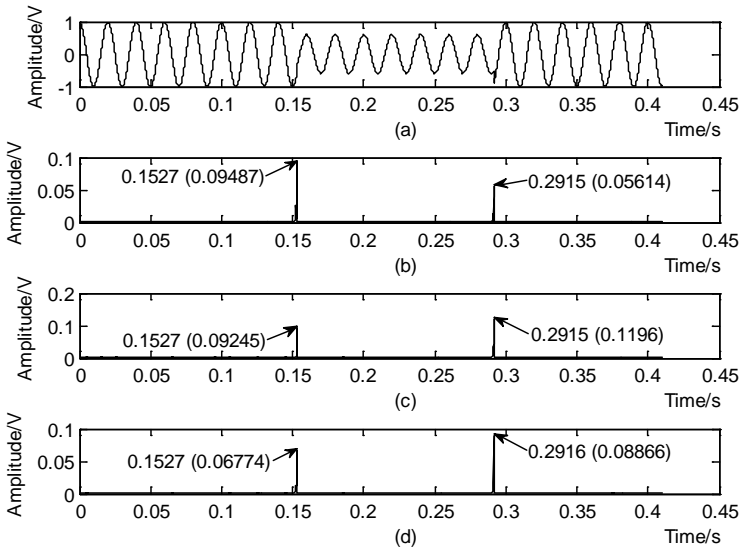


图 6-4 扰动 2 下电压暂降事件的小波分析：(a) 电压暂升仿真信号的时域图；(b) 经典小波的分析结果；(c) 提升小波的分析结果；(d) 冗余提升小波的分析结果

Fig. 6-4 Wavelet analysis of voltage sag for disturb 2: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of classic wavelet; (c) Analysis result of lifting wavelet; (d) Analysis result of redundant lifting wavelet.

根据图 6-1 至图 6-4，得到三种小波变换各自对扰动的识别结果，见表 6-1：

表 6-1 三种小波变换对扰动定位的对比分析

Table 6-1 Comparison analysis for disturbance location with three wavelet transforms

扰动	事件类型	扰动(s)	开始时间	幅值	结束时间	幅值	持续时间
			0.2436		0.3163		0.0727
扰动 1		经典小波	0.2435	0.034	0.3163	0.06758	0.0728
	电压暂升	提升小波	0.2435	0.07336	0.3163	0.06359	0.0728
		冗余提升小波	0.2436	0.05564	0.3162	0.0485	0.0726
		经典小波	0.2435	0.0272	0.3163	0.05406	0.0728
	电压暂降	提升小波	0.2435	0.05869	0.3163	0.05087	0.0728
		冗余提升小波	0.2436	0.04451	0.3162	0.0388	0.0726
			0.1527		0.2916		0.1389
扰动 2		经典小波	0.1527	0.1186	0.2915	0.07017	0.1388
	电压暂升	提升小波	0.1527	0.1156	0.2915	0.1495	0.1388
		冗余提升小波	0.1527	0.08467	0.2916	0.1108	0.1389
		经典小波	0.1527	0.09487	0.2915	0.05614	0.1388
	电压暂降	提升小波	0.1527	0.09245	0.2915	0.1196	0.1388
		冗余提升小波	0.1527	0.06774	0.2916	0.08866	0.1389

由上表 6-1 中的数据，可发现三种小波变换在分析结果上的异同点如下：

对于定位精度，三者对同一扰动下电压暂升和电压暂降两种暂态事件的定位结果与实际值的相对误差相同：对于第一组扰动下的两种暂态事件，三者对开始时间的定位相对误差均依次为 0.0411%、0.0411%、0%；对结束时间的定位相对误差均依次为 0%、0%、0.0316%；对于第二组扰动下的两种暂态事件，三者对开始时间的定位相对误差均依次为 0%、0%、0%；对结束时间的定位相对误差均依次为 0.0343%、0.0343%、0%。由此可知：对扰动的定位精度与扰动起止时间和分析方法有关，而与暂态事件的类型无关。

对于定位点的幅值，三者对同一扰动下电压暂升和电压暂降两种暂态事件的定位点幅值各不相同。但其中仍有共同之处：即无论对于第一组还是第二组扰动，三种小波变换对电压暂升起止时间的定位点幅值均要大于对电压暂降的起止时间的定位点幅值，而定位点幅值越大，则越有利于对扰动的准确识别。由此可知：暂态事件的类型可对定位点的幅值分析产生影响并进而影响到最终的扰动识别。

综合上述分析结果可知：经典小波、提升小波和冗余提升小波变换均可用于信号突变点的有效检测。虽然三者扰动定位的精度上存在一定差异，但整体分析效果相差不大。同时，提升小波和冗余提升小波可完全在时域进行，运算速度相比需借助卷积运算的经典小波有大幅提高，因而更适用于硬件的设计和实现。

6.3 扰动定位精度的影响因素分析

本节中仍将同时采用经典小波、提升小波和冗余提升小波进行分析。考虑到事件类型不影响扰动定位的精度，拟通过工程实际中最常给用户造成困扰的电压暂降事件的仿真信号对小波分解尺度、扰动起止时间和冗余算法三个因素对于扰动定位精度的影响进行详细探讨。

6.3.1 小波分解尺度

任取一组扰动其起止时间分别为 0.0928s 和 0.2742s，应用三种小波变换对仿真信号进行三层分解，并取三个尺度下细节信号 d1、d2 和 d3 的小波模板大值进行对比，所得结果如下图 6-5 至图 6-7 所示：

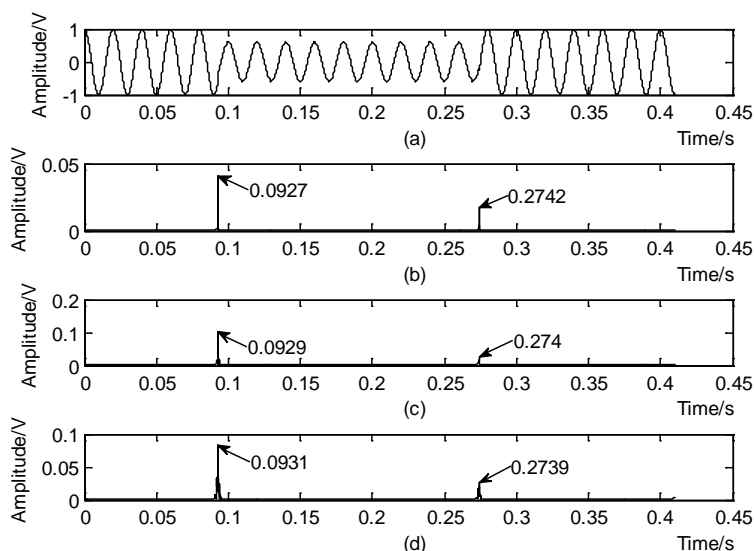


图 6-5 经典小波不同尺度下的扰动定位分析：

(a) 电压暂降仿真信号的时域图；(b) d1 的分析结果；(c) d2 的分析结果；(d) d3 的分析结果

Fig. 6-5 Disturbance location analysis with classic wavelet at distinct scale: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of d1; (c) Analysis result of d2; (d) Analysis result of d3.

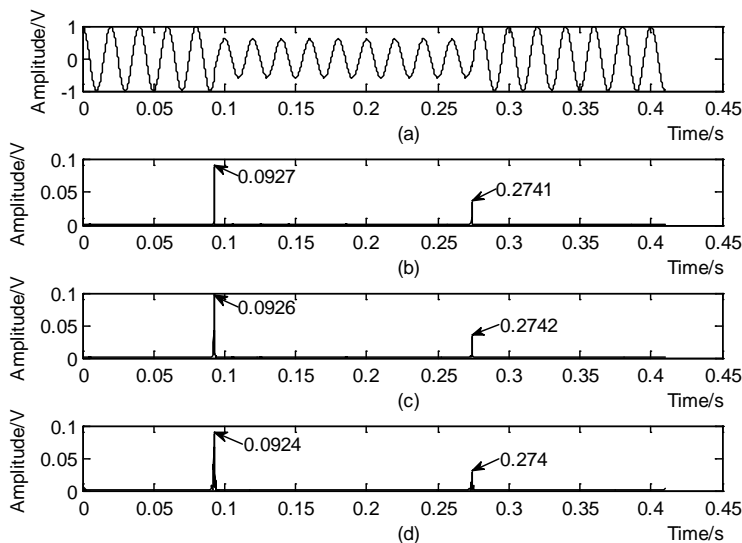


图 6-6 提升小波不同尺度下的扰动定位分析：

(a) 电压暂降仿真信号的时域图；(b) d1 的分析结果；(c) d2 的分析结果；(d) d3 的分析结果

Fig. 6-6 Disturbance location analysis with lifting wavelet at distinct scale: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of d1; (c) Analysis result of d2; (d) Analysis result of d3.

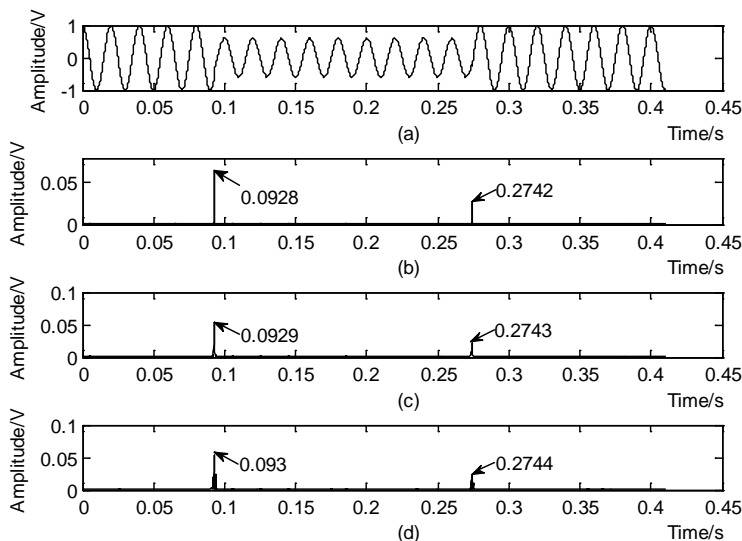


图 6-7 冗余提升小波不同尺度下的扰动定位分析：

(a) 电压暂降仿真信号的时域图；(b) d1 的分析结果；(c) d2 的分析结果；(d) d3 的分析结果

Fig. 6-7 Disturbance location analysis with redundant lifting wavelet at distinct scale: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of d1; (c) Analysis result of d2; (d) Analysis result of d3.

由图 6-5 至图 6-7 可得三种小波变换的不同尺度下小波模极大值对扰动的识别结果，如表 6-2 所示：

表 6-2 三种小波变换在不同尺度下的小波模极大值对扰动定位的对比分析
Table 6-2 Comparison analysis for disturbance location of wavelet modulus maxima with three wavelet transforms at distinct scale

扰动(s)	经典小波			提升小波			冗余提升小波			
	d1	d2	d3	d1	d2	d3	d1	d2	d3	
开始时间	0.0928	0.0927	0.0929	0.0931	0.0927	0.0926	0.0924	0.0928	0.0929	0.093
结束时间	0.2742	0.2742	0.274	0.2739	0.2741	0.2742	0.274	0.2742	0.2743	0.2744
持续时间	0.1814	0.1815	0.1811	0.1808	0.1814	0.1816	0.1816	0.1814	0.1814	0.1814

根据表 6-2，考虑三种小波变换在分解尺度 1、2、3 下对扰动的定位结果与实际值的相对误差：对于扰动开始时间，经典小波的依次为 0.1078%，0.1078%，0.3233%；提升小波的依次为 0.1078%，0.2155%，0.431%；冗余提升小波的依次为 0%，0.1078%，0.2155%；对于扰动结束时间，经典小波的依次为 0%，0.0729%，0.1094%；提升小波的依次为 0.0365%，0%，0.0729%；冗余提升小波的依次为 0%，0.0365%，0.0729%。

由上述误差分析可以发现：随着分解尺度的增加，三种小波变换对扰动起止时间的定位误差逐渐变大。由此可总结得到分解尺度这一因素对扰动识别的影响：对扰动定位的精度将随着分解尺度的增加而逐渐降低。考虑到小波时频分析特性中的时窗宽度与突变信号的检测有关，分析其原因是小波的时窗宽度将随着尺度的变化而发生变化：对于连续小波变换，当母小波 $\psi(t)$ 的时窗半径为 Δ_ψ 时，由 $\psi(t)$ 经平移和伸缩得到的尺度 a 下的分析小波 $\psi_{a,b}(t)$ 的时窗半径为 $a\Delta_\psi$ ；对于二进离散小波变换有 $a = 2^j, b = 2^j k$ ，则 $\psi_{j,k}(t)$ 的时窗半径为 $2^j \Delta_\psi$ 。因此，当分解尺度 a 或 j 增加时，小波的时窗宽度也将随之变宽，使得小波在时域的“聚焦”能力逐渐下降，进而导致其对扰动定位分析的误差变大。

6.3.2 扰动起止时间

为探讨扰动起止时间对定位结果的影响，考虑随机选取多组具有不同起止时

间的扰动进行分析。同时，为加强分析结果的可比性，考虑对扰动的开始和结束时间两者其一取定值，而另一者逐渐变化以作对比分析。

6.3.2.1 实例分析一

此处任取两组扰动：第一组令其开始时间均为 0.188s 而结束时间分别为 0.276s, 0.277s, 0.278s 和 0.279s，仍采用三种小波变换进行扰动识别，并选取具有更优定位精度的第一尺度下细节信号 d_1 的小波模极大值进行对比，所得结果如下图 6-8 至图 6-10 所示：

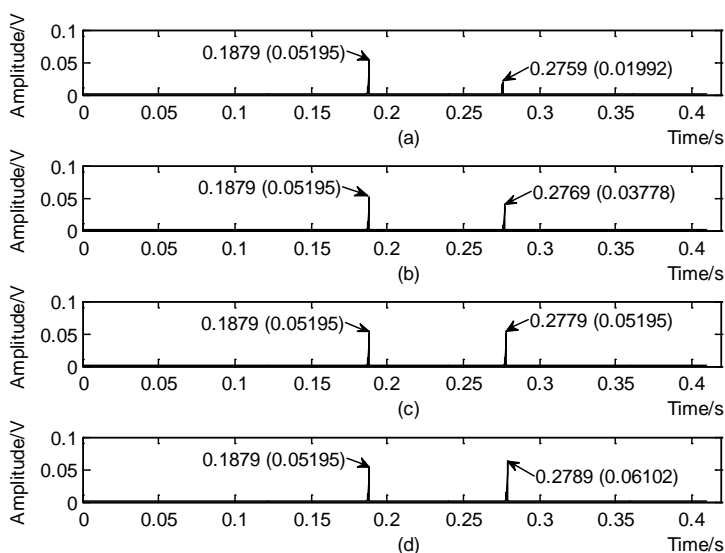


图 6-8 经典小波对第一组扰动的定位分析：(a) 扰动 1 的分析结果；(b) 扰动 2 的分析结果；(c) 扰动 3 的分析结果；(d) 扰动 4 的分析结果

Fig. 6-8 Location analysis with classic wavelet for the first group of disturbance: (a) Analysis result for disturbance 1; (b) Analysis result for disturbance 2; (c) Analysis result for disturbance 3; (d) Analysis result for disturbance 4.

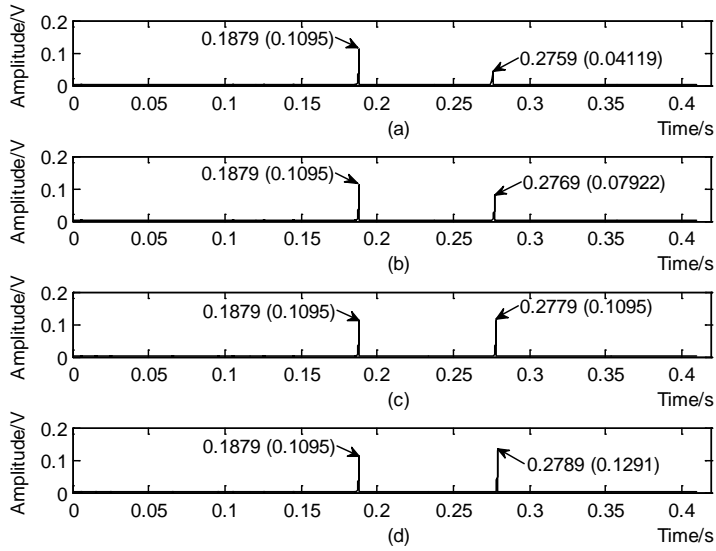


图 6-9 提升小波对第一组扰动的定位分析: (a) 扰动 1 的分析结果; (b) 扰动 2 的分析结果; (c) 扰动 3 的分析结果; (d) 扰动 4 的分析结果

Fig. 6-9 Location analysis with lifting wavelet for the first group of disturbance: (a) Analysis result for disturbance 1; (b) Analysis result for disturbance 2; (c) Analysis result for disturbance 3; (d) Analysis result for disturbance 4.

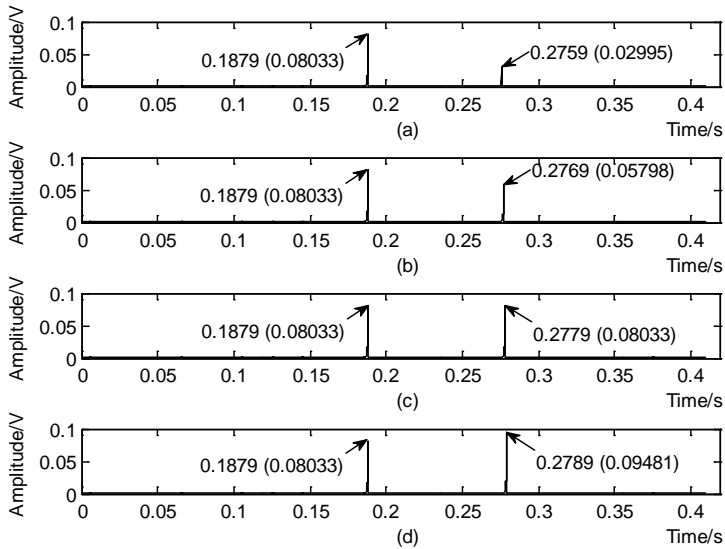


图 6-10 冗余提升小波对第一组扰动的定位分析: (a) 扰动 1 的分析结果; (b) 扰动 2 的分析结果; (c) 扰动 3 的分析结果; (d) 扰动 4 的分析结果

Fig. 6-10 Location analysis with redundant lifting wavelet for the first group of disturbance: (a) Analysis result for disturbance 1; (b) Analysis result for disturbance 2; (c) Analysis result for disturbance 3; (d) Analysis result for disturbance 4.

任取第二组扰动令其开始时间分别为 0.1006s, 0.1018s, 0.103s 和 0.1042s 而结束时间均为 0.3641s, 采用三种小波变换进行扰动识别, 并选具有更优定位精度的第一尺度下细节信号 d1 的小波模极大值进行对比, 得到结果如下图 6-11 至图 6-13 所示:

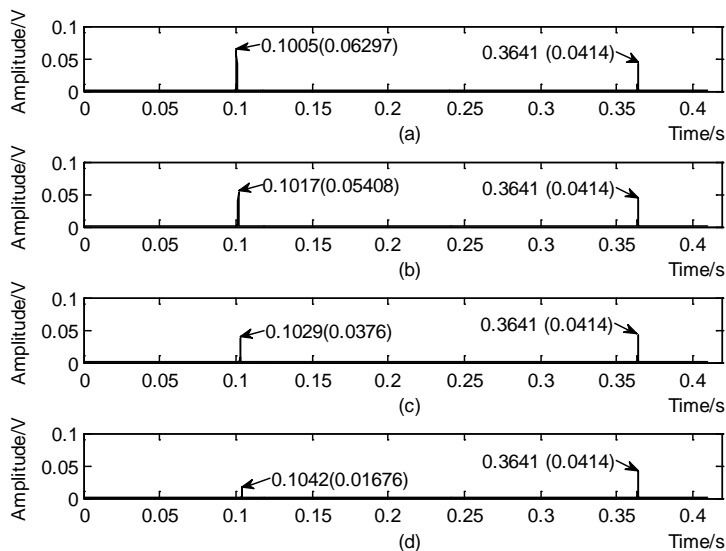


图 6-11 经典小波对第二组扰动的定位分析: (a) 扰动 1 的分析结果; (b) 扰动 2 的分析结果; (c) 扰动 3 的分析结果; (d) 扰动 4 的分析结果

Fig. 6-11 Location analysis with classic wavelet for the second group of disturbance: (a) Analysis result for disturbance 1; (b) Analysis result for disturbance 2; (c) Analysis result for disturbance 3; (d) Analysis result for disturbance 4.

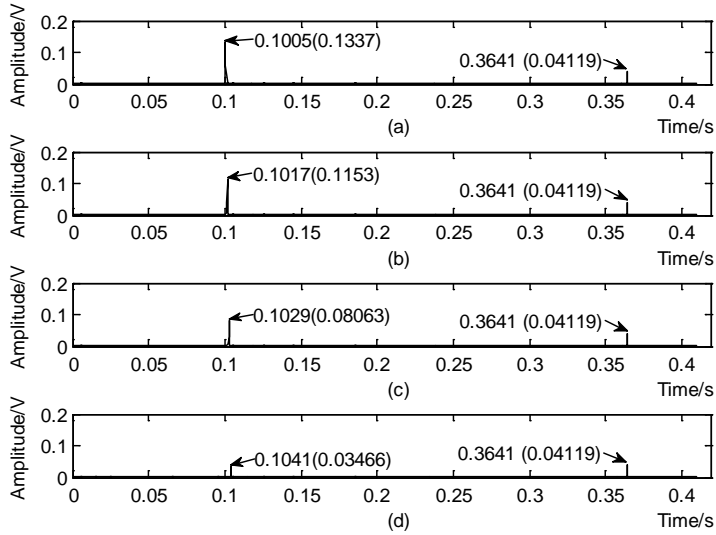


图 6-12 提升小波对第二组扰动的定位分析: (a) 扰动 1 的分析结果; (b) 扰动 2 的分析结果; (c) 扰动 3 的分析结果; (d) 扰动 4 的分析结果

Fig. 6-12 Location analysis with lifting wavelet for the second group of disturbance: (a) Analysis result for disturbance 1; (b) Analysis result for disturbance 2; (c) Analysis result for disturbance 3; (d) Analysis result for disturbance 4.

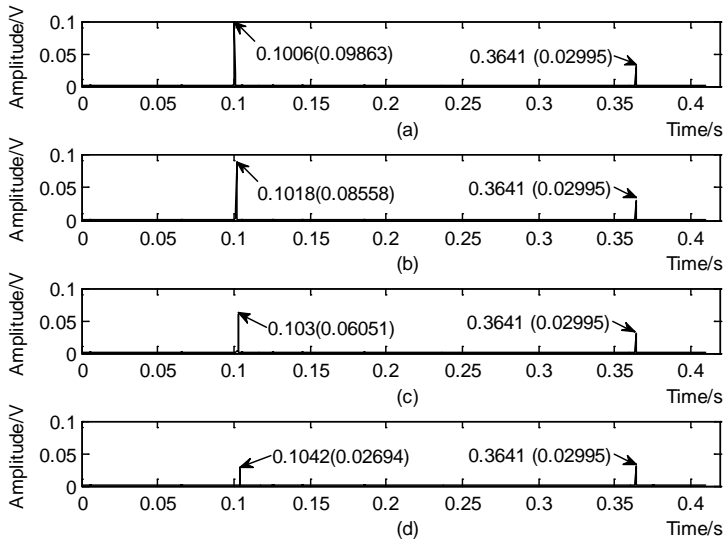


图 6-13 冗余提升小波对第二组扰动的定位分析: (a) 扰动 1 的分析结果; (b) 扰动 2 的分析结果; (c) 扰动 3 的分析结果; (d) 扰动 4 的分析结果

Fig. 6-13 Location analysis with redundant lifting wavelet for the second group of disturbance: (a) Analysis result for disturbance 1; (b) Analysis result for disturbance 2; (c) Analysis result for disturbance 3; (d) Analysis result for disturbance 4.

下表 6-3 为三种小波变换对具有不同起止时间的两组扰动的定位分析结果：

表 6-3 三种小波变换对具有不同起止时间的两组扰动定位的对比分析

Table 6-3 Comparison analysis of three transforms for location of two group of disturbances with distinct start and end time

分析方法	第一组扰动				第二组扰动			
	开始时间	幅值	结束时间	幅值	开始时间	幅值	结束时间	幅值
经典小波	0.1879	0.05195	0.2759	0.01992	0.1005	0.06297	0.3641	0.0414
	0.1879	0.05195	0.2769	0.03778	0.1017	0.05408	0.3641	0.0414
	0.1879	0.05195	0.2779	0.05195	0.1029	0.0376	0.3641	0.0414
	0.1879	0.05195	0.2789	0.06102	0.1042	0.01676	0.3641	0.0414
提升小波	0.1879	0.1095	0.2759	0.04119	0.1005	0.1337	0.3641	0.04119
	0.1879	0.1095	0.2769	0.07922	0.1017	0.1153	0.3641	0.04119
	0.1879	0.1095	0.2779	0.1095	0.1029	0.08063	0.3641	0.04119
	0.1879	0.1095	0.2789	0.1291	0.1041	0.03466	0.3641	0.04119
冗余提升小波	0.1879	0.08033	0.2759	0.02995	0.1006	0.09863	0.3641	0.02995
	0.1879	0.08033	0.2769	0.05798	0.1018	0.08558	0.3641	0.02995
	0.1879	0.08033	0.2779	0.08033	0.103	0.06051	0.3641	0.02995
	0.1879	0.08033	0.2789	0.09481	0.1042	0.02694	0.3641	0.02995

由表 6-3 可知，对于开始时间均为 0.188s 而结束时间分别为 0.276s，0.277s，0.278s 和 0.279s 的第一组扰动，在对逐渐变化的四个结束时间的定位上，三种小波变换的分析结果相同均依次为 0.2759s，0.2769s，0.2779s 和 0.2789s；但在对四个结束时间的定位点幅值上，三者有所差别：经典小波的依次为 0.01992，0.03778，0.05195 和 0.06102；提升小波的依次为 0.04119，0.07922，0.1095 和 0.1291；冗余提升小波的依次为 0.02995，0.05798，0.08033 和 0.09481。虽然三种小波变换对四个结束时间的定位点幅值各不相同，但从上述数据可以发现：三者的分析结果仍呈现出一致的变化趋势，即随着扰动结束时间的向后推移，三者对结束时间的定位点幅值均逐渐增加。

对于开始时间分别为 0.1006s，0.1018s，0.103s 和 0.1042s 而结束时间均为 0.3641s 的第二组扰动，在对逐渐变化的四个开始时间的定位上，三种小波变换的分析结果有所不同，其中经典小波的依次为 0.1005s，0.1017s，0.1029s 和 0.1042s；

提升小波的依次为 0.1005s, 0.1017s, 0.1029s 和 0.1041s; 冗余提升小波的依次为 0.1006s, 0.1018s, 0.103s 和 0.1042s。而在对四个开始时间的定位点幅值上, 三者也不相同: 经典小波的依次为 0.06297, 0.05408, 0.0376 和 0.01676; 提升小波的依次为 0.1337, 0.1153, 0.08063 和 0.03466; 冗余提升小波的依次为 0.09863, 0.08558, 0.06051 和 0.02694。从该组数据分析中仍可以发现: 三者对四个开始时间的分析结果亦呈现出一致的变化趋势, 即随着扰动开始时间的向后推移, 三者对开始时间的定位点幅值均逐渐减小。

总结上述分析结果可以发现: 扰动起止时间的变化可使定位点的幅值随之呈现出一定的变化趋势: 逐渐增加或减小。结合理想电网中的电源电压一般为标准的工频正弦信号这一特点, 可得出如下结论: 定位点的小波模极大值随着扰动起止时间的变化而呈现出规律性的变化, 即当扰动时间由正弦波的峰值点向过零点变化时, 被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变小; 而当扰动时间由正弦波的过零点向峰值点变化时, 被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变大。导致这一规律性变化的原因为: 发生在正弦波峰值点的扰动其突变强度最大, 随着扰动发生时间越来越偏离峰值点, 其突变强度将随之减小, 直至扰动发生在正弦波过零点时其突变强度最小; 反之亦然。

6.3.2.2 实例分析二

为验证实例分析一中得到的结论, 接下来考虑更复杂的情形即: 选取另一组扰动下的复合暂态事件的仿真信号进行分析。

所选仿真信号由电压暂升、电压暂降和短时电压中断三种典型的电能质量暂态事件复合组成。同时, 为验证上述结论, 结合理想电网中电源电压一般为标准工频正弦信号因而具有波形对称性的特点, 令仿真信号由以下四个暂态事件叠加组成:

- ① 电压暂升信号: 开始时间: 0.0592s, 结束时间: 0.1202s;
- ② 电压暂降信号 1: 开始时间: 0.2015s, 结束时间: 0.3121s;
- ③ 电压暂降信号 2: 开始时间: 0.4327s, 结束时间: 0.5639s;
- ④ 短时电压中断信号: 开始时间: 0.6187s, 结束时间: 0.8009s;

分析上述复合暂态事件的仿真信号可知其特点如下:

(1) 对于信号①和信号④, 其扰动的开始时间相较结束时间均更远离于正弦波的峰值点;

(2) 对于信号②和信号③, 两者的扰动时间 0.2015s、0.3121s、0.4327s、0.5639s 呈现出由正弦波的峰值点向过零点逐渐变化的特点;

(3) 对于信号①、②、③和④, 其相对正弦波峰值点的距离由近及远依次为: ①>④>②>③。

由于在实例分析一的结论中, 扰动起止时间的变化对于三种小波变换分析结果的影响均一致, 此处为简化取提升小波结合模极大值法对该复合仿真信号进行分析。对该信号作三层小波分解并取第一尺度下细节信号的小波模极大值进行扰动识别, 相应的分析结果如图 6-14 所示 (其中四次暂态事件如图 7(a)中红圈中的波形所示):

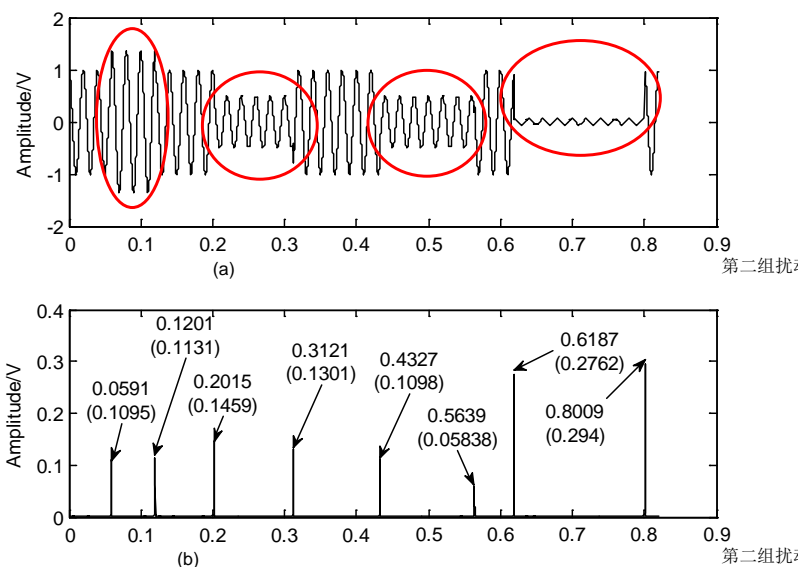


图 6-14 复合暂态事件仿真信号的扰动识别结果

Fig. 6-14 Analysis results of simulated signals of compound transient events

对上图 6-14 中的分析结果进行整理, 得到详细数据对比分析如下表 6-4 所示:

表 6-4 复合暂态事件仿真信号的分析结果数据对比

Table 6-4 Data comparison for Analysis results of simulated signals of compound transient events

仿真信号	电压暂升		电压暂降 1		电压暂降 2		短时电压中断	
	开始(s)	结束(s)	开始(s)	结束(s)	开始(s)	结束(s)	开始(s)	结束(s)
	0.0592	0.1202	0.2015	0.3121	0.4327	0.5639	0.6187	0.8009
定位点	0.0591	0.1201	0.2015	0.3121	0.4327	0.5639	0.6187	0.8009
幅值	0.1095	0.1131	0.1459	0.1301	0.1098	0.05838	0.2762	0.294

结合该复合仿真信号的三点特点，对图 6-14 以及表 6-4 中的结果进行分析，可得相关结论如下：

(1) 对于信号①和信号④，其开始时间的定位幅值均小于结束时间的定位点幅值，即 $0.1095 < 0.1131$ ； $0.2762 < 0.294$ 。考虑到两者的扰动开始时间相较结束时间均更远离于正弦波峰值点的特点，可验证实例分析一中“当扰动时间由正弦波的峰值点向过零点变化时，被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变小”的结论。

(2) 对于信号②和信号③，两者的扰动时间 0.2015s、0.3121s、0.4327s、0.5639s 的定位点幅值依次为 0.1459，0.1301，0.1098，0.05838，呈现出逐渐减小的特点。考虑到两者的扰动时间 0.2015s、0.3121s、0.4327s、0.5639s 呈现出由正弦波的峰值点向过零点逐渐变化的特点，亦可验证实例分析一中“当扰动时间由正弦波的峰值点向过零点变化时，被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变小”的结论；

(3) 对于信号①、②、③和④，四者扰动时间的定位点幅值无规律性变化。虽然四者的扰动时间相对正弦波峰值点的距离由近及远依次为：①>④>②>③，但其定位点幅值并无该趋势变化，这主要是由四者对应的暂态事件的类型不同所致，由此可验证实例分析一中“电能质量暂态事件的类型对定位点的小波模极大值的幅值大小有影响”的结论。

6.3.3 冗余算法

冗余算法是为了解决小波变换过程中由降采样导致的样本信息量减少和非平移不变性问题而引入的。本节将分别采用提升小波和冗余提升小波变换进行对比分析，从而探讨平移不变性对电能质量扰动定位结果的影响。

随机选取扰动令其开始时间为 0.0732s，结束时间为 0.3825s。首先采用提升小波变换分析。由于其第一步为剖分，即将初始信号划分为奇样本和偶样本两部分，当认为该电压暂降仿真信号数据样本的第一个样本点对应于奇样本时，所得扰动定位的分析结果如下图 6-15 所示：

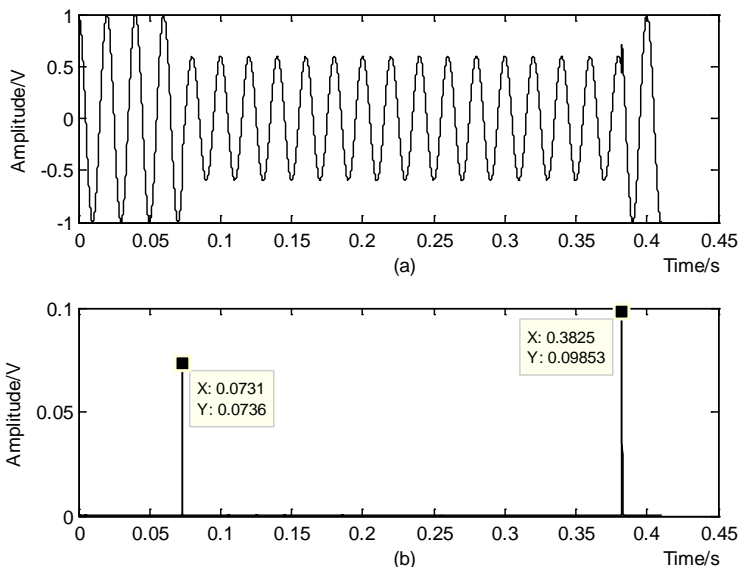


图 6-15 第一个数据样本对应于奇样本时的提升小波分析：
(a) 电压暂降仿真信号的时域图；(b) 扰动定位的分析结果

Fig. 6-15 Lifting wavelet analysis with the first data sample corresponding to odd sample: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of disturbance location.

当认为该电压暂降仿真信号数据样本的第一个样本点对应于偶样本时，所得扰动定位的分析结果如下图 6-16 所示：

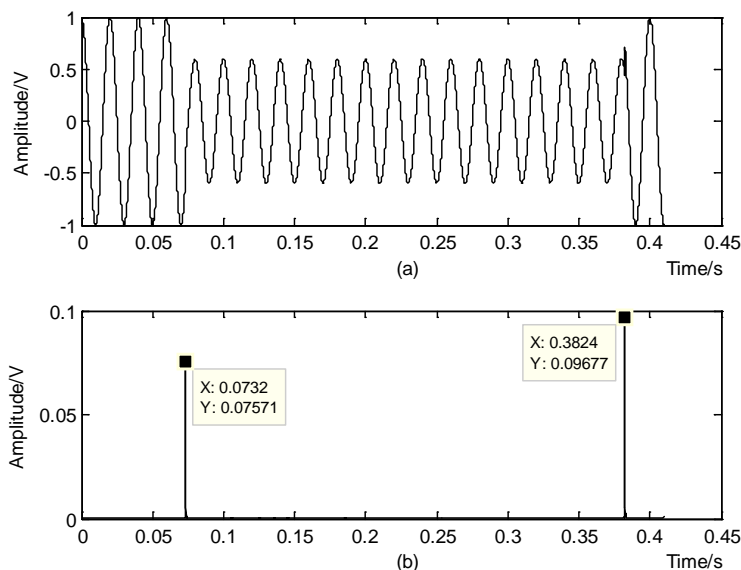


图 6-16 第一个数据样本对应于偶样本时的提升小波分析：
(a) 电压暂降仿真信号的时域图；(b) 扰动定位的分析结果

Fig. 6-16 Lifting wavelet analysis with the first data sample corresponding to even sample: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of disturbance location.

冗余提升小波变换进行分析，所得扰动定位的分析结果如下图 6-17 所示：

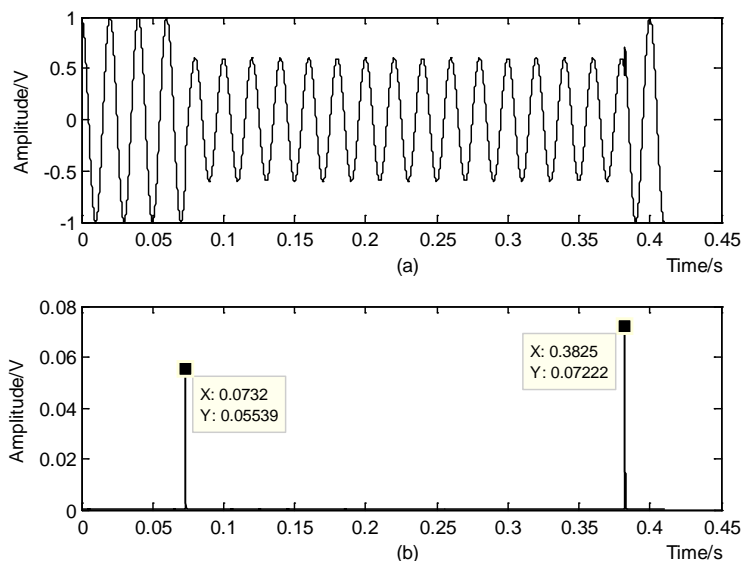


图 6-17 第一个数据样本对应于奇样本以及偶样本时的冗余提升小波分析：

(a) 电压暂降仿真信号的时域图；(b) 扰动定位的分析结果

Fig. 6-17 Redundant lifting wavelet analysis with the first data sample corresponding to odd sample or even sample: (a) Time domain chart of voltage sag simulation signal; (b) Analysis result of disturbance location.

由图 6-15 至图 6-17 可以看到，对于选取的开始时间为 0.0732s 和结束时间为 0.3825s 的同一扰动，采用提升小波变换可得到两种不同的分析结果：当认为仿真信号数据样本的第一个样本点对应于奇样本时，对扰动的定位结果如图 5-15 所示为开始时间 0.0731s 和结束时间 0.3825s；当认为仿真信号数据样本的第一个样本点对应于偶样本时，对扰动的定位结果如图 5-16 所示为开始时间 0.0732s 和结束时间 0.3824s。而采用冗余提升小波变换时，无论将仿真信号数据样本的第一个样本点作为奇样本还是偶样本考虑，所得对扰动的定位结果均相同，如图 5-17 所示为开始时间 0.0732s 和结束时间 0.3825s。

由上述分析结果可以发现：采用提升小波进行扰动识别，当对奇偶样本的处理方式不同时，对扰动定位的结果亦不相同，这主要是由提升小波变换中的剖分步骤造成的；而冗余提升小波变换由于无需考虑奇偶样本的划分问题，所得分析结果始终一致，因此具有更优的稳健性。

6.5 本章小节

在本章中，分别采用经典小波、提升小波和冗余提升小波并结合模极大值方法来对电能质量暂态事件中的扰动定位问题进行分析。同时，着重对小波分解尺度、扰动起止时间以及冗余算法这三种可能影响到扰动定位精度的因素进行了探讨性研究。通过大量的仿真分析结果，得到的初步结论如下：

(1) 电能质量暂态事件的类型对最终的扰动定位精度没有影响，而仅对突变点的小波模极大值的幅值大小有影响。

(2) 小波分解尺度会对扰动定位精度产生一定影响，即定位精度与小波分解尺度呈反向变化，随着分解尺度的增加，定位精度将会逐渐降低。

(3) 扰动起止时间主要使定位点的小波模极大值呈现出规律性的变化，即当扰动时间由正弦波的峰值点向过零点变化时，被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变小；当扰动时间由正弦波的过零点向峰值点变化时，被定位扰动时间的小波模极大值将逐渐变大。

(4) 冗余算法相比经典小波和提升小波分析，其算法实现过程中由于无需考虑到降采样的问题，因而具有更优的稳健性。

参考文献

- [1] P.K.Dash, S.K.Panda, A.C.Liew, B.Mishra, and R.K.Jena, "New approach to monitoring electric power quality." *Electric Power System.Res.*,1998,46(1):11-20
- [2] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1989, 11(7):674-693.
- [3] Coifman R.R, Wickerhauser M.V. Entropy based algorithm for best basis selection[J]. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1992, 38(2):713-718.
- [4] Wickerhauser M.V. INRIA lectures on wavelet packet algorithms[R]. Technical report, Washington University, 1991.
- [5] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1992, 38(2):617-643.
- [6] Yansun Xu, John B. Weaver, Dennis M. Healy, Jian Lu. Wavelet transform domain filters: a spatially selective noise filtration technique [J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 1994, 3(6):747-758.
- [7] David L. Donoho. De-noising by soft-thresholding [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*. 1995, 41(3):613-627.
- [8] David L. Donoho, Johnstone I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage [J]. *Journal of the American Statistical Association*. 1995, 90(432):1200-1224.
- [9] David L. Donoho. Minimax estimation via wavelet shrinkage [J]. *Annals of Statistics*. 1998, 26(3):879-921.
- [10] Santoso S, Powers E J, Grady W M. Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods [J]. *IEEE Trans Power Delivery*, 1997, 12(3):1250-1257.
- [11] Littler T B, Morrow D J. Wavelets for the analysis and compression of Power system disturbances[J]. *IEEE Trans Power Delivery*, 1999, 14(2):358-364.
- [12] M. Karimi, H. Mokhtari, and M. R. Iravani, "Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1212-1220, Oct. 2000.
- [13] S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady, A. C. Parsons, "Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier-part 1: theoretical foundation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 15, no. 1, pp. 222-228, Jan. 2000.
- [14] T. X. Zhu, S. K. Tso, K. L. Lo, "Wavelet-based fuzzy reasoning approach to power-quality disturbance recognition", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 4, pp. 1928-1935, Oct.

2004.

- [15] C. H. Lin, C. H. Wang, "Adaptive wavelet networks for power-quality detection and discrimination in a power system", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1106-1113, Jul. 2006.
- [16] G. Brodzinski, R. J. Rak, A. Majkowski, "Classification of disturbances in power systems based on wavelet decomposition and SVM neural network," *Przegląd elektrotechniczny*, vol. 85, no. 2, pp. 165-170, 2009.
- [17] M. Uyar, S. Yildirim, M. T. Gencoglu, "An effective wavelet-based feature extraction method for classification of power quality disturbance signals", *Electr. Pow. Syst. Res*, vol. 78, no. 10, pp. 1747-1755, Oct. 2008.
- [18] H. Eristi, A. Ucar, Y. Demir, "Wavelet-based feature extraction and selection for classification of power system disturbances using support vector machines", *Electr. Pow. Syst. Res*, vol. 80, no. 7, pp. 743-752, Jul. 2010.
- [19] H. Eristi Y. Demir, "Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines", *IET Gener. Transm. Dis*, vol. 6, no. 10, pp. 968-976, Oct. 2012.
- [20] A. Milchevski, D. Kostadinov, D. Taskovski, "Classification of power quality disturbances using wavelets and support vector machine" *Elektron. Elektrotech*, vol. 19, no. 2, pp. 25-30, 2013.
- [21] B. Biswal, S. Mishra, "Power signal disturbance identification and classification using a modified frequency slice wavelet transform", *IET Gener. Transm. Dis*, vol. 8, no. 2, pp. 353-362, Feb. 2014.
- [22] Stephane Mallat, Wen Liang Hwang. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1992. 38 (2): 617-643.
- [23] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [24] A. M. Gaouda, S. H. Kanoun, M. M. A. Salama, A. Y. Chikhani. Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement[J]. *IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*. 2002, 149(3): 310-318, May.
- [25] 王 晶, 束洪春, 陈学允. 小波变换电力系统工学应用综述[J]. *电网技术*. 2003, 27(6): 52-63.
- [26] 邓宏伟. 基于小波变换的电能质量分析与应用研究[D]. 武汉大学. 2004.
- [27] 耿云玲. 电能质量扰动分析中小波变换应用研究[D]. 湖南大学. 2006.
- [28] 王洪梅. 基于小波变换模极大值的电能质量信号检测研究[D]. 浙江大学. 2006.
- [29] G. Brodzinski, R. J. Rak, A. Majkowski. Classification of disturbances in power systems based on wavelet decomposition and SVM neural network.[J] *Przegląd elektrotechniczny*. 2009,

- 85(2): 165-170.
- [30] W. Z. Gao, J. X. Ning. Wavelet-based disturbance analysis for power system wide-area monitoring[J]. *IEEE Trans. on Smart Grid*. 2011, 1: 121-130.
- [31] S. J. Huang, C. T. Hsieh, “Coiflet wavelet transform applied to inspect power system disturbance-generated signals”, *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst*, vol. 38, no. 1, pp. 204-210, Jan. 2002.
- [32] A. M. Gaouda, S. H. Kanoun, M. M. A. Salama, A. Y. Chikhani, “Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement,” *IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, vol. 149, no. 3, pp. 310-318, May. 2002.
- [33] W. Z. Gao, J. X. Ning, “Wavelet-based disturbance analysis for power system wide-area monitoring”, *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 121-130, Mar. 2011.
- [34] R. Sadeghi, R. S. Dastjerdi, P. G. Panah, E. Jafari, “Automatic detection and positioning of power quality disturbances using a discrete wavelet transform”, *Life Science Journal-ACTA Zhengzhou University Overseas Edition*, vol. 9, no. 4, pp. 3481-3486, 2012.
- [35] W. Sweldens. The lifting scheme: A custom-design construction of biorthogonal wavelet[J]. *Appl. and Comput Harmonic Analysis*. 1996, 3(2): 186-200.
- [36] W. Sweldens. The lifting scheme: A construction of second generation wavelet constructions[J]. *SIAM J. Math. Anal.* 1997, 29(2): 511-546.
- [37] 曾黎玉, 王英健, 郑理科. 基于快速提升小波变换的电能畸变信号模极大值检测方法[J]. *长沙理工大学学报*. 2007, 4(4): 56-59.
- [38] 毛念奎, 张雪峰. 电能质量信号扰动检测与定位[J]. *淮南职业技术学院学报*. 2010, 10(34): 22-27.
- [39] 周建萍, 郑应平. 基于提升小波的电压暂态奇异点检测[J]. *上海电力学院学报*. 2010, 26(6): 564-566+576.
- [40] 陈珍萍. 基于自适应提升小波变换的电能质量检测节点[J]. *电子技术应用*. 2011, 37(7): 86-88+92.
- [41] 许童羽, 朴在林, 陈春玲. 希尔伯特变换与小波去噪提高暂态电能质量扰动检测与定位精度[J]. *农业工程学报*. 2012, 28(19): 150-155.
- [42] Min Li, Guang-pu He, Xiao-ying Zhang, Xiao-hong Wu. Power Quality Detecting Based on Fast Lifting Wavelet Transform[C]. *Control and Decision Conference*, 2008, 536 – 540.
- [43] 王坤, 余志飞, 林美玲, 王伟. 高效提升小波的电能质量暂态信号分析[J]. *电网与清洁能源*. 2011, 27(8): 23-26.
- [44] X. G. Chen, “Wavelet-based detection, localization, quantification and classification of short duration power quality disturbances”, presented at the Winter Meeting of the IEEE-Power-Engineering-Society, New York, USA, Jan. 2002.

- [45] A. S. Yilmaz, A. Subasi, M. Bayrak, V. M. Karsli, E. Ercelebi, "Application of lifting based wavelet transforms to characterize power quality events", *Energy Convers. Manage*, vol. 48, no. 1, pp. 112-123, Jan. 2007.
- [46] H. Liu, G. H. Liu, Y. Shen, "Lifting wavelet scheme and wavelet energy entropy theory for transient power quality detection", presented at the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, Jun. 2008.
- [47] C. L. Chen, T. Y. Xu, Y. Yuan, F. L. Jiang, "Detection and location of power quality transient disturbance based on lifting wavelet", presented at the 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China, Mar. 2010.
- [48] J. P. Zhou, Z. P. Wang, "Detection of dynamic power quality disturbance based on lifting wavelet", presented at the 2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, Sanya, China, Oct. 2010.
- [49] 肖湘宁, 徐勇海. 电能质量问题剖析电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
- [50] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [51] Daubechies, I.; Sweldens, W. Factoring wavelet transforms into lifting steps[J]. *J. Fourier. Anal.Appl.* 1998, 4, 247-269.
- [52] Holschneider, M., Kronland-Martinet R., Morlet J., Tchamitchian Ph. A Real-Time Algorithm for Signal Analysis with the Help of the Wavelet Transform. *Wavelets, Time-Frequency Methods and Phase Space*, Proceedings of the International Conference, Marseille, France, December 14-18, 1987.
- [53] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [54] 段晨东. 基于第二代小波变换的故障诊断技术研究[D]. 西安交通大学. 2005.
- [55] Rahm E, DoH.H. Data Cleaning: Problems and Current Approaches[J]. *IEEE Data Engineering Bulletin*, 2000, 23(4): 3-13.
- [56] 王曰芬, 章成志, 张蓓蓓, 吴婷婷. 数据清洗研究综述[J]. *情报分析与研究*. 2007, 12: 50-56.
- [57] Galhardas H, Florescu D. An Extensible Framework for Data Cleaning [C]. In: *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Data Engineering*. San Diego, California, 2000: 312 - 312.
- [58] 曹建军, 刁兴春, 汪挺, 王芳潇. 领域无关数据清洗研究综述[J]. *计算机科学*. 2010, 37(5): 26-29.
- [59] 叶鸥, 张璟, 李军怀. 中文数据清洗研究综述[J]. *计算机工程与应用*. 2012, 48(14): 121-129.
- [60] 蒋勇青, 杨奕虹, 杨贺. 论数据清洗对信息检索质量的影响及清洗方法[J]. *中国索引*. 2012, 1: 16-20.

- [61] 肖湘宁, 韩民晓, 徐永海等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社. 2004.
- [62] 唐会智, 彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术. 2003, 27(12): 85-88.
- [63] 江辉, 彭建春, 欧亚平等. 基于概率统计和矢量代数的电能质量归一量化与评价[J]. 湖南大学学报(自然科学版). 2003, 30(1): 66-70.
- [64] 欧阳森, 宋政湘, 王建华等. 基于信号相关性和小波方法的电能质量去噪算法[J]. 电工技术学报. 2003, 18(3): 111-116.
- [65] 黄文清, 戴瑜兴. 电能质量扰动的 Block-Thresholding 去噪方法[J]. 电工技术学报. 2007, 22(10): 160-166.
- [66] 刘志刚, 曾怡达, 钱清泉. 多小波在电力系统信号消噪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 30-34.
- [67] 唐良瑞, 杨雪. 基于三角模融合算子的电能质量去噪算法[J]. 电工技术学报. 2007, 22(9): 154-158.
- [68] IEEE Application Guide for IEEE Std 1547™, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems[S]. 2009.
- [69] Fernández G, Periaswamy S, Sweldens W. LIFTPACK: A Software Package for Wavelet Transforms using Lifting[J]. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2825, 1996, pp. 396-408.
- [70] W. Sweldens, P. Schröder, Building your own wavelets at home[J]. Lecture Notes in Earth Sciences, 90, 2000, pp. 72-130.
- [71] 薛毅, 耿美英. 数值分析[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2003.
- [72] Claypoole, R.L.; Baraniuk, R.G. Flexible Wavelet Transforms Using Lifting. Available online: <http://scholarship.rice.edu/handle/1911/19805> (accessed on 1 September 1998).

博士后在站期间取得的研究成果

- 1 Zijing Yang, Junwei Cao, Yanxiang Xu, Huaying Zhang, Peng Yu, Senjing Yao. Data Cleaning for Power Quality Monitoring. Proc. 4th Int. Conf. on Networking and Distributed Computing, Hongkong, China, 2013. (EI 检索)
- 2 张华赢, 阳子婧, 段绍辉, 姚森敬, 曹军威, 许延祥. 电能质量监测数据清洗技术研究. 高电压技术. 2014. (EI 检索, 已录用)
- 3 阳子婧, 曹军威. 冗余提升小波变换在电能质量暂态事件分析中的研究. 中国电机工程学会年会, 成都, 中国, 2013.
- 4 阳子婧, 曹军威, 王淼. 基于小波变换的电能质量扰动识别的影响因素分析研究. 第七届电能质量研讨会, 2014.
- 5 阳子婧, 曹军威等. 一种电能质量暂态事件突出区域监测信息与数据分析方法. 专利号: 201310419439.3 (发明专利, 已受理)
- 6 阳子婧. 电能质量暂态事件仿真分析软件. 证书号: 软著登字第 0652724 号. (软件著作权, 已登记)
- 7 Junwei Cao, Zijing Yang. Energy Flow Controller, Coming for Intelligent Energy Saving. 申请美国专利 (代理公司受理)

致 谢

两年前的一个热情四溢的夏季，满怀着憧憬、激情和信念的我，带着丝丝的新奇和期许，踏入了梦想中的清华园，拉开了我博士后科研生活的序幕；

转眼两年过去，又到了一个洋溢着欢乐和收获气息的夏季，我却即将收拾行囊，恋恋不舍地拉上我两年难忘的博士后生活的帷幕，踏上人生新的征程。

这两年，是拥有着许多美好回忆的珍贵的两年。一次次为了梦想而不懈地奋斗，一次次因为成长和积累而品味到喜悦；有过苦，也有过甜；有过欢笑，也有过泪水。这一切，这一点一滴，都将成为我人生中最宝贵的财富和最永恒的美丽记忆。为此，我感谢生活，感谢清华园，赋予我这一段永难忘却的美好时光。

同时，我要特别感谢我的合作导师曹军威教授。是他，为我提供了如此优越的科研平台和科研环境；是他，给予我无数次历练自我、不断提高自我的宝贵机会。他积极乐观的人生态度，严谨开拓的工作思路，勤勉谦和的处事作风，无不深深地影响着我，感染着我，让我从中领悟到许多，获益良多。为此，谨向曹老师致以我内心深处最真挚的感谢！

在此，还要感谢我身边的同事、同学和好友。是他们，一直陪伴在我身边，在我遇到困难的时候鼓励我，帮助我；在我开心的时候和我一起分享那份快乐与简单。正是他们，让我收获了太多的欢乐，以及一份太值得珍存的友情。

感谢电机系的韩英铎院士、袁志昌老师、陆超老师、张树卿博士，感谢王淼工程师对我在电网项目工作上的指导和帮助。

感谢 Eric 对我在 LIGO 科学合作组织工作中的热情帮助。

感谢国家 973 基础研究计划(2013CB228206)、国家自然科学基金(61233016)和中国南方电网 2012 年科技项目(K-SZ2012-026)给与我在科研工作上的资助。

感谢“深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范”项目。

感谢“澳门电网规划方案论证及配电网稳定性研究”项目。

最后，特别感谢一直以来为我无私付出、永远在我身后默默支持和鼓励我的我挚爱的父母。他们对我的生育之恩、养育之情，非言语可表达；唯待我“用心珍惜，倾情相报”。

阳子婧

2014 年 6 月于清华园