

# 目 录

中文摘要	
英文摘要	
第一章 绪 论	1
1.1 问题的提出	1
1.2 本课题的研究意义以及必要性	3
1.3 本课题的研究现状	4
1.4 “电压暂降”检测算法的初步探讨	5
1.5 本文的主要工作	7
第二章“电压暂降”检测的计算方法——小波变换	9
2.1 小波变换	9
2.1.1 关于小波变换的一些预备知识	10
2.1.2 小波变换的数学描述	12
2.1.3 小波变换的物理特性	14
2.2 “电压暂降”检测问题算法（一）——多分辨率分析	16
2.3 “电压暂降”检测问题算法（二）——复小波变换	24
2.3.1 改进递归小波算法	25
2.3.2 尺度的确定——熵值法	28
第三章 “电压暂降监测系统”的实现方法	30
3.1 虚拟仪器	30
3.1.1 虚拟仪器的基本概念	30
3.1.2 虚拟仪器的典型构成	31
3.1.3 虚拟仪器与传统仪器的比较	31
3.2 基于虚拟仪器概念“电能暂降监测系统”的硬件实现	32
3.3 基于虚拟仪器概念“电压暂降检测系统”的软件实现	35
3.3.1 LabVIEW 的几个概念	35
3.3.2 “电压暂降监测系统”的界面设计	37

---

3.3.3 “电压暂降监测系统”的采集模块的程序设计	43
3.3.4 “电压暂降监测系统”的数据处理模块的程序设计	45
3.3.5 “电压暂降监测系统”的数据分析与 管理模块的程序设计	48
实验数据与波形	53
4.1 利用实函数小波分析时的分析结果	53
4.2 利用复小波分析单相故障的波形	54
4.2.1 熵值法在检测中的作用	54
4.2.2 复小波的应用	57
第四章 结论及展望	59
5.1 结论	59
5.2 展望	59
致谢	62
参考文献	63
作者在攻读硕士学位期间发表的论文	66

## 摘 要

随着电力系统的发展，电压暂降故障发生越来越频繁，而电力系统大量使用的晶闸管以及终端用户使用的基于计算机控制的精密设备对电压暂降十分敏感。本文探讨了检测电压暂降的算法，通过分析比较，选用基于递归复小波作为电压暂降的检测算法。本文首次把“信息熵”引入电压暂降的检测工作中，用于寻找最优的小波尺度，使检测结果更加准确。最后本文利用虚拟仪器开发软件 LabVIEW 建立了电压暂降检测系统，通过实验模拟故障，验证了电压暂降检测算法的有效性。该系统最终实现了电压暂降故障的实时检测、故障报告的自动生成以及故障报文查询等功能。

关键词：电压暂降，小波变换，虚拟仪器，信息熵，数据采集与分析，LabVIEW

### ABSTRACT

Voltage sags occur more frequently with the development of power system. Thyristors are used widely in the power system, computer-based devices applied to many fields by different customers, meanwhile the thyristors and computer-based devices are sensitive to voltage sags. The arithmetic are discussed, the recursive complex wavelet is selected to analysis voltage sags by comparing to the others arithmetic in this thesis. Entropy is applied to find the proper wavelet scale parameter  $f$ , with which the analysis results are more precise than with other parameters. LabVIEW language is used to program Virtual Instruments for detecting and analyzing the voltage sags in this paper. The actual running result proves that the entropy-based recursive complex wavelet arithmetic is effectively on analyzing the voltage sags. In the virtual instrument we programmed, real time monitoring the voltage sags, automatic generating report, querying the malfunction report is realized too.

Sun xiaolong (Electrical engineering theory and new technology)

Directed by prof. Li Baoshu

Key Words: Voltage sags, Wavelet, Virtual Instruments, Entropy,

Data acquiring and analyzing, LabVIEW

# 第一章 绪 论

内容提要：本章主要介绍了电能质量问题各个元素的定义和内容，指出“电压暂降”问题产生的原因及其危害。根据“电压暂降”的特点初步探讨了检测“电压暂降”的方法，分析传统方法的不足之处。

## 1. 1 问题的提出

席卷全球的电力工业市场化浪潮正方兴未艾。竞争机制的引入使得电力工业充满活力，同时也带来了许多不确定因素。电能质量就是其中之一。电能的质量，通常以供电的电压频率、电压波动和闪变、间断、暂降、尖峰、谐波畸变、三相不平衡和高频干扰等项指标来表征。其具体含义见表 1.1<sup>[1]</sup>。

表 1.1 电能质量问题一览表

Tab1.1 List of power quality problem

类型	扰动性质	特征指标	产生原因	后果	解决办法
谐波	稳态	谐波频谱；电压、电流波形	非线性负载；固态开关负载	设备过热；继电保护振荡；设备绝缘破坏	有源、无源滤波器
三相不平衡	稳态	不平衡因子	不对称负载	设备过热；继电保护振荡；通信干扰	静止无功补偿
陷波	稳态	持续时间；幅值大小	调速驱动	计时器计时错误；通信干扰	电容器；隔离电感器
电压闪变	稳态	波动幅值；出现频率；调制频率	电弧炉；电机启动	伺服电机运行不正常	静止无功补偿
谐振暂态	暂态	上升时间、峰值、持续时间	线路、负载和电容器的投切	设备绝缘破坏；损坏电力电子设备	滤波器；避雷器；隔离变压器
脉冲暂态	暂态	上升时间；峰值；持续时间	闪电电击线路；感性电路开合	设备绝缘破坏	避雷器
瞬时电压上升、下降	暂态	幅值；持续时间；瞬时值/时间	远端发生故障；电机启动	设备停运；敏感负载不能正常运行	不间断电源；动态电压恢复器
噪声	稳态 暂态	幅值 频谱	不正常接地；固态开关负载	微处理器控制设备不能正常运行	正确接地、滤波器

在电力市场机制下，电力系统的发、输、配电方和用户通过电力这一特殊的商品有机的联系在一起，成为市场的参与者。在这一过程中，电能



质量及价格是各参与者共同关心的问题。优质优价的原则已经成为人们的共识，并且，电能的质量还关系到整个系统的安全与稳定，关系着电力系统各参与者的收益和损失，因而倍受关注。

表 1.1 所述的电能质量问题中，目前尤其为电力系统及用户所关心的有两方面内容：一个是电压的瞬时电压上升（Voltage Swell）与（Voltage Sag or Voltage Dip）下降，另外一个为电力系统的谐波（Harmonics）。到目前为止，对瞬时电压上升与下降还没有相对统一的定义，因此，本文暂且称“电压的瞬时下降”为“电压暂降”以方便行文。

在 IEEE Std 493 中<sup>[2]</sup>，电压暂降描述为：电压有效值（Voltage RMS）跌落为原电压有效之值的 10%~90%，持续时间在 0.5 周期到 1 分钟的故障。电压暂降通常以电压的下降幅值（通常用故障电压有效值与正常电压有效值的比值表示）与故障持续时间来表征。当电压跌落的时间超过 1 分钟之后，通常认为此时发生了电压的下陷（Undervoltage），而不是电压暂降。在文献[2]中，阐述了产生电压暂降故障的两个基本原因：一个是产生接地或短路故障后，故障电流故障点的流动造成了电压有效值的跌落，另一个是电机的起动。同时，文献还指出表征电压暂降的几个基本的指标，一个是发生电压暂降故障时电压有效值跌落的幅值(Magnitude of the Individual Sags)；一个是电压暂降故障持续的时间(Duration of the voltage Sags)；再一个是电压暂降故障发生的频度(Frequency-How often Sags Occur)。

电压暂降对电力系统无论是生产者还是终端用户均有严重的影响：

(1)在电力系统中大量使用的晶闸管通常作为功率变换装置的主要元件，它在工作时需要对器件的导通和关断进行有规律的切换，而其自关断需要反向电压，市电正弦波在某些特定的条件下可参与构成反向电压，瞬间的电压暂降会导致反向电压不足，导通的晶闸管也就不能及时关断，其它晶闸管可能导通，其后果就是桥臂短路将器件损坏，造成生产的中断。

当电磁开关两端的电压有效值降幅超过 50%，持续时间超过 10ms 时将自行脱钩，瞬间电压降发生以后，在重力和蓄能弹簧弹力作用下，使衔铁返回至原位，触点恢复正常。

(2)对于用户终端，尤其是计算机等精密设备用户，电压暂降的影响也十分严重。当电压降幅超过 10%，持续时间超过约 10ms 时，将影响

计算机的正常工作，对普通计算机而言，突然停电可能丢失大量数据甚至损坏硬件。对某些单片机控制系统来说将意味着失去控制，处于待机状态。如计算机的开关电源在电压下降到一定值时，交换器停止震荡，高频变压器不再传输能量，开关电源输出电压会迅速下降，导致机器“假停电”现象的产生。

总而言之，电压暂降对高层建筑、化纤、半导体、钢铁、造纸、交通、医院、银行、邮电、机关等诸多行业有着密切的关系。同时，电压暂降也是发生频率频繁的一种故障类型。例如，江西涤纶厂一直受电压暂降问题的困扰，根据该厂调度室对常规纺丝车间记录表明因电压暂降造成的停车故障的次数为：1996年3-12月共16次，1997年7-8月共18次，依次推算年平均为20次<sup>[3]</sup>。电压的暂降与电力系统谐波、电压闪变等等同属于电能质量问题，但在欧洲的电力部门及用户对暂降的关注程度比其它的有关电能质量问题的关注程度要强的多，由电压暂降引起的电能质量投诉占整个电能质量问题的80%以上，而由谐波，开关操作等过电压引起的电能质量投诉不到20%。

## 1.2 本课题的研究意义以及必要性

对电压暂降信号的捕捉与分析有十分重大的意义。通过上节所列举的电压暂降对电力系统无论发电端还是用户端的影响可以看出，本课题意义在于以下几点：

(1) 在电力市场机制下，可以为电力生产部门和用户评价电能质量提供可靠的依据，这样有利于明确责任，避免各种经济纠纷。

(2) 通过对电压暂降问题的检测，可以为各种电力设备生产部门提供丰富可信的数据资料，为其改进设备指出一个方向，有利于提高产品质量及经济效益。

(3) 可以为电力生产部门提供统计资料，为综合分析事故提供依据。

(4) 故障发生导致电压暂降发生，那么对电压暂降的全面分析，为预测电压暂降发生建立基础，通过准确的预测，实现在故障前有效的抑制。

可见，本课题无论对于理论还是实际，都有重要的意义。

### 1.3 本课题的研究现状

在国内，对于电能质量进行监控，已经渐渐成为人们的共识。也有很多人在这方面做了许多工作。文献[4]中详细说明了国标中各种电能质量问题的定义和检测的方法，由于电压暂降在我国还没有列入国标中，所以很难找到标准的、成熟的检测方法。文献[5]中，给出了基于传统智能仪器思想的电能质量测试系统的硬件软件的设计方法，其中硬件负责数据采集与分析工作，软件主要完成的通讯、数据管理工作。这样实现的测量系统的功能主要是由硬件功能决定的，而且很难对系统的功能进行更改、或添加。文献[6]中阐述了对电能质量全过程检测的必要性以及实现的方法，它是在测量现场，用不同的硬件仪表测量得到一系列数据后，再通过一台后台计算机把数据进行整理，然后传输到上位机实现测量工作的。但是在其实现方案中对于电压暂降事件，完全依赖有效值阈值来记录电压暂降故障，因此无法正确得到电压暂降的各种信息。

在文献[7-9]中，涉及到虚拟仪器的概念，并把虚拟仪器应用到电力系统中来，利用虚拟仪器完成了谐波、电力系统参数的测量工作。虚拟仪器的诸多优点也通过该系统而显现出来。

近些年来，国内对于电压暂降故障也越来越重视。文献[3]中指出了电压暂降对电力部门的危害，更强调了对电力用户造成的危害，最后谈到了一些对策。也有人提议在国标中添加有关电压暂降的一些标准。但是现在，国内对电压暂降问题的研究刚刚起步，还没有相对有效的检测电压暂降的设备和算法。对于电压暂降检测的算法研究，人们大多局限在快速傅立叶变换及其改进算法，另外还包括最小二乘估计、卡尔曼滤波、时间序列分析、及神经网络等方法。但是由于种种原因，对于电力系统中的暂态现象至今还没有相对比较统一的方法来描述。随着小波理论的形成与发展，以及文献[10-12]对小波变换技术在电力系统领域应用所做的介绍，使小波变换技术在电力系统暂态故障分析中得到了广泛的应用。随后，人们把小波变换应用到了电能质量监测领域<sup>[13]</sup>得到了良好的效果，人们也越来越注意到小波变换对奇异值的敏感性<sup>[14-15]</sup>。

在国外，电压暂降问题已经得到广泛的重视。在很早的时候，国外就

开始对一些与电压暂降有关的现象进行统计并给出一些统计资料<sup>[16]</sup>，小波变换也广泛的应用于暂态信号的分析当中<sup>[17-19]</sup>，这几篇文献都是使用多分辨率分析的方法，提取不同尺度下的细节信号，从而找到一些暂态故障的信息。在文献[18]中给出了一个典型的电压暂降故障波形的多分辨率分析方法，从试验数据上看，效果十分明显。随着小波理论的进一步发展，更多的母小波被人们发现，既包含幅值信息，还包括相位信息的母小波——复小波得到广泛的应用<sup>[20-21]</sup>，小波变换的相位信息往往对奇异性更为敏感，易于捕获奇异点，准确检测出信号的突变。

#### 1.4 “电压暂降”检测算法的初步探讨

在电力系统发展的初期，系统的容量较小，设备性质相对单纯，出现的故障类型也相对集中于周期性的、稳态的情况。譬如谐波问题就是一个很好的例子。随着谐波问题的深入研究，人们发现，在时间信号中很难寻找到关于信号的频率信息（即使找到的也局限于基波），于是在数学的“空间”，“基”，“正交基”的概念基础之上，人们利用三角函数  $\sin(x)$ ,  $\cos(x)$  的正交性，实现了时域到频域的一一映射，构建了一座时域与频域的桥梁——Fourier 变换。

##### (1) Fourier 变换

对信号  $f(x) \in L^2(R)$ ，其 Fourier 变化的定义为：

$$F(\omega) = \int f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1.1)$$

Fourier 逆变换为：

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1.2)$$

Fourier 变换中的基函数是三角函数，这些三角函数构成了平方可积的函数空间  $L^2(R)$  的一组正交基，所以可以将  $f(t)$  分成不同频率的三角函数的线性组合，从而得出待分析信号的频率组成方式。

人们通过 Fourier 变换，揭示了更加深刻的认识空间，但是，它也存在先天带来的不足：（1）由于三角函数填满空间的本性，它在物理空间是双向无限延伸的正弦波，因此 Fourier 变换是先天非局限的，它对信号  $f(t)$  中

的任何局部信息的处理都是相同的；(2) 为了用式 (1.1) 从信号中提取谱信息  $F(\omega)$ ，就要取无限的时间量，使用过去与将来的信号信息只为了计算单个频率的频谱，不能反映随时间变化的频率<sup>[22]</sup>。(3) 当信号只在某一局部变化时，会影响到每一个谱值的变化，从而使局部化特征“平淡化”。

通过“电压暂降”问题的定义描述，我们可以发现，“电压暂降”实际上是电压随时间变化的，非周期性质的暂态信号，这与 Fourier 变换的基本定义是相悖的。因此，我们可以得出结论：Fourier 变换是不适合作为分析暂态信号的数学工具的。

对于时域信息，其根本无法反映频域的变化，而对于 Fourier 变化后的频域信息，也无法反映出随时间变化的时域信息。为了能对这两种情况进行“折衷”，人们提出了“短时 Fourier 变换”亦称“加窗 Fourier 变换”。

### (2) 加窗 Fourier 变换 (Gobar 变换)

对信号  $f(x) \in L^2(R)$ ，其加窗 Fourier 变化的定义为：

$$(G_b^a f)(\omega) = \int f(t) g_a(t-b) \ell^{-i\omega t} d\omega \quad (1.3)$$

其中：

$$g_a(t) = \frac{1}{2\sqrt{\pi a}} \ell^{\frac{-t^2}{4a}} \quad (1.4)$$

从 (1.3) 式可以看出来 Gobar 变换不再是  $\omega$  单一变量的函数，而含有“ $b$ ”的信息，即在  $t=b$  时的信息。进一步研究表明，Gobar 变换的时间——频率窗的宽度对于所有频率的谱是不变的。这样就限制了它对很高或很低频率信号的应用。人们希望的是当信号频率较高时，频率窗要大，当信号频率较低时，频率窗可以较小，但时间窗要大。但同时对于实际的信号处理过程，时间窗和频率窗的乘积要满足测不准关系<sup>[23]</sup>，即海森堡 (Heisenberg) 测不准原理，该原理可描述为：对于分析所采用的时频窗，其时间带宽与频率带宽分别为  $\Delta t$  与  $\Delta \omega$ ，那么：

$$\Delta t \cdot \Delta \omega \geq c \quad (c \text{ 为一常数}) \quad (1.5)$$

因此时频域的分辨率不可能无限制的提高也就是说，无论时间窗还是频率窗，它们都不可以无穷大或者无穷小。可以看出，加窗 Fourier 变换割断了频率与窗口宽度的内在联系，在高频与低频上有一定的局限性，不适用与



频带较宽时的频谱分析。

对于“电压暂降”问题，往往伴随着一些奇异值点，阶跃点信息。在加窗 Fourier 变换或 Fourier 变换中，会使简单的信号复杂化，反倒不利于分析。例如  $f(t) = \delta(t - t_0)$ ，其傅立叶变换为  $F(\omega) = e^{-it_0\omega}$ 。同时，要求系统的采样频率很高，否则难以利用分析的结果恢复原来信号中的各种成分。

通过以上的简单探讨，我们发现，无论是 Fourier 变换还是加窗 Fourier 变换都无法满足我们对“电压暂降”问题进行有效分析的要求，我们只能借助现代信号处理技术中更加有效的办法来解决这个问题，这也是本文的关键所在。

## 1.5 本文的主要工作

通过对“电压暂降”问题的简单分析，以及电压暂降问题的研究现状，我们确定了本课题的主要的工作：

### (1) “电压暂降”检测的算法研究（一）。

我们首先采用了实小波 Daubechies 4 系数小波实现了 Mallet 多分辨率算法下电压暂降问题的检测。通过 DB4 小波进行多分辨率分解，我们可以在不同尺度下准确观察到幅值具有明显突变情况下的电压暂降发生时刻，但是对于电压暂降结束时刻，由于幅值没有明显阶跃，从而导致该算法的失败。

### (2) “电压暂降”检测的算法研究（二）。

通过我们进一步分析算法（一）的失败原因，我们发现，电压暂降故障的发生与结束，不但在电压有效值上发生跳变，电压幅值、相位也同时发生跳变。于是，我们尝试使用变换结果包含幅值与相位信息的复小波变换，并在小波变换结果中构造了有利于显现故障跳变点的检测值  $WTM_{3PH}$ ，使检测结果十分准确，具有很好的分析效果。

### (3) 将“信息熵”原理引入“电压暂降”分析中。

在确定复小波分析尺度问题上，一般的文献只是说选择合适的分析尺度，没有明确的分析办法。本文利用熵原理，通过计算不同尺度下的分解的熵值，找到“合适”的尺度，使得结果更加精确。

### (4) 利用虚拟仪器技术，构建“电压暂降检测系统”

虚拟仪器，作为仪器仪表发展的最新方向，以其丰富的功能，强大的数据处理与分析能力，越来越得到人们的认同，尤其是其依托于计算机这一强大工具，使其拥有更广泛的应用前景。

本课题即在虚拟仪器概念基础之上，构建了一套“电压暂降检测系统”，通过数据采集卡取得数据之后，完全利用软件实现了所有分析、存储、显示等功能。

## 第二章 “电压暂降” 检测的计算方法——小波变换

内容提要：本章介绍了小波变换基本的数学定义；分析了实小波变换与复小波变换的异同；最终给出了具体用于“电压暂降”检测的算法；并利用“熵”值法确定了合适的小波尺度，达到了分析目的。

### 2.1 小波变换

小波变换 (Wavelet Transform) 是本世纪数学研究成果中杰出的代表之一。它作为数学的一个分支，汲取了现代分析学中诸如泛函分析、数值分析、Fourier 分析、样条分析、调和分析等众多分支的精华。由于小波分析在理论上的完美性以及应用上的广泛性，在短短的几年内，受到了科学界，工程界的高度重视，并且在信号处理、图象处理、模式识别、量子场论、天体识别、CT 成像、话音识别、彩色复印、数字电视、音乐、雷达、刑事侦破等十几个学科领域中得到 (或将得到) 广泛应用。小波分析为本世纪现代分析学做了完美的总结。

小波变换方法的提出，尽管可以追溯到本世纪初，但作为一种比较成熟的理论，则是在 80 年代中叶，特别是 Mayer、Daubechies 等人为小波理论的形成和完善作出了重大贡献。1990 年，Daubechies 在美国作了 10 次关于小波分析的系列讲座，把小波分析介绍到工程界，从此，“小波热”就开始了，并迅速传播到世界各国。

小波变换是一种时域——频域分析，它在时域——频域同时具有良好的局部化性质 (Localization nature)。它可以根据信号不同的频率成分，在时域和空间域自动调节取样的疏密：频率高时，则密；频率低时，则疏。基于小波变换的这些优良特性，可以观察函数、信号、图象的任意细节，并加以分析，因此小波变换也被誉为“数学显微镜”。从而，小波分析在信号分析与重构、信号和噪声分离技术、特征提取、数据压缩等工程上，显示出优越性，而这些正是 100 多年来大量应用于工程的 Fourier 变换所无法做到的，而且从原则上来讲，传统上使用 Fourier 变换的地方，都可以利用小波变换来代替。



下面，我们简要的介绍一下有关小波变换的一些知识。

### 2. 1. 1 关于小波变换的一些预备知识

(1) 函数空间与基: 泛函分析的研究中，一个很重要的概念是函数空间。函数空间，即由函数构成的集合。设  $\ell_k(t)$  为一函数序列， $X$  表示  $\ell_k(t)$  所有可能的线性组合构成的集合，即：

$$X = \{ \sum_k a_k \ell_k(t); a_k \in R, k \in Z \} \tag{2.1}$$

称  $X$  为由序列  $\ell_k(t)$  张成的线性空间，记作：

$$X = span\{\ell_k\} \tag{2.2}$$

也即对任意  $g(t) \in X$  有

$$g(t) = \sum_k a_k \ell_k(t) \tag{2.3}$$

若  $\ell_k(t)$  是线性无关的，使得对任意  $g \in X$ ，式 (2.3) 中的系数  $a_k$  取值唯一，我们称  $\{\ell_k(t)\}_{k \in Z}$  为空间  $X$  的一个基底。那么，对于任意两个属于内积空间  $X$  的两个元素  $x, y$ ，若  $\langle x, y \rangle = 0$ ，则称  $x, y$  正交，用  $x \perp y$  表示。

若内积空间  $X$  中元素列  $\{\ell_k(t)\}$  满足

$$\langle \ell_m, \ell_n \rangle = \begin{cases} 1 & \text{当 } m = n \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } m \neq n \text{ 时} \end{cases} \tag{2.4}$$

则称  $\{\ell_k(t)\}$  为  $X$  中的标准正交基。

有些情况下，基底  $\{\ell_n(t)\}$  之间并不满足式 (2.4) 的正交关系，对于这种情况，引入对偶基  $\tilde{\ell}_k(t)$  的概念：

$$\langle \ell_l(t), \tilde{\ell}_k(t) \rangle = \delta(l - k)$$

则我们可得到函数分析和综合公式：

$$g(t) = \sum_k \langle g(t), \tilde{\ell}_k(t) \rangle \ell_k(t) \tag{2.5}$$

由于这里正交性存在于展开系和对偶系之间，所以这种基称为双正交基。

对任意的函数，在这种展开形式下，其展开系数是唯一的，因为无论正交基还是双正交基，它们的基元素之间都是不相关的。

如果一个函数序列  $\{\varphi_j\}_{j \in Z}$  是相关的，并且仍然允许在空间  $X$  中的按照式

(2.5) 展开, 此时我们称这个函数序列  $\{\varphi_j\}_{j \in Z}$  为框架。

(2) 框架 (**Frame**): 设  $H$  为一 Hilbert 空间,  $\{\varphi_j\}_{j \in Z}$  为  $H$  中的一个函数序列, 若对于任意  $f \in H$ , 存在实数  $A, B$ , 并且满足  $0 < A < B < \infty$ , 使得下述不等式成立:

$$A\|f\|^2 \leq \sum_{j \in Z} |\langle f, \varphi_j \rangle|^2 \leq B\|f\|^2 \quad (2.6)$$

则称  $\{\varphi_j\}_{j \in Z}$  为一个框架; 称  $A, B$  分别为框架的上、下边界。

若  $A=B$ , 则称此框架为一紧框架, 此时式 (2.6) 变为:

$$\sum_{j \in Z} |\langle f, \varphi_j \rangle|^2 = A\|f\|^2$$

由此可以推得:

$$f = A^{-1} \sum_{j \in Z} \langle f, \varphi_j \rangle \varphi_j$$

需要特别指出的是: 满足上式的紧框架  $\{\varphi_j\}_{j \in Z}$  一般并非正交的。若  $A=B>1$ , 此时  $A$  给出了这个离散框架的冗余度, 当  $A=B=1$  时,  $\|\varphi_j\|=1 (j \in Z)$ , 则此时  $\varphi_j$  为一正交基, 并且

$$f = \sum_{j \in Z} \langle f, \varphi_j \rangle \varphi_j \quad (2.7)$$

式 (2.7) 给出了紧框架情况下重建函数的公式。

对于框架这一抽象的概念, 我们可以这样理解: 首先我们定义一个线性变换  $[Tx]_j = \langle x(t), \varphi_j(t) \rangle$ , 简记为  $\langle x, \varphi_j \rangle; j \in Z$ 。如果要求能用  $Tx$  表征  $x$ , 则此变换应当具有这样的性质 (1) 唯一性, 即如果  $x_1 = x_2$ , 则  $Tx_1 = Tx_2$ ; (3) 正变换的连续性, 即如果  $x_1$  与  $x_2$  很接近, 则  $Tx_1$  与  $Tx_2$  也必定很接近, 用数学表征就是:

$$\sum_{j \in Z} |\langle f, \varphi_j \rangle|^2 \leq B\|f\|^2, \quad 0 < B < \infty \quad (2.8)$$

(4) 反演的连续性, 即当  $\langle x_1, \varphi_j \rangle (j \in Z)$  与  $\langle x_2, \varphi_j \rangle (j \in Z)$  十分接近时,  $x_1$  与  $x_2$  也十分接近, 由数学表达式表征为:

$$\sum_{j \in \mathbb{Z}} |\langle f, \varphi_j \rangle|^2 \geq A \|f\|^2 \quad 0 < A < \infty \quad (2.9)$$

把式 (2.8) 与 (2.9) 合到一起, 便得到式 (2.6) 所属所述的框架的基本定义。

### 2. 1. 2 小波变换的数学描述

小波变换完整的数学定义为:

设  $x(t)$  是平方可积函数[记作  $x(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ],  $\varphi(t)$  是被称为基本小波或母小波 (Mother Wavelet) 的函数。则

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \varphi^* \left( \frac{t-\tau}{a} \right) dt = \langle x(t), \varphi_{a\tau}(t) \rangle \quad (2.10)$$

称为  $x(t)$  的小波变换。

其等效频域表示为:

$$WT_x(a, \tau) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int X(\omega) \Psi^*(a\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2.11)$$

式中  $a > 0$  是尺度因子 (虽  $a$  亦可为负, 但在工程实践中,  $a < 0$  是没有意义的, 故不予以讨论。),  $\tau$  为位移, 其值可正可负。符号  $\langle x, y \rangle$  代表内积, 若存在两个函数  $x(t)$ ,  $y(t)$ , 这两个函数的内积表示为 (上标\*代表取共轭)

$$\langle x(t), y(t) \rangle = \int x(t) y^*(t) dt \quad (2.12)$$

$\varphi_{a\tau} = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi \left( \frac{t-\tau}{a} \right)$  是基本小波 (母小波) 的位移与尺度伸缩。在式 (2.10)

中不但  $t$  是连续变量, 而且  $a$  和  $\tau$  也是连续变量, 因此称为连续的小波变换 (continuous wavelet transform, 简记 CWT)。

并不是所有的  $\varphi(t) \in L^2(\mathbb{R})$  都可以作为小波来进行小波变换的, 只有当其傅立叶变换  $\Psi(\omega)$  满足允许条件:

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (2.13)$$

时, 我们称  $\varphi(t)$  为一个基本小波或母小波。

根据上一节的叙述，我们把式 (2.6) 中的  $\varphi$  换成小波函数  $\varphi(t)$ ，如果不等式依然成立，就得到了小波框架的定义，即：

$$A\|f\|^2 \leq \sum_j \sum_k |\langle f, \varphi_{jk} \rangle|^2 \leq B\|f\|^2 \quad (2.14)$$

此时便称  $[\varphi_{jk} | j \in z^+, k \in z]$  构成了一个框架。

在紧框架的定义下，信号的重建可以这样得到：  
对于紧框架有：

$$\sum_j \sum_k |\langle f, \varphi_{jk} \rangle|^2 = A\|f\|^2 \quad (2.15)$$

于是可得：

$$f(t) = \frac{1}{A} \sum_j \sum_k |\langle f, \varphi_{jk} \rangle| \varphi_{jk}(t) = \frac{1}{A} \sum_j \sum_k WT_f(j, k) \varphi_{jk}(t) \quad (2.16)$$

通过上面的推导，我们可以看出，在小波框架下，函数的小波变换和重构都是可行的。

对于计算机实现数据处理，我们需要使用离散化的小波变换。目前比较通行的办法是对尺度按幂级数离散化，即  $a$  取  $a_0^0 = 1, a_0^1, a_0^2, \dots, a_0^j$ 。位移的离散相对复杂一些，具体方法如下：当  $a = a_0^0 = 1$  时（也就是  $j = 0$  时）， $\tau$  可以是某一基本间隔  $\tau_0$  作均匀采样。其余各尺度下由于  $\varphi(a_0^{-j}t)$  的宽度是  $\varphi(t)$  的  $a_0^{-j}$  倍，因此采样间隔可以扩大  $a_0^{-j}$  倍。这样  $\varphi_{a\tau}(t)$  就被改写成：

$$a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi[a_0^{-j}(t - ka_0^j \tau_0)] = a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi[a_0^{-j}t - k\tau_0] \quad (2.17)$$

将 (2.17) 记做  $\varphi_{a_0^j, k\tau_0}(t)$ 。

在这些点上计算得的  $WT$  记做：

$$WT_x(a_0^j, k\tau_0) = \int x(t) \varphi_{a_0^j, k\tau_0}^*(t) dt, \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots, k \in Z \quad (2.18)$$

在计算机中，对于积分的处理，往往采用分段线性化的办法进行计算，这样就得到了适用于计算机处理的离散小波变换公式：

$$DWT_x(f, kT) = \sqrt{fT} \sum_{n=1}^{\infty} x(nT) \varphi^* [f(nT - kT)] \quad (2.19)$$

式中  $f = \frac{1}{a}$ ， $a$  为小波尺度， $T$  为采样周期， $k$  体现小波在时间上的平移。

### 2. 1. 3 小波变换的物理特性

在小波的数学定义中，我们还很难看出小波变换的许多优良的特性，通过本节的叙述，我们将清楚的看到小波变换的强大功能。

假定有如下三个频率不同的信号，前面所述的 STFT 变换下，时频域的波形如图 2.1 所示。

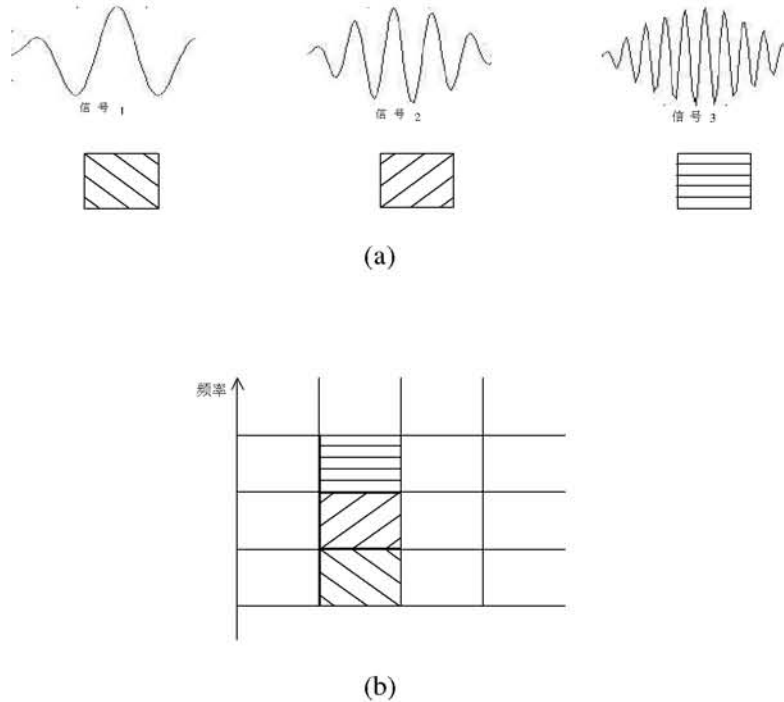


图 2.1 短时傅立叶变换 STFT 的基本分析单元与时频图

(a)STFT 的基本分析单元；(b)时频图

Fig2.1 Basis function and time frequency resolution of the short-time Fourier transform(STFT)

(a) Basis functions (b) Coverage of time-frequency plane

在图 2.1 中，信号下面对应的三个不同的方块分别表示三个频率由低到高的时频窗，基于这些时频窗，就可以在时频域上表征出原信号中不同

频率成分的含量，从而达到了变换的目的。这些小时频窗的长，表征了此变换在时间上的分辨率，宽则表征了在频率上的分辨率，希望它们的长度都很小，以便有更好的分辨率，但由于前面所述的海森堡测不准原理指出，两者不可以同时都任意的小。由此可见短时傅立叶变换虽然在一定程度上克服了标准傅立叶变换的局限，但当式 (1.3) 中的窗函数  $g(t)$  确定后，矩形窗的形状就确定了，改变的只是窗口在时频面上的位置，若要改变分辨率，就必须重新选择窗函数。因此，短时傅立叶变换 (STFT) 虽然用来分析平稳信号还是具有一定的应用价值，但并不适用于非平稳信号。在信号变化剧烈的时刻，主要是高频，要求有较高的时间分辨率，而波形变化比较平稳时，主要是低频，则需要有较高的频率分辨率，显然，短时傅立叶 (STFT) 不能两者兼顾。

同样对于前面所述的三个信号，利用小波变换，如图 2.2 所示。

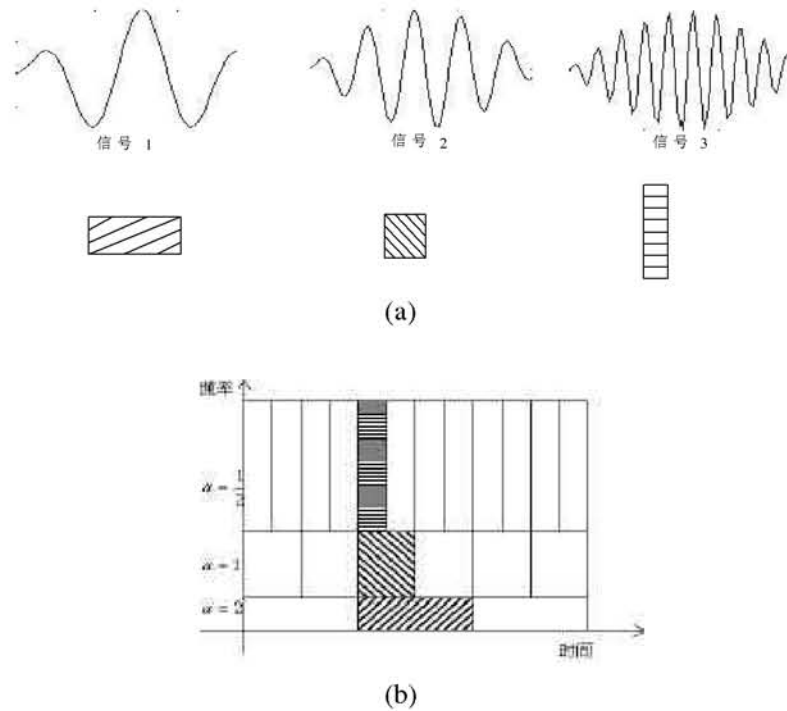


图 2.2 小波变换的基本分析单元与时频图  
(a) 小波变换的基本分析单元；(b) 小波变换的时频图

Fig2.2 Basis functions and time-frequency resolution of the wavelet transform (WT)

(a) Basis function (b) Coverage of time-frequency plane

图 2.2 充分的显示了小波变换的“变焦距”特性。当信号频率较低的时候（信号 1），分析窗则具有较高的时间分辨率、较低的频率分辨率；反之，当频率较高的时候（信号 3），分析窗则具有较高的频率分辨率、较低的时间分辨率。这些正是 STFT 所不具备的特性。在测不准原理下，小波变换既满足了频率分辨率要求，同时也兼顾了时间分辨率。

当小波函数  $\psi(\omega)$  是幅频特性比较集中的带通函数时，小波变换便具有表征待分析信号  $X(\omega)$  频域上局部性质的能力。例如，Morlet 小波  $\varphi(t) = \ell^{-\frac{t^2}{T}} \ell^{j\omega_0 t}$  的频谱  $\psi(\omega) = \sqrt{\frac{\pi}{T}} \ell^{-\frac{T}{4}(\omega-\omega_0)^2}$  便具有这样的特点，它是中心频率在  $\omega_0$  的高斯型函数。只要改变  $\omega_0$  就可以表征  $X(\omega)$  在  $\omega_0$  附近的局部特性。

采用不同的  $a$  值作处理时，各个  $\psi(a\omega)$  的中心频率和带宽是不一样的，但其品质因数[即（中心频率）/（带宽）]却不变。所以在图 2.3 中，当  $a$  值小的时候，时轴上观察范围较小，而在频域上相当于用较高的频率作分辨率较高的分析，即用高频小波作细致观察。当  $a$  值较大的时候，时轴上观察范围较大，而在频域上相当于用低频小波作细致观察<sup>[24]</sup>。

小波变换正好满足了我们对暂态信号分析所要求的特点，它也有有效的克服了传统 FFT 变换与 STFT 变换的根本性的不足，为解决“电压暂降”检测问题提供了有效的数学手段。

## 2.2 “电压暂降”检测问题算法（一）——多分辨率分析

对于一个小波函数  $\varphi(t)$ ，重写式（2.17），

$$a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi[a_0^{-j}(t - ka_0^j \tau_0)] = a_0^{-\frac{j}{2}} \varphi[a_0^{-j}t - k\tau_0] \quad (2.17)$$

令  $a = a_0$ ； $b = k\tau_0$ ，我们需要改变  $a$  和  $b$  的大小，以使小波变换具有“变焦距”的功能。在实际中最常采用的是二进制的动态采样网格，即  $a = 2$ ， $b = 1$ ，则每个网格对应的尺度为  $2^j$ ，平移为  $2^j k$ ，由此得到的小波

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \varphi(2^{-j}t - k) \quad j, k \in Z \quad (2.20)$$

称为二进制小波（Dyadic Wavelet）。

1988 年 S.Mallet 在构造正交小波基时提出了多分辨率（Multi-

Resolution Analysis) 的概念, 从空间的概念上形象的说明了小波的多分辨率特性, 并将之间所有正交小波的构造方法统一起来, 给出了正交小波的构造方法以及正交小波变换的快速算法, 即 Mallet 算法。Mallet 算法在小波分析中的的地位相当于快速傅立叶变换在经典傅立叶分析中的地位。

定义函数  $\phi \in L^2(R)$  为尺度函数 (Scale Function), 若其整数平移系列  $\phi_k(t) = \phi(t - k)$  满足

$$\langle \phi_k, \phi_{k'} \rangle = \delta_{k,k'} \quad k, k' \in Z \tag{2.21}$$

定义由  $\phi_k(t)$  在  $L^2(R)$  空间张成的闭子空间为  $V_0$ , 称为零度空间:

$$V_0 = \overline{\text{span}_k\{\phi_k(t)\}} \quad k \in Z \tag{2.22}$$

尺度与位移均可变化的函数集合:

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-\frac{j}{2}} \phi(2^{-j}t - k) = \phi_k(2^{-j}t) \tag{2.23}$$

则称每一尺度  $j$  上的平移系列  $\phi_k(2^{-j}t)$  所张成的空间  $V_j$  为尺度为  $j$  的尺度空间:

$$V_j = \overline{\text{span}_k\{\phi_k(2^{-j}t)\}} \tag{2.24}$$

随着尺度  $j$  的增大, 函数  $\phi_{j,k}$  的时间定义域变大, 且实际的平移间隔 ( $2^{-j} \Delta\tau$ ) 也变大, 则它的线性组合不能表示函数 (小于该尺度) 的细微变化。

于是, 为了能够表示不同尺度空间下的细节信息, 我们引进小波空间的概念。设  $W_m$  为  $V_m$  在  $V_{m-1}$  中的补空间即:

$$V_{m-1} = V_m \oplus W_m, \quad W_m \perp V_m \tag{2.25}$$

图 2.3 表征了对于尺度空间  $V_{m-1}$  的划分方法。按照这种方法, 可以对  $V_m$  继续进行划分, 这样就可以得到下一级的尺度空间  $V_{m+1}$  和小波空间  $W_{m+1}, \dots$

显然任意子空间  $W_m$  与  $W_n$  是正交的, 并且  $W_m \perp V_m$ , 所以:

$$L^2(R) = \bigoplus_{j \in Z} W_j \tag{2.26}$$



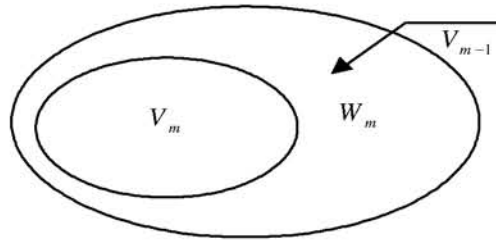


图 2.3 多分辨率空间的划分

Fig 2.3 The division of multi-resolution space

因此， $\{W_j\}_{j \in Z}$  构成了  $L^2(R)$  的一系列正交空间，并且

$$W_j = V_{j+1} - V_j \tag{2.27}$$

可见，小波空间是两个相邻尺度空间的差。因为小波空间能够反映相邻两个尺度空间的差别，因此小波空间有时又称为细节空间。

对于任意函数  $f(t) \in V_0$ ，我们可以将它分解为细节部分  $w_1$  和大尺度逼近部分  $v_1$ ，然后将大尺度逼近部分  $v_1$  进一步分解。如此重复就可以得到任意尺度（或分辨率）上的逼近部分和细节部分。这就是多分辨率分析的框架。

设  $f_s^j(t)$  为函数  $f(t)$  向尺度空间  $V_j$  投影后所得到的  $j$  尺度下的概貌信号，则

$$f_s^j(t) = \sum_k c_{j,k} \phi_k(2^{-j}t) = \sum_k c_{j,k} \phi_{j,k}(t) \quad k \in Z \tag{2.28}$$

其中：

$$c_{j,k} = \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \tag{2.29}$$

称为尺度展开系数。

若将函数向不同的尺度的小波空间  $W_j$  投影，则可得到不同尺度下的细节信号  $f_d^j(t)$

$$f_d^j(t) = \sum_k d_{j,k} \phi_k(2^{-j}t) = \sum_k d_{j,k} \phi_{j,k}(t) \quad k \in Z \tag{2.30}$$

其中

$$d_{j,k} = \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle \tag{2.31}$$

称为小波展开系数。

若将  $f(t) \in L^2(R)$  按以下空间展开：

$$L^2(R) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} W_j \oplus V_j \tag{2.32}$$

其中  $J$  为任意设定的尺度，则

$$f(t) = \sum_{j=-\infty}^J \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \varphi_{j,k}(t) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{J,k} \phi_{J,k}(t) \quad (2.33)$$

在这种定义下的尺度函数  $\phi(t)$  和小波函数  $\varphi(t)$  之间是存在联系的，也就是被称为二尺度方程，它描述的是两个相邻尺度空间，或相邻的尺度空间域小波空间的基函数之间的内在联系。

由多分辨率的概念可知， $\phi(t)$  与  $\varphi(t)$  分别为尺度空间  $V_0$  及小波空间  $W_0$  的一个标准正交基函数。又由于  $V_0 \subset V_{-1}, W_0 \subset V_{-1}$ ，所以  $\phi(t)$  与  $\varphi(t)$  也必然属于  $V_{-1}$  空间，也即  $\phi(t)$  与  $\varphi(t)$  也可以用  $V_{-1}$  空间的正交基  $\phi_{-1,n}(t)$  线性展开：

$$\phi(t) = \sum_n h_0(n) \phi_{-1,n}(t) = \sqrt{2} \sum_n h_0(n) \phi(2t - n) \quad (2.34)$$

$$\varphi(t) = \sum_n h_1(n) \phi_{-1,n}(t) = \sqrt{2} \sum_n h_1(n) \phi(2t - n) \quad (2.35)$$

其中展开系数  $h_0(n), h_1(n)$

$$h_0(n) = \langle \phi, \phi_{-1,n} \rangle \quad h_1(n) = \langle \varphi, \phi_{-1,n} \rangle \quad (2.36)$$

$h_0(n), h_1(n)$  不随尺度  $j$  的变化而变化。即  $h_0, h_1$  是由尺度函数  $\phi(t)$  和小波函数  $\varphi(t)$  决定的，与具体的尺度无关。下面我们称  $h_0$  与  $h_1$  为滤波器系数。

设  $H_0(\omega)$  为  $h_0(n)$  的傅立叶变换， $H_1(\omega)$  为  $h_1(n)$  的傅立叶变换，它们都是以  $2\pi$  为周期的周期函数：

$$H_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_n h_0(n) e^{-j\omega n} \quad (2.37)$$

$$H_1(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_n h_1(n) e^{-j\omega n} \quad (2.38)$$

则二尺度方程的频域表示为：

$$\Phi(\omega) = H_0\left(\frac{\omega}{2}\right) \Phi\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (2.39)$$

$$\Psi(\omega) = H_1\left(\frac{\omega}{2}\right) \Phi\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (2.40)$$

二尺度方程式 (2.39) 与 (2.40) 表明，小波基  $\psi_{j,k}(t)$  可以由尺度函数  $\phi(t)$  的平移和伸缩的线性组合获得，其构造归结为滤波器  $H_0(\omega)$  和  $H_1(\omega)$  的

设计。

下面我们以 Daubechies 4 小波为例,介绍其构成的多分辨率分析在“电压暂降”检测问题中的应用。

Daubechies 4 小波是具有 4 系数的正交小波滤波器组,通过计算可以得到该滤波器组的系数为:

$$\begin{aligned} h_0(0) &= 0.4830 & h_0(1) &= 0.8365 \\ h_0(2) &= 0.2241 & h_0(3) &= -0.1294 \end{aligned}$$

一般简称为 D4 滤波器组。

由这组滤波器,我们就可以求出  $h(n)$ ,  $\phi(t)$ ,  $\varphi(t)$  来。

小波函数和尺度函数波形如图 2.4 所示

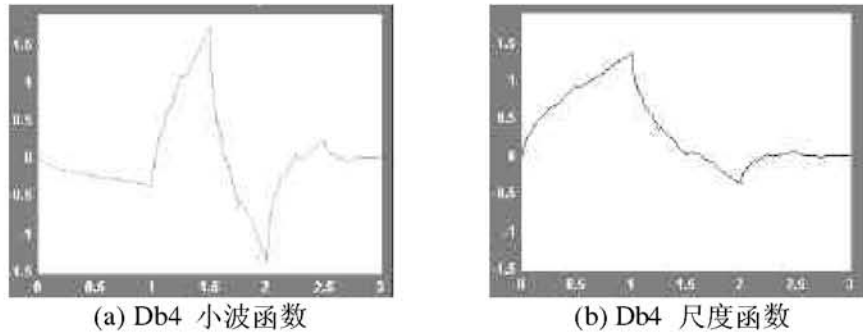


图 2.4 Daubechies 4 系数小波分析的小波小函数与尺度函数

Fig 2.4 Graphs of Daubechies 4 wavelet function and scale function

(a) Graph of Daubechies 4 wavelet function (b) Graph of Daubechies 4 scale function

通过图象,我们可以看出在多分辨率分析中尺度函数的低通特性与小波函数的高通特性,从而完成了对整个空间的不同频率特征的分析。

接下来,我们对“电压暂降”故障发生时刻的信号进行 Db4 多分辨率分析。

信号文件 1 记录的是在第 145 点开始发生电压暂降故障,文件长度为 680 点,系统采样频率为 12800 点/秒,系统频率为 50 Hz,每周期采样 256 点。图 2.5 显示的是采用 Db4 系数小波对这个故障文件进行三级多分辨率分析的分析结果。其中图一与图二显示的是原始波形,从原是波形中,我们可以明显看出故障发生时电压的跌落状况,但是我们不能给出具体的故障发生时刻;图三,图五,图七显示的分别是第一级,第二级,第三级

粗图的重构图象，图四，图六，图七显示的分别是第一级、第二级、第三级细节的重构图象。

按照多分辨率分析的定义，我们可以知道，第一级多分辨率分析的细节反映的是从 $(\frac{f_s}{4} \sim \frac{f_s}{2})Hz$  ( $f_s$  为采样频率)，对于故障文件 1，其采样频率为  $12.8k$ ，所以，第一级细节信号反映了此信号中  $3.2kHz \sim 6.4kHz$  频段上的信息，第一级粗图反映的是此信号中  $0Hz \sim 3.2kHz$  频段上的信息。第二级多分辨率分析则是对第一级粗图信号即  $0Hz \sim 3.2kHz$  的进一步划分，粗图与细节分别表征了  $0Hz \sim 1.6kHz$  频段和  $1.6kHz \sim 3.2kHz$  频段

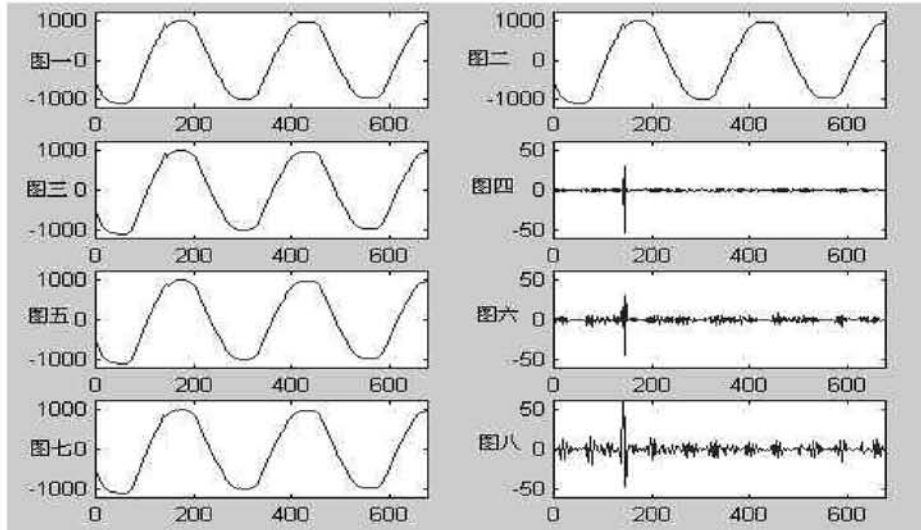


图 2.5 故障 1 的开始时刻多分辨率分析结果

Fig2.5 Analysis result of real malfunction data file 1 with multi-resolution analysis (Beginning Period)

上的信息.....依此类推，即完成了多分辨率分析。

通过图 2.5，我们可以得到故障发生的时刻（在图四中的最大值），因为故障发生时，伴随电压的跳变，形成频率很高的谐波，在多分辨率分析的细节信号中，就会明显的显现出来。而对于基频信号，则会在多分辨率分析的粗图中显露出来，当进行若干次的分解之后，高频信息从原信号中被“剥离”出去，这样就只剩下基频信号了，图 2.5 中的图七就说明了这一点。

图 2.6 是故障文件 2 的小波分析的结果，通过图象我们可以得出一个结论：

对于幅值变换明显的故障，多分辨率分析可以有效的找到故障发生的时刻。

但是实际系统的等效电路中，电感值要大于电容值，从而表现出电压可以出现跳变，而电流相对稳定，这样就意味着对于故障切除点，往往不会有大的电压跳变。

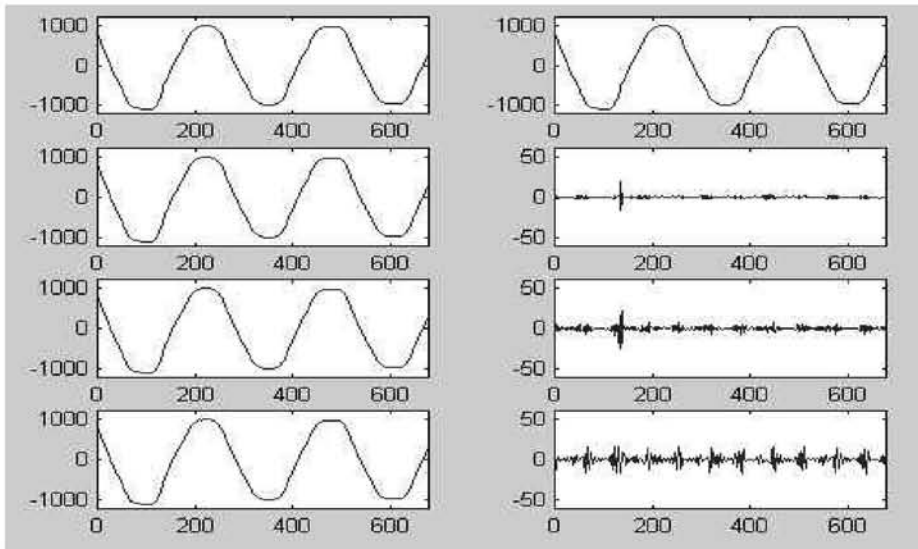


图 2.6 故障 2 开始时刻的多分辨率分析结果

Fig2.6 Analysis result of real malfunction data file 2  
with multi-resolution analysis(Beginning Period)

我们对故障 1 的结束时段进行分析，分析结果如图 2.7 所示。

图中，我们可以发现，在原始波形中，已没有明显的跳变点，多分辨率分析的结果中，无论在粗图还是在细节图象中，我们很难找到指示故障点的信息。对于故障 2 的结束时段的多分辨率分析，有同样的结果，如图 2.8 所示。

可见，多分辨率分析并不适合“电压暂降”检测问题。究其原因，主要在于我们采用的 Db4 小波的多分辨率分析是一个实函数，即它只能反映幅值上的变化，因此当故障结束时，由于没有幅值上的跳变，导致检测失败。

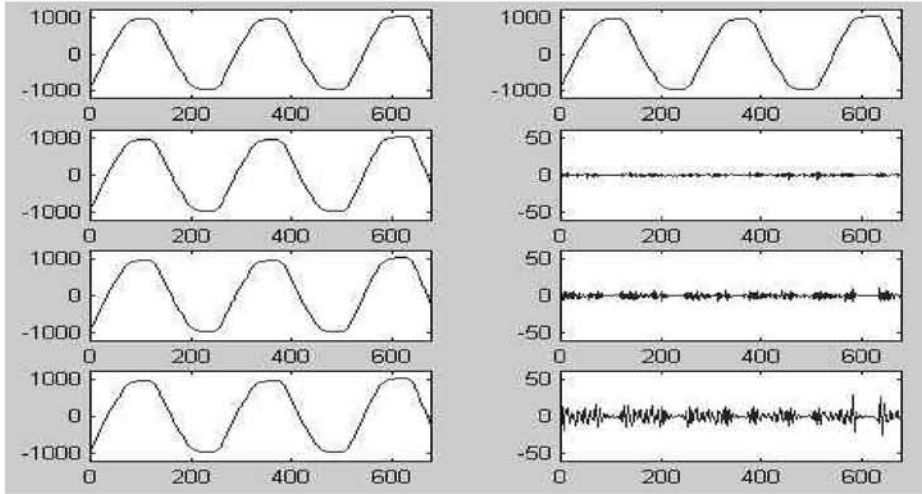


图 2.7 故障 1 结束时刻的多分辨率分析

Fig2.7 Analysis result of real malfunction data file 1  
with multi-resolution analysis(End Period)

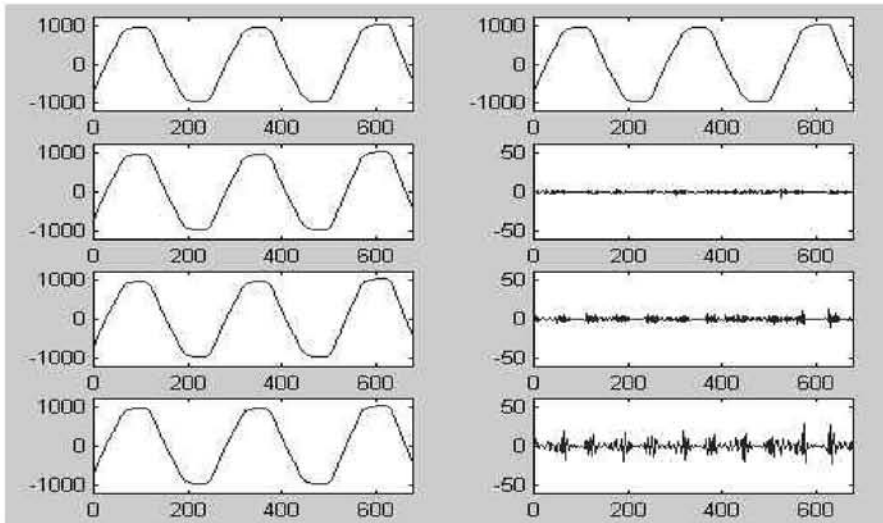


图 2.8 故障 2 结束时段的多分辨率分析

Fig2.8 Analysis result of real malfunction data file 2  
with multi-resolution analysis(End Period)

在文献[25]中，也讨论了多分辨率分析在电压暂降检测问题中的应用情况，而且，文中还提到了 Quadratic 变换（二次变换），在其结论中，也指出，这些方法只适用于“检测信号的剧烈变化，或者明显的具有高频特征的瞬态故障”；可见，同我们的结论是一致的。

文献[14]、[26]中提出了为了检测信号中的奇异性点，需要选用具有紧支撑的和足够阶数消失矩的小波函数，其中的示例也都是具有高阶数消失矩的实函数，其检测非剧烈变化的暂态信号，效果同样不是很好。

### 2.3 “电压暂降”检测问题算法（二）——复小波变换

文献[27—28]把三相系统的电压暂降分成了 4 种类型，类型 A 为三相同步故障并且三相的电压同时跌落相同的幅值，类型 B 为单相故障并且只是幅值的变化，类型 C 是两相发生故障并且不但幅值发生变化，其相角亦发生变化，类型 D 为三相都发生故障，并且其中两相只是相角变化，幅值保持，而另一相的幅值变化而相角保持不变。对于这四种不同的故障类型，文中给出了不同的相电压的表达式，这里不再赘述。在其表达式中，都包含有相位信息 $\phi$ ，这个相位偏差来自两方面。第一源于电源侧电路的 $\frac{X_s}{R_s}$

( $X, R$ 分别表示电路的等值阻抗和等值电阻)比值与供电电路的 $\frac{X_f}{R_f}$ 比值的

不同，往往会造成电压公共节点电压(PCC, Point-of-Common coupling)相角的跳变,这个电压相角的跳变可以看成是相位的初相角；第二源于变压器低压侧的三相不平衡电压跌落，也会造成相角的跳变。

因此，对于实小波为基础的多分辨率分析，只是计算出被分析信号与不同尺度下的尺度函数、小波函数局部波形的相似程度，而信号和小波波形的除了与它们的幅频特性有关外，还与它们的相频特性有关。正如前面所述，信号中往往也包含有丰富的相频信息，因此，小波的相频特性与被分析信号的相频特性匹配程度如何，对小波分析的结果有很大的影响。

文献[29]给出了生成双正交紧支复小波的方法。对于复小波的变换结果，文中提出了采用复合信息的方案。若令复小波变换的实部为 $WTR$ ，虚部为 $WTI$ ，大多数文献采用的是利用幅度信息 $WTM = \sqrt{WTR^2 + WTI^2}$ 与相位信息 $WTPH = \arctan(WTI/WTR)$ ，这种方法过于简单，不能揭示不同信号间的细微差别，于是该文中提出了复合信息的方案，即

$$WTIPH = WTI * WTPH \quad (2.45a)$$



$$WTRPH = WTR * WTRPH \quad (2.45b)$$

$$WTRIPH = |WTR| * |WTI| * WTPH \quad (2.45c)$$

$$WTMPH = WTM * WTPH \quad (2.45d)$$

这些复合信息提供了许多实小波无法提供的信息。

但是，由于文献[29]提出的计算方法，每次计算都需要进行一次完整的积分计算，其计算量随数据的增加迅速增加。

文献[30—31]提出了一种更加快捷具有实时性的复小波算法——改进的递归小波变换。

### 2.3.1 改进递归小波算法

在文献 [21] 中，选用复小波  $\varphi(t) = \left[1 + \sigma|t| + \frac{\sigma^2}{2}t^2\right] \ell^{-\sigma|t|} \ell^{j\omega_0 t}$  ( $\omega_0 = 2\pi, \sigma = 2\pi/\sqrt{3}$ )，构造了双向递推小波算法

(Recursive Wavelet Transform)，对于确定的尺度  $s$ ，只要计算一次  $\delta$ ， $\lambda$  等 5 个复系数及其共轭，此后，只需递推计算小波系数。此算法是由两部分组成：正向变换和反向变换，其中，正向小波变换全部由历史数据计算出的小波变换组合给出，因此是因果的；而反向小波变换要利用尚未计算出的小波变换，使用未来的数据信息，因此是非因果的。非因果系统容易导致结果的不稳定性，而且影响计算的速度。改进的递归小波变换就有效的克服了这一缺点。

本文采用文献[31]中给出的基本小波，现重写如下：

定义：

$$\varphi_1(t) = \left(\frac{\sigma^3 t^3}{3} - \frac{\sigma^4 t^4}{6} + \frac{\sigma^5 t^5}{15}\right) \ell^{(-\sigma+i\omega_0)t} u(t) \quad (2.46)$$

令  $\varphi(t) = \varphi_1^*(-t)$  为基本小波，则得到：

$$\varphi(t) = \left(-\frac{\sigma^3 t^3}{3} - \frac{\sigma^4 t^4}{6} - \frac{\sigma^5 t^5}{15}\right) \ell^{(\sigma+i\omega_0)t} u(-t) \quad (2.47)$$

基本小波在频域内的表示为：

$$\Psi(\omega) = \left[ \frac{6\sigma^5 - 2\sigma^3(\omega - \omega_0)^2}{[\sigma + i(\omega - \omega_0)]} \right]^* \quad (2.48)$$



其中  $\sigma = 2\pi/\sqrt{3}$ ;  $\omega_0 = 2\pi$ ; 此时  $\psi(0) = 0$ , 保证了所选的基本小波满足

容许条件。

图 2.9 即是该小波函数的时域、频域的图象。

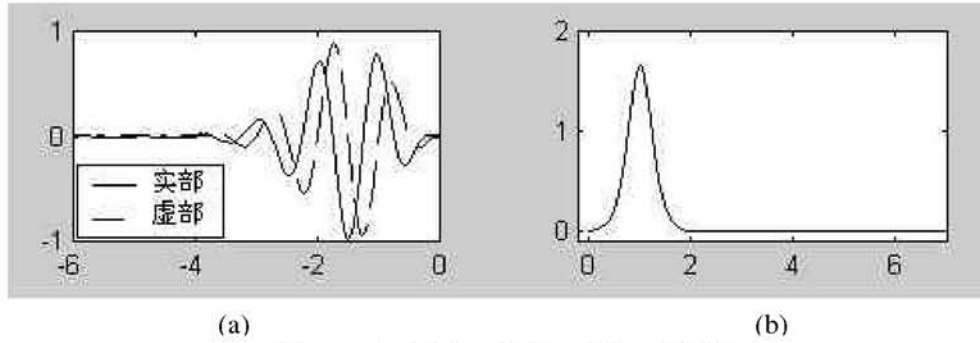


图 2.9 复小波函数的时域、频域图

Fig 2.9 Graph of a complex wavelet

(a) Magnitude versus time plot (b) Frequency plot of the complex wavelet

按照式 2.19 小波变换的离散化定义得：

$$\begin{aligned} W_{s,\varphi}(f, kT) &= \sqrt{fT} \sum_{n=1}^{\infty} s(nT) \varphi^*(f(nT - kT)) \\ &= \sqrt{fT} \sum_{n=1}^{\infty} s(nT) \varphi(f(kT - nT)) \end{aligned} \quad (2.49)$$

式中：

$T$  为采样周期；

$f = \frac{1}{a}$ ,  $a$  为小波尺度；

$k$  为整数，体现了小波在时间上的平移；

式 (2.49) 用卷积表示为：

$$W_{s,\varphi}(f, kT) = T\sqrt{f} [s(nT) * \varphi(fnT)] \quad (2.50)$$

两面取  $Z$  变换，得到：

$$W_{s,\varphi}(Z) = T\sqrt{f} [S(Z) * \psi(Z)] \quad (2.51)$$

把式(2.47)写成离散形式：

$$\varphi(fnT) = \left( -\frac{\sigma^3 (fnT)^3}{3} - \frac{\sigma^4 (fnT)^4}{6} - \frac{\sigma^5 (fnT)^5}{15} \right) \ell^{(\sigma+i\omega_0)fnT} u(-fnT) \quad (2.52)$$

其  $Z$  变换为:

$$\Psi(Z) = \sum_{n=0}^{\infty} \varphi(fnT)Z^{-n} \quad (2.53)$$

整理得:

$$\Psi(Z) = \frac{\delta_1 Z^{-1} + \delta_2 Z^{-2} + \delta_3 Z^{-3} + \delta_4 Z^{-4} + \delta_5 Z^{-5}}{1 + \lambda_1 Z^{-1} + \lambda_2 Z^{-2} + \lambda_3 Z^{-3} + \lambda_4 Z^{-4} + \lambda_5 Z^{-5} + \lambda_6 Z^{-6}} \quad (2.54)$$

其中:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \left[ \frac{(\sigma f T)^3}{3} - \frac{(\sigma f T)^4}{6} + \frac{(\sigma f T)^5}{15} \right] A \\ \delta_2 &= \left[ \frac{2(\sigma f T)^3}{3} - \frac{5(\sigma f T)^4}{3} + \frac{26(\sigma f T)^5}{15} \right] A^2 \\ \delta_3 &= \left[ -\frac{6(\sigma f T)^3}{3} + \frac{22(\sigma f T)^5}{5} \right] A^3 \\ \delta_4 &= \left[ \frac{2(\sigma f T)^3}{3} + \frac{5(\sigma f T)^4}{3} + \frac{26(\sigma f T)^5}{15} \right] A^4 \\ \delta_5 &= \left[ \frac{(\sigma f T)^3}{3} + \frac{(\sigma f T)^4}{6} + \frac{(\sigma f T)^5}{15} \right] A^5 \\ \lambda_1 &= -6A \quad \lambda_2 = 15A^2 \quad \lambda_3 = -20A^3 \\ \lambda_4 &= 15A^4 \quad \lambda_5 = -6A^5 \quad \lambda_6 = A^6 \\ A &= e^{-fT(\sigma - i\omega_0)} \end{aligned}$$

把式 (2.54) 代入式 (2.53) 中, 并利用  $Z$  变换的位移性质, 进行反  $Z$  变换, 得到改进递归小波:

$$\begin{aligned} W_{s,\varphi}(kT, f) &= \\ & \sqrt{f}T[\delta_1 s((k-1)T, f) + \delta_2 s((k-2)T, f) + \delta_3 s((k-3)T, f) + \\ & \delta_4 s((k-4)T, f) + \delta_5 s((k-5)T, f)] - \lambda_1 W_{s,\varphi}((k-1)T, f) - \\ & \lambda_2 W_{s,\varphi}((k-2)T, f) - \lambda_3 W_{s,\varphi}((k-3)T, f) - \lambda_4 W_{s,\varphi}((k-4)T, f) \\ & - \lambda_5 W_{s,\varphi}((k-5)T, f) - \lambda_6 W_{s,\varphi}((k-6)T, f) \end{aligned} \quad (2.55)$$

可见, 改进递归小波变换, 只采用历史数据信息, 不需要进行反向的推导, 计算量可以明显的减少。

### 2.3.2 尺度的确定——熵值法

基本小波确定了，接下来就是如何选择合适的尺度，以达到良好的分析效果。

Daubechies 证明了，当由一个多分辨率分析决定的尺度函数和小波函数都是实函数并且都有紧支集时，小波函数不再具有对称和反对称性，实际应用中只有根据不同信号分解的需要，在几种特性间取折中，选择满足需要的小波函数来分解。定性的讲，当被检测信号的振荡频率于相应的小波函数的振荡频率相近时，信号获得了较大系数的小波分解，这也正是小波分析可以多尺度提取信号不同频率成分的原因。定量来讲，本文采用“熵值法”来选取合适的尺度因子，以达到最大分解，实现测量目的。

文献[32]中给出了信息熵的定义：

若  $x$  为具有概率密度函数  $p(x)$  的随机变量，则其熵  $H(x)$  的定义为：

$$H(x) = E[-\ln p(x)] = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx \quad (2.56)$$

并指出熵值与方差之间存在一定的对应关系：

$$H(x) = \ln(A\sigma) \quad (2.57)$$

其中  $A$  为与  $p(x)$  有关的常系数。式(2.56)的离散形式为：

$$H(x) = -\sum p_i \ln p_i \quad (2.58)$$

对于小波变换的序列  $u(x)$ ，它的熵值通常定义为：

$$E = -\sum_k |u(k)|^2 \ln(|u(k)|^2) \quad (2.59)$$

它表征了信号与小波之间的距离，该距离越小（即熵值越小），则信号与基之间的差别越小，信号获得了最大的分解，以达到最佳的分解效果。

有了熵值的定义，我们可以利用熵值的大小来选择不同的小波尺度，下面我们以 10 个实际系统采样得到的电压暂降波形为例，分析熵值在确定故障结束点中的作用。

分析所采用的数据即为本课题开发出来的“电能质量监测系统”采集得到，采样频率为 12800 点/秒/每通道，即每周期 256 点，故障设定为单

相电阻性大负荷接入与切除，系统同时采集 2 个通道，通道 1 记录电压波形，通道 2 记录负荷电流，这样可以准确记录负荷接入与切除的时间，以确定故障的起始与结束时间。

分析图表 2.1 中记录的是不同尺度条件下结束时段波形的熵值。

在表 2.1 中的测量值取为故障结束时复小波分解后熵值最小的序列中的最大值的序列号，实际值取为电流波形的结束时刻的序列号，误差为序列号差值得绝对值与采样周期( $\frac{1}{12800}$ s)的乘积。

表 2.1 不同尺度  $f$  下的小波分解熵值比较

Table 2.1 The wavelet entropy in different scale parameter  $f$

编号	3000	3500	4000	4500	5000	5500	测量值	实际值	误差 (ms)
1	0.34394	0.16657	0.01117	0.02283	0.01175	0.00005	101	104	-0.2343
2	0.09394	0.05124	0.10091	0.08066	0.63363	3.55413	116	122	-0.4688
3	0.28841	0.1958	0.08355	0.01422	0.00188	0.00008	108	105	0.2434
4	0.32046	0.21971	0.09171	0.01831	0.00311	0.00024	109	106	0.2343
5	0.10593	0.08265	0.0311	0.0372	0.10469	0.50569	160	162	-0.1563
6	0.68567	0.46011	0.19694	0.01874	0.00204	0.00048	104	103	0.00781
7	0.23163	0.00354	0.10975	0.0736	0.22474	1.11955	148	146	0.1563
8	0.45497	0.38417	0.31058	0.12808	0.16316	0.01607	101	103	-0.1563
9	0.13609	0.13959	0.08629	0.10096	0.29880	1.51332	144	150	-1.4688
10	0.29390	0.22882	0.05735	0.0662	0.70724	4.04510	108	111	-1.2343

采用“熵值”法确定的不同尺度因子的小波函数能有效的检测非幅值明显变化的故障，其平均误差为：0.235151 毫秒，最大误差为：0.4688 毫秒，最小的误差仅为：0.00781 毫秒。

误差产生的原因归纳起来有以下两点：

- (1) 表 2.1 中的尺度因子的步长取的很大，这样容易造成跳过最佳尺度因子这种情况，如果能进一步缩小尺度因子的搜索步长，将会得到更好的分析效果，不过，运算量也将随之增加。
- (2) 因为采集卡采用的是多通道共用的 A/D 转换模块，因此电压通道与电流通道不可避免得存在不同步的情况。

## 第三章 “电压暂降监测系统”的实现方法

内容提要：本章首先介绍了“虚拟仪器”的基本概念，“虚拟仪器”与传统意义上的测量仪器的本质区别；在“虚拟仪器”的概念下构建了“电压暂降检测系统”，文中介绍了本系统具体的硬件与软件实现方法。

### 3.1 虚拟仪器

#### 3.1.1 虚拟仪器的基本概念

测量仪器从产生到发展按照文献[33]大体可以分为三个阶段：（1）以电磁机械式为代表的模拟仪表阶段；（2）以记录仪、示波器为代表的电子仪表阶段；（3）以使用计算机实现测量工作为代表的仪器阶段。

随着科学技术的迅猛发展，在测量中不仅要确定被测量的值，有时还要对大量的数据进行分析、判断，这样人工处理的弊端就显而易见了，急需一种新型的测量仪器，能代替人工完成测量任务。于是进入 20 世纪 80 年代以来，数字信号处理技术、系统辨识技术、计算机技术以及现代数学的迅速发展，为一种新型的仪器——虚拟仪器——提供了丰富的理论基础。

虚拟仪器技术是综合运用了计算机软件技术、智能测试技术、模板及总线的标准化技术、数字信号（DSP）处理技术及高速专用集成电路(ASIC)制造等技术，建立在标准化、系列化、模块化、积木化的硬件与软件平台上的一个完全开放的系统<sup>[34]</sup>。

虚拟仪器的基本思想是利用计算机来管理仪器、组织仪器系统，进而代替仪器完成测量，最终达到取代传统仪器电子仪器的目的。虚拟仪器中的硬件需要完成的只是数据的输入与输出，真正实现测量功能的是 PC 上的软件，因此，有人概括的说，虚拟仪器就是“软件即仪器”。

### 3. 1. 2 虚拟仪器的典型构成

虚拟仪器按照其构成方式的不同，通常分成 4 种，它们是（1）基于 GPIB（General Purpose Interface Bus）接口的虚拟仪器系统；（2）基于串口或其它工业标准总线的系统；（3）基于 VXI 总线仪器实现的虚拟仪器系统；（4）基于 PXI 总线的仪器系统。实际上，这四个不同的划分根本区别在于数据的获取渠道的不同，通过不同的总线（或接口）最终把数据传送到计算机的数据总线上，完成分析处理的工作。如图 3.1 所示，就是一个典型虚拟仪器的构成框图。

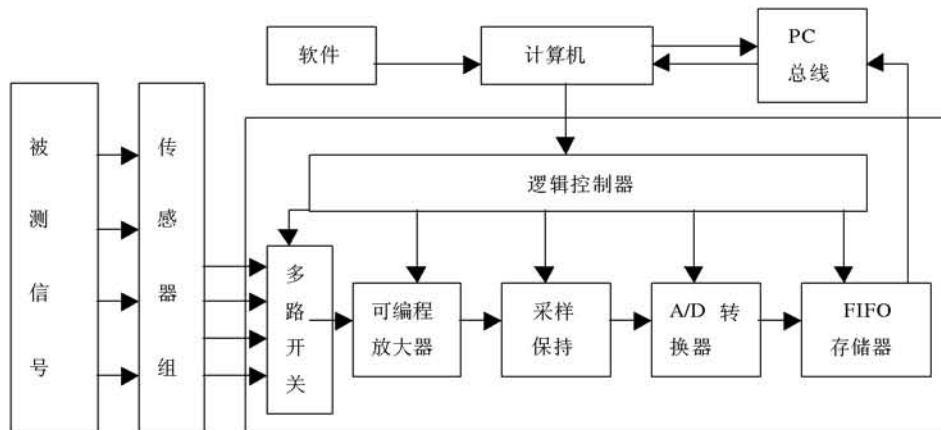


图 3.1 基于数据采集的虚拟仪器硬件框图

Fig 3.1 Elements graph of acquiring data hardware

整套系统的核心在于软件部分，计算机为软件的运行提供了硬件支持，软件所需的数据是通过 PC 总线上获得的。在实际电力系统中，被测信号往往为电压信号，或电流信号，有时还测取一些节点信号。传感器的作用就是把这些信号转换成适于 DAQ 板转化的电压信号（一般为  $\pm 5V \sim \pm 10V$  之间），DAQ 板的作用是把传感器送过来的信号转换成数字量，最终通过 FIFO 存储器把数据传送到数据总线上。根据测量的目的，编制相应的软件，利用总线上的数据就实现了传统仪器的测量任务。

### 3. 1. 3 虚拟仪器与传统仪器的比较

虚拟仪器系统是基于 PC 构成的，它的硬件部分往往具有很大程度的通用性，软件是系统的核心，这样使它的实现不是强调物理形式，因此，

虚拟仪器相对于传统仪器的优势是显而易见的，归纳起来有以下几点：

(1) 性价比高。虚拟仪器的价格相对同类功能的传统仪器的价格要便宜的多，尤其对于大型的测量系统，这种优势就更加明显；技术更新快（一般为 1~2 年）。虚拟仪器系统为开放系统，用户可以根据需要组成仪器或系统。用户有时甚至不用更改任何硬件，只需改动或应用相应的软件模块即可构成新的虚拟仪器系统。这样就一改传统仪器的各项功能均由厂商定义的传统，用户拥有更多更大的灵活性。

(2) 智能化高。利用计算机强大的分析、计算、逻辑判断能力，用户可以在其上建立一套智能专家系统，对于数据可以编辑、存储、打印，在完善的数据库基础上，还可以实现数据的检索与分析。

(3) 界面友好，使用简单。在基于视窗技术的虚拟仪器面板上，用户通过鼠标即可完成所有操作，人机界面十分友好。测量结果可以通过显示器直观显示出来。

(4) 具备网络功能。虚拟仪器是面向应用系统结构的，因此，它可以方便的与网络、各种外设及其它应用相联系。

(5) 误差的减小。在虚拟仪器系统的测量过程中，减少了硬件的使用，因而减小了误差。

正因为虚拟仪器具有以上特点，使其在工程实际中得到了越来越广泛的应用。在国际上，虚拟仪器早已步入实用阶段，我国虚拟仪器应用则刚刚起步，但是发展十分迅速。相信在不久的将来，我国虚拟仪器的应用也会越来越广泛，并将逐渐取代传统仪器。

### 3.2 基于虚拟仪器概念“电压暂降监测系统”的硬件实现

正如虚拟仪器的基本特征里叙述的一样，本系统的硬件部分完成的基本任务就是把市电（或工业用电）电压信号（通常为 220V 的交流电或 380V 的交流电）转化成 DAQ 的额定输入范围的交流信号（一般为  $-10V \sim +10V$  之间），再由 DAQ 板把模拟信号转换成数值量，形成计算机能够处理的数组。

根据硬件测量的基本任务，我们搭建了如图 3.2 所示的硬件平台。



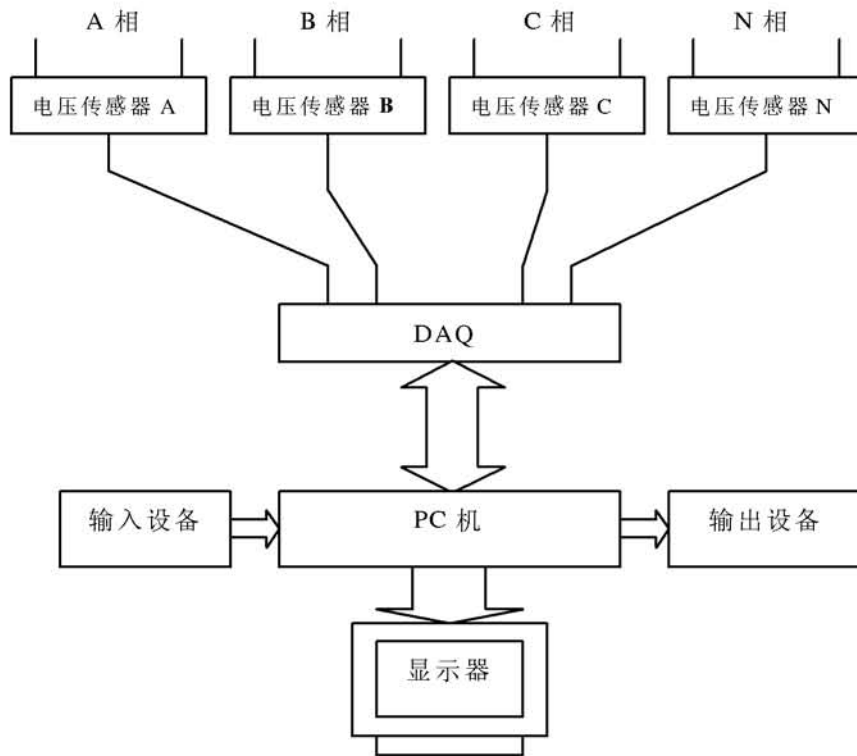


图 3.2 硬件系统的结构图

Fig 3.2 The sketch map of hardware

图中的传感器使用的是保定市霍尔电子有限公司生产的 HEC-F6 磁平衡电压传感器，该传感器的基本电气参数如表 3.1 所示：

表 3.1 传感器基本参数

Table 3.1 The parameters of sensor

型号规格	电流输入范围	失调电流	精确度等级	输出标称值	过载能力	线性度	响应时间	温度漂移	输入频率	隔离耐压
HEC-F6	0-20mA	±0.2 mA	0.5	25mA	1.5IN/60s	0.5	15us	250 ppm/C	±DC-10KHz	3KV DC

磁平衡电压传感器实际为一个精密的变电流装置，它把原边的电流成比例的变换为付边电流，用户通过电阻即可取得电压值。具体的接线如图 3.3 所示。电路中， $R_{i1}$  取  $27.5K\Omega$ ， $R_n$  取  $200\Omega$ ，这样在比较极端的情况下若电压为 380V 输入，输出最多也只有 9.77V 左右，处于  $\pm 10V$  之间。驱动电源采用  $\pm 15V$  的微机直流电源， $R_n$  的输出接在直流电源的 GRND 上。

DAQ 采用的是美国 NI 公司生产的 6040E (MIO-16E-4) 数据采集卡。它的电气特性为：



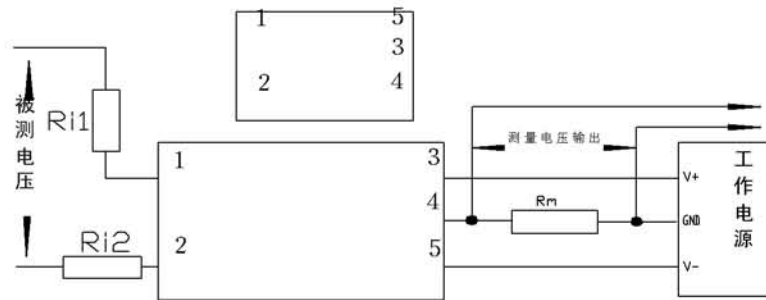


图 3.3 传感器的接线图

Fig 3.3 The connecting of the sensor

- 模拟输入

单端输入：16 通道；差动输入：8 通道；

单通道采集可达  $500\text{ kS/s}$ ；多通道可达  $250\text{ kS/s}$ ；

12 位精确度。

- 模拟输出

2 通道 12 位输出。

- 数字 I/O

8 线 ( $5\text{V/TTL}$ )。

- 计数器、时钟

2 上升沿/下降沿，24 为精确度。

- 触发

模拟触发/数字触发。

在 Windows 下 LabVIEW 自带的驱动程序库可以顺利的找到并安装该卡的驱动程序，并在 Measurement & Automation 中添加该卡，供用户配置与使用。

PC 机是虚拟仪器软件运行的环境，显示器类似传统仪器的指示面板，输入设备（如鼠标，键盘）类似于传统仪器的各种功能按钮；输出设备具有很多种形式，有打印机、磁盘机，还有近些年逐渐普及的光存储设备，这些是传统仪器所没有的。同时，PC 机还具有丰富的功能，这些功能都可以为虚拟仪器系统所利用。

### 3.3 基于虚拟仪器“电压暂降检测系统”的软件实现

软件是虚拟仪器系统的关键，没有软件，也就无从谈起虚拟仪器了。目前应用广泛的测控软件均要求具有层次化结构，一般分为驱动层软件和应用层软件。

驱动层软件大致有两种，一种是模块生产厂家提供的现成的硬件驱动程序，通过它用户可以方便的调用硬件，而不用对低层的内存、中断等进行操作，硬件对于用户相当于一个透明的黑匣子。同时，硬件厂家有时提供面向高级可视化编程语言的 API（应用程序接口）函数，为在应用程序中实现各种功能创造了良好的环境。另外一种驱动软件是用户自制的面向低层的驱动软件，它往往是用户在自制的硬件模块基础之上编写的程序，因此这种程序通常不具备通用性。在开发应用程序时，编程人员要详细的了解程序接口信息，不过，同时因为用户只会对想用的功能模块创建接口，这种自制的程序还具备高效的特点。本系统中的驱动程序即采用的 NI 公司 DAQ 卡（PCI-MIO-16E-4）自带的程序，在正确装载了硬件之后，在 WINDOWS 操作系统中会出现该卡号，同时在其属性中，我们可以发现，该卡的中断、内存分配都已完成，用户不用作任何干预。

应用软件是用户实现对数据采集各项内容的主要手段。通过应用软件，用户不但可以对系统各个硬件进行管理，同时还可以进行数据的分析与表达。目前比较普遍使用的开发平台有：C/C++，Visual C++，Visual Basic, Delphi, Power Builder 等等，它们都可以作为应用软件的开发环境，而 HP VEE, DT VEE, LabVIEW, BridgeVIEW 等则是更高级的、可视的软件开发平台，特别适用于数据采集和控制方面的应用。根据有关报道证明，采用 LabVIEW 语言开发的数据采集系统要比 C 语言生产效率提高 12 倍，因此，专家预言，以直观的图形开发系统是未来的发展方向。

本课题就采用了美国 N (National Instrument) 公司开发的可视化平台。LabVIEW 6.0I 作为开发环境。根据层次化及面向对象的编程思想，我们把整个系统分成以下几个模块：（1）界面部分；（2）采集模块部分；（3）数据处理模块；（4）数据分析管理模块；

#### 3.3.1 LabVIEW 的几个概念

本小节将介绍 LabVIEW 语言的一些基本概念，以方便下文的叙述。

使用 LabVIEW 开发平台编制的程序称为虚拟仪器程序，简称 VI。一个 VI 包括三个部分：程序前面板、框图程序和图标/连接器。

程序前面板用于设置输入数值和观察输出量，用于模拟真实仪表的前面板。在程序前面板上，输入量称为控制（Controls），输出量被称为显示（Indicators）。控制和显示是以各种图标形式出现在前面板上，如旋钮、开关、按钮、图表等，这使得前面板直观易懂。下面是一个温度计程序（Thermometer VI）的前面板。如图 3.4 所示。

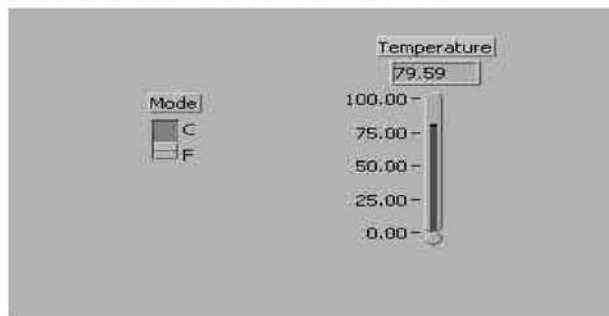


图 3.4 Thermometer VI 的前面板

Fig3.4 The front panel of Thermometer VI

每一个程序前面板都对应着一段框图程序。框图程序用 LabVIEW 编写，可以把它理解成传统的源代码。框图程序由端口、节点、图框和连线构成。其中端口被用来同程序前面板的控制和显示传递数据，节点被用来实现函数和功能调用，图框被用来实现结构化程序控制命令，而连线代表程序执行过程中的数据流，定义了框图的数据流动方向。上述温度计程序的框图如图 3.5 所示。

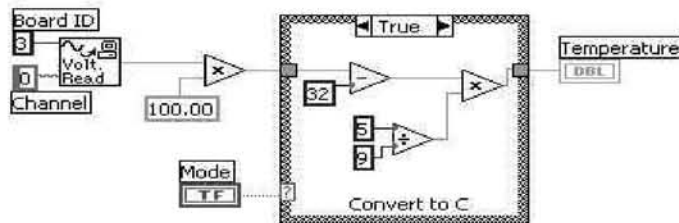


图 3.5 温度计程序的框图

Fig 3.5 The diagram of Thermometer VI

图标/连接器是子 VI 调用的接口。图标是子 VI 在其它程序框图中被调用的节点表现形式；而连接器则表示节点数据数据的输入/输入出口，就像函数的参数。用户必须指定连接器端口与前面板的控制和显示一一对应。图 3.6 就是温度计程序的图标和连接器。

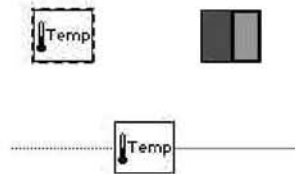


图 3.6 温度计程序的图标和连接器

Fig 3.6 The icons and connectors of Thermometer VI

连接器一般情况下是隐含不显示的，除非用户选择打开它。

LabVIEW 强大功能归因于它的层次化结构，用户可以把创建的 VI 程序当子程序调用，以创建更复杂的程序，而这种调用的层次是没有限制的。LabVIEW 具有多个图形化的操作模板，用于创建和运行程序。这些操作模板可以随意在屏幕上移动，并可以放置在屏幕的任一位置。操纵模板共有三类，为工具（Tools）模板、控制（Controls）模板和功能（Functions）

### 3.3.2 “电压暂降监测系统”的界面设计

本系统的主要功能分为数据采集与数据分析两个大的部分，数据采集主要是采集系统三相电压信息，数据分析则是对这些数据进行相应的数学运算，并进行储存，形成报文。

具体的程序编制中，我们采用了线程思想对各个功能模块进行规划、管理，具体分成三个线程，它们是界面显示线程；采集线程；文件分析与处理线程。程序框图如图 3.7 所示。

这三个线程随着主程序界面的启动而同时运行。但他们的优先级别是不同的。根据各线程完成任务的不同，设定采集线程的级别最高，也就是只要该线程需要 CPU 时间进行采集，就先停下其它所有的工作，满足采集需要。对于显示进程和分析线程，它们只有当采集动作板卡不需要 CPU 时间时才进行工作，即它们的级别要比采集线程低，它们是在采集的空隙 CPU 时间才进行工作的。每个采集周期结束，程序会查询界面的按钮状态，

以决定是否进行下一周期的采集工作。

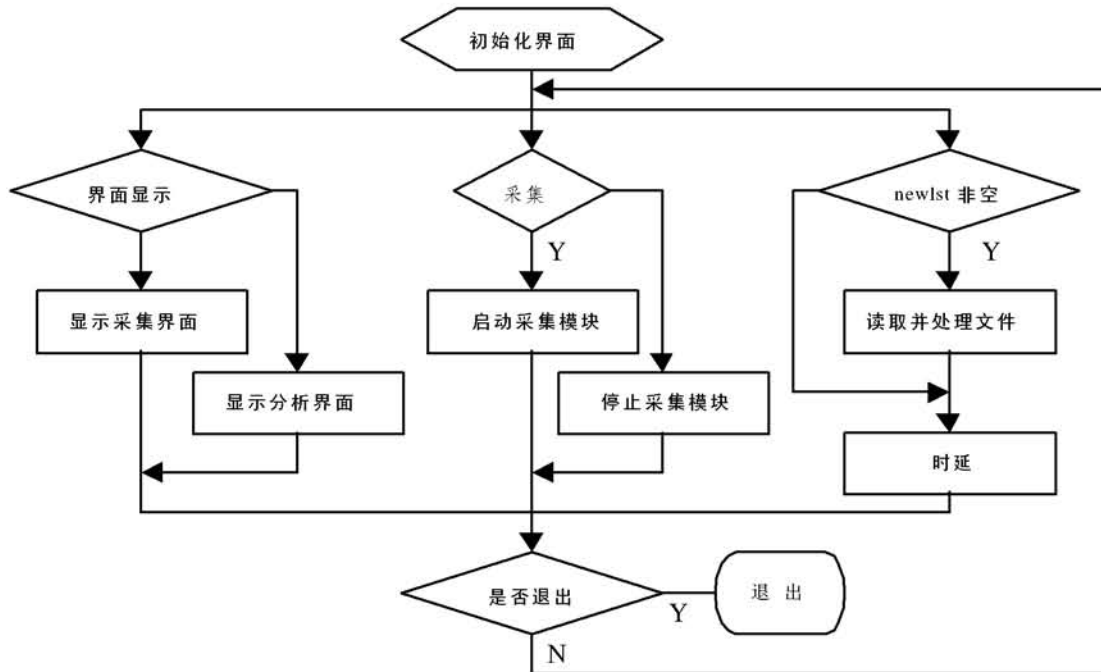


图 3.7 主界面程序框图

Fig 3.7 The program flow chart of main GUI

### 3.3.2.1 数据采集主界面的设计

程序运行的初始界面就是数据采集主界面，如图 3.8 所示。在这个界面上，主要完成了以下几个功能：

#### (1) 采集板卡的参数设定

数据采集板卡的参数采用一个“群”（Cluster）来给定。Device 号选定了安装在系统中编号（或名称）为 1 的 DAQ 板卡。这个编号（或名称）是由 LabVIEW 开发平台提供的 Measurement & Automation 软件设定的，在用户正确安装了 DAQ 板卡后，在 Measurement & Automation 中，就可以添加并设定该板卡的编号（或名称）、该板卡的输入输出方式、附件选择等。本系统采用的即是 NI 公司的产品，所以在安装好驱动之后，Measurement & Automation 自动的为该板卡编号为 1。其它，我们做了以下设定。输入方式：模拟输入方式；单端共地输入；附件为：CB-68BL 接线板。所以在程序中 Device 号设为 1。

Channels 描述了模拟输入通道号的字符串。本系统采用编号为 0~3

模拟通道完成采集采集交流三相电压以及中性点电压的工作。

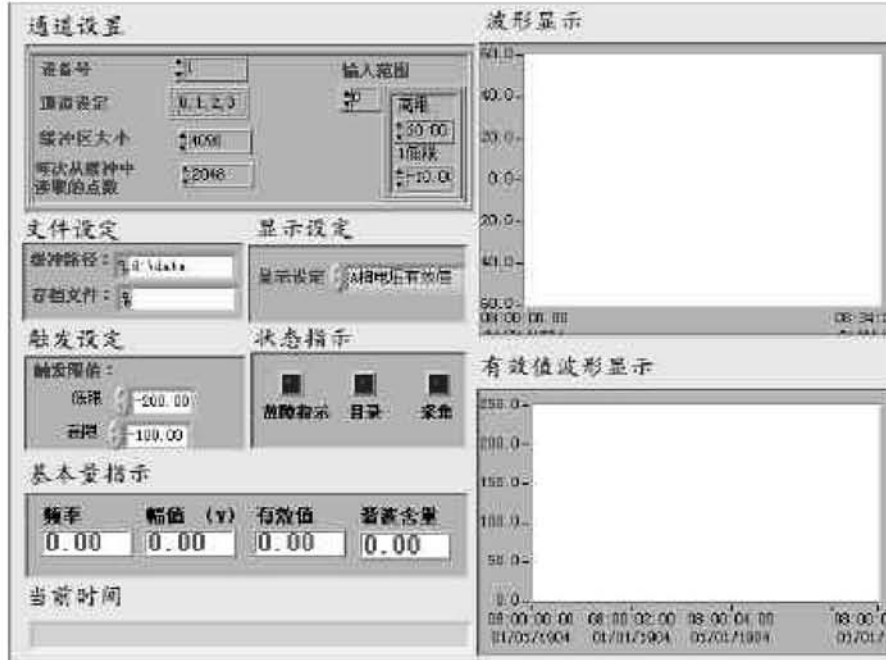


图 3.8 “电能质量监测仪”的主界面

Fig 3.8 The main GUI of Power Quality Monitoring Instruments

Buffer Size 用于给定 DAQ 卡进行连续采集所需的缓冲区 (Circular Buffers) 的大小。每次 LabVIEW 读进内存进行处理的数据多少是由 Scans to read at a time 项确定的。这两项相互配合, 实现了 FIFO (First In First Out), 即“先进先出”的内存管理策略。在本系统中, 由于数据采集相对于计算机系统的总线运行频率以及 CPU 运行频率来说要低的很多, 若系统一味的等待每一个采集到的数据然后再做处理, 显然效率低下, 而且也无法实现连续采集的目的。如果开辟出一段内存区域, 作为临时的数据存储空间, 再利用 Windows 系统的多任务功能, 实现一边采集数据到临时的内存空间, 一边快速处理前一段数据, 这样就实现了连续采集的目的。于是, 要求合理配置“临时内存空间” (Buffers) 与每次程序处理数据量的大小, 以保证: (1) 既不浪费太多的 CPU 时间用于等待下一批数据的到来, (2) 又不至于由于处理的数据太多, 使得“旧”的数还未处理完毕, 新的数据已经填满 Buffer 空间, 而造成数据丢失, (3) 同时, Buffers 空间要尽量的小, 以保证程序运行所需的内存空间。基于这三点考虑, 再加上反复的实际检测, 我们设定 Buffers 的空间大小为 8192 点, 每次系统处理的数据量



(Scans to read at a time) 为 2048 点。

High Limit 和 Low Limit 指明输入信号的范围。通过输入范围我们就可以确定 ADC 能够量化处理的最大、最小的输入电压值。它与分辨率、增益配合, 以获得最佳的测量精度。分辨率是模/数转换所使用数值位数。本系统取输入范围为  $-10V \sim +10V$ 。

Scan rate (采样速率) 决定板卡每秒钟数据的采集能力。再充分考虑本课题的测量目的, 采样频率设定为 12800 点/每秒/每通道。

## (2) 数据采集工作控制开关以及系统控制开关

在面板上的两个按钮“开始采集”、“退出”, 就是控制采集与系统工作与否得按钮。采集按钮在程序启动时是设为无效的(即不可操作的), 只有当文件路径设定有效时, 采集才具备条件。“退出”按钮控制着整个全系统的运行状态, 由于本程序采用线程思想组织的各个功能模块, 有效的退出每一个线程, 是其根本任务。在实现中, 我们使用了一个全局变量 Quit, 通过该全局变量向各个线程发送控制信息。按钮按下, 即为 Quit 赋“真”值, 程序退出, 当按钮开启, Quit 为假, 程序继续运行。

## (3) 文件处理路径的选定

文件路径分为两个部分, 一个是缓冲路径, 即存储临时文件的路径。另一个是存档文件, 即存储故障文件的路径。系统运行时, 首先对采集到的数据进行有效值判断, 当低于限值, 将该数据存储到临时的缓冲路径中, 因为为了保证能记录到故障前和故障后的故障波形, 我们在设定限值时, 并没有按照前面所述的“电压暂降”的定义进行设置, 而是留有 5% 的余地, 因此, 有时有些故障文件是正常范围内的波动造成的“假”故障文件, 在后续的处理中需要剔除。对于经过分析处理的数据文件, 并认定发生故障的情况, 该数据文件将被移动到“存档文件”指定的路径位置。

数据采集系统启动之前, 程序会检查在路径控制中输入的路径是否存在, 若为假, 则建立该目录, 若为真, 则准备后续的采集工作。

本系统的文件组织形式为

## (4) 触发阈值得设定

触发阈值中的高限决定了决定了系统何时进行数据的存储, 低限决定何时结束数据存储。高限要比电压暂降定义中给定的判定值(被测系统电



压有效值的 90%以下 10%以上) 高, 即若电压有效值为 220V, 那么当电压有效值跌落到 198V~22V 时, 即认为发生了电压暂降故障, 对于该系统, 高限就设为  $220 \times 95\% = 209V$ ; 低限是为了及时停止记录数据, 因此, 低限就设定为  $220 \times 90\% = 198V$ 。

#### (5) 采集数据的实时显示等显示功能

在数据采集主界面上, 显示着丰富的信息。故障指示灯表明的是被测系统的电压有效值是否越限, 同时也表示数据采集系统是否在记录数据; 目录指示灯表明的是数据采集系统的目录是否准备就绪, 只有当路径指示灯为真(亮)时, 才可以进行采集工作。

波形显示是数据采集界面的主要功能。在这里显示了电压的实时波形, 还有电压的有效值, 通过通道切换控制, 可以显示不同通道的信息。

在数据采集主界面还显示了频率、幅值、有效值、谐波含量、时间等信息。

### 3. 3. 2. 2 数据分析主界面的设计

如图 3.9 所示, 即是数据分析的默认界面, 也就是故障波形界面。

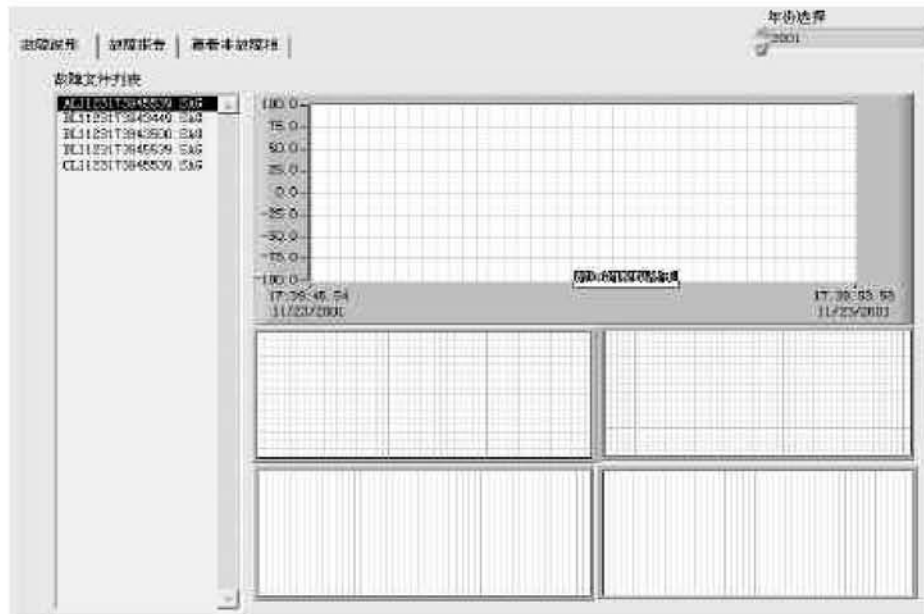


图 3.9 数据分析之故障波形界面

Fig 3.9 The main GUI of malfunction waveform

在数据分析主界面上有三个子界面，通过一个 Tab（翻页）控件分别可选定为：故障波形界面，故障报告界面，查看非故障相界面。故障波形界面包含有一个文件列表，它在每次进入数据分析界面时都会自动到默认目录寻找故障文件名，并显示在列表中；年限选择则是允许用户在故障文件库中选择不同年份的故障文件，当这两项选定之后，用户只要双击感兴趣的故障文件名，故障波形以及小波分析的结果就会显示在界面上的波形显示控件中。为了不做重复的计算工作，故障波形界面的小波分析结果是从故障文件分析报告中得到的。

故障报告界面如图 3.10 所示。

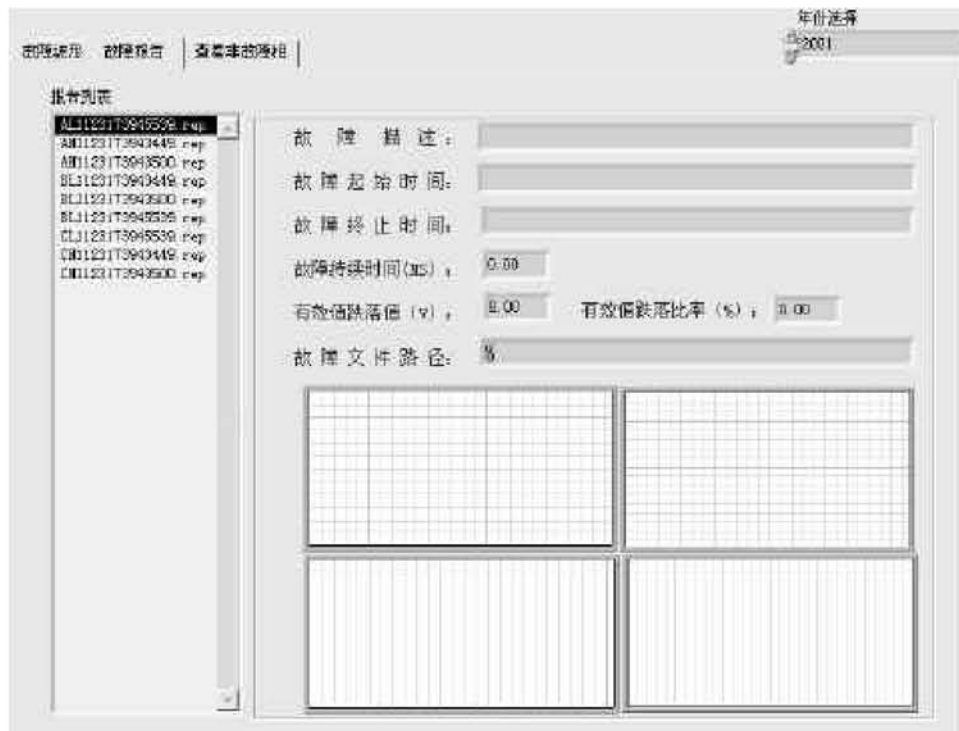


图 3.10 数据分析之故障报告界面

Fig 3.10 The main GUI of malfunction report

此时报告列表中显示的是故障报告的文件名，双击其中的一个，在界面上会显示出对故障的描述；故障的起始、终止时刻；故障的持续时间；有效值跌落情况；故障文件的路径；故障的波形以及小波分析的结果。故障报告包含了所有的电压暂降表征指标，在这里可以对某次电压暂降故障有全面的认识。

查看非故障相界面显示的是对应于一个故障文件，其它几个非故障相

波形，这样当发生故障后，可以查看其它非故障相的波形状态，对用户分析故障原因有很大帮助。

### 3. 3. 3 “电压暂降监测系统”的采集模块的程序设计

采集是本系统的一个核心。本模块设计的基本思想为：希望 DAQ 板工作在连续的采集状态下，利用 DAQ 卡板载的缓存实现数据的连续采集与处理。连续数据采集，或者称为实时数据采集，是在不断采集过程的情况下不断地向计算机返回采集数据。

我们编制了 Sample VI 子程序完成上述采集任务。

#### 3. 3. 3. 1 数据采集卡的设定与启动

数据采集卡设定是通过 AI Config VI 实现的。在 LabVIEW 环境下，对硬件的操作是透明的，用户只要给定一些参数，采集卡就会按照用户的要求进行工作，而不需用户进行中断、地址等低级硬件操作。

在程序的数据采集界面，给定的各种采集信息，通过连接器给到 AI Config 中，当 AI Config VI 完成对硬件的设定之后，会返回一个任务的 ID 号，把各种参数设定绑定到这个 ID 号中，以方便后续的工作。

AI Start VI 功能就是启动数据卡，进行采集工作。利用 AI Config VI 给定的 ID 号，AI Start VI 启动相应的数据采集卡，同时程序设定 AI Start VI 的 Number of scans to acquire 输入项为 0，即表示该板卡每采到一个数据，就会把它读到 Buffers（缓存）当中去，从而实现了数据的连续采集。

#### 3. 3. 3. 2 FIFO 的实现

FIFO（First in First out）先进先出的内存管理策略，在本程序中是通过一个循环实现的。

当 AI Start VI 开始了采集卡的采集工作之后，当缓存中的数据等于或大于 scans to read at a time 设定值时，程序利用 Read VI 从缓存中按照设定值读取数据，并执行分析存档等工作，在执行这些工作的同时，数据采集卡继续向缓存中添写数据，当缓存填满时，缓存的内存指针会跳回起始地址，继续写入数据，覆盖原有数据。分析工作必须在新数据未覆盖掉未分析数据前结束，否则会出现数据丢失的错误。FIFO 实现的示意图如图 3.11

所示。



图 3 11 FIFO实现示意图

Fig 3.11 The sketch map of implementing FIFO method

图 3.11 中，横条纹代表正在写入的内存空间，竖条纹代表存储程序处理过数据的内存空间，灰色条纹代表存储程序正在处理数据的内存空间。在  $t_1$  时刻，程序启动，采集卡采得数据并写入缓存，但此时缓存中的数据并没有达到 scans to read at a time 设定的数值  $N$ ，所以，程序只是在采集数据，并没有进行处理； $t_2$  时刻，缓存中的数据个数超过了  $N$ ，程序同时进行数据处理，采集也继续进行； $t_3$  时刻，缓存即将被填满，同时程序处理过的数据已经没有什么用处了，准备被新数据覆盖； $t_4$  时刻，缓存填满，采集得到的数据从头继续写入缓存， $t_1$  时刻采集的数据被覆盖掉，程序处理  $t_3$  时刻采到的数据 ..... 往复运行，就是现了 FIFO，也实现了连续数据采集的目的。

### 3. 3. 3. 3 频率跟踪的实现，以及电压频率、电压幅值的测量

对于本系统的分析模块，采用的是每周期定点数的分析方法，因此，为了保证每周期都采集定点数的点，就要求系统应当对采集周期做实时的调整，调整的依据就在于频率。只要知道被测系统的电压频率，就可以算出对于确定点数的采样频率。

在 LabVIEW 中，有一个名为 AMP.&FREQ. 的 VI，它可以根据给如的离散数列，计算出相应的幅值与频率值。利用它，我们得到了电压的频率和幅值，有效值通过计算同样可以得到。

在实际系统中，频率的波动不是快速的过程，而是一个缓慢变化的过程，因此，对于频率的测量，也不需要每次采样周期都进行测量。在程序实现中，我们设定每 20 次采样周期进行一次计算，即每  $\frac{2048}{12800} \times 20 = 3.2$  秒计算一次。得到的频率与采集采集系统设定的频率进行比较，若超出一定的范围（本程序设定为  $\pm 0.5\%$ ），则计算出满足该频率的采样频率，并在下一次数据采集周期到来之前，更改采集卡的采集频率，这就实现了频率的跟踪。该过程的流程图如 3.10 所示。

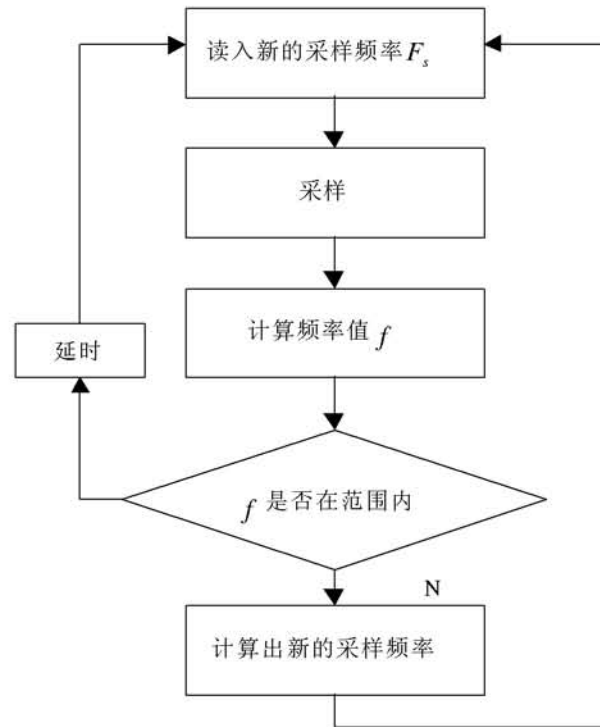


图 3.12 频率跟踪的实现框图

Fig 3.12 The flow chart of tracking frequency

### 3. 3. 4 “电压暂降监测系统”的数据处理模块的程序设计

数据处理模块的主要任务就是对处在缓冲区的数据进行及时处理。要对数据进行转化，把二进制的的数据还原成原数据值，然后进行有效值计算，以判断是否达到电压暂降的阈值，从而决定数据的存留还是舍弃。

我们编制了 Mydata VI 子程序，完成数据的处理，初步判定某段数据文件中是否包含有故障信息。

### 3. 3. 4. 1 数据转换

数据转换主要完成二进制数据到十进制表示的波形数据。在数据采集阶段，为了节省缓存空间，本程序采用了二进制数值存储，并且，舍弃了波形数据中重复的部分。波形数据是 LabVIEW 的一种数据形式，它除了包含有波形的各点的幅值信息，还包含有该波形的起始时间  $t_0$  和采样周期  $dt$ ，这两个信息只有当进行分析时才会用到，因此在程序数据流动时，把二进制的信息，和波形的基本信息分开。

数据采集卡写入缓存的是 16 位的二进制数组，对于单个字，是按照 IEEE big-endian byte ordering 结构排列的。所谓 Big-endian byte ordering 就是高 8 位字节排列在前，低 8 位排列在后。这也是 LabVIEW 与现在流行的大多数编程环境不同的地方。Windows 系统在处理二进制数时，多采用 little-endian 的排列结构，所以在转换时，需要格外注意。我们编制了 Bio to number VI 子程序，把二进制数组转换成十进制数组，再和与之对应的波形信息  $t_0$ 、 $dt$  组成波形数据，为后续工作做好准备。

### 3. 3. 4. 2 有效值计算及检验

有效值计算的基本思想是：对采集到的数组  $1/4$  周期滚动进行  $1/2$  周期有效值计算。即如图 3.131 所示的计算方法。然后与阈值比较得出判断结

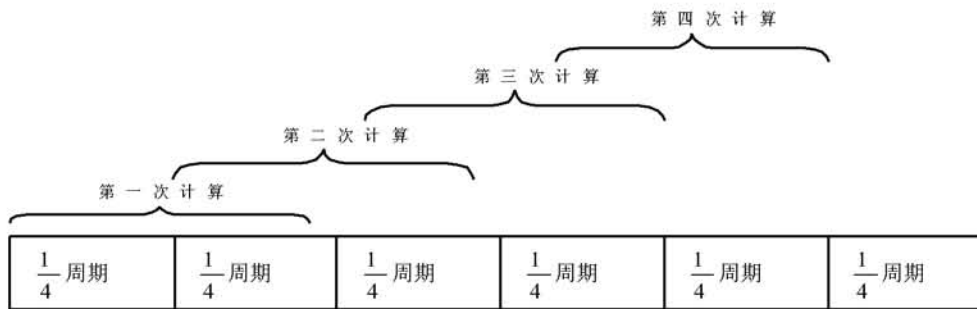


图 3.13 有效值计算方法示意图

Fig 3.13 The sketch map of RMS

论，进行数据处理。

为了实现数据的滚动计算，在程序中使用一个循环，通过设定一个确定步长（本程序中设为 64 点），实现对一次读进的 2048 点数据进行如图



3.13 所示的有效值计算。

在 Mydata VI 中,我们还编制了一个名为 Check VI 的子程序,Check VI 的作用是实现每次循环的半周期有效值进行判定,决定是否开始记录。Check VI 中的判定阈值,就是来自数据采集主界面的高限、低限的输入值。Check VI 的输出“是否发生故障”决定了 Save VI 子程序是否开始记录数据到数据文件,同时也决定数据采集界面的“故障指示灯”是“真”(亮),还是“假”(灭)。

#### 3.3.4.3 数据的存储

Save VI 子程序是完成记录故障数据到数据文件之中。

在故障发生后,Check VI 的输出“是否发生故障”变为真,Save VI 启动,开始记录故障数据。为了能完全捕捉到故障信息,在故障开始记录时,程序还会写入在此时刻之前的 1.5 个周期的非故障数据点。这是通过在数据采集 Sample VI 子程序中,在采集循环中加入一个移位寄存器(Shift Register),每次循环都保留结尾部分一定长度的数据点。这样在 Mydata 处理的时候,如果第一个半周期就发生故障,也有故障前的 1.5 周期数据点可以提前写入数据文件。

当故障发生后,Save VI 会建立 2 个文件。一个是故障数据文件,一个是对应的配置文件。在写入故障前 1.5 周期的非故障数据之后,每次循环向数据文件中添加 64 点(即  $\frac{1}{4}$  周期)的二进制数据,直到系统由故障转换为正常后,Save VI 子程序会继续向数据文件中写入 2 个周期的非故障数据,完成数据文件的存储。

与之相对应的配置文件,记录了记入故障文件第一个点的时间值,还包含采集卡此时的采样周期。

“AL0826132354467.sag”即是一个实际采集到的数据文件的文件名。它的命名规则如图 3.14 所示。

通过命名规则,我们根据该文件名,我们可以大概得出结论:A 项在 8 月 26 日 13 点 23 分 54.467 秒发生了故障。



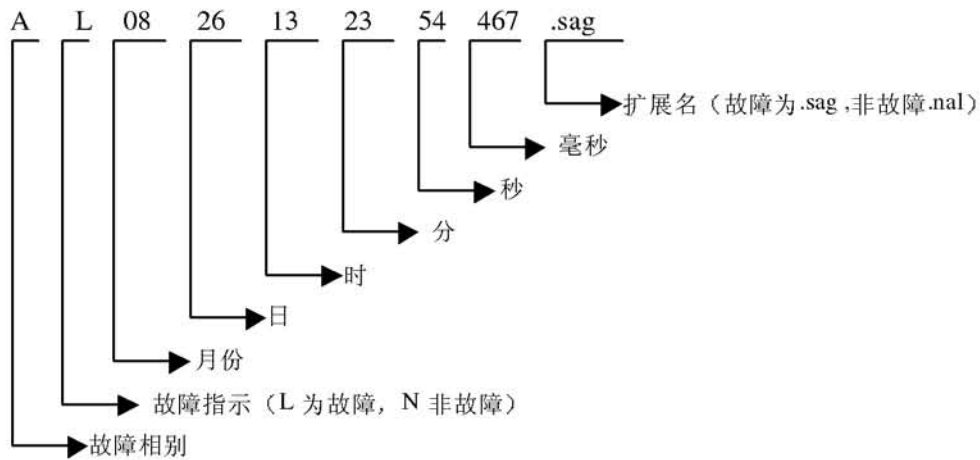


图 3.14 故障数据文件命名规则

Fig 3.14 The denominating regulation of malfunction data file

“AL0826132354467.cfg”即是该文件对应的配置文件。配置文件的命名规则与数据文件基本相同，只是把扩展名换为“.cfg”。

Save VI 子程序使用的存储路径，主界面上控制（Control）“缓冲路径”中的设定值通过一个全局变量传递到 Save VI 中的。这个设定值中包含有年份信息，这样 Save VI 子程序存储的文件的时间信息就全面了，可以作为数据分析所需的原始资料。

Save VI 子程序在创建完数据文件和配置文件之后，还会在 Newlst.txt 文件中添加新建的文件名，以备数据分析模块的调用。

### 3.3.5 “电压暂降监测系统”的数据分析与和管理模块的程序设计

数据分析的主要任务是根据 Newlst.txt 文件中的文件新文件列表，在缓冲路径中寻找到相应的数据文件，并利用复小波变换算法，判断电压暂降发生的起始与中止时间，并生成报告。我们编制了 Data bridge VI 子程序完成该任务。

在 Data Bridge VI 中 Read File VI 与 Creat Rep VI 是本模块的核心所在。Read File VI 完成数据的读取与故障文件首尾部分的小波变换；Creat Rep VI 则是根据计算结果，形成报告。

数据分析模块的流程图如图 3.15 所示。

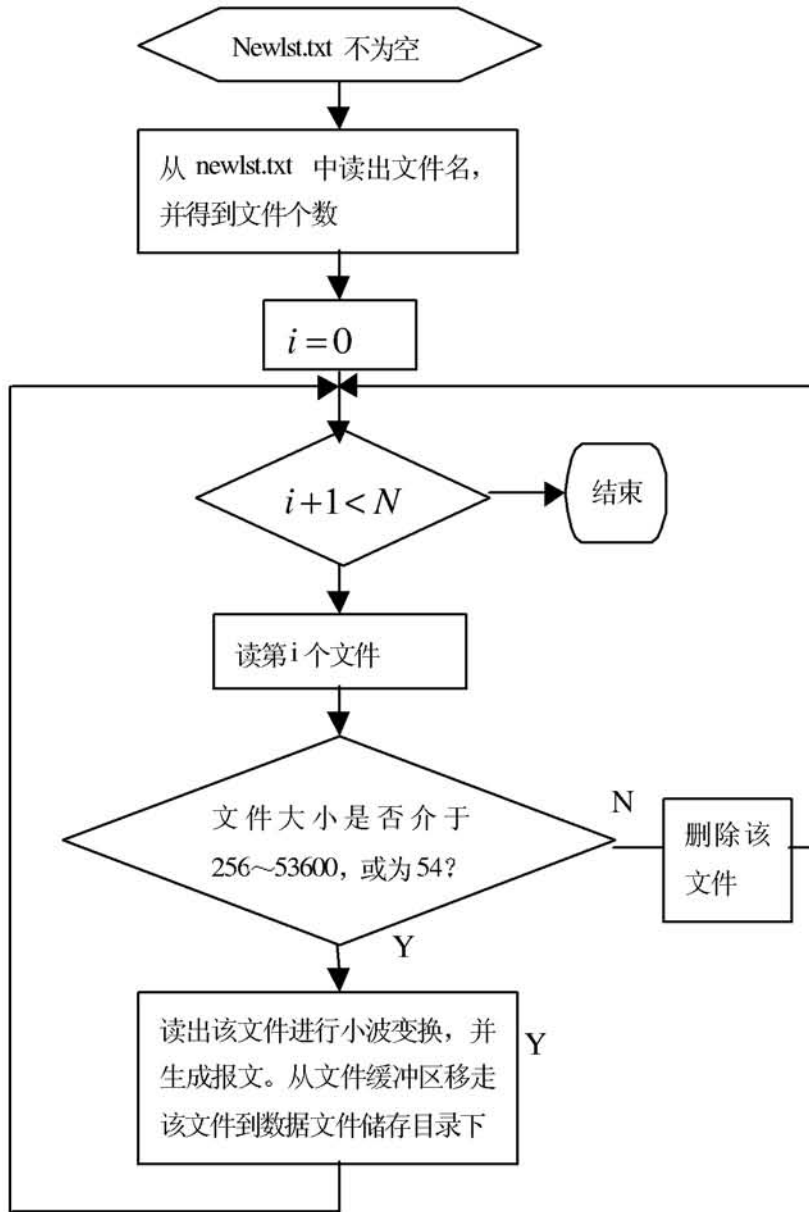


图 3.15 Data Bridge VI 实现的程序流程图

Fig 3.15 The program flow chart of Data Bridgr VI

需要说明的是判断文件大小这一环节。数据采集时，储存文件只是以高限与低限作为判定值，而没有考虑是否符合电压暂降的基本定义，即是否是故障的持续时间为 10ms~1min，若超出范围，我们将删除该文件，不做任何处理。

### 3. 3. 5. 1 Read File VI 子程序

Read File VI 子程序负责文件的读取与数据的分析。

Read File VI 中的 Find Point Start VI 与 Find Point End VI 子程序即是实现对故障数据进行复小波分解的子程序。在分解的时候，我们并没有对所有的数据点进行完全变换，而只是对故障发生时刻与结束时刻两个时段进行了两个周期的计算，这样可以大大减小运算量。Find point end VI 与 Find Point Start VI 有很多相似之处，这里，我们以 Find point end VI 子程序为例，详细介绍如何利用复小波在 LabVIEW 下实现电压暂降的检测。

先重写第二章关于复小波算法的公式如下：

$$W_{s,\varphi}(kT, f) = \sqrt{fT}[\delta_1 s((k-1)T, f) + \delta_2 s((k-2)T, f) + \delta_3 s((k-3)T, f) + \delta_4 s((k-4)T, f) + \delta_5 s((k-5)T, f)] - \lambda_1 W_{s,\varphi}((k-1)T, f) - \lambda_2 W_{s,\varphi}((k-2)T, f) - \lambda_3 W_{s,\varphi}((k-3)T, f) - \lambda_4 W_{s,\varphi}((k-4)T, f) - \lambda_5 W_{s,\varphi}((k-5)T, f) - \lambda_6 W_{s,\varphi}((k-6)T, f)$$

其中：

$$\delta_1 = \left[ \frac{(\sigma f T)^3}{3} - \frac{(\sigma f T)^4}{6} + \frac{(\sigma f T)^5}{15} \right] A$$

$$\delta_2 = \left[ \frac{2(\sigma f T)^3}{3} - \frac{5(\sigma f T)^4}{3} + \frac{26(\sigma f T)^5}{15} \right] A^2$$

$$\delta_3 = \left[ -\frac{6(\sigma f T)^3}{3} + \frac{22(\sigma f T)^5}{5} \right] A^3$$

$$\delta_4 = \left[ \frac{2(\sigma f T)^3}{3} + \frac{5(\sigma f T)^4}{3} + \frac{26(\sigma f T)^5}{15} \right] A^4$$

$$\delta_5 = \left[ \frac{(\sigma f T)^3}{3} + \frac{(\sigma f T)^4}{6} + \frac{(\sigma f T)^5}{15} \right] A^5$$

$$\lambda_1 = -6A \quad \lambda_2 = 15A^2 \quad \lambda_3 = -20A^3$$

$$\lambda_4 = 15A^4 \quad \lambda_5 = -6A^5 \quad \lambda_6 = A^6$$

$$A = e^{-fT(\sigma - i\omega_0)}$$

这样，我们只要计算出 6 个小波变换初值，以及  $\delta$  数组  $\lambda$  数组，以后只要向后递推即可得到所有小波系数，递推所需的系数（ $\delta, \lambda$  等）也只需计算一次。

根据上述分析，我们编写了 WT (K) VI 子程序计算出故障数据的复

小波分解系数数组  $WT(k)$ 。

在  $WT(K)$  VI 子程序的开始，我们建立了两个数组，一个是  $\delta_{k5}$ ；一个是  $\lambda_{k6}$ ，作为递推运算的系数数组。还建立了一个动态数组  $WT$  用来储存小波变换的结果。设计了两个循环分别完成了公式中序列与  $\delta_{k5}$  相乘；历史小波系数与  $\lambda_{k6}$  相乘。

第二章中，文中提到了复合方案对于不同信号的检测的作用，于是，通过我们的反复实践发现，利用变换后的复小波系数的实部与其相角信息的三次方相乘所得到的复合信息  $WTR3PH = WTR * WTPH * WTPH * WTPH$  除了具有很好的幅频特性，同时也具有很好的相频特性。相位信息连续相乘三次，能够使相角突变点进一步凸现出来，这样使突变点的变化十分微弱的信息，也能显露出来。

对于不同的  $f$ （尺度），利用  $WT(K)$  VI 子程序计算出复小波系数，并计算出相应的熵值，最后取熵值最小的一次分解，从中寻找系数的极大值点，于是认定该点是电压的突变点。以上叙述就是检测的基本思想。

### 3. 3. 5. 2 Create Rep. VI 子程序

在 Read File VI 中的小波分析结果；开始故障时的波形；以及结束时的波形通过 Read File VI 连接器把这些信息传递到 Create Rep VI 子程序，进而形成报告文件。

LabVIEW 支持一种新的文件形式——数据段文件（Datalog File）。所谓数据段文件就是文件中的每一个记录都是由群（Cluster）组成，群中包含一个或多个不同类型的数据，表示该记录的不同信息。我们可以利用这种文件格式方便快捷的储存大量复杂的数据。在 Create Rep File VI 中主要就是实现数据段文件的建立于存储工作。

在建立文件时，若设定了 New（建立新文件）功能模块的 datalog type 时，就建立了一个 Datalog File。在之后向文件添加数据的时候，LabVIEW 会检查输入数据是否是按照 Datalog Type 定义的形式组织的，否则，LabVIEW 会报告出错，拒绝向文件中添加数据。当读取得时候，也需要在 Open（打开文件）功能模块中的 Datalog Type 中设定与建立模式相同的类

型，否则是大不开文件的，读取文件内的数据也要每次都按照指定的格式读出。

本系统建立的数据段文件的组织格式表述如表 3.2 所示。

表 3.2 数据段文件的数据元格式

Fig3.2 Datalog file data elements structure

编号	类型	定义
1	字符串	表述某相为故障还是正常
2	双精度数值	故障起始时间
3	双精度数值	故障终止时间
4	单精度数值	下降幅度
5	单精度数值	下降幅度的比率
6	双精度数组	起始时段的小波变换
7	双精度数组	起始时段的原始波形
8	双精度数组	结束时段的小波变换
9	双精度数组	结束时段的原始波形

图 3.16 显示了一个实际采样分析后建立的报告。

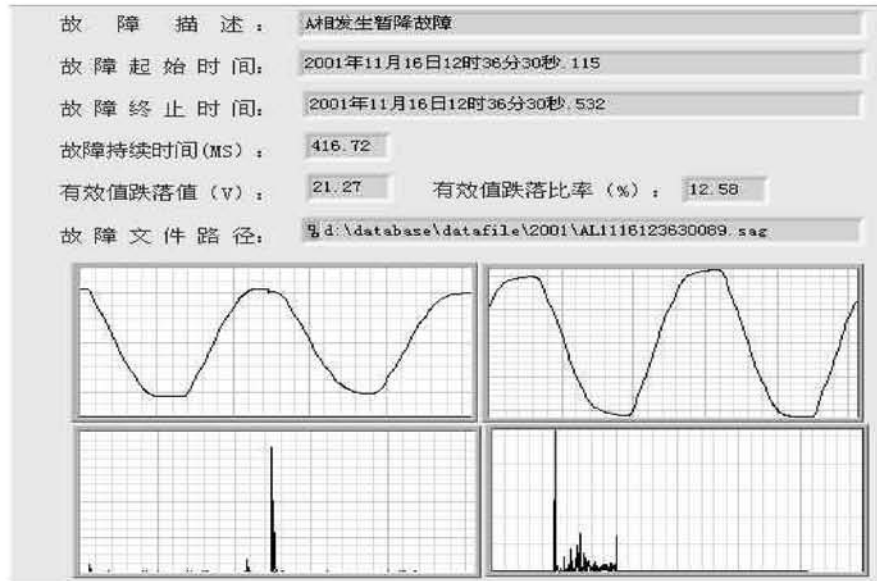


图 3.16 显示了一个实际采样分析后建立的报告。

Fig 3.16 The analysis report of actual malfunction data

这个报告涵盖了监测电压暂降所需的所有信息，满足了对于电压暂降测量的要求。

## 第四章 实验结果

内容提要：本章主要介绍利用 LabVIEW 编制的“电能质量监测系统”实际运行的结果。通过模拟故障，检测系统的性能。

### 4.1 利用实函数小波分析时的分析结果

通过这一环节，主要是直观说明利用实小波分析暂降故障时遇见的问题。

图 4.1~4.2 就是使用实小波函数分析故障波形的实际结果。

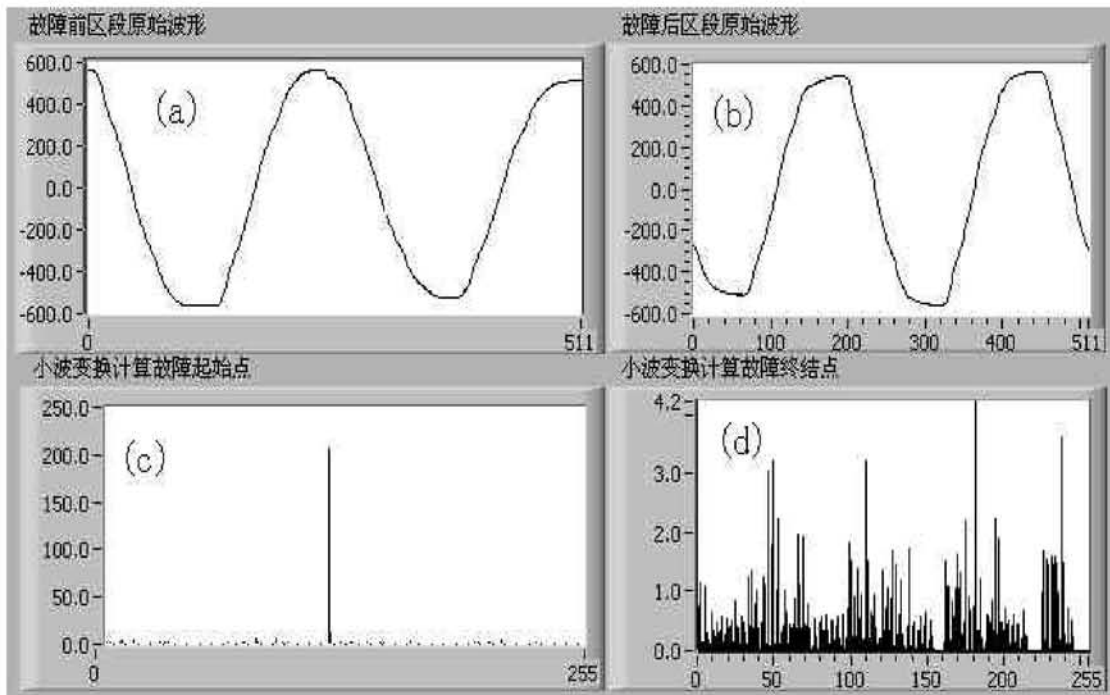


图 4.1 故障 1 分析结果

Fig 4.1 The analysis result of No.1 malfunction

在图 4.1 的故障起始时段 (a) 中，可以明显看出故障时发生的电压跳变，因此对应于小波变换结果 (c)，可得到满意的小波分析结果，一个极大值明确指定故障发生点。而在故障结束时段 (b)，电压波形在幅值上，并没有跳变，所以，小波分析结果 (d) 中，小波变换结果杂乱无章，检测失败。

实际分析结果也表明，我们在第二章中的理论分析与实际情况是相吻合的。

## 4. 2 利用复小波分析单相故障的波形

### 4. 2. 1 熵值法在检测中的作用

第二章，我们介绍了熵值法在选取尺度  $f$  时的作用，下面我们将通过一个实际的故障波形说明熵值法的作用。

图 4.2 给出实际的故障发生与终止的时刻。因为图 4.2 显示的是接在负载电源输入线的电流传感器测得的电流波形，当负载接入，才有电流流动，负载切除，电流即刻消失，因此，电流波形必然有跳跃点，用小波变换很容易就可以确定准确的故障起始与终止点。图 4.3~图 4.5 为不同  $f$  下的小波分析结果。

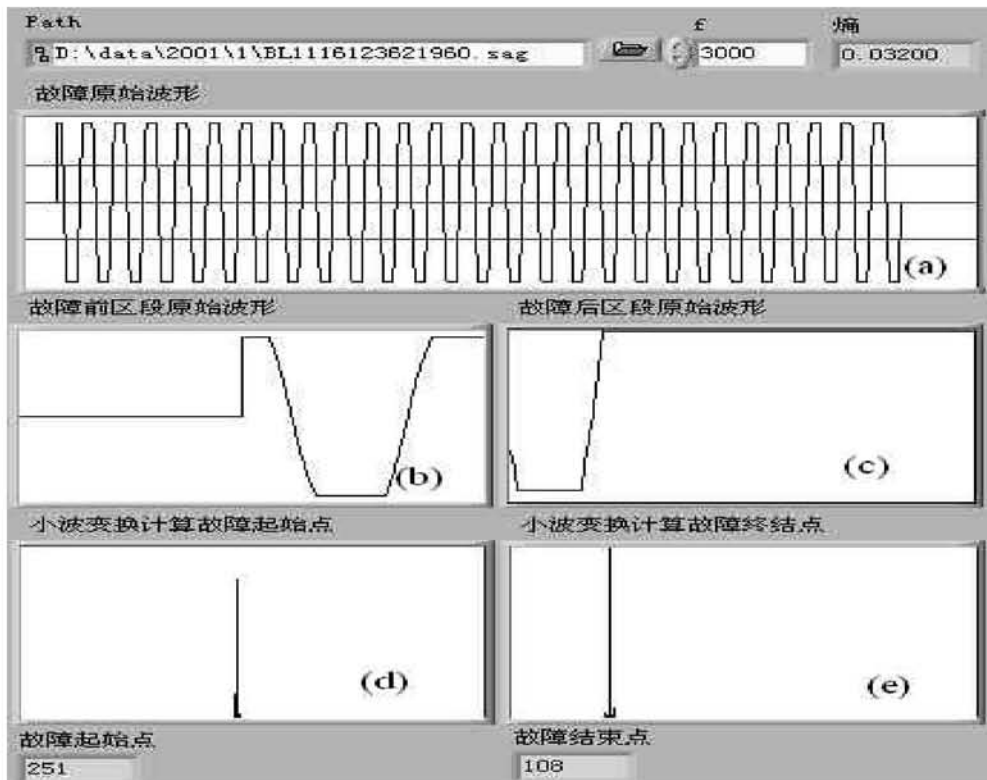


图 4.2 故障电流波形分析结果

Fig 4.2 The analysis result of malfunction current waveform



在图 4.2 中，(a) 显示的分别是原是数据的波形；(b)、(c) 显示的分别是故障发生时段（两周期）的故障波形和故障结束时段（两周期）的故障波形，(d)、(c)显示的分别是故障发生时段的小波分析结果和故障结束时段的小波分析结果。 $f$  为给定的尺度，熵显示的是熵值计算结果。对于图 4.4~图 4.5 这些定义是一样的。

从图 4.2 中，我们可以看到，在故障发生时段，计算出的故障发生点为 251，在故障结束时段，计算出的故障结束点为 108。

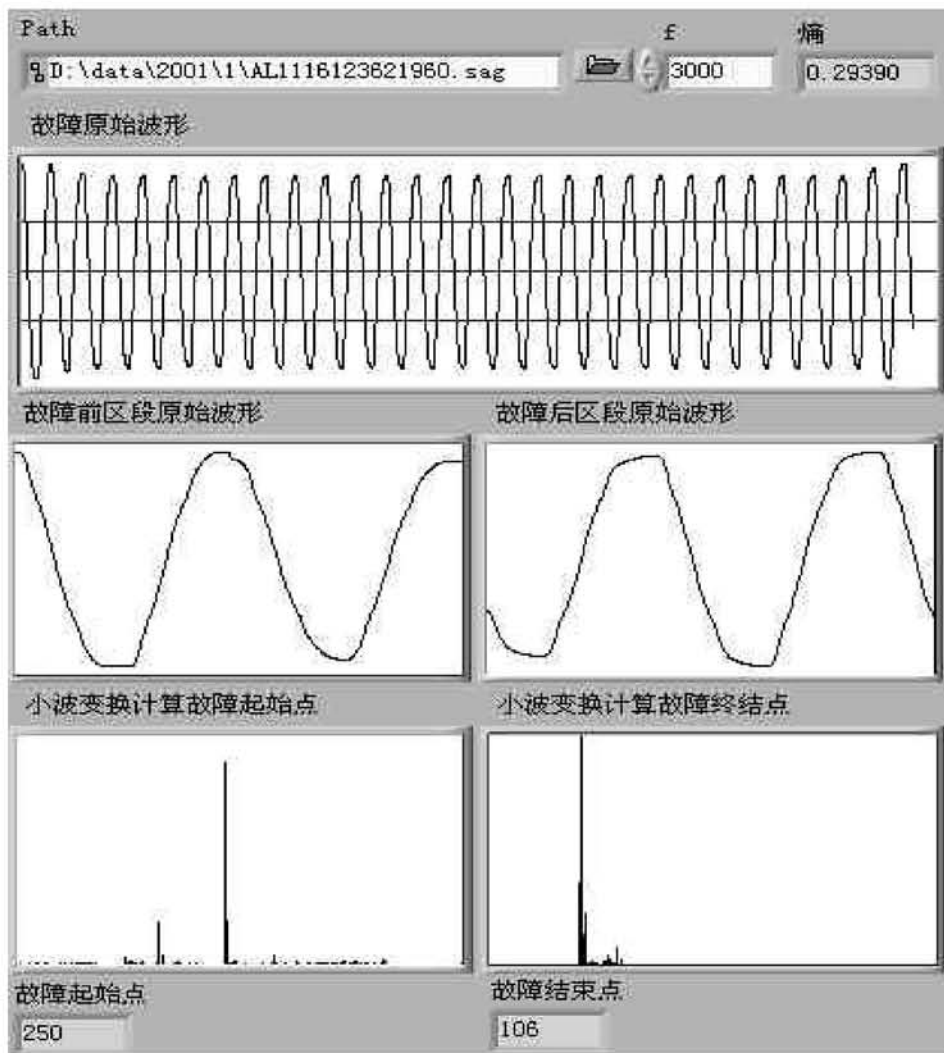


图 4.3 分析结果 ( $f = 3000$ )

Fig4.3 The analysis result (when  $f = 3000$ )

在  $f = 3000$  条件下，故障起始点计算结果为 250，故障结束点为 106，熵值为 0.29390。与前节所述的实小波分析结果已经有了质的变化，对于

幅值变化不明显的故障波形，仍然可以进行分析。

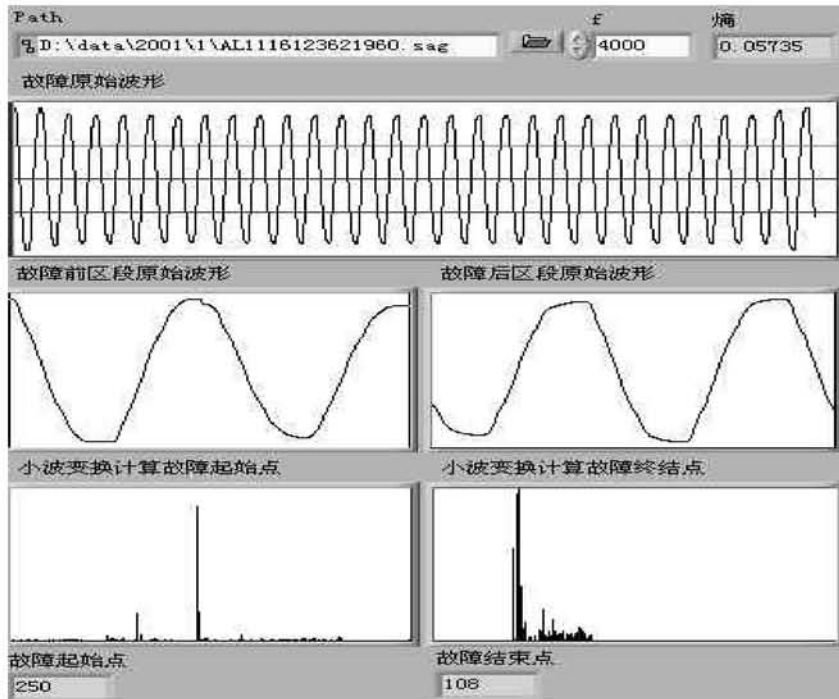


图 4.4 分析结果 ( $f = 4000$ )

Fig4.4 The analysis result (when  $f = 4000$ )

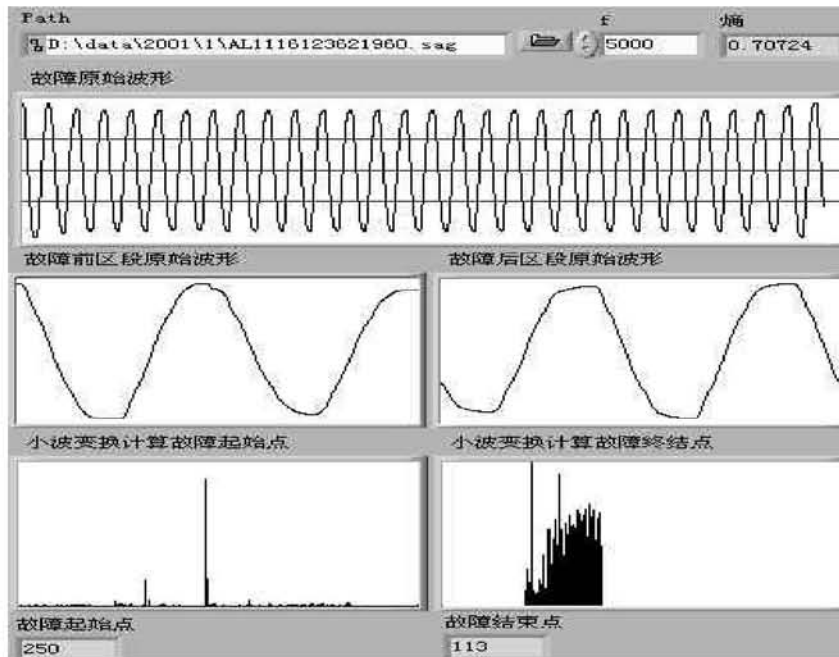


图 4.5 分析结果 ( $f = 5000$ )

Fig4.5 The analysis result (when  $f = 5000$ )

通过图 4.3~图 4.5，我们可以看到不同的尺度  $f$  下的不同分析结果。从熵值的大小比较，当  $f = 4000$  时，熵值最小，此时小波分析的结果显示，故障结束点在 108 处，和采用电流计算出的结果吻合。这就验证了熵值对选择尺度系数的作用。从波形上来看，也是当熵值较小的时候，小波系数反应的信息越明确。

#### 4.2.2 复小波的应用

利用复小波分析之后，分析结果直接明了，并且具有很高的准确性。在每个波形后，给出的是分析结果。

故障是通过一个大的负载瞬间投到系统中，再过一段时间切除；并利用本系统对连在同线路的电压波形进行采集得到的。进行实验时，系统的正常电压为 219V（有效值），设定的启动高限为  $219 \times 95\% = 208.5V$ ，低限为  $219 \times 90\% = 197.1V$ 。同时，我们还利用一个模拟输入通道，通过一个电流传感器测取了负载电流的波形，用于得到准确的故障发生与结束时刻，下面所讲的准确值，就是按照电流波形计算出来的。

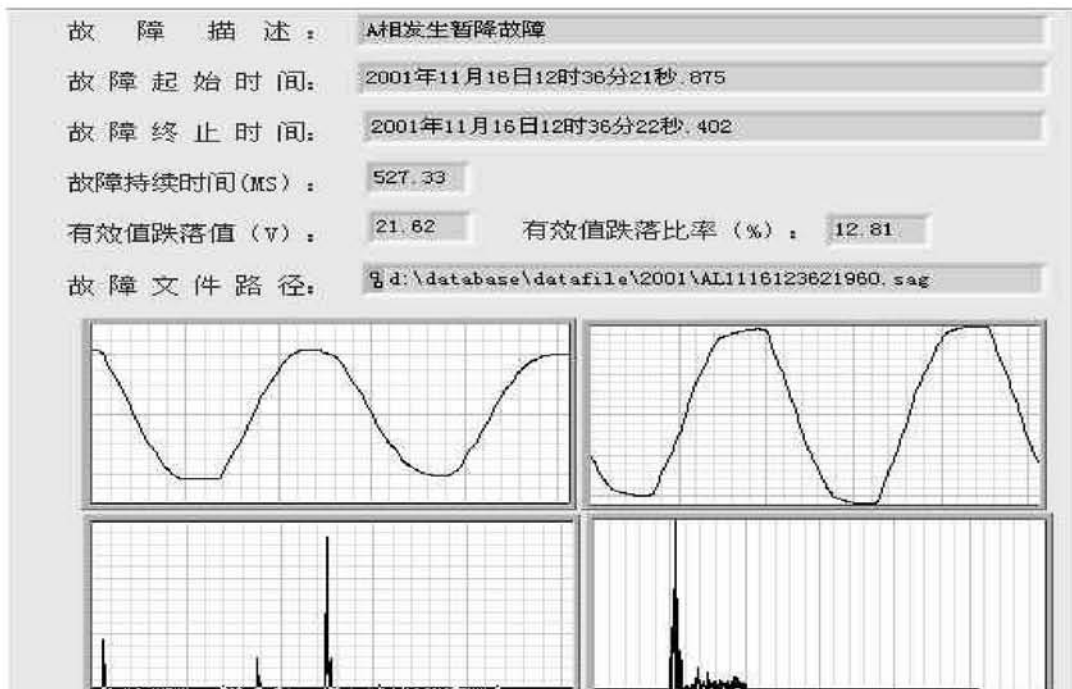


图 4.6 故障分析报告

Fig 4.6 The analysis report

图 4.6 显示的是一个故障报告，在上面给出了故障起始与终止时刻等

信息，表 4.1 中的信息就是从该界面上获得的。

表 4.1 故障报告

Table 4.1 analysis report

编号	有效值			起始时间	结束时间	持续时间 ms	误差 (%)
1	跌落幅值	55.08V	测量值	2001/11/16 12:36:21.894	2001/11/16 12:36:22.428	534.08	0.01498
	跌落比率	12.81%	实际值	2001/11/16 12:36:21.894	2001/11/16 12:36:22.428	534.00	
2	跌落幅值	56.41V	测量值	2001/11/16 12:36:23.235	2001/11/16 12:36:23.753	517.90	-0.0800
	跌落比率	13.11%	实际值	2001/11/16 12:36:23.235	2001/11/16 12:36:23.753	518.29	
3	跌落幅值	56.85V	测量值	2001/11/16 12:36:28.689	2001/11/16 12:36:29.128	439.05	0%
	跌落比率	13.18%	实际值	2001/11/16 12:36:28.688	2001/11/16 12:36:29.128	439.05	
4	跌落幅值	54.20V	测量值	2001/11/16 12:36:30.134	2001/11/16 12:36:30.558	423.49	-0.07550
	跌落比率	12.58%	实际值	2001/11/16 12:36:30.134	2001/11/16 12:36:30.558	423.81	
5	跌落幅值	55.02V	测量值	2001/9/18 16:04:44.900	2001/9/18 16:04:45.823	922.64	0
	跌落比率	14.29%	实际值	2001/9/18 16:04:44.900	2001/9/18 16:04:45.823	922.64	

表 4.1 中，跌落幅值是指测量到有效值的跌落幅值，跌落比率是跌落幅值与正常电压有效值的比值；测量值指通过采集得到的电压波形计算出来的故障发生与结束时刻，实际值指通过计算电流波形得到的故障起始与结束时刻；持续时间是故障结束时刻与开始时刻的差；误差是按照下面的公式计算：

$$\text{误差} = \frac{\text{测量值} - \text{实际值}}{\text{实际值}} \times 100\%$$

## 第五章 结论及展望

内容提要：总结了论文所做的研究工作，并对今后小波变换、电压暂降监测、熵值在电力系统的应用等问题进行了展望。

### 5.1 结论

本文主要完成了以下几个方面的问题：

(1) 与小波变换相比较，说明了传统加窗 FFT 在分析暂态信号时的局限性，以及小波变换在暂态信号分析、奇异提取等方面的优良性能。

(2) 利用多分辨率实函数进行分析，发现实小波函数不具备相角信息，得出不利于对幅值没有明显变化的故障波形进行分析的结论。

(3) 引进复小波分析，编制了复小波检测电压暂降故障的程序。由于复小波分析结果中不但包含了幅值信息，而且还包括相位信息，所以无论电压暂降信号是否具有电压幅值跳变，该算法都能成功检测到故障发生或是结束时刻，本文还提出了利用复小波分析结果，构建出着重凸现相位信息的 *WTM 3PH* 复合信息，用于分析电压暂降故障，取得了良好的效果。

(4) 本文还首次提出利用熵值法确定尺度因子，以达到最大分解的目的，提高计算的准确程度。熵值是在热工领域广泛使用的一个物理量，在本文中，利用熵值最小，寻找到合适的尺度因子，在该尺度因子下，分析结果的准确尺度明显提高。

(5) 利用虚拟仪器的概念，建立了检测电压暂降系统。硬件上采用磁平衡传感器与 NI 公司的 DAQ 数据采集板实现数据的采集，软件上利用 NI 公司的 LabVIEW 编制了电压暂降检测程序的界面、采集、数据处理、数据分析等功能模块，实现了电压暂降的检测功能。

### 5.2 展望

(1) “电压暂降”问题将越来越受到人们的关注。

随着现代化工业的迅猛发展，越来越多的基于微处理器控制的设备广泛的应用于生产实践中。而正是它们最容易受到电压暂降问题的影响

的。计算机逐渐渗透到人类生活的各个领域，大批的宝贵数据资源也在利用计算机存贮或处理，每一次电压暂降都有可能造成大量的数据丢失或错误。可以看出，电压暂降问题实际可能关系到每个人的生活。因此，对电压暂降问题的深入研究具有很现实的意义。研究的最终目的在于对其的抑制，相信在数学、数字信号处理等学科的迅速发展，实时监测并及时抑制电压暂降的设备，必将满足人们的要求。

### (2) 小波变换在电力系统的应用前景。

小波分析首先可以应用于电力设备的状态监视和故障诊断。电力设备正常时发出的电磁信号较为平稳，一旦发生故障，必然含有奇异。小波分析在检测奇异值方面具有很大的优越性。

其次小波分析可以应用在谐波分析上。利用多分辨率 (MRA) 分析，将故障信号变换投影到不同的尺度上会明显表现出故障造成的一些高频、奇异高次谐波信号的特性，这将很好的为抑制高次谐波，提供可靠的依据。最后，小波变换可以用于电力系统暂态稳定研究。小波变换的“局部细化与放大”作用，能辨别和追踪系统变量的微弱突变，进而推断出突变的局部故障时间和地点，有助于提高电力系统的暂态稳定预测的实时性和准确性。

以上是小波变换在电力系统的主要应用，基于小波变换的优点，它还可能应用于神经网络和专家系统研究；抗电磁干扰研究；输电线路故障定位研究；电力系统短期负荷预测研究；高压直流输电系统研究等方面。

### (3) 虚拟仪器在电力系统的应用前景

现在对电力系统的安全性、可靠性的要求越来越高，对其进行实时监控的要求也越来越迫切。虚拟仪器的准确性与高效性和正好满足这些要求，成为电力系统搭建全新的监测甚至控制系统的首选。利用虚拟仪器的高速总线，我们可以把图象加在监控信息之中，为故障诊断提供直观的判据，在结合小波变换等先进的信息处理方法进行图象识别，逐渐可以脱离人为因素造成的偏差，实现监控的“智能化”。

虚拟仪器的可扩展性，有利于电力系统的日益扩容。电力系统对设备的需要在种类和数量上也越来越多，利用虚拟仪器可以减少设备重复投资，提高电力系统运行的经济效益。

随着电力系统局域网，和 Internet 的飞速发展，虚拟仪器的网络功能，为电力信息的共享与发布创造了有利条件。

可见，虚拟仪器在电力系统的应用一定会越来越广泛。

#### (4) 熵原理在电力系统中的应用前景。

熵原理揭示了事物发展的方向，作为对物质系统不确定和无序性的量度，熵的引入必定会对电力系统的理论研究注入新的内涵。在电力系统安全稳定分析研究中，若能提出电力系统熵稳定判据，就可以帮助我们寻找到电力系统发展的规律性，用普遍的适用的观点将原来许多孤立研究的问题联系起来，进一步揭示它们之间内在的规律性。

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，有待日后继续完善补充，使电压暂降问题能够从根本上解决，以保证供电质量，减少或消除这方面造成的经济损失。



## 致 谢

在论文工作即将完成之际，深深感谢李宝树教授对我在攻读硕士学位期间的悉心指导。

导师李宝树教授对我在学习期间给予了精心的指导与极大的支持。李老师严谨的治学态度，一身正气的做人风格深深影响了我，使我受益终身。在论文阶段的，李老师的正确选题，为论文的完成奠定了良好的基础。在此，特向李老师表示深深的谢意和崇高的敬意。

论文工作得以完成，还离不开赵成勇副教授的尽心指导和帮助。赵老师就本课题研究方向，在理论基础和一些研究方法等方面给予很多指点，为我拓宽思路、解决难题提供了积极的建议。赵老师还在我的论文撰写过程，仔细阅读了论文初稿，提出大量有益的建议和意见，使本论文水平得以很大的提高，在此表示深深谢意。

我的爱人王禾，在我攻读硕士期间，尤其是论文撰写阶段，为我分担了许多负担，使我始终能全心于论文工作，在此深表谢意。

贾秀芳老师、赵书涛老师在我攻读硕士期间，对我在学习和生活上给予很多帮助和教诲，借此机会，向他们表示感谢。

在课题的研究过程中，还得到了 99 级硕士研究生同学们的帮助和支持。在此一并表示感谢！

谨以此文献给所有关心和帮助过我的人们！

## 参 考 文 献

1. 胡明，陈珩. 电能质量及其分析方法综述. 电网技术，2000，24（2），36—38
2. Carl Recker, William Braun Jr., Kenneth Carrick, et al. Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags(Dips) in Revision to IEEE Std 493,the Gold Book. IEEE Transactions on Industry Applications. 1994，30(3)，805-821
3. 刘桂英，伍家驹，赵文龙，等. 浅谈电网瞬间电压降的危害及对策. 江西电力，2000，24（3），28—30
4. Fluke公司上海办事处. 电能质量与谐波测量技术讲座—第八讲 电能质量标准和相关的测量规范. 仪表技术，2000（2），43—44
5. 廖泽龙. 电能质量综合测试系统的设计. 电网技术，2000（24），42-44
6. 许遐，王惠仁. 电能质量的全过程监测和预防检修. 华北电力技术，2000（2），1—5，13
7. 汪小平，王绍兰，杨维翰. 基于 LabVIEW 软件虚拟仪器的电能质量分析仪. 仪器与仪表，2000（5），19—21
8. 黄义雄，戚丽丽. 虚拟仪器下的电力参数测试. 自动化与仪器仪表，1998（6），52—53
9. 娄本刚，刘永清，吴今培. 虚拟仪器在电力系统谐波测量中的应用. 计算机自动测量与控制，2000（8），26—30
10. 任震，黄雯莹，何建军，等. 小波分析及其在电力系统中的应用（一）概论. 电力系统自动化，1997（21）1，5—7
11. 石志强，任震，黄雯莹. 小波分析及其在电力系统中的应用（二）理论基础. 电力系统自动化 1997，21（2）
12. 任震，黄雯莹，石志强. 小波分析及其在电力系统中的应用（三）工程技术应用. 电力系统自动化，1997，21（3）9—12
13. 王建贇，纪延超，冉启文. 小波变换在电能质量分析中的应用. 继电器，1999，（27）5，13—16，19

- 14.张兆宁,毛鹏,孙亚明. 电力系统故障暂态信号的小波奇异性检测. 继电器, 2000, (28) 4, 24-27
- 15.何正友,钱清泉. 基于小波变换的信号奇异性指数计算方法及其应用. 电力自动化设备, 2000, (20) 3, 12-15
- 16.W.Edward Reid. Power Quality Issues——Standards and Guidelines. IEEE Transaction Industry Application, 1996, (32) 3, 625-631
- 17.Surya Santoso,Edward J.Powers,Peter Hofmann. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis. IEEE Transaction on Power Delivery, 1996, (11) 2, 924-930
- 18.P.Pillay, A.Bhattacharjee. Application of Wavelets to Model Short-Term Power System Disturbances. IEEE Transactions on Power System, 1996, (11) 4, 2031-2036
- 19.W.A.Wilkinson, M.D.Cox. Discrete Wavelet Analysis of Power Transients. IEEE Transactions on Power System, 1996, (11) 4, 2038-2044
- 20.Olivier Poisson, Pascal Rioual, Michel Meunier. Detection and Measurement of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, (15) 3, 1039-1044
- 21.Chaari O,Meunier M,Brouaye F. Wavelets: a new tool for the resonate grounded power distribution system relaying. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3), 1301-1308
- 22.刘鲁源,李宗勃. 从傅立叶变化到小波变化. 自动化仪表, 2000, (15) 6, 1-2
- 23.刘令普,周洪玉,何湃,等. 由傅立叶分析到小波变换的进展. 数学的实践与认识, 2000, (30) 3, 298-302
- 24.杨福生. 小波变换的工程分析与应用. 北京: 科学出版社, 1999
- 25.O.Poisson,P.Rioual,M.Meunier. New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis. IEEE Transaction on Power Delivery, 1999, (14) 2, 561-566
- 26.Mallat S and Hwang W L. Singularity detection and Processing with Wavelets. IEEE Trans Information Theory, 1992, 38(2), 617-643

27. Math H.J. Bollen. Characterization of Voltage Sags Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drivers. IEEE Transaction on Power Delivery , 1997, (12) 4, 1666-1671
28. Math H.J. Bollen. Fast Assessment Method for Voltage Sags in Distribution System. IEEE Transaction on Industry Applications, 1996, (32) 6
29. 陈祥训, 淡文刚. 双正交紧支复小波的生成方法. 中国电机工程学报, 2000, (20) 4
30. 何建军, 任震, 黄雯莹, 等. 电力系统突变信号检测的一种实时小波算法. 中国科学 (E 辑), 2000, (30) 1, 79-84
31. 张传利, 黄益庄, 马晓旭, 等. 改进递归小波变换在变压器保护中的应用研究. 电力系统自动化, 1999, (23) 17, 20-22, 53
32. 朱坚民, 宾鸿赞, 王中宇, 等. 测量数据粗大误差的非统计判别. 华中理工大学学报, 2000, (28) 4, 17-19
33. 黄明俊, 赵伟, 候国屏. 虚拟仪器技术——现代电工电子测量的发展方向. 电工电能新技术, 1998 (4)
34. 孙晓龙, 李宝树, 赵书涛. 虚拟仪器技术及其在电力系统中的应用. 电力情报, 2001 (2), 5-9