

# 声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《配电网行波故障定位技术的研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：蔡秀雯 日 期：2007. 5. 16

## 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保留、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名：蔡秀雯

导师签名：杨少强

日 期：2007. 5. 16

日 期：2007. 5. 16

## 第一章 绪论

### 1.1 课题的研究背景

在我国 6~66kV 配电网中,广泛采用中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式,即为小电流接地系统。此种系统发生单相接地故障时,由于大地与中性点之间没有直接电气连接或串接了电抗器,因此短路电流很小,保护装置不需要立刻动作跳闸,从而提高了系统运行的可靠性。尤其在瞬时故障条件下,短路点可以自行灭弧恢复绝缘,不需要运行人员采取什么措施,这对于减少用户短时停电次数具有积极意义。但是随之而来的问题是:如果故障是永久性的,系统仅仅允许在故障情况下继续运行 1~2 个小时,此时运行人员必须尽快查明短路线路和短路点,以便采取相应对策解除故障,恢复系统正常运行。随着系统容量的增长,馈线增多,导致系统电容电流增大,如果发生单相接地故障,长时间带故障运行容易诱发持续时间长、影响面广的间歇电弧过电压,进而损坏设备,破坏系统安全运行。这就提出了小电流接地系统的单相接地故障选线和故障定位问题。

作为最早研究小电流接地系统单相接地故障选线技术的单位之一,我们课题组得到了国家自然科学基金的支持,经过了几年的研究,选线技术取得了突破性进展,研制了小电流接地系统选线装置,采用智能比幅比相法、谐波比幅比相法、小波法、首半波法等方法进行故障选线,融合了有效域技术和连续选线技术等先进技术。如今选线成功率通过实测统计不低于 95%,选线装置已在辽宁、山西、河北等地投运和推广,运行效果很好,满足了配电网运行对选线的要求。

选线问题解决之后,配电网单相接地故障定位问题就提到日程上来了。本文以后所指的配电网故障定位问题,都是特指配电网单相接地故障定位问题。

当前配电线路故障定位方法是在确定接地线路后,由人工沿线路寻找故障点。随着配电网网架的加强,线路增长,分支线路也增多,线路变得复杂,用传统的巡线方法找出具体故障点的位置非常困难,少则几小时,甚至数十小时,不仅耗费了大量人力物力,而且延长了停电时间,影响供电可靠性。尤其是在气候严寒的冬季或雨雪天气,现有寻找故障点的方法劳动强度非常大,难以适应当前生产的需求。

解决配电网故障定位问题将大大降低电气维护人员的工作难度和工作量,大大缩短因故障造成的停电时间,极大地降低由于停电造成的工农业生产损失,必将产生巨大的经济效益和社会效益。

## 1.2 国内外研究现状

目前,国内外学者对 110kV 及其以上高压输电线路故障定位问题进行了大量研究,且已经取得实用性进展,而配电网故障定位问题还没有真正有效的解决办法。原因在于:首先,高压输电网采用中性点有效接地的接地方式,属于大电流接地系统,故障信号明显,易于判别提取。而配电网采用中性点非有效接地的接地方式,发生单相接地故障后,故障电流为各非故障线路电容电流之和,与中性点接地的大电流接地系统相比,数值较小,故障信号较弱,故障特征量难以获得;其次,高压输电线从线路的始端到末端是一回线到底,中间没有分支。而配电网是多分支的复杂网状结构,进行配电网故障定位时,既要知道故障点的距离,又要知道故障点在哪一个分支。满足故障距离的分支可能有多个,要确定真故障点,必须排除伪故障点的干扰。以上两点都说明了,适用于高压输电线路的故障定位方法不一定能适用于配电网的故障定位问题。

### 1.2.1 国内研究现状

目前,国内对配电线路故障定位的研究按原理可以分为:阻抗法、行波法、S 注入法和“故障指示器”技术。

阻抗法:其故障测距原理是假定线路为均匀线,在不同故障类型条件下计算出的故障回路阻抗或电抗与测量点到故障点的距离成正比,从而通过计算故障时测量点的阻抗或电抗值除以线路的单位阻抗或电抗值得到测量点到故障点的距离<sup>[1]</sup>。阻抗法具有投资少的优点,但受路径阻抗、线路负荷和电源参数的影响较大,对于带有多分支的配电线路,阻抗法无法排除伪故障点,只适合于结构比较简单的线路<sup>[1]</sup>。

行波法:根据行波传输理论实现故障定位,一般可分为 A、B、C 型几类。A 型行波法是利用故障点产生的行波,根据测量点到故障点往返一次的时间和行波波速来确定故障点的位置;B 型行波法是利用故障点产生的行波到达线路两端的时刻并借助通信联系实现故障定位;C 型行波法是在故障发生后由装置发射高压高频或直流脉冲信号,根据高频脉冲从装置至故障点往返时间进行定位<sup>[2]</sup>。文献[3]提出了一种综合利用故障初始电流、电压行波线模分量实现配电线路双端测距的方法。文献[4]通过对故障产生的暂态行波进行检测、分析来实现故障定位。文献[5]提出了在线检测电压行波的双端故障测距方法。

S 注入法:其原理是通过母线 PT 向接地线的接地相注入信号电流,其基波频率处于工频  $n$  次谐波与  $n+1$  次谐波之间,然后利用专用的信号电流探测器查找故障线路和故障点<sup>[6]</sup>。文献[7]考虑到线路停电后绝缘可能恢复,在基于注入信号法的基础上,提出了一种离线故障定位新方法,该方法首先通过外加直流高压使接地点处于保持击穿状态,然后注入交流检测信号,通过寻踪注入的交流信号找出故障的准确

位置。S注入法的缺点在于，注入信号的能量有限，如果故障点经很大电阻接地，或者故障点距离线路始端很远，那么信号将很微弱无法准确测量<sup>[8]</sup>。S注入法在接地过渡电阻较小的情况下，有较高的定位精度。注入信号电流后，沿接地线路进行探测，注入信号电流消失点，即接地点。对于有分支线的情况，只要离开分支点6m，对每一分支进行探测，探测到信号电流的分支即接地点所在分支<sup>[6]</sup>。

“故障指示器”技术<sup>[9]</sup>：该技术得到了实用化，其原理为在变电站故障相母线上注入信号电流，该信号电流由变电站发送，经故障路径通过接地点流入大地返回信号源。挂在故障路径的故障指示器检测到该信号立即给出指示（翻牌）。挂在非故障路径上指示不动（牌不翻）。指示器翻牌表示接地点在该指示器的下游，在分支点，根据指示器的动作与否，判断出哪一分支是故障分支。运行人员按指示器的引导向前巡视，直至找到故障接地、故障分支和接地故障点。最早的故障指示器用于寻找短路故障分支和短路故障点。随后故障指示器推广应用到小电流接地电网单相接地故障选线，称为接地故障指示器。接地故障指示器和短路故障指示器在我国中压配电网都有所应用。故障指示器的优点是结构和原理简单，价格便宜，安装容易，用户反映短路故障指示器的实用效果还是比较好的。而接地故障指示器的使用效果则不很理想，正确率不高，电网发生单相接地故障时常常没有反应。可见，接地故障指示器技术不能圆满解决配电网故障定位问题。

### 1.2.2 国外研究现状

日本、美国和欧洲的许多国家都在研究和应用短路故障指示器，主要用于指示配电线路短路电流的路径，给巡线人员指明短路故障所在的出线、分支和区段。在这方面国外的技术水平和国内相近。国外对接地故障指示器的研究和应用较少。

另外，欧洲一些地区的故障定位技术主要是利用馈线自动化装置确定故障区段，然后由人工寻线来找到故障点。配电系统安装馈线自动化装置，即在线路上安装有自动分段开关和检测装置，故障后利用自动分段开关的相互配合，确定故障区段并将故障区段隔离，但是这种方法只能确定故障区段，并不能确定故障位置，而且馈线自动化投资大、维护复杂。

国外的学者关于行波定位法在配电网中的应用也进行了大量的研究。文献[10]~[15]分别提出利用故障自身产生的行波信号进行单端定位或双端定位的方法，其中文献[10]~[14]通过仿真进行验证，文献[15]利用现场试验进行验证。

### 1.3 存在的难点

国内外对配电网故障定位的研究，虽然有一定进展，但都没有取得突破，离圆满解决还有相当距离。调查表明，目前尚没有哪一种定位方法在实际运行中取得了

满意的定位效果。配电网故障定位技术的研究任重而道远，需要更进一步的研究。根据大量的试验和研究，发现配电网故障定位问题存在的难点包括以下内容：

#### (1) 建模难、现场试验难

分布参数线路的数学模型属于偏微分方程。配电网分支线众多，结构复杂，尚未见到有关配电网数学建模的相关文献发表。如果数学模型不能实现，随之而来的就是物理模型也不能实现，因为物理模型都是在数学模型的基础上实现的。研究配电网故障定位问题如果既不能用数学模型，又不能用物理模型，那么唯一的出路就是进行现场试验了。而电力系统关系到国计民生，停电影响千家万户，现场试验一直难以进行。

#### (2) 如何从采集到的行波数据中辨识出故障点的信息

对于行波定位法来说，如何从采集到的行波数据中辨识出故障点的信息是一个难题。第一，由于行波以近似于光速传播，十万分之一秒的微小误差，给定位带来的都将是 1 公里的距离误差，如何排除波速不确定带来的定位误差是一个难点；第二，配电网的众多分支导致了反射波太多，分支节点和端点都有反射波，难以分清哪个是故障点反射波，哪个是节点和端点反射波；第三，经过分支衰减后的行波信号，已经非常微弱，然而线路上存在着电磁干扰，这些干扰的幅值有时甚至和信号的强度接近，因此如何去除这些干扰的影响变得至关重要；第四，因为分支线众多，满足所测故障距离的点往往不止一个，而是多个，要找到真正的故障点就需要排除伪故障点。

### 1.4 解决问题的整体思路

针对配电网故障定位问题存在的难点，解决该问题的整体思路如下：

#### (1) 从简单到复杂

配电网单相接地故障定位是个复杂的问题。复杂问题的解决是个逐步实现的过程，不可能一蹴而就。要从简单到复杂，逐步深入，逐步完善。配电网有 10kV、35kV 和 66 kV 几个级别。10 kV 配电线拓扑结构最复杂，接地故障也最频繁，最需要故障定位技术，但解决起来困难也最大。35 kV 线路和 66 kV 网络结构简单，节点少、分支也少。研究工作从 35 kV 电网的故障定位问题入手，容易取得突破。35 kV 电网的故障定位问题如果取得成功，就可以为解决 10kV 电网的故障定位问题奠定基础。

#### (2) 根据配电网自身的特点，采用合适的定位方法

输电网行波定位技术的成功给了我们很大鼓舞和启发，但直接把输电网行波定位技术转化为配电网行波定位技术并不可行，因为配电线路带有分支，行波在配电线路上的流动远不像在输电线路那样简单。要解决配电网故障定位问题，就应

根据配电网自身的特点，采用合适的定位方法。

## 1.5 本文的主要工作

本文主要研究配电网单相接地故障定位问题，在了解了国内外研究现状、充分认识该问题难度的基础上，针对研究对象的特点，展开研究工作。本文的主要研究工作分为以下几个部分：

第一部分(本文的第二章) 在研究和比较了现有故障定位方法的基础上，根据配电网的自身特点，结合现场试验，选择了 C 型行波法作为主要研究对象。C 型行波法的主要优点是不需要巡线，定位速度快，可以进行多次定位。提出了“特征波”的概念来分析注入脉冲信号在带分支线路上的传播过程。经过试验发现，C 型行波法适用于接地过渡电阻不大于  $3\text{k}\Omega$  的配电网故障定位问题。为了进一步提高定位精度，提出将 C 型行波法和 S 注入法结合起来，优势互补，实现快速准确的综合定位。该方案的可行性在现场试验中得到了验证。

第二部分(本文的第三章) 主要研究了行波故障定位数学模型。为了彻底解决配电网故障定位问题，只有建立行波故障定位数学模型，深入了解行波在配电线路上的传播过程。在介绍了传输线波动方程的基础上，利用偏微分方程的数值解法，分别建立了无损线模型和有损线模型的离散格式，并分析了离散格式的稳定性，确定了不同情况下的边界条件，进行了数值试验，效果较好。

第三部分(本文的第四章) 主要研究了配电网行波故障定位信息辨识处理技术。主要对 C 型行波法采集到的数据进行分析处理，得到故障点的信息。由于配电网带有分支，故障点的信息就包含了故障点与测量点之间的距离、故障点所在线路的区段。确定行波在线路上的传播速度后，再比较线路正常时的行波波形与线路故障时的行波波形，就可以确定故障点与测量点之间的距离。通过识别行波的特征波，可以确定故障点所在的区段。对行波信号的采样率往往取得较高，高采样频率容易受到各种噪声影响，使定位的准确性降低。小波变换是处理行波信号的有力工具，采用了软阈值化算法对行波信号进行消噪处理。形成了完整的配电网行波故障定位信息辨识处理方法，通过将该方法应用到对现场试验的数据分析中，验证了其有效性。

第四部分(本文的第五章) 主要介绍配电网故障定位装置的设计与开发。详细说明了故障定位装置的总体框架的设计，各模块的功能、接口及通信规约的拟定。介绍了该装置对行波信号进行高速采集的过程，采用了四川中科动态仪器有限公司的 PCI4712 数据采集卡，其最高采样率达到  $40\text{MHz}$ ，能满足行波定位的要求。设计并开发了配电网故障定位装置主控软件，该主控软件采用了 Delphi 可视集成开发环境，由面向对象程序设计，在 Windows 系统下进行开发，实现了故障定位主控软件的可视化，使现场运行人员能够方便有效地找出故障点，提高工作效率。

## 第二章 配电网故障定位实用方法的研究

配电系统中线路单相接地故障定位问题是一个至今在国内外还没有很好解决的难题<sup>[16]</sup>。在研究和比较了现有故障定位方法的基础上,根据配电网的自身特点,结合现场试验,选择了C型行波法作为主要研究对象。详细介绍了C型行波法的相关原理,并对C型行波法的适用范围进行了试验分析。为了进一步提高定位精度,提出将C型行波法和S注入法结合起来,进行综合定位。

### 2.1 配电网故障定位实用方法的选择

近年来,有学者尝试将输电网的故障定位技术应用于配电网。输电网故障定位技术目前较为成熟,主要分为阻抗法和行波法两大类<sup>[17]</sup>。经过研究分析,发现阻抗法和A、B型行波法虽然已在输电网故障定位中得到广泛的应用,但却不能适用于配电网故障定位。

对于阻抗法来说,受路径阻抗、线路负荷和电源参数的影响较大,对于带有多分支的配电线路,阻抗法无法排除伪故障点,它只适合于结构比较简单的线路<sup>[1]</sup>。对于A型行波法,由于配电网分支多,从测量端到故障点往返两次将产生大量反射行波,不易进行区分。对于B型行波法,由于线路含有多个终端,因此不易进行多个信息源的信号同步,如果在多个终端采用GPS进行同步,投资太大。

配电网对于单相瞬时接地故障不用进行故障定位,故障能够自动消失并恢复绝缘;对于永久性接地故障一般需要先要将线路断开,然后进行故障定位。针对这个特点,我们发现C型行波法能够适用于配电网。该方法有以下优点:首先,该方法不需要巡线,定位速度快;其次,该方法在进行故障定位时可以重复的判断,如果某次检测因受到较大干扰影响了定位分析,可以重新发一个行波信号再进行一次定位,这也是C型行波法所特有的优势。因为在其它实时定位方法中,故障点处产生的行波是不可重现的<sup>[2]</sup>。

因此,本文主要以C型行波定位法作为主要研究对象,现详细介绍了C型行波定位法的相关原理。

### 2.2 C型行波法

#### 2.2.1 行波在波阻抗不连续节点上的折射与反射过程

通常线路都是一段一段连接而成的,有时相邻两段导线的波阻抗会不相同,行

波在线路上传播过程中在波阻抗不连续处会产生全部或部分反射，图 2.1 是行波在两个波阻抗不相同的导线连接处产生的折射和反射。

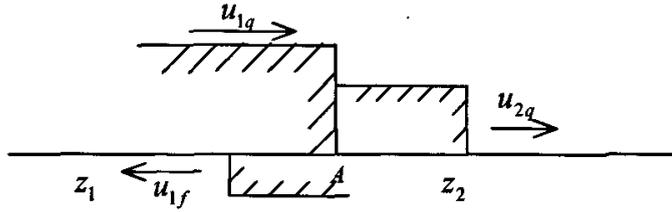


图 2.1 行波在波阻抗不连续节点的折射和反射过程

在图 2.1 中， $A$  为两段波阻抗不同导线的连接点，左侧导线波阻抗为  $z_1$ ，右侧导线波阻抗为  $z_2$ ， $u_{1q}$  为入射波， $u_{1f}$  为反射波， $u_{2q}$  为越过波阻抗不连续点的透射波。现将波阻抗为  $z_1$  的线路合闸于直流电源  $U$ ，合闸后沿线路  $z_1$  有一与电源电压相同的前行电压波  $u_{1q}$  自电源向节点  $A$  传播，到达节点  $A$  遇到波阻抗为  $z_2$  的线路，在节点  $A$  前后都必须遵守单位长度导线的电场能量与磁场能量相等的规律，但线路  $z_1$  与  $z_2$  的单位长度电感与对地电容都不相同，因此  $u_{1q}$  到达  $A$  点处要发生行波的折射与反射，反射电压  $u_{1f}$  自节点  $A$  沿线路  $z_1$  返回传播，折射电压波则自节点  $A$  沿线路  $z_2$  继续向前传播。此时折射电压波也就是线路  $z_2$  上的前行电压波，以  $u_{2q}$  表示。通过下面分析，可以求得反射电压波  $u_{1f}$  和折射电压波  $u_{2q}$ 。

我们假设折射电压波  $u_{2q}$  尚未到达线路  $z_2$  的末端，即线路  $z_2$  上尚未出现反行电压波。于是对于线路  $z_1$  有：

$$\begin{cases} u_1 = u_{1q} + u_{1f} \\ i_1 = i_{1q} + i_{1f} \\ u_1 = z_1 \cdot i_{1q} \\ u_{1f} = -z_1 \cdot i_{1f} \end{cases} \quad (2-1)$$

对于线路  $z_2$ ，因为  $z_2$  上的反行电压波  $u_{2f} = 0$ ，所以有：

$$\begin{cases} u_2 = u_{2q} \\ i_2 = i_{2q} \\ u_{2q} = z_2 i_{2q} \end{cases} \quad (2-2)$$

在节点处只能有一个电压和电流值，故

$$\begin{cases} u_1 = u_2 \\ i_1 = i_2 \end{cases} \quad (2-3)$$

于是有：

$$\begin{cases} u_{1q} + u_{1f} = u_{2q} \\ i_{1q} + i_{1f} = i_{2q} \\ \frac{u_{1q}}{z_1} - \frac{u_{1f}}{z_1} = \frac{u_{2q}}{z_2} \\ u_{1q} - u_{1f} = \frac{z_1}{z_2} u_{2q} \end{cases} \quad (2-4)$$

相加得：  $2u_{1q} = (1 + \frac{z_1}{z_2})u_{2q}$ ，故：

$$\begin{cases} u_{2q} = \frac{2z_2}{z_1 + z_2} u_{1q} = \alpha_u u_{1q} \\ i_{2q} = \frac{u_{2q}}{z_2} = \frac{2}{z_1 + z_2} u_{1q} = \frac{2z_1}{z_1 + z_2} \cdot i_{1q} = \alpha_i \cdot i_{1q} \end{cases} \quad (2-5)$$

将  $u_{2q}$  代入可得：

$$\begin{cases} u_{1f} = u_{2q} - u_{1q} = -\frac{2z_2}{z_1 + z_2} u_{1q} - u_{1q} = \frac{z_2 - z_1}{z_1 + z_2} u_{1q} = \beta_u u_{1q} \\ i_{1f} = -\frac{u_{1f}}{z_1} = -\frac{z_2 - z_1}{z_1(z_1 + z_2)} u_{1q} = \frac{z_1 - z_2}{z_1 + z_2} i_{1q} = \beta_i i_{1q} \end{cases}$$

式中  $\alpha_u$  表示线路  $z_2$  上的折射电压波  $u_{2q}$  与入射电压波  $u_{1q}$  的比值，称为电压折射系数， $\alpha_i$  称为电流折射系数。 $\beta_u$  表示线路  $z_1$  上的反射电压波  $u_{1f}$  与  $u_{1q}$  的比值，称为电压反射系数， $\beta_i$  称为电流反射系数。

折射系数的值永远都是正的，这说明折射电压波总是和入射电压波是同极性的，当  $z_2 = 0$  时， $\alpha_u = 0$ ；当  $z_2 \rightarrow \infty$  时， $\alpha_u \rightarrow 2$ ，因此  $0 \leq \alpha_u \leq 2$ 。反射系数可正可负，当  $z_2 = 0$  时， $\beta_u = -1$ ，当  $z_2 \rightarrow \infty$  时， $\beta_u \rightarrow 1$  因此  $-1 \leq \beta_u \leq 1$ 。同理可知， $0 \leq \alpha_i \leq 2$ ； $-1 \leq \beta_i \leq 1$ 。折射系数  $\alpha$  与反射系数满足下列关系  $\alpha = 1 + \beta$ 。

当线路出现断线，或行波运动到线路的开路终端时，阻抗不连续处的等效电阻为  $z_2 \rightarrow \infty$ 。通常普通架空线路的波阻抗大约是  $400 \sim 500 \Omega$ ，由于线路波阻抗远小于  $z_2$ ，可以忽略线路波阻抗的作用，这时，电压反射系数  $\beta_u = 1$ ，表明开路发生了全反射，电压反射波与入射波同极性。实际的开路点电压是入射电压与反射电压之和，出现了电压加倍的现象。开路点的电流反射系数为  $-1$ ，反射电流与入射电流大小相等，方向相反，实际的开路点电流是二者之和，因此为零。开路点的电流为零，电压加倍，说明行波到达开路点后，由电流携带的磁场能量全部转化成了由线路电压代表的电场能量。

当线路中出现短路时， $z_2 = 0$ ，这时的电压反射系数  $\beta_u = -1$ 。短路点反射电压与入射电压大小相等，方向相反，合成电压为  $0$ 。短路点的电流反射系数为  $+1$ ，反射电流与入射电流相等，出现了电流加倍的现象。短路点电压为零，电流加倍，说明行波到达短路点后，电场能量全部转化成了磁场能量。

## 2.2.2 经阻抗接地时的反射与透射

图 2.2 中线路波阻抗为  $z_1$ ，在  $A$  点发生接地故障，接地电阻为  $R$ ，此时一部分行波会向  $A$  点的另一侧和故障点透射，一部分行波能量消耗在电阻中，还有一部分行波自  $A$  点沿着线路返回。此时故障点的波阻抗可以看作是电阻  $R$  和波阻抗  $z_1$  并联等值阻抗，其值为  $\frac{R \times z_1}{R + z_1}$ 。所以电压反射系数  $\beta_u = \frac{-z_1}{z_1 + 2R}$ ，电压折射系数

$$\alpha_u = \frac{2R}{z_1 + 2R}, \text{ 令 } K = R/z_1, \text{ 则 } \beta_u = \frac{-1}{1+2K}, \alpha_u = \frac{2K}{1+2K}.$$

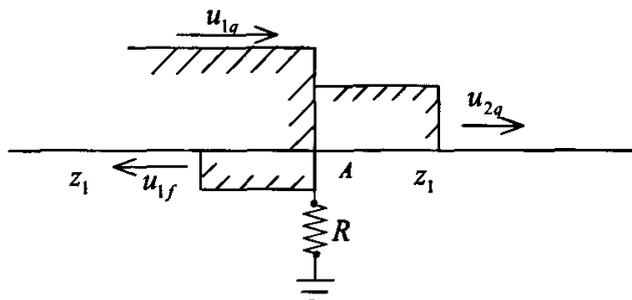


图 2.2 经阻抗接地时的反射与折射

电压行波在金属性接地点发生负的全反射，反射脉冲与发射脉冲的极性相反。电压脉冲在断线点产生正的全反射，反射脉冲与发射脉冲的极性相同。当故障点经电阻接地时，电压脉冲发生的是部分反射，电压反射系数跟接地电阻关系曲线如图 2.3 所示。

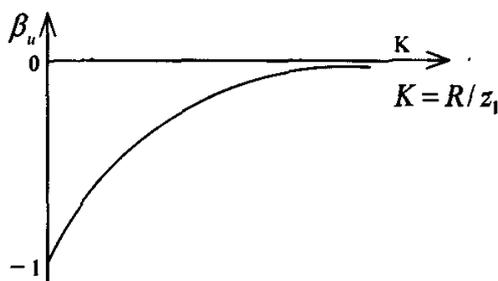


图 2.3 电压反射系数与接地电阻关系图

### 2.2.3 C 型行波法的基本原理与技术关键

C 型行波法是在故障发生后由装置发射高压高频或直流脉冲信号，根据高频脉冲从装置至故障点往返时间进行定位<sup>[2]</sup>。如图 2.4，由装设在线路首端 M 点的故障定位装置检测发射脉冲信号的时刻  $t_p$  和来自故障点的反射波到达检测点的时刻  $t_F$ 。

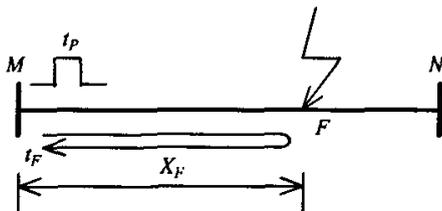


图 2.4 C 型行波定位示意图

设故障点到信号检测点的距离为  $X_F$ ，线路上行波传播的速度为  $v$ ，则有：

$$X_F = \frac{v \cdot (t_F - t_p)}{2} \quad (2-6)$$

C 型行波定位法的硬件关键是注入脉冲信号源。配电网由于带有分支，为了使

返回的行波信号仍然能够被识别和检测，注入的脉冲信号要求能量尽可能强，信号的电压幅值要经得住分支衰减的影响，因此信号注入系统发出的脉冲幅值应尽可能高。本课题组通过不断改进，将注入脉冲源的脉冲幅值由 300V 提高到了 10kV。

注入脉冲信号源的脉冲宽度对定位结果也有很大影响。如果脉冲宽度过宽，假设为  $T$ ，则在  $T$  时间内到来的反射脉冲与发射脉冲重叠，检测装置检测到的仍旧是发射脉冲的信号，而不是反射脉冲的信号，因而不能测出故障距离，出现盲区。发射脉冲的宽度愈宽，盲区愈大。但如果脉冲过窄，其所含的高频分量就愈多，它在线路上产生高频损耗也越大，从而使反射脉冲的幅值过小并产生严重畸变，也影响信号的接收。一般而言，定位距离愈远，应选择的脉宽愈宽。配电线路的长度一般为几公里到几十公里，通过反复试验，发现采用 10 微秒左右的脉冲宽度，对于配电线路是合适的。

如何从采集到的行波信号中辨识有用信息，也是实现 C 型行波定位法的关键。主要包括确定故障距离与确定故障区段两个问题，这方面内容将在第四章中详细说明。

#### 2.2.4 注入脉冲信号在带分支线路上的传播

行波在线路上传播过程中，在波阻抗不连续点会产生折射和反射过程。对于带分支的故障线路，波阻抗不连续点包括故障点、线路的终端、分支的节点和端点。现在详细分析利用 C 型行波法进行故障定位时，注入脉冲信号在带分支线路上传播产生的折射和反射过程。

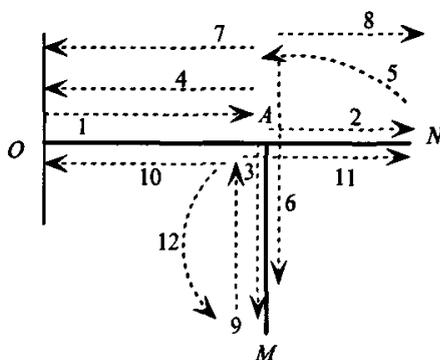


图 2.5 注入脉冲信号在带分支线路上的传播

如图 2.5 所示，在线路首端  $O$  点注入一个电压脉冲信号，该信号将沿着线路进行传播，即为行波 1。行波 1 遇到波阻抗不连续点  $A$  点时，一部分能量透过  $A$  点继续沿主干线路传播，即为行波 2；行波 1 的另一部分能量沿分支  $AM$  传播，为行波 3；行波 1 的其余一部分能量反射回  $O$  点，为行波 4。行波 2 传播到主干线路末端  $N$ ，发生开路反射，为行波 5。行波 5 在  $A$  点同样发生行波的折射和反射，将能量分给行波 6、行波 7 和行波 8。行波 3 传播到分支线路末端  $M$ ，发生开路反射，为行波 9。

行波 9 在  $A$  点发生折射和反射，将能量分给行波 10、行波 11 和行波 12。行波在带分支线路上按照上述规律进行传播，不断地在波阻抗不连续点发生折射和反射。

在此引入“特征波”的概念来分析行波信号。本文将波阻抗不连续点产生的第一个到达线路首端的反射波称为该点的特征波。图 2.5 中，行波 4 为  $A$  点的特征波，行波 7 为主干线路末端端点的特征波，行波 10 为分支  $AM$  端点的特征波。特征波可以反应线路拓扑结构。通过分析特征波可以确定故障点所在区段。如果能检测到某分支端点的特征波，就可以确定故障点在该分支点的下方区段。如果检测不到某分支端点的特征波，就可以确定故障点在该分支点的上方区段。

同理，假定在线路某处发生单相接地故障，在线路首端注入脉冲信号后，接地点产生的第一个到达线路首端的反射波称为故障特征波。能否找到故障特征波是实现 C 型行波定位法的关键。找到故障特征波后，寻找发脉冲时刻与故障特征波到达线路首端的对应时刻，根据式(2-6)就可以计算出故障距离。在第四章中将具有具体算法流程与实例分析。

## 2.2.5 C 型行波法的适用范围

在现场试验中，发现当配电网单相接地故障是经铁塔接地时，接地过渡电阻较小。当配电网单相接地故障是经水泥杆接地时，接地过渡电阻较大，有时甚至达到几十  $k\Omega$ 。而 C 型行波法在这两种情况下是否都有效，这是值得研究的问题。

在 2006 年 12 月 19 日对 C 型行波法的适用范围进行了现场试验。如图 2.6，为试验线路图。 $MA$ 、 $MB$  是同杆双回线， $MA$  段和  $MB$  段长度相同，均为 5920m， $MC$  段长 2369m，变电站与分支点  $M$  的距离为 5271m，设置故障点  $F$  与变电站的距离为 2376m。

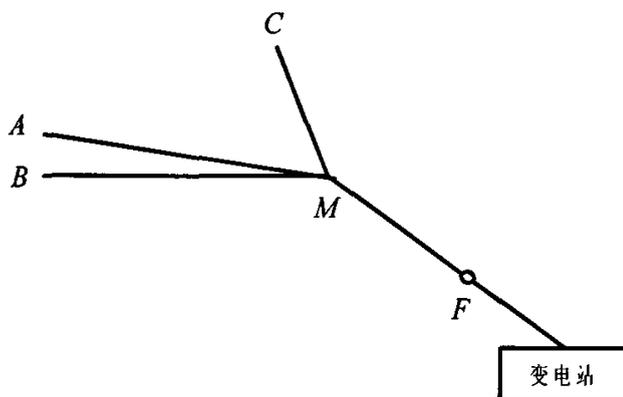


图 2.6 试验线路图

在线路正常状态下，在变电站内线路首端注入高压脉冲信号，在线路首端采集到的行波波形如图 2.7 所示。为了避免采集设备被高压损坏，接入采集设备的信号经过了分压处理。图 2.7 中， $W_1$  为注入的脉冲信号， $W_2$  为分支点  $M$  的特征波。 $W_3$

为分支线路  $MC$  的端点  $C$  点的特征波,  $W_4$  为分支线路  $MB$  的端点  $C$  点和  $MA$  的端点  $A$  的特征波,  $W_3$  比  $W_4$  靠前是因为  $MC$  线路长度比  $MB$  线路长度短, 反射波较早到达检测端。

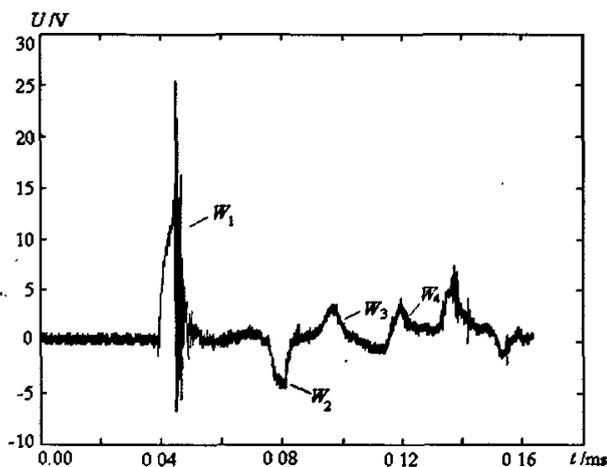


图 2.7 线路正常时的行波波形

在  $F$  点设置金属性接地故障, 在线路首端注入高压脉冲信号, 在线路首端采集到的行波波形如图 2.8 所示。图 2.8 中,  $W_1$  为注入的脉冲信号,  $W_{F1}$  为故障点特征波。

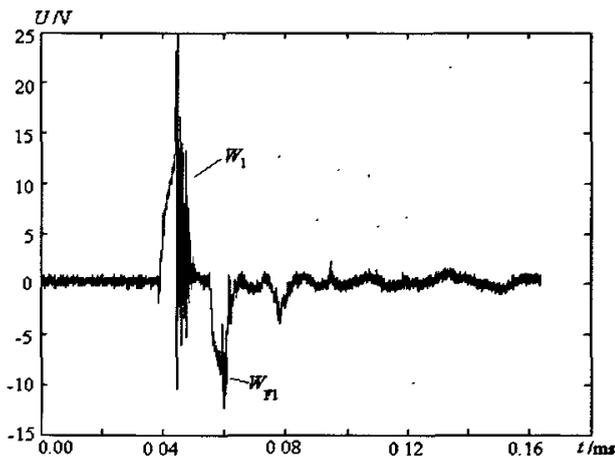


图 2.8  $F$  点金属性接地时的行波波形

在  $F$  点设置经  $3\text{ k}\Omega$  电阻接地故障, 在线路首端注入高压脉冲信号, 在线路首端采集到的行波波形如图 2.9 所示。图 2.9 中,  $W_1$  为注入的脉冲信号,  $W_{F2}$  为故障点特征波。图 2.9 和图 2.8 的区别在于, 故障点特征波的幅值不同, 金属性接地故障的故障特征波幅值较大, 经  $3\text{ k}\Omega$  电阻接地故障的故障特征波幅值较小。

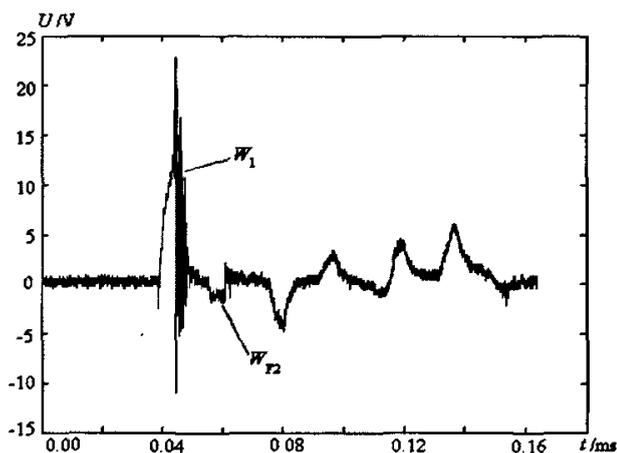


图 2.9 F 点经 3k 电阻接地时的行波波形

通过比较正常时的波形与故障时的波形，找到发脉冲时刻与故障特征波到达首端的时刻，按式(2-6)就可以计算出故障距离。通过上述试验，可以看出 C 型行波法在接地过渡电阻不大于  $3\text{ k}\Omega$  的情况下是有效的。而当接地过渡电阻大于  $3\text{ k}\Omega$  时，故障特征波很不明显，此时 C 型行波法就不适用。

### 2.3 C 型行波法与 S 注入法结合进行综合定位

C 型行波法具有定位速度快，无需巡线，可以进行多次定位的优点。但由于采集设备采样率和算法精度的限制，利用 C 型行波法定位存在  $\pm 300\text{ m}$  的定位误差。为了更好地实现快速准确的故障定位，可以将不同方法结合起来，优势互补进行综合定位。S 注入法具有定位精度高的优点<sup>[6]</sup>，但 S 注入法需要巡线，定位时间较长，因此考虑将 C 型行波法和 S 注入法有效结合起来。

设计综合定位方案如下：当线路发生单相接地故障后，先离线注入高压脉冲信号，根据 C 型行波法原理确定故障距离，并确定故障点所在区段；再采用 S 注入法细定位，离线注入特殊频率的电流信号，通过 S 信号检测器对满足故障距离的点附近的线路进行该特殊频率电流信号的检测，准确找到故障点位置。此外，在利用 C 型行波法计算出故障距离的前提下，如果由于配电网分支太多，通过分析特征波的方式无法确定故障所在的分支，也可以采用 S 注入法来确定分支。在 C 型行波法计算出故障距离后，划定满足故障距离的几个点，通过 S 信号检测器对这几个点附近线路的检测，找出真故障点。如图 2.10 所示，为 C 型行波法与 S 注入法综合定位实现流程图。

上述方案的可行性在现场试验中得到了验证。试验记录详见附录。

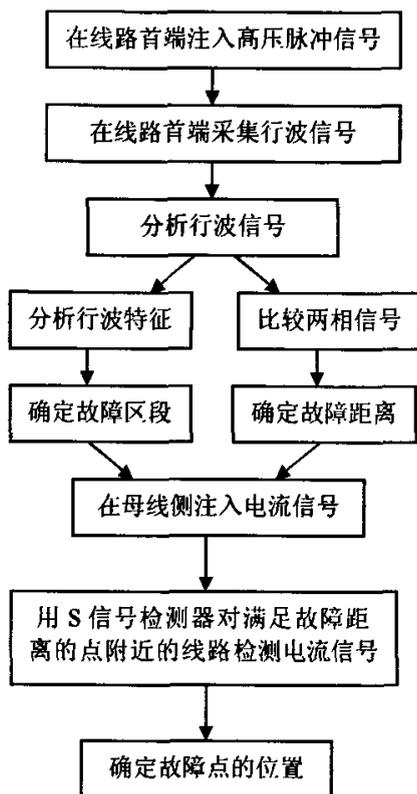


图 2.10 综合定位实现流程图

## 2.4 小结

在研究和比较了现有故障定位方法的基础上,根据配电网的自身特点,结合现场试验,选择了 C 型行波法作为主要研究对象。C 型行波法的主要优点是不需要巡线,定位速度快,可以进行多次定位。详细介绍了行波在波阻抗不连续节点上的折射与反射过程和经阻抗接地时的反射与透射过程。并介绍了 C 型行波法的基本原理与技术关键。提出了“特征波”的概念来分析注入脉冲信号在带分支线路上的传播过程。经过试验发现,C 型行波法适用于接地过渡电阻不大于  $3\text{ k}\Omega$  的配电网故障定位问题。为了进一步提高定位精度,提出将 C 型行波法和 S 注入法结合起来,优势互补,实现快速准确的综合定位。该方案的可行性在现场试验中得到了验证。

### 第三章 行波故障定位数学模型的研究

通过大量的试验，我们认识到要想彻底解决配电网故障定位问题，只有建立行波故障定位数学模型，深入了解行波在配电线路上的传播过程。此外，物理模型是在数学模型的基础上建立的，研究数学模型也就为研究物理模型打下了基础。目前尚未见到有关配电网数学建模的相关文献发表。配电网行波故障定位模型是在单根线的基础上增加分支个数，一步步完善的。因此本章从单根传输线入手，分别建立了无损线模型和有损线模型的离散格式，并分析了离散格式的稳定性，确定了不同情况下的边界条件，最后进行了数值试验，效果较好。

#### 3.1 传输线的波动方程

如果传输线由两根平行导线组成，每一导线沿线各处具有相同材料、相同截面，并且导线周围介质沿线均匀分布，则称之为二线均匀传输线或简称均匀线。一般二线架空输电线及同轴电缆均可近似地视为二线均匀传输线<sup>[18]</sup>。

在分布参数电路理论中，均匀传输线的原始参数是以每单位长度的线路参数来表示的。用线间分布电容来反映沿传输线周围空间分布的电场的储能特性（单位长度线段的两导线间的电容  $C_0$ ）；用沿线的分布电感来反映沿传输线周围空间分布的磁场的储能特性（单位长度线段上的电感  $L_0$  包括来回）；由于电流流过金属导体而引发热损耗的现象存在于传输线的整个长度上，用以反映这一过程的电路参数是沿线的分布电阻（单位长度线段上的电阻  $R_0$  包括来回）；因绝缘不完善而引起的线间泄漏电流也是沿线分布的，用以反映这一过程的电路参数是线间的分布漏导（单位长度线段的两导线间的漏导  $G_0$ ）。在相当宽的频率范围内四个参数内都是恒定的，即认为它们均为常量<sup>[18]</sup>。

传输线等值电路如图 3.1 所示：

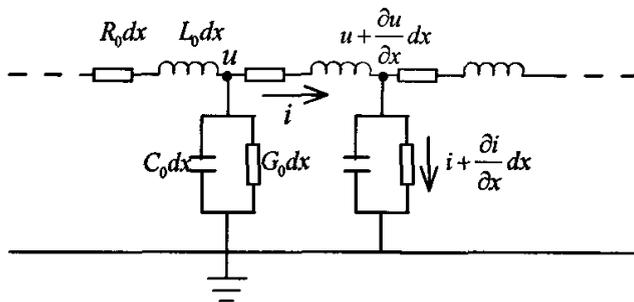


图 3.1 传输线分布参数的等值电路中某一段

图 3.1 为传输线分布参数等值电路的某一段，图中电压  $u$  和电流  $i$  均为距离  $x$  和时间  $t$  的函数，从等值电路可以列出下面方程：

$$\begin{cases} u - (u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx) = -\frac{\partial u}{\partial x} dx = R_0 \cdot dx \cdot i + L_0 \cdot dx \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \\ i - (i + \frac{\partial i}{\partial x} \cdot dx) = -\frac{\partial i}{\partial x} dx = G_0 \cdot dx (u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx) + C_0 dx \frac{\partial (u + \frac{\partial u}{\partial x} \cdot dx)}{\partial t} \end{cases} \quad (3-1)$$

略去上式中的二阶无穷小  $(dx)^2$  项并整理后得：

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases} \quad (3-2)$$

### 3.2 行波故障定位数学模型

传输线的波动方程是偏微分双曲型方程组，在给定的初始条件和边界条件下，可以唯一地确定  $u(x,t)$  和  $i(x,t)$ 。这是本文研究行波故障定位数学模型的基本依据。

传输线方程数值分析的具体方法多种多样，一部分是直接应用已经成熟的偏微分方程的数值分析方法，另一部分是学者们在不断探索过程中提出的一些改进的方法或新的数值分析方法。一般来说，数值方法可分为时域法和频域法这两大类。本文采用时域法进行数值试验。时域法是直接离散时间或空间，将偏微分方程变为常微分方程或差分方程，以迭代求解。

在偏微分方程数值解领域里，有限时域差分法以其离散格式简单、稳定性分析和误差分析的理论全面被广泛使用。差分格式采用显式格式还是隐式格式，取决于问题的复杂程度。对离散后的差分格式要讨论其稳定性。判断稳定性可以利用系数矩阵特征值的大小来直接判断，也可以采用 Fourier 方法。显式格式计算简单，但稳定性条件要求高一些，对简单问题可以采用显式格式。处理复杂问题时，显式格式可能满足不了稳定性条件，就应采用隐式格式。本文采用显式格式进行无损线和有损线的数值试验。

有限差分法的基本思路为：令  $x$  轴表示空间坐标， $y$  轴表示时间坐标，形成平面坐标。再利用矩形网格对模拟区域进行空间和时间的离散，形成平面离散网格图。在网格点上用差商代替方程中的微商形成差分格式，每排所有节点的差分格式联立，构成线性代数方程组。再利用初始条件和边界条件，迭代求出所有网格点的数值。

如图 3.2 所示，为本文利用偏微分方程数值解法研究行波故障定位数学模型的过程示意图。

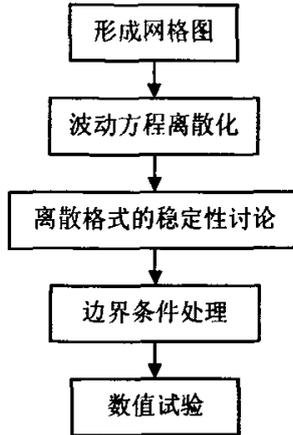


图 3.2 研究行波故障定位数学模型的过程示意图

### 3.3 无损线模型

#### 3.3.1 模型的离散化

当采用有限时域差分法求解偏微分方程数值时，首先将连续分布的时间、空间坐标离散得到时间、空间网格。在  $x-t$  上半平面上画出两组平行于坐标轴的直线，把上半平面分成矩形网格。这样的直线称作网格线，其交点称为网格点或节点。一般来说，平行于  $t$  轴的直线是等距的，可设距离为  $\Delta x > 0$  记为  $h$ ，我们称其为空间步长。平行于  $x$  轴的直线也假定是等距的，设距离为  $\Delta t > 0$  记为  $\tau$ ，称其为时间步长。这样两组网格线可以写为：

$$x = x_j = j\Delta x = jh, \quad j = 0, 1, 2, \dots$$

$$t = t_n = n\Delta t = n\tau, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

网格节点  $(x_j, t_n)$  简记为  $(j, n)$ ，如图 3.3 所示。

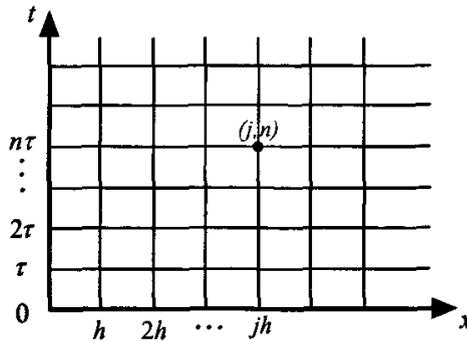


图 3.3 网格图

对于无损线， $G_0$  和  $R_0$  都为零，因此波动方程(3-2)式可以简化为：

$$\begin{cases} L_0 \frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial x} & (3-3) \\ C_0 \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial i}{\partial x} & (3-4) \end{cases}$$

将(3-3)式对  $x$  微分, 将(3-4)式对  $t$  微分, 得到:

$$\begin{cases} L_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t \partial x} = -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} & (3-5) \\ C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} & (3-6) \end{cases}$$

将(3-6)代入(3-5)中, 得到  $L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$

$$\text{转化为: } \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{L_0 C_0} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3-7)$$

又因为行波在线路上传播速度  $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ , 将其代入(3-7)得到:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (3-8)$$

$$\text{同理, 由(3-3) (3-4)消去 } u, \text{ 可得到 } \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} \quad (3-9)$$

无损线模型的数值解问题即转化为求解(3-8) (3-9)联立的偏微分方程组。

对于(3-8)中的偏微分  $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$ ,  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$  用中心差商来逼近, 得到差分格式:

$$\frac{u_j^{n+1} - 2u_j^n + u_j^{n-1}}{\tau^2} - v^2 \frac{u_{j+1}^n - 2u_j^n + u_{j-1}^n}{h^2} = 0 \quad (3-10)$$

对于(3-9)中的偏微分  $\frac{\partial^2 i}{\partial t^2}$ ,  $\frac{\partial^2 i}{\partial x^2}$  用中心差商来逼近, 得到差分格式:

$$\frac{i_j^{n+1} - 2i_j^n + i_j^{n-1}}{\tau^2} - v^2 \frac{i_{j+1}^n - 2i_j^n + i_{j-1}^n}{h^2} = 0 \quad (3-11)$$

### 3.3.2 模型的稳定性

下面来讨论差分格式(3-10)的稳定性, 可以把波动方程(3-8)化为一阶对称双曲型方程组, 令

$$p = \frac{\partial u}{\partial t}, \quad q = v \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \text{其中 } v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

$$\text{那么有 } \begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} - v \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial t} - v \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \end{cases}$$

如果令  $\mathbf{u} = [p, q]^T$ , 那么方程组可以写成:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + N \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3-12)$$

$$\text{其中, } N = \begin{bmatrix} 0 & -v \\ -v & 0 \end{bmatrix}$$

容易验证, (3-10)式等价于逼近方程组(3-12)的一个显式差分格式(3-13)<sup>[19]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{p_j^{n+1} - p_j^n}{\tau} - v \frac{q_{j+1/2}^n - q_{j-1/2}^n}{h} = 0 \\ \frac{q_{j-1/2}^{n+1} - q_{j-1/2}^n}{\tau} - v \frac{p_j^{n+1} - p_{j-1}^{n+1}}{h} = 0 \end{cases} \quad (3-13)$$

$$\text{其中 } p_j^n = \frac{u_j^n - u_j^{n-1}}{\tau}, \quad q_{j-1/2}^n = v \frac{u_j^n - u_{j-1}^n}{h}$$

因此只要讨论差分格式(3-13)的稳定性就可以了。根据文献[19], 差分格式(3-13)的稳定条件为  $v\lambda < 1$  (其中  $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ ,  $\lambda = \frac{\tau}{h}$ )。由于(3-10)式等价于逼近方程组(3-13), 因此(3-10)式的稳定条件为  $v\lambda < 1$ 。

同理可得, (3-11)式的稳定条件也为  $v\lambda < 1$ 。

计算时应在满足稳定条件的基础上选择时间步长和空间步长。

### 3.3.3 边界条件

整条传输线可视为无数多个微分段级联而成, 每个微分段是由  $R_0$ 、 $G_0$ 、 $L_0$ 、 $C_0$  构成的集中参数电路。波动方程就是在这个“微分段”上利用集中参数电路所满足的电路定理推导出来的。在线路的始端、终端利用集中参数电路模型, 推导偏微分方程数值解的边界条件。

对于无损传输线, 假定电源为没有内阻的理想电源, 始端集中参数电路模型为:

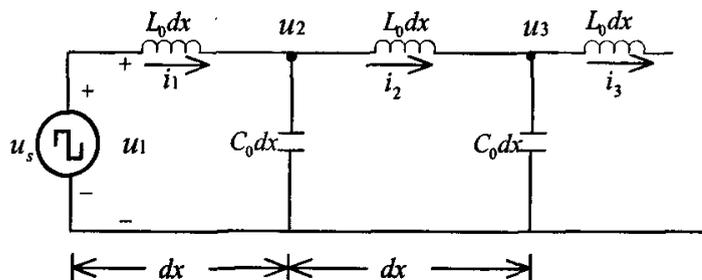


图 3.4 无损线始端集中参数电路

始端电压  $u_1$  仍然满足基尔霍夫电压定律。

$$u_s(t) = dxL_0 \frac{di_1}{dt} + u_2(t) \quad (3-14)$$

$$\text{且 } u_s(t) = u_1(t) \quad (3-15)$$

对始端电流应用前向欧拉公式<sup>[19]</sup>

$$\frac{di_1}{dt} \approx \frac{i_1^{n+1} - i_1^n}{\tau}$$

代人(3-14)式得,  $u_s^n = hL_0 \frac{i_1^{n+1} - i_1^n}{\tau} + u_2^n$

推出  $i_1^{n+1} = \frac{\tau}{hL_0} (u_s^n - u_2^n + \frac{hL_0}{\tau} i_1^n)$  (3-16)

因此, (3-15) 式和(3-16)式就是始端边界条件。

对于不同的负载, 终端边界条件是不同的。

1、线路末端短路的情况,

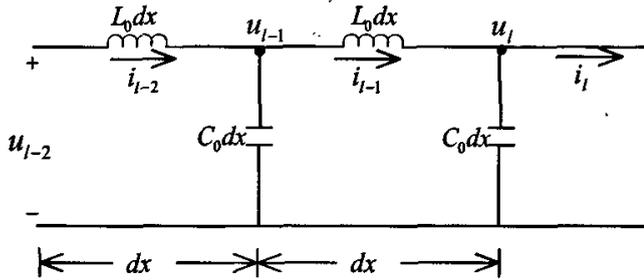


图 3.5 无损线末端短路的集中参数电路

电压的边界条件:  $u_l^{n+1} = 0$  (3-17)

电流的边界条件:  $i_l^{n+1} = i_{l-1}^{n+1}$  (3-18)

2、线路末端开路的情况,

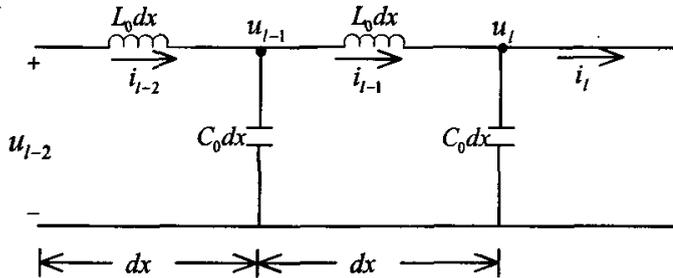


图 3.6 无损线末端开路的集中参数电路

根据基尔霍夫电压定律并采用后向欧拉格式。

$$u_l^{n+1} \approx u_{l-1}^{n+1} - \frac{L_0 h}{\tau} (i_{l-1}^{n+1} - i_{l-1}^n)$$
 (3-19)

由终端开路有:  $i_l^{n+1} = 0$  (3-20)

因此, (3-19)式和(3-20)式为线路末端开路的终端边界条件。

3.3.4 数值试验

根据上述算法, 进行数值试验。流程图如图 3.7 所示:

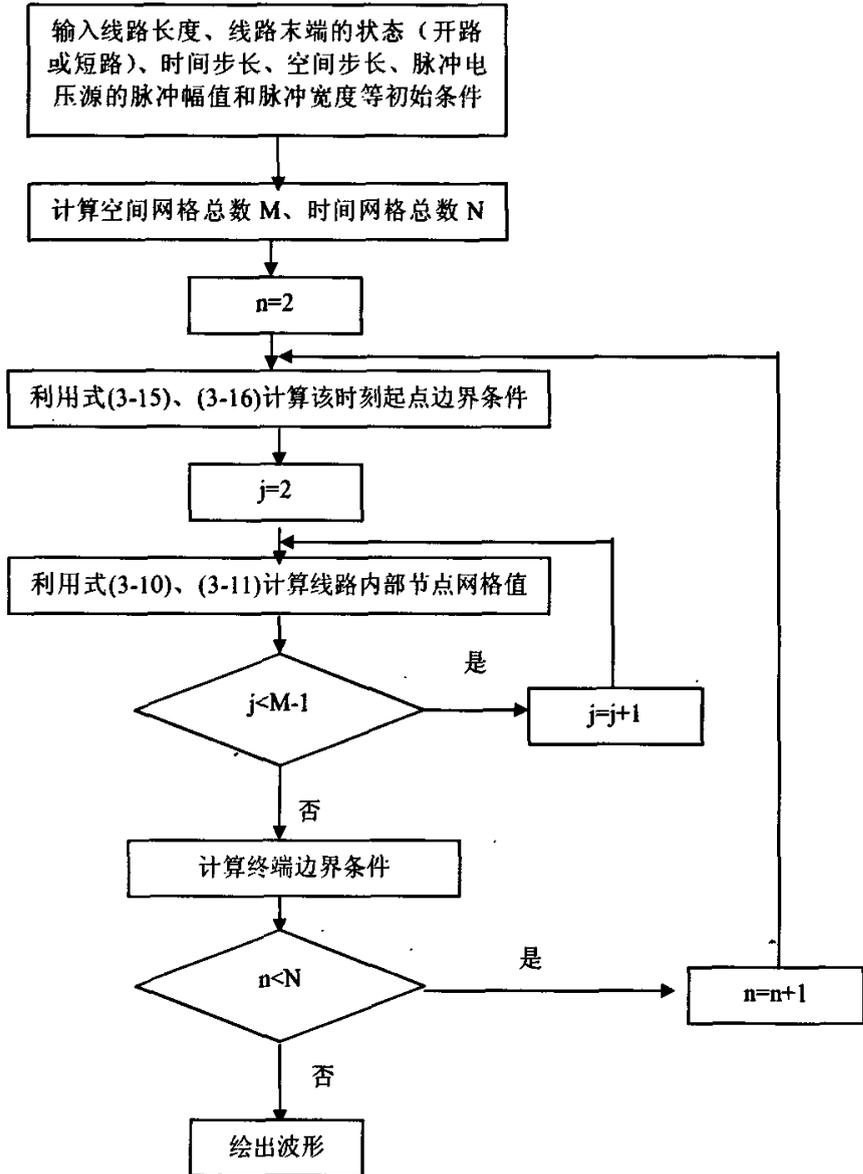


图 3.7 仿真流程图

仿真线路全长为 20km，在  $t=0$  时刻，在线路首端加一个脉冲电压信号（脉冲宽度 5 微秒，脉冲幅值 10kV）。仿真过程中行波在线路的传播速度取  $3 \times 10^8 m/s$ ，时间步长为 1 微秒，空间步长为 300m。通过观测线路首端电压随时间变化的情况来验证该算法的可靠性。

(1) 仿真线路末端为短路的情况，线路首端电压随时间变化的波形如图 3.8 所示。理论上，当线路全长为 20km，行波在线路的传播速度取  $3 \times 10^8 m/s$  时，在  $t=0$  时刻注入脉冲，注入脉冲到达线路末端，遇到短路点发生负的全反射后，反射波回到线路首端的时刻应为 133 微秒。由图 3.8 中可以看到，仿真中的短路反射波到达线路首端时刻为 133 微秒，该仿真结果与行波理论较为吻合。

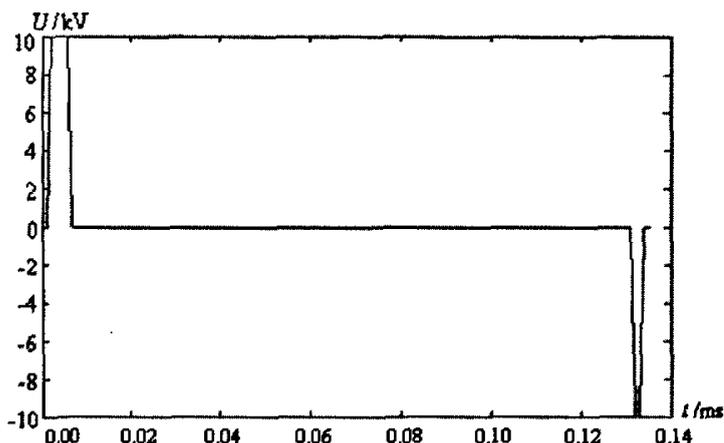


图 3.8 无损线仿真（线路末端短路）

(2) 仿真线路末端为开路的情况，线路首端电压随时间变化的波形如图 3.9 所示。理论上，当线路全长为 20km，行波在线路的传播速度取  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$  时，在  $t=0$  时刻注入脉冲，注入脉冲到达线路末端，遇到开路点发生正的全反射后，反射波回到线路首端的时刻应为 133 微秒。由图 3.9 中可以看到，仿真中的开路反射波到达线路首端时刻为 133 微秒，该仿真结果与行波理论较为吻合。

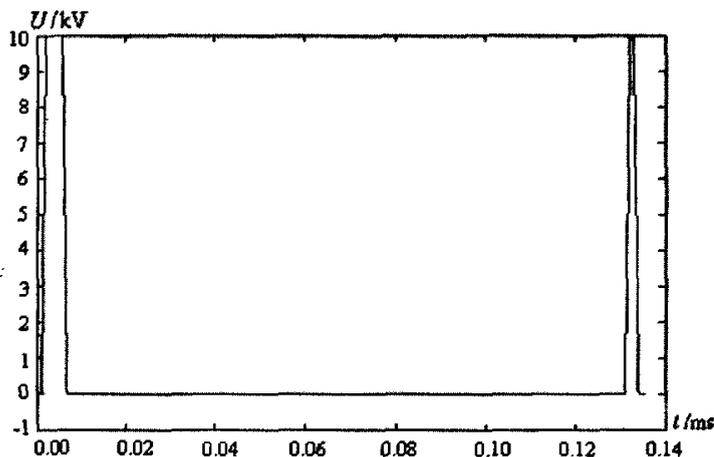


图 3.9 无损线仿真（线路末端开路）

### 3.4 有损线模型

#### 3.4.1 模型的离散化

对于波动方程(3-2)式

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = R_0 i + L_0 \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = G_0 u + C_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases}$$

$$\text{可转化为: } \begin{cases} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{1}{L_0} \frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{R_0}{L_0} i \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{C_0} \frac{\partial i}{\partial x} = -\frac{G_0}{C_0} u \end{cases} \quad (3-21)$$

$$\text{令 } \begin{pmatrix} i \\ u \end{pmatrix} = M, \quad A = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L_0} \\ \frac{1}{C_0} & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} \frac{R_0}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{G_0}{C_0} \end{pmatrix}$$

$$\text{则有 } \frac{\partial M}{\partial t} + A \frac{\partial M}{\partial x} = -BM \quad (3-22)$$

$A$  的两个左特征向量为:

$$k_1 = \left( \frac{\sqrt{L_0 C_0}}{C_0} \quad 1 \right) \quad \text{其特征值 } \lambda_1 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} ;$$

$$k_2 = \left( \frac{\sqrt{L_0 C_0}}{C_0} \quad -1 \right) \quad \text{其特征值 } \lambda_2 = \frac{-1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$

分别用  $k_1$ 、 $k_2$  左乘式(3-22), 得到

$$\begin{cases} \left( \frac{\sqrt{L_0 C_0}}{C_0} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{1}{C_0} \frac{\partial i}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{R_0}{\sqrt{L_0 C_0}} i - \frac{G_0}{C_0} u \\ \left( \frac{\sqrt{L_0 C_0}}{C_0} \frac{\partial i}{\partial t} - \frac{1}{C_0} \frac{\partial i}{\partial x} \right) - \left( \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \frac{\partial u}{\partial x} \right) = -\frac{R_0}{\sqrt{L_0 C_0}} i + \frac{G_0}{C_0} u \end{cases} \quad (3-23)$$

$$\text{考虑一阶双曲型方程: } \frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (3-24)$$

采用迎风格式<sup>[19]</sup>对上述方程离散可得:

$$\text{当 } a > 0, \quad \frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\tau} + a \frac{u_j^n - u_{j-1}^n}{h} = 0$$

$$\text{当 } a < 0, \quad \frac{u_j^{n+1} - u_j^n}{\tau} + a \frac{u_{j+1}^n - u_j^n}{h} = 0$$

令  $V_p = \sqrt{L_0 C_0}$ ,  $\gamma = \frac{\tau}{h \sqrt{L_0 C_0}}$  对式(3-23)采用迎风格式进行离散, 得到:

$$\begin{cases} i_j^{n+1} = \left( 1 - \frac{C_0 R_0}{V_p^2} - \gamma \right) i_j^n + \frac{\gamma}{2} (i_{j-1}^n + i_{j+1}^n) - \frac{\gamma C_0}{2 V_p} (u_{j+1}^n - u_{j-1}^n) \\ u_j^{n+1} = \left( 1 - \gamma - \frac{G_0}{C_0} \right) u_j^n + \frac{\gamma}{2} (u_{j-1}^n + u_{j+1}^n) - \frac{\gamma V_p}{2 C_0} (i_{j+1}^n - i_{j-1}^n) \end{cases} \quad (3-25)$$

差分格式(3-25)为有损线方程(3-2)的数值解计算格式, 它是显式迭代式。

### 3.4.2 模型的稳定性

为了保证差分格式(3-25)在计算中的稳定性, 现讨论其稳定条件。

根据文献[19], 如果  $\lambda\rho(A) < 1$  (其中  $\lambda = \tau/h$ ), 则差分格式(3-25)满足 von Neumann 条件。因为 von Neumann 条件是稳定的必要条件, 所以当  $\lambda\rho(A) < 1$  时, 差分格式(3-25)稳定。

要满足  $\lambda\rho(A) < 1$ , 则  $\lambda < \frac{1}{\rho(A)}$ 。

又因为  $A$  的两个特征值分别为  $\lambda_1 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$  和  $\lambda_2 = \frac{-1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ , 而  $\gamma = \frac{\tau}{h\sqrt{L_0 C_0}}$ , 所以稳定条件为  $\gamma = \frac{\tau}{h\sqrt{L_0 C_0}} < 1$ 。

计算时应在满足稳定条件的基础上选择时间步长和空间步长。

### 3.4.3 边界条件

对于有损传输线, 始端集中参数电路模型为:

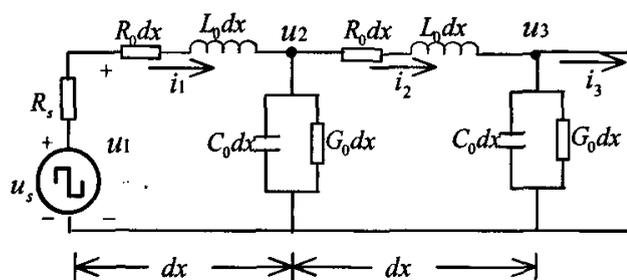


图 3.10 有损线始端集中参数电路

始端电压  $u_1$  仍然满足基尔霍夫电压定律。

$$u_s(t) = (R_s + R_0 dx)i_1(t) + L_0 \frac{di_1}{dt} dx + u_2(t) \quad (3-26)$$

$$\text{且 } u_1(t) = u_s(t) - R_s i_1(t) \quad (3-27)$$

对始端电流应用前向欧拉公式<sup>[19]</sup>

$$\frac{di_1}{dt} \approx \frac{i_1^{n+1} - i_1^n}{\tau}$$

$$\text{代人(3-26)式得, } u_s^n = (R_s + hR_0)i_1^n + hL_0 \frac{i_1^{n+1} - i_1^n}{\tau} + u_2^n$$

$$\text{推出: } i_1^{n+1} = \frac{\tau}{hL_0} [u_s^n - u_2^n + (\frac{hL_0}{\tau} - R_s - hR_0)i_1^n] \quad (3-28)$$

$$\text{将(3-28)代入(3-27), 得到 } u_1^{n+1} = u_s^{n+1} - R_s i_1^{n+1} \quad (3-29)$$

因此, (3-28) 式和(3-29)式就是始端边界条件。

对于不同的负载, 终端边界条件是不同的。

1、线路末端短路的情况，

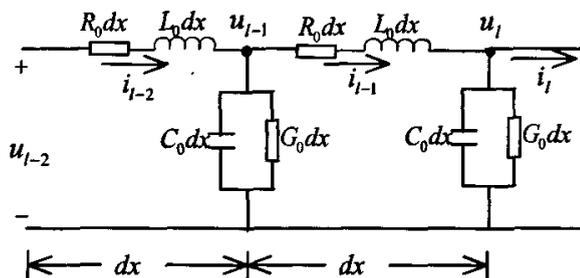


图 3.11 有损线末端短路的集中参数电路

电压的边界条件： $u_l^{n+1} = 0$  (3-30)

电流的边界条件： $i_l^{n+1} = i_{l-1}^{n+1}$  (3-31)

2、线路末端开路的情况，

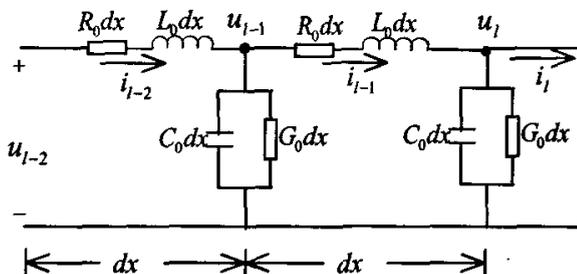


图 3.12 有损线末端开路的集中参数电路

根据基尔霍夫电压定律并采用后向欧拉格式。

$$u_l^{n+1} \approx u_{l-1}^{n+1} - \frac{L_0 h}{\tau} (i_{l-1}^{n+1} - i_{l-1}^n) - R_0 h i_{l-1}^{n+1} \quad (3-32)$$

由终端开路有： $i_l^{n+1} = 0$  (3-33)

因此，(3-32)式和(3-33)式为线路末端开路的终端边界条件。

### 3.4.4 数值试验

根据上述算法，进行数值试验。有损线的算法流程与无损线的算法流程相似。

仿真线路全长为 20km，在  $t=0$  时刻，在线路首端加一个脉冲电压信号（脉冲宽度 5 微秒，脉冲幅值 10000V，脉冲信号源内阻为 500Ω）。仿真过程中每公里线路参数取电感  $L_0=0.00133\text{H/km}$ ，电容  $C_0=0.00876\mu\text{F/km}$ ，电阻  $R_0=0.4\Omega/\text{km}$ ，电导  $G_0=0$ 。时间步长为 0.1 微秒，空间步长为 300m。通过观测线路首端电压随时间变化的情况来验证该算法的可靠性。

(1) 仿真线路末端为开路的情况，线路首端电压随时间变化的波形如图 3.13 所示。图 3.13 中，第一个上升波头为注入的脉冲信号，第二个上升波头为末端开路

反射波。图中，两个波头到达线路首端的时间差约为 136 微秒，根据 C 型行波法计算距离公式  $X_F = v \cdot (t_F - t_p) / 2$ ，已知仿真线路总长为 20km，因此可计算出对应的行波波速约为 294.1 m/ $\mu$ s。

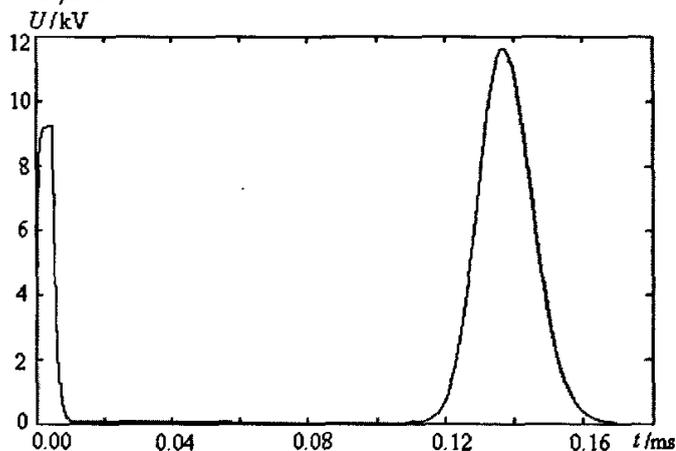


图 3.13 有损线仿真（线路末端开路）

与 2006 年 6 月 25 日的现场试验波形进行比较，试验线路为单根线，全长 3.5km。如图 3.14 所示为单根线线路末端开路的现场试验波形。从图 3.13 和图 3.14 的比较中可见，仿真结果与实际波形较为相似。图 3.14 中，第一个上升波头为注入的脉冲信号，第二个上升波头为末端开路反射波。两个波头到达线路首端的时间差约为 24 微秒，已知线路全长为 3.5km，因此可计算出对应的行波波速约为 291.7m/ $\mu$ s，这个结果与通过仿真计算得到的行波波速较为接近。

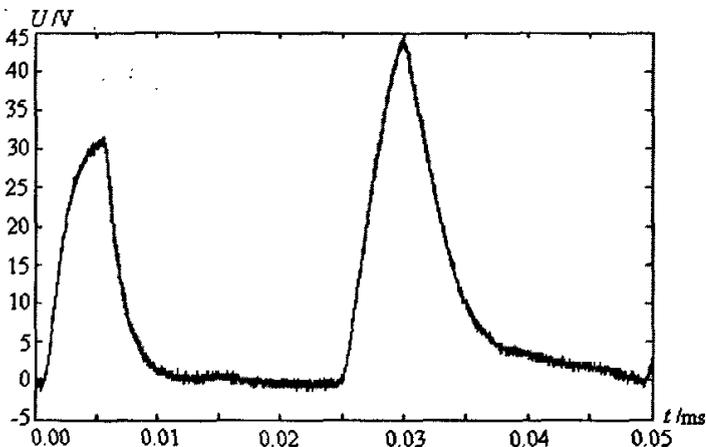


图 3.14 有损单根线现场试验波形（线路末端开路）

(2) 仿真线路末端为短路的情况，线路首端电压随时间变化的波形如图 3.15 所示。图 3.15 中，上升波头为注入的脉冲信号，下降波头为末端短路反射波。两个波头到达线路首端的时间差约为 136 微秒，根据 C 型行波法计算距离公式  $X_F = v \cdot (t_F - t_p) / 2$ ，已知仿真线路总长为 20km，因此可计算出对应的行波波速约

为  $294.1 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。

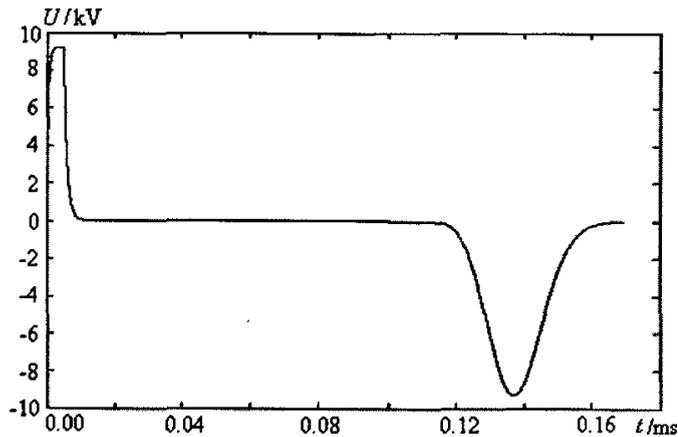


图 3.15 有损线仿真（线路末端短路）

与 2006 年 6 月 25 日的现场试验波形进行比较,如图 3.16 所示为单根线线路末端短路的现场试验波形。从图 3.15 和图 3.16 的比较中可见,仿真结果与实际波形较为相似。图 3.16 中,上升波头为注入的脉冲信号,下降波头为末端短路反射波。两个波头到达线路首端的时间差约为 24 微秒,已知线路全长为 3.5km,可计算出对应的行波波速约为  $291.7 \text{ m}/\mu\text{s}$ ,这个结果与通过仿真计算得到的行波波速较为接近。

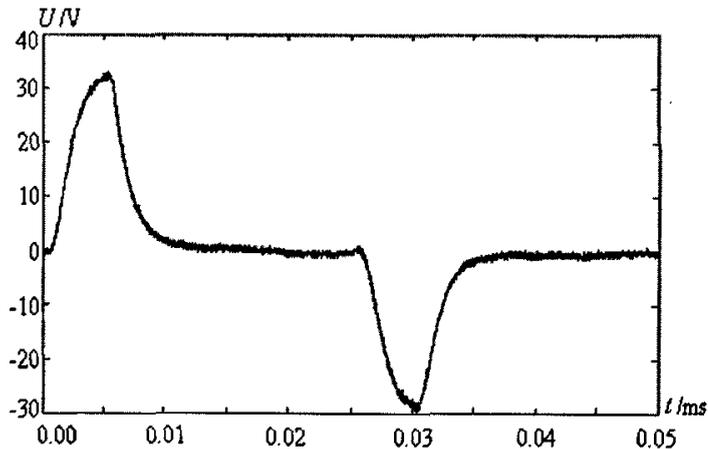


图 3.16 有损单根线现场试验波形（线路末端短路）

### 3.5 小结

本章采用了偏微分方程的数值解法,分别建立了无损线模型和有损线模型的离散格式,并分析了离散格式的稳定性,确定了不同情况下的边界条件,最后进行了数值试验。得到了以下结论:

1、对于无损线,离散化过程使用了解决偏微分方程非常经典的显式格式,对线路末端为开路和短路情况分别进行了数值计算,得到的数值结果和理论分析结果

较为吻合。

2、对于有损线，离散模型时先要把波动方程处理为向量形式，再利用迎风格式进行离散。对线路末端为开路和短路情况分别进行数值计算，仿真结果与现场试验波形较为接近。

为了进一步完善行波故障定位数学模型，需要在单根线的基础上增加线路分支使之更接近实际配电网。可考虑在本章建立的无损线模型和有损线模型的离散格式的基础上，改变边界条件来实现。

## 第四章 行波故障定位信息辨识处理技术的研究

对于行波定位法，如何从采集到的行波信号中辨识故障点的信息是非常关键的。由于配电网带有分支，故障点的信息就包含了故障点与测量点之间的距离、故障点所在线路的区段。

线路上存在着电磁干扰，而且为了能够捕捉行波波头来准确地判断行波波头的到达时刻，对行波信号的采样率往往取得较高，而高采样频率容易受到各种噪声影响。有效去除噪声干扰，是提取有用行波信号的第一步。

本章从这两方面入手，提出了行波故障定位信息辨识处理方法，并对现场试验数据进行了分析处理。

### 4.1 行波故障定位信息辨识的关键问题

#### 4.1.1 确定故障距离

要得到故障点的信息，需要比较线路正常时的行波波形与线路故障时的行波波行，但当发生实际故障时，线路正常时的行波波形难以得到。近似认为三相线路的参数相同。在进行 C 型行波定位时，分别在三三相的线路首端注入脉冲信号，并采集线路首端的行波信号。比较三个信号，与另两个信号明显不同的信号，即为故障相的信号，由此可区分出故障相和正常相。由于三相线路参数近似相同，可将采集到正常相的行波信号作为故障相在线路正常时的行波信号。

线路参数随频率变化，行波信号中不同频率成分的运动速度不同。行波波速对定位精度有直接的影响。从理论上来说，行波波速  $v$  可以根据  $v=1/\sqrt{L_0C_0}$  计算得到。但配电线路单位长度的电感值  $L_0$  和电容值  $C_0$  并不是定值。因此，我们考虑通过分析采集到的正常相行波数据，来确定行波在线路上的传播速度。

由于某些配电线路没有分支点（如某些 35kV 线路），为了全面考虑，因此根据线路结构，按照线路有分支点与无分支点两种情况来确定行波在线路上的传播速度。当线路无分支点时，首先寻找发脉冲时刻  $t_p$ ，再寻找线路正常时末端开路的特征波到达线路首端的时刻  $t_E$ ，已知线路总长  $X_L$ ，根据  $X_L=v*(t_E-t_p)/2$  即可得到当前波速  $v$ ；当线路有分支点时，首先寻找发脉冲时刻  $t_p$ 。寻找线路分支节点的反射波到达线路首端的时刻  $t_B$ ，已知线路分支点与首端的距离  $X_B$ ，根据  $X_B=v*(t_B-t_p)/2$  即可得到当前波速  $v$ 。计算行波波速的流程图如图 4.1 所示。

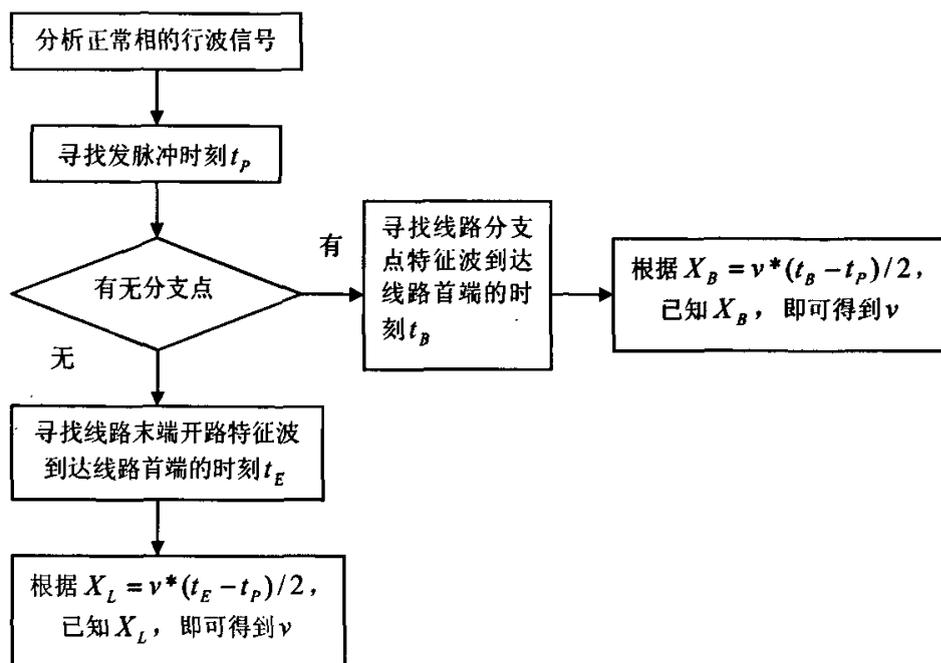


图 4.1 计算行波波速流程图

在得到当前行波波速的基础上，比较正常相的行波信号和故障相的行波信号来计算故障距离。从故障相行波信号中，找出故障特征波对应的时刻  $t_p$ 。因为在一次试验中，采集设备的触发电平都设为一致，所以对于故障相行波信号的发脉冲时刻也为  $t_p$ 。根据  $X_F = v*(t_F - t_p)/2$  式得到故障距离。

算例详见 4.4 节现场试验数据分析。

#### 4.1.2 确定故障点所在区段

在 2.2.4 节中提到，将波阻抗不连续点产生的第一个到达线路首端的反射波称为该点的特征波。在确定故障距离的基础上，通过分析特征波确定故障点所在区段后，即可准确定位故障所在位置。如果能检测到某分支端点的特征波，就可以确定故障点在该分支点的下方区段。如果检测不到某分支端点的特征波，就可以确定故障点在该分支点的上方区段。

对于结构复杂的配电线路，由于其分支非常多，行波发生了多次透射和反射过程，透射波和反射波与原有信号叠加，此时通过分析特征波较难判断故障区段。此时可通过 S 注入法来确定故障点的确切位置。在 C 型行波法计算出故障距离后，划定满足故障距离的几个点，通过 S 信号检测器对这几个点附近线路的检测，找出真故障点。

以线路有一个分支点为例，说明确定故障点所在区段的流程，流程图如图 4.2 所示。

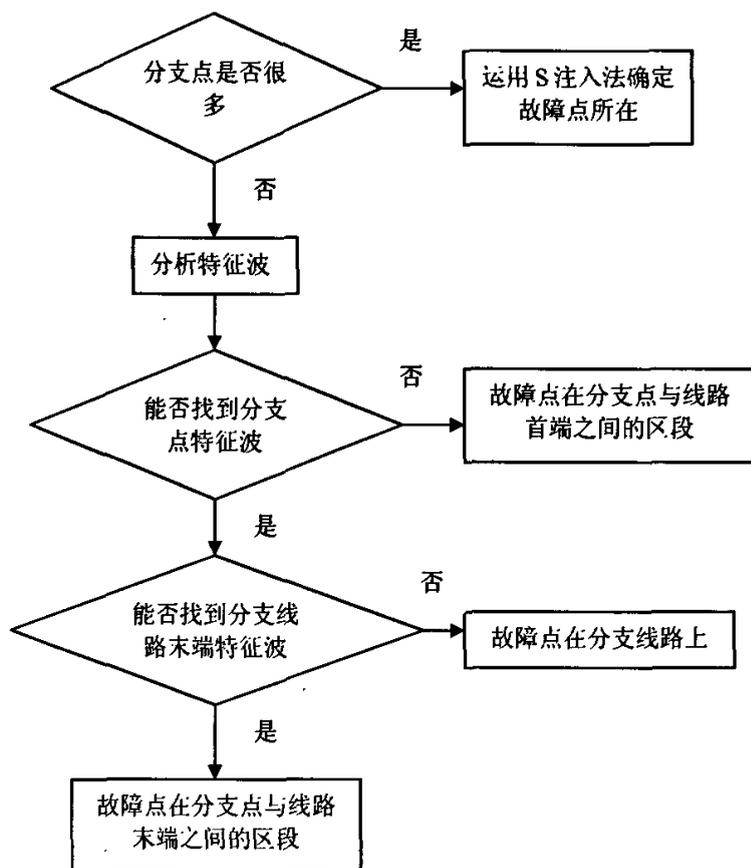


图 4.2 确定故障点所在区段流程图

算例详见 4.4 节现场试验数据分析。

## 4.2 利用小波变换对行波信号进行消噪处理

行波定位法对行波信号的采样率往往取得较高，高采样频率容易受到各种噪声影响，使定位的准确性降低。有效去除噪声干扰，是提取有用行波信号的第一步。小波变换近年来在电力系统中得到了广泛的应用<sup>[20]</sup>。因此，考虑运用小波分析处理行波信号，以消除噪声的影响<sup>[21,22]</sup>。

### 4.2.1 小波变换的基本概念

小波分析是 20 世纪数学研究成果中最杰出的代表之一。由于它在理论上的完美性和应用上的广泛性，受到了科学界和工程界的高度重视，并很快在众多学科领域中取得了重大进展。

小波分析属于时频分析的一种。传统的信号分析是建立在傅里叶变换的基础之上的。由于傅里叶分析使用的是一种全局的变换，要么完全在时域，要么完全在频

域, 因此无法表述信号的时频局域性质, 而这种性质恰恰是非平稳信号最根本和最关键的性质。为了分析和处理非平稳信号, 人们对傅里叶分析进行了推广乃至根本性的革命, 提出并发展了一系列新的信号分析理论: 短时傅里叶变换、Gabor 变换、时频分析、小波变换、Randon—Wigner 变换等。

小波变换是一种信号的时间—尺度(时间—频率)分析方法, 它具有多分辨率分析(Multiresolution Analysis)的特点, 而且在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力, 是一种窗口大小固定不变但其形状可改变, 时间窗和频率窗都可以改变的时频局部化分析方法<sup>[23]</sup>。即在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率, 在高频部分具有较高的时间分辨率和较低的频率分辨率, 很适合于探测正常信号中央带的瞬态反常现象并展示其成分, 所以被誉为分析信号的显微镜, 利用连续小波变换进行动态系统故障检测与诊断具有良好的效果<sup>[24]</sup>。

小波分析优于傅里叶变换的地方是, 它在时域和频域同时具有良好的局部化性质<sup>[25]</sup>。设  $\psi(t) \in L^2(R)$  ( $L^2(R)$  表示平方可积的实数空间, 即能量有限的信号空间), 其傅里叶变换为  $\hat{\psi}(\omega)$ , 当  $\hat{\psi}(\omega)$  满足允许条件(Admissible Condition):

$$C_{\psi} = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$$

时, 我们称  $\psi(t)$  为一个基本小波或母小波(Mother wavelet)。将母函数  $\psi(t)$  经伸缩和平移后, 就可以得到一个小波序列。

#### 4.2.2 小波基的选择

与标准傅里叶变换相比, 小波分析中所用到的小波函数具有不唯一性, 即小波函数  $\psi(x)$  具有多样性。小波分析在工程应用中, 一个十分重要的问题是最优小波基的选择问题, 这是因为用不同的小波基分析同一个问题会产生不同的结果。目前主要是通过用小波分析方法处理信号的结果与理论结果的误差来判定小波基的好坏, 并由此选定小波基。

小波基函数具有以下几个主要特征: 紧支性、消失矩、正则性和对称性等<sup>[26]</sup>。如果尺度函数和小波函数只在有限区间非零, 称小波函数具有紧支性。紧支性是小波函数的重要性质, 紧支小波不需要做人为的截断, 应用精度很高。如果小波函数有  $N$  阶消失矩, 则可突出信号的高阶起伏和  $N$  阶以上高阶导数中可能存在的奇异点。正则性表现为小波基的可微性。

小波的每一种特性在处理问题中都发挥着特有的作用。但是这些特性之间又是存在矛盾的。事实上构造一个既具有正交性, 又具有紧支集、平滑性甚至对称性的小波函数是难以做到的。Daubichies 首先证明了, 当由一个多分辨率分析所决定的尺度函数和小波函数都是实函数且都有紧支集时, 小波函数和尺度函数都不再具备对称性或反对称性。其次, 紧支集小波的光滑性也较差。如上所述, 光滑性与频域

局部性是一致的，而海森堡测不准原理说明，频域局部性变好，必然要增大时域支集的长度。对于正交小波，光滑性与衰减性也是一对矛盾的特性，一个无穷阶光滑并具有指数衰减的正交小波是不存在的。

分析行波定位数据时需要选择对称小波，减少不同尺度下的时移，从而保证暂态定位的准确性。而紧支小波不需要做人为的截断，应用精度很高。因此本文选用 Haar 小波（即 db1 小波）作为小波基进行行波信号的分析处理。Haar 函数是具有紧支性、对称性、正交性和消失矩为 1 的小波函数。Haar 函数的定义为：

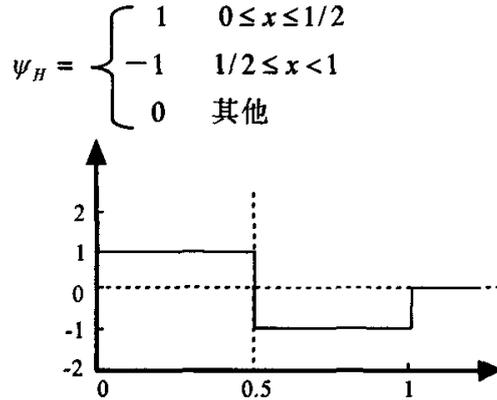


图 4.3 Harr 小波函数

### 4.2.3 对行波信号进行消噪处理

运用小波分析进行一维信号消噪处理是小波分析的重要应用之一，下面将其消噪的基本原理作一个简要的说明。一个含噪声的一维信号的模型可以表示成如下的形式：

$$s(i) = f(i) + \sigma * e(i) \quad (4-1)$$

其中， $f(i)$  为真实信号， $e(i)$  为噪声， $s(i)$  为含噪声的信号。在这里，以一个最简单的噪声模型加以说明，即认为  $e(i)$  为高斯白噪声  $N(0,1)$ ，噪声级（noise level）为 1。对信号  $s(i)$  消噪的目的就是要抑制信号中的噪声部分，从而在  $s(i)$  中恢复出真实信号  $f(i)$ 。

一般说来，一维信号的消噪过程可分为三个步骤进行：

1. 一维信号的小波分解。选择一个小波函数并确定小波分解的层次  $N$ ，然后对信号  $s(i)$  进行  $N$  层小波分解。
2. 小波分解高频系数的阈值量化。对第 1 到第  $N$  层的每一层高频系数，选择一个阈值进行阈值量化处理。
3. 一维小波的重构。根据小波分解的第  $N$  层的低频系数和经过量化处理后的第 1 层到第  $N$  层的高频系数，进行一维信号的小波重构。

其中，如何选取阈值和如何进行阈值的量化，直接关系到信号消噪的质量。给

定一个阈值  $\delta$ ，所有绝对值小于某个阈值  $\delta$  的小波系数被看成“噪声”，它们的值用零代替；而超过阈值的小波系数的数值用阈值  $\delta$  缩减后再重新取值。根据信号小波分界的这个特点，对信号的小波系数设置一个阈值，大于它的认为属于第二类系数，可以简单保留或进行后续操作；而小于阈值的则去掉。这样达到了降低噪声的目的，同时保留了大部分信号的小波系数，因此可以较好的保持信号细节。目前常用的有软阈值化算法和硬阈值化算法<sup>[27,28]</sup>。

$$\text{软阈值化算法用数学式表示为: } W_{\delta} = \begin{cases} \text{sgn}(W)(|W| - \delta), & \text{当 } |W| \geq \delta \\ 0, & \text{当 } |W| < \delta \end{cases} \quad (4-2)$$

其中  $W$  表示原始信号的小波系数， $W_{\delta}$  表示阈值化后的小波系数。

$$\text{硬阈值化算法用数学式表示为: } W_{\delta} = \begin{cases} W, & \text{当 } |W| \geq \delta \\ 0, & \text{当 } |W| < \delta \end{cases} \quad (4-3)$$

本文采用 Haar 小波进行 9 层分解，并采用软阈值化算法对行波信号进行消噪处理。图 4.4 是根据小波变换对某次试验采集到的行波数据进行消噪的效果。从图 4.4 中可以看出，消噪效果较好。

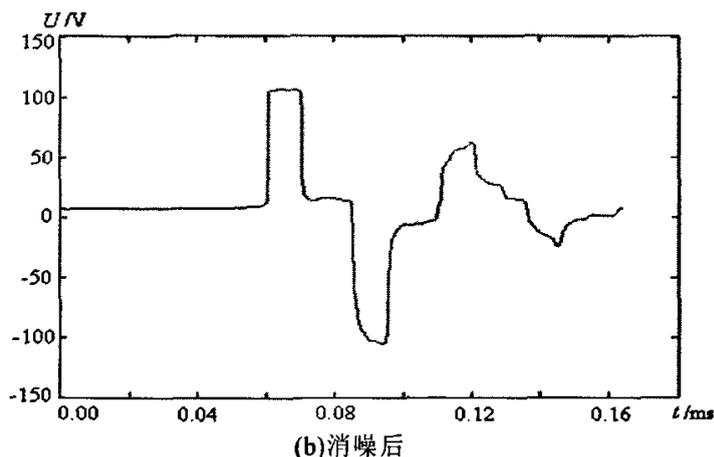
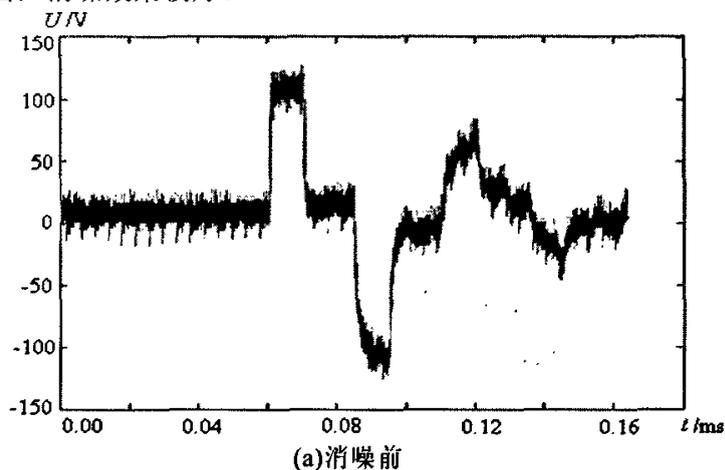


图 4.4 某次现场行波信号的消噪效果

### 4.3 行波故障定位信息辨识处理方法

综上所述，形成了完整的配电网行波故障定位信息辨识处理方法。进行 C 型行波定位时，分别在三相的线路首端注入脉冲信号，并采集线路首端的行波信号。按照下列步骤分析行波数据：

1. 对采集到的三相行波数据分别进行小波消噪处理。比较三个信号，与另两个信号不同的信号，即为故障相的信号，由此可区分出故障相和正常相。
2. 分析正常相波形得到当前行波波速。
3. 由于三相线路参数近似相同，可将采集到正常相的行波信号作为故障相在线路正常时的行波信号。比较正常相波形与故障相波形，找出故障特征波，计算故障距离。
4. 分析特征波确定故障所在区段。
5. 结合步骤 3 和步骤 4 的结果即可确定故障点位置。如果线路结构过于复杂，可在计算出故障距离的基础上，划定满足故障距离的几个点，通过 S 注入法来确定故障点的确切位置。

根据上述方法，对现场试验数据进行分析计算。本文列举其中的两次试验，对其数据分析过程进行详细介绍。

### 4.4 现场试验数据分析

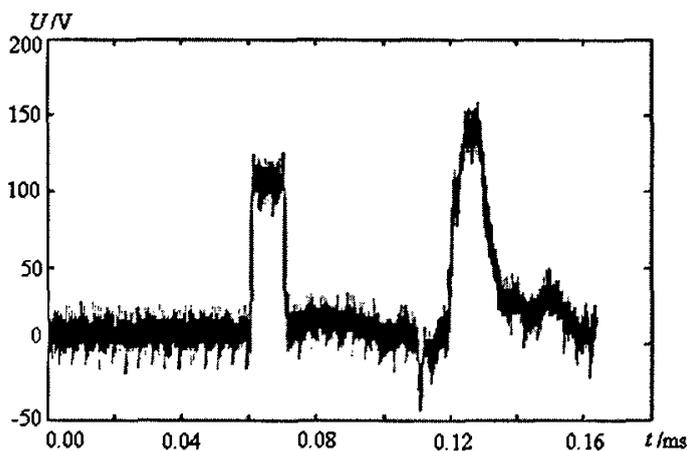
#### 4.4.1 现场试验 1 数据分析

2006 年 1 月 19 日，现场试验线路为 35kV 线路，总长 7.8km，在 7.5km 处有一个长为 100 米的分支。在线路首端 M 点采用脉冲信号发生器离线注入脉冲电压信号（注入脉冲幅值为 300V，脉冲宽度为 12 微秒）。在 M 点采集线路正常时的行波信号、A 点金属性单相接地故障的行波信号，数据采集率为 50M Hz。A 点与 M 点之间的距离为 3550 米。具体试验线路如图 4.5 所示。

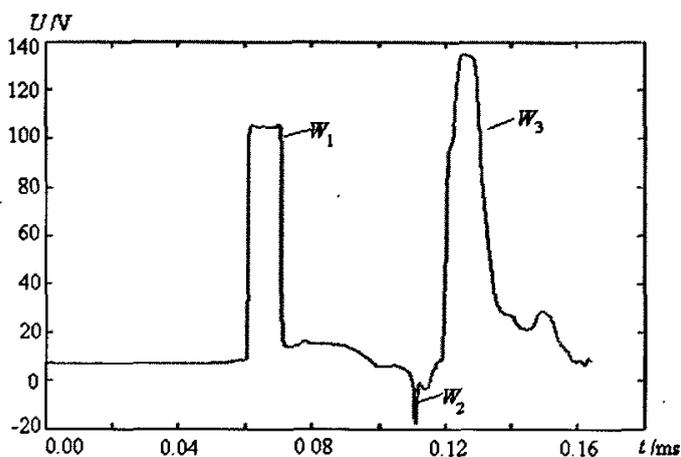


图 4.5 现场试验 1 线路示意图

采集得到的线路正常时的行波波形及其消噪后的波形，如图 4.6 所示。



(a) 消噪前



(b) 消噪后

图 4.6 现场试验 1 线路正常时的行波信号

如图 4.6(b)所示,  $W_1$  为所发的高压脉冲,  $W_2$  为分支点特征波,  $W_3$  为线路末端端点特征波。因此可以找出发脉冲时刻  $t_p$  为  $61 \mu\text{s}$ , 分支点特征波到达线路首端的时刻  $t_B$  为  $112 \mu\text{s}$ , 由于分支点与线路首端距离  $X_B$  为 7500 米, 根据  $X_B = v \cdot (t_B - t_p) / 2$ , 得到当前波速为  $294.1 \text{ m} / \mu\text{s}$ 。

利用小波消噪原理对线路 A 点故障的波形进行消噪, 如图 4.7 所示。

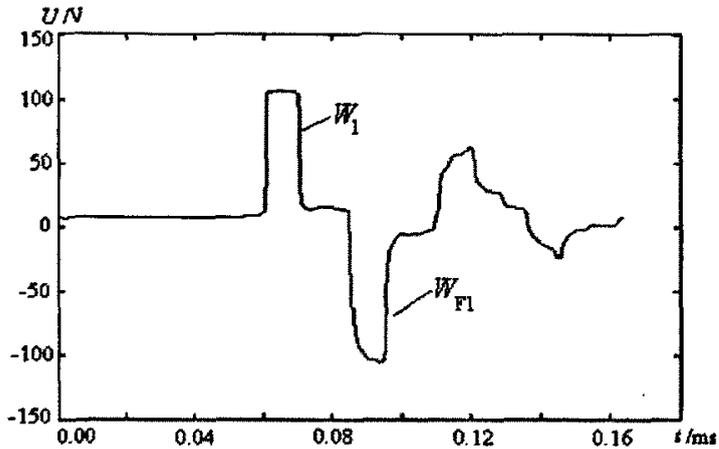


图 4.7 现场试验 1 线路 A 点故障（消噪后）

如图 4.7 所示， $W_1$  为所发的高压脉冲， $W_{F1}$  为 A 点故障特征波。比较正常时的行波波形与 A 点故障时的行波波形，可以找出故障特征波到达线路首端的时刻  $t_F$  为  $86 \mu s$ ，根据  $X_F = v \cdot (t_F - t_p) / 2$  得到故障距离为 3676 米。实际故障距离为 3550 米，定位绝对误差为 126 米，相对误差为 3.56%。

由于不能检测到分支点特征波，因此可以判断 A 点故障在分支点与线路首端之间的区段。结合故障距离与故障点所在区段，即可确定故障点位置。

#### 4.4.2 现场试验 2 数据分析

2006 年 8 月 23 日，现场试验线路为 35kV 线路。MA、MB 是同杆双回线，MA 段和 MB 段长度相同，均为 5920m，MC 段长 2369m，变电站至 M 点之间线路长 5271m。在变电站站内采用高压信号发生器发出脉冲信号（脉冲宽度为 12 微秒，幅值 10kV），为了避免采集设备被高压损坏，接入采集设备的信号经过了分压处理。分别在线路上设置 7 点进行金属性接地试验，在变电站内进行数据采集，采样率为 50M Hz。具体试验线路图如图 4.8 所示。

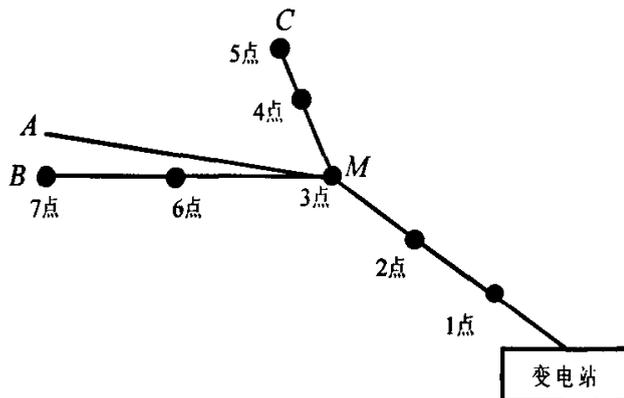
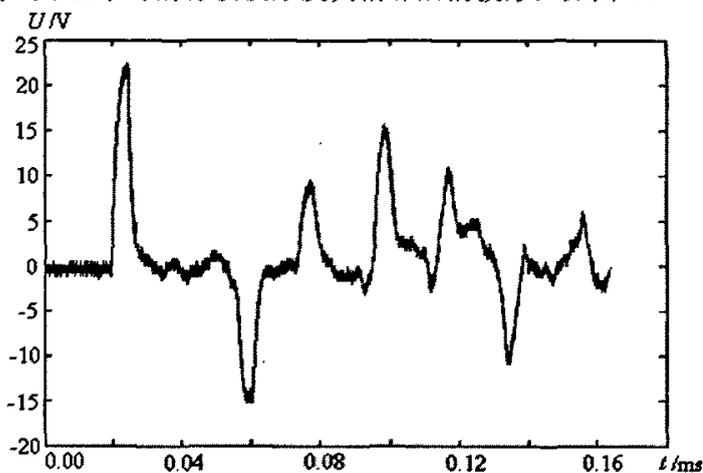
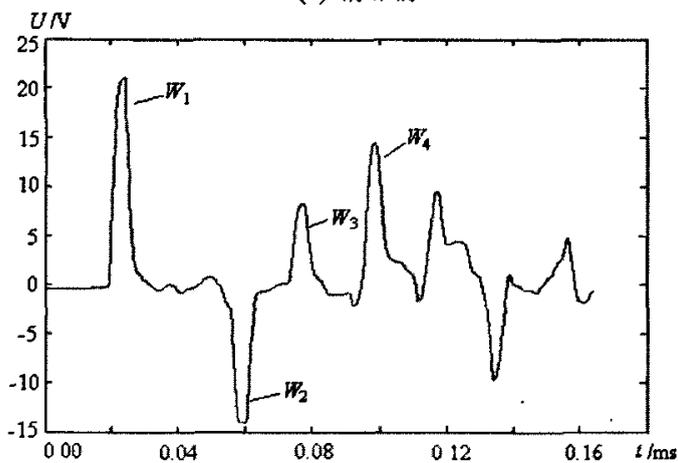


图 4.8 现场试验 2 线路图

采集得到的线路正常时的行波波形及其消噪后的波形，如图 4.9。



(a) 消噪前



(b) 消噪后

图 4.9 现场试验 2 线路正常时的行波信号

图 4.9(b)中， $W_1$ 为所发的脉冲信号， $W_2$ 为分支点  $M$  的特征波， $W_3$ 为分支线路  $MC$  的端点  $C$  点的特征波， $W_4$ 为分支线路  $MB$  的端点  $B$  点和  $MA$  的端点  $A$  的特征波， $W_3$ 比  $W_4$ 靠前是因为  $MC$  线路长度比  $MB$  线路长度短，反射波较早到达检测端， $W_4$ 的幅值高于  $W_3$ 是因为  $MA$  和  $MB$  是同杆双回线，其反射波同时到达检测端，叠加在一起，因此  $W_4$ 的幅值较高。因此可以找出发脉冲时刻  $t_p$  为  $21\mu\text{s}$ ，分支点特征波到达线路首端的时刻  $t_b$  为  $58\mu\text{s}$ ，由于分支点与线路首端距离  $X_B$  为  $5271$  米，根据  $X_B = v \cdot (t_b - t_p) / 2$ ，得到当前波速为  $284.9\text{m}/\mu\text{s}$ 。

利用小波消噪原理对线路各点故障的波形分别进行消噪，分析消噪后的行波信号，找出故障特征波，计算故障距离并确定故障区段。现列举其中的第 1 点、第 2 点、第 4 点故障进行说明。

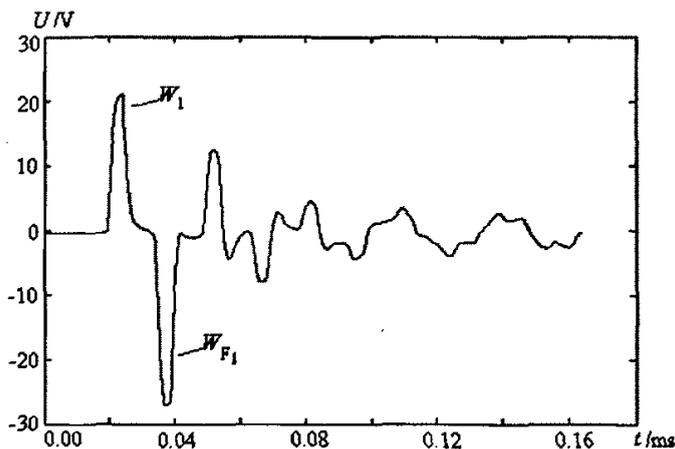


图 4.10 第 1 点故障

比较正常时的行波波形图 4.9 (b)与第 1 点故障时的行波波形图 4.10,  $W_{F1}$  是第 1 点的故障特征波, 可以找出故障特征波到达线路首端的时刻为  $36 \mu\text{s}$ , 根据  $X_F = v \cdot (t_f - t_p) / 2$  得到故障距离为 2136 米。实际故障距离为 2115 米, 定位绝对误差为 21 米, 相对误差为 1.03%。图 4.10 与图 4.9(b)的区别在于, 没有  $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$ , 而多了  $W_{F1}$ , 可见故障点 1 是在分支  $M$  点前的主干线路上。

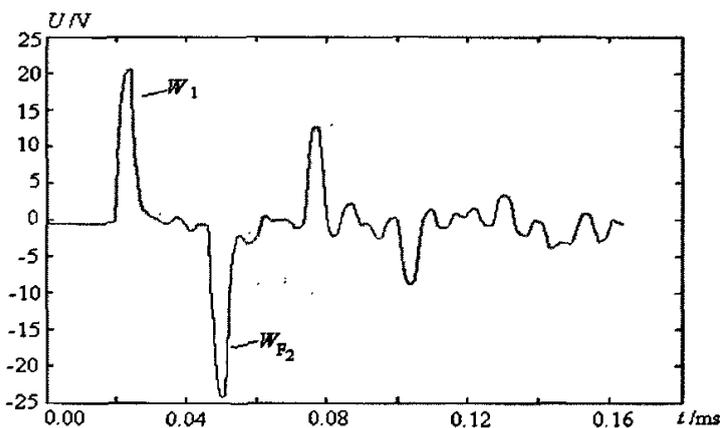


图 4.11 第 2 点故障

比较正常时的行波波形图 4.9 (b)与第 2 点故障时的行波波形图 4.11,  $W_{F2}$  是第 2 点的故障特征波, 可以找出故障特征波到达线路首端的时刻为  $48 \mu\text{s}$ , 根据  $X_F = v \cdot (t_f - t_p) / 2$  得到故障距离为 3846 米。实际故障距离为 3879 米, 定位绝对误差为 -33 米, 相对误差为 0.85%。图 4.11 与图 4.10 相似, 但  $W_{F2}$  位置比  $W_{F1}$  靠后, 可见故障点 2 仍是在分支  $M$  点前的主干线路上, 但故障点 2 与检测端的距离大于故障点 1 与检测端的距离。

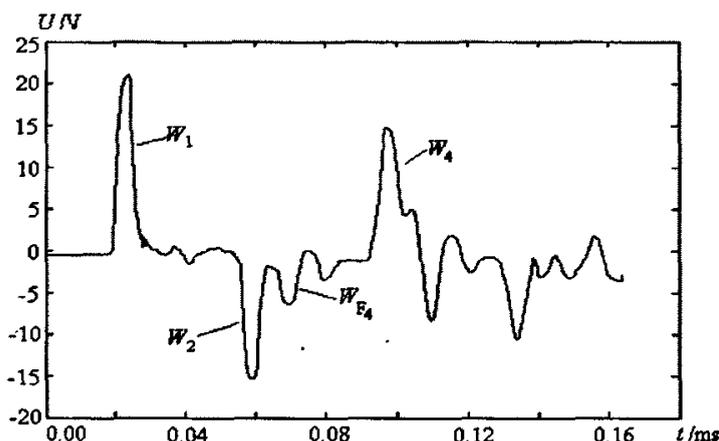


图 4.12 第 4 点故障

比较正常时的行波波形图 4.9(b)与第 4 点故障时的行波波形图 4.12,  $W_{F4}$  是第 4 点的故障特征波, 可以找出故障特征波到达线路首端的时刻为  $68 \mu s$ , 根据  $X_F = v \cdot (t_F - t_p) / 2$  得到故障距离为 6695 米。实际故障距离为 6870 米, 定位绝对误差为 -175 米, 相对误差为 2.55%。图 4.12 与图 4.9(b)的区别在于, 没有  $W_3$ , 而多了  $W_{F4}$ , 可见故障点 4 在分支 MC 上。

其余各点故障的分析与上述过程类似。现场试验 2 故障定位结果如表 4.1 所示。

表 4.1 现场试验 2 故障定位结果

试验序号	实际距离 /米	计算结果 /米	绝对误差 /米	相对误差 /%
1	2115	2136	21	1.03%
2	3879	3846	-33	0.85%
3	5291	5301	10	0.19%
4	6870	6695	-175	2.55%
5	7640	7618	-22	0.29%
6	8070	8188	118	1.46%
7	11191	11110	-81	0.72%

## 4.5 小结

本章对 C 型行波数据进行分析处理, 主要包括以下三个方面:

1. 由于配电网带有分支, 要确定故障点位置就需要确定故障距离和确定故障点所在区段。在确定行波在线路上的传播速度后, 再比较线路正常相的行波波形与故障相的行波波形, 就可以确定故障点与测量点之间的距离。通过识别行波的特征波, 可以确定故障点所在的区段。对于结构复杂的配电线路, 如果通过分析特征波较难判断故障区段, 可通过 S 注入法来确定故障点的确切位置, 在 C 型行波法计算出故障距离后, 划定满足故障距离的几个点, 在线路首端注入 S

信号，通过 S 信号检测器对这几个点附近线路的检测，找出真故障点。

2. 有效去除噪声干扰，是提取有用行波信号的第一步。小波变换是处理行波信号的有力工具，采用了软阈值化算法对行波信号进行消噪处理，该算法可以有效地消除噪声对行波信号的影响。
3. 形成了完整的配电网故障定位信息辨识处理方法，通过将该信息辨识处理方法应用到几次现场试验的数据分析中，验证了该方法的有效性。

## 第五章 配电网故障定位装置的设计与开发

第四章中提出了完整的配电网故障定位信息辨识处理方法，为故障定位装置的研制打下了基础。根据北京电力公司大兴供电公司的现场需求，本课题组自主开发了故障定位装置，该装置可以解决 35kV 配电网故障定位问题。本章从该装置的总体设计着手进行探讨，重点分析故障定位主控软件的设计与实现。

### 5.1 配电网故障定位装置的总体设计

#### 5.1.1 装置总体框架

本课题组研发的配电网故障定位装置的主要部分包括主控机、引出线机箱、脉冲信号源、S 信号源及 S 信号检测器，其中主控机、引出线机箱、脉冲信号源和 S 信号源连接在一起，装置的总体框架如图 5.1 所示。

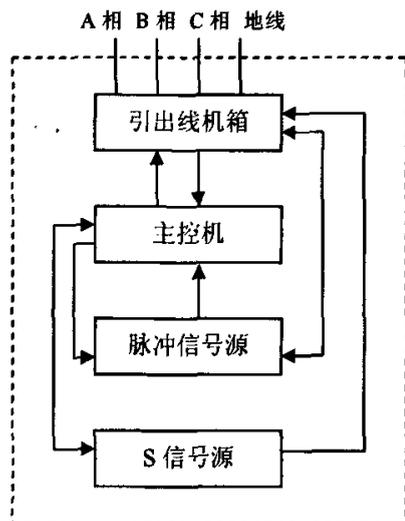


图 5.1 装置总体框架

该配电网故障定位装置是离线使用的。当配电网某条线路发生单相接地故障后，拉开该故障线路的开关，在变电站母线处投入该故障定位装置，通过 C 型行波法与 S 注入法相结合进行故障定位。

#### 5.1.2 各模块功能说明

1. 引出线机箱：提供了故障定位装置对外的接口。故障定位装置通过引出线机箱

与故障线路相连，向故障线路注入高压脉冲信号以及 S 电流信号。引出线机箱内安装五个大容量继电器。其中 A、B、C 三个继电器分别接故障线路的 A、B、C 三相，另有两个继电器分别接脉冲信号源和 S 信号源。主控机通过控制 A、B、C 三个继电器的通断可选择向故障线路的哪一相注入信号，通过控制另两个继电器的通断可选择脉冲信号源和 S 信号源哪个起作用。引出线机箱将开关量信号反馈给主控机，以便现场运行人员监测各个继电器的状态，所有的开关输入量以及开关输出量都通过引出线机箱后的端子排连接。

2. 主控机：采用研华工控机来实现，用 Delphi 语言开发了故障定位可视化主控软件，通过这个友好的主控界面，使现场运行人员能够方便有效地进行操作，提高工作效率。主控机协调控制高速采集卡、引出线机箱、脉冲信号源和 S 信号源的使用。按照先使用 C 型行波法粗定位再使用 S 信号法细定位的思路来设计主控软件总体流程。对于 C 型行波法，主控机首先控制高速采集卡采集线路首端的行波信号，其次对采集到的行波信号进行处理和分析，得到故障距离和故障点所在的区段。对于 S 信号源，主控机控制其向故障线路注入电流。
3. 脉冲信号源：C 型行波定位法的信号源，可向线路注入高压脉冲信号，高压脉冲幅值为 10kV，脉冲宽度可调。采用 IGBT 和单片机技术实现。
4. S 信号源：可向故障线路注入一个特殊频率的电流信号。采用 PWM 和单片机技术实现。
5. S 信号源检测器：在 S 信号源向故障线路注入特殊频率电流后，由现场运行人员手持 S 信号检测器沿着故障线路检测该电流信号。该检测器采用有源滤波技术和锁相技术实现。

### 5.1.3 各模块接口说明

1. 主控机与引出线机箱的接口：主控机通过数字量输出卡，控制引出线机箱的继电器的闭合和断开。引出线机箱的继电器状态通过数字量输入卡返回给主控机。
2. 主控机与脉冲信号源的接口：主控机通过 RS-232 串行通信发送信息控制脉冲信号源，脉冲信号源端口电压高达 10kV，为避免损坏高速采集卡，脉冲信号源端口电压经过分压处理后进入主控机的高速采集卡。
3. 主控机与 S 信号源的接口：主控机通过 RS-232 串行通信发送信息控制 S 信号源，S 信号源通过 AD 采样将其注入故障线路的电流值通过 RS-232 串行通信返回给主控机，并通过主控机界面显示给现场运行人员。

### 5.1.4 各模块间通信规约的拟定

采用 RS-232 串行通信作为主控机和脉冲信号源、以及主控机和 S 信号源的之

间的通信方式。

RS-232 的通信端口是每台计算机上的必要配置，目前的计算机大多使用的是 9 脚的 RS-232。其引脚编号及意义见表 5.1 所示。

表 5.1 RS-232 的引脚编号及意义

引脚	简写	意义
引脚 1	CD	载波检测 (Carrier Detect)
引脚 2	RXD	接收字符 (Receive)
引脚 3	TXD	传送字符 (Transmit)
引脚 4	DTR	数据端备妥 (Data Terminal Ready)
引脚 5	GND	地线 (Ground)
引脚 6	DSR	数据备妥 (Data Set Ready)
引脚 7	RTS	请求传送 (Request To Send)
引脚 8	CTS	清除以传送 (Clear To Send)
引脚 9	RI	响铃检测 (Ring Indicator)

根据故障定位装置的实际情况，拟定的通信规约格式为：

EB	90	EB	90	EB	90	源地址	目的地址	信息字 1	信息字 2	信息字 3	校验码
----	----	----	----	----	----	-----	------	-------	-------	-------	-----

通信规约具体说明：

1. 源地址：表示通信传送中的本机地址。主控机地址为 01，脉冲信号源地址为 02，S 信号源地址为 03。
2. 目的地址：表示通信传送中的对方机地址。
3. 信息字 1：表示脉冲信号源发出的脉冲宽度 (0, 1, 2, ……10 微秒)，主控机通过信息字 1 控制脉冲信号源发出指定的脉冲宽度值，其中 0 微秒表示关断脉冲信号源；
4. 信息字 2：表示 S 信号源注入线路的电流值 (0~100 毫安)，主控机通过信息字 2 控制 S 信号源注入指定的电流值，S 信号源返回信息字 2 表示其当前注入线路的电流值 (由 AD 采样得到)，其中 0 毫安指的是关断 S 信号源。
5. 信息字 3 备用。
6. 校验码：采用“和”校验，将源地址、目的地址、信息字 1、信息字 2 和信息字 3 求和，作为校验码。

## 5.2 故障定位装置主控软件的设计和实现

主控软件是故障定位装置的核心。采用研华工控机来实现，用 Delphi 语言开发。主控软件协调控制高速采集卡、引出线机箱、脉冲信号源和 S 信号源的使用，并完

成了行波信号的高速采集、行波信号的分析处理以及定位结果的显示。该主控软件主要针对 35kV 配电线路故障定位问题进行程序的设计。

### 5.2.1 Delphi 软件开发平台概述

Delphi 集中了第三代语言的优点，以 Object Pascal 为基础，扩充了面向对象的能力，并且结合了可视化的开发手段。Delphi 使用了本地编译器直接生成技术，使程序的执行性能远远高于其它产品生产的程序，而且是真正面向对象的编程语言。Pascal 语言的严谨加上可视化的优势和强大的数据库功能使其得到了广泛的使用。

Delphi 在编好程序后自动转换成 EXE 文件，它运行时速度比 VB 快，而且编译后不需要其他的支持库就能运行。它的数据库功能也很强大，是开发中型数据库软件理想的编程工具。Delphi 适用于应用软件、系统软件等类型的开发。Delphi 是全新的可视化编程环境，为我们提供了一种方便、快捷的 Windows 应用程序开发工具。

### 5.2.2 主控软件总体流程

按照先使用 C 型行波法粗定位再使用 S 信号法细定位的思路来设计主控软件总体流程。对于 C 型行波法，主控机首先控制高速采集卡采集线路首端的行波信号，其次对采集到的行波信号进行分析，得到故障距离和故障点可能所在的区段。对于 S 信号源，主控机控制其向故障线路注入电流，总体流程如图 5.2 所示。

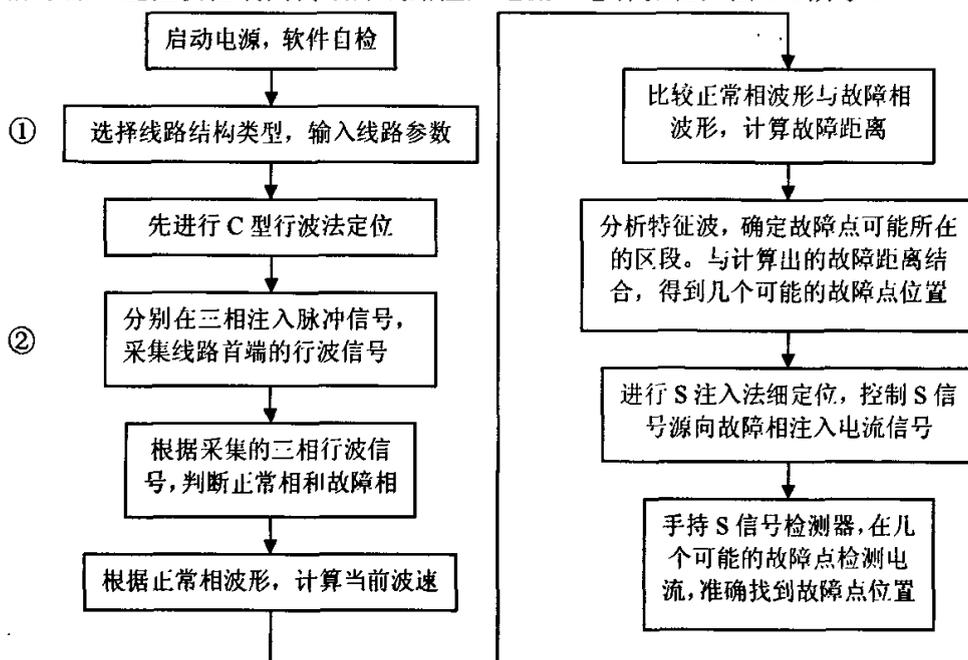


图 5.2 主控软件总体流程图

对流程中的重要步骤说明如下：

①35kV 线路主要有 3 种线路结构，无分支线、T 接线和十字接线。计算当前行波波速时，需要线路参数。对于有分支点的线路需要知道线路的第一个分支点与线路首端之间的距离。对于没有分支点的线路，需要知道线路的全长。现场工作人员在主控软件的界面上可以根据具体线路的结构类型，输入相应的线路参数。

②确认开始进行 C 型行波定位后，主控软件按照图 5.3 所示流程进行信号的采集。以 A 相为例，B、C 相类似。

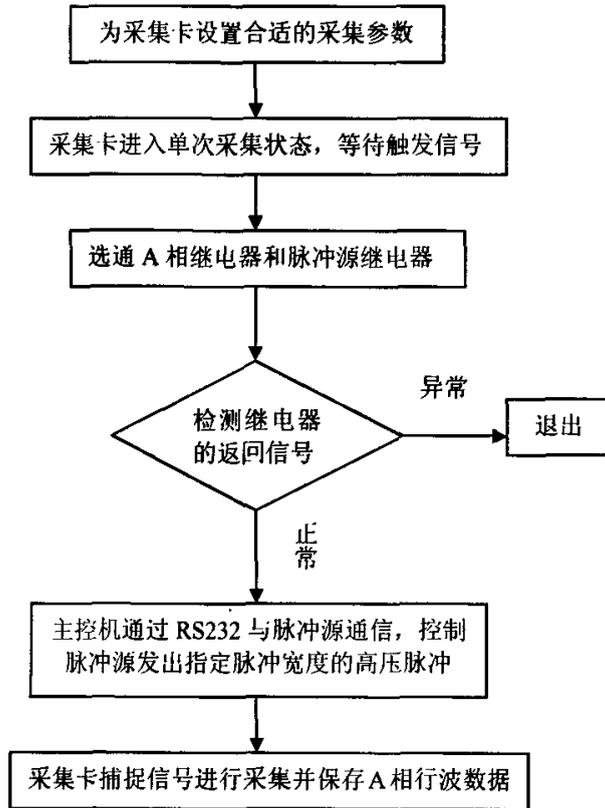


图 5.3 采集行波信号流程图

其中，对行波信号的高速采集采用了四川中科动态仪器有限公司的 PCI4712 采集卡。下面对该采集卡的主要性能特点进行说明，并分析了 C 型行波定位中采用的信号采集方式。

### 5.2.3 行波信号的高速采集

行波信号是高频暂态信号，高达几百兆赫兹，要对信号实现不失真采集，必须采用高速采集卡。四川中科动态仪器有限公司的 PCI4712 采集卡具有高速采集功能。采集卡采用同步并行设计，卡上集成了 4 片高速 40MSPS，12-bit A/D 转换器，和 4 个独立的高速精密运算放大器和精密衰减滤波网络组成程控增益通道，实现  $\pm 1V$ 、 $\pm 10V$  动态信号采集；每个通道的增益误差和零点漂移都可以独立地由 DAQ 控制器

微调消除，因此该产品具有很高的测量精度和相位一致性，板上没有手工调节的器件，具有较高的工作可靠性和稳定性。

PCI4712 高速采集卡的采集原理如图 5.4 所示：

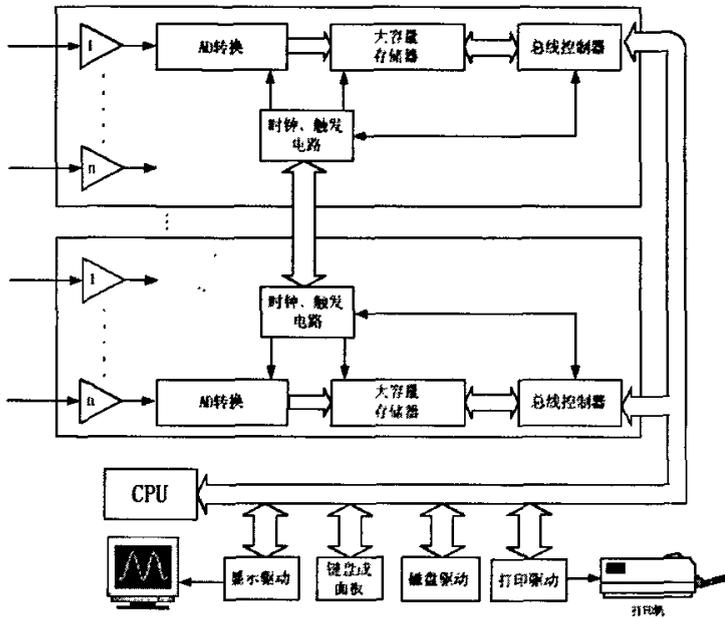


图 5.4 采集卡采集原理图

PCI4712 采集卡提供对模拟信号的高速数字化转换。为避免多通道时，因总线宽度不够而造成数据丢失，特地在采集卡设计固定容量的数据缓存池，便于采集的数据高速存入数据采集卡。PCI4712 有 4 个采集通道，每个通道最大存储空间是 4M。数据在存储空间中是循环存放的，即存储空间中数据存满了，后采集的数据将覆盖最前面的数据，如图 5.5 所示。

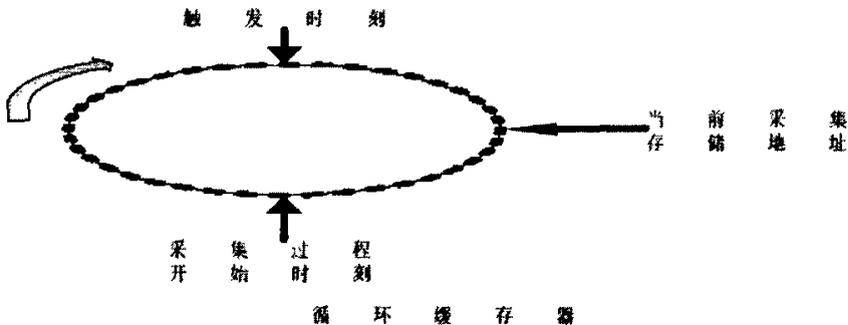


图 5.5 循环缓存器说明图

PCI4712 的触发方式包括手动触发、外触发、自动触发。手动触发是指在停止采集状态下点击软件按钮或启动采集卡上的采集开关后使采集卡处于等待采集状态，手动触发一次只能采集一段波形，下次触发需要再进行手动操作；自动触发包

括上升沿内触发和下降沿内触发，启动采集后由被捕捉信号本身使仪器触发，当采集完一段波形后自动进入下一段等待采集状态；外触发是采集卡外接专门的数字控制信号作为触发信号。

行波信号采用什么样的采集方式，直接关系到软件算法的实现方式，要取得最优的定位效果，必须探讨寻求最优的数据采集方式，以达到最好的软硬件配合。

经过多次现场试验，确定了 C 型行波法定位的信号采集方式如下：将 PCI4712 高速采集卡设置为自动触发中的上升沿触发模式。在向线路注入信号前，行波采集装置按设定的采样频率自动地对线路行波信号进行高速采样和 A/D 转换，并将 A/D 转换结果自动高速写入采集装置自带的大容量循环缓存器中。当在线路始端注入脉冲信号时，系统所测量的暂态信号幅值超过设定的门槛值时，高速数据采集单元中模拟比较回路的输出触发信号将立即记录高精度时钟的当前时间信息，并激活采集控制定时电路（定时时间根据线路的具体长度和存储器的大小设定），经过事先设定的定时时间后高速数据采集电路自动停止工作，并同时向工控机 CPU 发出外部中断请求信号。CPU 响应外部中断后，在中断服务程序中读取循环缓存器中指定长度的数据，并保存起来。按照上述过程依次采集三相的行波信号。

#### 5.2.4 主控软件显示界面

主控软件采用了 Delphi 可视集成开发环境，由面向对象程序设计，开发了配电网故障定位主控软件。如图 5.6 所示，为该主控程序的主界面，用户可以通过“C 型行波法”和“S 注入法”按钮分别进入各自相应的控制界面。



图 5.6 主界面

35kV 线路主要有 3 种线路结构，无分支线、T 接线和十字接线。如图 5.7 所示，

用户通过三个单选框选择线路类型，并通过该线路类型上的文本框输入线路长度，以上参数对于计算当前波速是必需的。用户通过“确认”按钮即可进行 C 型行波法定位。当主控软件控制采集卡采集到线路三相的行波信号后，先对信号进行处理和分析，然后在界面上显示故障点与线路首端的距离以及故障点所在区段。

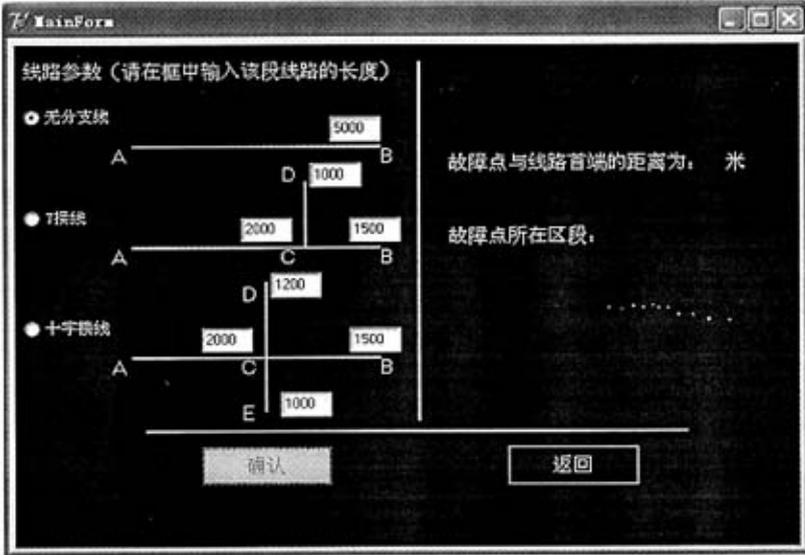


图 5.7 C 型行波法界面

如图 5.8 所示，用户通过“确认注入电流”即可向故障相注入特殊频率电流以进行 S 注入法细定位，界面上将显示当前注入故障相的电流值，以便于现场运行人员监测。同时，由运行人员手持 S 信号检测器沿着故障线路搜寻故障点。当 S 信号检测器搜寻到故障点后，就可以通过“取消注入电流”关断 S 信号源。

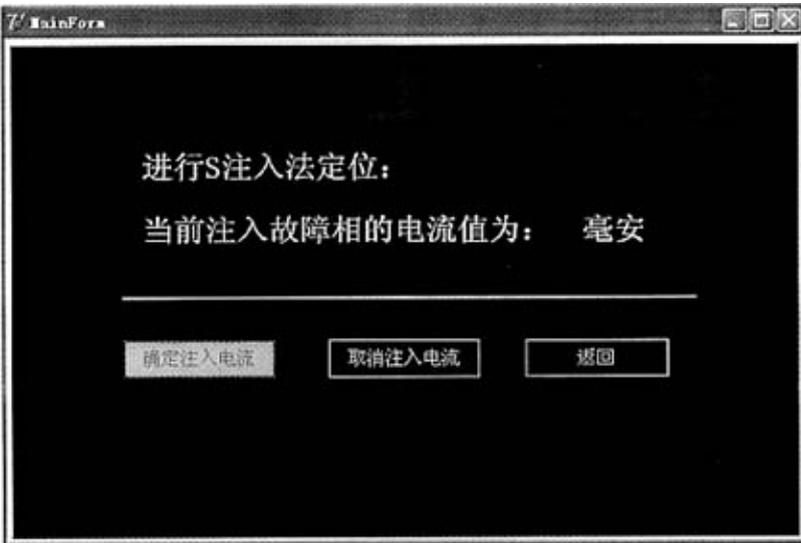


图 5.8 S 注入法界面

### 5.3 小结

本章主要介绍配电网故障定位装置的设计与开发。详细说明了故障定位装置的总体框架的设计,各模块的功能、接口及通信规约的拟定。介绍了该装置对行波信号进行高速采集的过程,采用了四川中科动态仪器有限公司的 PCI4712 数据采集卡,其最高采样率达到 40MHz,能满足行波定位的要求。设计并开发了配电网故障定位装置主控软件,该主控软件采用了 Delphi 可视集成开发环境,由面向对象程序设计,在 Windows 系统下进行开发,实现了故障定位主控软件的可视化,使现场运行人员能够方便有效地找出故障点,提高工作效率。

## 第六章 结论

本文在研究和比较了现有故障定位方法的基础上,根据配电网的自身特点,结合现场试验,选择了C型行波法作为主要研究对象,取得了如下主要研究成果与结论:

1、C型行波法的主要优点是不需要巡线,定位速度快,可以进行多次定位。提出了“特征波”的概念来分析注入脉冲信号在带分支线路上的传播过程。经过试验发现,C型行波法适用于接地过渡电阻不大于 $3\text{ k}\Omega$ 的配电网故障定位问题。为了提高定位精度,提出将C型行波法和S注入法结合起来,优势互补,实现快速准确的综合定位。该方案的可行性在现场试验中得到了验证。

2、根据传输线的波动方程,利用偏微分方程的数值解法,分别建立了无损线模型和有损线模型的离散格式,并分析了离散格式的稳定性,确定了不同情况下的边界条件,进行了数值试验,效果较好。

3、对C型行波数据进行分析处理,得到故障点的信息。由于配电网带有分支,故障点的信息就包含了故障点与测量点之间的距离、故障点所在线路的区段。确定行波在线路上的传播速度后,再比较线路正常相的行波波形与故障相的行波波形,就可以确定故障点与测量点之间的距离。通过识别行波的特征波,可以确定故障点所在的区段。对于结构复杂的配电线路,如果通过分析特征波较难判断故障区段,可通过S注入法来确定故障点的确切位置,在C型行波法计算出故障距离后,划定满足故障距离的几个点,在线路首端注入S信号,通过S信号检测器对这几个点附近线路的检测,找出真故障点。

4、对行波信号的采样率往往取得较高,高采样频率容易受到各种噪声影响,使定位的准确性降低。小波变换是处理行波信号的有力工具,采用了软阈值化算法对行波信号进行消噪处理,该算法可以有效地消除噪声对行波信号的影响。

5、形成了完整的配电网故障定位信息辨识处理方法,通过将该信息辨识处理方法应用到几次现场试验的数据分析中,验证了该方法的有效性。

6、利用了PCI4712高速采集卡对行波信号进行了采集。完成了配电网故障定位装置主控软件的设计与开发,该主控软件采用了Delphi可视集成开发环境,由面向对象程序设计,在Windows系统下进行开发。实现了故障定位软件的可视化,使现场运行人员能够方便有效地找出故障点,提高工作效率。

根据本课题的特点,有待进一步研究的工作:

1、进一步完善行波定位数学模型。需要在单根线的基础上增加线路分支使之更接近实际配电网。可考虑在本文建立的无损线模型和有损线模型的离散格式的基

基础上，改变边界条件来实现。

2、进一步提高 C 型行波法的适用范围。以现阶段的研究来看，C 型行波法对线路接地过渡电阻不大于  $3\text{ k}\Omega$  的情况适用。对于接地过渡电阻较大的情况，需进一步研究。

3、目前已经可以解决 35kV 配电网故障定位问题，但由于 10kV 配电网的分支更多、结构更复杂，10kV 配电网故障定位问题还需进一步深入研究。

## 参考文献

- [1]季涛, 孙同景, 薛永端. 配电网故障定位技术现状与展望. 继电器, 2005, 33(24): 32~37
- [2]郭俊宏, 杨以涵, 谭伟璞, 等. 电力系统故障定位原理综述. 继电器, 2006, 34(3): 76~81
- [3]季涛, 薛永端. 配电线路行波故障测距初探. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 66~71
- [4]严凤, 杨奇逊, 齐郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 37~43
- [5]郭俊宏, 杨以涵, 谭伟璞, 等. 中压配电网的故障测距实用化方法. 电网技术, 2006, 30(8): 76~80
- [6]桑在中, 潘贞存, 丁磊等. “S注入法”选线定位原理及应用. 中国电力, 1997, 30(6): 44~45, 62
- [7]张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64~66
- [8]齐郑. 小电流接地系统单相接地故障选线及定位技术的研究: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2005
- [9]徐容明. 一种基于故障指示器的配电线路故障自动定位系统. 电力设备, 2005, 6(10): 66~67
- [10]M El-Hami, L L Lai, D J Daruwala, A T Johns . A new travelling-wave based scheme for fault detection on overhead power distribution feeders. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 4, October 1992.
- [11]Nouri H, Chun Wang, Davies T. Anaccurate fault location technique for distribution lines with tapped loads using wavelet transform .Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, Volume 3,10~13 Sept.2001 Page(s): 4 pp.vol.3
- [12]Magnago F H, Abur A. A New Fault Location Technique for Radial Distribution Systems Based on High Frequency Signals. Power Engineering Society Summer Meeting, 1999 Page(s): 426~431 vol.1
- [13]H. Hizam, P. A. Crossley, P. F. Gale, et al. Fault section identification and location on a distribution feeder using travelling waves. Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE. Volume 3,2002 Page(s): 1107~1112 vol.3
- [14]David W. P. Thomas, Ricardo J. O. Carvalho, Elisete T. Pereira. Fault location

in distribution systems based on traveling waves. Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, Volume 2, 23~26 June 2003 Page(s): 5 pp. Vol.2

[15] D W P Thomas, C Christopoulos, et al. Single and double ended travelling-wave fault location on a MV system. Development in Power System Protection, 2004. Eighth IEE International Conference, Volume 1, 5-8 April 2004 Page(s): 200~203 vol.1.

[16] 严凤. 中性点非有效接地系统单相接地行波定位方法的研究: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2003

[17] 杜召满. 输电线路故障测距研究与应用: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2004

[18] 张希. 有损均匀传输线数值解的研究: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2003

[19] 陆金甫, 关治. 偏微分方程数值解法. 北京: 清华大学出版社, 2004, 45~55

[20] 胡国胜, 涂用军, 任震. 电力系统故障信号小波消噪应注意的问题. 继电器, 2003, 31(2): 5~8

[21] 姜晟, 舒乃秋, 胡芳, 等. 基于小波变换的含噪声行波信号奇异点检测. 电网技术, 2004, 28(10): 59~62

[22] 王学峰, 周俊宇. 用小波变换技术定位输电线路故障. 高电压技术, 2006, 32(1): 84~87

[23] 屠雪勇. 基于小波理论的小电流接地系统单相接地故障研究: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2006

[24] 车伟. 基于小波分析的小电流接地系统单相接地故障定位研究: [硕士学位论文]. 西安: 河海大学, 2003

[25] 刘峰. 小波变换在输电线路故障检测与测距中的应用研究: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2005

[26] 黄子俊, 陈允平. 行波故障定位中小波基的选择. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 61~64

[27] 张全明, 刘会金, 周新启. 电能质量信号的小波软阈值消噪方法. 高电压技术. 2006, 32(1): 99~101

[28] 欧阳森, 宋政湘, 陈德柱. 小波软阈值消噪技术在电能质量检测中的应用. 电力系统自动化. 2002, 26(19): 56~60

## 致 谢

本论文的工作是在导师杨以涵教授精心指导下完成的。衷心感谢导师两年来始终如一的教导和关心。杨老师高尚的人格、宽广的胸怀、渊博的知识、对科学前沿的敏锐洞察力、严谨的治学作风，以及对真理的不懈追求与无私奉献精神，深深的激励着我，让我在学业和做人上都终生受益。借此论文完成之际，谨向导师杨以涵教授致以诚挚的敬意和深深的感谢！

在论文和课题的研究过程中，得到了谭伟璞老师、戚宇林老师、石玉英老师的关怀与指导，在此向他们表示深深的谢意！

感谢我的家人对我的教诲与鼓励。对所有曾给予作者关心、帮助、支持、鼓励的老师、同学、亲人、朋友表示由衷的谢意！

在即将完成学业之际，衷心感谢母校华北电力大学对我的培养！

## 附 录

附表 2006 年~2007 年故障定位现场试验记录

序号	日期	地点	线路类型	信号源类型	试验目的	试验结果
1	2006.01.19	河北保定博野程委变电站	35kV 线路	C 型行波信号源, 脉宽可调	验证 C 型行波法在配电网故障定位中的可行性。	试验成功, 说明信号源的脉宽对于 C 型行波定位很重要。
2	2006.05.31	北京大兴南榆各庄变电站	10kV 线路	C 型行波信号源	验证 C 型行波法在配电网故障定位中的可行性。	试验成功。
3	2006.06.25	河北定兴固城变电站	10kV 线路	C 型行波信号源 (脉冲幅值 10kV)	检验高压脉冲源的性能。	试验成功。
4	2006.07.08	河北定兴固城变电站	10kV 线路	C 型行波信号源 (脉冲幅值 10kV)	检验高压脉冲源的性能。	进行最远端故障点定位时, 接受到的行波波形的波形无法看出差异。
5	2006.08.15	河北定兴固城变电站	10kV 线路	C 型行波信号源 (脉冲幅值 10kV)	改进了信号源, 检验其性能。	试验成功。
6	2006.08.23	北京大兴黄村会战变电站	35kV 线路	C 型行波信号源 (脉冲幅值 10kV)	设置了多点故障, 测试 C 型行波法的定位精度。	C 型行波法的定位误差在 $\pm 300$ 米之内。
7	2006.10.11	北京大兴黄村会战变电站	35kV 线路	C 型行波信号源, S 信号源	验证综合定位法的可行性。	试验成功。
8	2006.12.16	北京大兴黄村会战变电站	35kV 线路	C 型行波信号源, S 信号源	检验故障定位样机的性能。	试验成功。
9	2006.12.19	北京大兴黄村会战变电站	35kV 线路	C 型行波信号源	研究 C 型行波法的适用范围。	C 型行波法对接地电阻不大于 $3k\Omega$ 的故障是有效的。
10	2007.01.06	河北定兴固城变电站	10kV 线路	C 型行波信号源, S 信号源	检验故障定位样机的性能。	试验成功。

## 在学期间发表的学术论文和参加科研情况

### 发表的论文:

1. 蔡秀雯, 谭伟璞, 杨以涵. 基于数学形态学的配电网单端行波故障测距. 现代电力, 2006, 23(6): 25~29.
2. 蔡秀雯, 杨以涵, 等. 基于脉冲发射原理的配电网故障定位方法的研究. 继电器, 2007, 35(2): 1~5.
3. 蔡秀雯, 谭伟璞, 杨以涵. 基于数学形态学的配电网故障行波测距. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十二届学术年会, 南京, 2006, 10.
4. 蔡秀雯, 杨以涵. 小波变换和数学形态学在配电网行波定位中的应用. 华北电力大学第四届研究生学术交流会一等奖, 2006, 11.

### 参加科研情况:

2006.1—2006.12, 参加并完成了与北京电力公司大兴供电公司的合作项目: “35kV 配电网单相接地故障定位的研究与实现”。该项目获 2006 年度华北电网有限公司科技进步二等奖。