

分类号 TM757

密 级 _____

U D C 621.3

编 号 10486

武 汉 大 学
工 程 硕 士 学 位 论 文

中低压 XLPE 电缆外护套故障测距

研 究 生 姓 名: 罗亮荣

学 号: 2013282070139

指导教师姓名、职称: 刘剑 副教授

校外导师姓名、职称: 王汉广 高工

专 业 名 称: 电气工程

研 究 方 向: 电力系统运行与控制

二〇一五年十一月

A Dissertation Submitted to
Wuhan University
in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Master's Degree of Engineering

Detection of low voltage XLPE cable outer sheath fault

By
Luo LiangRong

Supervisor: Vice Prof. Liu Jian

November, 2015

论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者（签名）：

年 月 日

摘要

中低压 XLPE 电缆广泛应用于城市配电网中，电缆外护套破损引起的电缆故障频发。本文通过电缆外护套的材质、厚度和性能，研究了电缆外护套与电缆质量的关系；总结电缆外护套故障类型，分析故障原因，提出相应的预防和解决措施。

本文主要研究电缆外护套的故障测距，简要介绍离线测距中的预定位和精确定位的原理和方法；着重研究了基于小波变换的行波测距方法。根据小波变换原理，结合电缆外护套故障特点，比较选择出合适的小波基函数一双正交 B 样条四阶小波（bior4.12），并使用数据分析软件 MATLAB 编程实现；根据暂态行波的传播特性和测距原理，选取合适的行波测距算法。

本文根据 10kV 三芯 XLPE 电缆参数，搭建三芯电缆模型，采用脉冲法测量电缆护层行波波速，基于最小二乘法及最小误差原则，对护层行波波速进行拟合。结合实际电缆使用情况，电缆护层接地方式，使用电力系统暂态仿真软件 PSCAD 建立三芯 XLPE 电缆外护套故障模型，使用构造的 B 样小波及合适的分析阶次对故障信号进行小波分析；采用单端、双端行波测距方法，并比较了两者的测距精度和使用范围，分析了影响行波测距的因素。

此外，对不同电缆外护套故障类型进行仿真，比较了在不同测距范围、不同过度电阻下的各故障类型的测距精度，验证了电缆外护套故障的行波测距法的可行性。

关键词：XLPE 电缆；外护套故障；B 样条小波；行波测距

Abstract

XLPE cable is widely used in urban power distribution network, cable fault caused by cable sheath damage occurred frequently. In this article, the relationship between the cable sheath and the quality of the cable is studied by means of the material, thickness and performance of the cable sheath. Summarize the types of cable sheath fault, analyze the causes and propose the corresponding prevention and solution.

This article mainly studies the location of cable sheath fault, and briefly introduces the principle and method of the reservation and precise location of the cable sheath fault. This article focus on the research of the traveling wave fault location based on wavelet transform. According to the principle of wavelet transform and the fault characteristics of cable sheath fault, the four order wavelet (B) of the two orthogonal bior4.12 spline is used as the wavelet basis function, and achieve it by using the data analysis software MATLAB. According to the transmission characteristics of transient traveling wave and the principle of ranging, a suitable traveling wave ranging algorithm is selected.

According to the 10kV three core XLPE cable parameters, a three core cable model is constructed, and a pulse method is used to measure the traveling wave velocity. Based on the least square method and the minimum error principle, the wave velocity of the protecting layer is fitted. Combined with the use of the actual cable and cable shield grounding mode, the power system transient simulation software PSCAD is choosed to establish three core XLPE cable sheath failure model. Wavelet analysis of fault signal is carried out by using the bior4.12 spline and proper decomposition scale. Using single ended and double ended traveling wave fault location method, the accuracy and range of the two methods are compared, and the factors affecting the traveling wave distance measurement are analyzed.

In addition, different types of the cable sheath fault are simulated, and the ranging accuracy of different fault types in different range and over resistance is compared. It is proved that the location of the cable sheath fault can be measuremented by using the traveling wave fault location method.

Keywords: XLPE cable; outer sheath fault; B spline wavelet; traveling wave fault location

目录

摘要	I
Abstract.....	II
1 引言	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 电缆外护套故障测距方法.....	3
1.3 主要研究内容	10
2 中低压 XLPE 电缆外护套故障分类.....	11
2.1 电缆外护套结构.....	11
2.1.1 中低压电力电缆结构	11
2.1.2 电缆外护套结构及材料	12
2.1.3 电缆外护套与电缆质量关系.....	13
2.2 电缆外护套损坏原因分析及处理措施	14
2.2.1 电缆施工对外护套损伤及其处理措施	15
2.2.2 中间接头和接地箱进水及其处理措施	15
2.2.3 白蚁对外护套的侵蚀及其处理措施	16
2.2.4 潮湿环境对外护套的损害及其处理措施.....	17
2.2.5 外护套开裂的原因分析及其处理措施	17
2.3 电缆外护套故障分类及故障树.....	21
2.3.1 电缆外护套损坏导致的故障类型	21
2.3.2 电缆外护套故障树	23
2.4 电缆外护套故障总结	25
3 小波分析理论	27
3.1 小波分析理论	27
3.2 小波变换的离散化.....	28
3.3 多分辨率分析及 Mallat 算法	29
3.4 信号奇异性检测及模极大值	32
3.5 B 样条小波及其构造	33
3.5.1 小波基的选取	33
3.5.2 小波分析阶次的选择	35
3.5.3 B 样条小波的构造	36

4 行波测距理论	43
4.1 行波基本理论	43
4.1.1 行波的基本概念	43
4.1.2 行波的传播特性	44
4.2 单端行波测距原理	47
4.2.1 单端行波测距原理	47
4.2.2 反射波头到达时刻判断	48
4.3 双端行波测距原理	49
4.3.1 双端行波测距原理	49
4.4 基于小波变换的行波测距算法步骤	49
4.5 影响行波测距的因素	50
5 中低压 XLPE 电缆外护套故障测距	52
5.1 选择仿真工具和数值分析工具	52
5.2 10kV 三芯 XLPE 电缆建模	53
5.3 电缆护层行波波速测量	55
5.3.1 护层行波波速测量	55
5.3.2 护层行波波速仿真	56
5.4 电缆外护套故障测距	59
5.4.1 测距方法选择	60
5.4.2 单相护层故障	60
5.4.3 相间护层故障	69
5.4.4 不同敷设深度电缆连接处故障	74
6 结论	79
6.1 全文总结	79
6.2 未来展望	79
参考文献	81
附 录	84
1 小波分析理论	84
2 中低压 XLPE 电缆外护套故障测距	95
攻读硕士学位期间发表的科研成果	99
致 谢	100

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 研究背景

城市配电网中，电力电缆线路铺设在地下，节省了地上空间，很大程度上避免了恶劣天气和地面上不确定因素所带来的影响。由于以上优势，电力电缆在城市电网的改造中使用越来越广泛。虽然具有上述优势，但电力电缆也会受到多种因素的影响而发生各种故障；这些因素包括设计和制造不良，材料质量，外力破坏，绝缘受潮，绝缘老化变质，过电压，护套的腐蚀和电缆的绝缘物流失等。

在电力电缆结构中外护套处于最外层。电缆外护套某一点处的破损会导致电缆金属层单点接地，破损严重可引起多点接地，通过外护套破损处的电流，在金属屏蔽层会产生环流，电流较大时会发热损耗金属层和外护套，引起外护套绝缘材料局部过热并加速绝缘老化，严重影响绝缘寿命；电缆外护套绝缘受损后会导致水分浸入，绝缘介质加速老化以及增加了水树枝发生的概率，影响电缆的使用寿命；护套破损后金属护层容易发生电场集中，诱发电树枝和局部放电，对电缆正常运行造成危害。当外护套受损后其绝缘阻值降低，当不能承受正常电压时就会击穿绝缘层，引发接地短路故障；此外，护套破损后电缆金属护层产生回流损耗增大，使电缆输电能力下降。

国内配电网中主要是以中低压 XLPE 电力电缆为主，在国外某些国家也类似，例如日本，10kV 及以上等级中，XLPE 电缆已经超过 65%，并且随着城市改造逐年增加^[1]。10kV, 35kV 的电力电缆分单芯和三芯电缆，统计数据显示三芯电缆故障中电缆的本身制作质量占 12%，电缆施工造成电缆接头和附件占 36%，电缆受到外力损伤造成占 42%，接地方式占 10%。单芯电缆故障中产品本身的制造问题占 15%，电缆施工造成电缆接头和附件占 25%，电缆接地问题占 18%，电缆绝缘破损（电缆主绝缘及护套）42%。单芯、三芯电缆故障因素所占比例图 1.1 所示。

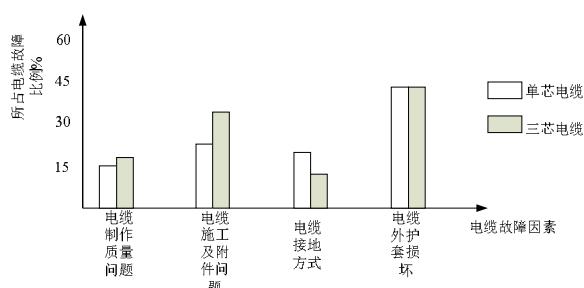


图 1.1 单芯、三芯电缆故障因素所占比例

因此，在三芯和单芯电缆故障中，发生故障的主要因素是电缆外护套破损所致。

由供电公司资料显示，电缆外护套达到要求的占 66%，电缆外护套接地故障 295 次，占故障总数 34%。外护套故障修复很消耗人力物力，简单的也需要 3, 4 天；复杂情况需一周左右。

1.1.2 研究意义

电力电缆故障中，电缆外护套损伤是主要诱发因素，分析外护套的结构和材料性能，找到故障因素，提出预防措施，防止外护套破损。

电缆外护套损坏后易导致各种故障，主要的故障类型有：串联故障，泄漏性故障，闪络性故障；后两者包括单相短路故障，相间短路故障，其中单相短路、相间短路根据故障处过度电阻大小可分为低阻故障，高阻故障。外护套的破损是导致故障的前提，护套损坏的诱发因素较多，主要是电缆施工，白蚁对护套的侵蚀，潮湿环境对护套的腐蚀等。分析导致电缆护套故障原因，提出相应的预防和解决措施可减少电缆故障的发生。

电缆故障发生后，主要的是检测故障发生位置，根据故障电缆情况可采用修复或更换电缆，及时恢复供电，那么快速准确的确定电缆故障位置是关键。目前，对于中低压 XLPE 电缆外护套故障的检测方法，主要是离线检测，离线检测需要在停止供电的情况下进行，不能提前检测出外护套破损情况及电缆运行时就发生的外护套故障；因此，若能实行不停电的在线检测，以及提前检测到潜在电缆外护套破损点和故障点，那么可做到预防电缆外护套故障及电缆故障的发生，采用及时更换破损严重的电力电缆，可防止停电事故的发生，减少经济损失，将提高电力电缆整体运行质量和供电水平。

因此，本文简要介绍离线检测法，主要研究在线检测的外护套故障测距法，使用基于小波分析的行波测距法实现在线故障定位，为在线检测提供参考。

1.2 国内外研究现状

二十世纪初，部分发达国家开始使用电力电缆，并通过实际使用对其进行分析和研究。由于电力电缆在使用中出现了不同的故障现象及其带来的影响，针对电缆的故障定位检测，修复技术的研究与时俱进。

原始的电缆排查方法是人工对其巡视和检测，最开始是通过外部现象来分析发现故障可能处，这样的工作量大，耗费人力物力，排查效果很差，有时候很难处理重要的故障和损坏的电缆。由于声磁设备的研制，利用电信号的检测仪器的出现，可以通过简单的仪器来大概找到相应的故障范围，这个阶段被称为电缆故障模拟查找。

随着通信技术、计算机技术的发展，到 20 世纪 90 年代，研发出电缆的检测技术，故障定位方法有了进一步的发展；出现一些利用微型计算机配合检测设备来查找和定位电缆故障。

在国外，英国及加拿大研究人员最初提出了，最早提出采用双端电气信号进行故障测距。日本学者利用基于光电传感技术的双端在线距法原理对电缆故障测距；主要是在电缆两检测端使用光磁传感器产生光信号，通过高速光/电(O/E)转换器，实现光电信号的转换^[1]，电信号通过 A/D 转换器变成离散数字信号，最后经 CPU 处理，依据 A 型行波测距法，检测结果并通过显示屏显示。美国学者提出一种在线故障测距方法，克服高压闪络对电缆造成的损害。根据环形线路开路或在线路末端设置开路点，结合行波经电缆故障点产生全反射的特性，以及通过故障点附近的传感器接受的脉冲信号，从而提高检测精度^[2]。

在国内，1995 年西安交通大学的学者提出了基于双端电信号故障测距方法。伴随着 GPS 技术的发展，2004 年武汉大学的相关专家提出基于 GPS 全球定位系统的双端信息故障测距方法。采用双端信息的故障测距方法可基本排除故障电阻大小的影响，成为电缆故障检测方法中新的研究热点。国内高校及研究院提出一些电缆故障检测的发明专利，日中煤科工集团重庆研究院申请的一种实用新型专利：一种基于 IEEE1588 的井下电缆在线故障定位系统；北京联合大学于 2005 年申请一项发明专利：一种电缆故障定位系统及其方法；西安科技大学于 2010 年申请发明专利：一种基于差分小波算法的电缆故障检测方法^[3-5]。

以上是电缆故障检测方法的发展和目前国内外取得的一些研究成果，对于电缆外护套故障的检测也是基于电缆故障检测方法发展而来，主要方法如 1.2.1 节内容。

1.2.1 电缆外护套故障测距方法

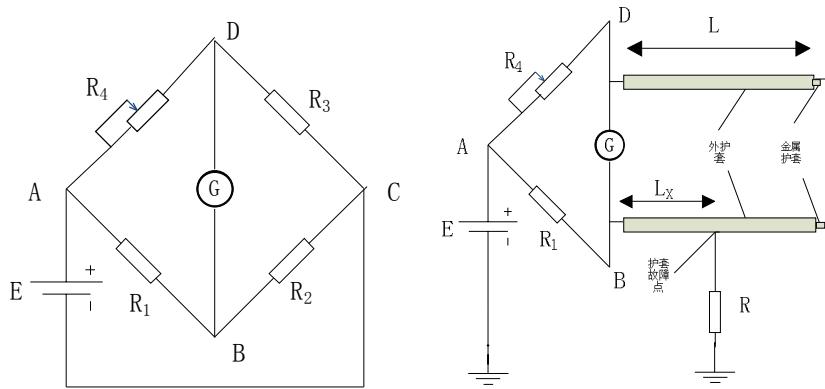
电缆外护套故障定位主要是离线定位，其定位步骤主要包括故障预定位、故障精确定位。

1.2.1.1 预定位方法

(1) 直流电桥法

故障预定位中最开始是使用直流电桥法，由于直流电桥法的原理简单，操作方便，得到广泛的应用，同时也实际证明直流电桥法检测效果较好^[6-8]。

直流电桥法的预定位原理如图 1.2 所示。



a) 直流电桥法电路原理图

b) 直流电桥法预定位的等效图

图 1.2 直流电桥法预定位原理图

1) 直流电桥法电路原理图, 由四个电阻构成桥型结构, 中间是灵敏电位计, 检测 B, D 两点电压差大小, 通过改变滑动变阻器 R_4 大小, 使得灵敏电位计电压为零, 同时指针居中。公式如下:

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (1.1)$$

2) 直流电桥法预定位的等效图, 通过将电力电缆的单位长度视为线性电阻, 电缆电阻与长度成线性比例, 可将其简化, 在图中 R_i 为电桥法参考电阻, L 为电缆总长度, L_x 为检测点与外护套故障点的距离。假设中低压 XLPE 电缆的金属护层单位阻值为 R_0 , 调整滑动变阻器 R_4 , 使灵敏电压指示为零, 此时等效为 BD 两点电压差为零, 则:

$$\frac{[L + (L - L_x)]R_0}{L_x R_0} = \frac{R_4}{R_i} \quad (1.2)$$

$$L_x = \frac{2L}{1 + \frac{R_4}{R_i}} \quad (1.3)$$

直流电桥法的简单易行, 在故障预定位的检测中得到普及, 而不足之处是电桥法容易受到其他因素干扰, 特别是周围的电缆、周围电磁电势的影响、检测设备与金属护层的连接性; 此外, 直流电桥法的正常应用需要一定的前提条件, 即电缆中必须要有一相电缆是正常无故障的。

(2) 压降比较法

压降比较法又可称为直流压降法。压降法原理是: 通过对检测电缆施加直流电压, 选用两个不同的回路, 测出两回路的电压, 由第一次的所测电流作为标准, 在第二次检测中通过调节激励电压使得的回路电流等于第一次电流, 从而测出电缆外护套故障

点所在位置。其中与直流电桥法相似之处在于，都将单位长度的电缆的金属层视为线性电阻，电缆电阻与设定单位电阻成线性比例。

压降比较法预定位原理如图 1.3 所示，所测故障电缆长度为 L ，检测点与电缆外护套的距离为 L_x ，设所测电缆的金属护层单位长度电阻为 R_0 。

调整检测电源 E_s ，当检测开关置于“a”时检测回路是“A”，从电流表取得电流值 I ，电压表值 U_1 ，由于设定电缆为线性电阻，由电路定理，电压只与电缆长度成正比，即：

$$U_1 = IR_0[L + (L - L_x)] \quad (1.4)$$

如上，调整检测电源 E_s ，当检测开关打在“b”时的检测回路是“B”，由检测原理需要控制为回路 I ，此时获得的电压是 U_2 ，由电路定理，即：

$$U_2 = IR_0 L_x \quad (1.5)$$

由(1.4)、(1.5)联合求解出故障点与检测点距离，得：

$$L_x = \frac{2LU_2}{U_1 + U_2} \quad (1.6)$$

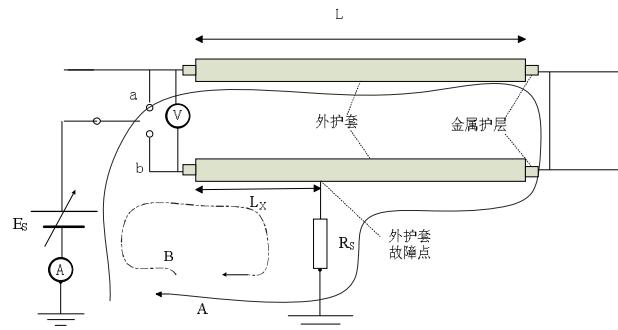


图 1.3 压降比较法预定位原理图

直流电桥法的检测的抗干扰能力较差，压降比较法在抗干扰能力有所提高，但是其检测准确程度与电缆金属层设定的线性电阻值关系紧密，其主要不足是压降法使用范围很窄只能检测单个护套故障点，对于设定的回路也不能出现较大问题，因此实际中的应用范围有所限制。

(3) 低压脉冲反射法

低压脉冲反射法是基本的行波检测法^[9]，一般适用于电缆绝缘故障中的低阻故障，或者开路故障，检测方便快捷，对电缆的损害小。

低压脉冲反射法运用到电缆外护套故障检测不但可以检测故障距离，还可判断故障性质。

1) 低压脉冲反射法原理

低压脉冲反射法原理：通过脉冲发射源发出和接受的反射波的极性来判断，当发射的脉冲波在电缆阻抗不一致的点会发生反射，经过检测脉冲发出和反射波之间时刻，即可得到护套故障点与检测点之间的长度，从而找到护套故障点。

相对于直流电桥法和压降比较法，低压脉冲反射法在处理电缆模型时，更加靠近真实电缆情况，采用的是利用输电线路的长线模型。长线模型考虑到电缆的分布参数，检测电缆的等效模型如图 1.4。

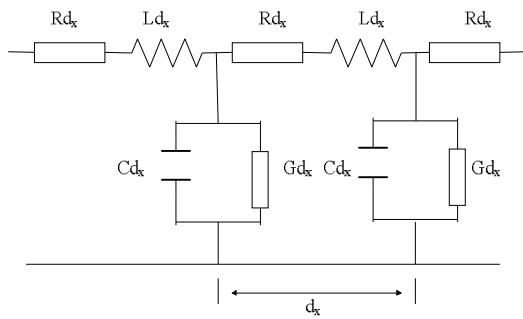


图 1.4 低压脉冲反射法中电缆等效模型

低压脉冲反射法中，利用电缆特性阻抗来研究等效模型。

利用电缆行波电压与电缆行波电流之比作为等效的特性阻抗 Z_0 。

$$Z_0 = U^+ / I^+ = U^- / I^- = \sqrt{(R + j\omega L_0) / (G + j\omega C_0)} \quad (1.7)$$

公式中， U^+ ， U^- 分别是低压脉冲反射法中的入射波和反射波电压， I^+ ， I^- 分别是低压脉冲反射法中的入射波和反射波电流，一般情况下， $R \ll \omega L_0$ ， $G \ll \omega C_0$ ，那么特性阻抗 Z_0 能够化简成：

$$Z_0 = \sqrt{L_0 / C_0} \quad (1.8)$$

低压脉冲反射法不是直接检测法，利用行波的往返时间长度 T ，行波在介质中的传播的波速 V 以及检测故障点位置 L_x 来检测故障点位置，即：

$$L_x = \frac{VT}{2} \quad (1.9)$$

1.2.1.2 精确定位方法

中低压 XLPE 电缆外护套故障的预定位中，由于干扰因素较多，在检测仪器和检

测过程都存在一定的误差，电缆敷设图和最初存档资料可能存在误差。因此预定位累计误差较明显，需要进一步精确故障位置，提高故障查找的准确性。

电缆外护套故障精确定位的检测方法主要有：跨步电压法，声磁同步法，音频定位法和直流冲击法^[10-12]。

(1) 跨步电压法

电力电缆的故障定位检测方法中，跨步电压法的检测原理容易实现，检测设备简单，因此应用广泛。跨步电压法的设备简单，主要由高压信号发射器，毫伏电压表及电位差计。

1) 跨步电压法的检测原理

跨步电压法的检测原理：将所测电缆的金属层与大地构成回路，对此回路施加高压脉冲电流，用灵敏电位差计沿着电缆敷设方向探测，判断出沿电缆路径过程中电位差计偏向变化；当电位差计在某一点的左右两边偏向相反时，左右摆动，说明此点电势靠近零电位，则此点为电缆外护套故障点^[13,15]。跨步电压法精确定位原理如图 1.5。

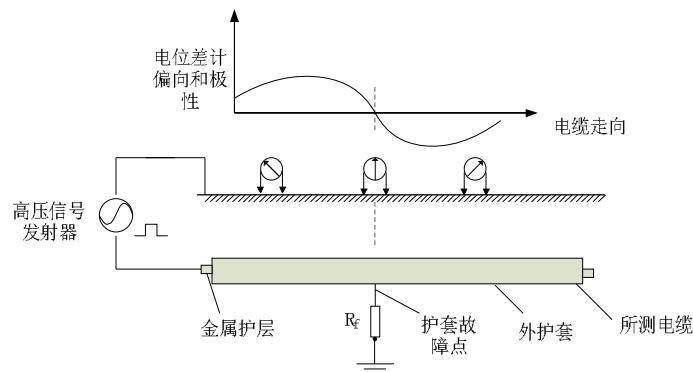


图 1.5 跨步电压法精确定位原理图

2) 跨步电压法精确定位的注意事项：

①由于跨步电压法的检测原理，其存在一定的检测局限，对于直埋电缆的护套故障可取得较好的效果，而对于非直埋的护套故障可能难以检测。

②为减少检测误差，对于金属护套的两端接线不能连接起来，因跨步电压法是在故障相和地面之间施加电压。

③对于跨步电压精确定位，需要参考预定位的检测范围，因为在护套故障的检测时，给金属护层施加高压，若护套存在例外的一些微小破损可能也会检测到，那么这些可用预定位来排除干扰。

④对于使用跨步电压法，因用电位差计的摆动方向来判断，因此检测前后电位差的指向和所处位置不能变化，而且要提前检测整套设备的功能是否正常。

(2)声磁同步法

声磁同步法是利用声音和电磁信号的传播速度差来检测^[14]，是对声测法的改进和发展；相对于跨步电压法，声磁同步法检测范围更宽，可以充分检测出电缆在施加高压脉冲信号后可以使得护套故障点产生放电或者发出声响震动的故障。

1)声磁同步法检测原理

声磁同步法原理：是利用检测设备发出的高压脉冲信号在故障点的反射信号来分析，利用声音和磁场的速度不一样，达到检测设备的时间不一致，经过得到检测的时间差以及现场的声音速度和电磁信号速度，来精确故障点位置。

利用高压脉冲信号促使故障点放电，故障点的放电会产生声音信号，放电电流会产生脉冲磁场信号；利用现代微电子技术把故障点产生的声音和磁场信号记录下来；通过记录下来的信号可以鉴别不同性质的故障点。通过改变检测设备的检测位置可以找到声音和磁场时间差最小处，此处就是电缆故障点，位于检测设备的地面上。

电缆外护套故障的声磁同步法精确定位原理如图 1.6。

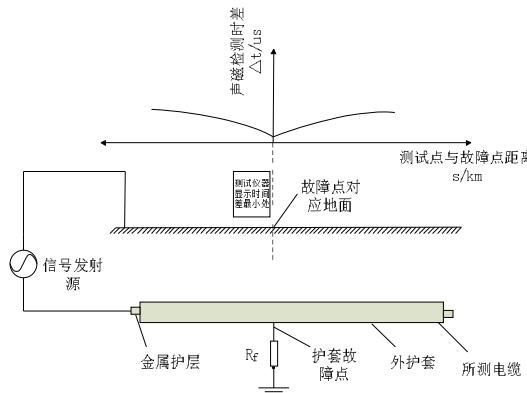


图 1.6 声磁同步法精确定位原理图

2) 声磁同步定点法精确定位注意事项：

- ①充分利用预定位检测到的故障点范围，提高查找效率。
- ②由于检测环境和土壤的结构性质各异，而其对检测中的声音和磁场速度有影响，在短时间差内精确的判断故障点位置有一定难度。
- ③检测过程中必须注意先后顺序，应该先通过接收到的磁场信号后再开始记录声音信号。
- ④试验前需检测设备是否正常，探针可否正常接受信号，所测故障电缆的金属护层接地线是否正确，金属护层是否参与了放电过程。

(3) 音频定位法

音频定位法原理简单，操作方便，主要适用于收发感应信号较弱的情况下。

1) 音频定位法检测原理

音频定位法检测原理：利用音频信号检测设备，向被检测的故障电缆金属护层输入音频信号，另一端和大地连接，沿着电缆走向用音频接收器检测收到的音频信号强弱，在接收器显示信号最弱处就是护套故障点处。

音频法精确定位原理如图 1.7 所示。

2) 音频定位法精确定位注意事项：

①充分利用前面的故障预定位检测到的范围，提高查找精度。

②由于音频定位法，受到周围环境声音的影响较大，因此需要在干扰条件少的时候检测。由于检测的土壤的结构性质各异，其对声音传播速度也有影响，在短时间差内精确判断故障点位置存在一定难度。

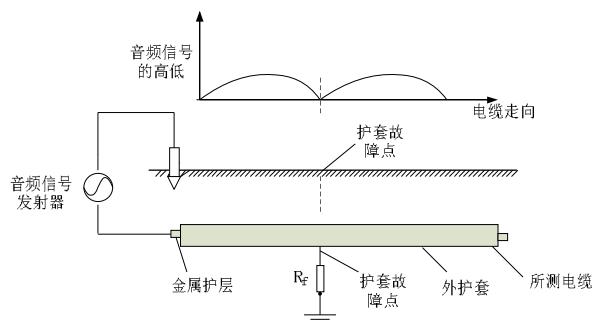


图 1.7 音频定位法精确定位原理图

(4) 直流冲击法

相对于前面的几种精确定位方法，直流冲击法比较简单，一般指适用于新敷设的电缆，或者是没有安装的电缆。

1) 直流冲击法检测原理

直流冲击法检测原理：通过检测设备在被测电缆两端施加能量较高的脉冲电压，外护套故障点会产生放电声音，可通过裸耳听到故障放电声音，在安静地环境下非常明显。

直流冲击法精确定位原理如图 1.8 所示。

2) 直流冲击法精确定位注意事项：

①由于直流冲击法的冲击电压较高，不宜长时间对电缆进行检测，以防止对电缆损伤。

②对于已经投运的电缆最好避免采用直流冲击法，以免施加的高压对护套和电缆造成损害。

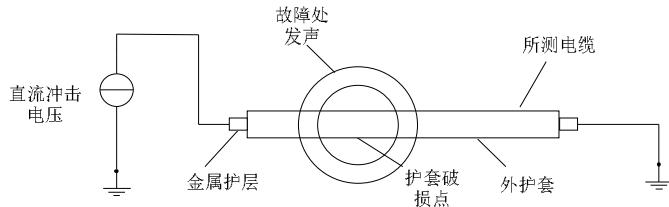


图 1.8 直流冲击法精确定位原理图

近来，学者们提出了一些的电缆外护套故障检测的理论和方法，也通过实践验证有了进一步发展，对于电缆外护套故障精确定位还存在较多困难，没有形成系统的高精度的电缆外护套的检测方法，且缺乏外护套故障的在线检测方法。

1.3 主要研究内容

本文分析中低压 XLPE 电缆外护套的结构、材料、护套厚度及外护套与电缆质量的关系，通过结构、材料分析，选择满足实际需求的电缆外护套，避免电缆故障的发生。针对电缆外护套损坏原因进行分析，给出具体的预防和解决措施。

本文根据小波分析理论及行波测距原理，选择适合外护套故障的小波基函数，使用 MATLAB 数据分析软件构造新的小波基；根据行波传播特性，对护层行波波速进行测量；结合行波测距原理和方法，选取合适的行波测距算法。

本文通过 PSCAD 仿真软件对电缆外护套的不同故障类型的进行仿真，根据仿真得到的故障信息，使用新构造的小波基函数，对故障信息进行小波变换；选取合适的行波测距算法，对外护套故障进行测距；此外，研究了在不同的测距范围、不同的故障电阻下的各种外护套故障类型及其测距精度。

2 中低压 XLPE 电缆外护套故障分类

2.1 电缆外护套结构

2.1.1 中低压电力电缆结构

电力电缆的种类繁多，按其结构、使用范围、电缆特点及物理性能划分为若干类别。电力电缆按照电缆的芯数、截面积、绝缘材质、护套材料以及电压等级分成不同的电缆类型，如表 2.1^[16-20]。

表 2.1 电力电缆的分类

电缆划分方式	按电压等级	按绝缘材料	按导体材料
电缆名称	中低压电力电缆	交联聚乙烯电缆	铜芯电缆
	高压电力电缆	聚乙烯电缆	
	超高压电缆	聚氯乙烯电缆	铝芯电缆
	特高压电缆	油浸纸绝缘电缆	

中低压 XLPE 电力电缆分为单芯电缆和三芯电缆，单芯电缆和三芯电缆两种电缆横截面结构如图 2.1。

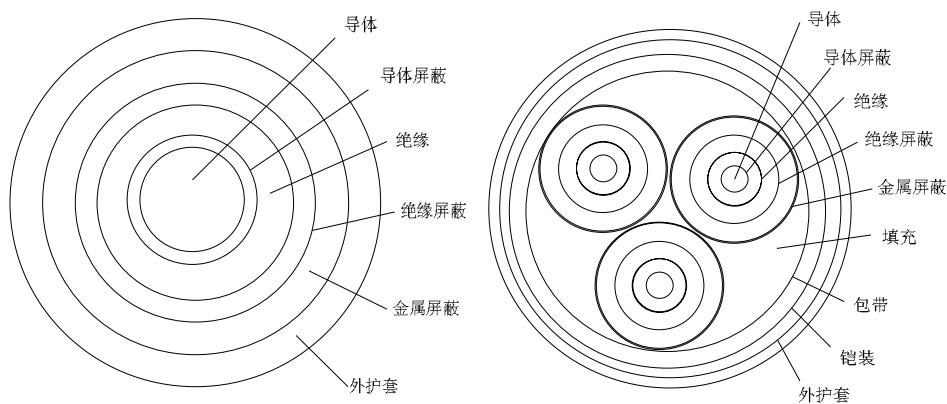


图 2.1 单芯、三芯 XLPE 中低压电缆结构图

如图 2.1，电缆的主要结构是导体、导体屏蔽层、绝缘层、金属蔽层、护套层这五个结构层。

导体一般采用紧压型线芯，这样可使导体屏蔽外表面平整光顺；这样可防止导丝效应，同时可避开其可能引起的电磁效应；此外，还防止水油等液体顺着线芯进入电

缆内部。因此，必须在电缆的铺设和安装前，选用配套的工具，检测导体是否合格，若是没有制作合格，会引起局部的高温膨胀。

导体屏蔽一般为半导电料，主要是以聚乙烯为基料加碳黑组成，将线芯以及电缆的其他部分隔离开，同时也隔离了不同电缆的电磁效应，预防短路故障，10kV及以下电缆的外半导屏蔽层可从电缆上分离出去，35kV及以上则不可分离出去，因为若将绝缘层剥离出电缆，则降低电力电缆的局部抗放电能力，特别是安装附件时，容易在微小部位造成空气缝隙。

绝缘层一般采用交联聚乙烯(XLPE)，交联聚乙烯是大分子材料，其体积电阻率一般在 $10^4 \Omega \text{cm}^3$ 以下，其厚度一般为 0.1: 0.4cm，介质损耗比纸绝缘和 PVC 绝缘都要小。交联聚乙烯较好的电气性能、机械性能、抗老化特性及较强的耐热变形，可使得在正常运行温度下发生的短路故障下允许大电流通过。

金属屏蔽是铠装屏蔽层。电缆故障电流由铠装屏蔽层构成通路，维持大小稳定的对地电位。铠装屏蔽层的铜带截面的选择是根据发生故障的电流大小和故障的持续时间。还可以按照是单端还是两端接地方式来选择。中低压 XLPE 电力电缆的单芯和三芯交联电缆采用钢带作为铠装层，其作用是保持电缆的机械强度和硬度。

外护套大部分是用聚氯乙烯(PVC)材料，厚度大约在 0.3: 0.4 cm，聚氯乙烯(PVC)材料的防火阻燃性能好，这种结构的电缆已在全国大量采用。外护套也采用聚乙烯(PE)材料，目的是防止水分的渗入，是因为聚乙烯(PE)材料的吸水率小于聚氯乙烯(PVC)。

2.1.2 电缆外护套结构及材料

从中低压 XLPE 电缆结构分析看，电缆外护套是电缆结构的最外层。最外层起到保护内部结构不受直接破坏的作用。

从电缆外护套的材料成分看，主要是聚乙烯(PE)和聚氯乙烯(PVC)两种材料。聚乙烯外护套材料是一种非极性材料，也是一种低填充物材料，按其分子结构和密度来分，可划分为线型密度聚乙烯，中密度、低密度和高密度聚乙烯。优点：聚乙烯材料作为电缆外护套材料具有较强的防水防潮功能，其绝缘电阻比聚氯乙烯的绝缘阻值高很多。缺点：聚乙烯材料阻燃性能差，氧指数低于 30，束燃烧试验难以达标。聚乙烯材料与护套表面的半导电涂层的粘附性较差，而容易脱落，尤其在电缆盘绕、搬运和敷设安装过程中。

聚乙烯(PE)护套的性能随着其密度的不同而相差较大，特别是其机械性能及耐磨强度。若选择较轻的通信电缆，则外护套选用低密度和线型低密度的聚乙烯；由于高压交联电力电缆重量大不易弯曲，而电缆的敷设过程聚乙烯护套容易受外力损伤，因此对于高压交联电缆，选择中密度的聚乙烯是合适的。

聚氯乙烯(PVC)护套材料是一种高分子材料、极性非结晶性高聚物。按照使用范

围的不同，聚氯乙烯可划分为：高聚度 PVC、通用 PVC、交联 PVC。缺点：聚氯乙烯护套材料的绝缘电阻低，在搬运、较长时间的存放过程易吸潮，受潮后绝缘电阻更低，严重情况下很难做直流耐压试验，这种情况应该避免。优点：聚氯乙烯护套材料与护套表面半导电石墨涂层的粘附性强，阻燃性能良好，在比较高的温度下材料的弯曲性能较好。普通的聚氯乙烯的氧指数一般在 25 左右，同时也是一种高填充物材料，可通过加入大量阻燃剂改善其氧指数，可使得其氧指数高达 30 以上。

2.1.3 电缆外护套与电缆质量关系

对于一个产品是否合格达标，首先从产品的外观表面上体现；无论是何种产品，在其制造的过程中必须保证外观的质量；控制好外观质量必须对制造过程严格控制，加强监督检查。电缆外护套的外观要求是：表面没有损伤，均匀光滑，光泽一致，电缆线芯居中（偏差不超过规定），通过肉眼没有明显的颗粒、花形、杂物和沙眼。此外，电缆外护套的厚度对于电缆运行质量也存在一定影响^[24-26]。

电缆外护套的厚度需适中，不能过厚或者过薄，不能超过规定的误差。如：电缆 ZR-KVVP 4*1.5mm² 其护套的厚度平均是 1.7mm，此类型号的电缆如参照标准 GB9330-88 要求，外护套厚度是 1.2mm。电缆外护套厚度不合格将导致如下问题：

(1) 缩短电缆运行寿命。由于电缆中的聚氯乙烯不宜长期在超过 60℃ 环境，而电缆在施工安装后，运行一段时间后，电缆发热，当超过电缆的允许温度 75℃ 后，其热量不能长期处于导体内，将散经过电缆外护套扩散，如果电缆外护套过厚，将热量积累在电缆内部，使得电缆绝缘层过热老化，缩短电缆运行寿命。此外，严重情况下将破坏绝缘层，发生短路接地故障，引发电缆击穿事故，造成停电。

(2) 护套功能缺陷。根据标准要求，护套厚度的增加和减少会影响到其氧指数的高低，特别是聚氯乙烯的阻燃性。并不是越厚越好，过薄也会容易导致电缆内部的结构损坏，厚度和功能不成正比。

(3) 破坏电缆的组成结构。根据电缆的结构层划分，由里到外依次是导体，导体屏蔽，绝缘层，金属铠装层，外护套，各层按照标准制造出来，不会导致护套过厚，过厚的护套隐藏着电缆结构不标准的隐患。

(4) 影响电缆的敷设施工。目前电缆敷设施工以穿管和桥架占主要，相关公司要求电缆制作紧致，外径不能过大，避免施工搬运中造成损伤和气隙，护套不能过厚，不然影响电缆散热性能，相反的情况下将给电缆敷设施工企业造成较大的难度，也影响到供电公司的正常规划。

结合以上几点，电缆厚度不能过厚或过薄，在制造和选用电缆护套是要严格按照标准。不但有利于施工单位的正常工作，也保障了供电的持续性。

2.2 电缆外护套损坏原因分析及处理措施

根据深圳南山供电局 2012 年资料，10kV 配网设备共发生各类故障 120 次，其中电缆故障 32 条次，占全年设备故障的 26.67%。测寻电缆故障 17 条次，其中外力施工破坏引起的 3 条次，电缆中间头故障的 13 条次，电缆本体故障的 1 条次，对其中 14 条次的电缆故障进行解剖分析，因外力破坏引起的故障 1 条次，因为施工工艺不良引起的故障 13 条次。

据南山供电公司统计，电缆故障的发生主要有三大要因：一是设备的自然老化，如电缆中间头、终端头的使用寿命已达设计年限，或因其安装施工质量不佳导致使用寿命提前到来等，是造成电缆故障的最大要因，所占为 65%；二是施工损坏电缆，部分施工质量不佳监管不严，导致电缆受到不同程度的损坏，所占为 22%；三是电缆失去了原有结构的保护，如外护套破损、钢铠和铜屏蔽损坏等，易因过电压而瞬间击穿造成故障，所占为 13%。如下图 2.2 所示。

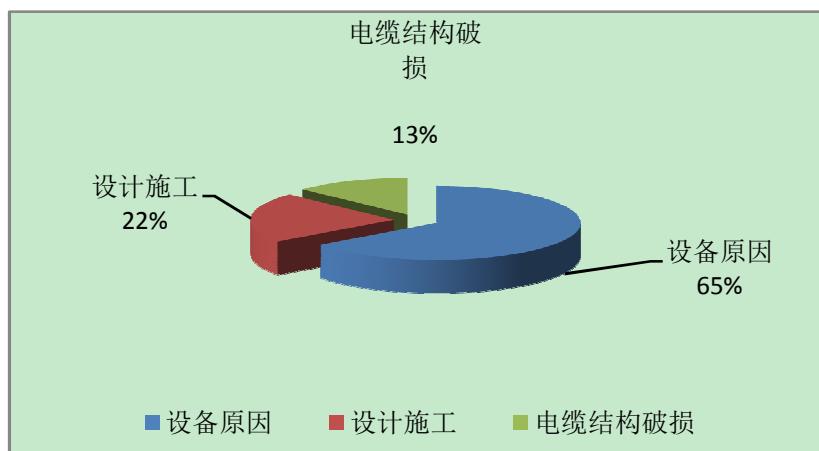


图 2.2 电缆故障按发生原因分类统计

此外，据某局五年以来统计的电缆故障，其中关于中低压电缆护套的故障共 300 次，并归类统计，类型如表 2.2，电缆护套破损引起的故障占百分之六十，其中外护套的破损因素中：敷设施工 30%，中间接头和接地箱进水 25%，白蚁侵蚀 20%，电缆外护套开裂 15%，其他不明因素 10%。

表 2.2 电缆外护套接地故障分析表

故障原因	故障发生次数	故障所占比例
敷设施工	90	30%
中间接头和接地箱进水	75	25%
白蚁侵蚀	60	20%
电缆外护套开裂	45	15%
其他	30	10%

根据电缆外护套故障分析表，分析主要的故障因素，并对此采取必要的预防措施，这是减少事故发生的前提条件；此外，针对故障电缆给出相应的解决措施，这可提高电缆更换和修复效率，改善电缆供电质量。

2.2.1 电缆施工对外护套损伤及其处理措施

(1) 原因分析

电缆外护套接地故障的主要因素是外护套受到外力破损，其中大多是电缆敷设或者施工过程中对电缆外护套造成磨损或刺伤；电缆使用前虽经过耐压试验，由于其试验时间短以及试验条件的不一，在短时间内护套破损处被击穿的可能性不大，因此护套的潜在故障处难以发现；此外，电缆存放时间较长护套被腐蚀的可能性增大，则电缆运行过程中，电缆金属层通过的电压会将破损处击穿，导致外护套单点或者多点接地故障，严重情况会引发电缆导体故障。此外，在电缆敷设后，当电缆接地箱和接地线被盗或者没有连接好，也会出现金属层的电压将破损处击穿。另外，对于没有达到要求的管道埋设和管道内存在尖锐物体，也可能刺破护套引发护套击穿故障^[25-28]。

(2) 处理措施

为预防电缆外护套受到损伤，在电缆敷设、填埋，运输等环节尽量避免外护套受损。针对电缆采购、运输、建筑施工、电缆敷设过程中需要增加现场监督检查力度，对于电缆敷设过程最容易使护套受损，因此要重点加强；此外，对电缆敷设沟渠进行检测，不能有尖硬物体；电缆存放和搬运中避免与尖锐物体的摩擦，尽量降低弯曲程度；此外，电缆敷设施工的设备要合格和施工队伍业务素质要达标。

2.2.2 中间接头和接地箱进水及其处理措施

(1) 原因分析

中间接头和接地箱进水是引发电力电缆护套故障的重要因素，经过现场调查，其主要原因是中间接头的制作质量不合格，中间接头的安装施工没有按照标准执行，施工过程中密封性没有处理好；电缆附件质量也存在问题，如中间接头防水罩性能质量

不良，防水材料的过早失效；针对接地箱进水的原因分析，主要是接地箱的密封性不良，尤其在南方地区以及多雨季节，水分非常容易渗透到接地箱；此外，接地箱的接地线在一定条件下也为水分渗入到接地箱提供了通道。

（2）处理措施

针对中间接头进水问题，要严把接头制作质量关，严格按照施工要求，使用质量好的达标附件，选用优质防水罩和密封材料；对于接地箱进水，采取快速安装的工艺，合理布置接地线。此外电缆敷设处的土壤干湿情况也非常重要，尽量选择干燥地区敷设安装电缆。

2.2.3 白蚁对外护套的侵蚀及其处理措施

（1）原因分析

白蚁主要生长繁衍在潮湿和低纬度地区，这些地区的电力电缆受到不同程度的侵害，白蚁多发地带对电力电缆的破坏更加严重，南方某市的中低压配电电缆就发生因白蚁侵蚀导致的电缆外护套故障，造成停电事故，后经过查找故障处，遭受白蚁侵蚀严重的电缆竟长达十几米，部分还露出了金属护层。电缆外护套、金属护层和导体主要受到白蚁分泌物的腐蚀，严重危害电缆正常运行^[21]。



图 2.3 被白蚁侵蚀的电缆外护套

（2）处理措施

针对白蚁多发地带，可使用以下方法：①化学方法消灭白蚁，或者根据实地土质情况和白蚁的生活习性防止其繁衍和对电缆的破坏。②可使用没有污染的新型护套材料：使用硬度大的外护套材料，研究证明当硬度系数 ((Shore D)>63) 可很好的抵抗白蚁侵蚀。③使用抗白蚁分泌物的金属护套，对于白蚁多发地区有较好的预防作用。④采用在电缆外护套上面喷涂灭蚁涂料，可以较好防止白蚁侵蚀。

根据实际情况选择最优方法，也可采用多种方法相结合，预防为主，防治结合，从而取得较佳效果。此外，对于电缆进行定期的检查，判断是否受到白蚁的侵蚀，是

采取以上措施的前提；若是找到被侵蚀的电缆，则结合侵蚀情况采取相应方法，减少电缆故障。

2.2.4 潮湿环境对外护套的损害及其处理措施

(1) 原因分析

由于中电压 XLPE 电缆有较好的抗土壤腐蚀能力，较好的抗药品性，使得施工和安装过程中的防水意识较差，在敷设施工中只是选择性的做电缆的局部干燥；而潮湿环境是导致电缆外护套的绝缘质量下降和产生水树枝的主要因素，潮湿环境对电缆外护套的损害包括：① 最容易腐蚀电缆外护套端部和表面层。② 在潮湿环境容易引发水树枝，绝缘材料的绝缘性能降低。③ 电缆内部的金属材料在潮湿环境容易产生一系列物理变化，破坏金属材质原有性能。④ 对电缆导体芯线、端子等电阻产生影响。以上损害直接间接的影响电缆的正常运行，进一步恶化可引起电缆故障^[27-29]。

电缆不可长期处于潮湿环境，尤其是带有强腐蚀性水分的土壤中，因此如何排出土壤的腐蚀性水分，对提高电缆的使用寿命和保证电缆正常运行很重要。

(2) 处理措施

①对于潮湿环境的电力电缆，优先考虑截断和阻止腐蚀性水分的渗入，需要定期的控制和检测电缆所敷设地区的排水情况，从源头上控制；对于受到污水腐蚀的电缆，需要找到腐蚀性水源头，防止其进一步对电缆外护套的腐蚀；对于找到的腐蚀性电缆，根据具体情况，更换电缆或者用干净水冲洗，干燥处理后再投入使用。

②改善电缆敷设沟道的结构，防止腐蚀性水分的渗入，更加方便污水流出以及方便电缆故障的查找，对于关键线路，尽量不用直埋安装施工；在不能改变电缆敷设地段的，可使用在外护套上喷涂抗腐蚀涂料，即在外护套外面套一层抗腐蚀管，或者调用较好的填充用土。

③从电缆自身出发，可以先检测敷设地段的土壤成分、物理化学性质，根据土壤检测情况，选用最合适的经济的电缆外护套材料。

2.2.5 外护套开裂的原因分析及其处理措施

对于中低压 XLPE 电缆外护套的开裂原因，选取三芯 XLPE 中低压电缆和单芯 XLPE 中低压电缆两种典型的电缆外护套开裂来分析其开裂原因^[16-18]。选择这两种来分析，对于防止中低压 XLPE 电力电缆外护套的开裂具有一定的参考价值。

2.2.5.1 三芯 XLPE 中低压电缆

根据某供电公司提供的资料，供电公司某站内 35kV 三芯 XLPE 中低压电力电缆在使用和运行过程中发生的开裂情况如下：最开始发现电缆外护套开裂是在敷设施工时，

还有一次是在电缆运输过程中还没有下盘时，发现外护套存在开裂缝隙。

(1) 原因分析

经过供应商和施工人员配合调查，从力的角度分析，研究有以下影响因素：

①弯曲张力的影响

电缆在搬运过程或者被安装在沟道里，存在一定的弯曲度，电缆弯曲时，电缆外护套的对外伸张率 φ 与电缆的大小和弯曲度有如下关系：

$$\varphi = d / (D + d) = 1 / (\beta + 1) \times 100\% \quad (2.1)$$

式中， d 为电缆直径， D 为电缆弯曲直径， $\beta = D/d$ 为电缆的综合弯曲系数。那么当电缆的直径不变的情况下，电缆弯曲程度越大，对外伸张应力越大。

②温度张力的影响

当电缆没有放在储存室里，而是电缆外护套直接处于光照下，尤其是强烈光照条件下以及高温条件下，有如下的测量数据，如表 2.3。

当经过一定时间的光照后，电缆外护套向光表面和背光表面温度差较大，由于热胀冷缩的原理，会形成较大的温度张力，护套容易变形开裂。

表 2.3 电缆外护套表面温度差

检测日期	环境温度/°C	护套向光面/°C	护套背光面/°C
7月16日	38	64	41
7月17日	41	69	48
7月18日	40	67	46
7月19日	39	65	44

③导体弯曲侧力的影响

对于三芯 XLPE 中低压电缆，截面积较大，当电缆弯曲后，导体之间的相互挤压，以及导体对外护套的压力分布不均，对于弯曲程度大的部位，电缆导体弯曲侧对护套的挤压力大，导体间的挤压力和导体对护套的挤压力重叠相加，弯曲侧力超过护套的抗伸张力时，外护套容易开裂。

④制作工艺中拉力的影响

对于不同电缆，不同外护套的制作工艺不同，大部分工艺中都使用挤管方式，将外护套的基料——聚烯烃（聚烯烃一般用于阻燃材料）加入护套中，由于基料的分子结构因素，对外表现为抗纵向拉伸强度差。在低烟无卤阻燃电缆中纵向开裂更加明显。阻燃材料过多加入护套容易导致其机械性能差，伸张率下降，容易碎裂。

2.2.5.2 单芯 XLPE 中低压电缆

对于单芯 XLPE 中低压电缆护套开裂，分为外部因素和内部因素。外部因素主要

是受到施工、温度、弯曲度、制作工艺等影响；内部因素，即电缆内部结构的因素，导体与绝缘体之间、金属护层和外护套之间的直接和间接的关系^[24]。相对于三芯电缆从力的角度分析，单芯电缆从材料，结构和制作工艺来分析，因素如下：

(1) 原因分析

①外护套材料的因素

由于外护套材料主要是聚氯乙烯（PVC）和聚乙烯（PE）材料中，根据电缆工作要求不同，选用不同的护套材料，考虑其硬度、机械强度、耐腐蚀性等，而在制作工艺中，存在较大的挤压，而聚乙烯的抗压缩性较差，所以在实际中聚乙烯护套也容易开裂。

②金属护层的因素

当电缆的金属护层较厚，则其机械强度增大，抗变形能力增加，在搬运或者弯曲敷设过程中，带来很大的抗弯曲力；当金属护层厚度超过允许范围时，对于电缆外径大的电缆则铠装层出现高低不平，对于直径小的电缆则表面更加凸凹不平；针对铠装层和电缆表面的凸凹不平问题，可采取在其中添加一层无纺布来改善。

③制作过程的因素

对于直径较大的电缆，在制作过程中重要的环节不完善，即护套的制作工具匹配度不够理想，容易导致制冷冷却后电缆护套内部张力超出标准。对于护套较厚的电缆，在护套制作好后，护套温度达 200 °C，将此高温冷却十分不容易，如果不能取得好的效果，则容易使得金属铠装和钢带对护套造成切入痕迹。此外，将刚制作好而没有充分冷却的电缆弯曲，则更加容易导致外护套破裂。

④电缆盘曲程度的因素

一般情况制作的电缆较长，尽量避免使用中间接头，由于运输条件的限制，在搬运过程中往往将电缆弯曲，对于直径较大的电缆弯曲时，电缆内部的挤压力和外护套的抗拉伸力共同作用，弯曲的时间较长后，外护套的抗拉伸性降低，则内部导体变形弯曲，因弯曲点提供持续的张力，加上金属毛边的切入，容易使得电缆外护套在弯曲点开裂。

⑤敷设安装的因素

部分敷设施工没有严格按照要求，敷设人员的操作能力没有经过严格考察，在没有高度重视的条件下，以及没有完整配套的施工设备条件下，电缆的敷设安装的各个相关环节都可能对外护套造成一定的损伤、破坏，特别是在弯曲度很大，受到较大的拉伸力和与硬质尖锐物体的摩擦后，使得外护套沿着磨损处的破损加速，开裂的可能性加大。

三芯、单芯 XLPE 中低压电缆的护套开裂的处理措施。

由于三芯 XLPE 中低压电缆和单芯 XLPE 中低压电缆，在护套开裂的原因分析中，都存在部分相同的开裂因素，因此在采取处理措施过程可综合比较和考虑。处理措施

如下：

(1)合适的外护套护套材料可很大程度防止护套开裂，因此，外护套材质的选择作为首要考虑，针对开裂原因应采用防开裂的材质，从分子结构、伸张率、抗磨性等综合考虑；双峰聚乙烯材料的抗开裂性比单峰聚乙烯更好。示意图如图 2.4。因双峰聚乙烯的高分子与低分子都均匀分布，因此表现出更加出色的机械强度、伸张性能。

双峰聚乙烯护套材料与单峰乙烯护套材料综合性能比较如表 2.4。

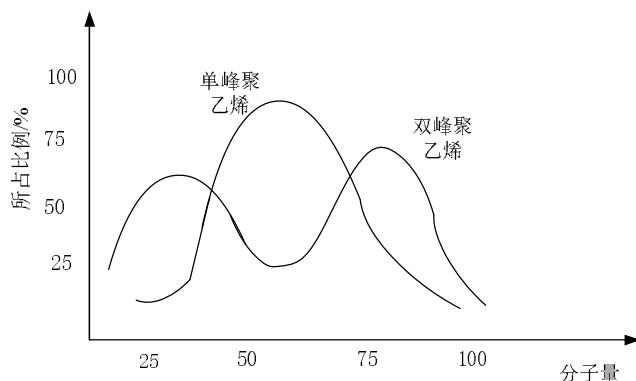


图 2.4 单峰、双峰聚乙烯分子量分布示意图

表 2.4 双峰聚乙烯与单峰聚乙烯护套材料综合比较

材料性能	双峰聚乙烯	单峰聚乙烯
耐磨性/%	1.73	3.5
伸张性/%	1.98	6.45
拉伸强度/ MPa	25.6	28.7
压缩强度/ MPa	20.1	16.4
耐环境应力开裂/h	>1380	>980
低温冲击脆化温度/ °C	-75	-77
密度/ g/ cm ³	0.961	0.946

(2)可通过改善冷却容器的大小，结合护套材料的分子结构特性，采用合适的制冷流程，提高护套冷却的效果；降低护套制作工艺速度，减少护套内部的张力，达到护套表面更加平整和内部结构更加匀称。

(3)根据电缆护套的结构和电缆整体构成，需要在护套与内部接触层添加缓冲带，预防内部金属对护套的损伤，同时可改善护套表面的光滑度。

(4)外护套制作时，采用更加合适匹配的生产工具，减少生产中护套内部的伸张应力。电缆制作后不能立即投入敷设安装，应该至于合适温度的室内，防止阳光的直射，

避免开裂。

(5)严格控制和监督施工敷设的过程，提高施工的质量，规范施工流程，采用合适的施工设备；提升施工队伍业务素质，选用经过严格培训和考察的施工人员；控制敷设电缆速度，减少护套受到磨损和刺伤，从而防止电缆外护套故障。

2.3 电缆外护套故障分类及故障树

2.3.1 电缆外护套损坏导致的故障类型

2.3.1.1 按电缆结构组成分类

中低压 XLPE 电力电缆结构组成中，外护套位于最外层，中低压 XLPE 电力电缆包括三芯和单芯电缆，从结构形式上划分，电缆故障分为并联和串联故障^[22-24]。

电力电缆的串联和并联故障的划分，如表 2.5。

表 2.5 按电缆结构组成划分故障类型

故障类型	故障产生原因	故障表现形式	故障频率
并联故障	电缆导体对护套或者电缆导体之间绝缘降低，不能承受电缆正常电压	一相或者两相接地、一相断线接地	高
串联故障	电缆一个导体或者多个导体断开	开路、断线故障	低

对于电缆结构划分的故障类型中，电缆外护套损坏都有可能导致以下故障类型：

(1) 单相接地故障

此故障中，电缆的导体部分是正常的，而电力电缆三相中有一相的绝缘层绝缘性能低于正常功能，外护套绝缘层电阻变低，护套导电性变大或者比较靠近良导体的电阻率，则可形成导电通路，产生泄露性故障。

(2) 相间故障

此故障中，电缆的导体内部和导体的对地绝缘是正常，而电缆的相与相之间起到隔离的绝缘护层导电性增加，或者耐击穿性下降，形成闪络性故障，也可发生泄漏性。

(3) 相间并对地故障

此类故障中，电缆的导体部分正常，电缆的相与相之间，或者多个相与相之间的接通并对地形成闪络性故障，也可形成泄漏性故障。

中低压电力电缆护套故障中，单相接地短路故障的频率最高，同时也带来大的经济损失。

2.3.1.2 按电缆结构材料分类

分析电力电缆的结构及其材料，从材料的不同来划分，可分成两大类：(1) 本体：如导体芯线，金属屏蔽等；(2) 绝缘体：如主绝缘层，电缆外护套。

根据电力电缆的材料，将电力电缆的故障结构划分为：本体故障，绝缘故障。电缆外护套是绝缘体，护套损坏导致的是绝缘故障。绝缘故障：电缆的组成中不能缺少绝缘层，绝缘层是必要组成部分，绝缘层对导体起到保护作用，电缆运行中导体产生的热量和环境主要是影响了绝缘层，使得绝缘层产生一些物理化学变化，导致老化及绝缘性降低，从而导致故障发生。

工程技术中，电介质主要用来作绝缘材料，电介质的漏导（电导）特性、电介质的击穿特性和电介质的损耗特性是绝缘材料的三个主要特性，这里主要考虑前两个特性。实际情况也证明大多数电缆故障是绝缘层出现问题。电力电缆绝缘层损伤导致的绝缘故障可分为：泄漏性故障和闪络性故障。

(1) 泄漏性故障

绝缘材料的漏导特性：原理上，绝缘材料一般是不导电的，可视为电阻无穷大，即可视为理想不导电体，不管给其施加何种多大的电压，其中没有电流通过，从电路欧姆定律： $I_g = U / R_\infty = 0$ ，电流为零。而上述只是理论情况，实际电缆情况是，绝缘材料并不是等效为无穷大电阻，而是某一较大的电阻，视为 R_t ；绝缘材料上存在电流通过的，称为泄漏电流，用 I_g 表示。在电缆质量正常前提下，通过电缆的允许电压内， I_g 一般不大于某一个限定值 I_{max} ，假设 I_{max} 为最大允许的泄漏电流。于在当电缆护套绝缘材料的漏导特性发生变化，绝缘能力降低后，则相当于 R_t 减少，则 I_g 会增加，此时产生泄露性电流。这种绝缘材料漏导性破坏带来的故障称为泄露性故障。

(2) 闪络性故障

绝缘材料电介质击穿特性：对于绝缘材料，不管是何种材料，其电介质都有共性，在电缆正常运输电能过程中，两端的电压会在绝缘材料中通过非常小的泄漏电流，当电缆两端的电压超过某一电压值即： $U > U_n$ ，或者短时间内增加到很大时，泄漏电流 I_g 随之会突然增大，超过允许的最大泄露电流，即： $I_g > I_{max}$ ，打破了原有的绝缘结构，从导电的绝缘体变成导电的绝缘体。此时的临界点电压称为绝缘材料的电介质击穿电压 U_n ，这种现象称为电介质击穿。对于某些绝缘材料，当突变的电压回到正常范围类，其绝缘性能还能恢复，这种情况的故障称为电缆的闪络性故障。若是电压降低后不能自行恢复绝缘性能，则等效为上述的绝缘泄漏性故障。

实际应用在，判断泄露性故障可通过直流电压，欧姆表等方式；闪络性故障可通过直流电压来判断，难以用欧姆表判断出。

2.3.1.3 按故障电阻大小分类

电力电缆故障可按照故障电阻大小来划分，分为：开路故障，低阻故障和高阻故障

三种类型。电缆的开路故障是指，电缆有一相或数相导体不连续，或者在实验室检测到两端工作电压相差过大，而相与相之间的绝缘性能正常。

电缆外护套损坏破坏电缆绝缘性能，形成接地故障，按照接地电阻值大小分为：低阻故障或者高阻故障。

(1) 低阻故障

低阻故障是指，电缆导体部分是正常连续的，电缆单相或者多相与地之间的绝缘阻值相对于正常值要低很多，一般认为低于十倍电缆等效波阻抗。

(2) 高阻故障

高阻故障是指，电缆导体部分正常连续的，电缆的单相或者多相与地之间的绝缘电阻对于正常值要高很多，一般其电阻值大于十倍的电缆等效波阻抗。

电缆外护套按故障电阻大小分类如表 2.6。

表 2.6 外护套故障按故障点电阻大小分类

故障分类	故障电阻值	常见类型
低阻故障	小于 $10Z_c$	三相短路接地故障、两相短路故障、 两相短路接地故障、单相接地故障
高阻故障	大于 $10Z_c$	三相短路接地故障、两相短路故障、 两相短路接地故障、单相接地故障

注释：表中 Z_c 为电缆的等效波阻抗。

2.3.1.4 按故障表面特性分类

从电缆故障发生处的表面特性来划分，可分为外露性故障和封闭性故障。

电缆的外护套损坏导致的是电缆的外露性故障。

(1) 电缆的封闭性故障只是电缆故障处的表面及电缆外护套没有破损，而电缆内部出现了问题，也称为内部故障。内部故障在电缆做耐压试验时有时出现，由于短时间的耐压试验没有破坏电缆护套，而排除外露性故障。

(2) 外露性故障是通过人的肉眼可直接查找到，比如，可以观察电缆外护套或者绝缘层是否存在明显的破裂或者损伤；此类故障通常伴有泄露性故障。

2.3.2 电缆外护套故障树

2.3.2.1 故障树分析法

故障树分析法，简称(FTA Fault Tree Analysis)，是一种评价复杂系统可靠性与安

全性的方法。故障树分析法是建立倒树结构来体现出故障间的因果关系，通过树的简化以及定量分析获取复杂系统的脆弱环节以及故障原因。

故障树分析方法的特点如下：

(1) FTA 体现的是一种图形化的逻辑结构，结合特定系统的故障条件，FTA 用图清楚的显示出系统是如何失效的以及涉及到的各个环节。

(2) FTA 把系统的组成部分和系统的故障有机结合起来，结合图论、割集理论；FTA 可以展现出所有可能的故障状态，即故障树的全部基本割集。

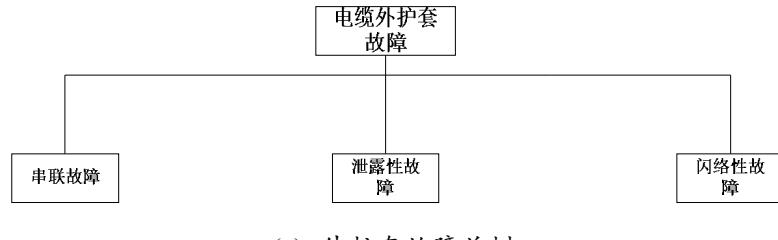
(3) FTA 是技术资料的一种形象化，构建完整的 FTA 成为一种直观的技术指导，可作为不涉及系统设计的管理和运维人员的教学指南。

(4) FTA 的构建借助计算机来实现，特别是分析复杂的系统；目前在有关 FTA 方面软件发展迅速，定性、定量化，可视化、微型化等方面进展很大。

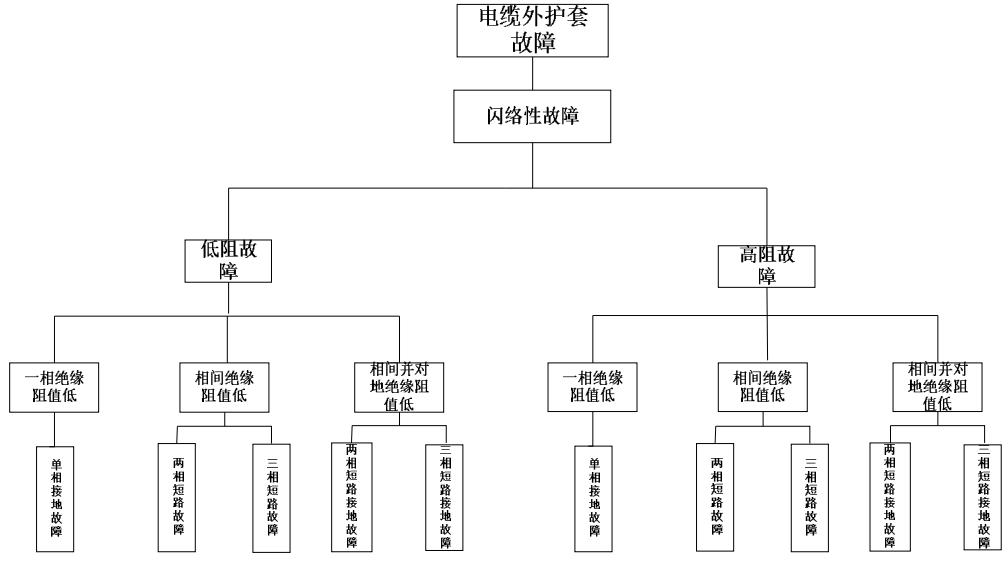
(5) FTA 的构建是基于统计数据的，因此其受数据的不确定性的影响，特别是在定量分析环节；由于 FTA 可体现系统的结构组成，其定性分析行之有效；而在定量分析中，FTA 体现分析的重要环节和灵活性；目前 FTA 从宇航、核能进入电力、电子、化工及机械等领域。

2.3.2.2 电缆外护套故障树

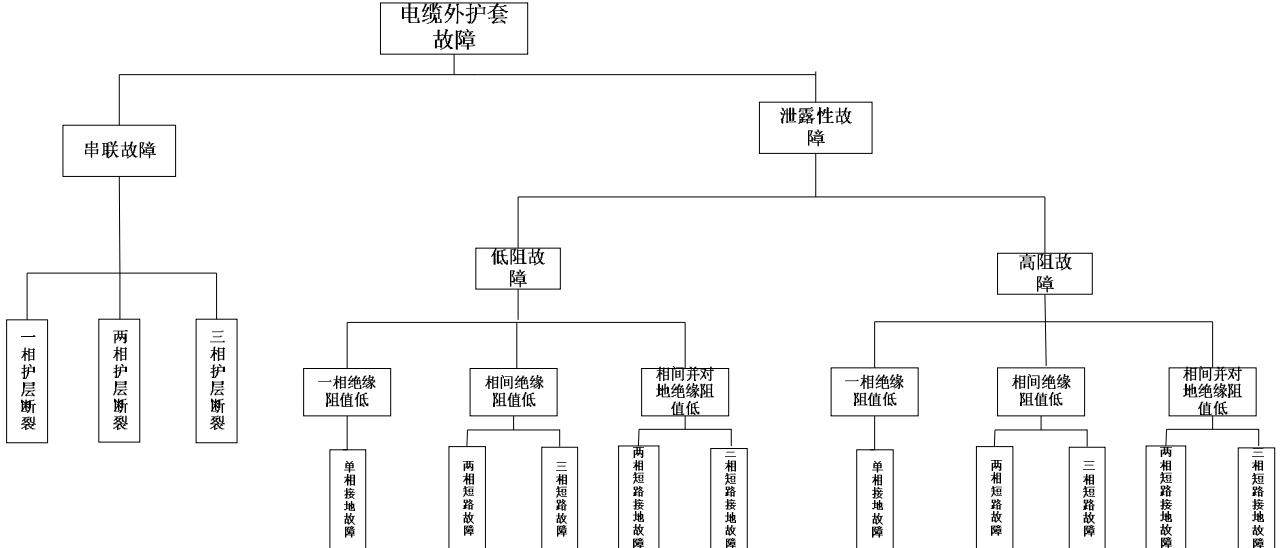
使用故障树分析法(FTA)，可构建电缆外护套故障系统，体现电缆外护套故障与各个故障之间的关联。



(a) 外护套故障总树



(b) 外护套闪络性故障树



(c) 外护套串联故障树及泄露性故障树

图 2.5 电缆外护套故障树

2.4 电缆外护套故障总结

电力电缆外护套故障大部分是由于外护套损坏所致，对电缆外护套故障分类和故障原因分析非常重要。

电缆外护套处于电缆结构最外层，从结构、材料和厚度分析其与电缆质量的关系，对聚氯乙烯和聚乙烯材料的外护套的性能做了综合比较，为选择符合实际需求的外护

套提供参考。中低压 XLPE 电力电缆外护套的破损可导致多种故障类型。根据电缆结构、组成材料、故障点的接地电阻大小、故障处表面特性来划分，通过故障树来构建外护套故障系统，体现各个故障环节与外护套故障之间的联系。

根据实际电缆的故障数据，对电缆外护套故障的原因进行分析总结，总结出故障原因存在于电缆制作、存放、运输、施工敷设、电缆运行等环节；针对主要的故障原因进行分析，并提出相应的预防和处理措施。对于防止电缆外护套故障的发生，应采取预防为主，防治结合，结合实际情况，做到从电缆的生产环节到施工质量都达到标准，并且定期对电缆进行巡视和检测；此外，需进一步研究外护套的预防及故障处理措施，提出更加具体有效的解决方法。

3 小波分析理论

3.1 小波分析理论

3.1.1 小波分析的定义

小波 (wavelet)，即小区域的波，是一种特殊的长度有限、平均值为 0 的波形。

一基本函数 $\psi(t)$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.1)$$

式中 a, b 均为常数，且 $a > 0$ 。 $\psi_{a,b}(t)$ 是基本函数 $\psi(t)$ 移位及伸缩后得到。若信号 $x(t)$ 平方可积，即 $x(t) \in L^2(R)$ ，则 $x(t)$ 的小波变换 (Wavelet Transform, WT) 定义为

$$\begin{aligned} WT_x(a,b) &= \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \\ &= \int x(t)\psi_{a,b}^*(t)dt = \langle x(t), \psi_{a,b}(t) \rangle \end{aligned} \quad (3.2)$$

式中 a, b 和 t 均是连续变量，(3.2) 式称为连续小波变换 (CWT)。一般情况，式中积分从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 。 $WT_x(a,b)$ 中， b 是时移， a 是尺度因子。 $\psi(t)$ 又称为基本小波，或母小波。 $\psi_{a,b}(t)$ 是母小波经移位和伸缩产生的一族函数，称之为小波基函数或小波基。 $WT_x(a,b)$ 称为 $x(t)$ 和一族小波基的内积^[30]。

在 (3.1) 式中， b 是 $x(t)$ 分析的时间中心。尺度因子 a 决定基本小波 $\psi(t)$ 伸缩。由 $\psi(t)$ 变成 $\psi\left(\frac{t}{a}\right)$ ，当 $a > 1$ 时，若 a 越大，则 $\psi\left(\frac{t}{a}\right)$ 时域支撑范围 (时域宽度) 较之 $\psi(t)$ 越大，反之，当 $a < 1$ 时， a 越小，则 $\psi\left(\frac{t}{a}\right)$ 的宽度越窄。 a 和 b 联合后确定了 $x(t)$ 分析的中心位置及时间宽度。

令 $x(t)$ 的傅里叶变换为 $X(\Omega)$ ， $\psi(t)$ 的傅里叶变换为 $\Psi(\Omega)$ ，根据 Parsevals 定理，(3.2) 式可重新表示为：

$$WT_x(a,b) = \frac{1}{2\pi} \langle X(\Omega), \Psi_{a,b}(\Omega) \rangle$$

$$= \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\Omega) \Psi^*(a\Omega) e^{j\Omega b} d\Omega \quad (3.3)$$

式 (3.3) 为小波变换的频域表达式。

3.1.2 小波变换的性质

根据小波变换的定义及 (3.2) 和 (3.3) 式, 若 $\psi_{a,b}(t)$ 在时域是有限支撑, 则其与 $x(t)$ 内积后 $WT_x(a,b)$ 的时域也是有限支撑, 可实现时域定位, 即 $WT_x(a,b)$ 反映 $x(t)$ 在 b 附近的性质。若 $\Psi_{a,b}(\Omega)$ 有带通性质, 即 $\Psi_{a,b}(\Omega)$ 围绕着中心频率是有限支撑的, 则 $\Psi_{a,b}(\Omega)$ 与 $X(\Omega)$ 内积后反映 $X(\Omega)$ 在中心频率处的局部性质, 可实现频率定位。

若 $\psi(t)$ 的时间中心是 t_0 , 时宽是 Δ_t , $\Psi(\Omega)$ 的频率中心是 Ω_0 , 带宽是 Δ_Ω , 则 $\psi(\frac{t}{a})$ 时间中心仍是 t_0 , 时宽变成 $a\Delta_t$, $\psi(\frac{t}{a})$ 的频谱 $a\Psi(a\Omega)$ 的频率中心为 Ω_0/a , 带宽变成 Δ_Ω/a 。而 $\psi(\frac{t}{a})$ 的时宽一帯宽之积仍是 $\Delta_t\Delta_\Omega$, 与 a 无关。

小波变换的恒 Q 性质。定义

$$Q = \Delta_\Omega / \Omega_0 = \text{带宽}/\text{中心频率} \quad (3.4)$$

为母小波 $\psi(t)$ 的品质因数, 对 $\psi(\frac{t}{a})$, 其

$$\text{带宽}/\text{中心频率} = \frac{\Delta_\Omega / a}{\Omega_0 / a} = \Delta_\Omega / \Omega_0 = Q$$

$\psi(\frac{t}{a})$ 与 $\psi(t)$ 具相同的品质因数, 与 a 无关 ($a > 0$)。

3.2 小波变换的离散化

若只对 a 离散化, 一般将 a 按幂级数的变化, 即令 $a = a_0^j, a_0 > 0, j \in \mathbb{Z}$ 。若取 $a_0 = 2$, 则

$$\psi_{j,b}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}(t-b)) \quad (3.5)$$

称为“半离散化二进小波”，则

$$\begin{aligned} WT_x(j, b) &= \langle x(t), \psi_{j,b}(t) \rangle \\ &= 2^{-j/2} \int x(t) \psi^*(2^{-j}(t-b)) dt \end{aligned} \quad (3.6)$$

称为二进小波变换。

若同时对 a 和 b 离散化，则令 $a = a_0^j, j \in Z$ ，若 $j = 0$ ，则 $\psi_{j,b}(t) = \psi(t-b)$ 。对 b 离

散化的方法是对 b 均匀抽样，如令 $b = kb_0$ ， b_0 的选择满足可由 $WT_x(j, k)$ 恢复出 $x(t)$ 。

当尺度 a 取 a_0, a_0^1, a_0^2, \dots 时， b 的抽样间隔取 $a_0 b_0, a_0^1 b_0, a_0^2 b_0, \dots$ ，则 a 和 b 离散化后的结

果是：

$$\begin{aligned} \psi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \psi[a_0^{-j}(t - ka_0^j b_0)] \\ &= a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - kb_0) \quad j, k \in Z \end{aligned} \quad (3.7)$$

信号 $x(t)$ 的连续续小波变换可变成 a 和 b 都离散化的小波变换，即

$$WT_x(j, k) = \int x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt \quad (3.8)$$

此式称为“离散小波变换（DWT）”。其中 t 仍是连续变量^[30]。

3.3 多分辨率分析及 Mallat 算法

多分辨率分析的定义

根据 Mallat 的多分辨率分析的定义^[31]：

设 $\{V_j\}_{j \in Z}$ 是 $L^2(R)$ 空间中的一系列闭合子空间，若 $\{V_j\}, j \in Z$ 是一个分辨率

近似，则满足如下六个性质：

(1) $\forall (j, k) \in Z^2$ ，若 $x(t) \in V_j$ 则 $x(t - 2^j k) \in V_j$

(2) $\forall j \in Z$ ， $V_j \supseteq V_{j+1}$ ，即 $V_0 \supseteq V_1 \supseteq V_2 \supseteq \dots \supseteq V_{j+1} \supseteq \dots$

(3) $\forall j \in Z$ ，若 $x(t) \in V_j$ ，则 $x(\frac{t}{2}) \in V_{j+1}$

(4) $\lim_{j \rightarrow \infty} V_j = \bigcap_{j=-\infty}^{\infty} V_j = \{0\}$

(5) $\lim_{j \rightarrow \infty} V_j = \text{Closure}(\bigcup_{j=-\infty}^{\infty} V_j) = L^2(R)$

(6) 存在一个基本函数 $\theta(t)$, 使得 $\{\theta(t-k)\}$, $k \in Z$ 是 V_0 中的 Riesz 基。

$\phi_{j,k}(t)$ 是 V_j 中的正交归一基, $\psi_{j,k}(t)$ 是 W_j 中的正交归一基, 且 $V_j \perp W_j$, $V_{j-1} = V_j \oplus W_j$ 。

相邻尺度 (如 j 和 $j-1$) 下的尺度函数和尺度函数之间、尺度函数和小波函数之间存在一定联系。

$$\phi\left(\frac{t}{2^j}\right) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_0(k) \phi\left(\frac{t}{2^{j-1}} - k\right) \quad (3.9)$$

$h_0(k)$ 是加权系数; 同理, W_j 包含 V_{j-1} 中, W_j 中的 $\psi_{j,0}(t)$ 可表为 V_{j-1} 中正交基 $\phi_{j-1,k}(t)$ 的线性组合, 即

$$\psi\left(\frac{t}{2^j}\right) = \sqrt{2} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h_1(k) \phi\left(\frac{t}{2^{j-1}} - k\right) \quad (3.10)$$

$h_1(k)$ 是加权系数, (3.9) 和 (3.10) 两式称为“二尺度差分方程”^[32-33]。

Mallat 算法

Mallat 算法建立在多分辨率分析的基础上, 如下两个定理给出了通过滤波器组实现信号的小波变换及反变换。

定理一: 令 $a_j(k)$, $d_j(k)$ 是多分辨率分析中的离散逼近系数, $h_0(k)$, $h_1(k)$ 是满足二尺度差分方程的两个滤波器, 则 $a_j(k)$, $d_j(k)$ 存在如下递推关系^[31]:

$$a_{j+1}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_j(n) h_0(n-2k) = a_j(k) * \bar{h}_0(2k) \quad (3.11)$$

$$d_{j+1}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_j(n) h_1(n-2k) = a_j(k) * \bar{h}_1(2k) \quad (3.12)$$

式中 $\bar{h}(k) = h(-k)$ 。

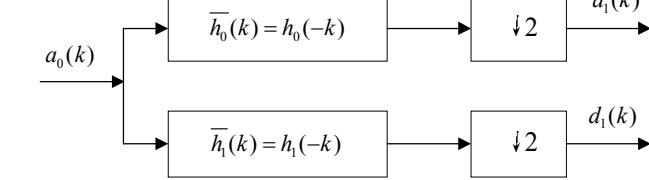
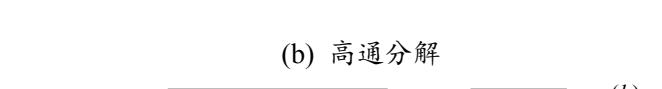
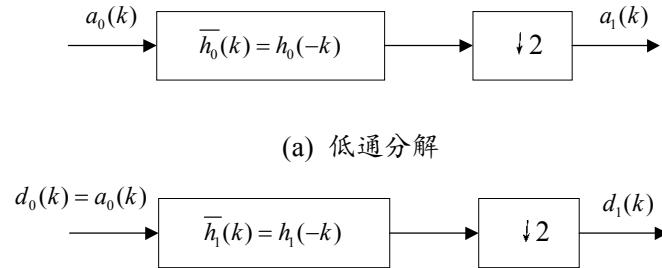


图 3.1 (3.11) (3.12) 式的网络结构

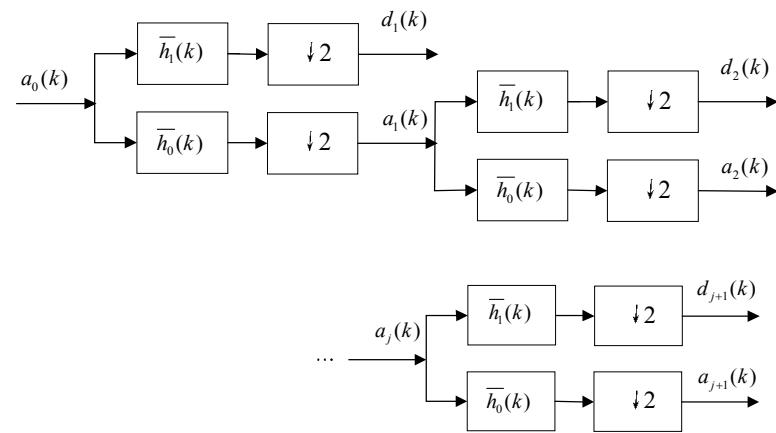


图 3.2 基于滤波器组实现多分辨率分解

定理二：若 $a_{j+1}(k)$, $d_{j+1}(k)$ 按(10.6.1)式得到，则 $a_j(k)$ 可由下式重建：

$$a_j(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{j+1}(k)h_0(k-2n) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{j+1}(k)h_1(k-2n) \quad (3.13)$$

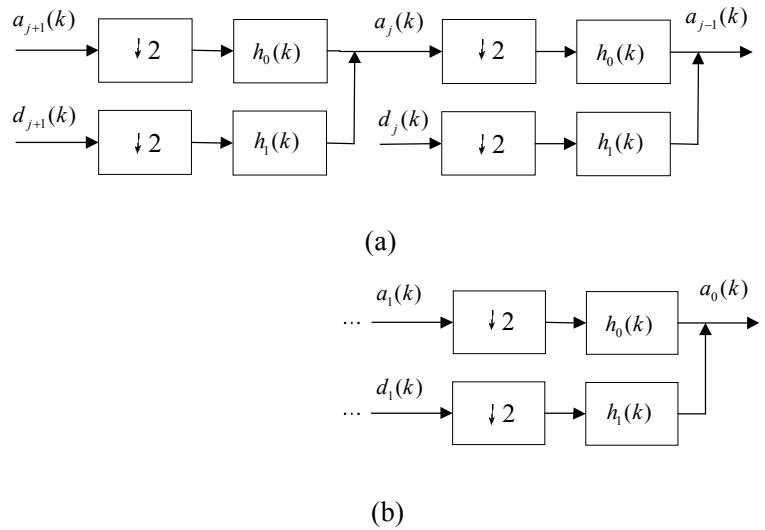


图 3.3 小波逆变换, (a)第 j 级, (b) 由 j 至 0 的过程

3.4 信号奇异性检测及模极大值

Lipschitz 指数

定义: 给定信号 $x(t)$, 若存在常数 $K > 0$ 及 $n = \alpha$ 阶的多项式 $p_{t_0}(t)$, 使得

$$|x(t) - p_{t_0}(t)| \leq K |t - t_0|^\alpha, \forall t \quad (3.14)$$

称 $x(t)$ 在 t_0 处具有 Lipschitz 指数 α 。Lipschitz 指数又称李氏指数。

由 Lipschitz 指数的定义可得出, 当 α 越大, 函数越光滑, 奇异性越小; 反之, α 越小, 则奇异性越大, 表明函数在该点处变换越剧烈。

设 $x(t) \in L^2(R)$, 且 $x(t)$ 在 t_0 处具有 Lipschitz 指数 $\alpha \leq n, n \in Z^+$ 是小波 $\psi(t)$ 的消失矩的阶次, 则存在常数 A 使得

$$|WT_x(a, b)| \leq A a^{\alpha+0.5} \left(1 + \left|\frac{t - t_0}{a}\right|^\alpha\right), \forall a \in R^+, t \in R \quad (3.15)$$

成立。

如果

$$\frac{\partial WT_x(a_0, t_0)}{\partial t} = 0 \quad (3.16)$$

那么 (a_0, t_0) 应为 $WT_x(a, t)$ 的局部极值点; 当 t 处在 t_0 的左邻域或者右邻域时, 如果都满足 $|WT_x(a_0, t)| < |WT_x(a_0, t_0)|$, 那么 (a_0, t_0) 应为 $WT_x(a, t)$ 的模极大值点, 而 $|WT_x(a_0, t_0)|$ 是相应的模极大值。

在二进制小波变换中，令 $a = 2^j$ ，则有

$$lb|WT_x(a,b)| \leq lbA + j(\alpha + 0.5) \quad (3.17)$$

显然，对于信号 $x(t)$ ，有如下结论成立：

- (1) 若 t_0 处的李氏指数 $\alpha > 0$ ，则小波变换的模极大值随尺度 j 的增大而增大。
- (2) 若 t_0 处的李氏指数 $\alpha < 0$ ，则小波变换的模极大值随尺度 j 的增大而减小。
- (3) 若 t_0 处的李氏指数 $\alpha = 0$ ，则小波变换的模极大值不随尺度 j 的变化而变化。

定理：设 $\psi(t) = (-1)^n \theta^{(n)}(t)$ ， $\theta(t)$ 为一高斯函数，对任意的 $x(t) \in L^2(t_a, t_b)$ ， $x(t)$ 的小波变换的模极大值点属于一条连通的曲线，即随着尺度的减小，模极大值线不会中断^[31]。

该定理指出可以准确的找到信号奇异点的位置。说明了可以找到模极大值的点。

3.5 B 样条小波及其构造

3.5.1 小波基的选取

小波基是小波变换的核心，电力系统暂态信号分析及故障定位中，不仅需要对小波基的时频特性、相位特征研究；而且，需要结合电力系统的暂态信号的特点，寻找或构造合适的小波基，改善暂态信号特征提取精度，电力系统暂态信号分析的小波基的选择原则的研究具有理论和实用价值^[35-39]。

在选择小波基需要从对称性、正交性、紧支性、衰减性、小波基的时频窗及其面积、消失矩阶数方面来考虑，同时还要考虑到分解尺度，以及带宽和中心频率。

(1) 对称性

若尺度函数和小波函数是对称或反对称，则可构造紧支的正则小波基，而具有线性相位。根据 Daubechies 证明，除了 Harr 小波基，不存在对称的紧支正交小波基。构建双正交小波基，则可合成具有对称或反对称的紧支撑小波基。对称滤波器组优点：一方面图形的对称性量化可减少视觉误差，另一方面对称滤波器组具有线性相位^[35-36]。

(2) 正交性

正交镜像对称滤波器组(QMF)是一种小波滤波器设计方法。QMF 主要有两类：正交与双正交。正交滤波器是指低通分析滤波器和高通分析滤波器正交；低通重建滤波器和高通重建滤波器正交。双正交是指低通分析滤波器和高通重建滤波器正交，低通重建滤波器和高通分析滤波器正交。

紧支集的小波一般不具有对称性，除 Harr 小波外，一切具有紧支集的规范正交小波基以及与之相关的尺度函数都不能以实轴上的任何点为对称轴或反对称轴。因此，

降低对正交性的要求来保持线形相位而采用双正交小波基。而大部分正交小波基是无限支集的，这在计算上是不可行。因此希望滤波器是有限支集的且是对称或反对称的。对称滤波器结构具有运算简单，便于边界处理的特点^[37-39]。

(3) 正则性

正则性又称规则性 (regularity) 是用来描述函数局部特征的度量，描述信号某一点或者某一区间的光滑性和能量集中度，函数的正则性的定义：设 $0 < \alpha < 1$ ，若对于任意 $t, \beta \in R$ 有

$$|\psi(t + \beta) - \psi(t)| < c|\beta|^\alpha \quad (3.18)$$

则称 $\psi(t)$ 的正则性阶数为 α ，其中 c 是一个与 t, β 无关的常数。若 $\psi(t)$ 的 N 阶导数满足上式，且 $r = N + \alpha$ ，则称 $\psi(t)$ 的正则性阶数为 r 。显然 $r > N$ (N 为某一正整数)，则 $\psi(t)$ 具有 N 阶连续导数，正则性阶数越大，则 $\psi(t)$ 越光滑，其频域的能量越集中，且 $H(\omega), G(\omega)$ 时域形式 h_n, g_n 正则性越强，数据压缩的结果越好^[35-39]。

大部分正交小波基正则性高则更消失矩越高。小波基正则性与支撑集大小有关，支撑越大，正则性越好。此外，一般小波基正则性越大最小化量化误差越小。

(4) 紧支性与衰减性

若小波 $\psi(t)$ 有紧支集，则称它具有紧支性；如果当 $t \rightarrow \infty$ 时，它快速衰减或具有指数规律衰减，称小波 $\psi(t)$ 具有衰减性（急衰或急降）。紧支性与衰减性是小波的重要性质，紧支宽度越窄或衰减越快，小波的局部化特性越好；紧支小波不需人为的截断，应用精度高；一个函数不可能在时域和频域都是紧支的，最多有一个是紧支，另一个是急衰。一般要求小波基是紧支撑集（时域上），其在数字信号的离散小波分解中可提供系数有限的、更实际的 FIR 滤波器；而非紧支撑小波在实际运算时必须截短^[35-39]。

(5) 消失矩

若小波函数 $\psi(t)$ 的 k 阶矩的傅里叶变换在 $\omega = 0$ 处有 n 阶重零点，则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} t^k \psi(t) dt = 0, k = 0, 1, 2, \dots, n-1 \quad (3.19)$$

称小波函数 $\psi(t)$ 的消失矩(vanishing moments)为 n ，当 $k = 0$ 时有 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ ，这

表明 $\psi(t)$ 是一个迅速衰减且平均值为 0 的波。

消失矩的大小决定了小波逼近光滑函数的收敛率。当图象光滑时，消失矩越大，导致越小的小波系数。为了能够有效地检测出奇异点，所选的小波基必须具有足够高的消失矩^[35-39]。

此外，小波基的时频窗面积的值愈小，小波的时频域局部化能力愈强，即其聚焦

能力愈强；小波具有自适应分辨分析性能，其时频窗面积不变条件下，可改变时窗和频窗的宽度取得较强的局部化能力。

根据文献[35]，相同尺度条件下，一次 Gauss 小波(反对称小波)和二次 B 样条小波(对称小波)对突变点的定位优于 Db4 小波，这是由于 Db4 不具有线性相位。对称小波或反对称小波具有线性相位，这可保证对暂态定位的准确性。边缘定位应选反对称小波，峰值定位应选对称小波^[35]。

根据文献[36]，B 样条小波是具有对称性及双正交性^[36]。

根据文献[37]，双正交小波基，可以合成具有对称或反对称的紧支撑小波基。对称滤波器组具有如下优点：首先，与非对称量化的误差相比较，人类的视觉对于对称量化的误差不敏感；其次，对称滤波器组具有线性相位，重构图像边缘部分失真较小，有利于获得高质量的重构图像^[37]。

根据文献[38]，在所有多项式样条函数中三次 B 样小波具有最小支撑，有“近似最小”的时频窗。三次 B 样小波在具有噪声情况下检测信号的奇异性是渐近最优的，也适用于电力系统故障分析^[38]。

结合前人的研究以及在后面的验证，根据护层暂态行波特点，三芯电缆的相邻电缆的影响较大，对波头时刻的提取需要满足对称性，正交性（双正交性），紧支撑性，较大的消失矩，同时具有小的时频窗，本文选择 B 样条四阶小波（bior4.12）做小波基。

3.5.2 小波分析阶次的选择

小波分析中选择正确的分析尺度（连续小波变换）或者阶次/层次（离散小波变换）非常重要；对于 Mallat 算法实现的小波分解，尺度、层次的选取在保证小波变换有意义的前提下进行，主要从其频段划分。

由采样定律，小波基的最高频率应小于信号采样频率的 $1/2$ ，设 k_c 为小波基的采样频率， k_0 为小波基的中心频率， Δk 为小波基的频宽；则尺度 a 取得的最小值应满足：

$$\begin{cases} \frac{2(k_0 + \Delta k)}{a} \leq k_c \\ a \geq \frac{2(k_0 + \Delta k)}{k_c} \end{cases} \quad (3.20)$$

此外，小波采样点应小于信号采样点数，设小波基的采样点数为 N_J ，信号采样点数为 N_f ，则

$$aN_J < N_f$$

$$\text{即 } a < \frac{N_f}{N_J} \quad (3.21)$$

根据 Lipschitz 指数与模极大值之间联系，李氏指数小于零时，尺度越小，小波变换的模极大值越小；李氏指数大于零时，尺度越大，小波变化的模极大值越大。研究发现，原信号的小波变换尺度或者层次越大或者越小，则小波变换系数的模极大值和小波的突变点的对应的误差越大。若尺度或者层次过大，利于过滤噪声，模极大值点较稳定，然对突变点的定位误差大；若尺度或者层次过小，噪声干扰较大，对突变点定位干扰较大，取得的模极大值点较多；尺度或层次选择不合理，则小波变换带来大的误差。

因此，在用小波变换模极大值法判断信号突变点时，需要把多个尺度或层次结合起来综合比较研究^[39]。

结合信噪比和均方差最小原则，模极大值和分解尺度或层次关系以及行波波速的变化，经多层次比较后，本文选择 B 样条四阶小波三层分解，即选取 bior4.12 离散小波变换的第三层分解的高频系数。

下面给出 bior4.12 小波基的构造理论和构造方法，编程实现见附录。

3.5.3 B 样条小波的构造

由于鲜有资料给出B样条四阶小波的构造方法和滤波器系数（三次B样条小波），同时MATLAB自带程序中也没给出，这里给出构造的理论和程序，程序及滤波器系数的获取见附录^[40]。

样条函数具有分段光滑且在连结点处有一定光滑性，其中基数 B 样条(Cardinal B-Spline)函数具有最小的支撑范围且容易在计算机上实现^[30]。

m 次 B 样条函数 $N_m(t)$ 是一阶 B 样条函数 $N_1(t)$ 自身作 $m-1$ 次卷积所得，而 $N_1(t)$ 是 Haar 小波的尺度函数，即

$$N_1(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3.22)$$

所以

$$N_2(t) = N_1(t) * N_1(t) = \begin{cases} t & 0 \leq t < 1 \\ 2-t & 1 \leq t < 2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$N_3(t) = N_2(t) * N_1(t) = \begin{cases} \frac{t^2}{2} & 0 \leq t < 1 \\ \frac{3}{4} - (t - 3/2)^2 & 1 \leq t < 2 \\ \frac{1}{2}(t - 3)^2 & 2 \leq t < 3 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3.24)$$

依次类推，则

$$\begin{aligned} N_m(t) &= N_{m-1}(t) * N_1(t) = N_{m-2}(t) * N_1(t) * N_1(t) \\ &= N_1(t) * N_1(t) * \Lambda * N_1(t) \end{aligned} \quad (3.25)$$

令尺度函数 $\hat{\phi}(t)$ 等于 $N_m(t)$ 。因 $\hat{\phi}(t)$ 以 $t = 0$ 对称，令

$$m = 1 \quad \hat{\phi}(t) = N_1(t) \quad (3.26)$$

$$m = 2 \quad \hat{\phi}(t) = N_2(t+1) = \begin{cases} 1 - |t| & |t| \leq 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3.27)$$

$$m = 3 \quad \hat{\phi}(t) = N_3(t+1) = \begin{cases} 0.5(t+1)^2 & -1 \leq t < 0 \\ 3/4 - (t - \frac{1}{2})^2 & 0 \leq t < 1 \\ 1/2 - (t - 2)^2 & 1 \leq t < 2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3.28)$$

$m = 1, 2, 3$ 时的 $\hat{\phi}(t)$ 如图(3.4)所示。由图看出， $N_1(t)$ 是不连续的， $N_2(t)$ 连续但一阶导数不连续，而 $N_3(t)$ 的一阶导数是连续的，曲线已比较光滑。当 m 增大时， $N_m(t)$ 会变得更光滑。

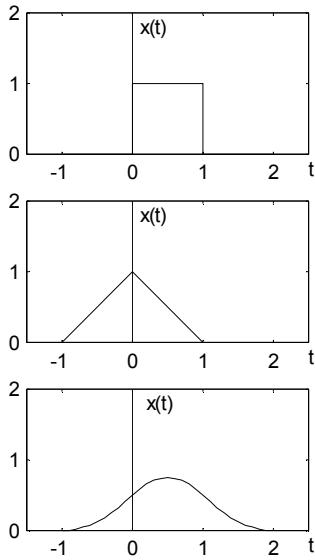


图 3.4 由 $N_m(t+1)$ 得到的尺度函数

易证(3.25)式所决定的 $N_m(t)$ 的傅里叶变换是

$$\left(\frac{1-e^{-j\omega}}{j\omega}\right)^m = e^{-j\omega m/2} \left[\frac{\sin \omega/2}{\omega/2}\right]^m \quad (3.29)$$

移位后 $\hat{\phi}(t) = N_m(t+1)$, 其傅里叶变换为

$$\hat{\Phi}(\omega) = e^{-j\varepsilon\omega/2} \left[\frac{\sin \omega/2}{\omega/2}\right]^m \quad (3.30)$$

如果 m 为偶数, 式中 $\varepsilon = 0$, 若 m 为奇数, 则式中 $\varepsilon = 1$ 。

$$\hat{\phi}(t) = N_2(t+1) = \frac{1}{2} \hat{\phi}(2t+1) + \hat{\phi}(2t) + \frac{1}{2} \hat{\phi}(2t-1) \quad (3.31)$$

满足二尺度差分方程。可得出

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} |\hat{\Phi}(\omega + 2\pi l)|^2 = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cos^2 \frac{\omega}{2} \quad (3.32)$$

是有界的。

当 $m = 3$ 时,

$$\hat{\phi}(t) = N_3(t+1) = \frac{1}{4} \hat{\phi}(2t+1) + \frac{3}{4} \hat{\phi}(2t) + \frac{3}{4} \hat{\phi}(2t-1) + \frac{1}{4} \hat{\phi}(2t-2) \quad (3.33)$$

满足二尺度差分方程, 同理可得

$$\sum_{l=-\infty}^{\infty} |\hat{\Phi}(\omega + 2\pi l)|^2 = \frac{8}{15} + \frac{13}{30} \cos \omega + \frac{1}{30} \cos^2 \omega \quad (3.34)$$

因此，在 $m=1,2,3$ 时不同的 $\hat{\phi}(t)$ 可构成一个分辨率分析。而 $\hat{\phi}(t)$ 的整数移位之间不构成正交基。可将 $\hat{\phi}(t)$ “正交化”，即令

$$\hat{\Phi}^\perp(\omega) = \frac{\hat{\Phi}(\omega)}{\left[\sum_{k=-\infty}^{\infty} |\hat{\Phi}(\omega + 2\pi k)|^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (3.35)$$

对 $\hat{\Phi}^\perp(\omega)$ 作反变换，得尺度函数 $\hat{\phi}(t)$ ，则 $\hat{\phi}(t-n)$ ， $n \in \mathbb{Z}$ 可形成一族正交基。

双正交的情况下，对 $\hat{\phi}(t)$ 作(3.35)式的正交化， $N_m(t)$ 移位后的 $\hat{\phi}(t)$ 作为尺度函数。

可得到了在双正交条件下样条小波分析滤波器 $H_0(z)$ 和重建滤波器 $\hat{H}_0(z)$ 的系数，即

$$\hat{H}_0(\omega) = \sqrt{2} \left(\cos \frac{\omega}{2} \right)^{\hat{N}}, \quad \hat{N} = 2\hat{l} \quad (3.36)$$

$$\hat{H}_0(\omega) = \sqrt{2} e^{-j\omega/2} \left(\cos \frac{\omega}{2} \right)^{\hat{N}}, \quad \hat{N} = 2\hat{l} + 1 \quad (3.37)$$

$$H_0(\omega) = \sqrt{2} \left(\cos \frac{\omega}{2} \right)^N \sum_{m=0}^{l+\hat{l}-1} \binom{l+\hat{l}-1+m}{m} \left(\sin^2 \frac{\omega}{2} \right)^m, \quad N = 2l \quad (3.38)$$

$$H_0(\omega) = \sqrt{2} e^{-j\omega/2} \left(\cos \frac{\omega}{2} \right)^N \sum_{m=0}^{l+\hat{l}} \binom{l+\hat{l}+m}{m} \left(\sin^2 \frac{\omega}{2} \right)^m, \quad N = 2l + 1 \quad (3.39)$$

下面给出不同 N 和 \hat{N} 组合情况下 $H_0(z)$ 、 $\hat{H}_0(z)$ 、 $\phi(t)$ 、 $\hat{\phi}(t)$ 、 $\psi(t)$ 和 $\hat{\psi}(t)$ 的系数。

情况 1. 令 $\hat{N}=1$ ，则必有 $\hat{l}=0$ ，由(3.37)式，有

$$H_0(\omega) = \sqrt{2} e^{-j\omega/2} \left[\frac{e^{j\omega/2} + e^{-j\omega/2}}{2} \right] = \frac{\sqrt{2}}{2} [1 + e^{-j\omega}]$$

所以， $\hat{H}_0(z) = \frac{\sqrt{2}}{2} (1 + z^{-1})$

即

$$\hat{h}_0(n) = \{0.707, 0.707\}$$

令 $N=1$ ，则必有 $l=0$ ，由(3.39)式，有

$$\begin{aligned}
H_0(\omega) &= \sqrt{2}e^{-j\omega/2} \left[\frac{e^{j\omega/2} + e^{-j\omega/2}}{2} \right] \sum_{m=0}^0 \binom{m}{m} \left(\frac{1 - \cos \omega}{2} \right)^m \\
&= \frac{\sqrt{2}}{2} (1 + e^{j\omega})
\end{aligned}$$

所以 $H_0(z) = \frac{\sqrt{2}}{2} (1 + z^{-1})$

即 $h_0(n) = \{0.707, 0.707\}$

在 $\hat{N}=1$ 的情况下，我们再令 $N=3$ ，则必有 $l=1$ ，由(3.39)式，有

$$\begin{aligned}
H_0(\omega) &= \sqrt{2}e^{-j\omega/2} \left[\frac{e^{j\omega/2} + e^{-j\omega/2}}{2} \right]^3 \sum_{m=0}^1 \binom{1+m}{m} \left(\frac{1 - \cos m}{2} \right)^m \\
&= \frac{\sqrt{2}}{8} [e^{j\omega} + 3 + e^{-j\omega} + e^{-j2\omega}] \cdot \left[\frac{4 - e^{j\omega} - e^{-j\omega}}{2} \right]
\end{aligned}$$

所以 $H_0(z) = \sqrt{2} \left[-\frac{1}{16}z^2 + \frac{1}{16}z + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}z^{-1} + \frac{1}{16}z^{-2} - \frac{1}{16}z^{-3} \right]$

依此类推，可得到 $\hat{N}=1, N=1, 3, 5; \hat{N}=2, N=2, 4, 6, 8; \hat{N}=3, N=1,$

3, 5, 7, 9 的 $\hat{H}_0(z)$, $H_0(z)$ 的系数；部分公式结果如下表 3.1。

表 3.1 $\hat{H}_0(z)/\sqrt{2}$, $H_0(z)/\sqrt{2}$ 的系数

\hat{N}	$\hat{H}_0(z)/\sqrt{2}$	N	$H_0(z)/\sqrt{2}$
1	$\frac{1}{2}(1+z^{-1})$	1	$\frac{1}{2}(1+z^{-1})$
		3	$-\frac{1}{16}z^2 + \frac{1}{16}z + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}z^{-1} + \frac{1}{16}z^{-2} - \frac{1}{16}z^{-3}$
		5	$\frac{3}{256}z^4 - \frac{3}{256}z^3 - \frac{11}{128}z^2 + \frac{11}{128}z + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}z^{-1} + \frac{11}{128}z^{-2} - \frac{11}{128}z^{-3} - \frac{3}{256}z^{-4} + \frac{3}{256}z^{-5}$
2	$\frac{1}{4}(z+2+z^{-1})$	2	$-\frac{1}{8}z^2 + \frac{1}{4}z + \frac{3}{4} + \frac{1}{4}z^{-1} - \frac{1}{8}z^{-2}$
		4	$\frac{3}{128}z^4 - \frac{3}{64}z^3 - \frac{1}{8}z^2 + \frac{19}{64}z + \frac{45}{64} + \frac{19}{64}z^{-1} - \frac{1}{8}z^{-2} - \frac{3}{64}z^{-3} + \frac{3}{128}z^{-4}$
		1	$-\frac{1}{4}z + \frac{3}{4} + \frac{3}{4}z^{-1} - \frac{1}{4}z^{-2}$
3	$\frac{1}{8}(z+3+3z^{-1}+z^{-2})$	3	$\frac{3}{64}z^3 - \frac{9}{64}z^2 - \frac{7}{64}z + \frac{45}{64} + \frac{45}{64}z^{-1} - \frac{7}{64}z^{-2} - \frac{9}{64}z^{-3} + \frac{3}{64}z^{-4}$
		3	

结合上述双正交 B 样条小波构造理论, 可实现 B 样条四阶小波构造, 其构造步骤如下:

- (1) 根据双正交 B 样条小波理论, 确定 B 样条小波的阶次 \hat{N} N , 根据公式(3.36) : (3.39), MATLAB 编程实现小波分析滤波器 $H_0(z)$ 和重建滤波器 $\hat{H}_0(z)$ 的系数。需要注意的是, 在编程实现中, 需要将上文中的 $z = e^{j\omega}$ 换成 $z = e^{-j\omega}$ [30,40]。
- (2) 根据 (1) 中得到的分析滤波器 $H_0(z)$ 和重建滤波器 $\hat{H}_0(z)$ 的系数, 使用 MATLAB 的自定义小波基函数的添加功能, 根据不同类型的小波添加方法, 编程实现 在 MATLAB 中添加新的小波基。
- (3) 使用 MATLAB 可编程查看新添加的小波基的分解低通滤波器、分解高通滤波器、重构低通滤波器和重构高通滤波器四个滤波器系数, 可编程显示新添加的小波基 小波函数和尺度函数图形, 或者在小波工具箱 Wavelet Display 功能查看小波基图形。
- (4) 验证滤波器系数正确性, 例如在附录滤波器系数的程序中取 $N=3$, $bior_N=1$,

即相当 bior3.1；即可得到与理论值一致的滤波系数，同时也与 MATLAB 自带的 B 样条小波（bior3.1）滤波器系数及小波图形一致。

在后续的暂态行波的小波分析中，对比研究了 Harr, Db4, 二次 B 样条，三次 B 样条小波，四种小波的小波分析以及故障信号的模极大值比较，根据对比结果，选择 $\hat{N}=4$, $N=12$ 的 B 样条四阶小波函数做小波基效果最佳，即 bior4.12，在添加到小波工具及程序中命名为 biop4，如图 3.5，其滤波器系数和构造程序见附录。

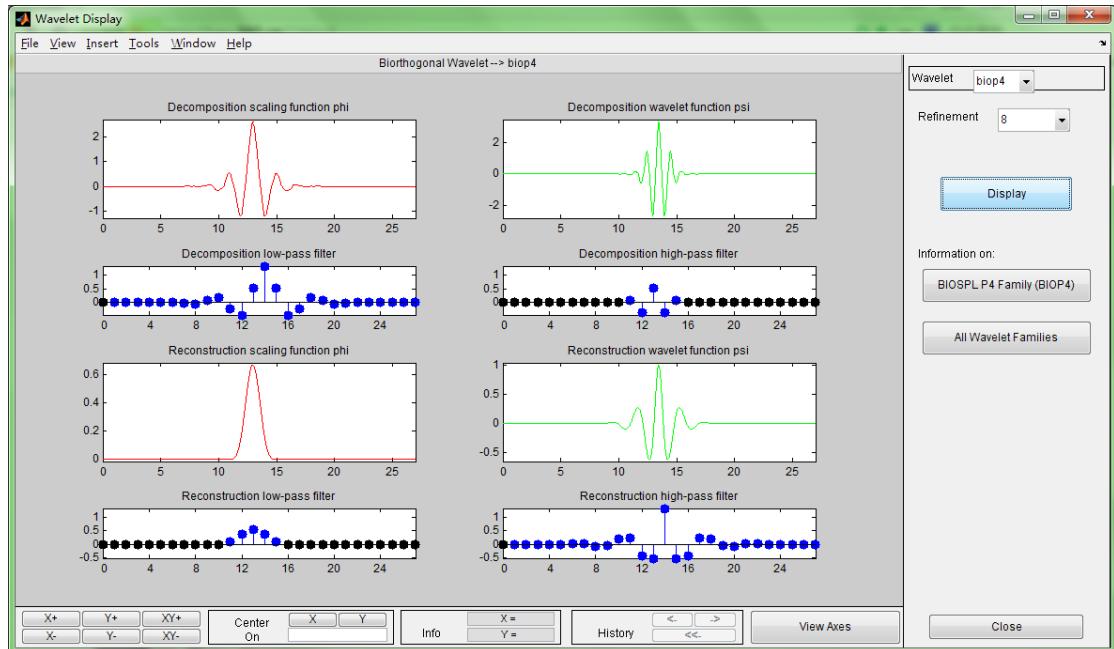


图 3.5 bior4.12 小波在 MATLAB R2008a 显示

4 行波测距理论

4.1 行波基本理论

4.1.1 行波的基本概念

4.1.1.1 行波的产生

当输电线路上的某点(如图 4.1 中 F 点)处发生故障时, 在故障点电压发生突变, 在线路上将出现电弧暂态行波过程, 故障暂态行波过程可利用叠加原理来分析。根据叠加原理, 在故障瞬间, 等效于在故障点突然附加一个与故障前电压 ($+U_F$) 大小相等、方向相反的虚拟电源 ($-U_F$), 如图 4.1 所示。附加电压源就是暂态行波的波源, 暂态行波初始以接近光速向两个相反的方向传播, 并在故障点和系统中的其它波阻抗不连续点之间来回反射和折射, 最终进入稳态^[41-43]。

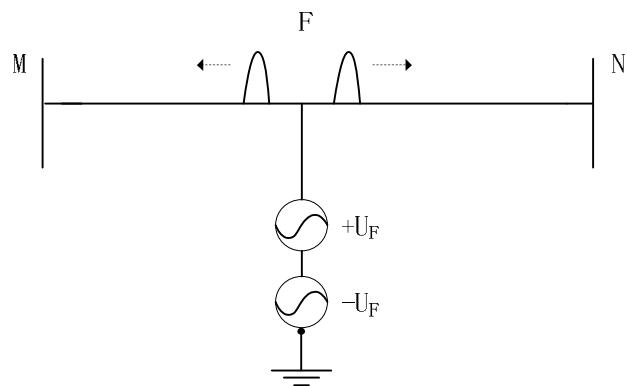


图 4.1 故障行波叠加原理示意图

行波分量包括稳态和暂态两种行波分量。稳态行波分量是线路对系统电源或各种扰动的稳态响应行波分量, 且存于线路受扰及受扰以后的全过程, 是单一频率的正弦波; 暂态行波分量是线路对系统电源或各种扰动的暂态响应中的行波分量, 一般含有从低频到高频的多种频率分量, 且在系统达到稳态时衰减为零。故障产生的行波为暂态行波分量, 故障暂态行波反映故障的暂态行为特性, 这些特性是实现行波保护及故障测距的基础。

4.1.2 行波的传播特性

4.1.2.1 波速度与波阻抗

行波从线路一端传到另一端所经过的线路长度与所需时间之比称为波速度^[50]。经分析，线路中行波的波速度可表示为：

$$V = 1/\sqrt{LC} = S\sqrt{\mu\epsilon} \quad (4.1)$$

其中： $S=3.8\times10^8$ 米/秒，是光的传播速度； μ 为行波传播介质的磁导率； ϵ 为行波传播介质的介电常数， L, C 分别为线路单位长度对地电感和对地电容。

无损输电线路的波阻抗可表示为：

$$Z = \sqrt{L/C} \quad (4.2)$$

其中， L, C 分别为线路对地电感、电容；此外，波阻抗与输电线路介质材料、介电系数、导磁系数、芯线的截面积和芯线与外皮之间的距离有关，而与线路长度无关。架空线路的波阻抗值一般在300:500欧姆左右；电缆线路的波阻抗一般在10:100欧姆左右。行波信号在不同输电线路的传播速度不一样^[43-46]。

线路中的电压波在向前运动时，对分布电容不断充电产生伴随电压波向前运动的电流波，用波阻抗 Z 来描述电压、电流波之间的关系。对于正向电压波 U^+ 与电流波 I^+ 之间，满足关系：

$$Z = \frac{U^+}{I^+} \quad (4.3)$$

而对于反向电压波 U^- 与电流波 I^- 之间，则有：

$$-Z = \frac{U^-}{I^-} \quad (4.4)$$

由式(4.3)与(4.4)看出，正向电压、电流波极性相同，反向电压、电流波极性相反。

规定由母线指向线路的方向为行波运动及电流的正方向，正向电流行波由母线指向线路，为正极性；反向电流行波为负极性。波阻抗是线路中一对正向或反向电压、电流波之间的幅值之比，而不是任一点电压、电流瞬间幅值之比。

4.1.2.2 行波的折射与反射

(1) 行波的折射与反射过程

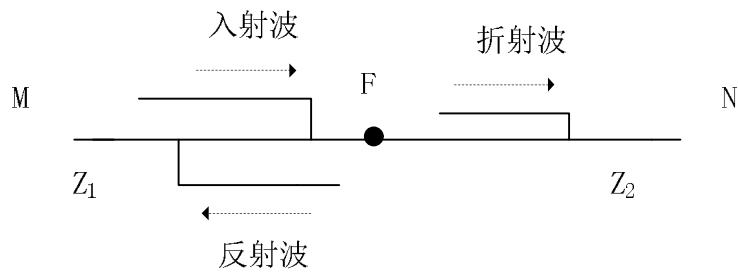


图 4.2 行波的折射和反射示意图

图 4.2 中, F 点为波阻抗不连续点。当线路 MF 中入射波到达 F 点时, 将会在 F 点发生折射和反射。

(2) 行波的折射系数与反射系数

如图 4.2 中, 线路 MF 的波阻抗为 Z_1 , 线路 FN 的波阻抗为 Z_2 , 同一线路上, 根据波阻抗不连续点的左右两侧电流、电压相等, 可得到左右两边行波的折射、反射系数。

电压行波的折射系数 α_u , 反射系数为 β_u :

$$\begin{cases} \alpha_u = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \\ \beta_u = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \end{cases} \quad (4.5)$$

电流行波的折射系数 α_i , 反射系数为 β_i :

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \\ \beta_i = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \end{cases} \quad (4.6)$$

由 (4.5) 和 (4.6), 折射系数恒为正, 折射波与入射波的极性相同; 反射波的极性不恒为正(负)。根据波阻抗不连续点的两端的波阻抗大小可判断行波的反射波和折射波的极性:

①当行波由波阻抗较大线路向波阻抗较小线路传播时, 电压行波的反射波与入射波极性相反, 电流行波反射波与入射波极性相同。

②当行波从波阻抗较小线路向波阻抗较大线路传播时, 电压行波的反射波与入射波极性相同, 电流行波反射波与入射波极性相反。

由 (4.5) 和 (4.6) 还可判断出发生故障时行波的反射和折射情况:

①线路末端发生接地短路故障时: $Z_2 = 0$, $\alpha_u = 0$, $\beta_u = -1$, $\alpha_i = 2$, $\beta_i = 1$,

则电压行波发生全反射且极性与入射波相反, 叠加结果是电压降为零; 电流反射行波与入射波同极性, 叠加结果是电流变为原来的两倍。

②当线路末端开路时: $Z_2 = \infty$, $\alpha_u = 2$, $\beta_u = 1$, $\alpha_i = 0$, $\beta_i = -1$, 则电压行波反射波与入射波同极性, 叠加结果是电压变为原来的两倍; 电流行波发生全反射且极性与入射波相反, 叠加结果是电流降为零。

③当线路末端发生接地短路故障时, 接地故障电阻对行波的折射和反射的影响。设线路波阻抗为 Z_l , 线路末端发生接地故障且故障电阻为 R_f , 则 $Z_1 = Z_l$; $Z_2 = Z_l PR_f$, 折射系数和反射系数的关系:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_u = \frac{2}{2 + \frac{Z_l}{R_f}} \\ \beta_u = -\frac{1}{1 + 2 \frac{R_f}{Z_l}} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha_i = \frac{2}{1 + \frac{1}{1 + \frac{Z_l}{R_f}}} \\ \beta_i = \frac{1}{1 + 2 \frac{R_f}{Z_l}} \end{array} \right. \quad (4.7)$$

则当 R_f 增大时, 电压行波折射系数 α_u 增大, 反射系数 β_u 的绝对值减小, 电流行波折射系数 α_i 和反射系数 β_i 都减小; 当 R_f 减小时, 电压行波折射系数 α_u 减小, 反射系数 β_u 的绝对值增大, 电流行波折射系数 α_i 和反射系数 β_i 都增大。

由上式可以判断出发生接地短路故障时电压、电流折射波、反射波与入射波的幅值极性关系^[45-49]。

4.1.2.3 行波在传输过程中的衰减

行波含有能量, 这些能量储存在电场与磁场中^[47-50]。故障行波的暂态过程时间很短, 而行波的功率值可达到几兆焦耳。

行波的传播系数为 $A(\omega) = e^{-\gamma t} = e^{-\alpha t} \cdot e^{-j\beta t}$, 式中 $\gamma = \alpha + j\beta$; α 为衰减常数; β 为相位常数。它们均为频率的函数, 行波信号中不同频率的分量衰减和不同相移特性会使信号出现畸变。

对于实际的输电线路, 影响行波的传播因素包括: 导线的串连电阻、集肤效应、电缆导线间介质的损耗、架空线绝缘子间的泄漏电流、接地电阻大小、电晕等; 这些因素都可使行波发生能量损耗和波形畸变, 波的幅值降低, 波形变形拉长, 波头陡度降低。

行波测距要求能够精确地检测行波波头到达检测点的时刻, 行波畸变会影响测距精度^[50-52]。

4.2 单端行波测距原理

现代行波故障测距原理主要包括单端(A, E 和 F型)测距原理和双端(D型)测距原理。本文介绍单端、双端行波测距原理^[50-54]。

4.2.1 单端行波测距原理

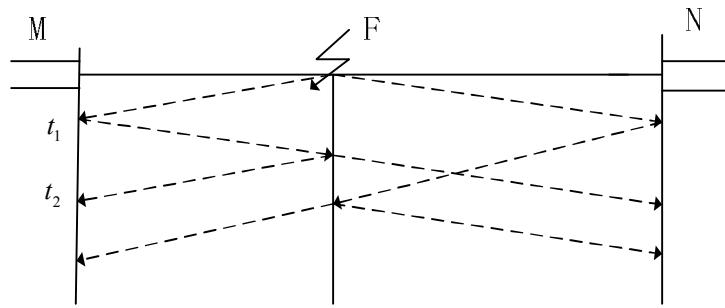


图 4.3 单端暂态行波故障测距图

图 4.3 是单端暂态行波故障测距图，故障点 F 距离检测端 M 距离为 L_M ，故障点 F 发生故障绝对时间为 t_0 ，初始行波到达检测端 M 的时间为 t_1 ，故障点反射波到达检测端时间为 t_2 ，波速为 v ，可以得到如下方程：

$$v(t_1 - t_0) = L_M \quad (4.8)$$

$$v(t_2 - t_0) = 3L_M \quad (4.9)$$

求解得到：

$$L_M = \frac{1}{2}v \times (t_2 - t_1) \quad (4.10)$$

(1) A 型单端行波测距原理。

A 型行波测距原理：基于单端暂态行波测距原理，利用线路故障时在测量端检测到的第 1 个正向行波浪涌与其在故障点反射波之间的时间差计算测量点到故障点之间的距离^[50-53]。

设行波正方向为从母线到故障点的传播方向，则故障初始行波浪涌到达测量端时形成本端第 1 个反向行波浪涌。该行波浪涌在母线的反射波形成本端第 1 个正向行波浪涌，它将向着故障点方向传播。正向行波浪涌在故障点的反射波返回测量端时表现为反向行波浪涌。即利用测量到的第 1 个正向行波与其在故障点反射波之间的时间差

计算故障距离^[47-49]。

(2) F型单端行波测距原理

F型行波测距原理：基于单端行波测距原理，利用故障线路断路器分闸时产生的暂态行波来测距。线路发生故障时继电保护装置动作，断路器分闸瞬间出现的电弧(此时触头间电流并不为零)在线路上形成暂态行波过程。

它利用线路测量端接受到的由本端分闸产生的初始行波浪涌形成的第1个正向行波浪涌与其在故障点反射波之间的时间差计算故障距离，其在测量端感受到的第1个正向行波浪涌必须是本端断路器分闸时所产生的初始行波浪涌^[47-50]。

4.2.2 反射波头到达时刻判断

设测量电缆总长度为 L ， L_M 为故障点距M侧距离， L_N 为故障点距N侧距离，则 $L_M + L_N = L$ ；根据单端法测距原理， L_M 可由故障初始波头与其在故障点反射波到达时间之差计算而得； L_N 可根据由故障初始波头与其在对端母线反射波到达本测量端时间差计算而得。

由于小波变换模极大值的极性存在差异，故障点反射波和对端母线反射回来的反射波的极性与故障类型有关联；当故障点为短路点时，前者与初始波头相反，后者与初始波头相反；当故障点为开路点时，则情况相反。因此，单端行波测距可根据如下四个边界条件识别故障反射波^[39]：

①故障反射波到达测量端时间满足： $t_0 < t < t_0 + T$ ，其中 t_0 为发生故障后的初始行波到达测量端的时刻， t 为反射波到达时刻，行波波速为 v ， $T = 2 \times L/v$ 。

②故障反射波到达测量端距离满足： $L_M = v(t_{M1} - t_0)$ ， $L_N = v(t_{N1} - t_0) - L$ ， $L_M + L_N = 2L$ 。设行波波速为 v ， L 为线路全长， t_{M1} 是故障点反射波到达本检测端的时刻， t_{N1} 是初始行波到达对端母线后反射到的本检测端的时刻。

③初始行波与故障反射波波头极性满足： $x(t_0) \times x(t_1) \times x(t_2) < 0$ ， $x(t_0)$ 、 $x(t_1)$ 、 $x(t_2)$ 分别为初始行波波头极性，故障点反射波波头极性，初始行波在对端母线发生反射到达本测量端波头极性， t_0 、 t_1 、 t_2 分别为三者对应的时刻。

④初始行波与故障反射波波头幅值满足： $x(t_0)、x(t_1)、x(t_2) > K$ ， K 为定值，在正常故障情况下，反射波幅值应大于一定值。

4.3 双端行波测距原理

4.3.1 双端行波测距原理

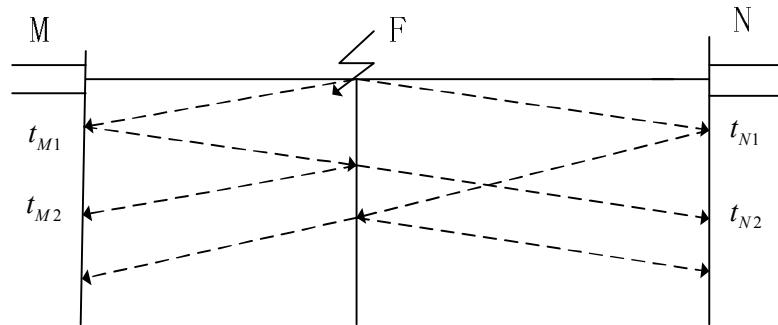


图 4.4 双端暂态行波故障测距图

图 4.4 是双端暂态行波故障测距图，故障点 F 距离检测端 M 距离为 L_M ，故障点 F 距离检测端 N 距离为 L_N ，故障点 F 发生故障绝对时间为 t_0 ，初始行波到达检测端 M 的时间为 t_{M1} ，初始行波到达检测端 N 的时间为 t_{N1} ，波速为 v ，可以得到如下方程^[48-50]：

$$v(t_{M1} - t_0) = L_M \quad (4.11)$$

$$v(t_{N1} - t_0) = L_N \quad (4.12)$$

$$L_M + L_N = L \quad (4.13)$$

求解得到：

$$\begin{cases} L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} \\ L_N = \frac{L + v \times (t_{N1} - t_{M1})}{2} \end{cases} \quad (4.14)$$

4.4 基于小波变换的行波测距算法步骤

本文中，基于小波变换的行波测距算法步骤如下：

(1) 提取外护套故障仿真（PSCAD）中测量端电流数据，进行一维离散小波变换，

根据小波变换的各层分解系数，并贮存到 MATLAB 的 mat 文件。所选的分解不宜过大，否则有用信号的局部奇异性也会丢失，本文选择第三层分解高频系数。

(2) 利用编程求出第三层分解高频系数里的模极大值点，保留模极大值对应的点，将非极大值点置零，并存储在数组里，得到模极大值数组。

(3) 在单端行波测距中，结合故障反射波波头到达时刻的判断，从模极大值数组找到初始行波及其故障反射波对应的时刻，即初始行波到达的时刻 t_1 ，及初始行波的在故障点的反射波头到达的时刻 t_2 ，结合单端测距公式进行测距。

(4) 在双端行波测距中，由两个测量端的电流数据信号的模极大值数组，结合波头到达时刻判断，找出到达两端初始行波波头的点，此点对应的时刻，即为初始故障行波到达两端的时刻 t_{M1} 及 t_{N1} ，结合双端法测距公式进行测距。

4.5 影响行波测距的因素

(1) 波速的影响

根据线路波动方程式，行波波速的表达式为： $V = 1/\sqrt{LC} = S\sqrt{\mu\varepsilon}$ ；其中， L, C 分别为线路单位长度对地电感和电容。理想状态，行波以光速传递，无损耗情况下，取行波波速为光速进行故障测距。实际中，因线路结构不同，单位长度线路对地电感和对地电容不一致，因此波速是不同的。

实际故障测距中，行波波速常选用一个接近于光速但小于光速的值，不同的文献中，波速取值差异较大。因波速微小变动会导致测距的较大误差，则行波测距的准确性将降低。即使行波波速的取值和实际波速接近，由于线路分布电容受到天气、温度条件及电晕的影响，行波波速也会变动，从而影响测距精度。

此外，线路参数也受频率的影响。导线中通交流电流时，电流密度沿导线截面的分布呈现不均匀，特别是在集肤效应的情况下，线路电阻随频率上升而增大，电感随频率上升而减小^[48-50]。因此，同一线路的不同时刻，其参数也是动态变化的，因此对行波波速取某一个接近光速的值是不准确的。那么要根据实际情况，现场测量其波速。

(2) 非故障线路母线反射波的影响

当检测母线有其他出线时或者在三芯电缆中两相导体距离很近时，故障初始行波将会经过母线的折射和反射，可透射到相邻相或者其他线路中去。这部分透射过来的行波分量，当在相邻相和其他线路发生折射反射后，一部分将再次透射到本母线，干扰检测母线的行波变化；因此非故障线路母线的反射波，将会对故障点反射波的判断也产生影响^[50-53]。

(3) 过渡电阻对单端行波测距的影响

在短路接地或者相间短路故障条件下，当过渡电阻较大（高阻，超过 100 欧姆）

时，暂态行波在故障点的反射波幅值较弱，则可能会被噪声掩盖，难以辨别；此时单端行波测距难以实现。当过渡电阻较小时(低阻或金属接地)，暂态行波在故障点反射波幅值较大，相对于初始行波经过对端母线的反射波，或者相对相邻母线的投射波都较容易识别；因此，相对于高阻故障，低阻故障对单端行波测距的影响较小。

(4)线路长度

根据行波传播特性，随着故障点与测量端之间距离的增加，其故障行波到达测量端的时间越长，行波波速的衰减越大，幅值及波头逐渐变平缓，都会影响测距的精度；而因此，随着测距范围的增大，测距误差也越大。

5 中低压 XLPE 电缆外护套故障测距

5.1 选择仿真工具和数值分析工具

PSCAD/EMTDC是电力系统分析中的专业仿真工具。PSCAD（Power System Computer Aided Design）是用户仿真界面，EMTDC是仿真引擎。PSCAD/EMTDC最适合瞬时状态仿真，即电磁暂态的仿真。

本文对电缆的外护套故障进行仿真和测距，需要仿真和检测外护套故障时在金属护层里的暂态行波；而PSCAD自带的电缆模型（CABLE）与实际电缆结构符合，电缆的导体、金属护层和绝缘层的半径和特性都可根据实际数据设置，能够很好地模拟电缆护层发生接地故障和短路故障的电流变化。

此外，PSCAD因拥有完整全面的元件库，稳定的计算流程，友好的图形界面，准确高效模拟电力系统电磁暂态。PSCAD可以模拟在不同的频率下电力系统暂态运行结果，用户可以自己选择仿真步长和仿真周期，仿真步长范围可在微秒到秒之间变化。

MATLAB（Matrix&Laboratory）是专业的数据处理软件。它具有完备的图形处理功能，可对图形进行标注和打印，可对图实现二维和三维的可视化及计算结果和编程的可视化，友好的用户界面及接近数学表达式的自然化语言；功能丰富的应用工具箱（如信号处理工具箱、通信工具箱等）等优点。

本文使用的是PSCAD 4.5.0（Professional）版本，作为电力系统暂态仿真工具；MATLAB R2008a 版本作为数据和图形处理工具。

5.2 10kV 三芯 XLPE 电缆建模

城市10KV配电网中，目前主要使用的是三芯电缆，10kV线路过电压按额定电压的1.15%考虑，会存在11.5kV的过电压，即最高运行电压11.5kV；在深圳、天津、山东等地供电部门都要求10KV必须采用8.7/15kV的电缆；结合实际情况，主要使用的电缆型号为：YJV₂₂-8.7/15-3*300mm²电缆（YJV₂₂交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆）。

10kV配电网中，使用的是YJV₂₂交联聚乙烯绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套电力电缆；其中，电缆导体为铜芯，YJ：电缆绝缘材料为交联聚乙烯（XLPE），V：电缆内护套的护套材料为聚氯乙烯(PVC)，V₂₂中的第一个2：表示镀锌钢带铠装，V₂₂中的第二个2：表示电缆外护套为聚氯乙烯护套料(PVC)。

YJV₂₂-8.7/15-3*300mm²电缆的具体参数如表5.1。

表 5.1 YJV₂₂-8.7/15-3*300mm² 参数

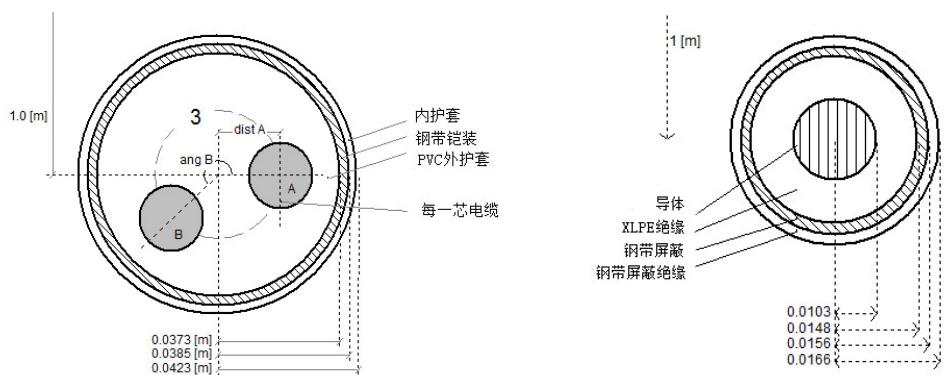
标称截面 mm ²	导体直径 mm	XLPE 绝缘 mm	钢带屏蔽 mm	钢带铠装 mm	PVC 护套 mm	电缆外直径 mm
300	20.6	4.5	0.8	1.2	3.8	84.6

根据表5.1，PSCAD 4.5.0中选择三芯电缆元件，将每一芯的电缆模型抽象等效为4层，电缆模块设置中选择C1-I1-C2-I2，建立等效模型，具体参数如表5.2。

表 5.2 YJV₂₂-8.7/15-3*300mm² 电缆 PSCAD 建模参数

序号	电缆结构	半径/厚度 mm	电阻参数 $\Omega \cdot \text{m}$	相对介电常数	相对磁导率
1	导体 (铜)	10.3/10.3	1.75×10^{-8}	4-10	1
2	XLPE 绝缘	14.8/4.5	10^{15}	2.3	1
3	钢带屏蔽 (金属护层)	15.6/0.8	1.477×10^{-7}	3-10	1
4	钢带屏蔽绝缘	16.6/1	10^{15}	2.3	1
5	内衬层 (电缆轴心到每芯电缆最外层的距离)	35.8	10^{14}	5.5	1
6	内护套层	37.3/1.5	10^{11}	5.5	1
7	钢带铠装	38.5/1.2	6.5×10^{-7}	3-10	1
8	PVC 外护套层	42.3/3.8	10^{11}	5.5	1

根据表 5.2, PSCAD 4.5.0 中 YJV₂₂-8.7/15-3*300mm² 电缆的等效电缆截面模型如图 5.1。



(a) 三芯电缆等效截面图

(b) 每一芯电缆等效截面图

图 5.1 YJV₂₂-8.7/15-3*300mm² 电缆截面结构图

5.3 电缆护层行波波速测量

5.3.1 护层行波波速测量

电缆线路发生短路故障时，故障点处产生的行波可近似为一阶跃波。阶跃行波中的高频分量波速快、衰减大，则行波传播一段距离后，行波波头前沿趋于平缓，整体波速降低。

行波测距中行波波头的到达时刻是关键，而行波的波速度则影响波头到达时刻，因此还应确定行波波速。对于行波波速的研究有相速度，群速度，视在波速。本文选取视在波速并对护层行波的视在波速测量。

行波测距应根据故障点的远近采用合适的注入脉冲宽度。故障点离测量点较近时注入脉冲宽度应较窄；考虑幅值衰减的影响则幅值应较大^[53]。

设信号注入时刻为 T_0 ，波头到达时刻为 T ，传输时间为 $\Delta T = T - T_0$ ，定义视在波速：

$$v = \frac{2L}{\Delta T} \quad (5.1)$$

式中： L 为故障点与信号注入点的距离；取 v 的对应时刻为 T_0 与 T 的中间时刻 t ，即 $t = \frac{T + T_0}{2}$ 。

改变电缆的长度，得到 t_i 和 v_i 的多个数组，形成数据样本 $[t_i, v_i]$ ($i=1, 2, \dots, n$)，然后对数据样本用最小二乘法拟合得到 v 对 t 的函数。行波的波速测量流程如图 5.2。

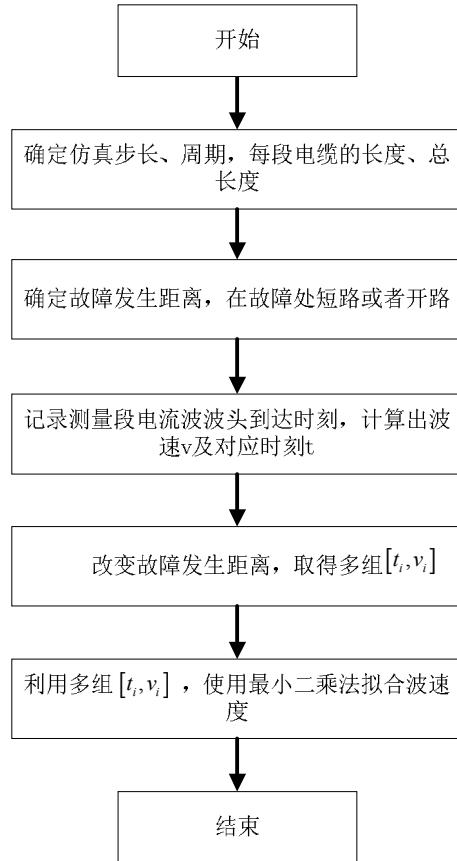


图 5.2 护层行波波速度测量流程图

5.3.2 护层行波波速仿真

针对电缆外护套故障行波波速的测量，建立三芯 XLPE 电缆护层波速仿真模型，如图 5.3，图中 PSCAD 仿真步长 0.1us，仿真周期 1us，图中每段电缆为 0.5km，在电缆末端短接(仿真中用开关，即可短接等效短路，又可断开等效开路)，冲击信号的幅值为 100，周期 2Hz，冲击信号发生时间为 0.01s，观察每段电缆的电流波形，用 MATLAB 找出每段电缆的波头时刻，如图 5.5，利用公式 (5.1)，得到时间与波速的数组 $[t_i, v_i]$ 。

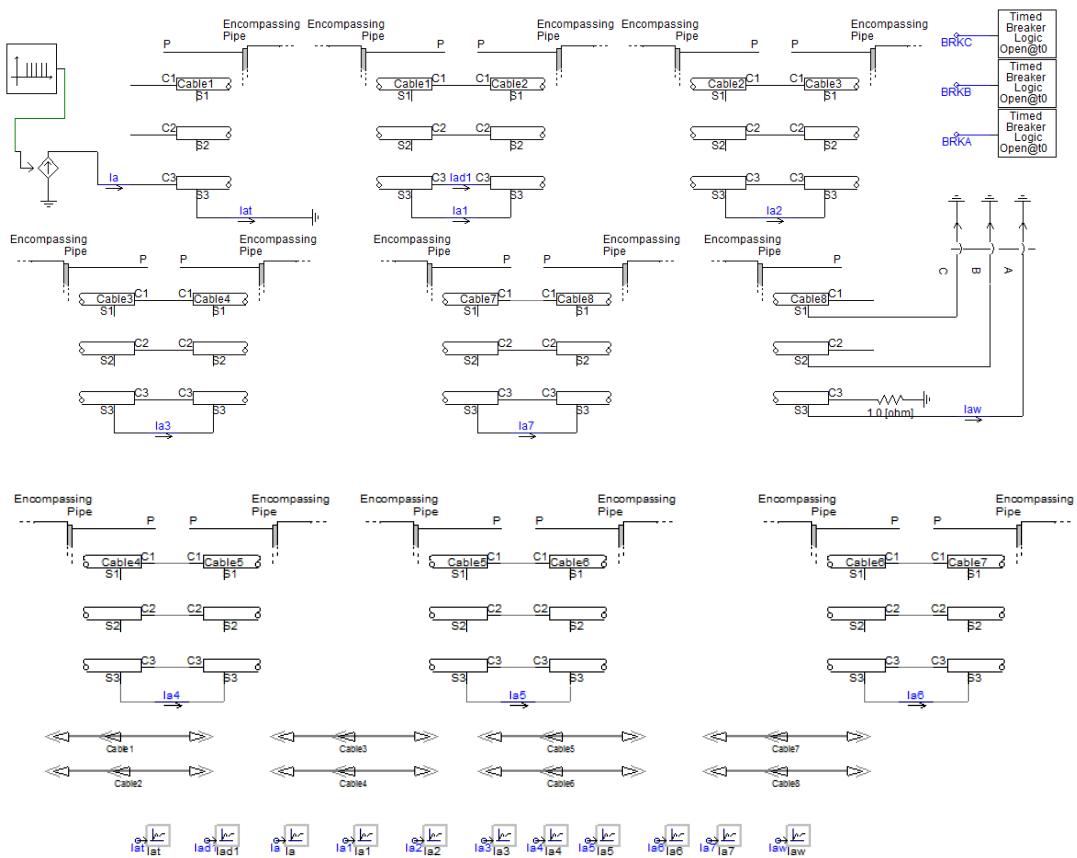


图 5.3 电缆护层行波波速仿真模型

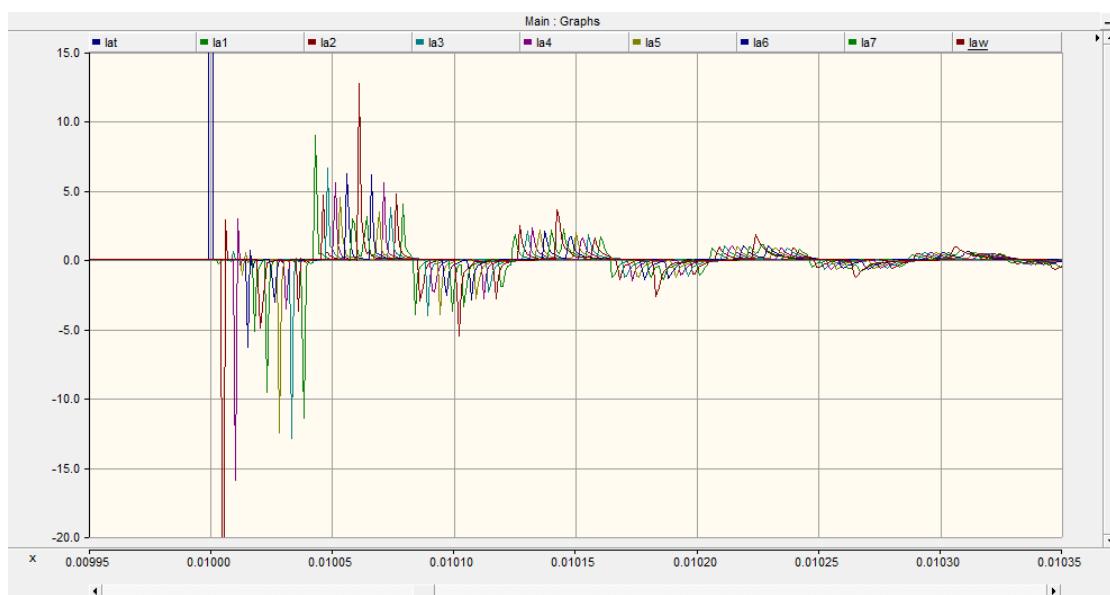


图 5.4 末端短接各段护层电流行波波形

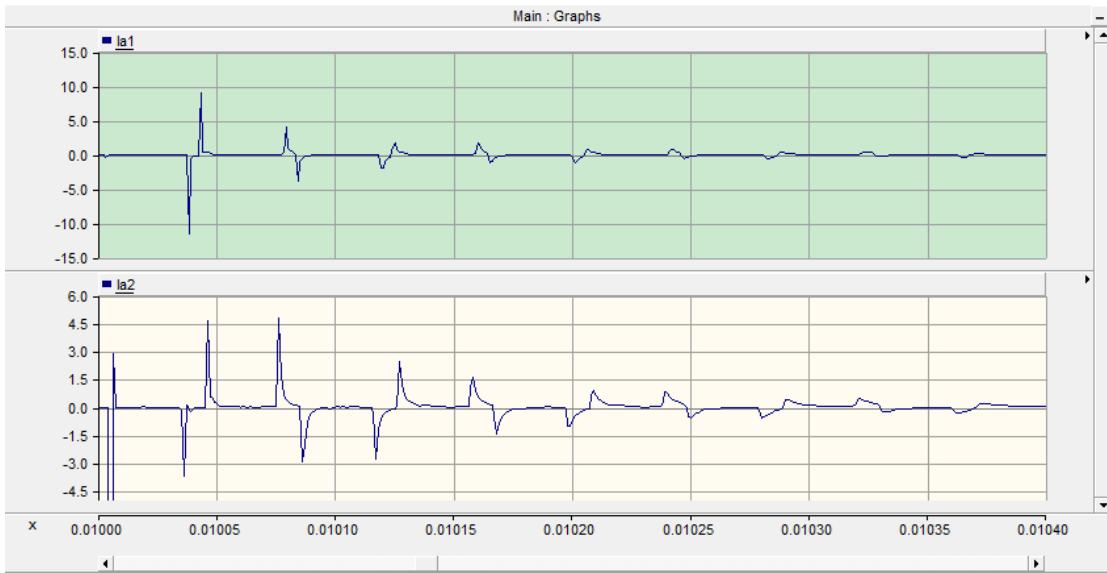


图 5.5 末端短接 1、2 段电缆护层电流行波波形

由图 5.4 及图 5.5 可见，随着电缆长度的增加，电缆末端短接，其行波的反射波幅值逐渐降低，同时反射波波头逐渐变缓，宽度逐渐增大。电缆越长信号衰减越大，频率越高则衰减越快，因高频分量衰减程度大，能量损失严重，将使得反射波速度降低，反射波头模糊平缓，影响故障测距精度^[54-56]。

经过多次测量，改变测量的距离以及仿真步长和周期，得出 0-40us 的 10 个时刻对应的波速度，如表 5.3。

表 5.3 电缆护层行波波速对应时刻表

时 刻 us	5	10	14	17	18	20	24	30	34	40
波速 10^8 m/s	2.896	2.576	2.351	2.14286	2.10526	2.0333	2.0030	2.0001	2.0	2.0

根据误差最小原则，同时结合实际情况，选取在 0us 时刻的波速度为光速，经过最小二乘法拟合，得到最佳拟合波速度公式，选取 0-17us 及 17-34us 分段拟合，得到波速度拟合公式，波速度拟合程序及选择见附录。

1) 时间 0-17us，行波波速公式为：

$$v = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.679316242359920 \\ -0.000059311029406 \\ 0.000000000022699 \\ 0.000000000000030 \end{bmatrix} \times 10^{16} \quad (5.2)$$

其中 $t \in [0-17]\text{us}$, v 的单位为 m/s。

2) 时间 17-34us, 行波波速公式为:

$$v = \begin{bmatrix} t^4 & t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9.563249796838150 \\ -0.001097118583190 \\ 0.000000046931732 \\ -0.0000000000000887 \\ 0.0000000000000000 \end{bmatrix} \times 10^{20} \quad (5.3)$$

其中, $t \in [17-34]\text{us}$, v 的单位为 m/s。

根据公式 (5.2) 和公式 (5.3) 得到如下的护层行波速度曲线, 如图 5.6。

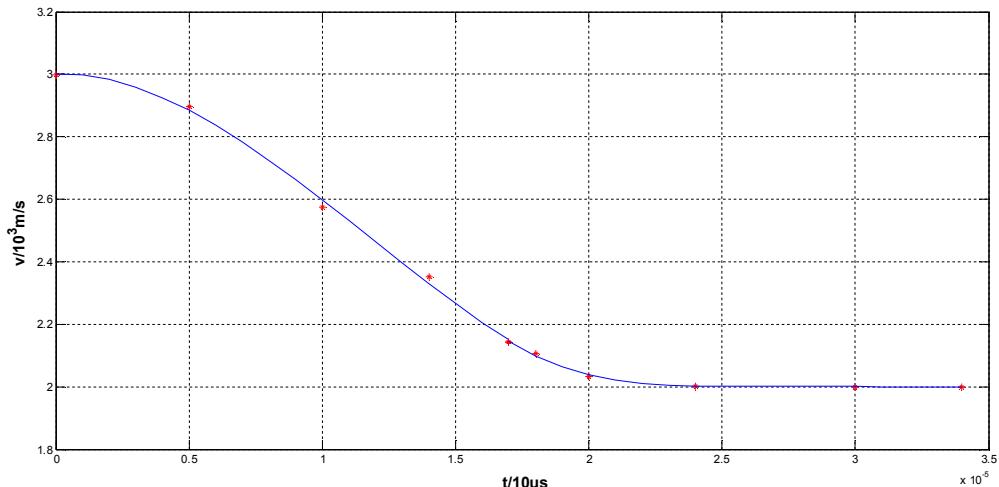


图 5.6 电缆护层行波速度曲线

5.4 电缆外护套故障测距

城市10KV配电网中, 实际使用的三芯 XLPE 电缆每段大约在 0.5km, 对于较长的电缆通常由多段电缆通过电缆接头连接; 本文仿真中三芯 XLPE 电缆每段长度也设置为 0.5km; 按照规范三芯电缆的铠装和屏蔽层在电缆投入使用时必须要接地, 其在电缆中间不需要接地, 只是在电缆两头接地; 因此本文中将两端电缆护层接地, 中间段直接连接, 护层故障设置在电缆中间段。

5.4.1 测距方法选择

1) 单端法

单端行波测距的关键是求出行波第 1 次到达测量端的时间，以及初始行波在故障点反射波到达测量端的时间，其难点在于故障反射波头时刻的精确。对于三芯电缆外护套故障中的护层接地故障时，行波产生时由故障点向两端传播，则经过对端母线的初始行波反射波也会干扰本端初始行波在故障点的反射波，同时故障行波会投射到非故障相相邻电缆，投射的一部分会再次反射到故障相护层，对故障相行波产生干扰；因此当护层故障发生在距离某一端较近时，其反射波波头时刻容易辨别，且经过反射后行波能量有损耗、波速降低、幅值减少及波头变平缓，则测量误差增大；因此单端测距只适用于在短距离测距。

2) 双端法

双端行波法测距关键是确定故障初始行波达到两测量端的时间，从而来确定故障距离，不用确定初始行波与其故障反射波的时差；这排除行波在对端母线的反射和非故障相母线的投射干扰，以及减少因反射波能量损耗、波速降低带来的测量误差，精度较好，可适用于短距离及长距离测距。

本文中，对于故障点发生在距离测量端 1km 以下的进行单端法及双端法测距，并比较两者的测距精度；对于故障点发生在距离测量端 1km 以上则采用双端法。

5.4.2 单相护层故障

5.4.2.1 A 相故障

电缆外护套故障的单相护层故障，单相护层故障仿真如图 5.7，电源电压为 10kV，频率 50Hz，上升沿时间 0.03s，仿真步长为 0.1us，仿真周期 1us，故障发生时间为 0.05s，持续时间 0.01s，即在 MATLAB 中若测得波头横坐标为 50002，则对应于 0.050002s，土壤电阻率 100 欧姆·米，土壤温度 20 摄氏度：电缆敷设深度 1m，护层故障设置在电缆中间段；10kV 配电网输送距离为 0-15km，而实际中电缆环网柜距离通常在 5km 以内，因此本文根据靠近电源端的距离分为三种情况仿真，即距离电源端 0.5km 发生故障，距离两端等距离 2.0km 发生故障，距离电源端 4.0km 发生故障。

电缆单相护层故障仿真示意图，如图 5.7。

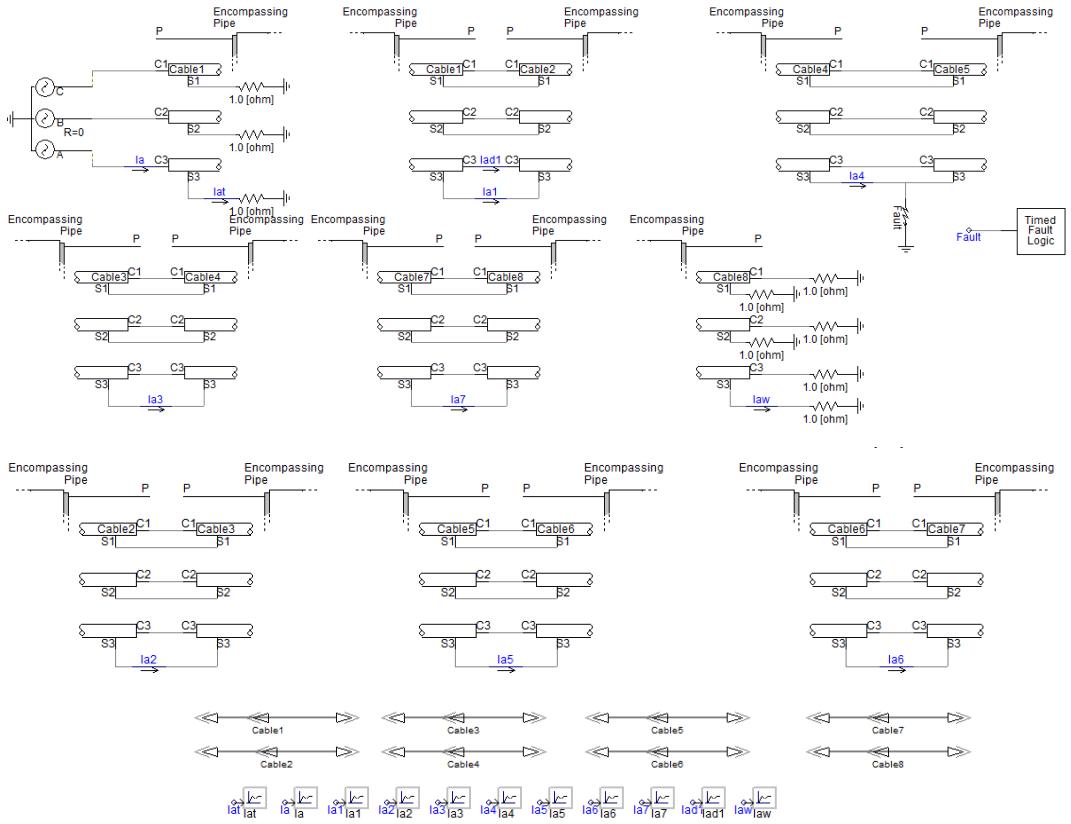


图 5.7 电缆单相护层故障仿真

设靠近电源端的测量端为 M 端，靠近电缆末端的测量端为 N 端，设置单相护层低阻故障的过度电阻为 30 欧姆，高阻 400 欧姆，故障测距及误差分析如下。

1) 0.5km A 相护层故障

(1) A 相低阻故障

A 相护层接地故障发生在距离 M 端 0.5km，距离 N 端 3.0km，过度电阻 30 欧姆，两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.8，图 5.9。

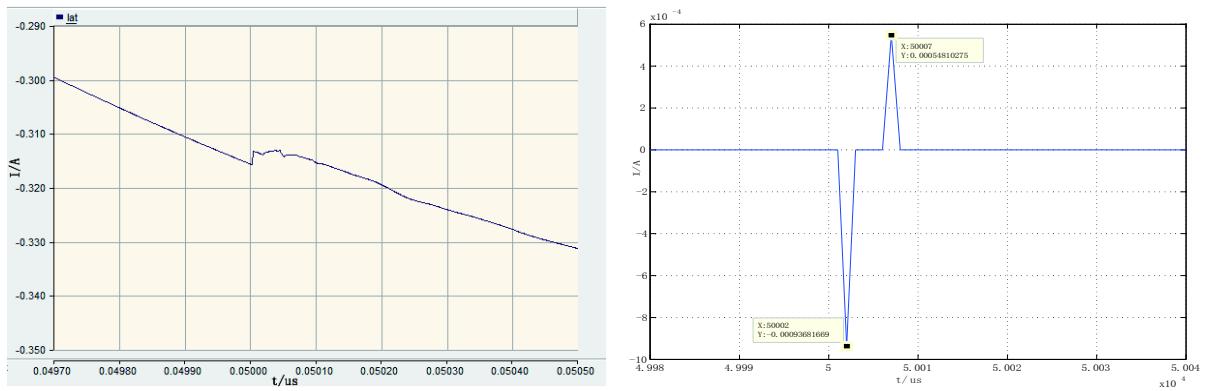


图 5.8 0.5km A 相低阻故障 M 端电流波形及模极大值

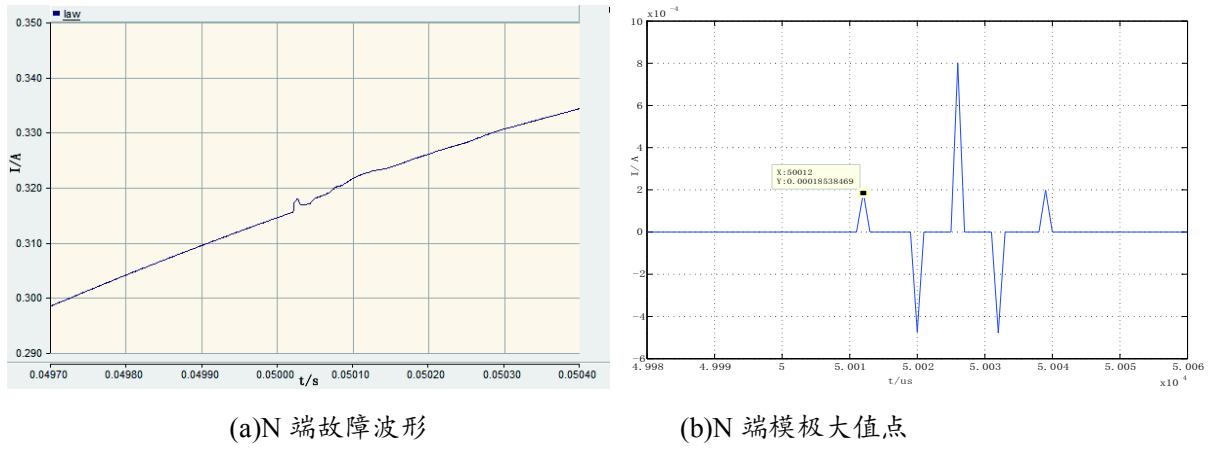


图 5.9 0.5kmA 相低阻故障 N 端电流波形及模极大值

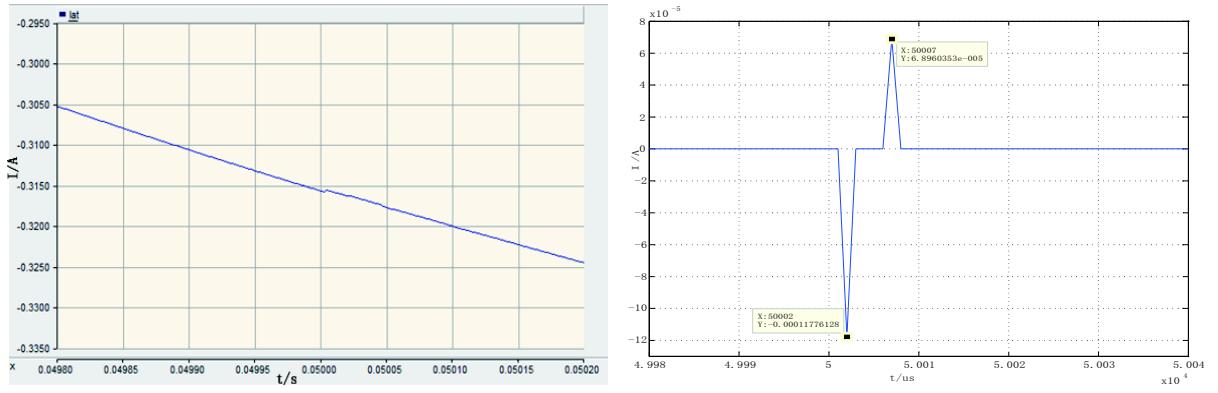
将故障仿真的 M 端, N 端的电流数据, 经 bior4.12 小波分析及模极大值提取, 找到初始行波到达两端的幅值、时刻, 以及根据波速公式 (5.2) 得到对应时刻的波速, 如下表 5.4 (表中幅值皆取正以便比较, 波头极性模极大值图中已给出)。其中, N 端第二个波头幅值为 $0.00047526718A$, 约为第一个波头的两倍, 这是由于对端行波的折射波与非故障相投射回的行波叠加的结果。

表 5.4 0.5kmA 相低阻故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ $10^{-4}A$	9.3681669	1.8538496
初始行波	时间/us	50002
	波速/ $10^8m/s$	2.982671
初始行波故障点	幅值/ $10^{-4}A$	5.4810275
	时间/us	50007
反射波	波速/ $10^8m/s$	2.7833781

(2) A 相高阻故障

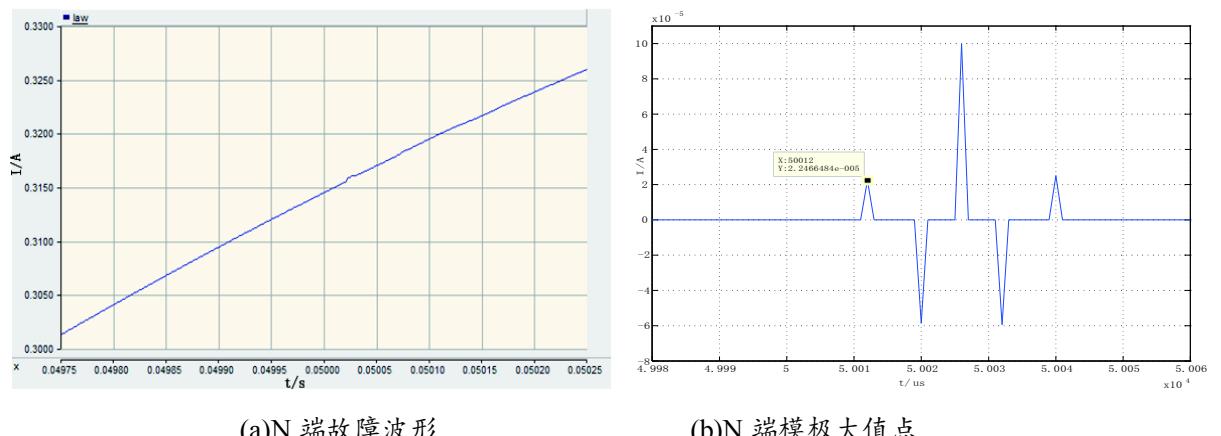
A 相护层接地故障发生在距离 M 端 0.5km, 距离 N 端 3.0km, 过渡电阻 400 欧姆, 两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.10, 图 5.11。



(a)M 端故障波形

(b)M 端模极大值点

图 5.10 0.5km A 相高阻故障 M 端电流波形及模极大值



(a)N 端故障波形

(b)N 端模极大值点

图 5.11 0.5km A 相高阻故障 N 端电流波形及模极大值

将故障仿真的 M 端, N 端的电流数据, 经 bior4.12 小波分析及模极大值提取, 找到初始行波到达两端的幅值、时刻, 以及根据波速公式 (5.2) 得到对应时刻的波速, 如下表 5.5。

表 5.5 0.5km A 相高阻故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ 10^{-4} A	1.1776128	0.22466484
初始行波	时间/us	50002
	波速/ 10^8 m/s	2.982671
初始行波故障点	幅值/ 10^{-5} A	6.8960353
	时间/us	50007
反射波	波速/ 10^8 m/s	2.7833781

对比低阻故障, 高阻故障的波头幅值大幅度减少, 约为低阻故障的十分之一, 波

头到达时间不变。采用单端行波测距，双端行波测距，故障测距及误差分析如下。

1) 单端法测距

根据单端法测距公式 (4.10)

使用 t_1 时的波速度，则

$$L_M = \frac{1}{2}v \times (t_2 - t_1) = \frac{1}{2} \times 2.982671 \times (7 - 2) \times 10^2 = 7.456678 \times 10^2 \text{ m} \quad (5.4)$$

使用 t_2 时的波速度，则

$$L_M = \frac{1}{2}v \times (t_2 - t_1) = \frac{1}{2} \times 2.7833781 \times (7 - 2) \times 10^2 = 6.958445 \times 10^2 \text{ m} \quad (5.5)$$

最小误差为： $\Delta L = (6.958445 - 5) \times 10^2 = 195.8445 \text{ m}$

2) 双端法测距

根据双端法测距公式 (4.14)

使用 t_{M1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{35 - 2.982671 \times 10}{2} \times 10^2 = 258.6645 \text{ m} \quad (5.6)$$

使用 t_{N1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{35 - 2.4638583 \times 10}{2} \times 10^2 = 518.07085 \text{ m} \quad (5.7)$$

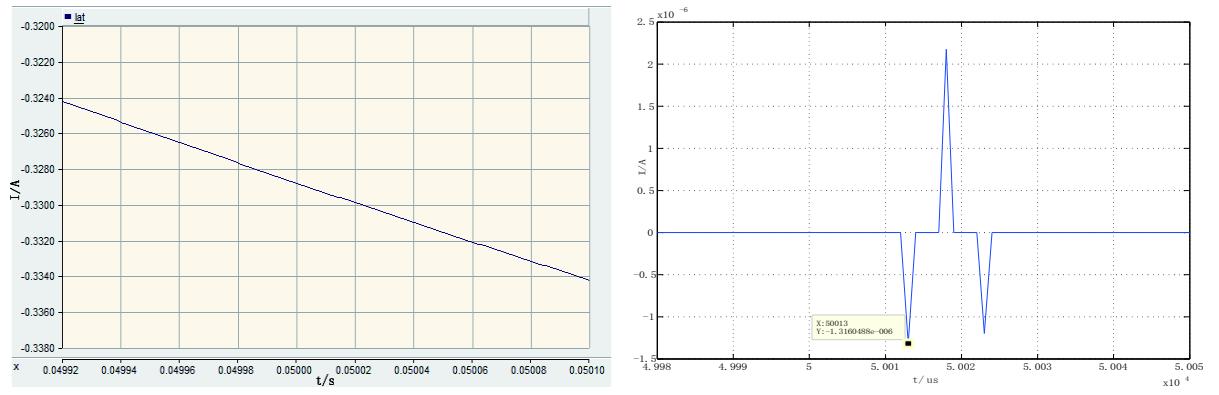
最小误差为： $\Delta L = (5.1807085 - 5) \times 10^2 = 18.07085 \text{ m}$

因此，比较单端法及双端法，得出双端法误差较小，精度相对比较高；而单端法测量误差大。

2) 2.0km A 相护层故障

(1) 2.0km A 相低阻故障

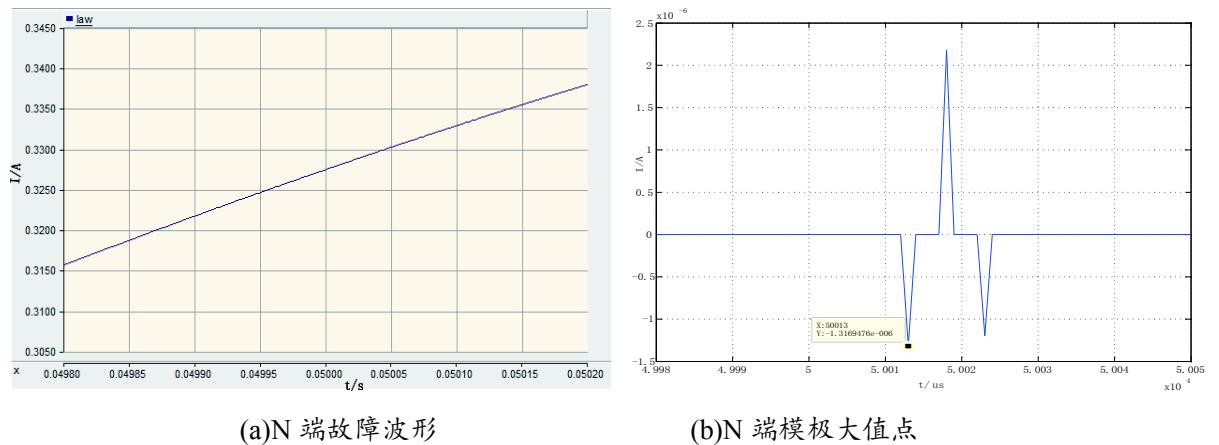
A 相护层接地故障发生在距离 M 端 2.0km，距离 N 端 2.0km，过度电阻 30 欧姆，两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.12，图 5.13。初始行波到达两端时刻如表 5.6。



(a)M 端故障波形

(b)M 端模极大值点

图 5.12 2.0km A 相低阻相故障 M 端电流波形及模极大值



(a)N 端故障波形

(b)N 端模极大值点

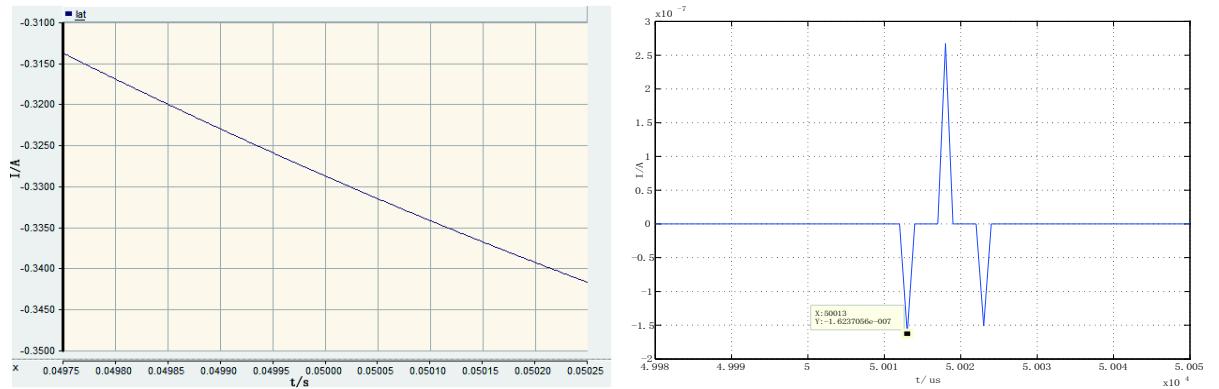
图 5.13 2.0km A 相低阻相故障 N 端电流波形及模极大值

表 5.6 2.0km A 相低阻故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ 10^{-6} A	1.3160488	1.3169746
初始行波时间/us	50013	50013
波速/ 10^8 m/s	2.3966106	2.3966106

(2) 2.0km A 相高阻故障

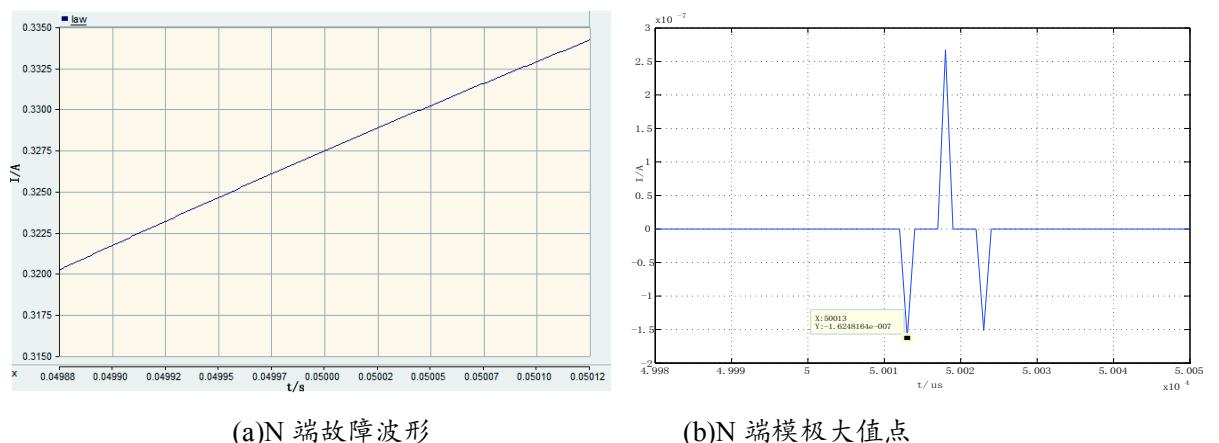
A 相护层接地故障发生在距离 M 端 2.0km, 距离 N 端 2.0km, 过渡电阻 400 欧姆, 两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.14, 图 5.15, 初始行波到达两端时刻如表 5.7。



(a)M 端故障波形

(b)M 端模极大值点

图 5.14 2.0km A 相高阻故障 M 端电流波形及模极大值



(a)N 端故障波形

(b)N 端模极大值点

图 5.15 2.0km A 相高阻故障 N 端电流波形及模极大值

表 5.7 2.0km A 相高阻故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ 10^{-7} A	1.6237056	1.6248164
初始行波时间/us	50013	50013
波速/ 10^8 m/s	2.3966106	2.3966106

对比低阻故障，高阻故障的波头幅值大幅度减少，约为低阻故障的十分之一，测量误差没有变化。

双端法测距

根据双端法测距公式 (4.14)

使用 t_{M1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{40 + 2.3966106 \times 0}{2} \times 10^2 = 2000.0 \text{ m} \quad (5.8)$$

使用 t_{N1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{40 + 2.3966106 \times 0}{2} \times 10^2 = 2000.0 \text{ m} \quad (5.9)$$

最小误差为： $\Delta L = (20.0 - 20.0) \times 10^2 = 0 \text{ m}$

3) 4.0km A 相护层故障

(1) 4.0km A 相低阻故障

A 相护层接地故障发生在距离 M 端 4.0km，距离 N 端 1.0km，过度电阻 30 欧姆，两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.16，图 5.17。根据波速公式 (5.2) 和

(5.3) 得到初始行波到达两端时刻和波速如表 5.8。

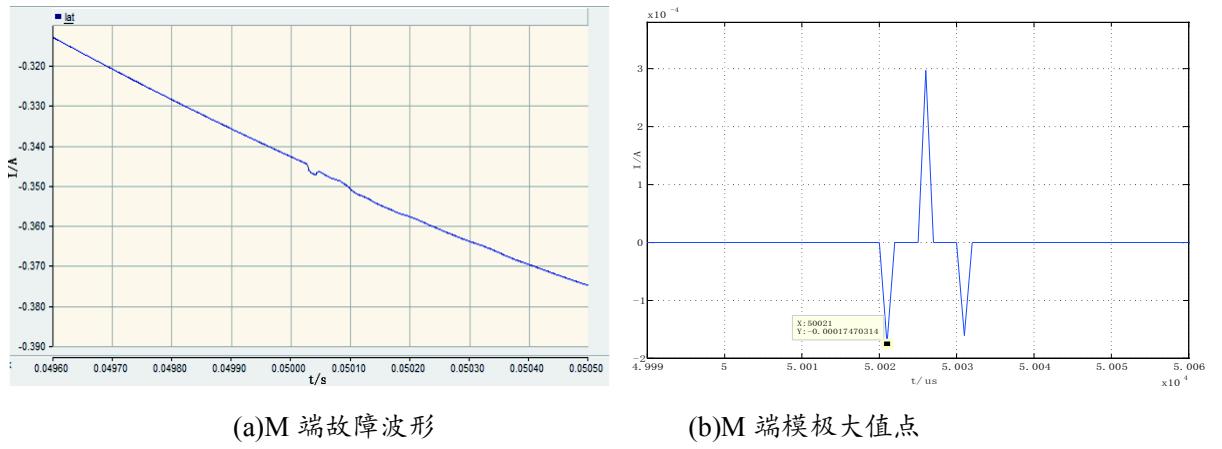


图 5.16 4.0km A 相低阻故障 M 端电流波形及模极大值

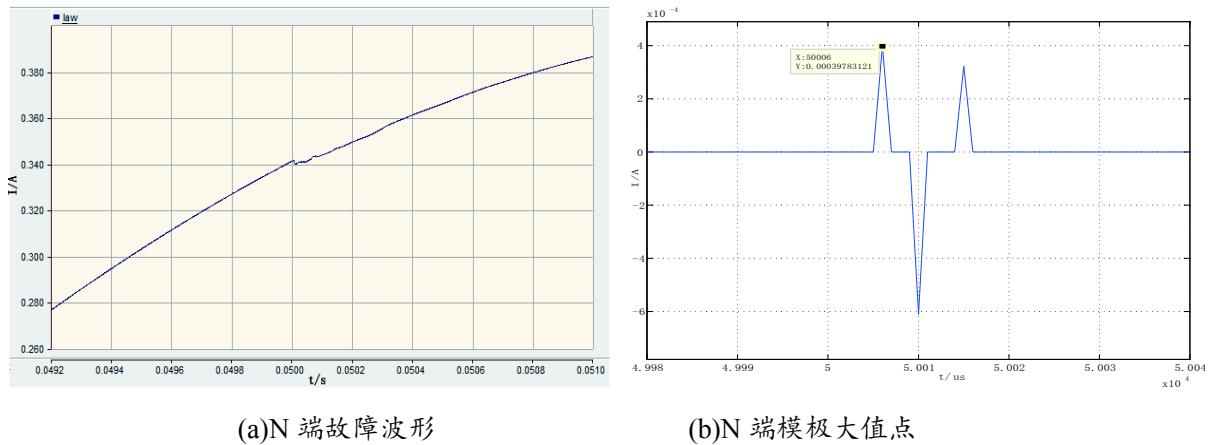


图 5.17 4.0km A 相低阻故障 N 端电流波形及模极大值

表 5.8 4.0km A 相低阻故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ 10^4 A	1.7470314	3.9783121
初始行波时间/us	50021	50006
波速/ 10^8 m/s	2.0210755	2.8368852

(2) 4.0km A 相高阻故障

A 相护层接地故障发生在距离 M 端 4.0km, 距离 N 端 1.0km, 过渡电阻 400 欧姆, 两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.18, 图 5.19, 以及根据波速公式 (5.2) 和 (5.3) 得到初始行波到达两端时刻和波速如表 5.9。

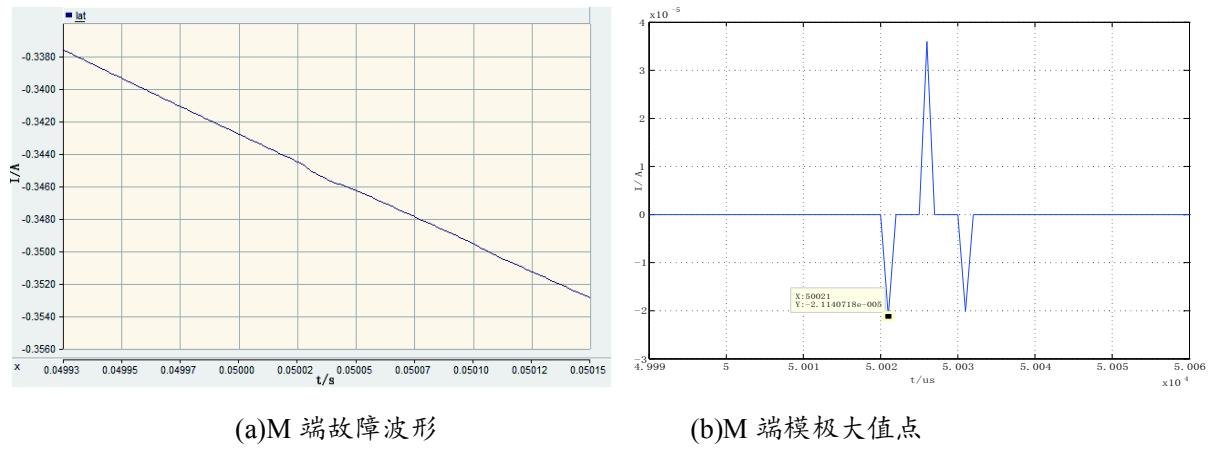


图 5.18 4.0km A 相高阻故障 M 端电流波形及模极大值

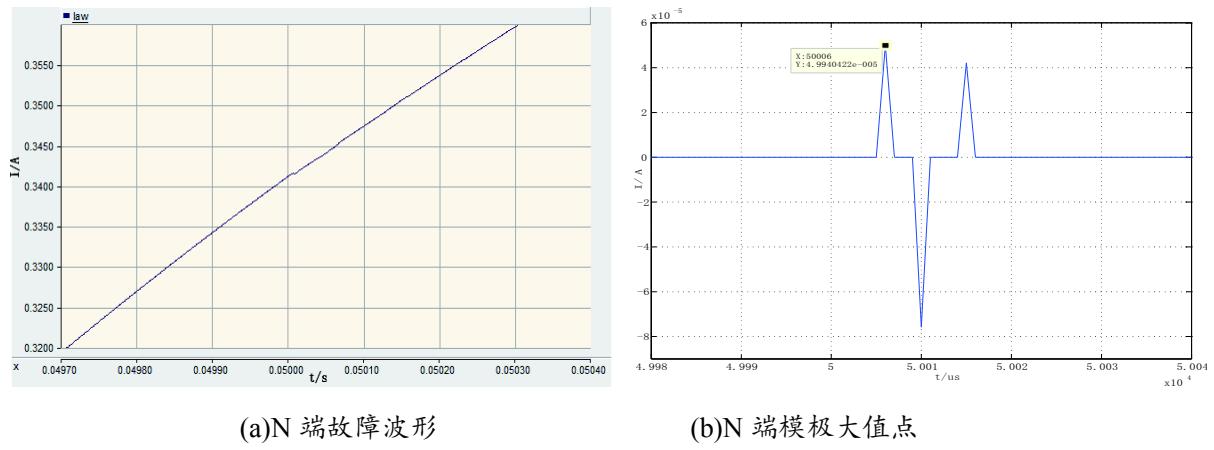


图 5.19 4.0km A 相高阻故障 N 端电流波形及模极大值

表 5.9 4.0km A 相高阻故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ 10^5 A	2.1140718	4.9940422
初始行波 时间/us	50021	50006
波速/ 10^8 m/s	2.0210755	2.8368852

对比低阻故障，高阻故障的波头幅值大幅度减少，约为低阻故障的十分之一，测量误差没有变化。

双端法测距

根据双端法测距公式 (4.14)

使用 t_{M1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{50 + 2.0210755 \times 15}{2} \times 10^2 = 4015.806625 \text{ m} \quad (5.10)$$

使用 t_{N1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{50 + 2.8368852 \times 15}{2} \times 10^2 = 4627.6639 \text{ m} \quad (5.11)$$

最小误差为： $\Delta L = (40.15806625 - 40.0) \times 10^2 = 15.806652 \text{ m}$

5.4.3 相间护层故障

10KV 配电网三芯电缆外护套故障中的相间护层故障，其故障仿真参数设置与单相护层故障一致，故障仿真示意图如图 5.20。

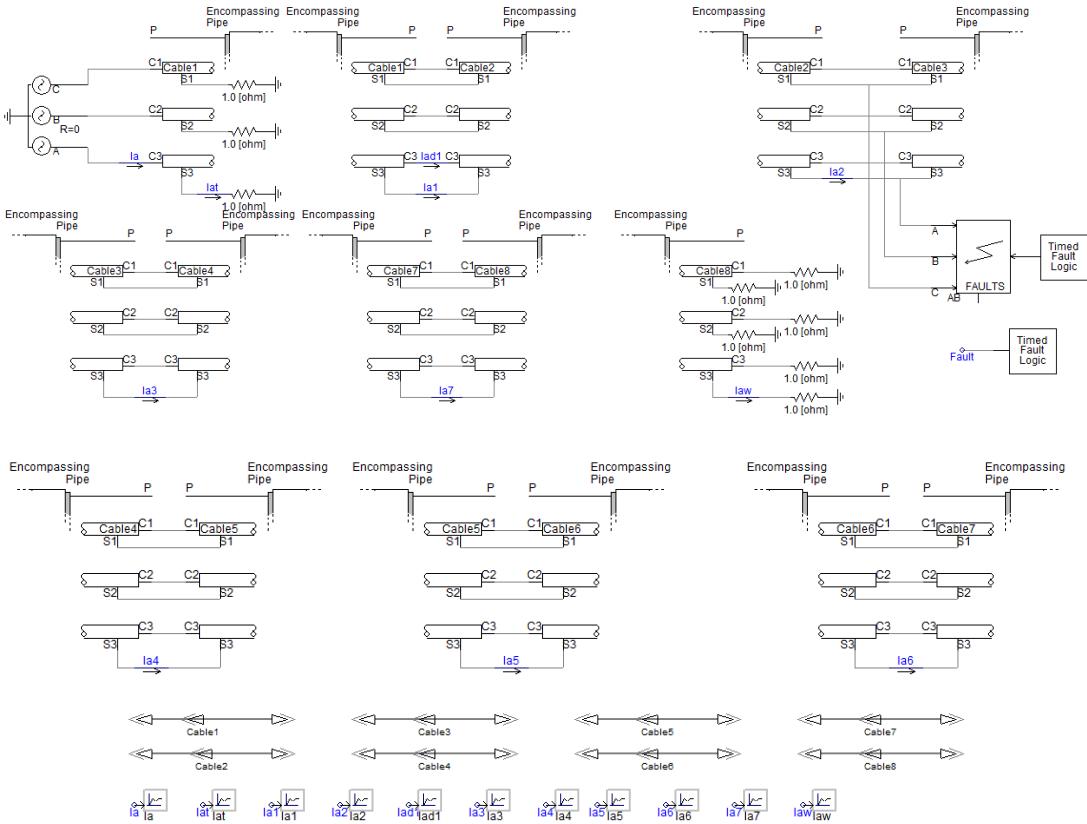
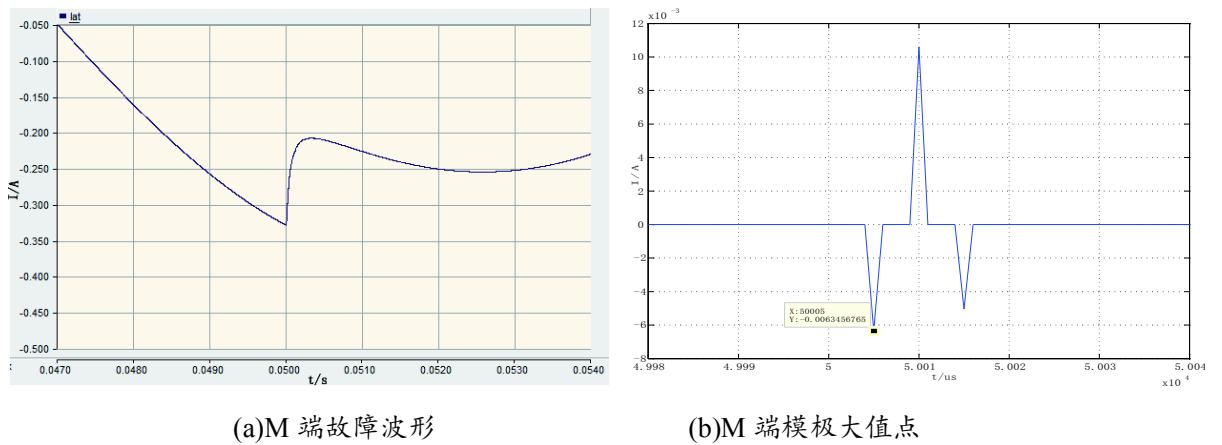


图 5.20 电缆相间护层故障仿真

5.4.3.1 AB 相间短路

AB 相间护层短路故障发生在距离 M 端(电源端)1.0km, 距离 N 端 3.0km, 过度电
阻 0.01 欧姆, 两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.21, 图 5.22。



(a)M 端故障波形

(b)M 端模极大值点

图 5.21 AB 相间护层故障 M 端电流波形及模极大值

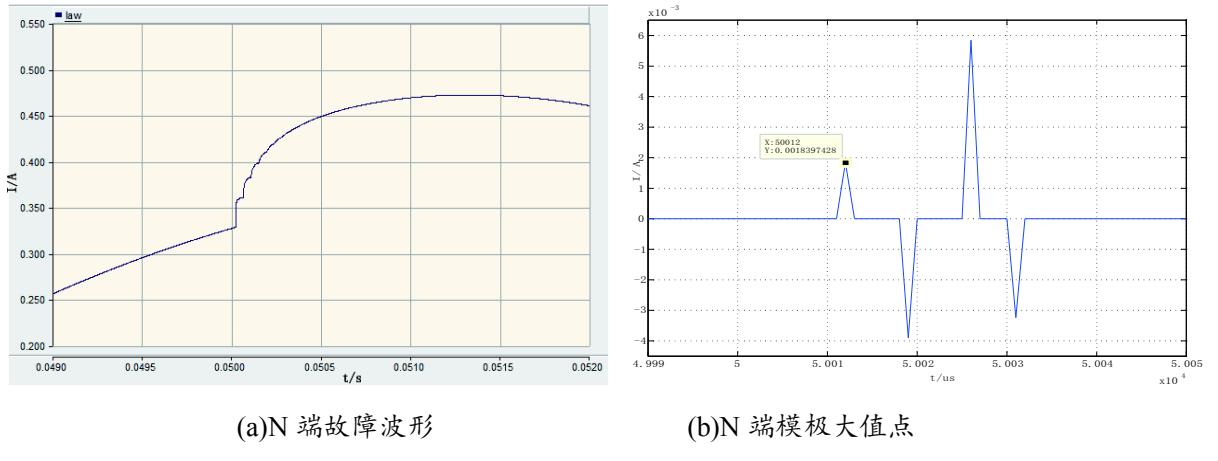


图 5.22 AB 相间护层故障 N 端电流波形及模极大值

将故障仿真的 M 端, N 端的电流数据, 经 bior4.12 小波分析及模极大值提取, 找到初始行波到达两端的幅值、时刻, 以及根据波速公式 (5.2) 得到对应时刻的波速, 如下表 5.10。

表 5.10 AB 相间护层故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ 10^3 A	6.3456765	1.8397428
初始行波	时间/us	50005
	波速/ 10^8 m/s	2.8845756
		2.4638583

双端法测距

根据双端法测距公式 (4.14)

使用 t_{M1} 时的波速度, 则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{40 - 2.8845756 \times 7}{2} \times 10^2 = 990.39854 \text{ m} \quad (5.12)$$

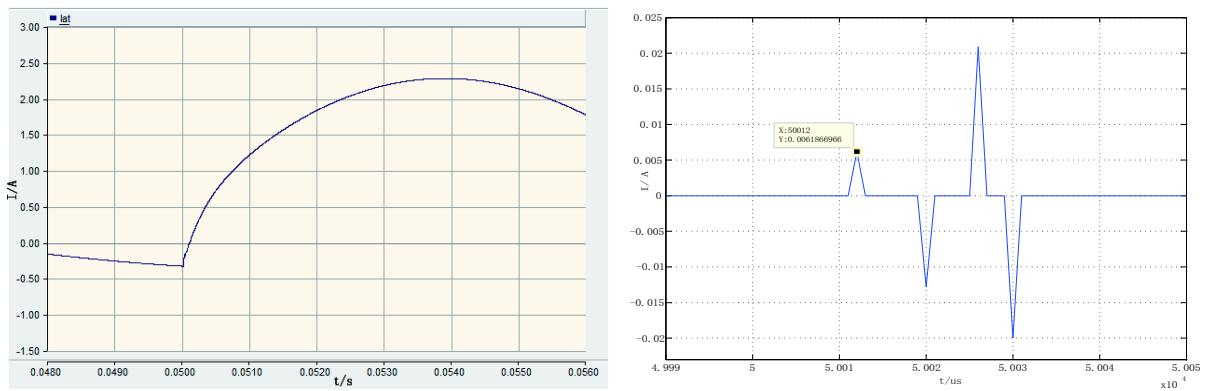
使用 t_{N1} 时的波速度, 则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{40 - 2.4638583 \times 7}{2} \times 10^2 = 1137.649595 \text{ m} \quad (5.13)$$

最小误差为: $\Delta L = (10 - 9.9039854) \times 10^2 = 9.60146 \text{ m}$

5.4.3.1 ABC 三相短路

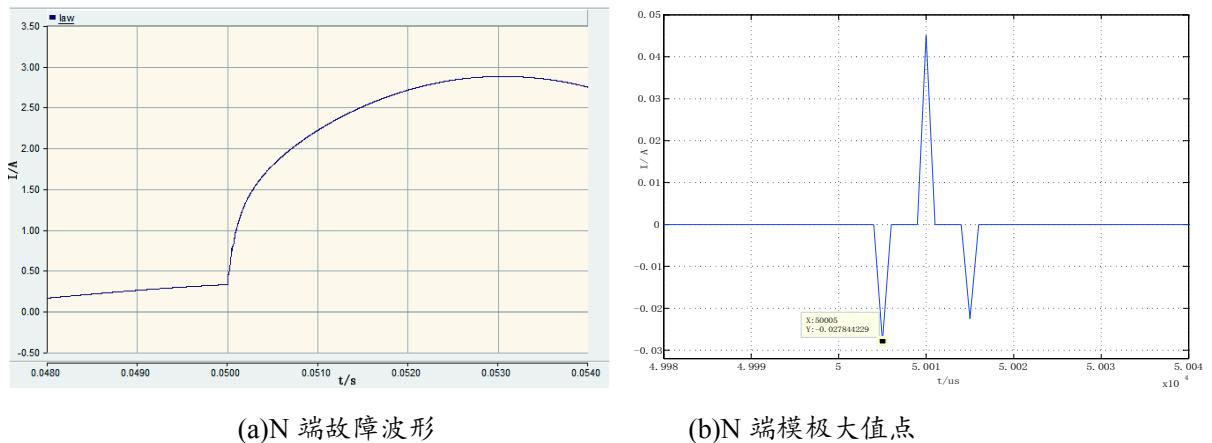
ABC 三相护层短路故障发生在距离 M 端 3.0km, 距离 N 端 1.0km, 过渡电阻 0.01 欧姆, 两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.23, 图 5.24。



(a)M 端故障波形

(b)M 端模极大值点

图 5.23 ABC 三相护层短路 M 端电流波形及模极大值



(a)N 端故障波形

(b)N 端模极大值点

图 5.24 ABC 三相护层短路 N 端电流波形及模极大值

将故障仿真的 M 端, N 端的电流数据, 经 bior4.12 小波分析及模极大值提取, 找到初始行波到达两端的幅值、时刻, 以及根据波速公式 (5.2) 得到对应时刻的波速, 如下表 5.11。

表 5.11 ABC 三相护层短路故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ 10^2 A	0.61866966	2.7844229
初始行波	时间/us	50012
	波速/ 10^8 m/s	2.4638583
		2.8845756

双端法测距

根据双端法测距公式 (4.14)

使用 t_{M1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{40 + 2.8845756 \times 7}{2} \times 10^2 = 3009.60146 \text{ m} \quad (5.14)$$

使用 t_{N1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{40 + 2.4638583 \times 7}{2} \times 10^2 = 2862.350405 \text{ m} \quad (5.15)$$

最小误差为： $\Delta L = (30.0960146 - 30) \times 10^2 = 9.60146 \text{ m}$

由单相护层故障与相间护层故障对比分析，不难看出当在相同过度电阻的情况下，三相护层短路故障的故障波形突变最激烈，其次是两相短路，单相故障最小，当过度电阻过小时其电压和电流的畸变较大，若故障持续时间较长会进一步损坏外护套及 XLPE 绝缘层，可导致电缆的导体故障，引起电缆烧损及停电故障。因此，虽然护层故障的故障波形突变不大，但在一定条件及长时间发生的泄露性故障则会降低外护套和 XLPE 绝缘层的绝缘性，容易发生水树枝和绝缘老化，对电缆运行造成潜在的隐患。

对于 10KV 配电网三芯 XLPE 电缆外护套故障不同的故障类型进行仿真，以及故障测距；总结各种外护套故障类型在不同的故障距离范围、不同过度电阻条件下的测距精度，采用双端行波测距法，如表 5.12，表 5.13，表 5.14。

表 5.12 故障类型和故障位置对测距精度的影响（过度电阻 0.01Ω）

实际 故障 距离 (km)	测距结果及误差							
	A 相接地		AB 相短路接地		AB 相间短路		ABC 三相故障	
	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)
0.5	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709
1	0.9929098	7.0902	0.9903985	9.60146	0.9903985	9.60146	1.0716137	71.6137
2	2.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00
3	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146
4	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067

表 5.13 故障类型和故障位置对测距精度的影响 (过度电阻 30Ω)

实际 故障 距离 (km)	测距结果及误差							
	A 相接地		AB 相短路接地		AB 相间短路		ABC 三相故障	
	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)
0.5	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709
1	0.9929098	7.0902	0.9903985	9.60146	0.9903985	9.60146	1.0716137	71.6137
2	2.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00
3	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146
4	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067

表 5.14 故障类型和故障位置对测距精度的影响 (过度电阻 400Ω)

实际 故障 距离 (km)	测距结果及误差							
	A 相接地		AB 相短路接地		AB 相间短路		ABC 三相故障	
	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)	测距(km)	误差(m)
0.5	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709	0.5180708	18.0709
1	0.9929098	7.0902	1.0716137	71.6137	1.0716137	71.6137	1.0716137	71.6137
2	2.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00
3	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146	3.0096104	9.60146
4	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067	4.0158066	15.8067

5.4.4 不同敷设深度电缆连接处故障

电缆外护套故障中，在电缆承受压力处或电缆转折处容易发生故障，针对上述情况，采用不同敷设深度电缆连接处发生故障来进行仿真，其示意如下图 5.25。

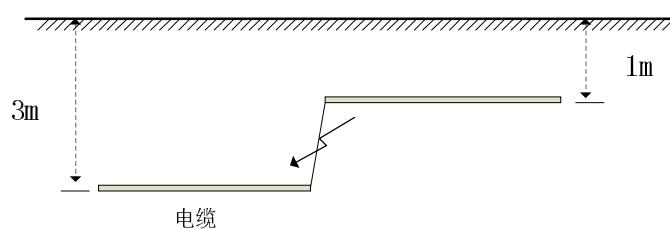


图 5.25 不同敷设深度电缆连接处护层故障

不同敷设深度电缆连接处故障仿真如下图 5.26。

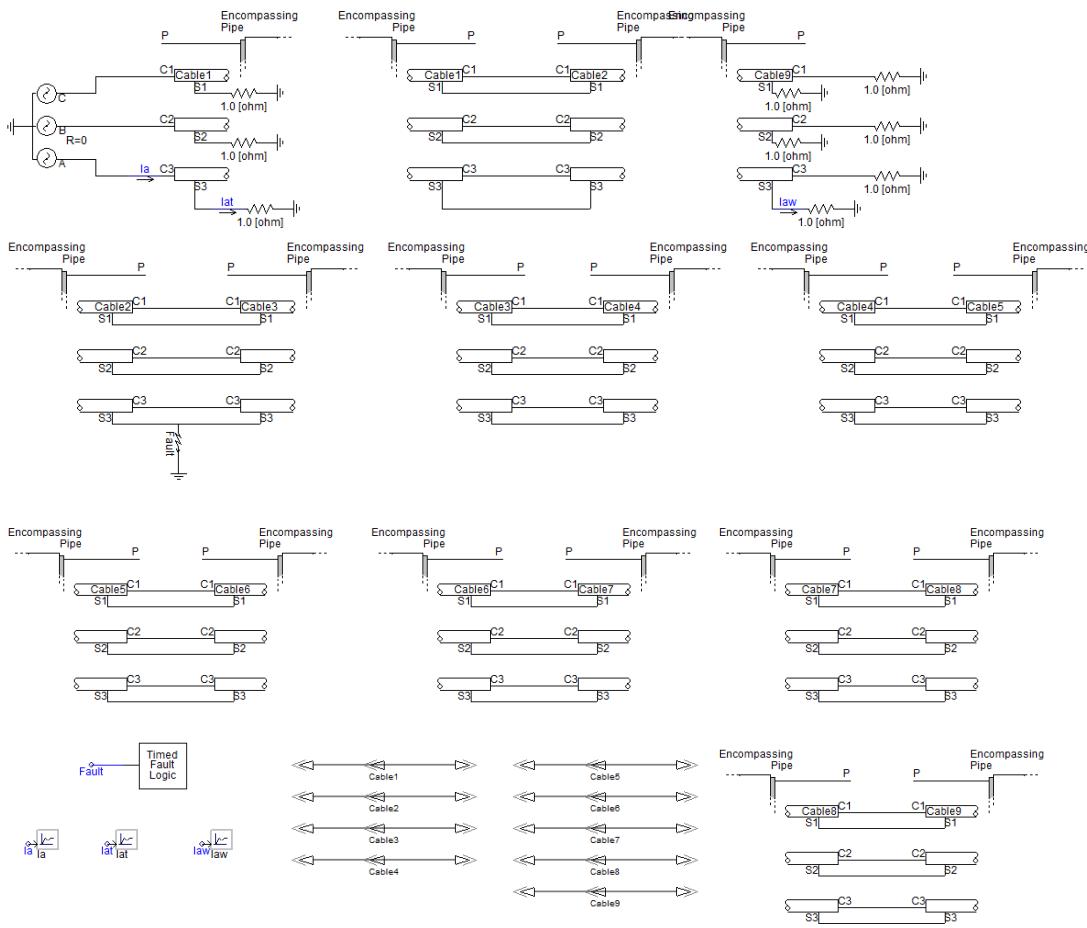


图 5.26 不同敷设深度电缆连接处护层故障

1) 电缆连接处发生 A 相护层低阻故障

电缆连接处发生 A 相护层短路故障，故障发生在距离 M 端 1.0km，距离 N 端 3.5km，靠近 M 端的前 1km，敷设深度为 3m，后 3.5km 敷设深度为 1m，故障发生在电缆连接处，过度电阻 30 欧姆，其他仿真参数设置如单相护层故障，两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.27，图 5.28。

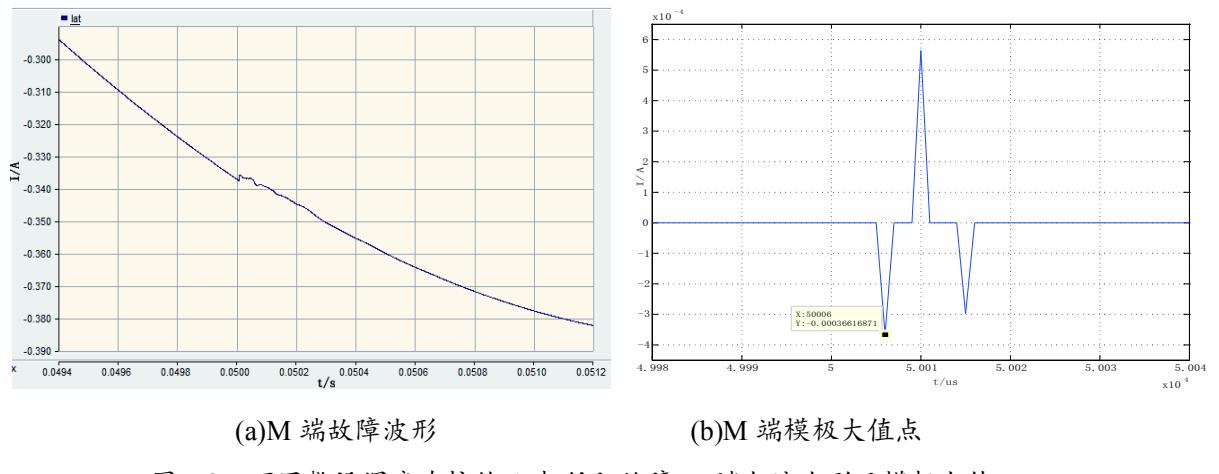


图 5.27 不同敷设深度连接处 A 相低阻故障 M 端电流波形及模极大值

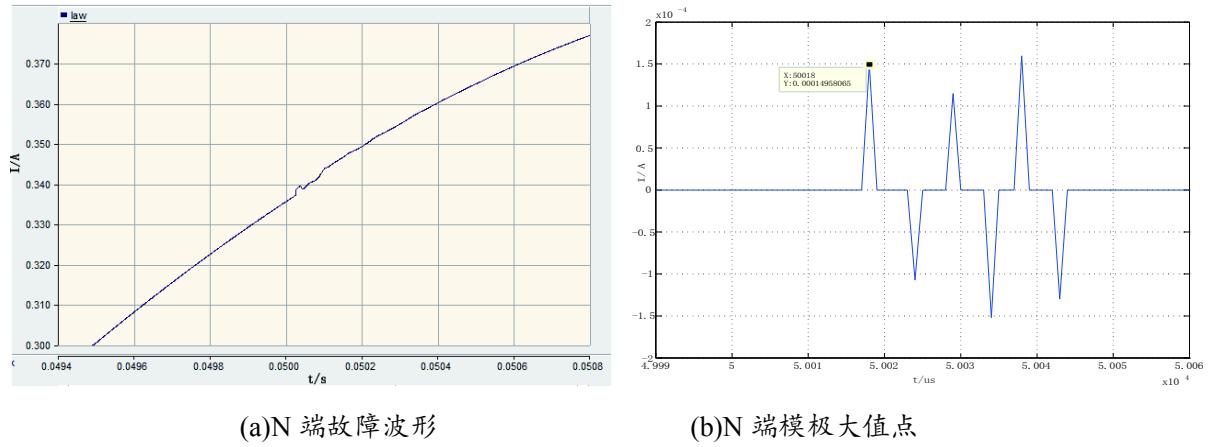


图 5.28 不同敷设深度连接处 A 相低阻故障 N 端电流波形及模极大值

将故障仿真的 M 端, N 端的电流数据, 经 bior4.12 小波分析及模极大值提取, 找到初始行波到达两端的幅值、时刻, 以及根据波速公式 (5.2) 和 (5.3) 得到对应时刻的波速, 如下表 5.15。

表 5.15 不同敷设深度连接处 A 相低阻故障波头时刻及速度

		M 端	N 端
	幅值/ 10^{-4} A	3.6616871	1.4958065
初始行波	时间/us	50006	50018
	波速/ 10^8 m/s	2.8368852	2.0983882

双端法测距

根据双端法测距公式 (4.14)

使用 t_{M1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{45 - 2.8368852 \times 12}{2} \times 10^2 = 547.86888 \text{ m} \quad (5.16)$$

使用 t_{N1} 时的波速度，则

$$L_M = \frac{L + v \times (t_{M1} - t_{N1})}{2} = \frac{45 - 2.0983882 \times 12}{2} \times 10^2 = 990.96708 \text{ m} \quad (5.17)$$

最小误差为： $\Delta L = (10 - 9.9096708) \times 10^2 = 9.03292 \text{ m}$

2) 电缆连接处发生 A 相护层高阻故障

电缆连接处发生 A 相护层高阻故障，过度电阻 400 欧姆，其他的条件同低阻故障一致，两测量端的电流波形及模极大值图形如图 5.29，图 5.30。

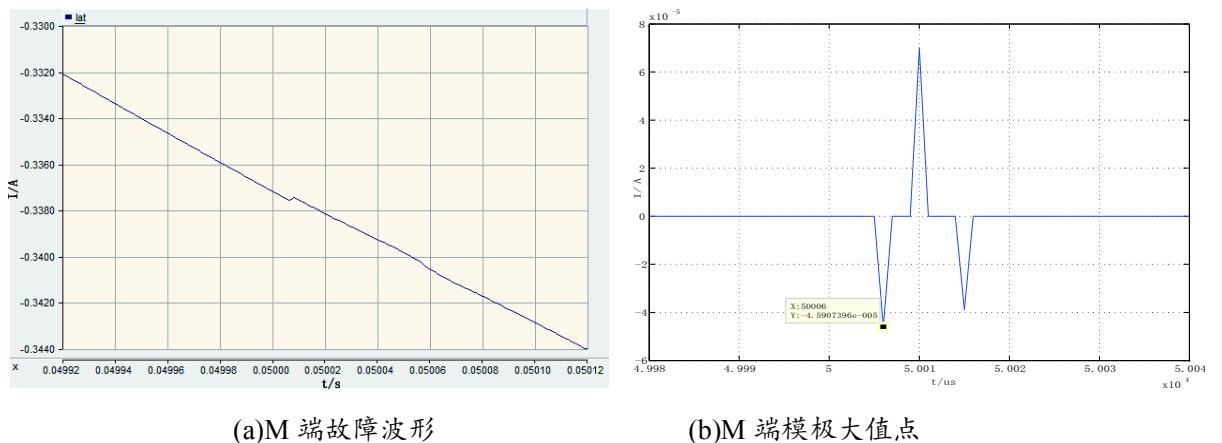


图 5.29 不同敷设深度连接处 A 相高阻故障 M 端电流波形及模极大值

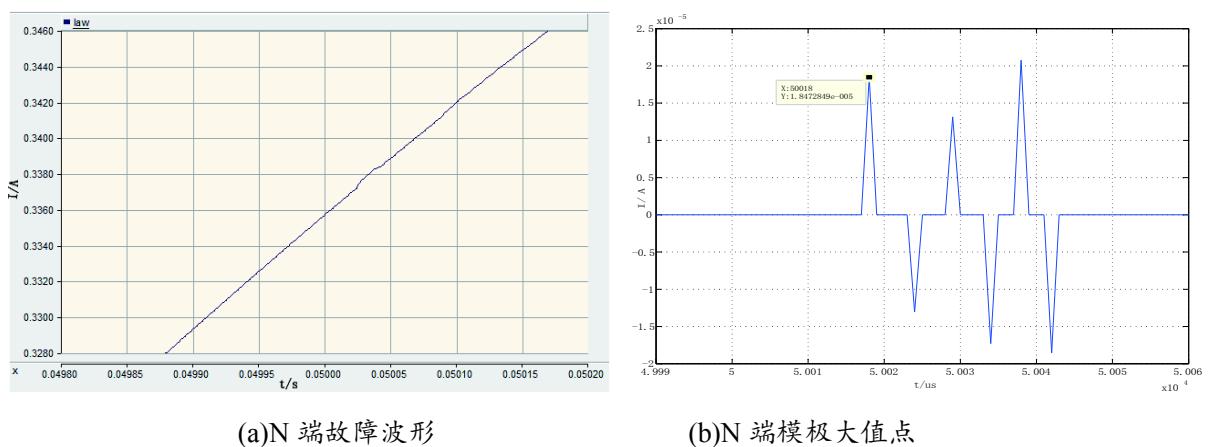


图 5.30 不同敷设深度连接处 A 相高阻故障 N 端电流波形及模极大值

将故障仿真的 M 端，N 端的电流数据，经 bior4.12 小波分析及模极大值提取，找到初始行波到达两端的幅值、时刻，以及根据波速公式 (5.2) 和 (5.3) 得到对应时刻

的波速，如下表 5.16。

表 5.16 不同敷设深度连接处 A 相高阻故障波头时刻及速度

	M 端	N 端
幅值/ 10^5 A	4.5907396	1.8472849
初始行波	时间/us	50006
	波速/ 10^8 m/s	2.8368852
		2.0983882

与低阻故障比较，初始行波波头时间一致，幅值约为低阻幅值的十分之一，测量距离及误差一样。

6 结论

6.1 全文总结

本文分析中低压 XLPE 电缆外护套结构、材料和厚度，研究了电缆的组成结构及外护套在电缆结构的位置及功能，对于外护套的材料，主要研究了聚氯乙烯和聚乙烯的特性，比较两者性能；研究了外护套厚度对电缆质量的影响，结合外护套实际使用情况，为满足实际需求的外护套提供参考；简介电缆外护套故障离线检测方法，说明离线检测的预定位查找和精确定位查找的原理和方法，分析其优点和不足。

本文总结中低压 XLPE 电缆外护套故障情况，根据其材料，结构，故障电阻，划分故障类型；分析了电缆外护套的故障原因，提出合适的预防和处理措施，对于实际电缆的故障预防和处理提供参考。

本文根据小波分析理论，针对外护套故障的护层行波电流特点，研究满足其条件的小波基函数，并构造新的小波基；根据暂态行波传播特性，测量 10kV 三芯 XLPE 电缆护层行波波速，使用最小二乘法及最小误差原则对行波波速进行拟合，得到行波波速公式；根据行波测距原理，选择合适的行波测量算法，分析了影响行波测距的因素。

本文选择 PSCAD 及 MATLAB 作为系统仿真软件和数值分析软件，通过 PSCAD 构建 10kV 三芯 XLPE 电缆外护套故障模型，使用构造的小波基对仿真数据进行小波变换，用合适的行波测距算法进行故障测距，分析比较了在不同故障测距范围、不同过渡电阻下的各种外护套故障类型的测距精度。

6.2 未来展望

关于中低压 XLPE 电缆外护套故障的检测方法，主要使用离线方法的预定位和精确定位，由于离线检测不能实时监测电缆运行状态，难以判断电缆外护套的损坏和老化情况，只能由电缆外护套故障发生后再去查找故障点，且在查找和判断外护套故障时存在较大的误差。

因此，对于未来的中低压 XLPE 电缆的外护套故障检测，最优方法是可在线监测外护套损坏程度，以及可灵敏的判断出外护套破损处，则可快速准确的锁定潜在的电缆故障，及时更换或者修复破损电缆，避免电缆故障发生；此外，对于离线测距方法，需提高测距精度，或提出新的检测原理和方法，进一步提高准确性。在实际情况中，两种方法可结合使用，根据具体要求和实际故障情况，综合考虑选择最佳方法。

此外，目前电缆外护套制作工艺和材料性能也存在一定的不足，在实际使用中暴露出较大的缺陷，例如：外护套容易受到外力损坏、坚硬物的切伤，易受到白蚁的侵蚀，潮湿环境的腐蚀，还存在护套开裂问题。

结合实际需求，研发出更能满足要求的外护套材料，完善外护套制造技术，并改进外护套的制作工艺和流程，制作出更合适优质的外护套；同时提高电缆敷设施工质量以及电缆中间接头的制作和安装水平，且不定期的巡查，可预防及减少外护套故障，提高电力电缆的供电性能。

参考文献

- [1] Inoue N, Tsunekage T, Sakai S. On-line fault location system for 66kV underground cables with fast O/E and fast A/D technique[J].IEEE Transactions on Power Delivery,1994, 9(1):579-584.
- [2] C .M .Wiggi ns, D.E.Thomas, T. M.Salas et al.A novel concept for URD cable faultlocation [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on,1994,9(1):591- 597.
- [3] E .S.Tag EI Din, M .Gilany, M.M.Abdel Aziz, et a l .A wavelet-based fault location technique for agedpower cables[C].IEEE Power Engineering Society General Meeting,2005:2485-2491
- [4] M .Gilany, D. K. Ibrahim, E. S. T EI Din.Traveling-Wave-Based Fault-Location Scheme for Multiend-Aged Underground Cable System[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(1):82-89
- [5] Boggess A.Nareowieh F J.A First Course in Wavelet with Fourier Analysis[M].Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004:59-63
- [6] 葛耀中.新型继电保护和故障测距的原理和技术[M].西安:西安交通大学出版社. 2007
- [7] 白春涛.电力电缆故障低压脉冲自动测距方法研究[D].郑州:郑州大学, 2007:10-13
- [8] 李尚振, 刘恩恒. 高压电缆金属护套接地故障的快速定位方法[J]. 山东电力技术, 2001, 3: 027.
- [9] 陈钊. 基于小波和脉冲衰减规律的电缆故障定位研究[D]. 长沙理工大学, 2013.
- [10] 张栋国主编. 电缆故障分析与测试. 中国电力出版社, 2005
- [11] 徐丙垠, 李胜祥, 陈宗军. 电力电缆故障探测技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1999: 29-33
- [12] B Ravikumar, D Thukaram and H P Khincha. Application of support vector machines for fault diagnosis in power transmission system[J]. IET Gener Transm Distrib,2008,2(1):119-130
- [13] 冀维成. 35KV 及以下电力电缆故障点测寻方法[J]. 硅谷, 2009, 1(11) : 43-58
- [14] 成永红. 电力设备绝缘在线检测与诊断 IM]北京:中国电力出版社. 2001
- [15] DL/T596-1996 电力设备预防性试验规程规定[S], 1996
- [16] 刘超, 白晓斌, 黄东利. 高压单芯电缆金属护套的接地方式[J]. 电缆技术. 2008 (2) : 32-33
- [17] 王爱华. 高压电力电缆故障检测技术的研究[D]. 大连理工大学硕士论文, 2009
- [18] 杨言清。10kV 以下输电网中电力电缆的选用浅析[J].江西电力, 2004. 28 (5) :46-48
- [19] 胡其秀. 电力电缆线路手册[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005: 52-55
- [20] 文昊. 电力电缆的故障测距与定点方法探讨[J]. 中国高新技术企业, 2009, 15 (2) : 14-15
- [21] 何乃烟. 刘毅刚. 许继葵. 高压交联电缆的自燃危害及对策[J]广东电缆技术, 2002, 3: 47-51
- [22] 任艳霞. 电力电缆故障诊断与监测[D]. 北京:北京交通大学, 2008: 35-37
- [23] 杨爱爱. 电力电缆故障性质分析[J]. 山西冶金, 2006, 29 (2) : 35-37
- [24] 曾庆沛. 浅谈电力电缆故障探测技术[J]. 科技资讯, 2010, 7, (11) :123-125
- [25] 贺智涛. 单芯高压电力电缆外护套故障分析及预防[J]. 湖北水力发电, 2006, 2: 77-79.
- [26] 晋入兵. 电缆外护套绝缘不良的原因及解决措施--以施工中 110kv 及以上 XLPE 单芯电缆为例[J]. 科技创新与应用, 2014 (8) : 140-140.

- [27] 郑晓泉, 阎春雨, 孙希斌, 等. 高压 XLPE 电缆护层绝缘故障及检测技术[J]. 电线电缆, 2004 (4): 29-32.
- [28] 具章平. 高压电缆外护套故障类型分析及探讨[J]. 科技风, 2012 (17).
- [29] 郭国伟. 一起电缆外护套材质不良故障分析[J]. 江西电力职业技术学院学报, 2010, 23(4): 50-51.
- [30] 胡广元. 现代信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [31] Mallat S.A Wavelet Tour of signal Processing.SanDiego,CA:Academic Press,1997
- [32] Daubechies I.Ten Lectures on Wavelets.Philadelphia,PA:SIAM,1992
- [33] Daubechies I,Lagarias J.Tow-scale difference equations:IL.Local regularity,infinite products of matrices and fractals.SIAM J of Math.Anal,1992,24
- [34] Mallat S.A Wavelet Tour of signal Processing.SanDiego,CA:Academic Press,1997
- [35] 何正友, 钱清泉. 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J]. 电力系统自动化, 2003, 10:45-48+76.
- [36] 田书, 贾纯纯, 马超. 故障定位中小波基的选择研究[J]. 煤矿机械, 2008, 09:205-207.
- [37] 魏宝琴, 李白萍. 最优小波基的选取原则[J]. 甘肃科技, 2007, 10:42-43.
- [38] 董新洲. 小波理论应用于输电线路行波故障测距研究[D]. 西安交通大学, 1996.
- [39] 汪敏. 小波变换在输电线路行波故障测距中的应用[D]. 华北电力大学, 2014.
- [40] Cohen A, Daubechies I, Feauveau J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets[J]. Communications on pure and applied mathematics, 1992, 45(5): 485-560.
- [41] 杨铁成. 试论电力电缆行波故障测距方法[J]. 黑龙江科技信息, 2007, 9(18): 71-76
- [42] 董杏丽, 葛耀中. 测距式行波距离保护的研究(二)——原理方案与仿真试验[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9):53-58
- [43] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理及技术[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1996.
- [44] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社, 1985.
- [45] 邱毓昌. 高电压工程[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1995.
- [46] Lou van der Sluis 著, 王一字等译. 电力系统暂态[M]. 北京:中国电力出版社, 2003.
- [47] 陈平. 输电线路现代行波故障测距及其应用研究[D]. 博士学位论文, 西安交通大学, 2003.
- [48] 陈平, 葛耀中, 索南加乐, 等. 输电线路故障开断暂态行波的传播特性研究 9-36[J]中国电机工程学报, 2000, 20(7):75~78.
- [49] 陈平, 葛耀中, 索南加乐, 徐丙垠. 基于故障开断暂态行波信息的输电线路故障测距研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8):56~59.
- [50] 季涛, 孙同景, 熊立新. 电力线路故障行波测距技术及应用 [J]. 山东大学学报(工学版), 2005, 35(Supp):31-36.
- [51] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用—D 型原理 [J]. 继电器, 2004, 32(3):14-17.
- [52] 陈平, 葛耀中, 徐丙垠, 等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用—A 型原理

- [J]. 继电器, 2004, 32(2):13-18.
- [53] 李友军, 王俊生, 郑玉平, 等. 几种行波测距算法的比较[J]. 电力系统自动化, 2001, (14):36-39.
- [54] 宋建. 基于小波变换的高压电缆故障行波测距研究[D]. 昆明理工大学, 2009.
- [55] 赵爱丽. 电力电缆脉冲电流故障测距法的改进[D]. 山东理工大学, 2009.
- [56] 朱正国, 黄超, 毛骏, 等. 10kV 电缆脉冲电流法局部放电检测技术研究[J]. 华东电力, 2014, 42(9).

附录

1 小波分析理论

1.1 构造 bior4.12 小波滤波器系数程序

滤波器系数程序

```
clear all;clc;

N=4;          % B 样条的阶数, 对应(3.36)的  $\hat{N}$ , 即 N-1 次 B 样条小波
bior_N=12;    % 对应(3.38)的 N, 且 bior_N>=1
syms z;
i=1;
n_min=-round(N/2);
n_max=N-round(N/2);
for n=n_min:n_max
    h(i)=2^(-N)*nchoosek(N,n+round(N/2));
    i=i+1;
end
h           % 显示  $\hat{H}_0(z)/\sqrt{2}$  系数, 求滤波器系数时需乘以根号 2
rat_h=rats(h)      % 分数表示
k=(N+bior_N)/2;    % (3.38) 中的  $l + \hat{l}$ 

p1=2-z-z^(-1);    % 4 倍(3.38) 中的  $\left(\sin^2 \frac{\omega}{2}\right)$ 
sum=0;
for m=0:k-1
    p2=nchoosek(k-1+m,m)*(1/4)^m*p1^m;    %  $\left(\sin^2 \frac{\omega}{2}\right)^m$ 
    sum=sum+p2;
    %  $\sum_{m=0}^{l+\hat{l}-1} \binom{l + \hat{l} - 1 + m}{m} \left(\sin^2 \frac{\omega}{2}\right)^m$ 
end
if rem(bior_N,2)==0
    p3=z+z^(-1)+2;
```

```

f=2^(-bior_N)*p3^(bior_N/2);      %  $\left(\cos\frac{\omega}{2}\right)^N$ 
else
    p3=z+1;
    p4=z+z^(-1)+2;
    f=2^(-bior_N)*p3*p4^((bior_N-1)/2);
end
bior_hz=f*sum;                  %  $H_0(\omega) = \sqrt{2} \left( \cos \frac{\omega}{2} \right)^N \sum_{m=0}^{l+\hat{l}-1} \binom{l+\hat{l}-1+m}{m} \left( \sin^2 \frac{\omega}{2} \right)^m$ 
bior_hz=expand(bior_hz)        % 求出  $H_0(z)/\sqrt{2}$  系数

```

1.1.1 bior4.12 濾波器系数程序结果

`h =`

0.0625000000000000	0.2500000000000000	0.3750000000000000
0.2500000000000000	0.0625000000000000	

`rat_h =`

1/16	1/4	3/8	1/4	1/16
------	-----	-----	-----	------

`bior_hz =`

778635/2097152*z+778635/2097152/z-5249/16384*z^2-5249/16384/z^2-1354283/838
8608*z^3-1354283/8388608/z^3+288995/2097152*z^4+288995/2097152/z^4+401465/838
8608*z^5+401465/8388608/z^5-3415/65536*z^6-3415/65536/z^6-32543/4194304*z^7-325
43/4194304/z^7+15153/1048576*z^8+15153/1048576/z^8-1095/4194304*z^9-1095/41943
04/z^9-165/65536*z^10-165/65536/z^10+3135/8388608*z^11+3135/8388608/z^11+429/20
97152*z^12+429/2097152/z^12-429/8388608*z^13-429/8388608/z^13+495495/524288

1.2 MATLAB 添加 bior4.12 小波

```
Current_DIR = cd;      % Save the current directory name.  
cd(tempdir);          % Work in a temporary directory.  
familyName      = 'BIOSPL P4';  
familyShortName = 'biop4';  
familyWaveType  = 2;  
familyNums       = " ";  
fileWaveName    = ' biop4.m';  
  
wavemngr('add','BIOSPL P4','biop4',2,"'biop4.m')  
  
function[Rf,Df]=file(biop4)  
Rf=sqrt(2)*[1/16 1/4 3/8 1/4 1/16];      %  $\hat{H}_0(z)$  重构系数,  
Df=sqrt(2)*[-429/8388608 429/2097152 3135/8388608 -165/65536 -1095/4194304  
15153/1048576 -32543/4194304 -3415/65536 401465/8388608 288995/2097152  
-1354283/8388608 -5249/16384 778635/2097152 495495/524288 ...  
778635/2097152 -5249/16384 -1354283/8388608 288995/2097152 401465/8388608  
-3415/65536 -32543/4194304 15153/1048576 -1095/4194304 -165/65536 3135/8388608  
429/2097152 -429/8388608];           %  $H_0(z)$  分解系数  
end
```

1.2.1 bior4.12 小波滤波器系数

MATLAB 输入如下代码查看 bior4.12 小波滤波器系数。

```
[LO_D,HI_D,LO_R,HI_R] = wfilters('biop4')
```

其中， LO_D——分解低通滤波器； HI_D——分解高通滤波器； LO_R——重构低通滤波器； HI_R——重构高通滤波器

```
>> [LO_D,HI_D,LO_R,HI_R] = wfilters('biop4')

LO_D =
    Columns 1 through 6
        0      -0.000072323992045      0.000289295968179
    0.000528521480327   -0.003560565762200   -0.000369206392955
    Columns 7 through 12
    0.020436838255538      -0.010972679128720      -0.073692921684328
    0.067681938149704      0.194883655766493      -0.228315041767516
    Columns 13 through 18
    -0.453076598443382      0.525072182244480      1.336547372985948
    0.525072182244480   -0.453076598443382   -0.228315041767516
    Columns 19 through 24
    0.194883655766493      0.067681938149704      -0.073692921684328
    -0.010972679128720      0.020436838255538   -0.000369206392955
    Columns 25 through 28
    -0.003560565762200      0.000528521480327      0.000289295968179
    -0.000072323992045

HI_D =
    Columns 1 through 6
        0          0          0          0
    0          0          0
    Columns 7 through 12
```

	0	0	0
0	0	0.088388347648318	0
Columns 13 through 18			
	-0.353553390593274	0.530330085889911	-0.353553390593274
0.088388347648318	0	0	0
Columns 19 through 24			
	0	0	0
0	0	0	0
Columns 25 through 28			
	0	0	0
0	0	0	0
LO_R =			
Columns 1 through 6			
	0	0	0
0	0	0	0
Columns 7 through 12			
	0	0	0
0	0	0.088388347648318	0
Columns 13 through 18			
	0.353553390593274	0.530330085889911	0.353553390593274
0.088388347648318	0	0	0
Columns 19 through 24			
	0	0	0
0	0	0	0
Columns 25 through 28			
	0	0	0
0	0	0	0
HI_R =			
Columns 1 through 6			
	0	0.000072323992045	0.000289295968179
-0.000528521480327	-0.003560565762200	0.000369206392955	
Columns 7 through 12			

0.020436838255538	0.010972679128720	-0.073692921684328
-0.067681938149704	0.194883655766493	0.228315041767516
Columns 13 through 18		
-0.453076598443382	-0.525072182244480	1.336547372985948
-0.525072182244480	-0.453076598443382	0.228315041767516
Columns 19 through 24		
0.194883655766493	-0.067681938149704	-0.073692921684328
0.010972679128720	0.020436838255538	0.000369206392955
Columns 25 through 28		
-0.003560565762200	-0.000528521480327	0.000289295968179
0.000072323992045		

1.2.2 MATLAB 小波工具箱 bior4.12 图形

MATLAB R2008a 小波工具箱的 Wavelet Display 查看新构建的 bior4.12 小波, 如图 1.1。

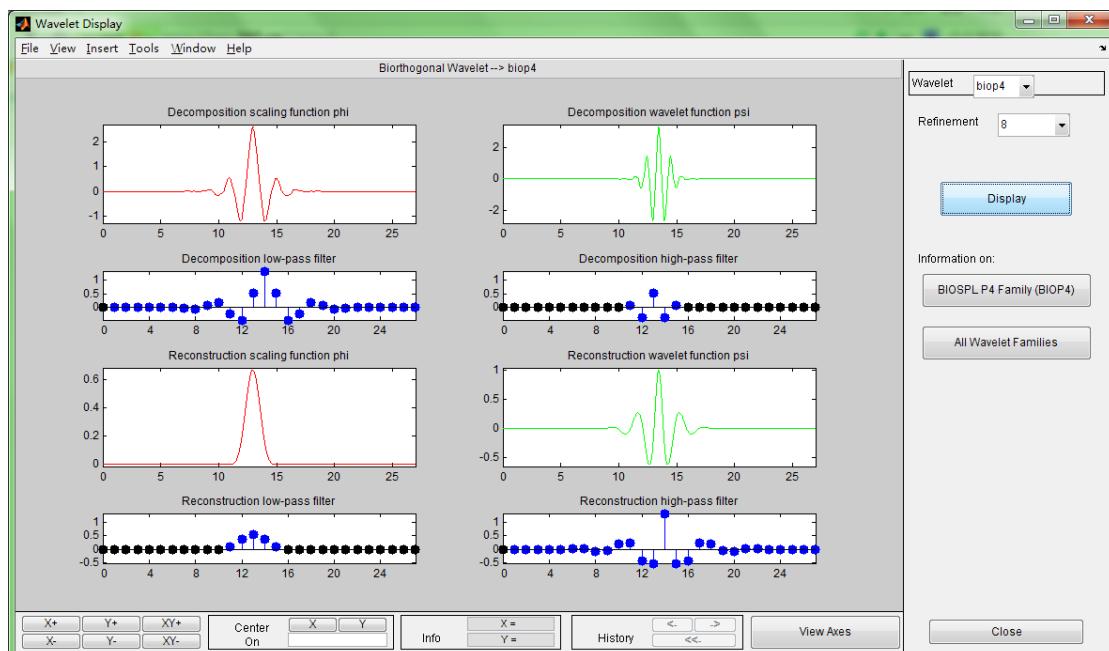


图 1.1 MATLAB R2008a 中 Wavelet Display 的 bior4.12 小波

1.2.3 bior4.12 尺度函数和小波函数图形

MATLAB 输入如下代码查看 bior4.12 的尺度函数和小波函数，如图 1.2。

```
wname = 'biop4';  
clf; wavefun(wname,'plot',7);
```

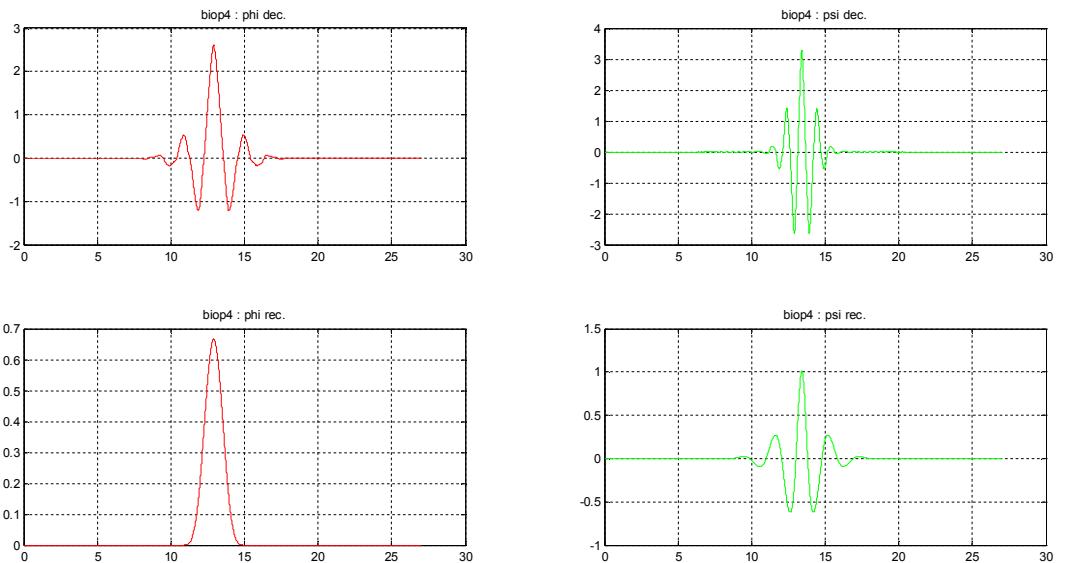


图 1.2 MATLAB R2008a 中 bior4.12 小波函数和尺度函数

其中，【phi, psi, xval】=wavefun ('wname', inter); 对应于正交小波 其中：phi 是尺度函数，psi 是小波函数，xval 是相应的点数；【phi1, psi1, phi2, psi2, xval】=wavefun ('wname', inter); 对应于双正交小波 其中：phi1 是分解尺度函数，psi1 是分解小波函数，phi2 是重构尺度函数，psi2 是重构小波函数，xval 是相应的点数。

1.3 bior4.12 小波变换程序

```
clear;
load data      % 电流波形的Y轴数据, mat文件
s= data;
ls=length(s);
[cA1,cD1]=dwt(s,'biop4');
A1=upcoef('a',cA1,'biop4',1,ls);
D1=upcoef('d',cD1,'biop4',1,ls);
subplot(2,1,1);plot(A1);title('低频A1')
subplot(2,1,2);plot(D1);title('高频D1')
A0=idwt(cA1,cD1,'biop4',ls);
figure(2)
subplot(2,1,1);plot(s);title('原始信号')
subplot(2,1,2);plot(A0);title('重构信号')

figure(3)
[C,L]=wavedec(s,5,' biop4');      %多层分解
cA5=appcoef(C,L,'biop4',5);
A5=wrcoef('a',C,L,'biop4',5);
D1=wrcoef('d',C,L,'biop4',1);      % 重构高频信号
D2=wrcoef('d',C,L,'biop4',2);
D3=wrcoef('d',C,L,'biop4',3);
D4=wrcoef('d',C,L,'biop4',4);
D5=wrcoef('d',C,L,'biop4',5);
subplot(3,2,1);plot(A5);title('低频A5')
subplot(3,2,2);plot(D1);title('高频D1')
subplot(3,2,3);plot(D2);title('高频D2')
subplot(3,2,4);plot(D3);title('高频D3')
subplot(3,2,5);plot(D4);title('高频D4')
subplot(3,2,6);plot(D5);title('高频D5')

figure(4)
A0=waverec(C,L,'biop4');
```

```

subplot(3,1,1);plot(s);title('原始信号')
subplot(3,1,2);plot(A0);title('重构信号')
subplot(3,1,3);plot(s-A0);title('误差信号')
err = max(abs(s-A0)) % 重构误差

```

1.4 提取模极大值程序

```

>> load dataDn      % 经过 bior4.12 小波变换的多层分解高频系数
>> W=Dn;
>> W(1:50000)=0;    % 消除边界影响
>> L=2;            % 比较范围 设定值
>> s= MaxMode(W,L);
>> plot(s)

```

1.5 模极大值函数程序

```

function md=MaxMode(W,L)

Wmax=0;          % 求取第一个小波变换的模极大值
tfirst=0;         % 求第一个小波变换模极大值点的时刻
for i=1:80000
    md(i)=0;
end

for(i=1:1:80000)
    if(abs(W(i))>abs(Wmax))

```

```

Wmax=W(i);
tfirst=i;
end
end
%求取小波变换模极大值点。
Wflag=abs(0.002*Wmax);      %设定小波变换模极大值的门坎值
tflag=tfir+2*L/1;           % 比较范围
for(i=1:1:tflag)
if((W(i+1)>Wflag)&(W(i+1)-W(i)>Wflag))
md(i+1)=W(i+1);
elseif((W(i+1)<-Wflag)&(W(i+1)-W(i)<-Wflag))
md(i+1)=W(i+1);
else
md(i+1)=0;
end
end

for(i=1:1:tflag)
if((md(i)>0)&(md(i+1)>md(i)))
md(i)=0;
elseif((md(i)<0)&(md(i+1)<md(i)))
md(i)=0;
end
end

```

2 中低压 XLPE 电缆外护套故障测距

2.1 护层行波速度拟合公式选择

根据时间波速度及误差最小原则，选择如下的分段拟合，若是用一个公式拟合则最佳为四次多项式，如图 2.1，但是由于末端 20us-34us 出现波速度小于 2.0 的所以不符合实际情况，应舍弃。经过比较选择，分段拟合误差最小。

一个公式的拟合程序程序及误差如下

```
>>x=[0.000000,0.000005,0.000010,0.000014,0.000017,0.000018,0.000020,0.000024,  
0.000030,0.000034];  
>>y=[2.99792,2.896,2.576,2.351,2.14286,2.10526,2.0333,2.00300, 2.0001,2.0000];  
>>p=polyfit(x,y,4); %多项式拟合  
>>x1=0.000000:0.000001:0.000034;  
>>y1=polyval(p,x1);  
>>yp=polyval(p,x);  
>>r1= sum((y-yp).^2); %拟合误差-平方和  
>>plot(x,y,'*r',x1,y1,'-b')  
>> r1  
r1 =  
0.002056746864100  
>> p  
p =  
1.0e+018 *  
-5.845312401148910 0.000453797715503 -0.000000010140659  
0.000000000000021 0.0000000000000000
```

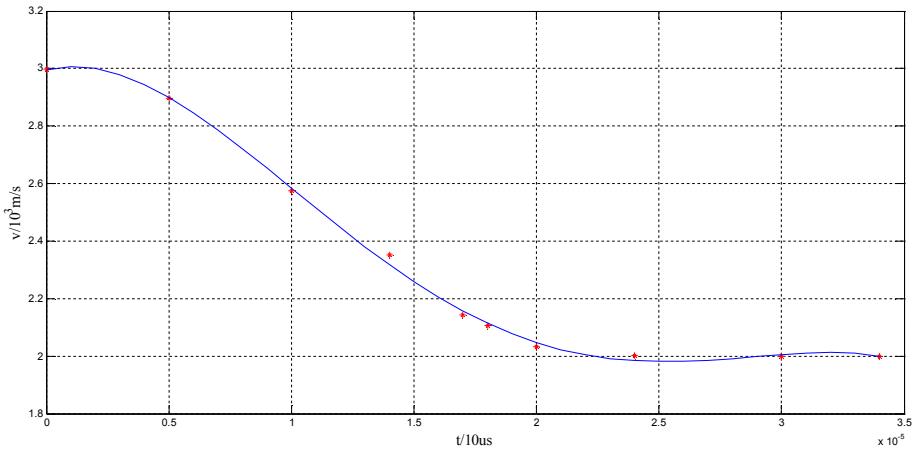


图 2.1 使用一个公式拟合的护层行波波速曲线

2.2 护层行波速度拟合程序

(1) 时间 0us-17us 的公式拟合及误差

```

>>x=[0.000000,0.000005,0.000010,0.000014,0.000017];
>> y=[2.99792,2.896,2.576,2.351,2.14286];
>> p1=polyfit(x,y,3);
>> x1=0.000000:0.000001:0.000017;
>> y1=polyval(p1,x);
>> y2=polyval(p1,x1);
>> r1= sum((y-y1).^2)
>> plot(x,y,'*r',x1,y2,'-b')
r1 = 0.001090707457195
>> p1
p1=
    1.0e+014 *
    1.679316242359920      -0.000059311029406      0.000000000022699
    0.000000000000030

```

(2) 时间 17us-34us 的公式拟合及误差

```
>>x=[0.000017,0.000018,0.000020,0.000024, 0.000030,0.000034];
>> y=[2.14286,2.10526,2.0333,2.00300, 2.0001,2.0000];
>> p=polyfit(x,y,4);
>> x1=0.000017:0.000001:0.000034;
>> y1=polyval(p,x);
>> y2=polyval(p,x1);
>> r1= sum((y-y1).^2)
>> plot(x,y,'*r',x1,y2,'-b')
r1 =
8.372047527058967e-005
>> p
p =
1.0e+018 *
9.563249796838150      -0.001097118583190      0.000000046931732
-0.000000000000887    0.0000000000000000
```

2.3 护层行波速度拟合曲线

将两段连接起来 0-34us 的程序如下，将分段拟合连接起来的护层行波波速曲线图
2.2.

```
>> xa=[0.000000,0.000005,0.000010,0.000014,0.000017];
>> ya=[2.99792,2.896,2.576,2.351,2.14286];
>> xb=[0.000017,0.000018,0.000020,0.000024, 0.000030,0.000034];
>> yb=[2.14286,2.10526,2.0333,2.00300, 2.0001,2.0000];
>> pa=polyfit(xa,ya,3);
>> xa1=0.000000:0.000001:0.000017;
>> xb1=0.000017:0.000001:0.000034;
>> ya1=polyval(pa,xa)
>> ya2=polyval(pa,xa1)
```

```

>> ra1= sum((ya-ya1).^2)
>> pb=polyfit(xb,yb,4);
>> xb1=0.000017:0.000001:0.000034;
>> yb1=polyval(pb,xb);
>> yb2=polyval(pb,xb1);
>> rb1= sum((yb-yb1).^2)
>> rab= ra1+rb1           %两段拟合的总误差-平方和
>> plot(xa,ya,'*r',xa1,ya2,'-b')
>> hold on
>> plot(xb,yb,'*r',xb1,yb2,'-b')
rab =

```

0.001174427932465

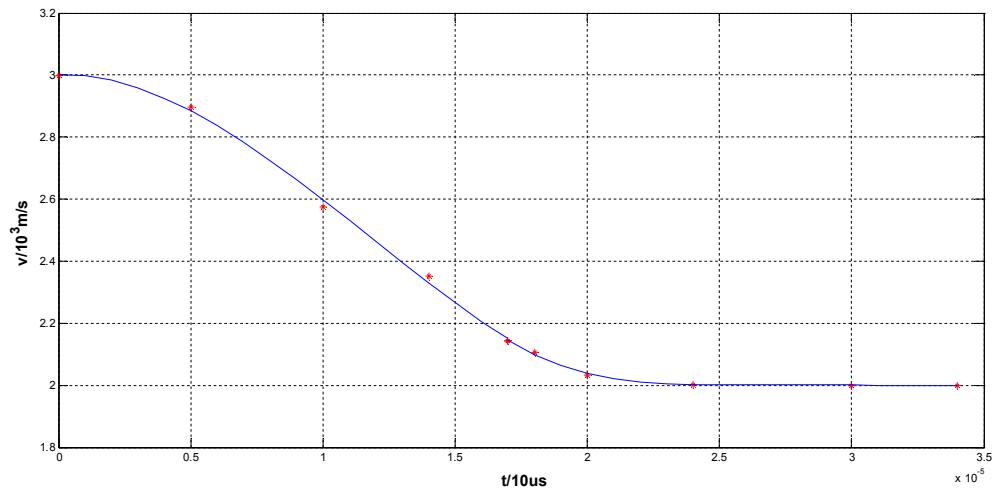


图 2.2 分段拟合的护层行波波速曲线

攻读硕士学位期间发表的科研成果

参与项目：

深圳供电局有限公司“配电电缆状态评估和防灾技术研究与应用”项目群《城市 10kv 配网电缆外护套检测方法研究及标准制定技术开发合同》(项目号：03NSHK1400255，2014 年 4 月 1 日~2015 年 12 月 1 日，参与)

致 谢

感谢刘剑导师的指导，感谢刘开陪老师及实验室各位老师的点拨，感谢深圳供电局有限公司的相关工作人员及其提供的相关数据，在此致以诚挚的谢意！感谢悠久美丽的武汉大学！谢谢！