



国家电网公司
电力科技著作出版项目

输电线路行波故障测距技术 及小波变换应用

覃 剑 陈祥训 雷林绪 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

中国电力科学研究院专著出版基金资助

输电线路行波故障测距技术 及小波变换应用

覃 剑 陈祥训 雷林绪 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

行波故障测距技术是利用电力输电线路在故障时产生的高频电磁波进行故障定位的一种技术,具有准确、高效的特点。小波变换是近 20 年来兴起的时-频分析方法,在包括电力系统在内的诸多领域都得到广泛的应用。

本书共九章,主要包括输电线路故障测距技术、输电线路故障行波的研究方法、传输线方程与行波特性、小波变换应用基础、故障测距用数学方法、行波在输电线路上的传播特性、基于小波变换的行波故障测距技术、行波故障测距技术应用实践等内容。

本书可供从事电力系统故障分析和诊断、行波故障测距、行波保护、小波变换应用的科研和工程技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路行波故障测距技术及小波变换应用 / 覃剑, 陈祥训, 雷林绪编著. —北京: 中国电力出版社, 2014.12

ISBN 978-7-5123-5698-6

I. ①输… II. ①覃…②陈…③雷… III. ①超高压
输电线路—行波—故障检测—测距 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 056587 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 12 月第一版 2014 年 12 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 235 千字

印数 0001—2000 册 定价 60.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

电能是现代社会应用最广泛、最重要的能源，在国民经济和人民生活中占有重要的地位。当前，电力已经和人们的工作生活非常紧密地结合在一起。电力中断，即使是短时间的电力中断也会给社会带来很大的生活不便和经济损失，甚至巨大的破坏。例如，2003年的北美大停电给美国和加拿大的部分地区带来了巨大的经济损失。停电期间，不仅造成了社会许多基础设施的瘫痪，还带来社会大恐慌。2003年9月的意大利大停电以及2012年8月发生的印度电网大停电等不仅严重影响了停电波及区域的人们的正常生活，也造成了很大的经济损失和严重的社会影响。建设一个坚强的电网对于现代国家具有重要的战略意义。

预料之外的电力中断常常是由于输电线路故障引起。为了稳定而有效地提供电能，电力是通过电力系统（电网）传输、配送供给用户的，其中高压输电线路是电力系统的骨干和命脉。由于高压输电线路长期暴露于风、雨、雷、电等恶劣的自然环境中，不可避免地会发生各种各样的故障。当然，故障发生后，继电保护装置会动作，切除故障线路。这样，可避免故障的进一步发展而造成更大的事故。之后，就需要维护人员尽快地赶到事故现场，维修设备，恢复供电。出于安全性和稳定性考虑，高压输电线路故障后必须找到故障点，查明故障原因，消除隐患，恢复供电。因此，输电线路发生故障后及时找到故障点并加以修复是电力系统运行中的一项重要工作。

行波故障测距技术是利用电力输电线路在故障时产生的高频电磁波进行故障定位的一种技术，具有准确、高效的特点，测距精度基本不受线路长度、故障位置、故障类型、负荷电流、大地电阻率等的影响，已广泛应用于我国的电力生产实际中。小波变换是集泛函分析、傅里叶分析、样条分析、调和分析、数值分析于一体的新的信号分析方法，在众多科学和技术领域得到广泛应用。

本书的作者都是长期从事故障测距研究和小波变换研究的科研人员，在行波故障的原理、方法及装置研制方面有着丰富的经验，并对小波变换技术的原理、方法和应用进行过深入的研究。全书由中国电力科学研究院的覃剑博士（教授级高工）统稿；第1~3章中2.2.3部分由陈祥训教授编写，其余部分由智能电网研究院的雷林绪高工编写；第4~6章由中国电力科学研究院的陈祥训教授编写；第7~9章由中国电力科学研究院的覃剑博士编写。

本书详细阐述了高压输电线路故障行波测距技术的原理、方法、应用技术以及小波变换技术的相关知识等。可供从事电力故障诊断、行波故障测距、行波保护、小波变换应用的广大电力系统工程技术人員、科研人員和高校師生学习和研究时参考。

由于作者的水平有限，加上时间仓促，书中难免会有错漏及不妥之处，敬请读者给予谅解并提出宝贵意见。

作 者

2014 年 10 月

前言

1 绪论	1
1.1 电力系统及故障.....	1
1.2 输电线路故障测距问题.....	5
1.3 输电线路故障测距技术发展历程.....	6
1.4 小结.....	8
2 输电线路故障测距技术	9
2.1 阻抗法.....	9
2.2 行波法.....	14
2.3 阻抗法和行波法的比较.....	18
2.4 小结.....	19
3 输电线路故障行波的研究方法	20
3.1 电力系统各元件特性和电磁暂态计算模型.....	20
3.2 参数计算.....	26
3.3 输电线路波过程计算方法.....	28
3.4 电力系统电磁暂态分析计算基本方法.....	35
3.5 常用电力系统故障分析软件.....	37
3.6 小结.....	38
4 传输线方程与行波特性	39
4.1 传输线方程及其解.....	39
4.2 特殊情况的传输线方程解.....	47
4.3 行波的衰减常数、相位常数与导波特性.....	53

4.4	行波的相速度与群速度	55
4.5	行波的色散	57
4.6	色散与行波波形畸变	65
4.7	小结	69
5	小波变换应用基础	71
5.1	小波基本类型与基本特性	71
5.2	正交、双正交小波多分辨率分析	81
5.3	正交、双正交小波生成方法	86
5.4	其他小波生成方法	93
5.5	小波变换	107
5.6	小结	120
6	故障测距用数学方法	122
6.1	基于阻抗的计算方法	122
6.2	离散卷积—相关基础算法	132
6.3	短序列循环卷积的 Winograd 快速算法	136
6.4	长序列循环卷积的 Agarwal-Cooley 算法	143
6.5	小结	147
7	行波在输电线路上的传播特性	149
7.1	行波在输电线路上传播时的色散特性研究	149
7.2	故障类型对行波传播的影响	151
7.3	线路参数等对行波传播的影响	154
7.4	小结	157
8	基于小波变换的行波故障测距技术	158
8.1	传统行波法的不足	158
8.2	确定行波到达时间和行波传播速度	159
8.3	利用小波变换故障测距的两种方案	161
8.4	用于测距的合适小波与合适尺度的选择	162
8.5	单端行波测距法和双端行波测距法的对比	164
8.6	小结	167

9 行波故障测距技术应用实践	168
9.1 110~750kV 交流输电工程中的应用	168
9.2 直流输电工程中的应用	172
9.3 影响行波故障测距技术的主要因素	172
9.4 线路故障未能找到故障点原因分析	176
9.5 小结	177
参考文献	178
索引	187



Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Power System and Its Fault	1
1.2 Fault Location Issue of Power Transmission Line	5
1.3 Development History of Transmission Line Fault Location Technology	6
1.4 Conclusions	8
Chapter2 Power Transmission Line Fault Location Technology	9
2.1 Impedance Method	9
2.2 Traveling Wave Method	14
2.3 Comparison of Impedance Method and Traveling Wave Method	18
2.4 Conclusions	19
Chapter 3 Analysis Methods of Fault Traveling Wave in Transmission Line	20
3.1 Components Characteristics and Electromagnetic Transient Calculation Model of power system	20
3.2 Calculation of Parameters	26
3.3 Calculation Method of Transmission Line Wave Process	28
3.4 Basic Method of Power System Electromagnetic Transient Calculation	35
3.5 Commonly used Power System Fault Analysis Software	37
3.6 Conclusions	38
Chapter 4 Transmission Line Equation and Traveling Waves Characteristics	39
4.1 Transmission Line Equation (TLE) and Its Solutions	39
4.2 Solutions of TLE in Particular Cases	47
4.3 Attenuation Constant and Phase Constant of Traveling Wave and Properties of Guided Wave	53

4.4	Phase Velocity and Group Velocity of Traveling Wave	55
4.5	Dispersion of Traveling Wave	57
4.6	Dispersion-Dependent Distortion of Traveling Wave	65
4.7	Conclusions	69
Chapter 5	Basis of Wavelet Transform Application	71
5.1	Basic Classification and Fundamental Properties of Wavelets	71
5.2	Multiresolution Analysis of Orthogonal and Biorthogonal Wavelets	81
5.3	Constructions of Orthogonal and Biorthogonal Wavelets	86
5.4	Constructions of Other Wavelets	93
5.5	Wavelet Transforms	107
5.6	Conclusions	120
Chapter 6	Fault Location Related Mathematic Methods	122
6.1	Fundamental Impedance –Based Methods	122
6.2	Basic Algorithms for Discrete Convolution-Correlation	132
6.3	Winograd Fast Algorithms for Short Alignment Convolution	136
6.4	Agarwal-Cooley Algorithms for Long Alignment Convolution	143
6.5	Conclusions	147
Chapter 7	Propagation Characteristic of Traveling Wave in Transmission Line	149
7.1	Dispersion of Traveling Wave in Transmission Line	149
7.2	Traveling Wave Propagation Under Different Type of Faults	151
7.3	Traveling Wave Propagation Under Different Line Parameters	154
7.4	Conclusions	157
Chapter 8	Traveling Wave Fault Location Technology using Wavelet Transform	158
8.1	Deficiency of Traditional Traveling Wave Fault Location Method	158
8.2	Definition of Traveling Wave Arrival Time and Propagation Velocity	159
8.3	Two Projects of Fault Location Method using Wavelet Transform	161
8.4	Choice of the Suitable Wavelet and the Suitable Scale for Fault Location	162
8.5	Contrast Traveling Wave Methods of Single Terminal With Double Terminal	164

8.6	Conclusions.....	167
Chapter 9	Practical Application of Traveling Wave Fault Location Technology	168
9.1	Application of 110kV-750kV AC Transmission Lines	168
9.2	Application of DC Transmission Lines.....	172
9.3	Main Influence Factors for Traveling Wave Fault Location Methods	172
9.4	Reason of No Fault Point Found in Fault Transmission Line	176
9.5	Conclusions.....	177
References		178
Index		187



绪 论

1.1 电力系统及故障

1.1.1 电力系统的构成

现代社会的基础能量转换和传输系统——电力系统是由发电机、输电线路、变压器、开关、电容器、电抗器、避雷器、保护间隙、负荷等电气元件组成的有机整体。电力系统的作用是把发电厂发出的电能通过由变压器、输电线路、开关等构成的输电网传输给电力负荷。

发电机是电力系统中重要的设备，也是最复杂的设备，它将热能、动能等其他形式的能量通过发电机转子与定子之间的磁场耦合作用，转换到定子绕组上变为电能，为系统提供电源。通常发电机分为汽轮发电机、水轮发电机、燃气发电机及柴油发电机。大部分发电机是同步发电机。

变压器是利用电磁感应原理制成的电气设备，把某一电压等级的交变电压变换为同频率的另一电压等级的电压。为了提高传输效率并减少损耗，电能从发电厂到用户的传输与分配，需要经过多次电压变换，因此电力变压器是电力系统的重要元件。按相数可分为单相、三相变压器；按每相绕组数可分为双绕组、三绕组变压器；按分接开关是否可在带负载的情况下操作可分为普通变压器、有载调压变压器；按绕组的耦合方式可分为普通变压器、自耦变压器。

电力开关是电力系统进行状态转换和切除故障的元件。在电力系统的运行中，常常需要对其进行操作，如线路的投入或停运，需要检修的变压器停运，检修完的用电设备的投入运行等。另外，故障发生时，隔离故障源也需要通过电力开关的动作来完成。

电容器和电抗器的作用有：①用来调节系统电压和无功，如用作变电站的无功补偿装置、输电线路的并联电抗。②调节系统中的阻抗，如限制短路电流的串联电抗、串联在输电线路中的串补装置。

避雷器和保护间隙是系统中对暂态过电压进行防护的装置。在电力系统的暂态过程中会产生很高的暂态过电压。如果将过电压直接施加到变压器、开关、发动机

等电力设备上, 会损毁这些电力设备, 甚至引起严重的事故。因此, 装设避雷器、保护间隙将暂态过电压限制在一定的范围之内, 从而保护电器设备的安全。

电力系统的负荷是指动力系统中各种用电设备。电力系统建立的最终目的是为各种用电负荷提供电能。电力系统的负荷分为工业负荷、商业负荷和民用负荷。大型工业企业需要由较高电压等级的输电网供电，小型工业企业需要从配电网的始端供电，小的工业负荷由一次配电网供电。工业负荷是复合式负荷，感应电机占很大的比例。商业和民用负荷由大量的照明、加热、制冷设备组成。

图 1-1 是一个简单电力系统单线图。

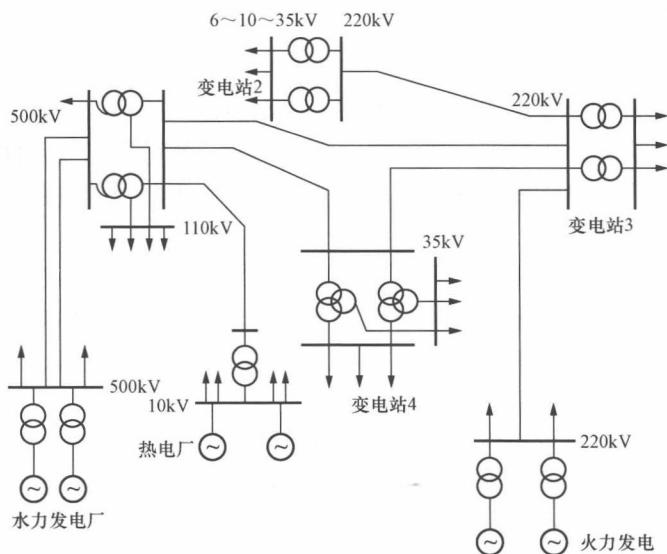


图 1-1 一个简单电力系统单线图

如果从地理分布的视角去看,电力系统则是由发电厂、变电站、输电线路和用户的用电设备构成。输电线路是电力系统中数量众多、分布最广的重要组成部分,输电线路与自然环境接触面远远大于电力系统的其他部分。

1.1.2 电力系统运行的特点及要求

电力系统运行的特点有:

(1) 电能不能大量储存。电能的生产、输送、分配、消费、使用是同时进行的, 每时每刻系统中发电机发出电能必须等于该时刻电力负荷使用的电能与传输这些电能时在电网中损耗的电能之和。能量的产销即时平衡是电力系统最重要的特点。

(2) 过渡过程非常迅速。电能的传输接近光的速度。电能从电源传输到 2000km

外的负荷所用的时间仅千分之几秒；电力系统从一种运行状态到另一种运行状态的过渡过程也非常快。

(3) 与国民经济各部门密切相关。现代工业、农业、国防、交通运输业等国民经济各个行业都广泛使用电能，人们的日常生活也广泛使用各种电器，并且电气化程度越来越高。因此，电能供应的中断或不足，不仅直接影响各行业的生产，造成人民生活紊乱，而且在某些情况下甚至会造成政治上的损失或极其严重的社会性灾难。

由于这些特点的存在，对电力系统的运行提出了严格的要求。

(1) 保证可靠地持续供电。电力系统运行首先要满足可靠、不间断供电的要求。这是由于电能不能大量储存，过渡过程又特别快，一旦供电不持续，用电设备将立即不能正常工作。

(2) 保证良好的电能质量。建立电力系统的根本目的是为各个用户的用电设备提供动力。用电设备的正常工作和安全运行，须由良好的电能质量保证。不合格的电能质量不仅会造成用电设备不能正常运行，而且会引起严重的后果。例如，电压和频率偏差过大时，会引起大量减产、产品报废，严重时会造成人身事故、设备损坏，甚至会危及整个系统的安全运行。

(3) 安全、经济。由于现代社会的电力使用量很大，能源是人类生产生活重要的资源，为节约能源，电力系统的经济运行有巨大的价值。另外，电力系统的运行有危险性，必须要保证安全运行。

1.1.3 电力系统运行状态

电力系统的状态分为两种。当它处在按照人们的设计，完成发电、输电、配电、用电功能的状态时，我们称之为处于正常运行状态。当它整体或局部不能很好地完成正常功能时，我们便称之为处于故障态，简称故障。故障态不仅在功能上不是我们所希望的，而且故障态通常带有不同程度的危害性。但是电力系统的故障态不可避免，因此要加以研究，找出措施，才能尽可能地减少故障态带来的不利影响。

电力系统的故障态通常是正常态发生了一些事故引起的，如短路、断路、雷击等，这些事件发生后，电力系统就由正常态转入故障态。故障态分为稳态和过渡状态。通常将这种过渡状态称为暂态。电力系统的暂态过程通常可以分为电磁暂态和机电暂态。在暂态刚开始的一段时间内，系统中的发动机及其他转动机械的转速由于惯性还来不及变化，暂态过程主要决定于各元件的电磁参数，暂态过程的这一阶段称为电磁暂态；随着暂态过程的发展，转速已有了变化，于是暂态过程状态将不仅与电磁参数有关，而且还与转动机械的机械参数（转速、角位移）有关，这一阶段称为机电暂态过程。

需要注意的是，不是故障时才有暂态过程。电力系统在正常运行状态时，也

会进行状态的切换，也就是说从一个正常运行状态切换到另一个正常运行状态，如投入无功补偿电容器、一个变压器退出运行等。这些正常运行状态间的过渡过程也是暂态过程。

1.1.4 电力系统故障

电力系统可能发生的故障类型比较多，对电力系统危害较严重的有短路、断路以及各种复杂故障等。由于短路故障是电力系统中经常发生、危害较严重的故障，所以这里重点讨论短路故障。

1.1.4.1 短路的基本概念

所谓短路，是指电力系统正常运行情况以外的一切相与相之间或相与地之间的短接。电力系统正常运行时，除中心点外，相与相或相与地之间都是绝缘的。如果由于某种原因使其绝缘破坏而构成了通路，就称电力系统发生了短路故障。三相系统中短路的基本类型有三相短路、两相短路、单相接地短路和两相接地短路。其中三相短路时，三相电路依旧是对称的，故称为对称短路，其他几种短路均使三相电路不对称，称为不对称短路。

1.1.4.2 短路的原因

发生短路故障的原因主要是电气设备载流部分的绝缘损坏。引起绝缘损坏的原因有各种形式的过电压（例如遭到雷击）、绝缘材料的自然老化、脏污、直接的机械损伤等。绝缘的破坏在大多数情况下是由于没有及时发现和消除设备中的缺陷，以及设计、安装和运行维护不良所致。运行人员带负荷拉隔离开关，或者线路检修后未拆除地线就加上电压等误操作，也会引起短路故障。此外，鸟兽跨接在裸露的载流部分以及风、雪、雹等自然现象所造成的短路也是屡见不鲜的。

1.1.4.3 短路的现象及后果

短路对电力系统的正常运行和电气设备有很大的危害。在发生短路时，由于电源供电回路的阻抗减小以及突然短路时的暂态过程，使短路回路中的短路电流值大大增加，可能超过该回路的额定电流的许多倍。短路点距电源的电气距离越近，短路电流越大。例如在发电机机端发生短路时，流过发电机定子回路的短路电流最大瞬时值可达发电机额定电流的 10~15 倍，在大容量的系统中短路电流可达几千甚至几十千安。短路引起的后果可能是破坏性的。具体表现在以下几个方面：

(1) 短路点的电弧有可能烧坏电气设备，同时很大的短路电流通过设备会使发热增加，当短路持续时间较长时，可能使设备过热而损坏。

(2) 很大的短路电流流过导体时，会引起导体间很大的机械应力，有可能使设备变形或遭到不同程度的破坏。

(3) 短路时，系统电压大幅度下降，对用户工作影响很大。系统中最主要的电

力负荷是异步电动机，它的电磁转矩同它的端电压的平方成正比，电压下降时，电磁转矩将显著降低，甚至使电动机停转，以致造成产品报废及设备损坏等严重后果。

(4) 接地短路时，会产生不平衡电流及磁通，将在邻近的平行线路内（如通信线路、铁道信号系统等）感应出很大的电动势。这将造成对通信的干扰，并危及设备和人身安全。

(5) 短路发生后，有可能使并列运行的发电机失去同步，破坏系统稳定，甚至使电力系统瓦解，引起大片地区的停电。这是短路故障最严重的后果。

1.2 输电线路故障测距问题

输电线路是电网的基本组成部分，由于分布范围广，且高压输电线路长期暴露于风、雨、雷、电等恶劣的自然环境中，不可避免地会发生各种各样的故障。这些故障直接影响输电线路安全可靠运行，严重时甚至会造成大面积停电事故。近年来，国外发生的大面积停电事故许多都起源于输电线路的故障。因此，故障发生后尽快处理事故，快速恢复供电，对提高电力系统安全运行水平、运行可靠性十分重要。

随着社会的发展，停电造成的损失和影响越来越大，现代生产、生活对供电连续性等电能质量指标的要求越来越高，人们要求事故后恢复供电的时间越来越短。

另外，现代电网的规模、容量越来越大，输电线路的电压等级越来越高、线路长度越来越长，输电线路经过的地理环境和气象环境越来越复杂。以我国为例，改革开放 30 多年，全国发电装机总容量由 7 千万多千瓦发展到近 10 亿千瓦，扩大了十几倍；最高电压等级由 220kV 提高到 1000kV；电网由省域电网发展为全国联网；单条输电线路的长度由 100 多千米发展到 2000 多千米。故障点的定位和查找越来越困难，工作量也越来越大。

从现有的恢复运行的经验来看，花在设备维护的多一半时间是找出故障位置，而在夜晚、山区和冬季，寻找故障点是比较困难的；同时对于占绝大多数的能够重合成功的瞬时性故障来说，准确地测出故障点位置，可以区分是雷电过电压造成的故障，还是由于线路绝缘子老化、线路下树枝摆动造成的故障等，以及时地发现事故隐患，采取有针对性的措施，避免事故再一次发生。线路故障后快速寻找故障点是保证电网安全稳定运行的一项关键技术，通过准确地故障定位既能减轻巡线负担，节省大量的人力物力，又能加快线路的恢复供电，减少因停电造成的综合经济损失，因此输电线路精确故障定位具有重要意义。

但是，长期以来，输电线路的故障定位是依靠巡线人员的人工巡查进行的。高压输电线路有很多要跨越原始森林、河流、排列在空中导线，难以观察，而且故障经常发生在雷雨、风雪交加的恶劣气象条件下，查找故障点的工作量和困难程度相

当大。人工巡查的故障定位方法无疑很难满足社会经济发展的要求。通过技术方法快速、准确地确定输电线路故障的位置是解决这一问题的必由之路，输电线路故障自动测距技术成为国内外电力生产和科研部门密切关注的研究课题。

多年以来，人们在故障定位技术方面做了大量的努力，但在微处理机应用之前，基本是依赖故障录波结果的分析来估算故障点的位置，时间响应慢，测距精度得不到保障。20 世纪 80 年代以来，随着电力系统中微电子应用技术的成熟及其推广应用，许多微机线路保护装置和故障录波装置都增加了基于阻抗测量原理的故障测距功能，推动了故障测距技术的进步，但受多种因素的影响，基于阻抗原理的测距精度不是很理想。

随着技术的发展，基于输电线路行波原理的故障测距新技术得到发展，基本解决了这一技术难题。

行波故障测距技术是利用电力输电线路在故障时产生的高频电磁波的特征进行故障定位的一种新技术。具有准确、高效的特点，测距精度基本不受线路长度、故障位置、故障类型、负荷电流、接地电阻、故障时电压相角、大地电阻率的影响，已广泛应用于我国的生产实际中。

1.3 输电线路故障测距技术发展历程

输电线路故障测距技术的发展可分为人工巡线阶段、阻抗法阶段、暂态行波测距阶段三个阶段。

1.3.1 人工巡线阶段

自从电力系统建立以来，人工巡线一直是输电线路故障点定位的主要方式。直到 20 世纪末，有些地方还在采用人工巡查的方式进行输电线路故障定位工作。

人工巡线的方式需要巡线工人付出巨大的艰辛，同时还需要巡线工非常熟悉线路，并具有高超的观察技巧，即便如此，这种方式的效率也是十分低下的。

1.3.2 阻抗法阶段

随着故障录波技术的发展，出现了采用阻抗法的故障定位技术。20 世纪 70 年代，电力系统的故障录波采用的是模拟式紫外光线示波器，紫外光线示波器在感光的记录纸上输出线路的电压、电流波形。技术人员用直尺测量故障前后的电压电流的幅度等信号，然后用阻抗法计算故障阻抗，进而求出故障点的位置。这种方法对测量精度很难把握，也就很难保证测距的准确度。而且计算靠人工进行，难免出错，实时性很差。

20 世纪 80 年代，随着电子技术的快速发展，采用微电子技术的数字式故障录波装置和微机保护装置相继出现，并快速发展，得到广泛应用。于是，基于数字式故障录波装置和输电线路微机保护装置的输电线路故障阻抗法得到发展。1979