

30221

张栋国 主编

# 电缆故障

分析与测试

47

27



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

# 电缆故障分析与测试

---

张栋国 主编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书详细介绍了各种行之有效的解决电缆故障的方法,并且介绍了在国内广泛应用的极具代表性的智能电力电缆故障测试仪,以及仪器的附属设备,即路径仪、定点仪的基本工作原理。

本书共七章,分别为电缆故障性质分析的准备知识、电力电缆故障的产生原因、电力电缆故障的测寻步骤、电力电缆故障的初测、电缆路径的探测与电缆的识别、电缆故障的精确定点、理论应用与实例分析。

本书可供中专以上文化程度的电气技术人员及有实践经验的工人学习参考,对于目前具有各种类型的电力电缆故障测试仪的单位和有电力电缆而暂无仪器的单位,本书是一本不可缺少的资料性、经验性读物,具有较大的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

电缆故障分析与测试/张栋国主编. —北京:中国电力出版社, 2005

ISBN 7-5083-3444-2

I. 电... II. 张... III. 电力电缆-故障诊断  
IV. TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 070068 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

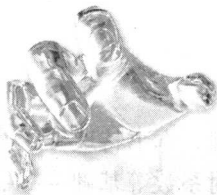
2005 年 9 月第一版 2005 年 9 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 3.625 印张 94 千字

印数 0001—4000 册 定价 8.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



## 前言

随着我国国民经济的高速发展和城市电网改造的完成,大量输电线路敷设在地下,各种类型的电力电缆在全国各工矿企业、事业单位得到了广泛的应用。石化、钢铁、机场、港口、城市等许多供电场合,从生产安全及维护方便的角度出发,几乎全部采用埋地电力电缆供电。这种供电的许多优点是显而易见的。但是,在使用电力电缆过程中,一旦发生绝缘故障,很难较快地寻测出故障点的确切位置,不能及时排除故障恢复供电,往往造成停电停产的重大经济损失。所以,如何用最快的速度、最低的维修成本恢复供电是各供电部门在遇到电缆故障时的首要课题。

电缆故障定位技术的发展经历了一个很长的时期。20 世纪 70 年代前发明的电桥法及脉冲测距法在测量电缆的接地故障和断路故障方面,可以说是发展得相当完善了。然而,对于高阻故障(高阻泄漏大或高阻闪络性故障)的寻测,采用上述方法则是无能为力的,必须另辟蹊径。这在 20 世纪 70 年代初对于世界各国都是一个相当新的课题。电缆故障的精确定点是故障探测的关键。目前,比较常用的方法是冲击放电声测法及主要用于低阻故障定点的音频感应法。实际应用中,往往因电缆故障点环境因素复杂,如环境振动噪声过大、电缆埋设深度过深等,造成定点困难,成为快速找到故障点的主要矛盾。本书扼要地回顾了近几年来新发展的测量技术和用这些新技术取得的满意结果。本书介绍的几种先进的测试技术及自行研制的几种测试设备的实际应用证明:对付电力电缆的各种类型高阻故障已不成任何问题。目前我国的电力电缆故障测试技术及测试仪器已经达到世界先进水平。

为了帮助读者深入了解电力电缆故障的测试和维修,本书特地增加了电波在动力电缆中的传输特性、特性阻抗、反射系数等基础理论知识。本书着重详细介绍了各种行之有效的解决各种类型高阻故障的方法,并且附带介绍了在国内广泛应用的极具代表性的智能电力电缆故障测试仪,以及以上几种仪器的附属设备即路径仪、定点仪的基本工作原理,以供电气技术员及有关研究、生产单位参考。本书介绍的一整套测试方法、经验已经受住了多年来大量实践的考验。这些方法、经验的应用大大提高了寻测高阻故障的效率。由于不用“烧穿”这一“经典”步骤,大大缩短了恢复供电所需时间。一般情况下,仪器加电后几分钟便可粗测出故障距离,然后即可迅速完成精确定点的测试任务。所以受到我国各大型钢铁联合企业,各大供电局,大中型厂矿,国防工程,军、民用机场、港口等有关单位的好评。为了尽快地总结和交流电力电缆故障寻测技术方面的经验,编者在大量翻阅中外资料的基础上,编写了此书,以飨读者。本书第一章至第六章由张栋国编写,第七章由樊永山、张昌民根据新研制的仪器及数据处理软件,将现场测试结果分析撰写而成。张栋国统稿。本书在编写过程中得到广东省电机工程学会电缆专业委员会蔡兴波教授的关心和支持,在此表示衷心感谢。

为让具有中专以上文化程度的电气技术员及大部分有实践经验的工人能迅速掌握电缆故障寻测技术,除基础理论部分有一些必不可少的公式外,电力电缆故障分析与测试方法部分避免用繁琐的数学推导,尽量用通俗易懂的语言文字及图示来说明每一个行之有效的方法。由于本书提供了大量的适合各种条件的测试方法与分析方法,并且介绍了不少的实测经验,对于目前具有各种类型的电力电缆故障测试仪的单位和有电力电缆而暂无仪器的单位,本书是一本不可缺少的资料性、经验性读物,具有较大的参考价值。

限于编者的水平,书中不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

**编 者**

2005年5月



## 第一章

# 电缆故障性质分析的准备知识

### 第一节 电力电缆的阻抗概念与反射系数

本章在讨论电力电缆故障性质及测试方法时，实际上涉及了动力电缆在高频运用下的传输特性。无论是低压脉冲法还是高压闪络法检测电力电缆故障距离，均是讨论电波在动力电缆中传播的微观过程，把动力电缆当作“均匀长线”来讨论。根据电波（波形）在传输过程中幅度、相位、速度等诸参数的变化规律，利用雷达测距原理来确定电缆绝缘故障点距测试端的距离。因此有必要首先建立起长线、阻抗概念与反射系数的概念。

#### 一、长线的基本概念

所谓长线，是指线的几何长度比其上所传输的电磁波的波长还长或者可以与之相比拟的传输线，反之称为短线。一般认为线长  $l > \frac{1}{10}\lambda$  即可认为是长线。可见长线和短线是相对的概念，它们是相对于工作波长而言的。长线的绝对长度并不一定很长。在微波技术中，波长以米或厘米计，长线的长度有时也不过是几厘米或几米长，但因这个长度已经大于波长或者与波长相差不多，我们仍称它为长线。相反地，输送市电的电力线（频率为 50Hz），即使长度在几千米以上，但与市电的波长（6000km）比较起来还是小得多，所以还是不能称为长线而应称为短线。

长线上所发生的现象与在短线上所发生的现象，区别不在于它们的绝对长度，而是决定于  $\frac{l}{\lambda}$ ， $l$  是传输线的几何长度， $\lambda$  是

工作波长。一般认为当  $\frac{l}{\lambda} > \frac{1}{10}$  为长线。长线上沿线各点的电流、电压在一般情况下均不相等。而短线上各点的电流（或电压）的大小和方向可近似认为是相同的。

为什么长线上各点的电流和电压不相等呢？这可以从长线的等效电路得到解释，即从分布参数概念来加以解释。

我们知道，低频电路是属于集总参数电路。在低频电路理论中，虽然并未明确指出，但实际上作了如下假设：

(1) 在一个由电阻  $R$ 、电感  $L$  和电容  $C$  所组成的电路里，磁场只集中在电感线圈附近，电场只集中在电容器附近，电源的功率只消耗在电阻上。电路中能分辨出截然不同的三种元件：电感、电容、电阻，而电路中的连接导线就认为是两根线。忽略了导线上的分布参数的影响。

(2) 在这种由电阻、电感、电容组成的电路中，在同一瞬间，一个元件上各点的电流，都大小相等、相位相同。由这些理想化的电路元件组成的电路即称为具有集总参数的电路。这种集总参数电路适用于频率很低、线很短的情况。此时不必研究电流和电压随空间位置变化的情况，只需研究它们随时间变化的情况。但是，当频率较高，线较长（即  $\frac{l}{\lambda}$  较大）时，线上的分布参数的影响就不能忽略了。

此时，线上发生的现象与集总参数及短线上的情况有显著区别：

(1) 在长线情况下，上述第一个假设显然不适用了。把长线接上电源后，电场和磁场分布在长线的周围，电感、电容、电阻都是分布在长线上，再也不能明显地分出哪一部分是电感，哪一部分是电容或电阻了。

(2) 在长线情况下，上述第二个假设也不成立了。当长线接入电源以后，在线上将有电流波和电压波。在同一瞬间，线上各点的电流、电压的数值可能不等，相位也可能不同。根据定义，电感  $L$  和磁通量  $\varphi$  电流  $I$  之间的关系为

$$L = \frac{\Phi}{I}$$

对于长线，两导线之间的磁通量  $\Phi$  是一个完全有意义的数量，但是既然线上各点的电流在同一瞬间都不相等，就无法决定用哪一点的电流去除  $\Phi$  来确定  $L$ 。因此这时电感  $L$  完全失去了它平常的意义。由于线上各点的电压都不相同，因此电容  $C$ 、电阻  $R$  也失去了平常的意义。此时，因为电感、电容、电阻分布在长线沿线上，所以长线称为具有分布参数的电路。在分布参数电路中，电压、电流不仅随时间而变化，而且随空间位置而变化。

由上可知，长线是属于分布参数电路，即它的参数不是集中而是分散的。它的每一小段都分布有一定数量的电阻  $R$  和电感  $L$ ，其线间都分布有一定数量的电容  $C$  和电导  $G$ 。又由于这些参数是沿线分布的。线上任一处均有  $R$ 、 $L$ 、 $C$  和  $G$ ，所以我们无法对整个长线定义  $R$ 、 $L$ 、 $C$  和  $G$ 。但是我们可以用下述方法来近似等效：在长线上取一段极短的线元  $\Delta Z$ ，当满足似稳条件时，可近似认为线元上的分布参数为一常数，它们分别等于

$$\Delta R = R_1 \Delta Z \quad \Delta L = L_1 \Delta Z \quad \Delta C = C_1 \Delta Z \quad \Delta G = G_1 \Delta Z$$

式中， $R_1$ 、 $C_1$ 、 $L_1$ 、 $G_1$ ，分别为长线单位长度的电阻、电感、电容和漏电导，即为长线的分布参数，它们的数值与长线的线径、线间距离、导线材料及所填充的介质的参数有关。以同轴线为例，它的分布参数表示式见表 1-1（动力电缆的结构类似）。

表 1-1 中  $\epsilon$  是所填充的介质的介电常数， $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ ， $\epsilon_r$  为该介质的相对介电常数对于空气介质

$$\epsilon = \epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} (\text{F/m})$$

由于线元极短，可将它看成一集总参数电路，并用一  $\Gamma$  型网络来代替（也可用  $T$  形或  $\pi$  形网络来代替），如图 1-1（a）所示。这样，就可以把长线看成由许许多多线元的四端网络串接而成的电路，在每个四端网络里均有该线元的电阻  $R$ 、电感  $L$ 、电容  $C$  及漏电导  $G$ 。

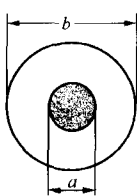
图 1-1（b）即为有耗长线的等效电路。对于无耗长线（ $R=$



0,  $G=0$ ), 其等效电路如图 1-1 (c) 所示。

在点  $aa'$  与  $bb'$  之间有串联阻抗存在, 所以这两点的电压就不能相等。而且可以看出, 当长线接入电源以后, 电源就要通过分布电感逐次向分布电容充电而形成向负载传输的电压波和电流波。即是说, 电压和电流是以波的形式在长线上传播, 并将能量从电源传送至负载。

表 1-1 同轴线的分布参数

| 结构图                                                                               | $L_1$ (H/m)                              | $R_1$ ( $\Omega$ /m)                                                                                                  | $C_1$ (F/m)                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|  | $L_1 = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$ | $R_1 = \frac{R_s}{2\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$<br>$= 1.45 \frac{1 + \frac{b}{a}}{b\sqrt{\lambda}}$ | $C_1 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{b}{a}}$ |

$\mu$  是所填充介质的导磁率,  $\mu = \mu_r \mu_0$ 。对于空气介质  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

由长线理论中长线方程解的分析得知: 长线上任一点的电压和电流均包含两部分: 一个是向负载方向传播的行波, 即入射波; 一个是向电源方向传播的行波, 即反射波。因此, 在长线上任一点的电压和电流, 一般情况下由入射波和反射波两部分叠加而成。

## 二、长线的特性参数

表征长线的特性参数有特性阻抗  $Z_0$ , 传播常数  $\gamma$ , 以及相速度  $v_p$ 、波长  $\lambda$  等。它们都取决于长线的分布参数及介质的特性。

### 1. 特性阻抗 $Z_0$

特性阻抗定义为行波电压与行波电流之比, 具体说就是入射波电压与入射波电流之比, 或反射波电压与反射波电流之比。

由长线方程的求解得到长线的特性阻抗一般表示式为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} \quad (1-1)$$

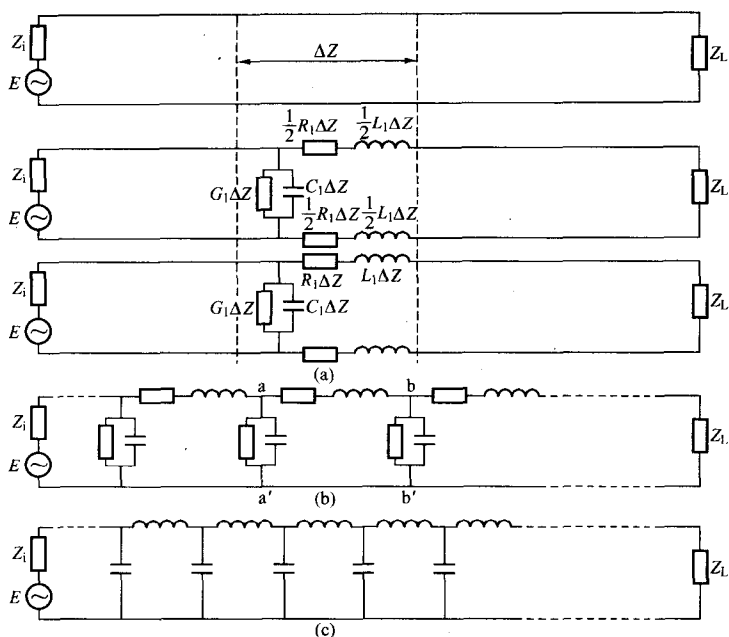


图 1-1 长线的三种等效电路形成

(a) 线元  $\Delta Z$  的集总参数四端网络等效电路；(b) 有耗长线的等效电路；(c) 无耗长线的等效电路

由式 (1-1) 可见特性阻抗与频率有关，但是，在微波情况下，有  $R_1 \ll \omega L_1$ ， $G_1 \ll \omega C_1$ ，因而有

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (1-2)$$

由此可见，在微波情况下，长线的特性阻抗与频率无关，为一实数（纯电阻）。仅与长线的截面形状、尺寸及周围介质的参数有关。

把同轴线的  $L_1$  和  $C_1$  分别代入式 (1-2)，即可得同轴线的特性阻抗（电力电缆类似）

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a}$$

$$= \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{b}{a} \quad (1-3)$$

同轴线的特性阻抗值一般为  $40 \sim 100 \Omega$ ，常用的是  $50$ 、 $75 \Omega$  两种。而电力电缆的特性阻抗值一般为  $10 \sim 50 \Omega$ 。经实际测试，ZQL 型油浸纸电缆的特性阻抗与电缆截面积成反比关系。例如  $35 \text{mm}^2$  的铝芯油浸纸电缆特性阻抗约  $40 \Omega$ ，而  $240 \text{mm}^2$  的铝芯油浸纸电缆特性阻抗约  $10 \Omega$ 。其他介质的电力电缆的特性阻抗与油浸纸电缆相仿。

## 2. 传播常数 $\gamma$

传播常数  $\gamma$  表示电磁波在单位长度上的振幅和相位的变化，其表达式为

$$\gamma = \sqrt{ZY_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta \quad (1-4)$$

可见，如果计及长线的分布电阻  $R_1$  和漏导  $G_1$ ，则传播常数  $\gamma$  一般为复数，其实数部分  $\alpha$  称为衰减常数，虚数部分  $\beta$  称为相位常数。衰减常数  $\alpha$  表示单位长度上行波的振幅衰减的大小。 $\alpha$  愈大，振幅衰减愈大。相位常数  $\beta$  表示单位长度上行波的相位差。 $\beta$  愈大，相位变化（超前或滞后）愈厉害。

对于微波情况， $R_1 \ll \omega L_1$ ， $G_1 \ll \omega C_1$ ，可得到表征  $\gamma$  的近似公式

$$\gamma = \frac{R_1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} + \frac{G_1}{2} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} + j\omega \sqrt{L_1 C_1} \quad (1-5)$$

由此得到

$$\alpha = \frac{R_1}{2} \sqrt{\frac{C_1}{L_1}} + \frac{G_1}{2} \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (1-6)$$

如果忽略  $G_1$ ，则

$$\alpha = \frac{R_1}{2Z_0} \quad (1-7)$$

$$\beta = \omega \sqrt{L_1 C_1} \quad (1-8)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

式中  $Z_0$ ——无耗线的特性阻抗。

式 (1-7) 表明：衰减常数  $\alpha$  决定于导线本身的电阻损耗与导线间的介质损耗。

### 3. 相速度 $v_p$

波传播时，振荡相位将以所谓“相速度”  $v_p$  向前传播。所谓相速度是指沿一个方向传播的行波（入射波或反射波）前进的速度。其定义为：高频波等相位点移动的速度。

经数学分析，波传播的相速度为

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \quad (1-9)$$

对于无耗线，由式 (1-8)  $\beta = \omega \sqrt{L_1 C_1}$ ，则

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1-11)$$

以同轴线之  $L_1$ 、 $C_1$  代入式 (1-11) 可得

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1-12)$$

式中  $\epsilon_r$ ——介质的相对介电常数；

$c$ ——光速。

由此可见，相速度与介质特性有关。若线间介质为空气， $\epsilon_r = 1$  则

$$v_p = c = 3 \times 10^8 \text{ m/s} = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$$

这就是为什么在测试不同种类的电缆的故障距离时，因为填充介质的相对介电常数  $\epsilon_r$  不同，其选择的电波传播速度完全不同的道理所在。

### 三、行波的反射与透射现象

两个波阻抗不同的电缆相连接时，连接点会出现阻抗不匹配的情况。当电缆中出现断线或低阻故障时，故障点等效阻抗与电缆波阻抗不相等，也会出现阻抗不匹配。行波运动到阻抗不匹配

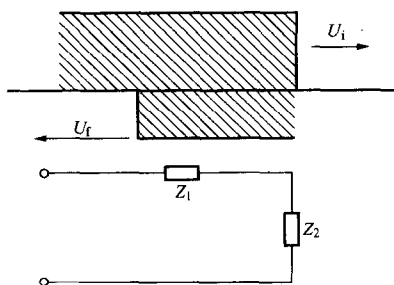


图 1-2 行波的反射示意图

点时，会产生全部或部分反射，出现行波回送现象。在低电阻故障（故障点电阻不为零时）还会有行波透射现象，即有一部分行波越过故障点继续往前运动。行波的反射和透射现象如图 1-2 和图 1-3 所示。

注意：行波的人射波与透射波反映了一种因果关系

系，即入射波在阻抗不匹配点导致了反射波与透射波的出现。而正、反向行波是针对电压、电流波的运动方向而言的。一个入射波可以是正向行波，也可以是反向行波。如果入射波运动方向与规定的方向一致的话，就是正向行波，对应的反射波与入射波运动方向相反、称为反向行波。而透射波与入射波运动方向相同，称为正向行波。反之，入射波是反向行波，对应的反射波为正向行波，透射波为反向行波。

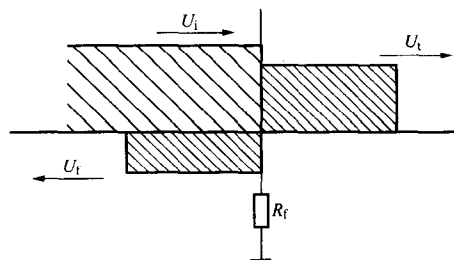


图 1-3 行波的透射示意图

#### 四、长线的阻抗概念、反射系数和透射系数

##### 1. 长线的阻抗概念

由上面分析可知，在长线上一般可以同时存在两个波，即从电源向负载传输的入射波和由负载向电源传输的反射波。每一个

电流波伴随一个电压波，反之亦然。在任一瞬间，长线上任一点的电流与电压之间的关系由欧姆定律所确定，即线上任一点的电压与电流之比值为该点的阻抗。

阻抗是传输线理论中一个很重要的物理概念。根据阻抗概念可以很方便地分析传输线的工作状态。由于长线有着不同的工作状态，因而阻抗的定义也有所不同。

长线的阻抗概念分为：特性阻抗  $Z_0$ 、等效阻抗  $Z_e$ 、输入阻抗  $Z_{in}$  和负载阻抗  $Z_L$ 。

## 2. 特性阻抗 $Z_0$

如前所述，特性阻抗  $Z_0$  是行波电压与行波电流之比值。具体说就是入射波电压与入射波电流之比值，或反射波电压与反射波电流之比的负值，且有

$$Z_0 = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{C_1 + j\omega C_1}}$$

在微波情况和无耗情况下

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$

## 3. 等效阻抗 $Z_e$

长线上任意一点总的电压与总的电流之比值称为该点的等效阻抗  $Z_e$ 。据分析，等效阻抗的一般表示式为

$$Z_e = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \operatorname{th} \gamma Z'}{Z_0 + Z_L \operatorname{th} \gamma Z'} \quad (1-13)$$

式中  $Z'$ ——该点距终端负载的距离。

对于微波无耗线  $\alpha = 0, \gamma = j\beta$ ，式 (1-13) 变为

$$Z_e = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta Z'}{Z_0 + jZ_L \tan \beta Z'} \quad (1-14)$$

## 4. 输入阻抗 $Z_{in}$

长线输入端的等效阻抗，即输入端总的电压与总的电流之比值，称为长线的输入阻抗  $Z_{in}$ 。

将式 (1-13)、式 (1-14) 中的  $Z'$  用长线的全长  $L$  代替，即

得输入阻抗表示式及微波无耗线的输入阻抗表示式

$$Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \operatorname{th} \gamma L}{Z_0 + Z_L \operatorname{th} \gamma L} \quad (1-15)$$

$$\text{高频、无耗线 } Z_{in} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta L}{Z_0 + jZ_L \tan \beta L} \quad (1-16)$$

由式 (1-15) 和式 (1-16) 可以看出, 线上任一点的等效阻抗就是在那一点向负载看进去的线的输入阻抗。

#### 5. 负载阻抗 $Z_L$

长线负载端的等效阻抗, 即负载端总的电压与总的电流之比值, 称为负载阻抗  $Z_L$ 。

### 五、反射系数 $\Gamma$

如上面分析所指出, 长线上的波一般为入射波和反射波的叠加。长线上波的反射现象是长线上最基本的物理现象。长线的工作状态主要取决于反射的情况。为了表征长线的反射特性, 特引入反射系数  $\Gamma$ 。

#### 1. 反射系数 $\Gamma$ 的定义及表示式

所谓反射系数是指长线上某点的反射波与入射波的振幅之比, 也就是指长线上某点的反射波的电压 (或电流) 与入射波电压 (或电流) 振幅之比, 即

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{I^-}{I^+} \quad (1-17)$$

式中  $V^-$ 、 $I^-$ ——反射波电压和反射波电流;

$V^+$ 、 $I^+$ ——入射波电压和入射波电流。

由于  $V^-$  和  $V^+$  或  $I^-$  和  $I^+$  是位置的函数, 所以反射系数  $\Gamma$  也是位置的函数。

#### 2. 反射系数与等效阻抗的关系

经分析, 等效阻抗与反射系数的关系为

$$Z_e = \frac{1 + \Gamma(Z')}{1 - \Gamma(Z')} \quad (1-18)$$

这样, 求长线上某点  $Z'$  的等效阻抗, 就可由该点的反射系数  $\Gamma(Z')$  来求得, 使长线的阻抗计算更加简便。

### 3. 反射系数与负载阻抗的关系

显然, 负载阻抗的大小和性质将直接影响反射波的大小和相位, 终端反射系数  $\Gamma_2$  即表征长线终端反射波的大小和相位。根据分析, 可得终端反射系数  $\Gamma_2$  为

$$\Gamma_2 = \frac{V^-}{V^+} = \frac{V_2 - I_2 Z_0}{V_2 + I_2 Z_0} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1-19)$$

终端反射系数  $\Gamma_2$  表示入射波传至终端后, 由于未被负载全部吸收而产生反射的程度。

根据式 (1-19) 可以看出, 按照负载阻抗  $Z_L$  的性质, 长线上将有如下三种不同的工作状态。

(1) 当  $Z_L = Z_0$  时,  $\Gamma_2 = 0$ , 称为无反射状态, 即行波状态。

(2) 当  $Z_L = \infty$  (终端开路) 时,  $\Gamma_2 = +1$

当  $Z_L = 0$  (终端短路) 时,  $\Gamma_2 = -1$

当  $Z_L = \pm jX_L$  (终端接纯电抗负载时)  $|\Gamma_2| = 1$ , 统称为全反射工作状态, 即驻波状态。

(3) 当  $Z_L = R_L + jX_L$  时  $|\Gamma_2| < 1$  称为部分反射工作状态, 即行驻波状态。

以上讨论的特性阻抗, 反射系数等基本概念将对动力电缆的故障性质分析及故障波形和在故障电缆中传播反射时的分析起到十分重要的作用。

### 六、行波的透射系数

行波的透射系数可用透射电压 (电流) 波与入射电压 (电流) 波的比值表示, 电压行波与电流行波的透射系数相同, 故叙述时不再加以区别。

如图 1-4 所示, 设两段线路的波阻抗分别为  $Z_1$ 、 $Z_2$  时, 则透射系数

$$\gamma = \frac{U_1}{U_2} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1-20)$$

可以推出透射系数与电压反射系数之间的关系为

$$1 + \Gamma_U = \gamma \quad (1-21)$$



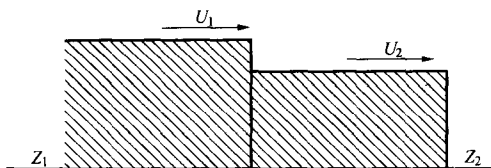


图 1-4 行波的透射

实际上碰到的很多情况是如图 1-4 所示的电缆中间有低电阻故障时的透射现象。这时求出透射系数为

$$\gamma = \frac{2R_f/Z_0}{1 + 2R_f/Z_0} = \frac{2K}{1 + 2K} \quad (1-22)$$

$$K = R_f/Z_0$$

式中  $R_f$ ——低阻故障点的电阻值。

### 七、行波过程分析的网格图法

网格图法是分析传输线行波过程的有力工具。网格图有时间与距离两个坐标。它反映了任一瞬间线路入射波、反射波与透射波的位置与运动方向。形象直观，易于理解。根据行波过程的网格图，可求出线路上任一点电压、电流随时间的变化情况。

下面用两个具体的例子说明网格图的应用。

#### 1. 直流电压突然作用于空载线路

如图 1-5 (a) 所示  $t=0$ ，开关 S 合上，电压为  $E$  的直流电压源与长度等于  $L$  的空载长线 MN 接通，线路 N 端接有电阻  $R$ ， $R$  是线路波阻抗值的 2 倍，因此 N 端的电压反射系数等于  $\Gamma_U = 1/3$ 。

图 1-5 (b) 给出了电压行波传播网格图。横坐标  $x$  代表距离， $x=0$  与  $x=L$  对应线路的两个端点。由  $x=0$ ， $x=L$  处分别作垂直于  $x$  轴的直线作为时间  $t$  轴。 $t=0$ ，S 合上，电压波  $U_d = E$  以波速  $v$  向 N 端运动，用从 M 处时间轴  $t=0$  出发向下运动的斜线来代替。斜线代表的电压值不变，箭头指向 N 端代表入射波的运动方向。斜线上 M 点坐标为  $(t_0, x_0)$ ，代表在  $t_0$  时刻，电压行波运动到了线路上距离 M 端的  $x_0$  位置。斜线与  $X=L$  处