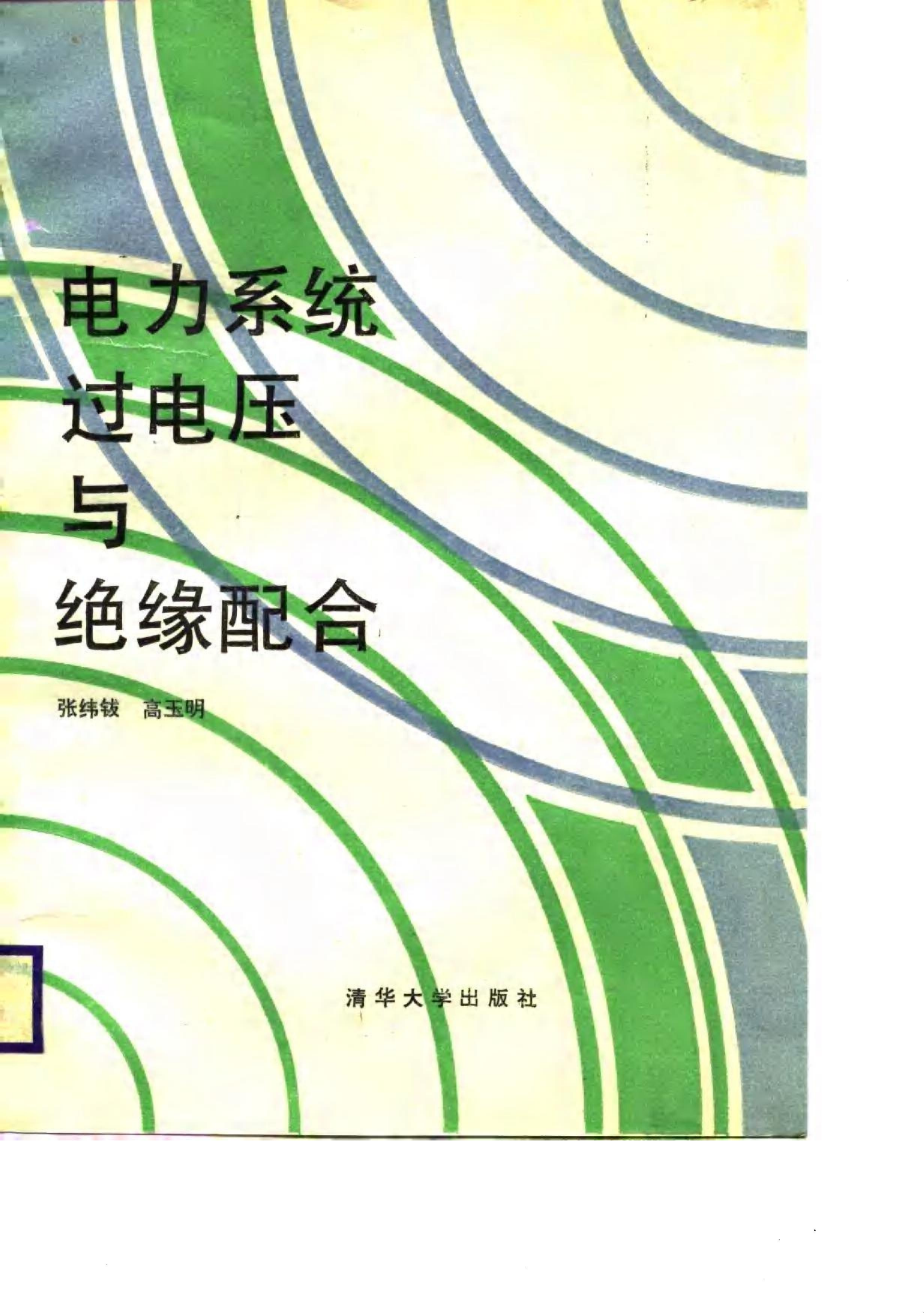




电力系统 过电压 与 绝缘配合

张纬钹 高玉明

清华大学出版社

内 容 提 要

本书内容包括波过程、雷电过电压、内部过电压、绝缘配合四个部分共九章,着重系统阐明电力系统过电压及绝缘配合的基本概念、基本原理和分析方法、计算方法;同时联系工程实际应用,注意反映国内外电力工业和电工制造部门生产科研发展的新成就、新动向,新增了氧化锌避雷器、六氟化硫绝缘全封闭组合电器、超高压电力系统过电压和绝缘配合、计算机数值分析和概率统计法等内容。

本书适用于高等院校高电压技术及其信息处理专业、高电压技术及设备专业;同时可作为电力系统及其自动化专业和其它电工类专业的补充教材和教学参考书,以及电力系统和电工制造部门工程技术人员的工作参考用书。

电力系统过电压与绝缘配合

张纬绶 高玉明

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京昌平振南排版厂排版

北京昌平县印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

☆

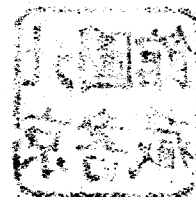
开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 20 字数: 504千字

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷

印数: 0001—5000

定价: 4.30元

ISBN7-302-00275-4/PM·1(课)



前 言

本书是在清华大学铅印教材《电力系统过电压及其防护》经过本校和其它四所高等院校高电压技术及设备专业、电力系统及其自动化专业几年教学实践的基础上，按照加强基础，精选内容，不断更新，利于教学的原则补充编写而成。

全书包括波过程、雷电过电压、内部过电压、绝缘配合四个部分，共九章，着重系统阐明电力系统过电压及绝缘配合的基本概念、基本原理和分析方法、计算方法；同时适当联系工程实际应用；注意及时反映国内外电力工业和电工制造部门生产科研发展的新成就、新动向，新增了一些如新型氧化锌避雷器、六氟化硫气体绝缘全封闭组合电器(GIS)、超高压电力系统的过电压及绝缘配合、电子计算机数值分析和概率统计法的应用等内容。书中联系实际配有适量的例题和练习题，以利于自学者理解和应用。

本书适用于高等院校高电压技术及其信息处理专业、高电压技术及设备专业电力系统过电压课程的教材；同时可作为电力系统及其自动化专业和其它电工类专业高电压技术课程的补充教材和教学参考书，以及电力部门和电工设备制造部门工程技术人员教学和工作参考用书。由于本书内容有所兼顾，在使用中应根据各专业的课程设置分工和要求的不同有所增减。

本书第一、二、三、四、五章由张纬铨编写；第六、七、八、九章由高玉明编写。吴维韩教授、张芳榴、黄炜纲副教授参加了本书编写大纲的讨论并校阅了初稿，也是原教材的编写人之一，特此致以深切谢意。

编者水平有限，恳切希望读者提出批评和宝贵意见。

编者

1987年6月于清华大学

目 录

第一部分 波 过 程

第一章 输电线路的波过程	(1)
§ 1-1 均匀无损单导线上的波过程	(1)
一、波传播的物理概念	(1)
二、波动方程解	(3)
三、前行波和反行波	(5)
§ 1-2 波的折射和反射	(6)
§ 1-3 集中参数等值电路 (彼德逊法则)	(11)
§ 1-4 波经过电容和电感	(13)
§ 1-5 波的多次折、反射, 网格法	(16)
§ 1-6 集中参数 L 、 C 的等值线段	(19)
§ 1-7 等值波法则	(22)
§ 1-8 计算波过程的特性线法	(23)
一、特性线法的基本原理	(23)
二、应用特性线求解线路波过程的方法	(25)
§ 1-9 平行多导线系统中的波过程	(29)
一、波在平行多导线中的传播	(29)
二、平行多导线的耦合系数	(30)
三、平行多导线的等值波阻抗	(32)
§ 1-10 波的衰减和变形, 冲击电晕的影响	(33)
一、波沿线路传播时的衰减和变形	(33)
二、冲击电晕对波过程的影响	(34)
§ 1-11 波过程数值计算的基本方法	(37)
一、单根均匀无损线的暂态等值计算电路	(38)
二、集中参数储能元件的暂态等值计算电路	(40)
三、节点电压方程和节点导纳矩阵	(42)
§ 1-12 计算多导线线路波过程的模变换法	(48)
一、多导线线路的波动方程	(48)
二、多导线波动方程的模变换	(49)
三、均匀换位线路的模变换	(50)
四、多导线线路的等值计算电路	(55)
练习题	(57)
第二章 变压器和电机绕组的波过程	(59)
§ 2-1 单相变压器绕组的波过程	(59)
一、等值电路和电位方程	(59)
二、起始电位分布和入口电容	(61)

三、稳态电位分布和振荡过程	(64)
§ 2-2 三相变压器绕组的波过程	(68)
一、星形接线中性点接地 (Y_0)	(68)
二、星形接线中性点不接地 (Y)	(69)
三、三角形接线 (Δ)	(69)
§ 2-3 改善变压器绕组电位分布的措施	(70)
一、对地电容电流补偿	(70)
二、纵向电容补偿	(72)
§ 2-4 变压器绕组之间的波过程	(73)
一、静电感应电压分量	(73)
二、电磁感应电压分量	(76)
§ 2-5 变压器绕组波过程的电磁模拟和数值计算	(78)
一、电磁模拟	(79)
二、计算机计算	(79)
§ 2-6 旋转电机绕组中的波过程	(81)
练习题	(84)

第二部分 雷电过电压

第三章 雷电特性及防雷保护装置	(85)
§ 3-1 概述	(85)
§ 3-2 雷电放电过程	(86)
§ 3-3 雷电放电的计算模型	(89)
§ 3-4 雷电参数的统计数据	(90)
一、雷电流的波形和极性	(91)
二、雷电流的幅值、波头、波长和陡度	(91)
三、雷电放电的重复冲击次数和总持续时间	(93)
四、雷电日和雷电小时	(94)
五、地面落雷密度	(94)
§ 3-5 雷电流的等值波形	(95)
§ 3-6 避雷针和避雷线的保护范围	(96)
一、避雷针的保护范围	(97)
二、避雷线的保护范围	(98)
§ 3-7 避雷器的基本类型和结构	(99)
一、对避雷器的基本要求	(100)
二、保护间隙和管型避雷器	(102)
三、普通阀型避雷器	(103)
§ 3-8 磁吹避雷器	(106)
一、磁吹避雷器的火花间隙和阀片电阻	(106)
二、复合式磁吹避雷器	(107)
§ 3-9 阀型避雷器的电气特性	(103)
§ 3-10 氧化锌避雷器	(112)
一、氧化锌非线性电阻片	(112)

二、氧化锌避雷器	(113)
三、氧化锌避雷器的电气特性	(116)
四、提高氧化锌避雷器保护性能的措施	(117)
§ 3-11 接地装置	(120)
一、接地和接地电阻的基本概念	(120)
二、工作接地、保护接地与防雷接地	(121)
三、工程实用的接地装置	(123)
练习题	(128)
第四章 输电线路的雷电过电压及保护	(129)
§ 4-1 概述	(129)
§ 4-2 输电线路的感应过电压	(130)
一、雷击线路附近大地时导线上的感应过电压	(131)
二、避雷线的屏蔽作用	(132)
三、雷击线路塔顶时导线上的感应过电压	(133)
§ 4-3 雷击导线——绕击时的过电压	(133)
一、绕击率	(133)
二、绕击过电压计算	(134)
三、绕击耐雷水平	(135)
§ 4-4 雷击杆塔反击时的过电压	(135)
一、塔顶电位	(136)
二、导线电位	(138)
三、绝缘子串的作用电压和闪络	(138)
四、雷击塔顶反击的耐雷水平	(139)
§ 4-5 雷击避雷线档距中央时的过电压	(140)
§ 4-6 输电线路的雷击跳闸率	(142)
§ 4-7 雷击线路的电气几何模型	(145)
一、电气几何模型的基本概念和假设	(146)
二、电气几何模型的作图法	(146)
三、用电气几何模型分析线路绕击事故	(148)
§ 4-8 输电线路雷电过电压的数值模拟	(149)
一、计算模型	(150)
二、等值计算电路	(151)
§ 4-9 蒙特卡洛法计算输电线路的雷击跳闸率	(152)
§ 4-10 输电线路的防雷保护措施	(154)
练习题	(155)
第五章 发电厂变电所的雷电过电压及保护	(157)
§ 5-1 概述	(157)
§ 5-2 发电厂和变电所的直击雷保护	(158)
§ 5-3 变电所的侵入波过电压保护	(161)
一、避雷器的保护动作过程分析	(161)
二、被保护设备上的过电压分析	(162)
三、变电所的侵入波保护方式	(163)

§ 5-4 变电所的进线段保护	(170)
一、35kV及以上变电所的进线段保护	(170)
二、35kV小容量变电所进线段保护的简化	(173)
§ 5-5 三绕组变压器、自耦变压器及变压器中性点的防雷保护	(173)
一、三绕组变压器的保护	(173)
二、自耦变压器的保护	(174)
三、变压器中性点的保护	(175)
§ 5-6 旋转电机的防雷保护	(175)
一、旋转电机防雷保护的特点	(175)
二、直配发电机的防雷保护	(176)
三、经变压器与架空线路连接的发电机的防雷保护	(179)
§ 5-7 气体绝缘变电所 (GIS) 的过电压保护和绝缘配合	(183)
一、GIS变电所过电压保护的特点	(184)
二、GIS变电所的过电压保护接线方式	(185)
三、GIS变电所保护用的避雷器型式	(187)
§ 5-8 变电所雷电侵入波过电压保护的数值分析	(188)
一、计算条件及参数	(189)
二、用补偿法计算含有非线性电阻元件——避雷器的电路	(190)
§ 5-9 用统计模拟法预测变电所的防雷可靠性	(193)
练习题	(195)

第三部分 内部过电压

第六章 电力系统工频电压升高	(197)
§ 6-1 概述	(197)
§ 6-2 空载长线路的电容效应	(198)
一、均匀长线及其稳态解	(198)
二、空载长线路的电容效应	(201)
三、电源阻抗对空载长线路电容效应的影响	(203)
§ 6-3 不对称短路引起的工频电压升高	(204)
§ 6-4 甩负荷引起的工频电压升高	(207)
§ 6-5 工频电压升高的限制措施	(209)
§ 6-6 并联电抗器的中性点小电抗与潜供电流	(213)
练习题	(215)
第七章 电力系统操作过电压	(216)
§ 7-1 概述	(216)
§ 7-2 合闸空载线路过电压	(217)
一、产生合闸过电压的物理过程	(217)
二、影响因素及限制措施	(221)
§ 7-3 切除空载线路过电压	(223)
一、重燃过程分析	(224)
二、影响因素及限制措施	(224)

§ 7-4	切除空载变压器过电压	(226)
一、	截流现象分析	(227)
二、	影响因素及限制措施	(229)
§ 7-5	解列过电压	(231)
§ 7-6	利用断路器的并联电阻限制分、合闸过电压	(232)
一、	利用断路器的并联电阻限制合闸空载线路过电压	(232)
二、	利用断路器的并联电阻限制分闸空载线路过电压	(234)
§ 7-7	利用避雷器限制操作过电压	(236)
§ 7-8	中性点不接地系统的弧光接地过电压	(239)
一、	间歇性电弧	(239)
二、	弧光接地过电压产生的基本原理	(241)
三、	弧光接地过电压的影响因素	(243)
§ 7-9	消弧线圈的应用	(244)
一、	消弧线圈的消弧原理	(244)
二、	消弧线圈的补偿度	(245)
练习题		(248)
第八章	电力系统谐振过电压	(250)
§ 8-1	概述	(250)
§ 8-2	线性谐振过电压	(251)
§ 8-3	铁磁元件的非线性特性	(255)
§ 8-4	基波铁磁谐振	(256)
§ 8-5	断线引起的铁磁谐振过电压	(260)
一、	中性点绝缘系统中发生单相断线	(261)
二、	中性点直接接地系统中发生单相断线	(262)
§ 8-6	传递过电压	(265)
§ 8-7	电力系统中高频和分频铁磁谐振	(268)
§ 8-8	超高压系统中的谐振过电压	(271)
一、	工频谐振过电压	(271)
二、	高频谐振过电压	(274)
三、	分频谐振过电压	(275)
§ 8-9	电磁式电压互感器引起的铁磁谐振过电压	(277)
一、	工频位移过电压	(279)
二、	谐波谐振过电压	(282)
三、	限制措施	(283)
§ 8-10	参数谐振——同步电机的自激过电压	(284)
练习题		(288)

第四部分 绝缘配合

第九章	电力系统绝缘配合	(291)
§ 9-1	概述	(291)
§ 9-2	绝缘配合的原则	(292)
§ 9-3	中性点接地方式对绝缘水平的影响	(294)

§ 9-4 绝缘配合的惯用法与变电所内电气设备绝缘水平的确定	(296)
一、惯用法的基本概念	(296)
二、变电所电气设备绝缘水平的确定	(296)
§ 9-5 绝缘配合的统计法	(300)
一、统计法	(300)
二、简化统计法	(301)
§ 9-6 架空输电线路绝缘水平的确定	(303)
一、绝缘子串中绝缘子片数的确定	(303)
二、导线对杆塔的空气间隙的确定	(306)
主要参考书	(308)

第一部分 波 过 程

第一章 输电线路的波过程

电力系统的架空输电线路、电缆线路、母线、变压器和旋转电机的绕组，都属于具有分布参数的电路元件。无论线路遭受雷击或者系统内部发生操作和故障，都会在系统中产生电磁暂态过程，形成一定的过电压。分布参数电路的电磁暂态过程也属于电磁波传播过程，简称为波过程。在暂态过程中形成的过电压波，可以从线路传播到变压器、发电机或者空载线路的末端，也可以从一条线路传播到相连的另一条线路。本章首先讨论输电线路中波传播的基本规律。关于变压器和电机绕组中的波过程，将在第二章中讨论。

波过程的分析和计算是电力系统过电压和绝缘配合的理论基础。分布参数电路的暂态过程，虽然可用运算微积法或状态变量法来进行分析和计算，但是即使比较简单的电路，要得到暂态过程的解析解已经比较复杂，对于工程上遇到的复杂电路，用解析求解就相当困难。本章将采用更为实用的行波方法来研究和计算分布参数电路的暂态过程，这也是用电子计算机数值求解波过程的基础。

§ 1-1 均匀无损单导线上的波过程

实际电力系统采用三相交流或双极直流输电，属于多导线线路，而且沿线路的电场磁场和损耗情况也不尽相同，因此所谓均匀无损单导线线路实际上是不存在的。但为了揭示线路波过程的物理本质和基本规律，可以暂时忽略线路的电阻和电导损耗，假定沿线线路参数处处相同，首先研究均匀无损单导线中的波过程。

一、波传播的物理概念

首先从物理概念上来分析电压波和电流波是怎样在线路上传播的。图 1-1-1 所示为一条无限长的均匀无损的单导线，设在 $t=0$ 时合闸于直流电压源 E ，单位长度线路的电感、电容分别为 L_0 、 C_0 。

合闸以后，电源向线路电容充电，即在导线周围空间建立起电场。靠近电源的电容立即充电，并向相邻的电容放电。由于线路电感的作用，较远处的电容要间隔一段时间才能充上一定数量的电荷，并向更远处的电容放电。这样，电容依次充电，线路沿线逐渐建立起电场，形成电压。也就是说，有一电压波以一定的速度沿线路 x 方向传播。

随着线路电容的充放电，将有电流流过导线的电感，即在导线周围空间建立起磁场。

因此, 和电压波相适应, 还有一电流波以同样的速度沿 x 方向流动。

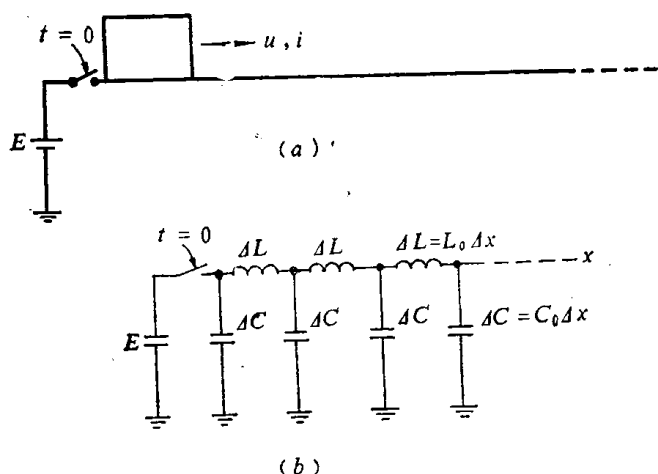


图 1-1-1 波在均匀无损单导线上的传播

电压波和电流波沿线路的流动, 实质上就是电磁波沿线路传播的过程。电磁波的传播是一个伴随而行的统一体。下面从物理概念上分析电压波和电流波的数量关系, 以及电磁波的传播速度。

设向 x 方向传播的电压波和电流波, 在开关合闸后 $t = \Delta t$ 时刻到达 $x = \Delta x$ 点。在这段时间内, 长度为 Δx 的导线上的电容 $C_0\Delta x$ 充电到 $u = E$, 获得电荷 $C_0\Delta xu$ 。这些电荷又是在时间 Δt 内, 通过电流波 i 输送过来的, 因此

$$C_0\Delta xu = i\Delta t \quad (1-1-1)$$

另一方面, 这段导线上的总电感为 $L_0\Delta x$, 在同一时间 Δt 内, 电流波 i 在导线周围建立起磁链 $L_0\Delta xi$, 因此导线上的感应电势为

$$u = \frac{L_0\Delta xi}{\Delta t} \quad (1-1-2)$$

从式 (1-1-1) 和 (1-1-2) 中消去 Δx 和 Δt , 可以得到电压波和电流波的关系为

$$\frac{u}{i} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1-1-3)$$

上式对于均匀无损线上的任一点都适用。 $\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ 值是一个实数, 具有电阻的量纲, 称为波阻抗, 用 Z 表示:

$$Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1-1-4)$$

对于架空线路, 单位长度的电感 L_0 和电容 C_0 为

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad \text{H/m} \quad (1-1-5)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} \quad \text{F/m} \quad (1-1-6)$$

其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$, 为空气的导磁系数; $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi \text{F/m}$, 为空气的介电系数; h 为导线的对地高度, 单位为 m ; r 为导线半径, 单位为 m 。因此

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \ln \frac{2h}{r} = 60 \ln \frac{2h}{r} \quad \Omega \quad (1-1-7)$$

一般单导线架空线路 $Z \approx 500\Omega$, 分裂导线 $Z \approx 300\Omega$ 。

对于电缆线路, 相对导磁系数 $\mu_r = 1$, 磁通主要分布在电缆芯线和铅包护层之间, 故

L_0 较小；又相对介电系数 $\epsilon_r \approx 4$ ，芯线和铅包之间距离很近， C_0 比架空线路大得多；因此，电缆的波阻抗要比架空线路小得多，数值约为几欧至二、三十欧。

从式(1-1-1)和(1-1-2)中消去 u 和 i ，可得电磁波的传播速度

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 C_0}} \quad (1-1-8)$$

对于架空线路

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

等于空气中的光速 c 。也就是说，电压波和电流波是以光速沿架空线路传播的。

对于电缆线路， $v \approx 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，传播速度较低，约为光速的一半。

波的传播也可以从电磁能量的角度来分析。在单位时间内，波传播的距离为 v ，这段导线的电感和电容分别为 vL_0 和 vC_0 。导线电感中流过电流 i ，在导线周围建立起磁场，相应的磁场能量为 $\frac{1}{2}(vL_0)i^2$ 。又由于电流对导线电容充电，使导线获得电位 u ，在导线周围建立起电场，其电场能量为 $\frac{1}{2}(vC_0)u^2$ 。根据式(1-1-3)和(1-1-4)有 $u=iZ$ ，不难证明

$$\frac{1}{2}(vL_0)i^2 = \frac{1}{2}vL_0\left(\frac{u}{Z}\right)^2 = \frac{1}{2}vL_0\frac{C_0}{L_0}u^2 = \frac{1}{2}vC_0u^2$$

导线周围空间在单位时间内获得的磁场能量与电场能量相等，正是电磁能传播的规律。这就是说，电压波和电流波沿导线传播的过程就是电磁能量传播的过程。

二、波动方程解

设单根均匀无损长线的参数 L_0 和 C_0 都是不变的常量。令 x 为线路首端到线路上某一点的距离。可以把长线看作是由许多无限小长度 dx 的线路单元电路串联而成，每一线路单元具有电感 $L_0 dx$ 和电容 $C_0 dx$ ，如图1-1-2所示。线路上的电压 $u(x, t)$ 和电流 $i(x, t)$ 都是距离和时间的函数。

由图1-1-2线路单元电路的回路电压关系和节点电流关系有

$$u = L_0 dx \frac{\partial i}{\partial t} + u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$$

$$i = C_0 dx \frac{\partial u}{\partial t} + i + \frac{\partial i}{\partial x} dx$$

经整理可以建立以下一阶偏微分方程组：

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \quad (1-1-9)$$

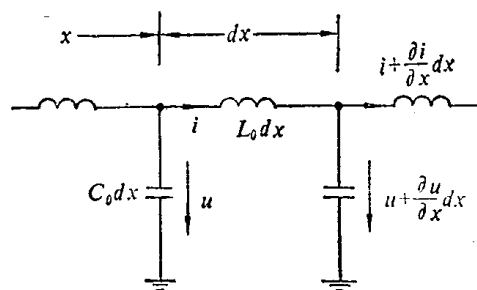


图 1-1-2 单根无损长线的单元等值电路

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1-1-10)$$

这就是大家熟悉的无损传输线方程。当然，以上方程对于线路上任何一点随时间 t 而变化的电压和电流都是适用的。

由方程(1-1-9)对 x 再求导数，由方程(1-1-10)对 t 再求导数，然后消去 i ，并用类似的方法消去 u ，可以得以下二阶偏微分方程：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1-1-11)$$

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (1-1-12)$$

这就是单根均匀无损长线的波动方程，属于两个自变量 x 和 t 的二阶偏微分方程。由此可见，波动方程所描述的线路暂态电压和电流不仅是时间 t 的函数，而且也是距离 x 的函数。方程(1-1-11)和(1-1-12)有完全相同的形式，可以预见 u 和 i 会有形式完全相同的解。

可以用不同的方法求解以上的波动方程。下面采用运算微积方法求解。

应用拉普拉斯变换对自变量 t 进行变换： $u(x, t) \Rightarrow U(x, p)$ ， $i(x, t) \Rightarrow I(x, p)$ ，并假定线路电压和电流的初始条件为零，则波动方程(1-1-11)和(1-1-12)变换成为

$$\frac{d^2 U(x, p)}{dx^2} = L_0 C_0 p^2 U(x, p) \quad (1-1-13)$$

$$\frac{d^2 I(x, p)}{dx^2} = L_0 C_0 p^2 I(x, p) \quad (1-1-14)$$

其中 p 为算子。将以上方程改写成

$$\frac{d^2 U(x, p)}{dx^2} - \gamma^2(p) U(x, p) = 0 \quad (1-1-15)$$

$$\frac{d^2 I(x, p)}{dx^2} - \gamma^2(p) I(x, p) = 0 \quad (1-1-16)$$

其中 $\gamma(p) = \pm \sqrt{L_0 C_0} p$ 为线路传播常数。考虑到线路无损时传播速度 $v = 1/\sqrt{L_0 C_0}$ ，则

$$\gamma(p) = \pm \frac{p}{v}$$

方程(1-1-15)和(1-1-16)属于自变量 x 的二阶齐次线性常微分方程，其解显然可以写为

$$U(x, p) = U_1(p) e^{-\frac{p}{v} x} + U_2(p) e^{\frac{p}{v} x} \quad (1-1-17)$$

$$I(x, p) = I_1(p) e^{-\frac{p}{v} x} + I_2(p) e^{\frac{p}{v} x} \quad (1-1-18)$$

其中 $U_1(p)$ 、 $U_2(p)$ 和 $I_1(p)$ 、 $I_2(p)$ 函数的具体形式,由线路的初始条件和边界条件决定。

根据拉普拉斯反变换的延迟定理:若 $f(t) \Leftrightarrow F(p)$,则 $F(p)e^{-p\tau} \Leftrightarrow f(t-\tau)$,解表达式(1-1-17)和(1-1-18)可反变换成

$$u(x, t) = u_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + u_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (1-1-19)$$

$$i(x, t) = i_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + i_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (1-1-20)$$

通过变量置换,以上两式也可改为

$$u(x, t) = u_1(x - vt) + u_2(x + vt) \quad (1-1-21)$$

$$i(x, t) = i_1(x - vt) + i_2(x + vt) \quad (1-1-22)$$

这就是均匀无损单导线线路波动方程的解。

三、前行波和反行波

下面用行波的概念来分析波动方程解的物理意义。

先讨论式(1-1-21)电压 u 的第一个分量 $u_1(x - vt)$ 。若观察者由任一时刻 t_1 开始,从线路上的任一点 x_1 出发,沿 x 方向以速度 v 运动,则对于任何时刻 t 和他所在的位置 x ,有

$$\begin{aligned} x - vt &= [x_1 + v(t - t_1)] - vt = x_1 - vt_1 \\ &= \text{常量} \end{aligned}$$

因此他所观察到的 $u_1(x - vt)$ 值始终不变,如图1-1-3所示。因为前面的假定 x_1 和 t_1 是任意的,所以对整个电压波分量 u_1 都是满足的。由此可见, $u_1(x - vt)$ 是随着时间 t 的增加,以速度 v 向 x 增加的方向运动的,是前行波电压分量。而第二个电压分量 $u_2(x + vt)$ 是 $x + vt$ 的函数,同样可以说明它随着 t 的增加向 x 减小的方向运动,是反行波电压分量。对式(1-1-22)的电流波 $i(x, t)$,以上分析的结论也适用。

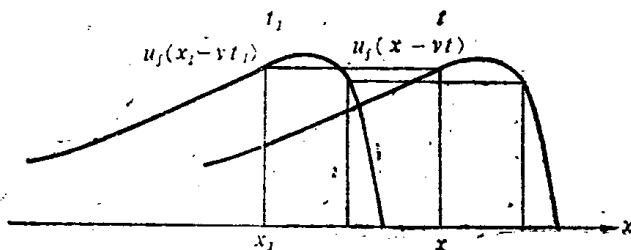


图 1-1-3 行波的运动

因此可以得出结论,线路上的电压波和电流波,一般情况下都由前行波和反行波两个分量叠加而成。为分析方便,式(1-1-21)和(1-1-22)可以简洁地表示为

$$u = u_1 + u_2 \quad (1-1-23)$$

$$i = i_1 + i_2 \quad (1-1-24)$$

前面已经分析,电压波和电流波数值之间的关系是通过波阻抗 Z 相联系的(1-1-3和1-1-4)。但不同极性的行波向不同的方向传播,需要规定一定的正方向。电压波的符号只决定于导线对地电容上相应电荷的符号,和运动方向无关。而电流波的符号不但与相应的电荷符号有关,而且与电荷的运动方向有关。根据习惯规定:沿 x 正方向运动的正电荷相应的电流波为正方向。这样可以得出如图1-1-4所示的结果:在规定的行波电流正方向的前提

下, 前行波 u_f 与 i_f 总是同号, 而反行波 u_b 与 i_b 总是异号, 即

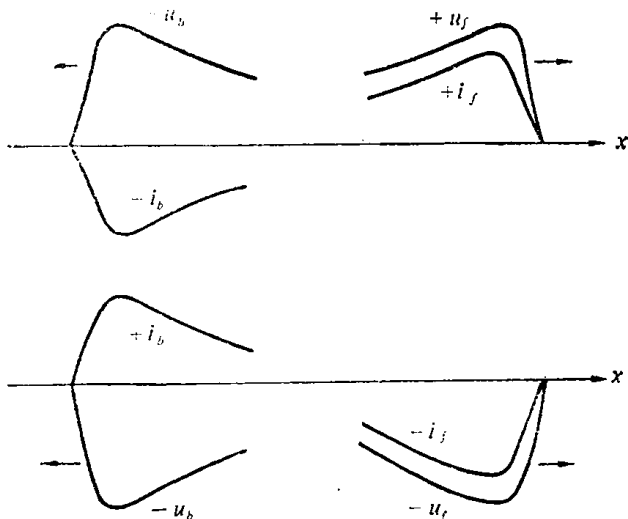


图 1-1-4 电压波和电流波的关系

$$\frac{u_f}{i_f} = Z \quad (1-1-25)$$

$$\frac{u_b}{i_b} = -Z \quad (1-1-26)$$

因而式 (1-1-24) 又可以写成

$$i(x, t) = \frac{1}{Z} (u_f - u_b) \quad (1-1-27)$$

上式也可以由式 (1-1-21) 对 x 求偏导数

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u_f'(x - vt) + u_b'(x + vt)$$

代入式 (1-1-9) 求出

$$\frac{\partial i}{\partial t} = -\frac{1}{L_0} [u_f'(x - vt) + u_b'(x + vt)]$$

后再对 t 积分求得

$$i = \frac{1}{vL_0} [u_f(x - vt) - u_b(x + vt)] = \frac{1}{Z} [u_f(x - vt) - u_b(x + vt)]$$

式 (1-1-23)、(1-1-24) 和 (1-1-25)、(1-1-26) 是反映无损单导线波过程基本规律的四个基本方程。从这四个基本方程出发, 加上初始条件和边界条件, 就可以算出导线上的电压和电流。

必须注意, 分布参数线路的波阻抗与集中参数电路的电阻虽然有相同的量纲, 但在物理意义上有着本质的不同。下面着重指出它的几个主要特点:

(1) 波阻抗表示向同一方向传播的电压波和电流波之间比值的大小。电磁波通过波阻抗为 Z 的无损线时, 其能量以电磁能的形式储存于周围介质中, 而不象通过电阻那样被消耗掉。

(2) 为了区别不同方向的行波, Z 的前面应有正负号, 如式 (1-1-25)、(1-1-26) 所示。

(3) 如果导线上有前行波, 又有反行波时, 导线上的总电压和总电流的比值不再等于波阻抗, 即

$$\frac{u}{i} = \frac{u_f + u_b}{i_f + i_b} = Z \frac{u_f + u_b}{u_f - u_b} \neq Z$$

(4) 波阻抗的数值 Z 只与导线单位长度的电感 L_0 和电容 C_0 有关, 与线路的长度无关。

§ 1-2 波的折射和反射

上一节假定波在线路参数不变的无限长线中传播。实际上波传播到线路的某一点, 可

能遇到线路参数突然改变的情况。例如波从波阻抗较大的架空线路进入波阻抗较小的电缆线路，或者相反，在线路中间或末端接有集中参数阻抗（如电阻、电容、电感等）。以上情况将导致波在节点产生折射和反射。我们可以运用上节得出的波传播的基本规律和边界条件来计算折射波和反射波。

设如图1-2-1所示，有一波阻抗为 Z_1 的线路1与另一波阻抗为 Z_2 的线路2在节点A相连，幅值等于 E 的无限长的直角波自无穷远沿线路1传来。当波到达节点A后即发生折射和反射。折射波通过节点A向线路2方向传播，反射波自节点A返回向线路1反方向传播。因此，在线路1上除了前行波 u_{1f} 、 i_{1f} 外，将出现反行波 u_{1b} 、 i_{1b} ，总的电压和电流为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= u_{1f} + u_{1b} \\ i_1 &= i_{1f} + i_{1b} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-1)$$

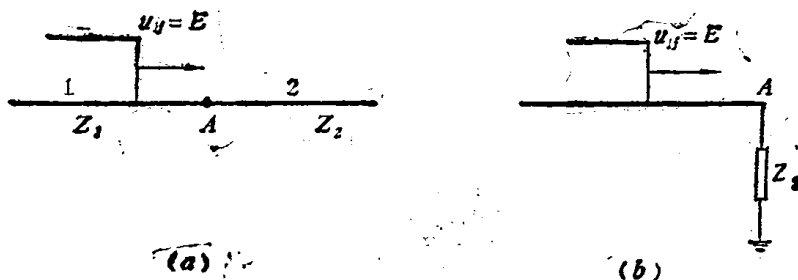


图 1-2-1 波在节点的折射和反射

设线路2为无限长或其末端的反射波尚未返回，则线路2上只有前行的折射波，没有反射波，因此

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= u_{2f} \\ i_2 &= i_{2f} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-2)$$

根据边界条件：在节点A只能有一个电压和电流，即 $u_1 = u_2$ ， $i_1 = i_2$ 。因此由式(1-2-1)和(1-2-2)可得

$$\left. \begin{aligned} u_{1f} + u_{1b} &= u_{2f} \\ i_{1f} + i_{1b} &= i_{2f} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-3)$$

上式中 $i_{1f} = u_{1f}/Z_1$ ， $i_{1b} = -u_{1b}/Z_1$ ， $i_{2f} = u_{2f}/Z_2$ ， $u_{1f} = E$ ，代入后得

$$\left. \begin{aligned} E + u_{1b} &= u_{2f} \\ \frac{E - u_{1b}}{Z_1} &= \frac{u_{2f}}{Z_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-2-4)$$

从上式中消去 u_{1b} 或 u_{2f} ，可以得到

$$\left. \begin{aligned} u_{2f} &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} E = \alpha E \\ u_{1b} &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} E = \beta E \end{aligned} \right\} \quad (1-2-5)$$

上式中 u_{2f} 就是入射波 $u_{1f} = E$ 经过节点A后进入线路2的折射波，而 u_{1b} 为自节点A返回

线路1的反射波。 α 和 β 分别称为电压波的折射系数和反射系数。根据上式有

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1-2-6)$$

$$\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (1-2-7)$$

根据式(1-2-3)还可得到折射系数与反射系数的关系为

$$\alpha = 1 + \beta \quad (1-2-8)$$

以上波的折、反射系数虽然是根据两段不同波阻抗的线路推导出来的,但也适用于线路末端接有不同负载电阻的情况。

下面我们将就线路末端开路、短路和接有负载电阻等于、不等于线路波阻抗等几种典型情况,来计算折、反射波,从而进一步搞清波的折、反射的物理概念。

(一) 线路末端开路 ($Z_2 = \infty$)

根据式(1-2-6)、(1-2-7): $\alpha = 2$, $\beta = 1$ 。此时,线路末端电压 $u_2 = u_{2f} = 2E$, 反射波电压 $u_{1b} = E$; 线路末端电流 $i_2 = 0$, 反射波电流

$$i_{1b} = -\frac{u_{1b}}{Z_1} = -\frac{E}{Z_1}$$

计算结果如图1-2-2所示。可以看到,由于线路末端开路发生电压波正的全反射和电流波负的全反射,使线路末端电压提高到入射波电压的2倍,末端电流为零;随着反射波的反行,在反射波到达以后的线路上,线路电压也上升到2倍,线路电流下降到零。

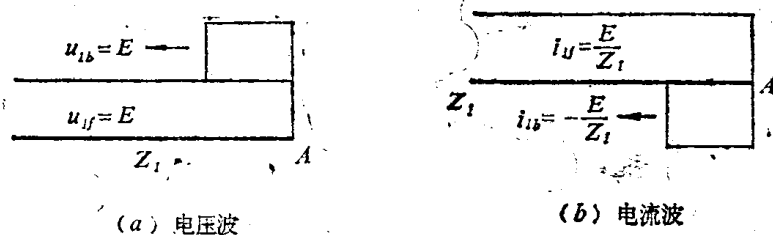


图 1-2-2 线路末端开路时的折、反射

这一现象可以从能量的角度得到解释。因为 $Z_2 = \infty$, $P_2 = u_{2f}^2/Z_2 = 0$, 全部能量皆由末端反射回去,使线路上反射波到达的范围内,单位长度的总能量等于入射波能量的2倍。由于入射波的电场能量与磁场能量相等,因此反射波返回后单位长度的总能量为 $2 \times 2 \times C_0 E^2/2 = 2C_0 E^2$ 。因为反射波到达后线路电流为零,磁场能量也为零,所以全部能量都储存在电场内。设此时线路电压为 u_1 , 则 $C_0 u_1^2/2 = 2C_0 E^2$, 故 $u_1 = 2E$ 。这就是全反射以后线路电压上升到2倍的缘故。

(二) 线路末端接地短路 ($Z_2 = 0$)

根据式(1-2-6)、(1-2-7)算得: $\alpha = 0$, $\beta = -1$ 。此时线路末端电压 $u_2 = u_{2f} = 0$, 反射波电压 $u_{1b} = -E$; 反射波电流

$$i_{1b} = \frac{u_{1b}}{-Z_1} = \frac{E}{Z_1} = i_{if}$$