



普通高等教育“十二五”规划教材

过电压防护的 理论与技术

吴广宁 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

过电压防护的 理论与技术

主编 吴广宁

编写 曹晓斌 李瑞芳

主审 司马文霞



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。主要内容包括基础理论和过电压分析 2 篇共 11 章, 比较系统地阐明了输电线路参数、变压器和旋转电机参数、电力系统暂态分析、外绝缘污秽与闪络、绝缘配合基础; 详细叙述了几种过电压的基本概念、基本原理、分析方法和计算方法; 同时联系工程实际应用, 介绍了过电压概率分布工程计算的相关内容。

本书可作为高等院校高电压与绝缘技术专业的必修教材, 同时可作为电力系统及其自动化专业和其他电工类专业的补充教材和教学参考书, 以及电力系统和电气制造部门工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

过电压防护的理论与技术/吴广宁主编. —北京: 中国电力出版社, 2015. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5124-7309-9

I. ①过… II. ①吴… III. ①过电压保护—高等学校—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 041772 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>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 404 千字
定价 33.00 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

前 言

本书是根据高等院校电力系统过电压与绝缘配合的课程教学计划，按照加强基础、精选内容、不断更新、利于教学原则编写而成。在内容方面，以介绍过电压与绝缘技术为主；在叙述方面，力求深入浅出，强调理论概念，便于自学。即便如此，过电压与绝缘配合课程作为一门专业性较强的课程，对读者的理论基础要求较高。建议读者在学习了高等数学、电路分析、电磁场、电力系统分析、高电压技术等相关基础上进行学习。

本书内容包括了基础理论和过电压分析 2 篇共 11 章，系统地阐明了输电线路参数、变压器和旋转电机参数、电力系统暂态分析、外绝缘污秽与闪络、绝缘配合基础；详细叙述了雷电过电压、工频电压升高、谐振过电压、操作过电压和分相过电压的基本概念、基本原理、分析和计算方法；同时，本书为联系工程实际应用，介绍了过电压概率分布工程计算的相关内容。

本书由吴广宁任主编，曹晓斌、李瑞芳参与编写。本书初稿的校对工作得到了罗勋、张先怡、陈奎、韩虎、易志兴、何方方、敬兴东等同志的大力帮助，在此一并表示感谢。

本书由重庆大学司马文霞教授担任主审，她对本书提出了宝贵的修改意见和建议，在此向她深表谢意。

由于编者水平有限，不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

常用符号说明

符号	表示意义
U	某一角频率下导线对地电压
I	某一角频率下导线中电流的有效值
Z	串联阻抗矩阵
ρ	土壤电阻率
R_{ii}	导线 i 的交流电阻, Ω/km
h_i	导线 i 对地的平均悬挂高度, m
D_{ik}	导线 i 与导线 k 镜像之间距离, m
d_{ik}	导线 i 与导线 k 之间距离, m
GMR_i	导线 i 的几何距离, m
ω	频率为 f 时的角频率, rad/s
$\Delta R, \Delta X$	计及大地影响时的卡松修正项
R, R_{dc}	导线的交流、直流电阻, Ω/km
L_i	导线内电感 (包括集肤效应), H/km
q	单位长度导线上的电荷, C/km
P	麦克斯韦电位系数
$2h$	导线到其镜像的距离, m
X_q	发电机横轴同步电抗
X_d	发电机纵轴同步电抗
S	发电机额定容量, kVA
U_N	额定线电压, kV
n	发电机的转数, rad/min
K	与绝缘等级相关的系数 (B级绝缘 $K=0.04$)

目 录

前言
常用符号说明

第1篇 基础理论

第1章 输电线路参数	1
1.1 多导线系统的电阻和电感	1
1.2 多导线系统的电容	6
1.3 输电线路的模型化	8
第2章 变压器和旋转电机参数	15
2.1 变压器	15
2.2 旋转电机	23
第3章 电力系统暂态分析	41
3.1 网格法	41
3.2 特征线法	48
第4章 外绝缘污秽与闪络	70
4.1 外绝缘的污秽沉积与等级划分	70
4.2 污秽绝缘子表面放电机理	86
4.3 污秽绝缘子污闪模型	95
4.4 污秽测量	102
第5章 绝缘配合基础	110
5.1 绝缘配合的原则和方法	110
5.2 中性点接地方式对绝缘水平的影响	114
5.3 变电站和架空线路绝缘水平的确定	115

第2篇 过电压分析

第6章 雷电过电压	122
6.1 雷电参数	122
6.2 雷电流测量方法	126
6.3 输电线路的雷电过电压	131
6.4 变电站和发电厂的雷电过电压	146
第7章 工频电压升高	154
7.1 空载线路的电容效应	155

7.2	不对称短路引起的工频电压升高	160
7.3	突然甩负荷引起的工频电压升高	163
第 8 章	谐振过电压	166
8.1	线性谐振过电压	167
8.2	非线性（铁磁）谐振过电压	171
8.3	超高压电网中的谐振过电压	177
8.4	参数谐振过电压	183
第 9 章	操作过电压	188
9.1	空载线路合闸过电压	188
9.2	切除空载线路过电压	192
9.3	间歇电弧接地过电压	195
9.4	电力系统解列过电压	198
第 10 章	分相过电压	199
10.1	分相过电压的工程背景	199
10.2	中性段感应电压	203
10.3	分相过电压产生机理	207
10.4	抑制分相过电压措施	228
第 11 章	过电压概率分布的工程计算	238
11.1	蒙特卡洛法简介	238
11.2	随机数序列的产生和抽样	240
11.3	内部过电压概率分布的蒙特卡洛法计算	243
11.4	雷击跳闸率的蒙特卡洛法计算	256
参考文献	258

第 1 篇 基 础 理 论

第 1 章 输 电 线 路 参 数

输电线路参数是研究输电线路上的物理现象所必不可少的参数。比如在计算线路的潮流时，必须首先获知输电线路在 50Hz 或 60Hz 下的正序参数；分析系统短路故障时，需知道系统的零序参数和负序参数。在研究线路的暂态过程时，仅有工频状态下的输电线路参数是不够的，还要详细地讨论这些参数在暂态下的特性。

本章内容是电力系统电磁暂态计算的基础，本章中将重点介绍输电线路的各项参数。完成本章内容的学习有助于利用计算机进行电磁暂态的数值计算。

在电路分析和电力系统等有关课程中，已对输电线路参数进行了一些介绍及计算，所以本章将只在必要的地方适当进行介绍，以利于问题的叙述。

1.1 多导线系统的电阻和电感

1.1.1 单根导线的电压降方程

单根或单相导线的线路电压降方程为

$$-dU = (Rdx)I + (j\omega Ldx)I$$

或

$$-\frac{dU}{dx} = RI + j\omega LI \quad (1-1)$$

式中 U 、 I ——某一角频率下导线对地电压和导线中电流的有效值；

R 、 L ——线路单位长度的电阻和电感量；

$(Rdx)I$ —— dx 段中的电阻压降，它包括 dx 段中导线电阻上的压降和地中电阻上的压降两部分；

$(j\omega Ldx)I$ —— dx 段中的电感压降，它包括 dx 段中空气磁通、地中磁通和导线内部磁通这三部分所产生的压降，其等值电路如图 1-1 所示。

1.1.2 多导线系统的电压降方程

多导线系统的电压降方程可写成式

(1-2) 的形式

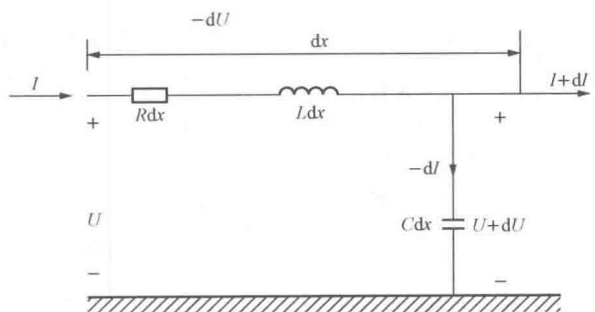


图 1-1 单相无损线路等值电路

$$-\begin{pmatrix} \frac{dU_1}{dx} \\ \frac{dU_2}{dx} \\ \vdots \\ \frac{dU_n}{dx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & \cdots & Z_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (1-2)$$

或

$$-\left[\frac{dU}{dx}\right] = [Z][I] \quad (1-3)$$

式中 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ ——各根导线的对地电压；

I_1, I_2, \dots, I_n ——各导线中的电流；

Z ——串联阻抗矩阵，其对角元素 Z_{ii} 即为上节所述导线的 $R+j\omega L$ ，

称为串联自阻抗，非对角线元素 Z_{ik} 表示串联互阻抗，例如，

Z_{12} 即表示 I_2 对 dU_1 的影响，互阻抗 Z_{ik} 可表达为 $R_{ik}+j\omega L_{ik}$ 。

Z_{ii} 、 Z_{ik} 的计算公式有多种表示方法，均可在一般教材中查到。虽然实际使用中各公式限制条件不同，计算的结果却几乎一致。近年来，土壤均匀分层的设想得到采用，即假定各层中土壤电阻率 ρ 不同，进而将各层土壤等值成一根根导线，以此来计及土壤电阻率不均匀大地对计算结果的影响。此方法计算比较简单，但原始数据的获得较困难。本书仅介绍比较通用的卡松 (Carson) 公式。

Carson 引入了一个修正项来计及大地土壤电阻率 ρ 的影响，这种做法对研究电力系统暂态问题是足够精确的。该公式中假定：

(1) 导线足够长，忽略三维末端效应。

(2) 大地电阻率均匀，并等效为一个可无限延伸的与输电线路平行的导体。

(3) 输电线路档距远远大于导线直径，因此忽略邻近效应，即忽略单根导线中电流分配不均匀性对邻近导线的影响。

此时串联阻抗矩阵的各个元素可根据杆塔结构及导线特性进行计算。自阻抗为

$$Z_{ii} = (R_{ii} + \Delta R_{ii}) + j \left(2\omega \cdot 10^{-4} \ln \frac{2h_i}{GMR_i} + \Delta X_{ii} \right) \quad (1-4)$$

$$Z_{ik} = Z_{ki} = \Delta R_{ik} + j \left(2\omega \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta X_{ik} \right) \quad (1-5)$$

式中 R_{ii} ——导线 i 的交流电阻， Ω/km ；

h_i ——导线 i 对地的平均悬挂高度， m ；

D_{ik} ——导线 i 与导线 k 镜像之间距离， m ；

d_{ik} ——导线 i 与导线 k 之间距离， m ；

GMR_i ——导线 i 的几何距离；

ω ——频率为 f 时的角频率， rad/s ， $\omega=2\pi f$ ；

$\Delta R, \Delta X$ ——计及大地影响时的卡松修正项。

上述部分量的物理意义可参考图 1-2。

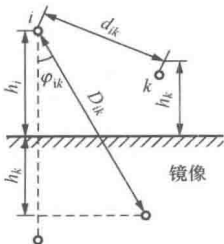


图 1-2 大地为非理想导体时的镜像

1.1.3 导线的集肤效应

众所周知,在交流电的情况下导线的集肤效应^①会使电阻加大,导线内部磁链的减少使电感减小。因此导线的交流电阻将大于直流电阻,而交流内电感将小于直流内电感。

对于管状导线,如图1-3所示,导线的电阻 R 和内电感 L_i 形成的阻抗 $R+j\omega L_i$ 可由式(1-6)求出

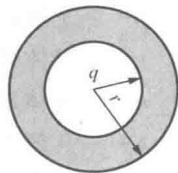


图1-3 管状导线

$$\frac{R+j\omega L_i}{R_{dc}} = j \frac{1}{2} mr(1-s^2) \cdot \frac{[\text{ber}(mr) + j\text{bei}(mr)] + \phi[\text{ker}(mr) + j\text{kei}(mr)]}{[\text{ber}'(mr) + j\text{bei}'(mr)] + \phi[\text{ker}'(mr) + j\text{kei}'(mr)]} \quad (1-6)$$

其中

$$\phi = -\frac{\text{ber}'(mq) + j\text{bei}'(mq)}{\text{ker}'(mq) + j\text{kei}'(mq)} \quad (1-7)$$

$$s = -\frac{q}{r}$$

式中 R 、 R_{dc} ——导线的交流、直流电阻, Ω/km ;

L_i ——导线内电感(包括集肤效应), H/km ;

q 、 r ——导线的内、外半径。

$$mr = \sqrt{\frac{k}{1-s^2}} \quad (1-8)$$

$$mq = s \cdot mr = s \sqrt{\frac{k}{1-s^2}} \quad (1-9)$$

且 $k = \frac{\mu\omega}{\pi R_{dc}}$, $\mu = \mu_0\mu_r = 4\pi \times 10^{-4}$ (当 $\mu_r = 1$ 时)

由图1-3知,当 $q=0$ 时, $s=-q/r=0$, 则

$$m = \frac{1}{r} \sqrt{k} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\mu\omega}{\pi\rho \frac{1}{\pi r^2}}} = \sqrt{\frac{\mu\omega}{\rho}} \quad (1-10)$$

相当于实心导线时的 m 值。

式(1-6)中的 $\text{ber}(\dots) + j\text{bei}(\dots)$, $\text{ber}'(\dots) + j\text{bei}'(\dots)$, $\text{ker}(\dots) + j\text{kei}(\dots)$, $\text{ker}'(\dots) + j\text{kei}'(\dots)$ 均为修正的贝塞尔函数及其导数,可由数学手册中近似公式算出。

对铝绞线,可按相应截面的实心导线进行计算,对于钢芯铝绞线,则通常可略去钢芯部分而近似地用上述管状导线来做计算。

Galloway 对集肤效应下的导线内电阻和内电感提出了如下计算公式,其单位为 Ω/km 。

$$R = j\omega L_i = \frac{k \sqrt{\omega\mu\rho}}{\sqrt{2r\pi(2+n)}} \quad (1-11)$$

式中 μ ——导体导磁率, H/m ;

^① 集肤效应——当导体中有交流电或者交变电磁场时,导体内部的电流分布不均匀,且电流集中在导体的“皮肤”部分的一种现象。

- ρ ——土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$;
 r ——导体外半径, m ;
 n ——导体最外层绞线数;
 k ——其值为 2.25。

式 (1-7) 用于计算 $f > 230\text{Hz}$ 时的导线电阻, 将获得比式 (1-6) 管状公式更高的阻值, 可能更加可靠。

工频的导线交流电阻可从手册上查得, 高频时由于集肤效应交流电阻将明显上升, 可按式 (1-11) 计算。对于内电感, 集肤效应将使它下降, 但由于它只占线路电感中的很小一部分, 因而使用上可不计其集肤效应的影响, 而按电力系统中一般方法计算。

1.1.4 大地的影响

实际上大地不是理想导体而具有一定的 ρ 值, 因而常需计其影响。这里我们将介绍卡松的研究结果。

计及大地的影响后, 假设大地具有均匀的 ρ 值, 则式 (1-4) 中串联阻抗 Z_{ii} 就需增加两个修正项: ΔR_{ii} 和 ΔX_{ii} (其单位均为 Ω/m), 他们是图 1-2 中 φ_{ik} 角的函数。当 $\varphi=0$ 时为自阻抗; 当 $\varphi=\varphi_{ik}$ 时为互阻抗, 并引入一个系数 a

$$a = 4\pi\sqrt{5} \times 10^{-4} D \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (1-12)$$

式中 D ——取 $2h_i$ 时为自阻抗, 取 D_{ik} 时为互阻抗, Ω/m 。

当 $a \rightarrow \infty$, 即频率非常高或土壤电阻率非常小时, ΔR_{ii} 和 ΔX_{ii} 趋近于零。当 $a \leq 5$ 时, 卡松公式给出级数如下:

$$\begin{aligned} \Delta R_{ii} = 4\omega \times 10^{-4} \left\{ \frac{\pi}{8} - b_1 a \cos\varphi + b_2 [(c_2 - \ln a) a^2 \cos(2\varphi) + \varphi a^2 \sin(2\varphi)] + b_3 a^3 \cos(3\varphi) \right. \\ \left. - d_4 a^4 \cos(4\varphi) - b_5 a^5 \cos(5\varphi) + b_6 [(c_6 - \ln a) a^6 \cos(6\varphi) + \varphi a^6 \sin(6\varphi)] \right. \\ \left. + b_7 a^7 \cos(7\varphi) - d_8 a^8 \cos(8\varphi) - \dots \right\} \quad (1-13a) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta X_{ii} = 4\omega \times 10^{-4} \left\{ \frac{1}{2} (0.6159315 - \ln a) + b_1 a \cos\varphi - d_2 a^2 \cos(2\varphi) + b_3 a^3 \cos(3\varphi) \right. \\ \left. - b_4 [(c_4 - \ln a) a^4 \cos(4\varphi) + \varphi a^4 \sin(4\varphi)] + b_5 a^5 \cos(5\varphi) - d_6 a^6 \cos(6\varphi) \right. \\ \left. + b_7 a^7 \cos(7\varphi) - b_8 [(c_8 - \ln a) a^8 \cos(8\varphi) + \varphi a^8 \sin(8\varphi)] + \dots \right\} \quad (1-13b) \end{aligned}$$

$$\text{其中起始值} \begin{cases} b_1 = \frac{\sqrt{2}}{6}, & \text{下标为奇数} \\ b_2 = \frac{1}{16}, & \text{下标为偶数} \end{cases}$$

$$b_i = b_{i-2} \frac{\text{sign}}{(i+2)} \quad \text{sign} = \begin{cases} +1, & \text{当 } i = 1, 2, 3, 4, \dots \\ -1, & \text{当 } i = 5, 6, 7, 8, \dots \end{cases}$$

(每 4 项变换一次正负号)

$$c_i = c_{i-2} + \frac{1}{i} + \frac{1}{i+2} \quad c_2 = 1.3659315$$

$$d_i = \frac{\pi}{4} b_i$$

当 $a > 5$ 时, ΔR_{ii} 和 ΔX_{ii} 近似公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{ii} &= \frac{4\omega \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2}} \left(\frac{\cos\varphi}{a} - \frac{\sqrt{2}\cos 2\varphi}{a^2} + \frac{\cos 3\varphi}{a^3} + \frac{3\cos 5\varphi}{a^5} - \frac{45\cos 7\varphi}{a^7} \right) \\ \Delta X_{ii} &= \frac{4\omega \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2}} \left(\frac{\cos\varphi}{a} - \frac{\cos 3\varphi}{a^3} + \frac{3\cos 5\varphi}{a^5} + \frac{45\cos 7\varphi}{a^7} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

式 (1-13a)、式 (1-13b) 中的项均是每隔 4 项有一次格式循环, 在此不再多写。例如 ΔR_{ii} 中, 带 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 的项形成一次循环, 带 b_5 、 b_6 、 b_7 、 b_8 的 4 项又形成一次格式循环。 ΔX_{ii} 式中也是这样, 4 项一次格式循环。

当近似的只取首项时, 则

$$\left. \begin{aligned} \Delta R_{ii} &= 4\omega \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\pi}{8} = \pi^2 f \cdot 10^{-4} = 0.05 (\Omega/\text{km}) \\ \Delta X_{ii} &= 4\omega \cdot 10^{-4} \left[\frac{1}{2} (0.616 - \ln a) \right] = \omega \cdot 2 \times 10^{-4} \ln \frac{e^{0.616}}{a} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

Z_{ii} 的感抗部分为

$$\begin{aligned} \omega \left(2 \times 10^{-4} \ln \frac{2h_i}{GMR} + 2 \times 10^{-4} \ln \frac{e^{0.616}}{a} \right) &= \omega \cdot 2 \times 10^{-4} \ln \frac{\frac{e^{0.616}}{a} \cdot 2h_i}{GMR} \\ &= \omega \cdot 2 \times 10^{-4} \ln \frac{D_\epsilon}{GMR} \end{aligned} \quad (1-16)$$

式中 D_ϵ ——通常介绍的大地镜像的等值深度, m。

$$\begin{aligned} D_\epsilon &= \frac{e^{0.616}}{a} D \\ &= \frac{e^{0.616}}{a} \cdot 2h_i \\ &= \frac{e^{0.616}}{4\pi \sqrt{5} \times 10^{-4}} \sqrt{\frac{\rho}{f}} \\ &= 658.9 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \end{aligned} \quad (1-17)$$

考虑大地对导线间互阻抗 Z_{ik} 的影响, 参考图 1-2, 卡松公式及修正项如下

$$Z_{ik} = Z_{ki} = \Delta R_{ik} + j(2\omega \cdot 10^{-4} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta X_{ik})$$

ΔR_{ik} 、 ΔX_{ik} 分别为电阻及电抗的修正值, 它们的表达式同式 (1-13a)、式 (1-13b)。但

$$\varphi = \varphi_{ik} = \cos^{-1} \left(\frac{h_i + h_k}{D_{ik}} \right) \quad (1-18)$$

即

$$a = 4\pi \sqrt{5} \times 10^{-4} D_{ik} \sqrt{\frac{f}{\rho}} \quad (1-19)$$

互感抗 Z_{ik} 中出现电阻分量 ΔR_{ik} , 表示当导线 k 有电流 I_k 流过时, 在导线 i 回路感应的电动势 $Z_{ik} I_k$ 与 I_k 之间相角不成 90° 。

式 (1-5) 中, 由于大地为理想导体, 感抗表示为 $2\omega \times 10^{-4} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}}$ 。

1.2 多导线系统的电容

1.2.1 单根导线的对地电容

通常, 在计算导线对地的电容时, 可以将地看做是零电位面, 故单根导线对地的电压 (即作用在该导线对地之间的电压) 和导线表面电荷之间的关系可由式 (1-20) 得出

$$U = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} = Pq \quad (1-20)$$

式中 ϵ_0 ——真空介电常数, $\epsilon_0 \approx \frac{1}{36\pi \times 10^9} \text{F/m} = 8.842 \times 10^{-9} \text{F/m}$;

q ——单位长度导线上的电荷, C/km;

P ——麦克斯韦电位系数, $P = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r} = 18 \times 10^6 \ln \frac{2h}{r}$, km/F;

$2h$ ——导线到其镜像的距离, m;

r ——导线半径, m。

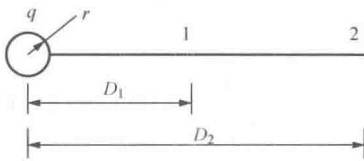


图 1-4 线电荷 q 在 1、2 两点间所产生的电位差

导线对地电容 C 为

$$C = \frac{1}{P} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} = \frac{1}{18 \times 10^6 \ln \frac{2h}{r}} \quad (1-21)$$

式中, C 单位为 F/km。

式 (1-20) 的导出如下, 线电荷 q 在 1、2 两点间所产生的电位差如图 1-4 所示。

在半径为 r 的导线周围, 线电荷 q 所产生电场中任意两点 1、2 的电位差为

$$U_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \int_{D_1}^{D_2} \frac{1}{x} dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_2}{D_1}$$

故图 1-5 中导线到其镜像之间的电位差为

$$2U = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h-r}{r} + \frac{(-q)}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{2h-r} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r}$$

故

$$U = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h}{r}$$

1.2.2 多导线系统的电容

如图 1-6 所示, 如导线 i 上有电荷 q_i , 则使导线 k 对地电位 U_k 为

$$U_k = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} = P_{ki} q_i \quad (1-22)$$

同样, 如导线 k 上有电荷 q_k , 则将使导线 i 对地电位 U_i 为

$$U_i = \frac{q_k}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} = P_{ik} q_k$$

很显然

$$P_{ik} = P_{ki} \quad (1-23)$$

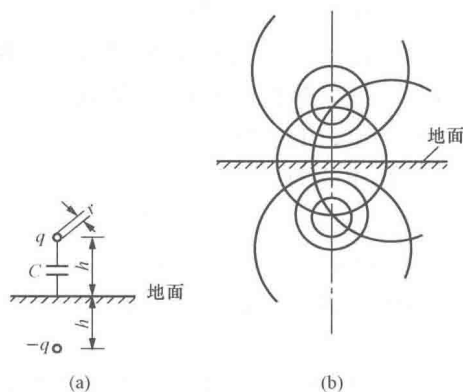


图 1-5 单根导线的电力线

(a) 单个导线及其镜像示意图; (b) 单根导线的电力线

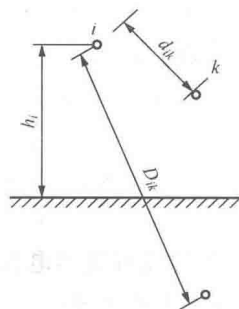


图 1-6 平行多导线线路

当有 n 根导线时, 各导线的表面电荷分别为 q_1 、 q_2 、 \dots 、 q_n ; 各导线的对地电位分别为 U_1 、 U_2 、 \dots 、 U_n 。则可以写出

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \cdots & P_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \cdots & P_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} \quad (1-24)$$

式中 q_i ——导线 i 上单位长度的表面电荷, $i=1, 2, 3, \dots, n$;

P_m ——麦克斯韦电位系数。

式 (1-24) 也可以写为

$$U = Pq \quad (1-25)$$

其中, P 为麦克斯韦电位系数矩阵。

由式 (1-24)、式 (1-25) 可得

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} \quad (1-26)$$

或写成

$$q = KU \quad (1-27)$$

式 (1-26) 中的 K 矩阵称为节点电压方程中的电容矩阵, 则

$$K = P^{-1} \quad (1-28)$$

矩阵 K 中各元素的含义可理解如下: 式 (1-26) 中, 当 U_1 外的各点电压 U_2 、 U_3 、 \dots 、 U_n 均为零时, 则 $q_1 = K_{11}U_1$, 故 K_{11} 表示导线 1 单位长度对地以及对其他导线之间的电容之和。同理, K_n 表示导线 i 单位长度对地以及对其他各导线的电容之和。当 U_i 外各导线的电位均等于零时, 可得第 k 根导线上的电荷量为 $q_k = K_{ki}U_i$ 。导线 i 与 q_k 通过电力线

相联系的部分电荷为 $-q_k$ ，故 i 、 k 之间的电容即为 $K_{ki}=(-q_k)/U_i$ 。

同理，当 U_k 以外各导线电位均为零时，可知 $K_{ik}=(-q_i)/U_k$ ， K_{ki} 与 K_{ik} 反映的是同一电容，故 $K_{ki}=K_{ik}$ ，因而 K 中各非对角元素 $K_{ki}=K_{ik}$ =单位长度 C_{ik} 的负值。

图 1-7 中设 $C_{10}=C_{30}=0.012\ 478\mu\text{F}/\text{km}$ ， $C_{20}=0.011\ 119\mu\text{F}/\text{km}$ ， $C_{12}=C_{23}=0.004\ 24\mu\text{F}/\text{km}$ ， $C_{13}=0.002\ 17\mu\text{F}/\text{km}$ 。于是可得式中的 K 矩阵为

$$[\mathbf{K}] = \begin{pmatrix} 0.018\ 873 & -0.004\ 224 & -0.002\ 171 \\ -0.004\ 224 & 0.019\ 567 & -0.004\ 224 \\ -0.002\ 171 & -0.004\ 224 & 0.018\ 873 \end{pmatrix}$$

1.2.3 多导线系统的电容电流方程

当导线系统中各导线的对地电压 U_1, U_2, \dots, U_n 按某一角频率而变化时，线路长度 dx 上的电容电流可由图 1-8 得出

$$-dI = j\omega Q dx$$

或

$$Q = -\frac{1}{j\omega} \frac{dI}{dx} \quad (1-29)$$

其中， $-dI$ 为由 dx 段导线流出的电容电流， Qdx 为由于 $-dI$ 在导线 dx 段导线上产生的电荷， I 和 Q 均指有效值。将式(1-29)代入式(1-27)，可得

$$-\frac{dI}{dx} = j\omega K U \quad (1-30)$$

式(1-30)中 U 为有效值， $-dI_i$ 表示由导线 i 沿电力线管 $Q_i dx$ 流出的电流，一般应包括由导线 i 流向地的电容电流以及流向其他与导线 i 有电容耦合的导线的电容电流。

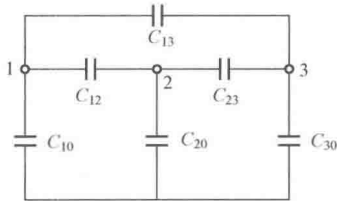


图 1-7 三相输电线路单位长度的电容

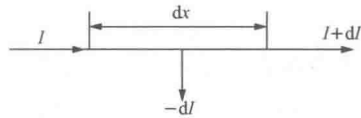


图 1-8 单位长度电容电流

1.3 输电线路的模型化

1.3.1 地线的消去方法

式(1-3)和式(1-30)考虑的是一般的情况，地线和分裂导线中的各根导线均可看做某个单根导线来处理。但通常感兴趣的是每相的电压、电流数值，本节将介绍地线的消去方法。分裂导线中的各根导线假定已归算到三相等值导线中。

假定地线的电位为零（对工频和操作过电压来说，由于频率较低，可以认为整个地线对地电位为零。但研究雷电过电压时，地线不能消去），对于式(1-30)可写作

$$\begin{pmatrix} \frac{dI_1}{dx} \\ \frac{dI_2}{dx} \\ \vdots \\ \frac{dI_{n-1}}{dx} \\ \frac{dI_n}{dx} \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1(n-1)} & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2(n-1)} & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{(n-1)1} & K_{(n-1)2} & \cdots & K_{(n-1)(n-1)} & K_{(n-1)n} \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{n(n-1)} & K_{nm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1-31)$$

或写成

$$\begin{pmatrix} -\frac{d\mathbf{I}_{\text{相}}}{dx} \\ \vdots \\ -\frac{d\mathbf{I}_{\text{地}}}{dx} \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} \mathbf{K}_A & \mathbf{K}_B \\ \mathbf{K}_C & \mathbf{K}_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{\text{相}} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \quad (1-32)$$

于是

$$-\frac{d\mathbf{I}_{\text{相}}}{dx} = j\omega \mathbf{K}_{\text{相}} \mathbf{U}_{\text{相}}, \mathbf{K}_{\text{相}} = \mathbf{K}_A \quad (1-33)$$

便可以求解。

例如对单回路、双地线线路，当每相分裂导线（设为两分裂）已归并成等值的相导线，则式（1-31）中 $n=5$ ， $-\frac{d\mathbf{I}_{\text{相}}}{dx} \mathbf{U}_{\text{相}}$ 中各包含 3 个元素， $-\frac{d\mathbf{I}_{\text{地}}}{dx}$ 中包含两个元素， \mathbf{K}_A 为 3×3 ，即 3 阶。若各相分裂导线中每根导线均作为单独导线处理，则 $n=8$ ， \mathbf{K}_A 为 6 阶。

对于式（1-3）由于地线的 U_{n-1} 、 U_n 均等于零，故有

$$-\begin{pmatrix} \frac{dU_1}{dx} \\ \frac{dU_2}{dx} \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_A & \mathbf{Z}_B \\ \mathbf{Z}_C & \mathbf{Z}_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ I_n \end{pmatrix} \quad (1-34)$$

或写成

$$-\begin{pmatrix} \frac{d\mathbf{U}_{\text{相}}}{dx} \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_A & \mathbf{Z}_B \\ \mathbf{Z}_C & \mathbf{Z}_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{\text{相}} \\ \mathbf{I}_{\text{地}} \end{pmatrix} \quad (1-35)$$

则

$$\begin{aligned} -\frac{d\mathbf{U}_{\text{相}}}{dx} &= \mathbf{Z}_A \mathbf{I}_{\text{相}} + \mathbf{Z}_B \mathbf{I}_{\text{地}} \\ 0 &= \mathbf{Z}_C \mathbf{I}_{\text{相}} + \mathbf{Z}_D \mathbf{I}_{\text{地}} \end{aligned}$$

于是得

$$-\frac{d\mathbf{U}_{\text{相}}}{dx} = \mathbf{Z}_{\text{相}} \mathbf{I}_{\text{相}}$$

$$\mathbf{Z}_{\text{相}} = \mathbf{Z}_A - \mathbf{Z}_B \mathbf{Z}_D^{-1} \mathbf{Z}_C \quad (1-36)$$

式(1-33)、式(1-36)便是消去地线后的线路基本线路,电压、电流均为每相的数值。

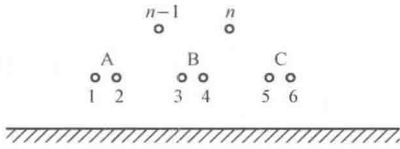


图 1-9 多相分裂导线的排列

1.3.2 分裂导线的合并方法

式(1-3)、式(1-30)考虑的是一般的情况,它可用于计算当分裂导线中的导线排列不对称时各根导线中的电流分布。当只对各相的相电流或对地电压感兴趣时,便可以将分裂导线中的导线加以合并。现以图1-9为例加以说明。

由式(1-30)可以写出

$$\begin{pmatrix} \frac{dI_1}{dx} \\ \frac{dI_2}{dx} \\ \frac{dI_3}{dx} \\ \frac{dI_4}{dx} \\ \frac{dI_5}{dx} \\ \frac{dI_6}{dx} \\ \vdots \\ \frac{dI_{n-1}}{dx} \\ \frac{dI_n}{dx} \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{31} & K_{31} & \cdots & K_{31} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & \cdots & K_{4n} \\ K_{51} & K_{52} & K_{53} & \cdots & K_{5n} \\ K_{61} & K_{62} & K_{63} & \cdots & K_{6n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ K_{(n-1)1} & K_{(n-1)2} & K_{(n-1)3} & \cdots & K_{(n-1)n} \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1-37)$$

考虑到各相电容电流 $I_A = I_1 + I_2$, $I_B = I_3 + I_4$, $I_C = I_5 + I_6$, 以及 $U_A = U_1 = U_2$, $U_B = U_3 = U_4$, $U_C = U_5 = U_6$, 因而得

$$\frac{dI_A}{dx} = \frac{dI_1}{dx} + \frac{dI_2}{dx}$$

由式(1-37)可知

$$\frac{dI_1}{dx} = K_{11}U_1 + K_{12}U_2 + K_{13}U_3 + \cdots + 0 + 0$$

$$\frac{dI_2}{dx} = K_{21}U_1 + K_{22}U_2 + K_{23}U_3 + \cdots + 0 + 0$$

则

$$\frac{dI_A}{dx} = (K_{11} + K_{21})U_1 + (K_{12} + K_{22})U_2 + (K_{13} + K_{23})U_3 + \cdots + 0 + 0$$

$$= (K_{11} + K_{21} + K_{12} + K_{22})U_A + (K_{13} + K_{23})U_3 + \cdots + 0 + 0$$

将式(1-37)中 I_1 、 I_3 、 I_5 换成 I_A 、 I_B 、 I_C 后,为了使等式成立,不但 \mathbf{K} 矩阵中 I_1 、 I_3 、 I_5 所对应的行必须与 I_2 、 I_4 、 I_6 对应的行元素相加,而且要 \mathbf{K} 矩阵中的第1、2、3、4、5、6列各自相加,经归并即成式(1-38)。如果是双回路的输电线路,推导的方法同上,