

高等学校教材

高压输电的环境保护

武汉水利电力学院 粟福珩 编

水利电力出版社

高等学校教材
高压输电的环境保护
武汉水利电力学院 栗福珩 编

*

水利电力出版社出版
(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
北京四季青印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9.25印张 202千字
1989年10月第一版 1989年10月北京第一次印刷
印数00001—1590 册
ISBN 7-120-00768-8/TM·230
定价1.15元

内 容 提 要

本书共分七章，主要内容有：高压输电的发展概况；高压输电线路及设备导体表面和周围空间电场强度的计算；高压输电系统产生的电场和磁场效应；交流输电线路的电晕现象与所引起的无线电干扰、电视干扰和可听噪声；高压直流输电对环境的影响等。

本书可作为高等院校电力类高压和发电输配电专业的选修课教材，也可供从事高压输配电设计、施工、运行和研究工作的人员参考。其它专业的人员也可从本书中了解到输变电工程环境保护问题的有关知识。

前 言

超高压和特高压输电带来了一些新问题。其中，由于强电场造成的生理—心理影响，由于电晕放电引起的各种效应，如无线电和电视干扰、可听噪声等一系列“环境影响”问题，已日益为公众所关注，并成为决定输电线路结构型式，影响建设费用等的主要因素。因此，世界各国在采用新的高电压等级之前，均进行大量的试验研究，以期获得为公众所能接受而经济上又是合理的输电线路设计。在我国，随着330kV和500kV超高压输电系统及±500kV直流输电线路的建立和发展，电力工业及其它部门对此问题也极为重视，并已开展了研究工作。

本书主要介绍高压输电对于环境的影响及其保护问题的基本概念和研究方法，以及国内外已取得的一些重要的研究成果。

本书在编写过程中得到了西安交通大学严璋、能源部电力科学研究院邵方殷等的支持和帮助。初稿完成后，由华中理工大学王晓瑜进行了审阅。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥及错误之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编者

1988年8月

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 超高压和特高压输电的发展	1
第二节 高压输电的环境问题	1
参考文献	3
第二章 电场计算	4
第一节 输电线路导线表面电场强度的计算	4
一、单导线表面电场强度的计算 二、分裂导线表面电场强度的计算 三、影响导线表面电场强度的因素	
第二节 输电线路及设备周围空间和地面电场强度的计算	14
一、输电线路下空间场强的计算 二、输电线路下空间场强的表示方法和一般特性 三、影响场强的主要因素 四、全档距内电场的分布 五、屏蔽效应 六、变电站空间场强的计算 七、变电站内空间场强的分布规律	
参考文献	33
第三章 输电系统产生的电场和磁场效应	34
第一节 带电导线附近物体的感应电压和电流	34
一、一般公式 二、 U_i 、 C_i 、 I_{si} 的计算 三、物体电导率的影响	
第二节 电场的生态效应——短时影响	43
一、电击和对电场的直接耐受 二、电流对人体的影响 三、几个电场效应事例	
第三节 电场的生态效应——长期影响	55
一、问题的提出 二、关于电场对生命活动影响的计算 三、对电场长期生态效应研究	
第四节 电场标准	60
第五节 静电感应的测量与模拟	62
一、电场强度的测量 二、开路电压的测量 三、人体感应电流的测量 四、静电感应的模拟	
第六节 输电线路的磁场效应	68
一、输电线路的磁场 二、磁场的测量 三、磁场的生态效应	
参考文献	70
第四章 交流输电线路的电晕现象	73
第一节 电晕的产生	73
一、电离与电晕起始场强 二、电晕起始场强计算(皮克公式)	
第二节 输电线路电晕放电的型式	74
一、负极性电晕过程 二、正极性电晕过程 三、交流电晕	
第三节 影响电晕过程的因素	77
一、由导线附近质点产生的电晕 二、表面状态的影响 三、导线上水的影响 四、空气密度、湿度和风的影响	
第四节 输电线路电晕效应的试验研究方法	79
一、电晕效应及电晕“产生量” 二、无线电噪声激励函数 三、可听噪声产生功率 四、测量方法	
参考文献	82

第五章 无线电干扰和电视干扰	83
第一节 无线电干扰的产生机理	83
第二节 无线电噪声测量	84
一、与噪声有关的定义 二、无线电干扰测量仪器 三、测量方法	
第三节 输电线路干扰场的主要性质	87
一、干扰场频谱特性 二、干扰场强的横向分布 三、统计分布曲线	
第四节 噪声允许度的标准	93
一、信噪比 二、无线电广播信号的特性 三、干扰容许度标准	
第五节 输电线路的无线电干扰计算	97
一、比较法 二、分析法	
第六节 绝缘子串和电站设备产生的干扰	104
一、实验室测量装置 二、绝缘子串或电站设备的干扰水平 三、干扰水平的允许值	
第七节 电视干扰	107
一、放电引起的干扰 二、屏蔽影响和重影干扰 三、防护措施	
参考文献	110
第六章 可听噪声	111
第一节 与噪声有关的定义	111
一、声波 二、人对声音的感觉特点 三、声级计—计权网络	
第二节 输电线路可听噪声的一般特性	113
一、无规噪声和纯音 二、噪声频谱 三、噪声的横向分布特性 四、气候及分裂导线结构的影响 五、输电线路可听噪声的测量	
第三节 输电线路可听噪声的计算	120
一、输电线路允许的噪声级 二、输电线路可听噪声的计算	
参考文献	124
第七章 高压直流输电线路对环境的影响	125
第一节 直流电晕和离子流	125
第二节 无线电干扰和电视干扰	126
一、直流电晕产生的无线电干扰和电视干扰 二、换流站产生的无线电干扰	
第三节 可听噪声	129
第四节 直流电离场的分析和试验研究	130
第五节 直流输电线路下的电场效应	134
一、稳态电击 二、暂态电击 三、对电场的直接感觉 四、生态效应	
参考文献	138

第一章 绪 论

第一节 超高压和特高压输电的发展

随着对电力需求的迅速增长, 输电电压不断提高, 本世纪50年代开始出现的超高压输电目前已经广泛使用, 60年代后期开始研究的特高压输电如今也已进入了实用阶段。

超高压 (EHV) 一般是指输电线路最大额定电压从300kV至1000kV以下的电压等级, 而特高压 (UHV) 是指输电线路最大额定电压为1000kV及其以上的电压等级。超高压及特高压输电是为了满足远距离大容量输电和联网的需要, 为解决线路走廊问题和限制短路电流, 以及降低输电成本而发展起来的。

交流输电方面, 目前已有40多个国家建有330kV及以上超高压输电线路。1952年瑞典首先建成采用分裂导线的380kV超高压输电线路。1959年苏联将在1956年投运的古比雪夫水电站至莫斯科的850km、400kV双回线路升压为500kV。加拿大配合大型水电站的开发, 于1965年建成了735kV输电线路。美国于1969年将输电电压提高到765kV。1985年5月, 苏联哈萨克北部埃基巴斯图兹火电厂至科克切塔夫的1150kV特高压输电线路投入运行。其它国家也为特高压输电作好了准备, 他们拟采用的电压等级是: 美国为1100kV和1500kV, 日本为1000kV, 意大利为1000kV。

直流输电电压的增长速度更快。瑞典于1954年首先以100kV直流电缆线路连接本土和哥特兰岛。新西兰于1965年采用 ± 250 kV。美国太平洋沿岸南北联络线于1970年采用 ± 400 kV。加拿大于1977年将纳尔逊河输电线路升压到 ± 450 kV。1979年投运的莫桑比克卡拉布拉萨工程采用 ± 533 kV。扎伊尔1981年投入运行的因加瀑布至沙巴直流输电线, 电压为 ± 500 kV、传送1700km, 是世界上最长的直流运行线路。1984年底巴西伊泰普水电站至圣保罗 ± 600 kV的直流输电线路投入运行。目前, 正在建设的最高电压的直流输电线路, 是苏联连接哈萨克北部埃基巴斯图兹煤田坑口电站群与欧洲中部地区及乌拉尔的 ± 750 kV线路, 输送距离2400km。苏联并已开始设计连接欧洲部分和中部西伯利亚的 ± 1500 kV直流输电线。

我国解放前电力工业十分落后, 在解放后才得到了相当迅速的发展。1953年我国建成了自行设计和施工的第一条从丰满水电站到虎石台变电所的220kV高压输电线路。1972年在西北建成了330kV超高压输电系统。1981年我国第一条500kV线路 (平顶山—武昌) 投入运行, 成为世界上第八个拥有这种超高压线路的国家。目前, 500kV输电正在全国迅速发展, 与此同时, 我国第一条 ± 500 kV直流输电工程 (葛洲坝—上海) 也即将竣工送电。

第二节 高压输电的环境问题

将电压等级分段而提出“超高压”和“特高压”, 不只是因为所采用的电压越来越高

在“量”上出现了差别，更重要的原因是随着电压的提高在输电技术上发生了“质”的改变。这种“质变”突出表现在绝缘问题与环境问题两个方面。

由于输电电压的提高，在超高压系统中操作过电压开始取代大气过电压而成为决定系统绝缘水平的控制因素，在特高压时则更是起主导作用。在特高压时，还因为空气间隙的工频及操作波击穿特性具有明显的“饱和现象”，以及击穿电压分散性较大，将使绝缘设计变得困难。这些因素，使得超高压和特高压相对于较低电压系统在绝缘设计的观念上发生很大改变。这方面的知识详见有关专著的介绍。

由于输电电压的提高，必然导致导线表面电场强度以及输电线路及设备周围的空间电场强度均较高，从而会因电晕现象和电场效应引起一系列“环境影响问题”，其中主要有：

- 1) 强电场的生理——心理影响；
- 2) 无线电干扰及电视干扰；
- 3) 可听噪声；
- 4) 对空气的污染；
- 5) 线路走廊问题；
- 6) 对周围景色和市容的影响。

如表1-1所示，由于电压等级的提高，输电线路附近地面的最大电场强度有所增加。这么大的电场强度是否会对人及环境产生不良影响，这是人们十分关心的问题。事实上，在场强较高的区域活动时，某些人会产生毛发竖立或皮肤刺激感，甚至在某些情况下会因

表 1-1 输电线路附近地面的最大电场强度

电压等级(kV)	220	330	500	1000
地面最大场强(kV/cm)	< 3	5~8	7~10	9~15

人体与其它物体间发生火花放电和电击引起明显的刺痛，对于平地站立的人会引起烦恼，对于高空作业而又没有思想准备的人还可能引起坠落事故。除了以上可以直接感受到的效应外，一个更引起普遍关注的问题是，电场长期作用对生态的影响。1972年，苏联关于超高压变电站工人反映电场对身体有影响的报告在大电网会议上发表后，引起了很大的轰动。十几年来，世界各国对此进行了大量的试验研究。虽然有些问题已得到比较一致的看法（例如现有的输电线路下的电场对人体一般不会有明显的直接影响），但是不少问题还正在继续研究中。为慎重起见，目前对于输电线路走廊和变电所范围的最大场强要给予一定限制；对人员来往频繁的地方或某些特殊场所，则要求采取屏蔽措施以降低场强。

在导线发生电晕期间，直接包围导线的小体积内的空气中会发生化学反应，这些反应会产生少量臭氧(O_3)和氮的氧化物(NO_x)，可能有生态学的影响。虽然对一些运行线路作过广泛的测量，证实这些影响并不重要，但对今后电压更高的线路仍应给以注意。另一方面，高压直流线路上发生电晕放电所形成的离子空间电荷，其浓度随着电压升高而增大，它们对人体及生态是否有一定影响，也是人们正在研究的课题。

电晕影响主要表现为无线电干扰、电视干扰及可听噪声。电晕放电产生高频电磁场引起的电波杂音,将对无线电设施的正常受信产生干扰,影响电力线路周围居民无线电广播和电视的收听及收看。对于220kV及以下线路,这一干扰已引起重视,随着输电发展到超高压,这种影响更为明显。当线路设计不好时,对这种“电磁污染”的处理,轻者是电力部门为申诉者购买质量更好的收音机予以补救,严重时则需要重新架线。

输电线路电晕放电产生的可听噪声,与有同一声压级的一般环境噪声相比,通常更令人厌烦。美国初期建设的几条500kV和765kV交流线路,由于导线表面场强较高,引起的噪声受到附近居民大量地抱怨,只得降压运行,后来更换为大直径的导线。一些研究表明,对于特高压线路,可听噪声将是选择导线结构、影响费用以及确定输电电压的主要因素。

超高压及特高压线路的杆塔高大显眼,设计时需要考虑对周围景物的影响,应使其造型美观、透视度好、颜色与自然环境协调;架设线路时,也应尽量减小对于自然环境的破坏。

总而言之,输电电压发展到超高压及特高压阶段,环境问题已成为输电工程建设中一个影响极大的方面。例如大多数情况下,输电线路导线截面的选择、导线对地净空距离的确定等,已不是根据工作电流或绝缘要求了,而是由电晕特性及对地面场强的限制要求来决定。随着人们保护环境呼声的日益高涨,在一些国家,来自公众的阻力开始给电厂、变电所和线路走廊的选址带来许多困难,或者订出了许多严格的限制。

一般说来,正确对待环境问题,一方面应充分认识当前环境污染问题的严重性,积极做好环境保护工作,对于每一项新出现的技术设备,都要仔细考察它是否会造成环境污染、是否会对人体健康有妨碍,作到以预防为主,防患于未然。另一方面,对于所出现的问题,也不应因此而产生恐慌和消极情绪,要相信现代科学技术的发展,总能不断地解决各种各样的环境问题。世界各国为发展超高压和特高压输电做了很多研究工作,每采用一个新的电压等级,常常是提前十几年就开始进行研究、试验和典型试运行。一些国家都建有相当规模的超高压及特高压试验研究基地,对包括环境问题在内的各个方面进行着广泛的研究。我国也很重视超高压输电技术,在国内已建有一批较高水平的高压实验室和试验场地,近些年来在研究高压输电对环境的影响以及解决措施等方面做了大量工作,为我国超高压输电的迅速发展作出了贡献。然而,由于在很多人的传统观念中,环境保护所涉及的范围还不包括高压输电这一领域,因而从某种程度上来说,不少人对这一问题并不十分了解。从国内情况来看,自从330kV和500kV超高压输电线路运行以来,引起的问题不少。有些是注意不够带来的问题,有些则是由于人们不必要的疑惧。因此,有关高压输电环境问题的起因、特点或分布规律、计算方法、降低措施等应该让更多的人了解。本书就是从基本概念出发,结合工程实际对这些问题进行较系统的论述。

参 考 文 献

[1] 黄晔, 电力发展史, 水利电力出版社, 1986。

[2] 赵智大, 略论超高压和特高压的特征, 高电压技术, 1982年第2期。

第二章 电 场 计 算

本章主要研究工频交变电场, 频率为50 (或60) Hz, 其波长远大于所研究场域的几何尺寸, 故可以用静电场的一般概念来分析。

第一节 输电线路导线表面电场强度的计算

在超高压和特高压输电线路的设计中, 导线的规格往往是由电晕性能确定的, 而不是由载流量来确定的。从经济上考虑, 要求采用尽可能高的导线表面电场强度, 因为不可能挑选过大的导线半径、过多的分裂根数和很大的线束直径, 那样做从机械应力、冰荷等方面考虑都是不能接受的。但过高的场强带来的严重电晕, 又将引起电晕损耗和无线电、电视干扰及可听噪声的增加。所以导线表面电场强度的计算直接关系到线路造价、经济运行和对两侧环境的影响, 是输电部门所关心的主要问题之一。对它的确定要求采用尽可能精确的计算方法。

由于导线多为多股绞线, 实际导线的表面电场强度沿导线圆周是在一平均值上下起伏。所以, 习惯上是先计算具有同一外径的光滑圆柱形导线的表面场强, 而在实用中再引入一个由实验确定的表面粗糙系数来校正。

为了便于计算, 需要对线路作如下简化: 认为输电线是有着相同半径、彼此间平行且对大地平行的无限长光滑圆柱形导体, 导线电压是已知的, 电荷分布沿线路无畸变, 即不考虑线路电压降落, 并且忽略杆塔、横担和周围邻近物体的影响, 导线对地高度按平均高度 $h = H_0 - (2/3)SAG$ 计算。这里, H_0 为导线悬挂点对地高度, SAG 是对应于年平均温度的导线弧垂。经过这样简化后, 电场的计算可以按照二维场处理。

一、单导线表面电场强度的计算

对每相为单根导线的输电线路, 导线表面电场可采用麦克斯韦电位系数法来计算。假定有一多导线系统, 导线数为 m , 各导线的线对地电压为 $U_1, U_2, \dots, U_m$ 。由于平行导线相互之间及导线至地面之间的距离相对于导线直径而言很大, 因此, 可以把每根导线上的电荷用集中在导线中心的线电荷来表示。设各导线的线电荷密度分别为 $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ (以后简称为电荷), 它们可以由下面的矩阵方程求得

$$[Q] = [P]^{-1}[U] \quad (2-1)$$

这里的 $[Q]$ 和 $[U]$ 分别是导线上的电荷和电压的列矩阵。而 $[P]$ 是由导线的自电位系数和互电位系数组成的方阵, 它们可以直接用镜像法求得 (图2-1)。其一般形式是:

$$\text{自电位系数} \quad P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i}$$

$$\text{互电位系数} \quad P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{L_{ij}}{L_{ji}}$$

式中 h_i ——导线 i 的对地高度;

r_i ——导线 i 的半径;

L_{ij} ——导线 i 与导线 j 之间的距离;

L'_{ij} ——导线 i 与导线 j 的镜像之间的距离;

ϵ ——空气的介电常数, $\epsilon \approx 1/(36\pi \times 10^9) (\text{F/m})$ 。

电荷求出后, 根据叠加原理, 导线表面的电场强度就可由下式算出

$$\vec{E}_i = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{j=1}^m \frac{Q_j}{r_{ij}} \vec{r}_{ij} \quad i=1, 2, \dots, m \quad (2-2)$$

式中 r_{ij} —— i 导线表面上场点至电荷 Q_j (位于导线中心) 之间的距离;

$\vec{r}_{ij}$ ——从电荷所在处指向场点的单位矢量。

对于三相线路 ($m=3$), 通常有 $D/r > 100$ (D 是相间距离), 当忽略相距甚远的其它两相导线上电荷的影响时, 导线的表面电场强度仅由其本身电荷所决定, 即有

$$E_i \approx \frac{Q_i}{2\pi\epsilon r_i} \quad (2-3)$$

按此计算的误差常不大于 0.5%。

二、分裂导线表面电场强度的计算

上述单根导线表面电场计算方法不能用于分裂导线的计算。因为在分裂导线中, 同束中次导线相距较近, 导线上的电荷及表面场强沿表面的分布是不均匀的, 计算时不能再单个集中在导线中心的线电荷代替。目前, 工程中用于计算分裂导线表面电场的有马克特-门格尔法。这一方法的优点是计算简单, 对四分裂以下的导线, 计算精度能满足工程要求。它的缺点是, 没有反映分裂导线中每根次导线表面电场大小和分布不一样这一实际情况, 不能计算导线附近空间的电场。因此, 又陆续提出了许多能准确计算分裂导线表面电场的方法, 主要有逐步镜像法、模拟电荷法、矩量法和保角变换法等, 其中尤以逐步镜像法和模拟电荷法采用的较多, 而且比较准确。

(一) 马克特-门格尔法

马克特 (Markt) - 门格尔 (Mengele) 法计算分裂导线表面电场强度方法的步骤如下:

1) 为了求取各个相导线的电荷, 按照保持对地电容相等的原则, 将分裂导线用一虚拟的等效单根圆柱形导线代替 (见图 2-2)。其半径由下式给定

$$r_{eq} = R \sqrt{\frac{n\tau}{R}} \quad (2-4)$$

式中 R ——分裂导线的半径;

n ——次导线的根数;

τ ——次导线的半径。

2) 用麦克斯韦电位系数法决定每根等效导线的电荷 Q , 此即分裂导线上的总电荷。

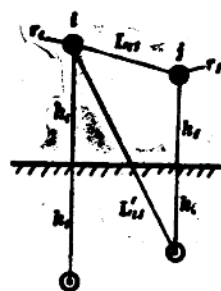


图 2-1 计算电位系数的示意图

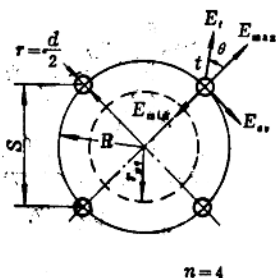


图 2-2 分裂导线及它的等值单导线

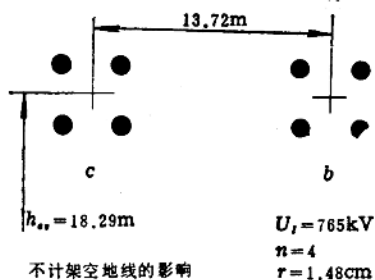


图 2-3 计算[例2-1]所用的765kV线路

3) 把分裂导线作为孤立导体对待, 即忽略了其它相线的影响, 并认为总电荷均匀分配在各根次导线上, 每根为 Q/n 。按此, 分裂导线和次导线的平均表面电场强度由下式计算

$$E_{av} = \frac{Q}{2\pi\epsilon} \times \frac{1}{nr} \quad (2-5)$$

由于屏蔽效应, 实际表面场强在分裂导线外部要更大些, 而在内部则小些。分别计算分裂导线的平均最大及最小表面电场强度

$$E_{max} = E_{av} \left[1 + (n-1) \frac{r}{R} \right] \quad (2-6)$$

$$E_{min} = E_{av} \left[1 - (n-1) \frac{r}{R} \right] \quad (2-7)$$

沿导线圆周上任一点 t 的电场强度则由下式计算

$$E_t = E_{av} \left[1 + \frac{r}{R} (n-1) \cos\theta \right] \quad (2-8)$$

式中 θ —— E_t 与 E_{max} 之间的夹角。

【例 2-1】 计算图2-3所示的765kV输电线路的导线表面场强。

计算如下:

$$\text{分裂导线的半径 } R = 0.457 \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.323(\text{m})$$

$$\text{等效导线的半径 } r_{eq} = 0.323 \sqrt{\frac{4 \times 0.0148}{0.323}} = 0.211(\text{m})$$

电位系数矩阵

$$[P] = \begin{bmatrix} 5.15 & 1.05 & 0.51 \\ 1.05 & 5.15 & 1.05 \\ 0.51 & 1.05 & 5.15 \end{bmatrix}$$

边相导线表面场强的计算

$$[U] = \begin{bmatrix} 441.67 \\ -220.84 \\ -220.84 \end{bmatrix} (\text{kV}) \quad [Q] = 2\pi\epsilon \cdot 10^3 \begin{bmatrix} 101.0 \\ -54.9 \\ -41.7 \end{bmatrix} (\text{c/m})$$

$$E_{av} = \frac{Q_s}{2\pi\epsilon} \frac{1}{nr} = \frac{101.0}{4 \times 1.48} = 17.07 (\text{kV/cm})$$

$$E_{\max} = E_{av} \left[1 + (n-1) \frac{r}{R} \right] = 17.07 [1 + 3 \times 0.046] = 19.42 (\text{kV/cm})$$

中相导线表面场强的计算

$$[U] = \begin{bmatrix} -220.84 \\ 441.67 \\ -220.84 \end{bmatrix} (\text{kV}) \quad [Q] = 2\pi\epsilon \cdot 10^3 \begin{bmatrix} -59.3 \\ 109.8 \\ -59.3 \end{bmatrix} (\text{C/m})$$

$$E_{av} = \frac{Q_s}{2\pi\epsilon} \frac{1}{nr} = \frac{109.8}{4 \times 1.48} = 18.55 (\text{kV/cm})$$

$$E_{\max} = 18.55 [1 + 3 \times 0.046] = 21.11 (\text{kV/cm})$$

本例用精确算法（逐步镜像法）算得的结果是：

(1) 当不计架空地线影响时 边相导线 $E_{\max} = 19.67 \text{ kV/cm}$;

中相导线 $E_{\max} = 21.09 \text{ kV/cm}$ 。

(2) 当考虑有两根架空地线时 边相导线 $E_{\max} = 19.74 \text{ kV/cm}$;

中相导线 $E_{\max} = 21.10 \text{ kV/cm}$ 。

与上面结果对比，可见 $n=4$ 时，马克特-门格尔法的计算精度是可以接受的。

马克特-门格尔法中计算导线表面场强的公式是依据叠加原理，使用镜像法并作了一些简化计算后得出的，推导如下：

先讨论两分裂导线（图2-4）。由于这是 根导线同时带有同号等量电荷 $q = Q/2$ ，因此，当计算其中任一根导线的表面电场强度时，可以看成是如下两种情况的叠加。

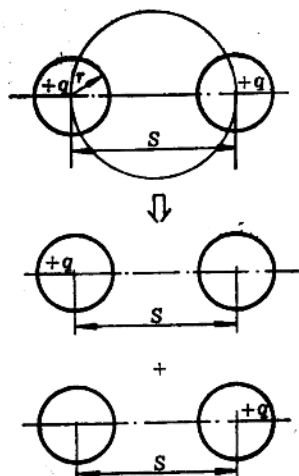


图 2-4 两分裂导线

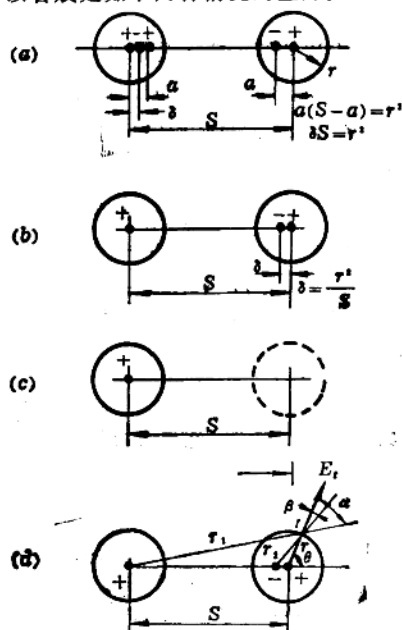


图 2-5 两分裂导线表面场强的计算

- 1) 一根导线带电而另一根导线不带电时, 这根导线在自身表面上所产生的电场强度;
- 2) 一根导线不带电而另一根导线带电时, 在这根导线表面上所产生的电场强度。

对于上述的一导线带电另一导线不带电的情况, 电场的精确计算可用多重镜象法, 由在两根导线内确定的一系列镜象电荷共同决定导线表面和周围空间的电场强度。然而在实际应用时, 用到二次镜象已足够了, 见图2-5(a)。在具体计算时, 考虑 $S \gg r$, $a \approx \delta$, 又可将带电导体内偏离轴心的两个电荷 $+q$ 和 $-q$ 看成相互重合而消除, 从而按照图2-5(b)所示的线轴电荷进行电场计算。

在按图2-5(b)计算其中的带电导线的表面场强时, 可以把位于不带电导线内的两个线轴电荷 $+q$ 和 $-q$ 看成重合, 从而互相消除, 即如图2-5(c)所示。换句话说, 这时可以不计及距离带电导线 S 处有一根不带电的导线存在的影响。这样, 对于带电的导线表面电场强度的计算, 将与孤独无限长带电导线表面电场的计算一样。其计算式可直接写出为

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \quad (2-9)$$

其方向是沿导线表面法线方向。

对于图2-5(b)中不带电的导线表面场强的计算, 则必须考虑所有三个线电荷, 各自按 $E = q_i / 2\pi\epsilon r_i$ 计算, 然后叠加。然而, 由于导线表面的电场强度方向, 都是与表面垂直的, 即沿导线的法线方向。因此, 在计算导线表面某一点处的电场强度时, 可如图2-5(d)所示, 直接采用各线电荷在该点表面法线方向上的场强分量, 进行代数叠加, 其中, 以穿出导线表面方向为“正”, 而以穿入导线表面方向为“负”。例如在任一点 t 处的场强

$$E_t = \frac{q}{2\pi\epsilon r_1} \cos\alpha + \frac{q}{2\pi\epsilon r} - \frac{q}{2\pi\epsilon r_2} \cos\beta \quad (2-10)$$

等式右边的第一项, 是带电导线的等效 $+q$ 电轴在点 t 处所产生的电场强度沿着过该点的导线表面法线方向上的分量。第二项和第三项分别是, 不带电导线轴心处的 $+q$ 电轴及偏离轴心 r^1/S 处的等效 $-q$ 电轴, 在点 t 处所产生的电场强度沿过该点的导线表面法线上的分量。

运用余弦定律, 参照图2-5(d), 可以列出

$$r_1^2 = r^2 + S^2 - 2rS\cos(\pi - \theta) = r^2 + S^2 + 2rS\cos\theta$$

$$r_2^2 = r^2 + \left(\frac{r^1}{S}\right)^2 - 2r\left(\frac{r^1}{S}\right)\cos(\pi - \theta) = \frac{r^2}{S^2}(S^2 + r^2 + 2rS\cos\theta)$$

$$\text{即} \quad r_2^2 = \frac{r^2}{S^2} r_1^2$$

$$\text{或} \quad r_2 = \frac{r}{S} r_1$$

$$\cos\alpha = \frac{r^2 + r_1^2 - S^2}{2rr_1}$$

$$\cos\beta = \frac{r^2 + r_2^2 - \left(\frac{r^1}{S}\right)^2}{2rr_2} = \frac{r^2 + \left(\frac{r}{S}r_1\right)^2 - \left(\frac{r^1}{S}\right)^2}{2r\left(\frac{r}{S}r_1\right)} = \frac{r}{S} \left(\frac{S^2 + r_1^2 - r^2}{2rr_1} \right)$$

把所列各式代入式(2-10), 加以归纳整理后, 可得

$$E_t = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \times 2 \times \frac{r(r+S\cos\theta)}{r^2+S^2+2rS\cos\theta} \quad (2-11)$$

如将等式右边的分子、分母同除以 S^2 , 则

$$E_t = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \times \frac{2r}{S} \times \frac{\cos\theta + \frac{r}{S}}{1 + \left(\frac{r}{S}\right)^2 + 2\frac{r}{S}\cos\theta}$$

考虑 $S \gg r$, 如将等式右边第三个乘项中 r/S 及 $(r/S)^2$ 忽略不计, 则得如下近似计算公式

$$E_t = \frac{q}{2\pi\epsilon r} \times \frac{2r}{S} \cos\theta \quad (2-12)$$

至此, 已由(2-9)及(2-12)式分别计算了带电导线及不带电导线的表面场强。根据前述的叠加原理, 并注意到分裂导线为对称排列, 因此两分裂导线的导线表面电场强度是(2-9)和(2-12)两式的代数叠加, 即

$$E_t = \frac{q}{2\pi\epsilon r} (1 + 2\frac{r}{S}\cos\theta) \quad (2-13)$$

对于分裂数更多的分裂导线表面电场强度的计算, 完全可以依照同样的原则和方法进行。即当计算其中一根导线表面的电场强度时, 对于其余的各根导线, 可以把它们当成线电荷看待; 并且根据叠加原理, 对于多根带电导线共同在某一根导线表面上产生的电场强度, 可以看成是每根导线单独带电时在该导线表面上所产生的电场强度的叠加。

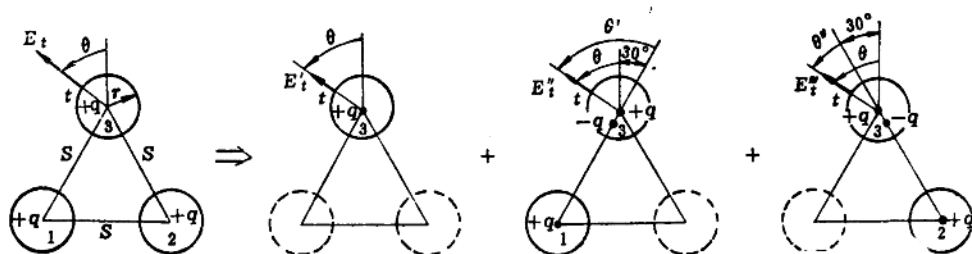


图 2-6 三分裂导线表面电场的计算

譬如, 对于三分裂导线表面电场强度的计算, 可以把这种三根导线同时带电的情况, 看成是三根导线不同时带电情况的叠加, 如图2-6所示。对于其中某一根(例如导线3)导线表面上任一点 t 处的电场强度, 同样是对(2-9)和(2-12)两式进行代数叠加, 可以求得为

$$E_t = \frac{q}{2\pi\epsilon r} + \frac{q}{2\pi\epsilon r} \times \frac{2r}{S} \cos\theta' + \frac{q}{2\pi\epsilon r} \times \frac{2r}{S} \cos\theta'' \quad (2-14)$$

等式右边的第一项为只有导线3带电时在自身表面所产生的场强; 第二项为只有导线1带电时在导线3表面上 t 点处所产生的场强, 显然, 其中的 $\theta' = \theta + 30^\circ$; 第三项为只有导线2带电时在导线3表面 t 点处所产生的场强, 显然, 其中的 $\theta'' = \theta - 30^\circ$ 。把 θ' 和 θ'' 与 θ 角的关系式代入(2-14)式, 可得

$$\begin{aligned}
E_t &= \frac{q}{2\pi\epsilon r} \left\{ 1 + \frac{2r}{S} \left[\cos(\theta + 30^\circ) + \cos(\theta - 30^\circ) \right] \right\} \\
&= \frac{q}{2\pi\epsilon r} \left[1 + \frac{2r}{S} \cdot 2\cos\theta\cos 30^\circ \right] \\
&= \frac{q}{2\pi\epsilon r} \left[1 + 2\frac{r}{S} (3-1)\sin\frac{180^\circ}{3}\cos\theta \right] \quad (2-15)
\end{aligned}$$

运用同样的方法, 对于 n 分裂线的导线表面电场强度的计算, 也可以推出在形式上完全类似的结果, 即

$$E_t = -\frac{q}{2\pi\epsilon r} \left[1 + 2\frac{r}{S} (n-1) \sin\frac{180^\circ}{n}\cos\theta \right]$$

将 $S = 2R\sin\frac{180^\circ}{n}$ 代入上式, 则得到前述分裂导线场强计算的一般表达式 (2-8)

$$E_t = -\frac{q}{2\pi\epsilon r} \left[1 + \frac{r}{R} (n-1)\cos\theta \right]$$

(二) 逐步镜像法

这种方法的基本出发点是, 在一个多导体组成的体系中, 每一导体用一系列置于该导体内的镜像电荷来代替, 使表面维持等电位面, 一旦这一条件满足, 就可根据这些镜像电荷计算导体表面和空间的电场。用逐步镜像法计算分裂导线表面电场强度时, 对每根次导线是单独处理的, 因此, 能够仔细考虑到每根次导线所处位置的不同, 计及每一次导线彼此间及大地和架空地线的影响, 使每根次导线各自所带的电荷量及表面电场强度大小和分布均不相同这一实际情况, 是一种较精确的计算方法。对于交流和直流输电线路, 其具体计算步骤和方法如下:

1) 根据交流三相(多相)或直流不同极性分裂导线中每根次导线和地线的具体位置、尺寸和所加电压, 用麦克斯韦电位系数法先求出每根导线的电荷值。矩阵方程同式(2-1), 即

$$[Q] = [P]^{-1}[U]$$

2) 将每根导线的电荷用一系列镜像电荷代替。导线内的镜像电荷可按下列方法求取: 求某一导线内的镜像电荷时, 可假设除该导线外所有导线的电荷都集中在各自的中心; 每一电荷在该导线内镜像电荷的大小等于原电荷, 但符号相反, 位于该导线中心至每一电荷的连线上, 距该导线中心距离为

$$\delta_{ij} = r_i^2 / L_{ij} \quad (2-16)$$

式中 r_i ——第 i 根导线的半径;

L_{ij} ——第 i 根导线至第 j 个电荷的距离。

以三相交流线路为例(图2-7), 若每相为4分裂导线, 有双地线, 考虑了代表大地作用的镜像后, 共有28个电荷。按理, 每根次导线内第一次镜像后应有27个镜像电荷与之对应, 这将使计算过于繁复。为了简化计算, 又能保证足够的准确度, 可用如下的简化办法, 即: 在安置每根次导线内的镜像电荷时, 只考虑同相导线电荷的镜像, 他相导线和地线电荷的镜像不予考虑。以图2-7中 a 相分裂导线为例, 一次镜像后的各次导线内电荷的分布见图

2-8, 图中的电荷 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 是按前述矩阵方程求得的导线 1、2、3、4 的电荷, $Q_s = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$, 它是图2-7中代替大地作用的镜像电荷 Q'_1 、 Q'_2 、 Q'_3 、 Q'_4 在导线内的镜像, 由于它们距离导线较远, L 约大于 r 三个数量级, 故可以看成位于导线中心。电荷 $Q_5 \sim Q_{14}$ 以及它们的镜像 $Q'_5 \sim Q'_{14}$ 在导线1~4内的镜像符号相反, 都位于导线中心, 故互相抵消, 可不予考虑。b相和c相导线内的镜像可用类似的办法得到。

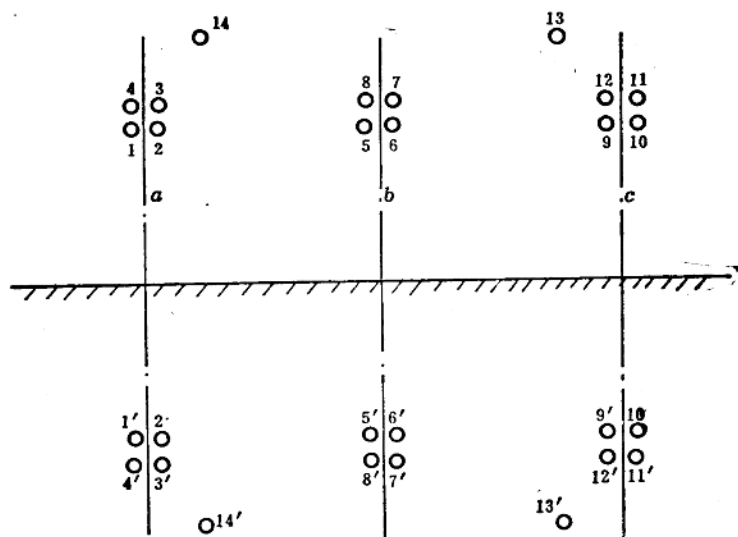


图 2-7 三相交流线路分裂导线及其代表电荷的编号

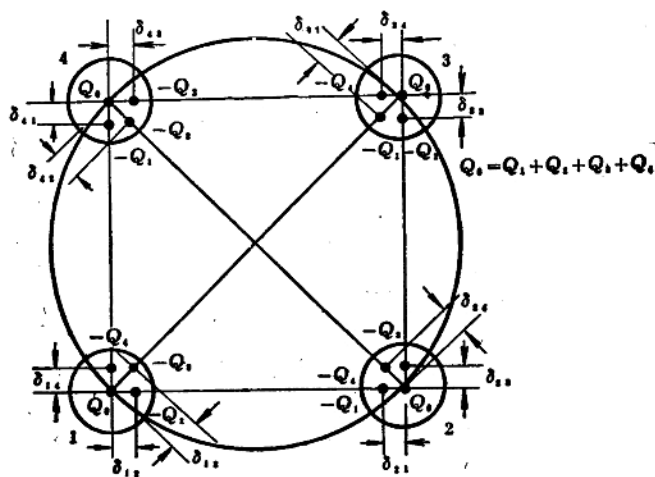


图 2-8 四分裂导线时每根导线中的镜像电荷及其位置