

| 雷电科学与技术专业系列教材 |

电涌保护器(SPD) 原理与应用

李祥超 赵学余
姜长稷 游志远

◆ 主编



YZLI0890119303

 气象出版社
China Meteorological Press

雷电科学与技术专业系列教材

电涌保护器(SPD) 原理与应用

主 编	李祥超	赵学余	姜长稷	游志远
编 者	唐宏科	朱延爱	余立军	柴 健
	刘 艳	李 霞	王 培	张 彬
	王中洋	王金虎	高 辉	



YZLI0890119303

 **气象出版社**
China Meteorological Press

内 容 提 要

本书主要对雷电科学与技术专业所涉及的常用电涌保护器(SPD)的基本原理、结构、测试方法和应用技术进行了完整介绍。本教材具有一定的理论深度,较宽的专业覆盖面,注重应用性,以提高学生对 SPD 性能的判别能力。

全书共 12 章,第 1~2 章为雷电的基本知识和雷电波传输过程的分析,对雷电、雷电过电压的形成及雷电流的传输过程进行了介绍。从第 3~5 章主要对常用于 SPD 中的非线性元件氧化锌压敏电阻、气体放电管、半导体过电压保护器件等,分别从工作原理和测试方法方面加以介绍。从第 6~9 章主要介绍电涌保护器(SPD)的工作原理、测试方法和选用原则,从工程实践的角度讲述 SPD 的性能优劣和使用原则。从第 10~12 章还针对 SPD 的测试设备的工作原理进行了分析,使学生拓宽了学习的知识面。

本书可作为雷电科学与技术专业教材及防雷技术人员资格考试培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

电涌保护器(SPD)原理与应用/李祥超等编著.

—北京:气象出版社,2010.12

ISBN 978-7-5029-5147-4

I. ①电… II. ①李… III. ①防雷-过电压保护装置
IV. ①TM862

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 264616 号

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:吴晓鹏 齐 翟

封面设计:博雅思企划

责任校对:永 通

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:700 mm×1000 mm 1/16

字 数:545 千字

版 次:2011 年 4 月第 1 版

定 价:60.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:29.5

印 次:2011 年 4 月第 1 次印刷

前 言

南京信息工程大学在国内率先开设雷电科学与技术专业,所有问题都是新的探索。由于该学科建设时间较短,经验还不足,许多问题需要我们共同探索和研究。

为满足普通全日制高等院校雷电科学与技术专业教学基本建设的需要,组织编写电涌保护器(SPD)相关教材,供雷电科学与技术专业使用,以改善该类教材匮乏的局面。

本套教材是根据雷电科学与技术专业培养计划而撰写的,从而保证了与其他专业课程的衔接,理论内容和实践内容的配套,体现了专业内容的系统性和完整性。本教材力求深入浅出,将知识点与能力点紧密结合,注重培养学生的理论分析能力和解决现场实际问题的能力。本教材可作为雷电科学与技术专业教学及培训防雷专业技术人员资格用书。

电涌保护器(SPD)作为现代雷电防护中的重要手段之一,它在生产和生活中的重要性已被人们所认识。随着电子设备的大规模普及和人们防雷意识的日益提高,国内外已将电涌保护器(SPD)的原理和应用技术列为重要的科研领域之一。本教材通过精选内容,以有限的篇幅取得比现有相关教材更大的覆盖面,在不削弱传统的较为成熟的电涌保护器(SPD)基本内容的前提下,更充实了SPD设计和使用的新思路,以及SPD元件的原理和测试方法等,拓宽了知识面,并紧跟高新技术的发展,以适应电涌保护器(SPD)开发、应用的需要。

鉴于电涌保护器(SPD)种类繁多涉及学科广泛。本教材在编写中力求突出对电涌保护器(SPD)结构和原理的分析,对各种SPD则注重机理分析和应用介绍,给出了各类SPD的测试方法和测试标准,并在本书最后三章介绍了SPD测试设备的原理。

本书在编写过程中得到国南京苏瑞科技实业有限公司、常州强宝通讯设备有限公司、南京普天鸿雁电器科技有限公司、扬州雷凯信息技术有限公司技术支持及提供的大量资料。詹家亮、汪计昌等在此书的编写过程中做了大量的资料收集及整理工作,在此表示衷心感谢!限于编者水平,书中难免存在错误和不足之处,恳请读者批评指正。

李祥超

2010年8月8日

目 录

前言

第一篇 雷电波及其传输特性

第 1 章 雷电的基础知识	(1)
§ 1.1 雷电的成因	(1)
§ 1.2 雷击闪电的特性	(6)
§ 1.3 雷电放电的计算模型	(10)
§ 1.4 雷电过电压的抑制措施	(13)
本章复习题	(16)
第 2 章 雷电波的传输过程	(17)
§ 2.1 无损单导线线路中的波过程	(17)
§ 2.2 行波的折射与反射	(22)
§ 2.3 行波通过串联电感和并联电容	(31)
§ 2.4 行波的多次折射、反射	(35)
§ 2.5 无损平行多导线系统中的波过程	(40)
§ 2.6 冲击电晕对线路波过程的影响	(46)
本章复习题	(48)

第二篇 电涌保护器中电子元器件的原理与测试

第 3 章 氧化锌(ZnO)压敏电阻的原理与测试	(51)
§ 3.1 ZnO 压敏电阻的电压—电流特性	(51)
§ 3.2 ZnO 压敏电阻的介电特性及损耗机理	(55)
§ 3.3 ZnO 压敏电阻的响应特性	(62)
§ 3.4 ZnO 压敏电阻的耐受能量冲击特性	(65)
§ 3.5 ZnO 压敏电阻的寿命及其预测	(78)
§ 3.6 ZnO 压敏陶瓷蜕变机理的实际研究	(82)
§ 3.7 ZnO 压敏电阻的并联使用	(110)
§ 3.8 金属氧化物压敏电阻的技术参数及测试	(114)
本章复习题	(117)

第 4 章 气体放电管的原理及测试方法	(118)
§ 4.1 带电质点与气体放电	(118)
§ 4.2 气体放电管的工作原理	(123)
§ 4.3 气体放电管的试验方法及性能要求	(136)
本章复习题	(146)
第 5 章 半导体过电压保护器件	(147)
§ 5.1 瞬态电压抑制二极管(TVS 管)	(147)
§ 5.2 雪崩击穿二极管(ABD 管)	(154)
§ 5.3 电涌抑制晶闸管(TSS 管)	(160)
§ 5.4 TSS 管参数、端(子)和特性名词的术语、符号和定义	(167)
本章复习题	(176)

第三篇 电涌保护器的原理、测试及应用

第 6 章 电涌保护器的工作原理	(177)
§ 6.1 低压电涌保护器(SPD)的工作原理	(177)
§ 6.2 信号线路电涌保护器(SPD)的工作原理	(189)
本章复习题	(206)
第 7 章 电涌保护器的试验方法和性能要求	(207)
§ 7.1 低压配电系统的电涌保护器的术语和定义	(207)
§ 7.2 低压配电系统的电涌保护器的试验方法和性能要求	(212)
§ 7.3 电信和信号网络系统中电涌保护器的术语和定义	(232)
§ 7.4 电信和信号网络的电涌保护器的试验方法和性能要求	(235)
本章复习题	(261)
第 8 章 电涌保护器(SPD)的选择和使用原则	(262)
§ 8.1 SPD 在低压配电系统的应用	(262)
§ 8.2 低压配电系统 SPD 的安装和保护效果	(264)
§ 8.3 低压配电系统 SPD 的选择	(273)
§ 8.4 SPD 辅助器件的特性	(279)
§ 8.5 SPD 的配合规则和原则	(280)
§ 8.6 SPD 能量配合的实例分析	(288)
§ 8.7 SPD 在电信和信号网络系统的应用	(297)
§ 8.8 电信和信号网络系统中风险管理及雷电过电压的耦合机理	(298)
§ 8.9 电信和信号网络中 SPD 的使用和安装	(305)
§ 8.10 SPD 之间及 SPD 和 ITE 之间的配合	(311)
本章复习题	(314)

第 9 章 运行中电涌保护器的检测技术	(315)
§ 9.1 SPD 检查内容、要求和方法	(315)
§ 9.2 SPD 测试内容、要求和方法	(317)
§ 9.3 SPD 检查检测周期、检测记录表	(319)
本章复习题	(321)

第四篇 电涌保护器测试设备的工作原理

第 10 章 冲击电压发生器的原理	(322)
§ 10.1 冲击电压波形	(322)
§ 10.2 冲击电压发生器的基本原理	(325)
§ 10.3 冲击电压发生器放电回路的数学分析	(329)
§ 10.4 冲击高电压的测量原理	(335)
§ 10.5 冲击分压器的原理	(342)
§ 10.6 冲击测量系统的性能试验和校准	(376)
§ 10.7 高电压测试的抗干扰措施	(380)
本章复习题	(385)
第 11 章 冲击电流发生器的原理及测量技术	(387)
§ 11.1 概述	(387)
§ 11.2 冲击电流发生器的基本原理	(388)
§ 11.3 冲击电流发生器的结构	(390)
§ 11.4 冲击电流发生器的电流幅值和波形的调节	(392)
§ 11.5 冲击电流方波发生器	(394)
§ 11.6 冲击电流发生器的恒流充电	(396)
§ 11.7 分流器	(400)
§ 11.8 罗戈夫斯基线圈	(405)
§ 11.9 冲击电流测量系统的性能试验	(409)
本章复习题	(411)
第 12 章 组合波冲击发生器的原理	(413)
§ 12.1 概述	(413)
§ 12.2 CWG 的设计与仿真计算	(416)
§ 12.3 耦合与去耦网络	(423)
§ 12.4 组合波的相位跟踪技术	(428)
§ 12.5 可控放电开关	(431)
§ 12.6 特殊组合波回路的设计与仿真	(436)
§ 12.7 两种不同组合波发生电路的比较	(440)

本章复习题	(441)
-------------	-------

第五篇 电涌保护器简介

第 13 章 电涌保护器简介	(442)
§ 13.1 SR 系列电涌保护器简介	(442)
§ 13.2 QSD、QPR、QPC、QPL 系列电涌保护器简介	(449)
§ 13.3 NH、HY 系列电涌保护器简介	(456)
参考文献	(462)

第一篇 雷电波及其传输特性

第 1 章 雷电的基础知识

§ 1.1 雷电的成因

通常所谓雷击是指一部分带电的云层与另一部分带异种电荷的云层,或者是带电的云层对大地之间迅猛放电的过程,这种迅猛放电的过程产生强烈的闪光并伴随巨大的声音。雷电是一种自然放电现象,在短时间内能释放出大量的电荷并产生很强的冲击电压和很高的电弧温度。闪电可以分为云闪和地闪,云闪是指不与大地和地上的物体之间发生接触的闪电,它包括云内闪电、云际闪电和云空闪电,主要对在云中的飞行器有危害;地闪是指云内荷电中心与大地和地物之间的放电过程,亦指与大地和地物发生接触的闪电,主要对大地上的建筑物、电子电气设备和人、畜危害甚大,是我们防护的主要对象。

通常雷击主要有以下几种形式:一是雷直接击在建筑物上发生热效应作用和电动力作用,称为直击雷;二是雷云放电时,在附近导体上产生的静电感应和电磁感应,称为感应雷击;此外,还有较为少见的“球形雷”。

1.1.1 雷云的形成

不管是直击雷还是感应雷击都与带电的云层存在分不开,带电的云层称为雷云。根据大量科学测试可知,地球本身就是一个电容器,通常大地稳定地带负电荷 $5 \times 10^5 \text{ C}$ 左右;而地球上空存在一个带正电的电离层,这两者之间便形成了一个已充电的电容器,它们之间的电压约为 300 kV 左右,并且场强为上正下负。

当地面含有水蒸气的空气受到炽热的地面烘烤受热而上升,或者较温暖的潮湿空气与冷空气相遇而被垫高都会产生向上的气流。这些含水蒸气的上升气流上升时温度逐渐下降形成雨滴、冰雹(均称为水成物),这些水成物在地球静电场的作用下被极化(如图 1.1 所示),负电荷在上,正电荷在下,它们在重力作用

下落的速度比云滴和冰晶(这两者称为云粒子)要大,因此,极化水成物在下落过程中要与云粒子发生碰撞。

碰撞的结果是其中一部分云粒子被水成物所捕获,增大了水成物的体积,另一部分未被捕获的被反弹回去。而反弹回去的云粒子带走水成物前端的部分正电荷,使水成物带上负电荷。由于水成物下降的速度快,而云粒子下降的速度慢,因此,带正、负两种电荷的微粒逐渐分离(这叫重力分离作用),如果遇到上升气流,云粒子不断上升,分离的作用更加明显。最后形成带正电的云粒子在云的上部,而带负电的水成物在云的下部,或者带负电的水成物以雨或雹的形式下降到地面。当雷云层一经形成,就形成雷云空间电场,空间电场的方向和地面与电离层之间的电场方向是一致的,都是上正下负,因而加强了大气的电场强度,使大气中水成物的极化更厉害,在上升气流存在的情况下更加剧重力分离作用,使雷云发展得更快。

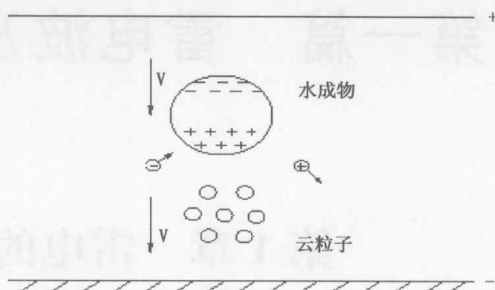


图 1.1 水成物在大气电场中的极化

从上面的分析,好像雷云总是上层带正电荷,下层带负电荷。实际上气流并不单是只有上下移动,而比这种运动更为复杂。因此,雷云电荷的分布也比前面所述的要复杂得多。

根据大量直接观测的结果,典型的雷云中的电荷分布大体如图 1.2 所示。

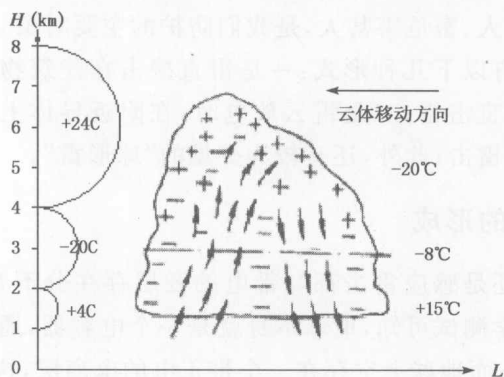


图 1.2 典型的雷雨云中的电荷分布,左端是按理论归纳的理想模型,右端是雷云常见的电荷实际分布 H —相对地面的高度(km); L —水平距离(km); C —库仑; $^{\circ}C$ —摄氏度

从测试结果表明,大地被雷击时,多数是负电荷从雷云向大地放电,少数是雷云上的正电荷向大地放电。在一块雷云发生的多次雷击中,最后一次雷击往

往是雷云上的正电荷向大地放电。观测证明,发生正电荷向大地放电的雷击显得特别猛烈。

上面的假说首先是由威尔逊(Wilson)提出的,通常把它叫做威尔逊假说。另外,有学者对雷云的形成提出了如下的假说:

雷电的出现是与气流、风速密切相关的,而且与地球磁场也有一定的联系。雷雨云内部的不停运动和相互摩擦而使雷雨云产生大量的正、负电荷的小微粒,即所谓的摩擦生电。这样,庞大的雷雨云就相当于一块带有大量正、负电荷的云块,而这些正、负电荷不断地产生,同时也在不断地复合,当这些云块在水平方向向东或向西迅速移动时(最大风速可达 40 m/s),它与地球磁场磁感线产生切割,这就好像导体切割磁感线产生电流一样,云中的正、负电荷将产生定向移动,其移动的方向可按右手定则来判断。若云块是由西向东移动,而地磁场磁感线则是由地球的南极指向地球的北极,因此,大量的正电荷向上移动,负电荷向下移动,这样云的下部将积聚越来越多的负电,而云的上部积聚大量的正电,当电场强度达到足够高($25\sim 30\text{ kV/cm}$)时将引起雷云间的强烈放电,或是雷云中的内部放电,或是雷云对地放电,即所谓的雷电。

综上所述,雷电的成因仍为摩擦生电及云块切割磁感线,使不同电荷进一步分离。由此可见,雷电的成因或者说主要能源来自于大气的运动,没有这些运动,是不会有雷电的。这也说明了为什么雷电总伴随着狂风骤雨而出现的。

1.1.2 电离层与地面间的电荷平衡

地球是一个表面带负电荷的球体,并且它所带的负电荷长期稳定在 $5\times 10^5\text{ C}$ 水平,而在地球上空的电离层上则带有相等的正电荷,使电离层与地面之间的电压约为 300 kV 。如图 1.3 所示。因而在电离层与地面之间存在一个电场,晴天时在地面附近的电场强度为 120 V/m 。即使在晴天时,大气中总有一些空气分子被电离,在电场的作用下造成放电电流。根据观测和计算的结果表明,全地球该放电电流强度为 1.8 kA ,如果长期如此,电离层与地面之间的电荷将很快放电完毕;然而事实上,它们之间大致长期保持恒定的电量和电压,这主要由于雷暴的形成和雷击,把正电荷从大地送回到电离层,起到对电离层的正电荷充电的作用。根据卫星观测资料及电学观测资料估计,在任何一时刻全地球表面上连续发生着大约 1000 个雷暴,从而使电离层与大地之间的电场保持稳定。

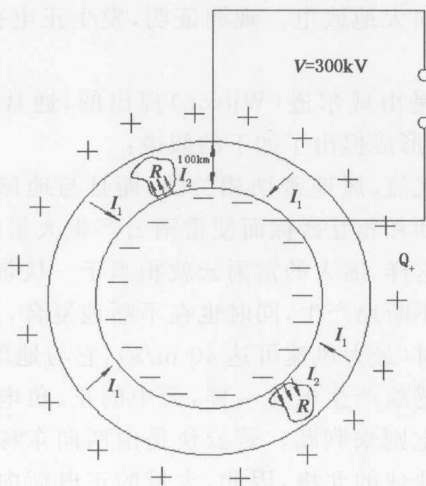


图 1.3 地球电场示意图

R —雷暴区,其余为晴天地区; I_1 —晴天电流(放电); I_2 —补偿电流(充电)

1.1.3 尖端放电与雷击

通常物体内部的正电荷和负电荷是相等的,所以从整体来看不显示带电现象,当某一物体所具有的正、负电荷不相等时,这个物体就显示带电的特性,当物体内部的正电荷多于负电荷时,物体带正电,反之带负电。由于电荷都有异性相吸、同性相斥的特性,所以带电物体中的同性电荷总是受到互相排斥的电场力作用。以一个带尖峰的金属球为例(如图 1.4 所示),假如金属球上带负电(同理也可以解释带上正电),由于电荷同性相斥的作用,电子总是分布到金属球的最外层表面,并且有逸出金属球表面的趋势。金属球带有尖峰部分的电子受到同性电荷往外排斥力最强,故最容易被排斥离开金属球(如图 1.4 所示),这就是通常说的“尖端放电”。此外,当带电物体周围的空气越潮湿或带有与带电体相反电荷的离子时,带电体也越容易放电。

当天空中有雷云的时候,因雷云带有大量电荷,由于静电感应作用,雷云下方的地面和地面上的物体都带上了与雷云相反的电荷。雷云与其下方的地面就成为一个已充电的电容器,当雷云与地面之间的电压高到一定值的时候,地面上突出的物体比较明显地放电。同时,天空带电的雷云在电场的作用下,少数带电的云粒(或水成物)也向地面靠拢,这些少数带电微粒的靠拢,叫做先驱注流,又叫电流先导。先驱注流的延续将形成电离的微弱导通,这一阶段称为先驱放电,开始产生的先驱放电是不连续的,是一个一个脉冲式地相继向前发展。它发展的平均速度为 $10^5 \sim 10^6$ m/s。各脉冲间隔约 $30 \sim 90 \mu\text{s}$,每阶段推进约 50 m。先驱放电常常表现为分枝状,这是由于放电是沿着空气电离最强,最容易导电的路

径发展的。这些枝状的先驱放电通常只有一条放电分支到达大地。

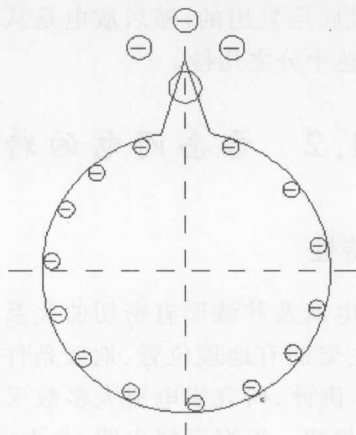


图 1.4 尖端容易放电

当先驱放电到达大地,或与大地放电迎面会合以后,就开始主放电阶段,这就是雷击。在主放电中雷云与大地之间所聚集的大量电荷,通过先驱放电所开辟的狭小电离通道发生猛烈的电荷中和,放出能量,以致发出强烈的闪光和震耳的轰鸣。在雷击中,雷击点有巨大的电流流过。大多数雷电流峰值为几十千安,也有少数上百千安甚至几百千安的。雷电流峰值的大小与土壤电阻率的大小成减函数关系,即土壤电阻率高,则雷电流峰值小;土壤电阻率低,则雷电流峰值大,如图 1.5 所示。

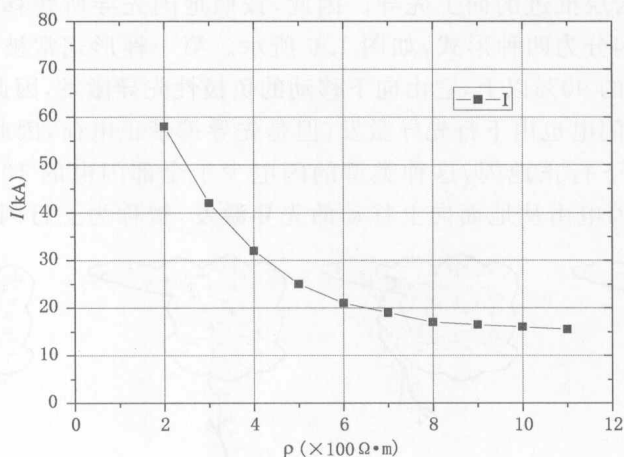


图 1.5 雷电流与土壤电阻率的关系

雷电流大多数是重复的,通常一次雷电包括 3~4 次放电。重复放电都是沿着第一次放电通路进行的。雷电之所以重复发生的原因,是由于雷云非常之大,

它各部分密度不完全相同,导电性能也不一样,所以它所包含的电荷不能一次放完,第一次放电是由雷云最底层发出的,随后放电是从较高云层、或相邻区发出的。一次放电全部时间可达十分之几秒。

§ 1.2 雷击闪电的特性

1.2.1 雷电流的特性

雷电破坏作用与峰值电流及其波形有密切的关系。雷击的发生、雷电流大小与许多因素有关,其中主要的有地理位置、地质条件、季节和气象条件。其中气象因素有很大的随机性,因此,研究雷电流大多数采取大量观测记录,用统计的方法统计它的概率分布规律。根据资料表明,各次雷击闪电电流大小和波形差别很大。尤其是不同种类放电差别更大。

由典型的雷雨云电荷分布可知,雷雨云下部带负电,而上部带正电。根据云层带电极性来定义雷电流的极性时,云层带正电荷对地放电称为正闪电,而云层带负电荷对地放电称为负闪电。正闪电时正电荷由云到地,为正值;负闪电时负电荷由云到地,故为负值。云层对地是否发生闪电,取决于云体的电荷量及对地高度或者说云地间的电场强度。

云地间放电形成的先导是从云层内的电荷中心伸向地面,这叫做向下先导。其最大电场强度出现在云体的下边缘或地上高耸的物体顶端。雷电先导也可能是从接地体向云层推进的向上先导。因此,按照地闪先导所转移电荷的极性和运动方向将地闪分为四种形式,如图 1.6 所示。第一种形式常被称为下行负地闪,占全部地闪的 90% 以上,它由向下移动的负极性先导激发,因此,向地面输送负电荷;第二种闪电也由下行先导激发,但是先导携带正电荷,因此,向地面输送正电荷,被称为下行正地闪,这种类型的闪电少于全部闪电的 10%。第三种和第四种类型的闪电由从地面向上移动的先导激发,被称为上行闪电(上行雷)。

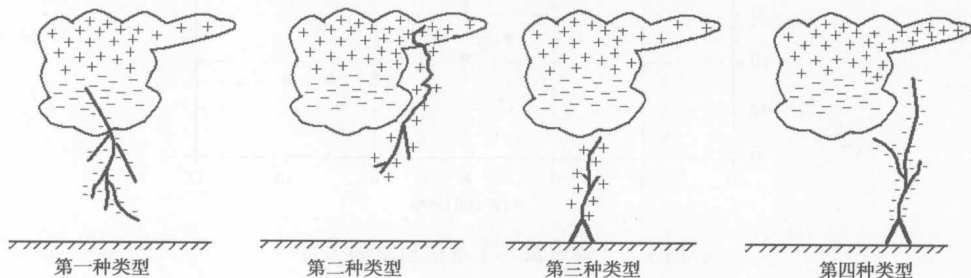


图 1.6 四种不同类型的地闪示意图

上行闪电一般比较罕见,通常发生在高山顶上或人工的高建筑物上。第三种闪电先导携带正电荷,因此,对应于云中的负电荷向地面输送,而第四种闪电则对应于负极性先导,因此,将云中的正电荷向地面输送。随着目前城镇高建筑物的增多,上行放电有略增的趋势。利用火箭拖带细导线技术的人工引发雷电实际上是一种上行闪电。通常,将向地面输送负电荷的闪电(第一、第三种类型)称为负闪,向地面输送正电荷的闪电(第二种、四种类型)称为正闪。

1.2.2 雷电波的频谱分析

雷电波频谱是研究雷电波的传输及雷电防护的重要依据。从雷电波频谱结构可以获悉雷电波电压、电流的能量在各频段的分布,根据这些数据可以估算通信系统频带范围内的雷电冲击的幅度和能量大小,进而确定防雷措施;在电力输电系统中,可以利用传输线的传输理论来分析雷电波的传输过程,为防雷工程的设计提供了理论依据。

虽然各种雷电波总体的轮廓相似,但是每一次雷电闪击的电流(电压)波形仍然存在很大范围的随机性。

雷云向大地或雷云之间剧烈放电的现象称为闪击,带负电荷的雷云向大地放电为负闪击,带正电荷的雷云向大地放电为正闪击,雷云对大地放电多为负闪击,其电流峰值约 $20 \sim 50 \text{ kA}$ 较多。正闪击比负闪击猛烈,其电流幅值往往在 100 kA 以上。

世界各地雷电科学研究者对于雷电流波形的实测统计,得到的结果也大致相似。为了便于分析,把实测的雷电流波形用逼近法加以整理并取正值,便得到如图 1.7 所示的典型曲线。曲线表明雷电流随时间以近似指数函数规律上升至峰值,然后又以近似指数函数规律下降,因此,它被称为双指数函数曲线,并可以用代数式(1-1)表示。

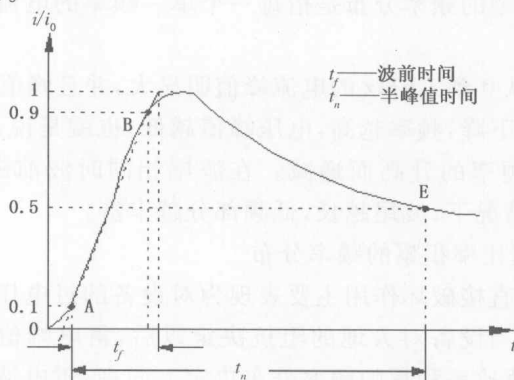


图 1.7 理想化的雷电流波形

$$i = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1-1)$$

式中: I_0 — 雷电流峰值(从数千安到数百千安), α — 波前衰减系数, β — 波尾衰减系数, i — 雷电流瞬时值。

双指数函数曲线峰值的左边部分称为波前,从峰值至电流下降到峰值的一半的 E 点这部分称为波尾。雷电流波形的波前很陡,通常只有零点几 μs 到十几 μs ,并包含丰富的谐波电流。下面分别讨论雷电流峰值比率的频率分布,雷电流峰值比率积累的频率分布和能量比率积累的频率分布。

1. 雷电流峰值比率的频率分布

把(1-1)式进行傅氏变换,得

$$\begin{aligned} I(j\omega) &= \int_0^{\infty} I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) e^{-j\omega t} dt = I_0 \left(\frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) \\ &= I_0 \left(\frac{\alpha - j\omega}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta - j\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \\ &= I_0 \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + j \left(\frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (1-2)$$

$$\frac{I(j\omega)}{I_0} = \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + j \left(\frac{-\omega}{\alpha^2 + \omega^2} + \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} \right) \right] \quad (1-3)$$

$$\text{令} \quad M = \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \quad \text{实部}$$

$$N = \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} - \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} \quad \text{虚部}$$

式中: ω 为角频率。

令 $I(\omega)$ 为雷电流峰值比率的频率分布,并且

$$I(\omega) = \sqrt{M^2 + (jN)^2} \quad (1-4)$$

根据式(1-4)可计算雷电流峰值比率的频率分布。

雷电流峰值比率的频率分布是指每一个单一频率的电流峰值对整个雷电流波峰之比的分布。

由计算可知,从 0 到 1 kHz 的电流峰值明显大,并且峰值大致相同,1 kHz 以上的电压峰值明显下降,频率越高,电压峰值越低,也就是说:雷电流主要分布在低频部分,且随着频率的升高而递减。在波尾相同时波前越陡,高次谐波越丰富,在波前相同的情况下,波尾越长,低频部分越丰富。

2. 雷电流峰值比率积累的频率分布

因为雷电波的直接破坏作用主要表现为对设备的过电压击穿和由于冲击能量太大的热击穿。当设备对大地的阻抗决定以后,雷电峰值电压比率积累的频率分布,由电流峰值比率积累的频率分布决定。同理,雷电波能量比率积累的频率分布与雷电流峰值比率的积累成平方关系,为此,下面将讨论雷电流峰值比率积累的频率分布。

雷电流峰值比率积累的频率分布,是在雷电流峰值比率的频率分布的基础上,把各频率的雷电流峰值比率从零到指定频率的积分。

把(1-3)式对 ω 积分得:

$$\begin{aligned} I_0(j\omega) &= \int_0^\omega \left[\left(\frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} \right) + j \left(\frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} - \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} \right) \right] d\omega \\ &= \int_0^\omega \frac{\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} d\omega - \int_0^\omega \frac{\beta}{\beta^2 + \omega^2} d\omega + j \int_0^\omega \frac{\omega}{\beta^2 + \omega^2} d\omega - j \int_0^\omega \frac{\omega}{\alpha^2 + \omega^2} d\omega \\ &= \left[\arctan \frac{\omega}{\alpha} \right]_0^\omega - \left[\arctan \frac{\omega}{\beta} \right]_0^\omega + j \left[\frac{1}{2} \ln(\beta^2 + \omega^2) \right]_0^\omega + j \left[\frac{1}{2} \ln(\alpha^2 + \omega^2) \right]_0^\omega \end{aligned} \quad (1-5)$$

当(1-5)式积分限由 0 至 ∞ 时,即为雷电流峰值 I_0 ,故 $I_0(j\omega)/I_0$ 为雷电流峰值比率积累的频率分布。

8/20 μs 、1.5/40 μs 和 10/700 μs 波形的 90% 峰值电流积累值分别出现在 24 kHz、87 kHz 和 11 kHz 附近。可见波前越陡,它的谐波越丰富,受雷电影响的频率范围越宽,也即 90% 峰值电流积累的频率越高,反之越低。

3. 雷电波能量比率积累的频率分布

在同一负载上(设负载为纯电阻),功率 P 只与通过它的电流的平方成正比,令 $I_0(\omega)$ 为雷电流频谱的能量积累分布,则有

$$I_0(\omega) = I_0(j\omega)/I_0 \quad (1-6)$$

将(1-2)式代入(1-6)式并积分,得

$$\begin{aligned} W(\omega) &= \frac{RI_0^2}{\pi} \cdot \frac{\beta - \alpha}{\alpha + \beta} \left[\frac{1}{\alpha} \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \arctan \frac{\omega}{\beta} \right]_0^\omega \\ &= R \frac{I_0^2}{\pi} \frac{\beta - \alpha}{(\alpha + \beta)\alpha\beta} \left[\beta \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctan \frac{\omega}{\beta} \right]_0^\omega \end{aligned} \quad (1-7)$$

为了讨论方便,把整个雷电波总能量规定为 W_0 ,其计算仍用(1-7)式,只是积分域定义为从 0 到 ∞ ,即

$$\begin{aligned} W_0 &= \frac{R}{\pi} \int_0^\infty |I(W)|^2 d\omega = \frac{RI_0^2}{\pi} \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \left(\frac{1}{\alpha} \frac{\pi}{2} - \frac{1}{\beta} \frac{\pi}{2} \right) \\ &= \frac{RI_0^2(\beta - \alpha)^2}{2(\beta + \alpha)\alpha\beta} \end{aligned} \quad (1-8)$$

故能量比率积累的频率分布为

$$\begin{aligned} \frac{W(\omega)}{W_0} &= \frac{RI_0^2(\beta - \alpha)}{\pi(\beta + \alpha)\alpha\beta} \left(\beta \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctan \frac{\omega}{\beta} \right) \div \frac{RI_0^2(\beta - \alpha)^2}{2(\beta + \alpha)\alpha\beta} \\ &= \frac{2}{\pi(\beta - \alpha)} \left[\beta \arctan \frac{\omega}{\alpha} - \alpha \arctan \frac{\omega}{\beta} \right]_0^\omega \end{aligned} \quad (1-9)$$

通过计算可求得雷电波的能量比率积累的频率分布。

由图 1.8 看到,雷电波能量比率积累的频率分布更明显地表明低频部分增