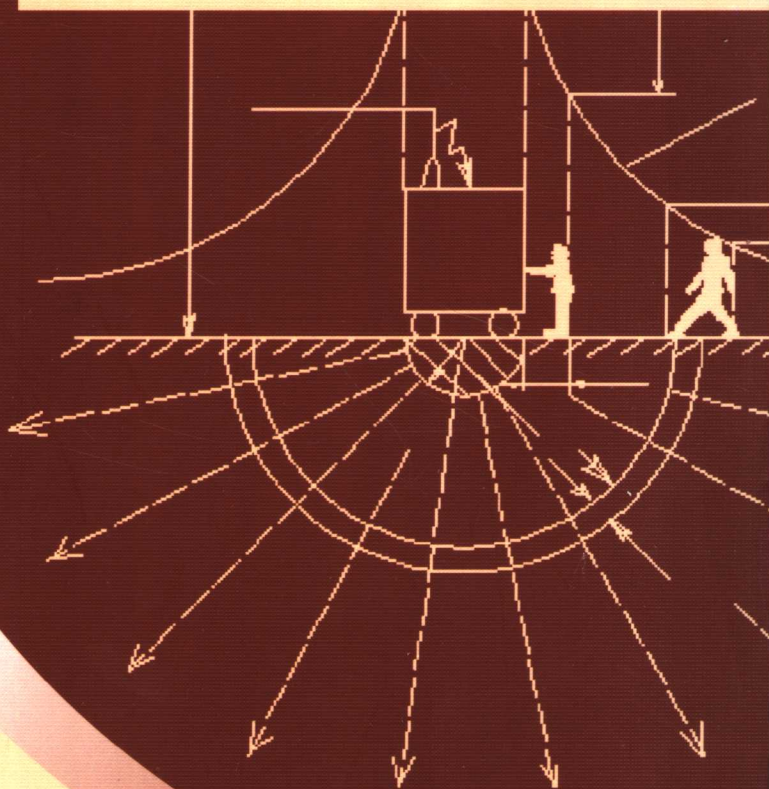


电 气 设 备 丛 书

防雷与接地装置

沈培坤 刘顺喜 编

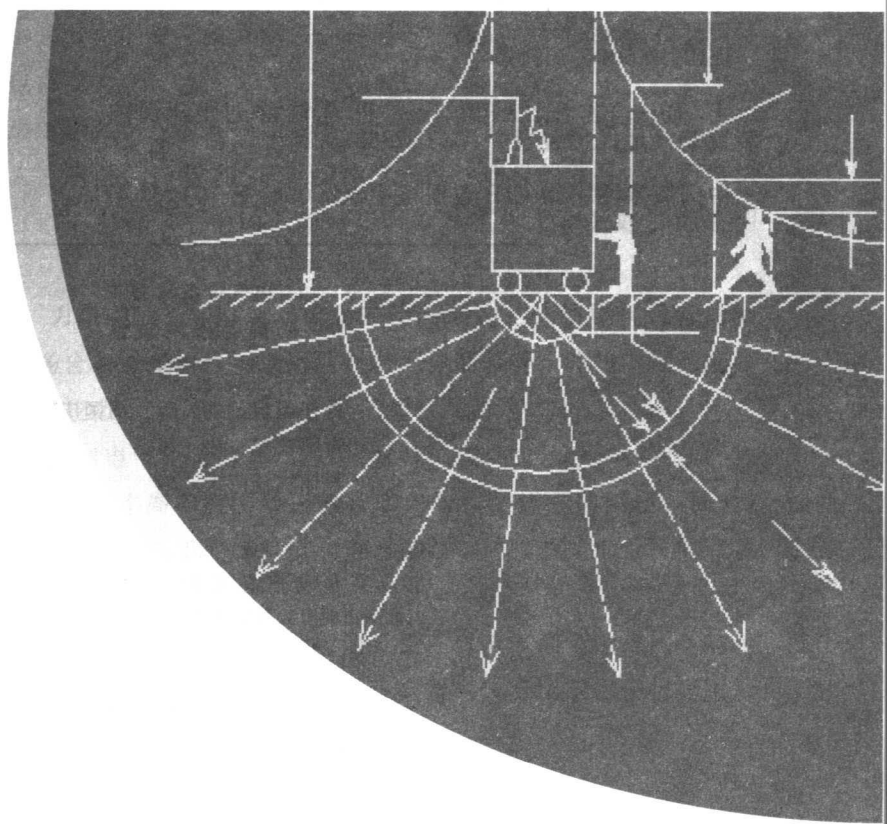


化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

电 气 设 备 丛 书

防雷与接地装置

● 沈培坤 刘顺喜 编



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是《电气设备丛书》之一。

防雷与接地是关系人的生命及财产安全的重要问题。本书首先介绍了雷电过电压的危害以及接地的基本知识,然后阐述了防雷装置和接地装置,以及医疗、通讯、计算机网络、微波站及电子设备等的接地保护,内容简明扼要。

本书可供电气工程技术人员和电气工程专业师生学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

防雷与接地装置/沈培坤,刘顺喜编. —北京:化学工业出版社,2005.12
(电气设备丛书)
ISBN 7-5025-8056-5

I. 防… II. ①沈…②刘… III. ①防雷-过电压保护装置②接地保护装置 IV. TM862

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 151467 号

电气设备丛书

防雷与接地装置

沈培坤 刘顺喜 编

责任编辑:刘 哲 周国庆

责任校对:边 涛

封面设计:于 兵

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 10 字数 234 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8056-5

定 价:23.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

电气设备丛书编委会名单

主任	孙玉坤			
副主任	赵德安	李金伴	陆一心	
委员	方昌林	张培寅	王尽余	张植保
	周新云	周洋	沈培坤	谭延良
	黄永红	杨东	盛占石	

前 言

随着科学技术的迅猛发展，电气设备发展日新月异。尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展，使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化，传统的电气设备设计、制造技术不断吸收信息控制、材料、能源及管理等领域现代成果，综合应用于产品设计、制造、检测、生产管理和售后服务。在生产技术和生产模式等方面，许多新的思想和概念不断涌现，而且，不同学科之间相互渗透、交叉融合，衍生新的研究领域，迅速改变着传统电气设备制造业的面貌，产品更新换代极为频繁。21世纪电气设备发展的总趋势是：强弱电技术的融合更为密切；多学科、多专业的交叉更为深入；我国电气产品与国际接轨的步伐将迈得更大，国内外的技术交流也将更为广泛。

当今世界，科学技术发展迅速，知识经济发展显现端倪，综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争，归根结底是科技与人才的竞争。为了适应社会主义现代化建设的需要，我们组织编写了这套《电气设备丛书》（以下简称《丛书》），满足广大电气工作者和爱好者的迫切需要。

《丛书》编写时从实用出发，力求理论与实际相结合，突出新颖性，介绍电气设备的结构、工作原理、技术参数、适用场合、技术操作要点、运行与维护经验等，并注重理论联系实际，融入应用实例，突出技能和技巧。

《丛书》本着求精避繁的原则，对电气设备的基础理论、材料、器件、应用电路、安装、调试、运行与维修等适用面广、使用频率高和实用性强的技术内容作了详细的阐述。同时，还从实际出发，介绍反映电工电子、电力电子、计算机、自动控制、传感器技术、机电一体化的相互交叉、纵横结合的发展大趋势。

本套丛书共10分册，包括：《防爆电器》、《防雷与接地装置》、《电气测量设备》、《电热设备》、《开关电源技术》、《漏电保护器》、《高压电器》、《低压电器》、《变压器原理与应用》、《电机原理与应用》。

本书是《防雷与接地装置》。

防雷与接地是关系着人们生命及财产安全的重要问题。随着各行各业生产技术的蓬勃发展和人民生活水平的日益提高，电力、电子设备及计算机网络等广泛应用，以及与人们的生产、生活的密切关系，为此，须提醒人们如何保证在使用上述电器的过程中，不发生危及人身及设备安全的事故，这是一个技术问题，也是一个科学知识问题。编写本书的目的就是从工程实际出发，推广、宣传、普及安全可靠设计、安装、使用各种电气设备及装置，以及防止雷电危害的技术和知识。

在本书的编写过程中，参阅了大量文献，在此对相关专家和作者表示衷心的感谢，对给

予支持和帮助的所有人员表示感谢。本书第 1、2、3、4、7、8 章由沈培坤编写，第 5、6 章由刘顺喜编写。全书由李金伴主审，由沈培坤统稿。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，敬请读者指正。

编 者
2005.12

目 录

第 1 章 雷电与雷电防护	1
1.1 雷电和大气过电压	1
1.2 输电线路的雷电过电压与防护	7
1.3 发电厂、变电站（所）的雷电过电压与防护	18
1.4 变电设备的雷电侵入波过电压防护	26
1.5 旋转电机的雷电波过电压防护	29
1.6 建筑物低压进户线高电位侵入的防护	33
1.7 气体绝缘变电所（GIS）的过电压防护	34
第 2 章 防雷装置	37
2.1 避雷针	37
2.2 避雷线	41
2.3 避雷带和避雷网	43
2.4 避雷器	43
第 3 章 接地的基本知识	58
3.1 接地、接地电阻及接地装置	58
3.2 工频接地电阻、冲击接地电阻和冲击系数	61
3.3 大地的导电特性及其电阻率	63
3.4 接地体工频接地电阻计算	67
3.5 接地装置的接地电阻最大允许值	76
第 4 章 电力系统实用接地装置	79
4.1 架空输电线路杆塔的接地装置	79
4.2 发电厂、变电站（所）的接地装置	81
4.3 配电及用电设备的接地装置	87
4.4 10kV/0.4kV 变电所接地装置设计示例及降低接地电阻措施	99
第 5 章 建筑物的防雷接地	103
5.1 民用与工业建筑物的防雷分级	103
5.2 各级防雷建筑物的保护措施	105
5.3 避雷针的防雷保护	109
第 6 章 接地保护	113
6.1 低压系统的接地保护	113
6.2 浴池、游泳池、卫生间的接地保护	116
6.3 医院手术室的接地保护	117

6.4	用电设备的接地保护	118
6.5	电子设备的接地保护	119
6.6	计算机及计算机网络的接地保护	120
6.7	通信系统机房的接地保护	121
6.8	微波通信站的防雷接地	122
6.9	有线系统的接地保护	124
6.10	油罐的接地保护	125
第7章	接地装置的测量	129
7.1	接地电阻测量	129
7.2	土壤电阻率测量	132
7.3	接触电压、电位分布及跨步电压测量	135
第8章	接地装置的腐蚀分析与防腐措施	140
8.1	接地装置腐蚀原因简析	140
8.2	接地装置的防腐蚀措施	142
附录	146
附录1	平行多导线波阻抗计算(参见附图1)及杆塔电感和波阻抗的 估计值	146
附录2	导线及避雷线平均悬挂高度 h_c 及 h_s 的计算	146
附录3	避雷线对导线的几何耦合系数 k_0 的计算及电晕修正系数 k_1 值(见 附图2)	146
附录4	β 值的计算	147
附录5	在发电厂、变电站(所)内及发电厂、变电站(所)外短路时,避 雷线的工频分流系数 k_f 的计算	148
附录6	接地网导体材料短路热稳定最小截面的推导计算	149
附录7	被测接地体、辅助接地体和接地棒的布置及相互间的距离	150
参考文献	151

第 1 章

雷电与雷电防护

1.1 雷电和大气过电压

1.1.1 大气过电压及其危害

一切对电气设备的绝缘有破坏性的电压升高，均称为过电压。大气过电压是指电力系统内的电气设备和地面上的建筑物与构筑物遭受直接雷击或雷电感应时产生的过电压。大气过电压的能量来源于电力系统外部，故又称外部过电压。

雷电是雷云间或雷云与地面物体间的放电现象。前者称为云闪，后者称为地闪。地闪对电力系统，特别是输电系统造成威胁，使绝缘击穿，造成相与地或相与相间短路，引起停电事故，给国民经济带来严重损失。同时，在雷云放电时，在被击物中流过雷电冲击电流，其幅值高达几百千安，该电流产生巨大的电磁效应、机械力效应和热效应，导致被击物体损坏；直接雷击及雷电感应产生的过电压冲击波幅值高达几百千伏，沿输电线路流动，侵入发电厂或变电站内，使发电机、变压器等重要电气设备遭受破坏；严重时还危及人们的生命安全。为此，对雷电活动及其防护问题一直引起人们的关注。

1.1.2 雷闪过程

雷电是一种既壮观又可怖的自然现象。早在 1700 多年前，就有人进行了雷电实验，揭示出雷电实质上是大气火花放电。但是，关于雷电的许多科学知识却是在 20 世纪以来获得的。这主要是由于高速摄影、记录示波器、雷电定向定位仪等现代电子技术用于雷电观测与长空气间隙的人工雷电放电试验的研究，更加丰富了人们对雷电的认识。

雷云放电是由带电荷的雷云引起的。关于雷云带电的原因目前有各种说法，一般认为雷云是地面上强大的湿热气流上升，进入稀薄大气层，冷凝成水滴或冰晶形成云。在强烈气流上升穿过云层时，水滴或冰晶因碰撞分裂，有的失去电子，有的得到电子，故而带电。其中轻微的水沫带负电，形成带负电的雷云；大滴的水珠带正电，凝聚成雨下降，或悬浮在云中，形成局部带正电的区域。再者，在雷云的底部大多带负电荷，它在地面上又会感应大量的正电荷。为此，在带有不同极性与不同数量电荷的雷云之间，或者雷云与大地之间就形成了强大的电场，其电位差可达数兆伏甚至数十兆伏。于是，当空间电场强度随着雷云的发展和运动而增强，并超过大气游离放电的临界强度时，就发生雷云之间或雷云与大地之间的火花放电。放出几十千安甚至几百千安的电流，并伴随有强烈的光和热，使其周围空气急剧膨胀，并发出轰鸣，这就是人们所见与所闻的闪电



和雷鸣，统称为雷电。

大多数雷云放电是发生在雷云之间，并且对地面没有直接影响。而雷云对地放电虽然占的比例并不大，但一旦发生，就有可能带来较严重的危害。测验得知，对地放电的雷云绝大部分带负电荷，所以雷电流的极性也为负的。

雷云对地放电的基本过程可用图 1-1 来描述。

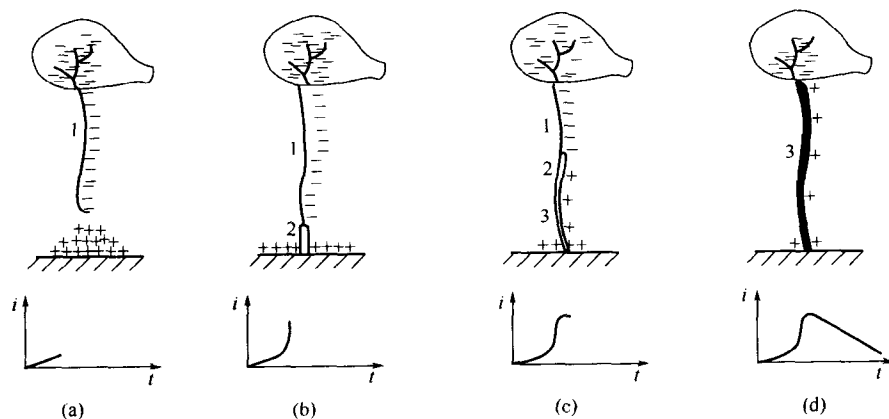


图 1-1 雷电放电的基本过程

1—先导放电通道；2—强游离区；3—主放电通道

雷云中的负电荷随雷云的发展逐渐聚积，并在附近地面感应出正电荷。在雷云与大地之间局部电场强度大于大气游离临界强度时，就产生局部放电通道，由雷云边缘向大地发展，此即为先导放电。

先导放电通道中充满了负电荷，并向地面延伸，与此同时，地面上感应出的正电荷也逐渐增多，如图 1-1 (a) 所示。

当先导通道发展到靠近地面，由于局部空间电场强度增强，在地面突起处出现正极性电荷形成的迎雷先导，并向天空发展。当先导放电与迎雷先导相遇后，就在通道端，因大气强烈游离而形成高密度的等离子区，并由下而上迅速传播，产生一条高导电率的等离子通道，从而使先导通道中的负电荷以及雷云中的负电荷与大地感应出的正电荷迅速中和，这个过程称为主放电过程。如图 1-1 (b)、(c)、(d) 所示。

先导放电及主放电阶段的雷电流变化状况也表示在图 1-1 中。先导放电发展较慢，平均速度约为 $1.5 \times 10^5 \text{ m/s}$ ，电流约数百安培；主放电发展很快，速度约为 $2 \times 10^7 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，出现较强的脉冲电流，数值约达几十千安到 $200 \sim 300 \text{ kA}$ 。

以上所述为带负电荷的雷云对地放电的基本过程，故又称为下行负闪电，如图 1-2 中 1a 和 1b 所示；若从地面高耸的突起处，如尖塔或山顶，出现由地面向云中负电荷区域发展的正先导放电，则称为上行负闪电，如图 1-2 中 2a 和 2b 所示。

与上述两种情况类似，带正电荷的雷云对地放电可能是下行正闪，或者为上行正闪，此情况分别如图 1-2 中 3a 和 3b 及 4a 和 4b 所示。

不难看出，主放电过程是逆着先导通道发展方向产生的。

另外，通过雷电观测，还发现先导放电并非一次性贯通全部空间，而是间歇的脉冲发



展，称为分级先导。每次间歇的时间约几十微秒。人们观察到的一次闪电，实际上包含很多次先导-主放电的重复过程，平均为2~3次，最多的有40余次。采用高速摄影绘制出多重放电发展的过程如图1-3所示。图中并注明了各个放电阶段延续的时间及相应的放电电流波形。

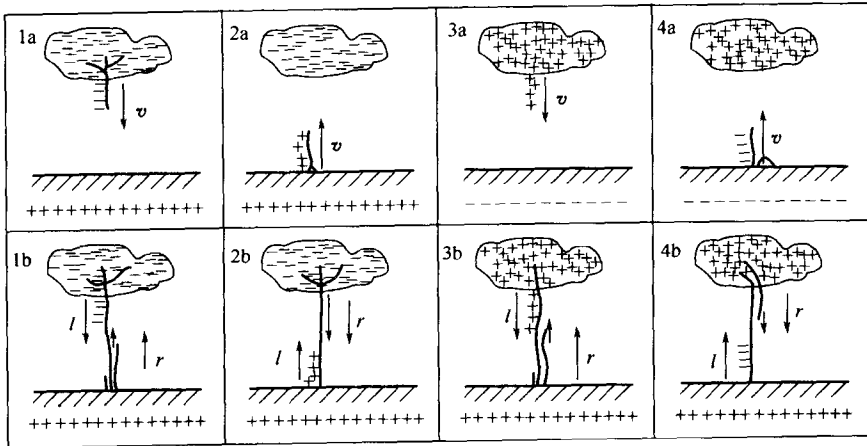


图 1-2 雷电放电类型

l —先导； r —主放电； v —发展方向

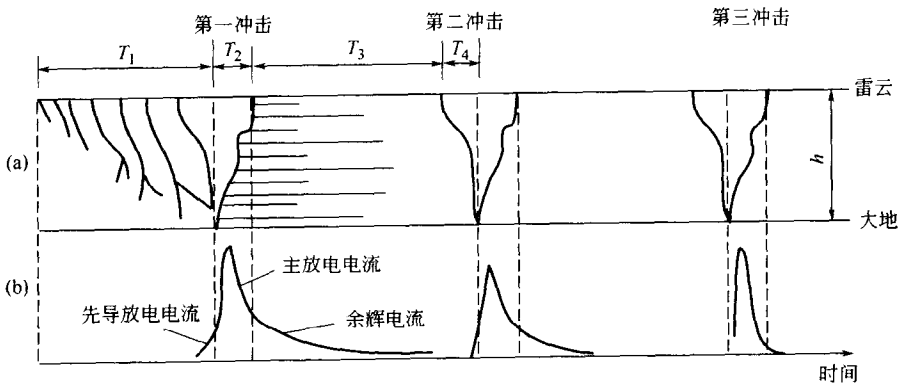


图 1-3 雷电放电的发展过程

T_1 —第一次先导放电发展时间 $(1\sim 2)\times 10^4\mu\text{s}$ ； T_2 —第一次主放电时间 $50\sim 100\mu\text{s}$ ；

T_3 —两次冲击的间隔时间 $0.03\sim 0.05\text{s}$ ； T_4 —第二次先导放电时间 $(1\sim 3)\times 10^3\mu\text{s}$ ；

h —雷云与大地距离，约 2km

(a) 放电过程；(b) 雷电流

对多重放电的解释是：雷云是一块大介质，电荷在其内部不容易运动。在雷云聚积电荷过程中，可能形成若干个电荷密集中心。在第一次先导-主放电冲击时，主要泄放第一个电荷中心及已传播到先导通道中的负电荷，如图1-4(a)、(b)、(c)、(d)所示。当第一次冲击放电结束，雷云内两个电荷中心之间的电流注放也已经开始，由于主放电通道仍然保持有高于周围大气的导电率，所以第二个乃至以后更多个电荷中心产生的先导-主放电又以更快的速度沿着原先的放电通道发展。如图1-4(e)、(f)所示。这就形成了多次重复冲击放电。



实际观测表明，第二次及以后的冲击放电，先导阶段时间均很短，没有分叉 [图 1-4 (e)]，而冲击放电电流的幅值以第一次的最大，第二次及以后的电流幅值均较小些。

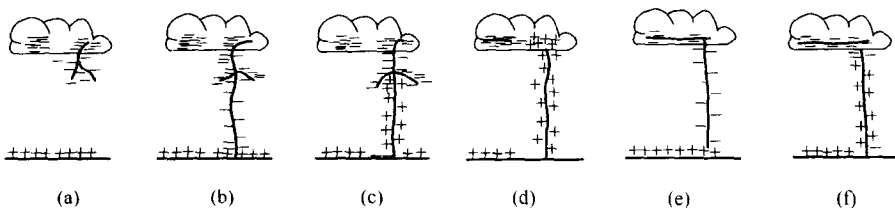


图 1-4 多重雷放电发展过程示意图

1.1.3 雷电参数

雷云放电涉及气象、地形、地质等许多自然因素，有很大的随机性。所以表征雷电特性的参数为长期观测统计分析得出的资料，是防雷保护设计及研究的依据。

下面将描述雷电的主要参数作简要说明。

(1) 雷电流的波形和极性 实测结果表明，雷电流是单极性的脉冲波，这与前面讲过的放电过程原理解释一致，如图 1-5 所示。

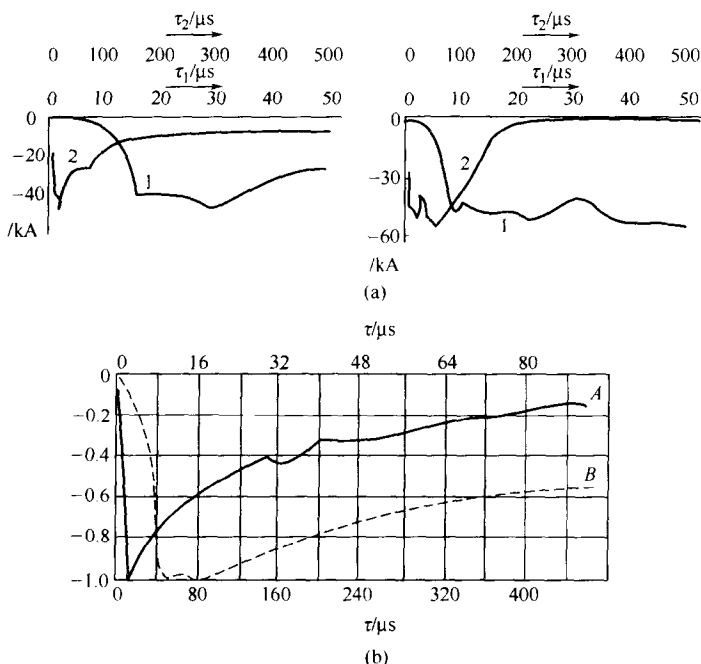


图 1-5 雷电流的实测波形

A—完整记录的波形；B—放大的波前沿

图 1-5 (a) 为几个下行负雷电第一次冲击放电的雷电流实测波形，图 1-5 (b) 是根据记录实测结果计算得出的平均雷电流波形。

根据国内外的实测统计，75%~90%的雷电流是负极性的。因此，电气设备的防雷保护和绝缘配合通常取用负极性的雷电冲击波来进行分析研究。



(2) 雷电流的幅值、波头、波长和陡度 对于脉冲波形的雷电流,用三个主要参数来表征:幅值 I , 单位 kA; 波头 τ_1 , 单位 μs ; 波长 τ , 单位 μs 。

幅值是脉冲电流所达到的最高值;波头是指雷电流上升到幅值的时间;波长是指脉冲电流的持续时间(一般取 1/2 幅值对应的时间)。

幅值和波头决定了雷电流随时间上升的变化率($a = \frac{di}{dt}$),称为雷电流陡度。雷电流陡度对雷电过电压有直接影响($u = L \frac{di}{dt}$),是常用的一个重要参数。我国在年平均雷电日大于 20 的地区测得的雷电流幅值概率分布曲线图(如图 1-6 所示)。

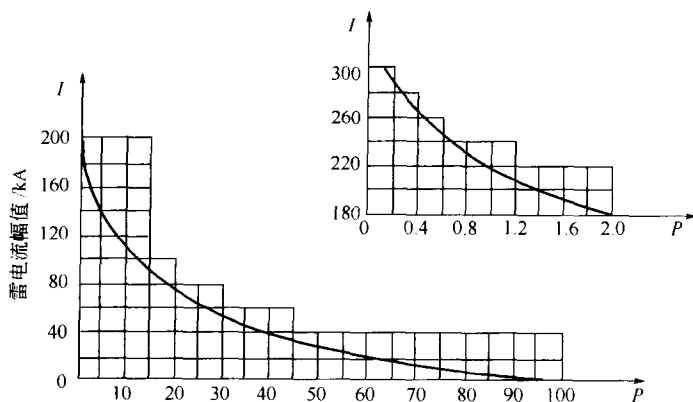


图 1-6 中国雷电流幅值的概率分布曲线

该曲线也可以用下式表示:

$$\lg P = -\frac{I}{108} \quad (1-1)$$

式中, P 为雷电流幅值超过 I (单位为 kA) 的概率,例如,取 $I = 180\text{kA}$,求得 $P = 10\%$ 。即每 100 次地闪大约平均有 10 次雷电流的幅值超过 108kA。

随着测试手段的不断提高和收集的数据越来越多,幅值概率曲线也将有所改变。我国现行《标准》推荐按下式计算:

$$\lg P = -\frac{I}{88} \quad (1-2)$$

对于雷电活动较弱的少雷区(年平均雷电日在 20 日以下),雷电流幅值概率则按下式计算:

$$\lg P = -\frac{I}{44} \quad (1-3)$$

虽然雷电流的幅值随各国的自然条件不同而差别很大,但是各国测得的雷电流波形却基本一致。据统计,波头长度大多数在 $1 \sim 5\mu\text{s}$ 的范围内,平均为 $2 \sim 2.5\mu\text{s}$ 。我国防雷保护设计中,建议采用 $2.6\mu\text{s}$ 的波头长度。

至于雷电流的波长,实测表明在 $20 \sim 100\mu\text{s}$ 范围内,平均约为 $50\mu\text{s}$,大于 $50\mu\text{s}$ 的仅占 $18\% \sim 30\%$ 。



据以上分析，在防雷保护设计时，雷电流波形采用 $2.6/50\mu\text{s}$ 。

由于雷电流的波头长度变化范围不大，所以雷电流的陡度和幅值密切相关。我国采用 $2.6\mu\text{s}$ 的固定波头长度，所以雷电流平均陡度 \bar{a} 和幅值 I 有线性关系，即

$$\bar{a} = \frac{I}{2.6} \quad (1-4)$$

这说明幅值较大的雷电流，具有较大的陡度。

目前在输电线路的防雷设计中，为简化计算多采用半斜角波雷电流波头；但在设计特高杆塔时，则采用半余弦波雷电流波头，此时波头部分的表达式为：

$$i = \frac{1}{2} I (1 - \cos \omega t) \quad (1-5)$$

式中， $\omega = \frac{\pi}{\tau_1} = \frac{\pi}{2.6} = 1.2$ ，半余弦波头的最大陡度为平均陡度的 $\pi/2$ 倍。

图 1-7 所示雷电流的等值波形为经过简化和典型化后得出的三种常用的计算波形。目的在于电力系统防雷保护计算时，可将雷电流波形公式化，以方便处理。

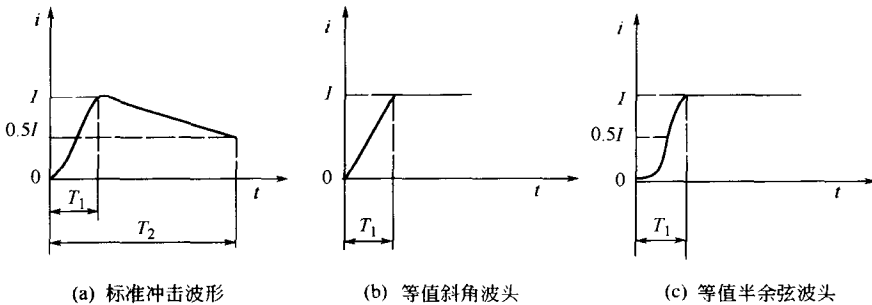


图 1-7 雷电流的等值波形 (I 表幅值)

(3) 雷电日和雷电小时 为了表征不同地区雷电活动频繁程度，通常采用年平均雷电日作为计算单位。雷电日是指该地区一年四季有雷云放电的天数。在一天内只要听到雷声就算一个雷电日。由于不同年份雷电日数变化较大，故采用多年平均值，称为年平均雷电日数。

我国各地年平均雷电日的多少和所在纬度及距海洋远近有关。北回归线（北纬 23.5° ）以南，平均雷电日数一般在 80 以上；北纬 23.5° 至长江以南大部分地区在 $40 \sim 80$ 之间；长江以北大部分地区，包括华北和东北地区，多在 $20 \sim 40$ 之间；西北地区多在 20 以下。根据雷电活动强弱程度和雷电活动危害大小，我国把年平均雷电日数超过 90 的地区称为强雷区，超过 40 的地区称为多雷区，不足 15 的称为少雷区，以便防雷保护设计因地制宜。

为了区别不同地区每个雷电日内雷电活动持续时间的差别，也可采用雷电小时数作为雷电活动频繁程度的统计单位，一小时内只要听到一次雷声，就算一个雷电小时。每一个雷电日平均约有 3 个雷电小时，但在强雷区，一个雷电日多达 4 个雷电小时。

(4) 地面落雷密度 雷电日和雷电小时的统计数字，没有区分是雷云间放电还是雷云与大地之间放电。实际上雷云之间放电远多于云地之间放电。雷电日数越多，云间放电比重越大，云间放电与云地放电之比，在温带约为 $1.5 \sim 3.0$ ，热带约为 $3 \sim 6$ 。



对防雷保护设计来说，有实际意义的是雷云对地放电的年平均次数。然而，目前这方面的统计资料还缺乏。

雷云对地放电的频繁程度和强度用地面落雷密度 γ 来描述。 γ 是指每个雷电日在每平方公里地面上平均落雷次数， γ 值与年平均雷电日数 T_d 有关。一般 T_d 较大的地区，其 γ 值也较大。我国《标准》依据国际大电网会议 (CIGRE) 1980 年提出的地面落雷密度与雷电日的关系式：

$$N_g = 0.023 T_d^{1.3} \quad (1-6)$$

式中， N_g 为每年每平方公里地面落雷数； T_d 为雷电日数。推导出 γ 的计算公式为：

$$\gamma = 0.023 T_d^{0.3} \quad (1-7)$$

例如， $T_d = 40$ 的地区， $\gamma = 0.07$ 。但是，现在按 GB 50057—94《建筑物防雷设计规范》规定：

$$N_g = 0.024 T_d^{1.3} \quad (1-8)$$

(5) 雷道波阻抗 雷电通道在主放电时，如同导体。雷电流在其中流动，同普通分布参数导体一样，具有某一等值波阻抗，称为雷道波阻抗，以 Z_0 表示。也就是说，主放电过程可视为一个电流波 ($I_m/2$) 沿着波阻抗为 Z_0 的雷道投射到雷击点。一般取 $Z_0 = 300\Omega$ 。

1.2 输电线路的雷电过电压与防护

1.2.1 概述

架空输电线路分布在旷野，绵延数千公里，极易遭受直接雷击。实际运行经验表明，雷击输电线路造成开关跳闸停电，在电网的总事故中占很大比例（雷击跳闸占总跳闸次数的 40%~70%）。同时，雷击线路产生的雷电过电压沿线路侵入变电所，又是造成变电所主要电气设备绝缘损坏的重要因素。因此，历来对输电线路的防雷极为重视。

输电线路上的雷电过电压按其形成分两种情况：一种是雷云直接击于线路（包括导线、杆塔，或许还有避雷线），在其上产生危害绝缘的电压，称为直击雷过电压；另一种是雷击输电线路附近地面，在输电线路的三相导线上，因感应而出现的高电压，称为感应雷过电压。感应雷过电压一般不超过 500kV，它只会对 35kV 及以下线路造成威胁，对较高电压等级的输电线路来说，危害最大的是直击雷。

工程上用耐压水平和雷击跳闸率两项指标来评价输电线路防雷性能的好坏。

耐雷水平是指线路遭受雷击时，其绝缘不发生闪络的最大雷电流幅值，单位为 kA。而它又分雷击杆塔耐雷水平和雷击导线（有避雷线时称绕击）耐雷水平。耐雷水平越高，表明线路防雷性能越好。

雷击跳闸率是指每 100km 长的线路，每年（折算到 40 个雷电日的标准条件下）因雷击引起线路跳闸的次数。这是衡量线路防雷性能的综合指标。

在此需要说明：到目前为止，线路防雷设计所依据的概念、假定及参数都不是十分准确和完美的，其计算结果只能作为线路防雷性能的参考指标，以便找出主要影响因素，提供改进措施。



1.2.2 输电线路的感应雷过电压

感应雷过电压包含静电感应和电磁感应两个分量。

在雷云放电先导阶段，输电线路处于雷云及先导通道与大地构成的静电场之中，如图 1-8 所示。由于静电感应，导线轴线方向上的电场强度 E_x 将正电荷（雷云带负电荷）吸引到靠近先导通道的一段导线上，成为束缚电荷 [见图 1-8 (a)]。而导线上的负电荷被排斥向两侧运动，并经线路泄漏电导和系统中性点流入大地。由于先导放电发展速度较慢，导线上的束缚电荷聚积得也缓慢，这样导线上呈现的电压 $u=iz$ (i 为导线聚积电荷时产生的电流，数值很小； z 为导线波阻抗， z 值的计算见附录 1) 也较小，若再忽略导线上的工作电压，则可认为导线具有大地电位。为此，在先导放电时，尽管导线上有束缚正电荷，但其在导线上产生的电位 $+u(x)$ 与先导通道中的负电荷产生的电位 $-u(x)$ 互相抵消，结果使导线仍然保持与大地同电位。

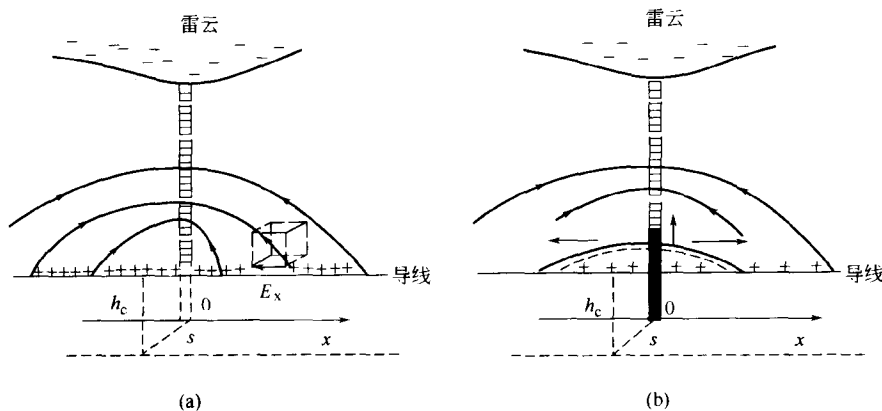


图 1-8 感应雷过电压静电分量形成示意图

主放电开始后，先导通道中的负电荷自下而上迅速被中和，相应的电场很快减弱。这样导线上被束缚的正电荷失去了束缚力，变为自由电荷，并向导线两侧移动，形成静电感应过电压流动波 $u=iz$ ，[见图 1-8 (b)]。显然， u 值与主放电速度 v 有关，当 $v=\infty$ 时，先导电荷瞬间被中和而消失， u 值达到最大值，它等于瞬间释放的束缚电荷在导线上形成的电位 $+u_c(x)$ ，这就是感应过电压的静电分量。

与此同时，在主放电过程中，伴随雷电流冲击波，在放电通道周围空间出现很强的脉冲磁场，其中一部分磁力线穿链导线-大地回路，如图 1-9 所示。图中 ABCDA 回路和 ABEFA 回路将产生感应电势，使 A 点对地电位升高，因而出现过电压，这便是感应过电压的电磁分量。

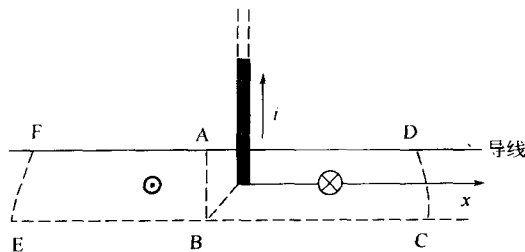


图 1-9 感应过电压的电磁分量示意图

实际上，感应过电压的静电分量和电磁分量都是在主放电过程中，由统一的电磁场突变而同时产生的。由于主放电速度 v 比光速 c 小得多 ($v = \frac{1}{20}c \sim \frac{1}{2}c$)，而且主放电通道



和导线又几乎是互相垂直的,所以互感不大,电磁感应较弱,所以感应过电压中,电磁感应分量远小于静电感应分量。另外,两种分量出现最大值的时刻也不同,因此,导线上总的感应过电压幅值中,以静电分量起主要作用。

1.2.3 感应过电压的工程实用计算

(1) 雷击输电线路附近大地时导线上感应过电压 由前面分析知,雷电感应过电压的静电分量和电磁分量的最大值都是出现在距雷击点最近的一段导线上(参见图1-8和图1-9)。根据电磁场理论,并计及镜像作用,当雷电流为直角波时,导线上离雷击点最近的一点的感应过电压静电分量的最大值 U_e 为:

$$U_e = K_e(v) \frac{h_c I}{s} \quad (1-9)$$

而电磁分量的最大值为:

$$U_m = K_m(v) \frac{h_c I}{s} \quad (1-10)$$

两者之和为雷电感应过电压最大值:

$$U_i = U_e + U_m = [K_e(v) + K_m(v)] \frac{h_c I}{s} = K \frac{h_c I}{s} \quad (1-11)$$

以上各式中, I 为雷电流幅值,kA; h_c 为导线对地面的平均高度(h_c 值计算参见附录2),单位m; s 为导线正下方距雷击点的水平距离,m; $K_e(v)$ 、 $K_m(v)$ 及 K 均为系数,具有电阻量纲; v 为主放电速度,实际上主放电速度有限, K 与 v 关系不大。

由于实际的雷电流波不是直角波,而是具有一定波头长度的,这使 K 值比直角波时小些。 K 值可根据线路实测结果或模型实验确定。《标准》规定,当 $s \geq 65\text{m}$ 时, K 取 25Ω 。故雷击线路附近大地、导线上感应过电压可按下式计算:

$$U_i = 25 \frac{h_c I}{s} \quad (1-12)$$

由上式可以看出,雷电感应过电压与雷电流 I 成正比,与导线悬挂平均高度 h_c 成正比,而与地面上雷击点距导线下方地面的水平距离 s 成反比。

(2) 雷击线路杆塔塔顶时导线上的感应过电压 式(1-12)只适用于雷击输电线路附近地面水平距离 $s \geq 65$ 的情况。线路的等值受雷宽度约为 $10h_s$ (h_s 为避雷线悬挂平均高度,其值的计算参见附录2)。若避雷线平均高度为13m,则输电线路两侧受雷宽度为65m。所以对于一般高度的高压输电线路,更近的落雷会因线路本身的引雷作用而击于导线上。

当雷击输电线路杆塔顶部时,迅速向上发展的主放电电流引起周围空间电磁场突变,在导线上感应出与雷电流极性相反过电压。而导线-大地回路中,因雷电通道中的电流所产生的电磁感应远小于沿杆塔的雷电流所产生的电磁感应,而杆塔雷电流感应的过电压又以杆塔电感压降的形式计及(主要考虑静电分量)。

按规程建议,无避雷线时,导线上的感应过电压最大值按下式计算:

$$U_i = ah_c \quad (1-13)$$

式中, U_i 为感应过电压,kV; h_c 为无避雷线时导线的平均高度,m; a 为感应过电压系数,kV/m,其值等于以kV/ μs 为单位的雷电流平均陡度。