

李景禄 等 编著

现代防雷技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

李景禄 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了雷电的形成、雷电参数和雷电的危害、人身及家用电器防雷的基本知识、防雷装置与防雷器件及新型防雷技术和防雷装置的试验与维护；重点论述了电力系统防雷、输电线路防雷、配电网防雷和弱电系统防雷，详细阐述了微波通信系统防雷、移动通信防雷、智能建筑物防雷和易燃、易爆场所的防雷。

本书可供从事防雷专业的工程技术人员阅读，亦可作为高等院校相关专业的选修课教材和教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代防雷技术/李景禄等编著. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978-7-5084-6351-3

I. 现… II. 李… III. 防雷-基本知识 IV. P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 035125 号

书 名	现代防雷技术
作 者	李景禄 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 20.25 印张 480 千字
版 次	2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《现代防雷技术》编著人员名单

主 编 李景禄

编著人员	李景禄	曹志煌	林 冶	周冠东	于建龙
	郑新才	余仁山	刘延斌	张春荣	杨 鑫
	郑智勇	李 超	陶 蓉	李志娟	黄 欣
	李 宇	马 福	何 娜	唐正森	崔 林
	秦晶晶	敬亮兵	彦喜平	李德超	宋 萍

前 言

雷电是一种自然放电现象。由于雷电放电是在极短的时间内释放出巨大的能量，形成的大电流和高电压具有极强的破坏力，因而给人类的日常活动带来了极大的影响和安全威胁。人类对雷电这一自然现象也进行了长期的、系统的研究，18世纪富兰克林用试验证明雷电是自然界的一种放电现象。关于雷电的起因现在已基本弄清，是气象活动，是大气运动形成的带电云团，雷电可以是带有异号电荷的雷云形成的云对云的放电，云对地的放电。

电力系统雷害事故特别是配电网雷害事故大约占到总事故的60%以上，电力系统投入了大量的人力和物力对雷电防护进行了系统的研究，目前已取得了较大的进步，从发电厂、变电所直击雷保护，线路来波保护，到输电线路的防雷措施，取得了较为成功经验。在防雷保护器件上，经历了由保护间隙到管型避雷器、阀式避雷器，到氧化锌避雷器等较大的进展。随着科学技术的发展，发电厂、变电所的各类保护和控制系统目前均为计算机控制的综合自动化系统，这与过去传统的保护和控制装置相比，是一次技术上的革命。但随之带来了各种干扰问题，特别是在雷击时，由雷电过电压产生的雷电过电压干扰，对微电子元件的影响最为严重，因为这些微电子元件对雷电干扰具有敏感性，在雷电干扰时会使逻辑混乱造成芯片损坏、保护“失灵”，严重时危及发电机、变压器等一些主设备。计算机控制系统，微波通信、移动通信系统，雷达系统，智能建筑及办公自动化系统受到雷电干扰也时有发生，防雷措施还不够完善，这也是防雷工作的重点。易燃、易爆场所防雷的重要性一直受到人们高度重视，因为任何的漏洞都会造成不可估量的损失。因雷害造成的人身伤亡事故时有发生，所以人身防雷知识的普及、学校及公共场所的防雷措施都非常重要。

笔者在电力系统从事了20多年的高电压专业技术工作，其中防雷接地工作乃是其主要的工作，从发电厂、变电所的防雷接地到输电线路的防雷接地，从配电设备的防雷接地，到微波通信系统的防雷接地工作，从防雷接地工程设计、防雷改造，防雷装置的运行管理，到雷害事故分析，防雷技术的监督，进行了大量的、系统的工作，也积累了丰富的实践经验和系统的理论知识，

对防雷工作进行了系统的理论研究和应用研究,积累了一些现场防雷接地方面的工作经验并出版了《实用电力接地技术》(中国电力出版社2002年出版)、《接地装置的运行与改造》(中国水利水电出版社2005年出版)。本书是笔者20多年来在从事防雷工作的经验总结,也是近年来科研成果的总结。为了能够全面反映在防雷方面的现代技术,在编写过程中参考了国内外近年来在防雷领域的大量的书籍、资料、研究成果和相关的国家标准和行业规程、标准,通过大量的实例分析,力求最大限度地、全面地反映在防雷方面的研究成果和技术进步。本书实用性强,可作为防雷工作人员的工具书。

本书共分12章,全面阐述了雷电成因、雷害事故、雷电参数、防雷设施、设备等,并重点介绍了电力系统防雷、通信系统防雷、建筑物防雷、易燃易爆场所防雷和防雷装置试验等知识。

本书由长沙理工大学的李景禄教授等编著,并指导研究生李超、陶蓉、杨鑫、黄欣、李志娟、李宇、马福、何娜、唐正森、崔林、秦晶晶、敬亮兵、彦喜平、李德超、宋萍进行了资料收集、编写和校对工作。福建省电力公司基建部主任林冶、生技部副主任于建龙高工、湖南省电力公司的副总工程师曹志煌高工、生产技术部周冠东高工、河南商丘电力公司的郑新才总工、江西九江供电公司生产技术部主任余仁山高工、厦门雷泰电安工程技术有限公司经理刘延斌、海南捷能特防雷工程有限公司经理张春荣、长沙科智防雷有限公司工程公司经理郑智勇参与了本书部分章节的编写。

由于成书时间仓促,再加上作者水平有限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2009年2月

目 录

前言

第一章 雷电及其参数	1
第一节 雷云的产生和雷电放电过程	1
第二节 雷电放电的基本形式与特点	9
第三节 雷电的危害及防雷基本知识	13
第二章 线路和绕组中的波过程	17
第一节 波沿均匀无损单导线的传播	17
第二节 波的折射与反射	22
第三节 波通过串联电感和并联电容	29
第四节 波的多次折、反射，网格法	32
第五节 平行多导线系统的波过程	34
第六节 波的衰减与变形	37
第七节 变压器绕组中的波过程	38
第八节 旋转电机绕组中的波过程	48
第三章 防雷保护装置	51
第一节 避雷针与避雷线	51
第二节 放电间隙与避雷器	54
第三节 消弧线圈	65
第四节 防雷接地装置	78
第四章 送电线路防雷保护	107
第一节 输电线路的感应雷过电压	108
第二节 输电线路的直击雷过电压	110
第三节 输电线路的耐雷水平及雷击跳闸率	114
第四节 输电线路雷害事故案例与分析	117
第五节 输电线路的防雷措施	128
第五章 发电厂、变电所防雷保护	139
第一节 发电厂、变电所的直击雷保护	139
第二节 发电厂、变电所的雷电侵入波保护	142

第三节	变电所的进线段保护	148
第四节	变压器保护	152
第五节	旋转电机的防雷保护	155
第六节	发电厂、变电所雷害事故及防雷措施	158
第六章	配电网防雷保护	163
第一节	配电所防雷保护	163
第二节	配电设备防雷保护	167
第三节	配电网防雷存在问题的分析	170
第四节	配电网防雷保护措施	179
第七章	弱电系统防雷保护	189
第一节	弱电系统防雷的特点	189
第二节	雷电侵入弱电系统的途径	190
第三节	雷电对弱电系统造成危害的实例及分析	193
第四节	弱电系统的防雷器件及装置	199
第五节	弱电系统的防雷措施	206
第八章	变电所地电位干扰及防护措施	213
第一节	变电所地电位干扰概述	213
第二节	变电所地电位干扰的途径、耦合机理及危害分析	216
第三节	现场调研及试验	221
第四节	变电所地电位干扰防护措施	227
第九章	通信系统的防雷保护	245
第一节	微波站的防雷保护	245
第二节	市话通信的防雷保护	249
第三节	通信系统的电源保护	252
第四节	移动通信基站防雷保护	254
第十章	高层建筑物防雷保护	258
第一节	雷电流的效应	258
第二节	高层建筑物的外部保护	260
第三节	建筑物的内部保护	264
第四节	典型建筑物的防雷保护	267
第十一章	易燃、易爆场所的防雷保护	272
第一节	油库、加油站的防雷保护	272
第二节	燃气供应站及管道的防雷保护	276
第三节	民用爆破器材工厂的防雷保护	279

第十二章 防雷装置的试验.....	281
第一节 避雷器试验	281
第二节 发电厂变电所接地试验	284
第三节 线路杆塔、避雷针接地试验	295
第四节 土壤电阻率试验	299
第五节 配电网电容电流测量	301
参考文献	312

第一章 雷电及其参数

雷电是大自然的一种气体放电现象。对雷电的物理本质了解始于 18 世纪，最有名的当属美国的富兰克林和俄国的罗蒙诺索夫。富兰克林在 18 世纪中期提出了雷电是大气中的火花放电，首次阐述了避雷针的原理并进行了试验；罗蒙诺索夫则提出了关于乌云起电的学说。近几十年来，由于雷电放电对于现代航空、电力、通信、建筑等领域都有很大的影响，促使人们从 20 世纪 30 年代开始加强了对雷电及其防护技术的研究，特别是利用高速摄影、数字记录、雷电定向定位等现代测量技术所作的实测研究的成果，大大丰富了人们对雷电的认识。

第一节 雷云的产生和雷电放电过程

一、雷电发生机理

雷电是由雷云放电引起的，热气流上升时冷凝产生冰晶，气流中的冰晶碰撞后分裂导致较轻的部分带负电荷并被风吹走形成大块的雷云；较重的部分带正电荷并可能凝聚成水滴下降，它们在重力作用下下落的速度大，并在下落过程中与其他水分粒子发生碰撞，结果一部分被另一水生成物捕获，增大水生成物的体积，另一部分云粒子被反弹回去，这些反弹回去的云粒子通常带正电荷，悬浮在空中形成一些局部带正电的云区，而水生成物带上负电荷。由于水生成物下降的速度快，而云粒子的下降速度慢，因而正、负电荷的微粒逐渐分离，最后形成带正电的云粒在云的上部，而带负电的水生成物在云的下部。整块雷云里边可以有若干电荷中心。负电荷中心，离地 500~10000m。它在地面上感应出大量的正电荷。

随着雷云的发展和运动，一旦空间电场强度超过大气游离放电的临界电场强度（大气中约为 30kV/cm，有水滴存在时约为 10kV/cm）时，就会发生云间或对大地的火花放电。雷电放电包括雷云对大地，雷云对雷云和雷云内部的放电现象。大多数雷云放电都是在雷云与雷云之间进行的，只有少数是对地进行的。在防雷过程中，主要关心的是雷云对大地的放电，如图 1-1 所示。

雷云对大地放电通常分为先导放电、主放电和辉光放电三个阶段。云地之间的线状雷电在开始时往往从雷云边缘向地面发展，以逐级推进方式向下发展。每级长度为 10~200m，每级的伸展速度约 10^7 m/s，各级之间有 10~100 μ s 的停歇，所以平均发展速度只有 10 万~80 万 m/s，这种放电称为先导放电，如图 1-3 所示。当先导接近地面时，地面上一些高耸的物体（如塔尖或山顶）因周围电场强度达到了能使空气电离的程度，会发出向上的迎面先导。当它与下行先导相遇时，就出现了强烈的电荷中和过程，出现极大的电



图 1-1 云对地放电

流（数十到数百千安），伴随着雷鸣和闪光，这就是雷电的主放电阶段。主放电的过程极短，只有 $50\sim 100\mu\text{s}$ ，它是沿着负的下行先导通道，由下而上逆向发展，故又称“回击”，其速度高达 $0.2\text{ 亿}\sim 1.5\text{ 亿 m/s}$ 。以上是负电荷雷云对地放电的基本过程，可称为下行负雷闪；对应于正电荷雷云对地放电的下行正雷闪所占的比例很小，其发展过程亦基本相似。主放电完成后，云中剩余的电荷沿着原来的主放电通道继续流入大地，看到的是一片模糊的发光，这就是辉光放电。

从旋转相机拍下的光学照片显示，大多数云对地雷击是重复的，即在第一次雷击形成的放电通道中，会有多次放电尾随，放电之间的间隔为 $0.5\sim 500\text{ms}$ 。主要原因是：在雷云带电的过程中，在云中可形成若干个密度较高的电荷中心，第一次先导——主放电冲击泄放的主要是第一个电荷中心的电荷。在第一次冲击完成之后，主放电通道暂时还保持高于周围大气的电导率，别的电荷中心将沿已有的主放电通道对地放电，从而形成多重雷击。第二次及以后的放电，先导都是自上而下连续发展的，没有停顿现象。放电的数目平均为 $2\sim 3$ 次，最多观测到 42 次。通常第一次冲击放电的电流最大，以后的电流幅值都比较小。如图 1-2 所示为用旋转相机和高压示波器拍摄和记录的负雷云对地放电的典型过程和电流波形。

若地面上存在特别高的导电性能良好的接地物体时，也可能首先从该物体顶端出发，发展向上的先导，称上行雷。但上行雷先导到达雷云时，一般不会发生主放电过程，这是因为雷云的导电性能比大地差得多，难以在极短的时间内提供为中和先导通道中电荷所需要的主放电电流，而只能向雷云深处发展多分支的云中先导。通过宽广区域的电晕流注，从分散的水性质点上卸下电荷，汇集起来，以中和上行先导中的部分电荷。这样电流放电过程显然只能是较缓和的，而不可能有大冲击电流的特性。其放电电流一般不足千安，而延续时间则较长，可能长达 0.1s 。此外，上行先导从一开始就出现分支的概率较大。

二、雷击时的等值电路

雷击地面发生主放电的开始，可以用图 1-3 中开关 S 的闭合来表示。图 1-3 中 Z 是

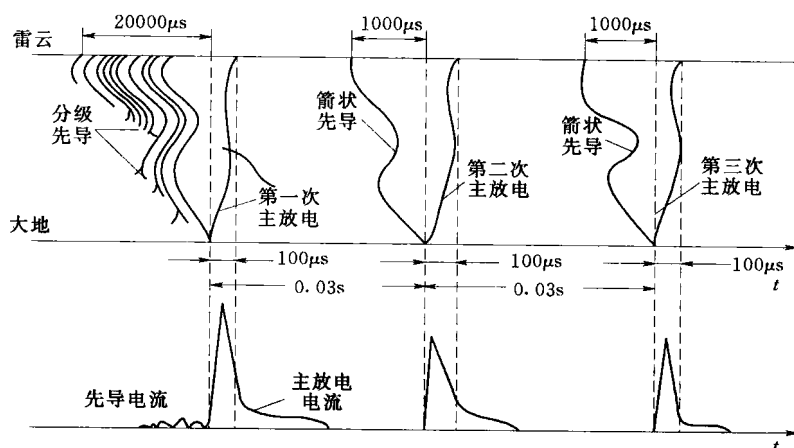


图 1-2 雷电放电的发展过程和雷电流的波形

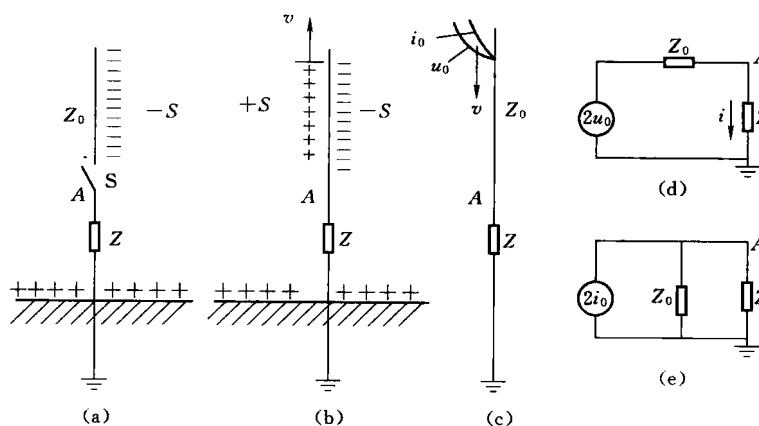


图 1-3 雷电放电模型和等值电路

(a) 先导放电；(b) 主放电；(c) 计算模型；(d) 电压源等值电路；(e) 电流源等值电路

被击物与大地（零电位）之间的阻抗， σ 是先导放电通道中电荷的线密度，S 闭合之前相当于先导放电阶段。S 突然闭合，相当于主放电开始，如图 1-3 (b) 所示。发生主放电时，将有大量的正、负电荷沿先导通道逆向运动，并中和雷云中的负电荷。由于电荷的运动形成电流 i ，因此雷击点 A 的电位也突然发生变化 ($u=iZ$)。雷电流 i 的大小与先导通道的电荷密度以及主放电的发展速度有关 ($i=\sigma v$)。

在防雷研究中，最关心的是雷击点 A 的电位升高，而可以不考虑主放电速度、先导电荷密度及具体的雷击物理过程，因此可以从 A 点的电位出发来把雷电放电过程简化为一个数学模型，如图 1-3 (c) 所示；进而得到其彼得逊等值电路，如图 1-3 中 (d)、(e) 所示。图中， Z_0 表示雷电通道的波阻抗（我国规程建议取 $300\sim 400\Omega$ ）。需要说明的是：尽管雷云有很高的初始电位才可能导致主放电，但地面被击物体的电位并不取决于这一初始电位，而是取决于雷电流与被击物体阻抗的乘积，所以从电源的性质看，雷电具有电流源的性质。



在雷击点 A 与地中零电位面之间串联着一个阻抗，它可以代表被击中物体的接地电阻 R ，也可以代表被击物体的波阻抗 Z 。从图 1-3 (e) 中可以看出，当 $Z=0$ 时， $i=2i_0$ ；若 $Z \ll Z_0$ （如 $Z \leq 30\Omega$ ），仍然可得 $i \approx 2i_0$ 。所以国际上习惯于把流经波阻抗为零（或接近于零）的被击物体的电流称为“雷电流”。从其定义可以看出，雷电流 i 的幅值恰好等于沿通道 Z_0 传来的流动电流波 i_0 的幅值的两倍。

雷电放电有单通道放电（见图 1-4）和多通道放电（见图 1-5），先导放电是不规则的树枝状（见图 1-4），但它还是具有分布参数的特征，作为粗略估计一般假设它是一个具有均匀电感、电容等分布参数的导电通道，即可以假设其波阻抗是均匀的。

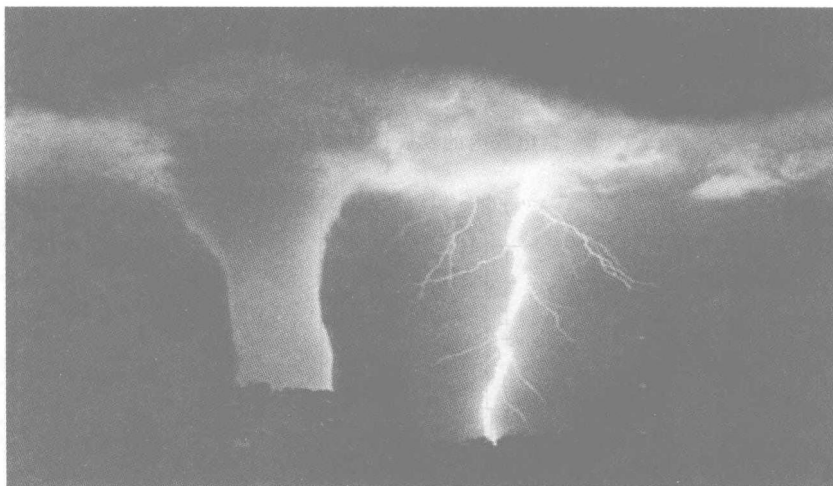


图 1-4 单通道雷电放电

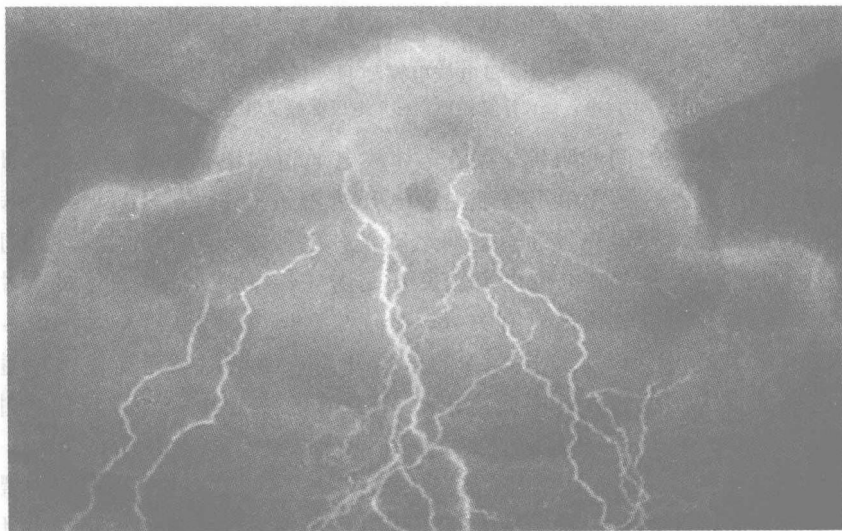


图 1-5 多通道雷电放电



雷电放电涉及气象、地貌等自然条件，随机性很大，关于雷电特性的诸参数因此具有统计的性质，需要通过大量实测才能确定，防雷保护设计的依据即来源于这些实测数据。在防雷设计中，最关心的是雷电流波形、幅值分布及落雷密度等参数。

三、雷电流幅值和波形

1. 幅值分布的概率

雷电流是单极性的脉冲波。对一般地区，我国现行标准推荐雷电流幅值分布的概率如下

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

式中： I 为雷电流幅值（kA）； P 为幅值大于 I 的雷电流概率。例如，当雷击时，出现幅值大于 50kA 雷电流的概率为 33%，大于 88kA 的概率为 10%。该公式是从 1025 个有效的雷电流观测数据中归纳出来的。

对年雷暴日数小于 20 的地区（我国除陕南以外的西北地区、内蒙古的部分地区外），雷电流幅值较小， P 可按下式计算

$$\lg P = -\frac{I}{44} \quad (1-2)$$

2. 波形和极性

虽然雷电流的幅值随各国气象条件相差很大，但各国测得的雷电流波形却是基本一致的。根据实测统计，雷电流的波头时间大多为 $1 \sim 5 \mu\text{s}$ ，平均为 $2 \sim 2.5 \mu\text{s}$ 。我国的防雷规程建议雷电流的波头时间取 $2.6 \mu\text{s}$ ，此时雷电流的平均波头陡度 $\bar{a}$ 与幅值成正比，即

$$\bar{a} = \frac{I}{2.6} \text{ kA}/\mu\text{s} \quad (1-3)$$

雷电流的波长大多为 $20 \sim 100 \mu\text{s}$ ，平均约为 $50 \mu\text{s}$ ，大于 $50 \mu\text{s}$ 的仅占 18%~30%。因此，在保护计算中，雷电流的波形可以采用 $2.6/50 \mu\text{s}$ 的双指数波。

在线路防雷设计中，一般可取斜角平顶波头以简化计算，我国规程规定雷电波的波头时间采用 $2.6 \mu\text{s}$ 。而在特高塔的防雷设计中，为更接近于实际，可取半余弦波头，其表达式为

$$i = \frac{I}{2} (1 - \cos \omega t) \quad (1-4)$$

式中： I 为雷电流幅值； ω 为角频率。

对半余弦波头，其最大陡度出现在 $t = \tau_i/2$ 时，其值为平均陡度的 $\pi/2$ 倍。

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一般都按负极性雷进行研究。

四、雷暴日和雷暴小时

为了表征不同地区的雷电活动频繁程度，常用年平均雷暴日作为计量单位。雷暴日是一年中雷电的天数，在一天内只要听到雷声就算一个雷暴日。我国各地雷暴日的多少和纬度及距海洋的远近有关。海南岛及广东的雷州半岛雷电活动频繁而强烈，平均年雷暴日



高达 100~133。北回归线（北纬 23.5°）以南雷暴日一般在 80 以上（但台湾地区只有 30 左右），北纬 23.5°到长江一带雷暴日为 40~80，长江以北大部地区（包括东北）雷暴日为 20~40，西北雷暴日多在 20 以下。西藏沿雅鲁藏布江一带雷暴日达 50~80。我国把年平均雷暴日不超过 15 的称为少雷区，超过 40 的称为多雷区，超过 90 的称为强雷区。在防雷设计中，要根据雷暴日的多少因地制宜。

雷暴小时是一年中雷暴的小时数，在 1h 内只要听到雷声就算一个雷暴小时。据统计，我国大部分地区雷暴小时与雷暴日之比约为 3。

我国规程建议采用雷暴日作为计算单位。

五、地面落雷密度和输电线路落雷次数

雷暴日和雷暴小时中，包含了雷云之间的放电，而防雷实际中关心的是云地之间的放电。地面落雷密度表征了雷云对地放电的频繁程度，其定义为每平方公里每雷暴日的对地落雷次数，用 γ 表示。世界各国根据各自的具体情况， γ 的取值不同。根据我国标准规定，对雷暴日 $T=40$ 的地区， $\gamma=0.07$ 次/（ $\text{km}^2 \cdot \text{雷暴日}$ ）。

输电线路的存在，改变了雷云一地之间的电场分布，有引雷作用。根据模拟试验及运行经验，线路每侧的引雷宽度为 $2h$ （ h 为避雷线的平均高度，m）。因此，对雷暴日 $T=40$ 地区，避雷线或导线平均高度为 h 的线路，每 100km 每年雷击的次数为

$$N = \frac{(b+4h)}{1000} \times 100T\gamma = 0.28(b+4h) \text{ 次} \quad (1-5)$$

式中： b 为两根避雷线之间的距离（m）。

六、雷电冲击电压作用下气体的击穿

由于雷电造成冲击电压的幅值高、陡度大、作用时间极短，在冲击电压作用下空气间隙的击穿特性有着许多新的特点，并且雷电冲击电压与操作冲击电压下的特性也有很大不同。下面讨论在雷电冲击电压下空气间隙的击穿特性。

1. 雷电冲击电压标准波形

为了检验绝缘耐受冲击电压的能力，在高压试验室中利用冲击电压发生器产生冲击电压，以模拟雷闪放电引起的过电压。过去，各国、各地不同的实验室用各自产生的冲击电压进行试验，因为波形不同，击穿电压也不同，所得结果无法互相比。为使实验结果具有可比性和实用价值，国际电工委员会（IEC）规定了雷电冲击电压的标准波形参数。标准波形是根据大量实测到的雷电冲击电压波形制定的。如图 1-6 所示，雷电冲击电压是非周期性指数衰减波，波形由波头时间和波尾时间加以确定。由于波形的原点较为模糊，波峰附件较为平缓，因此波形的原点和波峰的位置不易确定，为此取幅值的 0.3 倍和 0.9 倍两点连成直线，这条直线与横坐标的交点定义为视在原点，这条直线的延长线与幅值的交点定义为波峰点，从视在原点到波峰点的时间定义为视在波头时间，从视在原点到幅值的一半所对应的点定义为视在波尾时间。IEC 规定：视在波头时间 $T_1=1.2\mu\text{s}$ ，容许偏差 $\pm 30\%$ ；视在波尾时间 $T_2=50\mu\text{s}$ ，容许偏差 $\pm 20\%$ ；通常表示为 $\pm 1.2/50\mu\text{s}$ 波， $\pm$ 符号表示波的极性。我国国家标准规定的波形参数与 IEC 相同。

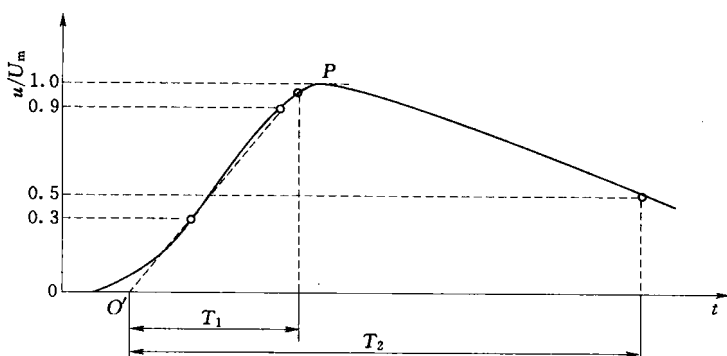


图 1-6 标准雷电冲击电压波形

2. 放电时延

雷电冲击电压是变化速度很快、作用时间很短的波，其有效作用时间是以微秒计的。实验表明：对空气间隙施加冲击电压，要使间隙击穿不仅需要足够幅值的电压，有引起电子崩并导致流注和主放电的有效电子，而且需要电压作用一定的时间让放电得以发展以至击穿。如图 1-7 所示，设对间隙施加冲击电压，当经过时间 t_1 后，电压升高到持续作用电压下的击穿电压 U_s （称为静态击穿电压）时，间隙并不立即击穿，而需要经过一定时间间隔 t_{lag} ，才能击穿。因这段时间中可能尚未出现有效电子，间隙中受到外界因素的作用出现自由电子需要一定时间，从 t_1 开始到间隙中出现第一个有效电子所需的时间 t_s 称为统计时延，这一电子的出现的所需时间是具有统计性的。从有效电子出现时刻起到产生电子崩、形成流注和发展到主放电，乃至间隙击穿完成所需的时间 t_f 称为放电形成时延，它同样具有统计性，所以冲击放电所需的全部时间为

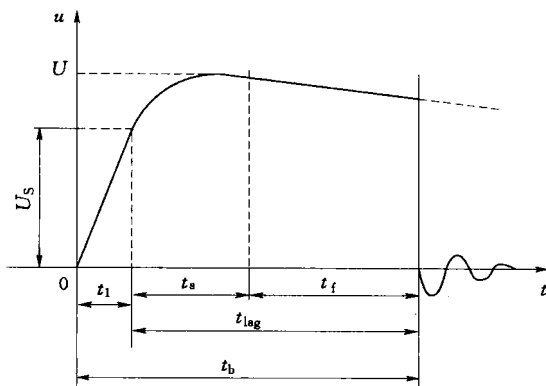


图 1-7 冲击放电时间的组成

$$t_b = t_1 + t_s + t_f \quad (1-6)$$

式中： $t_s + t_f$ 为放电时延，记为 t_{lag} ，它是统计时延和放电形成时延的总和。

研究表明：短间隙（几厘米内）中，特别是电场较均匀时，间隙中的电场到处都很强，放电发展速度快，放电形成时延短，此时 $t_s \gg t_f$ ，这种情况下 t_{lag} 主要决定于 t_s 。为了减小 t_s ，一方面可提高外施电压使气隙中出现有效电子的概率增加，另一方面可采用人工光源照射，使阴极释放出更多电子。如用较小的球隙侧冲击电压通常采取照射措施就是一例。在较长间隙中，电场不均匀，局部场强度高，出现有效电子的概率增加，统计时延短，放电时延往往主要决定于 t_f ，且电场越不均匀 t_f 越长。

3. 雷电 50% 冲击击穿电压 ($U_{50\%}$)

在持续电压作用下，当气体状态不变时，间隙距离一定，击穿电压就具有确定的数



值，当间隙上所加电压达到击穿电压时，间隙就被击穿。

在冲击电压作用下，保持冲击电压波形不变，逐渐提高冲击电压的幅值，在幅值很低时，虽然多次重复施加冲击电压，但间隙均不击穿；随着幅值增高，间隙有时击穿而有时不击穿，这是因为随着外加电压的升高，放电时延缩短；当电压幅值增加到某一定值时，由于放电时延有分散性，对于较短的放电时延，击穿已有可能发生，而较长的放电时延，击穿则不发生。也就是说，在多次施加同一电压值时，有时击穿，有时不击穿；随着电压幅值继续升高，间隙击穿的百分比越来越增大；最后，当电压超过某一值后，间隙百分之百击穿。

由于冲击电压作用下放电有分散性，所以很难准确得到一个使间隙击穿的最低电压值，因此工程上采用 50% 冲击击穿电压 ($U_{50\%}$) 来描述间隙的冲击击穿特性，即在多次施加同一电压时，用间隙击穿概率为 50% 的电压值来反映间隙的耐受冲击电压的特性。

采用 50% 冲击击穿电压决定绝缘距离时，应根据击穿电压分散性的大小，留有一定的裕度。在均匀电场和稍不均匀电场中，击穿电压分散性小，其 $U_{50\%}$ 和静态击穿电压 U_s 相差不大，因此冲击系数 β ($U_{50\%}$ 与 U_s 之比) 接近 1。而在极不均匀电场中，由于放电时延较长，其冲击系数 β 均大于 1，击穿电压分散性也大一些，其标准偏差可取 $\pm 3\%$ 。

实验表明：“棒—棒”和“棒—板”在间隙距离不很大时（几百厘米内）的冲击击穿特性有极性效应，气隙距离较大时同样存在极性效应，图 1-8 给出了“棒—棒”和“棒—板”长空气间隙的雷电 50% 冲击击穿电压和极间距离的关系，可以看出：“棒—板”气隙有明显的极性效应，“棒—棒”气隙也有极性效应。

4. 伏秒特性

由于雷电冲击电压持续时间短，间隙的击穿存在放电时延现象，所以仅靠 $U_{50\%}$ 冲击击穿电压来表征间隙击穿特性是不够的，还必须将击穿电压值与放电时间联系起来确定间隙的击穿特性，也就是伏秒特性，它是表征气隙击穿特性的另一种方法。

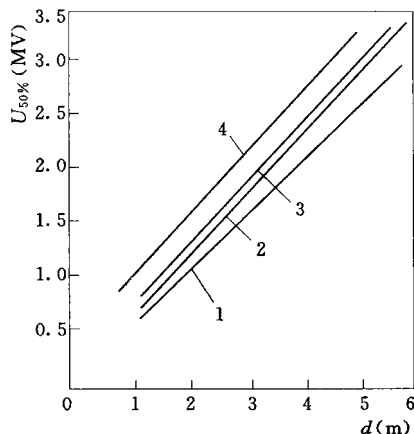


图 1-8 “棒—棒”和“棒—板”长空气间隙的雷电 50% 冲击击穿电压和极间距离的关系
1—正极性“棒—棒”；2—正极性“棒—板”；
3—负极性“棒—棒”；4—负极性“棒—板”

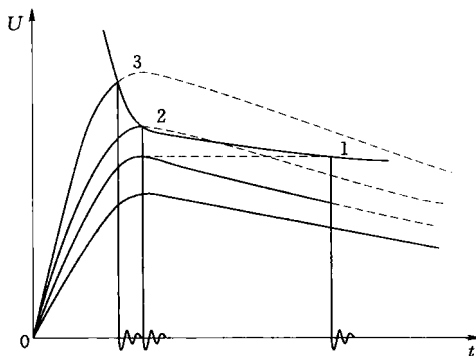


图 1-9 气隙伏秒特性曲线的绘制方法
(虚线表示原始冲击电压波形)