

谭琼 李景禄 李志强 等 编著

山区电网防雷技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

山区电网防雷技术

谭琼 李景禄 李志强 等 编著



内 容 提 要

本书从雷电的产生、放电形式、危害及防雷器件入手,以山区电网防雷研究成果为基础,对山区电网的雷电活动规律、现有防雷措施存在的问题进行详细分析和论述,重点研究讨论了山区电网防雷措施、方法和新技术。全书共分六章,第一章介绍了基本的防雷理论和防雷装置及其试验,后五章详细讨论了山区发电厂、变电所、输电线路、配电线路和用电设备的防雷措施。

本书可作为电力系统防雷工程技术人员和防雷公司工程技术人员的技术参考书,亦可作为高等学校电力工程专业和防雷工程专业本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

山区电网防雷技术 / 谭琼等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011. 11
ISBN 978-7-5084-9095-3

I. ①山… II. ①谭… III. ①山区—电网—防雷
IV. ①TM727②TM862

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第214719号

书 名	山区电网防雷技术
作 者	谭琼 李景禄 李志强 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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 13印张 308千字
版 次	2011年11月第1版 2011年11月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	49.00元

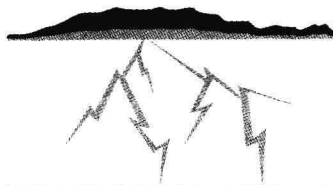
凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《山区电网防雷技术》编写人员名单

主 编 谭 琼 李景禄 李志强

参编人员	柳玉波	刘洋海	张 峰	刘晓林	唐 捷	高建勋
	梁 凯	梁永彪	刘文峰	陈 斌	邹剑翔	沈炳华
	李长庚	韦 超	戴耀文	林 冶	陆长青	李政洋
	唐 红	朱 稻	李俊岭	张春辉	田敏军	易秀成
	邱续东	熊世泽	杨廷方	贺科学	杨 鑫	唐茂林
	秦文韬	谢红生	郭保康	孙登敏	刘 玮	刘 源
	张 鑫	王伟平	周 峰	雷丰瑞	陈 智	甘 鹏
	徐 鹏	满超楠	郑 晖			



作者简介

一、谭琼

女, 1964 年 11 月生, 湖南省攸县人, 1990 年毕业于湖南大学电力系统及其自动化专业, 工学硕士, 现为南方电网市场营销部副主任, 教授级高级工程师。1990 年 4 月至 2005 年 3 月先后在韶关供电局历任继电保护专责、生技科副科长、副总工、副局长。2005 年 4 月至 2010 年 12 月任韶关供电局局长, 韶关市委市政府第四期、第五期、第六期专业技术拔尖人才, 兼任韶关电机工程学会, 长期担任《韶关供电技术》期刊主编, 与清华大学、华南理工大学电力学院等联合培养了多名工程硕士。有 20 多年的电力系统工作经验, 在电力系统中从事过继电保护、生产技术管理、安全管理、科研开发、规划建设及经营管理。对输、变、配电网生产运行技术, 尤其是山区电力系统防雷接地技术进行过多年的深入研究。与多家科研单位进行过合作, 完成了多项科研项目。组织人员成功抵御了 2006 年百年一遇的洪涝灾害和 2008 年韶关电网超 80 年一遇的冰冻灾害。主持的科研项目“带电设备无线成像监视器”, 于 2010 年 11 月获得国家知识产权局颁发的实用新型专利证书。“供电企业班站 5I 标准化管理 3D 系统”获广东电网公司 2010 年科技进步三等奖。“移动式高压试验室”获广东电网公司 2010 年技术改进贡献奖。“供电企业班站‘5I’标准化管理体系”、“流域水电站群优化调度系统”分别荣获 2008 年广东电网公司科技进步二、三等奖。“输电线路拉线防盗告警系统”、“基于交互式的电力安全操作可视模拟系统”、“供电企业规范化验收实用手册”荣获 2007 年广东电网公司科技进步三等奖。“基于虚拟仪器的谐波监测系统”项目获韶关市 2006 年度科技进步一等奖。“韶关电网在线预决策系统”荣获 2007 年广东省科技进步二等奖。结合管理实践, 出版了《供电企业规范化验收实用手册》(中国水利水电出版社, 2006)、《供电企业班站“5I”标准化管理体系内务现场管理规范与应用》(中国水利水电出版社, 2008)、《供电企业“5I”班站标准化管理》(中国电力出版社, 2010)、《非法用电民事责任追究工作指引》(中国民主法制出版社, 2010) 等著作, 在国内 10 多家杂志发表科技论文 20 余篇。

邮箱: sggdj01@163.com tanqiong@csg.cn

二、李景禄

男，1955年4月生，河南省确山县人，1982年毕业于华中科技大学高电压技术及设备专业，现为长沙理工大学教授、教授级高级工程师，长沙理工大学硕士生导师，长沙理工大学高电压技术研究所所长，长沙理工大学高电压与绝缘专业硕士点学术带头人，“全国电力系统高电压专业工作网”过电压专家工作组专家，湖南省电机工程学会高压专委会委员，“全国电力系统送电专业运行工作网”专家工作组专家，湖南省安全生产专家委员会专家，有20多年的电力系统工作经验，在电力系统中从事过多年现场生产管理、技术管理、安全管理、科研开发和公司经营管理。对高电压技术、现场试验检修、配电网技术、电力系统防雷接地技术进行过近30年的系统深入的研究。开发有ZXB系列自动跟踪消弧装置，JKSC配电网无功补偿装置、GPF—94系列高效膨润土降阻防腐剂、PKJ—10/35型配电网镀铜球型可调过电压保护装置、FLJ—110/220输电线路过电压保护器、FRC—1型输电线路侧向避雷针、JZ—1型智能绝缘子快速检测仪、SZ—10/35型特种防雷变压器、WYK—系列无人值班变电站音频监控装置等多项产品。对防雷接地工程、配电网工程及高压电气设备试验与状态诊断进行过长期的、系统的、深入的研究。与全国30多家防雷接地公司和科研单位有过合作，完成了多项防雷接地项目。从1985年起在全国范围完成了多项科研项目 and 工程项目，取得多项科研成果。著有《实用电力接地技术》（中国电力出版社，2002）、《接地装置运行与改造技术》（中国水利水电出版社，2005）、《实用配电网技术》（中国水利水电出版社，2006）、《电力系统电磁兼容技术》（中国电力出版社，2007）、《高电压技术》（中国水利水电出版社，2008）、《高压电气设备试验与状态诊断》（中国水利水电出版社，2008）、《现代防雷技术》（中国水利水电出版社，2009）、《电力系统安全技术》（中国水利水电出版社，2009）、《电力系统防污闪技术》（中国水利水电出版社，2010）、《电力系统状态检修技术》（中国水利水电出版社，2011），在国内外10多家杂志发表科技论文100余篇，其中核心期刊论文80余篇。2003年以来陆续获得了20多项国家专利。

邮箱：lijinglucslx@qq.com lijinglucslx@163.com lijinglucslx@126.com

电话：13787104968

前 言

山区电网由于受到雷电活动频繁以及受山区特殊地形、地势、气候和局部地理环境的影响，造成电网雷害事故频发，极大地影响了电网的安全稳定运行。雷电是小概率事件，具有较大的偶然性和突发性，给防雷措施的实施带来了较大的难度。然而，雷电活动具有一定的规律可循，比如雷云的形成和受季风、气流等大气运动的影响；雷云对地放电会受地形、地势、地质和局部小气候的影响等。因此，研究山区电网防雷电就是要找出山区雷电活动的规律，从而采取有效的防雷措施。

例如：广东省韶关地区山脉分布较广，且接近于沿海，雷电活动十分频繁、强烈，全年雷暴日近 80 天，因此多次发生输电线路、变电站雷击跳闸事故，给电网的安全及稳定运行带来巨大影响。为了解决韶关山区电网的防雷问题，自 2004 年起韶关供电局和长沙理工大学合作对该地区输电网、配电网、变电所和弱电系统展开了全方位、多层次的研究，且取得了一系列研究成果。该书以此为基础，同时根据长沙理工大学与福建省电力公司、浙江省丽水电业局、安徽池州电力公司、江西九江电力公司、河南省电力公司、湖南省电力公司等单位在电网防雷方面合作取得的科研成果编写而成。编写过程中参考了防雷的基本理论和近年来国内外在防雷技术研究成果和专著论文资料等。

全书由南方电网市场营销部副主任、教授级高工谭琼，长沙理工大学教授李景禄，南方电网韶关供电局副局长、高级工程师李志强主编。参加编写的有：韶关供电局生技部主任、高级工程师柳玉波；韶关供电局生技部高级工程师刘洋海，工程师张峰、刘晓林、唐捷、高建勋、梁凯、梁永彪、刘文峰、陈斌、邹剑翔、沈炳华、李长庚、韦超、戴耀文；长沙理工大学博士贺科学、杨鑫、杨廷方，硕士孙登敏、刘玮、刘源、张鑫、王伟平、周峰、雷丰瑞、陈智、甘鹏、徐鹏、满超楠、郑晖；福建省基建部主任、高级工程师林治；重庆亚东亚公司经理陆长青，总工程师唐红；湖南空管工程师朱稻；长沙信长电力科技有限公司李政洋、张春辉、田敏军；江苏连云港供电公司智源电力设计公司主任、高级工程师李俊岭；杭州易龙电气有限公司经理易

秀成；广州中光电子科技有限公司经理邱续东；河南省电力公司高级工程师熊世泽；湖南省电力公司高级工程师唐茂林；河南濮阳供电公司高级工程师秦文韬、谢红生，工程师郭保康等。

由于作者水平有限，再加上成书时间仓促，书中缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2011年6月

目 录

前言

第一章 雷电及防雷保护装置	1
第一节 雷云的产生和雷电放电过程	1
第二节 雷电放电的基本型式与特点	9
第三节 雷电的危害及防雷基本知识	12
第四节 防雷保护装置	14
第五节 防雷装置的试验	26
第二章 山区输电线路防雷	42
第一节 输电线路的雷电过电压	42
第二节 输电线路的耐雷水平及雷击跳闸率	48
第三节 山区输电线路杆塔接地	51
第四节 山区雷电活动规律及雷害事故特点	62
第五节 山区输电线路存在问题分析	67
第六节 山区输电线路的防雷措施	69
第三章 山区配电网防雷保护	85
第一节 配电所防雷保护	85
第二节 配电设备防雷保护	89
第三节 配电线路防雷保护	92
第四节 配电网存在的问题分析	94
第五节 配电网防雷保护措施	99
第六节 山区典型用户的防雷保护	110
第四章 山区变电所一次侧防雷与接地	119
第一节 山区变电所的直击雷保护	119
第二节 山区变电所的进线段保护	122
第三节 变压器的防雷保护	125
第四节 旋转电机的防雷保护	128
第五节 山区变电所的接地与降阻	131
第六节 雷害事故及防雷措施分析	150

第五章 山区变电站弱电系统防雷保护及地电位干扰	155
第一节 雷电侵入弱电系统的途径及危害	155
第二节 弱电系统的防雷器件及装置	162
第三节 山区变电站弱电系统的防雷保护措施	168
第四节 山区变电所地电位干扰的途径、耦合机理及危害分析	173
第五节 山区变电所地电位干扰防护措施	179
第六章 山区特殊场所电源系统防雷保护	183
第一节 山区特殊场所电源系统雷害事故调查与雷电侵入途径	183
第二节 山区特殊场所电源系统配电线路防雷措施	187
第三节 山区特殊场所采用双曲折防雷配电变压器	188
参考文献	198

第一章 雷电及防雷保护装置

雷电是气体放电现象。美国的科学家富兰克林在 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；俄国的科学家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。

本章在介绍了雷电的相关知识的基础上，分别对避雷针、避雷线、放电间隙、金属氧化物避雷器等防雷保护装置的原理、特点及其使用范围，作了详细介绍。

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，关于雷云的聚集和带电至今还没有令人满意的解释，目前比较普遍的看法是：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快，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，而带负电的水成物在云的下部。整块雷云里边可以有若干个电荷中心。负电荷中心，离地约 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点与雷云之间进行的，只有少数是对地进行的。在防雷工程中，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 $(1\sim8)\times 10^5$ m/s，这种放电称为先导放电，如图 1-2 所示。当先导接近地面时，地面



图 1-1 雷云对地放电

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”，其速度为 $2 \times 10^7 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。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。图 1-2 所示为用旋转相机和高压示波器拍摄和记录的雷电放电的发展过程和电流波形。

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进程，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为中和先导通道中电荷提供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，而不可能有大的冲击电流的特性，而延续时间则较长，可能长达 10^{-1} s 。此外，上行先导从一开始就出现分支的概率较大。

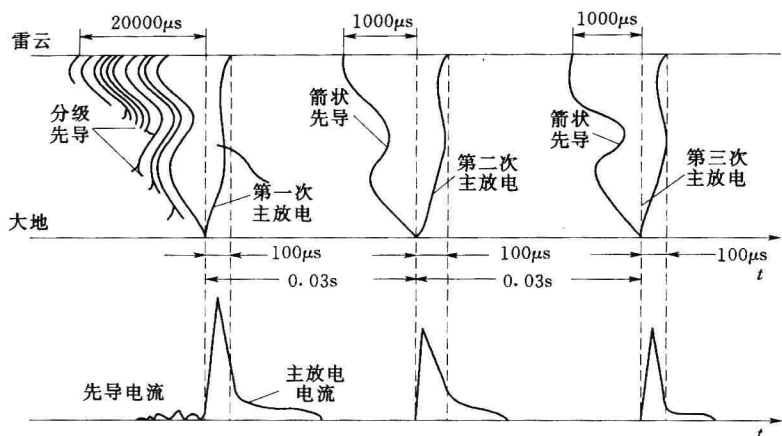


图 1-2 雷电放电的发展过程和电流的波形

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。图中 Z 是被击物与大地（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 ($i=\sigma v$)。

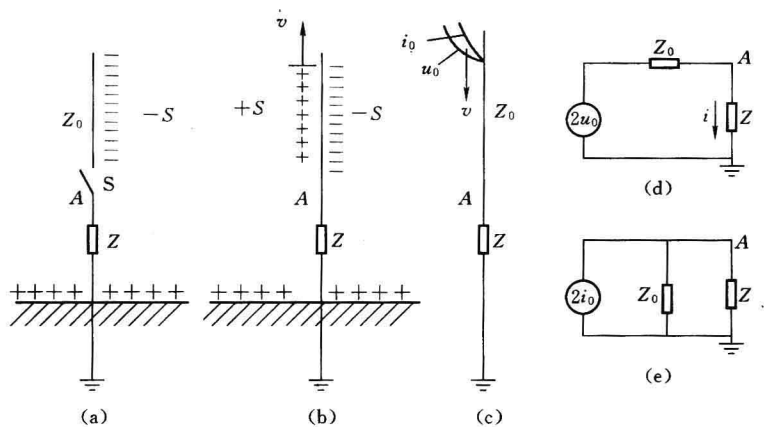


图 1-3 雷电放电模型和等值电路

(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

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 (DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》建议取 $300\sim400\Omega$)。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接着一个阻抗，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（图 1-4）和多通道放电（图 1-5），先导放电是不规则的树枝状（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。

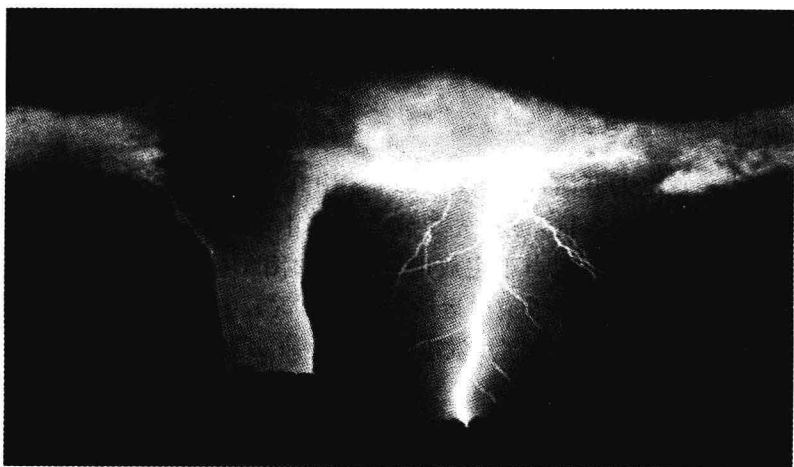


图 1-4 单通道雷电放电

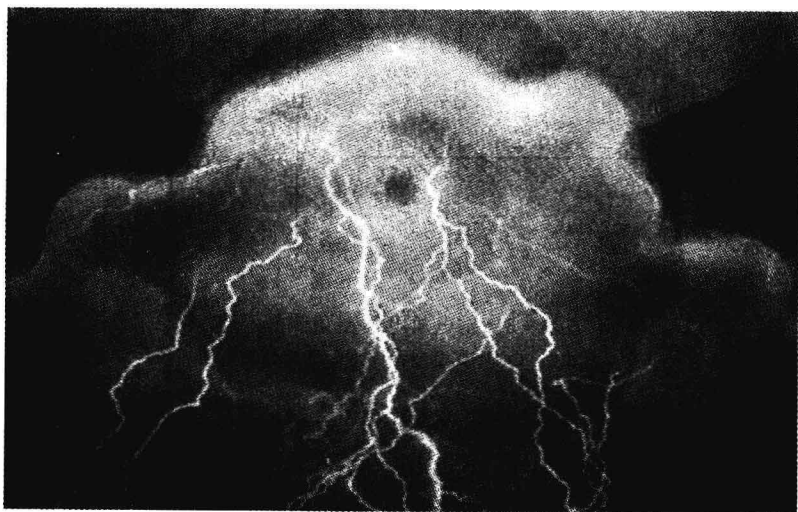


图 1-5 多通道雷电放电



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、雷电参数

1. 雷电流幅值

雷电流是单极性的脉冲波。对一般地区,DL/T 620—1997 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 ——雷电流幅值, kA;

P ——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%。式(1-1)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),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 $2 \sim 2.5 \mu\text{s}$ 。DL/T 620—1997 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

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

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,DL/T 620—1997 规定雷电流的波头时间采用 $2.6 \mu\text{s}$ 。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

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

式中 I ——雷电流幅值, kA;

ω ——角频率, rad/s。

对半余弦波头,其最大陡度出现在 $t = \tau_f/2$ 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。

3. 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(但台湾省只有 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, 西北雷暴日为 20 以下。西藏沿雅鲁藏布江一带雷暴日为 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。

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

DL/T 620—1997 建议采用雷暴日作为计算单位。

4. 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雷云—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 DL/T 620—1997 规定, 对雷暴日 $T=40$ 的地区, $\gamma=0.07$ 次/(km²·雷暴日)。

输电线路的存在, 改变了雷云—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

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

式中 b ——两根避雷线之间的距离, m。

四、雷电冲击电压作用下气体的击穿

由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, 波峰附近较为平缓, 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。

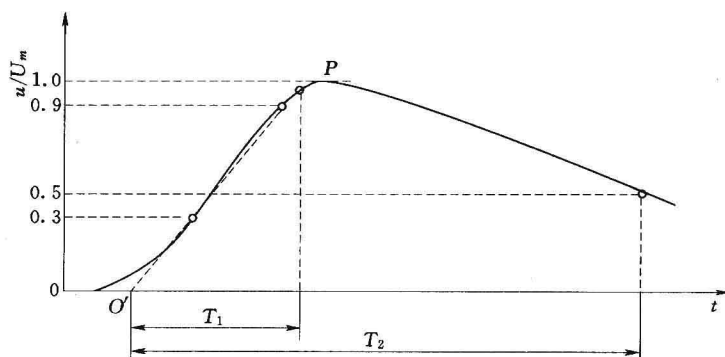


图 1-6 标准雷电冲击电压波形

U_m —雷电冲击电压的幅值； t —放电时间

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，其有效作用时间以微秒计。冲击放电时间的组成见图 1-7。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致击穿。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_i （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。这时间隙中可能尚未出现有效电子，因受到外界因素的作用间隙中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

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

式中 $t_s + t_f$ ——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。如用较小的球隙测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。

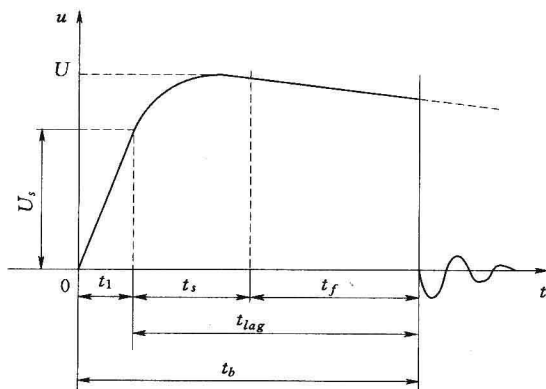


图 1-7 冲击放电时间的组成