



“十三五”普通高等教育本科规划教材
高电压与绝缘技术系列教材



Lightning Protection of Microelectronic Equipment

微电子设备防雷

周文俊 李 涵 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材
高电压与绝缘技术系列教材

微电子设备防雷

编著 周文俊 李 涵
主审 杨迎建



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书对微电子设备防雷技术分8章进行了论述。第1章介绍雷电及其参数；第2章介绍微电子设备雷害机理及侵入途径；第3章介绍了微电子设备防雷常用保护元件；第4章为微电子设备保护电路分析与设计；第5章介绍了电子元件抗电涌冲击能力试验；第6章介绍了现代建筑物的雷电综合防护；第7章为电子设备系统的雷害风险评估；第8章列举了微电子设备防雷工程应用实例。

本书可作为电气类专业的本科生和研究生教材，也可作为防雷、电信、电气、建筑、电子信息等领域从事电子设备的防雷设计与施工的科研、设计和工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

微电子设备防雷/周文俊, 李涵编著. —北京: 中国电力出版社, 2016. 11

“十三五”普通高等教育本科规划教材 高电压与绝缘技术系列教材

ISBN 978-7-5123-9578-7

I. ①微… II. ①周… ②李… III. ①微电子技术—电子设备—防雷—高等学校—教材 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 167679 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016年11月第一版 2016年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.25印张 224千字

定价 25.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

随着网络普及和信息时代的到来,微电子设备得以广泛应用。微电子设备对电磁干扰敏感,自身绝缘水平低,耐受电冲击能力弱。一旦微电子设备附近遭受雷击,雷电过电压、过电流及电磁脉冲可通过供电线路、通信线路、天线、金属管道、空间辐射等途径侵入电子设备内,威胁微电子设备的安全。轻则引起微电子设备失灵、误码,重则导致微电子设备损坏,更严重时还可能造成人员伤亡。统计数据表明,在电力系统、电信系统、网络、闭路电视系统、工矿企业、学校、民房建筑等环境中,全世界每年因雷击造成的电子设备损失总额超过 30 亿美元,因此急需推广微电子设备的雷电防护技术。

作者所在的教研室从事防雷接地 50 余年,前辈们开创出了良好的防雷接地平台,进行了大量的试验研究,解决了众多防雷工程问题,积累了丰富的理论知识。通过本科研发团队对于微电子设备防雷技术 20 多年的研究及对国内外防雷接地研究的解读,得出弱电设备防雷的基本要求和方法。本书是集作者多年教学、赴国内外进行讲座、现场实践经验以及试验和理论研究于一体的精华所在。

本书从理论和实践的角度对微电子设备防雷技术做了较完整的论述。书中提供了作者科研发团队试验和理论研究获得的电子器件和微电子设备过电压耐受能力数据,提出了微电子设备防雷具体的参数要求,既可为避免追求过高的技术指标而导致经济上的浪费提供参考依据,又可作为雷害事故的分析的参考数据。本书是对作者 20 多年来从事防雷接地试验与理论研究和完成数百个弱电设备防雷工程实践的总结。

本书共 8 章,第 1 章介绍了雷电及其参数;第 2 章讨论了雷电对微电子设备的危害机理,分析了雷电侵入电子设备的途径,以及空间电磁场的耦合方式;第 3 章给出了常用防雷保护元件及电涌保护器设计的基本要求;第 4 章论述了电源和信号线路的防雷保护电路设计方法;第 5 章讲述了电子器件和微电子设备的过电压、过电流冲击试验方法,及其耐电涌冲击的特性;第 6、第 7 章分别介绍了建筑物及内部电子信息的综合雷电防护和雷害风险评估方法;第 8 章列举了典型的微电子设备雷电防护工程实例。考虑到接地是防雷的基本要求,不少书已对接地做了详细的介绍,本书未对接地进行专门的论述。本书介绍的电涌保护器的典型设计电路以及相应的参数要求,可方便有关人员从事保护器的设计。最后给出的工程实例,对微电子设备和弱电系统的雷电防护方案设计和施工提供参考。

随着通信技术和网络的高速发展,为达到信号高传输率和低功耗的效果,微电子产品集成度不断提高,工作电平不断降低,但其耐受电冲击能力下降,更加凸显了过电压防护的重要性。所以本书介绍的内容可作为过电压防护基本方法的参考。

不少于 10 位研究生对本书中所列的试验与现场实施做了大量工作,喻剑辉教授参与了本书大量试验并多次修改书稿,南京信息大学防雷专业肖稳安副教授多次鼓励出版该书,国网电力科学研究院教授级高工杨迎建亲自审阅本书并提了很多宝贵意见。在此对那些支持帮

助和鼓励我们的前辈、领导和同行，以及对本书编写、定稿和出版有过帮助的同仁们一并致谢。

由于时间仓促，水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者不吝批评指正。

编者

2015年12月于珞珈山

目 录

前言

| | |
|-----------------------------------|----|
| 第 1 章 雷电及其参数 | 1 |
| 1.1 雷云的产生和雷电放电过程 | 1 |
| 1.2 雷电放电的基本形式与特点 | 9 |
| 1.3 现代防雷技术..... | 11 |
| 第 2 章 微电子设备雷害机理及侵入途径 | 13 |
| 2.1 雷电对微电子设备的危害机理..... | 14 |
| 2.2 防雷区的划分..... | 18 |
| 2.3 直击雷对微电子设备的危害机理..... | 19 |
| 2.4 侵入波对微电子设备的危害..... | 21 |
| 2.5 雷电感应对微电子设备的危害..... | 23 |
| 2.6 雷电电磁脉冲辐射对微电子设备的危害..... | 24 |
| 第 3 章 微电子设备防雷常用保护元件 | 26 |
| 3.1 放电管..... | 26 |
| 3.2 瞬态电压抑制二极管 (TVS) | 29 |
| 3.3 氧化物压敏电阻..... | 32 |
| 3.4 低通滤波器..... | 36 |
| 3.5 电涌保护器 (SPD) | 38 |
| 第 4 章 微电子设备保护电路分析与设计 | 42 |
| 4.1 电源系统的保护..... | 42 |
| 4.2 信号线路的保护..... | 47 |
| 4.3 减小寄生电感..... | 52 |
| 第 5 章 电子元件抗电涌冲击能力试验 | 63 |
| 5.1 电涌抗扰度试验要求..... | 63 |
| 5.2 计算机电源抗扰度试验..... | 64 |
| 5.3 常用通信接口芯片过电压耐受能力试验..... | 68 |
| 第 6 章 现代建筑物的雷电综合防护 | 76 |
| 6.1 侵入波的防护..... | 76 |
| 6.2 感应雷的防护..... | 80 |
| 6.3 等电位连接与接地系统设计..... | 81 |
| 6.4 屏蔽及布线设计..... | 88 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第 7 章 电子设备系统的雷害风险评估 | 92 |
| 7.1 雷害风险评估计算的意义 | 92 |
| 7.2 雷电防护等级的确定原则 | 92 |
| 7.3 电子设备系统雷电防护等级的风险评估方法 | 93 |
| 7.4 电子设备系统雷害风险评估实例 | 96 |
| 第 8 章 微电子设备防雷工程应用实例 | 100 |
| 8.1 变电站与发电厂内微机控制设备的防雷保护 | 100 |
| 8.2 微波通信站的防雷保护 | 104 |
| 8.3 计算机网络系统的防雷保护 | 106 |
| 8.4 石化系统信息设备的防雷保护 | 115 |
| 附录 A 全国主要城市雷暴日数 | 128 |
| 附录 B 名词解释 | 131 |
| 参考文献 | 140 |

第1章 雷电及其参数

1.1 雷云的产生和雷电放电过程

1.1.1 雷电的发生机理

雷电是雷云和雷云之间或雷云对大地放电的结果。整块雷云里包含若干个电荷中心，雷云下部多带负电荷，其中最主要的负电荷中心离地高度约 500~1000m，并在地面上感应出等量正电荷。

随着雷云的运动和发展，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，就会发生雷云间或雷云对大地的放电。雷电放电主要包括三种形式，雷云对大地放电（简称地闪）；雷云对雷云和雷云内部的放电（简称云闪）。统计数据表明，约 90% 雷云放电都是在雷云与雷云之间进行的，只有 10% 为对地放电。雷云中带负电荷区域对地形成的放电过程称为负雷闪（约占地闪的 80%），而正电荷区域对地放电所占的比例很小（约 20%），其发展过程基本相似，地面设备的防雷主要关注的是雷云对大地的放电过程。

雷云对大地放电通常分为先导放电、主放电和余光放电三个阶段（如图 1-1）。云地之间的线状雷电在开始时往往是从雷云边缘向地面以逐级推进的方式向下发展。每级长度约为 10~200m，每级的发展速度约为 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 $10^5 \sim 8 \times 10^5$ m/s，这种放电称为先导放电。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，伴随着雷鸣和闪光，产生极大的电流（可达数十到数百千安），这就是雷电的主放电阶段。主放电的过程极短，通常只有 50~100 μ s，它是沿着负的下行先导通道，由下而上逆向发展，故又称为“回击”，其速度可高达 $0.2 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8$ m/s。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注入大地，此时能肉眼看到一片模糊的发光，这就是余光放电。由于雷云中的电阻较大，余

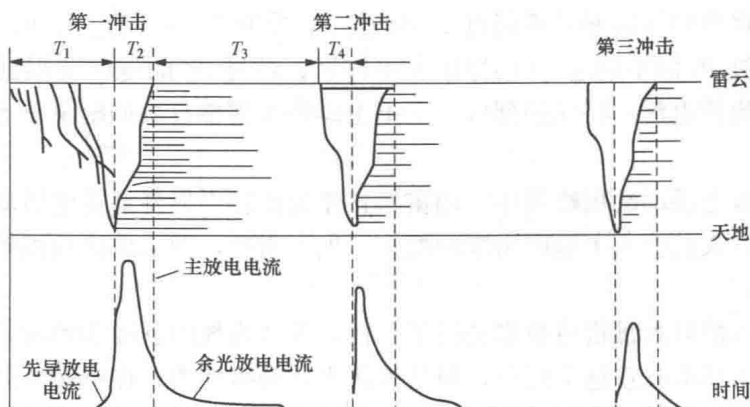


图 1-1 雷云放电过程和电流图解

光放电阶段对应的电流不大,但持续时间较长。

大多数雷云对地雷击放电是多重的,即在第一次雷击形成的放电通道中,会尾随多次放电,放电之间的间隔为 $0.5\sim 500\text{ms}$ 。形成多次放电的主要原因是雷云带电的过程中,在云中可形成若干个密度较高的电荷中心。产生第一次先导主放电泄放的主要是第一个电荷中心的电荷,在第一次放电完成后,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继续对地放电,从而形成多重回击放电。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。回击放电的次数平均为 $2\sim 3$ 次,最多观测到42次。通常第一次冲击放电的电流最大,以后各次的电流幅值都比较小。

若雷云下的地面上存在突出的且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,发展为向上的先导,此称为上行雷。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的电荷,而需要的主放电电流,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,从分散的水性质云中卸下电荷,汇集起来,以中和上行先导中的部分电荷。这样电流放电过程只能较缓和,而不可能有大冲击电流的特性,其放电电流一般不足 1kA ,而延续时间则较长,可能长达 0.1s 。

1.1.2 雷电参数

雷电参数是反映雷电活动规律的重要指标。IEC 61312-1:1995提出的雷电参数有雷暴日、地闪密度、雷电流幅值概率分布、雷电流陡度概率分布、雷击电荷概率分布、单位能量概率分布。

雷电特性通常采用下述参数来描述。

1. 雷暴日指数(T_d)及雷暴小时数(T_h)

20世纪初,观测手段和观测设备有限,国际上通常采用年雷暴日分布来表示区域的雷电活动频繁程度。雷暴日指数(也叫作年雷电日数)指的是每年气象观测站听到雷声的日数,用 T_d 表示。传统意义上,一天内只要气象观测站能听到雷声(不论外界噪声的干扰造成听雷的困难及该日雷电发生的次数和持续时间)即称为一个雷暴日,通常只能记录距离观测站 $15\sim 30\text{km}$ 的范围内闪电源。

在 1h 内听到一次及以上雷声就算一个雷暴小时,一年内雷暴小时的总数叫作雷暴小时数(T_h)。据统计,一个雷暴日约折合3个雷暴小时。雷电活动的频繁度与地球纬度及气象条件有关。我国将平均年雷暴日不超过15的地区定为少雷区;超过15但不超过40的地区定为中雷区;超过40但不超过90的地区为多雷区;超过90的地区要根据运行经验,雷害特别严重的地区为雷电活动特殊强烈区。全国主要城市雷暴日数如附录A所示。

2. 地闪密度

雷暴日是对雷电活动的粗略描述,用雷暴日作为比较世界各地雷电活动的参照具有一定的局限性。由此,人们引入了地闪密度的概念。地闪密度,即为单位面积单位时间内发生闪电的数值。

国际上,戈尔德对大量雷电数据进行了分析,他认为地闪密度和年雷暴日之间存在线性关系^[1]。布鲁克斯基本同意这个观点,但是他认为这种线性关系在应用到温带和热带气候区时,热带气候区的比例因子应该小一些^[2]。然而,随着闪电计数器的应用,穆勒·希勒布兰德对这种比例因子和线性关系提出了质疑^[3]。在20世纪70年代,科学家们开始采用高频、

甚高频、低频技术的天线定位系统测量闪电位置，这些科学家包括西野、水眼和学监等。薪岛和衡山对日本的雷电定位数据（1992~1995年）进行了分析，他们发现雷击次数与雷暴日关系随季节的变化而变化，难以用简单的公式来表达。众多研究工作者通过大量的研究都提出了雷暴日和地闪密度的关系，地闪密度和年雷暴日之间的经验关系式如表1-1所示。其中，皮尔斯提出的关系式为

$$N_m = (aT_m + a^2 T_m^4)^{\frac{1}{2}} \quad (1-1)$$

式中， $a=3 \times 10^{-2}$ 。

而麦克斯威尔提出关系式

$$N_m = 0.06 T_m^{15} \quad (1-2)$$

式中， m 均表示月份。

布泽特和普赖斯在内华达实验研究支持这些关系式。赛诺斯和皮尔斯对雷暴日和地闪密度之间的对应关系提供了普遍指导。

表1-1 地闪密度和年雷暴日之间的经验关系式

| 地区 | 地闪密度 (次/km ² ·a) | 参考文献 |
|------------|---|-------------------|
| 印度 | 0.1T | 艾娅 (1968) |
| 罗得西亚 | 0.14T | 安德森和詹纳 (1954) |
| 瑞典 | 0.004T ² | 穆勒·希勒布兰德 (1964) |
| 美国 (北部) | 0.11T | 角拉和姆齐 (1951) |
| 美国 (南部) | 0.17T | 角拉和姆齐 (1951) |
| 美国 | 0.1T | 安德森 (1968) |
| 美国 | 0.15T | 布朗·怀特海 (1969) |
| 苏联 | 0.036T ^{1.3} , 0.1T ^{1.3} | 克鲁克鲁夫和帕夫洛娃 (1972) |
| 全球 (温带气候)* | 0.19T | 布鲁克斯 (1950) |
| 全球 (温带气候)* | 0.15T | 戈尔德 (1966) |
| 全球 (热带气候)* | 0.13T | 布鲁克斯 (1950) |
| 全球* | 0.25T | 皮尔斯 (1966) |

注 *表示总地闪密度； T 为年雷暴日。

在20世纪60年代，刘继等人对我国35~220kV共9400km·a架空线路雷害事故进行了统计，得出地闪密度和雷暴日之间的关系式为 $N_g = 0.023 T_d^{1.3}$ [次/(km²·a)]^[4]，该公式一直沿用至今。近些年，雷电定位系统建立起来，陈家宏^[5] (2006)等提出了网格统计法统计雷暴日，并将此与传统人工观测的雷暴日做了对比分析；童杭伟^[6]等 (2006)分析了传统人工观测雷暴日的缺点，并提出地闪密度更能科学地反映雷电的活动情况的观点；白云庆^[7]等 (2007)对重庆地区2003~2005年雷电定位系统观测数据进行了统计，得到重庆地区雷暴日为50~60天；李家启^[8]等 (2009)对重庆地区2006~2008年闪电定位监测资料进行了统计分析，得到跨座式单轨交通2号线的雷暴日参数；吴高林等^[9]通过地闪密度计算，对重庆雷区进行了划分。

3. 雷电流幅值与分布

雷电流幅值是指主放电时冲击电流的最大值，也是一个重要的雷电活动参数。其测量通

常采用磁钢棒法、磁带法、人工引雷法和雷电定位法等^[10~15]。帕克尔斯(1897年)提出了雷电流磁钢棒测量方法,随后磁钢棒便成为测量雷电流幅值的主要工具。那琳达(1925年)首先记录了输电线路的雷电过电压,他采用的是高速阴极射线示波器,根据示波器或者雷电流特性记录仪的电流读数,可以获得单个闪击的雷电流幅值。纽曼特(1967年)采用的是火箭拖导线的方法,完成了人类历史上的首次引雷。凯瑞德(1980年)采用了磁定向雷闪定位系统^[14];之后,卡斯帕等(1991年)又采用了工作在低频段的时差法的定位系统^[15]。经过20多年的发展,两个系统合二为一,形成了地闪定位网,为探测闪电参数提供了有效的手段和途径^[16]。20世纪70年代以来,卫星雷电探测系统和雷电定位系统(LLS)快速发展,并广泛应用。雷电观测的研究对象向着跨区域、大范围的雷电活动发展。美国、日本、巴西、南非等国家都相继开展了雷电定位系统的建设和研究^[17~22]。1993年,我国第一套雷电定位系统在安徽电网投入工程应用。目前,中国电网已建立29个省域LLS,截至2006年,国家电网已建成覆盖20多个省域的雷电监测网。同时,气象部门也建立了覆盖全国的雷电监测网。LLS测量可以得到地闪发生的时间、位置、雷电流幅值、极性数据,这些数据为电力系统的雷电参数研究和雷电活动规律研究提供了基础资料。

雷电流幅值概率分布表征着雷电活动的频度,在国内外防雷界受到极大的重视^[23~25]。但是,国内外使用雷电流幅值概率分布的模式并不同。国际上,伯兰斯凯(1972年)对欧洲、澳洲和美国采用磁钢棒法对观测结果(共624组数据)进行了分析,发现大于2kA的电流概率分布模式采用正态分布最为理想。当时,该观点得到了伯杰(1975年)等人的广泛认可。此后,研究者根据对不同地区的电流观测分析,提出了不同的中值电流、对数标准偏差,其中埃里克松和安德森(1980年)的观测结果被广泛采用。安德森对伯杰等人获得的已进行过校正的负极性回击实测数据(80个),首次给出了雷击电流大于某一电流 I_p 的累积概率近似公式

$$P_c(> I_p) = 1/[1 + \left(\frac{I_p}{31}\right)^2] \quad (1-3)$$

式(1-3)中, I_p 为雷电流幅值,且 $I_p \in (2\text{kA}, 200\text{kA})$,为雷电流幅值大于 I_p 的累积概率。负极性后续雷击电流的中值为12.3kA,其对数值的标准差为0.5296,大于某一电流幅值 I_p 的累积概率近似可由以下公式得到

$$P_c(> I_p) = 1/[1 + \left(\frac{I_p}{12}\right)^{2.7}] \quad (1-4)$$

式(1-3)和式(1-4)被IEEE工作组和CIGRE所推荐。2005年,IEEE工作组于对全球雷电参数研究进行了回顾和总结,安德森^[26]提出的雷电流幅值概率分布的近似对数正态分布模式仍被推荐使用。为了监测雷电流参数,日本在1994—1997年,在60个运行的双回路输电线路(1000kV降压至500kV)杆塔顶安装了2.15m长的引雷针,由此,他们研究出了自己的雷电流幅值分布模式特征^[27]。

国内主要采用规程法对雷电流幅值概率分布进行计算^[28],采用的是对数模式。近30多年,我国对雷电流幅值分布模式进行过3次修改,具体内容见表1-2。目前,我国使用的是电力行业规程GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》中推荐的模式 $\lg P_i = -I/88$ 。这是孙萍^[29](2000年)对浙江省西部220kV新安江—杭州输电线路I回路用磁钢棒实测到的27年的全部雷击数据(716组、负极性闪电)进行数据统计分

析获得的雷电流幅值累积概率分布的对数模式。

表 1-2 我国雷电流幅值累积概率分布历次修订汇总

| 修订年份 | 雷电流幅值累积概率分布 | 依据 |
|------|--------------------|--|
| 1959 | $\lg P_1 = -I/60$ | 沿用俄国（前苏联）公式 |
| 1979 | $\lg P_1 = -I/108$ | 基于我国各地 1205 个磁钢棒记录数据 |
| 1997 | $\lg P_1 = -I/88$ | 新杭线 20 多年实测结果。采用 97 个雷击塔顶负极性雷电流幅值数据回归的概率 |

注 表 1-2 中, I 为雷电流幅值, kA。

4. 雷电能量

雷电流向负载设备施加的能量可分为两种典型情况：①向负载电阻传送能量；②向恒压负载传送能量。前者可表示电子设备负载，后者可表示保护元件（如压敏电阻等）。

(1) 对负载电阻传送的能量。为了简化分析，可考虑如图 1-2 所示的简单等值电路。

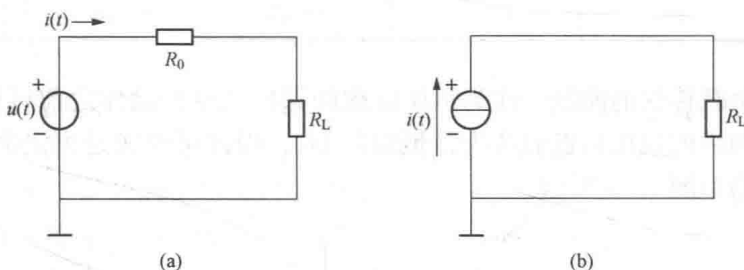


图 1-2 含负载电阻的简单等值电路

(a) 等值雷电脉冲电压波作用于负载；(b) 雷电流波作用于负载

对于图 1-2 (a) 所示等值雷电脉冲电压波作用于负载的情形，负载电阻 R_L 吸收的能量可表示为

$$W = \int_0^{\infty} i^2(t) R_L dt = \frac{R_L}{(R_0 + R_L)} \int_0^{\infty} u^2(t) dt \quad (1-5)$$

当负载电阻满足 $R_L = R_0$ 时，它可以获得最大能量，其值为

$$W_{\max} = \frac{1}{4R_0} \int_0^{\infty} u^2(t) dt \quad (1-6)$$

表 1-3 给出了相应的雷电脉冲最大能量值。

对图 1-2 (b) 所示雷电流波作用于负载的情形，负载吸收的能量为

$$W = R_L \int_0^{\infty} i^2(t) dt \quad (1-7)$$

表 1-3 常用等值雷电脉冲电压波下能量值

| 波形参数 (μs) | 幅值 (kV) | 波阻抗 R_0 (Ω) | 能量 W (J) |
|------------------------|---------|------------------------|------------|
| 1.2/50 | 1 | 10 | 0.9 |
| 1.2/50 | 6 | 10 | 32.4 |
| 0.5~100kHz | 1 | 10 | 0.0625 |

续表

| 波形参数 (μs) | 幅值 (kV) | 波阻抗 R_0 (Ω) | 能量 W (J) |
|------------------------|---------|------------------------|------------|
| 0.5~100kHz | 6 | 10 | 2.25 |
| 10/1000 | 0.6 | 10 | 6.5 |
| 10/1000 | 1 | 10 | 18 |

单位负载电阻吸收的能量常简称为单位能量，表 1-4 给出了三种常用雷电流波形下的单位能量值。

表 1-4 常用雷电流波形下的单位能量值

| 波形参数 (μs) | 幅值 (kV) | (J/ Ω) | 波形参数 (μs) | 幅值 (kV) | (J/ Ω) |
|------------------------|---------|----------------|------------------------|---------|----------------|
| 8/20 | 0.5 | 3.7 | 0.25/100 | 50 | 180 422 |
| 8/20 | 3 | 134 | 10/350 | 100 | 2 532 601 |
| 0.25/100 | 25 | 45 106 | 10/350 | 200 | 10 130 407 |

(2) 对恒压负载传送的能量。作为恒压负载的保护元件在动作之前可近似认为是开路，而动作之后，其两端的残压可近似认为是恒定值 U_L ，因此可看成是恒定电压源。含恒压负载的简单等值电路如图 1-3 所示。

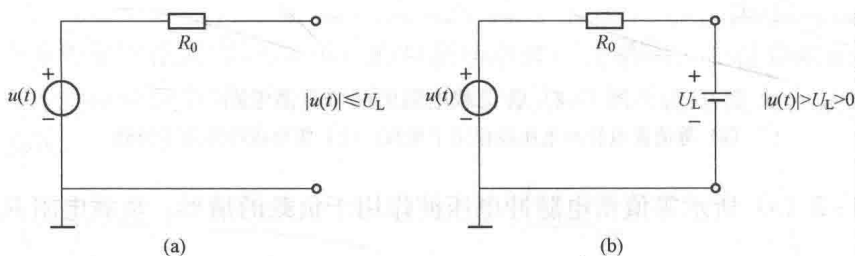


图 1-3 含恒压负载的简单等值电路

(a) 恒压负载动作前等效电路；(b) 恒压负载动作后等效电路

动作后的恒压负载从过电压源吸收的能量可表示为

$$W = \int P(t) dt \quad (1-8)$$

$P(t)$ 为恒压负载吸收的瞬时功率，其表达式为

$$P(t) = \begin{cases} 0 & |u(t)| < U_L \\ U_L [u(t) - U_L] R_0 & u(t) > U_L > 0 \\ U_L [-u(t) - U_L] R_0 & u(t) < -U_L < 0 \end{cases} \quad (1-9)$$

由雷电流源向恒压负载传递的能量可表示为

$$W = U_L \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (1-10)$$

如表 1-5 所示为恒压负载下几种常用雷电流和雷电过电压源吸收的能量。

表 1-5 恒压负载下常用雷电流和雷电过电压源吸收的能量

| 波形参数 (μs) | 幅值 (kV) | 波阻抗 R_0 (Ω) | 能量 W (J) | 波形参数 (μs) | 幅值 (kV) | 波阻抗 R_0 (Ω) | 能量 W (J) |
|------------------------|---------|------------------------|------------|------------------------|---------|------------------------|------------|
| 1.2/50 | 1 | 10 | 1.8 | 10/1000 | 1 | 10 | 11 |
| 0.5~100kHz | 1 | 12 | 0.025 | 8/20 | 1 | — | 4.4 |
| 0.5~100kHz | 6 | 12 | 0.98 | 8/20 | 6 | — | 2.6 |
| 10/1000 | 0.6 | 10 | 0.7 | 10/350 | 0.6 | — | 25 000 |

5. 雷电波频谱分析

对雷电流和雷电过电压波形的时域表达式进行傅里叶变换, 可以获得它的频谱密度函数。设雷电流或雷电过电压波形的时域用 $g(t)$ 表示, 运用傅里叶变换, 其频谱密度函数可表示为

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j\omega t} dt \tag{1-11}$$

由于 $t < 0$ 时, $g(t) = 0$, 式 (1-11) 的积分可简化为

$$G(\omega) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-j\omega t} dt \tag{1-12}$$

按式 (1-12) 对前面所介绍的几种常用雷电流和雷电过电压波形进行变换, 可得各自相应的频谱密度函数。如图 1-4 所示为闪电放电辐射频谱。

闪电放电辐射出很宽频的电磁脉冲, 频率范围从极低频到超高频 (VLF~UHF), 其中以 VLF/LF (极低频/低频) 辐射为最强。如图 1-5 所示为闪电放电过程中辐射能量的频段分布。

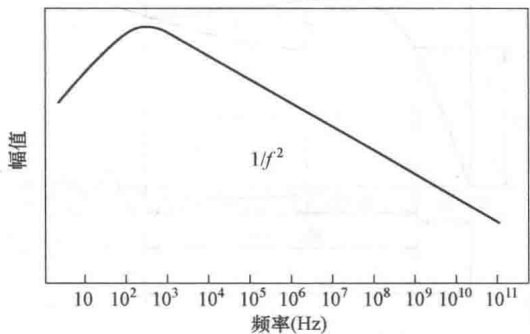


图 1-4 闪电放电辐射频谱

预击穿、梯级先导、云闪等过程的辐射能量主要集中在 1MHz 以上的高频段, 与回击过程的辐射相比, 这些过程在高频、超高频段辐射较强。

低频闪电电磁脉冲辐射主要由地闪产生, 云闪产生的电磁脉冲辐射主要分布在 VHF 频段, 从图 1-5 中 (在 1s 内), 可以很明显地看到 VHF 频段具有丰富的闪电信息, 也说明了闪电 VHF 频段辐射的频数远远高于 LF 频段辐射的频数。

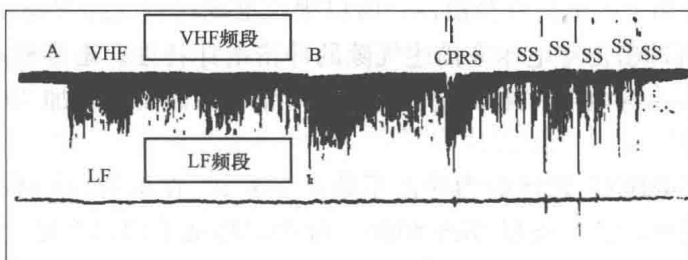


图 1-5 闪电放电过程中辐射能量的频段分布

1.1.3 冲击电压下气体的击穿特性

1. 雷电冲击电压标准波形

按照国际电工委员会 (IEC) 规定雷电冲击电压的标准波形 (见图 1-1), 雷电冲击电压是非周期性指数衰减波, 波形由波前时间和半峰值时间确定。由于该波头的原点部分较为模糊, 波峰后面较为平缓, 因此波形的原点部分和波峰位置较难确定, 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前时间, 从视在原点到幅值的一半所对应的点定义为视在半峰值时间。GB/T 17626.5—2008《电磁兼容试验和测量技术浪涌 (冲击) 抗扰度试验》规定视在波前时间为 $T_1=1.2\mu\text{s}$, 容许偏差; 视在半峰值时间为 $T_2=50\mu\text{s}$, 容许有一定偏差。我国国家标准规定的波形参数与 IEC 相同。

2. 放电时延

由于雷电冲击电压的持续时间极短 (几到几十微秒), 可与气隙击穿所需要的时间相比较。气隙的击穿特性与作用时间有关, 因为对空气间隙施加冲击电压时, 要使气隙击穿需要两个条件: ①足够幅值的电压, 以产生可以引起电子崩并导致流注和主放电的有效电子; ②电压作用一定的时间让放电得以发展至击穿。

如图 1-6 所示为气隙在冲击电压作用下的放电时延特性。

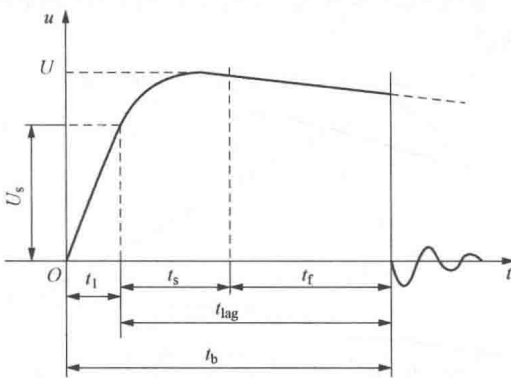


图 1-6 气隙在冲击电压作用下的放电时延特性

如图 1-6 所示, 气隙冲击放电整个放电时间 t_b 由三部分组成, 即

$$t_b = t_1 + t_s + t_f \quad (1-13)$$

式中 t_1 ——电压上升时间, 是放电电压由零上升到气隙的静态击穿电压 U_s 所需的时间;

t_s ——统计时延, 为从静态击穿到阴极附近出现有效电子所需的时间;

t_f ——放电形成时延, 为从有效电子出现到发展电子崩直至气隙击穿所需的时间。

($t_s + t_f$) 总称为放电时延 t_{lag} 。

实际上放电时延具有分散性, 并与所加电压大小有关。总的趋势是电压越高, 所需放电时间越短; 电场越均匀, 放电时间的分散性越小; 电场越不均匀, 放电时间的分散性越大。

3. 雷电 50% 冲击击穿电压

由于冲击电压作用下放电具有分散性, 所以很难准确得到一个气隙击穿的最低电压值, 因此工程上采用 50% 冲击击穿电压来描述气隙的冲击击穿特性。击穿概率等于 50% 时的电压即称为气隙的 50% 击穿电压, 用 $U_{50\%}$ 表示。实际情况中通常以施加 20 次电压有 9~11 次击穿来确定。

$U_{50\%}$ 与静态击穿电压 U_s 之比称为冲击系数, 记为 β 。在均匀和稍不均匀电场中, 冲击击穿电压的分散性很小, $U_{50\%}$ 与 U_s 几乎相同。对均匀与稍不均匀电场, $\beta \approx 1$, 此时由于放电时延短, 在 50% 击穿电压下, 击穿通常发生在波前峰值附近; 在极不均匀电场中, 由于放电时延较长, 击穿电压分散性较大, 其冲击系数 $\beta > 1$, 击穿通常发生在波尾部分。

4. 伏秒特性

由于雷电冲击电压持续时间短，气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气隙击穿特性是不够的，还必须将击穿电压值与放电时延联系起来确定气隙的击穿特性。

工程上将气隙击穿期间出现的冲击电压最大值和放电时间的关系来表征气隙在冲击电压下的击穿特性，此特性称为伏秒特性。

气隙的伏秒特性曲线的形状与气隙的电场分布有关，在均匀电场和稍不均匀电场中，击穿时平均场强较高，放电发展快，放电时延短，伏秒特性曲线平坦；在极不均匀电场中，平均击穿场强低，放电时延较长，放电分散性大，伏秒特性曲线较为陡峭。

实际上，放电时间具有分散性，即在每级电压下可测到不同的放电时间，所以伏秒特性曲线是以上下包带为界的带状区域，工程上为方便起见，通常用平均伏秒特性曲线或 50% 伏秒特性曲线表征气隙的击穿特性。在绝缘配合中伏秒特性具有重要意义。

伏秒特性的绝缘配合要求：用作过电压保护的设备（避雷器或气隙），其伏秒特性尽可能平坦，并位于被保护设备的伏秒特性之下，且二者永不相交。如图 1-7 所示为被保护设备 S1 与过电压保护设备 S2 的两条伏秒特性曲线。

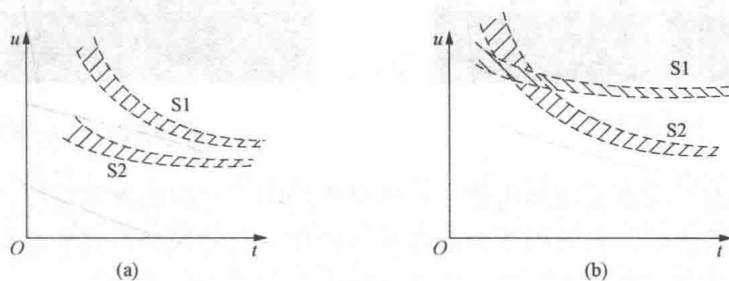


图 1-7 被保护设备 S1 与过电压保护设备 S2 的两条伏秒特性曲线

(a) 不相交（符合保护要求）；(b) 相交（不符合保护要求）

1.2 雷电放电的基本形式与特点

1.2.1 雷电放电的基本形式

前面谈到雷电放电的主要放电形式有三种：雷云对地放电；雷云对雷云放电；雷云内放电。这几种形式的放电分别具有如下特点。

(1) 雷云对地放电形成的直击雷。当云层较低或地面有高耸的尖端突起物时，雷云对地之间就会形成较高的电场强度，当电场强度达到一定值时，雷云就会向地面发展向下的先导，当先导到达地面，或与大地迎面先导会合时，就开始主放电阶段。在主放电过程中雷云与大地之间所聚集的大量电荷通过狭小的电离通道发生猛烈的中和，释放出能量，产生强烈的电闪雷鸣，此时在雷击点有巨大的雷电流流过。雷电流的峰值可达几十到上百千安。由于雷击是在极短的时间内释放较大的能量，具有极大的破坏作用。如图 1-8 所示为实际拍摄到的直击雷照片。

(2) 雷云对雷云放电。当带不同极性电荷的云团相遇时，就会发生雷云对雷云的放电。

雷云对雷云的放电是最主要的雷电活动形式。雷云对雷云放电对人类活动的影响要比雷云对地放电小得多,除了对飞机之类的航空设备外,一般不会直接造成人员伤亡或建筑物的损毁。但雷云对雷云放电会在线路和网络产生感应过电压,过电压的大小视雷电活动强弱和放电雷云离地面的高度而定。感应雷电压幅值与雷云放电时的电流大小、与线路的相对位置、遭受感应雷击的线路的长度、设备接地装置的接地电阻等诸多因素有关。一般而言,雷云对雷云放电越强烈,参与放电的云层离地面越低,所产生的感应过电压就越高,反之则越弱。雷电感应包含静电感应和电磁感应。如图 1-9 所示为实际拍摄到的雷云对雷云放电的照片。



图 1-8 直击雷照片



图 1-9 雷云间放电照片

(3) 雷云内放电。带电云团的内部,带异号电荷中心之间的电场强度达到空气间隙的击穿值时会发生雷云内放电,雷云内放电的强度一般都不会特别高,属于最弱的一种雷电活动形式,对人类活动几乎没有什么影响,因而也极少受到人们的关注。

(4) 球形雷。球形雷是一种橙色或红色的类似于火焰的发光球体,偶尔也有黄色、蓝色或紫色。大多数球形雷的直径在 10~100cm,球形雷多在强雷暴时空中闪电最频繁的时候出现。球形雷通常沿水平方向以 1~2m/s 的速度上下滚动,有时距地面 2~3m,有时距地面 0.5~1m,它在空中的漂游时间可由几秒到几分钟。关于球形雷的形成机理至今尚未有人给出合理的解释,通常认为球形雷是强雷暴时产生的分裂带电或放电云团。

1.2.2 雷电放电的选择性

在同一区域内雷击分布的不均匀现象称为雷电放电的选择性,雷云对地放电会受到地形、风向、地表水或地下金属矿藏等因素的影响,有一定的规律性。

(1) 雷击与雷云下地面地形的关系。对于山区来说,雷电活动受地形的影响较为明显,因为山区的雷电活动主要受季风的影响,而山区局部气候又受地形和地貌的影响,比如两侧有高山、隘口,那么雷云就会随着季风的作用从山谷或隘口穿过,这时如果附近有突出物,就会引起雷云对地放电。

(2) 雷击与地质的关系。如果地面土壤分布不均匀,则在土壤电阻率特别小的地区,雷击的概率较大。这是由于静电感应的作用,在雷电放电先导阶段,地中的感应电流沿着电阻率较小的路径流通,使地面电阻率较小的区域被感应而积累了大量与雷云相反的电荷,而雷电自然就朝着电阻率较小的地区发展。

(3) 雷击与地面设施的关系。当雷云运动到离地面较近的低空时,雷云与地面之间的电