

电气技术丛书

# 防雷与接地技术

● 吴薛红 濮天伟 廖德利 编著

 化学工业出版社

TM862/3

2008

电气设计丛书

# 防雷与接地技术

● 吴薛红 濮天伟 廖德利 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

定价：30.00元

ISBN 978-7-132-01478-8

本书对建筑物和供电系统的防雷与接地技术进行了较为详细的介绍。全书可分为两个主要部分：第一部分防雷保护部分，即雷电的基本知识，雷电过电压的分类和防护设备，电力装置和建筑物的防雷保护；第二部分接地技术部分，即供电系统电气设备的接地，信息系统的接地，智能建筑的防雷接地，接地电阻，接地网的设计、施工与实例，接地装置的运行维护。

本书可供从事电气设计、安装施工与技术开发工作的技术人员阅读，也可作为高等工科院校电气类相关专业学生的选修教材和参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

防雷与接地技术/吴薛红，濮天伟，廖德利编著. —北京：  
化学工业出版社，2008.1

(电气技术丛书)

ISBN 978-7-122-01473-3

I. 防… II. ①吴…②濮…③廖 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 (2007) 第 181046 号

---

责任编辑：刘 哲  
责任校对：周梦华

文字编辑：钱 诚  
装帧设计：于 兵

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京云浩印刷有限责任公司

装 订：三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13¼ 字数 331 千字 2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：30.00 元

版权所有 违者必究

# 丛书前言

进入 21 世纪,科学技术在许多领域,特别是在信息、先进制造、先进材料、生物、能源技术等高新技术领域的飞速发展,使社会、经济和人民生活发生了巨大的变化。我国加入世界贸易组织后机遇和挑战并存,全球范围的竞争主要表现在人才的竞争。国家“十一五”时期推进实施人才强国战略的主要任务之一,是实施专业技术人员知识更新工程和战略高技术人才培养工程。

科学是技术的源头,但直接作用于生产实际的是技术。加强工程教育,重视工程技术人才的培养,是一项长期的系统工程。“十一五”规划提出:加快构建终身教育体系,建立继续教育、终身学习的平台,完善终身学习保障机制,着力提高全民科学文化素质,提高公民的学习能力、实践能力和创新能力,加快建立学习型社会。对每一个投身工程领域的人,继续教育、终身学习已成为适应社会发展和科技进步的必需。科学发展和技术进步,体现在生产一线和工程实际中。已走出校门的工程技术人员除应当具有本专业领域比较深厚的理论基础外,相关领域的专业知识、工程应用和新技术也是关注和涉猎的,这是专业交叉,学科融合的大趋势给我们提出的要求。

电能与其他二次能源相比,具有易于传输、方便控制、利用环保的优点。随着经济的发展和科技的进步,电能的利用越来越广泛,社会对电气工程人才的需求越来越大,要求越来越高。针对电气工程人才的社会需求,以及工程技术人员对电气工程领域的专业知识、工程应用和新技术的关注,南京师范大学电气与自动化工程学院组织编写了这套电气工程技术丛书,希望通过这套丛书将电气工程领域的有关技术和发展奉献给读者,以达到联系工科教育、工程技术和生产实际的目的。这套丛书从规划选题开始就确立了以基本原理为基础、以工程应用和新技术为主线的编写思路,内容涵盖了电气工程领域中发电、变电、继电保护、防雷与接地、绝缘技术、电源技术、电气控制技术、电气测量技术、电梯与照明技术以及变频器技术等。在编写上注意以基础理论够用,强调工程应用为原则,反映新技术,注重启发性和实践性。

这套丛书的编者有从事工科教育的高等学校教师,有生产一线的工程师。大家都怀着为读者奉献高质量图书的良好愿望,但不足之处一定会有,真诚地希望读者及时给予批评和指正。

南京师范大学电气与自动化工程学院

# 前 言

雷电是一种强烈的大气放电现象，自古以来就是威胁人类生命财产的一大自然灾害。每年我国会有上万人因雷击事故而伤亡，并给国家和个人造成巨大的财产和经济损失。

长期以来，防雷保护问题一直是电气工程中一个必须考虑的重要问题，随着现代电气和信息智能化趋势的迅猛发展，这一问题的重要性正日益显著。从富兰克林发明避雷针至今，人们经过大量的观察、试验、研究和实践，已经逐步掌握了一套比较有效的防雷技术措施。基于这些技术措施，虽然还不能完全避免雷电的危害，但已可以用投资有限的防雷保护装置去尽可能地限制雷电的破坏作用，大幅度地减轻雷电的危害程度。近些年来，由于微电子技术、计算机信息技术的迅猛发展，建筑物内信息系统的雷电防护又成为防雷技术中新的研究课题。由于雷电电磁脉冲感应作用，在电力输电线、通信传输线和建筑物金属构件上产生很高的高电压冲击波，造成电子信息设备的损坏，甚至造成人身伤亡事故。因此，雷击电磁脉冲的防护已成为防雷设计中必不可少的重要内容。

1994年8月我国颁发了新的建筑物防雷设计标准 GB 50057—94《建筑物防雷设计规范》，该标准规定了各类建筑物防直击雷和雷电波侵入的要求和措施；规定了建筑物金属构件防止雷电感应的要求和措施。2000年8月又对该标准进行了修订，增加了第六章“防雷击电磁脉冲”。这是根据国际电工委员会（IEC）新出版的《雷电电磁脉冲的防护》标准而编写的，这也说明了我国对防护雷电电磁脉冲的重视，今后在建筑电气防雷设计中必须执行新的标准。

本书对建筑物和供电系统的防雷与接地技术进行了较为详细的介绍。全书分为两个主要部分：第一部分为雷电的基本知识和防雷保护，第二部分为接地技术，在选材上，本书着眼于我国防雷保护设计的实际现状，并适当体现当前国外的发展动向，吸收当前国内外出现的一些新技术。在叙述上，强调基本概念，突出重点问题，同时注意一定的内容覆盖面。在内容安排上，以工程实用性为主，兼顾一定的理论深度，力图在实践与理论的结合上对防雷保护与接地技术进行较为系统的阐述。

本书第一至第三章由南京师范大学吴薛红编写，第四至第十章由南京工程学院濮天伟、廖德利编写。全书由吴薛红统稿。南京师范大学姚盈老师帮助进行校稿，南京师范大学电气与自动化工程学院居荣院长给予了极大的关心和支持，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中不妥之处在所难免，在此诚恳地希望读者给予批评指正。

编 者



# 目 录

<b>第一章 雷电基础知识</b> .....	1
第一节 雷云和雷击.....	1
第二节 雷电参数.....	3
第三节 雷电的危害.....	7
<b>第二章 雷电过电压的分类和防护设备</b> .....	13
第一节 雷电过电压的分类 .....	13
第二节 防直击雷设备及工作原理 .....	13
第三节 防感应雷设备及工作原理 .....	29
第四节 信息系统的防雷保护器件 .....	34
<b>第三章 电力装置和建筑物的防雷保护</b> .....	39
第一节 电力装置的防雷保护 .....	39
第二节 建筑物防雷等级的分类 .....	57
第三节 建筑物的防雷保护措施 .....	60
第四节 雷击电磁脉冲的防护 .....	70
<b>第四章 接地的基本知识</b> .....	88
第一节 安全电压和安全电流 .....	88
第二节 接地的作用及分类 .....	91
第三节 各种接地的应用 .....	97
第四节 接地装置的结构及散流效应.....	112
<b>第五章 供配电系统电气设备的接地</b> .....	114
第一节 电力系统的接地.....	114
第二节 发配电设备的接地.....	123
第三节 输配电线路的接地.....	125
<b>第六章 信息系统的接地</b> .....	127
第一节 通信系统的接地.....	127
第二节 电子设备的接地.....	131
第三节 电声、电视系统的接地.....	137
第四节 综合布线系统的接地.....	140

<b>第七章 智能建筑的防雷接地</b> .....	145
第一节 智能建筑的防雷系统.....	145
第二节 智能建筑的接地系统.....	148
第三节 智能建筑的防雷接地.....	153
<b>第八章 接地电阻</b> .....	155
第一节 接地电阻的概念.....	155
第二节 接地电阻的测量.....	163
第三节 土壤的电阻率的测量.....	170
第四节 降低接地电阻的措施.....	173
<b>第九章 接地网的设计、施工与实例</b> .....	177
第一节 接地网的设计.....	177
第二节 施工工艺.....	181
第三节 接地实例.....	185
<b>第十章 接地装置的运行维护</b> .....	195
第一节 接地装置的运行管理.....	195
第二节 接地装置的防腐措施.....	199
第三节 接触电压和跨步电压的测量.....	203
第四节 接地装置的故障排除实例.....	207
<b>参考文献</b> .....	211

# 第一章

## 雷电基础知识

雷电是自然界中一种特殊的、极为壮观的声、光、电现象。这不仅在于它那划破长空的耀眼闪电和令人震耳欲聋的雷鸣，更重要的是它给人类生活和生产活动带来了巨大的影响。

雷电造成的有机化合物的合成，可能在地球生命起源中占有一定的地位。雷电引起的森林火灾，可能启发了远古人类对火的发现与利用。雷电产生的臭氧，对自然界的细菌生长有一定的抑制作用。雷电还可能在某种程度上杀死生物害虫、有利于植物和庄稼的生长。但是，雷电也是一种对国民经济和军事活动影响较大的灾害性天气现象。它不但威胁到人畜生命安全，对人类赖以生存的自然资源和人类创造的物质财富也有巨大的破坏性，而且还常给电力、通信、石油化工、航空航天、铁路交通，乃至金融证券等国民经济部门的设备设施带来损坏。例如地球上的森林火灾有 50% 以上是由雷电引起的，人们居住的建筑物也屡遭雷电的破坏。雷电产生的电磁波辐射又常常干扰正常的无线电通信和飞行器的遥控。因此，雷电现象一直为人们所关注和研究。

### 第一节 雷云和雷击

雷电，是伴随有闪电和雷鸣的一种恐怖而雄伟壮观的自然现象。人们通常习惯说雷雨，但有时出现了雷电现象而未必有雨，因此雷电这个名词要比雷雨来得确切一些。过去，人们既不能解释这种现象，更谈不上和它斗争，雷电被人们当神来崇拜。自 18 世纪富兰克林著名的风筝实验以来，人们致力于雷电及其防护的研究实践已有 200 年的历史，对雷电的防护已经取得了很大成绩，积累了丰富的经验。

#### 一、雷云

人们通常把发生闪电的云称为雷雨云，其实有几种云都与闪电有关，如层积云、雨层云、积云、积雨云，最重要的则是积雨云，一般专业书中讲的雷雨云就是指积雨云。

云的形成过程是空气中的水汽经由各种原因达到饱和或过饱和状态而发生凝结的过程。使空气中水汽达到饱和是形成云的一个必要条件，其主要方式有以下几种。

- ① 水汽含量不变，空气降温冷却。
- ② 温度不变，增加水汽含量。
- ③ 既增加水汽含量，又降低温度。

但对云的形成来说，降温过程是最主要的过程。而降温冷却过程中又以上升运动而引起的降温冷却作用最为普遍。

积雨云就是一种在强烈垂直对流过程中形成的云。由于地面吸收太阳的辐射热量远大于空气层，所以白天地面温度升高较多，夏日这种升温更为明显，所以近地面的大气的温度由





于热传导和热辐射也跟着升高。气体温度升高必然膨胀，密度减小，压强也随着降低，根据力学原理它就要上升，上方的空气层密度相对说来就较大，就要下沉。热气流在上升过程中膨胀降压，同时与高空低温空气进行热交换，于是上升气团中的水汽凝结而出现雾滴，就形成了云。在强对流过程中，云中的雾滴进一步降温，变成过冷水滴、冰晶或雪花，并随高度逐渐增多。在冻结高度（ $-10^{\circ}\text{C}$ ），由于过冷水大量冻结而释放潜热，使云顶突然向上发展，达到对流层顶附近后向水平方向铺展，形成云砧，是积雨云的显著特征。

积雨云形成过程中，在大气电场以及温差起电效应、破碎起电效应的同时作用下，正负电荷分别在云的不同部位积聚。当电荷积聚到一定程度，就会在云与云之间或云与地之间发生放电，也就是人们平常所说的“闪电”。

带负电荷的云层向下靠近地面时，地面的凸出物、金属等会被感应出正电荷，随着电场的逐步增强，雷云向下形成下行先导，地面的物体形成向上闪流，两者相遇即形成对地放电。这就容易造成雷电灾害。

闪电的形状最常见的是枝状，此外还有球状、片状、带状。闪电的形式有云天闪电、云间闪电、云地闪电。云间闪电时云间的摩擦就形成了雷声。

## 二、雷击

雷电的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。其中气象情况有很大的随机性，因此研究雷电流大多数采取大量观测记录，用统计的方法寻找出它的概率分布。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

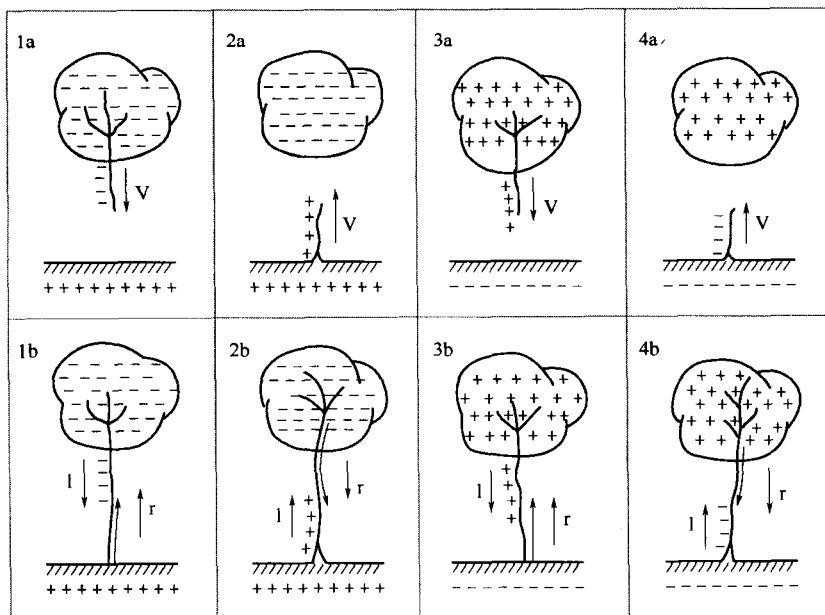


图 1-1 八类闪电（根据先导和回击的方向）

V—先导；r—回击；l—发展方向



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，因此可以把闪电分成四类，如图 1-1 的上半部分所示。只沿着先导方向发生电荷中和的闪电叫无回击闪电。当发生先导放电之后还出现逆先导方向放电的现象，称为有回击闪电。这样闪电的类型又可以分为四类，如图 1-1 的下半部分所示。

## 第二节 雷电参数

### 一、雷电日、雷电小时和地面落雷密度

雷电活动的频繁程度因地区而异。雷电日、雷电小时和地面落雷密度是描述雷电活动的三个基本参数，在防雷设计中占有十分重要的地位。通过长期的雷电观测，我国目前已逐步累积起关于这些基本参数的统计数据和经验公式，并已编入有关的设计规范。全国一些重要城市的年平均雷电日见表 1-1 所示。

表 1-1 全国一些重要城市的年平均雷电日

d

城市	雷电日	城市	雷电日	城市	雷电日
北京	36.7	合肥	30.1	贵阳	48.9
天津	28.6	福州	57.6	昆明	62.8
石家庄	31.5	南昌	58.5	拉萨	73.2
太原	36.4	济南	26.3	西安	17.3
呼和浩特	37.5	郑州	22.6	兰州	23.6
沈阳	27.1	武汉	37.8	西宁	32.9
长春	36.6	长沙	49.5	银川	19.7
哈尔滨	30.9	广州	87.6	乌鲁木齐	9.3
上海	32.2	南宁	88.6	海口	113.8
南京	35.1	重庆	41	台北	27.9
杭州	40.0	成都	36.9	香港	34.0

#### 1. 雷电日

地面上不同地区雷电活动的频繁程度通常是以年平均雷电日数度量的。雷电日的定义是：在指定地区内一年四季所有发生雷电放电的天数，以  $T_d$  表示。一天内只要听到一次或一次以上的雷声就算是一个雷电日。这里所说的雷声既包括雷云对地放电发出的，也包括雷云之间放电发出的，由此可知，雷电日并不仅仅表征地面落雷的频繁程度。由于在不同年份中观测到的雷电日数变化较大，所以要将多年份雷电日观测数据进行平均，取其平均值（即年平均值）作为防雷设计中使用的雷电日数据。由于我国幅员辽阔，各地区的雷电日数之间存在着较大的差异，全国各地的雷电活动情况大致可归结为：华南比西南强，西南比长江流域强，长江流域比华北强，华北比东北强，海南省和广东的雷州半岛是我国雷电活动最为频繁的地区，它们的年平均雷电日高达 100~133。北纬 23.5° 以南一般在 80 以上，北纬 23.5°



到长江一带约为 40~80, 长江以北大部分地区(包括东北)多在 20~40 之间。根据雷电活动的频繁程度, 通常把我国年平均雷电日数超过 90 的地区叫做强雷区, 把超过 40 的地区叫做多雷区, 把不足 15 的地区叫做少雷区。

### 2. 雷电小时

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, 也有用雷电小时数来作为雷电活动频繁程度的计量单位。雷电小时的定义是: 在一个小时内, 只要听到一次或一次以上雷声就算是一个雷电小时。我国大部分地区的一个雷电日约有 3 个雷电小时, 在西北一些少雷地区, 一个雷电日略少于 2 个雷电小时; 而像广东等强雷地区, 一个雷电日甚至可达 4 个雷电小时以上。

### 3. 地面落雷密度

雷电日和雷电小时的统计均未区分雷云之间放电和雷云对地放电, 从大量的观察结果来看, 雷云之间放电远多于雷云对地放电。在一定区域内, 如果雷电日数越多, 则雷云之间放电的比例也就越大。雷云之间放电与雷云对地放电之比在温带约为 1.5~3, 在热带约为 3~6。应当说, 对于建筑物防雷设计来说, 更具有实际意义的是雷云对地放电的年平均次数, 但目前还缺乏这方面比较可靠的观察统计数据。

雷云对地放电的频繁程度可以用地面落雷密度  $\gamma$  来表示,  $\gamma$  是指每个雷电日每平方公里地面上的平均落雷次数。事实上, 地面落雷密度  $\gamma$  与年平均雷电日数  $T_d$  有关, 如果  $T_d$  增大, 则  $\gamma$  也随之增大。由于我国幅员广大,  $T_d$  变化很大,  $\gamma$  变化也很大, 因此在防雷设计中一律采用同一个  $\gamma$  值将会造成误差。关于地面落雷密度  $\gamma$  与年平均雷电日数  $T_d$  之间的关系, 可采用以下经验公式来近似计算

$$\gamma = \alpha T_d^c \quad (1-1)$$

式中  $T_d$ ——当地年平均雷电日数;

$\alpha$ ——常数, 取值为 0.024;

$c$ ——常数, 取值为 0.3。

于是, 每平方公里年平均落雷次数  $N_g$  可表示为

$$N_g = \gamma T_d = \alpha T_d^{1+c} = 0.024 T_d^{1.3} \quad (1-2)$$

上式中的  $N_g$  也常称为年平均落雷密度。例如, 北京地区的年平均落雷密度约为 0.83/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ ), 即平均在一年中击中该地区单位面积 ( $\text{km}^2$ ) 上的雷电数为 0.83 个。

在了解了地面落雷密度概念之后, 就可以利用它来估算建筑物的年雷击次数。建筑物的年雷击次数  $N$  与建筑物的等值受雷面积  $S_e$ 、建筑物所处地区的年平均落雷密度  $N_g$  以及建筑物所处的地形有关, 可按以下经验公式来估算

$$N = K N_g S_e \quad (1-3)$$

式中  $K$ ——校正系数, 在一般情况下取 1, 对位于旷野孤立的建筑物取 2, 对金属屋面的木结构建筑物取 1.7, 对位于河边、湖边、山坡下或山地中土壤电阻率较小处、地下水出口处、土山顶部、山谷风口等处的建筑物, 以及特别潮湿的建筑物取 1.5;

$N_g$ ——建筑物所在地区的年平均落雷密度, 次/( $\text{km}^2 \cdot \text{a}$ );

$S_e$ ——建筑物的等值受雷面积,  $\text{km}^2$ 。

考虑到建筑物的引雷效应, 其等值受雷面积  $S_e$  应为其顶部的几何面积考虑向外扩展的



面积。扩展宽度  $D$  的计算方法为：

- ① 建筑物高度  $H < 100\text{m}$  时,  $D = \sqrt{H(200 - H)}$ ;
- ② 建筑物高度  $H > 100\text{m}$  时,  $D = H$ 。

当建筑物上各部高低不平时, 应考虑最大扩展宽度, 并沿顶部外围扩展的外端的连线所包围的面积计算值, 即等值受雷面积  $S_e$ 。

## 二、雷电流

由大量的实测结果显示, 各种形式的雷击电流脉冲可以简化为三种简单的基本雷击电流脉冲, 即首次短时雷击、后续短时雷击和长时间雷击, 波形如图 1-2 所示。其中首次短时雷击和后续短时雷击的波形基本相似, 实际上经常归纳为“短时雷击”和“长时间雷击”两种基本雷电流波形。

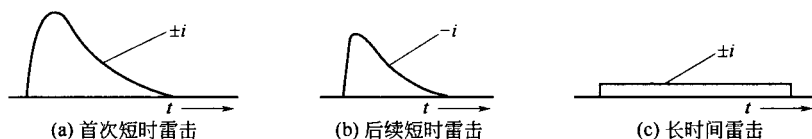


图 1-2 闪击中可能出现的三种雷击电流波形

短时雷击电流大致呈单极性的脉冲波形。主要可采用三个参数来表示, 即雷电流的幅值、波头时间和半幅值时间。由波头时间和幅值所决定的雷电流上升沿变化率常称为雷电流的波头陡度, 它对于雷电过电压和电磁干扰水平有直接影响。

图 1-3 给出了一个实测记录的短时雷击电流波形。图中电流是负值, 表示是由负闪击而产生的。如果只考虑绝对值, 曲线将沿横轴上翻转  $180^\circ$ , 所得波形与图 1-2(a) 是非常接近的。

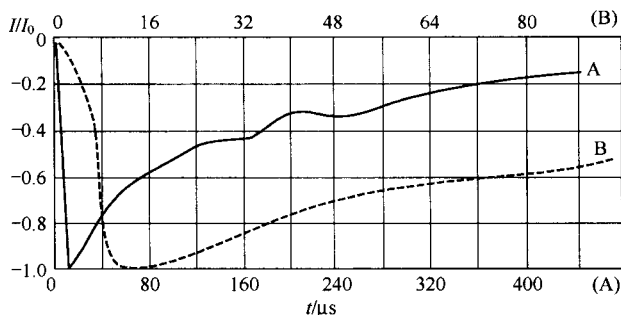


图 1-3 实测负闪击平均电流波形

A—完整记录的波形; B—放大的波前沿

注: 此曲线由 Berger 等 1975 年在瑞士圣萨尔瓦托山测得

### 1. 雷电流幅值

雷电流幅值指的是雷电流波形上的最大值。由于雷云对地放电具有很大的随机性, 因而只能通过统计和相应的经验公式来确定。

在防雷设计中, 一般采用雷电流幅值积累概率曲线来描述, 即通过大量的雷电流实测数据统计出各不同大小的雷电流幅值出现的积累概率 (大于或等于某一雷电流幅值的概率)。图 1-4 所示曲线即我国电力系统防雷设计中采用的雷电流幅值积累概率曲线。

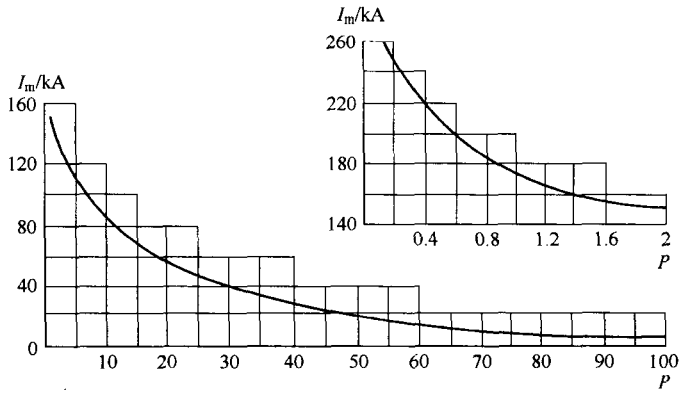


图 1-4 雷电流幅值累积概率曲线

### 2. 波头时间和半幅值时间

如图 1-5 所示，雷电流的波头时间  $t_{OD}$  是指在雷电流波形上从起始点上升到幅值所需的时间，用微秒 ( $\mu s$ ) 表示。当雷电流幅值一定时，波头时间越短，则雷电流上升速度越快，其曲线也越陡，陡度越大，引起的感应雷过电压幅值就越大。半幅值时间  $t_{OE}$  是指波形上从起始点上升到幅值后再下降到半幅值所需要的时间，也用微秒 ( $\mu s$ ) 为单位。

实际上，对于许多实测波形，采用作图法得出波头时间，作图如图 1-6 所示。在纵轴上经过  $0.1I_m$ 、 $0.9I_m$  两点分别作平行于横轴的直线交曲线于 A、B 两点。经过 A、B 两点作直线，与时间轴交于 F 点，与幅值切线交于 G 点。FG 线在时间轴上的投影  $\tau_f$  即波头时间。在纵轴上经过  $0.5I_m$  作平行于横轴的直线交曲线于 E 点。FE 两点的水平距离  $\tau_t$  即半幅值时间。

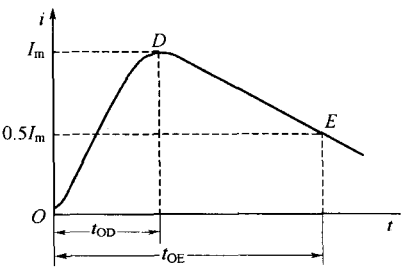


图 1-5 波头时间和半幅值时间示意

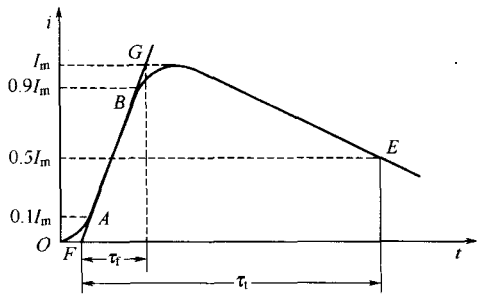


图 1-6 波头时间和半幅值时间的定义方法

由以上分析可知，对短时雷击电流脉冲来说，仅用电流幅值来表示是不够的。必须将  $I_m$ 、 $\tau_f$  和  $\tau_t$  三个参量同时表示出来，一般记作  $I_m(\tau_f/\tau_t, \mu s)$ 。例如某雷电流幅值  $I_m = 100A$ ， $\tau_f = 10\mu s$ ， $\tau_t = 350\mu s$ ，则记作  $100A(10/350\mu s)$ 。

长时间雷击电流由电量  $Q_L$  和时间  $T$  两个参数表示，其定义如图 1-7 所示。 $Q_L$  是长时间雷击脉冲的总电量， $T$  为从波头电流达幅值的 10% 起，至波尾下降到幅值 10% 时所包含的时间。长时间雷击的平均电流  $I \approx Q_L/T$ 。

### 3. 雷电流的等值波形

在防雷工程设计中，常常要求将雷电流的波形等值为典型化的，这样可以用解析表达式

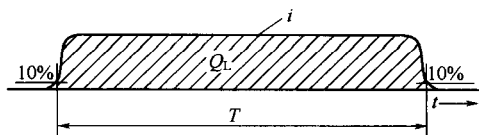


图 1-7 长时间雷击电流脉冲参数定义

$Q_L$ —长时间雷击电量； $T$ —时间

表示，以方便计算。常用的等值波形有以下三种。

(1) 标准冲击波 由双指数式表示雷电流，如图 1-8 所示。其表达式为

$$i = i_0 (e^{\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1-4)$$

式中  $i_0$ ——某一固定电流值；

$\alpha$ 、 $\beta$ ——两个常数；

$t$ ——时间。

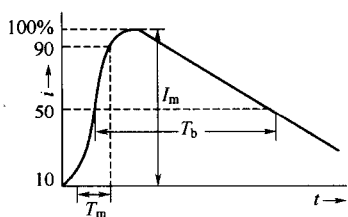


图 1-8 雷电流的标准波形

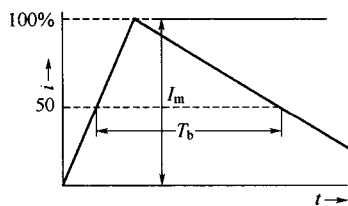


图 1-9 雷电流的等值斜角波

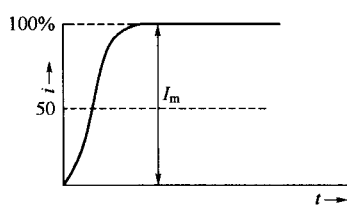


图 1-10 雷电流的等值余弦波

(2) 等值斜角波 如图 1-9 所示。为了简化防雷工程计算，雷电流的波头陡度  $a$ ，由给定雷电流幅值  $I_m$  和波头时间  $\tau_f$  决定，亦即

$$a = I_m / \tau_f \quad (1-5)$$

其波尾部分可以是无限长的，此时又叫做斜角平顶波。若有一定的波长，又叫做三角波。斜角波的数学表达式比较简单，用以分析雷电流所引起的波过程也比较方便。

(3) 等值余弦波 如图 1-10 所示。该等值波形多用于分析雷电流波头的作用，因为用余弦函数波长计算雷电流通过电感支路时间所引起的压降比较方便，其数学表达式可表示为

$$i = \frac{I_m}{2} (1 - \cos \omega t) \quad (1-6)$$

式中， $I_m$  为给定雷电流幅值； $\omega = \pi / \tau_f$ 。

波头最大陡度出现在波头中间  $t = \tau_f / 2$  处，其值为

$$a_{\max} = \left( \frac{di}{dt} \right)_{\max} = \frac{I_m \omega}{2} \quad (1-7)$$

在给定雷电流幅值和最大陡度的情况下，已知  $\omega \tau_f = \pi$ ，则可求出余弦波长对应的等值波的角频率  $\omega$  和  $\tau_f$ ，它们分别为

$$\omega = \frac{2a_{\max}}{I_m}, \quad \tau_f = \frac{\pi I_m}{2a_{\max}} \quad (1-8)$$

### 第三节 雷电的危害

雷电流也是电流，它具有电流所具有的一切效应，不同的只是它在短时间以脉冲的形式





通过强大的电流。尤其是直击雷，它的峰值有几十千安，以至几百千安。它的峰值时间（从雷电流上升至 1/2 峰值算起，直至下降到 1/2 峰值小的时间间隔），通常负闪击只有几微秒到十几微秒，正闪击较长些，正是这种特殊情况，使雷电流具有它特殊的破坏作用。

### 一、雷电流热效应的破坏作用

强大的雷电流通过被雷击的物体时要发出很大的热量。根据焦耳定律，一次闪击雷电流发出的热量  $Q$

$$Q = R \int_0^t i^2 dt \quad (1-9)$$

式中  $Q$ ——发热量，J；

$i$ ——雷电流，A；

$R$ ——电流通道的电阻， $\Omega$ ；

$t$ ——雷电流持续时间，s。

实际上雷电流作用的时间很短，散热影响可以忽略，在电流通路上由电流引起的温升  $\Delta T$  为

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} \quad (1-10)$$

式中  $m$ ——通过雷电流的物体的质量，kg；

$c$ ——通过雷电流的物体比热容，J/(kg·K)。

由于雷电流很大，通过的时间又短，如果雷电击在树木或建筑物构件上，被雷击的物体瞬间将产生大量的热量，又来不及散发，以致物体内部的水分快速变成蒸汽，并迅速膨胀，产生巨大的爆炸力，造成破坏；当雷电流通过金属体时，根据式(1-9)和式(1-10)可以算出其温度，如果金属体的截面积不够大时，甚至可使其熔化。特别是那些引流导体的不良接触处，接触电阻值比较大，产生大量的热量，可能导致金属熔化，有时甚至出现熔体飞溅。这些飞溅熔体产生的火花对存储易燃易爆物品的建筑物来说，是极具危险性的。

与雷电通道直接接触的金属因高温而熔化的可能性更大，因为通道的温度可高达6000~10000℃，甚至更高。因此在雷电流通道上遇到易燃物质，可能引起火灾。

### 二、雷电冲击波的破坏作用

雷电通道的温度高达几千度至几万度，空气受热急剧膨胀，并以超声速度向四周扩散，其外围附近的冷空气被强烈压缩，形成“冲击波”。被压缩空气层的外界称为“冲击波波前”。“冲击波波前”到达的地方，空气的密度、压力和温度都会突然增加。“冲击波波前”过去后，该区压力下降，直至低于大气压力。这种“冲击波”在空气中传播，会使其附近的建筑物、人、畜受到破坏和伤亡。这种冲击波的破坏作用就跟炸弹爆炸时附近的物体和人、畜受损害一样。这种“激波”的向外传播速度远大于声速，但很快就会衰减，转化为声波，于是人们就能够听到雷鸣声。冲击波的强度和回击时雷电流的大小有关，其破坏作用与波正面气压和环境大气压有关。

### 三、雷电流电动力效应的破坏作用

由物理学可知，在载电流的导体周围空间存在磁场，在磁场里的载流导体受到电磁力的作用。如图 1-11 所示的情况，如果导线 A、B 都载有电流，那么导线 A 的电流会在它的周围空间产生磁场，而导线 B 在导线 A 所产生的磁场里将受到一个电磁力的作用。同理导线

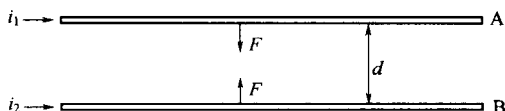


图 1-11 两根载流导体之间的电动力的作用

B 上的电流也会在它的周围空间形成磁场，导线 A 在该磁场里也会产生电磁力。这样两条载流导体相互有作用力存在，我们把这种作用力叫做电动力。

根据安培定律推导，每条平行导体，当 A、B 上分别通以电流  $i_1$ 、 $i_2$  (kA)，A、B 的距离为  $d$ (m) 时，单位长度导线所受的作用力按下式计算

$$F = 1.02 \times \frac{2i_1 i_2}{d} \times 10^{-8} \text{ (kgf/m)} \quad (1-11)$$

式中  $i_1$ 、 $i_2$ ——两平行导线上的电流，kA；

$d$ ——导体之间的距离，m；

$F$ ——单位长度导体的电动力，kgf/m。

假定雷击的瞬间两导线的电流  $i_1 = i_2 = 100\text{kA}$ ，两导线的距离为 50cm，计算结果这两条导线每米都受到 408kgf (1kgf=9.80665N) 的力。由电工学可知，当两条导线流过同方向的电流时，这两条导线受到的力有迫使这两条导线靠拢的趋势。因此雷击的时候，由于电动力的作用也有可能使导线被折断。

同样在同一条导线或金属构件的弯曲部分有电流通过的时候，如图 1-12 所示，其中流过 AO 段的电流产生的磁场可使 BO 段金属构件受到电动力，流过 BO 段的电流产生的磁场，可使 AO 段构件受到电动力，当电动力足够大的时候也会使构件受到破坏。由安培定律推导得知，凡拐弯的导体或金属构件，在拐弯部分将受到电动力作用，它们之间的夹角越小，受到的电动力越大。所以当拐弯的夹角为锐角时受到作用力最大，钝角较小。故接闪器及其引下线不应出现锐角的拐弯，尽可能采用钝角拐弯，在不得已采用直角拐弯时应加强构件强度，尤其是避雷引下线，一般应尽可能采用弧形拐弯，俗称“软连接”，因这样可使构件受到的应力较小，而且不集中在一点，雷击造成的损失就相对小些。

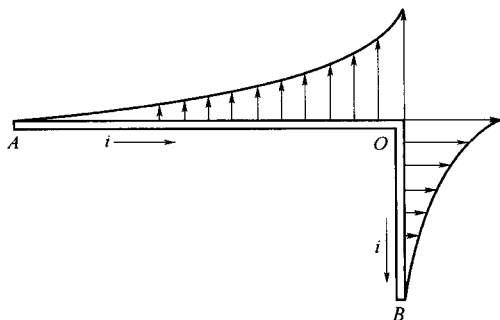


图 1-12 载流弯曲导体的受力示意

#### 四、雷电静电感应的破坏作用

当空间有带电的雷击出现时，雷云下的地面及建筑物等都由于静电感应的作用而带上相反的电荷。由于从雷云的出现到发生雷击（主放电）所需要的时间相对于主放电过程的时间要长得多，因此大地可以有充分的时间积累大量电荷。然而当雷击发生后，雷云上所带的电



荷，通过闪击与地面的异种电荷迅速中和，而建筑物和大地甚至架空导线上的感应电荷，由于局部与大地间的电阻比较大，而不能在同样短的时间内相应消失，这样就会形成局部地区感应高电压。形成原理如图 1-13 所示。

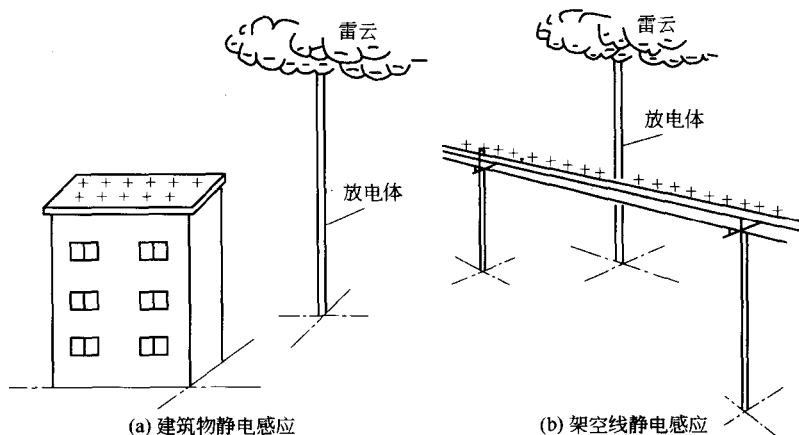


图 1-13 静电感应过电压

电压从雷击开始随着时间的推移而下降，它符合 RC 电路放电的规律，即

$$U_c = Ue^{-\frac{t}{RC}} \quad (1-12)$$

$$U = \frac{Q}{C} \quad (1-13)$$

式中  $U_c$ ——雷击发生后，局部高电压地区与大地之间任何瞬间的电压，V；

$U$ ——发生闪击那一瞬间，即  $t$  等于零那一瞬间，局部高电压地区对大地间的电压，V；

$R$ ——高电压局部地区对大地的散流电阻， $\Omega$ ；

$C$ ——局部高电压地区对雷云之间的电容，F；

$Q$ ——局部高电压地区积累的电荷量，C；

$t$ ——以发生闪击瞬间为零，闪击发生后延续的时间，s。

这样形成的局部地区感应高电压在高压架空线路可达 300~400kV，一般低压架空线路可达 100kV，电讯线路可达 40~60kV，建筑物也可以产生相当高的有危险的电压。这种由静电感应产生的过电压对接地不良的电气系统有破坏作用，建筑物内部的金属构架与接地不良的金属器件之间容易发生火花，这对存放易燃物品的建筑物，如汽油，有瓦斯的地方，如火药库，和有大量可燃性微粒飞扬的场所，如面粉厂、亚麻厂等，有引起爆炸的危险。1986 年我国某亚麻厂就是因为这一疏忽发生爆炸的，造成极严重的损失。

由于静电感应引起的局部高电压对人身也有相当大的危险，为了防止静电感应高电压发生，应将建筑物的金属屋顶、建筑物内的大型金属物品等给以良好的接地处理，以便感应电荷能迅速地流向大地。

### 五、雷电流电磁感应的破坏作用

由于雷电流有极大的幅值和陡度，在它周围的空间将有强大的、变化的电磁场，处在这电磁场中的导体会感应出较大的电动势。如图 1-14 所示。如果在雷电流引下线附近放置一个开