

电子工程技术丛书

电子信息系统防雷及 接地实用技术

● 周志敏 纪爱华 编著

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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电子工程技术丛书

电子信息系統防雷及 接地實用技術

周志敏 紀愛華 編著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以电子信息系统的防雷及接地实用技术为主线,系统地讲述了雷电形成机理、雷电危害与干扰、雷电的防护设计、过电压抑制器件,根据电子信息设备的应用领域,重点讲述信息网络系统、智能建筑、通信系统、CATV系统、微波站和移动基站、低压配电系统、智能家居的防雷技术。列举了电信机房、有线电视中心、计算机机房、移动基站、网络中心等具体的工程应用实例。本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值。

本书可供电信、智能建筑、信息、视频传输等行业从事防雷技术应用的工程技术人员和高等院校师生阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子信息系统防雷及接地实用技术/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2014.1
(电子工程技术丛书)

ISBN 978-7-121-21770-8

I. ①电… II. ①周… ②纪… III. ①电子系统-引伸体接地-研究 IV. ①TN103

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第257631号

策划编辑:富 军

责任编辑:侯丽平

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:390.4千字

印 次:2014年1月第1次印刷

印 数:4000册 定价:45.00元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

在国民经济的许多重要领域（航天、军事、电信、工控、信息产业、金融、广电、电力、交通等）防雷已经是热门话题，这是因为电子信息设备的广泛应用，引发了对传统防雷技术的创新和发展，因此推动了各种防雷新产品的开发和研制，使得现代防雷技术不断地创新和完善。

电子信息系统对防雷抗干扰技术提出了更新更高的挑战。在防雷技术相对滞后于电子信息技术发展的今天，在电子信息系统的防雷方案规划设计中，应结合电子信息设备的特点，遵循雷电自然规律，要整体、全面、系统地考虑电子信息系统的防雷设计，并要综合运用传统的和现代的防雷技术。

本书结合现代防雷技术的发展，将常规防雷技术与现代防雷技术，雷击危险评估和防雷工程的规划设计，防雷产品的开发和应用以及防雷施工技术有机结合。本书对防雷技术的发展、雷电形成机理、现代防雷技术、防雷装置的应用、防雷工程设计和施工等进行了系统的阐述。全书将防雷理论与现代防雷工程实践相结合，多角度地讲述了现代防雷技术和新型防雷器件及其在防雷工程设计中的应用技术。深信本书的出版发行对国内防雷技术的创新和发展及应用具有一定的现实意义，对于电子信息系统的防雷工程的规划和实际应用更具有其实际的经济和社会效益。

参加本书编写的有周志敏、纪爱华、周纪海、刘建秀、顾发娥、纪达安、刘淑芬、纪和平、纪达奇等，本书在写作过程中无论从资料的收集和技术信息交流上都得到了国内的专业学者和同行及防雷器件制造商的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

| | |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 概述 | 1 |
| 1.1 雷云的形成及电离层与地面间的电荷平衡 | 1 |
| 1.1.1 雷云的形成 | 1 |
| 1.1.2 电离层与地面间的电荷平衡及尖端放电 | 6 |
| 1.2 雷电流的特性及雷击选择性 | 7 |
| 1.2.1 雷电流的特性 | 7 |
| 1.2.2 雷电活动及雷击的选择性 | 9 |
| 1.3 防雷技术..... | 11 |
| 1.3.1 防雷机理..... | 11 |
| 1.3.2 现代防雷技术 | 13 |
| 1.3.3 现代防雷产品 | 15 |
| 第 2 章 雷电危害与干扰 | 18 |
| 2.1 雷电电磁脉冲干扰及防护分级计算方法..... | 18 |
| 2.1.1 雷电电磁脉冲干扰 | 18 |
| 2.1.2 雷电电磁脉冲防护分级计算方法 | 20 |
| 2.2 雷电对电子信息设备的危害及主要干扰途径..... | 22 |
| 2.2.1 雷击与雷电过电压 | 22 |
| 2.2.2 瞬态过电压 | 26 |
| 2.2.3 电子信息系统中的主要干扰途径 | 27 |
| 第 3 章 雷电的防护设计 | 29 |
| 3.1 防雷技术..... | 29 |
| 3.1.1 雷电防护的必要性 | 29 |
| 3.1.2 防雷装置..... | 32 |
| 3.1.3 电子信息系统的整体雷电防护 | 38 |
| 3.2 雷电防护的规划设计..... | 43 |
| 3.2.1 外部防雷系统的规划设计..... | 43 |
| 3.2.2 内部防雷系统的规划设计..... | 45 |
| 3.3 接地分类及接地网建设..... | 46 |
| 3.3.1 接地的分类和目的 | 46 |
| 3.3.2 接地要求和方法 | 47 |
| 3.3.3 接地网的建设 | 50 |
| 3.4 接地网设计和施工..... | 56 |
| 3.4.1 接地网设计 | 56 |
| 3.4.2 接地网施工工艺 | 58 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| 第 4 章 过电压抑制器件 | 62 |
| 4.1 防雷器的主要技术参数及分类 | 62 |
| 4.1.1 防雷器的主要技术参数 | 62 |
| 4.1.2 防雷器的分类 | 63 |
| 4.2 气体放电管特性及应用 | 64 |
| 4.2.1 气体放电管特性 | 64 |
| 4.2.2 气体放电管的应用 | 67 |
| 4.3 新型保护器件特性及选用指南 | 69 |
| 4.3.1 新型保护器件特性 | 69 |
| 4.3.2 新型保护器件选用指南 | 71 |
| 4.4 氧化物压敏电阻特性及存在的问题 | 73 |
| 4.4.1 氧化物压敏电阻特性及选用 | 73 |
| 4.4.2 氧化物压敏电阻存在的问题 | 79 |
| 4.5 SPD 浪涌防护器的特点及其应用 | 81 |
| 4.5.1 SPD 的性能特点 | 81 |
| 4.5.2 SPD 的安装方案 | 83 |
| 4.5.3 便携设备 SPD 的选择 | 86 |
| 4.5.4 建筑物入口处 SPD 的选择 | 88 |
| 4.5.5 SPD 的 I 级分类试验测试方法 | 95 |
| 第 5 章 信息网络系统防雷技术 | 100 |
| 5.1 信息技术设备的电磁兼容性标准及传导干扰测量方法 | 100 |
| 5.1.1 信息技术设备电磁兼容性标准 | 100 |
| 5.1.2 信息技术设备的传导干扰测量方法 | 102 |
| 5.2 信息技术设备的防雷端口及防护 | 104 |
| 5.2.1 信息技术设备的防雷端口及指标 | 104 |
| 5.2.2 信息技术设备的端口保护 | 106 |
| 5.3 计算机机房的防雷 | 108 |
| 5.3.1 雷电干扰侵入计算机系统的途径及抑制措施 | 108 |
| 5.3.2 计算机系统的瞬态过电压保护设计 | 113 |
| 5.3.3 计算机系统低阻抗地线均压网络设计 | 116 |
| 5.4 RS485 总线端口抗雷击技术及防雷设计 | 117 |
| 5.4.1 RS485 的抗雷击技术 | 117 |
| 5.4.2 RS485 接口防雷设计 | 118 |
| 第 6 章 智能建筑的防雷技术 | 121 |
| 6.1 智能建筑的防雷及抗干扰 | 121 |
| 6.1.1 智能建筑的防雷 | 121 |
| 6.1.2 智能建筑的抗干扰 | 123 |
| 6.2 智能建筑的防雷技术 | 124 |
| 6.2.1 建筑物防雷技术 | 124 |

| | | |
|------------|-----------------------------|------------|
| 6.2.2 | 智能建筑弱电系统防雷设计 | 127 |
| 6.2.3 | 智能建筑的端口雷电浪涌保护 | 128 |
| 6.2.4 | 智能建筑的接地技术 | 130 |
| 6.2.5 | 智能建筑接地设计应注意的问题 | 134 |
| 6.3 | 综合布线系统的结构及抗干扰技术 | 136 |
| 6.3.1 | 综合布线系统结构 | 136 |
| 6.3.2 | 综合布线系统中的屏蔽技术 | 137 |
| 6.3.3 | 综合布线系统中的接地技术 | 143 |
| 第7章 | 通信系统的防雷技术 | 146 |
| 7.1 | 通信系统的雷电系统及措施 | 146 |
| 7.1.1 | 现代通信的防雷系统 | 146 |
| 7.1.2 | 通信中心枢纽的防雷措施 | 150 |
| 7.2 | 强电和雷电防护对光缆的影响及防护技术的发展 | 151 |
| 7.2.1 | 强电和雷电对光缆的影响 | 151 |
| 7.2.2 | 光缆防强电及雷电技术的发展 | 153 |
| 7.3 | 通信系统的接地系统 | 155 |
| 7.3.1 | 接地系统简介 | 155 |
| 7.3.2 | 通信系统的联合接地方式 | 156 |
| 7.3.3 | 通信系统的接地电阻测量方法 | 158 |
| 7.4 | 通信系统防雷工程的施工 | 161 |
| 7.4.1 | 通信系统外部防雷工程的施工 | 161 |
| 7.4.2 | 通信系统内部防雷工程的施工 | 165 |
| 第8章 | CATV系统的防雷技术 | 168 |
| 8.1 | CATV系统的防雷接地技术 | 168 |
| 8.1.1 | CATV系统接收天线的防雷接地 | 168 |
| 8.1.2 | CATV系统前端设备的防雷接地 | 170 |
| 8.2 | 有线电视传输网络的防雷接地 | 172 |
| 8.2.1 | 同轴电缆传输系统的防雷 | 172 |
| 8.2.2 | 农村CATV网络的防雷与接地 | 175 |
| 8.3 | 安全监控系统防雷保护 | 176 |
| 8.3.1 | 安全监控系统的组成及防雷保护 | 176 |
| 8.3.2 | WCTV系统的综合防雷方案 | 177 |
| 第9章 | 微波站和移动基站的防雷技术 | 179 |
| 9.1 | 微波站防雷技术 | 179 |
| 9.1.1 | 微波站防雷设施 | 179 |
| 9.1.2 | 微波站接地系统 | 181 |
| 9.1.3 | 微波站的整体防雷方案 | 183 |
| 9.2 | 移动基站整体防雷 | 189 |
| 9.2.1 | 移动基站防雷特点 | 189 |

| | | |
|---------------|--------------------------|------------|
| 9.2.2 | 移动基站内外部保护 | 192 |
| 9.2.3 | 移动通信基站供电系统的防雷与接地 | 195 |
| 9.2.4 | 移动基站防雷解决方案 | 200 |
| 第 10 章 | 低压供电系统的防雷技术 | 202 |
| 10.1 | 电源防雷器性能及配置 | 202 |
| 10.1.1 | 电源防雷器性能 | 202 |
| 10.1.2 | 电源防雷器配置 | 204 |
| 10.2 | 供电系统的浪涌保护及电涌保护器接地 | 210 |
| 10.2.1 | 供电系统的浪涌保护 | 210 |
| 10.2.2 | 电源电涌保护器接地 | 216 |
| 第 11 章 | 智能家居的防雷技术 | 220 |
| 11.1 | 家居抗干扰技术 | 220 |
| 11.1.1 | 家居系统瞬态干扰防护的必要性 | 220 |
| 11.1.2 | 智能家居系统干扰的抑制措施 | 222 |
| 11.2 | 家居端口防雷技术 | 224 |
| 11.2.1 | 家居电源端口防雷技术 | 224 |
| 11.2.2 | 家居等电位连接 | 227 |
| 11.2.3 | 家居电器的防雷和浪涌防护 | 230 |
| 参考文献 | | 233 |

第 1 章

概 述

1.1 雷云的形成及电离层与地面间的电荷平衡

1.1.1 雷云的形成

雷电这一自然现象，瞬变万千。古人以阴阳平衡之理论来认识这一自然现象，其理论与之千年的实践，同现代实证性科学相比，有着相当深的科学内涵。随着人类社会的进步和科学技术的发展，人们对雷电这一自然现象有了新的认识，其理论和防雷实践都在不断地完善。自 200 多年前富兰克林避雷针问世至今，其顺应雷云放电规律，创造优先放电条件，使防雷实用技术进入一个崭新的阶段。

通常所谓雷击是指一部分带电的云层与另一部分带异种电荷的云层之间，或者是带电的云层对大地之间迅猛地放电。这种迅猛的放电过程产生强烈的闪电并伴随巨大的声音。当然，云层之间的放电主要对飞行器有危害，对地面上的建筑物和人、畜没有很大影响。然而，云层对大地的放电，则对建筑物、电子设备和人、畜危害甚大，这是防雷界要研究的主要对象。

通常雷击有三种主要形式：其一是带电的云层与地球上某一点之间发生迅猛的放电现象，叫作“直击雷”。其二是带电云层由于静电感应作用，使地面某一范围带上异种电荷，即当直击雷发生以后，云层带电迅速消失，而地面某些范围由于散流电阻大，以至出现局部高电压，或者是在直击雷的放电过程中，强大的脉冲电流对周围的导线或金属物因电磁感应而产生高电压，以至发生闪击的现象，叫作“二次雷”或“感应雷”。其三是一种特殊的雷电现象，即“球形雷”。“球形雷”为橙色或红色，或似红色火焰的发光球体（也有带黄色、绿色、蓝色或紫色的），直径一般为 10~20cm，最大的直径可达 1m，存在的时间为百分之几秒至几分钟，一般为 3~5s，其下降时有的无声，有的发出嘶嘶声，一旦遇到物体或电气设备会产生燃烧或爆炸，其主要是沿建筑物的孔洞或开着的门窗进入室内，有的由烟囱或通风管道滚进楼房，多数沿带电体消失。

在讨论雷电形成之前，首先讨论雷云的产生。不管是直击雷还是感应雷都与带电的云层分不开，带电的云层称为雷云。有关雷云形成的假说很多，但至今尚未有一种被公认为无懈可击的完整学说，这里仅介绍其中被认为比较完善并经常被推荐的假说。

1. 雷云形成的假说

根据大量科学测试可知，地球本身就是一个电容器，通常大地稳态时带负电荷 500 000C

左右，而地球上空存在一个带正电的电离层，这两者之间便形成一个已充电的电容器，它们之间的电压为 300kV 左右，其场强为上正下负。

当含水蒸气的空气受到炽热的地面烘烤受热而上升，或者较温暖的潮湿空气与冷空气相遇都会产生向上的气流。这些含水蒸气的气流在上升时温度逐渐下降形成雨滴、冰雹（称为水成物），这些水成物在地球静电场的作用下被极化，如图 1-1 所示，负电荷在上，正电荷在下，它们在重力作用下落下的速度比云滴和冰晶（这二者称为云粒子）要大，因此极化水成物在下落过程中要与云粒子发生碰撞。碰撞的结果是其中一部分云粒子被水成物所捕获，增大了水成物的体积，另一部分未被捕获的被反弹回去。而反弹回去的云粒子带走水成物前端的部分正电荷，使水成物带上负电荷。由于水成物下降的速度快，而云粒子下降的速度慢，因此带正、负两种电荷的微粒逐渐分离（这叫重力分离作用），如果遇到上升气流，云粒子不断上升，分离的作用更加明显。最后形成带正电的云粒子在云的上部，而带负电的水成物在云的下部，或者带负电的水成物以雨或雹的形式下降到地面。当带电云层一经形成，就形成雷云空间电场，空间电场的方向和地面与电离层之间的电场方向是一致的，都是上正下负，因而加强了大气电场的强度，使大气中水成物的极化更厉害，在上升气流存在的情况下更加剧重力分离作用，使雷云发展得更快。

从上面的分析，好像雷云总是上层带正电荷，下层带负电荷。实际上气流并不仅是只有上下移动，而比这种运动更为复杂。因此雷云电荷的分布也比上面讲的要复杂得多。

根据科学工作者大量直接观测的结果，典型的雷云中的电荷分布大体如图 1-2 所示。

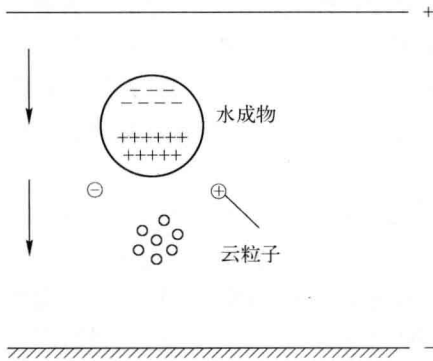


图 1-1 水成物在地球静电场的作用下被极化

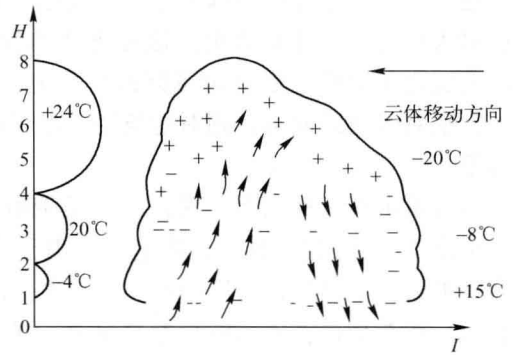


图 1-2 典型的雷云中的电荷分布

科学工作者的测试结果表明，大地被雷击时，多数是负电荷从雷云向大地放电，少数是雷云上的正电荷向大地放电；在一块雷云发生的多次雷击中，最后一次雷击往往是雷云上的正电荷向大地放电。观测证明，发生正电荷向大地放电的雷击显得特别猛烈。

上面的假说首先是由威尔逊（Wilson）提出的，通常把它叫作威尔逊假说。另外我国学者唐山樵先生曾对雷云的形成提出了如下的假说：雷电的出现是与气流、风速密切相关的，而且与地球磁场学有一定的联系。雷云内部的不停运动和相互摩擦而使雷云产生大量的带正、负电荷的小微粒，即所谓的摩擦生电。这样，庞大的雷云就相当于一块带有大量正、负电荷的云块，而这些正、负电荷不断地产生，同时也在不断地复合，当这些云块在水平方向向东或向西迅速移动时（最大风速可达 40m/s），它与地球磁场磁力线产生切割，这就好像导体切割磁力线产生电流一样，云中的正、负电荷将产生定向移动，其移动的方向可按右手

定则来判断。若云块是由西向东移动，而地磁场磁力线则是由地球南极指向地球的北极，因此大量的正电荷向上移动，负电荷向下移动，这样云的下部将积聚越来越多的负电荷，而云的上部积聚大量的正电，当电场强度达到足够高（ $25 \sim 30\text{kV/cm}$ ）时将引起雷云间的强烈放电，或是雷云中的内部放电，或是雷云对地放电，即所谓的雷电。

雷电是因强对流天气而形成的雷云层间和雷云与大地之间的强烈瞬间放电现象，当今还没有一个完整理论可以将全部雷电现象解释清楚。目前的办法是将不同理论综合起来，尽可能完善地解释各种雷电现象。

2. 雷电的形成

1) 雷电形成的三个条件

空气中必须有足够的水汽；有使潮湿空气强烈持久上升的气流；有使潮湿空气上升凝结成水珠或冰晶的气象、地理条件。

2) 雨滴分裂作用理论

当潮湿空气上升到高空，由于高空气温较低，产生凝结，在上升气流运动过程中逐渐增大形成小水滴。由于上升气流的不稳定性，水滴在运动过程中相互摩擦、碰撞、分裂形成大小不等的水珠，大水珠带正电荷，小水珠带负电荷，小水珠容易被上升气流带到上层云层，大水珠则留在下层或降落到地面，这样便形成了电荷的分离过程。当带电荷云层逐步积累到足够的电荷量时，便产生闪电现象，形成雷电。实验证明：

- (1) 水滴分裂时确实是大水珠带正电荷，小水珠带负电荷。
- (2) 分裂水滴所需气流的速度为 $3 \sim 8\text{m/s}$ ，正是雷云中上升气流的速度。

3) 电场极化理论

距离地面 80km 以上的电离层具有一定的导电能力，而且是带正电荷的，而大地是带负电荷、形成比较稳定的大气电场。因此，电离层和地这两个带电导体中间被不导电的大气所绝缘，形成一个电容器。使处于其中的任何导体上端带负电荷，下端带正电荷（云层也是如此），即发生极化。此外，近地大气中还常有一定量的离子，其中正离子较重（约为电子的 2000 倍）不大活动，而负离子则活动性较大，在大气电场的作用下，负离子向上运动，正离子向下运动，形成上负下正离子层；另外，空气中水滴分裂后形成上负下正的带电云层，进一步被大气电场极化，这些云层电荷量逐渐积累增多，达到了足够的能量时，便产生闪电现象，形成雷电。

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：

- (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,而在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,由于地面吸收太阳辐射的热量远大于空气层,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℃),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,这是积雨云的显著特征。

在积雨云形成过程中,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”。

3. 雷灾特点

雷电以其巨大的破坏力给人类社会带来了惨重的灾难,尤其是近几年来,雷电灾害频繁发生,对国民经济造成的危害日趋严重。为此应当加强防雷意识,做好预防工作,将雷害损失降到最低限度。当人类社会进入电子信息时代后,雷灾出现的特点与以往有极大的不同,可以概括为:

(1) 受灾面在不断扩大,从电力、建筑这两个传统领域扩展到几乎所有行业,特别是与高新技术关系密切的领域,如航天航空、国防、邮电通信、计算机、电子工业、石油化工、金融证券等。

(2) 从二维空间入侵变为三维空间入侵。从闪电直击和过电压波沿导线传输变为空间闪电的脉冲电磁场从三维空间入侵到任何角落,无孔不入地造成灾害,因而防雷工程已从传统防直击雷、感应雷进入现代的防雷电电磁脉冲(Lightning Electromagnetic Pulse, LEMP)阶段。前面是指雷电的受灾行业面扩大了,这里是指雷电灾害的空间范围扩大了。

(3) 雷灾的经济损失和危害程度大大增加了,它袭击的对象本身的直接经济损失有时并不太大,而由此产生的间接经济损失和影响是难以估计的。

产生上述特点的根本原因,是雷灾的主要对象已集中在微电子设备上。雷电本身并没有变,而是科学技术的发展,使得人类社会的生产生活状况变了。微电子技术的应用渗透到各种生产和生活领域,微电子器件极端灵敏这一特点很容易受到无孔不入的LEMP的作用,造成微电子设备的失控或者损坏。

为此,信息时代的防雷工作的重要性、迫切性、复杂性大大增加了,雷电的防御已从直击雷、感应雷防护发展到了整体的系统防护,必须站到新高度来认识和研究现代防雷技术,提高人类对雷灾防御的综合能力。

综上所述,雷电的成因为摩擦生电及云块切割磁力线,把不同电荷进一步分离。可见雷电的成因或者说雷电的主要能源来自于大气的运动,没有这些运动,是不会有雷电的。这也解释了为什么雷电总伴随着狂风骤雨而出现。

雷云的起电机理有三种理论,各解释一定的雷电成因现象。其三种理论分别为:水滴破

裂效应、水滴冻冰效应和吸收电荷效应。

本书认为前两种解释有其一定的局限性，而从火花放电发展机理去解释，雷云起电机理采用吸收电荷效应理论来阐述更容易理解。由于宇宙射线等使气体分子游离，在大气中存在着两种离子，由于大气空间场的作用，使云层上部积聚正电荷，下部积聚负电荷，在空间场的作用下云层分离从而带电。

雷云中电荷的分布是不均匀的，形成许多堆积中心。因而不论是在云中或是在云对地之间，电场强度是不一致的，当云中电荷密集处的电场强度达到 $25 \sim 30\text{kV/cm}$ 时，就会由云向地开始先导（雷云中积聚电荷最密集处，首先对物体击穿形成的一条导电带）放电（对于高层建筑，雷电先导可由地面向上发出，称为上行雷），由雷云发展至地面的时间约几个毫秒。光学照片显示先导继续生长不是均匀的，是跳跃式的、迈步式的，向地频繁迈步前进，即走一段，停一会，再走一段，再停一会。每秒的长度为 $10 \sim 200\text{m}$ ，每秒停歇的时间为 $10 \sim 100\mu\text{s}$ 。先导发展速度约为 10^7m/s ，延续时间约为 $1\mu\text{s}$ 。先导中心的电荷密度为 $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3}\text{C/m}$ ，先导的电晕半径为 $0.6 \sim 6\text{m}$ 。它有一个向下伸展的电荷囊，相应先导发展时的电流约为 100A ，先导中的纵向电位梯度约为 $100 \sim 500\text{kV/m}$ 。下行负先导在发展中会分成数支，这和空气原来随机存在的离子团有关。当先导通道的顶端接近地面时，可诱发迎面先导（通常起自地面的突出部分），当先导与迎面先导会合时，即形成了从云到地面的强烈电离通道，如图 1-3 所示。这就是雷电的主放电阶段，此时雷鸣和闪电都伴随出现。

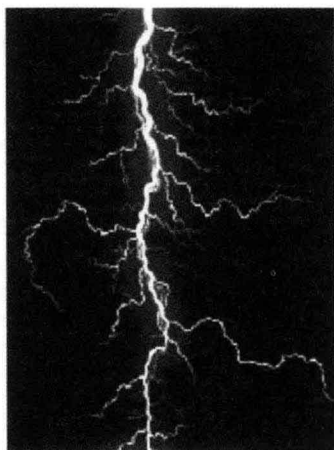


图 1-3 雷电从云到地面的电离通道图

迎面先导由地面向云的传播速度为光速的十分之几。流经被击物的雷电流幅值与定位高度、先导电荷相关。可获得的雷电流与击距（击距是指防雷计算中的抛球半径或滚球半径）有关，但有很多参数是不“真知”，一般推断，目前世界上有很多不同的击距与电流之间的关系计算公式。一般地说，雷电流越大，击距就越长，如雷电流为 200kA 以上，击距可能在 200m 及以上，雷电流为 $15 \sim 20\text{kA}$ ，击距可能在 $20 \sim 30\text{m}$ 。

雷击时，主放电存在的时间极短，为 $50 \sim 100\mu\text{s}$ ，主放电过程是逆着先导通道发展的，速度为光速的 $1/21 \sim 1/2$ ，主放电的电流可达数十万安，是全部雷电流中最主要部分。主放电到达云端时就结束了，然后云中的残余电荷经过主放电通道流下来，称为余光阶段，由于云中电阻较大，余光阶段对应的电流不大（约数百安），持续时间却较长（ $0.03 \sim 0.15\text{s}$ ）。由于云中可能同时存在几个电荷中心，所以第一个电荷中心的上述放电完成之后，可能引起第二个、第三个中心向第一通道放电。因此雷击放电含多重放电，含多个脉冲波（冲击波），每个脉冲波相隔时间为 $600 \sim 800\mu\text{s}$ ，放电的数目平均为 $2 \sim 3$ 次。最多记录到 42 次。后续放电，是沿着第一次放电（第一个脉冲）的游离通道进行的，自上而下连续发展，没有先导的停歇现象，但主放电仍然是由下向上发展。雷电多重放电总持续时间可达 1s ，绝大多数的持续时间不超过 0.3s 。一般来说，第一次主放电的雷电流脉冲幅值和陡度 di/dt 比后续大，其波形是相当复杂的。

雷电流具有两大特点，一是幅值大，二是持续时间短。由雷电流产生的磁场是一瞬变的

电磁场，这一瞬变磁场的辐射对在一定范围内的微电子设备造成干扰，又因瞬变磁场产生的电磁感应电压与雷电流的大小及变化速率成正比，与雷击处的距离成反比，同时雷电流极大的幅值和陡度，其感应电压可达相当高的幅值，是对微电子设备安全运行的最大威胁，其也可沿着传输线、供电线侵入、干扰甚至损坏设备。

1.1.2 电离层与地面间的电荷平衡及尖端放电

1. 电离层与地面间的电荷平衡

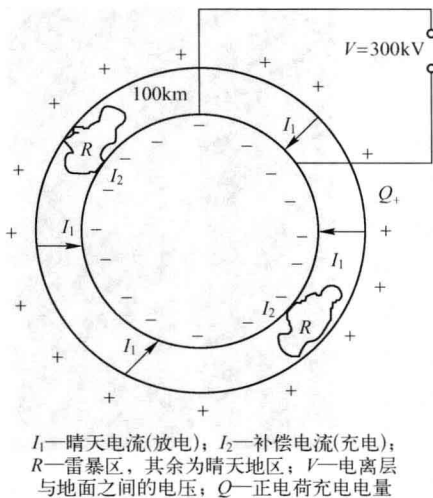


图 1-4 地球电场示意图

上面说过，地球是一个表面带负电荷的球体，并且它所带的负电荷量长期稳定在 $5 \times 10^5 \text{C}$ 水平，而在地球上空的电离层上则带有相等的正电荷，使电离层与地面之间的电压约 300kV，如图 1-4 所示。因而在电离层与地面之间存在一个电场，晴天时在地面附加的电场强度为 120V/m。即使在晴天，大气中总有一些空气分子被电离，在电场的作用下形成放电电流。观测和计算的结果表明，全地球该放电电流强度为 1800A，如果长期如此，电离层与地面之间的电荷将很快放电完毕；然而事实上，它们之间大致长期保持恒定的电量和电压，这主要是由于雷暴的形成和雷击，把正电荷从大地送回到电离层，起到对电离的正电荷充电的作用。根据卫星观测资料及电学观测资料估计，在任何时刻全地球表

面上连续发生着大约 1000 个雷暴，从而使电离层与大地之间的电场保持稳定。

2. 尖端放电与雷击

由物理学可知，通常物体内部的正电荷和负电荷是相等的，所以从整体来看不显示带电现象，当某一物体所具有的正、负电荷不相等时，这个物体就显示带电的特性，当物体内部的正电荷多于负电荷时，物体带正电，反之带负电。由于电荷都有异性相吸、同性相斥的特性，所以带电物体中的同性电荷总是受到互相排斥的电场力作用。以一个如图 1-5 所示的尖端放电示意图为例，假如金属球带上负电（同理也可以解释带上正电），由于电荷同性相斥的作用，电子总是分布到金属球的最外层表面，并且有“逃离”金属球表面的趋势。球的尖锋部分的电子受到同性电荷往外的排斥力最强，故最容易被排斥离开金属球，这就是通常说的“尖端放电”。此外当带电物体周围的空气潮湿或带有与带电体相反电荷的离子时，带电体也越易放电。当天空中有雷云的时候，因雷云带有大量电荷，由于静电感应作用，雷云下方的地面和地面上的物体都带上与雷云相反的电荷。雷云与其下方的地面就成为一个已充电的电容器，当雷云与地面之间的电压高到一定的时候，便对地面上突出的物体放电。同时，天空带电的雷云在电场的

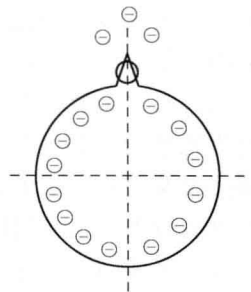


图 1-5 尖端放电示意图

作用下,少数带电的微粒(或水成物)也向地面靠拢,这些少数带电微粒的靠拢,叫作先驱注流,又叫电流先导。先驱注流的延续将形成电离的微弱导通,这一阶段称为先驱放电。开始产生的先驱放电是不连续的,是一个一个脉冲地相继向前发展。它发展的平均速度为 $10^5 \sim 10^6 \text{ m/s}$,各脉冲间隔约 $30 \sim 90 \mu\text{s}$,每阶段推进约 50 m 。先驱放电常常表现为分枝状,这是由于放电是沿着空气电离最强、最容易导电的路径发展的。这些分枝状的先驱放电通常只有一条放电分支达到大地。

当先驱放电到达大地,或与大地放电迎面会合以后,就开始主放电阶段,在主放电阶段雷云与大地之间所聚集的大量电荷,通过先驱放电所开辟的狭小电离通道发生猛烈的电荷中和,放出能量,以至发出强烈的闪光和震耳的轰鸣。在雷击中,雷击点有巨大的电流流过。大多数雷电流峰值为几十千安,也有少数上百千安甚至几百千安的。雷电流峰值的大小与土壤电阻率的大小成反比关系,即土壤电阻率高,则雷电流峰值小;土壤电阻率低,则雷电流峰值大。

雷电流大多数是重复的,通常一次雷电包括 $3 \sim 4$ 次放电。重复放电都是沿着第一次放电通路发展的。雷电之所以重复发生,是由于雷云非常大,它各部分密度不完全相同,导电性能也不一样,所以它所包含的电荷不能一次放完,第一次放电是由雷云最低层发出的,随后放电是从较高云层或相邻区发出的。

1.2 雷电流的特性及雷击选择性

1.2.1 雷电流的特性

雷电破坏作用与峰值电流及其波形有着密切的关系。雷击的发生、雷电流大小与许多因数有关,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规律。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。为此有必要做如下说明。由典型的雷云电荷分布可知,雷云下部带负电,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负闪电。正闪电发生时正电荷由云到地,为正值,负闪电发生时负电荷由云到地,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,这叫作向下先导。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,把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。上面讲到一次雷击大多数分成 $3 \sim 4$ 次放电,一般是第一次放电的电流最大,正闪电的电流比负闪电的电流大。

雷电放电参数是防雷设计的重要依据。雷电放电参数包括主放电通道波阻、雷电流波形、雷电流幅值概率分布、雷电流极性、重复放电次数及对地输送的电荷量等。

1. 主放电波阻

主放电阶段雷电通道阻抗不是常值,是随通道电流的增大而减小。该参数以等值阻抗

Z_M 来表征, 随雷电流幅值变化。雷电通道阻抗计算受流经被击物的雷电流幅值 I_{wt} 影响。 I_{wt} 可按下式计算:

$$I_{wt} = I_{R=0} \times Z_M / (Z_M + Z_{dx}) \quad (1-1)$$

式中 I_{wt} ——流经被击物的雷电流幅值, kA;

$I_{R=0}$ ——流经良好接地体的雷电流幅值, kA;

Z_M ——主放电阶段雷电通道阻抗, Ω ;

Z_{dx} ——被击物体等值阻抗, Ω , 例如, 雷击架空线路导线时, $Z_{dx} = Z_{da}/2$;

Z_{da} ——架空线路导线波阻, Ω 。

在大多数计算中, Z_M 应该等于无穷大, 这时 $I_{wt} = I_{R=0}$, 即可认为雷电通道是电流源。

2. 雷电流波形

世界各国测得的对地放电雷电流波形基本一致, 多数是单极性重复脉冲波, 少数为较小的负过冲, 一次雷击放电过程常常包含多次先导至主放电的过程(分别第一次放电和随后放电)和后续电流。这点对考核各种防雷保护器通流能量是很重要的。实际上通过防雷保护器的雷电流为一连串周期为几百微秒的脉冲电流。

正极性放电和随后负放电波形是有明显的区别, 第一次负放电电流波形较长, 在峰值附近有明显的双峰; 随后放电电流波形的波头较短, 没有双峰, 电流陡度远大于第一次放电(即第一次脉冲), 而电流幅值约为第一次放电的一半。随后放电, 约有一半存在连续的后续电流, 至少持续 40ms, 电流从数十安到几百安不等。

综合各国观测结果, 一次雷击(闪电)有多次雷电流脉冲, 一般为 2~3 个, 最多记录到 42 个, 多数是单极性的重复脉冲, 约 85% 的雷电流(脉冲)波头在 1~5 μ s, 平均为 2.6 μ s。雷电流(脉冲)波长在 20~350 μ s 之间。所以在工程上选用雷电流波形时, 应视其敏感性及其具体情况而定, 比如在《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》中, 在计算杆塔反击耐雷水平时采用雷电流波形为 2.6/50 μ s, 但在计算杆塔及反击时沿导线侵入变电所雷电流波形时, 在闪络点导线上雷电波头近似直角波, 与直击雷雷电流波头关系不大, 主要是闪络截波, 波尾较长, 这样仅波头受沿导线传播时电晕衰减影响, 波幅值不受影响。在考核避雷器残压时用陡波头(0.9~1.1 μ s); 而考核避雷器动作负载时, 在 CIGREQ(英文全称是 International Council on Large Electric Systems, 国际大电网会议)的 1999 年报告中建议用 100/200 μ s 波形来代替现行的 8/20 μ s。总之, 雷电流波形选用视具体情况而定。又如, 有的工程计算时采用指数波、余弦波等, 这符合数学运算关系。

3. 雷电流幅值概率分布

某一次雷击的电流幅值是随机的, 对大量实测的雷电流幅值进行统计分析, 可得其概率分布曲线。不同地区的雷电流幅值分布是不同的, 这主要与地区的纬度、地形、地貌、气象和雷暴强度有关。

综合了我国几十年观测结果, 对雷暴日超过 20 的地区, 雷电流幅值的概率分布推荐为:

$$\lg P = -I/88 \quad (1-2)$$

式中 P ——雷电流幅值超过 I 的概率;

I ——雷电流幅值, kA。

对 20 雷暴日及以下地区，概率分布减小，推荐为 $\lg P = -I/44$ 。

4. 雷电流极性

当雷云电荷为正时，所发生的雷云放电为正极性放电，雷电流极性为正，反之，雷电流极性为负。实测统计资料表明，不同的地形地貌，雷电流正负极性比例不同，负极性所占比例在 75% ~ 90% 之间。

5. 重复放电次数及对地输送的电荷量

在一个雷云单体中，常常有多个电荷密集中心，因此，一次雷云放电也常常包含多次放电脉冲，称多重放电。根据 6000 次实测统计，平均重复放电 2 ~ 3 次，最多 42 次。累计每次全放电过程对地输送电荷量称为放电电荷。

1.2.2 雷电活动及雷击的选择性

1. 雷电活动及雷电活动日

雷电活动从季节来讲以夏季最活跃，冬季最少，从地区分布来讲是赤道附近最活跃，随纬度升高而减少，极地最少。评价某一地区雷电活动的强弱，通常用两种方法。其中一种是习惯使用的“雷电日”，即以一年当中该地区有多少天发生耳朵能听到雷鸣来表示该地区的雷电活动强弱，雷电日的天数越多，表示该地区雷电活动越强，反之则越弱。我国平均雷电日的分布，大致可以划分为四个区域，西北地区一般 15 日以下；长江以北大部分地区（包括东北）平均雷电日在 15 ~ 40 日之间；长江以南地区平均雷电日达 40 日以上；北纬 23° 以南地区平均雷电日达 80 日。广东的雷州半岛地区及海南省，是我国雷电活动最剧烈的地区，年平均雷电日高达 120 ~ 130 日。总的来说，我国是雷电活动很强的国家。

因为人们耳朵能听到的雷声，一般距离只能在 15km 左右，更远的雷声一般就听不到了，所以雷电日只能反映局部地区雷电活动情况。

还有一些科学家认为用“雷电日”表征一个地区的雷电活动不够准确，因为一天当中听到一次雷声就算一个“雷电日”，而一天当中听到 1000 次雷声也算一个“雷电日”，他们认为测试地区以 1000km² 范围内发生的闪击次数来统计较准确，这样就得出一种新的评价雷电活动的方法，叫“雷闪频数”。“雷闪频数”是 1000km² 内一年共发生的闪击数（也可以用每 1km² 一年内雷击次数为单位）。显然以 1000km² 作为一个地区单位来评价雷电活动的情况，对航空、航海、气象、通信等现代技术更为适合。然而它的测试方法只能借助于无线电，用耳朵来听是无能为力的。而对于建筑行业防雷，用“雷电日”已足够准确，并且大量观测统计资料表明，一个地区的“雷闪频数”与雷电日成线性关系，所以两种统计方法是没有矛盾的。

2. 雷击的选择性

在同一区域内雷击分布不均匀的现象，称为“雷击选择性”。雷灾事故的历史资料统计和实验研究证明，雷击的地点以及遭受雷击的部位是有一定规律的，因此掌握这些规律对预防雷击具有很重要的意义。