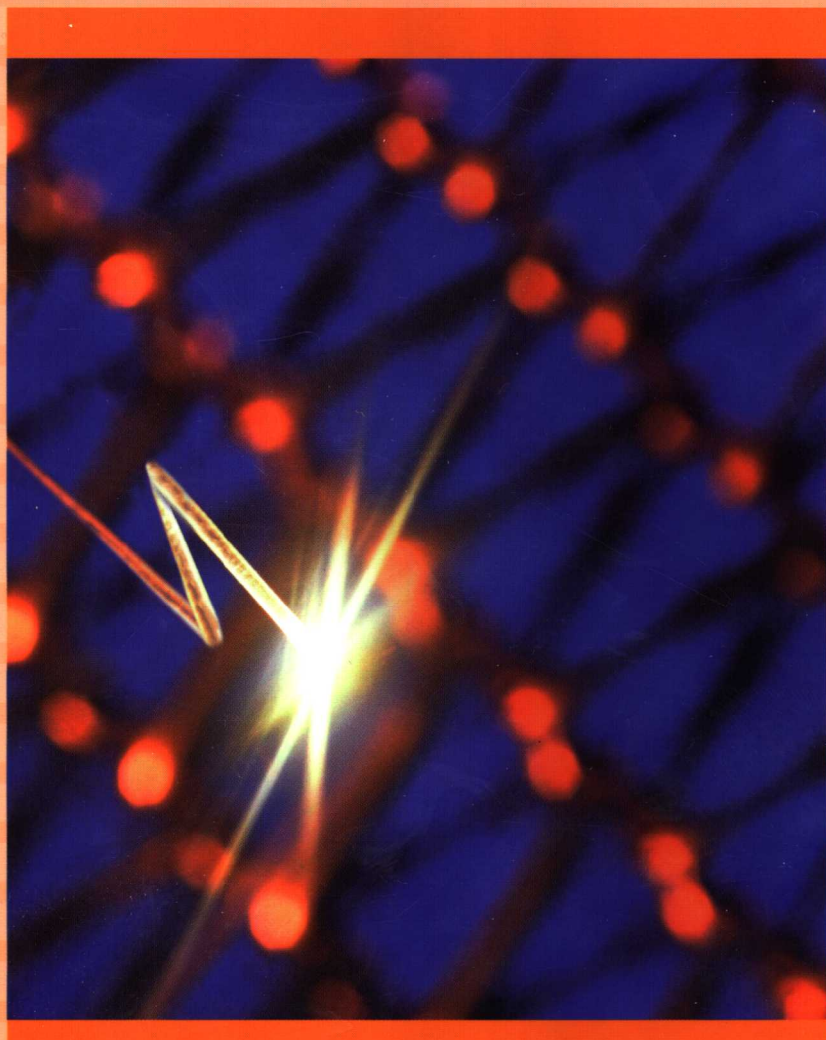


电子信息系统 防雷接地技术

DIANZI XINXI XITONG FANGLEI JIEDI JISHU

周志敏 周纪海 纪爱华 编著



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

电子信息系统防雷接地技术

周志敏 周纪海 纪爱华 编著

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

电子信息系统防雷接地技术 / 周志敏, 周纪海, 纪爱华编著. —北京: 人民邮电出版社, 2004.7
ISBN 7-115-12250-4

I. 电... II. ①周... ②周... ③纪... III. ①电子系统: 信息系统—防雷—技术②电子系统: 信息系统—接地装置 IV. ①TN②P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 042326 号

内 容 简 介

本书以电子信息系统的防雷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、雷电防护设计原则、过电压抑制器件以及电子信息系统防雷工程设计。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、低压配电系统以及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、移动基站和网络中心等具体的工程应用实例, 并对防雷规范和标准作以综述。本书题材新颖实用, 内容丰富, 深入浅出, 文字通俗, 具有较高的实用价值。

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。

电子信息系统防雷接地技术

◆ 编 著 周志敏 周纪海 纪爱华
责任编辑 刘 朋

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
读者热线 010-67129264
北京汉魂图文设计有限公司制作
河北邮电印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17

字数: 410 千字 2004 年 7 月第 1 版
印数: 1-5 000 册 2004 年 7 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-115-12250-4/TN · 2278

定价: 22.00 元

本书如有印装质量问题, 请与本社联系 电话: (010) 67129223

前 言

在国民经济的许多重要领域（如航天、军事、电信、工控、金融、广电、电力和公路等）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，推动各种防雷新产品的开发和研制，从而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，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地结合起来。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作以系统的阐述，并对防雷规范和标准作以综述。全书有机地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以及防雷工程设计中的应用技术。在本书后面的附录中收集了数百条防雷技术术语，为使读者查找方便，附录中的防雷技术术语按汉语拼音字母次序排序。深信本书的出版发行对国内防雷技术的创新、发展及应用具有一定的现实意义，对于电子信息系统防雷工程的规划设计和实际应用更具有其实际的意义。

本书在写作过程中无论是在资料的收集上还是在技术信息交流上都得到了国内的专业学者和同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，编者水平有限，难免有疏漏之处，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 雷电的形成	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 雷击闪电的特性	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 现代防雷技术概述	13
1.3.3 现代防雷产品	16
第 2 章 雷电危害与干扰	18
2.1 行波理论	18
2.1.1 行波理论简介	18
2.1.2 应用行波理论进行过电压分析	22
2.2 雷电电磁脉冲	23
2.2.1 雷电电磁脉冲干扰	24
2.2.2 雷电电磁脉冲防护分级计算方法	25
2.3 雷电对电子信息设备的危害	27
2.3.1 雷击与雷电过电压	27
2.3.2 瞬态过电压	31
2.3.3 电子信息系统中的主要干扰途径	32
第 3 章 雷电的防护设计	35
3.1 整体防雷技术	35
3.1.1 电子信息系统的雷电防护	35
3.1.2 防雷装置	38
3.1.3 信息系统整体防雷系统	43
3.2 雷电防护的规划设计	48
3.2.1 外部防雷系统	48
3.2.2 内部防雷系统	50
3.3 接地及接地线布置	51

3.3.1	接地的分类和目的	52
3.3.2	接地的要求和办法	53
3.3.3	接地网的建设	55
3.4	接地网的设计和施工	61
3.4.1	接地网的设计	61
3.4.2	施工工艺	63
第 4 章	过电压抑制器件	67
4.1	防雷器	67
4.1.1	防雷器的主要技术参数	67
4.1.2	防雷器的分类	68
4.2	气体放电管	69
4.2.1	气体放电管的结构和主要参数	69
4.2.2	气体放电管在电子信息系统中的应用	71
4.3	新型保护器件	73
4.3.1	二极管型保护器件	73
4.3.2	TVS 器件的选用	76
4.4	氧化物压敏电阻	77
4.4.1	氧化物压敏电阻的特性及选用	77
4.4.2	氧化物压敏电阻的分类及其性能的改进	83
4.5	浪涌防护器及其应用	85
4.5.1	浪涌防护器的性能特点	85
4.5.2	浪涌保护器的安装方案	87
4.5.3	便携式设备的 ESD 保护器件	89
4.5.4	建筑物入口处浪涌防护器的选择	91
4.5.5	浪涌防护器 I 级分类试验测试方法	97
第 5 章	信息网络系统的防雷接地技术	102
5.1	信息技术设备的电磁兼容性标准	102
5.1.1	信息技术设备	102
5.1.2	传导干扰的测量方法	105
5.2	信息技术设备的电磁干扰防护	107
5.2.1	信息技术设备的防雷端口及指标	107
5.2.2	信息技术设备的端口保护	108
5.3	计算机机房的防雷设计	110
5.3.1	雷电干扰侵入计算机系统的途径及抑制措施	110
5.3.2	计算机网络的瞬态过电压保护设计	115
5.3.3	低阻抗地线均压网络的设计	118
5.4	RS-485 总线端口的抗干扰设计	120

5.4.1	RS-485 的抗雷击技术	120
5.4.2	RS-485 接口的防雷设计	120
第 6 章	智能建筑的防雷接地技术	123
6.1	智能建筑的防雷系统	123
6.1.1	智能建筑的防雷	123
6.1.2	智能建筑的抗干扰	124
6.2	智能建筑的防雷设计	126
6.2.1	建筑物防雷技术	126
6.2.2	智能大厦弱电系统的防雷设计	128
6.2.3	智能建筑的端口雷电浪涌保护	129
6.2.4	智能建筑中的接地	132
6.2.5	智能建筑接地设计与施工中应注意的问题	135
6.3	综合布线系统的防雷设计	137
6.3.1	综合布线系统的结构	137
6.3.2	综合布线系统中的屏蔽技术	139
6.3.3	综合布线的接地系统	144
第 7 章	通信系统的防雷接地技术	147
7.1	通信系统的雷电防护	147
7.1.1	现代通信的防雷系统	147
7.1.2	通信中心枢纽的防雷措施	151
7.2	光缆的强电和雷电防护	152
7.2.1	强电和雷电对光缆的影响	152
7.2.2	光缆防强电和防雷电技术的发展	154
7.3	通信系统的接地技术	155
7.3.1	通信系统的接地系统	155
7.3.2	联合接地方式	157
7.3.3	通信设备接地电阻的测量方法	159
7.4	通信系统防雷工程的施工	161
7.4.1	外部避雷系统的施工	161
7.4.2	内部防雷设施的施工	165
第 8 章	有线电视系统的防雷接地技术	168
8.1	有线电视系统的防雷接地技术	168
8.1.1	接收天线的防雷接地	168
8.1.2	有线电视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	农村有线电视网络的避雷与接地	175
8.3	安全监控系统的防雷设计	176
8.3.1	安全监控系统的组成及雷害机理	176
8.3.2	安全监控系统的综合防雷	177
第9章	微波站和移动基站的防雷接地技术	179
9.1	微波站的防雷技术	179
9.1.1	微波站的防雷设施	179
9.1.2	微波站接地系统	182
9.1.3	微波站的整体防雷方案	183
9.2	移动基站的整体防雷	187
9.2.1	移动基站防雷的特点	187
9.2.2	移动基站内外部防雷保护	190
9.2.3	移动通信基站供电系统的防雷与接地	193
9.2.4	移动基站的防雷解决方案	198
9.3	气象雷达站的雷电防护	199
9.3.1	雷达站建筑物结构的防雷设计	200
9.3.2	雷达机房的雷电防护	201
第10章	低压供电系统的防雷接地技术	203
10.1	电源防雷器	203
10.1.1	电源防雷器的性能与分类	203
10.1.2	电源防雷器的配置	205
10.1.3	供电系统的浪涌防护	207
10.1.4	电源防雷器与接地汇集排的连线	209
10.2	电源噪声的抑制	211
10.2.1	电源设备中的噪声	211
10.2.2	系统电源的抗干扰技术	217
第11章	智能家居的防雷接地技术	221
11.1	家居抗干扰技术	221
11.1.1	家居系统瞬态干扰防护的必要性	221
11.1.2	智能家居系统的抗干扰措施	223
11.2	家居端口的防雷技术和民居建筑物的等电位连接	225
11.2.1	家居端口的防雷技术	225
11.2.2	民居建筑物的等电位连接	228
11.3	家用电器的防雷和防浪涌保护	230
第12章	防雷规范和标准综述	234

12.1 国内外防雷标准和技术	234
12.1.1 国际防雷技术标准框架	234
12.1.2 国际防雷标准简介	235
12.1.3 中华人民共和国国家标准	237
12.2 《通信局（站）雷电过电压保护工程设计规范》简介	238
12.2.1 应用范围	238
12.2.2 国内相关防雷标准	243
12.3 IEC 防雷及相关技术标准文件	244
附录 防雷接地技术术语	249
参考文献	262

第1章 概述

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 多年前富兰克林发明避雷针至今，避雷针顺应雷云放电规律，创造优先放电条件，使防雷实用技术进入一个崭新的阶段。

现代防雷技术的理论基础在于：闪电是电流源，防雷的基本途径就是要提供一条雷电流（包括雷电磁脉冲辐射）对地泄放的合理的阻抗路径，而不能让其随机性地选择放电通道，简言之就是要控制雷电能量的泄放与转换。

1.1 雷电的形成

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，或者是带电的云层与大地之间迅猛的放电。这种迅猛的放电过程产生强烈的闪交并伴随巨大的声音。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、电子电气设备和人、畜危害甚大，这是我们要研究的主要对象。

通常雷击有三种主要形式：其一是带电的云层与大地上某一点之间发生的迅猛放电现象，叫做直击雷；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，以致出现局部高电压，或者在直击雷放电过程中，强大的脉冲电流对周围的导线或金属物发生电磁感应而产生高电压以致发生闪击的现象，叫做二次雷，或称感应雷；其三是球形雷，这是一种特殊的雷电现象，简称球雷。球雷一般为橙色或红色的类似火焰的发光球体（也有黄色、绿色、蓝色或紫色的），火球的直径一般为 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，一般是 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时会发生燃烧或爆炸，其主要是沿建筑物的孔洞或开着的门窗进入室内的，有的由烟囱或通气管道滚进楼房，多数沿带电体消失。

1.1.1 雷云的形成

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存在分不开，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，通常大地稳定地带负电荷 50 万库仑左右，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时，都会产生向上的气流。这些含水蒸气的气流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云粒子被反弹回去。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较快，而云粒子下降的速度较慢，因此带正、负两种电荷的微粒逐渐分离（这叫做重力分离作用）。如果遇到上升气流，云粒子就不断上升，分离的作用更加明显。最后，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。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，因而加强了大气的电场强度，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。

根据上面的分析，好像雷云总是上层带正电荷，下层带负电荷。实际上气流的运动并不单是只有上下移动，而是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。

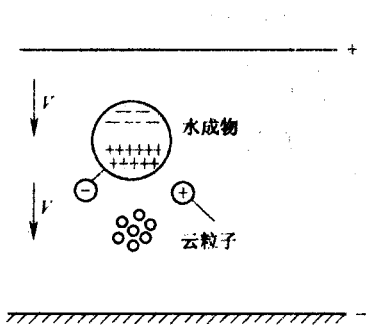


图 1-1 水成物在大气电场中的极化现象

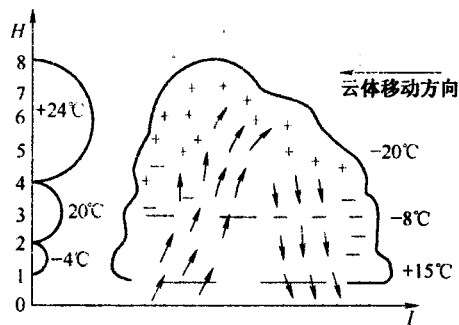


图 1-2 典型的雷云中的电荷分布

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。实际观测证明，正电荷向大地放电的雷击显得特别猛烈。

上面的假说最初是由威尔逊（Wilson）提出的，通常把它叫做威尔逊假说。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。雷雨云内部的不停运动和相互摩擦使雷雨云产生大量的带

正、负电荷的小微粒，即所谓的摩擦生电。这样，庞大的雷雨云就相当于一块带有大量正、负电荷的云块，而这些正、负电荷在不断产生的同时也在不断地复合。当这些云块在水平方向上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的，则地球磁场磁力线就是由地球南极指向北极的，因此大量的正电荷向上移动，负电荷向下移动，这样云的下部将聚积越来越多的负电荷，而云的上部聚积大量的正电荷。当电场强度足够高（25~30kV/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。

雷电是发生在因强对流天气而形成的雷雨云层间和雷雨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

雷电形成的三个条件是：空气中必须有足够的水汽；有使潮湿水汽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

当潮湿水汽上升到高空时，由于高空气温较低，潮湿水汽产生凝结，在上升气流运动的过程中逐渐增大形成小水滴。由于上升气流的不稳定，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中，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。当带电荷的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 3~8m/s，这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，并且是带正电荷的，而大地是带负电荷的，从而形成比较稳定的大气电场。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（约为电子质量的 2000 倍）且不大活动，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，形成上负下正的离子层。另外，空气中水滴分裂后形成的上负下正的带电云层进一步被大气电场极化，这些云层中电荷量逐渐增多，积累到足够的能量时，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、积云以及积雨云，其中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由于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，近地面的大气温度由于热传导和热辐射也跟着升高，气体在温度升高时必然膨胀，密度减小，压强也随着降低，根据热力学原理它就要上升。这样上方的空气层密度相对来说就较大，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，并随高度的增加逐渐增多。在冻结高度（ -10°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，这是积雨云的显著特征。

积雨云在形成过程中，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聚积。当电荷聚积到一定程度时，就会在云与云之间或云与地之间发生放电现象，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最密切的领域，如航空航天、国防、邮电通信、计算机、电子工业、石油化工以及金融证券等。

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、防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却是难以估计的。

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器件设备上。雷电的本身并没有变，而是科学技术的发展使得人类社会的生产、生活状况改变了。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雷电电磁脉冲的作用，造成微电子设备的失控或者损坏。

为此，当今防雷工作的重要性、迫切性和复杂性大大增加了，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，雷电的成因或者说主要能源来自于大气的运动，没有这些运动，是不会形成雷电的。这也说明了为什么雷电总伴随着狂风骤雨而出现。

雷雨云的起电机理有三种理论，分别用来解释一定的雷电成因现象。这三种理论分别为

水滴破裂效应、水滴冻冰效应以及吸收电荷效应。笔者认为前两种解释有一定的局限性，而从火花放电发展机理去解释，雷雨云起电机理采用吸收电荷效应理论来阐述更容易理解。由于宇宙射线或地面大气层的放射使气体分子游离，在大气中存在着两种离子，大气空间电场的作用使云层上部聚积正电荷，下部聚积负电荷，在空间电场的作用下云层分离而带电。

雷云中电荷的分布是不均匀的，而是形成许多堆积中心。因而不论是在云层中还是在云层和地之间，电场强度是不一致的。当云层中电荷密集处的电场强度达到 $25\sim 30\text{kV/cm}$ 时，就会由云层向地开始先导（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称为先导）放电（对于高层建筑，先导可由地面向上发出，称为迎面先导），由雷云中发展至地面的时间为几毫秒。光学照片显示先导继续生长不是均匀的，而是跳跃式的、迈步式的，向地频繁迈步前进，即走一段停一会儿，再走一段再停一会儿。每秒前进的距离为 $10\sim 200\text{m}$ ，每秒停歇的时间为 $10\sim 100\mu\text{s}$ 。先导发展速度约为 $1\times 10^7\text{m/s}$ ，延续时间约为 $1\mu\text{s}$ 。先导中心的线电荷密度为 $(0.1\sim 1)\times 10^{-3}\text{C/m}$ ，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，相应于先导发展时的电流约为 100A ，先导中的纵向电位梯度为 $100\sim 500\text{kV/m}$ 。下行负先导在发展中会分成数支，这和空气中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，此时雷鸣和电闪都伴随出现。

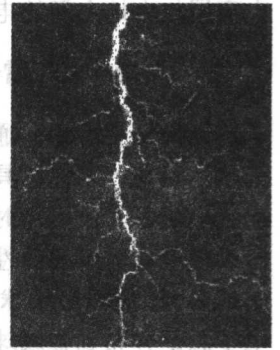


图 1-3 雷雷电离通道图

迎面先导由地向云传播的速度为光速的十分之一。流经被击物的雷电流幅值与定位高度和先导电荷有关。可获得的雷电流与击距（防雷计算中的抛球半径或滚球半径）之间有着密切的关系，但是很多参数并不“真知”。目前世界上有很多不同的表示击距与雷电流之间关系的计算公式。一般地说，雷电流越大，击距越长，如雷电流在 200kA 以上时击距可能为 200m 及以上，雷电流为 $15\sim 20\text{kA}$ 时其击穿距离在 $20\sim 30\text{m}$ 之间。

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，是全部雷电电流中最主要的部分。主放电到达云端时就结束了，然后云层中的残余电荷经过主放电通道流下来，称为余光阶段。由于云层中电阻较大，余光阶段对应的电流不大（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 $600\sim 800\mu\text{s}$ ，放电次数平均为 $2\sim 3$ 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，自上而下顺利连续发展，没有先导的停歇现象，但主放电仍然是由下向上发展的。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 。一般地说，主放电脉冲雷电流第一次幅值比后续的大，雷电脉冲波形是相当复杂的。

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磁场，这一瞬变磁场的辐射会对一定范围内的微电子设备造成干扰。又因瞬变磁场产生的感应电压与雷电流的大小及变化速率成正比，并与雷击处的距离成反比。由于雷电流极大的幅值和陡度，其感应电压可达到相当高的幅值，这是对微电子设备安全运行的最大威胁。它也

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

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，而地球上空的电离层则带有相等的正电荷，电离层与地面之间的电压约为 300kV ，如图 1-4 所示。因而在电离层与地面之间存在一个电场，晴天时地面附近的电场强度为 120V/m 。即使在晴天，大气中总有一些空气分子被电离，从而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，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。以如图 1-5 所示的带尖锋的金属球为例，假如金属球带负电（同理也可以解释带正电时的现象），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。金属球的尖锋部分的电子受到同性电荷往外排斥的力最强，故最容易被排斥离开金属球，这就是通常说的尖

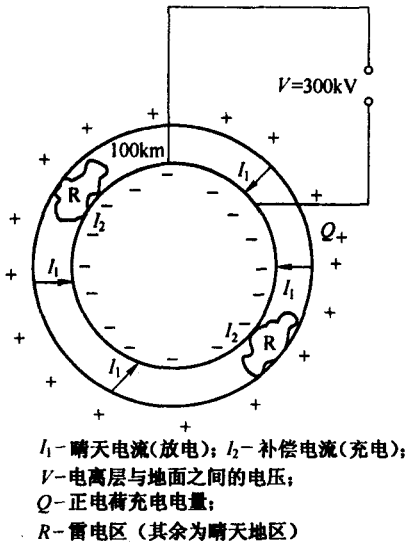


图 1-4 地球电场示意图

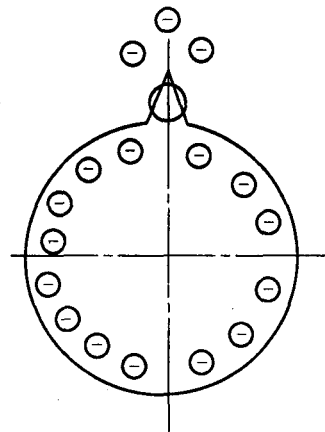


图 1-5 尖端放电示意图

端放电。此外，当带电物体周围的空气潮湿或带有与带电体电荷极性相反的离子时，带电体也容易放电。当天空中有雷云的时候，因雷云带有大量电荷，在静电感应的作用下，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。这时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，在电场的作用下，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做先驱注流，又叫做电流先导。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。开始时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 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6 \text{ m/s}$ ，各脉冲间隔 $30 \sim 90 \mu\text{s}$ ，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。这些分枝状的前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，就开始进入主放电阶段。在主放电阶段雷云与大地之间所聚积的大量电荷，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而放出能量，以致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，也有少数上百千安以至几百千安的。雷电流峰值的大小与土壤电阻率的大小成反比关系，即土壤电阻率越高，则雷电流峰值越小；土壤电阻率越低，则雷电流峰值越大。

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，是因为雷云非常大，它各部分的密度不完全相同，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域发出的。

1.2 雷击闪电的特性

1.2.1 雷电流的特性

雷电的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首先进行大量观测记录，然后用统计的方法寻找出它的概率分布的方法。有关资料表明，各次雷击闪电电流的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的，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，把只沿着先导方向发生电荷中和的闪电叫做无回击闪电。先导放电之后出现的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阻抗、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. 主放电通道阻抗

主放电阶段雷电通道阻抗不是常值，而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)；

$I_{R=0}$ ——流经良好接地物体的雷电流幅值 (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 $Z_{dx} = Z_{da}/2$ ，其中 Z_{da} 为架空线路导线波阻 (Ω)。

在大多数情况下， Z_M 应为无穷大，这时 $I_{wt} = I_{R=0}$ ，这就相当于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（分第一次放电和随后放电）和后续电流。注意这一点对考核各种防雷保护器通流能量来说是很重要的。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的波形是有明显区别的：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（即第一个脉冲），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，电流为数十安到 500A。

综合各国观测结果，一次雷击（闪电）有多次雷电电流脉冲，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）波头为 1~5 μ s，平均为 2.6 μ s。雷电流（脉冲）波长为 20~350 μ s。所以在工程中选用时，视其敏感性而定。例如 DL/T 620-1997（《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的雷电流波形为 2.6/50 μ s，但在计算杆塔及反击时沿导线侵入变电所的雷电流波形时，在闪络点导线上雷电波头近似为直角波，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）；而在考核避雷器动作负载时，CIGREQ33-11 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 波形。总之，雷电流波形选用视具体情况而定。又如，有时工程计算中采用指数波、余弦波、斜角波等，这是数学运算反边关系。

3. 雷电流幅值概率分布

尽管某一次雷击的电流幅值是随机的，但经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