



电子工程实用技术丛书

现代防雷 实用技术

电磁脉冲防护 静电防护
共用接地系统



© 周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子工程实用技术丛书

现代防雷实用技术

电磁脉冲防护 静电防护 共用接地系统

周志敏 纪爱华 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书结合国内外防雷技术发展及应用现状,以现代防雷实用技术为主线,全面、系统地阐述了现代防雷技术及产品的最新应用技术。全书共分为三部分,在概述了雷云形成及雷电流特性的基础上,系统地讲述了现代防雷技术及产品、外部防雷系统、内部防雷系统、静电产生及危害、ESD 保护器件特性及应用、接地网设计及施工技术、等电位连接与共用接地系统等内容。

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,可供从事防雷设计及应用的工程技术人员和高等学院及职业技术学院的师生阅读参考。

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

现代防雷实用技术:电磁脉冲防护·静电防护·共用接地系统/周志敏,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社,2015.3

(电子工程实用技术丛书)

ISBN 978-7-121-25173-3

I. ①现… II. ①周… ②纪… III. ①防雷 IV. ①P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 298416 号

策划编辑:富 军

责任编辑:底 波

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

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

版 次:2015 年 3 月第 1 版

印 次:2015 年 3 月第 1 次印刷

印 数:3 000 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 zltts@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

随着我国信息化建设进程的加快，计算机网络信息系统正扮演着越来越重要的角色，每年都有多起因雷击造成计算机及网络通信设施损坏，从而导致信息传输中断、信息受损乃至威胁人身安全的事故发生。目前，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，这是因为计算机网络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，推动各种防雷新产品开发和研制，而使得防雷技术不断创新和完善。

信息化时代对防雷技术提出了更新、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，在防雷方案的规划设计中，应结合信息化时代的特点，遵循雷电自然规律，要整体、全面、系统地规划防雷方案，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，系统地阐述了雷电电磁脉冲防护、静电防护、共用接地系统的设计方法、设计原则及最新应用技术。在写作上将常规防雷技术、现代防雷技术、雷电电磁脉冲防护、静电防护、共用接地系统设计融于一体，力求做到通俗易懂、结合实际，使得从事防雷设计的工程技术人员从中获益，本书是从事防雷设计工程技术人员必备参考书。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、刘建秀、顾发娥、纪达安、刘淑芬、纪和平、纪达奇、陈爱华等。本书在写作过程中无论从资料的收集到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。

由于时间短，加之作者水平有限，书中错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第一部分 雷电电磁脉冲防护

第 1 章 概述	3
1.1 雷电形成及电离层与地面间的电荷平衡	3
1.1.1 雷电及雷云的形成	3
1.1.2 电离层与地面间的电荷平衡及尖端放电	14
1.2 雷电流的特性及雷击选择性	16
1.2.1 雷电流的特性	16
1.2.2 雷电活动及雷击的选择性	19
第 2 章 现代防雷技术及产品	22
2.1 雷击形式及雷电入侵建筑物内的途径	22
2.1.1 防雷机理及雷击形式	22
2.1.2 雷电入侵建筑物内的途径	29
2.2 现代防雷技术	31
2.2.1 现代防雷技术的特点及防雷保护区的划分	31
2.2.2 三维防护及多层分级（类）保护	33
2.2.3 现代防雷产品	38
2.3 雷电电磁脉冲干扰及雷电防护系统	40
2.3.1 雷电电磁脉冲干扰及防护	40
2.3.2 雷电防护的必要性	45
2.3.3 雷电防护系统	49
第 3 章 外部防雷系统	55
3.1 外部防雷装置	55
3.1.1 接闪器保护范围及安装	55
3.1.2 引下线的要求及安装	63
3.1.3 接地装置的要求及安装	65
3.2 现代建筑物综合防雷技术	67
3.2.1 现代建筑物防雷技术的发展	67
3.2.2 现代建筑物的防雷设施	70
第 4 章 内部防雷系统	76
4.1 内部防雷系统的组成及规划设计	76
4.1.1 内部防雷系统的组成及措施	76
4.1.2 内部防雷系统规划设计	78
4.2 SPD 的特点及其应用	86
4.2.1 SPD 类型及产品术语	86



4.2.2	SPD 的性能特点	89
4.2.3	配电系统 SPD 配置方案及配置要点	90
4.2.4	建筑物入口处 SPD 的配置	94

第二部分 静电防护

第 5 章	静电产生及危害	105
5.1	静电产生及静电放电	105
5.1.1	静电现象及产生的原因	105
5.1.2	静电放电 (ESD)	111
5.2	静电危害及防护	115
5.2.1	静电危害	115
5.2.2	静电防护	126
5.2.3	静电接地	131
5.2.4	空气加湿增强静电泄漏	136
5.2.5	人体静电防护	138
5.2.6	电子设备的 ESD 防护措施	140
第 6 章	ESD 保护器件特性及应用	145
6.1	ESD 保护器件特性及选用指南	145
6.1.1	ESD 保护器件特性	145
6.1.2	TVS 器件选用指南	150
6.1.3	氧化物压敏电阻的特性及选用	151
6.2	ESD 保护器件的特性及参数	154
6.2.1	ESD 保护器件的特性及比较	154
6.2.2	ESD 保护器件的重要参数	157
6.3	NXP 系列 ESD 保护器件及选型	160
6.3.1	NXP 系列 ESD 保护器件	160
6.3.2	NXP 系列 ESD 保护器件选型	163

第三部分 分共用接地系统

第 7 章	接地网设计及施工技术	173
7.1	接地目的及接地网建设	173
7.1.1	地线的定义与接地目的	173
7.1.2	接地网的建设	178
7.1.3	地网形式	185
7.1.4	接地网优化设计	188
7.2	接地网填充材料及施工技术	194
7.2.1	接地网填充的材料	194
7.2.2	深井式施工技术	195
7.2.3	爆破施工技术	198
7.2.4	放热熔接技术	201



7.2.5 接地装置防腐技术	202
第8章 等电位连接与共用接地系统	208
8.1 等电位定义及连接要求	208
8.1.1 等电位定义及保护作用	208
8.1.2 等电位连接要求及在配电系统中的作用	210
8.2 等电位连接及设置原则	214
8.2.1 等电位连接方式及连接方法	214
8.2.2 等电位设置原则	216
8.3 等电位连接材料及施工方法	222
8.3.1 等电位连接材料及施工要求	222
8.3.2 等电位工艺程序及施工方法	225
8.4 共用接地系统	230
8.4.1 共用接地系统构成	230
8.4.2 机房共用接地系统设计方案	232
参考文献	234

第一部分 雷电电磁脉冲防护

第1章

概述



1.1 雷电形成及电离层与地面间的电荷平衡

1.1.1 雷电及雷云的形成

1. 雷电

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，其理论及之千年的实践，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，或者是带电的云层对大地之间迅猛放电。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、电气电子设备和人、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：一是带电的云层与大地上某一点之间发生迅猛的放电现象，称为“直击雷”；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，或者由于直击雷放电过程中，强大的脉冲电流对周围的导线或金属物因电磁感应而产生高电压，以致发生闪击的现象，称为“二次雷”或“感应雷”；三是“球形雷”，它是一种特殊的雷电现象，简称球雷。球雷一般是以橙或红色，或似红色火焰的发光球体（也有带黄色、绿色、蓝色或紫色的），直径一般约为10~20cm，最大的直径可达1m，存在的时间大约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。



2. 云的类型及雷雨云的电结构

1) 云的类型

(1) 卷状云。卷状云的类型有卷云、卷积云、卷层云和卷云砧。其中卷云表现成孤立的、白色的纤维状云，或窄细的云带；卷积云呈薄的白色的碎云块，卷层云表现为透明的、白色的、纤维状的或外形光滑的云幕，覆盖整个天空或部分天空，它由冰晶组成，呈白色纤维状、丝缕状结构，当高空风很大，它出现在积雨云顶顶部时，表现成砧状，称之为卷云砧，此时云与闪电的关系密切，时常有强雷电出现。

(2) 雾。雾可以认为是动力性最弱的云，它的生命为2~6h，假定厚为100m的雾内的平均垂直上升速度为0.01m/s，则一空气块进入云底和出云顶的时间尺度为 $100\text{m}/0.01\text{m/s} = 10^4\text{s}$ 。雾的含水量一般为 $0.05 \sim 0.2\text{g}/\text{m}^3$ ，因此，雾一般不大会有降水，雾中的湍流绝对值是小，但由于雾中的水平和垂直方向的速度很小，湍流仍会影响雾中的输送及其他的物理过程。

(3) 层云。雾离开地面就成为层云，它呈灰色，云底十分均匀，时常有毛毛雨，冬季的层云有时会有冰凌晶或雪粒。如果透过层云见到太阳，其外形轮廓清晰可辨，典型的层云含水量为 $0.05 \sim 0.25\text{g}/\text{m}^3$ 。

(4) 层积云。层积云呈灰色或灰白色云块，云片或云层有时可表现为圆形、云轴，没有纤维结构，在地面观测，云单体的角宽度大于 50° ，层积云内有弱对流，其对流受下沉气流抑制，时常出现于反气旋高压的东南侧。层积云和层云的时间尺度、云中液态水含量或湍流水平等方面与雾并没有明显的差别。其生命可达6~12h。

(5) 中云。中云包括高层云和高积云，它的云底高度通常为2500~4500m。高层云外形成层、纤维状或均匀的灰色或暗的云层，它时常覆盖整个或部分天空，云中部分很薄的地方，可见到轮廓模糊的太阳，好像透明玻璃似的。高积云呈白色、灰白色或灰色的碎云块，由薄云片、圆块状或滚轴云组成，排列有序的云体。其视角宽度介于 $1^\circ \sim 50^\circ$ 之间，并与锋面、气旋等天气尺度云系相关，水平范围很广，云体厚时有降水出现。

(6) 积云。积云为孤立云块，一般结构紧密、轮廓分明，垂直发展外形像山冈、圆丘或宝塔形，上部隆起部分像花椰菜形，又可分为淡积云和中积云。淡积云是垂直厚度较小的积云，呈扁平形；中积云是中等垂直发展的积云，出现有小的隆起云顶。对于垂直厚度达1500m的积云生命为10~30min，如果积云内的平均垂直速度为3m/s，气块从云底进入到离开云顶的时间尺度量级为 $1500\text{m}/3\text{m/s} \approx 10\text{min}$ ，小积云的液态水含量小于 $1.0\text{g}/\text{m}^3$ ，典型值为 $0.3\text{g}/\text{m}^3$ ，无降水。

(7) 浓积云。浓积云垂直发展旺盛，垂直厚度很大，云的上部时常呈花椰菜形，它有时也会引起闪电。浓积云的生命比积云大，介于20~40min，一般上升速度为10m/s，则对于厚达5000m的浓积云云底进入云顶离开的时间为10min，浓积云中的含水量约为 $0.5 \sim 2.5\text{g}/\text{m}^3$ ，云中的湍流较强。有时可降小阵雨。

(8) 积雨云。积雨云是最强的对流云，浓密而深厚，外形像山峰或巨塔，它荷电量，大气中的闪电是由它引起的。当高空风很大时，顶部出现云砧，云砧处常出现电晕，它的生命可以达到45min到数小时之久，但是一气块从进入云底到出云顶的时间尺度是较短的，如对积雨云的厚度为12000m，平均上升气流速度为30m/s，则其时间尺度为 $12000\text{m}/30\text{m/s}$



=400s, 比小的积雨云的生命还要短, 由于上升的强烈冷却, 积雨云中的含水量可达到 $1.5 \sim 4.5 \text{g/m}^3$ 或更大。

2) 雷雨云的电结构

雷电与雷云的存在是分不开的, 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 (Sc)、雨层云 (Ns)、积云 (Cu)、积雨云 (Cb), 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, 如图 1-1 所示。



图 1-1 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, 并随高度逐渐增高。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。

在积雨云的形成过程中, 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”。

一般情况下, 雷雨云上部有一个正电荷中心, 下部有一个负电荷中心, 即云层底部一般是带负电荷, 因此, 云对地的闪电绝大多数是负闪电。根据科学工作者大量直接观测的结果, 积雨云中电荷的典型分布大体如图 1-2 所示。



一般认为主要负电荷区中心位于3km高度，温度为 -8°C ，是半径为1km的球体，其电荷量为 -20C ；主要正电荷区中心位于6km高度，温度为 -30°C ，是半径为2km的球体，其电荷量为 $+24\text{C}$ ；最下方的正电荷区中心高度位于1.5km，温度 -1.5°C ，是半径为0.5km的球体，其电荷量为 $+4\text{C}$ ，积雨中电荷分布的一般特性如图1-3所示。这是按理论归纳的理想模式，不同地区的实际情况可能与这种典型分布有较大差别。

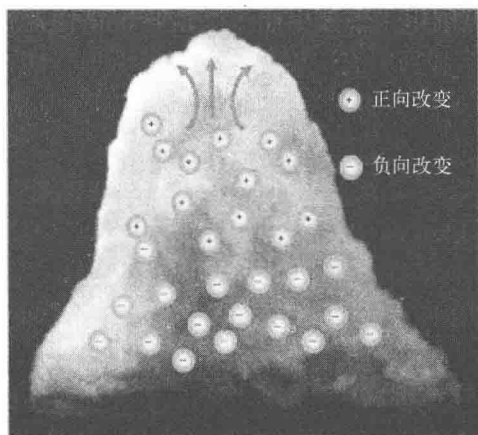


图1-2 积雨中电荷分布

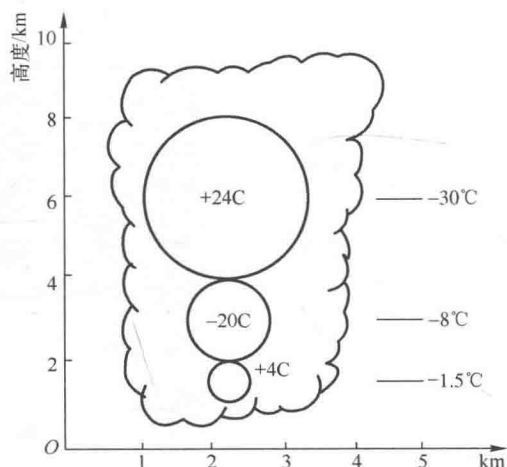


图1-3 积雨中电荷分布一般特性

积雨云是最强的对流云，浓密而深厚，外形像山峰或巨塔，在它发展旺盛时期，云顶高度可达 $10 \sim 15\text{km}$ ，云底高度在平原地区大约为 1km 左右。随着雷雨云的发展和运动，在发生降水后，当大气电场强度对于 $3\text{kV}/\text{cm}$ 以上时（晴天大气中约为 $30\text{kV}/\text{cm}$ ），云间就会对地火花放电，也称云地闪电。

3. 雷云形成的假说

雷电形成的三个条件：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。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) 电场极化假说

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为 $500\,000\text{C}$ 左右，距离地面 80km 以上的电离层具有一定的导电能力，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，电离层和大地这两个带电导体中间被不导电的大气所绝缘，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。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，达到了足够大的能量时，便产生闪电现象，形成雷电。

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1-4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。碰撞的结果使得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（称重力分离作用），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冰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加剧重力分离作用，使雷云发展得更快。

从上面的分析可知，好像雷云总是上层带正电荷，下层带负电荷。实际上气流并不单是只有上下移动的，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1-5所示。

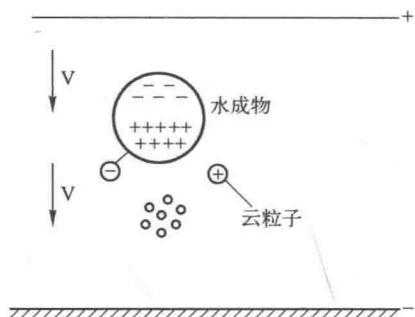


图1-4 水成物在大气电场中的极化

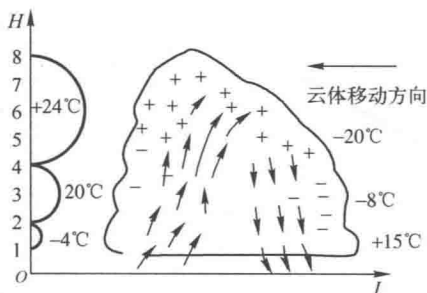


图1-5 典型的雷雨云中的电荷分布

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。从观测证明，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，通常把它称为威尔逊假说。

2) 温差起电假说

科学实验已证明，在冰中有一小部分的分子处于电离状态，形成较轻的 H^+ 和较重的羟基 (OH^-) 离子，并且其浓度随温度的升高而很快增加，温度较高的部位离子浓度较大，温度较低的部位离子浓度较低； H^+ 离子的扩散系数和迁移率比 OH^- 离子要大10倍以上。因此当冰中有温度梯度时就会出现离子浓度梯度，如图1-6(a)所示。

由于温度热端起初具有较高的正、负离子，而后沿此浓度梯度， H^+ 离子扩散得快，导



致正、负离子分离，使冷端获得净正电荷电量，而热端获得净的负电荷，冰体中电荷生成的电场阻止电荷继续分离，最后达到动态平衡状态，如图1-6 (b)所示。积雨云中的雷电形成有两种方式：一种是积雨云中的冰粒、雹粒相互碰撞接触时，由于温度的差异而发生离子的迁移，在重力和气流的双重作用下，使雷雨云中的正、负电荷分布发生差异；另一种是积雨云中的过冷却水滴，遇凝结核时快速凝结形成冰壳，同时放出潜热，当冰壳内的水逐渐凝结，导致冰壳体积增大而使外层冰壳破裂而产生冰屑。这种冰屑是带正电的，它们较轻而小，易被上升气流携至云的上部，所以积雨云的上部聚集大量的正电荷。

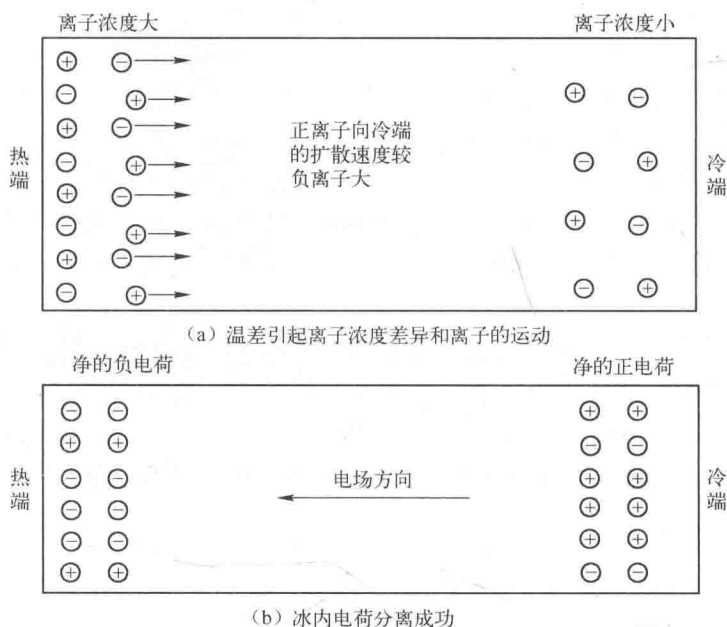


图 1-6 温差起电机制

3) 破碎起电假说

当潮湿水汽上升到高空，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，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的云层，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多的电荷量时，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。

观测表明，雷雨云底部有相当数量的大水滴，其半径超过毫米，在大气电场的作用下，大水滴的上部为负电荷，下部为正电荷。大水滴在强烈的上升气流作用下而破碎。如图1-7所示，最初水滴被变为扁平状，然后其下表面被气流吹凹进去，形成以液体圆环为外边界的、环状大口袋，产生许多小水滴。较大的水滴带正电荷，较小的水滴带负电荷，由于较小的水滴质量轻，会被上升气流携带到云的上部，而带正电荷的较大水滴因重力沉降聚集在云底附近。因此，雷雨云的底部往往出现一定数量的正电荷。

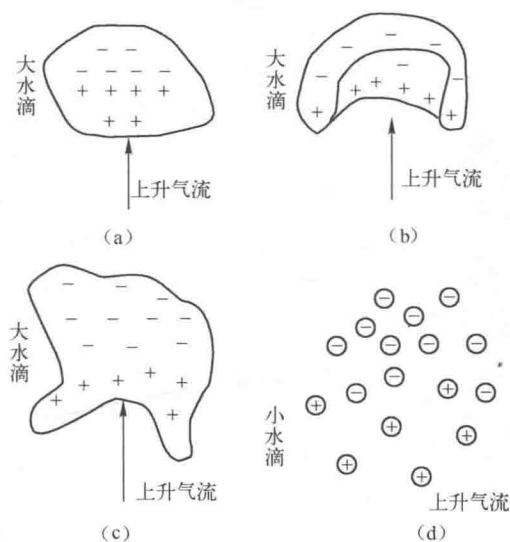


图 1-7 雨滴破碎起电机制的剖面图

4) 唐山樵假说

我国学者唐山樵先生曾对雷云的形成提出了如下假说。雷电的出现是与气流、风速密切相关的，而且与地球磁场有一定的联系。雷雨云内部的不停运动和相互摩擦而使雷雨云产生大量的正、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，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雨云层间和雷雨云与大地之间强烈瞬间放电现象，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的理论综合起来，尽可能完善地解释各种雷电现象。

综上所述，按照雷电的成因为摩擦生电及云块切割磁力线的假说，而把不同电荷进一步分离的解释，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。

若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，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，而是形成许多堆积中心。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),由雷云中发展至地面的时间约几毫秒。光学照片显示先导继续生长不是均匀的,而是跳跃式、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1-8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。

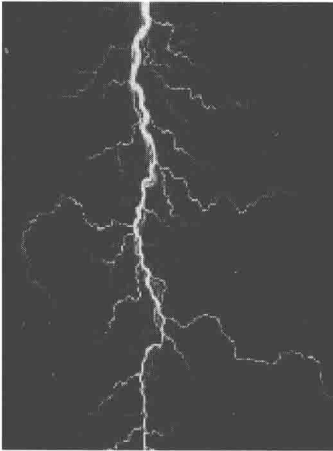


图1-8 雷电极化通道图

迎面先导由地向云传播速度约为光速的十分之几。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(防雷计算中的抛球半径或滚球半径)之间有关,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,击距越长,如 200kA 以上,击距可能在 200m 及以上,雷电流 $15 \sim 20\text{kA}$,击距可能在 $20 \sim 30\text{m}$ 。

雷击时,主放电存在的时间极短,约 $50 \sim 100/\mu\text{s}$,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,可能引起第二个中心、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,自上而下顺利连续发展的,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 。一般来说,主放电脉冲雷电流幅值和陡度 di/dt ,第一次幅值比后续大,雷电脉冲波是相当复杂的形状。

4. 云起电的一些特征

Monson (1971年)研究了云起电的一些基本特点,得出:

- (1) 对于单个雷暴产生降水和闪电活动的平均持续时间为 30min 。
- (2) 在一次闪电中破坏的电场强度是 $3 \sim 4\text{kV/cm}$,晴空中击穿电场则要高得多(30kV/cm)。
- (3) 在大块积雨云中,电荷的产生和分离发生在 $-5 \sim -40^\circ\text{C}$ 高度为界的区域中,半径大约有 2km 。
- (4) 负电荷常常集中在 $-10 \sim -20^\circ\text{C}$ 高度之间,正电荷在其上数千米处,有时在云底