

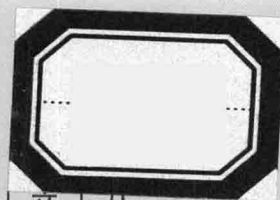


滇 | 西 | 学 | 术 | 文 | 丛

◎ 刘有菊
◎ 和伟
著

雷电放电电磁场 及防护

云南大学出版社
Yunnan University Press



滇 | 西 | 学 | 术 | 文 | 丛

◎ 刘有菊
◎ 和伟
著

雷电放电电磁场 及防护

云南大学出版社
Yunnan University Press

图书在版编目 (CIP) 数据

雷电放电电磁场及防护/刘有菊, 和伟著. —昆明: 云南大学出版社, 2009

(滇西学术文丛)

ISBN 978 - 7 - 81112 - 968 - 7

I. 雷… II. ①刘…②和… III. ①雷—放电—电磁场—研究②防雷—研究 IV. P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 216009 号

雷电放电电磁场及防护

刘有菊 和 伟 著

策划组稿: 徐 曼

责任编辑: 徐 曼 朱光辉

封面设计: 刘 雨

出版发行: 云南大学出版社

印 装: 昆明市五华区教育委员会印刷厂

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 8.75

字 数: 213 千

版 次: 2010 年 1 月第 1 版

印 次: 2010 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 81112 - 968 - 7

定 价: 25.00 元

云南大学出版社地址: 云南大学英华园内 (邮编: 650091)

电 话: 0871 - 5031071 5033244

网 址: <http://www.ynup.com> E-mail: market@ynup.com

“滇西学术文丛” 总序

蒋永文

保山学院的前身为保山师范高等专科学校，地处气候宜人、风景秀丽、历史悠久的滇西重镇——保山，是一所建校已有 30 年，主要为拥有 1 100 万人口的滇西 7 个州、市培养中小学师资的地方师范院校。长期以来，在艰苦的条件下，学院为该区域培养了上万名中小学教师和各行业建设者，为祖国西南边疆少数民族地区的教育发展作出了应有的贡献。2009 年 4 月，学校被教育部批准升为保山学院。这使我们站在了一个新的历史起点上，有了一个更为广阔的发展空间。

大学肩负着创造知识和传播知识的重任。学术是大学的精髓，学科是构筑大学的基石，学者是大学精神的化身。教学与科研相统一是大学的基本理念。科研和教学是彼此促进的，在教学中，可以激发灵感，开阔思路，发现研究课题。而研究成果又可以丰富教学内容，促进教学质量的提高，二者相得益彰。为了给滇西地区提供更好的高等教育资源，保山学院必须建立一支热爱教育事业、业务过硬、高水平、高质量的教师队伍，为此，学校以重点学科建设为龙头，提高效益为目标，以形成科研特色，增强科研实力。学校近几年采取了资助科研立项、奖励科研成果、出版学术论文等措施，不断提高广大教师的教学水平和科研水平，已取得了较好的效果。为了更好地为广大教师提供出版学术论著的园地，学校决定继续出版“滇西学术文丛”，出版学术水平较高的著作，相信“滇西学术文丛”的出版，一定会对保山学院科学研究的深入，学科建设和学科带头人、骨干教师的培养产生积极的影响。

辽阔的天空，允许大鹏展翅高飞，也允许小鸟上下蓬蒿。广袤的大地，允许参天大树生长，也允许无名小草成长。我们是小鸟，我们是小草，这套丛书，远非成熟完美之作，作者水平还需要不断提高。我们期待着批评和指教。我们会做得越来越好。

2009 年 5 月

前 言

自古以来,雷电对人类赖以生存的自然资源和人类创造的物质文明构成了巨大的威胁,如森林火灾有50%以上是由雷电引发的。随着现代化进程的加快,特别是信息产业的迅猛发展,自动控制、通信和计算机等微电子设备在各行各业中得到了日益广泛的应用,雷电将更加严重地对电力、广播电视、航空航天、邮电通信、交通运输、电子工业等行业产生危害,尤其是微电子设备对雷电产生的强大电磁脉冲(LEMP)非常敏感,很容易受其破坏。

据有关部门估计,全世界每年就有十亿次雷暴发生,平均每一天发生闪电800万次,每秒钟的落地闪就有30~100次,全球每年因雷击造成的人员伤亡超过1万人。在20世纪末联合国组织的国际减灾十年活动中,雷电灾害已成为联合国公布的10种最严重的自然灾害之一。因此,人们不再认为雷电防护是一种可有可无的“低损失率”的防护技术。

雷电灾害也是目前我国十大自然灾害之一。据有关部门的统计,我国有21个省(市、区)年平均雷暴日在50天以上,最多的可达149天。雷暴给人们的生活带来了极大的安全隐患。尤其是近年来,随着中国的经济、信息技术、计算机网络技术的迅速发展,雷电危害造成的损失越来越大,每年因雷电灾害造成的财产损失达上亿元,其中的雷电灾害损失80%以上涉及电子、通信和配电系统。

雷击的发生具有地域性特点,一般低纬度地区多于高纬度地区,山区多于平原,平原多于沙漠。如云南省地处云贵高原,海拔较高,地形以山地为主,气候条件复杂多样,受亚热带季风气候的影响,降雨充沛,雷电活动高于全国平均水平,是遭受雷击灾害最严重的省份之一,全省大部分地区年平均雷暴日在80天左右,每年平均发生雷电灾害事件300起以上,平均每年雷击造成人员死亡70多人,经济损失7000多万元。据不完全统计,2006年上半年全省发生重大雷击灾害事件427起,造成34人死亡,27人受伤。2007年上半年,云南雷电监测系统共监测到闪电83175次,发生雷电灾害33起,造成14人死亡,11人受伤。2008年上半年雷击事件78起,造成27人死亡,31人受伤。雷电事件既能造成巨大的经济损失,同时也给人类社会带来了难以估计的间接损失。

人们为解决雷电所产生的危害,对雷电现象进行了长期艰苦的研究,在各方面取得了可喜的进展:传输线路不再是每遭受一次雷击就会停止供电;重要设施可得到有效的保护,免受雷击;建筑物内易受损坏的设备可得到妥善的保护;预测雷击的报警系统已经完善;雷电定位系统能够确定雷击的位置和强度;等等。然而雷电是极其复杂的自然现象,雷电物理学中还有很多问题未认识清楚,工程实践中也有很多技术难题有待解决。相对其他现代技术的发展,雷电研究的进展非常缓慢。雷电活动对自然界中电子设备的影响非常大,主要表现在雷击产生的电磁冲击波对各种电子设备和通讯系统产生干扰甚至破坏。因此,对雷电电磁环境进行理论分析和数值计算,进而进行模拟和仿真,对电子设备、建筑

物、变电站等各种实体的防雷以及预测具有十分重要的现实意义。

本书根据雷电形成的特点，系统地介绍了雷电的形成、雷电的分类、雷电波的特征、雷电的危害、雷电脉冲所产生的电磁场等方面的知识。可为从事雷电研究及雷电防护人员提供参考，也可作为大学雷电科学与技术专业学生的学习参考书。

笔者衷心地感谢在本书编写过程中给予帮助的各位老师及在编写本书时所参阅的大量文献的作者。同时，笔者衷心希望广大读者及同行对本书提出宝贵的意见和建议。



本书由“保山学院学术出版基金”资助出版



“滇西学术文丛”编委会

主 任：蒋永文

副主任：张国儒 邓忠汉

编 委：何光文 李旻琪 杨学鸾 李德光

文 薇 成团英 杨朝凤 方 兴

汪建云 邱志华 郭秀清 李 杰

何树森

目 录

第一章 雷电的形成和分类	(1)
§ 1.1 雷电的形成	(1)
§ 1.2 雷电的分类	(10)
第二章 雷电的危害	(18)
§ 2.1 我国的雷电灾害	(18)
§ 2.2 云南雷电灾害的现状	(19)
§ 2.3 雷电的危害	(23)
第三章 雷电流波形的主要参数及特性	(39)
§ 3.1 雷电流的主要参量	(39)
§ 3.2 雷电流波形	(44)
§ 3.3 雷电流波的频谱分析	(50)
第四章 雷电产生的电磁场	(60)
§ 4.1 位于坐标原点的电流元产生的电磁场	(60)
§ 4.2 雷电流产生的电磁场	(64)
§ 4.3 雷电电磁场与各物理量的关系	(67)
§ 4.4 有限电导率大地对雷电电磁场的影响	(71)
第五章 建筑物内的雷电电磁场	(74)
§ 5.1 直击雷时建筑物内的电磁环境	(74)
§ 5.2 建筑物内部的防护	(82)
第六章 通信局站的雷电过电压保护	(84)
§ 6.1 通信局站雷电保护区的划分	(84)
§ 6.2 通信局站的雷电过电压保护器件的分类	(88)
§ 6.3 各类雷电过电压保护器件的测试参数	(95)
§ 6.4 通信局站雷电过电压保护器件的应用	(97)
附 录	(102)
参考文献	(123)

第一章 雷电的形成和分类

雷电是自然界中极其普遍而又壮观的声、光、电现象，它受人们的关注不仅是由于它那特有的划破长空的耀眼的闪电和震耳欲聋的霹雳声，更重要的还在于它给人类的生存和生产带来的巨大影响。在远古时代，雷电促成的有机化合物的合成对地球生命的形成起到过一定作用，雷电引起的森林火灾启发了远古人类对火的发现和利用。在现代生活中，雷电仍然对人畜的生命安全有所威胁，对航空、通讯、电力、建筑等国防和国民经济的许多部门造成重大的影响。因此，雷电现象的产生机制、过程及其防护等问题一直为气象学家、物理学家和工程技术专家们所关注。

§ 1.1 雷电的形成

一、大气中存在电场

人们都知道地球有磁场，人类是生活在无处不在的地球磁场中，它对人体有着千丝万缕的作用，包括人的睡眠都会受其影响，因此，人们在屋内放置床具时常常要考虑它相对于地球磁场的方向。各种电子设备也必须考虑地球磁场的作用。例如家中的彩色电视机，若使用不当，就会受其磁化而出现“跑彩”现象。但在某些精密测量中会出现找不出原因的“怪现象”，且百思不得其解，实际上产生这种情况的主要原因是大气中存在电场。

在夜晚可以看到高压输电线上有淡紫色光笼罩，可以听到滋滋声，嗅到臭氧及氧化氮味道，这是一种尖端放电，发生在曲率半径最小的表面位置附近，说明此处大气电场很不均匀，表现出大气中存在着电场。

描述大气电场最常见的物理量，一个是电场强度 E ，它是矢量；另一个是电势 V ，它是标量。由电磁学理论可知二者有如下的关系：

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (1.1)$$

在直角坐标系中，也可以表示为：

$$\vec{E} = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial V}{\partial y} \vec{j} - \frac{\partial V}{\partial z} \vec{k} \quad (1.2)$$

另外，还可用电场线来形象地描述大气中的电场，如图 1.1 所示。测出电场中电位相同的点，把这些点用一个面连接起来，这样的一个几何曲面就称为等势面，如图 1.2 所示。当把电场线和等势面都画出来时，发现电场线与等势面相交处总是相互垂直。如果用单位矢量 $\vec{n}$ 表示等势面的法线，则 (1.2) 式就可以简化成：

$$\vec{E} = -\frac{\partial V}{\partial n} \vec{n} \quad (1.3)$$

因此，上述表示方法都可描述大气电场的特征。

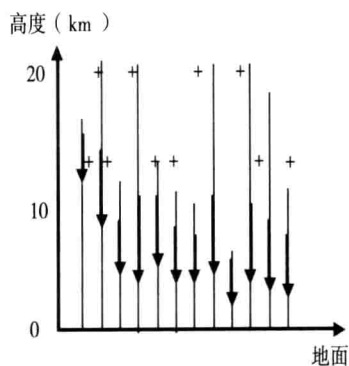


图 1.1 大气电场线

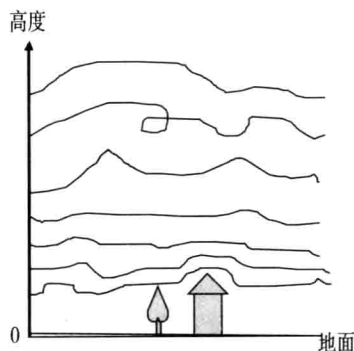


图 1.2 大气等势面

如果在不同的高度测量 $\vec{E}$ ，可以测出如图 1.3 所示的曲线。大气电场的电场强度值由地面向上逐渐减小，到 10km 以上，已减小到地面处的 3%。

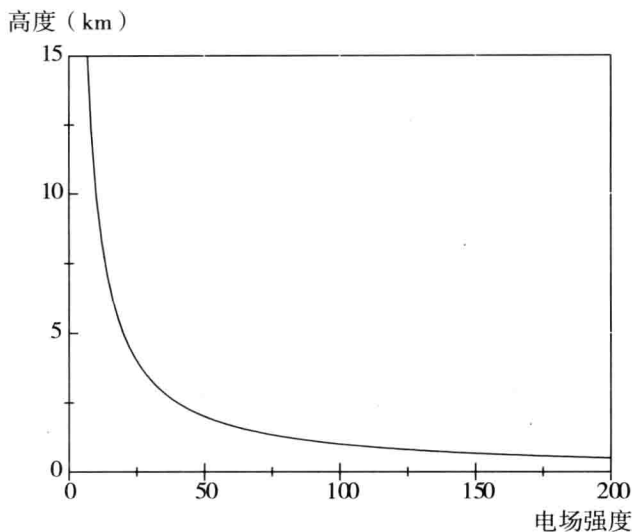


图 1.3 大气电场强度值与高度的关系

二、大气电流的产生

实际测量给出，各地地面大气电场强度是因地而异的。由此可以知道，大气电场并不是唯一地决定于地球所带电荷，还与空间电荷分布有关，实际情况非常复杂。人们通过长期考察之后，知道大气中总是含有大量正、负离子，使大气具有微弱导电性，这些带电粒

子的生成、运动和不同带电离子的分离和聚集，使大气显示出电性，产生大气电场、大气电流，导致大气中雷电的产生。

大气带电离子的形成是由于地壳中放射性物质辐射的射线和来自地球外太空的宇宙射线作用于大气分子，使大气分子电离而产生了大气带电粒子。此外，还有太阳辐射中波长小于 10^{-7}m 的紫外线、闪电、火山爆发、森林火灾、尘暴和雪暴等等，局部范围还有人为因素如火箭、飞机、工厂产生的离子，均可使大气分子电离为带电的离子。以上所有能使大气分子电离的物质统称为电离源。

大气分子受各种射线的电离得到大气离子的浓度是随时间、地点以及大气离子的移动而变化的，使得大气离子浓度的空间分布是不均匀的。从理论上讲，若同一浓度分布区，正、负离子均匀分布、混合在一起，宏观上不显电性，而实际情况却并不如此，因为除电离源产生的正负离子对外，上方有云雾降水产生的其他带电离子，下方有树枝、花草尖端放电产生的电荷，还有火山爆发、沙暴、雪暴、输电线路电晕放电、工厂排放的带电离子等等，它们受到电场、重力、对流等因素的非对称的作用，使得大气中各处的正、负电荷的分布不均匀，势必使任意局部空间都不是电中性的，显示有净的体电荷分布。若体积为 V 的大气中携带总的正电荷为 Q_+ ，负电荷为 Q_- ，则大气体电荷密度 ρ 为：

$$\rho = \frac{Q_+ + Q_-}{V} \quad (1.4)$$

晴天，大气体电荷的正、负离子在大气电场力作用下的运动，大气体电荷随气流流动以及大气湍流扩散产生的流动形成了晴天大气电流。因此，若用晴天大气电流密度表示晴天大气电流，则大气电流密度为：

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_w + \vec{J}_t \quad (1.5)$$

其中 $\vec{J}_c$ 为在电场作用下的传导电流密度， $\vec{J}_w$ 为在大气对流影响下的对流电流密度， $\vec{J}_t$ 为在大气作用下的扩散电流密度。

有时，当大气电场强度 $\vec{E}$ 发生变化时，还应考虑大气位移电流，以 $\vec{J}_d$ 表示其电流密度矢量，则有：

$$\vec{J}_d = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.6)$$

因此，用晴天大气电流密度表示晴天大气电流的表达式应变成：

$$\vec{J} = \vec{J}_c + \vec{J}_w + \vec{J}_t + \vec{J}_d \quad (1.7)$$

三、积雨云

在大气科学的范畴内，雷电与带电的云层的存在是分不开的，人们通常把发生闪电的云称为雷雨云（雷云）。实际上和闪电有关的云有多种，例如卷状云、层积云、雨层云、积云、积雨云等等，但最主要的是积雨云，人们通常提到的雷云总是指积雨云，因为它是最多见的雷电灾害发生的大气环境背景。

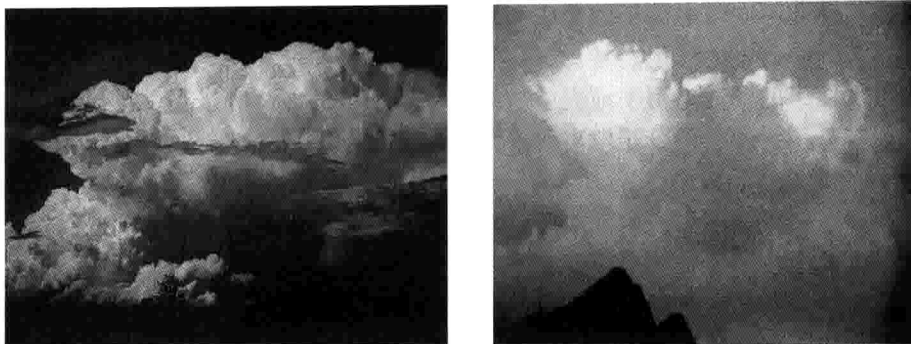


图 1.4 积雨云

积雨云（如图 1.4）是最强的对流云，浓密而深厚，外形像山峰或巨塔，它所带电荷量大，大气中闪电绝大多数是由它引起的。积雨云中的含水量可达到 1.5g/m^3 至 4.5g/m^3 或是更大，云底高度一般约在 $400 \sim 1\,000$ 米，在潮湿地区出现的高度通常比在干燥地区低；积雨云云顶很高，可达对流层顶（距地面达 $8\,000 \sim 12\,000$ 米）。积雨云又分秃积雨云和鬃积雨云两种。

（一）秃积雨云

秃积雨云（如图 1.5）为积雨云的初始阶段，是积雨云发展到鬃积雨云的过渡阶段，云状特征除了在云顶边缘的某些部位由于冰晶化而开始模糊，呈现丝缕结构之外，其他特征与浓积雨云相似，无明显差别，其存在的时间通常较短。秃积雨云常常由浓积云发展而成。秃积雨云常伴有浓积雨云（如图 1.6）、淡积雨云（如图 1.7）和碎积雨云（如图 1.8）。一般来说秃积雨云有两种发展情况：其一是发展迟缓，维持一段时间后便逐渐消散，不造成恶劣天气；其二是出现时间早，上午就出现，午后迅速向上发展成为鬃积雨云，将在 4 小时之内产生雷雨天气。

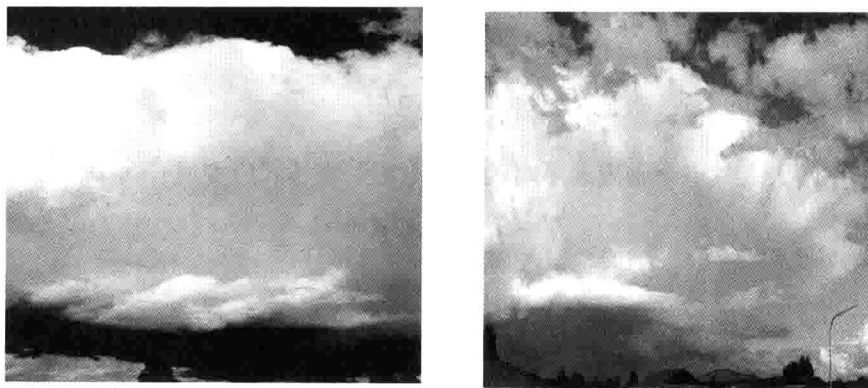


图 1.5 秃积雨云

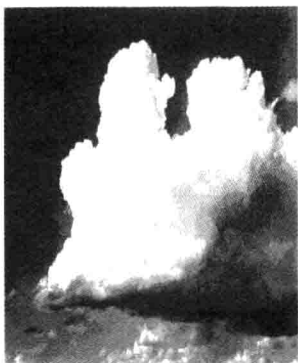


图 1.6 浓积雨云



图 1.7 淡积雨云

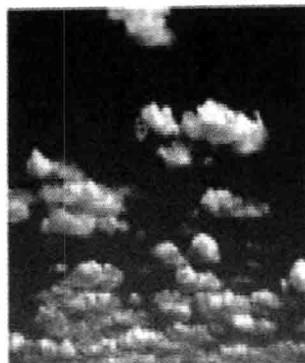


图 1.8 碎积雨云

(二) 鬃积雨云

鬃积雨云（如图 1.9）产生在对流发展极盛阶段，此时云顶发展到极高，由于该高度远高于冻结高度，云层中出现大量的冰晶，而且又受到上空强稳定层的阻抑，所以云顶花椰菜状迅速消失，趋向平展，形成铁砧状，称为云砧。

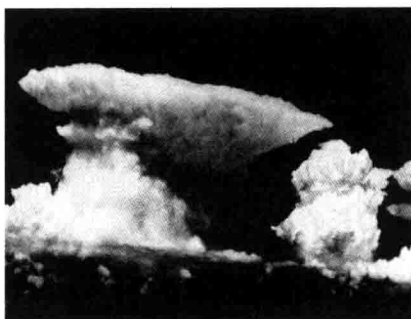


图 1.9 鬃积雨云

(三) 积雨云中大气电场特征

积雨云云砧有时也由于发展过程中因高空风速极大，水平运动加强，使云顶沿风的方向水平铺展开来而形成。积雨云云底阴暗，是对流发展到极盛的阶段，常产生较强的降水，并伴有大风、雷电等现象，有时还出现强的冰雹。

积雨云中的大气电场较为强烈，云中大气电场廓线变化大，云中电场分布很复杂。据观测，积雨云中大气电场很强，大气电场的峰值一般为正，其平均值的变化范围可从 10^4 V/m 至 10^5 V/m 数量级。表 1.1 给出了不同研究者观测到的电场。20 世纪 70 年代中国科学院大气物理研究所在北京也曾探测到积雨云中大气电场的峰值最大可达 $1.4 \times 10^5 \text{ V/m}$ 。美国用火箭探测 90 次，有 7 次观测到大气电场峰值超过 10^5 V/m ，最大的两次超过 $4 \times 10^5 \text{ V/m}$ 。

表 1.1 积雨云中的电场

研究者	典型值 (V/m)	最大值 (V/m)	测量工具
Winn et al (1974)	$5 \sim 8.0 \times 10^4$	2.0×10^5	火箭
Winn et al (1981)	—	1.4×10^5	气球
Kasemir and Perking (1978)	1.0×10^5	2.8×10^5	飞机
W. D. Rust and H. W. Kasemir	1.5×10^5	3.0×10^5	飞机
Imyanitov et al (1972)	1.0×10^5	2.5×10^5	飞机
Evans (1969)	—	2.0×10^5	降落伞探空仪
Fitzerald (1976)	$2.0 \sim 4.0 \times 10^5$	8.0×10^5	飞机

由积雨云中电荷分布与大气电场分布的关系及表 1.1 的观测结果, 可以得出积雨云中大气电场特征为:

(1) 积雨云中大气电场很强, 大气电场的峰值一般为正, 其平均值的变化范围可从 10^4 V/m 至 10^5 V/m 数量级。

(2) 积雨云中电荷分布与地面大气电场分布的关系, 相应云底正电荷区, 地面是负电荷区; 而对于云底负电荷区, 地面是正电荷区。

(3) 在大块积雨云中, 电荷的产生和分离发生在温度为 $-5 \sim -40^\circ\text{C}$ 相应高度为界的区域中, 半径大约有 2km。

(4) 负电荷常常集中在温度为 $-10 \sim -20^\circ\text{C}$ 的高度之间, 正电荷在其上数千米处, 有时在云底附近发现有一个次级正电荷区, 而在中尺度系统中的负的空间电荷中心位置可以略为低一些, 接近冻结高度。

(5) 电荷的产生和分离过程与降水发展关系密切, 虽然空间电荷中心似乎在垂直方向和水平方向都有与主降水核心区有偏离。

(四) 积雨云的放电过程

当积雨云带有大量电荷时, 由于静电感应作用, 在积雨云下方的地面或地面上物体附近的电场强度足够大时, 就开始出现积雨云和地表之间 (或地面上的物体之间) 的空气被击穿的局部放电现象, 即雷电现象。如图 1.10 所示是仿照负极性雷电放电的示意图。

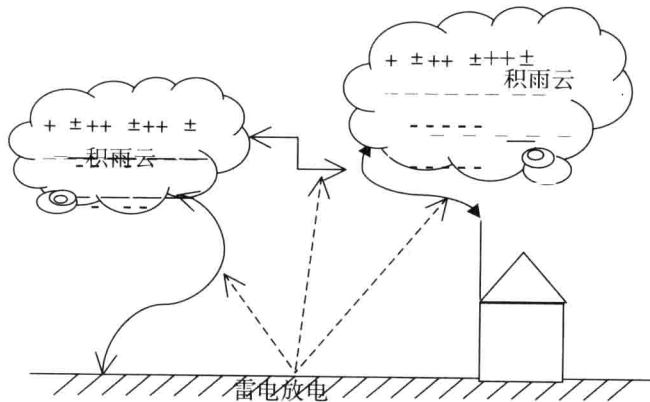


图 1.10 负极性雷电放电示意图

四、雷电的形成

(一) 雷 电

在大气科学研究的范畴内，雷电与带电的云层的存在是分不开的，雷电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的放电过程。这种迅猛的放电过程产生强烈的闪光并伴随巨大的声音。当然，云层之间的放电主要对飞行物有危害，对地面上的建筑物和人、畜没有太大的影响。然而，云层对大地的放电，则对建筑物、电子电气设备和人、畜危害很大。

我们把带电的云层与地球上某一点之间发生迅猛的放电现象，叫做直击雷或叫地闪。把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的放电现象，叫做感应雷。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产生电磁感应，发生高电压，以致发生闪击。

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。雷云形成与大气活动有直接的联系。当地面含水蒸汽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而被垫高都会产生向上的气流。这些含水蒸汽的上升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 1.11 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雨滴和冰晶（这二者称为云粒子）的要大，因此，极化生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。当上面所说的带电云层一经形成，就构成类云空间电场，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，使雷雨云发展得更快。根据 Simpson 和 Scrase 观测的结果，典型的雷雨云中的电荷分布大体如图 1.12 所示。

Berger 等人在 1946 ~ 1954 年观测期间，用示波器记录了 261 次闪电，其中有 204 次负闪电和 57 次正闪电；记录 455 次闪电，其中有 396 次负闪电和 59 次正闪电。在 1955 ~ 1963 年记录了 370 次闪电，其中有 324 次负闪电和 46 次正闪电。说明大地被雷击时，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。

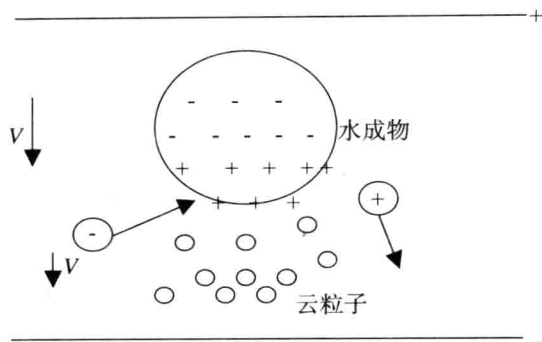


图 1.11 水成物在大气电场中的极化

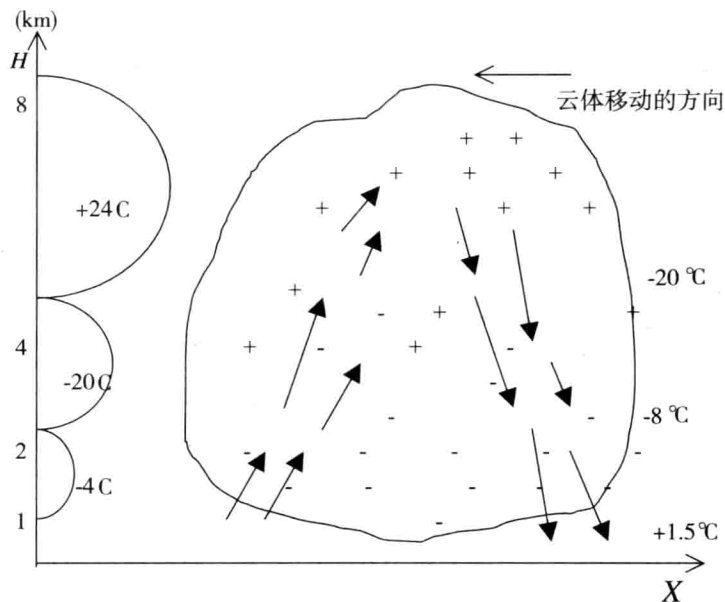


图 1.12 典型的雷雨云中的电荷分布

图中左端是按理论归纳的理想模式，右面是雷云常见的电荷实际分布。 H ——相对地面的高度， X ——水平距离， C ——库伦。

通常情况下，大气只有微弱导电性，只有极少的离子。即使电场强度很大，也不会出现大的电流。这与有大量自由电子的金属导体完全不同。即使在雷云与大地之间有了足够大的大气电场的情况下，地面各种尖端产生的放电电流仍然很小。虽然在云中的大气电场很强，但是云雾粒子之间的中性空气仍是绝缘的。但是当负电荷中心的电场强度达到 $10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 左右，云雾大气就会发生电击穿。主要是获得足够大动能的电子撞击气体分子使其游离而产生大量离子，这部分气体就成为导电介质，并且有气体发光现象，通常称这部分导电气体为流光或流柱。流柱状导电气体是逐级往下方延伸的，靠电场给予的动能去碰撞前方的气体分子，呈电子雪崩导电，它基本上沿着电场作用力的方向（注意，电子

是负电荷，积雨云负电中心向地面的电场的方向是垂直地面向上的)，但由于运动的惯性和碰撞的概率，每一个电子的速度方向因很多随机因素造成导电气体的向下发展方向并不是垂直向下，这一段暗淡的光柱是一条弯曲有分叉的折线，逐渐向下方推进，称它为梯级先导或梯式先导（如图 1.13 所示）。它向下推进的平均速度为 $1.5 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右，其变化范围为 $1.0 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而单个梯级的推进速度要大得多，一般为 $5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。单个梯级的长度平均为 50m 左右，其变化范围为 3 ~ 200m 左右。各梯级间的间歇时间平均为 $50 \mu\text{s}$ 左右，其变化范围为 $30 \mu\text{s} \sim 125 \mu\text{s}$ 左右。梯式先导的通道直径较大，其变化范围为 1 ~ 10m 左右。单个梯级较长也较亮，而后逐渐变暗。当具有负电位的梯式先导到达离地面约 3 ~ 50m 时，可形成很强的地面大气电场，就会引发地面产生回击。它实际上是引起地面空气产生向上的流光，这流光与下行的先导相接通，就形成一个直通云中负电荷区的导电通道，地面的电荷就迅速流入这个通道冲向云中。由于大地是导体，地面电荷全部可集中到通道，所以电流很大，形成很亮的光柱。回击的推进速度也比梯式先导快得多，平均为 $5 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，其变化范围为 $2.0 \times 10^7 \sim 2.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。回击通道的直径平均为几厘米，其变化范围在 0.1 ~ 23cm 之间。回击峰值电流可达 10^4 A 左右，是中和云中负电荷的主要过程。回击通道温度可达 10^4 K 量级。直接雷击所中和的云中负电荷绝大部分在先导放电过程中贮存在先导的主通道和分支中。回击过程中，地面的正电荷不断把这些负电荷中和掉。常称回击为主放电或主闪电。

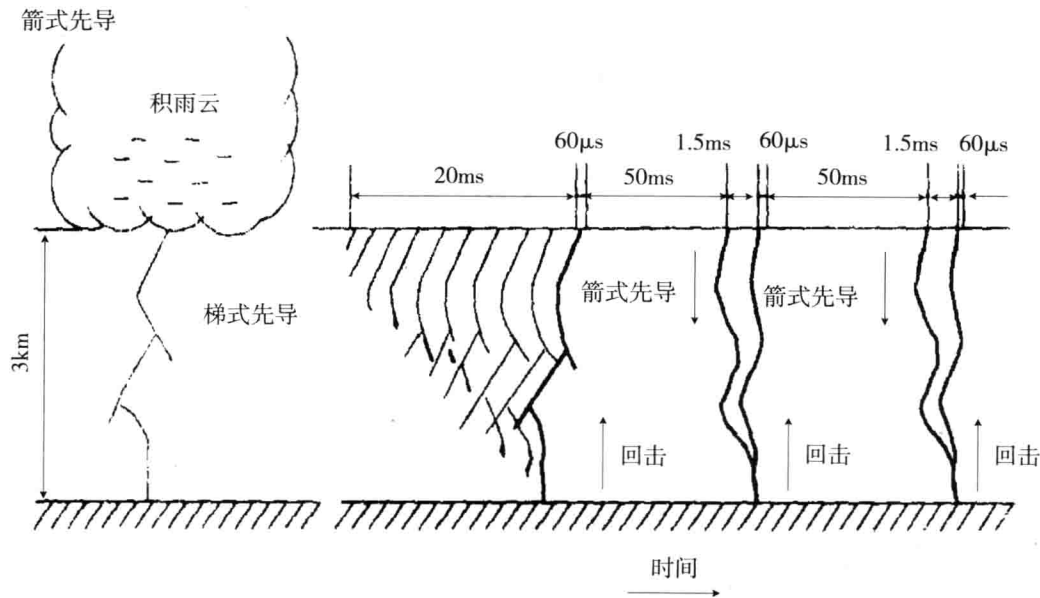


图 1.13 闪电从云向地面发展的过程示意图

由梯式先导到回击完成直击雷的第一次放电闪击，约过几十毫秒又出现第二次放电闪击。这是由于积雨云中分布的电荷互相被绝缘的空气所隔，这与大地不同，大地是导体，地面上的电荷可以自由流动，迅速聚集到闪击地点，而积雨云中电荷的迁移聚集到该点需要时间。待重新又聚集到负电中心处后，又可以循已有离子的原先通道再次放电，这时云