

雷电防护系列教材
南京信息工程大学电子工程系
防雷工程技术中心组编

LEIDIAN YU FANGHU JISHU JICHU

雷电与防护技术基础

肖稳安 张小青 编著

气象出版社

China Meteorological Press

雷电防护系列教材
南京信息工程大学电子工程系
防雷工程技术中心组编

雷电与防护技术基础

肖稳安 张小青 编著



气象出版社

内 容 简 介

本书根据雷电防护业务的特点,系统地介绍了雷电的形成、雷电流特征、雷电的危害、直击雷和雷击电磁脉冲的防护方法等基本知识。全书共分八章:第一章,雷电的形成和分类;第二章,雷电和雷电流参数;第三章,雷电的危害;第四章,建筑物的防雷分类和防雷保护区;第五章,现代防雷技术和方法;第六章,避雷器与电涌抑制器件;第七章,接地技术;第八章,屏蔽与等电位连接。

本书可供从事雷电研究、科研人员以及从事防雷工程设计、审核、检测的业务人员参考,也可作为大学雷电科学与技术专业研究生、本科生的学习参考书和教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

雷电与防护技术基础/肖稳安,张小青编著. —北京:

气象出版社, 2006. 4

ISBN 7-5029-4130-4

I. 雷... II. ①肖... ②张... III. ①雷-基本知识
②闪电-基本知识③防雷-基本知识 IV. P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 031553 号

Leidian Yu Fanghu Jishu Jichu

雷电与防护技术基础

肖稳安 张小青 编著

责任编辑:吴晓鹏 终 审:黄润恒

封面设计:李勤学 责任技编:王丽梅 责任校对:王丽梅

出版发行:气象出版社

出版社地址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

发 行 部:010-62175925

印 刷:北京昌平环球印刷厂

开 本:787mm×960mm 1/16

印 张:11.5

字 数:231 千字

邮政编码:100081

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

E - mail: qxcbs@263.net

版 次:2006 年 4 月第 1 版

印 次:2006 年 4 月第 1 次印刷

印 数:1~5000

定 价:20.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

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巨大的威胁,如森林火灾有50%以上是由雷电引发的。在现代生活中,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、通讯和计算机等微电子设备在各行各业得到日益广泛的应用,雷电将更加严重地对电力、广播电视、航空航天、邮电通讯、国防建设、交通运输、石油化工、电子工业等行业产生危害,尤其是计算机等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。雷击事故带来的损失和影响也越来越大,尤其是在经济发达国家和地区,雷击造成的电子设备直接经济损失达雷电灾害总损失的80%以上。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。据有关部门估计,全世界每年约有十亿次雷暴发生,平均每小时发生2000次雷暴。就整个地球表面而言,每秒钟的落地闪就有30~100次,而在地球表面各地,有时顷刻间就有2000个左右的闪电,平均每天发生闪电800万次,每次闪电在微秒量级的瞬间释放出约55kW·h的能量,全球每年因雷击造成的人员伤亡超过1万人,所导致的火灾、爆炸等时有发生。全世界每年因雷击造成的经济损失达10亿美元以上。1995年,德国一保险公司雷电灾害赔款是火灾和水灾的近10倍,高居赔款额首位。2003年8月中旬,美国东北部和加拿大发生大面积停电,其原因可能是闪电击中美国纽约州北部一家电厂并引起火灾。因此,人们把雷电灾害列为“电子时代的一大公害”。

雷电灾害,也是目前中国十大自然灾害之一。据统计,我国有21个省、区、市年雷暴日在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,中国社会经济、信息技术特别是

计算机网络技术发展迅速,城市高层建筑日益增多,雷电危害造成的损失也越来越大。仅1998年和1999年两年的统计,中国因雷击造成的直接经济损失达百万元以上的有38起。每年因雷电灾害伤亡的人数达十万多人,造成的财产损失上百亿元。我国的雷电灾害损失80%以上涉及电子、通讯和配电系统。如2000年8月18日12时56分,上海证券交易所卫星地面站机房遭受雷击,致使股票交易行情传输中断54分钟。雷电事故既能造成巨大的经济损失,也给社会带来难以估量的间接损失,对社会影响很大。

防雷减灾成为国家保护人民生命财产的重要内容,受到各级政府的高度重视。1999年10月31日,第九届全国人大常委会第二次会议审议通过的《中华人民共和国气象法》中明确提出:各级气象主管机构应当加强对雷电灾害防御工作的组织管理,并会同有关部门指导对可能遭受雷击的建筑物和其他设施安装的雷电灾害防护装置的检测工作。这是雷电防护工作的重要依据和保障。在该法的指导下,全国防雷工作发展很快。科技工作者在雷电的形成、监测、预警和防护方面做了大量的工作,向社会提供防雷装置安全检测、防雷电环境评价、防雷系统工程设计、防雷装置设计审核和防雷工程质量监督系统化服务,取得了防雷减灾的显著社会效益。

防雷减灾涉及到雷电的形成、雷电流特征、雷电电磁干扰的性质,电磁感应耦合过程、屏蔽、等电位连接、接地等知识和技术,还涉及生产制造、设计施工、检测系统等多种技术。现代防雷技术是多学科、多行业相互合作、协调、配合、相互联系的工程,是一项系统工程。本书根据雷电防护业务的特点,系统地介绍了雷电的形成、雷电流特征、雷电的危害、直击雷和雷击电磁脉冲的防护方法等基本知识,可供从事雷电研究、科研人员以及从事防雷工程设计、审核、检测的业务人员参考,也可作为大学雷电科学与技术专业研究生、本科生的学习参考书和教材使用。

本书在编写过程中得到南京菲尼克斯电气有限公司和杭州易龙电气技术有限公司的大力支持，同时也得到南京信息工程大学王振会教授的精心指导，在此表示衷心的感谢！

肖稳安 张小青

2005年6月

目 录

前言

第一章 雷电的形成和分类	(1)
§ 1.1 雷电的形成	(1)
§ 1.2 闪电的分类	(9)
第二章 雷电和雷电流参数	(17)
§ 2.1 雷电活动参数	(17)
§ 2.2 雷电流的波形及常用参数	(22)
第三章 雷电的危害	(40)
§ 3.1 直击雷的危害	(41)
§ 3.2 雷击电磁脉冲的危害	(47)
§ 3.3 暂态电位抬高及危害	(56)
§ 3.4 操作过电压的危害	(61)
第四章 建筑物的防雷分类和防雷保护区	(63)
§ 4.1 建筑物的防雷分类	(63)
§ 4.2 防雷保护区	(64)
第五章 现代防雷技术和方法	(70)
§ 5.1 现代防雷技术是一系统工程	(70)
§ 5.2 现代防雷技术的框架	(73)
§ 5.3 避雷针与避雷线	(74)
§ 5.4 避雷带与避雷网	(76)
§ 5.5 避雷针、带保护范围的确定	(79)

第六章 避雷器与电涌抑制器件	(87)
§ 6.1 避雷器的保护原理和性能要求	(87)
§ 6.2 阀式避雷器	(89)
§ 6.3 氧化锌避雷器	(96)
§ 6.4 保护间隙和管型避雷器	(102)
§ 6.5 对雷电电涌防护器件性能要求	(103)
§ 6.6 气体放电管	(106)
§ 6.7 压敏电阻	(113)
§ 6.8 齐纳、雪崩二极管和暂态抑制二极管	(118)
§ 6.9 正温度系数电阻和暂态抑制晶闸管	(123)
第七章 接地技术	(126)
§ 7.1 接地与接地电阻	(126)
§ 7.2 工频接地电阻	(129)
§ 7.3 冲击接地电阻	(136)
§ 7.4 土壤电阻率	(143)
§ 7.5 接地电阻与土壤电阻率的测量	(150)
第八章 屏蔽与等电位连接	(157)
§ 8.1 屏蔽的概念和分类	(157)
§ 8.2 屏蔽措施	(161)
§ 8.4 等电位连接	(166)
参考文献	(175)

第一章 雷电的形成和分类

在大气中常常发生强烈闪光伴有巨大隆隆爆炸声的现象，这就是人们常说的雷电现象。大气中雷电现象是如何产生的？雷电流的特征是什么？它在大气中是怎样传播的？经过人们的长期观测和实验研究，已经有了一些基本认识。

§ 1.1 雷电的形成

1.1.1 大气中存在电场

人们都知道地球有磁场，人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到地球有磁场的作用，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。但是大家都很少知道，人还生活在无处不在的大气电场中，因此，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原因是大气中存在电场。

在教堂的尖顶上、渔船的桅杆上或是在夜晚可以看到的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，它是一种尖端放电，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。

描述大气电场最常用的物理量，一个是电场强度 $\vec{E}$ ，它是矢量；另一个是电势 V ，它是标量。由电学理论知二者有如下关系：

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

在直角坐标中，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，可以用几何图形形象地描述大气电场，如图 1.1，法拉第提出用电力线来表征静电场。测出电场中电位相同的地点，把这些点用一个面连接起来，这样的几何曲面就称为等位面。当把电

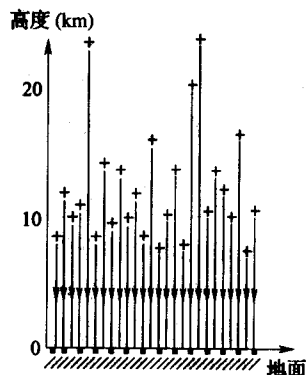


图 1.1 晴天大气电场的电力线

力线和等位面都画出来时, 就可以发现: 电力线与等位面相交处总是相互垂直的。如果用单位矢量 $\vec{n}$ 表示等位面的法线, 则 (1.2) 式就可简化成:

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

因此, 只要取上述两种表示方法之一就可描述大气电场的特征。

因为电场强度 $\vec{E}$ 等于电势梯度, 所以等势面的间距变化就可以表征 $\vec{E}$ 的数值变化。由于导体表面恒为等势面, 所以当地面有起伏, 空中有导体物时平行的平面等势面就发生弯曲, 如图 1.2 所示。

如果在不同高度测量 $\vec{E}$, 就可以测出如图 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%。

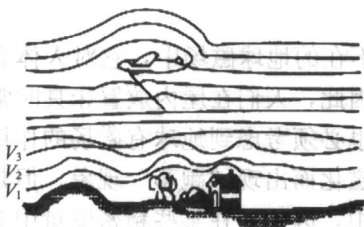


图 1.2 晴天大气电场的等势面

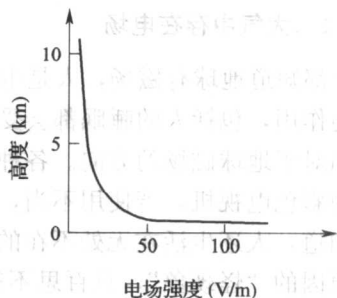


图 1.3 大气电场强度 $\vec{E}$ 值与高度的关系

1.1.2 雷电的形成

实际测量给出, 各地地面大气电场强度是时因地而异的。由此可以知道, 大气电场并不唯一地决定于地球的带电 (地球是一个变化于某负电荷稳定值的带电体), 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气体正、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, 使大气显示电性, 产生大气电场、大气电流, 导致大气中雷电的产生。

1.1.2.1 大气带电粒子的形成

大气是由几个物理性能不同的层次构成的, 按高度自上而下可以划分为: 外大气层、热层、中间层、平流层和对流层。所研究的雷电现象主要考虑发生在十几千米以下的对流层。因此, 低层大气带电离子的形成是我们关注的对象。

概括起来, 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, 大气中放射性物质辐射的射线和来自地球外空的宇宙射线作用于大气分子, 使大气分子电离而

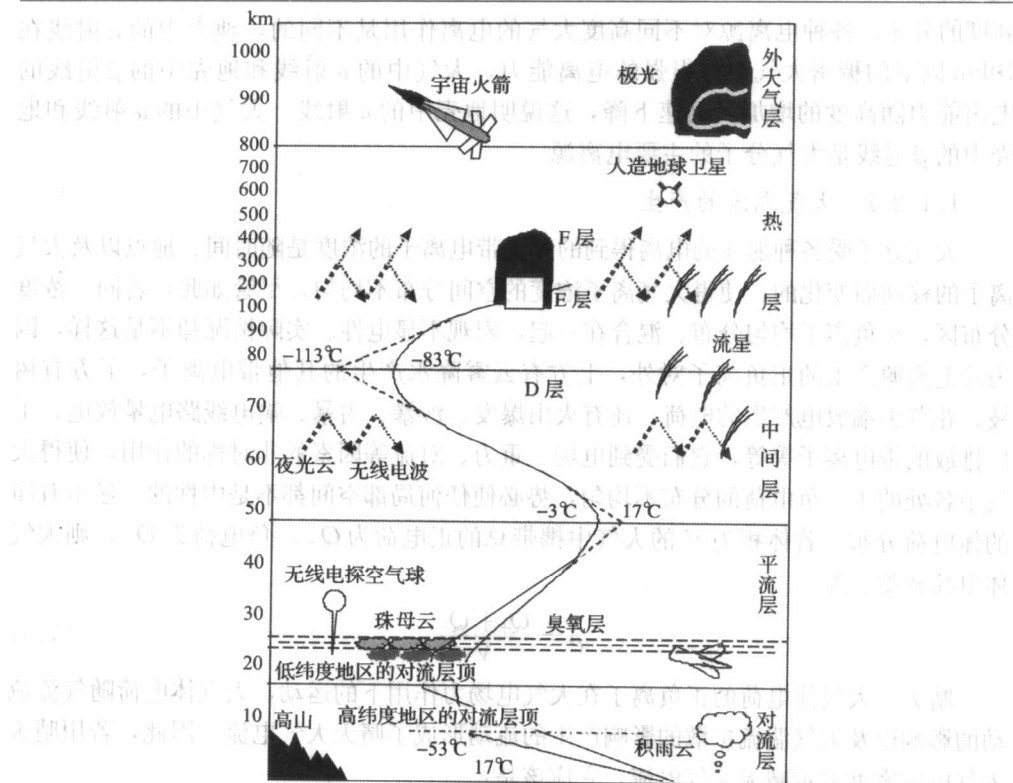


图 1.4 大气的垂直分层

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，局部范围还有人因素如火箭、飞机、工厂产生的离子，均可使大气分子电离为带电离子。以上所有能使大气分子电离的物质统称为电离源。

电离源使大气电离的能力可用大气电离率来表征，其定义为：单位体积和单位时间内大气分子被电离为正、负离子对的数目，单位取离子对/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ ，它的大小取决于电离源的强度和大气密度。图 1.5 给出各种电离源产生的大气电离率随

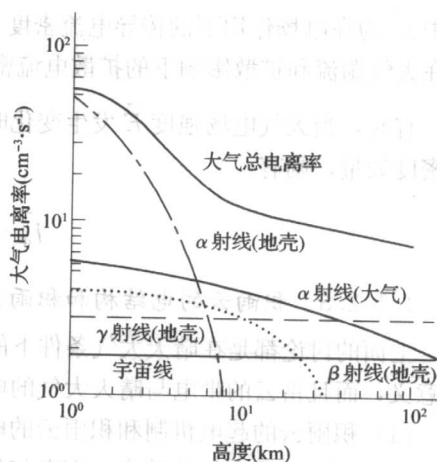


图 1.5 各种电离源产生的大气电离率随高度的分布

高度的分布。各种电离源对不同高度大气的电离作用是不同的,地壳中的 α 射线在10km以下的稠密大气中有很强的电离能力,大气中的 α 射线和地壳中的 β 射线的电离能力随高度的增加而迅速下降,这说明地壳中的 α 射线、大气中的 α 射线和地壳中的 β 射线是大气分子的主要电离源。

1.1.2.2 大气电流的产生

大气分子受各种射线的电离得到的大气带电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不均匀,尽管如此,若同一浓度分布区,正负离子均匀分布、混合在一起,宏观不显电性。实际情况却不是这样,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,势必使任何局部空间都不是中性的,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的影响以及大气湍流扩散的影响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,它应该是:

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

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, $\vec{J}_d$ 为在大气湍流和扩散影响下的扩散电流密度。

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:

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

1.1.2.3 积雨云的电结构和积雨云的起电机制

上面的讨论都是在晴天大气条件下情形,它给出的一些规律对雷雨云天气有指导意义,而且雷云的带电与晴天大气的电场有紧密关系。

(1) 积雨云的起电机制和积雨云的电结构

在大气科学研究的范畴内,雷电与带电的云层存在分不开,人们通常把发生闪电的云称为雷雨云。实际上与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，但最重要的是积雨云，人们通常提到的总是指积雨云，因为它是最多见的雷电灾害发生的大气环境背景。一些专业书上也只研讨积雨云雷电现象。

积雨云（图 1.6）是最强的对流云，浓密而深厚，外形像山峰或巨塔，它荷电量巨大，大气中闪电绝大多数是由它引起的。当高空风很大时，顶部出现云砧，云砧处常出现有电晕，它的生命可以达到 45 分钟之久，但是一气块从进入云底到出云顶的时间尺度是较短的，如积雨云的厚度为 12000m，平均上升气流速度为 $30\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，则其时间尺度为 $12000\text{m}/30\text{m} \cdot \text{s}^{-1} = 400\text{s}$ ，比较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 至 $4.5\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 或更大。



图 1.6 积雨云

许多对雷电现象有兴趣的人们，经过长期耐心细致的观察和实验研究，提出了多种积雨云起电机制的解释。概括起来，积雨云起电学说包括感应起电、温差起电、对流起电和破碎起电等等。经过这样一些宏微观物理过程，在积雨云中形成了一定的电荷分布特征。图 1.7 (a) 是人们根据大量的观测结果总结得到的积雨云电荷分布模型。宏观上可以看成三个电荷集中区，如图 1.7 (a) 所示，云中最高的集中区是正电荷，中间区为负电荷，最低区为正电荷。在云下面的地面上观测，好像云是带负电，这是因为中间区的电量最多，对云下空间产生的大气电场起着决定性作用。所以在雷暴来临时，云中电荷基本为双极性电荷分布，积雨云显示出电偶极子的特性。有时还观测到在积雨云底部有一个或几个局部弱正电荷区，它往往与大雨过程相关联。

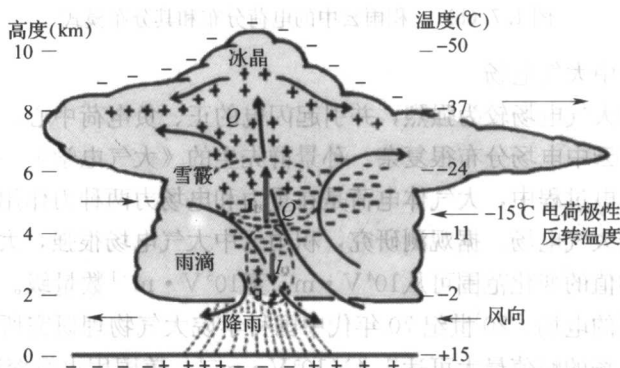
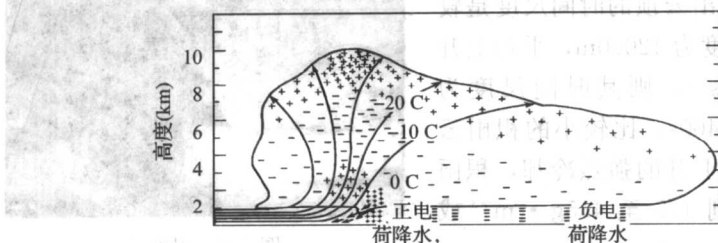


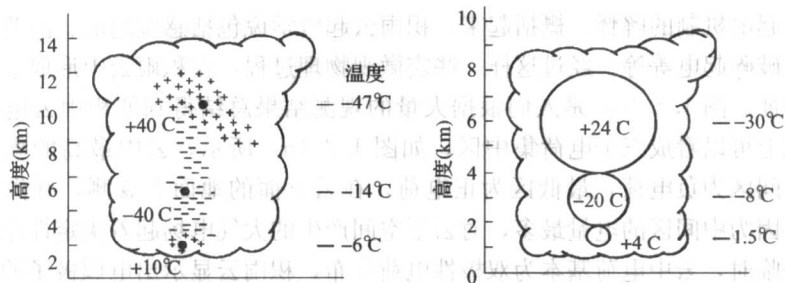
图 1.7 (a) 积雨云中电荷分布模式和气流特征

据孙景群先生的《大气电学》一书中记载,积雨云中大气电电荷密度绝对值平均为 $3 \times 10^{-16} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-3}$ 至 $3 \times 10^{-15} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-3}$, 也可观测到局部地区达 $10^{-14} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-3}$ 至 $10^{-13} \text{ C} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的情况。大气体电电荷尺度主要介于 $50 \sim 500 \text{ m}$, 对应出现概率最大的尺度为 200 m 左右, 大气体电电荷最大尺度可达 1000 m 以上。

图 1.7 (b) 是在英国寇乌等地区积雨云中正电荷区大致位于 7 km 高度以上, 温度低于 -20°C 左右的区域; 负电荷区大致位于 $2 \sim 7 \text{ km}$ 高度, 温度低于 -10°C 左右的区域; 云中次电荷区则大致位于 2 km 高度以下, 温度高于 0°C 高度附近。



(I) 英国寇乌地区云中的电荷分布



(II) 南非地区

(III) 电荷分布模式

图 1.7 (b) 积雨云中的电荷分布和其分布模式

(2) 积雨云中大气电场

积雨云中的大气电场较为强烈, 并引起闪电的正、负电荷中心, 云中大气电场廓线变化大, 积雨云中电场分布很复杂。孙景群先生的《大气电学》一书中还提到, 在积雨云的各种起电过程中, 大气体电电荷是在重力和电场力两种力作用下产生分离而导致了局地强大的大气电场。据观测研究, 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 $10^4 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 至 $10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 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 $1.4 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。美国用火箭探测 90 次, 有 7 次观测到大气电场峰值超过 $10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$, 最大的两次超过 $4 \times 10^5 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

表 1.1 积雨云中的电场

研究者	典型值 ($V \cdot m^{-1}$)	观测到的最大值 ($V \cdot m^{-1}$)	测量工具
Winn et al (1974)	$5 \sim 8 \times 10^4$	2×10^5	火箭
Winn et al (1981)	—	1.4×10^5	气球
Kasemir 和 Perking (1978)	1×10^5	2.8×10^5	飞机
W. D. Rust 和 H. W. Kasemir	1.5×10^5	3.0×10^5	飞机
Imyanitov et al (1972)	1×10^5	2.5×10^5	飞机
Evans (1969)	—	2×10^5	降落伞探空仪
Fitzgerald (1976)	$2 \sim 4 \times 10^5$	8×10^5	飞机

由积雨中电荷分布与地面大气电场分布的关系以及表 1.1 的观测结果可以看出, 积雨中大气电场特征是:

①积雨中大气电场很强, 大气电场的峰值一般为正, 其平均值的变化范围可从 $10^4 V \cdot m^{-1}$ 至 $10^5 V \cdot m^{-1}$ 数量级;

②积雨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, 地面是正电场; 而对于云底负电荷区, 地面是负电场;

③在大块积雨中, 电荷的产生和分离发生在 $-5 \sim -40^\circ C$ 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 $-10 \sim -20^\circ C$ 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。

(3) 积雨的放电过程

在虞昊等先生的《现代防雷技术基础》一书中指出: 第一次闪电一般出现于雷达测到积云中出现降水粒子之后约 10~20min 内, 这时云中较大范围内的大气电场强度大于 $3 \times 10^5 V \cdot m^{-1}$ 。由此可见, 雷电的形成可以概括为: 当积雨云带有大量电荷, 由于静电感应作用, 在积雨云的下方的地面或地面上的物体附近的电场强度足够大 (大于 $3 \times 10^5 V \cdot m^{-1}$) 时, 于是就开始积雨云和地表 (或地面上的物体之间) 之间空气被击穿的局部放电, 即雷电现象。图 1.8 是仿照负极性雷电放电的示意图。图 1.9 是常见负极性云地闪电的典型结构图。当云中负电荷中心的电场强度达到 $10^6 V \cdot m^{-1}$ 左右, 含云

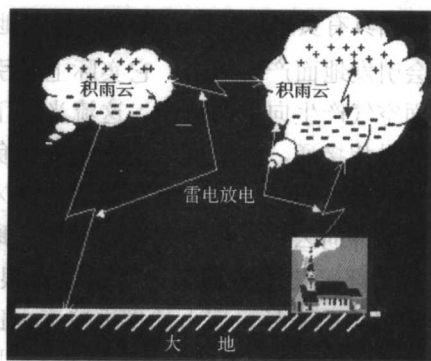


图 1.8 负极性雷电放电示意图

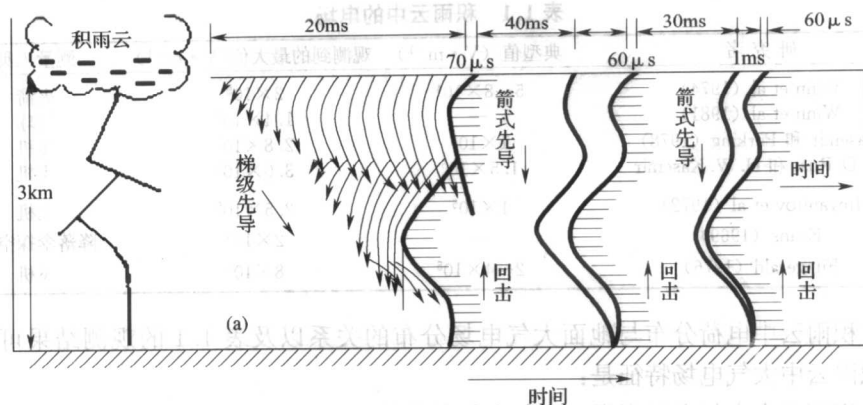


图 1.9 常见地闪中负极性闪电的梯式先导, 箭式先导, 回击的典型结构

大气就会发生电击穿, 获得足够大动能的电子撞击气体分子使其电离, 从而产生大量离子, 这部分气体就成为导电介质, 并具有气体发光现象, 通常称这部分导电的气体为流光或叫流注。这部分流注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)。但是由于运动的惯性和碰撞的概率, 每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垂直向下。这一段暗淡的光柱是一条弯曲有分叉的折线段, 逐渐向下方推进, 称它为梯级先导或梯式先导。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 $1.0 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \sim 2.6 \times 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。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 $30 \sim 125 \mu\text{s}$ 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, 而后逐渐变短变暗, 图 1.10 是由高速旋转相机摄取的梯式闪电。

当具有负电位的梯式先导到达离地约 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, 这流光于下行的先导相接通, 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要快得多, 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

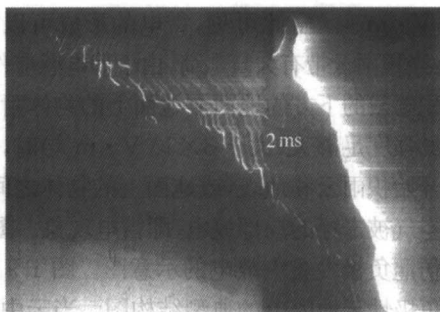


图 1.10 由高速旋转相机摄取的梯式闪电

右。回击通道的直径平均为几厘米,其变化范围为 $0.1\sim 23\text{cm}$ 。回击峰值电流可达 10^4A 左右,是中和云中负电荷的主要过程。回击通道温度可达 10^4K 量级。地闪所中和的云中负电荷绝大部分在先导放电过程中储存在先导的主要通道和分枝中。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。

由梯式先导到回击完成的第一次闪击,约为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。待重新聚集到负电中心处后,就可以循已有离子的原先通道再次放电,这时云中发出的流光不再是梯式先导那样逐级缓慢推进,而是顺利快捷得多,称之为箭式先导或叫直窜先导,如图 1.11,平均速度为 $2.0\times 10^7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,变化范围为 $1.0\times 10^6\sim 2.1\times 10^7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,当它到达地面上空一定距离后再次引发地面窜起的回击,组成第二个完整的放电闪击。这样的放电闪击次数最多可达 26 次之多(如图 1.12)。当然各地情况不完全一样,有些地方一次地闪只包含一个放电闪击,称为单闪击地闪。多闪击地闪的各个闪击之间间隔平均为 50ms ,变化范围为 $3\sim 380\text{ms}$ 。一次地闪的持续时间平均为 0.2s 左右,其变化范围为 $0.01\sim 2\text{s}$ 左右。

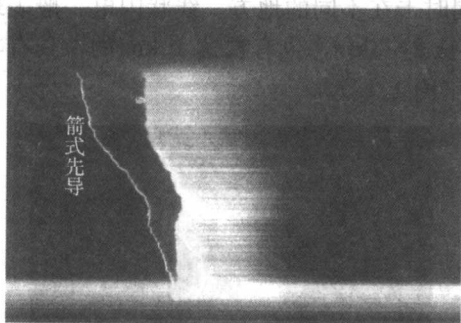


图 1.11 箭式(或直窜)先导

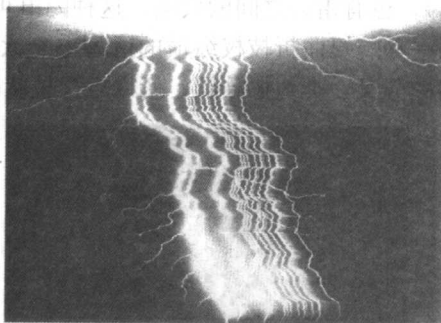


图 1.12 多次闪击

§ 1.2 闪电的分类

晴天大气中若存在体电荷的分布不均,带异号体电荷的两团大气之间的电场强度达到空气被击穿强度,在它们之间就会发生的放电现象,称之为晴空闪电。大气中的晴天闪电比较少见,大气中的闪电绝大部分发生在有云的天气条件下。云层是否发生闪电,取决于云层之间云体的电荷量及对地高度,或者说是云体之间或云地间的电场强度,当雷云与大地间或雷云相互间的电场强度由于游离电荷的逐渐累积而增长到足