



雷电物理学

郑秀书 张其林 袁 铁 张廷龙 编著



科学出版社

雷电物理学

邰秀书 张其林 袁 铁 张廷龙 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对近十多年来雷电物理学研究的主要成果进行了系统总结,同时,对早期在雷电研究史上有重要影响的科学事件和探测技术进行了回顾。主要内容包括雷暴云电荷结构和起电机,负地闪放电物理过程,正地闪、云闪和其他类型闪电,人工引发雷电、雷电探测和定位技术,雷电的天气气候学特征,雷暴云上方的中高层大气瞬态发光事件,以及雷暴或雷电诱发的高能辐射现象等。

本书是雷电研究人员或研究生的重要参考书,也可作为雷电科学、大气科学、绝缘与高电压等专业的本科生教材,同时也是从事雷电防护工程技术人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

雷电物理学/郟秀书等编著. —北京:科学出版社,2013.9

ISBN 978-7-03-038537-6

I. ①雷… II. ①郟… III. ①雷—大气物理学②闪电—大气物理学
IV. ①P427.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第210509号

责任编辑:杨帅英 朱海燕 张力群 / 责任校对:郑金红

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年11月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2013年11月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:441 000

定价:129.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

大气电学是大气物理学的一个分支，雷电物理则是大气电学的重要主题，主要研究大气中雷电过程的物理特征和结构、雷电形成的规律和机制、雷电与云降水等天气气候变化过程的相互作用以及雷电对人类生产活动和生活的影响和危害。近代雷电物理研究已有很长历史，早在 18 世纪中期，美国的富兰克林和俄国的罗蒙诺索夫等著名科学家就开创了对雷电的科学观测和分析，寻求雷电的奥秘。通过二百多年的努力，现代雷电物理学已取得了长足的进展。利用地基和卫星天基相结合的雷电探测网，已经可以取得全球高分辨率地闪和云闪的时空变化资料。通过雷电物理过程的综合观测试验和理论研究，初步建立了雷电物理模式，成功进行了雷暴云起电和雷电的数值模拟试验。利用火箭等技术实施了人工引雷，为防御雷电灾害研究提供了有效手段。

我国雷电物理学起步较晚，20 世纪 60 年代中期，根据国家需求和大气物理学学科发展，中国科学院地球物理研究所才开始了雷电物理学的研究，但是工作不久，就受到“文化大革命”的冲击而被迫中断。直到 70 年代，中国科学院兰州高原大气物理研究所全面重启了雷电物理研究，在西北艰难的工作条件下，经过多年坚持不懈的努力，逐步培养出了我国一枝独秀的雷电物理研究团队，形成了我国雷电物理研究基地，取得了一系列重大研究成果，在国际上占有一席之地，特别是开创了我国人工引雷技术和雷暴云起电数值模拟试验。

30 多年来，这个研究团队发表了一系列雷电物理学方面的科学论文，2000 年首次撰写出版了专著《雷电与人工引雷》（王道洪、郅秀书、郭昌明编著），总结了团队在人工引雷方面的研究成果。2009 年，又编写出版了专著《雷暴电学》（张义军、言穆弘、孙安平等著），重点补充了在雷暴云起电和数值模拟方面的研究成果。由郅秀书（现在中国科学院大气物理研究所工作）等编写的专著《雷电物理学》是团队的第三本专著，更加全面系统地综合了现代雷电物理学的发展，补充了团队近几年来研究的新进展。其中对球状闪电、中高层大气瞬态发光事件及雷电高能辐射等方面的阐述，可能会引起物理学、大气科学、空间物理等跨学科交叉研究的兴趣，开拓雷电物理学新的研究方向。书中第 6 章对雷电探测和定位技术的阐述，体现了国际雷电探测技术的发展趋

势，特别是甚高频（VHF）辐射源定位技术作为国际上最先进、最精确的雷电定位技术，对雷电物理过程和机制的认识以及雷电天气灾害的监测预警都有重要作用。第7章对雷电的天气气候学特征的介绍也十分重要，它表明雷电过程与天气气候变化的相互关联。随着全球雷电探测系统的建立以及和天气气候探测网的融合，将提供越来越多能揭示雷电活动和天气气候变化相互关联的丰富资料，雷电物理学可能成为天气气候学的重要组成部分。

衷心祝愿《雷电物理学》的出版能引起广大大气科技工作者对雷电物理科学的兴趣和重视，推动我国雷电物理学取得更大的发展。



周秀骥

2013年1月30日

前 言

雷电（也称为“闪电”）是发生于大气中的一种长距离、大电流、强电磁辐射瞬时放电事件。雷击不仅可造成人畜伤亡，引起森林、建筑物火灾，油库、化工厂爆炸，以及电力和通信中断等重要灾害，而且还严重干扰电子和微电子设备的正常工作，甚至造成设备的严重损坏。20世纪80年代以来，对电磁辐射十分敏感的电子和微电子器件被越来越广泛地应用于电子、电力、航空、航天、通信等领域，因此雷电对这些高技术领域也构成严重威胁。对雷电物理过程和机理的准确认识不仅是雷电科学发展的需要，同时也是对雷电灾害进行科学防护的需要。

由于雷电发生的瞬时性和随机性，对雷电的科学认识在很大程度上依赖于高时间分辨率探测技术的进步。近十多年来，随着电子技术、高速大容量数据采集技术、高时间精度GPS技术、计算机和通信技术等现代技术的发展，对雷电磁场、放电通道电流、放电通道光学演化等的探测技术有了很大的进步，特别是雷电VHF辐射源三维定位技术的发展完善，使得对雷电的微秒时间尺度的发生、发展过程的详细描述成为可能，从而对雷电物理过程和机理的认识取得了许多突破性的进展。近年来，雷电与强对流天气灾害关系的研究，以及雷电诱发的雷暴云顶与电离层之间发生的中高层大气瞬态发光事件（TLE）和雷电放电过程伴随的X射线、 γ 射线等高能辐射现象的揭示，不仅增进了对雷电物理学及其影响的认识，也使得雷电物理学研究领域大大扩展。

近年来，由于对雷电灾害防护的重视，我国从事雷电研究的科研人员和从事雷电灾害防护的工程技术人员逐年增多，为了满足大家对雷电物理学的最新研究成果系统了解的迫切需求，本书对近十多年来国内外雷电物理研究的主要成果进行了系统总结。同时为了使读者能对雷电物理学有系统的认识 and 了解，本书也对雷暴的起电机理和电荷结构、雷电探测技术、雷暴尺度和全球尺度的雷电活动等进行了较为系统的阐述，并介绍了国际上对中高层大气瞬态发光事件和雷电高能辐射的最新研究成果。全书共分9章，第1章主要是对雷电研究历史的回顾，着重介绍早期在雷电研究史上有重要影响的科学事件和探测技术；第2章介绍雷暴云的电荷结构和起电机理；第3章结合发生比例较高、认识也较为全面的下行负地闪详细介绍地闪的放电过程；第4章主要介绍正极性地闪特征，并对上行闪电、云闪、袖珍云闪（CID）、球状闪电等放电现象进行简要介绍；第5章介绍人工引发雷电及应用；第6章介绍一些主要的雷电探测和定位技术；第7章介绍雷电的天气气候学特征；第8章介绍发生于雷暴云上方的中高层大气瞬态发光事件；第9章介绍国际上开展的雷暴或闪电诱发的高能辐射最新研究成果。第1章、第6章、第8章和第9章由郟秀书撰写，

第2章由张廷龙撰写，第3章和第4章由张其林撰写，第5章由张其林和郗秀书撰写，第7章由袁铁撰写。张廷龙对全书参考文献进行了整理和统一，郗秀书对各章节内容进行了修改和补充，并最后审定。

冯桂力博士、杨静博士、刘冬霞博士、潘伦湘博士、蒋如斌博士、王彦辉博士、王彩霞博士、王俊芳博士、孔祥贞博士、曹冬杰博士、李万莉博士、赵中阔博士，以及在读研究生孙竹玲、王志超、王宇、高金阁、樊艳峰、张亮、田野、汤宵、武智君、朱润鹏等提供了部分研究结果，并绘制了部分图表，在此一并表示感谢！

衷心感谢原兰州高原大气物理研究所郭昌明研究员、刘欣生研究员、言穆弘研究员等老一辈科学家为雷电物理学研究奠定了良好的研究基础。衷心感谢周秀骥院士、吕达仁院士对雷电物理学研究的关心和大力支持，以及对团队研究工作的鼓励和肯定，特别感谢周秀骥院士在百忙中为本书亲笔撰写序言。

电子技术日新月异的进步极大地带动着雷电探测技术的发展，从而使我们对雷电物理学的认识也在不断深化，受编著者的学识水平和时间的限制，不妥之处在所难免，敬请读者给予批评指正。

本书得到了国家自然科学基金重点项目（40930949）的资助。

作者
2012年秋于北京

目 录

序

前言

第 1 章 雷电研究史上的里程碑	1
1.1 富兰克林风筝实验与避雷针	1
1.2 雷电光谱和基于 Boys 相机的条纹照相	3
1.3 雷暴云内电荷结构与 Simpson 电场探空	4
1.4 雷电电流测量与 Berger 回击峰值电流分布	5
1.5 全球大气电路概念与 Carnegie 曲线	7
第 2 章 雷暴云电荷结构和起电机制	9
2.1 晴天大气电学概述	9
2.1.1 地球大气分层和大气离子	9
2.1.2 全球大气电路与电平衡	11
2.2 雷暴云的形成和地面电场	14
2.2.1 雷暴云的形成和分类	14
2.2.2 雷暴云产生的地面电场及时间演化	16
2.3 雷暴云电场探空和云内电荷结构	18
2.3.1 雷暴云电场探空技术	18
2.3.2 单体雷暴的电荷结构	21
2.3.3 中尺度对流系统的电荷结构	21
2.3.4 日本冬季雷暴的电荷结构	24
2.3.5 中国内陆高原地区雷暴的电荷结构	26
2.4 雷暴云内的主要起电机制	29
2.4.1 非感应起电机制	30
2.4.2 感应起电机制	35
2.4.3 离子扩散起电机制	36
2.4.4 离子电导起电机制	36
2.4.5 次生冰晶起电机制	37
2.5 雷暴云电荷结构的数值模拟	38
2.5.1 电荷连续性方程与电场求解	38

2.5.2	闪电放电过程的参数化	39
2.5.3	基于云分辨模式的雷暴云电荷结构和放电通道模拟	42
2.5.4	基于中尺度气象模式的雷暴云电荷结构模拟	44
第3章	下行负地闪放电过程	48
3.1	下行负地闪物理过程概述	49
3.2	预击穿过程	49
3.3	下行负先导过程	52
3.3.1	光学发展特征和先导特征参数	52
3.3.2	负先导产生的地面电场变化	54
3.3.3	先导发展机制讨论	56
3.3.4	负先导过程的静电学模式	58
3.3.5	具有多接地点的负先导	60
3.4	连接过程	62
3.5	回击过程	64
3.5.1	回击电流波形	64
3.5.2	回击产生的地面电场变化	70
3.5.3	回击辐射场的频谱特征	73
3.5.4	回击电流模型	74
3.5.5	回击电磁场计算	79
3.6	闪击间的过程	84
3.6.1	连续电流	85
3.6.2	M 分量	87
3.6.3	K 变化	88
第4章	正地闪、云闪和其他类型闪电	91
4.1	正地闪	91
4.1.1	正地闪初始击穿	91
4.1.2	下行正先导	93
4.1.3	正地闪回击电流和电场变化	95
4.1.4	正地闪连续电流和 M 分量	99
4.2	上行闪电	101
4.3	双极性地闪	105
4.4	云闪	108
4.5	袖珍云闪	112
4.6	球状闪电	115
4.6.1	球状闪电的一般理论	116

4.6.2	实验室人造球状闪电	117
4.6.3	利用人工引发雷电技术制造球状闪电	122
第 5 章	人工引发雷电及应用	125
5.1	火箭-导线人工引雷技术的原理	125
5.2	国内外人工引雷实验概况	127
5.3	传统人工引雷的物理过程	129
5.3.1	初始连续电流过程	129
5.3.2	上行正先导	131
5.3.3	下行箭式负先导	134
5.3.4	人工引发雷电的连接过程	135
5.3.5	回击电流波形及 M 分量	138
5.3.6	人工引发雷电与自然雷电回击电流的对比	150
5.4	空中人工引发雷电放电过程	150
5.5	人工引发雷电的近距离电磁场	155
5.5.1	距雷电通道 0.1~5 m 范围的极近距离电场	155
5.5.2	距雷电通道 10~30 m 的电磁场	156
5.5.3	距雷电通道 60~550 m 的电磁场	158
5.5.4	人工引发雷电的远距离回击电磁辐射	159
5.6	人工引发雷电技术的应用	161
第 6 章	雷电探测和定位技术	165
6.1	传统的雷电探测技术	165
6.1.1	大气平均电场仪	166
6.1.2	快、慢天线雷电电场变化仪	167
6.1.3	雷电磁场探测仪与磁定向法	168
6.2	雷电 VHF/UHF 辐射源定位技术	170
6.2.1	长基线时间差法雷电 VHF 辐射源三维定位技术	171
6.2.2	短基线时间差法雷电 VHF 辐射源定位技术	177
6.2.3	雷电 VHF 窄带干涉仪定位技术	180
6.2.4	雷电 VHF/UHF 宽带干涉仪定位技术	182
6.2.5	VHF 辐射源定位系统的优势及不同系统之间的比较	184
6.3	地基 VLF/LF 雷电定位系统	185
6.3.1	VLF/LF 频段的雷电定位系统	185
6.3.2	VLF 频段的雷电定位系统	187
6.3.3	舒曼共振雷电探测系统	188
6.4	星载雷电探测系统	188

6.4.1	雷电光学探测器 LIS/OTD	189
6.4.2	FORTE 卫星的射频和光学雷电同步探测系统	190
第 7 章	雷电的天气气候学特征	191
7.1	雷暴尺度的雷电特征	191
7.1.1	冰雹云	191
7.1.2	飏线	197
7.1.3	热带气旋	202
7.1.4	正极性地闪与灾害性天气	208
7.1.5	雷电与雷暴动力、微物理和降水的关系	210
7.2	全球雷电活动和地域差别	215
7.2.1	全球雷电活动的时空分布和区域特征	215
7.2.2	中国及周边地区雷电活动的时空分布	218
7.3	雷电活动与气候变化	223
7.3.1	雷电活动对地面温度的响应	224
7.3.2	雷电与对流层上部的水汽	225
7.3.3	雷电产生的氮氧化物 (LNO_x)	226
7.3.4	气溶胶对雷电活动的影响	228
第 8 章	雷暴云上方的大气瞬态发光事件	230
8.1	瞬态发光事件的形态特征及其与雷电的联系	230
8.1.1	红色精灵	231
8.1.2	蓝色喷流	236
8.1.3	巨大喷流	236
8.2	中高层大气瞬态发光事件的物理机制	240
8.3	中高层大气瞬态发光事件的可能影响	241
第 9 章	与雷暴或雷电有关的高能辐射	243
9.1	与雷暴有关的高能辐射现象	243
9.2	雷电放电过程产生的高能辐射	245
9.3	地球 γ 射线闪	249
9.4	雷电高能辐射的产生机制	253
9.4.1	相对论电子逃逸击穿机制	253
9.4.2	逃逸击穿的正反馈机制	254
9.4.3	强场逃逸击穿机制	256
9.4.4	其他机制	257
参考文献	258

第 1 章 雷电研究史上的里程碑

雷电（也称为“闪电”）是雷暴天气中发生的一种长距离瞬时放电现象。自然界中 1/3 左右的雷电会击中地球，被称为地闪。地闪放电过程产生的大峰值电流、高峰值功率、炙热高温、强电磁辐射和冲击波等物理效应，会对地面建筑物、森林、电力和电子设备、航空、航天、通信等产生破坏作用，甚至威胁人的生命。历史上很早就有高建筑物遭雷击的记录，如威尼斯大约 100 m 高的圣马可钟楼（Campanile di San Marco）曾多次遭雷击损坏。1752 年本杰明·富兰克林（Benjamin Franklin, 1706—1790）发明避雷针，1766 年圣马可钟楼安装了这种避雷针，此后，再没有被雷击损坏的记录（Rakov and Uman, 2003）。

雷电放电因电离空气和伴随的光化学作用而成为自然界中氮氧化物（ NO_x ）的重要产生源。雷电产生的氮氧化物不仅因固氮而在全球氮循环中起着重要作用，同时也对自然界中的臭氧产生影响，因此雷电对地球生态系统的演化也有重要贡献。尽管地球上的生命演化已经有三百多万年的历史，但是地球上雷电的存在远远早于生命的出现，有研究表明，雷电对地球上的生命起源可能有重要作用，生命起源以前的大气放电产生了诸如氰化氢和氨基酸等生命起源所必需的有机分子（Oparin, 1938; Miller and Urey, 1959; Sanchez et al., 1967; Bar et al., 1984）。

雷电作为自然界中一种壮观的自然现象，很早就吸引了众多科学家的关注。本章对早期开展的一些主要雷电研究进行简要回顾，并着重介绍在 20 世纪 70 年代以前对雷电认识具有里程碑意义的重要事件或重要技术。

1.1 富兰克林风筝实验与避雷针

人类对雷电的科学探求可以追溯到 18 世纪初，但是真正的雷电实验始于 18 世纪中叶本杰明·富兰克林提出的“岗亭（sentry-box）实验”，类似的实验曾先后在美国费城、英国伦敦、法国巴黎等地进行尝试，其中在法国巴黎的马尔利实验最具代表性。1752 年 5 月 10 日，在位于巴黎附近的乡村马尔利-拉-维莱（Marly-la-Ville），退役骑兵 Coiffier 利用葡萄酒瓶将一根铁棒与地绝缘，在雷暴天气时引发了火花放电。尽管在此之前也有一些科学家注意到了实验室火花放电和雷电的相似性，但马尔利实验的结果第一次提供了雷暴中带电的直接证据。之后，马尔利实验在意大利、德国、俄国、荷兰、英国、瑞典等多个国家被重复进行（Prinz, 1977）。

本杰明·富兰克林是美国科学家、发明家、政治家和社会活动家，他将两种电荷命名为正电荷和负电荷，提出了电荷守恒原理。富兰克林本人在不知道马尔利实验的情况下，利用拖带丝线的风筝进行了类似的实验，即著名的“风筝实验”，并发明了避雷针。

1752年6月富兰克林和他的儿子威廉在美国费城进行了著名的风筝实验。他们用一根细铁丝固定在风筝顶上以吸引电荷，铁丝末端与放风筝的丝线相连，丝线的下端连接一把钥匙，钥匙与一端插入莱顿瓶^①的金属导线相连。当雷暴移近时，他们用一条丝带绑在钥匙上，并通过丝带放飞风筝。风筝放到空中后，他们躲到一个棚子内，以防靠近人体的丝带被雨淋湿，当雷暴从风筝上方经过时，电荷通过潮湿的风筝、丝线和钥匙进入莱顿瓶。当发现丝带的绒毛竖起来时，他意识到钥匙已经带电，这时他用另一只手去触摸钥匙，有被电击的感觉。

富兰克林的风筝实验表明，雷电是一种电现象，雷暴是带电的（Franklin, 1774）。风筝实验具有里程碑的意义，不仅证明了雷电的本质，也破除了当时人们对雷电所持的迷信观念，因此英国皇家学会为富兰克林颁发了金质奖章，并聘请他为皇家学会会员。

值得注意的是，在马尔利实验和富兰克林风筝实验中，无论是金属棒还是潮湿的风筝丝线都会在云电荷产生的电场中被极化，相反极性的电荷在导体的两端积累，当导体下端和地面之间的间隙减小时，会产生火花放电。很显然，这一火花放电的尺度和强度要比真实的雷电小几个量级。在这些实验设计中，他们并没有考虑到金属棒或风筝被直接雷击的可能性，实际上，在这种情况下，雷电很有可能击中实验者。俄国物理学家利赫曼（Georg Wilhelm Richmann）为了验证富兰克林的风筝实验，于1753年8月6日在圣彼得堡进行雷电实验时，雷电击中未接地的金属棒，他自己不幸被雷击身亡。不过，他并未直接接触金属棒，而是被来自金属棒的球状闪电击中了前额而致死。

通过风筝实验，富兰克林意识到电荷可以通过导体释放到地面，此后他发明了避雷针，通过避雷针为雷电提供一条可入地通道。他把几米长的铁杆用绝缘材料固定在屋顶，杆上接一根粗导线，一直通到地下，当雷电袭击房屋时，雷电流沿着金属杆通过导线直达大地，可有效保护房屋建筑不受雷击，至今这种传统的避雷针仍然被认为是最有效的雷电直击危害的防护措施。

麦克斯韦（James Clerk Maxwell）认为富兰克林避雷针系统会比周围环境更容易吸引雷电。1876年，他提出了利用具有一定厚度的金属壳将弹药库建筑完全屏蔽的防雷方法，即现在所说的法拉第笼（Faraday Cage）。当雷电击中金属屏蔽的建筑物时，电流将被限制在金属包敷物的外部，金属外壳甚至不必接地，在这种情况下，当金属壳遭到雷击时，金属壳和地之间仅仅形成一个电弧放电，可给全金属的汽车、飞机提供良好保护。

根据风筝实验的原理，20世纪60年代人类发明了人工引发雷电技术，在雷暴天气时，利用拖带金属导线的小火箭向起电的云体发射，通常当火箭达到几百米的高度时即可引雷成功。美国、法国、中国、日本和巴西曾先后拥有了这一技术，并相继开展了人工引发雷电实验。人工引发雷电技术可以使雷电在预知的时间和地点发生，使得雷电通道放电电流和近距离电磁场的直接同步测量成为可能，因此不仅为雷电放电物理过程和雷害机理的研究开辟了一条有效途径，而且也为防雷技术发展和验证提供了一种有效手段（详见第5章）。

^① 莱顿瓶（Leyden jar）由荷兰莱顿大学的物理学教授马森希罗克1745年发明，可以使摩擦生成的电储存起来。

1.2 雷电光谱和基于 Boys 相机的条纹照相

强烈的发光是雷电最为显著的特征之一，因此，对雷电物理的最早认识实际上来自于对雷电的光学观测。早在 19 世纪晚期，光谱识别作为重要的研究工具应用到雷电研究中，并由此获得了对雷电放电通道特征的重要认识。Herschel (1868) 首次识别出雷电放电的氮谱线是可见光波段最亮的谱线，并且谱线的相对强度随着光谱的不同而变化。Schuster (1880) 对雷电光谱进行了系统识别。Dufay (1949) 首次提出雷电光谱可以定量反映雷电通道及周围的物理条件。Slipher (1917) 获得了第一张雷电光谱的摄影记录。Uman (1969) 与 Orville 和 Spencer (1977) 曾全面回顾了早期的雷电光谱研究。雷电光谱分布特征也成为近代从空间探测雷电的重要基础。

最早使用静止和移动摄影相机的研究者包括 Hoffert (1889) 和 Larsen (1905) 等，时间分辨的摄影照片表明地闪常包含不只一次的回击。对雷电放电通道光学演化特征的认识很大程度上得益于 Boys 相机的发明 (Boys, 1926, 1928, 1929)。Boys 相机的底片具有旋转功能，从而可以快速拍摄雷电通道的发展演化图像。因其所拍摄到的雷电图像为时间上可以清晰分辨的亮条纹，所以也称条纹相机 (streaking camera)。条纹相机的应用极大地促进了对雷电放电过程的认识 (Schonland, 1956; Malan, 1957; Berger and Vogelsanger, 1966)。Schonland 和 Malan 及其合作者在 20 世纪 30 年代利用条纹相机在南非拍摄的雷电照片清楚地显示，中和云中负电荷的负地闪由下行的先导和向上的回击组成，首次回击的先导以梯级的形式发展。Schonland (1956) 曾对南非的主要研究结果进行了总结，这些结果后来被美国、苏联、法国、日本和瑞士的科学家们广泛证实，迄今我们一直沿用的大部分雷电术语都来自南非的研究。

Berger 和 Vogelsanger (1966) 利用条纹相机拍摄到了地闪先导的光学图像，从而提供了正、负先导发展的差异。图 1.1 (a)、图 1.1 (b) 分别给出了利用条纹相机拍摄到的一次始于云内的下行正地闪过程和下行负地闪先导过程的条纹照片。照片开始的短亮线条或光带是由先导过程的向下传播而产生的，而后面的连续长亮线条或光带则由回击产生。根据条纹相机的观测结果，负先导以梯级的形式传播，而正先导则近似连续发展。

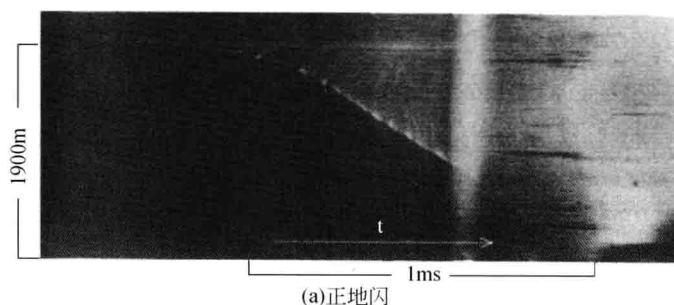


图 1.1 始于云内的地闪先导过程的条纹照片 (Berger and Vogelsanger, 1966)

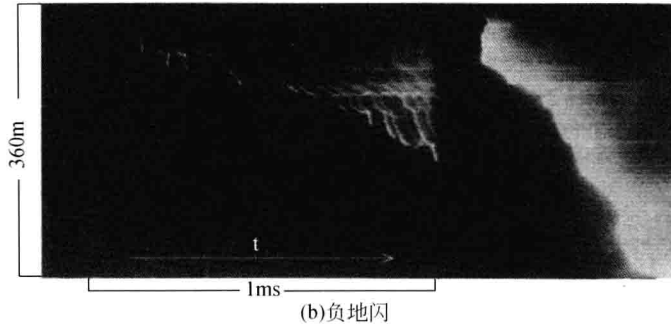


图 1.1 始于云内的地闪先导过程的条纹照片 (Berger and Vogelsanger, 1966) (续)

图 1.2 是根据静止照相和条纹照相画出的负地闪发展过程示意图，负先导的头部较后部通道要亮得多，其持续时间大约在 10 ms 量级，然后是与地面物体的快速连接过程及首次回击，以及由箭式先导引导的继后回击过程等。负地闪发展过程的详细研究参见第 3 章。

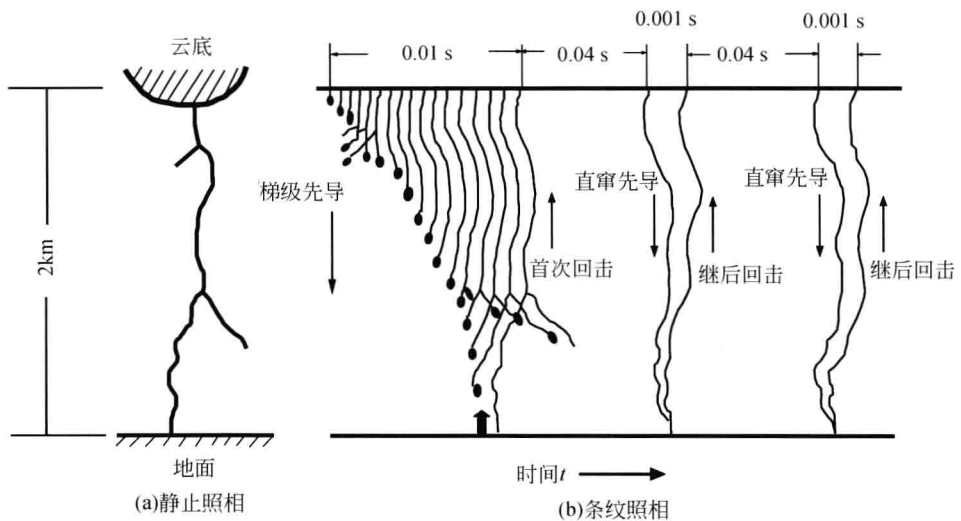


图 1.2 根据 Berger 和 Vogelsanger (1966) 静止照相和条纹照相结果得到的负地闪发展过程示意图

1.3 雷暴云内电荷结构与 Simpson 电场探空

20 世纪初，现代雷暴电学领域两位奠基人 C. T. R. Wilson 和 G. C. Simpson 就分别利用不同的探测手段，开始了对雷暴云电荷结构的研究。为寻找高能粒子发明云室的 Wilson 是诺贝尔奖获得者，他是第一个利用静电场测量来推断雷暴云内电荷结构和雷电中和电荷量的人。但是 Simpson 及其同事们开展的云内电场探空却提供了雷暴云电荷结构的直接科学证据。

Wilson (1920, 1929) 的研究基于雷电电场变化，认为雷暴电荷分布为正偶极结构

(上正下负)；Simpson (1927) 利用雷暴中心下方降水电荷的测量，认为雷暴电荷为负偶极结构(上负下正)。为此，两人分别在 1922 年和 1924 年进行过两次公开辩论，用 Simpson 自己的话来说，他和 Wilson 的辩论“气氛轻松，一直遵循真正的科学精神”(good tempered and always conducted in a truly scientific spirit)。为究其原因，Simpson 和他的同事们进行了穿云电场探测 (Simpson and Scrase, 1937; Simpson and Robinson, 1941)。他们利用自由气球携带电晕探针在英国进行了首次雷暴云内的电场探空实验，从而推断出了雷暴云内的电荷结构。在气球上升穿过雷暴云时，他们同时对垂直电场和大气压力进行测量，利用气压值推算出传感器所在的高度。根据探空结果，他们推断雷暴云内的电荷结构由垂直分层的三个电荷区域构成，即三极性电荷结构：下部是电荷量约 +4C 的正电荷区，位于高于 0℃ 的区域；中间是电荷量约 -20C 的主负电荷区域，位于 -10~0℃ 的区域；上面是一个主正电荷区，电荷量约 +24C，对应温度低于 -10℃ 的区域。尽管近年来的电场探空表明，雷暴云内的电荷结构较这一电荷结构可能要复杂得多，但是这一三极性的电荷结构模型被广泛接受了长达半个世纪。到 20 世纪 90 年代，随着电场探空技术的进步和大量雷暴云内电场探空个例的积累，表明不同雷暴系统、不同的雷暴发展阶段，甚至在雷暴系统的不同区域，其电荷结构会有差别 (详见第 2 章)。但是，时至今日，在很多情况下，单体雷暴云中的主要电荷区域仍常用经典三极性电荷结构来代表 (图 1.3)。

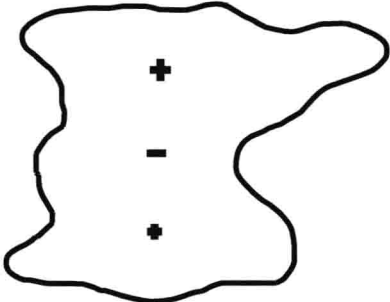


图 1.3 三极性雷暴电荷结构示意图

1.4 雷电电流测量与 Berger 回击峰值电流分布

雷电到底有多强？作为一种大气放电现象，最能直接反映其放电强度的量就是雷电的放电电流 (简称雷电流)。雷电流准确测量方法的发展经历了一个从简单的峰值估算，到时间分辨的电流测量 (反演)，再到高时间分辨率电流波形直接准确测量的发展历程，也反映了近代科学技术的发展历程。早期，Pockels (1897) 提出了极为重要的测量雷电流幅值的方法，他利用置于雷击地点附近的玄武岩剩磁方法对雷电的峰值电流进行估计，在意大利观象台获得了第一批资料。几十年以后，用高剩磁钢条束代替天然玄武岩的磁钢棒法发展起来，并成为雷电流峰值测量的一种重要方法。很长一段时间内，大量雷电流的测量都是采用置于高压输电线上的磁钢棒获得的，但是这种方法只能记录多次回击雷电中或测量期间所有雷电中的最大电流幅值，并且误差较大。

时间分辨的雷电流记录最早得益于高速阴极射线示波器的发展和应用。Berger 等 (1975) 将电流测量装置安装在瑞士 San Salvatore 山顶的两座高 70 m、相隔 400 m 的铁塔顶上，利用高速阴极射线示波器进行记录，获得的雷电流参数直到今天仍然被广泛应用。图 1.4 和图 1.5 分别给出了 Berger 等 (1975) 所观测到的下行雷电流波形及不同类型回击的峰值电流分布，可以看出负地闪和正地闪首次回击电流峰值的几何平均值为 30 kA，负地闪继后回击电流峰值的几何平均值为 12 kA。采取与 Berger 相同的方法，1978 年

Eriksson 等 (1978, 1989) 在南非较平坦地区的一座 60 m 高塔上进行了雷电流测量, 发现 50% 是下行雷。山体高度对塔的有效高度存在一定的影响, 山越高, 塔的等效高度越高, 在塔顶发生的上行雷概率越大。

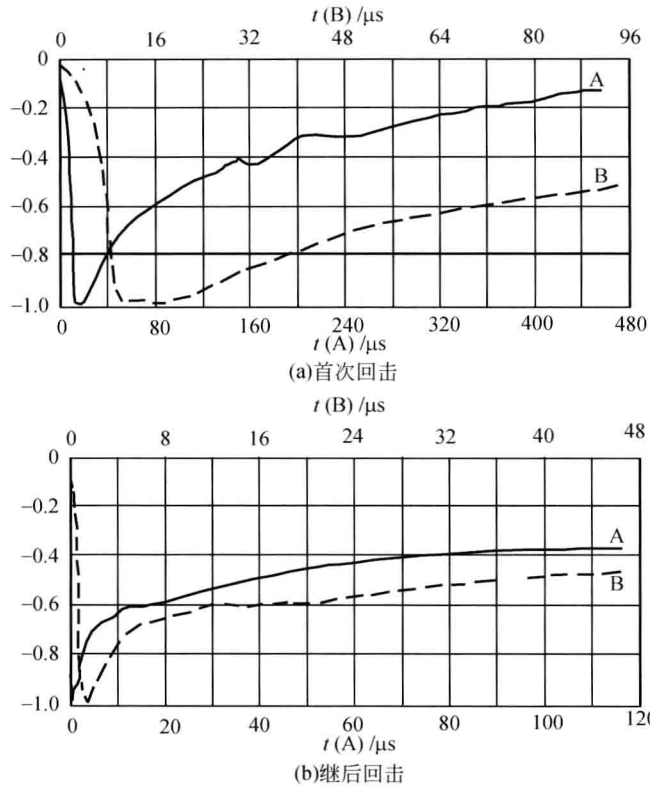


图 1.4 Berger 等 (1975) 得到的归一化的雷电流波形

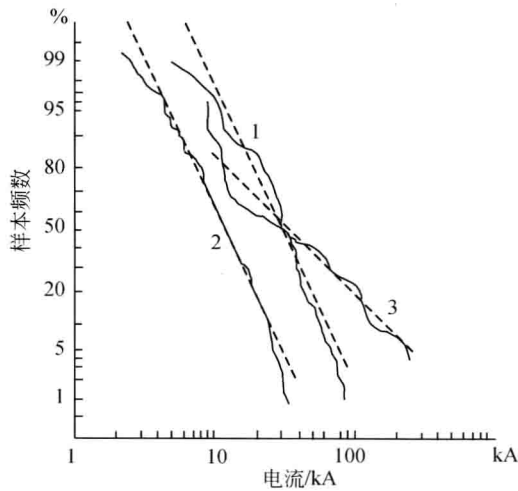


图 1.5 雷电流峰值分布

曲线 1: 负地闪首次回击; 曲线 2: 负地闪继后回击; 曲线 3: 正地闪回击 (Berger et al., 1975)