

Fundamentals of Lightning

雷电原理

[美]弗拉基米尔 A. 拉科夫 (Vladimir A. Rakov) 著

文继国 译

CAMBRIDGE



气象出版社
China Meteorological Press

Fundamentals of Lightning

雷电原理

[美] 弗拉基米尔 A. 拉科夫 (Vladimir A. Rakov) © 著
文继国 © 译

Fundamentals of Lightning(ISBN 978-1-107-07223-7)by Vladimir A. Rakov first published 2016 by Cambridge University Press all rights reserved.

This Simplified-Chinese translation edition for the People's Republic of China(excluding Hong Kong, Macau and Taiwan)is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and China Meteorological Press 2017

This Simplified-Chinese translation edition is authorized for sale in the People's Republic of China(excluding Hong Kong, Macau and Taiwan)only. Unauthorised export of this Chinese edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and China Meteorological Press.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾省)销售。

图书在版编目(CIP)数据

雷电原理 / 文继国译著. --北京:气象出版社,
2017. 11

书名原文:Fundamentals of Lightning

ISBN 978-7-5029-6658-4

I. ①雷… II. ①文… III. ①雷 ②闪电 IV.
①P427. 32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 262190 号

北京版权局著作权合同登记:图字 01-2017-7274

Leidian Yuanli

雷电原理

[美]弗拉基米尔 A. 拉科夫(Vladimir A. Rakov) 著

文继国 译

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码:100081

电 话:010-68407112(总编室) 010-68408042(发行部)

网 址:<http://www.qxcbs.com>

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

责任编辑:周黎明 黄红丽

终 审:吴晓鹏

封面设计:楠竹文化

责任技编:赵相宁

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

印 张:14

字 数:352 千字

版 次:2017 年 11 月第 1 版

印 次:2017 年 11 月第 1 次印刷

定 价:80.00 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。

《雷电原理》内容简介及作者简介

内容简介

本书作者为广受欢迎的《雷电原理及效应》专著(剑桥大学出版社,2003年)的作者之一,这本新书涵盖高年级本科生和研究生的《雷电学》课程内容,介绍雷电学的最新发展,包括雷电建模、雷电产生的电磁场计算、基于电磁场的雷电定位方法以及雷电危害和防护技术等。

本书特别适合作为《雷电学》课程的教材使用,书中包含每章结束后的小结、习题、阅读材料。书的末尾给出了多个可供挑选使用的附录,包括雷电引起的电磁场精确公式的详细推导过程;还给出了雷电和大气电学术语表。该书写作风格亦适合非专家级的专业技术人员阅读,对于研究人员、工程师以及从事雷电工作的专业人员也是一本有用且内容新的参考书。

著者简介

Vladimir A. Rakov(弗拉基米尔 A. 拉科夫),佛罗里达大学电气与计算机工程系教授,国际雷电研究和测试中心(ICLRT)副主任,编著和合著了另外三部专著,在雷电领域的各种专业期刊上发表论文 250 多篇。Vladimir A. Rakov 教授为美国电气和电子工程师协会(IEEE)会士,美国气象学会(AMS)会士,美国地球物理联合会(AGU)会士,英国工程技术学会(IET)会士。由于在雷电研究、雷电理论和工程应用、雷电建模和测量方面的杰出贡献,获得国际雷电防护会议(ICLP)科学委员会的卡尔·伯杰奖(Karl Berger Award)。

译者简介

文继国,成都信息工程大学电子工程学院教授,研究方向为微波/毫米波电路与系统。毕业于四川师范大学物理专业(理学学士,1985年)、电子科技大学电路与系统专业(硕士,2004年;博士,2009年),2004—2008年在日本千叶大学工学部从事联合研究项目,2016—2017年在美国佛罗里达大学电气与计算机工程系从事访问研究。参编《射频与微波晶体管功率放大器工程》(电子工业出版社,2013年),参译《无线应用射频电路设计(第二版)》(电子工业出版社,2014年)。

译者前言

在各国历史记录和文学作品中,雷电总让人产生敬畏与恐惧,但这也激发了研究雷电和探索雷电防护方法的热情。现在已经不再像以前那样担心雷电会造成停电、损毁电子设备和带来生命威胁,这得益于各国制定的雷电防护标准及其在建筑、通信、电力、运输等领域的贯彻执行。

电子和电气设计人员现在面临的挑战除了系统的复杂性越来越高外,还有就是越来越多的电子系统开始将防雷要求列入指标,但遗憾的是,很多设计人员对雷电知识了解甚少。

翻译《雷电原理》的想法来自和防雷产品研发与生产厂商的深度合作,特别是成都兴业雷安电子有限公司。这是一家从1995年以来一直专注于雷电防护产品研发与制造、雷电防护解决方案和工程设计及施工的大型企业,公司生产的信号电涌保护器、电源电涌保护器、天馈电涌保护器、接地电阻智能监测仪、直击雷防护系统,已经被广泛应用于智能楼宇、智慧城市、通信基站、飞行导航、石油石化、铁路电力、风力及光伏电站、发射场站等,并和其他电子设备一起出口到多个国家。作为成都信息工程大学的校外实习基地和合作伙伴,成都兴业雷安电子有限公司还为很多具有防雷要求的科研项目提供系统防雷设计及产品。在合作过程中,设计人员表达了对国外通俗易懂的雷电专著的巨大兴趣。

翻译《雷电原理》的行动得益于2016—2017年在佛罗里达大学电气与计算机工程系的访学经历。和导师谢会开教授谈及雷电研究和雷电防护在美国的发展现状时,他介绍了同在电气与计算机工程系的杰出教授 Martin A. Uman 博士。早已过了退休年龄的他仍坚守在研究工作一线,指导他的博士生并完成科研项目。在谈及希望向中国读者翻译一本最新的雷电专著时,他热情地向我介绍了一些专著,可惜近期他没有再编著新书的计划,但告诉我共同编写过专著《雷电原理及效应》(剑桥大学出版社,2003)的 Vladimir A. Rakov 教授刚出版了适合用于教学和研究的专著《雷电原理》(剑桥大学出版社,2016)。

Vladimir A. Rakov 教授也在佛罗里达大学电气与计算机工程系工作,除了讲授《电磁场》课程外,还主讲佛罗里达大学面向本科生和研究生开设的《雷电学》课程,并且担任国际雷电研究和测试中心(ICLRT)副主任。学校和公司联合运营的 ICLRT 位于几十英里外的一处军事区,每年有几十次人工触发闪电试验和现场设备测试,大学所在地盖恩斯维尔市的雷电观测站也是该中心的一个组成部分。佛罗里达大学位于佛罗里达州,该州三面环海,雷电频发,为自然闪电的观测研究提供了独特的自然环境。另外,位于佛罗里达州的美国肯尼迪航天中心以及遍布美国的闪电监测网,也为雷电研究提供了有力支撑。

与两位雷电领域资深教授愉快的交流过程中,他们的鼓励让我决定翻译这本 2016 年首次出版的《雷电原理》专著。由于时间仓促,水平有限,翻译中的不当之处欢迎批评指正。

文继国

成都信息工程大学电子工程学院

2017 年 7 月

谨以此书献给我的妻子露西，
我们的儿子塞奇和儿媳尤里娅，
以及他们的儿女亚历山大、伊丽莎白、维克托

Vladimir A. Rakov

原版前言

《雷电原理》是我和 M. A. Uman 合著的 678 页的专著《雷电原理及效应》(剑桥大学出版社, 2003) 的浓缩升级版, 自然从《雷电原理及效应》中吸取了很多内容。不过, 新书包含了大量新的素材, 特别是在 5、7、8、9 章以及附录 3~5, 附录 7~9, 并且对很多素材都进行了重新组织并对内容进行了更新。

《雷电原理及效应》(仍在发行) 几乎包含了雷电的各个方面, 包括雷电原理、雷电防护、雷电与各种物体、系统以及环境的相互作用。该书已成为雷电及其效应研究领域的专业人员和学生的一本重要参考文献(根据谷歌学术搜索结果, 引用 1 000 多次), 并且一直是佛罗里达大学(UF) 以及世界上其他同类大学一学期的《雷电学》课程教材。目前佛罗里达大学为高年级本科生和研究生开设了《雷电学》课程, 每年选课学生 30~40 人。在使用《雷电原理及效应》作为教材的 10 多年中, 我发现不尽人意的地方是, 该书包含的内容太多而无法在一学期的《雷电学》课程中讲完, 并且《雷电学》课程要求的部分内容并没有包含在书中(例如, 测量雷电引起的电场和磁场), 还有《雷电原理及效应》的编排结构和课程教学大纲不一致。这本新的浓缩版专著《雷电原理》的内容和结构更符合佛罗里达大学《雷电学》课程教学大纲, 希望学生喜欢。同时本书还做了一些有益于教学的改进: 每章结束后有小结(需要记住的要点)、习题和阅读材料, 放在书尾的术语表对雷电和大气电学术语进行了解释。根据本书一位审稿者的建议, 附录 3 详细介绍了雷电引起的电磁场精确公式的推导。尽管佛罗里达大学的《雷电学》课程是《电磁场》课程的一个组成部分, 选修《雷电学》课程之前需要学习《电磁场》课程, 但已经学过含有一定电磁场内容的本科《普通物理》课程的学生也适合学习《雷电学》课程。

除了学生外, 本书也是值得研究人员、工程师以及其他新进入雷电行业的工作人员阅读的一本专著, 本书的大部分内容(第 5 章和附录 3 除外) 的写作风格适合非专家级的专业技术人员阅读, 也适合有兴趣了解雷电及其效应的一般人员阅读。实际上, 附录 5~8 的大部分内容都是根据我对普通公众

的演讲文稿以及与大众媒体的交流互动内容编写而成。

在此感谢我的多位同事,他们阅读了初稿各个部分、提出了一些补充内容最终成为本书的一部分,并给了很多有益的意见和建议。他们的姓名按字母排序为:K. L. Cummins, J. R. Dwyers, R. L. Holler, E. P. Krider, A. Nag, M. Rubinstein, R. Thottappillil, M. D. Tran。在此还要感谢 R. B. Anderson, Y. Baba, J. D. Hill, A. Yu. Kostinsky, E. A. Maeev, G. Maslowski, A. Nag, R. E. Orville, D. D. Sentman, W. A. Lyons, S. Sumi 以及 M. D. Tran,他们提供了书中的原图。封面原图由 M. D. Tran 在佛罗里达州盖恩斯威尔闪电观测站(LOG)获取。另外,感谢 Y. Li, S. Mallick, W. Shi, N. N. Slyunyaev, V. B. Somu, M. D. Tran,特别是 P. Sun,他们绘制了书中某些章节及附录的插图。

在写作《雷电原理》的大约两年时间中,我从与现在和以前的研究生以及访问学者的互动中获益匪浅,研究生有:S. Mallick, C. T. Mata 博士, A. Nag 博士, V. B. Somu, M. D. Tran 以及 Y. Zhu;访问学者有:Y. Baba 教授, Y. Chen 教授, Y. Li 博士, W. Lu 教授, G. Maslowski 教授, W. Shi 博士, P. Sun 博士, D. Wang 教授。

剑桥大学出版社地球与环境科学分部的 Zoë Pruce 女士给予了大力支持,特别是在书稿的最后编排阶段更是如此。

目 录

《雷电原理》内容简介及作者简介

译者前言

原版前言

第 1 章 雷电类型及术语	1
1.1 概述	1
1.2 下行负地闪	3
1.3 下行正地闪	5
1.4 人工引发闪电	6
1.5 上行闪电	8
1.6 云顶和电离层之间的发光现象	9
1.7 闪电和雷暴产生的高能辐射	10
1.8 全球大气电路	12
习 题	12
阅读材料	13
第 2 章 地区和地物的雷击率	14
2.1 概述	14
2.2 年雷暴日	14
2.3 年雷暴小时	16
2.4 地闪密度	17
2.5 地物雷击率	19
2.6 小结	23
习 题	24
阅读材料	24
第 3 章 雷暴云荷电结构	25
3.1 雷暴云概述	25
3.2 理想总电荷分布	26
3.3 观测	31
3.4 雷暴云起电机理	35
3.5 底部正电荷区	38
3.6 小结	40

习 题	40
阅读材料	41
第 4 章 下行负地闪的特性	42
4.1 概述	42
4.2 初始击穿	48
4.3 梯级先导	51
4.4 连接过程	65
4.5 回击	66
4.6 继后先导	80
4.7 连续电流	83
4.8 M 分量	84
4.9 J 过程和 K 过程	87
4.10 小结	88
习 题	88
阅读材料	89
第 5 章 闪电产生的电磁场计算	90
5.1 一般方法	90
5.2 场方程	90
5.3 电流元产生的静电场和感应电场的反转距离	93
5.4 电场分量的非单值性	94
5.5 通道电流元与整个闪电通道长度	95
5.6 通道底部电流	96
5.7 传播效应	97
5.8 小结	98
习 题	98
阅读材料	99
第 6 章 闪电回击的建模	100
6.1 概述	100
6.2 工程模型	101
6.3 集总电流源模型和分布电流源模型的等效性	105
6.4 模型扩展到包含高耸物体	106
6.5 模型有效性验证	106
6.6 小结	112
习 题	113
阅读材料	113
第 7 章 测量闪电产生的电场和磁场	114
7.1 宽带电场测量	114

7.2	宽带磁场测量	120
7.3	雷电产生的宽带电磁场特性	123
7.4	小结	124
	习 题	125
	阅读材料	125
第 8 章	闪电电磁定位方法	126
8.1	概述	126
8.2	闪电定位原理	126
8.3	性能参数	133
8.4	现代闪电定位系统示例	134
8.5	小结	139
	习 题	139
	阅读材料	140
第 9 章	雷电危害及防护技术	141
9.1	概述	141
9.2	雷电参数与危害机理	143
9.3	电气几何模型	145
9.4	雷电防护应用的等电位连接法和隔离法	148
9.5	小结	150
	习 题	150
	阅读材料	151
附录 1	在雷暴云中闪电的形成过程	152
附录 2	根据测量的静电场变化重构电荷区	155
附录 3	推导闪电的电场和磁场精确计算公式	158
附录 4	小型云内闪(CID)	165
附录 5	闪电绝不会再次击中同一位置的真伪	168
附录 6	是否可能将闪电作为能源?	169
附录 7	雷电与安全	170
附录 8	雷电制造玻璃	173
附录 9	佛罗里达州布兰丁营触发闪电实验和自然闪电观测(1995—2014)的 论文目录	179
	术语表	190
	参考文献	192

第1章 雷电类型及术语

雷电可定义为在空气中发生的瞬时大电流(典型值为几十千安)放电现象,放电长度可达几千米。空气中发生放电时,放电通道为等离子态气体(等离子体),其峰值温度典型值为 30 000 K,约为太阳表面温度的 5 倍。在人类开始进化之前,雷电现象就存在于地球上,这或许还在地球生物进化过程中发挥了重要作用。每秒钟全球会发生几十到上百次雷电。美国每年发生 25 000 000 次云地闪电,由于气候变暖,此数据在二十一世纪有望增加约 50%(Romps 等,2014)。雷电引发大量森林火灾;供电线路的所有故障中,与雷电有关的故障超过 30%;每架商用飞机平均每年遭受一次雷击。无雷电防护的物体或系统即使仅遭受一次雷击,也可能造成灾难性的后果。

1.1 概述

通常将击中地面和不击中地面的雷电统称为“闪电”,或称为“闪”。闪电波及地物或大气中的物体时称为“雷击”,广泛使用的非专业术语为“霹雳”。大约四分之三的闪电不会波及地面,这些闪电包括云内闪、云际闪以及云空闪,统称为云闪(图 1.1),有时称为 IC 闪。云和大地之间的闪电称为云地闪或地闪,有时称为 CG 闪,地闪约占全球闪电的 25%。全球地闪中,90%以上为下行负地闪,它们将负电荷有效输送到大地,最初在云内形成,然后向下发展。使用“有效”一词说明在闪电过程中,电荷并非直接从云中到达大地,而是闪电通道中某个部分的电子(主要载流子)流动引起通道中其他部分的电子流动。除了下行负地闪外,其他类型的地闪还有下行正地闪、上行负地闪以及

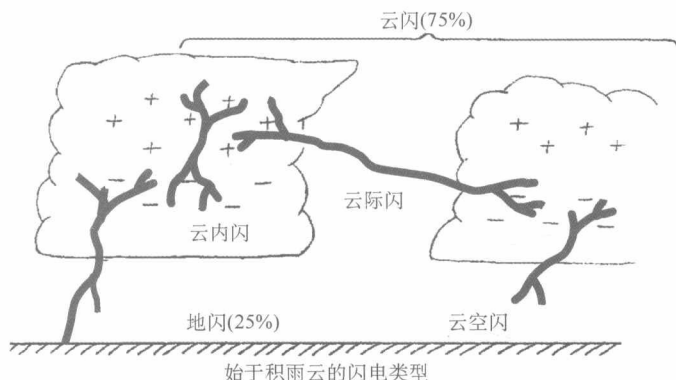


图 1.1 始于雷暴云的闪电基本类型。在全球闪电中,云闪占 75%,地闪占 25%

上行正地闪(图 1.2)。下行闪电具有向下分支,上行闪电具有向上分支。通常认为上行闪电(图 1.2b、d)仅始于高耸物体(高于 100 m)或位于山顶上的中等高度物体。也存在双极性闪电,在一次闪电过程中按顺序向地面输送正电荷和负电荷。双极性闪电一般始于高耸物体(因此属于上行闪电类型)。下行双极性闪电确实存在,但比较少见。

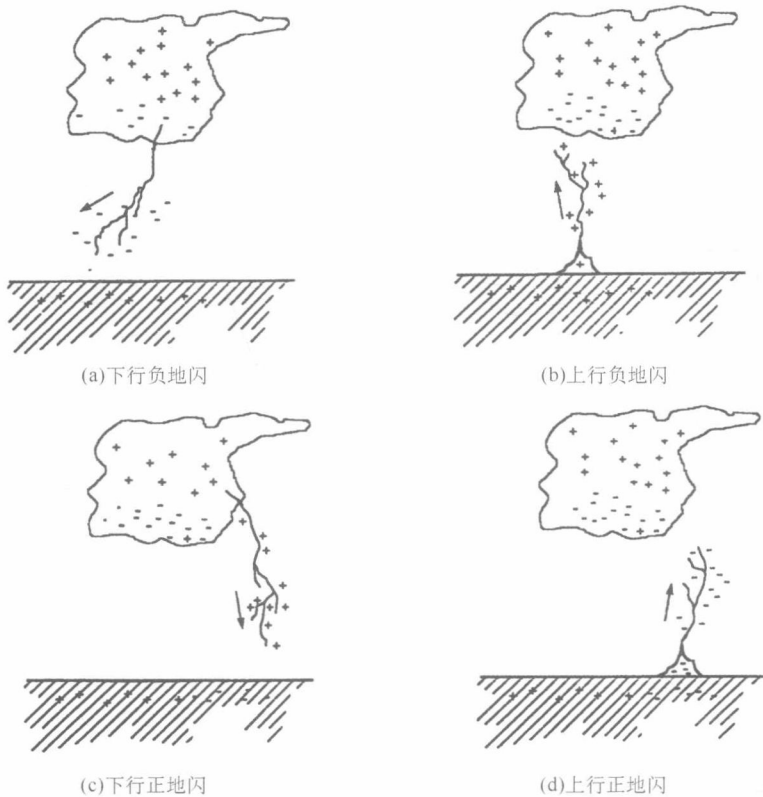


图 1.2 将云电荷有效输送到大地四种闪电类型。每种类型仅标示初始先导,图下方为闪电类型的名称,图中标示了初始先导的发展方向(下行或上行)和有效输送到大地云电荷极性(正电荷或负电荷)。在(a)和(c)中,输送到大地电荷与先导电荷极性相同,而在(b)和(d)中,输送的云电荷与先导电荷极性相反。图中没有画出上行(始于物体)和下行双极性闪电。© Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, 2003, 剑桥大学出版社。未经许可,不得复制

云闪最可能从主负电荷区的顶端和底端附近开始,前者通常连通云内的主负电荷区和主正电荷区(第 3 章),也可能是其他情形。有一种特殊类型的云闪产生最强的 HF-VHF(3~300 MHz)辐射信号到达地面,这种闪电称为小型云内闪(CID),其名称源于其空间尺度较小(几百米)。这种闪电多发生在高空(多数在 10 km 以上),可能与强对流有关(但最强的对流不一定会引起小型云内闪),发光亮度低于其他类型的闪电。有关小型云内闪的更多内容见附录 4。

闪电并非只发生在地球大气层。有可靠证据表明,在木星和土星上也存在闪电或类似闪电的放电现象。木星闪电的电流值预计比地球闪电高出 1~2 个数量级。Rakov 和 Uman(2003)给出了地球大气层外闪电的综述。

1.2 下行负地闪

本节先对照图 1.3a 和图 1.3b 介绍下行负地闪的基本组成元素——闪击。一次闪电一般包含 3~5 次闪击,实际观测到的闪击数从 1~26 次不等。大约 50% 的地闪在击中地面时不止一个雷击点,闪电通道的地面雷击点之间相距可达数千米。然后对照图 1.4a 和图 1.4b 介绍一次闪击包含的“先导”和“回击”两个主要闪电过程,发生顺序为先导之后才是回击。本节还将简要回顾闪电参数,更多详细内容见 Rakov 和 Uman (2003)以及文中的参考文献。

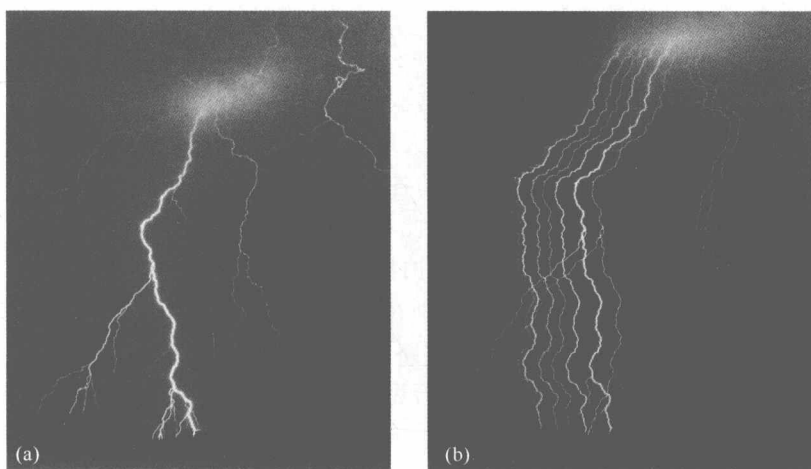


图 1.3 至少有七个(也许多达十个)地面雷击点的闪电:(a)固定式相机拍摄的图片,(b)高速线扫描相机拍摄的图片。有些雷击点由同一次闪击的多个分支通道接触大地形成,而其他雷击点由不同闪击以不同路径到达大地形成。摘自 Hendry(1993)

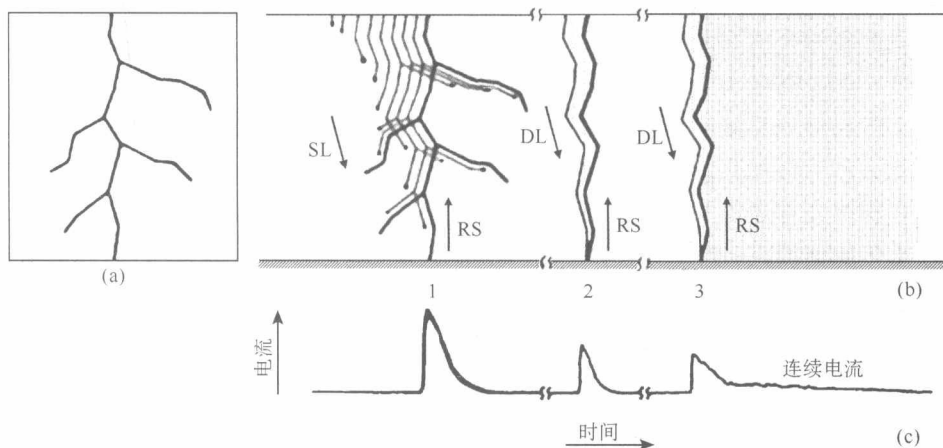


图 1.4 三闪击下行负地闪的通道亮度及对应的通道底部电流示意图:(a)固定式相机图像,(b)高速线扫描相机图像,(c)通道底部电流。© Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, 2003, 剑桥大学出版社。未经许可,不得复制

图 1.3a 和图 1.3b 为一次负地闪的两张照片。图 1.3a 用固定式相机拍摄,而 1.3b 为闪电期间沿水平方向移动的另一台相机拍摄,因此第二张照片具有时间分辨能力,显示为云和地之间有几个亮度不同的闪电通道,通道之间为黑色间隔。每个通道对应一次闪击,黑色间隔对应的时间间隔通常为几十毫秒量级。各次闪击之间的时间间隔解释了肉眼观察闪电时看到的“闪烁”现象。在图 1.3b 中,时间推进方向从右到左,因此最右边的是第一次闪击。前两次闪击具有分支,向下的分支表明这是一次下行闪电。

下面考察一次三闪击闪电的示意图,静止图像和具有时间分辨能力的图像分别如图 1.4a 和图 1.4b 所示,图 1.4c 为对应的通道底部电流示意图。在图 1.4b 中,时间推进方向从左到右,时间轴不连续。图 1.4b 所示的三次闪击中,每次闪击的亮度随离地高度和时间不同而不同,每次闪击由一个向下发展的“先导”过程和一个向上发展的“回击(RS)”过程组成。从先导转变为回击的过程称为“连接过程”,图 1.4b 中未画出。先导在云电荷区和大地之间形成导电电路径,使云电荷区的负电荷沿导电电路径分布。回击通过该路径由大地向云电荷区发展,中和这些先导负电荷。由此可见,先导过程和回击过程在效果上都是将负电荷从云中输送到大地。由图 1.4b 可见,引起首次回击的先导不同于引起两次继后回击(除首次回击外的各次回击都称为继后回击)的先导。特别不同的是,引起首次回击的先导断续推进,因此称为“梯级先导”(SL),而引起继后回击的先导前沿却连续发展,在高速线扫描相机拍摄的图片上表现为向下“窜动”,因此称为“箭式先导”(DL)。这两种先导的明显区别在于:梯级先导在原始空气中发展,而箭式先导沿前一次回击或前几次回击“形成的”路径发展。有些情况下,继后先导沿之前形成的路径发展过程中也出现梯级,这种继后先导称为“箭式—梯级先导”。此外,引起继后回击的先导还有“混沌”先导。

向下发展的梯级先导前沿与大地之间的电位差约为几十兆伏,这和云电荷区与大地之间电位差几乎相等或占了绝大部分,云电荷区的一点与大地上的另一点之间的电位差等于电场强度沿两点之间路径的线积分。估算主负电荷区下端到大地的电位差范围时,上限按观测的云中电场强度典型值 10^5 V/m 乘以云电荷区下端的离地高度,下限则按闪电即将发生前在雷暴云下方地面的预期电场强度 10^4 V/m 乘以云电荷区下端的离地高度。如果高度为 5 km,则得到的电位差范围是 50~500 MV。

当下行梯级先导接触地面时,便开始首次回击过程。在地面位置测得的首次回击电流在几微秒后增加到约 30 kA 的初始峰值,约几十微秒后减小到半峰值。回击将原来驻留在梯级先导通道及其分支通道内几库仑电量的电荷有效输送到大地。当箭式先导的前沿接触地面时,便产生向上发展的第二回击(或其他继后回击)。继后回击也是中和先导通道内的电荷。地面位置的继后回击电流通常在不到 $1 \mu\text{s}$ 的时间增加到 10~15 kA 的峰值,经过几十微秒后减小到半峰值。

大电流回击波快速加热通道,使通道的峰值温度达 30 000 K 或更高,气压达 10 个大气压(1 MPa)或更大,导致通道膨胀、发出强光以及产生冲击波向外扩散,冲击波经过一定距离后最终变为人们听见的雷声(声波)。每次地闪涉及的能量约为 $10^9 \sim 10^{10}$ J (1~10 GJ),这相当于 5 个 100 W 灯泡连续工作一个月所需的能量。需要注意的是,在雷击点并不能获得闪电的全部能量,此处的能量仅为闪电总能量的 1%~1% 之间,因为

闪电的大部能量消耗在产生雷声、高温空气、光以及电磁辐射上。

在回击过程中,脉冲电流之后通常出现连续电流,量值从几十到几百安不等,持续时间可达几百毫秒。持续时间超过 40 ms 的连续电流通常称为“长连续电流”,具有长连续电流的负地闪占负地闪总数的 30%~50%。叠加于连续电流上的电流脉冲以及由此引起闪电通道亮度增强,称为 M 分量。

1.3 下行正地闪

尽管正地闪比较少见(约占全球地闪的 10%),但多数正地闪发生在下列五种情况下:(1)雷暴消散阶段,(2)冬季(寒冷季节)雷暴,(3)中尺度对流系统的尾随层状云区,(4)某些强风暴,(5)在森林大火区域上方形成的雷暴云或受到烟雾污染的雷暴云。正地闪通常只含 1 次闪击,而大约 80% 的负地闪含有 2 次或多次闪击,典型值为 3~5 次。多闪击正地闪确实存在,但比较少见。与负地闪相比,正地闪通常具有更大能量,因而更具破坏性。

通常将“普通”雷暴云的整体电荷结构视为由三个电荷区组成的垂直三极子结构。上部为主正电荷区,中间为主负电荷区,底部是次正电荷区(通常较小)(见第 3 章)。这种电荷结构不容易发生正地闪。图 1.5 为观察到或假定的导致正地闪的六种概念性雷暴云电荷结构和场景,其中倾斜正偶极子、正单极子、倒置偶极子以及特大次正电荷区(图 1.5a—d)这四种结构中,主电荷区为带电云区;而云内负先导通道中断和云内通道分支(图 1.5e、f)这两种结构中,主电荷区为发生正地闪之前形成的云内闪电通道。

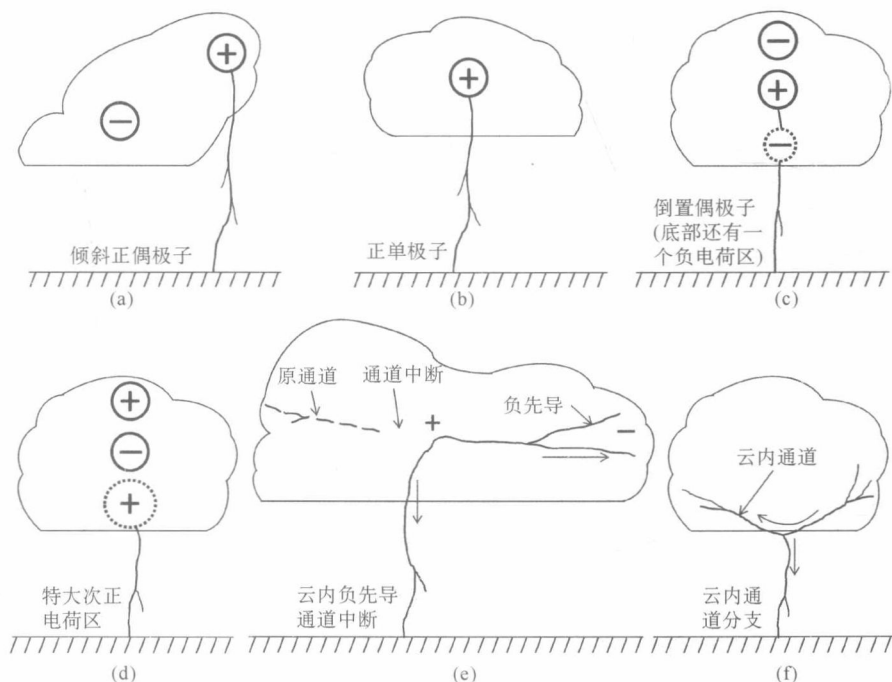


图 1.5 导致下行正地闪的六种概念性雷暴云电荷结构和场景。摘自 Nag 和 Rakov(2012)