

气象灾害丛书

LEIDIAN ZAIHAI

# 雷电灾害

张义军 陶善昌 马明 等 编著



 气象出版社  
China Meteorological Press

气象灾害丛书

# 雷电灾害

江苏工业学院图书馆  
藏书章

张义 陶善章 马 用 等 编著

 气象出版社  
China Meteorological Press

## 内容简介

本书全面介绍了我国雷电灾害的特点和分布状况,阐释了雷击发生的过程和防范措施。全书共分七章。第1章主要介绍雷电的成因和物理特性以及全球自然雷电分布,并解释雷电灾害的基本概念;第2章主要总结全球和我国雷电灾害的地理分布和季节变化特征,并详细说明雷电灾害的影响;第3章主要阐述雷击危害人身的各种形式以及基本防护和急救方法;第4章概述雷击地面物体的基本过程以及对建筑物、电力设备、微电子设备、飞行器、船舶等物体的主要危害形式;第5章介绍雷电灾害防御的主要对策;第6章介绍我国雷电防护的法规以及管理机构 and 应急措施,并说明雷电灾害的调查、评估和保险办法;第7章列举国内外重大雷电灾害的典型实例。全书图文并茂,文笔流畅,适合各级人士阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

雷电灾害/张义军,陶善昌,马明等编著. —北京:  
气象出版社,2009.5  
(气象灾害丛书)  
ISBN 978-7-5029-4714-9

I. 雷… II. ①张… ②陶… ③马… III. 雷击火—气象  
灾害—基本知识 IV. P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 053129 号

Leidian Zaihai

## 雷电灾害

张义军 陶善昌 马 明 等编著

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

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

总 策 划:陈云峰 成秀虎

责任编辑:周诗健

封面设计:燕形

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:700 mm×1000 mm 1/16

字 数:208千字

版 次:2009年5月第1版

印 数:1~6000

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxchs@263.net](mailto:qxchs@263.net)

终 审:章澄昌

责任技编:吴庭芳

印 张:11.25

印 次:2009年5月第1次印刷

定 价:27.00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

## 丛书编辑委员会成员

主任：秦大河

副主任：许小峰 丁一汇

成员（按姓氏笔画排列）：

马克平 马宗晋 王昂生 王绍武 卢乃锰 卢耀如  
刘燕辉 宋连春 张人禾 李文华 陈志恺 陈联寿  
林而达 黄荣辉 董文杰 端义宏

编写组长：丁一汇

副组长：宋连春 矫梅燕

## 评审专家组成员（按姓氏笔画排列）

丁一汇 马宗晋 毛节泰 王昂生 王绍武 王春乙 王根绪  
王锦贵 王馥棠 卢乃锰 任阵海 任国玉 伍光和 刘燕辉  
吴兑 宋连春 张小曳 张庆红 张纪淮 张建云 张强  
李吉顺 李维京 杜榕桓 杨修群 言穆弘 陆均天 陈志恺  
林而达 周广胜 周自江 徐文耀 陶诗言 梁建茵 黄荣辉  
琚建华 廉毅 端义宏

## 丛书编委会办公室成员

主任：董文杰

副主任：翟盘茂 陈云峰

成员：周朝东 张淑月 成秀虎 顾万龙 张锦

王遵娅 宋亚芳



## 《雷电灾害》分册编写人员

主 编 张义军 陶善昌 马 明

编写人员 吕伟涛 李家启 孟 青  
董万胜 李良福

## 序

**据**世界气象组织统计，全球气象灾害占自然灾害的86%。我国幅员辽阔，东部位于东亚季风区，西部地处内陆，地形地貌多样，加之青藏高原大地形作用，影响我国的天气和气候系统复杂，我国成为世界上受气象灾害影响最为严重的国家之一。我国气象灾害具有灾害种类多，影响范围广，发生频率高，持续时间长，且时空分布不均匀等特点，平均每年造成的经济损失占全部自然灾害损失的70%以上。随着全球气候变暖，一些极端天气气候事件发生的频率越来越高，强度越来越大，对经济社会发展和人民福祉安康的威胁也日益加剧。近十几年来，我国每年受台风、暴雨、冰雹、寒潮、大风、暴风雪、沙尘暴、雷暴、浓雾、干旱、洪涝、高温等气象灾害和森林草原火灾、山体滑坡、泥石流、山洪、病虫害等气象次生和衍生灾害影响的人口达4亿人次，造成的经济损失平均达2000多亿元。2008年，我国南方出现的历史罕见低温雨雪冰冻灾害，以及“5·12”汶川大地震发生后气象衍生灾害给地震灾区造成的严重人员伤亡和财产损失，都说明进一步加强气象防灾减灾工作的极端重要性和紧迫性。

党中央国务院和地方各级党委政府对气象防灾减灾工作高度重视。“强化防灾减灾”和“加强应对气候变化能力建设”首次写入党的十七大报告。胡锦涛总书记在2008年“两院”院士大会上强调，“我们必须把自然灾害预报、防灾减灾工作作为事关经济社会发展全局的一项重大工作进一步抓紧抓好”。在中央政治局第六次集体学习时，胡锦涛总书记再次强调，“要提高应对极端气象灾害综合监测预警能力、抵御能力和减灾能力”。国务院已经分别就加强气象灾害防御、应对气候变化工作做出重大部署。在2008年全国重大气象服务总结表彰大会上，回良玉副总理指出，“强化防灾减灾工作，是党的十七大的战略部署。气象防灾减灾，关系千家万户安康，关系社会和谐稳定，关系经济发展全局。气象工作从来没有像今天这样受到各级党政领导的高度重视，

从来没有像今天这样受到社会各界的高度关切，从来没有像今天这样受到广大人民群众的高度关心，从来没有像今天这样受到国际社会的高度关注。这既给气象工作带来很大的机遇，也带来很大的挑战；既面临很大压力，也赋予很大动力，应该说为提高气象工作水平创造了良好条件”。

我们一定要十分珍惜当前气象事业发展的好环境，紧紧抓住气象事业发展的难得机遇，深入贯彻落实科学发展观，牢固树立“公共气象、安全气象、资源气象”的发展理念，始终把防御和减轻气象灾害、切实提高灾害性天气预报预测准确率作为提升气象服务水平的首要任务。面对国家和经济社会发展对加强气象防灾减灾工作的迫切需求，推进防灾减灾工作快速发展，做到“预防为主，防治结合”，很有必要编写一套《气象灾害丛书》，从不同视角吸收科学、社会以及管理各方面的研究成果，就气象灾害的发生、发展、监测、预报和预防措施，普及防灾减灾知识，提高防灾减灾的效益，为我国防灾减灾事业、构建社会主义和谐社会做出贡献。

2003年中国气象局组织编写出版了《全球变化热门话题丛书》，主要立足宣传和普及天气、气候与气候变化所带来的各方面影响以及适应、减缓和应对的措施。这套书的出版引起了很大反响，拥有广大的读者群。《气象灾害丛书》是继《全球变化热门话题丛书》之后，中国气象局组织了有关部委、中科院和高校的气象业务科研人员及相关行业领域的灾害研究专家，编写的又一套全面阐述当今国内外气象灾害监测、预警与防御方面最新技术成果、最新发展动态的科学普及读物。《气象灾害丛书》分21分册，在内容上开放地吸收了不同部门、不同地区和不同行业在气象灾害和防御方面的研究成果，体现了丛书的系统性、多学科交叉性和新颖性。这对于进一步提高社会公众对气象灾害的科学认识，进一步强化减灾防灾意识，指导各级部门和人民群众提高防灾减灾能力、有效地为各行业从业人员和防灾减灾决策者提供参考和建议都具有重要意义。同时，根据我国和全球安全减灾应急体系建设这一大学科的要求，“安全减灾应急体系”共有100多部应写作的书籍，《气象灾害丛书》的出版为逐步完善这一科学体系做出了贡献。

在本套丛书即将出版之际，谨向来自气象、农业、生态、水文、地质、城乡建设、交通、空间物理等多方面的作者、专家以及工作人员表示诚挚的感谢！感谢他们参与科学普及工作的高度热忱以及辛勤工作。

郑国光

## 编著者的话

通过两年的努力，《气象灾害丛书》终于编写完毕。丛书由 21 册组成，每一册主要介绍一个重要的灾种，整个丛书基本上将绝大部分气象以及相关的衍生灾害都作了介绍，因而是一套关于气象灾害的系统性丛书。参加此丛书编写的专家有 200 位左右，他们来自中国气象局、中国科学院、林业部和有关高等院校等部门。他们在所编写的领域中不但具有丰硕的研究成果，而且也具有丰富的实践经验，因而，丛书无论是从内容的选材，还是从描述和写作方式等方面都能保证其准确性和适用性。编写组在编写过程中先后召开了六次编写工作会议，各分册主编和撰稿人以高度负责的态度和使命感热烈研讨，认真听取意见和修改，使各册编写水平不断提高，从而保证了丛书的质量。另外，值得提及的是，丛书交稿之前，又请了 46 位国内著名的院士、专家和学者进行了评审。专家们一致认为，《气象灾害丛书》是一套十分有用、有益和十分必要的防灾减灾丛书。它的出版有助于政府、社会各部门和人民群众对气象灾害有一个全面、深入的了解与认识，必将大大提高全民的防灾减灾意识。丛书的内容丰富、全面、系统、新颖，基本上反映了国内外气象灾害的监测、预警和防御方面的最新研究成果和发展动态，可以作为各有关部门指导防灾减灾工作的科学依据。

在丛书包括的 21 个灾种中，除干旱、暴雨洪涝、台风、寒潮、低温冷害、冰雪等过去常见的气象灾害外，丛书还包括了近一二十年新出现的或日益受到重视的新灾种，如霾、生态气象灾害、城市气象灾害、交通气象灾害、大气成分灾害、山地灾害、空间气象灾害等。这些灾害对于我国迅速发展的国民经济已越来越显示出它的重大影响。把这些灾害包括在丛书中不但是必要的，而且也是迫切的。另外，通过编写这些书，对这些灾种作系统性总结，对今后的研究进展也有推动作用。

为了让读者对每一种灾害都获得系统而正确的科学知识以及了解目前最

新的防灾减灾技术、能力和水平，编写组要求每一册书都要做到：（1）对灾害的观测事实要做全面、正确和实事求是的介绍，主要依据近 50 年的观测结果。在此基础上概括出该灾种的主要特征和演变过程；（2）对灾害的成因，要根据大多数研究成果做科学的说明和解释，在表达上要深入浅出，文字浅显易懂，避免太过专业化的用语和用词；（3）对于灾害影响的评估要客观，尽可能有代表性与量化；（4）灾害的监测和预警部分在内容上要反映目前的水平和能力，以及新的成就。同时要加强实用性，使防灾减灾部门和人员读后真正有所受益和启发；（5）对每一灾种，都编写出近 50 年（有些近百年）国内重大灾害事件的年表，简略描述出所选重大灾害事件发生的时间、地点、影响程度和可能原因。这个重大灾害年表对实际工作会有重要参考价值。

在丛书编写过程中，所有编写者亲历了 1 月发生在我国南方罕见的低温雨雪冰冻灾害和“5·12”汶川大地震。在全国可歌可泣的抗灾救灾精神的感召下，全体编写人员激发了更高的热情，从防大灾、防巨灾的观念重新审视了原来的编写内容，充分认识到防灾减灾任务的重要性、迫切性和复杂性。并谨以此丛书作为对我国防灾减灾事业的微薄贡献。

丛书编写办公室与编写组专家密切配合，从多方面保证了编写组工作的顺利完成，在此也表示衷心感谢。另外，由于这是一套科普丛书，受篇幅所限，各册文中所引文献未全部列入主要参考文献表中，敬请相关作者谅解。

编写组长 丁一汇

2008 年 10 月 21 日于北京

## 前 言

**雷**电（闪电）是大气中十分壮观的超长距离放电过程，通常伴随着强对流天气过程而发生。它是一种常见的自然现象，根据全球闪电的卫星观测结果估计：全球每秒钟有 46 次闪电发生，其中 88% 出现在陆地上。我国地处温带和亚热带地区，雷暴活动十分频繁，全国有 21 个省会城市的年最多雷暴日超过 50 天，最多达到了 134 天。

雷电因其强大的电流、炙热的高温、强烈的电磁辐射以及猛烈的冲击波等物理效应而能够在瞬间产生巨大的破坏作用，造成雷电灾害。雷击常常导致人员伤亡，据统计我国每年都有上千人遭雷击死亡，使很多家庭支离破碎，给这些受害者及其家庭带来不可挽回的伤害和损失。雷击可能导致建筑物、供电系统、通信设备、民用电器的损坏，引起森林火灾，仓储、炼油厂、油田等燃烧甚至爆炸，造成重大的经济损失和不良社会影响。例如 1989 年 8 月 12 日，我国山东省黄岛油库一个油罐遭雷击起火，并引爆了附近四个油罐，燃烧 104 小时才得以扑灭，造成 19 人死亡，78 人受伤，烧毁原油 3.6 万吨，整个油库毁坏殆尽，直接和间接经济损失超过一亿元。所以，对我们国家许多部门的安全生产而言，雷击灾害是不容忽视的一种严重威胁。尤其值得注意的是，随着人类社会生活和生产活动日益现代化，大量电子、电器和通信设备的普及应用，雷击灾害事故呈现逐年上升、损失逐年增加的态势。目前，计算机系统已经成为信息资源的重要载体和资料库，各行各业对计算机信息系统的依赖程度越来越高，大量有关高科技、国防军工、国民经济建设的重要数据信息的安全依赖于计算机系统工作的可靠性，但是，雷电电磁辐射对计算机系统及其数据存储所产生的干扰、破坏有致命的危害，对计算机系统的稳定性、可靠性和安全性形成威胁。如某数据中心，集全体技术人员历时三年的研究成果和宝贵数据也因一次雷灾而化为乌有。航空航天是汇集了人类最新高科技的尖端领域，液氢燃料的加注过程、火箭的发射升空都不能在有雷电发生的情况下进行。雷电除对航天飞行器、发射塔等造成直接

破坏外，还可引爆火箭的点火装置，使火箭自行升空，或使发射过程中的火箭爆炸，例如，1987年3月26日美国国家宇航局在卡纳维拉尔角基地利用大力神/半人马座火箭发射海军通信卫星时，雷击导致星箭俱毁，损失高达1.7亿美元。另外，雷电电磁辐射和静电效应的干扰也对火箭上的主要电子仪器造成威胁。正因为雷击灾害对人民生命财产和社会各部门和各行业的危害程度如此之大，范围如此之广，联合国有关部门把它列为“最严重的十种自然灾害之一”，被中国电工委员会称为“电子时代的一大公害”。因此，防雷减灾是社会公众和各行业及各部门必须切实重视的一项经常性议题。为了做到科学防雷，学习和掌握防雷科学知识和对策，了解国家相关的规章和规定，就显得十分必要和迫切了。

本书就是应这种社会需求而编写的，我们希望跟广大读者一起更好地推进我们国家防雷减灾事业的健康发展。本书第1章主要介绍雷电的成因和物理特性以及全球自然雷电分布和变化的气候特征，并解释雷电灾害的基本概念。第2章主要总结全球和我国雷电灾害的地理分布和季节变化特征，并详细说明雷电灾害影响的方方面面。第3章主要阐述雷击危害人身的各种形式以及基本防护和急救方法。第4章概述雷击地面物体的基本过程以及对建筑物、电力设备、微电子设备、飞行器、船舶等地面物体的主要危害形式。第5章介绍雷电灾害防御的主要对策，包括雷电监测和预警预报以及雷电防护工程技术的基本知识。第6章介绍我国雷电防护的法规以及管理机构 and 应急措施，并说明雷电灾害的调查，评估和保险。第7章列举国内外重大雷电灾害的典型实例，在附录中还列举了1997—2006期间我国引起重大人员伤亡和造成重大经济损失的雷电灾害事故的灾情。上述各章内容相互联系，但又相对独立成篇，具有不同知识背景的读者可以根据自己的不同需要，通读全书或阅读其中部分章节。

本书由张义军设计并审定全书编写大纲，主持编写工作，陶善昌教授撰写了第4章，参与撰写第1章，并对全文进行了审阅。马明副研究员撰写了第2章和第3章，李家启高工撰写了第6章，董万胜研究员、李良福正研级高工、孟青副研究员、吕伟涛副研究员分别撰写了第5章和第7章的部分内容。参加本书编写工作的还有姚雯、马颖、晁春丽、任晓毓、殷启元等同志。雷电物理和雷电防护科学技术处在日新月异的发展之中，限于我们的知识水平和掌握资料的局限性，书中难免存在疏漏和错误之处，在此恳请读者和同行专家们指正。

张义军  
2008年1月

# 目 录

## 序

## 编著者的话

## 前 言

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 历史回顾 .....	1
1.2 雷暴起电和闪电的起始 .....	4
1.3 雷电现象 .....	13
1.4 雷电的气候特征 .....	24
1.5 雷电灾害 .....	36
<b>第 2 章 雷电灾害的特点和影响</b> .....	39
2.1 全球雷电灾害分布特征 .....	39
2.2 我国雷电灾害分布特征 .....	40
2.3 雷电灾害的影响 .....	60
<b>第 3 章 雷击致人伤亡和急救</b> .....	65
3.1 雷击人身的各种危害形式 .....	65
3.2 电击的几种效应 .....	69
3.3 雷击受害人的医学症状 .....	71
3.4 应急防护和急救 .....	73
<b>第 4 章 雷击物体的过程和危害形式</b> .....	77
4.1 地闪接地过程和击距 .....	77
4.2 建筑物的雷击危害形式 .....	79



4.3	电力设备的雷击危害形式 .....	80
4.4	微电子设备的雷击危害形式 .....	81
4.5	飞行器的雷击危害形式 .....	82
4.6	船舶的雷击危害形式 .....	84
4.7	树木森林的雷击危害形式 .....	85
<b>第5章</b>	<b>雷电灾害防御 .....</b>	<b>87</b>
5.1	雷电的监测 .....	87
5.2	雷电的预警和预报 .....	100
5.3	雷电的防护技术 .....	116
<b>第6章</b>	<b>雷电防护法规与灾害的应急管理 .....</b>	<b>128</b>
6.1	雷电防护法规和雷电防护技术标准 .....	128
6.2	雷电防护管理机制与机构 .....	130
6.3	雷电灾害应急预案与实施 .....	132
6.4	雷电灾害调查、鉴定、评估、上报 .....	139
6.5	雷电防护与保险 .....	147
<b>第7章</b>	<b>国内外重大雷电灾害典型实例 .....</b>	<b>149</b>
7.1	国外部分雷电灾害实例 .....	149
7.2	国内部分雷电灾害实例 .....	152
	<b>参考文献 .....</b>	<b>157</b>
	<b>附录1 1997—2006年重大雷电灾害（人员伤亡）实例 .....</b>	<b>159</b>
	<b>附录2 1997—2006年重大雷电灾害（经济损失）实例 .....</b>	<b>166</b>

# 第1章

## 概 论

本章将简要回顾人类认识雷电的历史，介绍雷暴起电机制、电荷结构和闪电初始过程的基本知识，综述雷电现象的基本特性及其气候分布和变化，概述雷电灾害的基本概念，为全面了解雷电灾害的特点、危害形式和防护方法及对策提供基础知识。

### 1.1 历史回顾

雷电（闪电）这一自然现象远在人类出现之前在地球上就已经存在。雷电发出划破长空和炫目的闪光以及隆隆雷声，造成人畜伤亡，乃至点燃燎原大火，令人震撼。闪电现象的剧烈和种种威力，不能不在远古人类的内心产生畏惧和神秘感，并慢慢形成为对雷电的崇拜并演变出“雷公”和“电母”的神话。《山海经》中有多处关于雷神的记载，称雷神是“龙身而人头，鼓其腹”。大约在唐宋时期，闪电之神变成电母。唐朝崔致远写道，“使电母雷公，凿外域朝天之路”。宋朝和元朝之后，电母更有了名和姓，雷公和电母也被赋予代表上天惩恶扬善的职能。这种对雷电的崇拜同样出现在世界许多其他古老民族。保存了印度最古老神话的《梨俱吠陀本集》，其主角天神因陀罗是雷雨之神。希腊神话中居于诸神之首的是雷神宙斯。维柯《新科学》认为，雷神崇拜是宗教的起源，并认为“宙斯”这个词的发音是模拟雷声的，这和汉字“龙”的发音模拟隆隆雷声的方式是一致的。《印第安神话和传说》中的雷神，成了创造人类的始祖神。但是除了神话，在中外历史文献中留下了许多古代关于雷电和雷击灾害事件的精彩生动的记录，也不乏带有朴素唯物主义成分的关于雷电成因的论述。例如，沈括在《梦溪笔谈》中有雷电熔化金属详细情况的记载：“内侍李舜举家曾为暴雷所震。其堂之西屋，雷火自窗间出，赫然出檐。人认为堂屋已焚，皆出避之。及雷止，其舍宛然，墙壁窗纸

皆黔。有一木格，其中杂贮诸器，其漆器银扣者，银悉熔流在地，漆器曾不焦灼。有一宝刀，极坚钢，就刀室中熔为汁，而室亦俨然。人必谓火当先焚草木，然后流金石。今乃金石皆铄，而草木无一毁者，非人情所测也。”南宋庄绰在《鸡肋篇》中讲到：“余守南雄州，绍兴丙辰年（1136年）八月二十四视事。是日，大雷破树者数处，而福慧寺普贤像亦裂，所乘狮子凡金所饰与像面皆销释，而其余采色如故。与沈（括）所书盖相符也。”在古希腊亚里士多德的著作中也有过一条类似记载：“据说曾经雷击的一支矛，它的铜头是被融化了的，其木柄却全无损坏”。对于18世纪以前的古人来说，雷击房舍和物体，能够熔化金属，却未损坏木质之类的绝缘材料的现象是难以解释的。关于雷电的成因，在我国古代有两种学说：一种是战国时期慎到首先主张的“摩擦形成说”。他认为“阳与阴夹持，则磨轧有光而为电”。另一种是汉代王充等所主张的“爆炸起电说”，他在《论衡·雷虚篇》中用“一斗水灌冶铸之火，气激褰裂，若雷之音矣”。王充对雷电现象的季节性变化也有过精彩的叙述，他写道：“雷者，太阳之激气也，何以明之？正月阳动，故正月始雷。五月阳盛，故五月雷迅。秋冬阳衰，故秋冬雷潜。”意思是：春季太阳热力作用渐强，有雷电开始发生；夏季太阳热力作用强盛，雷电活动频繁；秋冬太阳热力作用已经衰弱，雷电现象就很少了。因此说雷电由太阳热力所激发。在西方，亚里士多德认为闪电和雷声是从地表散发出的干和湿散发物相互作用的结果，随着散发物的冷凝形成云，云越积越浓密，干的散发物受到排斥，干散发物撞击浓密的云，发出雷声。

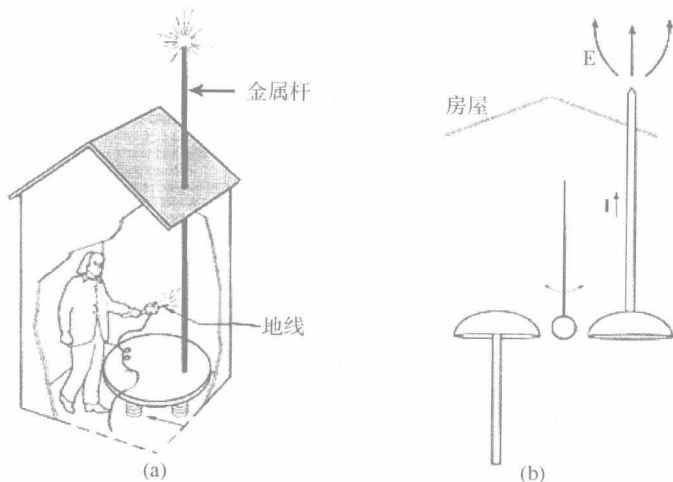


图 1.1 富兰克林的雷电实验

(a) 验证雷暴云带电的实验，(b) 验证雷暴电极性的实验

18 世纪随着物质电性质的发现,一些科学家注意到电火花发出的声音和表现类似于闪电和雷声,虽然自然雷电现象要更加强烈。所以他们提出雷暴以某种方式产生电,再通过闪电形式放电。富兰克林(Benjamin Franklin)在 1751 年建议利用高的金属杆把云中的电引下来,他设计的方案见图 1.1a,图中金属杆与地绝缘,观测者手持的地线接近金属杆,当雷雨云经过头顶时在金属杆与地线之间有电火花跳过。之后法国皇家宫廷决定进行富兰克林所描述的实验,检验云是不是带电,1752 年 5 月 10 日实验成功了。1752 年 6 月富兰克林也成功地进行了著名的风筝雷电实验,几乎同时还有其他科学家利用金属杆、风筝和气球继续进行这一实验,俄罗斯科学家里赫曼(Richman)在实验现场遭雷击牺牲。接着在 1752 年 9 月富兰克林又设计和进行了获得雷暴电极性的实验,装置如图 1.1b,他在他的房顶安装了 3 m 高的闪电柱(lightning rod),柱的下端连接一个铃;地线跟闪电柱间距 15 cm,顶端也设置一个铃;在柱和地线之间吊挂一个金属球。当雷暴云过头顶时,闪电柱下端铃上带有云感应电荷,悬挂的金属球受到静电感应并被吸引向右侧运动,与右侧铃接触,得到同极性电荷,受到排斥再向左摆动;又与左侧铃接触,释放电荷后,便继续在左右两个铃之间往返摆动,发出铃声,警示主人自己正临近雷暴。而且只要再用一个带已知极性电荷的小球靠近悬挂的金属球,便能够决定雷暴云感应电荷的极性。(提醒读者:这个装置是早期实验用的,有遭受雷击的危险,不能简单地模仿试验!)富兰克林在实验研究的基础上进一步提出了利用闪电柱(即避雷针)的防雷方法,其基本原理沿用至今。另外,几乎在同时代,一些法国和意大利科学家观测揭示了大气存在晴天电场。正是 18 世纪以富兰克林为代表的一批杰出科学家进行的大量开创性科学实验,初步揭示了雷电是雷暴云放电的本质,自远古时期就弥漫在人类心头对雷电的迷惑开始散去,初步奠定了雷电科学的基础。由于观测手段的局限性,此后的一个多世纪,科学界对于自然雷电特性和规律的认识没有实质性进展。雷电科学知识的下一个新飞跃是在 20 世纪高速照相技术和新的大气电场观测技术发明以后,尤其是 20 世纪最后二三十年内,随着微电子技术、计算机技术以及卫星遥感技术相继应用到雷电的观测研究中,对雷电特征和规律性的认识有了很大的丰富和深化,雷电监测和防护技术有了很大的发展,但是对于雷暴云起电机、闪电启动和传播规律以及接地过程和防护方法仍然存在许许多多需要深入研究的课题,这些在本书后面的章节中还会陆续谈到。

## 1.2 雷暴起电和闪电的起始

雷暴指的是产生了大风、强降水和雷电，甚至冰雹或龙卷风的局地强天气过程，雷暴云则专指产生了雷电的一类对流云，它发展旺盛，平原地区云底高度大约 1 km 左右，云层垂直伸展很高，云顶可以发展到 10~15 km 高度以上。飘浮在雷暴云内的各种水成物包括有云滴（半径小于 100  $\mu\text{m}$ ），雨滴（半径大于 100  $\mu\text{m}$ ），冰晶（直径小于 300  $\mu\text{m}$ ），雪晶（直径大于 300  $\mu\text{m}$ ，落速一般为 0.3~1.0 m/s），霰或软雹（直径大约 2~5 mm，密度小于 0.6 g/cm<sup>3</sup>，落速一般 1~3 m/s），雹粒（直径在 5 mm 以上，密度接近于 0.9 g/cm<sup>3</sup>，落速大）等。

雷暴云中电荷如何产生和分离的问题，也就是雷暴内产生雷电的物理成因，是一个非常重要的科学问题。一个多世纪以来，科学家们通过研究，先后提出了很多种积雨云起电理论和假说，如云粒子捕获离子起电（即云粒子对离子的选择捕获起电和离子扩散起电）、冰晶—霰粒碰撞起电（图 1.2）、过冷水滴—霰粒碰冻起电（即结凇起电，见图 1.3）、水的冻结或冰粒融化起电、云滴极化起电、水滴破碎起电等。上述起电机理大体可以分成两类，即感应起电和非感应起电，感应起电过程要求云内必须存在一定的电场，而非感应起电过程不依赖于云内电场的存在。下面简要介绍非感应和感应两种起电机理的基本形式和原理。

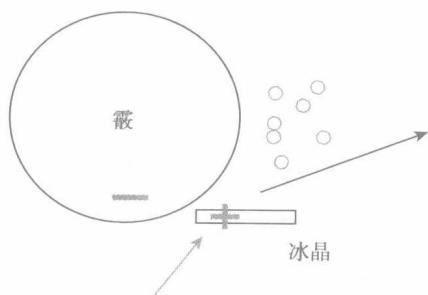


图 1.2 冰晶—霰碰撞分离起电示意图

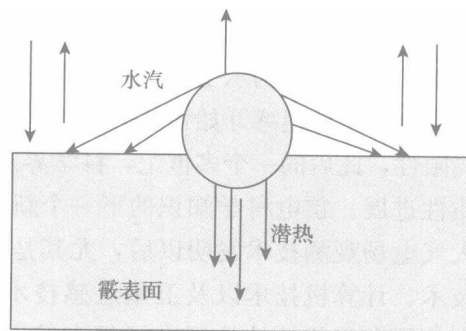


图 1.3 霰结凇增长示意图  
(撞击并合使霰表面的云滴很快冻结，  
释放的潜热使表面温度升高，  
同时在表面上发生水汽凝华或升华)