



雷电^与雷击

事故调查鉴定

林建民 主编

LEIDIAN

YU LEIJI SHIGU

DIAOCHA JIANDING



气象出版社

China Meteorological Press

雷电与雷击事故调查鉴定

林建民 主编

 气象出版社
China Meteorological Press

内容简介

本书在总结多年来基层雷击事故调查与鉴定经验的基础上,从雷电基础理论与雷电危害理论、雷击事故调查鉴定法律依据、我国雷电监测、雷电破坏效应调查鉴定方法、操作过电压产生原因及表现特点、案例分析、雷击事故调查鉴定项目与程序等方面,系统介绍了雷电事故的调查鉴定方法、程序规范和技术规范,可为基层防雷从业人员科学实施雷电事故调查与鉴定提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

雷电与雷击事故调查鉴定/林建民主编. —北京:

气象出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-5029-5948-7

I. ①雷… II. ①林… III. ①雷-事故-调查②闪电-事故-调查③雷-事故-伤害鉴定④闪电-事故-伤害鉴定
IV. ①P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 117153 号

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>

责任编辑: 姜 昊 张锐锐

封面设计: 博雅思企划

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 300 千字

版 次: 2014 年 6 月第 1 版

定 价: 48.00 元

邮政编码: 100081

发 行 部: 010-68409198

E-mail: qxcbs@cmp.cma.gov.cn

终 审: 黄润恒

责任技编: 吴庭芳

印 张: 11

印 次: 2014 年 6 月第 1 次印刷

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

《雷电与雷击事故调查鉴定》 编委会

主 任:李春虎

副 主 任:孔繁波 冯桂力 邵庆国 许传凯 林建民

委 员:(按音序排列)

姜 淼 李 莉 刘爱荣 牟 玲 孙传杰

孙 健 王晓东 王孝松 王英海 姚文军

张传庆 张开建 张 鹏 赵学振 郑美琴

周春奕 左迎之

主 编:林建民

副 主 编:宋佰春 李炳文 葛成新 周茂山 林丽娜

技术顾问:冯桂力

序

随着我国经济的快速发展,城市建设不断加快,现代化程度进一步提高,集成电路和弱电设备更是得到广泛应用。由于这些设备自身耐冲击电压及耐电磁脉冲的能力较低,导致雷电所造成的损失日趋严重,雷电灾害已被称为“电子时代的一大公害”,是最严重的十种自然灾害之一。为理清雷击事故发生的内在原因,界定事故责任,杜绝类似事故的继续发生,科学地开展雷电灾害调查和事故鉴定就显得尤为重要。

目前,我国雷击事故鉴定的理论、方法、规范尚处于探索阶段,雷击事故的调查项目不明确,致灾雷电发生的时间、地点、雷电流强度等因素确定困难,从而使雷击事故鉴定结果的严谨性与科学性受到一定影响。

为提高防雷从业人员的雷击事故调查鉴定能力,科学地调查分析雷击事故,准确地判定事故形成原因与事故性质,山东省气象局将雷击事故调查鉴定方法的研究列入科研项目进行研究。课题组经过两年的艰苦努力,顺利完成了课题研究,并编写了《雷电与雷击事故调查鉴定》一书。

本书的撰写是雷击事故调查鉴定课题研究成果的总结和提炼,并增加了雷电基础理论知识及雷电防护管理的法律依据,使雷击事故鉴定既有理论依据又有法律依据。

本书的编写填补了山东省雷击事故调查鉴定方法的空白,也是我国雷击事故综合调查鉴定方法的有益探索,希望对基层从事雷击事故调查鉴定的工作人员有所帮助。

李春虎*

2013年10月

* 李春虎,山东省气象局副局长。

前 言

为提高防雷从业人员的雷击事故调查鉴定能力,科学地调查分析雷击事故,准确地判定事故形成原因与性质,山东省气象局雷击事故调查鉴定研究课题组在山东省气象局的资助下,顺利完成了课题的研究任务,并编写本书。

雷击事故调查与鉴定是一个烦琐而且复杂的过程,以往的调查只是雷电灾害特征的吻合,由于缺乏闪电监测资料,无法确定危害雷电流的强度,调查鉴定结果可靠性不强。为打破该瓶颈,课题组对雷击事故调查鉴定方法作了深入的研究,并在课题研究的基础上增加了雷电基础理论知识、闪电定位系统和雷电监测知识、雷电防护管理的法律依据、过电压的分类及操作过电压的产生原因特点、雷击事故的调查项目与程序等有关内容。

本书的成稿既是各级气象部门的相互支持与合作的写照,也是社会各部门的支持结果。本书的编写得到了山东省气象局、省雷电防护技术中心、临沂市气象局、威海市气象局、济宁市气象局、菏泽市气象局、聊城市气象局、日照市气象局、莒县气象局等各级领导及防雷同仁的大力支持;同时也得到了浙江省临安万利防雷工程有限公司、日照市城建建筑设计院有限公司、海汇集团有限公司、莒县建筑工程质量监督站、山东天安电气有限公司等单位的支持,在此一并表示感谢。

由于雷击事故原因复杂,限于作者水平,难免有疏漏和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2013 年 10 月

目 录

序

前言

第 1 章 雷电的形成机制	(1)
1.1 晴天大气电场	(1)
1.2 雷雨云的形成	(2)
1.3 雷雨云的成电机制	(3)
1.4 闪电的构成	(6)
1.5 云地闪电的形成机制	(11)
1.6 球状闪电的形成与危害特点	(13)
第 2 章 雷电的危害	(14)
2.1 雷电活动的一般规律	(15)
2.2 雷击的选择性	(16)
2.3 雷电的破坏作用	(17)
2.4 雷电感应引起的破坏作用	(20)
第 3 章 雷电监测	(25)
3.1 强对流天气的预警预报	(25)
3.2 闪电监测系统工作原理	(26)
3.3 雷电资料的查询方法	(28)
第 4 章 雷电危害的调查鉴定项目与程序	(29)
4.1 雷击事故调查项目与程序	(29)
4.2 雷电灾情的调查方法	(32)
4.3 雷电破坏效应的危害表现	(34)
4.4 雷击事故鉴定因子	(36)
第 5 章 雷电流热效应的危害特点与鉴定方法	(39)
5.1 雷电流热效应危害金属构件的特点	(39)
5.2 常见金属构件熔痕分类及其表现特点	(40)
5.3 雷电流热效应危害金属构件的调查鉴定方法	(45)
5.4 雷电流热效应危害树木的特点	(50)
5.5 雷电流热效应危害树木的鉴定方法	(54)
第 6 章 雷电脉冲过电压引入的危害与鉴定	(59)
6.1 雷电脉冲过电压危害设备的特点	(60)
6.2 雷电脉冲过电压危害的鉴定方法	(61)

第 7 章 雷电电磁脉冲的危害特点与鉴定	(67)
7.1 雷电电磁脉冲危害电子设备的特点	(67)
7.2 雷电电磁脉冲危害电子设备的调查鉴定方法	(68)
第 8 章 闪电感应危害的特点与鉴定	(76)
8.1 闪电静电感应危害电子电气设备的特点	(76)
8.2 雷电电磁感应危害电子电气设备的特点	(77)
8.3 雷电静电感应危害电子电气设备的调查与鉴定	(78)
8.4 雷电电磁感应雷击事故的调查与鉴定	(80)
第 9 章 雷电机机械效应危害的特点与鉴定	(83)
9.1 雷电机机械效应危害的特点	(83)
9.2 雷电机机械效应危害的调查鉴定方法	(84)
第 10 章 雷电反击的危害特点与鉴定	(89)
10.1 雷电反击的危害特点	(89)
10.2 雷电反击的调查与鉴定	(90)
第 11 章 雷电冲击波危害特点与鉴定	(94)
11.1 雷电冲击波的危害特点	(94)
11.2 雷电冲击波危害的调查鉴定方法	(95)
第 12 章 雷电危害人体的特点与鉴定方法	(100)
12.1 雷电危害人体的特点	(100)
12.2 工频电压与雷电危害的异同点	(103)
12.3 雷电危害人体的调查与鉴定方法	(104)
12.4 球闪危害人体的调查与鉴定	(110)
第 13 章 过电压产生的原因及其性质特点	(113)
13.1 瞬时过电压产生的原因及性质特点	(113)
13.2 操作过电压产生的原因及性质特点	(114)
13.3 过电压的监测方法	(117)
13.4 操作过电压的调查方法	(118)
第 14 章 案例分析	(119)
14.1 “9·17”某小学雷击事故调查鉴定	(119)
14.2 “3·21”加油站雷击事故调查与鉴定	(124)
第 15 章 雷击事故调查鉴定管理依据	(129)
15.1 雷击事故调查鉴定的法律依据	(129)
15.2 雷电灾害调查鉴定的技术依据	(130)
15.3 规范雷电灾害调查鉴定管理	(131)
附录 1 分流系数的计算	(134)
附录 2 雷电流基本参量	(136)
附录 3 雷电灾害调查资料	(138)
附录 4 建筑物年预计雷击次数	(143)
附录 5 GB16840.1—1997《电气火灾原因技术鉴定方法》第 2 部分:剩磁法	(145)

附录 6	GB16840.1—1997《电气火灾原因技术鉴定方法》第 4 部分:金相法	(149)
附录 7	常见树木主分枝单位体积含水量测量法	(156)
附录 8	雷击点的确定方法	(159)
附录 9	几何耦合系数计算方法	(162)
参考文献		(164)

第 1 章 雷电的形成机制

20 世纪以来, Elster 和 Geitel 等研究者经过大量的探测、研究与实验, 发现了大气中的带电粒子有正负之分, 并对大气中带电粒子的来源、分布和运动规律进行了深入的研究。从而揭示了地球电量补给的来源、地面大气电场的电势和电场强度的一般规律。

1.1 晴天大气电场

1.1.1 大气中的电势与电场强度特点

英国著名的科学家法拉第最早提出了用电力线来表征静电场, 在电场中测量出电位相同的地点, 把这些点连接起来便形成了一个曲折的面, 这样的几何曲面称为等电位面。通过实验可以看出, 地球表面大气中存在着等电位面, 电力线与等电位面相交处, 总是互相垂直, 大气中的电场强度方向指向地表面(如图 1.1), 等电位面随地面起伏发生弯曲。大气电场的电场强度由地面向上逐渐减小, 到 10 km 以上已减小到地表面处的 3%(如图 1.2)(虞昊等, 1995)。

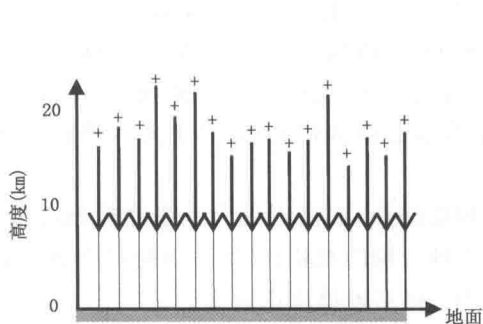


图 1.1 晴天大气电场的电力线

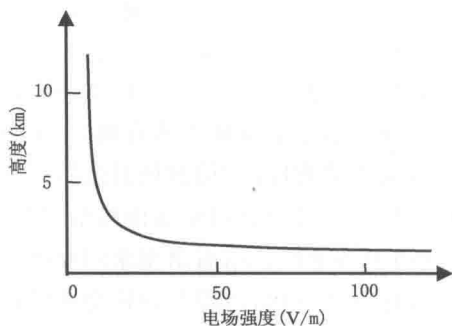


图 1.2 大气电场强度正值与高度的关系

1.1.2 世界各地地面大气电场

长期的观察表明, 大气电场的电场强度是因地而异、因时而异, 但是对某个地区而言, 地面平均晴天大气电场强度却是稳定的。表 1.1 为部分地区地面晴天大气电场平均状况, 全球平均为 130 V/cm, 人口密集的城市较大, 小城市和乡村较小(虞昊等, 1995)。

表 1.1 部分地区晴天大气电场的平均状况

观测地点	纬度	经度	大气电场 (V/cm)	大气电场变化(%)		观测时间
				日较差	年较差	
费尔班克斯(美国)	64.9°N	147.8°W	97	38	30	1932—1933 年
乌普萨拉(瑞典)	59.9°N	15.2°E	70	71	84	1912—1914 年
巴普洛夫斯克(苏联)	59.7°N	30.5°E	171	46	—	20 年
亚琛(德国)	50.8°N	6.1°E	95	61	94	1957—1958 年
巴黎(法国)	48.8°N	2.0°E	175	57	40	1893—1898 年
达沃斯(瑞士)	46.8°N	9.8°E	64	69	106	1908—1910 年
伊宁(中国)	44.0°N	81.3°E	56	129	—	1968 年 8—9 月
东京(日本)	35.7°N	139.8°E	144	100	72	1949—1952 年
台北(中国)	25.0°N	121.5°E	28	130	132	1934—1936 年
广州(中国)	23.1°N	113.3°E	87	110	—	1937 年 2 月 4—5 日

1.2 雷雨云的形成

在气象术语表达中,将产生闪电的云称为积雨云,通俗称为雷雨云。雷雨云的形成主要有两条途径:一是局地形成的热雷雨云;二是锋面过境形成的锋面雷雨云。

1.2.1 局地热雷雨云的形成过程

地面土壤吸收了太阳的辐射热量造成地面温度升高,由于土壤吸收热量的能力远远大于大气层,因而,吸收太阳辐射后,地面升温高于大气层。由于热传导和热辐射作用,近地面层的大气温度也随地面的升温而升高,气体升温则体积膨胀、密度减小、压强降低。根据流体力学原理可知,气体受热则上升,大气层上方密度较大的冷空气则下沉,这种对流现象整体运动是不可能发生的,多发生在地表抬升地区,由于地表抬升降起的部位升温高,上升气流首先从这里产生,从而形成有序的“伯纳德对流”。

由于高空气压较低,因而地面热空气上升时要膨胀降压,而高空的大气温度较地面低,使得上升气团中的水汽凝结而出现水滴并产生了云,这种云称为积状云,随着对流强度的发展变化,云系也在急剧变化,由积状云转变成淡积云、浓积云最后发展成积雨云。

当垂直对流达到非常强烈时,云中除了一般的水滴之外还有温度低于 0℃ 的过冷水滴和冰晶,厚度可达 10 km 左右,这时的云称为积雨云,也即雷雨云,闪电由此产生。

1.2.2 锋面雷雨云的形成

天气变化过程中,冷气团与暖气团之间有一过渡区域,当这一区域十分狭窄时,气象上就称它为锋。锋在大气空间总是倾斜的,下面是冷空气团,上面是暖空气团,近地面层锋宽约数十千米以上,高层则达到 200~400 km 以上(虞昊等,1995),由于其与气团相比较而言还是狭窄的,因而也称之为锋面。根据锋面的移动方向不同,可以将其分为两类:第一是冷锋过境,此时冷气团推动暖气团,气温下降;第二是暖锋过境,暖气团推动冷气团运动,气温升高(如图

1.3)。由于锋面上潮湿不稳定的暖气团强烈对流,从而形成了雷雨云,经验表明冷锋较暖锋形成的对流形势强烈。锋面过境时形成的雷雨云随锋面移动,其移动平均速度可达 30~40 km/h(虞昊等,1995)。

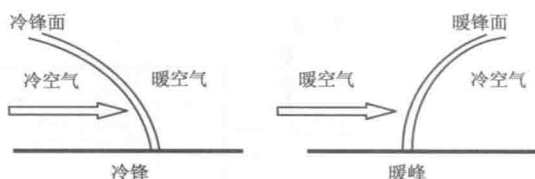


图 1.3 冷锋和暖锋示意图

1.3 雷雨云的成电机制

1.3.1 雷雨云的电结构

英、法、美、德、独联体等国家利用探空气球、飞机、火箭等工具对雷雨云电荷分布进行了多年的探测和研究,经过研究探索总结出了积雨云中电荷分布特点。Simpson 提出了雷雨云中的电荷分布模式,他认为主要正电荷中心位于高空 6 km 高度、温度为 -30°C 、半径为 2 km 的球体,其电荷为 +24 C。主要负电荷中心位于 3 km 高度、温度为 -8°C 、半径为 1 km 球体,电荷量为 -20 C。最下方的正电荷区中心位于 1.5 km 高度、温度为 1.5°C 、半径为 0.5 km 的球体,其电量为 +4 C(虞昊等,1995)。

综合各种探测和研究,可以看出雷雨云电荷分布的共同处:

①雷雨云的大气体电荷分布是复杂的,但可以看成三个电荷集中区,最高的集中区是正电荷,中间区为负电荷,最低区为正电荷。

②雷雨云中间区的电量最多,因而自下方观测,低层带负电荷,对大气电场的影响是由负变正。

③从远离雷雨云处观测时,雷雨云显示出电偶极子的特性。

④雷雨云中大气体电荷密度绝对值均为 $3 \times 10^{-16} \sim 3 \times 10^{-15} \text{ C/cm}^3$,最大到 10^{-13} C/cm^3 。

⑤雷雨云中大气体电荷尺度主要介于 50~500 m 之间,出现概率最大处的高度为 200 m,大气体电荷最大尺度可达 1000 m 以上。雷雨云消散阶段,大气体电荷尺度介于 100~1000 m 之间,对应出现概率最大尺度为 300 m(如图 1.4)。

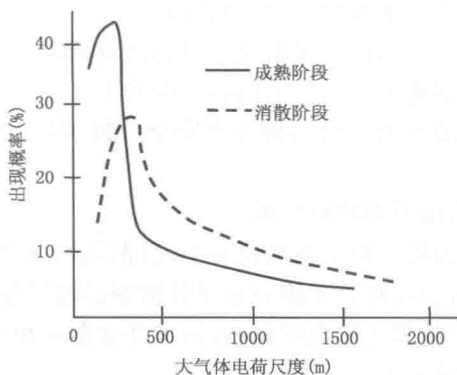


图 1.4 积雨云在不同大气体电荷尺度的出现概率分布图

⑥典型的雷雨云中的电荷分布大体布局(如图 1.5)(虞昊等,1995)。

1.3.2 雷雨云成电机制

(1)雷雨云起电机制的理论评判依据

雷雨云的成电机制,目前还处于理论的探索阶段。这个理论是否正确应符合两个方面的条件:首先,理论应符合实验结果,凡是不符合实验结果的理论就被淘汰;其次,是用普遍适用

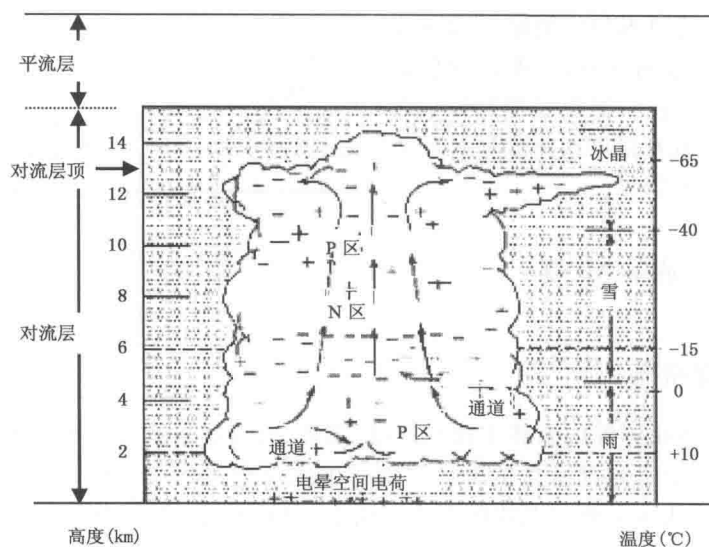


图 1.5 典型的雷雨云中的电荷分布大体布局

的早为大量不同方面的实践所证明的物理基本理论、定律来评判,凡是与之矛盾的则也必被大家所否定(虞昊等,1995)。

(2) 雷雨云起电学说的事实依据

- ①起电过程主要发生在雷雨云的初期,成熟阶段;
- ②雷暴单体中出现的大气带电过程的寿命期平均为 30 min;
- ③参与一次闪电的电荷量平均为 20~30 C,闪电电矩平均为 100 C·km;
- ④闪电频率可达每分钟几次;
- ⑤第一次闪电一般出现于雷达监测积雨云中出现降水粒子之后大约 10~20 min,此时较大范围的雷雨云中大气电场强度应大于 3×10^3 V/cm;
- ⑥雷雨云的电荷结构并非完全一致,但云中主要负电荷区一般位于 -5°C 层处(虞昊等,1995)。

(3) 雷雨云的成电学说

雷雨云的成电学说众说纷纭,目前认为与实验结果相符的理论学说有下列几种:大气离子扩散起电机;极化水滴的选择性捕获起电机;碰撞感应起电机;大雨滴破碎起电机;温差起电机;界面起电机;雷雨云降水起电机;对流起电机等,现就国际上普遍认可的三种学说介绍如下。

① 感应起电学说

当积雨云形成的初级阶段,云中降水粒子在初始大气电场的作用下,感应生成电荷。由于降水粒子远大于云粒子,因而在大气电场和重力作用下,下沉的降水粒子(水滴、冰晶、雹粒)极化带电(如图 1.6),上升气流携带的中性粒子与它相碰撞,当接触时间大于电荷传递所需的弛豫时间(约 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ s),弹离的粒子将带走降水粒子下部的部分正电荷,最后导致降水粒子带负电,云粒子带正电,形成云中上正下负的电荷中心。

在大气电场 E 作用下,半径为 R ,速率为 V_R 的降水粒子与半径为 r ,速率为 V_r 的云粒子碰撞,若云粒子的数密度为 n_r 则降水粒子电量的变化率为:

$$dq/dt = -\pi R^2 (V_R - V_r) n_{rc} \alpha r^2 (E/2 \cdot \pi^2 \cos\theta + 1/6 \cdot \pi^2 q R^{-2}) \quad (1.1)$$

式中: α 是降水粒子与云粒子的碰撞分离系数, 假设云粒子从降水粒子下表面各部位分离的机会均等, 取平均夹角为 45° , 则降水粒子的电荷量:

$$q = -2.12ER^2(1 - e^{t/\tau}) \quad (1.2)$$

τ : 张弛时间(s)。

$$\tau = [\pi^3 \alpha (V_R - V_r) n_{rc} r^2]^{-1} \quad (1.3)$$

验证: 当积雨中大气电场达 3×10^3 V/cm 时, 云中电荷区水平范围为 2 km 时, 电荷总量为 33 C, 因而该学说正确, 而且多用此学说解释雷雨云成电机制。

② 温差起电学说

雷雨云中含有冰晶、雹粒(软雹)、过冷水滴。在冰块中总是存在 H^+ 和 OH^- 两种离子, 离子浓度随温度升高而增大, 当冰粒的不同部分有温度差异时温度高的部分的离子浓度大, 这就必然出现扩散现象。扩散的速度与离子的大小有关, 因氢离子扩散速度大, 先期到达右端(冷端), 导致冷端带有正电荷(如图 1.7)。

冰中电荷生成的电场将阻止电荷分离的继续, 最后达到平衡状态, 冰体内建立了稳定的电位差, 它正比于温度梯度, 最后电场强度为:

$$E = K dT/dx \quad (1.4)$$

$$K = 2mv/^\circ C$$

式中: K 为波尔兹曼常数。

若有两片冰粒相接触, 其温度分别为 T_1 、 T_2 , 在 0.01 s 左右的时间内冰块获得最大的表面电荷密度为: $\sigma_{PM} = 3.05 \times 10^{-3} (T_1 - T_2) (C/cm^2)$

雷雨云的温差成电机制包括, 云中冰晶与雹粒碰撞摩擦而引起的起电机制和较大过冷云滴与雹粒碰冻释放热量产生冰屑温差起电机制。

该机制验证: 大气电场从初始的晴天大气电场值增到 3×10^3 V/cm, 所需时间 $t_0 = 500$ s, 即在降水出现后近 600 s 的时间, 因而认为该学说正确。

③ 大雨滴破碎起电学说

在雷雨云的底部总是集中着相当数量的水滴, 当水滴处于上升气流较强的地方且水滴的半径超过毫米级时, 水滴即被气流吹碎, 由于大气电场和重力的作用, 带有负电荷的水滴随气流上升, 而带正电荷的大水滴因重力作用而沉降到 $0^\circ C$ 层的云底附近, 使云底带正电(如图 1.8)。其破碎时, 产生的荷电量与水滴破碎的强弱有关。

破碎起电情况比较复杂, 它与水滴的化学成分、气流、水滴温度、电场强度及水滴破裂形式有关, 其起电量很不稳定。水滴破碎强烈时, 产生的电荷较多, 电量较大, 反之则形成的电量较少。

例如, 一个 4 mm 的大水滴在不考虑外在电场的情况下, 破碎强烈时造成的平均电荷为

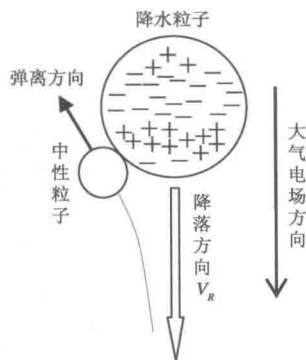


图 1.6 降水离子与云粒子碰撞起电学示意图

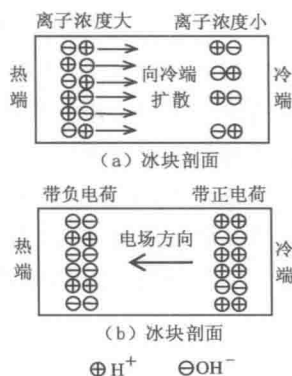


图 1.7 冰的热电起电学示意图

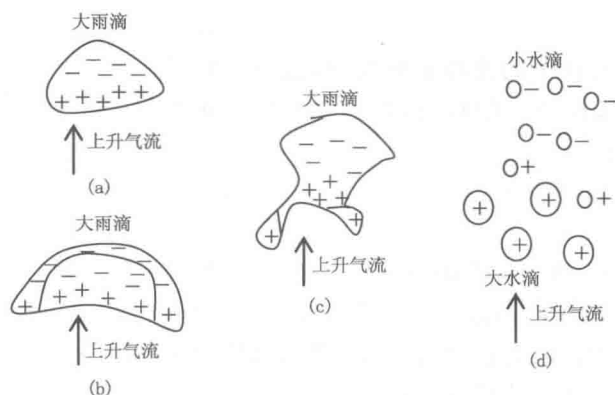


图 1.8 大雨滴破碎起电机制示意图

1.8×10^{-12} C/g, 不很强烈时则产生的电荷为 5.0×10^{-12} C/g, 同样, 雷雨云中的大水滴, 每次破碎产生的电荷为 6.7×10^{-12} C/g, 这说明大雨滴破碎过程中, 雨滴能达到的带电量并不多, 这一数值比实际至少小两个数量级。

若考虑云中水滴下沉时已存在晴天大气电场, 水滴在大气电场中极化, 水滴内沿电场方向的上半部带正电, 下半部带负电, 水滴破碎后所获得的电量就大多了, 雷雨云的大气电场随着体电荷的生成而逐渐增大, 雷雨云感应带电电荷量也逐步增大。根据这一理论推算出来的雷雨云的总带电量与实际测得平均数值比较接近。

1.4 闪电的构成

1.4.1 闪电的分类

根据雷电发生位置分类, 可将闪电分为: 云闪、地闪。

根据闪电的形状可分为: 线状闪电、带状闪电、联珠状闪电、球状闪电、片状闪电。

各种闪电出现的概率, 以云闪为最多, 地闪次之, 球闪较少。在各种闪电中地闪的破坏力最为严重。

1.4.2 流光的形成

闪电的基本放电过程为流光过程。

(1) 电子雪崩

若气体中的电子在强电场的作用下, 它由负电极向正电极高速运动, 电子在高速运动过程中与中性分子碰撞使之产生电离, 形成正离子和电子。若电场足够强, 则一个电子在高速运动的过程中因碰撞而产生若干对正离子和电子。这些新产生的电子又在强电场作用下形成高速运动, 经碰撞电离又产生更多的正离子和电子, 从而形成电子雪崩式地高速增长, 称为电子雪崩过程。同时, 气体中的离子也会在强电场的作用下由正极向负极运动, 碰撞电离而使正离子形成雪崩式快速增长, 称为正离子雪崩过程。

(2) 流光

电子在强电场作用下不仅会形成电子雪崩过程,而且因雪崩过程中形成激发态原子,辐射出高能光子,当这些光子具有的能量大于气体分子的电离能时,气体分子在这些光子的作用下产生光电离,形成大量的正离子和电子,这些新电子成为新电子雪崩源,并重复电子雪崩过程和光电离过程,形成巨大的向正极运动的电子流,称之为负流光,其速度比电子雪崩大一个数量级,而从正极向负极发展的流光称为正流光(虞昊等,1995)。

1.4.3 云闪

云闪是指不与大地或者地表物体接触的闪电。它分为云内闪电、云际闪电和云空闪电(如图1.9)。



图 1.9 闪电闪击瞬间

闪电的形状多为线状,肉眼看到的片状闪电为云层的对流光的反射光。

(1) 云闪的形成机制

雷雨云中局部电荷中心的大气电场到达 10^4 V/cm 时,带电水滴间会出现空气介质的强电击穿而发生导电,并发出流光。

最初形成的流光为初始流光。

云闪一般是正电荷中心发出初始正流光,持续向负电荷区中心发展,形成初始流光过程,这个过程持续时间约为 200 ms,传播速度为 10^6 cm/s,电流强度为 100 A。初始正流光将达到负电荷中心时,从负电荷中心发出不发光的负流光,沿初始流光通道反方向进行,把两个电荷中心联通完成放电过程,这个过程为反冲流光过程。该过程持续时间约为 100 ms,持续电流强度小于 100 A,其间间隔 10 ms,出现约 1 ms 的强放电过程,其峰值电流为 10^3 A,反冲流光的传播速度比初始流光高 2 个数量级,约为 10^8 cm/s,中和的电荷约为 0.5~3.5 C,其电矩为 3~8 C·km 左右。本机制是云内闪电的形成机制,云空闪电的形成机制可参考地闪的 1a、3a 型地闪的形成机制(如图 1.10)(虞昊等,1995)。

(2) 地面大气电场变化情况

云闪时近地面电场的变化可以分为三个阶段:初始阶段(具有大量较小的脉冲)、极活跃阶段(具有大量较大幅度的脉冲)和最后阶段的大气电场变化具有间歇脉冲(虞昊等,1995)。

(3) 云闪活动规律

云闪多发生在雷雨云中的 0°C 层附近,在纬度较低地区,雷雨云中 0°C 层较高,云中负电荷区中心较高,易成云闪,不易成地闪;纬度较高时,雷雨云中 0°C 层较低,云中负电荷区较低,易

成地闪不易成云闪,由实验测得云闪及地闪与纬度的关系式:

$$P(\varphi, N_y) = [4.16 + 2.16\cos(3\varphi)][0.6 + 0.4N_y/(72 - 0.98\varphi)] \tag{1.5}$$

式中: φ 为纬度, N_y 为雷暴日。

表 1.2 是根据局地测量结果得出的云闪数与地闪数比值随纬度变化的状况,可以看出热带地区的比值最高。

表 1.2 云闪数与地闪数比值随纬度变化的状况

纬度(°)	2~19	27~37	43~50	52~69
云闪数与地闪数之比	5.7	3.6	2.9	1.8

1.4.4 云地闪电

云地闪电是雷雨云与大地之间的一种放电现象,简称地闪。地闪的形状多为线状,有时因强风作用而出现带状,树状与联球状较少。

(1)地闪的分类

1)分类依据:

- ①正地闪:闪电电流为正的地闪,云中正电荷向下输送或向上输送负电荷时产生的电流。
- ②负地闪:闪电电流为负的地闪,云中负电荷向下输送或向上输送正电荷时产生的电流。
- ③向下先导:由云向下地面发展的先导。
- ④向上先导:由地面向云中发展的先导。

结合上述四个方面的因素和有无回击将闪电划分为八类(图 1.10)。

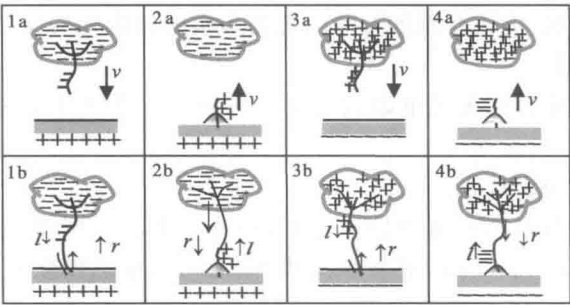


图 1.10 八类地闪

2)类别划分:

- ①1a 型:先导向下带负电且不落地,没有回击的闪电,为云内放电(云闪)。
- ②1b 型:先导带负电荷落地且有回击的闪电,向下负闪电。
- ③2a 型:自地面向上正先导,称为向上正先导—连续负闪电。
- ④2b 型:自地面向上正先导且有回击的闪电,称为向上正先导—多闪击负闪电。
- ⑤3a 型:先导向下带正电,且不落地没有回击的闪电,为云内放电(云闪)。
- ⑥3b 型:先导向下带正电,且有回击称为向下正闪电。
- ⑦4a 型:自地面向上负先导,电流为正,连续电流持续时间相当长称为向上负先导—连续正电流闪电。
- ⑧4b 型:向上负先导,先导后 4~25 ms 产生极强烈的回击,称为向上负先导—脉冲正电