

Lightning Protection Technology

雷电 防护技术



周志敏 纪爱华 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Lightning Protection Technology

雷电 防护技术



周志敏 纪爱华 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书将防雷理论与工程应用相结合,突出实用性,深入浅出地阐述了在防雷设计中经常涉及的防雷基础知识和设计原则与方法。全书共分7章,系统地讲述了认识雷电现象、雷击形式及现代防雷技术、外部防雷系统、内部防雷系统、等电位连接与共用接地系统、雷电灾害及风险评估、人身防雷击措施及雷击急救措施等内容。

本书内容丰富,文字通俗,具有很高的实用价值,可供从事防雷设计及应用的工程技术人员阅读,也可供高等学校及职业技术学院的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

雷电防护技术/周志敏等编著. —北京:中国电力出版社, 2016.4

ISBN 978-7-5123-8728-7

I. ①雷… II. ①周… III. ①防雷 IV. ①P427.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第004508号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年4月第一版 2016年4月北京第一次印刷

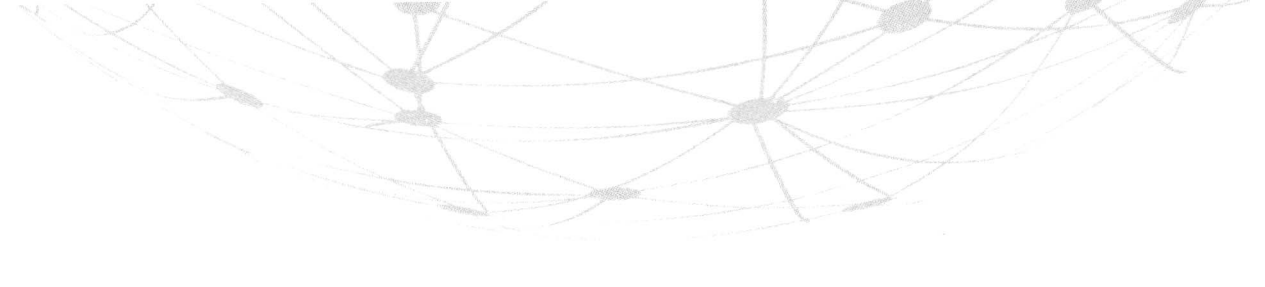
787毫米×1092毫米 16开本 11印张 284千字

印数0001—3000册 定价28.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



前 言

随着我国信息化建设进程的加快,计算机网络信息系统正扮演着越来越重要的角色,而每年都会发生多起因雷击造成计算机及网络通信设施损坏,导致信息传输中断、信息受损的事故。因此,在国民经济的许多重要领域(航天、军事、电信、工控、信息产业、金融、广电、电力、交通等),防雷已成为一项重要课题。

随着计算机网络信息设备的广泛应用,传统防雷技术也面临着创新和发展,需要推动各种防雷新产品开发和研制。

鉴于防雷技术相对滞后于电子信息技术发展的现状,在防雷方案的规划设计中,应结合信息化时代的特点,遵循雷电自然规律,整体、全面、系统地规划防雷方案,并要综合运用传统和现代防雷技术。

本书结合现代防雷技术的发展,系统地阐述了雷电电磁脉冲防护,静电防护,共用接地系统的设计方法、设计原则及最新应用技术。在内容上将常规防雷技术、现代防雷技术、雷电灾害风险评估、人身防雷措施及雷击急救措施融于一体,力求做到通俗易懂和结合实际,使从事防雷设计的工程技术人员从中获益。此书是从事防雷设计的工程技术人员必备参考书。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、刘建秀、顾发娥、纪达安、刘淑芬、纪和平、纪达奇、陈爱华等。本书在编写过程中,从资料的收集到技术信息交流,都得到了国内的专业学者和同行,以及防雷产品制造商的大力支持,在此表示衷心的感谢。

由于时间短,水平有限,不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

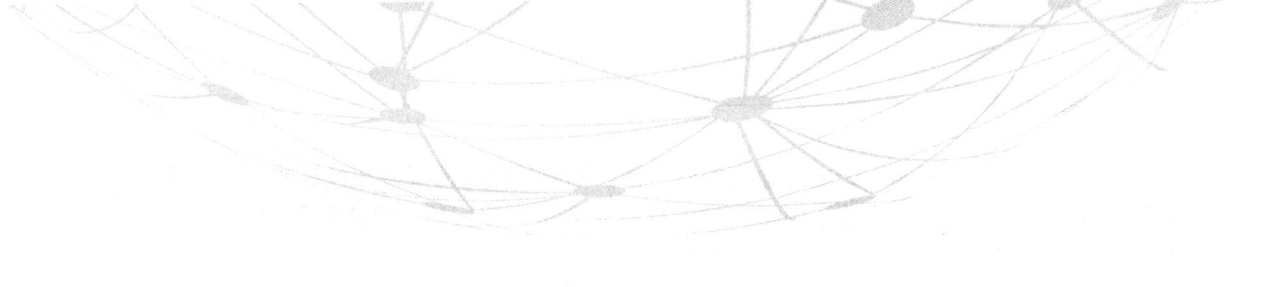
目 录

前言

第 1 章 认识雷电现象	1
1.1 人类对雷电的认识及雷雨云的电结构	1
1.1.1 人类对雷电的认识、防雷的起源	1
1.1.2 云的类型及雷雨云的电结构	3
1.1.3 积雨云特征、形成及分类	5
1.1.4 雷雨云形成及起电机理	6
1.2 雷电形成及电离层与地面间的电荷平衡	8
1.2.1 雷电及雷云的形成	8
1.2.2 电离层与地面间的电荷平衡及尖端放电	16
1.3 雷电流的特性及雷击选择性	17
1.3.1 雷电流的特性	17
1.3.2 雷电活动及雷击的选择性	20
第 2 章 雷击形式及现代防雷技术	23
2.1 雷击形式及雷电入侵建筑物内的途径	23
2.1.1 防雷机理及雷击形式	23
2.1.2 雷电入侵建筑物内的途径	29
2.2 现代防雷技术	31
2.2.1 现代防雷技术的特点及防雷保护区划分	31
2.2.2 三维防护及多层分级（类）保护	32
2.2.3 现代防雷产品	35
2.3 雷电电磁脉冲及现代雷电防护系统	37
2.3.1 雷电电磁脉冲干扰及防护	37
2.3.2 现代雷电防护系统	38
2.3.3 浪涌抑制器件的主要技术参数及分类	42
第 3 章 外部防雷系统	50
3.1 外部防雷装置	50
3.1.1 接闪器保护范围及安装	50
3.1.2 引下线要求及安装	57

3.1.3	接地装置要求及安装	59
3.2	现代建筑物综合防雷技术	60
3.2.1	现代建筑物防雷技术的发展	60
3.2.2	现代建筑物防雷设施	61
3.3	主动防雷技术	66
3.3.1	人工引雷	66
3.3.2	智能避雷技术	68
3.3.3	人工抑制雷电的实验方法	70
第4章	内部防雷系统	71
4.1	内部防雷系统的组成及规划设计	71
4.1.1	内部防雷系统的组成及措施	71
4.1.2	内部防雷系统规划设计	73
4.2	SPD的特点及其应用	79
4.2.1	SPD的类型及产品术语	79
4.2.2	SPD的性能特点	82
4.2.3	配电系统SPD配置方案及配置要点	83
4.2.4	建筑物入口处SPD的配置	86
4.2.5	SIEMENS电源防雷模块应用实例	93
第5章	等电位连接与共用接地系统	99
5.1	等电位定义及连接要求	99
5.1.1	等电位定义及保护作用	99
5.1.2	等电位连接要求及在配电系统中的作用	101
5.2	等电位连接及设置原则	104
5.2.1	等电位连接方式及连接方法	104
5.2.2	等电位设置原则	105
5.3	等电位连接材料及施工方法	112
5.3.1	等电位连接材料及施工要求	112
5.3.2	等电位连接工艺程序及施工方法	114
5.4	共用接地系统	118
5.4.1	共用接地系统构成	118
5.4.2	机房共用接地系统设计方案	120
第6章	雷电灾害及风险评估	122
6.1	雷电灾害与预警	122
6.1.1	雷电灾害	122
6.1.2	雷电预警	126
6.1.3	雷电监测及雷电定位系统	128
6.2	雷电灾害风险评估	134
6.2.1	雷电灾害风险评估的定义、范围、法规	134
6.2.2	雷电灾害风险评估的分类及作用	135
6.2.3	雷电灾害风险评估的基本原则及工作内容	135
6.2.4	大气雷电环境评价及雷击损坏风险评估	137

6.2.5	雷电灾害易损性评估及雷电灾害环境影响评价	140
6.2.6	GB 50343—2004 建筑物电子信息系统防雷技术规范中的评估方法	141
第 7 章	人身防雷击措施及雷击急救措施	145
7.1	人身防雷击措施	145
7.1.1	人身室外防雷措施	145
7.1.2	人身室内防雷措施	148
7.2	雷电对人体的生理效应及急救措施	149
7.2.1	雷电对人体的生理效应	149
7.2.2	雷击急救措施	150
7.2.3	急救方法及要领	151
附录	防雷技术术语	156
参考文献		168



第1章 认识雷电现象

1.1 人类对雷电的认识及雷雨云的电结构

1.1.1 人类对雷电的认识、防雷的起源

1. 人类对雷电的认识

轰隆隆的雷声从天空滚过，震撼着山川大地，一条条耀眼的闪电在天空飞舞，随之而来的是狂风暴雨。在现代人看来这只不过是一种自然现象罢了，但我们的祖先却对此难以理解，他们想象天上一定有种神秘的力量支配着这一切。

在希腊神话中，雷电有无比巨大的威力，就掌握万神之王宙斯的手中，它当宙斯生气发怒时，就把雷电放出来震慑群神和人类。在中国的神话传说中，雷电是雷公电母（雷公电母是古代汉族神话传说中掌管闪电打雷的神）在惩治邪恶。后来的欧美人又把雷电和上帝联系起来，说是上帝主宰雷电。

我国古代（公元前 1500 年）就有对雷电现象的初步记载，后在《论衡》、《南齐书》、《梦溪笔谈》中都有雷电对人、物的灾害及尖端放电的记载。那时人们对雷电只有一个表面的、带有神秘色彩的认识，没有通过实验的手段对雷电现象进行深入的探索。

16 世纪以前的欧洲是神学为主的时代，任何科学的、先进的思想和学说都是“异端”。神学认为雷电是来自“神”的意志。16 世纪后，在教堂一次次受雷击而受损，无论多么虔诚的祈祷，“神的意志”也不可动摇的时候，人们开始对雷电现象进行客观的思考。从盖利克创造人工起电机开始到“莱顿瓶”的发明，再到收集天电的实验，人们对雷电的认识进入到理性和科学的时期。

2. 防雷的起源

雷电是一种极为宏伟壮观的自然现象，有学者认为，雷电孕育了地球的生命，又促成了地球上的文明，但是雷电有时又伤害生灵、伤害人类、破坏建筑物、损毁财物，给人类带来灾难。

雷电这一自然现象，瞬变万千，古人以阴阳平衡之理论来认识这一自然现象，其理论与之千年的实践，同现代实证性科学相比，有着相当深的科学内涵。随着人类社会的进步和科学技术的发展，人们对雷电这一自然现象有了新的认识，其理论和防雷实践都在不断地完善。自 200 多年前富兰克林发明的避雷针问世至今，其顺应雷云放电规律，创造优先放电条件，使防雷实用技术进入一个崭新的阶段。

1749 年，波尔多科学院悬赏征求这样一个问题的答案：“在电和雷之间有什么类似之处？”一位叫巴巴雷特的医生在论文中宣称：电跟雷是一回事。他的论文因此而中奖。然而，真正以科学实验寻求答案的，却是美国的富兰克林。

17 世纪中叶，伟大的富兰克林（美国政治经济学家、科学家，《独立宣言》的起草人之



一) 通过多次实验,证实了天电与地电的同一性。他通过仔细的观察和科学的思考发现了自然界的放电现象,并提出和实施了引雷入地的措施和方法,即安装“避雷针”,富兰克林的这一发明一直沿用至今,仍是防直击雷的有效措施之一。

1746年,40岁的富兰克林开始全力投入电学研究。1749年,他进行了一些新的电学实验。在一次实验中,为了增大电容量,他把几个莱顿瓶(荷兰莱顿大学一位叫马森布洛克的教授做过一个试验:在一个玻璃瓶里装上水,用来储存摩擦起电产生的电荷。试验成功后,经过改进,在瓶的内外贴上金属箔,正式命名为莱顿瓶)连接在一起。当时,他的妻子丽达正在一旁观看他的实验。她无意中碰到了莱顿瓶上的金属杆,只见一团电火花一冒,并随之传出一声怪响,丽达已应声倒地。原来丽达受到了电击,幸好当时的电容量不大,丽达躺了一个星期才慢慢好转。

这次使丽达差点送命的电击实验给富兰克林很大启示,他联想到人们对雷电的两种不同的观念,决定从理论上探讨雷电的实质。富兰克林通过实验,证明正负电荷在短路时发生的火花、响声和雷电非常相似,他确信:雷电就是自然界的电。

富兰克林弄清了雷电的性质之后,就开始研究控制雷电、避免雷击的办法。富兰克林认为,既然莱顿瓶里的电可以引进引出,自然界的电也应该能通过导线从天上引下来。那么,怎样才能把雷电从天上引下来呢?细心的富兰克林观察到,闪电和电火花都是瞬时发生的,而且光和声都集中在物体的尖端。他由此想到,如果将带尖的金属杆装在屋顶上,再用电线把金属杆和地面相连,不就可以把空中的电引到地下来了么?这样就能避免高大建筑遭受雷击。

1752年6月,富兰克林冒着生命危险,进行了著名的费城风筝试验。这一天,狂风漫卷,阴云密布,一场暴风雨就要来临了。富兰克林和他的儿子威廉一道,带着上面装有一个金属杆的风筝来到一个空旷地带。富兰克林高举起风筝,他的儿子则拉着风筝线飞跑。由于风大,风筝很快就被放入高空。刹那,雷电交加,大雨倾盆。富兰克林和他的儿子一道拉着风筝线躲进一个建筑物内。此时,刚好一道闪电从风筝上空掠过,富兰克林的手上立即掠过一种恐怖的麻木感。他抑制不住内心的激动,大声呼喊:“我被电击了!我被电击了!”随即他用一串铜钥匙与风筝线接触,钥匙上立即放射出一串电火花。随后,他又将风筝线上的电引入莱顿瓶中。

在进行风筝实验之后的当年,富兰克林就发明了避雷针。其办法是:在建筑物的最高处立上一根2~3m高的金属杆,用金属线使它和地面相连接,等到雷雨天气,雷电沿着金属线流向地下,建筑物就不会遭受雷击了。

富兰克林为了推广避雷针的使用,专门写了《怎样使房屋等免遭雷电的袭击》的文章。文章发表后,美国的各个城市马上就开始安装避雷针。但这却遭到教士们的反对,他们说雷电是上帝的震怒。也有人因缺乏对雷电的知识,对避雷针的使用持怀疑态度。有个叫普林斯的医生发表看法说:“如果把雷电导入地里,那儿带的电就会增加,就很可能发生地震。”

避雷针在法国也受到了强烈反对,圣奥梅尔的居民对当地安装了避雷装置的人提出控告,他们害怕因为这种亵渎行为而受到惩罚。尽管有人反对,但避雷针还是普及开来了,因为事实证明,拒绝安装避雷针的一些高的教堂在大雨中相继遭受雷击,而比教堂更高的建筑物由于装上了避雷针而安然无恙。

雷电是一门古老而有神秘色彩的科学,自从有人类历史以来,各个时期都记录着人们和雷电斗争的历史。自从富兰克林研究大气物理建立雷电理论并发明了避雷针以来,人类同雷电的斗争进入了新的领域。

1.1.2 云的类型及雷雨云的电结构

1. 云的类型

(1) 卷状云。卷状云的类型有卷云、卷积云、卷层云和卷云砧。其中,卷云表现成孤立的、白色的纤维状云,或窄细的云带;卷积云呈薄的白色的碎云块;卷层云表现为透明的、白色的、纤维状的或外形光滑的云幕,覆盖整个天空或部分天空,它由冰晶组成,呈白色纤维状、丝缕状结构,当高空风很大,它出现在积雨云顶部时,表现成砧状,也称之为卷云砧,此时云与闪电的关系密切,时常有强雷电出现。

(2) 雾。雾可以认为是动力性最弱的云,它的生命为 $2\sim 6\text{h}$,假定厚为 100m 的雾内的平均垂直上升速度为 0.01m/s ,则一空气块进入云底和出云顶的时间尺度为 $100/0.01=10^4\text{ (s)}$ 。雾的含水量一般为 $0.05\sim 0.2\text{g/m}^3$,因此,雾一般不大会有降水,雾中的湍流绝对值是小的,但由于雾中的水平和垂直方向的速度很小,湍流仍会影响雾中的输送及其他的物理过程。

(3) 层云。雾离开地面就成为层云,它呈灰色,云底十分均匀,时常有毛毛雨,冬季的层云有时会有冰凌晶或雪粒。如果透过层云见到太阳,其外形轮廓清晰可辨,典型的层云含水量为 $0.05\sim 0.25\text{g/m}^3$ 。

(4) 层积云。层积云呈灰色或灰白色云块,云片或云层有时可表现为圆形、云轴,没有纤维结构,在地面观测,云单体的角宽度大于 50° 。层积云内有弱对流,其对流受下沉气流抑制,时常出现于反气旋高压的东南侧。层积云和层云的时间尺度、云中液态水含量或湍流水平等方面与雾并没有明显的差别,其生命可达 $6\sim 12\text{h}$ 。

(5) 中云。中云包括高层云和高积云,它的云底高度通常为 $2500\sim 4500\text{m}$ 。高层云外形呈层、纤维状或均匀的灰色或暗的云层,它时常覆盖整个或部分天空,云中部分很薄的地方,可见到轮廓模糊的太阳,好像透明玻璃似的。高积云呈白色或灰白色或灰色的碎云块,由薄云片、圆块状或滚轴云组成,是排列有序的云体。其视角宽度介于 $1^\circ\sim 50^\circ$,并与锋面、气旋等天气尺度云系相关,水平范围很广,云体厚时有降水出现。

(6) 积云。积云为孤立云块,一般结构紧密,轮廓分明,垂直发展外形像山冈、圆丘或宝塔,上部隆起部分像花椰菜,又可分淡积云和中积云。淡积云是垂直厚度较小的积云,呈扁平形;中积云是中等垂直发展的积云,出现有小的隆起云顶。对于垂直厚度达 1500m 的积云,其生命为 $10\sim 30\text{min}$,如果积云内的平均垂直速度为 3m/s ,气块从云底进入到离开云顶的时间尺度量级为 $1500\text{m}/(3\text{m/s})=500\text{s}$,小积云的液态水含量小于 1.0g/m^3 ,典型值为 0.3g/m^3 ,无降水。

(7) 浓积云。浓积云垂直发展旺盛,垂直厚度很大,云的上部时常呈花椰菜形,它有时也会引起闪电。浓积云的生命比积云大,介于 $20\sim 40\text{min}$,一般上升速度为 10m/s ,则对于厚度 5000m 的浓积云云底进入云顶离开的时间为 10min ,浓积云中的含水量为 $0.5\sim 2.5\text{g/m}^3$,云中的湍流较强,有时可降小阵雨。

(8) 积雨云。积雨云是最强的对流的云,浓密而深厚,外形像山峰或巨塔,它电荷量大,大气中闪电是由它引起的。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 45min 到数小时之久,但是一气块从进入云底到出云顶的时间尺度是较短的,例如,若积雨云的厚度为 $12\,000\text{m}$,平均上升气流速度为 30m/s ,则其时间尺度为 $12\,000\text{m}/(30\text{m/s})=400\text{s}$,比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 $1.5\sim 4.5\text{g/m}^3$ 或更大。



图 1-1 积雨云

2. 雷雨云的电结构

雷电与雷云的存在是分不开的,人们通常把发生闪电的云称为雷雨云。其实有几种云,都与闪电有关,如层积云 (Sc)、雨层云 (Ns)、积云 (Cu)、积雨云 (Cb),其中最重要的则是积雨云,一般专业书中讲的雷雨云就是指积雨云,如图 1-1 所示。

云的形成过程是空气中的水汽经由各种原因达到饱和或过饱和状态而发生凝结的过程,使空气中水汽达到饱和是形成云的一个必要条件,其主要方式有:

(1) 水汽含量不变,空气降温冷却。

(2) 温度不变,增加水汽含量。

(3) 既增加水汽含量,又降低温度。

但对云的形成来说,降温过程是最主要的过程,而在降温冷却过程中又以上升运动而引起的降温冷却作用最为普遍。

积雨云是一种在强烈垂直对流过程中形成的云,由于地面吸收太阳辐射的热量远大于空气层,所以白天地面温度升高较多,夏日这种升温更为明显,近地面大气的温度由于热传导和热辐射也跟着升高,气体温度升高必然膨胀,密度减小,压强也随着降低,根据力学原理它就要上升,上方的空气层密度相对来说就较大,就要下沉。热气流在上升过程中膨胀降压,同时与高空低温空气进行热交换,于是上升气团中的水汽凝结而出现雾滴,就形成了云。在强对流过程中,云中的雾滴进一步降温,变成过冷水滴、冰晶或雪花,并随高度逐渐增多。在冻结高度 (-10°C),由于过冷水大量冻结而释放潜热,使云顶突然向上发展,达到对流层顶附近后向水平方向铺展,形成云砧,是积雨云的显著特征。

在积雨云形成过程中,在大气电场及温差起电效应、破碎起电效应的同时作用下,正负电荷分别在云的不同部位积聚。当电荷积聚到一定程度,就会在云与云之间或云与地之间发生放电,也就是人们平常所说的“闪电”。

一般情况下,雷雨云上部有一个正电荷中心,下部有一个负电荷中心,即云层底部一般带负电荷,因此,云对地的闪电绝大多数是负闪电。根据科学工作者大量直接观测的结果,积雨云中电荷的典型分布大体如图 1-2 所示。

一般认为主要负电荷区中心位于 3km 高度,温度 -8°C ,是半径为 1km 的球体,其电荷量为 -20C ;主要正电荷区中心位于 6km 高度,温度 -30°C ,是半径为 2km 的球体,其电荷量为 $+24\text{C}$;最下方的正电荷区中心位于 1.5km 高度,温度 -1.5°C ,是半径为 0.5km 的球体,其电荷量为 $+4\text{C}$ 。积雨云中电荷分布的一般特性如图 1-3 所示。这是按

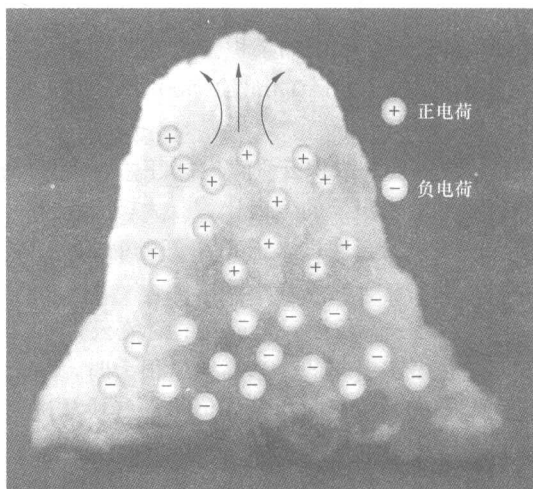


图 1-2 积雨云中电荷的典型分布



理论归纳的理想模式，不同地区的实际情况可能与这种典型分布有较大的差别。

在积雨云发展旺盛时期，云顶高度可达10~15km，云底高度在平原地区为1km左右。随着雷雨云的发展和运动，在发生降水后，当大气电场强度为3kV/cm以上时（晴天大气中约为30kV/cm），云间就会对地火花放电，也称云地闪电。

1.1.3 积雨云特征、形成及分类

1. 积雨云特征

夏季到来之前，在天上一般会见到积云，积云如果迅速地向上凸起，就会形成高大的云山，这时候，云底慢慢变黑，云峰渐渐模糊。不一会，整座云山就会崩塌，天空也特别暗，马上就会下起暴雨，雷声隆隆，电光闪闪，有时还会带来冰雹或龙卷风。

积雨云云浓而厚，云体庞大如高耸的山岳，顶部开始冻结时，轮廓模糊，有纤维结构，底部十分阴暗，常有雨幡及碎雨云。当形成浓积云之后，若空气对流运动继续增强，云顶垂直向上发展会更加旺盛，达到冻结高度以上时，原来浓积云的花椰菜状的云顶就开始冰晶化，它的明显而清晰的边缘轮廓开始在有些地方变得模糊，此时就进入积雨云阶段。

积雨云臃肿庞大，云底高度一般在400~1000m，在潮湿地区出现的高度通常比在干燥地区低近一半；冬季寒冷地区约4500m，夏季温暖地区约18000m。积雨云云顶很高，可达对流层顶8000~12000m。全球除了南极以外的地区，积雨云大多在温暖潮湿的地面上空、山区上空及在热带海洋部分上空。积雨云几乎总是形成降水，包括雷电、阵性降水、阵性大风及冰雹等天气现象，有时也伴有龙卷风，在特殊地区，甚至产生强烈的外旋气流，下击暴流，这是一种可以使飞机坠毁的气流。

2. 积雨云的形成

积雨云也叫雷暴云，是积状云的一种。积状云是由于空气以对流运动形式造成绝热冷却，使水汽饱和凝结而形成的，其中包括淡积云、浓积云、积雨云、碎积云。形成积雨云的三个必要条件如下：

（1）大量的不稳定能量。要产生对流天气，首先大气层结不稳定，在储存有大量不稳定能量的大气中，一旦受到足够的冲击力，不稳定能量就会释放出来，变为空气上升运动的动能。

（2）充足的水汽。充沛的水汽也是形成雷暴的必要条件，如果没有充沛的水汽，即使发生了对流，也不可能产生高大的雷暴云。所以，雷暴云多出现在水汽充沛的日子或地区。

（3）足够的冲击力，大气中不稳定能量和水汽的存在，具备了发生雷暴的可能。要使可能变为现实，还需要有足以使空气上升，到达自由对流高度以上的冲击力，这样不稳定能量才能释放出来，上升气流才能强烈发展，形成雷暴云。

3. 积雨云分类

积雨云分如下两种：

（1）秃积雨云（Cbcalv），为积雨云的初始阶段，云状特征除了在云顶边缘的某些部位由于

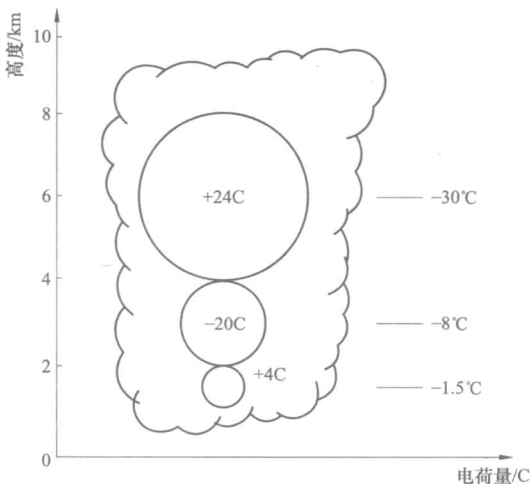


图1-3 积雨云中电荷分布的一般特性

冰晶化而开始模糊,呈现丝缕结构之外,其他特征与浓积云相似,无明显差别。

(2) 鬃积雨云(Cbcap),在对流发展极盛阶段,此时云顶发展到极高,由于该高度远高于冻结高度,出现大量的冰晶,而且又受到上空强稳定层的阻抑,所以云顶花椰菜状迅速消失,趋向平展,形成铁砧状,称为云砧。其边缘出现细鬃条纹,故称“鬃状”。积雨云云砧有时也由于发展过程中因高空风速极大,水平运动加强,使云顶沿风的去向水平铺展开来而形成。积雨云云底阴暗,并有乱流造成的起伏。在云的前方有升降气流造成的滚轴状云。

1.1.4 雷雨云形成及起电机理

雷电就是发生在雷雨云中的电学现象,也只有雷雨云才可能产生雷电。因此,雷雨云的存在就成了雷电发生的先决条件。在大多数情况下,雷雨云在产生雷电的同时,还伴随着降水。雷雨云在气象学中叫积雨云。只有发展成熟并伸展得很高的积雨云才有雷电现象出现。

大量研究证明,在发展成熟的积雨云里,存在着正负两种电荷。云中电荷的产生和分布,与雷雨云形成的客观过程及云中所发生的微物理过程有关。在雷雨云的不同部位,聚集了两种不同极性的电荷,当聚集的电荷达到一定的数量时,在云内不同部位之间或云与地面之间就形成了很强的电场。这电场的强度平均可以达到几千 V/cm,局部区域可以高达 1 万 V/cm。这么强的电场,足以把云内外的大气层击穿。于是,在云与地面之间,或者云的不同部位之间,以及不同云块之间激发出耀眼的闪光,这就是闪电。

雷雨云是一大团翻腾、波动的水、冰晶和空气。当云团里的冰晶在强烈气流中上下翻滚时,水分会在冰晶的表面凝结成一层层冰,形成冰雹。这些被强烈气流反复撕扯、撞击的冰晶和水滴充满了静电。其中质量较轻、带正电的堆积在云层上方;较重、带负电的聚集在云层底部。至于地面则受云层底部大量负电的感应带正电。当正负两种电荷的差异极大时,就会以闪电的形式把能量释放出来。

1. 形成条件

雷雨云的形成需要一定的条件,从局地条件来看,首先,大气的垂直层结构必须是不稳定的,以便诱发对流活动的发生和发展;其次,空气中要有足够的水分,能够满足云的生成。从天气背景来看,应当有促发局地对流发展的天气形势,如冷锋过境、正在填塞中的低压、反气旋后部、小波动及高空小股冷空气活动等。雷雨云往往由积云发展而来,它是对流云发展的成熟阶段。一个发展完整的对流云,一般都有一个形成、成熟和消散的过程。

不同的地方,不同的发展阶段,对流云的厚度相差悬殊。在中国西北高原地区,由于大气中的水汽不充沛,对流云发展到积雨云阶段也只有 3~4km 厚;而中、高纬度的锋面性对流云,在发展初期其厚度即可达到 5~6km;在热带海洋地区,如美国的佛罗里达,由于水汽充足,对流云发展十分旺盛,其云顶抵达平流层,高度可达 20km 以上,其水平尺度一般为 30~40km。在大多数情况下,云体先在垂直方向较快增长,当云顶达到一定的高度并比较稳定之后,才在水平方向较快地增长。

在雷雨云的下方,大气的电场与晴天正好反向,也就是说,此时地面带正电荷,它是由雷雨云感应产生的,这说明雷雨云带有负电荷。在雷雨云中,正电荷集中在云的上部,而负电荷集中在云的中下部。在通常情况下,云下部的负电荷略多于上部的正电荷。有时,在云的底部还有一个范围不大的带正电荷区域,它一般处于云的前部,这里上升气流有局部的极大值。

2. 形成过程

雷电放电是由带电荷的雷云引起的。雷云带电原因的解釋很多,但还没有获得比较满意的一致认识。一般认为雷云是在有利的大气和大地条件下,由强大的、潮湿的热气流不断上升进



入稀薄的大气层冷凝的结果。强烈的上升气流穿过云层,水滴被撞分裂带电。轻微的水沫带负电,被风吹得较高,形成大块的带负电的雷云;大滴水珠带正电,凝聚成雨下降,或悬浮在云中,形成一些局部带正电的区域。实测表明,在5~10km的高度主要是正电荷的云层,在1~5km的高度主要是负电荷的云层,但在云层的底部也有一块不大区域的正电荷聚集。雷云中的电荷分布很不均匀,往往形成多个电荷密集中心。每个电荷中心的电荷为0.1~10C,而一大块雷云同极性的总电荷则可达数百库仑。这样,在带有大量不同极性或不同数量电荷的雷云之间,或雷云和大地之间就形成了强大的电场。随着雷云的发展和运动,一旦空间电场强度超过大气游离放电的临界电场强度(大气中的电场强度约为30kV/cm,有水滴存在时约为10kV/cm)时,就会发生云间或对地的火花放电,放出几十乃至几百千安的电流,产生强烈的光和热(放电通道温度高达20 000℃),使空气急剧膨胀振动,发生霹雳轰鸣声。

雷雨云是对流云发展的成熟阶段,它往往是从积云发展起来的。发展完整的对流云,其生命史可以分为以下三个阶段:

(1) 形成阶段。这一阶段主要是从淡积云向浓积云发展。云的垂直尺度有较大的增长,云顶轮廓逐渐清楚,呈圆弧状或菜花形,云体耸立成塔状。这样的云在盛夏常常看到。在形成阶段,云中全部为比较规则的上升气流,在云的中、上部为最大上升气流区。上升气流的垂直廓线呈抛物线形。此阶段经历的时间大约为15min,一般不会产生雷电和降水。

(2) 成熟阶段。从浓积云发展成积雨云,就伴随着雷电活动和降水,这是成熟阶段的象征。在成熟阶段,云除了有规则的上升气流外,同时也有系统性的下沉气流。上升气流通常在云的移动方向的前部,往往在云的右前侧会观测到最强的上升气流。上升气流一般在云的中、上部达到最大值,其速度可以达25~60m/s,甚至更高。下沉气流是一支从云的中下部倾斜地穿出来的气流,它对雷雨云的发展成熟不单纯起消极作用,还与上升气流一起构成云中的铅直环流。对流云的厚度与其水平尺度具有同一数量级,这是对流云与其他种类云最重要的差异之一。

(3) 消散阶段。一阵电闪雷鸣、狂风暴雨之后,雷雨云就进入了消散阶段。这时,云中已被有规则的下沉气流所控制。云体逐渐崩溃,云上部很快演变成中、高云系,云底有时还有一些碎积云或碎层云,它们是由降水在地面蒸发后上升凝聚而成的。

3. 雷雨云的微物理结构

一块成熟的雷雨云其顶部可以伸展到-40℃的高度(约10 000m以上),而云底部的温度却在10℃以上。由于云体在垂直方向上跨过了这么宽的温度范围,因而云中水汽凝结物的相态就很不一样。在云中有水滴、过冷却水滴、雪晶、冰晶等。把雷雨云按温度高低来分层,便可以看:在温度高于0℃的“暖层”云中,全部是水滴(包括云滴),在温度为-8~0℃的云层中,既有较多的过冷却水滴(温度低于0℃的水滴),也有一些雪晶、冰晶;在温度低于-20℃的云层中,由于过冷却水滴自然冻结的概率大为增加,云中冰晶的天然成冰核作用更为显著,故云中基本上都是雪晶和冰晶了。在成熟阶段的雷雨云中,发生着非常复杂的微物理过程,在云的“暖层”中,有水滴之间由于大小不同而发生的重力碰撞,也有湍流碰撞和电、声碰撞。同时,有大水滴在气流作用下发生变形,破碎而产生“连锁反应”;还有由云的“冷层”掉到“暖层”中来的大雪花、霰等的融化等。在温度为-20~0℃的云层中,水汽由液态往固态转移十分活跃,冰晶、雪晶的粘连,大冰晶破碎等也很频繁。在低于-20℃的云层中,也还有冰晶之间的粘连和大冰晶的破碎过程发生。在雷雨云中发生的所有这些微物理过程,都可以导致云中水汽凝结物电学状态的改变,对于雷雨云的起电有十分重要的贡献。



4. 雷雨云中的电荷

雷雨云中的电荷主要是云中水滴、冰晶和霰粒（俗称雪子）在重力和强烈上升气流共同作用下，不断发生碰撞摩擦而产生的。当冰晶和霰粒相碰时，短暂的摩擦作用使霰粒表面局部温度比冰晶高，结果使霰粒表面带上负电，冰晶带上正电，这就是所谓的温差效应。当冰晶与霰粒分开时，正负电荷也离开了。当水滴在霰粒表面冻结时，水滴里外温度也不一致，水滴外层温度低先冻结呈正电性，里面温度高呈负电性。一旦内部水冻结，体积迅速膨胀，外层冰壳破裂，冰屑带着正电荷飞散出去，而留下的冻水滴上仍带着负电荷，这样正负电荷也发生了分离，冰屑较轻，被上升气流带到云层顶部，所以雷雨云上面带正电荷。强烈上升的气流也会将云中大水珠冲破，形成许多带负电的小水珠和带正电的较大水珠。带正电的较大水珠下沉直至被上升气流支持在云层底部的局部区域。前面所述带负电的小水珠和霰粒等逐渐扩散到雷雨云下部广大区域。

5. 雷雨云的起电机理

雷雨云的起电机理主要有四种理论：

（1）水滴破裂效应：云中水滴在高速气流中做激烈运动，分裂成一些带负电的较大颗粒和带正电的较小颗粒，后者同时被上升气流携带到高空，前者落在低空，这样正负两种电荷便在云层中被分离，这也就是造成 90% 的云层下部带负电的原因。

（2）吸电荷效应：由于宇宙射线或其他电离作用，大气中存在正负离子，又因为空间存在电场，在电场力的作用下正负离子在云的上、下层分别积累，从而使雷雨云带电，又称感应起电。

（3）水滴冻冰效应：水滴在结冰过程中会产生电荷，冰晶带正电荷，水带负电荷，当上升气流把冰晶上的水分带走时，就会导致电荷的分离，而使雷雨云带电。

（4）温差起电效应：实验证明在冰块中存在着正离子（ H^+ ）和负离子（ OH^- ），在温度发生变化时，离子发生扩散运动并相互分离。积雨云中的冰晶和霰粒在对流的碰撞和摩擦运动中会造成温度差异，并因温差起电，带电的离子又因重力和气候作用而分离扩散，最后达到一定的动态平衡。

综上所述，雷雨云起电可能是由于某一机理效应或多种机理效应而产生的。

1.2 雷电形成及电离层与地面间的电荷平衡

1.2.1 雷电及雷云的形成

1. 雷击

通常所谓雷击是指一部分带电的云层与另一部分带异种电荷的云层，或者是带电的云层对大地之间迅猛放电。这种迅猛的放电过程产生强烈的闪电并伴随巨大的声音。当然，云层之间的放电主要对飞行器有危害，对地面上的建筑物和人、畜没有很大影响。然而，云层对大地的放电，则对建筑物、电气电子设备和人、畜危害甚大，这是防雷界要研究的主要对象。

由于云层相互摩擦、碰撞而使不同的云层带不同的电，当电压达到可以穿过空气的程度以后，临近的两片云层会发生放电现象，产生电花和巨大的响声。肉眼看到的一次闪电的过程是很复杂的，当雷雨云移到某处时，云的中下部是强大负电荷中心，云底部变成正电荷中心，在



云底与地面间形成强大电场。在电荷越积越多, 电场越来越强的情况下, 云底首先出现大气被强烈电离的一段气柱, 称为梯级先导。这种电离气柱逐级向地面延伸, 每级梯级先导是直径约 5m、长 50m、电流约 100A 的暗淡光柱, 它以平均约 150 000m/s 的高速度一级一级地伸向地面, 在离地面 5~50m 时, 地面便突然向上回击, 回击的通道是上述梯级先导开辟出的电离通道。回击以 50 000km/s 的更高速度从地面驰向云底, 发出光亮无比的光柱, 历时 40 μ s, 通过电流超过 10 000A, 这即第一次闪击。相隔几秒之后, 从云中一根暗淡光柱携带巨大电流, 沿第一次闪击的路径飞驰向地面, 称为直窜先导, 当它离地面 5~50m 时, 地面再向上回击, 再形成光亮无比的光柱, 这即第二次闪击。接着又类似第二次那样产生第三、四次闪击。通常由 3~4 次闪击构成一次闪电过程。一次闪电过程历时约 0.25s, 在此短时间内, 窄狭的闪电通道上要释放巨大的电能, 因而形成强烈的爆炸, 产生冲击波, 然后形成声波向四周传开, 这就是雷声。

2. 雷云形成的假说

雷电形成的三个条件: 空气中必须有足够的水汽; 有使潮湿水汽强烈持久上升的气流; 有使潮湿空气上升凝结成水珠或冰晶的气象、地理条件。不管是直击雷还是感应雷都与带电的云层分不开, 带电的云层称为雷云。有关雷云形成的假说很多, 但至今尚未有一种被公认为无懈可击的完整学说, 这里仅介绍其中被认为比较完善并经常被推荐的假说。

(1) 电场极化假说。根据大量科学测试可知, 地球本身就是一个电容器, 通常大地稳态时带负电荷 500 000C 左右, 距离地面 80km 以上的电离层具有一定的导电能力, 而且是带正电荷的, 而大地是带负电荷的, 故形成比较稳定的大气电场。因此, 电离层和大地这两个带电导体中间被不导电的大气所绝缘, 这两者之间便形成一个已充电的电容器, 它们之间的电压为 300kV 左右, 其场强为上正下负, 使处于其中的任何导体上端带负电荷, 下端带正电荷 (云层也是如此), 即发生极化。此外, 近地大气中还常有一定量的离子, 其中正离子较重 (约为电子的 2000 倍), 活动不大, 而负离子则活动性较大, 在大气电场的作用下, 负离子向上运动, 正离子向下运动, 形成上负下正离子层; 另外, 空气中水滴分裂后形成上负下正的带电云层, 进一步被大气电场极化, 这些云层电荷量逐渐积累增多, 达到了足够的能量时, 便产生闪电现象, 形成雷电。

当含水蒸气的空气受到炽热的地面烘烤而上升, 或者较温暖的潮湿空气与冷空气相遇时都会产生向上的气流。这些含水蒸气的气流上升时温度逐渐下降形成雨滴、冰雹 (称为水成物), 这些水成物在地球静电场的作用下被极化, 如图 1-4 所示, 负电荷在上, 正电荷在下, 它们在重力作用下落下的速度比云滴和冰晶 (这二者称为云粒子) 要大, 因此极化水成物在下落过程中要与云粒子发生碰撞。碰撞的结果是其中一部分云粒子被水成物所捕获, 增大了水成物的体积, 另一部分未被捕获的被反弹回去。而反弹回去的云粒子带走水成物前端的部分正电荷, 使水成物带上负电荷。由于水成物下降的速度快, 而云粒子下降的速度慢, 因此带正、负两种电荷的微粒逐渐分离 (称为重力分离作用), 如果遇到上升气流, 云粒子不断上升, 分离的作用更加明显。最后形成带正电的云粒子在云的上部, 而带负电的水成物在云的下部, 或者带负电的水成物以雨或雹的形式下降到地面。当带电云层一经形成, 就形成雷云空间电场, 空间电场的方向和地面与电离层之间的电场方向是一致的, 都是上正下负, 因而加强了大气电场的强度, 使大气中水成物的极化更厉害, 在上升气流存在的情况下更加剧重力分离作用, 使雷云发展得更快。

在上面的分析中, 好像雷云总是上层带正电荷, 下层带负电荷。实际上气流并不单是只有上下移动, 而是比这种运动更为复杂, 因此雷云电荷的分布也比上面讲的要复杂得多。

根据科学工作者大量直接观测的结果，典型的雷云中的电荷分布大体如图 1-5 所示。

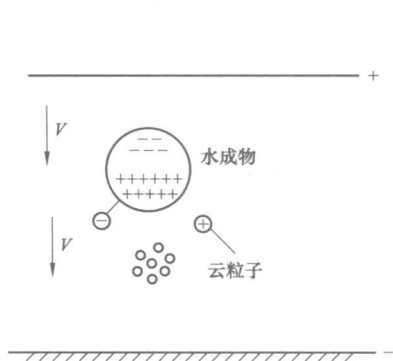


图 1-4 水成物在大气电场中的极化

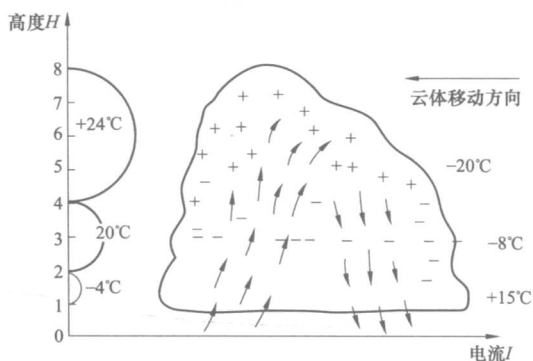


图 1-5 典型的雷雨云中的电荷分布

科学工作者的测试结果表明，大地被雷击时，多数是负电荷从雷云向大地放电，少数是雷云上的正电荷向大地放电；在一块雷云发生的多次雷击中，最后一次雷击往往是雷云上的正电荷向大地放电。观测证明，发生正电荷向大地放电的雷击显得特别猛烈。上面的假说首先是由威尔逊（Wilson）提出的，通常把它叫作威尔逊假说。

（2）温差起电假说。科学实验已证明，在冰中有一小部分的分子处于电离状态，形成较轻的 H^+ 和较重的羟基（ OH^- ）离子，并且其浓度随温度的升高而很快增加，温度较高的部位离子浓度较大，温度较低的部位离子浓度较低； H^+ 的扩散系数和迁移率比 OH^- 要大 10 倍以上。因此当冰中有温度梯度时就会出现离子浓度梯度，如图 1-6（a）所示。

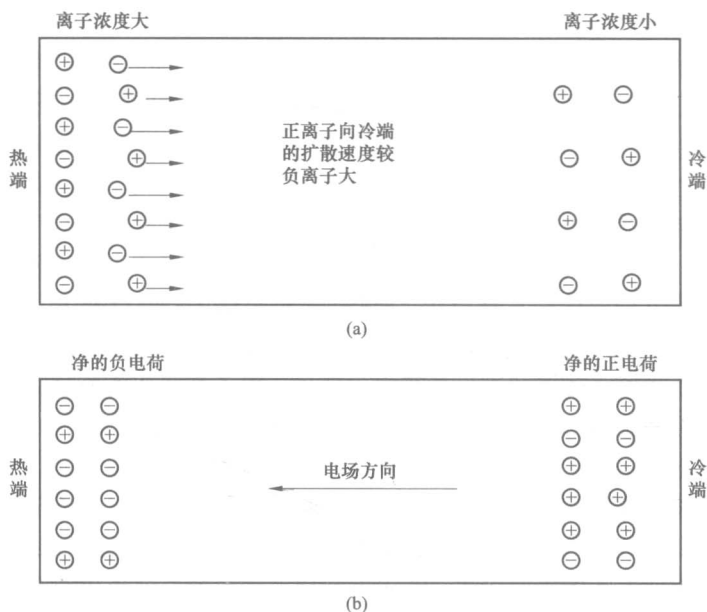


图 1-6 温差起电机制

（a）温差引起离子浓度差异和离子的运动；（b）冰内电荷分离成功

由于温度热端起初具有较高的正、负离子，而后沿此浓度梯度， H^+ 扩散得快，导致正、负离子分离，使冷端获得静正电荷电量，而热的一端获得静的负电荷，冰体中电荷生成的电场