



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

# 风电场 防雷与接地

FENGDIANCHANG  
FANGLEI YU JIEDI

郑明 刘刚 周冰 李炬添 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

# 风电场 防雷与接地

郑明 刘刚 周冰 李炬添 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一,介绍了雷电作用机制和雷电效应、防雷装置工作原理与运行维护、接地的类型及要求、接地装置与接地材料、接地测量技术等雷电防护知识;着重阐述了风电机组及箱式变电站的雷电防护、风电场集电线路的雷电防护、风电场升压站的雷电防护以及风电场二次系统的雷电入侵防护、陆上风电场的接地计算及降低接地电阻的措施、海上风电机组的接地仿真计算等;最后结合设计案例归纳总结出风电场雷电防护和接地的特点。

本书既适合从事风电场防雷与接地设计、维护工程技术人员阅读参考,也可作为高等院校相关专业的教学参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

风电场防雷与接地 / 郑明等编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016.5  
(风力发电工程技术丛书)  
ISBN 978-7-5170-4021-7

I. ①风… II. ①郑… III. ①风力发电—发电厂—防雷②风力发电—发电厂—接地保护 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第321575号

书 名	风力发电工程技术丛书 <b>风电场防雷与接地</b>
作 者	郑明 刘刚 周冰 李炬添 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 15.75印张 374千字
版 次	2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>55.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 《风力发电工程技术丛书》

## 编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙 强 孙志禹

李 炜 李 莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈 刚 陈 澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑 源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施 蓓 洪树蒙

祝立群 袁 越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡 新 糜又晚

丛书主编 郑 源 张燎军

**主要参编单位** (排名不分先后)

河海大学  
中国长江三峡集团公司  
中国水利水电出版社  
水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心  
华北电力大学  
水电水利规划设计总院  
水利部水利水电规划设计总院  
中国能源建设集团有限公司  
上海勘测设计研究院  
中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司  
中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司  
中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司  
中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司  
中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司  
长江勘测规划设计研究院  
中水珠江规划勘测设计有限公司  
内蒙古电力勘测设计院  
新疆金风科技股份有限公司  
华锐风电科技股份有限公司  
中国水利水电第七工程局有限公司  
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司  
中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司  
同济大学  
华南理工大学  
中国三峡新能源有限公司

**丛书总策划** 李 莉

**编委会办公室**

主	任	胡昌支	陈东明				
副	任	王春学	李 莉				
成	员	殷海军	丁 琪	高丽霄	王 梅	邹 昱	
		张秀娟	汤何美子	王 惠			



# 前 言

风电场防雷是风电场运行维护中的重要部分，随着风电装机容量的不断增加，因雷电导致的风电场雷击事件呈逐年增长的趋势，雷击造成的叶片、机组电控设备损伤严重，给整机、叶片制造企业及业主单位造成了较大的经济损失，雷击已经成为影响风电机组安全运行、风电场安全生产的危险因素之一。

接地技术是为了防止电力或电子等装置遭受雷击而引入的保护性措施，对于风力发电场，由于其所处的位置风力资源好，也比较空旷，因此遭受雷击的概率也比较高。风力发电机的雷电防护具有一定的特殊性，即利用自身作为引导雷电泄放的通道，因此其自身必须具有良好的通路。风电场所在区域的土壤电阻率一般较高，要使每台风电机组的接地电阻满足要求，需要做好风电场的接地设计。

海上风力资源以其自身优势与丰富的储量，已成为未来风力发电的重点发展方向。海上风电场比陆上风电场更易遭受雷击，雷击故障后的维修难度更大，但同时海上风电场可以利用海水和海床散流，利用机组基础作为自然接地体一般可以满足接地电阻的要求。本书在分析海上风电场防雷接地特点后对其防雷和接地措施，特别是对利用基础作为自然接地体的海上风电机组的接地仿真计算成果进行了重点介绍。

本书介绍了雷电作用机制和雷电效应、防雷装置工作原理与运行维护、接地的类型及基本要求、接地装置与接地材料、接地测量技术等雷电防护知识；着重阐述了风电机组及箱式变电站、集电线路、升压站的防雷保护以及风电场二次系统的防雷保护，陆上风电场的接地计算及降低接地电阻的措施，

海上风电机组的接地计算等；最后结合设计案例归纳总结出风电场雷电防护和接地的特点。

本书由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司郑明、周冰、李炬添及华南理工大学电力学院刘刚等编著，其中：第1章~第3章、第10章由郑明编写；第5章~第7章、第9章由刘刚编写；第4章和第8章分别由周冰和李炬添编写。同时，陆莹、张弦、周露、郭亚勋、金尚儿、马浩禹、梁嘉浩、许玮、邱梓庭、刘峻岐、游阳、王湘女、陈芷彤、陈长富等参与了文字编录、校正工作，在此表示感谢。

由于编写时间较为仓促，加上编者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作者

2015年12月



## 前言

<b>第 1 章 雷电放电与雷电参数</b> .....	1
1.1 雷电的形成机制 .....	1
1.1.1 积雨云、雷雨云的电结构 .....	1
1.1.2 积雨云的起电机制 .....	3
1.2 雷电放电机制 .....	6
1.2.1 闪电的形成与类型 .....	6
1.2.2 地闪的类型及其特性 .....	7
1.2.3 人工触发闪电及闪电的形成机制 .....	10
1.3 雷电表征参数与测量 .....	12
1.3.1 雷电表征参数 .....	12
1.3.2 雷电表征参数测量 .....	13
1.4 工程中的雷电模型 .....	14
1.4.1 工程界对雷电的描述 .....	14
1.4.2 雷电放电的工程模型及计算 .....	16
1.4.3 全球电路和地球与雷雨云之间的电荷输送 .....	17
参考文献 .....	20
<b>第 2 章 雷电效应及其危害</b> .....	21
2.1 雷电对人体的生理效应 .....	21
2.1.1 雷电流对人体的作用机理 .....	21
2.1.2 影响雷电对人体生理效应的因素 .....	23
2.2 雷电的光、热、冲击波与机械效应 .....	24
2.2.1 雷电的光效应 .....	24
2.2.2 雷电的热效应 .....	25
2.2.3 雷电的冲击波效应 .....	26
2.2.4 雷电的机械效应 .....	27



2.3 雷电的静电感应与电磁感应 .....	28
2.3.1 雷电的静电感应 .....	28
2.3.2 雷电的电磁感应 .....	30
2.4 雷电导致的暂态电位升高 .....	33
2.4.1 暂态电位升高的原理 .....	33
2.4.2 暂态电位升高的危害 .....	34
2.5 雷电电涌过电压的危害 .....	35
2.5.1 电涌过电压的产生与危害 .....	35
2.5.2 如何防备电涌过电压 .....	37
参考文献 .....	38
<b>第3章 防雷装置工作原理与运行维护 .....</b>	<b>39</b>
3.1 避雷针 .....	39
3.1.1 避雷针的原理和结构 .....	39
3.1.2 避雷针的保护范围 .....	41
3.1.3 避雷针(带、网)的检查与维护 .....	43
3.2 避雷线 .....	44
3.2.1 避雷线的保护范围 .....	44
3.2.2 避雷线的检查维护 .....	46
3.3 避雷器 .....	47
3.3.1 避雷器的工作原理及类型 .....	47
3.3.2 避雷器的性能参数 .....	53
3.3.3 避雷器的检查和维护 .....	54
3.4 避雷带和避雷网 .....	55
3.5 电涌避雷器 .....	57
3.5.1 电涌及电涌保护 .....	57
3.5.2 电涌避雷器的原理、类别 .....	58
3.5.3 电涌避雷器的主要参数 .....	59
3.6 新型防雷装置 .....	61
参考文献 .....	64
<b>第4章 风电场防雷保护 .....</b>	<b>65</b>
4.1 风电机组 .....	65
4.1.1 风电机组防雷保护的必要性 .....	65
4.1.2 风力发电机组的防雷保护区 .....	65
4.1.3 叶片的防雷保护 .....	67
4.1.4 机舱的防雷保护 .....	69
4.1.5 塔筒的防雷保护 .....	70
4.1.6 风电机组各部件之间的连接 .....	72

4.1.7	风电机组感应雷保护 .....	73
4.2	箱式变电站 .....	76
4.3	集电线路 .....	78
4.3.1	集电线路的感应雷过电压 .....	79
4.3.2	集电线路的直击雷过电压 .....	79
4.3.3	集电线路雷击跳闸率的计算 .....	83
4.3.4	集电线路的防雷保护措施 .....	85
4.4	升压站 .....	85
4.4.1	升压站的直击雷保护 .....	85
4.4.2	升压站的侵入波保护 .....	87
4.4.3	升压站变压器的防雷保护 .....	89
4.5	海上风电场 .....	91
4.5.1	海上风电场概述 .....	91
4.5.2	海上风电场电气系统 .....	91
4.5.3	海上风电场的防雷特点 .....	92
	参考文献 .....	94
<b>第5章</b>	<b>风电场二次系统防雷 .....</b>	<b>95</b>
5.1	风电场的二次设备与二次回路 .....	95
5.1.1	风电场主要二次设备 .....	95
5.1.2	风电场二次系统 .....	96
5.2	风电场二次系统 .....	97
5.2.1	接地 .....	97
5.2.2	均压 .....	98
5.2.3	屏蔽 .....	98
5.2.4	限幅 .....	98
5.2.5	隔离 .....	99
5.3	信息网络系统 .....	99
5.3.1	信息网络系统受雷电影响的原因、形式和途径 .....	99
5.3.2	电源感应雷防护 .....	100
5.3.3	信号线感应雷防护 .....	101
5.3.4	电子信息系统防雷器材及其安装 .....	101
5.3.5	辅助防雷方法 .....	103
5.4	计算机房 .....	104
5.4.1	雷电对计算机房影响的原因、形式和途径 .....	104
5.4.2	计算机房防雷的主要措施 .....	105
5.4.3	计算机房防雷主要器材及其安装 .....	107
5.5	低压供电系统 .....	109

5.5.1	低压供电系统遭雷击影响的原因、形式和途径 .....	109
5.5.2	低压供电系统的防雷保护措施 .....	110
5.5.3	低压供电系统防雷的器材及其安装 .....	110
	参考文献 .....	111
<b>第6章</b>	<b>接地系统</b> .....	<b>113</b>
6.1	接地的基本概念 .....	113
6.1.1	接地系统和非接地系统 .....	113
6.1.2	电力系统的接地方式 .....	116
6.1.3	电气设备的接地方法 .....	122
6.2	接地的类型 .....	123
6.2.1	接地的分类 .....	123
6.2.2	接地的目的 .....	124
6.3	接地的基本要求 .....	125
6.3.1	电力系统中性点接地基本要求 .....	125
6.3.2	电气设备接地的基本要求 .....	126
6.4	电气安全 .....	126
6.4.1	电气安全及其特点 .....	126
6.4.2	安全电流与安全电压 .....	127
6.4.3	电气事故的类型与预防措施 .....	127
	参考文献 .....	129
<b>第7章</b>	<b>接地装置</b> .....	<b>130</b>
7.1	接地体的安装 .....	130
7.2	接地导体截面选择计算 .....	131
7.2.1	圆棒形电极 .....	131
7.2.2	圆环形电极 .....	132
7.2.3	圆盘形电极 .....	133
7.2.4	扁钢和角钢的等值半径 .....	133
7.2.5	各种水平接地电极 .....	134
7.3	接地体的接地防腐要求 .....	136
7.3.1	接地材料的应用要求 .....	136
7.3.2	接地材料的腐蚀分析 .....	138
7.3.3	防腐材料的应用要求 .....	148
7.4	接地系统常用材料 .....	154
7.4.1	钢接地材料与铜接地材料性能比较 .....	154
7.4.2	降阻材料性能研究 .....	155
7.4.3	防腐材料性能研究 .....	158
7.4.4	工程上常用的防腐降阻材料 .....	160

参考文献	161
<b>第 8 章 接地设计</b>	<b>162</b>
8.1 接地电阻	162
8.1.1 工频接地电阻与冲击接地电阻	162
8.1.2 影响冲击接地电阻的主要因素	163
8.1.3 接地电阻的要求	163
8.1.4 风电场对接地电阻的要求以及升压站中性点接地方式	164
8.1.5 降低接地电阻的措施	166
8.1.6 接地电阻的计算	167
8.2 陆上风电场接地	168
8.2.1 接地电阻的计算	168
8.2.2 陆上风电机组接地电阻计算	170
8.2.3 陆上风电机组降低接地电阻的方式	172
8.2.4 陆上升压站接地计算	175
8.3 海上风力发电机组的接地计算	180
8.3.1 模型的建立和仿真计算条件	180
8.3.2 五种典型的风机基础的接地计算分析	181
8.3.3 影响接地电阻的因素分析	186
8.4 接地阻抗对海上风机桨叶引雷能力的影响	189
8.4.1 风机模型的建立	189
8.4.2 试验场地的设计	191
8.4.3 试验条件及设备的选取	191
8.4.4 试验方法的确定	191
8.4.5 试验结果及分析	192
参考文献	195
<b>第 9 章 接地系统的测量技术</b>	<b>196</b>
9.1 接地的模拟实验法	196
9.1.1 模拟实验	196
9.1.2 水槽模拟实验法	196
9.2 接地电阻的测量	199
9.2.1 接地电阻测量的目的	199
9.2.2 测量接地电阻的基本原理	199
9.2.3 测量接地电阻的方法	201
9.2.4 影响接地电阻测量结果的因素及消除方法	202
9.2.5 海上风力发电机接地阻抗的测试方法	204
9.3 土壤的电阻率的测量	206
9.3.1 测量电阻率的方法	206

9.3.2	测量时注意事项以及要求 .....	209
9.4	接触电压、电位分布和跨步电压的测量 .....	209
9.4.1	接触电压的测量 .....	210
9.4.2	电位分布及跨步电压的测量 .....	210
9.4.3	用接地电阻测量仪测量接触电压和跨步电压 .....	211
9.4.4	校验安全性 .....	213
	参考文献 .....	213
<b>第 10 章</b>	<b>风电工程防雷接地设计案例 .....</b>	<b>214</b>
10.1	风力发电机组 .....	214
10.1.1	风力发电机组的泄流途径 .....	214
10.1.2	风机直击雷防护 .....	214
10.1.3	风机感应雷防护 .....	218
10.1.4	风机等电位措施 .....	218
10.1.5	风机屏蔽措施 .....	222
10.2	陆上风电场接地实例 .....	222
10.2.1	陆上风电机组接地实例 .....	222
10.3	集电线路防雷设计实例 .....	231
10.3.1	计算模型的建立 .....	231
10.3.2	风电场集电线路雷击事故实例分析 .....	233
10.3.3	集电线路防雷措施的改进 .....	235
10.4	海上升压站平台的雷电防护与接地 .....	235
10.4.1	升压站的结构分层 .....	235
10.4.2	直击雷防护设计 .....	236
10.4.3	感应雷防护设计 .....	236
10.4.4	接地设计 .....	237
	参考文献 .....	237

# 第 1 章 雷电放电与雷电参数

本章系统地介绍了雷电产生的大气条件、雷云中的电结构以及关于雷云起电机制的各种假说，并对雷电的类型以及雷电过程进行了描述，使读者对于雷电有一定的了解。

## 1.1 雷电的形成机制

### 1.1.1 积雨云、雷雨云的电结构

天空中的云千变万化、千姿百态、形形色色。气象学根据云的结构特点、外形特征和云底高度，把云分成 20 多种。云在不同天气系统演变过程中形成，不仅代表着当时的天气状况，也预示着未来天气的变化。大量观测及研究也显示雷电的形成与云有着密不可分的关系。因此在研究雷电的进程中，对云的研究尤其是积雨云的研究便显得尤为重要。

#### 1. 云的分类

大气中的云可以分为很多种，在气象学中，按地面观测（只能观测到云底）可将云分成高云、中云、低云，按云的稳定性可分成层状云和直展（对流）云。具体情况见表 1-1。

表 1-1 云 的 类 型

类型	垂直分类	成 分	特 点
卷云	高云	冰晶	白色狭条状，细丝或碎片状，具有纤维或柔丝般光泽的外形或两者兼有
卷积云	高云	冰晶	由白色颗粒状或波纹状等很小的单元组成，排列有规律
卷层云	高云	冰晶	具有细微结构的淡白色的云幕，均匀地覆盖大部分天空
高积云	中云	水滴	白色或灰色的云层，云的小单体排列较有规律，有明显的轮廓
高层云	中云	水滴	淡灰色或淡蓝色云层，具有均匀或纤维的外形，覆盖大部分天空
雨层云	低云	水滴	灰色厚云层，很暗，有雨或雪
层积云	低云	水滴	灰色或灰白色云层，带有暗黑部分，有规律地排列
层云	低云	水滴	灰色云层，云底很均匀，有时有毛毛雨或米雪
积云	直展云	水滴	离散云体，浓密轮廓清楚，垂直方向发展，产生阵性降水
积雨云	直展云	顶部冰晶，中下部水滴	云浓而厚，垂直发展强烈，有闪电雷暴，顶部出现云砧或羽毛状

由表 1-1 中不同云的特点可以看出，并不是所有的云都会带来雷暴和闪电。能够带来雷电的主要是积雨云，也可称为雷雨云。

## 2. 雷雨云的形成及发展

直击雷和感应雷都与带电的云层有关，带电的云层称为雷雨云。有关雷雨云形成的假说很多，但至今尚未有一种被认为无懈可击的完整学说。本章介绍其中被认为比较完善并经常被推荐的假说。由于大气的剧烈运动引起静电摩擦和其他电离作用，云团内部产生了大量的带正、负电荷的带电离子。在空间电场力的作用下，这些带电离子定向垂直移动，使云团上部积累正电荷，下部积累负电荷（或者相反），云团内产生分层电荷，形成产生雷电的雷雨云。雷雨云的成因主要来自大气的运动。当雷雨云在天空移动时，在其下方的地面上会静电感应出一个带相反电荷的地面阴影，如图 1-1 所示。

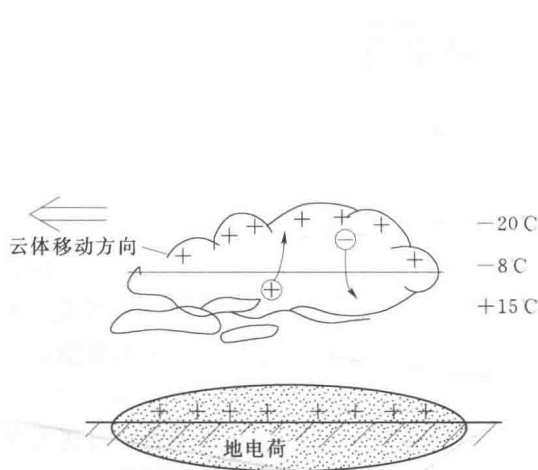


图 1-1 雷雨云带电图

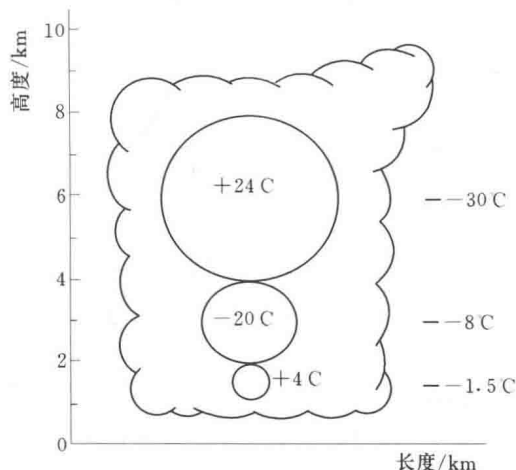


图 1-2 雷雨云中的电结构

雷暴出现会带来强降水、大风、光、强电场和强电流、雷、声、电磁脉冲辐射、天电、无线电噪声等。一方面，它可以造成洪涝灾害；另一方面，也会形成强电流强电场造成人类生命财产的损失，因此对雷暴的研究和分析有重要意义。

## 3. 雷雨云中的电结构

大量研究显示，雷雨云上部为正电荷区，下部为负电荷区，具有正的双极性分布，所以一般用偶极性电荷分布来描述雷雨云内主电荷结构。但它的实际电荷分布却要比这种简单模式复杂得多。雷雨云中的电结构如图 1-2 所示。

雷雨云中的电偶极子分布模式：雷雨云上部为中心高度 6km、半径 2km、含正电 24C 的区域，下部为中心高度 3km、半径 1km、含负电 20C 的区域，云底附近有一个中心高度 1.5km、半径 0.5km、含正电 4C 的区域（常称为正电荷中心）。

根据观测结果，雷雨云中的电结构除上述电偶极子分布外，还有很多其他的特征，雷雨云的电荷分布较晴天大气电荷的分布要复杂得多。

越来越多的研究表明，实际雷雨云中的电结构远比上述垂直分布的偶极型或三极性电荷结构复杂得多，除了主正、负电荷区和底部的小的正电荷区外，电荷结构也会发生倾斜，也可能呈现多层正负极性电荷层互相交替的结构，也会有反极性的电荷结构出现，而且不同极性的电荷也可能出现在同一高度。即使在同一纬度，不同地区、不同季节、不同的环流形式及不同扰动温度形成的雷雨云也各不相同。模式研究是与实际观测相互补充的



一项重要研究手段。

假定云内正负电荷分别集中分布在某一高度上,且上方为正电荷,下方为负电荷。如果把大地看成是一平面导体,从物理上分析,在点电荷  $Q$  的电场作用下,导体板上出现感应电荷分布。若  $Q$  为正的,则感应电荷为负的;若  $Q$  为负的,则感应电荷为正的。空间中的电场是由给定的点电荷  $Q$  以及导体面上的感应电荷共同激发的。利用镜像法,测站点处地面电场  $E$  为

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{2Q_P H_P}{(D_P^2 + H_P^2)^{3/2}} - \frac{2Q_N H_N}{(D_N^2 + H_N^2)^{3/2}} \right] \quad (1-1)$$

式中  $Q_P$ 、 $Q_N$ ——正、负电荷中心的电量;

$H_P$ 、 $H_N$ ——正、负电荷中心高度;

$D_P$ 、 $D_N$ ——测站点与云中正、负电荷中心在地面的投影点之间的距离。

### 1.1.2 积雨云的起电机制

在积雨云内,由云中粒子间相互作用起电称为微观起电;而由云内大尺度上升气流使云不同部位和不同极性的电荷的起电机制称为宏观起电机制。目前关于云内的起电理论有几十种,但没有哪一种理论能完善解释所有云荷电的实际观测结果。典型的雷雨云起电主要有感应起电、温差起电、大云滴破碎起电、对流起电等理论,但是这些理论难以用实际的观测证明其正确性。关于积雨云电荷的产生原因有很多学说,可以由感应起电、温差起电和破碎起电等进行解释。

#### 1.1.2.1 感应起电

当云中存在固态或液态水滴时,感应起电十分重要。大量科学研究表明,地球本身就是一个电容器,通常稳定地携带 50 万 C 的负电荷,而地球上空有一个带正电的电离层,这样就形成了一个已经充电的电容器,它们之间的电压大约为 300kV,上正下负。

降水粒子(大粒子)和云粒子(小粒子)受到外电场的作用而极化,由于降水粒子远大于云粒子,降水粒子向下运动,云粒子向上运动。它们相遇发生碰撞时交换电量。如果电场垂直向下,则粒子上半部极化为负电,下半部极化为正电。当它们接触时,降水粒子正电荷与云粒子负电荷相交换,最后导致降水粒子带负电,云粒子带正电。根据重力分离机制,荷正电的云粒子向云的上部运动,荷负电的降水粒子向云的下部运动,从而形成云中上部为正,下部为负的电荷中心。

积雨云的感应起电机制如图 1-3 所示。

#### 1.1.2.2 温差起电

夏季经常可观测到在积雨云的顶部的卷云处有电晕现象,这与该处的冰晶和温度有关。

##### 1. 温差起电原理

在强对流天气系统中,水打在冰面上而未完全冻结时,所形成的冰淞层带有相当多的负电荷,研究表明,结淞起电决定于垂直冰块表面的温度梯度,单个水滴冻结后,水滴表面会长出一些冰刺而脱落,有时水滴还会破裂,脱落下一些冰屑。

在冰刺或水滴破裂时,较大的残块常常带负电荷,每滴破碎后分离的电量在  $(-3.67 \sim$



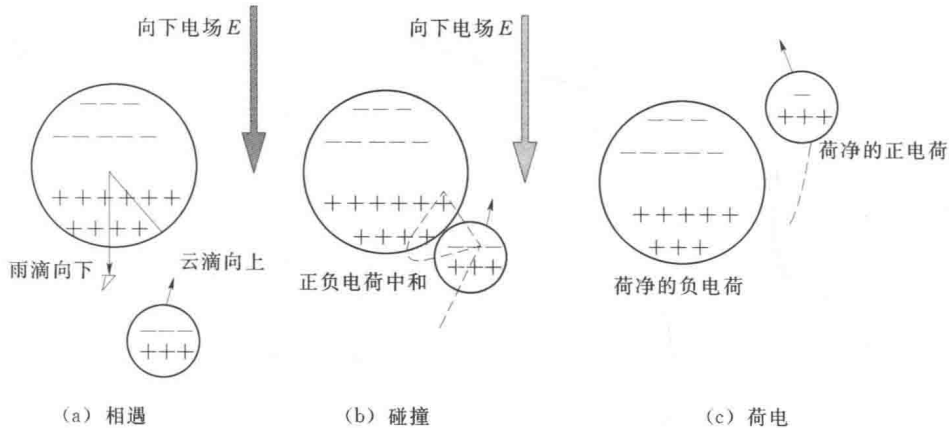


图 1-3 感应起电机理

$-400) \times 10^{-14} \text{C}$ , 平均为  $-2.87 \times 10^{-13} \text{C}$ 。冻结的起电原因如下:

(1) 冰中有一小部分的分子处于电离状态, 形成较轻的  $\text{H}^+$  和较重的羟基  $\text{OH}^-$  离子, 并且其浓度随温度升高而很快增加, 温度高(热)的地方离子浓度大, 温度低(冷)的地方离子浓度低。

(2)  $\text{H}^+$  离子的扩散系数和迁移率比  $\text{OH}^-$  离子要大 10 倍以上。因此当冰中有温度梯度时, 将出现离子浓度梯度。由于热端起初具有较多的正、负离子, 而后沿此浓度梯度,  $\text{H}^+$  离子扩散得快, 导致正负离子分离, 使冷端获得净正电荷电量, 而热的一端为净的负电荷, 冰中体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, 冰内建立了稳定的电位差。

温差起电原理如图 1-4 所示。

## 2. 雹块与冰晶摩擦温差起电机理

对于摩擦温差起电, 雹粒系雹胚碰冻云中过冷水滴增长而成, 表面较为粗糙, 在它降落过程中, 云中的冰晶与它碰撞摩擦增温。摩擦时雹粒的粗糙表面只有少量突出部分与冰晶接触, 这些少量突出部分升温较高, 加上雹粒含有气泡, 而空气的导热率小于冰的导热率, 不利于这些突出部分的温度因热传导而下降。反之冰晶表面较为细密而光滑, 以较大面积与雹粒突出部分接触, 摩擦增温面积大, 则单位面积增温小。因而由于冰的热电效应, 温度较高的雹粒带负电荷, 温度较低的冰晶带正电荷。由于云中重力分离作用, 带正电荷的冰晶随气流上升至云体上部, 而带负电荷的雹粒因重力沉降于云下部, 形成云体上部为正电荷区, 云体下部为负电荷区。

## 3. 碰冻温差起电机理

较大过冷云滴与雹粒碰撞时, 一般因冰核化而引起冻结, 云滴表面形成一层冰壳, 同时释放冻结潜热, 使过冷云滴内部增温; 随后, 当过冷云滴内部亦冻结时释放潜热, 形成冻滴内部热外部冷的径向温度梯度。由于冰的热电效应, 使冻滴外壳带正电荷, 内部携带负电荷。在过冷云沿着内部冻结的时候, 膨胀作用使冰壳破裂, 于是冻滴表面飞离的冰屑携带正电荷, 冻滴核心部分携带负电荷。在正、负电荷的重力分离过程中, 携带正电荷的冰屑随上升气流到达云体上部, 而携带负电荷的雹粒因重力下沉到云的下部。