

雷电放电数值模拟 与主动防护

魏光辉 万浩江 潘晓东 著



科学出版社

雷电放电数值模拟与主动防护

魏光辉 万浩江 潘晓东 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统地阐述了雷电先导放电的数值模拟和直击雷防护方法。重点阐述了雷暴云的荷电模型及其量子反演、雷电先导放电的分形模拟方法、局域屏蔽主动式直击雷防护方法和直击雷防护装置防护效能的数值评估方法。

全书共分7章。第1章、第2章讲述雷暴云起电、荷电的基础知识,并着重介绍基于地面电场监测数据的雷云荷电模型量子反演方法;第3章讲述闪电现象及其物理特性;第4章讲述雷电先导放电的三维数值模拟方法;第5章、第6章讲述直击雷防护方法,特别是基于静电场屏蔽与对消原理的主动防雷方法;第7章讲述直击雷防护装置的防护效能评估方法。

本书全面介绍了作者在雷电放电数值模拟与主动防护领域的最新研究进展,可为雷电防护技术研究人员提供相关研究方法和基础理论,也可作为雷电防护方面的研究生专业教材和相关专业科研人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

雷电放电数值模拟与主动防护/魏光辉,万浩江,潘晓东著. —北京:科学出版社,2014.3

ISBN 978-7-03-040022-2

I. 雷… II. ①魏…②万…③潘… III. ①雷-放电-数值模拟②防雷 IV. ①P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 042981 号

责任编辑:潘斯斯 于海云/责任校对:郑金红

责任印制:闫磊/封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2014年3月第一次印刷 印张:12

字数:241 000

定价:54.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

闪电,俗称雷电,是雷暴云在能量释放过程中的一种超强、超长放电现象,具有发生频率高、破坏能力强、危害范围广、防护难度大等特点。据统计,整个地球表面任意时刻都有 2000 多个雷暴正在发生,每天发生的雷暴可达约 45000 个,平均每秒钟的地闪就有 30~100 次。近年来,全球每年因雷击导致的人畜伤亡事件逐年增多,造成的经济损失达 10 亿美元以上,其危害范围已经涉及电力电子、航空航天、金融证券、国防军工和人身安全等各个社会领域,由雷电造成的灾害已被联合国有关部门列为“最为严重的十大自然灾害之一”,在我国是危害程度仅次于暴雨洪涝、气象地质灾害的第三大气象灾害。

人类对雷电现象的科学研究已经有 250 多年的历史,涉及的研究内容已由起初的直击雷扩展至雷电磁脉冲及其次生效应,国内在这方面的研究虽然开展较晚,但也是奋起直追,取得了许多可喜的成果。但是,迄今为止,雷电物理学体系仍然很不完善,尤其是直击雷,在其发生、发展以及防护方面仍然存在着众多未知的领域等待着人类去探索。例如,雷暴云的各种起放电模式虽然都能解释一部分雷云荷电及先导发展特征,但没有一种模式能将所有已知观测特征兼容并收;直击雷防理论与技术虽然百花齐放、百家争鸣,但除了传统避雷针系统之外,真正大规模投入使用的却寥寥无几,而避雷针又具有概率防护和容易引来雷电磁脉冲灾害的固有缺陷。要打破这种局面,进一步发展雷电科学与防护技术,就必须对雷电发展的物理机制、传播规律及其防理论有充分的认识。

本书以雷暴云的起电、荷电、放电,以及防护、效能评估为主线,在借鉴吸收国内外雷电模拟与防护最新研究成果的基础上,系统阐述了雷暴云的起电机制、雷暴云荷电结构与建模、雷电先导放电数值模拟、直击雷防护方法与防护效能评估方法。结合防雷工程实际,重点讲述了局域屏蔽主动式直击雷防护方法和直击雷防护装置防护效能的数值评估方法。本书对优化各种建筑物和野外设备的防雷设计具有重要的参考价值,对开展雷电模拟、探测与防护等问题研究也具有重要的学术价值。

本书是作者主持的武器装备探索研究重大项目“装备主动防雷击技术研究”取得的理论研究成果的集中体现,是在作者及其指导的博士、硕士研究生多年从事雷电理论与防护相关课题研究的基础上,对所完成的研究报告、学位论文经过进一步的修改、补充而成的。第 1 章、第 2 章讲述雷暴云起电、荷电的基础知识,并着重介绍基于地面电场监测数据的雷云荷电模型量子反演方法;第 3 章讲述闪电现象及

其物理特性;第4章讲述雷电先导放电的三维数值模拟方法;第5章、第6章讲述直击雷防护方法,特别是基于静电场屏蔽与对消原理的主动防雷方法;第7章讲述直击雷防护装置的防护效能评估方法。

全书由魏光辉提出编著纲目并执笔撰写,万浩江提供了第3~7章的部分初稿,潘晓东提供了第1、2、6章的部分初稿,作者的研究生们也提供了部分素材。

限于作者水平和写作经验不足,书中难免存在疏漏和欠妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2013年8月于石家庄

目 录

前言

第 1 章 雷暴云	1
1.1 大气电学基础	1
1.1.1 晴天大气电场	1
1.1.2 云雾、雷电与降水的电场特征	6
1.1.3 全球电路概念	8
1.2 雷暴云的发展与分类	10
1.2.1 雷暴的形成与发展	10
1.2.2 雷暴云的分类	12
1.3 雷暴云的起电机制	12
1.3.1 雷暴云起电机制的评判依据	13
1.3.2 感应起电机制	14
1.3.3 温差起电机制	17
1.3.4 破碎起电机制	19
1.3.5 对流起电机制	21
第 2 章 雷云荷电模型及其结构参数反演	23
2.1 经典偶极子类模型	23
2.1.1 偶极子模型	23
2.1.2 正偶极/三极模型	25
2.1.3 关于云顶屏蔽层的讨论	26
2.2 带电圆盘模型	27
2.3 雷云元线性加权模型	31
2.4 基于量子形态滤波器的地面电场监测数据降噪预处理	33
2.4.1 量子信息学相关概念	33
2.4.2 数学形态学基本原理	35
2.4.3 量子形态滤波器	36
2.4.4 仿真测试	37
2.4.5 雷云地面电场监测信号降噪	40
2.5 雷云荷电模型的量子反演	42
2.5.1 反演模型	42

2.5.2 量子反演算法	43
2.5.3 反演实验	47
第3章 闪电现象	51
3.1 云体击穿机制	51
3.1.1 长间隙放电理论	51
3.1.2 尖端放电机制	56
3.1.3 逃逸击穿机制	58
3.1.4 关于击穿相变的讨论	61
3.2 闪电的分类	66
3.2.1 按照闪电的表现形状分类	66
3.2.2 按照闪电的空间位置分类	68
3.3 地闪的物理特征	71
3.3.1 地闪的结构	71
3.3.2 下行负地闪过程	73
3.3.3 其他类型地闪的一些特性	76
3.4 下行梯级先导的通道特性	77
3.4.1 梯级先导通道的轴向电场	77
3.4.2 梯级先导通道内的电荷分布	79
第4章 雷电先导放电的数值模拟	82
4.1 分形	82
4.1.1 自相似性和标度不变性	82
4.1.2 分形维数	84
4.1.3 分形维数的计算	87
4.1.4 雷电放电图像的分形特征	88
4.2 基于分形理论的雷电先导放电三维数值模拟方法	89
4.2.1 空间电势分布的计算	89
4.2.2 电介质击穿模型及其改进	90
4.2.3 地闪先导放电数值模拟算法的流程	92
4.2.4 关于分形边界上 Dirichlet 问题的讨论	94
4.2.5 数值模拟实验	96
4.3 介质击穿模型参数对分形模拟结果的影响	98
4.3.1 模拟结果的评价参数	98
4.3.2 概率指数对模拟结果的影响	99
4.3.3 通道内电场对模拟结果的影响	102
4.3.4 电场击穿阈值对模拟结果的影响	103

第 5 章 直击雷防护方法概述	106
5.1 基于引雷思想的直击雷防护方法	106
5.1.1 传统避雷针系统	106
5.1.2 提前流光发射装置	110
5.1.3 人工引雷技术	112
5.2 基于消雷思想的直击雷防护方法	116
5.2.1 地面消雷器	116
5.2.2 云中消雷	119
5.3 基于主动防雷思想的直击雷防护方法	120
第 6 章 局域屏蔽防雷击方法	123
6.1 局域屏蔽防雷击的基本思想	123
6.1.1 雷击点的选择性	123
6.1.2 静电场屏蔽与对消	124
6.2 局域屏蔽防雷击系统的构成	127
6.2.1 防护系统的构成	127
6.2.2 雷电电场实时监测设备	128
6.2.3 双极性直流高压电源	132
6.3 局域屏蔽防雷击系统的工作流程	135
6.3.1 防护系统的工作流程设计	135
6.3.2 防护系统工作流程的可靠性检验	137
6.4 有源防护装置及其结构优化设计	141
6.4.1 有源防护装置的工作状态分析	141
6.4.2 防护电极静电场分析的有限元算法	143
6.4.3 防护电极形状对附近电场的影响	144
6.4.4 有源防护装置结构配置的优化方法	151
第 7 章 直击雷防护装置防护效能评估方法	159
7.1 传统的直击雷防护装置防护效能评估方法	159
7.1.1 标准中单根避雷针(线)保护范围的计算方法	159
7.1.2 野外人工引雷实验	163
7.1.3 实验室缩比模型实验	164
7.2 直击雷防护装置防护效能数值评估方法	166
7.2.1 评估区域的建模方法	166
7.2.2 试验设置与雷击点的确定原则	167
7.2.3 评估算法的流程	169
7.3 单根避雷针系统的数值评估试验	169

7.3.1	接闪概率指数的标定	169
7.3.2	评估试验的雷电背景环境	171
7.3.3	数值评估结果及讨论	172
7.4	局域屏蔽防雷击系统的数值评估试验	174
7.4.1	局域屏蔽防雷击系统的评估试验设置	174
7.4.2	数值评估结果及讨论	174
7.4.3	有源防护装置的改进措施	176
参考文献		181

第1章 雷 暴 云

闪电,俗称雷电,是雷暴云能量释放过程中的一种超强、超长放电现象,伴随雷电会有声、光、电等多种物理现象发生。世界上发现最早的雷击记录出自于我国的《周易》。《震》卦云:“震:亨。震来虩虩,笑言哑哑。震惊百里,不丧匕鬯。初九:震来虩虩,笑言哑哑,吉。六二:震来厉,亿丧贝。跻于九陵,勿逐,七日得。六三:震苏苏,震行无眚。九四:震遂泥。六五:震往来厉,亿无丧,有事。上六:震索索,视矍矍,征凶。震不于其躬,于其邻。无咎。婚媾有言。”《周易》记载的这段卦(爻)辞,反映了我国上古先民对雷电现象的朴素认识,辞中交织着对自然的敬畏与崇拜。在其影响下,古代学者开始了对雷电现象观察分析并对其物理本质进行思辨性解释的漫长征途。至《庄子》所述:“阴阳分争故为电,阴阳交争故为雷,阴阳错行,天地大骇,于是有雷、有霆。”其思想已与现代雷电学原理颇为相似。及《论衡》针对“雷者火也”的五验,则在雷电研究中始开科学观察与对比分析相结合之先河。然这些成就虽早于近代西方雷电物理学萌芽千余年,并在以后的时间中得到了丰富与发展,终究只是浮于思辨和经验总结,未能与实验相结合并最终上升至科学理论,可惜之余发人深省。1752年,Franklin发明实用的雷电防护装置——避雷针,并通过实验手段证明了雷云荷电,而云地闪电则是一种超长间隙空气放电现象,标志着近代雷电物理学的诞生。之后的二百多年,这个学科经历了飞速发展,研究手段从早期的自然观测、经验建模到当下的主动探测、理论建模、数值模拟、实验室放电模拟以及大规模野外引雷实验相结合,不断完善;研究内容则扩展至云内微物理过程发展规律、雷云起电机制与荷电结构特征、雷电起始条件与先导发展规律、雷电回击过程与其电磁辐射特征以及雷电与环境的相互作用等诸多方向,使人类对雷电物理本质建立起了一个比较清晰的图像。在系统地研究雷电放电及其防护技术之前,本章将首先就大气电学的基础以及雷电发展的源头——雷暴云进行简要介绍。

1.1 大气电学基础

1.1.1 晴天大气电场

晴天大气电场是晴天大气中始终存在的一个基本大气电现象。大量观测表明,晴天大气中始终存在着方向垂直向下的电场。这意味着通常情况下大气带正电荷,而地球带负电荷,大气和地球带异性电荷是大气电场形成的主要原因。然

而,晴天大气电场的存在又将产生晴天大气传导电流,并不断中和大气和大地所携带的电荷,从而使晴天大气电场逐渐减弱。此外,云中大气电过程所产生的带电降水将形成降水电流,其效果也是不断中和大气和大地所携带的电荷。因此,要维持恒定的晴天大气电场,就必然还存在一些其他的大气电过程,以补偿大气和大地因晴天大气电流和降水电流不断中和的电荷。维持恒定晴天大气电场的大气电过程主要是雷暴大气电过程,即雷暴天气条件下产生的云地闪电过程以及云体下方地物和植物的尖端放电过程。这些大气电过程所形成的闪电电流和尖端放电电流,将增加大气和大地所携带的异性电荷。当大气和大地的带电过程与电荷中和过程达到平衡时,便能形成恒定的晴天大气电场。此处作出规定,对于涉及大气电场的具体数值,采用大气电场垂直向下为正方向。

1. 晴天大气电导率

大气中正负离子的存在使得大气具有微弱的导电性,可定义大气离子在单位电场作用下运动所产生的电流密度为大气电导率,单位为 $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$,其大小主要由大气离子电荷、大气离子密度和大气离子迁移率决定。晴天大气电导率由大气正极性电导率和大气负极性电导率两部分组成。大气正极性电导率取决于大气正离子,大气负极性电导率取决于大气负离子。若大气正极性电导率表示为 σ_+ ,大气负极性电导率表示为 σ_- ,则大气总电导率 σ 可表示为

$$\sigma = \sigma_+ + \sigma_- \quad (1-1)$$

且有

$$\begin{cases} \sigma_+ = \int_0^{\infty} e k_+ B_+(k_+) dk_+ \\ \sigma_- = \int_0^{\infty} e k_- B_-(k_-) dk_- \end{cases} \quad (1-2)$$

式中: e 为电子电荷; k_+ 、 k_- 为大气正、负离子的迁移率; $B_+(k_+)$ 、 $B_-(k_-)$ 为大气正、负离子的谱分布函数。

如果将大气离子划分为大气轻离子和大气重离子两大类,则大气轻离子迁移率约比大气重离子迁移率大 2 个数量级,而大气轻离子浓度仅比大气重离子浓度小 1 个数量级左右。因此,大气电导率主要取决于大气轻离子。粗略地估计表明,大气轻离子对大气电导率的贡献可占大气轻、重离子对大气电导率总贡献的 95% 左右。

晴天大气电导率主要取决于晴天大气轻离子的浓度和迁移率,由于晴天大气轻离子浓度与大气气溶胶含量和大气电离率有关,所以晴天大气电导率也与大气气溶胶含量和大气电离率密切相关。低层大气电导率受气溶胶浓度(决定轻离子

密度)影响较大,二者呈反相关;在高层大气,由宇宙射线决定的大气电离率是大气电导率的主要影响因素,二者呈正相关。

2. 晴天大气体电荷

大气中不仅存在大气正、负离子,还存在带有正、负电荷的云雾降水等其他带电粒子,这些带电粒子在大气电场力、重力和大气对流等因素的作用下发生分离,从而使一定体积内的大气携带有净正电荷或净负电荷,称为大气体电荷。大气体电荷的状况可以用晴天大气体电荷密度 ρ_0 来描述,定义为单位体积大气所带的净电荷,单位为 $\text{C} \cdot \text{m}^{-3}$,其与晴天大气电场 $\mathbf{E}$ 的关系通过泊松方程定量描述

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_0 / \epsilon \quad (1-3)$$

式中: ϵ 为空气介电常数。根据晴天大气电场的空间分布,通过式(1-3)易得晴天大气体电荷密度 ρ_0 的空间分布,计算中常忽略 $\mathbf{E}$ 水平分量的影响,只考虑垂直电场的贡献。则高度为 z 处的晴天大气体电荷密度 $\rho_0(z)$ 即可表示为

$$\rho_0(z) = -\epsilon \frac{\partial E_z(z)}{\partial z} = \epsilon \frac{\partial^2 \varphi(z)}{\partial z^2} \quad (1-4)$$

式中: $E_z(z)$ 为大气电场的垂直分量; $\varphi(z)$ 为大气电位。

观测表明,全球表面晴天大气体电荷密度的平均值约为 $10^{-11} \text{C} \cdot \text{m}^{-3}$,各地地面或海面晴天大气体电荷密度的常见值为 $-2 \times 10^{-11} \sim 2 \times 10^{-11} \text{C} \cdot \text{m}^{-3}$,其绝对值的变化范围可达 1 个数量级左右。

晴天大气体电荷密度具有明显的时、空分布特征,它随高度的分布因时、因地而异。晴天大气体电荷密度随高度的分布往往是根据晴天大气电场随高度分布的观测结果,利用大气体电荷密度与大气电场的关系式(1-3)求取的。通常情况下,晴天大气体电荷密度 ρ_0 具有随高度单调递减的分布特征。但是,在实际中,由于受到逆温和湍流等气象因素的影响,晴天大气体电荷的实际分布相对比较复杂。

晴天大气体电荷密度除随地点和高度变化外,还具有明显的日变化和年变化。贴近地层大气中的晴天大气体电荷密度的日变化,与大气气溶胶含量等大气要素的日变化有关;晴天大气体电荷密度年变化的变化规律亦因地而异,它与局地条件和天气状况密切相关。晴天大气体电荷密度日变化和年变化的变化规律比较复杂,不同地点和时间的观测结果往往会有很大差异,甚至出现反常。

3. 晴天大气电流

大气中正负电荷的输送形成了大气电流。它主要包括晴天大气离子在晴天大气电场作用下运动所形成的大气传导电流、晴天大气体电荷随气流移动所形成的

大气对流电流、晴天大气体电荷因湍流扩散输送而形成的大气扩散电流以及大气电场变化所形成的大气位移电流四部分。将上述四种大气电流的密度矢量分别用 J_c 、 J_w 、 J_t 、 J_d 表示,则晴天大气电流密度矢量 J 可表示为

$$J = J_c + J_w + J_t + J_d \quad (1-5)$$

根据欧姆定律,晴天大气传导电流密度 J_c 与晴天大气电场 E 之间满足

$$J_c = \sigma E \quad (1-6)$$

假设气流移动的平均速度矢量为 v_w ,则晴天大气对流电流密度 J_w 可表示为

$$J_w = \rho_0 v_w \quad (1-7)$$

由于晴天大气体电荷 ρ_0 在大气中的分布是不均匀的,若假设 k_t 为大气湍流扩散系数,则因大气湍流扩散输送而形成晴天大气扩散电流 J_t 可表示为

$$J_t = -k_t \nabla \rho_0 \quad (1-8)$$

通常情况下,晴天大气体电荷密度在水平方向的变化较小,而在垂直方向的变化较大,因此晴天大气扩散电流密度以垂直分量为主。

当大气电场 E 发生变化时,会产生大气位移电流,其电流密度矢量 J_d 可表示为

$$J_d = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1-9)$$

观测结果表明,行星边界层之上传导电流占绝对优势;低层大气传导电流、对流电流与扩散电流强度相当,约为 $10^{-12} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

晴天大气电流密度随地点、季节而变,海洋上变化较小、陆地上变化较显著。此外,晴天大气电流每天还会发生脉动变化,可能会出现一至两个峰值。

4. 晴天大气电场的时空变化特征

晴天大气电场除了受地球带电量的影响外,还与空间电荷分布有关。大量观测结果表明,晴天大气电场因时、因地而异。具体表现如下。

(1) 海陆差异巨大。海洋由于下垫面条件相似,不同地区大气电场差异很小,其变化规律多与全球性影响机制有关,沿纬度从低到高则有先增大后减小的明显趋势;陆地由于环境条件变化复杂,局地条件差别较大,不同地区大气电场差异很大。例如,人口密集的城镇或工业区的电场强度一般要比郊野或乡村地区的电场强度高。也正是因为此,陆地晴天大气电场随纬度的变化规律反而不如海洋明显。典型的海陆晴天大气电场强度见表 1-1。

表 1-1 典型的海陆晴天大气电场强度

地域 \ 大气电场	平均值/($V \cdot m^{-1}$)	典型值/($V \cdot m^{-1}$)	变化范围/($V \cdot m^{-1}$)
陆地	115	80~150	19~310
海洋	130	90~150	50~250
全球	130	100~150	19~310

(2) 随高度变化复杂。一般自由大气中的电场随高度近似呈指数衰减趋势,但由于气象与地理条件的影响,其实际变化规律相当复杂。即使在同一时刻,晴天大气电场在不同高度范围内随高度的分布规律也不尽相同。在贴近地面的大气层中,晴天大气电场会受大地电极效应的影响,使贴近地面的一薄层大气中积聚大量的正电荷,且其体电荷密度在该气层中分布很不均匀,具有随高度增加而急剧递减的变化特征,从而在该气层中形成较强的大气电场和大气电场梯度。至于边界层大气,由于逆温和湍流等气象因素的影响,晴天大气电场随高度往往呈不规则分布。根据苏联在 1958~1959 年的 425 次晴天大气电场随高度分布的飞机观测结果,除个别情况外,可将晴天大气电场随高度的分布规律归纳为以下 4 类。第一类:晴天大气电场随高度单调递增,其数值始终为正;第二类:晴天大气电场随高度单调递减,其数值在低层大气为正,高度上升至 3~4km 以上后其数值为零或负;第三类:晴天大气电场先随高度递增,其值为正,上升到一定高度后又随高度单调递减;第四类:晴天大气电场随高度的变化较小,其值为正。上述 4 类晴天大气电场随高度变化的分布规律在实际观测中所占的比例如图 1-1 所示。

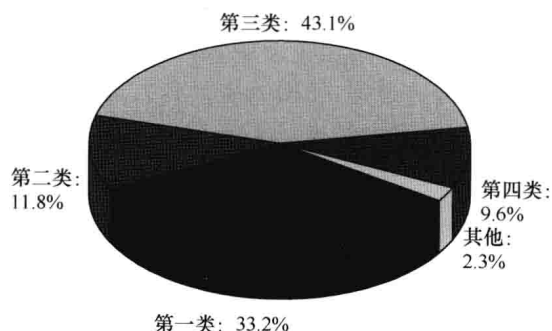


图 1-1 大气电场随高度变化呈现不同分布规律的比例

(3) 随时间变化明显。晴天大气电场具有明显的日变化与年变化特征,还存

在周期几分钟至十几分钟的脉动起伏变化,且太阳活动也可能对晴天大气电场的时间变化特征产生影响。

晴天大气电场的日变化是全球雷电活动和局地气象条件共同作用的结果。大陆上地面晴天大气电场的日变化主要受局地大气电导率和大气体电荷密度等气象条件日变化的影响,海洋上海面晴天大气电场日变化则主要受全球雷暴活动日变化的影响。晴天大气电场的日变化因地、因季节、因高度而异,有时只有单峰、单谷,有时则具有双峰、双谷。

晴天大气电场的年变化规律因地而异。地面和海面晴天大气电场的年变化波形一般具有单峰、单谷。平均而言,大陆、海洋和两极地区的地面和海面晴天大气电场年变化的均值多出现在北半球的冬季,而谷值多出现在北半球的夏季。

(4) 与气象条件关系密切。气象条件对晴天大气电场的影响往往是间接影响的结果,它们之间的关系往往是通过其他大气电学量建立起来的。例如:由于晴天大气电场与晴天大气电导率之间呈负相关,则对晴天大气电导率产生影响的气象条件都将间接影响晴天大气电场。尤其是大气中气溶胶含量将直接影响晴天大气电导率。若晴天大气中气溶胶含量减小,则大气轻离子浓度增大,导致晴天大气电导率增大,从而使晴天大气电场减小。反之,若晴天大气中气溶胶含量增大,则大气轻离子浓度减小,导致晴天大气电导率减小,最后使晴天大气电场增大。因此,晴天大气电场与气溶胶含量呈正相关。另外,晴天大气电场还与水汽和温度等气象因素有关。大量的观察结果表明,地面晴天大气电场与地面水气压的日变化规律、以及晴天大气电场随高度的分布与气温廓线均基本一致,它们之间亦呈正相关。

1.1.2 云雾、雷电与降水的电场特征

1. 云中大气电结构

云雾主要由冰相粒子与小水滴构成,是中低层大气的重要天气现象,而其中的积雨云(雷云)更是孕育雷电的母体,由于云中云粒子和降水粒子的各种起电过程,以及云中正、负电荷的重力分离过程,使得云中具有大量尺度为几十米至上千米的正、负电荷区,从而表现出与晴天大气电场迥异的电结构。通常,以云中大气体电荷和大气电场的分布来表征云中的大气电结构。

积雨云中的电荷分布较为复杂,大多数观测结果显示在积雨云的上部主要荷正电,下部主要荷负电,云中电荷分布基本为正双极性电荷分布。通常情况下,负电荷常常集中在 $-10\sim-20^{\circ}\text{C}$ 高度之间,正电荷在其上数千米处。此外,还观测到在积雨云的云底附近存在一个或几个局部次级正电荷区,这些较弱的正电荷区多与大雨过程密切相关。图 1-2 为根据在 New Mexico 的实际观测结果推算得到的一个孤立的雷暴云内的电荷分布情况。当然,对于个别积雨云中的电荷分布情况,有时会与上述电荷分布模式存在一定差异,甚至出现反常现象。

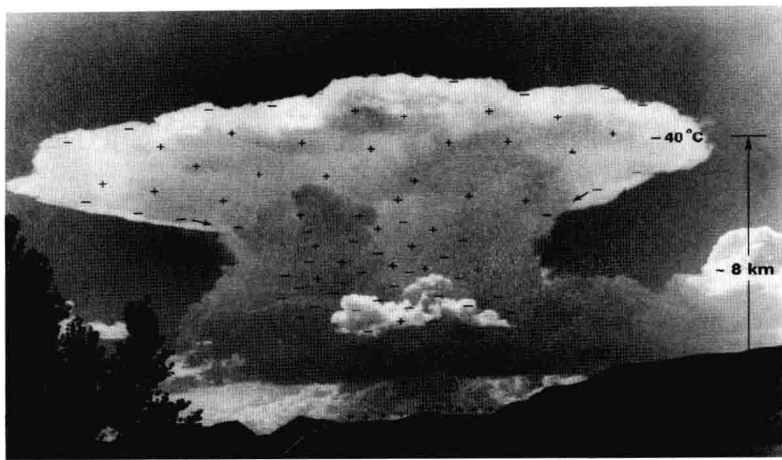


图 1-2 New Mexico 根据观测推算的一个孤立雷暴云内的电荷分布情况(Krehbiel,1986)

在大块积雨云中,电荷的产生和分离发生在 $-5\sim-40^{\circ}\text{C}$ 高度为界的区域内,半径大约为 2km。积雨云中的平均体电荷密度的绝对值为 $0.3\sim 3\text{nC}\cdot\text{m}^{-3}$,云中局部区域可能比平均值高出一至两个数量级。积雨云中大气体电荷密度的分布是不均匀的,其电荷分布尺度平均值的变化范围为 $100\text{m}\sim 1\text{km}$ 。积雨云大气电场强度平均值的变化范围在数十 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 到数百 $\text{kV}\cdot\text{m}^{-1}$ 数量级内,典型观测值见表 1-2。

表 1-2 积雨云大气电场强度典型值

观测者(年份)	典型值/ $(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	最大值/ $(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	观测方式
Evans(1969)		200	降落伞探空仪
Winn 等(1974)	50~80	200	火箭
Rust 和 Kasemir	150	300	飞机
Imyanitov 等(1972)	100	250	飞机
Fitzgerald(1976)	200~400	800	飞机
Kasemir 和 Perking(1978)	100	280	飞机
Winn 等(1981)		140	气球

2. 雷电对大气电场的影响

雷电,无论是云闪还是地闪,对云中积聚的电都能起到一个泄放的作用。雷电发生时,在云中或云地间的异性电荷区之间构建起一条高导电性的热等离子体通道,使异性电荷中和。从而形成负反馈限制了云中电场上限,对稳定大气电场具有重要作用。

3. 降水对大气电场的影响

降水粒子的下降的过程中,会在大气离子扩散起电机、选择吸附大气离子起电机和感应起电机等物理因素的作用下,带上不同大小和极性的电荷。降水粒子电荷的大小和极性,不仅取决于降水类型和强度以及云内微观条件和宏观条件等,还与云下大气的电状况密切相关。大量观测结果表明,降水粒子电荷绝对值约比云雾粒子电荷绝对值大5个数量级左右,各种类型降水的降水粒子电荷绝对值介于 $10^{-15} \sim 10^{-10} \text{C}$ 数量级之间,常见值则介于 $10^{-13} \sim 10^{-11} \text{C}$ 数量级之间。其中,连续性降水的降水粒子电荷绝对值偏低,而雷暴降水的降水粒子电荷绝对值偏高。

由于云中各种水成物粒子带有不同极性和数量的电荷,那么大量荷电降水离子在降水时就会形成一个相对稳定、方向垂直地面的降水电流,用降水粒子电流密度矢量来表示,单位为 $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。若取垂直向下为正方向,大量观测表明雷暴降水和持续降水电流密度多为正而阵发性降水电流密度则多为负。通常情况下,降水电流密度与地面大气电场往往以反相位随时间变化,呈现出类似于镜像效应的负相关性,这种相关性可能是二者相互影响制约的结果。当地面大气电场较弱时,降水电流密度和地面大气电场随时间变化的镜像效应,可能以降水电流密度对地面大气电场的影响为主。例如,若降水电流密度为正,降水电流将正电荷输送给大地,云中和云下大气中将携带负电荷,从而形成与降水电流密度方向相反的地面大气电场;当地面大气电场较强时,降水电流密度和地面大气电场随时间变化的镜像效应,可能以大气电场对降水电流密度的影响为主。例如,若地面大气电场为正,则降水粒子因极化而使其上半部荷负电,下半部荷正电。于是,降水粒子在云下大气降落过程中,将选择捕获大气负离子而荷负电,从而形成与地面大气电场方向相反的降水电流密度。此外,地面的尖端放电过程也会使得降水电流密度与地面大气电场随时间变化的镜像效应更为显著。

1.1.3 全球电路概念

如1.1.1节提到的,晴天大气中存在方向垂直地面向下的晴天大气电场,大气荷正电,地球荷等量的负电荷,由于大气离子的存在,大气有弱的导电性。于是,在