

防雷与接地 技术概论

FANGLEI YU JIEDI JISHU GAILUN

刘刚 邓春林 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

防雷与接地 技术概论

FANGLEI YU JIEDI JISHU GAILUN

刘 刚 邓春林 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

防雷与接地技术概论/刘刚, 邓春林编著. —广州: 华南理工大学出版社, 2011.6
ISBN 978-7-5623-3432-3

I. ①防… II. ①刘… ②邓… III. ①防雷 ②接地保护装置 IV. ①TM862

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 115898 号

总发行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048 (传真)

E-mail: scutc13@scut.edu.cn

<http://www.scutpress.com.cn>

策划编辑: 赖淑华

责任编辑: 何小敏

印刷者: 广东省农垦总局印刷厂

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 20.5 字数: 525 千

版次: 2011 年 6 月第 1 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1~5000 册

定价: 40.00 元

版权所有 盗版必究

序

雷电是一个古老而神秘的自然现象。1752年5月,法国的托马斯,佛朗索瓦和达利巴在巴黎北郊马尔利进行了垂直针与地绝缘的著名雷电试验,观测到4 cm长的火花,证明了雷电的电性质。同年6月,富兰克林进行了著名的风筝试验,也证明了雷就是电,为人类社会打开了电气时代的窗口。俄国工程师勃罗沃利斯基(1862—1919)制造出三相感应电机和变压器,并完成电能的远程传输以及在美国发明家贝尔(1847—1922)发明了电话以后,人类正式进入了电气化时代。雷电灾害的问题由过去的雷电直击地面上的人和物为主发展成为以通过金属导线传输的雷电波的危害为主。经过多年的研究,人们建立了雷电感应和高压反击的理论,弄清了高压雷电波在金属导线上的传输规律并于1890年发明了间隙串联熔断器的避雷器;1922年美国西屋公司制成了碳化硅避雷器;1972年日本制成了配电用无间隙氧化锌避雷器;1984年美国EFI公司首次推出模块化瞬态过电压浪涌抑制器(TVSS),在随后的几年里又相继推出正弦波跟踪技术(1985年)、多级混合并联技术(1986年)、热熔断技术(1988年)等。在防雷技术方面,先进的国家都制定了防雷规范,防雷纳入了国家技术管理和监督的范畴,使防雷科学技术得到了很大的发展,并已成为比较完整和有效的技术。

但随着现代社会的建筑、电力、通信、航空、航海、交通运输、林业、石油化工以及金融证券等各行业高速发展,特别是近年来微电子技术的广泛应用渗透到各个生产和生活领域中,由于人们对于雷电的机理认识不足和对防雷措施的使用不当而造成的雷电的灾害仍然广泛存在。

因雷电的产生危害形式是多种多样的,雷电侵入的渠道也是多种多样的,故雷电防护工程设计必须尽可能周密与合理。因此就防雷设计而言,它在技术上涉及气象、建筑、电力、通信等多方面专业知识,是一门新兴的综合性学科,对

设计人员的素质要求比较严谨。编著者以其执着的精神历经挫折,坚持不懈地从事有关防雷与接地的试验研究工作,广泛收集了大量国内外有关文献,终于编就本书。深信该书之出版,必将取得显著的社会效益。

编著者详尽地介绍了雷电产生的机理、雷电效益及灾害、雷电的探测原理及美国国家闪电监测网,进一步讲解了常用防雷装置、民用防雷技术、电子信息系统防雷技术、电力系统防雷技术,并从接地的原理上分析了接地技术的应用及各种电气环境下的接地,对电力运行、试验和维护部门的防雷专业人员,高等院校有关专业的大学生和研究生以及普通民众了解雷电的知识均有很好的指导作用。

杨然

前 言

雷电是最常见的自然现象之一,对人类的危害很大。雷电发生时可在千分之几秒到十分之几秒内产生几百千安的电流、几百千伏的电压、十亿到上千亿瓦的电能、上万度的高温、猛烈的冲击波、剧变的静电场和强烈的电磁辐射等物理效应,给人类造成多种危害。据统计,全球每年因雷电灾害而导致的经济损失约 100 亿美元,伤亡人数在 30000 人以上。

雷电也严重威胁电力系统的安全运行,是电力中断的头号环境因素。雷击线路造成跳闸事故,影响供电的可靠性;如果发电厂、变电所建在雷害发生频繁的地带,就很容易造成大面积停电,影响各行业的安全生产。据统计,在电力系统总的事故中,约 50% 是由雷击引起的,而造成这个局面的原因,很大程度上就是因为防雷措施的不当。

雷电对人类存在威胁的同时也存在有益的地方,它是全球电路中不可缺少的一环,因此,不能盲目地消灭雷电。逐步深入了解雷电过程,并由此开发各种有效的雷电防护技术是一项刻不容缓的任务。

接地作为应用最广泛的电气安全措施之一,对防雷而言至关重要,对各种电子电气设备的正常使用和保护更是不可缺少的,当然它同时也确保电力系统运行人员及其他人员的人身安全。

为了满足我国电力事业建设和运行的需要,加强公众的防雷意识,编写一本理论结合实际应用、全面系统、实用性较强的介绍雷电的基础及相应防护雷击方法的书,是作者的编写目的。

本书共分三篇十二章,第一篇为雷电基础篇,主要从雷电的形成、工程中的雷电模型、雷电效应及灾害和雷电探测技术方面,深层次解析雷电的产生原理及探测技术;第二篇为雷电防护篇,主讲防雷装置及其原理、民用防雷技术、电

子信息系统防雷、电力系统防雷等内容;第三篇为接地技术篇,主要介绍接地基础、接地系统、接地应用及接地检测技术等内容。

本书可供从事电力试验、运行和维护的专业防雷人员和管理人员使用,也可作为高等院校有关专业的大学生和研究生的参考书。初稿的文字编校工作得到了刘培媛、梁莉莉(第1、2、3章)、刘勇(第4、8章)、冯永坤(第5章)、董岩(第6、7章)、张孝顺(第9、12章)、高苏(第10、11章)等同志的大力帮助,在此表示感谢。

本书承蒙赖淑华编辑的认真审阅,审阅过程中提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一篇 雷电基础

第一章 雷电的形成	(3)
第一节 晴天大气电场	(3)
第二节 晴天大气电流	(6)
第三节 积雨云、雷雨云的电结构	(12)
第四节 积雨云的起电机制	(18)
第五节 闪电的类型	(22)
第六节 地闪的类型及其特性	(25)
第七节 闪电的形成机制	(29)
第八节 雷电的形成机制研究进展	(31)
第二章 工程中的雷电模型	(34)
第一节 工程界对雷电的描述	(34)
第二节 雷电放电的工程模型及计算	(36)
第三节 全球电路和地球与雷雨云之间的电荷输送	(37)
第三章 雷电效应及灾害	(42)
第一节 闪电对人体的生理效应	(42)
第二节 闪电的电动力效应	(45)
第三节 闪电的光辐射效应	(46)
第四节 闪电的冲击波效应	(47)
第五节 闪电的热效应和机械效应	(49)
第六节 闪电的静电感应效应	(50)
第七节 闪电的电磁场效应	(52)
第八节 闪电电流产生的高电压	(55)
第九节 雷电实例及分析	(57)
第四章 雷电探测技术	(68)
第一节 闪电的照相观测方法	(68)
第二节 大气电场和闪电电场的测量	(71)

第三节	雷电定位系统测量原理及测量数据	(79)
第四节	美国国家闪电监测网	(84)
第五节	卫星监测雷暴	(87)

第二篇 雷电防护

第五章	防雷装置及其原理	(95)
第一节	避雷针	(95)
第二节	避雷线	(102)
第三节	避雷带和避雷网	(107)
第四节	避雷器	(108)
第六章	民用防雷技术	(122)
第一节	人身防护及救援	(122)
第二节	建筑防雷	(131)
第三节	易燃易爆场所防雷	(137)
第四节	家用电器设备防雷	(141)
第五节	雷电预报与预警	(143)
第七章	电子信息系统防雷	(147)
第一节	信息网络系统的防雷	(147)
第二节	通信系统的防雷	(151)
第三节	智能建筑的防雷	(157)
第四节	微波站防雷	(159)
第五节	低压供电系统的防雷	(163)
第六节	计算机房的防雷	(165)
第七节	移动基站的防雷	(167)
第八章	电力系统防雷	(174)
第一节	输电线路防雷	(174)
第二节	发电厂与变电所防雷	(190)
第三节	雷电灾害风险评估	(210)
第四节	雷电灾害风险评估的参数研究	(213)

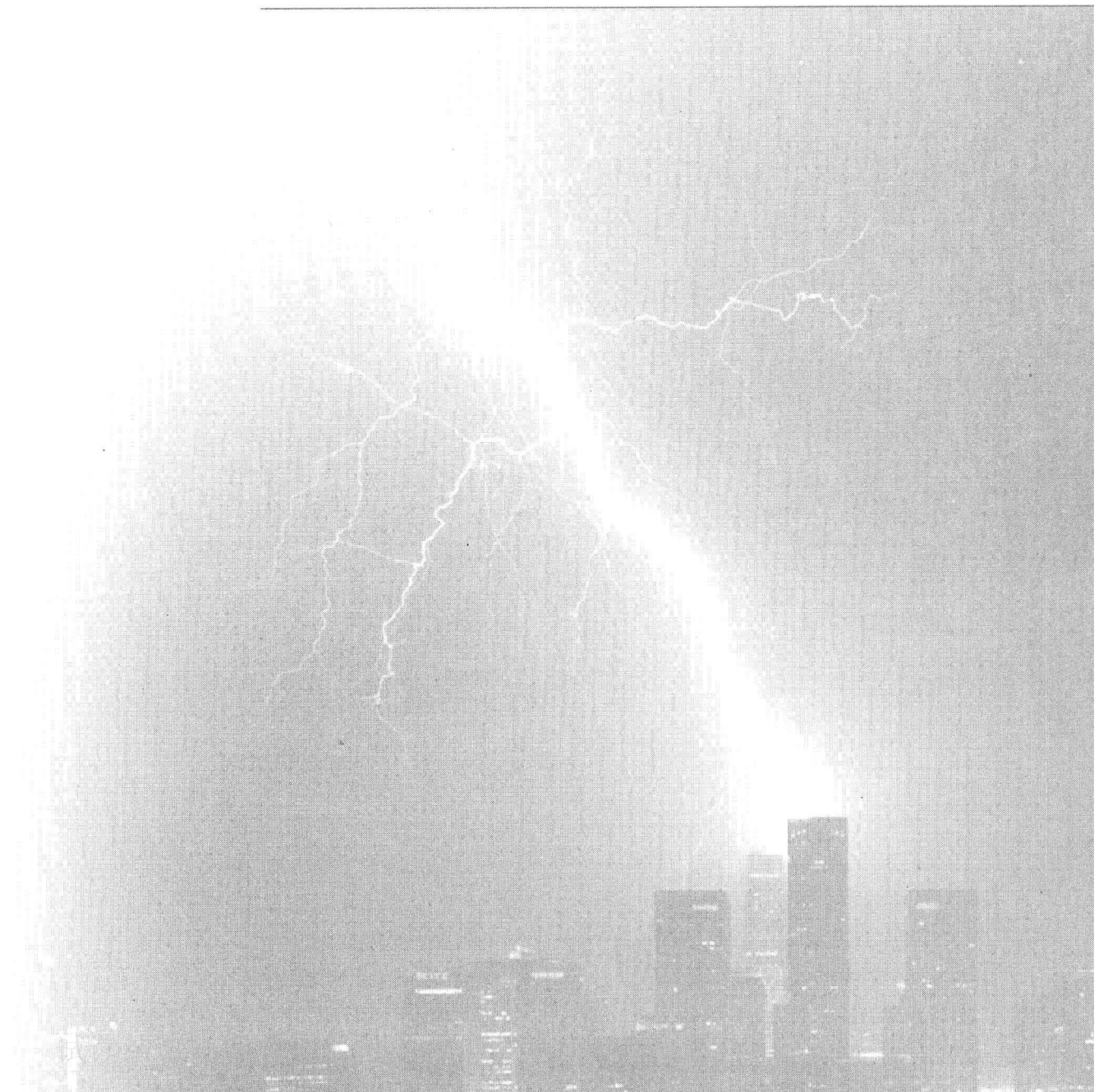
第三篇 接地技术

第九章	接地基础	(221)
第一节	接地的概念	(221)
第二节	接地电极基本概念	(223)

第三节	全空间问题和半空间问题·····	(234)
第四节	接地电阻的定义·····	(235)
第五节	土壤电阻率·····	(238)
第十章	接地系统 ·····	(245)
第一节	接地系统和非接地系统·····	(245)
第二节	电气设备技术标准中有关接地的条款·····	(250)
第三节	电源侧接地和负荷侧接地·····	(255)
第四节	各种环境和电气安全·····	(258)
第五节	电力系统接地方式·····	(263)
第六节	接地装置·····	(271)
第十一章	接地应用 ·····	(280)
第一节	静电接地·····	(280)
第二节	大地参数的推定法接地·····	(285)
第三节	接地极材料·····	(288)
第四节	接地阻抗·····	(292)
第十二章	接地检测技术 ·····	(299)
第一节	接地的模拟实验法·····	(299)
第二节	接地电阻的测量·····	(302)
第三节	土壤电阻率的测量·····	(308)
第四节	测量接触电压、电位分布和跨步电压·····	(312)

第一篇

雷电基础



第一章 雷电的形成

雷电，是自然界一种特殊的、极为壮观的声、光、电现象。自古以来，人们一直对雷电的活动保持着极大的关注。这不仅在于它那划破长空的耀眼闪电和令人震耳欲聋的雷鸣，更重要的是它给人类生活和生产活动带来了巨大的影响。一方面雷电引发的森林火灾启发了人类对火的发现和利用，雷电产生的有机化合物也给人类的生产生活带来了重要的影响；另一方面，雷电也对人类活动的安全构成了严重的威胁。雷电发生时可在千分之几到十分之几秒内产生几百千安的电流、几百千伏的电压、十亿到上千亿瓦的电能、上万度的高温、猛烈的冲击波、剧变的静电场和强烈的电磁辐射等物理效应，给人类造成多种危害。据统计，全球每年因雷电灾害而导致的经济损失约 100 亿美元，死亡人数在 30000 人以上。

雷电对人类有益也有害，同时也是全球电路中不可缺少的一环，因此，不能盲目地消灭雷电。逐步深入了解雷电过程，并由此开发各种有效的雷电防御技术是一项刻不容缓的任务。早在 1972 年美国科学家富兰克林就首先揭示了“雷电”的本质，实际上是一种电现象。从那以后人们对雷电的活动进行了大量的观察和研究，目前人们对雷电的形成和发展过程中的现象已有了较多的了解。

本章将系统地介绍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，并将对雷电的类型以及雷电过程进行描述，使读者对于雷电的过程有一定的了解。

第一节 晴天大气电场

一、晴天大气电场的概念

晴天大气电场是晴天条件下正常状态的大气电场。观测表明，晴天的低层大气中存在着方向垂直向下的电场，其产生的原因是大气和大地中存在着异种电荷，大气相对于大地带有正电荷，而大地带有负电荷。

在大气电场的作用下，地球和大气之间可产生传导电流、降水电流、尖端放电和闪电等四种形式的电荷交换。这些电荷的交换活动同时又影响着大气电场的平衡。例如晴天大气传导电流不断中和大气和大地所带的电荷，使大气电场不断减弱；当有云时，云中大气的电过程所产生的带电降水形成降水电流，也不断中和大气和大地所带的电荷；当有雷暴时，云层闪电、云下方的地面建筑物和植物的尖端放电过程，都将增加大气和大地所带的异种电荷。就全球长年平均而言，晴天传导电流和降水电流使地球获得的正电荷，恰好等于雷暴闪电和尖端放电电流使地球失去的正电荷，因此全球大气处于电平衡状态。雷暴活

动对大气电平衡的维持起着重要的作用。大气中的带电过程和电荷中和过程达到平衡时，便形成恒定的晴天大气电场。

二、晴天大气电场特征的描述

晴天大气电场通常用两个物理量来表示：一个是电场强度 E ，它是矢量；另一个是电势 U ，它是标量。

(一) 晴天大气的电场表示

大气电场强度 E 与大气电势 U 的关系式为

$$E(x, y, z) = -\nabla U(x, y, z) \quad (1-1)$$

由式 (1-1) 可知，大气中任一点 (x, y, z) 处的电场强度与该点处的电势梯度相等，方向与电势梯度方向（沿等势面法向指向电势增加方向）相反。

在直角坐标系中，大气电场 E 可以表示为

$$E(x, y, z) = E_x(x, y, z)\mathbf{i} + E_y(x, y, z)\mathbf{j} + E_z(x, y, z)\mathbf{k} \quad (1-2)$$

$$= \frac{\partial v}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial v}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial v}{\partial z}\mathbf{k} \quad (1-3)$$

式中 \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 、 \mathbf{k} 分别为 x 、 y 、 z 轴的单位矢量， $E_x(x, y, z)$ 、 $E_y(x, y, z)$ 、 $E_z(x, y, z)$ 分别是大气电场在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

(二) 晴天大气等电势面

大气电场也可以用几何图形形象地描绘出来。我们可以用电场线来表示静电场，另外，还可以通过测出电场中电位相同的点，把这些点连接起来形成一个面，这样的一个几何曲面叫做等势面（图 1.1）。当把电场线和等势面都画出来时，即可发现，电场线总是与等势面垂直。

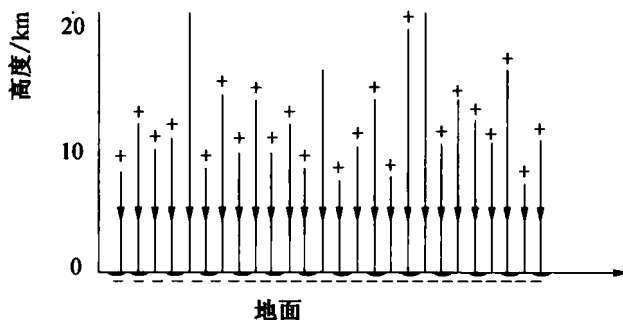


图 1.1 晴天大气电场电力线

若 \mathbf{n} 是大气中某一点大气等电势面的法向矢量，且由低电位指向高电位，则式(1-3)可以简化为

$$E = -\frac{\partial v}{\partial n}\mathbf{n} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明，大气中电势分布越密集的地方，场强就越大。

由图 1.2 可以看出等势面的弯曲与地表面的弯曲有关，所以当地面有起伏或者空中有导体时，平行的平面等势面就会发生弯曲。因此可以根据地面的弯曲程度对大气等势面分

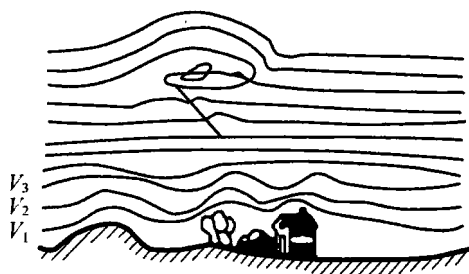
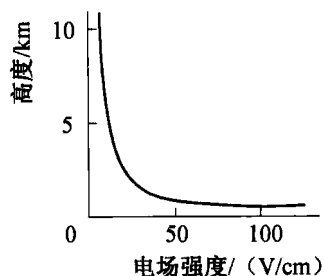


图 1.2 晴天大气电场等势面

图 1.3 大气电场 E 值与高度关系

两种情况讨论。一种是平坦地表。对于平坦的地表，晴天大气等电势面为平行于地面的平面，单位法向矢量 n 垂直向上，与 z 轴平行，此时晴天大气电场只存在垂直分量 E_z ，其余两个方向的分量均为零。另一种是起伏地表。对于起伏地表，晴天大气等电势面因地面起伏而变成一个曲面，且与地表曲面几乎平行。此时，晴天大气电场不仅仅有垂直方向上的分量 E_x 、 E_y 、 E_z ，还有水平分量。

因为电场强度 E 数值上等于电势梯度，所以用等势面的间距变化可以表征 E 的数值变化。我们只需取上述两种表示法之一就可描述大气电场的特征。

三、晴天大气电场的空间分布

晴天大气电场因时因地而异，其中与气溶胶（大气中气溶胶是指悬浮在大气中的各种固态和液态微粒，如尘埃、海盐、云雾和降水粒子等，但是习惯上大气气溶胶不包括云雾粒子和降水粒子）的浓度有密切关系。

（一）海洋

由于海洋下垫面条件相近，晴天电场间的差异很小。就全球而言，海面晴天电场约为 130 V/m 。

（二）陆地

就全球平均而言，晴天电场强度在陆地上约为 120 V/m 。不同地区条件相差很大，晴天大气电场强度大小也不一样。比如在农村地区，气溶胶浓度较低，场强一般在 120 V/m 以下。在城市市区，气溶胶浓度较高，场强一般在 120 V/m 以上。在工业区通常由于空气中存在高浓度的气溶胶，电场强度甚至会增至数百伏每米。

（三）纬度效应

晴天大气电场场强随纬度升高而增大，称为纬度效应。一般说来，陆地晴天电场受纬度的影响较小，海面晴天电场受纬度效应的影响较大。以北半球为例， $40^\circ \sim 60^\circ \text{ N}$ 处，晴天大气电场场强约为 155 V/m ； $20^\circ \sim 40^\circ \text{ N}$ 处，场强约为 125 V/m ； $0^\circ \sim 20^\circ \text{ N}$ 处，场强为 120 V/m ；此后越往北，电场场强越小。

（四）随高度变化

晴天大气电场强度也随高度变化而不同。通常晴天大气电场随高度呈指数衰减的分布特征，即电场强度在对流层中随高度的升高按指数律减小。但是即使同一时刻，晴天大气电场在不同高度范围内随高度分布也不相同。在近地面处，晴天大气电场将受大地电极影响，由于大地带负电荷，在近地面的一薄层大气中积聚了大量符号相反的正电荷，而且体

电荷密度在该层中很不均匀，因此电势在近地面随高度增加而急剧下降，形成较大的电势梯度，从而电场强度也很大。

在自由大气中，大气电场的变化可以采用指数形式表示，对于 (0~10 km) 写为

$$E(h) = E(0)(-ah + bx^2) \quad (1-5)$$

对于 (10~30 km)，写为

$$E(h) = E(h_0)\exp(-cz) \quad (1-6)$$

式中电场单位取 V/m， $E(0)$ 是海平面处的大气电场， $E(h_0)$ 是高度 h_0 处大气电场。

四、大气电场随时间的变化特征

(一) 晴天大气电场的日变化

晴天大气电场的日变化表现为波峰和波谷的出现时间，它随地点、季节而变化。观测表明，大气电场的日变化受两种因素制约：一是全球性普遍日变化机制，即与世界时间有关，主要取决于全球雷暴的日变化；二是地方性局地日变化机制，其变化与地方时有关，主要取决于局地大气状况的日变化。

在海洋和两极地区，电场日变化和地方时无关，在世界时 19 时左右出现极大，04 时左右出现极小，振幅约达平均值的 20%。对陆地测站而言，日变化和地方时有关，在地方时 04~06 时和 12~16 时出现极小值，07~10 时和 19~21 时出现极大值，振幅约达平均值的 50%。总体来说，晴天大气电场的日变化规律可表示为

$$E(t) = E_w(t) + E_L(t) \quad (1-7)$$

(二) 晴天大气电场的年变化

晴天电场还具有年变化，它也可以用其变化的波形和变化幅度来表示，主要是指年变化的波峰和波谷出现多少，出现的月份。其变化幅度多用年较差表示。年较差是指晴天大气电场相对 E/\bar{E} 在一年中的最大与最小值之差，用百分比表示。晴天大气电场具有明显的年变化，其变化规律因地而异。各地地面晴天大气电场年较差的平均结果的数值可以从 30% 变化到 130%，平均为 65%。地面和海面晴天大气电场年变化的波形一般具有单峰、单谷，即一年中出现一次极大和一次极小值的简单变化波形。平均而言，晴天电场峰值都在北半球的冬季，而谷值都在北半球的夏季。

(三) 晴天大气电场和电流的脉动变化

晴天大气电流具有脉动变化，其周期从几分钟到几十分钟，其变化与地理环境、海域大气湍流等气象要素有关。地面大气电场的脉动变化具有明显的日变化，其峰值出现于中午至下午，谷值出现于黎明前。这与中午到下午近地面大气对流较旺盛、早晨大气较稳定有关。地面大气电流还有明显的年变化，其峰值出现于夏季，谷值出现于冬季。

第二节 晴天大气电流

大气并非良好的绝缘介质，大气中总是含有大量气体正、负离子，使大气具有微弱的导电性。例如，将一个与地绝缘良好的带电金属球暴露于干洁的空气中，则经过几十分钟后，金属球所带电荷便会消失殆尽，研究发现，这一现象是由于在大气中含有适量的带电粒子，使大气具有微弱的导电性，从而逐渐中和金属球所带电荷。那么大气中的带电粒子

从何而来，如何分布，如何运动，又怎样形成电流，这些都与防雷密不可分。

一、晴天大气中的离子

大气中的离子是大气中最主要的带电粒子。

(一) 大气电离率

描述电离源对大气电离的能力用大气电离率 q 表示，定义为在单位体积和时间内大气分子被电离源电离为正负离子对的数目，单位取 $\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ，大小取决于电离源的强度和大气密度。

(二) 大气电离源

大气中离子的存在是由于大气中存在电离过程，而电离过程因素主要是：①宇宙射线和太阳紫外线；②地壳中的放射性物质（如铀、钍及其放射性同位素等）；③大气中的放射性物质（如气体氧等）。此外，雷电过程、火山爆发、森林大火、瀑布、波浪击岸、尘暴、雪暴、核爆炸等局部的或偶然的次要因素也会使大气电离。

1. 宇宙中的电离源

宇宙中的电离源主要来自宇宙射线，宇宙射线主要是由能量为 $10^8\sim 10^{20}$ eV 的高能质子所组成，它不仅使大气电离，而且与大气分子碰撞产生中子和介子等高能粒子，构成次宇宙射线。宇宙射线通过大气时受地磁场的作用向两极偏转，所以宇宙射线随纬度增加而增大，同时其电离率也随纬度而变化。如在赤道海平面处大气的电离率为 $1.5\text{ cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ；在纬度 $40^\circ\sim 50^\circ\text{ N}$ 处，其大气电离率增大到 $1.9\text{ cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2. 地壳中的电离源

地壳中含有镭、铀和钍等放射性物质，这些物质不断地发射 α 、 β 和 γ 射线。其中 α 射线有强的电离能力，但是贯穿能力差，所以它很少能达到离地面十几厘米高度以上的大气中，它对大气的电离可以忽略。 β 射线的电离能力弱于 α 射线，但是它的贯穿本领比 α 射线强，在地面处产生的大气电离率为 $0.38\text{ cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 γ 射线是光子流，它的电离能力最差，但是其贯穿本领最大，在地面处产生的电离率为 $3.2\text{ cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ ，约占地壳中各射线对大气电离贡献的 91%，是主要电离源。

3. 大气中的电离源

大气中含有氧等微量放射性物质，它们主要来自于地壳中的放射性物质，以及工业排放的放射性污染物质，这些物质借助大气中的上升气流和湍流，扩散到离地 4~5 km 高度的大气中。大气中的放射性物质发射的 α 、 β 和 γ 射线与地壳中所放射的射线的电离率不同，例如，它们在大气中近地面处的电离率分别达到 $4.4\text{ cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.03\text{ cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $0.15\text{ cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见 α 射线是大气中放射性物质发射的主要电离射线。

(三) 大气离子的形成

大气中的离子主要分为两类：一类是带正负号电荷的小离子，或称轻离子，其半径为 $10^{-8}\sim 10^{-7}\text{ cm}$ ，它常由几个电离分子与中性分子聚合而成；另一类是大离子，或称重离子，它是由各种大小不同的带电气溶胶粒子所组成。

在大气中当光子作用一分子时，分子中的电子获得能量，当电子具有的能量克服原子核对电子的束缚力时，就脱离分子，成为自由电子，此时分子失去电子成为正离子。大气电离，形成正离子和游离电子，游离电子又和其他中性分子或气溶胶分子结合，而正离子