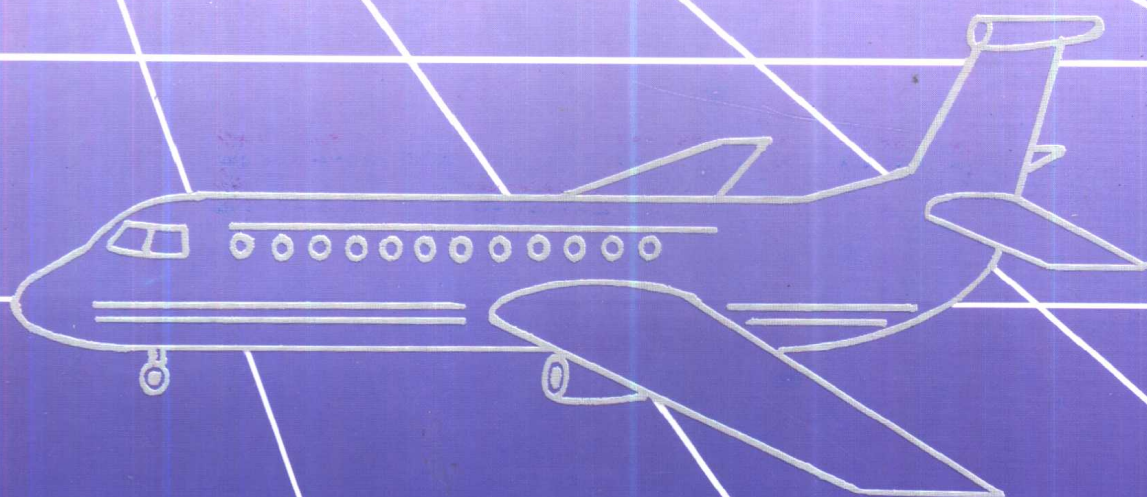


现代防雷技术

■ 潘忠林 编著



电子科技大学出版社

现代防雷技术

潘忠林 编著

电子科技大学出版社

内 容 简 介

雷电造成自然灾害的范围随社会经济的发展而日益扩大,可能影响到社会的很多方面。本书从雷电的基本知识出发,提出防雷的基本原则和方法,介绍了避雷装置和元器件,以及对建筑、石油天然气、电力、通信、无线电、计算机、机场等方面的防雷措施和方法。

本书可供从事防雷工程设计和施工人员、设备安装和操作人员、管理和维护人员阅读与参考。

现代防雷技术

潘忠林编著

※

电子科技大学出版社出版发行

(成都建设北路二段四号) 邮编 610054

成都青羊东方福利彩印厂印刷

※

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 410 千字

版次 1997 年 12 月第一版 印次 1997 年 12 月第一次印刷

印数 1—5000 册

中国标准书号 ISBN 7-81043-855-7/TM·7

定价:28.00 元

前 言

雷暴是一种自然灾害性天气,雷电可能影响到社会经济生活的各个方面。尤其是当前电子技术发展很快,电子设备日益向自动化、多功能和智能化方向发展,但是,这些设备的电路和器件存在着防雷电冲击能力弱的问题。因此,设备在日常运行中,常常被雷电击坏,甚至造成系统工作瘫痪和人员伤亡。民用航空港是采用先进电子设备比较集中的部门,也是受雷电损害严重的部门之一。这一严重性,愈来愈多地引起设备生产厂家和用户的极大关注。为了保证人机安全,不惜重金寻找有效的解决办法。然而,目前有关防雷技术的专著比较少,一些散见于杂志刊物上的先进理论和技术措施也亟待收集整理。

《现代防雷技术》一书的出版是一种很好的尝试,全书共十章,包括了雷电的基本知识,防雷的基本原则,避雷装置与元器件,避雷接地,对建筑物、易燃易爆物、电力线路及电气设备、信号传输线及通信设备、天线系统及无线设备、计算机及其网络、飞机及机场等防雷保护的详细论述。它不但总结了作者近几年从事研究和解决预防雷电方面的工作经验,还客观地收集和整理了目前国内外有关防雷的先进理论和技术资料,作者试图将它们与实际运用结合起来,通过系统化,以期得到进一步的提高。

书中明确指出,雷电过程的闪电电源不是一个电压源而是一个电流源,进而提出防雷的基本途径就是要提供一条使雷电(包括雷电电磁脉冲)对地泄放的合理低阻抗路径,而不是任其随机性选择放电通道。书中还介绍了被保护设备的基本知识以及对防雷的要求,希望能使防雷措施与设备性能完全配合,从而达到最佳的防雷效果。

这是一本兼具理论性与应用性,可供工程技术人员参考的、很有价值的书籍,希望该书能为预防雷电灾害,减少国家财产损失贡献一份力量。

华延文

1996.5

目 录

第一章 雷电的基本知识

§ 1.1 概述	(1)
§ 1.2 大气电平衡	(2)
1.2.1 大气电场	(2)
1.2.2 大气中的电流	(5)
1.2.3 大气电平衡	(6)
§ 1.3 雷(雨)云	(7)
1.3.1 雷(雨)云的形成	(7)
1.3.2 雷(雨)云的电结构	(10)
1.3.3 雷(雨)云的起电机制	(12)
§ 1.4 闪电	(13)
1.4.1 闪电及其分类	(13)
1.4.2 地闪的结构	(14)
1.4.3 地闪的类型	(17)
§ 1.5 雷电放电的计算模型	(18)
1.5.1 雷电放电的不同理论	(18)
1.5.2 行进电流源模型	(19)
1.5.3 彼得逊等值电路模型	(21)
§ 1.6 雷电的基本参数	(22)
1.6.1 雷暴日和雷暴小时	(22)
1.6.2 地面落雷密度	(24)
1.6.3 雷电流的极性和波形	(24)
1.6.4 雷电流的等值波形	(25)
§ 1.7 雷电放电的危害形式	(26)
1.7.1 直接雷击	(26)
1.7.2 感应雷击	(27)
1.7.3 电磁脉冲辐射	(27)
1.7.4 雷电过电压侵入	(28)
1.7.5 反击	(28)

第二章 防雷的基本原则与方法

§ 2.1 概述	(29)
§ 2.2 防雷的基本原则	(30)
§ 2.3 防雷的基本方法	(32)
2.3.1 接闪	(32)
2.3.2 均压连接	(32)

2.3.3 接地	(33)
2.3.4 分流	(33)
2.3.5 屏蔽	(34)
2.3.6 躲避	(34)
§ 2.4 防雷保护的分区与保护级别分类	(35)

第三章 避雷装置与避雷元器件

§ 3.1 概述	(38)
§ 3.2 避雷针	(39)
3.2.1 工作原理与结构	(39)
3.2.2 保护范围	(41)
3.2.3 避雷针的改进	(46)
§ 3.3 对消雷器的否定	(48)
§ 3.4 避雷线	(49)
3.4.1 工作原理	(49)
3.4.2 保护范围	(50)
§ 3.5 屏蔽网	(53)
3.5.1 工作原理	(53)
3.5.2 屏蔽网的设计考虑	(55)
3.5.3 屏蔽效能的判别	(57)
§ 3.6 电力避雷器	(58)
3.6.1 避雷器的基本要求	(58)
3.6.2 保护间隙	(60)
3.6.3 排气式避雷器	(60)
3.6.4 阀型避雷器	(62)
3.6.5 磁吹阀型避雷器	(64)
3.6.6 复合磁吹阀型避雷器	(66)
3.6.7 氧化锌避雷器	(67)
§ 3.7 电信避雷器	(70)
3.7.1 电信避雷器的基本特性	(70)
3.7.2 电源避雷器	(71)
3.7.3 天馈避雷器	(73)
3.7.4 信号避雷器	(75)
§ 3.8 避雷元件	(77)
3.8.1 熔丝	(77)
3.8.2 气体放电管	(77)
3.8.3 半导体防雷放电管	(80)
3.8.4 氧化锌压敏电阻	(82)
3.8.5 PTC 热敏电阻	(83)
3.8.6 半导体二极管	(84)

第四章 避雷接地

§ 4.1 概述	(86)
§ 4.2 接地原理	(87)
§ 4.3 冲击接地电阻	(88)
§ 4.4 接地电阻的计算	(90)
4.4.1 基本方法	(90)
4.4.2 人工接地体的接地电阻	(92)
4.4.3 自然接地体的接地电阻	(95)
4.4.4 冲击接地电阻的计算	(98)
§ 4.5 土壤电阻率及其测量	(100)
§ 4.6 高电阻率土壤的改良	(103)
§ 4.7 避雷接地装置的设计考虑	(106)
4.7.1 接地电阻极限值的确定	(106)
4.7.2 接地体的选择	(107)
4.7.3 引下线的选择	(108)
4.7.4 接地电阻的测量	(109)
§ 4.8 各种不同接地间的关系	(111)
4.8.1 各种接地的要求与目的	(111)
4.8.2 分立接地与联合接地	(112)
4.8.3 不同接地方式的防雷效果	(114)

第五章 建筑物的防雷保护

§ 5.1 概述	(117)
§ 5.2 建筑物着雷的特点	(118)
§ 5.3 雷电对建筑物金属构件的影响	(121)
5.3.1 沿引下线的电位降	(121)
5.3.2 接地体及其附近的电位降	(122)
5.3.3 感应电压	(122)
5.3.4 相邻导体间的电位差	(123)
§ 5.4 建筑物的防雷措施	(124)
5.4.1 室外防雷措施	(124)
5.4.2 室内防雷措施	(127)
§ 5.5 石油天然气工业建筑物的防雷保护	(129)
5.5.1 雷电对石油天然气工业的危害	(129)
5.5.2 石油天然气的特点	(129)
5.5.3 露天贮罐的防雷措施	(132)
5.5.4 天然气集输系统的防雷措施	(134)
5.5.5 钻井井场	(135)
§ 5.6 存放易爆易炸物的建筑物的防雷保护	(136)

§ 5.7 建筑物防雷保护的设计考虑	(137)
5.7.1 一般高度的房屋	(137)
5.7.2 多层高楼建筑物	(138)
5.7.3 特高层建筑物	(139)
5.7.4 高塔烟囱类建筑物	(140)
5.7.5 大型建筑物	(141)
5.7.6 体育场	(142)

第六章 电力线路及电气设备的防雷保护

§ 6.1 概述	(145)
§ 6.2 雷电引起的闪络与雷击跳闸率	(146)
§ 6.3 雷击线路的电气几何模型	(148)
§ 6.4 电力线路的防雷措施	(150)
6.4.1 架设避雷线	(151)
6.4.2 降低杆塔接地电阻	(151)
6.4.3 提高绝缘水平与采用不平衡绝缘方式	(153)
6.4.4 采用消弧线圈接地和自动重合闸装置	(153)
§ 6.5 变电所和发电厂的防雷方法	(155)
6.5.1 防直接雷击措施	(155)
6.5.2 防止雷电过电压波侵入	(156)
6.5.3 变电所的进线段保护	(158)
§ 6.6 电气设备的防雷保护	(161)
6.6.1 配电变压器	(161)
6.6.2 特殊变压器	(161)
6.6.3 变压器中性点的防雷保护	(162)
6.6.4 直配电机	(163)
§ 6.7 室内用电设备的保护接地与避雷接地	(166)

第七章 信号传输线及通信设备的防雷保护

§ 7.1 概述	(170)
§ 7.2 信号传输线的电学特性	(171)
§ 7.3 雷电对信号传输线的危害	(173)
7.3.1 对架空线路的影响	(173)
7.3.2 对地下电缆的危害	(175)
§ 7.4 架空通信线路的防雷措施	(177)
7.4.1 对架空地线的要求	(178)
7.4.2 二次感应	(179)
7.4.3 架空地线的规格	(181)
§ 7.5 地下通信电缆的防雷措施	(181)
7.5.1 选择路由和改进电缆耐雷性能	(181)

7.5.2 布放屏蔽线	(182)
7.5.3 安装避雷线或避雷针	(184)
7.5.4 电缆金属外皮接地	(185)
7.5.5 设置消弧线	(186)
7.5.6 过桥线	(186)
§ 7.6 光缆的防雷保护	(187)
7.6.1 雷电对光缆的影响	(187)
7.6.2 两种不同光缆防雷措施	(188)
§ 7.7 长途明线通信系统的防雷保护	(189)
7.7.1 雷电对长途明线通信系统的影响	(189)
7.7.2 进局设备的防雷措施	(191)
7.7.3 长途通信系统进局的第二级防雷措施	(192)
§ 7.8 程控电话交换机的防雷保护	(193)
7.8.1 电话交换技术的发展及防雷要求	(193)
7.8.2 雷电对程控交换机的危害	(193)
7.8.3 交换机的接地方式	(194)
7.8.4 交换机接地与机房避雷接地	(196)
7.8.5 外线进机保护——总配线架中的防雷措施	(197)

第八章 天线系统及无线电设备的防雷保护

§ 8.1 概述	(199)
§ 8.2 无线电通信的特点	(199)
8.2.1 天线的作用	(199)
8.2.2 不同波长的传播方式	(201)
8.2.3 雷电对无线电波传播和天线设备的影响	(202)
§ 8.3 无线电通信站的防雷保护	(203)
8.3.1 天线设备	(203)
8.3.2 天线馈线和信号传输线	(205)
8.3.3 电源系统	(206)
§ 8.4 移动通信的防雷保护	(207)
8.4.1 寻呼台	(207)
8.4.2 移动通信系统	(208)
§ 8.5 电视的防雷保护	(209)
8.5.1 电视机防雷	(209)
8.5.2 共用天线电视系统和闭路电视系统	(210)
8.5.3 卫星电视接收系统	(212)
8.5.4 电视发射塔	(213)
§ 8.6 微波通信的防雷保护	(214)
8.6.1 微波通信的特点	(214)
8.6.2 雷电对微波通信站的影响	(215)

8.6.3 微波通信站的防雷措施	(215)
§ 8.7 卫星通信系统的防雷保护	(217)
8.7.1 卫星通信的特点	(217)
8.7.2 雷电对卫星通信的影响	(219)
8.7.3 卫星通信地面站的防雷措施	(220)
§ 8.8 综合通信大楼的防雷保护	(223)
8.8.1 综合通信大楼的建筑结构	(223)
8.8.2 雷击时雷电流在大楼的分布情况	(224)
8.8.3 综合通信大楼的防雷措施	(225)
8.8.4 综合通信大楼的接地方法	(226)

第九章 计算机及其网络的防雷保护

§ 9.1 概述	(229)
§ 9.2 雷电对计算机及其网络的影响	(230)
9.2.1 计算机可能受到的雷电危害形式	(230)
9.2.2 雷电磁场对计算机的影响	(231)
9.2.3 闪电活动频度对计算机的影响	(232)
§ 9.3 计算机机房的防雷考虑	(234)
9.3.1 机房的防雷措施	(234)
9.3.2 计算机的接地	(235)
9.3.3 计算机接地与防雷接地的关系	(236)
§ 9.4 计算机设备的防雷措施	(239)
9.4.1 计算机的供电及其避雷措施	(239)
9.4.2 计算机信号传输线	(240)
9.4.3 计算机终端的多级保护	(241)
§ 9.5 计算机网络的防雷措施	(242)
9.5.1 联网出现的防雷问题	(242)
9.5.2 计算机网络的组成	(244)
9.5.3 计算机网络的基本防雷方法	(245)

第十章 飞机及机场的防雷保护

§ 10.1 概述	(247)
§ 10.2 飞机受雷击的情况	(248)
§ 10.3 飞机的防雷保护措施	(251)
10.3.1 保护准则	(251)
10.3.2 燃油系统	(251)
10.3.3 结构	(251)
10.3.4 电气线路和航空电子设备电路	(252)
§ 10.4 机场的特殊规定	(253)
10.4.1 机场的净空要求	(253)

10.4.2 导航台、定向台对周围环境的要求	(254)
10.4.3 通信导航设施的配置	(255)
§ 10.5 航管楼的防雷保护	(255)
10.5.1 建筑物的防雷措施	(255)
10.5.2 电源系统的防雷接线	(257)
10.5.3 航管楼设备的机线连接与防雷措施	(258)
§ 10.6 导航系统的防雷保护	(259)
10.6.1 导航台及指点标设备	(259)
10.6.2 全向信标台与测距仪	(261)
10.6.3 一二次雷达站	(262)
10.6.4 航向台	(265)
10.6.5 下滑台	(266)
10.6.6 助航灯光系统	(267)
结束语	(269)
附录:英汉专业词汇对照表	(270)
参考文献	(275)

第一章 雷电的基本知识

§ 1.1 概述

雷电是自然界中一种特殊的、极为壮观的声、光、电现象。这不仅在于它那划破长空的耀目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。

雷电造成的有机化合物的合成,可能在地球生命起源中占有一定的地位。雷电引起的森林火灾,可能启发了远古人类对火的发现与利用。雷电产生的臭氧,对自然界的细菌生长有一定的抑制作用。雷电还可能在某种程度上杀死生物害虫,有利于植物和庄稼的生长。不过,雷电也是一种对国民经济和军事活动影响较大的灾害性天气现象。它不但威胁到人畜生命安全,对人类赖以生存的自然资源和人类创造的物质财富也有巨大的破坏性,而且还常给电力、通信、石油化工、航空航天、铁道交通,乃至金融证券等国民经济部门的设备设施带来损坏。例如地球上的森林火灾有 50% 以上是由雷电引起的,人们居住的建筑物也屡遭雷电的破坏,雷电产生的电磁波辐射又常常干扰正常的无线电通信和飞行器的遥控。因此,雷电现象一直为人们所关注。

人类最初对雷电的认识总是与鬼神联系在一起的。我国东汉哲学家王充可以说是世界上最早用文字反对雷电神鬼说的唯物主义者,但他的认识仅仅是一种唯物主义的猜想而已,缺乏科学实验的基础。之后,北宋的沈括,明代的方以智等,对雷电的认识也基本上与王充相似。一千多年来,对于雷电的认识没有什么大的变化,这是由于与我国整个科学技术的发展状况分不开的。

在欧洲中世纪,也有相当多的人把雷电当作神的意志,认为只能靠祈祷和敲响教堂里的钟,才能避免雷电的袭击。然而据慕尼黑 1784 年出版的一本书统计,在此之前的 33 年内共有 386 个教堂的尖顶遭受到雷击,103 名教堂司钟员在钟楼内敲钟时死于雷击。在意大利威尼斯城的圣马可钟楼(Campanile of San Marco),从 1388 到 1762 年间,9 次毁于雷击。位于 Brittany 城的 24 个教堂,1718 年 4 月 14 日夜间全部遭受到雷击,一个教堂被彻底毁掉,2 名教堂司钟员毙命。

对于雷电的科学认识,只有等待电学发展到一定阶段时才有可能。1706 年,曾任英国伦敦皇家学会馆长的 Fransis Hauksbee,在用玻璃棒摩擦起电,研究电的发光时,看到了静电放电产生的闪光与自然界中的闪电相似。于是首先把实验室中的电和自然界的闪电联系起来,不过这仅仅是一种联想,还不能说是对雷电的科学认识。真正建立在科学实验论证基础上对雷电进行科学认识的应属美国杰出的科学家富兰克林(Benjamin Franklin, 1706~1790)。他在实验室内进行了一系列电学实验,论证了实验室内静电放电现象与天空中闪电的种种类似性,以科学的理性思维探索了雷电的本质。同时代的许多电学研究者也进行了大量类似的科学实验工作,可是富兰克林的卓越贡献和成就在于他把云中的闪电引到地面上来作实验检定。他所设计的“岗亭”实验和著名的风筝实验,科学地证明了他自己的理性判断。

从富兰克林解决了对雷电的定性认识问题之后的 100 多年,人类对雷电的认识并没有得到进一步的提高,因为要进行定量的认识,必须解决实验仪器和方法问题。英国科学家开尔文男爵(Lord Kelvin,即 William Thomson,1824~1907)建议用气球携带仪器到高空去测量不同高度的电场,从而开创了定量研究闪电物理的工作。他本人在实验研究和理论探索上也给大气电学作出了关键性的贡献。因此沿着开尔文提出的这些研究方向,大气电学在 20 世纪 20~30 年代得到了长足发展。

1903 年,Walter 用移动照相法实现了开尔文的设想。1904 年,Linké 首先用气球携带开尔文发明的滴水器对高空大气电场进行了探测。1926 年 Boys 设计出改进的拍摄闪电的照相机。Schonland 和 Collens 于 1934 年在南非首次拍到一批闪电照片,显示出了闪电全过程及其特性。这些照片一直被人们奉为经典实验证据,沿用至今。这个重大突破,使人们认识到闪电是由梯级先导开始,闪电全过程包括多次闪击放电。

1937 年,Simpson 与他的合作者用气球携带他所研制的高空电流计取得了空中大气电学量的连续记录,开始雷暴内部电场的探测,并初步测得雷云中的电荷分布结构。Wilson 则利用他设计的毛细管静电计测量闪电时电场的垂直变化(1916、1920),由此推算出云中的电量和电荷分布。这两种重要方法沿用至今,使我们对雷云的电荷分布有了比较清晰的理解和认识。

二次世界大战期间发展起来的无线电遥测技术以及飞机的改进,为大气电场的探测创造了条件。通过用飞机穿入雷云中,和利用地面无线电遥测,使我们对雷云的电结构、闪电发展的物理过程,以及雷云的起电机机制等的认识都大大前进了一步,这为人类设法预防和限制雷电的破坏性,减少雷击灾害的损失,甚至人工控制雷电过程奠定了科学的基础。

为了确保国民经济和人民生活的正常运行,我们在设计防雷工程,实施防雷措施的过程中,首先应对雷电的形成和放电过程有所了解,这是十分必要的。

§ 1.2 大气电平衡

1.2.1 大气电场

闪电的起源与大气电场有关。人类赖以生存的地球不单是一个磁体,有南北两极,而且还是一个携带着 $54 \times 10^4 \text{C}$ 负电荷的球体。这些电荷产生一个自空中指向地球表面的电场,我们称之为“大气电场”。人们就生活在这个大气电场之中却常常感觉不到它的存在,这是因为晴天的大气电场不如地球磁场那样容易用简单的办法觉察和显示出来。当人们在居室内时,房屋与大地等电位,房间内几乎不存在大气电场。当人们在室外时,人在从头到脚这样的高度差内,承受到晴天大气电场的电位差一般达到 200V 左右,那么人为什么没有感觉到触电呢?因为在晴天、干燥空气的电阻率很高,大约 $10^{15} \Omega \cdot \text{m}$,相对大气而言,人体也是良导体,从头到脚之间的电位差为零,所以人们不会感到电击。同样道理,山脉、树木、房屋等物体的电阻很小,亦可视为良导体,所以这些地方大气电场的等位面也随着地形和地面物体而起伏。

在自然界中,有些物质是可以使空气分子变成带电的离子,这些物质叫做电离源。电离源主要有三种:(1)地壳中丰富的放射性物质,如镭、钍和铀等,(2)大气中微量的气态放射性物质,如来自地壳和工业排放废料中的氡等,(3)来自太空中的宇宙射线。这些电离源有足够的能量使空气分子电离。由于空中悬浮着这些空气离子,所以大气就有了微弱的导电性。大气中,空气分子在发生电离过程的同时,也存在着相反的复合过程,电离和复合这两种过程相互制

约,最后达到动态平衡。但是无论在海洋还是在陆地的上空,大气中的离子极性总是正的比负的多,因此通常大气总是带正电的。大气中以空间电荷形式分布着的正电荷和地球携带的负电荷,就构成了上述大气电场的两个极性端,如图 1.1 所示。

描述大气电场的方法是用电场强度 $\vec{E}$ (矢量) 和电位 V (标量) 表示的,它们的关系为:

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (1.1)$$

在直角坐标中,则可以写成:

$$\vec{E} = -\vec{i} \frac{\partial V}{\partial x} - \vec{j} \frac{\partial V}{\partial y} - \vec{k} \frac{\partial V}{\partial z} \quad (1.2)$$

如果用单位矢量 $\vec{n}$ 表示等位面的法线方向,则 (1.2) 式就可以简化成:

$$\vec{E} = \vec{n} \frac{\partial V}{\partial n} \quad (1.3)$$

用电力线描述 $\vec{E}$ 的分布,用等位面描述电位分布,则电力线处处与等位面相垂直,而且等位面是按相等的电位差来画时,则从等位面的间距和疏密情况,即可知道电场强度的分布情况了。所以用等位面就可以表征整个大气电场的全部情况。

在静电场中,导体表面总是等位面,所以地球表面也是等位面。大气电场强度的方向总是垂直于地面。大气电场强度的数值,随着高度的增加而逐渐减小。到 10km 以上,已减小到只有地球表面处的 3% 左右,如图 1.2 所示。在 20km 以上的高度,已接近大气的电离层,此处空气是高度导电的,大气电场的强度很小。测得不同高度处的电场强度值 $E(h)$,就可以根据电位与电场强度的关系式:

$$V(h) = \int_0^h E(h) \cdot dh \quad (1.4)$$

求出不同高度处的电位 $V(h)$,显然它是随高度的增加而增大的。电离层与地面之间的电位差大约达到 300kV。

经过长期的观察表明:晴天各地地面的大气电场强度是因地而异的,并且随时都在变化。但是,各地平均晴天大气电场强度却又是比较稳定的,如表 1.1 中所示。各地差别很大,我国广州为 87V/m,而新疆伊宁却只有 56V/m。伦敦附近一个名叫丘的地方竟然高达 363V/m。全球陆地平均大气电场强度为 130V/m。

表 1.1 世界各地地面晴天大气电场平均结果

观测地点	纬度 (°)	经度 (°)	大气电场 (V $\cdot$ m $^{-1}$)	大气电场变化(%)		观测时间
				日较差	年较差	
图勒(格陵兰)	79.1N	11.6E	95	17	80	1913~1914
斯科斯比松(格陵兰)	70.5N	22.0W	71	45	50	1932~1933

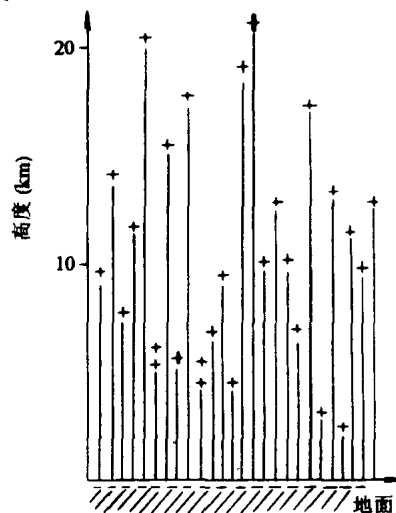


图 1.1 大气电场

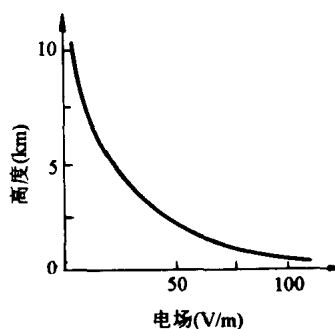


图 1.2 大气电场强度与高度的关系

观测地点	纬度 (°)	经度 (°)	大气电场 (Vm^{-1})	大气电场变化(%)		观测时间
				日较差	年较差	
特罗姆瑟(挪威)	69.7N	18.9E	104	50	28	1932~1933
阿什(挪威)	59.7N	10.8E	104	44	101	1916~1923
瓦西乔(瑞典)	68.4N	18.2E	89	56	124	1909~1910
乌普萨拉(瑞典)	59.9N	15.2E	70	71	84	1912~1914
波茨坦(德国)	52.4N	13.1E	202	36	63	1904~1923
亚深(德国)	50.8N	6.1E	95	61	94	1957~1958
法兰克福(德国)	50.1N	8.7E	146	46		1928~1931
慕尼黑(德国)	48.1N	11.6E	176	77	41	1906~1935
丘(英国)	51.5N	0.3E	363	41	74	1898~1931
埃斯克代尔米尔(英国)	55.3N	3.2W	263	42	61	1914~1920
巴黎(法国)	48.8N	2.0E	175	57	40	1893~1898
瓦尔乔那(法国)	48.8N	2.0E	90	53	870	1923~1924
昌邦拉福雷特(法国)	48.0N	2.3E	92	50	80	1942~1944
帕亚纳(瑞士)	46.8N	6.9E	86	80	118	1954~1955
朱特劳乔切(瑞士)	46.5N	8.0E	149	36	50	1954~1955
克雷斯蒙斯特(奥地利)	48.1N	14.1E	105	57	75	1902~1916
楚格斯皮茨(奥地利)	47.4N	11.0E	125	50	92	1927~1928
的里雅斯特(意大利)	45.6N	13.8E	73	118	34	1902~1905
托尔托萨(西班牙)	40.8N	0.5E	106	54	35	1910~1924
赫勒万(埃及)	29.8N	31.3E	150	41	36	1909~1914
巴甫洛夫斯克(俄罗斯)	59.7N	30.5E	171	46		20年
塔什干(乌兹别克)	41.3N	69.2E	118	116		
伊宁(中国)	44.0N	81.3E	56	129		1968.8~9
台北(中国)	25.0N	121.5E	28	130	132	1934~1936
广州(中国)	23.1N	113.3E	87	110		1937.2.4~5
东京(日本)	35.7N	130.8E	144	100	72	1949~1952
普纳(印度)	18.5N	73.9E	67	57	46	1930~1938
马尼拉(菲律宾)	14.5N	121.4E	79	47		1927~1930
万隆(印尼)	6.9S	107.5E	86	169	66	1935~1936
雷伊堡(加拿大)	62.8N	116.1W	82	46	34	1932~1933
弗尔班克斯(美国)	64.9N	147.8W	97	38	30	1932~1933
斯坦福(美国)	37.0N	122.0W	76	114	54	1932~1933

观测地点	纬度 (°)	经度 (°)	大气电场 (Vm^{-1})	大气电场变化(%)		观测时间
				日较差	年较差	
塔克森(美国)	32.3N	110.8W	46	110	17	1931~1934
万卡约(秘鲁)	12.1S	75.3W	47.3			1924~1934

1.2.2 大气中的电流

地球表面的大气是由几层物理性能不同的部分构成的,按照高度可以划分为四层,如图 1.3 所示。各层的电离情况差别很大。离地面大约 60km 以上,为电离层,这里是大气层最高处,空气非常稀薄,而空气分子几乎都是电离导电的。在这层之下是平流层,这里的空气很少流动,温度差不多也是恒定的。最低层约在十几公里高度以下,这里的空气运动极其活跃,称之为对流层,地球上的天气变化主要发生在该层,雷暴现象也在这一层发生。

对流层中的空气,由于电离源的作用,产生悬浮的正、负空气离子。电离源电

离大气空气分子的能力可以用大气电离率来表征。其定义是单位体积和单位时间内大气分子被电离为正、负离子对的数目,单位取为离子对/ $\text{cm}^3 \cdot \text{s}$ 。它的大小取决于电离源的强度和大气密度。

带电离子在大气电场的作用下要作加速运动,但它又因为与其他空气分子碰撞而减速。因此最终这些离子平均的定向运动速度有一确定值 $\bar{u}$ 。它的方向与大气电场强度的方向平行,即:

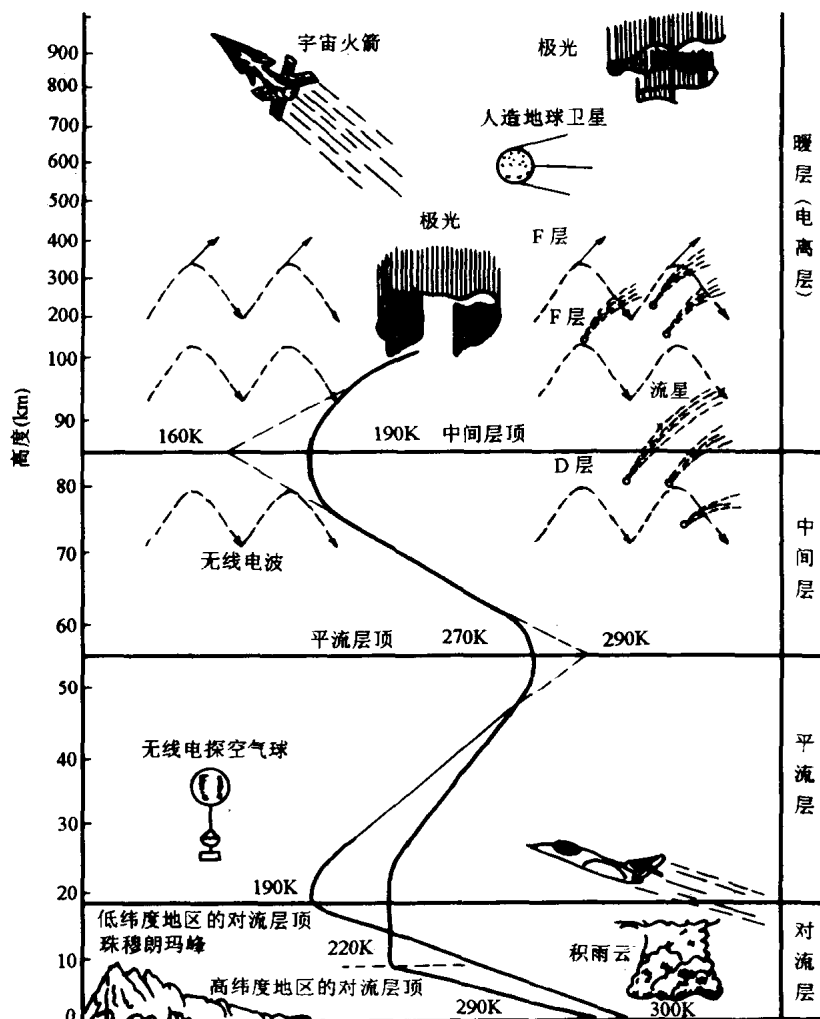


图 1.3 地球表面的大气层

$$\vec{u} = \kappa \vec{E} \quad (1.5)$$

系数 κ 称为离子的迁移率,其物理意义就是离子在单位电场强度作用下,在大气介质中作等速运动的速率,它显然与离子的大小有关,也与大气密度有关。

一般说,电离源产生浓度相等的正、负离子,这样似乎大气为等离子体,不应显示出电性。但实际上却不然。因为云雾的降水,地面尖端物体的放电,输电线路的电晕,工厂的排放等,以及重力、电场与对流等不对称作用,使得正、负电荷的分布状况不同,以致大气中的离子极性略为正。并显示出有体电荷分布,其体电荷密度为:

$$\rho = \frac{Q_+ + Q_-}{V} \quad (1.6)$$

式中 Q_+ 和 Q_- 分别表示在体积 V 内的正、负电荷值。

ρ 随地区和大气高度而变,差别很大,并且还有日变化和年变化。全球地表面的晴天大气体电荷密度平均值大约为 10^{17}C/cm^3 。

在大气电场的作用下,空气中这些带电的正、负离子定向迁移运动,就形成了晴天大气传导电流。在对流层中,气团携带着体电荷一起移动,就形成了晴天大气对流电流。大气电荷因湍流和扩散而形成电流,称之为晴天大气扩散电流。如果分别用 $\vec{j}_e$, $\vec{j}_w$ 和 $\vec{j}_i$ 三个矢量来表示它们的电流密度,那么大气中的电流密度为:

$$\vec{j} = \vec{j}_e + \vec{j}_w + \vec{j}_i \quad (1.7)$$

当大气电场强度发生变化时,还会有位移电流产生。其电流密度用 $\vec{j}_d$ 表示,则

$$\vec{j}_d = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1.8)$$

此时大气中电流密度矢量 $\vec{j}$ 为:

$$\vec{j} = \vec{j}_e + \vec{j}_w + \vec{j}_i + \vec{j}_d \quad (1.9)$$

一般情况下,在贴近地面处,当对流和湍流较强时,传导电流,对流电流和扩散电流的数量级相近,其电流密度值均大约为 10^{-16}A/cm^2 数量级,但方向不尽相同。

由大气流向地面的晴天大气传导电流,每平方米面积可以达到 $3 \times 10^{-12} \text{A}$,这是使用最灵敏的检流计也很难测量出来的微弱电流,但是,由于地球总的表面积大约为 $5 \times 10^{14} \text{m}^2$,所以流向地球的总的晴天大气电流为 1500A 。

1.2.3 大气电平衡

如前所述,地球总共携带有 $54 \times 10^4 \text{C}$ 的负电荷,而流向地球的晴天大气电流大约为 1500A ,这样,如果地球表面到电离层之间没有反向电流补充的话,那么地球上携带的负电荷用不到 10 分钟的时间就会被中和而消失干净。实际上,地球表面的负电荷始终维持着恒定的数值,这说明在自然界中还存在着给地球再充电的过程和充电电源。这个充电电源可以说就是雷暴活动地区造成的晴天大气电场的倒向,与大气离子传导电流方向相反的电场。

天空中,对流云在晴天大气电场中时常会产生电扰动,特别是在有雷暴活动的地区,大气电场的强度将发生剧烈的变化。由于大多数(但并非所有的)起电云都是在其顶部积聚净的正电荷,而在其下部积聚更大的净的负电荷,所以剧烈变化时,这些电荷造成的电场足够强,以至