

雷电防护

LEIDIAN FANGHU
JICHU

基础

林 刚 郭在华 余会莲 张晓春 编著



科学出版社

气象探测技术丛书

雷电防护基础

林 刚 郭在华 余会莲 张晓春 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以《建筑物防雷设计规范》GB 50057—2010 为指导,为适应社会需求,培养雷电防护人才,在突出我校气电结合的特色基础上,编写了雷电防护基础教材,内容包括雷电基础知识和雷电防护技术两大部分,共分为 11 章。雷电基础知识主要介绍晴天大气电场雷暴云的形成发展过程、雷暴云的类型及特征、雷暴云的电结构、雷暴云起电机理、闪电的类型、不同类型闪电的放电过程及电学特征、雷电流的几种数学模型、雷电产生的各种物理效应。雷电防护技术主要介绍防雷的目的和基本原则、防雷建筑物的分类、保护分区的划分、电子信息系统防雷等级的划分,接闪系统的组成、滚球法的基本原理、接闪器保护范围的计算方法,接地的基本概念、分类、接地装置的设计和计算方法,土壤电阻率和接地电阻的测量方法、浪涌保护器的分类、结构特点、特性参数、工作原理、电子电气系统中的应用、均压连接的基本类型、防雷分区界面均压连接以及各种金属和设备的均压连接,屏蔽的分类及特点,屏蔽中有关物理量的计算,综合布线的规范要求。本书内容完整,深入浅出,理论联系实际,雷电防护技术部分结合典型的工程实例配有大量例题分析和点评,并且每章都配有一定的习题。

本书可作为高等院校有关防雷专业和电类各专业选修现代防雷技术课的教材,也可作为培训从事防雷检测、建筑电气电子系统设计、施工人员专业培训班的教材。

图书在版编目(CIP)数据

雷电防护基础/林刚等编著. —北京:科学出版社,2016.3

(气象探测技术丛书)

ISBN 978-7-03-047999-0

I. ①雷… II. ①林… III. ①防雷—基本知识 IV. ①P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 062063 号

责任编辑:杨 岭 郑述方/责任校对:冯 铂

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

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

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:450 千字

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《气象探测技术丛书》

编委会

主 任 曹晓钟

副主任 何建新

委 员 (按姓氏拼音排序)

曹云昌 高玉春 蒋小平 雷 勇

刘黎平 杨志彪 姚振东 张兴赢

张雪芬 张义军 张玉淳

前 言

雷暴是一种自然灾害性天气，雷电造成灾害的范围随社会经济的发展呈扩大趋势且日益严重。在国民经济的许多重要领域（如航天、军事、电信、工控、金融、广电和电力等），防雷已经是热门话题。为适应社会需求，培养上述领域的雷电灾害防护人才，在突出我校气电结合的特色基础上，编写了雷电防护基础教材，内容包括雷电基础知识和雷电防护技术两大部分，共分为 11 章，每章都配有一定的习题。第 1 章主要介绍晴天大气带电粒子、大气电场、大气电流、大气电平衡等大气的的基本电特性。第 2 章主要介绍雷暴云的形成发展过程、雷暴云的类型及特征、雷暴云的电荷结构和电场以及雷暴云起电机制等。第 3 章主要介绍闪电的类型、不同类型闪电的放电过程及电学特征、全球的闪电活动参量等。第 4 章主要介绍雷电流的几种数学模型、雷电对人体的生理效应，根据雷电流的数学模型，结合例题分析了雷电产生的各种物理效应。第 5 章主要介绍防雷的目的和基本原则、防雷建筑物的分类和保护分区的划分、电子信息系统防雷等级的划分，并结合实例进行分析讲解。第 6 章主要介绍接闪系统的组成、工作原理，重点介绍了滚球法的基本原理，并结合典型的设计实例讲解接闪器保护范围的计算方法。第 7 章主要介绍接地的基本概念、分类、接地装置的设计，重点结合实例讲解接地电阻（工频接地电阻和冲击接地电阻）的设计和计算方法，分析了土壤电阻率对接地电阻大小的影响，对降低土壤电阻率的方法、土壤电阻率和接地电阻的测量方法进行介绍。第 8 章主要介绍浪涌保护器的分类、结构特点、特性参数、工作原理，重点介绍了浪涌保护器在电子电气系统中的应用，以及多级浪涌保护器的设置和能量配合问题，简要介绍了防雷基本元件。第 9 章主要介绍均压连接的基本类型、防雷分区界面均压连接以及各种金属和设备的均压连接。第 10 章主要介绍屏蔽的分类、特点，重点介绍屏蔽中有关物理量的计算。第 11 章主要介绍综合布线的目的和规范要求，并介绍有关安全距离的规范要求。

第 1~3 章由余会莲老师编写，第 4~7 章和第 11 章由林刚老师编写，第 8 章由郭在华老师编写，第 9 章和第 10 章由张晓春老师编写。本书编写中得到雷电教研室的全体教师的大力支持，在此表示衷心感谢。本书主要作为高校电类各专业选修现代防雷技术课的教材，也可作为从事防雷行业工程技术人员的参考书。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请批评指正。

编 者

2015 年 11 月于成都

目 录

第 1 章 晴天大气电环境概况	1
1.1 大气带电粒子	1
1.2 晴天大气电场	3
1.3 晴天大气等电位面	4
1.4 晴天大气电流	5
1.5 大气电平衡与全球电路	7
习题	8
第 2 章 雷暴及其起电机制	9
2.1 大气中的云	9
2.2 雷暴的形成和发展	14
2.3 雷暴的分类	16
2.3.1 单体雷暴	16
2.3.2 多单体雷暴	18
2.3.3 超级单体雷暴	19
2.3.4 其他类型的雷暴	20
2.4 雷暴云的电荷结构	21
2.5 雷暴云电场	22
2.6 雷暴云的起电机制	24
习题	27
第 3 章 闪电	28
3.1 闪电分类	28
3.2 地闪的物理图像	29
3.2.1 预击穿过程	30
3.2.2 梯级先导	31
3.2.3 先导的始发理论	34
3.2.4 先导的静电学模式	35
3.2.5 连接过程	37
3.2.6 回击	38
3.2.7 直窜先导	46
3.2.8 回击间的过程	48
3.3 正地闪	51
3.4 云内闪电	55
3.5 闪电活动参量	61

习题	63
第4章 雷电危害简析	64
4.1 雷电流的数学模型	64
4.1.1 双指数电流模型	64
4.1.2 霍德勒电流模型	64
4.1.3 斜角波电流模型	65
4.1.4 等值余弦波电流模型	65
4.2 雷电对人体的生理效应	65
4.3 雷电的物理效应	68
4.3.1 雷电的电动力效应	68
4.3.2 雷电的光辐射效应	69
4.3.3 雷电的冲击波(机械)效应	70
4.3.4 雷电的热效应	71
4.3.5 雷电流产生的高电压	72
4.3.6 雷电的静电感应效应	75
4.3.7 闪电的电磁感应效应	77
4.3.8 闪电的电磁脉冲辐射	78
习题	79
第5章 雷电防护的基本原则与分类	80
5.1 防雷的基本原则	80
5.2 防雷建筑物的分类	81
5.2.1 第一类防雷建筑物	81
5.2.2 第二类防雷建筑物	81
5.2.3 第三类防雷建筑物	82
5.3 爆炸物品与危险环境的划分	82
5.3.1 爆炸物品	82
5.3.2 爆炸性气体环境	83
5.3.3 爆炸性粉尘环境	84
5.3.4 火灾危险环境	84
5.4 防雷保护分区	85
5.5 信息系统保护级别划分	88
5.5.1 信息系统雷击电磁脉冲防护分级计算方法	88
5.5.2 信息系统雷击电磁脉冲防护分级	92
5.5.3 实例	92
习题	94
第6章 接闪与保护范围	96
6.1 概述	96
6.2 接闪器与引下线	96

6.2.1	接闪杆	97
6.2.2	接闪线	99
6.2.3	接闪带和接闪网	100
6.2.4	引下线	103
6.2.5	接闪器的布置	104
6.3	接闪器的保护范围	105
6.3.1	滚球法	106
6.3.2	接闪器的保护范围	107
6.3.3	单支接闪杆的保护范围的确定	108
6.3.4	双支等高接闪杆的保护范围的确定	110
6.3.5	双支不等高接闪杆的保护范围的确定	111
6.3.6	矩形布置的四支等高接闪杆的保护范围的确定	112
6.3.7	单根接闪线的保护范围的确定	114
6.3.8	两根等高接闪线的保护范围的确定	115
6.4	接闪设计实例	117
6.4.1	露天堆草场的接闪设计	117
6.4.2	裸露建筑物顶设备的接闪设计	120
	习题	123
第7章	接地技术	124
7.1	概述	124
7.1.1	问题提出	124
7.1.2	接地原理	125
7.1.3	接地分类	126
7.1.4	接地相关术语	127
7.2	低压配电设备接地与漏电保护	127
7.2.1	电流对人体的作用	127
7.2.2	电气设备工作接地	131
7.2.3	漏电保护装置	139
7.2.4	特殊场所中安全保护	142
7.3	工频接地电阻和冲击接地电阻	142
7.3.1	工频接地电阻	142
7.3.2	冲击接地电阻	154
7.4	土壤电阻率	160
7.4.1	土壤电阻率的测量	160
7.4.2	影响土壤电阻率的因素	161
7.5	降低高电阻率土壤的方法	163
7.5.1	一般方法	164
7.5.2	化学处理法	166

7.5.3 降阻剂法	167
7.6 防雷接地装置的选择与接地电阻的测量	171
7.6.1 接地电阻极限值的确定	171
7.6.2 接地体的选择	172
7.6.3 接地引线的选择	173
7.6.4 建筑物接地装置	174
7.6.5 接地电阻的测量	177
7.7 接地电极的抗腐蚀问题	182
7.7.1 电解现象和腐蚀	182
7.7.2 接地系统的防腐蚀措施——阴极保护法	183
7.8 各种不同接地间的关系	184
7.8.1 各种接地的要求与目的	184
7.8.2 分立接地与联合接地	185
7.8.3 一点接地与混合接地	186
7.8.4 环形接地与等电位连接	189
7.8.5 建筑物接地网设计原则	190
习题	190
第8章 浪涌保护器	192
8.1 概述	192
8.1.1 问题提出	192
8.1.2 伏秒特性	193
8.1.3 浪涌保护器	194
8.2 电力浪涌保护器	195
8.2.1 保护间隙	195
8.2.2 管型浪涌保护器	196
8.2.3 阀型浪涌保护器	197
8.2.4 磁吹阀型浪涌保护器	202
8.3 电信浪涌保护器	203
8.3.1 电信浪涌保护器的主要技术参数	203
8.3.2 电信浪涌保护器的分类	204
8.3.3 电源浪涌保护器	205
8.3.4 天馈浪涌保护器	207
8.3.5 信号浪涌保护器	209
8.3.6 电信浪涌保护器的应用	212
8.3.7 有关多级浪涌保护器的设置	228
8.4 浪涌保护器的主要元件	233
8.4.1 放电管	233
8.4.2 新型保护器件——二极管型保护器件	242

8.4.3 氧化物压敏电阻	246
习题	255
第 9 章 均压连接	257
9.1 概述	257
9.2 均压连接的结构类型	257
9.2.1 均压连接的基本结构	257
9.2.2 共用接地系统的均压连接的两种基本结构	257
9.2.3 共用接地系统的均压连接的组合结构	258
9.3 LPZ 区界面的均压连接	259
9.4 常见系统的均压连接	260
9.4.1 金属设施的均压连接	260
9.4.2 低压供电设备的均压连接	262
9.4.3 信息技术设备的均压连接	264
习题	265
第 10 章 屏蔽	266
10.1 概述	266
10.1.1 问题提出	266
10.1.2 电磁兼容	266
10.2 屏蔽分类	267
10.2.1 静电屏蔽	267
10.2.2 静磁屏蔽	269
10.2.3 电磁屏蔽	270
10.3 屏蔽中有关物理量的计算	272
10.3.1 各种装置构成的环路中感应电压及电流	272
10.3.2 环路中感应电压、电流和能量的计算	274
10.3.3 屏蔽中电磁场的计算	280
习题	283
第 11 章 综合布线及安全间距	285
11.1 综合布线	285
11.1.1 综合布线的目的	285
11.1.2 综合布线的要求	285
11.2 安全距离	287
11.2.1 独立接闪装置与被保护对象之间的安全距离	287
11.2.2 利用建筑物的钢筋作为防雷装置与被保护对象之间的安全距离	288
习题	290
参考文献	291

第 1 章 晴天大气电环境概况

晴天大气电场代表的是一个参考状态，雷暴的发生实际上是相对于这一正常状态的偏离。讨论雷暴和闪电之前有必要对晴天电场进行了解。其实大气中存在大量尺度和重量不等的荷电粒子，大气中的离子是大气中最主要的带电粒子，而大气中的气体分子和气溶胶是大气中荷电的基本载体，荷电载体不同，由此形成的带电粒子不同，其特性也不同。

1.1 大气带电粒子

18 世纪时，已有学者发现大气并非绝缘介质，莱顿瓶的发明就是因为很多研究电现象的学者发觉绝缘良好的带电物上的电荷会在几十分钟后消失殆尽。长期考察之后，才得知大气里总是含有大量气体正、负离子，使大气具有微弱导电性。这些带电粒子是如何产生的？其运动有何规律？这些都与闪电的特性和防雷有紧密关系。

1. 大气带电粒子

大气中的离子主要来源于大气中存在的电离过程，而引起大气电离的电离源有四种：一是地壳中放射性物质发出的放射线；二是大气中放射性物质发生的放射线；三是地球之外的宇宙射线，如太阳辐射中波长 $0.4\mu\text{m}$ 的紫外线，但它主要存在于高层大气，在对流层中不是很重要；四是大气中的闪电、火山爆发、森林大火、尘暴、雪暴等，也使大气电离。前三种是主要的电离源。

在陆地上，最底层的电离主要是由于地壳中放射性物质的作用，它能以大约 $8 \text{ 个}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 的速率产生离子对，而宇宙线的速率为 $2 \text{ 个}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 。但在较高的高度上，宇宙辐射有一个不断增长的作用。在海洋上，宇宙辐射起主要的作用。离子产生率最初随高度增加而增加，在中纬度地区的 12km 高度处达到约 $45 \text{ 个}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ 。在 12km 以上，由于空气密度降低，离子产生率大大降低。正空间电荷是由正离子过剩造成的，平均而言，正离子的过剩与地表上的负电荷相平均，即晴天大气中全球总正离子过剩量为 $5 \times 10^5 \text{ C}$ 左右。

各种离子可以粗略地分成两类：小离子和大离子。小离子通常由几个中性分子簇包围的单键荷电的分子所组成，具有约 $1.5 \text{ cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 的迁移率。迁移率是指在单位电场作用下离子的移动速度。大离子是由小离子附着到大得多的中性气溶胶粒子上时所形成的，具有 $10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ cm}^2/(\text{s} \cdot \text{V})$ 的迁移率。小离子的平均浓度，海上比陆地上要大；在陆地上小离子较大的产生率更多地为大核高捕获率所抵消。

正、负离子浓度相差不大，而代表正空间电荷的正离子有少量的过剩；正、负小离

子浓度之比约为 1.2。空气电导率正比于离子浓度和迁移率之乘积，在 20km 以下，它随高度增加而剧增，这是宇宙辐射强度随高度而变化，空气密度较小处离子迁移率较大，以及在较大高度上的离子复合率较低和放射性物质的浓度较小等综合作用的结果。低层大气中，正离子的电导率稍大于负离子的电导率，而在 7km 以上，极性电导率几乎相等。在晴天电场作用下，正离子向下移动而负离子向上移动，这就造成了一支方向朝下的传导电流，它使地球的负电荷趋向中和。在乡村空气中和海洋上，电导率主要是小离子的作用；在城市空气中，大离子的贡献为 10%或 20%。

2. 大气中的气体成分

大气中的气体成分是指包围地球的空气总体，见表 1-1。它是地球上一切生命赖以生存的重要物质条件之一。大气不仅随地球而转动，而且相对于地壳，又有复杂的运动。大气是以氧、氮为主的多成分混合气体，地表附近密度最大，接近地表的干燥空气，在标准状况下每升重 1.293g。海平面平均气压约 1013hPa。大气的密度和气压均随高度的增加按指数律减小。大气总质量约为 5.3×10^{18} kg，约占地球总质量的百万分之一。大气总质量的 99.9%集中在 48km 以下，约在距地表一个地球半径以外的高空，逐渐向星际空间过渡。

表 1-1 大气中的气体成分

气体	容积含量/%	气体	容积含量/%	气体	容积含量/%
氮 (N ₂)	78.084	氢 (H ₂)	5.0×10^{-5}	沼气 (CH ₄)	1.8×10^{-4}
氧 (O ₂)	20.947	氙 (Xe)	8.7×10^{-6}	一氧化碳 (CO)	$6.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5}$
氩 (Ar)	0.934	氡 (Rn)	微量	二氧化硫 (SO ₂)	1.0×10^{-4}
氖 (Ne)	1.82×10^{-3}	水 (H ₂ O)	0.1~0.4	氧化二氮 (N ₂ O)	2.7×10^{-5}
氦 (He)	5.24×10^{-4}	二氧化碳 (CO ₂)	0.032	一氧化氮 (NO)	微量
氪 (Kr)	1.14×10^{-4}	臭氧 (O ₃)	$1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5}$	二氧化氮 (NO ₂)	微量

3. 气溶胶

大气气溶胶是指悬浮在大气中的固体和液体微粒共同组成的相对稳定的多相体系。气溶胶的尺度范围为 0.001~100μm，跨越 5 个量级。图 1-1 为气溶胶图片。气溶胶粒子主要来源于地球地面，也有来自外太空的宇宙尘埃，可分为自然源和人为源两大类：自然源是指由自然现象产生的，如土壤、岩石风化和火山喷发的尘埃，生物质燃烧，海浪破裂，微生物、孢子、花粉等有机物质等；人为源是指由人类活动产生的，主要是工业产生的烟尘和粉尘以及工业排放气体通过气—粒转化产生的气溶胶。随着工业的发展和人口增加，人类活动产生的粒子也日益增多，人为排放的大气气溶胶产生的气候和环境效应已成为当今环境和大气科学普遍关注的热门问题。

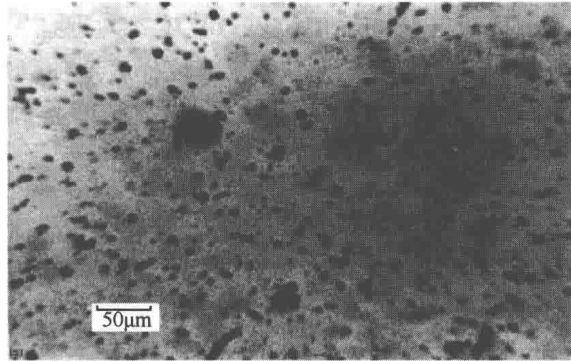


图 1-1 气溶胶图片

气溶胶质量 80% 以上都包含在对流层中。对流层中的气溶胶是一个包括固体和液体颗粒的复杂的混和体系。气溶胶的源区主要在地面，其中的大质粒常沉降在局地源附近，细质粒可以远距离输送。大多数的气溶胶质粒集中在对流边界层 1~2km 范围内，并且具有最宽的尺度和最大的变动性，其水平分布的变化很明显受源区大气稳定度与混合层厚度的强烈影响，由于受地面的影响较弱，4km 以上的尺度分布类似于稳定的背景气溶胶。

平流层气溶胶的含量虽然非常少，但是它对气候的影响却不可忽视。平流层气溶胶可分为背景气溶胶、火山气溶胶和极地平流层云质粒三种类型，其主要来源于对流层直接的输送，包括气体含硫化物通过连续扩散进入平流层，经气—粒转化形成的粒子以及火山喷发直接注入的硫化物和尘埃。

随着环境污染问题的日益严重，人们也已经意识到大气气溶胶自身的污染特性与其物理化学特性以及大气中的非均相化学反应有着密切关系。气溶胶还与很多环境问题如臭氧层的破坏、酸雨的形成、烟雾事件的发生等密切相关，这些环境问题主要与气溶胶的化学组成成分以及大气中发生的化学变化过程有关。这些气溶胶的来源主要是人为排放的气体经气—粒转化后形成的颗粒。因此，人为排放后产生的气溶胶颗粒严重影响大气环境质量，已成为环境科学的突出问题。

1.2 晴天大气电场

大气中带净正电荷，它是大气中两种相反极性多种离子的合成结果。因此大气实际上是微弱导电的，电流密度随着时间、地点的不同而发生变化，但随高度变化较小，在通常的理论计算中，晴天区平均的电流密度取值为 $3 \times 10^{-12} \text{A/m}^2$ 左右。传导到地球上的面电荷密度约为 -10^{-9}C/m^2 ，总的全球晴天区的地表电荷量约为 $-5 \times 10^5 \text{C}$ 。不同高度的垂直电场强度在地表呈现极大值，就全球平均而言，其值为 120V/m ，而在海洋上为 130V/m ；在工业区由于空气高度污染，小离子浓度减小，所以空气电导率变小，在电流密度不变的情况下，场强会大大增高。地表场强 E_0 (V/m) 与面电荷密度 σ (C/m^2) 的关系式可由高斯定理导出：

$$E_0 = \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)_{z=0} = -4\pi\sigma \quad (1-1)$$

式中, V 为电位或地球和 z 高度大气间的电位差 (V); z 为垂直坐标 (m)。晴天时, 全球各地的 E_0 都具有相同的符号和量级。场强 (或电位梯度) 随高度减小, 10km 高处降至地表值的 3%。因而, 低层大气通常含有正的空间电荷密度 $\rho(\text{C}/\text{m}^3)$, 则

$$\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -4\pi\rho \quad (1-2)$$

将式 (1-2) 积分, 得

$$\frac{\partial V}{\partial z} - \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)_{z=0} = -4\pi \int_0^z \rho dz \quad (1-3)$$

同时地表的电位梯度值为

$$\left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)_{z=0} = 4\pi \int_0^\infty \rho dz \quad (1-4)$$

因而

$$\sigma = -\int_0^\infty \rho dz \quad (1-5)$$

在实际大气中, 由于气象、地理条件等多种原因, 大气电场随空间和时间而变。大气相对于地球的电位, 一直到 20km 左右都随高度而增加, 往上则不再有明显的变化, 约为 $3 \times 10^5 \text{V}$ 。20km 以上大气中存在很小的电位梯度表明, 这些高度上的空气是高度导电的, 空间电荷密度随高度增加而减小。

除了由空间电荷密度和空气电导率的局地变化造成的短时脉动, 晴天电场强度还存在着日变化和季节变化。在海洋、两极和远离大气污染源的某些内陆地区, 电位梯度在格林尼治平均时约 19 时出现一个极大值, 而约在格林尼治平均时 04 时出现一个极小值。在大多数陆地测站, 电位梯度极大值和极小值出现的时间取决于地方时, 通常存在着两个起伏, 04~06 时和 12~16 时出现极小值, 07~10 时和 19~21 时出现极大值。这个日变化的振幅可达平均值的 50%。它与大气污染程度密切相关, 后者控制着小离子的含量, 从而控制着空气的电导率。在海洋上, 电位梯度的年变化不明显; 而南北半球上的陆地测站, 在当地的冬天出现极大值, 夏天出现极小值。

1.3 晴天大气等电位面

大气电位的分布可用大气等电位形象地加以表示。大气等电位面是指大气中相同大气电位各点相连而成的连续曲面。通常可把大地当成导体, 因此, 晴天大气等电位面平行于地面, 高度越低, 晴天大气等电位面的电位值越小; 高度越高, 晴天大气等电位面的电位值越大。当地面出现起伏或存在高耸地物时, 晴天大气等电位面将产生相应的起伏和畸变。随高度增加, 这种起伏和畸变将逐渐减弱。晴天大气等电位面的垂直剖面分布如图 1-2 所示。

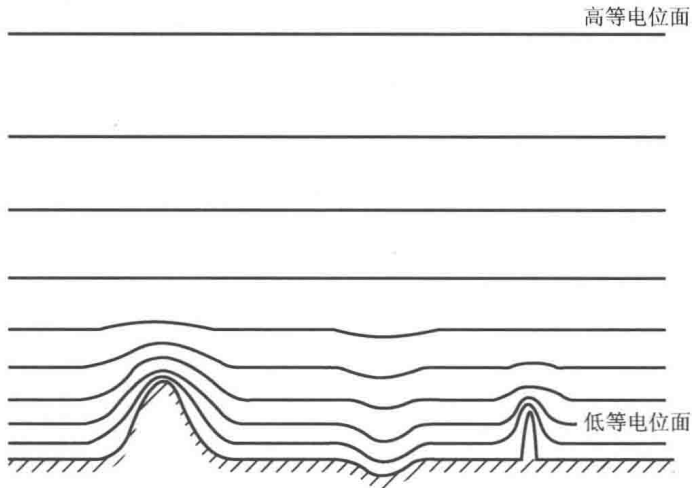


图 1-2 晴天大气等电位面

若 n 为大气中某点处大气等电位面的单位法向量，其方向垂直于大气等电位面，且由低电位值指向高电位值，则该点处的大气电场也可表示为

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial V}{\partial n} \mathbf{n} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明，大气等电位面分布较密集的地方，如图 1-2 中山顶附近和地物顶端附近等处，大气电场较强。反之，大气等电位面分布较稀疏的地方，如图 1-2 中平坦地面附近，大气电场较弱。

(1) 对于平坦地面，晴天大气等电位面为平行于地面的平面，单位法向量 n 垂直向上，与坐标轴 z 轴重合。因此，晴天大气电场只存在垂直分量 E_z ，而晴天大气电场的水平分量 $E_x = E_y = 0$ 。这时，晴天大气电场的表达式可改写为标量形式的表达式：

$$\mathbf{E} = E_z = -\frac{\partial V}{\partial z} \quad (1-7)$$

(2) 对于地形起伏和高耸地物附近的地区，晴天大气等电位面因起伏和畸变而成为曲面，单位法向量 n 也不再与坐标轴 z 轴重合。因此，晴天大气电场不仅存在垂直分量 E_z ，还存在水平分量 E_x 和 E_y 。然而，当观测点离山丘、洼地和地物的距离大于其垂直尺度的五倍，或观测点离如电线杆等细长地物的距离大于其垂直尺度的三倍时，地形和地物对晴天大气等电位面畸变的影响便可忽略，这时的情况就与平坦地面的情况相同了。随着高度增加，地形和地物对晴天大气等电位面畸变的影响便越来越不显著，为便于比较，实际观测的晴天大气电场多为平坦地面条件下的晴天大气电场。

1.4 晴天大气电流

大气中正、负电荷的输送便形成了大气电流。在晴天大气中，正、负电荷的输送具有不同方式，所以晴天大气电流可由不同性质的晴天大气电流分量组成。晴天大气电流主要包括晴天大气传导电流、晴天大气对流电流和晴天大气扩散电流。晴天大气传导电

流是晴天大气离子在晴天大气电场作用下产生运动而形成的大气电流。晴天大气对流电流是晴天大气体电荷随气流移动而形成的大气电流。晴天大气扩散电流是晴天大气体电荷因湍流扩散输送而形成的大气电流。晴天大气电流密度矢量为

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_c + \mathbf{j}_w + \mathbf{j}_t \quad (1-8)$$

式中, \mathbf{j}_c 为晴天大气传导电流密度矢量; \mathbf{j}_w 为晴天大气对流电流密度矢量; \mathbf{j}_t 为晴天大气扩散电流密度矢量。

1. 晴天大气传导电流

晴天大气离子在晴天大气电场的作用下, 大气正离子沿着晴天大气电场的方向运动, 大气负离子则沿着与晴天大气电场相反的方向运动, 从而形成与晴天大气电场方向一致的晴天大气传导电流。晴天大气传导电流密度 \mathbf{j}_c 与晴天大气电场 \mathbf{E} 之间有关系式:

$$\mathbf{j}_c = \lambda \mathbf{E} \quad (1-9)$$

2. 晴天大气对流电流

晴天大气体电荷若随气流移动则形成晴天大气对流电流密度 \mathbf{j}_w , 并可表示为

$$\mathbf{j}_w = \rho \mathbf{V} \quad (1-10)$$

3. 晴天大气扩散电流

晴天大气体电荷在大气中的分布是不均匀的, 往往因大气湍流扩散输送而形成晴天大气扩散电流。晴天大气扩散电流密度 \mathbf{j}_t 可表示为

$$\mathbf{j}_t = -k \nabla \rho \quad (1-11)$$

4. 晴天大气中的位移电流

根据电动力学可知, 变化的电场可产生位移电流, 晴天大气电场随时间变化时, 也会产生大气位移电流。大气位移电流密度 \mathbf{j}_d 可表示为

$$\mathbf{j}_d = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1-12)$$

若地面晴天大气电场在 1h 内增大了 300V/m, 则可求得大气位移电流密度为 $7.4 \times 10^{-17} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 其值与晴天大气传导电流密度可比拟。大气位移电流并不是大气中电荷输送的结果, 而是一等效电流, 因此, 不属于晴天大气电流的组成部分。大气位移电流的影响可能在直接测量晴天大气电流密度时出现较大偏差, 因此在直接测量晴天大气电流时可采取适当技术措施, 以避免大气位移电流对观测结果的影响。

晴天大气电流密度不仅随地点而异, 还具有明显的日变化、年变化和脉动起伏变化。在近地面层中, 由于受大气湍流的影响, 晴天大气传导电流密度随高度分布较为复杂。在混合层以上的大气中, 晴天大气电流密度近似为晴天大气传导电流密度, 而且变化较小。晴天大气电流密度有明显的日变化, 其变化规律随地点和季节而异, 大陆上变化复

杂，具有明显的日变化，有的地方表现为单峰单谷型，清晨和上午出现峰值，傍晚至夜间出现谷值；海洋上变化较小。晴天大气电流密度还有明显的年变化，其变化幅度一般陆地上大，海洋上小，并随地方而异，有的地方，晴天大气电流密度具有冬季出现极大，夏季出现极小的年变化规律。

观测表明晴天大气电流密度约为 $10^{-16} \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 量级，就全球而言，陆地面晴天大气电流密度平均为 $2.3 \times 10^{-16} \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，海洋表面为 $3.3 \times 10^{-16} \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，全球平均为 $3.2 \times 10^{-16} \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

1.5 大气电平衡与全球电路

如前所述，全球晴天区的地表电荷量约为 $-5 \times 10^5 \text{C}$ ，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和电荷中和过程达到平衡时，便能形成恒定的晴天大气电场。

全球电路概念是在电导大气的基础上产生的。图 1-3 给出了全球电路的等效示意图。电离层和地面构成一个球形电容器，如假定地面电位为零，则电离层电位平均约为 $+300 \text{kV}$ 。

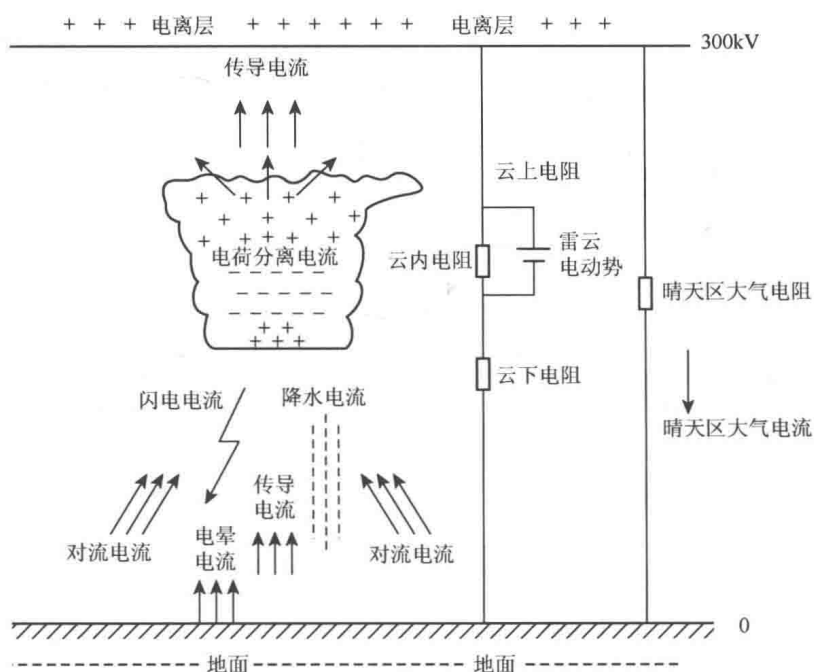


图 1-3 全球电路的等效示意图