



空间电学

庄洪春 编著

科学出版社

空间电学

第 1 卷 第 1 期

1980 年 1 月

空 间 电 学

庄洪春 编著

科 学 出 版 社

1 9 9 5

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了地球空间电学性能的形态、变化规律及基本理论。描述了从地面到几十个地球半径距离内的空间电学现象,以及与其他重要地球物理现象间的关系,特别是太阳活动对地球空间电环境的影响。

本书可供地球物理、空间物理、大气物理、气象、宇航、国防和天文等部门从事研究和实际工作的科技人员参考,也可作为空间物理及其他有关专业师生和研究生的教学参考书。

空 间 电 学

庄洪春 编 著

责任编辑 方开文

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1995 年 6 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1995 年 6 月第一次印刷 印张: 26 1/4

印数: 1—550 字数: 696 000

ISBN 7-03-003868-1/O · 679

定价 64.80 元

序 言

本书主要描述发生在地球空间内的电动力学现象。地球空间是指跟随地球一道绕太阳公转的粒子和场所占据的空间。它包括大气层、电离层和磁层等几个不同性质的区域,是地外天体,特别是太阳对人类发生影响的必经之路。地球空间的状态与人类的生存直接相关。空间状态包括粒子和场的状态。电场是与地球引力场和磁场一样重要的场。空间时代以来,特别是近年来,人们越来越认识到电场的重要性。人们利用了几乎所有的空间探测手段对地球空间内的电状态作了各种各样的探测,获得了大量的数据。在此基础上所做的研究也取得了丰硕的成果,大大地扩展了传统的大气电学的知识。本书的目的就是尽量完整地收集迄今为止人们所取得的空间电动力学方面的最宝贵的探测资料,尽量系统地综合所有最重要的研究成果,以供有关科研和教育工作人员参考。

第一章导言中除了叙述简史外,还主要介绍了地球空间的环境状态,作为对空间物理不很熟悉的读者阅读本书的背景知识。第二章描述地球空间的导电性能以及产生导电性能的原因,即电离源、带电粒子浓度及电导率等,说明整个地球空间都具有大小不等的导电性。这样,加上电源以后就会产生电场和电流。第三章就叙述地球空间中的电源。实际上在地球空间处处都存在着电源,并且它具有各种形式。第三章只是叙述在麦克斯韦(Maxwell)方程中表现出来的极化和感应两种电源,并且与由它们产生的电场一道介绍。第四至第六章依次分别叙述地球空间各区域即大气层、磁层和电离层中的电状态。它们的电状态各有自己的特点,所以分章叙述,对这些电状态的介绍重点放在慢速度过程。第七章叙述中等速度和快速度过程,主要介绍与地球空间中慢速度电状

态的最重要的电源即雷暴直接有关的天电等过程。因为太阳活动是造成地球空间电状态扰动的主要外来因素，所以第八章专门综述了与日地关系直接有关的空间电学内容。

本书叙述每一个现象的一般次序是，首先介绍从观测得到的空间分布形态及时间变化规律，然后给出经验公式，最后叙述理论模型。我们力求选用最新的观测结果和最先进的理论模型，一般并不介绍历史演变的完整过程以及并列的不同学派，而注重简明实用。本书一般只收集探测结果，对探测技术本身并不着重介绍。若无特别说明，本书中的公式一般都是实用单位制形式。

原空间物理所所长方正知先生对本书的编著给予了热情鼓励。空间电学组全体成员对本书的编著工作给予了大力的支持，直接参加了部分文献、图表、公式和单位等的收集和整理工作。作者对所有这些对于本书的成稿作出直接或间接贡献的同志们表示衷心的感谢。

本书承蒙吕保维、方正知、刘振兴、张先恭、徐楚孚、孙景群和马瑞平等同志审阅，并提出了许多宝贵意见，在此特表谢意。由于作者水平和经验有限，错误和不当之处在所难免，望读者批评指正。

符 号 表

a	半径; 电晕常数	DP	极区扰动亚暴
A	原子量; 磁场矢位; 交换系数	D_{st}	磁暴时变化
A_n	衰减因子	e	电子; 电子电荷; 水汽压
b	亮度	e	单位矢量
b'	噪声亮度	e_r	径向单位矢量
b	磁场方向单位矢量	e_i	发电机源区电场
B	磁感应强度	e_x	x 方向单位矢量
B_m	镜点磁场	e_y	y 方向单位矢量
B_n	传输因子	e_z	z 方向单位矢量
B_0	地磁场	E	能量; 椭圆积分
c	速度; 光速	E	电场强度
C	电容	E_e	发射机电场
C_a	全球大气电容	E_0	静止能量
C_i	电离层电容	E_i	赤道异常函数
C_M	磁层电流电容	E_p	极化电场
CR	宇宙线	E_T	每个宇宙线粒子总能量
d	直径	EUV	远紫外辐射
d_p	粒子直径	E_z	垂直电场
D	扩散系数	$E_{ }$	平行电场
D	电感应矢量	E_{cl}	对流电场
D_i	周日函数	E_{ex}	发电机电场
		f	频率;

	分布函数		辐射亮度;
f_H	电子回旋频率		辐照度;
f_i	折迭因子		地磁场倾角;
f_s	贝塞尔函数;		电流强度
	鼻哨鼻频	I_e	闪击连续电流强度;
f_p	等离子体频率		云顶流入电离层电流
F	力	I_i	闪击电流上升速率
F_a	外噪声数	I_p	回击峰值电流强度
F_e	地球轨道外宇宙线能谱	I_v	修正第一类贝塞尔函数
F_{df}	扩散泳力	j	电流密度;
F_e	电力		电流
F_0	太阳系外宇宙线能谱	j_b	地面尖端放电电流
F_{th}	热泳力	j_c	对流电流密度
g	引力加速度	j_D	位移电流
G	格林函数	j_G	梯度漂移电流
G_{mech}	机械动能	j_I	面电流
G_e	电磁动能	j_L	传导电流密度
h	等效深度;	j_M	迴旋电流
	高度	j_N	降水过程总电流
h_e	海拔高度	j_p	极化电流;
h_n	虚高		惯性电流
H	大气标高;	j_R	曲率漂移电流
	标高;	k	热导率;
	汉克尔函数;		波矢量
H	磁场强度	K	核粒子名;
H_i	第 i 种成分大气标高		涡流扩散系数;
i	离子;		椭圆积分
	虚数单位	K_n	幅度因子
i_A	大气总电流	K_p	地磁指数
I	湿润指数;	K_v	修正第二类贝塞尔函数

l	长度		全球雷暴活动数;
L	特征长度;		闪电回击数
	自由程;	N_e	电子密度
	磁壳参数;	N_H	黑迹和灰迹粒子总倍增数
	磁静日太阴潮汐电流系统	N_1	正气溶胶浓度
L_i	纬度函数	N_2	负气溶胶浓度
L_M	磁层电流的电感	N_0	中性气溶胶浓度
L^p	极区月球潮电流	p	质子
LT	地方时	p_b	黑迹粒子产生率
m	粒子质量;	p_g	灰迹粒子产生率
	偶极矩	p_n	勒让德多项式;
m_i	i 种成分分子质量		噪声功率
M	分子量;	p_i	簇射粒子产生率
	宇宙线粒子倍增数;	P	压强;
	偶极矩		电荷数;
M_b	宇宙线黑迹粒子倍增数		功率
M_g	宇宙线灰迹粒子倍增数	p_v	电偶极矩密度
M_i	簇射粒子倍增数	p_n	缔合勒让德函数
M	磁化强度矢量	q	电荷;
n	数密度;		电离率
	中子;	q_T	放射性电离率
	折射指数	q_i	宇宙线电离源函数;
n_i	i 种成分大气数密度		面电荷密度
n_1	正小离子浓度	Q	空间电荷;
n_2	负小离子浓度		单位质量空气带电荷
n_+	正离子数密度	Q_A	全球电荷
n_-	负离子数密度	Q_c	连续电流电荷
N	粒子数密度;	Q_s	闪电电荷量
	气溶胶总浓度;	Q_i	宇宙线电离率;

	面电荷;	τ	推迟时间
	每次闪击电荷量	T	温度;
Q_0	电离能		传输系数
r	径向距离;	T_c	闪电连续电流持续时间
	径向坐标	T_g	闪电持续时间
r	位置矢量	T_i	周年函数
r_c	曲率半径	T_p	等效位温;
r_e	地球半径		回击峰值电流时间
R	宇宙线粒子刚度	u	不匹配欧拉位;
R'	降雨速率		德拜位
R_A	全球大气电阻	u_i	非极函数
R_D	水平电阻	u_p	主激发位
R_e	地球半径	u_s	次激发位
R_E	地面电阻	U	电位;
RH	相对湿度		电层电位
R_g	云凝结核的平均几何半 径	U_A	大气电位
R_I	电离层的电阻	U_p	极化电位
R_1	宇宙线垂直入射时截止 刚度	U_0	全球平均大气电位
R_1	云地电阻	v	速度;
R_2	云内电阻		水平风速;
R_3	云顶-电离层间电阻		风速;
S	电流源函数;		体积元;
	面积;	v	不匹配欧拉位
	全球云面积	v	速度矢量
S_i	太阳周函数	v_A	阿耳文速度
S_q	磁静日太阳潮汐电流系 统	v_g	群速度
t	时间	$v_{g'}$	波包传播速度
		v_p	平行方向速度;
			相速度
		v_r	横向速度

V	电位; 力位; 电离层电位; 体积	Γ_A	全球大气柱电阻
VEI	火山爆发指数	δ	太阳倾角; 函数名
V_h	海梅特位势	Δ	镜像捕获距离
V_m	标量位	ϵ	介电常数
W	风速; 磁几何函数; 传输函数	ζ	释放系数; 约化高度
W_k	等离子体动能	η	电离效率; 粘滞系数
W_m	磁能	θ	极距; 天顶角
W_p	平行方向动能	κ	玻耳兹曼常数
$W_\perp$	横向动能	λ	波长; 自由程; 投掷角
X	宇宙线穿透深度; 粒子穿越厚度 电位梯度	Λ	核子吸收长度
XR	X 射线	μ	磁导率; 离子迁移率; 磁矩; 迴旋不变量
Z	原子序数; 粒子数	μ_H	霍耳迁移率; 漂移迁移率
Z_i	原子序数	μ_p	佩德森迁移率; 垂直迁移率
Z	阻抗张量	$\mu_\parallel$	平行迁移率
α	复合系数; 投掷角; 磁力线欧拉位座标之一	ν	碰撞频率
β	电子速度与光速之比 附着系数; 磁力线欧拉位之一	ν	离子曳力张量
Γ	复赫兹矢量	Π	赫兹矢量函数
Γ	大气柱电阻密度	ρ	大气质量密度; 大气比电阻;

	电阻率		光学深度;
ρ_q	电荷密度		时间常数
ρ_m	等离子体密度	τ_g	迴旋周期
ρ_0	平均大气密度	ψ	地理纬度
σ	电导率;	φ_m	地磁纬度
σ	吸收概率;	Φ	位势;
	电离截面		地磁纬度;
	标量电导率		方位角;
σ_c	考林电导率		以弧度为单位的地方
σ_h	霍耳电导率		时;
σ_H	霍耳电导率		飘迁不变量
σ_P	佩德森电导率	Φ_E	能流通量
σ_r	参考电导率	χ	天顶角
σ_s	海平面上电导率	ϕ	标势;
$\sigma_{ }$	平行电导率		电位
σ_0	标量电导率	ω	角频率;
Σ	积分电导率		质子能量;
Σ_c	考林积分电导率		共转角速度
Σ_H	霍耳积分电导率	Ω	地球自转角频率;
Σ_P	佩德森积分电导率		角迴旋频率;
τ	特征时间;	Ω_e	电子迴旋频率

目 录

符号表	v
第一章 导言	1
§ 1.1 研究简史和意义	1
§ 1.2 地球空间	5
§ 1.3 基本概念和基本规律	26
参考文献	36
第二章 地球空间导电性能	38
§ 2.1 大气电离源和电离率	38
§ 2.2 大气带电粒子	72
§ 2.3 迁移率	90
§ 2.4 大气电导率	96
§ 2.5 电离层导电性能	117
§ 2.6 磁层导电性能	158
参考文献	161
第三章 地球空间的电极化和感应	169
§ 3.1 极化电荷	169
§ 3.2 极化电场	196
§ 3.3 感应电场	240
参考文献	260
第四章 全球大气电回路	265
§ 4.1 全球大气电路的图像	266
§ 4.2 雷暴电源	293
§ 4.3 电离层电位	319
§ 4.4 大气电流	325
参考文献	354

第五章 磁层电回路	358
§ 5.1 概况.....	358
§ 5.2 磁层顶电流.....	365
§ 5.3 越尾电流.....	376
§ 5.4 环电流.....	378
§ 5.5 场向电流.....	387
§ 5.6 极光电急流.....	430
§ 5.7 磁暴模型和磁尾电流.....	436
§ 5.8 磁层电场.....	444
参考文献.....	475
第六章 电离层电状态	483
§ 6.1 大尺度电流和电场.....	484
§ 6.2 局地发电机效应.....	512
§ 6.3 极区电离层电状态.....	531
参考文献.....	582
第七章 空间电波	588
§ 7.1 辐射源.....	588
§ 7.2 闪电的电磁场观测和理论计算.....	615
§ 7.3 中、高层大气中的电波	648
§ 7.4 哨声和甚低频发射.....	679
§ 7.5 低频波.....	692
参考文献.....	697
第八章 电耦合与日地关系	703
§ 8.1 地球空间内的电耦合.....	706
§ 8.2 太阳活动对地球空间电的影响.....	744
§ 8.3 日气关系与空间电学.....	789
参考文献.....	814
索引	825

第一章 导 言

§ 1.1 研究简史和意义

一、大气电学

大气电学是大气物理学中较为成熟的领域之一，已经被不断地探索了两个多世纪。通常认为，大气电学诞生于1750年富兰克林(Franklin)发现闪电的电学性质^[1]。他做了一个用风筝把闪电从云中引下来的举世闻名的实验。在当时人们还把空气看作绝缘介质。但不久库仑(Coulomb)于1788年进行的一项实验表明，对地绝缘良好的带电体暴露在干洁大气中后经过一段时间电荷会消失。以后经过一系列研究，直到1900年人们才证明在大气中存在离子，这些离子的存在就是造成漏电的原因。于是人们开始致力于寻找大气电离源。后来发现了作为电离源的宇宙线。对宇宙线的研究越来越吸引人，并且为高能核物理这样一门非常重要的新领域的发展起到了相当大的促进作用，而大气电学本身的发展在较长时间内似乎处于停顿状况。其原因是探测困难。因为地面上观测到的大气电场包含了局地气象的影响。所以直到1954年第一次国际大气电学会议时仍把区分局地气象影响作为重点研究问题。当时“大气电学”的含义主要是静电学部分，包括雷暴起电、全球电路，同时还包括闪电及有关现象，如天电等。初期研究的探测最高到气球高度即30km。观测表明，空气的电导率随高度呈指数增加，在相当高的高度上电导率会很大，以致像导体那样有很强的导电性。因此开尔文(Kelvin)于1860年提出设想，认为在高层大气中存在一导电层，这一导电层与地面共同构成一个巨大的电容器。这一导电层完全是就大气的导电性能来说的。所以有人叫“等位层”，也有的叫“电层”。人们推测电层

高度约为 40—60Km。在电层与地面之间的区域，就是传统的大气电学的研究范围^[2-4]。

二、空间电学

在 1954 年 5 月召开的第一次国际大气电学会议上，会议主席 R. E. Holzer 提出一个属于空间电学的问题，他问是否应该到 30km 高度以上进行电学测量，这种测量是否有意义，是否有助于我们对大气电学整体的理解。

国际大气电学第二次会议是 1958 年 5 月召开的。那时人类已经进入了空间时代。第二次会议与第一次会议相比的显著进展是，采用了新的空间手段，如高空气球、火箭、卫星和深空飞行器等，探测高度大幅度提高。

1963 年 5 月召开的第三次国际会议就定名为“关于大气电学和空间电学的第三次国际会议”，会后的论文集也叫做“大气电学和空间电学的问题。”正式把空间电学的研究提到了重要的位置。

随着研究领域从大气电学推广到空间电学，我们的知识逐渐丰富了，眼界更开阔了。早先的大气电学研究近地面气象层内的电现象，那里的带电粒子是正、负离子。高度扩展到 10 多公里以上的中层大气和电离层后，那里的带电粒子过渡到自由电子为主，电子成为主要的带负电的粒子，电导率由标量过渡到张量。再往上去，则要用电动力学来代替静电学作研究。

极光现象是早就被人们看到的自然界的奇观。早在 2000 多年前，中国就有了用肉眼观测极光的记录。它在地球上分布在围绕磁极并离极约 23° 的带形区，发生在离地面 100km 以上的高空。早在 1896 年著名挪威科学家伯克兰 (Birkeland) 就首次指出极光是高能带电粒子沿地球磁力线进入极区电离层后，对高空大气造成的电离和激发作用产生的。这已经不是原先的大气电学范围的现象，而是空间电学现象。闪电是大气中的放电现象，而极光则是磁层中的放电现象。

这里，我们想起法拉第 (Faraday) 在 1932 年做的一个有名的

实验^[5]。他在滑铁卢桥的两端用一根电线伸到两岸边的河水里。电线中串接一电流计，试图测量因河水在地磁场中流动而产生的 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 电流。这一试验没有测出电流，但其原理是成立的。假如地球磁层是向着太阳风开放的，则在地球极盖区上空的情况就和滑铁卢桥上实验完全类似。滑铁卢桥及沿桥安置的电线被极区电离层所代替，而延伸到河水中的电线被极盖相对两边的开磁力线所代替。太阳风的流动就像河流一样，由法拉第实验的同样原理可以设想在两根磁力线上能感应出电流。这就是伯克兰所建议的场向电流。可见，行星际中或磁层中的电场可以传到电离层并且被地面感测到。这完全是一种空间电学的现象。

哨声现象也是较早就被人们注意到的一种空间现象。1894年 W. H. Preece 首次在电话中听到了哨声。1953年 L. R. O. Storey 应用测向器证实哨声起源于远处的闪电。事实上哨声主要是由云-地闪电的电磁辐射传到电离层和磁层中形成的。地面观测到的沿导管传播的哨声，由于地磁场和空间等离子体的影响而引起色散现象。因此在已知空间磁场分布的情况下，根据实测的哨声色散值即可推算出沿磁力线的空间电子密度分布。还可以用哨声观测来研究磁层中的电场和各种动力学过程。可见，哨声是可以用作研究空间电学的一种现象^[6]。

总之，人们逐渐认识到早先的电层的全屏蔽概念应该改变了。若只局限在传统的大气电学概念就不能解释像极光和哨声这样一些现象，而必须把整个地球空间作为一个整体，而把大气电学扩展成地球空间电动力学，或者简称空间电学。

“电层”概念提出来以后，首先探测到高层大气中导电层的存在的是无线电波的反射现象^[7,8]。人们称这个导电层为电离层。它与电层是从不同角度提出的。人们并不用电离层来取代电层。因为仍然使用电层的概念还是有好处的。首先电离层是从反射电波的性能来定义的，与电层的概念不一致。其次，电层约在 50km 左右的高度上，而电离层一般认为是 100km 以上的高度上，所以采用了电层的概念，就可以把大气电学的研究范围明确地定义在

• • •