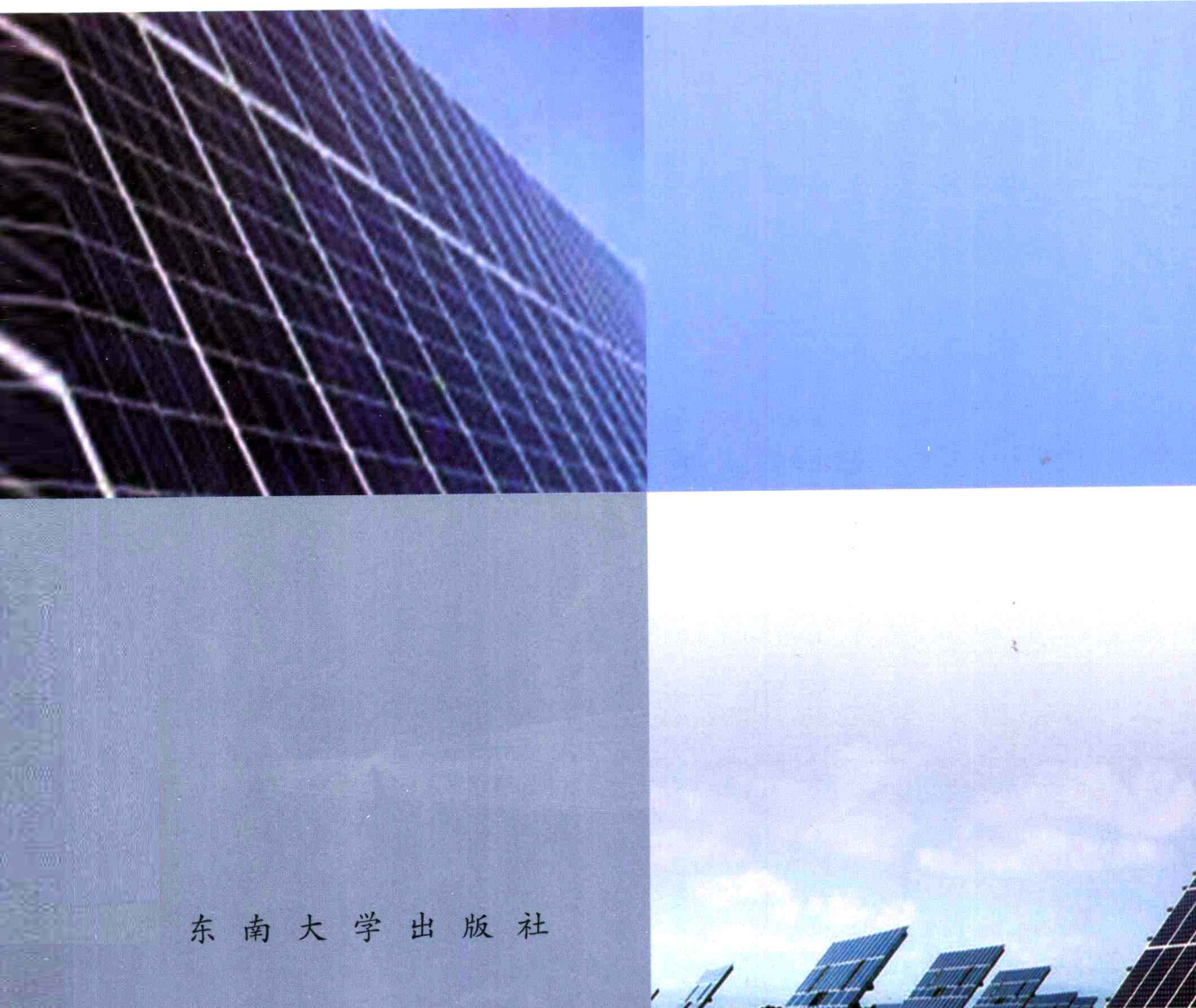


高等职业教育技能型
人才培养规划教材

太阳能光伏发电及应用技术

TAIYANGNENG GUANGFUFADIAN JI YINGYONG JISHU

赵书安 主编



东南大学出版社

高等职业教育技能型人才培养规划教材

太阳能光伏发电及应用技术

赵书安 主编

刘志璋 主审

东南大学出版社

内 容 简 介

太阳能光伏产业已成为新能源行业中的最大亮点,太阳能光伏发电应用技术得到广泛推广,光伏产业的发展需要大量的光伏技术人员和从业人员,本书立足这一基点从工程实际出发,深入浅出,详细地论述了太阳能光伏电池和电池组件的生产工艺和性能检测,太阳能光伏系统的组成、设计、安装施工与维护,并详细介绍了太阳能光伏技术的应用。全书共分为十个课题:太阳辐射,太阳电池,太阳电池组件,控制器,逆变器,太阳能光伏离网系统储能装置,太阳能光伏系统设计,太阳能光伏应用技术,太阳能光伏产业概况及核能利用和工程案例。

本书是依据太阳能光伏系统的组成和应用,循序渐进,由浅入深,项目化地编写教学内容,理论和实训实践有机结合,使得所写内容流畅、实用且贴近企业生产实际;教材紧紧围绕太阳能光伏技术应用能力和基本素质培养这条主线,突出对太阳能光伏产业的基本技术和基本技能的培养,注重职业能力和技术应用及管理能力的强化。

本书不仅适用于高等职业院校应用电子专业和光伏新能源专业的教学,也可作为太阳能光伏产业人员上岗培训用书,对太阳能光伏企业的工程技术人员、管理人员、维修服务人员、生产销售人员 and 科技爱好者均有较好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电及应用技术/赵书安主编. —南京:
东南大学出版社, 2011. 5
高等职业教育技能型人才培养规划教材
ISBN 978-7-5641-2711-4

I. ①太… II. ①赵… III. ①太阳能发电-高等职业
教育-教材 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 062884 号

太阳能光伏发电及应用技术

主 编 赵书安
责任编辑 陈 跃 E-mail: chen Yue 58@sohu.com
出版发行 东南大学出版社
出 版 人 江建中
社 址 南京市四牌楼 2 号
邮 编 210096
网 址 <http://www.seupress.com>

经 销 全国各地新华书店
印 刷 南京市雄洲印刷有限公司
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16
印 张 12.5
字 数 320 千字
版 印 次 2011 年 5 月第 1 版 2011 年 5 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5641-2711-4
印 数 1—3000 册
定 价 25.00 元

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83792328)

前 言

取之不尽、用之不竭的太阳能,将可能在本世纪中叶成为我国的重要能源。中国科学院党组已正式批准启动实施太阳能行动计划,该计划以 2050 年前后太阳能作为重要能源为远景目标,并确定了 2015 年分布式利用、2025 年替代利用、2035 年规模利用三个阶段目标。

随着我国光伏产业的高速发展和应用领域的拓宽,从事太阳能光伏系统集成设计和安装的技术人员不断增加。由于太阳能光伏技术属于跨多学科的新兴学科,它涉及气象、光学、半导体、电力、电子、计算机和机械等多种学科技术,要求从业的技术人员应掌握广泛而深入的技术知识,才能合理设计使用和充分发挥价格较昂贵的光伏系统设备的作用。本书是一本理论和实践有机结合的特色教材,是一门校企合作开发教材,也是作者在多年教学改革与实践的基础上所编写的教材之一。为适应应用电子技术的新形势和培养 21 世纪应用电子类和光伏新能源高素质、高技能型人才的迫切需要,本书在结构和内容上做了较大改进,项目化地编写教学内容。本书阐述了太阳电池和太阳电池组件的生产工艺,控制器和逆变器的结构、电路原理和应用设计,太阳能光伏系统的组成、设计、安装施工与维护等多方面内容,突出详述了太阳能光伏技术的应用,展示现代光伏技术的最新成就和行业企业最新技术发展水平,图文并茂,详略得当。本书在内容的编排上尽量做到科学、合理、循序渐进。

本书共分为十个课题:太阳辐射,太阳电池,太阳电池组件,控制器,逆变器,太阳能光伏离网系统储能装置,太阳能光伏系统设计,太阳能光伏应用技术,太阳能光伏产业概况及核能利用和工程案例。每个课题包含实训实践和习题,突出强调对学生动手实践能力的培养,做中学,学中做,巩固所学的知识和技能,培养学生的创新实践能力。

本书课题 1,2,3,4,5,7,8 由江苏城市职业学院赵书安编写,课题 6 由江苏城市职业学院李娅编写,课题 9 由江苏城市职业学院戴军编写,课题 10 由南京中电电气集团太阳能研究院有限公司的王宝华和罗韬编写,南京康尼科技实业



有限公司戴宁参与实训内容的编写。全书由赵书安统稿。在本书的编写过程中,得到南京中电电气集团太阳能研究院有限公司刘志璋教授、罗韬主任的大力支持,提出了许多有益的宝贵意见,南京中电电气集团太阳能研究院有限公司的丁世杰、张建标和葛玉建三位博士提供了宝贵的修改意见,江苏城市职业学院的束正煌教授和余宁副教授也给予了很大帮助,陈梅也参与了编写工作,在此一并表示感谢。

本书参考了国内外光伏发电与应用技术领域的许多文献资料,部分光伏企业如南京中电电气集团太阳能研究院有限公司、南京中电电气光伏有限公司和新能源有限公司、镇江荣德新能源科技有限公司和扬州荣德新能源科技有限公司等的工程技术人员在课程开发阶段为本书的编写提供了许多有价值的参考资料,并提出一些具体的编写意见,在此谨表示诚挚的谢意!

本书的编写出版得到江苏城市职业学院精品课程“太阳能光伏应用技术”建设项目的支持。

东南大学出版社为本套教材的编写和出版给予大力的支持和帮助。由于时间和水平有限,本书难免有疏漏和错误之处,请专家、读者批评指正。

编 者

2011年5月

目 录

课题1 太阳辐射	1
1.1 太阳概况	1
1.1.1 太阳的结构	1
1.1.2 日地运动规律	3
1.2 太阳辐射	6
1.2.1 地球大气层外的太阳辐射	7
1.2.2 到达地表的太阳辐射	10
1.2.3 地球表面倾斜面上的太阳辐射	12
1.2.4 太阳辐射能的测量	14
1.3 全球和中国太阳能资源分布	14
习题	16
课题2 太阳电池	17
2.1 太阳电池的物理基础	17
2.1.1 半导体及其主要特性	17
2.1.2 半导体能带结构和导电性	17
2.1.3 本征半导体、杂质半导体	19
2.1.4 P—N结	20
2.2 太阳电池的结构、原理和特性	20
2.2.1 太阳电池的结构	20
2.2.2 太阳电池原理	21
2.2.3 太阳电池的分类	22
2.2.4 太阳电池特性	23
2.3 太阳电池生产工艺	26
2.3.1 硅材料的制备	26
2.3.2 太阳电池生产工艺流程	29
2.4 太阳电池的发展	33

2.4.1	高效晶体硅太阳电池	34
2.4.2	薄膜太阳电池	35
2.5	实训1 太阳能电池发电原理实训	35
	习题	38
课题3	太阳电池组件	39
3.1	太阳电池组件的分类	39
3.2	太阳电池组件的结构	40
3.3	太阳电池组件的封装材料	40
3.3.1	上盖板	40
3.3.2	黏结剂	41
3.3.3	背面材料	42
3.3.4	边框	42
3.3.5	其他材料	42
3.4	太阳电池组件的封装工艺流程	42
3.4.1	激光划片	42
3.4.2	电池片分选	43
3.4.3	组合焊接	43
3.4.4	层压封装	44
3.4.5	安装边框和接线盒	45
3.4.6	性能检测	45
3.5	实训2 太阳电池能量转换实验	46
3.6	实训3 环境对光伏转换影响实训	51
3.7	实训4 太阳电池片的划片和分选实训	55
3.8	实训5 太阳电池片的焊接实训	57
3.9	实训6 太阳电池组件的叠层实训	58
3.10	实训7 太阳电池组件层压实训	59
	习题	60
课题4	控制器	61
4.1	控制器的基本工作原理	61
4.2	控制器的分类及工作原理	62
4.2.1	串联型充放电控制器	62
4.2.2	并联型充放电控制器	62
4.2.3	脉宽调制型充放电控制器	64
4.2.4	智能型控制器	64

4.2.5 最大功率跟踪型控制器	65
4.3 光伏控制器的性能与技术参数	66
4.3.1 光伏控制器的主要性能	66
4.3.2 光伏控制器的主要技术参数	66
4.4 实训 8 光伏控制器控制实训	67
4.5 实训 9 光伏控制器设计、制作实训	70
习题	71
课题 5 逆变器	72
5.1 逆变器的分类	72
5.2 逆变器的结构与工作原理	73
5.2.1 逆变器的基本结构	73
5.2.2 逆变电路基本工作原理	73
5.3 单相电压源型逆变器	74
5.3.1 推挽式逆变电路	74
5.3.2 半桥式逆变电路	74
5.3.3 全桥式逆变电路	74
5.4 三相逆变器	76
5.4.1 三相电压源型逆变器	76
5.4.2 三相电流源型逆变器	77
5.5 光伏并网逆变器	78
5.5.1 三相并网光伏逆变器	78
5.5.2 单相并网光伏逆变器	79
5.6 逆变器的技术参数与配置选型	80
5.6.1 逆变器的主要技术参数	80
5.6.2 逆变器的配置选型	82
5.7 实训 10 光伏逆变器逆变原理实训	84
5.8 实训 11 光伏逆变器全桥逆变实训	85
5.9 实训 12 光伏逆变器全桥逆变输出电能质量分析	88
5.10 实训 13 光伏逆变器的设计、制作实训	89
习题	90
课题 6 太阳能光伏离网系统储能装置	91
6.1 太阳能光伏离网系统储能装置的作用	91
6.2 太阳能光伏离网系统的主要储能装置	92
6.3 太阳能光伏离网系统常用蓄电池的种类	92

6.3.1	铅酸蓄电池	93
6.3.2	碱性蓄电池	95
6.3.3	其他新型蓄电池	96
6.4	太阳能光伏离网系统常用蓄电池的型号及特性参数	97
6.4.1	蓄电池的命名方法	97
6.4.2	蓄电池的特性参数	98
6.4.3	太阳能光伏离网系统对蓄电池的基本要求	101
6.5	太阳能光伏离网系统常用蓄电池的安装和维护	102
6.5.1	蓄电池组的安装	102
6.5.2	安装蓄电池时应注意的问题	102
6.5.3	铅酸蓄电池的维护	103
6.5.4	蓄电池管理维护工作需注意的问题	104
	习 题	104
课题 7	太阳能光伏系统设计	106
7.1	太阳能光伏系统组成原理及分类	106
7.1.1	太阳能光伏系统的组成和工作原理	106
7.1.2	太阳能光伏系统的分类	106
7.2	太阳能光伏系统的软件设计	110
7.2.1	太阳能光伏系统软件设计概述	110
7.2.2	太阳能光伏组件(方阵)设计	110
7.2.3	储能系统容量设计	112
7.2.4	太阳电池组件最佳倾角的设计	113
7.2.5	太阳能光伏系统容量设计实例	115
7.3	太阳能光伏系统的硬件设计	116
7.3.1	太阳能光伏系统的设备配置与选型	117
7.3.2	太阳能光伏系统的防雷和接地设计	126
7.4	太阳能光伏系统的安装与调试	130
7.4.1	太阳能光伏系统的安装	131
7.4.2	太阳能光伏系统的调试	133
7.5	太阳能光伏系统的运行与维护	135
7.5.1	太阳能光伏系统运行与维护的一般要求	135
7.5.2	太阳能光伏系统的运行与维护	136
7.5.3	巡检周期和维护规则	140
7.6	实训 14 太阳能光伏应用产品维护实训	144
7.7	实训 15 太阳能光伏系统设计实训	145

习题	146
课题 8 太阳能光伏应用技术	147
8.1 太阳能灯	147
8.1.1 太阳能路灯	147
8.1.2 太阳能路灯光源	148
8.1.3 太阳能灯的其他形式	150
8.2 太阳能光伏技术在交通上的应用	152
8.2.1 太阳能汽车	152
8.2.2 太阳能游船	153
8.2.3 太阳能飞机	154
8.2.4 太阳能电动车	156
8.3 太阳能光伏家用电源系统	157
8.3.1 小型电子产品光伏供电系统	157
8.3.2 户用独立光伏系统	158
8.3.3 户用并网光伏系统	159
8.4 太阳能光伏技术在通信系统中的应用	159
8.5 光伏建筑一体化	160
8.5.1 光伏与建筑物相结合的方式和优点	160
8.5.2 光伏建筑一体化设计的评价标准及核心问题	161
8.5.3 光伏建筑一体化的发展	162
8.6 太阳能光伏在太空中的应用	162
8.7 光伏电站	163
8.8 实训 16 太阳能光伏应用技术实训	165
习题	166
课题 9 太阳能光伏产业概况及核能利用	167
9.1 国际国内太阳能光伏发展现状与趋势	167
9.2 我国太阳能光伏产业现状及发展	170
9.3 我国太阳能光伏发展对策	172
9.4 核电站与核能	174
习题	178
课题 10 工程案例	179
10.1 案例 1 30 kW 光伏并网系统设计	179
10.1.1 案例简介	179

10.1.2	设计依据和标准	179
10.1.3	项目总体设计方案	180
10.1.4	系统效益分析	184
10.2	光伏离网发电系统设计	184
10.2.1	引言	184
10.2.2	太阳能电池组件容量的计算	185
10.2.3	蓄电池容量的计算	186
10.2.4	以峰值日照时数为依据的计算方法	186
10.2.5	案例	187
参考文献		189

课题 1 太阳辐射

太阳能光伏应用技术离不开太阳,本课题介绍太阳能结构,太阳的活动规律,太阳辐射的性质和计算,太阳与地球相对运动的规律,到达地面的太阳辐射能的计算,以及太阳辐射能资源的分布特点。

1.1 太阳概况

1.1.1 太阳的结构

太阳是距离地球最近的一颗恒星,日地距离为 1.49597892×10^8 km。太阳是一个炙热的大气球体,它的直径为 1.392×10^6 km,是地球直径的 109 倍,太阳的体积约为 1.4122×10^7 km³,比地球大 130 万倍,太阳的平均密度为 1.49 g/cm³,比水的密度大 50%,太阳内部的密度约为 160 g/cm³,日心引力比地心引力大 29 倍左右。太阳的总能量为 1.989×10^{30} kg,相当于地球总质量的 33.34 万倍。太阳的主要物质组成是氢和氦,其中氢占 78.4%,氦占 19.8%,金属和其他元素总计占 1.8%,太阳表面温度为 5700℃、中心温度高达 2×10^7 ℃,压强约为 2000 多亿个大气压。

太阳内部不断进行着热核反应,氢聚变为氦,通过热核反应,质量转换为能量,4 个氢原子核经过核反应聚变成一个氦原子,1 g 质量的氢原子在热核反应中产生的能量为 6.3×10^{11} J,能量 $\Delta E = \Delta mc^2$, Δm 为亏损质量, c 为真空中的光速。太阳每秒将 6 亿多吨氢变为氦并产生大量的能量,这些能量发射出来,总功率相当于 3.8×10^8 MW,该反应还可以维持 50 亿年。

太阳的结构从中心到边缘依次可分为核反应区、辐射区、对流区和大气层,如图 1.1 所示。太阳 99% 的能量是由中心核反应区的热核反应产生的。

1. 核反应区

核反应区是太阳的中心,也是热核反应的进行区,在太阳半径 25% (即 $0.25R$) 的区域内,集中了太阳一半以上的质量,在此区域内温度约为 1500 万度,压强为 2500 亿个大气压,在高温高压作用下,所有物质都只能以离子形态存在,在核反应区时刻进行剧烈的热核反应,产生的能量约占太阳产生总能量的 99%,并以对流和辐射形式向外释放。

2. 辐射区

核反应区外面的一层是辐射区,范围为 $0.25R$ — $0.8R$,温度下降到 130 万度,压强为数十万个大气层,从核反应区辐射出的能量是以高能伽马射线的形式发出的,辐射层通过对



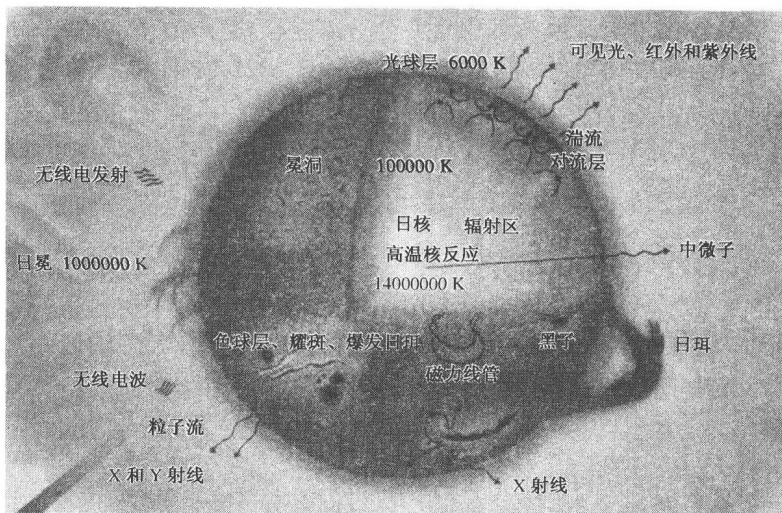


图 1.1 太阳结构示意图

这些高能粒子的吸收和再发射实现能量传递,经过无数次的这种再吸收、再辐射的漫长过程(一个光子脱离太阳约需要 1000 年时间),高能伽马射线经过 X 射线、紫外线逐渐转变为可见光和其他形式的辐射。

3. 对流区

从辐射区到 1 倍太阳直径处为对流区(对流层),范围为 $0.8R-1.0R$,温度下降为 4700 度。大量的对流热传播在该区进行。在对流区温度、压力和密度变化梯度很大,物质始终处在剧烈的上下对流状态,对流产生的低频声波可以通过光球层传播到太阳的外层大气。

4. 太阳大气层

太阳大气层可由光球、色球和日冕等构成。

(1) 光球层

对流层外面的部分称为光球层,厚度为 500 km,表面温度接近 6000°C ,即太阳的平均有效温度,光球内的温度随深度而增加,大气透明度有限。因此,在观测中有临边昏暗现象,几乎全部太阳光都是从这一层发射出的。太阳的连续光谱基本上就是光球的光谱,太阳光谱内的吸收线基本上也是在这一层内形成的。光球上最显著现象是太阳黑子,它实际上是具有强磁场的低温漩涡,由于它的温度相对较低,约为 4000°C ,同周边区域相比,看起来是“黑”的,所以称为太阳黑子,太阳黑子活动对地球的气候和生态影响很大,太阳黑子的活动周期平均为 11.2 年,光球表面还有颗粒状结构——米粒组织,它们是从对流层上升到光球的热气团,这些热气团时而出现时而消失,光球上亮的区域叫光斑。

(2) 色球层

色球层在光球层以外,其厚度约为 2000 km,几乎是透明的,平常看不到,只有在日全食时或用色球望远镜,才能观测到它。色球层的温度从底层的数千度升到顶部的数万度,色球上玫瑰红色的舌状气体如烈火升腾。它又称为日珥,大的日珥高于光球层几十万公里,还有无数被称为针状体的高温等离子小日珥,日珥在日面上的投影称为暗条,在色球与日冕之间有时会突然发生剧烈的爆发现象,称为耀斑,耀斑爆发时从射电波段到 X 射线的辐射通量会

突然增强,同时伴随大量高能粒子和等离子体喷发,对地球空间环境产生很大影响。

(3) 日冕

色球层外是伸入太空中的银白色日冕,日冕是由各种微粒构成的,包括一部分太阳尘埃质点、电离粒子和电子,密度为 10^{-6} g/cm^3 ,温度高达 1000 万度,有时日冕能向太空伸展几万公里,形成太阳网,打击到地球大气层上,产生磁暴或极光,影响地球磁场和通讯。

日冕上有冕洞,而冕洞是太阳风的风源,日冕也只有在全日食或用日冕仪才可观测到。

1.1.2 日地运动规律

1. 地球绕太阳运动

地球绕地轴自西向东旋转,自转一周即一昼夜 24 小时,地球每小时自转 15° 。地球除了自转以外,还绕太阳循着称为黄道的椭圆形轨道(长轴为 $152 \times 10^6 \text{ km}$,短轴为 $147 \times 10^6 \text{ km}$)运行,称为公转。公转周期为 1 年(实际为 365 天 6 时 6 分 9 秒)。地球绕太阳运行示意如图 1.2 所示。

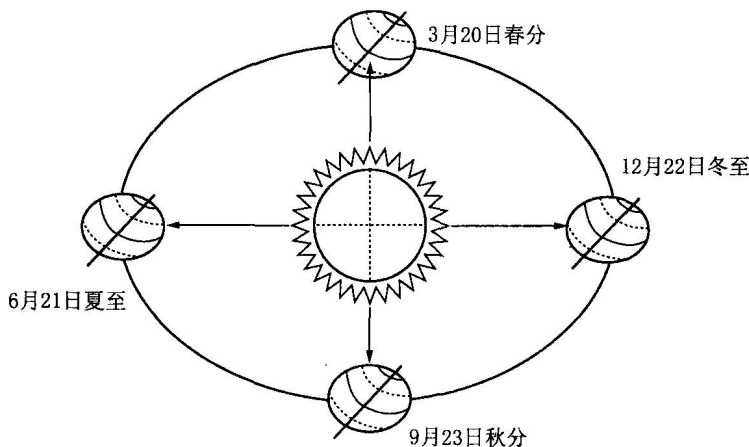


图 1.2 地球绕太阳运行的示意图

地球的自转轴与公转运行的轨道面(黄道面)的法线倾斜成 23.45° 夹角,而且在地球公转时其自转轴的方向始终不变,总是指向地球的北极。这就使得太阳光线直射赤道的位置有时偏南,有时偏北,形成地球上季节的变化。

在北半球除北极外,一年中只有春分日和秋分日是日出正东,日落正西。夏半年内,日出东偏北,日落西偏北方向,并且越近夏至日,日出和日落越偏北,夏至这天日出和日落最偏北。在冬半年内,日出东偏南,日落西偏南方向,并且越近冬至日,日出和日落越偏南,同样在冬至日这天日出和日落最偏南。

北半球在夏至日(6月 21/22 日),南半球恰好为冬至日,太阳直射北纬 23.45° 的天顶,因此称北纬 23.45° 纬度圈为北回归线。北半球冬至日(12月 21/22 日),南半球为夏至日,太阳直射南纬 23.45° 的天顶,因此称南纬 23.45° 纬度圈为南回归线。在北半球春分日(3月 20/21 日)和秋分日(9月 22/23 日),太阳恰好直射地球的赤道平面。

2. 天球坐标系

观察者站在地球表面,仰望天空,平视四周所看到的假想球面,按照相对运动原理,太阳

似乎在这个球面上自东向西而复始地运动,要确定太阳在天球上的位置,最方便的方法是采用天球坐标系。常用的天球坐标系有赤道坐标系和地平坐标系两种。

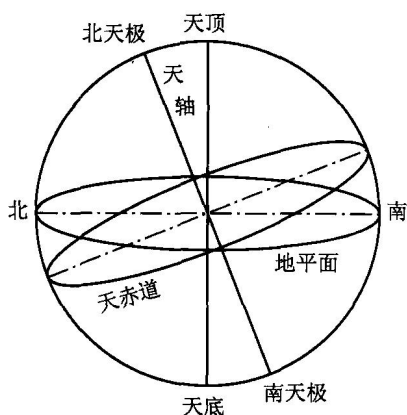


图 1.3 天球坐标系

如图 1.3 所示,以观察者为球心,以任意长度为半径,其上分布着所有天体的球面叫天球,通过天球的中心(即观察者的眼睛)与铅直线垂直的平面称为地平线,地平线将天球分为上下两个半球,交点分别称为天顶和天底。地球每天绕着它本身极轴自西向东地自转一周,反过来说,假设地球不动,那么天球将每天绕着本身的轴线自东向西的自转一周,称为周日运动。在周日运动中,天球上有两个不动点叫南天极和北天极,连接两个天极的直线称为天轴,通过天轴的中心(即观察者的眼睛)与天轴相垂直的平面称为天球赤道面,天球赤道面与天球的交线是个大圆,称为天赤道,通过天顶和天底的大圆称为子午线。

图 1.3 在上述这些极和圆(面)的基础上可以定义几种天球坐标系。

(1) 赤道坐标系

赤道坐标系是以天赤道 QQ' 为基本圆,与天子午线圈交点 Q 为原点的天球坐标系, PP' 分别为北天极和南天极,通过 PP' 的大圆都垂直于天赤道,通过 P 和球面上的太阳的半圆也垂直于天赤道,两者相交于 D 点,在赤道坐标系中,太阳的位置 B 由时角 ω 和赤纬角 δ 两个坐标决定,赤道坐标系如图 1.4 所示。

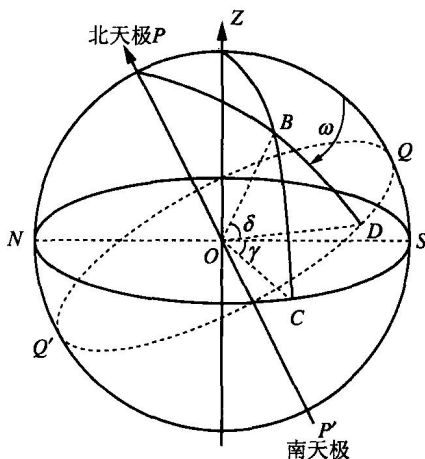


图 1.4 赤道坐标系

① 时角 ω

时角 ω 相对于圆弧 QD 从天子午圈上的 Q 点起算(即从太阳的正午起算),时角 ω 是用角度表示的时间,每 15° 为 1 小时,顺时针方向为正,逆时针方向为负,即上午为负,下午为正,以 ω 表示,等于离正午的时间(时数)乘以 15° 。

② 赤纬角 δ

与赤道平面平行的平面与地球的交线称为地球的纬度,通常将太阳直射点的纬度即太阳中心和地心的连线与赤道平面的夹角称为赤纬角,以 δ 表示。地球上太阳赤纬角的变化如图 1.5 所示。对于太阳来说,春分日和秋分日的 $\delta=0^\circ$,向北天极由 0° 变化到夏至日的 $+23.45^\circ$,向南天极有 0° 变化到冬至日的 -23.45° 。赤纬角是时间的连续函数,其变化率在春分日和秋分日最大,大约是一天变化 0.5° 。赤纬角仅仅与一年中的哪一天有关,而与地点无关,即地球上任何位置,同一天的赤纬角相同。

赤纬角可用库珀方程近似计算,即

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \times \frac{(284 + 2\pi n)}{365} \right]$$

式中 n 为一年中的日期序号, 如元旦为 $n=1$, 春分日 $n=81$ 。

赤纬角在一年中的 0° 到 23.45° 之间变化, 但是这个近似公式不能得到春分日、秋分日 δ 值同时等于 0° 的结果。

更为精确的近似公式为

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha_1}{N_1} + \frac{\alpha_2}{N_2} + \frac{\alpha_3}{N_3} + \frac{\alpha_4}{N_4} \right) \right]$$

式中, $N_1 = 92.795$ (从春分日到夏至日的天数), α_1 为从春分日开始计算的天数;

$N_2 = 93.629$ (从夏至日到秋分日的天数), α_2 为从夏至日开始计算的天数;

$N_3 = 89.865$ (从秋分日到冬至日的天数), α_3 为从秋分日开始计算的天数;

$N_4 = 89.012$ (从冬至日到春分日的天数), α_4 为从冬至日开始计算的天数。

在春分日, $\alpha_1=0$, 以此类推, 这使赤纬角 δ 计算值的精度比前述公式提高了 5 倍, 地球上太阳赤纬角的变化如图 1.5 所示。

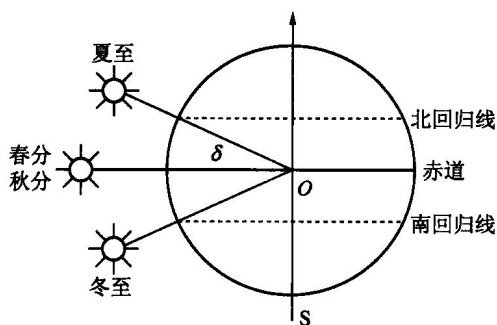


图 1.5 地球上太阳赤纬角的变化

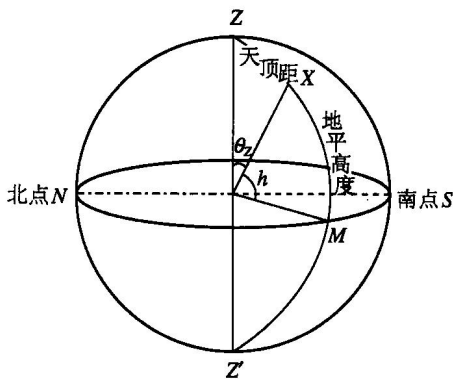


图 1.6 地平坐标系

(2) 地平坐标系

以地平圈为基本圈, 天顶为基本点, 南点为原点的坐标系为地平坐标系, 如图 1.6 所示。人在地球上观看空中的太阳相对于地平面的位置时, 太阳相对地球的位置是相对于地平面而言的, 通常用高度角 h 和方位角 γ 两个坐标决定。天顶角 θ_z 就是太阳光线与地平面法线之间的夹角。高度角 h 是太阳光线与其在地平面上投影线之间的夹角, 它表示太阳高出水平面的角度, 高度角 h 与天顶角 θ_z 的关系为:

$$h + \theta_z = 90^\circ$$

而方位角 γ 是太阳光线在地平面上投影和地平面上正南方向线之间的夹角, 它表示太阳光线的水平投影偏离正南方向的角度, 取正南方向为起始点 (0°), 向西 (顺时针方向) 为正, 向东 (逆时针方向) 为负。

(3) 太阳角的计算

① 太阳高度角 h

$$\sin h = \cos \theta_z = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega$$

式中 ϕ 为地理纬度, δ 为太阳赤纬角, ω 为太阳时角。

在太阳正午时, $\omega=0$, $\cos \omega=1$

上式可简化为:

$$\sin h = \sin \Phi \sin \delta + \cos \Phi \cos \delta = \cos(\Phi - \delta) = \sin[90^\circ \pm (\Phi - \delta)]$$

当正午太阳在天顶以南,即 $\Phi > \delta$,有

$$\sin h = \sin[90^\circ - (\Phi - \delta)]$$

$$h = 90^\circ - \Phi + \delta$$

当正午太阳在天顶以北,即 $\Phi < \delta$ 时,有

$$h = 90^\circ + \Phi - \delta$$

② 太阳方位角 γ

太阳的方位角 γ 与高度角、赤纬角、纬度及时角的关系为:

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h}$$

或

$$\cos \gamma = \frac{\sin h \sin \phi - \sin \delta}{\cos h \cos \phi}$$

根据地理纬度,太阳赤纬角及观测时间,就可以求出任一地区、任一刻的太阳方位角。

③ 日照时间

日出日落时,太阳高度角 $h=0$,由高度角计算式可得

$$\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega_s = 0$$

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta$$

$$\omega_s = \arctan(-\tan \phi \tan \delta)$$

ω_s 为日出或日落时角,以角度表示,负值为日出时角,正值为日落时角。

因 $\cos \omega_s = \cos(-\omega_s)$, 所以 $\omega_{s\text{出}} = \omega_s, \omega_{s\text{落}} = -\omega_s$ 。

日照时间是当地自日出到日落之间的时间间隔,由于地球每小时自转 15° ,所以日照时间可用日出、日落时角的绝对值之和除以 15° 得到。

$$N = \frac{|\omega_{\text{日落}}| + |\omega_{\text{日出}}|}{15} = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta)$$

1.2 太阳辐射

太阳发出的能量大约只有 22 亿分之一能够到达地球的范围,约为 173×10^4 亿千瓦,经过大气的吸收和反射,到达地球表面的约占 51%,大约为 88×10^4 亿千瓦,而能够到达陆地表面的只有到达地球范围辐射能量的 10% 左右,约为 17×10^4 亿千瓦,相当于目前全球消耗能量的 3.5 万倍,在单位时间内,太阳以辐射形式发射的能量称为太阳辐射功率或辐射通量,单位为瓦。太阳投射到单位面积上的辐射功率辐射通量称为辐射强度或辐照度,单位为瓦/平方米。该物理量表征的是太阳辐射的瞬时强度,而在一段时间内太阳投射到单位面积上的辐射能量称为辐射量或辐照量,单位为千瓦·时/[平方米·年(或月、日)],该物理量表征的是辐射总量,通常测量累积值。