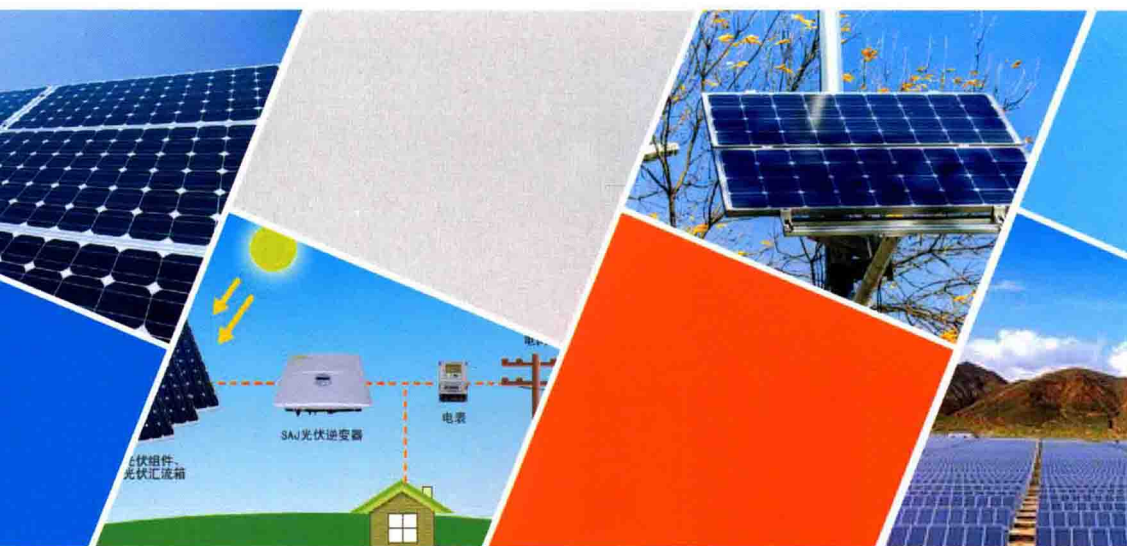


高职光伏发电技术及应用专业系列教材
国家骨干高职院校建设项目成果



光伏发电技术及应用

主 编◎颜鲁薪



西北工业大学出版社

高职光伏发电技术及应用专业系列教材
国家骨干高职院校建设项目成果

光伏发电技术及应用

主 编 颜鲁薪

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书作为光伏发电专业方向的专业基础课程之一，主要从太阳发光的基本过程出发，详细介绍了太阳光特性与应用、硅半导体与非晶硅材料、太阳能电池性能、太阳能电池技术指标和设计、光伏电池片和组件装配、独立光伏系统的结构设计、光伏系统设计、太阳能光伏发电系统的安装、太阳能光伏发电系统的维护管理、光伏控制器、太阳能光伏发电的应用和风光互补发电系统等内容。通过本书的学习，能够深化学生对于光伏发电技术的认识，激发学生的学习热情。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电技术及应用 / 颜鲁薪主编. —西安：西北工业大学出版社，2015. 2

ISBN 978-7-5612-4308-4

I. ①光… II. ①颜… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第035762号

出版发行：西北工业大学出版社

通信地址：西安市友谊西路127号 邮编：710072

电话：(029) 88493844 88491757

网址：www.nwpup.com

印刷者：陕西向阳印务有限公司

开本：720 mm×1 020 mm 1/16

印张：12

字数：184千字

版次：2015年4月第1版 2015年4月第1次印刷

定价：27.00元

前 言

本书以培养技能型人才为目标,在注重基础理论教育的同时,突出实践性教育环节,力求做到深入浅出,突出高等职业教育的特点,以适合高职高专工科学生使用。

本课程是太阳能光伏相关专业学生学习的专业基础课程,是学习光伏技术的入门课程。本书从太阳发光的基本过程出发,论述了光电伏特效应的基本原理,与前序课程紧密结合,实现光伏技术应用的学习。本书遵循基于工作过程系统化的教学方法,设立了12章内容,通过每章的学习,激发学生的学习兴趣。通过本书的学习,学生能够对光伏技术建立清晰的认识,初步掌握其实用技术,并具备在实践中进一步应用的能力。

本书在编写过程中,参考了其他版本的同类教材和相关技术标准、文献资料等,在此谨表谢意。

由于水平所限,书中不妥之处恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 太阳光特性与应用

1.1 光及其特性的认识	1
1.2 热辐射与波的认识	3
1.3 到达地面的热辐射	4
1.4 太阳与地球	8
1.5 人类活动与温室效应	10
1.6 地球运动	12

第二章 硅半导体与非晶硅材料

2.1 半导体基础知识	15
2.2 半导体的种类	18
2.3 电子空穴对的产生与复合	19
2.4 半导体的能级与载流子运动	22
2.5 PN结	25
2.6 光生伏特效应	27

第三章 太阳能电池性能

3.1 太阳能电池的结构	30
3.2 太阳能电池的技术参数	31
3.3 太阳能电池的伏安特性及等效电路	32
3.4 寄生电阻的影响	33
3.5 硅太阳能电池	34

第四章 太阳能电池技术指标和设计

4.1 光电转换效率	36
4.2 光学损失	36
4.3 复合损失	38
4.4 晶体硅太阳能电池制备	39
4.5 新型太阳能电池简介	43

第五章 光伏电池片和组件装配

5.1 光伏电池组件封装工艺	50
5.2 光伏电池组件设计	52
5.3 光伏电池分选	53
5.4 光伏电池块互连	53
5.5 光伏电池组件叠层	54
5.6 玻璃清洗	55
5.7 光伏电池组件层压	58
5.8 光伏电池组件组框	61
5.9 光伏电池组件测试	62
5.10 光伏电池方阵的组成——组件	65

第六章 独立光伏系统的结构设计

6.1 光伏系统组成	69
6.2 电池组件	69
6.3 蓄电池分类	70
6.4 铅酸蓄电池的基本概念	70
6.5 铅酸蓄电池结构和工作原理	72
6.6 铅酸蓄电池的分类和命名	74
6.7 蓄电池的性能参数	78

第七章 光伏系统设计

7.1 独立系统	88
7.2 系统利用率	89
7.3 混合系统	90
7.4 市电互补型光伏发电系统	90
7.5 风光互补发电系统	91
7.6 光伏系统的设计条件	92
7.7 太阳能光伏发电系统的简易设计方法	93
7.8 独立光伏系统设计实例	96

第八章 太阳能光伏发电系统的安装

8.1 太阳能光伏发电系统的安装施工	98
8.2 安装位置的确定及电池方阵支架设计	99
8.3 光伏电池方阵基础的设计施工	100
8.4 太阳能电池组件的安装	102
8.5 太阳能电池(方阵)前、后安装距离设计	103

8.6	直流接线箱的设计	104
8.7	光伏控制器和逆变器的安装	107
8.8	防雷与接地系统的设计与安装施工	108
8.9	蓄电池组的安装	112
8.10	线缆的铺设与连接	112

第九章 太阳能光伏发电系统的维护管理

9.1	光伏发电系统的检查	114
9.2	光伏发电系统的测试	115
9.3	太阳能光伏发电系统逆变器的调试	117
9.4	太阳能光伏发电系统的运行维护	120
9.5	太阳能光伏发电系统的故障排除	122

第十章 光伏控制器

10.1	光伏控制器概述	126
10.2	光伏控制器的基本原理	127
10.3	光伏控制器的电路原理	130
10.4	恒压控制法(CVT)	134
10.5	MPPT控制的实现	138
10.6	采用单片机组成的MPPT充放电控制器基本原理	139

第十一章 太阳能光伏发电的应用

11.1	太阳能光伏发电技术的应用优势	140
11.2	太阳能光伏发电技术的应用实例	141
11.3	光伏与建筑一体化(BIPV, Building Integrated PV)	148
11.4	光伏发电系统设计的技术方法	149

11.5 系统的优化设计	151
--------------------	-----

第十二章 风光互补发电系统

12.1 风力发电系统	153
12.2 风光互补发电系统的组成及特点	154
12.3 风力发电机组	157
12.4 风力发电机组的性能	164
12.5 风光互补发电系统的设计	166
12.6 风力发电机位置的选择	169
12.7 风能太阳能互补发电系统的安装	174
12.8 小型风力发电机的维护保养	176
12.9 常见故障及排除	179
参考文献	181

1.1 光及其特性的认识

太阳光线中包含不同频率的光,则为复合光。如果只含有一种频率的光,则为单色光。如激光,单色性是频率的宽度,越窄单色性越好。

白光是可见光中各色光的混合,当然也可以说白光的频率宽度覆盖了可见光的区域,覆盖了可见光中的各种单色光,所以色散的时候,三棱镜可以分出各种颜色的光,三棱镜的作用相当于把频率表示成偏转角的函数,所以白光单色性差。光源发出的复合光经单色器分解成按波长顺序排列的谱线,形成光谱。各种可见光的波长见表 1.1.1。

表 1.1.1 可见光波长

序号	光色	波长范围 λ/nm	中心波长/ nm
1	红	610 ~ 700	660
2	橙	590 ~ 610	600
3	黄	570 ~ 590	580
4	绿	501 ~ 570	550
5	青	490 ~ 501	495
6	蓝	450 ~ 490	470
7	紫	400 ~ 450	420

光的颜色是由光的波长(或频率)决定的。

(1) 存在一个截止频率(红限频率),只有当入射光波的频率高于截止频



率,电路中才有光电流,截止频率与材料有关,与光强无关。

(2) 当不同频率的光照射金属表面时,要入射光的频率大于截止频率,遏制电势差(光电子的动能)与入射光频率成正比,即遏制电势差与入射光频率成线性关系。如图 1.1.1 所示为铯(Cs) 锌(Zn) 铂(Pt) 的里遏制电势差。

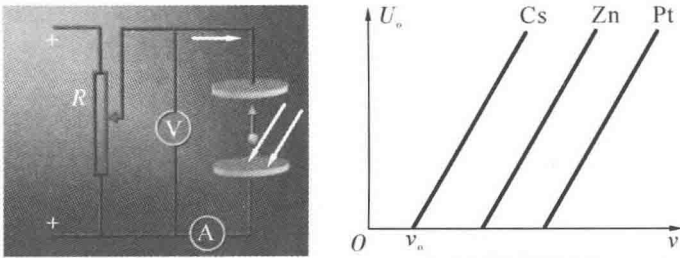


图 1.1.1 不同元素的遏制电势差

(3) 无论入射光的强度如何,只要其频率大于截止频率,则当先射到金属表面时,几乎立即就有光电子逸出。从光开始照射金属表面到光电子逸出,时间间隔通常不大于 10^{-9} s。

(4) 光的强度仅仅影响释放光电子的数量,光强越强,光电子数越多。

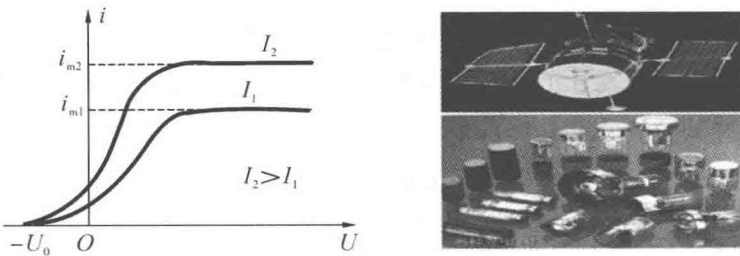


图 1.1.2 光照强度对辐射影响

过去的几百年里,围绕着表面上相互冲突的两派学说,人们对光的本性的认识产生了反复的变化。针对量子理论的进化史,Gribben 作出了深入浅出的描述。17 世纪后期,牛顿主张的光是由微小粒子组成的观点开始盛行。到了 19 世纪早期,菲涅尔的实验发现了光的干涉效应,表明光是由波组成的。直到 19 世纪 60 年代,麦克斯韦的电磁辐射理论被接受,光被普遍认为是由不同波长组成的电磁波谱中的一部分。1905 年,爱因斯坦阐释了光电效应,他指出光是由不连续的粒子或能量组成的,既是粒子又是波,光同时具有这两种对立而互补的性质,这一观点现在已被广泛接受。这一理论又被称为波粒二象性,且



可以总结为下列等式

$$E = hcf = \frac{hc}{\lambda}$$

式中, E 是频率为 f 或波长为 λ 的光所产生的波或光子的能量; h 是普朗克常量 ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$); c 是光速 ($3.00 \times 10^8 \text{ m/s}$)。

1.2 热辐射与波的认识

热辐射是物体由于具有温度而辐射电磁波的现象。热辐射是热量传递的 3 种方式之一。一切温度高于绝对零度的物体都能产生热辐射,温度愈高,辐射出的总能量就愈大,短波成分也愈多。热辐射的光谱是连续谱,波长覆盖范围理论上可从 0 直至无穷大,一般的热辐射主要靠波长较长的可见光和红外线传播。由于电磁波的传播无需任何介质,所以热辐射是在真空中唯一的传热方式。

在量子力学里,微观粒子有时会显示出波动性(这时粒子性较不显著),有时又会显示出粒子性(这时波动性较不显著)。在不同条件下分别表现出波动或粒子的性质,这种量子行为称为波粒二象性。具体体现在:

(1) 波动性:光的干涉和衍射。

(2) 粒子性: $E = hcf = \frac{hc}{\lambda}$ (光电效应)。

黑体,旧称绝对黑体,是一个理想化了的物体,它能够吸收外来的全部电磁辐射,并且不会有任何的反射与透射。换句话说,黑体对于任何波长的电磁波的吸收系数为 1,透射系数为 0。但黑体不见得就是黑色的,即使它没办法反射任何的电磁波,它也可以放出电磁波来,而这些电磁波的波长和能量则取决于黑体的温度,不因其他因素而改变。

基尔霍夫辐射定律指出,在热平衡状态的物体所辐射的能量与吸收率之比与物体本身物性无关,只与波长和温度有关。按照基尔霍夫辐射定律,在一定温度下,黑体必然是辐射本领最大的物体,可以叫作完全辐射体。黑体对于辐射来说是一个理想的吸收体或发射体。当它被加热后,开始发光,也就是说,开始发出电磁辐射。一个典型的例子就是金属的加热,金属温度越高,发射光的波长越短,发光的颜色由最初的红色逐渐变为白色。如图 1.2.1 所示为在三个

不同温度下理想黑体表面辐射能谱分布。

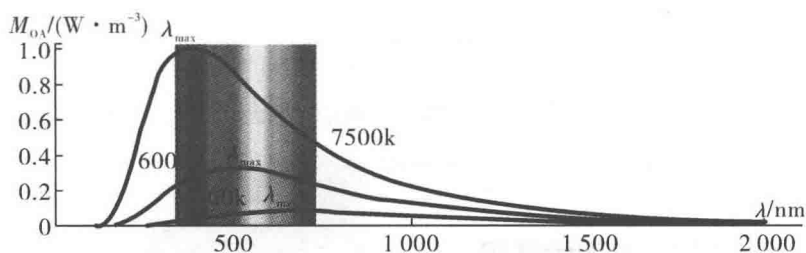


图 1.2.1 黑体不同温度辐射强度

1.3 到达地面的热辐射

太阳是距地球最近的恒星(见图 1.3.1)。太阳的基本参数如下。

- 半径: $R = 6.96 \times 10^5$ km(是地球的 109 倍);
- 体积: $1.412 2 \times 10^7$ km³(是地球的 130 万倍);
- 质量:约为 1.99×10^{27} t(是地球质量的 33 万倍);
- 平均密度: 1.409 g/cm³(是地球密度的 1/4), 160 g/cm³(核心);
- 温度: $5\ 770$ °C(表面), 1.56×10^7 °C(核心);
- 日地平均距离: 1.5×10^8 km;
- 太阳光到达地球表面时间:约 8'18";
- 年龄:约 50 亿年;
- 寿命:100 亿年。

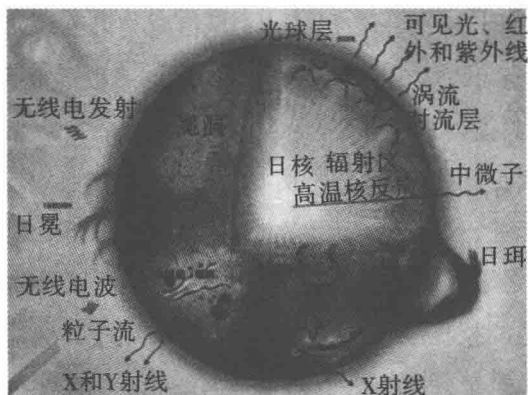


图 1.3.1 太阳

大气光学质量:光学质量是辐射束沿传输路径在单位截面气柱内吸收或散射的气体质量。简单来说,就是光线路径上气柱内空气的总质量。如图 1.3.2 所示为大气光学质量 AM 定义。

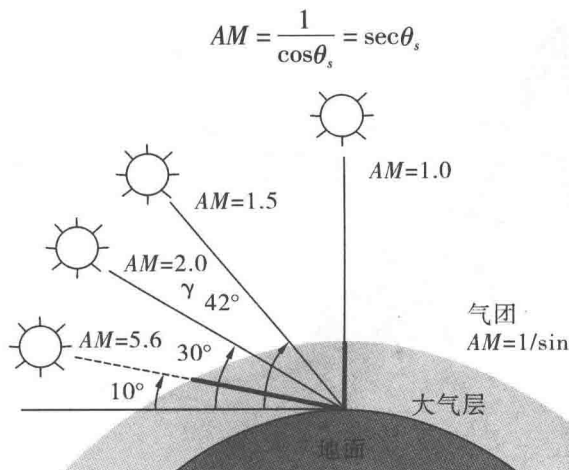


图 1.3.2 大气光学质量 AM 定义(美国)

任何地点的大气光学质量可以由以下公式估算

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{s}{h}\right)^2}$$

式中, s 是高度为 h 的竖直杆的投影长度。

太阳光在大气层外(即大气光学质量为零或者 AM_0)和 $AM_{1.5}$ 时的光谱分布如图 1.3.3 所示。 AM_0 从本质上来讲是不变的,将它的功率密度在整个光谱范围积分的总和,称为太阳常数,它的公认值为

$$\gamma = 1.3661 \text{ kW/m}^2$$

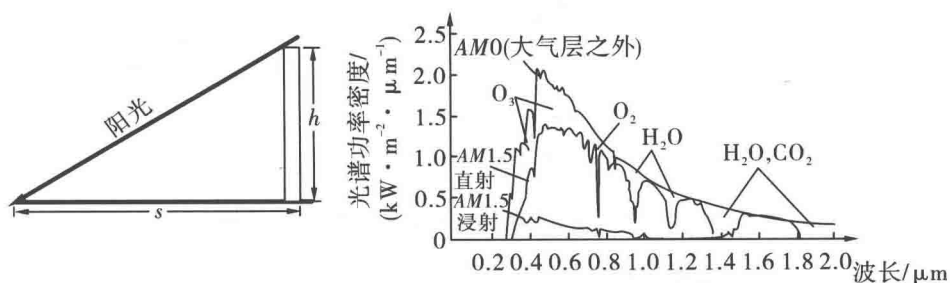


图 1.3.3 大气光学质量估算

地球的截面积是 $127\,400\,000\text{ km}^2$ ，因此整个地球接收到的能量是 $1.740 \times 10^{17}\text{ W}$ 。由于太阳表面常有黑子等太阳活动的缘故，太阳常数并不固定，一年当中的变化幅度在 1% 左右（见图 1.3.4 和图 1.3.5）。

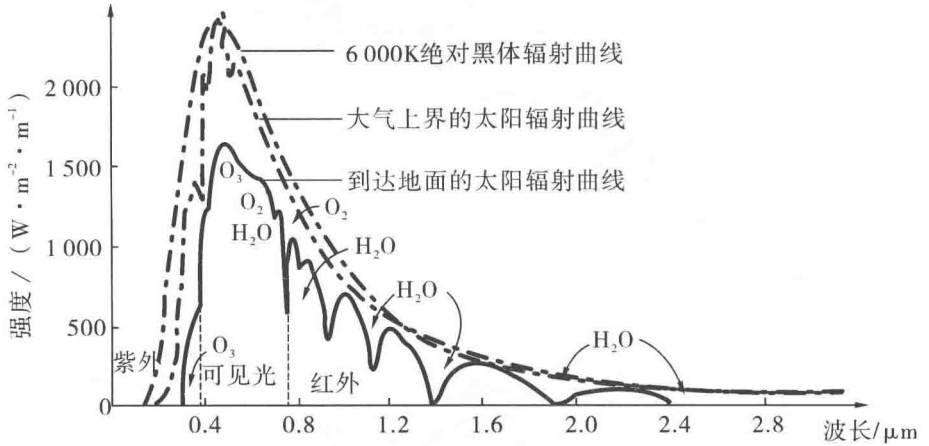


图 1.3.4 太阳光辐射

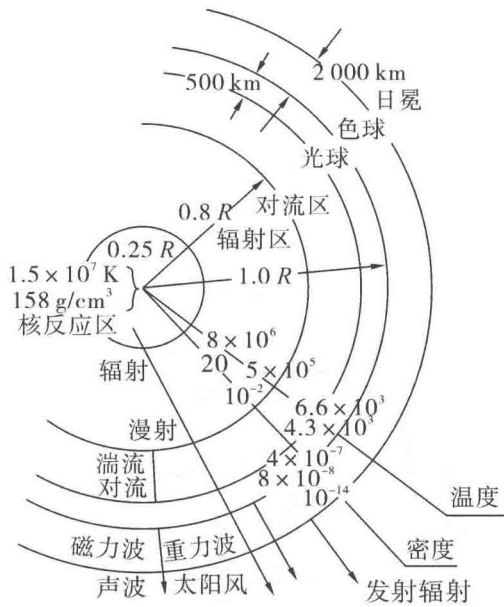


图 1.3.5 太阳结构和能量传递方式

1. 里三层——太阳内部

图 1.3.6 所示为太阳结构示意图。



核反应区: $0.25 R$ 内, 温度约为 $1.5 \times 10^7 \text{ }^\circ\text{C}$, 太阳一半的质量, 压力约为 $2\,500 \times 10^9 \text{ Pa}$; 氢聚合时放出 γ 射线, 这种射线通过较冷区域时, 消耗能量, 增加波长, 变成 X 射线或紫外线及可见光。

辐射区: $0.25 \sim 0.8 R$ 范围, 温度为 $1.3 \times 10^5 \text{ }^\circ\text{C}$, 密度为 0.079 g/cm^3 ; 太阳能通过这个区域由辐射传输出去。

对流区: $0.8 \sim 1.0 R$ 范围, 温度约为 $5\,000 \text{ }^\circ\text{C}$, 密度 10^{-8} g/cm^3 ; 太阳能主要靠对流传播。

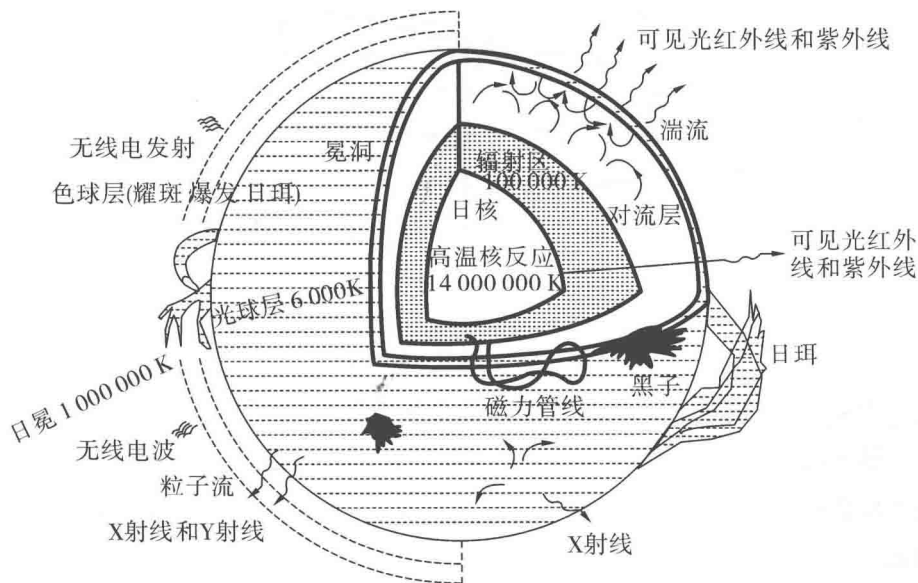


图 1.3.6 太阳结构示意图

2. 外三层——太阳外部(太阳大气)

光球层: 厚度约为 500 km , 温度约为 $5\,700 \text{ }^\circ\text{C}$, 太阳的全部光能几乎全从这个层发出。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。

太阳黑子产生。

色球层: 厚度为 $2\,000 \text{ km}$, 温度由内向外升高, 为 $4\,300 \text{ }^\circ\text{C} \sim$ 数万摄氏度; 边缘产生日珥、耀斑(极光)等。

日冕层: 内冕层高度为 $1.7 \times 10^5 \text{ km}$, 温度约为 $1.0 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$; 外冕层高度在 $1.7 \times 10^5 \text{ km}$ 以上, 温度低于内冕层。



太阳大气分层并不严格,实际是连续变化的。

1.4 太阳与地球

1. 天球与天球坐标系(如图 1.4.1 所示)

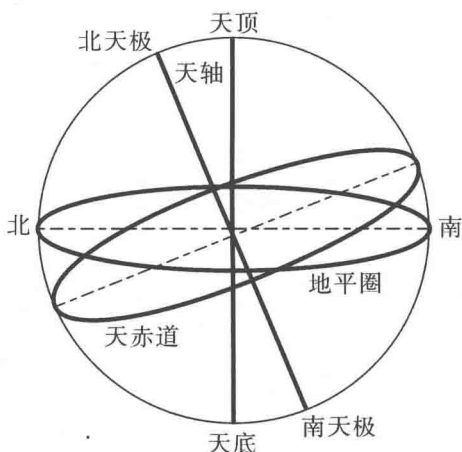


图 1.4.1 天球及天球坐标系

天球:观察者为球心,任意长度为半径的球面。

地平面,地平圈:通过天球中心(实际是观测者的眼睛)并与铅垂线(天顶与天底连线)相垂直的平面,称为天球的地平面,地平面与天球相交而成的大圆称为地平圈。

天顶和天底:天顶 zenith,位在观察者正上方处的天球点,天顶对应天球上的坐标与观察者所在的位置,与时间有关,天顶与天底(nadir)正好相反。

周日运动:周日运动亦称周日视运动,是描述地球上的观测者每天观测到天空上的天体明显的视运动状态,在近极区尤为明显。地球绕轴自转,使得所有天体都绕着这个轴(从观测者眼中即绕着北极星)作圆周运动,这个圆圈称周日圈,完成一圈运动需时 23 小时 56 分 4.09 秒(即一个恒星日)。而日、月之东升西落也是周日运动之体现。

南天极:地轴向南延伸和天球所交的点,也就是天球在地球南极正上方的那一点。

北天极:地轴和天球于北方相交的一点。即北半球星空旋转的虚拟中心点。