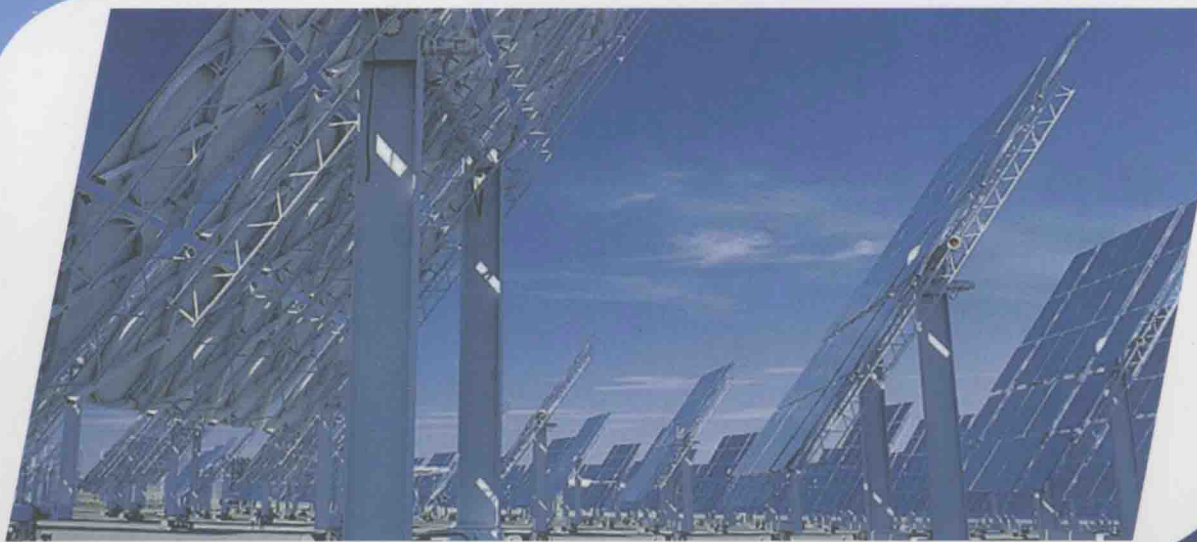




高职高专“十二五”规划教材——机械电子系列



光伏发电 技术与应用

宋超 郭霞 ◎主编

GUANG FU FA DIAN
JI SHU YU YING YONG



西苑出版社

高职高专“十二五”规划教材——机械电子系列

光伏发电技术与应用

主 编 宋 超 郭 霞

副主编 牛 伟 洪 勃 韩小辉



西苑出版社

XI YUAN PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书以“太阳能光伏发电技术”以及“电力电子技术”理论为基础, 主要介绍太阳能光伏发电系统的设计与施工, 内容包括太阳光的特性、半导体与 P-N 结、太阳能电池的特性、太阳能电池特性和设计、光伏电池的互联和组件的装配、独立光伏系统的结构、独立光伏系统设计、光伏的特殊应用、偏远地区供电系统、并网光伏系统、光伏泵系统、光伏水泵系统设计等内容, 为光伏并网发电技术的应用与研究提供了坚实的理论基础。

图书在版编目 (C I P) 数据

光伏发电技术与应用/ 宋超, 郭霞主编. — 北京 :
西苑出版社, 2011. 7
ISBN 978-7-80210-971-4

I. ①光… II. ①宋… ②郭… III. ①光伏发电—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①H991

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 011769 号

光伏发电技术与应用

主 编 宋 超 郭 霞

出版发行 **西苑出版社**

通讯地址 北京市海淀区阜石路 15 号

邮政编码: 100143

电 话: 010-88624971

传 真: 010-88637120

网 址 www.xycbs.com

E-mail: xycbs8@126.com

印 刷 北京紫瑞利印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

字 数 350 千字

印 张 15

版 次 2011 年 7 月第 1 版

印 次 2011 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-80210-911-5

定 价 36.00 元

(凡西苑版图书如有缺漏页、残破等质量问题, 本社邮购部负责调换)

版权所有

翻印必究

前 言

太阳能光伏发电作为可再生的清洁能源正受到日益广泛的关注与应用。近年,太阳能光伏发电的技术水平得到快速的发展与提高。《光伏发电技术与应用》从工作原理到系统构成和主要部件,从系统设计到操作使用和维护管理,都对太阳能光伏发电的最新技术进行了全面系统的介绍,技术内容先进、实用、可操作性强。

《光伏发电技术与应用》是编者在长期从事太阳能光伏发电技术与产业化基础上,通过学习和研究大量国内外相关参考文献编写而成的,是对相关教材的深入与完善。《光伏发电技术与应用》以“太阳能光伏发电技术”以及“电力电子技术”理论为基础,主要介绍太阳能光伏发电系统的设计与施工,内容包括从太阳光的特性、半导体与P-N结、太阳能电池的特性、太阳能电池特性和设计、光伏电池的互联和组件的装配、独立光伏系统的结构、独立光伏系统设计、光伏的特殊应用、偏远地区供电系统、并网光伏系统、光伏泵系统、光伏水泵系统设计等内容,为光伏并网发电技术的应用与研究提供了理论基础。

《光伏发电技术与应用》可为从事光伏并网发电技术以及并网逆变器技术相关研究与应用的工程技术人员提供参考,也可作为高等院校本科生、研究生的学习参考书。

在最后一章和附录中还介绍日本的安装太阳能光伏发电系统的相关法令及手续,以及并网系统技术要求准则、日本重要地区日照量数据等,该部分对国内相关部门及企业具有较高参考价值。

本书由宋超、郭霞任主编,由牛伟、洪勃、韩小辉任副主编,邓孟杰、徐森参与编写。全书由宋超统稿。

在编写过程中,作者翻阅了大量的资料,参考了许多专家及学者的研究成果,由于时间关系来不及与作者联系,在此向各位表示感谢!

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中难免有不足与疏漏之处,敬请各位专家、学者及使用本书的师生批评指正。如在使用本书的过程中有其他意见或建议,恳请向我们(bjlichunfeng@163.com)提出宝贵意见。

编 者
2011年7月

目 录

第 1 章 太阳光的特性.....	1	第 3 章 太阳能电池的特性.....	23
1.1 波粒二象性.....	1	3.1 光照的影响.....	23
1.2 黑体辐射.....	1	3.2 光谱响应.....	25
1.3 太阳及其辐射.....	2	3.3 温度的影响.....	26
1.4 太阳的辐射.....	2	3.4 寄生电阻的影响.....	27
1.5 直接辐射和漫射.....	4	习 题.....	29
1.6 温室效应.....	5	第 4 章 太阳能电池特性和设计.....	30
1.7 太阳的视运动.....	5	4.1 效率.....	30
1.8 日照数据及估算.....	7	4.2 光学损失.....	30
1.8.1 地外辐射.....	7	4.3 复合损失.....	32
1.8.2 在水平面上的陆地全局辐射.....	7	4.4 顶电极设计.....	34
1.8.3 全局辐射与漫射成分.....	11	4.4.1 体电阻率和方块电阻.....	34
1.8.4 落在倾斜表面上的辐射.....	13	4.4.2 栅线间隔.....	35
1.9 太阳能与光伏学.....	16	4.4.3 其他损失.....	35
习 题.....	16	4.5 实验室电池与工业要求的对比.....	37
第 2 章 半导体与 P-N 结.....	17	4.6 激光刻槽—埋栅太阳能电池.....	37
2.1 半导体.....	17	习 题.....	39
2.1.1 化学键模型.....	17	第 5 章 光伏电池的互联和组件的装配.....	40
2.1.2 能带模型.....	17	5.1 组件和电路设计.....	40
2.1.3 掺杂.....	18	5.2 相同特性的电池.....	40
2.2 半导体的种类.....	18	5.3 非相同特性的电池.....	40
2.2.1 单晶硅(sc—Si).....	19	5.4 非相同特性的电池组件.....	41
2.2.2 多晶硅(mc—Si).....	19	5.5 热点过热.....	42
2.2.3 非晶硅(a—Si).....	19	5.6 组件构造.....	44
2.2.4 薄膜晶体硅.....	19	5.7 抗候性.....	45
2.3 光的吸收.....	20	5.8 温度因素.....	45
2.4 复合.....	21	5.9 电绝缘.....	47
2.5 P-N 结.....	21		
习 题.....	22		

5.10 机械保护.....	48	6.8.1 电路布线.....	64
5.11 降格与失效.....	48	6.8.2 过流保护.....	65
5.12 物化能量和 生命周期的问题.....	50	6.8.3 开关.....	65
习 题.....	51	6.8.4 连接器.....	65
第6章 独立光伏系统的结构.....	52	6.8.5 接地.....	66
6.1 引言.....	52	6.8.6 雷电防护.....	66
6.2 独立光伏系统设计.....	53	6.8.7 计量和警报.....	66
6.3 电池组件.....	54	6.8.8 蓄电池保护和安全标识.....	66
6.4 蓄电池.....	55	6.8.9 电子元器件的保护.....	67
6.4.1 电池种类.....	55	6.8.10 组件支架.....	67
6.4.2 应用.....	55	习 题.....	70
6.4.3 要求.....	55	第7章 独立光伏系统设计.....	71
6.4.4 效率.....	56	7.1 引言.....	71
6.4.5 额定功率和容量.....	56	7.2 系统利用率.....	71
6.4.6 放电深度.....	56	7.3 混合系统.....	72
6.5 铅酸蓄电池.....	56	7.4 光伏系统的简易设计方法.....	73
6.5.1 类型.....	56	7.5 圣第亚国家实验室的方法.....	74
6.5.2 极板材料.....	57	7.6 《澳大利亚标准 AS4509.2》.....	75
6.5.3 充电.....	57	7.7 系统设计软件.....	76
6.5.4 效率.....	58	习 题.....	76
6.5.5 工业标准和分类.....	58	第8章 光伏的特殊应用.....	78
6.6 其他蓄电池设备.....	58	8.1 引言.....	78
6.6.1 镍镉蓄电池.....	58	8.2 空间应用.....	78
6.6.2 镍氢蓄电池.....	59	8.3 海洋航行辅助.....	78
6.6.3 可充电碱性锰蓄电池.....	59	8.4 无线电通信.....	79
6.6.4 锂离子和锂聚合物蓄电池.....	59	8.4.1 便携式光伏电源.....	79
6.6.5 氧化还原蓄电池.....	60	8.4.2 无线电话服务.....	80
6.6.6 超级电容器.....	60	8.4.3 手机网络.....	80
6.7 功率调节与控制.....	60	8.4.4 光纤网络.....	81
6.7.1 二极管.....	60	8.5 阴极保护.....	81
6.7.2 稳压器.....	60	8.5.1 系统尺寸.....	81
6.7.3 逆变器.....	63	8.5.2 控制器.....	82
6.8 系统平衡器件.....	64	8.5.3 电源供应系统.....	82

8.6 水泵.....	84	10.2 光伏系统在建筑上的应用.....	108
8.7 室内使用的消费光伏产品.....	87	10.2.1 太阳能板的安装.....	109
8.8 电池充电器.....	87	10.2.2 逆变器.....	110
8.9 发展中国家的光伏发电.....	87	10.2.3 本地存储.....	111
8.10 冷藏.....	88	10.2.4 系统规模和经济分析.....	112
8.11 光伏动力运输.....	89	10.2.5 其他方面.....	113
8.12 太阳能汽车.....	90	10.3 光伏在公共电网中的应用.....	113
8.13 照明.....	91	10.4 光伏集中发电站的设计.....	114
8.14 远程监测.....	92	10.5 安全.....	116
8.15 直接驱动的应用.....	92	10.6 光伏发电的价值.....	118
8.16 电力防护栅栏.....	93	10.6.1 能源效益.....	118
习 题.....	93	10.6.2 产能信用度.....	119
第9章 偏远地区供电系统.....	95	10.6.3 分布优势.....	119
9.1 家用电力系统.....	95	10.6.4 实例1: 加利福尼亚, 科尔曼配电支线 1103.....	120
9.1.1 交流或直流的选择.....	96	10.6.5 实例2: 澳大利亚, 卡尔巴里.....	122
9.1.2 电器用品.....	97	10.7 国际光伏市场.....	122
9.1.3 用户用电指导.....	99	10.7.1 美国.....	122
9.1.4 光伏一柴油/汽油混合发电系统.....	100	10.7.2 日本.....	124
9.1.5 柴油发电机.....	101	10.7.3 欧洲.....	125
9.1.6 汽油发电机.....	102	10.7.4 印度.....	126
9.1.7 混合系统设计.....	102	10.7.5 中国.....	126
9.2 RAPS 系统成本.....	104	10.7.6 澳大利亚.....	126
9.3 便携式 RAPS 系统.....	104	习 题.....	127
9.3.1 边远地区原住居民用便携系统.....	104	第11章 光伏水泵系统.....	129
9.3.2 太阳能集成屋.....	105	11.1 引言.....	129
9.3.3 Stationpower®.....	105	11.2 系统布局.....	129
9.4 可靠性和维护.....	106	11.3 水泵.....	131
9.5 政府援助计划.....	106	11.3.1 离心泵.....	132
习 题.....	107	11.3.2 容积泵.....	133
第10章 并网光伏系统.....	108	11.4 电动机.....	135
10.1 引言.....	108	11.4.1 引言.....	135
		11.4.2 直流电动机.....	136
		11.4.3 交流电动机.....	138
		11.4.4 电动机损耗.....	139

11.4.5 集成泵 / 电动机机械.....	139	附录 A 标准 AMO 与 AM1.5 光谱.....	149
11.5 功率调节电路.....	139	附录 B 计算太阳位置的公式.....	154
11.6 蓄电池 / 充电电池.....	142	附录 C 特征日期与日偏角.....	156
11.7 阵列线路布线与安装.....	143	附录 D 部分日照数据来源.....	157
11.7.1 阵列布线.....	143	附录 E 工业标准.....	162
11.7.2 组件安装.....	143	附录 F 水泵的可选动力来源.....	182
习 题.....	144	附录 G 独立光伏系统设计.....	186
第 12 章 光伏水泵系统设计.....	145	附录 H 光伏供电的水泵系统设计.....	192
12.1 引言.....	145	索 引.....	203
12.2 系统设计的基本步骤.....	145	参考文献.....	215
12.3 直接耦合系统的设计.....	146		

第 1 章 太阳光的特性

1.1 波粒二象性

在过去的几个世纪里,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(1984)。在 17 世纪后期,牛顿所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,杨和菲涅耳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子组成的。既是粒子又是波,光同时具有这两种对立而互补的性质,这一观点现已广泛接受。这一理论也被称为波粒二象性,且可总结为下列等式:

$$E = hf = hc/\lambda \quad (1-1)$$

频率是 f 或波长是 λ 的光,产生的波包或光子的能量是 E , h 是普朗克常量(6.626×10^{-34} J·s), c 是光速(3.00×10^8 m/s)(NIST,2002)。

在定义光伏或太阳能电池特性时,光有时被作为波来处理,其余情况下作为粒子或光子处理。

1.2 黑体辐射

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,发射的光的波长越短,发光的颜色由最初的红色逐渐变为白色。

经典物理无法解释由此类发热体发出的光的波长能谱分布。然而,在 1900 年,由普朗克所推导的一个数学表达式描述了这个能谱分布,尽管人们当时对黑体辐射的物理机制一无所知。五年后,爱因斯坦用量子理论做出了解释。黑体的光谱辐射功率是指从 λ 到 $\lambda + d\lambda$ 极小的波长变化范围内每单位面积辐射的功率,它服从普朗克分布(Incropera & DeWitt,2002)

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc/(\lambda kT)) - 1]} \quad (1-2)$$

这里 k 是玻耳兹曼常数, E 的量纲是单位面积单位波长的功率。黑体的总辐射功率,由单位面积所辐射的功率所表示。这个单位面积总辐射功率可以通过对式(1-2)积分而得到,以波长作自变量从零到正无穷大进行累积,结果是 $E = \sigma T^4$, σ 是斯忒藩-玻耳兹曼常数(Incropera & DeWitt,2002)。

图 1-1 描述了黑体在不同温度时在黑体表面所观测到辐射的能谱分布。最低的曲线表示的是被加热到 3000 K 的黑体,温度大约是正常工作时白炽灯钨丝的温度。处于辐射能量峰值

的波长约是 $1\ \mu\text{m}$,属于红外波段。在这种情况下,在可见光波段($0.4\sim 0.8\ \mu\text{m}$)只有少量的能量发射,这正是白炽灯效率低下的原因。将辐射峰值波长移动到可见光谱内需要极高的温度,超过绝大部分金属的熔点。

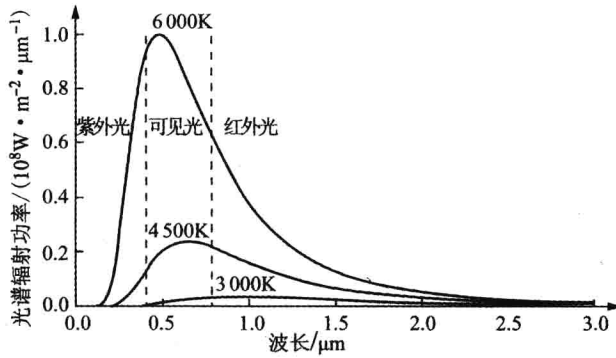


图 1-1 在三个不同温度下理想黑体表面辐射能谱分布

1.3 太阳及其辐射

太阳是一个通过其中心的核聚变反应产生热量的气体球(Quaschnig, 2003)。内部温度高达 $2\times 10^7\ \text{K}$ 。如图 1-2 所示,内部强烈的辐射被靠近太阳表面的一层氢离子所吸收。能量以对流的形式穿透通过这层光阻,然后在太阳的外表面的光球层重新向外辐射。如图 1-3 所示,这个辐射强度接近于温度为 $6000\ \text{K}$ 的黑体辐射。

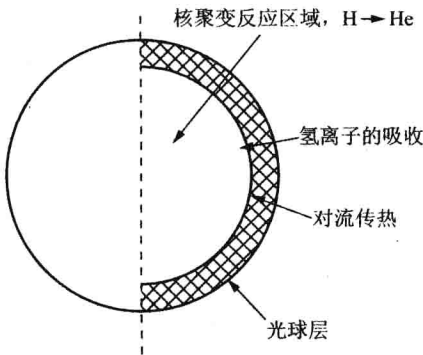


图 1-2 太阳内部的不同区域

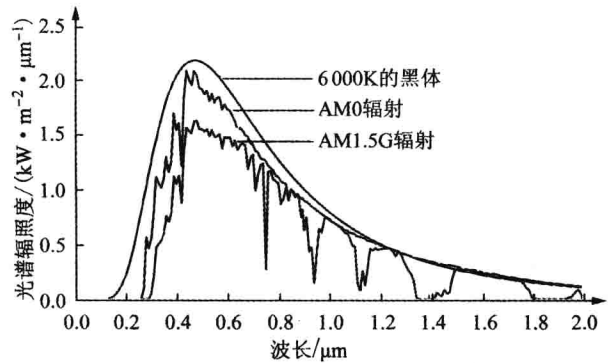


图 1-3 表面温度 $6000\ \text{K}$ 的黑体的光谱辐照度,位于恰好是地球大气层以外位置所观察到的太阳光球层的光谱辐照度(AM0),以及在穿透 1.5 倍于地球大气层垂直厚度的地球大气之后的太阳光球层的光谱辐照度(AM1.5G)

1.4 太阳的辐射

虽然太阳的表面辐射水平几乎恒定(Gueymard, 2004; Willson & Hudson, 1988),但是当到达地球表面时,太阳光受地球大气层的吸收和散射作用影响强烈,因而成为变量。

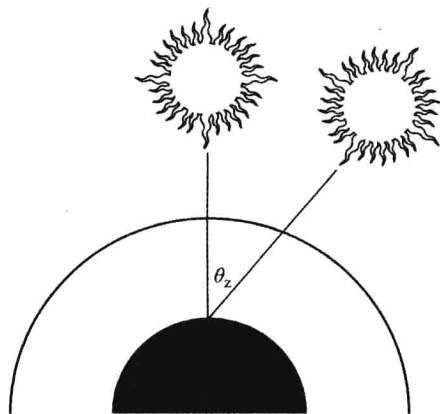


图 1-4 太阳辐射所穿过的大气厚度(大气光学质量)取决于太阳在天空中的位置

当天空晴朗,太阳在头顶直射且阳光在大气中经过的光程最短时,到达地球表面的太阳辐射最强。如图 1-4 所示,这个光程可用 $1/\cos\theta_z$ 近似, θ_z 是太阳光和本地垂线的夹角。

这个光程一般被定义为太阳辐射到达地球表面必须经过的大气光学质量 AM(air mass)。因此,

$$AM = 1/\cos\theta_z \quad (1-3)$$

这是基于对均匀无折射的大气层的假设,在接近地平线时将引入大约 10% 的误差。Iqbal(1983)给出了更加精确的公式,考虑到了光线通过密度随大气高度变化的大气层时的弯曲路径。

当 $\theta_z=0^\circ$ 时,大气光学质量等于 1 或称 AM1;当 $\theta_z=60^\circ$ 时,则是大气光学质量是 2 或 AM2 的情况。AM1.5(相当于太阳光和垂线方向成 48.2° 角)为光伏业界的标准。

任何地点的大气光学质量可以由下列公式估算:

$$AM = \sqrt{1+(s/h)^2} \quad (1-4)$$

如图 1-5 所示, 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 AM0)和 AM1.5 时的光谱能谱分布如图 1-6 所示。AM0 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,称作太阳常数(ASTM, 2000, 2003; Gueymard, 2004),它的公认值是

$$\gamma = 1.3661 \text{ kW/m}^2 \quad (1-5)$$

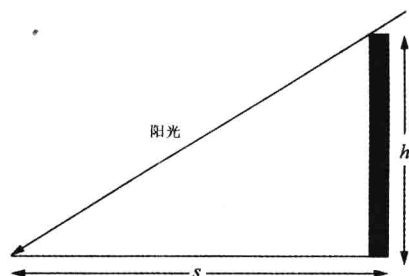


图 1-5 利用已知高度的物体的投影估算大气光学质量

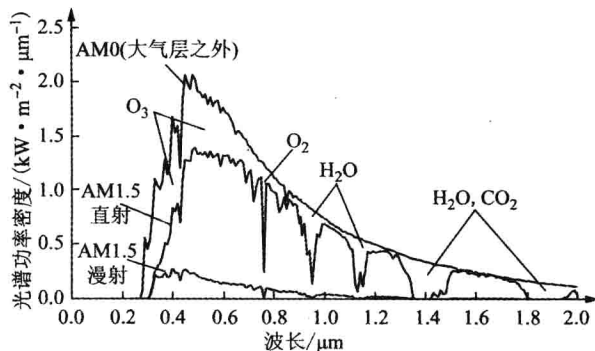


图 1-6 在大气层外(AM0)和地球表面(AM1.5)时太阳光的光谱功率密度,反映出不同的大气成分的吸收

通常情况下,将来自太阳本身的直射光束和来自天空的漫射光分开进行考虑,两者的总和和被称作全局辐射(或称总辐射)。附录 A 中给出的表格描述了在大气光学质量为 AM1.5 时,位于地面上的一个仰角为 37° , 面向赤道平面所接收到的全局辐照量和波长的对比。由于不同种类的太阳能电池对不同波长的光响应各不相同,该表格能被用来估算不同电池的潜在输出电力。

对附录 A 的光谱而言,总的能量密度,也就是对整个波长范围的功率密度的积分,接近

970 W/m²。这个光谱或能量密度为 1 000 W/m² 的“归一化”光谱是现阶段划分光伏产品等级的标准。后者在数值上接近地球表面所接收到的最大功率值。在附录 A 中,与归一化光谱相对应的功率和光子流密度可以通过将附录 A 中数值乘以系数 1 000/970 而获得。

为了评定太阳能电池或组件在实际系统中的性能,上面讨论的标准光谱必须与系统安装地点的实际的太阳光照水平相联系(图 1-12 给出了每日太阳辐照水平的全局和季节性的变化)。

1.5 直接辐射和漫射

当到达地球表面时,穿过地球大气层的太阳光被减少或削弱了大约 30%,其影响因素(Gast,1960;Iqbal,1983)如下:

- (1) 大气中分子的瑞利散射,对短波长光而言更为明显。
- (2) 烟雾和尘埃粒子的散射。
- (3) 大气中气体的吸收,如氧气,臭氧,水蒸气和二氧化碳(CO₂)。

大气气体造成的吸收光谱带如图 1-6 中所示。臭氧强烈吸收波长低于 0.3 μm 的光波。大气层中臭氧的损耗使得更多的这种短波长的光到达地球表面,而这将对生物系统产生有害的影响。1 μm 左右的吸收光谱带,是通过水蒸气吸收产生的,CO₂ 吸收更长波长的光波,而大气中 CO₂ 成分的改变也会对气候和生物系统产生影响。

图 1-7 指出,大气的散射作用导致了从天空中不同方向射来的漫射太阳光。由于大部分的有效散射发生在短波长范围里,漫射辐射在自然光谱的蓝端区域起主导作用。因此,天空呈现蓝色。AM1 辐射(太阳在头顶直射时的辐射)在天空晴朗时大约有 10%漫射辐射成分。漫射所占的百分比随着大气光学质量或者天空的阴云程度的增加而增加。

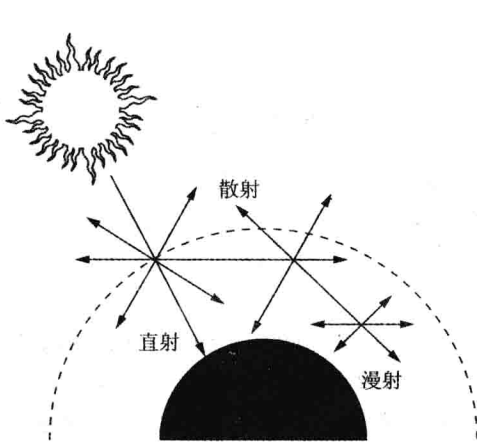


图 1-7 由大气散射导致的漫射辐射

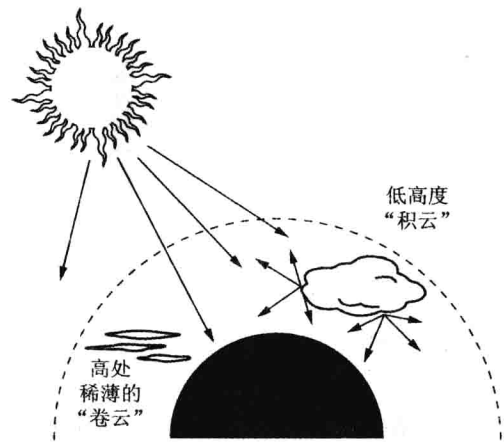


图 1-8 云层覆盖状况对到达地球表面的辐射的影响

当然,云层是太阳光在大气中衰减和产生散射的一个要因。积云,或处于低空体积较大的云层能够非常有效地阻挡太阳光。然而,大约有一半被积云阻挡的直接辐射能够以漫射辐射的形式重新到达地面。卷云,或稀薄的高处云层,对阳光的阻挡就不是那么有效了,大约 2/3 被阻挡的直接辐射能够转换为漫射辐射。在完全阴云的天气,没有直接日照,到达地球表面

的辐射大部分是漫射辐射(Liu & Jordan, 1960)。

1.6 温室效应

为了保持地球的温度,地球从太阳获得的能量必须与地球向外的热辐射能量相等。与阻碍入射辐射类似,大气层也阻碍向外的辐射。水蒸气强烈吸收波长为 $4\sim 7\ \mu\text{m}$ 波段的光波,而 CO_2 主要吸收的是 $13\sim 19\ \mu\text{m}$ 波段。大部分的出射辐射(70%)从 $7\sim 13\ \mu\text{m}$ 的“窗口”逃逸。

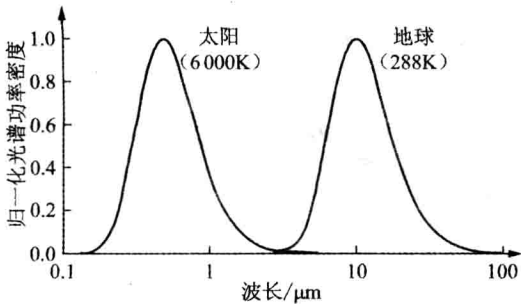


图 1-9 当地球和太阳都被视为黑体时,地球吸收和向外辐射的光谱能谱分布(注意,图中两条曲线的峰值已被归一化处理,并且水平坐标尺度是对数尺度)

如果我们居住的地表像在月球上一样没有大气层,地球表面的平均温度将大约是一 18°C 。然而,大气层中有天然背景水平为 270 ppm(浓度单位,即百万分之一)的 CO_2 ,这使得地球的平均温度大约在 15°C ,比月球表面平均温度高出 33°C 。图 1-9 显示的是如果地球上没有大气层且地球和太阳都被视为理想黑体时,地球吸收和向外辐射的波长能谱分布。

人类的活动增加了大气中“人造气体”的排放,这些气体吸收波长的范围是在 $7\sim 13\ \mu\text{m}$,特别是二氧化碳、甲烷、臭氧、氮氧化合物和氯氟碳化物(CFC)等。这些气体阻碍了能量的正常逃逸,并且被广泛认为是造成地表平均温度升高的原因。据 McCarthy 等一些作者的论述(2001),在 20 世纪里地球表面的平均温度已经增加了 $0.6\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。根据模型预测,到 2010 年,全球平均的表面大气温度比 1990 年要高出 $1.4\sim 5.8^\circ\text{C}$ 。这些模拟结果指出了升温过程可能随地区的不同而变化,并且伴随着降水量的增减而变化。除此之外,气候的多变性也会随之产生差异,并改变一些极端的天气现象的频率和强度。有迹象表明,洪水和干旱日益频繁。可以预见,温室效应对人类和自然环境将产生大范围的严重影响。

1.7 太阳的视运动

太阳的视运动(Iqbal, 1983; Sproul, 2002),以及它在太阳正午时候相对于一名在南纬 35° (或者北纬 35°)的固定观察者的位置如图 1-10 所示。太阳路径在一年中变化,图中也表示出了太阳在一年中不同的偏移极点,即在夏至和冬至以及在二分点的位置。在春分和秋分(3月 21日和 9月 23日左右)太阳正东升起,正西落下。在正午时分,太阳高度等于 90° 减去纬度。在冬至和夏至(对于北半球而言,分别大约在 12月 22日和 6月 21日左右;南半球正好相反)太阳的正午高度增加或减少一个地球黄赤交角 $23^\circ 27'$ 。利用附录 B 给出的公式可以算出任意时间太阳在天空中的位置。太阳的视运动轨迹有时用极坐标(如图 1-11 所示)或圆柱形图示

描述。其中，圆柱形图对预测附近物体的遮光效应特别有用。利用俄勒冈大学太阳辐射监测实验室所开发的在线计算器，可以进行圆柱形太阳图表的有关计算。

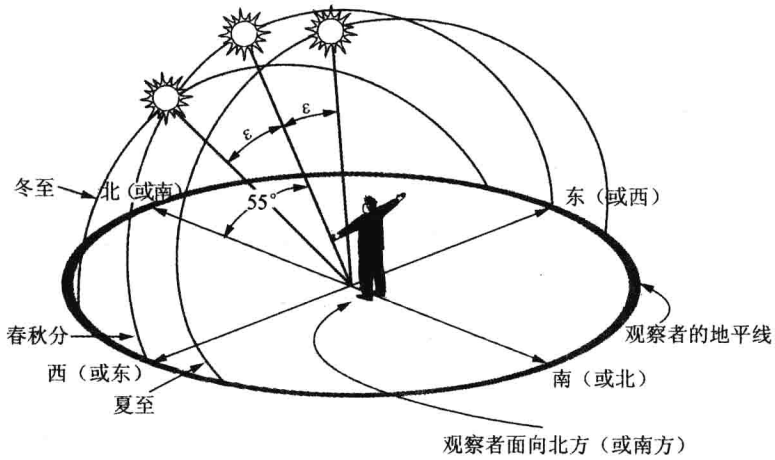


图 1-10 观察者在南纬或北纬 35°时所观察到的太阳的视运动(ε是地球自转平面(赤道平面)与地球围绕太阳公转平面(黄道平面)之间的夹角(ε=23°27′=23.45°))

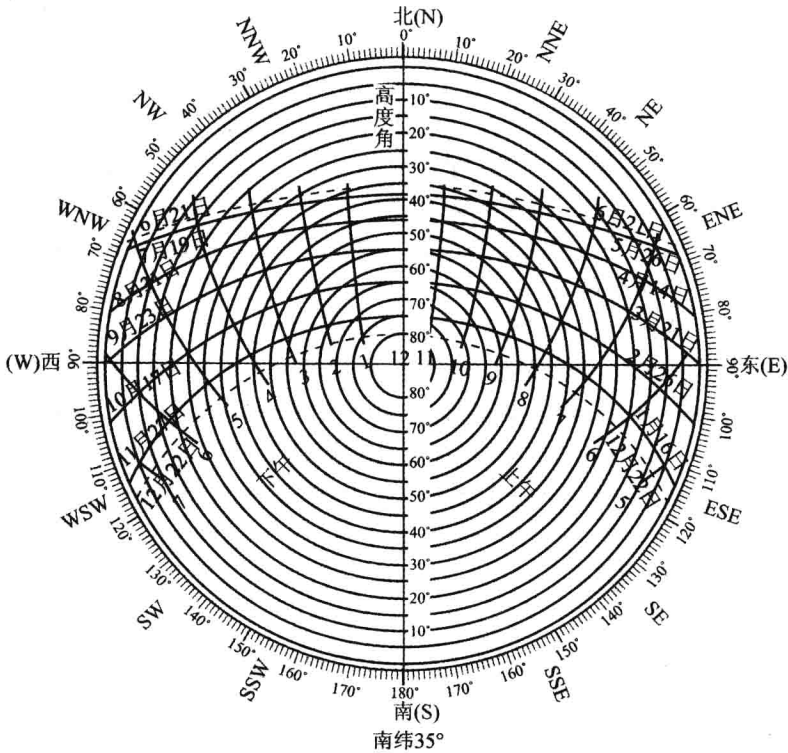


图 1-11 观察者在南纬 35°时太阳视运动轨道的极坐标图

(版权所有© CSIRO 1992, 经 CSIRO PUBLISHING, Melbourne Australia 许可重制,

选自《Sunshine and Shade in Australasia》第六版(R. O. Phillips), <http://www.publish.csiro.au/pid/147.htm>)

1.8 日照数据及估算

一些学者已对这个领域作出了完善的回顾,例如, Duffie 和 Beckman(1991), Iqbal(1983), Reddy(1987), Perez 等(2001), 以及 Lorenzo(1989, 2003)。地外辐射强度可由几何关系和太阳常数得知(见公式 1-5), 但是陆地上的日照强度并没有被很好地定义。

光伏系统的设计者们经常需要估算落在任意斜面的日照量。多数情况下, 月平均日间日照数据已经充分(Lorenzo, 2003), 通常用每月中旬的几个特征日期来定义月平均值(见附录 C)。在本书中, 用打星号变量来表示特征日期, 而上划线表示月平均值。当估算组件倾斜角对所接收日照的影响时, 直接辐射成分和漫射辐射成分一般是分别考虑的。但这些数值如果没有事先分别测定, 则是要根据全局辐射的数据估算而来。因此, 这里有三个基本的问题:

- (1) 利用测量所得到的数据来计算给定地点水平面上的全局辐射。
- (2) 利用全局辐射的数值来估算水平面上的直射成分和漫射成分。
- (3) 利用水平面上的直射成分与漫射成分数据来估算倾斜平面的相应数据。

1.8.1 地外辐射

水平表面上的地外辐射 R_0 (假设无大气层情况下的垂直日照情况) 可通过 γ_E 估算, 即太阳常数, 用一小时内入射能量来表示

$$\gamma_E = 3.6 \gamma (\text{MJm}^{-2}\text{h}^{-1}) \quad (1-6)$$

由太阳和地球的几何关系得到 R_0 (Iqbal, 1983, p. 65):

$$R_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right) \gamma_E e_0 \cos \varphi \cos \delta \left[\sin \omega_s - \left(\frac{\pi \omega_s}{180}\right) \cos \omega_s \right] \quad (1-7)$$

其中

$$e_0 \approx 1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi d}{365}\right) \quad (1-8)$$

是轨道离心率(地球矢径平方的倒数)(Iqbal, 1983)(1989年 Lorenzo 对此离心率作了更为精确的表述), φ 是纬度, ω_s 是日出相位角(也称日出或日落小时角), 定义为

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta \quad (1-9)$$

d 是从 1 月 1 日开始计算的天数, 并定义 1 月 1 日时为 $d=1$, (2 月通常假设为 28 天, 在闰年时引入一个小误差), 黄赤交角 $\epsilon = 23^\circ 27' = 23.45^\circ$, 而 δ 是太阳的赤纬, 由下式给出

$$\delta \approx \arcsin \left\{ \sin \epsilon \cdot \sin \left[\frac{(d-81)360}{365} \right] \right\} \approx \epsilon \sin \left[\frac{(d-81)360}{365} \right] \quad (1-10)$$

这个赤纬是连接地球和太阳中心的直线和地球赤道平面的交角, 它在昼夜平分点(即春分和秋分)时是零(Iqbal, 1983)。附录 B 提供了更加复杂而精确的表达式。

相应的在同一水平面上地球外的日辐射的月平均值, 由下式给出

$$\bar{R}_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right) \gamma_E e_0^* \cos \varphi \cos \delta^* \left[\sin \omega_s^* - \left(\frac{\pi \omega_s^*}{180}\right) \cos \omega_s^* \right] \quad (1-11)$$

1.8.2 在水平面上的陆地全局辐射

可以用来测量日照水平的设备多种多样(Iqbal, 1983; Tindell & Weir, 1986)。最简单的

例子是日光仪,它通过聚焦太阳光在旋转的图表上燃烧打孔,记录太阳曝晒的小时数。硅太阳能电池本身也被用于一些较为复杂的设备中。此外,热电效应(不同的材料在结区两端受热不同而产生电压)是一些更为精确的设备(高温计,日射强度计)之基础,因为这个效应对光波的灵敏度比较低。

以适当的形式获得准确的日照数据对设计光伏系统来说显然是非常重要的,但有时确实是一件比较艰巨的任务。应用较广的一种数据形式是落到水平面或者倾斜平面上的日平均、月平均、季平均或年平均全局(直接辐射和漫射辐射)辐射。图 1-12 显示的例子给出了用 MJ/(m²·day)作单位的每季季平均全局辐射等高线。美国圣第亚国家实验室也发表了类似的全局日照水平图(1991)。如果有可能,应当获得各区域更为确切的数据,最好是以直接辐射和漫射辐射成分的形式而不是全局日照水平的形式。附录 D 中列出了一些日照数据的原始资料。部分地区的直接辐射和漫射成分的测量数据已经完备。澳大利亚一些地方的数据已经被制成各种表格,这些数据对太阳能工程师和建筑师的工作有所助益(Lee 等,2003)。

1. 峰值日照小时数据

每月的日平均日照水平通常用“峰值日照小时数”来表示。其概念是说:全天所接收到的太阳辐射,早晨时候为低强度,在正午时候达到峰值,午后又逐渐降低。这些不断变动的日照数据在累加后,被压缩到一个日照水平等同于正午辐射强度的缩减的时间段里(美国圣第亚国家实验室,1991)。假设一天的正午日照水平(峰值日照)估算为 1.0 kW/m²,那么峰值日照小时数在数值上将等同于该天的总日照量,总日照量的单位是 kWh/m²。

2. 日照小时数据

一种通常使用的日照数据形式被称作“日照小时数”(或 SSH)(Twidell & Weir,1986)。这个数量描述了在一个给定的时间段(通常是一个月)中,每天超过约为 210 W/m² 辐射强度的日照小时数。值得注意的是,日照小时数没有给出日照的绝对数据,并且仅对太阳光的直射辐射有效。日照小时数的测量是通过 Campbell-Stokes 日照小时数装置获取的,装置将平行光线聚焦并照射到移动的记录带上,如果日光强烈的话能够燃烧。漫射光线无法以相同的方式来聚焦,因此不能被此类设备记录。通过这种方法得出的数据质量不高,除非能够将测得的小时数据与实际辐射数据进行有机结合,否则一般不推荐使用(《澳大利亚标准》(Standards Australia),2002),但这种方法对一些缺乏具体日照数据记录的地区比较适用。

对于光伏系统的设计来说,困难在于将日照小时数转化成更加实用的数据。这里,我们考虑一些估算方法,比如从日照小时数估算在某一水平面上日间全局日照量的月平均值(Iqbal,1983)

$$\bar{R} = \bar{R}_0(a + b\bar{n}/\bar{N}_d) \tag{1-12}$$

式中 \bar{R}_0 如公式(1-11)所定义, \bar{n} 是所记录的日间强光照小时数的月平均值,通常是由 Campbell-Stokes 仪器测量的, a 和 b 是回归常数,是从不同地区的测量数据总结得出。 \bar{N}_d 是月平均日长度=2/15 ω_s^* 。

这个模型曾被 Telecom Australia(注:Telecom 为澳大利亚最大的电信公司 Telstra 的旧称,下同)(Muirhead & Kuhn,1990)使用,表 1-1 列出了澳大利亚各地的 a 、 b 值,澳大利亚的平均值为

$$a = 0.24, \quad b = 0.48 \tag{1-13}$$

当然这些数值对纬度存在一定的依赖关系。

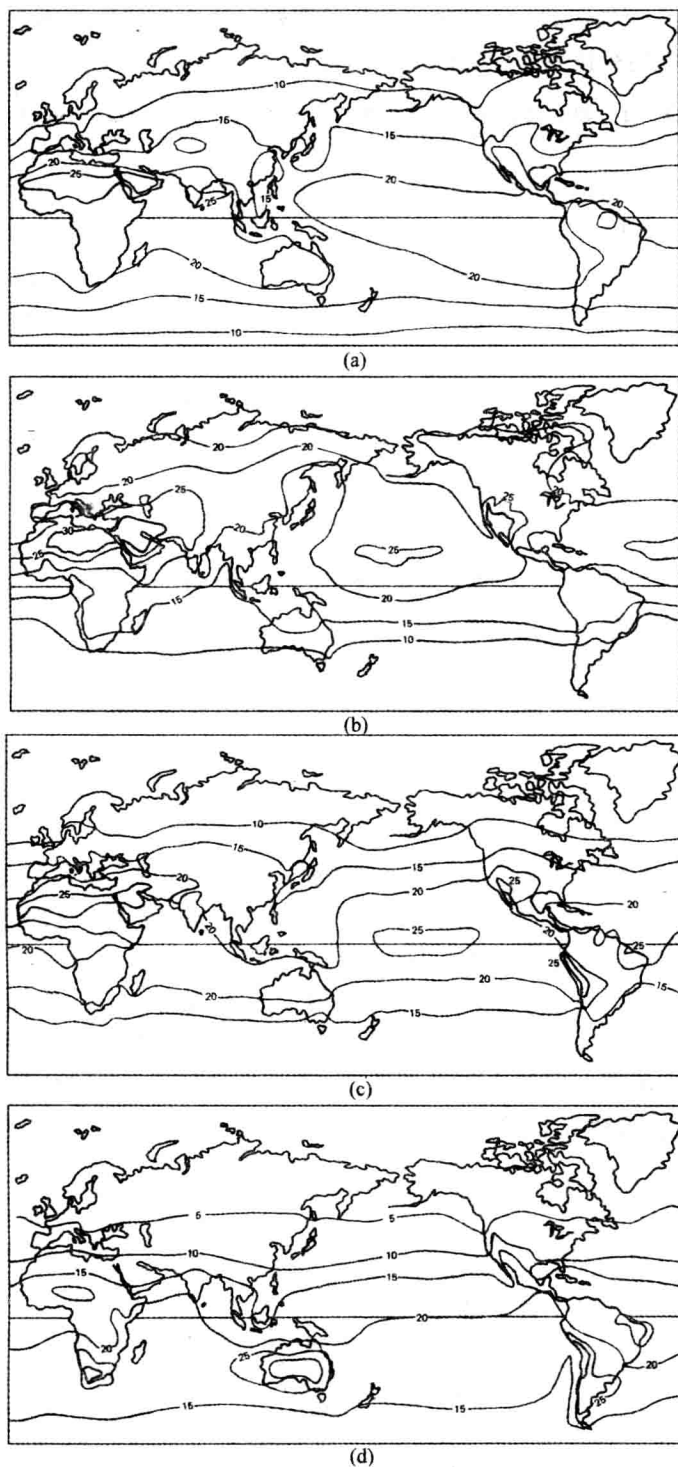


图 1-12 水平面上所接收到的季平均日间全局总日照量等高线,单位 MJ/m^2 ($1 \text{ MJ}/\text{m}^2 = 0.278 \text{ kWh}/\text{m}^2$)

(a) 第一季度(一至三月) (b) 第二季度(四至六月) (c) 第三季度(七至九月) (d) 第四季度(十至十二月)

(图片使用经原作者许可, Meinel & Meinel, 1976)