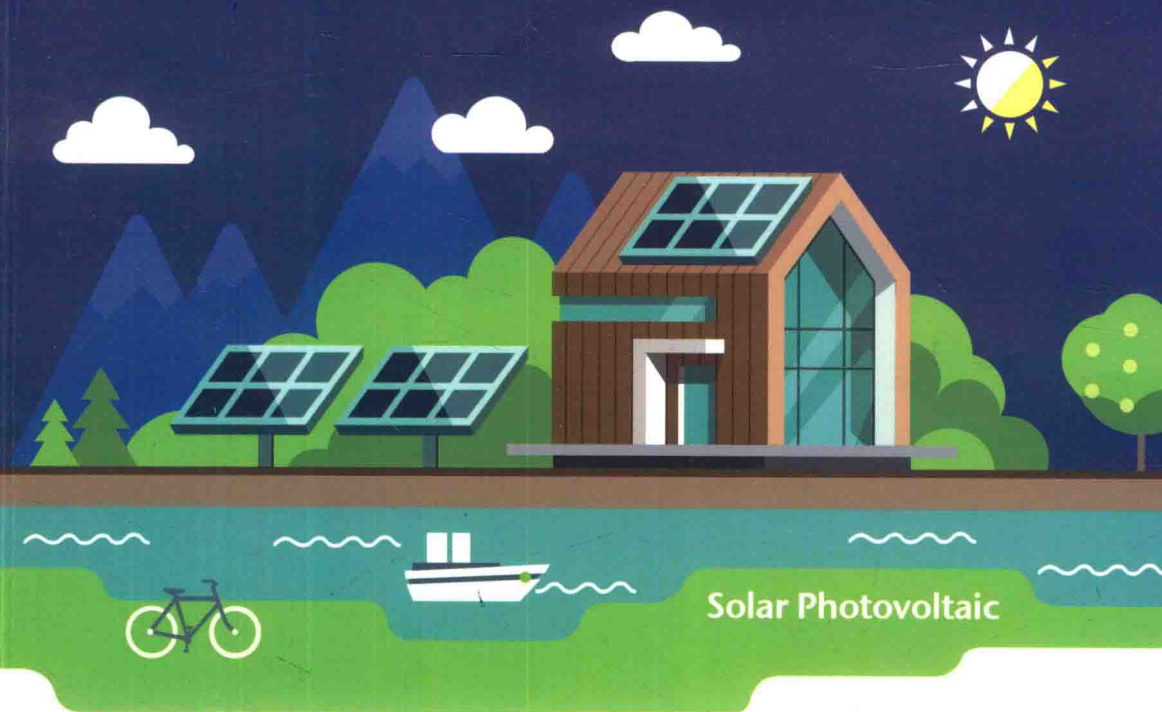




“十二五”国家重点图书出版规划项目 · 新能源技术丛书

太阳能 光伏发电系统

◆ 金步平 吴建荣 刘士荣 陈哲良 编著



中国工信出版集团



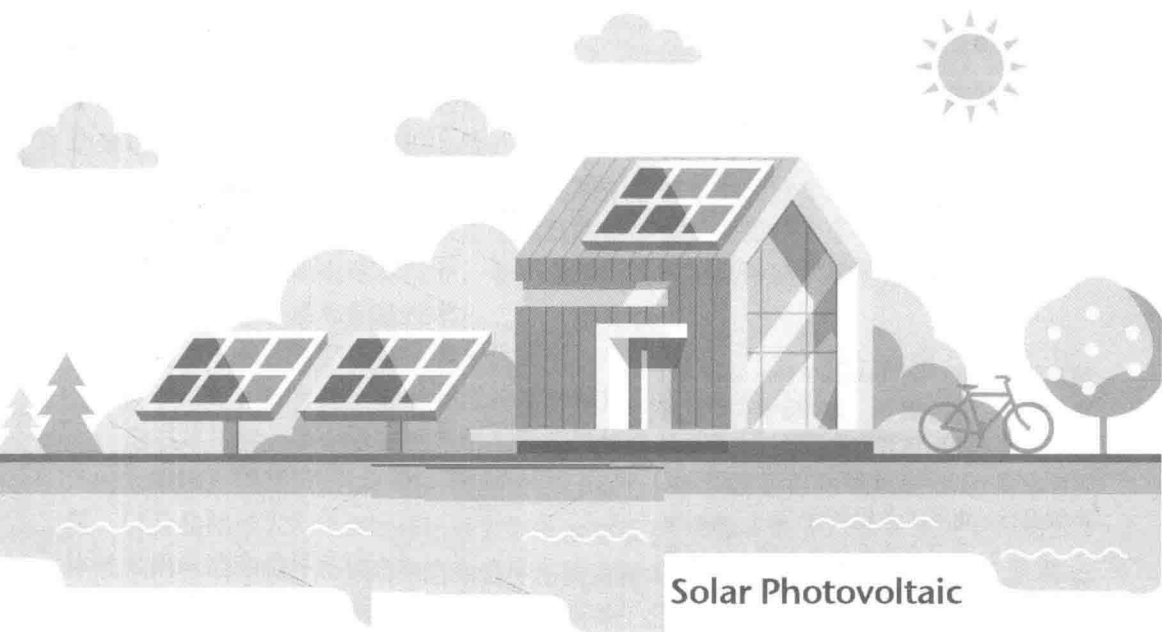
电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



“十二五”国家重点图书出版规划项目 · 新能源技术丛书

太阳能 光伏发电系统

◆ 金步平 吴建荣 刘士荣 陈哲良 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书立足于分布式光伏发电系统发展的需求,系统介绍了晶体硅太阳电池的物理基础,晶体硅太阳电池和组件的制造技术,硅基薄膜太阳电池、碲化镉太阳电池等太阳电池的原理、性能和制备技术,太阳能光伏发电系统中直流-直流(DC/DC)变换电路和直流-交流(DC/AC)变换电路、系统储能装置、系统的充/放电控制电路,光伏系统的软件设计和硬件设计,以及分布式发电与微电网的基本概念、微电网的典型结构、微电网运行控制等内容。在此基础上,本书也介绍相关的实际应用案例,以供读者在实际工作中作为参考。

本书内容较为丰富,既有工作原理的阐述,又列举了一些实际应用的案例,适合从事太阳能光伏发电技术的工程技术人员阅读使用,也可作为高等院校相关专业的教学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电系统/金步平等编著. -北京:电子工业出版社,2016.5
(新能源技术丛书)
ISBN 978-7-121-27968-3

I. ①太… II. ①金… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第317999号

策划编辑:张 剑 (zhang@phei.com.cn)

责任编辑:张 剑 文字编辑:牛平月

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:29 字数:601千字

版 次:2016年5月第1版

印 次:2016年5月第1次印刷

册 数:3000册 定价:78.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: zhang@phei.com.cn。

前 言

作为一种无污染的可再生清洁能源，太阳能的开发和应用近年来日益受到关注。而光伏发电技术则是利用太阳电池组件将太阳光能直接转化为电能的，再配备其他的辅助设备，如蓄电池、控制器和逆变器等，就可构成不同的发电系统。近十年来，光伏发电产业每年以40%~50%的速度递增，成为当今世界上发展最快的能源产业。我国也是太阳能资源丰富的国家之一，全国总面积2/3以上的地区年日照时数大于2000h，有着非常有利的利用条件。

2013年7月，国务院发布《关于促进光伏产业健康发展的若干意见》，国家发展和改革委员会、国家能源局也相继颁布了《分布式发电管理暂行办法》和《国家能源局关于进一步落实分布式光伏发电有关政策的通知》，这必将大大加强和推动分布式光伏发电项目的建设。由此可见，今后我国光伏发电系统的发展将以分布式光伏发电系统为主。本书的重点就是论述中小型规模的分布式光伏发电系统，涉及的内容涵盖了构成分布式光伏发电系统的各个主要方面。为了全面了解光伏发电系统的核心部件太阳电池和组件，本书还系统介绍了晶体硅太阳电池和硅基薄膜太阳电池的原理、性质和制造技术。

撰写本书的作者们长期从事光伏发电技术的研究、开发、推广应用工作和光伏专业教学工作，具有扎实的专业理论基础和较丰富的实践经验。

全书共9章。第1章主要介绍太阳能光伏系统的构成，重点讨论了地表上所受到的太阳辐射情况及其计算方法等；第2章主要介绍硅基太阳电池材料的基本性质，以及晶体硅太阳电池物理基础、工作原理及其性能参数等；第3章主要介绍晶体硅太阳电池和组件的制造技术；第4章主要介绍硅基薄膜太阳电池的工作原理、材料性质、制备技术和制备工艺等；第5章主要介绍化合物太阳电池及染料敏化太阳电池的发展概况、材料性质、制备技术和制备工艺等；第6章主要介绍各种类型的DC/DC变换电路和DC/AC变换电路的工作原理和特点；第7章主要介绍常用蓄电池的工作原理和特点，以及将来可能会在光伏系统中使用的一些新型储能装置，重点探讨了目前在光伏系统中广泛使用的铅酸蓄电池的主要特性参数及其充/放电特性、充/放电保护控制电路原理和一些基本电路结构；第8章主要讨论了光伏系统所涉及的软件设计和硬件设计，并介绍了一些目前较为常用的光伏系统设计和优化软件；第9章主要介绍分布式发电与微电网的基本概念、微电网的典型结构、

微电网运行控制等内容。

本书由金步平、吴建荣、刘士荣、陈哲良编著。其中，第1章、第6章至第8章由金步平编写，第2章和第3章由陈哲良编写，第4章和第5章由吴建荣编写，第9章由刘士荣编写。在本书撰写过程中，常州天合光能有限公司张臻博士提供了两例光伏电站的设计实例，在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中还参考了大量的国内外光伏发电领域的文献资料，在此谨向相关作者表示衷心的感谢！

太阳能光伏发电技术涉及众多学科，既涉及半导体物理、化学和材料科学，也涉及光学、电学、电子学、计算机和机械等，因此全书的符号难以做到完全统一，这可能会给读者的阅读带来一些不便，敬请谅解。

由于时间和作者水平的有限，书中难免会有疏漏和错误之处，敬请读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 阳光发电概论	1
1.1 太阳辐射	1
1.1.1 太阳能量与光谱	1
1.1.2 太阳与地球的位置关系	3
1.1.3 太阳辐射量	5
1.1.4 中国太阳能资源分布	11
1.1.5 太阳能的特点	12
1.2 太阳能光伏系统	13
1.3 太阳能光伏系统分类	17
参考文献	19
第 2 章 晶体硅太阳能电池	20
2.1 硅的晶体结构	20
2.2 晶体硅的基本物理与化学性质	22
2.3 硅的半导体性质	24
2.4 晶体硅太阳能电池物理基础	32
2.5 晶体硅太阳能电池的性质	39
参考文献	46
第 3 章 晶体硅太阳能电池和组件的制造	47
3.1 晶体硅太阳能电池的制造	47
3.2 太阳电池组件	72
3.3 太阳电池及组件的测试	78
参考文献	91
第 4 章 硅基薄膜太阳能电池	92
4.1 硅基薄膜太阳能电池发展概况	92
4.2 非晶硅薄膜性质	93
4.3 非晶硅薄膜制备技术	101
4.3.1 非晶硅薄膜沉积技术	101
4.3.2 非晶硅薄膜沉积机制	105
4.3.3 氢化非晶硅薄膜	106

4.3.4	非晶硅合金薄膜	107
4.3.5	影响非晶硅薄膜沉积的因素	108
4.3.6	非晶硅薄膜的光致衰减效应 (Staebler - Wronski 效应)	111
4.3.7	微晶硅/纳米硅薄膜	112
4.3.8	非晶硅薄膜的掺杂	113
4.4	硅基薄膜太阳能电池结构及性能	114
4.4.1	非晶硅单结太阳能电池	114
4.4.2	硅基叠层薄膜太阳能电池	119
4.5	硅基薄膜太阳能电池产业化生产技术	125
	参考资料	129
第 5 章	化合物太阳电池及染料敏化太阳电池	131
5.1	CdTe 太阳电池	131
5.1.1	CdTe 太阳电池发展概况	132
5.1.2	CdTe 材料性质	132
5.1.3	CdTe 薄膜制备技术	134
5.1.4	碲化镉薄膜太阳能电池结构及制备工艺	137
5.1.5	CdTe 薄膜太阳电池的产业化生产	142
5.2	CIGS 太阳电池	144
5.2.1	CIGS 太阳电池发展概况	144
5.2.2	CIGS 材料性质	145
5.2.3	CIGS 薄膜制备技术	147
5.2.4	CIGS 太阳电池结构及性能	152
5.2.5	CIGS 太阳电池制备技术	154
5.3	III - V 族化合物太阳电池	157
5.3.1	III - V 族化合物材料特性	157
5.3.2	GaAs 材料	158
5.3.3	GaAs 材料制备技术	161
5.3.4	GaAs 太阳电池	167
5.4	染料敏化太阳电池及有机太阳电池	176
5.4.1	染料敏化太阳电池	176
5.4.2	有机太阳电池	186
	参考文献	194
第 6 章	太阳能光伏系统电能变换电路	199
6.1	变换电路结构及分类	199
6.1.1	电路结构	199
6.1.2	变换电路分类	200

6.1.3	技术要求和主要技术指标	201
6.2	DC/DC 变换电路	203
6.2.1	非隔离型 DC/DC 变换电路	203
6.2.2	隔离型 DC/DC 变换电路	210
6.2.3	控制与驱动	219
6.3	DC/AC 变换电路	233
6.3.1	方波逆变电路	233
6.3.2	阶梯波逆变电路	234
6.3.3	正弦波逆变电路	235
6.3.4	其他类型逆变电路	238
6.4	并网型逆变电路	243
6.4.1	电压型逆变电路	244
6.4.2	电流型逆变电路	244
6.4.3	Z 源型逆变电路	246
6.4.4	隔离型并网逆变电路	246
6.4.5	非隔离型并网逆变系统	250
6.4.6	并网逆变器主要技术参数	259
	参考文献	261
第 7 章	光伏系统储能装置及其充/放电控制电路	263
7.1	蓄电池	263
7.1.1	蓄电池的命名方法	264
7.1.2	铅酸蓄电池	264
7.1.3	碱性蓄电池	272
7.1.4	锂离子蓄电池 (Li - Ion 蓄电池)	277
7.2	未来可能应用的新型的储能装置	278
7.2.1	超级电容器	279
7.2.2	超导磁能储能	281
7.2.3	燃料蓄电池	282
7.3	铅酸蓄电池主要特性参数	284
7.3.1	容量	284
7.3.2	电压	287
7.3.3	蓄电池内阻	288
7.3.4	寿命	289
7.3.5	荷电状态 (SOC)	289
7.3.6	放电深度 (DOD)	289
7.4	铅酸蓄电池充/放电特性	290

7.4.1	放电特性	290
7.4.2	充电特性	291
7.5	太阳能光伏发电系统对蓄电池的要求	297
7.6	充/放电控制器工作原理及分类	297
7.6.1	工作原理	297
7.6.2	充/放电控制器的分类	299
7.7	充/放电保护控制器基本电路	302
7.7.1	回差型充/放电保护控制器	302
7.7.2	脉宽调制型 (PWM) 充电控制器	306
7.7.3	智能型充电控制器	307
7.8	最大功率点跟踪	308
7.8.1	恒定电压法	308
7.8.2	MPPT 工作原理	309
7.8.3	MPPT 的硬件实现	319
7.9	控制器的主要技术参数及选型配置	320
7.9.1	控制器的主要技术参数	320
7.9.2	控制器选型配置	322
	参考文献	323
第 8 章	光伏系统设计	325
8.1	独立光伏系统设计	325
8.1.1	设计原则和步骤	325
8.1.2	系统容量设计	326
8.1.3	最佳安装倾角的确定	333
8.2	并网光伏系统设计	334
8.3	光伏发电系统的硬件设计	336
8.3.1	光伏方阵支架设计及安装	336
8.3.2	光伏方阵基础设计	346
8.3.3	光伏系统配线设计	348
8.3.4	防雷和接地设计	350
8.3.5	直流汇流箱的设计	353
8.3.6	交流配电柜的设计	355
8.4	光伏系统设计软件	356
8.4.1	RETScreen	356
8.4.2	PVSYST	359
8.4.3	PV * SOL	366
8.4.4	国内光伏系统优化设计软件	372

8.5	光伏电站系统效率分析	375
8.6	光伏电站设计实例	380
8.6.1	天合光能武威二期 100MW 光伏并网发电工程	380
8.6.2	天合光能 120MW 鱼光互补项目	386
8.7	光伏电站的智能化运维	387
8.7.1	监控系统	388
8.7.2	智能运维	389
	参考文献	391
第9章	分布式发电与微电网	393
9.1	分布式发电与微电网概述	393
9.1.1	分布式发电的基本概念	393
9.1.2	分布式电源	395
9.1.3	微电网的概念	398
9.1.4	国内外微电网发展概况	401
9.1.5	微电网的相关技术	406
9.2	微电网的典型结构	410
9.3	分布式电源的建模与控制	413
9.3.1	风力发电系统	413
9.3.2	微型燃气轮机发电系统	416
9.3.3	超级电容器	420
9.3.4	分布式电源控制	425
9.4	微电网运行控制	428
9.4.1	微电网的能量管理	429
9.4.2	微电网系统的控制模式	432
9.5	微电网的保护	436
9.5.1	分布式电源对传统继电保护的影响	436
9.5.2	并网运行时的保护	438
9.5.3	孤岛运行时的保护	440
9.5.4	孤岛检测方法	440
9.6	光伏微电网实例分析	443
9.6.1	光伏微电网的系统组成	443
9.6.2	光伏微电网并网运行控制	444
9.6.3	光伏发电微电网孤岛自治运行控制	449
	参考文献	451

第 1 章 阳光发电概论

阳光发电系统是指利用太阳电池组件将太阳光能直接转化为电能，再配备其他设备（如蓄电池、控制器和逆变器等）构成的各种不同的发电系统。对于直接利用太阳光发电的太阳电池而言，太阳辐射的光谱、能量和太阳辐射的变化情况与太阳电池的输出功率密切相关。本章将简单介绍太阳辐射和常用的一些坐标系，重点讨论地面上所接收到的太阳辐射情况及其计算方法，以及太阳能光伏系统的构成，为阅读后续章节打下基础。

1.1 太阳辐射

1.1.1 太阳能量与光谱

1. 太阳能量

太阳是一个主要由氢和氦组成的炽热的气体星球，直径约为 1.392×10^6 km，距地球的距离约为 1.496×10^8 km。太阳是能量最强、天然稳定的自然辐射源，其中心温度为 1.5×10^7 K，表面的有效温度为 5762K。内部发生由氢转换成氦的聚核反应，每秒有 6.57×10^{11} kg 的氢聚合生成 6.53×10^{11} kg 的氦，总辐射功率可达到 3.8×10^{26} W，这些能量以电磁波的形式，以 3×10^8 m/s 的速度向外发射，虽然其中只有大约 22 亿分之一能到达地球大气层（约为 1.7×10^{17} W），但也有相当于 5.9×10^6 t 煤的能量。这部分太阳辐射能在穿越大气层时，约 19% 被大气所吸收，约 30% 被大气尘粒和地面反射回宇宙空间，最后约有 8.5×10^{16} W 到达地球的表面。

2. 太阳光谱

太阳属于黄色的矮星，太阳光谱属于 G2V 光谱型，太阳辐射的波长范围覆盖了从 X 射线到无线电波的整个电磁波谱。在大气层外，太阳的光谱分布曲线和 5900K 黑体的相近。在地面上观测的太阳辐射的波段范围大约为 $0.295 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 。小于 $0.295 \mu\text{m}$ 和大于 $2.5 \mu\text{m}$ 波长的太阳辐射，因被地球大气中臭氧、水气和其他大气分子强烈吸收，而不能到达地面。

太阳辐射主要集中在可见光部分（ $0.4 \sim 0.76 \mu\text{m}$ ），波长大于可见光的红外线（ $>0.76 \mu\text{m}$ ）和小于可见光的紫外线（ $<0.4 \mu\text{m}$ ）部分较少。在全部辐射能中，波长在 $0.15 \sim 4 \mu\text{m}$ 之间的占 99% 以上，且主要分布在可见光区和红外区，前

者占太阳辐射总能量的约 50%，后者占约 43%，紫外区的太阳辐射能很少，只占总量的约 7%。

大气层外的太阳光谱如图 1-1 所示。太阳光谱辐照度的积分值见表 1-1^[1]。

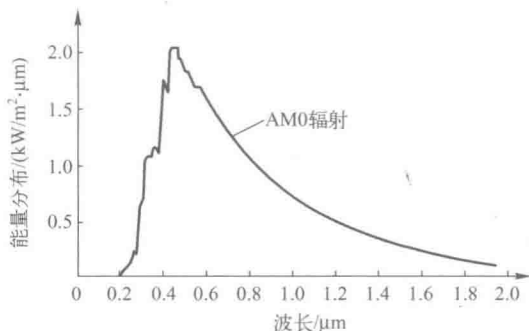


图 1-1 大气层外的太阳光谱

表 1-1 太阳光谱辐照度的积分值

波长范围/ μm	光照辐射度/ (W/m^2)	波长范围/ μm	光照辐射度/ (W/m^2)
0. 1510~0. 2100	a: 0. 2	0. 6569~1. 2500	a: $\eta = 2. 0\%$ 246. 4
	b: 0. 2		b: $\eta = 1. 0\%$ 248. 9
0. 2100~0. 3000	a: 16	1. 25~2. 5	a: 225. 7
	b: 16. 2		b: 228. 9
0. 3000~0. 3300	a: 20. 8	2. 5~10	a: 45. 6
	b: 22. 0		b: 47. 9
0. 3300~0. 6569	540. 3	> 10	0. 8
0. 6569~0. 8770	272. 0	合计	a: 1368
			b: 1377

3. 太阳常数

太阳的辐射能量用太阳常数来表示。太阳常数定义为在平均日地距离上、地球大气层外测得的垂直于光线的单位面积上所接收到的太阳辐射通量，用 I_{sc} (Solar constant) 表示。1976 年，美国宇航局发布的太阳常数值为 $(1353 \pm 21) \text{W}/\text{m}^2$ 。1981 年，世界气象组织推荐的太阳常数值 $I_{sc} = (1367 \pm 7) \text{W}/\text{m}^2$ ，通常采用 $1367 \text{W}/\text{m}^2$ 。

某一实际日地距离 R 处的太阳辐射通量 I_R 可由下式决定：

$$I_R = \frac{R_0^2}{R^2} I_{R_0} \quad (1-1)$$

式中， R_0 为平均日地距离 (km)； I_{R_0} 为平均日地距离的太阳辐射通量 (W)。

1.1.2 太阳与地球的位置关系

1. 地理坐标系

地理坐标系是用于确定地球上某一物体在地球上位置的坐标系。地球除绕太阳公转外，还绕自己的轴线旋转，地球自转轴（地轴）与地球椭球体的短轴相重合，并与地面相交于两点，即地球的两极——北极和南极。垂直于地轴，并通过地心的平面称为赤道平面，赤道平面与地球表面相交的大圆圈（交线）称为赤道，赤道平面将地球分为南半球和北半球。

地球表面上任一点的位置均可用纬度和经度来确定。纬度线和经度线是地球表面上两组正交（相交为 90° ）的曲线，这两组正交的曲线构成的坐标，称为地理坐标系，如图1-2所示。

1) 纬度 (Latitude) 过地表任意点 M 的平行于赤道的圆周线，称为纬度线；纬度线上任意点指向地心的铅垂线与赤道面的交角，称为该点的地理纬度（简称纬度），用字母 φ 表示。纬度从赤道起算，在赤道上纬度为 0° ，纬线离赤道越远，纬度越大，至极点纬度为 90° 。赤道以北称为北纬，以南称为南纬。

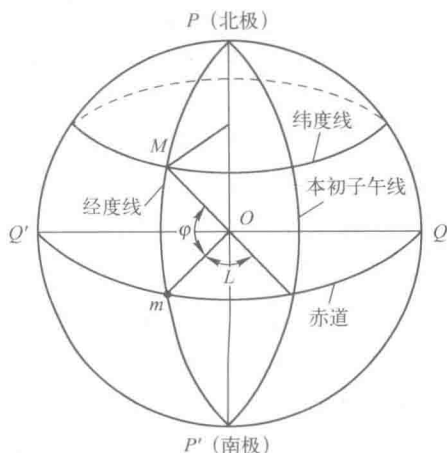


图1-2 地理坐标系

2) 经度 (Longitude) 过地表任意点 M 过南北极的垂直于赤道面的圆周线，称为经度线（又称为子午线）；过某点的子午面与通过英国格林尼治天文台的子午面所夹的二面角，称为该点的地理经度（简称经度），用字母 L 表示。国际规定通过英国格林威治天文台的子午线为本初子午线（或称为首子午线），作为计算经度的起点，该线的经度为 0° ，向东 $0 \sim 180^\circ$ 称为东经，向西 $0 \sim 180^\circ$ 称为西经。

2. 天球坐标系

由于要研究太阳和地球的相对位置关系，所以可采用表明太阳所处位置的天球坐标系。天球是以地球的地心为球心，以日—地平均距离为半径的一个假想球面，太阳就是在这个球面上自东向西做相对于地球的运动。天球坐标系上一些物理量和地理坐标系上的物理量可以相对应，只是所针对的球面不同，通过延长或平行放大就可得到。常用的天球坐标系分为赤道坐标系和地平坐标系两种。

1) 赤道坐标系 赤道坐标系是以天赤道 QQ' 为基本圆，以天赤道与天子午圈

的交点 Q 为原点的天球坐标系, 如图 1-3 所示。太阳的位置 S_0 由时角 θ_h 和赤纬角 δ 这两个具有相互垂直关系的坐标决定。

⊙ 时角 θ_h : 表示太阳中心点到地心的连线 OS_0 与天子午线 PQ 之间的夹角。对于圆弧 QB 而言, 顺时针方向为正, 逆时针方向为负。太阳正午时刻, $\theta_h = 0^\circ$, 上午为负值, 下午为正值, 每 1h 对应的时角为 15° 。任一时刻所对应的时角为该时刻与正午的时间差 (h) 乘以 15° 。

⊙ 赤纬角 δ : 表示太阳中心到地心的连线 OS_0 与其在天赤道平面投影 OB 之间的夹角。赤纬角是由于地球绕太阳运行造成的现象, 它随时间变化而变化。赤纬角以年为周期, 在 $+23.45^\circ$ 与 -23.45° 的范围内移动。每年夏至, 赤纬角达到最大值 $+23.45^\circ$, 太阳位于地球北回归线正上空, 夏至日是北半球日照时间最长、南半球日照时间最短的一天; 随后, 赤纬角逐渐减少, 至秋分时等于零; 至冬至时, 赤纬角减至最小值 -23.45° , 此时阳光斜射北半球, 昼短夜长, 而南半球则相反; 之后, 赤纬角逐渐增加, 至春分时, 赤纬角又回到 0° 。

因赤纬角值日变化很小, 按照库珀 (Cooper) 方程, 一年内任意一天的赤纬角 δ 可用下式计算:

$$\delta = 23.45 \sin [360 \times (284 + n) / 365] \quad (1-2)$$

式中, n 为日数, 自 1 月 1 日开始计算。如在春分日, $n = 81$, 则 $\delta = 0$ 。

式 (1-2) 只是一个很好的近似公式, 因一年的长度并不完全是 365 天, 春分也并不一定总是第 81 天。

2) 地平坐标系 地平坐标系中的基本圈是地平圈, 基本点是天顶和天底, 如图 1-4 所示。太阳的位置 S_0 由天顶角 θ_z (或太阳高度角 α) 和太阳方位角 γ_s 这两个具有相互垂直关系的坐标来决定。

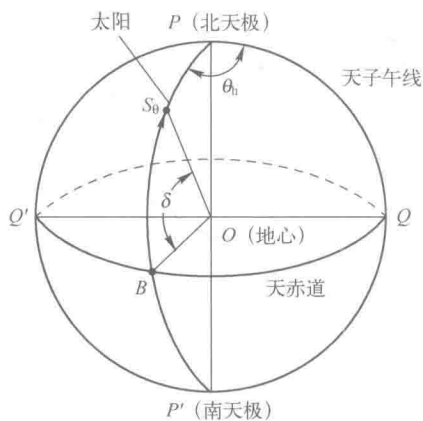


图 1-3 赤道坐标系

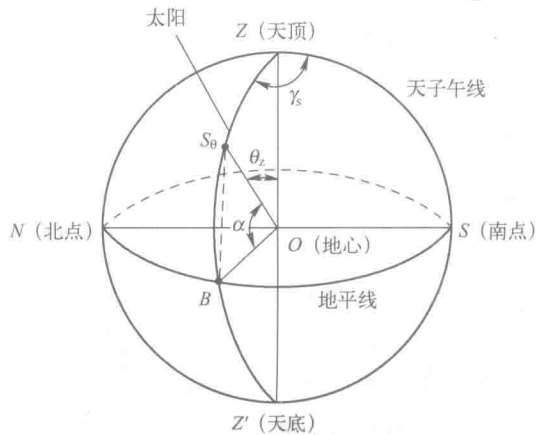


图 1-4 地平坐标系

☉ 天顶角 θ_z : 即地心到太阳中心的连线 OS_0 与地心到天顶连线 OZ 之间的夹角。

☉ 太阳高度角: 即地心到太阳中心的连线 OS_0 与其在地平面上投影线 OB 之间的夹角, 表示太阳高出水平面的角度。

太阳高度角 α 和天顶 θ_z 满足如下关系:

$$\theta_z + \alpha = 90^\circ \quad (1-3)$$

任意条件下的太阳高度角 α 可用下式来计算^[2]:

$$\sin\alpha = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos\theta_h \quad (1-4)$$

☉ 太阳方位角 γ_s : 即地心到南点的连线 OS 与 OS_0 在地平面上投影线 OB 之间的夹角, 表示太阳光线的水平投影偏离正南方向的角度。正南方向的方位角 $\gamma_s = 0^\circ$, 顺时针向西旋转为正, 逆时针向东旋转为负。

任意条件下的太阳方位角 γ_s 可用下式来计算:

$$\sin\gamma_s = \frac{\cos\delta \cdot \sin\theta_h}{\cos\alpha} \quad (1-5)$$

或

$$\cos\gamma_s = \frac{\sin\alpha \cdot \sin\varphi - \sin\delta}{\cos\alpha \cdot \cos\varphi} \quad (1-6)$$

1.1.3 太阳辐射量

地面上接收到的太阳辐射包括直接辐射和散射辐射。由于太阳辐射在穿越大气层时要受到大气层中的各种成分的反射、吸收和散射的影响, 使到达地球表面的太阳辐射强度和光谱能量分布都发生了不同程度的衰减和变化。太阳辐射通过大气层的路程越长, 大气层对其反射、吸收和散射的影响越大, 到达地球表面的太阳辐射能量也就越小。

1. 大气质量

大气质量是一个无量纲的量, 用 AM 表示, 其定义为太阳光线通过大气的路程与太阳在天顶角时太阳光线通过大气的路程之比。规定在 1 个标准大气压和温度为 0° 时, 海平面上太阳光线垂直入射路径 R 等于 1, 即 AM 为 1, 记作 AM1。AM1 条件下的太阳辐照度为 $0.107\text{W}/\text{cm}^2$ 。大气层外无衰减时的大气质量为 0, 即 AM0, 太阳在其他任意位置时的大气质量都大于 1。任意位置的大气质量 AM 与太阳高度角 α 的关系示意图如图 1-5 所示。AM 值可按下式计算得到:

$$\text{AM} = \sec\theta_z = \frac{1}{\sin\alpha}, \quad 0^\circ < \alpha < 90^\circ \quad (1-7)$$

式 (1-7) 的推出是忽略了折射和地面曲率等影响, 当 $\alpha < 30^\circ$ 时, 有较大误差。在光伏系统工程计算中, 可采用下式^[3]:

$$AM(\alpha) = \sqrt{1229 + (614\sin\alpha)^2} - 614\sin\alpha \quad (1-8)$$

我国规定 AM1.5 为测试硅太阳能电池标称输出功率的标准条件之一，此条件下的太阳高度角为 $\alpha = 41.81^\circ$ ，太阳辐照度为 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 。AM0 和 AM1.5 的太阳光谱的能量分布图如图 1-6 所示。

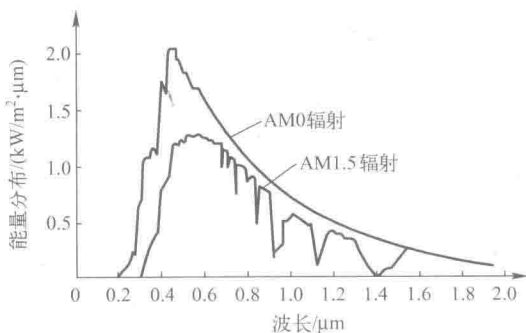
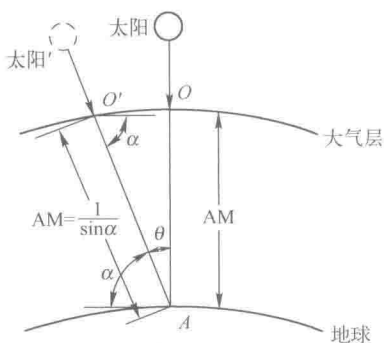


图 1-5 大气质量与太阳高度角关系示

图 1-6 太阳能光谱分布图

2. 大气透明度

大气透明度是表征地球大气容许太阳辐射通过的百分率。根据布克 - 兰伯特 (Bonguer - Lambert) 定律，波长为 λ 的太阳辐照度 $I_{\lambda,0}$ 经过厚度为 dm 的大气层后，辐照衰减量为

$$dI_{\lambda,n} = -\alpha_{\lambda} I_{\lambda,0} dm \quad (1-9)$$

积分后得到：

$$I_{\lambda,n} = I_{\lambda,0} e^{-\alpha_{\lambda} m} \quad (1-10)$$

式中， $I_{\lambda,n}$ 为到达地球表面的波长为 λ 的法向太阳辐照度； $I_{\lambda,0}$ 为大气层外的太阳辐照度； α_{λ} 为大气消光系数； m 为大气质量。

令 $P_{\lambda} = e^{-\alpha_{\lambda} m}$ ，为单色光谱的透明度或“透明系数”，则：

$$I_{\lambda,n} = I_{\lambda,0} P_{\lambda}^m \quad (1-11)$$

设在某个大气质量下的整个太阳辐射光谱范围内单色光谱透明度的平均值为 p_m ，则可得到该大气质量下全色太阳辐照度 I_n 为：

$$I_n = \int_0^{\infty} I_{\lambda,0} P_{\lambda}^m d\lambda = \gamma I_{sc} p_m^m \quad (1-12)$$

因此有：

$$p_m = \left(\frac{I_n}{\gamma I_{sc}} \right)^{1/m} \quad (1-13)$$

式中， γ 为日地变化修正值； I_{sc} 为太阳常数。

p_m 与 m 有着复杂的关系，它表征大气对太阳辐射能的衰减程度。

3. 与太阳光线垂直的地球表面上的太阳直接辐照度

由于 p_m 与 m 有着复杂的关系，为了简单起见，通常将大气透明度修正到某个给定的大气质量上，如将大气质量为 m 的大气透明度 p_m 值修正到大气质量为 2 的大气透明度 p_2 上，则与太阳光线垂直的地球表面上的太阳直接辐照度为

$$I_n = \gamma I_{sc} p_2^m \quad (1-14)$$

表 1-2 给出了各种大气透明度下太阳直接辐射的平均辐照度与大气质量的关系^[4]。

表 1-2 各种大气透明度下太阳直接辐射的平均辐照度与大气质量的关系

单位: $\text{cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$

代表值	p_2 范围	m					
		8	5	4	3	2	1
0.60	≤ 0.625	0.158	0.298	0.390	0.522	0.698	0.852
0.65	0.625~0.675	0.244	0.419	0.522	0.647	0.843	1.001
0.70	0.675~0.725	0.340	0.533	0.647	0.791	0.960	1.100
0.75	0.726~0.775	0.470	0.682	0.791	0.923	1.103	1.220
0.80	0.776~0.825	0.600	0.814	0.923	1.053	1.222	1.327
0.85	≥ 0.826	0.748	0.957	1.067	1.186	1.350	1.432

4. 水平面上的直接太阳辐照度

I_n 表示与太阳光线垂直的地球表面上的太阳直接辐照度。如果太阳是以某一高度角 α 入射，则可按下面的分析计算到达地球水平面上的直接太阳辐照度。

直接太阳辐照度与高度角的关系图如图 1-7 所示。 I_n 表示入射到 AC 面上的直接太阳辐照度， I_b 表示水平面上的直接太阳辐照度。由于在 AC 面上接受到的太阳能量与 AB 面上接受到的太阳能量相等，即：

$$I_n \times AC = I_b \times AB \quad (1-15)$$

而 $AC = AB \sin \alpha$ ，所以水平面上的直接太阳辐照度为：

$$I_b = I_n \sin \alpha \quad (1-16)$$

将式 (1-14) 代入式 (1-16)，可得：

$$I_b = \gamma I_{sc} p_2^m \sin \alpha \quad (1-17)$$

将式 (1-17) 对时间积分，则可得到水平面上单位面积上太阳辐射能为

$$Q_b = \int_0^t \gamma I_{sc} p_2^m \sin \alpha dt \quad (1-18)$$

将式 (1-4) 代入式 (1-18) 中，并利用时角 θ_h 与 t 的关系：

$$dt = \frac{T}{2\pi} d\theta_h$$

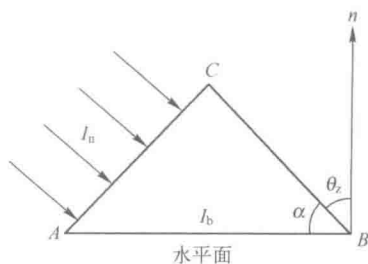


图 1-7 直接太阳辐照度与高度角的关系图