

TAIYANGNENG GUANGFUFADIAN
XITONG JIQI YINGYONG



太阳能光伏发电系统 及其应用

杨贵恒 张海呈 张颖超 强生泽 编著

第2版
The Second Edition



化学工业出版社

太阳能光伏发电系统 及其应用

杨贵恒 张海呈 张颖超 强生泽 编著

第2版

The Second Edition



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

太阳能光伏发电系统及其应用/杨贵恒等编著.
2版.—北京:化学工业出版社,2014.11
ISBN 978-7-122-21824-7

I. ①太… II. ①杨… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 209972 号

责任编辑:高墨荣
责任校对:宋夏

文字编辑:徐卿华
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司
720mm×1000mm 1/16 印张22¼ 字数476千字 2015年1月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究

前言 FOREWORD

进入 21 世纪的人类社会正面临着化石燃料短缺和生态环境严重污染的局面，廉价的石油时代即将结束，逐步改变能源消费结构，大力发展可再生能源，走可持续发展的道路，已成为世界各国政府的共识。

由于太阳能光伏发电系统具有其独特的优点，其应用与普及越来越受到人们的重视。我国的太阳能资源十分丰富，为太阳能的利用创造了有利的自然条件，近年来得到了飞速发展。我国太阳能电池的产量平均年增长率在 40% 以上，已成为发展迅速的高新技术产业之一，其应用规模和领域也在不断扩大，从原来只在偏远无电地区和特殊用电场合使用，发展到城市并网系统和大型光伏电站。尽管目前太阳能光伏发电在能源结构中的所占比例不大，但是随着社会的发展和技术的进步，其份额将会逐年增加。据专家预测，到 21 世纪中叶，太阳能光伏发电将成为世界能源供应的主体，一个光辉灿烂的太阳能时代即将到来。

本书共分为 8 章来讨论太阳能光伏发电系统及其应用技术。第 1 章介绍了太阳的物理特性、太阳辐射的性质、我国的太阳能资源分布与利用形式以及太阳能光伏发电现状与发展前景；第 2 章介绍了各种太阳能光伏发电系统的工作原理；第 3 章至第 7 章重点讨论了太阳能光伏发电系统中的核心部件及其相关技术：太阳能光伏电池与阵列、储能装置、光伏发电系统中的电能变换技术、光伏发电系统的控制与管理、光伏发电系统的设计等；第 8 章简要介绍了太阳能光伏发电系统的运行管理与维护。

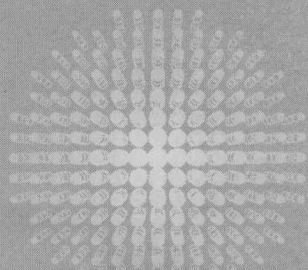
本书通俗易懂，注重科学性、针对性和实用性的有机结合，是从事太阳能光伏发电系统设计、开发与应用工程技术人员的必备读物，也可作为大专院校和职业技术学院相关专业师生的教学参考用书。本书第一版作为太阳能光伏发电系统的经典科技图书和教学参考用书，多所大专院校和职业技术学院相关专业选用此书作为教材，畅销五年，现全新改版新装上市，内容更全、技术更新、实用性更强！

本书由常熟理工学院李天福，盐城工学院张春富，重庆通信学院杨贵恒、张海呈、强生泽、张颖超、王秋虹、朱鹏涛、刘扬、叶奇睿、冯雪、张建新、景有泉、钱希森、李龙、向成宣、任开春、曹均灿、龚伟、金丽萍、田永书、刘凡、张瑞伟、聂金铜、文武松、詹天文、杨波、赵英等共同编写，最后由杨贵恒统稿。另外，本书在出版过程中，得到了重庆通信学院教保科的大力支持，在此表示衷心感谢。

读者如需要本书讲课资料，可发邮件至 gmr9825@163.com。

由于太阳能光伏发电技术所涉及的知识面广，相关技术发展迅猛，再加之编者的水平和经验有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正。

编著者



目录 CONTENTS

第1章 绪论

1.1 太阳及太阳能概述	1
1.1.1 太阳的物理特性	1
1.1.2 太阳能辐射与吸收	2
1.1.3 日地运动	4
1.1.4 天球坐标	6
1.1.5 我国的太阳能资源	8
1.1.6 太阳能利用的基本形式	10
1.2 太阳能光伏发电现状与发展前景	12
1.2.1 世界光伏发电的发展现状	13
1.2.2 中国光伏发电的发展现状	21
1.2.3 太阳能光伏发电的发展前景	25

第2章 光伏发电系统的类型

2.1 独立光伏发电系统	28
2.1.1 直流负载直结型系统	28
2.1.2 直流负载蓄电池使用型系统	28
2.1.3 交流负载蓄电池使用型系统	29
2.1.4 直、交流负载蓄电池使用型系统	29
2.2 并网光伏发电系统	30
2.2.1 无逆流并网系统	31
2.2.2 有逆流并网系统	31
2.2.3 切换式并网系统	32
2.2.4 自立运行切换型太阳能光伏系统	33
2.2.5 地域并网型太阳能光伏系统	33
2.2.6 直流并网光伏发电系统	35
2.2.7 交流并网光伏发电系统	37
2.3 互补型光伏发电系统	38

2.3.1	互补型光伏发电系统的类型	39
2.3.2	风光互补型光伏发电系统的控制器	44
2.3.3	风光互补型发电系统的应用	54

第3章 光伏电池与阵列

3.1	太阳能光伏电池及其工作原理	57
3.1.1	半导体基础知识	57
3.1.2	光生伏打效应	65
3.1.3	太阳能光伏电池工作过程	67
3.1.4	太阳能光伏电池的基本结构	68
3.2	太阳能光伏电池的基本特性	69
3.2.1	等效模型	69
3.2.2	伏安特性参数	72
3.2.3	影响太阳能光伏电池输出特性的主要因素	73
3.2.4	影响太阳能光伏电池转换效率的因素	77
3.3	太阳能光伏电池的类型与制造工艺	79
3.3.1	太阳能光伏电池的类型	80
3.3.2	太阳能光伏电池的制造工艺	83
3.4	太阳能光伏电池组件与阵列	86
3.4.1	太阳能光伏电池组件	87
3.4.2	太阳能光伏电池阵列	93
3.4.3	太阳能光伏组件与阵列的性能	99

第4章 储能装置

4.1	铅酸蓄电池的构造	103
4.1.1	电极	103
4.1.2	电解液	104
4.1.3	隔板(膜)	107
4.1.4	电池槽	108
4.1.5	排气栓	109
4.1.6	附件	110
4.1.7	装配方式	110
4.2	铅酸蓄电池的工作原理	112
4.2.1	放电过程	112
4.2.2	充电过程	112
4.2.3	阀控式密封铅蓄电池的密封原理	113
4.3	铅酸蓄电池的性能	116

4.3.1	内阻	116
4.3.2	电动势	118
4.3.3	开路电压	120
4.3.4	端电压	120
4.3.5	容量	125
4.3.6	自放电	131
4.3.7	寿命特性	137
4.4	其他储能装置简介	138
4.4.1	氢化物-镍蓄电池	138
4.4.2	锂离子电池	145
4.4.3	电化学容器	152

第5章 光伏发电系统中的电能变换技术

5.1	光伏发电系统对电能变换的要求	158
5.1.1	最大功率点跟踪	158
5.1.2	提高变换效率	159
5.1.3	绿色无污染	159
5.1.4	能量管理	159
5.2	直流-直流变换技术	159
5.2.1	直流-直流变换基本原理	160
5.2.2	非隔离型直流变换器	161
5.2.3	隔离型直流变换器	174
5.2.4	直流-直流变换器的控制与驱动	195
5.3	直流-交流变换技术	198
5.3.1	单相逆变电路	199
5.3.2	三相桥式逆变电路	202
5.3.3	新型逆变电路	207
5.3.4	逆变控制技术	213

第6章 光伏发电系统的控制与管理

6.1	最大功率点跟踪	223
6.1.1	MPPT 基本原理	223
6.1.2	恒定电压法	225
6.1.3	干扰观测法	226
6.1.4	三点重心比较法	227
6.1.5	电导增量法	228
6.1.6	其他 MPPT 方法	230

6.2	蓄电池的充放电控制与管理	231
6.2.1	独立光伏发电系统能流模型	231
6.2.2	蓄电池的充电方法	232
6.2.3	蓄电池的全浮充运行方式	237
6.2.4	蓄电池充放电管理	239
6.3	光伏并网逆变器及其控制	241
6.3.1	并网逆变器数学模型	241
6.3.2	并网逆变器电流控制方法	243
6.3.3	并网逆变器并联控制技术	248
6.4	孤岛效应及其检测	253
6.4.1	孤岛效应及其危害	253
6.4.2	孤岛产生的条件及其检测标准	254
6.4.3	孤岛检测方法	258

第7章 光伏发电系统设计

7.1	独立光伏系统的容量设计	266
7.1.1	设计流程	266
7.1.2	光伏阵列的容量设计	267
7.1.3	蓄电池的容量设计	272
7.1.4	计算实例	273
7.1.5	系统容量的快速设计	273
7.2	独立光伏系统的优化设计	275
7.2.1	均衡性负载	275
7.2.2	季节性负载	282
7.2.3	特殊要求负载	284
7.3	并网光伏系统的设计	285
7.3.1	设计计算	285
7.3.2	计算实例	286
7.4	光伏发电系统的硬件设计	287
7.4.1	电气、机械结构与热设计	287
7.4.2	辅助设备的选配	288
7.4.3	设备安装布置设计	289
7.4.4	配线设计	291
7.4.5	过流保护设计	296
7.4.6	防雷系统设计	298
7.4.7	接地系统设计	302
7.5	光伏系统设计的重点	304

7.5.1	系统容量设计重点	304
7.5.2	系统硬件设计重点	304
7.5.3	小结	305

第8章 光伏电站的建设与运行维护

8.1	光伏电站的工程施工	306
8.1.1	施工准备	306
8.1.2	基础建设	307
8.1.3	太阳能电池方阵的安装	310
8.1.4	蓄电池及其附件的安装	318
8.1.5	控制器和逆变器的安装	320
8.1.6	光伏系统的布线	322
8.1.7	防雷接地系统的安装	323
8.1.8	光伏电站的调试	324
8.1.9	配套图纸资料	325
8.2	光伏电站的检测	326
8.2.1	绝缘电阻的检测	326
8.2.2	绝缘耐压的检测	329
8.2.3	接地电阻的检测	329
8.2.4	光伏电池阵列输出功率的检测	330
8.2.5	并网保护装置的检测	331
8.3	光伏电站的维护与管理	332
8.3.1	建立严格的管理制度	332
8.3.2	构建完善的技术体系	333
8.3.3	树立“安全第一”的用电意识	339
8.3.4	提高运行维护人员的业务技能	341
8.3.5	构建高效的应急处理机制	341
8.4	光伏电站常见故障检修	343
8.4.1	系统的预防性维修	343
8.4.2	系统的常规故障检修	344
8.4.3	故障检修实例：巧用万用表检修布线故障	345

参考文献

第1章 绪论

随着世界经济的快速发展,对能源的需求越来越大。目前,世界各国大多以石油、天然气和煤炭等化学原料作为主要能源,这必将导致能源的日益枯竭与环境污染的日益突出,能源与环境已成为21世纪人类面临的两项重大难题,包括太阳能、风能、水能、生物质能、海洋能、地热能等在内的可再生能源的发展与应用受到广泛关注。

1.1 太阳及太阳能概述

太阳能是由太阳中的氢经过聚变而产生的一种能源。它分布广泛,可自由利用,取之不尽,用之不竭,是人类最终可以依赖的能源。太阳能以辐射的形式每秒钟向太空发射 3.8×10^{19} MW 能量,其中有二十二亿分之一投射到地球表面。地球上一年中接受到的太阳辐射能高达 1.8×10^{18} kW·h,是全球能耗的数万倍,由此可见太阳的能量有多么巨大。利用太阳能的分布式能源系统逐渐受到各国政府的重视。要想合理的利用太阳能,首先要了解太阳的物理特性、太阳辐射的性质以及我国的太阳能资源分布与利用形式等。

1.1.1 太阳的物理特性

人类对太阳的利用已有悠久的历史,中国早在两千多年前的战国时期就已经懂得用金属做成的凹面镜聚集太阳光来点火。那么,太阳的能量是从哪里来的呢?正像一年四季里人们亲身感受到的那样,太阳是一个热烘烘的大火球,每天都在向人们住居的地球放射出大量的光和热。太阳位于地球所在的太阳系的中心,太阳星系如图 1-1 所示。

太阳与地球、月亮最大的区别在于它是一个发光的巨大的气体恒星,是一个炽热的大气球。天文学家通常把其结构分成“里三层”和“外三层”。太阳内部的“里三层”,由中心向外依次是核反应区、辐射区和对流区。核反应区是太阳能产生的基地;辐射区是向外传播太阳能的区域;对流区是将太阳能向表层传播的区域。太阳外部有“外三层”,也就是我们日常所能看见的太阳大气层,它从里向外分别为光球层、色球层和日冕层(如图 1-2 所示)。太阳表面温度约 5770K,中心温度约 1.56×10^8 K,压力约为两千多亿大气压。由于太阳内部温度极高,压力极大,其内部物质早已离化而呈离子态,不同原子核的相互碰撞引起一系列类似于氢弹爆

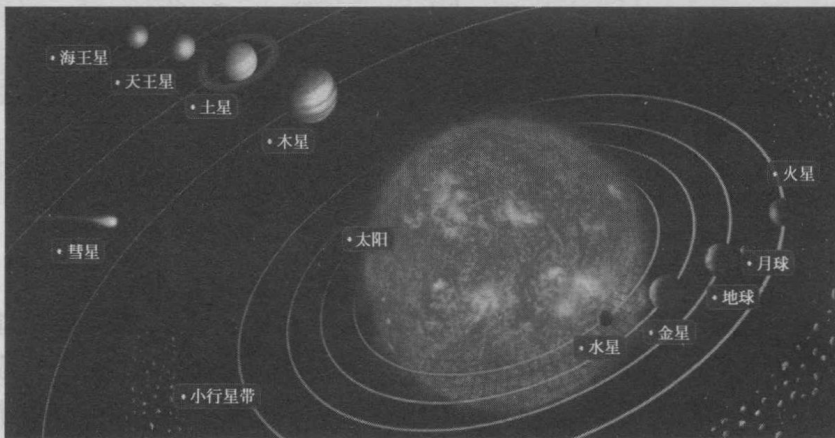


图 1-1 太阳系

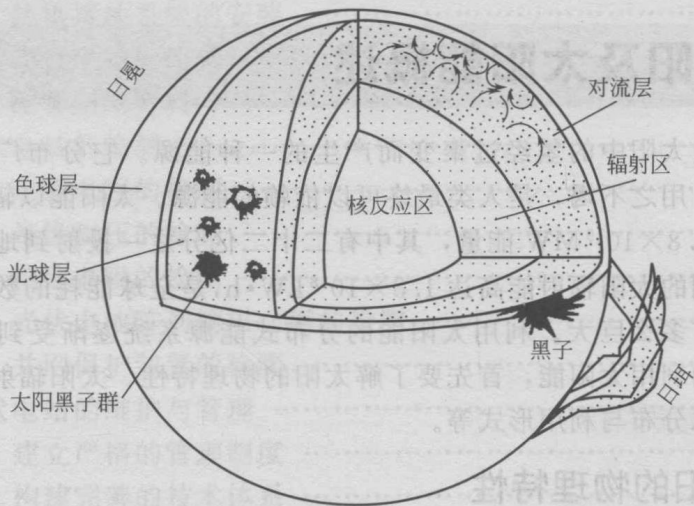


图 1-2 太阳结构

炸的核子反应是太阳能量的主要来源。表 1-1 简要介绍了太阳的物理性质。

1.1.2 太阳能辐射与吸收

太阳是以光辐射的方式将能量输送到地球表面的，其中一部分光线被反射或散射，一部分光线被吸收，只有大约 70% 的光线通过大气层到达地球表面，如图 1-3 所示。太阳光在到达地球平均距离处，垂直于太阳光方向的辐射强度（辐射强度也称辐照强度，是指在单位时间内，垂直投射到地球某一单位面积上的太阳辐射能量，通常用 W/m^2 或 kW/m^2 表示）为一常数 $1.367kW/m^2$ ，此值称为太阳常数 (Solar Constant)。到达地球表面的太阳辐照度（辐照度也称辐射通量，是指在单位时间内，投射在地球某一单位面积上太阳辐射能的量值，通常用 $kW \cdot h/m^2$ 表示）与穿透大气层的厚度有关。通过太阳在任何位置与在天顶时，日照通过大气到达测点路径的比值来描述大气质量 AM (Air Mass)。

表 1-1 太阳的物理性质

太阳的物理性质		数值
直径		$1.39196 \times 10^6 \text{ km}$
表面积		$6.093 \times 10^{12} \text{ km}^2$
质量		$1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$
体积		$1.4122 \times 10^{27} \text{ m}^3$
平均密度		1.409 g/cm^3
表面加速度		$2.7395 \times 10^4 \text{ cm/s}^2$
冠温度		$1 \times 10^6 \text{ K}$
光球表面温度(相对于黑体辐射)		5770 K
阳光辐射率		$6.5 \times 10^{10} \text{ erg/s}^{\text{①}} \cdot \text{cm}^2$
太阳表面抛物线速度		617 km/s
太阳自转恒星周期/会合周期		$25.38 \text{ d}/27.275 \text{ d}$
太阳成分(按质量)	氢	75%
	氦	24.25%
	重元素	0.75%
惯性矩		$6 \times 10^{46} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
太阳常数值		$(1.95 \pm 0.02) \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 或 1.367 kW/m^2
能量产生率		$3.9 \times 10^{16} \text{ W}$
表面逸出速度		618 m/s

① $1 \text{ erg/s} = 10^{-7} \text{ W}$ 。

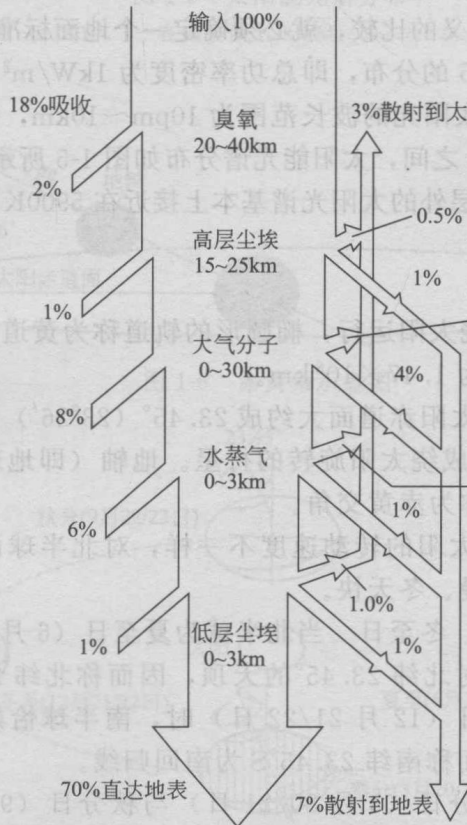


图 1-3 大气成分对太阳光的衰减作用

大气质量为零的状态 (AM0), 是指在地球空间外接收太阳光的情况。太阳与天顶轴重合时, 路程最短, 只通过一个大气层的厚度, 太阳光线的实际路程与此最短距离之比称为光学大气质量。光学大气质量为 1 时的辐射也称为大气质量为 1 (AM1) 的辐射。当太阳光线与地面垂直线成一个角度 θ 时 (如图 1-4 所示), 大气质量 $= 1/\cos\theta$ 。估算大气质量的简易方法是, 测量高度为 h 的物体的投射阴影长度 s , 则大气质量 $= \sqrt{1 + (s/h)^2}$ 。

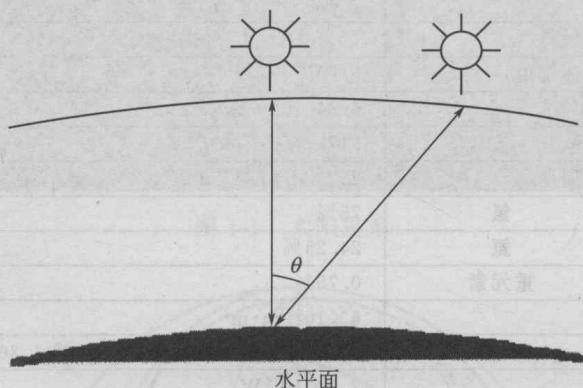


图 1-4 大气质量同照射角度的关系

由于地面阳光的强度和光谱成分变化都很大, 因此为了对不同地点测得的不同太阳能电池的性能进行有意义的比较, 就必须确定一个地面标准, 然后参照这个标准进行测量 (一般采用 AM1.5 的分布, 即总功率密度为 $1\text{kW}/\text{m}^2$, 即接近地球表面接收到的功率密度最大值)。太阳光的波长范围为 $10\text{pm} \sim 10\text{km}$, 但绝大多数太阳辐射能的波长位于 $0.29 \sim 3.0\mu\text{m}$ 之间, 太阳能光谱分布如图 1-5 所示 (由图可知, a 线和 c 线几乎重合, 意味着大气层外的太阳光谱基本上接近在 5900K 时的黑体辐射)。

1.1.3 日地运动

地球以椭圆形的轨道绕太阳运行, 椭圆形的轨道称为黄道, 在黄道平面内, 长轴为 $1.52 \times 10^8\text{km}$, 短轴为 $1.47 \times 10^8\text{km}$ 。

① 赤黄交角 地球与太阳赤道面大约成 23.45° ($23^\circ 26'$) 夹角方向运行 (如图 1-6 所示) 被太阳俘获, 变成绕太阳旋转的行星。地轴 (即地球斜轴, 又称地球自转轴) 与黄道平面的夹角称为赤黄交角。

② 角速度 地轴相对太阳的转动速度不一样, 对北半球而言, 夏天快、冬天慢, 对南半球而言, 夏天慢、冬天快。

③ 南北回归线与夏至、冬至日 当北半球为夏至日 (6 月 21/22 日) 时, 南半球恰好为冬至日, 太阳直射北纬 23.45° 的天顶, 因而称北纬 23.45°N 纬度圈为北回归线。当北半球为冬至日 (12 月 21/22 日) 时, 南半球恰好为夏至日, 太阳直射南纬 23.45° 的天顶, 因而称南纬 23.45°S 为南回归线。

④ 春分与秋分日 春分日 (3 月 20/21 日) 与秋分日 (9 月 22/23 日), 太阳恰好直射地球的赤道平面 (如图 1-7 所示)。

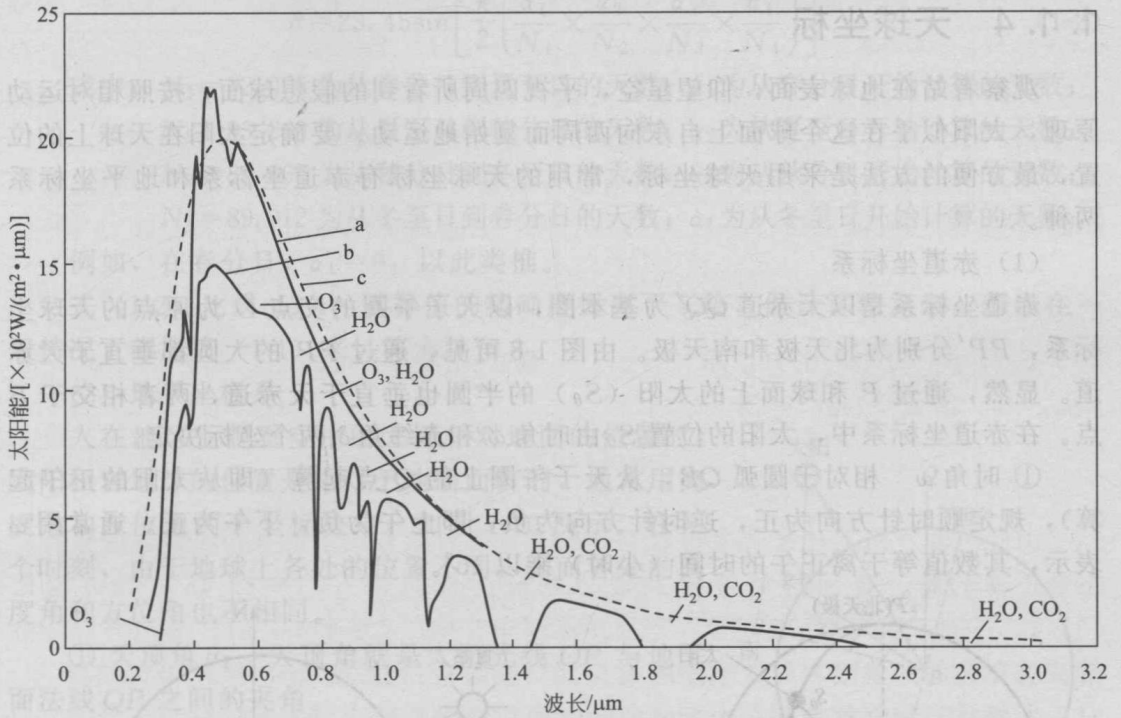


图 1-5 太阳能光谱分布

a—大气层以外 (AM0); b—在海平面上 (AM1.5); c—在 5900K 时的黑体辐射

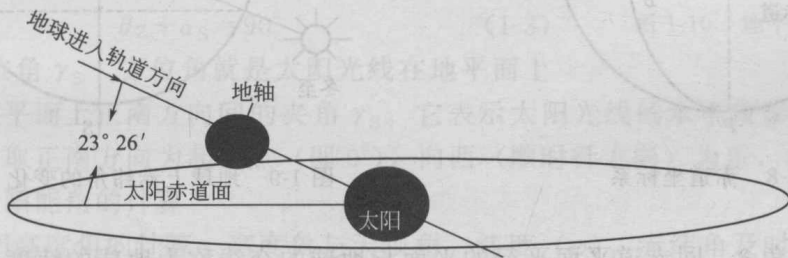


图 1-6 赤黄角示意图

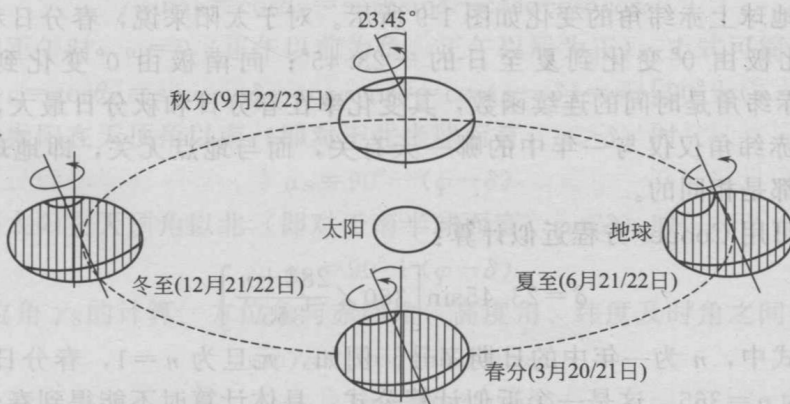


图 1-7 日地运动示意图

1.1.4 天球坐标

观察者站在地球表面，仰望星空，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周而复始地运动。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，常用的天球坐标有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' 为基本圈，以天子午圈的交点 O 为原点的天球坐标系， PP' 分别为北天极和南天极。由图 1-8 可见，通过 PP' 的大圆都垂直于天赤道。显然，通过 P 和球面上的太阳 (S_θ) 的半圆也垂直于天赤道，两者相交于 B 点。在赤道坐标系中，太阳的位置 S_θ 由时角 ω 和赤纬角 δ 两个坐标决定。

① 时角 ω 相对于圆弧 QB ，从天子午圈上的 Q 点起算（即从太阳的正午起算），规定顺时针方向为正，逆时针方向为负，即上午为负，下午为正。通常用 ω 表示，其数值等于离正午的时间（小时）乘以 15° 。

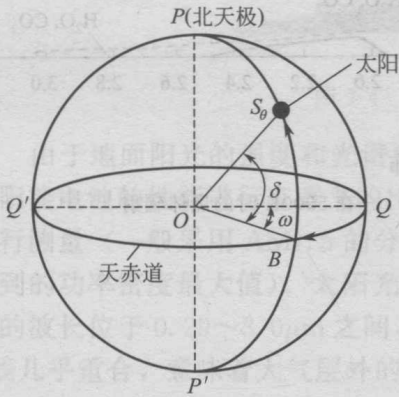


图 1-8 赤道坐标系

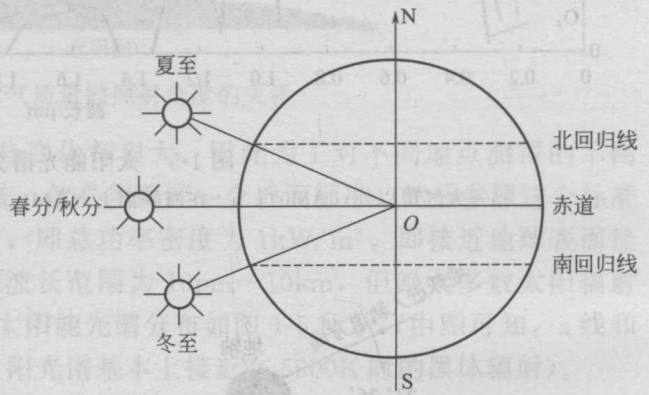


图 1-9 地球上赤纬角的变化

② 赤纬角 δ 同赤道平面平行的平面与地球的交线称为地球的纬度。通常将太阳的直射点的纬度，即太阳中心和地心的连线与赤道平面的夹角称为赤纬角，通常以 δ 表示。地球上赤纬角的变化如图 1-9 所示。对于太阳来说，春分日和秋分日的 $\delta = 0^\circ$ ，向北极由 0° 变化到夏至日的 $+23.45^\circ$ ；向南极由 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，即地球上任何位置的赤纬角都是相同的。

赤纬角可用 Cooper 方程近似计算：

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \times \frac{284+n}{365} \right] \quad (1-1)$$

上述公式中， n 为一年中的日期序号。例如，元旦为 $n=1$ ，春分日为 $n=81$ ，12月31日为 $n=365$ 。这是一个近似计算公式，具体计算时不能得到春分日、秋分日的 δ 值同时为 0 的结果。更加精确的计算可用以下近似计算公式：

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha_1}{N_1} \times \frac{\alpha_2}{N_2} \times \frac{\alpha_3}{N_3} \times \frac{\alpha_4}{N_4} \right) \right] \quad (1-2)$$

式中, $N_1=92.975$ 为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; $N_2=93.269$ 为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; $N_3=89.865$ 为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; $N_4=89.012$ 为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; 例如, 在春分日, $\alpha_1=0$, 以此类推。

式 (1-2) 比式 (1-1) 计算值的精确度提高了 5 倍, 但计算较复杂, 所以在一般情况下都用式 (1-1) 来计算赤纬角 δ 。

(2) 地平坐标系

人在地区上观看空中的太阳相对地面的位置时, 太阳相对地球的位置是相对于地面而言的, 通常用高度角和方位角两个坐标决定, 如图 1-10 所示。在某个时刻, 由于地球上各处的位置不同, 因而各处的高度角和方位角也不相同。

① 天顶角 θ_z 天顶角就是太阳光线 OP 与地平平面法线 QP 之间的夹角。

② 高度角 α_s 高度角就是太阳光线 OP 与其在地平面上投影线 Pg 之间的夹角, 它表示太阳高出水平面的角度。高度角与天顶角之间的关系为

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

③ 方位角 γ_s 方位角就是太阳光线在地平面上的投影与地平面上正南方向间的夹角 γ_s 。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 (即 0°), 向西 (顺时针方向) 为正, 向东为负。

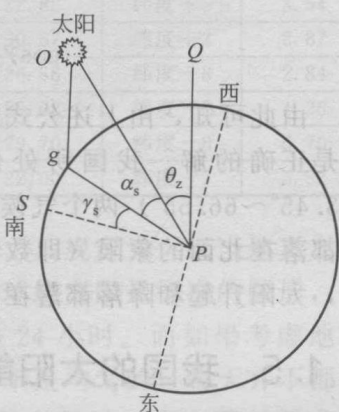


图 1-10 地平坐标系

(3) 太阳能角的计算

① 太阳高度角的计算 高度角与天顶角、纬度 (φ)、赤纬角及时角之间的关系为

$$\sin \alpha_s = \cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (1-4)$$

在太阳正午时, $\omega=0$ (正午以前为负, 正午以后为正), 上式可简化为

$$\sin \alpha_s = \cos \theta_z = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta = \cos(\varphi - \delta) = \sin[90^\circ \pm (\varphi - \delta)] \quad (1-5)$$

当正午太阳在天顶角以南 (即对于北半球而言, $\varphi > \delta$) 时

$$\alpha_s = 90^\circ - (\varphi - \delta) \quad (1-6)$$

当正午太阳在天顶角以北 (即对于南半球而言, $\varphi < \delta$) 时

$$\alpha_s = 90^\circ + (\varphi - \delta) \quad (1-7)$$

② 方位角 γ_s 的计算 方位角与赤纬角、高度角、纬度及时角之间的关系为

$$\sin \gamma_s = \cos \delta \sin \omega / \sin \alpha_s \quad (1-8)$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \alpha_s \sin \varphi - \sin \delta}{\cos \alpha_s \cos \varphi} \quad (1-9)$$

③ 日出、日落时的时角 ω_S 日出、日落时太阳高度角为 0° ，由式 (1-4) 可得

$$\cos\omega_S = -\tan\varphi\tan\delta \quad (1-10)$$

日出时的时角为 ω_{Sr} ，其角度为负值；日落时的时角为 ω_{Ss} ，其角度为正值。对于某一地点而言，太阳日出与日落时的时角相对于太阳正午是对称的。

④ 日照时间 N 日照时间是当地从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 N 可以用日出、日落时角的绝对值之和除以 15° 得到：

$$N = \frac{\omega_{Ss} + |\omega_{Sr}|}{15} = \frac{2}{15} \arccos(-\tan\varphi\tan\delta) \quad (1-11)$$

⑤ 日出、日落时的方位角 日出、日落时太阳高度角为 0° ，此时， $\cos\alpha_S = 1$ ， $\sin\alpha_S = 0$ ，由式 (1-9) 可得

$$\cos\gamma_{S,0} = \frac{\sin\alpha_{S,0} \sin\varphi - \sin\delta}{\cos\alpha_{S,0} \cos\varphi} = -\frac{\sin\delta}{\cos\varphi} \quad (1-12)$$

由此可知，由上述公式所得到的日出、日落时的方位角都有两组解，但只有一组是正确的解。我国所处位置大致可划分为北热带 ($0^\circ \sim 23.45^\circ$) 和北温带 ($23.45^\circ \sim 66.55^\circ$) 两个气候带，当太阳赤纬角 $\delta > 0^\circ$ (夏半年) 时，太阳升起和降落都落在北面的象限 (即数学上的第一、二象限)；当太阳赤纬角 $\delta < 0^\circ$ (冬半年) 时，太阳升起和降落都落在南面的象限 (即数学上的第三、四象限)。

1.1.5 我国的太阳能资源

太阳能资源的区划通常采用三种方式。

第一级区划按年太阳辐射量分区。

第二级区划是利用各月日照时数大于 6h 的天数这一要素为指标。一年中各月日照时数大于 6h 的天数最大值与最小值之比，可看作当地太阳能资源全年变幅大小的一种度量，比值越小说明太阳能资源全年变化越稳定，就越有利于太阳能资源的利用。此外，最大值与最小值出现的季节也说明了当地太阳能资源分布的一种特征。

太阳光在一天中实际的照射时数称日照时间。日照时间可分为最大可能日照时间与地理的或地形的可能日照时间，太阳边缘升起与降落之间的时段称为最大可能日照时间，太阳辐射能够达到一个给定平面的最长时段称为地理的或地形的可能日照时间。日照时间又可以分为天文日照时间和实际日照时间。天文日照时间是假设某地为晴天的日照时间，也就是实际日照时间的上限。实际日照时间与天文日照时间的比值称为日照率，可用来衡量一个地方为晴天的概率。日照率由以下公式确定：

$$\text{日照率} = \frac{\text{实际日照时间}}{\text{天文日照时间}} \times 100\% \quad (1-13)$$

若干年的年日照时间与年份数的比值称为年平均日照时间，此指标是太阳能利用价值的评估指标之一，全国主要城市的年平均日照及最佳安装倾角见表 1-2。