

江苏高校品牌专业建设工程资助项目



普通高等教育“十三五”规划教材
新能源科学与工程系列教材



新能源光伏发电 及控制

李天福 钱 斌 编著
潘启勇 胡雷振

非外借



科学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材
新能源科学与工程专业系列教材

新能源光伏发电及控制

李天福 钱 斌 编著
潘启勇 胡雷振

科学出版社

内 容 简 介

本书以光伏发电系统及其能量变换的控制技术为主要研究对象,在简要介绍太阳能辐射和太阳电池的基础上,全面、深入地介绍光伏阵列发电、储电、光伏最大功率点跟踪、光伏控制器、并网逆变器技术及光伏发电系统的构成、设计、仿真等内容。全书共8章,第1、2章为太阳能和发电系统总体知识,第3、4章介绍光伏发电和储电,第5~7章介绍光伏能量控制和变换技术,第8章为光伏发电系统的设计、工程与管理知识。

本书可作为高等学校新能源科学与工程专业的本科生教学用书,也可作为高等职业院校光伏新能源及相近专业的教学参考书,还可作为从事光伏产业的工程技术人员、管理人员的岗前培训和技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源光伏发电及控制/李天福等编著. —北京:科学出版社, 2017.9
普通高等教育“十三五”规划教材·新能源科学与工程专业系列教材
ISBN 978-7-03-054530-5

I. ①新… II. ①李… III. ①太阳能光伏发电-高等学校-教材
IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 228960 号

责任编辑:余 江 张丽花/责任校对:郭瑞芝

责任印制:吴兆东/封面设计:迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市书文印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年9月第 一 版 开本:720×1000 B5

2017年9月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:368 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

电能已成为现代人们生产和日常生活必不可少的能量物质,同时随着社会的飞速发展,电能的供给量可能制约人类的发展和需求,因此开发和利用资源丰富、采集方便、清洁无污染的再生新能源成为人类的共同愿望。

太阳能是一种清洁、无污染和可再生的自然资源,是人类可以长期依赖的重要能源之一,太阳能的转化利用是全球可再生能源发展战略的重要组成部分。近年来国内外的太阳能研究发展迅速,克服了诸多难题,太阳电池及其利用技术逐渐成熟,为大规模太阳能发电和利用开创了有利的局面。

新能源科学与工程专业作为一个新专业,教材建设是专业建设的重要内容之一,因此,需要编写适合理工类大学新能源专业的太阳能发电与控制技术的教材。常熟理工学院在前期的授课过程中,发现学生虽然学习了一些基础的电路原理、电力电子技术、光伏电池组件等课程,但是无法尽快地将以上课程有效融合,完成对光伏发电系统的开发和应用,甚至面对一些小的光伏供电的应用产品的设计都无法理解或毫无思路。本书就是在前期基础课程的学习基础上,给出条理清晰的分类、多种设计思路、简单实用的设计方案,给初学者快速的入门引导。本书基于教学中的讲稿并结合工程设计中的一些方案整理完成,希望能够对光伏发电与控制技术有一个全面的、基本的知识介绍,对培养专业学生及对从事光伏发电的开发、施工维护的工程技术人员提供帮助。

全书共8章,第1章为绪论,主要介绍太阳辐射的特点、计算方法,太阳能利用的方法;第2章为光伏发电系统,主要介绍离网型、并网型、互补型光伏发电系统的构成和主要特点,为掌握太阳能发电系统和能量变换提供一个全局性的认识;第3章为太阳电池阵列,主要介绍光伏组件与阵列产生电能的原理、构成、指标、连接方式、安装方式,光伏出现的问题以及解决办法;第4章为储能电池,以铅酸蓄电池为主介绍蓄电池结构、原理、应用以及锂离子电池的特点与保护;第5章为最大功率点跟踪,主要介绍最大功率点跟踪原理、跟踪的主要算法、直流-直流变换器常用电路、MPPT实现的方法;第6章为光伏控制器,主要介绍光伏控制器的功能、工作原理、选型与使用要求,光伏控制器的几种设计方案;第7章为光伏逆变器,主要介绍逆变器的分类、结构、功能要求,光伏逆变器的控制技术,大功率逆变技术;第8章为光伏发电系统设计与工程,主要介绍光伏发电系统的设计方法、光伏电站设备;每章附有思考题。

本书着重讲述光伏发电与电能变换的基本知识和通用技术，也适当地介绍一些最新的理论与方法；在叙述上，尽可能避免繁杂的公式推导，力求简单易懂，直接引出结果；在内容安排上，先总后分，由简入繁，逐步深化，多角度研究。由于光伏发电系统涉及半导体物理、化学、电工技术、电力电子技术、自动控制等多个学科，具有多学科交叉的特点，因此本书适合学习者快速学习基本原理和方法，但也需要具备一定的相关专业知识才可以深入研究和掌握。

本书由常熟理工学院的李天福、钱斌、潘启勇和苏州腾晖光伏技术有限公司的胡雷振编著。淮海工学院的邵理堂、孟春站、刘学东、黄增光以及中国人民解放军重庆通信学院的杨贵恒参与了写作。另外，苏州宇量电池有限公司的毛焕宇博士、卢洪波经理以及众多技术人员和职员，苏州腾晖光伏技术有限公司的领导和技术人员，常熟理工学院的领导和众多教师对本书的写作提供了支持，在此表示衷心感谢。

科学出版社的编辑对本书的出版做了大量的工作，不断的督促和鼓励给了编者压力与动力，使本书得以顺利出版，在此表示衷心感谢。在本书的编写过程中，编者还参阅了大量的文献资料，引用了许多图表、网上的资料，许多文档无法查找原作者，不能在参考文献中一一列出，在此对这些文献资料的作者一并表示衷心的感谢。编者的家人给予大力支持，在此也表示感谢。

限于编者水平，疏漏和不足之处在所难免，恳请同行和读者不吝指正。

编 者

2017年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电力新能源	1
1.2 太阳与太阳能	3
1.3 太阳能资源与利用	17
思考题	20
第 2 章 光伏发电系统	21
2.1 光伏发电系统分类	21
2.2 离网型光伏发电系统	26
2.3 并网型光伏发电系统	30
2.4 互补型光伏发电系统	35
2.5 平衡系统	38
思考题	39
第 3 章 太阳电池阵列	40
3.1 太阳电池	40
3.2 太阳能组件与阵列	48
3.3 光伏组件的参数	55
3.4 热斑效应	64
3.5 光伏阵列排布	69
3.6 阵列的安装方式	71
思考题	75
第 4 章 储能电池	76
4.1 储能蓄电池基础	76
4.2 铅酸蓄电池结构与工作原理	80
4.3 VRLA 蓄电池的充放电特性	87
4.4 VRLA 蓄电池在光伏发电系统中的使用	89
4.5 锂离子电池	91
4.6 其他蓄电池	96
思考题	98

第 5 章 最大功率点跟踪	99
5.1 最大功率点跟踪基本原理	99
5.2 恒压跟踪法	105
5.3 干扰观察法	107
5.4 电导增量法	112
5.5 人工智能 MPPT 控制法	114
5.6 光伏发电系统的 DC-DC 变换器	119
5.7 DC-DC 变换电路	122
5.8 MPPT 实现与方案	140
思考题	145
第 6 章 光伏控制器	146
6.1 光伏控制器的能流	146
6.2 光伏控制器的功能	153
6.3 光伏控制器的电路工作原理	156
6.4 光伏控制器的设计	166
6.5 光伏控制器的使用	177
思考题	181
第 7 章 光伏逆变器	182
7.1 离网逆变器	182
7.2 并网逆变器	194
7.3 光伏逆变器的控制	203
7.4 大功率逆变技术	227
思考题	237
第 8 章 光伏发电系统设计与工程	238
8.1 光伏发电系统总体设计	238
8.2 光伏发电系统的容量设计	242
8.3 光伏发电系统电气设备及设计	256
8.4 光伏发电系统的安装调试	265
8.5 光伏发电系统的维护管理	273
8.6 仿真技术	276
思考题	284
参考文献	285

第 1 章 绪 论

1.1 电力新能源

能源同物质、信息一样，是自然界的基本要素，是指可产生各种能量或可做功的物质的统称，能源也称能量资源或能源资源。

1.1.1 能量的划分

能源种类繁多，根据不同的划分方式，能源也可分为不同的类型。能源(按照生成方式、认识过程)可分为一次能源，二次能源；新能源和常规能源等。

1. 按照能量的生成方式分

一次能源，即天然能源，指在自然界现成存在的能源，如煤炭、石油、天然气、水能等。一次能源又分为可再生能源(如太阳能、风能、水能、海洋能、生物质能等)和不可再生能源(如石油、天然气、原煤、核燃料等)。可再生能源消耗后仍可获得，不可再生能源在消耗后消失或转化为非能源物质。

二次能源，又称人工能源，指经过消耗一次能源加工转化而产生的能源，如电能、热能、煤气、柴油、氢能、焦炭、沼气等。

2. 按照对能量的认识过程分

常规能源是已得到广泛利用的能源，如煤、石油、水力、电能。新能源是指原子能、太阳能、雷电能、宇宙射线能、火山能、地震能等逐渐得到开发利用的能源。

电能较其他一次能源的突出优点是效率高、距离传输远、清洁、应用范围广泛，是现代工业社会的基石。

1.1.2 传统电力能源的来源

传统电力能源的来源主要有 3 种，即火力发电、水力发电和核电。

1. 火力发电

火力发电，利用可燃物在燃烧时产生的热能，如煤、天然气和石油发电，通过发电动力装置转换成电能的一种发电方式。从能量转换观点分析，能量利用的基本过程是燃料的热能转化为机械能，机械能再转化为电能。

优点：燃料资源丰富，成本低。

缺点：火电需要燃烧煤、石油等化石燃料。一方面化石燃料蕴藏量有限、越烧越少，正面临着枯竭的危险；另一方面化石燃料燃烧有废气排放，会污染环境。

2. 水力发电

水力发电是利用水位落差，水的位能转化为水轮的机械能，再以机械能推动水轮发电机产生电力。能量利用的转换过程是水能转化为机械能，机械能转化为电能。

优点：水力是可以再生的能源；发电成本低；没有污染。

缺点：水电一次性投资大；要淹没大量土地，有可能导致生态环境破坏，而且大型水库一旦塌崩，后果将不堪设想；水力资源也是有限的，还受到季节的影响。

3. 核电

世界上一切物质都是由原子构成的，原子又是由原子核和它周围的电子构成的。轻原子核的融合和重原子核的分裂都能放出能量，分别称为核聚变能和核裂变能，简称核能。普通的压水反应堆核电站用的燃料是重金属铀，核燃料在反应堆内发生裂变而产生大量热能，再用高压下的水把热能带出，在蒸汽发生器内产生蒸汽，通过蒸汽推动汽轮机带着发电机一起旋转，产生电能。

优点：核能发电量大，但技术复杂。

缺点：核废料和热污染是核电的两大难题。一方面核废料万一发生核泄漏，后果是可怕的；另一方面现有蒸汽轮机热效率较低，因而它比一般化石燃料电厂会排放更多废热，故核能电厂的热污染较严重。

1.1.3 可再生能源的利用

随着经济的发展和社会的进步，人们对能源的需求越来越大，寻找新能源特别是对可再生能源的利用，成为当前人类面临的迫切课题。

1. 风能利用

风力发电是把风能转化为机械能，机械能转化为电能。

风能利用的主要特点是清洁无污染，但是能量的密度低、随机性大。

2. 太阳能利用

太阳能的直接利用方式有光-热转换、光-电转换和光-化转换，分别称为“太阳能光热利用”、“太阳能光电利用”和“太阳能光化学利用”。

太阳能的特点是分布广、能量大、时间久、无污染，但也有分散性、间歇性、随机性的缺点。

3. 生物质能利用

生物质能是绿色植物通过叶绿素将太阳能转化为化学能而储存在生物质内

部的能量。生物质能由太阳能转化而来,也是可再生能源。

生物质能发电的特点如下:生物质能的转化配套技术非常重要,且转化设备必须安全可靠、维护方便;利用当地的原料,必须储存足够数量的原料;装机容量一般较小,多为独立运行的方式;就地利用,适于居住分散、人口稀少、用电负荷较小的农牧业地区及山区;城市垃圾和工业有机废水对环境污染严重,用于发电,变废为宝。

4. 燃料电池、地热能、海洋能利用

燃料电池是一种将储存在燃料和氧化剂中的化学能,直接转化为电能的装置。当源源不断地从外部向燃料电池供给燃料和氧化剂时,它可以连续发电。

地热能是地下的热水、热气等资源,海洋能是海洋中的海流、波浪等资源。

新能源的利用包括以上可再生能源(风能、太阳能、生物质能、水能、海洋能)和地热能、氢能、核能转化及其利用技术。一方面利用可再生能源,获得电能;另一方面对电能通过变换、控制与管理,满足用户对能源的消费需求,产生了新能源发电及其控制技术。

1.2 太阳与太阳能

1.2.1 太阳

1. 太阳基本物理参数

太阳是距地球最近的恒星,是太阳系里唯一自己发光的天体,给地球带来光和热。它的质量占太阳系总质量的 99.865%,是地球质量的 33 万倍。太阳半径为 $6.96 \times 10^5 \text{ km}$ (地球半径的 109 倍); 体积为 $1.41 \times 10^{18} \text{ km}^3$ (地球体积的 130 万倍); 质量约为 $1.99 \times 10^{27} \text{ t}$ (地球质量的 33 万倍); 平均密度为 1.40 g/cm^3 (地球密度的 1/4); 表面温度为 5770K, 核心温度为 $1.56 \times 10^7 \text{ K}$; 日地平均距离为 $1.5 \times 10^8 \text{ km}$ 。

太阳是一个主要由氢和氦组成的炽热的气体火球,太阳的能量主要来源于氢聚变成氦的聚变反应。虽然太阳并不是一个恒定温度的黑体,而是由许多层构成的不同波长放射、吸收的辐射体,但通常还是将太阳看作温度为 5770K 的黑色辐射体。

2. 太阳的结构

太阳的结构分为里三层和外三层,如图 1-1 所示,用 R 表示太阳的半径。

里三层是指太阳内部分为核反应区、辐射区、对流区。

核反应区: $0.25R$ 内,是太阳的核心,集中了太阳一半以上的质量,温度为 $1.5 \times 10^7 \text{ K}$, 压力约为 2500 亿个大气压 (1 标准大气压 = $1.01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$), 密度接近 158 g/cm^3 。这部分产生的能量占太阳产生的总能量的 99%, 并以对流和辐射方式向外传播。

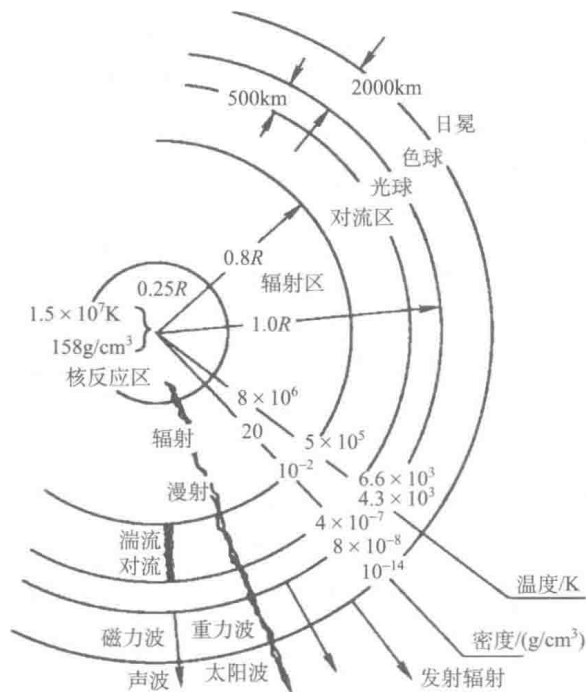


图 1-1 太阳的结构

辐射区：0.25R~0.8R，温度为 1.3×10^5 K，密度下降为 0.079 g/cm^3 ，太阳核心产生的能量通过这个区域辐射出去。

对流区：0.8R~1.0R，温度为5000K，密度为 10^{-8} g/cm^3 ；太阳能量主要靠对流传播。

外三层是指太阳外部(太阳大气)，分为光球层、色球层、日冕层。

外三层的各层次的物理性质有明显区别。太阳大气分层并不严格，它们的温度、密度随着高度实际是连续变化的。太阳大气的底层称为光球，厚度约为500 km，太阳的全部光能几乎都从这个层次发出。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。色球是太阳大气的中层，是光球向外的延伸，一直可延伸到几千公里的高度。太阳大气的最外层称为日冕。日冕是极端稀薄的气体壳，可以延伸到几个太阳半径之远。

1.2.2 太阳与地球

1. 太阳与地球的位置关系

地球每天绕着通过自身南极和北极的“地轴”自西向东地自转，24小时转一周为一天，每小时自转 15° 。地球绕太阳的运行公转，转一周365天为一年。地球的自转轴与公转运行的轨道面(黄道面)的法线倾斜角为 23.45° ($23^\circ 27'$)，也就

是黄赤交角。地球公转的时候,它的自转轴的方向始终不变,总是指向天球的北极。春分日、秋分日太阳直射赤道表面;在夏至日,太阳直射北回归线地区,而与赤道平面交角 23.45° ;地球处于运行轨道的不同位置时,阳光投射到地球上的方向也就不同,形成地球四季的变化。图 1-2 为太阳和地球的相对运动图,其中图 1-2(a)表示地球绕太阳运行的四个典型季节日的地球公转的行程图,图 1-2(b)表示对应于上述四个典型季节日地球受到太阳照射的情况。

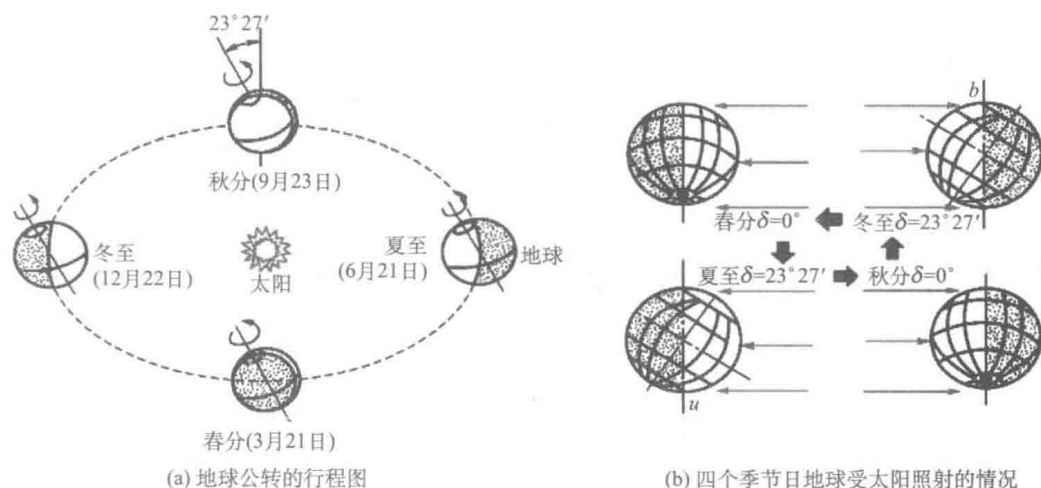


图 1-2 太阳和地球的相对运动

在地球上人们观察到的太阳运动轨迹,称太阳视运动,实质是地球和太阳的相对运动。如图 1-3 所示,观察者面向南,在纬某地区,观察太阳的运动,太阳从东边升起,西边降落;冬天太阳高度角低,夏天太阳高度角高。

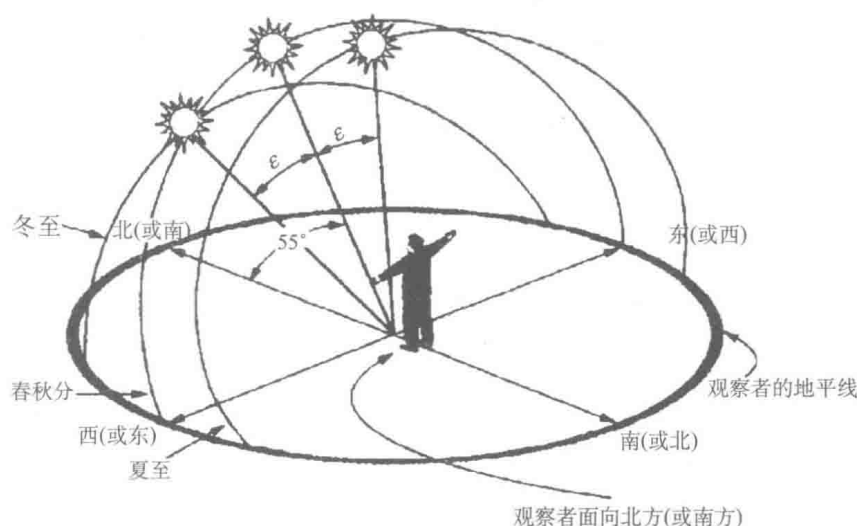


图 1-3 观察者在北纬某地观察的太阳视运动

图 1-4 是观察者在北纬 31.4°位置观察的太阳视运动的轨迹图(高度角-方位角的太阳运动轨迹图)，⑦号~①号~⑦号线分别对应 12 月~6 月~12 月，横轴为方位角(°)，纵轴为高度角(°)，时间值为法定时 (legal time) 而非太阳时 (solar time)。

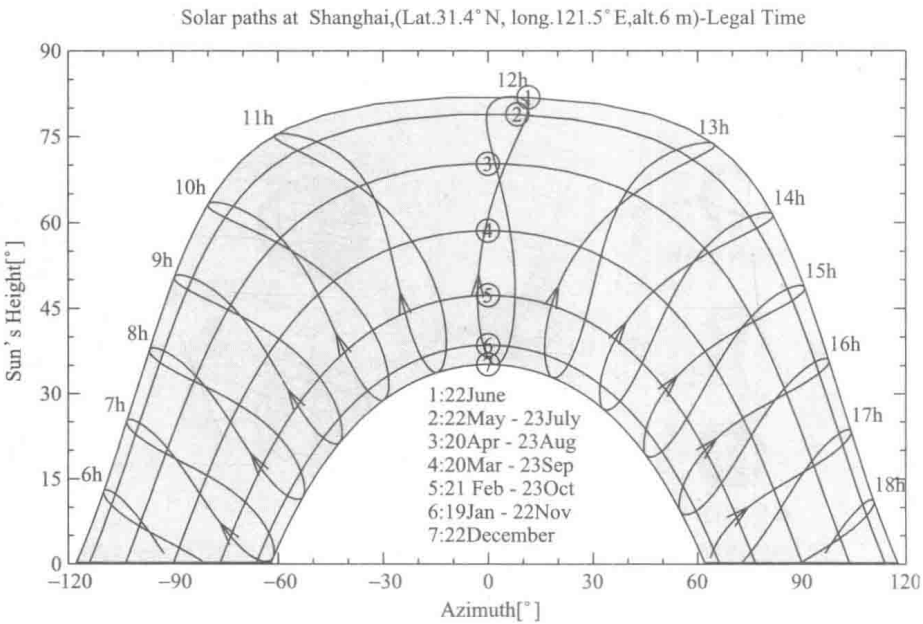


图 1-4 观察者在北纬 31.4°位置观察的太阳视运动的轨迹图

2. 太阳位置角度的定义

光伏组件表面的几个角度有天顶角、方位角、高度角等。图 1-5 表示光伏组件太阳能采集面与太阳位置的角度关系图。

S 为太阳能采集点 (或观察点) O 指向太阳的向量。

β 为太阳能采集面 (光伏组件) 与地平面的夹角。

h 为太阳高度角，指向太阳的向量 S 与地平面的夹角。

γ 为太阳方位角，指向太阳的向量 S 在地面上的投影与南北方向线间夹角；并规定正南方为 0° (假定方位角从南点起算)，向西为正、向东为负。它的变化范围是 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 。

Z 为天顶，是指采集点 O 地平面的法线方向。

θ_z 为天顶角，是指向太阳的向量 S 与天顶 Z 的夹角。 θ 为太阳入射角。

γ_n 为光伏组件的方位角，它和太阳方位角 γ 相类似，光伏组件表面法线在地平面上也有一投影，此投影线与正南方的夹角称为光伏组件的方位角。度量方法与太阳方位角相同。

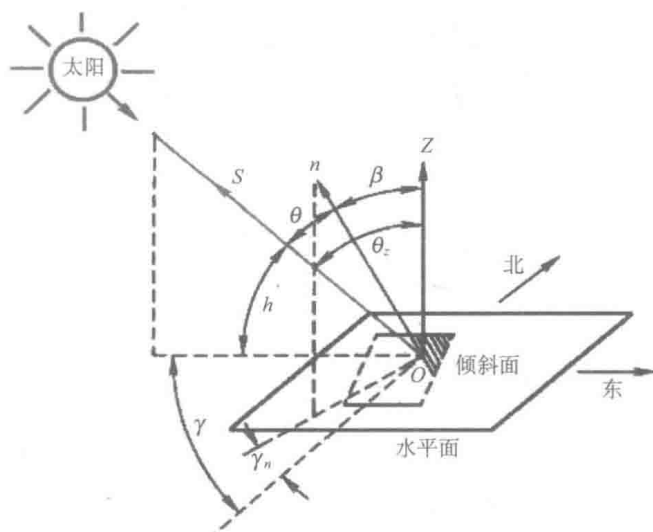


图 1-5 太阳能采集面与太阳位置的角度关系

从以上角度关系图中可得出,高度角与天顶角互余;假如光伏组件水平放置,则入射角与高度角互为余角。每日每时太阳的高度角、方位角都会产生变化,要想计算太阳能采集面上获得的能量,需要获得太阳赤纬角、太阳高度角、太阳方位角、太阳时角、日照时间等信息。

3. 太阳赤纬角

太阳光线与地球赤道面的交角就是太阳赤纬角,以 δ 表示。在一年中,太阳赤纬角每天都在变化,但不超过 $\pm 23.45^\circ$,如图 1-6 所示。夏天最大变化到夏至日的 $+23.45^\circ$,冬天最小变化到冬至日的 -23.45° 。

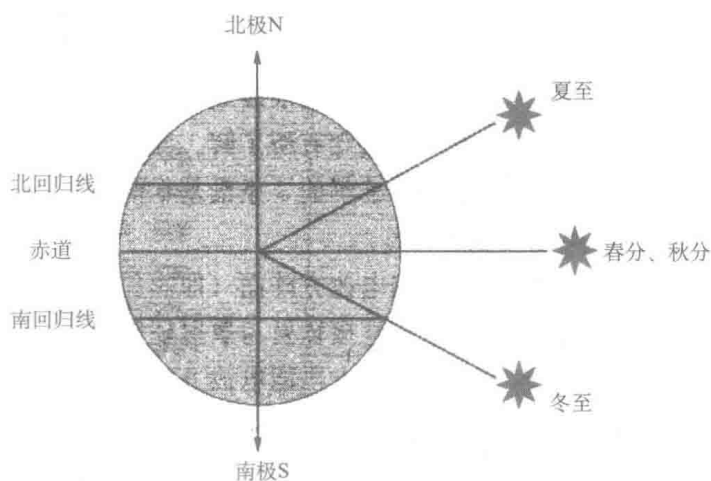


图 1-6 太阳赤纬角的变化范围

对某一指定日而言(即在这一日之内), 太阳赤纬角 δ 变化缓慢, 可以近似地认为是一个定值。某一指定日的太阳赤纬角可以按照库珀(Cooper)方程, 由式(1-1)计算:

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(2\pi \times \frac{284+n}{365}\right) \quad (1-1)$$

式中, n 为一年中从元旦算起的日期序号, 如 1 月 1 日, $n=1$; 2 月 1 日, $n=32$; 春分日, $n=81$, $\delta=0$ 。

如果 d 是从春分日算起的天数, 则库珀方程(1-1)变为式(1-2):

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(\frac{360^\circ d}{365}\right) \quad (1-2)$$

注意: 太阳位于赤道以北时太阳赤纬角取正值, 位于赤道时太阳赤纬角取 0, 位于赤道以南时取负值。

4. 太阳时角

用角度表示的太阳时称为太阳时角(简称时角), 以 ω 表示。

地球始终绕着地轴由西向东在自转, 每转一周(360°)为一昼夜(24h)。因此时间可以用角度来表示, 每小时相当于地球自转 15° 。每昼夜变化为 $\pm 180^\circ$, 每隔 1 小时增加 15° , 它是以一昼夜为变化周期的量。

规定某地的太阳正南方位角为 0° 时对应当地太阳时正午 12 点, 此时太阳时角为 0° , 则可以推算出其他时间对应的太阳时角。

注意: 太阳时角上午取负值, 下午取正值, 正午时太阳时角为 0° 。

在太阳能工程计算中, 涉及的时间都是当地太阳时。太阳时的特点是午时(中午 12 点)阳光正好通过当地子午线, 即在空中最高点处, 它与日常使用的标准时间并不一致。转换公式为

$$t_s = t + E \pm 4(L - L_s) \quad (1-3)$$

式中, t_s 为太阳时; t 为当地标准时间; L 为当地经度($^\circ$); L_s 为制定标准时间采用的标准经度($^\circ$)。所在地点在东半球取正号, 西半球取负号。

转换时的两项修正包括地球绕日公转时进动和转速变化而产生的时差 E 修正和经度与制定标准时间的经度差所产生的修正。

(1) 时差 E 修正, E 以分为单位, 可按式(1-4)计算:

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B \quad (1-4)$$

式中, $B = \frac{360^\circ(n-81)}{364}$; n 为所求日期在一年中的日子数, $1 \leq n \leq 365$ 。

(2) 经度差所产生的修正。由于经度每相差 1° , 在时间上就相差 4min, 所以

公式中最后一项乘4, 单位也是分。

【例 1-1】 求上午 8 点、上午 11 点、下午 1 点、下午 1 点半的太阳时角。

上午 8 点, $\omega = 15^\circ \times (8 - 12) = -60^\circ$;

上午 11 点, $\omega = -15^\circ$;

下午 1 点, $\omega = 15^\circ$;

下午 1 点半, $\omega = 22.5^\circ$ 。

5. 太阳高度角

太阳中心直射到地面的光线与当地水平面间夹角为太阳高度角, 用 h 表示。

在天文学中, 太阳高度角的计算公式为

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (1-5)$$

式中, φ 为观测点地理纬度; δ 为当天观测时刻的太阳赤纬角; ω 为太阳时角。 φ 、 δ 、 ω 单位都是度($^\circ$)。

正午时, $\omega = 0$, $\cos \omega = 1$ 。

式(1-5)简化为

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

所以, $\sin h = \sin[90^\circ \pm (\varphi - \delta)]$

$$h = [90^\circ \pm (\varphi - \delta)] \quad (1-6)$$

正午时, 若太阳在天顶以南, 即 $\varphi > \delta$, $h = 90^\circ - \varphi + \delta$; 若太阳在天顶以北, 即 $\varphi < \delta$, $h = 90^\circ + \varphi - \delta$ 。

冬至夏至日, 太阳在天顶, 则有 $h = 90^\circ$, $\varphi = \delta$ 。

注意: 地理纬度在北半球取正值, 南半球取负值。

6. 太阳方位角

太阳光线在地平面上的投影与当地子午线正南方的夹角 γ , 为太阳方位角, 变化范围为 $\pm 180^\circ$; 它表示太阳的方位, 决定了太阳光的入射方向。

由几何关系, 太阳方位角计算公式为

$$\cos \gamma = \frac{\sin h \sin \varphi - \sin \delta}{\cos h \cos \varphi} \quad (1-7)$$

也可用式(1-8)计算:

$$\sin \gamma = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (1-8)$$

根据地理纬度、太阳赤纬角及观测时间, 利用式(1-7)或式(1-8)可以求出任何地区、任何季节某一时刻的太阳方位角。

7. 日照时间

太阳在地平线的出没瞬间, 太阳高度角 $h=0$, 若不考虑地表面曲率及大气折射的影响, 可得出日出日没时角的表达式为

$$\cos \omega_{1,2} = -\tan \varphi \cdot \tan \delta \quad (1-9)$$

式中, $\omega_{1,2}$ 为日出或日没时角, $\omega_1 = -\omega_2$, $\omega_1 (< 0)$ 为日出时刻的太阳时角, $\omega_2 (> 0)$ 为日没时刻的太阳时角。

对于北半球, 当 $|\tan \varphi \cdot \tan \delta| \leq 1$ 时, 得 $\omega_2 = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \times 180/\pi$, $\omega_1 = -\omega_2$ 。

将日出日没时角换算为小时, 得一天中可能的日照时间为 T , 则

$$T = \frac{2}{15^\circ} \omega = \frac{2}{15^\circ} \arccos(-\tan \delta \tan \varphi) \quad (1-10)$$

式中, 乘以 2 表示日落、日出时间对午时来说是对称的, 除以 15 是将时角化为日出时刻和日落时刻(单位为小时)。

【例 1-2】 计算北纬 31.12° 地区 3 月 12 日中午 12 时和下午 2 时的太阳高度角与方位角, 以及该地区冬至日的日出日没时角及全天日照时间。

解: (1) 纬度 $\varphi=31.12^\circ$

(2) 3 月 12 日距元旦的时间 $n=71$, 则当日的赤纬角为

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left(360^\circ \times \frac{284+n}{365} \right) = 23.45^\circ \sin \left(360^\circ \times \frac{284+71}{365} \right) = -4.02^\circ$$

(3) 中午 12 时的时角 $\omega=0$

中午 12 时的太阳高度角为

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta = 90^\circ - 31.12^\circ + (-4.02^\circ) = 54.86^\circ$$

(4) 下午 2 时的时角 $\omega=15^\circ \times 2=30^\circ$

下午 2 时的太阳高度角为

$$\begin{aligned} \sin h &= \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \\ &= \sin 31.12^\circ \sin(-4.02^\circ) + \cos 31.12^\circ \cos(-4.02^\circ) \cos 30^\circ \\ &= 0.7034 \end{aligned}$$

$$h = 44.70^\circ$$

下午 2 时的太阳方位角为

$$\sin \gamma = \frac{\cos(-4.02^\circ) \sin 30^\circ}{\cos 44.70^\circ} = 0.702$$

由此可得

$$\gamma = 44.56^\circ$$

(5) 冬至日的太阳赤纬角 $\delta = -23.45^\circ$, 则