

实用电源技术丛书

自然能供电技术

刘 荣 主编



科学出版社

30
实用电源技术丛书

自然能供电技术

刘 荣 主编

科 学 出 版 社

2000

内 容 简 介

本书首先介绍了自然能供电技术的应用现状和发展前景。在此基础上,对目前应用较多的几类自然能发电设备的工作原理、蓄电池特性分别作了介绍,研究讨论了自然能供电系统的基本结构和工作原理,重点介绍了电能变换技术和系统控制方法。为了更深入地理解各部分内容,学以致用,本书还介绍了设备配置和容量计算方法,并通过两个实例,对自然能供电系统的设计方法进行了详细讨论,给出了系统原理结构图、硬件电路和控制程序。

本书可供从事自然能发电技术、自然能供电系统设计的工程技术人员参考,也可作为工科院校电力电子技术专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自然能供电技术/刘荣主编.-北京:科学出版社,2000
(实用电源技术丛书)
ISBN 7-03-008358-X

I. 自… II. 刘… III. 发电,自然能-技术 IV. TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 08587 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2000年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16
2000年9月第一次印刷 印张:10 1/4
印数:1—3 000 字数:222 000

定价:20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

前 言

本书是受中国电源学会及科学出版社的委托,在《实用电源技术丛书》编辑委员会的指导下编写的。

本书的编写宗旨是理论和实际相结合,为设计、使用与维护自然能供电系统提供参考。全书内容共分五章,第一章介绍了自然能供电系统的应用现状、发展前景及系统的各种基本结构形式;第二章着重介绍了太阳能电池、风力发电机、水力发电机等自然能发电设备及新型自然能发电设备的基本工作原理和应用维护方法,以及蓄电池的工作原理与使用维护方法;第三章主要讨论了直流变换技术、整流充电装置及逆变器的原理与设计;第四章分析了自然能供电系统的工作原理,着重讨论了控制器的硬件线路、软件编程的设计方法;第五章介绍了自然能供电系统的设计步骤和设计方法,通过实例讨论了单输入和多输入自然能供电系统的结构设计、设备选型、容量计算、控制线路设计、软件编程的方法。

本书由刘荣主编,第一章、第四章和第五章由刘荣执笔,第二章由王秋虹、强生泽、曹均灿合作编写,第三章由张黎编写。喻翔副教授认真审阅了本书。在编写过程中,我们还得到了重庆通信学院有关单位和电力电子教研室的大力支持,在此深表感谢。

本书内容涉及到电机学、化学电源、电力电子、自动控制、单片机等多个学科,读者在使用本书时,可根据实际情况,参考有关内容。

由于作者水平有限,有关参考资料尚嫌不足,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

1999 年 12 月

第一章 绪 论

1.1 概 述

20 世纪 70 年代以前,解决偏远山区、牧区、海岛的供电问题主要以柴油机发电为主。由于供电系统的负荷具有间歇性特点,系统经常要受到尖峰负荷的冲击,这使得柴油机发电系统必须具有较大的容量来满足用电要求。由于系统经常运行在低负荷状态下,而即使系统处于零负荷时,整个系统仍将消耗最大用油量的三分之一,因此系统运行极不经济。另外,发电系统经常处于轻载或空载状态下,会导致柴油机利用率低、磨损大。这些原因导致柴油发电的电价是常规能源电价的 3~4 倍。

随着社会生产的日益发展,对能源的需求量不断增长,全球范围内的能源危机也日益突出。经过第一次世界范围内“石油危机”的冲击,人类终于意识到地球蕴藏的矿物资源是有限的,总有一天会被消耗殆尽。柴油价格的不断上涨和运输困难,使柴油发电成本也逐步上涨,严重制约了人民生活水平的提高和社会生产的发展。

随着环境保护的呼声不断高涨,自然能发电技术的应用受到世界各国的普遍关注。科学技术的发展和高新技术的推广应用,使得自然能发电的技术性能和经济性能有了很大突破,自然能发电设备的成本不断降低,自然能供电系统的设计技术也日趋完善,自然能源的应用正在成为世界电力发展的潮流之一。

自然能供电技术的研究内容包括自然能-电能的转换、电能储存与变换及供电系统控制与管理几个方面,本书将逐一介绍并重点讨论自然能供电系统中电能的变换、储存、控制管理等内容,以帮助读者了解、设计、使用自然能供电系统。

1.2 自然能供电现状及发展前景

1.2.1 应用现状

自然能发电在全球许多地区的经济竞争力日益增强,由于它比核电站和其他传统发电技术便宜得多,因而受到世界各国的普遍重视。1994 年,风能和太阳能发电技术取得了巨大进展,成本大幅度降低,具备了直接与化石燃料竞争的能力。西方七国中,德国、英国和美国已安装了大量的风力发电机,中国、印度、阿根廷宣布将实施一些大型风力发电项目。太阳能发电技术也获得重要应用,从斯里兰卡到瑞士,数以万计的家庭采用了太阳能发电方式获得电能。世界上许多大公司,如安龙天然气公司、西屋公司、西门子公司已意识到可再生能源市场的迅速扩大,决定投入巨资进行太阳能和风能发电技术的研究,美国政府也把太阳能和风能发电技术列为能源优先发展的重点领域。

在西方发达国家和许多发展中国家,目前都安装了大量的自然能发电设备。美国、德国、英国目前已安装了大量的风力发电机,希腊、西班牙、荷兰都制定了雄心勃勃的风力发电计划。1994 年,欧洲风力发电装机容量已达 1400MW;印度风力发电量达 120MW;在克

里米亚半岛,乌克兰国家电力公司和旧金山 Kenetech 公司共同实施了 500MW 的风力发电项目;我国内蒙古自治区也安装了十万多套中小型风力发电设备,烟台、大陈岛、大连乌蟒岛已建成风力/柴油机供电系统。

太阳能发电在迅速发展,1979 年以色列就开始了太阳热槽式发电技术的商业活动;1984~1990 年,美国鲁兹国际公司安装了 9 座太阳热发电站,发电能力达 354MW;1994 年澳大利亚在其北部建立了一座 2MW 的盘式太阳热发电实验电站。20 世纪 90 年代初期,发展中国家已有数千万村民采用光伏照明、提水和为家用电器供电。在多米尼加,有 2000 多个家庭实现了“太阳能化”;肯尼亚利用太阳能电池使 2 万多个家庭实现了电气化;挪威已有 5 万多个家庭采用光伏供电。目前,世界上已建成了数十栋并网的光伏大楼。

海洋能资源的利用也日益广泛。全世界已建成许多潮汐电站,规模较大的有法国朗斯电站、加拿大那波利斯电站、中国江厦电站和幸福洋电站、原苏联基斯洛电站,另有若干座百万千瓦级的大型潮汐电站正在研制和建设中。

1.2.2 发展前景

随着科学技术的迅速发展,自然能发电设备的价格不断下降,发电效率逐步提高。同时,由于自然能具有廉价、可靠、清洁无污染、能源丰富的特点,自然能发电展现了良好的市场前景。

全球风能潜力约为全球用电量的 5 倍。以美国为例,只要在美国 0.6% 的陆地上安装风力发电机,就可满足美国目前电力需求量的 20%,北达科他、南达科他和得克萨斯三个州的风力资源则可满足全美的电力需求。风能足以满足全部或大部分电力需求的国家还有:阿根廷、加拿大、智利、中国、俄罗斯、英国、埃及、印度、墨西哥、南非和突尼斯。风力发电的成本越来越低,20 世纪 80 年代初期的风电价格为 20 多美分/度,90 年代初期为 7~9 美分/度。随着技术的不断发展,风电价格有望进一步降低,接近或低于化石燃料的发电成本。为此,许多国家都制定了雄心勃勃的风力发电计划。1993 年底,全世界投入运行的风力发电机约 2 万台,发电量达 3000MW,1994 年中期,欧洲风力发电装机容量已有 1400MW,并且欧盟各国计划 2000 年达 4000MW,2005 年达到 8000MW。

太阳能主要以太阳热发电和光伏发电的形式来利用。世界银行 1994 年的一项研究认为,许多国家的太阳热发电是经济的,并因此进行了资助。一些研究认为,在 21 世纪初,太阳热的发电成本将达到 5~7 美分/度,具有与化石燃料竞争的能力。由于太阳能电池的效率不断提高、制造成本不断降低,太阳能电池产业将成为全球最大的产业之一,光伏发电将对第三世界农村产生重要影响,实现为两亿多居民供电。

开发和应用自然能在我国具有重要意义。人类已经步入信息时代,电力供应是其基本保证。然而,目前我国仍然有大约一亿多人口的乡(镇)、村落、海岛及散居农牧民远离电网,居住分散,生产和生活用电问题长期得不到解决,严重影响了当地社会生产的发展和人民生活水平的提高。由于地理条件的限制,依靠延伸市电网不仅投资巨大,而且线路损耗严重,维护困难;如果采用油机发电,油料运输困难则非常突出;而小火电严重污染环境,对缺乏煤炭资源的地区也不现实。针对这个问题,国家计划委员会交通能源司拟订实施“光明工程”计划,用五年左右时间来解决远离电网地区的供电问题。

我国地域辽阔,地理、气候条件多样,具有丰富的自然能资源。全国可供开发利用的风能资源为 $2.53 \times 10^6 \text{ kW}$,太阳能辐射总量达 $930 \sim 2330 \text{ kW} \cdot \text{h}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$ 。中国地跨世界

两大地热带,地热能资源也十分丰富,目前已探明地热能储量约相当于 4626 亿吨标准煤。除此之外,我国海洋能资源也非常丰富。我国大陆海岸线长达 1.8 万公里,大小岛屿 6000 多个。据估算,海洋能约为 $4 \times 10^9 \sim 5 \times 10^9 \text{kW}$ 。这些蕴藏在自然界中的能源取之不尽、清洁无污染、经济,具有巨大的开发应用前景。

1.3 自然能供电系统基本结构

1.3.1 系统分类

目前应用的自然能供电系统种类很多,可以按照自然能输入数目、系统组成方式、控制方式等方法进行分类。

1. 按输入数目分类

自然能供电系统比较常用的能源包括风能、水力能、太阳能,根据地理、气象等环境条件的差异,系统可采用一种或多种自然能。在某些情况下,系统还可采用油机-发电机组作为后备能源。

- 单路自然能供电系统。这类系统的特点是只使用一种自然能源,如太阳能或其他自然能。由于输入能源种类单一,因而系统结构比较简单,但在所用自然能短缺时可能会出现供电不稳定等现象。该系统适用于某种自然能资源相对较为丰富,对供电质量要求不高的地区使用。

- 多路自然能供电系统。这类系统同时使用两路或两路以上的自然能输入,采用风光互补、风-水互补、风-光-水互补等结构形式。由于采用了两种以上的输入能源,因而可避免因一种自然能源短缺而可能出现的电力输出不稳定的现象,从而保证稳定的电力供应。

2. 按蓄电池组数量分类

自然能供电系统中,根据不同的应用要求,可配置不同数量的蓄电池组。

- 无蓄电池系统。这种系统中没有储能蓄电池,自然能发电设备输出的电能经过变换后直接供给用电设备。该系统结构简单,成本较低,适合于供电质量要求不高,不需要连续供电的情况下使用,如民用电器供电。

- 单组蓄电池系统。这种系统的储能设备为一组蓄电池,而自然能源既可以是一路,也可以是多路,但任何时刻只能有一路能源得到利用。在一路自然能源的情况下,供电性能受自然能源影响较大,不能保证连续供电;在有多路自然能源的情况下,不能充分利用自然能。

- 多组蓄电池系统。系统中配置了两组或两组以上的蓄电池,这种系统一般采用多种自然能供电,自然能源能够得到充分利用,连续供电性能较好,但系统结构较为复杂,成本也较高。

3. 按控制方式分类

自然能供电系统可以看作一个控制系统,系统中电能的变换、蓄电池组的充放电都需

要进行控制,按照其控制方式可分为:

- 简易供电系统。这种系统由发电设备直接对负载供电,或通过 AC/DC 变换器、DC/AC 变换器、DC/DC 变换器对负载供电,系统中没有专门的控制线路或控制装置。其特点是系统构成简单、成本低,但由于没有对系统实施必要的控制,供电质量受自然能源变化的影响很大,应用领域受到很大限制。这类系统的应用实例有灯塔供电系统、光伏照明系统等。

- 常规供电系统。这种系统通常由发电设备、蓄电池组、逆变器、DC/DC 变换器组成,利用继电器、电子线路或单片机进行简易的控制和切换。这类系统组成较为简单,不需要进行复杂的调节和控制,因而成本较低,能够满足对供电质量没有严格要求的用电设备使用,但由于系统没有进行完善的检测、控制和管理,系统的可靠性、供电质量均不够理想,目前有许多自然能供电系统均属于常规供电系统。

- 智能化供电系统。这种系统也利用计算机技术,与常规供电系统不同的是,它通过检测系统中各种信号,如电流、电压、温度等,对系统的电能变换、蓄电池充放电进行最优控制和管理。除此之外,利用计算机还可以对各电路单元的工作状态进行检测和判断,使系统具有自诊断能力。这类系统组成较为复杂,但系统的可靠性、寿命、供电质量均有大幅度提高,通过计算机进行判断处理,还可实现由负载控制开、关机等功能,大大降低系统自身功耗,延长后备供电时间。

1.3.2 系统组成

自然能供电系统一般由自然能发电设备、输入电能变换装置、输出电能变换装置、储能设备、控制器几部分组成,如图 1.1 所示。系统通常采用单元式电路结构,根据应用要求,每一部分可包含若干单元。自然能发电设备用于

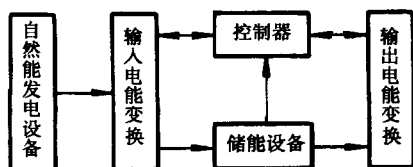


图 1.1 自然能供电系统组成

将自然能转换为电能,它包含风力发电机、水力发电机、太阳能电池阵列及其他自然能发电设备,根据需要,它也可以包括后备油机-发电机组;输入电能变换部分用于将发电设备输出的电能进行功率变换,以满足蓄电池充电的需要,它也由若干单元组成,通常与发电设备一一对应,每一种发电设备配置一个变换单元;输出电能变换部分用于将蓄电池中储存的电能转换为适合负载使用的形式,其具体结构与用电负载有关,对于交流用电负载应配置逆变器,而直流用电负载则应配置 DC/DC 变换器;储能设备用于储存发电设备输出的电能,使系统在自然能源短缺时能维持正常供电,储能设备通常采用蓄电池,对于不同的系统结构,蓄电池有不同的配置方法,如将蓄电池分为一组或多组;对于整个系统,控制器只有一个,它的作用是对系统工作状态、电能变换、蓄电池充放电、系统保护进行控制和管理。

1.3.3 系统基本结构

自然能供电系统的结构形式多种多样,具体所采用的结构与自然能资源状况、负载用电需求等因素密切相关,目前常见的结构形式主要有以下几种。

1. 单路自然能-无蓄电池组系统

这种系统的基本结构如图 1.2 所示。输入电能变换和输出电能变换合二为一,由电能变换装置完成。发电设备输出的电能经电能变换后直接提供给负载,在一定条件下,电能变换装置和控制器均可省略不用。例如,当发电设备采用风力发电机时,如果对供电质量没有特殊要求,可直接由风力发电机向负载供电,使系统结构得到极大简化。这种结构的不足之处是供电性能受自然能资源的影响很大,不能保证连续供电。

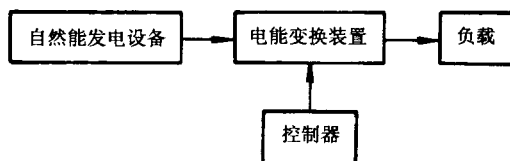


图 1.2 单路自然能-无蓄电池组系统

2. 单路自然能-单蓄电池组系统

这种系统的基本结构如图 1.3 所示。发电设备输出的电能经过输入电能变换装置转换为适当的直流电后向蓄电池组充电;输出电能变换装置将蓄电池组中的直流电能转换为满足负载要求的电能形式,向负载供电。由于系统中采用了蓄电池储能,即使在自然能资源短缺的情况下也能保证一段时间的连续供电,同时,由于输入电能变换和输出电能变换相互独立,其设计更为容易,自然能的波动对供电质量几乎没有影响。

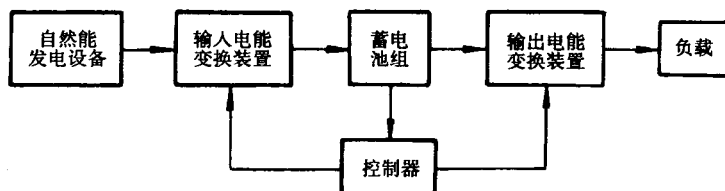


图 1.3 单路自然能-单蓄电池组系统

3. 多路自然能-单蓄电池组系统

这种系统的基本结构如图 1.4 所示。系统采用两个以上的自然能发电设备,每个发电设备配置一个输入电能变换装置,由多路电子开关将多个输入变换装置的输出合并为一,对蓄电池组进行充电,同样,由输出电能变换装置向负载供电。在实际系统中,电子开关也可并入输入变换装置中。这种结构的优点是可以利用多种自然能源,构成互补系统,如风-光互补系统、风-光-水互补系统,有利于减小蓄电池组容量,增长后备供电时间。这种系统的缺点是结构复杂,任何时刻均只有一种自然能源得到利用,能源利用率低。

4. 多路自然能-多蓄电池组系统

这种系统的基本结构如图 1.5 所示。系统中每个输入电能变换装置均配置一组蓄电池,各组蓄电池均有相同的电压等级,每路自然能发电设备输出的电能对各自的蓄电池组

充电,通过电子开关,输出电能变换装置选择电压较高的一组蓄电池对负载供电。这种结构的优点是自然能源利用较为充分,即使每组蓄电池容量较小,也能达到较长的后备供电时间。该系统存在的缺点是输入能源和蓄电池组的连接是固定的,如果某种自然能长期短缺,将导致蓄电池组充电不足,影响蓄电池寿命,其结构也比较复杂。实际应用中,可将图 1.4 和图 1.5 所示结构综合起来,构成如图 1.6 所示的系统。虽然该系统结构较为复杂,但系统的可控性、灵活性、能源利用率有了大幅度提高。通过电子开关选择,来自每一路发电设备的电能均可对任意一组蓄电池充电,克服了前述几类系统存在的问题。

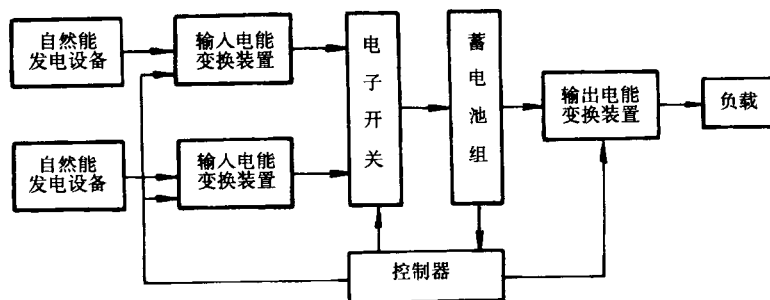


图 1.4 多路自然能-单蓄电池组系统

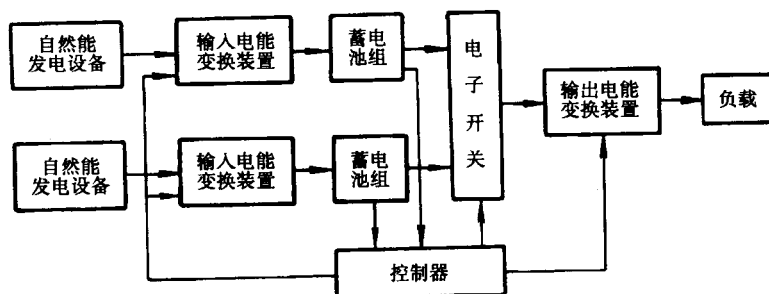


图 1.5 多路自然能-多蓄电池组系统之一

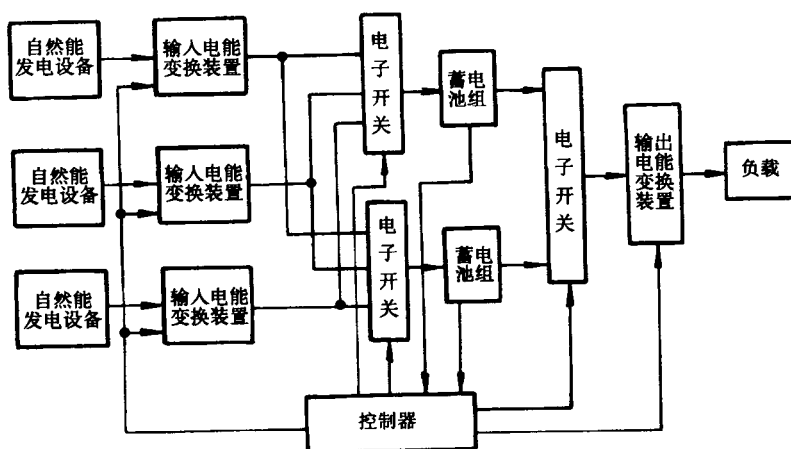


图 1.6 多路自然能-多蓄电池组系统之二

第二章 自然能发电与储能设备

自然能供电系统的电能来自各类自然能发电设备,如太阳能电池、风力发电机组、水力发电机组等,而由于自然能发电输出通常具有不稳定(随气候条件而变化)的特点,采用蓄电池等装置储存富余能量对于大多数自然能供电系统都是必不可少的。本章对常用的自然能发电设备和储能设备进行讨论,了解有关设备的原理和技术性能,以便更好地设计和使用自然能供电系统。

2.1 太阳能电池

太阳是一个取之不尽、用之不竭的能源库。从远古时代到现在,人类每时每刻都在利用太阳为人类服务。在早期,人类利用太阳能来取暖、采光,这是最简单的利用。到了 20 世纪 70 年代中期,由于地球上资源的日益匮乏和环境污染日趋严重,太阳能以它清洁、无污染的特点逐渐被人们认识和利用。

太阳辐射包括光辐射和热辐射,大部分能量是光能。人类对太阳能的利用主要有光热利用和光电利用两个方面,光热利用约占 80%,光电利用占 20%。光电发电的方式有多种,主要有太阳能光伏发电、光感应发电、光化学发电和光生物发电等,其中太阳能光伏发电应用得较为广泛。

太阳能光伏发电主要是利用半导体太阳电池的光伏效应发电。它是由法国物理学家皮亏雷尔在 1839 年发现的。伏打电池在受光照射的时候,能够产生额外的伏打电动势,这种现象称为光生伏打效应,简称光伏效应。能够产生光伏效应的器件称为光伏器件。通常用半导体制成 PN 结的光伏器件的光电转换效率最高,通常把这类光伏器件称为太阳电池。太阳电池由于具有效率高、重量轻、体积小、寿命长、无噪声、无污染、维护少、使用安全、便于携带和利用方便等优点,在空间利用和地面利用中备受人类青睐,成为人类开发、利用太阳能发电的主要方式。

太阳电池的分类方法很多。按材料可以分为硅太阳电池、硫化镉太阳电池、砷化镓太阳电池、非晶硅太阳电池、硒铟铜太阳电池等;按结构可以分为同质结电池、异质结电池、肖特基结电池、复合结电池、分光电池等;按厚度可分为薄膜电池、片状电池和块状电池等;按太阳电池的使用情况可以分为空间太阳电池、地面电池、聚光电池和平板电池等。

随着人类对太阳电池认识了解的逐渐深入,太阳电池的应用范围越来越广,它的成本也在逐渐下降。太阳电池也从原来的空间利用如人造卫星、宇宙飞船、星际站、天空实验室以及军事通讯等装备逐渐向工业应用和民用方向发展。

2.1.1 概述

1. 太阳能利用的有关知识

太阳对地球来说是一个惟一永恒的能源。太阳每时每刻都在以光辐射的形式向太空

发射能量。为了更好地利用太阳能,我们首先需要了解一些有关太阳能利用的概念。

太阳是个巨大的能源,它以光辐射的形式每秒钟向太空发射约 $3.8 \times 10^{23} \text{kW}$ 的能量,其中只有大约二十亿分之一到达了地球表面,约为 $173 \times 10^{12} \text{kW}$,如图 2.1 所示。根据

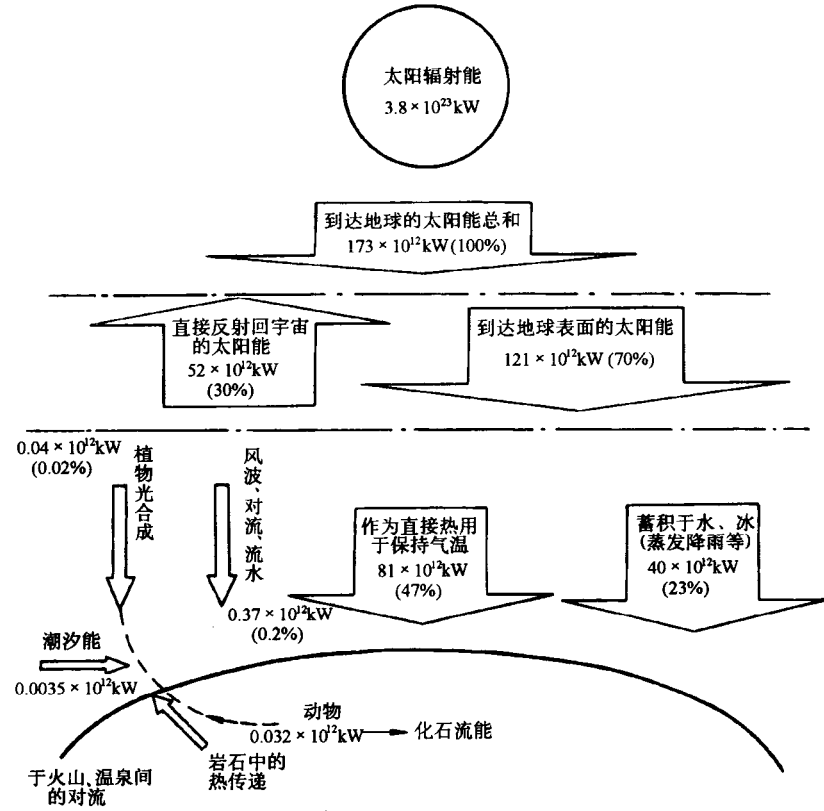


图 2.1 辐射到地球的太阳能

计算,在地球表面上正对太阳的每一平方米土地,大约能接收到 1kW 左右的能量。但由于地球每时每刻都在自转和绕着太阳公转(如图 2.2 所示),在远日点和近日点上,地球由于离太阳的距离不一样,它所接收的能量就不一样,为了统一标准,定义在平均日地距离处,垂直于太阳辐射方向的单位面积上接收到的太阳总辐射照度为太阳常数,其值为 1367W/m^2 。这一标准只是对空间应用。针对空间应用的太阳常数值确定太阳的光谱分布曲线。太阳光是各种波长的复合光,所含的各种光谱成分组成的光谱分布曲线随地点、时间及其他条件的差异而不同。但在大气层外太阳光谱的成分就非常单纯,没有受到大气层

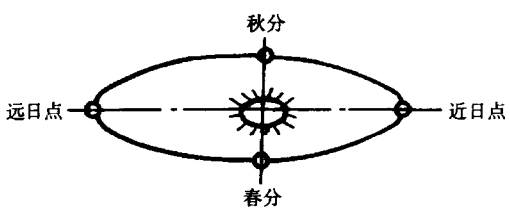


图 2.2 地球围绕太阳运转的轨迹

反射和吸收的影响,称之为大气质量为零的光谱,以 $\text{AM}0$ 来表示。如图 2.3 所示。但在地面上,由于太阳光穿过大气层后被选择性吸收,结果导致了非常复杂的光谱分布。为了统一标准,规定在晴朗的气候条件下,太阳光穿过大气层到达地面所经过的路程为

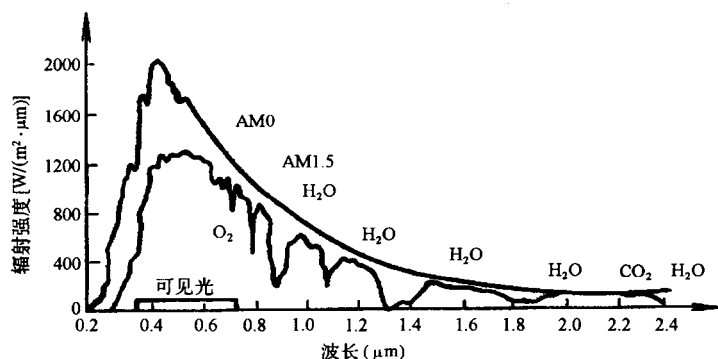


图 2.3 太阳辐射光谱

大气层厚度的 1.5 倍时,其光谱为标准地面太阳光谱,简称 AM1.5 标准太阳光谱。大气质量 AM 是太阳光束实际在大气中经过的路程与太阳在天顶位置时的大气深度之比,如图 2.4 所示。即有 $AM=d/D=\sec Z$ 。当 $Z=0$ 时, $AM=1$,称大气质量为 1(AM1)。一年中,只有当太阳在南、北回归线之间的某个时刻直射地球表面时,才能获得 AM1 光谱。当 $Z=48.2^\circ$ 时, $AM=1.5$ 。AM1.5 光谱在地球上的大部分地区均可得到。AM1.5 光谱曲线如图 2.3 所示。从曲线中我们可以看到,太阳辐射局限在 $0.3\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 的中等红外区之间,气体、水蒸气及云层的吸收只发生在某些特定的窄波段内。实际上,太阳辐射经过大气层时,会被各种气体分子、云雾、尘埃等散射。散射使得太阳辐射的方向被改变,甚至使得太阳辐射逸出大气层,不能到达地球表面。因此,对地面应用规定的标准辐照度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。但实际上地面阳光和很多复杂因素有关,这一数值在特定时间、理想的气候和地理条件下才能获得。地面上比较常见的辐照度是在 $600\sim 900\text{W}/\text{m}^2$ 范围内。

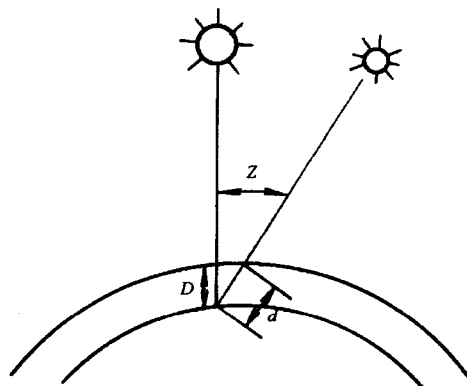


图 2.4 大气质量

2. 太阳能的特点

太阳能发电系统与其他发电系统相比,具有许多优点。它的能源取之不尽,用之不竭,而且清洁无污染。它不像其他许多发电系统那样不但对周围环境造成危害,而且能源的利用也将受到外部条件的限制。太阳能与这些常规能源(如煤炭、石油、天然气、核燃料等)相比,具有下面几个特点:

(1) 太阳能的广泛性:太阳能辐射比比皆是、就地可用。可以说地球上每一个角落都会受到太阳光的惠顾。因此,太阳能发电系统可以在地球上大部分地区使用。只要一次投资建好发电设备,平时的维护费用远比其他能源少。

(2) 太阳能的清洁性:太阳能发电系统是利用太阳电池的光电效应,将光能转换成电能的系统。在能量转换过程中,既不会给环境留下污染物,也不会向大气中排放废气,对环

境无公害。

(3) 太阳能的分散性:太阳辐射虽然遍及全球,但由于地球表面上每单位面积的入射量很少,即入射功率很小,因此要得到较大的功率,就必须要有庞大的受光面积。

(4) 太阳能的间歇性:太阳的高度角在一日及一年内在不断地变化,而且由于地球的公转和自转,日地距离在不断地变化,即使没有气候条件的影响,太阳辐射的变化也相当大。因此在利用太阳能发电时,必须备有相当的储能设备。

(5) 太阳能的永久性:据资料计算,太阳每秒钟释放 $3.8 \times 10^{23} \text{kW}$ 的能量,按现有的核反应速率计算,太阳的寿命仍有 5×10^9 年,真可谓取之不尽,用之不竭。

太阳能除了具有上述的各种特点以外,还具有地区性、随机性等特点。

3. 我国太阳能资源的分布情况

我国地域辽阔,太阳能辐射资源比较丰富,但是太阳能辐射资源受气候、地理等环境条件的影响,因此其分布具有明显的地域性。根据测量太阳能辐射总量的大小,我国可划分成以下四个太阳辐射资源带,如表 2.1 所示。我国的四个太阳辐射资源带分布如图 2.5 所示。

表 2.1 我国太阳辐射资源带

资源带号	名称	指标
I	资源丰富带	$\geq 6700 \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})^*$
II	资源较富带	$5400 \sim 6700 \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
III	资源一般带	$4200 \sim 5400 \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$
IV	资源贫乏带	$< 4200 \text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$

* $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ——兆焦/(平方米·年)

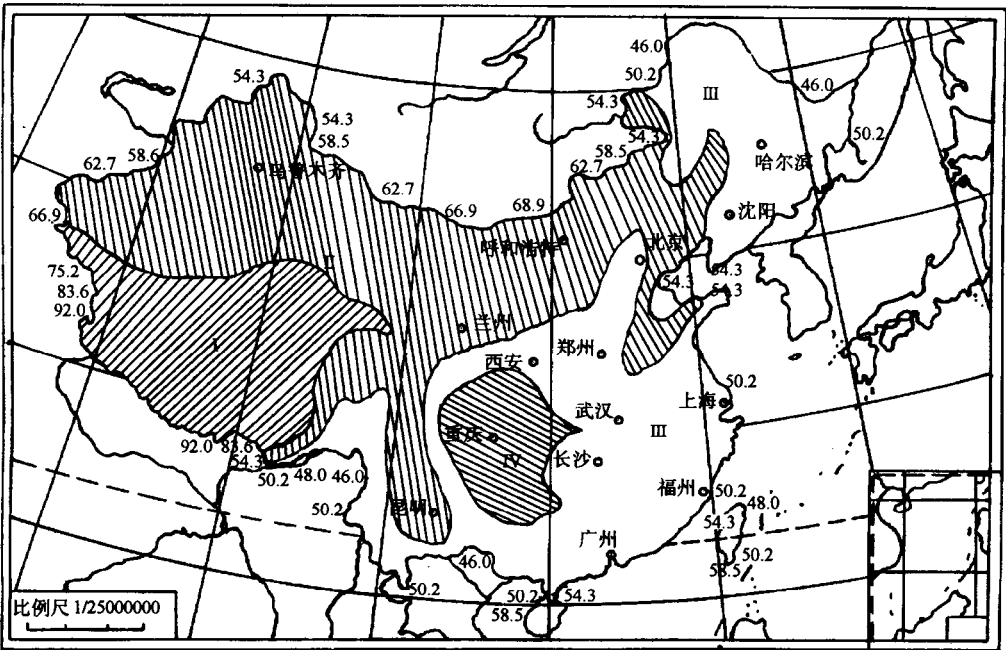


图 2.5 中国太阳能资源分布图($10^8 \text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)[焦耳/(平方米·年)]

由图中可以看出,我国各地全年太阳总辐射量的分布,大体上在 $80 \sim 200 \text{kcal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ [千卡/(厘米²·年)] 的范围内。青海及西藏地区最高,四川盆地、两湖地区、秦巴山地是低值区,塔里木盆地经河西走廊至内蒙古是另一高值区。我国东部、南部及东北地区则是中等数值区。

2.1.2 太阳能的光伏利用

1. 太阳能电池发电原理

太阳电池是把光能直接转换成电能的一种设备,它是用半导体材料制成的。半导体材料可以分为本征半导体和掺杂半导体。掺杂半导体中根据掺入的杂质不同,可以分为 P 型半导体和 N 型半导体。其中, P 型半导体中空穴是多数载流子, N 型半导体中电子是多数载流子。一旦 N 型半导体和 P 型半导体接触后,相互之间浓度大的载流子要向浓度小的区域扩散,即 P 区中的多子——空穴向 N 区扩散, N 区中的多子——电子向 P 区扩散,这些载流子的扩散形成扩散电流。而在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面两侧会形成正负电荷区叫空间电荷区。空间电荷区的正负电荷要形成电场,称为内建电场。内建电场一方面推动电子沿电场相反方向作漂移运动,形成漂移电流;另一方面也推动空穴沿电场方向作漂移运动,形成空穴漂移电流。最后当漂移电流和扩散电流相等时,称 P-N 结达到平衡。

对于平衡 P-N 结的情况也可以用能带图来讨论。所谓能带图是一种理论模型,它用来讨论半导体的导电过程和有关特性。如图 2.6 所示,用 E_c 表示导带底, E_v 表示价带顶。简单地讲,当某一个价电子的能量等于或大于 E_g 时,价电子便脱离原子的束缚,在半导体中起传导电流的作用,就称这个电子进入了导带。可知,在导带和价带之间不会有电子存在,称为禁带。电子吸收了 E_g 的能量后,便从价带激发到导带中。对于太阳电池的半导体材料而言,当被

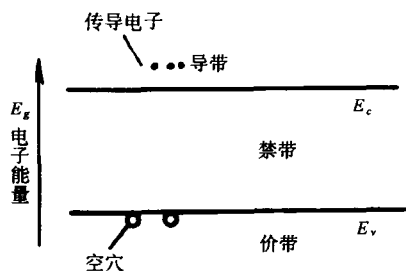


图 2.6 半导体能带

具有一定能量的太阳光照射时,电子被激发,同时在价电子带中形成空穴。因此太阳电池的半导体材料要形成电流,所需要的光能对于一个电子而言,一定要大于或等于 E_g ,对于整个半导体材料而言,所需的光能一定要比禁带宽度的能量大。太阳光是一种波,它可被看作光子。一个光子在半导体中产生一对电子-空穴对。当光照射半导体时,电子-空穴对被激发成为光生载流子。当需要向外电路供电的时候,则以某种方式在半导体中形成“势垒”,将受激发的电子-空穴对分开,从而可向外电路供电。

从上述可知,半导体太阳电池的工作原理可以概括成以下几个过程:

- 必须要有光的照射。
- 光子注入到半导体内后,激发出电子-空穴对。
- 必须要有一个静电场。在静电场的作用下,电子-空穴对被分离,电子集中在一边,空穴集中在一边,绝大部分太阳电池利用 P-N 结势垒区的静电场来实现分离电子-空穴对的目的。
- 被分离的电子和空穴,经电极收集输出到电池体外形成电流。

2. 硅太阳能电池的工作原理

硅太阳能电池有单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池。它的外形结构有圆形的和方形的两种,其结构如图 2.7 所示。这是一种 N^+/P 型太阳能电池,它的基体材料为 P 型单晶硅,厚度在 0.4mm 以下,上表面层为 N 型层,是受光层,它和基体在界面处形成一个 P-N 结。在上表面上加有栅状金属电极,可提高转换效率;另外在受光面上,覆盖着一层减反射膜,它是一层很薄的天蓝色氧化硅薄膜,用以减少入射太阳光的反射,使太阳能电池对入射光的吸收率达到 90% 以上。

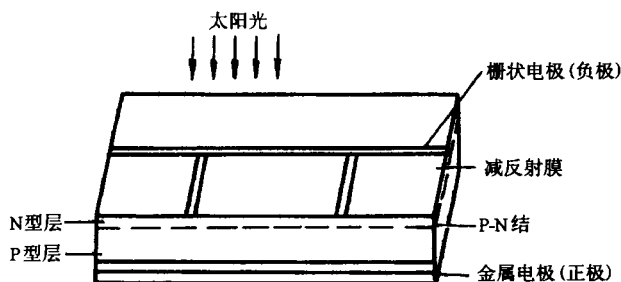


图 2.7 硅太阳能电池结构

对于半导体材料而言,当其中的 P-N 结处于平衡状态的时候,在 P-N 结处有一个耗尽区,存在着由 N 区指向 P 区的势垒电场。如图 2.8 (a) 所示。当每一个入射光子的能量大于 E_g ,即整个入射太阳光的能量大于硅禁带宽度的时候,太阳光子照射入半导体内,把电子从价带激发到导带,在价带中留下一个空穴,产生了一个电子-空穴对。因此,当能量大于 E_g 的光子进入电池的 N 区、空间电荷区和 P 区中时,会激发产生光生电子-空穴对。光生电子-空穴对在空间电荷区中产生后,立即被势垒电场分离,光生电子被推向 N 区,光生空穴被推向 P 区。在 N 区和 P 区中产生的光生电子-空穴对会向 P-N 结界面处扩散,当达到势垒电场边界时,立即受到势垒电场的作用,使光生电子留在 N 区,光生空穴留在 P 区。而在 N 区中的光生空穴由于内建电场的作用被推到 P 区,P 区中的光生电子同样被推到 N 区。最后就形成了 N 区中积累了过剩的电子,P 区中积累了过剩的空穴,而在 P-N 结两侧形成了与势垒电场方向相反的光生电动势。如图 2.8(b) 所示。这就是所谓的“光生伏打效应”。当光电场接上负载后,电流就从 P 区经负载流至 N 区,负载即得到功率输出。

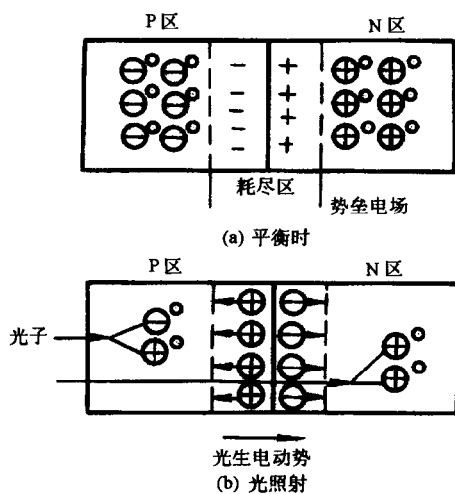


图 2.8 P-N 结光生伏打效应

3. 太阳电池的技术特性

(1) 等效电路

太阳电池的等效电路可以分为理想的等效电路和实际的等效电路。图 2.9 是理想的等效电路。在该电路中,将太阳电池看成是能够稳定地产生光电流 I_L 的电流源和与它并联处于正偏的二极管。流过二极管的电流用 I_D 来表示。其中 R_L 表示外接的负载, I_R 表示流过负载的电流。

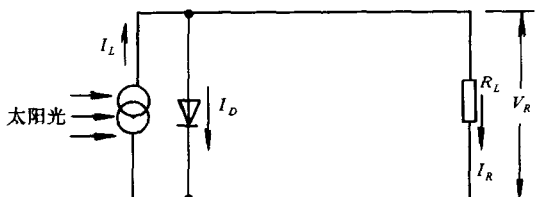


图 2.9 理想的等效电路

由等效图我们可以看出,太阳电池受阳光照射以后,产生了一定的光电流 I_L 。其中的一部分用来抵消结电流 I_D , 另一部分给负载提供能量, 即有

$$I_R = I_L - I_D \quad (2.1)$$

上面讨论了太阳电池的理想等效电路的情况。但是在实际的电路中,太阳电池本身还具有内阻, 它的内阻包括了串联电阻 R_S 和并联电阻 R_{Sh} , 其电路如图 2.10 所示。串联电阻 R_S 包括了硅片的内部电阻和电极电阻。并联电阻 R_{Sh} 则指的是 P-N 结的分路电阻。一般来说, R_S 与 R_{Sh} 相比, R_S 为低阻值, 小于 1Ω ; 而 R_{Sh} 是高阻值, 约为几千欧姆。由图 2.10 可以看出, 流过负载的电流为:

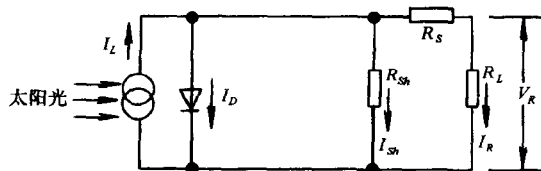


图 2.10 实际的等效电路

电阻 R_S 包括了硅片的内部电阻和电极电阻。并联电阻 R_{Sh} 则指的是 P-N 结的分路电阻。一般来说, R_S 与 R_{Sh} 相比, R_S 为低阻值, 小于 1Ω ; 而 R_{Sh} 是高阻值, 约为几千欧姆。由图 2.10 可以看出, 流过负载的电流为:

$$I_R = I_L - I_D - I_{Sh} \quad (2.2)$$

(2) 太阳电池的伏安特性

太阳电池的伏安特性指的是在一定的条件下,太阳电池两端电压与电流的对应关系。根据这一关系画出的曲线叫做太阳电池的伏安特性曲线,如图 2.11 所示。

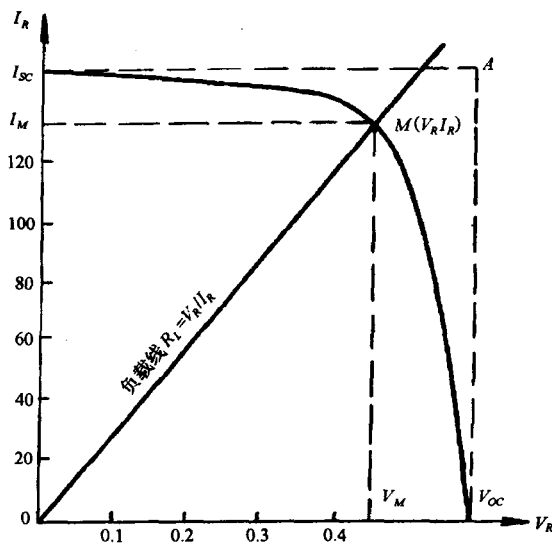


图 2.11 硅太阳电池的伏安特性