

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



XINNENGYUAN JI FENBUSHI
FADIAN JISHU

新能源及分布式 发电技术

孙云莲 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



XINNENGYUAN JI FENBUSHI
FADIAN JISHU

新能源及分布式 发电技术

孙云莲 编
刘涤尘 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书在参考大量国内外资料的基础上,系统、详细地介绍了太阳能、生物质能、风能、地热能、海洋能的利用原理和工程应用技术,介绍了分布式发电并网技术及其并网后对电力系统的影响。全书共七章,主要内容包括概述、太阳能发电、风能发电、地热能发电、生物能的利用、海洋能发电、分布式发电与现行电网关系等。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、能源动力类等相关专业的本科生、研究生教材,也可作为新能源、可再生能源领域科研及工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源及分布式发电技术/孙云莲编. —北京:中国电力出版社, 2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-9659-0

I. 新… II. 孙… III. 新能源—发电—技术—高等学校—教材 IV. TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 200816 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 11 月第一版 2009 年 11 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 9.25 印张 218 千字

定价 15.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



序

当今社会,能源与环保问题并存,发展新的绿色能源,寻求可持续发展之路不仅是发达国家面临的道路,也是我国在经济持续增长时越来越重视的问题。由于利用传统化石能源所带来的环境污染和生态破坏是世界能源环境恶化的主要问题,因此开发可再生能源电力也成为有效解决能源危机和改善环境质量的最主要途径。

该书全面介绍了槽式太阳能热发电系统,塔式太阳能热发电系统和碟式太阳能热发电系统,太阳能光电转换中的光伏发电原理,光伏发电系统,光伏技术应用以及太阳能制冷空调技术,风力发电系统及其组成部分,风力发电的并网技术,中国地热资源和地热发电技术,地热空调和地源热泵,生物质能发电和垃圾发电技术,分布式发电对系统影响等。

目前国内关于新能源的应用及研究掀起了一股热潮,在此形势下,在本科生教学中设置有关新能源与并网技术的课程十分必要,武汉大学电气工程学院在2005年秋的本科课程修订时,增加了“新能源与分布式发电”课程,并组织了该教材的编写。同时该教材被列为武汉大学“十一五规划教材”,几年来,编者在查阅大量国内外资料和文献的基础上,完成了该书的撰写。

该书从新能源发电的角度系统地介绍了新能源的特点及并网影响,其内容也是研究新能源发电专业人士的参考书籍。

孙文章

2009年10月



前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

目前全世界的能源消耗主要依靠煤炭和石油,由于是不可再生的化石能源,因而陷入了既为自身生存发展不得不消耗大量的能源,又为“坐吃山空”而忧虑的能源窘境。同时,煤炭和石油的利用还带来 SO_2 、 NO_2 、 CO_2 及粉尘等污染物。为了实现能源与社会经济、环境的可持续发展,除了积极实现常规能源的高效化、优质化利用、提高能源利用效率外,开发利用太阳能、风能、地热能、海洋能等新能源是重要途径之一。

新能源不仅是资源丰富的可再生能源,而且不产生或很少产生污染物,既是近期重要的补充能源,又是未来能源结构的基础,对能源的可持续发展起着重要的作用。从长远来看,人类必将逐步过渡到以可再生新能源为主的可持续能源系统。

大电网与以新能源为主的分布式电网的结合,被世界许多能源和电力专家公认是节省投资、降低能耗、提高电力系统稳定性和灵活性的主要方式,是 21 世纪电力工业的发展方向。此外,现在世界各国都在提倡“绿色环保”,采用以能源为代表的分布式发电,充分利用各地丰富的“清洁能源”,这对于我国可持续发展的战略具有重大意义。

分布式发电及其应用是 21 世纪最受重视的高科技领域之一,是电力系统的一个新的发展方向。随着对环境及能源使用效率的进一步重视,分布式发电在我国的广泛应用是可以预见的。

本书将详细系统介绍太阳能、生物能、风能、地热能、海洋能的利用原理及工程应用技术,同时介绍分布式发电并网技术及其并网后对电力系统的影响。

全书是在系统查阅、参考大量国内外同行发表的最新文献、资料基础上整理编写完成,在此特对他们表示衷心感谢,由于时间仓促,如果有遗漏在后文没有引入的作者,特表歉意。由于本人水平有限,错误与不足之处在所难免,敬请读者指正。

感谢胡雯对全书的图表进行了精心的绘编,感谢刘涤尘教授在审稿过程提出的很好的建议,感谢中国电力出版社对本书的厚爱和支持。

编者

2009 年 10 月



目 录

序	
前 言	
第 1 章 概述	1
1.1 什么是新能源	1
1.2 新能源对我国能源可持续发展的作用	1
1.3 新能源发电技术及我国新能源的开发基础	2
思考题	5
本章参考文献	5
第 2 章 太阳能发电	6
2.1 太阳能热发电	6
2.2 太阳能光伏发电	16
2.3 太阳能制冷空调	37
思考题	41
本章参考文献	41
第 3 章 风能发电	43
3.1 风力发电的发展史	44
3.2 各国风力发电的发展情况	46
3.3 风能发电技术	48
3.4 并网型风力发电系统拓扑结构性能比较	55
思考题	56
本章参考文献	56
第 4 章 地热能发电	57
4.1 概述	57
4.2 地热发电技术	62
4.3 地热空调	65
4.4 地源热泵	66
4.5 地热发电存在的主要问题	67
思考题	68
本章参考文献	68
第 5 章 生物能的利用	69
5.1 生物质资源	70
5.2 生物质能发电技术	73
5.3 垃圾发电	87
思考题	92

本章参考文献	92
第 6 章 海洋能发电	93
6.1 潮汐发电	94
6.2 海（潮）流能发电	96
6.3 波浪能发电	96
6.4 海洋温差能发电	102
6.5 我国海洋能发电存在的问题及发电前景展望	107
思考题	110
本章参考文献	110
第 7 章 分布式发电与现行电网关系	111
7.1 分布式发电技术	111
7.2 分布式发电系统	114
7.3 电力电子技术在分布式发电系统电能变换中的作用	115
7.4 分布式发电对电力系统影响	121
7.5 基于分布式发电的微电网概念	133
思考题	136
本章参考文献	136

第 1 章 概 述

1.1 什么是新能源

通常人们把技术上比较成熟,已被人类广泛利用,在生产和生活中起着重要作用的能源称为常规能源,如煤炭、石油、天然气、水能和核裂变能等。将目前尚未被人类大规模利用,还有待进一步研究试验与开发利用的称为新能源,例如太阳能、风能、地热能、海洋能及生物质能等。

联合国开发计划署(UNDP)将新能源和可再生能源分为三类:

- (1) 大中型水电;
- (2) 可再生能源,包括小水电、太阳能、风能、现代生物质能、地热能、海洋能;
- (3) 传统生物质能。

目前,在我国新能源和可再生能源一般是指除常规化石能源和大中型水力发电、核裂变发电之外的太阳能、风能、小水电、生物质能、地热能及海洋能等一次能源。这些能源资源丰富,可以再生,清洁干净,是最有前景的替代能源,将成为未来世界能源的基石。

本书重点将讲述太阳能、风能、生物质能、地热能及海洋能发电技术,同时介绍分布式发电并网技术及其并网后对电力系统的影响。

1.2 新能源对我国能源可持续发展的作用

随着我国经济的持续发展和国际煤炭、石油等资源的紧缺,我国能源发展将面临供需缺口加大、石油后备资源不足、以煤为主的能源结构带来严重环境污染等一系列问题。根据计算,为了保证 GDP 年均增长 7% 以上,我国面临能源供应保持每年递增 4% 左右的压力。到 2050 年,我国能源年消耗量将达到标煤 38 亿吨,相当于 2000 年的 3 倍,成为世界第一能耗大国。

就全世界而言,目前都陷入了一种既为自身生存发展不得不消耗大量的能源,又为“坐吃山空”而忧虑的能源窘境。有关资料表明,按照现在的开采速度,石油只够约 40 年全世界需求,煤炭开采期稍长一点,天然气还能持续开采约 60 年。从以上数据看,为了实现能源与社会经济、环境的可持续发展,除了积极实现常规能源的高效化、优质化利用,提高能源利用效率外,开发利用太阳能、风能、地热能、生物质能、海洋能等新能源是解决能源危机的重要途径之一。

新能源不仅是资源丰富的可再生能源,而且不产生或很少产生污染物,既是近期重要的补充能源,又是未来能源结构的基础,对能源的可持续发展起着重要的作用。从长远来看,人类必将逐步过渡到以可再生新能源为主的可持续能源系统。

从我国的国情来看,通过大力开发新能源,还可以起到以下作用:优化能源结构,改善环境,促进能源可持续发展和社会经济可持续发展。尤其在西部大开发问题上,开发新能源不仅能缓冲西部边远地区能源短缺问题,而且可以从源头上改善生态环境,有利于西部地区

经济和生态环境的协调发展。加快新能源的开发利用，更有利于我国农村地区以及边疆、海岛、偏远地区及少数民族地区的发展，提高人民生活质量，改善生态环境，为我国经济可持续发展提供保障。

1.3 新能源发电技术及我国新能源的开发基础

1.3.1 太阳能发电技术

太阳是地球永恒的能源，它以光辐射的形式每秒向太空发射约 $3.8 \times 10^{20} \text{MW}$ 能量，其中有 22 亿分之一投射到地球上。丰富的太阳能是地球上万物生长之源，其照射到地球上的能量要比人类消耗的能量大 6000 倍，具有广阔的利用前景。充分利用太阳能具有可持续发展能源和绿色环保双重意义。

我国幅员辽阔且多处于中低纬度，太阳高度角较大，辐射较强，太阳能资源十分丰富。我国 2/3 地区的年日照小时数大于 2000h，太阳辐射总量大于 $5.0 \times 10^6 \text{kJ/m}^2$ 。青藏高原大部分地区年辐射量大于 $6.7 \times 10^6 \text{kJ/m}^2$ ，年日照小时数超过 3000h，是世界上的高值区之一。表 1.1 为我国太阳能资源的分类及分布。

表 1.1 我国太阳能资源的分类及分布

地区分类	全年 日照时数 (h)	太阳辐射年总量 (10^6kJ/m^2)	地 区
I	3200~3300	6.7~8.4	宁夏北部、甘肃北部、新疆东南部和西藏西部
II	3000~3200	5.9~6.7	河北北部、山西北部、内蒙古和宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南部
III	2200~3000	5.0~5.9	山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、山西北部、甘肃东南部、广东和福建南部、北京
IV	1400~2200	4.2~5.0	江苏、安徽、湖北、湖南、江西、浙江、广西和广东北部、陕西南部、黑龙江
V	1000~1400	3.4~4.2	四川、贵州

太阳能的转换和利用方式有光—热转换、光—电转换和光—化学转换。光—热转换是太阳能热利用的基本方式，采用接收器（或聚集板）接收（或聚集）太阳能使之转换为热能，用于生产和生活的一些方面。例如，太阳能热水器，是目前太阳能热利用的主要形式，它是利用太阳能将水加热储于水箱中以便利用的装置。太阳能产生的热能可以广泛的应用于采暖、制冷、干燥、蒸馏、温室、烹饪及工农业生产等各个领域。

太阳能热发电是将太阳辐射能转换为热能，再通过各种发电装置将热能转换为电能的发电技术。

太阳能发电的方式主要有通过太阳能热发电的塔式发电、抛物面槽式聚光发电、碟式太阳能发电、热离子发电、热光伏发电、温差发电等和不通过热过程发电的光伏发电、光感应发电、光化学发电、光生物发电等。

1.3.2 风力发电技术

风能是一种干净、储量极为丰富的可再生能源。与煤、石油、天然气等不同，风能是不会因为其本身的利用和转化而减少的。

风是由空气流动而产生的，由于风具有一定的质量和速度，因而具备产生能量的基本要素，可以利用风推动风力发电机发电。但由于风能是随机性的，风力的大小时刻变化，风力发电必须根据风力的大小及电能需要量的变化，及时通过控制装置来实现对风力发电机组的启动、调节（转速、电压、频率）、停机、故障保护（主要是超速、振动、过负荷等）以及对电能用户所接负荷的接通、调整及断开等操作。对于风力发电来说，其控制技术十分关键。风力发电系统是将风能转换为电能的机械、电气及其控制设备的组合。

我国位于亚洲大陆东部，濒临太平洋，季风强盛，有较丰富的风能资源。根据全国气象台部分风能资料的统计和计算，我国风能分区及占全国面积的百分比见表 1.2。

表 1.2 我国风能分区及占全国面积的百分比				
指 标	丰富区	较丰富区	可利用区	贫乏区
年有效风能密度 (W/ m ²)	≥200	200~150	150~50	≤50
风速≥3m/s 的年 小时数 (h)	≥5000	5000~4000	4000~2000	≤2000
占全国面积 (%)	8	18	50	24

19 世纪末丹麦就开始研究风力发电技术，但直到 1973 年出现世界能源危机后，煤和石油等化石燃料日益枯竭，空气污染等环境问题也日趋严重，风力发电作为可再生的清洁能源才受到越来越多的重视。随着桨叶空气动力学、材料、发电机技术、计算机和控制技术的发展，风力发电技术随之迅速发展。单机容量从最初的数十千瓦级发展到兆瓦级机组；功率控制方式从定桨矩失速控制向全桨叶变矩和变速控制发展；运行可靠性从 20 世纪 80 年代初的 50%，提高到现在的 98% 以上；同时目前在风电场运行的风力发电机组，全部可以实现集中控制和远程控制；风电场发展空间也更加广阔，从内陆移到海上。

- 风力发电具有以下优点：
- (1) 不消耗资源，不污染环境。
 - (2) 建设周期短，万千瓦级风电场建设周期不到一年，而且安装 1 台可投产 1 台；装机规模灵活，为筹集资金带来便利。
 - (3) 风力发电运行简单，可完全做到无人值守等优点。
 - (4) 风力发电实际占地面积少，机组与监控、变电等建筑仅占风场约 1% 的土地，其余场地仍可供农、牧、渔和旅游使用；对土地的要求也低，在山丘、海边、荒漠等地形条件下均可建设。
 - (5) 风力发电在发电方式上既可联网运行，也可和柴油发电机组等形成互补系统，脱离电网独立运行。

1.3.3 生物质能发电技术

生物质能是蕴藏在生物质中的能量，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。有机物中除矿物燃料以外，所有来源于动植物的能源物质均属于生物质能，通常包括木材、森林废弃物、农业废弃物、水生植物、油料植物、城市和工业有机废弃物、动物粪便等。生物质能的利用主要有直接燃烧、热化学转换和生物化学转换三种途径。

使用生物质作为燃料的直接燃烧技术，一直以来且预计在今后相当长时期内仍将是我国农村生物质能利用的主要方式。

生物质的热化学转换是指在一定温度和条件下，使生物质气化、碳化、热解和催化液化以生产气态燃料、液态燃料和化学物质的技术。生物质的生物化学转换包括生物质—沼气转换和生物质—乙醇转换等。沼气转换是有机物质在厌氧环境中，通过微生物发酵产生一种以甲烷为主要成分的可燃性混合气体，即沼气。乙醇转换是利用糖质、淀粉和纤维素等原料经发酵制成的。

生物质发电是将生物质本身的能量，转化为可驱动发电机的能量形式，如燃气、燃油、酒精等，再按照通用的发电技术发电，然后直接提供给用户或并入电网提供给用户。

1.3.4 地热发电技术

所谓地热能，简单地说，就是来自地下的热能，即地球内部的热能。地热资源按储存形式可分为水热型（又分为干蒸汽型、湿蒸汽型和热水型）、地压型、干热岩型和岩浆型四大类；按温度高低可分为高温型（ $>150^{\circ}\text{C}$ ）、中温型（ $90\sim 149^{\circ}\text{C}$ ）和低温型（ $\leq 89^{\circ}\text{C}$ ）。

地热能的利用方式主要有地热发电和地热直接利用两大类。 $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的地热能，可用于洗浴、养殖、种植和医疗等； $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 的地热能，主要用于温室、采暖、家用热水、工业干燥和制冷；而 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的地热能，主要用于采暖、工业干燥、脱水加工、回收盐类和双循环发电； $150\sim 200^{\circ}\text{C}$ 的地热能，用于发电、工业热加工、工业干燥和制冷； $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的地热能，则用于发电和综合利用。

地热发电是利用地下热水和蒸汽为动力源的一种新型发电技术。地热发电和火力发电的基本原理是一样的，都是将蒸汽的热能经过汽轮机转变为机械能，然后带动发电机发电。

我国地处环太平洋地热带和地中海—喜马拉雅山地热带，地热资源较丰富。

1.3.5 海洋能发电技术

地球上浩瀚、连续的水体叫作海洋。全球海洋的面积约为 3.62 亿 km^2 ，占地球表面积的 70.9% 。海洋是个庞大的能源宝库，既是吸能器，又是储能器，蕴藏着巨大的动力资源。海水中蕴藏的这一巨大的动力资源的总称就叫作海洋能。海洋能包括潮汐能、波浪能和海洋温差能。因此，海洋能发电有潮汐能发电、波浪能发电和海洋温差能发电。

潮汐能是指海水涨潮和落潮形成的水的动能和势能。潮汐发电，就是利用海水涨落及其所造成的水位差来推动水轮机，再由水轮机带动发电机来发电。潮汐能在我国沿海蕴藏量极其丰富，特别是东南沿海，有很多能量密度较高、平均潮差 $4\sim 5\text{m}$ 、最大潮差 $7\sim 8\text{m}$ 的自然条件优越的地址，可供开发利用。据有关资料报道，全国沿海潮汐能资源可开发总装机容量约为 21.79GW ，年可发电量 624 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。其中以福建和浙江省的潮汐能资源最多，两省合计占全国总容量的 88.3% 。

波浪能发电从原理上主要有浮体式和气室式两类：前者利用浮体在水面上由于波浪摇动或上下运动，将动能转换为电能；后者利用波浪的上下运动产生气流，驱动空气透平发电机组。

海洋温差发电则使用低沸点工质,利用海洋表层暖海水在换热器内加热工质并使其蒸发,再让工质蒸汽驱动涡轮发电机;工质蒸汽通过涡轮发电机之后被送入另一个换热器,通过深层海水冷却凝结,冷凝后的工质被泵回到暖水换热器完成一个循环。如此周而复始的循环,以达到利用温差发电的目的。

本书在后面章节将详细介绍上述各种新能源发电的原理和技术及其并网技术。

思考题

1. 什么是能源?为什么有新能源的说法?通常新能源指的是哪些?
2. 新能源各有什么特点?与常规能源有什么区别?
3. 试述新能源的现状与发展趋势。

本章参考文献

- [1] 刘志强. 新能源发电综述. 国际能源网.
- [2] 刘广志. 新能源近期的发展态势. 中国工程科学, 2003.
- [3] 郑明. 中国能源发展现状与面临的挑战. 领导文萃, 2007.
- [4] 秦宣仁. 中国能源可持续发展前景展望. 领导文萃, 2007.
- [5] 都士杰. 中国能源紧张的现状分析及策略. 中国电力教育, 2007.
- [6] 朱俊生. 中国新能源和可再生能源发展状况. 可再生能源, 2003.
- [7] 王长贵. 新能源和可再生能源的分类. 太阳能, 2003.
- [8] 张新房. 风力发电技术的发展及若干问题. 现代电力, 2003.
- [9] 傅赐福. 关于发展我国风力发电问题的思考. 能源与环境, 2004.
- [10] 茹俊卿. 新能源发电技术概述. 河北电力技术, 2001.



第2章 太阳能发电

人类社会进入 21 世纪后面临着重大的能源挑战。随着全球经济的发展,能源的需求量也不断增加。在过去 20 年中,全世界能源消耗量增加了 40%,其中 85% 以上使用的是矿物燃料,而矿物燃料的储藏量是有限的。但随着人类对于能源需求量的剧增,矿物燃料储藏量将迅速减少,如不采取有效措施,到 21 世纪中叶,人类必将面临矿物燃料枯竭的能源危机局面。同时,矿物燃料燃烧时会产生温室气体,单是 CO_2 排放量全球每年就超过 500 亿 t,而且还在不断增加。 CO_2 排放造成大气污染,形成的酸雨会使土壤退化,危害生物。全球气候变暖还极可能产生灾难性后果。

全世界普遍认识到需要逐步改变现有的能源结构。大力开发利用新能源是保证全球能源的长期稳定供应,保护人类生态环境,是实现人类可持续发展的需要。在新能源中,应用最广、最有发展前途的是太阳能发电。太阳能发电具有安全可靠,使用寿命长,运行费用少,维护简单,随处可用,不需要长距离输送,没有活动部件、不容易损坏,无噪声,不需要燃料,不污染环境等优点。安装 1MW 光伏系统,至少要比现有同样规模最“干净”的燃煤电站减少 CO_2 排放量 2 万 t、 NO_x 排放量 25t,是理想的新能源。

我国太阳能资源非常丰富,在我国广阔的土地上,有着丰富的太阳能资源,理论储量达每年 17 000 亿 t 标准煤。太阳能资源开发利用的潜力非常大。全国大多数地区年平均日辐射量在 $4 \times 10^6 \text{ kJ/m}^2$ 以上,西藏日辐射量最高达 $7 \times 10^6 \text{ kJ/m}^2$ 。年日照时数大于 2000h。我国的太阳能资源与同纬度的其他国家相比,与美国相近,比欧洲、日本优越得多,因而有很大的开发潜能。

太阳能热发电是将太阳辐射能转换为热能,再通过各种发电装置将热能转换为电能的发电技术。目前,实际应用比较多的太阳能发电可分为太阳能热发电和太阳能光发电(又称为光伏)两大类。本章在 2.1~2.2 节详细介绍太阳能光伏发电和太阳能热发电的原理、技术和应用,在 2.3 节介绍太阳能空调的原理和技术。

2.1 太阳能热发电

2.1.1 概念

太阳能热发电是将太阳辐射能转换为热能,再通过各种发电装置将热能转换为电能的发电技术。

太阳能热发电系统一般由太阳能集热系统、蓄热与换热系统和汽轮机发电系统组成。与常规热发电的不同是太阳能热发电必须考虑太阳能能量密度低、间歇性、不稳定性等因素。太阳能热发电的集热系统用聚光集热装置将太阳能收集起来,将集热工质加热到一定的温度,经过换热器将热能传递给动力回路中循环做功的工质,或产生高温高压的过热蒸汽驱动汽轮机、再带动发电机发电;从汽轮机出来的乏气,其压力和温度已大大降低,或经凝冷器凝结成液体后,被重新泵入换热器,开始新的循环。太阳能电站一般带有储热装置。

太阳能热发电与常规的化石能源热力发电方式的热力学工作原理相同,都是通过 Rankine 循环、Brayton 循环或 Stirling 循环将热能转换为电能,区别仅在于两者的热源不同。

太阳能进行热发电的能量转换过程首先是将太阳辐射能转换为热能,然后通过热机将热能转换为机械能,最后再将机械能转换为电能。因此,整个太阳能热发电系统的效率也是由这三个部分的效率组成,即太阳场效率、动力系统效率和发电机效率三者的乘积。太阳场效率随着集热温度的上升逐渐降低;动力系统的效率则受制于卡诺定律,随着集热温度的上升逐渐增加。

太阳能热发电系统一般由六部分组成:

- (1) 太阳能集热子系统;
- (2) 吸热与输送热量子系统;
- (3) 蓄热子系统;
- (4) 蒸汽发生系统;
- (5) 动力子系统;
- (6) 发电子系统。

其中,前两部分简称为太阳场,是太阳能热发电技术的核心。由于太阳能供应不稳定、不连续,为保障热发电系统稳定运行,通常在系统中配置蓄能子系统,将收集到的太阳能热能存储起来,以保证在夜间或太阳辐照不足时的发电;或是将太阳能与其他能源组成综合互补的发电系统,在太阳能供应不足的情况下,由其他形式的能源供应。在配置蓄能子系统的发电方式中,太阳能聚光装置将太阳能聚集到吸热器上,被吸热器中的传热介质吸收,并输送到蓄热子系统中,将能量存储起来,当需要能量时,蓄热介质通过蒸汽发生器将热量传递给动力子系统的工质,产生的高温、高压工质进入动力装置中做功。但目前还没有成熟的低成本蓄热技术;而太阳能与其他能源组成综合互补的发电系统则可以降低太阳能发电的成本,虽然与太阳能热发电的初衷有悖,但仍不失为实际应用中的选择。

在一般商业化的太阳能电站,化石燃料的贡献一般限制在总发电量的 15% 以内。

2.1.2 槽式太阳能热发电系统

一、系统原理及构成

槽式太阳能热发电系统,是利用槽式抛物面反射镜聚光的太阳能热发电系统的简称。

槽式抛物聚光镜面从几何上看是将抛物线平移而形成的槽式抛物面,它将太阳光聚在一条线上,在这条焦线上安装有管状集热器,以吸收聚焦后的太阳辐射能。槽式太阳能热发电系统常常将众多的槽式抛物面串并联成聚光集热器阵列,其槽式抛物面对太阳辐射多进行跟踪控制(设备轴线南北放置,然后东西旋转跟踪),几何聚光比在 10~100 之间,温度可达 400℃ 左右。整个槽式太阳能热发电系统包括聚光集热子系统、换热子系统、发电子系统、蓄热子系统和辅助能源子系统。

(1) 聚光集热子系统:由聚光镜、接收器和跟踪装置构成是系统的核心。

(2) 换热子系统:当系统工质为油时,采用双回路,即接收器中工质油被加热后,进入换热子系统中产生蒸汽,蒸汽进入发电子系统发电。换热子系统一般由预热器、蒸汽发生器、过热器和再热器组成。直接采用水为工质时,可简化此子系统。

(3) 发电子系统:按照工质是水还是气体选用汽轮机组或燃气轮机组,其基本组成与常规发电设备类似,但需要设置工作流体在接收器和辅助能源系统之间循环的切换装置。

(4) 蓄热子系统：太阳能热发电系统在早晚或云遮间隙必须依靠储存的能量维持系统正常运行。蓄热的方法主要有显式、潜式和化学蓄热三种。

(5) 辅助能源子系统：在夜间或阴雨天，一般采用辅助能源系统供热。蓄热系统应设计合理，过大会引起初始投资的增加。

图 2.1 为槽式太阳能热发电系统示意图。由图可见，利用导热油作为集热介质， 293°C 的低温导热油从储油罐中泵入槽式太阳能集热场，被加热到 390°C ，然后依次通过再热器、预热器、蒸发器、过热器等，将收集到的太阳热能交换给动力回路中的蒸汽，产生 $10.4\text{MPa}/370^{\circ}\text{C}$ 的过热蒸汽进入汽轮机中做功。该系统中集热油回路和动力蒸汽回路分离开来，经过一系列换热器来交换热量。当太阳能供应不足时，利用一个辅助加热器将油回路中的导热油加热，从而实现系统的稳定连续运行。

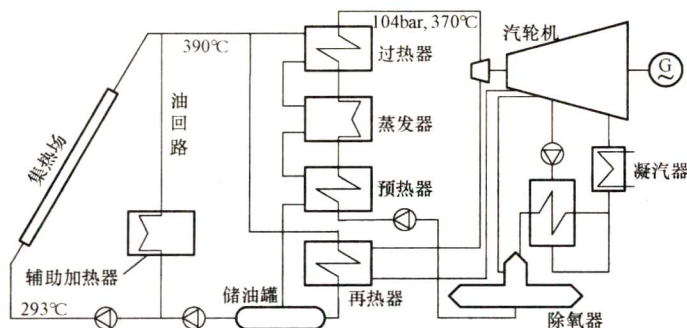


图 2.1 槽式太阳能热发电系统示意图

槽式太阳能热发电系统具有三种工作模式，分别称为直通模式、注射模式和循环模式。

(1) 直通模式中的水经过预热、蒸发、过热后直接推动汽轮机发电。该模式最简单、投资较少，但控制复杂。

(2) 注射模式中水分别从集热管不同的地方注入。该模式正常运行需要必要的测试系统，由于系统的复杂性和系统投资较大，已经不具有竞争力。

(3) 循环模式是目前最有竞争力的方式，在集热管路的蒸发段的末端安装一个水汽分离装置，注入到蒸发段的水量大于系统可以蒸发的水量，过量的水就通过分离器被循环泵送到集热环路的进水入口段，而蒸汽经过水汽分离器进入到集热管的过热段。这种模式具有高度可控性，但是有循环管路的存在及水汽分离装置等增加了系统的投资。

太阳能集热器只能收集太阳的直射光线，而对散射部分无能为力，因此集热器的聚光系统必须使光轴指向太阳，即跟踪太阳。要使槽式太阳能热发电系统正常运行、提高系统效率，需采用自动跟踪装置，使得槽式聚光器时刻对准太阳，以保证从源头上最大限度地吸收太阳能非常关键。据统计，采用跟踪比非采用跟踪所获得的能量要高出 37.7% 。由于太阳时刻处于运动状态，再加上自然天气随时变化，因此全天候、全自动太阳跟踪装置的设计就成了一个难点。

太阳能热发电跟踪系统按照入射光线和主光轴位置关系可以划分为两轴跟踪系统和单轴跟踪系统。

两轴跟踪根据太阳高度角和赤纬角的变化情况而设计，它要求入射光和主光轴方向一致。两轴跟踪具有最理想的光学性能，是最好的跟踪方式，能够使入射光与主光轴方向一

致，获得最多的太阳能；但设备结构复杂，制造和维修成本高。

单轴跟踪只要求入射光线位于含有主光轴和焦线的平面就行，结构简单，但跟踪准确度不高。一般在阳光充裕的地方优先考虑单轴跟踪。

跟踪太阳的控制检测方式大致可分为两类：光电跟踪和根据视日运动轨迹跟踪。光电跟踪的优点是灵敏度高，结构设计较为方便；缺点是受到天气的影响很大。根据视日运动轨迹跟踪则是通过数学上对太阳轨迹的预测，从理论上精确地计算太阳运行轨迹，按一定的程序驱动运行设备跟踪太阳；缺点是有累积误差。根据视日运动轨迹跟踪和传感器联合控制则是集中了二者的优点，程序计算聚光镜位置和太阳轨迹，再利用传感器进行校正，以避免累积误差。现在这种联合控制方式越来越多地被采用。

槽式太阳能热发电系统具有规模大、寿命长、成本低等特点，非常适合商业并网发电。

二、应用情况

美国鲁兹（LUZ）公司是槽式太阳能热发电技术应用的先行者，1985～1991年间，LUZ公司在美国南加州先后建成9座槽式太阳能热发电站（Solar Energy Generating Systems, SEGS），总装机容量353.8MW，是世界上规模最大、成效最高的太阳能热发电工程。其中最为典型的是80MW装机容量的SEGSⅧ电站，该电站的槽式抛物面反射镜为东西向放置，采用单轴跟踪技术。集热器为性能优越的LS-3型集热器。LS-3型集热器使用的是真空管环形接收器，直径70mm的不锈钢管装在同轴直径为115mm圆柱形玻璃套内，玻璃管上涂覆双层减反射膜，阳光透过率为0.965，玻璃管内保持真空以减少热损失，不锈钢管表面采用磁控溅射涂覆高温选择性吸收涂层，其可见光吸收比达0.966，红外发射比为0.19，不锈钢管和玻璃套管间采用可阀封接；集热器工作介质为导热油，工作温度为391℃。整个电站共使用了900个LS-3型太阳集热器。抛物面反射镜的开口面积达545m²，使用了224块扇形玻璃镜片，镜片背面镀银，每片镜片由4个圆形托盘托附在支架上，支架上装有太阳辐射传感器，经液压传动机构驱动支架跟踪太阳，如遇恶劣天气支架自动翻转、镜面开口向下，使镜面和接收器得到保护。SEGSⅧ电站的峰值太阳能热电转换效率为24%，循环效率为38.4%，峰值太阳能热电转换效率为24%，年平均太阳能热电转换效率为4%，初始投资为2560美元/kW，发电的成本为8美分/kW。

LUZ公司在已经建成9座槽式太阳能热发电站的基础上，对系统中的组件不断进行技术改进，在欧洲的西班牙热发电研发中心PSA进行试验。系统采用更先进的聚光器，其结构形式由轴式单元发展为衍架式单元（Eurotrough），如图2.2所示；聚光器单列长度由100m增长为150m，这样一套驱动机构可以带动更长的聚光器阵列（图2.3所示为SEGS电站采用的衍架式聚光器阵列）；此外，在聚光镜材料、玻璃厚度等方面不断优化，以最大限度降低整机重量；同时采用极轴跟踪技术，充分考虑方位角和高度角的影响，聚光集热器阵列由原来的南北向水平放置改为



图2.2 衍架式单元（Eurotrough）聚光器阵列

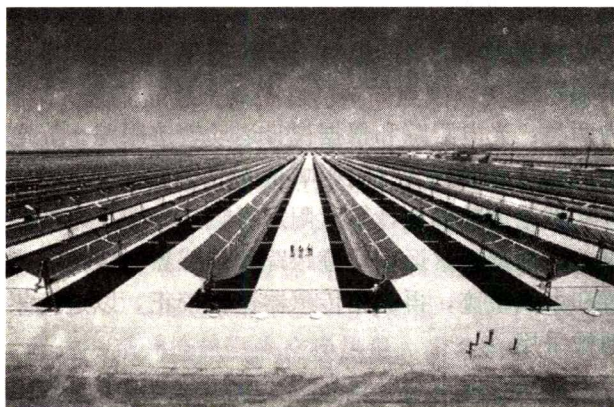


图 2.3 SEGS 电站采用的衍架式聚光器阵列

南北向的倾斜轴（倾斜角度与纬度有关），从而更有效地接收太阳辐射能。系统还采用高性能的高温真空管接收器，由以色列 Solel 公司（前身为 LUZ 公司）提供。德国 Schott 公司对高温真空管作了改进：一是为防止两端温度过高影响封接质量，在局部增加了太阳辐射反射圈；二是力求最大限度减少遮光面积，使真空管有效利用长度大于 96%；三是调整相关玻璃材料配方，使可阀与玻璃管封接得更好。此次试验还

采用 DSG 技术，即直接用水作为介质的新型槽式发电技术，利用这一技术可以取代大量的换热器，进而达到简化系统、提高效率、降低成本的目的，目前过热蒸汽的工作参数已经达到 400°C 、 10MPa 。

LUZ 公司最后因税收问题而破产倒闭。LUZ 公司的主席辞职后进入一家名为 Bright-source 的太阳能公司，该公司目前签了 2 个大项目，即从现在到 2017 年建立 14 座太阳能电站，总装机容量达 2600MW 。新修建的太阳能热电站将与 SEGS 不同，SEGS 用长条形的槽子接受太阳能，而新建电站将采用数以万计的镜面收集太阳能并将之反射聚焦于更便宜、更高效的中央集热塔上。

2.1.3 塔式太阳能热发电系统

一、系统原理及构成

塔式太阳能热发电系统是一种中央式聚光的太阳能热发电系统，主要由布置在太阳能场上的定日镜阵列、中心接受器、控制中心和发电系统组成。该系统由定日镜阵列将入射太阳光反射和汇聚于设置在高塔上的中心接受器的吸收表面，产生高温高压蒸汽或气体（ $550\sim 700^{\circ}\text{C}$ ），驱动发电系统发电。

塔式太阳能热发电系统包括聚光子系统、集热子系统、发电子系统、蓄热子系统和辅助能源子系统。

塔式太阳能热发电系统具有规模大、热传递路程短、热损耗少、聚光比较高和温度较高等特点，极适合于大规模并网发电，是近年来建设的获得大功率发电能力的一种太阳能热发电系统，如图 2.4 所示。

塔式太阳能热发电系统的聚光子系统包括定日镜群和跟踪装置，采用双轴跟踪，以确保每台定日镜的反射光线进入集热系统的接收器内；定日镜微弧度的镜面保证太阳光聚焦到塔顶的接收器。塔式太阳能热发电系统中采用的聚光器聚集的光斑应始终落在接收器的范围内，但它并不正对太阳，其法线与太阳光成一个有规律的夹角。聚光器自动跟踪系统除与当地的经纬度和时间密切相关外，还与定日镜在镜场中的位置有关。由于塔式电站具有庞大的定日镜场，每台定日镜都需单独控制跟踪太阳，所以在太阳能热发电站中塔式电站的定日镜控制系统最为复杂。定日镜的控制一般采用计算聚光镜位置和太阳轨迹的程序控制，存在积累误差，需要定期校正。