

# 太阳能热发电技术与系统

杨敏林<sup>1</sup>, 杨晓西<sup>2</sup>, 林汝谋<sup>3</sup>, 袁建丽<sup>4</sup>

(1. 华南理工大学强化传热与过程节能教育部重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 东莞理工学院, 广东 东莞 523808;  
3. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 4 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

**摘 要:**我国对大规模太阳能热发电技术的研究仍处于起步阶段, 而国外则已进行了多年的研究。本文介绍了各类太阳能热发电技术及其系统, 总结了国内外一些学者的研究成果, 比较了各类太阳能热发电技术的优缺点。塔式和槽式技术最适用于大规模太阳能热发电系统。碟式太阳能热发电装置功率较小, 适用于分布式能源系统。其它太阳能热发电技术仍处在试验研究阶段。今后的研究重点主要是塔式太阳能热发电系统的系统集成技术和槽式真空吸热管技术。

**关键词:** 太阳能; 太阳能热力发电; 太阳能集热器

中图分类号: TM615

文献标识码: A

## 引 言

太阳能热发电是指将太阳光聚集并将其转化为工作流体的高温热能, 然后通过常规的热机或其它发电技术将其转换成电能的技术。经过 30 多年的研究和实际运行经验积累, 目前太阳能热发电的技术取得了重大进展和突破, 电站关键设备的成本也有较大幅度的下降, 美国 Solar Two 电站的发电成本为 0.11 欧元/kWh, 美国 SEGS 的发电成本为 0.091 欧元/kWh, 西班牙 PS10 为

0.09 欧元/kWh。近年来, 由于环境与资源的压力, 给可再生能源的发展带来了全球性的繁荣, 具有低成本潜力的太阳能热发电技术也进入了快速发展时期<sup>1~4</sup>。

太阳能供应不稳定、不连续, 而热发电系统需要稳定运行。为了解决这一矛盾, 目前主要有两种解决方案: 一种为系统中配置蓄能系统, 将收集到的太阳能存储起来, 以便于为电站在夜间或者多云天气时提供热能, 保证连续发电; 另外一种方案为将太阳能与其它能源组成互补发电系统, 当太阳能供应不足的情况下, 由其它能源供应能源, 这样可以保证系统的连续稳定运行。

按照太阳能集热方式的不同, 太阳能热发电系统主要有两大类, 即聚焦式和非聚焦式。其中聚焦式系统主要有槽式、碟式和塔式 3 种, 非聚焦式系统主要有太阳能热气流发电和太阳能池热发电 2 种。

## 1 塔式太阳能热发电技术

塔式太阳能热发电主要由定日镜系统、吸热与热能传递系统(热流体系统)、发电系统 3 部分

组成。定日镜系统实现对太阳的实时跟踪, 并将太阳光反射到吸热器。位于高塔上的吸热器吸收由定日镜系统反射来的高热流密度辐射能, 并将其转化为工作流体的高温热能。高温工作流体通过管道传递到位于地面的蒸汽发生器, 产生高压过热蒸汽, 推动常规汽轮机发电。由于使用了高塔聚焦, 典型的塔式太阳能热发电系统可以实现 200~1 000 以上的聚焦比(concentration factor), 投射到塔顶吸热器的平均热流密度可达 300~1 000 kW/m<sup>2</sup>, 工作温度可高达 1 000 °C 以上。电站规模可达 200 MW 以上。

塔式太阳能热发电系统主要有熔盐系统、空气系统和水/蒸汽系统。无论采用哪种工质, 系统的蓄热至关重要。由于太阳能的间隙性, 必须由蓄热器提供足够的热能来补充乌云遮挡及夜晚时太阳能的不足, 否则发电系统将无法正常工作。

### 1.1 塔式熔盐系统

熔盐吸热、传热系统一般以熔融硝酸盐为工作介质, 系统低温侧一般为 290 °C, 高温侧为 565 °C。低温熔盐通过熔盐泵从低温熔盐储罐被送至塔顶的熔盐吸热

收稿日期: 2007-11-21; 修订日期: 2007-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776020); 东莞市科技计划基金资助项目(2007-01-22)

作者简介: 杨敏林(1963-)男, 内蒙古喀喇沁旗人, 华南理工大学博士研究生, 东莞理工学院副教授

器,吸热器在平均热流密度约  $430 \text{ kW/m}^2$  的聚焦辐射照射下将热量传递给流经吸热器的熔盐。熔盐吸热后温度升高至约  $565 \text{ }^\circ\text{C}$ ,再通过管道送至位于地面的高温熔盐罐。来自高温熔盐罐的熔盐被输送至蒸汽发生器,产生高温过热蒸汽,推动传统的汽轮机做功发电。

以熔盐为吸热、传热介质,主要有以下几个优点:(1)除克服流动阻力外,系统无压运行,安全性提高;(2)传热工质在整个吸热、传热循环中无相变,且熔盐热容大,吸热器可承受较高的热流密度,从而使吸热器可做得更紧凑,减少制造成本,降低热损;(3)熔盐本身是很好的蓄热材料,系统传热、蓄热可共用同一工质,使系统极大的简化<sup>[3]</sup>。

但是,熔盐介质也有其缺点。一是熔盐的高温分解和腐蚀问题,相关材料必须耐高温和耐腐蚀,使系统成本增加、可靠性降低;二是熔盐的低温凝固问题,在夜间停机时高、低温熔盐储罐都必须保温,以防止熔盐凝固,清晨开机时也必须对全部管道进行预热,这些都将增加系统的伴生电耗。

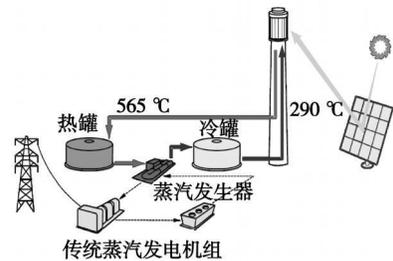


图1 Solar two 塔式熔盐电站示意图<sup>[2]</sup>

典型的塔式熔盐系统是美国 Solar Two 试验电站,其系统如图1所示。Solar Two 是在关闭了的 Solar One 电站上改建而成的。

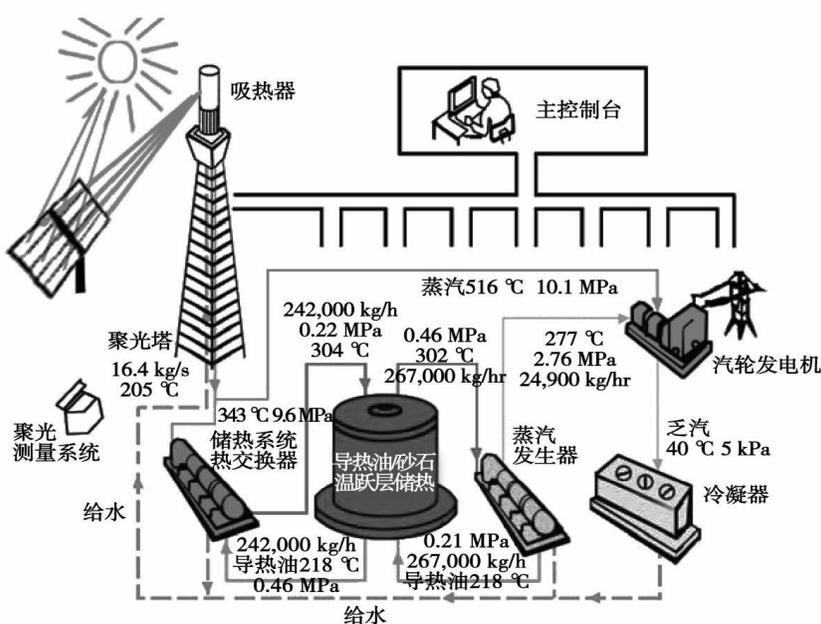


图2 Solar One 试验电站示意图<sup>[7]</sup>

该电站于1996年2月28日投入运行,成功完成各项试验任务后于1999年4月8日关闭。Solar Two 的试验研究证实了熔盐技术的可行性;进一步降低了塔式热发电的技术和经济风险;促进了塔式热发电技术的商业化<sup>[3]</sup>。

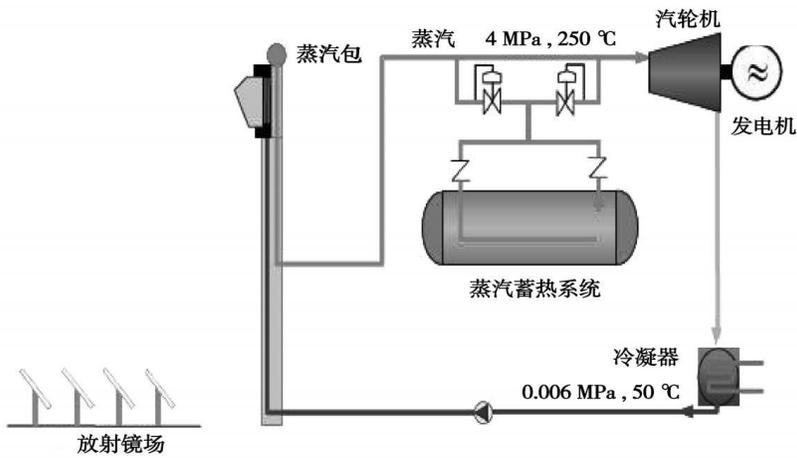
### 1.2 塔式水/蒸汽系统

水/蒸汽系统以水为传热介质。在这类系统中,过冷水经泵增压后被送到塔顶吸热器,在吸热器中蒸发并过热后被送至地面,驱动汽轮机做功发电。在这一系统中,吸热器与反射镜场聚焦光斑的技术最为关键。置于塔顶的吸热器吸收聚焦太阳辐射热后产生高压蒸汽,由于蒸汽热容低,容易发生传热恶化,因此对于吸热器的性能要求比较高,能够承受较大的能流密度和频繁的热冲击。

典型的塔式水/蒸汽太阳能热发电试验电站有美国的 Solar One,西班牙的 CESA-1 和 PS10。Solar One 和 CESA-1 均建造于1982年,PS10 则于2007年3月投

入商业运行。

图2为美国 Solar one 试验电站示意图。Solar one 吸热器是一个外圆柱式吸热器,由24块管板组成,每块管板有70根吸热管。24块管板中,6块板起预热过冷水的作用,其余18块板产生过热蒸汽。整个吸热器实际上就是一个将水直接加热到过热蒸汽的太阳能锅炉。吸热器出口的蒸汽参数为  $516 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $10.1 \text{ MPa}$ ,直接用于驱动汽轮机。过热蒸汽也可以送入一个油-沙石蓄热系统进行能量的存储。Solar one 从1982年到1988年运行了6年。尽管 Solar one 电站成功地证明了塔式发电技术的可行性,但是蓄热系统不能提供足够的蒸汽用于汽轮机发电,因为蓄热系统仅仅在  $220 \sim 305 \text{ }^\circ\text{C}$  运行,而吸热器的出口蒸汽温度为  $516 \text{ }^\circ\text{C}$ 。电站的最主要的运行模式是将太阳能接收器和汽轮机耦合起来,蓄热系统设置为旁路,系统所产生的多余蒸汽进入蓄热系统实现能量存储,蓄热系统只产生辅助蒸汽,用于系

图3 PS10水/蒸汽10 MW太阳能电站示意图<sup>[10]</sup>

统的启停和离线运行时保温<sup>[6-7]</sup>。

与Solar one同期建设的CE-SA-1试验电站设计容量为1.2 MW,采用腔式吸热器,吸热器出口过热蒸汽参数为525 °C,10.8 MPa。系统采用一对高低温熔融盐储罐蓄热,额定蓄热量为16 MWh和给水发生热交换后能产生330 °C,1.6 MPa的过热蒸汽,可以使电站在840 kW发电功率下运行3.5 h<sup>[7]</sup>。

早期的塔式水/蒸汽试验电站为了获得较高的发电效率,吸热器出口蒸汽参数都较高,相应技术风险也较大。为了降低电站的技术风险,作为商业运行的PS10电站选择了比较保守的吸热器技术,其出口蒸汽温度为250 °C,压力为4 MPa。其电站示意图如图3所示。PS10由西班牙Solucar公司建造,额定发电功率10 MW。该电站采用了4个蒸汽储罐蓄热,蓄热系统可以75%额定功率驱动电站运行1 h<sup>[8-10]</sup>。

由国家发改委、科技部、中国科学院及北京市政府共同支持的863重点项目,太阳能热发电1 MW塔式太阳能热发电技术及系统示范项目,也采用了水/蒸汽方

案<sup>[11]</sup>,目前该项目正在紧张进行中。

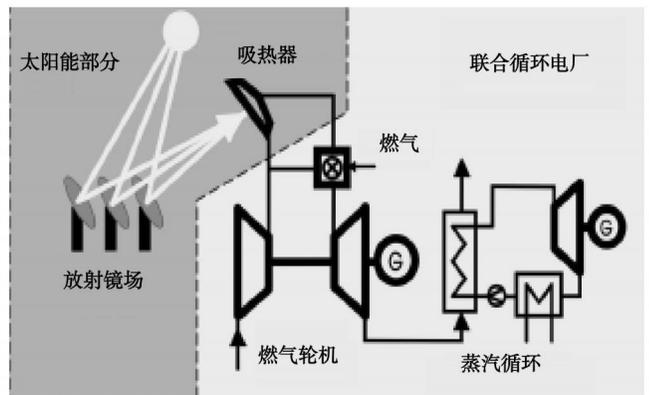
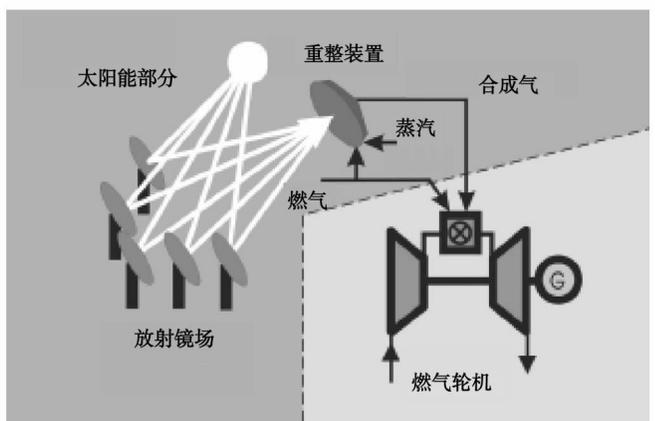
### 1.3 塔式空气系统

以空气作为塔式太阳能热发

电系统的吸热与传热介质有以下优点:(1)从大气来,到大气去;取之不尽,用之不绝,不污染环境;(2)没有因相变带来的麻烦;(3)允许很高的工作温度;(4)易于运行和维护,启动快,无须附加的保温和冷启动加热系统<sup>[5]</sup>。基于以上优点,很多早期的塔式太阳能热发电站采用了空气作为吸热与传热介质。空气

系统的应用也很灵活,高温空气既可与水/蒸汽换热驱动汽轮机发电,也可直接驱动燃气轮机发电;既可用于燃气轮机的空气预热,也可用于燃料重整等等,如图4和图5所示。

空气系统一般采用容积式吸热器。容积式吸热器一般以蜂窝状或密织网状的多孔结构材料为吸热体,其工作原理如下:聚焦太阳能将多孔结构的吸热体加热;空气被强制通过吸热器,与多孔结构对流换热后被加热至高温。用于容积式吸热器的多孔材料主要有蜂窝陶瓷,发泡陶瓷,金属丝编织的多层密网等。良好的容积式吸热器应具有多孔性,可使太

图4 太阳能空气预热系统<sup>[11]</sup>图5 太阳能燃料重整发电系统<sup>[11]</sup>

阳辐射深入多孔结构内部,产生所谓的容积效应(volumetric effect),即多孔结构无辐射侧的温度低于吸热介质出口温度。此外,多孔材料的耐热性能非常关键,要能承受高能流密度太阳辐射和极高的温度。

典型的金属密网吸热器是西班牙 CIEMAT 公司的 TSA 吸热器,其吸热器功率为 2.7 MW,直径 3.4 m,所吸热量的 90% 集中在直径为 2.8 m 的圆内,正常工作时出口空气温度 680 °C,进口空气温度 110 °C,回流空气比可达 49%。在额定工作温度下可长期运行。研究表明,由于使用了金属作为吸热体,金属密网吸热器的工作温度受到限制,最高温度不超过 800 °C<sup>[12]</sup>。

陶瓷材料具有更高的耐热性能,因此近年来陶瓷材料吸热体成为容积式空气吸热器研究的重点。大量测试证明,容积式吸热器可产生 1 000 °C 以上的高温空气,平均热流密度达 400 kW/m<sup>2</sup>,峰值流密度达 1 000 kW/m<sup>2</sup><sup>[12~13]</sup>。陶瓷材料吸热体的另一个优点是易于成型加工,实现吸热单元的模块化。模块化的吸热单元可以很容易地组合成各种所需吸热器。1996 年,由德国的 DLR、西班牙的 CIEMAT 等联合实施的 REFOS 计划,在西班牙的 PSA 太阳能试验基地测试了由 3 个模块组成的吸热器。每个 REFOS 吸热器模块的设计工作压力为 1.5 MPa,出口空气温度 800 °C,单个模块的吸热功率为 350 kW。测试研究表明,REFOS 吸热器模块的效率可达 80%<sup>[14~15]</sup>。

以空气为传热介质的太阳能热发电系统具有显著的优点,但大规模试验研究(3 MW 以上)至今未见实施。其主要原因是空气

的热容低,系统结构大,技术风险相应增大。原计划采用空气系统的 PS10 就是因为担心技术风险而改用了现在的水/蒸汽系统。

## 2 槽式太阳能热发电

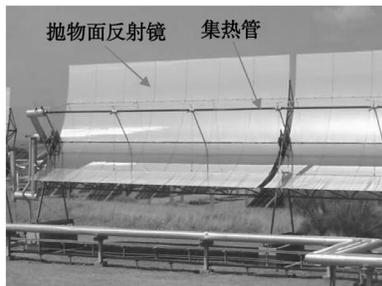


图 6 槽式聚光集热系统

槽式太阳能热发电系统的聚光反射镜从几何上看是将抛物线平移而形成的槽式抛物面,它将太阳光聚焦在一条线上(如图 6 所示)。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。因此槽式聚焦方式亦常称为线聚焦。槽式抛物面一般依其焦线按正南北方向摆放,因此其定日跟踪只需一维跟踪。槽式的聚光比为 10~100 之间,一般在 50 左右,温度可达 400 °C 左右。由于槽式的聚光比小,为维持高温时的运行效率,必须使用真空管作为吸热器件。高温真空管的制造技术要求高,难度大。目前,只有德国 SCHOTT 等少数几家公司生产的真空管可基本满足槽式聚光集热的要求。

与塔式太阳能热发电系统相比,槽式太

阳能热发电系统除聚光和集热装置有所不同外,两者在系统构成和工作原理等方面,基本上都是一样的,都是通过汽轮机将热能转化为电能。由于槽式系统结构简单,温度和压力都不高,技术风险较低,因此较早实现了商业化的大规模应用。最著名的商业化槽式电站位于美国南加州 Mojave 沙漠地区的 SEGS (Solar Electric Generating Systems) 系列电站。

### 2.1 商业化的 SEGS 系列电站

1983 年,美国的 Luz 公司与南爱迪生电力公司签署了长达 30 年的购电协议,之后两年,Luz 公司先后投产了 13.8 MW 的 SEGS I 和 30 MW 的 SEGS II,并成功上网卖电。至 1991 年,Luz 公司共建成了 9 座槽式电站,电站规模由 SEGS I 的 13.8 MW 发展到 SEGS IX 的 80 MW,系列电站总装机容量达 353.8 MW。由于技术的不断成熟及规模效应,建站成本也由最初的 4 000 美元/kW 降低到 3 000 美元/kW<sup>[16~17]</sup>。

图 7 为 SEGS I 电站的系统示意图。SEGS I 系统有 82 960 m<sup>2</sup> 的抛物槽集热开口面积,利用聚集的太阳能来加热一种碳氢基导热油,加热后的导热流体流经

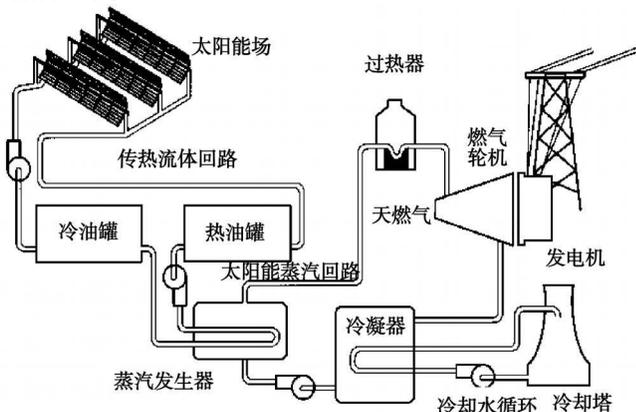


图 7 SEGS I 电站的系统示意图<sup>[18]</sup>

一个换热器, 产生 3.53 MPa, 307 °C 的蒸汽, 进入过热器升温。过热器由天然气加热, 将蒸汽温度加热到 415 °C 后进入常规汽轮机中膨胀做功。系统中有 2 个 3 220 m<sup>3</sup> 的热、冷导热油蓄热罐, 可使系统在满负荷下运行约 3 h。

在总结 SEGS I 电站建设经验的基础上, SEGS II 在设计上作了两点改进, 一是在系统中增加了一个天然气补燃锅炉, 与太阳能集热系统并联布置。汽轮机所需要的蒸汽既可以由太阳能集热场提供, 也可以由天然气补燃锅炉供应, 形成混合动力系统, 实现全天候运行; 二是在太阳能集热系统中增加了一个太阳能过热器, 使得系统在单纯太阳能利用模式下仅仅依靠太阳能就可以单独运行。SEGS II 的设计理念在后面的 7 个电站均得以继承和应用。

真空集热管方面, 运用于 SEGS I 的 LS-1 集热管出口温度为 307 °C, SEGS III 至 SEGS V 的 LS-2 集热管出口温度为 349 °C。而在之后的电站中, 由于采

用了陶瓷选择性膜, 集热管出口温度可达 391 °C。不过, 这些集热管在实际运行中都出现了真空度降低, 吸收管表面的选择性涂层性能下降的问题, 导致集热管性能下降<sup>[4]</sup>。

SEGS 系列电站虽然取得了成功, 但在技术上仍存在不少缺点。由于采用导热油作为传热介质 (HTF: Heat Transfer Medium), 虽然降低了传热系统的压力, 减少了技术风险, 但也增加了系统的成本; 系统的工作温度也受导热油工作温度的限制很难超过 400 °C; 此外, 导热油与水/蒸汽的换热过程增加了系统的热损, 降低了系统效率<sup>[17]</sup>。

### 2.2 直接产生蒸汽槽式系统

采用直接产生蒸汽 (简称 DSG: Direct Steam Generating) 的槽式系统可有效地克服因导热油引起的各种技术问题。但该技术也存在很大的技术难点: 两相流问题。由于直接产生蒸汽, 位于抛物槽焦线上的集热管内的两相流动很难控制。水和蒸汽具有不同的换热特性, 在两相流区域集热

管中的温度不均匀, 同一根管子上会出现较大的温度梯度。针对两相流问题, 直接产生蒸汽的槽式集热系统一般有 3 个基本加热模式<sup>[18-19]</sup>: 一次通过模式, 如图 8(a) 所示; 注入模式, 如图 8(b) 所示; 循环模式, 如图 8(c) 所示。3 种模式各有优缺点。一次通过模式结构最简单, 但两相流较难控制; 注入模式需增加额外的管道阀门及控制系统; 循环模式增加了一个气液分离器, 系统的控制及稳定性较容易实现, 但成本最高。

1996 年, 在欧盟的支助下, 德国和西班牙合作开展了 DISS (Direct Solar Steam) 计划。该计划的目标是证明抛物槽太阳能集热器直接产生蒸汽的技术可行性, 开发一种适用于商业化应用的槽式 DSG 太阳能热发电系统。该计划在西班牙的 PSA 太阳能研究基地进行了系统试验。DISS 试验工程安装了总长 550 m 的抛物槽反射镜, 总反射面积 3 000 m<sup>2</sup>。

DISS 项目虽然证明了直接产生蒸汽技术的可行性, 但离其 550 °C、1 MPa 的技术目标还有一定距离。相应的高温高压系统部件仍有待进一步开发研究。

### 3 碟式太阳能热发电



图 9 中科院电工所研制的碟式太阳能热发电装置

碟式太阳能热发电系统一般由旋转抛物面反射镜、吸热器、跟踪装置以及热功转换装置等组成, 如图 9 所示。碟式反射镜可以是一整块抛物面, 也可由聚焦于同一点的多块反射镜组成。因此碟式聚焦方式亦常称为点聚焦。

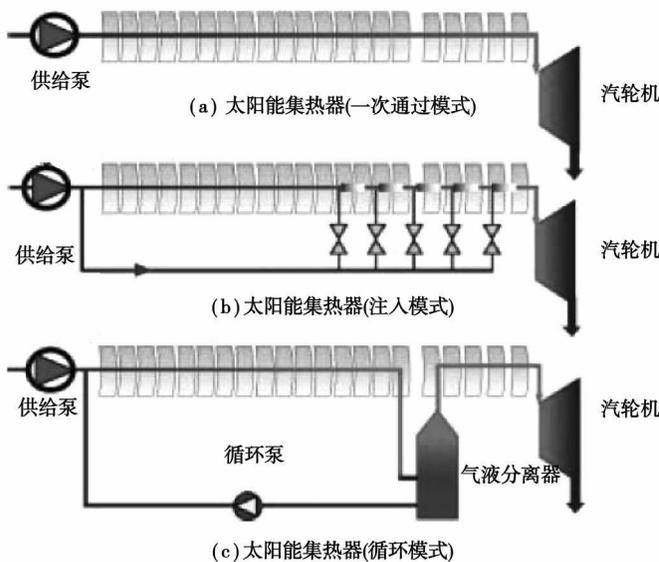


图 8 DSG 技术的 3 种基本模式<sup>[19]</sup>

其聚焦比可高达 500 ~ 1 000 之间,焦点处可产生 1 000 °C 以上的温度。整个碟式发电系统安装于一个双轴跟踪支撑装置上,实现定日跟踪,连续发电。碟式系统的吸热器一般为腔式,与斯特林发电机相连,构成一个紧凑的吸热、做功、发电装置。整个装置安装于抛物面的焦点位置,吸热器的开口对准焦点。

由于聚焦比大,工作温度高,碟式系统的发电效率高达 30%,高于塔式和槽式。但是,这类系统的单元容量较小,一般为 30 ~ 50 kW。比较适用于分布式能源系统,也可以将多个单元系统组成一簇,集中向电网供电。目前,碟式系统正处于商业化进程中,相关示范研究项目主要有美国的 SAIC 公司和 SIM 公司联合开发的 SunDish 系统和欧洲的 EuroDish 计划。

#### 4 其它太阳能热发电系统

##### 4.1 向下反射式太阳能热发电系统

近年来,一种新的太阳能热发电系统设计理念得到了广泛的关注,即所谓向下反射式系统<sup>[20]</sup>。如图 10 所示。这种系统也有一个塔,但塔顶只有一个中央反射镜(Central Mirror),吸热器设置在地面。位于地面的反射镜场(Heliostat Field)将太阳辐射聚焦到中央反射镜,中央反射镜再将其向下反射到吸热器。

这种系统采用了一种带复合抛物面聚光镜(简称 CPC: Compound Parabolic Concentrator)的熔盐吸热器,如图 11 所示。从中央反射镜反射来的聚焦太阳辐射进入 CPC 后被二次聚焦,再进入腔式吸热器。由于经过两次聚焦,

辐射热流密度大大提高,整个吸热器可制作得更紧凑。

从设计上来说,向下反射式太阳能热发电系统既保留了塔式系统聚焦比高、规模大的优点,又较好地解决了塔顶吸热器热损大,安装维护成本高等问题,是一个很有发展前景的设计方案。但中央反射镜、复合抛物面聚光

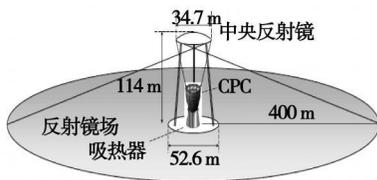


图 10 向下反射式太阳能聚集系统方案<sup>[20]</sup>

镜以及腔式熔盐吸热器等部件的相关技术和材料均有待进一步研究和开发。

##### 4.2 太阳能热气流发电

太阳能热气流发电也称为太阳烟囱发电。其工作原理是利用太阳能将集热器内的空气加热,热空气由于烟囱作用在烟囱内上升,推动风机做功发电。这种发电系统的集热器是由透明材料建造的大棚,棚顶的中央与烟囱相连,棚的四周开放。在太阳的辐照下,棚内的空气被加热上升,推动位于烟囱的风机做功;同时,环境空气被源源不断的吸入棚内,维持系统的循环。整个吸热器实际上就是一个温室,其室内外温差可达 35 °C,在烟囱内相成的上升气流速度可达 15 m/s<sup>[21~22]</sup>。

太阳能热气流发电站具有技术简单、材料便宜、易于建造和无污染等优点,且吸热器下面的土

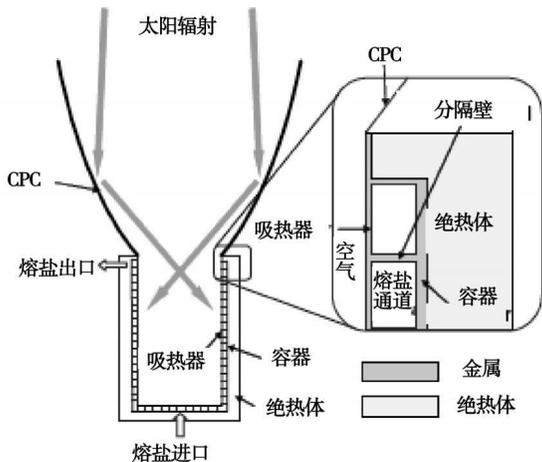


图 11 带复合抛物面聚光镜的熔盐吸热器<sup>[20]</sup>

地具有很好的蓄热性能,无需额外的蓄热系统。但该技术也存在不少缺点:发电效率低,一般不超过 1%;占地面积大,使用材料多;大容量电站需要特别高的烟囱,一个 30 MW 电站需建造 750 m 高的烟囱。

太阳能热气流发电系统仍处于研发试验阶段。图 12 为西班牙与德国合作建设的 50 kW 太阳能热气流发电试验电站。该电站位于西班牙的 Manzanares, 烟囱高度为 195 m, 烟囱直径 10 m, 集热棚直径 240 m, 边缘处棚高 2 m, 中间棚高 8 m。该电站 1982 年投入运行, 1989 年关闭, 可靠率超过 95%<sup>[21~22]</sup>。



图 12 西班牙太阳能热气流发电试验电站

##### 4.3 太阳能池热发电

太阳能池是一个盐水池,由3层不同浓度的盐水构成。上层是很薄的低浓度盐水或清水,称为上对流层,起透光和保温作用,同时可减少外界对底部盐水层的扰动;下层是饱和盐水,称为下对流层,是太阳能池的吸热、蓄热层,其最高温度可超过100℃;两者之间是非对流层,其浓度自上而下逐渐增加,起到防止上下层池水对流的作用。池的底部一般铺有衬垫及保温层,以防止池水泄漏,减少热损。

太阳能池热发电系统就是以太阳能池底的高温盐水为热源,通过热交换器来加热工质,驱动热机做功发电。在这一系统中,太阳能池是其核心装置。太阳能池结构简单、操作方便,非常适宜在盐湖资源丰富的地区应用,是一种很有发展前景的太阳能热发电模式。

此外,太阳能池在采暖、海水淡化、制盐及农业生产用热等方面也有非常广泛的应用。

## 5 太阳能热发电技术的商业化

从技术层面来看,当前太阳能热发电技术研究的重点是进一步降低成本,提高系统效率和可靠性,进一步开展较大规模的系统示范,为大规模推广应用提供技术支撑。

从政策层面来看,政府进一步加大对可再生能源开发的支助和扶持极为重要。目前,世界各国都在制定自己的可再生能源利用支助法案。例如,西班牙于2007年颁布了新的特殊领域电力生产法案RD661/2007,代替原RD436/2004法案。这一法案规定,对太阳能热发电(含化石能源辅助运行系统,但化石能源发电

量占电站年发电量总额的比例不超过12%)的政府补助标准为26.9375欧分/(kWh)<sup>[23]</sup>。PS10电站正是在这一法案的支持下顺利实现了商业发电。

## 6 结论

塔式太阳能热发电系统聚光比高,易于实现较高的工作温度,系统容量大、效率高。塔式熔盐系统易于实现蓄热,经济性好,最适用于太阳能独立发电。但熔盐熔点高,系统需要夜间保温,电站寄生电耗高。此外,高温熔盐具有腐蚀性,易挥发,系统技术难度较大。相关部件如熔盐吸热器、高温熔盐泵、阀等仍有待进一步研究。塔式水/蒸汽系统的吸热器实际上就是一个太阳能锅炉,技术难度相对较小,可靠性高。但系统蓄热性能较差,高温高压下的系统安全性仍有待提高,已实现商业化运行的PS10电站为确保系统安全,选择了250℃,4MPa较为保守的参数。由于蒸汽的热容低,为避免吸热器中蒸汽过热器的失效,系统对反射镜场的控制精度要求更高。塔式空气系统环保性能最好,结构简单,可靠性高。但系统容量低,蓄热性能较差,难于实现独立的太阳能发电系统。大功率空气吸热器在技术上仍存在较大难度。塔式空气系统的主要应用模式是与化石能源系统结合,构成混合系统,可极大的提高太阳能的利用效率。

槽式太阳能热发电系统结构简单,技术较为成熟,可实现较大规模的热发电系统。但聚光比小,系统工作温度较低。其核心部件真空集热管在运行中易出现真空度降低,吸收管表面选择性涂层性能下降等问题。目前,研

发可靠、耐久、高效的真空吸热管是推广槽式发电技术的关键。

碟式太阳能热发电系统聚光比大,工作温度高,系统效率高;结构紧凑,安装方便,非常适用于分布式能源系统,具有很好的应用前景。但其核心部件斯特林发动机技术难度较大,在我国仍处于研发阶段。

太阳能热气流发电,太阳能池热发电及向下反射式太阳能热发电等在技术上各有优势,均处于试验研究阶段。

我国是较早开展太阳能热利用研究及应用的,在太阳能热发电、太阳能热水、太阳能建筑、太阳能制冷与空调以及太阳能海水淡化等领域,都已有较深入的研究和广泛的应用。相信在政府的引导和支持下,我国的太阳能热发电技术与应用一定会取得快速的发展。

## 参考文献:

- [1] MANUEL ROMERO, REINER BUCK, JAMES E PACHECO. An update on solar central receiver systems, projects and technologies [J]. ASME J Sol Energy Eng, 2002, 124: 98-108.
- [2] JAMES E PACHECO. Final test and evaluation results from the solar two project [R]. SAND2002-0120 Livemore, CA: Sandia National Laboratories, 2002.
- [3] KOLB GREGORY. Solar power tower [R]. SAND: 9998-915, Livemore, CA: Sandia National Laboratories, 1999.
- [4] JOACHIM BENEMANN. Status report on solar trough power plants - experience, prospects and recommendations to overcome market barriers of parabolic trough collector power plant technology [M]. Germany: Pilkington Solar International GmbH, 1996.
- [5] YANG MINLIN, YANG XIAOXI, DING JING, et al. Performance comparisons of solar central receivers and working fluids for solar power tower systems (CD-ROM) // Proceedings of the 3rd Interna-

tional Green Energy Conference [ C ] .  
Vasteras Sweden; Swedish Energy Agency, 2007; 362—369.

[ 6 ] KOLB GREGORY J, AIPERT DANIEL J, LOPEZ CHARLES W. Lopez. Insights from the operation of solar one and their implications for future central receiver plants[ J ] .Solar Energy, 1991, 47(1): 39—47.

[ 7 ] BAKER A F, FAASL S E, RADOSEVICH L G. U.S. — Spain evaluation of the solar one and CESA—1 receiver and storage systems[ R ] . SAND88—8262 UC—235, Livermore, CA; Sandia National Laboratories, 1988.

[ 8 ] OSUNA R, FERNANDEZ V, ROMERO M, et al. 2000PS10: A 10 MW solar tower power plant for southern Spain // Proc 10th Solar Paces Int[ C ] . Symposium 'Solar Thermal 2000', Sydney, Australia, 2000. 13—18.

[ 9 ] MICHAEL GEYER, RICHTER C, ROMERO M, et al. Solar power and chemical energy systems[ R ] . Solar Paces Annual Report 2003. Köln Germany; The International Energy Agency, 2003.

[ 10 ] OSUNA R, FERNANDEZ V, ROMERO S. PS10: A 11.0 MWe Solar tower power plant with saturated steam receiver (CD—ROM) // 12th Solar Paces International Symposium[ C ] . Oaxaca Mexico, 2004.

[ 11 ] WANG ZHIFENG, YAO ZHIHAO, DONG JUN, et al. The design of a 1 MW solar thermal tower plant in Beijing China // Proceedings of ISES Solar World Congress 2007[ C ] . Beijing Solar Energy and Human Settlement, 2007. 1729—1732.

[ 12 ] HOFFSCHIMDT B, FERNANDE V, KONSTANDOPOULOS A G. Development of ceramic volumetric receiver technology // Proc of 5th Cologne Solar Symp, Forschungsbericht DLR—Cologne [ C ] . Germany, 2001; 51—61.

[ 13 ] BECKER M, CORDES S, BOHMER M. The development of open volumetric receivers // Proc of 6th Int. Symp on Solar Thermal Concentrating Tech. CIEMAT, ed Madrid[ C ] . Spain, 1992, II; 945—952.

[ 14 ] Plataforma Solar de Almería (PSA). A dependency of the centro de Investigaciones Energéticas medio ambientales y Tecnológicas (CIEMAT)[ R ] . Plataforma Solar de Almería (PSA) Annual report, 2004.

[ 15 ] BUCK R, LUPFERT E, TELLEZ F. Receiver for solar—hybrid gas turbine and CC Systems REFOS // Proc 10th Solar Paces Int. Symp Solar Thermal 2000[ C ] . Sydney, Australia; 2000; 95—100.

[ 16 ] HEINMUT K, RAINER K, JOACHIM N, et al. Solar thermal power plants for solar countries — technology, Economics and market potential [ J ] . Applied Energy, 1995, 52; 165—183.

[ 17 ] GREGORY J KOLB. Evaluation of power production from the solar electric generating systems at Kramer junction; 1988 to 1993[ R ] . SAND 94—2909C, Albuquerque, New Mexico; Sandia National Laboratories, 1994.

[ 18 ] EDUARDO ZARZAL, LORETO VALENZUELA, JAVIER LEÓN, et al. The DISS Project; direct steam generation in parabolic trough systems operation and maintenance experience[ J ] . Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124; 126—133.

[ 19 ] EDUARDO ZARZA, M ESTHER ROJAS, LOURDES GONZÁLEZ, et al. INDITEP; the first pre—commercial DSG solar power plant [ J ] . Solar Energy, 2006, 80(10); 1270—1276.

[ 20 ] HIROSHI HASUIKE. Study on design of molten salt solar receivers for beam—down solar concentrator[ J ] . Solar Energy, 2006, 80(10); 1255—1262.

[ 21 ] HAAF W, FRIEDRICH K, MAYR G, et al. Solar chimneys, part I; principle and construction of the pilot plant in Manzanares [ J ] . International Journal of Solar Energy, 1983, 2(1); 3—20.

[ 22 ] HAAF W. Solar chimneys, part II; preliminary test results from the Manzanares pilot plant[ J ] . International Journal of Solar Energy, 1984, 3(2); 141—161.

[ 23 ] Royal Decree of Spain; Regulating the Production of Electricity in the Special Regime[ R ] . Royal Decree 661, 2007.

(编辑 何静芳)

联合循环电站

## 1200 MW 联合循环电站投入运行

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2007年12月号报道,由华能电力国际公司和上海Shenergy集团共同拥有的1200 MW联合循环电站已于2006年7月30日正式投入商业运行。

该联合循环由三个400 MW F级单轴动力单元组成,输出功率为1200 MW,净效率高达58%。每个动力单元基于一台烧天然气的260 MW Siemens SGT5—4000F燃气轮机。第一台机组完全由Siemens制造和装配,然后发运到中国。第二台机组部分由上海电力集团在中国装配。第三台机组完全由上海电力集团利用全部由Siemens供应的部件进行装配。

每台燃气轮机驱动一台由Siemens设计并由上海电力集团在中国制造的氢冷和水冷发电机。140 MW汽轮机也是由Siemens设计并由上海电力集团制造。该汽轮机连接到发电机的另一侧,以便形成以3000 r/min旋转的单轴动力单元。

燃气轮机排气被引到一台卧式三压再热式余热锅炉。该锅炉由Alston设计并由上海锅炉厂生产。

该联合循环电站被设计成供上海220 kV电网用的调峰机组。估计它每年将运行3500 h。

(吉桂明 供谢)

太阳能热发电技术与系统= **Solar Energy-based Thermal Power Generation Technologies and their Systems** [刊, 汉] / YANG Min-lin (Education Ministry Key Laboratory on Intensified Heat Transfer and Process Energy Conservation, South China University of Technology, Guangzhou, China, Post Code: 510640), YANG Xiao-xi (Dongguan University of Technology, Dongguan, China, Post Code: 523808), LIN Ru-mou (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), YUAN Jian-li (North China Electric Power Science Research Institute Co. Ltd., Beijing, China, Post Code: 100045) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 221 ~ 228

The research on large-scale solar energy-based thermal power generation technologies in China is still in its infancy but in foreign countries it has been going on for many years. The authors have described the technologies in question and their systems, summarizing the research achievements of some Chinese and foreign academics and comparing their advantages and disadvantages. The tower and trough type technologies are most suitable for large-scale solar energy thermal systems. Due to its relatively small power output, the dish type is applicable for distributed energy source systems. Other systems are still in their experimental and research stage. Among the above, the integrated technology of the tower type and the vacuum heat absorption tube technology of the trough type will be the focus for future research. **Key words:** solar energy, solar energy thermal power generation, solar energy thermal collector

离心压气机凹槽导流片式机匣处理失速控制研究= **A Study of the Stall Control Involved in the Casing Treatment of a Centrifugal Compressor with Recessed Guide Vanes** [刊, 汉] / GAO Peng, CHU Wu-li, WU Yan-hui (College of Power and Energy Source, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 229 ~ 234

The authors have conducted an accurate time-variant three-dimensional numerical simulation with respect to a new type casing treatment structure that can remarkably improve the stability margin of the original compressor. A detailed comparison and analysis was performed of the flow fields in the blade tip region of a centrifugal compressor with a solid-wall casing structure and recessed guide vane type casing treatment structure. The meridian speed distribution inside the blade passages in the radial direction is also analyzed, thus revealing the diffusion stabilization mechanism of the casing treatment structure with recessed guide vanes. An analysis of the calculation results of casing treatment with recessed guide vanes of different parameters shows that the increase in the axial overlapping amount is favorable for improving the stability margin of the compressor but unfavorable for enhancing its efficiency. The decrease of the groove depth will somehow improve the stability margin of the compressor. The total pressure ratios at both the peak and the stall point, however, will be somewhat reduced. **Key words:** centrifugal compressor, recessed guide vane type of compressor casing, axial overlapping amount

燃烧室预混段燃烧/空气混合规律的数值研究= **A Numerical Study of the Fuel/air Mixing Law Specific to the Premixing Section of a Gas Turbine Combustor** [刊, 汉] / LI Yu-hong, SUN Bao-cheng, QI Hai-ying (Department of Thermal Energy and Engineering, Education Ministry Key Laboratory on Thermal Sciences and Thermal Energy Power Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(3). — 235 ~ 239

The uniform mixing of fuel and air plays a decisive role in the technology of dilute-state homogeneous-phase premixed combustion. By adopting a numerical simulation method, studied was the fuel and air mixing process under various operating conditions in a premixed section with a cylindrical jet flow. The research results show that the increase of the premixed section length, decrease of the fuel nozzle diameter as well as the reduction of gas average speed and the enhancement of gas turbulence can all improve the mixing ability of the premixing section. The unified quantitative relations of all the main parameters were obtained by a study and used to forecast the fuel and air mixing state under other conditions through extrapolation. The research results are of major reference value for the understanding of the mechanism governing the premixing process and the design of a gas turbine combustor. **Key words:** gas turbine, combustor, mixing non-uniformity, numerical simulation