DOI: 10.3724/SP.J.1224.2009.04314

槽式太阳能集热发电系统发展状况

陈 超[1], 聂志刚[1], 那小桃[2]

(1. 美盛沃利(北京)工程设计有限公司, 北京 100015;
2. 国电科学技术研究院北京分院, 北京 100081)

摘 要: 本文简要介绍了槽式太阳能集热发电系统的组成、关键技术、国外应用现状及国内研发状况。基于包括槽式太阳能系统在内的太阳能光热发电技术今后必然会在中国得到大力发展这样一个预期, 本文作者根据自身的实际工程经验对未来中国的商业化规模的槽式太阳能热发电系统的工程设计提出了自己的建议。

关键词: 可再生能源; 槽式; 太阳能集热发电

中图分类号: TK51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-4969(2009)04-0314-05

太阳能的商业化开发和利用是可再生能源领域的一个重要发展趋势，2006 年太阳能产业的平均增长速度超过 60%。欧盟、日本和美国已经把 2030 年以后能源供应安全的重点放在太阳能等可再生能源方面。国际能源署(IEA)预计，到 2040 年太阳能发电将占世界电力供应的 20%以上。聚光式太阳能热发电技术作为太阳能利用的一种重要方式，已成为国际太阳能技术发展的重要方向之一。中国《可再生能源发展“十一五”规划》中也明确提出，要在内蒙古鄂尔多斯高地沿黄河平坦荒漠、甘肃河西走廊平坦荒漠、新疆哈密地区、西藏拉萨或北京周边选择适宜地区，开展太阳能热发电试点工作。

近几十年来，经过一些国家的持续研究，目前已开发出多种形式的太阳能热发电系统，单级容量从千瓦级发展到兆瓦级,并已进入大规模商业开发和运行阶段。根据新兴能源研究咨询公司(EER)的统计，目前全球正在规划的装机容量在 150MW 以上的聚光式太阳能热发电厂超过 40 个，总的装机容量达 5.8 GW[1]。按集热器类型的不同，聚光式太阳能热发电系统可分为槽式系统，塔式系统和碟式系统三大类。通过三十多年的研究开发实践，在国际已达成共识，即太阳能热发电站，尤其槽式太阳能热电站，可能是目前最经济的太阳能发电方式，而且只有槽式太阳能热发电实现了商业化运行，是最成熟的太阳能热发电技术[2]。

1 槽式太阳能集热发电系统原理及其相关应用

如图 1 所示，基于槽式系统的太阳能热电站主要包括：槽形抛物面聚光器及其单轴或双轴跟踪系统、合成油热载体及其循环系统、油水换热系统和汽轮机发电系统。槽式太阳能热发电系统是通过抛物面槽式聚光镜面将太阳光汇聚在焦线上，在焦线上安装管状吸热器吸收聚焦后的太阳辐射能。集热器轴线与焦线平行呈南北向布置。

收稿日期: 2009–10–27; 修回日期: 2009–11–09

作者简介: 陈超(1973–), 男, 河南信阳人, 工学博士, 能源项目论证部经理, 研究方向为可再生能源利用、煤气化和先进洁净煤发电技术、发电系统的 CO_2 减排等。E-mail: chao.chen@worleyparsons.com

聂志刚(1971–), 男, 山西寿阳人, 设计部经理, 主要从事工程设计工作。

那小桃(1963–), 女, 山西太原人, 主要从事技术管理与咨询工作。

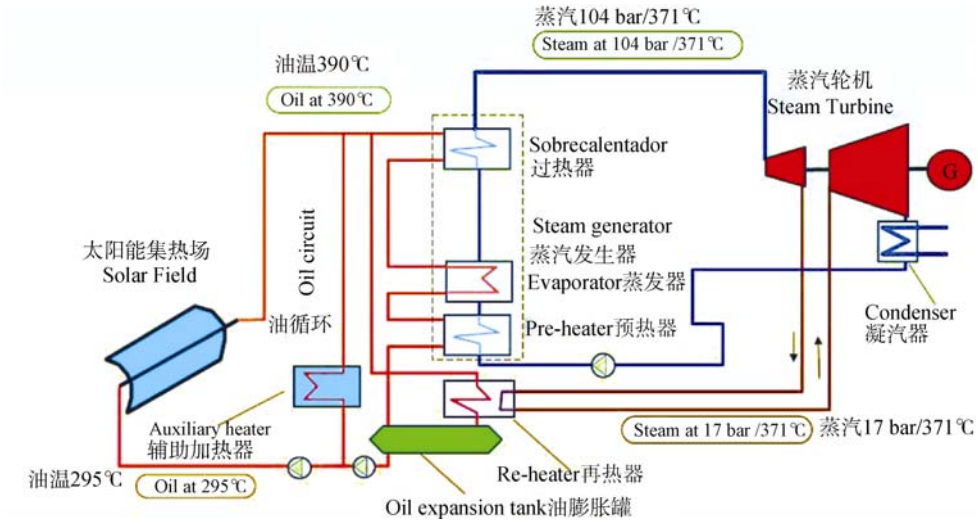

图 1　槽式太阳能热电站示意图[3]

管内的流体被加热后，流经换热器加热水产生蒸汽，借助于蒸汽动力循环来发电。为解决太阳能的间歇性和不稳定性，在太阳能热电系统中也可配置蓄热装置或者辅助锅炉，以实现电厂的持续发电或提高功率输出的平稳性。上述的槽式太阳能热发电系统存在着三个回路：传热液体回路；蒸汽回路；冷却水回路[4]。在槽式太阳能热发电系统中，汽轮机蒸汽循环发电系统是相对比较常规的技术，而聚光器、吸收器以及跟踪系统构成槽式太阳能热发电系统的太阳岛部分，是槽式太阳能热发电系统的关键性技术。

槽式太阳能热发电系统中的聚光器是具有高精度和高反射率的抛物面，用于收集太阳能并将其聚焦到吸收器上。槽式系统太阳能吸收器通常采用玻璃金属太阳能集热管。这种集热管是一种高效、耐用的太阳能吸收器，其生产制造技术主要掌握在德国和以色列等国的个别公司的手中，目前在中国还处于开发阶段。槽式太阳能热发电系统中，聚光器只能收集直射光线，必须利用跟踪装置和相应的控制系统来调节聚光器和入射光线的角度，以使系统在光照期间充分获得太阳辐射能量[5]。图 2 是 WorleyParsons 公司对设计输出功率为 250 MW 的槽式太阳能热发电厂各子系统输入/输出功率的模拟结果。这个结果表明基于目前的技术，大约 35%左右的入射太阳能在太阳岛的各个设备环节中被耗散掉了，因此，进一步提高太阳岛部分主要设备的性能是提高太阳能热发电系统效率和降低造价的一个重要努力方向。

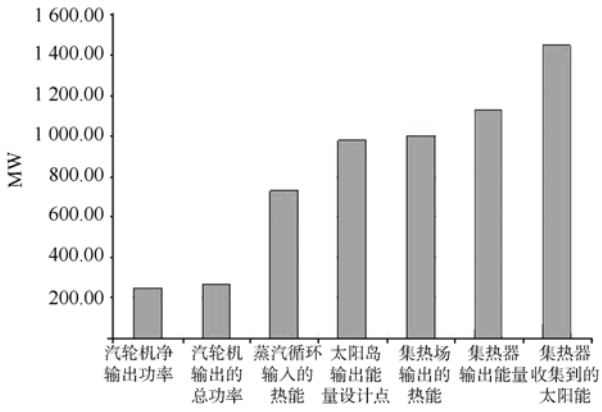

图 2　250MW CSP 电厂各子系统单位时间输出功率比较
(WorleyParsons 公司内部模拟结果)

除了可以应用于大规模发电外，以槽式集热为基础的太阳能利用系统可以很方便地产出 100—350℃的蒸汽或热水，从而广泛适用于采暖、空调、纺织、印染、造纸、橡胶、海水淡化、食品加工、木材烘干、花卉蔬菜以及其他工农业生产与生活领域。表 1 列出了一些有可能使用以槽式集热为基础的太阳能利用系统的领域[6]。

从表中可以看到，以槽式集热为基础的太阳能利用系统和工艺具有广泛的应用市场和前景，其

表 1　以槽式集热为基础的太阳能利用系统的可能应用领域

工业利用领域	用途	热能形式	温度(℃)
食品加工	冲洗	水蒸气	80–150
	浓缩	蒸汽	130–190
	干燥	蒸汽(空气)	130–240
塑料加工	引发	蒸汽	130–150
	快速分离	蒸汽	150
	挤压	蒸汽	150
	干燥	蒸汽(空气)	180
	混合	蒸汽	150
玻璃加工	压平	空气	110–150
	干燥纤维	空气	130–180
化学工业	加热浸析	蒸汽(空气)	150–180
	烘干	蒸汽(空气)	150–180
造纸工业	牛皮纸漂白	蒸汽	150–180
	干燥	蒸汽	150
木材加工	窑内烘干	空气	80–120
	胶合板制备	蒸汽	120–180
	热压纤维板	蒸汽	200
合成橡胶	引发	蒸汽	130
	单体回收	蒸汽	130
	干燥	蒸汽(空气)	130
纺织工业	漂洗	水	80–100
	处理	蒸汽	80–130
	干燥	蒸汽(空气)	80–140
公路建设	融化沥青	蒸汽	120–180
烟草行业	制丝	蒸汽	150–200

应用的关键在于生产出先进、实用、可靠和高性价比的槽式太阳能集热设备。

2　国内外槽式太阳能集热发电系统发展状况简介

从 20 世纪 80 年代初各国就开始积极发展槽式太阳能热发电技术，美国、西欧、以色列、日本发展较快。表 2 列出了目前已建成的槽式太阳能热电站，其中日本的两座主要是研究性的实验装置，而美国加州的 SEGS 电厂是全球首座商业化运行的槽式太阳热发电厂，并运行至今。下面将对几个比较典型的，具有工业化规模的槽式太阳热发电厂加以介绍。

美国 Luz 公司在 1985—1991 年共建造了 9 座槽式太阳热发电系统(SEGS Ⅰ—SEGS Ⅸ)，其发电

表 2　全球主要槽式太阳能热发电装置[7]16

地点	年份	装机容量(MW)	热力循环类型
西班牙阿尔梅里亚	1981	0.5	蒸汽循环
日本香川县	1981	1	蒸汽循环
美国加州 SEGS	1985—1991	354	蒸汽循环
西班牙 DISS	1996—1999	2	直接产生蒸汽发电
希腊克里达	1997	50	蒸汽循环
以色列	2001	100	蒸汽循环
美国内华达	2006	64	蒸汽循环

功率分别为 14 MW、6×30 MW 和 2×80 MW，总装机容量达 354 MW。SEGS 电站建成后，一直向加州电网供电至今，累计供电 12 TWh，其中新装置的电效率已达 30%。SEGSⅢ—SEGSⅨ七座电站采用天然气补燃，其中天然气发电量占 25%，以满足夜间和阴雨天的电力需求。自第一套装置投运以后，该电站一直在进行很多的改进工作，主要包括改进集热器的系统支撑结构以降低其重量并提高抗腐蚀性和抗风性能；尝试使用新开发的聚光器和集热器产品，以减小镜面厚度，提高玻璃与金属封接的可靠性等。以上所进行的技术改造和更新，使该厂的初始投资成本由 1 号电站(功率为 14 MW)的 4490 美元/kW 降到了 8 号电站(功率为 80 MW)的 2890 美元/kW，发电成本由 1 号电站的 44 美分/kWh 下降到 9 号电站的 17 美分/kWh (按照 2004 年美元计算)，系统效率由 1 号电站的 9.3% 提高到 9 号电站的 13.6%[3]。SEGS 电厂的建造和成功运行，从技术性和经济性两个方面证明了槽式太阳热发电系统的可行性，并为后来的槽式太阳能热发电厂在技术研发、工程设计、设备选型、施工和运行维护等方面提供了宝贵的经验。

继 SEGES 电厂后，1997 年希腊在克里达岛建造了欧洲第一座商业规模的槽式太阳能电站，其装机容量 50 MW。该电站以液化石油气为辅助燃料，采用了补燃设计，从而具有非常灵活的操作方式，汽轮发电机组可在只利用太阳能、只利用辅助能源和混合能源的三种模式下发电。该电站使用并改进了曾经应用于 SEGS 电站上的新型集热器[7]19。

2006 年美国在内华达州建造了一座装机容量为 64 MW 的槽式太阳能热发电站 SOLAR-1，该电站在设计中广泛采纳和吸收了 SEGS 电厂多年的运行经验来提高效率和可靠性。通过改善后的装置，电站只需要有 30 分钟的储热装置和 2%的天然气作为辅助能源。

除了上述一些已建成的槽式太阳能热电厂外，目前欧洲和美国正在建设一批改进的，性能更加优越的槽式太阳能热发电系统。2008 年 6 月 3 日，美国 eSolar 公司宣布将建立一个功率达 245MW 的太阳能热发电厂，该电厂将建于南加利福尼亚 Antelope 河谷，预计于 2011 年开始运行。该太阳能热发电系统将通过软件控制日光反射装置，以最大程度地接收太阳能。国际能源署(IEA)在 2000 年发起一项国际合作计划，目标是在 2015 年前建设 5000 MW 太阳能热电站。在该计划中，已经建成和计划建设的项目包括：阿尔及利亚、埃及、墨西哥、摩洛哥、印度等国 30 MW，伊朗 60 MW，南非 100 MW，西班牙 600 MW，以色列 500 MW 以及美国 3000 MW 太阳能热发电站。其中，除南非的太阳能热发电厂为塔式外，其他都将采用槽式。在德国政府支持下，德国能源部门联合埃及、阿尔及利亚和约旦的能源部门于 2006 年完成了 TRANS-CSP 规划。TRANS-CSP 规划的目标是要在 2050 年前，在中东和北非建设多个太阳能热电站，将电力通过直流高压线送到欧洲。该规划中的太阳能热发电厂的总装机容量将达 102 GW，年发电量为 707 TWh。

中国对太阳能热发电技术的研究起步较晚，因而对于美国加州 SEGS 槽式太阳能热发电站的成功运行给予了广泛关注，并曾计划引进该类机组在西藏拉萨建设一座槽式太阳能热发电站。国家“八五”计划也安排了小型部件和材料的攻关项目。目前，中国对太阳能热发电技术的研究给予了相当大的重视，“十一五”计划安排了数十亿资金以开发太阳能热发电技术。中国科学院工程热物理研究所和电工研究所进行了一些部件和材料的研究。近年来，随着一些有研究开发实力的工程技术公司的加入，中国在太阳能热发电领域的研究取得了可喜的进展。北京康拓科技、德州华园新能源、东莞康达机电等都正在加紧研发具有自主知识产权的关键技术。同时，国外一些在太阳能热发电领域知名的工程设计公司和技术供应商也开始看好中国市场，他们正在开发和寻找一些合适的项目机会。总体而言，中国槽式太阳能市场尚处于起步阶段，除技术问题需要解决外，配套政策还不够明朗，这些因素都将影响到太阳能热发电技术和项目在中国的发展进程。

3 对槽式太阳能集热发电厂工程化设计的一些思考

根据《可再生能源发展“十一五”规划》，中国将陆续建立一些商业化的槽式太阳能热发电厂，但是目前几乎所有国内的电力设计单位都没有槽式太阳能热发电厂的可行性研究和设计经验。WorleyParsons 作为在太阳能热发电领域居于领先地方的工程设计公司，在槽式太阳能热发电厂的概念性设计、可行性研究、详细设计、施工管理以及调试运行等方面积累了大量的经验。根据目前国际槽式太阳能利用的技术发展趋势、中国的实际情况和 WorleyParsons 公司在这方面的经验，我们对中国槽式太阳能发电厂的工程化设计提出如下建议。

(1) 在太阳能热发电厂的可行性研究阶段要充分重视厂址的比选：除了常规电厂厂址比选中要考虑的因素，太阳能热电厂选址中首先要考虑的是太阳辐射强度和变化规律，这是决定太阳能热电厂能否经济运行的关键因素。

(2) 由于商业规模的槽式太阳能热发电厂占地面积相对较大，厂区内各热力管网距离相对较远，对保温、伴热要求相对较高，设计中要从系统配置及管线布置上进行整体考虑，以提高热效率；由于占地面积大，太阳岛部分的土建工程量也比较大，对槽式集热系统的支撑部件的地基和打桩等部分进行优化设计，可以在满足电厂运行安全性和可靠性的前提下，降低工程造价，节约投资成本。

(3) 槽式太阳能系统的迎风面积较大，抗风能力较差，而中国阳光富足地区往往多风[8]，因此在设计中要仔细考虑抗风方面的要求，通过设计优化等手段来增强槽式系统的抗风能力。

(4) 我国适合建造太阳能热发电厂的地区往往水资源匮乏，在电厂设计中要充分考虑各种可能的节水方案。

(5) 即使具有辅助燃料或储热装置的槽式太阳能热发电厂也往往需要间歇式运行，电厂可能会有每日暂停和需要快速启动的要求，在设备选择上，从大到汽轮机，小到一个阀门、垫圈和螺钉，都需要和常规的电厂有所区别，如果这些设备选择不合适，整个项目都将为此付出巨大的代价。同时在设计中要考虑配套系统、控制及材料，应满足机组频繁启停的需要和夜间机组停止运转时的保护措施等。在这方面要充分吸收已有槽式太阳能热发电厂的设计和运行经验。

(6) SEGS 电厂的实际运行经验表明，槽式太阳能热发电厂在集热场的设计和运行、集热系统和发电系统的集成以及周期运行的操作模式等方面和常规电厂有很大区别，因此槽式太阳能热发电厂在工程设计的过程中就要充分考虑到以后运行和维护的要求，比如建立有效的监测聚热镜表面反射率、控制程序以及正确的镜面清洗方法等。

总之，槽式太阳能热发电系统已经进入了商业化应用阶段，我们一方面要继续重点研发聚光器、吸收器以及跟踪系统的新技术和新工艺，另一方面也要在实际的工程设计中充分考虑该类型电厂运行和维护的自身特点，充分吸收已有的经验，从而使该技术能够为我们更快、更多、更好的利用太阳能发挥更大的作用。

参考文献

[1] Global Concentrated Solar Power Markets and Strategies: 2009-2020[R]. Emerging Energy Research, 2007.
[2] Stoddard L, Abiecunas J, and O'Connell R.Economic, Energy, and Environmental Benefits of Concentrating Solar Power in California[R]. Kansas: National Renewable Energy Laboratory, 2006.
[3] 罗智慧，龙新峰. 槽式太阳能热发电技术研究现状与发展[J]. 电力设备, 2006, 7(11): 29–32.
[4] Zarza E. Overview on Direct Steam Generation (DSG) and Experience at the Plataforma Solar de Almería (PSA)[R]. Almería(Spain):Parabolic Trough 2007 Workshop, 2007.
[5] 张先勇，舒杰，吴昌宏. 槽式太阳能热发电中的控制技术及研究进展[J]. 华东电力, 2008, 36(2): 135–138.
[6] 槽式太阳能中高温技术[EB/OL]. [2009-10-03]. http://www.chinaep.net/jieneng/jieneng19.htm.
[7] 安翠翠，张耀明，张军，等. 国际主要槽式太阳能热发电站介绍[J]. 太阳能，2007, (7): 16–20.
[8] 王亦楠. 对我国发展太阳能热发电的一点看法[J]. 中国能源, 2006, 28 (8): 5–10.

On the development of Parabolic Trough Concentrating Solar Power Station

Chen Chao[1], Nie Zhigang [1], Na Xiaotao[2]

(1. *Beijing MaisonParsons Engineering & Technology Co., Limited, Beijing* 100015;
2. *Guodian Science and Technology Institute Beijing institute, Beijing* 100081)

Abstract: This article briefly introduces the parts, key technologies, foreign application status and China's current research situation of the parabolic trough Concentrating Solar Power (CSP). With an expectation of the promising development and application of solar power in light and heat power generation including the CSP technology in China, the author, based on their first hand engineering experience, proposes suggestions on the engineering design of China's future commercial scale parabolic trough CSP stations.

Key words: Renewable Energy; Trough Type; Concentrating Solar Power

□责任编辑：李增喜