

## 发电工程设计项目经理（设总）培训课题

### 第四部分：相关设计技术

## 第三章：太阳能光伏及光热发电



华北电力设计院工程有限公司

2012年8月 北京

编写：蒋华庆 田增华 田景奎

# 目 录

<b>1 太阳能及其特点 .....</b>	<b>1</b>
<b>2 太阳能光伏发电 .....</b>	<b>5</b>
<b>3 主要光伏设备简介.....</b>	<b>6</b>
3.1 光伏组件 .....	6
3.2 光伏支架 .....	9
3.3 汇流箱和直流配电柜 .....	11
3.4 逆变器 .....	11
<b>4 太阳能光伏发电的历史、现状和发展趋势.....</b>	<b>12</b>
<b>5 太阳能热发电 .....</b>	<b>17</b>
5.1 槽式太阳能热发电 .....	19
5.2 塔式聚光太阳能热发电 .....	34
5.3 碟式热发电 .....	46
5.4 菲涅尔太阳能热发电系统 .....	47
5.5 太阳能热发电控制技术 .....	50
5.6 太阳能镜场的运行维护及检修 .....	56
<b>6 太阳能光热发电的历史、现状及发展趋势.....</b>	<b>58</b>
6.1 国内外太阳能热发电综述 .....	58
6.2 太阳能热发电技术前景分析 .....	63

## 1 太阳能及其特点

太阳能的定义有广义与狭义之分。广义太阳能指一切来源于太阳的能量形式，地球上的绝大部分能量归根结底都来源于太阳，风能、海流能、波浪能和生物质能等都属于广义太阳能。狭义太阳能指太阳以电磁能的形式投射到地球的辐射能。本文以下所指均为狭义太阳能。

尽管太阳辐射到地球大气层的能量仅为总辐射能量的 22 亿分之一，但已高达  $173,000\text{TW}$  ( $1\text{T}=1\times 10^{12}$ )，也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于 500 万吨煤。国际能源署数据显示，在全球 4% 的沙漠上安装太阳能光伏系统，就足以满足全球能源需求。太阳能光伏享有广阔的发展空间（屋顶、建筑面、空地和沙漠等），其潜力十分巨大。

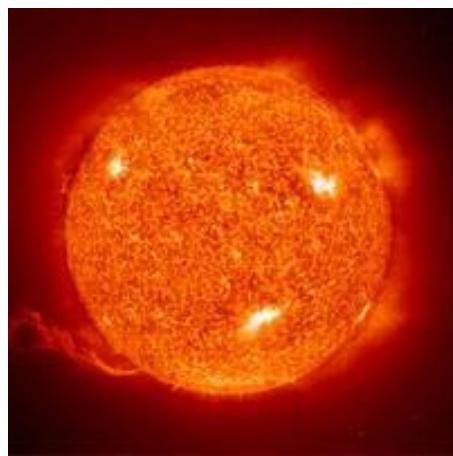


图 2.1 太阳

太阳能具有周期性、随机性等特点：

◆ 周期性：太阳能的周期性是由地球自身的自转以及地球围绕太阳的公转产生。地球自转使得只有白天可以利用太阳能，而地球公转使得太阳能存在一年四季的变化；

◆ 随机性：地球表面接收到的太阳能受云、雾、雨、雪等天气因素的影响。这些天气因素的随机性决定了太阳能的随机性。

除了上述两个特性，太阳能还具有能量密度较低的特点。根据世界气象组织 1981 年发布的数值，地球大气层外日地平均距离处的法向直接日射辐照度为  $1367\text{W/m}^2 \pm 7\text{W/m}^2$ （此值被称为“太阳常数”）。

太阳光在穿过大气层到达地面的过程中，由于大气中空气分子、水蒸气和尘埃等对太阳辐射的吸收、反射和散射，辐射强度将会减弱，因此地面接收到的太阳能辐射的强度一般会低于太阳常数。



太阳能辐射量测量设备（一）

## 我国太阳能资源

### 全国划分为五类地区

一类地区：为我国太阳能资源最丰富的地区，年太阳辐射总量 $6680\sim8400\text{ MJ/m}^2$ ，相当于日辐射量 $5.1\sim6.4\text{ KWh/m}^2$ 。包括宁夏北部、甘肃北部、新疆东部、青海西部和西藏西部等地。尤以西藏西部最为丰富，最高达 $2333\text{ KWh/m}^2$ （日辐射量 $6.4\text{ KWh/m}^2$ ），居世界第二位，仅次于撒哈拉大沙漠。

二类地区：为我国太阳能资源较丰富地区，年太阳辐射总量为 $5850\sim6680\text{ MJ/m}^2$ ，相当于日辐射量 $4.5\sim5.1\text{ KWh/m}^2$ 。这些地区包括

河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部和新疆南部等地。

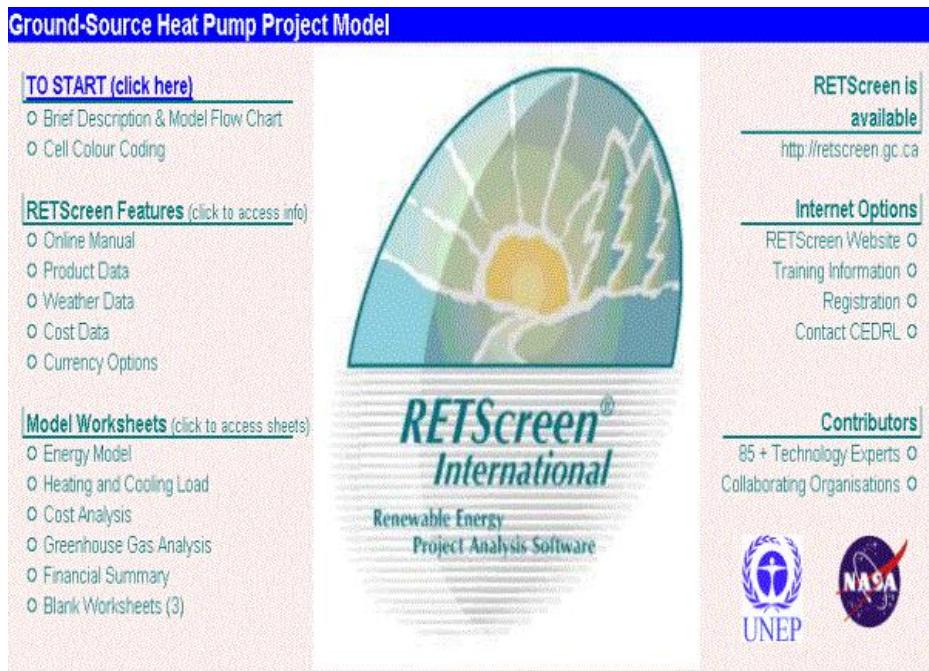
三类地区：为我国太阳能资源中等类型地区，年太阳辐射总量为 $5000\sim 5850 \text{ MJ/m}^2$ ，相当于日辐射量 $3.8\sim 4.5 \text{ KWh/m}^2$ 。主要包括山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、苏北、皖北、台湾西南部等地。

四类地区：是我国太阳能资源较差地区，年太阳辐射总量 $4200\sim 5000 \text{ MJ/m}^2$ ，相当于日辐射量 $3.2\sim 3.8 \text{ KWh/m}^2$ 。这些地区包括湖南、湖北、广西、江西、浙江、福建北部、广东北部、陕西南部、江苏北部、安徽南部以及黑龙江、台湾东北部等地。

五类地区：主要包括四川、贵州两省，是我国太阳能资源最少的地区，年太阳辐射总量 $3350\sim 4200 \text{ MJ/m}^2$ ，相当于日辐射量只有 $2.5\sim 3.2 \text{ KWh/m}^2$ 。

#### 光伏发电量计算软件 1: RETScreen

**RETScreen** 清洁能源项目分析软件是 CANMET、NASA、UNEP、GEF、可再生能源及能源效率合作组织（REEEP）、加拿大自然资源部合作开发的软件。该免费的软件可以在全球范围内使用，用以评估各种能效、可再生能源技术 的能源生产量、节能效益、生命周期成本、减排量和财务风险。软件也包括产品、成本和气候数据库，并有一个详细的在线用户手册。

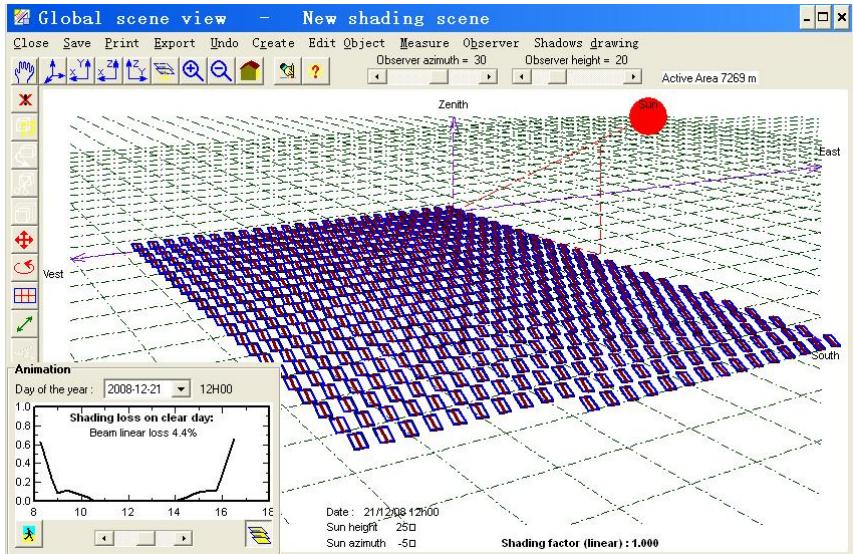


软件运行界面截图

## 光伏发电量计算软件 2: PVSYST

PVSYST 软件可以依据不同之太阳能系统(独立运转型、并网型...等等)以及太阳能电池(单晶硅、多晶硅、厂牌、型号...等等)，分别设定环境参数：日射量、温度、经纬度及建筑物相对高度等，以计算出太阳能电池之发电总量。

- 主要功能与设定之介面下列所示：
- a. 设定太阳能发电系统种类
- b. 设定太阳能电池种类与设置场合
- c. 设定太阳能电池之摆设参数
- d. 架构建筑物对应关系与遮蔽效应影评估
- e. 模拟系统之发电量



软件运行界面截图

## 2 太阳能光伏发电

现代物理学研究认为，太阳光是由不同频率的光子组成的；光子是光线中携带能量的粒子。太阳能光伏发电就是利用光子激发半导体物质中的电子、从而产生光生伏打效应，将太阳能直接转换为电能的一种发电方式。

光伏发电有离网应用和并网应用两种类型。并网应用又可根据接入电网的电压等级分为低压并网和高压并网两种类型。本文主要针对高压接入电网的并网光伏发电。

高压接入的并网光伏发电的主要工艺流程如图 2.2-1：

- (1) 光伏组件将太阳能转换为直流电；
- (2) 若干块光伏组件串联后成为 1 串输出电压更高的光伏组串；
- (3) 若干光伏组串通过汇流箱汇集成 1 路后输出；
- (4) 若干汇流箱输出通过直流配电柜汇集成 1 路后输出；
- (5) 直流配电柜输出与逆变器相连，通过逆变器将直流电转换为交流电；
- (6) 单元升压变压器将逆变器输出的低压交流电升压为 10kV 或 35kV；
- (7) 若干个单元变压器出口通过高压柜与电缆相连，汇集至变电站（或开闭站），最后接入电网送出；

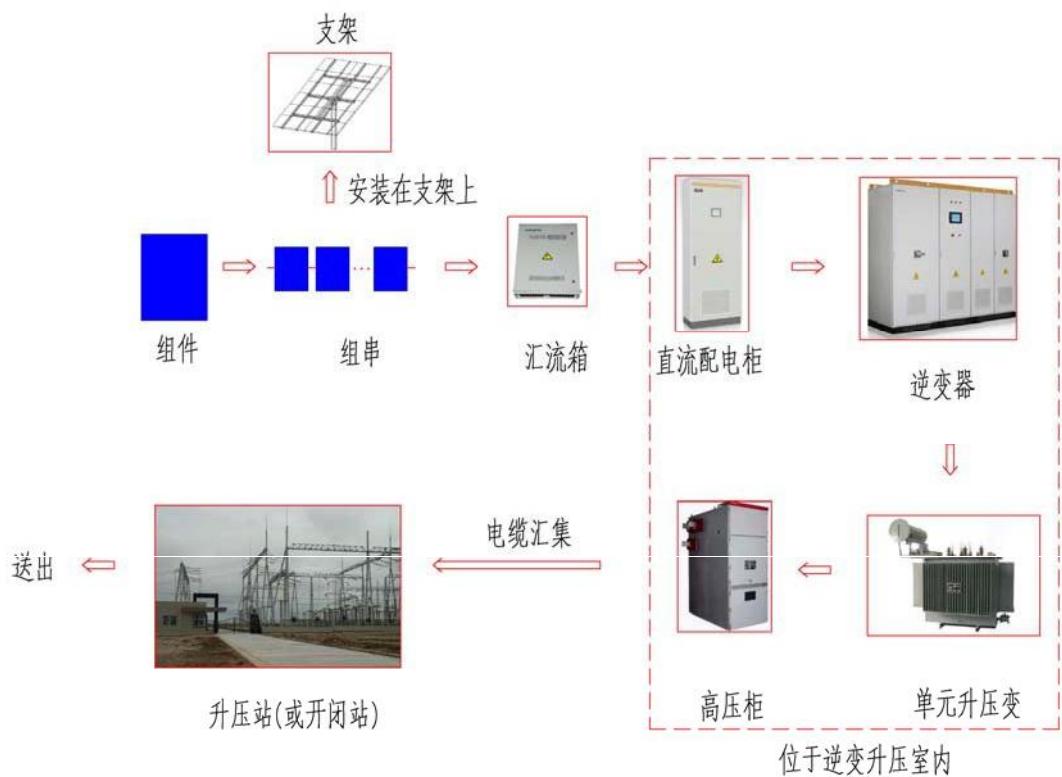


图 2.2-1 光伏发电工艺流程及主要设备

主要的光伏设备有：光伏组件及支架、汇流箱、直流配电柜和逆变器。另外，还有单元升压变、高压柜、电缆等常规设备或材料。

### 3 主要光伏设备简介

#### 3.1 光伏组件

太阳能光伏系统中最重要的是电池，是收集阳光的基本单位。若干片光伏电池合成在一起构成光伏组件。

太阳能光伏电池主要有：晶体硅电池（包括单晶硅、多晶硅）、非晶硅薄膜电池、非硅薄膜光伏电池（包括硒化铜铟 CIS、碲化镉 CdTe）。



图 2.3.1-1 光伏组件（左起：单晶硅、多晶硅、非晶硅）

### 3.1.1 晶体硅光伏电池

单晶硅电池是最早出现，工艺最为成熟的太阳能光伏电池，也是大规模生产的硅基太阳能电池中，效率最高。单晶硅电池是将硅单晶进行切割、打磨制成单晶硅片，在单晶硅片上经过印刷电极、封装等流程制成的，现代半导体产业中成熟的拉制单晶、切割打磨，以及印刷刻版、封装等技术都可以在单晶硅电池生产中直接应用。大规模生产的单晶硅电池效率可以达到 13–20%。由于采用了切割、打磨等工艺，会造成硅原料的损失；受硅单晶棒形状的限制，单晶硅电池必须做成圆形或圆角方形，对光伏组件内部电池的布置也有一定的影响。

多晶硅电池的生产主要有两种方法，一种是通过浇铸、定向凝固的方法，制成多晶硅的晶锭，再经过切割、打磨等工艺制成多晶硅片，进一步印刷电极、封装，制成电池。浇铸方法制造多晶硅片不需要经过单晶拉制工艺，消耗能源较单晶硅电池少，并且形状不受限制，可以做成方便光伏组件布置的方形；除不需要单晶拉制工艺外，制造单晶硅电池的成熟工艺都可以在多晶硅电池的制造中得到应用。另一种

方法是在单晶硅衬底上采用化学气相沉积 (CVD) 等工艺形成无序分布的非晶态硅膜，然后通过退火形成较大晶粒，以提高发电效率。多晶硅电池的效率能够达到 10–18%，略低于单晶硅电池的水平。和单晶硅电池相比，多晶硅电池虽然效率有所降低，但是节约能源，节省硅原料，达到工艺成本和效率的平衡。

### 3.1.2 非晶硅薄膜电池和非硅薄膜光伏电池

非晶硅薄膜电池是在不同衬底上附着非晶态硅晶粒制成的，工艺简单，硅原料消耗少，衬底廉价，具有弱光性好，受高温影响小的特性。自上个世纪 70 年代发明以来，非晶硅薄膜电池经历了一个发展的高潮。80 年代，非晶硅薄膜电池的市场占有率达到 20%，但受限于较低的效率，非晶硅薄膜电池的市场份额逐步被晶体硅电池取代，目前约为 12%。

非硅薄膜太阳电池是在廉价的玻璃、不锈钢或塑料衬底上附上非常薄的感光材料制成，比用料较多的晶体硅技术造价更低。目前已商业化的非硅薄膜光伏电池材料有：铜铟硒 (CIS, CIGS) 和碲化镉 (CdTe)，它们的厚度只有几微米。

### 3.1.3 几种组件的国产化和市场占有情况

目前市场生产和使用的太阳能光伏电池大多数是用晶体硅材料制作的，2007 年占 88% 左右；其中，单晶硅由于生产周期长、硅原料损失以及生产过程耗能大，产量近年来一直低于多晶硅组件；薄膜电池中非晶硅薄膜电池占据薄膜电池大多数的市场。

晶体硅电池、非晶硅薄膜电池目前均可以实现国产；铜铟硒 CIS、碲化镉 CdTe 等非硅薄膜光伏电池目前国内尚不能进行商业化生产。虽然美国第一太阳能公司在碲化镉领域一枝独秀，2009 年全年的产量达 1.2GWp，但是该种组件制造所需的碲、镉等元素储量较小，很难代替硅基光伏组件的位置。铜铟硒 CIS 目前产量还较低，并且也存在生产所需元素储量较小，含有重金属等问题。

在未来几年，国内主要应用的光伏组件仍将是多晶硅组件，其次是单晶硅和非晶硅薄膜组件。

### 3.1.4 光伏组件的标称

各种光伏组件在销售时均以标称功率作为计价依据，功率以峰瓦(W<sub>p</sub>)为单位。

### 3.2 光伏支架

光伏支架主要有简单的固定式和自动跟踪2种类型。自动跟踪式又可分为“单轴跟踪”、“双轴跟踪”两种类型。

固定式：光伏组件固定安装在支架上，一般朝正南方向放置，且有一定的倾角。倾角可根据当地太阳能资源数据和地理位置进行优化选择。



图 2.3.4-1 固定式光伏方阵

单轴跟踪式：它通过围绕位于光伏方阵面上的一个轴旋转来跟踪太阳。最常见的有三种：（1）轴取为南北横向，即水平单轴跟踪系统；（2）轴取为南北向，有一定的倾角，即斜单轴跟踪系统；（3）轴取为垂直于地面，支架具有一定的倾角，即方位角跟踪系统。如图2.3.4-3所示。



图 2.3.4-3 单轴跟踪式光伏方阵（左起：水平轴、斜单轴、方位角跟踪）

双轴跟踪式：它有两个可以旋转的轴，通过旋转这两个轴可使得

方阵面始终和太阳光垂直，从而最大可能捕获太阳能。如图2.3.4-4所示。



图2.3.4-4 双轴跟踪式光伏方阵



图2.3.4-5 转盘式跟踪聚光系统



图2.3.4-6聚光追踪系统

### 3.3 汇流箱和直流配电柜

汇流箱和直流配电柜的作用是将若干路直流输入并联汇集成 1 路直流输出。

### 3.4 逆变器

逆变器是光伏电站的核心设备之一，其基本功能是将光伏电池组件输出的直流电转换为交流电。



图 2.3.4-1 逆变器

## 4 太阳能光伏发电的历史、现状和发展趋势

### 4.1 光伏发电的历史

太阳能光伏发电的最关键设备为太阳能光伏电池以及利用太阳能电池制造的太阳能光伏电池组件。太阳能光伏电池的发展主要历史里程碑如下：

1839 年法国科学家贝克勒尔(Becquerel)发现“光生伏打效应”，即“光伏效应”。

1876 年亚当斯等在硒片上发现固态光伏效应。

1941 年奥尔在硅上发现光伏效应。

1954 年恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室，首次制成了实用的单晶太阳电池，效率为 6%。

1959 年第一个多晶硅太阳电池问世，效率达 5%

1960 年硅太阳电池首次实现并网运行。

1990-1998 年，砷化镓太阳能电池和单晶硅电池效率分别达到 32% 和 24.7%。

随着光伏电池技术的发展和成熟，1997 年美国率先宣布实施“百万太阳能屋顶计划”，随后在 1998 年德国宣布从 1999 年 1 月起实施“十万太阳能屋顶计划”；在政府的推动下，光伏发电进入快速发展道路。

### 4.2 光伏发电的现状

2001~2010 年全世界光伏组件的产量及年增长率见图 4.2-1。从图中可以看出，近 10 年光伏组件的发展十分迅速。

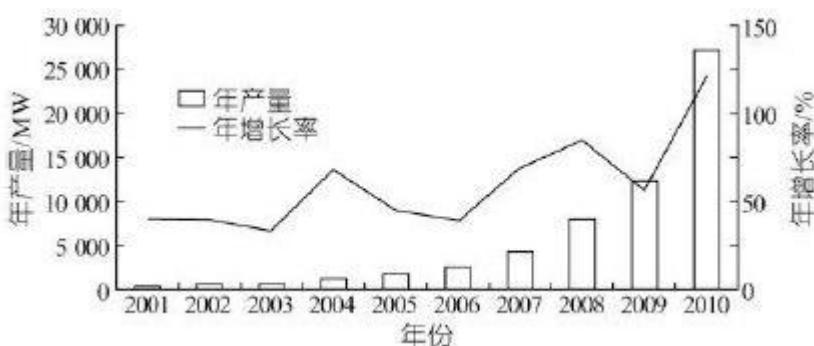


图 4.2-1 2001~2010 年全球光伏组件年产量

2007 年中国光伏组件年生产量首次超过日本，一跃成为全球最

大的光伏组件制造国。根据欧盟 2010 年 4 月的统计（见表 4.2-1），2008 年中国大陆和中国台湾光伏组件产量 6180MW，占世界总产量的 50.2%；2009 年中国大陆和中国台湾光伏组件产量更是占到世界总产量的 59%。

表 4.2-1 2008 年及 2009 年全球光伏组件产量地理分布

国家/地区	2008 年		2009 年	
	产量/MW	比例/%	产量/MW	比例/%
中国大陆	2 589.0	32.7	4 676.3	38.0
德国	1 460.6	18.5	1 850.4	15.0
日本	1 269.0	16.0	1 544.5	12.5
中国台湾	919.5	11.6	1 503.4	12.2
马来西亚	167.0	2.1	785.4	6.4
欧洲其他	560.0	7.1	543.4	5.4
亚洲其他	372.0	4.7	637.5	5.2
美国	431.5	5.5	547.2	4.4
印度	87.2	1.1	220.1	1.8
非洲和中东	14.0	0.2	11.0	0.1

2009 年及 2010 年全球十大光伏组件厂商产量见表 4.2-2。这十大厂商 2009 年年产量之和 5806.9MW，是当年全球光伏组件总产量的 45.5%。

表 4.2-2 2009 年及 2010 年全球十大光伏组件厂商

公司	国家/地区	主打电池类型	产量/MW	
			2009 年	2010 年
First Solar	美国	薄膜(CdTe)	1 112.6	1 400.0
尚德	中国	晶硅(多晶、单晶) / 薄膜( $\alpha$ -Si、 $\mu$ -Si)	704.0	1 572.0
Sharp	日本	晶硅(多晶、单晶) / 薄膜( $\alpha$ -Si、 $\mu$ -Si)	595.0	1 109.0
Q-Cells	德国	晶硅(多晶、单晶) / 薄膜(CIGS、CdTe)	586.0	1 014.0
英利	中国	多晶硅	525.3	1 061.6
晶澳	中国	晶硅(多晶、单晶)	520.0	1 460.0
Kyocera(京瓷)	日本	多晶硅	400.0	650.0
天合	中国	晶硅(多晶、单晶)	399.0	1 060.0
Sun Power	美国、菲律宾	单晶硅	397.0	584.4
Gintech(昱晶)	中国台湾	晶硅(多晶、单晶)	368.0	680.0

目前，硅是制造光伏组件应用最多的半导体材料，包括晶硅组件、非晶硅组件等。2008 年、2009 年各种光伏组件市场见表 4.2-3，由表可看出，多晶硅、单晶硅占主导地位，而非晶硅市场份额从 2008 年的

12.5%提高到2009年的17.7%，但2011年以来由于晶硅价格的大幅下跌，非晶硅的市场份额有所下降。

表4.2-3 2008年及2009年各种硅基光伏组件市场份额

电池类型	2008年/%	2009年/%
多晶硅	47.7	46.9
单晶硅	38.3	34.1
非晶硅	12.5	17.7
带硅	1.5	1.3

2009年，全球光伏新增装机7106MWp，比2008年的5962MWp增长19%；截止2009年年底，全球光伏发电累计装机容量达到2290万千瓦，10年间平均增速超过50%。

中国光伏电池2001年的产量为4.5MW，2010年达到8000MW，十年间增加1770多倍。2001年中国光伏发电累计用量23.5MW，2010年增加到860MW，十年间增加了36倍。中国具有世界上规模最大的光伏产业，2010年产能达20GW，产量8GW，占世界产量50%。但是95%以上的产品出口，国内用量不足5%。

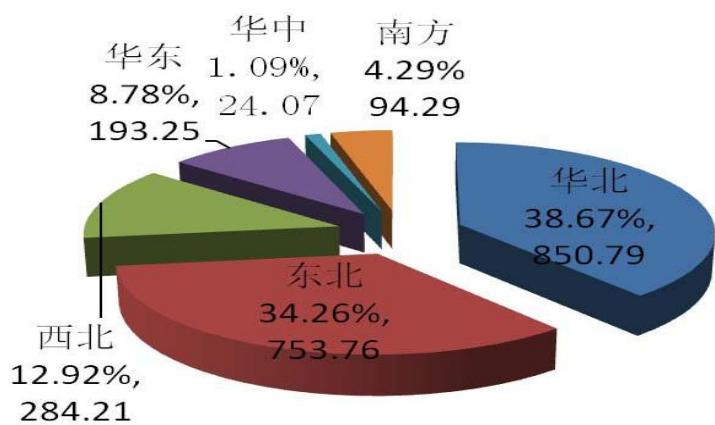
2011年中国光伏新增装机达2.6GW，累计装机容量达到3.43GW。

可再生能源中长期发展规划，2020年太阳能发电200万kw，风电3000万kw，生物质发电3000万kw；

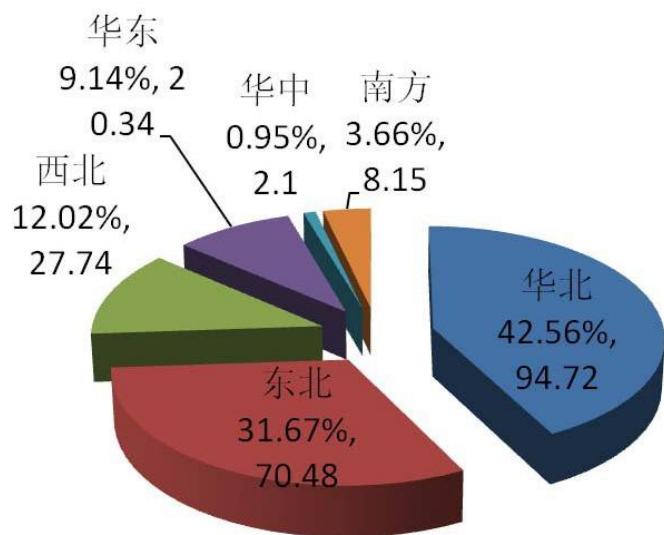
“十二五”规划，2015年太阳能发电拟调至10GW，风电100GW；

根据最新的报道，2015年光伏规划目标拟从原定的10GW调整到15GW。

光伏发电价格高、规模小，需要政策推动。据2010年中国电监会统计：太阳能发电共收购7216万kwh，占发电总量4.228万亿kwh的0.000017，平均上网电价1.17元/kwh，补贴金额6290万元，平均补贴0.87元/kwh。相比，水电上网电价平均为0.247元/kwh，火电上网电价平均为0.38元/kwh。



截至 **2010** 年 **6** 月底光伏并网装机容量分区域情况（单位：万千瓦）



**2010** 年 **1** 至 **6** 月光伏上网电量分区域情况（单位：亿千瓦时）

2008 年金融危机后，光伏组件的海外市场受到影响，为了刺激国

内光伏需求和加快国内光伏发电的发展，国家陆续推出了一系列政策和措施：

——2008年12月，国家第一个光伏并网特许权项目：甘肃敦煌10MWp光伏电站发标，最终中标价1.09元/kWh。

——2009年3月，财政部“光电建筑一体化”补贴政策。规定：光伏组件作为建材或构件时，补贴不超过20元/瓦；与屋顶或墙面结合时，补贴不超过15元/瓦。

——2009年7月，财政部“金太阳”政策出台。补贴范围：大型光伏电站(>300kWp)；补贴比例：并网光伏电站及配套输配电工程按总投资的50%补贴，上网电价按当地脱硫标杆电价。

——2010年7月，国家第二批光伏并网特许权项目发标，共13个项目、280MWp。最终中标价格从0.7288元/kWh到0.9907元/kWh不等。

——2011年7月，《国家发展改革委关于完善太阳能光伏发电上网电价政策的通知》提出固定电价上网政策：2011年7月1日以前核准建设、2011年12月31日建成投产、我委尚未核定价格的太阳能光伏发电项目，上网电价统一核定为每千瓦时1.15元（含税，下同）。2011年7月1日及以后核准的太阳能光伏发电项目，以及2011年7月1日之前核准但截至2011年12月31日仍未建成投产的太阳能光伏发电项目，除西藏仍执行每千瓦时1.15元的上网电价外，其余省（区、市）上网电价均按每千瓦时1元执行。今后，我委将根据投资成本变化、技术进步情况等因素适时调整。

#### 4.3 光伏技术的发展趋势

##### 4.3.1 光伏组件的效率将进一步提高

随着技术的进步，未来光伏组件的效率将进一步提高。根据日本发布的光伏技术发展路线，2017年实现商业化组件效率20%，实验室效率25%；2030年商业化组件效率25%，实验室效率30%；2050年开发出40%以上的超高效率太阳电池。

##### 4.3.2 薄膜电池市场份额将上升

晶硅电池是近30年占主导地位也是最为成熟的技术，目前已占市

场份额的 80%，而随着薄膜电池（含非晶硅、碲化镉、铜铟硒等）技术的进步，未来晶硅电池市场份额会有所下降。据欧洲光伏产业协会（EPIA）2011 年的预测，2020 年晶硅电池市场份额将为 61%，而薄膜电池则从目前的 20% 左右上升到 33%。



## 5 太阳能热发电

太阳能热发电，也叫聚焦型太阳能热发电（Concentrating Solar Power，简称CSP）。太阳热发电系统由集热系统、热传输系统、蓄热储能系统、热机、发电机等组成。集热系统聚集太阳能后，经过热传输系统将聚集的太阳热能，传给热机，由热机产生动力，带动发电机来发电，整个系统的热源来自于太阳能，所以称之为太阳能热发电系统。

太阳能热发电的基本工作原理如下：利用太阳集热器将太阳能收集起来，加热工质，产生过热蒸汽，驱动热动力装置带动发电机发电，从而将太阳能转换为电能。典型太阳能热发电站热力循环系统原理，如图 1.5-1 所示。

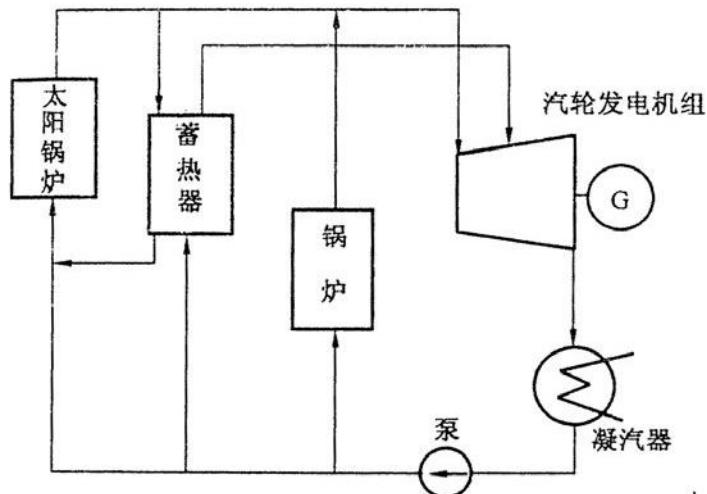


图 1.5-1 典型太阳能热发电站热力循环系统原理图

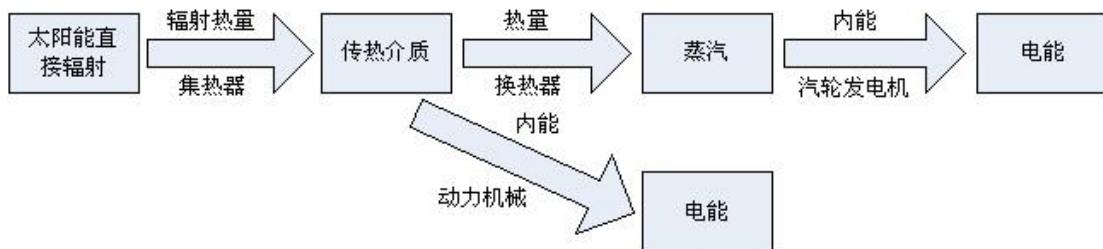


图 1.5-2 太阳能热发电流程简图

常规火力发电厂和太阳能热发电站的热循环系统基本相近，它们的汽轮发电部分则完全一样，都是产生过热蒸汽驱动汽轮发电机组发电。不同之外，只在于使用不同的一次能源。常规火力发电厂燃烧矿物燃料，太阳能热发电站收集太阳辐射能为能源。太阳能为自然能，自身能量密度低，昼夜间歇，冬夏变化，且一天之中变化莫测。为能使太阳能热电站稳定运行，一般在太阳能热发电系统中，都设置蓄热子系统或辅助能源子系统，这是由太阳辐射能本身的特点所决定的。

太阳能热发电是太阳能利用中的重要方向之一。目前聚光类太阳能热发电按照接收系统的形式，大致可分为四大类：槽式聚光太阳能热发电、塔式聚光太阳能热发电、碟式太阳能热发电及菲涅尔式太阳能热发电。



太阳能辐射量测量设备（二）

### 5.1 槽式太阳能热发电

基于槽式系统的太阳能热电站主要包括：集热装置、换热装置、热储能装置及常规蒸汽发电系统，其主要系统如图 1.5-3 所示。

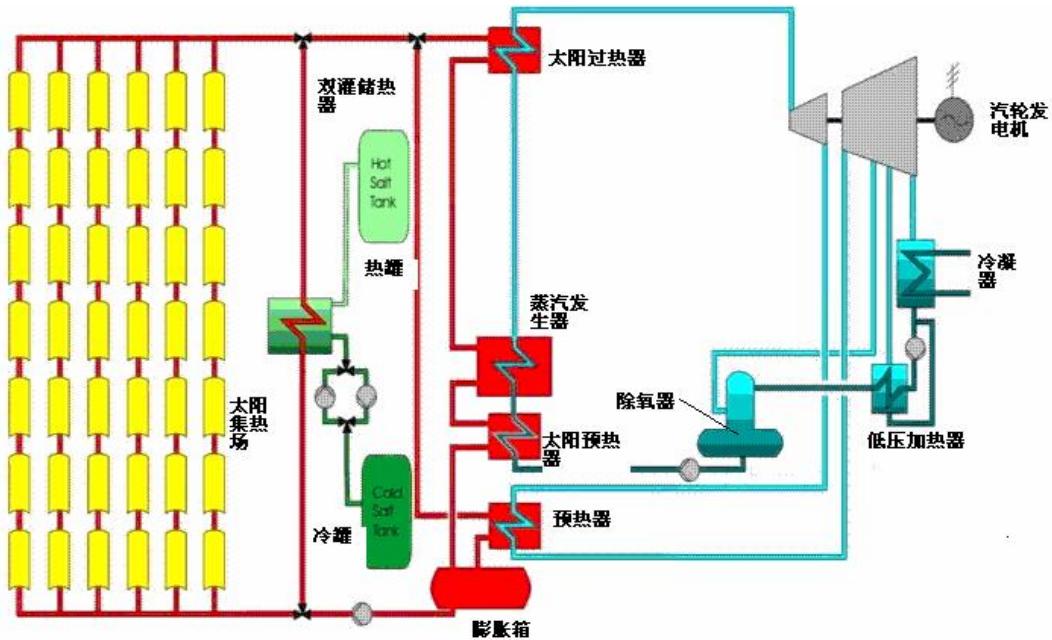


图 1.5-3 槽式太阳能热发电系统图

槽式太阳能热发电系统是将众多的槽型抛物面聚光集热器，经过串并联的排列，从而可以收集较高温度的热能，加热工质产生蒸汽，驱动汽轮发电机组发电。槽式太阳能热发电站系统主要由 4 部分组成：聚光集热装置、蓄热装置和汽轮发电装置，其系统简图如下图：

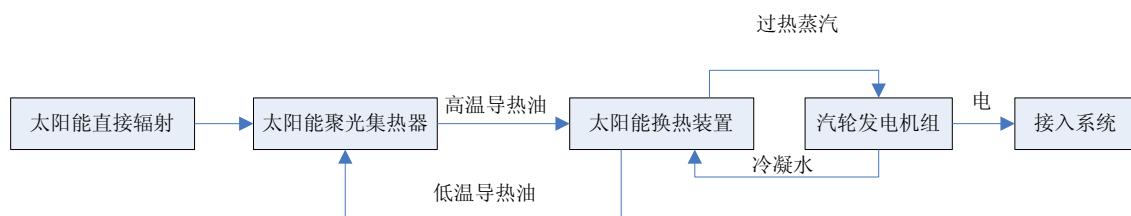


图 1.5-4 槽式太阳能热发电流程图

20 世纪 90 年代以来，美国能源部通过“太阳能热发电计划”，对已有的 9 套槽式线聚焦系统进行了考察和分析，确定了系统运行、维修的优化方案，对分系统的自动化、可靠性以及集热器的对准和净化等进行了分析。认为槽式电站的运行和维修成本可以降低 30% 左右，已可步入商业化应用。

各工业发达国家虽然在采取措施、制定规划积极研究和发展太阳能热发电技术，但对其经济性也有不同看法。由于在地面上所接受的太阳能辐射的能量密度低，所以太阳能热发电系统的集热面积要比相

同容量火电厂煤场的占地面积约大 10 倍左右。发电系统要获得很高的系统效率，必须采用高倍率的聚光集热器，致使单位容量的造价很高，其发电成本目前尚难以与火力发电相竞争。但随着新技术、新材料和新工艺的不断发展，研究开发工作的跟家深入，应用市场的不断扩大，太阳能热发电系统的造价是完全有可能大为降低的。同时，随着常规能源的涨价和资源的逐步匮乏，以及大量燃用化石能源对环境影响的日益突出，发展太阳能热发电技术将会逐渐显现出起经济社会的合理性。特别是在常规能源匮乏、交通不便而太阳能资源丰富的边远地区，当需要热电联合开发时，采用太阳能热发电技术是有利的、可行的。



图 1.5-5 槽式太阳能热发电站

### 5.1.1 集热装置

吸收器一般采用双层管结构，被置于抛物面聚光器焦线上，内侧为热载体，外侧为真空，以防热流失。热载体可以是水蒸气、热油或熔盐。温度一般在 400℃ 左右，属于太阳热能的中低温利用。聚光镜是一种表面上涂有聚光材料的抛物镜面，它的作用是将分散的低密度太阳光聚焦到吸收器上以产生高温，聚光镜性能的好坏除了与自身的制造精度有关外，还与跟踪装置的好坏有关。一般的太阳能发电站都采用单轴跟踪方式使抛物面对称平面围绕南北方向的纵轴转动。与太阳照射方向始终保持 0.04° 夹角。以便在任何情况下都能有效的反射太阳光。然而，近年来人们正在研制一种由多个小型平面反射镜组成的环带太阳能集热器系统，这种技术可以大大降低反射镜的制造难度，但其可靠性和经济性还需作进一步验证。槽式集热管结构如图 1.5-6

所示。

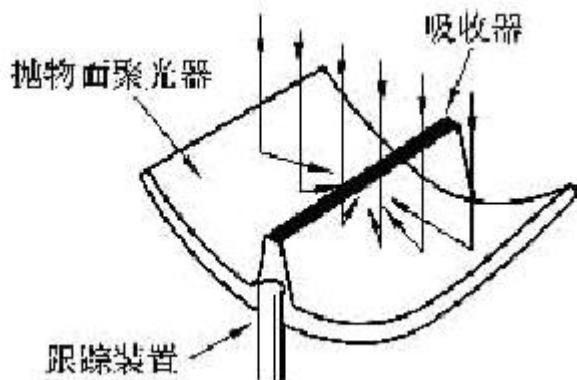


图 1.5-6 槽式抛物面太阳能热发电系统的集热装置

槽型抛物面反射镜为线聚焦装置，阳光经聚光器聚集后，在焦线处成一线型光斑带，集热管放置在此光斑上，用于吸收聚焦后的阳光，加热管内的工质。所以集热管必须满足以下五个条件：(1) 吸热面的宽度要大于光斑带的宽度，以保证聚焦后的阳光不溢出吸收范围；(2) 具有良好的吸收太阳光性能；(3) 在高温下具有较低的辐射率；(4) 具有良好的导热性能；(5) 具有良好的保温性能。目前，槽式太阳能集热管使用的主要是一直通式金属——玻璃真空集热管，另外还有热管式真空集热管、双层玻璃真空集热管、聚焦式真空集热管和空腔集热管等。

直通式金属——玻璃真空集热管是一根表面带有选择性吸收涂层的金属管 吸收管，外套一根 同心玻璃管，玻璃管与金属管 通过可伐过渡 密封联接 玻璃管与金属管夹层 内抽真空以保护吸收管表面的选择性吸收涂层，同时降低集热损失。

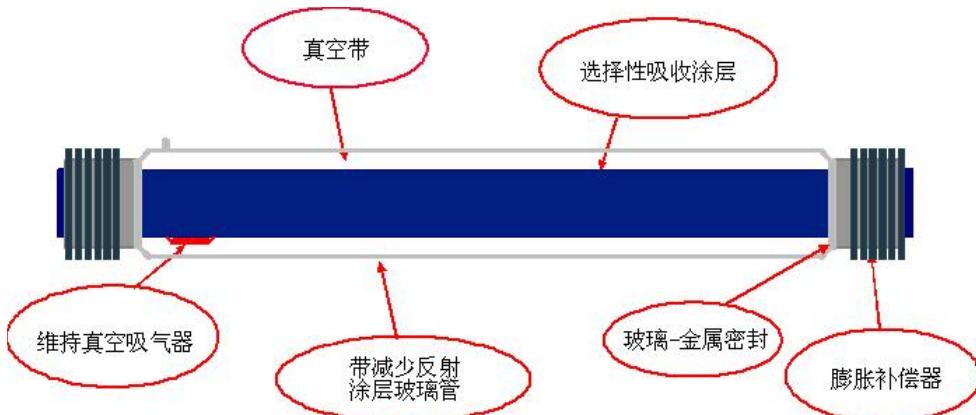


图1.5-7 集热管构造示意图



图1.5-8 集热管实物图

### 5.1.2 反光镜

反射率是反射镜最重要的性能。反射率随反射镜使用时间增多而降低，主要原因是：①灰尘、废气、粉末等引起的污染；②紫外线照射引起的老化；③风力和自重等引起的变形或应变等。为了防止出现这些问题，反射镜要：①便于清扫或者替换；②具有良好的耐候性；③重量轻且要有一定的强度；④价格要合理。

反射镜由反射材料、基材和保护膜构成。以基材为玻璃的玻璃镜为例，在槽式太阳能热发电中，常用的是以反射率较高的银或铝为反光材料的抛物面玻璃背面镜，银或铝反光层背面再喷涂一层或多层保护膜。因为要有一定的弯曲度，其加工工艺较平面镜要复杂得多。反射镜通过粘接陶瓷块与集热器支架进行连接。

最近国外已开发出可在室外长期使用的反光铝板，很有应用前景。

它具有以下优点：对可见光辐射和热辐射的反射效率高，表现出卓越的反射性能，具有较轻的重量、防破碎、易成型，可配合标准工具处理透明的陶瓷层提供高耐用性保护，可防御气候、腐蚀性和机械性破坏。但目前价格很贵，有待于进一步降低成本。

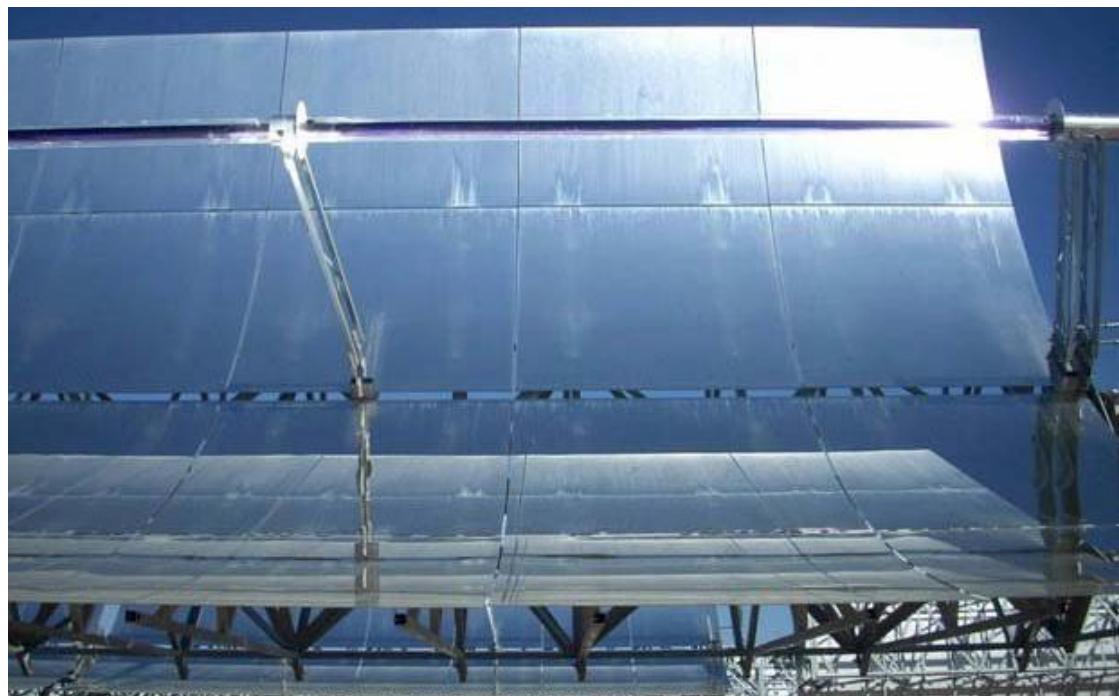


图1.5-9 反射镜安装位置

表1.5-1 反射镜参数表

安装位置	规格 (mm)	重量 (kg)	反射率 (%)
内侧	1700×1641×4	28	≥93.5
	1700×1641×5	35	≥92.5
外侧	1700×1641×4	27	≥93.5
	1700×1568×5	33	≥92.5

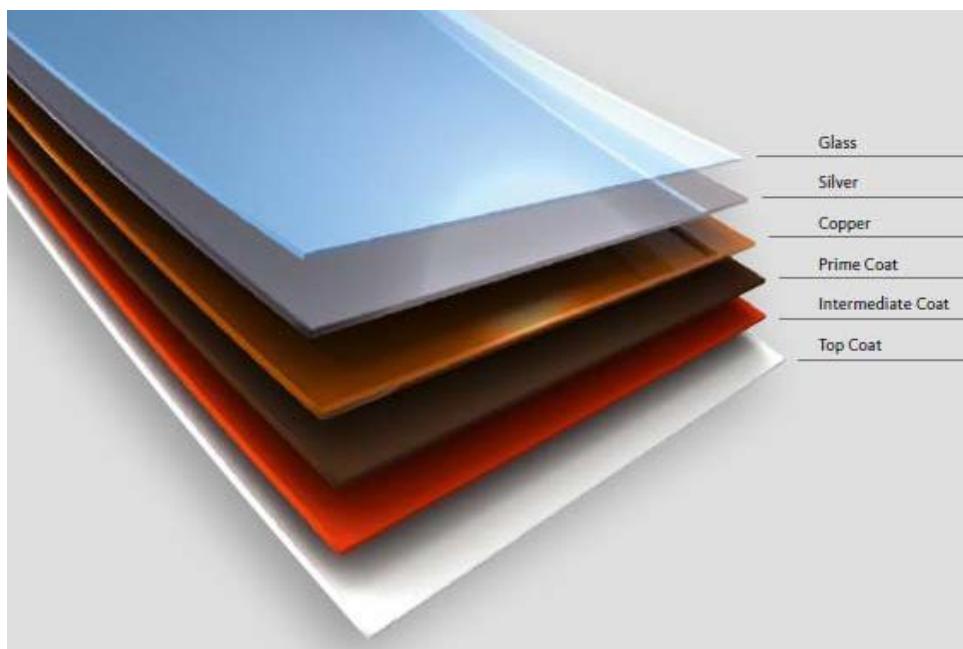


图1.5-10 反射镜涂层示意图



图1.5-11 反射镜连接陶瓷块

### 5.1.3 支架

支架是反射镜的承载机构，在与反射镜接触的部分，要尽量与抛物面反射镜相贴合，防止反射镜变形和损坏。支架还要求具有良好的刚度、抗疲劳能力及耐候性等，以达到长期运行的目的。

支架的作用：①支撑反射镜和真空集热管等；②抵御风载；③具有一定强度抵御转动时产生的扭矩，防止反射镜损坏。

要达到上述的作用，要求支架重量尽量小传动容易，能耗小，制

造简单，成本低，集成简单，保证系统性能稳定且寿命长。



图 1.5-12 槽式太阳能聚光集热器支架及跟踪装置

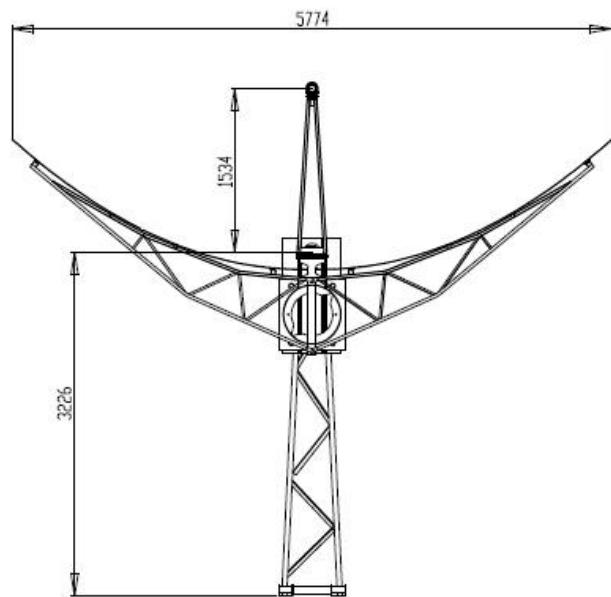


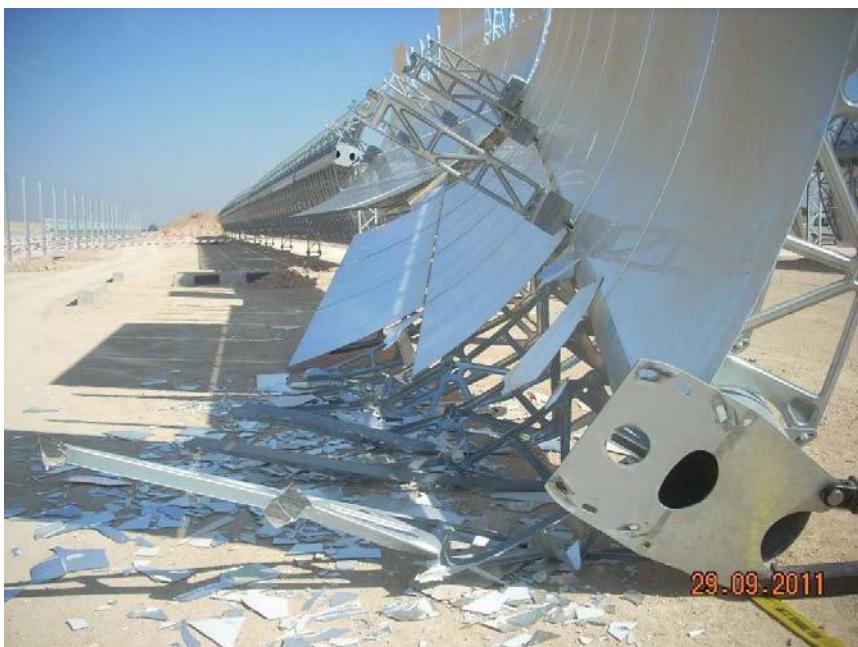
图 1.5-13 槽式太阳能聚光集热器支架示意图

集热器支架参数如下：

- 焦距：1.71m

- 开口宽度: 5.760m
- 集热器模块长度: 12m
- 集热器组合长度: 100m/150m
- 跟踪精度: <2mrad
- 工作风速:  $\leq 13.8 \text{ m/s}$
- 保护风速:  $> 13.8 \text{ m/s}$
- 峰值光学效率:  $\geq 78\%$
- 工作温度:  $-40^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$
- 设计寿命: >20 年

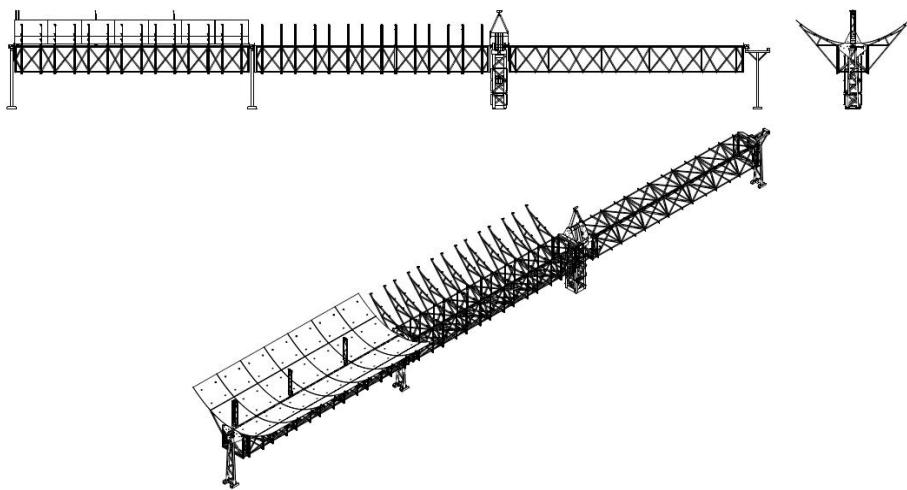
集热器支架及基础设计时, 应充分考虑到厂址处的气候条件、地质条件等, 避免出现集热器支架倒塌或集热器基础倾覆的情况。



目前天威太阳能公司已设计生产出适用于槽式太阳能热发电系统的集热器, 其参数如下表。

反射镜数量	<b>336</b>
聚光器长度	<b>148.5米</b>
聚光器总集热面积	<b>817.5平方米</b>
开口长度	<b>5.77米</b>

焦距	<b>1.71米</b>
最大工作风速	<b>14米/秒</b>
抗风姿态最大承受风速	<b>33米/秒</b>



#### 5.1.4 集热阵列布置

为使集热管、聚光器发挥最大作用，聚光集热器应跟踪太阳。槽型抛物面反射镜根据其采光方式，分为东西向和南北向两种布置形式。东西放置只作定期调整，南北放置时一般采用单轴跟踪方式。南北向放置时，除了正常的平放东西跟踪外，还可将集热器作一定角度的倾

斜，在倾斜角度达到当地纬度时，效果最佳，聚光效率提高。

槽式聚光镜的布置主要应考虑槽式聚光镜之间的间距以保证槽式聚光镜在运行时不存在遮挡问题，保证最大的聚光效率。在太阳能直接辐射数据整理的基础上，考虑太阳运行轨迹及当地坐在维度，在避免遮挡的前提下，进行集热装置阵列计算，计算得到集热阵列间距及高度等数值。



图 1.5- 14 槽式太阳能集热场布置

### 5.1.5 槽式太阳能集热器的安装

太阳能集热组合在现场的组装车间组装完毕后，由专门的工具运到指定位置，在指定位置将组装完毕的集热器组合对接。集热器组合的安装要求现场风速小于14m/s。 3个安装工人可在15分钟安装一套集热器组合。



图 1.5-15 槽式太阳能集热器安装



### 5.1.6 换热装置

换热装置目前拟考虑采用三级管式换热器：预热器、蒸发器、过热器。预热器用于预热给水，相当于电站锅炉中的省煤器；蒸发器用于使给水蒸发沸腾，相当于电站锅炉的水冷壁及汽包；过热器则是加热饱和蒸汽，进一步提升蒸汽过热度，增强蒸汽做功能力，与常规电站锅炉过热器作用相同。其基本流程如图1.5-16所示。

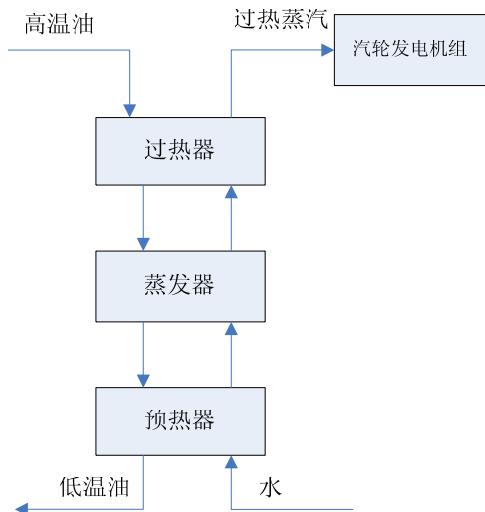


图1.5-16 槽式太阳能换热系统流程图

目前，槽式太阳能换热装置国内已有厂家可以进行设计和生产。由于导热油的特性，因此换热设备材质需采用耐腐蚀材料。换热效率则要根据当地日照情况及装机规模通过进一步计算而定。该设备选型由热机专业通过计算结合已有的设备技术进行选型。



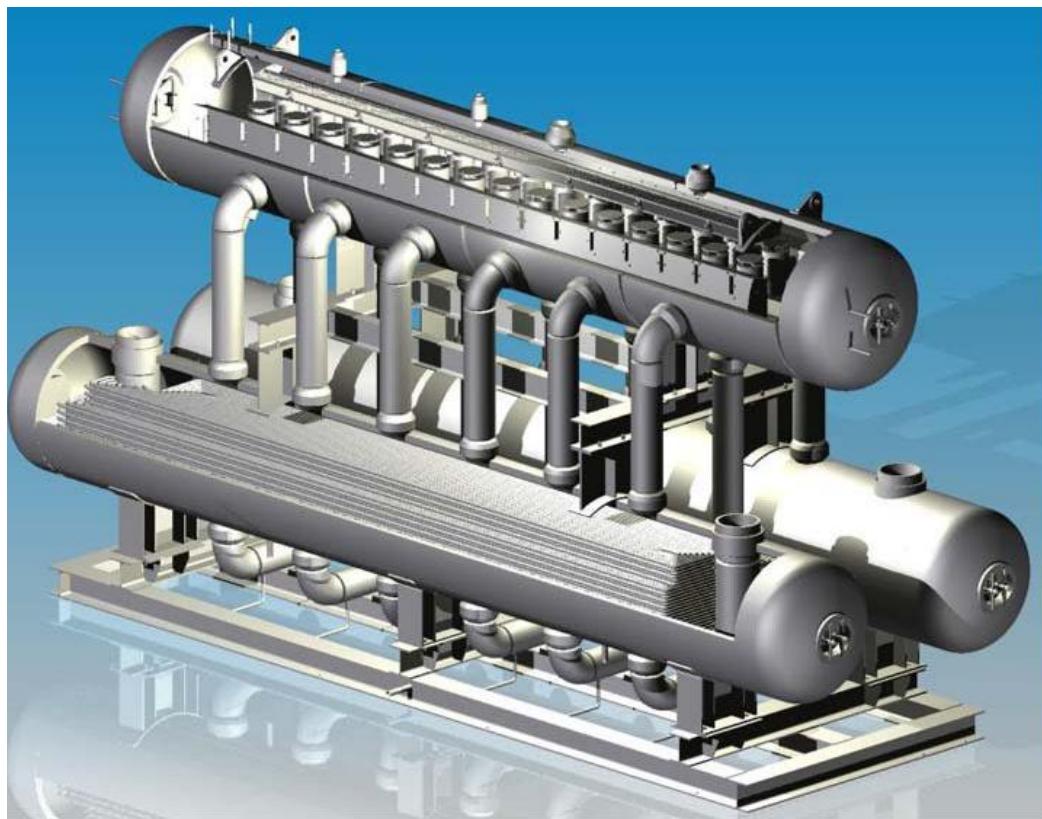


图1.5-17 国外槽式太阳能热发电系统换热设备

### 5.1.7 SEGS 槽式太阳能电站参数

位于美国加州的 SEGS 系列槽式太阳能热发电项目，总装机容量为 354MW（9 期），其主要参数见表 1.5-2。

表1.5-2 SEGS槽式太阳能热电站技术参数

项目	SEGS I	SEGS II	SEGS III	SEGS IV	SEGS V	SEGS VI	SEGS VII	SEGS VIII	SEGS IX
地址	Daggett	Daggett	Kramer Junction	Kramer Junction	Kramer Junction	Kramer Junction	Kramer Junction	Hipper Lake	Hipper Lake
投运年份	1985	1986	1987	1987	1988	1989	1989	1990	1991
额定电功率 MW	13.8	30	30	30	30	30	30	80	80
集热面积 ( $\times 10^4$ ) m <sup>2</sup>	8.296	18.899	23.03	23.03	25.05 <sup>[1]</sup>	18.8	19.428	46.434	48.396
介质入口温度 /℃	240	231	248	248	248	293	293	293	293
介质出口温度 /℃	307	316	349	349	349	391	391	391	391
蒸汽参数 / (℃ MPa)	太阳能 天然气 417/3.7	327/4.3 510/10.5	327/4.3 510/10.5	327/4.3 510/10	371/10 510/10	371/10 510/10	371/10 510/10	371/10 371/10	371/10 371/10
汽轮机效率 %	太阳能 31.5 <sup>[1]</sup> 天然气 37.3	29.4 37.4	30.6 37.4	30.6 37.4	37.5 39.5	37.5 39.5	37.6 37.6	37.6 37.6	37.6 37.6
汽轮机循环方式	无再热	无再热	无再热	无再热	无再热	再热	再热	再热	再热
峰值光学效率 %	71	71	73	73	73	76	76	80	80
吸热器年平均效率 %	51	53	50	50	50	50	51	53	53
电厂年均发电效率 %			11.5	11.5	11.5	13.6	13.6	13.6	13.6
年发电量 ( $\times 10^5$ ) /( $kW \cdot h$ )	30.10	80.50	92.78	92.78	91.82	90.85	92.65	252.75	256.13
总投资 /亿美元	0.62	0.96	1.01	1.04	1.22	1.16	1.17	2.12	
投资比 /[\$美元 · ( $kW \cdot h$ ) <sup>-1</sup> ]	4.490	3.200	3.370	3.470	4.070	3.870	3.900	2.650	

### 5.1.8 太阳能——天然气联合循环发电技术

太阳能——天然气联合循环槽式热发电系统（简称 ISCC），是将槽式太阳能热发电系统与燃气轮机发电系统相结合，以优化能源利用结构，提高能源利用效率。ISCC 作为槽式太阳能热发电系统的一种新兴形式，已越来越多的受到国际社会关注。

该系统中做功工质的流程为：给水通过预热后，一路进入蒸汽发生器，利用太阳能集热场收集的太阳热量来加热，产生微过热蒸汽；另一路进入余热锅炉继续加热，在余热锅炉的过热器前两路汇合，其余的流程与蒸燃联合循环相同。

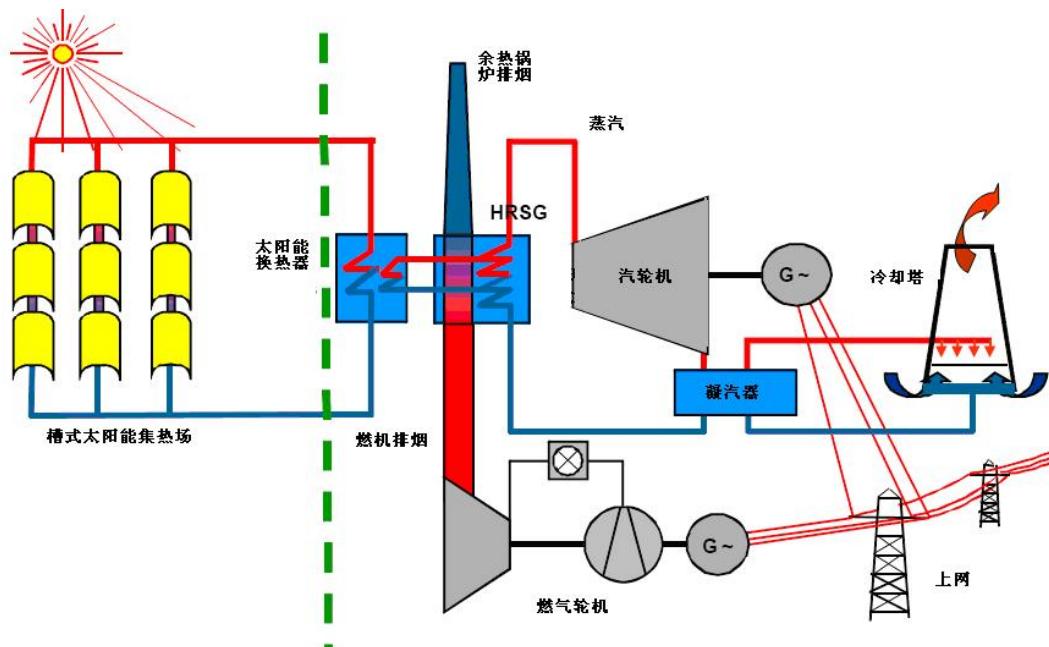


图 1.5-18 ISCC 电站系统流程图

该系统中由于太阳能集热场提供了额外的热量，ISCC 方案较采用相同燃机配置的普通蒸燃联合循环可加热更多的循环工质，因此 ISCC 方案中的汽轮机、余热锅炉都要比相应的联合循环方案中的大。在没有太阳能的情况下，普通蒸燃联合循环部分可单独运行。

近年来，世界范围内加快了 ISCC 技术的研究和发展步伐。目前国际上有多个 ISCC 电站正在运行。



图 1.5-19 国外投运的 ISCC 电站

## 5.2 塔式聚光太阳能热发电

塔式太阳能发电概念于 20 世纪 70 年代就已提出，其基本原理是利用太阳能集热系统将太阳热能转换并储存在传热介质(水、熔盐或空气等)中，再用该高温传热介质加热蒸汽至 10MPa，500℃以上，驱动常规郎肯循环汽轮发电机组发电。这种发电方式无需常规能源，其动力的供给完全来自于集热系统内因太阳辐射所产生的高温传热介质。基于这一原理构建的塔式太阳能发电系统主要由定日镜阵列、高塔、受热器、传热流体、换热部件、蓄热系统、控制系统、汽轮机和发电系统等部分组成，属于太阳能、蓄热与发电三大技术的创新性组合应用。图 1.5-20 所示为该项技术的结构与原理。

目前正在运行的塔式太阳能电站有美国 Sierra SunTower (5MW, eSolar)、西班牙 Gemasolar 电站(19.9MW)、西班牙 PS10 电站(11MW) 和 PS20 (20MW) 电站。

大型受热器位于一高塔上，定日镜群以高塔为中心，呈圆周状分

布，以便将太阳光精确地聚焦到高塔顶部的受热器上，将受热器中的传热介质加热至  $500^{\circ}\text{C}$  以上，存入高温储罐。需要时用泵将高温传热介质泵入蒸汽发生器内，与给水进行热交换产生  $10\text{Mpa}$ ,  $500^{\circ}\text{C}$  以上的蒸汽，最后利用该高温高压蒸汽驱动郎肯循环汽轮发电机组发电。汽轮机排汽经冷凝器冷凝后泵回给水系统，供蒸汽发生器重复循环利用。高温传热介质在蒸汽发生器中经热交换后，温度降至  $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ ，被泵入低温储罐储存，需用时，再泵送回高塔上受热器内加热。传热介质沿受热器→高温储罐→蒸汽发生器→低温储罐循环流动，所发生的能量转换过程为：太阳热能(定日镜场)→传热介质内能(受热器)→蒸汽动能(蒸汽发生器)→电能(汽轮发电机)。

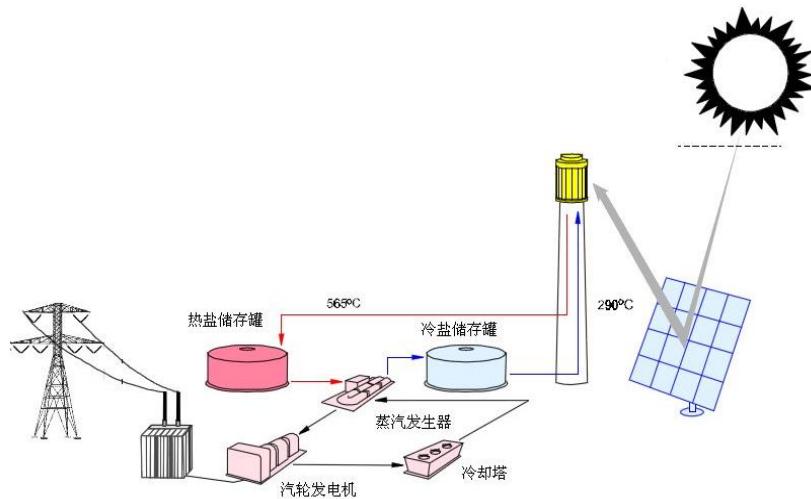


图 1.5-20 塔式太阳能热力发电系统图



图 1.5-21 西班牙 GemaSolar 电站 (19.9MW)

塔式太阳能发电系统采用成熟的常规能源技术，仅是热能供给部分由太阳能取代化石燃料，从而降低了技术难度和投资风险。其他特点还包括：

(1) 定日镜采用双轴跟踪，将太阳光精确地聚焦到位于高塔顶部的受热器上，聚光倍数高达 500℃以上，易达到较高温度，但跟踪控制系统复杂，代价太高，目前技术条件下，难以实现商业化。

(2) 能量集中过程是靠定日镜反射太阳光线一次完成，且受热器散热面积相对较小，因而光-热转换效率较高。与其它几种太阳能热力发电相比，需要的土地面积小。发电效率除与辐射强度有关外，还随定日镜面积和塔高的增加而提高，为获得较高的效率和经济性，须构建大功率(如 100MW)的电站。

(3) 备有足够大的高温储能系统，延长了发电时间，蓄热系统白天吸热，阴天或夜晚将所储存的热量释放出来加热蒸汽，使电站在夜间能够持续发电，减少了对天气的依赖性，且不需要化石燃料。

(4) 集热器安装在高塔上，安装、维修、操作等不便，而且输送管路系统复杂，热损较大。



图 1.5-22 西班牙塔式 PS10 和 PS20 太阳能电站

### 5.2.1 定日镜技术

定日镜是一种由镜面(反射镜)、镜架(支撑结构)、跟踪传动机构及其控制系统等组成的聚光装置，用于跟踪接收并聚集反射太阳光线进入位于接收塔顶部的集热器内，是塔式太阳能热发电站的主要装置之一。

为确保塔式太阳能热发电站的正常、稳定、安全和高效运行，定日镜的总体性能应达到如下基本要求：镜面反射率高、平整度误差小；整体结构机械强度高、能够抵御8级台风袭击；运行稳定、聚光定位精度高；操控灵活、紧急情况可快速撤离；可全天候工作；可大批量生产；易于安装和维护，工作寿命长等。

定日镜在电站中不仅数量最多、占据场地最大，而且是工程投资的重头。美国Solar Two电站的定日镜建造费用占整个电站造价的50%以上。虽然近年来定日镜成本已经不断降低，但在2004年建成的SolarTres塔式太阳能热发电系统中，定日镜建造费用仍是构成工程总成本的最大部分，达43%。因此，降低定日镜建造费用，对于降低整个电站工程投资是至关重要的，仍是今后的一个重要研发方向。

目前，定日镜的研究开发以提高工作效率、控制精度、运行稳定性和安全可靠性以及降低建造成本为总体目标。现分别针对定日镜各组成部分，综述其研发现状及关键技术问题。

反射镜是定日镜的核心组件。从镜表面形状上讲，主要有平凹面镜、曲面镜等几种。在塔式太阳能热发电站中，由于定日镜距位于接收塔顶部的太阳能接收器较远，为了使阳光经定日镜反射后不致产生过大的散焦，把95%以上的反射阳光聚集到集热器内，目前国内采用的定日镜大多是镜表面具有微小弧度(16')的平凹面镜。从镜面材料上看，主要有两种反射镜，(1)张力金属膜反射镜，其镜面是用0.2~0.5mm厚的不锈钢等金属材料制作而成，可以通过调节反射镜内部压力来调整张力金属膜的曲度。这种定日镜的优点是其镜面由一整面连续的金属膜构成，可以仅仅通过调节定日镜的内部压力调整定日镜的焦点，而不像玻璃定日镜那样由多块拼接而成。这种定日镜自身难以逾越的缺点是反射率较低、结构复杂。(2)玻璃反射镜。目前已建成投产的塔式热电站的定日镜以及待建、拟建的塔式热电项目等均采用玻璃反射镜。它的优点是重量轻，抗变形能力强，反射率高，易清洁等。目前，玻璃反射镜采用的大多是玻璃背面反射镜。由于银的太阳吸收比低，反射率可达97%，所以银是最适合用于太阳能反射的材料之一，但由于它在户外环境会迅速退化，因此必须予以保护。

考虑到定日镜的耐候性、机械强度等原因，国际上现有的绝大多数塔式太阳能热发电站都采用了金属定日镜架。定日镜架主要有两种，一种是钢板结构镜架，其抗风沙强度较好，对镜面有保护作用，因此镜本身可以做得很薄，有利于平整曲面的实现；另一种是钢框架结构镜架，这种结构减小了镜面的重量，即减小了定日镜运行时的能耗，使之更经济。但这种钢框架结构也带来一个新问题，即镜面支架与镜面之间的连接，既要考虑不破坏镜面涂层，又要考虑镜子与支架之间结合的牢固性，还要有利于雨水顺利排出，以避免雨水浸泡对镜子的破坏。目前，对此主要可采取以下三种方法：在镜面最外层防护漆上粘结上陶瓷垫片，用于与支撑物的连接；用胶粘结；用铆钉固定。



图1.5-23 塔式太阳能发电定日镜

### 5.2.2 集热器

集热器(又称太阳锅炉)位于中央高塔顶部，是SPT电站中光-热转换的关键部件，其作用是将定日镜群汇集来的太阳光能转换为热能，加热工作介质至500℃以上。塔高与定日镜反射光仰角相关，当仰角大于60°时，集热效率可达90%以上。受热器的设计应充分考虑聚焦面的能量密度分布规律、被加热工质的物理特性及被加热的状态参数。在商业运行的塔式太阳能热发电中，多采用腔式或者外表面吸热器。

腔式吸热器的工作原理是多块管板围成一个具有一定开口尺寸的空腔，太阳光从空腔开口入射到空腔内部的管壁上，经管壁吸收，再与内部流动工质进行换热。显然这种腔式吸热器的热损失可以降到很低，适用于采用高参数、高效率的汽轮机发电循环。

外表面吸热器就是外维护结构与吸热面一体的太阳能吸热器，受热表面直接暴露在外，太阳光投射到吸热表面进行换热，与腔体式相比，其热损失显然要大一些，但是这种结构的吸热器可以更容易接收到定日镜边缘反射的太阳辐射，如美国的Solar One试验电站吸热器，

该集热器为圆柱形(直径7m、高13.7m)，外壁由面板拼装而成，每块面板装有70根直径12.7mm的镍合金管，集热器利用定日镜汇集来的太阳光将管内的水加热成10.3Mpa，515℃的过热蒸汽，蒸汽带动汽轮发电机组发电。SolarOne改进成SolarTwo后，采用熔盐为蓄热介质，并对受热器作了重新设计和制造，面板改由32根薄壁不锈钢管组成，管外壁喷一层可抗高温和热循环黑色特种漆，可吸收95%的入射光。

就吸热器材料而言，金属吸热器在整体密封性、导热性和承压能力方面均性能优良，但在高温性能方面比非金属材料吸热器差；非金属吸热器则在耐高温、耐腐蚀以及使用寿命方面性能优良，虽然承压能力较弱，吸热器体积也比较大，但是对于高参数、高效率的汽轮发电循环是适用的。目前非金属材料吸热器的制造主要有陶瓷、石墨、玻璃和氟塑料等，其中石墨材料具有优良的导热性和一定的力学性能，通过浸渍酚醛树脂进行不透性处理后，可以具有非常优良的化学稳定性；陶瓷材料具有超强的耐腐蚀性能和抗渗透性能，但耐温急变的性能较差，脆性很大。同时为增强对太阳光辐射的吸收效果，减少吸热器对外的辐射损失，常在吸收器表面覆盖选择性涂层。

目前采用的传热工质一般为水/蒸汽、熔融盐和空气。

### (1) 水/蒸汽吸热器技术

水/蒸汽吸热器实质上就是一个由聚焦太阳能加热的蒸汽发生器或锅炉，产生高压蒸汽直接推动汽轮机发电。以水作为吸热器的传热介质具有其他工质难以替代的优点，有大量的电站设计和运行经验，其附属设备也已商品化。使得导热率高、无毒、无腐蚀、易于运输等优点使其在太阳能热发电技术中得到了广泛的应用。

采用水工质作为传热工质的主要问题是：水/蒸汽在高温时有高压问题，这对传热及输送系统的耐压等级提出较高要求；传热工质在吸热过程中存在两相流问题；蒸汽的热容很小，蒸汽段管路容易发生过热烧蚀问题。另外，存在启动时间长、太阳辐射能不稳定时造成蒸汽轮机频繁启停、热能损失大、电站热效率低等制约因素，使电站净发电量收到较大影响。

## (2) 熔融盐吸热器技术

以熔融盐作为吸热器传热工质的优点有：系统无压运行，安全性提高；提高了吸热器的温度，且传热工质在整个吸热、传热循环中无相变，由于熔融盐热容大，吸热器可承受较高的热流密度，从而使吸热器外形紧凑，减少对流及辐射损失，提高了吸热器的效率；由于熔融盐本身是很好的蓄热材料，因为太阳能热力系统的传热、蓄热可采用同一工质，使系统极大地简化。特别是采用熔融盐中间回路后，集热系统和发电系统可以相互独立运行，汽轮发电机可以避免频繁启停的工况发生。

在实际运行中，熔融盐吸热器主要经受三方面的考验：

①吸热器需经受峰值为 $850\text{kW/m}^2$ 的辐射热流密度，这将在吸热管内形成很高的温度梯度，造成吸热管的膨胀及塑性变形；

②由于云的突然遮挡及系统每天的启停等，将使吸热管在30年预期寿命期内经受约36000次速度达 $2.8^\circ\text{C/S}$ 的温度变化；

③由于熔融盐的熔点较高，在太阳落山后使吸热器及管路保持高温以避免熔融盐凝固需消耗大量的能量。应防止发生夜间因冷凝而引起的氯化物腐蚀开裂。

因此，吸热管及输送管道必须选择优质材料，以承受交变高温和强腐蚀的考验。针对这些问题，Solar Two电站采用了316H不锈钢。

Solar Tres电站此采用了高镍合金，可以抵挡氯化物腐蚀问题，并可承受 $1.5\text{MW/m}^2$ 的辐射热流密度。

## (3) 空气吸热器技术

早期建设的塔式太阳能热发电站中，有些采用控制作为吸热与传热介质，空气经高温加热后（ $1000^\circ\text{C}$ 以上），利用燃气轮机进行发电。其好处在于在夜晚或太阳能不充足时，可燃用天然气来推动燃机发电，可省去辅助燃料系统及蓄热系统，但该技术发展并不成熟，目前不适合大规模工程应用。我国南京江宁塔式 $75\text{kW}$ 发电系统采用的就是该种技术。

空气吸热器技术有以下特点：

① 可以产生1000℃以上的高温空气，利用空气透平，即可构成高效率的布雷顿循环；

② 不会发生因相变带来的问题；

③ 易于运行和维护，启动快，无需附加保温盒冷启动加热系统。

早期的容积式吸热器沿用了传统的吸热管结构，并在PSA进行了测试，所测试的金属管空气吸热器可在质量流量为 $2.45\text{kg/s}$ 时产生压力为 $0.95\text{Mpa}$ 、出口温度为 $800^\circ\text{C}$ 的蒸汽。由于管式空气吸热器的能留密度太低，致使其一直没有在塔式太阳能热发电系统中应用。而另一种容积式吸热器在塔式太阳能热发电系统中得到广泛应用，大量测试表明，容积式吸热器可产生 $1000^\circ\text{C}$ 以上的高温空气，平均热流密度达 $400\text{kW/m}^2$ ，峰值流密度达 $1000\text{kW/m}^2$ 。

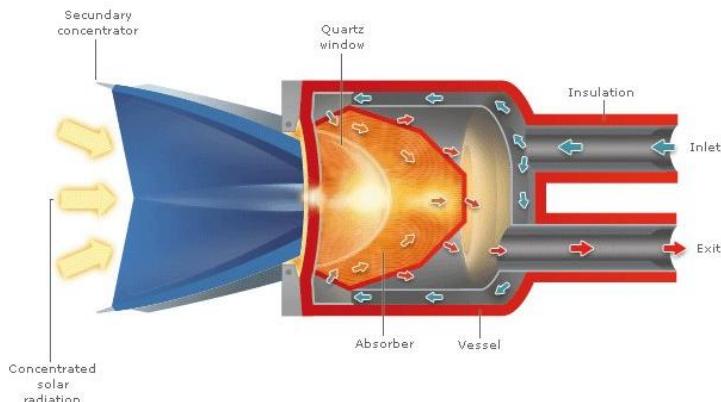


图1.5-24 塔式太阳能集热器工作示意图

### 5.2.3 蓄热系统

#### 5.2.3.1 蓄热系统功能及设计原则

太阳辐射强度具有显著的不稳定性和间断性，为弥补这一不足，使之从辅助能源最终变为一种使用方便可靠的清洁能源，储能问题的解决是关键的一环。对于太阳能热力发电，储能的作用是调节负荷、降低设备容量和投资成本，进一步提高太阳能资源利用效率和设备利用率，提高太阳能热力发电系统的可靠性和经济性。

就目前的技术发展水平而论，储能是整个太阳能利用技术中的薄弱环节。太阳能显热储能技术相对比较成熟，目前就具有实用价值。显热储能系统的研究工作集中在新材料、新工艺、新设计等方面。储能材料主要有熔盐、油(岩石)、陶瓷等，美、法等国在显热储能系统

研制方面都取得了实质性的进展。

太阳能热发电站储热装置的设计原则有：

(1) 由于储热系统是为汽轮机提供能量，因此单纯从热力学第一定律出发分析系统是不全面的，而采用(火用)分析，同样忽视了Rankinc 循环的介质温度特性，因此，对于某一储热系统的评价和热经济学优化需要分析整个过程，包括太阳能场和热力学循环；

(2) 储热系统能够实现充热、放热中的电力转换，通常情况下，高的传热效率伴随着热力学不可逆性的增加，使得系统的容量较设计值低；

(3) 储热材料要求其不可燃、无毒、廉价、易于获取，并能够延长高温使用寿命。

### 5.2.3.2 蓄热系统分类

太阳辐射强度具有显著的不稳定性和间断性，为弥补这一不足，储能问题的解决是关键的一环。对于太阳能热力发电，储能的作用是调节负荷，进一步提高太阳能资源利用效率和设备利用率，提高太阳能热力发电系统的可靠性和经济性。太阳能显热储能技术相对比较成熟，目前具有实用价值。

按热能存储方式的不同，太阳能热发电蓄热技术可已分为显热蓄热、潜热蓄热和化学反应蓄热三种方式。

#### (4) 显热蓄热

显热蓄热是通过提高蓄热介质的温度来实现热存储，是三种热能存储方式中原理最简单、技术最成熟的，被广泛应用于太阳能热发电的高温蓄热系统，根据蓄热介质的物理特性分为液体显热蓄热和固体显热蓄热及固体/液体双介质显热蓄热。

#### (2) 潜热蓄热

潜热蓄热是利用蓄热介质发生相变时吸收或放出热量来实现能量的储存，具有蓄热密度大、充放热过程温度波动范围小、结构紧凑等特点，自二十世纪七十年代就引起人们极大的关。目前，太阳能高温潜热蓄热技术应用于太阳能热发电站还处于实验室研究阶段，相变材

料的高温性能有待于进一步验证。

### (5) 化学反应热蓄热

化学反应热蓄热是通过化学反应的反应热进行蓄热，具有储能密度高、可以长期储存等特点。美国太阳能研究中心曾经指出，化学反应热蓄热是一种非常有潜力的高温蓄热方式，且成本有可能降至相对较低的水平。利用氢氧化钙或氨的分解与合成反应蓄热，这种化学反应热蓄热方式在理论上可以满足太阳能热发电的要求，对于能否满足太阳能热发电系统动力要求，以及如何与发电系统结合的问题也还处于实验室研究阶段。

#### 5.2.3.3 储热系统容量选择

储热系统容量即为系统能够存储和提供能量的大小。储热系统的设计不仅仅是技术性问题，也关系电站的经济性问题。储热系统容量选择直接影响到太阳能热发电站的投资成本及运行费用。储热装置有以下三种典型的应用模式。

### (6) 缓冲器式

如果确定太阳能热电站为带基荷电厂，则储热系统可以选择缓冲器式应用模式以展平太阳能的输入。由于有云遮挡太阳将显著地影响太阳能热发电系统的运行，这种间歇式的隔离将降低发电效率，主要是因为汽轮机将在部分负荷运行而且处在瞬态不稳定的工作模式。如果在一段时间内经常性的且足够数量的云遮，将会导致汽轮机蒸汽参数大幅度波动，若没有其他的辅助能源供给来平抑蒸汽参数的扰动，汽轮机随时可能跳闸，被迫停止运行。缓冲器式储热系统的主要特征是可以设置较小的存储容量，典型的储能时间为汽轮机满负荷运行半小时。

### (2) 分配能量式

如果确定太阳能热电站为调峰电厂，则储热系统需选择分配能量应用模式，使储热系统具有足够的能力收集太阳充足时的部分或者全部能量用于随后的用电高峰期或者电价较高的时段。这种分配性或者转移时间应用模式需要设置较大容量的热能存储系统，但是不需要提

高太阳能因子或者增加集热面积。分配能量式储热系统容量为汽轮机满负荷运行3-6小时。

#### (7) 增加年运行太阳能因子式

如果确定太阳能热电站具有常规电站的运行特性，即无论白天和黑夜均具有带负荷能力，则储热系统需选择增加年运行太阳能因子应用模式。该种模式的目的就是延长太阳能热电站在全年的运行时间，增加太阳能在电网的发电份额，因此需要设置更大容量的热能存储系统，和相对于不设置储热系统时更大的集热面积，可实现全部运行时间内的纯太阳能发电。



图15-25 双罐间接熔融盐热储能系统布置

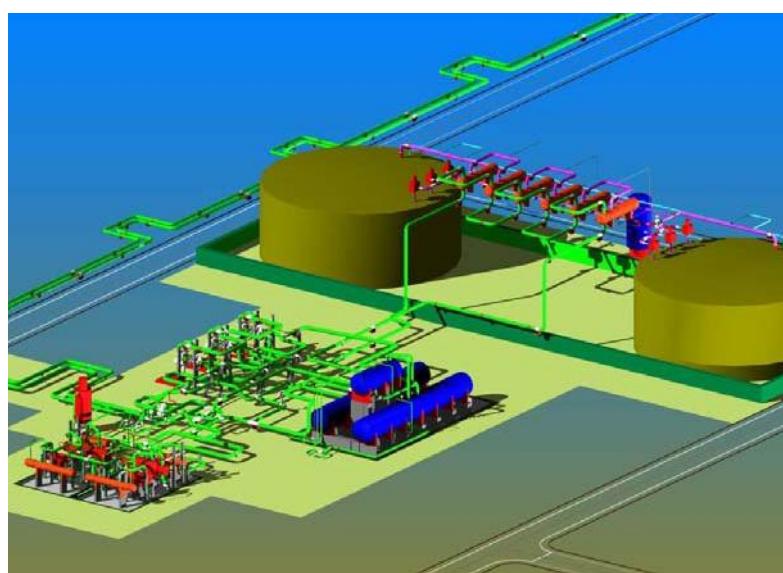


图1.5-25 双罐间接熔融盐热储能系统模型图

#### 5.2.3.4 影响储热系统的关键因素

仅从技术角度考虑，影响储热系统的关键因素有：

- (1) 储热材料具有高的单位体积或者单位质量热能存储密度；
- (2) 储热介质与换热流体间具有良好的换热性能；
- (3) 储热介质机械、化学性质稳定；
- (4) 储热介质、换热器、传热流体化学相容，不发生反应；
- (5) 充热、放热过程在经过大量循环后完全可逆；
- (6) 热损失小；
- (7) 易于控制。

影响储热系统成本控制的主要因素有储热材料成本，充热和放热过程使用的换热器的成本及储热系统占地费用和保温材料成本。

### 5.3 碟式热发电

借助于双轴跟踪，抛物型碟式镜面将接收的太阳能集中在其焦点的接收器上。接收器吸收这部分辐射能并将其转换成热能。在接收器上安装热电转换装置，比如斯特林发动机或朗肯循环热机等，从而将热能转换成电能。

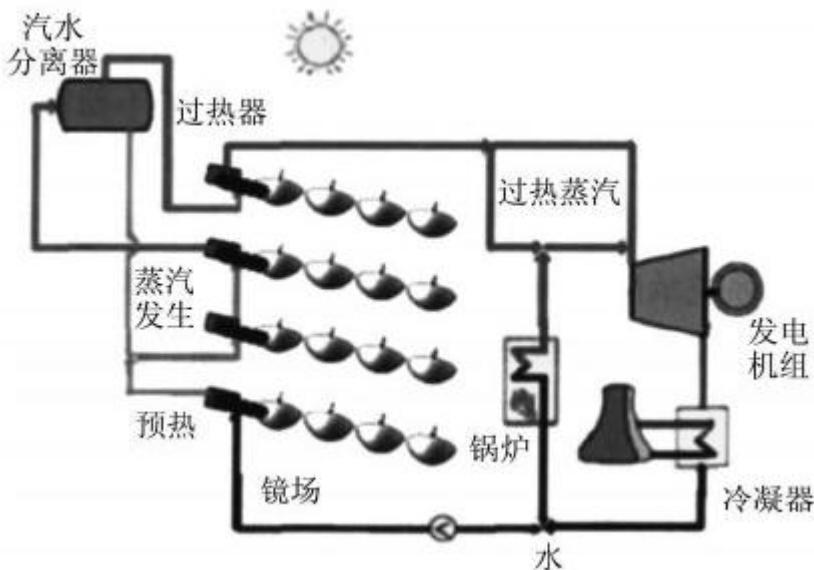


图 1.5-26 碟式太阳能热发电系统图

单个碟式斯特林发电装置的容量范围在 5~50kW 之间。用氦气或氢气作工质，工作温度达 800℃，斯特林发动机能量转换效率较高。

碟式系统可以是单独的装置，也可以是由碟群构成以输出大容量电力。



图 1.5-27 碟式发电系统

多碟式系统以美国 CENICOM 公司和以色列 HelioFocus 公司为主，传热介质采用空气，可配置热蓄能装置，可做到能量的收集和发电分开。

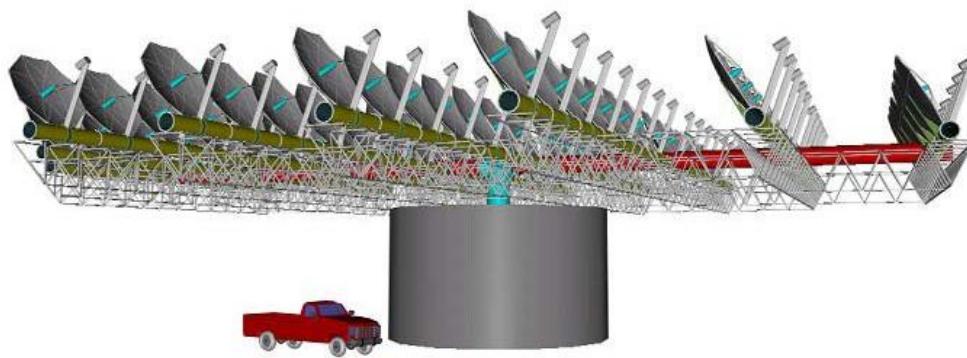


图 1.5-28 多碟式太阳能热发电系统

#### 5.4 菲涅尔太阳能热发电系统

菲涅尔热发电技术的聚光形式属于太阳能反射线聚焦形式。但其聚光方法却与槽式不同。如 1.5-29 所示，菲涅尔太阳能热发电技术是利用具有跟踪太阳运动装置的主反射镜列将太阳光反射聚集到固定的具有二次曲面的二级反射镜和集热管上，集热管将太阳光的辐射能转化为热能，并加热集热管内高温高压的水，产生蒸汽推动汽轮机发电

机组发电。

太阳聚光镜场由主镜场基架、主镜面场、太阳跟踪装置、二级反射镜、集热管、控制装置六个部分组成，其中二级反射镜和集热管组合起来又称为太阳能接收器。系统运行中，控制系统控制太阳跟踪装置驱动主镜场中的平面镜绕其转动轴旋转，使太阳光被反射聚集到二级反射镜和吸收器上，吸收器吸收光能并转化为工质的热能，从而实现太阳光能到热能的转化。其主镜场反射镜采用平板反射镜，平板反射镜与镜座经过机械连接具有微小的弧面，替代以前使用的曲面玻璃反射镜，避免了高成本投入。太阳能接受器不采用真空技术，接受器的受光孔用平板玻璃封接，避免因内外空气对流产生的对流换热损失。吸收器可采用非真空集热管技术，二级反射镜具有保温隔热的设计结构以降低因吸收器热辐射和二级反射镜热传导造成的热量损失。主镜场的镜列水平放置，平面镜关于转动轴对称，镜场的风载比槽式系统要小得多，因此主镜场基架设计简单，所用材料的重量轻，成本低。

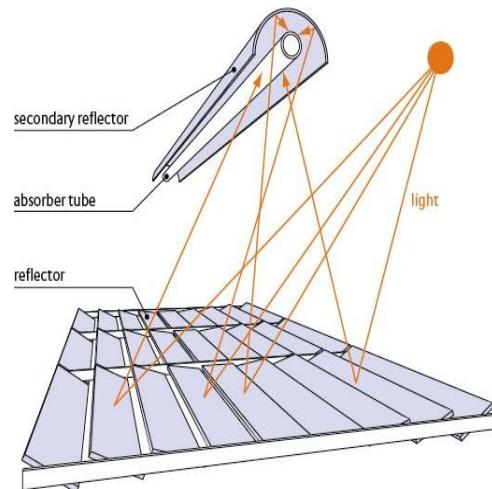


图 1.5-29 菲涅尔装置示意图



图 1.5-30 菲涅尔式发电装置

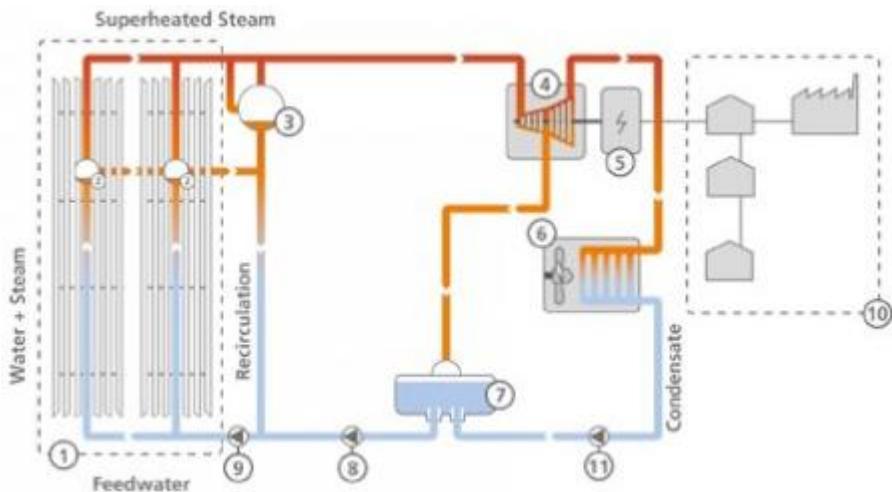


图 1.5-31 西班牙 Puerto Errado 2 期电站

菲涅尔试验示范系统式热发电系统部件一般为标准部件。集热管悬空固定后就省去了槽式和碟式系统中需旋转的高压弯管和旋转连结部件。热交换过程直接产生蒸汽输送到动力装置或者经过热交换器。相比其他类型太阳能聚光方式，可靠性更高，平面反射镜面更易清洁、单位建设成本更低。

工程设计中，安装简单、施工期短。高度低，抗风性能好。没有旋转弯头，减少了泄漏等问题。利用水/蒸汽系统，运行灵活、降低了泵功损耗。且对场地平整度要求不高，可有 5% 度的倾斜度。维修清洗方便。追踪系统可同时控制多个聚光装置。

目前可产生饱和蒸汽或400℃左右的过热蒸汽。镜场效率70%左右，整个光热电转化效率目前较低。蒸汽参数可以进一步提高，从而提高整个系统效率。但菲涅尔试验示范系统的产生的蒸汽温度比塔式技术低、热损失较大。对聚焦技术和集热管性能有一定要求。



1.集热场, 2.汽水分离器, 3.平衡罐, 4.汽轮机, 5.发电机, 6.空冷凝汽器  
7.除氧器, 8.给水泵, 9.循环泵, 10.电网, 11.凝结水泵

图 1.5-32 ABB NOVATEC 技术系统流程图

## 5.5 太阳能热发电控制技术

目前广泛采用的跟踪控制方式是“开环”方式，即利用时钟来控制定日镜的转动角度。采用传感器瞬时测量值作反馈的“闭环”控制方式，虽然在任何气候条件下都能得到稳定而可靠的跟踪控制，但由于成本等问题，一直没有被规模化使用。但“闭环”跟踪控制方式是定日镜跟踪控制系统的发展趋势，应对其作进一步的研究。

### 5.5.1 塔式太阳能发电系统定日镜控制

#### (1) 跟踪传动机构

目前，定日镜跟踪太阳的方式主要有以下两种：方位角——仰角跟踪方式以及自旋——仰角跟踪方式。方位角——仰角跟踪方式是指定日镜运行时采用转动基座(圆形底座式)或转动基座上部转动机构(独臂支架式)来调整定日镜方位变化，同时调整镜面仰角的方式。自旋——仰角跟踪方式是指采用镜面白旋，同时调整镜面仰角的方式来

实现定日镜的运行跟踪，这是由新的聚光跟踪理论推导出的一种新的跟踪方法，也叫“陈氏跟踪方法”。陈氏跟踪法比传统的聚光跟踪方法能更有效的接收太阳能法比传统的聚光跟踪方法能更有效的接收太阳能。

定日镜的传动方式多采用齿轮传动、液压传动或两者相结合的方式。由于平面镜位置的微小变化都将造成反射光在较大范围的明显偏差，因此目前采用的多是无间隙齿轮传动或液压传动机构。在定日镜的设计研制中，传动部件的密封防沙和防润滑油外泄等也是重要环节。传动系统选择的主要依据是：消耗功率最小、跟踪精确性好、制造成本最低、能满足沙漠环境要求、具有模块化生产可能性，密封符合美国IP54标准等。

## （2）控制系统

定日镜的控制系统，使得定日镜实现将不同时刻的太阳直射辐射全部反射到同一个位置的目标。太阳光定点投射的含义即：镜入射光线的方位角和高度角均是变化的，但目标点的位置不变。从实现跟踪的方式上讲，有程序控制、传感器控制以及程序、传感器混合控制三种方式。程序控制方式，就是按计算的太阳运动规律来控制跟踪机构的运动，它的缺点是存在累积误差。传感器控制方式，是由传感器实时测出入射太阳辐射的方向，以此控制跟踪机构的运动，它的缺点是在多云的条件下难以找到反射镜面正确定位的方向。程序、传感器混合控制方式实际上就是以程序控制为主，采用传感器实时监测作反馈的“闭环”控制方式，这种控制方式对程序进行了累积误差修正，使之在任何气候条件下都能得到稳定而可靠的跟踪控制。图1.5-33即为“闭环”控制方式的原理流程框图。

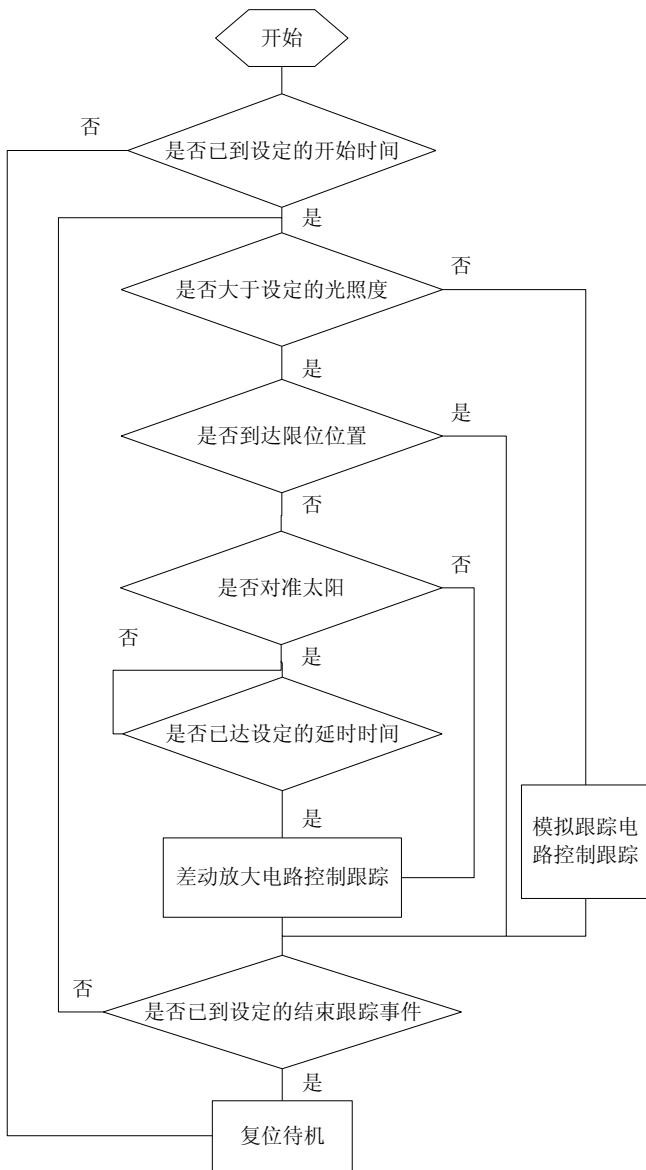


图 1.5-33 闭环控制方式的原理流程框图

目前广泛采用的跟踪控制方式是“开环”方式，即利用时钟来控制日镜的转动角度。从上世纪80年代美国的Solar One到2005年西班牙的PS10均采用了这种控制方式。而以程序控制为主，采用传感器瞬时测量值作反馈的“闭环”控制方式，虽然在任何气候条件下都能得到稳定而可靠的跟踪控制，但由于成本和可靠性等问题，一直没有被规模化正式使用。但“闭环”跟踪控制方式是定日镜跟踪控制系统的发展趋势，应对其作进一步的研究。

### 5.5.2 槽式太阳能发电系统聚光镜控制

抛物柱面槽式聚光集热器收集太阳的直射光线，因此集热器的聚光系统必须使光轴指向太阳，即跟踪太阳。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。两轴跟踪要求入射光和主光轴方向一致；单轴跟踪只要求入射光线位于含有主光轴和焦线的平面内。两轴跟踪根据太阳高度角和赤纬角的变化情况而设计，它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。单轴跟踪要求入射光线位于含有主光轴和焦线的平面就行，且结构简单，跟踪精度要求不高或阳光充裕的地方一般优先考虑单轴跟踪。

槽型抛物面反射镜根据其采光方式，分为东西向和南北向两种布置形式。东西放置只作定期调整；南北放置时一般采用单轴跟踪方式。跟踪方式分为开环、闭环和开闭环相结合三种控制方式。开环控制由总控制室计算机计算出太阳能的位置，控制电机带动聚光器绕轴转动，跟踪太阳。优点是控制结构简单；缺点是易产生累积误差。每组聚光集热器均配有一个伺服电机，由传感器测定太阳位置，通过总控制室计算机控制伺服电机，带动聚光器绕轴转动，跟踪太阳。传感器的跟踪精度为 $0.50^\circ$ 。优点是精度高；缺点是大片乌云过后，无法实现跟踪。采用开、闭环控制相结合的方式则克服了上述两种方式的缺点，效果较好。

南北向放置时，除了正常的平放东西跟踪外，还可将集热器作一定角度的倾斜，在倾斜角度达到当地纬度时，效果最佳，聚光效率提高达30%。

塔式太阳能热发电站镜场中的众多定日镜，每台都必须作独立的双轴跟踪；而槽式太阳能热发电中多个聚光单元只作同步跟踪，跟踪

装置大为简化，投资成本大为降低。

目前有以下几种对日跟踪技术：

(1) 以低沸点工质作为传感元件，采用液压运动实现了单轴太阳自动跟踪。

(2) 采用由两个同心圆组成的等面积五象限光电检测装置，当光线与光电池垂直时其投影光斑经过透镜后正好完全覆盖五片光电池，而当光线与光电池成一夹角时，投影光斑必然发生偏移，将光斑在光电池上的偏移转换成光电流差值的变化，实现了自动跟踪太阳。

(3) 从太阳方位变化规律的分析计算入手，利用天文时间提供准确可靠的自动跟踪信号，利用伺服电机带动聚光器实现方位角的自动跟踪，而将俯仰角的缓慢变化按其非线性规律反映在一个特定的凸轮曲面上，通过丝杠转动时形成的一维平动带动凸轮产生进或退，实现了俯仰角的跟踪。这种一维驱动二维跟踪的方式具有结构简单，成本低等新特点。

(4) 则将传感系统和程控系统相结合，采用定时法原理进行程序控制，同时利用传感器对聚光器进行实时检测和定位，消除由机械结构等因素引起的累计误差，利用步进电机实现了高度角和方位角两个方向的跟踪。

(5) 陕西师范大学的王存义教授发明的簧轮自动跟日机实现了广义时角自动跟踪和广义赤纬跟踪，并且具有成本低，不耗电，精度高，运载能力大等优点，达到了国际领先水平。

每个太阳集热器组合(SCA)控制系统都包括有就地控制器(LOC)、液压驱动系统、和场地监控器(FSC)。跟踪系统由就地控制器(LOC)来控制，LOC 安装在驱动塔架上，信号线和动力线由 LOC 连接至液压机构和传感器。太阳能集热场受场地监控器(FSC)的控制，以一个整体来运行。FSC 是位于镜场控制室的计算机控制系统，与每个 SCA 通讯，并与电厂的分散控制系统(DCS) 通讯。

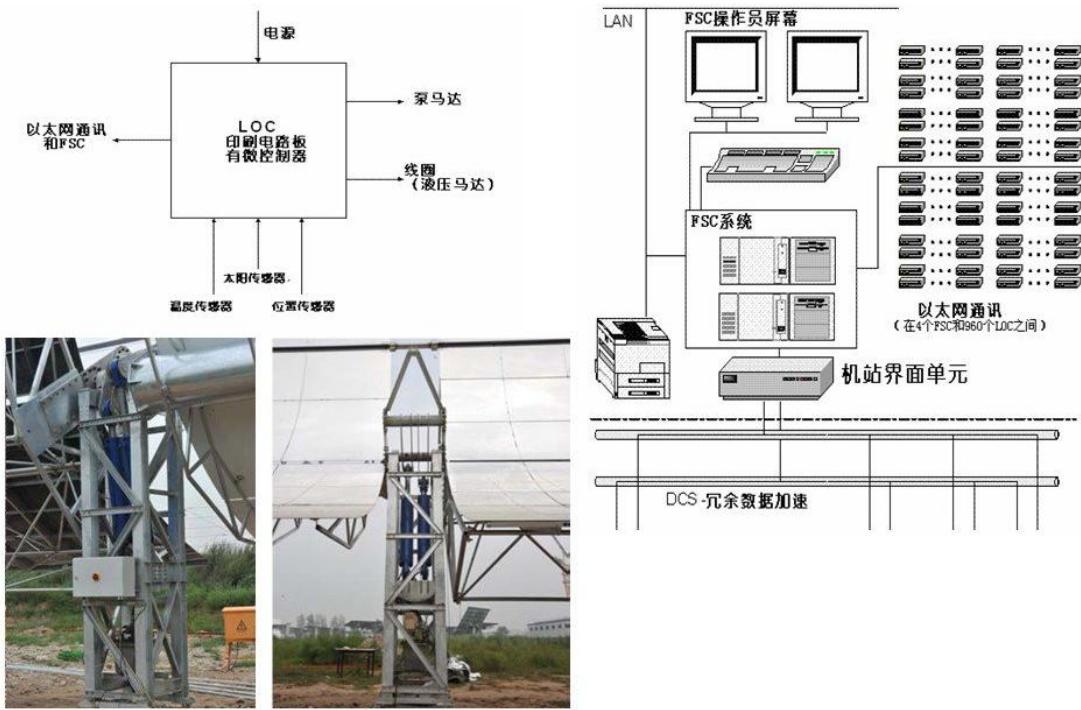


图 1.5-34 槽式太阳能跟踪控制系统

### 5.5.3 碟式太阳能发电系统聚光器控制

碟式太阳能聚光镜的控制与塔式定日镜控制类似，不论是采用极轴坐标系统还是地平坐标系统，太阳运行的位置变化都是可以预测的，通过数学上对太阳轨迹的预测完成对日跟踪。理论上可以精确地跟踪太阳运行轨迹，因此可以采用程序控制。

但程序跟踪存在许多局限性，主要是在开始运行前需要精确定位，出现误差后不能自动调整等。因此使用程序跟踪方法时，需要定期的人为调整聚光器的方向，使其轴线正对太阳。

传感器跟踪是通过光敏元件的输出，判断聚光镜轴线是否正对太阳。通过聚光镜轴线与理想位置的偏差调整驱动装置的运动状态，从而调整聚光镜位置使轴线指向太阳。传感器跟踪也存在响应慢、精度差、稳定性差、某些情况下出现错误跟踪等缺点。

两者结合，各取其长处，可以获得较满意的跟踪结果。采用程序跟踪和传感器跟踪相结合的控制方式，即采用程序控制方式，并利用光学传感器对聚光器做自动定位。

系统的工作过程为：

(1) 微机系统通过当地时间，计算出太阳所在的位置，通过驱动系统驱动聚光器转动。

(2) 为保证驱动系统的精度，对驱动电机测速，输入到微机系统，并通过增量式算法计算出聚光器的位置作为反馈量，形成闭环控制。

(3) 测速装置可能出现误差，导致系统的位置反馈量出现累积误差。当传感器发现这一误差时，将误差量提供给微机，微机根据误差进行相应的调整。

控制系统的硬件方案设计如图1.5-35。

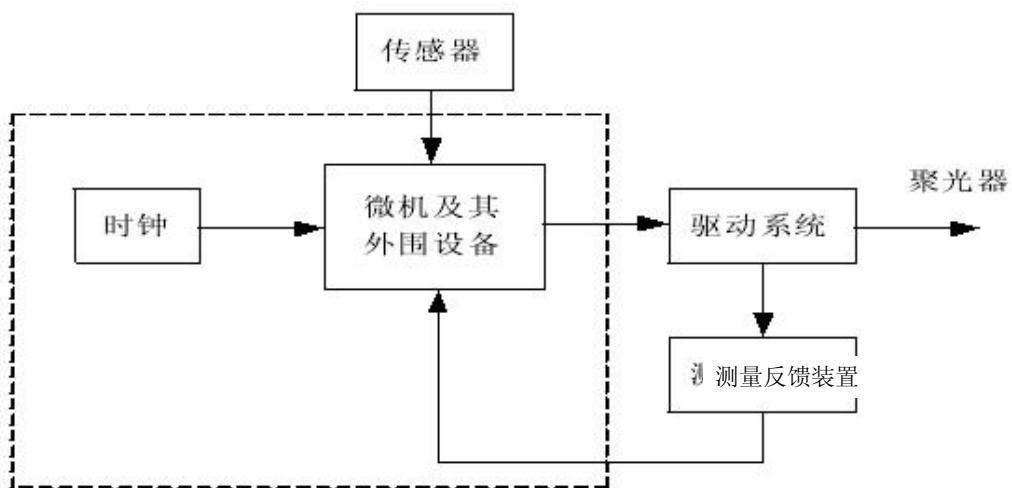


图 1.5-35 硬件电路结构

## 5.6 太阳能镜场的运行维护及检修

太阳能热发电站镜场的运行维护及检修主要分为对镜面的日常运行维护及对支架的定期检修。

由于反射镜面是长期暴露在大气条件下工作的，不断有尘土沉积在表面，从而大大影响反射面的性能。因此，如何保持镜面经常清洁，目前仍是所有聚光集热技术中面临的难题之一。一种方法是在反光镜表面覆盖一层低表面张力的涂层，使其具有抗污垢的作用。但已有的经验表明，在目前技术条件下，唯一有效可行的还是采用机械清洗设备的方法，定期对镜面进行清洗，一般时间间隔为2周为宜。图1.5-36为美国Mr. Twister公司的镜面清洗机在清洗槽式太阳能镜面污垢。



图1.5-36 Mr. Twister反光镜清洗机



图1.5-37 西班牙Abengoa公司反射镜清洗车

对于支架的定期检修，则主要应针对跟踪传感器的精度、步进电

机进行维修和更换。

## 6 太阳能光热发电的历史、现状及发展趋势

### 6.1 国内外太阳能热发电综述

为了减少对常规能源的依赖，特别是为了应对全球气候变化，兑现“京都议定书”规定的减排温室气体的目标，欧洲国家对可再生能源非常重视。欧盟明确规定，到2010年，可再生能源要占到能源消费量的12%、可再生能源发电要占到全部电力消费的23%。太阳能是重要的可再生能源。因此，西班牙把太阳能作为优先发展的可再生能源予以高度重视。从考察了解的情况来看，西班牙利用太阳能热发电技术成熟，政策落实，太阳能热发电开发利用已成为重要的新型产业，对保障能源安全、增加就业机会、促进电力发展，以及确保能源与环境的协调发展等发挥着重要的作用。

#### 6.1.1 国外太阳能热发电概述

国际上第一座太阳能塔式热发电试验电站是1950年原苏联研制成功的。之后，工业发达国家对太阳能热发电技术进行了广泛的、基础性的探索和研究，但由于其建设成本和运行维护费用太高，所以此后经历了近30年的徘徊，直到80年代初，随着化石燃料发电成本的不断提高，该项技术才得到广泛关注和较快发展。1981年，法国、德国和意大利等9个欧洲国家在意大利西西里岛联合建成了世界首座并网运行的1MWe太阳能塔式热发电站；1982年，美国在加州南部Barstow沙漠建成了10MWe的大型太阳能塔式热发电站（Solar One）；日本、西班牙、以色列、澳大利亚等国也相继建成了不同型式的试验和示范电站，从而促进了太阳能热发电技术的不断发展。更多的工业发达国家，均将太阳能热发电技术作为国家研究开发的重点。截至目前，全世界建造了多座兆瓦级太阳能热发电站，包括美国的SEGS I～IX机组354MW太阳能热电站及Nevada Solar One 64MW机组，西班牙的Andasol 1号机及2号机100MW机组、PS10及PS20塔式太阳能热电站等，投入运行的太阳能热发电站总容量为1285.65MW。

全球的太阳能热发电产业正在迅速增长。截止2009年12月在建的

太阳能热发电站容量约为2.1GW，仅西班牙就有30多项工程。预计到2015年全球的太阳能热发电站装机容量可达24.5GW。在发展中国家，由世界银行贷款的太阳能/燃气轮机联合循环项目在埃及、墨西哥和摩洛哥已经获得批准建设，目前埃及项目已经成功并网发电，墨西哥和摩洛哥项目正在建设当中。目前已建成投产的太阳能热发电项目见下表所示。

表1.6-1 世界上建成投产的太阳能热发电项目

容量 (MW)	名称	国家	位置	技术 路线	备注
0.25	<a href="#">Shiraz solar power plant</a>	<a href="#">伊朗</a>	<a href="#">Shiraz</a>	槽式	
1	<a href="#">Saguaro Solar Power Station</a>	<a href="#">美国</a>	<a href="#">Red Rock</a>	槽式	
1.5	<a href="#">Maricopa Solar</a>	<a href="#">美国</a>	Peoria, Arizona	碟式	
1.5	<a href="#">Jülich Solar Tower</a>	德国	Jülich	塔式	
2	<a href="#">Liddell Power Station Solar Steam Generator</a>	澳大利亚	<a href="#">New South Wales</a>	菲涅尔式	
2	<a href="#">Keahole Solar Power</a>	<a href="#">美国</a>	<a href="#">Hawaii</a>	槽式	
5	<a href="#">Kimberlina Solar Thermal Energy Plant</a>	<a href="#">美国</a>	<a href="#">Bakersfield, California</a>	菲涅尔式	
5	Thai Solar Energy (TSE) 1	泰国	Huaykrachao	槽式	
5	<a href="#">Sierra SunTower</a>	<a href="#">美国</a>	<a href="#">Lancaster</a>	塔式	
5	<a href="#">Archimede solar power plant</a>	意大利	<a href="#">Syracuse, Sicily</a>	槽式	
11	<a href="#">PS10 solar power tower</a>	<a href="#">西班牙</a>	<a href="#">Seville</a>	塔式	
17	<a href="#">Yazd integrated solar combined cycle power station</a>	<a href="#">伊朗</a>	<a href="#">Yazd</a>	槽式	
19.9	<a href="#">Gemasolar</a>	<a href="#">西班牙</a>	Fuentes de Andalucia (Seville)	塔式	
20	Beni Mathar Plant	摩洛哥	Ain Bni Mathar	ISCC	
20	<a href="#">PS20 solar power</a>	<a href="#">西班牙</a>	<a href="#">Seville</a>	塔式	

	<u>tower</u>				
20	Kuraymat Plant	埃及	Kuraymat	<u>ISCC</u>	
25	<u>Hassi R'mel integrated solar combined cycle power station</u>	阿尔及利亚	Hassi R'mel	ISCC	
31.4	Puerto Errado 1+2	<u>西班牙</u>	Murcia	<u>菲涅尔式</u>	
50	Solacor 2	<u>西班牙</u>	El Carpio	槽式	
50	Solacor 1	<u>西班牙</u>	El Carpio	槽式	
50	Lebrija-1	<u>西班牙</u>	Lebrija	槽式	
50	Helioenergy 1	<u>西班牙</u>	Ecija	槽式	
50	La Dehesa	<u>西班牙</u>	La Garrovilla (Badajoz)	槽式	
50	Majadas de Tiétar	<u>西班牙</u>	Caceres	槽式	
50	La Florida	<u>西班牙</u>	Alvarado (Badajoz)	槽式	
50	<u>Alvarado I</u>	<u>西班牙</u>	Bada joz	槽式	
50	Ibersol Ciudad Real	<u>西班牙</u>	Puertollano, Ciudad Real	槽式	
64	<u>Nevada Solar One</u>	<u>美国</u>	<u>Boulder City, Nevada</u>	槽式	
75	<u>Martin Next Generation Solar Energy Center</u>	<u>美国</u>	<u>Indiantown, Florida</u>	<u>ISCC</u>	
100	<u>Extresol Solar Power Station</u>	<u>西班牙</u>	<u>Torre de Miguel Sesmero</u>	槽式	
100	<u>Manchasol Power Station</u>	<u>西班牙</u>	<u>Alcázar de San Juan</u>	槽式	
100	<u>Palma del Rio Solar Power Station</u>	<u>西班牙</u>	<u>Palma del Río</u>	槽式	
100	<u>Valle Solar Power Station</u>	<u>西班牙</u>	<u>San José del Valle</u>	槽式	
150	<u>Andasol solar power station</u>	<u>西班牙</u>	<u>Guadix</u>	槽式	
150	<u>Solnova Solar Power Station</u>	<u>西班牙</u>	<u>Sanlúcar la Mayor</u>	槽式	
354	<u>Solar Energy Generating Systems</u>	<u>美国</u>	<u>Mojave Desert, California</u>	槽式	
1702.65	全部运行容量				

### 6.1.2 国内太阳能热发电概述

我国太阳能热发电技术的研究开发早在70年代末就已开始，由于工艺及材料等薄弱环节的限制，加上科研经费问题，太阳能热发电关键技术的研发一直未能突破，与国外存在较大差距。近10年来，国内的科研机构和大专院校进行联合研发，取得重大进展。2005年5月，伴随着南京江宁70kWe太阳能塔式热发电试验电站的成功并网运行，标志着我国在太阳能热发电领域的技术研究进入一个新的发展阶段。之后太阳能热发电技术被列为《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020）》的重要内容。特别是2006年10月，国家科技部将太阳能热发电技术及系统示范研究列入国家863重点项目，必将极大地促进我国太阳能热发电技术发展。

近期，太阳能热发电项目如塔式及槽式等技术类型不同程度地进入试验和工程化应用阶段。国家层面的专家学者重申，在世界新一轮科技革命中，太阳能热发电是未来太阳能发展的重要方向，创新空间很大。通过自主研发、自主设计并具有全部自主知识产权的太阳能热发电试验示范装置和实验电站，为我国独立建造太阳能热发电站奠定了基础，同时也为建立太阳能热发电站装备制造产业化提供了有益探索。

### 6.1.3 国内太阳能热发电技术的发展情况

(1) 2005年河海大学与南京春辉公司(中材科技南京玻璃纤维设计院控股)与以色列EDG公司合作，在南京建立了75kW空气工质的塔式电站；

(2) 2006年上海工电能源科技有限公司(上海联合投资控股)成立，该公司专业从事塔式太阳能热发电的研发；

(3) 2006年美国新霓虹公司与西藏华冠公司合作在天津建立空气传热发电试验装置，热功率超过1000kW；

(4) 2007年德国太阳千年公司与内蒙绿能公司(内蒙古自治区发改委下属)签署了在额尔多斯建立1000MW电站的协议，一期工程建设规模 $1 \times 85\text{MW}$ ；

(5) 2007年南京市立项支持东南大学进行槽式系统的研制；

(6) 2008年广东省科技厅成立重大专项支持东莞康达机电集团100kW槽式热发电项目；

(7) 2008年西班牙Abengoa公司与中国华电集团在甘肃玉门建立了测光站，有意向在该地区建立大型电站。

(8) 2008年中国科学院电工所在北京延庆进行我国科技部863重点项目“1MW太阳能热发电技术及系统示范”工程建设。

(9) 彩熙太阳能环保技术（天津）有限公司于2008年斥资建设146kW CENICOMTM太阳能热发电示范电站，已于2009年5月投入运行。

(10) 2009年9月天威集团与成都市政府共同投资建设10MW太阳能热发电项目。

(11) 由中国科学院电工研究所发起，筹备成立“太阳能热产业技术创新战略联盟”，旨在推动我国太阳能热领域技术和产业突破，提高企业自主创新能力和服务能力。

(12) 2009年12月澳洲雄狮国际投资有限公司、华电新能源技术开发有限公司就格尔木市太阳能热发电1000MW项目进行考察，并就项目合作事宜达成一致，举行了太阳能热发电1000MW项目签约仪式。

(13) 美国加州帕萨迪纳全球性太阳能发电供应商ESolar公司与山东蓬莱电力设备制造有限公司签订帮助我国建立两百万千瓦太阳能聚光热电机组的总代理协议。

(14) 华能西藏发电有限公司计划在“十二五”期间在藏建设装机规模50MW的太阳能热发电站，拟采用先进的储热技术。

(15) 北京中航空港通用设备有限公司通过与中科院工程热物理研究所合作，实现了曲面聚光镜从技术到生产的完全国产化，大大降低了槽式太阳能热发电的成本。

(16) 2010年10月，我国首个太阳能光热特许权示范项目——内蒙古50兆瓦太阳能热发电特许权示范项目正式招标。

(17) 2010年12月，成都天威与中国大唐集团合作开建中国首座兆瓦级太阳能热发电试验示范项目。这个项目以光煤混合发电的方式，通过利用可再生的太阳能资源来补充发电。

(18) 华能集团清洁能源技术研究院在菲涅尔线性太阳能热发电技术方面开展了研究工作，并计划在三亚建设实验装置。

## 6.2 太阳能热发电技术前景分析

世界范围内的环境改变已经引起人们的关注，最主要的焦点就是二氧化碳，而 90%以上的二氧化碳来自于化石燃料的燃烧，例如石油、煤、天然气等。因此，很多国家规定要求使用清洁能源来减少温室气体的排放。可再生能源引起可持续性、清洁机环保性能，成为未来能源的发展方向。世界许多国家制订了可再生能源发展规划和战略目标，绿色和平组织和欧洲可再生行业协会联合发布了一个世界愿景——能源革命设想，它提供了一个切实可行的计划来快速降低与能源有关的二氧化碳的排放。在中科院发布的我国面向 2050 年科技发展十大路线中，也将“可再生能源规模发电技术”列入开发方向之一。

伴随着多座大规模太阳能热发电站在美国和西班牙等国家投入运行，为很多倡导太阳能热发电技术的国家提供了成功范例，这预示着太阳能热发电技术正向可再生能源技术的前沿迈进。大规模的太阳能热发电站可用于商业化发电，尤其适用于日照充足的地区，例如欧洲南部、北非、中东、印度部分地区、中国、美国南部和澳大利亚，以上这些地区经常会受到用电高峰、停电以及增长的电费的影响。太阳能资源是取之不尽的，并且太阳能热发电不会造成气候变化。目前这项技术已很成熟，可以在世界的“太阳能带”上得到广泛的应用。美国、印度、中国等多个国家制定公布了太阳能行动计划，特别是 2009 年 7 月，以德国企业为主的 12 家大型公司在德国慕尼黑签署备忘录，启动欧洲沙漠行动计划，将在未来实十年内，投资 4000 亿欧元，在中东及北非地区建立一系列并网的太阳能热发电站，来满足欧洲 15% 的电力需求以及电站所在国家的部分电力需求。中国的太阳能行动计划于 2009 年 1 月正式启动，成立了太阳能技术研究中心，包括太阳能光热转化及规模化研究示范中心、太阳电池研究中心、太阳能光伏系统及规模化利用研究中心。太阳能光化学转化研究中心及太阳能光生物转化研究中心，并且设定了 2015 年实现分布利用、2025 年实现替代

利用及 2035 年实现规模利用阶段性目标。

国际绿色和平组织以及欧洲太阳能发电联盟和国际能源署共同完成的《2009 世界太阳能热发电展望》，为世人描绘了一个宏伟蓝图：按照先进的工业发展设想，由于太阳能热发电技术具有高的能源效率，预计到 2030 年，太阳能热发电将能满足世界能源发电量的 7% 以上，到 2050 年将会达到四分之一。

国家“十二五”规划纲要提出，新能源产业将重点发展新一代核能、太阳能热利用和光伏光热发电、风电技术装备、智能电网、生物质能。在发展太阳能热发电方面，国家“十二五”规划纲要提出，在内蒙古、甘肃、青海、新疆等地选择荒漠、戈壁、荒滩等空闲土地，建设太阳能热发电示范项目。因此，相信太阳能热发电在我国将迎来一个发展的大好时机。

#### 工程实例照片

##### 运输





安装





运行中的破损



检修维护

