

TASHI TAIYANGNENG  
GUANGRE FADIANZHAN SHEJI  
GUANJIAN JISHU

# 塔式太阳能 光热发电站设计

## 关键技术

许继刚 主 编

汪 毅 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TASHI TAIYANGNENG  
GUANGRE FADIANZHAN SHEJI  
GUANJIAN JISHU

# 塔式太阳能 光热发电站设计

## 关键技术

许继刚 主 编

汪 毅 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书依托国家标准 GB/T 51307—2018《塔式太阳能光热发电站设计标准》、IEC（国际电工委员会）国际标准 IEC 62862-4-1《塔式太阳能光热发电厂设计总体要求》和国家重点研发计划“太阳能光热发电及热利用关键技术标准研究”（项目编号：2017YFF0208300）的有关成果，结合国内示范工程案例和国外光热发电站设计经验提炼撰写而成。

本书围绕塔式太阳能光热发电站设计关键技术进行介绍，主要包括光热资源评估、站址选择、光污染分析、光热关键设备部件选型设计、镜场设计、储热系统设计、光热工艺系统集成设计、控制系统设计、信息系统设计、吸热塔结构设计、定日镜结构设计、消防设计、镜场清洗技术等方面。

本书可供光热发电站设计人员参考，也可供相关科研、装备、安装、调试、运行、检修、管理、教学、培训人员阅读使用。

### 图书在版编目（CIP）数据

塔式太阳能光热发电站设计关键技术 / 许继刚主编. —北京：中国电力出版社，2019.3  
ISBN 978-7-5198-0442-8

I. ①塔… II. ①许… III. ①太阳能发电—电站—设计 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 037389 号

---

出版发行：中国电力出版社

地 址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）

网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：郑艳蓉 韩世韬（010-63412373）

责任校对：黄 蓓 太兴华

装帧设计：王英磊

责任印制：吴 迪

---

印 刷：三河市万龙印装有限公司

版 次：2019 年 3 月第一版

印 次：2019 年 3 月北京第一次印刷

开 本：787 毫米 × 1092 毫米 16 开本

印 张：12

字 数：247 千字

印 数：0001—2000 册

定 价：100.00 元

---

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

# 编 委 会

主 编：许继刚

副主编：汪 毅

编 委：(按姓氏笔画排序)

王立军 仇 韬 田启明 杨金芳 李 心

李红星 张开军 陈玉虹 赵晓辉 官 博

彭 兢 曾春花

# 前言

太阳能资源取之不尽，用之不竭，我们利用的很多资源，都直接或间接来自于太阳能。作为一种可再生能源发电方式，太阳能光热发电利用集热场将低密度的太阳能汇聚成高密度的能量，由太阳能转化成热能，通过工作流体传热，再由热机或其他发电技术将其转换成电能，并可以与化石燃料形成混合发电系统。太阳能光热发电绿色环保，建设场地灵活，在储热系统的配合下，可以连续稳定发电，电站既可并网运行，也可建成分布式电源为偏远地区供电。

太阳能光热发电主要有塔式、槽式、菲涅耳式和碟式四种形式，塔式太阳能光热发电具有聚光比高、传热工质能够达到较高温度、系统综合效率高、设计参数可与常规火电机组一致等优点，适合于大规模、大容量商业化应用，在国内外取得了较快发展。

为促进和规范太阳能光热发电技术的发展，《住房城乡建设部关于印发2015年工程建设标准规范制定、修订计划的通知》明确，由中国电力企业联合会和中国能源建设集团有限公司工程研究院担任主编单位，起草国家标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》。GB/T 51307—2018《塔式太阳能光热发电站设计标准》自2018年12月1日正式实施。该国家标准的发布填补了国内外太阳能光热发电设计标准的空白，将对我国乃至世界太阳能光热发电行业的技术发展产生重要影响。

同时，第一届全国太阳能光热发电标准化技术委员会（SAC/TC 565）也于2017年成立，对口国际电工委员会太阳能光热发电技术委员会（IEC/TC 117）。该标委会以国家标准的编制内容为基础，申请立项 IEC/TC 117 国际标准。2017年11月，在摩洛哥举行的 IEC 年会上，由本书主编提交的标准提案获得 IEC 官员和各成员国的高度评价并获投票通过。会议明确由中国主持编制国际标准 IEC 62862-4-1《塔式太阳能光热发电厂设计总体要求》，项目负责人由本书主编担任，项目组由中国、西班牙、德国、葡萄牙、摩洛哥等国的20多位专家组成。

为了配合 GB/T 51307—2018《塔式太阳能光热发电站设计标准》的宣贯工作，使有关技术人员更好地掌握该国家标准的主要内容，同时也为了解答当前塔式太阳能光热发电设计的关键技术问题，特以国家标准配套的13个专题研究报告为基础，结合 IEC 国际标准编制过程中汲取的各国先进经验，以及由本书主编担任项目负责人的国家重点研发计划“太阳能光热发电及热利用关键技术标准研究”（2017YFF0208300）的研究成果，进行提炼整合，形成专著与读者共享。

本书针对性强、涉及面广，研究内容覆盖了太阳能光热资源评估、站址选择、塔式太阳能光热发电站光污染分析、光热关键设备部件选型设计、镜场设计、

储热系统设计、光热工艺系统集成设计、控制系统设计、信息系统设计、吸热塔结构研究、定日镜结构设计、消防设计、镜场清洗技术等多个方面。本书的出版将有助于规范和提高我国塔式光热发电站工程研究、设计、制造和建设的技术水平，对推动我国太阳能光热发电产业的技术进步具有重要作用。

本书编委会由 GB/T 51307—2018《塔式太阳能光热发电站设计标准》、国际标准 IEC 62862-4-1《塔式太阳能光热发电厂设计总体要求》、国家重点研发计划“太阳能光热发电及热利用关键技术标准研究”（2017YFF0208300）的核心骨干人员和相关科研、设计单位的技术专家组成，分别来自中国能源建设集团有限公司工程研究院、中国电力企业联合会、中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司、中国电力工程顾问集团有限公司、中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司、浙江中控太阳能技术有限公司、中国科学院电工研究所（中国科学院大学）、河北省电力勘测设计研究院、国核电力规划设计研究院有限公司等单位。

本书作者都是长期从事光热发电工程研究、设计、制造与建设的专业技术人员，有着丰富的实践经验。本书不仅有理论研究和设计方案比选，同时还有大量的调研数据和案例分析，对从事光热发电站工程研究、设计、制造、建设的专业技术人员有着较好的指导作用。同时，对于从事光热发电站调试、运行、维护、检修、管理和教学、培训的人员也有一定的参考价值。

本书由许继刚担任主编，汪毅担任副主编，负责全书的组织、策划和统稿工作。王立军负责全书的图文整理工作。前言由许继刚编写，第一章由许继刚和王立军编写，第二章由田启明编写，第三章由彭兢编写，第四章由曾春花编写，第五章由陈玉虹编写，第六章由李心编写，第七章和第八章由赵晓辉编写，第九章由仇韬编写，第十章由杨金芳编写，第十一章由李红星编写，第十二章由官博编写，第十三章由张开军编写，第十四章由王立军和李心编写，第十五章由李心和赵晓辉编写。全书由许继刚和汪毅审定。

由于太阳能光热发电技术发展迅速且本书编写时间仓促，本书难免存在需要改进的地方，真诚欢迎读者提出批评意见和修改建议。

**编者**

# 目录

前言

<b>第一章 太阳能光热发电技术概述</b> .....	<b>1</b>
第一节 发展背景 .....	1
第二节 太阳能光热发电形式 .....	3
第三节 塔式太阳能光热发电现状 .....	9
第四节 设计标准与关键技术 .....	13
<b>第二章 太阳能光热资源评估</b> .....	<b>17</b>
第一节 太阳辐射 .....	17
第二节 太阳能资源 .....	18
第三节 太阳能资源环境监测站 .....	20
第四节 太阳能资源评估 .....	23
<b>第三章 塔式太阳能光热发电站站址选择</b> .....	<b>28</b>
第一节 太阳能资源条件 .....	28
第二节 气象条件 .....	30
第三节 水源条件 .....	32
第四节 光污染影响 .....	33
第五节 场地条件 .....	34
<b>第四章 塔式太阳能光热发电站光污染分析</b> .....	<b>38</b>
第一节 光污染环境的影响评价现状、标准及方法 .....	38
第二节 电站光污染影响分析 .....	42
第三节 预防措施 .....	45
<b>第五章 塔式太阳能光热关键设备部件选型设计</b> .....	<b>47</b>
第一节 定日镜选型 .....	47
第二节 传热工质选择 .....	51
第三节 吸热器选型 .....	54
第四节 蒸汽发生器选型 .....	58
第五节 储热方式选择 .....	60
第六节 汽轮机组选型与运行模式 .....	62
<b>第六章 塔式太阳能光热发电站镜场设计</b> .....	<b>67</b>
第一节 定日镜场设计的基本思路 .....	67
第二节 定日镜场设计边界条件及输入因素分析 .....	68

第三节	镜场设计内容 .....	70
第四节	几种主要的定日镜场布置方式及优劣对比 .....	74
第五节	定日镜场设计计算例 .....	77
<b>第七章</b>	<b>塔式太阳能光热储热系统设计 .....</b>	<b>81</b>
第一节	储热系统及技术 .....	81
第二节	储热系统关键设备 .....	83
第三节	熔融盐储热系统相关计算 .....	87
第四节	储热容量的优化选取 .....	88
<b>第八章</b>	<b>塔式太阳能光热工艺系统集成设计 .....</b>	<b>89</b>
第一节	塔式太阳能光热电站系统集成 .....	89
第二节	系统匹配及优化设计 .....	92
<b>第九章</b>	<b>塔式太阳能光热发电站控制系统设计 .....</b>	<b>98</b>
第一节	定日镜控制 .....	98
第二节	塔式太阳能光热发电站全厂控制系统 .....	101
第三节	塔式太阳能热发电特有控制技术 .....	105
<b>第十章</b>	<b>塔式太阳能光热发电站信息系统设计 .....</b>	<b>115</b>
第一节	塔式太阳能电站信息系统应用现状 .....	115
第二节	信息系统规划原则 .....	116
第三节	塔式太阳能电站信息系统的规划 .....	118
第四节	信息系统设计 .....	119
<b>第十一章</b>	<b>塔式太阳能光热发电站吸热塔结构设计 .....</b>	<b>124</b>
第一节	吸热塔结构设计技术现状 .....	124
第二节	吸热塔结构种类 .....	125
第三节	吸热塔抗风设计 .....	128
第四节	吸热塔抗震设计 .....	131
第五节	结构安全监测 .....	136
<b>第十二章</b>	<b>塔式太阳能光热定日镜结构设计 .....</b>	<b>138</b>
第一节	定日镜结构体系 .....	138
第二节	定日镜风荷载 .....	140
第三节	定日镜风振变形 .....	146
第四节	定日镜结构优化 .....	148
<b>第十三章</b>	<b>塔式太阳能光热发电站消防设计 .....</b>	<b>151</b>
第一节	电站的重点防火区域 .....	151
第二节	电站的特殊消防分析 .....	152
第三节	电站主要建(构)筑物的防火间距 .....	158

第四节 电站消防给水的有关问题 .....	160
<b>第十四章 塔式太阳能光热发电站镜场清洗技术 .....</b>	<b>162</b>
第一节 定日镜清洗方式 .....	162
第二节 清洗水和清洗设备的要求 .....	164
第三节 定日镜清洗设备案例 .....	165
第四节 定日镜清洗实测数据 .....	168
<b>第十五章 工程案例 .....</b>	<b>170</b>
第一节 德令哈 50MW 塔式光热发电站工程案例 .....	170
第二节 哈密 50MW 塔式光热发电站工程案例 .....	174
<b>参考文献 .....</b>	<b>180</b>

# 太阳能光热发电技术概述

按照聚光方式分类,光热发电通常包括塔式、槽式、菲涅耳式和碟式四种。2016年国家能源局公布的首批20个太阳能光热发电示范项目中,塔式共9个,占据近半壁江山,高居首位,无疑成为光热发电实现商业化和规模化最具竞争力的主流形式。

工程开发,设计先行。设计集成,标准引领。国家标准 GB/T 51307—2018《塔式太阳能光热发电站设计标准》的发布,开国内外综合性设计标准之先河,填补了光热发电领域设计标准的空白,将对我国首批光热发电示范项目以及后续光热电站的开发、建设、运营等发挥重要指导作用,对于国际光热发电标准的制修订也具有重要的参考意义。

本章在解析太阳能光热技术发展背景,比较四种不同发电技术形式及其特点,介绍国内外技术发展现状的基础上,重点聚焦和阐释 GB/T 51307—2018 的技术内容与特点,介绍塔式太阳能光热发电站设计关键技术。

## 第一节 发展背景

随着化石能源的不断枯竭,以及生态环境的逐渐恶化,大力发展可再生能源,尤其是充分利用太阳能资源,已成为我国的一项基本国策。2005年2月28日,《中华人民共和国可再生能源法》(中华人民共和国主席令第三十三号)颁布,明确国家鼓励单位和个人安装和使用太阳能热水系统、太阳能供热采暖和制冷系统、太阳能光伏发电系统等太阳能利用系统。2005年11月29日,国家发展改革委发布《可再生能源产业发展指导目录》(发改能源〔2005〕2517号),明确发展太阳能光热发电,用于为电网供电或为电网不能覆盖地区的居民供电,包括塔式太阳能光热发电系统、槽式太阳能光热发电系统、菲涅耳式太阳能光热发电系统、碟式(盘式)太阳能光热发电系统。

在2005~2013年的这段时间里,无论是国务院,还是国家发展改革委、国家能源局,分别在颁布的《能源发展“十二五”规划》(国发〔2013〕2号)、《可再生能源中长期发展规划》(发改能源〔2007〕2174号)、《可再生能源发展“十一五”规划》(发改能源〔2008〕610号)、《太阳能发电“十二五”规划》(国能新能〔2012〕194号)中,大力支持太阳能光热发电技术的发展和太阳能光热发电站的建设。

2015年9月23日,国家能源局发布《关于组织太阳能热发电示范项目建设的通

知》(国能新能〔2015〕355号),决定组织一批太阳能光热发电示范项目建设。2016年8月29日,国家发展和改革委员会发布《关于太阳能热发电标杆上网电价政策的通知》(发改价格〔2016〕1881号),确定2018年12月底以前投产的光热项目标杆上网电价为每千瓦时1.15元(含税)。2016年9月13日,国家能源局发布《关于建设太阳能热发电示范项目的通知》(国能新能〔2016〕223号),公布首批20个光热发电示范项目。标杆电价和示范项目的出台,在社会层面、产业层面和技术层面,都将产生深远的影响。

从社会层面上看:中国经济已经步入新常态,燃煤电厂产能过剩,风电场和太阳能光伏电站存在大量弃风、弃光现象。国家出台光热发电标杆电价,并适时推出20个示范项目,说明国家对光热发电的高度重视以及大力发展光热发电的决心,同时也预示着光热发电在我国能源转型升级中将占据重要地位。

从产业层面上看:光热产业迎来了前所未有的发展机遇。虽然在“十二五”期间国内建设了十几个示范回路,建设了1MW的塔式光热示范试验电站,但真正投入商业运行的只有青海德令哈10MW塔式电站。光热电价和示范项目的出台,不仅推动了20个示范项目的建设,而且还带动其他一批项目的规划与建设,推动我国光热产业迅速发展。

从技术层面上看:示范项目锁定了塔式、槽式、菲涅耳式三种主流的发电技术,大多采用国际上已得到实践验证的熔融盐塔式、水工质塔式、导热油槽式等相对较成熟的技术。20个示范项目分别是7个熔融盐塔式,2个水工质塔式,5个导热油槽式,2个熔融盐槽式,3个导热油菲涅耳式,1个熔融盐菲涅耳式。从入选的项目看,较为成熟的熔融盐塔式、水工质塔式、导热油槽式将在工程技术方面得到进一步提升;而相对不够成熟的熔融盐槽式、熔融盐菲涅耳式等项目,则会在工程技术上实现新的突破。同时,未能入选的技术形式也会在这轮光热建设浪潮中得到推动,促进光热发电技术百花齐放。比如,目前正在开展的空气工质塔式光热发电技术、碟式与塔式的混合发电技术等,虽然还处于研发阶段,也会借助这一东风,加快取得核心技术,尽快形成竞争力。

2016年12月8日,国家能源局印发《太阳能发展“十三五”规划》(国能新能〔2016〕354号),明确指出到2020年底,太阳能光热发电装机达到500万kW,在“十三五”前半期,国家积极推动150万kW左右的太阳能光热发电示范项目建设。2018年5月18日,国家能源局印发《关于推进太阳能热发电示范项目建设有关事项的通知》(国能发新能〔2018〕46号),从三个方面对示范项目提出具体要求:①统一思想,高度重视示范项目建设;②多措并举,着力构建项目推进机制;③加强协作,多方联动形成工作合力。根据示范项目实际情况,明确首批示范项目建设期限可放宽至2020年12月31日,同时建立逾期投运项目电价退坡机制,具体价格水平由国家发展改革委价格司另行发文明确。该通知的出台,再次从政策层面为示范项目保驾护航,无疑会推动太阳能光热发电站的建设进入前所未有的历史新阶段。

## 第二节 太阳能光热发电形式

太阳能光热发电是指利用不同类型的聚光装置，将太阳辐射能转化为热能，然后通过常规的热机或其他发电技术将其转换成电能的技术。电站包括太阳能集热、储热、热功转换、发电等模块。其工作原理是：低密度太阳能经不同类型集热器聚焦之后转化为高密度太阳能，加热工质到一定温度，然后推动不同类型的热动力发电机组发电。按照聚光方式，太阳能光热发电可划分为点聚焦和线聚焦，其中点聚焦聚光比较高，包括塔式和碟式；线聚焦聚光比相对较低，包括槽式和非涅耳式。目前达到商业化应用水平主要是塔式和槽式两种。

### 一、塔式太阳能光热发电

塔式太阳能光热发电是通过多台跟踪太阳运动的定日镜将太阳辐射反射至放置于支撑塔上的吸热器中，把太阳辐射能转换为传热工质的热能，通过热力循环转换成电能的太阳能光热发电系统，如图 1-1 所示。塔式太阳能光热发电系统主要由定日镜场、吸热塔、吸热器、储热器、换热器和发电机组等组成。按照传热工质的种类，塔式太阳能光热发电系统主要有水/蒸汽、熔融盐和空气等形式。

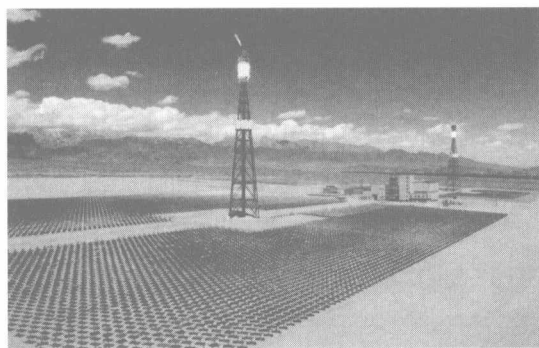


图 1-1 塔式太阳能光热电站

#### 1. 水/蒸汽塔式光热发电系统

如图 1-2 所示，以水/蒸汽作为传热工质，水经过吸热器直接产生高温高压蒸汽，进入汽轮发电机组。水/蒸汽塔式太阳能光热发电系统的传热和做功工质一致，年均发电效率可达 15% 以上。水/蒸汽具有热导率高、无毒、无腐蚀性等优点。蒸汽在高温运行时有高压问题，在实际使用时蒸汽温度受到限制，抑制了塔式太阳能光热发电系统运行参数和系统效率的提高。

#### 2. 熔融盐塔式光热发电系统

如图 1-3 所示，以熔融盐作为传热介质，在吸热器内加热后，通过熔融盐/蒸汽发生器产生蒸汽，并推动汽轮机发电。加热后的熔融盐先存入高温热盐罐，然后送入蒸

汽发生器加热水产生高温高压蒸汽，以驱动汽轮发电机组；汽轮机乏汽经凝汽器冷凝后返回蒸汽发生器循环使用。在蒸汽发生器中放出热量的熔融盐送至低温冷盐罐，再送回吸热器加热。常规使用的硝酸钠与硝酸钾混合盐（太阳盐）汽化点较高，可达 $620^{\circ}\text{C}$ ，可以实现热能在电站中的常压高温传输，实现系统高参数运行，传热和储热工质一致，减小换热过程损失，年均发电效率可达 $20\%$ 。

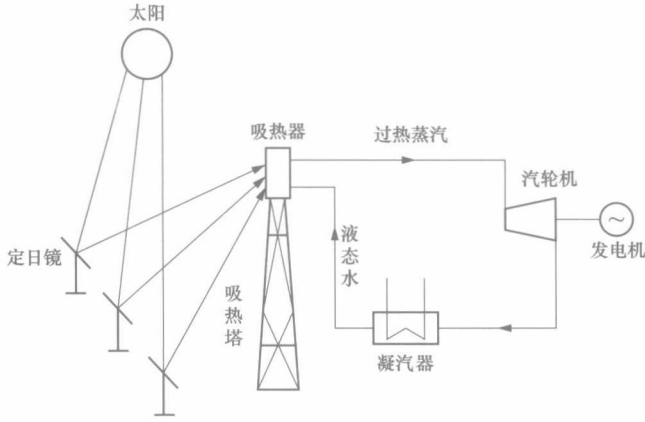


图 1-2 水工质塔式太阳能光热发电原理图

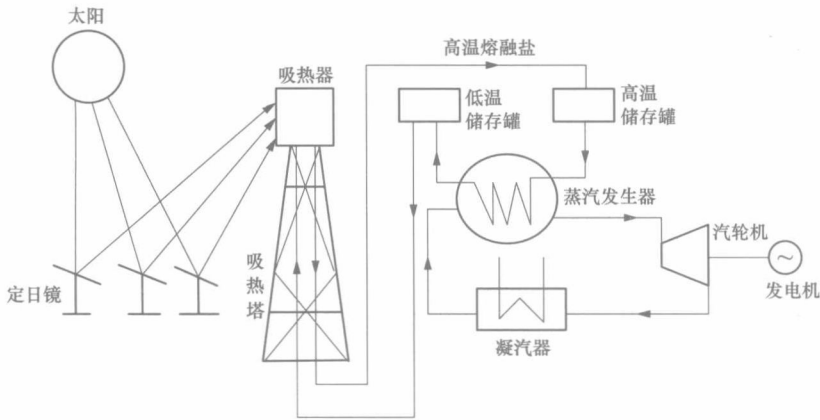


图 1-3 熔融盐工质塔式太阳能光热发电原理图

### 3. 空气塔式光热发电系统

如图 1-4 所示，以空气作为传热工质，空气经过吸热器加热后形成高温热空气，进入燃气轮发电机组发电。空气作为传热工质，易于获得，工作过程无相变，工作温度可达 $1600^{\circ}\text{C}$ ，由于空气的热容较小，空气吸热器的工作温度可高于 $1000^{\circ}\text{C}$ ，大大提高燃气轮机进口空气温度，减少燃气用量，年均发电效率可达 $30\%$ 。但该技术尚未成熟。

塔式太阳能光热发电的技术特点一般表现为：

- (1) 通过点聚光方式实现高聚光比，从而有利于提高发电效率，扩大规模和容量。典型塔式太阳能光热发电站聚光比为 $300\sim 1000$ 。

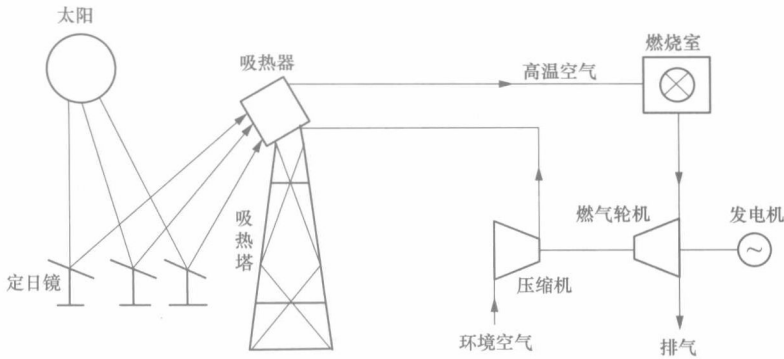


图 1-4 空气工质塔式太阳能光热发电原理图

(2) 热工质工作温度高，因此光热转换效率、热电转换效率高。塔式太阳能光热发电技术中热工质的最高工作温度一般可实现超过  $500^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 采用水工质作为吸热工质，直接生成蒸汽，实现高参数发电。

(4) 对环境和工程施工条件要求低，如对土地平整度、土地坡度等都没有严格的要求，且不存在冬季工质防冻问题。

(5) 除常规发电装备外，塔式太阳能光热发电的关键装备为定日镜及其控制系统、吸热系统和储热系统，均属于较成熟制造行业。

## 二、槽式太阳能光热发电

槽式太阳能光热发电是指采用抛物线形槽式反射镜面将太阳光聚焦到位于焦线的吸热管上，使管内的传热工质（油或水等）加热至一定温度，然后经热交换器产生蒸汽驱动汽轮发电机组发电，如图 1-5 和图 1-6 所示。槽式太阳能光热发电系统一般由抛物面槽式聚光器、吸热管、储热单元、蒸汽发生器和汽轮发电机组等单元组成。槽式太阳能光热发电站中，抛物面槽式聚光集热器通过串联和并联方式相互连接，并通过模块化布局形成集热场，如图 1-7 所示。

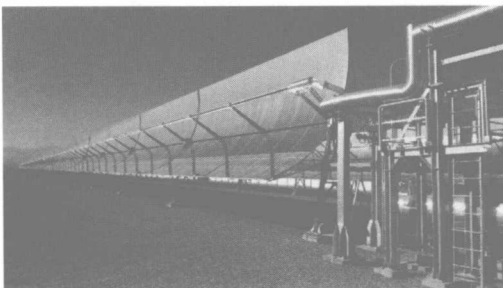


图 1-5 槽式太阳能光热发电集热系统



图 1-6 槽式太阳能光热发电站

槽式太阳能光热发电的技术特点一般表现为：

(1) 通过线聚光方式实现聚光，结构相对简单，易于实现标准化批量生产和安装，但线性聚光方式的聚光比小，典型槽式太阳能光热发电站聚光比为  $80\sim 100$ ，导致系统工作温度有限，效率存在瓶颈。

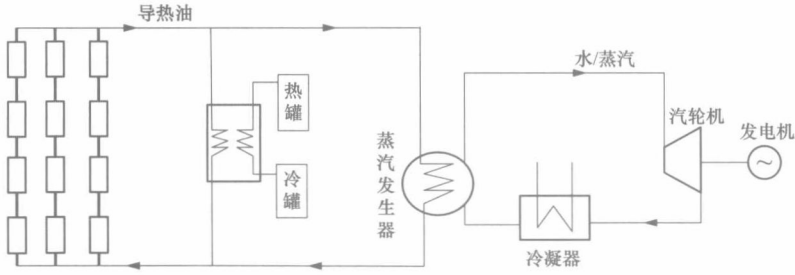


图 1-7 槽式太阳能光热发电原理图

(2) 槽式发电使用抛物面 (parabolic) 长槽型 (trough) 的聚光器和吸热管, 真空集热管和抛物面反射镜属于特殊产品部件, 生产工艺要求高。

(3) 采用合成油 (导热油) 等作为工作介质的双回路系统技术成熟。工作介质温度一般在  $400^{\circ}\text{C}$ 。但导热油对土壤和农作物有危害, 且导热油更换周期短。

(4) 对环境 and 工程施工条件要求高, 如对土地平整度、土地坡度等都有严格的要求, 通常坡度不得超过  $1\%$ 。

(5) 聚焦分散使得散热面积增大, 辐射损失随温度的升高而增加, 热损耗大。

### 三、菲涅耳式太阳能光热发电

菲涅耳式太阳能光热发电是指采用靠近地面放置的多个几乎是平面的镜面结构 (带单轴太阳跟踪的线性菲涅耳反射镜), 先将阳光反射到上方的二次聚光器上, 再由其汇聚到一根长管状的热吸热管, 并将其中的水加热产生热蒸汽直接驱动后端的涡轮发电机, 如图 1-8 和图 1-9 所示。

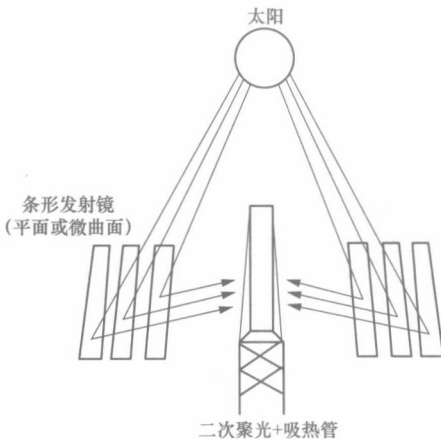


图 1-8 菲涅耳式太阳能光热发电示意图



图 1-9 菲涅耳式太阳能光热发电站

菲涅耳式太阳能光热发电系统技术特点一般表现为:

(1) 利用二次反射, 提高了几何聚光比, 容易获得较高的吸热器传热流体出口温度。

(2) 中心吸热管保持不动,不随主反射镜跟踪太阳而运动,避免了高温高压管路的密封和连接问题以及由此带来的成本增加。

(3) 主反射镜较为平整,可采用紧凑型的布置方式,土地利用率高,且反射镜近地安装,大大降低了风阻,具有较优的抗风性能,选址更为灵活。

(4) 由于采用的是平直镜面,易于清洗,耗水少,维护成本低。

(5) 聚光场效率不高;早上和傍晚受余弦损失大;二次聚光器进一步降低效率。

#### 四、碟式太阳能光热发电

碟式太阳能光热发电是利用旋转抛物面反射镜,将入射阳光聚集在焦点上,放置在焦点处的太阳能接收器收集较高温度的热能,加热工质,驱动发电机组发电,或在焦点处直接放置太阳能斯特林发电装置发电,如图 1-10 和图 1-11 所示。碟式太阳能光热发电系统包括聚光器、接收器、热机、支架、跟踪控制系统等主要部件。系统工作时,从聚光器反射的太阳光聚焦在接收器上,热机的工作介质流经接收器吸收太阳光转换成的热能,使介质温度升高,即可推动热机运转,并带动发电机发电。

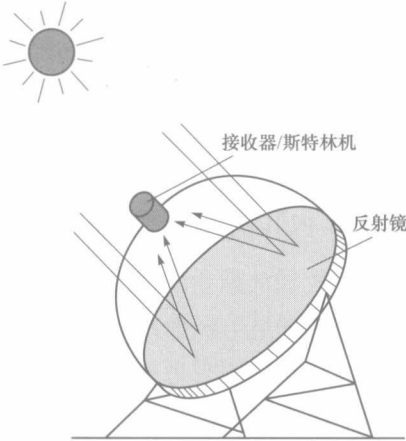


图 1-10 碟式太阳能光热发电示意图



图 1-11 碟式太阳能光热发电站

碟式太阳能光热发电技术特点一般表现为:

- (1) 高效率聚光。
- (2) 高聚光比,可达数千。
- (3) 能流高但分布不均匀,对吸热元件挑战大。
- (4) 直接连斯特林机可获得 30% 以上的太阳能-电效率。
- (5) 空冷系统在运行过程中不消耗水。
- (6) 分布式利用,单机容量难以做大。

(7) 储热问题难以解决。在光伏发电成本不断降低的形势下,碟式-斯特林发电系统大规模应用的成本压力很大。

## 五、四种太阳能光热发电技术比较

塔式太阳能光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。塔式熔融盐系统易于实现储热，经济性好，最适应于太阳能独立发电。但熔融盐熔点高，系统保温能耗较高，技术难度较大。

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，但系统储热性能较差，高温高压下的系统安全性仍有待提高。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。

塔式空气系统耗水量低，具有无相变、工作温度高、启动快等优点，尤其适合少水或无水地区，但传热性能较差，系统容量低，储热性能较差，目前大功率空气吸热器在技术上仍存在较大难度，商业化应用尚不成熟。

槽式太阳能光热发电结构简单，技术较为成熟，可以实现较大规模的热发电系统，但其聚光比小，系统工作温度相对较低。核心部件真空集热管在运行中易出现真空度降低，吸接管表面选择性涂层性能下降等问题。目前，研究可靠、耐久、高效的真空吸热管是槽式发电技术的关键。

菲涅耳式太阳能光热发电系统由于聚光倍数只有数十倍，因此加热的水蒸气热能品质不高，使整个系统的年发电效率仅能达到10%左右，但由于系统结构简单、直接使用导热介质产生蒸汽等特点，其建设和维护成本也相对较低。

碟式太阳能光热发电系统聚光比大，工作温度高，系统效率高，机构紧凑，安装方便，非常适合于分布式能源系统，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大。

四种太阳能光热发电技术比较见表1-1。

表 1-1 四种太阳能光热发电技术比较

特征	塔式	槽式	菲涅耳式	碟式
对光照资源要求	高	高	低	高
聚光比	300~1000	50~80	25~100	1000~3000
运行温度(℃)	500~1400	350~550	270~550	700~900
传热介质	水、合成油、熔融盐、空气	水、合成油、熔融盐	水、合成油、熔融盐	空气
储能	可储热	可储热	可储热	否
机组类型	蒸汽轮机、燃气轮机	蒸汽轮机	蒸汽轮机	斯特林机
动力循环模式	朗肯循环、布雷顿循环	朗肯循环	朗肯循环	斯特林循环
联合运行	可	可	可	视具体情况
峰值系统效率	23%	21%	20%	31%
系统年平均效率	10%~16%	10%~15%	9%~12%	16%~18%