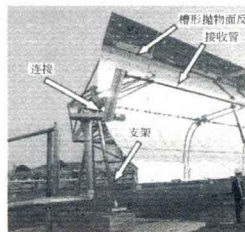
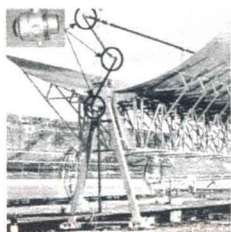
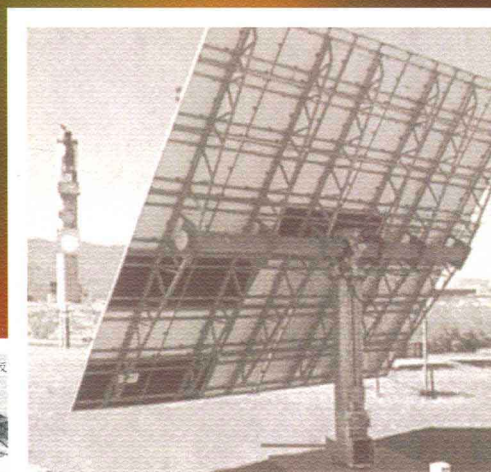
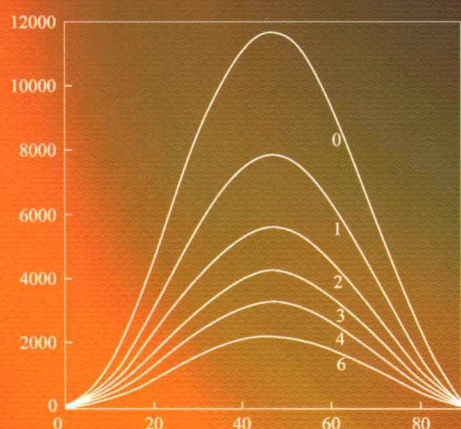




TAIYANGNENG
REDONGLI
FADIAN JISHU

太阳能热动力 发电技术

◎ 刘鉴民 著



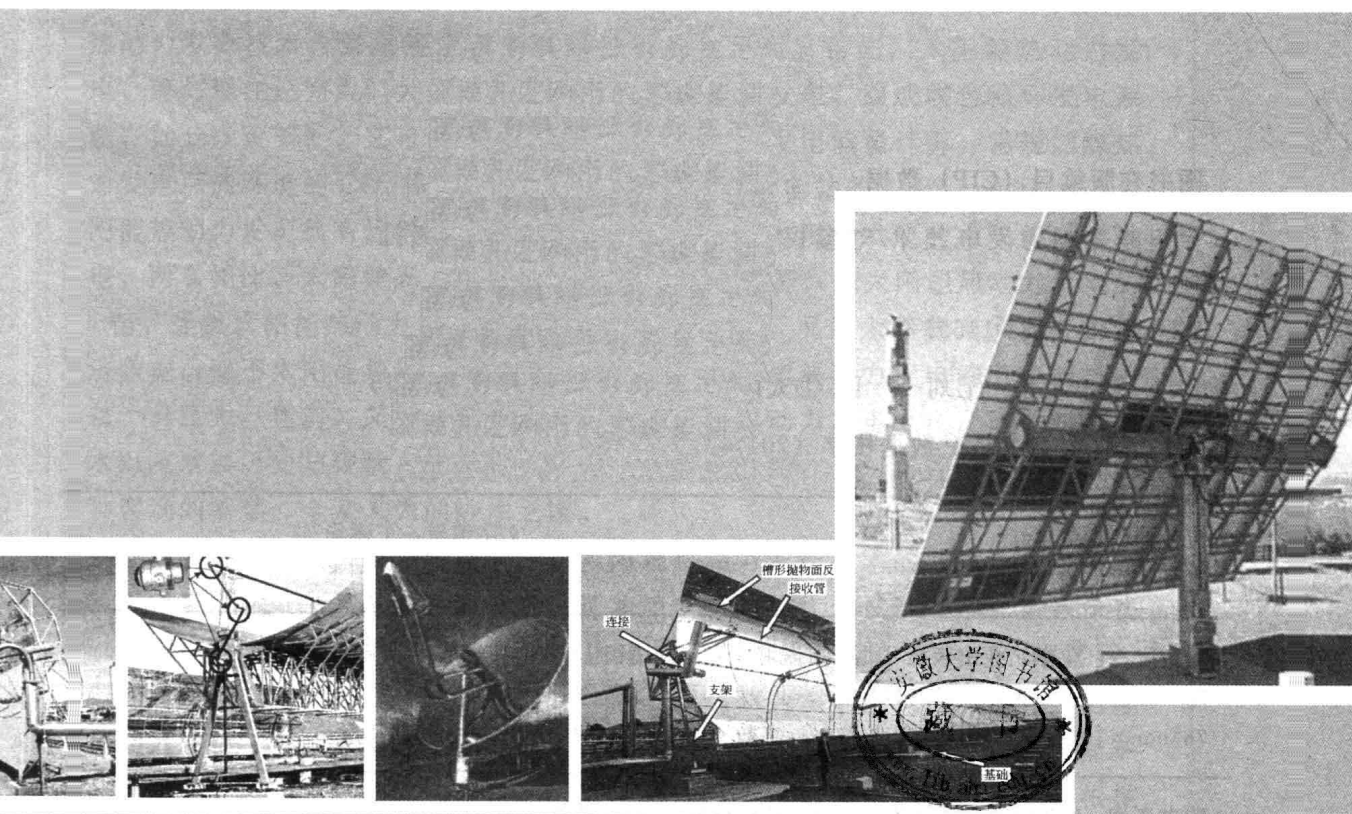
化学工业出版社



TAIYANGNENG
REDONGLI
FADIAN JISHU

太阳能热动力 发电技术

◎ 刘鉴民 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书系统而有序地讲述了太阳能热动力发电技术问题。共分为 8 章。第 1 章总论，讲述了诸太阳能热动力发电技术的共性，它们的发展历史与现状，及其总体系统分析、基本组成与电站优化设计原理，重点论述以太阳能为一次能源的太阳能热动力发电技术自身的特点和其内在的规律性。第 2~7 章顺次按照目前人们已经从事研发的 6 种太阳能热动力发电方式，即槽式太阳能热动力发电、塔式太阳能热动力发电、盘式太阳能热动力发电、条式太阳能热动力发电、太阳池热动力发电和太阳能烟囱热气流动力发电排序，根据各自的技术特点自成章节，从电站系统组成，电站工作原理，光、热、电转换等性能分析，直到典型电站介绍，多作分析性与研究性的讲述。最后，第 8 章归结到工程经济分析，展望发展前景。

本书适合已经掌握了有关太阳能以及传统热力发电厂的基础知识的读者阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

太阳能热动力发电技术/刘鉴民著. —北京: 化学工业出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-122-14597-0

I. ①太… II. ①刘… III. ①太阳能发电-研究 IV. ①TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 131659 号

责任编辑: 戴燕红
责任校对: 边 涛

文字编辑: 丁建华
装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 404 千字 2012 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

前言

太阳能热动力发电技术
TAIYANGNENG REDONGLI FADIAN JISHU

目前,科技界专门讲述太阳能热动力发电技术的专著甚少,大多散杂在一些讲述太阳能利用技术的有关著作中介绍。客观上讲,太阳能热动力发电是一项很有应用发展前景的可再生能源发电高新技术。但由于种种原因,至今仍有争议,稍有微词。

纵观太阳能利用的发展历史,人们对太阳能热动力的构想已有上百年,而对太阳能热动力发电的实践,从20世纪50年代初算起,也已走过了60年。此起彼伏,始终不断,强力表现其内在的生命力。究其根本原因,就在于太阳能热动力发电技术自身客观上具有其所独有的立足点。首先,太阳能热动力发电,可与现在已为人们大规模开发利用的常规能源发电,组成联合循环发电系统,如此既可节能,又可调峰发电。其次,按单位发电能量计算,常规燃煤热力发电厂向环境的 CO_2 排放量,是太阳能热动力发电站的45倍,相比之下太阳能热动力发电具有优异的减排效能。即使是同为太阳能发电的太阳能光伏发电,两者相比,太阳能光伏发电向环境的 CO_2 排放量,是太阳能热动力发电的5倍,显然太阳能热动力发电则是更为清洁的能源。况且太阳能光伏发电的经济数据远逊于太阳能热动力发电。由此可见,太阳能热动力发电的节能减排效益十分巨大。当前,又兴起一股加紧研发太阳能热动力发电之风,因此对其技术以及发展历史与现状进行系统的总结、整理、介绍、分析与评估,确实是一种客观的需要,全无人为的炒作之嫌。

本书共8章。首章总论,讲述诸太阳能热动力发电技术的共性,它们的发展历史与现状,及其总体系统分析、基本组成与电站优化设计原理,重点论述以太阳能为一次能源的太阳能热动力发电技术自身的特点和其内在的规律性。顺次按照目前人们已经从事研发的6种太阳能热动力发电方式,即槽式太阳能热动力发电、塔式太阳能热动力发电、盘式太阳能热动力发电、条式太阳能热动力发电、太阳池热动力发电和太阳能烟囱热气流动力发电,划为6章,根据各自的技术特点自成章节,从电站系统组成,电站工作原理,光、热、电转换等性能分析,直到典型电站介绍,多作分析性与研究性的讲述。最后归结到工程经济分析,展望发展前景。作者力图按此思路,将其组成一个完整的独立体

系，系统而有序地讲述太阳能热动力发电技术问题，自成一书。这样的安排，假定了读者已经掌握了较为深厚的有关太阳能以及传统热力发电厂的基础知识。

从当今世界对太阳能热动力发电研发的总体情况来看，槽式太阳能热动力发电技术较为成熟，经济数据更具有可比性，很有可能率先付诸大规模开发利用。基于这一现状，从技术本身的重要性、可行性和成熟性上评估，本书重点讲述了槽式太阳能热动力发电技术，占有全书约 1/3 的篇幅。除总论外，并先于其他几种太阳能热动力发电技术，列为首讲，这种排序也无形式上的人为做作之嫌。

本书承中国科学院能源研究所王长贵教授诚挚推荐、并审阅。本书的构思，原本出自作者的著作《太阳能利用：原理·技术·工程》一书中的第 12 章“太阳能热动力发电工程”，这里，不忘此书编辑曾经做出的贡献。上海交通大学研究生院培养办副主任刘俭助理研究员、李云霞高级工程师对全书做了文字输入与润饰。本书作者十分感谢他们的真诚帮助。

本书根据作者多年研习与实践太阳能热动力发电技术的心得，参考国外最新发表的大量数据与研究成果，精心组织章节，细心梳理素材，奋力写作而成。作者从 20 世纪 70 年代开始从事槽式太阳能热动力发电技术的研究工作，几十年过去了，但平心而论，作者深感自身水平确实极为有限，写作这本书，只剩下一点奋斗精神和勇气了，我愿为之做一次努力。因此，书中定有不少差错与谬误，抛砖引玉，是为本意，诚望广大学者和业界同仁多加批评指正。

谨以此书献给我伟大的祖国，献给我国的太阳能热动力发电事业。



上海交通大学

闵行

二〇一二年二月

目 录

太阳能热动力发电技术
TAIYANGNENG REDONGLI FADIAN JISHU

第 1 章 总 论 1

1.1 概述	1
1.1.1 太阳能热发电的分类	1
1.1.2 太阳能热动力发电发展简史	2
1.1.3 太阳能热动力发电技术发展现状	8
1.2 太阳能热动力发电系统及其分析	9
1.2.1 电站基本热力系统	9
1.2.2 电站系统分析	10
1.2.3 太阳能双能源联合循环发电系统	14
1.2.4 太阳能双工质联合循环发电系统	16
1.3 太阳能热动力发电站的基本组成	20
1.3.1 聚光集热子系统	20
1.3.2 储热子系统	24
1.3.3 辅助能源子系统	25
1.3.4 监控子系统	25
1.3.5 热动力发电子系统	25
1.4 太阳能热动力发电站的优化设计研究	26
1.4.1 有限时间热力网格的基本原理简介	26
1.4.2 有限时间热力网格用于分析太阳能热动力发电站的优化设计	30

第 2 章 槽式太阳能热动力发电 32

2.1 槽式太阳能热动力发电站的系统组成与工作原理	32
2.1.1 电站系统组成	32
2.1.2 电站工作原理	33
2.2 槽形抛物面聚光器	34
2.2.1 槽形抛物面的聚光设计	34

2.2.2	槽形抛物面聚光器主参数的设计计算	37
2.2.3	聚光器定位布置的设计分析	39
2.2.4	聚光器的镜面结构设计	40
2.3	线聚焦接收器	41
2.3.1	高真空集热管	42
2.3.2	空腔集热管	51
2.3.3	复合空腔集热管	56
2.3.4	不同形式集热管特性的比较分析	61
2.4	槽形抛物面聚光集热器及其性能分析	63
2.4.1	槽形抛物面聚光集热器的分类	63
2.4.2	槽式太阳能热动力发电站中两种主要形式的槽形抛物面聚光集热器	63
2.4.3	槽形抛物面聚光器的光学性能分析	66
2.4.4	槽形抛物面聚光集热器的热性能分析	68
2.4.5	槽形抛物面聚光集热器的结构载荷设计分析	69
2.4.6	聚光器镜架的结构设计	73
2.4.7	槽形抛物面聚光集热器的支架结构	75
2.5	槽形抛物面聚光集热器集热工质选择的比较分析	75
2.5.1	可以选用的集热工质的基本特性	75
2.5.2	工作性能的比较计算与分析	77
2.6	槽形抛物面聚光集热器直接产生蒸汽 (DSG) 技术	83
2.6.1	集热管中直接产生蒸汽过程的物理描述	83
2.6.2	集热管中流体流动过程的动态特性分析	86
2.6.3	工质参数控制的理论描述	89
2.6.4	直接产生蒸汽实验研究的设计	91
2.6.5	直接产生蒸汽技术示范应用的设计原则	95
2.7	槽形抛物面聚光集热器阵列的设计与布置	95
2.7.1	确定聚光集热器回路长度	95
2.7.2	集热器阵列设计	96
2.7.3	集热器阵列布置	97
2.8	缓冲储热汽水分离器的设计及其在聚光集热器阵列中的布置	99
2.8.1	缓冲储热汽水分离器的设计	99
2.8.2	缓冲储热汽水分离器在聚光集热器阵列中的布置设计	102
2.9	槽形抛物面直接产生蒸汽聚光集热器回路储热系统的设计研究	103
2.9.1	集热器回路储热原理	103
2.9.2	集热器回路储热设计	104
2.9.3	储热槽的设计	106

2.10	槽式太阳能热动力发电站的系统优化设计分析	110
2.11	槽式太阳能直接产生蒸汽 50MW _e 热动力发电站的设计研究	111
2.11.1	电站设计研究的基础数据	112
2.11.2	电站系统总体设计	113
2.12	典型槽式太阳能热动力发电站介绍	117
2.12.1	国际 LUZ 公司槽式太阳能热动力发电站	117
2.12.2	Spanish-German 联合工程公司 INDITEP: 槽式太阳能热动力发电站	121

第 3 章 塔式太阳能热动力发电 124

3.1	塔式太阳能热动力发电站的系统组成与工作原理	124
3.1.1	电站系统组成	124
3.1.2	电站工作原理	125
3.2	塔式聚光装置	125
3.2.1	定日镜	125
3.2.2	定日镜阵列	131
3.2.3	镜场设计分析	135
3.3	定日镜跟踪系统	141
3.3.1	定日镜像散现象	142
3.3.2	太阳视位置跟踪原理	144
3.3.3	太阳视位置跟踪装置	148
3.4	塔顶接收器	149
3.4.1	塔顶接收器的分类及其热过程的应用传热原理	149
3.4.2	圆柱接收器	150
3.4.3	复合容积接收器	157
3.4.4	空腔接收器	161
3.5	塔式聚光集热系统性能的综合分析	166
3.5.1	镜面散焦分析	166
3.5.2	镜场参数的极限分析	166
3.5.3	镜场与塔顶接收器的总体性能评估	167
3.6	塔式太阳能热动力发电站中央动力塔	168
3.6.1	塔高计算	168
3.6.2	动力塔的原则结构设计	169
3.7	塔式太阳能热动力发电站的储热设计	169
3.7.1	混合盐集热储热	169
3.7.2	空气堆积床显热储热	169
3.8	塔式太阳能热动力发电站监控系统	170

3.9 塔式太阳能双工质双循环热动力发电站的设计研究·····	171
3.9.1 双工质双循环的基本工作原理·····	172
3.9.2 塔式太阳能双工质双循环 100MW _e 热动力发电站的概念设计·····	172
3.10 典型塔式太阳能热动力发电站介绍·····	174
3.10.1 美国 Solar I、Solar II 塔式太阳能热动力发电站·····	174
3.10.2 西班牙 PS 10 塔式太阳能热动力发电站·····	178

第 4 章 盘式太阳能热动力发电 180

4.1 盘式太阳能热动力发电装置的系统组成与工作原理·····	180
4.1.1 装置系统组成·····	180
4.1.2 装置工作原理·····	180
4.2 旋转抛物面聚光器·····	181
4.2.1 旋转抛物面的聚光设计·····	181
4.2.2 旋转抛物面聚光器的镜面利用系数·····	183
4.2.3 旋转抛物面的聚光性能分析·····	184
4.2.4 旋转抛物面聚光器的结构设计·····	186
4.3 空腔接收器·····	186
4.3.1 两种加热设计原理·····	187
4.3.2 圆柱形陶瓷空腔体的热性能分析·····	187
4.3.3 拱形钠热管接收器的设计研究·····	190
4.4 热动力发电机组·····	194
4.4.1 传统兰金循环热动力发电·····	194
4.4.2 斯特林循环热动力发电·····	194
4.4.3 机组支撑结构·····	199
4.5 典型盘式太阳能热动力发电装置介绍·····	199
4.5.1 盘式太阳能斯特林循环热动力发电装置·····	199
4.5.2 盘式太阳能兰金循环热动力发电装置·····	201

第 5 章 条式太阳能热动力发电 203

5.1 条式太阳能热动力发电站的系统组成与工作原理·····	203
5.1.1 电站系统组成·····	203
5.1.2 电站工作原理·····	203
5.2 条形线性菲涅尔反射式聚光装置·····	203
5.2.1 线性菲涅尔反射聚光原理·····	203
5.2.2 条形反射镜的方位和镜位布置设计·····	204
5.2.3 条形聚光装置的主要性能特点·····	205

5.3 塔杆顶接收器·····	206
5.3.1 接收器的结构组成·····	206
5.3.2 玻璃真空集热管·····	206
5.3.3 接收器的热损失·····	207
5.3.4 接收器的塔杆顶布置方式·····	208
5.3.5 塔杆顶接收器二次反射系统的布置设计·····	208
5.4 条形聚光集热装置性能的优化设计·····	210
5.4.1 最佳集热管长度·····	210
5.4.2 装置性能的优化设计·····	210
5.5 条式太阳能热动力联合循环发电站介绍·····	212

第6章 太阳池热动力发电 215

6.1 太阳池热动力发电站的系统组成与工作原理·····	215
6.1.1 电站系统组成·····	215
6.1.2 电站工作原理·····	215
6.2 太阳池理论·····	216
6.2.1 太阳池工作原理·····	216
6.2.2 太阳池对入射太阳辐射的吸收·····	217
6.2.3 太阳池的热性能分析·····	219
6.3 太阳池热动力发电站热力循环工作流体的选择·····	223
6.3.1 热力循环工作流体的选择标准·····	223
6.3.2 几种可供选用的有机工质热力循环性能的比较·····	224
6.4 太阳池热动力发电站的热力性能分析与参数研究·····	224
6.4.1 电站热力性能分析·····	224
6.4.2 电站参数研究·····	225
6.5 太阳池热动力发电站介绍·····	226

第7章 太阳能烟囱热气流动力发电 228

7.1 太阳能烟囱热气流动力发电站的系统组成与工作原理·····	228
7.1.1 电站系统组成·····	228
7.1.2 电站工作原理·····	228
7.2 太阳能空气集热棚·····	229
7.2.1 太阳能空气集热棚原理·····	229
7.2.2 太阳能空气集热棚的性能分析·····	230
7.3 热动力烟囱·····	234
7.3.1 热动力烟囱的设计原理·····	234

7.3.2	热动力烟囱的气动过程分析·····	235
7.4	太阳能烟囱热气流动力发电站的能量转换与运行分析·····	235
7.4.1	电站发电功率·····	235
7.4.2	电站能量转换效率·····	238
7.4.3	电站运行分析·····	238
7.5	太阳能烟囱热气流动力发电站的相似模拟研究·····	239
7.5.1	量纲分析·····	239
7.5.2	计算验证与讨论·····	240
7.6	兆瓦级太阳能烟囱热气流动力发电站的典型概念设计与参数曲线·····	242
7.6.1	大型太阳能烟囱热气流动力发电站的典型概念设计·····	242
7.6.2	典型兆瓦级太阳能烟囱热气流动力发电站的概念设计参数 曲线·····	242
7.7	太阳能烟囱热气流动力发电实验电站介绍·····	243

第8章 太阳能热动力发电的工程经济分析与发展前景展望

244

8.1	工程经济学的产生和研究内容·····	244
8.1.1	工程技术实践的经济效果·····	244
8.1.2	技术与经济的相互关系·····	245
8.1.3	技术创新-技术进步-经济的稳步增长·····	245
8.2	太阳能工程经济分析的准则和特点·····	245
8.2.1	太阳能工程经济分析准则·····	246
8.2.2	太阳能工程经济分析特点·····	246
8.3	太阳能工程经济分析方法·····	247
8.3.1	现值分析·····	247
8.3.2	投资回收年限·····	249
8.4	太阳能热动力发电的工程经济分析示例·····	249
8.4.1	槽式太阳能直接产生蒸汽热动力联合循环发电经济分析·····	249
8.4.2	塔式太阳能热动力(熔盐)联合循环发电经济评估·····	250
8.4.3	太阳能烟囱热气流动力发电经济远景展示·····	252
8.5	太阳能热动力发电技术的发展前景展望·····	254
8.5.1	不同形式太阳能热动力发电站特性的比较·····	254
8.5.2	推动发展太阳能热动力发电技术的诸因素·····	256
8.5.3	发展前景展望·····	258

参考文献

262

第 1 章

总 论

太阳能热动力发电技术在太阳能利用领域中占有十分重要的地位。太阳能热动力发电和太阳能光伏发电都是将太阳能转换为电能，均为太阳能利用的高新技术，构成太阳能利用工程学中的两大技术支柱。但它们的工作原理、设备配置和性能特点全然不同，正可以充分发挥各自的技术优势，共同服务于人类社会。

1.1 概述

将太阳辐射能经由热能转换为电能的能量转换方式，统称为太阳能热发电。将太阳辐射能转换为热能，再经热动力发电装置转换为电能的能量转换方式，称为太阳能热动力发电。

1.1.1 太阳能热发电的分类

根据工作原理的不同，太阳能热发电可以分为以下两大类。

(1) 半导体或金属材料的温差发电、碱金属热电转换等

热电子、热离子温差发电，碱金属热电转换以及磁流体发电等，它们的共同特点是，均可利用太阳能进行热电转换。太阳能热电子发电^[70]、热离子发电等单机容量小，太阳能碱金属热电转换、太阳能磁流体发电等尚处于原理性探索阶段。以色列和美国就曾计划建造太阳能磁流体发电站。这类太阳能热发电方式，均不属本书所要讲述的内容。

(2) 太阳能热动力发电

太阳能热动力发电包括槽式太阳能热动力发电、塔式太阳能热动力发电、盘式太阳能热动力发电、条式太阳能热动力发电、太阳池热动力发电和太阳能烟囱热气流动力发电 6 种发电方式。其基本工作原理是，利用不同形式的聚光或非聚光太阳能集热装置，收集太阳辐射能，并转换为不同温度的热能，直接加热水、气、低沸点工质，或加热高温油、熔盐等再经热交换，使水、气等变成高温高压蒸汽或高温高压热气体，推动不同形式的热动力发电机组发电，从而将低品位的太阳能转换为高品位的电能，完成能量转换的全过程。

上述 6 种太阳能热动力发电方式，它们的共同特点是，其热动力发电部分与常规热力发电厂相同或相近，均为常规设备，这部分本书只作有选择性的简要介绍，而着力讲述太阳能系统



部分。有关热动力发电部分，需要详细研究的读者，请参阅文献 [78] 或其他有关专著。

1.1.2 太阳能热动力发电发展简史

利用太阳能聚光集热技术产生太阳能动力的设想，不是人们近年来的一大发明，而是一个古老的概念。1878 年，法国工程师在巴黎建造了一座小型太阳能热动力站，采用盘形抛物面反射镜，将阳光聚焦到置于其焦点处的蒸汽锅炉，由此产生的蒸汽驱动一台很小的交互式蒸汽机运行。1882 年，法国数学家 A. Mouchot 设计建造了一台太阳能装置，通过产生蒸汽推动蒸汽机，将太阳能转换为机械能，带动印刷机工作。1913 年，美国工程师研制成功率 36.8kW 太阳能蒸汽机，安装在埃及开罗附近，从尼罗河提水灌溉农田。该装置采用槽形抛物面反射镜，将阳光聚焦在中心加热管上，其聚光比为 4.5 : 1。此后，直至 1970 年，太阳能聚光集热技术在工业生产领域均未能得到长足的发展与应用。

太阳能热动力发电技术的现代研究，起始于 20 世纪 70 年代。

1973 年爆发了世界石油危机，一些发达国家将太阳能热动力发电技术列为国家研发重点项目。根据统计，迄今全世界共建造了各种不同形式的兆瓦级太阳能热动力发电站 30 余座，其中主要形式是塔式太阳能热动力发电站，其次是槽式太阳能热动力发电站，最大单机容量为 80MW。表 1-1 按电站建成年月排序，列出几座极具代表性的太阳能热动力发电站的基本情况。表中并列出国 2005 年建成的小型塔式太阳能热动力发电试验装置。

20 世纪 80 年代中期以来，人们在对已建成的太阳能热动力发电站进行了大量的实验研究和分析之后，得出的结论是，太阳能热动力发电在技术上是可行的，但目前的电站比投资过大，要迅速降低电站比投资，尚需奋斗，坚信通过不懈的努力是能够逐步降低电站造价以及发电成本电价，最终实现其商业应用。所以，研究步伐始终没有停止。

以下，对上述 6 种太阳能热动力发电方式的发展简史分别进行介绍。

(1) 槽式太阳能热动力发电

20 世纪 80 年代初期，以色列 LUZ 公司着力研发槽式太阳能热动力发电技术。从 1983~1991 年的 8 年间，在美国加州相继建成 9 座槽式太阳能热动力发电站，称为 SEGS I~IX，总装机容量 353.8MW，并投入加州爱迪生电网并网营运。电站年太阳能发电效率 14%~18%，峰值发电效率 22%，电站利用率超过 98%。9 座电站中，SEGS I 电站于 1992 年 2 月为火灾所毁坏。LUZ 公司从第 1 座电站 SEGS I 到第 9 座电站 SEGS IX 的研发过程中，逐座进行升级改进，以求达到更高的转换效率、更低的电站比投资以及更低的运行与维修费用。经过几年的不懈努力，电站比投资由 SEGS I 电站的 4490 美元/kW 降到 SEGS VIII 电站的 2650 美元/kW，发电成本电价从 24 美分/(kW·h) 降到 8 美分/(kW·h)。至此，该公司满怀信心，计划到 2000 年在加州建成总装机容量达 800MW 的槽式太阳能热动力发电站，发电成本电价降至 5~6 美分/(kW·h)。这一进展，使得槽式太阳能热动力发电站在经济上已可与常规热力发电厂相竞争。遗憾的是，1991 年 LUZ 公司宣告破产，从而使该计划中断。LUZ 公司的破产，很清楚是由于当时矿物燃料的价格大幅降低和税收政策的变化，以及常规能源电站组建为联合循环发电，将大幅降低电站比投资和大幅提高电站热力循环效率等因素造成的，并非槽式太阳能热动力发电技术本身的原因。



表 1-1 世界上已建成的几座具有代表性的太阳能热动力发电站概况

电站参数	标名	SSPS	Eurelios	SUNSHING	Solar I	CESA-I	THEMIS	SEGS I ~IX	Solar II	PS 10	
电站形式		塔式	塔式	塔式	塔式	塔式	塔式	槽式	塔式	塔式	塔式
站址		西班牙	意大利	日本香川县	美国加州	西班牙	法国南部	美国加州	美国加州	西班牙南部	中国南京
额定功率/MW		0.5	1	1	10	0.5	2.5	353.8	10	11	0.07
设计太阳辐射条件/(kW/m ²)		春分正午	春分正午	夏至14:00	冬至14:00	冬至10:00	春分正午	冬至14:00	冬至14:00	冬至10:00	
		0.92	1.0	0.75	0.9	0.70	1.04	0.9	0.9	0.70	
日照时间/(h/a)		3000	3000	2000	3500	3000	2400	3500	3500	3000	2000
聚光集热方式		空腔型	空腔型	空腔型	外表受光型	空腔型	空腔型	真空集热管	外表受光型	空腔型	空腔型
定日镜/m ² ×台		39.3×93	52×70 23×112	16×807	39.9×1818	(36~40) ×300	53.7×280		39.9×1818 95×108	121×624	24×32
反射镜总面积/m ²		3655	6216	12912	72540	11400	10740		82980	75504	768
集热工质		钠	水	水	水	水	混合盐	高温油	混合盐	水	空气
储热工质		钠	混合盐	加压水	石子+油	混合盐	混合盐	高温油	混合盐	饱和蒸汽	
储热容量		2h	0.5h	3h	7×4MW	3h	3.3h		3h	1h5MW·h _{th}	
汽轮机蒸汽入口参数		500℃ 105bar	510℃ 66.9bar	187.1℃ 12.2bar	510℃ 104bar	520℃ 101bar	430℃ 41.5bar	371℃ 100bar	510℃ 104bar	250℃ 40bar	900℃
总投资/亿美元		0.17	0.25	0.22	1.4	0.179	0.236				
电站比投资/(美元/kW)		34000	25000	22000	14000	17900	9450	4490~2650		3500 欧元/kW	
电站并网日期		1981	1981	1981	1982	1983	1984	1984~1990	1996	2006	2005

注：1bar=10⁵Pa。



尽管由于 LUZ 公司破产使槽式太阳能热动力发电技术的研发工作被迫停止,但在其研发的最后阶段,选择水作集热工质,以槽形抛物面聚光集热器 LS-3 开发的直接产生蒸汽技术取得了初步结果,并用于 SEGS IX 做运行试验,为推动槽式太阳能热动力发电技术进一步向前发展,奠定了坚实的物理基础。德国和西班牙的科技人员,注意到 LUZ 公司取得的这一成就。世纪之交,他们沿着 LUZ 公司开辟的这条技术途径,对槽形抛物面聚光集热器直接产生蒸汽技术,进行了从理论到实验的全方位的研究,取得了很多重要成果。在此技术基础上,研发了属于他们自己的槽形抛物面聚光集热器 ET-100,以水作集热工质,直接产生蒸汽,并作了发电功率 50MW 的槽式太阳能直接产生蒸汽热动力发电示范电站的模拟设计。由此,掀起了新一轮对槽式太阳能直接产生蒸汽热动力发电技术深入研发的浪潮^[16]。

2008 年 12 月,Spanish-German 联合工程公司,在西班牙 Guadix 建设了一座 50MW 槽式太阳能直接产生蒸汽热动力发电实验电站,并取得成功。系统中设置了储热容量数小时的储热子系统。

(2) 塔式太阳能热动力发电

1950 年,前苏联设计并建造了世界上第一座塔式太阳能热动力发电站的小型模拟实验装置,设计装置容量为 50kW,对太阳能热动力发电技术进行了广泛的、基础性的探索和研究,应该说这是世界上研究开发太阳能热动力发电技术的第一次实际的尝试。

塔式太阳能热动力发电技术的现代规模研究,起始于 20 世纪 80 年代初。

1982 年,美国在加州建成 Solar I 塔式太阳能热动力发电站,以水作集热工质,装机容量 10MW。经过一段时间的试验运行和总结之后,又建造了 Solar II,改以熔盐作集热工质,装机容量同为 10MW,于 1996 年 1 月建成并投入试验运行。Solar II 电站建造的目的在于,着重研究电站中的一些关键部件,如定日镜、塔顶接收器等,以及镜场布置设计,尤其是提供一座以熔盐作集热工质的塔式太阳能热动力发电站的示范性设计。经过试运行,澄清了发展以熔盐作集热储热工质的塔式太阳能热动力发电系统在经济上和技术上的若干不确定性,使工业界能够充满信心地去发展适宜于商用规模(30~100MW)的塔式太阳能热动力发电站。

在此期间,世界各国相继建造了多座容量为 0.5~10MW 的塔式太阳能热动力发电实验电站,参阅表 1-1。

2006 年春,欧盟在西班牙 Abengoa,建造了一座功率为 11MW 的塔式太阳能热动力发电站,并投入试验运行,称为 PS 10,参见图 3-2。该电站的与众不同之处是,采用饱和蒸汽兰金循环发电,而非过热蒸汽。2008 年,在 PS 10 电站成功发电的基础上,在其近旁再建另一座相同形式、功率为 20MW 的塔式太阳能热动力发电站,称为 PS 20。该电站峰值发电效率为 23%,年平均发电效率为 20%,它是目前世界上已建成的容量最大的塔式太阳能热动力发电站。欧盟计划从 2008 年开始,设计建造容量为 300MW 的大型塔式太阳能热动力发电示范电站。这是塔式太阳能发电经过多年实验研究之后,向商业化应用的起步。应该说,建造第一座商业示范实验电站是完全必需的,以求确认在真正的实用和商业运行条件下技术本身具有充分的依据。

迄今,世界上已建有超过 10 座以上不同形式的塔式太阳能热动力电站投入试验运行,

进行着各式各样的实验研究,其单元电站发电功率大致为 $1\sim 20\text{MW}$ 。实验研究的主要目的是,希望通过各种试验证实其技术上的可行性以及和大型储热系统联合运行的性能。

目前,美国加州正在建造世界上容量最大的塔式太阳能热动力发电站^[5],由相邻的三座中央动力塔组成,安装定日镜 347000 台,直接产生 550°C 高温高压过热蒸汽,推动汽轮发电机组发电,总发电功率 392MW ,占地 14km^2 ,计划 2013 年建成并网运行。

(3) 盘式太阳能热动力发电

早在 19 世纪 70 年代,在法国巴黎近郊建成的小型太阳能动力站,就是一个早期的盘式太阳能热动力系统。但它不是发电而是带动水泵抽水。

近年来,随着新型热动力机和其他相关技术的迅猛发展,将新型热动力发电机组置于旋转抛物面聚光器焦点上,构成现代盘式太阳能热动力发电装置,即盘式太阳能热气机动力发电系统。由于单个旋转抛物面聚光器不可能做得很大,因此盘式太阳能热动力发电装置的单机功率都比较小,一般为 $5\sim 50\text{kW}$ 。它可以分散地单台发电,也可以由多台组成一个较大的发电场。

现代盘式太阳能热动力发电技术的研究,主要目标致力于研究盘式太阳能斯特林循环热动力发电装置,着眼于开发功率质量比大的空间电源。这项技术的研发工作始于 1980 年,主要是美国和德国。

美国第 1 台盘式太阳能热动力发电装置的聚光器为小面积型,具有二次反射镜,因此其聚光比很高,达到 $C=3000$ 。聚光器结构坚固,单位光孔面积质量大约是 $100\text{kg}/\text{m}^2$ 。1983 年,美国 Advanco 研制的 Vanguard I 原型机,发电功率 25kW ,安装在美国加州,从 1984 年 2 月至 1985 年 6 月,在 Mojave 沙漠地区总计运行了 18 个月。该装置聚光器的直径为 10.7m ,镜面反光面积为 86.7m^2 ,动力机采用了美国联合斯特林公司生产的 4-95 II 型斯特林机。该机为 4 缸,汽缸容积为 95cm^3 ,并联配气,具有双动活塞,组装成四方形。工作气体采用氢气,压力 20MPa ,温度 720°C 。斯特林机的功率由变化工作气体的压力进行调节。Advanco/Vanguard 系统(包括辅助系统)的净效率超过 30%,至今仍保持这类热动力发电机组转换效率的世界纪录。

其后,Douglas 公司采用相同的技术和热气机,研发了另一台改进型盘式太阳能斯特林循环热动力发电装置。其旋转抛物面聚光器的入射光孔面积为 88m^2 ,由 82 枚小弧面镜组成。总计生产了 6 台,安装在美国境内不同地区做运行试验。经过评估,机组性能达到了 Advanco/Vanguard 系统的水平。随后计划停止。1996 年,该项目的研发工作重又得到一定的扶持,组装了多台盘式太阳能斯特林循环热动力发电装置,投入试验运行与改进。迄至 2003 年,该装置日转换效率达到 $24\%\sim 27\%$,年转换效率达到 24% ,更重要的是在太阳辐射强度为 $300\text{W}/\text{m}^2$ 时达到 94% 的利用率。

在上述工作的基础之上,2010 年美国在 Mojave 沙漠地区,安装了 60 台 Vanguard I 型盘式太阳能斯特林循环热动力发电装置,总装机容量为 1500kW ,参见图 4-19(c)。

1992 年德国研制成功盘式太阳能斯特林循环热动力发电装置,其发电功率为 9kW ,至 1995 年 3 月,累计运行了 17000h ,峰值净转换效率为 20%,月净转换效率为 16%。

1992~1993 年,日本在宫古岛进行了盘式太阳能斯特林循环热动力发电实验,机组额



定发电功率为 8kW。聚光器由 24 枚反射镜组成,其输出热功率为 40kW_{th} 。

2004 年法国国家科学研究中心,研制成功发电功率为 10kW 盘式太阳能斯特林循环热动力发电装置,安装在法国 Odeillo 做试验。至 2006 年,总计运行了 2500h,产生电能 $14.6\text{MW}\cdot\text{h}$,在太阳辐射强度为 $974\text{W}/\text{m}^2$ 时,峰值发电功率为 11.1kW,相应的转换效率为 21.6%。

(4) 条式太阳能热动力发电

最早的线性菲涅尔聚光概念是由 Francia 于 1960 年提出的,当时的设想是一组条形反射镜对准单个置于塔杆顶的线性接收器。这从聚光原理上讲,条形反射镜需要跟踪太阳视位置,自然就要考虑相邻条形反射镜之间的屏蔽问题。随后的研究提出一组条形反射镜对准多个塔杆顶接收器,实际上就是改变镜场中相邻条形反射镜的聚焦点。这样,可以使条形反射镜之间的屏蔽降至最小,从而可能将镜场布置得更为紧凑,称为紧凑线性菲涅尔聚光系统 (CLFR)。

1993 年,澳大利亚悉尼大学开始实际研发这一技术。1995 年 Mills 申报了专利,在该专利中,采用玻璃真空管集热器作接收器^[10]。1996 年, Solsearch 申报了该技术的第 2 个专利,采用了全组装的接收器系统。

2002 年,澳大利亚太阳热和动力工程公司计划应用这一技术,在 Liddell 燃煤热力发电厂建造热功率为 103MW_{th} (约为 39MW_e) 的太阳能热动力发电站。计划分 3 个阶段进行:第 1 阶段,建设镜面面积 1400m^2 的线性菲涅尔反射聚光集热装置试验阵列,暂不与电厂相连接;第 2 阶段,若上述试验取得成功,将聚光集热装置镜面面积扩大至 20000m^2 ,组建 3 排相邻的接收器塔杆,长 300m,通过电站给水加热器与发电厂相连接;第 3 阶段,发展塔杆总排数为 20 行的条式太阳能热动力发电站。

近年来,该公司与澳大利亚悉尼大学合作,在 Liddell 发电厂附近安装了 500kW_{th} 线性菲涅尔聚光系统,为该发电厂提供 270°C 的湿蒸汽作锅炉给水预热,组成联合循环系统,进行太阳能供热联合循环发电试验。另有澳大利亚几家公司,分别计划应用这一技术建造更大容量的 20~200 MW_e 条式太阳能热动力发电站。其示范运行电站的容量为 1MW_e 或 2MW_e 。

此外,西班牙、比利时也都在研发 2MW_{th} 线性菲涅尔聚光集热系统,用于供热或发电。

(5) 太阳池热动力发电

1902 年,匈牙利物理学家 Kalecsinsky 在作自然资源考察时,观察到一个有趣的自然现象,即在一些天然盐水湖泊中,水底的温度往往高于水面的温度。例如,他在考察匈牙利 Medve 湖时发现,夏季在水深 132cm 处,湖水温度达到 70°C 。1948 年, Bloch 在上述发现的启示下,向以色列国家研究委员会建议,建设人工分层的盐水池作太阳能集热器,收集太阳能以供利用。对于这一具有开创性意义的设想,直到十年以后, Tabor 等人在以色列国家物理实验室,开始了从理论到实验的全方位探索研究,并于 20 世纪 60 年代初期,在以色列死海岸边建造了一座面积为 625m^2 的实验盐水池,测得在水深 80cm 处,水温达到 95°C 。这样的温度,已经具有热利用的实际价值。这是世界上第一座利用人造盐水池收集太阳辐射能的集热装置,被命名为太阳池。这一成功促使很多国家相继开展对太阳池的研究,建造了不少实验性太阳池,用于供热、采暖,以至用于热动力发电。