



CAOSHI TAIYANGNENG ZHIJIE ZHENGQI
FADIAN XITONG
JIRECHANG JIANMO YU KONGZHI

槽式太阳能直接蒸汽发电系统 集热场建模与控制

郭苏 刘群明 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

槽式太阳能直接蒸汽发电系统 集热场建模与控制

郭苏 刘群明 著



内 容 提 要

本书以槽式太阳能直接蒸汽发电系统及对应的 DSG 槽式集热器为对象, 对其基础知识、设计原理等进行了介绍; 建立了 DSG 槽式集热器传热与水动力耦合稳态模型及非线性分布参数动态模型、移动云遮工况的云遮始末时间模型, 直通模式和再循环模式系统的集热场非线性分布参数模型及传递函数模型; 分析了直通模式系统、再循环模式系统及 DSG 槽式集热器的稳态特性和动态特性, 研究了再循环模式系统的热工控制方案。

本书适用于新能源科学与工程专业、热能与动力工程专业及其他相关专业的本科生和研究生阅读, 也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

槽式太阳能直接蒸汽发电系统集热场建模与控制 /
郭苏, 刘群明著. — 北京: 中国水利水电出版社,
2018.5
ISBN 978-7-5170-6653-8

I. ①槽… II. ①郭… ②刘… III. ①太阳能聚热器—系统建模—研究 IV. ①TK513.3

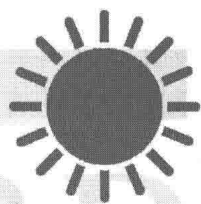
中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第170276号

书 名	槽式太阳能直接蒸汽发电系统集热场建模与控制 CAOSHI TAIYANGNENG ZHIJIE ZHENGQI FADIAN XITONG JIRECHANG JIANMO YU KONGZHI
作 者	郭苏 刘群明 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.75印张 255千字
版 次	2018年5月第1版 2018年5月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	39.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



FOREWORD

工质为水或水蒸气的槽式太阳能直接蒸汽发电 (DSG) 系统是当今槽式太阳能热发电系统的发展方向。优化槽式 DSG 系统性能, 提高其运行控制的稳定性是槽式 DSG 技术的研究方向。建立 DSG 槽式集热器和槽式 DSG 系统的数学模型, 研究其运行机理、控制方法和策略, 是实现上述研究目标的基础, 而国内外针对槽式 DSG 系统建模与控制所做的研究还非常有限。

本书以 DSG 槽式集热器和槽式 DSG 系统为研究对象, 对其进行了机理分析、数学建模、实验对比、特性分析, 并对再循环模式槽式 DSG 系统的工质参数制定了控制方案。

本书共分 10 章。第 1 章对槽式系统基本概念、发展现状和方向, 以及相关技术的研究现状进行了综述。第 2 章介绍了太阳辐射的相关知识。第 3 章介绍了太阳能光学设计原理以及太阳辐射的透过、吸收和反射现象。第 4 章介绍了槽式聚光集热器表面的直射辐射强度及光学效率模型。第 5 章建立了 DSG 槽式集热器传热与水动力耦合稳态模型, 在模型求解中采用了太阳辐射热能、工质焓值和工质压力耦合判定, 对管内换热系数、蒸汽含汽率、压降、流体温度以及管壁温度等参数进行耦合求解的方法, 提高了计算结果的精度; 揭示了 4 种主要影响因素对 DSG 槽式集热器出口参数的影响规律, 为槽式 DSG 系统设计提供了理论依据。第 6 章建立了 DSG 槽式集热器的非线性分布参数动态模型和移动云遮工况的云遮始末时间模型, 其中集热器动态模型的传热系数和摩擦系数采用了实时计算值, 提高了模型的精度; 解决了 DSG 槽式集热器非线性集总参数模型不能模拟局部云遮、移动云遮等实际太阳直射辐射变化工况的问题; 揭示了 5 种主要影响因素对 DSG 槽式集热器的主要工质参数的影响规律。第 7 章建立了直通模式槽式 DSG 系统集热场非线性分布参数模型, 该模型由 DSG 槽式集热器非线性分布参数模型以及喷水减温器非线性集总参数模型组成; 揭示了直通模式槽式 DSG 系统集热场工质参数的稳态和动态变化规律; 提出了直通模式槽式 DSG 系统正常工作时直射辐射强度、工

质流量、入口工质温度、入口工质压力的选择范围；揭示了直射辐射强度扰动位置对工质参数的影响规律；给出了集热场出口蒸汽温度的传递函数。第8章建立了再循环模式槽式DSG系统集热场非线性分布参数模型，该模型由DSG槽式集热器非线性分布参数模型、汽水分离器非线性集总参数模型以及喷水减温器非线性集总参数模型组成，揭示了再循环模式槽式DSG系统集热场工质参数的稳态和动态变化规律；提出了再循环模式槽式DSG系统正常工作时直射辐射强度、工质流量、入口工质温度、入口工质压力的选择范围；揭示了直射辐射强度扰动位置对工质参数的影响规律；给出了集热场出口蒸汽温度和汽水分离器水位的传递函数。第9章对再循环模式槽式DSG系统控制方案进行了研究，提出了再循环模式槽式DSG系统的全厂运行控制策略；利用本书仿真得到的传递函数，分别采用抗积分饱和PI控制方案和多模型切换广义预测控制策略对汽水分离器水位和出口蒸汽温度进行了控制；对比发现，多模型切换广义预测控制策略可使被控参数快速平滑地跟踪设定值，并有效地解决了变工况可能导致的模型失配问题。第10章对全书做出总结和展望。

在本书编写过程中，江苏省陈星莺副省长，东南大学张耀明院士、沈炯教授、金保昇教授，河海大学刘德有教授、许昌教授在各个方面对作者给予了大力支持，在此对各位师长表示衷心的感谢。东南大学张耀明院士和河海大学刘德有教授审阅了全部书稿，为本书的完成做出了重要贡献，在此特致敬意。

在本书完稿之际，对书末所附参考文献的作者也致以衷心的感谢。

由于作者学识有限，本书编写时间又很仓促，书中难免有疏漏及错误，殷切希望读者批评指正。

作 者

2017年8月

于河海大学能源与电气学院

符 号 说 明*

常用变量:

B ——聚光器开口宽度, m。

D ——直径, m。

\dot{m} ——工质流量, kg/s。

F ——截面积, m^2 , 增强因子。

G ——质量通量, $kg/(m^2 \cdot s)$ 。

H ——比焓, J/kg。

I_{direct} ——聚光器开口面垂直方向上的太阳直射辐射强度, W/m^2 。

K_{ra} ——入射角修正系数。

L ——集热场长度, m。

W ——集热场(U形场)宽度, m。

M ——分离器质量。

P ——工作压力, MPa。

P_{cr} ——水的临界压力, Pa。

P_d ——摩擦压降, Pa。

Q_1 ——单位时间单位管长, 聚光器收集的太阳辐射能, W/m 。

Q_2 ——单位时间单位管长, 金属管传递的太阳辐射热能, W/m 。

S ——限制因子。

T ——温度, K。

V ——容积, m^3 。

ΔZ ——云影宽度, m。

K_p ——比例增益。

K_i ——积分增益。

K_d ——微分增益。

N_1 ——优化时域初值。

N_2 ——优化时域终值。

N_u ——控制时域。

T_i ——积分时间。

T_d ——微分时间。

* 本书符号主要依据锅炉及锅炉过程控制专业领域的常用符号制定。

T_0 ——采样周期。
 T_{\min} ——等待周期。
 Y ——输出预测值。
 Y_R ——输出期望值。
 ΔU ——控制增量预测值。
 a ——对流因子。
 b ——辐射因子。
 c ——比热容, $J/(kg \cdot K)$; 风速因子。
 c_p ——定压比热, $J/(kg \cdot K)$ 。
 h ——水位, m ; 传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。
 λ ——导热系数, $W/(m \cdot K)$; 放大系数; 控制加权系数。
 m ——质量, kg 。
 q ——热流密度, W/m^2 。
 q_l ——DSG 槽式集热器单位管长热力学损失, W/m 。
 r ——汽化潜热, J/kg 。
 t ——温度, $^{\circ}C$ 。
 v ——速度, m/s 。
 x ——质量含汽率。
 y ——沿管长方向长度。
 Δt ——DSG 槽式集热器上某个固定点被云阴影遮挡的时间, s 。
 y_r ——输出参考轨迹。
 $u(t)$ ——被控对象的输入。
 $y(t)$ ——被控对象的输出。
 $w(t)$ ——互不相关的随机序列信号。
 α ——有效金属系数; 输出柔化系数; 云移动的方向与正南方的夹角, $(^{\circ})$ 。
 ρ ——密度, kg/m^3 。
 θ ——入射光线到聚光器法线的夹角, $(^{\circ})$ 。
 ν ——运动黏度, m^2/s 。
 η ——动力黏度, $Pa \cdot s$, 效率。
 ω ——输出设定值。
 ϵ ——发射率。
 λ_f ——摩擦系数。
 ϕ ——Martinelli - Nelson 两相乘子。
 τ ——时间, s 。
 ξ ——修正系数。
 Re ——雷诺数。
 Pr ——普朗特数。
 Fr ——弗汝德数。

常用角标：

' (上角标) —— 饱和水。

" (上角标) —— 饱和蒸汽。

B —— 核态沸腾。

1ph —— 单相 (水或者蒸汽)。

2ph —— 两相。

ab —— 集热器金属管。

ave —— 平均值。

bh —— 饱和。

cq —— 产汽。

cs —— 产水。

dp —— 露点。

g —— 饱和蒸汽。

l —— 饱和水。

1s —— 过热区冷段。

a —— 喷水减温器，环境。

i —— 内径。

in —— 集热器金属管内侧，集热器入口，分离器入口。

j —— 金属。

sw —— 喷水减温器减温水。

o —— 外径。

opt —— 光学。

out —— 集热器金属管外侧，集热器出口，分离器蒸汽出口。

s —— 汽水分离器。

sb —— 分离器出水口。

sj —— 汽水分离器有效金属。

sky —— 天空。

wind —— 风。

yx —— 有效。

目录

CONTENTS

前言

符号说明

第 1 章 绪论

- 1.1 太阳能热发电背景及意义 1
- 1.2 槽式太阳能热发电技术 3
- 1.3 槽式太阳能热发电技术发展现状及发展方向 7
- 1.4 槽式太阳能热发电技术研究现状 14
- 1.5 本书主要研究内容与成果 18

第 2 章 太阳辐射

- 2.1 地球绕太阳的运行规律 21
- 2.2 天球与天球坐标系 23
- 2.3 天球坐标系的变换 25
- 2.4 太阳光线相关角度的定义 27
- 2.5 日照时间 28
- 2.6 太阳常数和大气层外太阳辐射强度 28

第 3 章 槽式聚光集热器光学基础

- 3.1 太阳能光学设计原理 30
- 3.2 太阳辐射的透过、吸收和反射现象 32

第 4 章 槽式聚光集热器表面直射辐射强度及光学效率计算

- 4.1 地球大气层外水平面上的太阳辐射 37
- 4.2 大气层对太阳辐射的影响 39

4.3	太阳辐射量的计算	43
4.4	DSG 槽式聚光集热器及其光学特性	48

第 5 章 DSG 槽式集热器传热与水动力耦合稳态模型及稳态特性分析

5.1	建模方法	57
5.2	物理模型	58
5.3	传热与水动力耦合稳态模型	59
5.4	传热与水动力耦合稳态模型的求解	63
5.5	传热与水动力耦合稳态模型的验证	65
5.6	DSG 槽式集热器的稳态特性分析	66

第 6 章 DSG 槽式集热器非线性分布参数动态模型及动态特性分析

6.1	动态建模方法及形式	71
6.2	DSG 槽式集热器动态模型	73
6.3	二次建模	75
6.4	动态模型求解	75
6.5	单相 DSG 槽式集热器动态特性分析	77
6.6	出口两相 DSG 槽式集热器动态特性分析	81
6.7	出口过热蒸汽 DSG 槽式集热器动态特性分析	87
6.8	移动云遮时 DSG 槽式集热器动态特性分析	96

第 7 章 直通模式槽式 DSG 系统集热场模型与特性分析

7.1	直通模式槽式 DSG 系统集热场模型	103
7.2	直通模式槽式 DSG 系统集热场稳态特性分析	106
7.3	直通模式槽式 DSG 系统集热场动态特性分析	111

第 8 章 再循环模式槽式 DSG 系统集热场模型与特性分析

8.1	再循环模式槽式 DSG 系统集热场模型	119
8.2	再循环模式槽式 DSG 系统集热场模型验证	124
8.3	再循环模式槽式 DSG 系统集热场稳态特性分析	125
8.4	再循环模式槽式 DSG 系统集热场动态特性分析	130

第 9 章 再循环模式槽式 DSG 系统控制研究

9.1	全厂运行控制策略	139
-----	----------------	-----

9.2	再循环模式槽式 DSG 系统汽水分离器水位控制	140
9.3	再循环模式槽式 DSG 系统集热器出口蒸汽温度控制策略	143

第 10 章 总结与展望

10.1	总结	151
10.2	展望	153
	参考文献	154

第 1 章 绪论

1.1 太阳能热发电背景及意义

21 世纪,全人类都面临着同样的能源问题。一方面,经济、社会的可持续发展与环境可承载能力之间存在巨大矛盾,经济、社会的发展离不开能源,而燃烧常规化石燃料会产生大量的二氧化碳,二氧化碳是主要的温室气体类型。观测资料表明,在过去的 100 年里,全球平均气温上升了 $0.3\sim 0.6^{\circ}\text{C}$,全球海平面平均上升了 $10\sim 25\text{cm}$,这就是温室效应。目前,经济和社会正在迅速发展,但环境的可承载力已接近极限。另一方面,常规能源的日趋匮乏与能源需求的急剧增加是当今社会亟须解决的主要矛盾。据《2013—2020 年中国煤炭行业市场研究与投资前景评估报告》显示,2012 年年底,世界石油可采储量为 16689 亿桶,储采比为 52.9;天然气为 187.3 万亿 m^3 ,储采比为 55.7;煤炭为 8609 亿 t,储采比为 109。从煤炭、石油、天然气储量情况看,煤炭储量最为丰富,储采比最长,石油、天然气储采比相当,均为 50 多年。当面临全球污染严重、常规能源近乎枯竭又急需大量能源的双重矛盾时,全人类达成了共识,即依靠科技进步,大规模地开发利用太阳能、风能、生物质能等可再生清洁能源。

近年来,太阳能热发电在欧美地区快速发展。目前,面向承担基础电力负荷的“大容量、高参数、长周期储热”是国际太阳能热发电的技术发展趋势。2015 年,全球光热发电建成装机容量达到约 4940.1MW,比 2014 年增长 421.1MW,增幅为 9.3%。目前,太阳能热发电的年平均效率超过 12%,成本价格在 0.2 欧元/(kW·h),到 2020 年有望降低到 0.05 欧元/(kW·h)。

国际能源署发布的《能源技术展望 2010》报告指出,到 2050 年,太阳能热发电装机容量将达到 10.89 亿 kW,产生电力占总发电量的 11.3%。因此太阳能热发电绝对称得上是朝阳产业,有非常广阔的发展空间。

就我国而言,我国正处于经济高速发展时期,能源的消耗量还要大大增加。但我国的能源储量并不容乐观,根据 2012 年的统计数据,煤炭储量为 1145 亿 t,占世界储量的 13.3%;石油储量为 173 亿桶,仅占世界储量的 1%;天然气储量为 3.1 万亿 m^3 ,仅占世

界储量的 1.7%。人均能源可开采储量更是远低于世界平均水平。而且由于历史原因，我国的能源有效利用率非常低。从开采到利用，几乎都还停留在粗放型生产模式，这对环境造成的污染非常严重。我国是全球第二大二氧化碳排放国，也是第一大煤炭消费国，是世界上少有的几个能源结构以煤炭为主的国家。

我国的太阳能资源非常丰富，不仅拥有世界上太阳能资源最丰富的地区之一——西藏地区，而且陆地面积每年接受的太阳总辐射能相当于 2.4×10^4 亿 t 标准煤，约等于数万个三峡工程发电量的总和。如果将这些太阳能有效利用，对于缓解我国的能源问题、减少二氧化碳的排放量、保护生态环境、确保经济发展过程中的能源持续稳定供应等都将具有重大而深远的意义。

我国太阳能热发电技术研究起步较晚，目前几座商业运行太阳能热发电站正在建设中。“八五”以来，科技部就关键部件在技术研发方面给予了持续支持，“十一五”期间启动了 1MW 塔式太阳能热发电技术研究及系统示范。目前，大规模发电技术已有所突破，大部分关键器件已产业化。

更值得一提的是，太阳能发电已成为我国能源战略调整的重要方向，国家相继颁布了促进太阳能发电产业快速发展的若干文件和政策。

2005 年 2 月，我国出台了《中华人民共和国可再生能源法》，国家将可再生能源的开发利用列为能源发展的优先领域，通过鼓励利用可再生能源改善中国目前的能源结构，通过制定可再生能源开发利用总量目标和采取相应措施推动可再生能源市场的建立和发展。该法 2006 年起开始实施。

2006 年 2 月，国务院发布《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》，太阳能热发电技术作为纲要中明确的重要内容，是我国太阳能利用及产业发展的重要方向之一。太阳能热发电技术作为优先发展方向，若干项目相继获得国家项目资金支持，如 2006 年“太阳能热发电技术及系统示范”列入国家 863 重点项目；2009 年“高效规模化太阳能热发电的基础研究”获得国家科学技术部 973 项目立项。

2011 年 6 月，《产业结构调整指导目录（2011 年本）》开始正式施行。在指导目录鼓励类新增的新能源门类中，太阳能热发电被放在突出位置。

2012 年 5 月，国家科学技术部发布《太阳能发电科技发展“十二五”专项规划》，明确将光热发电作为我国“十二五”太阳能发电科技的重点规划内容之一。

2012 年 9 月，国家能源局印发《太阳能发电“十二五”规划》，明确太阳能发电的发展目标、开发利用布局和建设重点。按照规划，到 2015 年年底，太阳能发电装机容量达到 2100 万 kW 以上，年发电量 250 亿 kW·h。该规划还要求，在“十二五”发展的基础上，继续推进太阳能发电产业规模化发展，到 2020 年太阳能发电总装机容量达到 5000 万 kW，使我国太阳能发电产业达到国际先进水平。

2013 年 2 月，国家发展和改革委员会同国务院有关部门对《产业结构调整指导目录（2011 年本）》有关条目进行了调整，形成了《产业结构调整指导目录（2011 年本）》（修正版）。在第一类鼓励类的新能源领域中，太阳能热发电集热系统、太阳能光伏发电系统集成技术开发应用、逆变控制系统开发制造被列在第一条。

2016 年 9 月，国家能源局正式发布《关于建设太阳能热发电示范项目的通知》，共 20

个项目入选中国首批光热发电示范项目名单，总装机约 1.35GW，包括 9 个塔式电站、7 个槽式电站和 4 个菲涅尔电站。国家发展和改革委员会核定我国的太阳能热发电标杆上网电价为 1.15 元/(kW·h)。

太阳能资源丰富、社会发展面临的现状和国家政策支持为我国太阳能热发电技术的发展和进一步推广提供了良好的外部环境。

1.2 槽式太阳能热发电技术

太阳能热发电技术主要包括碟式太阳能热发电（图 1.1）、塔式太阳能热发电（图 1.2）、槽式太阳能热发电（图 1.3）、太阳能热气流发电、太阳池热发电等形式。符合“大容量，高参数，长周期储热”国际太阳能热发电技术发展趋势的是前三种，而槽式太阳能热发电是世界上迄今为止商业化最成功的太阳能热发电系统。

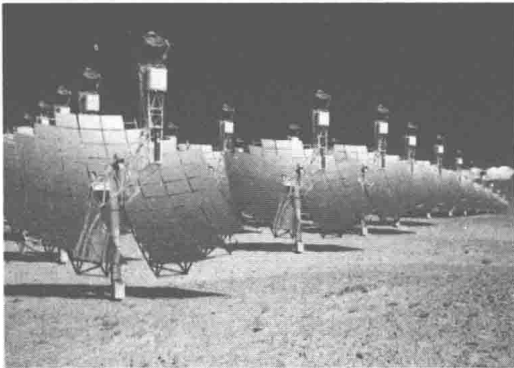


图 1.1 美国加利福尼亚州斯特林碟式发电站



图 1.2 美国内华达太阳一号塔式太阳能热发电站

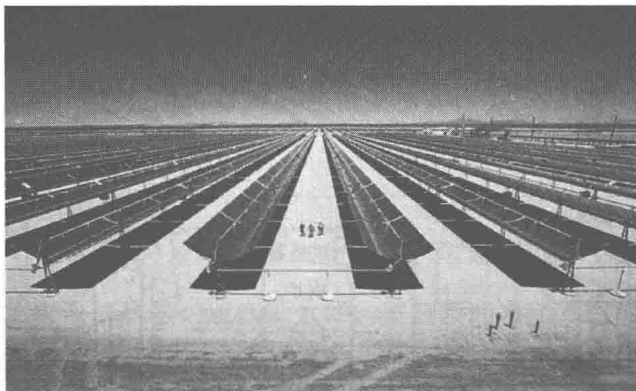


图 1.3 美国加利福尼亚州克莱默叉口槽式太阳能热发电站

槽式太阳能热发电技术将由抛物线槽式聚光镜、集热管等构成的大量槽式太阳能聚光集热器（槽式集热器）布置在场地上，再将这些槽式集热器加以串并联。抛物线槽式聚光镜采用单轴跟踪方式追踪太阳运动轨迹，将入射的直射太阳辐射聚焦到位于抛物线焦线的集热管上，集热管中的传热工质被加热到 400℃左右的高温，进入蒸汽发生装置放热以产

生高温高压蒸汽，高温高压蒸汽推动汽轮发电机组发电。传热介质放热完毕后再次进入槽式聚光器阵列开始下一个循环；而通过汽轮机做功后的乏汽冷凝后经过循环泵返回蒸汽发生装置，吸热后再次进入汽轮机做功。这样周而复始的循环，太阳能就被源源不断地转化成电能。但是在太阳能直射辐射不好的天气或没有太阳的夜里，要想实现槽式太阳能热发电系统不间断供电就必须采用蓄热系统或者常规能源系统加以能源补给。另外，蓄热系统或者常规能源系统还能使整个系统的运行更加稳定、安全可靠，大大减少了因突然云遮等原因蒸汽品质恶化给汽轮机带来的冲击。

槽式热发电系统结构简单、成本较低、土地利用率高、安装维护方便，导热油工质的槽式太阳能热发电技术已经相当成熟。由于槽式系统可将多个槽式集热器串联、并联排列组合，因此可以构成较大容量的热发电系统，但也正是因为其热传递回路很长，因此传热工质的温度难以再提高，系统综合效率较低。

集热管里的工质通常是导热油，但随着科学技术的发展，工质可以扩展到熔融盐、水、空气等物质。目前，实际应用的工质主要有两种，即导热油和水。槽式太阳能热发电技术按其工质不同，分为导热油槽式太阳能热发电系统（通常简称为导热油槽式系统）和槽式太阳能直接蒸汽发电（Direct Steam Generation, DSG）系统（通常简称为槽式 DSG 系统）。

1.2.1 导热油槽式系统

传统槽式太阳能热发电系统的工质为导热油，导热油工质被加热后，流经换热器加热产生过热蒸汽，借助于蒸汽动力循环推动常规汽轮发电机组来发电。作为太阳能量不足时的备用，系统通常配有一个辅助燃烧炉，辅助燃烧炉燃料通常用天然气或燃油。导热油槽式系统工作原理如图 1.4 所示，其主要由聚光集热子系统、换热子系统、发电子系统、蓄热子系统、辅助能源子系统构成。

(1) 聚光集热子系统。它是系统的核心，导热油槽式系统的聚光集热装置是众多分散

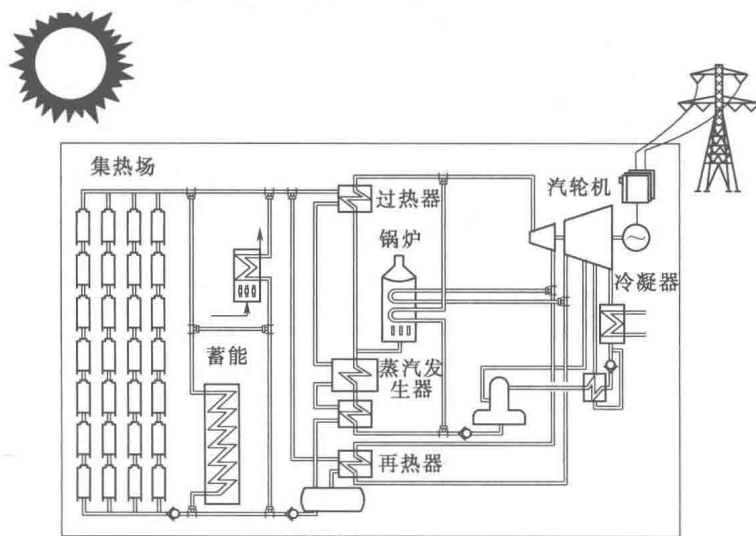


图 1.4 导热油槽式系统工作原理示意图

布置的槽式集热器。槽式集热器的结构主要由抛物线槽式聚光镜、集热管和跟踪装置三部分组成。抛物线槽式聚光镜由很多抛物面反射镜单元组成。反射镜采用低铁玻璃制作，背面镀银，镀银表面涂有金属漆保护层。抛物线槽式聚光镜为线聚焦装置，阳光经镜面反射后，聚焦为一条线，集热管就放置在这条焦线上，用于吸收阳光加热工质，如图 1.5 所示。实际上，槽式系统的集热管就是一根作了良好保温的金属圆管。目前，集热管有真空集热管和空腔集热管两种结构。槽式集热器配有自动跟踪系统，能跟踪太阳的运行。反射镜根据其采光方式的不同，即轴线指向的不同，可以分为东西向和南北向两种布置形式，因此它有两种不同的跟踪方式。通常，南北向布置的反射镜需作单轴跟踪，东西向布置只作定期跟踪调整。每组槽式集热器均配有一个伺服电机。由太阳辐射传感器瞬时测定太阳位置，通过计算机控制伺服电机，带动反射镜面绕轴跟踪太阳。槽式集热器的聚光比约为 10~30，集热温度可达 400℃。

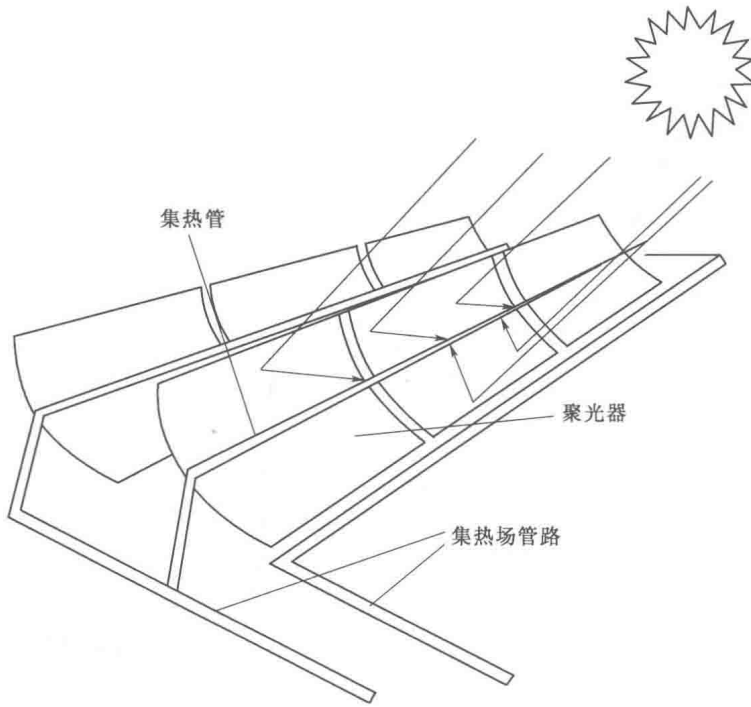


图 1.5 槽式系统聚光原理示意图

(2) 换热子系统。它由预热器、蒸汽发生器、过热器和再热器组成。导热油槽式系统采用双回路结构，即集热管中的工质油被加热后，进入换热子系统中产生过热蒸汽，过热蒸汽通过蒸汽回路进入汽轮发电子系统发电。

(3) 发电子系统。它的基本组成与常规发电设备类似，但太阳能加热系统与辅助能源系统联合运行时，需要配备一种专用控制装置，用于工作流体在太阳能加热系统与辅助能源系统之间的切换。

(4) 蓄热子系统。它是太阳能热发电站不可缺少的组成部分。太阳能热发电系统在早晚或云遮时通常需要依靠储能设备维持系统的正常运行。蓄热器就是采用真空或隔热材料

作良好保温的贮热容器。蓄热器中贮放蓄热材料，通过换热器对蓄热材料进行贮热和取热。蓄热子系统采用的蓄能方式主要有显式、潜式和化学蓄热 3 种。对不同的蓄热方式，应该选择不同的蓄热材料。

(5) 辅助能源系统。它一般应用于夜间或阴雨天系统运行时，采用常规燃料作辅助能源。Al-sakaf 提出，电厂通常可以使用 25% 以上的化石类燃料作不时之需，这样可以节省昂贵的能量储存装置，降低整个太阳能热发电系统的初次投资，而且优化了太阳能热发电站的设计，大大降低了生产单位电能的平均成本。

1.2.2 槽式太阳能直接蒸汽发电系统

1. 发展槽式太阳能直接蒸汽发电系统的必要性

目前，世界上商业运行的槽式太阳能热发电系统普遍应用导热油作为其传热工质，但是导热油却存在着很多不足之处：①导热油在高温下运行时，化学键易断裂分解氧化，而引起系统内压力上升，甚至出现导热油循环泵的气蚀，特别是对于气相循环系统，压力上升，则难以控制其内部温度，进而因为气夹套上部或盘管低凹处气体的寄存，造成热效率降低等不良影响，因此导热油工作槽式系统一般运行温度为 400℃，不宜再提高，这直接造成导热油工作槽式系统的系统效率不高；②导热油在炉管中的流速必须选在 2m/s 以上，流速越小油膜温度越高，易导致导热油结焦；③油温必须降到 80℃ 以下，循环泵才能停止运行；④一旦导热油发生渗漏，在高温下将增加引起火灾的风险。美国 LUZ 公司的 SEGS 电站就曾经发生过火灾，并为防止油的泄漏和对已漏油的回收投入大量资金。鉴于导热油工质的上述问题，太阳能专家开始考虑直接应用水蒸气作为工质进行发电。水工质槽式系统的运行温度可以达到 500℃ 甚至更高，减少了换热环节的能量损失以及换热设备等的投资，降低了电站的成本，降低了电站的安全隐患，减少了对环境的影响，提高了电站的发电效率。因此，Cohen 和 Kearney 于 1994 年提出了直接蒸汽发电槽式太阳能聚光集热器（槽式集热器）的概念，作为槽式集热器的未来发展方向。近年来，各国专家学者均将目光投向了直接以水（蒸汽）为工质的槽式 DSG 系统。

2. 槽式 DSG 系统的概念和优势

槽式 DSG 系统是利用抛物线形槽式聚光器将太阳光聚焦到集热管上，直接加热集热管内的工质水，直至产生高温高压蒸汽推动汽轮发电机组发电的系统。其中，由聚光器与集热管组成的装置称为 DSG 槽式太阳能聚光集热器（DSG 槽式集热器），是槽式 DSG 系统的核心部件。与工质为导热油的槽式系统相比，槽式 DSG 系统同样由聚光集热子系统、发电子系统、蓄热子系统、辅助能源子系统构成，但由于利用水工质代替了导热油工质，因此没有换热环节。槽式 DSG 系统具有以下优势：①用水替代导热油，消除了环境污染风险；②省略了油或蒸汽换热器及其附件等，电站投资大幅下降；③简化了系统结构，大幅降低了电站投资和运营成本；④具有更高的蒸汽温度，电站发电效率较高。

3. 槽式 DSG 系统运行模式

Dagan 和 Lippke 提出槽式 DSG 系统的运行模式有直通模式、注入模式和再循环模式 3 种，如图 1.6 所示。

在直通模式槽式 DSG 系统中，给水从集热器入口至集热器出口，依次经过预热、蒸