

分 类 号 \_\_\_\_\_

学号 \_\_\_\_\_ D201277241 \_\_\_\_\_

学校代码 10487

密级 \_\_\_\_\_

华中科技大学  
博士 学位 论文

太阳能梯级集热发电系统优化设计及  
其建模研究

学位申请人： 张成

学科专业： 热能工程

指导教师： 高伟 教授

Inmaculada Arauzo 教授

张燕平 副教授

答辩日期： 2018 年 1 月 20 日

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the  
Requirements for the Ph.D

Cascade solar thermal power system optimization and  
modeling research

Student : Cheng Zhang

Major : Thermal Engineering

Supervisor : Prof. Wei Gao

Prof. Inmaculada Arauzo

Associate Prof. Yanping Zhang

**Huazhong University of Science & Technology**

**Wuhan 430074, P. R. China**

**January 20, 2018**

## 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除文中已标明引用的内容外,本论文不包含任何其他人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体,均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名:

日期: 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定,即:学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权华中科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本论文属于  保密口,在 \_\_\_\_ 年解密后适用本授权书。  
 不保密口。  
(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名:

日期: 年 月 日

指导教师签名:

日期: 年 月 日

## 摘 要

随着化石能源消耗和环境污染问题的凸显,太阳能被广泛认为是未来最有潜力替代传统化石能源的清洁能源。本文以国家国际合作项目专项“太阳能梯级集热发电系统关键技术合作研究”为背景,目标是研究太阳能光热发电装置,利用各种传统型式的太阳能光热发电系统的优缺点以及热力特性,提出并组建,优化太阳能梯级集热发电系统,为探索大规模低成本高效率利用太阳能的光热发电技术提供新的方案。主要研究内容包括:

提出了多种采用梯级集热和梯级发电的太阳能光热梯级发电系统。在梯级系统中,采用多种型式的集热器,实现能量的梯级收集,采用多种形式的热力循环,实现能量的梯级利用。经过系统评估,参数选取,初步计算,方案比较,确定了两种具有代表性的梯级系统方案。

采用数学计算工具和系统开发工具,建立了梯级系统中各部件的机理模型,进而开发了太阳能光热发电系统设计软件。采用面向对象的方法,充分利用了继承、多态等特性,保证了各部件之间既具有独立性又具有关联性。其中,斯特林机的建模过程中,考虑了多种不可逆过程及多类损失,建立了较为完善的斯特林机机理模型,并进行了模型验证分析。结果表明,所建立的斯特林机模型的精度要高于传统的经典斯特林机模型。

研究了太阳能光热梯级发电系统中斯特林机组不同排列方式对系统效率的影响。通过分析斯特林机组的各种不同的排列方式,发现串联连接是最佳的排列方式,斯特林机组具有最佳健壮性和最大的发电效率。

提出了分段加热系统,有效降低了蒸汽发生系统中的熵损。在传统蒸汽发生系统的换热过程中,加热流体无相变,被加热流体有相变,两者存在较大的换热温差,换热过程有较大的熵损。本文提出分段加热的方法,通过改变各段加热流体的流量,减小换热温差,降低换热过程的熵损,进而提升太阳能镜场的集热效率。

提出了太阳能光热梯级发电系统与传统型式太阳能光热发电系统的对比方法。本文针对新型梯级发电系统提出了性能评估指标及其与传统型式太阳能光热发电独立系统的对比方法。经过建模仿真分析发现,梯级系统在一定的参数条件下,相比其对应的独立系统,具有更高的总体光电转换效率。

建立了太阳能光热发电实验平台,并开展了相关的实验工作。在相关实验条件下,槽式集热器的热效率在 60.1% 到 62.8% 之间,槽式集热器的热效率在 39.7% 到 63.3% 之间。实验还验证了本文建立的槽式集热器和碟式集热器模型。

# 华 中 科 技 大 学 博 士 学 位 论 文

---

**关键词：** 槽式集热器, 碟式集热器, 朗肯循环, 斯特林循环, 斯特林机组, 梯级发电

## Abstract

With the increasing awareness of the problem of fossil energy consumption and environmental pollution, solar energy is regarded as the best potential alternative of fossil energy. This research is based on the national cooperation project “Collaborative research on key technologies to produce electricity by cascade utilization solar thermal energy”. The objective of this project is to conduct research on the equipment of solar thermal power generation system, to propose, develop and optimize a solar thermal cascade system depending on the advantages and disadvantages of the solar thermal power generation technologies, and to explore a new feasible technology for large-scale solar thermal power generation. The main contents and conclusions of this thesis are as follows:

Multiple topological structures with cascade collection and cascade utilization of the cascade systems were proposed. In these systems, different types of collectors were used for cascade collection and different types of thermodynamic cycles were used for cascade utilization. After system evaluation, parameter selection, preliminary calculation and scheme comparison, two representative typical schemes were selected.

Mechanism models were established for the components of solar thermal power generation system by using mathematical calculation tool and system development tool. The modeling process uses an object-oriented approach, taking full advantage of inheritance, polymorphism and other characteristics, to ensure each component has both independence and relevance. Among them, the Stirling machine modeling process, considering various irreversibilities and losses, established a more accurate Stirling mechanism model with verification analysis. The results show that the accuracy of the established Stirling model is higher than that of the classical classical Stirling engine models.

The effect of different arrangements of Stirling engines on the efficiency of the cascade system was studied. Through the analysis of different arrangements of Stirling engines, it was found that series connection is the best arrangement for the best robustness and maximum efficiency of the Stirling engines.

A method of multistage heating was proposed, which can effectively reduce the exergy loss of steam generating system. During the entire heat exchange process of a conventional steam generating system, there is no phase change in the heating fluid and there is a phase change in the heated fluid. There exist large heat transfer temperature differences between

the two fluids in the heat exchangers, which makes large entropy production during the heat exchange process. In this thesis, a method of heating in stages is proposed, in which the flow rates of the heating fluid in different heat exchangers are controlled to reduce the heat transfer temperature difference and the exergy losses, hence to increase the thermal efficiency of the solar fields.

A comparison method of cascade system and traditional solar thermal power generation systems is proposed. In this thesis, corresponding independent systems of the cascade system was proposed for comparison. After modeling and simulation of the systems, it is found that the cascade system has a higher overall solar-to-electric conversion efficiency under certain parameters compared to its corresponding independent systems.

A solar thermal power generation test platform was established, and the relevant experimental work was carried out. Under the relevant test conditions, the thermal efficiency of trough collectors is between 60.1% and 62.8%, and that of dish collectors is between 39.7% and 63.3%. The experiment also validated the established trough collector and dish collector models.

**Key words:** parabolic trough collector, parabolic dish collector, Rankine cycle, Stirling cycle, Stirling engine array, cascade solar thermal power

## 目 录

摘要	I
插图索引	VII
表格索引	VIII
<b>1 太阳能梯级发电实验台的建设及实验研究</b>	<b>1</b>
1.1 实验台简介 . . . . .	1
1.2 实验 . . . . .	6
1.3 结果分析 . . . . .	11
1.4 本章小结 . . . . .	18
<b>参考文献</b>	<b>20</b>
<b>附录 A 流体与定温热源的传热计算公式</b>	<b>21</b>
<b>附录 B 等热流密度下的流体与定温热源的传热计算公式</b>	<b>23</b>
<b>附录 C 类 Stream 的 MATLAB 源代码</b>	<b>25</b>
<b>附录 D 攻读学位期间的主要成果和奖励</b>	<b>27</b>

## 术语表

下标

$i$  进口

$o$  出口

## 插图索引

图 1-1	太阳能光热发电实验台的结构示意图 . . . . .	2
图 1-2	实验台的槽式集热器 . . . . .	3
图 1-3	实验台的碟式集热器 . . . . .	4
图 1-4	ORC 系统结构示意图 . . . . .	5
图 1-5	ORC 系统实物图 . . . . .	5
图 1-6	ORC 系统控制柜的操作界面 . . . . .	6
图 1-7	法向直射辐射强度 $I_r$ 对槽式集热器效率的影响 . . . . .	12
图 1-8	导热油流量对槽式集热器效率的影响 . . . . .	13
图 1-9	入口油温对槽式集热器效率的影响 . . . . .	14
图 1-10	法向直射辐射强度 $I_r$ 对碟式集热器效率的影响 . . . . .	15
图 1-11	法向直射辐射强度 $I_r$ 与碟式集热器集热效率之间的模拟结果曲线图 . . . . .	16
图 1-12	空气流量对碟式集热器效率的影响 . . . . .	17
图 1-13	空气的入口温度对碟式集热器效率的影响 . . . . .	18
图 2-1	流体与定温热源的传热示意图 . . . . .	21
图 2-1	等热流密度下的流体与定温热源的传热示意图 . . . . .	23

## 表格索引

表 1.1	碟式集热器的重要参数列表 . . . . .	4
表 1.2	太阳能槽式系统的设计工况 . . . . .	8
表 1.3	太阳能碟式系统的设计工况 . . . . .	10
表 1.4	槽式集热器在工况 1 到工况 10 条件下的实验结果 . . . . .	11
表 1.5	槽式集热器在工况 11 到工况 15 条件下的实验结果 . . . . .	12
表 1.6	槽式集热器在工况 16 到工况 20 条件下的实验结果 . . . . .	13
表 1.7	碟式集热器在工况 1 到工况 10 条件下的实验结果 . . . . .	15
表 1.8	碟式集热器在工况 11 到工况 15 条件下的实验结果 . . . . .	16
表 1.9	碟式集热器在工况 16 到工况 20 条件下的实验结果 . . . . .	17

# 1 太阳能梯级发电实验台的建设及实验研究

第??章介绍了利用 MATLAB 建模工具实现为太阳能光热发电系统中各关键部件建模的工作，并开发了太阳能光热系统设计软件。利用该软件，可以方便地构建太阳能光热发电实验台的模型。

本文建立了槽式集热器和碟式集热器的机理模型。在假定整体传热系数沿着集热器长度方向均匀分布的条件下，建立了传热流体温升与法向直射辐射强度、集热器长度、传热流体流量、环境温度、传热流体入口温度等因素之间的关系式，得出了槽式集热器的热效率计算公式。还详细分析了碟式接收器的各种能量损失，建立了详细的热网络模型。通过使用各种经典的传热公式，求解了热网络模型中各节点温度值，并得到了碟式集热器的热效率计算公式。

为了更加深入地理解太阳能光热发电系统，也为了对所提出的部件模型进行验证分析和误差分析，建立了包括太阳能槽式集热器、太阳能碟式集热器、有机工质朗肯循环系统(ORC 系统)的太阳能光热发电实验台。该实验台的建立为后续太阳能梯级集热系统的完善提供了良好的基础。

## 1.1 实验台简介

太阳能光热发电实验台的结构示意图如图1-1所示。不同的流体构建了三个回路，包括空气回路、油回路和有机工质回路。在空气回路中，环境中的空气首先在空气压缩机中被加压，再被送到碟式集热器中实现高温集热，经过空气-油换热器将获得的热量提供给朗肯循环，再经过冷却系统排至环境中。此外，空气回路还设有加热器支路，可以将空气预热之后再送入碟式集热器中，以便于研究不同空气入口温度对碟式集热器热效率的影响。在油回路中，导热油先被槽式集热器加热，然后流入空气-油换热器吸收热空气提供的热量，接着流入 ORC 系统的蒸发器，为朗肯循环提供热量后再经油泵回到槽式集热器。此外，油回路还设有加热器支路，可以将导热油再次加热之后送入 ORC 系统。利用此加热器支路，可以将导热油加热至指定温度，为 ORC 系统提供温度稳定的热源。在有机工质回路中，有机工质流体在蒸发器中吸收热量，变成蒸气，进入有机工质汽轮机膨胀做功，接着流入回热器回收部分热能，然后通过有机工质泵回到蒸发器。

接下来详细介绍太阳能光热发电实验台的重要设备。

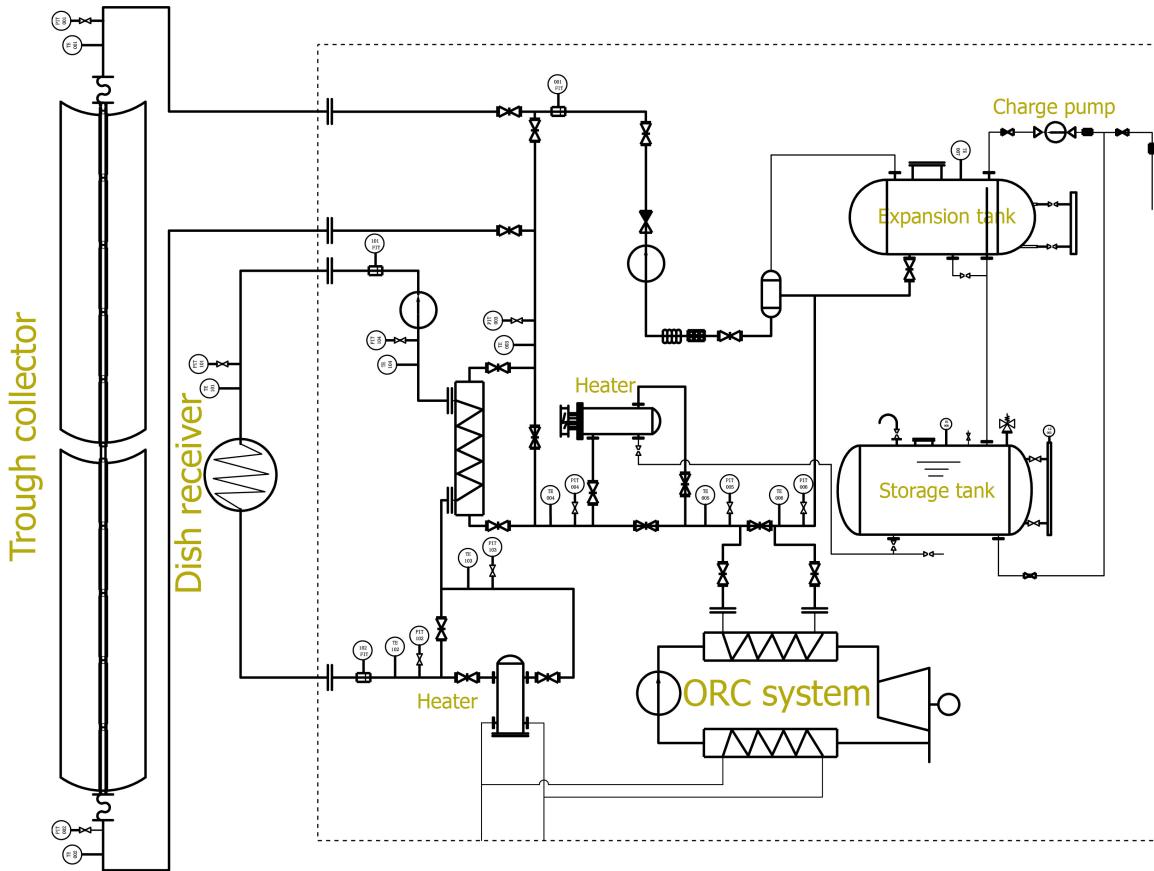


图 1-1 太阳能光热发电实验台的结构示意图

### 1.1.1 碟式集热器

受限于实验台的土地,碟式集热器沿东西方向布置。它由槽式反射镜、接收器和支架组成,其实物图如图1-2所示。槽式反射镜长 20 m,宽 2.55 m。接收器采用的是北京桑普公司的 SEIDO-I 系列产品,它由黑色的金属吸热管和透明的玻璃管组成,二者之间抽成真空以减少散热损失。玻璃管的外径为 0.11 m,内径为 0.106 m,金属管的外径为 0.038 m,内径为 0.035 m。金属和玻璃采用溶封(火封)连接,玻璃管和金属管之间起始真空度在 0.05 Pa 左右,真空管内设有消气剂以保持管内真空度。支架用于支撑反射镜和接收器,其结构足以抵御市内的大风、雷电及雨雪等恶劣天气。槽式系统采用单轴跟踪系统,水平回转角度为  $-85^{\circ}$  至  $+175^{\circ}$ ,能够运算太阳轨迹,并进行实时跟踪。此外,除了自动跟踪模式以外,跟踪系统还提供了手动模式,控制柜中的控制按钮可以方便地将集热器调整到指定方位。跟踪系统还提供了意外事故发生时系统自动切换至自动保护的功能。整个槽式集热器系统装置的转动,定位和连接等机械结构

简单可靠,便于安装,拆装和运输,运行和维护方便,能够连续 24 小时稳定工作。

槽式集热器选用长城润滑油 L-QD350 合成型导热油作为传热介质,其典型参数由商家提供。



图 1-2 实验台的槽式集热器

### 1.1.2 碟式集热器

碟式集热器的实物图如图1-3所示,其镜面由多块弯曲成型的玻璃反射面组成。当集热器开口正对太阳时,每块玻璃反射面都将入射光线反射到集热器的焦点处。集热器的焦点处放置有自行设计的接收器,如图1-3的右上角所示。碟式集热器的各重要参数见表1.1。碟式集热器采用 YYGN-GR-1A 型双轴跟踪系统,该跟踪系统同时采用算法跟踪和传感器跟踪。除了自动跟踪功能外,该跟踪系统还提供了手动调整集热器朝向的功能。通常在进行聚焦工作时,先启用手动模式,将集热器粗略调整至朝向太阳的方向,然后再启用自动模式,利用传感器精确对准太阳,并启用跟踪算法,实现连续精确地跟踪太阳。这为碟式集热器提供了非常精确的跟踪方式,其误差小于  $0.2^\circ$ ,且没有累积误差。

碟式集热器的控制柜提供了机械电气等控制功能。它还提供了对环境风速的实时监测结果,可以设定极限风速。当环境风速达到设定的极限风速时,系统将启用保

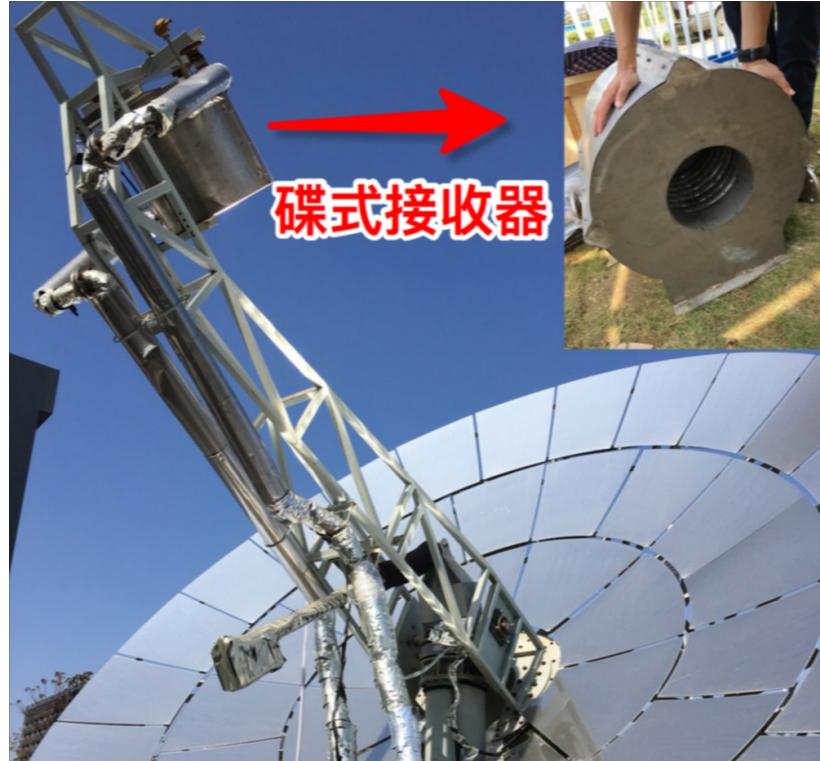


图 1-3 实验台的碟式集热器

表 1.1 碟式集热器的重要参数列表

参数	值	参数	值	参数	值
$d_{cav}$	0.45 m	$\epsilon_{insu}$	0.6	$\theta_{dc}$	20°
$\delta_{insu}$	0.11 m	$\alpha_{cav}$	0.87	$\gamma$	0.97
$l_{cav}$	0.45 m	$\delta_a$	0.002 m	$\eta_{shading}$	1
$d_{ap}$	0.25 m	$d_{i,1}$	0.07 m	$\rho$	0.91
$\lambda_{insu}$	0.06 W/(m · K)	$A_{dc}$	23.3 m <sup>2</sup>		

护动作, 将碟式集热器旋转至安全角度(朝向天顶)。

### 1.1.3 有机工质朗肯循环系统

ORC 系统选用的是法国公司 Enogia 的产品, 整个 ORC 系统放置在长 1.2 m, 宽 0.8 m, 高 1.7 m 的钢架结构中, 其系统结构示意图和实物图分别如图1-4和图1-5所示,

ORC 系统由汽轮机、发电机、回热器、凝汽器、缓冲罐、泵、蒸发器、控制柜、润滑冷却系统等部件组成。

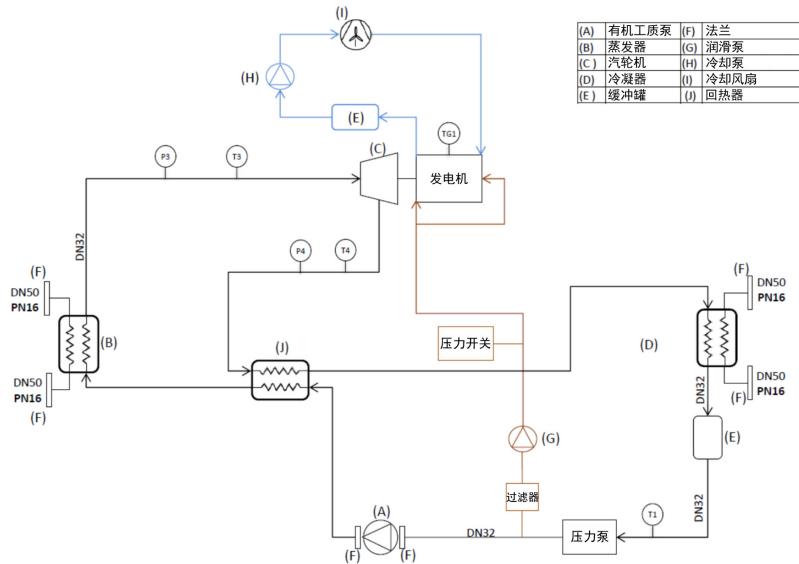


图 1-4 ORC 系统结构示意图

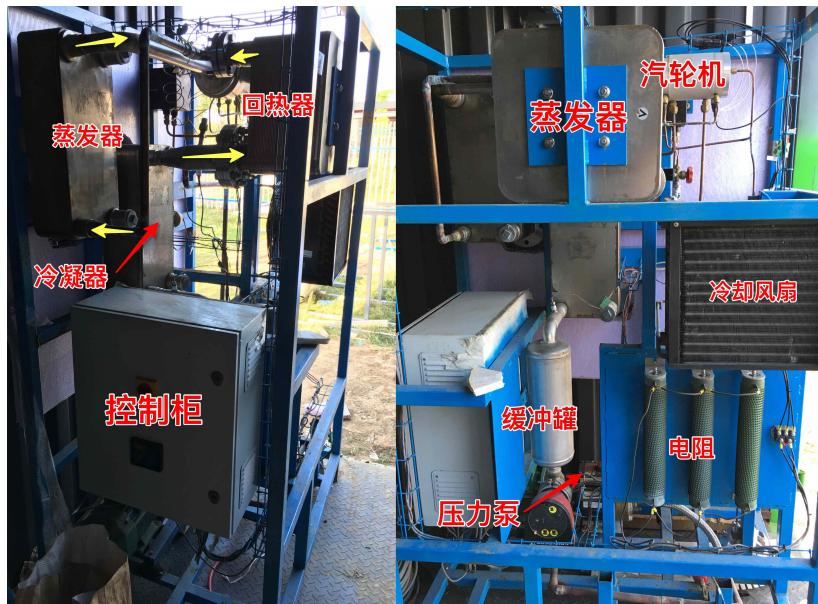


图 1-5 ORC 系统实物图

ORC 系统采用导热油作为热源, 采用自来水作为冷源。在额定工况下, 导热油的

入口温度为  $180^{\circ}\text{C}$ , 出口温度为  $160^{\circ}\text{C}$ , 质量流量为  $0.44 \text{ kg/s}$ 。冷却水的入口温度为  $30^{\circ}\text{C}$ , 质量流量为  $0.83 \text{ kg/s}$ 。额定工况的输出功率为  $1.5 \text{ kW}$ 。

控制柜提供了触摸屏来控制 ORC 系统, 控制柜提供了自动模式和手动模式。在自动模式下, 所有的启动工作和关停工作都由程序设定自行完成, 系统根据当前热源和冷源的情况自行调整输出功率。在手动模式下, 可以手动调节系统运行参数, 如有机工质泵的频率, 来对系统进行精确调节。



图 1-6 ORC 系统控制柜的操作界面

需要指出的是, 由于 ORC 系统在运输和存放过程中, 汽轮机末端轴承产生了损伤。ORC 系统不能连续稳定运行, 需要待法国工程师更换轴承后再进行相关实验工作。

#### 1.1.4 管道系统

管道系统提供了流体流动和换热的基础。此外, 它还铺设了保温层以减少热流体的对环境的散热。管道中布置了测量仪表、泵、阀门、罐体及加热器等器件来维持系统正常有序地运行。

太阳能光热发电实验台采用了两个加热器来调节流体(空气和导热油)的温度, 以满足实验的要求。两个加热器都可以通过改变功率来维持其出口流体温度的稳定。此外, 当太阳辐射强度不够高时, 可以启用加热器辅助加热, 实现 ORC 系统的正常运行。

## 1.2 实验

为了测试实验台的性能并验证本文建立的部件模型, 进行了相关的实验操作。

### 1.2.1 槽式集热器实验

#### 1.2.1.1 实验目的

槽式集热器实验的目的是研究太阳法向直射辐射强度,传热流体流量,入口温度对槽式集热器热性能的影响,并验证第??节所建立的槽式集热器模型。

#### 1.2.1.2 实验步骤

实验步骤分为以下几步:

- (1) 完成准备工作。确保所有部件和仪表都正确连接,并可以正常工作。
- (2) 初始化太阳能辐射仪。调整太阳能辐射仪的方向来获取太阳法向直射强度的数值,确保穿过辐射仪孔道的阳光落在校准位置。
- (3) 打开油回路的阀门,并开启油泵。
- (4) 打开槽式集热器跟踪系统的马达。同步跟踪系统的时间,并开启自动模式,让槽式系统自动对向太阳,并开始跟踪。
- (5) 调整槽式系统参数来满足设计工况要求。当实验数据稳定后,记录并保存数据收集系统采集到的实验数据。
- (6) 当所有设计工况测试完毕后,结束实验。
- (7) 复位槽式集热器。在系统控制界面将槽式集热器调整至其开口水平的状态,关闭马达。
- (8) 关闭油泵。

#### 1.2.1.3 实验设计工况

考虑到太阳直射辐射强度在晴天具有不可控性和相对连续性,当以太阳直射辐射强度为控制变量时,太阳辐射强度值不能控制为设计值,而应该为实测值。当需要固定太阳直射辐射强度时,应该尽量控制实验的总时间,以减少太阳直射辐射强度变化带来的影响。

表1.2中,工况 1 到工况 10 分别在一天或数天间的不同时间点完成。工况 11 到工况 15 的实验要求在半个小时之内完成。需要指出的是,当以入口油温为考察变量时,仅仅设计了 5 个温度相差不大的工况(工况 16 到工况 20)进行实验。这是由于通过加热器提升油温的速度较慢,为了保证太阳辐射强度基本不变,所以各工况入口油温设计值差别不大。这 5 个工况的实验要求在一个小时之内完成。

表 1.2 太阳能槽式系统的设计工况

工况编号	$I_r(\text{W/m}^2)$	流量( $\text{kg/s}$ )	入口油温( $\text{K}$ )
1-10	实测值	0.2	433.2
11	实测值	0.1	433.2
12	实测值	0.2	433.2
13	实测值	0.3	433.2
14	实测值	0.4	433.2
15	实测值	0.5	433.2
16	实测值	0.2	413.2
17	实测值	0.2	423.2
18	实测值	0.2	433.2
19	实测值	0.2	443.2
20	实测值	0.2	453.2

#### 1.2.1.4 数据处理方法

商家给定的导热油的比热容的数据为：当  $T = 373.15^\circ\text{C}$  时， $c_p = 2.4 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ；当  $T = 473.15^\circ\text{C}$  时， $c_p = 2.88 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。本文假定导热油的比热容与温度成线性关系，采用线性插值法，则有  $c_p = aT + b$ ，其中  $a = 4.4 \text{ J/(kg} \cdot \text{K}^2)$ ， $b = 798.14 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。

导热油吸收的热量  $Q_{abs} = \int_{T=T_i}^{T=T_o} c_p \dot{m} dT = \frac{1}{2} a(T_o^2 - T_i^2) \dot{m} + b(T_o - T_i) \dot{m}$ .

槽式集热器的集热效率

$$\eta_{tc} = \frac{Q_{abs}}{I_r w_{tc} L_{tc}} \quad (1.1)$$

为了验证本文建立的槽式集热器的模型的正确性，需要检查方程(??)。在模型中，

$$\tilde{T}_o = T_{amb} + \frac{q''}{U(T_{abs})} + \exp\left(-\frac{U(T_{abs})\pi d_o L}{\dot{m}\tilde{c}_p}\right)(T_i - T_{amb} - \frac{q''}{U(T_{abs})}) \quad (1.2)$$

其中， $T_{abs}$  用  $(T_i + T_o)/2$  代替 ( $T_i$  和  $T_o$  分别采用测量的入口油温和出口油温)， $\tilde{c}_p$  是用  $(T_i + T_o)/2$  得到的平均比热容。 $U(T_{abs})$  由下式得到<sup>[1]</sup>：

$$U(T_{abs}) = 0.687257 + 0.001941(T_{abs} - T_{amb}) + 0.000026(T_{abs} - T_{amb})^2 \quad (1.3)$$

$$q'' = \frac{I_r w_{tc} \rho \gamma \tau F_e K(\theta)}{\pi d_o} \quad (1.4)$$

$$K(\theta) = \cos \theta + 0.000884\theta - 0.00005369\theta^2 \quad (1.5)$$

$$\widetilde{\eta_{tc}} = \frac{\dot{m} \widetilde{c_p} (\widetilde{T_o} - T_i)}{I_r w_{tc} L_{tc}} \quad (1.6)$$

于是模拟得到的集热器的效率值  $\widetilde{\eta_{tc}}$  可以同方程 (1.1) 得到的实验值  $\eta_{tc}$  进行比较。

## 1.2.2 碟式集热器实验

### 1.2.2.1 实验目的

碟式集热器实验的目的是研究太阳法向直射辐射强度,传热流体流量,入口温度对碟式集热器热性能的影响,并验证第??节所建立的碟式集热器模型。

### 1.2.2.2 实验步骤

实验步骤分为以下几步:

- (1) 完成准备工作。确保所有部件和仪表都正确连接,并可以正常工作。
- (2) 初始化太阳能辐射仪。调整太阳能辐射仪的方向来获取太阳法向直射强度的数值,确保穿过辐射仪孔道的杨过落在校准位置。
- (3) 打开水冷系统。
- (4) 打开空气回路的入口阀门和开口阀门,再打开空气压缩机。
- (5) 使用手动模式将集热器转动至朝向太阳,再切换至自动模式,让集热器实现自动调整跟踪。
- (6) 调整碟式系统参数来满足设计工况要求。当实验数据稳定后,记录并保存数据采集系统采集到的实验数据。
- (7) 当所有设计工况测试完毕后,结束实验。
- (8) 复位碟式集热器。将集热器切换至手动模式,手动将借热器调整至朝向天顶的方向。依次关闭空气压缩机,空气回路入口阀门和出口阀门,水冷系统。

表 1.3 太阳能碟式系统的设计工况

工况编号	$I_r(\text{W/m}^2)$	流量( $\text{kg/s}$ )	入口温度( $\text{K}$ )
1-10	实测值	0.03	423.2
11	实测值	0.01	423.2
12	实测值	0.02	423.2
13	实测值	0.03	423.2
14	实测值	0.04	423.2
15	实测值	0.05	423.2
16	实测值	0.03	383.2
17	实测值	0.03	403.2
18	实测值	0.03	423.2
19	实测值	0.03	443.2
20	实测值	0.03	463.2

### 1.2.2.3 实验设计工况

表1.3中,工况 1 到工况 10 分别在一天或数天间的不同时间点完成。工况 11 到工况 15 的实验要求在半个小时之内完成。工况 16 到工况 20 的实验要求在一个小时之内完成。

### 1.2.2.4 数据处理方法

知道了压力( $p = 4 \times 10^5 \text{ Pa}$ )和测量的温度值,可以得到空气的入口焓  $h_i$  和出口焓  $h_o$ 。

空气吸收的热量  $Q_{abs} = \dot{m}(h_o - h_i)$ 。

碟式集热器的集热效率  $\eta_{dc} = \frac{Q_{abs}}{I_r A_{dc}}$ 。

为了验证本文建立的碟式集热器的模型的正确性,求解第??节建立的碟式接收器的热网络模型(见图??)。通过求解该热网络模型,可以得到空气吸收的热量  $Q_{dr,1}$ 。

则模拟所得的碟式集热器的集热效率为  $\widetilde{\eta_{dc}} = \frac{Q_{dr,1}}{I_r A_{dc}}$ 。

## 1.3 结果分析

### 1.3.1 槽式集热器实验结果分析

#### 1.3.1.1 法向直射辐射强度 $I_r$ 的影响

表 1.4 槽式集热器在工况 1 到工况 10 条件下的实验结果

工况编号	$I_r$ (W/m <sup>2</sup> )	$\dot{m}$ (kg/s)	$T_i$ (K)	$T_o$ (K)	$T_{amb}$ (K)
1	353	0.2	433.2	452.9	277.8
2	408	0.2	433.2	456.2	278.0
3	464	0.2	433.2	459.4	278.2
4	476	0.2	433.2	460.2	278.4
5	497	0.2	433.2	461.3	278.4
6	508	0.2	433.2	462.0	278.6
7	553	0.2	433.2	464.6	278.6
8	610	0.2	433.2	467.9	278.8
9	637	0.2	433.2	469.3	278.8
10	652	0.2	433.2	470.2	278.9

工况 1 到工况 10 的实验结果如表 1.4 所示。需要指出的是, 由于太阳能辐射强度的不可控性和多变性, 表中太阳法向直射辐射强度  $I_r$  的实测值分布并不均匀。 $I_r$  对集热器效率的影响曲线见图 1-7。图中还显示了模型计算的结果。模型所采用的参数和实验参数相同。

可以发现, 实验数据和模拟结果具有相同的变化趋势, 即槽式集热器的集热效率随着  $I_r$  的增加而升高。模拟结果与实验数据的误差很小(相对误差小于 1%), 但随着  $I_r$  的增加, 误差会有所增大。

#### 1.3.1.2 导热油质量流量 $\dot{m}$ 的影响

工况 11 到工况 15 的实验结果如表 1.5 所示。这些数据点都在半个小时内完成采集, 以减小太阳辐射变化带来的影响。导热油质量流量对集热器集热效率的影响曲线见图 1-8。

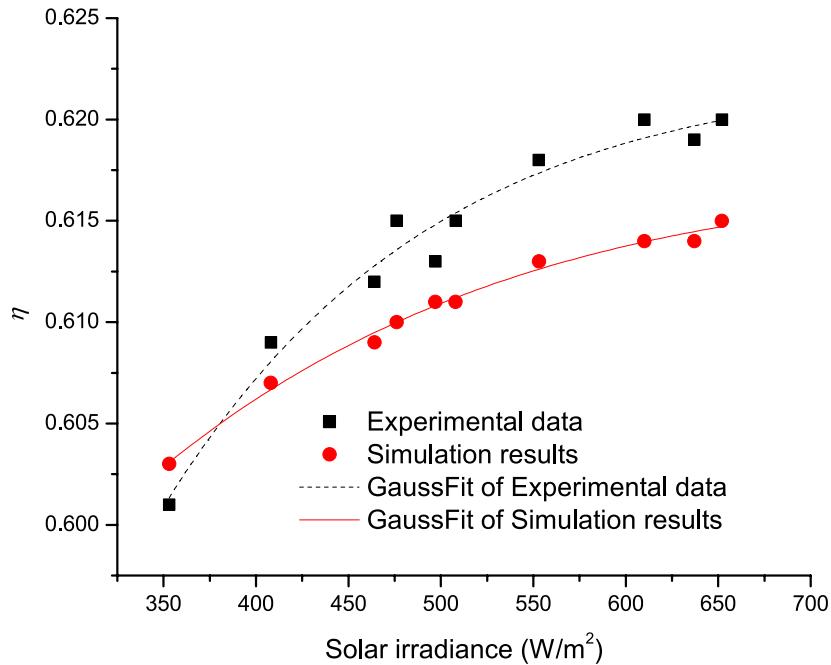
图 1-7 法向直射辐射强度  $I_r$  对槽式集热器效率的影响

表 1.5 槽式集热器在工况 11 到工况 15 条件下的实验结果

工况编号	$I_r$ (W/m <sup>2</sup> )	$\dot{m}$ (kg/s)	$T_i$ (K)	$T_o$ (K)	$T_{amb}$ (K)
11	612	0.1	433.2	501.0	286.3
12	615	0.2	433.2	468.2	286.4
13	615	0.3	433.2	456.7	286.6
14	614	0.4	433.2	451.2	286.7
15	612	0.5	433.2	447.6	286.7

可以发现, 实验数据和模拟结果具有相同的变化趋势, 即槽式集热器的集热效率随着传热流体流量的增加而升高。这是因为, 更大的流量将从吸热器带走更多的热量, 导致更低的吸热器温度分布, 进而使散热损失减小。模拟结果与实验数据存在较小的偏差(相对误差在 0.4% 到 0.9% 之间), 模拟结果所得的集热效率要低于相应的实验数据得到的集热效率。这是由于模拟过程所采用的整体传热系数公式(见式1.3)适用于 LS-3 型的接收器, 而对本实验所采用的集热器并不是很适合。未来可以获得更多的实验数据来修正此公式, 使其更加适用于本实验台的 SEIDO-I 型接收器。

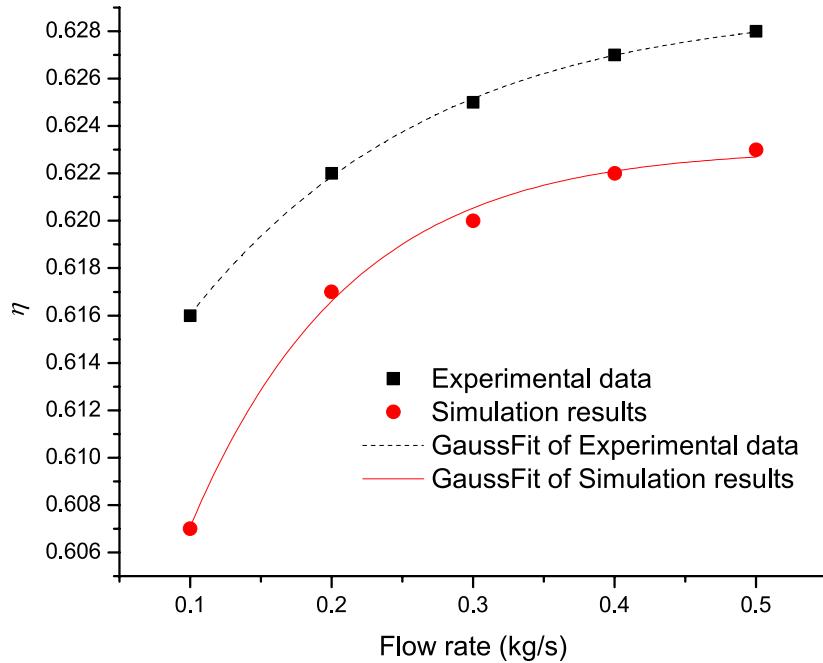


图 1-8 导热油流量对槽式集热器效率的影响

### 1.3.1.3 入口油温 $T_i$ 的影响

表 1.6 槽式集热器在工况 16 到工况 20 条件下的实验结果

工况编号	$I_r$ (W/m <sup>2</sup> )	$\dot{m}$ (kg/s)	$T_i$ (K)	$T_o$ (K)	$T_{amb}$ (K)
16	616	0.2	413.2	449.7	289.5
17	614	0.2	423.2	458.8	288.3
18	610	0.2	433.2	467.9	288.7
19	618	0.2	443.2	477.7	288.9
20	615	0.2	453.2	486.8	286.3

工况 16 到工况 20 的实验结果如表 1.6 所示。导热油入口温度对槽式集热器集热效率的影响曲线见图 1-9。

可以发现, 实验数据和模拟结果具有相同的变化趋势, 即槽式集热器的集热效率随着导热油入口温度的提高而降低。这是因为, 更高的入口油温将导致更高的吸热器温度分布, 并由此带来更多的散热损失。模拟结果和实验数据算得的集热效率之间存

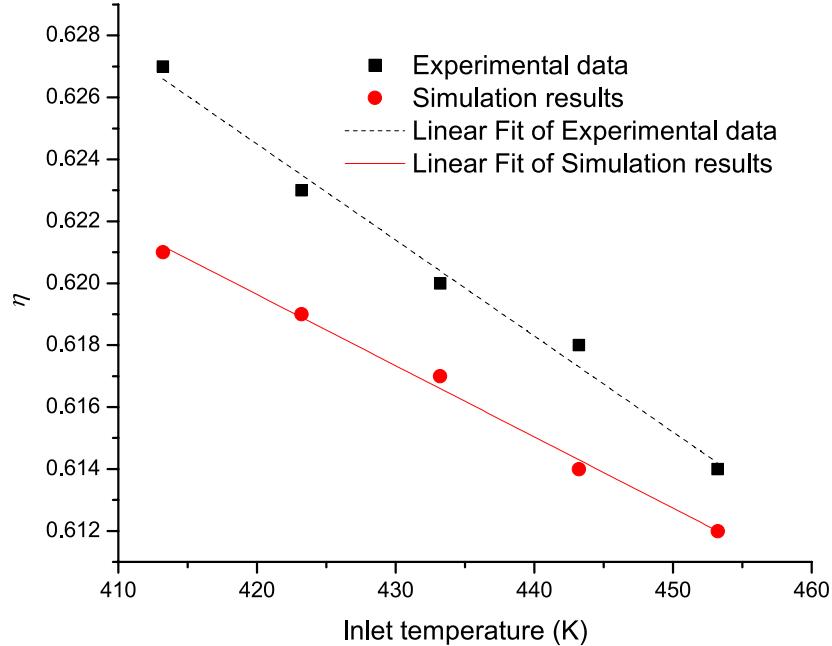


图 1-9 入口油温对槽式集热器效率的影响

在较小的偏差(0.7% 到 1.5%)，模拟结果的效率要低于相应的实验数据得到的集热效率。这同样可以用整体传热系数不适用来解释。

### 1.3.2 碟式集热器实验结果分析

#### 1.3.2.1 法向直射辐射强度 $I_r$ 的影响

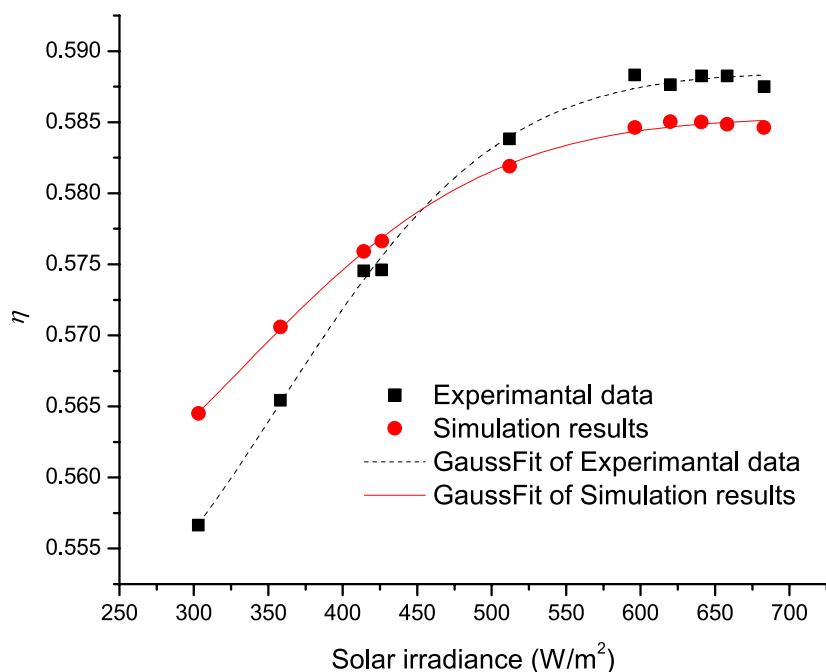
工况 1 到工况 10 的实验结果如表 1.7 所示。太阳法向直射辐射强度  $I_r$  对集热器效率的影响曲线如图 1-10 所示。图中还显示了模拟计算的结果。模型所采用的参数和实验参数相同。

可以发现，实验数据和模拟结果具有相同的变化趋势，即碟式集热器的集热效率存在极值。当  $I_r$  小于  $600 \text{ W/m}^2$  时，碟式集热器的集热效率随着  $I_r$  的增加而升高；当  $I_r$  大于  $600 \text{ W/m}^2$  时，碟式集热器的集热效率随着  $I_r$  的增加而下降。这是由于，较高的辐射强度将会增加接收器的内腔温度，进而带来更多的辐射损失，而由于辐射损失与内腔温度的四次方成正比，所以随着辐射强度的增加，集热器的热效率反而下降。模拟结果和实验数据之间的差异可以认为是接收器的绝热措施不够导致的，实验测得的绝热层外壁温度高于热网络结构图算得的温度也验证了这一点。

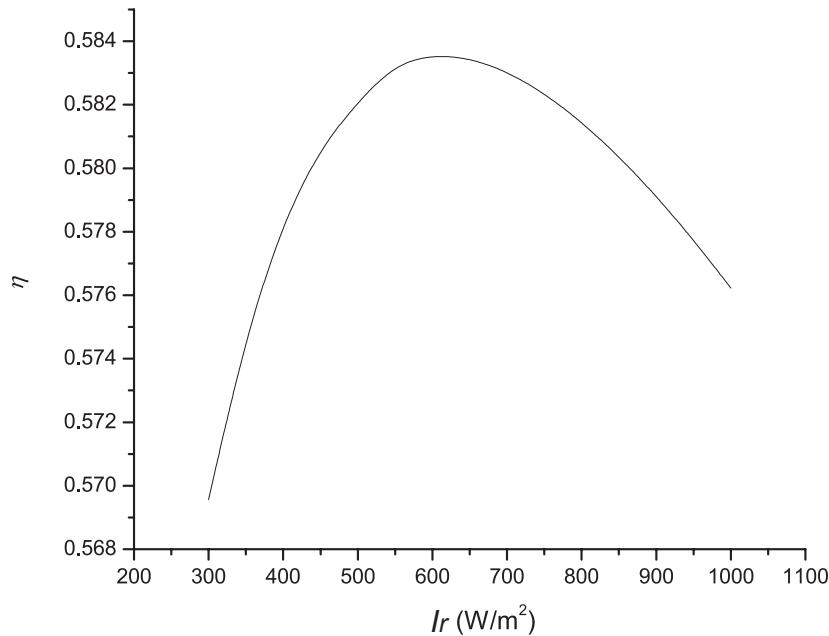
为了更加清晰地表明更高的辐射强度对碟式集热器的影响，图 ?? 显示了  $I_r$  值在

表 1.7 碟式集热器在工况 1 到工况 10 条件下的实验结果

工况编号	$I_r$ (W/m <sup>2</sup> )	$\dot{m}$ (kg/s)	$T_i$ (K)	$T_o$ (K)	$T_{amb}$ (K)
1	303	0.03	423.2	552.1	282.1
2	358	0.03	423.2	576.4	282.5
3	414	0.03	423.2	602.3	283.2
4	426	0.03	423.2	607.5	283.4
5	512	0.03	423.2	646.0	285.0
6	596	0.03	423.2	682.7	287.4
7	620	0.03	423.2	692.4	289.2
8	641	0.03	423.2	701.5	289.5
9	658	0.03	423.2	708.7	289.4
10	683	0.03	423.2	719.4	289.5

图 1-10 法向直射辐射强度  $I_r$  对碟式集热器效率的影响

300 W/m<sup>2</sup> 到 1000 W/m<sup>2</sup> 之间变化时, 碟式集热器集热效率的模拟结果曲线图。模拟的参数为: 入口空气温度为 423.2 K, 流量为 0.03 kg/s, 环境温度为 283.2 K, 环境风速

图 1-11 法向直射辐射强度  $I_r$  与碟式集热器集热效率之间的模拟结果曲线图

为 0.4 m/s。可以发现,对于给定的集热器,存在最佳  $I_r$ ,使得集热器获得最大集热效率。本实验的条件下,碟式集热器的最佳  $I_r$  约为 600 W/m<sup>2</sup>。

### 1.3.2.2 质量流量 $\dot{m}$ 的影响

表 1.8 碟式集热器在工况 11 到工况 15 条件下的实验结果

工况编号	$I_r$ (W/m <sup>2</sup> )	$\dot{m}$ (kg/s)	$T_i$ (K)	$T_o$ (K)	$T_{amb}$ (K)
11	613	0.01	423.2	950.7	286.3
12	615	0.02	423.2	783.9	286.4
13	616	0.03	423.2	691.8	286.6
14	614	0.04	423.2	634.9	286.7
15	613	0.05	423.2	597.8	286.7

工况 11 到工况 15 的实验结果如表 1.8 所示。这些数据点都在半个小时以内完成采集,以减小太阳辐射变化带来的影响。空气流量对槽式集热器集热效率的影响曲线见图 1-12。

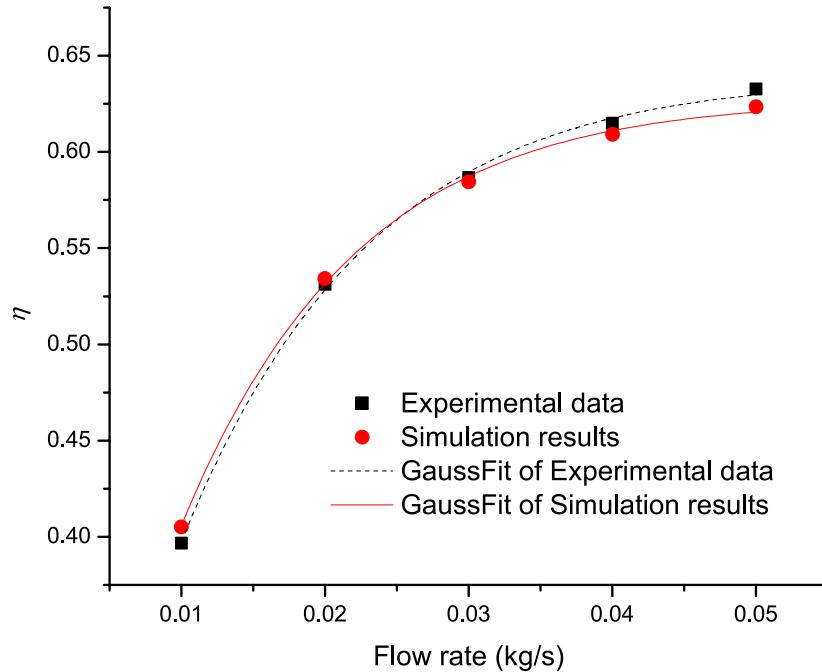


图 1-12 空气流量对碟式集热器效率的影响

可以发现,实验数据和模拟结果具有相同的变化趋势,即碟式集热器的集热效率随着空气流量的增加而增加。这是因为,更大的流量将从接收器带走更多的热量,导致更低的接收器温度分布,进而使散热损失减少。模拟结果和实验数据符合的很好。

### 1.3.2.3 入口温度 $T_i$ 的影响

表 1.9 碟式集热器在工况 16 到工况 20 条件下的实验结果

工况编号	$I_r$ (W/m <sup>2</sup> )	$\dot{m}$ (kg/s)	$T_i$ (K)	$T_o$ (K)	$T_{amb}$ (K)
16	616	0.03	383.2	661.9	289.0
17	615	0.03	403.2	676.4	288.8
18	612	0.03	423.2	690.6	288.8
19	617	0.03	443.2	707.8	288.9
20	615	0.03	463.2	722.2	288.9

工况 16 到工况 20 的实验结果如表1.9所示。空气入口温度对碟式集热器效率的

影响曲线如图1-13所示。

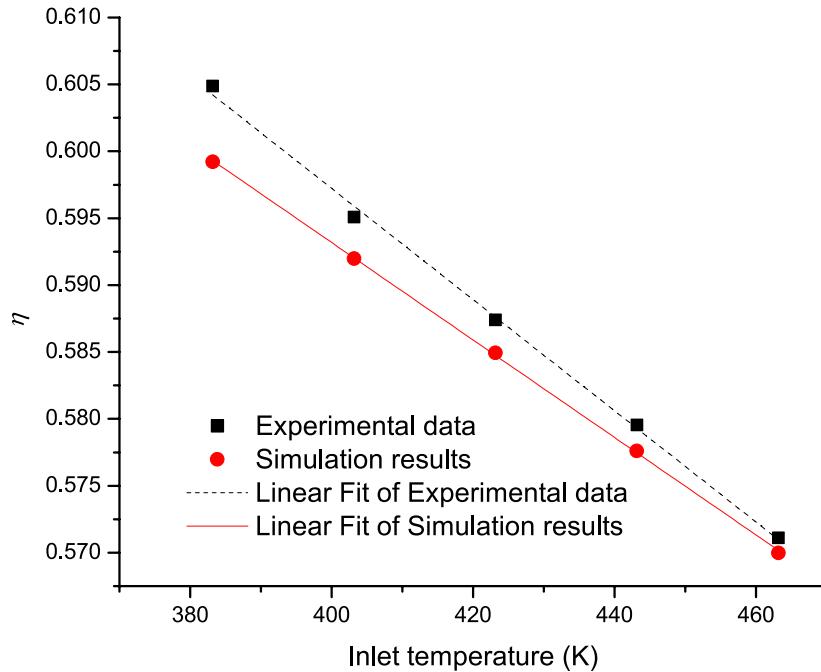


图 1-13 空气的入口温度对碟式集热器效率的影响

可以发现,实验数据和模拟结果具有相同的变化趋势,即碟式集热器的集热效率随着空气入口温度的提高而降低。这是因为,更高的空气入口温度将导致更高的接收器温度分布,并由此带来更多的散热损失。模拟结果和实验数据符合的很好。

## 1.4 本章小结

太阳能光热发电实验台的建立是太阳能梯级系统的建设工作的良好开端。本章介绍了实验台的部件和各回路。依据太阳辐射的特点,专门设计了特殊的实验工况来研究不同参数对槽式集热器和碟式集热器的集热效率的影响。明确了实验目的,设计了实验方案,安排了实验步骤,并进行了相关的实验,获得了相关的实验数据。

研究分析了太阳法向直射强度,传热流体流量,入口温度对集热器性能的影响,并对建立的槽式集热器模型和碟式集热器模型进行了验证分析。需要指出的是,由于实验台并不具备测量各集热器光学效率的能力,且本文建立的集热器模型中光学效率的各参数都是常数值,所以本章所建立的模型的光学效率是人为设定的常数值。这些集热器的光学效率有待在未来的研究工作中进行测量分析。

通过对实验数据和模拟结果的分析,可以发现:

- (1) 在实验条件下,槽式集热器的集热效率在 60.1% 到 62.8% 之间,碟式集热器的集热效率在 39.7% 到 63.3% 之间。
- (2) 在不同测试参数下,模拟结果都与实验数据具有相同的变化趋势。更高的传热流体流量带来更高的集热效率,更高的传热流体入口温度导致更低的集热效率。
- (3) 对于给定的碟式集热器,存在最佳的太阳法向直射辐射强度使集热器获得最高的集热效率。
- (4) 槽式集热器模拟结果和实验数据之间的差异表明模型所用的整体传热系数和实验台所采用的集热器的整体传热系数存在差异,可以通过更多的实验数据来修改公式,使模拟结果更加精确。
- (5) 碟式集热器模拟结果和实验数据之间的差异表明需要检查并加强碟式集热器的绝热措施。

## 参考文献

- [1] Romero-Alvarez M, Zarza E. Concentrating solar thermal power. Efficiency and Renewable Energy, 2007.

## 附录 A 流体与定温热源的传热计算公式

假定  $U, T_c, \dot{m}$  和  $c_p$  都为常数, 对于给定的来流温度  $T_i$ ,

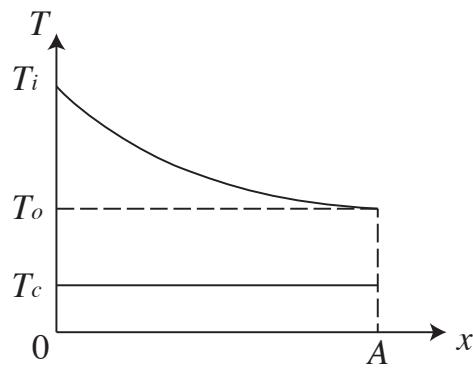


图 1-1 流体与定温热源的传热示意图

取  $x$  为已经参与换热的面积, 当  $x = 0$  时,  $T(x) = T_i$ ; 当  $x = A$  时,  $T(x) = T_o$ 。

$$\dot{m}c_p dT(x) = (T_c - T(x))U dx \quad (\text{A.1})$$

于是,

$$\frac{dT(x)}{dx} = -\frac{U}{\dot{m}c_p}(T(x) - T_c) \quad (\text{A.2})$$

$$T_g(x) = T_p(x) + T_h(x) \quad (\text{A.3})$$

其中,  $T_g(x)$  是通解,  $T_p(x)$  是特解,  $T_h(x)$  是齐次解。

$$-\frac{U}{\dot{m}c_p}(T_p(x) - T_c) = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$T_p(x) = T_c \quad (\text{A.5})$$

$$\frac{dT_h(x)}{dx} = -\frac{U}{\dot{m}c_p}T_h(x) \quad (\text{A.6})$$

$$\int_{T_h(x)=T_h(0)}^{T_h(x)=T_h(A)} \frac{dT_h(x)}{T_h(x)} = - \int_{x=0}^{x=A} \frac{U}{\dot{m}c_p} dx \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{T_h(A)}{T_h(0)} = \exp\left(-\frac{UA}{\dot{m}c_p}\right) \quad (\text{A.8})$$

也就是

$$\frac{T_g(A) - T_p(A)}{T_g(0) - T_p(0)} = \exp\left(-\frac{UA}{\dot{m}c_p}\right) \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{T_o - T_c}{T_i - T_c} = \exp\left(-\frac{UA}{\dot{m}c_p}\right) \quad (\text{A.10})$$

## 附录 B 等热流密度下的流体与定温热源的传热计算公式

假定  $U, T_c, \dot{m}, c_p$  和  $q''$  都为常数, 对于给定的来流温度  $T_i$ ,

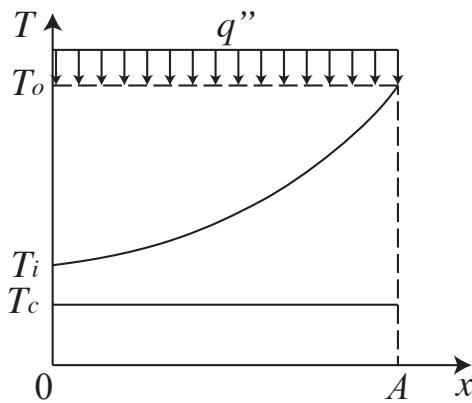


图 2-1 等热流密度下的流体与定温热源的传热示意图

取  $x$  为已经参与换热的面积, 当  $x = 0$  时,  $T(x) = T_i$ ; 当  $x = A$  时,  $T(x) = T_o$ 。

$$\dot{m}c_p dT(x) = (T_c - T(x))U dx + q'' dx \quad (\text{B.1})$$

于是,

$$\frac{dT(x)}{dx} = -\frac{UP}{\dot{m}c_p}T(x) + \frac{q''P + UPT_c}{\dot{m}c_p} \quad (\text{B.2})$$

$$T_g(x) = T_p(x) + T_h(x) \quad (\text{B.3})$$

其中,  $T_g(x)$  是通解,  $T_p(x)$  是特解,  $T_h(x)$  是齐次解。

$$-\frac{U}{\dot{m}c_p}T_p(x) + \frac{q'' + UT_c}{\dot{m}c_p} = 0 \quad (\text{B.4})$$

$$T_p(x) = T_c + \frac{q''}{U} \quad (\text{B.5})$$

$$\frac{dT_h(x)}{dx} = -\frac{U}{\dot{m}c_p}T_h(x) \quad (\text{B.6})$$

同方程 (A.6) 一样, 于是有

$$\frac{T_g(A) - T_p(A)}{T_g(0) - T_p(0)} = \exp\left(-\frac{UA}{\dot{m}c_p}\right) \quad (\text{B.7})$$

$$\frac{T_o - T_c - \frac{q''}{U}}{T_i - T_c - \frac{q''}{U}} = \exp\left(-\frac{UA}{\dot{m}c_p}\right) \quad (\text{B.8})$$

## 附录 C 类 Stream 的 MATLAB 源代码

```

1 classdef Stream < handle
2     %Stream This class describes a fluid stream that has inherent
3     %properties and dependent properties
4
5     properties
6         fluid;    % Fluid type
7         dot_m;   % Mass flow rate, kg/s
8         T;        % Temperature, K
9         p;        % Pressure, Pa
10        x;       % Quality, [0, 1] for two phase stream; NaN for single
11                % phase stream
12    end
13    properties(Dependent)
14        h;        % Mass specific enthalpy, J.kg
15        s;        % Mass specific entropy, J/kg-K
16        cp;      % Specific heat under constant pressure, J/kg-K
17    end
18
19    methods
20        function obj = Stream
21            obj.T = Temperature;
22            obj.dot_m = Massflow;
23            obj.p = Pressure;
24        end
25        function flowTo(obj, st)
26            st.fluid = obj.fluid;
27            st.dot_m = obj.dot_m;
28        end
29        function st2 = mix(obj, st1)
30            % Get the properties of a stream mixed by two streams
31            % The two streams must have the same fluid type and pressure
32            if obj.fluid == st1.fluid
33                if obj.p.v == st1.p.v
34                    obj.p = st1.p;
35                    st2.fluid = obj.fluid;
36                    st2.p = obj.p;
37                    st2.dot_m.v = obj.dot_m.v + st1.dot_m.v;
38                    h = (obj.dot_m.v .* obj.h + st1.dot_m.v .* st1.h)...
39                        ./ (obj.dot_m.v + st1.dot_m.v);
40                    st2.T.v = CoolProp.PropsSI('T', 'H', h, 'P', st2.p.v);
41                else
42                    error('The two streams have different pressures!');
43                end
44            else

```

```

45         error('The two streams have different fluid types!');
46     end
47 end
48 function convergeTo(obj, st, y)
49     % Get another stream converged (or diverged)
50     % from the original stream state.
51     % If y < 1, the original stream is diverged
52     % If y > 1, the original stream is converged
53     st.fluid = obj.fluid;
54     st.T = obj.T;
55     st.p = obj.p;
56     st.x = obj.x;
57     st.dot_m.v = obj.dot_m.v .* y;
58 end
59 end
60 methods
61     % The dependent properties can be obtained from the inherent
62     % properties
63     % If x is NaN, then the dependent properties are determined
64     % by T and P; otherwise, they are determined by P and x
65     function value = get.h(obj)
66         if isempty(obj.x)
67             value = CoolProp.PropsSI('H', 'T', obj.T.v, ...
68                                         'P', obj.p.v, obj.fluid);
69         else
70             value = CoolProp.PropsSI('H', 'P', obj.p.v, 'Q', ...
71                                         obj.x, obj.fluid);
72         end
73     end
74     function value = get.s(obj)
75         if isempty(obj.x)
76             value = CoolProp.PropsSI('S', 'T', obj.T.v, ...
77                                         'P', obj.p.v, obj.fluid);
78         else
79             value = CoolProp.PropsSI('S', 'P', obj.p.v, 'Q', ...
80                                         obj.x, obj.fluid);
81         end
82     end
83     function value = get.cp(obj)
84         if isempty(obj.x)
85             value = CoolProp.PropsSI('C', 'T', obj.T.v, ...
86                                         'P', obj.p.v, obj.fluid);
87         else
88             value = inf;
89         end
90     end
91 end
92 end

```

---

## 附录D 攻读学位期间的主要成果和奖励

- [1] Cheng Zhang, Yanping Zhang, Inmaculada Arauzo, Wei Gao, Chongzhe Zou. Cascade system using both trough system and dish system for power generation. *Energy Conversion and Management*. 2017.06.15;142:494–503.
- [2] Cheng Zhang, Yanping Zhang, Xiaolin Lei, Wei Gao. Design and Comparison of Solar Thermal Oilfield Steam Production System Plans. *Journal of Solar Energy Engineering*. 2017.01.08;139;004502-4.
- [3] Cheng Zhang, Kun Wang, Jizhou Wang, Shuhong Huang. FEA simulation on the alignment of the shafts of three-fulcrum turbine. *International Conference on Power Engineering*. 2013.
- [4] Chongzhe Zou, Yanping Zhang, Quentin Falcoz, Pierre Neveu, Cheng Zhang, Shuhong Huang, Weicheng Shu. Design and Optimization of a High-temperature Cavity Receiver for a Solar Energy Cascade Utilization System. *Renewable Energy*. 2017.04.01;103; 478-89.
- [5] Chongzhe Zou, Yanping Zhang, Huayi Feng, Quentin Falcoz, Pierre Neveu, Cheng Zhang, Wei Gao. “Effects of Geometrical Parameters on Thermal Performance for a Cylindrical Solar Receiver Using 3D numerical Model.” *Energy Conversion and Management*, 2017.10.1: 126-17.
- [6] Chongzhe Zou, Yanping Zhang, Quentin Falcoz, Pierre Neveu, Cheng Zhang. Thermal modeling of a pressurized air cavity receiver for solar dish Stirling system, *Solarpaces: International Conference on Concentrating Solar Power & Chemical Energy Systems*. AIP Publishing LLC, 2017:1884-1892.
- [7] A solar thermal cascade system, No. 201610806296.5
- [8] A flow control method used in a multistage heating system, No. 201610805604.2