

分类号 _____
U D C _____

密级 _____
编号 _____

中国科学院研究生院

硕士学位论文

非跟踪聚光反射器的优化设计程序及模拟实验研究

刘灵芝

指导教师 _____ 李戡洪 研究员 _____

申请学位级别 _____ 硕士 _____ 学科专业名称 _____ 热能工程 _____

论文提交日期 _____ 2006年5月 _____ 论文答辩日期 _____ 2006年6月 _____

培 养 单 位 _____ 中国科学院广州能源研究所 _____

学位授予单位 _____ 中国科学院研究生院 _____

答辩委员会主席 _____ 朱冬生 教授 _____

Guaduate School of the Chinese Academy of Sciences

**Optimization design program and simulating experiment
for the focus reflector**

Liu Lingzhi(Thermal Engineering)

Directed by Prof.Li Jianhong

M.S.Thesis

**Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of
Sciences, June 2006**

摘 要

本研究首先介绍了目前太阳能热发电领域的几种常见的系统,对其中一种以真空管集热器为基础的低温蒸汽发电方式的关键技术——非跟踪聚光反射器进行了详细的分析研究。以太阳能集热器效率公式和能量平衡公式为理论基础,用 Borland C++Builder 6 软件编写了优化设计程序——聚光反射器模拟程序。程序针对圆管形接收器编写,反射器形状可以根据设计自由加载。程序可以通过模拟计算比较对加载的反射器形状进行优化,得到一定形状反射器的最佳组合形式。

在程序调试完善之后,加载了五种自己设计的反射器形状:V形、梯形、圆弧形、抛物形和渐开线形,分别进行了优化模拟计算,得到了各自的最佳组合形式。对各形状反射器的最佳组合形式的相关参数进行了对比研究,证明了其中四种反射器的实际可行性。

在理论研究的基础上还进行了实验研究,我们加工了通过模拟优化计算得出的四种实际可行的反射器。选择了5月的一个晴天对置于四种反射器及无聚光的真空管进行了空晒温度测试。并且把空晒温度及其变化趋势与在当天太阳辐射条件的模拟结果进行了比较。分析显示聚光反射器模拟程序编写是成功的,新设计的几种非跟踪聚光反射器效果都颇为理想,完全可能用于低温蒸汽发电。

关键词: 太阳能热发电; 低温发电; 聚光反射器; 优化设计; 空晒温度

ABSTRACT

The paper describes several kinds of solar thermal power system and the research for no tracking focus reflector, which is the key for the low temperature solar thermal power system. Based on efficiency expressions and energy balance expressions for solar collection, using computer program Borland C++Builder 6 to write a Optimization design program——the focus reflector simulating program. The program is just for round pipe receiver, the reflector shape can be loaded freely. The program can optimize the reflector shape by simulating calculate, and find the best assembled form of the reflector shape.

Based on the debugged program, five reflector shapes were loaded, they are V shape, trapezium, arc, parabola and involute. Then the best assembled forms of them were gained by the program, it is proved that four of them are feasible.

In the experimental study, four reflector shapes were made for experiment. The experiment is mainly for testing the stagnation temprature of the evacuated glass tube solar collectors which are within and without the four reflectors respectinely. The experiment result was compared with the result of the simulating calculate. It is proved that the focus reflector simulating program is successful, and all reflector shapes designed are perfect, and can be used for the low temperature solar thermal power system.

Keywords: solar thermal power system; low temperature power; focus reflector; Optimization design; stagnation temprature.

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 引言.....	1
1.1 研究的背景和意义.....	1
1.1.1 研究的目的和意义.....	1
1.1.2 国内外研究动向.....	3
1.2 研究现状和待解决的问题.....	5
1.3 研究的内容和目的.....	5
第二章 各种太阳能热发电系统.....	7
2.1 高温太阳能热发电.....	7
2.2 中温太阳能热发电.....	8
2.3 低温太阳热发电.....	9
2.3.1 太阳池发电.....	10
2.3.2 太阳能烟囱发电.....	10
2.3.3 利用真空管集热器的低温发电技术.....	11
第三章 聚光反射器的程序设计.....	13
3.1 程序编写理论基础.....	13
3.2 程序调试——CPC程序部分.....	15
3.2.1 聚光原理.....	15
3.2.2 程序的光学原理.....	16
3.2.3 程序成型.....	17
3.3 程序改进和完善.....	18
3.3.1 设计模型介绍.....	19
3.4 程序界面和操作.....	21
3.4.1 设置界面.....	21
3.4.2 子程序界面.....	23
3.5 小结.....	26
第四章 聚光反射器的优化设计.....	28
4.1 参数设定.....	28
4.2 优化设计.....	29
4.2.1 V形聚光反射器的优化.....	29
4.2.2 梯形聚光反射器的优化.....	32
4.2.3 圆弧形反射器的优化.....	37
4.2.4 抛物形反射器的优化.....	40
4.2.5 渐开线形反射器的模拟计算.....	43
4.2.6 各种形状最佳组合对比.....	43
4.3 东西方向摆放各反射器参数的优化.....	47
第五章 实验部分.....	50
5.1 实验材料.....	50
5.1.1 真空管集热器.....	50
5.1.2 反射材料的选择.....	50

5.2 实验设备的加工.....	52
5.3 实验.....	52
5.3.1 设备的安装.....	53
5.3.2 实验测量.....	53
5.3.3 实验结果分析.....	56
5.4 实验结果与模拟计算对比分析.....	56
5.5 2006年5月14日东西方向摆放的模拟计算.....	58
第六章 总结.....	61
参考文献.....	62
符号说明.....	65
发表文章目录.....	67
致 谢.....	68

第一章 引言

1.1 研究的背景和意义

1.1.1 研究的目的和意义

随着人类文明的迅速发展，能源的消耗急剧增加，人类将面对越来越严峻的能源危机。能源是发展工业、农业、国防和科技的重要物质基础。能源也与国民经济的发展息息相关，能源的匮乏将会严重阻碍经济的发展，影响社会的和谐发展，甚至引起社会动荡。

人口、能源与环境的和谐发展，是全人类共同的美好追求。寻求经济、能源和环境（Economy, Energy, Environment 所谓 3E）的相互协调，实现可持续发展的战略，已经成为全世界人民的共识^[1]。

随着经济的发展、社会的进步，能源的消费越来越高，人们对能源提出的要求也越来越高。现在发电主要有三种形式：火力发电、水力发电和核能发电。火力发电需要燃烧煤、石油等化石燃料^[2]。一方面化石燃料蕴藏量有限、越烧越少，正面临着枯竭的危险。据估计，全世界石油资源再有 30 年便将枯竭。另一方面燃料燃烧将排放CO₂和硫的氧化物，因此会导致温室效应和酸雨，恶化地球环境。国际能源总署估计到 2010 年，CO₂的产生量将为 1991 年的 128%。目前常规能源的使用排放的CO₂已经造成“温室效应”，使全球变暖。科学家们估计，由于使用常规能源，产生的大气变化可能使全球平均温度上升导致冰川溶化，海面上升，使沿海地区变成海洋；由于气候的改变还将破坏农业，使防洪能力失去控制，许多动植物也将无法生存^[3]。水力发电要淹没大量土地，有可能导致生态环境的破坏。另外，一个国家的水力资源是有限的，而且还要受到季节的影响。核能发电在正常情况下固然是干净的，但万一发生核泄露，后果同样是很可怕的。前苏联切尔诺贝利核电站事故，已使 900 万人受到不同程度的损害，而且现在仍有影响。

这些都迫使人们去寻找新能源。新能源要同时符合两个条件：一是蕴藏丰富不会枯竭；二是安全、干净，不会威胁人类和破坏环境。太阳能被认为是最理想的新能源。

中国太阳能辐射总量在 3.3×10^3 - 8.4×10^6 千焦耳/平方米·年之间，全国2/3以上地区年日照时数大于2000小时，日照在 5×10^6 kJ/(m².a)以上，陆地面积每年接受的太阳辐射能相当于 2.4×10^4 亿吨标准煤，约等于上万个三峡工程发电量的总和^[4]。如果能有效利用这样丰富的太阳能，对于缓解中国的能源问题、减少向大气中排放的CO₂、保护生态环境、保证经济发展过程中能源的持续稳定供应等都将具有重大而深远的意义。尤其是未来前景广阔的阳光经济，将引发太阳能利用技术的全面发展，催生阳光时代的到来。

利用太阳能热力发电技术，可从浩瀚无垠的太阳热能中索取应有的电力资源，对实现人类社会与自然的可持续发展有着重要的作用，它所形成的产业必将成为世界经济发展的新的增长点，并将逐步成为当代新兴的能源产业，对世界能源、电力产业结构的重组和调整产生巨大影响。加快太阳能热力发电的科技研究和技术开发，不仅是积极调整国家电力产业结构、减轻环境压力、增强经济与社会可持续发展能力的迫切需要，也是一个国家综合国力和科技发展水平的有力显示。

太阳热力发电作为一种绿色环保的可大规模集中发电方式具有极大吸引力，在上世纪中后期很有可能占据重要位置。应不失时机地开展这一新型发电技术的基础性研究，把它作为电力工业可持续发展的技术储备，并逐步实现其规模应用和设备的国产化。

根据国家有关部门的最新统计数字，我国还有大约2.9万个村庄、700万个家庭、2300万人口没有用上电。这些无电人口大都分布在我国西部边远地区和一些海岛，这些村落和农户在今后相当长的时期很难靠电网获得电力供应。而这些无电地区大都拥有很丰富的太阳能资源，太阳能发电在这样的地区有广阔的市场前景。采用太阳能发电技术解决边远地区分散供电比延伸电网或柴油发电有明显的优势。

有关方面预测，到2010年，太阳能发电技术将继续在解决我国大约700万边远无电户的项目中发挥主要作用，同时为我国能源供应的战略安全和减小环境污染做出贡献。

我国发展太阳热发电技术具有十分重要的战略意义，因为：

(1) 为适应经济全球化趋势，发展适合我国国情的太阳热发电技术是必要的。

太阳热发电、光伏发电和风力发电等可再生新能源技术并重、协调发展，是客观需要。

(2) 从国际太阳能利用技术的发展趋势来看，太阳热发电技术是可再生能源技术的一个新的热点，我们应该不失时机地研发适合我国国情的太阳能热电系统。

(3) 发展太阳热发电将带来显著的社会、经济、环境效益；将减少温室气体排放，增加高技术的产业链，成为新的经济增长点，实现可持续发展，顺应经济飞速发展及环境生态保护的大趋势。

(4) 我国目前尚未建设一座太阳热电站，人们对环境问题的关注和能源消耗的增加，使得太阳热发电迎来了新的商机。

本文根据一般蒸汽发电的原理结合太阳能的利用，分析了中低温太阳能热发电系统的技术特点和优势，重点对关键的太阳能聚光反射器进行了优化设计的研究，以此提高集热器的集热温度达到设想的要求，为中低温热发电打下了基础。

1.1.2 国内外研究动向

太阳能热发电在国外以美国、澳大利亚、德国、以色列等国家比较先进。由国际能源署（IEA）组织和以美国、俄国、德国、以色列、澳大利亚、瑞士、西班牙七国作为执行委员会的太阳能热动力和化学能系统Solar PACES(Solar Thermal Power and Solar Chemical Energy Systems)计划，头号任务就是集中力量发展太阳能热电系统。早在 1950 年，前苏联设计了世界上第一座太阳能塔式电站，建造了一个小型试验装置。70 年代，太阳电池价格昂贵，效率较低，相对而言，太阳热发电效率较高，技术比较成熟，因此当时许多工业发达国家都将太阳热发电作为重点，投资兴建了一批试验性太阳能热发电站。80 年代以来，美、意、俄、澳等国相继建立起不同形式的示范装置，有力促进了热发电技术的发展。据不完全统计，从 1981~1991 年，全世界建造的太阳能热发电站（500kw以上）约有 20 余座，发电功率最大达 80MW^[5]。目前美国、日本、西班牙等国都在深入开展太阳热发电的研究与开发，并希望通过太阳热发电从沙漠获得取之不尽的绿色电力。太阳热发电技术也逐步进入了实用期。如美国，容量 354 MW的“Trough Power Plants”（槽型太阳热发电厂）已投入商业运行；西班牙，30 MW太阳热发电项目也于 1999 年完成最终实验等。

我国在太阳能热发电领域受经费和技术条件的限制，开展的工作比较少。我国开发太阳能热发电技术始于上个世纪 70 年代末，开展了应用性基础试验研究，在“六五”期间建立了一套功率为 1kW 的太阳能塔式热发电模拟装置和一套功率为 1kW 的平板式太阳能低温热发电模拟装置，在天津、上海、北京分别建造了一些热发电模拟试验装置及单元性试验研究，但由于工艺、材料、部件及相关技术未得到根本解决以及经费不足，项目先后停止和下马。20 世纪 70 年代末，湘潭电机厂和美国合作，建成了国内首座碟式太阳能热发电实验装置。中国科学院电工研究所，曾在 20 世纪 70 年代末期进行了太阳能热发电方面的应用基础研究工作，包括太阳能集热器、太阳辐射的吸收涂层以及斯特林发动机等。“八五”期间，北京市太阳能研究所与中国科学院电工研究所承担了太阳能热发电的关键技术攻关项目，中国科学院电工研究所研制了槽式线聚焦装置，对槽式抛物面集热系统进行了研究，取得了可喜的成果。中国科学技术大学、中国科学院电工研究所非成像的 CPC 集热、强化传热方面做了深入的研究工作^[3]。这些都为我国太阳能热发电技术的研发打下了良好的基础，但目前还没有试验样机，与国外差距很大。

世界现有的太阳能热发电系统研究应用得最多的大致有三类：槽式线聚焦系统、碟式系统和塔式系统。其中塔式系统具有规模大、热损耗小、聚光比和温度较高等特点，世界上先后建成的各有特色的塔式太阳能热发电试验电站，经过几年的实验运行，已经积累了丰富的经验。但是由于这种电站属高聚焦高温发电系统，对设备的要求特别高，所以其建设费用十分昂贵：美国太阳 1 号（10MWe）塔式电站的投资高达 1.42 亿美元，即 1.42 万美元/kW，其中定日镜场占 50% 以上。

相对中高温太阳能热发电而言，也有低温太阳能热发电的方式。低温太阳热发电，利用太阳能集热器，获取 90~180℃ 左右的热量，然后通过介质（水、氟利昂、异丁烷等）产生蒸汽，利用蒸汽推动汽轮发电机组发电。太阳池蓄热发电也属于低温太阳热发电。在太阳能低温发电计划中，以色列在死海沿岸先后建造了三座太阳池发电站，第一座功率为 150kW，于 1979 年投入运行。以色列曾计划围绕死海建造一系列太阳池电站，以提供以色列全国三分之一用电需要。美国也曾计划将加州南部萨尔顿海的一部分变为太阳池，建造 80~600 万 kW 太阳池

电站。后来，以色列和美国太阳池发电计划均作了改变。

1.2 研究现状和待解决的问题

由于太阳能热发电在技术上的复杂性，太阳能热发电系统还很少有投入正式的商用的，大部分还处于实验阶段。太阳能电站昂贵的初投资大大提高了它的发电成本，与常规能源发电站相比它的发电成本还是高很多，要赶上常规能源发电还有很多工作需要做。这些因素使得太阳能热发电系统距离大规模的商业营运还有很大的距离。如何降低太阳能热发电系统的造价、降低发电成本，使之更加广泛的走向实际应用是当今太阳能利用领域的主要研究课题。

对于利用太阳能作为热源的太阳能热发电系统要推广应用仍存在很多问题，目前需要重点解决的关键问题包括：

- 1) 低价高性能太阳能集热器的生产，太阳能集热器为整个太阳能利用系统提供热源，也是决定系统整体性能和造价的部分，如何在提高太阳能集热器性能（集热温度、集热效率）的前提下，降低太阳能集热器的造价，对于太阳能系统的广泛应用至关重要；
- 2) 研究出高效价廉的聚光反射装置，更好地收集太阳能；
- 3) 研制反射比更高而价格低廉性能良好的太阳能反射材料；
- 4) 根据太阳能本身的特点，辅助系统和储能装置在太阳能热发电系统中是必不可少的，如何使辅助系统更匹配、储能装置更合理，也是迫切需要解决的问题；
- 5) 自动控制系统的改进提高，自动控制系统是太阳能利用系统的大脑，合理的控制系统不仅可以使系统最大限度的利用太阳能，而且保证系统工作的稳定性和可靠性。

1.3 研究的内容和目的

本课题——非跟踪聚光反射器的优化设计程序及模拟实验研究是在综合讨论各种形式的太阳能热发电系统的基础上针对目前高温太阳能热发电复杂的跟踪聚光装置、昂贵的建设费等问题，着重研究中低温太阳能热发电的关键技术——中低温蒸汽发生器。以真空管集热器为集热载体，通过编写非跟踪聚光反射器程序来优化选择反射器形状。在程序模版调试改进和完善之后加载了几个自己设

计的小聚光形状的反射器,进行优化设计,得出各种形状聚光反射器的最佳参数,并且对各种形状的最佳组合形式进行对比性分析研究,通过比较它们的能量聚光比、能量效率和耗材设计出最佳的聚光反射器配比,并进行实验验证。

第二章 各种太阳能热发电系统

太阳能转换为电能有两种基本途径：一种是通过光电器件将太阳光直接转换为电能，即“太阳光发电”。太阳辐射的光子带有能量，当光子照射半导体材料时，光能便转换为电能，这个现象叫“光生伏特效应”。太阳电池就是利用光生伏特效应制成的一种光电器件。另外一是先把太阳辐射能转换为热能，即“太阳热发电，太阳能热发电是利用集热器将太阳辐射能转换成热能并通过热力循环过程进行发电。

太阳能热发电是太阳能热利用的重要方面。1950年，原苏联设计了世界上第一座太阳能塔式电站，建造了一个小型试验装置。上世纪70年代，太阳电池价格昂贵，效率较低，相对而言，太阳热发电效率较高，技术比较成熟，因此当时许多工业发达国家都将太阳热发电作为重点，投资兴建了一批试验性太阳能热发电站。据不完全统计，从1981~1991年，全世界建造的太阳能热发电站（500kw以上）约有20余座，发电功率最大达80MW。从美国和欧洲的热发电现状和计划看出，这些工业发达国家正处在太阳能热发电商业化前夕，政府和工业界联合积极推动商业化进程，预计2020年前，太阳能热发电将在发达国家实现商业化，并逐步向发展中国家扩展^[6]。

世界上现有的太阳能热发电方式主要有三种：槽形抛物面太阳能热发电系统、碟式太阳能热发电系统和塔式太阳能热发电系统。除此之外还有太阳能烟囱发电和太阳池发电方式都属于太阳能热发电方式。以工作温度范围划分，也可以分为高温、中温和低温太阳能热发电。

2.1 高温太阳能热发电

太阳能热发电中的高温发电系统主要是中央塔式和碟式发电系统，它们的集热温度可以达到好几百度，甚至上千度，一般效率比较高，不过系统比较复杂。塔式系统具有规模大、热损耗小、聚光比和温度较高等特点，世界上先后建成的各有特色的塔式太阳能热发电试验电站，经过几年的试验运行，已经积累了丰富的经验。

美国太阳I号电站是目前世界上较为典型的塔式太阳能热发电站。该电站由

美国能源部和南加州数家公司组建，由McDonnell Douglas公司承建，位于加州南部Barstow沙漠地区附近，采用外圆柱形吸收器，运行时间为1982年4月12日至1988年9月27日。把水转换为516℃温度、102bar压力的过热蒸汽^[7]。过热蒸汽既可直接用于驱动透平-发电机，也可用于加热高密度油、石、砂床^[8]，以贮存热能，供夜晚、多云、停运预热和早晨起动运行时产生蒸汽。但这种贮能方法不能产生足够品质的蒸汽，以便全效率驱动传统透平-发电机^{[9][10]}，只能贮存3h满负荷运行的热能。

太阳2号是美国太阳能热电计划中最令人瞩目的项目之一，是推进塔式太阳能热电系统商业化进程的先导性工程^[20]。太阳2号电站位于南加州Mojave沙漠地区，设计容量10MW，为目前世界上最大的新型、商用、熔盐、塔式太阳能电站，1996年4月在美国能源部的支持下开始并网发电，并从6月份起进入长年试验与评估阶段^[10]。

2.2 中温太阳能热发电

槽形抛物面太阳能热发电系统太阳能中温发电的典型代表。槽形抛物镜集热器是一种线聚焦集热器，它的聚光倍数只有几十，且吸收器散热面积较大，集热器所能达到的介质工作温度一般不超过380℃^[11]。槽式太阳能电站的主要部件是集热器、循环泵、透平-发电系统、辅助系统及控制设备。槽形抛物镜集热器的优点：跟踪难度较低，跟踪控制代价较小。由于吸收器为管状，使得工作介质加热流动的同时也是能量集中的过程，因此它的总体代价相对较小，经济效益相对较高^[12]。

美国和以色列联合组成的路兹太阳能热发电国际有限公司，自1980年开始进行太阳热发电技术研究，主要开发槽式太阳能热发电系统，5年后奇迹般地进入商业化阶段。该公司从1985年至1991年在美国加州沙漠建成9座槽式太阳能热电站，总装机容量353.8MW。电站的投资由1号电站的5976美元 / kW，降到8号电站的3011美元 / kW，发电成本从26.5美分 / kWh降到8.9美分 / kWh。

槽形集热器有很多优点，但它也存在一个大的问题：两种状态流分层的区域在吸收器的边界有热梯度且吸收器有弯曲变形现象，有人提出用Cu-Fe双金属壁吸收器代替一般的钢体吸收器可以很好的解决这个问题^[13]。此外，Cu-Fe双金属壁吸收器还能一定程度上解决低速流的分层现象。

现在对槽式集热器发电系统主要趋向于直接蒸汽发电法（DSG）。文献[14]提出了一套直接蒸汽发电系统，系统采用抛物型槽式太阳能集热器，用复合油作热传导流体，发电系统采用朗肯循环。文章对用合成油（现在的SEGS电站）和水（将来的计划）做工作流体的效率进行了分析，还提出了槽式集热器的效率计算公式，并估算了在不同的辐射强度和不同的管径下蒸汽直接产电系统的效率。文中还对蒸汽直接产电系统集热器中的液态、蒸发沸腾和干蒸汽区的不同状态做了单独分析。

1996年到1998年在Plataforma Solar de Almeria建成了一座新型的太阳热电站。该电站用于研究在太阳场中集热器中用水作传热介质的直接蒸汽发电系统。从1999年起，为了寻求比较理想的操作模式，电站用了不同的操作方案和结构对系统进行了测试评估^[15]。文献[15]和文献[16]都很好的论证了DSG过程在槽形抛物型发电系统中是可行的，并且还说明了不同模式的各自的优缺点。

还有学者提出一种适合太阳能槽形抛物型集热器的再热再生朗肯循环系统^[17]。电站系统中用槽形抛物型集热器提供热能，用水/蒸汽作为工作流体。由于沸腾压力不同，从再生朗肯循环的透平中放出的蒸汽的冷凝压力可能是湿饱和、干饱和或是过热状态。为了扩展加热温度的范围，同时保证湿蒸汽的品质不低于0.9，并且提高循环效率，而且需要再热模型，因此，用到了一个再热再生朗肯循环作为动力循环。动力循环中过程热温度可通过改变沸腾压力/温度来改变。分析表明再热再生装置适合中温太阳能热电站。存在一个沸腾室内的最佳饱和温度或流体进入太阳能场的最佳进口温度。当达到这一温度时，再热再生循环和太阳能集热器联合系统的热效率和功率同时到达最大值。文中还提到用太阳能半自动再生朗肯电站系统代替传统的再生朗肯的电站，并且用一个改良的再生再热朗肯电站循环作为低温太阳能和其他低温热源的主要热源。

2.3 低温太阳热发电

低温太阳热发电，通常利用集热器获取 90~185℃ 的热能，然后通过低沸点工质（氟利昂、异丁烷等）产生蒸汽或直接利用水产生水蒸汽，利用这种蒸汽推动汽轮发电机组发电。还有利用太阳池蓄热发电和利用太阳能烟囱集热发电的，也属于低温太阳热发电。

2.3.1 太阳池发电

太阳池发电就是将天然盐水湖建成太阳池，相当于一个巨大的平板太阳集热器。利用它吸收太阳能，加热池水，性能良好的太阳池中水能达到 90℃左右，再通过热交换器加热低沸点工质产生过热蒸汽，驱动汽轮发电机组发电。

1958 年，在泰勃(Tabor)的领导下，以色列利用旧的晒盐池建成了最早的人工太阳池，池水主要是氯化镁(MgCl₂)溶液，经测试池水能达到的最高温度为 96℃^[18]。1975 年，以色列在死海边上的Ein Boqeq建造了世界上第一座太阳池发电站，池水的发电温度在 90℃左右，发电功率为 150kW。这座电站的建成，预示了太阳池作为季节性储能的可行性和经济性。另外，以色列奥尔马特汽轮机公司在美国加州东圣伯纳第诺地区一个干涸湖泊上建筑了世界上最大的太阳池发电站，其总净发电功率为 48 MW，第一组 12MW机组于 1985 年投入运行，整座电站于 1987 年 12 月投入运行^[19]。

2.3.2 太阳能烟囱发电

太阳能烟囱发电系统由太阳能集热棚、太阳能烟囱和涡轮机发电机组3 个基本部分所构成。太阳能集热棚建在一块太阳辐照强、绝热性能比较好的土地上；集热棚和地面有一定间隙，可以让周围空气进入系统；集热棚中间建烟囱，在烟囱底部装有涡轮机。太阳光照射集热棚，集热棚下面的土地吸收透过覆盖层的太阳辐射能，并加热土地和集热棚覆盖层之间的空气，使集热棚内空气温度升高，密度下降，并沿着烟囱上升，集热棚周围的冷空气进入系统，从而形成空气循环流动。由于集热棚内的空间足够大，当集热棚内的空气流到达烟囱底部的时候，在烟囱内将形成强大的气流，利用这股强大的气流推动装在烟囱底部的涡轮机，带动发电机发电^[20]。

受德国研究与技术部资助，1982 年在西班牙马德里南部150 km 处的 Manzanares 附近的LaMancha 沙漠地区建立了第一座峰值发电功率为50kW 的太阳能烟囱式实验性电站。电站主要由太阳能烟囱、集热棚和空气涡轮机3大部分组成，该实验电站的烟囱高195 m，直径10 m。与烟囱相连的集热棚直径240 m，其边缘处与地面间隙约2 m，中间处距地面8 m^[21]。我国的华中科技大学受武汉市青年科技晨光计划资助已经开始从事这方面的研究，目前正在筹备建造一座50 W 太阳能烟囱式发电装置，拟对集热棚和烟囱内的传热和流

动过程进行数值模拟研究^[20]。上海交通大学教育部太阳能发电及制冷工程研究中心的代彦军等人^[22]运用一种简化分析方法对所构建的概念太阳能烟囱式电站的性能进行了预测，并针对宁夏地区气候特点，对其在银川、平罗和贺兰三个地区应用的可行性做了分析。

2.3.3 利用真空管集热器的低温发电技术

太阳能低温热发电与地热发电很类似，只是两者的热源不同，其发电系统的动力循环部分基本相同。地热发电主要利用地热田中热能发电，地热田分为蒸汽田和热水田。蒸汽田以蒸汽为主，温度较高，一般为160℃以上，可将地热田的蒸汽直接引入普通汽轮机发电。地热热水田则以热水为主，温度较低，一般为50~160℃，这就需要将地热水中的热能转换成地热蒸汽引入普通汽轮机发电^[23]。将热水转换成蒸汽有两种不同的方法：扩容法和中间介质法。扩容法是将地热井口来的中温地热汽水混合物，先送到扩容器中进行降压扩容(又称闪蒸)使其产生部分蒸汽，再引到常规汽轮机做功发电。扩容后的地热水回灌地下或作其他方面用途。中间介质法地热水发电又叫热交换法地热发电，这种发电方式不是直接利用地下热水所产生的蒸汽进入汽轮机做功，而是通过热交换器利用地下热水来加热某种低沸点介质，使之变为汽体去推动汽轮机发电。

1979年3月起，广州能源研究所在广东丰顺建成了一座300千瓦的扩容法地热电站。该电站的发电原理是利用当地91℃的低下热水，在闪蒸器(扩容器)中降压，产生一部分蒸汽，然后输送进入负压汽轮机做功，驱动发电机发电。1982年上半年开始了试生产运行，通过近900小时的并网发电运行，机组运行正常、安全可靠，是目前我国正常运行时间最长的地热发电站之一。

参照地热发电的方法，我们可以设计不同的方案利用太阳能发电。在太阳能发电系统中如果也能达到100℃以上的温度，在集热器中水能加热形成水蒸汽，利用产生的水蒸汽推动汽轮机发电。另外如果集热器中水的温度不能达到水的沸点，这就需要先把热水变成蒸汽才能达到发电的目的，我们可以借鉴以上提到的扩容法和中间介质法对太阳能低温发电系统进行改进。

文献[24]介绍了一个太阳能热电系统，这个系统由玻璃液体凸透镜、真空集热器、自动跟踪系统、蒸汽透平和发电机等部分组成。系统的工作流程如下：玻璃液体凸透镜把水预热后输入真空集热器。真空集热器有选择性涂层，可以有

效的吸收太阳能。经玻璃液体凸透镜聚焦后的阳光，照射到真空集热管上，使水温迅速增高。集热管内的水加热成蒸汽后，通过顺序阀门输入蒸汽透平。顺序阀门保证在蒸汽压力达到规定值后自动开启，使蒸汽推动蒸汽马达并使发动机发电。

最近有研究用真空管集热器集热直接产生水蒸气采用朗肯循环发电系统推动蒸汽透平发电^[25]。文中提到在真空管中水被加热最高能达到 185℃，产生蒸汽送入一个采用朗肯循环的透平中，水在这个小型的透平进行闭式循环。水被加热成水蒸气推动小型透平发电，然后被送入冷凝器冷凝成液态水参加再循环。在 Sychney 的实验系统中真空管水温能达到 165℃，而变成水蒸气，系统每天将太阳辐射转化为热能 11MJ/m²，透平系统的效率为 10~13%，加之真空管的效率，系统的发电效率约为 7%，产电量为 1.1~1.4MJ/m²。

以上描述的低温发电技术都是采用真空管集热器集热直接产生水蒸气来推动汽轮机发电的系统。一般这样的系统的动力部分都是采用朗肯循环，因为与其他循环方式相比朗肯循环的效率是比较高的。

目前国内常用的真空管集热器集热温度不加聚光可达 120℃，采取一些措施也可达到产生 185℃的水蒸汽。因此，利用真空管集热器进行发电应用有以下几个方案：

- 1) 采用扩容法，把热水送入扩容器中进行降压扩容使其产生部分蒸汽，再引到常规汽轮机做功发电。
- 2) 选用低沸点工质，如氟利昂、异丁烷等在集热器中流动，吸收太阳能直接产生蒸汽，推动汽轮机发电。
- 3) 改进真空管集热器系统，安装免跟踪的小聚光反射镜，通过它反射并聚集一部分光到集热管上，以便使集热管中的工质能提高 30~50 度，发电系统运行将更加理想。其中免跟踪是减小成本的关键。

方法一加了一个扩容器，使系统复杂化了，系统的投资自然也就提高了。方法二中所用的低沸点工质一般都是化学物质，大部分对环境有负面影响，特别像氟利昂如果排入大气，会破坏大气层中的臭氧层，所以对系统的要求很高。方法三是比较安全可行的方法。因此引入用真空管集热器外加小型免跟踪聚光发射装置是研究的重点，也是本课题的研究内容。

第三章 聚光反射器的程序设计

第二章介绍的几种太阳能热发电方式，塔式、槽式、太阳能烟囱和太阳池都属于大规模发电，只有做成几十兆瓦级甚至几百兆级，发电成本才能降下来，建成这样大规模太阳能热电站需要十几亿乃至几十亿人民币的投资。其中塔式、碟式和槽式太阳能发电都是高温发电方式除了对设备的要求比较高以外，还需要复杂的跟踪和控制系统，操作和控制都比较繁杂。针对以上情况我们认为低温蒸汽太阳能发电方式比较适合我们目前的国情。该方式具有以下几个特点：

- ① 结构简单，技术要求较低，容易实现；
- ② 造价低，容易与目前成熟的太阳能热水器市场接轨；
- ② 具有一定的聚光装置，但不需要跟踪系统；
- ③ 灵活性强，对场地没有特殊要求，规模可大可小。

根据以上要求，我们提出了低温蒸汽发生器的设想，希望研制出一种免跟踪小聚光集热器，可以在加载一定形状的反光板之后集热器中载热流体产生蒸汽来用于发电。

为了便于研究计算，我们设计首先用 Borland C++Builder 6 软件编写程序加载模型进行模拟计算，然后再根据模拟计算的结果选择一定的模型进行试验，最终寻找出一种或者几种比较理想的方式。

3.1 程序编写理论基础

为了与实际相联系，程序中以圆管形集热器为接收器进行设计。程序是对聚光反射器的模拟计算，我们的目的是对于一定形状的反射器在一定的太阳辐射条件下，它能计算中心圆管集热器能接收到多少能量和集热器的接收效果，甚至计算出在某一特定时刻接收器接收到的能量及相关量的情况。

根据圆管集热器的光效率公式^[26]和能量公式有：

$$\eta_o = \rho_m^{<n>} \tau_e \alpha_r pf_{ref}$$

$$Q = A_c CG \rho_m^{<n>} \tau_e \alpha_r pf_{ref}$$

ρ_m ：反射板的反射比；

τ_e : 玻璃套管的透射比;

α_r : 吸收体的吸收比;

$\langle n \rangle$: 平均反射次数;

p : 空隙热损因子;

f_{ref} : 吸收体管子和玻璃套管之间的多重反射因子;

A_c : 集热器的接收面积;

C : 聚光比

G : 太阳辐射强度。

其中 $\langle n \rangle = 1 + 0.07C$, 而我们设想给出 ρ_m 通过程序自行计算出 $\rho_m^{\langle n \rangle}$, 这样比理论单纯的公式计算更加确切, 另外也不受聚光比 C 的限制, 也就是说在只有反光板形状和尺寸而不知道 C 的情况下也不影响计算。

$$p = 1 - g / 2\pi r_1$$

g : 玻璃套管与吸收体管子之间的空隙宽度

r_1 : 吸收体管子的半径

程序以这两个光学公式为理论指导进行编写, 而且为了便于相关量的编辑我们设计出程序界面包含一个参数设定部分, 把相关参数设定为一定范围, 当进行计算操作时可以选择设定参数后进行计算, 计算结果在界面的另一部分计算显示出来。此外, 考虑到直观性, 我们设计在程序界面包含一个反射器形状显示部分, 可以使由相关参数控制调整的反射器形状跃然于界面上, 并且使相关操作结果也可可视化。

为了模拟入射和反射的光路, 同时根据一定的 ρ_m 值计算 $\rho_m^{\langle n \rangle}$ 值, 我们需要计算当一路光线以一定的角度入射后经过一次反射或多次反射到达接收器上或者投射出去的光路。我们根据光的反射原理: 入射光线的入射角等于反射光线的反射角, 首先计算出某一入射光线落点处在曲线的切线方程, 然后根据法线与切线垂直的原理计算出法线方程, 最后利用反射原理计算出反射光路。在实际的计算中一个个这样的计算相当复杂, 一旦写入程序用一定的量去控制, 计算就方便

多了。在计算光路的同时，程序同时记录下某条入射光线的反射次数，光线每经过一次反射能量就会削减成为原来的 ρ_m 倍，依此类推，对所有的光线进行累积平均计算后最终得到 $\rho_m^{<sup>n>$ 值纳入计算公式完成计算。

本程序模拟以下情形的光线反射计算：

- ① 受光体为细长管状，反射面由特定形状的对称曲线沿受光体轴心方向扫描而成；
- ② 反射面长度远大于宽度，光线从前端面或者后端面溢出对计算造成的影响可以忽略不计；
- ③ 反射计算只与反射次数有关，与最后光线投射到受光体的位置和角度无关。

程序基本参数编写完成后，必需有一定的形状的反射器来支持验证，于是我们首先选择了目前已经比较成熟的复合抛物面聚光器（CPC）进行了加载，编写了一个基础的模拟程序，对其进行了相关模拟计算，也是对程序的调试。

3.2 程序调试——CPC 程序部分

复合抛物面聚光器（CPC）的性能非常接近于理想聚光器，这是一种根据边缘光学原理设计的非成像聚光器，可对斜入射的太阳光进行有效收集，达到最大理论聚光比^[27]。这是因为入射阳光在CPC中可以通过几次反射到达接收表面，流失的光线较少。另一方面，CPC的运行不需要随时跟踪太阳位置，只需根据季节调节方位就能确保达到一定聚光比，结构简单，操作控制方便。非成像的CPC聚光比一般不超过 15，工作温度范围为 80~250℃，是具有一定特色的中低温聚光集热器^[28]。

3.2.1 聚光原理

CPC的主体部分为两片抛物面反射板，纵切面图如图 3-1。图中AC和BD为抛物线，关于中心轴对称；AD和BC为CPC的入射限制线，分别与抛物线的主轴平行（或为CPC的主轴）；入射限制线与对称轴夹角 θ 称为接收半角，根据从CPC上端开口入射的光线入射角小于或等于 θ 时可直接或经过反射最终向CPC的下端开口射出被利用，而当入射角大于 θ 时，光线经过多次反射从的上端口射出不能被利用。所以在CPC中 θ 是一个关键的参数，它的大小直接决定了CPC的几何聚光比。CPC的聚光比 C 的定义为 $C = 1/\sin\theta$ ^[29]， C 与 $1/\sin\theta$ 成反比可以利用几

何方法进行证明。

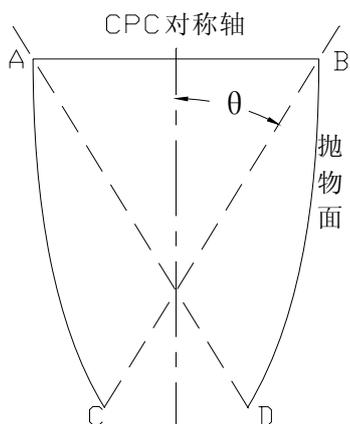


图 3-1 CPC 剖面图

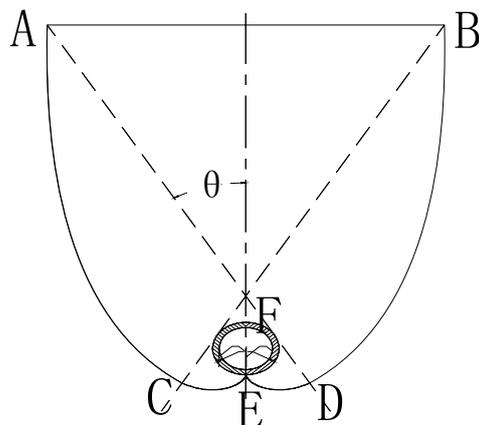


图 3-2 圆管型 CPC

CPC包括平板型和圆管型两种，现在我们只研究加载圆管型CPC部分。圆管型CPC系统的底部具有渐开线形状，进入CPC下端，落在渐开线上的光线最终都能反射到圆管接收器上^{[30][31]}。图 3-2 是圆管型CPC系统的剖面图。CPC反光板由圆（半径为 r ）的渐开线和焦点为圆的上顶点的两段抛物线组成，其剖面图如图 3-2 所示。图中AC、BD为抛物线，CE、DE为圆的渐开线，点F（圆的上顶点）为两抛物线共同的焦点。 h 为从圆心算起的CPC的高度。

3.2.2 程序的光学原理

首先我们需要对反射器形状定型，必须把控制反射器形状的相关公式转化成程序语言才能实现。下面给出圆管型CPC形状控制公式^[32]：

渐开线部分：

$$\begin{aligned} \text{左渐开线部分} \quad & \begin{cases} x = -r \sin t + \rho \cos t \\ y = -r \cos t - \rho \sin t \end{cases} ; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{右渐开线部分} \quad & \begin{cases} x = r \sin t - \rho \cos t \\ y = -r \cos t - \rho \sin t \end{cases} \quad \text{式中} \quad \rho = r\theta; \quad 0 \leq t \leq \theta + \pi/2。 \end{aligned}$$

抛物线部分：

$$\text{左抛物线方程: } (x \cos \theta - y \sin \theta + r \sin \theta)^2 = 4f(x \sin \theta + y \cos \theta + f - r \cos \theta)$$

$$\text{右抛物线方程: } (x \cos \theta + y \sin \theta - r \sin \theta)^2 = 4f(-x \sin \theta + y \cos \theta + f - r \cos \theta)$$

通过以上公式我们定型了反射器的形状，为了更进一步进行反射板用料的

计算，我们需要计算出整个形状曲线部分的长度，以便于计算反射板面积。通过计算推导得出以下相关量的计算公式：

$$\text{聚光器的高度: } h = C\pi r \operatorname{ctg} \theta + r / \sin \theta = C\pi r \operatorname{ctg} \theta + rC$$

聚光器的焦距计算：

$$f = \frac{r}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{180} \pi + \cos \theta + \sqrt{(1 - \sin \theta)^2 + \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{180} \pi + \cos \theta \right)^2} \right)$$

左右抛物线顶点坐标分别为 $(-f \sin \theta, r - f \cos \theta)$ 、 $(f \sin \theta, r - f \cos \theta)$

关于反射板弧长的计算：

$$\text{渐开线部分: } l_1 = \frac{r}{2} t^2 \Big|_0^{\pi/2 + \theta} = \frac{r}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{180} \pi \right)^2$$

抛物线部分：

$$l_2 = \frac{1}{2f} \left[\frac{x}{2} \sqrt{x^2 + 4f^2} + 2f^2 \operatorname{In}(x + \sqrt{x^2 + 4f^2}) \right] \Big|_{x_1}^{x_2}, \text{ (抛物线先转换成标准形式)}$$

假设圆管的长度为 L ，那么整个反光板的面积为：

$$\begin{aligned} S &= 2L(l_1 + l_2) = 2L \left(\frac{r}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{180} \pi \right)^2 + \frac{1}{2f} \left[\frac{x}{2} \sqrt{x^2 + 4f^2} + 2f^2 \operatorname{In}(x + \sqrt{x^2 + 4f^2}) \right] \Big|_{x_1}^{x_2} \right) \\ &= L \left[r \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\theta}{180} \pi \right)^2 + \frac{1}{f} \left[\frac{x}{2} \sqrt{x^2 + 4f^2} + 2f^2 \operatorname{In}(x + \sqrt{x^2 + 4f^2}) \right] \Big|_{x_1}^{x_2} \right] \end{aligned}$$

根据前面介绍的光路生成方法生成光路图，对于圆管 CPC 型由于其形状控制方程比较复杂且不规则，此处的计算都是采用近似计算。

3.2.3 程序成型

把上面所有的计算公式编写成程序语言之后，加上原来的效率公式和能量公式控制的参数编写的程序部分，整个程序基本定型，最后程序的界面图 3-3：控制程序所有的可以调节的参数都包含在界面的右边的上面部分，所有的参数都有一个选择范围，可以选择某一参数后在右边中间的参数调整轴进行调整，也可以通过调整轴旁边的方框填写数据进行调整，程序计算的结果体现在右下角的结果显示框内。

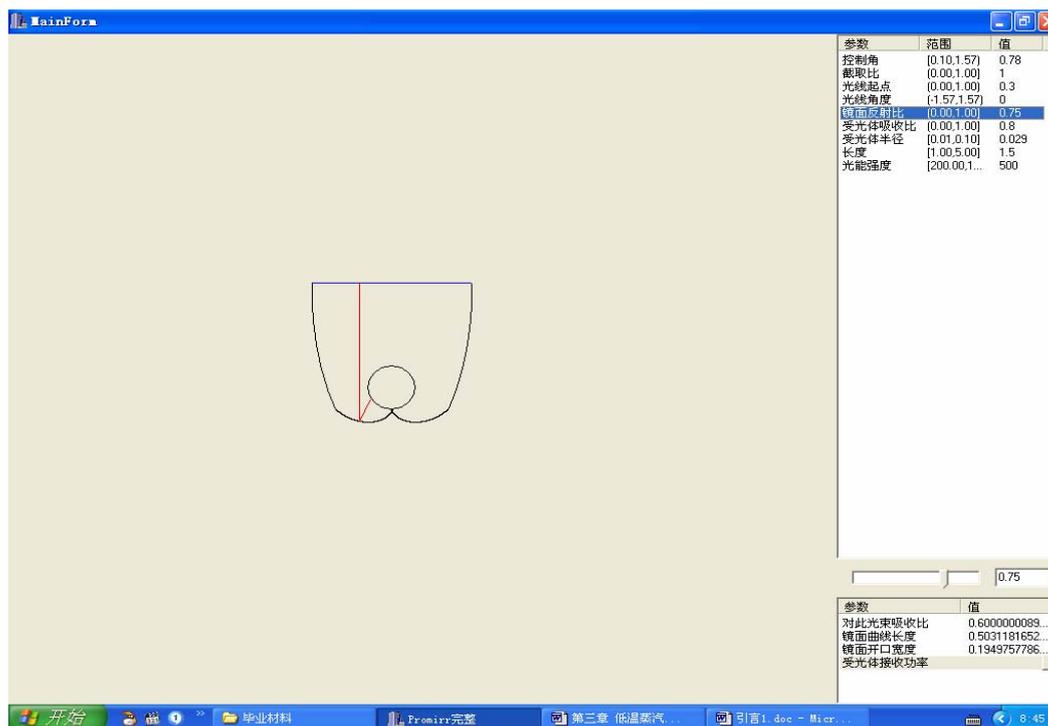


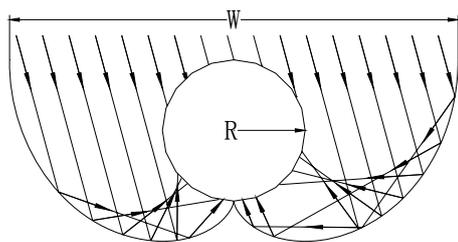
图 3-3 CPC 程序界面

3.3 程序改进和完善

经过 CPC 基础程序部分的调试，我们觉得用编写程序的方法进行模拟计算完全可行，而且计算起来比较方便，于是我们进一步对程序进行了改进和完善。CPC 固然是一种很好的可用于低温发电的聚光装置，它已经非常成熟，但由于它结构比较复杂，加工起来比较麻烦，用材也比较多，目前在太阳能热发电方面没有得到应用，我们的目的是找到一种结构简单、容易加工的相对耗材也较少的聚光反射器，我们编写程序时可以自行加载各种形状的聚光反射器。为了程序的完整性我们事先设计了几种反射器形状加载后进行模拟计算，这几种形状基本涵盖了结构简单、容易加工的小聚光反射器的可行形状，当然如果有其它形状同样可以加载后编写进程序中进行模拟计算。

经过反复调试，改进和完善的程序命名为聚光发射器模拟程序，程序的功能简介如下：

- ① 参数的选择输入。根据不同需要设计了不同的角度单位：弧度、角度和平角的倍数；长度单位：米、毫米；摆放方式：南北方向和东西方向。
- ② 反射器几何参数设定。程序加载了反射器反射材料的反射比 (ρ)，集热器的外管半径 (R)、长度 (L)，集热器的吸收比、损失因子等的乘积（所有这些



渐开线形

图 3-4 各聚光反射器剖面图

符号说明：R：真空管集热器的外管半径；

W：反射器开口宽度；

H：反射器高度；

h：真空管集热器圆心到反射器底部的距离，即中心高度；

θ ：V形或梯形斜边倾角。

V形反射器：形状由开口宽度 W 和倾斜角 θ （或高度 H）控制，调整反射器的宽度和倾斜角可以得到不同的形式的 V 形。

梯形反射器：形状由开口宽度 W、倾斜角 θ 和高度 H 控制，调整反射器的宽度、倾斜角和高度可以得到不同的形式的梯形。

圆弧形反射器：形状由开口宽度 W 和高度 H 控制，所谓的圆弧就是中心角小于等于 180° 的弧形。当开口宽度一定时，改变高度即改变了圆弧的形状。

抛物形反射器：形状由开口宽度 H 和焦距 F 控制，改变焦距就改变了抛物形的形状，再确定开口宽度决定了抛物形的高度，最终定型。

渐开线形反射器：反射板弧形是内部圆管集热器圆的渐开线。圆的半径确定，圆的渐开线就确定了，只要确定好渐开线延伸的长度就可以定型了。这里我们以渐开线从圆的底部画弧开始到左右渐开线画弧不到半周而开口宽度最大时为止，也就是第三章中提到的渐开线公式中 $t=\pi$ 时。这样渐开线形的形状就确定了。

为了方便比较，其他四种形状的反射器的开口宽度 W 就设定为渐开线确定的开口宽度，再改变不同形状的其他控制参数来控制反射器的最终形状。

由于反射器最终都是为集热器能够接收更多的热能而设计的，而决定集热器接收能量的多少和集热器与反射器的位置关系有着紧密的联系，所以确定真空管集热器圆心到反射器底部的距离 h 也是关键的问题。

3.4 程序界面和操作

从直观看程序有两个主要的操作界面，一个界面我们称设置界面，另一个称子程序界面。

3.4.1 设置界面

设置界面：用于切换反射器形状、选择光线长度单位、光线角度单位、摆放方向和对太阳辐射强度进行编辑，同时也可以显示能量曲线和能量结果。界面如图 3-5 所示。

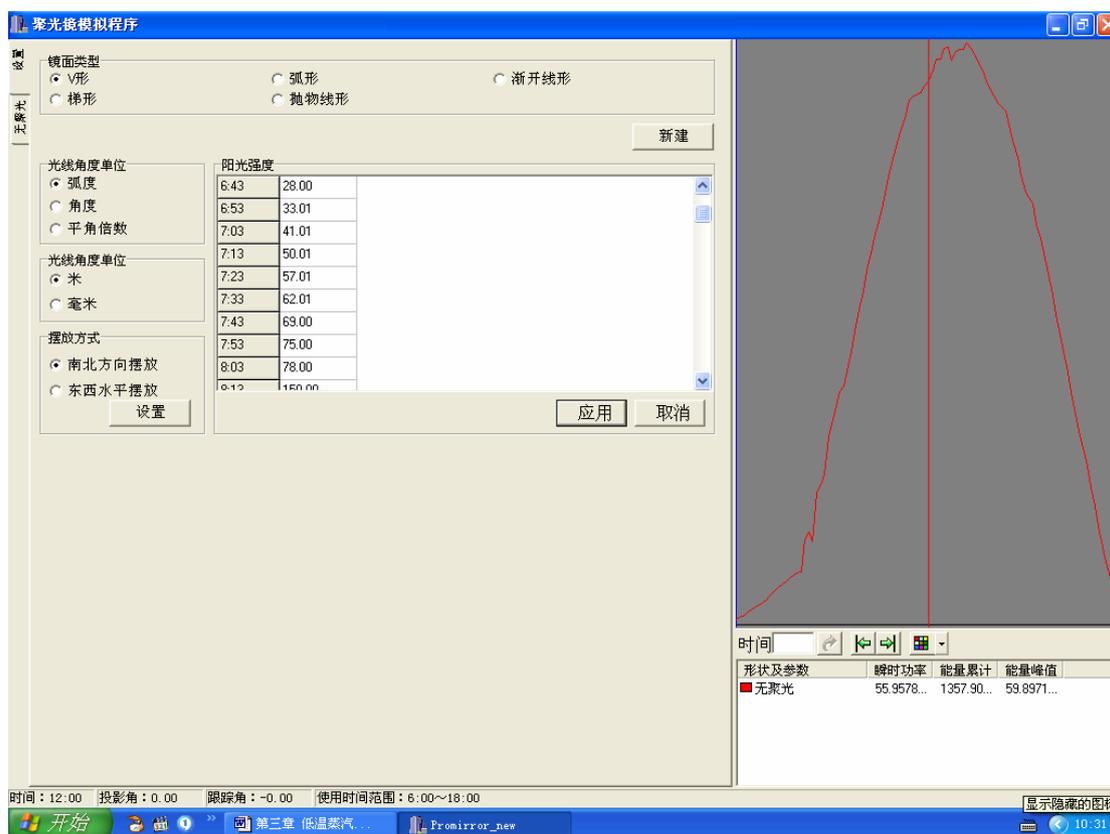


图 3-5 设置界面

下面介绍设置界面各个功能的编辑。

切换反射器形状：在镜面类型处选择要操作的类型，然后按新建键，在界面的左竖排中将列出新建的类型，而且马上跳到新建子界面，如果要返回按左竖排至顶的设置即可。在反射器形状界面上还可以根据自己的需要通过编写程序添加反射器形状。

选择光线长度单位、光线角度单位、摆放方向：相应处选择合适的选项即可。在摆放方向下面有个活动按钮——设置，可以点开设正午阳光角度和摆放倾角，角度以弧度为单位。

编辑太阳辐射强度：在太阳辐射强度表格区域内点击鼠标右键出现四个选项，如图 3-6 所示，可以选择做相应的操作。

插入：针对单个时间点的太阳辐射强度进行操作。选择插入，界面上会弹出一个输入时间的口令，输入要插入的时间点它将自动插入合适的位置，然后在插入的时间后面输入相应的太阳辐射强度值即可。

删除：针对单个时间点的太阳辐射强度进行操作。选择删除将会删除界面上已经选择的呈蓝色的一组数据。也可以选择已经生成的数据对其进行修改操作。

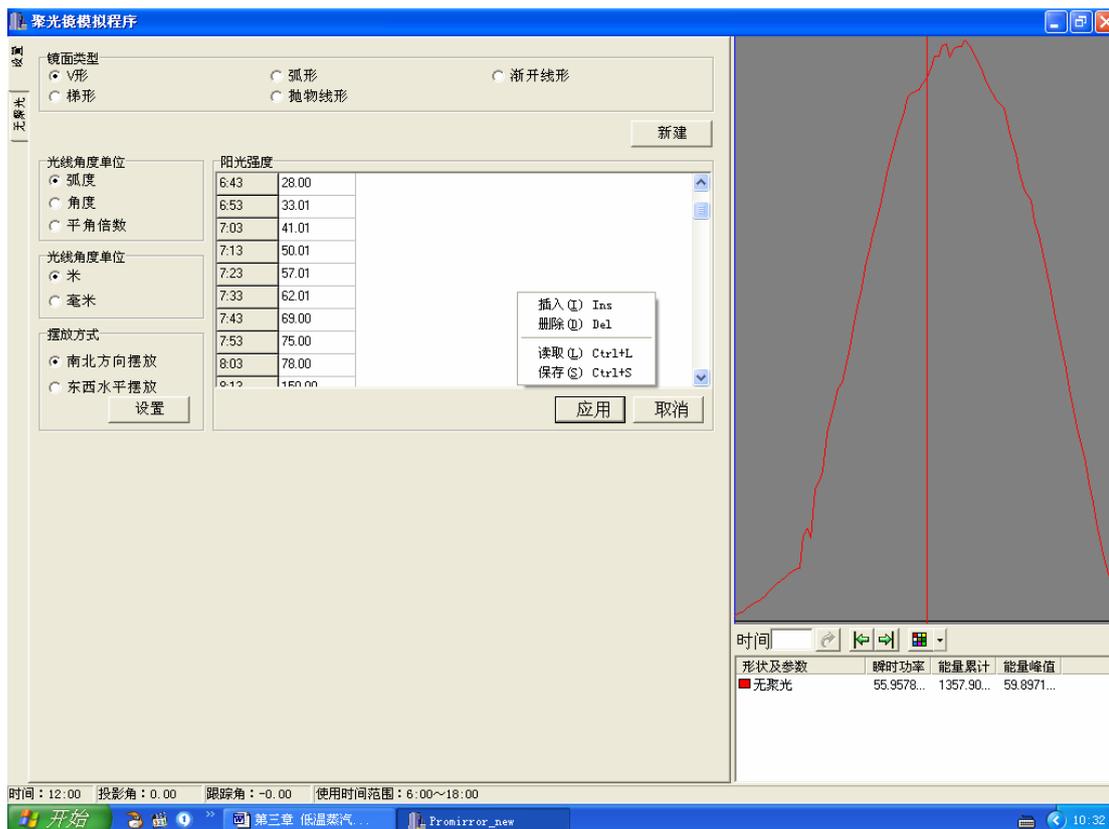


图 3-6 编辑太阳辐射对话框

读取：用来读取已经生成的文本表格导入到太阳辐射强度区域。选择读取查找数据，数据文件格式选择所有文件，然后选择.txt 的纯数据文本表格即可立刻导入。读取太阳辐射对话框如图 3-7。

保存：对删除、插入和读取的操作进行存档，以 .txt 格式将操作保存起来。

上述四个操作最终要通过太阳辐射强度区域下端的应用或取消键实现或取消操作。一旦操作应用右边曲线栏中的曲线也相应改变。

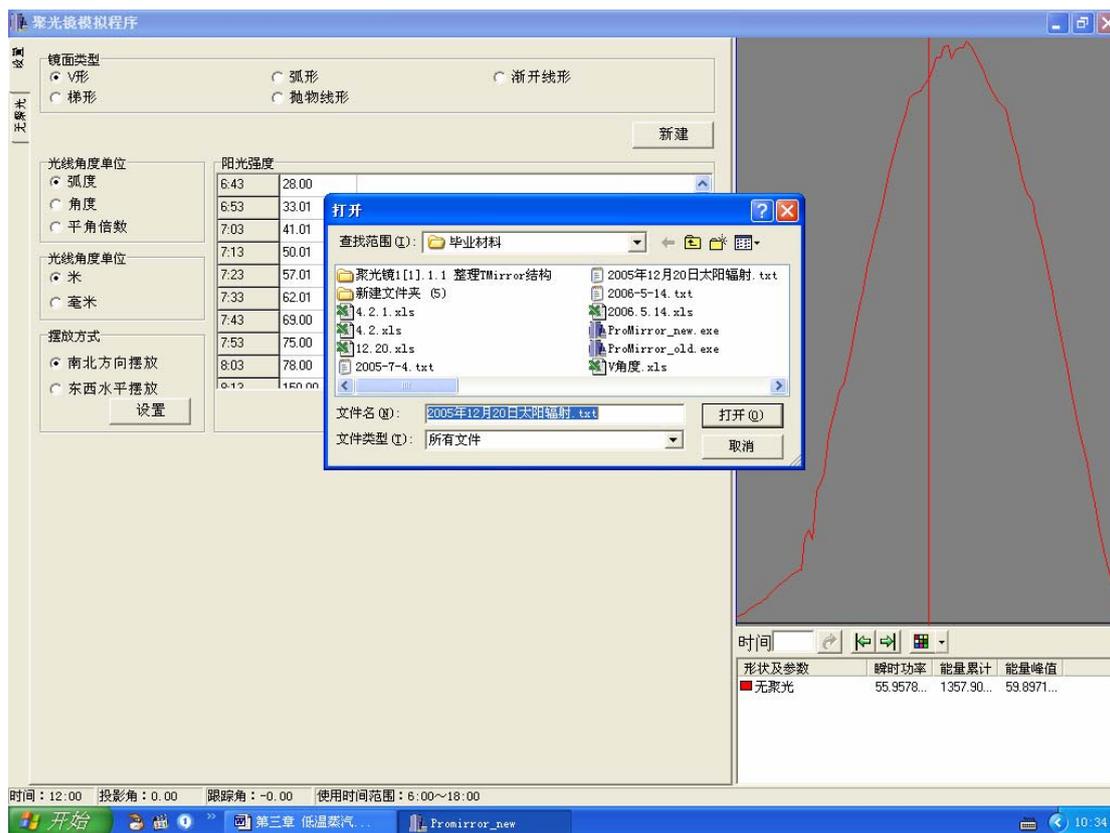


图 3-7 读取太阳辐射对话框

3.4.2 子程序界面

这个界面包括三个部分：参数设定和聚光反射器特性结果输出部分、聚光反射器形状显示部分以及接收能量情况输出部分。这个界面是以无聚光形式时为默认界面，通过设置界面的镜面类型新建键新建一个新的子程序界面，可以通过这种方式创建多个子程序界面，界面之间可以通过界面左竖排的子程序名栏进行相互切换。图 3-8 为圆弧形子程序界面。

参数设定和聚光反射器特性结果输出部分：

参数设定中包含了通用参数和特殊参数。通用参数就是各种不同类型反射器共用的参数，包括投影角（阳光入射与垂直地面所呈角，上午为负下午为正，主要用于模拟太阳光入射变化情况，在聚光反射器形状显示部分可以显示出来）、反射比、综合系数、线距（模拟阳光入射间隔，在聚光反射器形状显示部分可以显示出来）、长度和半径。特殊参数就是控制不同形状反射器的参数，例如圆弧形包括高度和中心高度。

所有参数都可以自主设定数值，设定参数数值的步骤：在上面参数部分选择要设定的参数（选择后呈蓝色），中间部分参数名就出现选定的参数名及其单位

——在参数名下面数值方框输入想要设定的数值取代原数值——确定/取消即可执行设定或取消设定。需要注意的是这样的操作设定的数值，对于通用参数意味着所有子程序的此参数都改变成设定值，对于特殊参数同种类型反射器的此参数也都改变成设定值。如果需要其他子程序界面的此参数不随单个子程序改变而改变，可以在输入参数数值之后按数值左边的小方框使它呈实心（此小方框称输入锁定切换键）。那么要设定参数只对此子程序界面有效的步骤为：选择要设定的参数——输入想要设定的数值取代原数值——按输入锁定切换键锁定数值——确定/取消。

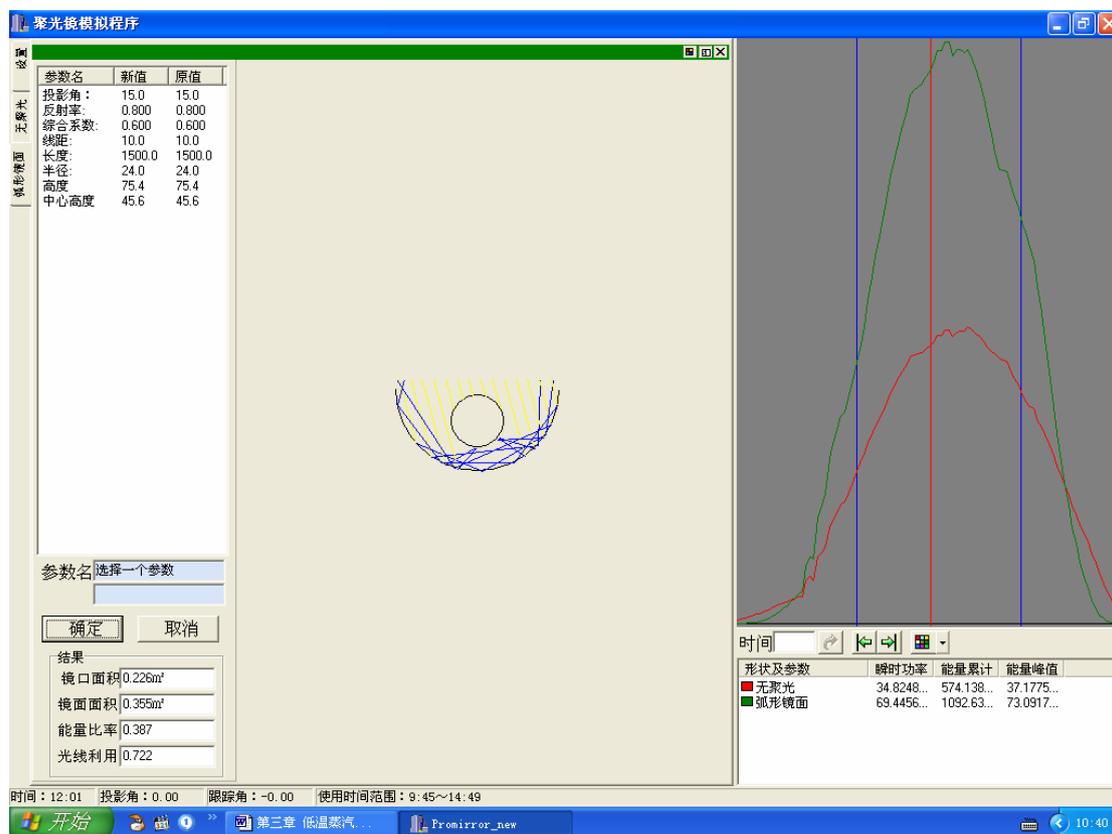


图 3-8 圆弧形子程序界面

聚光反射器特性结果输出可以输出以下几个结果：镜口面积（即反射器开口面积）、镜面面积（所需反光板面积）、能量比率（进入反射器的能量和接收器接收能量的比值，是个瞬时量，与投影角有关，即与时间有关）和阳光利用（进入反射器的光线数和投射到接收器上的光线数的比值，是个瞬时量，与投影角有关，即与时间有关）。

聚光反射器形状显示部分：直观反映左边参数设定，用图形描绘出来。而且左边参数改变，聚光反射器形状也会相应改变。的图 3-9 是通过圆弧形参数进

行调整数值改变反射器形状的图例。

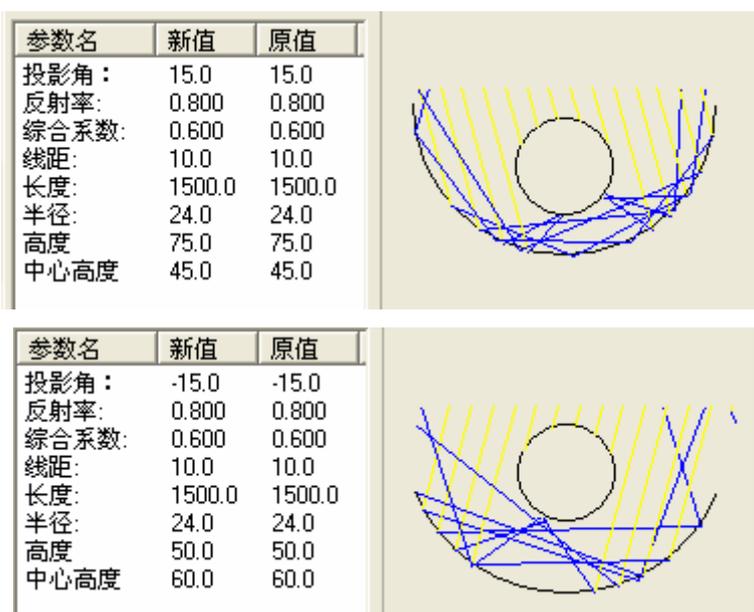


图 3-9 参数调整控制反射器形状图例

接收能量情况输出部分：用曲线描绘出全天接收器接收太阳能的情况，并用数值量化全天反射器接收的总能量和选定时刻的接收器瞬时接收能量，并可以输出全天瞬时接收能量峰值。接收能量曲线可以转换成数据导出到 EXCEL 中进行编辑。图 3-10 是曲线导出对话框。

接收能量曲线部分与子程序相对应，每一条曲线是一个子程序接收能量情况的反应。子程序有多少个能量曲线就有多少条，各曲线通过不同的颜色加以区别，曲线颜色与数据输出部分颜色图例一致。

此部分中间有几个设定区：时间、箭头和颜色。

时间：在后面的方框内输入时间，上面曲线中当前时间线移动到该时刻，下面瞬时能量也输出该时刻接收器接收的瞬时能量，最下横排也输出该时间值或者程序读出的最近时间值和此刻阳光投影角。

箭头：设定两个时间即为一个时间范围，最下横排也显示该时间范围值，右下方的能量累积变为该时间范围内接收器接收的总能量。在两个时间范围之外再选择一个时间，两条蓝色线之间为时间范围，一条红色线是新选定的当前时间线，可以通过左右键改变时间范围，使新设定的当前时间线值成为时间范围的一端点。选择左箭头把原来范围的起点改变成为当前时间线的时刻，选择右箭头把原来范围的起点改变成为当前时间线的时刻。

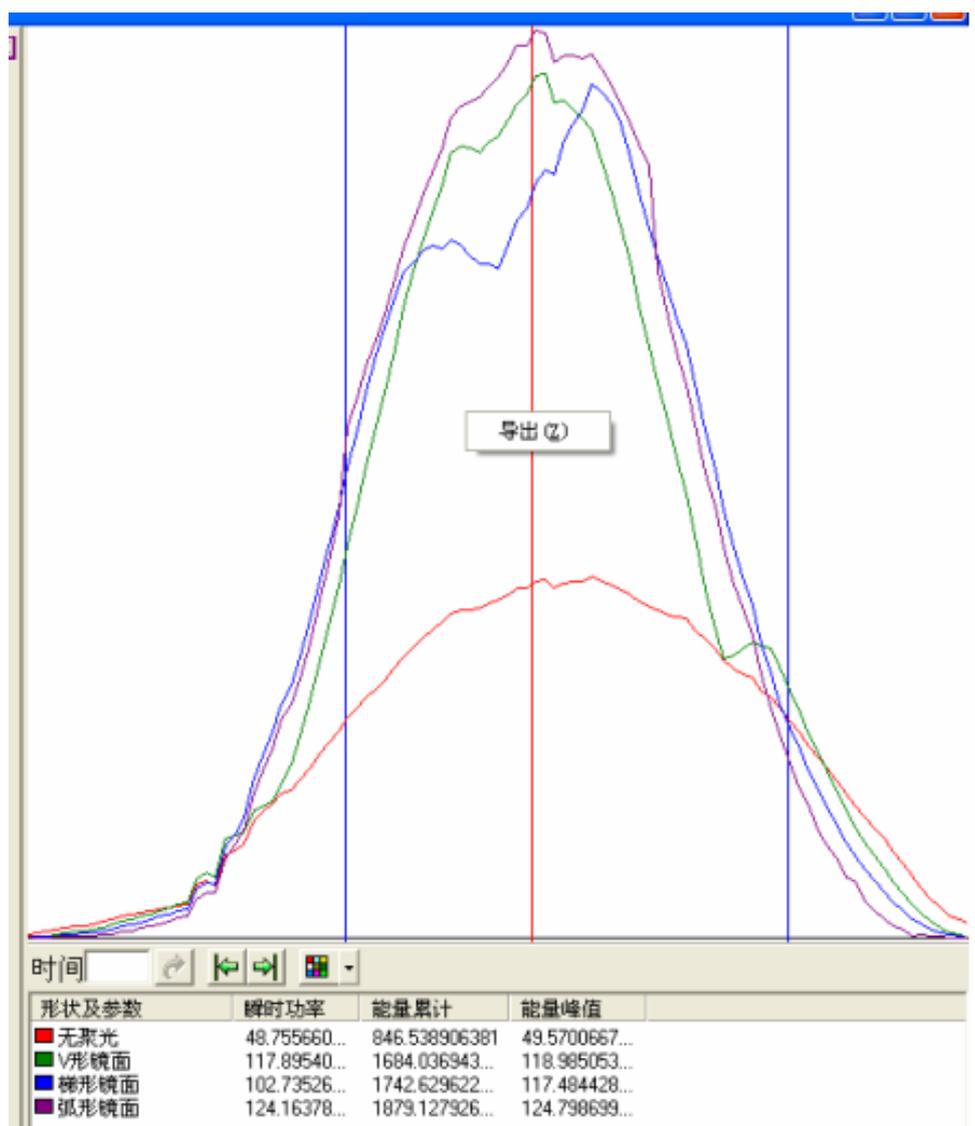


图 3-10 曲线导出对话框

颜色: 对能量曲线部分进行颜色设定。颜色设定包括背景颜色(默认为灰色)、坐标轴颜色(默认为黑色)、当前时间线颜色(默认为红色)和时间范围线颜色(默认为蓝色), 点击颜色设定框右边的下拉键选择需要改变颜色的选项即弹出颜色对话框, 选择合适的颜色确定即可。

3.5 小结

本章以常用的真空管集热器为基础, 研究编写了以圆管型吸收体为集热载体的聚光反射器模拟程序, 程序可以任意加载一定形状的反射器。该程序考虑周全, 包含了实际情况下的各个参数和实验的构成要件, 程序完全模拟太阳光在一定的太阳辐射条件的入射和反射光路, 可以对一定形状反射器进行优化设计, 并计算出其能量聚光比、能量效率和所需反光板材料的面积等参数。程序在调试完成后

加载了我们设计的五种聚光反射器进行改进和完善，程序在反复调试改进和完善之后具有以下几个特点：

- ① 贴近实际，实用性强；
- ② 界面明朗，直观感强；
- ③ 具有导入导出功能，兼容性强。

程序经过改进和完善之后基本定型，可以正式加载反射器形状进行优化计，并且进行相关的模拟计算。

第四章 聚光反射器的优化设计

程序已经编写完成,在做模型实验之前我们先对实验加载合适的数据进行模拟计算,为后面的模型实验做理论指导和参考。

4.1 参数设定

以实际情况出发,选择适当的参数进行模拟实验,参数设定如下:

反射比: 0.8,以采集的材料的测试值为参考;

综合系数,取无聚光时集热器的光效率: 0.8,以真空管的性能参数为依据;

长度: 1500 mm,半径: 24 mm,以 $\phi 58 \times 1500$ mm 的真空管为参照,真空管外套外径为 58 mm,内管外径为 48 mm,内管有涂层,为真空管接收能量部分。

太阳辐射强度: 以 2005 年 12 月 20 日测得的一组广州附近地区的太阳辐射强度为基础。这天的太阳辐射情况如图 4-1。在没有聚光反射器的情况下单根真空管接收的能量为 1123.79 kJ/day,单根真空管瞬时接收能量峰值为 49.57J。

为了配合渐开线形聚光反射器,也为了方便各种不同形状的反射器之间的相互比较,这里我们设定所有反射器的开口宽度 W 都为 $2\pi R=182.2$ mm,此时理论聚光比 $C=1$,然后加载上太阳辐射强度分别进行优化,把 2005 年 12 月 20 日的太阳辐射强度代入计算,从反射器开口进入反射器的总能量为 4413.09 kJ/day。

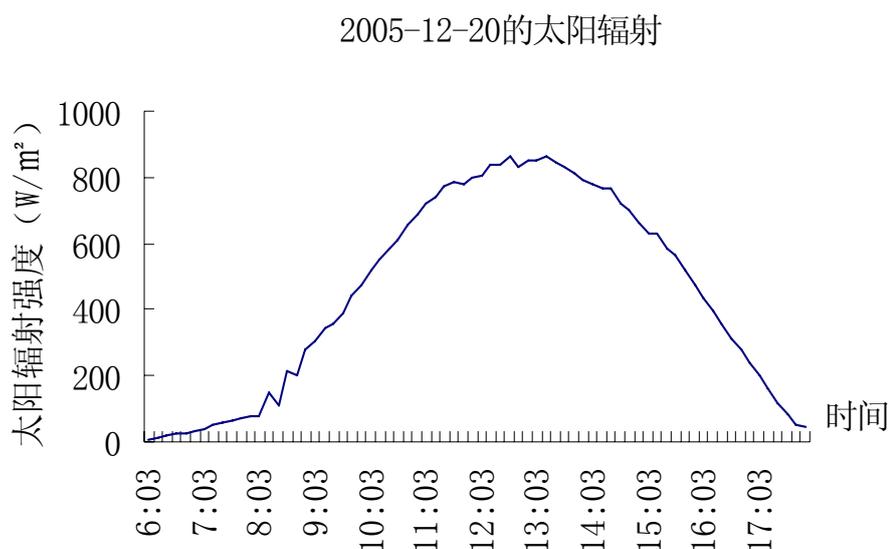


图 4-1 2005 年 12 月 20 日的太阳辐射

4.2 优化设计

第三章加载在程序中的各种形状的反射器的形状受到不同的参数的控制，只有选择了合适的参数真空管集热器全天接收能量才能达到最佳状态。下面我们对五种形状的反射器分别进行模拟计算，力求找出五种形状的反射器的最佳参数组合形式，我们以下列几个参数作为反射器效果好坏的衡量标准。

- ① $Q_{\text{总}}$ ：真空管集热器全天接收的总能量，kJ/day；
- ② S ：反射器反射板面积， m^2 ；
- ③ q_s ： $Q_{\text{总}}$ 与 S 的比值，简称能量面积比， MJ/m^2 ；
- ④ C_n ：聚光反射器集热器接收总能量与无聚光情况下接收能量的比值，简称能量聚光比；
- ⑤ η ： $Q_{\text{总}}$ 与进入反射器的总能量的比值，简称能量效率。

下面对各反射器南北摆放的形式进行模拟比较，假定正午阳光角度（ 90° - 正午太阳高度角）与摆放角度一致。

4.2.1 V形聚光反射器的优化

V形聚光反射器影响真空管集热器全天接收太阳能量的参数主要是斜边倾角和中心高度，如图4-2所示。

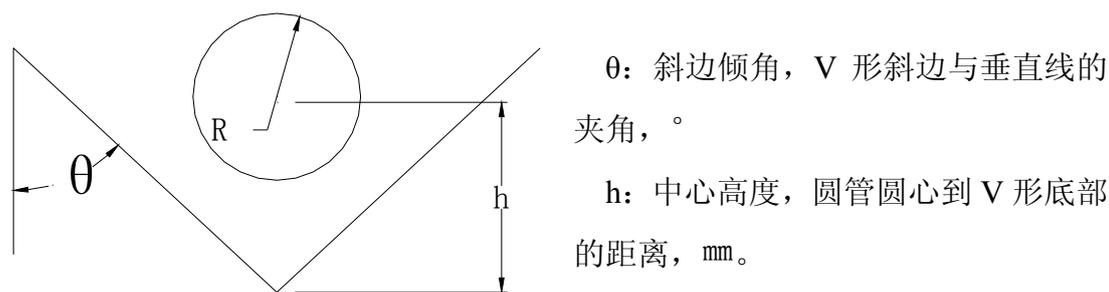


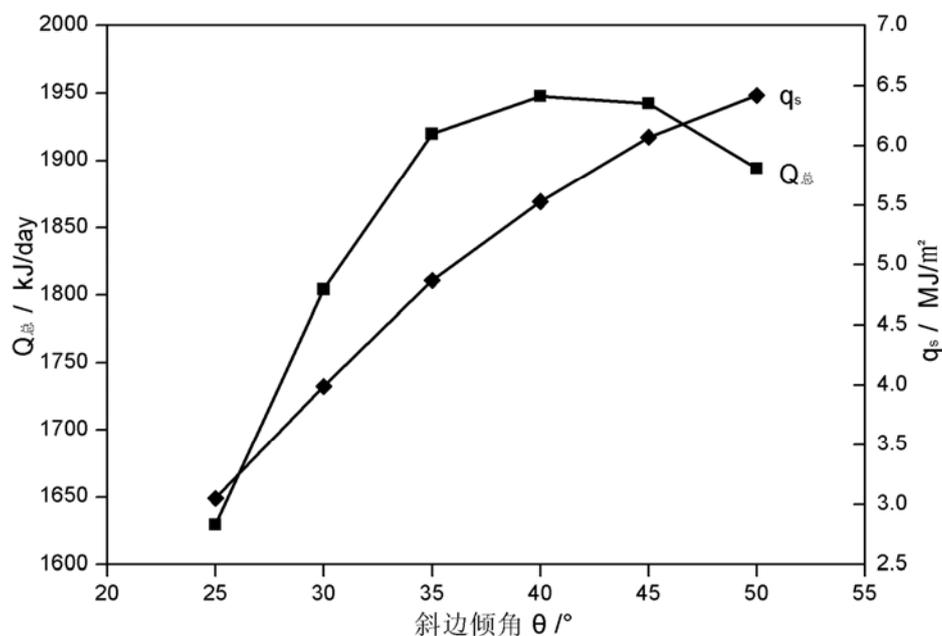
图4-2 V形反射器控制参数示意图

1. V形斜边倾角 θ 的确定

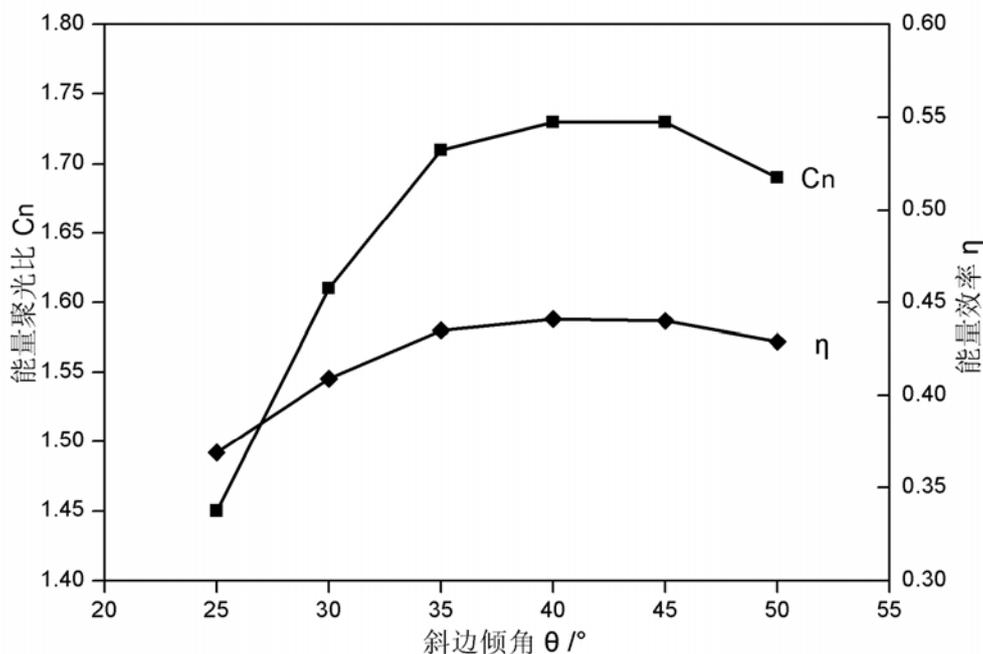
首先我们设定中心高度为70 mm，然后调节斜边倾角 θ ，从斜边倾角 50° 开始，每次减小 5° 观察各参数变化情况。图4-3、4-4和表4-1给出了模拟计算的结果。

表 4-1 V形反射器 θ 对各参数的影响

斜边倾角 θ	50°	45°	40°	35°	30°	25°
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1894.14	1942.41	1947.81	1919.80	1804.03	1629.18
C_n	1.69	1.73	1.73	1.71	1.61	1.45
S (m ²)	0.295	0.320	0.352	0.394	0.452	0.535
q_s (MJ/m ²)	6.42	6.07	5.53	4.87	3.99	3.05
η	0.429	0.440	0.441	0.435	0.409	0.369

图 4-3 V形反射器 θ 与 $Q_{\text{总}}$ 及 q_s 的关系

从表 4-1 和图 4-3、4-4 可以看出，V 形反射器随着斜边倾角 θ 的减小单根真空管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 先增加，在斜边倾角为 40° 附近达到最大值，倾角再减小时能量聚光比 C_n 和能量效率 η 的变化趋势与 $Q_{\text{总}}$ 的变化趋势一致。反射板面积 S 始终随着 θ 的减小而增大，而真空管能量面积比 q_s 却始终是随着 θ 的减小而减小。

图 4-4 V 形反射器 θ 与 C_n 和 η 的关系

2. V 形中心高度 h 的确定

根据以上对 θ 的初选，我们两次设定斜边倾角 θ 分别为 40° 和 45° ，然后调节中心高度 h ，从 h 为 80 mm 开始，每次减小 5 mm，观察能量接收变化情况。下面表格给出了模拟计算的结果。

表 4-2 V 形反射器 h 对 C_n 和 η 的影响

h (mm)	80	75	70	65	60	55
$40^\circ Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1912.50	1936.29	1947.81	1945.87	1927.47	1893.36
C_n	1.70	1.72	1.73	1.73	1.72	1.68
η	0.433	0.439	0.441	0.441	0.437	0.429
$45^\circ Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1858.10	1905.20	1942.41	1966.46	1974.90	1964.59
C_n	1.65	1.70	1.73	1.75	1.76	1.75
η	0.421	0.432	0.440	0.446	0.448	0.445

从表 4-2 和图 4-5 可以看出，当斜边倾角 θ 一定时 V 形反射器随着中心高度 h 的减小单根真空管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 先增加后减小。斜边倾角为 40° 时，单根真空管接收 $Q_{\text{总}}$ 在 h 为 70 mm 附近达到最大值，斜边倾角为 40° 时，单根真空管的 $Q_{\text{总}}$

在 h 为 60 mm 附近达到最大值, 而且斜边倾角为 40° 时 $Q_{\text{总}}$ 最大值比斜边倾角为 45° 时的 $Q_{\text{总}}$ 最大值小, C_n 和 η 的变化趋势和 $Q_{\text{总}}$ 一致。从前面部分分析可知 θ 越大 S 越小, 所以斜边倾角 θ 为 45° 时 q_s 会更多。

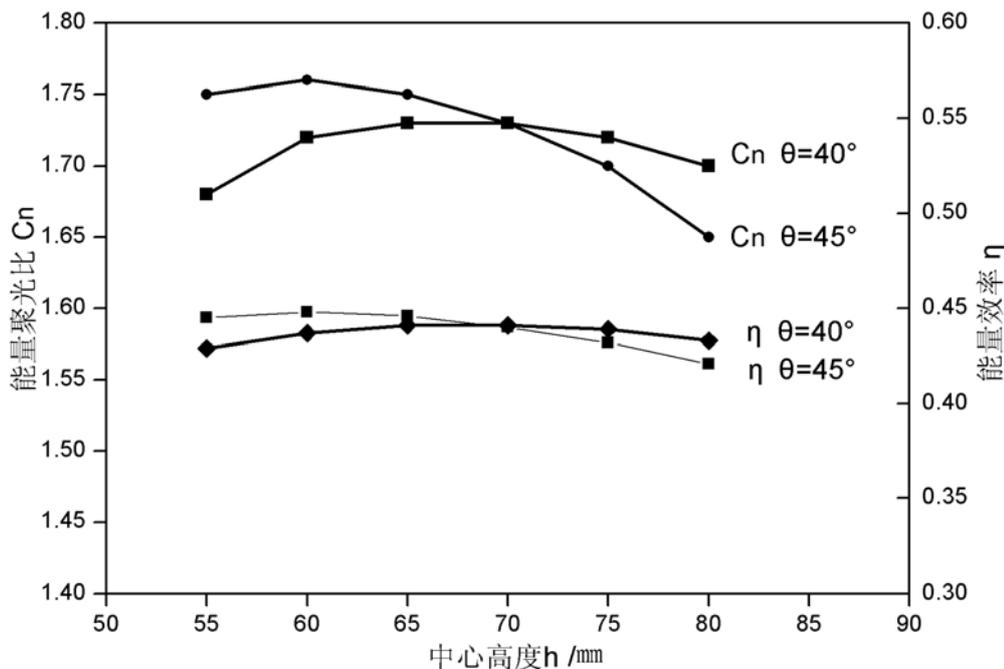


图 4-5 V 形反射器 h 与 C_n 和 η 的关系

为了寻找真正的最佳参数组合, 我们在斜边倾角 θ 为 45° 和中心高度 h 为 60 mm 附近进行了更加精确的模拟计算, θ 以加减 1° 、 h 以加减 1 mm 为梯度进行模拟计算, 比较单根真空管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 。最终我们找到了 V 形反射器的最佳组合为: 当 θ 为 47° , h 为 58 mm 时 V 形反射器达到最佳集热效果, 此时反射器反射板的面积 S 为 0.309 m^2 , 真空管集热器全天接收的太阳辐射总量 $Q_{\text{总}}$ 为 1982.63 kJ, 能量聚光比 C_n 为 1.76, 能量效率 η 为 0.449, 能量面积比 q_s 为 $6.42 \text{ MJ}/\text{m}^2$, 瞬时能量峰值为 118.99 J。

4.2.2 梯形聚光反射器的优化

梯形聚光反射器影响真空管集热器全天接收太阳能量的参数主要是斜边倾角、高度和中心高度, 如图 4-6 所示。

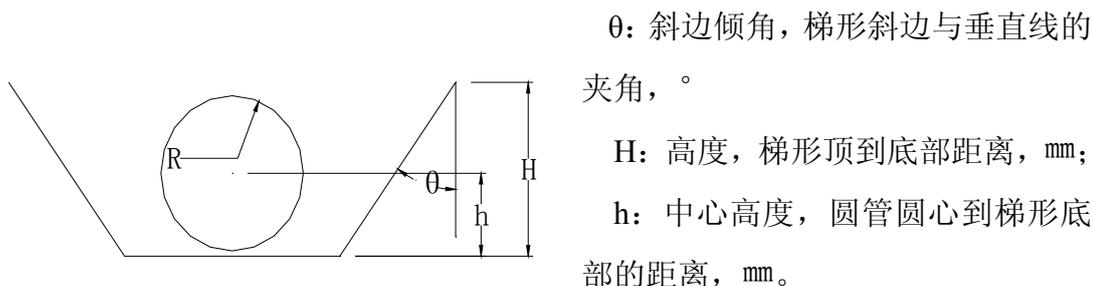


图 4-6 梯形反射器控制参数示意图

1. 梯形斜边倾角 θ 的确定

首先我们设定高度 H 为 60 mm, 中心高度 h 为 35 mm, 然后调节斜边倾角 θ , 从 θ 为 50° 开始, 每次减小 5° 观察各参数变化情况。下面图表给出了模拟计算的结果。

表 4-3 梯形 θ 对各参数的影响

斜边倾角 θ	50°	45°	40°	35°	30°	25°
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1829.45	1911.48	1988.45	2021.77	2002.89	1952.52
C_n	1.63	1.70	1.77	1.80	1.78	1.74
S (m^2)	0.292	0.301	0.310	0.320	0.330	0.341
q_s (MJ/m^2)	6.27	6.35	6.41	6.312	6.07	5.73
η	0.416	0.433	0.451	0.458	0.454	0.442

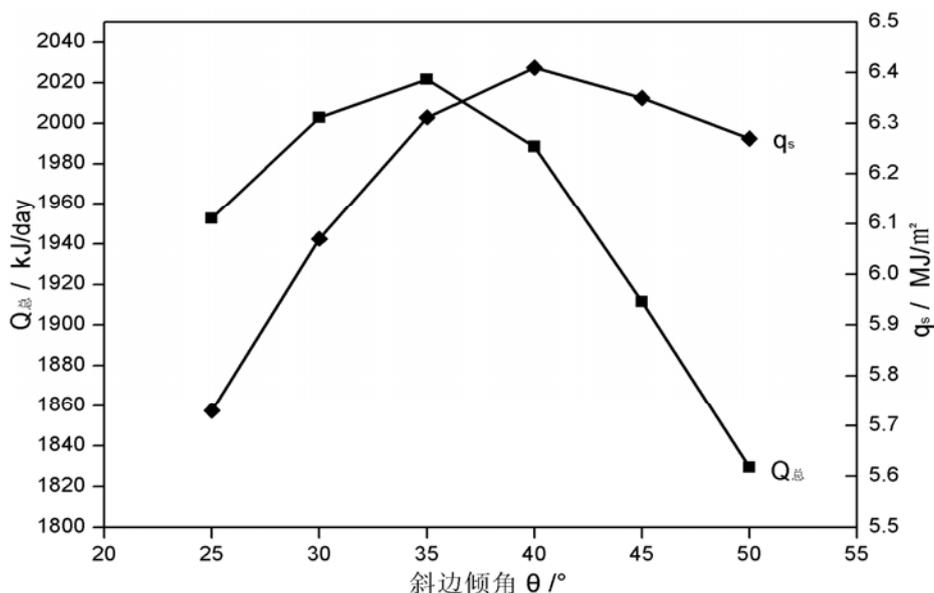
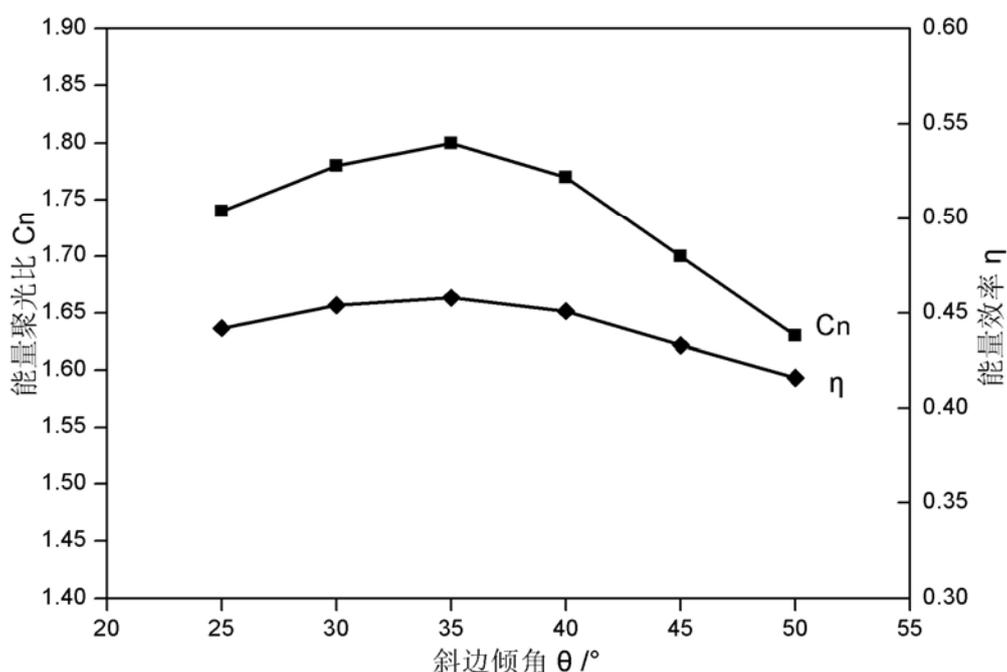


图 4-7 梯形反射器 θ 与 Q_s 的关系

图 4-8 梯形反射器 θ 与 C_n 和 η 的关系

从表 4-3 和图 4-7 和图 4-8 可以看出，梯形反射器随着斜边倾角 θ 的减小接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 先增加，在斜边倾角为 35° 附近达到最大值， θ 再减小时单根真空管的 $Q_{\text{总}}$ 也跟着减小， C_n 和 η 的变化趋势和 $Q_{\text{总}}$ 一致。反射板面积 s 始终是随着斜边倾角的减小而增大，而真空管能量面积比 q_s 先随着斜边倾角 θ 的减小而增大，在 θ 为 40° 附近达到最大值，而后 θ 再减小时 q_s 也减小。

2. 梯形高度 H 的确定

根据以上 θ 的初选，我们设定斜边倾角 θ 分别为 35° ，中心高度 h 为 35 mm，调节高度，从高度 H 为 70 mm 开始，每次减小 5 mm，观察各参数变化情况。下面表格给出了模拟计算的结果。

表 4-4 梯形 H 对各参数的影响

H (mm)	70	65	60	55	50	45
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1984.34	2011.69	2021.77	2017.14	2000.76	1977.40
C_n	1.77	1.79	1.80	1.79	1.78	1.76

S (m^2)	0.336	0.328	0.320	0.312	0.304	0.296
q_s (MJ/m^2)	5.91	6.13	6.32	6.47	6.58	6.68
η	0.450	0.456	0.458	0.457	0.453	0.448

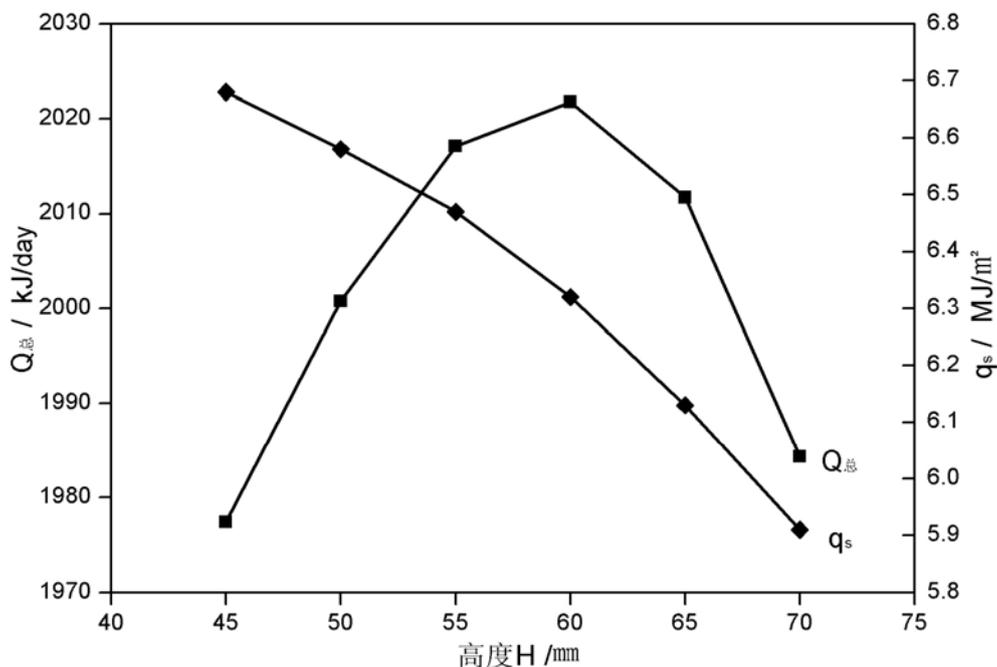


图 4-9 梯形反射器 H 与 $Q_{总}$ 及 q_s 的关系

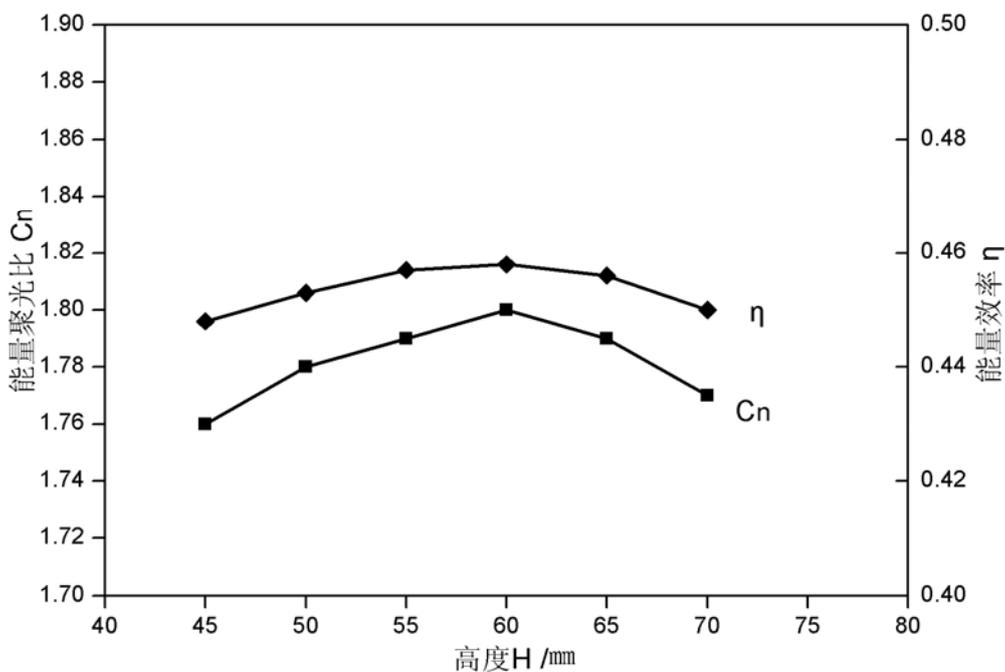


图 4-10 梯形反射器 H 与 C_n 和 η 的关系

从表 4-4 和图 4-9、图 4-10 可以看出, 梯形反射器随着高度 H 的减小单根真空管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 先增加, 在高度为 60 mm 附近达到最大值, H 再减小时 $Q_{\text{总}}$ 也跟着减小, C_n 和 η 的变化趋势始终和 $Q_{\text{总}}$ 保持一致。反射板面积 S 终是随着高度 H 的减小而减小, 而真空管的能量面积比 q_s 始终随着高度的减小而增大。

3. 梯形中心高度 h 的确定

根据以上对 θ 和 H 的初选, 设定斜边倾角 θ 分别为 35° , 高度 H 为 60 mm, 调节中心高度 h , 从 h 为 50 mm 开始, 每次减小 5 mm, 观察参数 C_n 和 η 的变化情况。由于受到真空管外套直径为 29 mm, 限制了中心高度最小只能是 29 mm。下面表格给出了模拟计算的结果。

表 4-5 梯形 h 对 C_n 和 η 的影响

h (mm)	50	45	40	35	30	29
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1945.32	1972.46	1997.45	2021.77	2042.87	2046.80
C_n	1.73	1.76	1.78	1.80	1.82	1.82
η	0.441	0.447	0.453	0.458	0.463	0.464

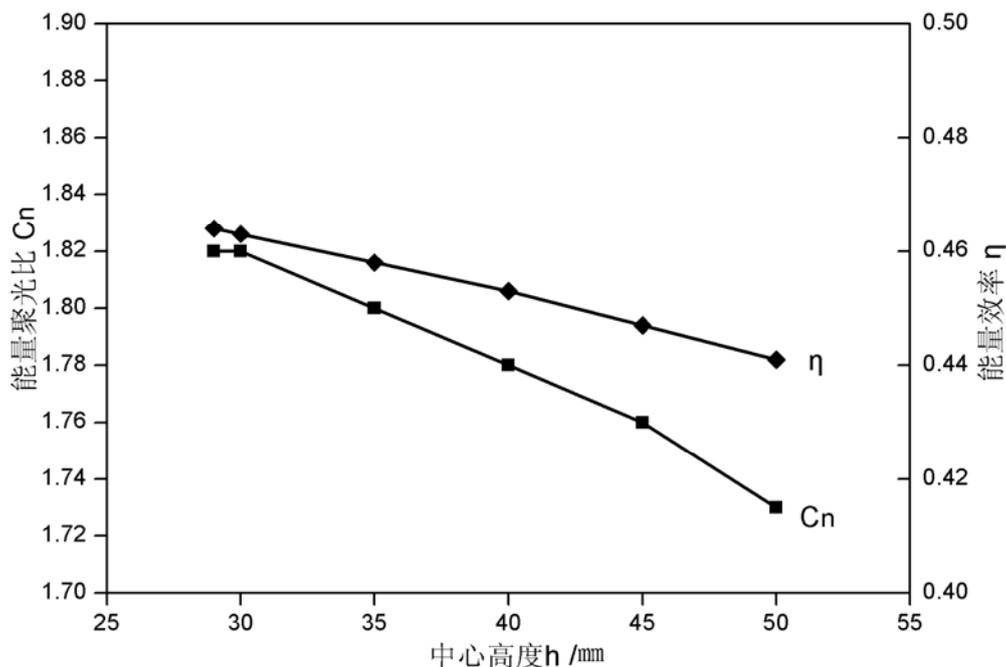


图 4-11 梯形反射器 h 与 C_n 和 η 的关系

从表4-5和图4-11可以看出梯形反射器随着中心高度的减小单根真空管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 以及 C_n 和 η 的值都一直增加，在高度为29 mm时达到最大值。

为了寻找最佳参数组合，我们在斜边倾角 θ 为 35° 、中心高度 h 为30 mm和 H 高度为60 mm附近进行了更加精确的模拟计算， θ 以加减 1° ， H 和 h 以加减1 mm为梯度进行模拟计算，比较单根真空管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 。最终我们找到了梯形反射器的最佳组合为：当 θ 角为 36° ， H 为53 mm， h 为29 mm时梯形反射器的集热效果最佳，此时单个反射器反射板的面积 S 为 0.307 m^2 ，真空管集热器全天接收的太阳辐射总量 $Q_{\text{总}}$ 为2052.39kJ，能量聚光比 C_n 为1.83，能量效率 η 为0.465，能量面积比 q_s 为 6.69 MJ/m^2 ，瞬时能量峰值为117.48J。

4.2.3 圆弧形反射器的优化

圆弧形聚光反射器影响真空管集热器全天接收太阳能量的参数主要是高度和中心高度，如图4-12所示。

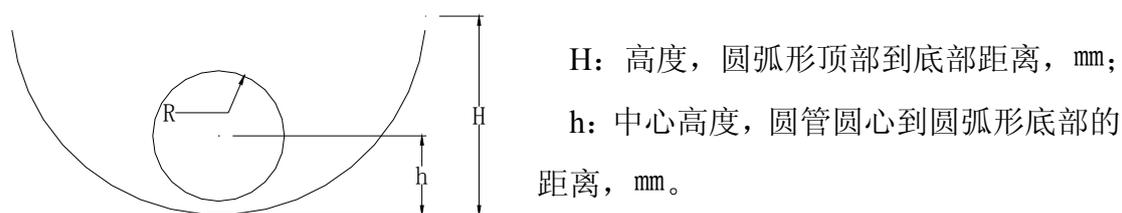


图 4-12 圆弧形反射器控制参数示意图

1. 圆弧形高度 H 的确定

首先设定中心高度为35 mm，调整高度，高度从70 mm开始以5 mm为梯度减小进行模拟计算，模拟计算的结果如表4-6和图4-13、图4-14所示。

表 4-6 圆弧形 H 对各参数的影响

H (mm)	70	65	60	55	50	45
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	2109.43	2124.43	2133.44	2128.29	2114.91	2096.22
C_n	1.88	1.89	1.90	1.89	1.88	1.87
S (m^2)	0.339	0.325	0.312	0.299	0.288	0.277
q_s (MJ/m^2)	6.22	6.54	6.84	7.12	7.34	7.57

η	0.478	0.481	0.483	0.482	0.479	0.475
--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

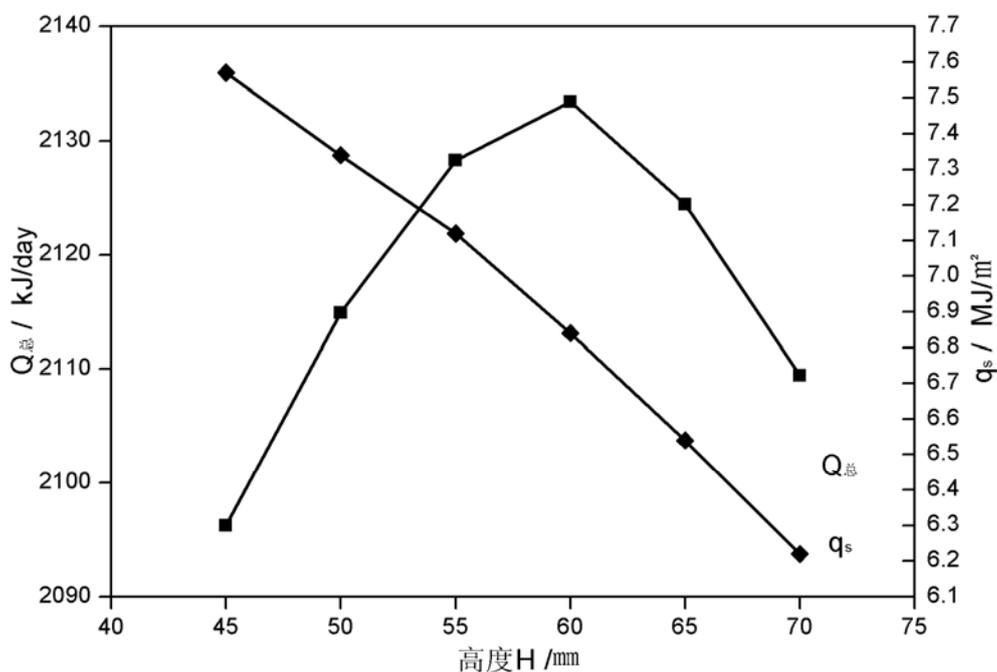


图 4-13 圆弧形 H 与 Q_s 的关系

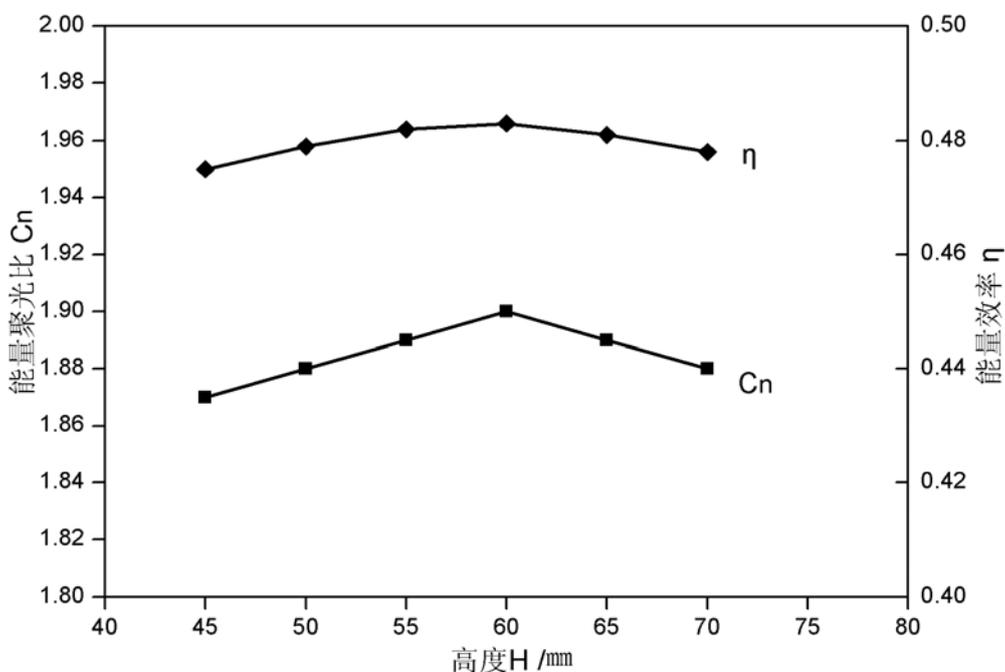


图 4-14 圆弧形反射器 H 与 C_n 和 η 的关系

从表 4-6 和图 4-13、图 4-14 可以看出，圆弧形反射器随着高度 H 的减小单

根真空管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 、 C_n 和 η 都是先增加，在 H 为 60 mm 附近达到最大值， H 再减小时 $Q_{\text{总}}$ 、 C_n 和 η 也跟着减小。反射板面积 S 始终是随着高度 H 的减小而减小，而真空管的能量面积比 q_s 始终随着 H 的减小而增大。

2. 圆弧形中心高度 h 的确定

设定高度为 60 mm，调整中心高度，中心高度从 50 mm 开始以 5 mm 为梯度减小进行模拟计算。由于受到真空管外套直径为 29 mm，限制了中心高度最小只能是 29 mm。表 4-7 和图 4-15 给出了模拟计算的结果。

表 4-7 圆弧形 h 对 C_n 和 η 的影响

h (mm)	50	45	40	35	30	29
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1827.46	1960.92	2066.11	2133.44	2139.03	2141.64
C_n	1.63	1.74	1.84	1.90	1.90	1.91
η	0.414	0.444	0.468	0.483	0.485	0.485

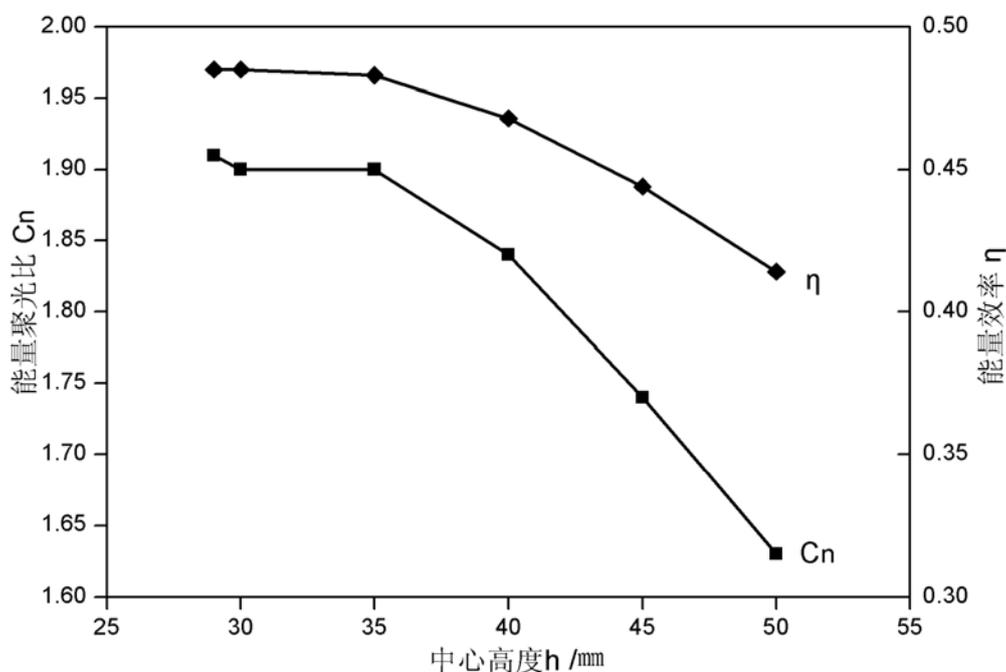


图 4-15 圆弧形反射器 h 与 C_n 和 η 的关系

从表 4-7 和图 4-15 可以看出圆弧形反射器随着中心高度 h 的减小单根真空

管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 、 C_n 和 η 都一直增加，在中心高度 h 为 29 mm 时达到最大值。

为了寻找最佳参数组合，我们在中心高度为 30 mm 和高度为 60 mm 附近进行了更加精确的模拟计算，高度和中心高度以加减 1 mm 为梯度进行模拟计算，比较单根真空管接收总能量。最终我们找到了圆弧形反射器的最佳组合为：当高度 H 为 58 mm，中心高度 h 为 29 mm 时圆弧形反射器的集热效果最佳，此时单个反射器反射板的面积 S 为 0.307 m²，真空管集热器全天接收的太阳辐射总量 $Q_{\text{总}}$ 为 2142.66 kJ，能量聚光比 C_n 为 1.91，能量效率 η 为 0.486，能量面积比 q_s 为 6.95 MJ/m²，瞬时能量峰值为 93.60 J。

4.2.4 抛物形反射器的优化

抛物形聚光反射器影响真空管集热器全天接收太阳能量的参数主要是抛物线的焦距和中心高度，如图 4-16 所示。

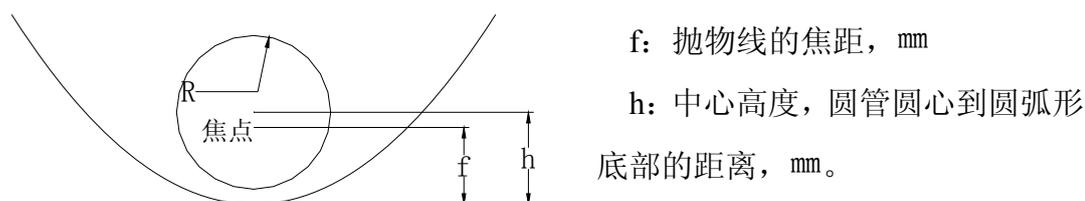


图 4-16 抛物形反射器控制参数示意图

1. 抛物形焦距 f 的确定

首先设定中心高度 h 为 35 mm，调整抛物线焦距 f ，抛物线焦距 f 从接收圆管半径的 1.5 倍即 36 mm 开始，以接收圆管半径的 0.1 倍即 2.4 mm 为梯度减小进行模拟计算，模拟计算的结果如表 4-8 和图 4-17、图 4-18 所示。

表 4-8 抛物形 f 对各参数的影响

焦距 f (mm)	36	33.6	31.2	28.8	26.4
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	2059.07	2065.78	2068.03	2066.30	2058.59
C_n	1.83	1.84	1.84	1.84	1.83
S (m ²)	0.263	0.267	0.273	0.280	0.289
q_s (MJ/m ²)	7.83	7.74	7.58	7.38	7.12

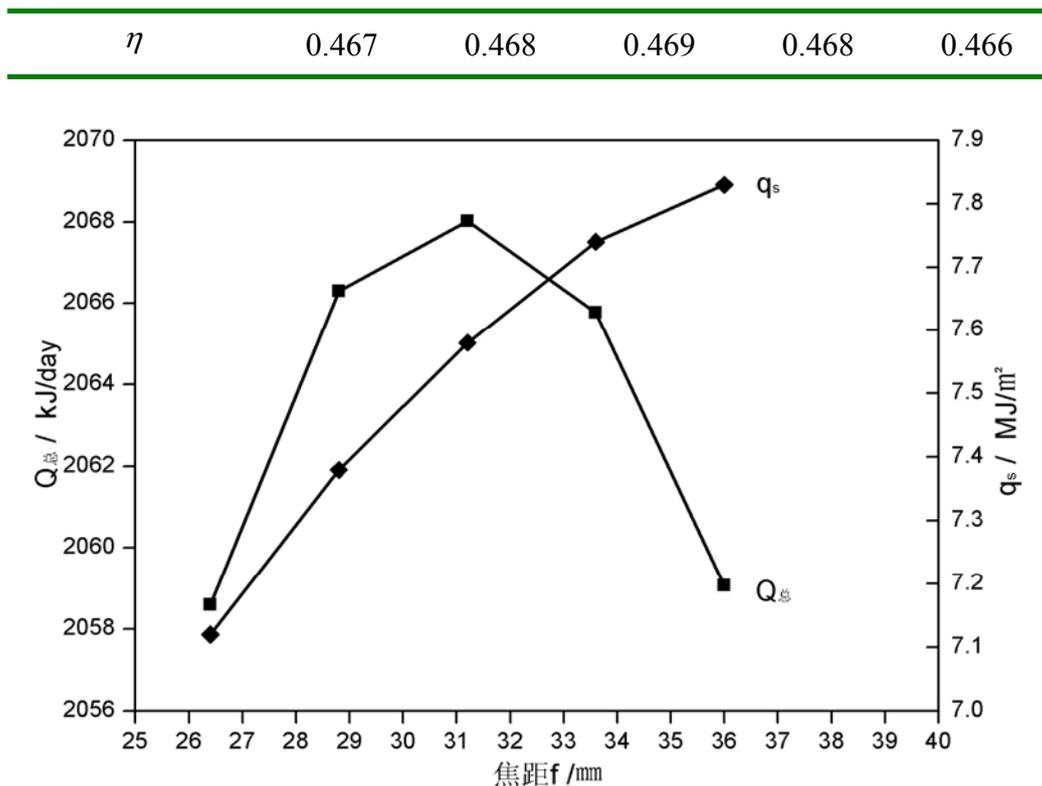


图 4-17 抛物形反射器 f 与 Q_s 的关系

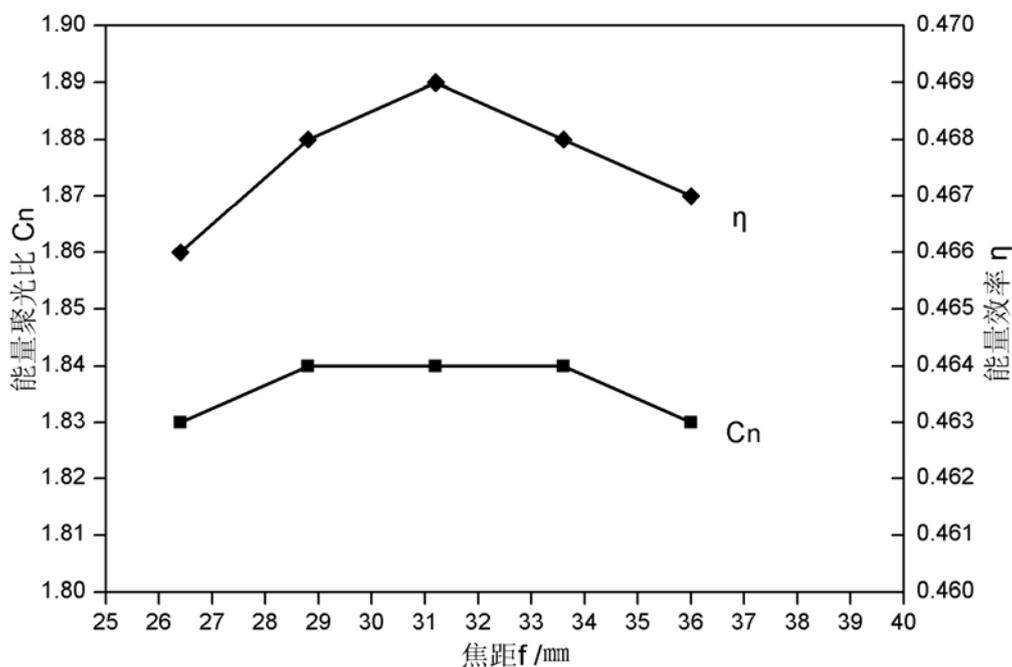


图 4-18 抛物形反射器 f 与 C_n 和 η 的关系

从表 4-8 和图 4-17、图 4-18 可以看出，抛物形反射器随着抛物线焦距 f 减小

单根真空管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 、 C_n 和 η 都是先增加，在 f 为 31.2 mm 附近达到最大值， f 再减小时单根真空管的 $Q_{\text{总}}$ 、 C_n 和 η 也跟着减小。反射板面积 S 始终是随着 f 的减小而增大，而真空管的能量面积比 q_s 始终随着 f 的减小而减小。

2. 抛物形中心高度 h 的确定

设定抛物线焦距 f 为 31.2 mm，调整中心高度 h ，中心高度 h 从 40 mm 开始以 2 mm 为梯度减小进行模拟计算。由于受到真空管外套直径为 29 mm，限制了 h 最小值为 29 mm。表 4-6 和图 4-19 给出了模拟计算的结果。

表 4-6 抛物形 h 对 C_n 和 η 的影响

h (mm)	40	38	36	34	32	30
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	2023.79	2045.35	2062.50	2072.71	2076.71	2071.91
C_n	1.80	1.82	1.84	1.84	1.85	1.84
η	0.459	0.463	0.467	0.470	0.471	0.469

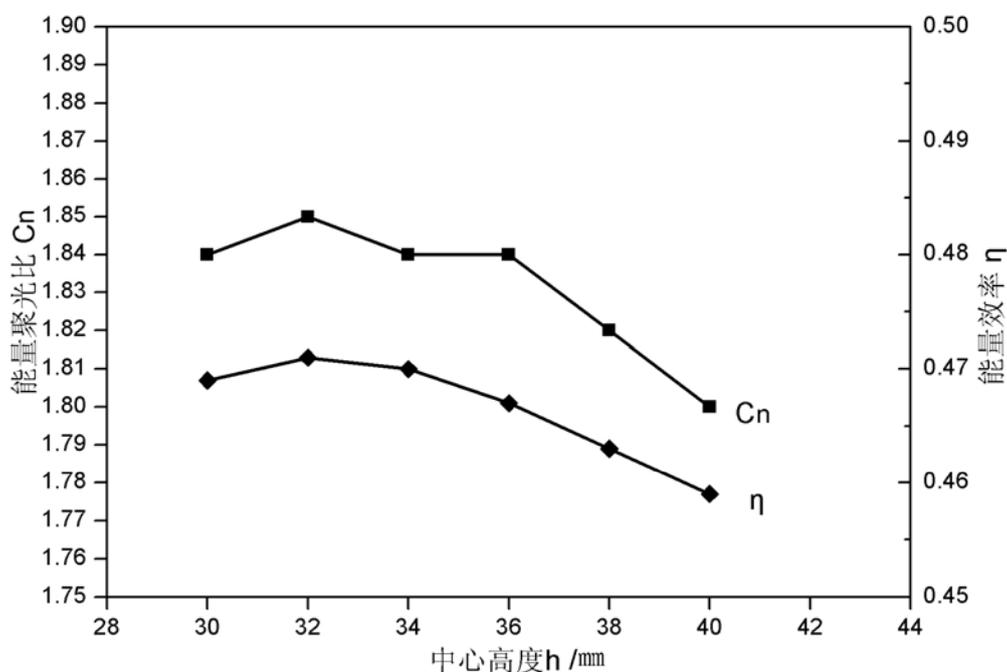


图 4-19 抛物形反射器 h 与 C_n 和 η 的关系

从表 4-6 和图 4-19 可以看出抛物形反射器随着中心高度 h 的减小单根真空

管接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 、 C_n 和 η 都是先增加后减小，在中心高度 h 为 32 mm 附近达到最大值。

为了寻找最佳参数组合，我们在中心高度为 32 mm 和抛物线焦距为 31.2 mm 附近进行了更加精确的模拟计算，中心高度以加减 1 mm、抛物线焦距以 0.1 mm 为梯度进行模拟计算，比较单根真空管接收总能量。最终找到了抛物形反射器的最佳组合为：当焦距 F 为 30.5 mm，中心高度 h 为 32 mm 时抛物形反射器的集热效果最佳，此时单个反射器反射板的面积 S 为 0.275 m²，真空管集热器全天接收的太阳辐射总量 $Q_{\text{总}}$ 为 2077.87 kJ，能量聚光比 C_n 为 1.85，能量效率 η 为 0.471，能量面积比 q_s 为 7.56 MJ/m²，瞬时能量峰值为 132.04 J。

4.2.5 渐开线形反射器的模拟计算

一旦接收圆管的半径确定渐开线反射器的形状就确定。在 4.1 给定的参数条件下渐开线形反射器单个器反射板的面积 S 为 0.355 m²，真空管集热器全天接收的太阳辐射总量 $Q_{\text{总}}$ 为 2414.16 kJ，能量聚光比 C_n 为 2.15，能量效率 η 为 0.547，能量面积比 q_s 为 6.80 MJ/m²，瞬时能量峰值为 122.56 J。

以上得出的五种形状的最佳组合形式是经过反复的模拟计算得出来的，结论基本正确，但是如果再进一步微调参数的话可能得到更加精确的结果。上面斜边倾角 θ 的大小对于不同的圆管半径都适应，而高度 H 、中心高度 h 和抛物线的焦距 f 如果半径改变参数需要进一步调试，不过可以根据以上得的结论缩小参数调节范围。

4.2.6 各种形状最佳组合对比

为了便于各种形状反射器的比较，表 4-7 和图 4-20、图 4-21、图 4-20 分别给出上面得出的五种形状最佳形式时真空管集热器全天接收太阳辐射的情况、反射板面积 S 、集热器全天得热总量 $Q_{\text{总}}$ 和能量面积比 q_s 、能量峰值 $Q_{\text{峰}}$ 以及能量聚光比 C_n 、能量效率 η 的情况。

表 4-7 各形状最佳反射器各参数的比较

反射器形状	V 形	梯形	圆弧形	抛物形	渐开线形
-------	-----	----	-----	-----	------

$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1982.63	2052.39	2142.66	2077.87	2414.16
C_n	1.76	1.83	1.91	1.85	2.15
S (m ²)	0.309	0.307	0.307	0.275	0.355
q_s (MJ/m ²)	6.42	6.69	6.95	7.56	6.80
η	0.449	0.465	0.486	0.471	0.547
$Q_{\text{峰}}$ (J)	118.99	117.48	93.60	132.04	122.56

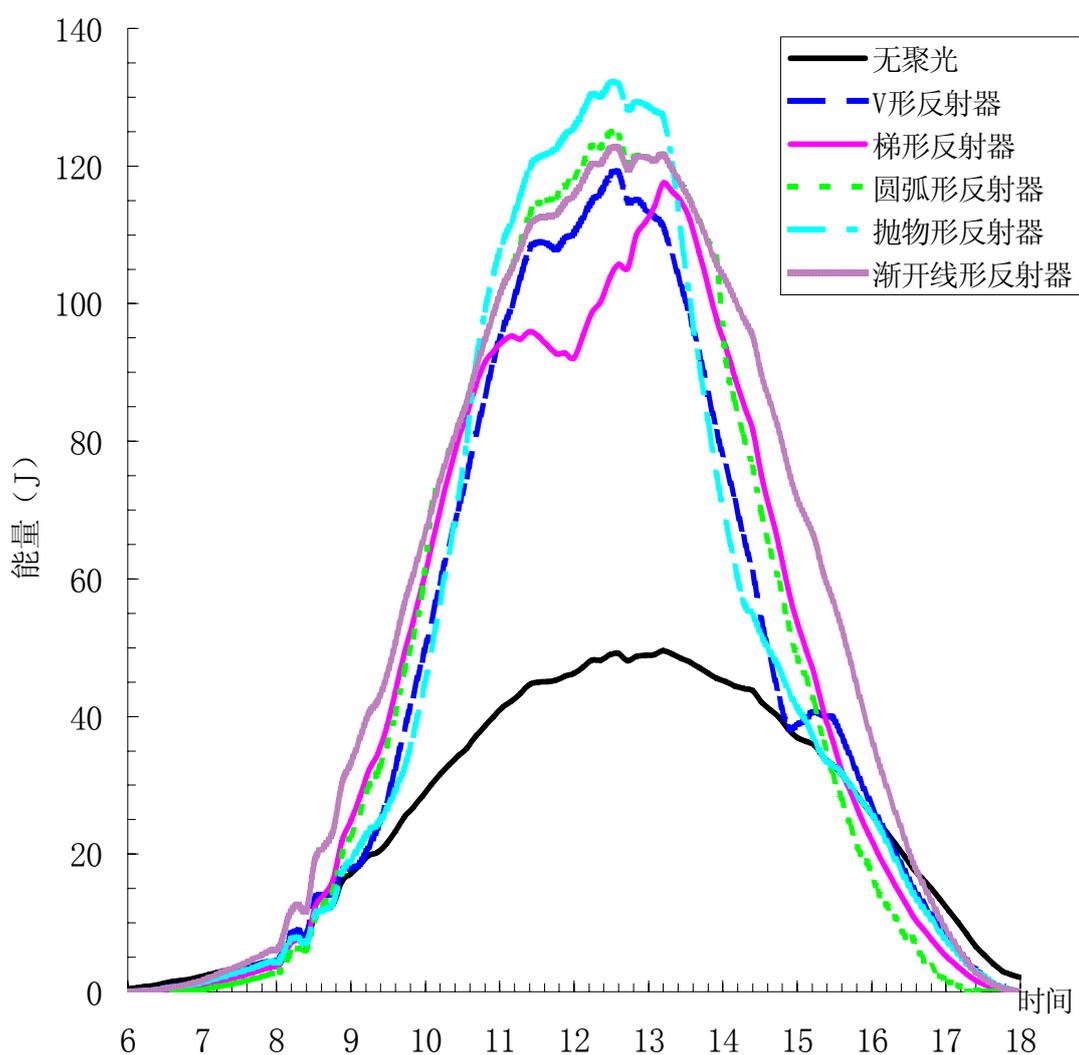


图 4-20 各形状最佳反射器全天接收能量情况

通过表 4-7 和图 4-21 对各个形状单个反射器反光板用材进行比较，抛物形反射器是最省材料的，梯形反射器和圆弧形反射器单个反射器反光板用材相同，耗材次之，V 形反射器单个反射器反光板用材比梯形反射器和圆弧形反射器稍

多，而渐开线形反射器用材比其他几种形状都多得多，是几种发射器中单个反射器反光板用材最多的。

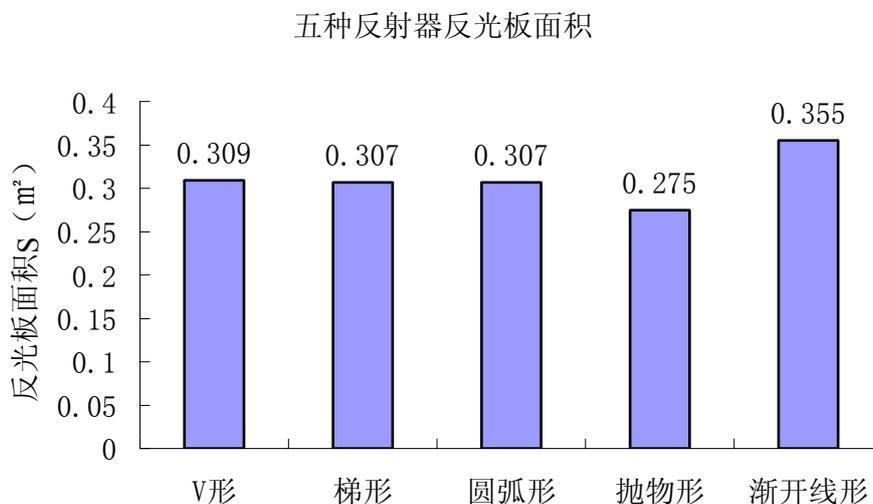


图 4-21 各形状最佳反射器反光板面积 S 的比较

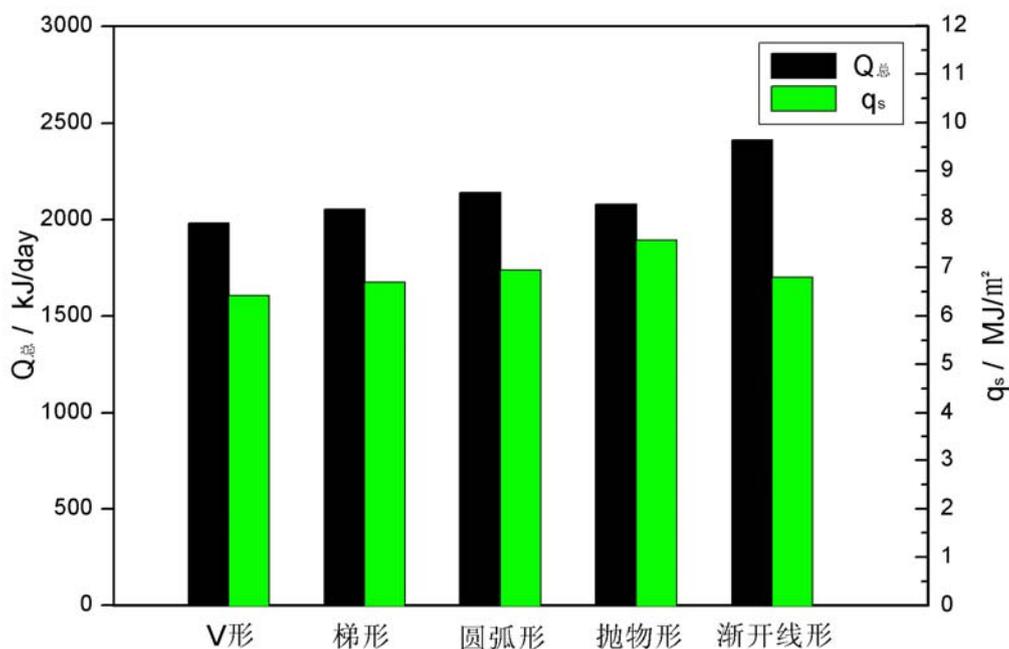


图 4-22 各形状最佳反射器 $Q_{\text{总}}$ 和 q_s 的比较

从表 4-7 和图 4-22 可以看出，对单个反射器接收的总能量 $Q_{\text{总}}$ 来讲，渐开线形反射器最多，圆弧形反射器第二多，抛物形反射器次之，梯形反射器再次，V 形反射器接收能量最少。而对于 q_s 值来讲，抛物形反射器效果最佳，圆弧形反

射器第二，渐开线形反射器次之，梯形反射器再次，V形反射器最差。

通过表 4-7 和图 4-23 对各种形状单个反射器的能量聚光比 C_n 和能量效率 η 进行比较，可以看出 C_n 和 η 的比较结果和 $Q_{\text{总}}$ 一致：渐开线形反射器最佳，圆弧形反射器第二，抛物形反射器次之，梯形反射器再次，V形反射器最差。

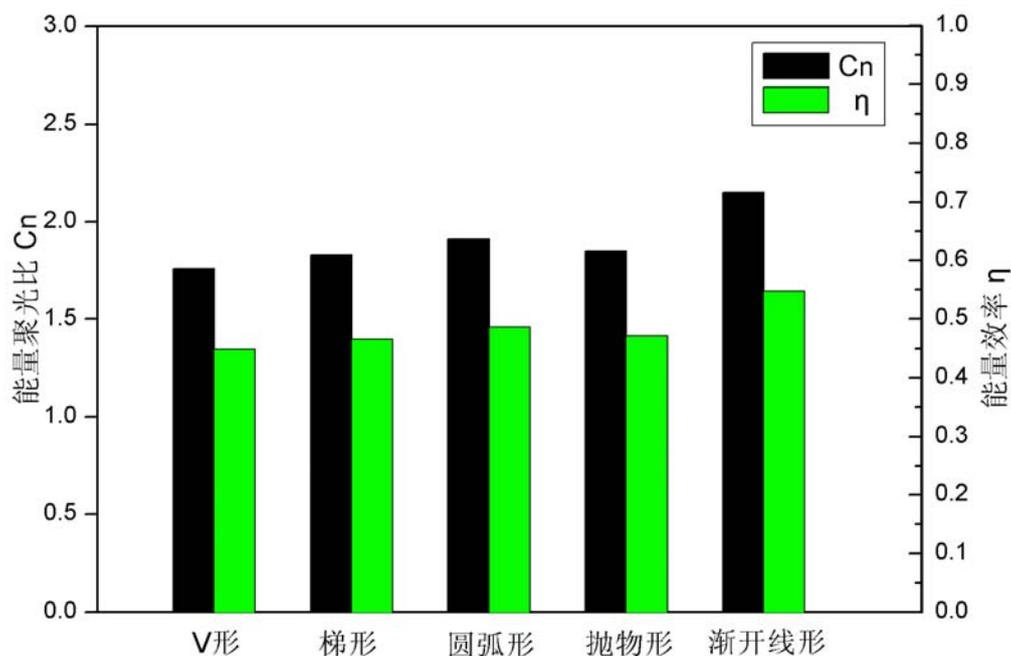


图 4-23 各形状最佳反射器 C_n 和 η 的比较

综合考虑在南北摆放的情况下反光板用材 S 和集热器全天接收的太阳总能量 $Q_{\text{总}}$ 可以看出，以梯形为参照，V形用材比梯形稍多，但集热器全天接收的太阳总能量却稍少一些；圆弧形用材和梯形相当，集热器全天接收的太阳总能量却多一些；抛物形用材比梯形相对少一些，是几个形状用材最少的，而集热器全天接收的太阳总能量却比梯形稍多；渐开线形用材和集热器全天接收的太阳总能量都比梯形都要多很多。如果反光材料占整个聚光反射器造价比重比较小，那么只考虑全天接收总能量 $Q_{\text{总}}$ ，总体效果是渐开线形最佳，圆弧形次之，抛物线形再次，梯形再次，V形效果最差。如果反光材料占整个聚光反射器造价比重比较大，超过一半多，那么我们应该以面积能量比 q_s 衡量，那么总体来看是抛物形最优，

圆弧形较优，渐开线形次之，梯形再次，V形最差。所以相对与渐开线形，抛物线形和圆弧形反射器在节省材料方面还是有一定优势的。

4.3 东西方向摆放各反射器参数的优化

根据以上介绍的各形状反射器南北摆放的优化方法对各形状反射器东西摆放的情况进行优化模拟。参数设定情况不变，假定正午阳光角度（ 90° - 正午太阳高度角）与摆放角度一致。优化模拟的结果如下：

- ① V形反射器的最佳参数组合为： θ 角为 42° ， h 为 54 mm时。
- ② 在相同的 θ 角情况下梯形反射器无论怎么调整，接收总能量都比V形反射器的该 θ 角的最佳组合少。经过优化得梯形反射器的最佳参数组合为：当 θ 角为 42° ， H 为 80 mm， h 为 51 mm时梯形反射器的集热效果最佳。
- ③ 圆弧形反射器的最佳参数组合为： H 为 35 mm， h 为 29 mm。
- ④ 抛物形反射器的最佳参数组合为： f 为 30.5 mm， h 为 33 mm。

图 4-24 和表 4-8 分别给出 2005 年 12 月 20 日东西方向摆放接收能量情况和东西摆放各形状最佳组合反射器的参数情况。图 4-25 和图 4-26 给出了东西摆放和南北方向摆放的参数比较。

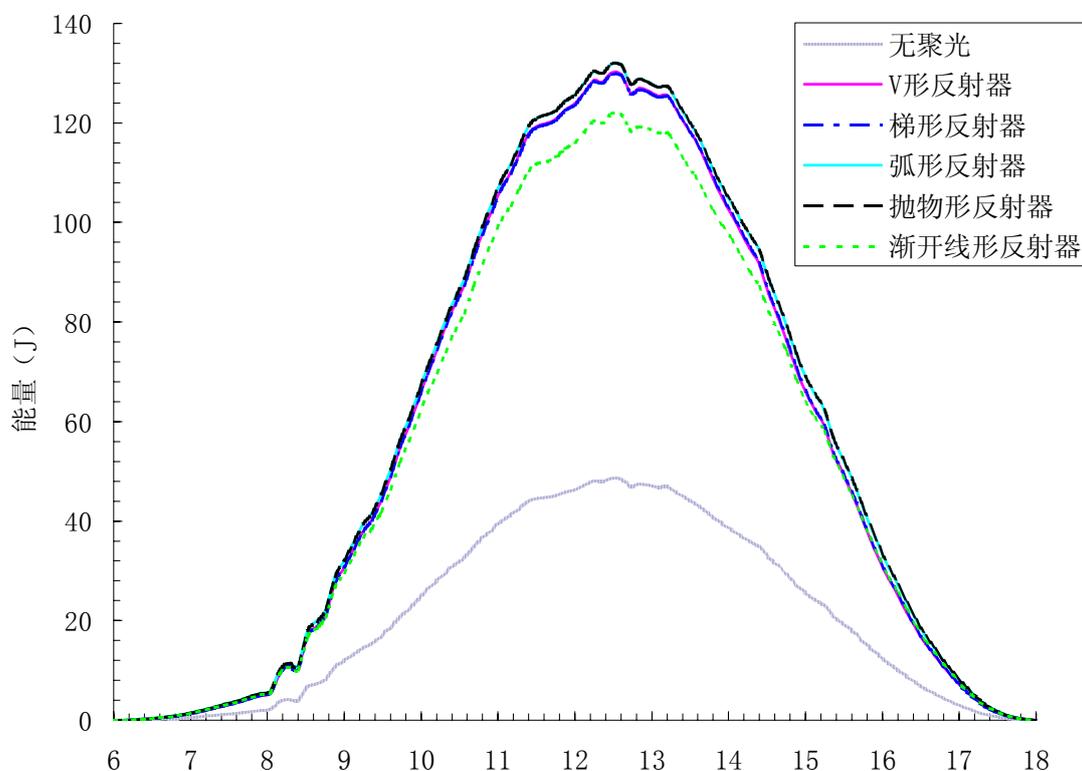
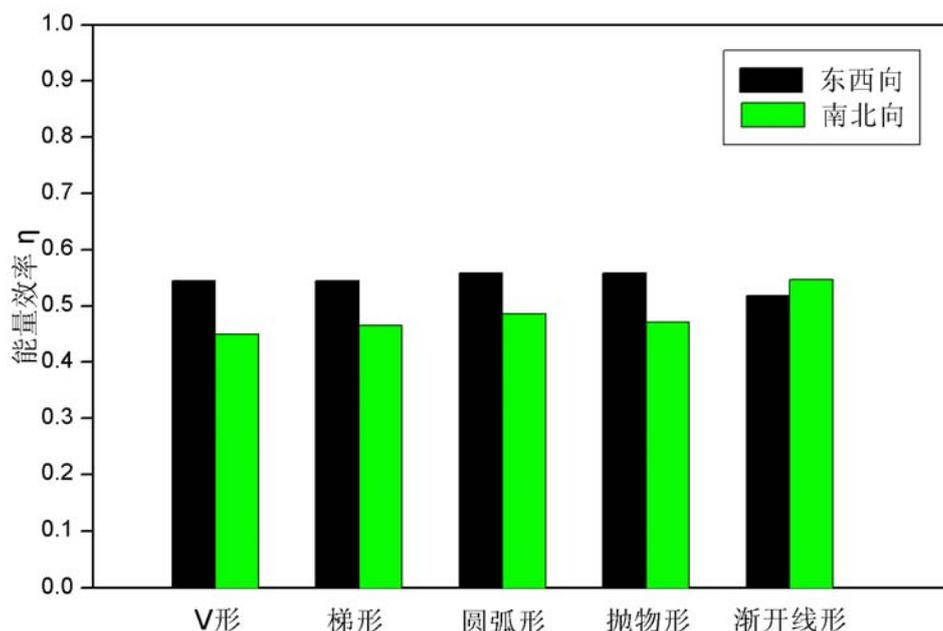


图 4-24 2005 年 12 月 20 日东西方向摆放接收能量情况

根据图 4-24 各聚光反射器全天接收太阳能量来看，东西方向摆放的反射器形状不会象南北方向摆放那样受自身反射形状有那么大的影响，对太阳高度小的能量接收不会有阻挡。几个形状的反射器全天接收能量总的趋势相同，但是因为反射器形状对光线的反射效果不同而使接收的总能量有一定差别。

表 4-8 东西摆放各形状最佳反射器各参数的比较

反射器形状	V 形	梯形	圆弧形	抛物形	渐开线形
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	2406.78	2406.56	2468.07	2468.25	2285.94
C_n	2.14	2.14	2.20	2.20	2.03
S (m ²)	0.338	0.333	0.257	0.275	0.355
q_s (MJ/m ²)	7.12	7.23	9.60	8.98	6.44
η	0.545	0.545	0.559	0.559	0.518
$Q_{\text{峰}}$ (J)	130.05	129.77	131.85	131.88	121.98

图 4-25 东西、南北摆放的 η 的比较

根据表 4-8 和图 4-25、图 4-26 可以看出，分析对比东西摆放的几种形状的最佳组合。从接收能量总量 $Q_{\text{总}}$ 和能量聚光比 C_n 和能量效率 η 来看，抛物形反射器效果最佳，圆弧形稍差居其后，V 形次之，梯形再次，而渐开线形是接收总能量最少的。而考虑的反光板材耗 S ，圆弧形是最省材的，抛物形较省材，梯形次

之，V形再次，渐开线形是最耗材的。综合考虑能量面积比 q_s ，圆弧形反射器效果最佳，抛物形较好，梯形次之，V形再次，渐开线形效果最差。

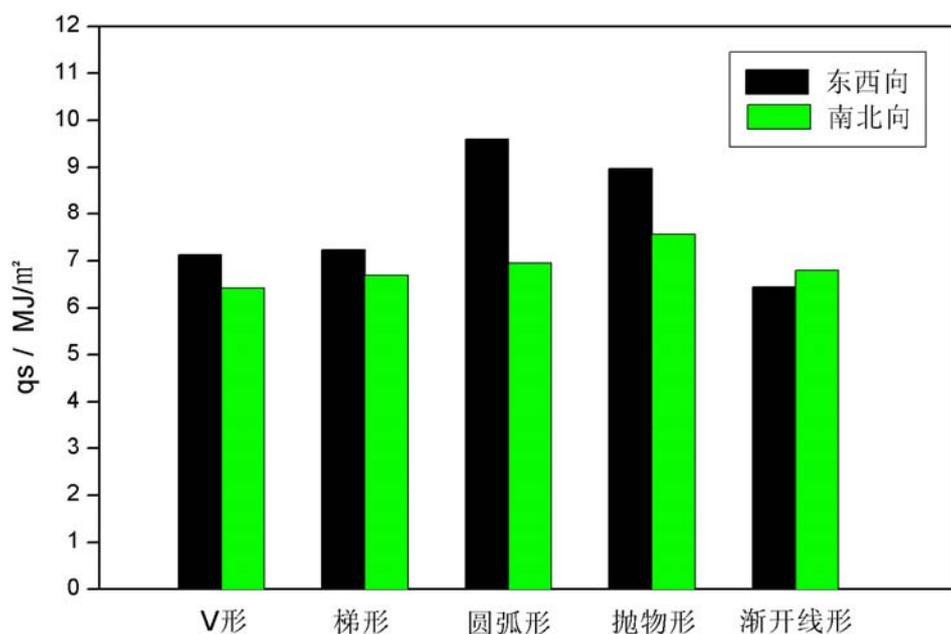


图 4-26 东西、南北摆放的 q_s 的比较

结合表 4-7、表 4-8 和图 4-25、图 4-26，以各自的最佳参数组合形式比较，综合各结果参数考虑，V形、梯形、圆弧形和抛物形反射器都是东西摆放效果佳，而渐开线形反射器南北摆放效果佳。把各自聚光比 $C=1$ 的最佳组合效果的反射器进行比较，最后得出：圆弧形反射器效果最佳，抛物形较好，梯形次之，V形再次，渐开线形效果最差，尤其圆弧形和抛物形反射器效果非常理想，任何结论参数都比渐开线形效果好。

在实际应用中，可根据需要设计为东西方向摆放或南北方向摆放。东西方向摆放相对南北方向摆放受季节性影响比较明显，应用时可以选择进行季节性的调整摆放倾斜角或者根据当地纬度设定为一固定的摆放倾斜角。

第五章 实验部分

第四章通过模拟计算得出了五种聚光反射器的最佳组合形式,而且得出了各自反射板面积和在给定的参数和太阳辐射强度下全天接收的太阳能量。这一章将介绍根据第四章设计的几种反射器选择它们的最佳形态和最佳组合位置关系进行实地实验。对于南北摆放的几种形状,除了效果不太理想的 V 形反射器,其余形状的反射器我们都根据模拟计算得出的最佳形式制作了反射器进行实验,而对于东西摆放的几种形状的最佳组合形式由于时间和天气等因素的关系没能进行实验。

5.1 实验材料

5.1.1 真空管集热器

真空管集热器为 $\phi 58 \times 1500$ mm 的真空管,真空管的外玻璃管外径为 58 mm,内管吸收管外径为 48 mm,平均热损系数小于 $0.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,所以上面的参数 R 为 24 mm, L 为 1500 mm。

5.1.2 反射材料的选择

为了加工的方便我们采用了两种不同的反射材料。一种是由上海安美特铝业提供的由德国生产的 850 – Solar。850 – Solar 采用陶瓷作为反射面,对可见光辐射和热辐射的反射效率高达 85%,同时其具有较轻的质量、防破碎、易成型和可配合标准工具处理等优点。它是太阳能聚光系统的专业的配套反射材料。这种材料相对比较厚,手工加工成弧线比较困难,而做一定角度的弯折相对比较容易些。另一种反光材料是建材市场购买的进口 PC 银镜,价格为 150RMB/张,单张尺寸为 $906 \text{ mm} \times 1848 \text{ mm}$,这种材料比较薄,比较容易加工出弧线,而很难折出一定角度。

下面给出了由公司提供的 850 – Solar 的反射性能测试结果如表 5-1 所示,此外我们用日立公司生产的 UV4100 紫外可见近红外分光光度计测试出来的 850 – Solar 和 PC 银镜在阳光波长为 350~2500nm 的反射比如图 5-1 和图 5-2 所示。根据图 5-1 和表 5-1 综合得出 850 – Solar 的反射比为 0.85 左右,根据图 5-2 得出 PC 银镜的反射比为 0.8 左右。

表 5-1 850-Solar 的反射比 (公司提供)

反射比	阳光来源	标准	数据
全反射比	可见分光 V (1)	DIN5036-3	85%
漫反射比	可见分光 V (1)	DIN5036-3	12%

850-Solar 反射性能

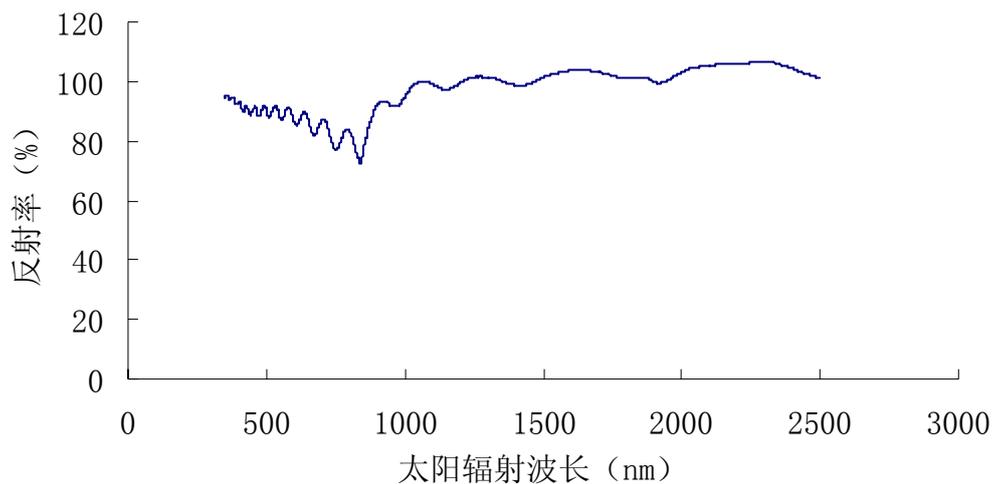


图 5-1 850-Solar 在太阳辐射波长 350~2500nm 的反射比曲线

PC 银镜反射率

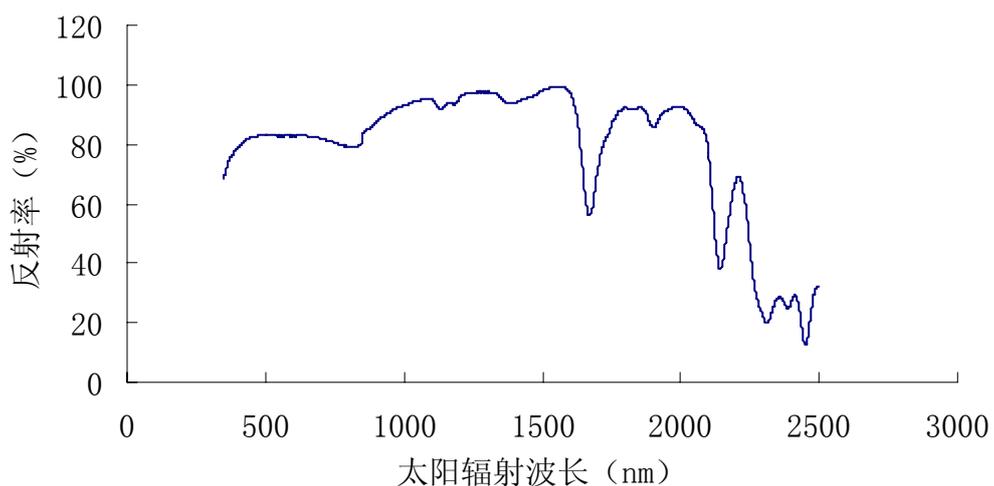


图 5-2 PC 银镜在太阳辐射波长 350~2500nm 的反射比曲线

5.2 实验设备的加工

为了便于定型我们选用厚夹板做几个反射板的支撑板，然后下面和两边用木条固定。首先我们用 CAD 绘制出各个反射器的形状及支撑夹板的高度和宽度，严格按尺寸用硬纸打印出来，剪切出形状，再在夹板上用墨线量好尺寸描好形状进行支撑板切割。所有支撑板安装成型之后，把按尺寸切割好的反射板压出形状之后固定在支撑板上，然后按真空管与反射板之间的距离位置把真空管安装上去即成。聚光反射器加工为单管分体式。根据反射器形状和材料特点，我们选用 850 – Solar 做梯形反射器，而用进口 PC 银镜做圆弧形、抛物线形和渐开线形反射器。

图 5-3 是我们加工成型的几种反射器实验装配图。



图 5-3 反射器实验装配图

5.3 实验

空晒实验是目前对各种类型集热器性能分析的常用的实验方法，目的是检验集热器的热性能，其检验结果对衡量集热器的热性能具有很强的参考价值。例如，真空管产品的出厂性能参数也有这一项，一般为 $180^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 左右。首先我们用半天的时间对各种形状的聚光反射器的所用真空管进行了单管空晒实验，目的是

测量各个单管真空管的热性能,以便实验参考。单管闷晒实验结果如表 5-2 所示,结果表明几根真空管的热性能差别很小,在下一步的实验中我们将忽略其影响。之后我们随机分配真空管对进行各种形状聚光反射器的闷晒实验,抛物形反射器用 1#管,圆弧形反射器用 2#,无聚光形用 3#管,渐开线形反射器用 4#管,梯形反射器用 5#管。

表 5-2 单管空晒实验结果

温度 (°C)	1#	2#	3#	4#	5#
时间					
8: 00	31.1	31.1	31.1	31.1	31.1
8: 30	88	89.5	87	91	93.5
9: 00	124	121	119	122	120
9: 30	130	129	126	125	127
10: 00	139	139	135.5	134.5	134
10: 32	160	162	158	159	157
11: 00	175	177	172.5	173	171.5

5.3.1 设备的安装

聚光反射器已经加工成型,为了做空晒实验必须把真空管的口子塞住,我们选用气密性较好的橡胶塞。为了防止空气因吸收太阳热量在温度升高的同时气压也升高而把橡胶塞冲出,设计在橡胶塞上开一个小的排气孔。为了测量真空管内部空气的温度,设计在橡胶塞上打个孔插入温度计,选择的温度计的量程为 0~300°C 的。参看图 5-3。

设备已经准备就绪,设备为单个分体的,比较轻巧,搬运比较方便。选择晴朗的天气我们把设备安放在实验楼的天台上,安放时南北方向安放,向南方倾斜一小角度,倾斜角度为 8°。

5.3.2 实验测量

我们选择比较晴朗的 2006 年 5 月 14 日进行了实验。下面是测量实验数据。

表 5-3 给出了 2006 年 5 月 14 日太阳辐射数据由广州市气象卫星站提供,提供的数据测量时间范围为 6: 10~17: 50,每隔十分钟的数据。图 5-4 是根据提供的数据绘制的 2006 年 5 月 14 日太阳辐射曲线图。

表 5-3 2006 年 5 月 14 日太阳辐射数据 (由广州市气象卫星地面站提供)

时 分	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
00		501	627	712	632	840	868	858	827	747	634	445
10	241	530	674	664	371	826	870	855	816	736	615	391
20	315	549	680	682	789	857	859	840	795	733	595	352
30	371	582	695	294	810	857	862	852	785	705	563	294
40	427	605	715	173	830	873	866	847	782	679	516	233
50	467	628	709	341	837	870	872	837	765	651	485	177

5月14日太阳辐射强度

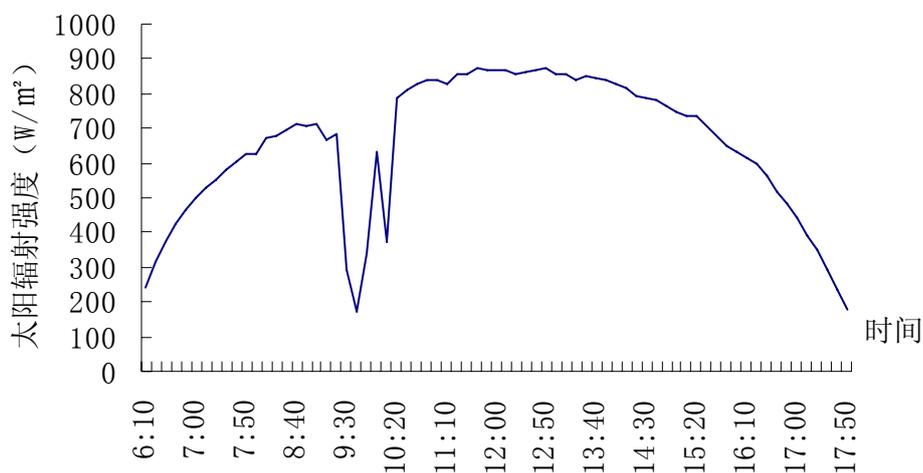


图 5-4 2006 年 5 月 14 日太阳辐射曲线图

2006 年 5 月 14 日实验设备于 7:40 安放完毕, 当时气温为 $21.6^{\circ}C$, 各种反射器及单根真空管在无聚光情况下测量的温度数据如表 5-4, 图 5-5 是根据数据绘制的温度曲线图。

表 5-4 2006 年 5 月 14 日实验测量的温度数据 ($^{\circ}C$)

时间	抛物形	渐开线形	圆弧形	梯形	无聚光	气温
8:20	95.5	122	85	105	107	23.2
9:00	132.5	195.5	133	149	146.5	24.4
9:30	146.5	201	159	178	161	25.1

10:00	163	236	191	207	172	25.4
10:30	168	212	195	197	161	26.4
11:10	210.5	234	248.5	236.5	179	27.2
11:40	227	235	261	243	184	27.2
12:24	236	233	262	241	188	28.1
13:00	235	236	261	241	189	29.4
13:30	231	238	260	240	187.5	29.1
14:00	220.5	239	258	238.5	185	28.5
14:40	197	233	236	221	174	28.5
15:20	150	226	209	196	174	28.7
16:00	141	201	173	169	150.5	28.7
16:30	130.5	183	151	147	123	28.4
17:05	120	162	130	120	112	28.2

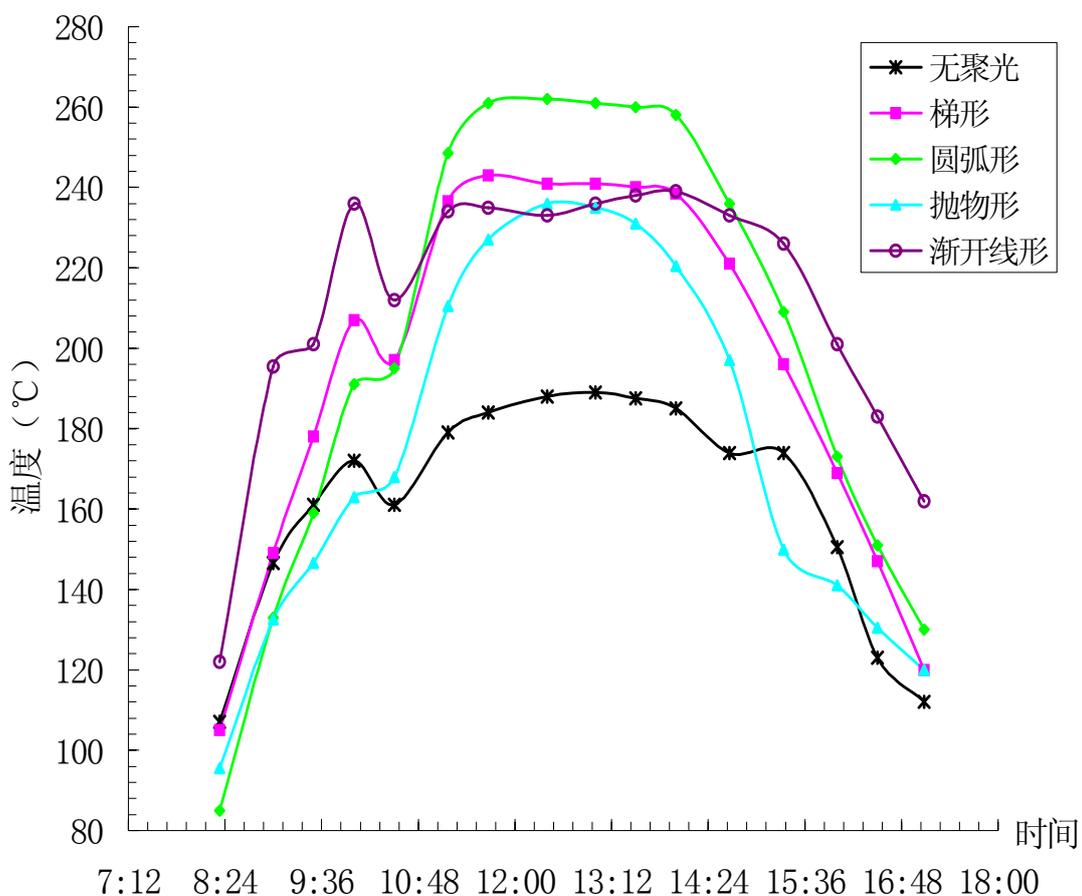


图 5-5 2006 年 5 月 14 日实验测量的温度曲线

5.3.3 实验结果分析

从表 5-4 和图 5-5 可以看出渐开线形一开始温度上升比较快, 当达到一定温度后即使太阳辐射在增加温度只有小的波动。这种趋势与渐开线本身的性质决定的。因为进入渐开线反射器的阳光都能经过一次或多次反射投射到中心圆形接收器上。而圆弧形和梯形在 9:30 以前温度比无聚光型的温度还要低, 9:30 之后温度升高较快, 到 11 点左右温度赶上并超过渐开线形。而抛物形开始上升更慢, 到 10:30 左右才赶上无聚光型, 之后温度迅速升高。造成其他几种形状反射器开始升温比较慢, 甚至低于无聚光型的原因是反射器两边反射板对太阳高度角低时阳光有遮挡作用, 而当太阳高度角达到一定大小时这种遮挡作用没有, 而反射作用表现明显, 所以之后温度升高比较快。几个真空管空晒最高温度都出现在 11:10~13:00 之间, 此时太阳辐射强度在 820~870W/m² 之间。渐开线形在这段时间之后又出现一个稍高的温度, 几个真空管空晒最高温度分别为: 无聚光: 189℃; 抛物形: 236℃ (47℃); 渐开线形: 239℃ (50℃); 圆弧形: 262℃ (73℃); 梯形: 243℃ (54℃), 括弧内为该形状反射器最高空晒温度与无聚光形式最高空晒温度的差值。

5.4 实验结果与模拟计算对比分析

表 5-5 和图 5-6 是把 2006 年 5 月 14 日测量的太阳辐射数据导入程序中进行模拟计算得出的结果。根据模拟计算得出从反射器开口进入反射器的全天总能量为 6281.68 kJ/day。

表 5-5 2006 年 5 月 14 日各种反射器接收能量模拟数据

	无聚光	梯形	圆弧形	抛物形	渐开线形
接收总能量 $Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	1599.62	2485.02	2502.18	2545.52	3038.64
能量峰值 $Q_{\text{峰}}$ (J)	50.00	99.41	127.82	135.64	125.05
q_s (MJ/m ²)		8.09	8.15	9.26	8.56
能量聚光比 C_n		1.55	1.58	1.59	1.90
能量效率 η		0.396	0.398	0.405	0.484

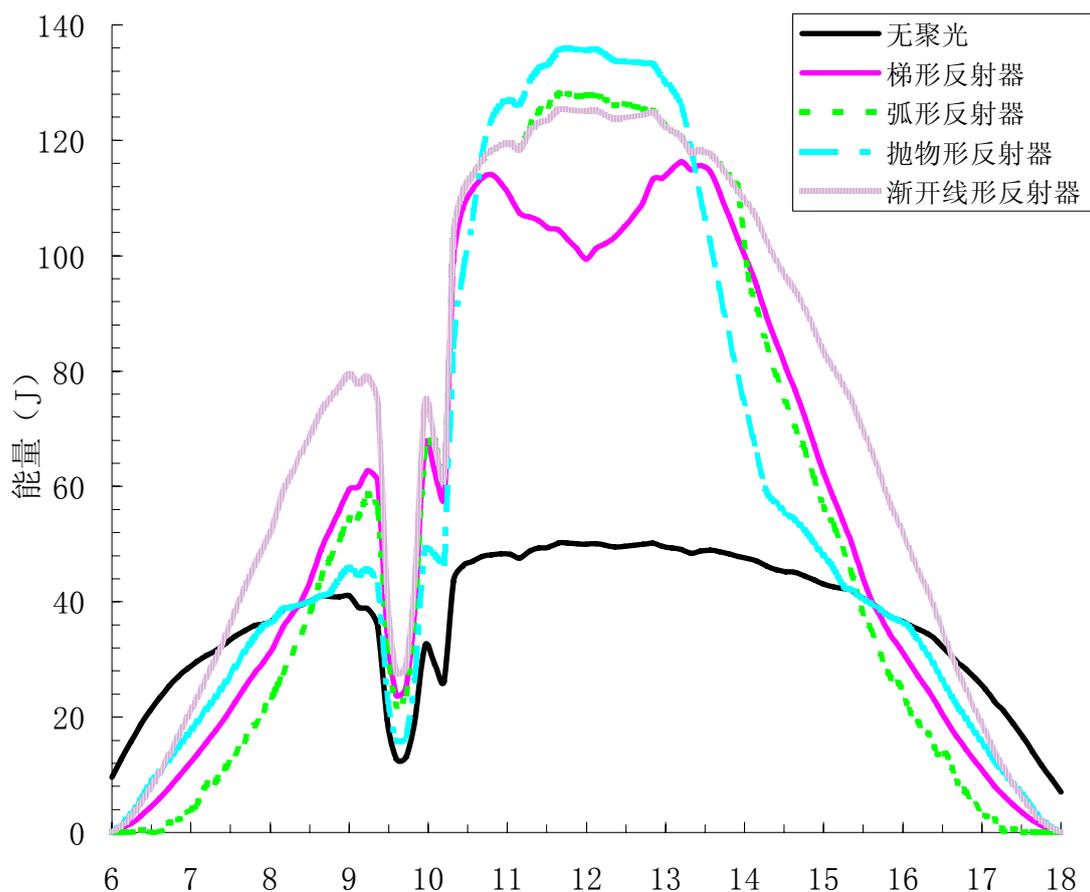


图 5-6 2006 年 5 月 14 日各种反射器接收能量模拟曲线

从图 5-6 和表 5-5 可以看出:渐开线形一开始接收能量就比其它形状上升快,当达到一定程度后不再上升,在 10:30~14:00 之间有一个中间回落的过程,这和上面测量的温度变化趋势比较吻合。而其它几个形状 of 反射器在上午 10:30 以前接收能量和无聚光形相当,在 8:30 之前甚至比无聚光型接收的瞬时能量还少,其中抛物形尤其表现明显。在经过一个迅速上升的过程后这三种形状在 11:00~13:00 之间接收能量相对比较平稳,在这段时间内出现瞬时能量峰值,这跟测量的温度变化趋势基本吻合。而从能量峰值来看抛物线形最高,渐开线形较高,圆弧形次之,梯形再次。理论上说能量峰值对应的是最高温度,而实验测量的结果对应的各种反射器集热最高温度次序为:圆弧形最高,梯形第二高,渐开线形次之,抛物形再次。很明显测量得出的最高温度趋势和模拟计算的结果不相符合。

上面得出对单个形状反射器来讲实验测量的结果的变化趋势和模拟计算基本吻合,而根据相互之间的比较对于单个形状反射器的峰值温度不吻合,下面分析相关原因:由于手工加工,反射器形状加工不够精确,特别是对于带弧形的形

状, 梯形相对加工难度小, 形状走形较小, 影响自然比较小。而圆弧形相对抛物形和渐开线形又要简单一些, 所以结果偏差较小。而抛物形和渐开线形形状控制比较难以把握, 特别是渐开线形比较复杂的弧线手工加工起来相当困难, 并且在安装的时候由于材料的问题中间部分没有连接在一起, 分两块材料进行加工, 这样使形状大打折扣, 形状走形非常严重, 这直接导致测量结果和模拟计算不相吻合。而对测量温度变化趋势则影响不大, 所以单个形状反射器实验测量的结果和模拟计算基本吻合。此外单根真空管性能本身有一定的差别。

综上所述聚光镜模拟程序模拟效果较为理想, 与实际实验比较吻合, 说明程序编写比较成功。另外从实验测量得到的空晒温度来看, 设计的几种形状的聚光反射器效果比较理想, 完全有可能使载热介质水蒸发产生蒸汽。

5.5 2006年5月14日东西方向摆放的模拟计算

虽然没有对东西摆放的模型进行实验, 但是还是利用2006年5月14日的太阳辐射数据对东西摆放的模型进行了模拟计算, 模拟计算的结果和其与南北摆放的情况进行的对比情况如表5-6和图5-7、图5-8。

表5-6 东西摆放各形状最佳反射器各参数的比较

反射器形状	V形	梯形	圆弧形	抛物形	渐开线形
$Q_{\text{总}}$ (kJ/day)	2965.65	2965.45	3061.35	3062.10	2838.96
C_n	1.85	1.85	1.91	1.91	1.77
S (m ²)	0.338	0.333	0.257	0.275	0.355
q_s (MJ/m ²)	8.77	8.91	11.91	11.13	8.00
η	0.472	0.472	0.487	0.487	0.452
$Q_{\text{峰}}$ (J)	133.96	133.73	135.87	135.90	125.54

根据表5-6和图5-7、图5-8和图5-9可以看出东西方向摆放的各形状反射器除渐开线形外的接收总能量 $Q_{\text{总}}$ 、能量聚光比 C_n 、能量效率 η 和能量面积比 q_s 等性能参数都比南北方向摆放效果好, 而且这些性能参数都比南北方向摆放的渐开线效果都更好。另外考虑能量峰值 $Q_{\text{峰}}$, 对比表5-5和表5-6可以得到: 东西方向摆放的各形状反射器的 $Q_{\text{峰}}$ 都比南北方向摆放的高, 也就是说从理论上讲, 东西

方向摆放能得到更高的峰值温度。并且由 4.3 的分析结合实验所测得的在南北方向摆放下渐开线反射器空晒温度可得几种反射器在东西摆放的情况下温度升高都比较快，全天达到高温的时间段都比较长。结合南北方向的空晒实验，我们相信设计的几种形状的聚光反射器东西摆放实验空晒温度会更加理想，完全可以使载热介质水蒸发产生蒸汽。

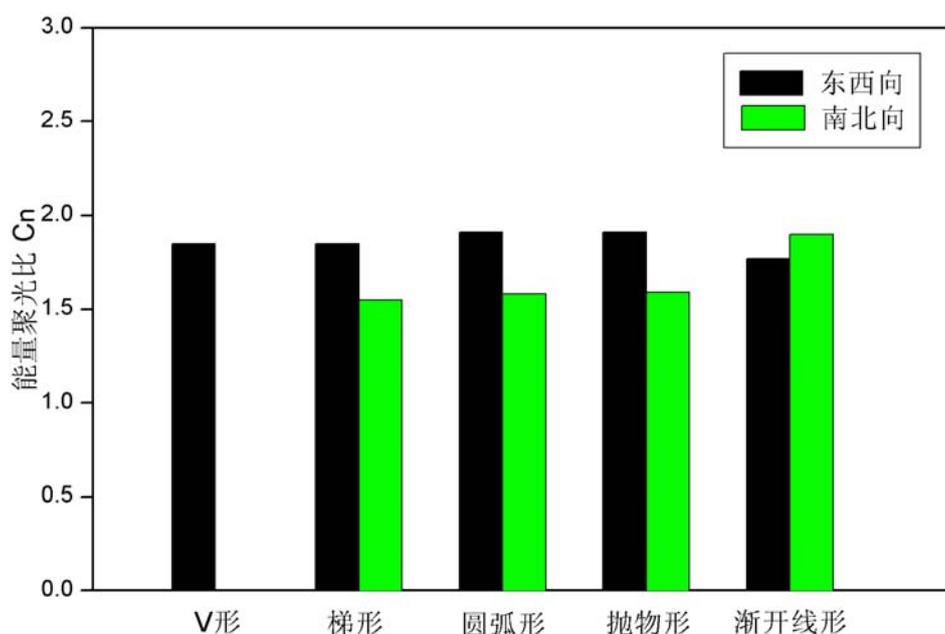


图 5-7 东西、南北摆放的 C_n 的比较

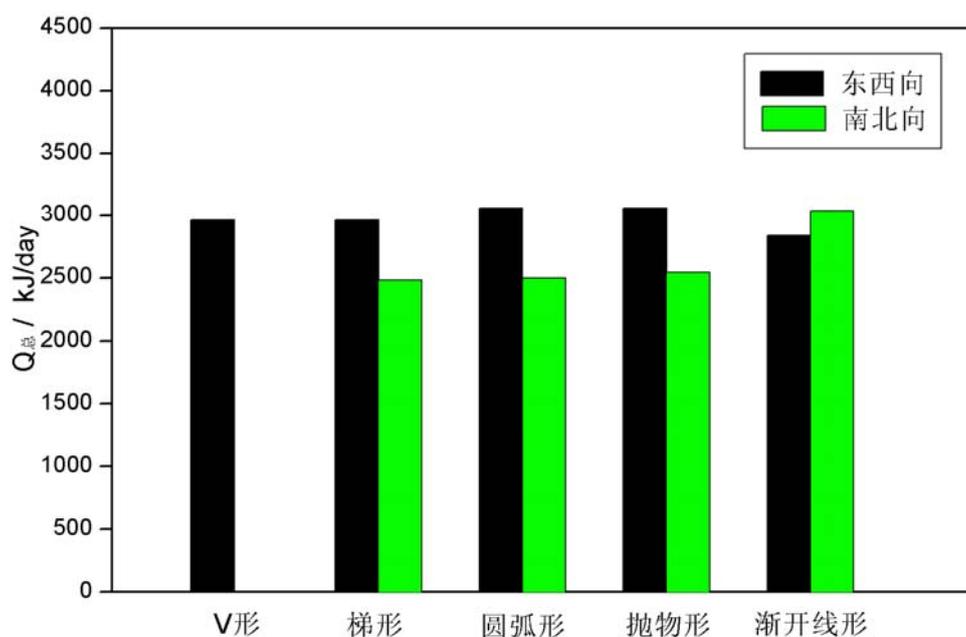


图 5-8 东西、南北摆放的 $Q_{总}$ 的比较

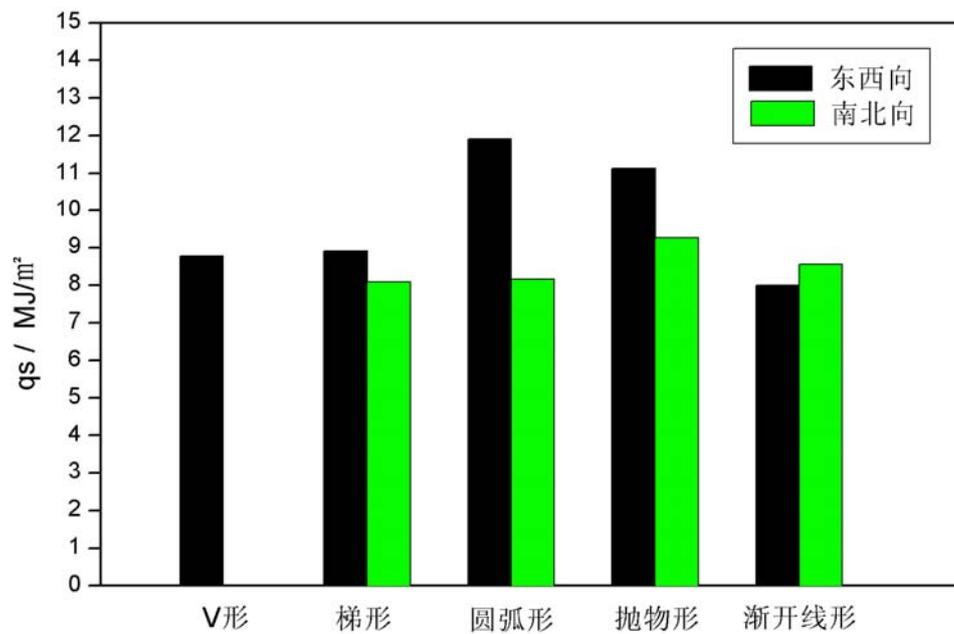


图 5-9 东西、南北摆放的 q_s 的比较

第六章 总结

本研究以产生低温蒸汽为出发点,用 Borland C++Builder 6 软件编写程序——聚光镜模拟程序。程序以太阳能集热器效率公式和能量平衡公式为理论基础,以小聚光、免跟踪为原则进行编写。考虑实际需要程序模拟所包含的内容丰富,基本上包括了实际实验中的各个要素,可以根据实际设计需要添加反射器类型,进行模拟计算。经过不断的改进和完善该程序具有实用性强、贴近实际、直观感强和兼容性强等特点,操作方便直观。聚光镜模拟程序的模拟计算能对反射器设计形状进行优化计算,可为实际应用提供参考。

在模拟程序编写的基础上设计了五种利用目前比较成熟的真空管为集热载体的聚光反射器。这五种聚光反射器为:V形、梯形、圆弧形、抛物形和渐开线形,基本涵盖了小聚光反射器的形状,特点是形状比较简单,加工比较容易。首先用聚光反射器模拟程序对各种形状的反射器进行了优化计算,得到了各种形状反射器在东西方向摆放和南北方向摆放时的最佳组合形式,然后对两种摆放情况下各种形状反射器的最佳组合形式以及无聚光形式进行对比模拟计算。模拟计算结果证明这几种聚光反射器聚光效果较为明显,在接收能量方面相对无聚光形式有相当明显的优势,证明使用程序进行优化设计是可行的,且几种反射器效果颇为理想。

参考程序模拟计算对五种聚光反射器的优化,在南北方向摆放情况下选择了四种形状的反射器的最佳组合加工成模型进行了空晒实验。实验表明这几种形状的反射器虽然在形状不太精确的情况下空晒最高温度比无聚光情况仍然要高出较多,空晒最高温度达 262℃,与无聚光相比最高空晒温度温差达 73℃,证明这几种形状的聚光反射器设计比较成功,用于低温蒸汽发电的完全可行。同时实验测量的温度变化趋势与模拟计算的接收能量变化趋势基本吻合,进一步证明了模拟程序编写是成功的,对实际实验的指导性得到了验证。

参考文献

- [1] 王如竹等. 吸附式制冷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 王野平, 徐岩松, 梁伟延. 从可持续发展战略高度审视太阳能热力发电[J]. 科技管理研究, 2002, 3: 92-95.
- [3] 李斌, 李安定. 太阳能热发电的分析思考[J]. 电力设备, 2004, 5: 83-85.
- [4] 罗运俊, 何梓年等. 太阳能利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [5] 李锦堂. 20世纪太阳能科技发展的回顾与展望. 太阳能学报[J], 1999, 特刊.
- [6] 中华人民共和国国家发展计划委员会基础产业发展司编. 中国新能源与可再生能源, 1999 白皮书[M]. 北京: 中国计划出版社, 2000.4.
- [7] Castro M, Presa J L, Diaz J. CRS receiver and storage systems evaluation[J]. Solar Energy, 1991, 47(3): 197-207.
- [8] Faas S E, Thorne L R, Fuchs E A, *et al.* 10MW solar Thermal storage subsystem evaluation[A]. Final Report No SAND868212. Livermore[C], CA: Sandia National Laboratories, 1986
- [9] Williams T. The Solar Tow power tower, solar thermal. The World Directory of Renewable Energy Suppliers and Services 1996, James & James Science Publishers Ltd, 1996
- [10] Flores J. Solar Tow begins validation of molten salt technology[J]. Sun World, 1996, 20(3): 25
- [11] 李新秋, 徐光. 太阳能热发电及工业供热技术(上)[J]. 新能源, 1998, 20(11): 24-33
- [12] 李新秋, 徐光. 太阳能热发电及工业供热技术(下)[J]. 新能源, 1998, 20(11): 1-6, 11
- [13] Vicente Flores, Rafael Almanza. Direct steam generation in parabolic trough concentrators with bimetallic receivers[J]. Energy 2004; 29: 645 - 651
- [14] S. D. ODEH, G. L. MORRISON, M. BEHNIA. MODELLING OF

- PARABOLIC TROUGH DIRECT STEAM GENERATION SOLAR COLLECTORS[J]. Solar Energy 1998; 62 (6): 395-406
- [15] Loreto Valenzuela, Eduardo Zarza, Manuel Berenguel, Eduardo F. Camacho. Control concepts for direct steam generation in parabolic troughs[J]. Solar Energy 2004
- [16] M. Eck , E. Zarza , M. Eickhoff , J. Rheinlander , L. Valenzuela. Applied research concerning the direct steam generation in parabolic troughs[J]. Solar Energy 2003; 74: 341-351
- [17] Ying You, Eric J. Hu. A medium-temperature solar thermal power system and its efficiency optimization. Applied Thermal Engineering, 2002, 22: 357 - 364
- [18] 葛新石, 龚堡, 陆维德等. 太阳能工程——原理和应用[M]. 北京: 学术期刊出版社, 1988
- [19] 王长贵, 崔容强, 周篁. 新能源发电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003
- [20] 张建锋, 杨家宽, 肖波, 王秀萍. 太阳能烟囱发电技术现状及展望[J]. 可再生能源, 2003, 1: 5-7
- [21] 龙新峰. 太阳能烟囱式热力发电技术进展[J]. 广东电力, 2004, 17 (1) : 1-5, 32
- [22] 代彦军, 黄海宾, 王如竹. 太阳能热风发电技术应用于宁夏地区的研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24 (3) : 408 —412.
- [23] 周大吉. 地热发电简述[J]. 电力勘测设计, 2003, 3: 1-6
- [24] 李颖, 李宝骏, 姜兴有等. 太阳能光导采光与热发电系统的研究[J]. 新能源, 1998, 20 (12): 24-28
- [25] D.Mills, Advances in solar thermal electricity technology[J]. Solar Energy, 2004, 76: 19-31
- [26] R. Oommen, S. Jayaraman. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses—oversized reflector[J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42, 1379—1399.

- [27] Rabl. A. , O'Gallagher. J. , Winston. R. DESIGN AND TEST OF NON-EVACUATED SOLAR COLLECTORS WITH COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATORS[J]. Solar Energy, 1980, 25(4): 335-351.
- [28] 郭廷玮, 刘鉴民, M. DAGUENET. 太阳能的利用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1987.
- [29] Farouk. Kothdiwala A., Norton. B., Eames. P. C. The effect of variation of angle of inclination on the performance of low-concentration-ratio compound parabolic concentrating solar collectors[J]. Solar Energy, 1995, 55(4): 301-309.
- [30] R Oommen, S. Jayaraman. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses—oversized reflector[J]. Energy Conversion and Management, 2001, 42: 1379-1399.
- [31] Rachel Oommen, S. Jayaraman. Development and performance analysis of compound parabolic solar concentrators with reduced gap losses—‘V’ groove reflector[J]. Renewable Energy, 2002, 27: 259-275.
- [32] H. E. I. KHONKAR, A. A. M. SAYIGH. OPTIMIZATION OF THE TUBULAR ABSORBER USING A COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR[J]. Renewable Energy, 1995, 6(1): 17-21.
- [33] 殷志强, 唐轩. 全玻璃真空太阳能集热管光-热性能[J]. 太阳能学报, 2001, 22(1): 1-5

符号说明

η_o	—	集热器光效率
ρ_m	—	反射板的反射比
τ_e	—	玻璃套管的透射比
α_r	—	吸收体的吸收比
$\langle n \rangle$	—	平均反射次数
p	—	空隙热损因子
f_{ref}	—	吸收体管子和玻璃套管之间的多重反射因子
A_c	—	集热器的接收面积, m^2
C	—	聚光比
G	—	太阳辐射强度, W/s
r_1	—	吸收体管子的半径, mm
g	—	玻璃套管与吸收体管子之间的空隙宽度, mm
R	—	真空管集热器的外管半径, mm
W	—	反射器开口宽度, mm
H	—	反射器高度, mm
θ	—	V形或梯形反射器的斜边倾角, $^\circ$
h	—	反射器中心高度, mm
$Q_{总}$	—	真空管集热器全天接收的总能量, kJ/day
S	—	反射器反射板面积, m^2
q_s	—	能量面积比, MJ/m^2
C_n	—	能量聚光比
η	—	能量效率
c_f	—	工质的比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$
m	—	工质质量, kg

t_s	——	集热管内温度, °C
t_a	——	真空管外管温度, 我们认为其等于环境温度, °C
$\mu_{LT,S}$	——	集热管温度为 t_s 环境温度为 t_a 时的真空管的热损系数, W/ ($m^2 \cdot ^\circ C$)
$Q_{\text{峰}}$	——	集热器接收的瞬时能量峰值, J

发表文章目录

1. 刘灵芝, 李戡洪, 聚光反射器的计算机程序设计, 可再生能源, 已录用
2. 刘灵芝, 李戡洪, 复合抛物面聚光器(CPC)光学分析研究, 能源技术, 2006, 27(2): 52-56

致 谢

时光冉冉，三年硕士阶段的学习马上就要告一段落了，在这三年研究生学习和生活期间里，得到了导师李戡洪研究员大量的有方向性的精心指导，李老师严谨的治学态度、敏捷的思维、渊博的知识使我受益终身，在此表示深深的感谢！李老师在生活上也给予了我无微不至的关怀，并对个人的未来发展给与了无私的帮助和指导。在此，谨向李老师致以崇高的敬意和衷心的感谢！同时对在编写程序上给我支持和帮助的好友朱博炎一并表示由衷的感谢！

另外对马伟斌研究员、廉永旺师兄和陈维博士等在学习、工作中的指导和帮助表示感谢！并对太阳能协会的陈教授和梁自健师傅为实验测量提供的支持和帮助表示感谢！

此外对三年来一直在工作、学习和生活中给予热心帮助的陈锋、饶红、张小娟等职工表示感谢！对三年的同窗好友们在生活和学习方面的帮助表示感谢！特别对男朋友李刚在学习和生活的支持和帮助表示衷心的感谢！同时也对家人的关心与鼓励表示由衷的感谢！