

太阳能真空管集热器管中心距的优化与应用

柴 婷¹, 胡海涛¹, 丁国良^{1*}, 张 科², 李宏达², 尉永魁²

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 霍尼韦尔(中国)有限公司, 上海 201203)

摘要:为提高太阳能热水器的性能并降低其成本,通过综合考虑性能与成本对真空管集热器进行了优化,提出了以集热器单位集热量的成本为优化目标的真空管集热器管中心距优化模型。优化模型包括集热器成本计算模型和集热器集热量计算模型,其中的集热器集热量计算考虑了太阳的辐射强度变化与真空管管间遮阴作用。采用该模型对常用太阳能集热器进行了优化。实验结果表明,优化后集热器单位集热量成本降低了1.5%,集热器制造成本降低了4.6%。

关键词:真空管;太阳能集热器;集热性能;成本;管中心距

中图分类号:TK124

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)11-1295-05

Optimization and application of tube pitch for evacuated tube solar collector

CHAI Ting¹, HU Hai-tao¹, DING Guo-liang¹, ZHANG Ke², LI Hong-da², YU Yong-kui²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Honeywell (China) Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: In order to improve the performance and decrease the cost of solar water heater, the optimization of evacuated tube solar collector was done by considering both the performance and the cost. The optimization model of tube pitch for the evacuated tube solar collector was developed, and the optimization object is the cost per unit energy gain. The optimization model included a collector cost model, and a solar energy gain model in which the solar radiation and the effect of shadow between tubes were taken into consideration. A case study of the model on commonly used solar collector shows that the cost per unit energy gain and the total cost of solar collector are decreased by 1.5% and 4.6%, respectively.

Key words: evacuated tube; solar collectors; solar collecting performance; cost; tube pitch

0 引 言

在传统能源枯竭和日益强调环保的今天,太阳能作为一种无污染可再生能源越来越为人们所重视。怎样更高效又更低成本地采集、利用太阳能,是当今太阳能集热器设计界着重思考并解决的问题^[1-5]。对于广泛应用于太阳能热水器中的真空管式太阳能集热器,真空管的管中心距是直接影响集热器性能与成本的重要因素。在真空管数目一定的情况下,通过减小真空管管中心距,会降低集热器的成本,但是同时也会

增强管间遮阴作用、降低单根真空管的太阳能采集利用率,导致集热器性能的降低;通过增大真空管管中心距虽然能减弱遮阴作用,使集热器集热量有一定程度地提高,但是同时会导致集热器成本的提高。面对真空管管中心距与集热器能量和成本之间的复杂关系,太阳能集热器生产厂家亟需一个准确可行且同时考虑集热器性能和成本的真空管管中心距优化模型来指导生产。因此,需要综合考虑集热器性能和成本两个因素,建立真空管集热器管中心距优化模型。

目前常见的真空管集热器管中心距优化模型一

收稿日期:2011-06-14

作者简介:柴 婷(1987-),女,湖南怀化人,主要从事热泵热水器、太阳能热水器仿真优化方面的研究。E-mail: chaiting8748@sjtu.edu.cn

通信联系人:丁国良,男,教授,博士生导师。E-mail: glding@sjtu.edu.cn

般选取集热器集热量为优化目标^[6-7],在晴天太阳辐射模型^[8]的基础上建立真空管管间遮阴模型,得出考虑遮阴的集热器集热量,并得出了考虑集热量的最优管中心距。由于集热器成本也是真空管管中心距优化的一个重要影响因素,在优化管中心距时,应同时考虑成本的影响。因此,有关文献^[9]同时考虑了集热器成本和集热器集热量,对模型进行了改进,以性能价格比为优化目标对管中心距进行优化计算,得出了最优管中心距的范围,但是其集热器成本计算模型没有考虑真空管管中心距的影响,且使用的管间遮阴模型^[10-11]运算较复杂。到目前为止,没有综合考虑真空管管中心距对集热性能和成本影响的管中心距优化模型。

本研究对已有的管间遮阴模型进行改进,并在此基础上建立综合考虑性能和成本的真空管集热器管中心距优化模型。

1 综合考虑性能与成本的真空管集热器管中心距优化模型

本研究的优化对象为太阳能热水器中的真空管式太阳能集热器,集热器放置角度关系和结构示意图如图 1 所示。

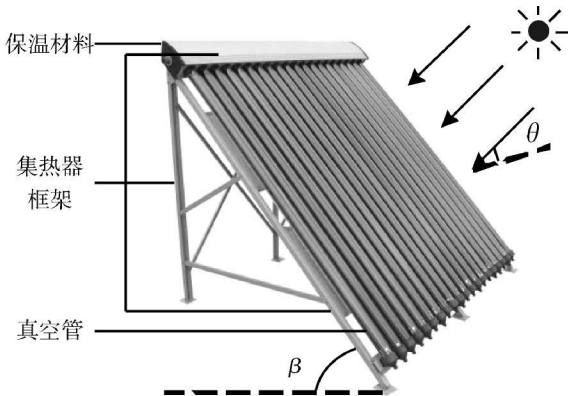


图 1 真空管集热器
θ—入射光线入射角;β—集热器倾角

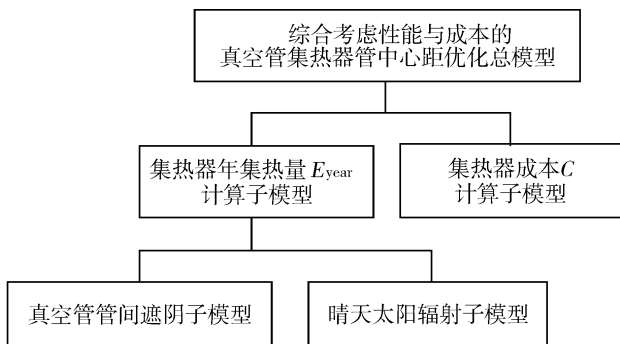


图 2 真空管集热器管中心距优化模型结构图

本研究的优化目标为建立综合考虑集热性能与成本的真空管集热器管中心距优化模型。模型结构如图 2 所示。

本研究的优化模型建立步骤为:① 建立综合考虑集热器年集热量 E_{year} 与成本 C 的真空管管中心距优化总模型;② 建立集热器成本 C 计算子模型;③ 建立集热器年集热量 E_{year} 计算子模型;④ 为了计算考虑真空管管间遮阴的集热器年集热量 E_{year} , 建立真空管管间遮阴模型。图 2 中的晴天太阳辐射子模型可参考文献^[8],本研究不再赘述。

1.1 综合考虑性能与成本的真空管集热器管中心距优化总模型

为使优化模型能够综合反映集热器集热性能和成本,本研究选取单位集热量的集热器成本 U_c 为优化目标,对真空管管中心距进行优化计算,当 U_c 取最小值时,管中心距有最优值 d_{best} ,真空管集热器管中心距的优化模型为:

$$U_c = C / E_{year} \tag{1}$$

$$\min(U_c) = f(d_{best}) \tag{2}$$

式中: U_c —真空管式太阳能集热器单位集热量的成本,元,为真空管管中心距 d 的函数; C —真空管式太阳能集热器的成本,元; E_{year} —集热器年集热量,MJ; f —单位集热量的集热器成本最小值 $\min(U_c)$ 与管中心距最优值 d_{best} 的函数关系。

1.2 集热器成本 C 计算子模型

本研究根据图 1 所示的集热器结构,将集热器成本表示为集热器框架、管、保温材料等成本之和,如下式所示:

$$C = C_{集热器框架} + n \times C_{管} + C_{保温材料} \tag{3}$$

$$C_{集热器框架} = V_{框架材料} \times [(d(n-1) + 2M) \times S_1 + L_s \times S_2] \tag{4}$$

式中: $C_{集热器框架}$ —集热器框架成本,元; n —集热器上真空管根数; $C_{管}$ —折合到每根管上的真空管、铜管、总集热流道、吸热铝翼和连接件等的成本之和,元; $C_{保温材料}$ —集热器总集热流道外保温材料的成本,元; $V_{框架材料}$ —集热器框架材料单位体积的价格,元/ m^3 ; d —真空管管中心距,m; M —集热器最外侧真空管中心线与相邻平行集热器外缘的距离,m; L_s —集热器长度,m; S_1 —集热器宽度方向集热器框架总截面积之和, m^2 ; S_2 —集热器长度方向框架总截面积之和, m^2 。

公式(4)的集热器框架成本计算反映了真空管管中心距 d 的影响。

1.3 集热器年集热量 E_{year} 计算子模型

本研究中的集热器无反射板,故任意一天的集热

器日集热量 E_{ndate} 仅由集热器接收的太阳直射辐射量 $E_{ndate,1}$ 与集热器接收的来自天空散射辐射量 $E_{ndate,2}$ 两部分组成。一年中集热器的日集热量一直变化,为了分析集热器全年的集热性能,对全年日集热量 E_{ndate} 进行累加,采用集热器全年集热量 E_{year} 作为评价参数。 E_{year} 的计算公式为:

$$E_{year} = \sum_{ndate=1}^{365} E_{ndate} \quad (5)$$

$$E_{ndate} = E_{ndate,1} + E_{ndate,2} \quad (6)$$

$$E_{ndate,1} = \int_{\Omega} dE_{ndate,1} = \int_{\Omega} \left(\frac{180^\circ - \alpha}{180^\circ} \times \pi \times \frac{D}{2} \times \cos\gamma \times \cos i_\alpha \times \tau \times \mu \times I_N \times L \times n \right) dt \quad (7)$$

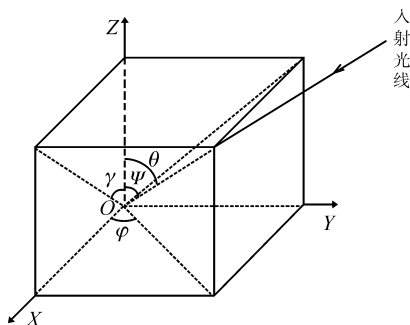
$$E_{ndate,2} = \int_{\Omega} dE_{ndate,2} = \int_{\Omega} \left(\frac{D/2 \times \pi}{2 \times 180^\circ} \times c \times f_{cs} \times \theta_m \times (1 + \overline{\cos\theta}) \times \tau \times \mu \times I_N \times L \times n \right) dt \quad (8)$$

$$dt = \frac{24 \times 3600}{2\pi} d\Omega = 13751 d\Omega \quad (9)$$

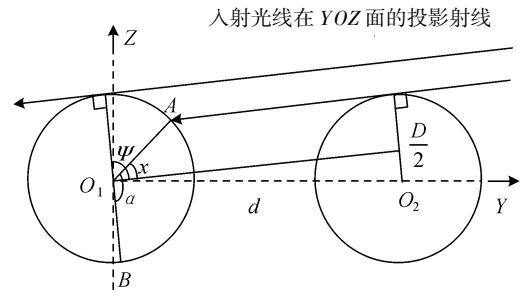
式中: E_{ndate} —日序数为 $ndate$ 时的集热器日集热量, J; $dE_{ndate,1}$, $dE_{ndate,2}$ —单位时间 dt 内集热器接收的太阳直射辐射量和天空散射辐射量, J; Ω —时角; Ω_s —日出时角, Ω_s —日没时角; γ —入射光线与真空管横截面的夹角; i_α —平均入射角; τ —透过率; μ —吸收比; I_N —太阳直射辐射照度, W/m^2 ; L —真空管长度, m; n —集热器上真空管的根数; c —散射因子^[12]; α —遮阴角,由真空管管间遮阴子模型求出; f_{cs} , θ_m , $\overline{\cos\theta}$ 的计算公式见文献[10]。

1.4 真空管管间遮阴子模型

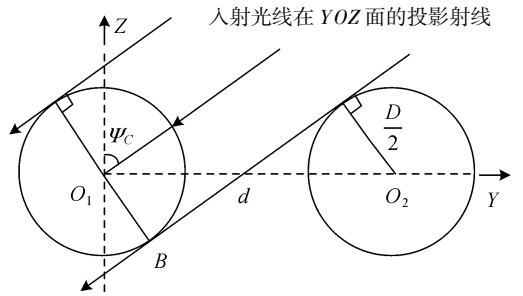
本研究建立真空管管间遮阴子模型的目的是计算集热器年集热量 E_{year} 计算子模型公式(7)中的遮阴角 α 。



(a) 真空管坐标系



(b) 真空管管间遮阴情况示意图



(c) 真空管管间遮阴临界情况示意图

图 3 太阳能集热器真空管坐标系及光照示意图

本研究在单根真空管上建立如图 3(a)所示坐标系。坐标系原点 O 经过真空管管中心线, X 轴与真空管管中心线重合, Y 轴平行于集热器平面, Z 轴垂直于集热器平面。真空管管间遮阴一般情况示意图如图 3 (b)所示;真空管管间遮阴现象的临界情况如图 3(c)所示,此时正好无遮阴现象发生。考虑到入射光线在 YOZ 平面的投影射线与 O_1 、 O_2 两圆同时相切的情况有两种,故有两种临界遮阴情况。由图 3 中几何关系可得到遮阴角 α 的计算公式如下:

$$\begin{cases} |\Psi| < |\Psi_c| \text{ 时, 无遮阴, } \alpha = 0 \\ |\Psi| \geq |\Psi_c| \text{ 时, 有遮阴, } \alpha = 90^\circ + x \end{cases} \quad (10)$$

$$\Psi = \arctan(\sqrt{\tan^2\theta - \tan^2\gamma}) \quad (11)$$

$$\Psi_c = \arccos\left(\frac{D}{d}\right) \quad (12)$$

$$x = \arcsin\left(\frac{D - 2L\cos\Psi}{D}\right) \quad (13)$$

$$\gamma = \arctan\left(\sqrt{\tan^2\theta / [1 + (\tan A_s \cdot \cos\beta)^2]}\right) \quad (14)$$

式中: Ψ —入射光线在 YOZ 面投影线与 Z 轴的夹角; Ψ_c —临界遮阴情况时入射光线在 YOZ 面投影线与 Z 轴的夹角; α —遮阴角,为真空管上被遮阴区域在真空管半圆柱面所形成的角度 $\angle AO_1B$; x — O_1A 与入射光线在 YOZ 面的投影方向的夹角, A 点为与真空管内管外径圆 O_2 相切的入射光线在 YOZ 面投影线在圆 O_1

上的交点; θ —入射角,是入射光线与 Z 轴的夹角; γ —入射光线在 XOZ 面投影线与 Z 轴的夹角; D —真空管内管外径, m ; d —真空管中心距, m ; β —集热器倾角; A_s —太阳方位角。

2 模型验证

由集热器管中心距优化模型公式(1)可知, C 为成本计算的理论值,因此只需验证集热器年集热量 E_{year} 计算模型的正确性。

笔者采用与文献[13]相同的集热器结构和工况,将本研究模型的集热量预测值与该文献实验值比较,如图4所示。对比结果表明,计算值与88%的实验数据误差在10%以内。

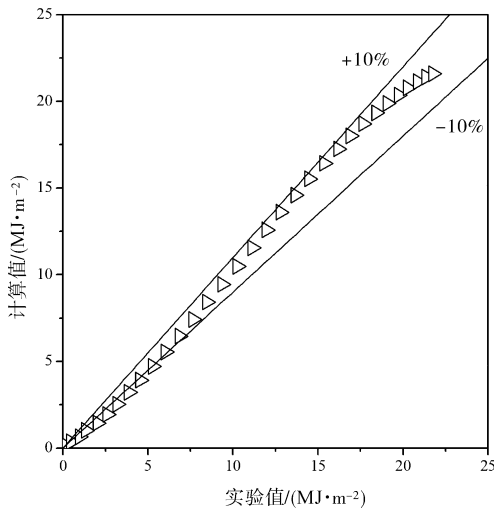


图4 本研究模型的集热量预测值和已有文献实验数据的对比

3 优化实例与结果分析

本研究以常见结构参数、地理位置和放置情况的太阳能热水器为实例进行优化计算,经优化得出该集热器的性能和成本综合最优的真空管管中心距,并对优化效果进行评价分析。

已知需要优化的集热器的结构参数为管长 $L=1.8\text{ m}$,集热器长度 $L_s=2\text{ m}$,管数 $n=12$,真空管管外径 $D_{out}=0.058\text{ m}$;集热器所在纬度为北纬 40° ,海拔高度为 0.2 km ,集热器倾角为 30° ,集热器朝向正南方放置。

求最优真空管管中心距 d_{best} 的步骤为:

(1) 设定真空管管中心距的初始值 $d=D_{out}$;

(2) 将集热器所在地地理环境条件及集热器放置角度代入晴天太阳辐射模型中,计算出瞬时太阳直射辐射照度 I_N ;

(3) 将集热器所在地地理环境条件、集热器放置角度、真空管管外径和真空管管中心距代入真空管管间遮阴模型中,计算出遮阴角 α ;

(4) 将步骤(2)和(3)的输出量代入集热器年集热量 E_{year} 计算子模型中,计算出集热器年集热量 E_{year} ;

(5) 将集热器结构尺寸和各部件及用材单价代入集热器成本 C 计算子模型中,计算出集热器成本 C ;

(6) 将步骤(4)和(5)计算得出的 E_{year} 和 C 代入综合考虑性能与成本的真空管集热器管中心距优化总模型中,计算得出单位集热量的集热器成本 U_c ;

(7) 改变真空管中心距的值,重复步骤(1)~(6),得到单位集热量的成本 U_c 随真空管管中心距 d 的变化曲线,曲线最低点对应值即为集热器最优管中心距 d_{best} 。

本研究根据以上所述优化方法,编写真空管管中心距优化计算软件,软件界面截图如图5所示。用户在软件中输入地理环境参数、真空管结构和放置角度等参数,利用本研究优化模型通过软件计算,输出真空管管中心距优化图 and 最优管中心距。

利用本研究优化模型进行计算,得出 U_c 随真空管管中心距 d 的变化曲线,如图6所示。同时,为了分析不同管中心距 d 对集热器成本的影响,本研究给出了集热器总成本随管中心距的变化关系图,如图7所示。

根据图6可以看出,在管中心距 d 为 $1.2 D_{out}$ 时,单位得热量的成本最低,为最优管中心距,即对于优化的 58 mm 管外径的真空管,在管中心距为 70 mm 时,单位得热量的成本最低。为了对比优化效果,在图6和图7



图5 真空管管中心距优化软件图

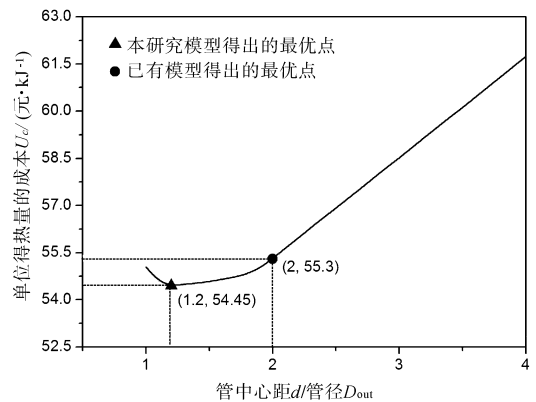


图6 集热器单位集热量的成本随管中心距比的变化

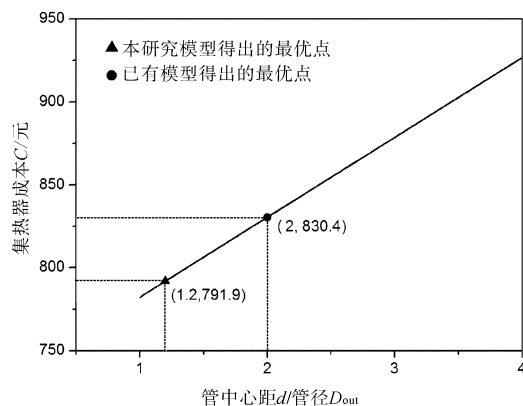


图 7 集热器总成本随管中心距比的变化

中,同时给出了已有模型得出的最优点($d=2D_{out}$),对比结果表明,采用本研究模型优化管中心距后,集热器单位集热量的成本降低了 1.5%,制造成本降低了 4.6%。

4 结束语

(1) 本研究建立了综合考虑集热器集热性能和成本的管中心距优化模型,采用该模型对常见的真空管管外径为 58 mm 的太阳能集热器进行优化,得出的最优管中心距为 $1.2 D_{out}$;

(2) 与已有模型优化后的管中心距为 $2 D_{out}$ 的集热器相比,利用本研究模型优化后的集热器单位集热量成本降低了 1.5%,制造成本降低了 4.6%。

参考文献(References):

[1] SHAH L J, FURBO S. Theoretical flow investigations of an all glass evacuated tubular collector [J]. *Solar Energy*, 2007, 81(6): 822-828.

- [2] KIM Y, SEO T. Thermal performances comparisons of the glass evacuated tube solar collectors with shapes of absorber tube [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(5): 775-778.
- [3] TANG R S, LI Z M, ZHONG H, et al. Assessment of uncertainty in mean heat loss coefficient of all glass evacuated solar collector tube testing [J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, 47(1): 60-67.
- [4] 翟辉, 代彦军, 吴静怡, 等. 大型平板型 / 真空管太阳集热器阵列排布问题研究 [J]. *太阳能学报*, 2008, 29(5): 564-568.
- [5] 何海霞, 张三明, 陈湛. 杭州地区太阳能集热器最佳倾角研究 [C]. 2010 年建筑环境科学与技术国际学术会议论文集, 2010: 80-84.
- [6] 葛洪川, 李炜, 闵子建. 储热式真空管集热器管中心距与能量收益关系的研究 [J]. *太阳能学报*, 1997, 18(3): 262-268.
- [7] 张纪波. 南宁晴天太阳辐射模型与全玻璃真空管太阳集热器最佳管间距(B/D)分析 [D]. 南宁: 广西大学物理科学与工程技术学院, 2007.
- [8] DUFFIE J A, BECKMAN W A. *Solar Engineering of Thermal Processes* [M]. John Wiley & Sons, Inc., 1980.
- [9] 宋爱国. 真空管式太阳集热器管间遮阴分析(二) [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2005, 26(2): 19-22.
- [10] 宋爱国. 真空管式太阳集热器管间遮阴分析(一) [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2003, 24(3): 36-39.
- [11] 宋爱国. 真空太阳集热器的入射乘积因子 [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2003, 24(2): 37-40.
- [12] American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers. *Hand Book of Fundamentals* [M]. New York, ASHARE, 1978.
- [13] 宋爱国, 贾加顺. 真空管式太阳热水器热性能研究(二) [J]. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2001, 22(2): 43-48.

[编辑: 李 辉]

(上接第 1294 页)

参考文献(References):

[1] 吴根茂. 新编实用电液比例技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006: 159-166.

[2] LIU Song, YAO Bin. Automated modelling of cartridge valve flow mapping [C] // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. AIM, 2005: 789-794.

[3] XIE Ling, PREMACHANDRAN C S, MICHELLE C. Optimization of a microfluidic cartridge for Lab-on-a-chip (LOC) application and bio-testing for DNA/RNA extraction [C] // Proceedings-Electronic Components and Technology Conference, 2008: 1310-1316.

[4] WANG Xin-hua, CHANG Jia-qing. Analysis and emula-

tion of steady-state characteristic for water hydraulic proportional throttle valve [C] // Proceeding 2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, 2009: 1090-1095.

- [5] 陈柏金. 锻造液压机组液控系统研究 [D]. 武汉: 华中理工大学材料科学与工程学院, 2000: 3-4, 72-74.
- [6] 唐香珺. 锻造液压机插装类元件动态特性理论与实验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学机械工程学院, 2008: 62-63.
- [7] 陈 绍. 阀控液压转向系统的传真与分析 [J]. *现代制造技术与装备*, 2009(2): 77-78.
- [8] 黄人豪, 濮凤根. 二通插装阀和电液比例技术在中国重大工程和装备中应用 [J]. *流体传动与控制*, 2004(1): 23-31.

[编辑: 张 翔]