

一种太阳能集热器流体平均温度计算方法

徐立^{1,2,3,4}, 孙飞虎^{1,2,3,4}, 李志², 张强强^{2,3*}

(1. 中国科学院太阳能热利用及光伏系统重点实验室, 北京市海淀区 100190;
2. 中国科学院电工研究所, 北京市海淀区 100190; 3. 中国科学院大学, 北京市
海淀区 100049; 4. 北京市太阳能热发电工程技术研究中心, 北京市海淀区 100190)

A Calculation Method of Average Fluid Temperature in Solar Collector

XU Li^{1,2,3,4}, SUN Feihu^{1,2,3,4}, LI Zhi², ZHANG Qiangqiang^{2,3*}

(1. Key Laboratory of Solar Thermal Energy and Photovoltaic System, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100049, China; 4. Beijing Engineering Research Center of Solar Thermal Power, Haidian District, Beijing 100190, China)

摘要: 太阳能集热器是进行光热转换的重要设备,既可以应用于塔式热发电技术进行集中式能源利用,也可以应用于碟式热发电技术进行分布式能源利用,因此评估太阳能集热器的热性能十分重要。为此,提出了一种计算太阳能集热器流体平均温度的新方法,经实验验证,计算结果与实验数据符合较好,证明该方法可以较好地预测太阳能集热器的流体平均温度。为了更好地掌握太阳能集热器的热性能,研究了不同参数对太阳能集热器热效率的影响,结果表明:当输入功率恒定时,增大流量可以有效提高太阳能集热器的效率;当流量恒定时,太阳能集热器效率随着输入功率的增加会先升高后降低;太阳能集热器的效率与入口温度成反比,与环境温度成正比。

关键词: 太阳能热发电; 太阳能集热器; 流体平均温度; 热性能

ABSTRACT: The solar collector is an important equipment for photo-thermal conversion. It can be used not only for centralized energy utilization by tower thermal power generation technology, but also for distributed energy utilization by disc thermal power generation technology. Therefore, it is necessary to evaluate the thermal performance of solar collectors. A new method was proposed to calculate

the average fluid temperature of solar collectors. The experimental results show that the calculation results are in good agreement with the experimental data, which proves that the method can predict the average fluid temperature of solar collector. The effect of different parameters on thermal efficiency was also investigated to better acquire the thermal performance of solar collectors. The results show that when the input power is constant, increasing the flow rate can effectively improve the efficiency of solar collector. When the flow rate is constant, the efficiency of solar collector increases first and then decreases with the increase of input power. The efficiency of solar collector is inversely proportional to the inlet temperature and proportional to the ambient temperature.

KEY WORDS: solar thermal power generation; solar collector; average fluid temperature; thermal performance

0 引言

太阳能热发电技术近年来受到广泛关注^[1-4]。我国能源局在2018年立项20个太阳能热发电示范项目,包含塔式、槽式和碟式等多种热发电技术形式,其中塔式发电技术占一半以上。

目前,已有很多学者^[5-18]对太阳能集热器进行了研究。文献[8]将Monte Carlo方法和Gebhart方法耦合起来,提高了太阳能集热器模型边界条件的准确性。文献[9]提出了适用于太阳能集热器设计的性能模型,并与Gemasolar电站的数据进行了比对。文献[10]给出了一种快速计算太阳能集热

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905102); 中国科学院国际伙伴计划项目(182111KYSB20200021); 中国科学院电工研究所科研基金(E155710101)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2018YFB0905102); International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (182111KYSB20200021); Research Fund of Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences (E155710101).

器出口温度的模型。文献[11-12]提出了一种新的套管式太阳能集热器结构，二维仿真分析结果显示，如果只需要计算出口温度及太阳能集热器的效率，则周向的温度变化可以忽略。文献[13-14]采用 Monte Carlo 方法计算太阳能集热器的辐射换热，同时采用 FLUENT 计算太阳能集热器的对流换热，两者耦合可以较为准确地计算太阳能集热器的热性能。文献[15]分开考虑辐射换热和对流换热，在辐射换热计算中使用 Monte Carlo 方法得到太阳能集热器微元表面之间的角系数，在对流换热计算中使用 FLUENT 判断对流的类型，但是并没有得出一个综合表征热损失的参数。文献[16]使用 Gebhart 和 Clausing 方法分别计算太阳能集热器的辐射热损失和对流热损失，由于该辐射换热计算过程过于复杂，所以并没有将其与对流换热耦合在一起。文献[17]对二维开口腔体的自然对流换热和壁面辐射换热情况进行了数值模拟。文献[18]建立了太阳能热发电站的模型，用于预测其长期性能，在建模过程中测试了节点数量对太阳能集热器效率的影响，研究结果显示，在流体物性不变的前提下，每个管板可以使用单个节点替代。

以上文献大多先把太阳能集热器离散为多个微元，然后采用 Monte Carlo 方法计算太阳能集热器的辐射换热或者角系数；在对流换热的计算上通常使用经验公式或 FLUENT；大多分开考虑辐射和对流热损失，而没有提出可以考虑各种热损失的综合性参数。

为此，本文提出使用热损失系数来综合表征太阳能集热器的辐射和对流热损失，并代入能量平衡方程计算太阳能集热器的输出能量。该能量平衡方程需要用到太阳能集热器的流体平均温度，由于平均温度无法通过准确测量得到，因此本文通过推导使用入口温度替代平均温度。经过上述处理后，本文方法可以快速预测太阳能集热器的长期热性能。

1 数学模型

太阳能集热器稳态工况下的输出功率表示为

$$Q_{\text{abs}} = F' [Q_{\text{net, in}} - U_L A_p (T_f - T_a)] \quad (1)$$

式中： $Q_{\text{net, in}}$ 为太阳能集热器的净入射功率或输入功率，即单位时间入射能量与反射能量损失之差； A_p 为集热器面积； T_f 为流体平均温度； T_a 为环境温度； F' 和 U_L 分别为集热器的效率因子和总热损失系数^[19]。与其他方法不同， U_L 可以直接用于比较不同太阳能集热器的热损失情况。

式(1)可以用于预测太阳能集热器的长期性能，然而流体平均温度 T_f 不容易得到，因此有必要提出一种计算流体平均温度的方法。

太阳能集热器结构如图1所示。太阳能集热器由管板组成，管板结构如图2所示。各管板的吸热管排布在一起组成了吸热面，因此可以把管板视为太阳能集热器的基本组成单元。将管板从入口至出口方向依次编号为1, 2, ..., N，流体的平均温度也可以表示为各管板中流体温度的加权平均数，即

$$T_f = \frac{\sum_{i=1}^N \chi_i T_{f,i}}{N} \quad (2)$$

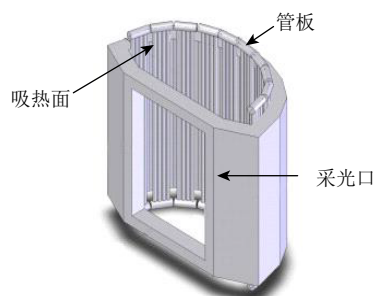


图1 太阳能集热器结构示意图

Fig. 1 Structure of solar collector

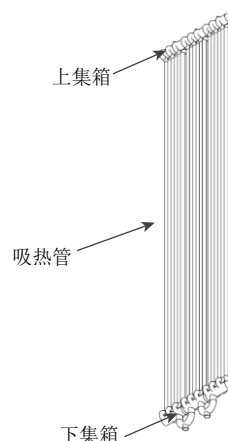


图2 管板结构示意图

Fig. 2 Structure of receiver panel

式中: $T_{f,i}$ 为管板 i 的流体平均温度; χ_i 为加权系数, 定义为

$$\begin{cases} \chi_i = \frac{h_{s,f,i}}{h_{s,f}} \\ h_{s,f} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_{s,f,i} \end{cases}$$

式中: $h_{s,f,i}$ 为管板 i 的对流换热系数; $h_{s,f}$ 为所有管板的平均对流换热系数。

联立方程(1)和(2)并修正环境温度可得

$$Q_{abs} = \sum_{i=1}^N F_L [Q_{net,in,i} - F_L h_{s,f,i} A_{s,f,i} (T_{f,i} - T_a)] \quad (3)$$

式中: $A_{s,f,i}$ 为管板 i 的换热面积; F_L 为中间变量, 定义为

$$F_L = \frac{U_L A_p}{h_{s,f} A_{s,f}}$$

其中 $A_{s,f}$ 为总的换热面积。

忽略各管板连接管路的热损失, 将方程(3)应用管板 $i(i>1)$, 并与流体吸收的能量平衡方程联立, 可得

$$\begin{aligned} T_{f,i} - T_a &= \frac{F'}{\beta_a} \sum_{k=1}^{i-1} \left(\frac{\beta_m}{\beta_a} \right)^{i-k} Q_{net,in,k} + \frac{F'}{2\beta_a} Q_{net,in,i} + \\ &\quad \frac{1}{2} \left(\frac{\beta_m}{\beta_a} \right)^{i-1} \left(1 + \frac{\beta_m}{\beta_a} \right) (T_{f,i,1} - T_a) \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $T_{f,i,1}$ 为太阳能集热器的入口温度; β_a 和 β_m 为中间变量,

$$\begin{cases} \beta_a = \dot{m} C_f + \frac{1}{2} F' U_L \frac{A_p}{N} \\ \beta_m = \dot{m} C_f - \frac{1}{2} F' U_L \frac{A_p}{N} \end{cases} \quad (5)$$

式中: \dot{m} 为质量流量; C_f 为流体比热。

将所有管板的平均温度表达式累加, 可得整个太阳能集热器的流体平均温度为

$$T_f - T_a = \gamma_s \frac{F' Q_{net,in}}{U_L A_p} + \gamma_f (T_{f,i,1} - T_a) \quad (6)$$

式中 γ_s 和 γ_f 为中间变量,

$$\begin{cases} \gamma_s = \frac{1}{2N} \frac{U_L A_p}{\beta_a} + \frac{1}{N} \frac{U_L A_p}{\beta_a} \sum_{i=2}^N \left[\sum_{k=1}^{i-1} \left(\frac{\beta_m}{\beta_a} \right)^{i-k} \frac{Q_{net,in,k}}{Q_{net,in}} \right] \\ \gamma_f = \frac{1}{2N} \left(\frac{1 + \beta_m/\beta_a}{1 - \beta_m/\beta_a} \right) [1 - (\beta_m/\beta_a)^N] \end{cases} \quad (7)$$

太阳能集热器的入口温度在实验中很容易测量得到, 也是各种仿真模型的输入参数, 因此使用入口温度替代流体平均温度更加实用。方程(6)

只适用于单个入口和出口的太阳能集热器, 对于多进出口的太阳能集热器需要重新进行推导。

2 实验装置及计算条件

图3是实验平台的结构图, 其中太阳能集热器由7个管板并联组成, 吸热面由多根不锈钢吸热管的表面组成。每个管板设有3个温度测点, 用于监测管板的壁面温度。

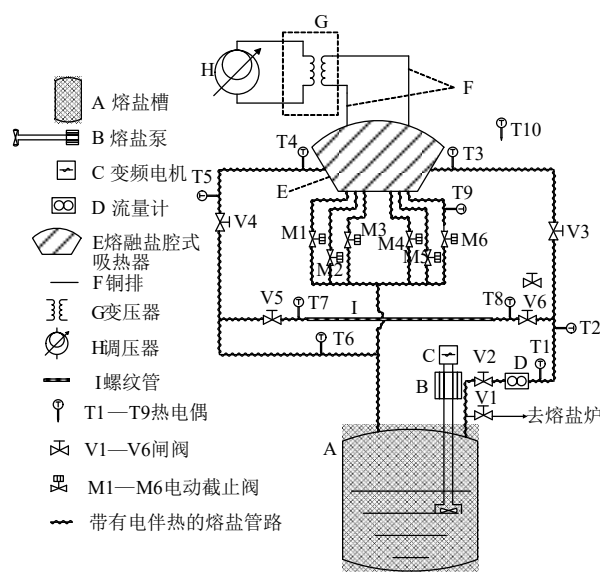


图3 实验台结构图

Fig. 3 Structure of experimental platform

该集热器使用电能作为能量输入, 每个管板作为电阻由于焦耳效应而产生热量。与室外工作的太阳能集热器不同, 该集热器无需考虑反射能量损失。由于各管板的电阻相同, 每个管板的输入能量也相同。

实验中采用了中山大学自行研制的新型熔融盐, 其主要成分为质量分数53%的 KNO_3 、40%的 $NaNO_2$ 、7%的 $NaNO_3$ 以及5%的添加剂, 流体的密度 ρ 、黏度 μ 和导热系数 k 关系式^[20]如下:

$$\begin{cases} \rho = 1938 - 0.732(T - 200) \\ \mu = e^{-4.343 - 2.0143(\ln T - 5.011)} \\ k = -6.53 \times 10^{-4}(T - 260) + 0.421 \end{cases} \quad (8)$$

该熔融盐的熔点为142℃, 液态的比热基本恒定为1561.7J/(kg·K)。表1为太阳能集热器的结构参数^[21-22]。

利用方程(6)来计算该太阳能集热器的流体平均温度, 通过将计算结果与实验数据进行对比来

验证方程的正确性。为了分析包含能量分布在内的参数对太阳能集热器热效率的影响，定义一个参考工况，当研究单个参数对太阳能集热器效率的影响时，其他参数保持与参考工况一致。参考工况中各参数的值如表2所示。

表1 太阳能集热器的结构参数
Tab. 1 Structural parameters of solar collector

结构	管板数	单个管板 吸热管数	外径/ mm	壁厚/ mm	采光口 面积/m ²
腔式太阳能集热器	7	4	14	1.4	0.12

表2 参考工况下各参数的值
Tab. 2 Parameter values under reference condition

参数	$Q_{\text{net,in}} / \text{kW}$	T_a / K	T_{fi} / K	$\dot{m} / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_w / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ε_p	ε_r	$k_p / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
数值	140	293.15	493.15	0.5	6	0.66	0.8	15

注： T_{fi} 为流体入口温度； v_w 为风速； ε_p 为管板发射率； ε_r 为腔体内壁面发射率； k_p 为管壁导热系数。

表2中后4个参数 v_w 、 ε_p 、 ε_r 、 k_p 仅用于计算总热损失系数 U_L ，并不直接影响 T_r 和 Q_{abs} ，因此，参数分析侧重于表2中前4个参数。

实验过程中，太阳能集热器的输入能量和流量可以通过调整输入电流及变频进行调节。因此，该实验平台可以进行多工况的实验。测量参数的范围及不确定度如表3所示。

表3 测量参数的范围及不确定度
Tab. 3 Ranges and uncertainties of test parameters

参数	范围	不确定度
输入功率	0~200 kW	±0.5%
入口温度	0~510 °C	±1.5 °C
出口温度	0~510 °C	±1.5 °C
环境温度	5~40 °C	±1.5 °C
体积流量	0~24 L/min	±1%

3 结果与讨论

以某次实验为例，在该实验开始后迅速将输入功率提升至73.39 kW，实验过程中保持流量恒定为0.24 kg/s。图4是实验过程中太阳能集热器的入口温度和输入功率，图5是实验过程中的环境温度及流量。将上述实验数据代入方程(6)，计算实验过程中太阳能集热器的流体平均温度，其计算结果与实验数据的对比如图6所示。

图6将实验过程分为2个阶段，在P1阶段，

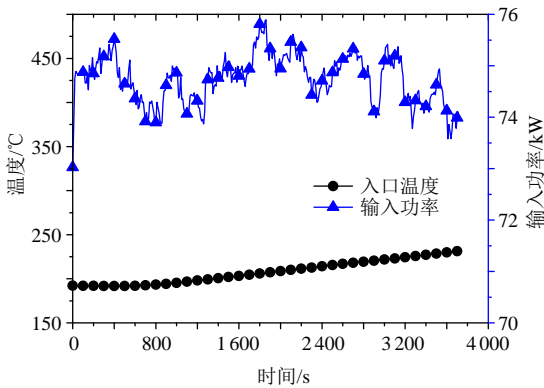


图4 太阳能集热器的入口温度和输入功率
Fig. 4 Inlet temperature and input power of solar collector

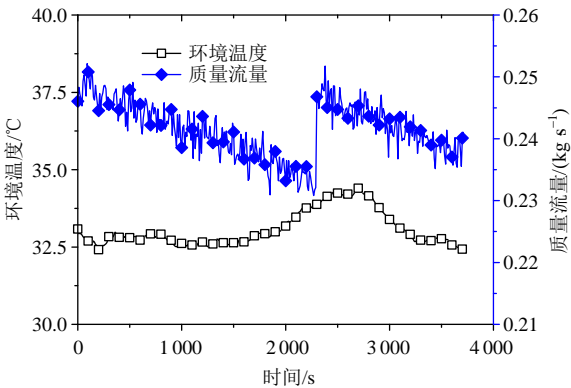


图5 太阳能集热器的环境温度和流量
Fig. 5 Ambient temperature and mass flow rate of solar collector

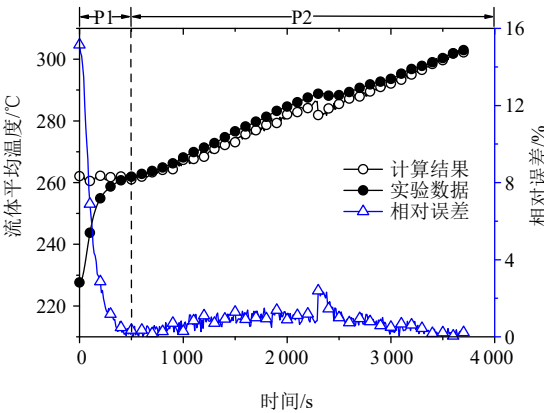


图6 流体平均温度的计算结果与实验数据的对比
Fig. 6 Comparison between calculation results and experimental data of average fluid temperature

由于输入功率迅速升高，实验数据也从初值开始迅速增大，然而计算结果在该阶段基本保持恒定，两者的相对误差超过15%；在P2阶段，实验数据由于入口温度的缓慢上升而升高，计算结果与实

验数据的相对误差减小到3%以下。之所以2个阶段有如此的差异,是因为在方程(6)的推导过程中,最重要的假设就是太阳能集热器处于稳态工况下运行。因此,太阳能集热器的工作状态越接近于稳态,计算结果也就越准确。在实际工作中,太阳能集热器经常在多云等变辐照气象条件下运行,运行工况无法保持稳态,因此方程(6)无法用于计算太阳能集热器的秒级或者分钟级短期动态特性。在评估较长时间跨度(如5~10 a甚至更长时间)下太阳能集热器的性能时,辐照、风速等外界条件一般取为小时平均值或者日平均值,此时适宜采用稳态能量平衡方程进行性能的核算。因此,方程(6)可以用于预测太阳能集热器的长期性能。

由于实验平台只包含一个熔盐储罐,太阳能集热器的入口温度无法保持恒定,因此实验平台不能进行稳态试验工况测试。为了使实验工况满足验证方程(6)的条件,定义太阳能集热器的进出口温差在1 min内波动小于0.2℃时为相对稳态。图7为在不同输入功率 and 流量下太阳能集热器的流体平均温度的计算结果与实验数据的相对误差,对比所用数据点都处于相对稳态。

从图7可以看出,在最小质量流量和最大输入功率组合的工况下,流体平均温度出现了最大相对误差;而当最大质量流量与最大输入功率组合在一起时,流体平均温度的相对误差最小,整

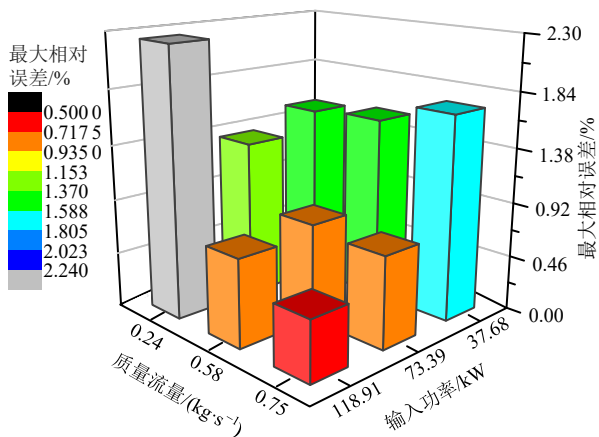


图7 不同工况下流体平均温度的计算结果与实验数据的最大相对误差

Fig. 7 Maximum relative error between calculation results and experimental data of average fluid temperature under different working conditions

体上并无规律。9种工况下,流体平均温度的最大相对误差为2.24%。因此,本文中的模型可以准确计算相对稳态下的太阳能集热器流体平均温度。相对误差可能由如下因素导致:1)每个管板只有3个温度测点,即太阳能集热器共有21个温度测点,因此测点数量不足会导致所测壁面平均温度与真实值有差别;2)太阳能集热器的管内换热情况采用经验公式进行计算,得到的对流换热系数与真实值之间也会有差别。

在推导流体平均温度表达式时,输入功率的空间分布也被考虑在内。图8是输入功率的6种分布情况,图9是6种功率分布情况下太阳能集热器的效率值。由于本文中太阳能集热器采用电能作为能量输入,因此在计算太阳能集热器效率时不考虑反射能量损失:

$$\eta_{th} = Q_{abs} / Q_{net, in} \tag{9}$$

从图9可以看出,分布1—4对太阳能集热器效率几乎没有影响,分布5下太阳能集热器的效率最高,分布6下太阳能集热器的效率最低。管板是从太阳能集热器的入口到出口方向进行编号,

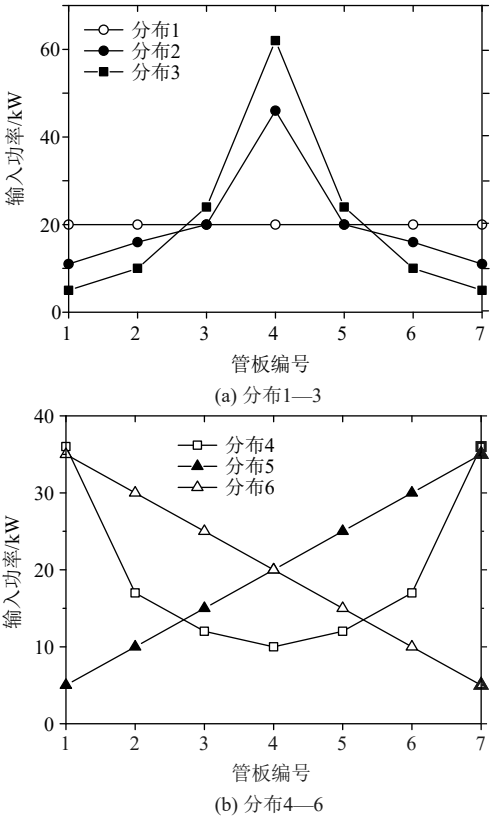


图8 太阳能集热器输入功率的分布

Fig. 8 Distribution of input power of solar collector

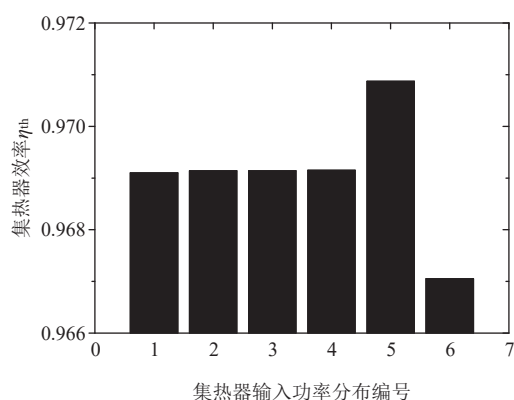


图9 不同输入功率分布下太阳能集热器的效率值

Fig. 9 Thermal efficiency of solar collector under different input power distributions

因此, 分布5中输入功率随着流体流动升温而逐渐增大, 这种分布可以降低壁面与流体间的温差, 因此可以改善换热效果。分布6则跟分布5刚好相反, 其输入功率随着流体流动升温而逐渐减小, 这种分布会导致壁面和流体间的温差较大, 从而降低了换热效果及太阳能集热器的效率。

图10展示了入口温度及环境温度对太阳能集热器效率的影响。可以看出, 太阳能集热器的效率正比于环境温度, 环境温度升高有利于减小太阳能集热器的热损失, 从而增大太阳能集热器的效率; 入口温度升高实际上提升了流体的温度, 从方程(1)可知, 流体温度越高, 热损失越大, 从而效率越低。与环境温度相比, 入口温度对效率的影响较大, 但是由于太阳能集热器的采光口较小, 导致太阳能集热器的热损失也较小, 因而从

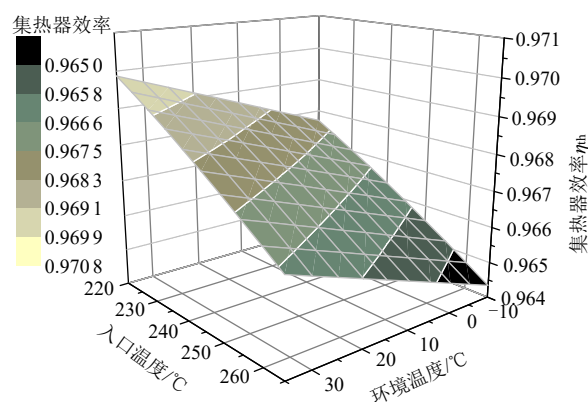


图10 入口温度与环境温度对太阳能集热器效率的影响

Fig. 10 Effect of inlet and ambient temperature on thermal efficiency of solar collector

绝对数值上来看, 两者对太阳能集热器效率的影响都较小。

图11为输入功率和流量对太阳能集热器效率的影响。可以看出, 当流量恒定时, 初期输入功率增大会提高太阳能集热器的效率, 但是当输入功率超过某点后, 太阳能集热器的效率会随着输入功率的增大开始降低。图11中的灰色点即为太阳能集热器在恒定流量下对应的最大效率值。当输入功率恒定时, 增大流量可以显著地提高太阳能集热器的效率。然而, 当流量已经足够大时, 继续增大流量对太阳能集热器效率的提高作用会越来越小。

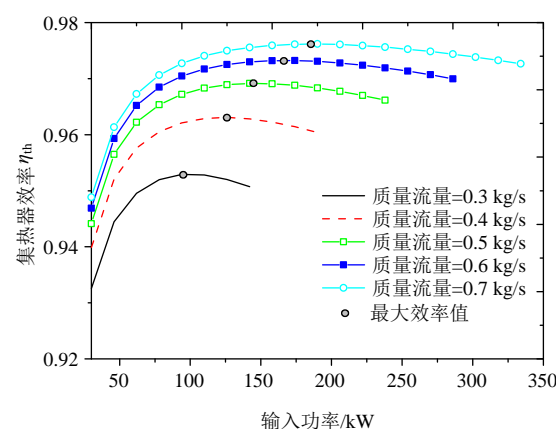


图11 输入功率与流量对太阳能集热器效率的影响

Fig. 11 Effect of input power and mass flow rate on thermal efficiency of solar collector

采用敏感性分析^[23]找出对太阳能集热器效率影响较大的因素。图12为不同参数对太阳能集热器效率的敏感性分析结果, 可以看出, 在分析

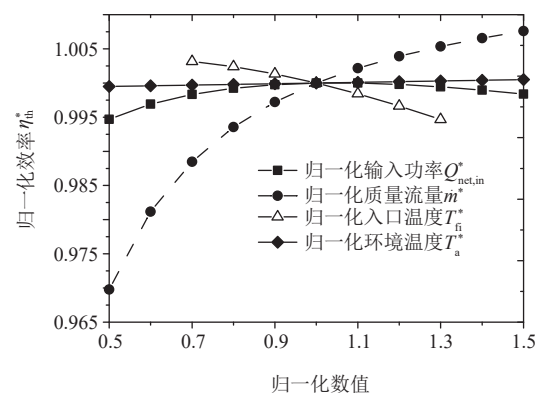


图12 不同参数对太阳能集热器效率的敏感性分析

Fig. 12 Sensitivity analysis of different parameters on thermal efficiency

范围内,太阳能集热器效率与流量、环境温度成正比,与入口温度成反比。在归一化数值0.5~1.0范围内,太阳能集热器效率与输入功率成正比;在归一化数值大于1.0后,太阳能集热器效率与输入功率成反比。在归一化数值0.5~1.0范围内,流量对太阳能集热器效率的影响最大;在归一化数值0.7~1.3范围内,入口温度对太阳能集热器效率的影响也较大;流量变大后对太阳能集热器效率的影响变小,该结论与图11的分析一致。

4 结论

基于太阳能集热器的基本组成单元管板提出了一种计算流体平均温度的方法,并用9种实验工况的数据对该方法进行了验证。对比结果显示,该方法可以准确地计算太阳能集热器在稳态下的流体平均温度。分析了不同输入功率分布下太阳能集热器的效率情况,研究了不同参数对太阳能集热器热效率的影响,具体结论如下:

1) 输入功率随流体流动方向逐渐增大的分布有利于提高太阳能集热器的效率,反之则会降低太阳能集热器的效率,其余分布对太阳能集热器的效率影响不明显。

2) 当输入功率恒定时,增大流量可以有效提高太阳能集热器的效率,但是当流量增大到一定数值时,继续增大流量对提高太阳能集热器效率的作用将减小;当流量恒定时,太阳能集热器效率随着输入功率的增加会先升高后降低;太阳能集热器的效率与入口温度成反比,与环境温度成正比。

需要注意的是,该方法基于稳态假设,不能用于计算太阳能集热器在短期动态过程的性能。

参考文献

- [1] 张哲昞, 巨星, 潘信宇, 等. 太阳能光伏-光热复合发电技术及其商业化应用[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 220-230.
- ZHANG Z Y, JU X, PAN X Y, et al. Photovoltaic/concentrated solar power hybrid technology and its commercial application[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 220-230.
- [2] 张晓东, 牛海明. 槽式光热电站镜场效率计算模型与

仿真分析[J]. 分布式能源, 2020, 5(5): 56-63.

ZHANG X D, NIU H M. Calculation model and simulation analysis of mirror field efficiency of through CSP station[J]. Distributed Energy, 2020, 5(5): 56-63.

- [3] 王泽众, 黄平瑞, 魏高升, 等. 太阳能热发电固-气两相化学储热技术研究进展[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 238-246.

WANG Z Z, HUANG P R, WEI G S, et al. Research progress of solid-gas two-phase chemical heat storage technology for solar thermal power generation [J]. Power Generation Technology, 2021, 42(2): 238-246.

- [4] 梁政, 魏震波, 孙舟倍, 等. 光热发电商参与下的电力现货市场均衡分析[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 122-131.

LIANG Z, WEI Z B, SUN Z B, et al. Analysis of the equilibrium of electricity spot market with the participation of CSP[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 122-131.

- [5] XU C, LI X, WANG Z, et al. Effects of solid particle properties on the thermal performance of a packed-bed molten-salt thermocline thermal storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 57 (1/2): 69-80.

- [6] DU B C, HE Y L, ZHENG Z J, et al. Analysis of thermal stress and fatigue fracture for the solar tower molten salt receiver[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 99: 741-750.

- [7] Sandia National Lab. A final report on the Phase 1 testing of a molten-salt cavity receiver[R]. Albuquerque: Sandia National Lab, 1992.

- [8] WANG K, HE Y L, QIU Y, et al. A novel integrated simulation approach couples MCRT and Gebhart methods to simulate solar radiation transfer in a solar power tower system with a cavity receiver[J]. Renewable Energy, 2016, 89: 93-107.

- [9] TEHRANI S S M, TAYLOR R A. Off-design simulation and performance of molten salt cavity receivers in solar tower plants under realistic operational modes and control strategies[J]. Applied Energy, 2016, 179: 698-715.

- [10] LI X, KONG W, WANG Z, et al. Thermal model and thermodynamic performance of molten salt cavity receiver[J]. Renewable Energy, 2010, 35(5): 981-988.

- [11] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ M R, SÁNCHEZ- GONZÁLEZ A, MARUGÁN-CRUZ C, et al. New designs of molten-salt tubular-receiver for solar power tower[J]. Energy

- Procedia, 2014, 49: 504-513.
- [12] RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ M R, MARUGAN-CRUZ C, ACOSTA-IBORRA A, et al. Comparison of simplified heat transfer models and CFD simulations for molten salt external receiver[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(1): 993-1005.
- [13] FANG J, TU N, WEI J. Effects of absorber emissivity on thermal performance of a solar cavity receiver [J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2014, 2014: 1-10.
- [14] FANG J B, TU N, WEI J J. Numerical investigation of start-up performance of a solar cavity receiver[J]. Renewable Energy, 2013, 53: 35-42.
- [15] CHANG Z, LI X, XU C, et al. Numerical simulation on the thermal performance of a solar molten salt cavity receiver[J]. Renewable Energy, 2014, 69: 324-335.
- [16] TEICHEL S H, FEIERABEND L, KLEIN S A, et al. An alternative method for calculation of semi-gray radiation heat transfer in solar central cavity receivers [J]. Sol Energy, 2012, 86(6): 1899-1909.
- [17] GONZALEZ M M, PALAFOX J H, ESTRADA C A. Numerical study of heat transfer by natural convection and surface thermal radiation in an open cavity receiver [J]. Sol Energy, 2012, 86(4): 1118-1128.
- [18] WAGNER M J. Simulation and predictive performance modeling of utility-scale central receiver system power plants[D]. Wisconsin: University of Wisconsin Madison, 2008.
- [19] ZHANG Q, LI X, WANG Z, et al. Cavity receiver thermal performance analysis based on total heat loss coefficient and efficiency factor[J]. International Journal of Energy Research, 2018, 42(6): 2284-2289.
- [20] YANG Z, GARIMELLA S V. Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline [J]. Solar Energy, 2010, 84(6): 974-985.
- [21] ZHANG Q, LI X, CHANG C, et al. An experimental study: thermal performance of molten salt cavity receivers[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50 (1): 334-341.
- [22] ZHANG Q, LI X, WANG Z, et al. Experimental and theoretical analysis of a dynamic test method for molten salt cavity receiver[J]. Renewable Energy, 2013, 50: 214-221.
- [23] LIAO Z, LI X, XU C, et al. Allowable flux density on a solar central receiver[J]. Renewable Energy, 2014, 62: 747-753.

收稿日期：2021-09-01。

作者简介：



徐立

徐立(1984)，男，博士，副研究员，研究方向为太阳能集热器和吸热器性能、太阳能热化学储能、电子器件散热和电池热管理等，xuli1@mail.iee.ac.cn；



孙飞虎

孙飞虎(1980)，男，博士，助理研究员，研究方向为太阳能定日镜跟踪质量诊断、定日镜场跟踪校正和聚光能流密度分布测量等，sunfeihu@mail.iee.ac.cn；



李志

李志(1988)，男，博士后，研究方向为换热设备性能、电气与电子装备冷却技术等，lizhi@mail.iee.ac.cn；



张强强

张强强(1986)，男，博士，副研究员，研究方向为太阳能吸热器性能评价和太阳能热化学等，本文通信作者，zhangqiangqiang@mail.iee.ac.cn。

(责任编辑 尚彩娟)