

# 太阳能集热系统过热影响因素分析

刘艳峰, 李荟婷, 王登甲, 陈耀文, 刘加平

(西部绿色建筑国家重点实验室, 西安建筑科技大学, 西安 710055)

**摘要:** 通过分析太阳能供热系统集热、蓄热和用热各个子系统的动态热量平衡关系, 建立太阳能集热系统热量传递数学模型, 并结合集热系统内部流体过热汽化原理, 提出集热系统过热度评价指标, 并对集热系统在不同流量、水箱容积以及不同连接方式等条件下的过热程度进行分析计算。结果表明, 集热系统过热度随热媒流量、集热器倾角和水箱容积取值的增大而减小, 并通过对上述3种因素进行敏感性分析得到集热器倾角对系统过热度的影响最大。

**关键词:** 太阳能供热; 系统设计; 敏感性分析; 影响因素; 系统过热

**中图分类号:** TK511

**文献标志码:** A

## 0 引言

太阳能集热系统为冬季供暖提供足够热源的同时也为全年提供了充足的卫生热水。目前, 太阳能集热系统容量设计通常以冬季供暖热负荷为依据, 这使得在其他季节, 尤其是夏季常发生集热系统的集热量大于用户需热量的情况, 从而使系统容易产生过热现象。季节性用热需求的不平衡、环境条件差异及不同的系统设计条件均会造成太阳能供热系统的集热量大于需热量, 进而使太阳能集热系统过热。长时间的过热现象会导致系统局部部件损坏、安全可靠降低的问题。例如集热器处于高温工况时容易发生蒸汽腐蚀或集热流体降解现象<sup>[1]</sup>, 系统内蒸汽的大量产生, 造成系统压力升高。当前, 太阳能集热系统过热方面的研究多集中在工程实例及技术开发方面, 例如减少集热器的光入射<sup>[2]</sup>、增加集热系统的散热量<sup>[3]</sup>及发明新型防过热集热器等<sup>[4]</sup>。

目前众多学者在不同设计因素对太阳能集热系统热性能影响方面研究较多且深入。Furbo等<sup>[5]</sup>提出不同的热水流量、集热器连接方式以及安装方式都会影响集热系统的热性能。马东等<sup>[6]</sup>分析进口水温、工质流量以及集热材料3种因素对平板集热器的光热性能影响。翟辉等<sup>[7]</sup>分析集热倾角、连接方式等设计因素对集热阵列接受的太阳辐照量的影响, 研究表明集热器的排布方式同样影响着集热系统热性能。

现有研究缺少对系统的过热评价, 缺少季节性因素及设计因素对系统过热的影响分析。

基于此, 本文提出瞬时过热度及累计过热度2种评价指标, 以衡量集热系统在不同条件下的过热程度。着重分析集热器倾角、热媒流量和水箱容积等设计参数对集热系统过热

的影响, 以为太阳能供热系统的防过热技术开发应用提供理论基础。

## 1 太阳能供热系统原理及数学模型

### 1.1 太阳能供热系统热力学过程

太阳能供热系统热力学平衡原理如图1所示, 系统主要是由集热系统、蓄热系统及供热系统组成。图1中,  $T_w$  为水箱平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_a$  为环境或周围空气温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$  为集热器出口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $A_c$  为太阳集热器总面积,  $\text{m}^2$ ;  $G$  为太阳辐射照度,  $\text{kJ}/\text{m}^2$ ;  $m$  为集热流量,  $\text{kg}/\text{h}$ 。

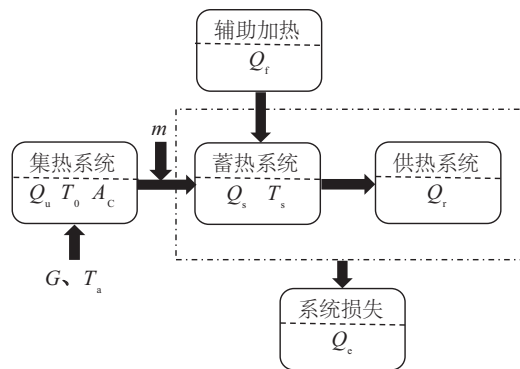


图1 太阳能供热系统热力学过程图

Fig. 1 Schematic of solar heating system

太阳能供热采暖系统总平衡方程为:

$$Q_u(\tau) + Q_f(\tau) = Q_s(\tau) + Q_r(\tau) + Q_c(\tau) \quad (1)$$

式中,  $Q_u$  ——有效集热量,  $\text{kJ}$ ;  $Q_f$  ——辅助加热量,  $\text{kJ}$ ;  $Q_s$  ——储热量,  $\text{kJ}$ ;  $Q_c$  ——系统损失量,  $\text{kJ}$ ;  $Q_r$  ——耗热量,  $\text{kJ}$ ;  $\tau$  ——时间变量,  $\text{h}$ 。

收稿日期: 2018-11-01

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0700400); 国家自然科学基金(51678468; 51878532)

通信作者: 刘艳峰(1971—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事建筑节能与太阳能热利用方面的研究。liuyanfeng@xauat.edu.cn

### 1.1.1 有效集热量计算

集热系统的有效集热量可表达为<sup>[8-9]</sup>:

$$Q_u(\tau) = A_c \{ F_R(\tau) \alpha_c G(\tau) - F_R U_L [T_i(\tau) - T_a(\tau)] \} \quad (2)$$

$$Q_u(\tau) = c_p m(\tau) [T_o(\tau) - T_c(\tau)] \quad (3)$$

式中,  $Q_u(\tau)$ ——集热器获得的有效集热量, kJ;  $F_R$ ——太阳能集热器热迁移因子;  $(\tau) \alpha_c$ ——集热器有效透射率-吸收率积;  $U_L$ ——太阳集热器总热损系数,  $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{C} \cdot \text{h})$ ;  $T_i$ ——太阳集热器工质进口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $c_p$ ——流体的定压比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{C})$ 。

根据式(2)、式(3), 可将集热器出口温度表达为:

$$T_o(\tau) = T_i(\tau) + \frac{F_R}{m(\tau)c_p} \{ (\tau) \alpha_c G(\tau) A_c - U_L A_c [T_i(\tau) - T_a(\tau)] \} \quad (4)$$

假定水箱温度等于集热器进口温度, 式(4)可转换为:

$$T_o(\tau) = T_s(\tau - 1) + \frac{F_R}{m(\tau)c_p} \cdot [(\tau) \alpha_c \cdot G(\tau) \cdot A_c - U_L A_c T_s(\tau - 1) + U_L A_c T_a(\tau)] \quad (5)$$

### 1.1.2 系统损失计算

系统损失量由供热环路损失及水箱损失组成, 可表达为<sup>[10]</sup>:

$$Q_c(\tau) = X Q_l(\tau) + X_2 V_s \cdot \Delta T(\tau) \quad (6)$$

式中,  $X Q_l(\tau)$ ——供热环路损失, kJ;  $X$ ——比例系数, 取 0.1;  $X_2$ ——蓄热水箱热损失系数, 取  $0.029 \text{ kJ}/(\text{h} \cdot \text{L} \cdot \text{C})$ ;  $\Delta T(\tau)$ ——水箱同环境温度的差值,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.1.3 蓄热量计算

水箱蓄热量可计算为<sup>[11]</sup>:

$$(c_p V_s \rho) \frac{\partial T_s}{\partial t} = Q_s \quad (7)$$

式中,  $V_s$ ——蓄热容积, L;  $r$ ——热水密度, 取  $0.983 \text{ kg/L}$ 。

水箱容积可由式(8)表示<sup>[8]</sup>:

$$V_s = X_1 \cdot A_c \quad (8)$$

式中,  $X_1$ ——水箱容积比, 水箱体积同集热器面积的比值。

假设集热量足够, 无需辅助热源的情况, 将式(2)、式(6)~式(8)代入式(1)并应用差分法表示可得水箱温度为:

$$T_s(\tau) = T_s(\tau - 1) + \frac{\Delta \tau}{\rho V_s c_p} \cdot [A_c \cdot \delta_c \{ F_R(\tau) \alpha_c G(\tau) - F_R U_L [T_s(\tau - 1) - T_a(\tau)] \} - (1 + X) \cdot Q_l(\tau) - X_2 V_s \cdot \Delta T(\tau)] \quad (9)$$

式中,  $T_s(\tau)$ ——水箱温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $V_p$ ——集热流体质量, L;  $r_p$ ——集热流体密度,  $\text{kg/L}$ 。

## 1.2 太阳能集热系统过热度评价指标

太阳能供热系统运行中, 若集热系统的集热量长时间高于供热系统的供热量会造成集热系统内部流体温度升高, 从而产生过热情况。为方便分析集热系统的过热规律及多种因素对其过热影响, 提出瞬时过热度及累计过热度 2 种指

标, 以衡量集热系统过热度。其中过热度常用于形容流体过热温度与饱和温度相差的程度, 此处借鉴其概念, 用以表征集热系统过热度大小。

### 1.2.1 瞬时过热度

瞬时过热度  $\theta(\tau)$  为集热器瞬时出口温度  $T_o(\tau)$  和集热流体汽化温度  $T$  的温度差同  $T$  的比值。  $\theta(\tau)$  越大表明集热系统的瞬时的过热度越高;  $\theta(\tau) < 0$  时表明集热系统未过热。瞬时过热度计算式为:

$$\theta(\tau) = \frac{[T_o(\tau) - T]}{T} \quad (10)$$

式中,  $\theta(\tau)$ ——瞬时过热度;  $T$ ——集热流体汽化温度, 不同的集热流体在不同的气压下汽化温度的值都不相同,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.2.2 累计过热度

累计过热度  $\theta_d$  为一段时间内大于零的瞬时过热度值之和。  $\theta_d$  越大表明集热系统该时段内累计过热度越高。累计过热度计算式为:

$$\theta_d = \sum \theta(\tau_i) \quad (11)$$

式中,  $\theta_d$ ——累计过热度;  $\tau_i$ ——瞬时过热度值大于零的时刻。

## 2 数值计算

以中国某西北典型地区为例进行集热系统过热情况分析, 该地区纬度为北纬  $42^{\circ}$ , 选取该地区夏季典型气象年的气象数据为基准参数, 典型日的气象规律及热水负荷规律如图 2 所示, 热水负荷规律参考文献[12], 热水高峰集中在 20:00~22:00 时段, 最高可达到  $7090 \text{ kJ/h}$ , 日均热水负荷为  $39391 \text{ kJ}$ 。

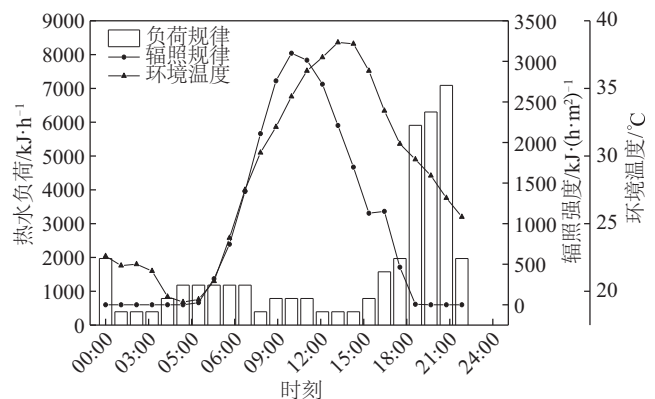


图2 典型日气象参数及热水负荷规律

Fig. 2 Daily meteorological parameters and hot water load

基于已有文献中对影响太阳能集热系统热性能因素的分析结果, 选取集热器倾角、热媒流量、水箱容积及集热器连接方式共 4 种因素。不同因素的工况设置如表 1 所示, 其中水箱容积工况是通过改变水箱容积比  $X_1$  来实现的; 分析集热器连接方式对集热系统热性能影响时, 选取集热器的串联、

并联及混联3种工况进行分析。在相同气象及负荷规律条件下,利用1.1节所建立的数学模型,计算不同工况下应用真

空管集热器的集热系统的瞬时及累计过热度,分析不同因素对集热系统过热程度的影响。

表1 不同影响因素工况表

Table 1 Value table of different influencing factors

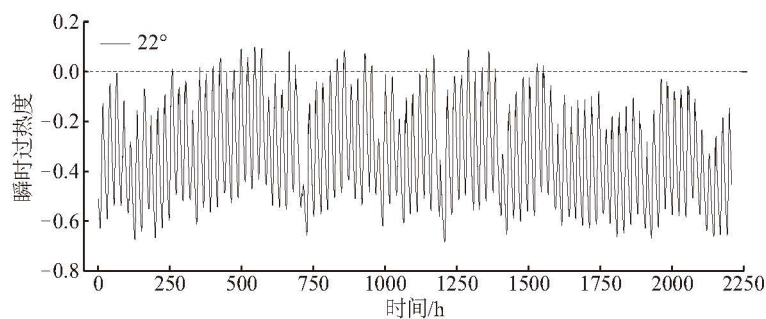
模拟工况	集热倾角 $q/(^\circ)$	集热流量 $m/kg\cdot h^{-1}\cdot m^{-2}$	水箱容积比 $X_1/L\cdot m^{-2}$	集热器连接方式
1	42	35	50	—
2	22~67	35	50	—
3	42	11~65	50	—
4	42	35	10~80	—
5	42	35	50	①串联、②并联和③混联

### 3 结果与分析

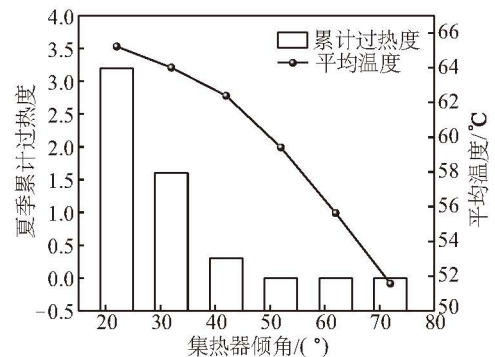
#### 3.1 集热器倾角对系统过热度的影响

集热器倾角会对集热阵列接收到的太阳辐射量产生影响<sup>[10]</sup>,为增强系统集热热性能,规范推荐安装倾角宜在当地纬度 $-10^\circ\sim 20^\circ$ 范围内<sup>[8]</sup>。本文为分析倾角对系统过热的影响,选取在当地纬度 $-20^\circ\sim 25^\circ$ 范围内变化集热器倾角,得到典型日集热系统瞬时过热度曲线及夏季累计过热度、集热器平均出口温度曲线。图3a以集热倾角为 $22^\circ$ 为例,给出系统夏季瞬时过热度规律,由曲线规律可知,6、7月份的

过热程度高,8月份的过热程度低,6~8月份的月累计过热度值分别为1.70、1.46、0.10。由图3b曲线规律可知,当集热器倾角大于等于 $52^\circ$ 时系统未产生过热情况,夏季累计过热度随集热器倾角的增加而减小,倾角每增加 $10^\circ$ 对应的累计过热度值分别为3.24、1.56、0.28、0、0和0。分析可知在北方地区,夏季太阳高度角高于冬季,增加集热器倾角可使集热器接收到的太阳辐射量减少,进而减少集热系统的集热量,但冬季相反,更高的倾角有利于接受更多的太阳辐射,因此应综合考虑冬季工况及夏季工况后,合理选取集热器倾角。



a. 集热系统瞬时过热度曲线



b. 系统夏季累计过热度及集热器平均出口温度曲线

图3 不同集热倾角下的系统过热度曲线

Fig. 3 Overheating curves under different collecting angles

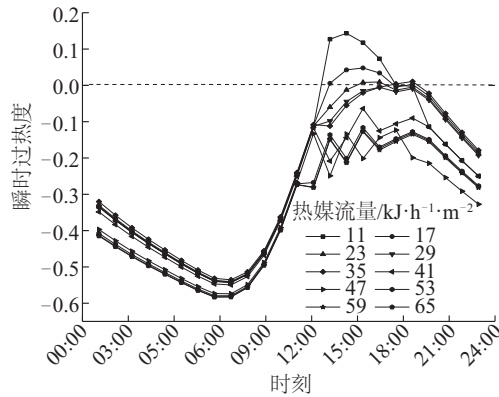
#### 3.2 热媒流量对系统过热度的影响

热媒流量是指集热系统中集热介质的循环速率,其值会影响集热系统和蓄热系统之间的换热速率。本文中真空管集热器为例进行计算分析,据文献[8]给出的推荐流量区间,最终选取 $11\sim 65\text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 作为分析工况,得到典型日集热系统瞬时过热度曲线及夏季累计过热度、集热器平均出口温度曲线。由图4a可知,在表1中模拟工况2的条件下,当热媒流量高于 $35\text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 时系统未发生过热现象,当设计热媒流量为 $11\text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 时,过热温差最大值出现于16:00,为 $14^\circ\text{C}$ 。由图4b可知,随着热媒流量的增加集热系统的累计过热度降低,流量每增加 $6\text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ 对应的夏季累计过热度值分别为3.29、2.06、0.67、0.30、0.28、0、0、0、0和

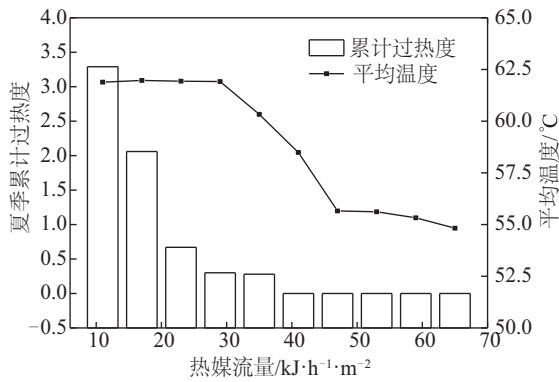
0。分析可知,在其余条件一定的情况下,热媒流量的增加会减少介质在集热器内的停留时间,即缩短了单位质量流体的换热时间,从而降低集热器出口温度,因此集热系统过热时,增大热媒流量可减缓系统过热程度,但随着热媒流量的增大,过热度减缓的趋势减小。

#### 3.3 水箱容积对系统过热度的影响

水箱容积比是指蓄热水箱容积同集热面积的比值。水箱容积比的选取影响着蓄热水箱的蓄热量,本文根据改变水箱容积比来分析水箱容积对系统过热度的影响。据文献[8]推荐取值,最终选取水箱容积比变化区间为 $10\sim 80\text{ L}/\text{m}^2$ ,得到典型日集热系统瞬时过热度曲线及夏季累计过热度、集热器平均出口温度曲线。由图5a可知,系统过热度总体上随着水



a. 集热系统典型日瞬时过热度曲线

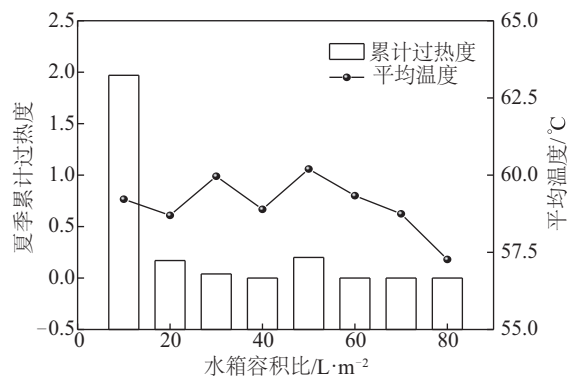


b. 系统夏季累计过热度及集热器平均出口温度曲线

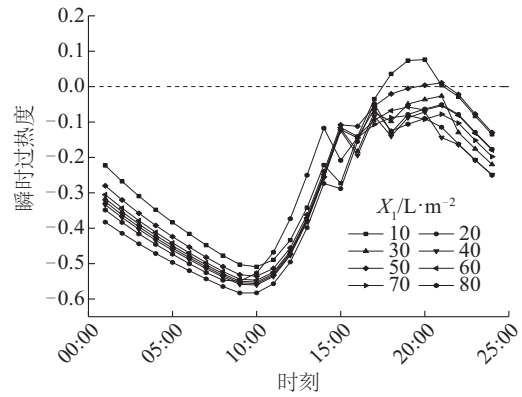
图4 不同热媒流量下的系统过热度曲线

Fig. 4 Overheating curve under different heat flowrate

箱容积的增加而降低。在表 1 中模拟工况 3 的条件下,水箱容积比大于等于 60 L/m<sup>2</sup>时,系统再无过热现象。容积比每增加 10 L/m<sup>2</sup>时,系统夏季累计过热度值分别为 1.97、0.17、0.04、0、0.28、0、0 和 0。由图 5b 可知,当水箱容积比  $X_1$  为 10 L/m<sup>2</sup>时,典型日的过热程度最高,过热温差最大值出现在 19:00,为 7.5 °C。分析得知,在集热面积一定的条件下,增加水箱容积比会增加水箱的蓄热容积,导致水箱温度下降,进而降低集热器的进口温度,最终使集热系统过热程度减小;但过大的水箱容积使水箱内温度降低,因此应合理选取水箱容积,从而在保证水温的同时能够改善系统的过热程度。



a. 系统夏季累计过热度及集热器平均出口温度曲线



b. 集热系统典型日瞬时过热度曲线

图5 不同水箱容积下的系统过热度曲线

Fig. 5 Overheating curve under different volume of tank

### 3.4 集热器连接方式对系统过热度的影响

集热器的连接方式多变,不同的连接方式会造成集热器内温度分布的不同<sup>[5]</sup>。改变集热器的连接方式,分别选取串联、并联和混联形式。串联条件下,各集热器温度分布规律不同,全并联条件下各集热器温度分布规律相同。在文中夏季负荷条件下,当冬夏负荷比为 3.26 时,经初步计算需采用 6 块集热器,每块集热器面积为 2 m<sup>2</sup>。混联连接方式采取先串联后并联形式,共分为 3 组,组间温度分布规律相同,各组内串联的 2 块集热器温度规律不同。采用逐板计算方法<sup>[13]</sup>,该方法定义在集热器串联时,上一块集热器出口的工质状态作为下一块集热器的进口工质状态,并联时,进入 2 块集热器的工质状态相同。得到不同连接方式下,集热系统的日累计过热度及水箱平均温度,见表 2。

表2 不同连接方式下的日累计过热度及水箱平均温度

Table 2 Overheating degree and tank's temperature under different connections

连接方式	串联	并联	混联
总相对日均过热度	5.11	0	0
平均水箱温度/°C	71.91	62.60	66.60

串联条件下各集热器的累计过热度值为依序为 0、0、0.22、0.85、1.63 和 2.41,由此可知,越靠近串联末端,过热程度越强。而由表 2 可知,在文中条件下,串联方式造成集热系统过热程度最高,并联及混联方式下未有过热情况产生,但并联方式使蓄热水箱的平均温度最低。由上述结果可知,从防止过热的角度来说,并联方式为最好的选择,但进行系统设计时需综合考虑所需水温后再进行连接方式的选取方能在保证供热效果的前提下降低系统过热程度,提高系统的热性能。

### 3.5 敏感性分析

本文将敏感性分析法应用于各设计因素对集热系统过热度影响方面。采用局部敏感性分析法<sup>[14]</sup>,分析单个参数变

化对指标结果的影响,假定其他条件不变,只改变单一变量,从而分析这些因素对指标的影响程度,影响程度的大小称为敏感性系数,其值越大说明该因素对指标影响越大,越应重视该因素对评价指标的影响<sup>[15]</sup>。

本文中以夏季累计过热度作为分析指标,选取集热器倾角、热媒流量和水箱容积这3个设计因素作为敏感性分析的不确定因素,敏感性系数计算公式为<sup>[15]</sup>:

$$e_i = \left| \frac{\frac{\Delta\theta_i}{\theta_i}}{\frac{\Delta x_i}{x_i}} \right| \quad (12)$$

式中,  $e_i$  —— 不确定因素  $x_i$  的敏感性系数;  $\theta_i$  —— 不确定因素  $x_i$  对应的过热度。

热媒流量、集热倾角和水箱容积3种因素的敏感性系数见表3。表3中数据是基于热媒流量为  $35 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ , 集热倾角为  $42^\circ$ , 水箱容积比为  $50 \text{ L}/\text{m}^2$  工况下分别改变单一参数得到的3种影响因素对累计过热度的敏感度系数。由表3可知,集热倾角的敏感度系数最大,水箱容积的敏感性系数最小,表明3种因素对集热系统过热的影响程度由强到弱的顺序为集热倾角、热媒流量、水箱容积。

表3 敏感性系数计算结果表

Table 3 Results of sensitivity coefficient

影响因素	敏感性系数
热媒流量 $m$	8.1
集热倾角 $q$	12.7
水箱容积 $V_s$	3.8

## 4 结 论

本文提出以集热器出口温度及过热时长为参考量的过热度评价指标,该指标,一定程度上反映集热系统的过热度,便于衡量不同设计条件对集热系统过热情况的影响及分析每天集热系统的过热规律。文中分别在不同集热器连接方式、集热器倾角、热媒流量、水箱容积条件下计算集热系统的过热度值,分析各因素对集热系统过热的影响情况,得到以下主要结论:

1) 过热度随着热媒流量、集热倾角、水箱容积取值的增大而降低;串联条件下的集热系统过热度值最高,混联方式及并联条件下未有过热情况的产生,但并联方式下水箱平均温度最低。

2) 通过敏感性分析可知,集热器倾角对集热系统过热的影响程度最高,水箱容积的影响程度最低,说明在进行集热系统容量设计时,集热器倾角的选取对系统过热的影响最强。

上述结论为太阳能集热系统防过热优化设计提供了理论依据。通过分析上述影响因素可知,除环境温度及热水负荷等不易人为控制的因素外,集热器的排布方式(连接方式、集热倾角)、热媒流量及水箱容积等设计因素均应在综合考

虑系统供水温度等因素后进行选取,以提高系统保证率的同时防止过热情况的产生。

## [参考文献]

- [1] HILLERNS F. The behaviour of heat transfer media in solar active thermal systems in view of the stagnation conditions [C]// IEA - SHC Task 26 Industry Workshop, Borlänge, Sweden, 2001.
- [2] SLAMAN M, GRIESEN R. Solar collector overheating protection[J]. Solar energy, 2009, 83(7): 982-987.
- [3] HUSSAIN S, HARRISON S J. Experimental and numerical investigations of passive air cooling of a residential flat-plate solar collector under stagnation conditions[J]. Solar energy, 2015, 122: 1023-1036.
- [4] FARAMARZ M. Solar collector with temperature limitation using shape memory metal [J]. Renewable energy, 1999, 16(1): 611-617.
- [5] FURBO S, DRAGSTED J, PERERS B, et al. Yearly thermal performances of solar heating plants in Denmark-Measured and calculated [J]. Solar energy, 2018, 159: 186-196.
- [6] 马冬, 李虹, 刘立群. 不同因素对平板太阳能集热器光热性能的影响[J]. 太原科技大学学报, 2017, 38(6): 428-433.  
MA D, LI H, LIU L Q. Affect of different factors on the flat plate solar collector performance of light [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2017, 38(6): 428-433.
- [7] 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.  
ZHAI H, DAI Y J, WU J Y, et al. Research on arrangement problem of lager scale flat plane/evacuated tube solar collector array [J]. Acta energiae solaris sinica, 2008, 29(5): 564-568.
- [8] 郑瑞澄. 太阳能供热采暖工程应用技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
ZHENG R C. Technical manual of solar heating engineering application [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [9] 彭飞, 张国勋. 一个太阳能-热能系统的计算机分析模型[J]. 太阳能学报, 1988, 9(4): 41-48.  
PENG F, ZHANG G X. A computer analysis model for solar thermal system [J]. Acta energiae solaris sinica, 1988, 9(4): 41-48.
- [10] 刘艳峰, 王登甲. 太阳能采暖设计原理与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
LIU Y F, WANG D J. Design principle and technology of solar heating [M]. Beijing: China Architecture & Building

- Press, 2016.
- [11] 王登甲, 刘艳峰, 王丽娟. 主动太阳能采暖供水管流量规律研究[J]. 太阳能学报, 2011, 32(9): 1387-1390.  
WANG D J, LIU Y F, WANG L J. The flowrate of water supply pipe for solar heating [J]. Acta energiae solaris sinica, 2011, 32(9): 1387-1390.
- [12] 王珊珊, 郝斌, 陈希琳, 等. 居民生活热水需求与用能方式调查研究[J]. 给水排水, 2015(11): 73-77.  
WANG S S, HAO B, CHEN X L, et al. Investigation on residents' domestic hot water demand and energy consumption mode [J]. Water & wastewater engineering, 2015(11): 73-77.
- [13] 李宏燕, 何建国, 李明滨. 太阳能平板集热器串联阵列运行特性的数值模拟[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(3): 195-200.  
LI H Y, HE J G, LI M B. Numerical simulation on operation properties of plate solar collector array [J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2016, 37(3): 195-200.
- [14] 何亮, 赵刚, 靳宁, 等. 不同气候区和不同产量水平下 APSIM-Wheat 模型的参数全局敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 148-157.  
HE L, ZHAO G, JIN N, et al. Global sensitivity analysis of APSIM-Wheat parameters in different climate zones and yield levels [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 148-157.
- [15] 代倩, 段善旭, 蔡涛, 等. 电动汽车充换电站的成本效益模型及敏感性分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 41-47.  
DAI Q, DUAN S X, CAI T, et al. Cost and its sensitivity analysis for battery charging and swapping station for electric vehicles [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(24): 41-47.

## FACTOR ANALYSIS OF OVERHEATING IN SOLAR COLLECTOR SYSTEM

Liu Yanfeng, Li Huiting, Wang Dengjia, Chen Yaowen, Liu Jiaping

(State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** A mathematical model of heat transfer in solar collector system was established by analyzing the process of heat balance in each subsystem of solar heating system. According to the vaporization's principle of the internal fluid of collector, the overheating evaluation index was proposed. Overheating degree of the solar collector system under different conditions such as heat flowrate, volume of water tank and collecting tilt angle was analyzed. The results indicate that the overheating degree decreases with the increase of heat flowrate, collecting tilt angle and volume of water tank. Through sensitivity analysis of the above three factors, the heat collecting tilt angle has the greatest influence on system overheating.

**Keywords:** solar heating; system design; sensitivity analysis; influence factor; overheating