

# 厦门地区固定式集热器最佳倾角分析

丁德锋, 黄文洪, 陈武

(福建省船舶与海洋工程重点实验室, 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了确定厦门地区集热器的最佳倾角, 以年集热量最大、年辅助热量最小为目标, 利用 Visual Basic 语言, 计算得到最佳倾角分别为  $18.2^\circ$  和  $39.1^\circ$ , 对这 2 种倾角与采用厦门纬度  $24.8^\circ$  为倾角时全年各月太阳能集热量进行比较, 同时在实验平台上研究了倾角对得热量的影响。结果表明: 固定式集热器正南朝向时, 得热量应与全年各月热水负荷相匹配, 倾角采用  $39.1^\circ$  时, 秋冬季得热量最多, 年辅助耗电量最小。该结果可为厦门地区太阳能系统的设计与安装提供理论依据。

[关键词] 集热器; 倾角; 辅助热量; 得热量; 厦门地区

[中图分类号] TU 822

## Analysis on the Best Optimum Tilt Angle for Fixed Installed Solar Collector in Xiamen Area

DING Defeng, HUANG Wenhong, CHEN Wu

(Provincial Key Laboratory of Naval Architecture & Ocean Engineering, School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to determine an optimum tilt angle for solar collector used in Xiamen area, calculations, which were based on the objectives of maximum annual heat gain and minimum annual auxiliary heating, were carried by employing Visual Basic language and accordingly obtained the optimum tilt angle respectively about  $18.2^\circ$  and  $39.1^\circ$ . The collected heat in every month under the above tilt angles was compared with that of  $24.8^\circ$  which is in correspondence with the latitude at Xiamen area. Also, the influence of tilt angle on heat gained was investigated on the experiment platform. The results show that, for fixed solar collector facing due south, the collected heat should match with those required by hot water at different months. In the autumn and winter seasons, when the tilt angle is set as  $39.1^\circ$ , the maximum heat is obtained in comparison of minimum consumption of auxiliary electricity. It suggests that the results from this paper can be a theoretical basis for solar system design and installation in Xiamen area.

**Keywords:** solar collector; tilt angle; auxiliary energy; heat gain; Xiamen area

## 0 引言

太阳能是取之不尽, 用之不竭的清洁能源, 太阳能的利用越来越受到人们的重视。将太阳能应用于建筑中为人们提供生活热水, 可以减少化石能源的消耗。太阳能热水系统得热量的多少直接取决

[收稿日期] 2016-12-27

[修回日期] 2017-06-28

[基金项目] 福建省科技重点项目(2014H0035)

[作者简介] 丁德锋(1986—), 男, 硕士, 助教, 主要从事热泵及太阳能利用研究。通信作者: 陈武(1973—), 男, 教授, 博导, 从事能源利用技术研究, E-mail: dingdefeng8866@163.com。

于集热器的集热量, 而集热器倾角是影响集热量的主要因素, 虽然太阳能自动跟踪系统可以最大限度地吸收太阳辐射能, 但由于安装维护成本大, 限制了它的推广使用, 所以固定式安装仍是主要方式。

针对固定式集热器的安装倾角, 张鹤飞等<sup>[1]</sup>认为一般取当地纬度大小, 春分至秋分取比当地纬度小 10°~15°, 秋分至来年春分取比当地纬度高 10°~15°。W. G. Le Roux<sup>[2]</sup>利用日射功率计等仪器所测得的数据, 分析了南非的最佳平板倾斜角, 发现相比水平安装, 理想的倾角可以使得全年集热量提高 10%, 而对于太阳能自动跟踪系统, 全年太阳集热量可以提高 45%。朱丹丹等<sup>[3]</sup>分析了倾斜面全年太阳辐射总量随倾斜角的变化规律, 并通过对我国部分地区年最佳倾角影响因素分析, 得出除纬度外, 太阳直射辐射和散射辐射的全年变化状况也是年最佳倾角的重要影响因素。

厦门属于我国太阳能资源丰富地区<sup>[4]</sup>, 但针对厦门地区集热器安装倾角的设计计算相对较少。本文对 3 种常见的固定式平板集热器倾角计算方法进行了比较, 同时在实验平台上测试了不同倾角对太阳能得热量的影响, 得到厦门地区平板集热器的最佳安装倾角。

### 1 太阳能集热量的计算

由于辐射到倾斜集热器上的太阳能随着太阳高度角的改变而改变, 如图 1 所示, 图中:  $\gamma_s$  为太阳在某一时刻的方位角;  $\beta$  为集热器的倾角;  $\theta$  为入射光与集热器法线的夹角。对于倾斜角度为  $\beta$  的集热器而言, 倾斜面上的太阳辐射总量  $H_t$ , 主要由太阳直射辐射量、天空散射辐射量和地面反射辐射量 3 部分构成<sup>[1]</sup>, 即:

$$H_t = H_{dir}R_{dir} + H_{dif}R_{dif} + \rho H_0R_{ref} = H_{dir}R_{dir} + H_{dif}(1 + \cos \beta)/2 + \rho(H_{dir} + H_{dif})(1 - \cos \beta)/2。 \tag{1}$$

式中:  $H_t$ —倾斜面上的太阳总辐射量, MJ;  $H_0$ —水平面太阳总辐射量, MJ;  $H_{dir}$ —水平面上的直射辐射量, MJ;  $H_{dif}$ —水平面上的散射辐射量, MJ;  $R_{dir}$ —倾斜面上的直射辐射量与水平面上的辐射量之比;  $R_{dif}$ —倾斜面上的散射辐射量与水平面上的辐射量之比;  $R_{ref}$ —倾斜面上的反射辐射量与水平面上的辐射量之比;  $\rho$ —反射率, 由于集热器通常置于混凝土上, 故可以取  $\rho = 0.2$ 。

$R_{dir}$  为大气透明度函数, 若方位角  $\gamma = 0^\circ$ , 则有:

$$R_{dir} = (\cos(\varphi - \beta)\cos \delta \sin \omega + \sin(\varphi - \beta)\sin \delta)/(\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta)。 \tag{2}$$

式中:  $\delta$ —太阳赤纬角;  $\psi$ —当地纬度;  $\omega$ —太阳时角。

$$\delta = 23.45 \sin[360 \times (284 + n)/365]。 \tag{3}$$

式中:  $n$ —日期序号;

$$\omega = 15^\circ \times (T_s - 12)。 \tag{4}$$

式中:  $T_s$ —太阳时。

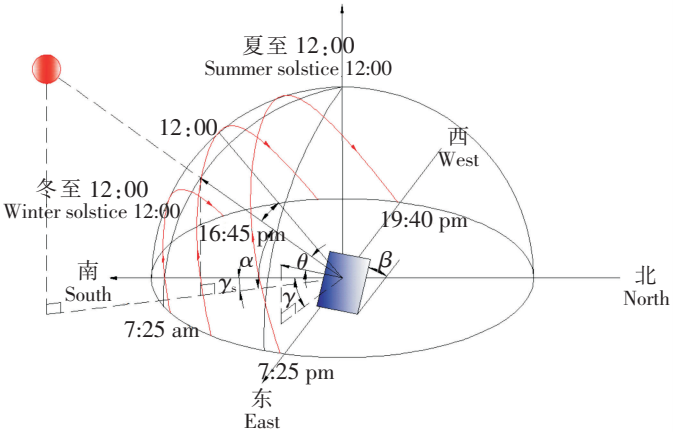


图 1 集热器太阳倾角及太阳方位角示意图  
Fig.1 Schematic show of the solar angle and the tilt angle of solar collector

### 2 厦门地区太阳辐射特征

厦门地理经度为 118°07', 纬度为 24°48', 1971—2003 年 32 年间厦门地区各月太阳平均辐射量如表 1 所示<sup>[5]</sup>。从表 1 中可以看出各月的辐射量在不同月份相差很大, 年均太阳辐射量达到了 4600 MJ/m<sup>2</sup>, 同时从表 1 中还可以看出日总辐射量在 7 月份最大, 日均太阳总辐射能为 17.065 MJ/m<sup>2</sup>, 2 月份最少。

对于不同月而言, 若要每月获得最大集热量, 可以以每月集热器的集热量最大为计算目标, 根据

倾斜平面太阳辐射能计算式（1）~式（4），利用 Visual Basic 编写相应程序，在编程过程中以厦门北纬 24.8°为已知值，以集热器朝南放置（ $\gamma=0^\circ$ ）为研究前提，将相应的变量输入程序，倾角以 10°为步长，按图 2 所示流程图进行计算。

固定式集热器月日均集热量随倾角的变化关系如表 2 所示。由表 2 可以看出，在不同月份，倾斜面上的月日均太阳能集热量与倾斜角度密切相关，不同月份对应着不同的最佳倾角，如 1 月份的最佳倾角为 35°~40°，日均集热量最高为 11.17~11.28 MJ/m<sup>2</sup>，而 7 月份所对应的最佳倾角为 0~10°，日均最高集热量为 17.63~17.40 MJ/m<sup>2</sup>。同时月日均集热量随倾角的增大呈现不同的趋势，对于 1, 2, 3, 9, 10, 11, 12 月份呈现先增大，后减小的趋势，而对于 4, 5, 6, 7, 8 月份则基本呈现逐渐递减的趋势，为此若按月最大集热量安装平板集热器，必须选用倾角可调支架，但成本会相应增加。

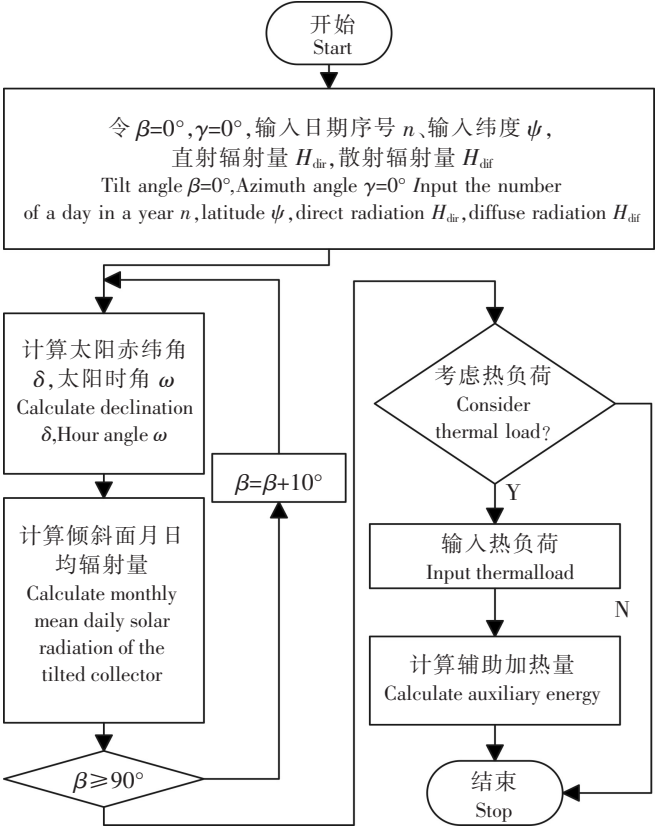


图 2 集热器太阳辐射量及辅助加热量计算流程图  
Fig.2 Calculation flowchart of solar radiation and auxiliary heating on the collector

表 1 厦门地区各月太阳辐射量  
Tab. 1 Monthly solar radiation in Xiamen

(MJ · m <sup>-2</sup> )												
月份 Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
总辐射 Total radiation	285.7	221.4	299.3	343.3	440.5	437.0	529.0	499.5	468.8	415.9	349.7	324.6
直射 Direct radiation	108.3	67.0	97.0	92.2	188.2	183.4	288.2	173.5	170.5	169.5	171.8	170.4
散射 Diffuse radiation	177.4	154.5	202.3	251.1	252.3	253.6	240.8	326.0	298.3	246.4	177.8	154.2

表2 月日均集热量随倾角的变化  
Tab.2 Variation of monthly mean daily solar energy collection with tilt angle

月份 Month	平均日集热量 Mean daily solar energy collection/( MJ · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> )									
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1	9.52	10.28	10.84	11.17	11.28	11.15	10.78	10.20	9.42	8.48
2	7.38	7.69	7.86	7.88	7.76	7.50	7.11	6.59	5.97	5.26
3	9.98	10.24	10.31	10.19	9.88	9.39	8.74	7.94	7.02	6.02
4	11.44	11.50	11.35	11.01	10.49	9.79	8.95	7.98	6.91	5.79
5	14.68	14.58	14.12	13.49	12.53	11.34	9.94	8.38	6.72	4.99
6	14.57	14.35	13.84	13.05	12.00	10.74	9.29	7.70	6.02	4.29
7	17.63	17.40	16.78	15.78	14.42	12.76	10.84	8.73	6.48	4.16
8	16.65	16.69	16.40	15.80	14.90	13.72	12.31	10.70	8.96	7.12
9	15.63	15.60	16.05	15.78	15.20	14.33	13.19	11.81	10.25	8.55
10	13.86	14.62	15.07	15.21	15.03	14.53	13.74	12.67	11.36	9.84
11	11.66	12.79	13.64	14.18	14.40	14.28	13.84	13.09	12.05	10.74
12	10.82	12.14	13.20	13.92	14.32	14.39	14.12	13.51	12.59	11.38

3 最佳倾角分析

为求取厦门地区固定式集热器的全年最佳倾角, 对年集热量最大、采用当地纬度及年辅助热量最小这3种模式下固定式支架倾角求解进行比较分析。

3.1 年最大集热量

在该计算方法中, 以全年集热量最大为目标, 其求解过程与各月集热量最大求解过程相同, 所得集热器集热量随倾角的关系如图3中所示。从图3中可以看出, 厦门地区全年集热量最大时所对应的倾角为18.2°, 小于厦门纬度(24.8°), 集热量为4785 MJ/m², 小于或大于该倾角, 都会减少集热器的集热量。

3.2 年辅助热量最小

实际使用中, 太阳辐射量与热水使用所要求的负荷有很大差异, 往往是冬季的热水负荷较大, 而太阳辐射得热量较小, 同时在太阳辐射量较大的夏季, 所要求的热水负荷反倒较小, 从节能方面考虑, 以全年辅助热量最小为目标, 分析倾角对集热器辅助热量的影响。在计算过程中, 取春秋季、夏季和冬季人均日热水负荷分别为4.92, 2.59, 6.75 MJ<sup>[6]</sup>, 人均集热面积为1 m²。根据集热器全日集热效率的经验值0.4~0.55<sup>[7]</sup>, 设定全年各月集热效率依次为0.45, 0.45, 0.50, 0.50, 0.50, 0.55, 0.55, 0.55, 0.50, 0.50, 0.50, 0.45, 所得年需补充热量曲线如图4所示。从图4中可以得出, 年人均辅助热量在集热器倾角为39.1°时最小, 为155.26 MJ。

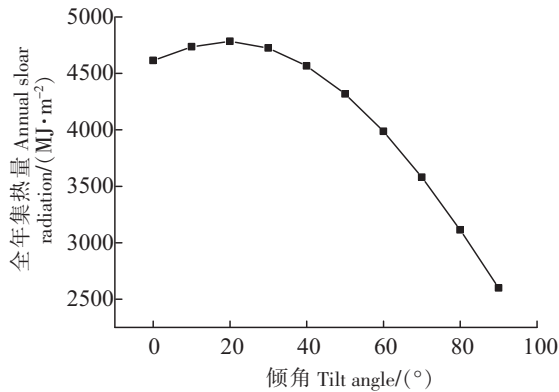


图3 倾角对全年集热量的影响

Fig.3 Influence of tilt angle on annual solar radiation

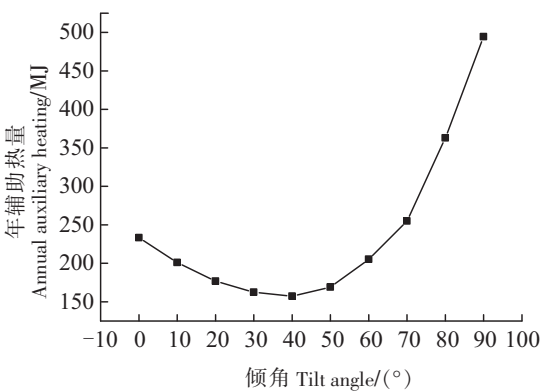


图4 年辅助热量随倾角的变化

Fig.4 Variation of annual auxiliary heating with tilt angle

3.3 倾角变化的影响

根据经验法，集热器倾角一般采用当地纬度<sup>[1]</sup>，为此将厦门地区集热器倾角设为 24.8°，利用 Visual Basic 程序可以求得如图 5 所示的各月集热量。

通过图 5 可以看出，3 种倾角下的全年太阳能集热量趋势基本相同。固定式集热器倾角采用厦门纬度（24.8°）时，由于没有考虑具体的热水负荷，所得集热量在 7 月份时最大，而秋冬季时反而较小。当倾角为 39.1°时，全年集热量虽然最小，为 4617 MJ/m<sup>2</sup>，比其他两种倾角的集热量分别少 3.6%，3.3%，但由于考虑了所需热水负荷的全年变化趋势，秋冬季是集热量最高，其年所需辅助热量反而最小。

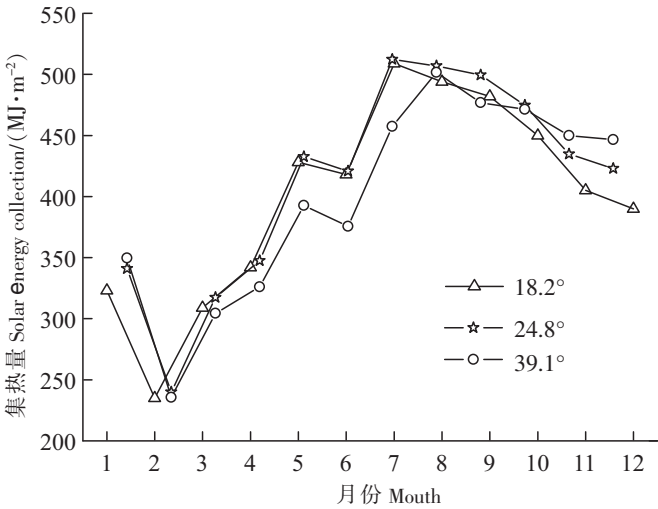


图 5 3 种倾角下的全年各月太阳能集热量  
Fig.5 Monthly solar energy collection under three tilt angles

4 试验及结果分析

为验证上述 3 种倾角对集热性能的影响，搭建了如图 6 所示的空气源热泵辅助太阳能热水系统，该系统由太阳能集热单元、热泵辅助加热单元、控制器和采集单元组成。太阳能集热器为皇明蓝钛平板型，集热面积为 4 m<sup>2</sup>；太阳能循环水泵为 550 W 的阳春水泵；空气源热泵选用型号为 RB247GHAC 的三菱压缩机，额定功率 1030 W；水箱容积为 200 L。实验系统需要测量的参数包括温度、辐照、功率及制热量等。主要测试仪器：WT230 功率计；TES 1333R 记录型太阳能功率表；ALIYIQI 数显角度仪；铜-铜镍热电偶；PT100 热电阻。实验过程中温度和压力等变送器的输出量均由 Agilent 34972A 型多通道数据采集仪来处理，相对于变送器的测试精度，采集仪的误差可以忽略不计<sup>[8]</sup>。

对于本实验水箱中水的太阳能得热量可由  $f = Q = cm(T_0 - T_i)$  计算得到。式中： $Q$  为得热量； $c$  为水的比热； $m$  为水的质量； $T_0$  为水的终温； $T_i$  为水的初温。

在水的温升过程中，水的比热可以忽略不计；同时由于 200 L 的水在加热过程中水箱内部存在膨胀空间，水的质量可以认为不变。

系统的集热量属于间接计算量，需要进行系统误差分析。实验系统测量参数误差根据  $\Delta(f)/f = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\partial f/\partial x_i)^2 (\Delta x_i/f)^2}$  计算<sup>[9-10]</sup>。式中： $\Delta(f)$  为直接测量所构成的函数  $f$  的绝对误差； $f$  为直接测量所构成的函数； $x_i$  为测量过程中的第  $i$  个自变量， $\Delta x_i$  为第  $i$  个自变量的绝对误差； $\Delta(f)/f$  为直接测量所构成函数  $f$  的相对误差。故系统得热量的相对误差可以通过  $\Delta Q/Q = [(\Delta T_0/(T_0 - T_i))^2 + (\Delta T_i/(T_0 - T_i))^2]^{0.5}$  计算。式中： $\Delta Q$  为得热量的绝对误差， $\Delta T_0$  为终了温度的绝对误差， $\Delta T_i$  为初始温度的绝对误差。

实际加热过程中，水的初始温度设定为 23.5℃，终了温度维持在 35~65℃，故温升范围为 11.5~41.5℃。根据该测试方法，系统得热量的相对误差为：

$$(\Delta Q/Q)_{\min} = [(0.5/41.5)^2 + (0.5/41.5)^2]^{0.5} = 1.7\%,$$

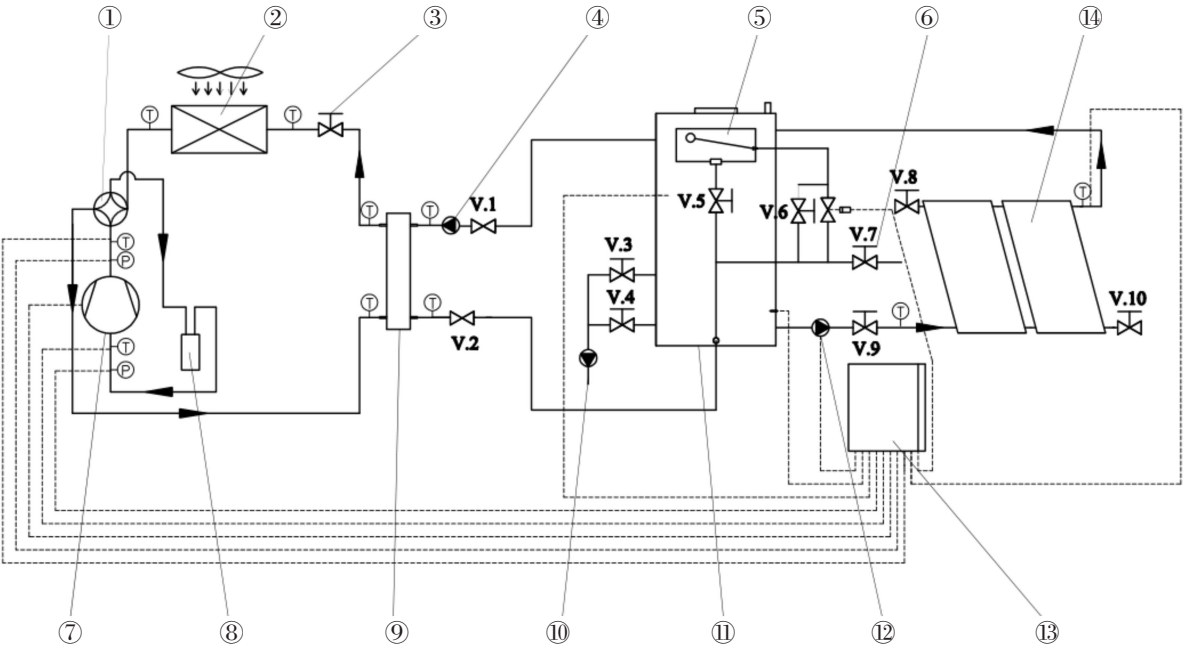
$$(\Delta Q/Q)_{\max} = [(0.5/11.5)^2 + (0.5/11.5)^2]^{0.5} = 6.1\%。$$

由此可以看出将整箱水从初始温度加热到终了温度的得热量相对误差范围为 1.7%~6.1%，可以满足测试要求。

空气源辅助太阳能热水系统，在 PLC 控制程序开启后，利用 PT100 热电阻检测集热器进出口温



度,当温差大于 8 ℃ 时,启动太阳能循环泵,并强制运行 5 min,将太阳能集热器中的热水泵入循环水箱。为比较集热器倾角分别为 18.2°、39.1°、24° 时系统的得热量,保持循环水量、水的初温、环境温湿度等条件相同,实验自 8:00 开始运行,待水平太阳辐照量均为 13.5 MJ/m<sup>2</sup> 时,停止太阳照射,利用温度变送器检测循环水箱内的水温,若循环水箱的水温已达 55 ℃,PLC 控制器不启动空气源热泵单元;若循环水箱的水温仍低于 55 ℃,则启动空气源热泵对循环水箱内的水进行循环加热直至达到 55 ℃。



1—四通阀 Four-way valve;2—蒸发器 Evaporator;3—节流阀 Throttle;4—热泵循环泵 Circulating pump of heat pump;5—副水箱 Auxiliary water tank;6—进水管 Inlet pipe;7—压缩机 Compressor;8—储液罐 Reservoir;9—套管冷凝器 Tube-in-tube condenser;10—出水管 Outlet pipe;11—循环水箱 Recirculating water tank;12—太阳能循环泵 Circulating pump of solar energy;13—控制柜 Control cabinet;14—太阳能集热器 Solar energy collector;T—温度变送器 Temperature transducer;P—压力变送器 Pressure transducer;V—阀门 Valve

图 6 太阳能热水系统原理图

Fig.6 Schematic diagram of the air-source heat pump assisted solar water heating system

图 6 显示了厦门地区秋季典型日平板集热器倾角分别为 18.2°, 39.1°, 24.8° 时,系统热水温度随太阳辐射时间的变化关系。实验中循环水箱内水的初始温度均为 23.5 ℃,平板集热器所处外界平均环境温度为 20.8 ℃,平均相对湿度为 49%,微风。在 3 种倾角下,循环水箱内的水温随着辐射时间的增加温度不断升高,其温升斜率与具体时段的太阳辐射强度相关,在 11:00 至 13:30 时段温度升至最高,之

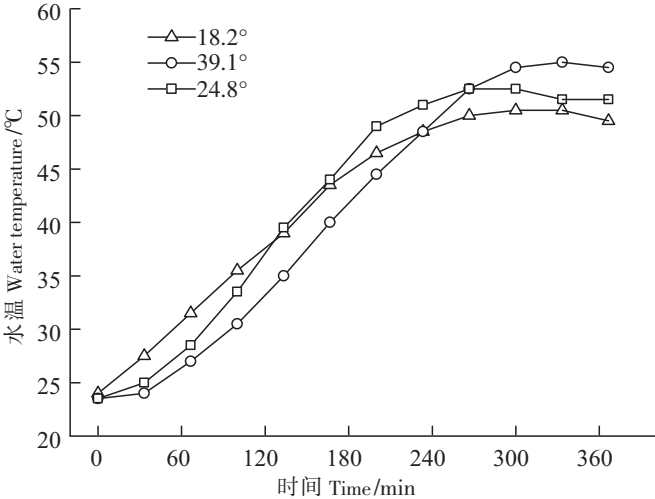


图 7 集热器在不同倾角下的循环水箱水温

Fig.7 Temperature of water in circulation tank at different tilt angles of collector

后随着太阳辐射的减弱,吸收的太阳能不足以补充管系的漏热量,水箱水温呈现降低趋势。以水平辐射量相同作为比较基准,当水平辐射量均达到 $13.5 \text{ MJ/m}^2$ 时,循环水箱在集热板倾角分别为 $18.2^\circ$ ,  $39.1^\circ$ ,  $24^\circ$ 时,所能达到的温度分别为 $49.5$ ,  $53.5$ ,  $51.5^\circ\text{C}$ 。倾角为 $39.1^\circ$ 时系统太阳能得热量为 $25.2 \text{ MJ}$ ,比厦门纬度倾角( $24.8^\circ$ )和年最大集热量倾角( $18.2^\circ$ )的得热量分别高 $7\%$ ,  $15\%$ 。为使循环水箱内的水温达到 $55^\circ\text{C}$ ,需热泵进一步加热,3种倾角下太阳能循环水泵及空气源辅助热泵运行耗电分别为 $0.47$ ,  $1.77$ ,  $1.05 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 。

## 5 结论

本文对固定式集热器倾角的3种求解模式及3种倾角下太阳能热水系统的得热量进行了分析,结果表明:

1) 对于固定式集热器,年得热量最大所确定的倾角为 $18.2^\circ$ ,全年集热量为 $478.5 \text{ MJ/m}^2$ ,相较于传统的以当地纬度为集热器倾角的工况,每年可多获得 $17 \text{ MJ/m}^2$ 的太阳能热量。以年辅助热量最小为目标的方法,兼顾了全年太阳辐射和热水负荷的匹配,此方法求得厦门地区最佳倾角为 $39.1^\circ$ ,人均年辅助热量为 $155.26 \text{ MJ}$ 。

2) 在厦门秋季典型日,倾角为 $39.1^\circ$ 时系统太阳能得热量比采用厦门纬度倾角( $24.8^\circ$ )和年最大集热量倾角( $18.2^\circ$ )的得热量分别高 $7\%$ 、 $15\%$ 。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 张鹤飞. 太阳能热利用原理与计算机模拟 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1990.
- [2] ROUX W G L. Optimum tilt and azimuth angles for fixed solar collectors in South Africa using measured data [J]. Renewable Energy, 2016, 96: 603-612.
- [3] 朱丹丹, 燕达. 太阳能板放置最佳倾角研究 [J]. 建筑科学, 2012, 28(2): 277-281.
- [4] 郑瑞澄. 民用太阳能热水系统工程技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 24-26.
- [5] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [6] 钟林志, 孙志新, 许巧玲, 等. 不同方位角上太阳能集热器最佳倾角的确定 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 2015, 43(1): 135-141.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 太阳能热水系统设计、安装及工程验收技术规范: GB/T 18713—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 9-11.
- [8] 郭俊杰. 空气源热泵热水装置优化分析与运行策略研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [9] 国家质量技术监督局计量司. 测量不确定度评定与表示指南 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2000.
- [10] KLINE J, MO CLINTOCK F A. Describing uncertainties in single sample experiments [J]. Mechanical Engineering, 1953, 34: 3-8.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)