

# 太阳能集热器最佳倾角确定及计算方法比较

侯根富, 张慈枝, 戴贵龙, 叶靖

(福建工程学院 生态环境与城市建设学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 分析福州地区典型气象年数据,表明该地区全年太阳辐射量和日照时数较大,太阳能和空气能资源较为优越。综合考虑入射太阳光余弦效应、太阳辐射量和热水负荷的变化,3种不同方法分别计算得到集热器最佳倾角,并比较分析倾角精确度及对应辅助加热量,最大限度地提高系统太阳能利用率,为实际太阳能热泵系统应用提供可靠理论支持。

**关键词:** 集热器; 太阳辐射; 热水负荷; 最佳倾角

中图分类号: TU831.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)06-0511-07

## The determination of the optimum inclination angle of solar energy collectors and calculation methods

Hou Genfu, Zhang Cizhi, Dai Guilong, Ye Jing

(College of Eco-Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The typical annual meteorological data of Fuzhou area were analysed. Fuzhou is rich in solar radiation with a large number of sunshine hours, which shows that the solar energy and air energy resources in Fuzhou are superior. Considering the variation of solar cosine effect, solar radiation amount and hot water load, the best inclination angle of certain collector was calculated by three different methods. The inclination accuracy and the corresponding auxiliary heating quantity were compared to maximize the system solar energy utilization to provide reliable theoretical support for practical application of solar heat pump system.

**Keywords:** collector; solar radiation; hot water load; optimum inclination angle

太阳能集热器是影响热水系统集成及热泵辅助加热的关键,而其安装倾角是最大限度利用太阳能资源及提高系统集成效率的主要因素。目前,太阳能集热器按是否跟踪可以分为非跟踪和自动跟踪两大类,理论上实时跟踪能大大提高太阳能利用率,但由于建筑一体化及安装成本的需求限制,主要安装方式仍是固定式或阶段调节倾角。因此,确定集热最佳倾角对减少集热面积、提高系统效率及降低成本具有重要意义。

对于北半球太阳运行轨迹几乎沿东西方向对

称,一般集热器方位选择朝南布置,倾角取当地纬度<sup>[1]</sup>,忽视了地区太阳辐射状况和用热负荷特性对其的影响。目前,集热器最佳倾角研究方法大致可分为两种:一种是基于集热器太阳辐射接收量最大确定最佳倾角;另一种以集热器年需辅助加热量最小确定最佳倾角。前者方法无需热负荷和集热器数据,仅与地域有关,计算简单、直观,如李华山<sup>[2]</sup>、马江燕<sup>[3]</sup>、於仲义<sup>[4]</sup>等。后者在计算中充分考虑太阳辐射接收量与热负荷匹配关系,减少辅助热源耗量,实现多种能源高效综合利用,

收稿日期: 2016-11-18

基金项目: 福建省教育厅科研项目(JAT160319)

第一作者简介: 侯根富(1965-),男,湖北枣阳人,教授,硕士,研究方向:燃烧、供热等方面教学与科研。

如 Shariah A<sup>[5]</sup>、何世钧<sup>[6]</sup>、钟林志<sup>[7]</sup>。非跟踪聚光集热器有效地收集太阳能和热效率发生动态变化受入射太阳光束的余弦效应的影响,因此确定集热器最佳倾角需考虑入射太阳光余弦效率的影响。

本文结合福州地区典型气象年逐年数据,进行太阳辐射能及空气能利用前提分析,再综合考虑入射太阳光余弦效率、太阳能辐射量及热负荷的变化情况,对太阳能集热器在月阶段、季节性阶段、夏冬半年及全年的最佳倾角的多种计算方法进行比较分析,以确定最佳倾角计算方法。

## 1 物理数学模型

对于非跟踪太阳能集热器,不论是否聚光,太阳光线不可能始终与集热器的集热平面垂直,不同时刻的太阳光线与集热平面法线形成一个相应入射角,其存在使光线到达集热面时产生余弦效应,影响集热器获得有效辐射能。

### 1.1 入射太阳光余弦效率最大时集热器最佳倾角

太阳赤纬角  $\delta$  可由 Cooper 给出的近似公式计算如下<sup>[7]</sup>:

$$\delta = 23.45^\circ \frac{2\pi}{360} \sin\left(2\pi \frac{284 + N}{365}\right) \quad (1)$$

式中  $N$  为一年中某天的日序。

太阳时角是指太阳所在的时圈与子午圈构成的夹角,单位为( $^\circ$ )。规定正午 12 时太阳时角为  $0^\circ$ ,在正午前是正值,正午之后是负值。观察的某一时刻  $t$ ,太阳所处位置的时角  $\omega$  为<sup>[8]</sup>:

$$\omega = 15 \times (12 - t) \quad (2)$$

式中  $t$  为真太阳时(h),用 24 h 的时钟。

集热器倾斜面上的太阳光余弦效率计算公式为<sup>[8]</sup>:

$$\cos \theta_r = \cos \beta \sin \varphi \sin \delta + \cos \beta \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \beta \sin \gamma_n \cos \delta \sin \omega + \sin \beta \sin \varphi \cos \delta \cos \omega \cos \gamma_n - \sin \beta \cos \gamma_n \sin \delta \cos \varphi \quad (3)$$

### 1.2 热水系统最小辅助热量时集热器最佳倾角

系统的人均月热水负荷计算式<sup>[1]</sup>:

$$q_r = N_i C_p V (t_e - t_i) \quad (4)$$

式中:  $q_r$  为人均月热水负荷, MJ;  $N_i$  为第  $i$  月累积天数;  $C$  为水的定压比热容,  $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\rho$  为水的密度,  $980 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $V$  为日均日热水量, L;  $t_e$  为供水温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_i$  为冷水温度,  $^\circ\text{C}$ 。

若以热水系统辅助加热量为计算目标,需考虑集热器辐射量与民用热负荷的匹配。根据上述计算模型可以得到任意倾角的集热器各月得热量为  $Q_{\beta i}$  及热负荷  $Q_{ri}$ 。第  $i$  月集热器得热负荷满足用热负荷的需求程度  $\Delta Q_i = Q_{\beta i} - Q_{ri}$ ,当  $\Delta Q_i > 0$  表示集热器第  $i$  月集热量满足该月用热负荷要求,反之则无法满足,而其差值绝对值即为辅助热源加热量,即系统的人均第  $i$  月辅助热量为<sup>[7]</sup>:

$$\Delta Q_{f,i} = \begin{cases} 0 & \Delta Q_i > 0 \\ |\Delta Q_i| & \Delta Q_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

当人均集热面积较大,集热器各月集热量均能满足热负荷的需求时,正南方位固定式集热器全年最佳倾角若为全年得热量最大时倾角,可能造成集热器安装成本大幅增加,以及夏季热量严重过剩。而实际集热面积一般只保证月有效集热量在全年大部分能满足热负荷的需求,小部分需采取辅助热源加热来弥补供热不足,此时应以全年辅助热量最小为目标来确定集热器的全年最佳倾角,即

$$\Delta Q_f |_{\beta_{\text{opt}}} = \min \sum_{i=1}^{12} \Delta Q_{f,i} \quad (6)$$

## 2 计算结果分析

### 2.1 福州地区太阳辐射能及空气能分析

福州位于北纬  $26.08^\circ$ ,东经  $119.28^\circ$ ,全年水平面太阳辐射总量  $4\ 344.4 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ,根据中国太阳能资源区域划分,属于太阳能资源较丰富区 ( $4\ 200 \sim 5\ 400 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ),为该地区的太阳能热水系统应用和推广提供了前提条件。对文献[9]提供的典型气象年逐年数据整理,得到福州地区典型气象年各月气象参数,如表 1 所示。

由表 1 可看出,全年中 6 个月尤其夏季 6~8 月水平面太阳散射辐射量超过了直射辐射量,正值福州梅雨季节及台风的多发期,大大削弱太阳直射辐射,散射辐射强度在  $0 \sim 300 \text{ W}/\text{m}^2$  占全年 88.19%。因此,对于非跟踪采取固定式、月阶段或季节性调整的低倍聚光型太阳能集热器的太阳辐射计算模型,需考虑散射辐射的影响,区别于跟踪聚光。在春夏季节全天太阳辐照时数最长可达 14 h,总辐射量是冬季的两倍,冬季较为匮乏。

福州年平均干球温度  $20.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最热 7 月日平均最高干球温度为  $33.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最低  $26.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最冷 1 月日平均最高干球温度  $15.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,最低  $8.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。全

年各级干球温度小时分布如图 1 所示。全年环境温度低于  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  很少, 常规空气源热泵指在环境温度  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上运行机组, 一般建议在环境温度  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上运行, 否则效果比较差, 接近电加热的,

不建议启动使用。因此该地区的空气热源利用相当有前景, 为推广太阳能热泵热水系统应用提供光热条件。

表 1 福州市典型气象年各月气象参数

Tab.1 Monthly meteorological parameters of typical meteorological year in Fuzhou

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年平均
月平均干球温度/ $^{\circ}\text{C}$	11.3	11.7	13.9	18.1	23.2	26.3	29.1	28.6	26.1	22.8	18.2	13.6	20.3
月平均冷水温度/ $^{\circ}\text{C}$	11.8	12.0	16.1	18.5	23.6	25.0	30.2	29.0	26.0	23.0	18.2	11.9	20.6
月平均相对湿度/%	72.8	76.3	85.0	79.8	77.5	80.8	76.1	76.2	73.2	71.1	69.9	76.0	76.2
月平均日水平面太阳直射 辐射量/ $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$	4.1	4.7	4.9	5.4	7.8	7.5	9.0	7.6	8.1	5.0	4.8	3.0	6.0
月平均日水平面太阳散射 辐射量/ $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$	3.1	3.6	4.0	6.3	6.5	8.7	9.3	8.9	5.6	6.9	4.1	3.9	6.0
月平均日水平面太阳 总辐射量/ $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})$	7.1	8.4	8.9	11.7	14.5	15.6	18.3	16.5	14.1	11.8	8.8	6.9	11.9
日照时数/h	111	88	117	136	164	191	251	244	160	206	138	127	161

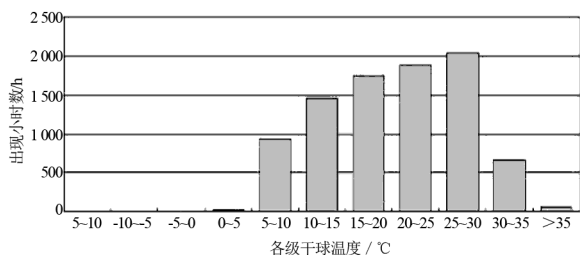


图 1 全年各级干球温度小时分布

Fig.1 Annual dry bulb temperature hours distribution at all levels

## 2.2 入射太阳光余弦效率最大时集热器最佳倾角特性分析

入射太阳光束的余弦效应能使非跟踪集热器有效地收集太阳能和热效率发生动态变化, 根据数学模型计算分析入射太阳光余弦效率最大值来确定最佳倾角, 计算得到集热器各月中午 12 时倾斜面入射太阳光余弦效率如表 2。

全年集热器各月中午 12 时入射太阳光余弦效率随倾斜角  $\beta$  增加先增加后减少, 余弦峰值约为 0.99。太阳光余弦效应影响聚光型集热器最为明显, 适当增大集热器倾角可以提高余弦效率, 从而提高聚光集热器所接收的有效太阳辐射能。当倾角超过最佳角度后, 余弦效率下降获得有效辐

射能就削弱。夏半年该集热器最佳倾角的范围为  $0^{\circ} \sim 25^{\circ}$ , 冬半年月的余弦效率变化趋势虽与夏半年相似, 但是最佳倾斜角有较大差异, 变化范围为  $25^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。

从图 2 可以看出, 不同月份的入射太阳光余弦效率有较大差别。集热器在相同倾斜角下即为固定式, 倾斜角在  $-15^{\circ} \sim 10^{\circ}$  之间 (图 2(a)), 对夏半年 4~9 月份倾斜面上入射太阳光余弦大, 平均约 0.93 左右, 而冬半年小, 甚至一半; 在  $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$  之间 (图 2(b)), 对全年倾斜面上余弦效率都大, 平均约 0.9 左右;  $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$  之间 (图 1(c)), 对冬半年倾斜面上余弦效率大, 平均约在 0.85 左右, 而夏半年小。

同理计算不同倾角下集热器各月上午 9 时集热面入射太阳光余弦效率, 得到类似数据见图 3。集热器倾斜角仍是太阳光余弦效率的重要影响因素之一, 全年集热器各月上午 9 时入射太阳光余弦效率随倾斜角  $\beta$  增加先增加后减少, 余弦峰值约为 0.76。此时, 夏半年 (图 3(a)) 该集热器最佳倾斜角所在范围为  $-5^{\circ} \sim 25^{\circ}$ , 而冬半年 (图 3(b)) 变化范围为  $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。

从图 4(a)~(c) 看出, 集热器固定倾斜角在  $-15^{\circ} \sim 10^{\circ}$  范围内, 夏半年倾斜面上太阳光余弦大,

平均约为 0.67,冬半年小。在 15°~40° 范围内,夏、冬半年平均太阳光余弦效率近似相同,平均约为 0.65,而在 45°~90° 范围内,同一倾角,冬半年太阳光余弦大,平均约为 0.62,而夏半年却只有一半。

为了获得全年及每月的集热器最佳倾角以每

日上午 9 时,中午 12 时倾角余弦值为基础,采用计算机软件 (SPASS) 拟合求得曲线最大值 (表 2),该最大值对应的倾角就是最佳  $\beta_{opt}$  列于表 3,季节及夏冬半年最佳倾角可按公式求解亦可取相应平均值。

表 2 不同倾角下集热器各月中午 12 时入射太阳光余弦效率特征表

Tab.2 Cosine efficiency of solar light incidence at 12 noon at different inclination angles (dips)

$\beta/(\circ)$	$\cos\theta_r$											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
-15	0.469 6	0.586 9	0.724 8	0.850 6	0.925 0	0.951 1	0.940 6	0.886 8	0.780 1	0.635 4	0.501 7	0.437 2
-10	0.544 7	0.655 2	0.782 1	0.893 2	0.954 6	0.974 4	0.966 6	0.923 7	0.831 6	0.700 3	0.575 1	0.513 9
-5	0.615 7	0.718 5	0.833 4	0.929 0	0.976 9	0.990 3	0.985 3	0.953 6	0.876 8	0.759 8	0.644 2	0.586 7
0	0.682 0	0.776 4	0.878 3	0.957 7	0.991 8	0.998 6	0.996 4	0.976 2	0.915 4	0.813 6	0.708 4	0.655 0
5	0.743 1	0.828 3	0.916 7	0.979 1	0.999 2	0.999 4	0.999 6	0.991 4	0.947 0	0.861 1	0.767 2	0.718 3
10	0.798 6	0.874 0	0.948 0	0.993 1	0.998 9	0.992 6	0.996 0	0.999 0	0.971 4	0.902 1	0.820 1	0.776 2
15	0.848 0	0.913 0	0.972 1	0.999 5	0.991 1	0.978 2	0.984 4	0.999 1	0.988 4	0.936 3	0.866 9	0.828 2
20	0.890 9	0.945 1	0.988 8	0.998 4	0.975 7	0.956 4	0.965 3	0.991 5	0.997 9	0.963 3	0.907 0	0.873 8
25	0.927 1	0.969 9	0.998 1	0.989 6	0.952 9	0.927 3	0.938 9	0.976 5	0.999 8	0.983 0	0.940 2	0.912 9
30	0.956 2	0.987 5	0.999 7	0.973 4	0.922 9	0.891 2	0.905 3	0.954 0	0.994 1	0.995 3	0.966 3	0.945 0
35	0.978 1	0.997 5	0.993 7	0.949 7	0.885 8	0.848 3	0.864 9	0.924 2	0.980 8	0.999 5	0.985 1	0.969 9
40	0.992 5	0.999 9	0.980 2	0.918 8	0.842 0	0.798 9	0.817 9	0.887 4	0.960 1	0.997 0	0.996 3	0.987 4
45	0.999 4	0.994 7	0.959 2	0.880 9	0.791 8	0.743 5	0.764 6	0.843 9	0.932 1	0.986 5	0.999 4	0.997 4
50	0.998 7	0.981 9	0.930 9	0.836 3	0.735 6	0.682 4	0.705 6	0.794 0	0.897 0	0.968 5	0.996 1	0.999 2
55	0.990 3	0.961 7	0.895 6	0.785 4	0.673 8	0.616 2	0.641 2	0.738 0	0.855 1	0.943 1	0.984 6	0.994 7
60	0.974 5	0.934 2	0.853 4	0.728 5	0.606 9	0.545 2	0.571 9	0.676 4	0.806 7	0.910 6	0.965 6	0.982 0
65	0.951 2	0.899 6	0.804 8	0.666 0	0.535 4	0.470 1	0.498 3	0.609 7	0.752 1	0.871 1	0.939 3	0.961 8
70	0.920 8	0.858 1	0.750 0	0.598 5	0.459 8	0.391 4	0.420 8	0.538 3	0.691 8	0.825 0	0.905 8	0.934 3
75	0.883 3	0.810 1	0.689 5	0.526 5	0.380 6	0.309 8	0.340 2	0.462 8	0.626 3	0.772 7	0.865 4	0.899 7
80	0.839 1	0.756 0	0.623 8	0.450 4	0.298 6	0.225 8	0.257 0	0.383 9	0.556 0	0.714 4	0.818 5	0.858 3
85	0.788 5	0.696 1	0.553 4	0.370 9	0.214 4	0.140 1	0.171 8	0.302 0	0.481 5	0.650 7	0.765 4	0.810 3
90	0.731 9	0.630 9	0.478 7	0.288 6	0.128 5	0.053 3	0.085 4	0.217 8	0.403 3	0.582 1	0.706 4	0.756 2

表 3 各月及全年集热器最佳倾角

Tab.3 Optimum inclination angle of collector in each month and the whole year

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	全年
9 时 $\beta_{opt}/(\circ)$	47.0	39.1	28.6	16.7	7.3	3.0	4.9	12.5	23.8	35.6	44.9	49.1	26.0
12 时 $\beta_{opt}/(\circ)$	54.5	44.2	29.6	13.0	0.5	-5.0	-2.7	7.3	22.8	39.4	51.8	57.1	26.0

2.3 考虑热水负荷的最佳倾角计算分析

文献[1]给出了不同场所的热水用水定额,

最高日热水定额推荐值为 40~80 L·(人·d)<sup>-1</sup>,太阳能热水系统热水负荷计算时,设计热水用水量

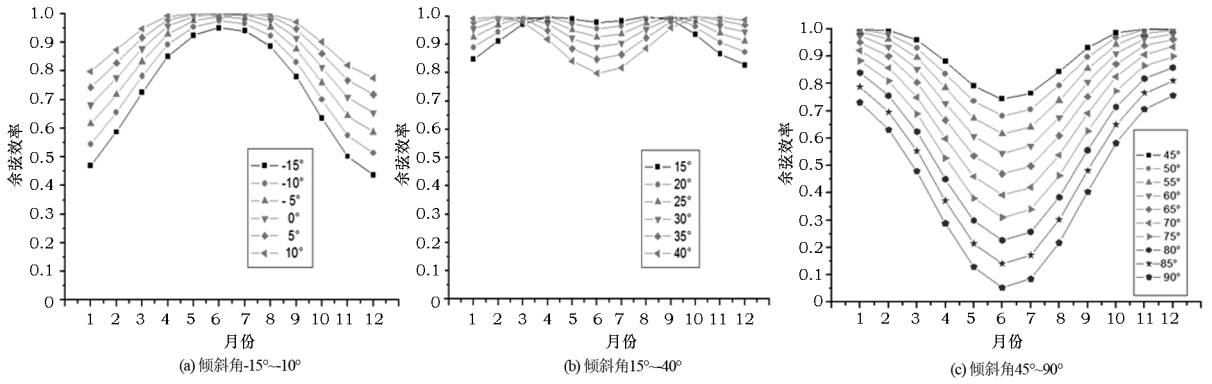


图 2 中午 12 时固定斜面不同月份入射太阳光余弦效率特征曲线

Fig.2 The cosine efficiency characteristic curve of solar light incidence at fixed slope at 12 noon

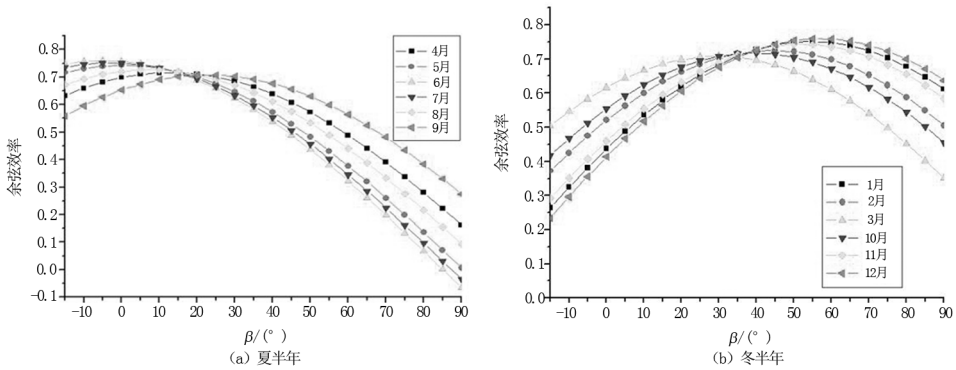


图 3 上午 9 时倾斜表面入射太阳光余弦效率特征曲线

Fig.3 The cosine efficiency characteristic curve of solar light incidence at 9 am in the morning

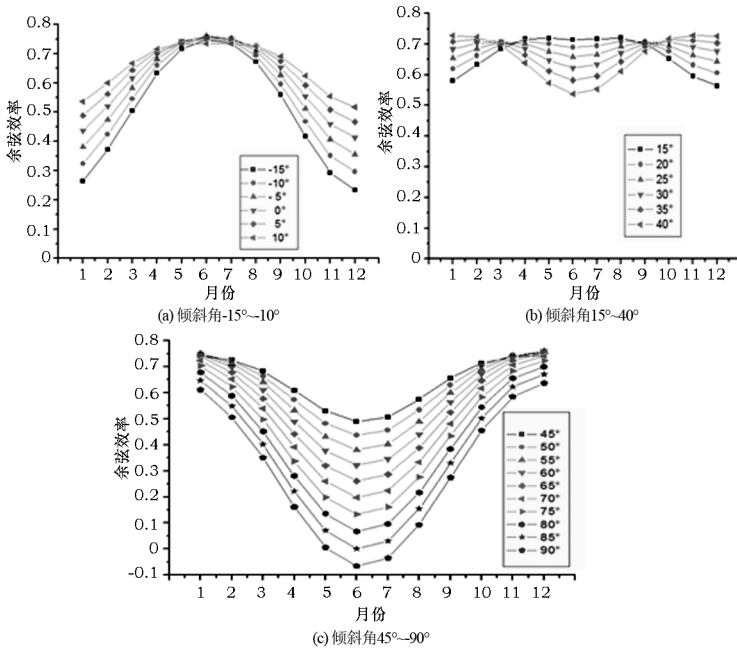


图 4 上午 9 时固定斜面不同月份入射太阳光余弦效率特征曲线

Fig.4 The cosine efficiency curve of solar light incidence at 9 am in different months

按平均日用水量计算。一般按最高日用水量的下限取值,热用量取  $40 \text{ L} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$ ,热水温度为

$60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。以下通过 1.2 节公式(6)计算得到单个学生宿舍(标 4)的每月设计热水负荷,如表 4 所示。

表 4 学生宿舍各月设计热水负荷

Tab.4 The designed hot water load in different months at a students' apartment

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
热水负荷/MJ	979.33	975.27	891.97	843.20	739.58	711.14	605.48	629.86	690.82	751.77	849.30	977.30

在一定集热面积情况下,集热器倾角应该使其得热量尽可能满足实际需热量,从而减少辅助加热设备能耗,最大限度利用太阳能清洁能源。人均集热面积  $1 \text{ m}^2$  计算得到集热器在不同倾角下的年需辅助加热量变化趋势见图 5,集热器的全年最佳倾角为  $40.8^\circ$ ,此时最小年需辅助加热量为  $1878.24 \text{ MJ}$ 。文献[7]给出集热器年最大得热量最佳倾角为  $18.9^\circ$ ,而考虑入射太阳光余弦最大得热量年最佳倾角为  $26.0^\circ$ ,与之相比年辅助加热量最小的年最佳倾角为  $40.8^\circ$ 。

从下表 5 可以看出,单个学生宿舍用热情况下,将人均集热面积从  $0.4 \text{ m}^2$  增长到  $1.0 \text{ m}^2$ ,年最

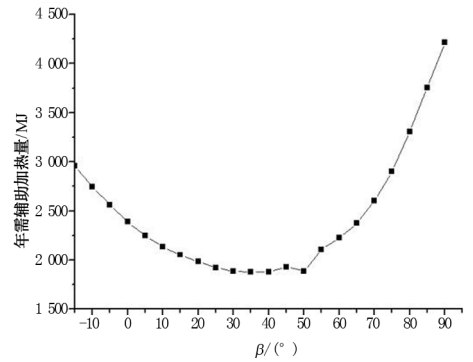


图 5 不同倾角集热器年需辅助加热量

Fig.5 The required annual auxiliary heating capacity of collectors with different inclination angles

表 5 不同人均集热面积所对应的集热器最佳倾角及年需辅助加热量

Tab.5 The optimal inclination angle of heat collector and annual auxiliary heating amount vs per capita heat collection area

人均集热面积/ $\text{m}^2$	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.7
$\beta_{\text{opt}} / (^\circ)$	25.4	26.2	26.7	30.6	31.9	34.5	40.8	40.9	40.9	40.8	40.9	40.8
年需辅助热量/MJ	5623.27	4826.64	4029.87	3316.04	2734.63	2254.53	1878.24	1538.34	1192.13	923.59	486.68	126.62

佳倾角随之增大而增大,而对于太阳能热水系统的年需辅助热量随之减小。当人均集热面积达到  $1 \text{ m}^2$  之后,年最佳倾角基本稳定在  $40.8^\circ$ 。这是因为若继续增大倾角,部分供热不足月份集热器得热量虽能得到增加,但其他月份的得热量却因为倾角的增大而减少。人均集热面积  $1.7 \text{ m}^2$  已基本满足热负荷需求,但过量增大集热面积来减少辅助热量程度是有限的,且集热系统成本会大大增加,满足冬季热负荷时也会造成“夏季过剩”。

#### 2.4 几种确定最佳倾角计算结果比较

对于全年采用太阳能集热器的系统而言,前述 3 种计算方法分别是考虑入射太阳光余弦效率、倾斜面上的总辐射量、热水负荷求得集热器最佳倾角最优为  $26.0^\circ$ 、 $18.9^\circ$ 、 $40.8^\circ$ 。对比唐润生提

出的集热器最佳倾角关系式<sup>[10]</sup>:

$$\beta_{\text{opt}} = 43.6 + 0.32\varphi - 54.3K_d \quad (7)$$

式中:  $K_d$  为全年水平面上散射辐射量与总辐射量之比,适用于  $20^\circ < \varphi < 380^\circ$ ,  $35 < K_d < 0.6$ 。

根据式(7)计算得到福州地区集热器年最佳倾角为  $25.02^\circ$ ,相比较之下,结果相差分别约为  $0.98^\circ$ 、 $5.92^\circ$ 、 $16.78^\circ$ ,以当地纬度  $26.08^\circ$  为集热器倾角的热热水系统偏重于夏季使用,根据热水负荷匹配计算的相差较大,偏重于冬季使用,利用本研究结果可避免热水系统“夏季热量过剩、冬季得热不足”,可供工程中集热器倾角设计参考。

### 3 结论

在福州地区典型气象年逐年数据基础上,分

别以入射太阳光束余弦最大、倾斜面最大辐照量和年需最小辅助加热量为计算目标,得到集热器正南方位的最佳倾角。结果表明:

(1)福州地区太阳辐射和日照时数时间分布为夏秋季较大,冬春季较小,属于太阳能资源较丰富区,冬季节气候环境温度较高,相对湿度较大,年均环境温度 $20.3^{\circ}\text{C}$ ,最小不低于 $5^{\circ}\text{C}$ ,空气热源状况较为优越,为该地区太阳能空气源热泵热水系统应用提供光热利用条件。

(2)不论是以上午9时还是中午12时集热

器倾斜面上入射太阳光束余弦最大确定年最佳倾角都是 $26.0^{\circ}$ ,但是季节性最佳倾角有所变化,春秋季节各月变化不大。夏冬季节差别较大,上午9时夏、冬季集热器最佳倾角为 $-0.12^{\circ}$ 、 $51.92^{\circ}$ ,而中午12时为 $6.8^{\circ}$ 、 $45.1^{\circ}$ 。

(3)考虑集热器入射太阳光束余弦效率确定年最佳倾角为 $26.0^{\circ}$ ,而年需最小辅助加热量确定最佳倾角为 $40.8^{\circ}$ ,两者与文献[7]研究集热器年最大得热量的最佳倾角 $18.9^{\circ}$ 相比,热水系统每年减少的额外辅助热量分别是 $4.52\%$ 、 $6.35\%$ 。

## 参考文献:

- [1] 瑞澄.民用建筑太阳能热水系统工程技术手册[M].北京:化学工业出版社,2011:29-30.
- [2] 李华山.乌鲁木齐地区太阳能集热器最佳倾角计算[J].太阳能,2008(10):51-53.
- [3] 马江燕.典型气象年下我国正南安装的太阳能集热器最佳倾角的计算与分析[J].铁道建筑技术,2012(5):110-113,123.
- [4] 於仲义,陈焰华,雷建,等.武汉地区太阳能集热器倾角的确定[J].武汉勘察设计,2016(1):31-34.
- [5] Sampson A, Le Y, Williamson J F. Optimizing the tilt angle of solar collectors [J]. Renewable Energy, 2002, 26(4): 587-598.
- [6] 何世钧,张雨,周文君.太阳能热水系统集热器最佳倾角的确定[J].太阳能学报,2012,33(6):922-927.
- [7] 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.
- [8] 何梓年.太阳能热利用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009.
- [9] 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.
- [10] 唐润生,吕恩荣.集热器最佳倾角的选择[J].太阳能学报,1988,9(4):369-376.

(特约编辑:黄家瑜)