

不同方位角上太阳能集热器最佳倾角的确定

钟林志, 孙志新, 许巧玲, 严哲钦

(福州大学节能技术研究中心, 福建 福州 350116)

摘要: 综合考虑太阳辐射量和热负荷的变化, 以福州地区为例, 分别以年最大得热量和年需最小辅助加热量为目标, 计算得到不同方位角所对应的集热器最佳倾角. 结果表明, 正南朝向下, 相较于以年最大得热量为目标确定的集热器最佳倾角, 以年需最小辅助加热量为目标确定的集热器最佳倾角可节约 11.7% 的辅助加热量. 方位角对集热器最佳倾角也有较大影响. 当方位角的绝对值较大时, 应采用较小的集热器倾角.

关键词: 太阳能集热器; 最佳倾角; 方位角; 热负荷

中图分类号: TK513.3 **文献标识码:** A

The optimum tilt angles of solar collectors for different azimuth angles

ZHONG Linzhi, SUN Zhixin, XU Qiaoling, YAN Zheqin

(Energy Saving Technology Research Center of Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China)

Abstract: Considering the changes of solar radiation and heating load and taking Fuzhou region for instance, the optimum collector tilt angles at different azimuth angles were calculated based on the objectives of maximum annual heat gain and minimum annual auxiliary heating respectively. The results show that, when the collector facing due south, the optimum tilt angle obtained based on minimum annual auxiliary heating could reduce the heating supplement by 11.7%, compared to the angle obtained based on maximum annual heat gain. Azimuth angle has a great influence on the optimum collector tilt angle. A smaller collector tilt angle should be adopted when the absolute value of azimuth angle is larger.

Keywords: solar collector; optimum tilt angle; azimuth angle; heating load

0 引言

太阳能热水系统因其能明显降低生活耗能而成为近年来的研究热点. 集热器倾角是影响集热系统集热效率的主要因素. 太阳能自动跟踪系统能自动改变集热器倾角, 始终保持集热器与太阳光线垂直, 可以最大限度地吸收太阳辐射, 但建筑美观以及安装维护成本等因素限制了其在太阳能热水系统领域的应用^[1]. 目前, 固定式倾角仍是集热器安装的主流形式. 对于固定安装的集热器, 必然存在一个最佳倾角使系统效率达到最高. 目前集热器最佳倾角主要依据两种目标来确定. 一种是以集热器年最大辐射接收量为目标, 杨金焕^[2]、李华山^[3]等以此为目标函数, 计算了全国多个典型城市的集热器最佳倾角. 该方法无需热负荷数据, 计算较为简便, 但所确定的最佳倾角容易造成集热系统夏季热量过剩、冬季得热不足. 另一种是以集热器年需最小辅助加热量为目标来确定集热器最佳倾角. 该方法由 Adnan Shariah 等^[4]提出, 在计算中充分考虑太阳辐射接收量与实际热负荷之间的匹配关系, 能够减少辅助加热量, 实现能源的合理利用, 在集热器倾角的计算中也有一定的应用^[5].

但不论采用哪一种目标函数, 目前对于集热器最佳倾角的计算大多针对正南摆放的情况, 对其他朝向下集热器倾角的计算则相对较少. 然而实际安装过程中, 集热器常会遇到因建筑的朝向或位置限制而无法面向正南安装的情况, 此时便需考虑不同朝向对集热器最佳倾角的影响.

收稿日期: 2013-12-18
通讯作者: 孙志新(1984-), 讲师, 博士, 主要从事中低温热源利用研究, zxsun@fzu.edu.cn
基金项目: 福建省科技重大专项经费资助项目(闽科技[2008]88号); 福建省经贸委经费资助项目(830004)

针对集热器不同摆放方位,综合考虑太阳辐射量与热负荷(以福州地区为例),分别以年最大得热量和年需最小辅助加热量为目标计算集热器的最佳倾角,为邻近地区的太阳能热水工程集热器倾角选择提供参考.

1 数学模型

1.1 太阳辐射

地球与太阳的运动规律是确定的,要计算地球表面任意位置的太阳辐射量,需要确定大气层外水平面上的太阳辐射强度、太阳赤纬角、日出时角、日落时角等基本参数.

1.1.1 太阳赤纬角 δ

太阳赤纬角 δ 指的是太阳光线与地球赤道平面的夹角. 赤纬角以年为周期,在 $-23^{\circ}27' \sim 23^{\circ}27'$ 范围内变化,春分和秋分时刻为零,夏至和冬至则分别达到正负极值. 赤纬角可由 Cooper 在 1969 年提出的近似公式计算得到^[6]:

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

(1)

式中: N 为一年中某一天的日序,其值可由表 1 确定^[7].

表 1 各月代表日的日序

Tab. 1 The representative day of each month

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
月的日序	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10
年的日序	17	47	75	105	135	162	198	228	258	288	318	344

1.1.2 日出、日落时角 (ω_{sr} 、 ω_{ss} , 弧度制)

太阳时角 ω 即日面中心时角,上午为正,下午为负,其值反映了一天中太阳位置的变化情况. 对处在任意纬度 φ 且方位角为 γ 、倾角为 β 的集热器,其日出时角 ω_{sr} 及日落时角 ω_{ss} 可由 Bushell 于 1982 年提出的改进公式^[8] 计算得出:

$$\omega_{sr} = -\min\left\{\left| -\arccos\left(-\frac{A}{D}\right) + \arcsin\left(\frac{C}{D}\right) \right|, \omega_0 \right\}, \quad \omega_{ss} = \min\left\{\arccos\left(-\frac{A}{D}\right) + \arcsin\left(\frac{C}{D}\right), \omega_0 \right\}$$

(2)

式中: $\omega_0 = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta)$; $A = \sin \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma)$; $B = \cos \delta (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma)$; $C = \cos \delta \sin \beta \sin \gamma$; $D = \sqrt{B^2 + C^2}$.

1.1.3 大气层外水平面上的太阳辐射强度 (H_0)

一年中每日大气层外水平面上的太阳辐射强度 H_0 , 可由下式计算得出:

$$H_0 = \frac{24}{\Pi} I_{sc} \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360^{\circ} N}{365}\right) \right] \cdot \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{2\Pi\omega_s}{360^{\circ}}\right) \sin \varphi \sin \delta \right]$$

(3)

式中: I_{sc} 为太阳常数,其值为 $1\,367\text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.

1.1.4 集热器倾斜表面太阳总辐射量 H_T

确定集热器的最佳倾角,首先需要准确计算出集热器倾斜表面上所接收的太阳辐射总量. 通常认为,集热器倾斜表面太阳辐射总量 H_T 等于倾斜表面接收的直接辐射量 (H_{bT}) 与天空散射辐射量 (H_{dT}) 以及地面反射辐射量 ($H_{\rho T}$) 三者之和,即:

$$H_T = H_{bT} + H_{dT} + H_{\rho T} = H_b R_b + H_d R_d + \rho H R_p$$

(4)

式中: H_b 为水平面太阳直射辐射量; R_b 为大气层外倾斜面辐射量与水平面辐射量之比; H_d 为水平面太阳散射辐射量; R_d 为天空散射辐射量与水平面辐射量之比; ρ 为地表反射率,按集热器安装地表为混凝土取值 0.22; H 为水平面太阳总辐射量; R_p 为地面反射辐射量与水平面辐射量之比, $R_p = (1 - \cos \beta)/2$.

天空散射辐射量的模型众多, Hay 模型因其简明实用的特性以及较好的计算精度而被广泛应用于工

程计算中^[9], 故选用 Hay 模型做为计算模型. Hay 模型认为天空散射辐射量 H_{dT} 应由两部分组成, 即太阳方向的绕日分量与其余天空穹顶均匀分布的散射辐射, 可用下式表示:

$$H_{dT} = H_d R_d = H_d \left[\frac{H_b}{H_0} R_b + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{H_b}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right]$$

(5)

当集热器倾斜面朝正南方向布置, 即集热器方位角 $\gamma=0$ 时:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_0 + \omega_0 \sin \varphi \sin \delta}$$

(6)

当集热器倾斜面朝向偏离正南方, 即集热器方位角 $\gamma \neq 0$ (向东为负, 向西为正) 时:

$$R_b = \left[(\omega_{ss} - \omega_{sr}) \sin \delta (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) + \cos \delta (\sin \omega_{ss} - \sin \omega_{sr}) \cdot \right. \\ \left. (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) - (\cos \omega_{ss} - \cos \omega_{sr}) \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \right] / \\ \left[2 (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \sin \varphi \sin \delta \omega_s) \right]$$

(7)

最终, 公式(4)可改写为:

$$H_T = H_b R_b + H_d \left[\frac{H_b}{H_0} R_b + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{H_b}{H_0} \right) (1 + \cos \beta) \right] + \frac{1}{2} \rho H (1 - \cos \beta)$$

(8)

根据以上公式, 代入当地实测太阳辐射数据, 便可计算出不同方位集热器倾斜面上的太阳辐射总量.

1.2 热负荷

文献[10]给出了不同场所的热水用水定额, 其中福州地区宿舍的最高日热水定额推荐值为 $40 \sim 80 \text{ L} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$ (折算成 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$). 由于热负荷对最佳倾角计算有较大影响, 因此需要更为精确的数值. 为获得更符合实际的热负荷, 采用问卷调查的形式对福州地区某高校学生不同季节的热水用途、洗浴习惯等方面进行调研.

调查显示, 学生宿舍生活热水主要用于洗浴、洗漱及洗衣物三个方面. 春秋季、夏季以及冬季生活热水的使用均以洗浴为主, 其热水用量占总热水用量的比重分别为 82.9% 、 90.1% 和 66.0% , 而洗漱及洗衣物热水用量所占比重较小, 故仅对洗浴热水展开详细分析, 而洗漱及洗衣物的日均热水用量则根据统计结果按混合水温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 通过总热水换算系数 c_{hs} 折算到日均总热水用量.

1.2.1 洗浴热水用量

根据不同季节将洗浴热水温度从低到高大致分为冷水、 $35 \sim 37$ 、 $38 \sim 40$ 、 $41 \sim 43$ 、 $44 \sim 46\text{ }^{\circ}\text{C}$ 5 个级别, 对调查结果进行统计分析, 结果如表 2 所示. 将洗浴时间细化, 分 7 个时间段进行分析, 结果如表 3 所示. 可以看出, 洗浴时间与气温成反比, 天气越冷洗浴时间越长.

表 2 不同季节洗浴热水温度用量分布及平均值

Tab.2 The distribution and mean value of bathing water temperature in different seasons

季节	不同洗浴热水温度用量分布/%					$\bar{\theta}_a / ^{\circ}\text{C}$
	冷水	35 ~ 37 $^{\circ}\text{C}$	38 ~ 40 $^{\circ}\text{C}$	41 ~ 43 $^{\circ}\text{C}$	44 ~ 46 $^{\circ}\text{C}$	
春秋季	0.0	28.3	43.3	19.8	8.5	39.3
夏季	27.1	57.1	14.6	1.2	0.0	36.7
冬季	0.0	3.6	22.3	25.9	48.2	43.0

表 3 不同季节洗浴时间

Tab.3 Bath time in different seasons

季节	不同洗浴时间百分比/%							\bar{t}_a / min
	1 ~ 5 min	5 ~ 10 min	10 ~ 20 min	20 ~ 25 min	25 ~ 30 min	30 ~ 35 min	35 ~ 40 min	
春秋季	6.1	36.0	45.8	7.3	4.1	0.8	0.0	12.7
夏季	9.4	49.4	38.3	2.8	0.0	0.0	0.0	10.3
冬季	2.8	30.0	42.9	14.6	5.3	2.4	2.0	15.0

不同季节洗浴频率的调查结果列于表 4. 三个季节中以夏季洗浴频率最高, 约每天 1 次; 冬季则因天气寒冷, 洗浴频率大幅下降, 平均一周只有 3 次.

表 4 不同季节洗浴频率

Tab. 4 Bathing frequency in different seasons

季节	不同洗浴频率百分比/%					$\bar{f}_a/\text{次} \cdot \text{周}^{-1}$
	每天 2 次	每天 1 次	一周 4~5 次	一周 2~3 次	一周 1 次	
春秋季	0.0	19.8	59.1	20.7	0.4	5
夏季	10.6	83.8	3.4	3.4	0.0	7
冬季	0.0	7.3	30.0	58.3	4.5	3

1.2.2 学生宿舍日均热负荷计算

对各项统计结果进行整理分析, 根据不同季节各类用途热水用量百分比折算出各季节的总热水用量换算系数, 最后按公式(9)计算不同季节的日均热负荷, 计算结果见表 5. 由计算结果可知, 春秋季、夏季以及冬季人均日热水用量(60℃)分别为 29.2、18.7、32.9 L.

$$Q_r = c\rho v\Delta t \times 10^{-3} \tag{9}$$

式中: Q_r 为日均热负荷, MJ; c 为水的定压比热容, $4.187 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; ρ 为水的密度, $\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$; v 为人均日热水用量, L; Δt 为用户侧热水与自来水的温度差, $^\circ\text{C}$.

表 5 人均日热负荷计算表

Tab. 5 Calculation table of Per – capita daily hot water consumption in one day

季节	洗浴热水用量							总热水用量		
	$t_a/$	$f_a/$	$V_{\text{周}}/$	$V_{\text{日}}/$	$\theta_a/$	$\theta_0/$	$V_{60^\circ\text{C}}/$	c_{ha}	$V_{60^\circ\text{C}}\text{总}/$	Q_r/MJ
	min	次 $\cdot \text{周}^{-1}$	L $\cdot \text{周}^{-1}$	L $\cdot \text{日}^{-1}$	$^\circ\text{C}$	$^\circ\text{C}$	L			
春秋季	12.7	5	381.0	54.4	39.3	20	26.3	1.11	29.2	4.92
夏季	10.3	7	432.6	61.8	36.7	27	18.2	1.03	18.7	2.59
冬季	15.0	3	270.0	38.6	43.0	11	25.2	1.31	32.9	6.75

2 计算结果

为得到不同朝向下的集热器最佳安装角度, 分别对集热器正南朝向安装和其他方位安装两种情况进行分析.

根据式(6)~式(8)利用 Matlab 编程, 设定倾角 β 步长为 5° ($0^\circ \sim 90^\circ$ 内变化), 输入福州市纬度 $\varphi = 26.08^\circ$ 、日序日 N 、赤纬角 δ 、时角 ω 等相关参数和福州市太阳辐射数据^[11], 并按图 1 所示流程进行计算.

2.1 正南朝向集热器最佳倾角

2.1.1 得热量最大时集热器最佳倾角

由于受到阳光照射条件等因素的影响, 集热器不同月份的集热效率各不相同, 因此在计算时应考虑集热器的平均集热效率^[5]. 根据集热器全日集热效率的经验值 $0.4 \sim 0.55$ ^[12], 分别取集热器 1~12 月的集热效率为 0.45 、 0.45 、

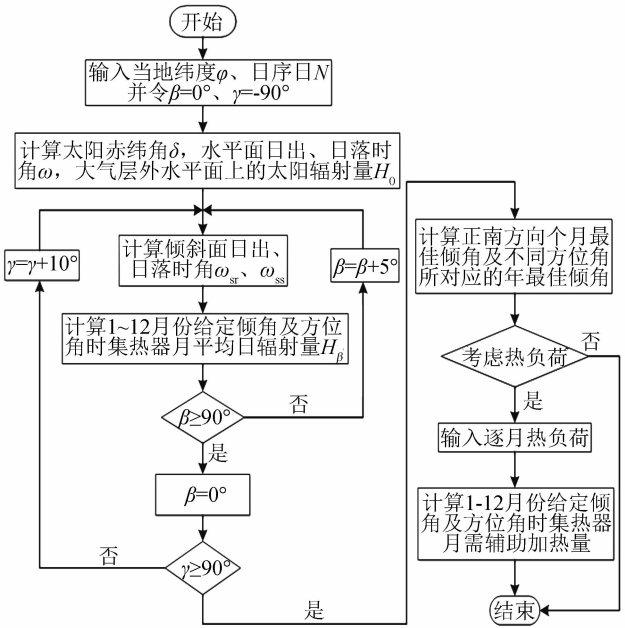


图 1 集热器倾斜面太阳辐射量及辅助加热量计算流程图
Fig. 1 Calculation flowchart of auxiliary heating and solar radiation on the collector

0.5、0.5、0.5、0.55、0.55、0.55、0.5、0.5、0.5、0.45。通过计算得到正南方向不同倾角下集热器的各月日平均得热量 Q_{β} 及热负荷 Q_r , 如表 6 所示。

表 6 不同倾角的集热器各月日平均得热量及热负荷

Tab. 6 Average daily heat gain of collector at different tilt angle and heating load in each month

$\beta/(^{\circ})$	Q_{β} , 日均/MJ											
	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	2.57	3.20	4.03	5.52	7.17	8.64	10.09	8.77	6.48	4.90	3.52	2.27
-10	2.80	3.41	4.21	5.66	7.24	8.67	10.15	8.93	6.71	5.27	3.84	2.55
-5	3.01	3.59	4.34	5.76	7.26	8.63	10.14	9.03	6.88	5.61	4.12	2.82
0	3.21	3.77	4.47	5.83	7.25	8.56	10.08	9.09	7.03	5.92	4.40	3.08
5	3.40	3.92	4.57	5.88	7.20	8.45	9.97	9.11	7.14	6.20	4.66	3.33
10	3.57	4.06	4.65	5.89	7.12	8.30	9.82	9.07	7.22	6.44	4.90	3.57
15	3.72	4.18	4.71	5.87	7.01	8.11	9.62	8.99	7.26	6.65	5.11	3.78
20	3.85	4.27	4.75	5.83	6.87	7.89	9.38	8.87	7.27	6.82	5.29	3.97
25	3.97	4.34	4.76	5.75	6.70	7.63	9.10	8.69	7.24	6.95	5.44	4.14
30	4.06	4.39	4.74	5.64	6.49	7.34	8.77	8.48	7.18	7.04	5.56	4.28
35	4.13	4.42	4.70	5.51	6.26	7.02	8.41	8.22	7.07	7.08	5.65	4.40
40	4.18	4.42	4.64	5.34	6.01	6.67	8.02	7.92	6.94	7.09	5.71	4.49
45	4.20	4.40	4.55	5.15	5.73	6.30	7.59	7.58	6.77	7.05	5.74	4.55
50	4.20	4.35	4.45	4.94	5.43	5.91	7.13	7.21	6.56	6.98	5.73	4.58
55	4.18	4.29	4.32	4.70	5.11	5.50	6.66	6.81	6.33	6.86	5.69	4.59
60	4.13	4.20	4.16	4.44	4.77	5.08	6.16	6.38	6.06	6.70	5.62	4.57
65	4.06	4.09	3.99	4.16	4.42	4.65	5.65	5.92	5.77	6.50	5.52	4.52
70	3.97	3.95	3.80	3.86	4.07	4.21	5.13	5.44	5.45	6.27	5.39	4.45
75	3.86	3.80	3.60	3.56	3.71	3.79	4.62	4.95	5.11	6.00	5.23	4.34
80	3.73	3.63	3.38	3.23	3.35	3.38	4.12	4.45	4.75	5.70	5.04	4.21
85	3.57	3.44	3.14	2.91	3.00	3.00	3.64	3.95	4.38	5.36	4.82	4.06
90	3.40	3.24	2.89	2.58	2.68	2.68	3.22	3.46	3.98	5.00	4.58	3.88
Q_r	6.75	6.75	4.91	4.91	4.91	2.59	2.59	2.59	4.91	4.91	4.91	6.75

由表 6 可以看出, 冬半年 10~3 月集热器各月日平均得热量随倾斜角度的增大呈先增大后减小的趋势。这是因为冬半年太阳高度角较小, 适当增大集热器倾角使其与太阳高度角互余, 可提高集热器的有效接收面积, 获得更多的太阳辐射能。当倾角超过最佳角度后, 集热器的有效接收面积减小, 得热量便随之减少。因此, 存在一个最佳倾角使得集热器得热量最大。夏半年 4~9 月的得热量变化趋势与冬半年相似。但不同的是, 5、6、7 三个月的得热量最大值出现在 $-15^{\circ} \sim 0^{\circ}$ 的负角度下。

为获得最佳倾角, 首先采用 3 次多项式对表 6 中的数据进行拟合, 然后通过求导得到曲线极值点, 随后将倾角步长调整为 0.1° , 在极值点的附近区域进一步进行精确计算, 得到每月的最佳倾角 β_{opt} 并列于表 7。

表 7 各月、半年及全年最佳倾角

Tab. 7 Monthly, semi - annual and annual optimum tilt angle

月份	夏半年						冬半年						全年
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
$\beta_{opt}/(^{\circ})$	-4.1	-10.4	-7.8	3.8	18.4	9.8	38.2	46.7	53.8	47.6	38.0	24.5	—
$\beta_{opt}/(^{\circ})$	0.8						41.9						18.9

由表 7 可以看出, 不同月份所对应的月最佳倾角也有所不同。由夏季转入冬季时, 月最佳倾角逐渐增大; 而由冬季转入夏季时, 月最佳倾角逐渐减小。这是由太阳高度角的季节性变化引起的。夏季时太阳高度角较大, 采用较小的集热器倾角更利于太阳直射辐射的接收; 而冬季时太阳高度角较小, 故应采用较大的

倾角. 因此, 若福州地区的热热水系统偏重于夏季使用, 0.8° 的集热器倾角可使集热器在夏季获得更多的太阳辐射能; 若热水系统偏重于冬季使用, 则应尽量将倾角设置在 41.9° ; 若为全年使用则将倾角设为 18.9° .

夏半年的 5、6、7 三个月对应的最佳倾角为负, 说明这三个月中, 集热器稍微向北方倾斜能够接收更多的太阳辐射. 这是由于福州地区靠近热带, 夏季时太阳从东北升起自西北落下, 一天中的大部分时间太阳位于建筑物北侧, 因此会出现集热器的最佳倾角为负的情况.

2.1.2 辅助加热量最小时集热器最佳倾角

以上采用得热量最大为计算目标时, 无需考虑热负荷; 而采用辅助加热量最小为计算目标时, 则需考虑得热量与热负荷的匹配. 令任意倾角的集热器得热量为 Q_{β} , 热负荷为 Q_r , 则 $Q_{fi} = Q_{\beta i} - Q_{ri}$ 表示第 i 月集热器提供的热量满足热负荷需求的程度. $Q_{fi} > 0$ 代表该月集热器得热量可满足热负荷的实际需求; 反之则无法满足, 而其差值即为辅助热源所需额外补充的热量. 当集热器的安装面积较大, 每月集热器得热量均能满足热负荷的需求时, 最佳倾角即为全年得热量最大时的倾角. 但这样会造成安装成本的大幅增加和夏季大量的产能浪费. 因此, 集热器的安装面积一般只保证得热量在全年大部分时间里能满足热负荷的需求, 而在冬季时采用辅助加热的办法弥补供热不足. 因此, 集热器的最佳倾角应以年需辅助加热量

最小, 即
$$\min \sum_{i=1}^{12} Q_{fi}^*, Q_{fi}^* = \begin{cases} 0 & (Q_{fi} \geq 0) \\ |Q_{fi}| & (Q_{fi} < 0) \end{cases}$$
 为目标来确定.

根据上述方法, 以宿舍(一间 4 人)为单位, 按人均集热面积 1 m^2 计算得到年辅助加热量最小时集热器的最佳倾角为 41.6° . 为直观地比较得热量最大与辅助加热量最小这两种计算准则之间的差异, 分别计算了两种情况下集热器每月得热量及所需辅助加热量, 计算结果列于表 8.

表 8 不同倾角集热器每月得热量与所需辅助加热量

Tab.8 Monthly heat gain of collector and the auxiliary heating demand at different tilt angles (MJ)

月份	$\beta = 18.9^{\circ}$				$\beta = 41.6^{\circ}$		
	Q_r	Q_{β}	Q_{fi}	Q_{fi}^*	Q_{β}	Q_{fi}	Q_{fi}^*
1	836.8	474.5	-362.3	362.3	518.9	-317.9	317.9
2	755.8	476.2	-279.6	279.6	494.6	-261.3	261.3
3	609.3	587.8	-21.5	21.5	572.4	-36.9	36.9
4	589.6	700.7	111.1	0	634.5	44.9	0
5	609.3	856.0	246.7	0	734.9	125.6	0
6	311.4	952.5	641.1	0	787.6	476.2	0
7	321.8	1170.4	848.6	0	978.7	656.9	0
8	321.8	1103.2	781.4	0	970.1	648.3	0
9	589.6	872.8	283.2	0	826.6	237.0	0
10	609.3	841.3	232.0	0	878.3	269.0	0
11	589.6	629.9	40.3	0	686.7	97.1	0
12	836.8	487.3	-349.5	349.5	559.0	-277.9	277.9
全年	6 981.1	9 152.4	—	1 012.9	8 642.3	—	894.0

由表 8 可知: 4~11 月份两种最佳倾角下的集热器得热量均大于热负荷, 无需辅助加热, 而 12~3 月份期间均需要辅助加热. 相较于以集热器得热量最大为目标确定的最佳倾角, 采用辅助加热量最小目标得到的集热器最佳倾角可使集热系统每年减少 11.7% 的额外热量补充.

2.2 其他方位角下的集热器最佳倾角

分别以年最大得热量和年最小辅助加热量为目标计算不同方位角所对应的最佳倾角, 结果如图 2 所示. 对于计算目标为集热器得热量最大的情况, 集热器最佳倾角随着方位角绝对值的增大而减小. 这是因为当方位角的绝对值增大时, 即集热器的朝向向东或向西偏移时, 集热器接收太阳辐射的有效面积变小, 同时接收辐射时间变短, 集热器得热量减少. 但若相应地减小集热器的倾角, 则可使集热器全天受到太阳照射的时间增长, 从而提高集热器的得热量. 因此方位角的绝对值越大, 集热器的最佳倾角越低. 当方位角绝对值为 90° , 即集热器面向正东或正西安装时, 两种计算目标得到的最佳倾角均接近于零, 此时集热

器表面近似与地面平行, 集热器在太阳日出与日落之间均可吸收太阳辐射。

图 3 所示为不同方位角的最佳倾角所对应的年需辅助加热量。可以看出, 年需辅助加热量随着方位角绝对值的增大而增大。这是由于集热器接收太阳辐射的有效面积和时间同时减小, 集热器得热量减少, 因此所需的辅助加热量增加。随着方位角绝对值的增大, 两种计算目标所得到的最佳倾角逐渐靠近, 因此二者所需的辅助加热量也逐渐趋于相同。

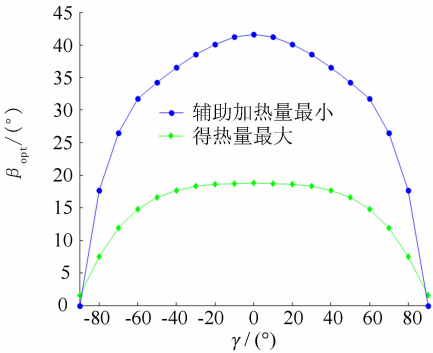


图 2 不同方位角对应的最佳倾角

Fig. 2 The optimum tilt angle corresponding to different azimuth angle

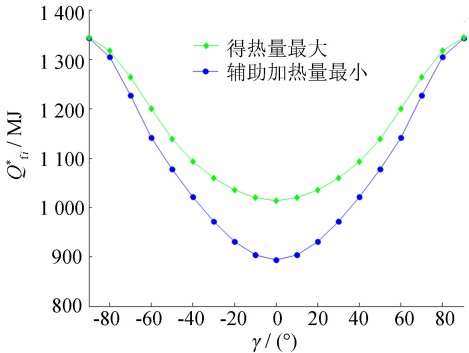


图 3 不同方位角对应的最佳倾角年需辅助加热量

Fig. 3 Annual auxiliary heating at the optimum tilt angle corresponding to different azimuth angle

3 结语

以福州地区为例, 分别以年最大得热量和年需最小辅助加热量为计算目标, 得到了集热器正南朝向和其他朝向下的最佳倾角。结果表明:

- 1) 两种计算目标所得到的集热器最佳倾角差别较大。以全年得热量最大为目标确定的集热器最佳倾角为 18.9°; 而以年最小辅助加热量为目标确定的最佳倾角为 41.6°, 该倾角可使集热系统年节约 11.7% 的辅助加热量。
- 2) 方位角的变化对集热器最佳倾角的影响较大。集热器方位角的绝对值较大时, 即集热器朝向偏离正南方向较多时, 应采用较小的集热器倾角。

参考文献:

[1] 夏君铁. 大规模日照跟踪技术的研究[J]. 太阳能, 2013(10): 48-53.

[2] 杨金焕, 毛佳俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角的计算[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 1 032-1 035.

[3] 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.

[4] Shariah A, Al-Akhras M A, Al-Omari I A. Optimizing the tilt angle of solar collectors[J]. Renewable Energy, 2002, 26(4): 587-598.

[5] 杨庆, 丁昀, 周朝晖, 等. 考虑热负荷的太阳能热水系统集热器最佳倾角确定[J]. 太阳能学报, 2007, 28(3): 309-313.

[6] Cooper P I. The absorption of solar radiation in solar stills[J]. Solar Energy, 1969, 12(3): 333-346.

[7] 韩斐, 潘玉良, 苏忠贤. 固定式太阳能光伏板最佳倾角设计方法研究[J]. 工程设计学报, 2009, 16(5): 352.

[8] Bushnell R H. A solution for sunrise and sunset hour angles on a tilted surface without a singularity at zero[J]. Solar Energy, 1982, 28(4): 359.

[9] Evseev E G, Kudish A I. The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south[J]. Solar Energy, 2009, 83(3): 377-388.

[10] 郑瑞澄. 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.

[11] 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.

[12] GB/T 18713-2002 太阳能热水系统设计、安装及工程验收技术规范[S].

(责任编辑: 沈芸)