

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2016.07.029

云南南向平板太阳能热水系统 水量配比特性研究^①

胡粉娥¹, 魏生贤²

1. 曲靖师范学院 化学与环境科学学院, 云南 曲靖 655011; 2. 曲靖师范学院 磁性材料及器件研究中心, 云南 曲靖 655011

摘要: 基于平板型集热器日均能量输出模型, 建立了太阳能热水系统水箱水量与集热器面积的配比模型. 以云南省 10 个城市的典型气象数据为例, 利用所建模型对太阳能热水系统的水量配比进行了计算. 为便于实际应用, 给出了水箱终温为 60 ℃ 时各城市各季节和全年使用太阳能热水系统水量配比与倾角间相关系数大于 0.999 的数学关系式. 进一步研究发现, 这 10 个城市春季、夏季、秋季、冬季和全年使用太阳能热水系统集热器的最佳倾角及其对应的水量配分别分别在 5~15°, 0~0°, 29~38°, 43~50°, 20~30° 和 50~62, 44~60, 43~56, 44~58, 46~56 kg/m² 之间. 依据供热目的的不同, 可利用该研究结果对太阳能热水系统进行优化设计.

关键词: 太阳能热水系统; 水量配比; 平板型集热器; 最佳倾角

中图分类号: TK519 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2016)07-0185-06

太阳能热水器已广泛应用于中国的城市和农村地区. 2010 年底, 我国太阳能热水器的安装面积已达 1.68 亿 m², 每年节能 20 兆吨标煤. 2015 年底, 我国太阳能热水器的安装总量可达到 2.5 亿 m², 预计 2020 年底达到 6.0 亿 m²^[1]. 太阳能热水系统的大规模应用, 对我国节能减排^[2-3]、实现国家发改委提出的“2020 年非化石能源的份额达到 15%”^[4]的目标具有积极作用.

为保证太阳能热水系统的高效运行和用户对水箱终温的需求, 世界各国因气候不同对平板型太阳能热水系统水箱水量与集热面积配比(简称水量配比, Mass Area Ratio, MAR)给出了不同的推荐值: 如, 美国^[5]与希腊^[6]为 75 kg/m²、马来西亚^[7]与土耳其^[8]为 50~70 kg/m²、塞浦路斯^[9]为 45~60 kg/m²、爱尔兰^[10]为 50 kg/m²、中国^[11]为低于 100 kg/m². 根据我国的气候特点, 有关学者对此进行了更为深入的研究: 文献[12]综合考虑气候因素、系统投资, 给出了以最大收益为目标函数的水量配比计算公式; 文献[5]认为 50~90 kg/m² 较为合适, 昆明气候条件下平板集热器水量配比在 60~100 kg/m² 较为合适^[13]. 这些研究结果表明, 对于平板型太阳能热水系统的水量配比, 仅有部分国家(如美国、希腊、爱尔兰)给出了确定的推荐值. 马来西亚、土耳其、塞浦路斯给出了水量配比的取值范围, 且变化较小. 我国地域辽阔, 气候复杂, 文献[10]所给公式计算相对复杂、文献[3, 9, 11]所给结果取值范围较大, 致使工程上难以直接应用. 为解决此问题, 本研究依据平板太阳能集热器有用能量输出模型建立了平板型太阳能热水系统的水量配比模型. 前期研究显示, 此模型的计算值与实验值的相对误差小于 10%^[14]. 云南省地处我国西南边陲, 气候温和, 太阳能资源较为丰富, 属于我国太阳能资源区划三等地区. 本文以云南省 10 个城市的气象参数

① 收稿日期: 2015-04-27

基金项目: NSFC-云南联合基金重点项目(U1137605); 云南省科技厅面上项目(2013FZ111).

作者简介: 胡粉娥(1977-), 女, 云南曲靖人, 硕士, 副教授, 主要从事化工与新能源利用的研究工作.

为例, 利用所建模型对集热器南向放置的太阳能热水系统的水量配比进行了计算分析. 为便于实际应用, 文中给出了春季、夏季、秋季、冬季和全年使用太阳能热水系统的水量配比与集热器倾角的数学关系式, 并进一步给出了各季节和全年使用太阳能热水系统时集热器的最佳倾角和对应的水量配比.

1 模型建立

1.1 南向平板型集热器能量输出模型

单位倾斜面上时均接收的太阳总辐射^[15] 为:

$$I_{\beta} = K_b I_b \cos \theta + \frac{1}{3} K_d I_d (2 + \cos \beta) + \frac{1}{2} \rho_g K_g I_h (1 - \cos \beta) \quad (1)$$

式中: I_b , I_d 和 I_h 分别为时均太阳直射、地面散射辐射和总辐射; I_b , I_d 和 I_h 可由水平面上月平均日总太阳辐射 H_h 折算得出^[16].

倾斜面上直射、散射和地面反射入射角的修正因子为

$$\begin{cases} K_b = 1 + b_0 (1/\cos \theta - 1) \\ K_d = 1 + b_0 (1/\cos \theta_d - 1) \\ K_g = 1 + b_0 (1/\cos \theta_g - 1) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \theta_d = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \\ \theta_g = 90 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \end{cases} \quad (3)$$

太阳直射光对斜面的入射角

$$\cos \theta = \sin \delta \sin (\lambda - \beta) + \cos \delta \cos (\lambda - \beta) \cos \omega \quad (4)$$

式中: λ 为地理纬度; δ 为太阳赤纬; β 为集热器倾角; ρ_g 为地面反射率; ω 为时角; $\theta, \theta_d, \theta_g$ 为倾斜面上直射、散射和地面反射等效入射角; 对于单层透明盖板, 常数 $b_0 = -0.1$.

稳态工况下, t_1 至 t_2 时间内平板型集热器有用能量输出 Q_u 为

$$Q_u = A_c \int_{t_1}^{t_2} [(\tau \alpha) I_{\beta} - U_{Lf} (T_{abs} - T_{air})] dt \quad (5)$$

热损失系数可表示为

$$U_{Lf} = U_{top} + U_{bot} + U_{edg} \quad (6)$$

其中: A_c 为采光面积; $(\tau \alpha)$ 为透射—吸收积; U_{Lf} 为平板集热器热损失系数; T_{abs} 与 T_{air} 为吸热板、环境空气平均温度; $U_{top}, U_{bot}, U_{edg}$ —集热器顶部、底部与边缘热损系数^[17-18].

1.2 水箱容水量与集热面积配比

热水耗热量为

$$Q_h = MC_p (T_{hot} - T_w) \quad (7)$$

式中: M 为水箱容水量, C_p 为水的比热, T_{hot} 为水箱终温, T_w 为自来水温度.

当 $Q_u = Q_h$ 时, 集热器输出能量即可满足热水负荷. 此时, t_1, t_2 分别代表日出和日落时刻. 则水箱容水量与集热面积比 MAR 为

$$\frac{M}{A_c} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} [(\tau \alpha) I_{\beta} - U_{Lf} (T_{abs} - T_{air})] dt}{C_p (T_{hot} - T_w)} \quad (8)$$

自来水水温与环境温度、相对湿度和风速的近似关系为^[19-20]:

$$T_w = \frac{1}{2} \left[(2.82 + 0.82 T_{air}) \frac{(1 + R_H^2)^{0.435}}{(1 + 0.31 V^2)^{0.056}} + 4.717 e^{0.041 T_{air}} \frac{(1 + R_H^2)^{0.781}}{(1 + 0.325 V^2)^{0.0325}} \right] \quad (9)$$

式中, R_H 为相对湿度, V 为风速.

2 平板型太阳能热水系统的水量配比与最佳倾角

基于云南省 10 个城市(蒙自、临沧、腾冲、昆明、楚雄、丽江、德钦、勐腊、澜沧、元江)的气象数据, 利用上述数学模型对平板型太阳能热水系统的水量配比进行了计算与分析. 分析过程中, 集热器方位角为 0° , 水箱终温为 60°C , 透射-吸收积($\tau\alpha$)为 0.81, 地面反射率 ρ_g 为 0.2, 水的比热 C_p 为 $4.187\text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

2.1 月平均气温与水平太阳总辐射

云南省 10 个城市的月平均气温和水平面上月平均日总太阳辐射分别见图 1—2. 图 1 显示, 各城市最低气温出现在冬季, 德钦的月平均气温最低, 达 -2.4°C ; 最高气温出现在夏季, 元江的月平均气温最高, 达 28.9°C . 图 2 显示, 各城市水平面上月平均日总太阳辐射的最高值基本上出现在春季, 昆明和丽江的最大, 约为 $21.5\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$; 最低值出现在秋冬季, 德钦的最小, 约为 $9.5\text{ MJ}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$.

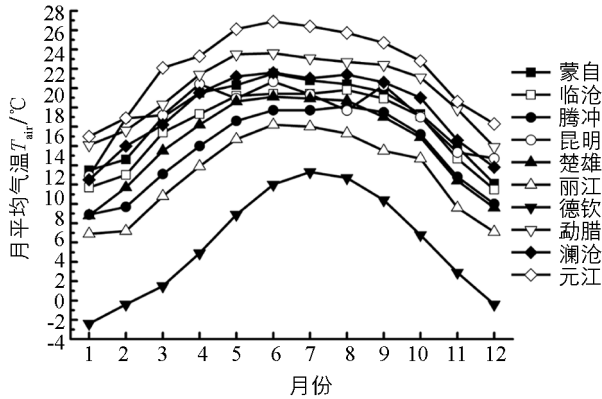


图 1 城市的月平均气温

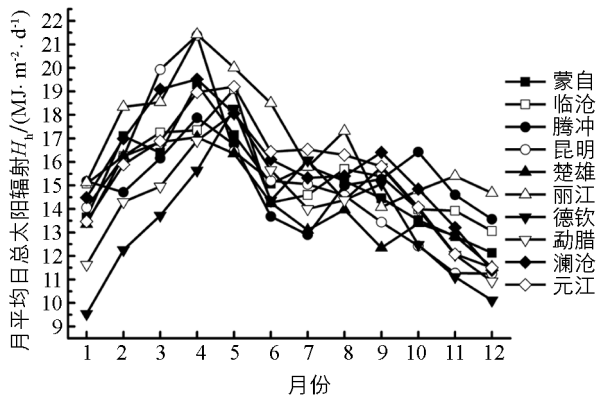


图 2 水平面上月平均日总太阳辐射

2.2 水量配比与集热器倾角关系

图 3 和图 4 分别为昆明与德钦 2 城市春季、夏季、秋季、冬季和全年各倾角下的平均水量配比. 由图可知, 各季节和全年使用的太阳能热水系统的水量配比随集热器倾角的增大基本上呈现出先增大后减少的趋势. 其余 8 个城市亦存在类似的变化趋势. 图中曲线显示, 每个城市各季节和全年使用的太阳能热水系统的水量配比随倾角的取值范围较大, 不利于实际应用. 但图中曲线基本上为抛物线的一部分, 为便于水量配比的快速取值, 将数据进行二次拟合, 回归系数和相关系数(R^2)见表 1. 拟合关系式为

$$MAR = a + b\beta + c\beta^2 \quad (10)$$

由表 1 可知, 太阳能热水系统的水量配比 MAR 与集热器倾角 β 具有较好的相关性. 回归相关系数均大于 0.999, 回归关系式的可信度较好, 可利用(10)式快速确定这 10 个城市各倾角下各季节和全年使用太阳能系统的水量配比.

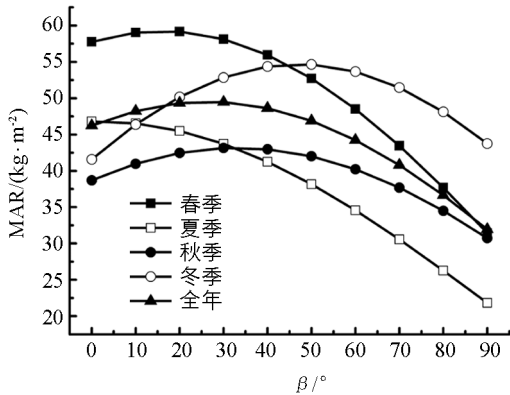


图 3 水量配比与倾角的关系(昆明)

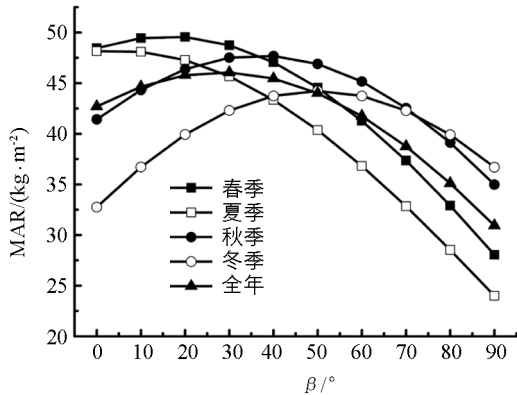


图 4 水量配比与倾角的关系(德钦)

表 1 水量配比与倾角间的回归系数及其相关系数

时间	回归系数	城 市									
		蒙自	临沧	腾冲	昆明	楚雄	丽江	德钦	勐腊	澜沧	元江
春季	a	55.087 1	55.540 6	51.523 8	58.103 8	50.714 5	52.017 6	48.725 2	56.853 6	60.927 7	61.520 9
	b	0.080 3	0.084 8	0.093 4	0.136 7	0.098 0	0.128 8	0.106 4	0.042 6	0.091 7	0.087 1
	c	-0.004 2	-0.004 3	-0.004 0	-0.004 9	-0.003 9	-0.004 4	-0.003 8	-0.004 1	-0.004 8	-0.004 8
	R^2	0.999 1	0.999 1	0.999 1	0.999 1	0.999 1	0.999 1	0.999 1	0.999 0	0.999 1	0.999 1
夏季	a	50.633 6	49.274 8	45.102 6	47.157 7	44.368 2	48.282 6	48.482 6	53.076 9	53.834 0	59.783 6
	b	-0.061 7	-0.051 5	-0.036 1	-0.043 3	-0.038 4	-0.030 7	-0.016 2	-0.082 6	-0.075 0	-0.072 8
	c	-0.002 9	-0.002 8	-0.002 5	-0.002 7	-0.002 5	-0.003 0	-0.002 9	-0.002 9	-0.003 0	-0.003 5
	R^2	0.999 0	0.999 0	0.999 0	0.999 0	0.999 0	0.999 0	0.999 1	0.999 0	0.999 0	0.999 0
秋季	a	43.794 2	47.045 2	49.112 0	38.789 5	40.590 0	40.519 0	41.464 6	49.286 2	50.157 0	49.102 3
	b	0.289 3	0.334 1	0.395 6	0.258 1	0.302 3	0.367 5	0.335 0	0.279 6	0.320 9	0.315 7
	c	-0.004 5	-0.005 0	-0.005 5	-0.003 9	-0.004 3	-0.004 8	-0.004 5	-0.004 8	-0.005 1	-0.005 0
	R^2	0.999 4	0.999 4	0.999 5	0.999 4	0.999 5	0.999 6	0.999 6	0.999 3	0.999 3	0.999 4
冬季	a	42.999 3	44.273 4	42.724 4	41.487 6	40.496 2	41.219 8	32.637 4	39.621 6	44.292 4	42.625 8
	b	0.536 3	0.589 5	0.608 6	0.556 9	0.540 6	0.662 0	0.462 3	0.411 5	0.529 4	0.527 7
	c	-0.005 9	-0.006 3	-0.006 3	-0.005 9	-0.005 8	-0.006 6	-0.004 6	-0.004 8	-0.006 0	-0.005 8
	R^2	0.999 8	0.999 8	0.999 7	0.999 8	0.999 8	0.999 7	0.999 7	0.999 8	0.999 8	0.999 8
全年	a	48.129 9	49.030 6	47.113 7	46.385 3	44.042 6	45.513 3	42.830 4	49.711 3	52.302 2	53.258 6
	b	0.211 0	0.239 3	0.265 5	0.227 2	0.225 5	0.281 7	0.221 8	0.162 7	0.216 8	0.214 4
	c	-0.004 4	-0.004 6	-0.004 6	-0.004 3	-0.004 1	-0.004 7	-0.004 0	-0.004 1	-0.004 7	-0.004 8
	R^2	0.999 2	0.999 2	0.999 3	0.999 2	0.999 3	0.999 3	0.999 3	0.999 1	0.999 2	0.999 2

2.3 最佳倾角及其水量配比

根据极值条件, 令 $d(MAR)/d\beta=b+2c\beta=0$ 可得各季节和全年使用太阳能热水系统时集热器的最佳倾角 β_{opt} 及其对应的水量配比 MAR_{opt} (表 2).

表 2 最佳倾角及其水量配比

城市	纬度/ °	春 季		夏 季		秋 季		冬 季		全 年	
		$\beta_{\text{opt}}/$ °	$MAR_{\text{opt}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\beta_{\text{opt}}/$ °	$MAR_{\text{opt}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\beta_{\text{opt}}/$ °	$MAR_{\text{opt}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\beta_{\text{opt}}/$ °	$MAR_{\text{opt}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	$\beta_{\text{opt}}/$ °	$MAR_{\text{opt}}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
蒙自	23.38	9.56	55.47	0.00	50.63	32.14	48.44	45.45	55.19	23.98	50.66
临沧	23.88	9.86	55.96	0.00	49.27	33.41	52.63	46.78	58.06	26.01	52.14
腾冲	25.02	11.68	52.07	0.00	45.10	35.96	56.23	48.30	57.42	28.86	50.94
昆明	25.02	13.95	59.06	0.00	47.16	33.09	43.06	47.19	54.63	26.42	49.39
楚雄	25.03	12.56	51.33	0.00	44.37	35.15	45.90	46.60	53.09	27.50	47.14
丽江	26.87	14.64	52.96	0.00	48.28	38.28	47.55	50.15	57.82	29.97	49.73
德钦	28.48	14.00	49.47	0.00	48.48	37.22	47.70	50.25	44.25	27.73	45.91
勐腊	21.48	5.20	56.96	0.00	53.08	29.13	53.36	42.86	48.44	19.84	51.33
澜沧	22.57	9.55	61.37	0.00	53.83	31.46	55.20	44.12	55.97	23.06	54.80
元江	23.60	9.07	61.92	0.00	59.78	31.57	54.09	45.49	54.63	22.33	55.65

表 2 中夏季最佳倾角的计算值均为负数, 考虑到倾角范围为 $0\sim90^\circ$ 之间, 故记为 0° . 表 2 中的数据显示, 云南省 10 个城市春季、夏季、秋季、冬季和全年使用太阳能热水系统集热器的最佳倾角分

别在 $5\sim 15^{\circ}$, $0\sim 0^{\circ}$, $29\sim 38^{\circ}$, $43\sim 50^{\circ}$ 和 $20\sim 30^{\circ}$ 之间, 对应的水量配比分分别在 $50\sim 62$, $44\sim 60$, $43\sim 56$, $44\sim 58$, $46\sim 56\text{ kg/m}^2$ 之间. 依据使用侧重季节的不同, 实际应用中可参照(10)式和表 1—2 对太阳能热水系统进行优化设计.

3 结束语

基于云南省 10 个城市的典型气象数据, 利用所建模型对各城市春季、夏季、秋季、冬季和全年使用的平板太阳能热水系统的水量配比进行了计算. 为便于实际应用, 本研究给出了水箱终温为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 各城市各季节和全年使用平板太阳能热水系统水量配比与集热器倾角间相关系数大于 0.999 的拟合关系式. 利用所建关系式可快速确定集热器处于不同倾角下太阳能热水系统的水量配比, 为云南平板太阳能热水系统的大规模应用提供了理论依据. 此外, 本研究还进一步给出了云南省 10 个城市各季节和全年使用太阳能热水系统集热器的最佳倾角及其对应的水量配比值. 最佳倾角及其水量配比的取值范围分别为 $5\sim 15^{\circ}$, $0\sim 0^{\circ}$, $29\sim 38^{\circ}$, $43\sim 50^{\circ}$, $20\sim 30^{\circ}$ 和 $50\sim 62$, $44\sim 60$, $43\sim 56$, $44\sim 58$, $46\sim 56\text{ kg/m}^2$.

参考文献:

[1] YUAN Jia-hai, XU Yan, ZHANG Xing-ping, et al. China's 2020 Clean Energy Target: Consistency, Pathways and Policy Implications [J]. Energy Policy, 2014, 65: 692—700.

[2] 陈 勇, 黄 波. 中小企业减排技术协同创新策略研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(8): 97—104.

[3] 胡秀芝, 鲍安红, 曹树星, 等. 基于 PKPM 的重庆三峡库区农村建筑节能改造——以丰都县某村委会楼为例 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(10): 161—164.

[4] HONG L, ZHOU N, FRIDLEY D, et al. Assessment of China's Renewable Energy Contribution During the 12th Five Year Plan [J]. Energy Policy, 2013, 62: 1533—1543.

[5] 宋爱国. 真空管式太阳热水器的水量配比及日平均效率的修正 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2002, 23(4): 40—43.

[6] PRAPAS D E. Improving the Actual Performance of Thermosiphon Solar Water Heaters [J]. Renewable Energy, 1995, 6(4): 399—406.

[7] ZAHEDI H R, ADAM N M, SAPUAN S M, et al. Effect of Storage Tank Geometry on Performance of Solar Water Heater [J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 2007, 66(2): 146—151.

[8] KEMAL ÇOMAKL, UGUR ÇAKLR, MEHMET KAYA, et al. The Relation of Collector and Storage Tank Size in Solar Heating Systems [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 63: 112—117.

[9] SOTERIS KALOGIROU. Thermal Performance, Economic and Environmental Life Cycle Analysis of Thermosiphon Solar Water Heaters [J]. Solar Energy, 2009, 83(1): 39—48.

[10] AYOMPE L M, DUFFY A, KEEVER M M, et al. Comparative Field Performance Study of Flat Plate and Heat Pipe Evacuated Tube Collectors (ETCs) for Domestic Water Heating Systems in a Temperate Climate [J]. Energy, 2011, 36(5): 3370—3378.

[11] NY/T 343-1998. 家用太阳热水器技术条件 [S]. 中华人民共和国农业部发布, 1998.

[12] 王少杰, 涂光备, 郑宗和, 等. 太阳热水器水箱容积与集热面积的合理配比的探讨 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 629—632.

[13] 谌学先, 高文峰. 家用太阳热水器水量配比与平均日效率关系 [J]. 云南师范大学学报, 2000, 20(2): 24—28.

[14] 魏生贤, 李 明, 林文贤, 等. 高层住宅建筑南立面太阳能热水系统水量配比特性研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(4): 663—669.

[15] NOTTON G, CRISTOFARI C, POGGI P. Performance Evaluation of Various Hourly Slope Irradiation Models Using Mediterranean Experimental Data of Ajaccio [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(2): 147—173.

[16] CRISTOFARI C, NOTTON G, POGGI P, et al. Modelling and Performance of a Copolymer Solar Water Heating Collector [J]. Solar Energy, 2002, 72(2): 99—112.

- [17] 张鹤飞, 俞金娣, 赵承龙, 等. 太阳能热利用原理与计算机模拟 [M]. 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [18] KHALED ZELZOULI, AMENALLAH GUIZANI, CHAKIB KERKENI. Numerical and Experimental Investigation of Thermosyphon Solar Water Heater [J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 78: 913–922.
- [19] 白振营. 一个计算湖泊(水库)自然水温的新公式 [J]. *水文*, 1999, 3: 29–32.
- [20] 李克锋, 郝红升, 庄春义, 等. 利用气象因子估算天然河道水温的新公式 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(1): 1–4.

Optimization Studies of Tank-Volume-to-Collector-Area Ratio for South-Facing Flat-Plate Solar Water Heating System Used in Yunnan Province

HU Fen-e¹, WEI Sheng-xian²

1. College of Chemistry and Environmental Science, Qujing Normal University, Qujing Yunnan 655011, China;

2. Center Magnetic Materials and Devices, Qujing Normal University, Qujing Yunnan 655011, China

Abstract: The model for discussing the tank-volume-to-collector-area ratio (the ratio is abbreviated as MAR) for south-facing flat-plate solar water heating system was established based on the energy output model of the flat-plate solar collector. The MARs were calculated by using the typical meteorological data of ten cities in Yunnan Province. The final water temperature in the storage tank is 60 °C in the calculation process. To facilitate engineering applications, the quadratic fit relations between the MARs and the tilt angles of the solar collector have been obtained with high correlation coefficients ($R^2 > 0.999$). Further discussions found that the optimal tilt angles and the corresponding MARs for spring, summer, autumn, winter and year-round operation of the solar water heating system are respectively in 5~15°, 0~0°, 29~38°, 43~50°, 20~30°, 50~62 kg/m², 44~60 kg/m², 43~56 kg/m², 44~58 kg/m² and 46~56 kg/m². Depending on the purpose and requirement of heating, the seasonal or year-round solar hot water systems can be optimized and designed by using the key results from this paper.

Key words: solar water heating system; mass area ratio(MAR); flat-plate solar collector; optimal tilt angle

责任编辑 潘春燕

