

一种能耗最优电辅热太阳能热水器系统设计模型

曹阳^[1] 贡琳慧^[2]

(1. 南京江北新区产业投资集团有限公司, 江苏 南京 210000;

2. 南京师范大学中北学院, 江苏 丹阳 212300)

摘要 本文研究了一种能耗最优太阳能热水器的设计理论, 主要基于太阳能水平面辐照计算模型和倾斜面辐照计算“K-T”模型, 理论分析得出任意倾斜面全年每小时接收辐照模型, 再通过光热转换和电辅加热建立太阳能电辅热水器角度和加热时间的理论模型, 最后仿真计算满足全天候热水使用的最优能耗太阳能热水器设计方式。本文以山西大同某太阳能电辅热水器为参考, 利用VB和Matlab模拟该地太阳能电辅热水器在不同设置角度条件下, 计算对应的电加热用电量, 最终求解出一、二月份该太阳能电辅热水器加热时间最短和耗电量最低条件下的最优角度, 进一步印证本文设计方法的理论可行性。

关键词 电辅太阳能热水器 K-T模型 倾斜面辐照量 电热转换

中图分类号: TK51

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)04-0013-03

在现今全球范围内能源短缺和能源危机的形势下, 太阳能作为清洁无污染的可再生能源日益得到广泛的关注。光热利用是将光能直接转换热能后投入使用, 这使用方式已经在世界范围内得到普遍认同。真空玻璃管太阳能热水器在世界范围内得以迅速推广, 在现有产品性能一定的条件下, 太阳能热水器实际集热效率受诸多因素的影响, 包括太阳辐照量、光线角度、周围环境, 以及所处的地理纬度、地区的气候与气象条件、安装倾角和方向角等。

传统的太阳能热水器在设计时, 一般采用固定的设计方式, 太阳能集热管角度出厂时就已经设计好, 具体摆放朝向由施工人员按照经验朝南放置, 这是当下太阳能热水器普遍采用的一种设计和施工方式。然而此种方式没有综合考虑当地具体的光照条件, 也没有综合考虑用电量的多重要素。

本文建议首先分析经典太阳能辐射模型, 建立任意地点、时间、空间、环境下所得到的太阳能辐射模型, 然后参考经典倾斜面辐射量K-T模型^[1]计算热水器表面接收的辐照量, 最后建立辐照量与用电量之间关系, 从而得到可以模拟任意地点、任意使用条件下的热水器设计模型。区别于其他学者单纯的理论分析求解最佳倾角^[2-4], 本文的最优设计模型主要基于数值遍历计算方法, 通过计算机建模计算, 得到一种最优条件下的太阳能电辅热水器的设计方式。

1 理论建模

1.1 倾斜面辐照量理论

本文主要采用Klein和Theilacker研究的计算任意朝向方位角和倾角计算斜面辐射量理论模型(K-T方法), 根据该方法建立数学模型用以计算任意安装地点、任意安装朝向和任意安装倾斜角情况下的倾斜面辐照量。倾斜面上的太阳能辐射量由三部分组成, 即阳光直射辐射量、空气散射辐射量和地面反射辐射量^[5-7]。

$$\bar{H}_T = \left[D + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \times \bar{H}$$

日出时角:

$$\cos \omega_s = -\frac{\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta} = -\tan \varphi \tan \delta$$

D由下式求解:

$$D = \begin{cases} \max \{0, G(\omega_{ss}, \omega_{sr})\}, & \omega_{ss} \geq \omega_{sr} \\ \max \{0, [G(\omega_{ss}, -\omega_s) + G(\omega_s, \omega_{sr})]\}, & \omega_{ss} < \omega_{sr} \end{cases}$$

G函数定义如下:

$$G(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2d} \left[\left(\frac{bA}{2} - a'B \right) (\omega_1 - \omega_2) \frac{\pi}{180} + (a'A - bB) (\sin \omega_1 - \sin \omega_2) - a'C (\cos \omega_1 - \cos \omega_2) + \left(\frac{bA}{2} \right) (\sin \omega_1 \cos \omega_1 - \sin \omega_2 \cos \omega_2) + \left(\frac{bC}{2} \right) (\sin^2 \omega_1 - \sin^2 \omega_2) \right]$$

上式中, $a' = a - \frac{\bar{H}_d}{H}$

$$|\omega_{sr}| = \min \left[\omega_s, \cos^{-1} \frac{AB + C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right],$$

$$\omega_{sr} = \begin{cases} -|\omega_{sr}|, (A > 0 \text{ 且 } B > 0) \text{ 或 } (A \geq B) \\ +|\omega_{sr}|, \text{ 其它} \end{cases}$$

$$|\omega_{ss}| = \min \left[\omega_s, \cos^{-1} \frac{AB - C\sqrt{A^2 - B^2 + C^2}}{A^2 + C^2} \right],$$

$$\omega_{ss} = \begin{cases} +|\omega_{ss}|, (A > 0 \text{ 且 } B > 0) \text{ 或 } (A \geq B) \\ -|\omega_{ss}|, \text{ 其它} \end{cases}$$

式中, \bar{H}_t 为斜面辐射量; \bar{H} 为水平面辐射量, β 为倾斜面倾角, 所指平面与水平面的夹角, $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$; ρ_g 为地面反射率, 一般取 20% 左右; ω 为时角, 每小时变化 15° , 上午为负, 下午为正, 正午为 0° ; φ 为纬度, $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$; δ 为赤纬角, $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ 。

1.2 太阳能热水器最优倾角模型

1.2.1 太阳能热水器单个集热管吸收热量

$$Q = l \times \pi \times R \times \text{SarXMHour}(\text{Day}, \text{Hour}) \times \eta \times 3600$$

其中, $\text{SarXMHour}(\text{Day}, \text{Hour})$ 某天每小时斜面接收到的辐照度, Wh/m^2 。

1.2.2 太阳能热水器整体吸收热量

$$Q_{\text{hour}}(\text{Day}, \text{Hour}) = \text{SarXMHour}(\text{Day}, \text{Hour}) \times \eta \times l \times \pi \times R \times N$$

1.2.3 太阳能热水器当日吸热量

$$Q_{\text{day}}(\text{Day}) = \sum_{\text{Hour}=1}^{24} Q_{\text{hour}}(\text{Day}, \text{Hour})$$

1.2.4 全年加热总时间

由前天晚上的温度得当天早上 6:00 的水温:

$$\text{Tshuixiang}(\text{Day}, 0) = \text{Tshuixiang}(\text{Day}-1, 2) \times 0.9$$

晚上洗澡时的水温:

$$\text{Tshuixiang}(\text{Day}, 1) - \text{Tshuixiang}(\text{Day}, 0) = Q_{\text{day}} / (c \times \rho \times v)$$

其中, c 为水比热容; ρ 为水密度; v 为体积; 联立方程可得用去的热水量 $V1$:

$$\begin{cases} \text{Tshuixiang}(\text{Day}, 1) \times V1 + \text{Tem}(\text{Day}) \times V2 = 40 \times 150 \\ V1 + V2 = 150 \end{cases}$$

太阳能热水器加满水后的水温:

$$\text{Tshuixiang}(\text{Day}, 2) \times 160 = \text{Tshuixiang}(\text{Day}, 1) \times (160 - V1) + \text{Tem}(\text{Day}) \times V1$$

若不需要加热, 则第二天早上 6:00 水温:

$$\text{Tshuixiang}(\text{Day}+1, 0) = \text{Tshuixiang}(\text{Day}, 2) \times 90\%$$

此时, 太阳能热水器电加热时间:

$$t(\text{Day}) = 0$$

若需要加热, 则第二天早上 6:00 水温:

$$\text{Tshuixiang}(\text{Day}+1, 0) = 65 \times 0.9$$

计算太阳能热水器电加热时间:

$$t(\text{Day}) \times 1500 \times 0.9 = \rho \times c \times v \times (65 - \text{Tshuixiang}(\text{Day}, 2))$$

计算全年太阳能热水器电加热时间:

$$t_{\text{year}} = \sum_{\text{Day}=1}^{365} t(\text{Day})$$

按照以上理论数学建模可以计算出, 任意地点、倾斜面任意倾角和方位角时的全年加热时间, 遍历倾斜面可以设置倾角和方位角得到不同安装方式的年加热时间, 取电加热时间最小值, 此时对应的太阳倾角和方位角为最佳倾角和方位角。

2 仿真模拟和分析

现模拟在山西省大同市安装设计家用型真空玻璃管太阳能热水器, 大同市的经度为纬度为 40.1° , 113.3° 。根据本文建立大同地区太阳能热水器的倾角、方向角与热效率的理论关系, 这里倾角是指热水器受热面与水平面的夹角 (小于 90°), 方向角是指热水器底座侧面边线与正南方向的夹角, 向东为负, 向西为正, 若热水器朝正南, 则方向角为 0° 。太阳能热水器集热器直径为 $\Phi 47\text{mm}$, 长度为 1500mm , 真空管 24 根, 水箱为 160 升, 带有 1500W 的辅助电加热器, 电加热器的电热转换效率为 90% , 每天 20 时, 当水箱中水温低于 40°C 时, 电加热器自动通电加热水温至 65°C 停止。家庭晚间每天消耗 40°C 热水 150L , 并于使用结束后加满水箱。水箱中热水过夜后第二天早晨温度降为原来温度的 90% , 并设在白天水箱中水的热量没有损失, 温度不下降。

本文讨论通过太阳能辐射模型和能量守恒原理得到某一个安装方式下的年加热时间, 也就是一、二月份每天太阳能吸收的太阳能和电加热器的耗电量。由于第一天早上的温度未知, 但实际是去年最后天的晚上加水后的水温, 先假设一个水温, 计算后得到的当年最后一天的水温代入第一天计算, 直至两者间误差不超过 1°C 。再以 10° 为步长遍历方位角和太阳高度

表1 1月22日6:00-18:00 辐照量和吸热量

时刻	斜面接收辐照量 (Wh/m ²)	真空管吸收热能 J	时刻	斜面接收辐照量 (Wh/m ²)	真空管吸收热能 J
0	0	0	12	1095.697	323246.5
1	0	0	13	1076.771	317662.8
2	0	0	14	972.6413	286943.2
3	0	0	15	603.9037	178160.3
4	0	0	16	266.5482	78635.55
5	0	0	17	21.03354	6205.197
6	0	0	18	0	0
7	0	0	19	0	0
8	9.581817244	2826.774063	20	0	0
9	85.57201431	25244.97644	21	0	0
10	252.3086782	74434.69325	22	0	0
11	876.3263843	258528.9023	23	0	0

表2

最佳倾角	最佳方位角	耗电量°	总加热时间/h
11	44	31.4953	20.9968674

角来寻找最佳倾角的区间,在找到的区间内进行加密遍历。以上计算即可得到不同设计方式下的年加热时间,最后通过寻找最短的年加热时间来确定最佳的设计方式,给出最佳安装角度下的一、二月份每天太阳能吸收的太阳能和电加热器的耗电量。1月中某一天随时间(6:00-18:00)与所吸收的热能的关系(见表1),然后得出计算结果(如表2)。

3 结论和建议

本文讨论的基于倾斜面辐照量计算理论上,采用能量守恒定律建立太阳能热水器全年用电模型,使复杂问题简单化,方便计算机求解,不仅提高了真空管获得的总辐照度,也使电加热用电量最少,在不同的地区下都可以用已建好的模型,方便快捷,节约开支,使实际问题更加精确。在实际运用中,将此倾角模型融入到太阳能热水器倾角的设计中来,一是可以大量节省太阳能热水器设计的时间;二是可以确保设计出的方案具有较高的实用性,并且可以使各种资源得到最大的利用。

参考文献:

- [1] Klien S A, Theilacker J C. An algorithm for calculating monthly average radiation on inclined surfaces[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1981(103):29-33.
- [2] 陈维, 沈辉, 刘勇. BIPV 中光伏阵列朝向和倾角对性能影响理论研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(02):206-210.
- [3] 杨金焕, 毛家俊, 陈中华. 不同方位倾斜面上太阳辐射量及最佳倾角得计算[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(07):1032-1036.
- [4] 李庆林, 王平阳, 杨帆. 倾斜面上太阳辐射计算与最佳位置确定[J]. 节能技术, 2008, 26(06):571-574.
- [5] Coulson, K.L. Solar and Terrestrial Radiation[M]. New York: Academic Press, 1975.
- [6] 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(05):348-353.
- [7] Klein S A. Calculation of Monthly Average Isolation on Titled Surfaces[J]. Solar Energy, 1977.