

晴天模型下太阳能热水器加 设平面反射板的能量增益研究

Studies on the Energy Enhancement of a Solar Water-heater Installed Plane Reflectors with Sunshine Model

郑宏飞

钟水库

Zheng Hongfei

Zhong Shuiiku

(广西大学物理系 南宁市西乡塘路 10号 530004)

(Dept. of Physics, Guangxi Univ., 10 Xixiangtang Road, Nanning, Guangxi, 530004)

摘要 在晴天模型下平板型太阳能热水器加设平面反射板后的能量增益与用太阳日射表实测到的实验数据比较,加设平面反射板后的能量增益显著,其中夏半年加下反射板效果优于加上反射板,冬半年加上反射板效果优于加下反射板。

关键词 晴天模型 平面反射板 能量增益

Abstract The energy enhancement of a flat-plate solar water-heater installed plane reflectors was calculated with sunshine model, and compared with the experimental data measured with a solar actinometer. It was found that the energy enhancement was remarkable, and the efficiency using lower reflector was better than using upper reflector in summer and conversely in winter.

Key words sunshine model, plane reflector, energy enhancement

平板型太阳能热水器是一种广泛使用的低温太阳能热利用装置。作为低温太阳能热利用装置,其不足之处在于热输出小和运行温度低。一般而言,提高平板型太阳能热水器性能的基本途径有二:一是增大热水器的集热器面积;二是保持吸热器的面积不变,而增加其采光面积。前者无疑会提高成本,后者的方法是在吸热板的上端或下端装配平面反射板。由于反射板的成本相对较低,使得这一作法更有实际意义。加设反射板的实际价值如何,关键在于它对集热器提供的能量大小,即能否明显提高热水器的能量收益。

迄今为止,国外已有不少学者对加设反射板的太阳能系统进行了讨论,并得到了一些有益的结论^[1]。但在特定天气模型下研究其能量增益的却不多,进行实验对比研究的就更少,加之各实验点的地理纬度和实验条件不同,得出的结论也不尽相同,因此,不能直接为我国学者所利用,因而本文进行这方面的探讨

是有实际意义的

1 晴天模型

太阳能热水器一般都在晴天或大半晴天的条件下才能使用,探索太阳能热水器在加设平面反射板后的能量增益,也应该是在晴天的条件下进行才最有代表性。所以我们有必要先对晴天时的太阳辐射进入太阳能系统的结构进行探讨,即有必要先建立一个晴天模型。

若以 I_0 表示天空的太阳辐射强度; I_b 表示照射到集热器上的直射辐射强度; I_d 为照射到集热器上的散射辐射强度; I_r 为照射到反射板上的直射强度。据文献 [2],我们可得到如下关系:

$$I_b = I_0 \cos \theta_c, \quad (1)$$

$$I_d = C I_0 f_c, \quad (2)$$

$$I_r = I_0 \cos \theta_r, \quad (3)$$

$$I_0 = A \exp(-B / \sin h), \quad (4)$$

式中,

$$f_c = (1 + \cos U) / 2. \quad (5)$$

f_c 为集热器对天空的形状因子; θ_c 为阳光对集热器的入射角; θ_r 为阳光对反射板的入射角; h 为太阳高度角; U 为集热器的安装倾角. A B C 分别为与月份有关的经验系数, 具体数值由表 1 所示

表 1 经验系数 A B C 的数值

Table 1 Values of empirical coefficients A , B , C

月份 Month	A (W/m^2)	B	C
1	1230	0.142	0.058
2	1217	0.143	0.059
3	1191	0.152	0.069
4	1146	0.175	0.092
5	1110	0.196	0.116
6	1093	0.202	0.130
7	1086	0.207	0.136
8	1102	0.202	0.120
9	1143	0.182	0.098
10	1184	0.163	0.076
11	1214	0.151	0.066
12	1229	0.144	0.059

假设反射现象只在反射板上进行, 即不考虑集热器及盖层的反射, 并只考虑反射板对集热器的遮阴因子, 而不考虑集热器对反射板的遮阴因子. 那么我们很容易写出加设反射板后太阳能热水器的能量增益为

$$M = q/Q, \quad (6)$$

q — 反射板反射到集热器上的能量,

Q — 最佳倾角, 无反射板时集热器接收的能量

在晴天模型下, 集热器采集到的能量应由三部分组成: 一部分是集热器本身采集到的能量; 另两部分分别是上、下反射板反射到集热器上的能量, 即

$$Q = (1 - S_r) [I_b + I_d + d(I_1 f_{r1} \cos \theta_{r1} + I_2 f_{r2} \cos \theta_{r2})], \quad (7)$$

式中 $S_r = S_{r1} + S_{r2}$, S_{r1} 和 S_{r2} 分别为上、下反射板的遮阴因子, 若反射板安装适当, 遮阴因子可取为 0. I_1 和 I_2 分别为直射到上、下反射板的太阳辐射量; d 为反射板的反射率; f_{r1} 和 f_{r2} 分别为上、下反射板的转换因子; θ_{r1} 和 θ_{r2} 分别为反射光在集热器上的入射角.

由 (6) 式和 (7) 式可得

$$M = \frac{d I_1 f_{r1} \cos \theta_{r1} + d I_2 f_{r2} \cos \theta_{r2}}{I_b + I_d}. \quad (8)$$

另据文献 [3] 我们得到,

$$\cos \theta_{r1} = \cosh \cdot \cos V \sin(2U_1 - U) + \sinh \cos(2U_1 - U), \quad (9)$$

$$\cos \theta_{r2} = -\cosh \cdot \cos V \sin(2U_2 + U) + \sinh \cos(2U_2 + U), \quad (10)$$

式中 U_1 和 U_2 分别为上、下反射板的安装倾角; V 为太阳方位角; h 为太阳高度角. 上、下反射板的转换因子可分别写成

$$f_{r1} = 0.5(1.5 + S_1) R_1 / W_1, \quad (11)$$

$$f_{r2} = 0.5(1.5 + S_2) R_2 / W_2, \quad (12)$$

其中系数分别取

$$S_1 = \frac{e_{y1}}{a}, \quad R_1 = \frac{e_{x1}}{a}, \quad W_1 = \frac{b}{a} \cos U,$$

$$S_2 = \frac{e_{y2}}{a}, \quad R_2 = \frac{e_{x2}}{a}, \quad W_2 = \frac{b}{a} \cos U.$$

a b b_1 和 b_2 分别为集热器和反射板的几何尺寸, 如图 1 所示. 而

$$e_{x1} = -b_1 \cos U_1 + C_1 \cdot u_1, \quad (13)$$

$$e_{y1} = 0.5a + C_1 \cdot V_1, \quad (14)$$

$$e_{x2} = b_2 \cos U_2 + C_2 \cdot u_2, \quad (15)$$

$$e_{y2} = 0.5a + C_2 \cdot V_2, \quad (16)$$

$$c_1 = b_1 \sin(U_1 - U) / \cos \theta_{r1}; \quad (17)$$

$$c_2 = b_2 \sin(U_2 - U) / \cos \theta_{r2}, \quad (18)$$

$$u_1 = -\cosh \cos V (\cos^2 U_1 - \sin^2 U_1) + \sinh \cdot \sin 2U_1, \quad (19)$$

$$V_1 = \cosh \sin V, \quad (20)$$

$$u_2 = -\cosh \cos V (\cos^2 U_2 - \sin^2 U_2), \quad (21)$$

$$V_2 = -\cosh \sin V. \quad (22)$$

将 (9) ~ (22) 式的结果代入 (8) 式, 即可得到晴天模型下带反射板的太阳能热水器的能量增益

图 1 集热器及反射板的几何关系图

Fig. 1 Geometrical relationship of thermal arrestor and plane reflector

2 能量增益的实验测试

若用日射表对带反射板的太阳能集热器接收的能量进行测试,则可实际测出其系统的能量增益,此时增益公式可写成

$$M = \frac{(I - I_c) \cdot A_r}{I_c \cdot A_o} = f_g \frac{I - I_c}{I_c}, \quad (23)$$

式中 I_c 为直接投射到集热器上的总能量; I 为包括反射时投射到集热器上的总能量; f_g 为反射光斑面积与集热器的面积之比. I_c 是可测量的, f_g 则可通过计算光斑面积而求出. 对于上反射板,

$$f_g = \frac{A_{r1}}{A_o} = nb_1 \left(\frac{1}{b_c} - \frac{mb_{r1}}{2ba} \right), \quad (24)$$

当 $b > nb_1$ 时;

$$f_g = \left(1 - \frac{mb_{r1}}{2a} \right), \quad (25)$$

当 $b \leq nb_1$ 时.

式中,

$$n = - (\sin U_1 \cosh \cos V_+ \cos U_1 \sinh) / \cos \theta_i, \quad (26)$$

$$m = - [\sin(U_1 - U) \cosh \sin V] / \cos \theta_i, \quad (27)$$

$$\cos \theta_i = - \cosh \cos V \sin(2U - U) - \sinh \cos(2U - U). \quad (28)$$

对于下反射板,

$$f_g = \frac{A_{r2}}{A_o} = nb_2 \left(\frac{1}{b_c} - \frac{mb_{r2}}{2ab_c} \right), \quad (29)$$

当 $b > nb_2$ 时;

$$f_g = \left(1 - \frac{mb_{r2}}{2a} \right), \quad (30)$$

当 $b \leq nb_2$ 时.

式中,

$$n = [\sin(U_2 + U) \cosh \cos V - \cos(U_2 + U) \sinh] / \cos \theta_j, \quad (31)$$

$$m = - [\sin(U_2 + U) \cosh \cos V] / \cos \theta_j, \quad (32)$$

$$\cos \theta_j = + \sin(2U_2 + 3U) \cosh \cos V - \cos(2U_2 + U) \sinh. \quad (33)$$

因此,通过将 (24) ~ (33) 式代入 (23) 式,即可用辐射表测量出集热器的能量增益

3 实验结果与理论结果的比较

我们在 1992 年 5~10 月间,选择了若干个晴天日进行了实际测试,并把所得数据用计算机模拟得出实测热水器的增益曲线,再由 (8) 式求得热水器的理论增益曲线,两者之比较见图 3 所示. 实验中,用

图 2 上、下反射板反射光斑面积计算图

Fig. 2 Area computation for reflecting faculae of upper reflector and lower reflector

四台完全相同的太阳能热水器同时进行试验,一台加上反射板,一台加下反射板,一台加上、下反射板,一台不加反射板,用日射表同时测量出各集热器上的太阳能辐射量. 其几何参数, $a = 1 \text{ m}$, $b = 1 \text{ m}$, $b_{r1} = b_{r2} = 0.5 \text{ m}$

从图 3 中可以看出,实验曲线与理论曲线的变化趋势十分符合,各实验点也基本在回归线上. 但同时也发现,理论曲线比实验曲线都要略高一些. 究其原因可能有: (1) 实际上的反射光斑并不像理论上计算的那样是一个平行四边形,而是一个不十分规则的图形,并且没有理论上计算的面积大; (2) 我们在计算理论值时,把反射板的反射率定为 0.8,实际上反射板不可避免地有些灰尘,因此实际的反射率可能略小于 0.8; (3) 用计算机进行重复迭代时,反射板的最佳倾角在一天中是变化的,而我们在进行实验时,却把上午 10 时的最佳值当作该天的最佳倾角. 因此,所得实验值比理论值略低是可以理解的.

4 结论

从我们所得的结果来看,用加设平面反射板的方法来提提高平板型太阳能热水器的性能是一条可行的途径,尤其是下反射板在夏季带来的能量增益十分可观,达到 12% 以上. 10 月份之后,由于太阳高度角减小,效果差一些,但也在 8% 以上. 加上反射板在冬季带来的效益也十分理想,可达 9% 左右. 加设反

图 3 加设平面反射板后集热器的能量增益曲线

Fig. 3 Energy enhancing curves of thermal arrestor with a plane reflector

- (1) 5月 15日测量 Measured on 15th May
 - (2) 6月 8日测量 Measured on 8th June
 - (3) 7月 8日测量 Measured on 8th July
 - (4) 9月 15日测量 Measured on 15th September
 - (5) 10月 15日测量 Measured on 15th October
- A 加下反射板 Installing lower reflector
B 加上反射板 Installing upper reflector

射板后,一方面可以提高热水器的性能,另一方面能延长热水器的供热水时间,特别是广西的气候大多数属于间晴日,加设反射板后,能更容易获得可用的温度

参考文献

- 1 Taber H. Mirror booster for solar collectors. *Solar Energy*, 1966, 10 (3): 111~ 114.
- 2 Liu B Y H. The long-term average performance of flat-plate solar energy collectors. *Solar Energy*, 1963, 7 (2): 53~ 56.
- 3 Garg H P, Hrishikesan D S. Enhancement of solar energy on flat-plate collectors by plane booster mirrors. *Solar Energy*, 1988, 40 (4): 452~ 455.
- 4 宋爱国. 平面反射板对平板型太阳能集热器能量收益的影响. *北京师范学院学报 (自然科学版)*, 1991, 12 (2): 52~ 55.

(责任编辑: 邓大玉 蒋汉明)