

# 太阳能平板型热水器主要结构参数的最佳化

李元哲

(清华大学)

方铨荣

(中国科学院力学研究所)

赵士怀

(清华大学)

## 摘要

本文讨论了太阳能平板型热水器的集热器主要结构参数的最佳化。建立了连续控制的集热系统的数学模型及计算模拟程序,用复合形多参数寻优法寻找最佳值。最后,以北京地区气象资料为例,计算了集热器最佳参数。所编计算程序可通用。

用本文推荐的优值与目前国内习用的参数,分别核算了集热器的成本,采用优值可使成本显著下降。

## 一、前言

目前,我国太阳能热水器已批量生产,因此,必须重视经济核算,对集热器的结构尺寸进行优选是提高其经济效益的重要途径。迄今为止,国内外在这方面已有不少的研究成果。

文献〔1〕从传热机理出发,对铜管、铜板集热器提出了优化的肋片型式;文献〔2、3〕提出了平板集热器最佳倾角的计算方法;文献〔4〕提出了最佳管间距;文献〔5〕进一步利用简化模型,对于不同材料的最佳管间距和板厚进行了探讨。根据这些方法确定的集热器几何参数都较当前国内沿用的经济合理。然而,上述方法还存在两方面的问题:

第一,它们是针对集热器中的某一个或某两个参数分别进行寻优的,而忽视了这些参数之间的相互影响,致使所得优值与真正优值有一定差别。下面,以效率成本最低作为评价标准的一类方法为例,对这个问题加以说明。

这类方法认为,评价相同寿命的集热器的标准是

$$E_{\min} = \text{Min} \left\{ C(1+r)^N + m \frac{(1+r)-1}{r} \right\}^{(5)}$$

对于给定的  $r$ 、 $m$  和  $N$ , 则

$$E_{\min} = \text{Min}\{C\} \quad (1)$$

$$C = A \cdot h = \frac{G \cdot (T_{f,o} - T_{f,i}) \cdot C_p \cdot h}{I \cdot \eta}$$

当  $G$ 、 $C_p$ 、 $I$ 、 $T_{f,o}$ 、 $T_{f,i}$  为定值时,可以得到

$$E_{\min} = \text{Min}\{h/\eta\} \quad (1)'$$

式中

$$\eta = F_R [(\tau\alpha) - U_L(T_{f,i} - T_a)] / I \quad (2)$$

$$F_R = \frac{G \cdot C_p}{U_L \cdot A} \left( 1 - e^{-\frac{U_L F' A}{G \cdot C_p}} \right) \quad (3)$$

当寻求  $w^*$ 、 $t^*$  时, 必须先给定  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 。但由(2)可见,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  不同时,  $U_L$  不同, 使  $\eta$  也不同(且它们之间是非线性关系), 因而  $w^*$ 、 $t^*$  就不同, 所以,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $w$ 、 $t$  等参数是相互关联的, 在求最佳值时, 同时考虑更为恰当。

其次, 上述方法都是在给定的设计条件下, 即在固定的日照、外温、出入口水温以及板温下进行寻优的。这些设计固定值如果选择不当, 就不能反映外界环境和系统运行过程对最佳值、尤其是对  $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$  的影响。事实上, 作为生活用热水器系统中的平板集热器, 总是和一定容积的水箱联合使用的, 集热器的进、出口水温总是随日照及时间在连续变化着, 在这种情况下寻求  $\delta_1^*$  和  $\delta_2^*$  时,  $U_L$  变化显著, 但却与  $[(\tau\alpha) - U_L(T_{f,i} - T_a)] / I$  的变化不成比例, 因而, 由(1)式求出的最佳值就与  $(\tau\alpha)$ 、 $I$ 、 $T_{f,i}$ 、 $T_a$  的具体数值有关, 如用固定的上述参数去代替全天变化着的状况时, 必须采用某种有代表意义的平均值, 否则, 就很难接近实际情况。

我们利用集热器—水箱动态模型, 输入典型的全天气象数据, 用复合形优选法对集热器主要结构参数进行同时寻优。这种方法寻优快, 结果较准确。

## 二、平板型热水器最佳结构参数的评价标准及计算方法

本文讨论的热水器系统如图 1 所示。

### 1. 可比条件

(1) 在相同的日照及环境下, 具有相同的日产热能力  $Q$ , 并且假定  $Q$  在集热终了时集中使用。

(2) 假定蓄水箱只蓄存当天的集热量, 集热器开始运行时, 水箱温度等于环境温度; 集热器运行终了时, 平均水温为生活热水要求的温度, 即  $40^\circ - 45^\circ\text{C}$ ; 集热器内流量全天固定, 并能满足上述温度要求, 且尽可能接近最佳值。

(3) 集热器寿命、维修费用及电耗基本相同。

### 2. 比较的指标

由于不同参数的集热器总产值相同, 所以, 使用年限内总花费最小, 或年总费用最小, 可作为集热器的比较标准。其中, 维修费以投资的固定百分率给出, 因此, 当寿命和利率给定后, 就可得出最佳参数将是一次投资最小者<sup>(5)</sup>, 即:

$$E_{\text{最佳}} = \text{Min}\{C\}$$

$$C = A \cdot h$$

$A$ ——集热器面积, 米<sup>2</sup>;

$h$ ——单位面积集热器的投资, 元/米<sup>2</sup>;

### 3. 集热器面积的计算

集热器面积

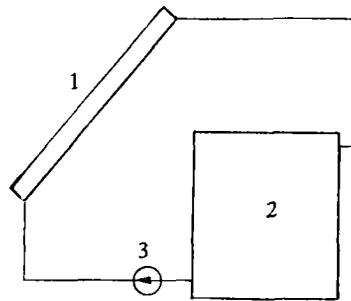


图 1 连续控制式强迫循环热水器系统

1-集热器 2-蓄水箱 3-水泵

$$A = \frac{Q}{\int_{\text{全天}} q_u dt} \quad (4)$$

式中，分母代表全天有效得热，采用 HWB 静态模型和分层水箱动态模型相结合，进行逐时积分计算，在准稳态条件下，计算结果有足够的准确性。计算公式见文献[6]。

由于在不同的结构参数下计算得到的全天终了水温及集热量尚不能完全一致，为了在相同的产热量及水温下进行对比，可利用(5)式对(4)式算得的集热器面积进行修正，即

$$A' = A \times \frac{T_r - T_0}{T - T_0} \quad (5)$$

式中， $T$ ——运行结束时，水箱实际平均水温， $^{\circ}\text{C}$ ；

$T_r$ ——进行比较的基准温度，本文取  $40^{\circ}\text{C}$ ；

$T_0$ ——水箱开始运行时的水温， $^{\circ}\text{C}$ 。

利用  $A$ ，可计算集热器的初投资。

#### 4. 集热器单位面积成本 $h$

$$h = h' + h'' \quad (6)$$

式中， $h'$ ——集热器中，与寻优参数无关的部分造价，元/米<sup>2</sup>；

$h''$ ——集热器中与寻优参数有关的部分造价，元/米<sup>2</sup>。

$h''$ 的计算如下：

$$h'' = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \frac{\gamma \cdot C_t}{w} \times 10^{-3} + t \cdot \gamma \cdot C_p \times 10^{-3} + \delta_2 \times C_{\delta_2} \times 10^{-3} + C_{\delta_1} \times \frac{\delta_3 + \delta_1 + t + \delta_2 + \delta_4}{H} \quad (10)$$

$C_t$ 、 $C_p$ 、 $C_{\delta_1}$ 、 $C_{\delta_2}$ 分别为管、板、保温、边框的造价，元/米<sup>2</sup>；

$H$ 是与 $C_{\delta_1}$ 对应的集热器边框高度，毫米。

### 三、集热器结构参数的寻优计算

本文采用优选法中的复合形法，以  $C$  为目标函数，对  $t$ 、 $w$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  四个参数寻优，其计算框图如图 2 所示。

使用本文给出的通用计算程序，只需输入晴天逐时日照量、外气温、风速，以及管、板、保温和对应某一高度的边框单位成本即可求出  $t^*$ 、 $w^*$ 、 $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$ 。

#### 四、计算实例

本文以北京市太阳能试验厂生产的管板式热水器为例，计算了上述四个参数的优值，并与其它参数的热水器成本进行了对比，计算条件如下：

##### 1. 集热器结构与材料

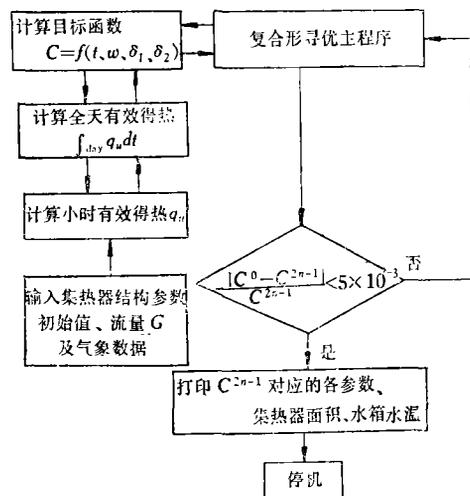


图 2 寻优计算框图

表 1

月 份	晴 天 类 别	集 热 器 经 济 性 能 指 标						最 佳 结 构 参 数				
		面 积 米 <sup>2</sup>	总 投 资 元	单 位 成 本 元/米 <sup>2</sup>	热 水 量 公斤/日	水 温 °C	日 效 率 %	成 本/η	w* 毫米	t* 毫米	δ <sub>1</sub> * 毫米	δ <sub>2</sub> * 毫米
6	偏 晴 天	6.224	142.226	22.86	933.6	40.1	50.4	.4525	50.85	.27	25.33	20
		4.885	142.31	29.13	732.75	42.87	56.87	.5122	50.85	.28	26.21	20.65
		5.02	143.75	28.63	753	42.52	56.05	.5107	51.37	.24	37.79	21.9
6	混 浊	6.15	143.816	23.38	922.5	40.227	50.7	.4611	50.43	.195	33.7	24.5
		4.225	142.744	33.785	633.75	44.642	61	.5538	50	.3	25	25
6	混 浊	4.719	159.3	33.75	707.85	43.24			51.97	.235	36.856	20
		4.686	158.313	33.78	702.9	43.33			50	.3	25	25
6	很 混 浊	5.51	186.143	33.79	826.5	41.4			50.45	.25	29.39	22.71
		5.52	186.475	33.78	827.9	41.325			50	.3	25	25
7	混 浊	4.56	153.473	33.65	684	43.64			50.65	.29	25.3	22.02
		4.551	153.752	33.782	682.6	43.693			50	.3	25	25
8	混 浊	4.71	158.613	33.67	706.5	43.26			50.52	.295	25.7	23.16
		4.706	158.996	33.78	705.9	43.227			50	.3	25	25
5	正 常	4.35	148.962	34.24	652.5	42.75			50.95	.24	34.7	25.9
		4.416	149.178	33.78	662.37	42.215			50	.3	25	25
9	正 常	4.869	165.056	33.89	730.4	42.809			50.565	.2823	30.99	20
		4.902	165.61	33.79	735.3	42.726			50	.3	25	25

表 2

月 份	晴 天 类 别	集 热 器 的 经 济 性 能 指 标						结 构 参 数				
		面 积 米 <sup>2</sup>	总 投 资 元	单 位 成 本 元/米 <sup>2</sup>	热 水 量 公斤/日	水 温 °C	日 效 率 %	成 本/η	w	t	δ <sub>1</sub>	δ <sub>2</sub>
6	偏 低	4.2254	142.744	33.782	633.8	44.644	61	0.5544	50	0.3	25	25
		5.31898	166.266	31.259	797.7	41.8585	54.50	0.5795	100**	0.5**	25**	50**
		4.66	154.56	33.167	699	43.3959	58.09	0.571	70***	0.3***	40***	50***
8	混 浊	4.7	158.996	33.259	705	43.2274	57.7	0.5855	50	0.3	25	25
		5.912	184.806	31.259	886.8	40.6138	51.5	0.6069	100	0.5	25	50
		5.194	172.258	33.164	779.1	42.05	54.95	0.6035	70	0.3	40	40

\*\* 目前我国常用的集热器结构参数

\*\*\* 固定板温及日照下, 用单参数寻优法所得集热器的结构参数

表 3

集热器上日总照值 (千卡/米<sup>2</sup>·时)

月份	晴天类别	6	7	8	9	10	11	12	全日
		18	17	16	15	14	13		
6	偏低	102.72	257.46	430.2	590.7	720.9	804.12	832.14	6427.8
	混油	98.36	239.7	401.94	562.92	686.7	761.28	788.16	6292.8
1	很混油	92.4	217	361.44	512.76	631.86	699.54	724.74	5755.02
7	混油	93.78	241.92	405.18	558.3	687.66	762.24	789.78	6291.84
8	混油	67.38	201.06	368.7	538.74	676.2	756.48	777.3	5994
5	正常	79.3	249.2	439	615.1	748.7	836.9	866.99	6803.1
9	正常	14.58	183.5	374.9	573.5	718.4	815.88	848.39	6209.9

表 4

月份	日平均逐时外气温 (°C)												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
5	14.2	15.7	17.4	19.0	20.9	22.5	23.8	25.1	24.5	24.7	24.4	23.8	27.7
6	18.34	20.34	21.91	23.27	24.53	25.55	26.48	27.36	28.22	28.52	28.39	27.71	27.19
7	22.2	22.8	23.5	24.5	25.8	26.6	27.2	28.1	28.5	28.3	28.3	27.6	27.5
8	20.7	21.7	23.6	24.7	26.2	27.2	27.9	28.2	28.8	28.6	28.2	27.9	27.6
9	13.91	14.6	17.2	19.26	21.3	22.58	23.2	24.58	24.71	24.87	24.78	23.53	22.47

月份	日平均逐时风速 (°C)												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
5	1.9	1.9	2.6	3.1	2.9	3.0	3.4	3.3	3.5	3.5	3.6	3.4	3.3
6	1.7	2.1	2.7	2.8	2.7	2.9	3.1	2.9	3.2	3.5	3.2	2.9	2.9
7	1.3	1.6	1.8	1.9	2.0	2.1	2.4	2.2	2.8	2.8	2.7	2.8	2.4
8	1.1	1.2	1.5	1.9	2.1	2.1	2.3	2.1	1.8	1.8	1.9	1.5	1.3
9	1.1	1.1	1.1	1.6	2.1	2.1	2.5	2.8	2.9	2.6	2.5	2.2	1.8

单层 5 毫米厚的玻璃盖板,  $\tau=0.75$ ,  $\varepsilon_g=0.88$ ;

集热板为管板式, 涂无光黑漆,  $\alpha=0.95$ ,  $\varepsilon=0.95$ ; 管板之间点焊,  $C_b=20$ ; 其材料及单价如下:

钢管——薄壁管  $\phi 18/\phi 16$

1.1 元/公斤;

黑铁厚壁管  $\phi 25$

0.68 元/公斤;

钢板—— 0.81 元/公斤;

保温用矿渣棉\*—— 48 元/米<sup>3</sup>;

边框——木制, 当高度约为 108 毫米时, 每平方米集热器约需 3.5 元(按大约 2 米<sup>2</sup>一块考虑)。

每平方米木壳管板式集热器材料成本总价为 35.92 元, 除管、板、保温及边框外为 19.4 元(暂不计工厂工时费与利润)。

集热器在 5 月—9 月使用, 倾角为 30°, 朝南。

集热器面积/水箱容量约为 1 米<sup>2</sup>/150 公斤。

## 2. 气象资料

采用各月有代表性的晴天逐时日照, 即 5 月、9 月取正常晴天; 6 月取偏低晴天; 7 月、8 月取混浊晴天; 采用各月日逐时平均气温及风速。具体数值见表 3 和 4。

## 3. 其它

日集热量取  $Q=20000$  大卡/日, 集热初始水温为各月平均外气温; 终了水温为  $T_r=40^\circ\text{C}$ ; 集热器流量取 50 公斤/小时·米<sup>2</sup>。

计算结果列于表 1 和 2。

# 五、分析及讨论

1. 由于计算机给出的最小目标函数的收敛值是在一定误差范围内的, 因此, 最佳值可以有几种不同的组合, 在这些组合中, 可以挑选工程上较合理的作为推荐的最佳结构参数。例如, 六月份有五种组合, 其目标函数相差在 1% 以内, 可取其中之一, 即  $w=50$ 、 $t=0.3$ 、 $\delta_1=25$ 、 $\delta_2=25$  作为推荐的最佳值。

2. 从表 1 还可看出, 最佳结构参数对晴朗程度的反应是不敏感的。以 6 月为例, 上述推荐的优值对于偏低、混浊及很混浊三类晴天, 差别在 1% 以内。

3. 在表中列出了 7、8、5、9 月所寻任一组集热器最佳结构参数与采用上述 6 月份的推荐最佳参数之间的差异。可以看出, 它们之间的目标函数也仅差 1% 左右。

由此可见, 上述推荐的最佳值适用于 5—9 月。

4. 表 2 列出了采用本文推荐的优值、目前我国习用的集热器结构参数以及采用固定保温、日照、进出口水温、外气温进行单参数寻优所得的集热器的经济性能指标。可以看出, 采用本文推荐的结构参数与目前习用参数分别制作的集热器相比, 每 4—5 米<sup>2</sup>可节省成本费近 25 元; 与用简单的寻优方法相比, 也可节省 13—14 元。

5. 为了校验寻优结果的可靠性, 说明上述四个参数分别对集热器经济性能的影响, 图 3—6 示出了集热器的任何三个参数取优值时, 目标函数  $C$  随第四个参数变化的趋势(以六月份偏低晴天为例)。可以看出, 集热器的成本效率对于管间距  $w$  是最敏感的, 对  $t$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  不太敏感, 因此, 必须首先重视管间距的选择。

在上述选择的参数中,  $w^*$ 、 $t^*$ 、 $\delta_1^*$  诸优值是合适的, 只有保温层略偏高。虽然, 在六月份的五组最佳值中, 保温层  $\delta_2^*$  选 25 所对应的成本最高, 然而, 对于其它气温偏低的月份来

\* 矿渣棉在成型、耐温、耐候等方面较珍珠岩及聚苯乙烯好。

说这是合适的。

6. 有两点需要说明：第一，本文推荐的最佳管间距是偏小的。在目标函数中，未考虑加工费用的增长，认为它与集热器面积减小带来的占地面积、支架费用的减小相抵消。第

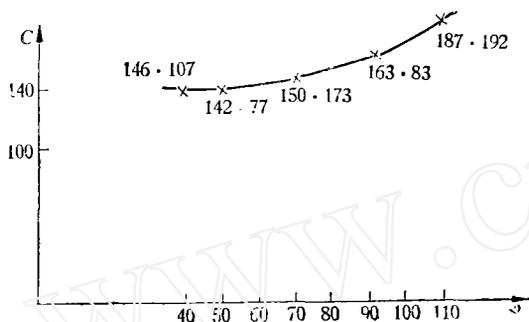


图3 当  $t$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  为最佳值时，目标函数值随管间距的变化(以6月偏低晴天为例)

$$\begin{aligned} t^* &= 0.3 \\ \delta_1^* &= 25 \\ \delta_2^* &= 25 \end{aligned}$$

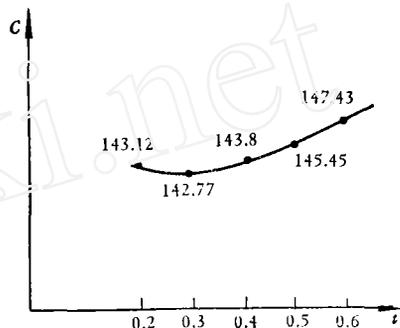


图4 当  $w$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$  为最佳值时，目标函数值随管板厚的变化(以6月偏低晴天为例)

$$\begin{aligned} w^* &= 50 \\ \delta_1^* &= 25 \\ \delta_2^* &= 25 \end{aligned}$$

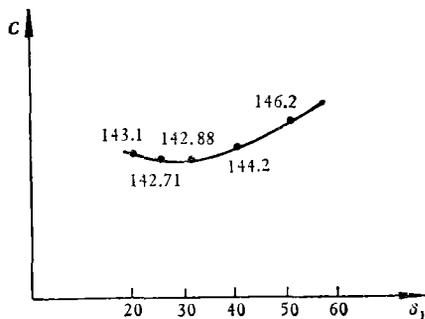


图5 当  $w$ 、 $\delta_2$ 、 $t$  为最佳值时，目标函数值随夹层厚度的变化(以6月偏低晴天为例)

$$\begin{aligned} w^* &= 50 \\ \delta_2^* &= 25 \\ t^* &= 0.3 \end{aligned}$$

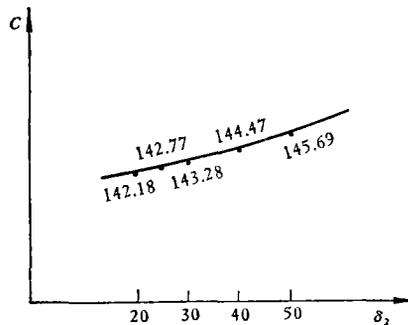


图6 当  $w$ 、 $t$ 、 $\delta_1$  为最佳值时，目标函数值随保温层厚度的变化

$$\begin{aligned} w^* &= 50 \\ \delta_1^* &= 25 \\ t^* &= 0.3 \end{aligned}$$

二，以上推荐的优值是对薄壁管而言的，如果采用厚壁管(管径稍许增大)，则最佳值要改变。例如，用6月偏低晴天的气象数据，采用 $\phi 25$ 的厚壁管，在其它条件相同时得出的最佳值为： $w=84$ 、 $t=0.6$ 、 $\delta_1=30$ 、 $\delta_2=20$ ，此时材料的成本费增加68%。因此，采用薄壁管还是采用厚壁管，要根据两者的实际寿命进行经济比较而定。

## 结 论

对太阳能平板式集热器的主要结构参数同时进行优选，寻优快，结果较准确。由于集热器的最佳值对于温暖季节的气象条件变化并不敏感，故可以选取这些月份的典型晴天的日

照、气温、风速为输入值进行寻优计算。

从我国实际情况出发,本文提出了适用于评价太阳能热水器的目标函数,所得结果有一定经济价值。本文提出的集热器优化程序可有通用性。

### 符 号

$E$ ——集热器评价指标(元);  
 $C$ ——集热器初投资(元/米<sup>2</sup>);  
 $r$ 、 $m$ 、 $N$ ——利率、维修费百分率及集热器平均寿命(年);  
 $A$ 、 $A'$ ——集热器面积与折合面积(米<sup>2</sup>);  
 $h$ ——集热器单位面积投资(元);  
 $G$ 、 $C_p$ 、 $T_{f,o}$ 、 $T_{f,i}$ 、 $T_{pm}$ 、 $\eta$ ——集热器流量、流体比热、出入口水温、板面平均温度及瞬时效率(%);  
 $F_R$ 、 $F'$ 、 $U_t$ 、 $U_o$ 、 $U_L$ ——集热板热转换因子、效率因子、集热器顶部、底部及总热损失系数;  
 $w$ 、 $t$ 、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ ——集热器管间距、板厚、罩板夹层间隙及底部保温厚度(毫米);  
 $w^*$ 、 $t^*$ 、 $\delta_1^*$ 、 $\delta_2^*$ ——上述参数的最佳值(毫米);  
 $(\tau\alpha)$ ——集热器的透射吸收率;  
 $I$ 、 $t_a$ ——日照强度(千卡/米<sup>2</sup>·小时)及外气温(°C);  
 $q_u$ ——集热器有效得热(千卡/小时·米<sup>2</sup>);  
 $d$ 、 $D$ 、 $\nu$ ——集热管内外径(毫米)及管材比重(公斤/米<sup>3</sup>);  
 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ ——集热器罩板厚度及外壳板厚(毫米);  
 $\varepsilon_s$ 、 $\varepsilon$ 、 $\frac{1}{C_b}$ ——集热器罩板的发射率、集热板的发射率及集热管与板之间的导热热阻(米·°C小时/千卡)。

### 参 考 文 献

- [1] F. D. Winter, W. Stuart Luman, Optimum collection geometries for copper tube-copper sheet flat plate collectors, *Sun*, Vol. 2, 1978, 895—899.
- [2] B. S. Jagadish, Optimum tilt for the flat-plate collector, *Sun*, Vol. 2, 1978, 1149—1153.
- [3] J. Kern, I. Harris, On the optimum tilt of a solar collector, *Solar Energy*, Vol. 17, 1975.
- [4] B. T. Nigaguna, S. U. Shenoy Optimum tube pitch in solar collectors, *Sun*, Vol. 2, 1978, 1107—1110.
- [5] 王补宣等, 平板集热器最佳结构参数及经济分析, *太阳能学报*, 第二卷 第三期, 1980.
- [6] John A. Duffie and William A. Beckman, *Solar energy thermal processes*, JOHN Wiley & Sons, 1974.

## THE OPTIMIZATION OF THE CHIEF CONSTRUCTIVE PARAMETERS FOR SOLAR ENERGY FLAT PLATE COLLECTOR

Li Yuan-zhe

(*Qinghua University*)

Fang Duo-rong

(*Institute of Mechanics of the Chinese Academy of Sciences*)

Zhao Shi-huai

(*Qinghua University*)

### Abstract

The paper dealt mainly with the optimization of the chief constructive parameters for solar energy collector. These are the pipe spacing, heat plate thickness, cover spacing and bottom insulation thickness.

For this purpose we first made the mathematical model for solar energy collector of the continuous control heating water system and made the calculating simulation program. Then we made the compound form method to find the optimums. Using the meteorological data of Beijing as an example, we calculated the optimums of the above four parameters of solar energy collector. The program can be generally used.

Comparing the cost of the optimum parameter's collector with another of the parameters used over our country, we found that the former was obviously lower.