

# 太阳能直热式海水淡化系统热经济孤立化研究<sup>\*</sup>

田 禾<sup>1,2</sup>, 张于峰<sup>1</sup>, 江菊元<sup>2</sup>, 崔明贤<sup>2</sup>

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 天津理工大学自动化学院, 天津 300191)

**摘 要:** 为了提高直热式太阳能海水淡化系统的设计与操作, 运用热经济孤立化方法, 对直热式太阳能海水淡化系统进行分析, 获得了系统最优化操作参数。同时讨论了设备使用年限、最高海水温度、进料海水焓单价对年度化费用的影响。结果表明: 当拉格朗日乘子分别为 ¥4.85/kJ、¥0.59/kJ、¥0.40/kJ、¥0.19/kJ 时, 系统实现热经济孤立化。此时, 闪蒸温度为 58.6 °C, 蒸发温度为 35 °C 时, 年度化费用为 ¥4 332.81/a。年度化费用随设备使用年限的增加而减小, 随最高海水温度的升高而降低, 随进料海水焓单价的升高而增加。

**关键词:** 太阳能海水淡化; 直热式; 热经济; 孤立化

**中图分类号:** TK284.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)05-0051-05

## The Research of Thermo Economic Isolation on Direct Heated Solar Seawater Desalination System

TIAN He<sup>1,2</sup>, ZHANG Yufeng<sup>1</sup>, JIANG Juyuan<sup>2</sup>, CUI Mingxian<sup>2</sup>

(1. School of Environment Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. School of Electrical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** Applied the method of thermo economic isolation, the direct heated solar seawater desalination system is analyzed to obtain the optimum operation parameters. Besides, the effects of equipment life, the highest seawater temperature and exergy price of feed seawater on annual cost were discussed. The results show that when Lagrange multipliers are ¥4.85/kJ, ¥0.59/kJ, ¥0.40/kJ and ¥0.19/kJ, the system's thermo economic isolation is realized. Flash temperature is 60 °C, evaporation temperature is 35 °C and annual cost is ¥4 332.81/year under this condition. The annual cost declines with extending of equipment life and increasing of the highest seawater temperature and mounts up with rising of exergy price of feed seawater.

**Key words:** solar seawater desalination; direct heated; thermo economy; isolation

由于能量系统的复杂性、设备和参数的多样性, 特别是对于大型的综合装置, 总体优化常常是很困难的。因此, 我们希望着眼于总体最优, 但着手于个别部件或设备的局部优化, 最后达到全局的最优, 也就是说把整个系统分解成若干子系统, 逐个进行优化, 故叫做分解优化。

为了解决这个问题, Tribus 提出了“热经济学孤立化”的理论, 认为只要使各个子系统在热经

济学上“孤立化”了, 就可以实现通过子系统的局部寻优而达到全局最优了, 故这种优化方法也叫孤立化模式的优化。后来 Evans 做了“热经济学孤立化”的数学论证<sup>[1-3]</sup>。所谓热经济学孤立化原理指的是在一定条件下可以将整个系统的优化设计转化为各个子系统分别优化的问题处理, 换句话说, 这种原理为人们提供了一种从个别子系统的优化入手解决整个系统优化设计的方法。由于影响子系统

\* 收稿日期: 2008-09-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2002AA513030)

作者简介: 田禾(1975年生), 女, 博士研究生; E-mail: tianhe@tjut.edu.cn

优化设计的因素显然要比整个系统简单,这就为解决复杂系统的优化设计提供了一种简便可行的途径。但是,局部最优并不等于全局最优,若在某种情况下,局部单独求得的热经济优化结果的集合,能够成为全局的热经济优化结果,这表明能够实现热经济孤立化,也即各个子系统在热经济学上“孤立化”了,这样才有可能通过局部寻优达到全局最优。尽管热经济孤立化思想提出了解决系统热经济优化的一个捷径方向,即以局部或单元优化来代替系统总体优化,这样既可避免数学上的求解困难,又可大大减少优化计算的工作量。但对其成立条件分析后发现,仅当各子系统的目标函数与输出烟流成线性关系时,热经济孤立化才能实现<sup>[4-6]</sup>。

## 1 直热式太阳能海水淡化系统描述

到目前为止,世界上报道的太阳能海水蒸馏淡化系统,无论是多级闪蒸(MSF)还是低温多效蒸馏(LT-MED)都无一例外的采用太阳能间接加热海水的方法<sup>[7-9]</sup>。这些方法的淡水产量与第一级(效)和最后一级(效)的温差有关。那么在海水流量一定的条件下,提高第一级和最后一级的温差,可以使淡水产量上升。

基于以上原因,我们设计开发了直热式太阳能海水淡化系统。在本系统中,将海水直接进入太阳能集热系统,然后输出到第一级闪蒸室,这样避免了中间的换热损失,使第一级的蒸发温度提高,达到了提高淡水产量之目的。同时,传统上海水蒸馏淡化工艺里能与太阳能直接加热海水方法相配套的是多级闪蒸,但是多级闪蒸要求负荷稳定,很难适应太阳能作为热源的不稳定条件,而低温多效能够适应这种情况。因此我们开发了闪蒸与低温多效相结合的新工艺,既第一级是闪蒸,之后是低温多效。以闪蒸连接太阳能直接加热海水系统,用低温多效解决条件不稳定的问题。使太阳能海水蒸馏淡化系统的总能效得到了提高。系统流程图如图1所示。

## 2 直热式太阳能海水淡化系统热经济学孤立化原理证明

图2为直热式太阳能海水淡化系统的烟分析图。假设忽略系统中真空泵、循环泵、排水泵等的烟流。图2中 $C_a$ 、 $C_b$ 、 $C_c$ 分别为闪蒸室、蒸发器、冷凝器的设备年度化费用,其中包括初投资、运行费、维修费、折旧费等; $E_0$ 代表输入太阳能集热系

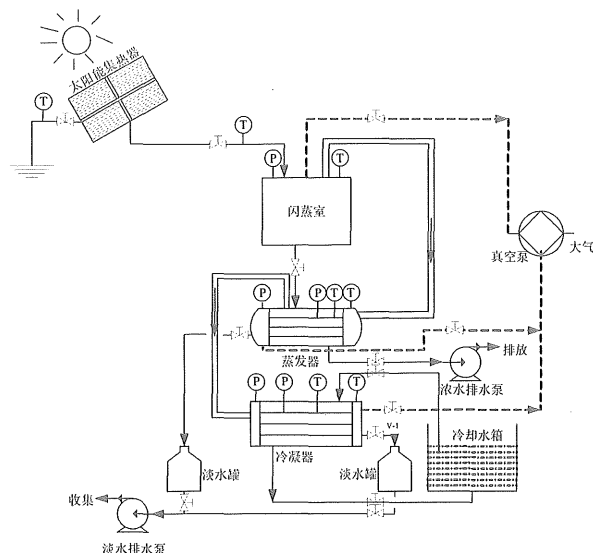


图1 直热式太阳能海水淡化工艺流程图

Fig. 1 Process chart of direct heated solar seawater desalination system

统的进料海水的烟流,单价为 $c_0$ ;  $E_{in}$ 代表经太阳能集热系统后进入海水淡化系统的热海水烟流,单价为 $c_{in}$ ;  $E_j$ 代表闪蒸室输出的水蒸汽烟流,单价为 $c_j$ ;  $E_L$ 代表闪蒸室输出的较浓海水烟流,单价为 $c_L$ ;  $E_g$ 代表蒸发器输出的水蒸汽烟流,单价为 $c_g$ ;  $E_b$ 代表蒸发器排出的浓海水的烟流,单价为 $c_b$ ;  $E_{d1}$ 代表蒸发器凝结排出的淡水的烟流,单价为 $c_{d1}$ ;  $E_k$ 代表输入冷凝器的冷却水的烟流,单价为 $c_k$ ;  $E_w$ 代表冷凝器排出的冷却水的烟流,单价为 $c_w$ ;  $E_{d2}$ 代表冷凝器凝结排出的淡水的烟流,单价为 $c_{d2}$ 。因为由冷凝器冷却水和蒸发器浓海水带走的热量烟流几乎没有利用价值,所以设该烟流单价 $c_b$ 和 $c_w$ 均为0。设输入烟流的单价 $c_0$ 和 $c_k$ 已经给定。 $E_k$ 的值由冷却水的温度决定,与系统参数无关,可认为是定值<sup>[10-11]</sup>。

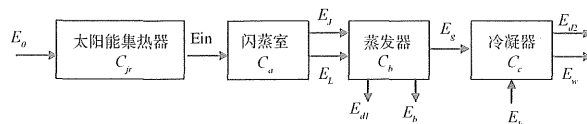


图2 直热式太阳能海水淡化系统烟分析图

Fig. 2 exergy analysis of direct heated solar seawater desalination system

直热式太阳能海水淡化系统的最优参数是使整体系统年度化费用 $C_T$ 最小。因此设目标函数为

$$C_T = c_0 E_0 + c_k E_k + C_p + C_a + C_b + C_c \quad (1)$$

对于图2中的太阳能集热器、闪蒸室、蒸发器和冷凝器子系统,由于 $E_b$ 是已给定的随浓海水排出

热量烟流,  $c_b = 0$ ;  $E_w$  是已给定的随冷却水排出热量烟流,  $c_w = 0$ , 因而可以认为  $E_j$ ,  $E_L$  和  $C_b$  分别只是  $X_b$ ,  $E_{d1}$  和  $E_g$  的函数,  $E_g$  和  $C_c$  分别只是  $X_c$  和  $E_{d2}$  的函数。  $X_{jr}$ ,  $X_a$ ,  $X_b$ ,  $X_c$  为太阳能集热器、闪蒸室、蒸发器、冷凝器的决策变量<sup>[12-13]</sup>。于是可分别写出:

$$C_{jr} = f_{jr}(X_{jr}, E_{in}) \quad (2)$$

$$C_a = f_a(X_a, E_j, E_L) \quad (3)$$

$$C_b = f_b(X_b, E_b, E_{d1}, E_g) = f_b(X_b, E_g, E_{d1}) \quad (4)$$

$$C_c = f_c(X_c, E_w, E_{d2}) = f_c(X_c, E_{d2}) \quad (5)$$

$$E_{in} = E_{IN}(X_a, E_j, E_L) \quad (6)$$

$$E_j = E_J(X_b, E_b, E_{d1}, E_g) = E_J(X_b, E_g, E_{d1}) \quad (7)$$

$$E_L = E_L(X_b, E_b, E_{d1}, E_g) = E_L(X_b, E_g, E_{d1}) \quad (8)$$

$$E_g = E_G(X_c, E_w, E_{d2}) = E_G(X_c, E_{d2}) \quad (9)$$

利用拉格朗日待定乘子法, 这时目标函数变为:

$$L = c_0 E_0 + c_k E_k + f_{jr} + f_a + f_b + f_c + \lambda_1 (E_{IN} - E_{in}) + \lambda_2 (E_J - E_j) + \lambda_3 (E_L - E_L) + \lambda_4 (E_G - E_g) \quad (10)$$

式中,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  是拉格朗日待定乘子。

为了求取极值, 将式 (10) 分别对变量  $E_{in}$ ,  $E_j$ ,  $E_L$  与  $E_g$  求偏导, 并令这些偏导数为零, 即

$$\frac{\partial L}{\partial E_{in}} = \frac{\partial}{\partial E_{in}}(f_{jr} - \lambda_1 E_{in}) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial L}{\partial E_j} = \frac{\partial}{\partial E_j}(f_a + \lambda_1 E_{IN} - \lambda_2 E_j) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial E_L} = \frac{\partial}{\partial E_L}(f_a + \lambda_1 E_{IN} - \lambda_3 E_L) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial E_g} = \frac{\partial}{\partial E_g}(f_a + \lambda_2 E_J + \lambda_3 E_L - \lambda_4 E_g) = 0 \quad (14)$$

对太阳能集热器、闪蒸室、蒸发器、冷凝器, 有现金流量平衡, 得式 (15) — (18):

$$c_0 E_0 + C_{jr} = c_{in} E_{in} \quad (15)$$

$$c_{in} E_{in} + C_a = c_j E_j + c_L E_L \quad (16)$$

$$c_j E_j + c_L E_L + C_b = c_b E_b + c_{d1} E_{d1} + c_g E_g \quad (17)$$

$$c_g E_g + c_k E_k + C_c = c_w E_w + c_{d2} E_{d2} \quad (18)$$

将式 (15) — (18) 带入式 (11) — (14), 得

$$\lambda_1 = c_{in} \quad (19)$$

$$\lambda_2 = \frac{\partial}{\partial E_j}(f_a + c_{in} E_{in}) = \frac{\partial}{\partial E_j}(c_j E_j + c_L E_L) = c_j \quad (20)$$

$$\lambda_3 = \frac{\partial}{\partial E_L}(f_a + c_{in} E_{in}) = \frac{\partial}{\partial E_L}(c_j E_j + c_L E_L) = c_L \quad (21)$$

$$\lambda_4 = \frac{\partial}{\partial E_g}(f_b + \lambda_1 E_j + \lambda_2 E_L) = \frac{\partial}{\partial E_g}(c_g E_g + c_b E_b + c_{d1} E_{d1}) = c_g \quad (22)$$

由式 (19) — (22) 可得出, 对太阳能直热式海水淡化系统, 当  $\lambda_1 = c_{in}$ ,  $\lambda_2 = c_j$ ,  $\lambda_3 = c_L$ ,  $\lambda_4 = c_g$ , 且  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$ ,  $\lambda_4$  为常数时, 满足热经济孤立化原理。此时, 整体系统得到最优化, 得到最优决策变量和最小年度化费用。

### 3 计算结果与分析

根据用户要求及当地海水性质, 有关基本原始经济技术数据如下: 系统淡水产量为  $109 \times 10^3 \text{ kg/a}$ , 进料海水 (即进入集热器海水) 比热  $c_p = 3.9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$ , 盐度 35, 进料海水的烟单价为  $\text{¥} 1.0/\text{kJ}$ , 冷凝器冷却水为进料海水。经太阳能集热系统后进入海水淡化系统的热海水的设计温度, 即最高海水温度  $t_{in} = 70^\circ\text{C}$ ; 环境温度为  $25^\circ\text{C}$ ; 环境压力为  $0.1 \text{ MPa}$ ; 原料海水温度为  $30^\circ\text{C}$ ; 淡水的 NaCl 浓度为  $50 \text{ mg/L}$ 。设备直接投资见表 1, 循环泵、真空泵、排水泵、海水泵的费用分别计入太阳能集热系统、闪蒸室、蒸发器、冷凝器的设备直接投资中。太阳能集热系统、闪蒸室、蒸发器、冷凝器非能量费用  $C$  按式 (23) 计算:

$$C = Z \times \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (23)$$

式中:  $N$  为设备使用年限,  $N = 10 \text{ a}$ ;  $i$  为年利率,  $i = 5\%$ 。

将闪蒸温度  $t_1$ 、蒸发温度  $t_2$  作为优化变量, 经计算机编程计算得到表 2 的优化结果。

表 1 各子系统的设备直接投资

Table 1 Direct investment of subsystem

| 设备名称                                           | 设备直接投资 $Z$ |
|------------------------------------------------|------------|
| 太阳能集热器 $C_{jr}/(\text{¥} \cdot \text{a}^{-1})$ | 20 000     |
| 闪蒸室 $C_a/(\text{¥} \cdot \text{a}^{-1})$       | 2 000      |
| 蒸发器 $C_b/(\text{¥} \cdot \text{a}^{-1})$       | 3 000      |
| 冷凝器 $C_c/(\text{¥} \cdot \text{a}^{-1})$       | 3 000      |

表 2 热经济孤立化优化结果

Table 2 Optimization results using thermo economy isolation

| 拉格朗日<br>日待定<br>乘子 $\lambda_1/$<br>( $\text{¥} \cdot \text{kJ}^{-1}$ ) | 拉格朗日<br>日待定<br>乘子 $\lambda_2/$<br>( $\text{¥} \cdot \text{kJ}^{-1}$ ) | 拉格朗日<br>日待定<br>乘子 $\lambda_3/$<br>( $\text{¥} \cdot \text{kJ}^{-1}$ ) | 拉格朗日<br>日待定<br>乘子 $\lambda_4/$<br>( $\text{¥} \cdot \text{kJ}^{-1}$ ) | 闪蒸<br>温度<br>$t_1/^\circ\text{C}$ | 蒸发<br>温度<br>$t_2/^\circ\text{C}$ | 年度<br>化费<br>用 $C_T/$<br>( $\text{¥} \cdot \text{a}^{-1}$ ) |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 4.85                                                                  | 0.59                                                                  | 0.40                                                                  | 0.19                                                                  | 58.6                             | 35                               | 4 332.81                                                   |

年度化费用随设备使用年限的变化趋势如图 3 所示。由图 3 可以看出, 设备使用年限越长, 则系统

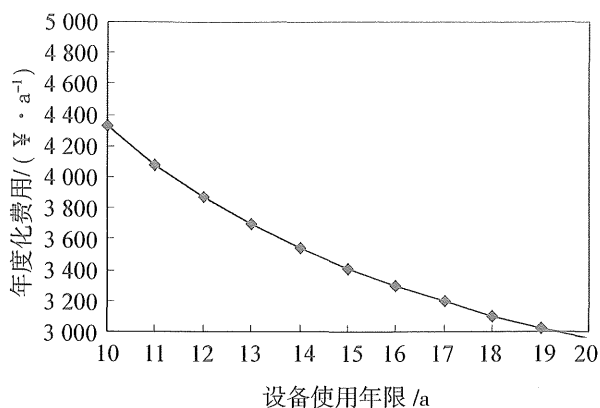


图3 年度化费用随设备使用年限变化趋势图

Fig. 3 Tendency curve of the annual cost changing with equipment life

的年度化费用越小,热经济性也就越好;反之设备使用年限越短,则系统的热经济性越差。设备使用年限为10 a时,年度化费用为¥4 332.81/a。设备使用年限增加10 a,年度化费用可以节省¥1 374.8/a。可见设备使用年限对年度化费用的影响是很大的,提高设备使用年限是降低年度化费用的重要手段。

图4表示的是年度化费用与最高海水温度的变化趋势。年度化成本随最高海水温度的升高而降低,但降低的幅度很小。最高海水温度从60℃升高到80℃,相应的年度化成本从¥4 356.09/a降低到¥4 320.11/a,只降低了¥35.98/a。相对于设备使用年限,最高海水温度对年度化费用的影响要小很多。所以从热经济学孤立化的角度来看,通过降低最高海水温度来减少设备的腐蚀,从而提高设备使用年限,这样可以有效降低年度化费用。

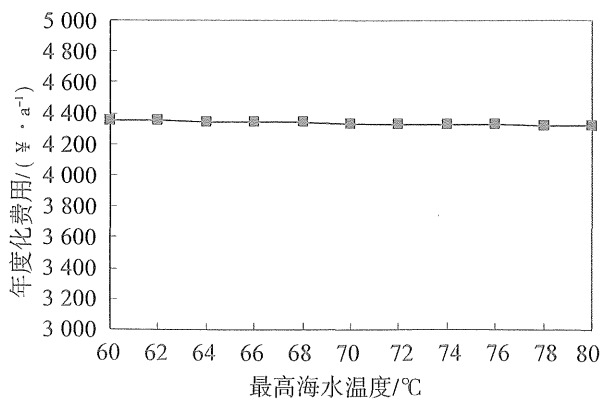


图4 年度化费用随最高海水温度变化趋势图

Fig. 4 Tendency curve of the annual cost changing with the highest seawater temperature

图5为年度化费用随进料海水单价变化趋势图。进料海水焓单价增加,年度化费用增加,焓单价降低,年度化也降低。变化趋势呈线性关系。由年度化费用最小的目标函数即公式(1)可得出,若冷却水使用原料海水,则该线性关系的斜率为 $(E_0 + E_K)$ ,截距为 $C_{jr} + C_a + C_b + C_c$ 。进料海水焓单价与淡化装置与采水点的距离,以及近料海水的预处理工艺等有关,选择合理的位置和预处理工艺,可以降低进料海水焓单价,从而减少年度化费用。

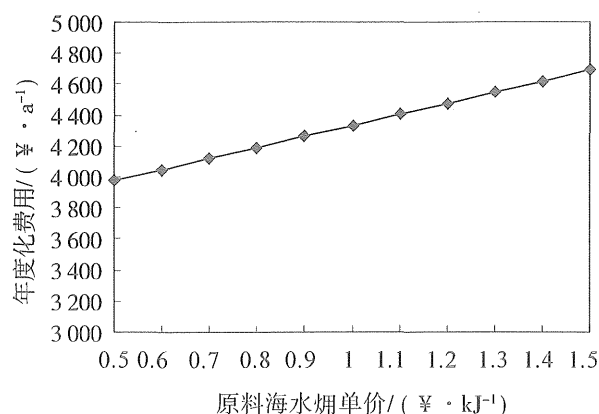


图5 年度化费用随进料海水单价变化趋势图

Fig. 5 Tendency curve of the annual cost changing with exergy price of feed seawater

## 4 结 论

(1) 热经济孤立化原理是能量系统优化设计的一种重要方法,通过对直热式太阳能海水淡化系统的热经济孤立化研究,确定系统最优化操作参数。当拉格朗日待定乘子分别为¥4.85/kJ、¥0.59/kJ、¥0.40/kJ、¥0.19/kJ时,系统实现孤立化。此时,闪蒸温度为58.6℃,蒸发温度为35℃时,年度化费用为¥4 332.81/a。

(2) 设备使用年限、最高海水温度、进料海水焓单价对年度化费用都有直接的影响,设计优化时要综合考虑这些因素。

### 参考文献:

- [1] EL-SAYED Y M, EVANS R B. Thermoeconomics and the design of heat systems [J]. Trans A SME J Engineering Power, 1970, 92 (3): 27—35.
- [2] 王加旋,张恒良. 动力工程热经济学[M]. 北京:水利电力出版社,1995.

- 405.
- [16] 刘杏芹,徐正良,刘亚飞,等.  $\text{CdO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$  复合氧化物半导体气敏材料的制备和性能 [J]. 中国科学技术大学学报, 1998, 28(1): 49-54.
- LIU Xinqin, XU Zhengliang, LIU Yafei, et al. Preparation and gas-sensing properties of  $\text{CdO}-\text{Fe}_2\text{O}_3$  system complex oxide semiconductors [J]. J China Univ Sci Techno, 1998, 28(1): 49-54.
- [17] LOU Xiangdong, LIU Shuping, SHI Dongyang, et al. Ethanol-sensing characteristics of  $\text{CdFe}_2\text{O}_4$  sensor prepared by sol-gel method [J]. Mater Chemis Phys, 2007, 105: 67-70.
- [18] LIU Tian, WANG Linsheng, YANG Ping, et al. Preparation of nanometer  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$  by auto-combustion and its catalytic activity on the thermal decomposition of ammonium perchlorate [J]. Mater Lett, 2008, 62: 4056-4058.
- [19] 刘杏芹,陶善文,沈渝生. 纳米  $\text{SnO}_2$  微粉的制备与性能 [J]. 应用化学, 1996, 13(1): 65-67.
- LIU Xinqin, TAO Shanwen, SHEN Yusheng. Preparation and properties of nanometer-sized  $\text{SnO}_2$  powder [J]. Chinese J Appl Chem, 1996, 13(1): 65-67.

(上接第 54 页)

- WANG Jiaxuan, ZHANG Hengliang. Power engineering thermoeconomic [M]. Beijing: China WaterPower press, 1995.
- [3] EVANS R B. Thermoeconomic isolation and energy analysis [J]. Energy, 1980, 5(8-9): 805-821.
- [4] 李世武,苏莫明. 链式能量系统热经济孤立化的实现方法 [J]. 化工学报, 2002, 53(5): 546-548.
- LI Shiwu, SU Morning. Method of thermoeconomic isolation on chain energy systems [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2002, 53(5): 546-548.
- [5] VON SPAKOVSKY M R, RANCRUEL D F. Decomposition with thermoeconomic isolation applied to the optimal synthesis/design and operation of an advanced tactical aircraft system [J]. Energy, 2006, 31(15): 3327-3341.
- [6] EVANS R B, Thermoeconomic isolation and essergy analysis [J]. Energy, 1979, 5(8-9): 802-821.
- [7] 赵建民. 海水利用 [M]. 天津: 天津科技出版社, 1994.
- ZHAO Jianmin. Seawater utilization [M]. Tianjin: Tianjin Science & Technology Press, 1994.
- [8] 郑宏飞,何开岩,陈子乾. 太阳能海水淡化技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
- ZHENG Hongfei, HE Kaiyan, CHEN Ziqian. Solar Desalinization Technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [9] MATHIOULAKIS E, BELESSIOTIS V, DELYANNIS E. Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art [J]. Desalination, 2007, 203(1): 346-365.
- [10] 包天舒. 氨水吸收式制冷系统的实验研究和热经济分析 [D]. 北京化工大学, 2005.
- BAO Tianshu. Experiment and thermoeconomic analysis for a single stage ammonia/water absorption refrigeration system [D]. BEIJING UNIVERSITY OF CHEMICAL TECHNOLOGY, 2005.
- [11] 颜爱斌. 地源热泵系统的传热特性与热经济学分析 [D]. 天津大学, 2005.
- YAN Aibin. Heat transfer performance and thermoeconomic analysis for ground source heat pump system [D]. TIANJIN UNIVERSITY, 2005.
- [12] 刘凤强,曹家枏,朱冬林. BCHP 系统的热经济孤立化证明 [J]. 燃气轮机技术, 2007, 20(1): 47-49.
- LIU Fengqiang, CAO Jiacong, ZHU Donglin. The proof of thermo-economic autonomy of BCHP systems [J]. GAS TURBINE TECHNOLOGY, 2007, 20(1): 47-49.
- [13] RANCRUEL D F, VON SPAKOVSKY M R. Decomposition with thermoeconomic isolation applied to the optimal synthesis/design of an advanced tactical aircraft system [J]. International Journal of Thermodynamics, 2003, 6(3): 93-105.