

水电联产低温多效蒸发海水淡化系统优化研究

刘晓华*, 沈胜强, 罗建松, 杜宇, 张小曼

(大连理工大学 海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在对带有冷凝水闪蒸和海水预热的低温多效蒸发海水淡化系统进行物料和热量衡算的基础上,建立了相应海水淡化系统并叉流流程下水电联产系统优化的数学模型.该模型以单位产量淡水成本最小为优化目标,利用 Matlab 工具箱编制了求解程序,对水电联产系统数学优化模型进行了求解,分析了效数、加热蒸汽流量和系统规模对单位产量淡水成本的影响,并将水电联产优化设计、水电联产等温差设计和无水电联产等温差设计3种方案下的单位产量淡水成本进行了比较.计算结果表明:参数相同情况下,水电联产优化设计和无水电联产等温差设计相比,最大可节约淡水成本 87.54%.水电联产低温多效蒸发是降低海水淡化成本的有效途径.

关键词: 海水淡化;低温多效蒸发;水电联产;淡水成本

中图分类号: TK114.14 **文献标志码:** A

0 引言

从长远的观点来看,在众多的解决淡水资源方法之中,将海水淡化装置和热力发电厂组成水电联产系统^[1-4],是节约能源、实现可持续发展的有效途径.

水电联产海水淡化系统的原理:利用热电厂发电之后的乏汽或者从汽轮机某级抽取较低参数的蒸汽,直接送到多效蒸发海水淡化系统的第一效蒸发器内作为加热蒸汽,对进料海水进行多效蒸发.此方案的好处在于,既利用了热力发电厂的抽汽或者乏汽,又利用多效蒸发技术产出数量可观的淡水.尤其是在我国沿海缺水地区可充分利用火力发电厂低成本热源,用多效蒸发技术实现水电联产,这既提高了发电厂的经济效益,又可向当地居民提供质量可靠的饮用水,可谓是一个双赢的好方法.经测算,在青岛、烟台、威海等城市用这种水电联产方式向城市居民供应饮用水,单价可在 10 元/t 左右^[5].

本文对水电联产系统进行优化研究.将并叉流流程的海水淡化系统与电厂耦合,以单位产量淡水成本最小为优化目标,研究效数、加热蒸汽流

量和系统规模对单位产量淡水成本的影响.

1 优化模型的建立

图 1 给出了海水淡化系统并叉进料流程示意图.原料海水首先进入冷凝器,然后被分成两股流:一股直接排回大海,另一股作为蒸馏过程的进料.海水由后至前边预热边进入各效蒸发器,蒸发器产生的二次蒸汽大部分进入下一效作为加热蒸汽,余下部分被抽往预热器用于预热海水;浓缩海水在两效间的压差作用下流入下一效继续蒸发;各效蒸汽的凝结水流入相应闪蒸罐,产生的蒸汽也被引至下一效.如此进行直到末效,浓海水最终由末效排出.

1.1 物料衡算与热量衡算

对任意一效蒸发器的海水进行物料衡算,得

$$F_0 x_0 + F_{i-1} x_{i-1} = F_i x_i \quad (1)$$

式中: F_0 为海水进料量(kg/s), x_0 为海水进料液的质量分数; F_{i-1} 为由第 $i-1$ 效蒸发器流入第 i 效蒸发器的海水质量(kg/s), x_{i-1} 为相应的海水质量分数; F_i 为离开第 i 效蒸发器的海水质量(kg/s), x_i 为相应的海水质量分数.

收稿日期: 2010-10-18; 修回日期: 2012-05-21.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT10ZD109);大连市建委科技计划资助项目(2010).

作者简介: 刘晓华*(1970-),女,博士,副教授, E-mail: lxh723@dlut.edu.cn.

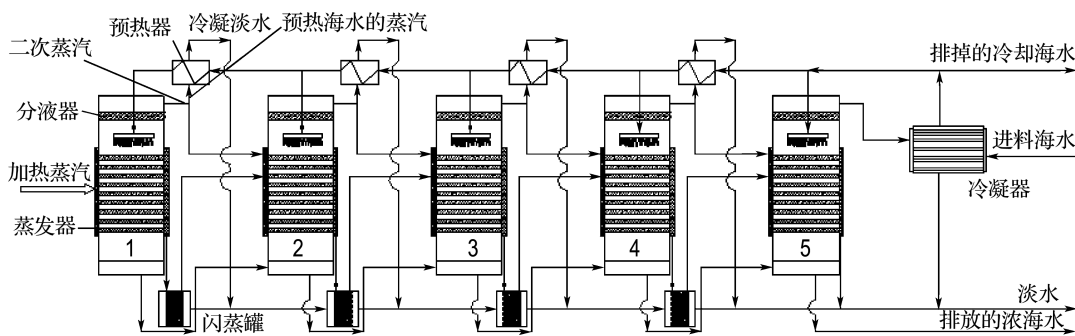


图1 低温多效蒸发海水淡化系统流程示意图

Fig. 1 System diagram of LT-MED seawater desalination

系统总蒸发水分量

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad (2)$$

$$W_i = \{ [iF_0 c_{p0} - c_p^* (W_1 + W_2 + \dots + W_{i-1})] \times (t_{i-1} - t_i) + F_0 c_{p0} (t_{in,i-1} - t_{i-1}) \} / r_{i+1} + D_i r_i / r_{i+1} \quad (3)$$

式中: W_i 为第 i 效蒸发器生成二次蒸汽流量 (kg/s), c_{p0} 为进口海水定压比热容 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), c_p^* 为纯水的定压比热容 ($\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$), t_i 为离开第 i 效蒸发器的海水温度 ($^{\circ}\text{C}$), t_{i-1} 为离开第 $i-1$ 效蒸发器的海水温度 ($^{\circ}\text{C}$), $t_{in,i-1}$ 为进入第 i 效蒸发器的海水温度 ($^{\circ}\text{C}$), r_i 为水在温度 t_i 下的汽化热 (kJ/kg), D_i 为第 i 效蒸发器的加热蒸汽流量 (kg/s).

预热器和闪蒸器的物料衡算与热量衡算见文献[6].

1.2 目标函数的确定

以该系统的年总费用(元)比淡水产量(t/a)即得单位产量淡水成本 J (元/ t). 年总费用各部分具体计算如下:

(1) 年耗加热蒸汽费用

从低压缸抽气从而导致发电量减少而产生的费用[7]:

$$J_1 = \theta c_2 [H(p_0, T_0) - H(p, T)] D_1 \eta \quad (4)$$

式中: θ 为系统年运行时间(取 7 200 h); c_2 为发电成本(取 0.25 元/ kWh); $H(p_0, T_0)$ 为第一效加热蒸汽焓(kJ/kg); $H(p, T)$ 为电厂排气参数下的蒸汽焓(kJ/kg)(为接近真实情况, 本文取大连某电厂的排气参数 $p = 0.0029 \text{ MPa}$, $T = 303 \text{ K}$); η 为电厂机电效率(取 0.9); D_1 为第一效加热蒸汽流量(kg/s).

(2) 蒸发器年折旧及维修费用[8]

$$J_2 = C \times \sum_{i=1}^n \{ [4\,400 + (B - 620)] \times 1.2 \times$$

$$(0.667 + 0.0287 A_i) h_i \} \quad (5)$$

式中: C 为装置年折旧及维修率(取 $C = 0.15$); i 为第 i 效, n 为总效数; B 为市场钢材价格(蒸发器用黄铜材料制作, 取 25 000 元/ t); A_i 为第 i 效蒸发器传热面积(m^2), h_i 为增资系数, 当 $A_i \leq 100 \text{ m}^2$, $h_i = 1.0$; $100 \text{ m}^2 < A_i \leq 200 \text{ m}^2$, $h_i = 1.2$; $200 \text{ m}^2 < A_i \leq 400 \text{ m}^2$, $h_i = 1.5$.

(3) 闪蒸器年折旧及维修费用[9]

$$J_3 = C \sum_{i=1}^{n-1} a_i V_i^{b_i} f_1 f_2 \quad (6)$$

选取闪蒸器类型为简单容器, 衬铝. 各参数值如下: $a_1 = 645$, $b_1 = 0.54$, $f_1 = f_2 = 1.0$; 本文中为了计算方便, 将 V_i 取为第一效闪蒸器的体积.

(4) 冷凝器的年折旧及维修费用[9]

$$J_4 = C a A_c^b f_1 f_2 \times 1.3 \quad (7)$$

式中: A_c 为冷凝器面积(m^2), 选取冷凝器类型为浮头式冷凝器, 其各参数值为 $a = 487$, $b = 0.72$, $f_1 = 1.0$, $f_2 = 6.5$.

(5) 预热器的年折旧及维修费用[9]

$$J_5 = \sum_{i=1}^{n-1} C a A_{pi}^b f_1 f_2 \times 1.3 \quad (8)$$

式中: A_{pi} 为预热器面积(m^2), 选取预热器类型为浮头式换热器, 其各参数值为 $a = 276$, $b = 0.8$, $f_1 = 1.0$, $f_2 = 9.5$.

1.3 优化模型

为使优化模型变得较易求解, 又能反映工程实际情况, 作以下几点简化:

(1) 各效预热器年折旧及维修费用均按照最末效预热器的年折旧及维修费用计算, 而各效闪蒸器年折旧及维修费用均按照第一效闪蒸器的年折旧及维修费用计算.

(2) 各效沸点升高设为 1.5°C .

(3) 预热器入口二次蒸汽温度至少要比出口海水温度(即蒸发器入口温度)高 5°C , 取 $t_i -$

$t_{in,i-1} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

(4) 海水和蒸汽的定压比热容均取定值, 分别为 $c_p = 4\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $c_p^* = 4.2\text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

(5) 各效蒸发器传热系数取 $2\,000\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

经过以上几点简化, 目标函数为多元低次、带等式和不等式约束的目标函数.

简化后的系统优化模型为

$$\begin{aligned} \min J; J &= \frac{J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5}{3.6 \times 7\,200 \times \sum_{i=1}^n W_i} \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^n \Delta t_i - (t_0 - t_n) + \sum_{i=1}^n \Delta_i &= 0 \\ 30 \leq t_0 \leq 70 \\ \Delta t_i &\geq 5 \end{aligned} \quad (9)$$

式中: t_0 为加热蒸汽温度($^{\circ}\text{C}$), Δ_i 为各效温差损失($^{\circ}\text{C}$); Δt_i 为第 i 效蒸发器传热温差($^{\circ}\text{C}$).

利用 Matlab 工具箱编制了求解程序, 对简化后的系统优化模型进行了求解.

2 优化结果与分析

已知进口海水质量分数为 3.2% , 温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 出口浓海水质量分数为 6.4% . 计算结果在图 2~6 中给出.

由图 2 可以看出, 在加热蒸汽流量为 8 和 5 t/h 时, 随着效数的不断增加, 海水淡化成本先减小, 后增加, 在 6 效时成本最低; 对于加热蒸汽流量大于 8 t/h 的情况, 在加热蒸汽流量相同的条件下, 随着效数的不断增加, 海水淡化成本不断减小, 但是其减小幅度随着效数的增加逐渐变小.

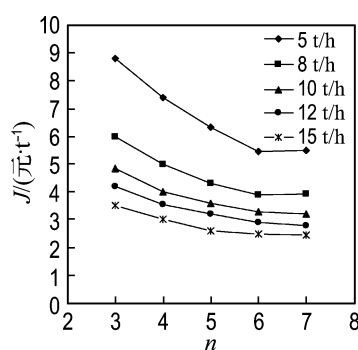


图 2 不同加热蒸汽流量时淡水成本随效数的变化关系

Fig. 2 Variation of water costs with the number of effects under different flow of heating steam

影响淡水成本的主要因素有 2 个: 第一是运行费用和 investment 费用(各设备的年折旧费用); 第二

是淡水产量. 以加热蒸汽流量为 8 和 5 t/h 时为例, 在 6 效以前, 随效数的增加, 其淡水产量逐渐增加, 投资费用也逐渐增加, 此时淡水产量是决定淡水成本的主要因素, 故成本逐渐变小, 而成本减小幅度逐渐变小的原因是年折旧费用随着效数增加而增加的幅度加大; 在 6 效以后, 年折旧费用的增大成为了决定淡水成本的主要因素, 其淡水成本反而随效数的增加而加大. 对于加热蒸汽流量为 10、12、15 t/h 时, 在本文计算范围内, 其淡水产量一直是决定淡水成本的主要因素, 其淡水成本随效数的增加而减小, 并未有增大的趋势, 可以预测随着效数的继续增加, 年折旧费用的增大将成为影响淡水成本的主要因素, 致使到一定效数以后, 淡水成本会随着效数的增加而增加. 对于一定的加热蒸汽流量, 存在一个最佳效数(淡水成本最低), 当加热蒸汽流量增大时, 最佳效数会变大. 故在设计多效蒸发海水淡化系统时, 不要一味增加效数.

从图 3 可以看出, 当效数一定时, 淡水成本随着加热蒸汽流量的增加而减小, 分析其原因是, 效数一定时, 淡水产量会随着加热蒸汽流量的增加而增加, 成为影响淡水成本的决定因素, 故淡水成本逐渐降低.

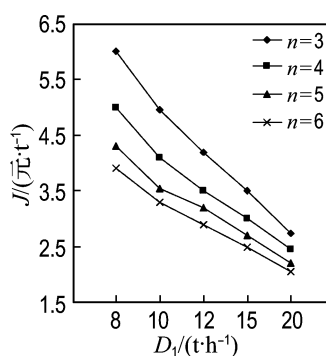


图 3 不同效数时淡水成本随加热蒸汽流量的变化关系

Fig. 3 Variation of water costs with the flow of heating steam under different number of effects

以 5 效为例, 把加热蒸汽流量进一步加大, 如图 4 所示, 在加热蒸汽流量比较小, 也即海水淡化系统规模较小时, 单位产量淡水成本很高. 但随着加热蒸汽流量逐渐增大, 即规模逐渐增大, 成本陡降, 直到加热蒸汽流量为 100 t/h 时. 之后, 成本随规模逐渐增大缓慢减小. 到最后规模 500 t/h 加热蒸汽流量时, 成本几乎没有降低. 从以上可以看出, 规模效应会大大降低成本. 但在规模达到一定值时, 淡水成本与生产规模无关, 故在资金允许

的情况下,建立海水淡化系统应当适当扩大规模,从而有利于降低成本。

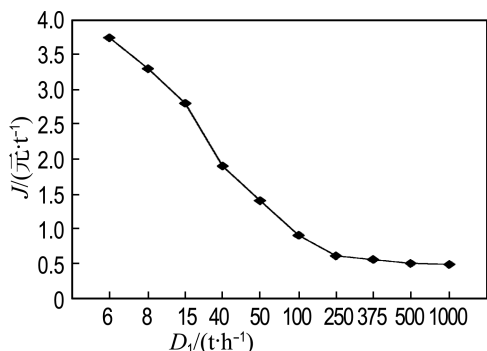


图4 淡水成本随加热蒸汽流量的变化关系

Fig. 4 Variation of water costs with the flow of heating steam

本文分两种情况比较了水电联产低温多效蒸发系统优化设计、水电联产低温多效海水淡化系统等温差设计、无水电联产的独立低温多效海水系统等温差设计的淡水成本:①当效数为7时,改变加热蒸汽流量(8~15 t/h),其他参数不变;②当加热蒸汽流量取10 t/h时,改变效数(3~7),其他参数不变。在计算无水电联产的独立低温多效海水系统等温差设计的淡水成本时,加热蒸汽价格按照75元/t计算。计算结果如图5、6所示。

从图5和6中可以看出,在效数为7时,水电联产优化设计、水电联产等温差设计和无水电联产等温差设计的淡水成本都随着加热蒸汽流量的增加而减小,但是水电联产优化设计和水电联产等温差设计的淡水成本要大大低于无水电联产等温差设计的淡水成本,水电联产优化设计的淡水成本稍低于水电联产等温差设计的淡水成本;在加热蒸汽流量为10 t/h时,水电联产优化设计、

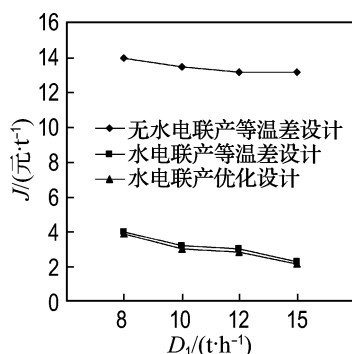


图5 3种情况下淡水成本随加热蒸汽流量的变化关系

Fig. 5 Variation of water costs with the flow of heating steam under three different conditions

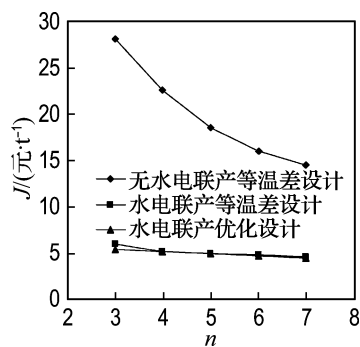


图6 3种情况下淡水成本随效数的变化关系

Fig. 6 Variation of water costs with the number of effects under three different conditions

水电联产等温差设计和无水电联产等温差设计的淡水成本都随着效数的增加而减小,同样水电联产优化设计和水电联产等温差设计的淡水成本要大大低于无水电联产等温差设计的淡水成本,水电联产优化设计的淡水成本稍低于水电联产等温差设计的淡水成本。可以明显看出水电联产优化设计后带来的经济效益,水电联产对降低淡水成本意义显著。在本文的计算范围内,水电联产优化设计和无水电联产等温差设计相比,最大可节约淡水成本87.54%。水电联产低温多效蒸发是降低海水淡化成本的有效途径。

3 结 论

(1)在加热蒸汽流量为8和5 t/h时,随着效数的不断增加,海水淡化成本先减小,后增加,在6效时成本最低;对于加热蒸汽流量大于8 t/h的情况,在加热蒸汽流量相同的条件下,随着效数的不断增加,海水淡化成本不断减小,但是其减小幅度随着效数的增加逐渐变小。对于一定的加热蒸汽流量,存在一个最佳效数(淡水成本最低),当加热蒸汽流量增大时,最佳效数会变大;当效数一定时,淡水成本随着加热蒸汽流量的增加而减小。

(2)在加热蒸汽流量比较小,也即海水淡化系统规模较小时,单位产量淡水成本很高。但随着加热蒸汽流量逐渐增大,即规模逐渐增大,成本陡降,直到加热蒸汽流量为100 t/h时,之后,成本随规模逐渐缓慢减低。到最后规模500 t/h加热蒸汽流量时,成本几乎没有降低。规模效应会大大降低成本,但在规模达到一定值时,淡水成本与生产规模无关。建立海水淡化系统应当适当扩大规模,可以有利于降低淡水成本。

(3)水电联产对降低淡水成本意义显著。在本文的计算范围内,水电联产优化设计和无水电联

产等温差设计相比,最大可节约淡水成本 87.54%。水电联产低温多效蒸发是降低海水淡化成本的有效途径。

参考文献:

- [1] Darwish M A. Desalting fuel energy cost in Kuwait in view of MYM75/barrel oil price [J]. **Desalination**, 2007, **208**(1-3):306-320.
- [2] Darwish M A, Alotaibi S, Alfahad S. On the reduction of desalting energy and its cost in Kuwait [J]. **Desalination**, 2008, **220**(1-3):483-495.
- [3] Sommariva C. Utilisation of power plant waste heat streams to enhance efficiency in thermal desalination [J]. **Desalination**, 2008, **222**(1-3):592-595.
- [4] Bouzayani N, Galanis N, Orfi J. Thermodynamic analysis of combined electric power generation and water desalination plants [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2009, **29**(4):624-633.
- [5] 聂振都. 低温多效蒸馏海水淡化的应用 [J]. 中国电力企业管理, 2002(9):38.
NIE Zhen-du. The application of low temperature multiple-effect evaporation desalination [J]. **Business Administration of China Power**, 2002(9):38. (in Chinese)
- [6] 沈胜强,张全,刘晓华. 低温多效蒸发海水淡化装置的计算分析[J]. 节能, 2005(6):10-13.
SHEN Sheng-qiang, ZHANG Quan, LIU Xiao-hua. Calculation and analysis of low-temperature multi-effect evaporation for seawater desalination [J]. **Energy Conservation**, 2005(6):10-13. (in Chinese)
- [7] 张瑞生,沈才大. 化工系统工程基础 [M]. 上海:华东化工学院出版社, 1991.
ZHANG Rui-sheng, SHEN Cai-da. **Engineering Basis of Chemical Industry System** [M]. Shanghai: The Press of Chemical Engineering Institute of East China, 1991. (in Chinese)
- [8] 梁虎,王黎,朱平. 多效蒸发系统优化设计研究 [J]. 化学工程, 1997, **25**(6):48-51.
LIANG Hu, WANG Li, ZHU Ping. The optimization design and research of multi-effect evaporation system [J]. **Chemical Engineering**, 1997, **25**(6):48-51. (in Chinese)
- [9] 葛维寰. 化工过程设计与经济 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1989.
GE Wei-huan. **Chemical Engineering Process Design and Economics** [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989. (in Chinese)

Research on optimization of power and water cogeneration system with LT-MED for seawater desalination

LIU Xiao-hua*, SHEN Sheng-qiang, LUO Jian-song, DU Yu, ZHANG Xiao-man

(Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: On the basis of mass and heat energy balance of low temperature multiple-effect distillation (LT-MED) seawater desalination system, the optimization mathematical model of power and water cogeneration system with parallel/cross flow is developed in which condensed water flash distillation and seawater preheating are considered. The minimum cost of unit water is the optimization target. The optimization model of power and water cogeneration system is solved and analyzed by computing program which is carried out with Matlab toolboxes. The influence of number of effect, the amount of heating steam, system scale on the cost of unit water is analyzed. In the meantime, the costs of unit water with power and water cogeneration, equal temperature difference design with power and water cogeneration and equal temperature difference design with no power and water cogeneration are compared. The results indicate that the cost of unit water with power and water cogeneration is 87.54% lower than that of equal temperature difference design with no power and water cogeneration with the same parameters. Power and water cogeneration is an effective way to reduce the cost of unit water.

Key words: seawater desalination; low temperature multiple-effect distillation (LT-MED); power and water cogeneration; cost of unit water