

低温多效蒸馏海水淡水—发电联产系统经济性分析

沈胜强, 杨洛鹏

(大连理工大学 动力工程系, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对低温多效蒸馏海水淡化—发电联产系统, 应用等效焓降理论, 计算了制水的能量成本和加热抽汽对汽轮机组的影响。结合 $q-\gamma-\tau$ 矩阵方程, 构造了通用性强、精度高和易于程序化的等效焓降法抽汽效率矩阵模型和局部定量分析矩阵模型。利用该矩阵模型可以方便、快捷、准确计算制水耗电率(ELWP)和制水燃料成本随抽汽压力和加热蒸汽温度的变化。计算结果显示, 采用制水电耗率比传统的性能指标造水比(GOR)能够更准确的评价水电联产系统热性能; 降低抽汽压力和加热蒸汽温度有利于降低制水能量成本, 但抽汽压力和加热蒸汽温度的下限应分别满足蒸汽喷射器的引射系数和压缩比的要求; 低温多效蒸馏海水淡化—发电联产系统能够经济有效地解决北方沿海地区, 尤其是北方沿海火电厂的缺水问题。

关键词: 等效焓降; 水电联产; 低温多效蒸馏; 海水淡化
中图分类号: TK212 文献标识码: A

1 引 言

水资源匮乏在我国尤其是在北方沿海地区已经成为制约社会经济可持续发展的瓶颈, 海水淡化作为新的供给水源是解决水资源短缺的有效途径之一。目前国内外海水淡化的主要方法有蒸馏法和膜法, 其中蒸馏海水淡化方法包括低温多效蒸馏、多级闪蒸和压汽蒸馏, 而低温多效蒸馏(Low Temperature Multi-Effect Distillation-LT-MED)运行温度低(通常温度低于 75 °C), 能够有效利用低品位的电厂余热, 从而降低制水能量成本和有效降低结垢及腐蚀的发生, 已成为未来第二代水电联产海水淡化厂的主流技术^[1]。

能量需求巨大是限制海水淡化技术推广的主要因素之一, 控制着海水淡化成本。水电联产(也称双目的电厂)是有效降低海水淡化能源成本的途径之一。水电联产系统中, 如何准确计算制水的能量成

本, 对于评价水电联产的经济性十分必要。国外学者采用了各种方法来计算制水的能量需求^[2~3], 但 these 方法忽略了用于海水淡化的抽汽对汽轮机组回热系统的影响, 因此只是估算制水的能量成本。本文提出采用等效焓降理论来分析水电联产系统, 建立了等效焓降法中抽汽效率的矩阵模型和局部定量分析矩阵模型, 分析比较了用于海水淡化的加热抽汽对电厂经济性以及制水的能量成本的影响。

2 低温多效蒸馏海水淡化—发电联产系统数学模型

2.1 低温多效蒸馏海水淡化—发电联产系统

图 1 所示为低温多效蒸馏海水淡化—发电联产的热力系统。由于 LT-MED 的海水顶值温度低于 75 °C, 汽轮机的抽汽参数与海水淡化装置所要求的参数不能很好的匹配, 因此水电联产系统中通常利用蒸汽喷射器(Thermal Vapor Compression—TVC)来解决蒸汽参数不匹配的问题。蒸汽喷射器将抽汽作为动力蒸汽来引射 LT-MED 未效产生的二次蒸汽后, 共同作为加热蒸汽进入海水淡化装置, 抽汽冷凝后返回电厂给水系统。

2.2 再热机组变热量等效焓降

等效焓降法是依据热力学第一定律, 由能量平衡和质量平衡方程对热功转换过程及其变化进行推导, 得出两个有用的表征抽汽品质的参量, 即等效焓降和抽汽效率, 用以分析蒸汽动力装置和热力系统的经济性。对于一个工况下的热力系统而言, 抽汽的品质不随热力系统局部的改变而改变, 借助于这些品质参数可以对热力系统的局部进行定量分析, 从而避免了热力系统局部发生变化后, 需要对整个热力系统重新进行繁琐的计算, 只要考虑变动以后

收稿日期: 2005-06-14; 修订日期: 2005-08-08

基金项目: 辽宁省科学技术基金资助项目(20042147)

作者简介: 沈胜强(1961—), 男, 辽宁大连人, 大连理工大学教授, 博士生导师。

的各抽汽份额以及功率的变化, 通过局部计算就可 以得到全局的经济性变化结果。

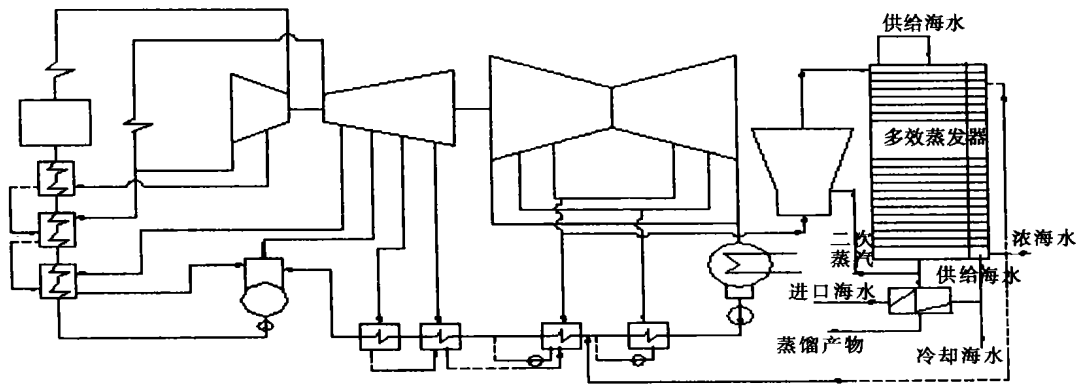


图 1 低温多效蒸馏海水淡化—发电联产热力系统图

再热机组热力系统中, 再热热端到凝汽器之间的任何回热抽汽, 均不通过再热器, 因此其抽汽等效焓降与非再热机组相同。依据等效焓降理论^[4], 非再热机组的等效焓降 H_j^f 为:

$$H_j^f = h_j - h_k - \sum_{r=j+1}^{\infty} \frac{A_r}{q_r} H_r^e \quad (1)$$

式中: h_j —加热器 j 的抽汽焓, kJ/kg ; h_k —汽轮机的排汽焓, kJ/kg ; q_r —加热器 r 的 1 kg 抽汽在该加热器中的放热量, kJ/kg ; A_r 根据加热器的型式取 τ_r 或 γ_r , 其中 τ_r 为 1 kg 凝结水在加热器 r 的焓升, kJ/kg ; γ_r 为上级加热器的 1 kg 疏水在加热器 r 的放热量, kJ/kg 。

再热机组再热冷端到新蒸汽之间的回热抽汽的等效焓降 H_j^f 为:

$$H_j^f = h_j - h_k - \sum_{r=j+1}^{\infty} \frac{A_r}{q_r} H_r^e + \Delta q_{th} \quad (2)$$

式中: Δq_{th} — 1 kg 蒸汽在再热器中的吸热量, kJ/kg 。

回热抽汽的抽汽效率 η_j 为:

$$\eta_j = H_j^f / q_j \quad (3)$$

新蒸汽的等效焓降 H_0^e 为:

$$H_0^e = h_0 - h_k - \sum_{r=1}^{\infty} \tau_r \eta_r + \Delta q_{th} \quad (4)$$

热力系统的循环吸热量 q_0 为:

$$q_0 = h_0 - \bar{h}_{fw} + \alpha_{th} \Delta q_{th} \quad (5)$$

汽轮机装置效率 η_0 为:

$$\eta_0 = H_0^e / q_0 \quad (6)$$

式中: h_0 —汽轮机的排汽焓, kJ/kg ; \bar{h}_{fw} —锅炉进口给水焓值, kJ/kg ; α_{th} —再热蒸汽占进口新蒸汽的份额。

抽汽效率是等效焓降法的核心, 是等效焓降法能使局部定量简单、准确的根本所在。以图 1 所示的热力系统为例, 其抽汽效率矩阵模型为:

$$\begin{bmatrix} q_0 & \tau_1 & \tau_2 & \tau_3 & \tau_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & q_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & & q_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & & & q_3 & \gamma_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & & & & q_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & & & & & q_5 & \gamma_6 & \gamma_7 & \tau_8 \\ & & & & & & q_6 & \gamma_7 & \tau_8 \\ & & & & & & & q_7 & \tau_8 \\ & & & & & & & & q_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_0 \\ \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \\ \eta_7 \\ \eta_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 - h_k - \Delta q_{th} \\ h_1 - h_k + \Delta q_{th} \\ h_2 - h_k + \Delta q_{th} \\ h_3 - h_k \\ h_4 - h_k \\ h_5 - h_k \\ h_6 - h_k \\ h_7 - h_k \\ h_8 - h_k \end{bmatrix} \quad (7)$$

简写为:

$$[A][\eta] = [\Delta h] \quad (8)$$

式中: q_0 —将锅炉视为混合式加热器的吸热量, 系数矩阵 A 是由热力系统结构和参数决定。

2.3 变热量等效热降分析模型

2.3.1 抽汽做功损失

如图 2 所示, 焓值为 h_T , 份额为 α_T 的抽汽进入海水淡化系统放热凝结, 其凝结水从加热器 j 后返回回热系统, 依据等效焓降法有工质携带热量进出系统计算法则, 这部分抽汽的做功损失 ΔH 为:

$$\Delta H = \alpha_T (h_T - h_k - (\bar{h}_T - \bar{h}_{j+1}) \eta_j - \sum_{r=z}^{\infty} \tau_r \eta_r) \quad (9)$$

式中: \bar{h}_T —加热抽汽凝结水焓, kJ/kg ; \bar{h}_{j+1} —加热器 $j+1$ 出口水焓 kJ/kg 。

抽汽做功损失计算矩阵模型为:

$$\Delta H = \alpha_T (h_T - h_k) - [\eta^T][A][\alpha_r] \quad (10)$$

图 3 ~ 至图 4 是在新蒸汽流量不变条件下, ELWP 和 GOR 随加热蒸汽温度和抽汽压力的变化。从图中可以看出, ELWP 随加热蒸汽温度和抽汽压力的升高而增加, 而 GOR 随抽汽压力的升高而增加, 随加热蒸汽温度的升高而减少。对于相同的抽汽压力, 加热蒸汽温度升高, TVC 需要消耗更多的抽汽来引射 LT-MED 末效产生的二次蒸汽, 造成系统的 GOR 减少, 汽轮机组的抽汽做功损失增加, 因此制水的 ELWP 增加。

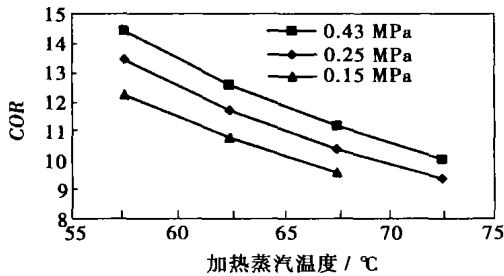


图 4 系统造水比 GOR 随加热蒸汽温度和抽汽压力的变化情况

当加热蒸汽温度不变, 随着抽汽压力的升高, 抽汽的能量品质升高, 汽轮机的做功损失增加; TVC 进口抽汽压力的升高, 被 TVC 吸入的二次蒸汽量增加, 同时由于 TVC 出口的加热蒸汽流量不变, 因此动力蒸汽的消耗量减少, 造水比升高。由于做功损失的增加大于 GOR 的变化, 根据式 (11), 制水的 ELWP 增加。从上面的分析可以看出, 抽汽压力升高时, 以通常采用的 GOR 来评价海水淡化系统热性能, 制水的经济性提高; 而以 ELWP 作为评价指标, 制水的经济性降低。这是因为 GOR 指标并没有考虑能量的品质, 而 ELWP 反映的是抽汽返回汽轮机的真实做功能力, 标志抽汽的能级或能位高低, 所以 ELWP 指标能够比传统的热性能指标 GOR 更准确地反映水电联产系统的经济性。

从图 3 中还可以知道, LT-MED 的 ELWP 可达 10 kWh/h, 相对于反渗透法制水的 6 kWh/h 的能耗, LT-MED 的能量成本要高。但是 LT-MED 的产品水水质要远高于反渗透法, 前者的水质可达到 5 mg/L, 可以直接作为锅炉的补水而无需再处理, 而后的水质为 500 mg/L, 必须经过进一步的除盐, 才能用于电厂的补水。一般而言, 作为沿海火电厂自身的用水而言, LT-MED 制水的经济性要优于反渗透法。

图 5 是新蒸汽流量不变条件下, 改变加热蒸汽温度和抽汽压力对 LT-MED 系统所需的传热面积的

影响情况。图中显示传热面积随着加热蒸汽温度的升高而急剧减少, 不随抽汽压力的变化而变化。由于末效蒸发器温度恒定, 随着加热蒸汽温度的升高, 每一效蒸发器内的传热温差增加, 传热面积减少, 同时蒸发器的传热系数随着加热蒸汽温度的升高而增大, 这两方面共同作用的结果使传热面积随加热蒸汽温度而剧烈变化。对于加热蒸汽温度一定时, 抽汽压力变化引起的是喷射器消耗的抽汽量的改变, 并不影响蒸发器内的温度, 因此其传热面积不随抽汽压力变化。从图 3 中知道, 加热蒸汽温度降低时, ELWP 减少, 能够降低制水成本, 但传热面积急剧增加, 增加了 LT-MED 系统的制造成本。因此必须综合考虑系统的运行成本和制造成本来优化加热蒸汽温度。

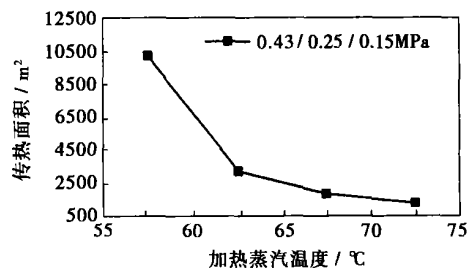


图 5 LT-MED 传热面积随加热蒸汽温度和抽汽压力的变化情况

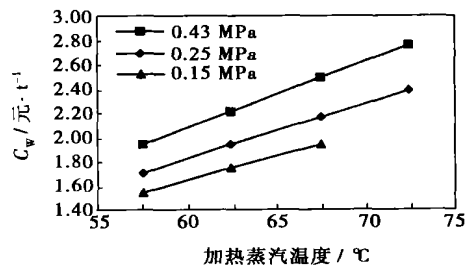


图 6 制水燃料成本随加热蒸汽温度和抽汽压力的变化情况

图 6 是在汽轮机组功率不变条件下, 电厂燃煤按热值折算成标准煤, 标煤单价为 500 元/t 时, 制水燃料成本 C_w 随加热蒸汽温度和抽汽压力的变化。从图中看出, 淡水的燃料成本随加热蒸汽温度和抽汽压力的变化范围为 1.44 ~ 2.8 元/t, 此高纯度淡水的价格甚至低于严重缺水的北方沿海火电厂的工业用水价格, 因此低温多效水电联产系统在经济上是完全可行的, 能够有效解决北方沿海地区, 尤其是火

电厂的缺水问题。

ELWP 和 C_w 随抽汽压力的降低而减少, LT-MED 系统所需的传热面积不随抽汽压力的变化而变化, 因此降低抽汽压力有利于降低制水成本。但是由于 TVC 的引射蒸汽压力和 LT-MED 的加热蒸汽压力一定, 抽汽压力降低, TVC 的膨胀比降低, 造成 TVC 的引射系数减小, 而为保证 TVC 的正常工作, 引射系数不得低于 0.2, 所以能够满足 TVC 引射系数要求的最低汽轮机抽汽压力为 0.15 MPa。

ELWP 和 C_w 随加热蒸汽温度的降低而减少, 有利于系统的经济运行, 但是在 TVC 引射蒸汽(即 LT-MED 系统未效蒸汽)温度保持不变时, 加热蒸汽温度降低, TVC 压缩比降低, 而为使 TVC 能够稳定运行, 其压缩比下限为 1.2, 因此加热蒸汽温度的降低受到 TVC 压缩比的限制。加热蒸汽温度的降低使 LT-MED 系统所需的传热面积急剧升高, 增加了 LT-MED 系统的制造成本。因此对加热蒸汽温度的优化, 要综合考虑 TVC 的压缩比和 LT-MED 系统所需的传热面积对制水成本的影响。

4 结 论

(1) 应用等效焓降理论及等效焓降法中抽汽效率和局部定量分析的矩阵模型, 计算了制水电耗量和制水燃料成本, 实现了对低温多效蒸馏海水淡化—发电联产系统制水能量成本的准确评价。

(2) 降低抽汽压力, 有利于降低制水能量成本, 但是抽汽压力的下限应该满足 TVC 引射系数的要求; 降低加热蒸汽温度, 有利于降低 ELWP 和 C_w , 但

是加热蒸汽温度的降低受 TVC 压缩比的限制, 同时传热面积随加热蒸汽温度的降低急剧增加, 引起制造成本升高。因此要综合考虑系统的运行成本、制造成本和 TVC 的稳定运行来优化加热蒸汽温度和抽汽压力。

(3) 采用制水电耗量(ELWP)比传统的 GOR 指标能够更准确的评价水电联产系统的热性能。

(4) 低温多效蒸馏海水淡化—发电联产系统能够经济有效地解决北方沿海地区, 尤其是火电厂的缺水问题。

参 考 文 献:

- [1] DARWISH M A, EL-DESSOUKY H T. The heat recovery thermal vapour-compression desalting system: a comparison with other thermal desalination processes [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1996, **18**: 523—537.
- [2] MAHESHWARI SMITH G P, AL-RAMADHAN M. Energy requirement of water production in dual-purpose Plant [J]. *Desalination*, 1995, **101**: 133—140.
- [3] DARWISH M A. Fuel cost charged to desalters in Cogeneration power-desalting plants [J]. *Heat Recovery Systems & CHP*, 1998, **15**(4): 357—368.
- [4] 林万超. 火电厂热系统定量分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- [5] EL-DESSOUKY H T, ETTOUNEY H M. Performance of parallel feed multiple effect evaporation system for seawater desalination [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2000, **20**: 1679—1706.
- [6] 沈胜强, 李素芬, 夏远景. 喷射式热泵的设计计算与性能分析 [J]. 大连理工大学学报, 1998, **38**(5): 558—561.

(渠源 编辑)

(上接第 21 页)

念清晰, 易于掌握, 具有规律性强、通用性好、人为主观干预少等特点, 尤其适用于作为计算机处理的数学模型, 对实现火电机组的节能降耗具有重要的理论意义, 是火电厂热力系统经济运行在线分析的实用技术。

参 考 文 献:

- [1] 马芳礼. 电厂热力系统节能分析原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

- [2] 陈海平. 汽轮机排汽系数通用计算方法的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003(9): 193—197.
- [3] 胡华进. 电站热力系统循环组合法及其矩阵模型 [J]. 中国电机工程学报, 1998(1): 12—15.
- [4] CHEN H P. The calculating method of thermal system for the coal-fired power unit based on mass unit [A]. *Proceedings of the International Conference on Power Engineering* [C]. Japan: Kobe, 2003. 3—193.

(渠源 编辑)

cle analyzed is the impact of such parameters as turbine entry temperature, pressure ratio, injection ratio and regeneration ratio, etc on cycle efficiency and specific work. Through a comparison and discussion of the specific features of the two relevant cycles the authors have come to the conclusion that the humid air injected cycle makes it possible to enhance output power by 10% ~ 25%, reduce heat consumption rate by 6% ~ 15% and NO_x emissions by 15% ~ 50%. Moreover, the above-mentioned modification can be implemented on existing power plants. **Key words:** gas turbine, steam injected gas turbine, regenerative gas turbine, humid air cycle

火电机组轴封渗漏及利用系统的通用计算方法 = **A General Method for Calculating the Shaft Seal Leakage and Utilization System of a Thermal Power Plant** [刊, 汉] / CHEN Hai-ping, YU Shu-mei, ZHANG Shu-fang (Power Engineering Department, North China University of Electric Power, Baoding, China, Post Code: 071003), SHI Wei-zhu (Beifang United Electric Power Co., Huhuohaote, Inner Mongolia, China, Post Code: 010020) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 19 ~ 21, 26

With the shaft seal leakage and utilization system of a thermal power plant serving as an object of study and on the basis of a comprehensive consideration of its system configuration and composition features deduced was a model of quantitative analytic calculations for the shaft seal leakage and utilization system. This model adopts a matrix-form expression with the presence of a one-to-one correspondence between the calculation model and the thermal system configuration. Its usage features simplicity and conciseness in calculations and high versatility. The model can be used for the analysis of power units of various types and different operating conditions, and is especially suited to serve as a computer processing-based mathematical model. In view of the above the model under discussion is of major theoretical significance for the realization of energy-savings and the reduction in energy consumption for thermal power plants. **Key words:** thermo-economics, shaft seal leakage and utilization system, general calculation method, thermal system, matrix

低温多效蒸馏海水淡水—发电联产系统经济性分析 = **An Analysis of the Cost-effectiveness of a Cogeneration System for the Simultaneous Production of Electric Power and also Fresh Water by Low-temperature Multi-effect Distillation of Seawater** [刊, 汉] / SHEN Sheng-qiang, YANG Luo-peng (Department of Power Engineering, Dalian University of Science & Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(1). — 22 ~ 26

With respect to a cogeneration system for the simultaneous production of electric power and also fresh water by low-temperature multi-effect distillation of seawater the energy cost of water-making and the impact of extracted-steam heating on a steam turbine unit were calculated using an equivalent enthalpy drop theory. In conjunction with a q - γ - τ matrix equation constructed were a partial quantitative analytic matrix model and an equivalent enthalpy drop method-based steam-extraction efficiency matrix model featuring high versatility and precision as well as ease of sequencing. By employing the above matrix models it is possible to conveniently, rapidly and accurately calculate water-making power consumption rate and the variation of water-making fuel cost caused by a change in steam extraction pressure and steam heating temperature. The results of the calculation indicate that compared with the traditional performance index water-making ratio or gained output ratio (GOR) the use of water-making electric power consumption rate can more accurately evaluate the thermal performance of the water-electricity cogeneration system. The reduction of steam extraction pressure and steam heating temperature is favorable to lowering the water-making energy cost. However, the lower limit of steam extraction pressure and steam heating temperature should respectively meet the requirements of ejection factor of steam injector and compression ratio. The cogeneration system for the simultaneous production of electric power and also fresh water by low-temperature multi-effect distillation of seawater can effectively resolve the water shortage problem in northern China coastal areas, especially that of thermal power plants in those areas. **Key words:** equivalent enthalpy drop, cogeneration of water and electricity, low-temperature multi-effect distillation, seawater desalination

基于矢量分析的转子碰磨故障轴向定位方法 = **Vector Analysis-based Axial Locating Method for Rotor Contact-rubbing Faults** [刊, 汉] / LI Lu-ping, ZOU Xin-yuan, JIN Feng-hua (Institute of Energy Source & Power Engi-