

# 3000吨/日MSF海水淡化系统 国产化的热经济学分析

胡三高 周少祥 宋之平  
(华北电力学院北京研究生部)

〔摘要〕以热经济学分析方法为工具,并结合我国国情,对3000吨/日MSF海水淡化系统进行了较详细的热经济学分析,得出了一些有益的结论,为MSF系统进一步国产化设计提供了必要的参考依据。

关键词 海水淡化 热经济学分析 多级闪蒸 优化

## 1 引言

我国现有淡水资源并不丰富,人均占有量仅为世界人均占有量的1/4。随着工农业生产及四化建设事业的发展,我国淡水短缺问题日趋严峻,特别是沿海地区,工农业生产水平较高,且人口密集,淡水需求量很大。因此,我们必须在最大限度地合理用水和节水的同时,加速发展和开发新的淡水资源。

在水源危机已变成全球性问题的時候,世界各国都非常重视发展海水淡化技术。在众多的海水淡化方法中,以蒸馏法的应用最为广泛,其中又以多级闪蒸法(MSF)占主导地位。MSF装置的主要特点在于其淡水产量大,淡水成本较低、结垢问题较易控制,而且不受海水含盐度的影响,海水只需要加热到70℃~120℃,因此,它能够充分利用低品位的余热能。而且,淡水纯度高(可达3~5ppm),这对于生产中具有余热且需用高纯度淡水的某些工业是极其有利的(如火力发

电厂)。

众所周知,热电联产是能量得以充分利用的有效方式之一,因此,利用电厂汽轮机的调节抽气或低压乏汽作为MSF系统的热源,不仅提高了电厂的热经济性,还可以生产高纯度的淡水以满足电厂自身用水(锅炉补给水)和日益增长的工农业及人民生活对淡水的需求。这种热电结合海水淡化的方式目前已被世界各国所普遍采用。

本文以我国某发电厂从国外引进的两套日产3000吨多级闪蒸海水淡化装置为研究对象,进行较详细的热经济学分析。为能够利用海水淡化方法,对解决我国沿海地区工农业、人民生活用水问题,以及在引进设备的基础上消化吸收国外技术进行国产化的研究等方面具有重要意义。

## 2 热经济学模型<sup>[1,2]</sup>

热经济学是70年代以来而逐步形成的

收稿日期 1992 05 27

本文联系人 胡三高 男 30 讲师 100085 北京清河

一个新兴学科,它将热力学分析与经济分析相结合,来寻求能量利用的合理性及在经济上的可行性,以使能量系统达到最佳的经济运行状态。

本文将MSF系统以其全寿期内的年平均费用下的淡水成本为目标函数,并取闪蒸级数 $N$ 和预热器出口端差 $\Delta t_c$ 为决策变量,构成下述无约束优化问题:

$$\min C_d = (C_m E_m + C_e E + Z_d + Z_{o,p} + Z_i) / H \cdot M_d \quad (1)$$

式中, $E_m$ 为MSF系统年输入焓流,由电厂汽轮机抽汽提供; $E_e$ 为MSF系统年输入电量; $Z_d$ 为MSF系统设备年折旧; $Z_{o,p}$ 为设备年运行维护费用; $Z_i$ 为年海水预处理费用; $M_d$ 为淡水产量; $H$ 为年运行小时数; $C_m$ 为输入焓流单价; $C_e$ 为发电成本。

### 3 目标函数中各项确定

#### 3.1 MSF系统年折旧 $Z_d$

经过我们的研究<sup>[3,4]</sup>,淡化厂(MSF)投资总费用为:

$$CC_d = 18.671 C_m F + 3.91326 \times 10^5 \times N^{0.4} + 370.44 \times 10^4 (\text{元}) \quad (2)$$

式中, $C_m$ 为预热器用管材价格,元/kg; $F$ 为预热器传热面积, $m^2$ ; $N$ 为闪蒸器级数。

若设备服役年限为 $n$ (一般取25年),那么在不考虑设备残余寿命,只考虑资金的时间价值的情况时,则设备的年度化成本 $Z_d$ 为:

$$Z_d = j \cdot CC_d (\text{元/年}) \quad (3)$$

$$j = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}}$$

式中, $j$ 为资金回收系数; $i$ 为年利率; $n$ 为设备服役年限。

#### 3.2 MSF系统年运行维护费用 $Z_{o,p}$

一般情况下,系统的年运行维护费用为

其投资的2.4%左右<sup>[3]</sup>,即:

$$Z_{o,p} = 2.4\% CC_d (\text{元/年}) \quad (4)$$

#### 3.3 MSF系统年海水预处理费用 $Z_i$

$$Z_i = 0.1636 H \cdot M_d (\text{元/年}) \quad (5)$$

#### 3.4 系统年输入电量 $E_e$

在MSF系统中,各种泵(海水循环泵、冷却海水泵、浓海水排放泵、淡水输出泵等)耗电设备所消耗的电量构成了系统年输入电量,为分析方便,在系统设计中,一般以制取每吨淡水需耗电量来衡量,系统年输入电量 $E_e$ 为:

$$E_e = n' \cdot H \cdot M_d$$

式中, $n'$ 为制取每吨淡水需耗电量,本文取4.5 kW·h/t。

#### 3.5 MSF系统输入焓流 $E_m$

在MSF系统中,所消耗的焓主要是由电厂汽轮机抽汽来加热海水,其消耗的焓量根据抽气量、抽汽参数很方便地确定,困难的是输入焓流的单价 $C_m$ 的求取。为此,作者曾提出一个新的系统性能评价指标<sup>[5]</sup>,这个指标称为淡水功耗率,定义是:

$$EECR = W / M_d \quad (7)$$

其中, $W$ 表示为了获得 $M_d$ 的淡水。由于汽轮机为淡化装置抽汽以及供给它附加的厂用电等原因而使得电厂送出的电很少。该指标的优点在于它不仅体现了所耗能量的品位,而且定义式中分子(代价)与分母(产品)都是电厂所直接关心的两个参量。在现代热经济学优化分析中,人们常把系统中的能流转化为焓流,进而把焓流转化为金钱流(如式(1))。在第二步转化中,加热蒸汽的成本(如式(1)中的 $C_m$ )往往难以确定,对于以发电为主造水为辅的热电厂中,应用该指标后,单位量淡水耗能成本 $C_{d1}$ 可以很方便而合理地从发电成本 $C_e$ 转化过来:

$$C_{d1} = C_e \times EECR \quad (8)$$

这样,式(1)中等式右边的前二项 $(C_m E_m + C_e E) / (H \cdot M_d)$ 可以转化成式(8),故原优化

问题成为：

$$\min C_d = C_e \times EECR(t_m, N, \Delta t_e) + [Z_d(t_m, N, \Delta t_e) + Z_{op}(t_m, N, \Delta t_e) + Z_f] / H \cdot M_d$$

### 4 优化结果及分析

为配合引进设备国产化研究工作，第一步优化分析工作作如下限定：系统淡水产量定为日产 3 000 吨；系统海水顶值温度  $t_m$  定为 110℃；决策变量选定为系统闪蒸级数  $N$  (优化结果需取整数) 和预热器出口端差  $\Delta t_e$ 。此外，预热器管材价格  $C_{10}$ 、利率  $i$ 、发电成本  $C_e$  作为赋值变量考虑。

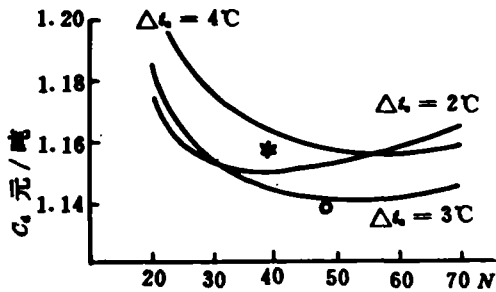


图 1  $N, \Delta t_e$  对  $C_d$  的影响

图 1 表示级数  $N$  和预热器出口端差  $\Delta t_e$  对淡水成本  $C_d$  的影响，其中最优点 (标有  $opt$ ) 是针对  $C_e = 0.03$  元 / (kW · h),  $C_{10} = 19$  元 / kg,  $H = 7 920$  小时 / 年,  $i = 0$  的条件下的优化结果；标有 \* 的点是针对引进设备进行国

产化的一个方案，其级数  $N$  为 39 级，端差  $\Delta t_e$  为 3.7℃，其它有关参量取值同最优 ( $opt$ ) 点。虽然这两种设计 ( $N, \Delta t_e$  不同) 其级数和端差相差较大，但其对应的淡水成本相差并不大，如  $opt$ 、\* 两点的淡水成本分别为 1.139 元 / 吨和 1.155 元 / 吨。这是由于淡水成本函数在最优点附近 (如级数  $N$  在 35 - 60 级；出口端差  $\Delta t_e$  在 2 - 4℃ 范围内) 对于  $N$  和  $\Delta t_e$  的敏感度不高造成的，以致于在较大的级数范围内在 (如图 1 中 35 - 60 级)，改变级数和端差所带来的综合收益并不大。根据这样一个结论，我们最后拟定系统时，对级数  $N$  和端差  $\Delta t_e$  的选择有较大的自由度，也就是说，先根据优化结果再考虑实际情况对级数  $N$  和出口端差  $\Delta t_e$  的要求进行适当调整，以确定最后的系统参数。

表 1 表示不同的厂用电价和资金利率  $i$  下寻优结果。随着电价  $C_e$  的提高，应增加级数、减小端差 (换热面积增加)。也就是说，随着能量费用的提高，不得以增加系统设备投资来获取能量的节省，以降低淡水成本。显然，当利率  $i$  提高时，应减小设备投资，如减少级数和增大端差 (减小换热面积)。由表 1 还可以看出，厂用电价  $C_e$  对最优结果的影响较大，因此在实际工程应用中，应正确、合理选取厂用电价格，这点须引起足够的重视。

表 2 表示不同的预热器换热管材价格

表 1 不同  $C_e, i$  下的优化结果

$C_e$	$i$	$N_{opt}$	$(\Delta t_e)_{opt} (^\circ C)$	$C_d^{opt}$	$C_d$
0.03	0	48	2.8	1.139	1.155
0.03	10%	28	3.9	1.689	1.697
0.05	0	68	2.2	1.405	1.488
0.05	10%	40	3.1	2.022	2.031

$C_{10}$  和资金利率  $i$  下的寻优结果。可以看出，随着  $C_{10}$  的增加，最优级数略减小，但最优出口端差增加 (换热面积减小) 幅度较大，也就是

说，随着预热器换热管材价格的提高，应以增加能量消耗费用来获取淡化设备投资的减小以降低淡水成本。另一方面，由于预热器换热

表2 不同 $C_{ib}$ 、 $i$ 下的优化结果

$C_{ib}$	$i$	$N_{opt}$	$(\Delta t_c)_{opt} (^\circ\text{C})$	$C_d^{opt}$	$C_f$
19	0	48	2.8	1.139	1.155
19	10%	28	3.9	1.689	1.697
28.5	0	46	3.5	1.224	1.226
28.5	10%	27	4.9	1.811	1.847

注: 1. 表1中,  $C_{ib} = 19$ 元/kg,  $H = 7920$ 小时/年

2. 表2中,  $C_e = 0.03$ 元/kW·h,  $H = 7920$ 小时/年

3.  $C_f$ 表示在级数为39级, 出口端差为3.7℃, 其它参量与各优化方案相同的条件下的一个国产化方案

管材一般都采用价格昂贵的钛合金或铝黄铜, 所以, 在淡化设备的投资费用结构中, 换热面的投资占很大比例, 这就是最优出口端差增加幅度较大的原因。

从表1和表2还可以看出, 随着赋值变量 $C_e, C_{ib}, i$ 的变化, 其最优级数和最优端差及淡水成本变化很大。同时, 尽管最优解 $[N_{opt}, (\Delta t_c)_{opt}]$ 与国产化的一个方案( $N = 39, \Delta t_c = 3.7^\circ\text{C}$  其它参量相同)相差较大, 淡水成本却变化不大。这是由于淡水成本函数在最优值附近较大的范围内对决策变量 $N, \Delta t_c$ 的敏度不高造成的, 淡水成本函数的这种性质在进行系统参数及方案决策过程中须引起足够的重视。

## 5 结 论

1 3000吨/日MSF海水淡化系统国产化的热经济学分析及优化结果示于图1、表1和表2。在电成本 $C_e = 0.03$ 元/(kW·h), 管材价格 $C_{ib} = 19$ 元/kg, 利率 $i = 0$ , 所运行小时数 $H = 7920$ 小时/年的情况下, 最优级数为48级, 最优出口端差为2.8℃, 此时的淡水成本为1.139元/吨。

2 厂用电价格、管材价格、资金利率的不同, 最优级数、最优端差及淡水成本也不

同, 且变化较大。这些变量对最优值的影响趋势见表1和表2。

3 由热经济学分析及优化结果可以看出, 当决策变量在 $N < 30$ 和 $N > 60$ 级、 $\Delta t_c < 2^\circ\text{C}$ 和 $\Delta t_c > 4^\circ\text{C}$ 的范围内对淡水成本有明显的影 响, 但当 $N = 30 - 60$ 级、 $\Delta t_c = 2 - 4^\circ\text{C}$ 范围内时,  $N$ 和 $\Delta t_c$ 的变化对淡水成本的影响不太大。也就是说, 级数和出口端差在最优值附近有较大变化的取值所引起的淡水成本变化并不太大。因此, 在实际工程应用中, 根据优化结果再适当考虑工程实际需要和要求以最后确定系统主要参量。

## 参 考 文 献

- 1 EL-Sayed Y M. Thermo-economic optimization of dual-purpose power-desalting plants. Proceedings of 6th Intern. Symp. Fresh water from the sea, 1978, 1, PP, 357-367
- 2 胡三高, 宋之平. 热电合产海水淡化装置的可行性研究. 华北电力学院学报, 1987(4)
- 3 周少祥等. 3000吨/日多级闪蒸海水淡化装置国产化方案论证及可行性研究. 课题鉴定报告, 华北电力学院北京研究生部, 1990. 6
- 4 国产化3000吨/日MSF系统的经济性分析. 科学技术报告, 华北电力学院北京研究生部, 1990. 6
- 5 Song Zhiping, etc. Indigenous construction of sizeable desalination units for dual-purpose power plants in China. EN-ERGY, 1991, 16(4)

**(154)Thermoeconomic Analysis of the Feasibility of a Home-made 3000 t/day MSF Seawater Desalination System** .....Hu Sangao, et al. (*Beijing Postgraduate Department under North China Power Engineering Institute*)

Employing a thermoeconomic analysis method and taking account of the specific conditions prevailing in China, the authors have made a relatively detailed thermoeconomic analysis of a 3000 t/day MSF seawater desalination system and come up with some useful conclusions, which can serve as a necessary basis for furthering the realization of the design of a home-made MSF seawater desalination system. **Key words:** *seawater desalination, thermoeconomic analysis*

**(158)A Pair of New Quality Factors of a Thermodynamic Cycle**.....Yan Zijun (*Xiamen University*)

In view of the defectiveness of current thermodynamic quality factors and the inability of replacing them with finite-time exergoeconomic quality factors, this paper proposes a pair of new quality factors called the ecological quality factors. The significance of such quality factors lies in the fact that they can determine whether a thermodynamic cycle is operating in the optimum condition based on a well-balanced compromise between the function rate and function rate dissipation. **Key words:** *finite-time thermodynamics, thermodynamic cycle, quality factor, ecological optimization criteria*

**(162)On Curzon-Ahlborn Efficiency, Irreversible Heat Engines and the Development of Finite-Time Thermodynamics**.....Chen Lingen, et al. (*Naval Academy of Engineering*)

The famous Curzon-Ahlborn efficiency  $\eta_{CA}$  was first deduced by El-Wakil in 1962. The irreversible heat engine model was also first set up by El-Wakil. The finite-time thermodynamics is currently undergoing a development from physics to engineering and may well bring about tremendous changes in engineering thermodynamics. **Key words:** *finite-time thermodynamics, overview*

Edited and Published by Editorial Staff of Journal of	Cable: 6511, Harbin, China
Engineering for Thermal Energy and power	Post Code Number 150036
Printer: Printing House of Harbin Institute of Technology	ISSN1001-2060
Address: P. O. Box 77, Harbin China	Periodical Registration: CN 23-1176/TK
	Distributed by China International Book Trading Corporation, P. O. Box 399, Beijing, China