

火电机组辅助汽水系统热经济性矩阵分析方法

高大明, 谷俊杰, 杨建蒙

(华北电力大学能源与动力工程学院, 河北省 保定市 071003)

Matrix Analysis Method of Thermal Economy of the Auxiliary Steam-water System for the Coal-fired Power Unit

GAO Da-ming, GU Jun-jie, YANG Jian-meng

(School of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Based on the analysis of the influence on the work done and heat absorption of unit by the variation of unit's steam extraction, the steam extraction efficiency matrix equation and the reheat absorption modulus matrix equation were obtained, in a following step the matrix increment equation for calculating the influence of auxiliary steam-water system on the work done and heat absorption of unit was deduced, and the coal consumption rate micro-increment equation was built. This equation can directly calculate the variation of coal consumption rate caused by the auxiliary steam-water flow, and present a new method which can make a deep analysis for the thermal economy of auxiliary steam-water system from the aspect of the variation of unit's work done and heat absorption. The analysis method was validated by an actual example.

KEY WORDS: thermal system; thermal economy; auxiliary steam-water system; coal consumption rate

摘要: 在分析机组回热抽汽量变化对机组作功量和吸热量影响的基础上, 得出回热抽汽效率矩阵和再热吸热系数矩阵, 然后推导出计算辅助汽水系统对机组作功量和吸热量影响的矩阵增量方程, 并建立了煤耗率微增量方程。该方程可以直接计算各辅助汽水流量引起的机组煤耗率的变化值, 提出了一种从机组作功量和吸热量变化的角度对热力系统辅助汽水系统热经济性进行深入分析的新方法, 并通过实例对该分析方法进行了验证。

关键词: 热力系统; 热经济性; 辅助汽水系统; 煤耗率

0 引言

火电机组热力系统热经济性定量分析方法, 是指导火电厂节能降耗的理论基础, 对于提高我国整体能源利用水平具有重大意义^[1-3]。

在火电机组热力循环中, 虽然各辅助汽水流量

在总蒸汽流量中所占的比例不大, 但对机组的热经济性有很大影响。因此, 定量分析计算各辅助汽水流量对机组热经济性的影响, 是火电机组热力系统热经济性分析的核心内容。文[4]导出了发电煤耗率与辅助汽水流量的微分关系式, 但没有考虑主系统与辅助系统之间的联系, 对进出不同设备的辅助汽水流量需要分别进行分析处理, 使分析和计算方法较复杂。文[5]以进出热力系统不同部位的各辅助汽水流量的结构特点为基础, 建立了辅助汽水系统定量分析的矩阵模型, 通过计算辅助汽水流量系数, 可以分析各辅助汽水流量对机组热耗率的影响。

目前建立在等效热降理论基础上的以热力系统特征矩阵为核心的通过矩阵的结构和元素值表达实际热力系统结构和参数的矩阵分析方法已得到广泛应用, 并提出了一系列用于机组热力系统经济性计算的矩阵方程和分析方法^[6-12]。本文从主、辅系统相联系的角度, 在分析主系统热经济性参数的基础上, 推导出各辅助汽水流量对机组作功量和吸热量影响的矩阵增量方程, 该方程不需进行复杂的高阶矩阵求逆运算, 使计算大为简化, 并建立了物理意义更为明确的综合反映作功量和吸热量变化对机组热经济性影响的煤耗率微增量方程, 可以直接计算各辅助汽水流量引起的机组发电标准煤耗率的变化量, 提出了一种更深入全面的火电机组辅助汽水系统热经济性分析方法。

1 分析思路与基本方程

电厂实际热力系统结构复杂, 主系统与辅助汽水系统是一个紧密联系、相互影响的有机整体, 从本质上看, 各辅助汽水流量对于机组热经济性的影响, 都是通过改变主系统中各级回热抽汽量, 从而

改变流经汽轮机高、中、低压缸和再热器的主蒸汽流量，使其在汽轮机中的作功量和再热吸热量发生变化，并最终造成机组发电煤耗率的增加来实现的。因此，本文在分析主系统中各级回热抽汽热经济性的基础上，得出了反映各级回热抽汽量变化对机组作功量和吸热量影响的抽汽效率矩阵 η_i 和再热吸热系数矩阵 ξ_i 作为分析辅助汽水系统的已知参数，并结合机组热力系统汽水分布矩阵方程、功率方程和吸热量方程，从机组作功量、吸热量和发电标准煤耗率变化的角度对辅助汽水系统的热经济性进行定量分析计算。

1) 热力系统汽水分布矩阵方程。

应用能量、质量守恒定律对各辅助汽流量进行分析，将主系统的汽水分布矩阵方程^[13-15]扩展到辅助系统，可以表示为：

$$AD_i + A_f D_{fi} + A_r D_{wi} + \Delta Q_i = D_0 \tau_i \quad (1)$$

方程两边除以主蒸汽流量 D_0 得：

$$A\alpha_i + A_f \alpha_{fi} + A_r \alpha_{wi} + \Delta q_i = \tau_i \quad (2)$$

式中： A 、 A_f 、 A_r 分别为主系统、辅助蒸汽系统和辅助水流系统的结构矩阵，其填写规则在文献[14]中有详细论述； α_i 、 α_{fi} 、 α_{wi} 、 Δq_i 、 τ_i 分别为各级回热抽汽份额、进出主系统的辅助蒸汽份额、辅助水流份额、纯热量和各级加热器给水焓升列向量。

2) 机组功率方程。

将文献[16]中机组功率方程两边除以 D_0 表示为 1 kg 主蒸汽在汽轮机中的作功量为：

$$N = (h_0 + \sigma - h_c) - \alpha_i^T \tilde{h}_i^\sigma - \alpha_{xi}^T \tilde{h}_i^\sigma \quad (3)$$

式中： h_0 为新蒸汽焓； h_c 为汽轮机排汽焓； σ 为 1 kg 蒸汽在再热器中吸热量； α_{xi} 为离开汽轮机的辅助蒸汽份额列向量。

$$\begin{cases} \tilde{h}_i^\sigma = h_i + \sigma - h_c, & \text{再热冷段前} \\ \tilde{h}_i^\sigma = h_i - h_c, & \text{再热冷段后} \end{cases}$$

式中 h_i 为相应的回热抽汽或辅助蒸汽焓值。

3) 工质吸热量方程。

将文献[17-18]中工质吸热量方程两边除以 D_0 ，表示为 1 kg 主蒸汽的循环吸热量为

$$Q = (h_0 + \sigma - h_c) - \alpha_{iH}^T \sigma_H - \alpha_{xiH}^T \sigma_H + \alpha_{pw} (h_{pw} - h_{fw}) + \alpha_{zy} (h_{zy} - h_{fw}) + \alpha_{ss} (h_{fw} - h_{ss}) + \alpha_{rs} (h_{th} - h_{ts}) \quad (4)$$

式中： α_{iH} 和 α_{xiH} 分别为再热冷段前(包括冷段)的回热抽汽份额列向量和离开汽轮机的辅助蒸汽份额列向量； σ_H 为 n 个 σ 组成的列向量， n 为再热冷段前(包括冷段)的加热器个数； h_{fw} 为给水焓值； α_{pw} 、

h_{pw} 为锅炉排污水份额及焓值； α_{zy} 、 h_{zy} 为自用蒸汽份额及焓值； α_{ss} 、 h_{ss} 为过热器减温水份额及焓值； α_{rs} 、 h_{rs} 、 h_{th} 为再热器减温水份额、焓值及再热器喷水减温后焓值。

2 主系统热经济性分析

主系统中各级回热抽汽效率矩阵 η_i 和再热吸热系数矩阵 ξ_i 表示各级回热抽汽对汽轮机作功量和吸热量的影响程度，是对辅助汽水系统热经济性进行定量分析计算的基础。本文根据等效热降理论，以图 1 所示国产 N300-165/550/550 机组热力系统的主系统为例，推导以上两个主系统经济性矩阵的计算式。

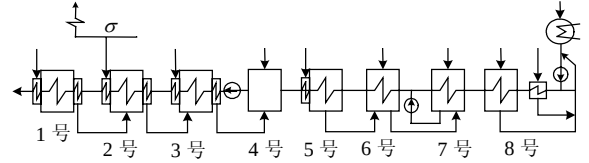


图 1 国产 N300-165/550/550 机组主热力系统

Fig. 1 Main thermal system of the N300-165/550/550 domestic unit

根据等效热降理论，主系统的回热抽汽等效焓降 H_i 与回热抽汽效率 η_i 的通式为：

$$\begin{cases} H_i = (h_i + \sigma - h_c) - \sum_{r=i+1}^z \frac{A_r}{q_r} H_r \\ H_i = (h_i - h_c) - \sum_{r=i+1}^z \frac{A_r}{q_r} H_r \\ \eta_i = \frac{H_i}{q_i} \end{cases} \quad (5)$$

式中：若 i 为汇集式加热器，以 τ_i 代替 A_r ；若 i 为疏水放流式加热器，则从 i 以后直到(包括)汇集式加热器以 γ_r 代替 A_r ，在汇集式加热器以后则均以 τ_r 代替 A_r ； z 为主系统中加热器的级数。

根据图 1 所示国产 N300-165/550/550 机组的主系统，将式(5)用矩阵表示为：

$$\begin{bmatrix} h_1 + \sigma - h_c \\ h_2 + \sigma - h_c \\ h_3 - h_c \\ h_4 - h_c \\ h_5 - h_c \\ h_6 - h_c \\ h_7 - h_c \\ h_8 - h_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & q_2 & \gamma_3 & \gamma_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & & q_3 & \gamma_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & & & q_4 & \tau_5 & \tau_6 & \tau_7 & \tau_8 \\ & & & & q_5 & \gamma_6 & \gamma_7 & \tau_8 \\ & & & & & q_6 & \gamma_7 & \tau_8 \\ & & & & & & q_7 & \tau_8 \\ & & & & & & & q_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \\ \eta_7 \\ \eta_8 \end{bmatrix} \quad (6)$$

简记为 $\tilde{h}_i^\sigma = B\eta_i$ ，经验证系数矩阵 B 与式(1)中的主系统结构矩阵 A 的关系为 $B=A^T$ ，即

$$\tilde{h}_i^\sigma = A^T \eta_i$$

因此回热抽汽效率矩阵 η_i 可以表示为

$$\eta_i = [A^T]^{-1} \tilde{h}_i^\sigma \quad (7)$$

根据等效热降理论,再热冷段及以前第*i*级加热器排挤 1 kg 抽汽引起的再热器吸热量变化 ΔQ_{Zr-i} 为:

$$\begin{cases} \Delta Q_{Zr-c} = \sigma, & \text{再热冷段} \\ \Delta Q_{Zr-i} = \sigma \prod_{r=i+1}^c (1 - \gamma_r / q_r), & \text{再热冷段前} \end{cases} \quad (8)$$

式中 *c* 为与再热冷段相连的加热器编号。

定义再热吸热系数 ξ_i 为:

$$\xi_i = \frac{\Delta Q_{Zr-i}}{q_i} \quad (9)$$

根据图 1 所示国产 N300-165/550/550 机组的主系统, 将 ξ_i 代入式(8)并用矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} q_1 & \gamma_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma \\ \sigma \end{bmatrix} \quad (10)$$

简记为 $B_H \xi_i = \sigma_H$, 同样可用式(1)中的主系统结构矩阵 A_H^T 代替系数矩阵 B_H , 可得:

$$A_H^T \xi_i = \sigma_H \quad (11)$$

式中 B_H 与 A_H^T 分别为只包含再热冷段及以前各级加热器的系数矩阵和结构矩阵。

由式(11)可把再热吸热系数矩阵 ξ_i 表示为

$$\xi_i = [A_H^T]^{-1} \sigma_H \quad (12)$$

式(7)和式(12)分别为主系统中各级回热抽汽效率矩阵 η_i 和再热吸热系数矩阵 ξ_i 的计算公式, 但由于需要进行复杂的高阶矩阵求逆运算, 计算过程十分复杂。通过推导过程可知, 在实际计算时, 可以通过求解式(6)和式(10)的线性代数方程得到回热抽汽效率矩阵 η_i 和再热吸热系数矩阵 ξ_i , 由于 2 个方程中系数矩阵均为上三角矩阵, 因此求解过程简单, 同时便于利用计算机编程计算。

3 辅助汽水系统热经济性分析

3.1 辅助汽水流量的处理

将式(2)中汽水分布矩阵方程左面代表辅助蒸汽、辅助水流和进出主系统纯热量的 3 项热平衡矩阵关系式合并, 可表示为

$$A\alpha_i + Q_{fi} = \tau_i \quad (13)$$

式中:

$$Q_{fi} = A_f \alpha_{fi} + A_r \alpha_{wi} + \Delta q_i \quad (14)$$

在矩阵 A_f 和 A_r 的具体处理时, 对于进出相同加热器的同一类 *n* 股辅助汽水流, 按文献[14]中的第 2 种方法采用并联矩阵处理, *n* 股辅助汽水流以 *n* 个并

联列向量分别表示。

矩阵 Q_{fi} 综合反映了机组热力系统中进出系统不同部位各类辅助汽水流以及纯热量的结构和能量关系, 本文将其定义为辅助系统广义能量矩阵。该矩阵把机组热力系统中各类复杂的辅助汽水流和纯热量用与机组热力系统结构相关的矩阵统一表示, 具有很强的规律性, 有效简化了辅助汽水系统的分析计算。

3.2 辅助汽水系统的功率增量方程

根据式(13), 主系统各级回热抽汽份额矩阵 α_i 的计算式为:

$$\alpha_i = A^{-1}(\tau_i - Q_{fi}) \quad (15)$$

将式(15)代入式(3)的机组功率方程得:

$$N = (h_0 + \sigma - h_c) - [A^{-1}(\tau_i - Q_{fi})]^T \tilde{h}_i^\sigma - \alpha_{xi}^T \tilde{h}_i^\sigma \quad (16)$$

不考虑辅助汽水流量的影响, 则 1 kg 主蒸汽在机组主系统循环中的作功量为:

$$N_0 = (h_0 + \sigma - h_c) - \tau_i^T [A^T]^{-1} \tilde{h}_i^\sigma \quad (17)$$

将式(16)与式(17)相减得:

$$\Delta N = Q_{fi}^T [A^T]^{-1} \tilde{h}_i^\sigma - \alpha_{xi}^T \tilde{h}_i^\sigma \quad (18)$$

将主系统各级回热抽汽效率矩阵 η_i 的计算式(7)代入式(18), 可得辅助汽水系统的功率增量矩阵方程为:

$$\Delta N = Q_{fi}^T \eta_i - \alpha_{xi}^T \tilde{h}_i^\sigma \quad (19)$$

式中等号右面第 1 项的意义为各辅助汽水流进入(或离开)主系统各级加热器的汽水管路使回热抽汽量减少(或增加)后, 造成的汽轮机作功量的变化; 第 2 项的意义为辅助蒸汽(如门杆漏汽、轴封漏汽等)或小汽轮机的抽汽离开汽轮机而减少的作功量。 ΔN 即为辅助汽水系统对机组作功量的影响值。当分析小汽轮机抽汽对机组作功量的影响时, 由于其抽汽离开汽轮机后进入小汽轮机作功并最终排入凝汽器, 因此只需计算式(19)中的第 2 项。

3.3 辅助汽水系统的吸热量增量方程

由于再热冷段以后各级抽汽量和各辅助汽水流对机组的工质循环吸热量没有影响, 为简化计算, 可以在式(15)的各矩阵中仅取代表再热冷段前(包括再热冷段)的各项矩阵元素, 组成子矩阵, 以下标 H 表示可得:

$$\alpha_{iH} = A_H^{-1}(\tau_{iH} - Q_{fiH}) \quad (20)$$

式(20)如用于分析图 1 所示的国产 N300-165/550/550 机组热力系统, 则各项矩阵均为 2 阶方阵或 2 阶列向量。

将式(20)代入式(4)工质吸热量方程可得:

$$Q = (h_0 + \sigma - h_c) - [A_H^{-1}(\tau_{iH} - Q_{fiH})]^T \sigma_H - \alpha_{xiH}^T \sigma_H + \alpha_{pw}(h_{pw} - h_{fw}) + \alpha_{zy}(h_{zy} - h_{fw}) + \alpha_{ss}(h_{fw} - h_{ss}) + \alpha_{rs}(h_{th} - h_{ts}) \quad (21)$$

不考虑辅助汽水流量的吸热量, 则 1 kg 主蒸汽在机组主系统中的循环吸热量为:

$$Q_0 = (h_0 + \sigma - h_c) - \tau_{iH}^T [A_H^T]^{-1} \sigma_H \quad (22)$$

同理将式(21)与式(22)相减得:

$$\Delta Q = Q_{fiH}^T [A_H^T]^{-1} \sigma_H - \alpha_{xiH}^T \sigma_H + \alpha_{pw}(h_{pw} - h_{fw}) + \alpha_{zy}(h_{zy} - h_{fw}) + \alpha_{ss}(h_{fw} - h_{ss}) + \alpha_{rs}(h_{th} - h_{ts}) \quad (23)$$

将主系统的再热吸热系数矩阵 ξ 的计算式(12)代入式(23), 可得辅助汽水系统的吸热量增量矩阵方程为

$$\Delta Q = Q_{fiH}^T \xi_i - \alpha_{xiH}^T \sigma_H + \alpha_{pw}(h_{pw} - h_{fw}) + \alpha_{zy}(h_{zy} - h_{fw}) + \alpha_{ss}(h_{fw} - h_{ss}) + \alpha_{rs}(h_{th} - h_{ts}) \quad (24)$$

式中等号右面第 1 项的意义为各辅助汽水流量进入(或离开)主系统中再热冷段及以前的各级加热器汽水管路使其回热抽汽量发生变化, 进而使进入再热器的蒸汽流量变化引起的再热吸热量的变化; 第 2 项的意义为再热冷段及以前的辅助蒸汽离开汽轮机不进入再热器而减少的再热吸热量; 后 4 项分别为排污水、自用蒸汽、过热器减温水 and 再热器减温水使机组增加的循环吸热量。 ΔQ 即为辅助汽水系统对机组吸热量的影响值。当分析小汽轮机抽汽对机组吸热量的影响时, 如果其抽汽汽源来自再热冷段之后, 则 $\Delta Q=0$; 如果其抽汽汽源来自再热冷段之前, 则只需计算式(24)中的第 2 项。当具体计算辅助汽水流量对机组吸热量的影响时, 在矩阵 Q_{fi} 中取代表再热冷段及以前的各元素构成矩阵 Q_{fiH} 并代入式(24)中计算即可。

3.4 煤耗率微增量方程

机组的发电标准煤耗率计算式为

$$b_s = \frac{3\ 600Q}{7\ 000 \times 4.1816 \eta_b \eta_m \eta_g N} \quad (25)$$

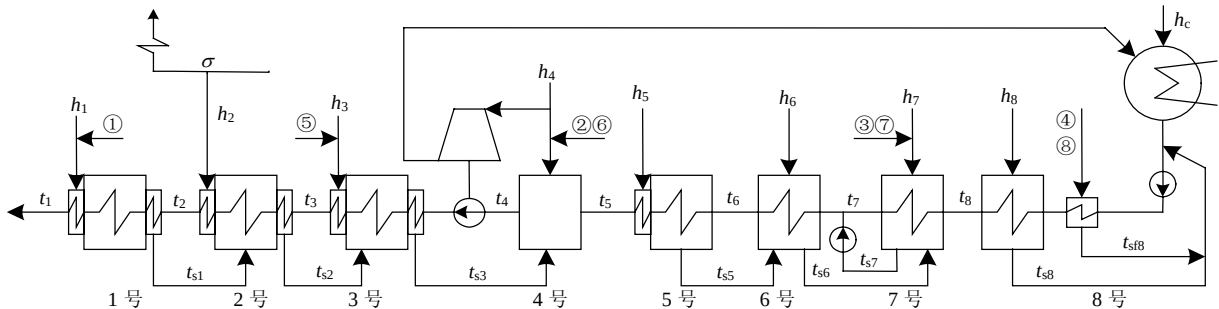


图 2 国产 N300-165/550/550 机组热力系统
Fig. 2 Thermal system of the N300-165/550/550 domestic unit

式中: b_s 为发电标准煤耗率, $g/(kW \cdot h)$; Q 为机组某一稳定运行工况下的循环吸热量, kJ/kg ; N 为机组某一稳定运行工况下的比内功(即 1 kg 主蒸汽在汽轮机内的作功量, 不包括小汽轮机作功, kJ/kg); η_b 为锅炉效率; η_m 为汽轮机机械效率; η_g 为发电机效率。

在机组稳定运行工况下, η_b , η_m , η_g 基本不变, 可以视为常数, 对式(25)两边取对数并微分得:

$$db_s = b_s \left(\frac{dQ}{Q} - \frac{dN}{N} \right) \quad (26)$$

由于各辅助汽水流量在总蒸汽流量中所占的份额很小, 其变化不会对机组运行工况产生明显影响, 即对机组热力系统的各热力参数以及机组循环吸热量 Q 和机组比内功 N 的影响可以忽略, 根据小扰动理论, 可以在机组运行的稳定工况点处对(26)式进行局部线性化处理, 将式(26)中的导数项表示成增量形式, 此时辅助汽水系统的煤耗率微增量方程为

$$\Delta b_s = b_s \left(\frac{\Delta Q}{Q} - \frac{\Delta N}{N} \right) \quad (27)$$

式(27)综合反映了机组稳定工况下各辅助汽水流量引起的机组作功量和吸热量变化对机组热经济性的影响, 代入功率增量矩阵方程(19)和吸热量增量矩阵方程(24)的计算结果 ΔN 和 ΔQ , 根据机组某一稳定运行工况下的循环吸热量 Q 和比内功 N 便可以直接计算机组某一稳定工况下各辅助汽水流量对机组的重要热经济性指标——发电标准煤耗率的影响值, 从机组作功量和吸热量变化的角度对辅助汽水系统的热经济性进行深入全面的定量分析。

4 应用举例

以图 2 所示国产 N300-165/550/550 机组热力系统为例, 对额定负荷稳定运行工况下机组辅助汽水系统的热经济性进行定量分析计算。

在额定负荷稳定运行工况下机组热力系统的
主要热力参数以及整理后的计算结果如表 1、2 所
示, 其中的汽、水焓值根据 1967 年 IFC 水蒸气图
表查得。

表 1 主系统汽水参数
Tab. 1 Steam-water parameters of main system

序号	h_i /(kJ/kg)	t_i /(kJ/kg)	t_{si} /(kJ/kg)	抽汽份额 α_i	q_i /(kJ/kg)	τ_i /(kJ/kg)	γ_i /(kJ/kg)	回热抽汽效率 η_i	再热吸热系数 ξ_i
1	3 155.4	1145.9	1 073.6	0.045 84	2081.8	107.4	—	0.387 79	0.214 57
2	3 072.1	1038.5	862.6	0.088 79	2 209.5	203.2	211.0	0.362 25	0.223 53
3	3 331.6	835.3	748.4	0.037 05	2 583.2	138.3	114.2	0.318 44	—
4	3 153.0	697.0	—	0.009 63	2 527.1	71.1	122.5	0.267 82	—
5	3 050.6	625.9	625.6	0.031 56	2 425.0	93.4	—	0.243 46	—
6	2 932.1	532.5	540.6	0.052 10	2 391.5	155.4	85.0	0.204 60	—
7	2 725.8	375.2	387.3	0.036 43	2 504.9	156.2	319.7	0.129 51	—
8	2 604.4	220.9	232.9	0.022 07	2 465.1	81.6	—	0.085 19	—

注: 主蒸汽焓 $h_0=3 435.8$ kJ/kg; 排汽焓 $h_c=2 394.4$ kJ/kg; 凝结水焓 $t_c=139.3$ kJ/kg; 再热吸热量 $\sigma=493.9$ kJ/kg; 机组循环吸热量 $Q=2 709.3$ kJ/kg; 机组比内功 $N=1 208.4$ kJ/kg。

表 2 辅助汽水参数
Tab. 2 Auxiliary steam-water parameters

序号	流量份额 α_{fi}	焓 h_{fi} /(kJ/kg)	放热量 Δq_{fi} /(kJ/kg)
1	0.006 01	3 383.7	2 310.1
2	0.008 28	3 319.6	2 693.7
3	0.001 59	3 151.9	2 931.0
4	0.000 24	3 435.7	3 296.4
5	0.000 27	3 508.6	2 760.2
6	0.001 07	3 565.9	2 940.0
7	0.001 43	3 445.2	3 224.3
8	0.000 94	2 581.4	2 169.8

注: 辅助汽水流中①~④段来自再热冷段以前。

应用式(27)的煤耗率微增量方程对辅助汽水系统的热经济性进行定量分析计算, 首先要根据机组的实际热力系统写出辅助汽水系统的广义能量矩阵 Q_f , 同时由式(6)、(10)计算主系统的回热抽汽效率矩阵 η_i 和再热吸热系数矩阵 ξ_i 作为已知参数, 再将矩阵 Q_f 中代表各辅助汽水流量的列向量分别代入式(19)和式(24)计算机组的作功量变化 ΔN 和吸热量变化 ΔQ , 最后便可根据式(27)定量计算各辅助汽水流量对机组发电标准煤耗率的影响值。在图 2 所示机组中各辅助汽水流量的列向量如下:

$$\begin{aligned} Q_{f1} &= [\Delta q_{f1} \quad \gamma_2 \quad \gamma_3 \quad \gamma_4 \quad \tau_5 \quad \tau_6 \quad \tau_7 \quad \tau_8]^T \\ Q_{f2} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad \Delta q_{f2} \quad \tau_5 \quad \tau_6 \quad \tau_7 \quad \tau_8]^T \\ Q_{f3} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \Delta q_{f3} \quad \tau_8]^T \\ Q_{f4} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \Delta q_{f4}]^T \\ Q_{f5} &= [0 \quad 0 \quad \Delta q_{f5} \quad \gamma_4 \quad \tau_5 \quad \tau_6 \quad \tau_7 \quad \tau_8]^T \\ Q_{f6} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad \Delta q_{f6} \quad \tau_5 \quad \tau_6 \quad \tau_7 \quad \tau_8]^T \\ Q_{f7} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \Delta q_{f7} \quad \tau_8]^T \\ Q_{f8} &= [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad \Delta q_{f8}]^T \end{aligned}$$

当代入吸热量增量矩阵方程(24)时只需在各辅助汽水流量列向量中取代表再热冷段及以前的前两项元素代入即可。

在额定负荷稳定运行工况下, 机组各辅助汽水流量的热经济性计算结果如表 3 所示。

表 3 热经济性计算结果
Tab. 3 Thermal economy calculation results

序号	ΔN /(kJ/kg)	ΔQ /(kJ/kg)	Δb_s /(g/kW·h)	$(\Delta b_s/b_s)/\%$
1	-2.163 9	0.294 1	0.582 3	0.189
2	-5.100 1	-4.089 5	0.831 3	0.271
3	-1.375 1	-0.785 3	0.260 0	0.085
4	-0.301 1	-0.118 5	0.063 0	0.021
5	-0.032 6	0	0.008 3	0.003
6	-0.323 6	0	0.082 1	0.027
7	-0.895 6	0	0.227 2	0.074
8	-0.002 0	0	0.000 5	1.68×10^{-4}

注: 机组循环吸热量 $Q=2 709.3$ kJ/kg; 机组比内功 $N=1 208.4$ kJ/kg; 发电标准煤耗率 $b_s=306.61$ g/(kW·h)。

5 结论

本文提出的火电机组辅助汽水系统热经济性

分析方法具有以下特点：

1) 基于主、辅系统相统一的思想，通过对主系统的分析推导，得出了回热抽汽效率矩阵 η 和再热吸热系数矩阵 ξ ，使对辅助汽水系统的功率增量矩阵方程和吸热量增量矩阵方程的计算中不再需要进行复杂的高阶矩阵求逆运算，计算大为简化。

2) 将进出机组热力系统不同部位各类辅助汽水流量和纯热量统一用广义能量矩阵 Q_{fi} 表示，具有极强的规律性与通用性，代入辅助汽水系统的功率增量矩阵方程和吸热量增量矩阵方程，使辅助汽水系统的经济性分析过程转化为简单的矩阵运算，便于利用计算机编程进行在线分析。

3) 建立了辅助汽水系统的功率增量矩阵方程、吸热量增量矩阵方程和煤耗率微增量方程，可以从机组作功量、吸热量和发电标准煤耗率变化的角度对辅助汽水系统的热经济性进行更全面深入地定量分析，并且物理意义更为明确，便于在机组运行过程中对运行人员进行操作指导。

4) 分析方法通用性强，适用于火电厂各种不同机组辅助汽水系统热经济性的分析计算。

参考文献

- [1] 邵树峰, 严俊杰, 刘继平, 等. 二次再热机组热力系统的定量分析方法[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(11): 1137-1141.
Shao Shufeng, Yan Junjie, Liu Jiping, et al. Thermo-economics analysis method of thermal system for power unit with double reheat[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(11): 1137-1141(in Chinese).
- [2] 张超, 刘黎明, 陈胜, 等. 基于热经济学结构理论的热力系统性能评价[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 108-113.
Zhang Chao, Liu Liming, Chen Sheng, et al. Performance evaluation of thermal power system based on the structure theory of thermoeconomic[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 108-113(in Chinese).
- [3] 程伟良, 王清照, 王加璇. 300MW 凝汽机组的热经济学成本诊断[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 126-129.
Cheng Weiliang, Wang Qingzhao, Wang Jia xuan. Thermo-economics cost diagnosis of 300MW condensing power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 126-129(in Chinese).
- [4] 李永华, 闫顺林, 王松岭. 煤耗与辅助汽水流量的通用微分关系式[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 79-83.
Li Yonghua, Yan Shunlin, Wang Songling. Common differential relationship equation for coal consumption and auxiliary steam-water flux[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 79-83(in Chinese).
- [5] 陈海平, 刘吉臻, 张春发, 等. 火电机组辅助汽水系统定量分析的通用模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 98-102.
Chen Haiping, Liu Jizhen, Zhang Chunfa. A general model of quantitative analysis of the steam-water auxiliary system for the coal-fired power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 98-102(in Chinese).
- [6] 郭民臣, 魏楠. 电厂热力系统矩阵热平衡方程式及其应用[J]. 动力工程, 2002, 22(2): 1733-1738.
Guo Minchen, Wei Nan. Thermodynamic system matrix thermal balance equation of power plant and its application[J]. Journal of Power Engineering, 2002, 22(2): 1733-1738(in Chinese).
- [7] 郭江龙, 张树芳, 宋之平, 等. 火电厂热力系统热经济性矩阵分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 205-210.
Guo Jianglong, Zhang Shufang, Song Zhiping, et al. A matrix method for thermal system analysis in a power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 205-210(in Chinese).
- [8] 顾倩, 王明春. 再热机组热力系统能效分布矩阵模型算法研究[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(4): 263-265.
Gu Qian, Wang Mingchun. Study on the algorithm of power-efficiency distributing matrix model for thermal system for power unit with double reheat[J]. Turbine Technology, 2004, 46(4): 263-265(in Chinese).
- [9] 张学镭, 王松岭, 陈海平, 等. 加热器端差对机组热经济性影响的通用计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 166-171.
Zhang Xuelei, Wang Songling, Chen Haiping, et al. General calculation model on the influence of terminal temperature difference on heat economy of unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 166-171(in Chinese).
- [10] 彭勇. 一种基于系统结构特征矩阵的火电厂热力系统通用矩阵模型[J]. 广东电力, 2006, 19(7): 4-7.
Peng Yong. A kind of general matrix model of thermal power plant thermodynamic system based on system structural characteristic matrix[J]. Guangdong Electric Power, 2006, 19(7): 4-7(in Chinese).
- [11] 王松岭, 张学镭, 陈海平, 等. 抽汽压损对机组热经济性影响的通用计算模型[J]. 动力工程, 2006, 26(6): 888-893.
Wang Songling, Zhang Xuelei, Chen Haiping, et al. A general model for calculating the influence of steam extraction pressure loss on a unit's thermal efficiency[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(6): 888-893(in Chinese).
- [12] 张新铭, 谭灿条, 吴阿峰. 基于结构特征矩阵的电厂热力系统通用矩阵模型[J]. 动力工程, 2007, 27(1): 145-148.
Zhang Xinming, Tan Canshen, Wu Afeng. A matrix model based on configuration characterized matrices of thermodynamic system for power plants[J]. Journal of Power Engineering, 2007, 27(1): 145-148(in Chinese).
- [13] 闫顺林, 徐鸿. 火电机组热力系统的自适应汽水分布状态方程[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 54-58.
Yan Shunlin, Xu Hong. The self-adapted steam-water distribution

- equation of thermodynamic system for the coal-fired power unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 54-58(in Chinese).
- [14] 闫顺林, 张春发, 李永华, 等. 火电机组热力系统汽水分布通用矩阵方程[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 69-73.
- Yan Shunlin, Zhang Chunfa, Li Yonghua, et al. The steam-water distribution general matrix equation of thermal system for the coal-fired power unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 69-73(in Chinese).
- [15] 郭江龙, 张树芳, 宋之平, 等. 定热量等效热降法的数学基础及其矩阵分析模型[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 210-215.
- Guo Jianglong, Zhang Shufang, Song Zhiping, et al. The mathematic fundamental of constant-heat equivalent heat drop method and it's model for matrix analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 210-215(in Chinese).
- [16] 郭民臣, 魏楠, 刘文毅. 汽耗变换系数及抽汽等效焓降与主循环的汽耗率[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 93-98.
- Guo Minchen, Wei Nan, Liu Wenyi. Steam rate transformation coefficient, extraction equivalent enthalpy drop and steam rate of main cycle[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 93-98(in Chinese).
- [17] 郭民臣, 魏楠, 杨勇平. 热耗变换系数、抽汽效率与主循环效率[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 83-87.
- Guo Minchen, Wei Nan, Yang Yongping. Heat rate transformation coefficient, extraction steam efficiency and main cycle efficiency [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 83-87(in Chinese).
- [18] 刘强, 郭民臣, 王毅林, 等. 二次再热机组的热耗变换系数和汽耗变换系数[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(26): 59-64.
- Liu Qiang, Guo Minchen, Wang Yilin, et al. Heat rate transformation coefficient and steam rate transformation coefficient of thermodynamic system for power unit with double reheat [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(26): 59-64(in Chinese).



高大明

收稿日期: 2008-05-23。

作者简介:

高大明(1980—), 男, 讲师, 主要从事发电厂火电机组热力系统的经济性分析与优化控制方面的研究, gaodaiming8073@sina.com;

谷俊杰(1959—), 男, 教授, 中国动力工程学会会员, 主要从事发电厂火电机组优化与控制方面的研究;

杨建蒙(1964—), 男, 副教授, 主要从事发电厂火电机组热力系统自动化与仿真方面的研究。

(责任编辑 王庆霞)