

火电机组辅助汽水系统定量分析的通用模型

陈海平¹, 刘吉臻¹, 张春发¹, 石维柱²

(1. 华北电力大学, 河北省 保定市 071003; 2. 北方联合电力公司, 内蒙古自治区 呼和浩特市 010020)

A GENERAL MODEL OF QUANTITATIVE ANALYSIS OF THE STEAM-WATER AUXILIARY SYSTEM FOR THE COAL-FIRED POWER UNIT

CHEN Hai-ping¹, LIU Ji-zhen¹, ZHANG Chun-fa¹, SHI Wei-zhu²

(1. North China Electric Power University, Baoding, 071003, Hebei Province, China; 2. North United Electric Power Co., Huhehaote 010020, Inner Mongolia, China)

ABSTRACT: Based on the research on the characteristics of “mass unit” and strict deduction and demonstration, a general model of quantitative analysis and calculation of the steam-water auxiliary system for the coal-fired power unit is derived in this paper. The result of the application shows that the calculating method proposed possesses a series of advantages, such as convenience and simplicity, accuracy and universality in use. It can not only offer possibility to program general thermal dynamic calculation. What is more, it provides new method for coal-fired power unit’s thermal dynamic energy-saving analysis especially for partial quantitative analysis.

KEY WORDS: Thermal power engineering; Coal-fired power unit; Steam-water auxiliary system; A general calculating model; Matrix

摘要: 以质量单元为基础, 通过严谨的数学推演, 提出了火电机组辅助汽水系统定量分析计算的通用模型, 该模型全面考虑了辅助汽水系统组成特点, 具有分析与计算方便、简洁、准确性高、通用性强等特点; 不仅为编制通用的热力系统计算软件提供了依据, 而且为火电机组的节能降耗, 特别是辅助汽水系统的定量分析计算提供了新的理论基础, 并通过实例进行了验证。

关键词: 热能动力工程; 火电机组; 辅助汽水系统; 计算通用模型; 矩阵

1 引言

辅助汽水系统是火电机组热力系统的重要组成部分, 对其进行定量分析, 可认识它们对机组热经济性影响的规律和热力学实质, 以分析其影响的因素, 确定其数量的大小。机组热力系统是以汽轮机

及其原则性回热系统为基础, 考虑锅炉与汽轮机的匹配及其辅助汽水系统与回热系统的配合而形成的^[1-10]。按照辅助汽水流进、出回热系统的地点可以将其归纳为以下 4 类: 汇入回热系统汇集式加热器或凝汽器; 汇入表面式加热器的水侧 (进水管); 汇入表面式加热器的汽侧; 通过冷却器汇入回热系统。

由文[1]知, 汽轮发电机组热耗率等于热力系统在不考虑任何辅助汽水系统时 (主凝汽循环) 的热耗率 $H_{R(\pm)}$ 与因辅助汽水系统进、出热力系统而增加或减少的热耗率 $\Sigma \Delta H_{Rx}$ 之和, 即

$$H_R = H_{R(\pm)} + \Sigma \Delta H_{Rx} = H_{R(\pm)} + \Sigma \frac{q_{xc} D_x}{P}$$

式中 D_x 为辅助汽水流量; P 为发电机功率; q_{xc} 为热量多耗系数。

在火电机组热力系统结构及运行工况一定的情况下, 当循环的初、终参数、回热系统、汽水参数、附加成分及其汽水参数等一定时, 由文[2]知, 热量多耗系数 q_{xc} 为

$$q_{xc} = \frac{1}{\alpha_x} \left(1 - \frac{w_{0x}}{w_{0c}}\right) (h_0 - t_{gs} + \tau_b) + \frac{1}{\alpha_x} (\alpha_{xr} - \frac{w_{0x}}{w_{0c}} \alpha_{xr\pm}) \cdot \sigma + \frac{1}{\alpha_x} \left(\alpha_c - \frac{w_{0x}}{w_{0c}} \alpha_{c\pm}\right) \tau_n \alpha_x = \prod_{i=1}^n d_{Gxi}$$

式中 w_{0c} 、 w_{0x} 为主系统、实际系统的汽轮机内部轴功率, kJ/kg; d_{Gxi} 为第 i 个质量单元的辅助汽水流单元进水系数; n 为质量单元的个数。

分析上式可以发现, 在上述条件下, 只要求得 d_{Gxi} 即 α_x , 即可求得热量多耗系数 q_{xc} , 从而可方便地求得机组热耗率及机组其它热经济性指标。因此,

在热力系统结构一定的情况下，当有辅助汽水流进、出热力系统时，机组热经济性定量分析计算的主要任务就是要寻找辅助汽水流的单元进水系数 d_{GXi} 计算式。

2 辅助汽水系统单元进水系数 d_{GXi} 通用计算模型

2.1 汇入表面式加热器汽侧的 d_{GXi} 通用计算模型

在进、出回热系统不同地点的 4 类辅助汽水系统中，以进、出加热器（无论是表面式加热器或汇集式加热器）汽侧的辅助汽水循环最为常见，如轴封渗漏及利用系统等。

图 1 表示辅助汽水系统的汽被送入质量单元 1 号加热器的汽侧的质量单元简图。其出水为 1kg，辅助循环的进水系数为 d_{GX1} ， d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 是辅助循环进水为 d_{GX1} 时所对应的各级加热器的单元抽汽系数。

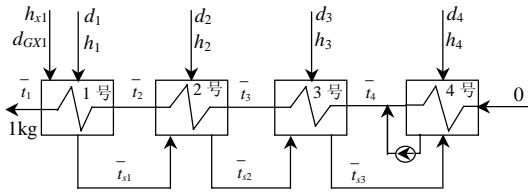


图 1 计算质量单元简图
Fig. 1 The mass unit sketch

对如图 1 所示的质量单元，按照 q 、 γ 、 τ 的定义规则^[2]，列 1 号~4 号加热器的热平衡方程及质量平衡方程，经推导可得如下矩阵方程：

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \gamma_2 q_2 \\ \gamma_3 \gamma_3 q_3 \\ \gamma_4 \gamma_4 \gamma_4 q_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} - d_{GX1} \begin{bmatrix} q_{x1} \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \end{bmatrix}$$

其中 $d_{GX1} = 1 - \sum_{i=1}^4 d_i$ 。

当辅助汽水系统的汽被分别送入 2 号~4 号加热器汽侧时，采用与前述完全相同的推导方法，可以发现，所得矩阵方程具有很强的规律性，并可写成如下通用形式：

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \gamma_2 q_2 \\ \gamma_3 \gamma_3 q_3 \\ \gamma_4 \gamma_4 \gamma_4 q_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} - d_{GXi} \begin{bmatrix} c_{x1} \\ c_{x2} \\ c_{x3} \\ c_{x4} \end{bmatrix} \dots (1)$$

其中 $d_{GXi} = 1 - \sum_{i=1}^4 d_i$ 。

$$\text{简记为： } \mathbf{B} \cdot \mathbf{d}_i = \boldsymbol{\tau}_i - d_{GXi} \mathbf{c}_{ix} \dots (2)$$

其中， \mathbf{B} 为反映系统连接方式的拓扑矩阵， $\mathbf{B} = \mathbf{b}_{ij}$ ，并且，当 $i=j$ 时， $\mathbf{b}_{ij} = \mathbf{q}_i$ ； $i > j$ 时，若第 i 级加热器接收第 j 级加热器的疏水， $\mathbf{b}_{ij} = \boldsymbol{\gamma}_i$ ；否则 $\mathbf{b}_{ij} = 0$ 。 $i < j$ 时， $\mathbf{b}_{ij} = 0$ 。 \mathbf{q}_i 、 $\boldsymbol{\gamma}_i$ 、 $\boldsymbol{\tau}_i$ 为抽汽放热量、疏水放热量及给水焓升； \mathbf{d}_i 表示单元抽汽系数。 d_{GXi} 为所研究质量单元的单元进水系数， \mathbf{c}_{xi} 为辅助汽水系统的汽被送入所研究质量单元加热器汽侧后所引起的抽汽放热量或疏水放热量的改变量；并且，当辅助汽水系统的汽被送入第 i 级表面式加热器的汽侧时，则该级加热器的 $\mathbf{c}_{xi} = \mathbf{q}_{xi} = \mathbf{h}_{xi} - \bar{t}_{si}$ ，第 1 级~第 $i-1$ 级表面式加热器的 $\mathbf{c}_{xi} = 0$ ；第 $i+1$ 级及其之后加热器的 $\mathbf{c}_{xi} = \boldsymbol{\gamma}_i$ 。当辅助汽水系统的汽送入第 i 级汇集式加热器或向凝汽器放流疏水的表面式加热器的汽侧时，该级加热器的 $\mathbf{c}_{xi} = \mathbf{q}_{xi} = \mathbf{h}_{xi} - \mathbf{c}_{i+1}$ ；且当该级加热器为汇集式加热器或向凝汽器热井或凝结水泵入口放流疏水的表面式加热器时， $\bar{t}_{i+1} = 0$ ；当该级加热器为向凝汽器放流疏水的表面式加热器时， $\bar{t}_{i+1} = \bar{t}_c$ ，其中 \bar{t}_c 为凝结水泵出口凝结水焓。

以上结论是以 4 级质量单元进行推导的，但对于任意级数的质量单元，该结论同样适用。对于 m 级的质量单元，采用同样的方法，可推导出如下矩阵方程：

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{d}_i = \boldsymbol{\tau}_i - d_{GXi} \mathbf{c}_{xi} \dots (3)$$

其中 $d_{GXi} = 1 - \sum_{i=1}^m d_i$ ， $i=1, \dots, m$ ， m 为该热力单元内加热器的级数。其它符号意义同前。一般情况下， $m \leq 4$ 。

2.2 汇入表面式加热器水侧或汇集式加热器的 d_{GXi} 通用计算模型

图 2 是辅助小水流送进带疏水泵式加热器 4 级单元 1 号加热器水侧的质量单元简图。

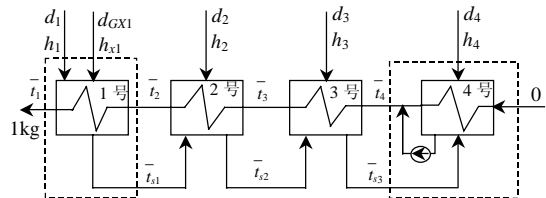


图 2 计算质量单元简图
Fig. 2 The mass unit sketch

按照 q 、 γ 、 τ 的定义法则，通过对 1~4 号加热器列质量平衡与热平衡方程，经推导可得如下形式的矩阵方程：

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \gamma_2 q_2 \\ \gamma_3 \gamma_3 q_3 \\ \gamma_4 \gamma_4 \gamma_4 q_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} - d_{GX1} \begin{bmatrix} \tau_{x1} \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix}$$

其中 $d_{GX1} = 1 - \sum_{i=1}^4 d_i$ 。

当辅助汽水系统的水被分别送入2号~4号加热器水侧时,采用与前述完全相同的推导方法,可以发现,所得矩阵方程仍具有很强的规律性,并可写成如下通用形式:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \gamma_2 q_2 \\ \gamma_3 \gamma_3 q_3 \\ \gamma_4 \gamma_4 \gamma_4 q_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} - d_{GXi} \begin{bmatrix} \tau_{x1} \\ \tau_{x2} \\ \tau_{x3} \\ \tau_{x4} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $d_{GXi} = 1 - \sum_{i=1}^4 d_i$ 。

简记为 $\mathbf{B} \cdot \mathbf{d}_i = \boldsymbol{\tau}_i - d_{GXi} \boldsymbol{\tau}_{xi}$ (5)

其中 \mathbf{B} 、 $\boldsymbol{\tau}_i$ 、 d_i 意义同前, d_{GXi} 为辅助小水流单元进汽系数; $\boldsymbol{\tau}_{xi}$ 为辅助小水流送入回热加热器进水管后所引起的主凝结水(给水)的给水焓升。当辅助小水流送入第*i*级表面式加热器的进水管时,该级加热器的 $\boldsymbol{\tau}_{xi} = \bar{t}_{xi} - \bar{t}_{i+1}$,第1级~第*i*-1级疏水放流式加热器的 $\boldsymbol{\tau}_{xi} = 0$,第*i*+1级加热器及其后各级加热器的 $\boldsymbol{\tau}_{xi} = \bar{t}_i$ 。

当辅助汽水流送进4级质量单元4号汇集式加热器(即带疏水泵式加热器或除氧器)的进水管或送进4级质量单元的凝汽器出口凝结水管道时, $\boldsymbol{\tau}_{xi} = 0$,式(2a)变为如下形式:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{d}_i = \boldsymbol{\tau}_i$$

该式就是辅助小水流送进质量单元汇集式加热器或凝汽器的通用计算模型。

以上结论是以小水流送入4级质量单元为例进行推导的,但对于任意级数的质量单元以及小水流出系统,该结论同样适用。对*m*级质量单元而言,可写出如下矩阵方程:

$$\mathbf{B} \cdot \mathbf{d}_i = \boldsymbol{\tau}_i - d_{GXi} \boldsymbol{\tau}_{xi} \quad (6)$$

$$d_{GXi} = 1 - \sum_{i=1}^m d_i$$

式中 $i=1,2,\dots,m$, m 为加热器的级数。

2.3 通过冷却器汇入回热系统 d_{GXi} 的通用计算式

中小型汽轮机的抽气器用汽和大中型汽轮机低压缸轴封漏汽一般是通过冷却器凝结为疏水再放

流到凝汽器。由于冷却器与低压加热器的相对位置的不同,可分为6种情形进行研究,即:①冷却器在凝结水泵前,低压加热器未放流疏水到凝汽器;②冷却器在凝结水泵前,低压加热器的疏水放流到凝汽器;③冷却器在最后一个质量单元之前,且最低压力加热器未放流疏水到凝汽器,而冷却器的疏水放流到凝汽器;④冷却器在最后一个质量单元之前,且最低压力加热器和冷却器都有疏水放流到凝汽器;⑤冷却器在最后一个质量单元的带疏水泵的加热器之前;⑥冷却器在向凝汽器逐级放流疏水的质量单元各级加热器之间。

采用与前述完全相同的方法,对上述6种情形经严谨的数学推导,可将它们写成如下综合形式的矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ \gamma_2 q_2 \\ \gamma_3 \gamma_3 q_3 \\ \vdots \\ \gamma_n \gamma_n \gamma_n q_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \vdots \\ \tau_n \end{bmatrix} - d_{GXi} \begin{bmatrix} e_{x1} \\ e_{x2} \\ e_{x3} \\ \vdots \\ e_{xn} \end{bmatrix} \dots \quad (7)$$

其中 $d_{GXi} = 1 - \sum_{i=1}^n d_i$ 。

其中符号 q 、 γ 、 $\boldsymbol{\tau}$ 、 d_i 、 d_{GXi} 的意义同前, e_{xi} 为辅助汽水系统通过冷却器送入回热系统时所对应的辅助抽汽放热量, $e_{xi} = q_{xi} = h_{xi} - \bar{t}_{xi}$,其中, i 表示辅助抽汽通过冷却器送入回热系统加热器的级数,而未涉及到的加热器 $e_{xi}=0$ 。

式(3)可简记为

$$\mathbf{B} \mathbf{d}_i = \boldsymbol{\tau}_i - d_{GXi} \mathbf{e}_{xi} \quad (8)$$

其中 $d_{GXn} = 1 - \sum_{i=1}^n d_i$, $i=1,\dots,n$, n 为所研究质量单元内包含的加热器级数。

2.4 辅助汽水系统 d_{GXi} 的通用计算模型

通过以上分析可以发现,按照质量单元矩阵分析法对火电机组辅助汽水系统的分析所得出的单元进汽系数 d_{GXi} 的计算式,具有很强的规律性,综合式(3)、式(6)、式(8),可以将其写作如下通用计算式:

$$\mathbf{B} \mathbf{d}_i = \boldsymbol{\tau}_i - d_{GXi} \mathbf{f}_{xi} \quad (9)$$

$$d_{GXi} = 1 - \sum_{i=1}^m d_i \quad (10)$$

式中 m 为所研究质量单元内加热器的级数。

对于式(9),做如下的分析讨论:

(1) 矩阵 B 为反映回热系统连接方式的拓扑矩阵, $B=b_{ij}$, 并且, 当 $i=j$ 时, $b_{ij}=q_i$; $i > j$ 时, 若第 i 级加热器接收第 j 级加热器的疏水, $b_{ij}=\gamma_j$, 否则, $b_{ij}=0$; $i < j$ 时, $b_{ij}=0$ 。 q_i 、 γ_j 、 τ_i 为以前述方法定义的抽汽放热量、疏水放热量、给水焓升。

(2) d_{GXi} 表示所研究辅助汽水系统对应质量单元的单元进水系数, d_i 表示其单元抽汽系数。

(3) f_{xi} 表示辅助汽水系统的汽或水汇入回热系统后所对应的抽汽放热量、疏水放热量、给水焓升。

1) 当辅助汽水系统的水汇入质量单元第 i 级表面式加热器进水管时, $f_{xi}=\tau_{xi}$, 而第 $1\sim(i-1)$ 级的加热器, $f_{xi}=0$, 第 $i+1$ 级及其之后各级加热器, $f_{xi}=\tau_i$; 此时, 式(9)也就是式(6), 其研究对象是辅助汽水系统的水汇入表面式加热器的水侧 (进水管)。

2) 当辅助汽水系统的汽或水被送入质量单元第 i 级表面式加热器汽侧时, $f_{xi}=q_{xi}$, 而第 $1\sim(i-1)$ 级的加热器, $f_{xi}=0$, 第 $i+1$ 级及其之后各级的加热器, $f_{xi}=\gamma_i$; 此时, 式(9)也就是式(3), 其研究对象是辅助汽水系统的汽汇入表面式加热器的汽侧。

3) 当辅助汽水系统通过冷却器汇入质量单元的第 i 级加热器时, $f_{xi}=q_{xi}$, 对于未涉及到的加热器, $f_{xi}=0$; 此时, 式(9)也就是式(8), 其研究对象是辅助

汽水系统通过冷却器汇入回热系统。

4) 当辅助汽水系统的汽或水被送入某一质量单元的汇集式加热器时, 对于该单元内的所有加热器, $f_{xi}=0$ 。此时, 式(9)所对应的研究对象是辅助汽水系统汇入回热系统汇集式加热器或凝汽器。

因此, 式(9)与式(10)就是辅助汽水系统所研究质量单元的单元进水系数 d_{GXi} 的通用计算式。通过它, 可以方便地求得辅助汽水系统的排汽系数 α_x 和热量多耗系数 q_{xc} 等; 从而可通过辅助汽水系统热经济指标的计算法则求得各项热经济指标的准确结果。

3 实例计算及检验

以图 3 所示功率为 300MW 火电机组为例进行热力系统计算, 计算数据见表 1 及表 2。

经计算, 上述所有辅汽所产生的热耗变化量之和为: $\sum \Delta H_{Rx} = 482.845 \text{ kJ/kwh}$, 主系统的热耗率为: $H_{R0\text{主}} = 7738.27 \text{ kJ/kwh}$, 机组热耗率为

$$H_{R0} = H_{R0\text{主}} + \sum \Delta H_{Rx} = 8221.115 \text{ kJ/kwh}$$

比较以上结果与用常规法进行实际热力系统的计算结果发现, 虽然计算过程不一样, 但是其结果却是完全相同的。

从上面的例子可看出, 本文方法是确实可行的。

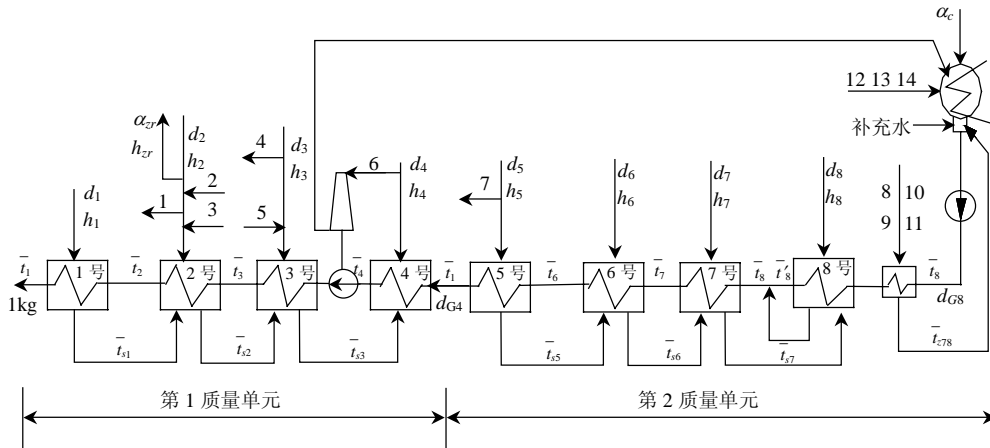


图 3 国产 300MW 机组热力系统

Fig. 3 The thermodynamic system of 300MW coal-fired power unit

表 1 300MW 火电机组工况参数整理结果

Tab. 1 Summarized properties of 300MW power plant

工况参数	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号
q_i	2083.36	2143.22	2576.98	2413.69	2468.96	2363.87	2373.92	2242.03
γ_i		190.49	128.54	38.94		70.76	105.09	11.72
τ_i	158.26	182.96	125.19	158.68	124.76	69.92	96.30	108.44

注: 主蒸汽焓 $h_0=3394.66$; 排汽焓 $h_n=2351.73$; 凝结水焓 $t_c=143.63$; 给水泵焓升 $\tau_b=28.05$; 再热器入口蒸汽焓 $h_d=3023.29$; 再热器出口蒸汽焓 $h_j=3536.17$; 再热器吸热量 $\sigma=512.88$; 机电效率 $\eta_{el}=0.9812$ 。

表2 辅助汽水系统汽水参数表
Tab.2 Parameters of auxiliary steam-water system

序号	名称	流量/(kg/h)	焓/(kJ/kg)	放热量/(kJ/kg)	备注
1	高压缸排汽管漏汽	$D_{21}=95$	$h_{21}=3024.92$		未再热(至低压轴封汽调节器)
2	高压门杆漏汽	$D_{22}=36.48$	$h_{22}=3394.66$	$q_{22}=2514.59$	未再热
3	调节级后漏汽	$D_{23}=361.24$	$h_{23}=3321.81$	$q_{23}=2441.74$	未再热
4	厂用高压蒸汽	$D_{31}=15000$	$h_{31}=3328.51$		已再热
5	中压门杆漏汽	$D_{32}=3840$	$h_{32}=3536.17$	$q_{32}=2784.64$	已再热
6	小汽轮机用汽	$D_{34}=40320$	$h_{34}=3126.28$		已再热
7	厂用低压蒸汽	$D_{5}=20000$	$h_{5}=2919.46$		已再热
8	高压缸门杆漏汽	$D_{81}=122$	$h_{81}=3394.66$	$q_{81}=2979.75$	未再热
9	高压缸轴封漏汽	$D_{82}=116$	$h_{82}=3023.29$	$q_{82}=2608.38$	未再热
10	中压缸轴封漏汽	$D_{83}=105$	$h_{83}=3126.28$	$q_{83}=2711.37$	已再热
11	低压缸轴封漏汽*	$D_{84}=727$	$h_{84}=3070.98$	$q_{84}=2656.07$	部分未再热, 部分已再热
12	中压缸轴封漏汽	$D=439$	$h=3126.28$		已再热, 经低压轴封进凝汽器
13	高压缸轴封漏汽	$D=457$	$h=3023.29$		未再热, 经低压轴封进凝汽器
14	中压缸轴封漏汽	$D=12290$	$h=3126.28$		未再热, 经低压缸进凝汽器
	补充水	$D_{6s}=35000$	$\bar{t}_{6s}=143.61$		
	小汽轮机排汽	$D_{34}=40320$	$h_{34}'=2464.77$		已再热

4 结论

火电机组热力系统热经济性的定量分析计算方法的研究具有重要的理论意义和现实意义, 它既是热力系统设计、技术改造的理论基础, 又是火电厂热力设备经济运行在线分析的实用技术。本文通过理论分析和严谨的数学推导, 给出了火电机组辅助汽水系统的定量分析计算通用模型, 其特点如下:

(1) 辅助汽水系统 d_{Gxi} 的通用计算模型与其结构具有一一对应的关系, 规律性强, 可适用于任何火电机组辅助汽水系统的定量分析与计算。

(2) 对于实际热力系统, 只要结构一定, 辅助汽水系统的 d_{Gxi} 只与本单元的抽汽放热量 q_i 、给水焓升 τ_i 及疏水放热量 γ_i 有关, 在解决许多实际问题时, 更为方便。

(3) 该方法做到了“数”与“形”的巧妙结合, 概念清晰, 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。

致谢

本文得到华北电力大学博士学位教师科研基金资助(93102022), 特此致谢。

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, 1992.12.
- [2] 陈海平, 刘吉臻, 张春发, 等. 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, 2003,23(9): 193-197.
Chen Haiping, Liu Jizhen, Zhang Chunfa *et al.* A research on the general method for calculating the exhaust coefficient of a steam turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 193-197.
- [3] 胡华进, 徐治皋. 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, 18(1): 12-15.

- Hu Huajin, Xu Zhigao. Cycle combination method and its matrix model of thermodynamic cycle system[J]. Proceedings of the CSEE, 1998,18(1): 12-15.
- [4] Chen Haiping, Zhang Chunfa, Liu Jizhen. The calculating method of thermal system for the coal-fired power unit based on mass unit[C]. Proceedings of the International Conference on Power Engineering-03, Japan, 2003.11.
 - [5] Chen Haiping, Zhang Chunfa, Liu Jizhen. The research of calculating method of heat economy of auxiliary system for the coal-fired power unit[C]. Proceeding of the International Conference on Power Engineering-03, Japan, 2003.11.
 - [6] 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): 69-78.
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): 69-78.
 - [7] 郭民臣, 魏楠, 刘文毅, 等. 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 *et al.* Steam rate transformation coefficient extraction equation enthalpy drop and steam rate of main cycle[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(2): 93-98.
 - [8] 郭民臣, 魏楠, 刘文毅, 等. 自由路径法则在电厂热力系统分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 122-126.
Guo Minchen, Wei Nan, Liu Wenyi *et al.* The application of free path rule in power plant thermodynamic system analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,22(4): 122-126.
 - [9] 张春发, 张素香, 崔映红, 等. 现行电力系统热经济性状态方程[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(11): 665-667.
Zhang Chunfa, Zhang Suxiang, Cui Yinghong *et al.* Thermo-economy state equation of modern power system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001,22 (11): 665-667.
 - [10] 闫顺林, 李永华, 杨昆, 等. 回热系统热力计算的递推通解[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 93-95.
Yan Shunlin, Li Yonghua, Yang Kun *et al.* The general solution by recursion formula of thermal calculation for the regenerative system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 93-95.

收稿日期: 2005-01-04。

作者简介:

陈海平(1963-), 男, 博士, 目前主要从事汽轮机、发电厂热力系统等方面的教学与科研工作。