

火电机组 回热系统焓损分布的矩阵算法

李永华¹, 苗鑫华¹, 李庚生², 闫顺林¹

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 天津津能投资公司, 天津 300204)

[摘要] 根据火电机组回热系统焓损分布的通用矩阵方程, 运用 MathCAD 软件计算了 200 MW 和 600 MW 机组两套典型回热系统的焓损, 并与传统焓损计算方法的计算结果进行比较, 详细介绍了该方程的应用方法和使用技巧。通过焓分析, 找出了这两套回热系统的节能潜力所在, 并用棒状图对 4 种焓分析指标进行比较, 证明了焓损率和焓损系数更能表现回热系统的完善程度。

[关键词] 火电机组; 回热系统; 焓损; 焓损通用矩阵方程; 焓分析指标

[中图分类号] TK123

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-3364(2007)03-0024-05

求取焓损的传统方法需要对每个研究对象列出焓平衡方程, 因而不能编制通用的计算机程序, 这使得用传统的焓损计算方法实时分析研究对象或进行在线指导工作量巨大且繁琐。对此, 经严密地推导论证, 首次导出了火电机组回热系统焓损分布通用矩阵方程^[1], 该方程通用、易行, 计算简单、准确, 既可计算任意火电机组回热系统的焓损分布, 也为编制焓损在线分析的计算程序以及建立焓经济学分析、焓经济学故障诊断通用数学模型奠定了理论基础。本文采用该矩阵方程计算 200 MW 和 600 MW 机组两套典型回热系统的焓损, 并将其与传统方法相比较, 证明了其正确性。最后对所得计算结果进行分析, 引入了焓分析性能指标, 分别找出了两套回热系统的节能潜力所在。

1 矩阵方程简介

回热系统焓损分布通用矩阵方程的详细说明及推导过程请见文献^[1], 本文只给出其最终结果(式(1))。

设有 n 级加热器且该方程中的元素均为代数数值, 进入系统为“+”, 离开系统为“-”。

$$\begin{bmatrix} y_{11} & & & & \\ y_{21} & y_{22} & & & \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ y_{n1} & y_{n2} & y_{n3} & \cdots & y_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum D_{1k_1} \\ \sum D_{2k_2} \\ \sum D_{3k_3} \\ \vdots \\ \sum D_{nk_n} \end{bmatrix} + \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \sum \Delta E_{1i_1} \\ \sum \Delta E_{2i_2} \\ \sum \Delta E_{3i_3} \\ \vdots \\ \sum \Delta E_{ni_n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_1 & & & & \\ & \mu_2 & & & \\ & & \mu_3 & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & \mu_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{w1} \\ D_{w2} \\ D_{w3} \\ \vdots \\ D_{wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

简记为: $Y(D_i + D_n) + \Delta E_i - \mu D_{wi} = I_i$ (2)

收稿日期: 2006-11-01

作者简介: 李永华(1961-), 女, 能源与动力工程学院动力系教授, 现在电站设备状态监测与控制教育部重点实验室从事火电机组经济性的分析研究。

E-mail: li-yonghua@263.net

2 机组回热系统焓损计算

2.1 200 MW 机组回热系统矩阵方程

按照 200 MW 机组热力系统图的给水流程将回热系统划分为 8 个控制体(图 1),其中每个控制体各包含 1 个加热器。控制体 3 还包含 1 个蒸汽冷却器和 1 个疏水冷却器,控制体 8 还包含 1 个轴封加热器和 1 个轴封冷却器。将控制体中的各股进出能量依照文献[1]的规定进行标注,写出矩阵方程(式(3))。

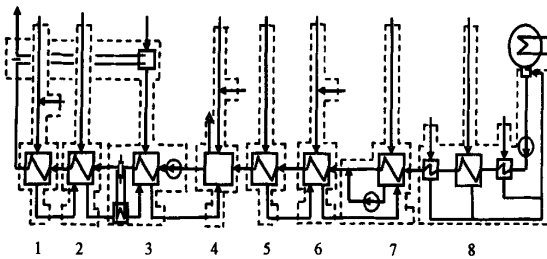


图 1 200 MW 机组回热系统

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2 & \varphi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_3 & \beta_3 & \varphi_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_4 & \beta_4 & \beta_4 & \varphi_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_5 & \varphi_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_7 & \beta_7 & \varphi_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \\ D_7 \\ D_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum D_{1k_1} \\ \sum D_{2k_2} \\ \sum D_{3k_3} \\ \sum D_{4k_4} \\ \sum D_{5k_5} \\ \sum D_{6k_6} \\ \sum D_{7k_7} \\ \sum D_{8k_8} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum \Delta E_{1l_1} \\ \sum \Delta E_{2l_2} \\ \sum \Delta E_{3l_3} \\ \sum \Delta E_{4l_4} \\ \sum \Delta E_{5l_5} \\ \sum \Delta E_{6l_6} \\ \sum \Delta E_{7l_7} \\ \sum \Delta E_{8l_8} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_8 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{w1} \\ D_{w2} \\ D_{w3} \\ D_{w4} \\ D_{w5} \\ D_{w6} \\ D_{w7} \\ D_{w8} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 600 MW 机组回热系统矩阵方程

按照 600 MW 机组热力系统图的给水流程将回热系统划分为 7 个控制体(图 2),其中每个控制体各包含 1 个加热器。控制体 7 还包含 2 个疏水冷却器和 1 个轴封冷却器。将控制体中的各股进出能量依照文献[1]的规定进行标注,写出矩阵方程(式(4))。

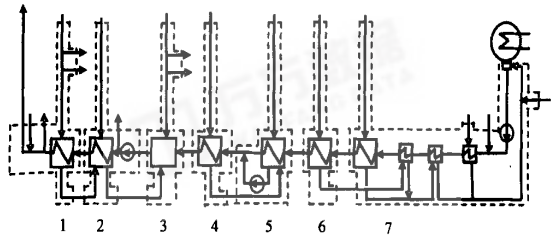


图 2 600 MW 机组回热系统

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2 & \varphi_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_3 & \beta_3 & \varphi_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \varphi_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_5 & \varphi_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varphi_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta_7 & \varphi_7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \\ D_6 \\ D_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum D_{1k_1} \\ \sum D_{2k_2} \\ \sum D_{3k_3} \\ \sum D_{4k_4} \\ \sum D_{5k_5} \\ \sum D_{6k_6} \\ \sum D_{7k_7} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sum \Delta E_{1l_1} \\ \sum \Delta E_{2l_2} \\ \sum \Delta E_{3l_3} \\ \sum \Delta E_{4l_4} \\ \sum \Delta E_{5l_5} \\ \sum \Delta E_{6l_6} \\ \sum \Delta E_{7l_7} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \mu_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_7 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_{w1} \\ D_{w2} \\ D_{w3} \\ D_{w4} \\ D_{w5} \\ D_{w6} \\ D_{w7} \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.3 矩阵方程应用

回热系统焓损分布通用矩阵方程依据焓分析通用模型、焓平衡方程、质量平衡方程经过一定的变换推导得出,应用该焓损分布通用矩阵方程的一般方法为:
(1)划分控制体。按照给水流程,每级控制体中包含 1 个加热器,最后一级控制体的给水入口划分到热井处。为便于比较轴封加热器和轴封冷却器对加热器的影响,其疏水进入到哪级控制体则将其划分到哪级之中,

同时将进入该级的轴封漏气看作第 1 类辅助汽水 D_{a1} 。本文 200 MW 机组 2 号加热器的疏水流经 1 个外置疏水冷却器,为便于比较上级疏水有无疏水冷却器对本级加热器的影响,将疏水冷却器划分到控制体 3 中。控制体 3 中还有一个蒸汽冷却器,其目的同样是为了比较有无蒸汽冷却器对该级加热器的影响,其进出的给水旁路可视为本级的第 2 类辅助汽水 D_{0m1} 。

(2)按照规定对进出控制体的各股烟流进行标注。(3)将系统原始数据整理成进出系统各股能量的烟流形式。(4)写出各个矩阵并进行计算。

2.4 计算结果比较

对两套回热系统分别用传统烟损计算方法进行手工计算和用矩阵方法通过 MathCAD 软件计算,两种方法的计算结果比较见表 1、表 2。由表 1 和表 2 看出,两种方法计算结果的绝对误差和相对误差均很小,在工程允许的范围之内,验证了回热系统烟损分布通用矩阵方程的正确性。

3 机组回热系统烟分析

3.1 性能指标

以烟来分析评价机组性能有不同的评价指标。本文用矩阵方法计算出各个控制体的烟损之后,选取以下 4 种性能指标来分析机组热力系统的性能。

(1)加热器的目的烟效率,即达到目的(将给水加热)所得到的烟与付出代价所消耗的烟的比值,它反映出回热系统各设备的热力学完善程度。

(2)加热器的烟损率,即加热器的烟损与回热系统总烟损之比,它反映出加热器的烟损在回热系统总烟损中所占的比重。

(3)加热器的烟损系数,即加热器的烟损与回热系统总消费烟的比值,它反映出加热器的烟损在供给回热系统总的烟量中所占的比重,同时能反映烟损在系统各个环节上的分布,因而可以明确指出节能潜力所在。

表 1 200 MW 机组回热系统烟损计算 kJ/s

控制体	传统方法	矩阵方法	绝对误差	相对误差
1	427.050 567 469 665	427.050 567 469 663	$1.989\ 520 \times 10^{-12}$	$4.658\ 745 \times 10^{-15}$
2	455.231 103 152 223	455.231 103 152 22	$3.012\ 701 \times 10^{-12}$	$6.617\ 960 \times 10^{-15}$
3	629.685 183 960 666	629.685 183 960 676	$-1.011\ 81 \times 10^{-11}$	$-1.606\ 86 \times 10^{-14}$
4	888.935 353 585 221	888.935 353 585 224	$-2.955\ 86 \times 10^{-12}$	$-3.325\ 17 \times 10^{-15}$
5	483.275 047 623 558	483.275 047 623 556	$2.557\ 954 \times 10^{-12}$	$5.292\ 957 \times 10^{-15}$
6	593.072 870 015 098	593.072 870 015 098	0	0
7	824.055 963 092 790	824.055 963 092 791	$-4.547\ 47 \times 10^{-13}$	0
8	1 234.224 402 170 72	1 234.224 402 170 72	$4.547\ 474 \times 10^{-13}$	0

表 2 600 MW 机组回热系统烟损计算 kJ/s

控制体	传统方法	矩阵方法	绝对误差	相对误差
1	2 196.157 952 561 63	2 196.157 952 561 63	0	0
2	1 768.830 596 991 79	1 768.830 596 991 76	$2.910\ 38 \times 10^{-11}$	$1.645\ 37 \times 10^{-14}$
3	3 736.065 900 372 14	3 736.065 900 372 13	$7.275\ 96 \times 10^{-12}$	$1.947\ 49 \times 10^{-15}$
4	2 199.599 602 490 71	2 199.599 602 490 71	0	0
5	2 491.311 244 738 00	2 491.311 244 738 00	0	0
6	2 556.121 763 940 31	2 556.121 763 940 32	$-5.456\ 97 \times 10^{-12}$	$-2.134\ 86 \times 10^{-15}$
7	2 445.999 518 936 48	2 445.999 518 936 47	$1.818\ 99 \times 10^{-12}$	0

(4)单位烟耗,即生产单位数量的产品所耗费的供给烟,它反映出各个加热器的燃料消耗情况。

本文 200 MW 和 600 MW 机组回热系统热力性能指标计算结果见表 3 和表 4。

表 3 200 MW 机组回热系统烟分析性能指标计算结果

控制体	烟损 / $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$	烟效率 /%	烟损率 /%	烟损系数	单位烟耗
1	427.1	94.3	7.71	0.008 0	1.06
2	455.2	94.7	8.22	0.008 5	1.06
3	629.7	92.8	11.4	0.011 7	1.08
4	889.0	91.5	16.1	0.016 6	1.09
5	483.3	89.0	8.73	0.009 0	1.12
6	593.1	81.6	10.7	0.011 0	1.23
7	824.1	85.5	14.9	0.015 3	1.17
8	1 234	71.1	22.3	0.023 0	1.41

表 4 600 MW 机组回热系统烟分析性能指标计算结果

控制体	烟损 / $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$	烟效率 /%	烟损率 /%	烟损系数	单位烟耗
1	2 196	95.0	12.6	0.012 0	1.05
2	1 769	95.1	10.2	0.009 7	1.05
3	3 736	88.7	21.5	0.020 5	1.13
4	2 200	90.2	12.6	0.012 0	1.11
5	2 491	88.9	14.3	0.013 6	1.12
6	2 556	82.5	14.7	0.014 0	1.21
7	2 446	75.6	14.1	0.013 4	1.32

3.2 烟分析

(1)从表3中看出200 MW机组8号加热器的烟效率最低,烟损率和烟损系数最大,单位烟耗最高。这是因为该处有1个轴封加热器和1个轴封冷却器,且其疏水均流回热井,在该处各股烟流混合,混合的流动阻力和各股烟流的参数差别都较大,其不可逆性也较大。同时可以看出,4号和7号加热器的烟损率和烟损系数也较大,这是因为4号为混合式加热器,7号的疏水方式为自流式。在这两处同样是由于烟流混合,各股流的参数差别较大。因此,8号、4号、7号加热器为该回热系统的薄弱环节,具有改造潜力。

(2)从表4中看出,600 MW机组的7号加热器的烟效率较低,这是因为该机组有2个凝汽器,2股凝结水混合到一起作为给水送往锅炉,因此该处效率较低;3号加热器的烟损率和烟损系数很大,这是由于该加热器为混合式,该处的流动阻力及各股流的参数差别都较大,混合后造成不可逆性较大,因此优化该加热器可较大提高该机组回热系统的热力性能。

3.3 棒状图比较

由于本文选取的600 MW机组回热系统有7个加热器,其中2个高压加热器、1个除氧器和4个低压加热器。为便于对两套回热系统进行棒状图比较,将600 MW机组回热系统加热器由2开始编号,使两套系统的除氧器相对应。

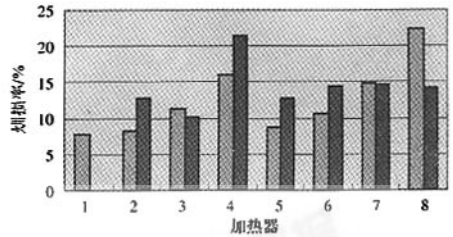


图5 加热器烟损率比较

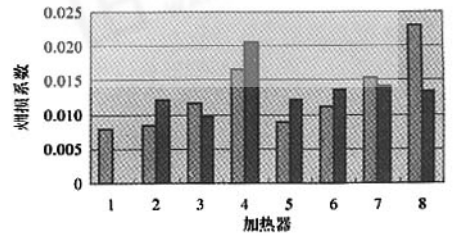


图6 加热器烟损系数比较

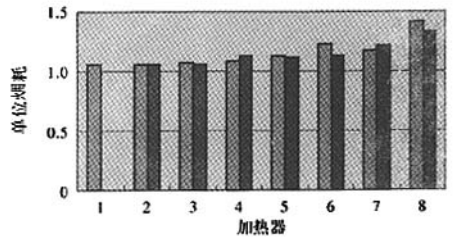


图7 加热器单位烟耗比较

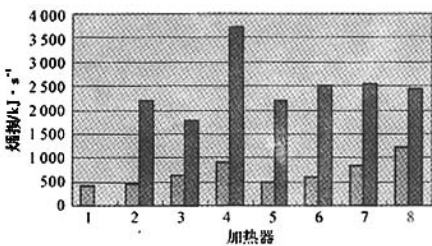


图3 加热器烟损比较

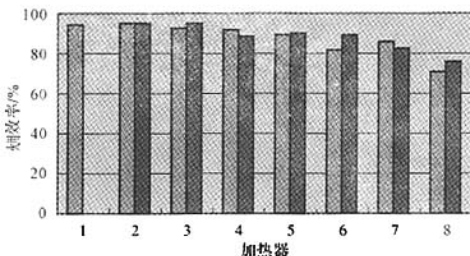


图4 加热器烟效率比较

通过棒状图比较可以看出,由于机组的输出功率不同,其加热器给水流量也不同,从而造成不同机组回热系统的烟损差别也较大。因此,单独比较烟损不易得出不同回热系统薄弱环节的共性,同时各个加热器的烟效率和单位烟耗差别并不大,不能明显揭示回热系统的节能所在。而对比200 MW和600 MW机组回热系统加热器的烟损率和烟损系数,则可看出各个加热器的差别较大,处于各股烟流混合处的除氧器具有很大的节能改造潜力,证明这两项性能指标在反映回热系统各设备的热力学完善程度方面比烟效率和单位烟耗更好。

4 结论

(1)用矩阵法计算出的回热系统烟损与用传统方

法计算出的焓损相比,其相对误差和绝对误差极小,证明该矩阵方程的正确性和通用性。

(2) 由棒状图比较可以看出,由于机组的输出功率不同,其加热器给水流量也不同。因此不同机组回热系统的焓损差别也较大,不宜比较;而焓效率和单位焓耗的差别并不大,也不能明显揭示回热系统的节能所在;焓损率和焓损系数则可鲜明地比较出机组内部不同加热器的焓损大小和节能部位,同时还可以对不同机组进行比较,从而找出电厂回热系统节能之关键所在。

(3) 本文计算的 200 MW 机组回热系统 8 号加热器和轴封加热器以及轴封冷却器的疏水均回至热井,4 号加热器为混合式加热器,7 号加热器的疏水方式为疏水自流式,因此这 3 处所处位置均有多股焓流混合,造成其焓损率和焓损系数均较大,因而这 3 个加热器是该系统的薄弱环节。

(4) 本文计算的 600 MW 机组 3 号加热器由于是混合式加热器,其内部焓流多股混合,造成焓损率和焓损系数较大,是该机组回热系统节能关键之所在。

(5) 通过棒状图比较可以看出,回热系统除氧器的焓损率和焓损系数都较大,其原因是各股焓流均在该处混合,混合的流动阻力和各股焓流的端差都较大,其不可逆性也较大,因此回热系统的除氧器具有一定的节能潜力。

【参 考 文 献】

[1] 李永华,李庚生,闫顺林.火电机组回热系统焓损分布通用矩阵方程[J].动力工程,2006,26(4):595-598.
 [2] H Y Kwak,D J Kim,J S Jeon. Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants[J]. Energy,2003,28:343-360.
 [3] 林万超.火电厂热系统节能理论[M].西安:西安交通大学出版社,1994.
 [4] 王加璇,张树芳.焓方法及其在火电厂中的应用[M].北京:水利电力出版社,1993.
 [5] 钟史明.具有焓参数的水和水蒸气性质参数手册[M].北京:水利电力出版社,1989.
 [6] 郑体宽.热力发电厂[M].北京:中国电力出版社,2001.
 [7] 宋之平.节能原理[M].北京:水利电力出版社,1985.

EXERGY LOSS DISTRIBUTION MATRIX ARITHMETIC OF REGENERATIVE SYSTEMS OF COAL - FIRED POWER UNIT

LI Yong - hua¹, MIAO Xin - hua¹, LI Geng - sheng², YAN Shun - lin¹

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Tianjin Jinneng Investment Co., Tianjin 300204, China)

Abstract: It calculates the exergy loss of 2 sets of typical regenerative systems(200MW & 600MW)by the software MathCAD, based on the generalized exergy loss distribution matrix equation of regenerative systems of coal-fired power unit; then compared with the results which calculated by the traditional calculating methods. Furthermore, the application methods of the equation and the usage skills are introduced in detail. Again, exergy analysis of the results is made to find out the potential of the energy saving. Then 4 kinds of exergy analysis indication were compared through the bar graphs to prove that the exergy loss ratio and the exergy loss coefficient could represent the perfect degree of the regenerative systems.

Key words: coal - fired power unit; regenerative systems; exergy loss; generalized exergy loss distribution matrix equation; exergy-analysis indication

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告