

基于矩阵法的 660 MW 机组 回热系统焓损分析

薛青鸿,吕智嘉,李亚峰

神华国华陈家港发电有限公司,江苏 盐城 224631

[摘要] 根据某 660 MW 机组回热系统结构及参数,给出了焓损分布矩阵方程。选取 100%、75%、50%、30% 负荷工况点,对回热加热器焓损和焓效率进行了定量计算与分析。结果表明,当传热量及加热器结构一定时,为了降低换热温差,则必须设法增大换热系数,如减小阀门阻力、提高工质流速等。

[关键词] 660 MW 机组;回热系统;矩阵方程;焓损;焓效率;换热

[中图分类号] TK222

[文献标识码] A

[文章编号] 1002-3364(2011)04-0048-05

[DOI 编号] 10.3969/j.issn.1002-3364.2011.04.048

EXERGY LOSS ANALYSIS OF REGENERATIVE SYSTEM OF ONE 660 MW UNIT BASED ON MATRIX METHOD

XUE Qinghong, LÜ Zhijia, LI Yafeng

Shenhua Guohua Chenjiagang Power Generation Co Ltd, Yancheng 224631, Jiangsu Province, PRC

Abstract: Based on the structure and parameters of the regenerative system for one 660 MW unit, the matrix equation of exergy loss distribution has been given. Selecting operating condition point under 100%, 75%, 50%, and 30% load, the exergy loss and exergy efficiency of regenerative heater has been calculated. The calculation and analysis show that the heat exchange coefficient must try to be increased for reducing the temperature difference of heat exchange at certain heat transfer and heater structure, including decrease of valve resistance, and enhance of working medium flow speed, etc.

Key words: 660 MW unit; regenerative system; matrix equation; exergy loss; exergy efficiency

火电机组回热系统焓损分析是节能研究的核心,在分析其焓损分布时,将回热系统按物流和焓流状况划分为若干级控制体,对每一控制体列出焓平衡方程,再通过数学推导转化为矩阵形式,从而得出火电机组回热系统焓损分布通用矩阵方程,可显著减少常规算法

带来的繁琐,易于电算。本文建立了 660 MW 机组回热系统焓损方程,分别计算了 100%、75%、50%、30% 额定负荷下各加热器焓损及焓效率,并对其进行焓损分析。

作者简介: 薛青鸿(1983-),男,福建泉州人,2005年7月毕业于华北电力大学热能与动力工程专业,工学学士,助理工程师,现从事 660 MW 火电机组集控运行工作。

E-mail: xueqinghong@sina.com

1 焓损分布通用矩阵方程

1.1 参数定义

(1) φ_i 为汽轮机第 i 级抽汽在加热器中的比焓降, 称抽汽比焓降, kJ/kg 。

对疏水自流表面式加热器:

$$\varphi_i = e_i - e_{di} \quad (1)$$

对汇集式加热器:

$$\varphi_i = e_i - e_{w(i+1)} \quad (2)$$

式中: e_i 为第 i 级加热器抽汽比焓; e_{di} 为第 i 级加热器疏水比焓; e_{wi} 为第 i 级加热器出口水比焓。

(2) β_i 为 1 kg 疏水在第 i 级加热器中的比焓降, 称疏水比焓降, kJ/kg 。

对疏水自流表面式加热器:

$$\beta_i = e_{d(i-1)} - e_{di} \quad (3)$$

对汇集式加热器:

$$\beta_i = e_{d(i-1)} - e_{w(i+1)} \quad (4)$$

(3) μ_i 为 1 kg 给水(或凝结水)在第 i 级加热器中的比焓升, kJ/kg 。

$$\mu_i = e_{wi} - e_{w(i+1)} \quad (5)$$

1.2 通用矩阵方程

依据焓平衡及质量平衡, 选取火电机组热力系统, 划分级控制体, 建立常规能量平衡方程, 通过数学矩阵理论的转换推导, 得出文献[1-3]所提出的焓损通用矩阵方程:

$$\mathbf{Y}(\mathbf{D}_i + \mathbf{D}_{ki}) + \Delta \mathbf{E}_{i1} - \mu \mathbf{D}_{wi} = \mathbf{I}_i \quad (6)$$

式中: \mathbf{Y} 为一下三角矩阵, 矩阵的元素 y_{ij} (i 为行, j 为

列), 当 $i=j$ 时 $y_{ij} = y_{ji} = \varphi_i$, 当 $i < j$ 时 $y_{ij} = 0$, 当 $i > j$

$$\text{时 } y_{ij} = \begin{cases} \beta_i (\text{i 级控制体接受 j 级疏水}) \\ 0 (\text{i 级控制体不接收 j 级疏水}) \end{cases}; \mathbf{D}_i、\mathbf{D}_{ki} \text{ 分别}$$

为各级控制体抽汽量组成的矩阵和进入第 i 级控制体中第 1 类辅助汽水流量的代数和构成的矩阵; $\Delta \mathbf{E}_{i1}$ 为进入各级控制体辅助汽水焓的代数和构成的矩阵; μ 为对角矩阵, 主对角线上的元素为各级控制体给水(或凝结水)的比焓升; \mathbf{D}_{wi} 为流出各级控制体的主凝结水(或给水)流量组成的矩阵; \mathbf{I}_i 为各级控制体的焓损矩阵。

2 660 MW 机组回热系统焓损计算与分析

2.1 焓损矩阵方程

图 1 为某 660 MW 机组回热系统, 该回热系统具有 8 段非调整抽汽, 配有 1 台外置疏水冷却器(吸收 7、8 号低压加热器(低加)疏水放热量用于加热主凝结水), 6 号低加疏水通过疏水泵送至 5 号低加凝结水侧入口, 汽轮机冷端系统为双背压凝汽器。根据回热系统级控制体划分原则, 将该回热系统划分为 8 个控制体(H1~H8), 其中 7 个控制体各包含 1 个加热器, 1 个控制体包含除氧器。给水泵和低加疏水泵分别划入控制体 H3 和 H6 中, 控制体 H8 还包含有一个疏水冷却器和一个轴封加热器, 而且控制体 H8 的给水入口划分到热井处, 同时将进入该级的轴封漏汽确定为第一类辅助汽水 D_{iki} 。

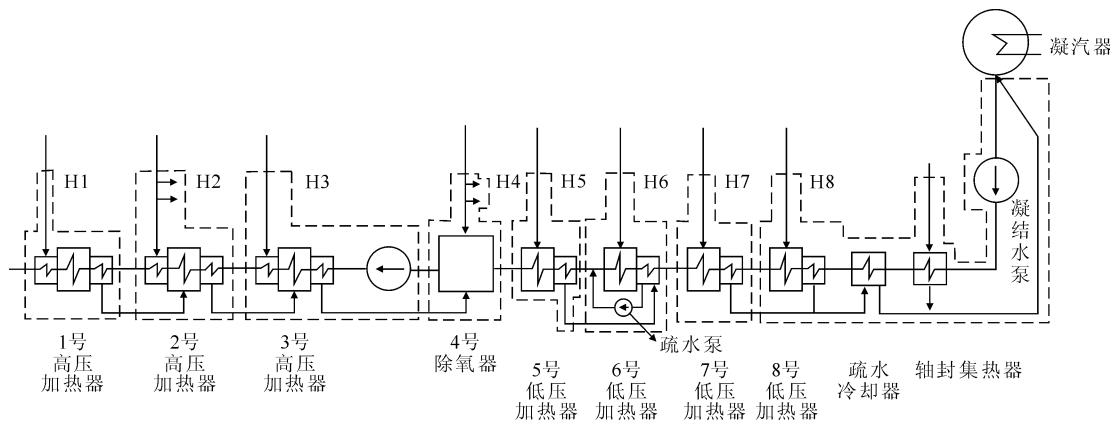


图 1 660 MW 机组回热系统

依据焓损分布的通用矩阵方程, 数学推导后可得

出 660 MW 机组回热系统焓损矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{I}_4 \\ \mathbf{I}_5 \\ \mathbf{I}_6 \\ \mathbf{I}_7 \\ \mathbf{I}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & & & & & & & & & & \\ \beta_2 & \varphi_2 & & & & & & & & & \\ \beta_3 & \beta_3 & \varphi_3 & & & & & & & & \\ \beta_4 & \beta_4 & \beta_4 & \varphi_4 & & & & & & & \\ & & & & \varphi_5 & & & & & & \\ & & & & \beta_6 & \varphi_6 & & & & & \\ & & & & & & \varphi_7 & & & & \\ & & & & & & & \beta_8 & \varphi_8 & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ \mu_4 \\ \mu_5 \\ \mu_6 \\ \mu_7 \\ \mu_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{w1} \\ \mathbf{D}_{w2} \\ \mathbf{D}_{w3} \\ \mathbf{D}_{w4} \\ \mathbf{D}_{w5} \\ \mathbf{D}_{w6} \\ \mathbf{D}_{w7} \\ \mathbf{D}_{w8} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$g \begin{bmatrix} \mathbf{D}_1 \\ \mathbf{D}_2 \\ \mathbf{D}_3 \\ \mathbf{D}_4 \\ \mathbf{D}_5 \\ \mathbf{D}_6 \\ \mathbf{D}_7 \\ \mathbf{D}_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sum \mathbf{D}_{2k2} \\ 0 \\ \sum \mathbf{D}_{4k4} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sum \mathbf{D}_{8k8} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \sum \mathbf{E}_{2/2} \\ 0 \\ \sum \mathbf{E}_{4/4} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sum \mathbf{E}_{8/8} \end{bmatrix} -$$

2.2 焓计算

表1列出660 MW机组回热系统各控制体在100%、75%、50%、30%负荷工况下主要汽水参数。取环境条件:大气压力 $p_0 = 101.15 \text{ kPa}$,环境温度 $T_0 = 298.15 \text{ K}$,经计算后所需主要参数(φ_i 、 β_i 、 μ_i)见表2,计算结果汇总(焓损、焓效率)见表3,对应的棒状图见图2、图3。

表1 660 MW 机组回热系统控制体主要汽水参数

	项目	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8
660 MW	抽汽压力/MPa	7.259	5.529	2.512	1.180	0.547	0.238	0.035	0.017
	抽汽温度/°C	401.20	363.50	493.60	383.50	283.70	194.50	76.48	58.60
	疏水温度/°C	275.9	229.8	198.0		129.1	125.9	72.5	56.6
	给水压力/MPa	30.40	30.50	30.60	1.17	1.36	1.41	1.46	1.51
	给水温度/°C	290.0	270.3	224.2	186.6	152.4	123.5	69.7	53.8
	抽汽量/kg·s ⁻¹	24.48	47.46	22.67	21.48	19.06	31.91	9.73	11.65
495 MW	给水量/kg·s ⁻¹	498.772	498.772	498.772	498.772	382.686	382.686	331.719	331.719
	抽汽压力/MPa	5.413	4.120	1.889	0.923	0.421	0.186	0.028	0.014
	抽汽温度/°C	406.5	369.1	495.9	391.1	289.1	200.1	70.5	56.5
	疏水温度/°C	257.7	215.1	185.4		121	117.8	67.5	52.9
	给水压力/MPa	22.38	22.43	22.48	0.91	1.10	1.13	1.16	1.19
	给水温度/°C	270.6	252.1	209.5	175.7	142.7	115.1	64.7	50.2
330 MW	抽汽量/kg·s ⁻¹	15.30	30.13	15.31	15.29	13.07	22.20	6.63	7.03
	给水量/kg·s ⁻¹	361.373	361.373	361.373	361.373	285.346	285.346	250.078	250.078
	抽汽压力/MPa	3.631	2.765	1.281	0.648	0.292	0.130	0.020	0.011
	抽汽温度/°C	412.3	375.4	498.2	398.3	294.6	206.0	64.2	49.9
	疏水温度/°C	234.9	196.5	169.0		110.3	107.2	60.3	47.0
	给水压力/MPa	14.91	14.94	14.96	0.63	0.83	0.84	0.86	0.87
198 MW	给水温度/°C	246.4	229.4	190.9	160.9	129.9	104.7	57.4	44.2
	抽汽量/kg·s ⁻¹	8.32	16.68	9.12	9.46	7.89	13.75	4.04	2.85
	给水量/kg·s ⁻¹	235.782	235.782	235.782	235.782	192.220	192.220	170.580	170.580
	抽汽压力/MPa	2.280	1.741	0.814	0.419	0.189	0.085	0.013	0.007
	抽汽温度/°C	410.5	374.6	500.3	402.9	298.8	210.8	55.6	43.1
	疏水温度/°C	211.1	176.8	151.4		98.2	95.1	51.5	40.0
198 MW	给水压力/MPa	11.54	11.54	11.55	0.40	0.60	0.61	0.61	0.62
	给水温度/°C	220.8	205.5	171.2	144.0	115.6	92.6	48.7	37.2
	抽汽量/kg·s ⁻¹	4.24	8.69	5.08	5.31	4.46	8.00	2.21	0.33
	给水量/kg·s ⁻¹	145.361	145.361	145.361	145.361	122.038	122.038	109.593	109.593

表 2 经计算后的控制体主要参数

项目	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	
660 MW	$\varphi_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	937.6	956	1 115.1	952.5	777.7	597.1	310.7	158.6
	$\beta_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		87.4	59.0	68.3		3.8		12.0
	$\mu_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	44.0	89.8	53.0	48.5	34.4	43.3	7.2	4.7
495 MW	$\varphi_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	959	971.4	1 105.4	942.8	757.1	576.3	286.0	192.9
	$\beta_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		84.3	52.1	59.3		3.6		9.9
	$\mu_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	38.9	78.8	47.6	44.1	30.1	37.9	6.2	3.4
330 MW	$\varphi_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	978.7	974.9	1 084.1	921.0	725.2	543.7	244.8	156.8
	$\beta_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		70.7	43.7	50.3		2.9		6.7
	$\mu_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	32.9	65.9	40.1	38.5	24.9	31.1	4.5	1.8
198 MW	$\varphi_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	973.9	955.2	1 052.5	883.7	684.6	500.0	193.9	111.7
	$\beta_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		56.3	35.9	40.5		2.4		4.1
	$\mu_i/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	26.5	53.5	33.8	30.9	20.4	24.2	2.9	1.1

表 3 控制体计算结果汇总

项目	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	
660 MW	烟损/ $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$	1 007.50	2 721.85	3 089.02	2 726.52	1 657.64	2 554.21	634.11	405.5
	烟效率/%	95.6	94.3	89.5	89.9	88.8	86.6	79.0	79.4
495 MW	烟损/ $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$	615.41	2 082.11	2 089.35	2 080.87	1 306.26	2 026.14	345.68	571.45
	烟效率/%	95.8	93.2	89.2	88.5	86.8	84.2	81.8	59.8
330 MW	烟损/ $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$	385.62	1 311.64	1 513.87	1 350.86	935.55	1 520.71	221.38	166.90
	烟效率/%	95.3	92.2	86.2	87.0	83.6	79.7	77.6	64.8
198 MW	烟损/ $\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$	277.30	762.64	897.72	930.23	563.70	1 052.33	110.71	37.07
	烟效率/%	93.3	91.1	84.6	82.8	81.5	73.7	74.2	76.5

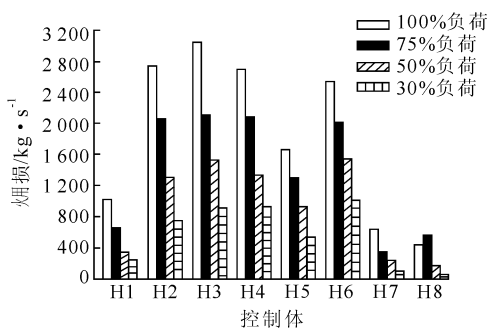


图 2 烟损比较

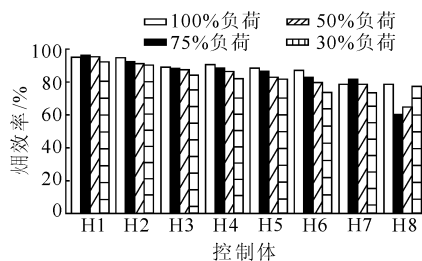


图 3 烟效率比较

2.3 烟分析

(1) 以烟平衡为基础的矩阵算法, 适合电算, 也使

得文献[1-3]提出的烟损通用矩阵方程在分析回热系统热经济指标、找出并改进节能薄弱环节方面具有了极强的实用性。

(2) 进入加热器的抽汽、疏水及辅助烟流的烟值和与流出加热器的疏水烟值的差值是该加热器获得效率所付出的代价烟, 流出加热器的给水烟值与流入加热器的给水烟值的差值是该加热器获得效率的收益烟。对给水流量相同的加热器, 收益烟的大小只能反映出给水在加热器中做功能力提高了多少。

(3) 按照效率的定义, 加热器烟效率是其收益烟与代价烟的比值。烟损只能反映出加热器烟损失量, 不能用来评价加热器的热力学完善程度, 而烟效率才能真正反映出加热器的热力学完善情况。从图 2、图 3 可以看出, 在某一负荷点下, 加热器烟效率按加热器压力等级基本由高到低排列, 这主要是受温差及压降的影响, 其差值越大, 不可逆程度越深, 致使烟效率降低。

(4) 对照在各负荷点下, 随着负荷的降低, 各加热器烟损逐渐减少, 因为随着负荷的降低, 流入加热器的给水流量降低, 使得加热器的加热量降低, 进而烟损减少。

(5) 不同工况下回热系统各加热器(1~3号, 5~7

号)和除氧器的焓效率总体随着负荷的降低而降低,对于8号加热器,随着负荷的降低,加热器换热温差降低较多,不可逆程度减缓,因而焓效率随负荷的降低呈现上升的态势。

(6)在计算中将4号除氧器与8号加热器所在的控制体按汇集式考虑,尤其是8号控制体包含有1个疏水冷却器、1个轴封加热器,同时还有多股焓流混合进入该控制体,各参数差别较大,混合后不可逆程度更深,使效率较低。该处系统为薄弱环节,有一定的节能潜力。

(7)计算结果表明,加热器必然存在着因有限传热温差和流体流动的压力降引起的焓损失,这是最主要的两项内部损失。当传热量及加热器结构一定时,为了降低换热温差,必须设法增大传热系数,如减小管路阀门阻力、提高工质流速等,为加热器焓优化指明了方向。

3 结论

(1)在电厂回热系统结构一定时,焓损分布可用焓损通用矩阵方程直接描述,相对于传统算法,该方程具有快速、简洁、适合电算的优点,在回热系统节能分析中具有极强的实用性。

(2)加热器的焓损随着加热器压力等级和负荷的降低而减少,不同工况下加热器(1~3号,5~7号)及

除氧器的焓效率基本上随着负荷的降低而降低,8号加热器因负荷降低时换热温差减小,使得焓效率呈现上升的趋势。

(3)对于汇集式加热器(4号除氧器和8号低加),因多股焓流混合使得参数差别较大,焓效率较低,是系统的薄弱环节,可通过运行方式的调整、技术改造等手段,挖掘更多的节能潜力。

[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] 李永华,苗鑫华,李庚生,等. 火电机组回热系统焓损分布的矩阵算法[J]. 热力发电,2007,36(3):24-28.
- [3] 李永华,闫顺林,李铭,等. 回热系统热力计算的新方法[J]. 河北电力技术,2001,20(6):5-6.
- [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] 郭江龙,张树芳,宋之平,等. 电厂热力系统能效分布矩阵方程式及其应用[J]. 热能动力工程,2004,19(1):29-32.
- [6] 郭江龙,张树芳,宋之平. 热力系统广义 $q-\gamma-\tau$ 矩阵方程式及其应用[J]. 热力发电,2006,35(2):11-13,28.
- [7] 邢德山,阎维平,刘亚芝. 火电厂热力系统矩阵分析方法[J]. 华北电力大学学报,2006,33(4):27-31.
- [8] 王连启,张阴智. 火电机组回热系统效率通用矩阵方程[J]. 能源技术,2008,29(4):200-202.

(上接第44页)

(2)在运用模糊层次分析法对凝汽器真空降低影响因素进行权重计算时,在隶属度的选择上,应考虑机组实际运行情况和相关数据。

(3)通过对华能汕头电厂3号机组凝汽器真空降低影响因素的分析与计算,最终得到给水泵轴端密封不严密C6所占权重最大(0.296)。其次为换热管束脏污C2(0.189)。

(4)在某次机组起动期间,经过对凝结水系统、轴封系统、循环水系统及凝汽器本体进行试验分析,最终确定在汽动给水泵密封水(以凝结水为密封水)回水管路处确实存在漏气点而使真空系统漏入空气,这与运用模糊层次分析法得到的结论是一致的。

[参 考 文 献]

- [1] 张吉军. 模糊层次分析法(FAHP)[J]. 模糊系统与数学,2000,14(2):80-88.
- [2] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1988.
- [3] 吕跃进,覃柏英,王玉燕. 模糊判断矩阵一致性逼迫和调整的一种新方法[J]. 重庆工学院学报,2004,18(6):49-52.
- [4] 赵洪字,李蔚,盛德仁,等. 基于BP神经网络的凝汽器故障诊断研究[J]. 电站系统工程,2004,20(6):32-34.
- [5] 江宁,曹祖庆. 影响汽轮机凝汽器真空主要因素作用分析[J]. 热力透平,2007,36(4):207-211.
- [6] 张建华,侯国莲,张巍,等. 一种基于模糊规则和遗传算法的凝汽器故障诊断方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(4):205-209.