

## 660 MW机组加热器端差对热经济性的影响

马一博, 刘鑫屏

引用本文:

马一博, 刘鑫屏. 660 MW机组加热器端差对热经济性的影响[J]. 南方能源建设, 2021, 8(1): 93–99.

MA Yibo, LIU Xinping. The Effect of Terminal Temperature Difference of Heater in a 660 MW Unit on Heat Economy[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 93–99.

---

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

### 1000MW超超临界燃煤机组高压加热器端差取值分析

Terminal Temperature Difference Value Analysis of High Pressure Heater for 1 000 MW Ultra–supercritical Coal–fired Unit  
南方能源建设. 2016, 3(z1): 14–17 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.S1.004>

### 蛇形管高压加热器用于1000MW二次再热机组的可行性分析

Feasibility Analysis on the Application of High Pressure Serpentine Heater in 1 000 MW Coal–fired Power Plant with Double Re–heating Cycles  
南方能源建设. 2017, 4(1): 44–48 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.01.007>

### 两级除氧器热力系统研究

Research on Thermal System with Double–deaerator  
南方能源建设. 2020, 7(4): 98–101 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.015>

### 超超临界机组邻炉蒸汽加热系统优化研究

Optimization Research on Adjacent Boiler Heating System of Ultra Supercritical Unit  
南方能源建设. 2016, 3(2): 127–130,20 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.024>

### 采用再热温度630℃的1000 MW新一代超超临界二次再热机组可行性研究

Feasibility Study on 1000 MW New Generation Ultra–supercritical Unit with Double Re–heating Cycles at 630 °C  
南方能源建设. 2018, 5(3): 33–41 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.005>

# 660 MW 机组加热器端差对热经济性的影响

马一博<sup>✉</sup>, 刘鑫屏

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 保定 071003)

**摘要:** [目的] 加热器的端差是影响机组热经济性的主要原因之一, 准确定量计算加热器端差对热经济性的影响具有十分重要的意义。[方法] 将某 660 MW 机组作为研究对象, 用等效热降法分别计算了 THA、80%THA、60%THA 和 40%THA 四种工况下各级加热器端差对热耗率的影响, 并对比分析了同一级加热器的端差在不同工况下对热耗率的影响及其变化规律。[结果] 结果表明, 各工况下端差对热耗率影响较大的是最后一级高加和 2 号低加, 而且机组出力越大, 同一级高加的端差对热耗率的影响逐渐变大, 同一级低加的端差对热耗率的影响逐渐变小。[结论] 研究结果有助于指导机组的实际运行, 提高机组的热经济性。

**关键词:** 加热器; 端差; 热经济性; 等效热降; 热耗率

中图分类号: TM611; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)01-0093-07

开放科学(资源服务)二维码:



## The Effect of Terminal Temperature Difference of Heater in a 660 MW Unit on Heat Economy

MA Yibo<sup>✉</sup>, LIU Xinping

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** [Introduction] The heater's terminal temperature difference is one of the main reasons that affect the heat economy of the unit. It has great significance to accurately and quantitatively calculate the effect of heater's terminal temperature difference on heat economy. [Method] A 660 MW unit was taken as the research object, the equivalent heat drop method was used to calculate the effect of the heater's terminal temperature difference on the heat rate under the four operating conditions of THA, 80% THA, 60% THA and 40% THA. The influence of the terminal temperature difference of the same stage heater on the heat rate under different working conditions and its changing law were analyzed. [Result] The results showed that the terminal temperature difference of the last stage high pressure heater and No. 2 low pressure heater have a greater influence on the heat rate under various operating conditions. As the output of the unit increases, the effect of the terminal temperature difference of the same stage of high pressure heater on the heat rate gradually becomes larger, and the effect of the terminal temperature difference of the same stage of low pressure heater on the heat rate gradually becomes smaller. [Conclusion] The research results are helpful for guiding the actual operation of the unit and improving the thermal economy of the unit.

**Key words:** heater; terminal temperature difference; heat economy; equivalent enthalpy drop; heat rate

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

现阶段火力发电由于其稳定、成本较低的优点, 仍然是我国发电的主力, 火力发电的节能减排

对减少环境污染所带来的环境和社会问题有着重要的意义。汽轮机回热系统中的回热加热器是组成火电机组回热系统的主要设备之一, 同时也是电厂的核心部分, 其运行状况的良好与否直接影响着机组的热经济性<sup>[1]</sup>。加热器在工作过程中对回热系统产生影响的主要原因之一就是其端差, 另外由于

收稿日期: 2020-06-19 修回日期: 2020-11-11

基金项目: 国家重点研发计划“提升供热机组电出力调节能力的蒸汽系统流程改造”(2017YFB0902100); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目“供热机组灵活性提升理论及工程技术研究”(2017MS132)

汽轮机抽汽管道存在压降,以及加热器自身的散热,所以抽汽压损和自身的散热损失也是对回热系统产生影响的原因<sup>[2]</sup>。加热器的端差是指加热器侧抽汽压力对应下的饱和温度与加热器出口水温之差<sup>[3]</sup>。如图1所示,图中表示的是端差产生的原因,点1~点2表示的是回热系统中给水或者凝结水的焓升,点3~点4的热力过程线表示的是汽轮机抽汽在加热器中的凝结放热, $\Delta t$ 指的是加热器的端差。当机组回热系统运行时,加热器的端差会使得上述的吸热和放热过程变的不对等,在同样的抽汽条件下,端差会引起加热器出口水温降低,从而使得下一级加热器的抽汽流量增加或者锅炉吸热量的增加,最后影响汽机装置的效率<sup>[4]</sup>。为了尽量降低加热器端差所造成的影响,提升机组的热经济性,我们需要针对端差所带来的影响进行计算和分析,以此得到各级加热器的端差对机组影响的实际大小,使运行人员可以监管那些影响很大的加热器,有助于指导机组的实际运行。

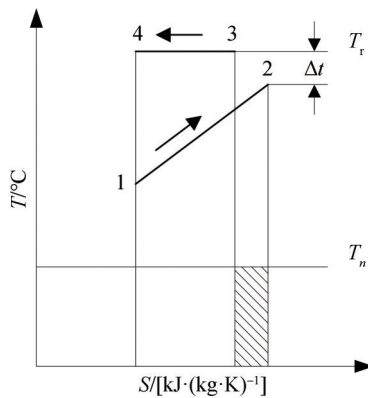


图1 加热器端差的表示

Fig. 1 Indication for heater terminal temperature difference

现阶段,对加热器端差的研究方法主要包括等效热降法、热力学方法和矩阵分析法。文献[5]根据凝气系数法,通过数学推导得到了不同型式加热器的端差对经济性影响的数学模型;文献[6]在加热器上端差变化的基础上,通过能效分析模型对机组进行热经济性分析,提出了简捷的数学计算模型;文献[7]在定流量的前提下,通过分析和推导不同型号加热器的端差与机组各参数之间的数学关系,得到了对热经济性影响的计算公式。文献[8]利用偏导的方法进行数学推导,基于矩阵热平

衡方程建立了端差对热经济性影响的数学模型;文献[9]将矩阵方程和热力学方程相结合对加热器端差的影响进行推导并建立了通用模型,与其他方法的计算结果相比较证明了实际可行性。以上研究虽然都验证了计算模型的可行性和计算结果的准确性,但是都是基于机组的单一工况,未充分考虑机组变负荷运行工况下各加热器端差对机组热经济性影响的大小和影响的变化规律。

针对以上研究未充分分析多工况下各级加热器的端差对热经济性的影响及其变化规律,本文以某电厂660 MW机组回热系统为研究对象,基于等效热降<sup>[10]</sup>的方法构造加热器端差对机组热经济性影响分析的模型,在THA、80%THA、60%THA、40%THA四种不同工况下对各加热器端差对热经济性的影响进行定量计算,并对比分析同一级加热器的端差在不同工况下对热经济性影响的规律,给机组的实际运行提供了一定的参考。

## 1 等效热降理论

等效热降法是一种基于质量平衡和能量平衡的对热系统进行局部定量分析的方法,具有简单、快捷、准确的特点,在火电厂热经济分析中得到广泛的应用<sup>[11]</sup>。因为回热系统中各段抽汽的存在,使得从锅炉过热器来的1 kg工质在汽轮机内并未全部做功,而是相当于 $(1 - \sum_{j=1}^n \alpha_j y_j)$  kg工质从低压缸全部排出的做功。式中: $\alpha_j$ 为第j段抽汽流量占总汽水流量的比重; $y_j$ 为第j段抽汽的做功不足系数;j是指汽轮机第j段抽汽;n是汽轮机总的抽汽段数。

由上述原理可知,当由于某些原因使得某段抽汽被排挤回汽轮机时,该单位质量的排挤蒸汽在汽轮机内做的功,就是对应的抽汽等效热降 $H_j$ 。

再热热段后的 $H_j$ 计算公式为:

$$H_j = (h_j - h_n) - \sum_{i=1}^{j-1} \frac{A_i}{q_i} H_i \quad (1)$$

再热冷段前的 $H_j$ 计算公式:

$$H_j = (h_j + \sigma - h_n) - \sum_{i=1}^{j-1} \frac{A_i}{q_i} H_i \quad (2)$$

式中: $h_j$ 为第j段抽汽比焓(kJ/kg); $h_n$ 为低压缸排汽比焓(kJ/kg); $q_i$ 为抽汽在加热器中的焓降(kJ/kg); $\sigma$ 为1 kg高压缸排汽在再热器中的焓升(kJ/kg)。

公式 (1) 和 (2) 中,  $A_i$  的取值与相应加热器的型号有关。假设第  $j$  号加热器为汇集式, 那么  $A_j = \tau_i$ 。  $\tau_i$  为给水或凝结水在加热器中的焓升 (kJ/kg)。假设第  $j$  号加热器为疏水放流式, 设中间第  $m$  号加热器为汇集式, 其中  $1 \leq m < j$ , 那么当  $m \leq i \leq j-1$  时  $A_i = \gamma_i$ , 当  $1 \leq i < m$  时  $A_i = \tau_i$ 。  $\gamma_i$  为疏水在加热器中的焓降 (kJ/kg)。

各级的抽汽效率为:

$$\eta_j = \frac{H_j}{q_j} \quad (3)$$

最终主蒸汽的等效热降如下:

$$H = h_0 + \sigma - h_n - \sum_{i=1}^n \tau_i \eta_i - \sum \Pi \quad (4)$$

式中:  $h_0$  为主蒸汽比焓 (kJ/kg);  $\sum \Pi$  为辅助成分的损失 (kJ/kg)。

机组的循环吸热量:

$$Q = h_0 + \alpha_z \sigma - h_{gs} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_z$  为再热蒸汽的比例;  $h_{gs}$  为锅炉省煤器入口给水比焓 (kJ/kg)。

所以汽轮机装置效率为:

$$\eta_i = \frac{H}{Q} \quad (6)$$

## 2 理论计算模型

如图 2 所示, No.  $j$  加热器存在端差  $\Delta t$ , 也可用热焓表示为  $\Delta \tau_j$ 。端差的存在引起给水的加热不足, 会使 No.  $j$  加热器抽汽份额减少, 抽汽热量减少  $\Delta \tau_j$ , 同时也让下一级加热器的抽汽流量变多, 多放热  $\Delta \tau_j$  以弥补加热不足<sup>[12]</sup>。由上述可知, 发生在两个加热器上抽汽流量的变化, 等效热降  $H$  会因为  $j$  段抽汽做功增加  $\Delta \tau_j \eta_j$ ,  $j+1$  段抽汽做功减少  $\Delta \tau_j \eta_{j+1}$  从而减少  $\Delta H = \Delta \tau_j (\eta_{j+1} - \eta_j)$ 。由此引起装置效率降低为:

$$\delta \eta_i = \frac{\Delta H}{H - \Delta H} \quad (7)$$

对于再热机组, 因为高加端差的存在会排挤本

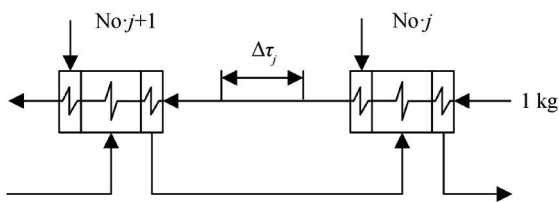


图 2 No.  $j$  加热器的端差

Fig. 2 No.  $j$  heater's terminal temperature difference

级抽汽, 增加下一级加热器的抽汽, 所以还导致机组循环吸热量改变  $\Delta Q$ 。例如最高一级高加的端差如果发生变化, 导致最终给水温度变化, 从而使锅炉的蒸发吸热量发生改变, 同时也会引起再热蒸汽份额的变化, 使再热蒸汽吸热量发生改变。两个参数变化后的公式为:

$$H' = H + \Delta H \quad (8)$$

$$Q' = Q + \Delta Q \quad (9)$$

$\Delta H$  和  $\Delta Q$  在计算的过程中要区分正负。

装置效率相对变化为:

$$\delta \eta_i = \frac{\Delta H - \Delta Q \eta_i}{H + \Delta H} \times 100\% \quad (10)$$

热耗率相对变化为:

$$\delta q = \delta \eta_i \cdot q \quad (11)$$

式中:  $q$  为热耗率 (kJ/kW·h)。

## 3 实例分析

### 3.1 660 MW 机组数据

文中以某电厂使用的 660 WM 超临界汽轮机组为研究对象, 根据 THA、80%THA、60%THA 和 40%THA 四种设计工况的参数, 分别计算各级加热器的端差对机组热耗率的影响, 并对分析同一级加热器的端差在不同工况下对机组热耗率的影响及其变化规律。由于在设计工况下加热器已经存在端差, 所以在已有端差的基础上分别令其变化  $\pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\pm 4^\circ\text{C}$ 、 $\pm 6^\circ\text{C}$ 、 $\pm 8^\circ\text{C}$ 、 $\pm 10^\circ\text{C}$  来进行计算和分析。

机组的回热系统简图如图 3 所示, 该回热系统一共有 9 段抽汽, 其中 7、8、9 三段抽汽来自汽轮机高压缸, 第 5 段抽汽供应于除氧器, 其余 8 段抽汽供应于加热器。按照工质的流动方向, 凝结水泵之后的 1、2、3、4 号为低压加热器, 给水泵之后的分别为 6、7、8、9 号高压加热器, 5 号是除氧器。THA 工况下 9 号高压加热器被关闭, 其抽汽量为零, 其余三种工况 9 号高压加热器正常工作。机组主要参数如表 1 所示。

### 3.2 各级加热器端差对热耗率的影响

根据各设计工况下的参数, 使用上述理论计算模型, 来对 THA、80%THA、60%THA 和 40%THA 滑压工况下各级加热器的端差对热耗率的影响进行计算, 并绘制成加热器上端差变化  $T(^{\circ}\text{C})$  和热耗变化率  $\delta(\%)$  的关系图。结果如图 4 ~ 图 7。

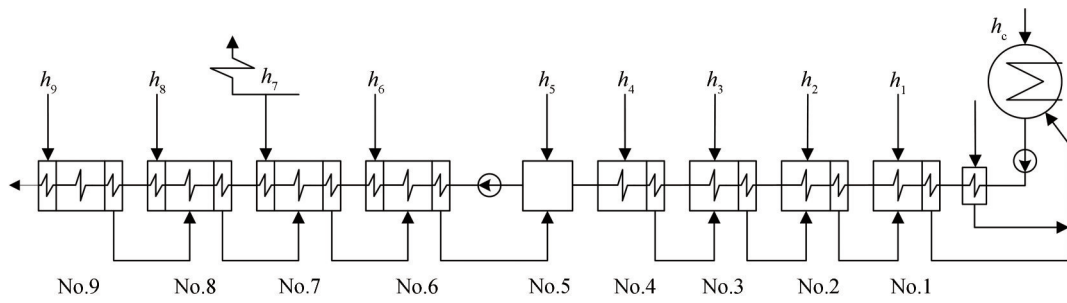


图 3 机组回热系统简图

Fig. 3 Diagram of unit regenerative system

表 1 机组主要参数

Tab. 1 Main parameters of the unit

工况	$h_9/(kJ \cdot kg^{-1})$	$h_8/(kJ \cdot kg^{-1})$	$\sigma/(kJ \cdot kg^{-1})$	$H/(kJ \cdot kg^{-1})$	$Q/(kJ \cdot kg^{-1})$	$\eta/\%$
THA	3 486.4	2 410.2	621.7	1 301.5	2 638.19	0.493 3
80%THA	3 532.1	2 440.8	602.7	1 291.1	2 650.5	0.487 1
60%THA	3 578.7	2 484.6	573	1 314.3	2 777.5	0.473 2
40%THA	3 622.3	2 552.5	544.2	1 321.9	2 931.4	0.450 9

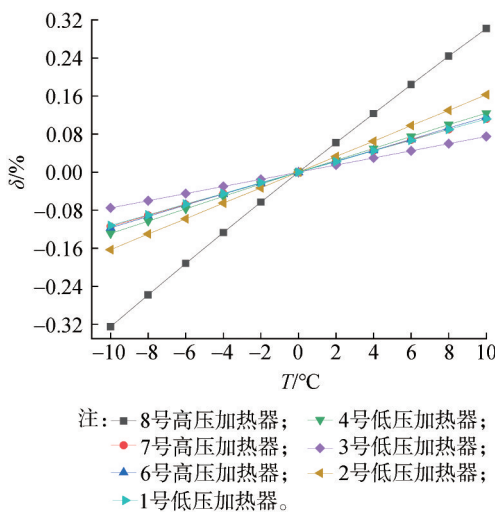


图 4 THA 工况

Fig. 4 Working condition of THA

各加热器的端差对热耗率的影响大致成线性关系。图 4 中，THA 工况下 9 号高加被关闭，8 号高加的端差对热耗率的影响最大，端差增加 2 °C 时热耗率增加 0.062%，2 号低加次之，端差增加 2 °C 时热耗率增加 0.033%，3 号低加的端差对热耗率的影响最小，端差增加 2 °C 时热耗率增加 0.015%，其余加热器的端差对热耗率的影响大致相同。端差变化相同时，8 号高加对热耗率的影响约是 2 号低加的 2 倍，2 号低加对热耗率影响约是 3 号低加的 2 倍。

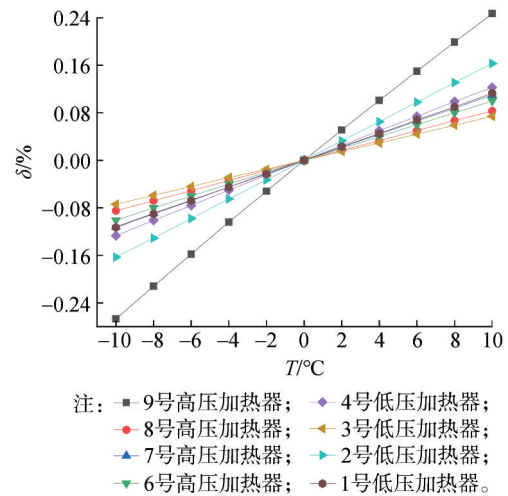


图 5 80%THA 工况

Fig. 5 Working condition of 80%THA

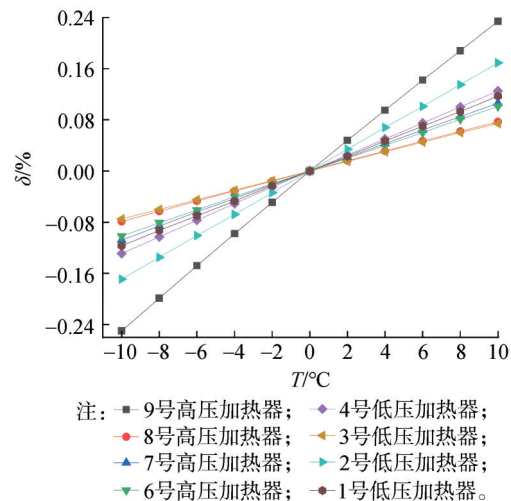


图 6 60%THA 工况

Fig. 6 Working condition of 60%THA

图 5 ~ 图 6 中，80%THA 和 60%THA 两种工况下热耗相对变化率最高的是 9 号高加，端差增加 2 °C 时分别使热耗率增加了 0.051% 和 0.048%，2 号低加使热耗率分别增加了 0.033% 和 0.034%，3 号低

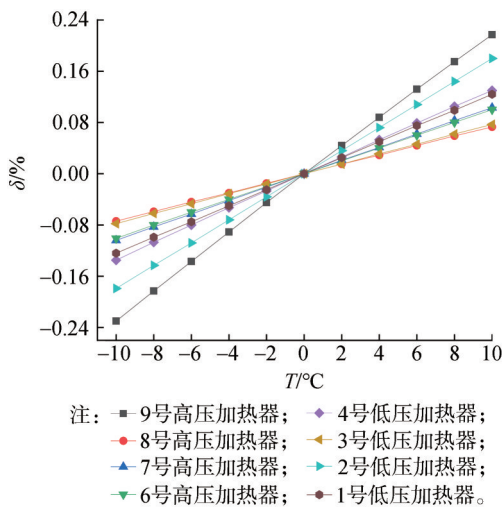


图7 40%THA 工况

Fig. 7 Working condition of 40%THA

加引起的热耗相对变化率最低, 端差增加 2 °C 时热耗率都增加了 0.015%。

图 7 中, 40%THA 工况下 9 号高加的端差对热耗率的影响最大, 当端差增加 2 °C 时热耗率增加 0.044%, 2 号低加的端差对热耗率的影响次之, 端差增加 2 °C 时对热耗率的影响为 0.036%, 8 号高加端差对热耗率的影响最小, 端差增加 2 °C 时热耗率增加 0.015%, 3 号和 8 号两个加热器的端差对热耗率影响差距很小。端差增加 2 °C 时可以看出, 对机组热耗率的影响中, 9 号高加约是 8 号高加的 3 倍, 2 号低加约是 8 号高加的 2.4 倍。

从结果中我们可以看到, 最后一级高加的端差对热耗率影响最大, 原因是因为最后一级高加端差的存在, 使机组循环吸热量发生明显变化, 因此对热耗率的影响也就更大, 所以在机组实际运行中要尽可能减少最后一级高加的端差。与高加相比低加对机组热耗率的影响较大, 是因为回热系统中相邻两级低压加热器的抽汽效率之差较大, 所以对热耗率的影响就较大。因此可以得知, 加热器的型号和加热器所处位置的不同, 以及回热系统给水在各个加热器中吸热量的不同, 即使是在同一回热系统中, 对机组热经济性的影响亦不一样<sup>[13]</sup>。在四种工况下分别将各级加热器的端差增大 2 °C, 结果如表 2 所示。

### 3.3 同一级加热器端差对热耗率的影响对比

分别将同一级加热器的端差在不同工况下对热耗率的影响进行对比分析。从表 2 的数据来看, 4

表 2 各加热器端差增加 2 °C 时机组热经济性的变化  
Tab. 2 The change of heat economy of the unit when the terminal temperature difference of each heater increases by 2 °C

端差增加 2 °C	热经济性变化	THA			
		THA	80% THA	60% THA	40% THA
9号高加	热耗率相对变化/%	—	0.051	0.048	0.044
	热耗率变化/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	—	3.88	3.74	3.59
	发电煤耗率变化/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	—	0.141	0.137	0.132
8号高加	热耗率相对变化/%	0.062	0.017	0.016	0.015
	热耗率变化/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	4.68	1.29	1.25	1.22
	发电煤耗率变化/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.170	0.047	0.046	0.045
7号高加	热耗率相对变化/%	0.023	0.022	0.021	0.021
	热耗率变化/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	1.73	1.67	1.64	1.71
	发电煤耗率变化/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.063	0.061	0.060	0.063
6号高加	热耗率相对变化/%	0.023	0.020	0.020	0.020
	热耗率变化/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	1.73	1.52	1.56	1.63
	发电煤耗率变化/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.063	0.055	0.057	0.060
4号低加	热耗率相对变化/%	0.025	0.025	0.025	0.026
	热耗率变化/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	1.89	1.90	1.95	2.12
	发电煤耗率变化/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.069	0.069	0.071	0.078
3号低加	热耗率相对变化/%	0.015	0.015	0.015	0.016
	热耗率变化/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	1.13	1.14	1.17	1.30
	发电煤耗率变化/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.041	0.041	0.043	0.045
2号低加	热耗率相对变化/%	0.033	0.033	0.034	0.036
	热耗率变化/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	2.49	2.51	2.65	2.94
	发电煤耗率变化/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.091	0.091	0.097	0.108
1号低加	热耗率相对变化/%	0.022	0.023	0.023	0.025
	热耗率变化/[kJ·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	1.66	1.75	1.79	2.04
	发电煤耗率变化/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	0.060	0.064	0.065	0.075

个高压加热器中 9 号高加的端差对热耗率的影响最大, 6 号和 7 号高加的端差对热耗率的影响大致相同, 8 号高加端差对热耗率的影响最小。同一级高加的端差对热耗率的影响大小是随着工况的改变而变化的, 虽然变化幅度较小, 但总体来说, 随着机组出力的增加, 同一级高加的端差对热耗率的影响逐渐变大。8 号高加在 THA 工况的热耗变化率明显比其他三种工况的大, 是因为 THA 工况下 9 号高加被关闭, 8 号高加就成为了回热系统中的最后一级高加, 其端差对热耗率的影响就会变大很多。

由表 2 数据可知, 端差分别增加 2 °C 时, 4 个低压加热器中对机组热耗率影响最大的是 2 号低加, 紧接着的是 4 号以及 1 号, 影响最小的是 3 号低加。此外低加与高加的情况正好相反, 虽然在不同工况下同一级低加端差对热耗率的影响互相之间差别也

不大,但是随着机组出力的增加,同一级低加的端差对热耗率的影响逐渐变小。出现这种情况是因为随着机组出力的减小,例如从60%THA工况变成40%THA工况,相邻两级低压加热器抽汽效率的差值就会变大,从而导致端差对热耗率的影响变大。

近些年来风电和光电行业的迅猛发展,使得新能源的发电量占比越来越高,紧接着导致我国新能源消纳问题日益严峻<sup>[14-15]</sup>,“弃风弃光”的现象愈发严重,火力发电作为中流砥柱承担着更大的调峰压力,因此火电机组经常处于低负荷运行状态。通过以上分析可知,在这种情况下除了要尽量减小最后一级高加和2号低加的端差,而且当机组因调峰而负荷变低时,考虑到上述低加对热耗率和煤耗率的影响,所以要更加重视机组低负荷运行时低加的端差对热经济性的影响。通过上述研究,能使运行人员在机组实际运行时重点监测对机组热经济性影响较大的加热器的端差,从而为机组经济运行提供实际指导。

## 4 结 论

以某电厂660 MW机组为研究对象,基于等效热降理论,计算了THA、80%THA、60%THA和40%THA四种工况下各级加热器的端差对机组热耗率的影响,并对比分析了同一级加热器的端差在不同工况下对热耗率的影响及其变化规律,有助于指导机组的实际运行,对机组运行优化与节能降耗具有重要意义。主要结论如下:

1) THA工况下8号高加和2号低压的端差对机组热耗率的影响较大,80%THA、60%THA和40%THA三种工况下9号高加和2号低加的端差对机组热耗率的影响较大,因此在机组实际运行中应尽量降低最后一级高加和2号低加的端差,以提高机组的热经济性。

2) 在四种不同工况下,随着机组出力的增加,同一级高加的端差对热耗率的影响逐渐变大,而同一级低加的端差对热耗率的影响逐渐变小。

3) 在对新能源消纳的背景下,当机组因调峰而负荷变低时,应更加重视低加的端差对机组热经济性的影响。

### 参考文献:

[1] 李勇,黄萍力. 汽轮机回热系统加热器给水焓升的优化分配

[J]. 汽轮机技术,2008,50(6):404-406+409.

LI Y, HUANG P L. The feed-water enthalpy rise optimal distribution in regenerative system of steam turbine [J]. Turbine Technology, 2008, 50(6): 404-406+409.

[2] 冯庭有,陈凡夫. 1 036 MW机组加热器端差对热经济性影响的等效焓降法分析 [C]//中国动力工程学会. 超超临界机组技术交流2012年会论文集,宁波,2012. 宁波:中国动力工程学会,2012:193-200.

FENG T Y, CHEN F F. Analysis of the effect of heater terminal temperature difference of 1 036 MW unit on heat economy by equivalent enthalpy drop method [C]//Chinese Society of Power Engineering. Proceedings of the 2012 Annual Meeting of Ultra Supercritical Unit Technology Exchange, Ningbo, 2012. Ningbo: Chinese Society of Power Engineering, 2012: 193-200.

[3] 邓成刚,石佳. 1 000 MW超超临界燃煤机组高压加热器端差取值分析 [J]. 南方能源建设,2016,3(增刊1):14-17.

DENG C G, SHI J. Terminal temperature difference value analysis of high pressure heater for 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired unit [J]. Southern Energy Construction, 2016, 3 (Supp. 1): 14-17.

[4] 王政先,郭宝仁. 汽轮机深度节能降耗的技术途径及措施 [J]. 节能技术,2016,34(6):567-571.

WANG Z X, GUO B R. Depth technical approach and energy saving measures for turbine [J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(6): 567-571.

[5] 周振起,李晓东,王涛,等. 加热器端差对1 000 MW机组热经济性影响的数学模型研究 [J]. 汽轮机技术,2013,55(2): 89-92.

ZHOU Z Q, LI X D, WANG T, et al. Calculation mode on the influence of terminal temperature difference on heat economy of 1 000 MW unit [J]. Turbine Technology, 2013, 55(2): 89-92.

[6] 闫顺林,刘志巍,滕龙,等. 加热器上端差对机组能效影响的分析研究 [J]. 汽轮机技术,2014,56(5):379-381+384.

YAN S L, LIU Z W, TENG L, et al. Influence of heater's upper terminal temperature difference disturbances on energy efficiency [J]. Turbine Technology, 2014, 56(5): 379-381+384.

[7] 刘强,郭民臣,田永伟,等. 加热器端差对机组热经济性影响的定量分析方法 [J]. 热能动力工程,2007(5):521-524+578.

LIU Q, GUO M C, TIAN Y W, et al. A method for the quantitative analysis of the impact of terminal temperature differences of heaters on thermal effectiveness of power generating units [J]. Engineering for Thermal Energy and Power, 2007(5): 521-524+578.

[8] 郭民臣,刘强,叶江明,等. 定功率下加热器端差对机组热经济性的影响 [J]. 中国电机工程学报,2008(23):42-45.

GUO M C, LIU Q, YE J M, et al. Influence of terminal temperature difference on thermal economy under conditions of constant power output [J]. Proceedings of the CSEE, 2008

- (23):42-45.
- [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(4):168-173.  
ZHANG X L, WANG S L, CHEN H P, et al. General calculation model on the influence of terminal temperature difference on heat economy of unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2005(4):168-173.
- [10] 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.  
LIN W C. Energy conservation theory of coal-fired power plant thermal system [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1994.
- [11] 许相波. 大型火电机组热经济性的在线计算[D]. 太原:太原理工大学,2008.  
XU X B. On-line calculation on thermoeconomic indicators for a large fire power generating unit [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008.
- [12] 王义松,郭宝仁,华兴鲁,等. 给水回热加热器端差对机组经济性的影响[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版),2013,9(3):238-241.  
WANG Y S, GUO B R, HUA X L, et al. Impact on the economical efficiency of unit due to the terminals temperature difference of the water supply regenerative heater [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2013, 9(3):238-241.
- [13] 赵劲松,李岩,田松峰. 1 000 MW 机组加热器端差对热经济性影响的分析[J]. 汽轮机技术,2010,52(6):460-463.  
ZHAO J S, LI Y, TIAN S F. The analysis of thermal economic on terminal temperature difference of heater in 1 000 MW unit [J]. Turbine Technology, 2010, 52(6):460-463.
- [14] 刘吉臻. 大规模新能源电力安全高效利用基础问题[J]. 中国电机工程学报,2013,33(16):1-8+25.  
LIU J Z. Basic issues of the utilization of large-scale renewable power with high security and efficiency [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):1-8+25.
- [15] 刘志文,李志铿,徐飞,等. 含多种新能源的园区型微电网规划关键问题研究[J]. 南方能源建设,2017,4(2):38-45.  
LIU Z W, LI Z K, XU F, et al. Research on key issues of zone type micro-grid planning with multiple new energy sources [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(2):38-45.

#### 作者简介:



马一博

马一博(通信作者)  
1995-,男,河南驻马店人,硕士研究生,主要从事火电厂节能技术方面的研究(e-mail) m17639607349@163.com。

#### 刘鑫屏

1975-,女,河北唐山人,副教授,博士,主要从事热力发电建模、软测量及大机组智能优化控制研究(e-mail) liuxinpingty1@163.com.cn。

#### 项目简介:

**项目名称** 提升供热机组电出力调节能力的蒸汽系统流程改造(2017YFB0902100)

**承担单位** 西安热工研究院有限公司

**项目概述** 项目通过调研东北地区供热机组的类型的技术现状,归纳影响供热机组电出力调节能力的限制因素;研发低压缸末端高真空小汽流冷却技术、减温减压系统的高效分级集成及装置可靠性提升技术、多源供热抽汽流程设计及参数匹配技术;研究蒸汽流程改造后供热机组的电、热负荷变工况特性,分析不同蒸汽流程改造方案的经济性和适应性;建立蒸汽流程改造关键部件的实验台,开展减温减压装置及引射混流装置流动特性和安全性实验研究;研究蒸汽流程改造后汽轮机本体、辅助设备、供热系统的安全运行范围,指定蒸汽流程改造的安全评估方案;建立蒸汽流程改造后的供热机组仿真和控制平台,研发机组不同供热模式下的柔性控制技术,实现电出力的宽领域灵活调节。

**主要创新点** 针对供热机组效率高,但电出力调节受限的矛盾,在分析影响热供电机组电出力调节能力受限制因素和变化规律的基础上,提出蒸汽流程改造原则性技术方案及其电、热负荷适用性选择原则。在此基础上,研发低压缸末端高真空小汽流冷却、多源供热抽汽流程设计及参数匹配等蒸汽流程关键技术;同时采用关键设备实验台和现场试验相结合的方式,对蒸汽流程改造技术方案进行安全评估并提出相应的提升机组运行安全性的技术措施,论证各技术方案的安全运行边界和典型控制参数的控制范围;建立改造后供热机组的非线性动态模型,搭建运行仿真和控制平台,研发多供热模式下的柔性控制技术,形成兼顾机组效率和灵活性的系列蒸汽改造流程和改造集成技术,降低电、热出力的耦合强度,在保障供热负荷下,实现电出力高效、灵活调节。

**项目名称** 供热机组灵活性提升理论及工程技术研究(2017MS132)

**承担单位** 华北电力大学

**项目概述** 建立蒸汽流程改造后供热机组的简化非线性动态模型;研究改造后机组运行控制参数极限和安全性评估方法;研究实现供热机组快速变负荷的多尺度协调控制系统;研究机组不同供热模式间切换的柔性控制方法。

**主要创新点** 通过减弱供热机组电热耦合提高发电负荷调节范围、利用机组和热网蓄热提高发电负荷调节速率中的控制优化和安全性评估等问题。

(责任编辑 李辉)