

文章编号: 1000-582X(2011)10-076-06

引射式加热器替代低压回热系统等效焓降分析

杨 琳^{1,2}, 冉景煜¹

(1. 重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;
2. 重庆工商大学 计算机科学与信息工程学院, 重庆 400067)

摘 要:火电机组低压回热系统中的面式加热器普遍存在较大焓损。应用等效焓降方法, 深入分析采用引射式加热器替代面式低压加热器下机组热经济性的变化, 并得到各个变化因素的数学计算式。在此基础上, 对 N600-165/535/535 型机组低压回热系统进行实例计算, 并与常规热平衡法计算进行了比较, 结果表明: 引射式加热器替代面式低压加热器, 可以有效减小焓损, 替代全部四级面式低压加热器, 可使机组经济性提升最大, 达 0.263%; 文中分析推导得出的计算表达式可用于机组热经济性分析计算。

关键词:引射式加热器; 热经济性; 等效焓降; 低压回热系统; 面式加热器

中图分类号:TK123

文献标志码:A

The equivalent enthalpy drop theory calculation of the ejector heaters applied for low-pressure feed water heater system of thermal power unit

YANG Lin^{1,2}, RAN Jing-yu¹

(1. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Dystems Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. School of computer science and information engineering, Chongqing technology and business University, Chongqing 400067, P. R. China)

Abstract: There is much exergy loss in low-pressure feed water heater system of the thermal unit. The thermo-economic characters by the equivalent enthalpy drop method while the low-pressure heater was replaced with the ejector heater. At the same time, the thermo-economic characters formulas for the different factors were also gotten. Based on these results, the thermo-economic changing features were analyzed for the low pressure heaters replaced with the ejector heaters of the N600-165/535/535 units, and the results were compared with the normal heat balance method. The results show that the ejector heaters can reduce the exergy loss efficiently, and the thermo-economic effects is the best for replacing the all low-pressure heaters with the ejector heaters, and its efficiency can be increased by 0.263%. The given equations of this paper can be used for analyzing the thermal economic effects.

Key words: ejector heaters; thermo-economic; the equivalent enthalpy drop theory; low-pressure feed water heater system; surface heaters

收稿日期: 2010-05-11

基金项目: 重庆市重大科技攻关项目(CSTC2008AA1007A)

作者简介: 杨琳(1972-), 重庆大学博士研究生, 主要从事节能燃烧与环保、自控技术与理论研究。

冉景煜(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) ranjy@cqu.edu.cn。

回热系统作为电厂热力系统的核心,是提高机组热经济性的重要方式之一,其运行状况的优劣,对机组及电厂的整体热经济性有着重要的影响。但在实际运行中,特别是低压回热系统中的面式加热器却存在较大焓损^[1-4]:1)换热端差的存在,降低机组效率和热经济性;2)压力最低的两级加热器通常工作在负压状态,对其密封性的要求较高,空气的泄漏会严重影响其加热效果及加热器的安全运行;3)疏水系统中水位的不稳定也严重影响了加热器的加热效果。

目前针对低压回热系统的改造及优化运行的研究中,较为集中在面式加热器改为混合式加热器。为此国外学者曾提出重力自流接触混合式加热器^[5]替代压力最低的两级面式加热器。但该方式受到厂房高度限制,且操作复杂、运行可靠性较低。引射式加热器作为一种新型的节能换热设备,与常规混合式加热器相比,采取汽水直接混合的加热方式,不需要疏水系统。而且还有一定的升压能力,具有较高的稳定可靠性^[6-14]。因此引射式加热器替代面式低压加热器,成为提高机组回热系统经济性的研究热点问题。

引射式加热器的原理和结构,在相关文献中都有提及^[6-15]。采用引射式加热器替代面式加热器,会导致回热系统中端差等焓损以及疏水采集方式的改变,在以往相关可行性及热经济性研究中^[14-18],通常只针对某一变化因素或某一特定类型机组的回热系统进行分析。采用等效焓降法,从引射式加热器替代单一面式加热器出发,全面分析影响回热系统热经济性变化的因素,并得到各个因素变化的数学计算式,为引射式加热器替代面式加热器所导致的系统热经济性的变化提供了较为简便的计算方法,进一步为引射式加热器应用于电厂低压回热系统提供理论基础。

1 引射式低压回热系统

图 1 所示为 N600-165/535/535 型机组的低压回热系统。由 4 台面式加热器组成,其中 No. 2 面式加热器的疏水采集方式为疏水泵形式,混合点在加热器出口,其余面式加热器的疏水采集方式均为疏水自流形式。

引射式低压回热系统是指采用引射式加热器替代机组低压回热系统中的面式低压加热器而建立的新的低压回热系统。采用引射式加热器替代 N600-165/535/535 型机组低压回热系统中的全部 4 级低

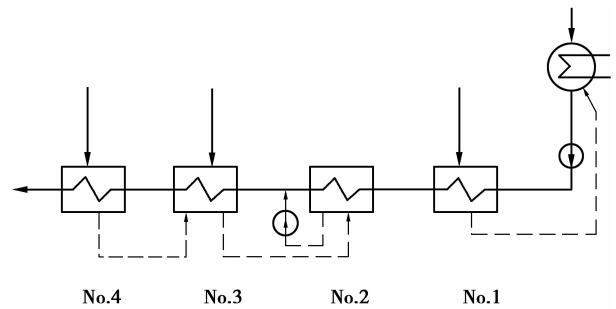


图 1 N600-165/535/535 型机组低压回热系统热力图

压面式加热器后,所组成的引射式低压回热系统如图 2 所示。

与原有低压回热系统相比,最大不同在于 4 级面式加热器的疏水采集方式全部取消。主凝结水通过给水泵进入 No. 1 加热器时,最末一级抽汽与主凝结水在加热器中直接混合,冷凝换热后与主凝结水一同升压进入 No. 2 加热器,以后经历相似过程直至进入除氧器。

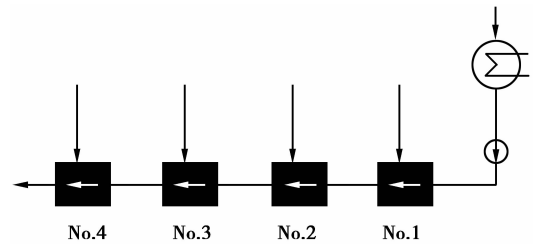


图 2 N600-165/535/535 型机组引射式低压回热系统

2 机组热经济性变化因素的定量分析

理论上,引射式加热器可以将给水加热到抽汽压力对应下的饱和水温,对机组热经济性的提高首先体现在能有效减少换热端差,提高加热器出口水温,减小机组焓损。其次,汽水直接混合的加热方式,导致引射式加热器不需要疏水采集方式,直接将抽汽热焓利用在本级加热器,从而减小串联疏水的热损失及高品质蒸汽在低能级的利用。再次,独特的升压能力,可减小凝结水泵做功,减少厂用电,提高机组的整体经济性。

笔者以引射式加热器替代机组低压回热系统中的任意单一面式加热器 No. j 作为研究对象,分析系统热经济性的变化。将系统热经济性的变化主要分成端差的减小、疏水采集方式的改变、减小厂用电 3 个方面进行讨论。

2.1 端差

引射式加热器无需面式加热器的换热管道,具有较高的换热系数,可有效减小因换热管道产生的换热端差。另一方面,引射式加热器结构简单、体积较小,可将其布置在汽轮机相应的抽汽口附近以减小抽汽压损,因引射式加热器无需疏水采集方式,减小的抽汽压损全部体现在提高加热器出口水温,减小换热端差。因此当引射式加热器替代 No. j 面式加热器时,端差的示意图如图 3 所示,端差的减小所引起系统的等效焓降为

$$\Delta H_{Tj} = \alpha_H (\Delta \tau_{j1} + \Delta \tau_{j2}) (\eta_{j+1} - \eta_j), \quad (1)$$

式中: α_H 为进入 No. j 加热器的凝结水份额; $\Delta \tau_{j1}$ 为管道产生的换热端差所减小的焓值; $\Delta \tau_{j2}$ 为抽汽压损减小而导致的换热端差减小的焓值; η_j 为 No. j 加热器的抽汽效率。

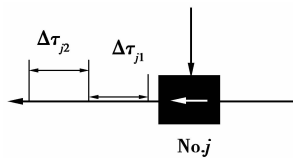


图 3 端差示意图

2.2 疏水采集方式

由于引射式加热器无需疏水采集方式,直接将抽汽热焓利用在引射式加热器,提高系统经济性的同时,还可简化回热系统结构,提高系统运行的安全性和稳定性。采用引射式加热器替代 No. j 面式加热器,疏水采集方式的改变包括: No. j 加热器疏水采集方式的取消和 No. $j+1$ 加热器疏水采集方式的调整。

2.2.1 No. j 加热器疏水采集方式的取消

引射式加热器采用汽水直接混合的加热方式,使得抽汽凝结换热后随主凝结水一同进入下一级加热器,因此, No. j 加热器疏水采集方式的取消,可等效看作份额为 β_j 的疏水,无需疏水泵做功而直接携带热量 $\beta_j \bar{t}_{sj}$ 在 No. j 加热器入口处与主凝结水混合后进入 No. j 加热器。如图 4 虚线部分所示。由于在电厂低压回热系统中,汇集式加热器 No. m 通常为带疏水泵形式的汇集式加热器, No. j 加热器疏水采集方式的取消使得该份额的疏水不再通过 No. m 加热器的疏水泵与 No. m 加热器出口的主凝结水混合,故也损失做功 $\beta_j (\bar{t}_{sm} - \bar{t}_m) \eta_{m+1}$ 。因此 No. j 加热

器疏水采集方式的取消其引起的等效焓降为

$$\Delta H_{Wj} = \beta_j [(\bar{t}_{sj} - \bar{t}_{j-1}) \eta_j + \sum_{r=m}^{j-1} \tau_r \eta_r - \sum_{k=m}^{j-1} \gamma_r \eta_r - (\bar{t}_{sm} - \bar{t}_m) \eta_{m+1}], \quad (2)$$

式中: β_j 、 τ_r 、 γ_r 、 η_j 分别为疏水分额、加热器焓升、疏水放热量及抽汽效率; \bar{t}_{sj} 及 \bar{t}_j 分别为加热器疏水焓值和出口焓值。

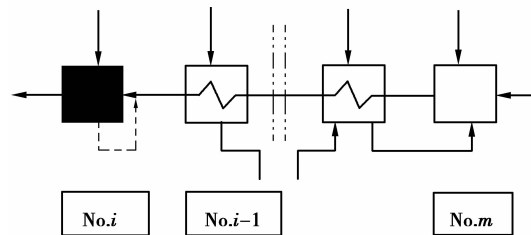


图 4 No. j 加热器疏水采集方式取消示意图

当 $J=M$, 即替代汇集式加热器 No. M 时,由上述分析可知,加热器 No. M 疏水采集方式的取消,等效使得疏水与主凝结水的混合点由加热器出口变成加热器进口,但同时取消了原疏水采集方式的疏水泵做功。此时疏水取消所引起的等效焓降的变化为

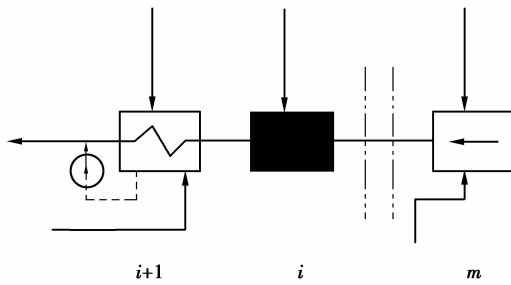
$$\Delta H_{Wj} = \beta_j [(\bar{t}_{sj} - \bar{t}_{j-1}) \eta_j - (\bar{t}_{sj} - \bar{t}_j) \eta_{j+1} + W(1 - \eta_{j+1})], \quad (3)$$

式中: β_j 、 τ_r 、 γ_r 、 η_j 分别为疏水分额、加热器焓升、疏水放热量及抽汽效率; \bar{t}_{sj} 及 \bar{t}_j 分别为加热器疏水焓值和出口焓值; W 为疏水泵焓升, $W=1$ kJ/kg, 对应压头为 1 MPa。

2.2.2 No. $j+1$ 加热器疏水采集方式的调整

由于引射式加热器没有疏水采集方式,采取引射式加热器替代 No. j 面式加热器,会使得 No. $j+1$ 加热器疏水采集方式不再流经 No. j 面式加热器,迫使 No. $j+1$ 加热器疏水采集方式需要作出相应调整。显然此情况只适用于 No. $j+1$ 加热器的疏水采集方式为疏水自流的情况。若 No. $j+1$ 加热器为汇集式加热器则不作任何改变。

No. $j+1$ 加热器疏水不再流经 No. j 加热器的方式有两种:一为 No. $j+1$ 加热器的疏水跳过 j 级加热器,而直接流向能级更低的 No. $j-1$ 加热器,此方法称为疏水逐级自流级数的改变。另一种对 No. $j+1$ 加热器的疏水采集方式采取加设疏水泵,使得 No. $j+1$ 加热器的疏水在其出口与主凝结水混合,此方法称之为疏水泵方式。

图 5 No. $j+1$ 加热器的疏水采集方式的调整

若 No. $j+1$ 加热器的疏水直接流向 No. $j-1$ 加热器,只会使得系统增加低品位蒸汽的排挤抽汽,而导致机组效率和热经济性降低。相反对 No. $j+1$ 加热器的疏水采集采取加设疏水泵方式,使其疏水与主凝结水在加热器出口处混合,可提高 No. $j+1$ 加热器的出口水温,增加高品位蒸汽的排挤抽汽,提高了机组效率和热经济性。因此对 No. $j+1$ 加热器疏水采集方式的调整,均采用疏水泵的方式,如图 5 虚线部分所示。因此 No. $j+1$ 加热器的疏水采取疏水泵方式,所引起的等效焓降为

$$\Delta H_{W_{j+1}} = \beta_{j+1} [(\bar{t}_{sj+1} - \bar{t}_{j+1})\eta_{j+2} + \sum_{r=m+1}^{j+1} \tau_r \eta_r - \sum_{r=m}^j \gamma_r \eta_r - a(\bar{t}_{sm} - \bar{t}_m)\eta_{m+1} + W'(\eta_{j+2} - 1)], \quad (4)$$

式中: β_j 、 τ_r 、 γ_r 、 η_j 分别为疏水分额、加热器焓升、疏水放热量及抽汽效率; \bar{t}_{sj} 及 \bar{t}_j 分别为加热器疏水焓值和出口焓值; W' 为新增疏水泵焓升,其取值与 No. $j+1$ 加热器出口压力成 1 kJ/kg:1 MPa 的正比关系。

2.3 减少厂用电

引射式加热器作为一种新型的节能换热设备,其最显著的特点在于无需任何机械设备辅助,就可达到升压的目的。独特的升压能力,使得引射式加热器替代常规面式加热器,在保持给水进入除氧器压力不变的情况下,可有效减小凝结水泵作功,从而减少厂用电,提高机组的整体经济性。按照文献[10]中的方法,所减小的凝结水泵作功引起的等效焓降为

$$\Delta H_{P_j} = \alpha_c (W_c - W'_c)(1 - \eta_j), \quad (5)$$

式中: α_c 为凝结水分额; W_c 和 W'_c 分别为原回热系统的凝结水泵焓升及采用引射式加热器替代面式加热器后的凝结水泵焓升,取 $W_c = 1$ kJ/kg,对应压头为 1 MPa。 W'_c 的取值与凝结水泵出口压力成 1 kJ/kg:1 MPa 的正比例关系。

以上对机组热经济性变化因素的定量分析,从

替代单一 No. j 面式加热器入手,阐述了引射式加热器替代面式加热器,影响系统热经济性变化的 3 个主要影响因素,特别是疏水采集方式的改变包括疏水采集方式的取消和上一级疏水采集方式的调整两项。如拟对机组低压回热系统采取局部替代多个面式加热器的方式,则多级替代方式机组热经济性变化的定量计算,以替代单一面式加热器的方法为基础,将多级替代方式看作多个单一替代方式,仍然可按上述方法,结合具体的局部多级替代方式,对各个影响因素进行求和即可。对于系统热效率的增加按下式计算。

$$\delta\eta = \frac{\Delta H}{H + \Delta H} \times 100\%, \quad (7)$$

式中, ΔH 和 H 分别为采用引射式加热器替代面式加热器后系统等效焓降的变化和原有回热系统的新蒸汽的等效焓降。

3 实例计算分析

文中的实例计算以 N600-165/535/535 型机组的低压回热系统为例。其低压回热系统如图 1 所示。各级低压加热器原始工况的数据采集来自于贵州纳雍电厂 2# 机组,并采用文献[5]中的方法计算各级低压加热器的热力参数,如表 1 所示。

表 1 N600-165/535/535 型机组各级原始热力参数

编号	τ_j	q_j	γ_j	α_j	η_j
1	195.7	261 3.2	0	0.049 36	0.113 68
2	95.3	260 1.5	291.3	0.021 33	0.178 32
3	106.4	246 5.7	184.8	0.028 74	0.210 51
4	114.8	257 8.4	0	0.032 57	0.264 35
5	44.1	2663.5	178.9	0.004 86	0.293 24

注:数字 1、2、3、4、5 为图 5 中的加热器编号,其中 No. 5 加热器为除氧器,图 5 中并未给出, τ_j 为给水在加热器中的焓升; q_j 为蒸汽在加热器中的放热量; γ_j 为疏水在加热器中的放热量; α_j 为抽汽份额; H_j 为抽汽等效焓降; η_j 为抽汽效率

笔者拟采用引射式加热器替代其低压回热系统中的任意一级、任意两级、任意三级、任意四级加热器等 4 种局部多级替代方式,以分析引射式加热器应用于该类型机组低压回热系统中的最佳方式。不同替代方式的系统热经济性变化的详细数据,如表 2 所示。

表2 不同替代方式的热经济性

不同组合替代方式	ΔH_j	$\delta\eta/\%$	
任意一级	1	0.78	0.084
	2	0.94	0.091
	3	1.16	0.103
	4	1.21	0.109
任意二级	1,2	1.72	0.137
	1,3	1.94	0.148
	1,4	1.99	0.151
	2,3	2.07	0.156
	2,4	2.12	0.159
	3,4	2.42	0.178
任意三级	1,2,3	2.85	0.197
	1,2,4	2.93	0.201
	1,3,4	3.19	0.222
	2,3,4	3.28	0.229
四级	1,2,3,4	4.06	0.263

从表中数据可知,采用引射式加热器替代N600-165/535/535型机组低压回热系统中的面式加热器,可有效减少机组的焓损,提高机组效率和热经济性,具有明显的节能效果。系统热经济的变化随着替代面式加热器数目的增多而增加,且替代能级高的面式加热器的热经济性高于级低的面式加热器。其中替代全部4级低压加热器,所取得的热经济性效果最高,达到0.263%。

4 计算模型的验证

对于文中所采用的等效焓降计算模型的验证,拟采用常规热平衡的方法进行。虽然目前已经有相关文献[19-20]对等效焓降计算方法与常规热平衡方法的一致性进行了相关的验证,但其验证过程仅从热经济性变化的一个因素进行了相关计算。因此文中以替代#4号面式低压加热器为例,仍然从端差的变化,疏水采集方式的改变,减少的厂用电3个方面进行常规热平衡的计算,与等效焓降的计算结果对比如表3所示。

表3 2种计算方法的对比

不同计算方法	ΔH_j	$\delta\eta/\%$
热平衡方法	1.18	0.107
等效焓降法	1.21	0.109

由计算结果可知,等效焓降的计算结果稍大于热平衡的计算结果,但两者相差甚微,在实际工作应用中,该计算误差是可以忽略不计的,因此可认为等效焓降的计算方法与热平衡方法具有一致性,这与文献[19-20]的结论是一致的。

5 结论

引射式加热器作为一种新型的节能设备,替代机组低压回热系统中的常规面式加热器,可有效减小机组的焓损,从而提高机组效率和热经济性,对于N600-165/535/535型机组低压回热系统,替代全部四级低压加热器,可使系统热经济性提高0.263%,并能最大程度提高系统运行的稳定性和可靠性,为最佳替代方式。采用等效焓降法分析推导得出的计算表达式与常规热平衡方法的计算结果一致。

参考文献:

- [1] 盛伟,肖增弘,牛卫东,等. 电厂热力设备及运行[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [2] 周怀春. 热力系统节能[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [3] 李又奎. 大型汽轮机机组经济性分析与优化[D]. 南京:东南大学,2000.
- [4] 郑体宽. 热力发电厂[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [5] 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.
- [6] ALY N H, KARAMELDON A, SHAMLOUL M M. Modelling and simulation of steam jet ejectors [J]. Desalination, 1999, 123(1): 1-8.
- [7] BEITHOU N, AYBAR H S. A mathematical model for steam-driven jet pump [J]. International journal of Multiphase Flow, 2000, 26(10): 1609-1619.
- [8] DEBERNE N, LEONE J F, DUQUE A, et al. A model for calculation of steam injector performance [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(5): 841-855.
- [9] CATTADOR G, GALBIATI L, MAZZOCCHI L, et al. A single-stage high pressure steam injector for next generation reactors: test results and analysis [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(4): 591-606.
- [10] 刘继平,严俊杰,邢秦安,等. 超因素两相流加热技术用于电厂低压加热器的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 175-178.

- LIU JI-PING, YAN JUN-JIE, XING QIN-AN, et al. A theoretical research on supersonic heating technology applied for the L. P. heater system in a power plant[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2003, 23(12): 175-178.
- [11] 严俊杰, 刘继平, 林万超, 等. 汽-液两相流喷射升压装置的机理研究[J]. 核动力工程, 2001, 11(6): 45-48.
YAN JUN-JIE, LIU JI-PING, LIN WAN-CHAO, et al. Research on mechanism of steam-water two-phase flow injector[J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 11(6): 45-48.
- [12] 刘继平, 严俊杰, 林万超, 等. 低进汽压力下超音速汽液两相流升压特性试验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(2): 268-270.
LIU JI-PING, YAN JUN-JIE, LIN WAN-CHAO, et al. Experimental research on the performance of the supersonic steam-water two-phase flow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(2): 268-270.
- [13] 刘继平, 严俊杰, 林万超, 等. 汽液两相流激波升压特性实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(1): 1-3.
LIU JI-PING, YAN JUN-JIE, LIN WAN-CHAO, et al. Experimental research on the steam-water two-phase flow shock wave injector[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(1): 1-3.
- [14] 刘继平, 严俊杰, 林万超, 等. 进水温度对汽液两相流激波升压特性影响实验研究[J]. 热能动力工程, 2001(6): 622-624.
LIU JI-PING, YAN JUN-JIE, LIN WAN-CHAO, et al. Experimental research on influence of inlet temperature to the steam-water two-phase flow shock wave injector[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(6): 622-624.
- [15] 严俊杰, 刑秦安, 林万超, 等. 火电厂热力系统经济性诊断理论及应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [16] 张春发, 郭民臣. 电厂热力系统分析中的两个重要参量[J]. 工程热物理学报, 1993, 14(4): 365-368.
- ZHANG CHUN-FA, GUO MIN-CHEN. Two important parameters in electric power heat system analization[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1993, 14(4): 365-368.
- [17] 张学蕾, 王松龄, 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 XUE-LE, WANG SONG-LING, CHEN HAI-PING, 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.
- [18] 刘强, 郭民臣, 刘朋飞. 抽汽压损对机组热经济性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 5(3): 22-26.
LIU QIANG, GUO MIN-CHEN, LIU PENG-FEI. Study on the influence of extraction steam loss on thermal economy of unit[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 5(3): 22-26.
- [19] 胥建群, 周克毅, 张雄, 等. 关于常规热平衡法、等效焓降法整体算法和等效焓降法局部简化算法的一致性的探讨[J]. 汽轮机技术, 2000, 42(4): 214-218.
XU JIAN-QI, ZHOU KE-SONG, ZHANG XIONG, et al. Analysis of the equivalence between the equivalent enthalpy drop method and the habitual thermal balance method [J]. Turbine Technology, 2000, 42(4): 214-218.
- [20] 江峰, 王培红. 等效焓降与热平衡算法的一致性证明与验证[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(4): 261-264.
JIANG FENG, WANG PEI-HONG. The normal energy balance method and the equivalent heatdrop methods[J]. Turbine Technology, 2008, 50(4): 261-264.

(编辑 陈移峰)