

# 基于低温省煤器的回热系统最佳焓升分配研究

谭良红<sup>1</sup>, 胡三高<sup>1</sup>, 曹晟磊<sup>1</sup>, 安丰波<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 2. 华能临沂发电有限公司, 山东 临沂 276016)

**摘要:** 针对带有低温省煤器的N300机组, 建立有大量外部热量引入时最佳焓升分配的数学模型, 并利用遗传算法对焓升进行优化。结果表明: 优化后的方案利用更多低参数抽汽节省了更多高参数的抽汽, 相比于未优化的机组, 煤耗降低了0.54 g, 节能效果显著, 因此对有大量外部热量引入的回热系统重新进行焓升分配是非常有必要的。

**关键词:** 回热系统; 低温省煤器; 焓升分配; 遗传算法

中图分类号: TM621.2 文献标识码: A  
DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.09.014

## 引言

汽轮机的回热系统是火电厂热力系统中的重要组成部分, 通过高参数蒸汽和低参数蒸汽的合理配合将凝结水加热到给水温度, 提高吸热温度降低了锅炉传热过程中的不可逆损失, 而且减少了抽汽的冷凝损失, 从而达到提高机组效率的目的, 因此, 回热系统对汽轮机的经济性运行具有重要影响。

合理的选择抽汽参数, 使焓升达到最佳分配, 有助于提高回热系统的经济性。对于焓升分配的研究方法主要分为两类, 第一类是通过一定的假定条件进行简化后, 利用多元函数求偏导、求极值的方法求取焓升的最佳分配。文献[1]通过对汽轮机效率的求偏导, 得到给水焓升最佳分配的通用表达式; 文献[2]以质量单元矩阵分析法为基础, 推导回热系统最佳焓升分配的算式。第二类是考虑各变量存在不连续, 通过建立目标函数和确定约束条件, 利用运筹学的各种寻优方法进行优化。文献[3]利用多项式回归法建立各相关参数间的函数关系式, 通过加速单纯形法对N200机组的焓升进行优化; 文献[4]利用正多面体法对热力参数进行综合优化; 部分学者利用粒子群算法和遗传算法对压水堆核电机组以及火电机组的焓升分配进行优化, 效果明显<sup>[5-7]</sup>。

在对火电机组节能增效方面的研究中, 通过加设低温省煤器回收烟气余热提高机组效率的方法得到了广泛的应用, 并取得了较好的经济效益<sup>[8-9]</sup>, 然而, 有关低温省煤器所引入热量对回热系统最佳焓升分配的影响鲜有研究。本文考虑低温省煤器所引入外部热量的影响, 以带有低温省煤器的N300机组为例, 对热平衡方程进行改进, 建立有大量外部热量引入时的最佳焓升分配的数学模型, 并进行优化计算。

## 1 数学模型的建立

### 1.1 功率方程

带有低温省煤器的再热机组如图1所示, 为了研究低温省煤器对最佳焓升分配的影响, 将低温省煤器视为一个回热加热器, 凝结水的吸热量全部来自于烟气, 其抽汽量为零。汽轮机对外做功如式(1)所示:

$$w = (h_0 - h_c + \sigma) - \alpha^T Y - \alpha_f^T Y_f \quad (1)$$

式中:  $h_0$ —主蒸汽焓值, kJ/kg;  $h_c$ —汽轮机的排汽焓, kJ/kg;  $\sigma$ —再热蒸汽的焓升, kJ/kg;  $Y_f^T$ —轴封漏汽的做功不足;  $\alpha_f^T$ —轴封漏汽份额;  $\alpha^T$ —各段抽汽的份额; 考虑低温省煤器引入的影响, 其中低温省煤器没有消耗抽汽, 抽汽份额为零,  $\alpha_{LPE} = 0$ 。 $\alpha^T$ 表达式如下:

$$\alpha^T = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \alpha_3 \ \alpha_4 \ \alpha_5 \ \alpha_6 \ \alpha_7 \ \alpha_{LPE} \ \alpha_8] \quad (2)$$

$$Y^T = [h_1 - h_c + \sigma \ h_2 - h_c + \sigma \ h_3 - h_c \ \dots \ h_7 - h_c, \ 0 \ h_8 - h_c] \quad (3)$$

$Y$ : 为各段抽汽的做功不足, 抽汽用于加热凝结水则有部分做功不足, 由于第一段抽汽和第二段抽汽在再热之前, 所以做功不足包括再热的热量。

收稿日期: 2015-10-28; 修订日期: 2015-12-18  
作者简介: 谭良红(1990-), 男, 湖南茶陵人, 华北电力大学研究生。  
通讯作者: 胡三高(1963-), 男, 华北电力大学教授。



反复迭代计算抽汽的压力和温度; 考虑抽汽的压损和上端差  $\bar{\theta}_j$ , 得到各回热加热器凝结水出口温度; 考虑下端差  $\bar{\Phi}_j$ , 得到疏水温度; 最后调用 IF97 的程序计算疏水焓值, 入口、出口焓值, 其表达式如下:

抽汽压力:

$$p_j = f(h_j, s_j) \quad (8)$$

抽汽温度:

$$T_j = f(h_j, s_j) \quad (9)$$

汽侧饱和温度:

$$T_{sj} = f(p_j - \Delta p_j) \quad (10)$$

出口温度:

$$\bar{t}_j = T_{sj} - \bar{\theta}_j \quad (11)$$

疏水温度:

$$\bar{t}_{sj} = \bar{t}_{j+1} + \bar{\Phi}_j \quad (12)$$

对于第七级回热加热器, 低温省煤器引入了固定热量, 通过热量守恒定律, 可以计算出第七级加热器入口的焓值, 从而得到第七级加热器的各参数。

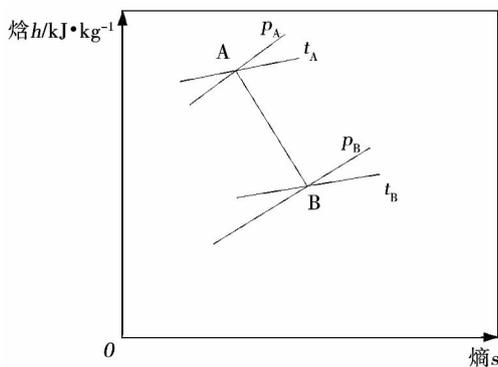


图 2 热力过程线

Fig. 2 Thermodynamic process lines

## 2 目标函数与约束条件

在已知抽汽焓值和上下端差时, 各加热器出口焓值只与抽汽焓值有关, 各级加热器的热力参数可以通过计算求得, 根据已知的热力参数可以得到焓升矩阵、结构矩阵和轴封漏汽的结构矩阵, 再通过矩阵运算求得抽汽份额, 因此各段抽汽份额只与第一段抽汽至本级抽汽的抽汽焓值有关, 有如下关系式:

$$\alpha_1 = f(h_1, h_2) \quad (13)$$

$$\alpha_2 = f(h_1, h_2, h_3) \quad (14)$$

$$\alpha_3 = f(h_1, h_2, h_3, h_4) \quad (15)$$

$$\alpha_4 = f(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5) \quad (16)$$

$$\alpha_5 = f(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6) \quad (17)$$

$$\alpha_6 = f(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7) \quad (18)$$

$$\alpha_7 = f(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, Q_{LPE}) \quad (19)$$

$$\alpha_8 = f(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, Q_{LPE}, h_8) \quad (20)$$

对热力系统焓升最佳分配研究的目的是通过优化机组的焓升分配, 提高机组的效率, 因此本文以汽轮机效率的最大值为目标函数, 汽轮机效率是抽汽份额和抽汽焓值的函数, 而抽汽份额是通过抽汽焓值确定的, 因此最终的目标函数转化为各抽汽焓值的复合函数, 即:

$$\eta_i = F(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, Q_{LPE}, h_8) \quad (21)$$

根据热力系统的特点, 各段抽汽的焓值必须满足的约束条件, 如下式所示。

$$St: \begin{cases} h_0 - h_1 > 0 \\ h_1 - h_2 > 0 \\ h_2 - h_{zr}' \geq 0 \\ h_{zr}'' - h_3 > 0 \\ h_3 - h_4 > 0 \\ h_4 - h_5 > 0 \\ h_5 - h_6 > 0 \\ h_6 - h_7 > 0 \\ h_7 - h_8 > 0 \\ h_8 - h_c > 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $h_{zr}'$ —高压缸的排汽焓值  $\text{kJ/kg}$ ;  $h_{zr}''$ —中压缸入口的蒸汽焓值  $\text{kJ/kg}$ 。

## 3 遗传算法

遗传算法是利用生物进化论的自然选择和遗传学理论构建的一种智能算法<sup>[11]</sup>。通过计算每个个体的适应度, 按照优胜劣汰的原则逐步淘汰适应度差的个体, 使个体逐步向最优解演化, 在个体的选择中除了按适应度进行选择, 还考虑遗传学中组合交叉和变异所产生的新个体。在不断产生新个体的过程中, 群体的适应度不断提高, 直到达到最大迭代次数或小于最小偏差的终止条件, 从而获得最优解<sup>[12]</sup>。

### (1) 构造适应度函数

适应度函数具有非负性, 而目标函数满足非负性, 适应度函数如下:

$$F(h) = F(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, Q_{LPE}, h_8) \quad (23)$$

(2) 编码

遗传算法不能直接处理实际问题的参数,必须将参数转换成遗传空间中的染色体或个体,这就是编码,常用的编码技术有二进制编码、浮点数编码和字符编码,考虑计算的精度,本文采用浮点数编码。

(3) 初始群体选取

遗传算法中的个体是通过随机产生的,但由于此问题带有约束条件,为保证初始群体的数目,先随机生成一定数目的个体,选取满足约束条件个体加到初始群体中,直到初始群体中个体数目达到预先确定的规模。

(4) 遗传操作

遗传操作包括三个基本遗传算子:选择、交叉和变异。选择是通过优胜劣汰的方式选取适应度高的个体,选择算子有适应度比例法、随机遍历法和局部选择法。交叉是将二个父代个体的部分基因进行替换和重组生成新的个体,交叉重组最常用的是单点交叉。变异是对个体基因值作变动,维持群体的多样性,防止出现未成熟收敛现象。

4 实例计算

以带有低温省煤器的 N300 机组为例,给水压力为 20.14 MPa,给水温度为 276.7 °C;主蒸汽压力为 16.8 MPa,温度为 541 °C;再热蒸汽压力为 3.485 MPa,再热温度为 541 °C;汽轮机的排汽压力

0.005 5 MPa,干度为 0.91。机组原设计采用的是三高四低一除氧的回热系统,其中第一段、第二段抽汽来自于高压缸,第一段抽汽的焓值为 3 144.7 kJ/kg,第二段抽汽的焓值为 3 035.6 kJ/kg,第三段抽汽的焓值为 3 390.8 kJ/kg,第四段抽汽为 3 135.6 kJ/kg,第五段抽汽的焓值为 2 940.2 kJ/kg,第六段抽汽的焓值为 2 764.0 kJ/kg,第七段抽汽的焓值为 2 669.3 kJ/kg,第八段抽汽的焓值为 2 617.7 kJ/kg;各段抽汽的压损为 5%。在设计工况下,汽轮机的效率为 46.99%。在节能减排改造过程中,在空预器出口加设了低温省煤器,低温省煤器串联于七号加热器和八号加热器中间,回收烟气从 130 °C 到 90 °C 的热量,相对于单位质量主蒸汽所回收的热量为 60 kJ/kg。在原设计中,回热系统各回热加热器的上下端差如表 1 所示。

表 1 各回热加热器的端差

Tab. 1 Terminal temperature difference of various reheaters

回热加热器	1	2	3	4	5	6	7	8
上端差	-1.6	0	0	0	2.7	2.8	2.8	2.8
下端差	5.6	5.6	5.6	—	5.6	5.6	5.6	5.6

利用遗传算法,对基于低温省煤器的回热系统进行最佳焓升的计算,回热加热器的端差取原设计机组的值,低温省煤器依然串联与七号和八号加热器中间,将优化的结果和原机组的结果相比较,计算结果如表 2 所示。

表 2 遗传算法优化结果和未优化结果的比较

Tab. 2 Comparison of the results optimized by using the genetic algorithm with those not optimized

编号	优化情况			未优化情况		
	抽汽焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	焓升/kJ·kg <sup>-1</sup>	抽汽份额	抽汽焓值/kJ·kg <sup>-1</sup>	焓升/kJ·kg <sup>-1</sup>	抽汽份额
1	3 144.7	133.0	0.066 1	3 144.7	133.0	0.066 1
2	3 035.6	239.7	0.104 1	3 035.6	160.4	0.072 3
3	3 285.0	113.2	0.038 3	3 390.8	192.5	0.064 3
4	3 135.6	155.4	0.046 9	3 135.6	150.3	0.045 7
5	2 933.1	91.8	0.028 7	2 940.2	126.2	0.039 3
6	2 805.1	41.7	0.013 0	2 764.0	70.4	0.021 7
7	2 747.3	58.7	0.018 0	2 669.3	26.6	0.008 2
LPE	—	78.9	0	—	78.9	0
8	2 553.9	140.0	0.039 4	2 517.7	115.1	0.032 1

由表 2 可知,对于未优化的情况,由于低温省煤器串联于七号加热器与八号加热器中间,引入的外部热量使得七号加热器的焓升由原来的 105.5 kJ/kg 降低为 26.6 kJ/kg,减少了七号加热器的抽汽,但对其它更高参数抽汽的影响几乎没有,所排挤的第七段抽汽返

回到汽轮机中做功,提高了机组的效率。优化后机组效率为 0.473 3,未优化机组效率为 0.472 5,效率的相对变化率为 0.55%,煤耗降低了 1.76 g/(kW·h)。

对于遗传算法优化的方案,考虑低温省煤器所带入的热量对最佳焓升分配的影响,增大了凝结水

在八号加热器的焓升,并且七号加热器的焓升由原来的 26.6 kJ/kg 增加到 58.6 kJ/kg,而五号和六号加热器中的凝结水焓升有一定程度的降低,从而使第八段抽汽量和第七段抽汽量增多,第五段抽汽量和第六段抽汽量减少,消耗了更多的低参数蒸汽,节省了更多的相对高参数的蒸汽,充分利用了低温省煤器回收的热量和汽轮机的抽汽,使得机组的焓升分配更为合理,机组的效率得到了更多的提高,机组效率的相对变化率达到了 0.72%,煤耗降低了 2.30 g/(kW·h)。

对基于低温省煤器热力系统进行最佳焓升分配优化,节能效果较为明显,对于优化后的方案,虽然低温省煤器的换热面积增大了 15%,但是煤耗多降低了 0.54 g/(kW·h),以机组每年运行 5 000 h 为例计算,一年可节省 810 t 燃煤。因此对于有固定数量的外部热量引入回热系统时,应考虑外部热量对焓升分配的影响,对回热系统的焓升分配进行重新优化,更多的提高机组的效率。

## 5 结 论

本文考虑低温省煤器所引入外部热量对焓升分配的影响,建立了基于低温省煤器回热系统最佳焓升分配的数学模型;并以带有低温省煤器的 N300 机组为例,利用遗传算法进行最佳焓升分配的优化,计算的结果表明:采用优化后,更多低参数的抽汽被消耗而节省了部分高参数的蒸汽,充分利用了烟气的余热和汽轮机的抽汽,更多的提高了汽轮机的效率,相比于未优化的情况,焓升分配更加趋于合理,煤耗降低了 0.54 g/(kW·h),每年可节省 810 吨燃煤,节能和经济效果显著;因此对于有大量热量引入回热系统的情况,应考虑外部热量对焓升分配的影响,对回热系统的焓升分配进行优化,获得更高的机组效率。

## 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 06: 404 - 406 + 409.  
LI Yong ,HUANG Ping-li. Optimized distribution of the enthalpy rise of the feed-water to heaters in the reheat system of a steam turbine[J]. Steam Turbine Technology 2008 06: 404 - 406 + 409.
- [2] 陈海平,林安飞,武俊峰. 基于质量单元矩阵分析法的回热系统给水焓升最佳分配[J]. 热力发电 2006 09: 11 - 14 + 2.  
CHEN Hai-ping ,LIN An-fei ,WU Jun-feng. The optimal enthalpy rise distribution of a recuperative system based on the mass unit matrix analytic method[J]. Thermal Power Generation 2009 09: 11 - 14.
- [3] 王运民. 汽轮机回热系统给水焓升的最优分配[J]. 汽轮机技术 2003 04: 217 - 218 + 245.
- [4] WANG Yun-min. Optimized distribution of the enthalpy rise of the feedwater in the recuperative system of a steam turbine[J]. Steam Turbine Technology 2003 04: 217 - 218.
- [4] 赵 毅,安敏善. 回热再热汽轮机热力系统参数综合优化研究[J]. 中国电机工程学报 1991 01: 49 - 56.  
ZHAO Yi ,AN Min-shan. Study of the comprehensive optimization of the parameters of a recuperative and reheat thermal system of a steam turbine[J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering ,1991 01: 49 - 56.
- [5] 付文锋,王蓝婧,李 飞,等. 基于改进动态自适应粒子群优化算法的汽轮机组给水回热分配优化方法[J]. 动力工程学报, 2014 08: 653 - 659.  
FU Wen-feng ,WANG Lan-jing ,LI Fei ,et al. Method for optimizing the feedwater recuperative distribution in a steam turbine unit based on the improved dynamic PSO algorithm[J]. Journal of Power Engineering 2014 08: 653 - 659.
- [6] 周兰欣,李 飞,付文锋,等. 基于粒子群算法的压水堆核电机组回热系统优化[J]. 热力发电 2014 09: 5 - 11.  
ZHOU Lan-xin ,LI Fei ,FU Wen-feng ,et al. PSO algorithm-based optimization of the recuperative system of a PWR nuclear power plant[J]. Thermal Power Generation 2014 09: 5 - 11.
- [7] 张俊礼,葛 斌. 遗传算法在压水堆核电机组给水回热分配中的应用[J]. 中国电机工程学报 2005 06: 155 - 159 .  
ZHANG Jun-li ,GE Bin. Applications of the genetic algorithm in the feedwater recuperative distribution of a PWR nuclear power unit [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering , 2005 06: 155 - 159.
- [8] 徐 钢,许 诚,杨勇平,等. 电站锅炉余热深度利用及尾部受热面综合优化[J]. 中国电机工程学报 2013 14: 1 - 8 + 15.  
XU Gang ,XU Cheng ,YANG Yong-ping ,et al. In-depth utilization of the waste heat from a utility boiler and comprehensive optimization of the heating surface in the tail portion [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering 2013 14: 1 - 8.
- [9] 赵之军,冯伟忠,张 玲,等. 电站锅炉排烟余热回收的理论分析与工程实践[J]. 动力工程 2009 11: 994 - 997 + 1012.  
ZHAOZhi-jun ,FENG Wei-zhong ,ZHANG Ling ,et al. Theoretical analysis and engineering practice of the heat recovery from the exhaust flue gases of a utility boiler[J]. Journal of Power Engineering 2009 11: 994 - 997.
- [10] 杨海生,郭江龙,孟向明. 汽轮机性能验收试验中低压缸热力过程线的处理方法[J]. 热力发电 2007 02: 39 - 41 + 44.  
YANG Hai-sheng ,GUO Jiang-long ,MENG Xiang-ming. Method for processing the thermal process lines of the low pressure cylinder in the performance acceptance test of a steam turbine [J]. Thermal Power Generation 2007 02: 39 - 41.
- [11] 金 芬. 遗传算法在函数优化中的应用研究[D]. 苏州大学 2008.  
JIN Fen. Study of the applications of the genetic algorithm in the optimization of functions [D]. Suzhou: Suzhou University 2008.
- [12] 崔珊珊. 遗传算法的一些改进及其应用[D]. 中国科学技术大学 2010.  
CUI Shan-shan. Some of the improvements in the genetic algorithm and their applications [D]. China University of Science and Technology 2010.

(刘 瑶 编辑)

hai ,China ,Post Code: 200090) ,HAN Tao ,PAN Wei-guo ,WANG Wen-huan ,DING Cheng-gang ( Shanghai Research Center for Power Generation and Environmental Protection Engineering Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31( 9) . -75 ~82

To meet the stringent quota for emissions for the purpose of environmental protection ,further reduce the sulfur oxide emissions from flue gases outgoing from coal-fired units and realize the ultra low emissions meeting the quota for the emissions concentration of a gas-fired unit ,on the basis of the existing flue gas desulfurization devices in a thermal power plant in operation ,an efficiency-enhancement reconstruction of the foregoing equipment items was performed. The life cycle assessment ( LCA) was employed to evaluate the FGD system of a 1 000 MW supercritical coal-fired unit before and after the reconstruction ,study the potentials that the production ,transportation and desulfurization totaling three processes of the limestone and other main engineering materials influence the environment and calculate the energy consumption rates of the foregoing processes and their impact on the environment. It has been found that after the reconstruction ,the sulfur dioxide emissions concentration can decrease from 56.9 mg/m<sup>3</sup> to 30.86 mg/m<sup>3</sup> , each year reducing the emissions by 292.8 t. The resource depletion coefficient will increase by 19.98 population equivalent and the potential influencing the environment will decrease by 32 069.43 population equivalent. **Key words:** life cycle evaluation ,ultra low emissions ,flue gas desulfurization ,resource consumption ,environmental impact

基于低温省煤器的回热系统最佳焓升分配研究 = **Study of the Optimum Enthalpy Rise Distribution of a Low Temperature Economizer Recuperative System** [刊 ,汉] /TAN Liang-hong ,HU San-gao ,CAO Sheng-lei ( College of Energy Source ,Power and Mechanical Engineering ,North China University of Electric Power ,Beijing , China ,Post Code: 102206) ,AN Feng-bo ( Huaneng Linyi Power Generation Co. Ltd. ,Linyi ,China ,Post Code: 276016) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31( 9) . -83 ~87

For a N300 unit equipped with a low temperature economizer ,established was a mathematical model for optimum enthalpy rise distribution when a large quantity of heat was being introduced from the outside world and utilized was the genetic algorithm to optimize the enthalpy rise. The calculation results show that the optimized version can utilize more steam extracted at low parameters ,thus save more steam extracted at high parameters. Compared with the units not optimized ,the coal consumption rate of the optimized unit will decrease by 0.54 g ,thus achieving an obvious energy-saving result and indicating that to conduct an enthalpy rise distribution once again is most necessary for a recuperative system into which a large quantity of heat is being introduced from the outside world. **Key words:** recuperative system ,low temperature economizer ,enthalpy rise distribution ,genetic algorithm

三室电除尘器前烟道的数值模拟与结构优化 = **Numerical Simulation and Structural Optimization of the Flue Gas Duct Before a Three-chamber Electrostatic Precipitator** [刊 ,汉] /JIA Yan ,CUI Hao ( China Electric Power Engineering Consultancy Group ,South China Electric Power Designing Institute Co. Ltd. ,Wuhan ,China ,Post