

电站锅炉热管空气预热器优化设计数学模型

黄新元 (山东工业大学)

摘要 本文提出电站锅炉热管式空气预热器优化设计的数学模型,将预热器最低管子壁温的控制条件引入约束函数矢量;对最优化技术在热管空气预热器设计中应用的方法特点作了说明,并给出一个计算实例。

关键词 电站锅炉 热管 空气预热器 数学模型

分类号 TK17.4 TK22.34 O224

0 引言

为解决电站锅炉空气预热器的低温腐蚀、堵灰和漏风问题,国内不少电厂相继设计安装了热管式空气预热器以取代原有管式空气预热器或暖风器,取得较佳效果。目前电站锅炉采用热管空气预热器的这种趋势和规模还在扩大。如何利用电子计算机结合最优化技术来选择热管空气预热器的结构参数,最大限度地降低设备造价及运行费用,已成为人们所关心的问题。

本文提出电站锅炉热管空气预热器优化设计的一个数学模型,将预热器最末排(按烟气流向)管子壁温的控制条件引入约束函数矢量;从参数及变量分析、建立目标函数、确定约束条件等诸方面对最优化技术应用于电站锅炉热管空气预热器设计的方法特点作了阐述。

笔者在建模过程中采用变量转换系统描述状态参数,使模型具有灵活性和通用性。

1 数学模型

1.1 参数与变量分析

热管空气预热器所处的流动、传热物理状态由下述一组状态参数单值地确定:烟气流量 M_1 ,空气流量 M_2 ,烟气进口温度 t_1 ,空气进、出口温度 t_2, t_2' ,烟气流速 w_1 ,空气流速 w_2 ,预热器的热、冷通道长度 L_1, L_2 ,热管管束横、纵向节距 S_1, S_2 ,管束横、纵向排数 m, n ,热管热、冷段长度 l_1, l_2 ,光管直径 d_0 ,管壁厚度 δ ,翅片高度 h_r ,翅片厚度 δ_r ,热管热、冷段翅片间距 S_{r1}, S_{r2} ,流动方式 β (逆、顺、叉流),排列方式 γ (错、顺排),流程数 u 。这24个状态参数中, d_0, β, γ 和 u 为离散量,其余则为连续量。

现将全部状态参数表示为 $Z = Z(C_0, X, Y)$, $Z \in E^{24}$ 。其中 C_0 为定值量, Y 为相关变量, X 为独立变量或决策变量。

对于热管式空气预热器的设计,烟气流,量,空气流量,烟气进口温度、空气进、出口温度这5个参数均由设计任务给定,不能随意变动,属于定值量 C_0 。

收稿日期 1993 02 15 修改定稿 1993 10 15

本文联系人 黄新元 男 46 副教授 250014 济南山东工业大学动力系

剩余 19 个可以调整的参数中,真正独立的仅有 14 个,这是因为在预热器所处的物理状态,存在以下 5 个参数关联式:(1) $C_2 M_2 (t_2 - t_1) = K \cdot \Delta t \cdot H$; (2) $L_1 = l_1 + \Delta l_1$; (3) $L_2 = l_2 + \Delta l_2$; (4) $w_1 = \frac{M_1}{\rho_1(m+1)S_1 \varepsilon_1}$; (5) $\frac{w_2}{w_1} = \frac{\rho_1 L_1 M_2 \varepsilon_1}{\rho_2 L_2 M_1 \varepsilon_2}$

14 个状态参数中选择哪些作独立变量显然不能是任意的。由函数联系矩阵(表 1)可以解出一组可能的独立变量组合,它们是 $X = X(\beta, \gamma, u, L_1, L_2, S_1, S_2, d_0, w_1, S_{r1}, S_{r2}, h_t, \delta, \delta_r)$; 相关变量为 $Y = Y(l_1, l_2, m, n, w_2)$ 。

表 1 函数联系矩阵

序号	β	γ	u	w_1	w_2	L_1	L_2	S_1	S_2	m	n	l_1	l_2	d_0	h_t	S_{r1}	S_{r2}	δ	δ_r	关联方程式
1	1°	1°	1°	(1°)	(1°)					(1°)	1°	(1°)	(1°)	1°	(1°)	(1°)	(1°)			1) $f(w_1, w_2, d_0, h_t, S_{r1}, m, n, l_1, l_2, S_{r2}, \beta, \gamma, u,) = 0$
2						1°						1°								2) $f(L_1, l_1) = 0$
3							1°						1°							3) $f(L_2, l_2) = 0$
4				1°				1°		1°				(1°)	1°	1°			1°	4) $f(w_1, m, S_1, d_0, h_t, S_{r1}, \delta_r) = 0$
5				(1°)	1°	(1°)	(1°)	(1°)						(1°)	(1°)	(1°)	1°		(1°)	5) $f(w_1, w_2, L_1, L_2, d_0, h_t, S_{r1}, S_{r2}, S_1, \delta_r) = 0$

此时,独立变量 X 取得热管空气预热器优化设计中最大可能的自由度。

实际设计时,由于各种要求及限定,使 X 的自由度进一步减少,X 中的某些参数将作为定值量转移到 C_0 中去或者作为相关变量转移到 Y 中去;最终保留的独立变量即为决策变量。例如,从对传热经济的理解和简化系统的要求出发,可以将流动方式选定为逆流,排列方式选定为错排,流程数选定为 1,从而使 β, γ, u 退出独立变量;从减轻空气预热器堵灰,腐蚀的特定设计要求,继续引入 4 个控制烟侧热管结构的关联方程式,从而使 $S_{r1}, h_t, S_1,$ 和 S_2 也成为相关变量,这 4 个相关联系式是:

- (1) $S_{r1} = a_1 d_0$
- (2) $h_t = a_2 d_0$
- (3) $S_1 = a_3 (d_0 + 2h_t)$
- (4) $S_2 = a_4 S_1$

式中 a_i 为常数 ($i = 1, 2, 3, 4$)

在上述情况下,决策变量是:

$$X = X(L_1, d_0, w_1, S_{r2}, L_2, \delta, \delta_r) \quad (1)$$

式(1)是笔者为热管式空气预热器优化设计确定的一组一般型式的决策变量。

1.2 目标函数

由于实际问题的要求不同,所要研究的经济指标会有不同。鉴于电站锅炉热管空气预热器优化设计比较的基础是生产指定数量与质量的产品(热能),产生完全相同的效益

(由解决堵灰、腐蚀等问题带来的发电效益、检修效益、风机电耗节省等),因此以开销的总费用最少为追求的一个目标显然是合理的。按照“年计算费用法”,建立目标函数为:

$$F = T_c \cdot E_r + T_H$$

式中 T_c —热管空气预热器的投资费用,取决于热管换热总表面积, $T_c = C_h \cdot G_h + C_k \cdot r_f \cdot G_h$;

E_r —投资效益系数

T_H —预热器的年运行费用,作为支配因素,本模型只考虑其中最大的两项:设备折旧费用 $T_{H1} = T_c / \tau$;及风机的动力消耗费用

$$T_{H2} = \frac{V_1 \Delta P_1 + V_2 \Delta P_2}{1000 \eta} \tau_a \cdot C_a$$

以上热管空气预热器的投资费用 T_c , 折旧费用 T_{H1} 和风机动力消耗 T_{H2} 都是决策变量 $X(L_1, d_0, w_1, S_{t2}, L_2, \delta, \delta_f)$ 的函数,因而目标函数 F 也是决策变量 X 的函数。使 F 达到最小值时的解 $X = X^*$, 即为满足全部设计要求限制下,使年计算费用最为节省的热管空气预热器的结构参数。

1.3 约束函数

1.3.1 管子壁温约束

在所有决策变量的变动范围内,预热器最末排(按烟气流向)管子的壁温应高于某一控制温度,以避免烟气中 H_2SO_4 蒸汽结露、腐蚀,产生粘沉积灰。对于常规的空气预热器,要保持受热面最低壁温高于烟气露点,势必抬高排烟温度,从技术经济上考虑很难做到。而热管空预器的独到之处是可以不提高排烟温度而只通过调整热管结构来大幅度调高壁温,因而完全有可能将最低管子壁温控制在烟气露点以上,这是第一个要求。另一方面,热管空气预热器第一排管子的壁温应低于热管安全工作温度 t_s , 以免爆管,这是第二个要求。这两个要求给出数学表达式,构成管子壁温约束函数:

$$t_1 - \frac{q}{\alpha_1 A_{10}} \geq t_s \quad (2)$$

$$t_1 - \frac{q}{\alpha_1 A_{10}} \leq t_s \quad (3)$$

式中, t_1 为预热器热管结构参数的复杂函数,当预热器的入口烟温低于 250°C 时,可以撤消式(3)约束,而仅在优化计算结束之后予以校核即可。

1.3.2 流动阻力约束

对烟气及空气的流动阻力约束是考虑在绝大多数空气预热器改造的实践中,通常不允许流动压降大于某一限值,否则将引起更换风机的必要。或不得不降低锅炉燃烧出力。因此,原有风机在克服所有其它受热面部件的流动阻力之后所剩余的压头裕量,即规定了所设计热管空气预热器的最大允许流动压降 $[\Delta P_1], [\Delta P_2]$, 约束函数为:

$$\text{烟气侧: } \Delta P_1 \leq [\Delta P_1]$$

$$\text{空气侧: } \Delta P_2 \leq [\Delta P_2]$$

式中的阻力计算采用前苏联公式(该式虑及翅片间距对流阻的影响)

$$\Delta P_i = 2.7 \left(\frac{d_i^*}{d_{ni}} \right)^{0.3} \times Re_i^{*-0.25} \cdot w_i^2 \cdot \rho_i \cdot C_n \cdot n \quad (i = 1, 2)$$

1.3.3 决策变量边界约束

决策变量边界约束是对决策变量取值范围上、下限的规定。与热管元件的制作工艺条件、预热器物理过程约束及现场实际情况有关。例如,空气预热器的平均烟速 w_1 , 其低限值由不发生堵灰的最低烟速决定,其高限则由烟气对管子磨损条件而定。决策变量边界约束可表示为:

$$X_{\min} \leq X \leq X_{\max}$$

1.4 数学模型

综上所述,为电站锅炉热管空气预热器的优化设计建立如下数学模型:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F = T_c \cdot E_r + \frac{T_c}{\tau} + \frac{(V_1 \Delta P_1 + V_2 \Delta P_2) \tau_a \cdot C_e}{1000 \eta} \quad (4) \\ \text{s.t} \quad \Delta P_1 \leq [\Delta P_1] \quad (5) \\ \quad \Delta P_2 \leq [\Delta P_2] \quad (6) \\ \quad t_1' - \frac{q}{\alpha_1 A_{10}} \geq t_L \quad (7) \\ \quad t_1' - \frac{q}{\alpha_1 A_{10}} \leq t_j \quad (8) \\ \quad X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \quad (9) \end{array} \right.$$

2 计算实例

某电厂 35 t/h 锅炉燃用高硫煤,管式空气预热器严重腐蚀、堵灰、清灰周期不到一个月,预热器寿命仅为半年。要求为其设计并运行的两台翅片热管空气预热器取代原预热器的低温段。给定如下设计资料:煤发热量 $Q_1 = 20\ 110\ \text{kJ/kg}$;烟气流量 $M_1 = 61\ 360\ \text{kg/h}$,空气流量 $M_2 = 49\ 020\ \text{kg/h}$,入口烟温 $t_1 = 210\ ^\circ\text{C}$,冷风温度 $t_2 = 15\ ^\circ\text{C}$,热风(低温段出口)温度 $t_2' = 75\ ^\circ\text{C}$,烟气露点 $t_L = 123\ ^\circ\text{C}$,要求预热器逆流布置、单回程。

设计中作如下考虑:

为节省热管使用量,预热器采用错排;

根据现场条件,烟道尺寸 $L_1 = 1.6\ \text{m}$ 难以变动,取为常数;从保证管子磨损寿命及翅片热管工艺条件,取光管壁厚 $\delta = 2.5\ \text{mm}$,翅片厚度 $\delta_r = 1.2\ \text{mm}$,也为常数。据此,本文 1.1 节给出的模型中,变量 L_1, δ 及 δ_r 作为定值量转移到 C_0 中去。于是,有 4 个变量最后确定为本次设计的决策变量 $X, X = X(d_0, w_1, S_{r2}, L_2)$ 。

对于 1.4 节数学模型中各常数,取值如下: $M_1 = M_2 = 30, a_1 = a_2 = 0.4, a_3 = 1.5, a_4 = \sin 60^\circ, [\Delta P_1] = 392, [\Delta P_2] = 440, t_L = 123, E_r = 0.12, \tau_a = 8040, \tau = 3, C_e = 0.1, C_h = 17, C_k = 6, r_1 = 0.9, \eta = 0.9$

各决策变量的边界约束由工艺及现场条件确定如下:

$$\begin{aligned} 25 &\leq d_0 \leq 40 \\ 8 &\leq w_1 \leq 13 \\ 4 &\leq S_{r2} \leq 25.4 \\ 500 &\leq L_2 \leq 1000 \end{aligned}$$

入口烟温 $210\ ^\circ\text{C}$ 小于 $250\ ^\circ\text{C}$,可暂不考虑约束函数式(8)。

以上各条件使数学模型(4)~(9)具体化,构成本次设计的优化模型。这是一个不等式约束四元非线性规划问题,由于目标函数与约束函数的一阶、二阶偏导数无法用解析式表达,故用网格法求解。为本模型编制的计算机程序,运行得如下结果:解向量 $X^*(d_0, w_1, S_{r2}, L_2) = (25, 9.88, 16.3, 840), \Delta P_1 = 312(\text{Pa}), \Delta P_2 = 370(\text{Pa})$,最末排热管壁温 $t_2 = 124.5\ ^\circ\text{C}$,目标函数的最优值 $F = 1.883 \times 10^4$ 元/年。由此确定的最佳结构参数及运行参数的几个主要值为:热管长度 2.44 m,热、冷侧长度比 1.905,热管直径 25 mm,翅片高度 10 mm,热、冷侧翅片间距分别为 10 mm 和 16.3 mm,热管纵向排数 15,烟速 9.88 m/s,风速 10.15 m/s。

对同一问题,对比计算的另一结果为:当 $X = (38, 8, 25.4, 580)$ 时,目标函数 $F = 2.21 \times 10^4$ 元/年。由此看出,与另外一组热管结构参数相比,最优化设计的年节省量至少可达 14.8%。

3 结论

为电站锅炉热管空气预热器优化设计所建立的数学模型可用于选择热管式空气预热器的最佳结构参数;本模型引入预热器的最低壁温控制作为约束函数,使所设计热管空气预热器在抗堵灰耐腐蚀的前提下谋求最高的经济性。笔者使用变量转换方式描述状态参数,使本模型灵活适用,便于在不同设计背景下变通其具体形式作实际问题的计算。

热管空气预热器优化设计的进一步完善,依赖于取得对实际积灰过程规律的定量认识,以及在此基础上探讨对流动阻力影响的数学关系式。

符号

V_1 烟气体积流量; V_2 空气体积流量; G_0 热管总重量;

C_0 热管造价;

r_1 换热器的钢材耗量比, $r_1 = \frac{\text{钢结构重量}}{\text{热管重量}}$;

C_k 钢材价格; C_e 电价; η 风机效率;

τ_0 年运行小时数; τ 预热器寿命; q 热流密度;

α_1 基于热侧光管外表面积的烟气对流放热系数;

A_{10} 热侧光管外表面积;

e_1, e_2 预热器热、冷侧阻断系数;

$\Delta l_1, \Delta l_2$ 热管与烟、风道的端部间隙;

ρ_1, ρ_2 烟气、空气的密度; C_n 管排修正系数;

d^* 相对直径; d_0 水力学平均直径; Re^* 雷诺数

参 考 文 献

- 1 沈幼庭等. 热力系统及设备最优化. 机械工业出版社. 1985
- 2 陈鸿伟. 热管式空气预热器的积灰分析. 热能动力工程, 1989 (6)

(渠源汤 编辑)

【 高效电站 】

效率最高的联合循环电站

据“Modern Power Systems”1993年8月号报道,韩国电力公司的 Seoinchon 联合循环电站已于1992年下半年投入运行,该电站位于汉城以西,离汉城64公里的仁川市。

该电站的主要设备为8套GE STAG 107F联合循环装置。每套装置包括1台159 MW的GE MS7001F燃气轮发电机组和1台83 MW的GE三压余热汽轮发电机。1个排气旁通烟囱允许每套装置既能以简单循环方式又能以联合循环方式运行。

该联合循环电站装机电功率为1910 MW,达到了55%的总(毛)效率,使它成为迄今为止世界上效率最高的联合循环电站。

从签订合同之日起到联合循环投入商业运行仅用了二年半时间,从而使该电站也创造了建设投运时间最短的新记录。

到1993年6月6日为止,该电站的8台燃机已累计运行32000小时;以简单和联合循环方式运行,该电站已发电4880 GW·h。

(学牛 供稿)

() *heat recovery boiler, regeneration restriction, simulation calculation, STIG cycle*

(151) **A Study on the Combustion Stability of Utility Boilers** Chen Gang, Li Fekin, et al. (*Central China Polytechnical University*)

This paper gives a brief description of the theory of boiler combustion stability and presents several types of combustion stabilizing devices, among others, boundary jet-flow bluff-body combustion stabilizer, central return-flow combustion stabilizing device, inward/outward duplex return flow combustion stabilizer, intersection type high concentration pulverized coal burner. Their practical applications have shown that significant economic benefits have been attained as a result of their combustion stabilizing effect due to degreasing and also their enhanced combustion efficiency. **Key words:** *stable combustion, combustion theory, boiler*

(155) **An Exploratory study on the Development of Circulating Fluidized Bed Boilers** Zhang Zidong, Wu Wenyuan, Bao Yilin, Bei Rushan, Zhao Mingquan (*Power Engineering Department of the Harbin Institute of Technology*)

Circulating ratio, as an important design parameter of CFG boilers, exercises a significant influence on boiler design and operation. In this paper the authors deal with the dependence of the circulation ratio on the following factors: the selection of circulating materials, combustion efficiency, separation efficiency of separators, the arrangement of heating surfaces in a dense phase region, superheated steam temperature, etc. In addition, some helpful suggestions concerning the above are also presented. **Key words:** *circulating fluidized boiler, circulating ratio, low circulating ratio, circulating materials*

(159) **Jet-flow Device—a Useful Tool for Enhancing Circulation Water Velocity in Natural Circulation Hot Water Boilers** Zhu Qunyi, Zhang Peting, et al. (*Harbin Institute of Technology*)

Theoretical analysis and experimental study results are given of the performance of a jet-flow device employed in the circulating circuit of natural circulation hot water boiler. Presented in the paper is also a formula for calculating additional head ΔP of the said circuit after the installation of a straight-tube nozzle and a conical one. **Key words:** *hot water boiler, jet-flow device, straight-tube nozzle, conical nozzle*

(163) **A Mathematical Model for the Optimized Design of Heat Pipe Air Preheater of a Utility Boiler** Huang Xinyuan (*Power Engineering Department of Shandong Polytechnical University*)

This paper presents a mathematical model for the optimized design of the heat pipe air preheater of a utility boiler. The control condition of the preheater minimum tube wall temperature has been introduced into the constraint function vector. Some explanatory notes are given regarding the specific features of the method involving the use of optimization techniques during the design of the heat pipe air preheater. A specific calculation example is also presented. **Key words:** *utility boiler, heat pipe, air preheater, mathematical model*

(168) **A Study on the pressure Distribution in Headers of Gas-Liquid Two-Phase Flows in a Horizontal Parallel Tube System** Wu Dongyin (*Xi'an thermotechnical Institute*); Liu Zonghu (*Xi'an Communications University*)