

燃油烟管蒸汽锅炉热力设计优化数学模型的研究

宋正昶, 高建康

(中国矿业大学 机电学院, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 为了优化燃油烟管锅炉热力设计, 根据热力设备优化理论, 分析确定了优化的独立变量和相关变量, 以及目标函数。结合热力设计过程, 对目标函数的中间变量进行了求解, 并确定了优化的约束条件, 建立了完整的优化数学模型。此外, 编制了计算机求解程序, 并对一个典型燃油烟管锅炉进行了优化, 优化结果表明, 该优化模型和求解程序是有效和实用的。

关 键 词: 燃油锅炉; 热力设计优化; 数学模型; 计算机程序

中图分类号: TK212 文献标识码: A

1 引 言

近些年来, 为了减少燃煤污染, 在大中城市以及其他环保要求高的地区, 燃煤中小型锅炉已经禁止使用, 取而代之的是燃油(气)锅炉。我国燃油锅炉制造与国外相比, 起步较晚, 很多厂家都是模仿国外炉型设计制造, 由于缺乏详尽的设计计算资料, 在锅炉主要设计参数的选择上, 如排烟温度、烟气流速, 虽然有一定的范围, 但随意性较大。降低排烟温度可以提高锅炉热效率, 节省燃料, 但要布置更多的受热面, 使初投资增大, 同时提高烟气流速可以节省受热面, 但要增加运行费用^[1]。因此, 应当合理选择这些参数, 设计高效经济的燃油锅炉。

2 物理模型

一种常见的卧式三回程烟管燃油蒸汽锅炉的型式如图 1 所示。

3 优化数学模型的建立

3.1 变量分析及独立变量的选取

为便于分析, 把图 1 简化成图 2。

在热工状态参数中, 水侧参数由锅炉设计要求给定, 不在优化之列, 只需对烟气侧参数优化。烟气

按两参数工质考虑, 取流量和温度为变量, 共有 6 个热工状态参数, 即 $D_1, D_2, D_3, t_1, t_2, t_3$; 对流受热面有 6 个结构状态参数, 即 n_1, d_1, L_1 和 n_2, d_2, L_2 , 分别代表第一和第二管束的管子根数、内径和长度, 这样共 12 个状态变量。由能量平衡知, 在锅炉额定蒸发量和蒸汽设计参数给定的情况下, D_1 是排烟温度 t_3 的单值函数, 分析过程如下:

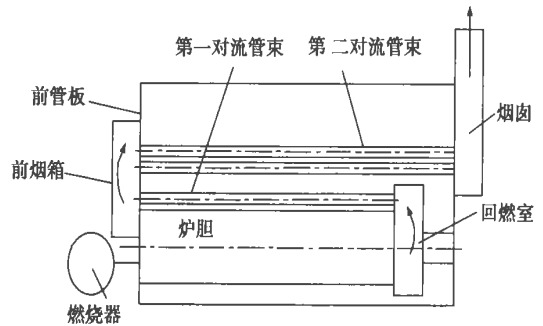


图 1 三回程烟管燃油锅炉示意图

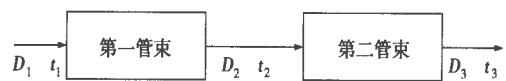


图 2 对流受热面简化图

锅炉效率 $\eta = 100\% - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)\%$, 对燃油锅炉机械未完全燃烧损失 q_4 和化学未完全燃烧损失 q_3 为零, 散热损失 q_5 取为定值, 排烟损失

$$q_2 = \frac{H_{py} - \alpha_{py} H_{lk}^0 (1 - q_4)}{Q_f^v}$$
 式中, H_{py} — 排烟焓;

α_{py} — 排烟过量空气系数; H_{lk}^0 — 冷空气焓; Q_f^v — 单位质量燃料拥有热, 除 H_{py} 外都是常量。烟气焓是温度的单值函数, 可以根据烟气焓温表计算, 然后拟合成 $H = f(t)$, 排烟焓 $H_{py} = f(t_3)$, 故锅炉效率是排

烟温度 t_3 的单值函数。计算燃料消耗量 $B_j = \frac{Q_{gl}}{Q_j \eta}$ ，式中， Q_{gl} —锅炉总吸热量，其它量与以上意义相同。可见 B_j 也是排烟温度 t_3 的单值函数。 $D_1 = B_j V_y^0$ ，式中 V_y^0 为理论烟气体积，单位为 m^3/kg ，燃料种类一定的情况下此为定值，因此 D_1 是排烟温度 t_3 的单值函数^[1]。

燃油(气)锅炉的设计首先要选择燃烧器，燃烧器确定以后，炉胆的直径和长度基本上是个定值。根据炉胆传热量和焓降平衡方程可知， t_1 是 t_3 的单值函数。物理过程方程包括两个质量平衡方程 $D_1 = D_2 = D_3$ ，两个焓降方程 $Q_1 = k_1 A_1 \Delta t_{m1} = H_1 - H_2$ 和 $Q_2 = k_2 A_2 \Delta t_{m2} = H_2 - H_3$ ，再加上所确定的 D_1 和 t_1 与 t_3 的两个关联式，共6个物理过程方程。由于 L_1 和 L_2 由已定炉胆尺寸确定，于是独立变量可以从 $t_2, t_3, n_1, n_2, d_1, d_2$ 中选4个。在燃油锅炉设计中，管径往往根据经验预先选定，这样独立变量只需在 t_2, t_3, n_1, n_2 选两个^[2]。

3.2 目标函数的建立

目标函数取锅炉对流管束年总折算费用，包括固定费用与年运行费用。年运行费用除了燃料费用外，还应计及换热介质通过对流换热管束时由于阻力降造成的动力费用^[2]。这样锅炉对流管束年总费用亦即目标函数可表示为：

$$J = C_A K_F A + C_u H_y B_j + E_i C H_y A$$

式中： C_A —对流管束单位传热面积的投资费用，包括维修等费用，元/ m^2 ；

K_F —对流管束的年折旧率，1/a；

A —对流管束的传热面积， m^2 ；

C_u —单位质量换热介质的费用，元/kg；

H_y —年工作小时数，h/a；

E_i —按单位传热面积计的管程功率损失，kW/ m^2

C_i —管程单位动力费用，元/(kWh)；

B_j —换热介质的流率，kg/h；

目标函数中 B_j, E_i, A 为中间变量，可由独立变量求取^[2]。

3.2.1 燃料消耗量 B_j 的求取

计算燃料消耗量 $B_j = Q_{gl} / (Q_r \eta)$ ，式中， $Q_{gl} = D[(h_{sv} - h_{fw}) + P_{pw}(h_{sw} - h_{fw})] \times 10^3$ ，其中 D —锅炉蒸发量，t/h； h_{sv} —额定压力对应下的饱和蒸汽焓值，kJ/kg； h_{fw} —额定压力对应下的饱和水焓值，

kJ/kg； h_{fw} —给水焓值，kJ/kg； P_{pw} —锅炉排污率，取定。 $Q_r = Q_{dw}^v + C_r t_r = Q_{dw}^v + (1.74 + 0.0025 t_r) t_r$ ，其中 Q_{dw}^v —燃料低位发热量，kJ/kg； t_r —燃料的温度， $^{\circ}C$ 。 $\eta = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5)$ ，其中 q_3, q_4, q_5 取定； $q_2 = (H_{py} - \alpha_{py} H_{lk})(1 - q_4) / Q_r$ ，其中 H_{py} —排烟焓值，由 t_3 查烟焓表确定，kJ/kg； H_{lk} —冷空气焓值，有冷空气温度 t_{lk} (取定)，kJ/kg； α_{py} 已知。假设 t_3 ，由上面公式可求出 B_j 值。

3.2.2 对流受热面 A 的求取

总传热面积 $A = n_1 \pi d_1 L_1 + n_2 \pi d_2 L_2$ ，式中各符号意义同前。 n_1 为独立变量， n_2 是相关变量， n_2 的求取步骤如下：

(1) 第一对流管束进口温度 t_1 的求取

烟气在炉胆内的放热量 $Q_{\eta 0} = \phi B_j (Q_1 - H_1)$ ，式中 ϕ —保热系数， $\phi = 1 / (1 + q_5 / \eta)$ ； Q_1 —1 kg 燃料代入炉内的热量， $Q_1 = Q_r + Q_k = Q_r + \alpha H_k$ 。

炉胆传热量为：

$$Q_0 = 1.163 \times 10^{-3} F_0 C \left\{ \left[0.01 \times \left[\frac{t_r + t_1}{2} \right] + 273 \right]^4 - [0.01 \times (t_s + \Delta t + 273)]^4 \right\}$$

式中： F_0 —炉胆换热面积， m^2 ，由炉胆尺寸确定； C —辐射换热系数，一般为2.5~3.8； t_r —理论燃烧温度， $^{\circ}C$ ； t_s —额定压力对应的饱和水温度， $^{\circ}C$ ； Δt —管壁和水的温差， $^{\circ}C$ ，选取。

令 $Q_{\eta 0} = Q_0$ ，通过迭代可求出 t_1 。

(2) 第一对流管束出口温度 t_2 求取

首先对总传热系数 K 简化。管内为烟气强制对流加辐射换热，管外为水沸腾换热，后者热阻远小于前者，可以忽略。此外管内辐射换热系数仅为管内对流换热系数 α_d 的5%左右，折算到灰污系数，则有 $K = \Psi \alpha_d$ 。 t_2 的求取步骤如下：

① 假设 t_2, n_1 ，计算对数温差： $\Delta t_1 = (t_1 - t_2) / \ln[(t_1 - t_s) / (t_2 - t_s)]$ ；

② 计算第一对流管束传热面积 $A_1 = n_1 \pi d_1 L_1$ ，通流面积 $F_1 = n_1 \pi d_1^2 / 4$ ；

③ 计算对流管束平均温度 $t_{1pj} = (t_1 + t_2) / 2$ ，根据 t_{1pj} 可得导热系数 λ_1 和运动粘度 γ_1 ；

④ 计算烟气流速 $w_1 = B_j V_y (t_{1pj} + 273) / (3600 \times 273 F_1)$ 和雷诺数 $Re_1 = w_1 d_1 / \gamma_1$ ；

⑤ 计算对流传热系数 $\alpha_{d1} = 0.023 \times \lambda_1 / d_1 Re_1^{0.8} Pr^{0.4}$ ；

⑥ 计算烟气在对流管束中的放热量 $Q_{\eta 1} =$

$\phi(H_1 - H_2)$ 和对流管束传热量 $Q_1 = K_1 A_1 \Delta t_1 / (B_j / 3.6)$;

⑦ 令 $Q_{p1} = Q_1$, 通过迭代可求出 t_2 。

(3) 第二对流管束根数 n_2 的求取:

n_2 的求取步骤和 t_2 是类似的, 限于篇幅, 不再赘述。至此, 对流受热面面积可求出。

3.2.3 单位传热面积管程功率损失 E_i 的求取

单位传热面积管程功率损失 $E_i = \Delta P w \rho_i F / (1000 \rho_i A) = \Delta P w F / (1000 A)$, 式中, ΔP — 管程流体的阻力, N/m^2 ; w — 管程流体速度, m/s ; ρ_i — 管程流体密度, kg/m^3 ; F — 管程流通横截面积, m^2 。 $\Delta P = \xi L \rho w^2 / (2 d_i)$, $F = \pi d_i^2 / 4$, $A = \pi d L$, 将它们代入上式并化简得 $E_i = \xi w^3 / (8000 \rho_i)$ 。 ρ_i 由管程平均温度 t_{pj} 确定, 即 $\rho_i = f(t_{pj})$; $w = B_j V_y (t_{pj} + 273) / (3600 \times 273 F)$, V_y 为 $1 kg$ 烟气的实际容积, 故 $w = f(t_3, t_{pj}, n)$; 阻力系数 ξ 是管子结构参数和 Re 的函数, 而 $Re = f(w, \gamma)$, $\gamma = f(t_{pj})$, 且管子结构参

数预先选定, 故 $\xi = f(w, t_{pj})$, 对于光管, $\xi = 0.316 / (4 \times Re^{0.25})$ 。

3.3 约束条件

一般锅炉效率不小于 0.86 , 即 $\eta > 0.86$; 第一、第二对流管束的阻力降总和应低于燃烧器提供的总压头, 即 $\Delta P_1 + \Delta P_2 < \Delta P_d$; 根据设计经验, 烟气流速应大于 $8 m/s$ 而且小于 $50 m/s$ 。至此, 数学模型可表述如下:

$$\min: J = C_A K_F A + C_u H_y B_j + E_i C_i H_y A$$

$$S. t: \quad \eta > 0.86$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 < \Delta P_d$$

$$8 m/s < w_1 < 50 m/s$$

$$8 m/s < w_2 < 50 m/s$$

4 数学模型的求解

独立变量为 t_3 和 n_1 , t_3 是连续变量, n_1 是离散

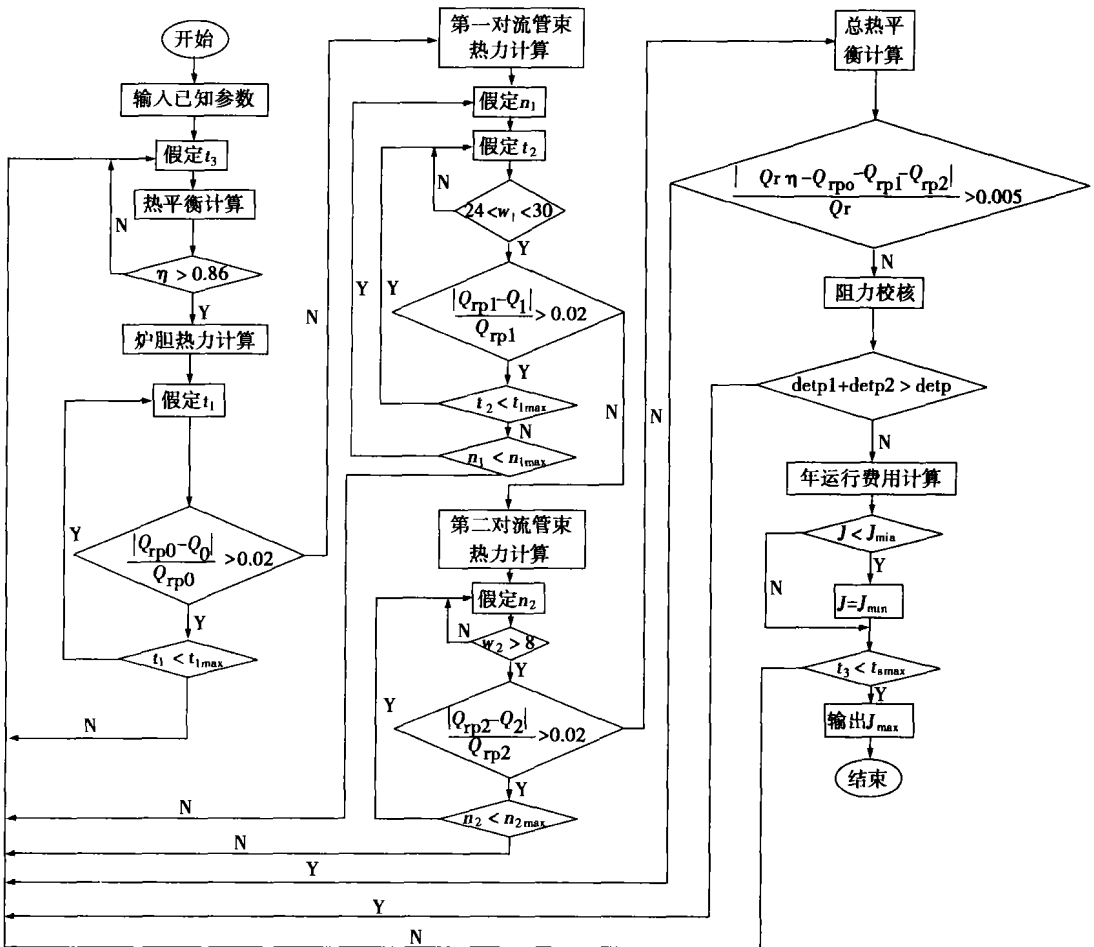


图 3 优化程序流程图

(下转第 432 页)

结点数, 计算机就能自动计算各项作业的直接费用率、各结点的最早开始时间和最迟结束时间, 确定关键路线, 并自动从关键路线上费用率最低的作业入手进行优化, 直至确定最优方案。若检修过程中情况发生了变化, 可修改相关的输入数据重新计算, 以确保网络计划始终按最优的方向进行。

(3) 虽然以给水泵检修为例说明网络图的优化问题, 但若是其它设备的检修, 同样可采用此原理进

行计算和优化。特别是电厂汽轮机、锅炉、发电机等大型设备检修时, 网络图优化技术会带来更为显著的经济效益。

参考文献:

[1] 郭丙然. 火电厂计算机分析[M] . 北京: 水利电力出版社, 1991.
 [2] 山西省电力工业局. 汽轮机设备检修[M] . 北京: 中国电力出版社 1997.

(上接第 394 页)

变量, 故此为混合优化问题。由于没有现成的优化算法程序适合该优化问题的求解, 我们用 C 语言编制了适于不同容量锅炉的通用求解程序。物性参数都是温度的单值函数, 根据物性参数的原始数据, 用三次样条差值法拟合出了物性参数和温度间的函数, 即 $h = f(t)$, $\lambda = f(t)$, $\rho = f(t)$, $\gamma = f(t)$, $P_r = f(t)$, 由主函数直接调用就可求出某一温度下的物性参数的具体值。为便于已知变量的输入, 在编程时把它们做成了头文件^[3~4]。程序流程如图 3 所示。

5 计算实例与分析

利用已经建立的优化数学模型和求解程序, 对型号为 WNS4-0.7-YC 的燃油锅炉对流管束进行了优化。选取经济性参数 $K_F = 20\%$, $C_u = 2.0$ 元/kg, $H_y = 2200$ h/a, $C_i = 0.65$ 元/(kWh), $C_A = 200$ 元/m²。计算结果如表 1 所示。

表 1 优化结果

	优化前	优化后
第一对流管束内径 d_{i1}/m	0.045	0.045
第一对流管束根数 $n_1/$ 根	80	65
第二对流管束内径 d_{i2}/m	0.045	0.045
第二对流管束根数 $n_2/$ 根	48	111
第一对流管束进口烟温 $t_{1i}/^{\circ}C$	920	863
第一对流管束出口烟温 $t_{2e}/^{\circ}C$	285	256
第二对流管束出口烟温 $t_{3e}/^{\circ}C$	215	192
年运行总费用 $J/$ 万元	139.05	136.02

由表 1 可知, 在不改变管子直径情况下, 排烟温度明显降低, 年运行费用节省了 3.03 万元; 排烟温度降低了近 23 °C。通过优化, 降低了排烟温度, 节约了能源, 减少了年运行费用。

6 结 论

(1) 建立的优化数学模型能成功地对燃油烟管蒸汽锅炉进行热力设计优化, 为排烟温度、管子根数和直径的合理选择提供帮助, 避免了反复计算。

(2) 本文编制的优化模型的求解程序实用有效, 使用方便。

(3) 该优化数学模型和求解程序可以指导其他型式的燃油(气)锅炉的热力设计优化。

参考文献:

[1] 赵钦新, 惠世恩. 燃油燃气锅炉[M] . 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
 [2] 沈幼庭. 热力系统及设备最优化[M] . 北京: 机械工业出版社, 1985.
 [3] 任开隆, 杨奇峰. 微机实用数值计算——算法程序[M] . 北京: 电子工业出版社, 1996
 [4] 袁 琪. 锅炉热力计算的计算机算法[J] . 工业锅炉, 2002(5): 175-225.

abatic combustion.

煤粉气流强迫点火特性试验研究= **Experimental Investigation of the Characteristics of Forced Ignition by Pulverized Coal-air Flows** [刊, 汉] / GU Zhong-zhu (Power Engineering Institute under the Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210042), WANG Zhi-bin (Jiangsu Provincial Electric Power Design Institute, Nanjing, China, Post Code: 210092), ZHANG Yong-lian (Education Ministry Key Laboratory of Clean Coal Combustion and Power Generation Technology under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 389 ~ 391.

On a small-sized combustion test rig for pulverized coal an experimental investigation was performed of the forced ignition characteristics of two types of pulverized coal-air flow under different conditions. The results of the investigation indicate that in case of igniting pulverized coal-air flows by torches there exists an optimum ignition speed corresponding to the minimum concentration of the pulverized coal. The pulverized coal-air flow ignition limit is mainly influenced by such parameters as initial temperature, ignition source temperature, coal rank and the fineness of the pulverized coal. The enhancement of the initial temperature of the pulverized coal-air flow, the ignition source temperature and the fineness of the pulverized coal can all widen the range of ignition. It is relatively easy to ignite coal with a high volatile content. Under the same conditions it is easier to ignite a straight pulverized coal-air flow than a swirling one. **Key words:** pulverized coal-air flow, ignition, ignition limit.

燃油烟管蒸汽锅炉热力设计优化数学模型的研究= **A Study of a Mathematical Model of Optimized Thermodynamic Design for an Oil-fired Smoke-tube Steam Boiler** [刊, 汉] / SONG Zheng-chang, GAO Jian-kang (College of Electro-mechanical Engineering under the China University of Mining Engineering, Xuzhou, China, Post Code: 211672) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 392 ~ 394, 432.

To optimize the thermodynamic design of an oil-fired smoke-tube steam boiler, optimized independent variables, relevant variables and objective functions were analyzed and determined on the basis of a thermal equipment optimization theory. In connection with a thermodynamic design process the intermediate variables in the objective functions were solved. The constraint conditions of optimization were determined and a complete mathematical model of optimization was set up. Furthermore, a computer program was prepared to solve the mathematical model. The results of optimization of a typical oil-fired smoke-tube boiler indicate that the optimization model and the computer program for mathematical solution are effective and practical for engineering applications. **Key words:** oil-fired boiler, thermodynamic design optimization, mathematical model, computer program.

湿法烟气脱硫系统中 ALS 式氧化装置性能的试验研究= **Experimental Study of the Performance of a ALS (Air Lance Assembly) Type Oxidation Device Used in a Wet Flue Gas Desulfurization System** [刊, 汉] / ZHU Qun-yi, QIAN Lin-feng, DU Qian, et al (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(4). — 395 ~ 397.

An oxidation device composed of an agitator and air lance assembly (ALS) and installed in a wet flue-gas desulfurization system underwent a simulation by using an aeration type of stirring reactor. An experimental study was conducted of the influence on oxidation performance of the ALS type oxidation device exercised by such factors as the hole opening direction and hole diameter (0.5 - 1.5 mm) of a sparger, stirring speed (150 - 350 r/min), apparent air velocity ($0.8 \times 10^3 \sim 5 \times 10^3$ m/s), etc. The results of the study indicate that the hole opening direction and the hole diameter of the sparger has a relatively small influence on the oxidation rate. With an increase in stirring speed and the apparent air velocity there will be an increase in oxidation speed. However, when the apparent air speed increased to a certain value, the oxidation rate increase tends to slow down. A theoretical analysis and calculation was conducted by using a two-film model. The calculation results are in relatively good agreement with test results. **Key words:** oxidation device of the air lance assembly type, oxidation performance.