

基于神经网络和遗传算法的磨煤机 结构和工作参数的优化

常 绿¹, 杨 涛², 姚树建¹, 李春然²

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130025; 2. 沈阳重型机械集团有限责任公司, 辽宁 沈阳 110025)

摘 要: 双进双出钢球磨煤机的磨煤功率和磨煤出力是其重要的性能参数, 它们与磨煤机的结构参数、工作参数、被磨原煤的特性参数之间的关系十分复杂。利用人工神经网络建立了磨煤机磨煤功率和磨煤出力的数学模型, 借助遗传算法对双进双出磨煤机的结构和工作参数进行了优化设计。算例计算结果表明, 滚筒有效长度 L 从 6 m 降为 5 m, 有效直径 D 从 4 m 降为 3.8 m; 磨煤机入口热风温度 T_{12} 从 295 °C 降为 269.67 °C, 但其入口热风的体积流量 Q_H 从 46.5 m³/s 升到 48.16 m³/s; 目标函数磨煤比能耗 e_m 从 142.55 kWh/t 降为 121.13 kWh/t。优化设计方案的工作参数有升有降, 但优化设计方案改善了磨煤机的结构参数, 目标函数的改善较明显。

关 键 词: 遗传算法; 神经网络; 球磨机; 结构优化; 工作参数优化

中图分类号: TK223.25 文献标识码: A

引 言

双进双出钢球磨煤机具有磨煤效率高、研磨煤种范围广、磨煤出力和细度稳定等特点, 是电站锅炉的关键设备之一。磨煤功率和磨煤出力是双进双出钢球磨煤机重要的性能参数。磨煤功率和磨煤出力与磨煤机的结构参数、工作参数、被磨原煤的特性参数有关。由于影响磨煤功率和磨煤出力的参数很多, 有些参数还随着时间的变化而发生变化, 因此目前还难以导出足够精度的理论计算公式^[1]。现有的磨煤功率和磨煤出力数学表达式是人们利用特定条件下的实测数据推导出来的, 这些计算磨煤功率和磨煤出力的理论公式、半经验公式和经验公式都是把磨煤机性能看成是相关影响参数的线性组合, 不能反映磨煤功率和磨煤出力与这些参数间的复杂非线性函数关系, 因而都有一定的局限性。磨煤功率和磨煤出力的计算过程中, 输入与输出之间的关系不明确, 适合用 BP 网络来逼近。在此基础上, 本文用遗传算法优化双进双出球磨机结构和性能参数。

1 磨煤机比能耗的数学模型

可以把双进双出钢球磨煤机以及进出该机的物质和能量参数看成一个系统, 如图 1 所示。

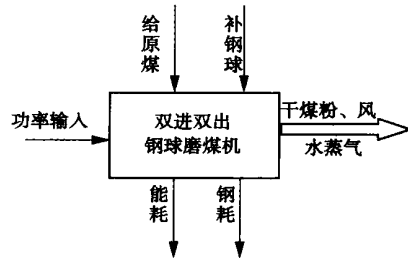


图 1 双进双出钢球磨煤机工作系统示意图

由于双进双出磨煤机能耗仍然较高, 降低制粉电耗, 提高磨煤机生产经济性, 是设计者和使用者追求的目标。

1.1 目标函数

磨煤机系统总的输入功率包括磨煤功率、热风内能所含功率和送风机机械功率, 可以用下式表示:

$$N_p = N_m + N_{H1} + N_{H2} + N_{H3} \quad (1)$$

式中: N_p —磨煤机系统总的输入功率; N_m —磨煤机的磨煤功率; N_{H1} —磨机入口热风内能所含电功率; N_{H2} —进入磨煤机总风量动能消耗功率; N_{H3} —进入磨煤机总风量压力势能消耗功率。

根据热力学原理, 磨机入口热风内能所含电功率等于磨机入口处热风质量流量与其加热焓值的乘积, 设热风加热前的温度为 20 °C。则:

$$N_{H1} = \rho_{12} \times Q_H \times [h(T_{12}) - h(20)] \quad (2)$$

式中: Q_H —磨机入口热风的体积流量, m³/s; T_{12} —磨机入口热风温度, °C; $h(T_{12})$ —磨机入口热风的焓

值, kJ/kg; $h(20)$ —热风加热前的焓值, kJ/kg; ρ_{12} —磨机入口热风的质量密度。

进入磨煤机总风量动能消耗功率可用下式计算:

$$N_{H2} = \frac{1}{2} \rho_{12} \frac{Q_H^3}{A_H^2} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: A_H —磨机入口热风管道截面积, 经统计可用下式近似计算:

$$A_H = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{5}\right)^2$$

式中: D —磨煤机筒体有效直径, m。

进入磨煤机总风量压力势能消耗功率可用下式计算:

$$N_{H3} = p_f \times Q_H \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中: p_f —磨煤机入口热风的压力, MPa。

磨煤功率和磨煤出力的计算过程中, 涉及到的参数多, 输入与输出之间的关系不明确, 用 BP 网络原理来进行磨煤功率和磨煤出力的计算。

对磨煤机自身来说, 可取磨煤比能耗作为其优化设计的目标函数。即:

$$e_m = \frac{N_p}{B_m} = \frac{N_m + N_{H1} + N_{H2} + N_{H3}}{B_m} \quad (5)$$

式中: e_m —磨煤机比能耗; B_m —磨煤机的额定磨煤出力, 即取钢球填充率 ϕ 为其额定值时的磨煤出力能力。

式(5)即为目标函数, 即 $\min F(X) = \min(e_m)$ 。

其中 N_{H1} 、 N_{H2} 、 N_{H3} 分别由式(2)~式(4)求得, 由 BP 网络完成 N_m 、 B_m 的计算。

1.2 设计变量

影响双进双出磨煤机系统运行经济性的主要因素有筒体有效长度 L 、有效直径 D 、滚筒转速率 Ψ 、钢球填充率 ϕ 、热风在磨机入口处的流量 Q_H 、温度 T_{12} 和压力 p_f 。统计表明, 对双进双出磨煤机, $\phi = 0.12 \sim 0.22$, 本文取 $\phi = 0.18$; $\Psi = 0.78 \sim 0.80$, 本文取 $\Psi = 0.78$; 热风在磨机入口的压力很低, 一般 $p_f = 0.001 \sim 0.010$ MPa。本文取 $p_f = 0.008$ MPa。于是双进双出磨煤机系统的设计变量可取: L 、 D 、 Q_H 、 T_{12} 4 个独立变量, 即:

$$X = [L, D, Q_H, T_{12}]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T$$

1.3 约束条件

1.3.1 边界约束

$$g_1(X) = L_{\min} - L \leq 0 \quad (6)$$

$$g_2(X) = L - L_{\max} \leq 0 \quad (7)$$

$$g_3(X) = D_{\min} - D \leq 0 \quad (8)$$

$$g_4(X) = D - D_{\max} \leq 0 \quad (9)$$

$$g_7(X) = Q_{H\min} - Q_H \leq 0 \quad (10)$$

$$g_8(X) = Q_H - Q_{H\max} \leq 0 \quad (11)$$

$$g_9(X) = T_{12\min} - T_{12} \leq 0 \quad (12)$$

$$g_{10}(X) = T_{12} - T_{12\max} \leq 0 \quad (13)$$

1.3.2 几何约束

$$g_{11}(X) = 1.3D - L \leq 0 \quad (14)$$

$$g_{12}(X) = L - 1.6D \leq 0 \quad (15)$$

1.3.3 性能约束

$$g_{13}(X) = B_{mx} - B_m \leq 0 \quad (16)$$

$$g_{14}(X) = B_m - 1.15B_{mx} \leq 0 \quad (17)$$

$$g_{15}(X) = 1.4B_m - 3.6\rho_{12}Q_H \leq 0 \quad (18)$$

$$g_{16}(X) = 3.6\rho_{12}Q_H - 1.7B_m \leq 0 \quad (19)$$

$$g_{17}(X) = B_m - Q_d \leq 0 \quad (20)$$

式(20)中: Q_d —磨煤机的干燥出力, t/h。

式(6)~式(20)构成目标函数的约束条件, 其中 L_{\min} 、 L_{\max} 、 D_{\min} 、 D_{\max} 、 $Q_{H\min}$ 、 $Q_{H\max}$ 、 $T_{12\min}$ 、 $T_{12\max}$ 、 B_{mx} 根据所设计的磨煤机及其使用条件给出具体数值。 Q_d 的计算方法见参考文献[1]。

2 计算磨煤功率和磨煤出力的神经网络模型

双进双出钢球磨煤机的磨煤功率和磨煤出力目前尚无精确有效的理论计算方法, 可按参考文献[2]中表4-1-1的方法获得需要的参数, 磨煤机的结构参数(磨煤机筒体有效直径 D 、有效长度 L)、被磨原煤哈氏可磨度 K_H 、出粉细度对磨煤出力的影响系数 K_μ 、钢球填充率 ϕ 对磨煤出力的影响系数 K_ϕ 、磨煤过程中原煤水分蒸发量对磨煤出力的影响系数 K_W 。针对某一型号的磨煤机, 可建立 $(K_H, K_\mu, K_\phi, K_W)$ 与 (N_m, B_m) 之间的关系。

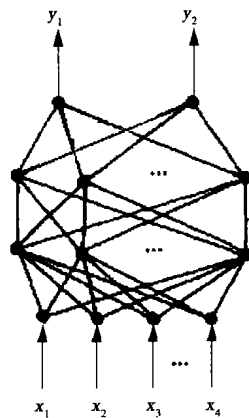


图2 两层中间隐含层的BP模型

采用一个 4 层 BP 模型, 包括输入层、两层中间隐含层和输出层。由于中间隐含层网络结点数的选取目前尚无理论指导, 必须通过试算凭经验选取。通过试算, 选取的网络结点数为 4-9-5-2。网络模型如图 2 所示, 输入层有 4 个结点, 分别对应于 K_H 、 K_μ 、 K_ϕ 、 K_W , 输出层有两个结点, 分别对应于 (N_m, B_m) 。实验证明该网络能够给出很好的结果。

为了使设计变量在变量空间均匀分布, 采用两个 $L_{25}(5^4)$ 正交表获得训练集和测试集。训练集和测试集不得重复, 取点时可交叉取值。在网络训练时, 先将输入/输出模式集进行归一化之后, 再送入网络进行学习, 并随机地为网络连接权值和阈值赋予 $[-1, 1]$ 区间内的值。训练网络参数设置如下: 最大训练步数 $mne = 10\ 000$; 误差均方和指标 $sse = 0.001$; 学习率 $lr = 0.3$; 传递函数 $f_1 = 'tansig'$ 、 $f_2 = 'purelin'$ 。图 3 示出训练步数—误差均方和关系图, 训练 3874 次后达到目标误差。

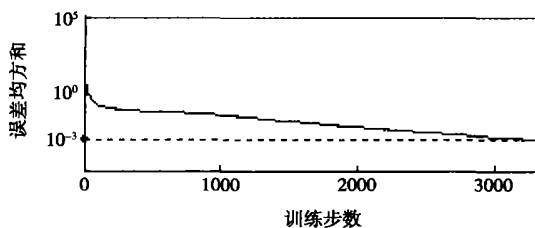


图 3 训练步数和误差均方和关系

3 遗传算法

遗传算法从代表问题可能潜在解集的一个种群开始, 借助选择、复制、交叉、变异等遗传操作, 依据“适者生存”原则, 指导在不断改进的解区域中进行搜索, 最后以末代种群的最优个体作为问题的近似最优解。与其它优化方法相比, 遗传算法以单一字符串的形式描述所研究的问题, 只需利用适应度函数来进行优化计算, 不要求函数具有连续性和可微性, 且能收敛到全局最优解。遗传算法的适应面非常广, 是工程优化领域常用的求解方法。

采用惩罚函数方法, 将约束优化问题转化为无约束优化问题。取群体大小 $n = 40$, 交叉概率 $p_c = 1.0$, 变异概率 $p_m = 0.1$, 进化代数取 40, 按下列步骤构造遗传算法:

- (1) 随机产生一组初始个体构成初始种群, 并评价每一个体的适配值;
- (2) 判断算法收敛准则是否满足, 若满足则输出搜索结果, 否则执行以下步骤:

- (3) 根据适配值大小以一定方式执行复制操作;
- (4) 按交叉概率 p_c 执行交叉操作;
- (5) 按变异概率 p_m 执行变异操作;
- (6) 返回步骤(2)。

4 算例

以 BBD4060 双进双出磨煤机为例, 其原结构参数如表 1, 并示出在设计条件相同时 BBD4060 原设计方案与优化方案的对比。结合 BBD4060 实际结构情况, 给出约束函数取值。

表 1 优化模型复算的结果与原设计方案的比较

参数类别	原方案	BP+GA 优化方案
设计变量		
L/m	6	5.50
D/m	4	3.80
$Q_H/m^3 \cdot s^{-1}$	46.5	48.16
$T_{12}/^\circ C$	295	269.67
目标函数		
$e_m/kWh \cdot t^{-1}$	142.55	121.13

4.1 算例的边界约束

滚筒有效长度 L 和滚筒有效直径 D 均取现有长度再加上其上下的 10% 为各自的取值范围, 即 $5.4\text{ m} \leq L \leq 6.6\text{ m}$; $3.6\text{ m} \leq D \leq 4.4\text{ m}$; 类比法国斯坦公司的 BBD 系列磨煤机, 当 D 取 3~5 m 时, 热风体积流量可取 $5\text{ m}^3/\text{s} \leq Q_H \leq 80\text{ m}^3/\text{s}$; 根据煤的干燥要求和可燃性特点, 以及设计规范, 取 $150\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{12} \leq 330\text{ }^\circ\text{C}$ 。

4.2 算例的几何约束

手册推荐, 一般磨机长径比取 1.3~2.0, 考虑到双进双出磨机的特点, 取 $1.3 \leq L/D \leq 2.0$ 。

4.3 算例的性能约束

为了使锅炉有尽量小的负荷, 应选用较小的风煤质量比, 即可取 $1.4 \leq 3.6 \rho_{12} Q_H / B_m \leq 1.7$; 若锅炉所要求的磨煤机额定磨煤出力为 B_{mx} , 那么磨机的设计磨煤出力 B_m 应大于 B_{mx} , 但不宜大得过多, 取 $1 \leq B_m / B_{mx} \leq 1.15$; 按双进双出磨煤机的工作方式要求, 其干燥出力不能小于磨煤出力, 于是有 $Q_d \geq Q_m$ 。

按上述方法建立数学模型, 采用遗传算法优化对其结构和工作参数优化, 进化结果如图 4 所示。进化到第 40 代结果为: $f(5.497\ 066, 3.803\ 281, 48.159\ 762, 269.667\ 659) = 121.125\ 363$ 。即 $x_1 = 5.497\ 066$, $x_2 = 3.803\ 281$, $x_3 = 48.159\ 762$, $x_4 = 269.667\ 659$, $f_{\min}(X) = 121.125\ 363$ 。

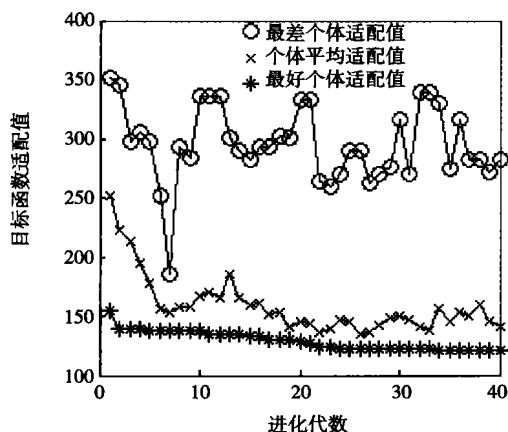


图 4 遗传算法的寻优性能曲线

5 结 论

比较表 1 示出的 BBD4060 原设计方案与优化方案, 优化方案得到的磨煤机结构参数滚筒长度 L 和滚筒直径 D 均明显小于原方案; 工作参数中热风在磨机入口处的流量 Q_H 略有增加, 但 T_{12} 有较明显改

善; 优化方案目标函数 e_m 比原方案小 15% 以上。总之, 与原设计方案相比, 优化设计方案的工作参数有升有降, 但优化设计方案改善了磨煤机的结构参数, 目标函数的改善较明显, 表明本文采用神经网络和遗传算法对磨煤机结构和工作参数的优化设计方法效果较好。

参考文献:

- [1] 任志宇, 王振东, 王国强, 等. 双进双出磨煤机主参数的确定 [J]. 动力工程, 1995, 15(6): 49-55.
- [2] 赵仲琥, 张安国, 王文元, 等. 火力发电厂煤粉制备系统设计和计算方法 [J]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [3] 任志宇, 吴贵生, 李秋生. 双进双出磨煤机干燥能力的确定 [J]. 河北煤炭建筑工程学院学报, 1995(3): 41-44.
- [4] 王国强, 朱 详, 李国忠, 等. 双进双出磨煤机最佳给风参数的探讨 [J]. 动力工程, 1994, 14(4): 58-65.
- [5] 谢庆生, 尹 健, 罗延科. 机械工程中的神经网络方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] 常 绿, 王国强, 冯素丽. 基于遗传算法的混凝土搅拌机上料机构的优化设计 [J]. 建筑机械, 2005(12): 76-80.

(渠 源 编 辑)

(上接第 64 页)

加, 高熔点的 X 煤和中等熔点的 C 煤的灰熔融温度迅速下降, Y 煤的灰熔融温度则呈先下降后上升的趋势, 至红水含盐率为 10% 时, 各特征温度几乎又升高至原煤样煤灰的一样温度, 其后随着红水含盐率的继续增加, 煤灰熔融性温度则开始下降。

(3) 添加一定量石灰石后, 随着废液红水含盐率的增加, 高熔点的 X 煤灰熔融温度呈先下降后上升的趋势, 在废液含盐率为 10% 处灰熔融温度降到低谷, 其后废液含盐率继续增加, 灰熔融温度开始上升。C 煤和 Y 煤的灰熔融温度的变化情况与没添加石灰石时类似。

(4) 从分析的结果可知: 含盐的化工废液焚烧的灰熔融温度较低, 其中低熔点的 Y 煤为辅助燃料焚烧时床料更易结渣。因此在设计和运行过程中应予以高度重视, 并采取有效的措施来加以预防或减轻结渣。

参考文献:

- [1] 王泉清, 曾蒲君. 煤灰熔融性的研究现状与分析 [J]. 煤炭转化, 1997, 20(2): 32-37.
- [2] ALASTUEY A, JIMENEZ A, PIANA F, et al. Geochemistry, mineralogy and technological properties of the main Stephanian(carboniferous) coal seams from puerollano basin spain [J]. Int J Coal Geol, 2001, 45(4): 247-265.
- [3] JAK EVGUENI. Application of the F. * A * C * T. thermodynamic com-
- [4] COSTEN P G, LOOKWOOD F C, SIDDIQUE M M. Mathematical modeling of ash deposition in pulverized fuel-fired combustors [J]. Proc Combust Inst, 2000, 28(2): 2243-2250.
- [5] BRYANT G W, BROWNING G J, EMANUEL H. The fusibility of blended coal ash [J]. Energy Fuels, 2000, 14(2): 316-325.
- [6] KAHRAMAN H, REIFENSTEIN A P, CALIOS N J, et al. Mineralogical changes in selected Australian and overseas coals in boiler simulation test and improved ash fusion test // Proceedings of 18th Annual International Pittsburgh Coal Conference [C]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2001. 746-762.
- [7] PATTERSON J H, HURST H J. Ash and slag qualities of Australian bituminous coals for use in slagging gasifiers [J]. Fuel, 2000, 79(13): 40-45.
- [8] 毛 军, 徐明厚, 李 帆. 碱性矿物质对煤灰熔融特性影响的研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2003 31(4): 59-62.
- [9] 修洪雨, 黄镇宇, 周俊虎, 等. CaO 对煤灰主要成分熔融特性的影响 [J]. 电站系统工程, 2005, 21(2): 20-22.
- [10] 许志琴, 于戈文, 邓蜀平, 等. 助熔剂对高灰熔点煤影响的实验研究 [J]. 煤炭转化, 2005 28(3): 22-25.
- [11] 别如山, 杨励丹, 周 定. 焚烧含盐有机废液添加剂对流化床床料烧结的影响 [J]. 化工学报, 2002, 53(12): 1253-1259.
- [12] 杨志忠, 何秀英, 沈坚勇. 石灰石 CFB 锅炉灰熔性影响的试验研究 [J]. 动力工程, 2002 22(6): 2067-2071.
- [13] 董 方, 郭贵宝, 王 南, 等. Na₂O 对连铸保护渣熔性性能的影响 [J]. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(3): 198-200.

(渠 源 编 辑)

perature of Coal X and C tends to go down as a result of an increase in salt content of the red water, during which under an identical salt content, the ash fusion temperature of Coal X drops by a relatively big margin and that of Coal Y tends to go down at the beginning and then go up followed by a go-down. After limestone ($Ca/S=2.0$) has been added, with an increase in the salt content of the red water, the ash fusion temperature of Coal X displays a tendency to first fall and then rise and there exists a minimum value among its four characteristic temperatures when the salt content of the red water is 10%. By contrast, the ash fusion temperatures of Coal C and Y undergo a change similar to the case when no limestone is added. However, the above change is relatively small. At a certain salt content (15%) and with an increase in added amount of limestone, the ash fusion temperature of Coal X and C will all first go down and then up, but for Coal X there is a significant change. The deformation and softening temperature of Coal Y rises while its hemispheric and flow temperature goes down first and then up. The research results provide a theoretical basis for the prevention of coking of bed materials when organic salty waste liquid is fired in a fluidized bed. **Key words:** fusion temperature, fusion characteristics, coking, weak reduction atmosphere

W 型火焰炉旋风分离器分离特性的实验研究 = **Experimental Investigation of the Separating Characteristics of a Cyclone Separator for a W Shaped Flame-based Boiler** [刊, 汉] / ZHANG Jie, LI Zheng-qi, JING Jian-ping, et al (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 65 ~ 68

The cyclone separator for a W shaped flame-based boiler is a kind of pulverized coal concentrator operating on a cyclone separation theory. An experimental study of gas-solid distribution characteristics of the cyclone separator was conducted on a gas-solid two-phase flow test rig. The test results show that when the opening of the exhaust gas valve reaches 100%, the exhaust gas flow will only account for 35% of the total air flow. The concentration of primary air particles will rise from 0.58 kg/kg at the inlet to 0.80 kg/kg at the outlet, but the concentration effectiveness of pulverized coal was relatively poor. In view of this, the diameter of the exhaust gas tube was increased from 80 mm to 100 mm. It has been determined from a test that when the exhaust gas valve is fully opened (100%), the exhaust gas will account for 65% of the total air flow with the concentration of the primary air particles rising to 1.58 kg/kg, thus achieving a relatively good concentration effectiveness. **Key words:** W shaped flame-based boiler, cyclone separator, gas-solid two phase flow, exhaust gas valve, pulverized-coal concentration

基于神经网络和遗传算法的磨煤机结构和工作参数的优化 = **Optimization of Structural and Operating Parameters of a Ball Mill Based on a Neural Network and Genetic Algorithm** [刊, 汉] / CHANG Li, YANG Tao, YAO Shu-jian (College of Mechanical Science and Engineering under the Jilin University, Changchun, China, Post Code: 130025), LI Chun-ran (Shenyang Heavy Machinery Group Co. Ltd., Shenyang, China, Post Code: 110025) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2007, 22(1). — 69 ~ 72

The grinding power and capacity of a dual-in and dual-out ball mill are its very important performance parameters, which have a most sophisticated relationship with such parameters as ball mill structural ones, operating ones and the characteristics of the raw coal being ground. By using an artificial neural network, a mathematical model of the grinding power and capacity of the ball mill was established and with the help of a genetic algorithm the structural and operating parameters for the dual-in and dual-out ball mill were also optimized. The results of a calculation example show that with the effective length L of a roller being shortened from 6 m to 5 m and the effective diameter D from 4 m to 3.8 m, the inlet hot air temperature T_{12} of the ball mill will be lowered from 295 °C to 269.67 °C. But the volumetric flow rate Q_H of hot air at the inlet will be increased from 46.5 m³/s to 48.16 m³/s, and the grinding specific power consumption e_m of the target function will be reduced from 142.55 kWh/t to 121.13 kWh/t. The optimized design version may cause some operating parameters to rise or fall, depending on specific situations. However, it ameliorates the structural parameters of the ball mill with the target function being markedly improved. **Key words:** genetic algorithm, neural network, ball mill, structural parameter optimization, operating parameter optimization