

循环流化床锅炉热效率在线计算与影响因素分析

宋 波, 江青茵, 曹志凯

(厦门大学化学化工学院化学工程与生物工程系, 福建 厦门 361005)

摘 要: 提出一种基于正平衡方法的热效率在线计算方法: 通过在线采集锅炉运行中主蒸汽、给水、一二次风等锅炉运行参数, 计算锅炉有效利用能量和输入能量, 实现热效率的在线计算; 采用福建某 135 t/h 工业 CFB 锅炉发电机组现场数据进行仿真计算, 仿真结果验证了算法的有效性。在此基础上采用正交试验设计方法分析影响 CFB 锅炉热效率的影响因素; 由于工业现场采样的操作数据难以得到各个因素不同水平下的热效率的对应值, 故首先采用工业数据和热效率计算数据建立基于 LM-BP 算法的人工神经网络热效率预测模型。根据模型预测数据设计正交试验, 结果表明对于该锅炉风煤比、主汽压力和炉床温度对该锅炉热效率的影响最大。最后进行工业调优试验, 试验结果验证了分析结果并初步实现了锅炉热效率的在线优化。

关键词: 在线计算; 热效率; 正交试验; BP 神经网络; 循环流化床锅炉

中图分类号: TQ 041 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 6613 (2008) 04 - 0616 - 05

On-line calculation and analysis of heat efficiency of circulating fluidized bed boiler unit

SONG Bo, JIANG Qingyin, CAO Zhikai

(Department of Chemical & Biochemical Engineering, School of Chemistry & Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China)

Abstract: A new method of on-line calculation of heat efficiency of circulating fluidized bed boiler (CFB Boiler) was proposed. Based on some measurable operation parameters, including pressure, temperature and the flow rates of main steam, water and primary and secondary air, which were collected online, input energy and the utilization of energy in effect could be deduced respectively, and then heat efficiency could be calculated. Using the plant-site data from a 135 t/h CFB boiler unit in Fujian, the online calculation of heat efficiency was simulated and the result of industrial simulation indicated that this method was accurate and effective. Furthermore, orthogonal experiment was performed to analyze seven factors which contributed to heat efficiency of CFB boiler. Because it is hard to get corresponding data on the orthogonal layout, a Levenberg-Marquardt (LM)_back propagation (BP) algorithm-based predictive model was established by using the data collected from plant-site and on-line calculation model. The result of orthogonal experiment indicated that air/coal ratio, main steam pressure and boiler firebox temperature were key factors. The result was validated by the industrial optimization experiment. This method will help on-line optimal operation of the CFB boiler.

Key words: on-line calculation; heat efficiency; orthogonal experiment; BP network; CFB boiler

热效率是循环流化床 (CFB) 锅炉主要的节能和效能指标, 其在线计算与优化一直为业内人士所重视^[1]; 但由于多数循环流化床锅炉燃煤品质多变, 锅炉燃烧过程烟气构成难以在线实时测量, 因此锅炉热效率的在线实时计算和优化尚无成熟方案。

要实现在线调优, 首先需要解决 CFB 锅炉热效

收稿日期: 2007 - 11 - 01; 修改稿日期: 2007 - 11 - 29。

基金项目: 福建省科技计划重点项目 (2005H044)。

第一作者简介: 宋波 (1983—), 男, 硕士研究生。E-mail: songbo_songbo@yahoo.com。联系人: 江青茵, 教授, 主要研究方向为流程工业先进控制与在线优化。E-mail: xdceds@xmu.edu.cn。

率的在线测算。锅炉热效率的计算基于锅炉输入、输出热量及各项热损失的能量平衡为基础^[1]进行计算。李智、蔡九菊等^[2]提出了一种基于燃煤的低位发热量、燃煤的灰分、排烟温度、氧量、飞灰含碳量的电站锅炉效率计算方法；参照欧美的 ASME PTC4.1 计算标准，张小桃、王培红等^[3]基于同样的变量，提出了一种新的锅炉热效率计算模型。由于燃煤低位发热量和燃煤灰分不能在线测取，因而这两种计算方法并不能实现锅炉热效率的在线测算。本研究第一部分基于正平衡计算方法，直接计算锅炉的有效利用热量与锅炉的总输入热量之比，提出了一种锅炉热效率在线计算方法，并采用福建某 135 t/h 工业 CFB 锅炉发电机组的现场数据进行实时计算仿真，验证了该算法的有效性。

实现在线优化的第二步，需要对热效率的影响因素进行分析。对于 CFB 锅炉，影响热效率的主要因素有炉床温度、主汽压力、风煤比、锅炉氧含量、蒸汽温度等。为了分析这些因素的影响力大小，本研究第二部分采用正交试验设计的方法，并用极差分析法分析了影响 CFB 锅炉热效率的影响因素的影响力大小。由于采集的工业操作数据包含多种同步操作，难以得到各个因素不同水平下热效率的对应值，为此利用工业现场数据，先建立基于 LM-BP 人工神经网络的 CFB 锅炉热效率的预测模型，然后利用此预测模型进行正交实验分析。

1 CFBB 热效率在线计算

根据 GB 10184—88 电站锅炉性能试验规程^[4]，锅炉的有效利用能量^[5]为水转化为过热蒸汽需要的能量，锅炉的输入能量为锅炉燃烧过程主反应释放的能量，即 C 与 O₂ 燃烧生成 CO₂ 的反应释放的能量。基于正平衡计算方法，锅炉热效率在线计算的函数表达式如式(1)所示，计算流程如图 1 所示：

$$\eta = \frac{Q_1}{Q_r} = \frac{[D_{gq}(h_{gq} - h_{gs})]}{N_{CO_2} \times H} \quad (1)$$

1.1 有效利用能量在线计算

锅炉的有效利用能量可用式 (2) 表示：

$$Q_1 = Q_{gq} - Q_{gs} \quad (2)$$

式中，Q₁ 表示有效利用能量；Q_{gq} 表示过热蒸汽总热焓；Q_{gs} 表示锅炉给水总热焓。

曾祥平等^[6]针对主蒸汽热焓提出了可用于实时计算的在线计算方法，主蒸汽流量可实测，因而对于锅炉有效利用热量的实时计算只需解决给水热焓实时计算问题。根据不同温度和压力下的给水热焓

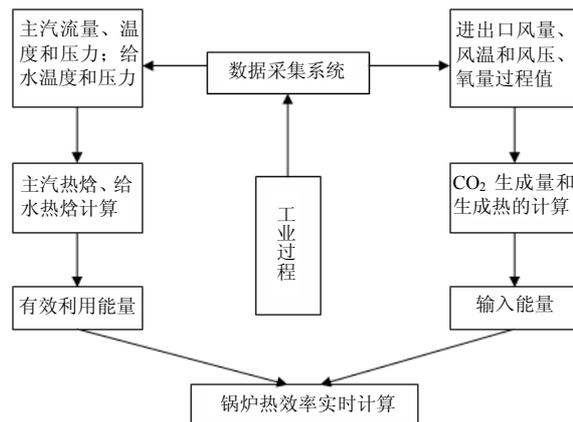


图 1 锅炉热效率计算步骤图

数据^[7]可以通过样条插值得到，但是不同的循环流化床锅炉由于工艺设计的不同，给水温度和给水压力有很大的差别，同时在工业现场应用中，给水温度和压力随时间动态变化，查表不适合在线计算。为了使计算方法具有更加广泛的适用性，选取温度范围在 150~300 °C、压力范围在 9~22 MPa 的给水热焓数据 (kJ/mol)^[7]进行三阶最小二乘多项式拟合计算。给水热焓是温度和压力的函数，依次对温度和压力进行最小二乘多项式拟合，拟合结果如式(3)所示：

$$h = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 \quad (3)$$

其中 b 值方程如式 (4) ~ 式 (7) 所示：

$$b_0 = -194.89 + 11.220p - 0.280p^2 + 3.24 \times 10^{-3} p^3 \quad (4)$$

$$b_1 = 7.30 - 0.163p + 0.0043p^2 - 5.10 \times 10^{-5} p^3 \quad (5)$$

$$b_2 = -0.017 + 8.28 \times 10^{-4} p - 2.22 \times 10^{-5} p^2 + 2.62 \times 10^{-7} p^3 \quad (6)$$

$$b_3 = 3.23 \times 10^{-5} - 1.44 \times 10^{-6} p + 3.76 \times 10^{-8} p^2 - 4.38 \times 10^{-10} p^3 \quad (7)$$

为了验证拟合方程的准确性，选取 14 MPa 和 18 MPa 的给水热焓真值数据，与拟合数据进行对比。对比结果如表 1 所示，结果表明采用三阶最小

表 1 给水焓拟合值与真值的比较表

T/°C	14 MPa			18 MPa		
	真值	拟合值	相对误差/%	真值	拟合值	相对误差/%
	/kJ·mol ⁻¹	/kJ·mol ⁻¹	差/%	/kJ·mol ⁻¹	/kJ·mol ⁻¹	差/%
160	683.51	683.18	0.048	685.93	686.21	0.041
180	769.93	769.69	0.031	772.07	772.56	0.064
200	857.67	857.02	0.076	859.47	859.79	0.037
220	947.16	946.07	0.115	948.52	948.65	0.014
240	1038.95	1037.70	0.120	1039.72	1039.91	0.018
260	1133.86	1132.80	0.094	1133.80	1134.35	0.049
280	1233.15	1232.22	0.075	1231.83	1232.71	0.071
300	1338.97	1336.86	0.158	1335.6	1335.76	0.012

二乘法多项式拟合, 拟合数值与真值的相对误差在 0.15%之内, 可满足工业在线计算的需要。表 1 中相对误差计算公式 (8) 所示:

$$\text{相对误差} = (\text{拟合值} - \text{真值}) / \text{真值} \times 100\% \quad (8)$$

1.2 输入能量在线计算

根据 GB 简化热效率计算法则, 在进行简化计算时, 可忽略燃料的物理显热、外加热源带入锅炉系统的能量和燃油雾化蒸汽带入锅炉的热量, 而将给煤发热量作为锅炉的输入热。给煤的发热量可由给煤含碳量和给煤的燃烧热值通过工业分析值计算得到, 但是工业分析周期长而锅炉给煤复杂多变, 无法实现在线计算。对于工业锅炉, 煤燃烧所发生的主反应是 C 与 O₂ 反应生成 CO₂ 的反应, 而锅炉燃烧过程中氧气大量过量, 燃烧中的其它杂质, 如 SO₂、NO_x 含量又很难在线测量, 因而在燃料输入能量的计算中, 忽略 CO 和其它杂质气体的影响, 只考虑 C 与 O₂ 反应生成 CO₂ 的反应。这样, 燃烧过程给煤消耗量和给煤释放能量的计算就转化为对燃烧过程 CO₂ 生成量及反应生成热的计算。

由工业现场采集循环流化床锅炉一、二次风、燃烧室出口烟气的流量、温度和压力以及气体含氧量的实时数据, 因此采用热力学上普遍化的第二维里系数方程^[8], 将锅炉一、二次风、燃烧室出口烟气的性质转化为标准状态, 从而计算氧气的摩尔体积和消耗氧气的物质的量。由于反应是等摩尔反应, 根据配比关系, 消耗氧气的物质的量也就是燃烧过程生成的 CO₂ 的物质的量。具体方程式如式(9)和式(10)所示:

$$V_m = \frac{RT}{P} + B \quad (9)$$

$$B = \frac{RT_c}{P_c} (B^0 + \omega B^1) \quad (10)$$

给煤燃烧主反应生成热与反应进行的温度有关, 由于反应热与温度线性关系良好, 考虑对其进行拟合, 得到简便的计算公式。取温度范围为 700~1500 K, 根据物性数据手册^[9]查得的 CO₂ 反应生成热, 采用二阶最小二乘多项式拟合法对反应热和反应温度进行拟合, 得到拟合方程如式(11)所示:

$$y = -405.52549 + 0.037097T + 8.17397 \times 10^{-6} T^2 \quad (11)$$

拟合结果表明, 二阶拟合误差小于 0.08%, 能满足工业上计算需要。

1.3 工业数据仿真

本研究采用福建某电厂 135 t/h CFB 锅炉机组工业数据进行仿真计算, 共 2160 组连续 3 h 的工业

现场数据, 采样周期为 5 s, 计算结果由图 2 所示。图 2 中给出仿真计算的锅炉热效率曲线和现场采集的标准煤耗曲线, 可以看到锅炉热效率和标准煤耗的变化趋势相反, 大致呈现反比的趋势, 该结果与工业上及理论上的变化趋势相同, 由此可知本研究提出的锅炉热效率的在线计算方法是可行的。

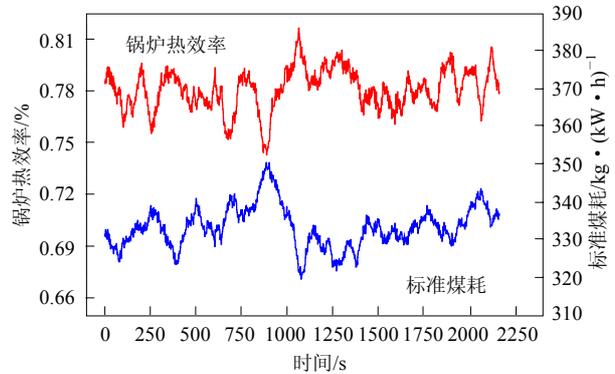


图 2 热效率仿真结果与现场采集标准煤耗曲线图

2 基于人工神经网络的正交试验分析

对于 CFB 锅炉, 炉床温度、主汽压力、风煤比、氧含量、蒸汽温度和粒子浓度等都对锅炉的热效率产生重要的影响, 但影响程度不同。这里的氧含量指的是通过氧量测量仪表在线测得的锅炉炉膛的氧气浓度, 电负荷指的是电网负荷, 粒子浓度则是表征 CFB 锅炉回料量中含碳量大小的变量。为实现在线调优需要能在线分析这些影响因素的影响力大小进而找出主要的影响因素, 这里采用正交试验设计的方法分析各因素对热效率的影响程度。但若直接采用工业现场数据, 很难针对正交试验中各个因素的不同水平, 找到相应的热效率的对应值, 因而考虑采用人工神经网络建模的方法建立热效率的在线预测模型; 之后, 利用预测模型在选取的工业数据范围内选择合适的因素和水平, 进行正交试验设计, 并使用极差分析法, 按各因素影响优化目标的重要程度找出主次关系, 确定最佳的运行条件。

2.1 基于 LM-BP 神经网络的锅炉预测模型

人工神经网络是由人工神经元广泛互联而成的网络, 由于其对任意非线性函数的拟合能力和良好的泛化能力, 以及对复杂问题具有自学习和自适应能力, 在非线性系统建模^[9-10]和锅炉预测建模^[11-12]方面得到了广泛的研究和应用。

选取工业过程炉床温度、主汽压力、风煤比、蒸汽温度、电负荷、粒子浓度、氧浓度等 7 个运行

参数为网络输入，锅炉热效率为网络输出。将 1.3 节中采样周期为 5 s 的连续 3 h 工业现场数据以及通过上述在线计算算法得到的锅炉热效率作为样本数据，共 2160 组，其中 1/3 用于训练，另外 2/3 用于泛化验证。采用 3 层网络结构，经多次数值实验，确定使用 120 个隐层结点。为了加快网络训练速度，将工业数据进行归一化处理采用 LM-BP 算法对网络进行训练，设置最大学习迭代次数 100 次，训练目标误差平方和取为 0.01，经过 17 次迭代达到训练目标。得到的训练曲线和泛化曲线如图 3 和图 4 所示，学习训练和泛化均方误差为 0.0007 和 0.0041。结果表明该预测模型可以较好的对锅炉的热效率进行预测，因此在正交试验时，可以利用该预测模型进行正交试验，在不同因素、不同水平下得到锅炉热效率的对应输出。

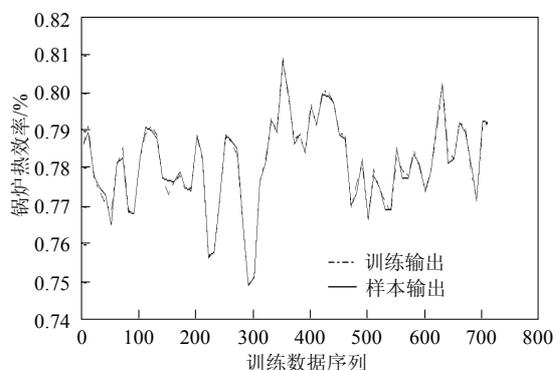


图 3 锅炉热效率训练输出与样本输出

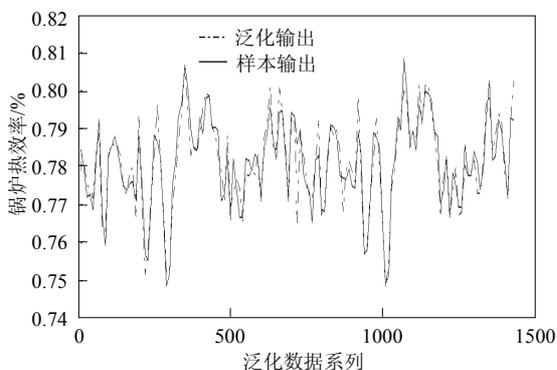


图 4 锅炉热效率泛化输出与样本输出

2.2 正交试验方案设计与结果分析

正交试验分析方法由组合理论推导，是一种通过科学挑选试验条件、对结果进行统计分析的多因素试验方法。正交试验的步骤如下：①确定试验目标；②决定试验因素；③定出各因素的水平；④选择合适的正交表和试验方案；⑤正交试验结果分析^[13]。

根据资料并结合实际运行情况对影响因素进行筛选，影响试验目标即锅炉热效率的主要因素有炉

床温度、主汽压力、风煤比、氧含量、电负荷、蒸汽温度、粒子浓度等将这些锅炉运行参数定为正交试验的 7 种因素。因素确定以后，根据试验设计和所取数据时间段各因素的取值范围，确定水平数为 4 个，水平的选取结果表 2 所示。

在此正交试验中，因素为 7 个，水平为 4 水平，因此选择常见正交试验表中的 $L_{32}(4^9)$ 正交表，共完成 32 次试验，可完成试验要求，表 3 是正交试验表 $L_{32}(4^9)$ 的试验方案及部分锅炉热效率试验结果表。

表 2 正交试验因素/水平表

因素	水平			
	1	2	3	4
炉床温度/°C	970	980	990	1000
主汽压力/MPa	3.61	3.66	3.71	3.76
蒸汽温度/°C	435	437	439	441
风煤比/%	2.75	2.94	3.13	3.31
电负荷/kW·h	25.4	25.8	26.2	26.6
氧体积分数/%	8.12	8.43	8.74	9.02
相对粒子浓度	106	115	126	133

表 3 $L_{32}(4^9)$ 正交试验表(部分)

序号	水平							试验结果
	炉床温度	主汽压力	蒸汽温度	风煤比	电负荷	氧含量	相对粒子浓度	
1	1	1	1	1	1	1	1	0.78159
2	1	2	2	2	2	2	2	0.77459
3	1	3	3	3	3	3	3	0.79664
							
16	4	4	3	1	2	1	3	0.81027
17	1	1	4	1	4	3	2	0.86137
18	1	2	3	2	3	4	1	0.77389
							
30	4	2	4	3	1	1	2	0.79849
31	4	3	1	2	4	4	3	0.77995
32	4	4	2	1	3	3	4	0.82388

表 4 是锅炉热效率的正交试验结果极差分析表， R 值越大表明因素对目标变量的影响力越大。根据表中得到的极差 R 值大小，对于选取的数据，7 个因素影响排序依次为风煤比、主汽压力、炉床温度、氧含量、蒸汽温度、电负荷和粒子浓度，其中风煤比、主汽压力、炉床温度和氧含量的影响作用更为明显。

表 4 正交试验极差分析表

项 目	炉床温 度/°C	主汽压 力/MPa	蒸汽温 度/°C	风煤 比/%	电负荷 /kW·h	氧体积 分数/%	相对粒 子浓度
K_1	80.21	79.81	77.93	80.89	79.165	79.69	78.03
K_2	79.4	78.4	78.77	77.38	78.685	77.49	78.745
K_3	79.385	78.675	77.62	78.47	78.86	78.695	79.18
K_4	77.95	77.205	79.77	77.345	80.24	78.21	78.125
R	2.26	2.61	2.151	3.544	1.557	2.20	1.152

3 工业调优试验

以福建某 135 t/h CFB 工业锅炉发电机组为对象进行工业调优试验。根据上述影响因素分析，可以确定调优方案；在上述影响因素中，考虑影响程度较大的前 5 个因素；其中风煤比对热效率影响最大，但实际工业生产中，受引风机负荷、风机电流等原因限制，风煤比调整幅度不可能太大，另外，增加风量也意味着增加风机电耗，氧量的增加（主要调二次风）也有类似的限制；主汽压力和温度受设备限制，一般维持高位运行，炉温允许变化范围较大，但需<1000 °C 以防止结焦。

综合上述分析，在线调优以风煤比的微调和炉温调控为主；但该工业装置实际炉温已较高，为防止结焦，考虑炉温的波动，对炉温给定值只能做少量改动。

表 5 给出试验结果；序号 1 数据为实施上述在线调优措施后的数据；序号 2 为未优化的数据，分别为 10 h 数据的平均值。由表 5 可知，通过炉床温度调控和风煤比微调，锅炉平均热效率提高了 0.011，标准煤耗相应降低了 7.19 g/(kW·h)，说明炉床温度和风煤比对能耗指标的影响是显著的，与本研究分析得到的结果相一致，也说明在线调优方案是有效的，能够实现锅炉热效率的在线优化。

表 5 福建某 CFB 锅炉工况数据表

序号	炉温 平均/°C	风煤比 平均/%	主汽压 平均/MPa	热效率 /%	煤耗 /g·(kW·h) ⁻¹
1	989	3.01	3.72	0.776	325
2	988	2.97	3.72	0.765	332

4 结 论

研究锅炉热效率的在线计算和影响因素大小分析，对于锅炉实时在线监控，进而实现锅炉低煤耗、高效率的在线优化控制，实现锅炉节能运行的目标是十分有意义的。本研究提出了一种基于正平衡计算方法的 CFB 锅炉热效率在线计算的方法，进行了

工业仿真计算。建立 CFB 锅炉热效率的人工神经网络预测模型，采用正交试验设计分析的方法分析了影响 CFB 锅炉煤耗和热效率的影响因素大小，最后进行了工业调优试验，证实了方法的有效性。该方法初步实现了循环流化床锅炉煤耗和热效率在线监控和分析，有利于锅炉的优化运行。

符 号 说 明

- B, B^0, B^1 ——维里系数，m³/kmol
- D_{gq} ——主蒸汽流量，kg
- H ——反应生成热，kJ/mol
- h_{gq} ——蒸汽热焓，kJ/kg
- h_{gs} ——给水热焓，kJ/kg
- N_{CO_2} ——CO₂生成量，mol
- p ——氧气对比压力，kJ/kg
- p_c ——氧气临界压力，MPa
- Q_1 ——锅炉有效利用热量，kJ
- Q_r ——锅炉输入热量，kJ
- T ——氧气对比温度
- T_c ——氧气临界温度，K
- V_m ——氧气的体积摩尔数，m³/kmol
- η ——锅炉热效率，%
- Ω ——氧气离心因子，量纲为 1

参 考 文 献

- [1] 沈芳平. 锅炉热效率计算方法研究与软件开发[D]. 长沙: 东南大学, 2004.
- [2] 李智, 蔡九菊. 电站锅炉效率在线计算方法[J]. 节能, 2005(3): 28-30.
- [3] 张小桃, 王培红. 一种新的锅炉效率的计算模型[J]. 电站系统工程, 1999, 15(4): 16-18.
- [4] 中华人民共和国机械电子工业部. GB 10184—88. 电站锅炉性能试验规程[S]. 全国文献工作标准化技术委员会, 1988-11-08.
- [5] 赵宪平, 杨平. 论工业锅炉运行热效率的在线自动测定[J]. 上海电力学院学报, 1994, 10(3): 44-53.
- [6] 曾祥平, 江青茵, 曹志凯. 火力发电机组热效率的在线计算[J]. 化工进展, 25(增刊): 402-404.
- [7] 瓦格纳 W, 克鲁泽 A. 水和蒸汽的性质[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] 陈钟秀, 顾飞燕. 化工热力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [9] 杜朝波, 高建强, 王印松. 神经网络在国内火电厂中的应用[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(4), 244-246.
- [10] 董长虹. Matlab 神经网络与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [11] Chu Jizheng, Shieh Shyanshu. Constrained optimization of combustion in a simulated coal-fired boiler using artificial neural network model and information analysis[J]. Fuel, 2003, 82(2): 693-703.
- [12] Roland R C. Neural network based combustion optimization reduces NO_x emissions while improving performance[J]. Dynamic Modeling Control Applications for Industry Workshop, 1998, 30(1): 1-6.
- [13] 上海市科学技术交流站组编. 正交试验设计法[M]. 上海: 上海人民出版社, 1975.