

基于遗传算法的 PID 参数整定在高温多相流风洞中的应用

徐婷艳, 浦兴国, 袁镇福

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 高温多相流风洞可以模拟锅炉运行过程中的气固两相流流动工况, 方便研究流动特性及测试方法。为了更好地控制风洞的技术参数, 风洞主要的控制回路中采用了 PID 控制, 并对 PID 参数进行基于遗传算法的参数整定。重点介绍了遗传算法目标函数的选取以及遗传算法的具体操作, 并在选择操作中结合最优保存策略。借助 Matlab 软件对温度控制对象进行基于遗传算法的 PID 参数整定的仿真。将整定的 PID 参数代入现场调试, 稍加修正后得到 $k_p=0.2173$, $k_i=0.4505$, $k_d=0.0758$ 。实验中温度的最大动态偏差为 1°C , 具有良好的控制品质。

关 键 词: 遗传算法; PID 参数整定; 风洞; 高温多相流

中图分类号: O359 TP301.6 文献标识码: A

引 言

风洞主要用于动力设备的流动与传热特性实验研究, 是促进流量等测量仪器研究水平提高的有力手段。在工程热物理研究领域经常遇到高温的气固多相流过程, 建立高温多相流风洞对其研究有着十分重要的意义。高温多相流风洞主要应用于诸如一次风煤粉气流、含有飞灰的炉内烟气流等气固两相流流动的实验研究。

由于热工过程大多具有大滞后和时变的复杂特性, 控制器参数的整定往往需要花费较长时间, 造成参数整定不良, 对运行工况的适应性较差。因此, 控制器参数的优化成为人们关注的问题, 它直接影响控制效果的好坏及系统的安全稳定运行。遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 作为一种仿生自寻优随机算法, 具有并行计算、全局收敛、编码操作等特点。由于其算法结构开放, 易于与问题结合, 因此将其运用于高温多相流风洞自动控制回路的参数优化。本研究以 Matlab 软件为平台, 以高温多相流风洞的实验段温度为控制对象, 进行基于遗传算法的 PID 控制器参数优化, 将优化得到的参数输入风洞的自控回路控制器中进行调试, 取得既快又好的效果。该

参数整定方法也可以应用于其它自动控制回路。

1 高温多相流风洞监控系统

高温多相流风洞结构如图 1 所示, 它由高温气流发生与控制系统、固体颗粒循环系统、风洞实验系统组成。为模拟目前大多数锅炉工作过程中的流动工况, 高温多相流风洞的主要技术参数定为: (1) 水平实验段风速为: $0 \sim 25 \text{ m/s}$; 实验气流的温度为: 室温 $\sim 250^\circ\text{C}$; (2) 高温实验段为: $250 \sim 450^\circ\text{C}$; (3) 实验两相流的颗粒浓度为: $0 \sim 0.06$ 和 $0 \sim 0.6 \text{ kg/kg}^{(1)}$ 。

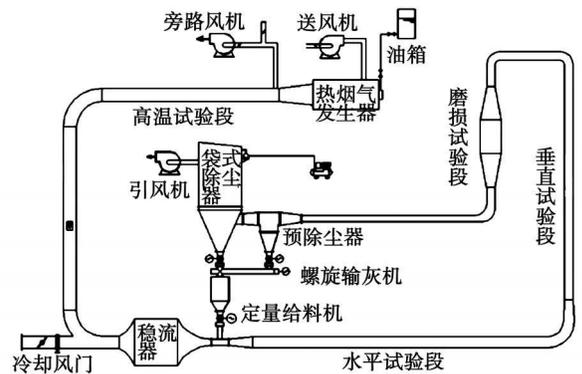


图 1 高温多相流风洞结构示意图

高温多相流风洞监控系统由可编程控制器 (PLC) 与计算机 (PC) 组成, 具有先进的监测和控制水平, 确保风洞安全和稳定运行。计算机监控上位机软件使用北京亚控科技发展有限公司提供的组态王开发, 下位机使用西门子 S7-300 系列的 PLC。下位机软件用 Step7 语言编辑器编写, 上位机 PC 与下位机 PLC 之间是通过 MPI 卡进行通讯。根据实验需要, 该监控系统对主要参数实行自动控制, 包括实验段温度控制回路、实验段流速控制回路、实验段负压控制回路和实验段颗粒浓度控制回路。

收稿日期: 2009-07-13 修订日期: 2009-08-11

作者简介: 徐婷艳 (1985-), 女, 安徽宁国人, 浙江大学硕士研究生。

温度控制系统—风洞采用耗油量固定的柴油燃烧器加热空气。根据设定的实验气流温度, 调节送风机风门开度, 使送风机输入的空气与燃烧器产生的烟气在热空气发生器内混合, 形成风洞所需要的高温气流。

流速控制系统—热空气发生器内混合形成的高温气流, 通过引风机引导, 在实验段达到实验所需的流速。风洞实验段的流速通过改变引风机的转速来控制。引风机转速采用变频器调节, 提高其动态特性的线性度。

负压控制系统—由于燃烧器的燃油量固定, 故配置的燃烧器容量大于风洞所需的供热量, 热空气发生器产生的气流量总是多于实验所需流量。系统配置有旁路风机, 将多余的气流量在进入实验段前抽出, 排入大气。通过调节旁路风门的开度控制旁路风机的抽风量, 使实验段维持合适的负压, 避免固体颗粒向外泄露。

颗粒浓度控制系统—灰斗内的固体颗粒通过定量给料机在实验段前送入, 颗粒入口至实验段有足够长度的直段, 使颗粒在进入实验段时已经得到充分的加速和扩散^[2]。控制回路根据流过实验段的风量和实验要求的颗粒浓度, 计算所需的给料量, 然后调节定量给料机的转速, 控制给料数量, 维持实验要求的浓度。实验段后的两相气流进入预除尘器和布袋除尘器, 将固体颗粒进行回收, 收集的固体颗粒经由各自的输灰器和螺旋输灰器送入灰斗, 循环使用。

以上 4 个控制回路除颗粒浓度控制回路采用开环控制外, 其它 3 个控制回路均采用闭环 PD 控制。

2 基于遗传算法的 PD 参数整定

2.1 目标函数的选取

在遗传算法中, 目标函数直接影响适应度函数进行参数寻优, 决定着群体的进化行为。为了使得表征控制要求的目标函数达到最优的控制器参数, 目标函数必须与系统调节指标密切相关, 反映系统的调节品质。

控制系统的性能一般从稳定性、快速性和准确性 3 个方面来评价, 可视为一个多目标的优化问题。误差绝对值的时间积分反映系统的准确性, 积分结果越小, 调节效果越好。上升时间反映了系统的快速性, 上升时间越短, 控制进行得越快。由于控制量过大会导致系统不稳定, 在目标函数中加入控制量的平方项。为避免超调, 采用了惩罚功能, 即一旦产

生超调, 将超调量作为最优指标的一项^[3]。研究分析中的目标函数采用权重系数变化法, 通过给控制器各性能指标函数赋予不同的权重, 将多目标优化问题转化为单目标优化问题。其中权重大小代表相应子目标在多目标优化问题中的重要程度。由上可得目标函数为:

$$J = \int_0^{\infty} (w_1 |e(t)| + w_2 |u(t)| + w_3 |e^y(t)|) dt + w_4 t \quad (1)$$

式中: $e(t)$ —系统误差; $u(t)$ —控制器输出; t —上升时间; $e^y(t)$ —超调量; w_1 、 w_2 、 w_3 、 w_4 —权值, 且 $w_4 \gg w_i$ 。

适应度函数为:

$$F = 1/J \quad (2)$$

2.2 遗传算法的操作

选择操作建立在个体适应度评价的基础之上, 它将当前群体中适应度较高的个体按某种规则和模型遗传到下一代群体中。不同的选择策略导致不同的选择压力, 使下一代与父代呈现不同的分配关系, 采用确定式采样方法分析, 具体操作过程为:

计算群体中各个个体在下一代群体中的期望生存数目:

$$N_i = M \cdot F_i / \sum_{i=1}^M F_i \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (3)$$

用 N_i 的整数部分 N_r ($N_r \leq N_i$) 确定各个对应个体在下一代群体中的生存数目, 共可确定出下一代群体中的 $\sum_{i=1}^M N_r$ 个个体; 按照 N_i 的小数部分对个体进行降序排列, 顺序取前 $M - \sum_{i=1}^M N_r$ 各个个体加入到下一代群体中, 至此可完全确定出下一代群体中的 M 个个体^[4]。这种选择操作方法可保证适应度大的一些个体一定能够被保留在下一代群体中, 并且操作也比较简单。

交叉运算是遗传算法中产生新个体的主要操作过程, 它既不要太多地破坏个体编码串中表示优良性状的优良模式, 又要能够有效地产生一些较好的新个体模式。本研究中操作对象为实数编码所表示的个体, 因此采用算术交叉方法。

假设在 X_A^t 、 X_B^t 两个个体之间进行算术交叉, 则交叉运算后所产生的两个新个体是:

$$X_A^{t+1} = \alpha X_B^t + (1-\alpha) X_A^t \quad (4)$$

$$X_B^{t+1} = \alpha X_A^t + (1-\alpha) X_B^t \quad (5)$$

在这里 α 为一个常数, 此时所进行的交叉运算称为均匀算术交叉。

变异运算是产生新个体的辅助方法, 它决定了遗传算法的局部搜索能力, 是必不可少的运算步骤。

在变异操作中变异概率 P_m 不能取得太大, 否则将退化为随机算法。变异的具体操作为: 对种群中的任一个体, 随机产生一个 $[0, 1]$ 区间的实数 P , 若 $P < P_m$ 则对该个体进行变异。本研究采用的是实值变异方法, 变异算法为:

$$X'_k = U_{min}^k + \delta \cdot (U_{max}^k - U_{min}^k) \quad (6)$$

式中: $\delta \in [0, 1]$ 内的随机值。

2.3 最优保存策略

在遗传算法的运行过程中, 由于选择、交叉、变异等遗传操作的随机性, 进化过程中的优良个体可能会被破坏。为了将适应度最好的个体尽可能地保留到下一代群体中, 我们可以使用最优保存策略来进行优胜劣汰操作。即当前群体中适应度最高的个体不参与交叉运算和变异运算, 而是用它来替换掉本代群体中经过交叉、变异等遗传操作后产生的适应度最低的个体。最优保存策略可视为选择操作的一部分, 它是遗传算法收敛性的一个重要保证条件^[5]。

3 仿真实验

3.1 控制对象的传递函数

高温多相流风洞的温度控制通过调节送风机风门开度来实现, 即执行机构为送风门。该风洞中设有 4 个实验段, 6 个温度测量点, 分别为高温实验段进口温度、水平实验段进口温度、水平实验段出口温度、垂直实验段出口温度、磨损实验段进口温度、磨损实验段出口温度。在进行温度自动控制时, 根据实验要求, 选定其中一点的温度作为控制目标, 执行机构根据设定值进行调节。经分析可知送风门开度与水平实验段进口温度为反作用关系, 送风门开度越大, 水平实验段进口温度越低, 在进行 PID 控制时应取反向关系。

为了在 Matlab 上进行基于遗传算法 PID 整定的仿真, 需要控制对象的传递函数。控制对象的建模方法有机理建模和实验建模两种, 研究采用实验建模中的飞升曲线法。选取水平实验段进口温度为控制对象, 送风门开度从 70% 变化到 60% 时, 水平实验段进口温度的阶跃响应特性如图 2 所示。

通过观察飞升曲线可知水平实验段进口温度为无延迟的一阶对象, 经切线法分析飞升曲线的特征参数可得控制对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.0125}{s + 0.0083} \quad (7)$$

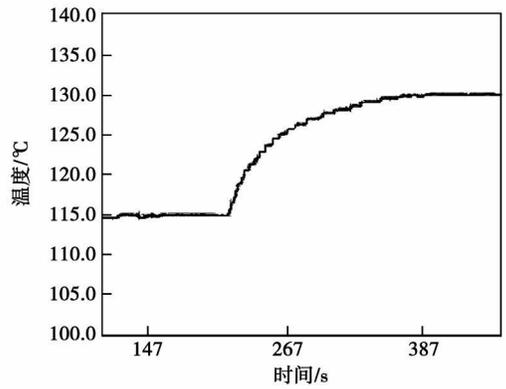


图 2 水平实验段进口温度的阶跃响应曲线

3.2 控制器参数整定

已知控制对象的传递函数, 温度采样周期 $t_s = 2$ s, 输入指令为阶跃信号, 采用 Matlab 作为软件平台进行系统编程和仿真。

遗传算法中使用的样本个数为 30, 取交叉概率 $P_c = 0.9$, 变异概率 $P_m = 0.033$, 参数 k_p 的取值范围为 $[0, 2]$, k_i 的取值范围为 $[0, 1]$, 取 $w_1 = 1.44$, $w_2 = 2 \times 10^{-3}$, $w_3 = 0.01$, $w_4 = 10^2$ 。采用实数编码方式, 经过 100 代进化, 获得的优化参数分别为: $k_p = 0.2430$, $k_i = 0.4972$, $k_d = 0.0613$, 性能指标 $J = 21.7759$ 。图 3 为迭代次数 $G=5$, $G=50$, $G=100$ 时的系统阶跃响应曲线对照, J 的优化过程如图 4 所示。

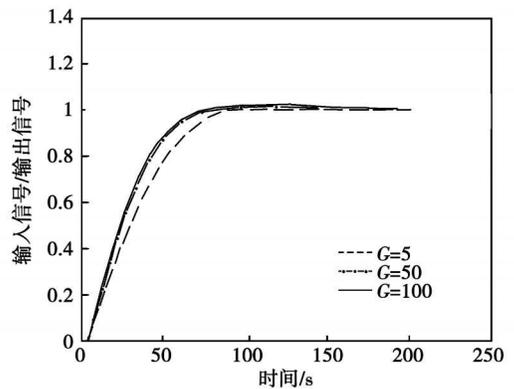
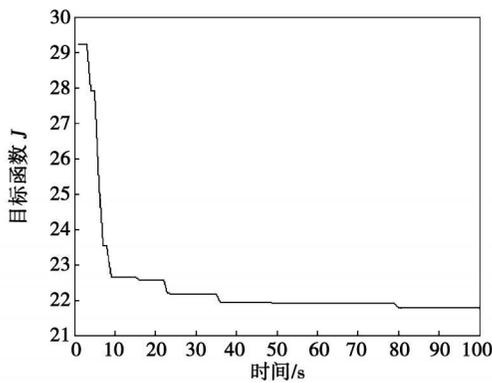


图 3 仿真结果比较

由图 3 可知, $G=5$ 时曲线的上升时间较长, 超调量也较大, 到 $G=50$ 时曲线已经有较好的控制效果, 与 $G=100$ 的曲线比较接近。 $G=100$ 时系统响应的超调量几乎为零, 调节时间也较短, 具有优良的控制效果。分析图 4 目标函数 J 的优化过程可知, 随着迭代次数的增加, 目标函数 J 趋于最小, 算法可能收敛至最优, 使用遗传算法设计的控制器具有较好的稳定性和快速性。

图 4 目标函数 J 的优化过程

4 现场调试及运行结果

根据 MATLAB 仿真实验, 整定得到了控制器参数; 在高温多相流风洞实验台上进行温度自动控制的调整实验, 稍加修正后的 PID 参数分别为 $k_p=0.2173$ $k_i=0.4505$ $k_d=0.0758$ 。当水平实验段进口温度设定值从 $119\text{ }^\circ\text{C}$ 变化到 $130\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 温度控制回路对水平实验段进口温度的控制情况如图 5 所示。

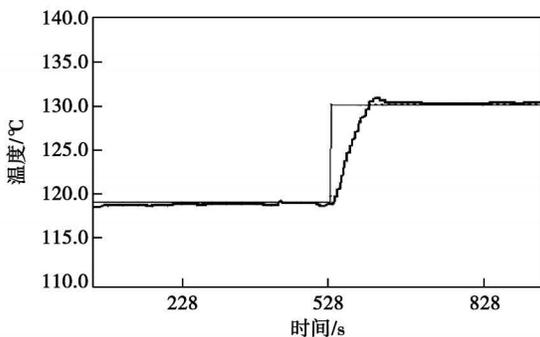


图 5 温度控制曲线

运行结果表明: 水平实验段进口温度的最大动态偏差为 $1\text{ }^\circ\text{C}$, 调节时间约为 70 s , 气流温度即达到设定值。具有良好的控制品质, 且大大节省了参数整定调试时间。

在进行实验时, 需要使实验段维持一定的负压。压强过高会引起烟气和颗粒外泄, 甚至导致燃烧器回火, 烧坏实验设备。当送风量变化引起实验段负压变化时, 负压控制回路自动调节旁路风机风门进行控制, 维持设定的负压。图 6 为负压自动控制曲线。

负压在设定值上下来回脉动, 波动幅度基本控制在 $\pm 30\text{ Pa}$ 之内, 能满足实验要求。当送风量等

干扰引起负压大幅度变化时, 负压自动控制回路立刻控制执行机构动作, 调节负压至设定范围内, 调节时间约为 30 s 。

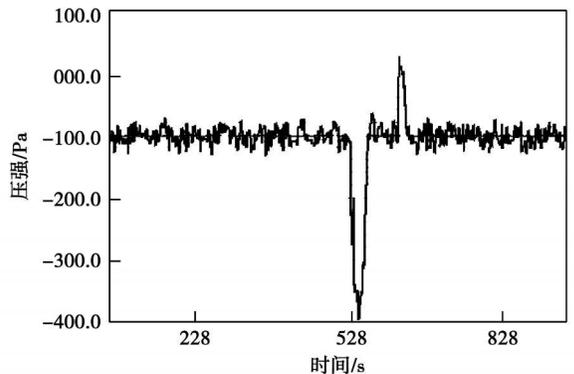


图 6 负压控制曲线

5 结 论

(1) 高温多相流风洞的主要参数的控制回路有: 温度控制回路、流速控制回路、负压控制回路和颗粒浓度控制回路。前 3 个控制回路采用 PID 控制器, 对温度控制回路进行基于遗传算法的 PID 参数整定。

(2) 遗传算法中的目标函数采用权重系数变化法, 以线性加权作为多目标优化问题的评价函数, 将多目标优化问题转化为单目标优化问题。权重系数分配往往依据经验判断, 带有一定的主观随机性。

(3) 仿真整定的 PID 参数带入现场实际投运, 稍经修正后分别为 $k_p=0.2173$ $k_i=0.4505$ $k_d=0.0758$ 。运行中温度的最大动态偏差为 $1\text{ }^\circ\text{C}$, 调节时间约为 70 s , 具有良好的控制品质。说明采用的整定方法是比较有效的。使用遗传算法 PID 参数整定方法, 具有较好的控制性能, 并且克服了传统 PID 参数整定困难的缺点。

参考文献:

- [1] 高夫燕, 浦兴国, 赵鸣志, 等. 高温气固两相流风洞的设计[J]. 动力工程, 2007, 27(1): 95-98.
- [2] 赵鸣志, 浦兴国, 周 浩, 等. 高温两相流风洞收缩段和试验段的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 50-53.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [4] 周 明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [5] 李少远, 王景成. 智能控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

(编辑 陈 滨)

operating conditions of the boiler. Compared with the currently available methods for evaluating and judging the combustion conditions of a boiler, the above-mentioned method can avoid the difficulty for evaluation, judgment and policy-making caused by the incomparability of various factors, making the operation realized by using the method in question enjoy a conspicuous superiority. Key words: tangentially corner-fired pulverized coal boiler; combustion judgment; factor analytic method; common factor; mean square deviation; contribution rate

混煤可磨特性与掺烧方式试验研究 = Experimental Study of the Grindability and Mixed-diluted Combustion Mode of a Blended Coal [刊, 汉] / DUAN Xue-nong, ZHU Guang-ming, JIAO Qing-feng (Experiment Research Institute, Hunan Provincial Electric Power Corporation, Changsha, China, Post Code: 410007), YAO Bin (College of Energy Source and Power Engineering, Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 410 ~ 413

Experimentally studied were the grindability and the variation law of the particle diameter distribution of four kinds of typical lean coal and anthracite respectively in different coal mixing modes in a laboratory. The test results show that the grindability of the blended coal tends to be such as assumed by coal ranks difficult to grind, i.e. in the pulverized coal samples, the coarse particles pertain to more difficult to grind coals while the fine particles involve more easily grindable coal ranks. The test results were explained physically from the angle of the standard testing of grindability. It has been concluded that the grindability of a blended coal must be determined through tests. The pulverized coal fineness of a blended coal must be decided by a coal rank with a relatively low volatile content when it is "mixed and diluted in front of the furnace" and a rational fineness for each coal component must be chosen when separate milling is adopted. For the mixed/diluted combustion of coal ranks with a relative big difference in grindability, an optimization test was performed of three "separate milling" mixed/diluted combustion modes in the light of specific features of the milling and combustion system. By controlling relatively well the pulverized coal finenesses of difficult to grind and difficult to burn out coal ranks, the boiler efficiencies were invariably enhanced by more than 1.5% when compared with that in the traditional "mixing/dilution in front of the furnace" combustion mode. Key words: blended coal; grindability; particle diameter distribution; burn-out characteristics; separate milling

基于遗传算法的 PD 参数整定在高温多相流风洞中的应用 = Application of PID (Proportional, Integral and Differential) Parameter Setting Based on a Genetic Algorithm in a High-temperature Multiphase Flow Wind Tunnel [刊, 汉] / XU Ting-yan, FU Xing-guo, YUAN Zhen-fu (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Source, Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 414 ~ 417

A high-temperature multiphase flow wind tunnel can simulate gas-solid two-phase flow conditions during the operation of a boiler, facilitating the study of flow characteristics and testing methods. To better control the technical parameters of the wind tunnel, PID (proportional, integral and differential) controllers were adopted in the main control loops of the wind tunnel and the PID parameters were set based on a genetic algorithm. The choice of the target function based on the genetic algorithm and the concrete operations of the genetic algorithm were described in detail with the optimization operations being coupled with optimum preservation tactics. By using software Matlab, a simulation was performed of the PID parameter setting of temperature control objects based on the genetic algorithm. The set PID parameters were used for on-site commissioning test, and $k_p=0.2173$, $k_i=0.4505$ and $k_d=0.0758$ were obtained after a tiny correction. During the test, the maximal dynamic deviation of temperature was 1 °C, thus attaining a good control quality. Key words: genetic algorithm; PID (proportional, integral and differential) parameter setting; wind tunnel; high-temperature multiphase flow