

文章编号: 1671-7848(2008)06-0685-03

基于 PSO 优化的燃油供给压力动态跟踪控制

李晓斌¹, 刘 丁², 寇得民¹

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 200091; 2. 西安理工大学 信息与控制工程研究中心, 陕西 西安 710048)



摘 要: 燃烧用油料供给压力的精确控制是一个具有非线性特性的流体输送压力控制问题, 针对现有 PID 控制存在的不足, 提出了基于 PSO 优化的预测函数控制 (PSO-PFC) 方法, 通过与 PFC, PID 控制方法的仿真比较, 以及对阳极焙烧炉重油燃烧供给压力的动态跟踪控制表明, 该方法优于原有燃油燃烧系统的 PID 控制, 以及常规和其他改进的 PFC 控制方法, 实现了燃油供给压力的动态跟踪精确控制。

关 键 词: 燃油供给压力; 参数动态跟踪; PSO 算法; 预测函数控制 (PFC)
中图分类号: TP 273 **文献标识码:** A

Dynamic Tracking Control of Fuel Oil Feeding Pressure Based on PSO Optimization

LI Xiao-bin¹, LIU Ding², KOU De-min¹

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 200091, China;
2. Center of Information and Control Engineer, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To the accurate control problem of fuel oil feeding pressure that is of nonlinear dynamic tracking control, and is difficult to deal with by traditional PID controller, the particle swarm optimization predictive function control (PSO-PFC) is presented. The results of simulation and experiment show that the PSO-PFC has higher precision than the methods of PFC and PID. It is proved that the proposed method is effective in the fuel oil feeding pressure accurate dynamic tracking control for anode baking.

Key words: fuel oil feeding pressure; parameter dynamic tracking; particle swarm optimization algorithm; predictive function control

1 引 言

在有色、冶金、能源、动力等以油品为燃料的燃油输送供给过程中, 油品输送供给压力的精确控制直接影响着油品的输送与充分燃烧, 是节能降耗和降低环境污染的最主要控制参数^[1,2], 这一过程又是一个受脉冲控制喷射燃烧和燃烧废气排放压力等波动影响的动态过程, 以往此类过程或与此类似的压力控制通常是采用开环定值控制, 或者常规及改进的 PID 控制方式^[2]。通过现场实际测试发现, 现有的这些燃油供给压力控制方法很难满足使用要求^[2], 因此, 有待于解决燃油供给压力的快速动态跟踪控制, 以保证燃油的有效喷射、充分雾化及与空气完全混合, 从而提高燃烧效率, 满足低油耗、高热值、低排放的要求的问题。

本文以铝电解阳极焙烧的重油燃烧为实际研究对象, 提出了基于粒子群算法的预测函数控制 (PSO-PFC) 方法, 该方法优于传统的 PID 控制和其

他改进 PFC 控制方法, 可为油料的充分燃烧创造有利的前提条件。

2 燃油输送工艺及模型和参数的估计

1) 燃油输送工艺 以铝电解阳极焙烧重油系统为试验对象, 研究供给燃烧器燃油的压力控制部分, 工艺过程, 如图 1 所示。

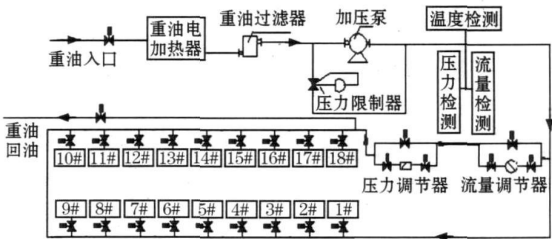


图 1 重油供给燃烧系统工艺图

Fig 1 Chart of heavy oil feeding combustion system

该部分主要包括加压油泵、过滤器、加热器、电子脉冲重油燃烧器、压力、流量、温度的检测、

收稿日期: 2007-09-13 收修定稿日期: 2007-11-01

基金项目: 国家科技攻关计划基金资助项目(2002BA901A28); 甘肃省省长基金资助项目(GS015-A52-012)

作者简介: 李晓斌(1966), 男, 甘肃秦安人, 教授, 博士, 主要从事复杂系统智能控制理论与应用等方面的教学与科研工作。

各种阀门等; 工作压力一般为 2.0~4.0 MPa。
2) 燃油供给压力模型的预测 依据流体动力学知识和有关文献^[3], 燃油输送压力过程的预测模型可表示为

$$G(s) = \frac{K}{Ts+1} \exp(-\tau) \quad (1)$$

式(1)离散化处理后的状态空间表达式为
 $y(k) = \alpha y(k-1) + K(1-\alpha)u(k-1-L)$ (2)
式中, $\alpha = \exp(-T_s/T)$, T_s 为采样周期; $L = \tau/T_s$; K 和 T 分别为过程的稳态增益和时间常数。

对象输出由自由输出响应 $\alpha \cdot y(k-1)$ 和函数输出响应 $K \cdot (1-\alpha) \cdot u(k-1-L)$ 两部分组成。

对于多步预测, 当预测步长取 H , 并且选取 $u(k) = u(k+1) = \dots = u(k+H-1)$ 时, 则依据式(2)知, 未来 H 步模型预测输出为

$$y_m(k+H) = \alpha_m^H y_m(k) + K_m(1-\alpha_m^H)u(k) \quad (3)$$

3) 燃油压力设定参数的变化与预估 在阳极焙烧的重油燃烧过程中, 重油燃烧供给压力参数取决于初始的设定值和燃烧过程中由排烟系统反馈的随机修正值, 所以有:

$$Y_r(t) = Y_{r0} + P_s(t) \quad (4)$$

式中, $Y_r(t)$ 为实际要求的压力设定值; Y_{r0} 为生产工艺理论要求的压力设定值; $P_s(t)$ 为燃烧过程中来自于燃烧结果的压力随机修正值。

其他来自于天气环境、间歇式燃烧的燃烧架移动等造成的压力变化, 均作为干扰或扰动处理。为了提高压力控制的自适应性和鲁棒性, 使得所跟踪的压力值更满足实际使用需要, 当设定值的变化按阶跃变化考虑时, 只需选择一个阶跃函数为基函数, 则式(4)可写为

$$Y_r(k+H) = Y_p(k) + (1-\beta^H)(Y_{r0}(k) - Y_p(k)) = \beta^H Y_p(k) + (1-\beta^H)Y_{r0}(k) \quad (5)$$

式中, $Y_{r0}(k)$ 为设定的压力工艺曲线值; $Y_r(k+H)$ 为参考跟踪值; $\beta^H = \exp(-T_s/T_r)$, T_s 为采样周期, T_r 为参考压力跟踪轨迹时间常数; $Y_p(k)$ 为过程预测输出。

4) 燃油供给压力的优化指标及控制变量 燃油输送供给压力的优化目标可选择为

$$J_p = \min \left[\sum_{p_1}^{p_2} (Y_r(k+H) - Y_p(k+H))^2 \right] \quad (6)$$

且有:

$$Y_r(k+H) = y_m(k+H) + e(k+H) \quad (7)$$

P_1 和 P_2 在实际使用时, 为压力控制的上下限; $Y_p(k+H)$ 为燃油供给压力过程输出的预测; $y_m(k+H)$ 为模型的输出; $e(k+H)$ 为未来时域的

预测输出误差。

引入一个预测误差的修正补偿式, 用以克服由于二次输入噪声、系统的非线性及时变化等造成的模型预测输出和对象输出之间的随机偏差:

$$e(k+H) = (1-\gamma)e(k+H-1) + \gamma[y_p(k+H) - y_m(k+H)] \quad (8)$$

式中, $\gamma \in [0, 1]$ 。

式(8)对应应有:

$$e(k) = (1-\gamma)e(k-1) + \gamma[y_p(k) - y_m(k)] \quad (9)$$

由式(3), 式(5), 式(7)~式(9)可得:

$$u(k) = [(1-\beta^H)Y_{r0}(k) + (\beta^H - \gamma)Y_p(k) + (\gamma - \alpha_m^H)y_m(k) + (\gamma - 1)e(k-1)]/[K_m(1-\alpha_m^H)] \quad (10)$$

3 燃油供给压力的动态跟踪控制方法

PSO 优化的预测函数控制结构, 如图 2 所示。

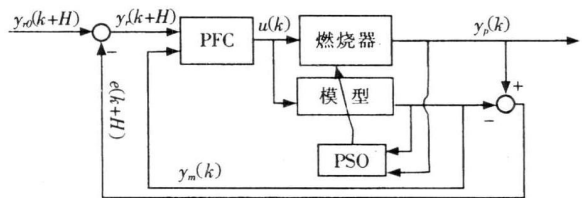


图 2 燃油燃烧压力跟踪控制结构图

Fig 2 Structure of fuel oil combustion pressure tracking control

预测函数控制是一种具有很强鲁棒性和自适应性的在线动态跟踪控制方法, 针对非线性对象预测函数控制中的模型失配、操作变量约束等问题的改进及其性能分析也有相应的报道^[4,5]。但这些方法在动态跟踪控制时受到实时性的限制, 使得他们在燃油供给压力动态跟踪控制实时性很强的系统中使用时并不理想。因此, 对于燃油燃烧压力跟踪控制问题, 提出了 PSO 算法辨识优化模型参数、基函数权系数和参考轨迹参数的方法, 扩展预测时域, 实现基函数的优化, 克服模型失配, 从而提高了控制系统的稳定性和鲁棒性。

从式(10)可看出, 需要进行离线辨识和在线优化的参数为 K_m , α_m , β 和 γ , 这里采用 PSO 算法, 实际测量数据样本, 对其进行离线辨识, 见表 1。

工程中投入燃油燃烧供给压力动态跟踪控制系统时, 选取采样周期为 1 s, 以离线辨识所得的参数 K_m , α_m , β 和 γ 为初始值, 在此值所在的较小邻域内, 在线优化参数 K_m , α_m , β 和 γ 。

对于 PSO 求解优化问题, 是将问题的解抽象为没有质量和体积的微粒(点)。在 D 维搜索空间中, 有 m 个粒子, 其中第 i 个粒子的位置表示为向量 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, 飞行速度表示为向量 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$ 。将 x_i 带入目标函数可算出其适

应值，并且粒子知道自己到目前为止发现的最好位置 p_{best} 和现在的位置 x_i 。除此之外，每个粒子还知道到目前为止整个群体中所有粒子发现的最好位置 g_{best} ， g_{best} 是在 p_{best} 中的最好值。在找到这两个最好解后，粒子根据下式来更新自己的速度和位置：

$$v_{id}^{k+1} = w \times v_{id}^k + c_1 \times \text{rand}(\bullet) \times (p_{id} - x_{id}^k) + c_2 \times \text{rand}(\bullet) \times (p_{gd} - x_{id}^k) \tag{11}$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \tag{12}$$

式中， $i = 1, 2, \dots, m$ ， m 为群体中粒子的总数； v_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 飞行速度向量的第 D 维分量； x_{id}^k 为第 k 次迭代粒子 i 位置向量的第 D 维分量； p_{id} 为粒子 i 个体最好位置 p_{best} 的第 D 维分量； p_{gd} 为群体最好位置 g_{best} 的第 D 维分量； c_1 和 c_2 为权重因子，分别调节向全局最好粒子和个体最好粒子方向飞行的最大步长； $\text{rand}(\bullet)$ 为随机函数，产生 $[0, 1]$ 之间的随机数； w 为惯性权重函数，可以用来控制前面的速度对当前速度的影响。

表 1 实际测量的数据

Table1 Data of practical measure

时间 s	压力 MPa	阀门开度 %	时间 s	压力 MPa	阀门开度 %
0	0.23	100	60	2.33	40
5	0.30	97	65	2.88	38
10	0.43	93	70	3.02	31
15	0.51	88	75	3.12	27
20	0.55	84	80	3.33	22
25	0.71	77	85	3.50	18
30	0.85	71	90	3.61	15
35	1.20	66	95	3.88	13
40	1.36	63	100	3.94	7
45	1.54	58	105	3.96	5
50	1.83	55	110	4.00	2
55	2.16	48	115	4.01	0

若 c_1 、 c_2 太小，则粒子可能远离目标区域；若太大，则会导致突然向目标区域飞去，或飞过目标区域。合适的 c_1 和 c_2 可以加快收敛且不易陷入局部最优，通常选 $c_1 = c_2 = 2$ 。较大的 w 可以加强 PSO 的全局搜索能力，而较小的 w 能加强局部搜索能力，通常选用以下方法线性地减少 w ：

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{T_{\max}} \times T \tag{13}$$

式中， $w_{\max}$ 为 w 的最大值； $w_{\min}$ 为 w 的最小值； $T_{\max}$ 为迭代的最大代数， T 为当前迭代代数。

PSO 辨识和优化参数 K_m ， α_m ， β ， γ 的过程为

1) 初始化 初始搜索点的位置及其速度通常是在允许的范围内随机产生的。确定 PSO 算法的最大迭代次数 $T_{\max} = 100$ ， $D = 4$ ，种群规模为 40，权重因子 $c_1 = c_2 = 2$ 。权重函数 w 由式 (13) 从 0.9 线性化减小到 0.1。

2) 选取各微粒的适应度函数为

$$J = \min \left[\sum_{p_1}^{p_2} (Y_m(k+H) - Y_p(k+H))^2 \right] \tag{14}$$

根据训练样本集和式 (14)，评价每一个粒子的适应度值，如果好于该粒子当前的适应度值，则将 p_{best} 设置为该粒子的位置，且更新个体适应度值。如果所有粒子的个体适应度值中最好的好于当前的全部粒子的最优适应度值，则将 g_{best} 设置为该粒子的位置，记录该粒子的序号，且更新最优适应度值。

3) 粒子的更新 根据式 (11) 和式 (12) 对每一个粒子的速度和位置进行更新。

4) 输出判断 如果迭代次数达到了预先设定的最大次数，则停止迭代，输出最优解；否则转到第 2 步。

离线辨识所得初始预测模型的 K_m ， α_m ， β 和 γ 参数值为 $[-13.998\ 3, 0.987\ 5, 0.307\ 6, 0.125\ 3]$ 。

4 仿真研究与实际应用

1) 仿真研究 为了验证 PSO-PFC 在燃油供给压力动态跟踪控制中的有效性和优越性，选取参考模型及对象模型：

$$G_m(s) = \frac{2}{s^2 + 8s + 16} \exp(-8s) \tag{15}$$

$$G_p(s) = \frac{3}{2s^2 + 10s + 20} \exp(-5s) \tag{16}$$

通过仿真对 PFC，GA-PFC，AGA-PFC 和 PSO-PFC 进行比较。

采样周期 T_s 取 0.5 s，群体个数为 40，迭代次数 100 代， $D = 4$ ， $c_1 = c_2 = 2$ ， $w \in [0, 1]$ ， $H = 10$ 。仿真结果，如图 3 所示。

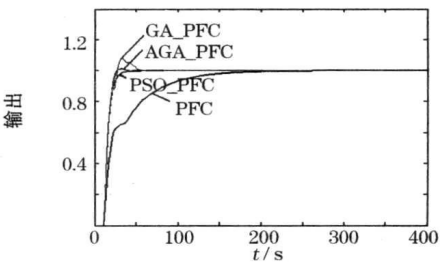


图 3 PSO-PFC 与其他改进 PFC 仿真结果比较

Fig 3 Simulation results of PSO-PFC and other improved PFC

从图可以看出，采取 PSO 对模型参数进行离线和在线辨识优化的 PSO-PFC 控制，无论在响应时间，还是在跟踪误差等方面，均优于 PFC 及其他改进 PFC 方法。

2) 实际应用 本文提出的 PSO-PFC 控制方法，实验和运行均在铝电解阳极焙烧炉的燃油供给系统中进行，硬件为 Modicon Quantum，软件用 VC++ 和 Concept2.5。控制目标为 3 台燃烧架提供燃烧工艺所需重油喷射燃烧压力。（下转第 723 页）

7 结 语

本无刷直流电动机控制器综合应用 AVR 单片机 ATmega48 与专用集成电路 MC33035, MC33039, 已成功应用于绕线机的电机控制。工程应用的实践表明, 本文所提出的使用单片机对控制信号进行预处理的方式, 达到了精确、安全、方便地控制电机的效果。本控制器相对于目前其他无刷直流电机的控制方案, 简化了软件的设计和调试, 降低了硬件成本, 同时具有适应不同参数电机的能力, 可以广

(上接第 687 页)

阳极焙烧是一个间歇式燃烧过程, 焙烧工艺所造成的扰动主要来自于 3 台燃烧架中的 1 台停燃移动对另外 2 台燃烧架供给压力的影响。同时, 由于每个燃烧器都是通过电子脉冲进行电磁阀的开关控制, 也会造成燃烧器之间的扰动。

阳极焙烧现场不移炉工作时, 设定目标压力 2.2 MPa, 现场运行 10 min 数据打印一次记录的结果比较。2004-12-20 的 15:04:46~2004-12-22 的 03:00:02AC7 加热架管内轴压趋势图, 如图 4 所示; 2004-11-11 的 11:02:04~23:00:08AC7 加热架管内轴压趋势图, 如图 5 所示; 2004-11-13 的 09:10:04~10:30:08AC7 加热架管内压趋势图, 如图 6 所示。

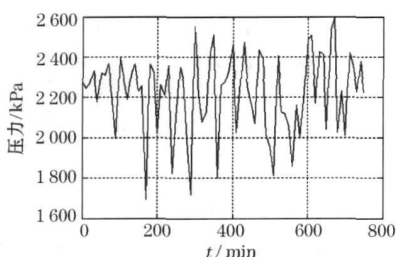


图 4 原采用自整定 PID 控制结果

Fig 4 The result of self-tuning PID control

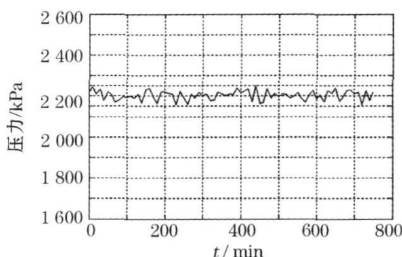


图 5 PSO-PFC 控制结果

Fig 5 The result of PSO-PFC control

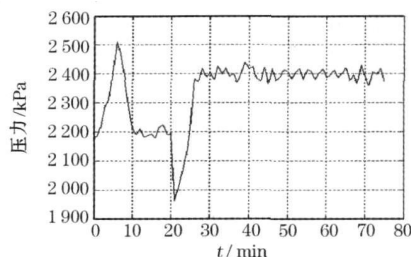


图 6 工艺扰动对供给压力的影响曲线

Fig 6 Feeding pressure curve with a technics disturbance

5 结 语

本文提出了 PSO-PFC 方法, 通过 PSO 和预测函数相结合的策略, 解决了预测函数控制使用中基函数的优化以及模型的失配问题; 同时, 应用到燃油供给压力的实际控制中, 为相关油料电子脉冲控制喷射燃烧的燃油压力动态跟踪控制提出了一种全新的控制方法。实验结果表明, 该方法优于传统的 PID 方法及其他改进的 PFC 方法, 为油料的充分燃烧提供了有利的前题条件。

参考文献(References):

- [1] Moura de R R, Mesquita A L A. Development and test in situ of a

泛地应用于无刷电动机控制领域。

参考文献(References):

- [1] 王晓明, 王玲. 电动机的 DSP 控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004. (Wang Xiaoming, Wang Ling. The DSP control of motor[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004.)
[2] 牛海清, 谢运祥. 无刷直流电动机及其控制技术的发展[J]. 微电机, 2002, 35(5): 36-38. (Niu Haiqing, Xie Yunxiang. Development of BLDCM and its control[J]. China-micromotor, 2002, 35(5): 36-38.)
[3] 马潮. 高档 8 位单片机 ATmega128 原理与开发应用指南(上)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004. (Ma Chao. The theory and application guide of slap-up 8-bit single chip ATmega128[M]. Beijing: Beihang University Press, 2004.)

当一台燃烧架进行移炉时, 停止燃烧和重新启动燃烧, 造成 2 次扰动, 每隔 1 min 打印一次所记录的运行数据结果。从运行结果比较可以看出, 原使用 PID 控制的偏差在 ± 450 kPa 左右, 非常不利于重油的充分燃烧; 而 PSO-PFC 控制的重油供给压力动态跟踪控制系统, 克服了工艺、环境等扰动造成的影响, 设定与实际控制间的压力绝对偏差均小于 ± 50 kPa, 完全满足工艺要求控制偏差不大于 ± 100 kPa 的目标。从图 6 燃烧架移动时扰动对重油供给压力的影响曲线可以看出, PSO-PFC 控制系统可以很好地适应燃烧架工艺性停燃和移动时造成的干扰, 可以很快跟踪到正常设定的供给压力。

heavy oil burner for alba's fumaces [J]. Light Metals, 2002, 73(5): 621-627.

- [2] 肖文雍, 杨林, 梁锋. GD-1 高压共轨式电控柴油机燃油喷射压力控制策略的研究[J]. 内燃机学报, 2004, 22(3): 235-240. (Xiao Wenyong, Yang Lin, Liang Feng. Injection pressure control of GD-1 electronically controlled high-pressure common rail fuel injection system[J]. Transactions of CSICE, 2002, 22(3): 235-240.)
[3] Boucher R F, Kitsios E E. Simulation of fluid network dynamics by transmission line modeling [J]. Proc Imech E, 1986, 200(c1): 21-29.
[4] Lepetic M, Skrjanc I, Chiacchiarini H G, et al. Predictive functional control based on fuzzy model: Magnetic suspension system case study [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, (16): 425-430.
[5] 潘红华, 朱森, 孙东彦, 等. 神经网络模型预测函数控制方法[J]. 火力与指挥控制, 2005, 30(1): 110-112. (Pan Honghua, Zhu Sen, Sun Dongyan, et al. Study of predictive functional control algorithm based on neural net model [J]. Fire Control & Command Control, 2005, 30(1): 110-112.)

bemetics, 1985, 15 (1): 116-132.

- [11] Isidori A. Nonlinear control systems [M]. New York: Springer-Verlag, 1989.
[12] Tanaka K, Kosali T. Design of a stable fuzzy controller for an articulated vehicle [J]. IEEE transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1997, 27(3): 552-558.

(上接第 706 页)

- [9] Murray R M, Li Z, Sastry S S. Introduction to robotics: Mechanics and Control [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994.
[10] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control [J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cy-