

# 基于微粒群算法的灰色预测 PID 控制器

吴晓威,张井岗

(太原科技大学 电子与信息工程学院,山西 太原 030024)

**摘要:**针对大滞后系统,提出一种基于微粒群算法的灰色预测 PID 控制算法.采用灰色预测模型 GMC(1,2) 预测时滞系统的输出并用微粒群算法优化 PID 控制器的参数.这种控制方法不需要精确的数学模型,在线估计参数少,计算简单.仿真结果表明该方法的有效性.

**关键词:**微粒群算法;灰色预测;PID 控制器

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2007)05-0063-05

## Grey prediction PID controller based on particle swarm optimization approach

WU Xiao-wei, ZHANG Jing-gang

(College of Electronics and Information Engineering, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** A grey prediction PID controller based on particle swarm optimization is presented for systems with long time-delay. The output of a system with time-delay is predicted by using a grey prediction model GMC(1,2) and the optimal parameters of the PID controller are obtained by using particle swarm optimization. The proposed scheme does not require a precise mathematical model. Fewer parameters must be estimated on-line and computations are very simple. Simulation results show the effectiveness of the proposed controller.

**Keywords:** particle swarm optimization; grey prediction; PID controller

PID 控制器因其结构简单,容易实现以及鲁棒性好等特点,目前在工业过程控制领域仍广泛使用.但常规 PID 控制器对纯滞后和参数不确定对象,难以获得满意的控制效果.为此,众多学者提出了各种改进方法.这些方法大致有 3 类:一类是基于智能控制的 PID 控制方法,如模糊控制 PID、专家 PID、自适应控制器、神经网络 PID 控制器等;一类是基于 Smith 预估器的控制方法,如文献[1]是基于遗传算法的时滞系统参数辨识与时滞系统的 Smith 预估控制算法结合;另一类是与预测控制结合的方法,如文献[2]采用预测控制与遗传算法结合来控制的.这些方法在一定程度上改进了控制效果,但存在一些问题:第 1 类控制方法是根据当前的误差信号来决定下一步的控制量,属于“事后控制”;第 2 类需要被控系统具有精确的数学模型;第 3 类是基于 CARMA 模型的控制算法,需要求解复杂的 Diophantine 方

程,模型参数较多,计算量大.灰色预测控制的出现较好地解决了这些问题.

灰色预测控制是一种将控制理论和灰色系统理论相结合的新型控制方法.该方法需要的原始数据少,计算简单,且不需要精确的数学模型,目前在工业控制中得到了广泛应用<sup>[3-15]</sup>.文献[11]将遗传算法和灰色预测 GM(1,1) 结合控制电力系统稳定器,取得了满意的控制效果.文献[12]将进化规划和 GM(1,1) 结合,取得了较好的控制效果.但采用的 GM(1,1) 模型仅根据系统实际输出的离散值进行了预测,没有考虑控制量对系统输出的影响情况,有时预测效果不佳.本文采用 GMC(1,2) 模型既考虑了控制量对系统输出的影响,又提高了预测精度.利用 GMC(1,2) 模型预测时滞系统输出,并采用微粒群算法优化 PID 参数,从而获得更好的控制性能.

### 1 灰色预测控制

灰色预测控制通过系统行为数据系列的提取寻

收稿日期:2006-12-01.

基金项目:山西省教育厅科技项目(20051311).

求系统发展规律,从而按规律预测系统未来的行为,并根据系统未来的行为趋势确定相应的控制决策进行预测控制,提高适应能力<sup>[3-5,7]</sup>.

### 1.1 灰色预测模型

这里采用文献[14]的改进灰色预测模型 GMC(1,2).设可测得系统的输入和输出时间序列如下:

$$\text{输入: } u^{(0)} = (u^{(0)}(1), u^{(0)}(2), \dots, u^{(0)}(r)), \quad (1)$$

$$\text{输出: } y^{(0)} = (y^{(0)}(1), y^{(0)}(2), \dots, y^{(0)}(r)). \quad (2)$$

这些数据有正有负,而灰色系统建模时要求原始数据序列必须为非负<sup>[3-5,7]</sup>.所以必须将非恒正序列变换为恒正序列.本文采用的变换为

$$y_m^{(0)} = y^{(0)} + \min(y^{(0)}) / +, \quad (3)$$

$$u_m^{(0)} = u^{(0)} + \min(u^{(0)}) / +. \quad (4)$$

式中: 为任意正常数.

对该序列(3)和(4)进行生成累加,得到一次累加生成(1-A GO)数据列:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(y^{(1)}(rp+1) + y^{(1)}(rp+2)) & \frac{1}{2}(u^{(1)}(1) + u^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(y^{(1)}(rp+2) + y^{(1)}(rp+3)) & \frac{1}{2}(u^{(1)}(2) + u^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{2}(y^{(1)}(rp+1-r) + y^{(1)}(rp+r)) & \frac{1}{2}(u^{(1)}(r-1) + u^{(1)}(r)) & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Y = (y^{(0)}(2), y^{(0)}(3), \dots, y^{(0)}(r))^T. \quad (10)$$

式(7)的解为

$$\hat{y}_m^{(1)}(rp+t) = y_m^{(1)}(rp+1)e^{-(t-1)} + \int_1^t e^{-a(t-\tau)} (bu_m^{(1)}(\tau) + \dots) d\tau. \quad (11)$$

用梯形公式求上式积分得

$$\hat{y}_m^{(1)}(rp+t) = y_m^{(1)}(rp+1)e^{-a(t-1)} + \int_1^t e^{-a(t-\tau)} (bu_m^{(1)}(\tau) + \dots) d\tau \approx \frac{1}{2}(e^{-a(t-1)} + 1)(bu_m^{(1)}(1) + \dots). \quad (12)$$

由于 GMC(1,2)微分方程(7)是由一次累加生成数据所建立的.故对  $\hat{y}_m^{(1)}$  序列进行累减生成(IA GO),可得预测序列  $\hat{y}_m^{(0)}$ ,其中

$$\hat{y}_m^{(0)}(t+1) = \hat{y}_m^{(1)}(t+1) - \hat{y}_m^{(1)}(t). \quad (13)$$

式(13)得到的是变换序列的预测值,对其进行逆变换,得到原始数列的预测值

$$\hat{y}^{(0)}(k) = \hat{y}_m^{(0)}(k) - (\min(y^{(0)}) / +). \quad (14)$$

### 1.2 灰色预测模型算法

通过灰色预测,将其预测值应用到 PID 控制算法中就形成了灰色预测控制算法.其闭环控制构成如图1.

图1中,  $r(t)$  为  $k$  时刻系统给定,  $Y(k)$  为  $k$  时刻

$$u_m^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i u_m^{(0)}(k), i = 1, 2, \dots, r, \quad (5)$$

$$y_m^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i y_m^{(0)}(k), i = 1, 2, \dots, r. \quad (6)$$

利用一次累加生成数据列(5)和(6),可建立 GMC(1,2)微分方程:

$$\frac{dy_m^{(1)}(rp+t)}{dt} + ay_m^{(1)}(rp+t) = bu_m^{(1)}(t) + \dots \quad (7)$$

式中:  $rp$  为滞后时间;  $a$  为发展系数,反映  $y^{(0)}$  的发展态势;系数  $b$  的大小反映控制变量  $u$  对行为变量  $y^{(0)}$  的影响大小与影响极性(“+”为促进,“-”为抑制),为灰色作用量,这些参数由下式估计:

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y. \quad (8)$$

式中:

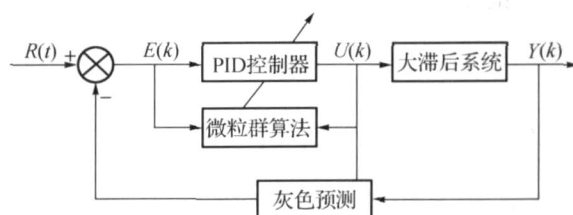


图1 基于微粒群算法的灰色预测 PID 控制系统结构图

Fig.1 Block diagram of the grey prediction PID controller based on PSO

系统输出,  $U(k)$  为  $k$  时刻控制量输出,  $\hat{Y}(m)$  为  $(k-m)$  步的灰色预测值.

根据图1,可以得到系统  $k$  时刻的预测误差.  $e(k) = r(k) - \hat{y}_m$ . 用预测误差调节,可以有效抑制系统可能出现的超调.

## 2 基于 PSO 算法的 PID 参数优化设计

### 2.1 PID 控制器

数字 PID 控制在生产过程中是一种最普遍采用的控制方法,在冶金、机械、化工等行业中获得广泛应用.

传统 PID 离散控制算式为

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^k e(j) + k_d (e(k) - e(k-1)). \tag{15}$$

式中:  $k_p$  为比例系数,  $k_i$  为积分系数,  $k_d$  为微分系数.  $e(k)$  为设定值与预测量之间的偏差  $e(k) = y_r - \hat{y}(k+d)$ .

2.2 微粒群算法原理

微粒群算法 (PSO) 与其他进化算法相似,也是将寻优的参数组合成群体,通过对环境的适应度来将群体中的个体向好的区域移动. 然而不像其他算法一样对个体使用演化算子,而是将每个个体看作是  $N$  维搜索空间中一个没有体积的微粒,结合微粒的历史最佳位置和群体历史最佳位置信息,以一定的速度向目标值逼近,并根据对个体和集体的飞行经验的综合分析来动态调整这个速度<sup>[16-18]</sup>.

假设在一个  $N$  维的目标搜索空间中,有  $n$  个粒子组成一个群体部落. 其中  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}), i = 1, 2, \dots, n$ , 是第  $i$  个粒子在  $N$  维搜索空间中的位置,  $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$  是第  $i$  个粒子的飞行速度,  $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})$  是第  $i$  个粒子迄今为止搜索到的最优位置.  $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gN})$  是整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置. 第  $i$  个微粒速度和位置的进化方程为

$$\begin{aligned} V_i(t+1) &= \tilde{V}_i(t) + c_1 r_1 (P_i - X_i(t)) + \\ &\quad c_2 r_2 (P_g - X_i(t)), \\ X_i(t+1) &= X_i(t) + V_i(t+1). \end{aligned} \tag{16}$$

式中:  $\tilde{}$  表示惯性权重,它使微粒保持运动惯性,使其具有扩展搜索空间的趋势,有助于新区域的搜索.  $c_1, c_2$  均为正实数,称为加速度常数.  $c_1$  为调节自身最好位置方向的步长,  $c_2$  为调节微粒向全局最好位置飞行的步长.  $r_1, r_2$  是  $[0, 1]$  之间的随机数. 为了减少在进化过程中,微粒离开搜索空间的可能性,  $v_{ij}$  通常限定于一定范围内,即  $v_{ij} \in [-v_{\max}, v_{\max}]$ . 如果问题的搜索空间限定在  $[-x_{\max}, x_{\max}]$ , 则可设  $v_{\max} = kx_{\max}, 0.1 \leq k \leq 0.5$ .

2.3 基于 PSO 的 PID 参数整定

使用 PSO 优化 PID 的 3 个参数  $K = [k_p, k_i, k_d]$  是  $n \times 3$  维. PID 参数优化的目标是寻找一组优化参数  $k_p, k_i, k_d$  使得系统快速响应,同时满足超调量小、调节时间短. 采用常用的性能评价指标 ISTE:

$$\begin{aligned} J &= \int_0^t e^2(t) dt, \text{ 适应度函数取为} \\ f &= \frac{1}{J}. \end{aligned} \tag{17}$$

用于 PID 参数整定的 PSO 算法如下:

1) 确定微粒的规模,对微粒群的随机位置和速度进行初始设定,并给出 3 个参数  $k_p, k_i, k_d$  的上界和下界;

2) 根据式 (17) 计算每个微粒的适应度;

3) 对于每个粒子,将其适应值与最好位置  $P_i$  的适应值比较,若较好,则将其作为当前最好位置;

4) 对于每个粒子,将其适应值与全局最好位置  $P_g$  的适应值比较,若较好,则将其作为当前全局最好位置;

5) 根据

$$\begin{aligned} V_{ij}(t+1) &= \tilde{V}_{ij}(t) + c_1 r_1 (P_{ij} - X_{ij}(t)) + \\ &\quad c_2 r_2 (P_{gj} - X_{ij}(t)), \end{aligned}$$

更新每个粒子的速度,

$i = 1, \dots, n, j = 1, 2, 3, v_{i1}$  代表  $k_p$  的速度,  $v_{i2}$  表示  $k_i$  的速度,  $v_{i3}$  表示  $k_d$  的速度;

6) 如果  $V_{ij}(t+1) > V_j^{\max}$ , 则  $V_{ij}(t+1) = V_j^{\max}$ , 如果  $V_{ij}(t+1) < V_j^{\min}$ , 则  $V_{ij}(t+1) = V_j^{\min}$ ;

7) 根据  $X_{ij}(t+1) = X_{ij}(t) + V_{ij}(t+1)$ , 更新每个粒子的位置. 其中  $X_j^{\min} < X_{ij}(t+1) < X_j^{\max}$ ,  $X_j^{\max}$  表示 PID 参数的上界,  $X_j^{\min}$  表示 PID 参数的下界;

8) 如果未达到预设最大代数,则返回 2), 否则输出最优的 PID 的参数.

3 仿真实验

为了验证本文提出的将微粒群算法和灰色预测结合整定 PID 方法的有效性,对大滞后系统进行计算机仿真研究.

为了便于比较,被控对象的传递函数为  $G(s) = \frac{10}{25s+1} e^{-40s/13}$ . 系统给定输入  $r(t) = 1(t)$ , 扰动输入为  $n(t) = 0.3(t-2000)$ , 采样周期均为 1 s, 灰色预测数列长度为 5, 使用的样本数均为 30, 进化代数均为 100, 其中 PID 的参数  $k_p, k_i, k_d$  范围是  $k_p \in [0, 1], k_i \in [0, 1], k_d \in [0, 1]$ . 在本文中惯性权重  $\tilde{}$  是从 0.9 逐渐线性衰减到 0.4, 加速度常数  $c_1 = 2, c_2 = 2$ , 经过 17 代进化后得到最优解. 在文献[11]方法中,染色体长度为 60,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.02,进化 76 代得到最优解. 在文献[12]中染色体长度为 61,预测步数为 5,进化 30 代得到最优解. 将这 3 种方法进行比较,得出的参数及在该参数下系统的性能指标见表 1.

程序的运行时间是利用 Matlab 的函数 tic [程序内容] toc 求出的;计算机配置是 Pentium4 CPU 1.7 GHz, 256 MB 内存.

表 1 PID 设计方法得到的参数和性能指标

Table 1 Parameters and performance based on different PID design method

PID 设计方法	PSO- Grey	GA- Grey <sup>[11]</sup>	EP- Grey <sup>[12]</sup>
$k_p$	0.045 2	0. 475	0.697
$k_i$	0.001 1	0.013	0.17
$k_d$	0.685 1	0.804 3	0.964 8
%	1.1	20.2	7.5
上升时间 $t_r$	246	292	309
调节时间 $t_f$	254	1 182	736
ISTE	30.291 8	43.196 1	41.402 5
运行时间/s	607.969 0	1 234.754 2	965.187 5

图 2 是 3 种方法在模型匹配时仿真结果. 其中点划线为文献[12]的阶跃响应, 文献[11]的阶跃响应见虚线所示, 本文提出的基于微粒群算法的灰色预测的阶跃响应见实线所示. 与其他方法相比, 文中方法使系统具有良好的动态特性, 有效减少系统的超调量和缩短调整时间. 这是由于灰色预测控制属于超前控制, 可以根据系统将来输出的变化来预先调整控制量, 从而可以有效抑制系统超调和震荡.

为了检验本文提出的控制器具有较强的鲁棒性, 改变系统的增益、纯滞后时间、时间常数. 对系统增益失配增加 20%, 即对象变为  $G(s) = \frac{12}{25s + 1} \cdot e^{-40s}$ , 采用上述 3 种方法调节 PID 控制器参数得到的阶跃响应曲线如图 3 所示. 图 4 为对象的时间常数失配增加 20% 时, 即  $G(s) = \frac{10}{30s + 1} e^{-40s}$  的阶跃响应. 图 5 为纯滞后时间失配增加 20%, 即  $G(s) = \frac{10}{25s + 1} \cdot e^{-48s}$ , 的阶跃响应. 图 6 为增益、纯滞后时间、时间常数均失配增加 20% 时, 即  $G(s) = \frac{12}{30s + 1} \cdot e^{-48s}$ , 得到的仿真曲线.

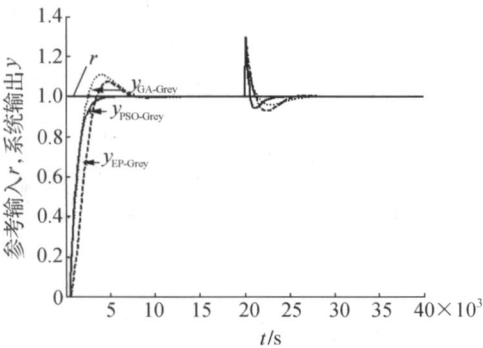


图 2 3 种方法在模型匹配时的仿真结果  
Fig. 2 Simulation results of model matching

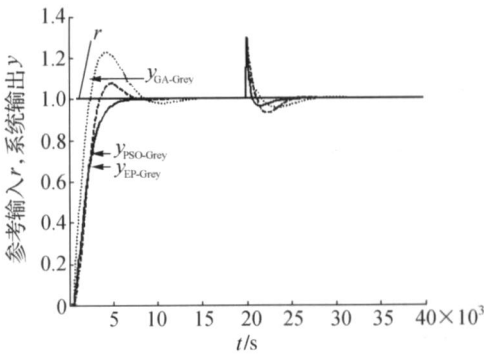


图 3 增益失配增加 20% 时的仿真结果  
Fig. 3 Simulation results of gain constant mismatching +20%

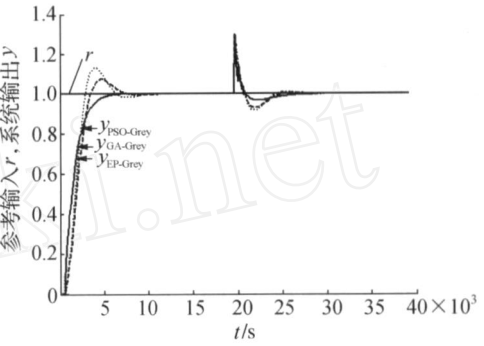


图 4 时间常数失配增加 20% 时的仿真结果  
Fig. 4 Simulation results of time constant mismatching +20%

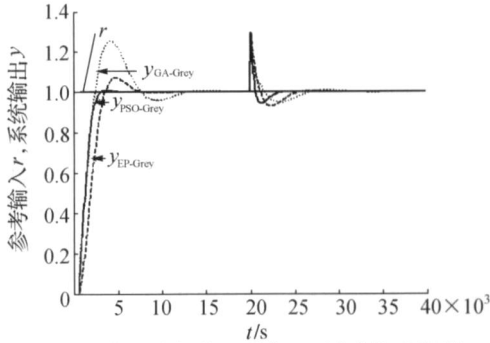


图 5 纯滞后时间失配增加 20% 时仿真结果  
Fig. 5 Simulation results of delay time constant mismatching +20%

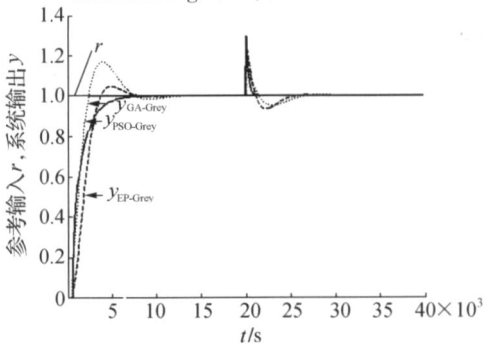


图 6 增益、时间常数、纯滞后时间失配增加 20% 时仿真结果  
Fig. 6 Simulation results of gain constant, time constant and delay time all mismatching +20%

## 4 结束语

本文提出基于微粒群算法的灰色预测PID控制器,将传统PID、微粒群算法和灰色预测相结合.利用灰色预测克服时滞,利用微粒群算法优化PID控制器的参数.仿真结果表明,该方法可以显著提高系统的动态特性,有效地减少系统超调量,缩短调整时间,而且具有较好的鲁棒性和适应性.

## 参考文献:

- [1]张世超,姜波.基于遗传算法的时变纯滞后系统的在线辨识与控制[J].计算机应用与软件,2005,22(5):102-103.  
ZHANG Shichao, JIANG Bo. On-line identification and control of system with time-varying time delay based on genetic algorithms[J]. Computer Applications and Software, 2005, 22(5): 102-103.
- [2]杨智,高靖.基于遗传算法的预测自整定PID控制器[J].控制与决策,2000,15(1):113-118.  
YANG Zhi, GAO Jing. Optimal prediction PID controller based on genetic algorithm[J]. Control and Decision, 2000, 15(1): 113-118.
- [3]邓聚龙.灰色控制系统[M].武汉:华中科技大学出版社,1987.
- [4]姚向东,张立军.灰色预测控制的设计及其应用[J].电子与自动化,1998(4):14-16.  
YAO Xingdong, ZHANG Lijun. Design and application of grey prognostic controlling[J]. Electronics & Automation, 1998(4): 14-16.
- [5]毕效辉,姚琼荟.灰色预测在过程控制中的应用[J].西南工学院学报,1997(3):11-16.  
BI Xiaohui, YAO Qionghui. Preliminary study on grey predictive control of industrial process[J]. Journal of Southwest China Institute of Technology, 1997(3): 11-16.
- [6]CHEN J Y. An integration design approach in PID controller[A]. Proc of the Int Conf on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials[C]. Hawaii, 1999.
- [7]刘思峰,郭天榜.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2000.
- [8]张广立,付莹.一种新型自调节灰色预测控制器[J].控制与决策,2004,19(2):212-215.  
ZHANG Guangli, FU Ying. Novel self-adjustable grey prediction controller[J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 212-215.
- [9]邹健,杨莹春,诸静.基于灰色模型的预测模糊控制策略及其应用[J].中国电机工程学报,2002,22(9):12-14.  
ZOU Jian, YANG Yingchun, ZHU Jing. Design of Grey model based predictive controllers and its application[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2002, 22(9): 12-14.
- [10]刘栋梁,赵光宇.灰色反馈线性化控制及其在感应电机调速中的应用[J].浙江大学学报,2005,39(8):1164-1167.

LIU Dongliang, ZHAO Guangyu. Grey feedback linearization speed control and its application in induction motor[J]. Journal of Zhejiang University, 2005, 39(8): 1164-1167.

- [11]DING C C, LEE K T. Optimal design for power system dynamic stabilizer by grey prediction PID control[A]. IEEE ICIT '02[C]. Bangkok, Thailand, 2002.
- [12]LI C Y, HUANG T L. Optimal design for the grey prediction PID controller for power system stabilizers by evolutionary programming[A]. Proc IEEE International Conference on Networking 2004[C]. Taipei, China, 2004.
- [13]刘红军,韩璞.时变大滞后系统的自适应灰色预测PID控制[J].华北电力大学学报,2004,31(5):44-47.  
LIU Hongjun, HAN Pu. Adaptive grey prediction PID control of time-variable large delay system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(5): 44-47.
- [14]WU W Y, CHEN S P. A prediction method using the grey model GMC(1,n) combined with the grey relational analysis: a case study on Internet access population forecast[J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 169: 198-217.
- [15]TIEN TZU-LI. A research on the deterministic grey dynamic model with multiple inputs DGM(1,1,1)[J]. Applied Mathematics and Computation, 2003, 139: 401-416.
- [16]KAO C C, CHANG C W, FUNG R F. The self-tuning PID control in a slider-crank mechanism system by applying particle swarm optimization approach[J]. Mechatronics, 2006, 16: 513-522.
- [17]KHODIER M M, CHRISTODOULOU C G. Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization[J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 2005, 53(8): 2674-2679.
- [18]GAING Z L. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 384-391.

## 作者简介:



吴晓威,女,1982年生,硕士研究生,主要研究方向为智能控制和鲁棒控制.

E-mail: wxwei2002467@126.com.



张井岗,1965年生,教授,硕士生导师,主要研究方向为鲁棒控制和智能控制及其应用.发表学术论文60余篇,其中20余篇分别被EI、SCI、ISTP检索.