

基于灰色预测的自适应内模 PID 双重控制器设计

吴晓威, 张井岗, 赵志诚

(太原科技大学 电子与信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 针对一类非线性系统, 提出一种基于灰色预测的自适应内模 PID 双重控制方法. 把由系统的输入输出数据得到的灰色预测模型作为系统的内部模型, 并在基本的内模控制结构上增加 PID 控制器, 加快了跟踪误差收敛速度, 内模控制的性能明显改善. 仿真结果表明, 该控制方法简单而有效, 内模 PID 双重控制较单一内模控制具有更好的系统性能.

关键词: 内模控制; PID 控制; 灰色预测模型

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2008)01-0071-06

Design of a dual controller with an adaptive internal model and PID in conjunction with grey prediction

WU Xiao-wei, ZHANG Jing-gang, ZHAO Zhi-cheng

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

Abstract: A dual controller strategy with an adaptive internal model in conjunction with grey prediction and PID controller is presented for nonlinear systems. The grey prediction model, which was obtained from input-output data, was employed as the internal model of the system. A PID controller was added to the original IMC structure in order to speed up tracking of error convergence and improve IMC controller performance. Simulation results demonstrate that the proposed control strategy is simpler and more effective, indicating that a dual IMC and PID controller has better performance than a controller with only IMC.

Keywords: internal model control; grey prediction model; nonlinear system

内模控制(internal model control, IMC)的概念是1982年由Garcia和Morari提出的, 由于它具有跟踪调节性能好、鲁棒性强、能消除不可预测干扰的影响、设计简单等优点, 已经成为工业过程控制系统的一类有效控制结构^[1-2]. 目前内模控制已推广到非线性系统, 并在非线性系统领域中取得了显著成果. 目前非线性内模控制常见模型为: 神经网络模型^[3-5]、小波神经网络模型^[6]、模糊系统模型^[7]、Volterra级数模型^[8-9]、模糊神经网络模型^[10-11]等, 这些方法在一定程度上改善了控制性能, 但他们也存在一些问题. 采用神经网络、模糊系统建模方案, 一般仅给出训练算法, 算法的收敛性和系统稳定性分析往往停留在定性分析上, 而且常局限于某一特定的

非线性系统^[12]. Volterra级数需要相当多的被估计参数才能取得满意的精度, 这在很大程度上限制了这种方法的应用.

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. 这种控制方法具有对模型精度要求低、在线估计参数少、计算方便、控制综合效果好等优点, 目前被广泛应用于工业过程控制领域. 文中将灰色预测GM(1, 2)模型作为系统的内部模型. 该模型只要在线检测过程的输入和输出数据, 而不需要复杂的辨识过程, 计算简单. 在基本的内模控制结构上增加PID控制器, 使得跟踪误差较快收敛, 内模控制的性能明显改善. 仿真结果表明, 该控制方法简单而有效, 内模/PID控制较单一内模控制具有更好的系统性能.

1 灰色预测模型

这里采用灰色预测GM(1, 2)模型.

收稿日期: 2007-07-17.

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目(2007011049); 山西省教育厅科技资助项目(20051311).

通讯作者: 吴晓威. E-mail: wxwei2002467@126.com.

设可测得其输入和输出时间序列如下:

输入:

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

输出:

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

对序列(1)和(2)进行一次累加生成 1-A GO,

$$u^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i u^{(0)}(k), \quad i = 1, 2, \dots, r, \quad (3)$$

$$y^{(1)}(i) = \sum_{k=1}^i y^{(0)}(k), \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (4)$$

利用一次累加生成数据列(3)和(4),可建立 GM(1,2)灰微分方程

$$y^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = bu^{(1)}(k). \quad (5)$$

式中: $z^{(1)}(k)$ 为背景值,

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(y^{(1)}(k-1) + y^{(1)}(k)), \quad (6)$$

GM(1,2)白化方程

$$\frac{dy^{(1)}(t)}{dt} + ay^{(1)}(t) = bu^{(1)}(t). \quad (7)$$

式中: 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).这些参数利用最小二乘法求解

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

式中:

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & u^{(1)}(2) \\ -z^{(1)}(3) & u^{(1)}(3) \\ \dots & \dots \\ -z^{(1)}(n) & u^{(1)}(n) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

将方程(7)离散化,得到

$$y^{(1)}(k+1) = (1 - Ta)y^{(1)}(k) + Tbu^{(1)}(k). \quad (10)$$

将式(10)乘以差分算子的平方 $1 - z^{-1}$ (z^{-1} 为滞后算子),经整理得

$$y^{(0)}(k+1) = (1 - Ta)y^{(0)}(k) + Tbu^{(0)}(k). \quad (11)$$

2 基于灰色预测的双重控制策略

2.1 灰色内模控制器

基本的内模控制结构如图1虚框内所示.其中 d 为扰动, u_1 为内模控制器的输出, u_2 为 PID 控制器的输出.滤波器 F 可增强系统的鲁棒性,平滑噪声,柔化快变信号,以改善系统响应的过渡过程.

由式(11)可以得到

$$(1 - (1 - Ta)z^{-1})y^{(0)}(k+1) = Tbz^{-1}u^{(0)}(k+1). \quad (12)$$

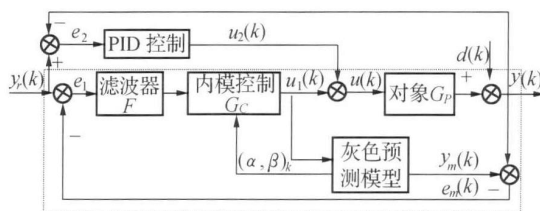


图1 基于灰色预测内模 PID 结构图

Fig.1 Block diagram of adaptive internal model and PID dual controller based on grey prediction

将式(12)化简为

$$(1 - z^{-1})y^{(0)}(k+1) = z^{-1}u(k+1). \quad (13)$$

式中: $1 - Ta$, Tb , T 为采样周期.

所以,系统的估计脉冲传递函数为

$$\hat{G}_P = \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}}. \quad (14)$$

可将过程模型 \hat{G}_P 分解为 2 部分,即

$$\hat{G}_P(z^{-1}) = \hat{G}_{P+}(z^{-1}) \hat{G}_{P-}(z^{-1}). \quad (15)$$

式中: $\hat{G}_{P+}(z^{-1}) = z^{-1}$,

$$\hat{G}_{P-}(z^{-1}) = \frac{\hat{G}_P(z^{-1})}{z^{-1}} = \frac{1}{(1 - z^{-1})}, \quad (16)$$

$| | < 1$.

为保证控制器可实现,取

$$G_{IMC} = \hat{G}_{P-}^{-1}(z^{-1})f(z^{-1}). \quad (17)$$

式中: $f(z^{-1}) = \frac{1 - z^{-1}}{1 - z^{-1}}$ 为内模控制器的可实现因子,这里选为滤波器形式.所以,内模控制器

$$G_{IMC} = \frac{(1 - z^{-1})}{(1 - z^{-1})}. \quad (18)$$

式中: f 由灰色预测模型得到.

文中采用等维信息 GM(1,2) 模型,就是在增加最新信息的同时,去掉最老信息,在滚动建模时保持数据个数不变,然后在此基础上建立灰色预测模型.灰色预测控制的参数,随着系统的运行进行,不断的自动更新,具有很强的自适应性.

2.2 PID 控制设计

图1在基本内模控制的基础上,加入 PID 控制器.用设定值 $y_r(k)$ 与实际输出值 $y(k)$ 的差作用于 PID 控制器.

图1中 PID 控制器取增量形式:

$$u_2(k) = k_p(e_2(k) - e_2(k-1)) + k_i e_2(k) + k_d(e_2(k) - 2e_2(k-1) + e_2(k-2)). \quad (19)$$

式中: k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例、积分和微分时间常数.

$$\begin{aligned} u_2(k) &= u_2(k-1) + \Delta u_2(k), \\ e_2(k) &= r(k) - y(k). \end{aligned} \quad (20)$$

2.3 静态性能分析

由图 1 可以得到闭环输出为(为了简单计算省略括号内的 z^{-1} 算子)

$$y^{(0)}(k) = \frac{(G_{PID} + G_{IMC})G}{1 + G_{PID}G + G_{IMC}(G - \hat{G})}r(k) + \frac{1 - G_{IMC}\hat{G}}{1 + G_{PID}G + G_{IMC}(G - \hat{G})}d(k). \tag{21}$$

跟踪误差与设定值之间的关系为

$$E(k) = r(k) - y^{(0)}(k) = \frac{1 - G_{IMC}\hat{G}}{1 + G_{PID}G + G_{IMC}(G - \hat{G})}r(k) - \frac{1 - G_{IMC}\hat{G}}{1 + G_{PID}G + G_{IMC}(G - \hat{G})}d(k). \tag{22}$$

如果模型匹配,稳态时有

$$k \rightarrow \infty, z^{-1} \rightarrow 1, G(1) = \hat{G}(1), G_{IMC}(1) = \frac{1 - \hat{G}(1)}{1 - G(1)}, \hat{G}(1) = \frac{1 - G_{IMC}(1)G(1)}{1 - G_{IMC}(1)G(1) + G_{IMC}(1)(G(1) - \hat{G}(1))}.$$

从而有

$$E(k) = \frac{1 - G_{IMC}(1)\hat{G}(1)}{1 + G_{PID}(1)G(1) + G_{IMC}(1)(G(1) - \hat{G}(1))}r(k) - \frac{1 - G_{IMC}(1)\hat{G}(1)}{1 + G_{PID}(1)G(1) + G_{IMC}(1)(G(1) - \hat{G}(1))}d(k) = 0. \tag{23}$$

式(23)表明,在稳定时,如果模型匹配,对阶跃输入和扰动,系统可实现无偏差跟踪。

对于虚框内的基于灰色预测的内模控制,可以类似的得到跟踪误差与设定值的关系为

$$E(k) = r(k) - y^{(0)}(k) = \frac{1 - G_{IMC}\hat{G}}{1 + G_{IMC}(G - \hat{G})}r(k) - \frac{1 - G_{IMC}\hat{G}}{1 + G_{IMC}(G - \hat{G})}d(k). \tag{24}$$

比较式(23)和(24)可以看出,由于双重控制结构中增加了 PID 控制器,与基本内模控制相比,在满足鲁棒稳定性的前提下,可使得跟踪误差较快收敛。如果系统存在输出扰动时候,通过 PID 反馈控制,也可以抑制这种干扰的影响。

3 仿真研究

3.1 仿真实验 1

考虑文献[6]中的非线性离散系统

$$y_p(k+1) = f(y_p(k), y_p(k-1)), u(k) = \frac{y_p(k)y_p(k-1)}{2.5 + y_p^2(k) + y_p^2(k-1)} + u(k).$$

1) 系统辨识

采用等维新息滚动的灰色预测模型 $GM(1,2)$, 建模维数选为 5。图 2 中给定输入信号 $u(k) = 0.75\sin(2k/50) + 0.75\sin(2k/25)$, 采样周期为 0.001。从图 3 可以看出,等维信息滚动的灰色预测模型 $GM(1,2)$ 得到的系统输出与实际非线性系统输出非常接近,辨识误差非常小。利用公式求出 $e_{avg} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{y^0(k) - y(\hat{k})}{y^0(k)} \right|$ 平均残差为 0.004 1, 预测精度由 $(1 - e_{avg}) \times 100\%$ 计算为 99.59%。图 4 为参数 a 与 b 的变化曲线图。由此可知,等维信息滚动的灰色预测模型 $GM(1,2)$ 得到的系统行为模型作为系统的内部模型是可行的。

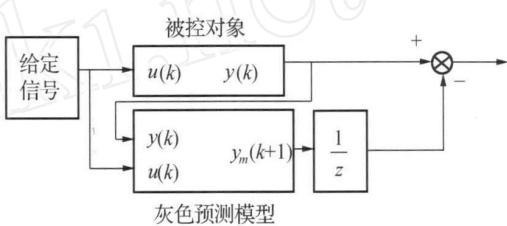
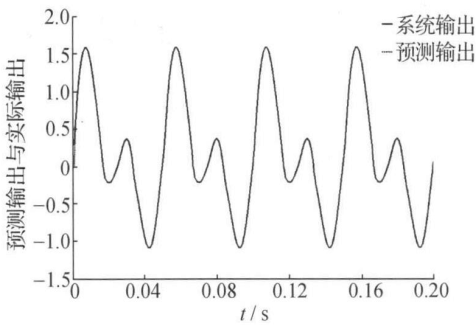
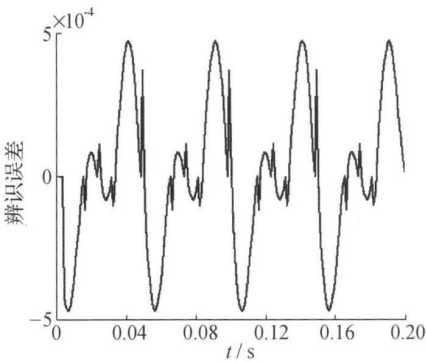


图 2 灰色系统辨识

Fig. 2 The identified model based grey prediction



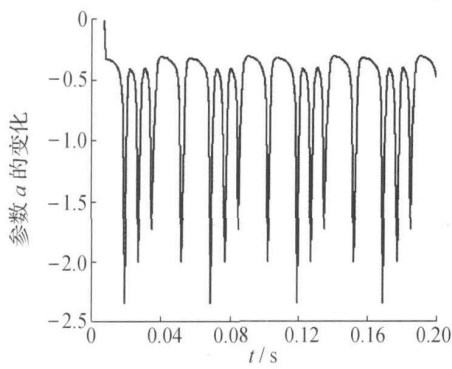
(a) 预测输出与实际输出比较图



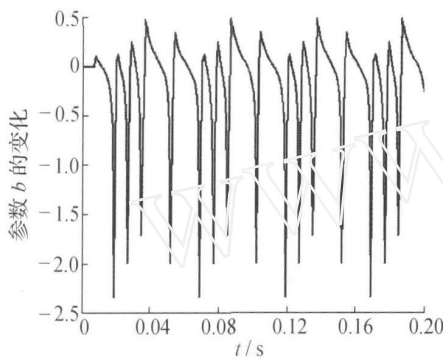
(b) 辨识误差

图 3 预测输出与实际输出比较与辨识误差

Fig. 3 The predictive output and the system output and the identification error



(a)参数 a 的变化曲线图



(b)参数 b 的变化曲线图

图 4 参数 a、b 的变化曲线图

Fig. 4 The change of the parameters of a and b

2) 输出跟踪研究：

给定参考输入 $r(k)$ 为方波信号. 仿真中可实现因子 $= 0.5$. PID 控制器的参数为 $k_p = 0.1$, $k_i = 0.07$, $k_d = 0$. 在图 5 中, 实线为文中方法, 虚线为文献[6]采用小波神经网络内模加 PID 控制器方法. 文中所提方法比文献[6]方法响应速度快, 控制效果更好.

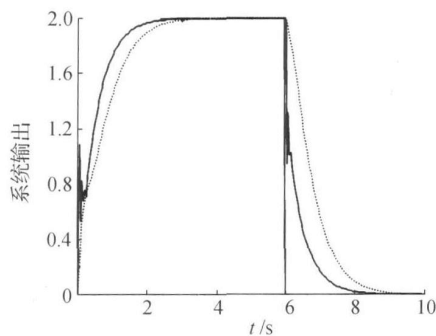


图 5 2 种控制方案的输出比较图

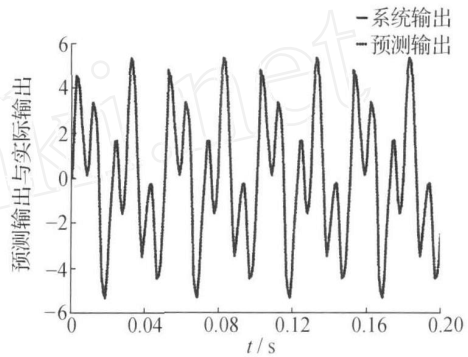
Fig. 5 Simulation results of the different controller

3.2 仿真实验 2

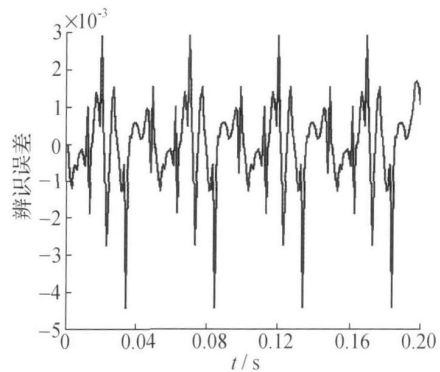
考虑文献[4]中的非线性系统：

$$y(k+1) = 0.5\sin(y(k)) + 3u(k) + \frac{\sin(y(k)u(k))}{1+y^2(k)}.$$

采用等维新息滚动的灰色预测模型 GM(1,2), 建模维数选为 5. 在图 2 中, 给定输入信号 $u(k) = \sin(2k/10) + \sin(2k/25)$, 从图 6 中可以看出, 预测输出与系统的实际输出非常接近, 预测误差也非常小, 最大误差为 0.044 3, 平均误差为 0.006 8. 预测精度为 99.32%. 图 7 为参数 a 与 b 的变化曲线图.

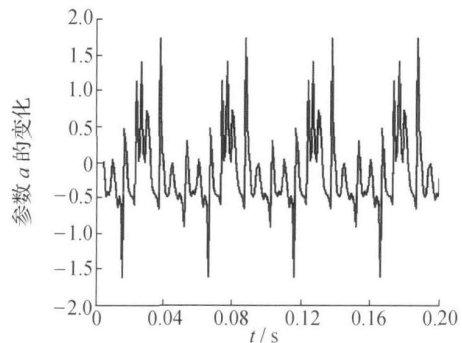


(a)预测输出与实际输出比较图



(b)辨识误差

图 6 预测输出与实际输出比较与辨识误差
Fig. 6 The predictive output and the system output and the identification error



(a)参数 a 的变化曲线图

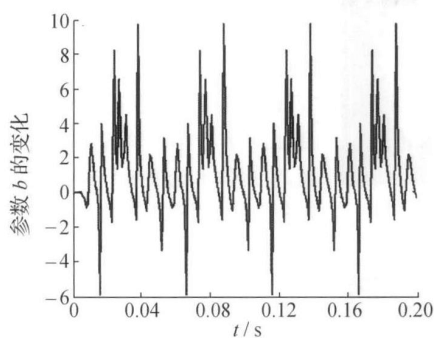
(b) 参数 b 的变化曲线图图 7 参数 a 、 b 的变化曲线图Fig. 7 The change of the parameters of a and b

图 8 中可实现因子选为 $\lambda = 0.7$. PID 控制器的参数为 $k_p = 0.01$, $k_i = 0.1$, $k_d = 0.01$. 实线为文中方法, 虚线为文献[4]采用基于神经网络的逼近内模控制方法. 从图中可以看出文中方法响应速度快, 控制效果明显改善.

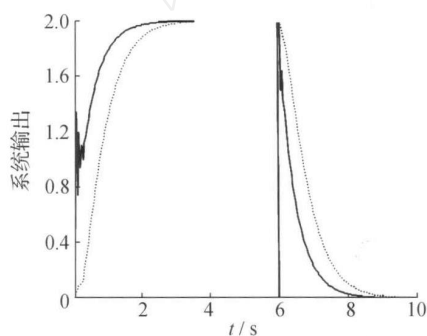


图 8 2 种控制方案的输出比较图

Fig. 8 Simulation results of the different controller

4 结束语

针对非线性系统, 提出一种基于灰色预测的自适应内模/ PID 双重控制方法. 该控制方法结合了灰色预测、内模控制和 PID 控制器的优点. 与基本内模控制相比, 在满足鲁棒稳定前提下, 可使得跟踪误差较快收敛. 如果系统存在输出扰动时候, 通过 PID 反馈控制, 也可以抑制这种干扰的影响. 仿真结果表明该方法的有效性.

参考文献:

- [1] 赵 曜. 内模控制发展综述[J]. 信息与控制, 2000, 29 (6): 526-531.
ZHAO Yao. A survey of development of internal model control[J]. Information and Control, 2000, 29 (6): 526-531.

- [2] 周 涌, 陈庆伟, 胡维礼. 内模控制研究的新发展[J]. 控制理论与应用, 2004, 21 (3): 475-482.
ZHOU Yong, CHEN Qingwei, HU Weili. New developments of research on internal model control[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21 (3): 475-482.
- [3] LI S, LI J H. IMC-PID control of ultra-sonic motor servo system based on neural network[C]// Proceedings of the 6th World Congress on Control and Automation. Dalian, China, 2006.
- [4] LI H X, DENG H. An approximate internal model-based neural control for unknown nonlinear discrete processes[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2006, 17 (3): 695-670.
- [5] HABER R E, ALIQUE J R. Nonlinear internal model control using neural networks: an application for machining processes[J]. Neural Comput & Applic, 2004, 13: 47-55.
- [6] 吕朝霞, 吴晓蓓, 郭 建, 等. 基于小波网络的非线性内模控制[J]. 控制与决策, 2001, 16 (1): 65-68.
LU Zhaoxia, WU Xiaobei, GUO Jian, et al. Nonlinear internal model control based on wavelet network [J]. Control and Decision, 2001, 16(1): 65-68.
- [7] HABER R E. Nonlinear internal model control using neural networks and fuzzy logic: application to an electromechanical process [J]. LNCS, 2006, 2657: 351-360.
- [8] 党映农, 韩崇昭. 基于 Volterra 级数模型的内模控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35 (4): 385-389.
DANG Yingnong, HAN Chongzhao. Internal model control for uncertain Volterra series system [J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2001, 35 (4): 385-389.
- [9] 刘士荣, 林卫星, 俞金寿, 等. 非线性动态系统神经模糊建模与内模/ PID 双重控制系统设计[J]. 控制理论与应用, 2004, 21 (4): 553-560.
LIU Shirong, LIN Weixing, YU jinshou, et al. Neuro-fuzzy modeling for nonlinear dynamic systems and double control system design with internal model control and PID control[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21 (4): 553-560.
- [10] HE M J, CAI W J, WU B F. Design of decentralized IMC-PID controller based on dRi analysis[J]. American Institute of Chemical Engineers, 2006, 52 (11): 3852-3863.
- [11] LI C Y, HUANG T L. Optimal design for the grey prediction PID controller for power system stabilizers by evolutionary programming [C]// Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing & Control. Taipei, China, 2004.
- [12] DING C C, LEE K T. Optimal design for power system dynamic stabilizer by grey prediction PID control[C]//

IEEE ICIT02. Bangkok, Thailand, 2002.

[13] 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.

[14] TIEN T L. A research on the deterministic grey dynamic model with multiple inputs DGDMMI(1, 1, 1) [J]. Applied Mathematics and Computation, 2003, 139: 401-416.

作者简介:



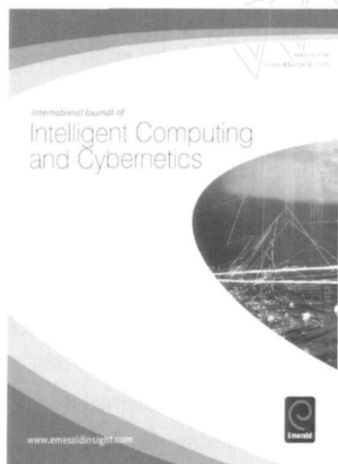
吴晓威, 女, 1982年生, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制和鲁棒控制。



张井岗, 男, 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。主持和完成国家“九五”攻关项目、山西省自然科学基金项目、山西省青年科学基金项目等研究课题, 发表学术论文 60 多篇, 其中 20 余篇分别被 EI、SCI、ISTP 收录。



赵志诚, 男, 1970年生, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为智能控制, 参加和完成国家“九五”攻关项目、山西省自然科学基金项目、山西省青年科学基金项目和横向科技开发项目等多项, 发表论文多篇。



International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics

(Quarterly, ISSN: 1756-378X)

www.emeraldinsight.com/ijicc.htm

<http://ijicc.buaa.edu.cn>

Editor-in-Chief: Hai-Bin Duan

International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics (IJICC) is quarterly published by Emerald Group Publishing Limited. This journal provides a unique international forum to discuss, through articles, new theoretical developments and techniques in the fields of intelligent computing and cybernetics.

Coverage includes, but is not limited to:

- computational intelligence, soft computing, multi-agent systems, cognitive systems • decision support systems, case-based reasoning, game theory
 - data mining, cluster analysis, informatics
 - fuzzy systems, neural networks, support vector machines
 - genetic algorithm, ant colony optimization, particle swarm optimization
 - differential evolution, cultural algorithms, knowledge acquisition
 - granular computing, grid computing, DNA computing, internet computing, quantum computation
 - image processing, pattern recognition
 - socio-technical systems, evolutionary logistics, internet/electronic commerce
 - flight control, intelligent control, nonlinear control, optimal control, predictive control, adaptive control
 - evolvable hardware, robotics, hybrid systems, manufacturing systems, hybrid systems, virtual reality
- For further information, please contact the managing editor at: ijicc@buaa.edu.cn.