

多轴速度同步偏差耦合控制

尹亚南, 韩浩

(郑州电力高等专科学校, 郑州 450000)

摘要: **目的** 解决传统印刷机、包装机各轴机械连接方式下, 多电机同步控制存在的机械磨损严重、同步控制精度低等问题。**方法** 基于偏差耦合控制系统结构, 将PID与神经网络控制相结合, 提出一种径向基神经网络PID的多电机速度同步控制策略。**结果** 通过仿真可知, 该算法相较于传统PID控制超调量更小, 系统能够以较快的速度实现同步跟踪, 速度同步精度明显高于PID控制。**结论** 该控制算法能够大大提升印刷机多轴同步控制的动态性能, 可以有效提高印刷质量。

关键词: 同步控制; 偏差耦合控制; 径向基神经网络; 仿真

中图分类号: TB486.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)13-0222-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.13.032

Synchronous Deviation Coupling Control of Multi-axes Speed

YIN Ya-nan, HAN Hao

(Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450000, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve problems in the mechanical connection mode of traditional printing machines and packaging machines such as serious mechanical wear and low synchronization control accuracy of multi motor synchronous control. Based on the structure of deviation coupled control system, PID and neural network control were combined to propose a multi motor speed synchronization control strategy based on RBF neural network PID. The simulation results showed that compared with the traditional PID control, the overshoot of the algorithm was smaller. The system can achieve synchronization tracking at a faster speed, and the speed synchronization accuracy was obviously higher than that of the PID control. The control algorithm can greatly improve the dynamic performance of the multi axis synchronous control of the printer, and can effectively improve the printing quality.

KEY WORDS: synchronous control; deviation coupling control; radial basis neural network; simulation

目前, 大部分印刷制造企业在壁纸生产线中, 仍然采用传统的机械轴连接进行同步传动控制^[1-5], 但随着设备投入年限的增加, 机械传动磨损越来越严重, 机械故障率也越来越高, 出现故障便要停产维修, 这样不仅增加了维修成本, 而且严重影响企业生产效率。为了解决上述问题, 可以使用无轴电子传动技术替代传统的机械总轴控制。无轴技术, 又称伺服驱动技术, 消除了传统机械长轴和齿轮箱传动的限制和缺

陷, 从而提高了印刷质量。无轴传动印刷机控制系统的关键技术是对多轴伺服系统的控制。为了保证印刷机各单元运转的速度和相位实现同步, 对于无轴传动中伺服电机的控制尤为重要。这种多轴电子同步控制方式, 可以减小噪声、降低能耗, 提高印刷和生产效率^[6-9]。

考虑到电机参数漂移、负载扰动等不确定因素, 多电机同步控制性能势必大受影响, 所以开展多电机同步控制算法研究具有一定的实际意义。目前, 经常

收稿日期: 2018-09-04

基金项目: 河南省科技厅科学技术成果(9412015Y0711)

作者简介: 尹亚南(1980—), 女, 工程硕士, 郑州电力高等专科学校讲师, 主要研究方向为自动控制。

使用的多电机同步控制技术主要包括偏差耦合、相邻交叉耦合、交叉耦合、主-从等控制算法；其中主-从控制算法结构简单，比较容易实现，但是无法保证同步精度；交叉耦合控制虽然能够提高同步控制精度，不过算法比较复杂，不易实现；相对而言，偏差耦合控制不仅具有较好的同步控制性能而且控制结构简单。针对偏差耦合控制，普遍采用传统 PID 控制算法，虽然该算法结构简单，参数易于整定，但是很容易受参数时变或外部扰动的影响，进而导致控制效果无法满足现场需求^[10-13]。文中在现有研究基础上，结合径向基神经网络控制和 PID 控制方法，根据偏差耦合控制算法，设计一种基于 RBF 神经网络 PID 的多电机协调控制方案。

1 偏差耦合控制策略

机组式凹版印刷机系统的结构见图 1。包装印刷机在印刷开始前，将相应的水墨涂料调好色彩，每个印刷辊只套印一种颜色，利用各辊的同步协调运动将图案印制到相应的印版上，依次将单色图案套印在印刷材料上，最终完成图案印刷。凹版印刷机无轴同步传动技术是指系统在高速和高精度前提下，实现多个伺服电机位置和速度的协调同步，在各轴运动过程中需要保证各轴之间的位置或速度的误差绝对值不超过一定值，为了满足这一要求，多轴同步控制可能涉及到多个变量的协调关系，每一个受控量应该满足一定的线性或非线性变化。

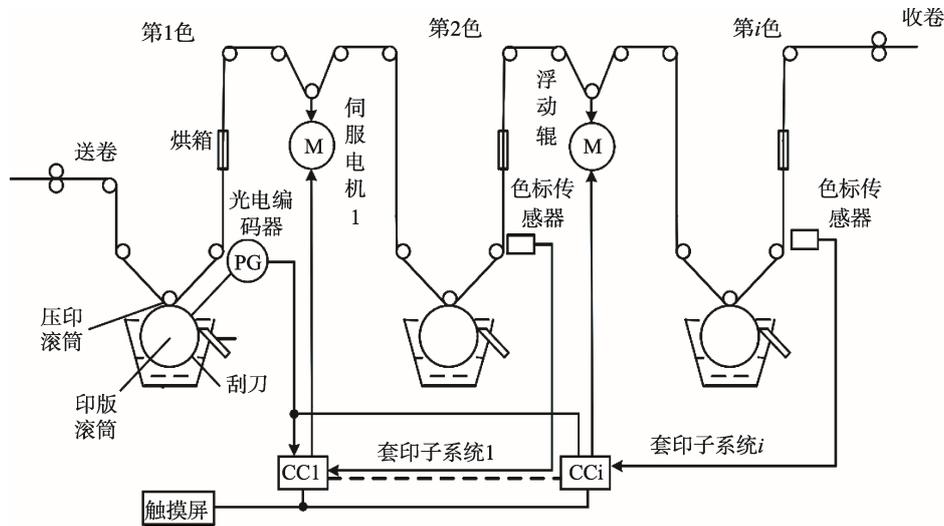


图 1 三伺服枕式包装机系统结构
Fig.1 System structure of the three-servo pillow packaging machine

为了便于分析，假设多轴同步控制系统中所用的伺服电机完全一样，假设第 i 台电机跟踪误差表达式为：

$$e_i(t) = n_i^*(t) - n_i(t) \tag{1}$$

式中： $n_i^*(t)$ 为电机的参考转速； $n_i(t)$ 为电机的实际转速。

在多电机同步控制系统中，不仅要保证 $e_i(t) = 0$ ，还要保证 n 台电机之间的跟踪误差满足：

$$e_1(t) = \dots = e_i(t) = \dots = e_n(t) \tag{2}$$

假设 n 台电机的同步误差为：

$$\begin{cases} \varepsilon_1(t) = e_1(t) - e_2(t) \\ \varepsilon_2(t) = e_2(t) - e_3(t) \\ \dots \\ \varepsilon_i(t) = e_i(t) - e_{i+1}(t) \\ \dots \\ \varepsilon_n(t) = e_n(t) - e_1(t) \end{cases} \tag{3}$$

为了保证上式成立，需要满足 $\varepsilon_i(t) = 0$ ，

$$\forall i = 1, 2, \dots, n。$$

2 神经网络 PID 多轴同步控制

常规 PID 控制无法根据实际工作情况在线调整参数，同时对非线性、参数时变系统，其控制效果欠佳。相对而言，神经网络具有一定的自学习能力，可根据系统运行状态，实时在线调整 PID 控制器参数，控制效果比较理想。基于神经网络的参数自整定 PID 控制器具有更好的鲁棒性和响应速度，适用范围广，控制性能比较优越^[14-16]，RBF-PID 的多电机同步控制系统结构见图 2。

2.1 径向基网络结构

以单输出径向基神经网络为例，见图 3。该网络由输入层、隐含层以及输出层组成，隐含层使用径向基函数作为激励函数，而径向基函数通常选用高斯函数。

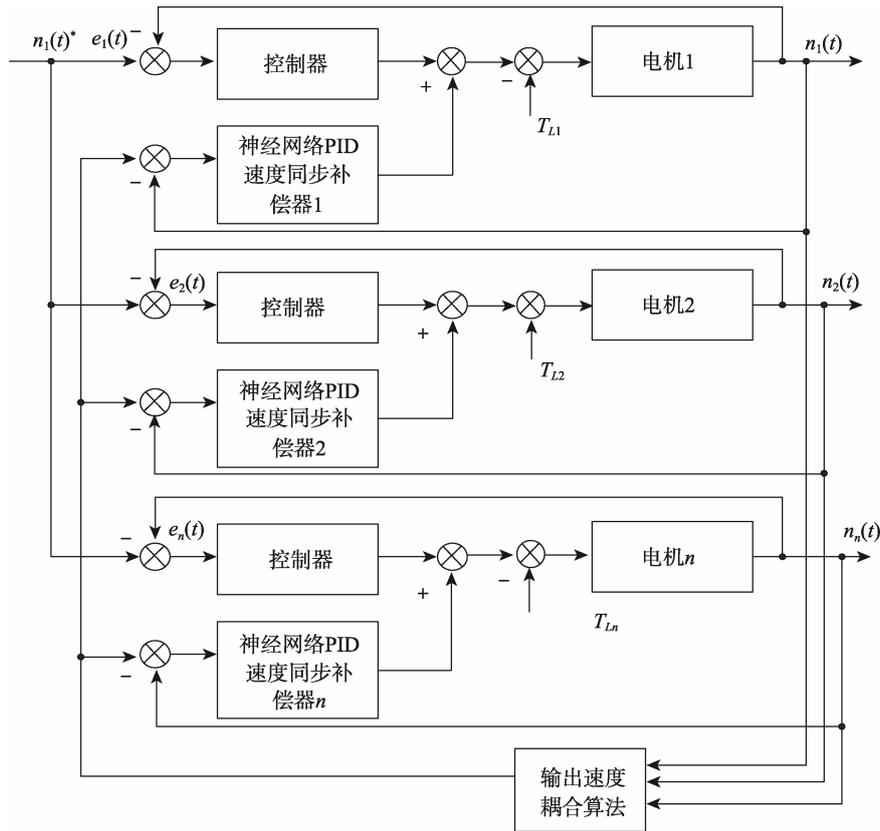


图2 神经网络PID偏差耦合控制系统
Fig.2 Neural network PID deviation coupling control system

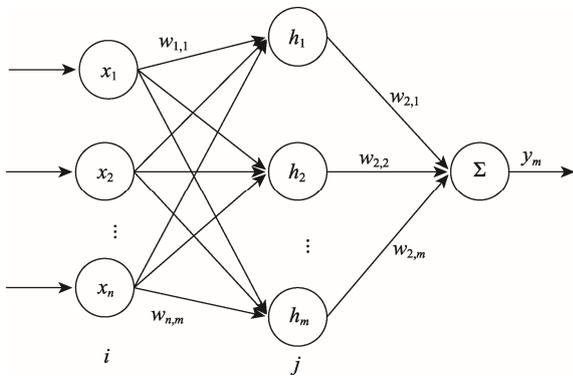


图3 径向基神经网络结构
Fig.3 Structure of radial basis neural network

可以看出, 隐含层第 i 个神经元的输入可表示为:

$$k_i = \sqrt{\sum_j (w_{j,i} - x_j)^2} \times b_i \quad (4)$$

其输出可表示为:

$$r_i = \exp\left(-\left(k_i^q\right)^2\right) = \exp\left(-\left(\sqrt{\sum_j (w_{j,i} - x_j)^2} \times b_i\right)^2\right) = \exp\left(-\left(\|w_i - X\| \times b_i\right)^2\right) \quad (5)$$

函数灵敏度可通过改变径向基函数的阈值 b 进行调节。由于激励函数为纯线性函数, 输出层的输入

可用隐含层各神经元输出加权和表示, 故其输出可表示为:

$$y_m = \sum_{i=1}^n r_i \times w_{2,i} \quad (6)$$

神经网络的训练过程主要分为3步: 确定网络输入、径向基函数阈值 b 和输出; 确定输入层和隐含层之间的权值系数 $w_{j,i}$; 确定隐含层和输出层之间的权值系数 $w_{2,i}$ 。

2.2 控制器设计

系统闭环控制基于增量式PID控制实现, 而且其3个关键参数: 比例、积分、微分系数可以实时调整。那么系统偏差可表示为:

$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (7)$$

式中: k 为采样序号。

PID控制器的3个输入可定义为:

$$\begin{cases} x(1) = e(k) - e(k-1) \\ x(2) = e(k) \\ x(3) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $e(k)$, $e(k-1)$, $e(k-2)$ 分别表示 k , $k-1$, $k-2$ 时刻的偏差数值。

那么控制算法可描述为:

$$u(k) = u(k-1) + k_p x(1) + k_i x(2) + k_d x(3) \quad (9)$$

式中： $u(k)$ 和 $u(k-1)$ 分别表示 k 和 $k-1$ 时刻控制器的输出量； k_p ， k_i ， k_d 分别表示比例、积分和微分系数。

定义径向神经网络的目标函数为：

$$E(k) = \frac{1}{2}(r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2}e(k)^2 \quad (10)$$

采用梯度下降法实时调整 k_p ， k_i ， k_d 的数值：

$$\begin{cases} \Delta k_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_p} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x \\ \Delta k_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_i} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x \\ \Delta k_d = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_d} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x \end{cases} \quad (11)$$

式中： η 用于调节下降速度； $\frac{\partial y}{\partial u}$ 为被控对象的 Jacobian 信息，可通过网络辨识获取。

3 仿真分析

为了验证所述控制算法的有效性，采用 Matlab 对传统 PID 控制算法以及神经网络 PID 控制算法分别进行了仿真分析。

1) 在无干扰情况下，PID 控制和神经网络 PID 控制下，各轴的跟踪误差见图 4—5。通过仿真可以看出，传统 PID 控制时超调量较大，而采用神经网络 PID 控制时，超调量很小，系统能够很快地跟踪到设定值。

2) 设备在实际运行过程中，各轴速度通常会根据参数设置出现变化，故对速度设定值进行跳变仿真。假设系统稳定后，在 0.04 s 时，将各轴速度由 500 rad/s 突变到 600 rad/s。传统 PID 控制和神经网络 PID 控制下的速度跟踪误差见图 6—7，由仿真曲线可以看出，与传统 PID 控制相比，采用神经网络 PID 控制算法时，系统超调量更小、震荡更小，系统跟踪速度更快。

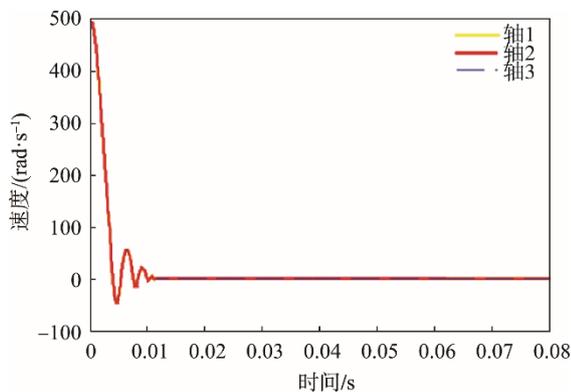


图 4 传统 PID 控制各轴跟踪误差
Fig.4 Tracking error of each axis in traditional PID control

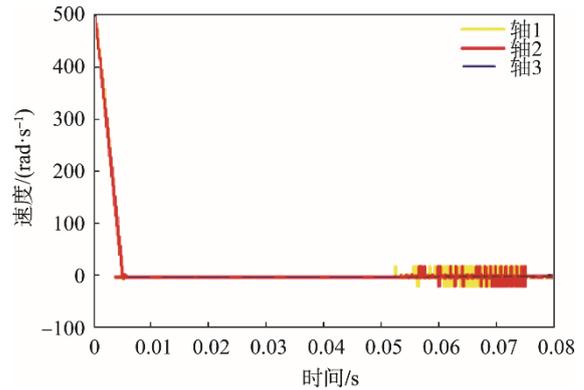


图 5 神经网络 PID 控制各轴跟踪误差
Fig.5 Tracking error of each axis in Neural network PID control

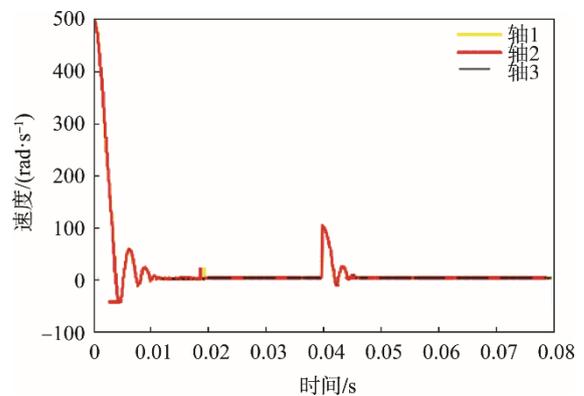


图 6 传统 PID 控制各轴跟踪误差
Fig.6 Tracking error of each axis in the traditional PID control

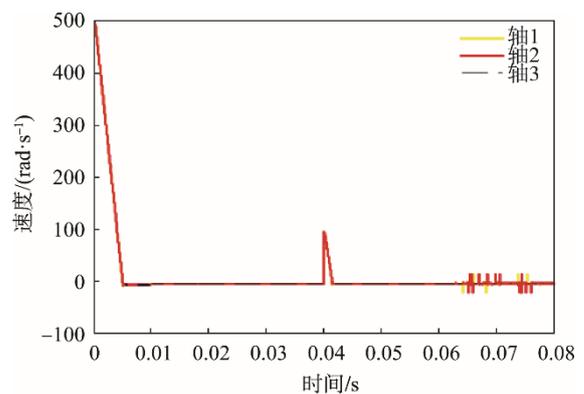


图 7 神经网络 PID 控制各轴跟踪误差
Fig.7 Tracking error of each axis in the Neural network PID control

4 结语

针对印刷机的多电机同步控制系统进行了研究，上述设备多采用机械总轴传动方式，因机械传动存在摩擦、振动等因素影响，导致控制精度较低。为解决此问题，提出了一种多电机协调控制策略，利用径向神经网络控制在非线性、自适应性以及自学习方面

的优势,补偿传统PID控制的不足,实现了参数的在线调整。同时结合偏差耦合控制实现了多电机协调控制。仿真结果表明,神经网络PID控制具有良好的自适应以及鲁棒性,能够明显提高同步控制系统的稳定性,提高多轴同步跟踪精度。

参考文献:

- [1] 朱火美,蒲洪彬,李伟光. 数控瓦楞纸板印刷模切机伺服配置设计与评价研究[J]. 包装工程, 2012, 33(3): 85—88.
ZHU Huo-mei, PU Hong-bing, LI Wei-guang. Servo Configuration and Evaluation of Numerical Printing and Die-cutting Machinery of Corrugated Board[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3): 85—88.
- [2] 周振雄,徐玉娇. 全自动六线同步灌装控制系统设计[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2012(5): 32—35.
ZHOU Zhen-xiong, XU Yu-jiao. Automatic Six-wire Synchronous Filling Machine Control System Design[J]. Journal of Beihua University (Natural Science Edition), 2012(5): 32—35.
- [3] YOUNGSEOK C, JAEHYUN P, HANS H, et al. Development of a Web-based Survey System for Evaluating Affective Satisfaction[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2011(41): 247—254.
- [4] 张海燕,王伟,赵庆海. 无轴传动控制策略及仿真分析[J]. 自动化技术与应用, 2007(3): 105—108.
ZHANG Hai-yan, WANG Wei, ZHAO Qing-hai. Simulation Analysis of the Control Strategy of Shaftless Dries[J]. Techniques of Automation and Applications, 2007(3): 105—108
- [5] YONG Xiao, ZHUA Kuan-yi, LIAWHC. Generalized Synchronization Control of Multi-axis Motion Systems[J]. Control Engineering Practice, 2005(13): 809—819.
- [6] 马膺峻. 无轴套印控制系统综合控制策略的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.
MA Ying-jun. Research on Synthetic Control Strategy of Shaftless Chromatography System[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [7] 冯贞. 基于DSP与CPLD的灌装机同步控制系统设计[J]. 机械与电子, 2016, 34(7): 53—56.
FENG Zhen. Design of Synchronization Control System Based on DSP and CPLD for Filling Machine[J]. Machinery & Electronics, 2016, 34(7): 53—56.
- [8] 段文军,石卓栋,徐志刚,等. 基于双闭环的直线容积式自校正灌装设备控制系统设计及应用[J]. 包装工程, 2013, 34(21): 80—84.
DUAN Wen-jun, SHI Zhuo-dong, XU Zhi-gang, et al. Design and Application of Control System for Straight Line Volumetric Self-correction Filling Equipment Based on Double Closed-loop[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(21): 80—84.
- [9] 柳成,崔杨. 基于PLC和DSP的全自动液体灌装机的设计[J]. 机床与液压, 2012, 40(8): 1—3.
LIU Cheng, CUI Yang. Design of Automatic Liquid Filling Machine Based on PLC and DSP[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2012, 40(8): 1—3.
- [10] 刘福才,刘学莲,刘伟. 多级电机传动系统控制理论与应用研究[J]. 控制工程, 2002, 9(4): 87—89.
LIU Fu-cai, LIU Xue-lian, LIU Wei. Synchronous Control Theory and Practical Study of Multimotor Synchronous Driving System[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(4): 87—89.
- [11] 李慧,刘星桥,李景,等. 多电机同步协调系统控制策略[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(4): 6—11.
LI Hui, LIU Xing-qiao, LI Jing, et al. Summary of Multi-Motor Synchronization and Coordination System Control Strategy[J]. Machine and Control Applications, 2014, 41(4): 6—11.
- [12] 李春文,赵德宗,任军. 基于全滑模面的多感应电机速度同步控制[J]. 系统工程理论与实践, 2009, 29(10): 110—117.
LI Chun-wen, ZHAO De-zong, REN Jun. Total Sliding Mode Speed Synchronization Control of Multi Inductions Motors[J]. System Engineering Theory & Practice, 2009, 29(10): 110—117.
- [13] 王建华,詹国兵. 造纸机多电机同步速度链控制系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(4): 148—149.
WANG Jian-hua, ZHAN Guo-bing. Research on Multi-motor Synchronous Speed Chain Control System of Paper Machine[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2015(4): 148—149.
- [14] 苗新刚,汪苏,韩凌攀,等. 基于偏差耦合的多电机神经元同步控制[J]. 微电机, 2011, 44(2): 44—47.
MIAO Xin-gang, WANG Su, HAN Ling-pan, et al. Single Neuron PID Synchronization Control Strategy in Multi-motor Systems Based on the Relative Coupling Control[J]. Micromotors, 2011, 44(2): 44—47.
- [15] 刘汉忠,俞鹏. 模糊PID自适应控制在微型齿轮泵恒流控制系统中的应用[J]. 流体机械, 2018, 46(12): 50—53.
LIU Han-zhong, YU Peng. Application of Fuzzy-PID Adaptive Control in Constant Current Control System of Micro Gear Pump[J]. Fluid Machinery, 2018, 46(12): 50—53.
- [16] 崔皆凡,刘艳,闫红,等. 基于模糊控制的多电机神经元PID同步控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013, 2(2): 81—83.
CUI Jie-fan, LIU Yan, YAN Hong, et al. Multi-motor Neuron PID Synchronous Control Based on Fuzzy Control[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013, 2(2): 81—83.