

模糊自适应 PID 控制的研究及应用仿真

张泾周, 杨伟静, 张安祥

(西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 传统 PID 控制器参数的整定是在获取对象数学模型的基础上, 根据某一整定规则来确定的, 难以适应复杂多变的控制系统。针对其参数整定不良、性能欠佳, 对被控过程的适应性差等缺点采用模糊控制与自适应 PID 控制结合起来, 设计了模糊自适应 PID 控制器。利用模糊推理方法实现对 PID 参数的在线自整定, 进一步完善 PID 控制器的性能, 提高系统的控制精度。仿真结果表明该模糊自适应 PID 控制器既具有 PID 控制器高精度的优点, 又具有模糊控制器快速、适应性强的特点, 使被控对象具有良好的动、稳态特性, 有较好的工程应用前景。

关键词: 模糊控制; 自适应; 仿真

中图分类号: TP273+.4 **文献标识码:** A

Research on Fuzzy Self-adaptive PID Control and Its Emulation

ZHANG Jing-zhou YANG Wei-jing ZHANG An-xiang

(College of Automation, Northwestern Polytechnic University, Xi'an Shanxi 710072, China)

ABSTRACT: The tuning of parameters for traditional PID controllers was based on the mathematical model of the object and on some rules which was difficult to adapt to complicated and variable control systems. In view of the shortcomings of PID controllers such as bad parameter tuning, not good enough performance and weak adaptability, a self-adaptively adjusted fuzzy-PID controller is proposed. The use of fuzzy logic controller makes the parameter self-adapting of PID controller possible. It also perfects the properties of PID controller and improves the precision of control system. The result of simulation in fuzzy logic toolbox of Matlab proves that the controller possess both the precise character of PID controller and the flexible advantage of fuzzy controller, and can guarantee that regulation system has good dynamic and static quality. It has further prospect in engineering application.

KEYWORDS: Fuzzy control; Self adjusting parameter; Simulation

1 引言

常规 PID 控制是最早发展起来的控制策略之一, 由于其算法简单、鲁棒性好且可靠性高, 因此被广泛应用于工业过程控制, 尤其适用于可建立精确数学模型的确定性控制系统。而实际工业生产过程由于具有非线性、时变不确定性的特点, 难以建立精确的数学模型, 常规 PID 控制器参数往往整定不良、性能欠佳, 对被控过程的适应性差。

模糊控制器是一种近年来发展起来的新型控制器, 其优点是不要求掌握被控对象的数学模型, 而根据人工控制规则组织控制决策表, 然后由该表决定控制量的大小, 但其控制精度一般不高。

将模糊控制和 PID 控制两者结合起来, 扬长避短, 既具有模糊控制灵活、适应性强的优点又具有 PID 控制精度高的特点。

本文针对某一工业控制系统变参数, 强干扰, 强耦合、大惯性等特点, 将模糊控制与自适应 PID 控制结合起来, 设计了模糊自适应 PID 控制器, 实现对 PID 参数的在线自整定, 并进行了仿真。仿真结果表明这种方法的控制效果优于常规的 PID 控制, 具有响应时间短、控制精度高、稳定性好等优点, 适应复杂的被控过程和高指标的控制要求。

2 模糊自适应 PID 控制器的设计

2.1 PID 控制

PID 控制器是一种线性控制器, 如图 1。

$$u(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt})$$

式中, K_p 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

目前比较广泛应用的是增量式 PID 控制算法, 其算式如下, 其输出是控制量的增量 $\Delta u(k)$ 。

$$\Delta u(k) = K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)]$$

收稿日期: 2008—07—16 修回日期: 2009—04—10

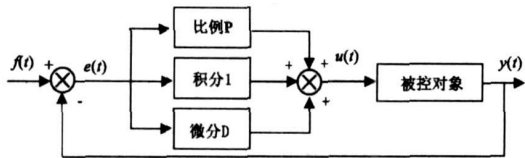


图 1 PD系统框图

其中, K_p 为比例系数; $K_I = K_p T / T_I$ 为积分系数; $K_D = K_p T_D / T$ 为微分系数。

在 PID 控制过程中, 首先根据被控对象的数学模型确定 PID, 然后再用偏差 e 作为输入, 计算出控制量, 并驱动相应的执行机构来减小误差, 直到被控对象稳定在允许的范围内。

2.2 模糊自适应 PID 控制器的控制原理

模糊自适应 PID 控制是找出 PID 三个参数 K_p K_I K_D 与 e 和 e_c 之间的模糊关系, 在运行中通过不断检测 e 和 e_c 根据模糊控制原理来对三个参数在线修改, 以满足不同的 e 和 e_c 对控制参数的不同要求, 而使被控对象有良好的动、静态性能。整模糊自适应 PID 控制器的结构如图 2 所示。

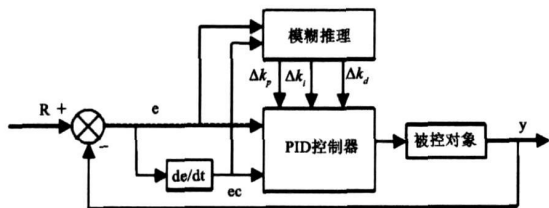


图 2 模糊自适应 PID 控制器结构图

系统包括一个常规 PID 控制器和一个模糊控制器。偏差和偏差的变化率作为模糊系统的输入, 三个 PID 参数的值作为输出, 根据事先确定好的模糊控制规则作出模糊推理在线改变 PID 参数的, 从而实现 PID 参数的自整定。使得被控对象有良好的动、静态性能, 而且计算量, 易于工程实现。

2.3 模糊自适应 PID 控制器的设计

2.3.1 语言变量隶属度函数的确定

将偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为模糊控制器的输入, PID 控制器的三个参数 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 作为输出。根据工程实际情况, 输入变量 e 和 e_c 的模糊子集为 {负大、负中、负小, 零、正小、正中、正大}, 记为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 将偏差 e 和偏差变化率 e_c 量化到 $(-3, 3)$ 的区域内。同时, 输出变量 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的模糊子集 {负大、负中、负小, 零、正小、正中、正大}, 记为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 分别将其量化到 $(-0.3, 0.3)$ $(-0.06, 0.06)$ $(0, 3)$ 的区域内。其隶属函数曲线分别如图 3、图 4 所示。

根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数的模糊控制模型, 应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表, 在线修正 PID 参数, 计算公式如下:

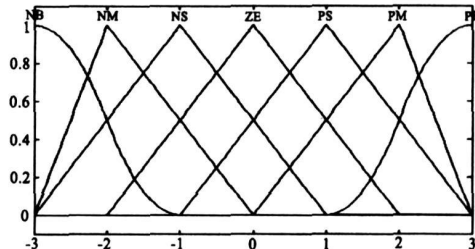


图 3 输入变量 e 的隶属函数曲线

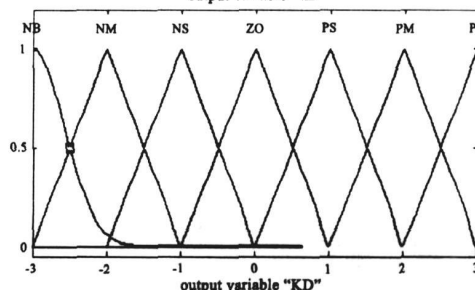
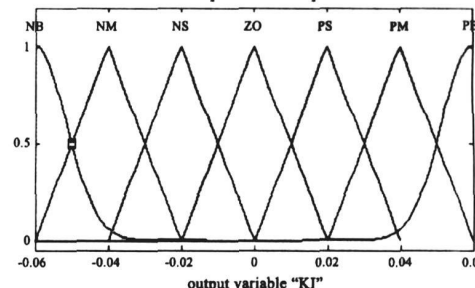
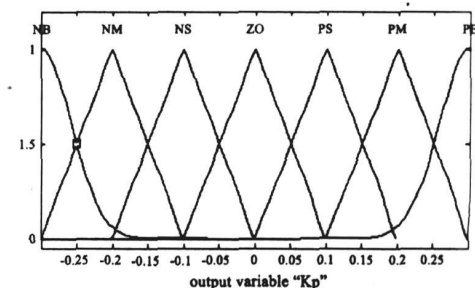


图 4 输出变量 ΔK_p ΔK_I ΔK_D 的隶属函数曲线

$$K_p = K_p' + \Delta K_p$$

$$K_I = K_I' + \Delta K_I$$

$$K_D = K_D' + \Delta K_D$$

上式中 K_p' 、 K_I' 、 K_D' 为原来整定好的 PID 参数

2.3.2 建立模糊控制器的控制规则表

模糊自适应 PID 控制中模糊规则的建立, 首先依据专家经验知识建立的知识库来判断, 决策出 PID 的三个参数与误差 e 和误差变化率 e_c 之间的模糊关系。再通过对运行中 e 和 e_c 的不断检测, 根据确定的模糊控制规则来对三个参数进行在线自适应调整, 以满足不同 e 和 e_c 时对两个参数的不同要求, 而使被控对象具有良好的动静态性能。

根据参数 K_p 、 K_I 、 K_D 对系统输出特性的影响情况, 可归

纳出系统在被控过程中对于不同的偏差 e 和偏差变化率 e_c ，参数 K_p 、 K_I 、 K_D 的自整定原则如下：

1) 当偏差 e 较大时，为了加快系统的响应速度，并防止因开始时偏差 e 的瞬间变大可能引起的微分过饱和而使控制作用超出许可范围，应取较大的 K_p 和较小的 K_D ，通常取 $K_I = 0$ 。

2) 当偏差 e 和偏差变化率 e_c 为中等大小时，为了使系统响应的超调量减小和保证一定的响应速度， K_p 应取小一些；在这种情况下， K_D 的取值对系统影响很大，也应取小一些； K_I 的取值要适当。

3) 当偏差 e 较小时，为了使系统具有较好的稳态性能，应增大 K_p 、 K_I 值，同时为避免输出响应在设定值附近振荡，以及考虑系统的抗干扰能力，应适当选取 K_D 。其原则是：当偏差变化率 e_c 较小时， K_D 取大一些；当偏差变化率 e_c 较大时， K_D 取较小的值；通常 K_D 为中等大小。

依据 PID 参数整定原则，并在总结工程技术人员技术知识和实际操作经验的基础上，列出输出变量 ΔK_p 、 ΔK_I 、 ΔK_D 的控制规则表 1、2、3 所示。

表 1 ΔK_p 的模糊规则表							
e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_I 的模糊规则表							
e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_D 的模糊规则表							
e	e_c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2.3.3 模糊推理

M andan 推理法是一种在模糊控制中普遍使用的方法，可以用 m andan 提出的推理法来解决这个问题，用一个由 X 到 Y 的模糊关系 $R_a \rightarrow \epsilon$ 来示模糊条件语句：if A then B 当输入为 A^* 时，输出 B^* 可下式求得：

$$B^* = A^* \circ R_{a \rightarrow b}$$

其中表示模糊关系的合成的运算。

模糊 $R_a \rightarrow \epsilon$ 关系 M andan 根据的定义：

$$\mu_{R_{A \rightarrow B}}(x, y) = [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)]$$

所以根据上式控制器的输出 B^* 的隶属度函数为：

$$\mu_{B^*}(y) = \sup_{x \in X} \{ \mu_{A^*}(x) \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \}$$

2.3.4 去模糊化

把模糊量转换为精确量的过程称为清晰化，又称为去模糊化，或称为模糊判决。为了获得准确的控制量，就要求模糊方法能够很好地输出隶属度函数的计算结果。本文采用工业控制中广泛使用的去模糊化方法——加权平均法，是取隶属度的加权平均值输出的清晰值。假设输出模糊集可表示为 $U = \sum u_i(x_i) / x_i$ 按如下公式计算最后输出清晰量

$$u_c = \frac{\int_U x u_i(x) dx}{\int_U u_i(x) dx}$$

3 模糊自适应 PID 控制系统仿真实现及结果分析

3.1 模糊控制器的编辑

在 MATLAB 的 command Window 窗口运行 Fuzzy 函数进入模糊逻辑器，并建立一个新的 FIS 文件，设置各参数。

1) 确定模糊控制器的类型和结构

进入 FIS 编辑器窗口时，为 M andan 型，依次选定【Edit】下的【Add Input】、【Add Output】选项，以确定模糊控制器的结构，并确定输入、输出变量名和个数。

2) 编辑输入输出变量的隶属函数

双击编辑器窗口的某个输入或者输出图标，打开隶属函数编辑窗口，选定【Edit】下的【Add MFs】可增加隶属度函数个数。选中要编辑变量的图标，确定当前变量量化等级的范围 (Range)、隶属函数的类型、模糊变量的量化等及隶属函数的类型。最后，对各变量的隶属函数标明其对应模糊子集的模糊语言值。每一个输入、输出变量隶属函数的编辑过程相同。所有的隶属函数都标明以后，关闭隶属函数编辑窗口。

3) 编辑模糊控制规则

在 FIS 窗口，双击模糊控制规则图标，打开规则编辑窗口。只要在 if and (or)、then 选择框中选中各自的语言变量，然后单击该窗口下面的 Add rule 该条规则就被写入规则框中。将所有规则写入规则框中以后，关闭该窗口。至此，模糊控制器编辑完成，保存文件，文件类型是 *.fis。这里我们保存为 aa.fis。

3.2 系统仿真模型的建立

返回到 Matlab 的命令窗口,输入 `simulink` 进入 `simulink` 环境下。建立如图 5 所示的完整模型。然后在双击 `Fuzzy Logic Controller` 图标,在弹出的对话框中输入 `aa` 即可。

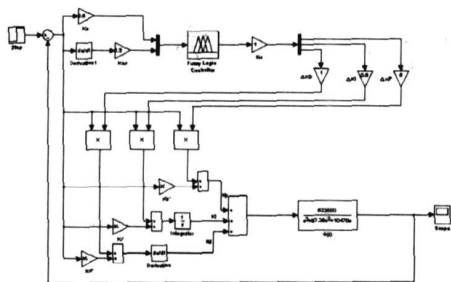


图 5 自适应模糊 PD 控制器的系统设计框图

3.3 仿真结果与分析

以某工业过程控制对象为例,其传递函数 $G(s)$ 为:

$$G(s) = \frac{523500}{s(s^2 + 87.35s + 10470)}$$

1) 对象的阶跃响应

图 6 所示的是分别采用 PID 控制与模糊自整定的控制对象的阶跃响应。很明显,由于模糊控制判断语句的作用,后者在超调量和调节时间上的控制效果都要好,但同时上升时间变得较慢。

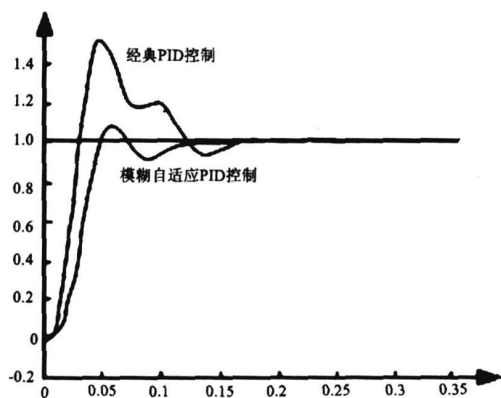


图 6 阶跃响应曲线比较

2) 外来扰动下的曲线响应

在系统运行期间的某一个时刻如果受到一个外来扰动的影响,一旦系统的自适应能力较差,可能系统会出现振荡,使得生产出现危险。但由于自整定模糊控制器本身的参数自整定功能,使得系统具有了较强的自适应能力,能够在外来扰动进入时及时恢复,不出现振荡。如图 7。

3) 为了说明模糊自整定控制器良好的适应性,将上述被控对象的几个参数均作了变化,来生成一组响应曲线:

被控对象分别变为:

$$G_1(s) = \frac{600000}{s(s^2 + 87.35s + 10470)}$$

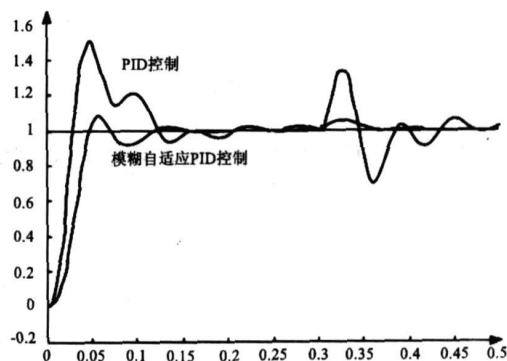


图 7 外来干扰下响应曲线比较

$$G_2(s) = \frac{500000}{s(s^2 + 87.35s + 10470)}$$

$$G_3(s) = \frac{523500}{s(s^2 + 60s + 10470)}$$

$$G_4(s) = \frac{523500}{s(s^2 + 87.35s + 800)}$$

由于模糊自整定 PID 参数控制器能根据工况变化过程中偏差和偏差变化率自动进行 PID 参数调整,因而具有较好的自适应能力。图上所标的 1~4 所指曲线分别为对象 1~4 所对应响应曲线。如图 8。

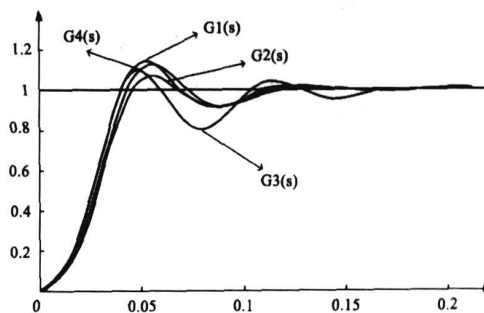


图 8 对象改变后响应曲线

4 结论

使用模糊自适应 PID 控制方法计算量小、易于实现,控制过程中通过 K_p K_i K_d 的自适应调整,使控制器具有更好的控制效果。由仿真结果可知,这种方法能发挥 PID 和模糊控制两者的优点,能在更短的短时间内达到稳定,超调更小。同时模糊自适应 PID 控制具有了较强的自适应能力和鲁棒性,能够较好地适应在控制过程中被控对象变化以及外来扰动突然进入系统的情况,特别是在系统参数发生改变时同样可获得令人满意的控制效果,有较好的工程应用前景。

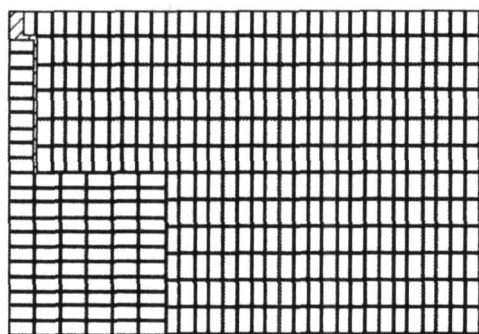
参考文献:

[1] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用 [M]. 北京:机械工业出版社,

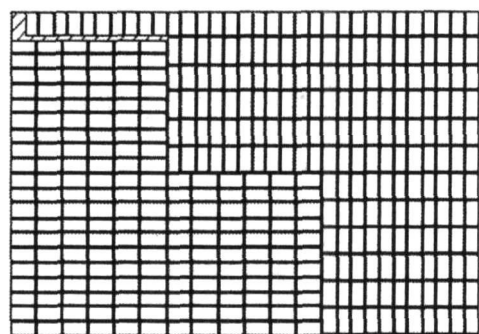
2002.

(下转第 163 页)

例 2: 板材 3000×2000 , 毛坯 166×91 , 排样方案如图 5 所示, 两图含毛坯数均为 394 个。图 4a 为条带数最少的排样方式, 含 18 根条带; 图 4b 为条带数最多的排样方式, 含 24 根条带。前者的剪切工作量只是后者的 75%。



(a) 条带数为 18



(b) 条带数为 24

图 5 例 2 的求解结果

5 结论

本文算法设计简单, 易于实现, 能够在所有含小箱数最大的装裁方案中, 找到条带数最少的方案, 简化装裁或下料过程, 具有较重要的实践意义。

本文解决的问题是一个典型的最小最大问题, 即在所有小箱数达到“最大”的装裁方案中, 找到条带数“最小”的方案。本文以价值最大化为优化目标, 将最小最大问题转换为最大问题, 算法得到简化, 在理论上也有一定意义。将本文

思想加以扩展, 求解排样或填充领域的其它问题, 可作为今后的研究工作。

参考文献:

- [1] G Wascher H Haussner H Schumann An improved typology of cutting and packing problems[J]. European Journal of Operational Research 2007, 183(3): 1109—1130.
- [2] Y Cui R Zhou Generating optimal cutting patterns for rectangular blanks of a single size[J]. Journal of the Operational Research Society 2002, 53(12): 1338—1346.
- [3] G Young-Gun K Maing-Kyu A fast algorithm for two-dimensional pallet loading problems of large size[J]. European Journal of Operational Research 2001, 134(1): 193—202.
- [4] G H A Martins R F Dell Solving the pallet loading problem[J]. European Journal of Operational Research 2008, 184(2): 429—440.
- [5] A GTamowski J Temo G Scheithauer A polynomial time algorithm for the guillotine pallet-loading problem[J]. Information Systems and Operational Research 1994, 32(4): 275—287.
- [6] M Z Arslanov Continued fractions in optimal cutting of a rectangular sheet into equal small rectangles[J]. European Journal of Operational Research 2000, 125(2): 239—248.
- [7] Y Cui Dynamic programming algorithms for the optimal cutting of equal rectangles[J]. Applied Mathematical Modelling 2005, 29(11): 1040—1053.
- [8] P K Agrawal Minimizing trim loss in cutting rectangular blanks of a single size from a rectangular sheet using orthogonal guillotine cuts[J]. European Journal of Operational Research 1993, 64(3): 410—422.

[作者简介]



孙英 (1971—), 女 (汉族), 云南大姚人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为优化计算技术与 CAD;

何冬黎 (1974—), 女 (汉族), 广西桂林人, 硕士, 副教授, 主要研究方向为优化计算技术与 CAD;

崔耀东 (1957—), 男 (汉族), 河南林州人, 博士, 教授, 主要研究方向为优化计算技术与 CAD。

(上接第 135 页)

- [2] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [3] 闻新, 等. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [4] 侯勇严, 孙瑜, 郭文强. 一种自适应模糊 PID 控制器的仿真研究 [J]. 陕西科技大学学报, 2004, 4(22): 48—52.
- [5] 叶润玉. 一种自适应模糊 PID 控制器的设计及应用 [J]. 福建工程学院学报, 2006, 4(6): 801—821.
- [6] 耿瑞. 基于 MATLAB 的自适应模糊 PID 控制系统计算机仿真 [J]. 信息技术, 2007, (1): 43—46.
- [7] 苏明, 等. 模糊 PID 控制及其 MATLAB 仿真 [J]. 计算机应用,

2004, (4).



[作者简介]

张泾周 (1960—), 男 (汉族), 陕西泾阳人, 副教授, 在职博士生, 研究方向为计算机智能控制、生物医学信号检测与图象处理;

杨伟静 (1982—), 女 (汉族), 河北保定人, 西北工业大学研究生, 主要研究领域为控制理论与控制工程;

张安祥 (1985—), 男 (汉族), 山东菏泽人, 西北工业大学研究生, 研究方向为控制理论与控制工程。