

自适应模糊PID控制器在跟踪器瞄准线稳定系统中的应用

姬 伟^{1, 2}, 李 奇²

(1. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 东南大学 自动化研究所, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对陀螺惯性平台上的跟踪器瞄准线稳定系统中非线性不确定因素对稳定精度的影响, 设计了一种自适应模糊PID复合控制策略. 提出了改进的自适应调整因子和学习算法进行控制参数和规则的在线修正; 采用PID控制克服模糊控制固有的精度盲区. 实验结果表明该方法在一定测量噪声和速度敏感范围内, 能有效地隔离载体扰动, 保证跟踪器对目标的准确瞄准, 具有动态响应快、稳定精度高、自适应抗干扰鲁棒性强等特点.

关键词: 自适应模糊PID控制器; 瞄准线稳定; 伺服系统; 光电跟踪转台

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Application of adaptive fuzzy PID controller to tracker line of sight stabilized system

Ji Wei^{1, 2}, Li Qi²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;

2. Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 100080, China)

Abstract: The adaptive fuzzy PID hybrid control is developed for the LOS(line of sight) stabilized system with nonlinear property and some uncertain factors. In the adaptive fuzzy controller, the self-tuning factors are made to modify the parameters of fuzzy controller online. A new learning algorithm of rule modifier is proposed to adjust control efforts. The PID control is adopted to eliminate the static error that fuzzy controller inheres and to fulfil the error-free requirement. The experimental results show that the proposed method can achieve perfect performance and is effective in separating carrier disturbances within the scope of definite noise and sensitivity to velocity. The system has fast dynamic response, high stabilization precision and strong adaptive robustness.

Key words: adaptive fuzzy PID controller; LOS stabilization; servo system; opto-electronic tracking platform

1 引言(Introduction)

运动载体上的光电跟踪系统(如导引头、机载光电侦察设备等)由于载体的振动通过轴承摩擦耦合到跟踪平台上造成跟踪器瞄准线(LOS)晃动, 引起图像模糊而影响提取目标脱靶量精度, 因此必须采用视线稳定技术, 为跟踪器提供具有空间稳定的惯性基准. 瞄准线稳定采用陀螺惯性平台结构, 陀螺作为空间速率的敏感元件, 通过对电机直接驱动的平台框架的整体控制使瞄准线保持稳定^[1].

瞄准线稳定系统作为一类特殊的伺服控制系统, 得到了广泛的关注^[2~4]. 美国TI公司与Texas大学的研究项目报告中指出自适应控制是惯性稳定系统的发展方向^[5]. 根据系统特点和应用环境要求, 本文提出一种自适应模糊PID复合控制策略. 采用模糊控制保证系统的快速动态响应^[6]; 引入自适应调整算法进行控制规则和参数的在线修正^[7~11]; 采用PID控

制克服模糊控制固有的精度盲区. 最后在具有两轴陀螺惯性平台的四轴光电跟踪转台上进行了实验验证.

2 自适应模糊控制器(Adaptive fuzzy controller)

常规模糊控制由于固定的控制参数和隶属函数限制, 以及依据个别专家经验确定的有限控制规则的粗糙和不完善, 不能适应过程的持续变化. 将自适应方法引入控制器设计可以改善控制品质, 提高对外界扰动和运行工况变化的鲁棒适应能力^[12]. 模糊控制器自整定主要包括参数、隶属函数和控制规则的整定, 其中参数和控制规则的在线调整具有实用价值^[7~10]. 因此, 所设计的自适应模糊控制器如图1虚线框内所示, 在基本模糊控制器的基础上, 自适应调整更新因子进行控制输出比例因子的在线修正; 交互学习算法实现控制规则的自调整.

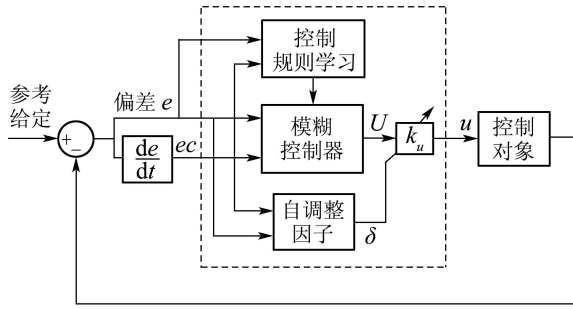


图1 自适应模糊控制器框图

Fig. 1 The adaptive fuzzy controller structure

2.1 模糊控制器(Fuzzy controller)

模糊控制器采用双输入单输出形式, 输入为偏差 E , 偏差变化 EC , 输出量为 U , 它们分别是实际偏差 e , 偏差变化 ec 和输出控制电压 u 的模糊语言变量。考虑到在实际系统中变量的不对称情况, 设 e, ec 和 u 的变化范围为 $[e_{\min}, e_{\max}]$, $[ec_{\min}, ec_{\max}]$ 及 $[u_{\min}, u_{\max}]$, 其归一化模糊论域为 $[-1, 1]$, 则论域正规化变换公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} E = k_e \left(e - \frac{e_{\max} + e_{\min}}{2} \right), \\ k_e = \frac{2}{e_{\max} - e_{\min}}, \\ EC = k_{ec} \left(ec - \frac{ec_{\max} + ec_{\min}}{2} \right), \\ k_{ec} = \frac{2}{ec_{\max} - ec_{\min}}, \\ U = \left(u - \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2} \right) / k_u, \\ k_u = \frac{u_{\max} - u_{\min}}{2}. \end{array} \right. \quad (1)$$

其中: k_e, k_{ec} 为输入变量量化因子, k_u 为输出变量比例因子。 E, EC 和 U 均采用相同的模糊子集{NB, NS, ZO, PS, PB}, 其隶属函数采用对称、均匀分布、全交迭的三角形形式。应用常规模糊条件和模糊关系“IF A_i and B_i THEN C_i ”形式建立模糊规则如表1所示。

根据Mamdani的min-max推理法则^[6]

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \bigcup_{i=1}^n R_i = \bigcup_{i=1}^n (A_i \times B_i) \times C_i, \\ \mu_{R_i} = \min\{\mu_{A_i}(E), \mu_{B_i}(EC), \mu_{C_i}(U)\}, \\ \mu_C(U) = \\ \max\{\min[\mu_{A \times B}(E, EC), \mu_R(E, EC, U)]\}, \end{array} \right. \quad (2)$$

可得到采用加权平均解模糊化的模糊控制输出

$$U = \frac{\sum_i \mu_{C_i}(U_i) \cdot C_i}{\sum_i \mu_{C_i}(U_i)}. \quad (3)$$

故实际控制输出为

$$u(k) = k_u(k) U + \frac{u_{\max} + u_{\min}}{2}. \quad (4)$$

表1 控制规则集
Table 1 Control rule-bases

e	ec				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	ZO	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PS	PB	PB

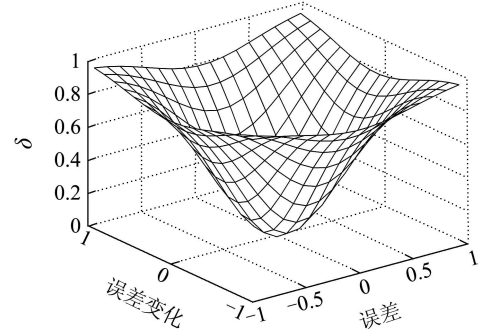
2.2 自适应机制 (Adaptive tuning mechanism)

A) 参数自调整。

系统运行的各阶段对模糊控制器比例因子要求是不同的, 采用固定常数很难获得满意的控制效果。依据控制参数调整规则^[8,9], 提出了一种输出比例因子的在线自调整因子

$$\delta(e, ec) = 1 - \gamma \exp(-(\alpha e^2 + \beta ec^2)), \delta \in [0, 1]. \quad (5)$$

其中: γ 为积分常数, $0 < \gamma < 1$, α, β 分别为输入变量增益系数, $\alpha > 0, \beta > 0$ 。自调整因子 δ 变化规律如图2所示。

图2 自调整因子 δ 变化示意图Fig. 2 The variation of updating factor δ with e and ec

由式(5)得输出量比例因子为

$$k_u(k) = \delta(e(k), ec(k)) \cdot k_u(0). \quad (6)$$

其中 $k_u(0)$ 为比例因子初始值。下面分别讨论 α, β 和 γ 对调整因子的影响。对式(5)分别求偏导:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \delta}{\partial e} = 2\gamma \cdot \alpha \cdot e \cdot \exp(-(\alpha \cdot e^2 + \beta \cdot ec^2)), \\ \frac{\partial \delta}{\partial ec} = 2\gamma \cdot \beta \cdot ec \cdot \exp(-(\alpha \cdot e^2 + \beta \cdot ec^2)). \end{array} \right. \quad (7)$$

情况1 讨论 α, β 的影响(以 α 为例)。

i) 在 e 接近0的附近, 有

$$\delta'(e)|_{e \rightarrow 0} \approx$$

$$\begin{aligned} 2\gamma \cdot \alpha \cdot e \cdot (1 - \alpha \cdot e^2) \cdot \exp(-\beta \cdot ec^2) \approx \\ 2\gamma \cdot \alpha \cdot e \cdot \exp(-\beta \cdot ec^2). \end{aligned} \quad (8)$$

由上式可知,在本区域内, α 越大, $|\delta'(e)|$ 就越大,说明 δ 的变化相对于 e 是快的,因而比例因子变化也很快. 相反, α 越小,比例因子变化不大.

ii) 在 e 接近1的附近,有

$$\begin{aligned} \delta'(e)|_{e \rightarrow 1} \approx \\ 2\gamma \cdot \alpha \cdot \exp(-\alpha \cdot e^2) \cdot \exp(-\beta \cdot ec^2) \approx \\ 2\gamma \cdot \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot ec^2) / \exp(\alpha). \end{aligned} \quad (9)$$

此时, α 越大, $|\delta'(e)|$ 就越小,说明 δ 的变化相对于 e 是慢的,因此比例因子变化也不大. 相反, α 较小时, δ 的变化相对于 e 在区间 $[-1, 1]$ 的任何点处都很小.

情况2 讨论 γ 的影响.

设 $e = ec = 0$ 是系统平衡状态,有 $\delta(e, ec) = 1 - \gamma$.

i) 如果 $\gamma = 0$,则 $\delta(0, 0) = 1$,此时比例因子在控制过程中保持不变,系统蜕化为非变参数的情形.

ii) 如果 $\gamma = 1$,则 $\delta(0, 0) = 0$,此时比例因子变为0,则输出控制量为零,系统稳定在平衡状态.

由式(7)可知,对于同一个点, γ 越小, $\delta(e, ec)$ 的导数就越小, δ 的变化就不大,伸缩因子的曲线就向竖轴正提升,逐渐趋于平缓.

上述讨论给出了各参数对自调整因子的影响. 通过调整因子的自动修正,比例因子也相应调整,从而实现了根据偏差和偏差变化自适应调节控制量,来改善控制性能. 与文献[7,8]相比,该方法调整规则明确,设定参数少,运算时间短,保证了系统的实时性.

B) 控制规则自学习.

模糊控制规则的确定和可调整性对非线性时变系统的控制性能具有决定性作用^[10,11]. 本系统先验知识和操作经验都相对缺乏,为了实现自适应控制,基于负梯度下降的交互学习算法被引入用于控制规则的在线调整^[11]. 定义性能指标函数

$$J = \sum_{k=1}^n \sqrt{e^2(k) + \rho \cdot ec^2(k)}. \quad (10)$$

其中 $\rho > 0$ 为加权系数. 性能指标 J 关于 e 和 ec 的偏微分表示为

$$\frac{\partial J}{\partial e(k)} = \frac{e(k)}{\sqrt{e^2(k) + \rho \cdot ec^2(k)}}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial J}{\partial ec(k)} = \frac{\rho \cdot ec(k)}{\sqrt{e^2(k) + \rho \cdot ec^2(k)}}, \quad (12)$$

则性能优化的负梯度为

$$\begin{aligned} -|\nabla J| = - \left| \frac{e(k)}{\sqrt{e^2(k) + \rho \cdot ec^2(k)}} \right| - \\ \rho \cdot \left| \frac{ec(k)}{\sqrt{e^2(k) + \rho \cdot ec^2(k)}} \right|. \end{aligned} \quad (13)$$

基于优化控制^[11], 调整控制量为

$$\Delta U(k) = \eta \cdot (-|\nabla J|) \cdot \begin{bmatrix} e(k) \\ ec(k) \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其中 η 为学习速率, $0 < \eta < 1$. 则控制规则的修改算法为

$$\Delta C_i = \Delta U \cdot \frac{\mu_{C_i}(U_i)}{\sum_i \mu_{C_i}(U_i)}, \quad (15)$$

$$C_i = C_i + \Delta C_i. \quad (16)$$

其中 $\mu_{C_i}(U_i)$, ΔC_i 是第 i 条规则的激活度和修改量.

3 瞄准线稳定系统复合控制(LOS stabilized system hybrid control)

陀螺惯性平台瞄准线稳定系统除了具有运动控制中常见的机械谐振、电机死区和极限环振荡,摩擦力矩耦合负载变化以及电气参数的波动等问题外,还具有外部载体的耦合扰动、陀螺随机漂移等特殊影响因素^[2]. 而且,此类光电跟踪系统反应时间很短,稳定控制响应时间一般在毫秒级,因此要求控制系统具有快速动态响应、高质量稳定精度以及对于模型参数变化的自适应能力和鲁棒性.

自适应模糊控制对系统非线性和结构参数时变特性具有良好的快速适应能力,但对于小范围偏差和振荡无能为力,当偏差小于一个模糊量化等级时,控制输出为零,将出现精度“盲区”. 实验中显示当系统工作在线性范围内时,采用传统PID控制,可以满足期望的性能指标,但在出现非线性不确定现象区域,例如平台启动阶段以及低速运行时的“爬行”和换向时的“平顶”等情况时,很难实现系统高稳定精度和运动快速平稳性要求. 因此,对瞄准线稳定提出采用图3所示的自适应模糊PID复合控制策略.

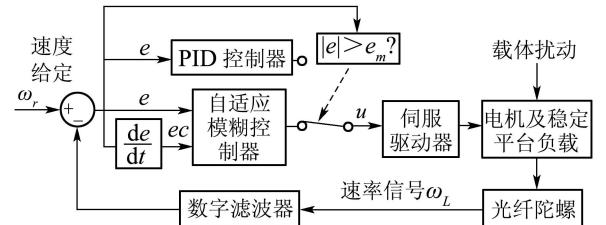


图3 瞄准线稳定系统自适应模糊PID复合控制

Fig. 3 LOS stabilized system adaptive fuzzy PID control

3.1 控制器切换规则(Controller switching rules)

在控制中设置速度偏差阈值 e_m 作为切换点. 当 $e > e_m$ 时, 采用自适应模糊控制使系统在最短时间里接近给定速度, 保证系统具有更快的动态响应和自适应能力; 等到平台扶正, 即 $e \leq e_m$ 时, 系统切换到PID控制, 利用积分控制的无静差调节性能, 来实现偏差的精细调节, 从而快速消除平台失稳. 由于一般系统进入稳态的指标为给定的 $\pm 5\%$, 因此偏差阈值选取采用 $e_m = 0.05 \cdot \omega_r$, 其中 ω_r 为给定速度, 并且实验中通过在切换条件满足后加入一定的时

滞,再实施切换动作的方法来减小控制器之间切换引起的振动。

3.2 控制器参数设计(Controller parameters design)

在实际系统中,选取速度偏差 e 的范围为 $[-20, 40]^\circ/\text{s}$,偏差变化 ec 的范围为 $[-500, 500]^\circ/\text{s}^2$.则输入量化因子 $k_e = 1/30$, $k_{ec} = 1/500$.控制量 u 的范围为 $[-10, 10]\text{V}$,比例因子初始值 $k_u(0) = 10$.考虑到系统的快速性,量化等级和隶属函数以及初始控制规则采用上节所给出的形式.自调整因子采用 $\delta(e, ec) = 1 - 0.98 \exp(-(2e^2 + 1.5ec^2))$,控制规则修正参数 $\rho = 5, \eta = 0.1$.PID控制器初始参数采用临界比例法进行粗整定,再根据实验结果进行修正。

4 系统建立和实验结果(System setup and experimental results)

实验装置为四轴光电跟踪转台,外部为两个轴系的非稳定摇摆台,用于模拟载体在运动中对负载平台的扰动;内部负载框架为两个轴系(俯仰、方位)的陀螺稳定跟踪平台.系统框架驱动采用力矩电机与负载直接耦合实现.以俯仰框系统为例,选用电机型号为J110LYX01,技术参数:额定转速为640 r/min,连续堵转力矩 $\geq 1.25 \text{ N} \cdot \text{m}$,峰值堵转力矩 $\geq 4.7 \text{ N} \cdot \text{m}$,电气时间常数2 ms,转动惯量 $0.0005 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.惯性速率敏感元件采用VG941-3AM型光纤陀螺,性能参数:比例因子为 $6 \text{ mV}/(\text{deg} \cdot \text{s}^{-1})$,比例因子稳定性为0.03%,随机游走系数为 $0.0015^\circ/\sqrt{\text{s}}$,零漂为 $3 \sim 10^\circ/\text{h}$.系统控制器选用以Motorola的DSP56001为核心的PMAC2A-PC运动控制模块,其采样周期为 $100 \mu\text{s}$,伺服算法更新率达10 kHz.驱动器采用GDS系列脉宽调制系统,其功率转换采用开关速度快、压降小的IGBT功率模块构成H型双极四相限全桥电路,以PWM方式工作,驱动频率为16 kHz。

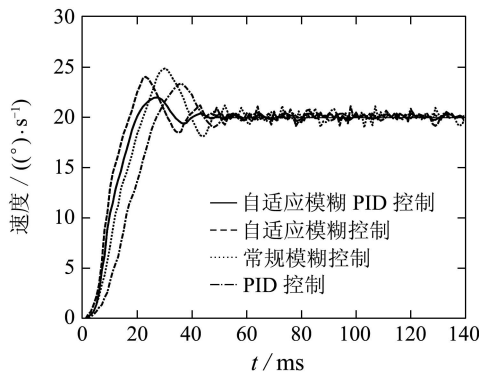


图4 瞄准线稳定控制阶跃响应

Fig. 4 Step responses of LOS stabilized control

在实验装置上对所设计控制方案的性能进行验证.图4为采用不同控制器时的阶跃响应曲线,其中常规模糊控制的调节时间为42 ms,超调24%;而自适应模糊控制的调节时间为34 ms,超调19%;常

规PID控制的调节时间为46 ms,超调16%;自适应模糊PID复合控制的调节时间为30 ms,超调10.5%.可见,自适应机构的引入以及复合控制的设计分别对提高响应速度和抑制超调起到了有效作用,并且稳态性能也有明显改善。

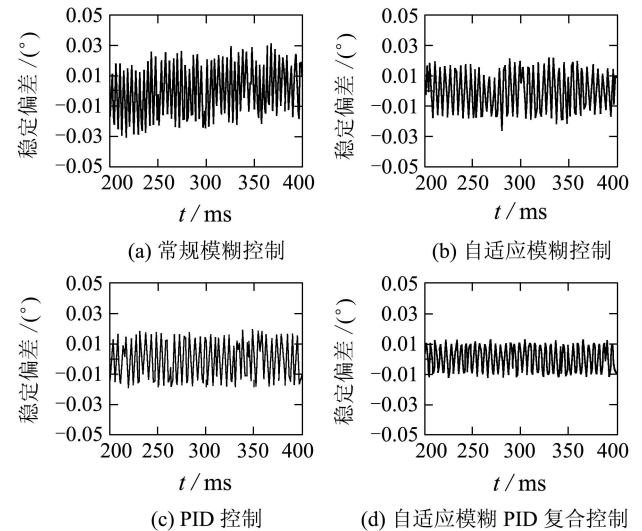


图5 无扰动时的瞄准线稳定偏差曲线

Fig. 5 LOS Stabilization error without disturbance

图5为跟踪器瞄准静止目标(给定速度为0),无外部干扰时采用不同控制器的稳定控制精度曲线,其中模糊控制的最大稳定偏差 $> 0.03^\circ$,自适应模糊控制的最大稳定偏差 $> 0.02^\circ$,PID控制的稳定偏差在 0.01° 和 0.02° 之间,而自适应模糊PID控制的稳定偏差(保持在 0.01° 以内)及运动平稳性都优于上述控制方式,说明自适应模糊PID控制能较好地克服系统内部扰动和各种非线性因素的影响,具有良好的控制性能和鲁棒性。

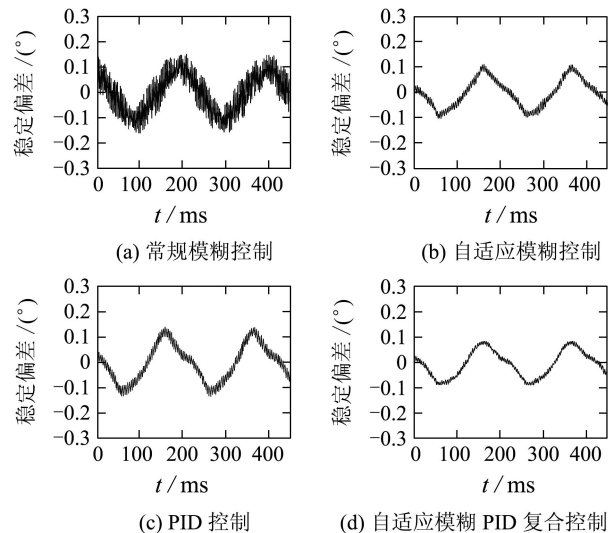


图6 正弦干扰下的瞄准线稳定控制效果

Fig. 6 LOS stabilization precision with sinusoidal disturbance

图6为跟踪器瞄准静止目标, 摇摆台加入正弦扰动(振幅 $A = 10^\circ$ 、频率 $f = 5 \text{ Hz}$)时, 采用不同控制器的瞄准线稳定控制效果, 可见, 自适应模糊控制相对常规模糊控制性能有所提高, 但和PID控制一样, 仍然有较频繁的抖动, 直接导致跟踪器所获得的图像模糊, 提取的目标脱靶量偏差大. 而自适应模糊PID复合控制的稳定隔离效果明显(最大稳定偏差 $< 0.1^\circ$), 运动过程较为平稳, 波动较小, 保证了图像跟踪器对目标的稳定瞄准.

5 结论(Conclusions)

针对跟踪器瞄准线稳定系统非线性不确定性特点, 提出了一种自适应模糊PID复合控制策略. 采用自适应调整因子进行控制参数的在线修正, 改善了控制器的动、静态特性; 引入交互学习算法有效地克服了固有控制规则的不足; 采用PID控制实现了无差调节. 实验结果表明, 该控制器算法简单, 稳定精度高, 解决了系统响应快速平稳性和高稳定精度之间的矛盾.

参考文献(References):

- [1] 郭富强. 陀螺稳定装置及其应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.
(GUO Fuqiang. *Gyro-stabilized Mechanism and Application*[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995.)
- [2] ORTEGA J J. Gunfire performance of stabilized electro-optical sights[C]// *SPIE Conference on Acquisition, Tracking, and Pointing XIII*. Orlando: Spie-International Society For Optical Engineering, 1999, 3692: 74 – 83.
- [3] KRISHNA J A, MARATHE R, SULE' V R. H_∞ control law for line-of-sight stabilization for mobile land vehicles[J]. *Optical Engineering*, 2002, 41(11): 2935 – 2944.
- [4] LIN C M, HSU C F, MON Y J. Self-organizing fuzzy learning CLOS guidance law design[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003, 39(4): 1144 – 1151.
- [5] HILKERT J M, HULLENDER D A. Adaptive control system techniques applied to inertial stabilization systems[C]// *SPIE Conference on Acquisition, Tracking, and Pointing IV*. Florida: Spie-International Society for Optical Engineering, 1990, 1304: 190 – 206.
- [6] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996.
(LI Shiyong. *Fuzzy Control-Neurocontrol and Intelligent Cybernetics*[M]. Harbin: HIT Press, 1996.)
- [7] OH S Y, PARK D J. On-line self-tuning fuzzy controller using intelligent membership function[C]// *The Society of Instrument and Control Engineers (SICE) annual conference 1995*. Sapporo: Sice-Society of Instrument and Control Engineers, 1995: 1317 – 1320.
- [8] MUDI R K, PAL N R. A robust self-tuning scheme for PI-and PD-type fuzzy controllers[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, 7(1): 2 – 16.
- [9] WOO Zhi-Wei, CHUNG Hung-Yuan, LIN Jin-Jye. A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 115(3): 321 – 326.
- [10] WU Z Q, W P Zhuang. A rule self-regulating fuzzy controller[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 47(1): 13 – 21.
- [11] YEH Zong-Mu. A systematic method for design of multivariable fuzzy logic control systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1999, 7(5): 741 – 752.
- [12] ASTROM K J, WITTENMARK B. *Adaptive Control*[M]. New York: Addison-Wesley, 1995.

作者简介:

姬 伟 (1974—), 男, 博士, 研究方向为智能控制、精密伺服系统研究, E-mail: jwhxb@163.com;

李 奇 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为系统优化、智能控制和综合自动化等方面.