

## SCARA 机器人的模糊自适应滑模控制

吉 峰<sup>1</sup>, 赵登步<sup>2</sup>, 闫文才<sup>2</sup>, 白瑞林<sup>2</sup>

(1. 无锡信捷电气股份有限公司, 江苏 无锡 214072

2. 江南大学 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 为了提高 SCARA 机器人的轨迹跟踪控制性能, 提出一种双模糊自适应滑模控制; 采用一自适应模糊控制器, 根据滑模到达条件对滑模切换增益进行估算, 消除滑模控制中输出力矩的抖振现象, 增强其对不确定性因素的适应能力; 采用另一自适应模糊控制器对指数趋近律系数进行修正, 改善由于大范围初始位姿产生的偏差而引起的大力矩和速度跳变问题; 基于 Lyapunov 方法进行了稳定性证明, 保证控制系统的稳定性与收敛性; 仿真实验结果表明, 该方法应用于 SCARA 机器人, 跟踪效果良好并产生了平滑的力矩输出和速度输出。

**关键词:** SCARA 机器人; 滑模控制; 自适应模糊控制; 抖振; 速度跳变

## Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for SCARA Robots

Ji Feng<sup>1</sup>, Zhao Dengbu<sup>2</sup>, Yan Wencai<sup>2</sup>, Bai Ruilin<sup>2</sup>

(1. Xinje Electronic Co., Ltd., Wuxi 214072, China; 2. Key Laboratory of Advanced

Process Control for Light Industry Ministerial, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

**Abstract:** An improved algorithm of the SCARA robots control is proposed in this paper, to improve the SCARA robot trajectory tracking control performance. An adaptive fuzzy controller is used to estimate the sliding mode switch gain according to its reaching conditions, eliminating the chattering of output torque in sliding mode control and enhancing its adaptive ability to uncertainties. And another adaptive fuzzy controller is utilized to amend exponential reaching law coefficient, also to improve big torque and speed jump problem caused by a wide range of initial position deviation. The stability is proved in the design process based on the method of Lyapunov, guaranteeing the stability and convergence of the control system. Experimental results show that this method applied to SCARA robots, has a good tracking effect and smooth outputs of torque and speed.

**Keywords:** SCARA robot; sliding mode control; adaptive fuzzy control; chattering; speed jump

## 0 引言

机器人主要应用于工业生产的装配、搬运任务, 提高机器人的运动速度和精度水平对提高生产效率及质量, 降低生产成本具有重要研究意义。机器人是具有时变、强耦合等动态特性的多输入多输出的复杂控制系统。为使机器人达到良好的动静品质, 基于动力学设计的控制器成为研究热点。

由于重力补偿的 PID 控制<sup>[1-2]</sup>无法实现动态轨迹跟踪, 所以在机器人控制中引入计算力矩法<sup>[3]</sup>, 但是计算力矩法需要确定的机器人模型, 当模型计算有误差时, 控制精度将受到很大的影响。滑模控制无需准确的被控对象数学模型, 具有强鲁棒性而被广泛用于机器人控制当中<sup>[4-5]</sup>。

然而, 滑模控制容易出现抖振问题, 为进一步提高滑模控制效果, Charles J. Fallaha<sup>[6]</sup>采用带有指数趋近律的滑模控制器, 有效的抑制了滑模控制中的抖振。文献 [7-9] 采用自适应模糊滑模控制, 根据滑模到达条件对滑模切换增益进行估算, 增强其对不确定性因素的适应能力, 消除了滑模控制中

输出力矩的抖振现象, 取得了很好的跟踪精度。文献 [10] 基于三关节机器人提出双模糊滑模控制方法, 采用两个模糊控制器分别调整滑模面的斜率和滑模切换增益, 取得较高的跟踪效果。

上述提及的控制方法, 对于跟踪误差突变时控制器的速度跳变问题, 都没有给出有效的解决方法。本文针对 SCARA (selective compliance assembly robot arm) 机器人提出双模糊自适应滑模控制方法。采用一自适应模糊控制器, 根据滑模到达条件对滑模切换增益进行估算, 增强其对不确定性因素的适应能力, 消除了滑模控制中输出力矩的抖振现象; 采用另一模糊自适应控制器对指数趋近律系数进行修正, 改善由于大范围的初始位姿偏差而引起的大力矩和速度跳变问题。

## 1 SCARA 机器人动力学模型估算

对于一个  $n$  关节的机器人系统, 其动力学方程可以由以下二阶非线性微分方程描述:

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

式中,  $q \in \mathbf{R}^n$  为关节角位置矢量,  $\dot{q}, \ddot{q} \in \mathbf{R}^n$  为关节角速度和加速度矢量;  $D(q) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为机器人的惯性矩阵;  $C(q, \dot{q}) \in \mathbf{R}^{n \times n}$  为离心力和哥氏力矩阵;  $G(q) \in \mathbf{R}^n$  为重力项矢量;  $\tau \in \mathbf{R}^n$  为关节控制力矩矢量。

SCARA 机器人如图 1 所示。利用拉格朗日方法, 可以求出动力学模型如下:

收稿日期: 2014-09-03; 修回日期: 2014-10-13。

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目 (BY2012056)。

作者简介: 吉 峰 (1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事工业自动化系统与装备方向的研究。

白瑞林 (1955-), 男, 教授, 博导, 主要从事机器视觉与智能系统的方向研究。

$$D(q) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & D_{14} \\ D_{21} & D_{22} & 0 & D_{24} \\ 0 & 0 & D_{33} & 0 \\ D_{41} & D_{42} & 0 & D_{44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$D_{11} = \frac{1}{3}m_1 l_1^2 + m_2 \left( \frac{1}{3}l_2^2 + l_1^2 + l_1 l_2 C_2 \right) + \frac{1}{2}m_4 r^2 + (m_3 + m_4)(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 C_2)$$

$$D_{22} = \frac{1}{3}m_2 l_2 + m_3 l_2^2 + m_4 l_2^2 + \frac{1}{3}m_4 r^2$$

$$D_{33} = m_3 + m_4, D_{44} = \frac{1}{2}m_4 r^2, D_{14} = -\frac{1}{2}m_4 r^2$$

$$D_{12} = \frac{1}{3}m_2 l_2^2 + \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 C_2 + m_3 l_2^2 + m_3 l_1 l_2 C_2 + m_4 l_2^2 + m_4 l_1 l_2 C_2 + \frac{1}{2}m_4 r^2$$

$$D_{21} = \frac{1}{3}m_2 l_2^2 + \frac{1}{2}m_2 l_1 l_2 C_2 + m_3 l_2^2 + m_3 l_1 l_2 C_2 + m_4 l_2^2 + m_4 l_1 l_2 C_2 + \frac{1}{2}m_4 r^2$$

$$D_{24} = -\frac{1}{2}m_4 r^2, D_{41} = -\frac{1}{2}m_4 r^2, D_{42} = -\frac{1}{2}m_4 r^2$$

$$C(q, \bar{q})\bar{q} + G(q) = \begin{bmatrix} 2D_{112}q_1\bar{q}_2 + D_{122}\bar{q}_2^2 \\ -D_{122}\bar{q}_1^2 \\ (m_3 + m_4)g \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$D_{111} = 0, D_{112} = -\left(\frac{1}{2}m_2 + m_3 + m_4\right)l_1 l_2 S_2$$

$$D_{121} = D_{112} = -\left(\frac{1}{2}m_2 + m_3 + m_4\right)l_1 l_2 S_2$$

$$D_{122} = -\left(\frac{1}{2}m_2 + m_3 + m_4\right)l_1 l_2 S_2$$

$$D_{211} = -D_{122} = \left(\frac{1}{2}m_2 + m_3 + m_4\right)l_1 l_2 S_2$$

其中:  $m_i$  代表各连杆的质量,  $l_i$  代表各连杆长度,  $C_i, S_i$  是  $\cos(q_i), \sin(q_i)$  的简写。

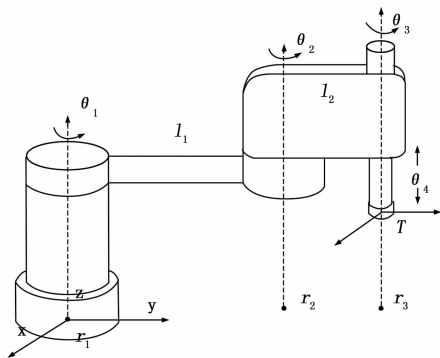


图 1 SCARA 机器人

## 2 双模糊自适应滑模控制

### 2.1 滑模控制器的设计

定义机器人各关节的位置偏差为:  $e = q_d - q$ , 其中  $q_d$  为位置给定,  $q$  为实际位置反馈。定义误差函数为:  $s = \dot{e} + \Lambda e$ , 其中  $\Lambda = \text{diag}[\lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n]$ ,  $\lambda_i > 0$ 。并定义:

$$\bar{q}_r = \bar{q} - s = \bar{q}_d - \Lambda e$$

$$\bar{q}_r = \bar{q} - s = \bar{q}_d - \Lambda e \quad (4)$$

设计控制律为:

$$\begin{aligned} \tau &= \hat{\tau} - A s - K \text{sgns} \\ \hat{\tau} &= \hat{H}\bar{q}_r + \hat{C}\bar{q}_r + \hat{G} \end{aligned} \quad (5)$$

其中:  $\hat{\tau} = \hat{H}\bar{q}_r + \hat{C}\bar{q}_r + \hat{G}$  为等效控制,  $A_s$  为指数趋近律,  $K \text{sgns}$  为切换控制。  $\hat{H}, \hat{C}, \hat{G}$  分别为  $H, C, G$  的估计值,  $K = \text{diag}[K_{11}, \dots, K_{ii}, \dots, K_{mm}]$ ,  $A = \text{diag}[a_1, \dots, a_i, \dots, a_n]$  为正定矩阵。

### 2.2 基于模糊自适应增益的机器人滑模控制

#### 2.2.1 模糊控制系统的设计

采用模糊控制自适应逼近滑模控制律的增益。系统的控制输出为<sup>[12]</sup>:

$$y = \frac{\sum_{m=1}^M \epsilon^m \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^m}(x_i^*)}{\sum_{m=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^m}(x_i^*)} = \epsilon^T \Psi(x) \quad (6)$$

式中,  $\epsilon = [\epsilon^1, \dots, \epsilon^m, \dots, \epsilon^M]^T$ ,  $\Psi(x) = [\varphi^1(x), \dots, \varphi^m(x), \dots,$

$$\varphi^M(x)]^T, \varphi^m(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^m}(x_i^*)}{\sum_{m=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^m}(x_i^*)}, M$$
 为模糊规则数量,  $n$  为模糊控制输入个数。

#### 2.2.2 基于模糊增益自适应调整的滑模控制

基于模糊增益调整的控制律设计为:

$$\tau = \bar{H}\bar{q}_r + \bar{C}\bar{q}_r + \bar{G} - A s - K \quad (7)$$

其中:  $K = [k_1, \dots, k_i, \dots, k_n]$ ,  $k_i$  为第  $i$  个模糊系统的输出。

1) 模糊规则的设计:

将式 (4) 代入式 (1) 得:

$$\bar{H}s + (C + A)s = \Delta f - K \quad (8)$$

其中  $\Delta f = \Delta H\bar{q}_r + \Delta C\bar{q}_r + \Delta G, \Delta H = \hat{H} - H, \Delta C = \hat{C} - C, \Delta G = \hat{G} - G$ 。

如果增益  $K$  采用模糊控制进行逼近, 并且定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^T H s \quad (9)$$

则:

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{1}{2} [\bar{s}^T H s + s^T \bar{H} s + s^T H \bar{s}] = \frac{1}{2} [2s^T H \bar{s} + s^T \bar{H} s] = \\ &= s^T [-(C + A)s + \Delta f - K + Cs] = \\ &= s^T [-As + \Delta f - K] = s^T [\Delta f - K] - s^T A s = \\ &= \sum_{i=1}^n [s_i \Delta f_i - s_i k_i] - s^T A s \end{aligned} \quad (10)$$

由此可见, 为保证  $\bar{V}$  为负, 应使  $s_i k_i \geq 0$ , 即保证  $s_i$  与  $k_i$  符号相同。同时, 考虑  $s_i \Delta f_i - s_i k_i$ , 当  $|s_i|$  较大时, 为保证  $\bar{V}$  为较大的负数, 希望  $|k_i|$  较大; 当  $|s_i|$  较小时,  $|k_i|$  保持较小的值, 就可保证  $\bar{V}$  为负数。

如果以  $s_i$  作为规则的输入, 则模糊规则可采用如下形式:

IF  $s_i$  is  $A_i^m$  THEN  $k_i$  is  $B_i^m$

其中  $A_i^m$  和  $B_i^m$  为模糊集。

选择  $s_i, k_i$  的论域, 将它们模糊化为 7 个等级, 定义如下:

$$s_i = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

$$k_i = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

表示为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ , 分别对应负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。用于表示模糊集的隶属函数设计为:

$$\mu_A(x_i) = \exp\left[-\left(\frac{x_i - \alpha}{\sigma}\right)^2\right] \quad (11)$$

模糊系统的输出为:

$$k_i = \frac{\sum_{m=1}^M \epsilon_{k_i}^m \mu_{A^m}(s_i)}{\sum_{m=1}^M \mu_{A^m}(s_i)} = \epsilon_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i) \quad (12)$$

其中:  $\epsilon_{k_i} = [\epsilon_{k_i}^1, \dots, \epsilon_{k_i}^m, \dots, \epsilon_{k_i}^M]^T, \Psi_{k_i}(s_i) = [\varphi_{k_i}^1(s_i), \dots,$

$$\varphi_{k_i}^m(s_i), \dots, \varphi_{k_i}^M(s_i)]^T, \Phi^m(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^m}(x_i^*)}{\sum_{m=1}^n \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^m}(x_i^*)},$$

2) 自适应模糊滑模控制律的设计:

由 (8) 式得:

$$H\bar{s} = -(C + A)s + \Delta f - K \quad (13)$$

取  $k_i = \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)$  为理想  $\Delta f_i$  的逼近, 根据万能逼近定理<sup>[13]</sup>, 存在  $\omega_i > 0$ , 有  $|\Delta f_i - \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)| \leq \omega_i$ 。

定义  $\bar{\epsilon}_{k_i} = \epsilon_{k_i} - \epsilon_{k_{id}}$ 。选取自适应律为:  $\bar{\epsilon}_{k_i} = s_i \Psi_{k_i}(s_i)$ 。

### 2.3 指数趋近率系数的自适应模糊调整

由于机器人启动时会产生较大的初始偏差和位置变化率, 此时控制器会产生一较大的力矩输出。为避免这种情况, 对滑模控制的指数趋近率系数进行模糊控制, 通过调节 A 来达到: 当误差及误差变化率大的时候尽量减小控制量; 反之, 则增加控制量。

模糊控制系统的设计: 控制输入为  $e = |de|, ec = |dec|$ , 输出为  $A = \text{diag}(a_1, a_2 \dots a_n)$ 。

选择  $e, ec, A$  的论域, 将它们模糊化为 7 个等级, 定义如下:

$$E = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

$$C = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

$$U = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

表示为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ , 分别对应负大, 负中, 负小, 零, 正小, 正中, 正大。

建立  $a_i$  的调整规则, 具体的控制规则为: 当  $e_i$  或  $ec_i$  较大时, 适当减小  $a_i$  的值; 当  $e_i$  或  $ec_i$  较小时, 则适当增大  $a_i$  的值。

为使已有模糊控制器具有更强的应变性, 采用控制规则可自调整的自适应模糊控制器。对于一个二维的模糊控制器, 当其输入变量  $E, EC$  和输出量  $U$  的论域划分等级相同时, 所引入的描述控制规则表达式为:

$$U = -[\alpha E + (1 - \alpha)EC] \quad \alpha \exists \in (0, 1) \quad (14)$$

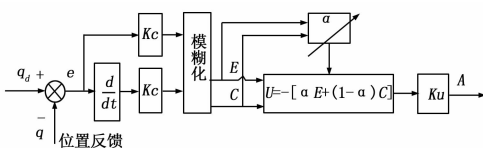


图 2 指数趋近率系数的自适应模糊调整结构图

通过调节  $\alpha$  值便可以对控制规则进行调整。 $\alpha$  值的大小直接反应对误差  $E$  和误差变化率  $EC$  的加权程度。

### 3 稳定性证明

定义 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} s^T H s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\epsilon_{k_i}^T \bar{\epsilon}_{k_i}) \quad (15)$$

其中:  $\bar{\epsilon}_{k_i} = \epsilon_{k_i} - \epsilon_{k_{id}}$ 。则

$$\bar{V} = \frac{1}{2} [s^T H s + s^T \bar{H} s + s^T H \bar{s}] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\bar{\epsilon}_{k_i}^T \epsilon_{k_i} + \bar{\epsilon}_{k_i}^T \bar{\epsilon}_{k_i}) = \frac{1}{2} [2s^T H \bar{s} + s^T \bar{H} s] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n 2\bar{\epsilon}_{k_i}^T \epsilon_{k_i} = s^T [H \bar{s} + C s] + \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{k_i}^T \epsilon_{k_i} =$$

$$s^T [-(C + A)s + \Delta f - k + C s] + \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{k_i}^T \epsilon_{k_i} =$$

$$s^T [-As + \Delta f - k] + \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{k_i}^T \epsilon_{k_i} = -s^T A s + s^T [\Delta f - k] + \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{k_i}^T \epsilon_{k_i} = -s^T A s + \sum_{i=1}^n s_i [\Delta f_i - k_i] + \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{k_i}^T \epsilon_{k_i} \quad (16)$$

由于  $k_i = \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i) + \bar{\epsilon}_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)$ , 则:

$$\bar{V} = -s^T A s + \sum_{i=1}^n s_i [\Delta f_i - (\bar{\epsilon}_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i) + \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i))] + \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{k_i}^T \bar{\epsilon}_{k_i} = -s^T A s + \sum_{i=1}^n s_i [\Delta f_i - \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)] + \sum_{i=1}^n (-s_i \bar{\epsilon}_{k_i}^T \Psi_{k_i}(s_i)) + \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{k_i}^T \bar{\epsilon}_{k_i} = -s^T A s + \sum_{i=1}^n s_i [\Delta f_i - \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)] + \sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{k_i}^T (-s_i \Psi_{k_i}(s_i) + \bar{\epsilon}_{k_i}) \quad (17)$$

选取自适应律为:

$$\bar{\epsilon}_{k_i} = s_i \Psi_{k_i}(s_i) \quad (18)$$

并代入 (17) 式得:

$$\bar{V} = -s^T A s + \sum_{i=1}^n s_i [\Delta f_i - \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)] \quad (19)$$

存在很小的正实数  $\gamma_i$ , 使得 (14) 式满足:

$$|\Delta f_i - \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)| \leq \omega_i \leq \gamma_i |s_i| \quad (20)$$

其中  $0 < \gamma_i < 1$ 。则:  $s_i |\Delta f_i - \epsilon_{k_{id}}^T \Psi_{k_i}(s_i)| \leq \gamma_i |s_i|^2 = \gamma_i s_i^2$

$$\bar{V} \leq -s^T A s + \sum_{i=1}^n \gamma_i s_i^2 = \sum_{i=1}^n (-a_i s_i^2 + \gamma_i s_i^2) = \sum_{i=1}^n (\gamma_i - a_i) s_i^2 \leq 0 \quad (21)$$

其中  $\gamma = \text{diag}[\gamma_1, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_n]$ ,  $a_i > \gamma_i$ 。由式 (21) 可见, 仅当  $s = 0$  时,  $\bar{V} = 0$ , 自适应律 (19) 渐进收敛。得出结论为  $\lim_{t \rightarrow \infty} s = \lim_{t \rightarrow \infty} (\bar{e} + \lambda e) = 0$ , 即  $\lim_{t \rightarrow \infty} q = q_d, \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{q} = \dot{q}_d$ 。

### 4 实验测试与分析

基于双模糊自适应滑模控制算法的 SCARA 机器人的实际控制架构如图 3 所示。利用 MATLAB 进行仿真实验, 其动力学模型为:

SCARA 机器人的物理参数如下:

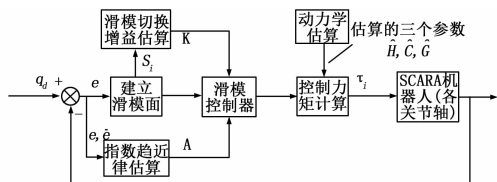


图 3 系统控制框图

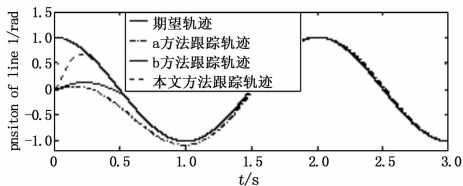
$m_1 = 15 \text{ kg}, m_2 = 12 \text{ kg}, m_3 = 3 \text{ kg}, m_4 = 3 \text{ kg}, l_1 = 0.5 \text{ m},$   
 $l_2 = 0.4 \text{ m}, r = 0.2 \text{ m}, g = 9.8 \text{ m/s}^2$

期望的跟踪轨迹:  $q_{1d}(t) = q_{2d}(t) = q_{4d}(t) = \cos(\pi t) q_{3d}(t) = \sin(\pi t)$

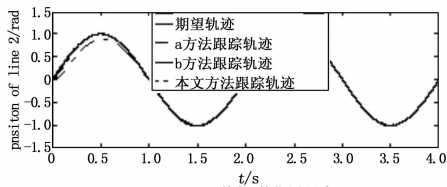
初始条件为:  $\mathbf{q}(0) = [0, 0.5, 0.5, 0]^T, \dot{\mathbf{q}}(0) = [0, 0, 0, 0]^T$

控制参数为:  $\alpha = 5, \beta = 1, \lambda = 1.9, k = 10, h = 7, a = 0.2, b = 5.$

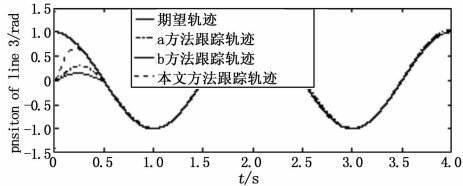
本文以 SCARA 机器人为研究对象, 通过 MATLAB 分别对 3 种算法进行了仿真与对比试验: 1) 含指数趋近律的滑模控制算法; 2) 模糊自适应与滑模控制器相结合的算法; 3) 文中算法。



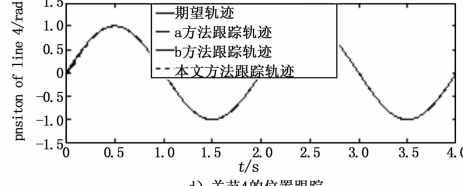
a) 关节1的位置跟踪



b) 关节2的位置跟踪



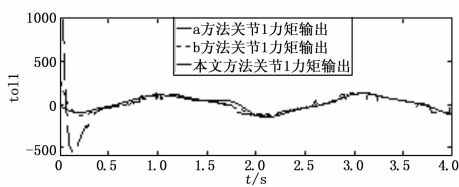
c) 关节3的位置跟踪



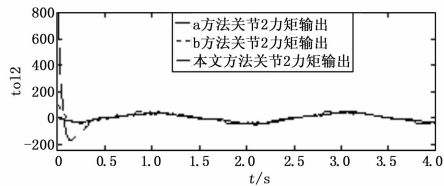
d) 关节4的位置跟踪

图 4 位置跟踪

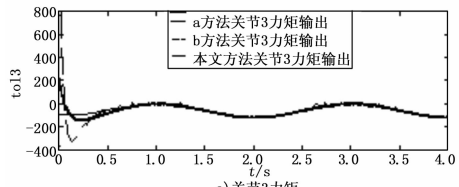
仿真结果如图 4~6 所示, 由图 4 可以看出, 采用模糊自适应与含指数趋近律的滑模控制器相结合的算法, 位置跟踪精度优于含指数趋近律的滑模控制算法。图 5 表明, 与采用带指数趋近律滑模控制算法的力矩输出存在明显的抖振现象相比, 采用模糊自适应与含指数趋近律的滑模控制器相结合算法力矩输出消除了抖振。图 5 和图 6 表明, 采用模糊自适应与含指数趋近律的滑模控制器相结合的算法, 输出存在明显的大力矩和



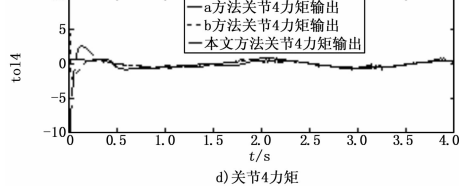
a) 关节1力矩



b) 关节2力矩

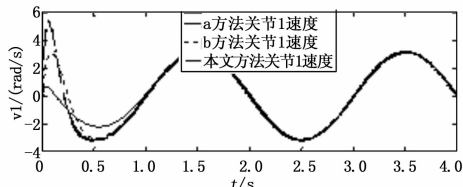


c) 关节3力矩

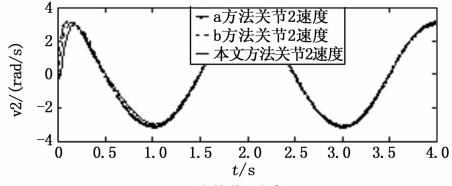


d) 关节4力矩

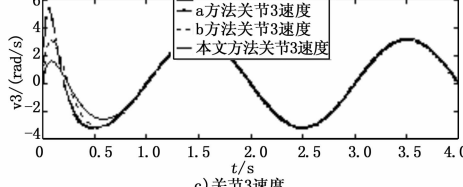
图 5 关节力矩计算



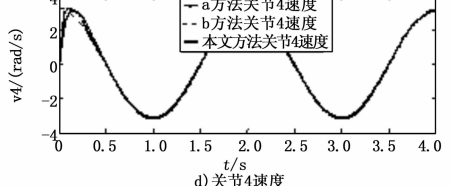
a) 关节1速度



b) 关节2速度



c) 关节3速度



d) 关节4速度

图 6 关节速度

### 3 试验结论

系统调试完成后, 在某型号发动机地面试验中进行了验证, 选取了 250 kg/min 的流量计测量参数 Wf250s 与燃油进口压力 Pfin 随发动机转速变化的数据。数据回放曲线如图 5 所示, 从图示波形来看:

- 1) 整套系统控制方式简单高效, 快速准确;
- 2) 系统可以实现发动机各个状态的稳定控制及参数测量;
- 3) 发动机从起动到最大状态, 测量参数波形稳定, 无振荡, 随着发动机状态改变, 波形随动性较好, 抗干扰能力强;

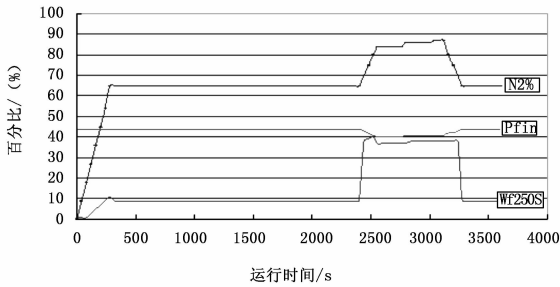


图 5 数据回放曲线

(上接第 1528 页)

速度跳变问题, 与它相比采用双模糊自适应滑模控制算法的初始力矩和速度得到了平滑, 大力矩和速度跳变问题得到了有效地解决。

### 5 结论

本文以 SCARA 机器人为研究对象, 进行了双模糊自适应滑模动力学控制策略的设计, 并通过 MATLAB 分别对 3 种算法进行了仿真与对比试验。

1) 无需确定被控对象的具体数学模型; 具有强鲁棒性、高跟踪精度。采用基于计算力矩法的滑模方法, 保证控制中的强鲁棒性; 引入指数趋近律, 消除滑模控制中的抖振问题。

2) 采用一个自适应模糊控制器, 根据滑模到达条件对滑模切换增益进行估算, 增强其对不确定性因素的适应能力, 消除在滑模控制中输出力矩的抖振现象。

3) 采用另一个模糊自适应控制器对指数趋近律的系数进行修正, 改善了由于大范围的初始位姿偏差而引起的大力矩和速度跳变问题。

#### 参考文献:

- [1] Le T D, Kang H J, Ro Y S. Robot manipulator modeling in Matlab Simmechanics with PD control and online Gravity compensation [A]. IFOST 2010 Proceedings [C]. 2010: 446 - 449.
- [2] Luca A D, Flacco F. A PD-type Regulator with Exact Gravity Cancellation for Robots with Flexible Joints [A]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. 2011: 317 - 322.
- [3] 霍伟. 机器人动力学与控制 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [4] Zhu M C, Li Y C. Decentralized adaptive fuzzy sliding mode control for reconfigurable modular manipulators [J]. International Journal

of Robust and Nonlinear Control, 2010, 20 (4): 472.

各型号发动机试验数据经设计部门验证考核, 与发动机实际性能吻合度较高, 说明该套系统控制方法有效, 获得的数据真实可靠, 达到了设计部门的使用需求, 可以应用于发动机地面试验。

### 4 结束语

基于 PLC 的燃油控制系统自 2011 年投入使用以来, 一直运行稳定, 目前已实现 3 年无故障运行。该系统功能完善, 并可根据实际需求对控制程序和上位机监控界面进行更改及调整, 较好的解决了远程监控燃油系统各类参数的问题, 具有较高的应用价值。整套系统与服务器上数据采集系统的数据交互, 更使得整套系统的信息化水平进一步提高。

#### 参考文献:

- [1] 中国航空工业集团公司, 新航空概论 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.
- [2] 刘帅, 纪志成. 基于 S7-400 的脱盐水综合控制系统设计 [J]. 测控技术, 2013, 32 (9): 60 - 63.
- [3] 孙朝辉, 乔黎, 等. 飞机附件液压泵加载测控系统设计 [J]. 测控技术, 2013, 32 (9): 97 - 99.
- [5] Chang M K, Lin S Y, Yuan T H. Tracking control of a 3-DOF rehabilitation robot actuated by pneumatic muscle actualors using adaptive self-organising fuzzy sliding mode control [J]. International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 2011, 10 (1): 65.
- [6] Charles J. Fallaha, Maarouf Saad, Hadi Youssef Kanaan, Kamal Al-Haddad. Sliding-Mode Robot Control With Exponential Reaching Law [J]. IEEE Transactions on industrial Electronics, 2011: 600 - 610.
- [7] Kuo T C, Hong B W, Huang Y J, et al. Adaptive Fuzzy Controller Design for Robotic Manipulators with Sliding Mode Control [A]. IEEE World Congress on Computational Intelligence [C]. 2008: 581 - 586.
- [8] Bao G J, Zhang Q F, Lu J Y, et al. Sliding-mode Position Control of Robot Joint Based on Self-adaptive Parameters Adjusting [A]. Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics [C]. 2010: 478 - 483.
- [9] 张金萍, 刘阔, 林剑锋, 等. 挖掘机的 4 自由度自适应模糊滑模控制 [J]. 机械工程学报, 2010, 46 (21): 87 - 94.
- [10] Hai-Jun Rong. Indirect Adaptive Fuzzy-Neural Control of Robot Manipulator [A]. 2012 IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communications [C]. 2012: 1776 - 1781.
- [11] 熊有伦. 机器人技术基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1996.
- [12] 蔡自兴. 机器人学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [13] Wang L X. A Course in Fuzzy Systems and Control [M]. EnglewoodCliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [14] 黄用华, 廖启征, 魏世民, 等. 前轮驱动自行车机器人定车运动的鲁棒控制实现 [J]. 计算机测量与控制, 2012 (6): 1535 - 1539.