

高精度电液系统的模糊滑模控制仿真研究

孟珺遐¹, 王渝¹, 王西彬²

(1. 北京理工大学信息科学技术学院 北京 海淀区 100081; 2. 北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 海淀区 100081)

【摘要】结合模糊逻辑和滑模理论,对带有大转动惯量负载的电液系统实现了高精度的控制。该控制器在系统状态到达滑模面时由模糊逻辑求出等效控制量,有效地削弱了抖振、抑制了外部干扰。为了在没有专家经验时,设计出性能良好的模糊控制器,采用遗传算法优化隶属函数和控制规则。在MATLAB中的仿真结果表明,所设计的控制器表现出良好的性能,满足了系统控制指标的要求。

关键词 抖振; 电液系统; 模糊滑模控制; 遗传算法; 仿真

中图分类号 TN273+.3

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.03.015

Simulation of Fuzzy Sliding Mode Controller in High Precise Electro-Hydraulic System

MENG Jun-xia¹, WANG Yu¹, and WANG Xi-bin²

(1. School of Information Science & Technology, Beijing Institute of Technology Haidian Beijing 100081;

2. School of Mechanical & Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology Haidian Beijing 100081)

Abstract Fuzzy logic and sliding mode theory are applied to control a nonlinear, complex electro-hydraulic system with large moment of inertia of load. Fuzzy logic is used to obtain equivalent control signal after system states reaching sliding manifold. As a result, chattering caused by switching action is effectively weakened, and external disturbance is restrained also. In order to design a good fuzzy controller without professional experience, membership functions of then-part and control rules are optimized by means of genetic algorithm simultaneously. Simulation result shows the proposed controller exhibits excellent performance and satisfies control demand of the system adequately.

Key words chattering; electro-hydraulic system; fuzzy sliding mode control; genetic algorithm; simulation

电液系统中普遍存在系统参数摄动、外部干扰力矩和多种非线性因素的影响,以及系统结构复杂而产生的建立精确数学模型的困难等,使获得快速高精度响应的难度增加。仅在系统标称数学模型的基础上,采用传统控制方式难以满足控制要求。滑模变结构是一种对系统模型变化、参数摄动和外部干扰不敏感的非线性控制方法,在电液系统中已经获得一定的应用^[1-2]。目前,抖振是滑模控制实际用的主要障碍,产生抖振的两个主要原因是:(1)被控对象中的未建模动态导致滑模面附近的小幅值振荡;(2)非理想的开关作用产生高频振荡^[3]。平衡点附近的抖振降低了控制的精度,增加了控制能量的消耗,使执行机构的磨损加剧。另外,抖振也很容易使系统产生振荡或者不稳定,损害控制器部件^[4]。

本文提出一种模糊滑模控制器(fuzzy sliding mode controller, FSMC),被控系统的动态品质可由所设计的滑模面来规定,利用模糊逻辑产生等效控制削弱抖振及抑制扰动,并采用遗传算法(genetic algorithm, GA)优化隶属函数和控制规则,提高控制性能^[5]。

1 被控系统的状态方程

取被控对象输出转角 α 和转动的角速度 $\dot{\alpha}$ 为状态变量 x_1 和 x_2 。为了满足系统的性能指标,使阶跃输入响应的稳态误差为0,滑动模态应包含指令信号 u_r 与转角 α 之差的积分,即:

$$\dot{x}_0 = u_r - \alpha$$

得到被控系统的状态空间方程为:

$$\dot{x} = Ax + Bu + DT_f + Eu_r =$$

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -228.787 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.730 \times 10^4 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.857 \times 10^{-3} \end{bmatrix} T_f + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_r$$

$$y = [0 \quad 1 \quad 0]x$$

式中 T_f 为耳轴摩擦力矩, 各种随机干扰都通过该力矩施加于系统^[6]。

2 设计模糊滑模控制器

2.1 控制原理

系统方程的可控性矩阵满秩, 是完全可控的。采用极点配置法设计滑动模面, 根据控制性能要求, 选择期望极点为 $-9.6 \pm 4.4j$ 。采用线性滑模面, 则有:

$$s = -0.006 \ 445x_0 + 0.001 \ 110x_1 + 0.000 \ 060x_2$$

在变结构控制中, 如果滑模面不是全局性的, 则可将过渡过程分为两个阶段

(1) 第一阶段是设计不连续的控制律, 使系统状态从任意的初始位置到达滑模面, 该阶段的控制称为到达控制律, 用 u_h 表示^[7]。若采用部分状态的比例切换控制, 则 u_h 的形式为:

$$u_h = \sum_{i=1}^2 \varphi_i x_i + \varphi_0$$

式中 $\varphi_i = \begin{cases} \alpha_i & x_i s > 0 \\ \beta_i & x_i s < 0 \end{cases}; i = 1, 2; \varphi_0$ 用于克服外部

扰动和未建模动态的影响。根据广义滑模条件 $s\dot{s} < 0$, 同时考虑系统参数摄动范围为 $\pm 10\%$, 可计算出:

$$\varphi_1 = \begin{cases} -0.006 \ 898 & x_1 s > 0 \\ -0.005 \ 644 & x_1 s < 0 \end{cases}$$

$$\varphi_2 = \begin{cases} 0.009 \ 847 & x_2 s > 0 \\ 0.014 \ 973 & x_2 s < 0 \end{cases}$$

$$\varphi_0 = \begin{cases} 0.005 \ 644u_r - 1.186 \ 65 \times 10^{-5} \operatorname{sgn}(s) & u_r s > 0 \\ 0.006 \ 898u_r - 1.186 \ 65 \times 10^{-5} \operatorname{sgn}(s) & u_r s < 0 \end{cases}$$

(2) 第二阶段是状态到达滑模面后, 维持状态在其上滑动并最终到达平衡点。该阶段的控制称为等效控制, 用 u_e 表示, 并由模糊逻辑计算具体值^[8]。整个过程的控制量可表示为:

$$u = \lambda u_h + (1 - \lambda)u_e$$

式中 λ 是切换因子, 定义为:

$$\lambda = \begin{cases} 1 & |s| \geq s_0 \\ 0 & |s| < s_0 \end{cases}$$

s_0 为预先定义的边界层。系统的控制原理如图1所示。

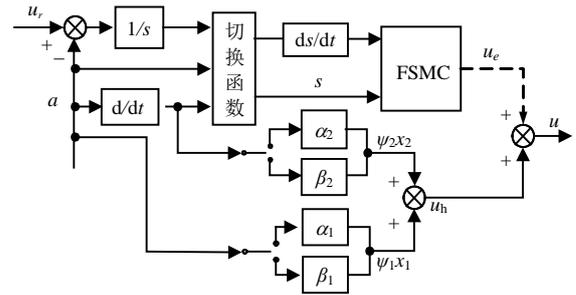


图1 系统控制原理示意图

2.2 优化隶属函数和控制规则

FSMC 不同于常规的 FLC, 它的输入始终是二维的, 即 s 和 \dot{s} ^[9]。 s 和 \dot{s} 的语言值分别为:

$$s = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$$

$$\dot{s} = \{NB, NS, ZE, PS, PB\}$$

式中 “NB”、“NM”、“NS”、“ZE”、“PS”、“PM”、“PB” 分别表示“负大”、“负中”、“负小”、“零”、“正小”、“正中”、“正大”。输入变量的论域设定为 $[-1, 1]$, s 和 \dot{s} 的量化因子分别为 1×10^6 和 1×10^3 。在模糊控制过程中, 控制作用对语言变量值隶属函数的形状并不敏感, 只是对隶属函数的范围有一定的敏感性^[10]。不失一般性, 规定前件的隶属函数如图2所示。

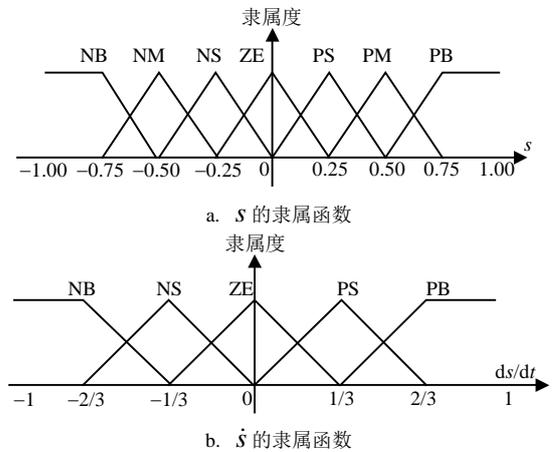


图2 输入变量的隶属函数

模糊控制器的输出也有7个语言值, 取值及其意义同 s 。输出变量的论域取为 $[-1, 1]$, 比例因子为 1×10^{-3} 。控制规则的形式为:

Rule1: IF s is NB, \dot{s} is NB, then u_f is U_1 ;

Rule2: IF s is NB, \dot{s} is NS, then u_f is U_2 ;

⋮

Rule n : IF s is PB, \dot{s} is PB, then u_f is U_n 。

规则中, u_f 乘以相应的比例因子作为等效控制量 u_e 。本文中 $n=35$, n 为控制规则的数目。仅对后件的隶属函数和控制规则作优化是一种简单、有效

的方法^[11]。

2.2.1 个体的编码

输出变量取三角形和梯形隶属函数，并且认为同一变量的某一隶属函数的顶点位于相邻隶属函数顶点所确定的区域内，并规定语言值“ZE”的顶点在纵轴上^[12]。优化时，只需要选择6个语言值的顶点位置，即语言值“NB”和“PB”的梯形隶属函数的右顶点与左顶点(其隶属函数的左、右顶点已经确定，分别为-1和1)，以及语言值“NM”、“NS”、“PS”、“PM”的三角形隶属函数的顶点，就能完全确定后件的隶属函数。遗传算法采用实数编码方式，为了保证数据在交叉、变异操作后的有效性，限定各隶属函数顶点的取值范围为：“NB”为[-1,-2/3]、“NM”为[-2/3,-1/3]、“NS”为[-1/3,0]、“PS”为[0,1/3]、“PM”为[1/3,2/3]、“PB”为[2/3,1]。对于每一条控制规则，在1~7之间随机选择某个整数作为输出值，1~7代表的语言值如表1所示。为了保证控制规则描述的正确性，在交叉和变异后将样本四舍五入成最接近的整数再生成控制规则。综上所述，需要优化的参数共为40个，每一个随机样本构成GA的一个个体，代表一种模糊控制方案，多个个体组成一代种群，再使用复制、交叉和变异算子进化成下一代种群。

表1 数字代表的语言值

1	2	3	4	5	6	7
NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB

3.2.2 确定评价函数

能否定义一个适合的性能评价指标，对优化结果有着重要影响。定义优化指标为：

$$J = \min \left(w \cdot \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |s(kt_s)| + v \cdot \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u(kt_s)^2} \right)$$

式中 N 为采样次数； t_s 为采样时间； w 、 v 为权值。优化指标由两项组成；第一项的作用是使抖振的平均幅值最小；第二项为控制量的RMS(root mean square)，作用是使控制输入的能量最小^[13]。权值 $w = kt_s$ ，即随着控制时间的增长，对削弱抖振的要求不断提高。 v 取常数，为0.2。取优化指标的倒数作为个体的适应度函数 $F = 1/(J + \epsilon_0)$ ， ϵ_0 是一个很小的正数，用以避免除数为零。由于优化的参数较多，为了提高运算效率，取每代的个体数为20，遗传代数数为500代。变异概率 P_m 在[0.005,0.010]间取值，如取 $P_m = 0.01$ ；交叉概率 P_c 在[0.75,0.95]间取值，如取 $P_c = 0.9$ 。

3 仿真实验

仿真实验在MATLAB/SIMULINK提供的平台上进行。GA优化程序用m文件编制，运行后得到的模糊输出变量的隶属函数和控制规则如图3和表2所示。图4为优化指标 J 随遗传代数的变化曲线。用频率为1 Hz，幅值为58.5 N·m的正弦信号模拟系统的外部干扰 T_f 。控制系统的仿真模型如图5所示，仿真步长为0.001 s。

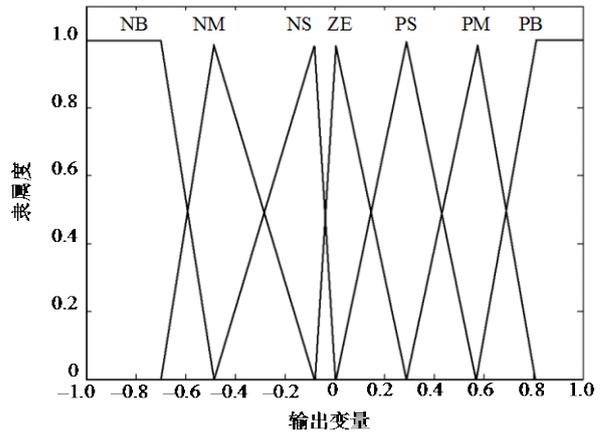


图3 输出变量的隶属函数

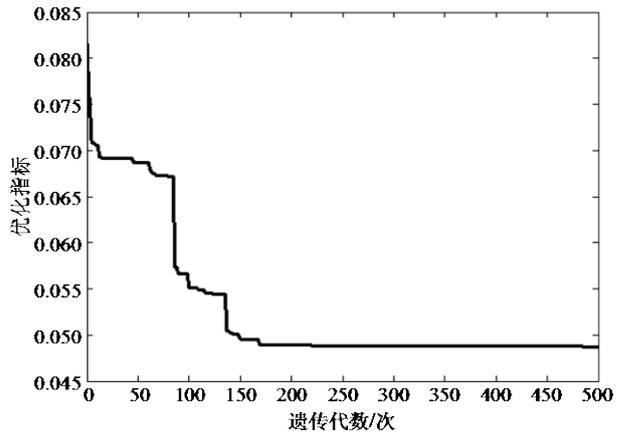


图4 指标函数 J 随遗传代数的变化曲线

表2 控制规则表

	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PB	PS	ZE	NM	NM	NM	NB	NB

当给定值是单位阶跃函数或斜率为0.1 t的斜坡函数，仅采用比例切换控制时，系统的响应结果如图6所示。为验证控制器对系统不确定性的鲁棒性，考虑了一阶未建模动态，其时间常数取为0.03 s。因

为建模时, 忽略了液压放大器的动力学特性, 它的时间常数在0.01~0.02 s之间变化, 此外还包括一些传感器和快变器件的动态情况。加入未建模动态后

的切换函数分别见图6f和图7i。图中, MF为Matlab函数; c_0 、 c_1 、 c_2 为线性滑模面的系数; K 表示放大倍数; 虚线框内为被控对象仿真模型。

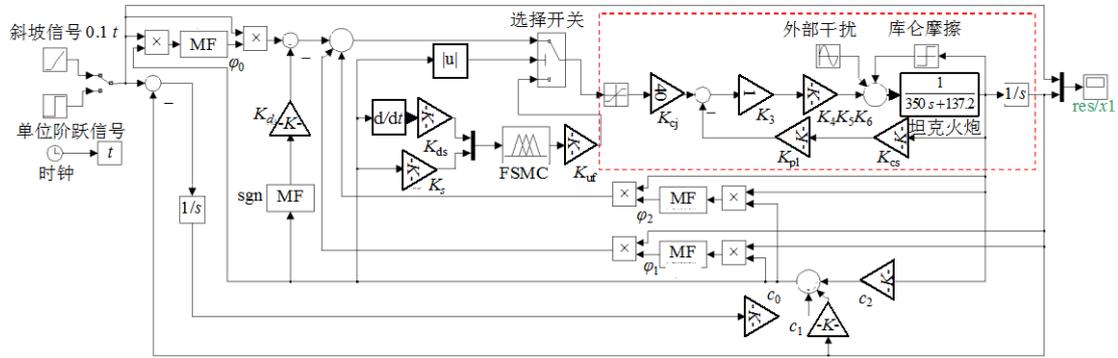


图5 控制系统的仿真模型

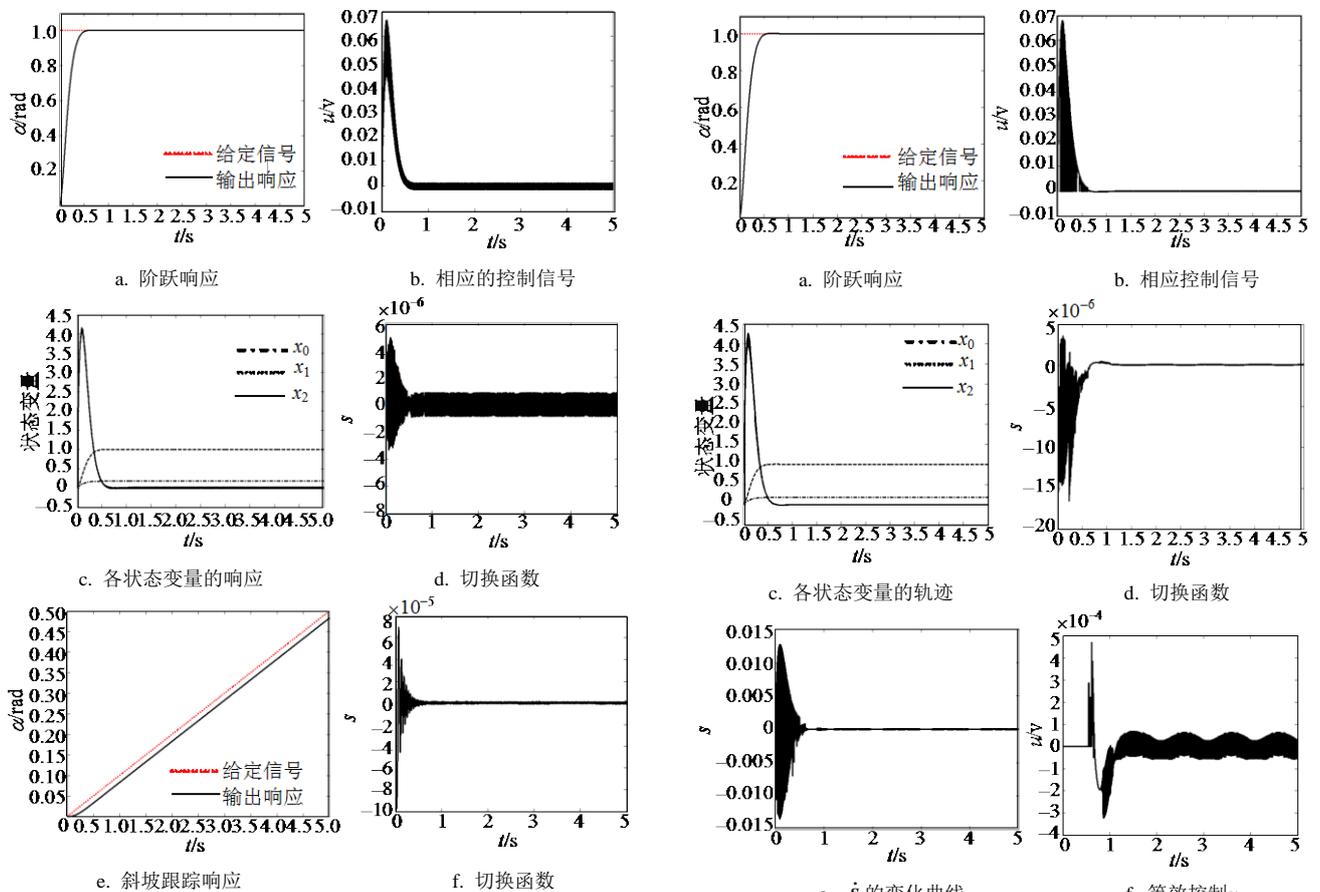
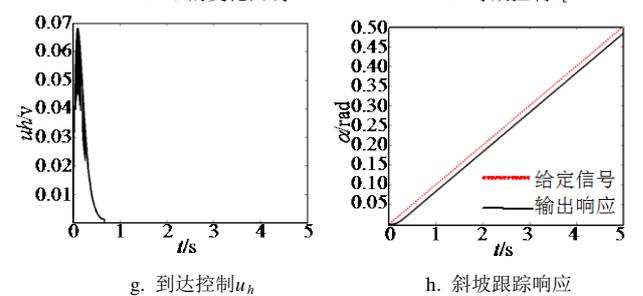
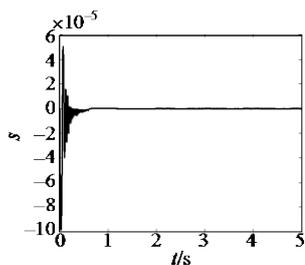


图6 比例切换控制时的响应

从图6a可知, 系统阶跃响应基本做到了快速无超调。当误差 $<2\%$ 时, 调节时间约为0.45 s, 超调只有0.19%, 在 >0.85 s后稳态误差均小于 10^{-3} 的数量级, 斜坡输入最大跟踪误差为0.017 3 rad。从图6b和图6d可知, 滑模面和控制信号均有较大的抖振。采用FSMC控制后, 得到的实验结果如图7所示。





i. 切换函数

图7 FSMC控制时的响应

4 结论

首先,由图7b可知,在系统状态到达滑模面时,采用FSMC能够大大削弱控制信号的抖振,减小控制能量的消耗;从图7c、7d和7i可看出状态 x_2 和滑模面 s 的抖振幅值明显减小,FSMC的滑模面几乎无抖动。削弱抖振有利于系统平稳运行,可有效避免激发系统中的未建模动态。其次,在系统的外部干扰和参数摄动未知,很难得到精确 u_e 的条件下,采用模糊控制能很好地抑制扰动。在FSMC设计中,必须注意确保系统状态能够到达滑模面,并保持在该平面上滑动到平衡点。由于计算 u_h 时考虑了参数摄动和扰动,因此系统在到达阶段也有一定的鲁棒性。另外,FSMC的阶跃响应和斜坡跟踪的输出曲线几乎不变,可知加入模糊控制器对系统动态品质没有影响。最后,在仿真实验时,对边界层厚度 λ 和优化指标中的加权系数 ν 进行了多次调整,直到达到满意的效果。由前文可知,在用GA优化模糊控制器的隶属函数时,在一定程度上限制了语言值隶属函数顶点的取值范围,不太合理。在后续的研究中,将做进一步的探讨。

参 考 文 献

[1] UTKIN V I. Variable structure systems with sliding modes[J]. IEEE Transaction on Automatic Control, 1977, 22(2): 212-222.

[2] HONGMING C, RENN J C, SU J P. Sliding mode control with varying boundary layers for an electro-hydraulic position servo system[J]. International Advanced Manufacture Technology, 2005, 26(26): 117-123.

[3] YOUNG K D, UTKIN V I, OZGUNER U. A control engineering's guide to sliding mode control[J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 1999, 7(3): 328-342.

[4] BOIKO I, FRIDMAN L, IRIARTE R. Analysis of chattering in continuous sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(9): 1442-1446.

[5] 付 华, 杜 维. 利用遗传算法优化模糊控制器综述[J]. 石油化工自动化, 2001, 24(1): 24-27.

FU Hua, DU Wei. Survey on optimistic fuzzy logic controller based on genetic algorithm[J]. Automation in Petro-chemical Industry, 2001, 24(1): 24-27.

[6] 孙常胜, 刘 妃, 陈 杰, 等. 坦克稳定器滑动模态变结构控制[J]. 计算机仿真, 2004, 21(1): 22-25.

SUN Chang-sheng, LIU Fei, CHEN Jie, et al. Design of tanker's stabilizer with sliding mode variable structure control[J]. Computer Simulation, 2004, 21(1): 22-25.

[7] GHALIA M B, ALOUANI A T. Sliding mode control synthesis using fuzzy logic[C]//Proceedings of the 1995 American Control Conference. Seattle, WA, USA: American Autom Control Council, 1995: 1528-1532.

[8] CHOI S B, KIM J S. A fuzzy-sliding mode controller for robust tracking of robotic manipulators[J]. Mechatronics, 1997, 7(2): 199-216.

[9] 孙仁云, 李 治. 模糊软切换控制的汽车SBC研究[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(2): 313-316.

SUN Ren-yun, LI Zhi. Study of automobile SBC on fuzzy-soft switch control[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(2): 313-316.

[10] 李友善, 李 军. 模糊控制理论及其在过程控制中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

LI You-shan, LI Jun. Fuzzy logic theory and its application on process control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993.

[11] LIN S C, CHEN Y Y. Design of self-learning fuzzy sliding mode controllers based on genetic algorithms[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 86(2): 139-153.

[12] GO S J, LEE M C. Fuzzy-sliding mode control with the self tuning fuzzy inference based on genetic algorithm[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2000: 2124-2129.

[13] KHARAAJOO M J, KANGHARLOO K, ROUDSARI F. H. Fuzzy sliding mode control design based on genetic algorithms: application to building structures[C]//2004 IEEE International Conference on Industrial Technology. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 27-31.

编辑 蒋 晓