

机器人关节滑模变结构的位置控制*

张庆丰, 高峰, 王 燕, 杨庆华*

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为了使机器人关节有良好的静态特性,并具有一定的抗干扰能力,提出了一种由力矩电机和谐波减速机组成的机器人关节,采用指数趋近律的滑模变结构和模糊自适应滑模控制对机器人关节进行了位置控制,通过对机器人单关节 Simulink 建模仿真比较,结果表明,模糊自适应滑模控制大大减轻了指数趋近律滑模控制的抖振问题,其稳态精度达到了 9×10^{-5} rad;且与 PID 控制相比较,其响应速度快;在受高斯扰动时,采用模糊自适应滑模控制的关节发生的角度偏差整整比 PID 控制小 10 倍。仿真结果表明,滑模控制在机器人关节控制中精度高,响应速度快,具有一定的鲁棒性能。

关键词: 滑模变结构;模糊;抖振;位置控制

中图分类号:TH122;TH39;TP24

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)10-0011-05

Position control of robot joints based on sliding mode variable structure

ZHANG Qing-feng, GAO Feng, WANG Yan, YANG Qing-hua

(The MOE Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to make robot joints have good static characteristics and a certain anti-interference ability, the robot joint composed of a torque motor and a harmonics reducer was proposed. The sliding mode variable structure based on index reaching law and fuzzy adaptive sliding mode was used to position control. According to the Simulink simulation and comparison, the fuzzy adaptive sliding mode substantially was applied to eliminate chattering on the robot joint, the steady-state accuracy reached 9×10^{-5} rad. Compared with the PID control, it had effect of fast response, when interfered by the signal of Gaussian, joint controlled by fuzzy adaptive sliding model had angle deviation which is 10 times smaller than that controlled by PID control. Simulation results show that the sliding mode control of robot joint controlled by the sliding mode control has the effect of high precision, fast response, a certain degree of robust performance.

Key words: sliding mode variable structure; fuzzy; chattering; position control

0 引 言

滑模变结构控制是 20 世纪 50 年代由前苏联学者 Emelyano 提出的变结构控制,它以其独特的优点,为不确定性系统提供了一种很有前途的系统控制综合方法^[1]。滑模控制对系统参数及扰动的变化反应迟钝,具有很强的鲁棒性。机器人关节是一个复杂的多输入/多输出的非线性系统,受负载变化以及各种不可预

见的外部干扰和不确定因素的影响^[2-3]。所以机器人控制是近年来滑模变结构控制理论的主要应用环境之一。

梅红等人提出了一种非线性滑模面和一种新的双幂次趋近律^[4],使得系统状态在趋近滑模面的全过程中,能够拥有较高的速度,并消除了传统滑模变结构控制所固有的抖振。经仿真机器人的路径跟踪控制,结果表明,系统具有较强的鲁棒性和较快的收敛速度。王海宁等人采用了后滤波器用于消除对象输出的噪声

收稿日期:2010-03-24

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2009AA04Z209);浙江省基金资助项目(Y1080485)

作者简介:张庆丰(1984-),男,浙江余姚人,硕士研究生,主要从事机器人关节驱动控制方面的研究. E-mail: kingfun888@sohu.com

通信联系人:杨庆华,男,教授,博士生导师. E-mail: robot@zjut.edu.cn

干扰^[5],有效削弱了单纯滑模变结构控制系统的抖振,实现了机器人关节的高精度跟踪。冯旭刚针对不确定机器人轨迹跟踪控制^[6],提出了基于模糊滑模方法下的神经网络自适应控制,该控制律能保证误差的快速收敛性及对参数不确定性和外部扰动的鲁棒性。

针对传统滑模变结构的抖阵问题,本研究采用模糊自适应滑模变结构对机器人关节进行位置控制,仿真表明,其减轻了常规滑模控制中的抖振,有着良好的静态性能,而且有一定的抗干扰能力。

1 关节结构及建模

关节建模主要就是对直流力矩电机的建模。

1.1 关节结构

如图 1 所示,机械人关节由直流力矩电机、谐波减速器、电机固定架、主轴等组成。采用直流力矩电机加谐波减速器的传动方式。谐波减速器中的刚轮通过螺栓螺母固定在电机固定架上,而谐波发生器通过紧钉螺钉与电机转子相连,柔轮通过内六角螺栓与法兰、主轴相连。当电机转子转动,转子带动谐波发生器的柔轮运动,经过 1/80 的减速比带动法兰和主轴转动,产生力矩。此关节力矩电机具有结构简单、体积小、重量轻的特点。

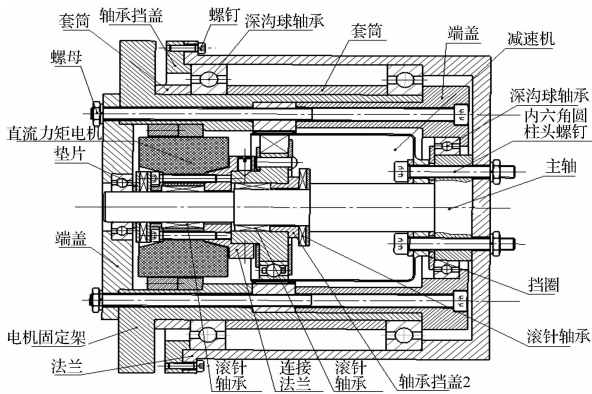


图 1 机器人关节的机械结构

1.2 关节建模

直流力矩电机的电磁转矩为:

$$T_m = K_m I_m \quad (1)$$

式中 e_k —电磁转矩; I_m —电枢电流; K_m —转矩常数。

输出转矩平衡方程式为:

$$T_m = T_L + T_j + F\omega \quad (2)$$

$$T_j = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中 T_m —负载转矩; T_L —负载转矩; T_j —动态转矩; ω —电机的角速度; F —粘滞摩擦系数; J —电机输出轴

上的转动惯量。

电枢电压平衡方程:

$$L_m \frac{dI_m}{dt} + I_m R_m + U_e - U_d = 0 \quad (4)$$

式中 L_m —电动机绕组电感; I_m —电枢电流; R_m —电动机绕组电阻; U_e —感应电动势; U_d —电枢两端的电压。

且:

$$U_e = C_e \Phi n = k_e \omega \quad (5)$$

式中 U_e —感应电动势; C_e, k_e —反电动势系数; Φ —磁通; ω —电机的角速度。

根据上面的推导,经拉氏变换,以电机的电枢电压为输入,以电机的角速度为输出,忽略扰动力矩,且总粘滞摩擦系数 F 很小^[7-8],通常可以忽略,本研究建立了直流力矩电机的模型框图,如图 2 所示。

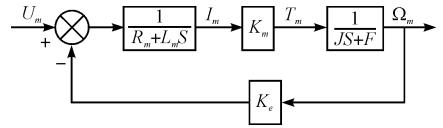


图 2 直流力矩电机模型图

$$\frac{\Omega_m(s)}{U_m(s)} = \frac{1/k_e}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (6)$$

式中 τ_m —机电时间常数, $\tau_e = \frac{R_m J}{k_e k_m}$; τ_e —电磁时间常数, $\tau_e = \frac{L_m}{R_m}$ 。

2 基于指数趋近律的滑模控制

2.1 建模

为了提高关节的响应速度,降低抖振,笔者建立了基于指数趋近律的滑模控制。

不考虑电枢电流发生变化在电枢回路中将产生电抗压降。设定状态变量为 e (位置偏差), \dot{e} (位置偏差的导数),则:

$$e = r - \theta, \dot{e} = \dot{r} - \dot{\theta} = -\omega;$$

$$x_1 = e, x_2 = \dot{e} = -\omega。$$

可得系统的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_m K_e}{J R_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_m}{J R_m} \end{bmatrix} u_i + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} T_L \quad (7)$$

取二阶线性滑模面:

$$s = c x_1 + x_2 \quad (8)$$

式中 c —滑模常数。

根据高为炳提出的指数趋近率:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks = c \dot{x}_1 + \dot{x}_2 \quad (9)$$

式中 ε, k —滑模常数。

定义李雅普诺夫函数为:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (10)$$

系统稳定,因此将趋近律式(8)代入可以得到:

$$\dot{V} = s \dot{s} = s(-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks) \quad (11)$$

显然, $\dot{V} < 0$, 所以基于指数趋近律的滑模控制律是稳定的。

把式(7)代入式(9)可得:

$$-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks = c \dot{x}_1 + \frac{-K_m K_\varepsilon}{JR_m} x_2 + \frac{-K_m}{JR_m} u_i + \frac{1}{J} T_L \quad (12)$$

可得滑模控制输出为:

$$u_i = \frac{JR_m}{K_m} \left[\left(c - \frac{K_m K_\varepsilon}{JR_m} \right) x_2 + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks + \frac{1}{J} T_L \right] \quad (13)$$

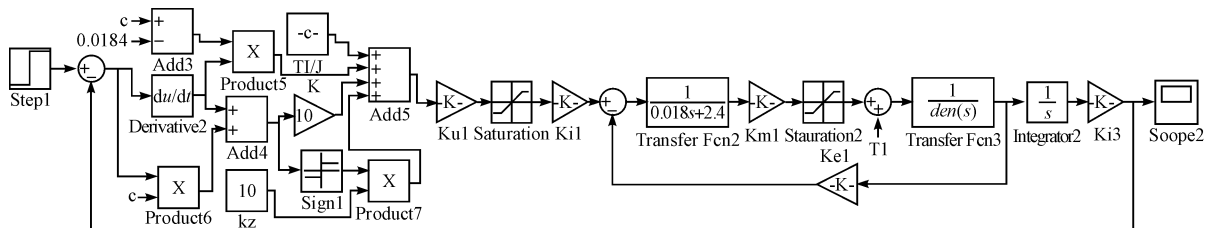


图 3 滑模控制 Simulink 建模

取滑模常数 $c = 30, k = 10$, 分别取 $\varepsilon = 10, 30$ 。滑模阶跃响应如图 4、图 5 所示, 对比知, ε 越大, 系统阶跃越快, 但抖振越大; 为了保证快速趋近的同时削弱抖振, 应在增加 k 的同时减小 ε ^[9]。

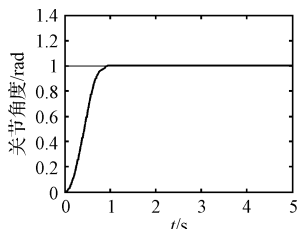


图 4 $\varepsilon = 10$ 滑模阶跃响应

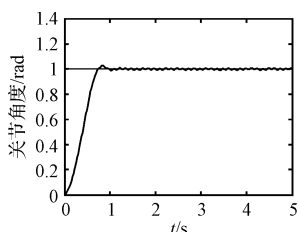


图 5 $\varepsilon = 30$ 滑模阶跃响应

抖振会导致控制器输出的能量大部分做无用功,

2.2 仿真

在本研究中,电机选择北京勇光高特公司生产的 LYX 系列稀土永磁直流力矩电动机,具体型号为 70L-YX01,具体参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数名称	符号	单位	数值
堵转转矩	T_m	N · m	0.5
堵转电流	I_m	A	3.8
电枢电阻	R_m	Ω	2.4
电枢电感	L_m	H	16×10^{-3}
额定电压	U_m	V	27
最大空载转速	n_0	r · min ⁻¹	1 500
转矩常数	K_m	N · m · A ⁻¹	0.13
转动惯量	J	kg · m ²	0.006 2
反电动势系数	K_e	V · s · rad ⁻¹	0.17

设关节转动惯量 $J = 0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 则折算到电机轴上为 $0.006 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。在 Matlab 中对关节 Simulink 建模,模型主要由滑模控制模型和电机模型组成。并对滑模控制输出量和堵转转矩作了限制,如图 3 所示。

并加剧关节机构的发热^[10]。且关节电机在外部干扰作用下,需要调整 ε 值,使滑模控制输出 u 变化,从而调整关节电磁力矩,平衡关节外部干扰。因此,本研究采取模糊自适应方法来确定 ε 值,既减小系统达到滑模面的抖振,又提高系统的抗干扰能力。

3 模糊滑模自适应系统的设计

3.1 模糊滑模控制意义

模糊滑模控制是将模糊控制和传统的滑模控制相结合,并将两者的优点紧密结合起来。模糊滑模控制保持了常规模糊控制器的优点,即可以不依赖系统的模型。但是模糊滑模控制相对于常规模糊控制的变化具有两个方面的重要意义:①控制目标从跟踪误差转化为滑模函数,只要施加控制使滑模函数 S 为零,跟踪误差将渐近到达零点;②模糊滑模控制具有简化模糊控制系统结构复杂性的作用。对于滑模控制而言,模糊滑模控制的意义在于它柔化控制信号,减轻或避免了一般滑模控制的抖振现象^[11]。

3.2 模糊规则建立

分别取 s 和 \dot{s} 为输入变量, ε 为输出变量。分别采用 3 个模糊集合来表示:

$$s = \{NB, ZO, PB\}; \dot{s} = \{NB, ZO, PB\};$$

$$\varepsilon = \{NB, ZO, PB\}.$$

两个输入变量的等级范围为 $[-3, 3]$; 输出变量的等级范围为 $[-3, 3]$; $NB = \{-3, -1\}$; $ZO = \{-2, 2\}$; $PB = \{1, 3\}$ 。

根据经验和滑模控制稳定性原理 $s \dot{s} < 0$, 本研究采用以下 9 条模糊规则。如第 1 条规则: 当 s 和 \dot{s} 都为负大, 这意味着 $s \dot{s}$ 是正大, 因此取 ε 为正大, 由式 (13) 可知, 系统的滑模控制输出会得到一个大的负的变化, 以使 $s \dot{s}$ 快速减小。

模糊规则如下:

- (1) If (s is NB) and (\dot{s} is NB) then (ε is PB)
- (2) If (s is NB) and (\dot{s} is ZO) then (ε is PB)
- (3) If (s is NB) and (\dot{s} is PB) then (ε is ZO)
- (4) If (s is ZO) and (\dot{s} is ZO) then (ε is ZO)
- (5) If (s is ZO) and (\dot{s} is PB) then (ε is ZO)
- (6) If (s is ZO) and (\dot{s} is NB) then (ε is PB)
- (7) If (s is PB) and (\dot{s} is NB) then (ε is ZO)
- (8) If (s is PB) and (\dot{s} is ZO) then (ε is ZO)
- (9) If (s is PB) and (\dot{s} is PB) then (ε is NB)

模糊系统的输入和输出隶属函数如图 6、图 7 所示。

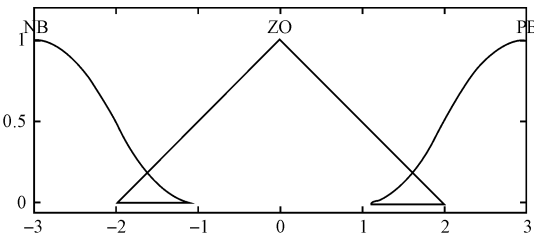


图 6 输入变量 s 和 \dot{s} 隶属度函数

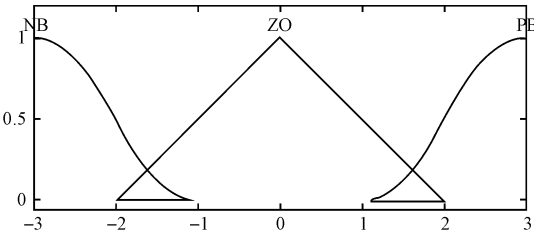


图 7 输出变量 ε 隶属度函数

输入采用的是正态分布和三角形隶属度函数, 而输出采用的是 Mamdani 方法。得到模糊输入/输出对应的关系如图 8 所示, 最后用 Simulink 建立模糊滑模控制模型如图 9 所示。

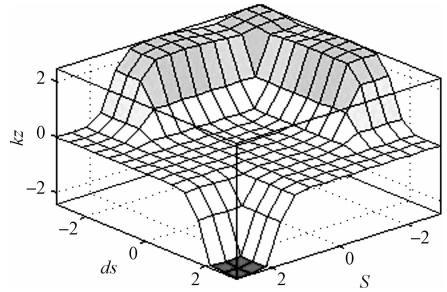


图 8 模糊输入/输出三维对应关系

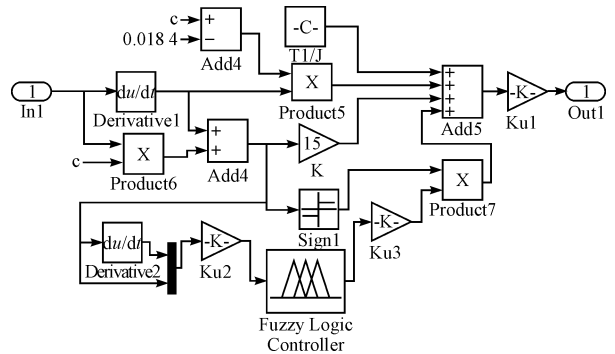


图 9 模糊滑模 Simulink 模型

指数趋近律滑模变结构控制中, 系统从初始状态以指数规律趋向于滑模面, 趋近速度从一较大值逐渐减小到零, 而当 s 接近于零时, 趋近速度是 ε , 可以保证在有限时间到达滑模面。如图 10 所示, 在将近 1 s 时, 系统以大概 $\varepsilon = 25$ 的速度 (如图 12 左图所示) 趋向于滑模面。到达滑模面之后为了减少系统抖振, ε 值趋向于零, 实现了模糊滑模对参数 ε 自适应调节^[12]。

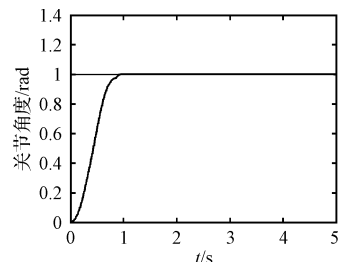


图 10 模糊滑模阶跃响应

3.3 模糊滑模建模及响应

如图 10 所示, 模糊滑模阶跃响应无超调量, 稳态精度达到了 3×10^{-5} rad。既能达到高精度, 又能对滑模参数 ε 进行在线调节, 相比指数趋近律的滑模控制, 降低了机器人关节的抖振。

3.4 PID 与模糊滑模在控制性能上的比较

在负载力矩端加上高斯函数形式的不确定干扰项:

$$E(t) = 0.5e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}}$$

其中 $b = 0.1, c = 3$, 机器人关节分别用 PID 控制和模糊自适应滑模控制, 并且用 Simulink 建立两种控制模型。如图 11 所示, 关节目标位移是转动 1 rad, 在保证无超调的情况下, 关节在滑模控制下到达稳态的时间比 PID 控制将近快 0.3 s, 且关节最大只产生了 0.005 rad 的角度偏差; 而在 PID 控制下关节最大产生了将近 0.04 rad 的角度偏差。

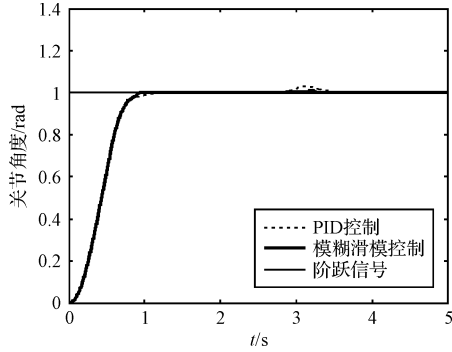


图 11 PID 与模糊滑模加干扰阶跃响应比较

如图 12 所示, 在 $t = 2.7 \sim 3.3$ s 系统受到扰动时, ε 值做高频切换, 快速调整控制输出, 产生的转矩(如图 13 所示)几乎平衡干扰力矩, 使关节角度几乎保持不变。可见模糊滑模控制下的关节系统受到负载扰动, 能对滑模参数 ε 自适应调节, 有着很好的鲁棒性^[13-14]。

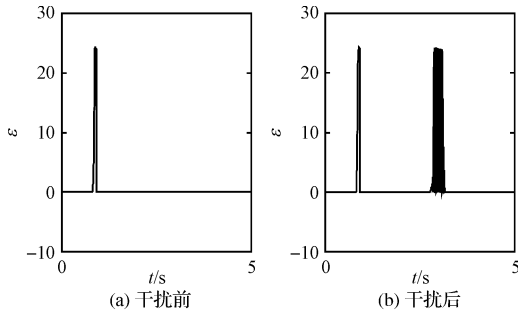


图 12 模糊滑模加干扰前后 ε 仿真

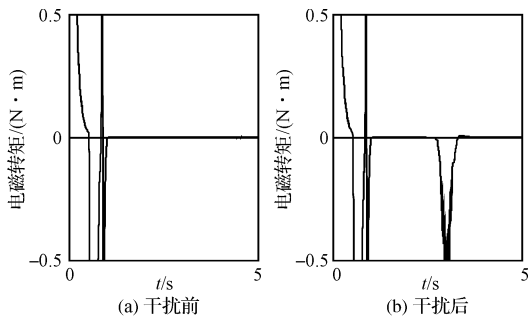


图 13 模糊滑模加干扰电磁转矩变化

而对于 PID 控制下的机器人关节, 受到干扰时, (如图 14 所示) 产生的平衡力矩不做切换作用, 且产生平衡力矩小于滑模控制产生的平衡力矩, 最终产生

的平衡力矩小于干扰力矩, 使关节角度发生明显变化。

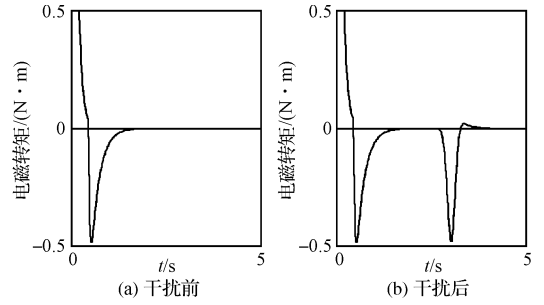


图 14 PID 控制加干扰电磁转矩变化

4 结束语

本研究建立了机器人关节数学模型, 又建立了关节的指数趋近律的滑模变结构控制模型。通过仿真分析, 其结果表明关节存在着抖振问题, 会导致关节振荡。模糊自适应滑模控制大大减轻了机器人关节控制中的抖振问题, 能根据外部干扰, 实时地调整滑模参数。与 PID 控制进行比较, 其结果表明了机器人关节滑模变结构控制不仅响应速度快, 精度高而且有着较好的鲁棒性能。

参考文献 (References):

- [1] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [2] FENG Y, BAO S. Inverse dynamics nonsingular terminal sliding control of two link flexible manipulators[J]. **International Journal of Robotics and Automation**, 2004, 19(2): 91 - 102.
- [3] 李香军, 余星火. 机械臂系统的一种自适应滑模控制方法[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(10): 2895 - 2898.
- [4] 梅红, 王勇. 快速收敛的机器人滑模变结构控制[J]. 信息与控制, 2009, 22(3): 6 - 9.
- [5] 王海宁, 张晓江. 基于滤波器的机器人滑模控制[J]. 电子工程师, 2009, 34(4): 17 - 20.
- [6] 冯旭刚. 基于模糊滑模方法的不确定机器人神经网络控制[J]. 电机与控制学报, 2007, 34(4): 12 - 16.
- [7] 邓星钟. 机电传动控制[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [8] 骆涵秀. 机电控制[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.
- [9] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [10] UTKIN V I. Sliding mode control design principles and applications to electric drives[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1993, 40(1): 23 - 26.
- [11] UTKIN V I. Control Systems of Variable Structure[M]. New York: Wiley, 1976.
- [12] HUNG Lon-chen, LIN Hung-ping, CHUNG Hung-yuan. Design of self-tuning fuzzy sliding mode control for TORA system[J]. **Expert Systems with Applications**, 2007, 32(1): 201 - 212.
- [13] 司震鹏, 曹西京, 姜小放. 4 自由度模块化机器人的设计[J]. 轻工机械, 2009(4): 39 - 42.
- [14] 汪秉权, 章正伟. 基于虚拟仿真的四足机器人行走研究[J]. 轻工机械, 2009(3): 5 - 7. [编辑: 柴福莉]