

液压挖掘机自适应模糊滑模控制的研究与仿真

刘 阔, 郭大猛, 刘 杰, 杨克石
(东北大学 机械工程及自动化学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 为了解决滑模控制中的抖振问题, 设计了自适应模糊滑模变结构控制器。为了使滑模控制的等效控制不依赖于挖掘机工作装置的精确数学模型, 引入自适应模糊控制连续逼近等效控制器, 增强对不确定性控制系统的鲁棒性, 并将其用于液压挖掘机工作装置的轨迹跟踪控制。控制规则包括等效控制、切换控制和调整控制三个部分。在 Matlab7.4/Simulink 环境下对自适应模糊滑模控制进行了挖掘轨迹的跟踪仿真, 给出了跟踪性能及控制输入。

关 键 词: 液压挖掘机; 运动学; 动力学; 滑模控制; 自适应模糊控制

中图分类号: TU 621 文献标识码: A 文章编号: 1005-3026(2009)11-1649-04

Research and Simulation of Hydraulic Excavator's Adaptive Fuzzy Sliding Control

LIU Kuo, GUO Da-meng, LIU Jie, YANG Ke-shi

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China.
Correspondent: LIU Kuo, E-mail: liukuo0727@126.com)

Abstract: To eliminate the chattering in sliding control, a structure-variable controller is developed for adaptive fuzzy sliding. Introducing the adaptive fuzzy control to continuously approximate to the equivalent controller so as to make the equivalent control independent of the accurate mathematic model of the hydraulic excavator's bucket, the robustness of the uncertainty control system is enhanced and then applied to the trajectory tracking control of the hydraulic excavator's bucket. The control law involves three parts, i. e., the equivalent, switching and regulating control. The adaptive fuzzy sliding control is simulated with Matlab7.4/Simulink for path tracing of excavator's bucket, thus revealing the tracking performance and input control.

Key words: hydraulic excavator; kinematics; dynamics; sliding control; adaptive fuzzy control

滑模变结构控制是一种强鲁棒性的非线性控制, 它不需要精确的数学模型, 只要知道模型的参数和扰动的上界就能设计出渐近稳定的控制器。其缺点是在控制过程中存在抖动现象, 可能激活高频动态^[1]。自适应模糊滑模控制基于滑模控制的鲁棒性和自适应模糊控制的逼近能力^[2], 利用模糊控制动态调节切换增益, 将滑模控制的切换项转化为连续的模糊系统, 可以消除滑模控制的抖振, 并且有较强的自适应跟踪能力。

挖掘机工作装置的轨迹跟踪控制是实现挖掘自动化的一个重要课题, 由于外界干扰和本身难以建立精确数学模型的原因, 对其控制的一个要

求就是对外界干扰和不确定性具有鲁棒性^[3-5]。因此, 将自适应滑模变结构控制应用于挖掘机工作装置的轨迹跟踪控制中, 可以保证系统良好的动静态品质。

1 挖掘机工作装置的动力学特性

液压挖掘机工作装置的拉格朗日动力学方程的一般形式为^[6]

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

其中: τ 为输出力矩; $D(\theta)$ 为惯性矩阵; $C(\theta, \dot{\theta})$ 为向心力和哥氏矩阵; τ_f 为黏滞摩擦力矩; $G(\theta)$ 为重力向量。

收稿日期: 2009-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50775029)。

作者简介: 刘 阔(1983-), 男, 河北石家庄人, 东北大学博士研究生; 刘 杰(1944-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师。

挖掘机的动力学参数具有以下性质: 惯性矩阵 $D(\theta)$ 正定对称且满足: $0 < D_{\min} \leq \|D(\theta)\| \leq D_{\max}$, D_{\min} 和 D_{\max} 分别为 $D(\theta)$ 的最小和最大特征值. 向心力和哥氏矩阵 $C(\theta, \dot{\theta})$ 满足^[7]: $\|C(\theta, \dot{\theta})\| \leq C_{\max} \|\dot{\theta}\|$, $\forall \theta$. $D(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta})$ 是一个斜对称矩阵, 并且满足如下关系:

$$\theta^T [D(\theta) - 2C(\theta, \dot{\theta})] \dot{\theta} = 0, \forall \theta. \quad (2)$$

2 自适应模糊滑模控制器的设计

2.1 滑模控制器的设计

设液压挖掘机工作装置的关节角跟踪误差为 $\theta_i = \theta_i - \theta_{di}$ 以及误差函数为 $s = \dot{\theta}_i + \Lambda \theta_i$ ^[8], 其中 $\Lambda = \text{diag}[\Lambda_i] (i = 1, 2, \dots, n)$, $\Lambda_i > 0$.

定义

$$\left. \begin{aligned} \theta_{ri} &= \theta_i - s = \theta_{di} - \Lambda \theta_i, \\ \ddot{\theta}_{ri} &= \ddot{\theta}_i - \dot{s} = \ddot{\theta}_{di} - \Lambda \dot{\theta}_i. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由于对挖掘机的工作装置建立数学模型的参数可能不准确, 所以设: $D = D + \Delta D$, $C = C + \Delta C$, $G = G + \Delta G$. D , C 和 G 分别为 D , C 和 G 的名义值; ΔD , ΔC 和 ΔG 分别为 D , C 和 G 的不确定项. 设 $f(\ddot{\theta}_i, \dot{\theta}_i, \theta_i) = D\ddot{\theta}_{ri} + C\dot{\theta}_{ri} + G + \tau_{vf}$ 为控制系统不确定的源, 并且 f 是有界的, 满足 $|f_i(\ddot{x}, \dot{x}, x)| < x_i (i = 1, 2, \dots, n)$, $\forall (\ddot{x}, \dot{x}, x)$, $x_i > 0$.

设系统的控制输入 u 为挖掘机工作装置液压缸的输出力矩 τ , 设计控制律:

$$u = \hat{u} - F \cdot s - K \text{sgn}(s). \quad (4)$$

其中: $\hat{u} = D(\theta_i) \ddot{\theta}_{ri} + C(\theta_i, \dot{\theta}_i) \dot{\theta}_{ri} + G(\theta_i)$ 为等效控制; $F \cdot s$ 为调整控制; $K \text{sgn}(s)$ 为切换控制; $F = \text{diag}[f_i]$ 为正定矩阵 ($i = 1, 2, \dots, n$); $K = \text{diag}[k_i (s_i)]$ 为正定矩阵 ($i = 1, 2, \dots, n$), $k_i \geq x_i$.

2.2 自适应模糊控制

为了调整切换控制增益, 建立一个 5 条规则的模糊系统:

- If s_i is NB, Then q_i is NB;
- If s_i is NS, Then q_i is NS;
- If s_i is ZO, Then q_i is ZO;
- If s_i is PS, Then q_i is PS;
- If s_i is PB, Then q_i is PB.

第 i 个模糊系统的输出为

$$q_i = \xi_{k_i}^T \Theta_{k_i}(s_i). \quad (5)$$

其中: $\xi = [\xi_j]^T (j = 1, 2, \dots, m)$ 为模糊规则向量;

$\Theta(x) = [\Theta(x)]^T (j = 1, 2, \dots, m)$, 其中

$$\Theta_j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \exp\left[-\left(\frac{s_i - a_j}{b_j}\right)^2\right]}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \exp\left[-\left(\frac{s_i - a_j}{b_j}\right)^2\right]} \quad (6)$$

为模糊基函数, a_j 和 b_j 为高斯型隶属函数的设计参数, m 为模糊规则数量^[9]. 模糊系统的输出 q_i 逼近不确定源 f , 存在 $\zeta_i > 0$, 使得

$$\left| \xi_{k_{id}}^T \Theta_{k_i}(s_i) + f \right| \leq \zeta_i.$$

模糊滑模变结构控制可以削弱系统的抖振, 但外界干扰较大时无法自动保证系统的稳定性, 这里采用自适应调整控制保证干扰较大时的系统的稳定性. 自适应控制律取为

$$\dot{\xi}_{k_i} = s_i \Theta_{k_i}(s_i). \quad (7)$$

其中 $\xi_{k_i} = \xi_{k_i} - \xi_{k_{id}}$.

2.3 稳定性分析

把自适应控制律考虑入内, Lyapunov 函数形式如下:

$$V = \frac{1}{2} s^T D s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \xi_{k_i}^T I \xi_{k_i}. \quad (8)$$

对新的 Lyapunov 函数求时间导数, 代入式 (7) 得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2} [2s^T \dot{D}s + s^T \dot{D}s] + \sum_{i=1}^n \xi_{k_i}^T I \dot{\xi}_{k_i} = -s^T F s \\ &+ \sum_{i=1}^n \left[-s_i f_i - s_i q_i \right] + \sum_{i=1}^n \xi_{k_i}^T I \dot{\xi}_{k_i} = \\ &-s^T F s + \sum_{i=1}^n s_i [-f_i - (\xi_{k_i}^T \Theta_{k_i}(s_i) + \\ &\xi_{k_{id}}^T \Theta_{k_i}(s_i))] + \sum_{i=1}^n \xi_{k_i}^T I \dot{\xi}_{k_i} = \\ &-s^T F s + \sum_{i=1}^n s_i [-f_i - \xi_{k_{id}}^T \Theta_{k_i}(s_i)]. \end{aligned}$$

存在很小的正实数 $\rho_i < 1$, 使得

$$\left| \xi_{k_{id}}^T \Theta_{k_i}(s_i) + f \right| \leq \zeta_i < \rho_i |s_i|,$$

所以

$$\dot{V} \leq -s^T F s - \sum_{i=1}^n \rho_i s_i^2 = \sum_{i=1}^n (-\rho_i - f_i) s_i^2 \leq 0.$$

3 仿真试验

3.1 挖掘机工作装置的参数

仿真用的挖掘机参数以本实验室的迷你型小松挖掘机 PC02-1 为依据. $m_1 = 112 \text{ kg}$, $m_2 = 82 \text{ kg}$, $L_1 = 1\,130 \text{ mm}$, $L_2 = 510 \text{ mm}$, $L_{g1} = 0.565 \text{ mm}$, $L_{g2} = 250 \text{ mm}$. 其中 m_1 和 m_2 分别为挖掘机动臂和斗杆铲斗部分的等效质量; L_1 和 L_2 分别为挖掘机动臂和斗杆铲斗部分的长度; L_{g1} 和 L_{g2} 分别为动臂和斗杆铲斗部分的重心到相应转轴的

距离。

挖掘机在挖掘时工作装置都在垂平面上, 因此假设没有回转运动, 即 $\theta_0 = 0$ 。考虑挖掘机在实际作业过程中经常使用动臂和斗杆两关节协调动作, 即铲斗和斗杆之间没有相互运动, 因此考虑两自由度的情况, 则各矩阵元素分别为

$d_{11} = (m_1 l_{g1}^2 + m_2 l_1^2) + m_2 (l_{g2}^2 + 2 l_1 l_{g2} \cos \theta_2),$

$d_{12} = m_2 (l_1 l_{g2} \cos \theta_2 + l_{g2}^2),$

$d_{21} = m_2 (l_1 l_{g2} \cos \theta_2 + l_{g2}^2),$

$d_{22} = m_2 l_{g2}^2;$

$c_{11} = 0,$

$c_{12} = -m_2 l_1 l_{g2} (2 \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2,$

$c_{21} = m_2 l_1 l_{g2} (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2) \sin \theta_2,$

$c_{22} = m_2 l_{g2}^2 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2;$

$g_1 = (m_1 l_{g1} + m_2 l_1) g \cos \theta_1 + m_2 g l_{g2} \cos (\theta_1 + \theta_2),$

$g_2 = m_2 g l_{g2} \cos (\theta_1 + \theta_2).$

3.2 仿真

在 Matlab7.4 环境下对自适应模糊滑模控制进行仿真。取仿真参数 $\Lambda = \begin{bmatrix} 250 & 0 \\ 0 & 250 \end{bmatrix}$, $F = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 200 \end{bmatrix}$, $D = 0.8 * D$, $C = 0.8 * C$, $G = 0.8 * G$ 。

为了验证所设计算法的有效性, 把算法用于仿真试验。对挖掘轨迹进行离散化, 如图 1 所示。

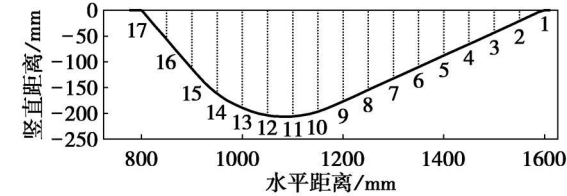


图 1 挖掘轨迹示意图

Fig. 1 Schematic of moving trajectory of excavator's bucket

从挖掘机的挖掘轨迹可以得到离散化后各点的坐标值如表 1 所示。

表 1 挖掘轨迹的坐标序列

Table1 Coordinate sequence of moving trajectory of excavator's bucket			
序号	坐标值/mm	序号	坐标值/mm
1	(1 600 - 18)	10	(1 150 - 221)
2	(1 550 - 60)	11	(1 100 - 211)
3	(1 500 - 98)	12	(1 050 - 194)
4	(1 450 - 133)	13	(1 000 - 173)
5	(1 400 - 163)	14	(950 - 138)
6	(1 350 - 187)	15	(900 - 100)
7	(1 300 - 206)	16	(850 - 55)
8	(1 250 - 218)	17	(800 - 4)
9	(1 200 - 223)		

根据如下挖掘机工作装置的运动学逆解方程

$$\begin{cases} \theta_1 = \tan^{-1} \left[\frac{y(l_1 + l_2 c_2) + x l_2 s_2}{x(l_1 + l_2 c_2) - y l_2 s_2} \right], \\ \theta_2 = \cos^{-1} \left[\frac{x^2 + y^2 - (l_1^2 + l_2^2)}{2 l_1 l_2} \right]. \end{cases}$$

可得 θ_1 和 θ_2 的序列。

把挖掘轨迹的坐标序列对应的角度值序列进行细化, 输入控制器进行自适应模糊滑模控制。针对动臂和斗杆的关节角输入, 其跟踪曲线、控制输入分别如图 2、图 3 所示。

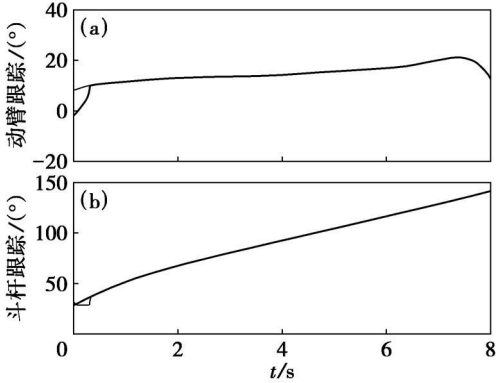


图 2 动臂和斗杆关节的角度跟踪

Fig. 2 Angle tracking of boom and bucket arm hinge

(a) — 动臂关节; (b) — 斗杆关节。

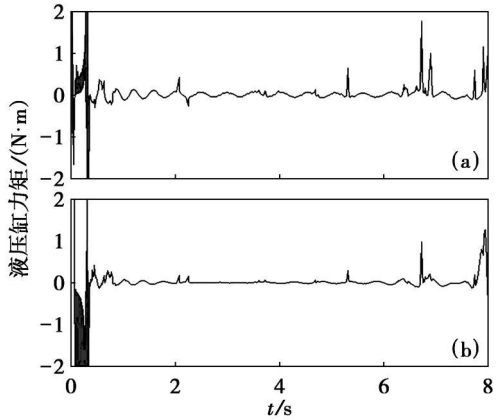


图 3 自适应模糊滑模控制的动臂和斗杆的控制输入

Fig. 3 Input control of boom and bucket arm

(a) — 动臂; (b) — 斗杆。

通过仿真可以看出, 动臂和斗杆的关节角误差很小, 可以满足实际工作的要求。液压缸在伸缩起始处存在一些液压冲击, 高频抖振不明显, 可以满足实际工作的要求。

4 结 语

针对挖掘机工作装置的非线性和参数不确定性, 设计了一种自适应模糊滑模控制器并将其用于挖掘机的轨迹跟踪控制中。该控制器结合了模糊控制和滑模控制优点, 利用模糊控制动态调节切换增益, 将滑模控制的切换项转化为连续的模

糊系统, 消除了滑模控制的抖振, 并且有较强的自适应跟踪能力. 仿真结果表明自适应模糊滑模控制策略对于参数扰动及干扰都具有较好的动态响应性能, 可以削弱高频抖振, 具有良好的稳定性和鲁棒性.

参考文献:

[1] 王艳敏, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电动机的无抖振滑模控制系统的设计[J]. 电机与控制学报, 2008, 12(5): 514– 519.
(Wang Yan-min, Feng Yong, Lu Qi-liang. Design of free chattering sliding mode control systems for permanentmagnet synchronousmotor[J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(5): 514– 519.)

[2] Gu H C, Song G B, Malki H. Chattering-free fuzzy adaptive robust sliding-mode vibration control of a smart flexible beam [J]. *Smart Material and Structures*, 2008, 17(3): 035007.

[3] Lippiello V, Siciliano B, Villani L. A position based visual impedance control for robot manipulators [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. Rema: IEEE, 2007: 2068– 2073.

[4] Ha Q P, Nguyen Q H, Rye D C, *et al.* Fuzzy sliding-mode controllers with applications [J]. *IEEE Transactions on*

Industrial Electronics, 2001, 48(1): 38– 46.

[5] Lever P J A, Wang F Y, Shi X B, *et al.* A fuzzy-behavior based approach for controlling mining excavator bucket/rock interactions[J]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994, 3: 3284– 3289.

[6] Seul J, Hsia T C. Neural network impedance force control of robot manipulator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1998, 45(3): 451– 461.

[7] Ibeas A. Robust sliding control of robotic manipulators based on a heuristic modification of the sliding gain[J]. *Journal of Intelligent and Robotic System: Theory and Applications*, 2007, 48(4): 485– 511.

[8] 尹凤杰, 井元伟, 杨晖. 基于模糊滑模控制的主动队列管理算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2006, 27(5): 473– 476.
(Yin Feng-jie, Jing Yuan-wei, Yang Hui. Active queue management algorithm based on fuzzy sliding mode control[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2006, 27(5): 473– 476.)

[9] Cheng K F, Wang X Z, Wang Y, *et al.* Fuzzy adaptive energy-saving control system for a hydraulic excavator[J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(9): 813– 817.