

文章编号:0253-9993(2012)12-2107-05

采煤机滚筒调高滑模变结构控制策略

苏秀平^{1,2}, 李 威², 樊启高²

(1. 江苏师范大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要:针对采煤机自动调高是电液比例伺服控制的情况,通过建立采煤机调高油缸数学模型,得到采煤机调高系统状态空间方程,采用滑模变结构控制策略设计了采煤机自动调高控制器,主要包括根据采煤机调高系统状态方程设计滑模面切换函数和滑模控制规律,得到滑模控制函数。最后,在建立采煤机调高系统状态方程和滑模控制函数的基础上,进行了采煤机调高控制器仿真分析,其结果表明,采用滑模变结构控制能够较好地实现采煤机截割滚筒快、平、稳的自动调整。

关键词:采煤机;调高;滑模;状态方程

中图分类号:TD421.6 **文献标志码:**A

A shearer drum height adjusting strategy using sliding-mode variable structure control

SU Xiu-ping^{1,2}, LI Wei², FAN Qi-gao²

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221008, China; 2. School of Mechanical & Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: As automatic height adjusting of the shearer was achieved by electro-hydraulic proportional servo control, established a height-adjustment cylinder model of the shearer, and deduced state space equation of the shearer height adjusting system, then designed an automatic height adjusting controller, in the controller authors adopted the controller sliding-mode variable structure control strategy, including the sliding function design and sliding control rule analysis. Finally, based on the state equation and the controlling function, authors simulated the shearer height adjusting controller, the results show that with the sliding mode variable structure control strategy, the automatic height adjusting become fast and stable.

Key words: shearer; height adjusting; sliding-mode; state equation

随着煤矿安全重要性的提高和煤炭开采技术的发展,井下采煤工作面实现少人或者无人开采是必然趋势,实现井下少人或者无人开采的必要条件是井下采煤装备机械化和自动化。采煤机作为主要落煤装备,其自动化水平是综采工作面自动化的关键^[1]。采煤机自动控制主要包括变频牵引和滚筒智能调高两部分。随着变频技术的发展,大功率变频调速技术已在新型采煤机上得到比较成熟的运用,然而在采煤机滚筒调高自动控制方面,还有很多问题有待解决。滚筒自动调高是指在采煤机牵引运动时,前后滚筒需要沿工作面煤岩界面的高度自动调整,以获得最大的

采出率,并尽量避免截割岩石。采煤机滚筒高度调节控制是通过液压缸的调节来实现的,由于采区地质条件的不同,夹在顶板与底板之间煤层厚度有较大差异,这就要求采煤机工作时滚筒高度能随煤层的厚度进行自动调整以避免割到顶板和底板。

如今采煤机滚筒自动调高主要包括两个研究方向:一方面以煤岩界面识别为主,探索有效的煤岩界面传感方法,为采煤机滚筒高度调节提供信息感知,建立反馈控制;另一方面以采煤机滚筒调高过程控制为主,讨论如何实现快速、平稳和准确的滚筒高度调节,其中以控制策略研究为核心内容。山东科技大学

收稿日期:2011-12-05 责任编辑:许书阁

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)重点资助项目(2008AA062202);江苏省研究生培养创新工程资助项目(CXZZ11-0286);中国矿业大学科技攀登计划资助项目

作者简介:苏秀平(1971—),女,山东宁阳人,讲师,博士研究生。Tel:0516-83885829, E-mail: suxiuping@znu.edu.cn

的王增才进行了自然 γ 射线检测剩留煤层厚度的理论和实验研究^[2], 中国矿业大学(北京)的张俊梅等研究了以自然 γ 射线煤岩界面识别传感器为煤岩界面识别元件的采煤机调高伺服控制系统^[3]。近几年, 我国有关科研人员已开始对基于记忆截割技术的采煤机滚筒调高电液控制策略展开了相关基础研究。西安科技大学的张修荣用先导式比例方向流量阀作为主控元件, 以磁致伸缩位移传感器做检测元件测量活塞杆的位置信号组成反馈回路, 组成比例闭环控制系统, 采用经典 PID 控制算法, 通过控制阀的开口大小, 来调油缸的液压油流量, 对液压缸的伸缩量进行调整, 以保证活塞位置精度, 进行了控制仿真研究^[4]。黑龙江科技学院的刘春生提出了记忆程控截割技术, 并在此基础上针对电磁阀控液压缸的开关控制特性, 分别运用模糊算法和灰度关联计算进行采煤机调高自动控制^[5-6]; 中国矿业大学的王忠宾设计了基于人工免疫和记忆切割的采煤机滚筒自适应调高控制系统^[7]; 中国矿业大学的樊启高建立了采煤机调高机构运动学模型, 并提出运用动态模糊神经网络采煤机调高控制器^[8]。但由于利用自然 γ 射线等进行煤岩界面识别的方法对地质条件要求较高, 实际生产当中并没有广泛推广, 后来采用基于人工示教的记忆截割策略能够间接实现煤岩分界, 为采煤机自动调高系统提供依据, 但针对采煤机滚筒调高过程控制的研究还比较少。本文提出以记忆截割信息为采煤机调高判据, 采用变结构滑模控制策略实现快、稳、准的采煤机调高过程, 构建采煤机自动调高系统。

1 采煤机调高系统建模与分析

1.1 采煤机调高系统构成

如图 1 所示, 采煤机调高系统包含截割滚筒、摇臂、调高油缸和液压控制回路。由于采煤机调高负载比较大, 同时动态性能要求较高, 采用电液比例系统进行采煤机调高自动控制。在采煤机液压调高回路中采用两个液控单向阀组成的锁紧回路, 可以实现活塞在任意位置上的锁紧。通过电液比例阀控制系统中液流的方向和流量, 实现液压缸活塞的直线往复运动。

忽略活塞运动过程中的黏性阻尼系数和外部干扰, 同时根据文献[9]得到采煤机电液比例调高系统的伺服阀闭环传递函数^[9]为

$$G(S) = \frac{K_p K_q}{\omega_h^2 S^2 + 2\xi_h S + 1 + K_p K_q K_f} \frac{1}{2A_1 - A_2} \quad (1)$$

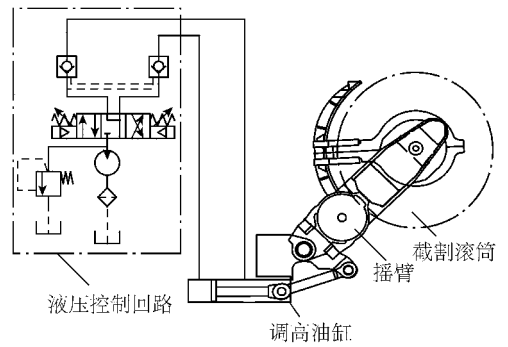


图 1 采煤机调高系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the shearer height adjusting system

其中, A_1 和 A_2 分别为调高油缸内部活塞左右两腔有效面积; K_q , K_f 和 K_p 分别为流量增益、反馈系数和等效系数; ξ_h 和 ω_h 分别为系统阻尼比和固有频率。由于采煤机调高系统负载特性为惯性负载, 可以得到采煤机调高油缸位移与阀流量传递函数为

$$\frac{X_p}{Q_p} = \frac{K_q}{\omega_h^2 S^2 + 2\xi_h S + 1 + K_q K_f} \frac{1}{2A_1 - A_2} \quad (2)$$

考虑到下一步采煤机调高控制器设计, 需要得到系统状态空间方程。

令系统状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (3)$$

根据式(2)得到:

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_h^2 \left(1 + \frac{K_q K_f}{2A_1 - A_2}\right) & -2\omega_h \xi_h \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_q \omega_h^2}{2A_1 - A_2} \end{bmatrix}^T \\ C = [1 \ 0 \ 0] \\ D = [0 \ 0 \ 0] \end{cases} \quad (4)$$

采煤机调高系统状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_h^2 \left(1 + \frac{K_q K_f}{2A_1 - A_2}\right) & -2\omega_h \xi_h \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_q \omega_h^2}{2A_1 - A_2} \end{bmatrix} U \\ Y = [1 \ 0 \ 0] X \end{cases} \quad (5)$$

式中, \mathbf{X} 为采煤机调高系统状态矩阵; \mathbf{Y} 为调高油缸位移输出; \mathbf{U} 为液压流量控制输入信息。

1.2 采煤机记忆截割分析

采煤机进行自动调高的前提是具有煤层高度判据, 本文提出利用采煤机记忆截割数据作为调高系统的判据, 为采煤机滚筒规划路径, 从而进行自动调高。采煤机记忆截割基本原理由采煤机司机操作采煤机沿工作面煤层先割一刀, 并根据采煤机位置对滚筒高度进行等间距采样, 控制系统将行程位置与对应的截割高度等信息存入计算机, 以后在某一行程位置的截割高度均由计算机根据存储器记忆的工作参数自动调整。如煤层条件发生较大变化, 则由采煤机司机手动操作割煤, 并自动记忆调整过的工作参数, 作为下一刀滚筒调高的参数^[10]。

如图 2 所示, X 为沿工作面水平方向, Y 为沿工作面推进方向, Z 为绝对高度。根据采煤机位置等距采样 9 个点, 当完成第 i 刀时, 记录所有点高度数据。在第 $i+1$ 刀时, 按照第 i 刀所记录数据进行自动调高。在第 $i+2$ 刀时, 有些数据已经不能满足实际工况, 需要人工参与调整, 调整完之后重新保存数据, 作为第 $i+3$ 刀的调高判据, 如此进行循环割煤。

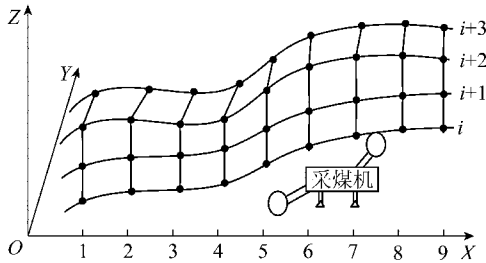


图 2 采煤机记忆截割原理示意

Fig. 2 Schematic diagram of shearer memory cutting principle

2 采煤机调高控制器设计

采煤机滚筒调高在空载和割煤时, 要克服摇臂自重和截煤阻力, 同时由于煤质和煤层分布等参数变化, 对自动调高系统动态响应和稳定性等指标干扰较大, 针对采煤机调高系统这一特性, 提出采用变结构滑模控制保证调高滚筒对于规划路径的有效跟踪。变结构滑模控制能够通过切换控制量来保证系统的状态沿着滑模面滑动, 使系统存在参数摄动和受到外部干扰时具有不变性, 这是滑模变结构控制最本质的特点^[11-12]。

设计采煤机调高变结构滑模控制器的基本步骤包括以下两部分^[13-14]: ① 利用采煤机调高系统状态方程, 设计切换面 s , 使之确定的滑动模态渐进稳定且具有良好的动态品质; ② 设计滑模控制律 u , 使滑

模到达条件得到满足, 从而在切换面上形成滑动模态区, 同时利用滑动模态控制律控制削弱滑模抖振, 满足采煤机调高系统要求。

2.1 滑模控制切换面设计

根据采煤机调高系统建模部分的式(4)可以得到调高系统状态空间方程组中的状态方程系数矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 是可控的, 取系统偏差向量 $\mathbf{E} = (e_1, e_2, e_3)$, 为系统输出与输入偏差, 其中 $e_i = \dot{e}_{i-1}$ 。根据采煤机调高系统状态方程得到:

$$\dot{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_h^2 \left(1 + \frac{K_q K_f}{2A_1 - A_2} \right) & -2\omega_h \xi_h \end{bmatrix} \mathbf{E} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{K_q \omega_h^2}{2A_1 - A_2} \end{bmatrix}^T \mathbf{U} \quad (6)$$

考虑到采煤机调高系统采用流量输入控制, 属于单输入控制, 选择切换函数^[15]为

$$s = \mathbf{C}_n^T \mathbf{x} \quad (7)$$

由于系统为三阶, 式中 $\mathbf{C} = (c_1, c_2, 1)$, 其中 c_3 为常数, 取 1。被控量为 \mathbf{E} , 则得到滑模面切换函数为

$$s = \mathbf{C}_n^T \mathbf{E} = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 \quad (8)$$

2.2 滑模控制律确定

确定滑模面切换函数后, 采用指数趋近律控制策略。对于指数趋近律^[16]有

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks \quad (\varepsilon > 0, k > 0) \quad (9)$$

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} 1 & (s > 0) \\ -1 & (s < 0) \end{cases}$$

其中, 常数 ε 表示系统的运动点趋近切换面 $s=0$ 的速率; k 为指数项系数。根据式(6)和式(8)得到

$$\dot{s} = c_1 \dot{e}_1 + c_2 \dot{e}_2 + \dot{e}_3 = c_1 e_2 + c_2 e_3 + \dot{e}_3 = c_1 e_2 + c_2 e_3 - \omega_h^2 \left(1 + \frac{K_q K_f}{2A_1 - A_2} \right) - 2\omega_h \xi_h - \frac{K_q \omega_h^2}{2A_1 - A_2} u \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)得到

$$c_1 e_2 + c_2 e_3 - \omega_h^2 \left(1 + \frac{K_q K_f}{2A_1 - A_2} \right) - 2\omega_h \xi_h - \frac{K_q \omega_h^2}{2A_1 - A_2} u = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks \quad (11)$$

即可得到滑模控制函数为

$$u = \frac{2A_1 - A_2}{K_q \omega_h^2} \left[c_1 e_2 + c_2 e_3 - \omega_h^2 \left(1 + \frac{K_q K_f}{2A_1 - A_2} \right) - 2\omega_h \xi_h + \varepsilon \text{sign}(s) + ks \right] \quad (12)$$

3 系统仿真分析

通过采煤机调高系统传递函数和滑模控制器控制函数,进一步确定系统参数。取油缸固有频率为 26 Hz,液压系统阻尼比 $\xi_n = 0.2$,内部活塞左右两腔有效面积计算式 $2A_1 - A_2 = 15 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,流量增益 $K_q = 2 \text{ m}^2/\text{s}$,信号反馈系数 $K_q = 1.5$ 。对控制器进行正弦和方波跟踪效果测试,同时根据系统状态方程,采用传统 PID 控制器进行对比仿真。

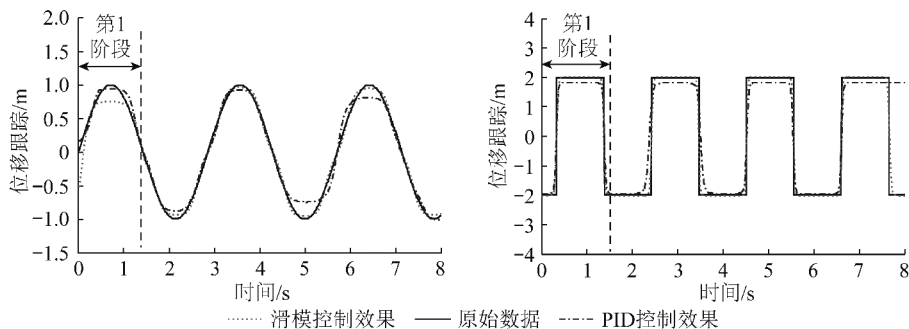


图3 滑模控制与PID正弦与方波信号跟踪仿真

Fig. 3 Sinusoidal signal and square signal tracking simulation diagram of sliding-mode control and PID

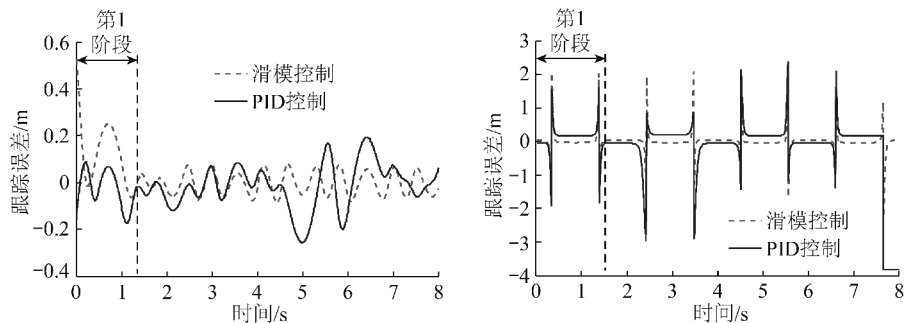


图4 滑模控制器与PID控制器正弦与方波信号跟踪误差图

Fig. 4 Sinusoidal signal and square signal tracking simulation error diagram of sliding-mode control and PID

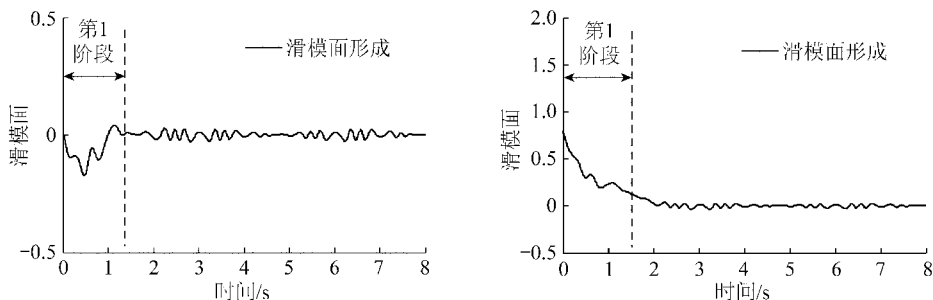


图5 正弦与方波信号跟踪滑模面形成过程

Fig. 5 Sliding surface formation process of sinusoidal signal and square signal tracking

4 结 论

(1) 采用滑模变结构控制实现采煤机自动调高,主要机理在于:一是得到采煤机调高油缸电液伺服系统传递函数,建立相应的系统状态方程;二是通过系

对于给定正弦信号和方波信号,分别采用滑模控制器和传统PID控制器进行跟踪仿真,如图3所示,在第1阶段,处于滑模面形成阶段,采用指数趋近律,在短时间内进入滑模面,这个过程滑模控制器需要时间调整。进入滑模面后,采用滑模控制能够实现比传统PID控制更好的控制效果,符合采煤机调高系统动态性要求。

跟踪误差如图4所示,滑模面形成过程如图5所示。

统状态方程设计滑模控制器切换面函数 s ,根据切换面函数 s 提出滑模控制规律,得到采煤机调高系统滑模控制函数。

(2) 以采煤机记忆截割数据为调高系统判据,重点研究采煤机动态响应性能,通过仿真得到,采用滑

模变结构控制能够实现采煤机调高系统快、平、稳的自动调整。

本文旨在研究滑模变结构控制在采煤机自动调高系统中的可行性,由于滑模变结构控制的关键是快速稳定到达滑模面,并在滑模面上上下抖动,故对调高系统可能会产生高频抖振,故需对有害抖振加以分析和抑制,这是下一步的研究内容。

参考文献:

- [1] 张世洪. 我国综采采煤机技术的创新研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11):1898-1902.
Zhang Shihong. Study on the innovation of fully mechanized coal shearer technology in China [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11):1898-1902.
- [2] 王增才, 王汝琳, 徐建华, 等. 自然 γ 射线法在采煤机摇臂自动调高中检测煤层厚度的研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(4):425-429.
Wang Zengcai, Wang Rulin, Xu Jianhua, et al. Research on coal seam thickness detection by natural Gamma ray in shearer horizon control [J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(4):425-429.
- [3] 张俊梅, 范 迅, 赵雪松. 采煤机自动调高控制系统研究[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(4):415-418.
Zhang Junmei, Fan Xun, Zhao Xuesong. Automatic horizon control system of coal mining machine [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2002, 31(4):415-418.
- [4] 权国通, 谭 超, 周 斌. 基于模糊自适应 PID 算法的采煤机液压自动调高系统研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(15):20-23.
Quan Guotong, Tan Chao, Zhou Bin. Study on automatic lifting hydraulic system of shearer based on fuzzy self-adaptive PID algorithm [J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(15):20-23.
- [5] 刘春生, 杨 秋, 李春华. 采煤机滚筒记忆程控截割的模糊控制系统仿真[J]. 煤炭学报, 2008, 33(7):822-825.
Liu Chunsheng, Yang Qiu, Li Chunhua. Simulation of shearer drum cutting with memory program controlling by fuzzy control [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7):822-825.
- [6] 刘春生, 荆 凯, 杨 秋. 采煤机滚筒截割记忆程控的灰关联度计算新方法[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5):666-669.
Liu Chunsheng, Jing Kai, Yang Qiu. A new grey correlation degree computation method of shearer drum by cutting memory program controlling [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5):666-669.
- [7] 王忠宾, 徐志鹏, 董晓军. 基于人工免疫和记忆切割的采煤机滚筒自适应调高[J]. 煤炭学报, 2009, 34(10):1405-1409.
Wang Zhongbin, Xu Zhipeng, Dong Xiaojun. Self-adaptive adjustment height of the drum in the shearer based on artificial immune and memory cutting [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(10):1405-1409.
- [8] Fan Qigao, Li Wei, Wang Yuqiao, et al. Control strategy for an intelligent shearer height adjusting system [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(6):908-912.
- [9] 张修荣. 采煤机滚筒自适应液压调高系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
Zhang Xiurong. Research of adaptive hydraulic shearer drum system [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.
- [10] 樊启高, 李 威, 王禹桥, 等. 一种采用灰色马尔科夫组合模型的采煤机记忆截割算法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10):2913-2918.
Fan Qigao, Li Wei, Wang Yuqiao, et al. An algorithm of shearer memory cutting based on grey-Markovian model [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(10):2913-2918.
- [11] 桑 勇, 祁晓野, 王占林. 基于滑模变结构控制的电机-泵组、阀复合调速的研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(5):674-678.
Sang Yong, Qi Xiaoye, Wang Zhanlin. Study on compound speed-adjusting control with parallel connection between the electromotor-pump and the valve based on SMVSC [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5):674-678.
- [12] 张细政, 王耀南, 杨民生. 新型感应电机自适应观测与滑模控制策略[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8):1144-1148.
Zhang Xizheng, Wang Yaonan, Yang Minsheng. New controller design for induction motor drives based on adaptive observer and sliding-mode control [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8):1144-1148.
- [13] 马亚丽. 基于滑模变控制理论的电液位置伺服控制方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
Ma Yali. Study on the method of electro-hydraulic servo control based on sliding mode control theory [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
Liu Jinkun. MATLAB simulation for sliding mode control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [15] 刘 阔, 郭大猛, 刘 杰, 等. 液压挖掘机自适应模糊滑模控制的研究与仿真[J]. 东北大学学报(自然科学版) 2009, 30(11):1649-1652.
Liu Kuo, Guo Dameng, Liu Jie, et al. Research and simulation of hydraulic excavator's adaptive fuzzy sliding control [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009, 30(11):1649-1652.
- [16] 赵 成, 胡增荣, 陈大跃, 等. 半主动悬架的滑模变结构控制[J]. 中国公路学报, 2007, 20(3):109-114.
Zhao Cheng, Hu Zengrong, Chen Dayue, et al. Sliding mode varying structure control for semi-active suspension [J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(3):109-114.