

# 基于 LabVIEW 的滑模变结构控制实验研究

The experiment by the sliding mode variable structure control based on LabVIEW

董彩云

DONG Cai-yun

(燕山大学, 秦皇岛 066004)

**摘要:** 针对电液伺服系统的控制特点和性能要求, 将滑模变结构控制方法应用到电液伺服系统中。以某材料试验机为研究对象, 借助 LabVIEW 软件设计了一种滑模变结构控制器, 并进行了大量的实验研究。实验结果表明, 滑模变结构控制器能够使电液伺服系统具有良好的动态性能和较强的鲁棒性。同时实验研究了滑模变结构控制器的参数变化对动态性能的影响, 为工程应用奠定了基础。

**关键词:** 电液伺服系统; 滑模变结构控制; 鲁棒性; 材料试验机

中图分类号: TP271.31

文献标识码: B

文章编号: 1009-0134(2009)05-0022-05

## 0 引言

变结构控制(Variable Structure Control, VSC)本质上是一类特殊的非线性控制, 其非线性表现为控制的不连续性<sup>[1]</sup>。这种控制策略与其他控制策略的不同之处在于系统的“结构”并不固定, 其结构可以在动态过程中, 根据系统当前的状态(如偏差及其各阶导数等)有目的的不断变化, 迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动。所以又常称变结构控制为滑动模态控制(Sliding Mode Control, SMC)即滑模变结构控制。由于变结构控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点, 使得该理论在机器人、航空航天和伺服系统领域有着广泛的应用<sup>[2-5]</sup>。

本文以某材料试验机为研究对象, 借助 LabVIEW 软件设计了滑模变结构控制器, 并对该试验机进行了大量的实验研究。实验可分为 3 部分: 两种控制方法的实验对比研究、供油压力对位置闭环以及滑模控制器参数变化对其动态特性的影响。

## 1 滑模变结构控制器的设计

### 1.1 材料试验机的数学模型

电液伺服材料试验机是材料力学试验机中精度最高的一种试验机, 是精确研究材料的力学性能、模拟零件、部件, 甚至整机在实际使用状态下的力学性能的有力试验手段, 由于材料试验机上装有位

置、速度、压力控制系统, 所以它还是电液伺服系统控制技术研究理想试验台。根据系统的流量方程、力平衡方程等经简化可得到系统的传递函数为:

$$Y = \frac{K_{sv} K_s K_p}{s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1)} U \quad (1)$$

式中  $Y$ —传感器所测得的实际位移

$K_{sv}$ —伺服阀的静态-流量放大系数(即在一定的供油压力下, 伺服阀额定流量与额定电流的比值, 也称流量增益)

$K_s$ —一位移传感器放大增益

$K_p$ —伺服放大器放大增益

$A_p$ —液压缸活塞的面积

$\omega_h$ —液压固有频率

$\xi_h$ —液压阻尼比

$U$ —控制器的输出指令

$$\text{其中 } \omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{m_t V_t}} \quad (2)$$

$$\xi_h = \frac{K_{ce}}{A_p} \sqrt{\frac{\beta_e m_t}{V_t}} + \frac{B}{4A_p} \sqrt{\frac{V_t}{\beta_e m_t}} \quad (3)$$

式中  $\beta_e$ —油液的有效体积弹性模量

$V_t$ —总压缩容积

收稿日期: 2008-11-17

作者简介: 董彩云(1982-), 女, 工学硕士, 主要研究方向为滑模变结构控制及其应用。

$m_f$  — 活塞、油液及负载等效到活塞上的总质量  
 $K_{ce}$  — 总流量-压力系数  
 $B$  — 活塞以及负载的粘性阻尼系数

## 1.2 滑模变结构控制器的设计

假定为给定输入信号，定义系统的偏差向量为：

$$[e_1 \ e_2 \ e_3] = [y_r - y \ \dot{y}_r - \dot{y} \ \ddot{y}_r - \ddot{y}] \quad (4)$$

则写出以偏差向量为状态变量的控制系统状态方程：

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = e_3 \\ \dot{e}_3 = -a_2 e_2 - a_3 e_3 - bu + f_r \end{cases} \quad (5)$$

式中  $e_1$  — 输入位移与输出位移之间的位移差  
 $e_2$  — 输入位移与输出位移之间的速度差  
 $e_3$  — 输入位移与输出位移之间的加速度差

$$\text{其中 } a_2 = \omega_h^2, \quad a_3 = 2\xi_h \omega_h, \quad b = \frac{K_{sv} K_s K_d \omega_h^2}{A_p}$$

$$f_r = a_2 \dot{y}_r + a_3 \ddot{y}_r + \ddot{y}_r$$

取滑模切换函数为：

$$s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 \quad (6)$$

可得到

$$\dot{s} = c_1 e_2 + c_2 e_3 - a_2 e_2 - a_3 e_3 - bu + f_r \quad (7)$$

### 1.2.1 切换函数的确定

本文采用极点配置方法设计切换函数。极点配置方法<sup>[6]</sup>因其设计简单，工程实现方便而得到了广泛的应用。

将状态方程(5)写成分块矩阵形式

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e_3 \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -c_1 & -c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} s \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dot{e}_3 = -a_2 e_2 - a_3 e_3 - bu + f_r \quad (9)$$

由于在子空间上  $S_0 = \text{Ker}(s)$ ，有

$$s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 = 0 \quad (10)$$

其中， $\text{Ker}(s)$ 为  $s$  的核或者  $s$  的零空间，那么式

(4)在子空间  $S_0$  上为：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -c_1 & -c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

此式即为滑动模态的运动微分方程，它决定了

滑动模态的动态品质。令式(15)系数矩阵的特征根等于给定极点，就可以求得  $c_1$  及  $c_2$  的值。

### 1.2.2 控制函数的确定

本文系统采用主比例控制，将控制策略  $u = \varphi_1 e_1$  带入到式(7)得：

$$\begin{aligned} \dot{s} &= (c_2 - a_3)s + (c_1 a_3 - c_1 c_2 - b\varphi_1)e_1 \\ &\quad + (c_1 - c_2^2 + a_3 c_2 - a_2)e_2 + f_r \end{aligned} \quad (12)$$

当输入为阶跃响应时，很容易证明  $f_r = 0$ 。

为保证滑动模态的存在，满足可达性条件也就是说在  $s=0$  以外的任意点均能在有限的时间内达到切换面  $s=0$ ，控制函数  $u$  就必须满足下面不等式：

$$s\dot{s} \leq 0 \quad (13)$$

由滑动模态的存在性条件如式(13)所示，可得：

$$\varphi_1 = \begin{cases} m \geq \sup[c_1(a_3 - c_2)]/b, & \text{当 } e_1 s > 0 \\ n \leq \inf[c_1(a_3 - c_2)]/b, & \text{当 } e_1 s < 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中  $\sup(\ )$  为上确界函数， $\inf(\ )$  为下确界函数。  
 $c_2 < \inf(a_3)$  (15)

可以证明，如果  $b$  足够大，则  $c_2$  可不受式(15)的限制。

## 2 控制系统的组成

### 2.1 控制系统硬件部分的实现

本次实验的硬件部分由下面几部分组成：

1) 微型计算机 基本配置如下：P4-2.4 G CPU，120 G 高速硬盘；256 MB 内存。

2) 位移传感器 本文采用材料试验机作为实验控制对象，在油缸活塞杆的另一端带 1 只位移传感器，检测出位移信号，作为模拟输入的发生端，旨在形成位移闭环，以判断所设计的控制器的控制效果。所采用的位移传感器是美国 BEI DUNCAN 公司超精密密度导电塑料基片以及铂金电刷组装而成的直线位移传感器(俗称电子尺，电阻尺)。

3) 电液伺服阀 本实验所采用的电液伺服阀是某公司生产的 FF-102 型的电液伺服阀，取其固有频率为 100 HZ，阻尼系数为 0.63。

4) 伺服放大器 所选型号为某公司生产的 MKZ801.14 系列伺服放大器，该伺服放大器是专为中航总公司 609 所生产的伺服阀配套使用的放大器，采用了多项先进技术，控制精度高，可靠性好。

5) 数据采集卡 美国NI公司的PCI-6024E多功能数据采集卡。

6) I/O端子板 选用NI公司的CB-68LP。具体参数如下:外形尺寸14.35 × 10.74 cm;68个端子。

7) 连接电缆 选用NI公司的R6868。此电缆两端分别带有一个68芯的连接器的,分别和数据采集卡和端子板相连。

## 2.2 控制系统的软件设计

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)<sup>[7]</sup> 即实验室虚拟仪器工程平台 是直观的前面板与流程图式的编程方法的结合,是构建虚拟仪器的理想工具。由于LabVIEW具有强大的硬件驱动能力,便于与数据采集和仪器仪表控制系统交互联系<sup>[8]</sup>,因此借助该软件设计了系统的控制算法。阶跃响应曲线测试的流程图如图1所示。

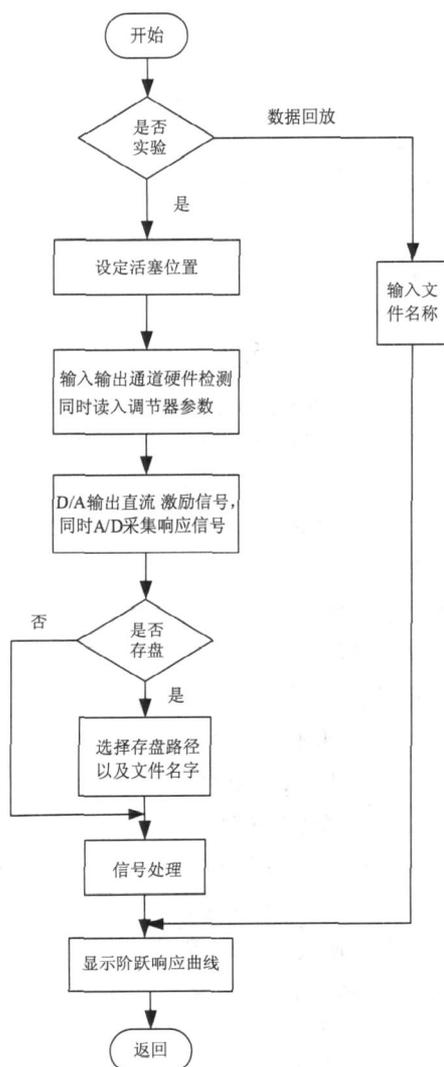


图1 阶跃响应测试流程图

## 3 实验研究及对比

本文在该试验机上进行了阶跃响应的研究。从总体上来讲本实验可分为3部分,即:两种控制方法的实验对比研究、供油压力的实验影响以及滑模控制器参数变化对其动态特性的影响。

### 3.1 两种控制方法的对比实验研究

图2以及图3分别为系统采用PID控制以及滑模变结构控制(SMC)时监控程序的前面板。

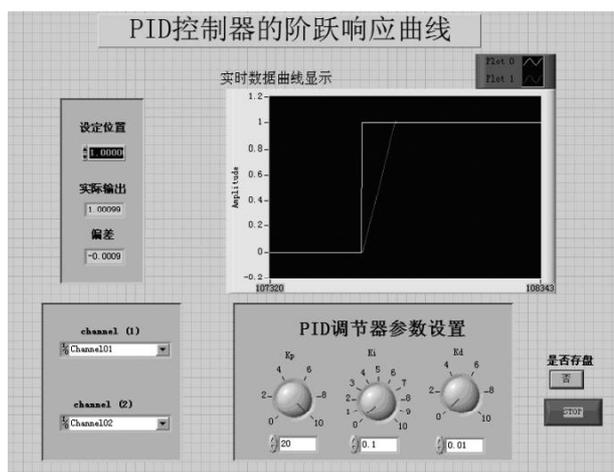


图2 PID控制的系统监控程序的前面板

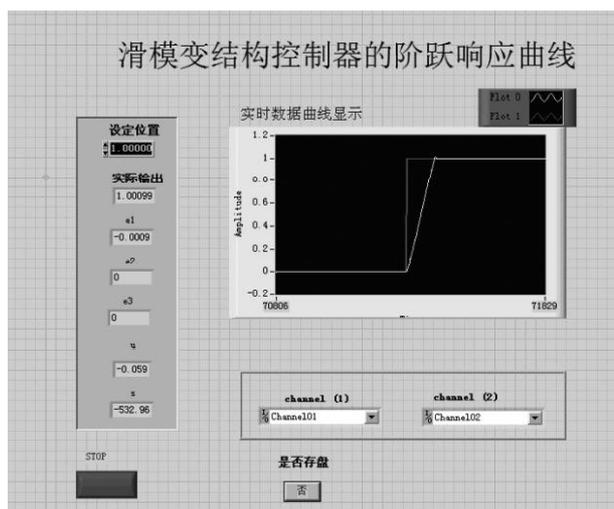


图3 SMC控制的系统监控程序的前面板

为了方便进行对比,选取温度T为25℃,系统压力P为5 MPa时的两组数据放在一起进行说明比较。当目标输入为10 mm时,在两种控制器控制下,系统的阶跃响应曲线如图4所示。

从图4可看出,滑模变结构控制上升快,具有较理想的过渡过程,调节时间短;而利用传统PID控制则过渡过程时间较长,上升慢。可以看出,滑

模变结构控制具有很好的优越性。

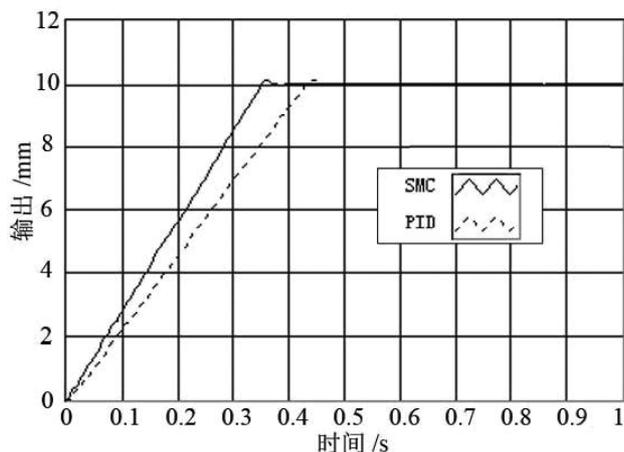


图4 P=5 MPa时的阶跃响应曲线

### 3.2 供油压力对位置闭环的影响

在油温  $T=25$  的条件下,当系统输入为 10 mm 时,针对几组不同的供油压力,从系统阶跃响应的曲线变化,说明系统供油压力对系统动态性能的影响。此时,系统的阶跃响应对比曲线如图 5 所示。

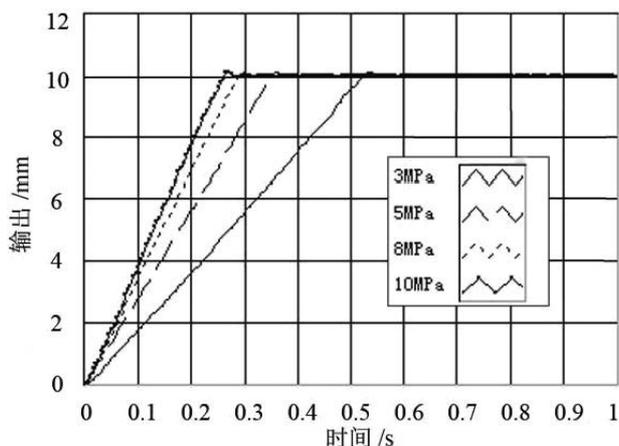


图5 SMC控制的不同压力下的阶跃响应比较

由图 5 可看出,随着供油压力  $P$  的增大,系统的上升时间,以及调节时间都有所减小。这是因为系统固有频率  $w_n$  与油液的有效体积弹性模量  $b_0$  成正比,而当供油压力升高时,由于有很多混入油液的空气溶解到油液中而不再影响容积模数,使  $b_0$  值提高,从而使系统固有频率  $w_n$  提高,即提高了系统的动态响应性能。同时,从图 5 中,可以看出,随着供油压力的增大,系统固有频率逐渐增大,在调节参数不变的情况下,系统曲线只是调节时间略有变长,但是曲线形状基本不变,仍然具有较好的跟踪性能。从而验证了在参数扰动情况下,系统具有鲁棒性的优点。

### 3.3 调节参数对动态特性影响的实验研究

为了更加充分的了解 SMC 控制方法,以及更加方便地使用 SMC 控制器,下面研究了 SMC 控制器参数变化对动态特性的影响。

在  $T=25$ , 系统压力  $P$  为 3 MPa 时,经过多次实验,当控制器的控制参数分别为:  $c_1=180000$ ,  $c_2=600$ ,  $m=20$  时,系统阶跃响应的动态特性最佳。现在分别选取不同的  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $m$  值进行实验,分析这些参数对系统动态性能的影响。

当目标输入为 10 mm,控制器的  $c_2$  值取 600,  $m$  值取 20,  $c_1$  值分别选取 180000、1000、500000 时,系统的对比阶跃响应曲线如图 6 所示。

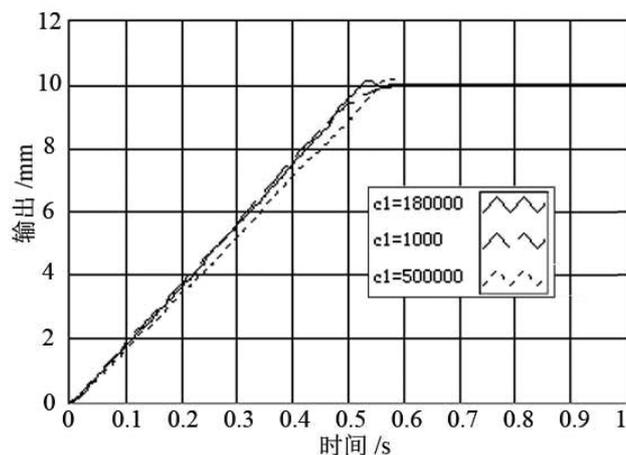


图6  $c_1$ 值变化时的阶跃响应比较

从图 6 可以看出,  $c_1$  值能够加快响应速度。  $c_1$  值增大时,系统响应时间缩短,但是  $c_1$  值过大时,反而会使计算机工作量增加,系统调节时间延长。

当目标输入为 10 mm,控制器的  $c_1$  值取 180000,  $m$  值取 20,  $c_2$  值分别选取 100、600、1000 时,系统的对比阶跃响应曲线如图 7 所示。

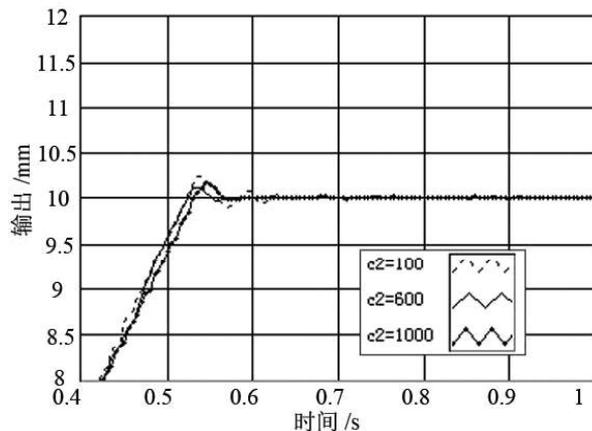


图7  $c_2$ 值变化时的阶跃响应比较

【下转第 81 页】

$$\gamma = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{\gamma_i}} = 30.107 \quad (4)$$

### 3 结论

本文通过模块化的设计方法,实现了滑块的快速、便捷地自动分选,具有结构简单、研究周期短、可靠度高等优点。使用神经网络对测试过程中的动态数据进行预测,能够在很短的时间内对传感器的稳态输出实现预测,满足测量的快速性要求。该自动分选仪可以高精度、快速地对中小尺寸零件几何

参数进行自动分选,适于大批量生产零部件的 $\mu$ m级、100%检测的场合。

参考文献:

- [1] 吴立志,马国远. 双层滑片压缩机滑片厚度比的选择分析[J]. 压缩机技术, 2003, (2): 7-11.
- [2] 强锡富. 传感器[M]. (第三版). 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] Cheij D. Using interchangeable virtual instrument (IVI) drivers to increase test system performance[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 2001, 16(7): 8-11.
- [4] 张永怀, 杨帮华, 刘君华. 基于虚拟仪器软件平台的弹簧自动分选仪[J]. 传感器技术, 2003, 22(7): 50-51.
- [5] 许力. 智能控制与智能系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

【上接第 25 页】

从图 7 可以看出,当  $c_2$  值增大时,系统超调减小,震荡减少。但是  $c_2$  值过大时,反而会使计算机工作量增加,系统调节时间延长。

当目标输入 10 mm,控制器的  $c_1$  值取 180000,  $c_2$  值取 600,  $m$  值分别选取 15、20、35 时,系统的对比阶跃响应曲线如图 8 所示。

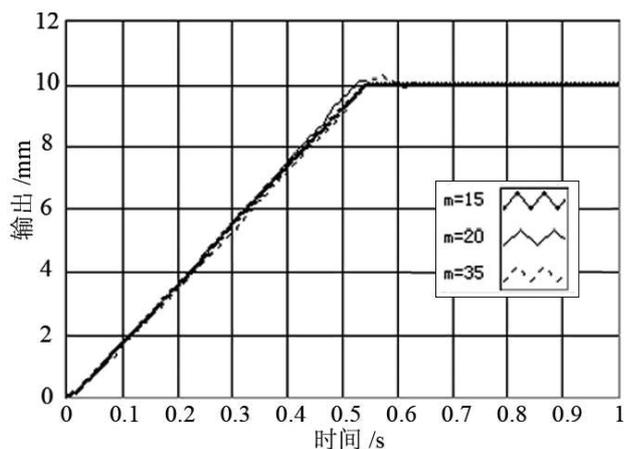


图 8  $m$  值变化时的阶跃响应比较

从图 8 可以看出,  $m$  值增加能够加快系统的响应速度,提高系统的控制精度。随着  $m$  值的增大,响应速度加快,超调增大,稳态误差减小。但是  $m$  值过大时,响应速度变慢,调节时间加长。

### 4 结论

本文深入研究了电液伺服系统的滑模变结构控制问题。以某材料试验机为研究对象,借助 LabVIEW 软件设计了滑模变结构控制器,并进行了实时控制研究。在实验过程中,首先对两种控制方法的控制效果作了对比,然后对系统压力变化以及

滑模变结构控制器参数变化对系统动态性能的影响进行了实验研究。实验结果表明:

- 1) 同采用 PID 控制策略相比,应用滑模变结构控制方法后,系统响应速度变快,调节时间变短。
- 2) 在系统压力发生变化时,系统曲线基本不变,仍然上升快,调节时间短,表明该方法具有较强的鲁棒性和很好的动态性能。

滑模变结构控制方法上升快,调节时间短,鲁棒性好,是一种值得提倡的控制方法。这为提高电液伺服系统的响应速度和精度提供了新的途径,具有很高的推广应用价值。在此基础上,实验研究了滑模变结构控制器的参数变化对动态性能的影响,为工程应用奠定了基础。

参考文献:

- [1] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] 汤青波, 张国新, 梁建伟. 液压力位置伺服系统的模糊滑模控制器设计[J]. 机床与液压, 2006, (5): 29-31.
- [3] 任淑红, 邵雷, 张庆波. 基于变结构理论的导弹舵机伺服系统设计[J]. 战术导弹控制技术, 2006, (1): 81-83.
- [4] Perruquetti W, Barbot JP. Sliding mode control in engineering. Marcel Dekker Inc., New York, 2002
- [5] Yu X H, Xu J X. Advance in Variable Structure Systems. World Scientific Publishing, Singapore, 2000
- [6] Sivaramakrishnan A Y, et al. Design of variable-structure load frequency controller using pole assignment technique[J]. Int. J. Contr., 1984, 40(3): 487-498.
- [7] 杨乐平, 李海涛, 杨磊. LabVIEW 程序设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 1-2.
- [8] Robert H. Bishop. 乔瑞萍, 林欣, 等译. LabVIEW 7 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 28-29.