

变结构控制方法在热轧卷取机踏步控制系统中的应用

姜万录, 董彩云, 陈东宁, 王海军

(燕山大学重型机械流体动力传输与控制河北省重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

摘要: 以往热轧卷取机在卷取开始时, 由于带钢头部搭头部位与助卷辊发生冲撞, 产生过大的冲击。笔者参考实际现场卷取工艺, 研制了电液踏步控制系统, 以实现助卷辊对台阶的自动回避。针对实验室建造的热轧卷取机踏步控制半物理实验模型, 设计了一种滑模变结构控制器, 通过设计切换函数以保证系统具有良好的动态特性。仿真结果表明: 变结构控制能够有效地克服系统变参数的影响, 可以取得较高的伺服跟踪效果, 使系统具有较强的鲁棒性和良好的动态性能。

关键词: 液压伺服系统; 变结构控制; 鲁棒性; 切换函数; 滑动模态

中图分类号: TP271.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881(2008)1-120-4

Application of a Variable Structure Approach on Step-by-step Control System for Coiler of Hot Rolling Mill

JINAG Wanlu, DONG Caiyun, CHEN Dongning, WANG Haijun

(The Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission & Control, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: Because of the collision between lap of strip steel and unit roller, too big an impact occurs during the initial coiling of previous coiler of hot rolling. Based on the real work process of coiler at worksite, an electro-hydraulic step-by-step system was developed in order that unit roller can evite the step automatically. A variable structure approach using sliding mode was presented for the mechanical model of step-by-step control system for coiler of hot rolling mill which was built at laboratory used for research work. The switching function was designed to ensure the system to have better dynamic performance. Simulation results show that the proposed approach may give rather accurate servo tracking result and is fairly robust to the system parameter variation and has better dynamic performance.

Keywords: Hydraulic servo system; Variable structure control; Robust; Switching function; Sliding mode

0 引言

近年来, 控制理论得到了很大发展, 出现了不少新的控制策略, 但在工程上的实际应用仍然是很有限的。只有 PID 控制器以其直观、实现简单等优点而得到广泛应用。据统计, 目前大多数 (90% 以上) 实际应用的控制回路仍采用 PID 控制算法^[1]。PID 控制适用于可建立精确数学模型的确定系统, 其显著缺点是不适用于参数变化较大甚至结构也变化的受控对象, 以及系统复杂、环境复杂、控制性能要求高的场合。

液压系统工作环境复杂, 系统存在比较大的不确定性, 如流体的压缩性和流量压力关系引起的非线性内漏产生的死区, 以及液压系统的线性化所引起的诸多不确定性等, 而且许多液压系统都存在外部负载干扰。而系统要求稳态误差小、快速性好, 这就给控制系统的设计带来了很大的困难^[2]。这时候如果应用常规的 PID 控制器就不能达到非常理想的控制效果。作

为鲁棒控制的一种强有力的工具, 滑动模态变结构控制正越来越多地被广大技术人员所接受。滑模变结构控制的主要特点: 当系统状态穿越状态空间的不同区域时, 反馈控制器的结构按照一定的规律发生变化, 使得控制系统对伺服系统的内在参数变化和外在环境扰动等因素具有较强的适应能力, 从而保证系统能够达到期望的性能指标要求^[3]。

1953 年, Wunch 的博士学位论文中出现了“改变系统结构”这一思想^[4]。之后, 诸多前苏联学者将这一思想应用到了控制系统中进行研究。文献 [5-6] 首先提出变结构控制系统 (VSCS) 的概念, 而且逐步形成了一个新的控制系统综合方法。随着高速功率电子器件的发展, 滑模控制已成功地应用^[7], 但在热轧卷取机踏步控制系统中的应用研究尚不多见。由于热轧卷取机踏步控制系统具有参数不确定性和非线性特点, 研究其变结构控制器无疑具有实际意义。本文以燕山大学重型机械流体动力传输与控制实

收稿日期: 2007-02-05

作者简介: 姜万录, 男, 1964 年生, 工学博士, 燕山大学机械工程学院教授, 博士生导师, 中国人工智能学会智能控制与智能管理专业委员会委员。主要研究领域为现代检测技术、控制理论与应用、智能信息处理。发表论文 80 余篇, 出版专著 1 部, 教材 3 部。主持完成科研项目 20 余项, 其中获国家科技进步二等奖 1 项, 省部级科技进步一、二等奖各 1 项。联系人: 董彩云, 电话: 13582454781, E-mail: dongcaiyn0335@163.com。

验室的热轧卷取机踏步控制半物理实验模型为研究对象，针对卷取机电液伺服系统存在较大的干扰力、参数不确定性等复杂系统的特点，提出了滑动模态变结构控制设计方法。

1 滑模变结构控制基本原理及策略

滑模变结构控制是变结构控制的一种控制策略。这种控制策略与常规控制策略的根本区别在于控制的不连续性，即一种使系统“结构”随时间变化的开关特性。该控制特性可以迫使系统在一定特性下沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的上下运动，即所谓的“滑动模态”或“滑模”运动。这种滑动模态是可以设计的，而且与参数的变化及扰动无关。这样，处于滑动模态的系统具有很好的鲁棒性。

目前，变结构控制理论中的滑模变结构控制基本策略有^[8]：

(1) 常值切换控制

$$u = u_0 \operatorname{sgn}(s(x)) \quad (1)$$

式中： u_0 是待求的常数， sgn 是符号函数， $s(x)$ 是切换函数，求滑模变结构控制就是求 u_0 。

(2) 函数切换控制

$$u = u_{eq} + u_0 \operatorname{sgn}(s(x)) \quad (2)$$

这是以等效控制 u_{eq} 为基础的形式。

上面两种方法一般采用广义滑模条件和一定的趋近律来实现。

(3) 比例切换控制

$$u = \varphi_1 e_1 \quad (3)$$

其中： $\varphi_1 = \begin{cases} m & \text{当 } e_1 s > 0 \\ n & \text{当 } e_1 s < 0 \end{cases}$ ， m, n 为常数， e_1 为输入位移与输出位移之间的位移差。

这种控制策略一般遵守滑模存在性条件，而滑模可达性条件则另作保证。

2 液压踏步控制系统的滑模变结构控制

2.1 系统建模

国内现有的大多数热连轧地下卷取机普遍存在一个函待解决的问题。那就是，在卷取开始时，带钢头部搭头部位与助卷辊发生冲撞，产生过大的冲击，使热连轧地下卷取机经常发生助卷辊支臂裂纹，严重影响产品质量，作业率低，成为热轧线最薄弱的环节。为了有效消除冲击，比较理想的办法就是

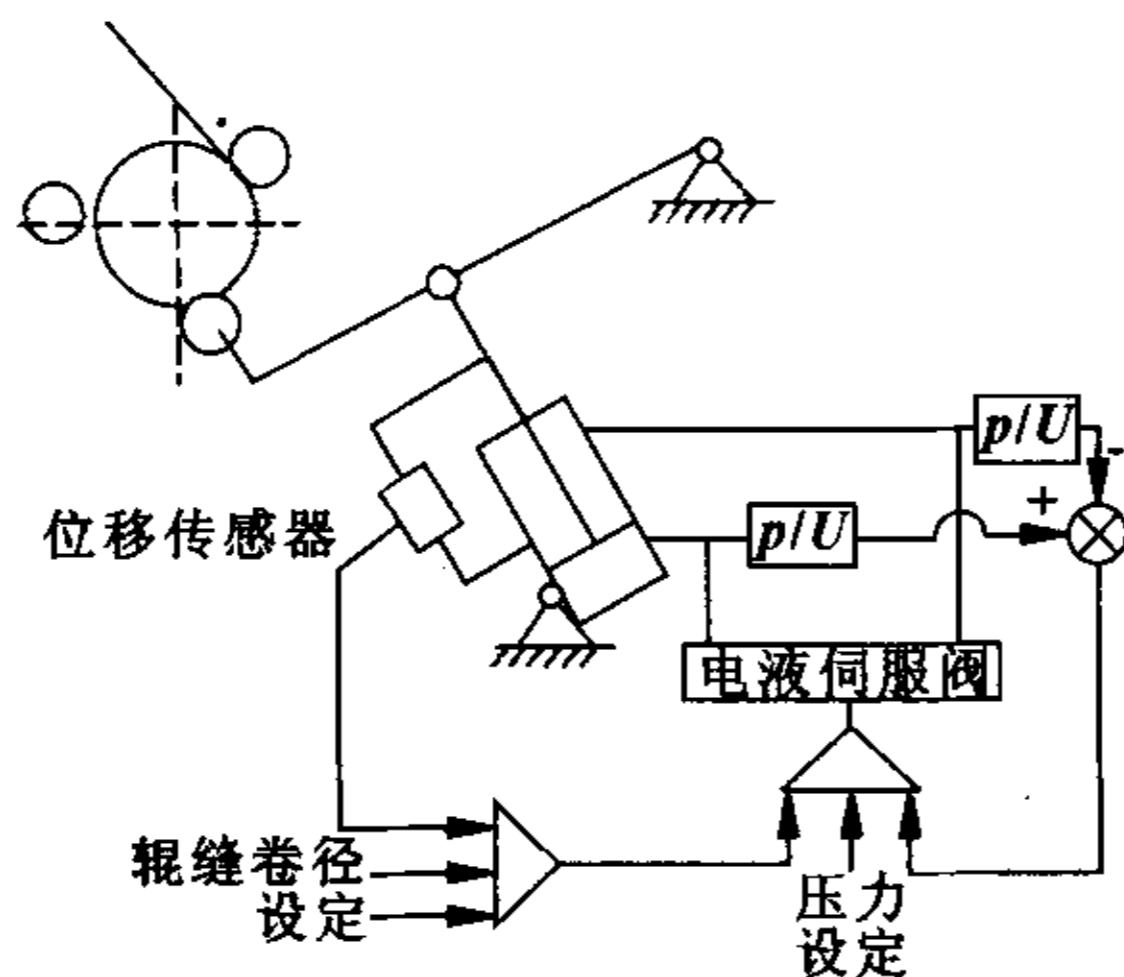


图 1 助卷辊自动台阶回避踏步系统控制方案

使助卷辊实现对带头台阶的自动回避。针对这种情况，在现代的热轧卷取机中，开发带有位置调节和压力调节的踏步式电液伺服自动台阶回避系统。本文以实验室建造的热轧卷取机踏步控制半物理实验模型（图 1）为对象进行建模与控制。该系统是带有位置调节和压力调节的电液伺服系统。本论文主要对电液位置伺服系统的控制进行了研究。

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：

$$Y = \frac{K_s K_w A_p K_a U}{s \left\{ \frac{V_t}{4\beta_c} m_t s^2 + s \left[(B+b) \frac{V_t}{4\beta_c} + m_t K_c \right] + A_p^2 \right\}} \quad (4)$$

式中： K_w 为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_c 为伺服阀的压力流量放大系数；

m_t 为活塞、油液及负载等效到活塞上的总质量；

B 为粘性阻尼系数；

b 为非线性系数；

β_c 为液体有效容积弹性模量；

A_p 为液压油缸的无杆腔面积；

V_t 为油缸容腔和伺服阀到油缸之间管道的总容积；

K_s 为位移传感器放大器增益；

K_a 为伺服放大器增益；

Y 为传感器所测得的实际位移；

U 为控制器的输出指令。

令 $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_c A_p^2}{m_t V_t}} \quad (5)$

$$\xi_h = \sqrt{\frac{\beta_c m_t K_c}{V_t A_p} + \sqrt{\frac{V_t}{\beta_c m_t} \frac{B+b}{4A_p}}}$$

式中： ω_h 为无阻尼液压谐振频率；

ξ_h 为液压阻尼比。

则原传递函数变为：

$$Y = \frac{K_w K_s K_a U}{A_p s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2 \frac{\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (6)$$

系统的主要参数： $K_w = 0.02625 \text{ m}^2 / (\text{s} \cdot \text{A})$ ， $B = 0.759$ ， $K_c = 7.5 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{MPa})$ ， $\beta_c = 7.0 \times 10^8 \text{ Pa}$ ， $V_t = 6.07 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ ， $m_t = 400 \text{ kg}$ ， $A_p = 3.117 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ， $K_a = 0.01 \text{ A/V}$ ， $K_s = 31.25 \text{ V/m}$ 。将参数数据代入到式 (5) 经计算得： $\omega_h = 335 \text{ rad/s}$ ； $\xi_h = 0.517$ 。

将上面各参数代入式 (6) 可得：

$$Y = \frac{295151.75U}{s^3 + 346.4s^2 + 112225s} \quad (7)$$

2.2 变结构控制策略的选取

控制策略的选择包括两个设计原则：(1) 选择切换函数使滑动模态具有良好的动态特性，使系统渐进稳定，达到控制系统的动态品质要求；(2) 选择控制函数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 $s=0$ 。

假定 y_r 为给定输入信号，定义系统的偏差向量为：

$$[e_1 \ e_2 \ e_3] = [y_r - y \ \dot{y}_r - \dot{y} \ \ddot{y}_r - \ddot{y}] \quad (8)$$

则写出以偏差向量为状态变量的控制系统状态方程：

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = e_3 \\ \dot{e}_3 = -a_2 e_2 - a_3 e_3 - bu + f_r \end{cases} \quad (9)$$

式中： $a_2 = \omega_h^2$ ； $a_3 = 2\xi_h \omega_h$ ； $b = \frac{K_v K_s K_a \omega_h^2}{A_p}$ ； $f_r = a_2 \dot{y}_r + a_3 \ddot{y}_r + \ddot{y}_r$ 。

其中： e_1 为输入位移与输出位移之间的位移差； e_2 为输入位移与输出位移之间的速度差； e_3 为输入位移与输出位移之间的加速度差。

取滑模切换函数为：

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

则

$$\dot{s} = c_1 e_2 + c_2 e_3 - a_2 e_2 - a_3 e_3 - bu + f_r \quad (11)$$

2.2.1 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^[9]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 (9) 写成分块矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} e_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (s - c_1 e_1 - c_2 e_2) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -c_1 & -c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} s \quad (12)$$

$$\dot{e}_3 = -a_2 e_2 - a_3 e_3 - bu + f_r \quad (13)$$

由于在子空间 $S_0 = \text{Ker}(s)$ 上，有

$$s = c_1 e_1 + c_2 e_2 + e_3 = 0 \quad (14)$$

其中， $\text{Ker}(s)$ 为 s 的核或者 s 的零空间^[10]，那么式 (12) 在子空间 S_0 上，为：

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -c_1 & -c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

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。

2.2.2 u 的确定

由系统传递函数可以看到，该系统为三阶系统。本文所述系统采用主比例控制，取控制策略如式 (3) 所示。

将式 (3) 代入到式 (11) 得：

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c_1 e_2 + c_2 e_3 - a_2 e_2 - a_3 e_3 - bu + f_r = c_1 e_2 + c_2 e_3 - \\ &a_2 e_2 - a_3 e_3 - b\varphi_1 e_1 + f_r = (c_2 - a_3)s + (c_1 a_3 - c_1 c_2 - b\varphi_1) \\ &e_1 + (c_1 - c_2^2 + a_3 c_2 - a_2)e_2 + f_r \end{aligned} \quad (16)$$

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 必须满足下面不等式：

$$s\dot{s} \leq 0 \quad (17)$$

由滑动模态的存在性条件如式 (17) 所示，可解得：

$$\varphi_1 = \begin{cases} m \geq \sup[c_1(a_3 - c_2)]/b, & \text{当 } e_1 s > 0 \\ n \leq \inf[c_1(a_3 - c_2)]/b, & \text{当 } e_1 s < 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中： $\sup()$ 为上确界函数， $\inf()$ 为下确界函数。

$$c_2 < \inf(a_3) \quad (19)$$

可以证明，如果 b 足够大，则 c_2 可不受式 (19) 的限制。在满足上面各式的条件下，经反复试验，取 $c_1 = 64\ 800$ ， $c_2 = 600$ ， $m = 300$ ， $n = -1$ 。

3 仿真研究

3.1 原模型的仿真比较

在 MATLAB 环境下，分别采用 PID 和滑模变结构控制仿真，其仿真框图如图 2、3 所示。

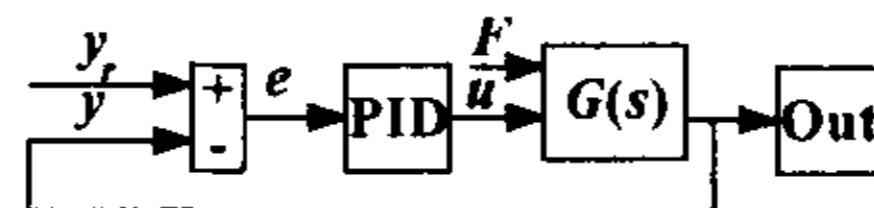


图 2 原模型的 PID 仿真框图



图 3 原模型的 SMC 仿真框图

当目标输入为 1cm 时，系统（没有外负载干扰力 F 时）的阶跃响应曲线如图 4 所示。由图 4 可以看出，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

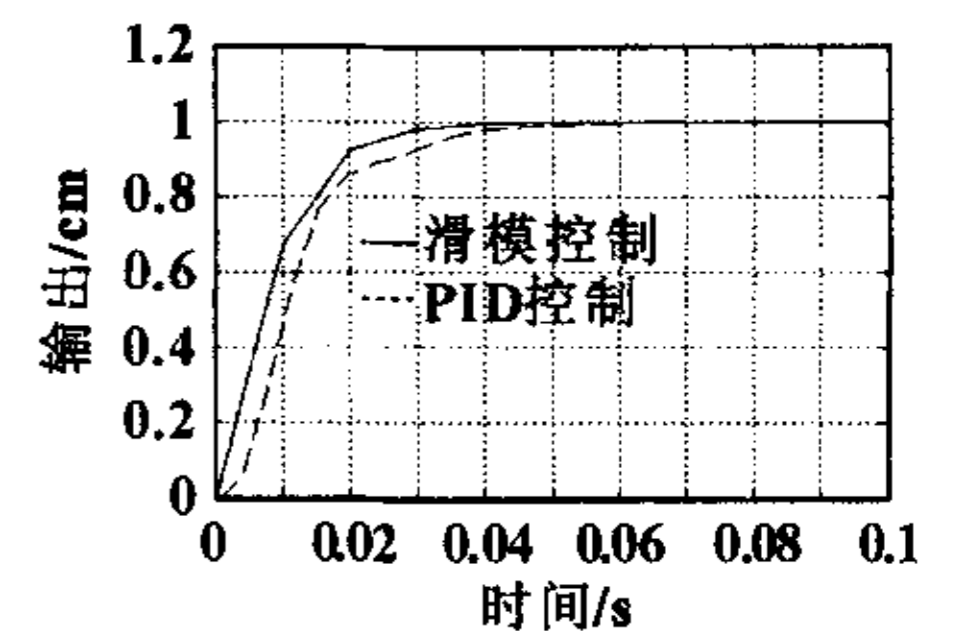


图 4 原模型的仿真图比较

利用传统 PID 控制则过渡过程时间较长，上升慢。

3.2 系统参数变化时的仿真研究

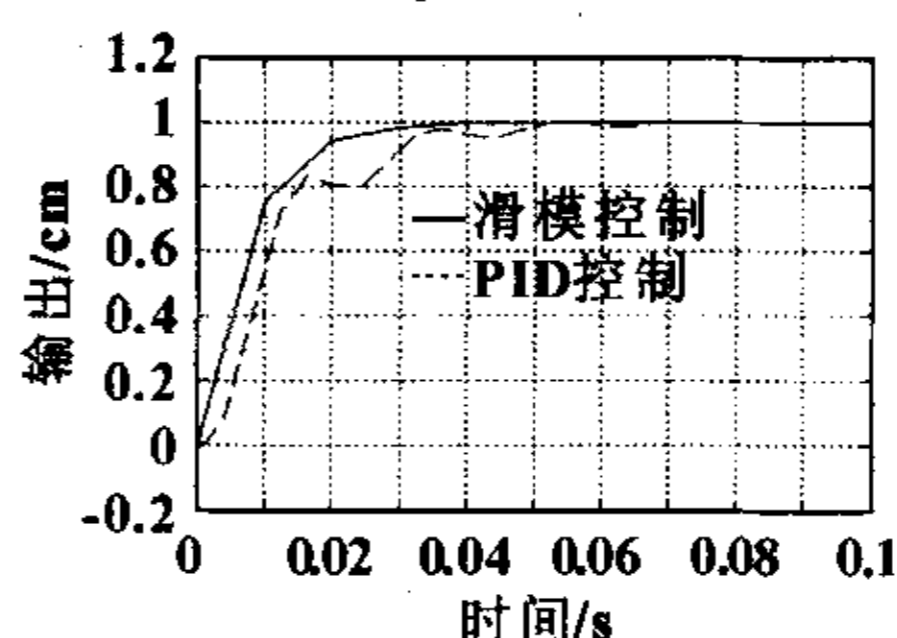


图 5 $\xi_h = 0.3$ 时的阶跃响应曲线

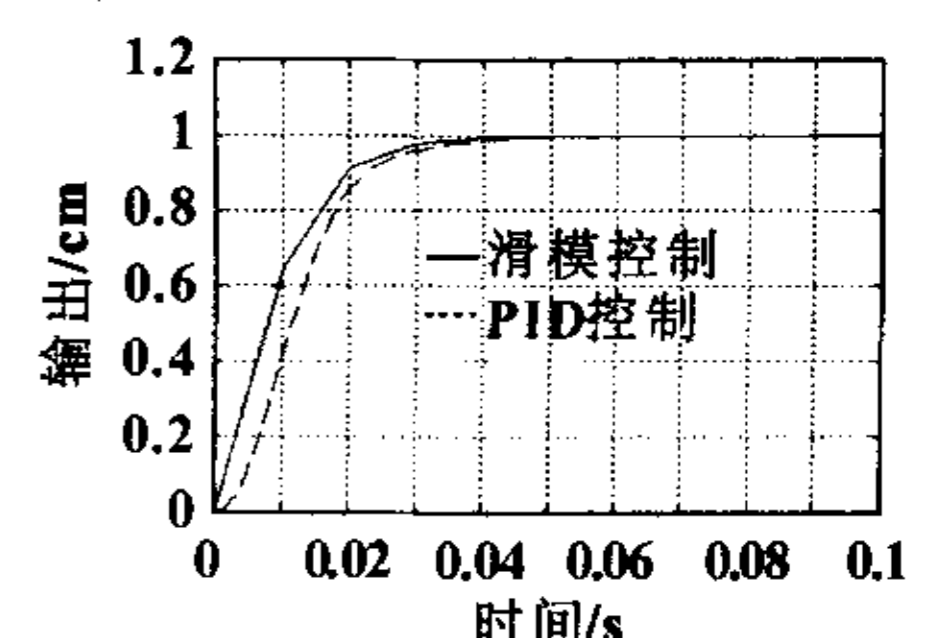


图 6 $\xi_h = 0.7$ 时的阶跃响应曲线

当系统参数 ω_h 、 ξ_h 发生变化, 目标输入为 1cm 时, 系统的阶跃响应输出如图 5—8 所示。

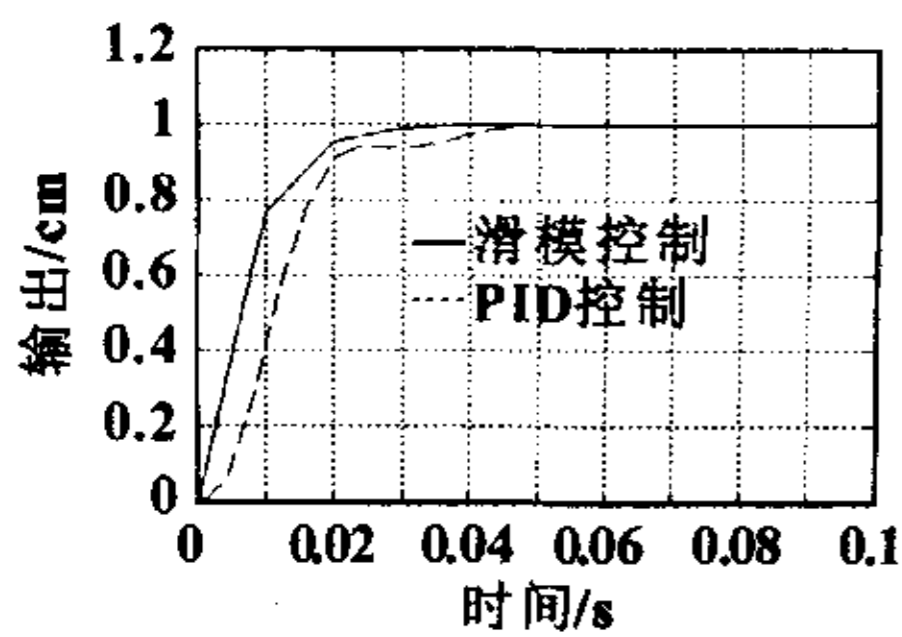


图7 $\omega_h = 280\text{rad/s}$ 时的阶跃响应曲线

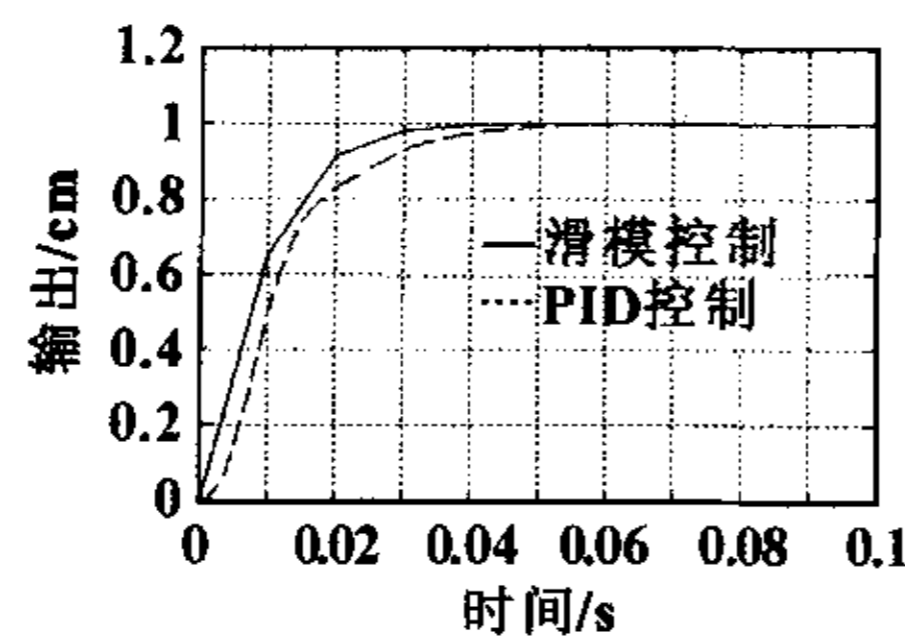


图8 $\omega_h = 380\text{rad/s}$ 时的阶跃响应曲线

经图 5—8 的比较, 在系统参数变化的情况下, 滑模变结构控制上升快, 其调节时间仍然短于 PID 控制的调节时间, 其输出曲线在参数变化的情况下基本不变, 表现出了较强的鲁棒性和良好的动态性能。而 PID 控制则出现波动, 调节时间长, 鲁棒性差。

3.3 施加外干扰力时的仿真研究

当系统存在外负载干扰力时, 负载干扰力的作用位置如图 2、3 中的 F 所示。当目标输入为 1cm 时, 系统的阶跃响应输出如图 9、10 所示。

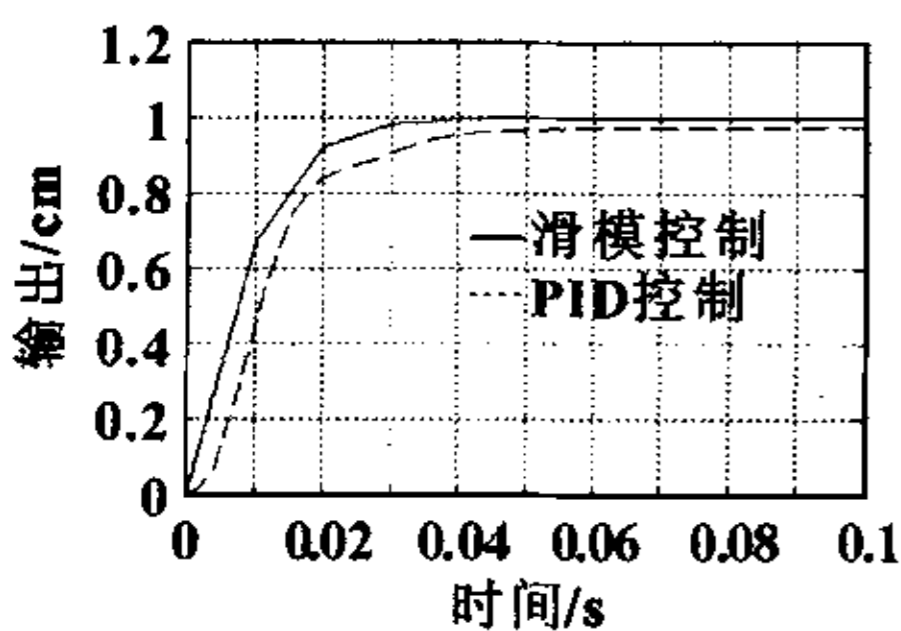


图9 $F = 8000\text{N}$ 时的阶跃响应曲线

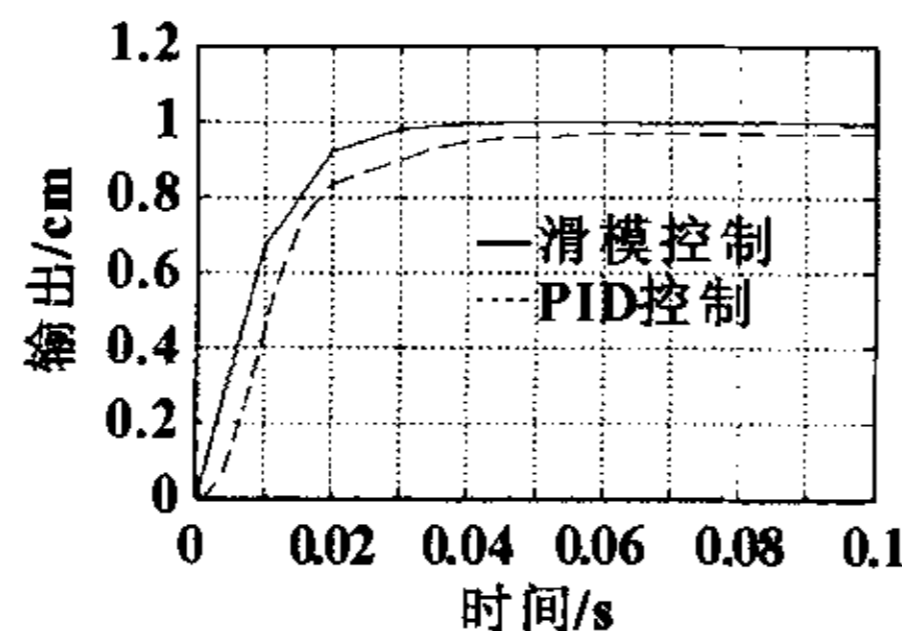


图10 $F = 10000\text{N}$ 时的阶跃响应曲线

从上面 2 个图形中可以看出, 随着外负载干扰力的增大, PID 控制的稳态误差逐渐变大; 而滑模变结构控制的输出曲线基本不变, 再次证明滑模变结构控制鲁棒性好, 具有很强的抗外负载干扰能力。

4 结论

本文将滑动变结构控制方法应用在热轧卷取机踏步控制半物理实验模型中。滑模变结构控制方法的最大特点是: 系统在所选定的状态空间的超平面两侧, 以跳动的方式改变控制器的控制结构, 从而沿着超平面产生滑模运动。由于滑模运动被约束在超平面内, 就带来了系统对参数和外扰变化的不灵敏性, 可实现很强的鲁棒性, 获得良好的动静态性能。仿真结果表明: (1) 在该系统中应用滑模变结构控制方法, 系统上升快, 调节时间短; (2) 无论是系统参数发生扰动还是施加外负载干扰力时, 系统曲线都基本不变, 仍然上升快, 调节时间短, 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, 这是以往的 PID 控制无法达到的控制效果, 是一种值得提倡的控制方法。这为提高卷取机控制系统的响应速度和精度提供了新的途径, 具有很高的价值。

参考文献

- [1] 褚健. 过程控制是艺术还是工程应用 [J]. 化工自动化及仪表, 1996, 23: 2-3.
- [2] 汤青波, 张国新, 梁建伟. 液压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] W S Wunch. Reproduction of an Arbitrary Function of Time by Discontinuous Control [D]. Stanford (CA, USA): Stanford University, 1953.
- [5] S V Emelyanov. Control of First Order Delay System by Means of Astatic Controller and Nonlinear Correction [J]. Automation and Remote Control, 1959, 20 (8): 983-991.
- [6] S V Emelyanov, A I Fedotova. Design of Astatic Tracking System with Variable Structure [J]. Automation and Remote Control, 1962, 23 (10): 1223-1335.
- [7] V J Utkin. Variable Structure Systems with Sliding Modes. IEEE Trans. Auto. Control, AC - 22.2, 1997, 212-222.
- [8] 王丰尧. 滑模变结构控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [9] A Y Sivaramakrishnan, et al. Design of variable-structure load frequency controller using pole assignment technique [J]. Int. J. Contr, 1984, 40 (3): 487-498.
- [10] 葛显良. 应用泛函分析 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1998.

(上接第 119 页)

- [3] 谢勇, 王耀南, 彭涛, 等. 基于机器视觉印品缺陷检测的滤波算法 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32 (4): 53-57.
- [4] C.-S. Lin, L. W. Lue. Image system for fast positioning and accuracy inspection of ball grid array boards [J]. Microelectronics and Reliability, 2001, 41: 119-128.
- [5] C. A. Chang, H.-D. Lin, C.-C. Lo. Test of pattern change for automated detection of printing faults using computer vision systems [J]. International Journal of Industrial Engineering, 1997 (4): 5-13.
- [6] B. R. P. Dawson, A. J. Parsons. Texture measures for the identification and monitoring of urban derelict land [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994 (15): 1259-1271.