

微差压控制系统的滑模变结构控制器设计与仿真*

苏小兵,李天平

(山东师范大学 传播学院,山东 济南 250014)

摘要: 将具有强鲁棒性的滑模变结构控制策略应用于转炉炉口微差压系统,采用炉口压力控制模型,分析、设计了两种变结构控制器。通过仿真研究表明滑模变结构控制方法具有很强的鲁棒性,可有效地改善控制系统的动态响应品质。

关键词: 微压差控制系统;滑模变结构控制;仿真

中图分类号: TP391.9;TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)23-0077-03

Sliding mode controller design and simulation for micro-differential pressure control system

SU Xiao Bing, LI Tian Ping

(Communication College, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: Having a strong robust sliding mode control strategy applied to the converter mouth differential pressure system, using mouth pressure control model, analysis and design of the two kinds of variable structure controller. The result of simulation shows that the sliding model variable structure control is robust, and can enhance the dynamic quality of the control system effectively.

Key words: micro-differential pressure control system; sliding model variable structure control; simulation

滑模变结构控制系统 VSS(Variable-Structure Control system with sliding Mode)是一类特殊非线性系统,其非线性表现为控制的不连续性。该系统与其他控制系统的主要区别在于其“结构”并非固定,而是在控制过程中不断地改变。“结构”在诸多的控制理论文献中并未给出统一的解释,参考文献[1]的系统结构给出了解释:系统的结构就是系统在状态空间(或相空间)中的状态轨迹(或相轨迹)的总体几何(拓扑)性质。滑模变结构控制系统的最大特点就是具有极强的鲁棒性,即对被控对象的模型误差、对象参数的变化以及外部干扰有极佳的不敏感性,因此它十分适用于解决复杂的非线性和不确定性系统的控制问题。

近年来,针对离散变结构控制理论与设计的研究逐渐增多,并且已取得了一些成果^[2-3]。参考文献[4]为了消除离散滑模控制的抖振,设计了两种滤波器:前滤波器和后滤波器,其中前滤波器用于控制信号的平滑及缩小饱和函数的边界层厚度,后滤波器用于消除对象输出

的噪声干扰。参考文献[5]基于两种不同的切换面,设计了离散时间系统变结构控制器。所设计的控制器保持了变结构控制系统动态性能好的优点,消除了系统的抖振。

本文将具有强鲁棒性的滑模变结构控制策略应用于转炉炉口微差压系统,采用炉口压力控制模型,设计相应的控制算法及两种滑模变结构控制器,提高了控制性能,并具有强鲁棒性,避免或削弱了抖振。

1 系统建模

被控对象的传递函数描述为:

$$F(s) = \frac{K_p e^{-Ls}}{(1+T_M s)(1+T_p s)} \quad (1)$$

式中: K_p 为二文管喉口 PA 挡板的增益; L 为二文管喉口 PA 挡板的纯滞后时间; T_M 为二文管喉口 PA 挡板的时间常数; T_p 为管道部分的时间常数。

通过对参数的设置,把相应参数代入式(1),被控对象的传递函数转化为:

$$G(s) = \frac{0.822e^{-1.5s}}{(1+2.22s)(1+15.65s)} \quad (2)$$

《微型机与应用》2010年第29卷第23期

* 基金项目: 山东省教育厅科技计划项目(J07YJ05)

技术与方法 Technique and Method

2 滑模控制器设计与仿真分析

滑模变结构控制理论不是一种分析方法,而是一种综合方法,其重点就是系统的设计问题。设计滑模变结构控制器的基本步骤包括两个相对独立的部分:

- (1)设计切换函数,或者说确定切换面 $s(x)=0$ 。
- (2)求取滑动模态控制律 $u^*(x)$ 。

一旦切换函数和滑动模态控制律都得到了,滑模控制系统就能完全建立。本文采用以下两种方法设计滑模块控制器。

2.1 基于趋近率的滑模块控制器设计

在 Matlab Control 工具箱中,线性定常态空间模型描述为:

$$\dot{x}=Ax+Bu \quad x \in R^n, u \in R \quad (3)$$

将传递函数模型转换为线性定常态空间模型,表达为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t-1.5) \\ y(t)=Cx(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中: $A=\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0.02878 & -0.5143 \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0.02366 \end{bmatrix}, C=[1 \ 0]$ 。

其中, x 为状态向量, u 为输入向量, y 为输出向量。

2.1.1 设计切换函数

取切换函数:

$$s(x)=cx=c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_{n-1}x_{n-1}+x_n=\sum_{i=1}^{n-1} c_i x_i+x_n \quad (5)$$

其中 $x_i=x^{(i-1)}(i=1,2,\dots,n)$ 为系统状态及其各阶导数,常系数 c_1, c_2, \dots, c_{n-1} 满足霍尔维兹(Hurwitz)稳定性条件。

炉口压力设定值为 $R=10$ Pa, 取系统的位置误差 e 和速度误差 \dot{e} , 则有:

$$\begin{cases} e=R-x_1 \\ \dot{e}=\dot{R}-x_2 \end{cases} \quad (6)$$

其中 x_1, x_2 为系统状态变量。

切换函数式(4)转换为:

$$s=ce+\dot{e} \quad (7)$$

取常数 $c=[c \ 1]=[8 \ 1]$, 参数 c 可以根据控制效果加以调节。

2.1.2 求取滑动模态控制律

设计的控制器包括等效控制 u_{eq} 和切换控制 u_{vss} 两部分。

(1)等效控制

假设系统轨迹停留在切面上,则由式(5)得:

$$s(x)=cx=c_1x_1+c_2x_2+\dots+c_{n-1}x_{n-1}+x_n=\sum_{i=1}^{n-1} c_i x_i+x_n=0 \quad (8)$$

由式(3)和式(8)得:

$$s=c\dot{x}=c(Ax+Bu_{eq})=0 \quad (9)$$

若 $[CB]$ 满秩,可解出等效控制。

$$u_{eq}=-[CB]^{-1}Ax \quad (10)$$

(2)切换控制

切换控制律将保证系统状态轨迹到达并收敛到滑模面的邻近区域。文中设计的切换控制律用函数切换控制,控制律设计为:

$$u_{vss}=(CB)^{-1}(cAx+s) \quad (11)$$

式中的 s 为某一种趋近律。

假设取上文中的指数趋近律 $\dot{s}=-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)-ks$, 将相应参数代入式(4),整理后得:

$$u_{vss}=\frac{1}{0.02366}[0.02878x_1-7.4857x_2-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)-ks] \quad (12)$$

再选取趋近律中的参数 ε 和 k 就能完全确定控制律。

2.1.3 系统仿真分析

为了验证滑模控制效果,下面作仿真分析。

对于系统中的纯滞后采用 Smith 预估补偿。仿真框图如图 1 所示,图中 S_controller 是用 S 函数编写的控制器, S_plant 为 S 函数编写的控制对象。输入设定值 10 Pa。

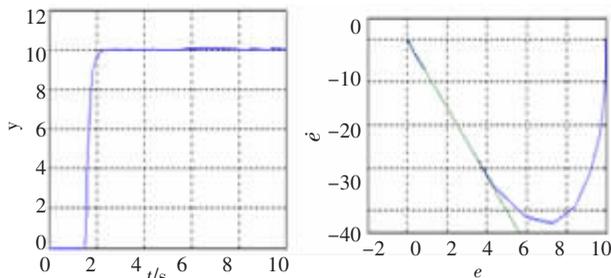


图 1 滑模控制仿真图

为了考察滑模控制在抗干扰和不确定性方面的鲁棒性,在式(4)的系统中加入干扰,同时,模型参数也加以变化,此时的系统表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1=x_2 \\ \dot{x}_2=-0.04x_1-0.3x_2+0.2633u(t-1.5)+d_1(t)+d_2(t) \\ y=x_1 \end{cases} \quad (13)$$

d_1, d_2 为不同形式的干扰, $d_1(t)=5\exp(-(t-ci)^2)/(2bi^2)$ 是 Gaussian 函数形式的干扰, 并取 $bi=0.5, ci=5$ 。 $d_2(t)=5+0.5\sin(2\pi t)$ 为正弦形式干扰。采用指数趋近律: $\dot{s}=-\varepsilon \operatorname{sgn}(s)-ks$, 其中参数为 $\varepsilon=12, k=18$ 。仿真结果如图 2 所示。



(a)含干扰和不确定时的滑模控制器输出值图 (b)含干扰和不确定时的滑模控制器相轨迹图

图 2 同时含干扰和不确定时的滑模控制器输出和相轨迹图

技术与方法 Technique and Method

由图可见,虽然对象中含有可很大的干扰,对象模型也发生了变化,但控制性能却没有明显变坏,显示了滑模变结构控制的鲁棒性。通过相轨迹分析,抖振有所变大。

2.2 准滑动模态控制器设计

2.2.1 准滑动模态控制器设计过程

从相轨迹方面来说,具有理想滑动模态的变结构控制是一定范围内的状态点均被吸引至切换面,速度矢量始终沿切换面。准滑动模态控制在实现上的这种差别,使它从根本上避免或削弱了抖振。其设计步骤与前述方法相同,只是将有继电特性的符号函数用饱和函数或连续函数替换。

常用的准滑动模态控制有以下两种:

(1)用饱和函数 $sat(s)$ 代替上述滑模中的符号函数 $sgn(s)$ 。

$$sat(s) = \begin{cases} 1 & s > \Delta \\ ks & |s| \leq \Delta \quad k = \frac{1}{\Delta} \\ -1 & s < -\Delta \end{cases} \quad (14)$$

(2)用连续函数 $\theta(s)$ 取代符号函数 $sgn(s)$,从而将继电特性连续化。

$$\theta(s) = \frac{s}{|s| + \delta} \quad (15)$$

2.2.2 系统仿真分析

采用与前述滑模控制相同的外界条件,用连续函数 $\theta(s)$ 取代符号函数 $sgn(s)$ 。仿真结果如图3所示。

由仿真结果可见,滑模控制效果很理想。从相轨迹图可看出系统状态在原点的抖振不明显,有效地抑制了抖振。

炉口微差压控制系统通过上述用趋近律方法设计的滑模控制器实现滑模控制后,取得了控制速度快、超调量小、稳定性好及对参数变化不敏感等一系列优于传

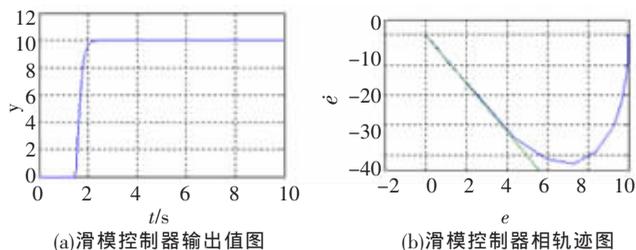


图3 滑模控制器输出和相轨迹图

统控制器的控制效果。而准滑模控制能进一步减小抖振影响,从而在实际工作中得到了广泛的应用。

参考文献

- [1] 王丰尧.滑模变结构控制[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [2] CARCIA J P F, RIBEIRO J M S, SILVA J J F, et al. Continuous-time and discrete-time sliding mode control accomplished using a computer [J]. IEEE Proc Control TheoryApp, 2005, 152(2): 220-228.
- [3] LIU Z, SVOBODA J. A new control scheme for nonlinear systems with disturbances [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(1): 176-181.
- [4] SU W C, DRAKUNOV S V, OZGUNER U, et al. Sliding mode with chattering reduction in sampled data systems [C]// Proc of the 32th IEEE Conf on Decision and Control. San Antonio, USA: IEEE Press, 1993, 12: 2452-2457. Control Systems Technology, 1999, 7(4): 414-422.
- [5] 魏丽霞,崔宝同.离散时间系统的滑模控制器设计与仿真应用[J].计算机应用研究,2007,24(12):201-203.

(收稿日期:2010-05-04)

作者简介:

苏小兵,男,1981年生,硕士研究生,主要研究方向:计算机应用与算法研究。

李天平,男,1965年生,硕导,研究员,主要研究方向:计算机控制技术应用与研究。