

基于模糊滑模算法的液压位置伺服系统^①

杨 坤 王 宪 (江南大学 通信与控制工程学院 江苏 无锡 214122)

摘 要: 针对液压位置伺服系统中外界干扰大和内部参数时变的特点, 结合模糊控制减小抖振的功能和滑模控制算法与系统参数、外界干扰无关的特点, 设计了一种新型的模糊滑模控制算法。在仿真过程中分别模拟内部参数时变和外界强干扰, 结果表明基于模糊滑模控制算法的液压位置伺服系统具有更强的抗外部干扰和内部参数时变的能力。

关键词: 模糊; 滑模; 伺服; 干扰; 参数时变

Hydraulic Servo System Based on Fuzzy Sliding Mode Algorithm

YANG Kun, WANG Xian

(School of Communication and Control Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: To deal with the great interference from outside on hydraulic position servo system and its parameters' time varying problem, a novel fuzzy sliding control algorithm is designed as the fuzzy control can soften the buffeting and the sliding control system will not be influenced by the parameters nor the interference from the outside. The simulation of time-varying parameters and the outside interference shows that the fuzzy sliding mode control method has a greater resistance against internal and external interference with time-varying parameters.

Keywords: fuzzy; sliding; servo; interference; parameters of time-varying

自动位置控制是在尽可能短的时间内将被控对象的位置自动地控制到预先给定的目标值上,使控制后的位置与目标位置之差保持在允许的偏差范围之内^[1]。无缝钢管生产线轧辊自动位置控制采用液压位置伺服控制系统,该系统由控制器、电液伺服阀、液压缸、负载以及位置传感器等组成。受漏油、油液污染和外界条件变化等因素影响,液压位置伺服系统中参数普遍存在时变和外界不确定的强干扰的问题,只能建立近似的三阶数学模型,由这种近似模型出发设计控制算法,在设计中被忽略的时变参数和不确定因素会引起控制系统品质的恶比,甚至导致系统不稳定^[2]。

滑模变结构控制算法具有控制不连续的特性^[3]。

这种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、高频率的运动,直到滑动至期望点,这种滑动模态是可以设计的,且与系统的参数及扰动无关。这样,处于滑模运动的系统就具有很好的鲁棒性,并且可以保证系统是渐进稳定的^[4]。然而,滑模变结构控制在本质上的不连续特性会引起系统的抖振。为充分利用滑模变结构控制的优点,近年来,国内外学者将滑模变结构控制与其他控制方法相结合,提出了许多复合控制方法,T.L.Chern等^[5,6]设计了一种积分变结构方案来解决外部扰动带来稳态误差的问题,然而这种积分变结构控制具有一定的局限性,它要求控制对象的系统模型是可控标准型、且不包括任何零点,

① 基金项目:国家自然科学基金(60574051)

收稿时间:2009-12-15;收到修改稿时间:2010-02-04

无法推广到液压位置伺服系统等 不确定模型的对象中。高为炳等^[7]使用趋近律的概念, 设计了指数趋近律 $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks$, 通过调整趋近律的参数 k 和 ε , 既可以保证滑动模态到达过程的动态品质, 又可以减弱控制信号的高频抖振, 但这种控制方法在不确定项和外界强干扰的情况下难以取得理想的效果。本文设计的模糊滑模控制算法充分利用了模糊控制算法柔性控制信号减小抖振的功能与滑模控制与系统参数和外界干扰无关的特点, 具有更强的抗外部干扰和内部参数时变的能力, 适合应用于液压位置伺服系统。

1 液压位置伺服控制系统描述

无缝钢管生产线轧辊液压位置控制系统由控制器、电液伺服阀、液压缸、负载以及位置传感器等组成, 在不考虑液压缸结构柔度的影响、忽略摩擦负载、弹性负载和内部参数时变的前提下^[8], 液压位置伺服系统控制框图的近似简化如下:

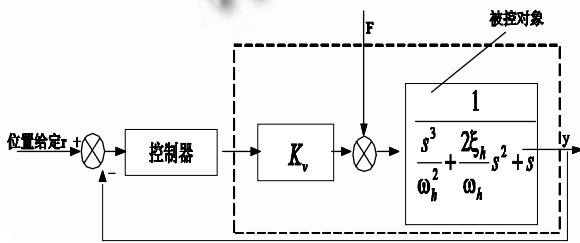


图 1 位置伺服系统简化方框图

被控对象的传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_v}{\frac{s^3}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s^2 + s} \quad (1)$$

式中, K_v 为速度放大系数, ω_n 为液压缸固有频率。 ξ_h 为动力原件阻尼比。传递函数可转换为微分状态方程的形式:

$$\ddot{x} = f(x) + g(x)u(t) \quad (2)$$

其中: $f(x) = -2\xi_h \omega_h \dot{x} - \omega_h^2 x$, $g(x) = K_v$ 。

2 模糊滑模控制器的设计

2.1 滑模控制算法的原理

滑模变结构控制算法的不连续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。其设计原理如下:

一般的情况, 在系统:

$$\dot{x} = f(x) \quad x \in R^n \quad (3)$$

的状态空间中有一切换面

$$s(x) = s(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (4)$$

它将平面分成上下两部分, $s > 0$ 及 $s < 0$

在切换面上中有一类被称作终止点的运动点, 这种终止点到达切换面 $s = 0$ 附近时, 从切换面的两边趋向于该点。如果在切换面上某一区域内所有的运动点都是终止点, 则一旦运动点趋近于该区域, 就会被“吸引”到该区域内运动。此时, 称在切换面 $s = 0$ 上所有的运动点都是终止点的区域称为“滑模”区。系统在滑模区中的运动就叫做“滑模运动”。

按照滑动模态区上的运动点都必须是终止点这一要求, 当运动点到达切换面 $s = 0$ 附近时, 必有

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} \leq 0 \quad \text{及} \quad \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} \geq 0 \quad (5)$$

也可以写成

$$\lim_{s \rightarrow 0} s \dot{s} \leq 0 \quad (6)$$

根据此不等式对系统构造了一个形如:

$$v(x_1, x_2, \dots, x_n) = [s(x_1, x_2, \dots, x_n)]^2 \quad (7)$$

的李雅普诺夫(Lyapunov)函数。由于在切换面邻域内函数式(7)是正定的, 而按照式(6), s^2 的导数是负半定的, 也就是说在 $s = 0$ 附近 v 是一个非增函数, 因此, 如果满足条件式(6), 则式(7)是系统的一个李雅普诺夫函数。系统本身也就稳定于条件 $s = 0$ 。

2.2 滑模控制算法的设计

根据滑模控制算法的原理, 液压位置伺服系统滑模控制设计过程如下:

设定图 1 所示液压位置伺服系统的跟踪误差为:

$$e = r - y \quad (8)$$

定义全局滑模面为

$$s = \dot{e} + c_1 e + c_2 e \quad (9)$$

设计滑模控制率为

$$u = \frac{1}{g(x)} [-f(x) + \ddot{r} + c_1 \dot{e} + c_2 e + K(t) \operatorname{sgn}(s)] \quad (10)$$

其中 $K(t)$ 为切换增益, 有 $K(t) \geq 0$

稳定性证明: 定义 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (11)$$

则:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s[\ddot{e} + c_1\dot{e} + c_2e] \\ &= s[\ddot{r} - \ddot{y} + c_1\dot{e} + c_2e] \\ &= s[\ddot{r} - f(x) - g(x)u + c_1\dot{e} + c_2e] \end{aligned} \tag{12}$$

将控制律式(10)代入式(12), 得

$$\dot{V} = s[-K(t)\text{sgn}(s)] \tag{13}$$

得:

$$\dot{V} = -K(t)|s| \leq 0 \tag{14}$$

则系统在滑面 s 上稳定的。

2.3 模糊规则的设计

在滑模控制律式(10)中, 切换增益 $K(t)$ 用于补偿不确定项, 以保证滑模存在性条件得到满足, 但是 $K(t)$ 值是造成抖振的原因, 本文设计了模糊控制器对 $K(t)$ 进行模糊化, 来减弱系统存在的抖振现象。

采用二维模糊控制器, 通过模糊控制规律直接设计切换增益 $K(t)$ 。设模糊控制器的输入是 s 和 \dot{s} , 模糊控制器的输出是控制的变化量 ΔK 的模糊化变量。模糊控制器设计的具体步骤如下:

①定义模糊集

PB = 正大; PM = 正中; PS = 正小; ZO = 零
NS = 负小; NM = 负中; NB = 负大

②根据模糊控制原理, 定义 s 和 \dot{s} 为模糊控制器的输入, 输出为 ΔK

$s = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$

$\dot{s} = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$

$\Delta K = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$

其论域均为 $\{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$

上述模糊化变量均选择正态分布隶属函数。

③确定模糊滑模控制器的模糊控制规则

根据相关理论^[9], 滑模存在的条件 $s\dot{s} < 0$, 当系统到达滑模面后, 将会保持在滑模面上。 $K(t)$ 为保证系统运动得以到达滑模面的增益, 其值必须足以消除不确定项的影响。由此可得模糊规则如下:

如果 $s\dot{s} > 0$, 则 $K(t)$ 应增大 (15)

如果 $s\dot{s} < 0$, 则 $K(t)$ 应减小 (16)

由式(15)和式(16)得, 当 s 和 \dot{s} 都为正大, 这意味着

$s\dot{s}$ 是正大, 那么 $K(t)$ 就需要控制输入一个大的正的变化, 以使 $s\dot{s}$ 快速减小 (If s is PB and \dot{s} is PB then ΔK is PB)。当 s 和 \dot{s} 都为负大, 这也意味着 $s\dot{s}$ 是正大, 那么同样需要控制输入一个大的正的变化, 以使 $s\dot{s}$ 快速减小 (If s is NB and \dot{s} is NB then ΔK is NB)。当 s 为正大和 \dot{s} 为负大, 这意味着 $s\dot{s}$ 是负大, 那么 $K(t)$ 同样需要控制输入一个大的正的变化, 以使 $s\dot{s}$ 快速减小 (If s is NB and \dot{s} is NB then ΔK is NB), 按照这种规律, 得到模糊规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

\dot{s}	s						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	NB	NB	NM	ZO	PM	PB	PB
PM	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
NS	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
NM	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
NB	PB	PB	PM	ZO	NM	NB	NB

3 液压位置伺服系统的仿真

在仿真过程中, 取 $\omega_n = 70$, $\xi_n = 0.5$, $K_v = 1$, 采用 MATLAB 软件对系统进行仿真。结果与基于趋近率的滑模控制算法相比较, 结果如图 2。

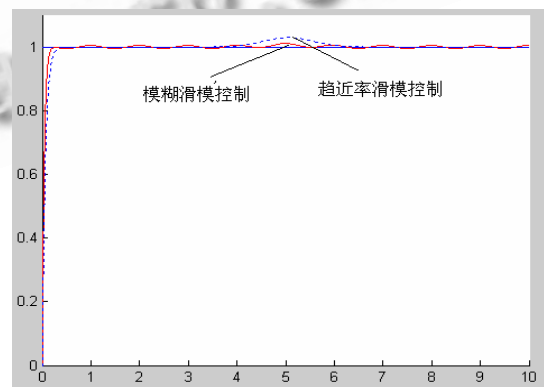


图 2 高斯干扰阶跃响应比较

为了模拟实际液压位置伺服系统易受到外界强干扰的特点, 将扰动设为高斯函数的形式, 即

$$F = 200 \exp\left(-\frac{(t-5)^2}{0.5}\right)$$

仿真结果图 2 表明, 在外界的

强干扰影响模糊滑模控制系统的影响幅度 0.5%，而对基于趋近率滑模控制系统影响幅度达到 1.5%，模糊滑模控制系统具有更强的抗干扰能力。

为了模拟实际液压位置伺服系统参数时变的特点，假设参数 ω_n^2 的取值受到了外界因素影响，设 $\omega_n^2 = 4900 + 2000\sin(2\pi t)$ ，得系统仿真图 3，该仿真结果表明模糊滑模控制系统对系统参数变化反应不灵敏，在内部参数时变的情况下依然有很好的跟踪性能，模糊滑模控制比基于趋近率滑模控制系统具有更强的鲁棒性。

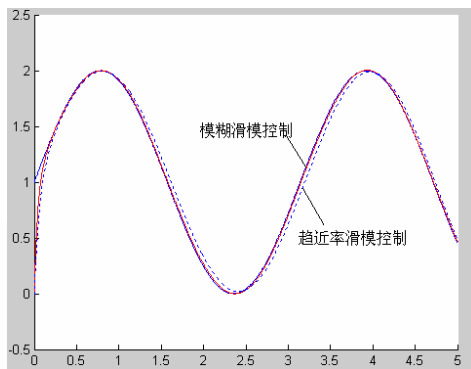


图 3 内部参数时变正弦位置跟踪比较

4 结论

在简化液压位置伺服系统数学模型的基础上，设计了滑模控制算法并使用构造 Lyapunov 函数的方法证明了该滑模控制算法的稳定性。为了解决滑模控制算法在本质上的不连续的特性会引起系统抖振的问题，在理论分析的基础上设计了模糊控制规则来柔化控制信号。在系统仿真的过程中，根据位置伺服系统的实际情况，分别模拟外部强干扰和被控对象参数时变，仿真结果表明，基于模糊滑模控制算法的液压位

置伺服系统具有更强的抗外界干扰能力，内部参数的时变情况下依然保持良好的跟踪性能。

参考文献

- 1 郑中白,曾庆亮,李子林. 轧制过程自动化. 北京:冶金工业出版社,2005.106-107.
- 2 刘金锴. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真. 北京:清华大学出版社, 2005.14-15.
- 3 张昌凡,何静. 滑模变结构的智能控制理论与应用研究. 北京:科学出版社, 2005.9-10.
- 4 Zhang YX, Zhang SY. Fuzzy Indirect Adaptive Sliding Mode Tracking Control for a Class of Nonlinear Interconnected System. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2003, 29(5):658-665.
- 5 Chern TL. Design of integral variable structure controller and application to electrohydraulic velocity servosystems. IEEE Proceeding, 1991,138(5):439-444.
- 6 Chern TL, Wu YC. Integral variable structure control approach for robot Manipulators. IEEE Proceeding, 1993,139(2):161-166.
- 7 Chen MS, Hwang YR, Tomizuka. A state-dependent boundary layer design for sliding mode control. IEEE Transactions Automatic control, 2002,47(10):1677-1681.
- 8 张利平. 液压传动与控制. 西安:西北工业大学出版社, 2005.262-281.
- 9 Xiang J, Su HY, Chu J. Sliding Mode Control Design for a Class of System with Mismatched Uncertainties. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2005,31(5):788-793.