

液压伺服系统自适应模糊变结构控制

杨 勇

(广东技术师范学院机电学院, 广东广州 510665; 中南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410083)

摘 要: 结合变结构控制、自适应控制和模糊技术等特点, 提出一种自适应模糊变结构控制方法. 首先, 设计一个带积分开关平面函数的变结构控制器, 并构造一个二维模糊边界层宽度调节器以削弱抖振. 其次, 基于 Lyapunov 稳定性理论, 引入一自适应算法, 自适应调节变结构控制参数. 应用于液压伺服系统的控制实验结果表明, 所提出的控制方法能削弱抖振, 改善液压伺服系统稳态控制精度, 具有较强的鲁棒自适应综合性能.

关键词: 模糊变结构控制; 边界层宽度调节; 自适应控制; 抖振削弱; 稳态精度; 液压伺服系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 01-0086-04

Adaptive Fuzzy Variable Structure Control for Hydraulic Servo System

YANG Yong

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou, Guangdong 510665, China;
College of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Combining the merits of variable structure control (VSC), adaptive control and fuzzy technique, an adaptive fuzzy variable structure control has been developed. A variable structure controller with integral switching plane function is designed, and a two dimension fuzzy scheduling mechanism is designed for boundary layer width tuning to reduce chattering. Based on Lyapunov stability theory, an adaptive algorithm is used to adaptively tune the parameters of VSC. Experiment results applied to hydraulic servo system show that both chattering reduction and higher steady state precision can be effectively carried out by using the proposed control method. The proposed control system has stronger robustness and adaptation.

Key words: fuzzy variable structure control (FVSC); boundary layer width tuning; adaptive control; chattering reduction; steady-state characteristics; hydraulic servo system

1 引言

液压伺服系统^[1]应用广泛, 但易受干扰的影响, 迫切需要强鲁棒、强自适应和高精度控制. 变结构控制^[2]对周围摄动和外界扰动具有不变性, 但存在高频抖振. 消除高频抖振与保证稳态精度和系统鲁棒性是变结构控制中的矛盾方面.

模糊控制^[3]无需建立精确的系统数学模型, 对模型参数变化和干扰具有强鲁棒性, 但控制精度不高, 单独使用效果不佳. 融合变结构控制和模糊控制的特点, 形成一种模糊变结构控制^[4], 但自适应性欠缺.

自适应控制^[5]能自动修正控制律参数, 但控制算法复杂, 对强干扰和动态参数剧烈变化的鲁棒性不强. 综合变结构控制和自适应控制构成一种变结构自适应控制^[6]. 本文结合变结构控制、模糊技术和自适应控制等特点, 提出一种自适应模糊变结构控制方法. 控制结

果表明, 系统抖振得到削弱, 稳态控制精度较高, 具有良好的鲁棒性和抗干扰自适应性, 综合性能得到改善.

2 液压伺服系统自适应模糊变结构控制器设计

定义状态变量 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$, 且 $x_1 = x_d - x_p$, $x_2 = -\dot{x}_p$, $x_3 = -\ddot{x}_p$, 于是基于在原点附近的线性化和 Laplace 变换方法, 由控制元件的线性化方程、流量连续性方程和力平衡方程^[1], 可得液压伺服系统状态方程模型为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + DF_L \\ y &= Gx \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $y \in \mathbf{R}^{1 \times 1}$, $x \in \mathbf{R}^{3 \times 1}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\omega_h^2 & -2\zeta_h\omega_h \end{bmatrix}$,

$$B = [0 \ 0 \ K_f K_q \omega_h^2 / A_p]^T, \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$G = [1 \ 0 \ 0]$$

其中, K_{qi} 为阀零位流量增益 (m^3/sA), A_1, A_2 分别为液压缸活塞面积 (m^2), 且 $A_1 = A_2 = A_p$, $V_1 = V_1 + V_2$ 为有效容积 (m^3), β_e 为体积弹性模量 (N/m^2), M 为负载质量 (kg), F_L^* 为名义外负载干扰 (N), K_f 为反馈增益系数 (V/m), 且 ω_h 为液压缸固有频率 (rad/s), 且 $\omega_h =$

$$\sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{MV_1}}, \zeta_h \text{ 为液压缸阻尼系数 (-)}, \text{ 且 } \zeta_h = \frac{K_c}{A_p} \sqrt{\frac{\beta_e M}{V_1}},$$

其中, K_c 为阀流量压力增益 (m^5/Ns).

如图 1 所示, 所提出的自适应模糊变结构液压伺服控制系统由变结构控制器, 模糊边界层逻辑调节器和自适应机构三个部分组成.

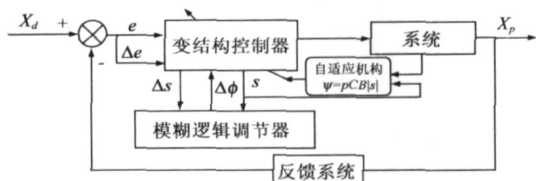


图 1 自适应模糊变结构控制系统

2.1 变结构控制器

考虑系统参数未知不确定性因素的影响, 方程(1)可写为

$$\dot{\tilde{x}} = (A + \Delta A)\tilde{x} + (B + \Delta B)u + (D + \Delta D)F_L \quad (2)$$

式中 $\Delta A, \Delta B, \Delta D$ 为未知系统参数矩阵.

重组式(2)为

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B(u + \Omega) \quad (3)$$

式中 $\Omega = B^+ [\Delta A\tilde{x} + \Delta B u + (D + \Delta D)F_L]$, 伪逆 $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$.

构造如下积分型滑模面为

$$s = C \left[\tilde{x} - \int_0^t (A + BK)\tilde{x}(\tau) d\tau \right] = 0 \quad (4)$$

式中 $C \in \mathbf{R}^{1 \times 3}$ 为常数滑模面矩阵, $K \in \mathbf{R}^{1 \times 3}$ 为状态反馈增益矩阵.

式(4)表明, 只要采取适当的状态反馈, 使方程 $\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + BK\tilde{x}$ 的所有极点处于左半平面, 则系统跟踪误差渐进收敛到零. 这时, 选取控制规则如下

$$u = K\tilde{x} - \Psi \text{sgn}(s) \quad (5)$$

式中 Ψ 为一正常数, $\text{sgn}(s) = \begin{cases} +1, & \text{当 } s > 0 \\ -1, & \text{当 } s < 0 \end{cases}$.

定义 $|\Omega| \leq \Psi$, 则

$$\begin{aligned} \dot{s} &= s[C\tilde{x} - C(A + BK)\tilde{x}] \\ &= s[C(A\tilde{x} + Bu + \Omega) - C(A + BK)\tilde{x}] \\ &= s\{CA\tilde{x} + CB[K\tilde{x} - \Psi \text{sgn}(s) + \Omega] - C(A + BK)\tilde{x}\} \\ &\leq -CB|s|(\Psi - |\Omega|) \leq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

则滑模存在, 并有限时间可达.

引入边界层平滑抖振^[2], 则控制规则式(5)变为

$$u = K\tilde{x} - \Psi \text{sat}(s, \phi) \quad (7)$$

式中 ϕ 为边界层宽度, sat 为饱和函数, 且

$$\text{sat}(s, \phi) = \begin{cases} s/\phi, & \text{当 } |s| \leq \phi \\ \text{sgn}(s), & \text{当 } |s| > \phi \end{cases}$$

这时滑模存在的条件是

$$|s| \geq \phi \Rightarrow \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq (\phi - \eta) |s| \quad (8)$$

高精度位置控制与减弱控制高频抖动形成一对矛盾, 这里采用如下模糊边界层的动态调节来协调这种设计冲突.

2.2 模糊边界层调节器

模糊调节系统的输入量采用系统的滑模函数(s)及其误差变化量(Δs), 定义它们的语义变量均为 $\{PB, PM, PS, ZR, NS, NM, NB\}$, 分别表示“正大”, “正中”, “正小”, “零”, “负小”, “负中”, “负大”, 输出量采用变结构控制系统边界层宽度(ϕ), 其语义变量为 $\{B, M, LM, S, LS\}$, 分别代表“大”, “中”, “小中”, “小”, “小小”. 表 1 为本文采用的变结构控制系统开关平面 16 条模糊边界层宽度调节规则, 采用 Max-min 模糊推理和重心法反模糊运算.

表 1 模糊边界层调节规则

Δs (或 s) \ $\Delta \phi$ (或 s)	NB	NM	NS	ZR
PB	LM	B	S	LM
PM	B	S	LM	M
PS	S	LM	M	LS
ZR	LM	M	LS	LS

图 2 为模糊调节器输入输出变量的隶属度函数. 采用边界层实时“变宽变窄”的模糊调整策略, 以兼顾系统平滑变结构抖振和获取较高控制精度. 模糊调节边界层宽度规则具有对称性, 它们满足条件(8). 在变结构控制应用中, 需要预先知道不确定性因素(如系统参数变化、外界干扰)的上界, 但实际不确定性范围难以准确获取, 且随着不确定性因素的增加, 不确定性上界

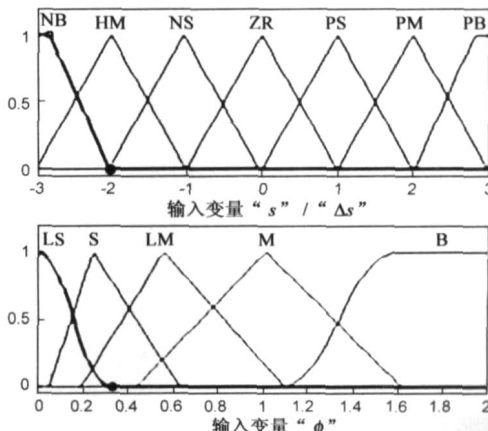


图 2 模糊调节器输入/输出变量隶属度函数

会增大, 导致控制信号增大, 控制成本增加. 为此, 引入如下自适应机构, 根据滑模状态变化, 动态自适应调节变结构控制作用.

2.3 自适应机构

假定存在一优化控制参数 Ψ^p , 且 $|\Omega| \leq \Psi^p$, 满足滑模存在条件. 定义误差

$$\delta = \Psi - \Psi^p \quad (9)$$

式中 Ψ 为控制参数 Ψ 的估计值, Ψ^p 为控制参数 Ψ 的优化值, δ 为一小常数.

定义控制参数误差矢量为

$$\bar{\Psi} = \Psi - \Psi^p \quad (10)$$

式中 $\bar{\Psi}$ 为控制参数 Ψ 的误差矢量.

基于开关平面函数和控制参数误差矢量, 定义如下 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \left(s^T s + \frac{1}{\rho} \bar{\Psi}^T \bar{\Psi} \right) \quad (11)$$

式中 ρ 为正数值.

对式(11)求导, 可得

$$\dot{V} = \dot{s} + \frac{1}{\rho} \bar{\Psi}^T \dot{\Psi} \quad (12)$$

由式(6)和式(12)得

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -CB|\Psi|s| + CB\delta\Omega + \frac{1}{\rho} \bar{\Psi}^T \dot{\Psi} \\ &\leq -CB|\Psi|s| + CB|\delta\Omega| + \frac{1}{\rho} \bar{\Psi}^T \dot{\Psi} \\ &= -CB|\delta\Omega| + \frac{1}{\rho} \bar{\Psi}^T \dot{\Psi} \\ &= -CB|\delta\Omega| + \frac{1}{\rho} \bar{\Psi}^T [-\rho CB|\delta\Omega|] \end{aligned} \quad (13)$$

如果上式(13)满足自适应规则

$$\dot{\Psi} = \rho CB|\delta\Omega| \quad (14)$$

那么

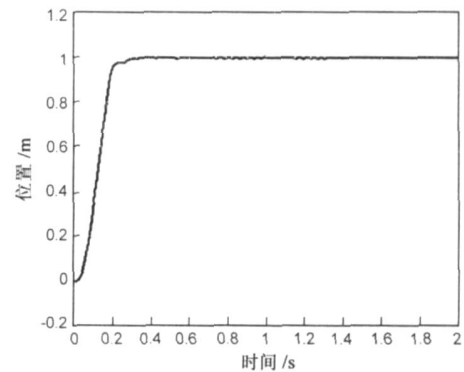
$$\dot{V} = -CB|\delta\Omega| \leq 0 \quad (15)$$

因此, 系统渐近稳定

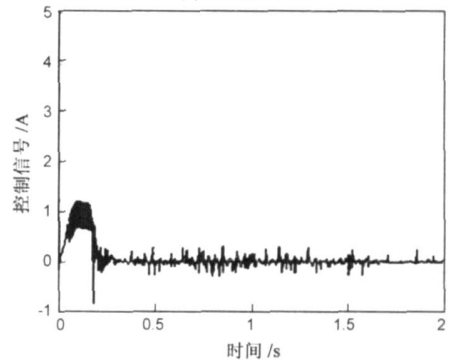
3 实验结果及讨论

为了证实自适应模糊变结构控制效果, 对液压伺服系统进行了控制实验. 表 2 为系统主要参数. 滑模面矩阵 C 取为 $[250000, -1000, 1]$, 采用位置和速度反馈, 状态反馈增益矩阵 K 取为 $[100, -10, 0]$, 初始 Ψ 取为 30, 常数 ρ 取为 0.15. 在液压伺服控制系统中, 使用 dSPACE 卡以完成实时测量和控制工作.

图 3 和图 4 分别是当系统有 10% 的参数变化和 500N 外干扰力 F_L 时的自适应模糊变结构控制和常规模糊变结构控制结果. 图 3 和图 4 中 (a) 为液压伺服系统控制响应曲线, 比较结果可看出, 自适应模糊变结构控制精度较高, 动态响应特性好, 对系统参数变化的自

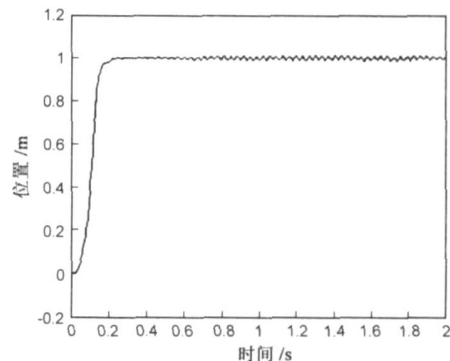


(a) 系统响应曲线

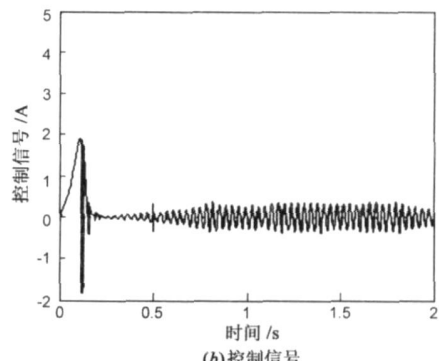


(b) 控制信号

图3 控制结果 (自适应模糊变结构控制)



(a) 系统响应曲线



(b) 控制信号

图4 控制结果 (常规模糊变结构控制)

适应能力较强. 图 3 和图 4 中 (b) 为液压伺服系统控制信号曲线, 对比结果表明, 自适应模糊变结构控制系统的抖振得到有效削弱. 综合结果可以看出, 自适应模糊

变结构控制在平滑抖振, 保证系统稳态精度, 和加强系统鲁棒自适应性等整体综合性能方面, 较常规模糊变结构控制表现得更出色.

表 2 液压伺服系统主要参数

参数名称(单位)	参数值	参数名称(单位)	参数值
油腔总容积 $V_p(\text{m}^3)$	0.763×10^{-3}	流量增益 $K_q(\text{m}^3/\text{sV})$	3.323×10^{-12}
活塞室有效面积 $A_p(\text{m}^2)$	0.7663×10^{-3}	阀流量压力增益 $K_c(\text{m}^5/\text{Ns})$	6.03×10^{-12}
活塞室容积系数 $C_p(\text{m}^5/\text{N})$	0.633×10^{-12}	反馈系统增益 $K_f(\text{V/m})$	100
阀固有频率 $\omega_v(\text{rad/s})$	220	阀阻尼比 $\xi_v(-)$	0.5
体积弹性模量 $\beta_e(\text{N/m}^2)$	9.83×10^9	负载质量 $M(\text{kg})$	387

4 结论

在传统变结构控制系统中融合模糊逻辑的非线性推理和自适应控制算法, 提出了一种液压伺服系统自适应模糊变结构控制策略. 综合自适应、模糊和变结构控制特点, 可有效柔化高频切换控制作用, 加强对不确定性参数和外干扰变化的自适应鲁棒性, 保证较高控制精度和较优整体动静态性能.

参考文献:

[1] 王占林. 近代电气液压伺服控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
WANG Zhan lin. On Modern Electric, Hydraulic Servo Control [M]. Beijing: Beijing University of Aero and Astro, 2005. (in Chinese)

[2] J Y Hung, GAO Weibing, J C Hung. Variable structure control: a survey[J]. IEEE Trans on Ind Electronics, 1993, 40(1): 2-22.

[3] C C Lee. Fuzzy logic in control systems: fuzzy controller Part I, II[J]. IEEE Trans on Sys, Man and Cyb, 1990, 20(2): 404-435.

[4] R Palm. Robust control by fuzzy sliding mode[J]. Automatica, 1994, 30(9): 1429- 1437.

[5] K J Östöm. Theory and application of adaptive control survey [J]. Automatica, 1983, 19(4): 471- 486.

[6] 吴振顺, 卢剑锋, 董泳, 等. 变结构自适应控制器及其在液压伺服系统中的应用[J]. 中国机械工程学报, 2000, 36(5): 107- 110.
WU Zhen shun, LU Jian feng, DONG Yong, et al. On application research of variable structure adaptive control in hydraulic servo systems[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(5): 107- 110. (in Chinese)

作者简介:

杨 勇 男, 1968 年 5 月生于湖南石门, 广东技术师范学院教授, 中南大学材料科学与工程学院博士后. 主要研究方向为工业过程控制等. E-mail: Yang_99@163.com