

基于线性化的液压马达伺服系统滑模控制

柳金利

(上海理工大学机械学院, 上海 200093)

✉192351380@st.usst.edu.cn



摘 要: 针对液压马达伺服控制系统由于系统强非线性引起的精确控制困难的问题, 提出了基于线性化和滑模控制算法的自适应鲁棒积分滑模控制器。在不改变系统模型的前提下, 应用线性化将系统模型中的部分非线性项进行线性化处理, 降低了系统的强非线性, 并结合自适应算法进行线性化误差补偿。同时, 针对跟踪精度不足等问题, 引入积分滑模控制算法进行鲁棒控制器设计, 并通过Lyapunov理论证明了液压马达伺服系统的闭环稳定性。仿真结果表明, 所设计的控制器相比传统PID控制性能提升了40%, 且具有较强的鲁棒性。

关键词: 液压马达; 线性化; 积分滑模控制; 自适应

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Sliding Mode Control of Hydraulic Motor Servo System based on Linearization

LIU Jinli

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

✉192351380@st.usst.edu.cn

Abstract: Aiming at the problem of precise control difficulty caused by strong nonlinearity of hydraulic motor servo control system, this paper proposes to design an adaptive robust integral sliding mode controller based on linearization and sliding mode control algorithm. Under the premise of not changing the system model, some nonlinear items in the system model are linearized by applying linearization to reduce the strong nonlinearity of the system, and the linearization error compensation is carried out with the adaptive algorithm. At the same time, aiming at the problem of insufficient tracking accuracy, an integral sliding mode control algorithm is introduced to design a robust controller, and the closed-loop stability of the hydraulic motor servo system is proved by Lyapunov theory. The simulation results show that the proposed controller improves the performance by 40%, compared with the traditional PID control and it has strong robustness.

Keywords: hydraulic motor; linearization; integral sliding mode control; self-adaption

1 引言(Introduction)

近年来, 随着全球环境污染的不断加剧, 不可再生能源的大量减少, 节能研究成为重点研究课题, 同时液压系统的节能问题一直是研究热点^[1-3]。压力共轨(Common Pressure Rail, CPR)系统的特点是具有多个可驱动执行器, 可进行能量回收等, 且其无节流损失的特性使其与其他液压节能系统相比具有极大的优势^[4-5], 其中的液压马达控制部分更是广泛应用于工程机械和船舶领域中^[6]。但同样由于其自身复杂的内

部结构和工作原理, 其控制系统具有很强的耦合性, 增加了系统的控制难度^[7]。

对于液压马达系统控制算法的研究, 由于其存在的强非线性等问题, 需要使用可以解决系统强非线性且鲁棒性强的控制算法进行控制器设计。常用的算法有滑模控制^[8]、模糊控制^[9]和反步控制^[10]等。LU等^[11]针对直线负载提出了基于模糊系统的自适应PID算法, 提高了系统的响应速度和系统鲁棒性。SHEN等^[12]提出了一种基于Pi-Sigma模糊神经网络的自

适应滑模控制算法。利用Pi-Sigma模糊神经网络逼近非线性方程,解决了三角函数等非线性问题,提高了系统的控制性能。然而,在上述研究中,包含控制变量的三角函数项被模糊系统完全逼近,系统模型往往被视为一个“黑箱”,忽略了系统的先验信息,不利于进一步提高系统的控制性能。

基于上述问题,本文提出了一种基于线性化的自适应积分滑模控制器。在不改变系统模型的前提下,应用线性化方法将系统模型中的三角函数项进行线性化处理,通过自适应算法进行线性化误差补偿,并结合积分滑模进行控制器设计,以提高系统控制精度。仿真结果证明,该控制器能够实现精确的速度跟踪控制,具有较强的鲁棒性。

2 液压马达伺服系统模型(Hydraulic motor servo system model)

液压马达伺服系统如图1所示。其中,A端口与高压油路和液压马达进油口相连;B端口、T端口分别与液压马达出油口和低压管路相连。系统通过控制变压比来改变液压马达两端压差,进而达到控制液压马达旋转的效果。

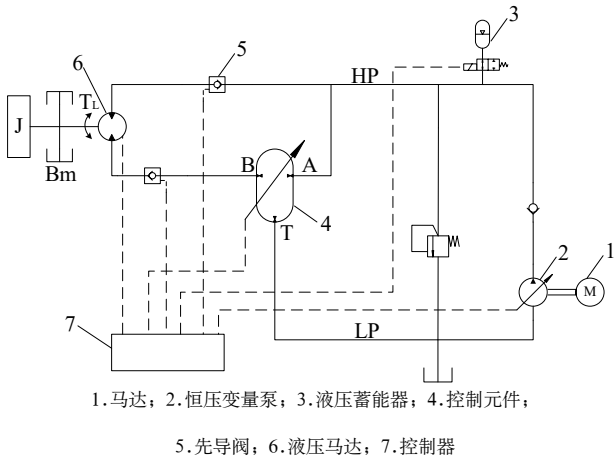


图1 液压马达伺服系统结构图

Fig.1 Structure diagram of hydraulic motor servo system

忽略液压马达的外泄漏并假设A端口压力为定值,T端口压力为零,选取状态变量:

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4] = [\theta_m \ \dot{\theta}_m \ p_B \ \omega_{HT}]$$

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{-B_m x_2 + x_3 D_m - P_A D_m - T_L}{J_m} \\ \frac{-x_4 V_{HT} \sin \frac{\beta}{2} \sin(u - \frac{\alpha}{2} - \frac{\beta}{2}) + (L_{im} + L_{ic}) P_A - (2L_{im} + L_{em} + L_{ic}) x_3 - D_m x_2}{2\pi} \\ \frac{1}{\beta_c V_{Lb}} \end{bmatrix} \\ y = [0 \ 1 \ 0 \ 0]x \end{cases} \quad (1)$$

系统中各参数值如表1所示。

表1 液压马达伺服系统参数

Tab.1 Parameters of hydraulic motor servo system

系统参数	数值
轴向柱塞部件排量 $V_{HT} / \text{m}^3 \cdot \text{r}^{-1}$	45×10^{-6}
控制元件转动惯量 $J_{HT} / \text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.0033
A端口压力 P_A / MPa	15
液压马达排量 $D_m / \text{m}^3 \cdot \text{r}^{-1}$	15×10^{-6}
B端口到马达进油管容积 V_{Lb} / m^3	5×10^{-4}
液压马达粘性阻尼系数 $B_m / \text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$	0.353
外负载转矩 T_L / N	40
弹性模量 β_c / Pa	6.99×10^8
控制元件泄漏系数 $L_{em}, L_{im}, L_{ic} / \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$	3×10^{-11}
液压马达转动惯量 $J_m / \text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.25

3 自适应积分滑模控制器设计(Adaptive integral sliding mode controller design)

3.1 线性化设计

从液压马达伺服系统状态空间方程可以看出,系统控制量 $u(t)$ 被包含于三角函数中,且状态空间方程结构不符合反步、滑模等控制方法的要求,这一方面增强了系统的非线性,另一方面也使得系统无法采用常规的滑模、反步及反馈线性化等先进控制算法进行有效的控制器设计。此外,为保障系统效率,合理的配流盘转角应限定在 $0 < u < 1.75$,这也增加了系统解耦求解时的困难。为此,本文采用线性化方法,对包含控制变量的非线性项 $\sin(\frac{2}{3}\pi - u)$ 进行线性化,同时结合积分滑模进行非线性控制器设计。线性化示意图如图2所示。

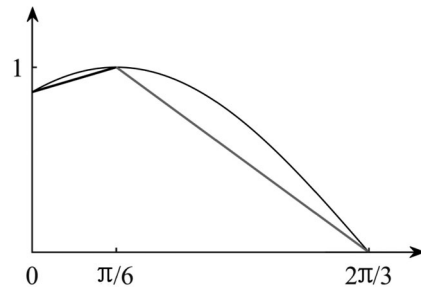


图2 线性化示意图

Fig.2 Schematic diagram of linearization

3.2 控制器设计

将液压马达速度跟踪误差定义为 $e = x_{2d} - x_2$, 其中 x_{2d} 为理想速度信号,则可将滑模面设计为:

$$s = \dot{e} + c_1 e + c_2 \int f(e) dt \quad (2)$$

式中, $c_1 > 0$ 、 $c_2 > 0$ 为控制器增益系数; $f(e)$ 为非线性函数, 具有放大较小误差、限制较大误差的作用, 可以使控制器控制效果更平稳, 增强系统鲁棒性。 $f(e)$ 表达式如下:

$$f(e) = \begin{cases} l \times \text{sgn}(e), & |e| \geq l \\ -[l^2 - (e+l)^2]^{1/2}, & -l < e < 0 \\ [l^2 - (e-l)^2]^{1/2}, & 0 < e < l \end{cases} \quad (3)$$

对式(2)求导得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_2 f(e) \\ &= x_4 \left[\frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} \sin(2\pi/3 - u)}{4\pi J_m V_{1-b}} \right] + x_2 Y_2 + x_3 Y_3 + T \\ &= x_4 \left[\frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} (au + b + \sigma)}{4\pi J_m V_{1-b}} \right] + x_2 Y_2 + x_3 Y_3 + T \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $au + b$ 为非线性项线性化后所得直线; σ 为线性化误差, 应用自适应对其进行误差补偿; $Y_2 = \frac{c_1 B_m}{J_m} - \frac{B_m^2}{J_m} + \frac{D_m^2 \beta_e}{J_m V_{1-b}}$,

$$Y_3 = \frac{-c_1 D_m}{J_m} + \frac{B_m D_m}{J_m^2} + \frac{D_m \beta_e (2L_{im} + L_{em} + L_{ic})}{J_m V_{1-b}},$$

$$T = \frac{c_1 (P_A D_m + T_L) - B_m (P_A D_m + T_L)}{J_m} - \frac{D_m \beta_e P_A (L_{im} + L_{ic})}{J_m V_{1-b}} + (c_1 \ddot{x}_{2d} + \ddot{x}_{2d} + c_2 f(e)).$$

定义Lyapunov函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \frac{1}{2h} \tilde{\sigma}^2 \quad (5)$$

式中, h 为自适应增益; $\tilde{\sigma} = \hat{\sigma} - \sigma$ 为自适应误差, 其中 $\hat{\sigma}$ 为 σ 的估计值。

求得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \tilde{\sigma}\dot{\hat{\sigma}}/h \\ &= s \left\{ x_4 \left[\frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} (au + b + \hat{\sigma} - \tilde{\sigma})}{4\pi J_m V_{1-b}} \right] + x_2 Y_2 + x_3 Y_3 + T \right\} + \frac{\tilde{\sigma}\dot{\hat{\sigma}}}{h} \end{aligned} \quad (6)$$

将滑模控制律设计为:

$$u = -\frac{1}{a} \left\{ \frac{4\pi J_m V_{1-b} [\varepsilon \text{sgn}(s) + ks + x_2 Y_2 + x_3 Y_3 + T]}{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} x_4} + b + \hat{\sigma} \right\} \quad (7)$$

式中, $\varepsilon > 0$, $k > 0$ 。

将式(7)代入式(6)可得:

$$\dot{V} = -s \left[x_4 \frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} \tilde{\sigma}}{4\pi J_m V_{1-b}} + ks + \varepsilon \text{sgn}(s) \right] + \frac{\tilde{\sigma}\dot{\hat{\sigma}}}{h} \quad (8)$$

取自适应律为:

$$\dot{\hat{\sigma}} = hs \frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} x_4}{4\pi J_m V_{1-b}} \quad (9)$$

为防止 $\hat{\sigma}$ 过大导致控制信号过大, 采用如下映射自适应

算法将 $\hat{\sigma}$ 限制在 $[\sigma_{\min} \ \sigma_{\max}]$ 之间。

$$\dot{\hat{\sigma}} = \text{Proj}_{\hat{\sigma}} \left(hs \frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} x_4}{4\pi J_m V_{1-b}} \right) \quad (10)$$

$$\text{Proj}_{\hat{\sigma}}(g) = \begin{cases} 0, & \hat{\sigma} \geq \sigma_{\max} \ \& \ g > 0 \\ 0, & \hat{\sigma} \leq \sigma_{\min} \ \& \ g < 0 \\ g, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (11)$$

由式(8)—式(11)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -s \left\{ x_4 \left[\frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} \tilde{\sigma}}{4\pi J_m V_{1-b}} \right] + ks + \varepsilon \text{sgn}(s) \right\} + \frac{\tilde{\sigma}}{h} \text{Proj}_{\hat{\sigma}} \left(hs \frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} x_4}{4\pi J_m V_{1-b}} \right) \\ &\leq -s \left\{ x_4 \left[\frac{\sqrt{3} D_m \beta_e V_{HT} \tilde{\sigma}}{4\pi J_m V_{1-b}} \right] + ks + \varepsilon \text{sgn}(s) \right\} + \frac{\sqrt{3} \tilde{\sigma} s D_m \beta_e V_{HT} x_4}{4\pi J_m V_{1-b}} \end{aligned} \quad (12)$$

即 $\dot{V} \leq -ks^2 - \varepsilon|s| \leq 0$ 。

由式(12)可知, 当且仅当滑模面函数 $s = 0$ 时, $\dot{V} = 0$, 即 $\dot{V} \equiv 0$ 时, $s \equiv 0$ 。根据LaSalle不变性原理^[13], 液压马达伺服速度控制闭环系统渐进稳定。

4 仿真分析(Simulation analysis)

为了验证本文所提出的基于线性化的自适应积分滑模控制器的有效性, 结合所建立的液压马达伺服系统数学模型和系统实际工况, 应用MATLAB软件搭建了系统仿真模型, 并根据此模型进行仿真实验。将本文所提出的控制器与PID控制器进行跟踪效果对比, 以验证控制器的控制性能。同时, 为保证两个控制器能保持良好的控制性能, 选取控制器参数如表2所示。

表2 控制器参数

Tab.2 Controller parameters

控制器参数	数值
K_p, K_i, K_d	0.02, 0.05, 0
滑模函数增益 c_1, c_2	130, 150
控制律增益 k, ε	232, 1000
自适应增益 h	2×10^{-9}
积分项参数 l	50

选取正弦信号 $50 \sin 2t + 20$ 和一个自制信号作为理想信号进行仿真实验, 仿真结果如图3和图4所示。图3为以正弦信号为输入信号时液压马达伺服速度系统的响应, 由图3(a)和图3(b)可以看出, PID控制器的速度跟踪曲线在初始阶段与理想输入信号有一段较大的偏离, 大约1秒后可较好地实现对理想

信号的跟踪。而本文所提出的基于线性化的自适应积分滑模控制器在初始阶段即可实现对理想信号的正常跟踪,且在整個仿真过程中控制器始终保持较小的跟踪误差,不存在异常波动,图3(c)中自适应积分滑模控制器的平稳输出也可以进一步证明该控制器的稳定性。

为验证所提出的自适应积分滑模控制器的鲁棒性,引入如图4(a)所示的自制信号作为理想信号,该自制信号结合系统实际工况,具有多处速度突变点,可以从这个角度检验控制器的“抗突变”性能。由图4(a)和图4(b)可知,与PID控制器相比,在具有初始速度误差的情况下,自适应积分滑模控制器能够快速逼近理想曲线,控制精度提升了40%,且在后续跟踪过程中遇到速度突变点时也能够保持较小的跟踪误差,验证了控制器的鲁棒性。另外,如图3(c)和图4(c)所示,在对两个不同理想信号的跟踪过程中,所提出的控制器控制输出始终保持在 $[0-1.75\text{rad}]$ 这一高效工作区间内。结合以上仿真结果分析,本文所提出的自适应积分滑模控制器具有较好的控制性能,且具有良好的鲁棒性。

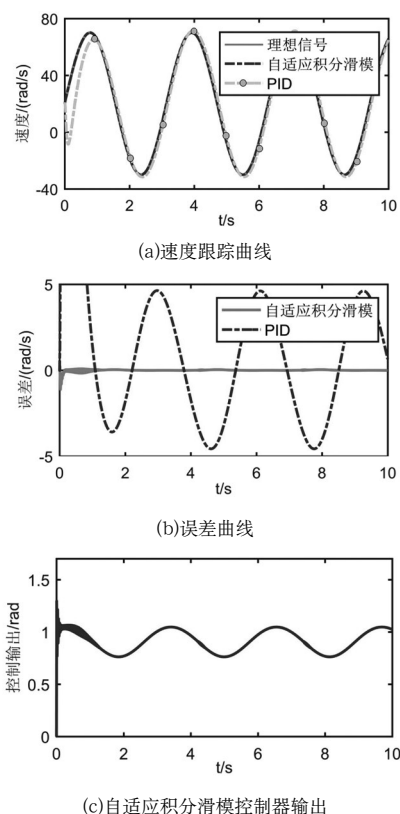


图3 输入信号为正弦信号时液压马达伺服速度系统的响应
Fig.3 Response of hydraulic motor servo speed system when input is sinusoidal signal

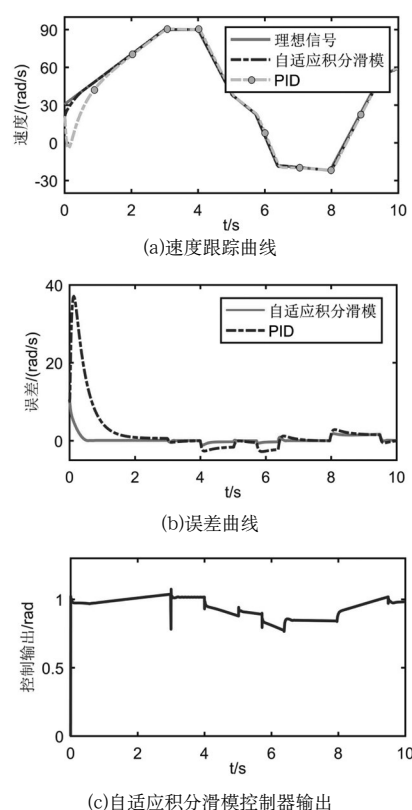


图4 输入信号为自制信号时液压马达伺服速度系统的响应
Fig.4 Response of hydraulic motor servo speed system when input is customized signal

5 结论(Conclusion)

本文建立了液压马达伺服速度系统数学模型,推导出了状态方程,并以该数学模型为依据设计了一种基于线性化的自适应积分滑模控制器。在所提出的控制器中,应用线性化对模型中包含控制量 u 的非线性项进行线性化处理,降低了系统的强非线性,并结合自适应算法进行线性化误差补偿。同时,在控制器设计中引入积分滑模来增强系统鲁棒性,提高系统控制精度。仿真结果证明,基于线性化的自适应积分滑模控制器具有良好的速度跟踪控制性能,且具有较强的鲁棒性。在未来的工作中,可以在线性化的基础上尝试结合其他先进控制算法进行液压马达伺服系统控制器设计,以实现更好的控制性能。

参考文献(References)

- [1] LIN T, CHEN Q, REN H, et al. Review of boom potential energy regeneration technology for hydraulic construction machinery[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79:358-371.

(下转第47页)