

电动静液作动器的自适应变阻尼滑模控制

王明康¹, 付永领¹, 朱德明¹, 杨荣荣²

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191

2. 兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: 电动静液作动器 (EHA) 具有高集成度和功重比的优点, 然而如何抑制其死区影响和参数不确定性造成的扰动一直是研究的热点。本文在滑模控制 (SMC) 的基础上设计了一种新型自适应变阻尼滑模 (ADV-SMC) 控制方法, 该方法通过滑模控制的鲁棒性克服摩擦和外部扰动, 同时通过参数自适应律在线估计系统的未知参数进而抑制参数摄动的影响从而提高系统的跟踪性能。随后通过理论分析和仿真验证的方法证明了该自适应滑模配合变阻尼的控制策略能有效提高 EHA 的瞬态响应和稳态跟踪性能。

关键词: 滑模控制; 自适应控制; 变阻尼滑模面; 电动静液作动器 (EHA);

中图分类号: TH137

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965 (2020) XX-XXXX-XX

1 引言

在多电/全电飞机的趋势下, 新型的电传作动器包括电静液作动器 (Electro-Hydrostatic Actuator, EHA) 和机电作动器 (Electromechanical Actuator, EMA) 得到了快速发展[1][2]。相比于传统的伺服阀控作动器, 电作动器省去了油箱、液压管路等附属液压元件, 具有占用空间小、效率高、集成度高等一系列的优势。EHA 相比于 EMA, 它具有液压的自润滑作用且没有机械结构的卡死问题, 因而在现阶段被广泛应用。然而 EHA 也有着自身需要解决的问题, 如参数随着外部环境的时变性问题、液压缸本身的摩擦和泄漏带来的死区和参数不确定性等[3]。

因此, 许多学者提出了多种方案来尝试解决上述问题, 旨在提高 EHA 的动态和稳态性能。如多环级联的模糊自适应 PID 方法, 不过该方法中模糊规则的设计过度依赖经验和专家系统, 因此在实际应用中受到相当的限制[4][5]。此外, 反馈线性化控制、模型参考自适应控制、 H_∞ 控制、反步法控制等方法也被应用到 EHA 的控制中以期提高系统的鲁棒性[6][7][8]。再者, 一些人工智能的控制方法也在 EHA 领域进行了初步尝试, 如基于灰度预测的 PID 控制、基于神经网络的反步法控制等等, 不过这类方法要么需要全局寻优求解造成运算量巨大要么需要系统状态全部可

测, 这些给 EHA 的驱动控制均带来巨大的压力[9][10]。基于自适应鲁棒的方法在伺服阀控上被证明是一种行之有效的控制方法, 然而其由于偏微分的存在使得控制量非常复杂, 因此在 EHA 上没有得到广泛的研究[11][12]。

滑模控制作为一种鲁棒控制策略, 能够广泛地应用于线性和非线性系统当中, 它具有对系统外部扰动、内部参数摄动均不敏感的优点, 且它逻辑简单, 有着严格的证明过程和理论支撑[13][14]。不过它也有着一定的不足: 1) 需要大的控制增益和非线性鲁棒项来压制系统的不确定性, 这种不连续“过度”补偿就导致系统稳态时的抖振; 2) 把系统全部的不确定性依靠鲁棒项处理, 这就使得鲁棒项的任务过大。针对这两个关键问题, Yang 提出一种新型的自适应趋近律和滑模观测器用来抑制抖动和观测外部扰动, 然而这种新型趋近律方法过于复杂, 实现困难[15]。张振等人提出一种模糊滑模控制来改善抖振, 这种模糊规则也依赖非常经验设计[16]。付永领等人设计的变阻尼滑模能够改善 EHA 的阶跃响应性能, 但是该方法去掉了前馈项, 不利于系统的稳态响应, 且没有单独考虑参数不确定性[17]。

因此, 本文针对上述问题, 在滑模控制的基础上, 结合自适应方法的优点设计了一种新型的自适应变阻尼滑模控制 (ADV-SMC) 策略。该方法有如下优点: 1) 通过自适应律估计系统未知

参数, 实现了参数摄动和外部扰动的分开处理, 减小了鲁棒项任务量; 2) 通过采用饱和函数代替符号函数缓解了系统稳态时的抖振; 3) 自适应律的补偿作用提高了系统稳态精度。

本文的结构如下: 第二章详述了 EHA 系统的非线性建模过程; 第三章给出新型自适应阻尼滑模控制策略的详细设计过程, 并分析了其稳定性。第四章通过仿真的方式, 在模型基础上对比了自适应阻尼滑模和滑模、变阻尼滑模和 PID 的效果, 验证了该方法的有效性。最后是结论部分。

2 EHA 系统模型

EHA 工作原理如图 1 所示, 驱动控制器接受上位机指令, 驱动伺服电机, 带动双向泵工作, 通过液压回路将油液注入油缸, 实现作动缸的伸缩, 最终将作动杆推动到指定位置。

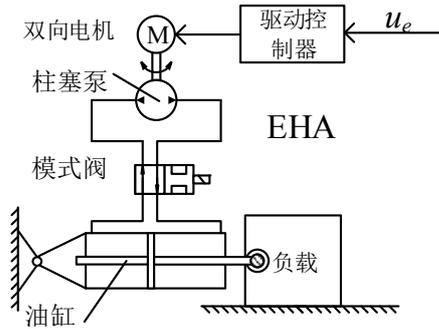


图 1 EHA 原理图

Fig.1 Schematic diagram of an EHA

2.1 直流无刷电机 (BLDCM) 模型

EHA 的伺服电机采用直流无刷电机, 绕组采用星形连接, 并且建模过程中有以下假设:

- 1) 直流无刷电机的绕组参数完全相同;
- 2) 定转子之间的油隙磁场为规则梯形波。

该电机绕组的模型可以写为:

$$\begin{cases} U_U = L_U \dot{i}_U + R_U i_U + e_U + U_N \\ U_V = L_V \dot{i}_V + R_V i_V + e_V + U_N \\ U_W = L_W \dot{i}_W + R_W i_W + e_W + U_N \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, 下标 U 、 V 和 W 分别代表电机三相; L_* 为相电感; i_* 为相电流; R_* 为相电阻;

e_* 为相反电动势; U_N 为三相连接中点电压。

一般情况下, 直流无刷电机为两两导通方式, 因此可以将式 (1) 改写为:

$$U = Li + Ri + E \quad (2)$$

式 (2) 中, U 、 L 、 i 、 R 和 E 分别为等效电压、电感、电流、电阻和电动势。

假设直流无刷电机的扭矩系数 K_t , 则其转动的动态方程为:

$$\begin{cases} U = Li + Ri + K_e \omega \\ T_e = K_t i \\ J_m \dot{\omega} = T_e - T_L - B_m \omega \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中, K_e 为反电动势系数; T_e 为电磁

转矩; J_m 为转动惯量; T_L 为等效外负载; B_m 为粘性摩擦系数。

2.2 泵控液压缸模型

根据油液泵的工作原理, 其进口流量 Q_i 和出口流量 Q_o 为:

$$\begin{cases} Q_i = \omega D_p - L_i(p_i - p_o) - L_o(p_i - p_a) - \frac{V_{in}}{\beta_e} \dot{p}_i \\ Q_o = \omega D_p - L_i(p_i - p_o) + L_o(p_o - p_a) + \frac{V_{out}}{\beta_e} \dot{p}_o \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 中, D_p 为排量; L_i 为内泄漏系数;

L_o 为外泄漏系数; p_i 、 p_o 和 p_a 为入口压力、出口压力和油箱压力; V_{in} 和 V_{out} 为入口和出口的等效容腔体积; β_e 为油液的弹性模量。

EHA 液压回路很短, 可以将阀块中的油液压力损失忽略不计。又根据流量连续性定理, 油缸两腔的流量和压力与泵的进出口的流量和压力相等。

油缸的动态方程为:

$$\begin{cases} Q_l = A\dot{x} + \frac{V_{in}}{\beta_e} \frac{dp_l}{dt} + L_c(p_l - p_r) \\ Q_r = A\dot{x} - \frac{V_{out}}{\beta_e} \frac{dp_r}{dt} - L_c(p_l - p_r) \end{cases} \quad (5)$$

式 (5) 中, 下标 l 和 r 分别表示油缸的两腔; A 为活塞有效面积; x 为活塞位移; L_c 为油缸的内泄。

若油缸的 l 腔与泵的进口连通, r 腔与泵的出口连通。联立 (4) 和 (5) 则油缸模型可以表示为:

$$\begin{cases} D_p \omega = A \dot{x} + \frac{V_0}{\beta_e} \Delta \dot{p} + L_a \Delta p + Q_a \\ A \Delta p = M \ddot{x} + B_c \dot{x} + K_s x + F_f + F_L \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中, V_0 为容腔有效体积; L_a 为泵和油缸总的泄漏系数, 并且与压差 Δp 成正比; Q_a 为不可预计的流量损失; M 为油缸和负载总的等效质量; B_c 为油缸的粘性摩擦系数; K_s 为弹性负载系数; F_f 和 F_L 分别为静摩擦和外负载。

通过联立 (3) 和 (6), 选择系统状态变量 $X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [x \ \dot{x} \ \Delta p \ \omega \ i_q]^T$ 可以建立 EHA 的状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{A}{M} x_3 - \frac{K_s}{M} x_1 - \frac{B_c}{M} x_2 - \frac{F_f + F_L}{M} \\ \dot{x}_3 = \frac{\beta_e}{V_0} (D_p x_4 - A x_2 - L_c x_3 - Q_{un}) \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{J_a} (K_t x_5 - B_m x_4 - D_p x_3 - T_f) \\ \dot{x}_5 = \frac{1}{L} (U - R x_5 - K_e x_4) \end{cases} \quad (7)$$

式 (7) 中, J_a 为泵和电机总的转动惯量; Q_{un} 为不可预计的流量损失。

可以看出整个 EHA 模型是一个通过调整控制量 U , 即母线电压为输入, 使得活塞杆位移 x_1 在存在不确定性 (如摩擦 F_f 和外负载 F_L) 情况下, 也能够跟踪目标轨迹。

3 控制器设计

3.1 坐标转换

分析系统状态空间方程式 (7), 其前两个动态方程表示液压缸的动态, 第三个方程表示系统压力的动态, 而最后两个方程表征的分别为电机转速和电流的动态。因此, 当将 x_4 视作由式 (7) 的前三个方程所构成的子系统输入 u 时, 系统模型 (7) 被拆分成机械液压子系统 (简称机液环节) 和电机子系统。这两个子系统的输入分别为电机转速和直流母线电压, 输出分别液压缸的位移和电机转速。

对于机液环节而言, 系统存在着非匹配扰动,

而滑模方法对非匹配型扰动不具备鲁棒性, 因此需要对机液环节进行坐标转换。重新定义机液环节的状态变量为:

$$\mathbf{Z} = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ 0]^T = [x_1 \ \dot{x}_1 \ \ddot{x}_1 \ 0]^T \quad (8)$$

那么, 三阶的机液环节的系统状态方程可以表示为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \dot{z}_3 = g(z_3, z_2, z_1, u, F_f, F_L) \end{cases} \quad (9)$$

根据重新定义的状态变量, 可得:

$$\begin{cases} z_3 = \dot{x}_2 = \frac{A}{M} x_3 - \frac{K_s}{M} x_1 - \frac{B_c}{M} x_2 - \frac{F_f + F_L}{M} \\ M \dot{z}_3 = A \dot{x}_3 - K_s z_1 - B_c z_2 - d(F_f + F_L) / dt \end{cases} \quad (10)$$

将式 (7) 的第三个方程带入到式 (10) 的第二个方程中消去 \dot{x}_3 , 进而有:

$$M \dot{z}_3 = A \left[\frac{\beta_e}{V_0} (D_p x_4 - A x_2 - L_c x_3 - Q_{un}) - K_s z_1 - B_c z_2 - d(F_f + F_L) / dt \right] \quad (11)$$

联立式 (11) 和式 (10) 的第一个方程, 可以得到 $\dot{z}_3 = g(z_3, z_2, z_1, u, F_f, F_L)$ 的具体表达式, 则式 (9) 可以重写为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ g_3 \dot{z}_3 = u - A_3 z_3 - A_2 z_2 - A_1 z_1 + f_d(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中, $g_3 = M V_0 (A \beta_e D_p)^{-1}$, $A_3 = L_c M (A D_p)^{-1}$,

$$A_2 = L_c B_c (A D_p)^{-1} + A D_p^{-1} + B_c V_0 (A \beta_e D_p)^{-1},$$

$$A_1 = K_s L_c (A D_p)^{-1} + K_s V_0 (A \beta_e D_p)^{-1},$$

$$f_d(t) = -Q_{un} D_p^{-1} - V_0 (\dot{F}_f + \dot{F}_L) (A \beta_e D_p)^{-1} - L_c (F_f + F_L) (A D_p)^{-1}$$

。需要说明的是, 这里假设 Q_{un} 、 \dot{F}_f 和 \dot{F}_L 均为有界值。

3.2 自适应变阻尼滑模控制器 (ADV-SMC) 设计
重新定义系统的参数矢量:

$$\boldsymbol{\theta}^T = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ g_3]^T \quad (13)$$

那么式 (12) 可以写为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 = z_3 \\ \theta_4 \dot{z}_3 = u - \boldsymbol{\theta} \mathbf{Z} + f_d(t) \end{cases} \quad (14)$$

假设系统的跟踪目标为 x_d ，那么定义误差及其导数为：

$$\begin{cases} e = e_1 = z_1 - x_d \\ \dot{e} = e_2 = z_2 - \dot{x}_d \\ \ddot{e} = e_3 = z_3 - \ddot{x}_d \end{cases}$$

设计变阻尼滑模面为：

$$\begin{cases} \sigma_1 = \ddot{e} + \gamma_1 \dot{e} + \omega_n^2 e \\ \gamma_1(e) = 2\omega_n \left(\xi_{\min} + \frac{\xi_{\max}}{1 + \delta e^2} \right) \end{cases} \quad (15)$$

那么当 $(\xi_{\min} + \frac{\xi_{\max}}{1 + \delta e^2}) > 0$ 时滑模面是收敛的，

即满足Hurwitz条件。

那么，根据滑模控制器的设计思想，控制输入 u_1 和自适应律可以设计为：

$$\begin{cases} u_1 = \hat{\theta}_4 \ddot{x}_d + \hat{\theta} \mathbf{Z} - \gamma_1 \ddot{e} - \dot{\gamma}_1 \dot{e} - \omega_n^2 \dot{e} - \eta \text{sign}(\sigma_1) \\ \dot{\hat{\theta}} = \text{Proj}(-\Gamma \mathbf{Z}_n \sigma_1) \end{cases} \quad (16)$$

式中，所以以 $\hat{\theta}$ 表示 θ 的估计值，因为在式 (14) 中，由于环境抑或测量的影响，我们无法得知系统中某些参数的真实值（如液压缸阻尼系数 B_c 、泄漏系数 L_c 等）；

$\mathbf{Z}_n = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ (\ddot{x}_d - \gamma_1 \ddot{e} - \dot{\gamma}_1 \dot{e} - \omega_n^2 \dot{e})]^T$ ； $\text{Proj}(\cdot)$ 为一个非线性映射，可以表示为：

$$\text{Proj}_{\hat{\theta}_i}(\bullet_i) = \begin{cases} 0, & \text{if } \hat{\theta}_i > \theta_{i\max} \text{ and } \dot{\hat{\theta}}_i > 0 \\ 0, & \text{if } \hat{\theta}_i < \theta_{i\min} \text{ and } \dot{\hat{\theta}}_i < 0 \\ \bullet_i, & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

设计 Lyapunov 函数为：

$$V = \frac{1}{2} \theta_4 \sigma_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} \quad (18)$$

此时系统渐进稳定。

式中 Γ^{-1} 为增益矩阵；定义 $\tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$ ，且假设参数 θ 为慢变的（通过分析 θ 的表达式，可知该假设是合理的）。

证明：

对式 (18) 求其关于时间的导数为：

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \theta_4 \sigma_1 \dot{\sigma}_1 + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \\ &= \theta_4 \sigma_1 (\gamma_1 \ddot{e} - \dot{\gamma}_1 \dot{e} - \omega_n^2 \dot{e}) + \sigma_1 (u - \theta \mathbf{Z} + f_d(t) - \theta_4 \ddot{x}_d) + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \\ &= \theta_4 \sigma_1 (\gamma_1 \ddot{e} - \dot{\gamma}_1 \dot{e} - \omega_n^2 \dot{e}) + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \\ &\quad + \sigma_1 [\hat{\theta} \mathbf{Z} + \hat{\theta}_4 \ddot{x}_d - \theta_4 (\gamma_1 \ddot{e} - \dot{\gamma}_1 \dot{e} - \omega_n^2 \dot{e}) - \eta \text{sign}(\sigma_1) + f_d(t)] \\ &= \sigma_1 \hat{\theta} \mathbf{Z}_n - \eta |\sigma_1| + \sigma_1 f_d(t) + \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} \\ &= -\eta |\sigma_1| + \sigma_1 f_d(t) + \tilde{\theta}^T (\sigma_1 \mathbf{Z}_n + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}) \\ &\leq [-\eta + f_d(t)] |\sigma_1| \end{aligned} \quad (19)$$

由式 (19) 可以推出，当增益 η 大于 $f_d(t)$ 的上界 $|F_d|$ 时，根据 LaSalle 不变性原理，当 $t \rightarrow \infty$ 时，可得 $\sigma_1 \rightarrow 0$ ，且系统收敛速度取决于增益 η 。进一步，由于采用了非线性映射自适应律 $\hat{\theta}$ ，那么同时能够保证：

$$\tilde{\theta}^T (\sigma_1 \mathbf{Z}_n + \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}}) \leq 0 \quad (20)$$

即保证了对于任意的系统轨线均有 $\tilde{\theta} \rightarrow 0$ ，因此有 $\dot{V}(\sigma_1, \tilde{\theta}) \leq 0$ ，即系统渐进稳定，证毕。

3.3 电机环节控制器设计

如前所述，对于电机环节的两个动态，可以视为一个二阶的系统。因此可以采用工业中常用的转速-电流双环 PID 控制器：

$$\begin{cases} u_{id} = k_{ip} e_s + k_{ii} \int e_s dt + k_{id} \dot{e}_s \\ u_{Vd} = k_{vp} e_i + k_{vi} \int e_i dt + k_{Vd} \dot{e}_i \end{cases} \quad (21)$$

式中， u_{cd} 和 u_{Vd} 分别表示电机电流和电机母线电压的目标值； k_{*p}, k_{*i}, k_{*d} ($*=i, V$) 表示所在控制环路的比例系数、积分系数和微分系数； e_s, e_i 分别表示转速偏差和电流偏差。

所提出的新型控制方法的

根据 EHA 模型式 (7)、新型变阻尼滑模控制律式 (20) 和双环 PID 控制律式 (21)，其原理框图如图 3 所示，即最外环为 DV-SMC，内环为双环 PID：

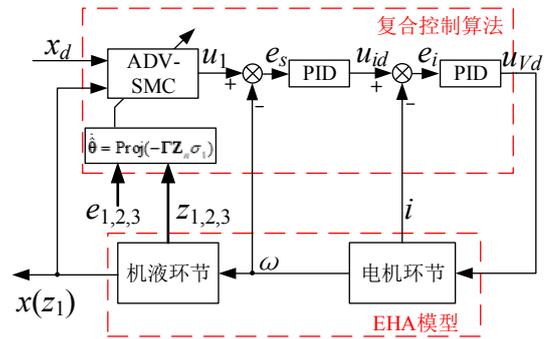


图 2 级联控制算法原理框图

Fig.2 Schematic diagram of the proposed cascade controller

4 仿真分析

表 1 中列出了 EHA 仿真所用相关参数。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulative parameters of the EHA

参数	值
活塞有效面积 A (m ²)	1.134*10 ⁻³
有效行程(m)	0.1
泄漏系数 L_c (m ³ /(s/Pa))	2.5*10 ⁻¹¹
油液弹性模量 β_e (N/m ²)	6.86*10 ⁸
液压缸总容积 V_0 (m ³)	4*10 ⁻⁴
油缸粘性摩擦 B_c (N/(m/s))	1000
液压缸及负载质量 M (kg)	243
泵排量 D_p (m ³ /rad)	3.98*10 ⁻⁷
电机粘性摩擦 B_m (N·m/(rad/s))	6*10 ⁻⁴
相电阻 R (Ω)	0.2
相电感 L (mH)	1.33
主轴转动惯量 J_a (kg·m ²)	4*10 ⁻⁴
扭矩系数 K_t (N·m/A)	0.351
反电动势系数 K_e (V/(rad/s))	0.234
弹性负载系数 K_s (N/m)	0
母线电压(VDC)	270

仿真中给定三组 x_d 为：

- ①0.005m 阶跃指令；
- ②0.05m 阶跃指令；
- ③ $x_d = 0.005 \sin(2\pi t)[1 - \exp(-t^3)]$ 。

这三组输入分别代表的是小阶跃输入、大阶跃输入、低频和中高频正弦信号，几乎包括了 EHA 的全部工况，以便能够对控制器的性能进行充分测试。

每一组输入分别有四个控制器用于比较：

- ①工业领域中最常用的 PID 控制器；控制器参数为：比例系数 $k_p=65000$ ，积分系数 $k_i=48500$ ，微分系数 $k_d=0$ ；
- ②传统 SMC 控制器，控制器参数为： $c_1=70.7$ ， $c_2=2500$ ， $\eta_{SMC}=210.7$ ；
- ③文献中所使用的变阻尼滑模控制器 (DV-SMC)，敏感因子 $\delta=1$ ， $\omega_n=50$ ， $\xi_{max}=1$ ， $\xi_{min}=0.1$ ， $\eta_{DV-SMC}=210.7$ ；
- ④本文中提出的 ADV-SMC 控制器，在 DV-SMC 基础上增加参数自适应律，增益矩阵 $\Gamma = \text{diag}\{510, 2.2 \times 10^6, 8150, 5 \times 10^{-3}\}$ ，参数上下限设为

$\theta_{max}=[10,5000,25,2]$ ， $\theta_{min}=[0,1000,5,0]$ 。由于实际情况下无法得知参数真值，于是初始参数估计设置为 $\hat{\theta}=[0,2000,5,1]$ ，SMC 和 DV-SMC 同样使用该组估计参数。

三组输入试验的仿真结果如图 3-图 5 所示。

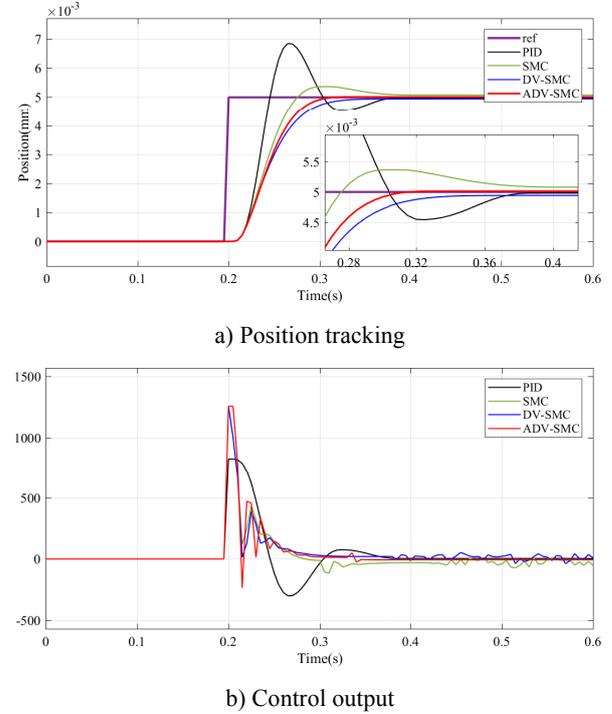


图 3 5mm 阶跃仿真结果

Fig.3 Simulative results of 5mm step

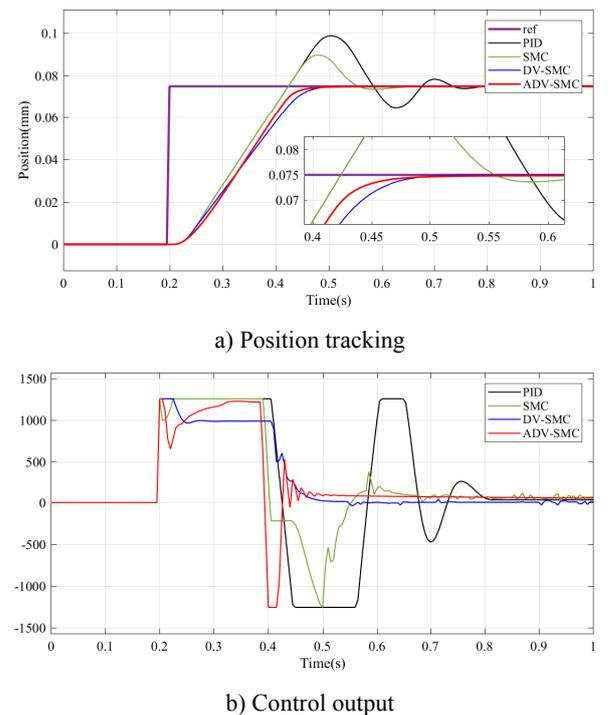


图 4 75mm 阶跃仿真结果

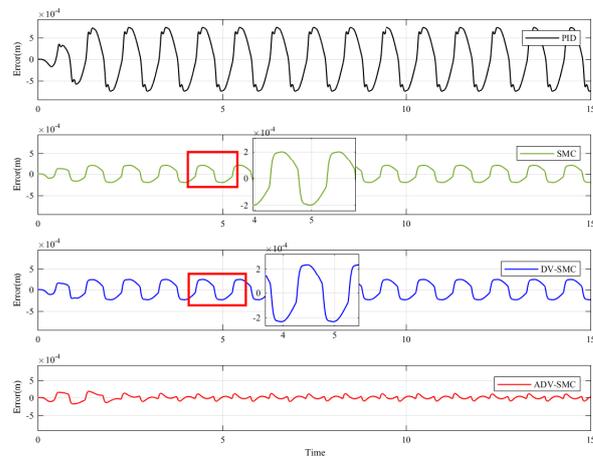
Fig.4 Simulative results of 75mm step

分析图 3, PID 和传统 SMC 方法均产生了超调分别为 1.8mm 和 0.45mm, 而 DV-SMC 和 ADV-SMC 方法均没有超调, 这体现出变阻尼方法对超调效果的抑制作用。对比后两者则可以看出, 由于参数自适应律的作用, 新的 ADV-SMC 方法在精度和快速性上均优于未改进的 DV-SMC 策略。图 4 所示为 75mm 大阶跃仿真结果。通过对比可以看出, 随着阶跃幅值的增大, PID 和 SMC 的超调现象更佳明显, 这也体现出变阻尼对超调的抑制的效果。同样, 增加自适应后的 DV-SMC 策略在快速性上也更加具有优势。但是值得一提的是, 由式 (16) 可以看出参数的自适应效果是基于积分作用的, 这就要求调整时间足够长。从阶跃仿真结果中虽然能够一定程度上显示出自适应律的优势, 但由于调整时间短, 参数适应的效果不能够完全显现。因此, 在正弦仿真中将加长仿真时间。

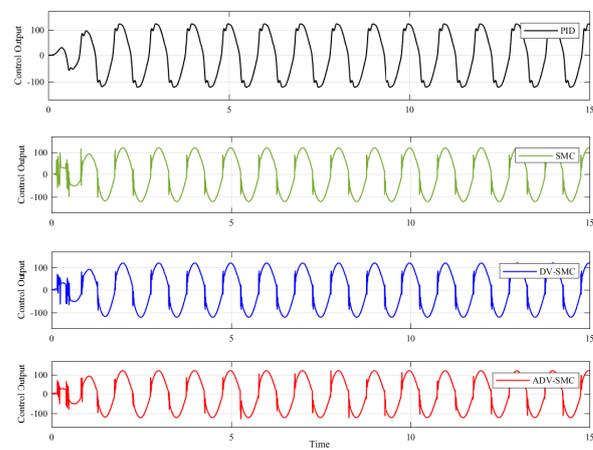
图 5 所示为正弦指令的仿真结果, 引入 $[1-\exp(-t^3)]$ 的目的是使指令更加平滑。图 5 的 a) -c) 分别为位置跟踪误差、控制量和 ADV-SMC 方法的参数估计结果。从 a) 中不难发现, 1Hz 正弦指令下, PID 方法的稳态最大跟踪误差约为 $7.5 \times 10^{-4} \text{m}$, SMC 方法的稳态最大误差约为 $2 \times 10^{-4} \text{m}$, DV-SMC 则为 $2.4 \times 10^{-4} \text{m}$ 。可以看出 SMC 方法要优于略 DV-SMC, 因为从控制量输出的表达式可以看出, 优于变阻尼方法为了抑制超调将 x_d 的一、二阶导数均视为 0, 这相当于在 SMC 基础上去掉了前馈补偿项, 因此就正弦跟踪性能而言 SMC 方法略有优势。

ADV-SMC 的稳态最大跟踪误差为约 $1.1 \times 10^{-4} \text{m}$ 。通过图 5a) 可以发现在起始阶段, 其跟踪误差和 DV-SMC 方法相似, 这是因为起始阶段由于时间短, 自适应律对参数的调整效果有限, 导致 ADV-SMC 和 DV-SMC 方法的输出差异较小。随着时间的拉长, 观察 c) 可以看出参数 θ_1 和 θ_4 分别趋向于最大和最小值, 这体现出了 Proj(*)函数的非线性映射作用。 θ_2 和 θ_4 则分别趋向于稳定范围内, 此时的跟踪误差明显得到抑制, 这证明了参数自适应对系统跟踪性能的促进作用。从 5b) 的控制量输出也能够得出类似的结论: PID 的控制输出在活塞杆速度换向点是连续的, 而由于死区的影响, 联系的控制量必然会造成大的跟踪误差。而后三者在该处均有一个输出“尖峰”, 这个尖峰源于鲁棒项, 它能够抑制摩擦的作用使得 EHA 能够更快地跨过死区。同时, 在自

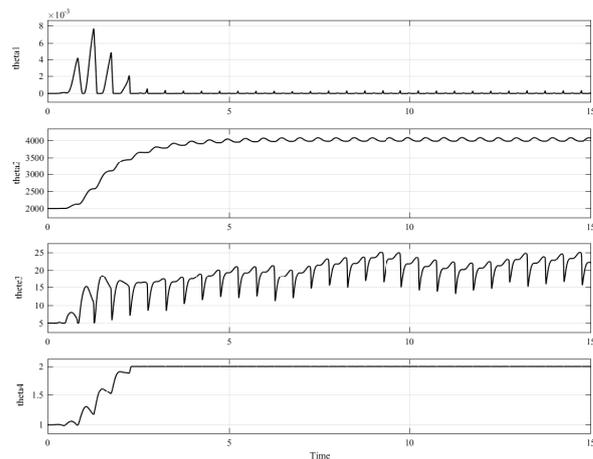
适应律的作用下 ADV-SMC 在死区的控制作用更加明显, 进而获得更好的控制效果。



a) Tracking error



b) Control output



c) Parametric estimation

图 5 1Hz 响应仿真结果

Fig.5 Simulative results of 1Hz sinusoidal signal

5 结论

本文以 EHA 为研究对象, 在滑模控制策略的基础上, 指出了其在实际应用中存在的参数不确定性问题, 并通过引入参数自适应方法设计了一种自适应变阻尼滑模控制策略。并采用仿真的方式, 与 PID、传统滑模控制和变阻尼滑模控制方法进行了对比验证, 得出如下结论:

1) 对于 EHA 中存在的慢变参数的不确定性, 自适应控制是一种有效的方法, 它能够在线估计系统的未知参数。

2) 相比于变阻尼滑模, 引入自适应策略能够在阶跃和正弦响应中提高 EHA 的快速性和跟踪精度。

3) 本文所设计的方法, 能够有效改善变阻尼滑模控制过程中由于忽略前馈项引起的误差增大现象, 并且随着参数估计地稳定, 能够进一步减小系统的跟踪误差。

参考文献 (References)

- [1] MARE J, FU J. Review on signal-by-wire and power-by-wire actuation for more electric aircraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(3):857-870
- [2] ALLE N, HIREMATH S S, MAKARAM S, et al. Review on electro hydrostatic actuator for flight control[J]. International Journal of Fluid Power, 2016, 17(2):125-145
- [3] QI H T, FU Y L, QI X Y, et al. Architecture optimization of more electric aircraft actuation system[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4):506-513
- [4] J. Zheng, S. Zhao, and S. Wei, "Application of self-tuning fuzzy PID controller for a SRM direct drive volume control hydraulic press," Control Engineering Practice, vol. 17, no. 12, pp. 1398-1404, 2009.
- [5] J. Li, Y. L. Fu, Z. L. Wang, and et al., "Research on fast response and high accuracy control of an airborne electro hydrostatic actuation system," in Proceedings of the 2004 International Conference on Intelligent Mechatronics
- [6] G. Ren, M. Esfandiari, J. Song, and N. Sepehri, "Position Control of an Electrohydrostatic Actuator with Tolerance to Internal Leakage," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 24, no. 6, pp. 2224-2232, 2016.
- [7] S. H. Cho and R. Burton, "Position control of high performance hydrostatic actuation system using a simple adaptive control (SAC) method," Mechatronics, vol. 21, no. 1, pp. 109-115, 2011.
- [8] H. Zhang, X. Liu, J. Wang, and H. R. Karimi, "Robust H_{∞} sliding mode control with pole placement for a fluid power electrohydraulic actuator (EHA) system," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014.
- [9] K. K. Ahn, D. N. C. Nam, and M. Jin, "Adaptive backstepping control of an electrohydraulic actuator," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 99, pp. 1-9, 2013.
- [10] C. C. Soon, R. Ghazali, H. I. I. Jaafar, S. Y. S. Hussien. "Sliding Mode Controller Design with Optimized PID Sliding Surface using Particle Swarm Algorithm," Procedia Computer science, vol. 2017, no. 105, pp. 235-239.
- [11] YAO Z K, YAO J Y, YAO F Y, et al. Model reference adaptive tracking control for hydraulic servo systems with nonlinear neural-networks[J]. ISA Transactions, 2019
- [12] WANG C W, QUAN L, JIAO ZX, et al. Nonlinear Adaptive Control of Hydraulic System With Observing and Compensating Mismatching Uncertainties[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(3):927-937
- [13] 王永宾, 林辉. 基于滑模控制的机载作动器摩擦转矩补偿研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(7):809-814
WANG Y B, LIN H. Friction Compensation of Aircraft Actuator Based on Sliding Model Control[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(7):809-814(in Chinese)
- [14] 李小虎, 王孙安, 张育林, 等. 基于反馈变结构控制电动静液作动器的研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(12):71-74
LI X H, WANG S A, ZHANG Y L, et al. Study on Sliding Mode Control Based on Feedback for Electro-hydrostatic Actuator[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36(12):71-74(in Chinese)
- [15] YANG R R, FU Y L, ZHANG L, et al. A Novel Sliding Mode Control Framework for Electrohydrostatic Actuator[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018
- [16] 张振, 李海军, 诸德放. EHA 反馈线性化最优滑模面双模糊滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(7): 1398-1405
ZHANG Z, LI H J, ZHU D F. Double Fuzzy Sliding Mode Control for EHA Based on Feedback Linearization Optimal Sliding Surface[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016 42(7): 1398-1405(in Chinese)
- [17] 王明康, 付永领, 赵江澳, 等. 电动静液作动器的新型变阻尼级联滑模控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2020.
WANG M K, FU Y L, ZHAO J A, et al. A Novel Cascade Control Based on Damp Variable Sliding Mode Control for an Electro-hydrostatic Actuator. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020 (in Chinese)
- [18] 任德成. 高温环境无刷直流电动机无传感器控制方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2015:89
REN D C. Research on the control method of a sensorless BLDCM system in high-temperature environment[D]. Harbin Institute of Technology, 2015: 89.

A Novel Cascade Control Based on Damp Variable Sliding Mode Control for an Electro-hydrostatic Actuator

WANG Mingkang¹, FU Yongling¹, ZHU Deming¹, YANG Rongrong²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China

(2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China)

Abstract: An Electro-hydrostatic Actuators (EHA) is a typical mechanical/hydraulic system suffering from heavy nonlinearity and parametric uncertainties needed to be compensated. In this paper, a novel control scheme, adaptive damping variable sliding mode control (ADV-SMC), integrating sliding mode control (SMC), variable damping sliding surface and adaptive method is proposed to handle the preceding uncertainties. And the parameter adaptation law is driven by tracking errors. The task of the robust item is alleviated due to the presence of parameter adaptation. Consequently, the tracking performance can be further improved. Besides the theoretically proof of an asymptotic tracking performance, numerical experiments are also obtained to verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Sliding Mode Control; Adaptive Control; Damp variable Sliding Surface; Electro-hydrostatic Actuator;
