

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.04.007

# 飞机电静液作动器滑模-PID 控制器设计

## Sliding Mode-PID Control for Aircraft Electro-Hydrostatic Actuator

洪 辉<sup>1</sup> 高 斌<sup>2</sup> 李 晶<sup>1</sup> / HONG Hui<sup>1</sup> GAO Bin<sup>2</sup> LI Jing<sup>1</sup>

(1. 同济大学, 上海 201800; 2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(1. Tongji University, Shanghai 201800, China;

2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

在多电飞机应用环境中,由于电静液作动器(Electro-Hydrostatic Actuator,以下简称 EHA)系统本身的强非线性与承载交变动载荷的不确定性,简单 PID 控制无法达到理想控制效果。提出了滑模-PID 复合控制,电机电流环和转速环构成控制系统内环,以 PI 控制器实现电机调速;作动筒位置环为外环,以滑模控制提升系统的快速性和鲁棒性。建立了 EHA 数学模型,并设计了滑模控制器结构。仿真结果表明,滑模-PID 复合控制方法能有效地消除超调和减小跟随误差,实现对 EHA 位置的精确控制。

**关键词:** 电静液作动器;多电飞机;滑模控制;PID 控制

**中图分类号:** TH137

**文献标识码:** A

**OSID:**



**[Abstract]** In the application environment of more electric aircraft, simple PID control cannot achieve the ideal control requirements because of the strong nonlinearity of Electro-Hydrostatic Actuator (EHA) system and uncertainty of external variable load. This paper provides a sliding mode-PID control system, in which the motor current loop and speed loop form the inner loop of the control system, and PI controller is used to control motor speed; the actuator cylinder position loop is the outer loop, sliding mode control is used to improve rapidity and robustness. EHA mathematical model is established, and sliding mode controller structure is designed. The simulation results show that the sliding mode-PID control can eliminate the overshoot, reduce the tracking error and achieve the precise control of EHA position.

**[Keywords]** electro-hydrostatic actuator; more electric aircraft; sliding mode control; PID control

## 0 引言

电静液作动器(Electro-Hydrostatic Actuator,以下简称 EHA)是一种功率电传作动器,其优势在于能源系统和液压用户被集成在一起,减少了管道,提高了能量效率和飞机的生存能力<sup>[1-2]</sup>。目前,EHA 已开始应用于 A380 飞控系统。随着多电飞机的发展,EHA 将在机载系统中发挥更重要的作用<sup>[3]</sup>。

EHA 主要有三种形式:变速电机驱动定量泵(Variable Motor Fixed Pump,以下简称 VMFP);恒速电机驱动变量泵(Fixed Motor Variable Pump);变速电机驱动变量泵(Variable Motor Variable Pump)<sup>[4]</sup>。

其中,VMFP-EHA 由于其结构简单和高效率而得到较多应用。

飞机 EHA 系统具有复杂的非线性,且在飞控系统中直接承受不确定性的交变载荷<sup>[5-6]</sup>。因此,采用简单的 PID 控制无法达到理想的控制效果。为提高 EHA 动态性能,许多学者基于非线性控制理论来设计其控制器,如自适应控制<sup>[7]</sup>和模糊控制<sup>[8]</sup>等,并取得了一定的成果。

本文以 VMFP-EHA 为研究对象,设计了滑模-PID 复合控制系统,利用了滑模抗干扰能力强和 PID 控制器简单的优点。建立了 EHA 数学模型,并设计了滑模位置控制器结构。最后,通过仿真结果

验证了本文所提出控制优化方法的有效性。

## 1 EHA 系统建模

VMFP-EHA 的工作原理如图 1 所示。

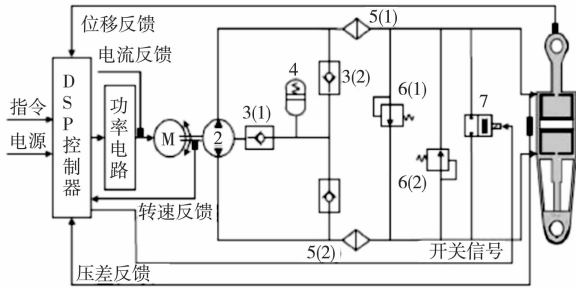


图 1 VMFP-EHA 工作原理

DSP 控制器接收控制指令,同时根据压差、电流、转速和位移反馈产生控制信号。功率驱动电路控制电机转向和转速,电机带动泵工作,将油液传送至作动筒,从而使其产生相应位移。

### 1.1 电机数学模型

电机主回路电压平衡方程为:

$$u_c - E = R_c i_c + L_c \dot{i}_c \quad (1)$$

转矩平衡方程为:

$$T_l = J\dot{\omega} + K_f\omega + D_p(P_a - P_b) \quad (2)$$

电磁转矩方程为:

$$T_l = C_t i_c \quad (3)$$

式中:  $E = C_E n$  为反电动势;  $C_E$  为反电势系数;  $R_c$  为电枢绕组;  $L_c$  为电枢电感;  $i_c$  为电枢电流;  $C_t$  为电磁转矩系数;  $J = J_m + J_p$ ,  $J_m$ 、 $J_p$  分别为电动机与泵转动惯量;  $K_f$  为电机摩擦系数;  $D_p = D/2\pi$ ;  $D$  为泵排量;  $P_a$ 、 $P_b$  分别为泵进出口压力。

### 1.2 液压部分数学模型

泵出入流量  $Q_a$ 、 $Q_b$  分别为:

$$\begin{cases} Q_a = D_p\omega - \xi(P_a - P_b) - L_e(P_a - P_{case}) \\ Q_b = D_p\omega - \xi(P_a - P_b) + L_e(P_b - P_{case}) \end{cases} \quad (4)$$

液压缸出入流量  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为:

$$\begin{cases} Q_1 = A_t \dot{x}_t + L_e P_1 \\ Q_2 = A_t \dot{x}_t - L_e P_2 \end{cases} \quad (5)$$

假定作动筒与泵以刚性管道连接,则流量连续性方程为:

$$\begin{cases} V_t \dot{P}_1 / E_y = Q_a - Q_1 \\ V_t \dot{P}_2 / E_y = Q_2 - Q_b \end{cases} \quad (6)$$

作动筒力平衡方程为:

$$F = (P_1 - P_2)A_t = M\ddot{x}_t - B_t\dot{x}_t + F_L \quad (7)$$

式中:  $\xi$  为泵内部泄漏系数;  $L_e$  为泵和液压缸外部泄漏系数;  $P_{case}$  为储能器口压力;  $A_t$  为活塞受力面积;  $P_1$ 、 $P_2$  分别为两容腔压力;  $V_t$  为管道和作动筒的平均容积;  $E_y$  为油液等效体积弹性模量;  $B_t$  为粘性阻尼系数;  $F_L$  为负载力。

## 2 滑模-PID 复合控制系统

### 2.1 系统结构设计

EHA 系统的最终控制目标为作动筒位移,使其满足准确性、快速性和稳定性的要求。由于系统的强非线性与承受载荷的不确定性,传统 PID 位置控制无法满足控制要求。

因此,本文提出滑模-PID 复合控制系统,如图 2 所示。

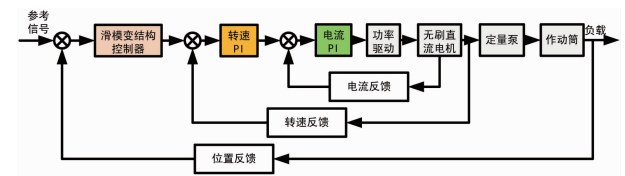


图 2 复合控制方案

控制系统内环由电流环和转速环构成,以 PI 控制器实现电机的调速;外环为位置反馈,以滑模控制替代 PID 控制位置环,提升系统的快速性和鲁棒性。实现方式为:滑模控制器根据输入参考信号和作动筒位置反馈生成电机转速的控制信号,通过转速进而控制泵的流量,从而实现对作动筒位置的精确控制。

### 2.2 滑模控制器设计

滑模控制 (sliding mode control) 是一种变结构控制策略<sup>[9]</sup>。不同于传统 PID 控制,其控制律不连续,可随时间发生变化。这种变化的控制特性可使被控量沿规定轨迹作滑模运动,同时也保证了控制系统的抗干扰性。根据滑模控制的原理,可将其控制器的设计分成两个过程<sup>[10]</sup>:设计滑模切换函数  $s(x)$ ,保证系统状态经滑模运动后收敛至期望点,以及优秀的动态特性;设计滑模控制律  $u(x)$ ,使滑模面之外的状态能顺利到达滑模面,并形成滑模运动。

#### 2.2.1 切换函数

滑模复合控制系统的最终目标是保证作动筒输出期望位移,取状态向量为作动筒位移、速度和加速

度,转换成三阶系统。

$$x_1 = x_t, x_2 = \dot{x}_t, x_3 = \ddot{x}_t \quad (8)$$

由 EHA 数学模型可得:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_3 \\ \dot{x}_3 &= \begin{bmatrix} -\frac{B_t}{M}x_3 - \frac{2A_t^2 E_y}{MV_t}x_2 - \frac{\dot{F}_L}{M} \\ -\frac{2A_t E_y (\xi + 1/2L_e)}{MV_t}(p_1 - p_2) + \frac{2A_t E_y D_p}{MV_t}\omega \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

设给定输入信号为  $x_d$ , 则误差及其导数为:

$$\begin{aligned} e &= x_d - x_t = x_d - x_1 \\ \dot{e} &= \dot{x}_d - \dot{x}_t = \dot{x}_d - x_2 \\ \ddot{e} &= \ddot{x}_d - \ddot{x}_t = \ddot{x}_d - x_3 \end{aligned} \quad (10)$$

本文设计切换函数  $s$  为误差变量的线性组合:

$$s = \mathbf{C}\mathbf{E} \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{C} = [c_1 \ c_2 \ 1]$ , 误差向量  $\mathbf{E} = [e \ \dot{e} \ \ddot{e}]^T$ ,

则有

$$\begin{aligned} s &= c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{e} = \\ c_1 (x_d - x_1) &+ c_2 (\dot{x}_d - x_2) + \ddot{x}_d - x_3 \end{aligned} \quad (12)$$

为保证  $s = c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{e} = 0$  有解, 需满足  $c_1 \geq 2\sqrt{c_2} > 0$ 。

$\mathbf{C}$  阵的合理取值对于滑动模态的动态品质影响非常大, 其常见确定方法有极点配置法和最优化设计法。本文采用极点配置法, 设定极点集为  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2\}$ , 可得:

$$\lambda_1 \lambda_2 + c_1 + c_2 \lambda_2 = 0 \quad (13)$$

### 2.2.2 控制律

控制律的合理设计决定了滑模面之外的系统状态能否顺利到达滑模面, 以及趋近过程中的动态品质。

本文采取指数趋近律。

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c_1 (\dot{x}_d - x_2) + c_2 (\ddot{x}_d - x_3) + \ddot{x}_d - \dot{x}_3 \\ &= -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \quad \varepsilon > 0 \ k > 0 \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $\varepsilon$  为速度参数;  $k$  为到达参数。

将式 (14) 代入式 (9) 和 (10) 可得控制律表达式:

$$u = \frac{MV_t}{2A_t E_y D_p} \begin{bmatrix} c_1 e + c_2 \dot{e} + \ddot{x}_d + \frac{2A_t^2 E_y}{MV_t} \dot{x}_t + \\ \frac{2A_t E_y (\xi + 1/2L_e)}{MV_t} (p_1 - p_2) + \\ \frac{B_t}{M} \ddot{x}_t + \frac{\dot{F}_L}{M} + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks \end{bmatrix} \quad (15)$$

构造 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (16)$$

$s(x)$  可微并过原点, 显然当  $s(x) = 0$  时,  $V(0) = 0$ , 当  $s(x) \neq 0$  时,  $V(s) > 0$ , 故  $V(s)$  正定, 进一步求导:

$$\begin{aligned} \dot{V}(s) &= s\dot{s} = s[-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks] = \\ \begin{cases} -\varepsilon s - ks^2, & s > 0 \\ \varepsilon s - ks^2, & s < 0 \end{cases} &= -\varepsilon |s| - ks^2 \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

根据 Lyapunov 第二法, 满足系统渐进稳定。

由式 (15) 可知,  $k, \varepsilon, c_1, c_2$  取值都不唯一, 并直接影响系统控制性能。为实现最优控制效果, 本文借助自适应遗传算法 (Adaptive Genetic Algorithm, 以下简称 AGA) 进行优化仿真分析。

## 3 仿真分析

EHA 系统仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真参数

参数	取值
直流电机定子绕组电阻 $R_e/\Omega$	0.13
电机定子绕组电感 $L_e/\text{mH}$	4.8
电机反电势系数 $C_E/(\text{V}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}))$	0.215
电机电磁转矩系数 $C_t/((\text{N} \cdot \text{m})/\text{A})$	0.179
电机-泵阻尼系数 $K_f/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$6 \times 10^{-4}$
液压泵排量 $D_p/(10^{-7} \text{m}^3 \cdot \text{rad}^{-1})$	4.8
电机转动惯量 $J_m/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$1.49 \times 10^{-3}$
泵转动惯量 $J_p/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$1.2 \times 10^{-4}$
蓄能器口压力 $P_{case}/\text{Pa}$	$2 \times 10^4$
内泄漏系数 $\xi/(\text{m}^3 (\text{s} \cdot \text{Pa})^{-1})$	$2 \times 10^{-12}$
外泄漏系数 $L_e/(\text{m}^3 (\text{s} \cdot \text{Pa})^{-1})$	$0.5 \times 10^{-12}$
液压油体积弹性模量 $E_y/(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	$6.86 \times 10^8$
作动筒活塞有效面积 $A_t/\text{m}^2$	$1.83 \times 10^{-3}$
容腔容积 $V_t/\text{m}^3$	$1.5 \times 10^{-4}$
活塞及负载质量 $M/\text{kg}$	1.42
活塞及负载的阻尼系数 $B_t/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	100

搭建滑模-PID 复合控制 Simulink 模型, 如图 3 所示。通过 MATLAB 编写优化适应度函数, 函数与 Simulink 模型的接口实现参数传递。优化和仿真同时进行, 直到产生最大适应度值, 将对应参数作为最

优的一组解输出。

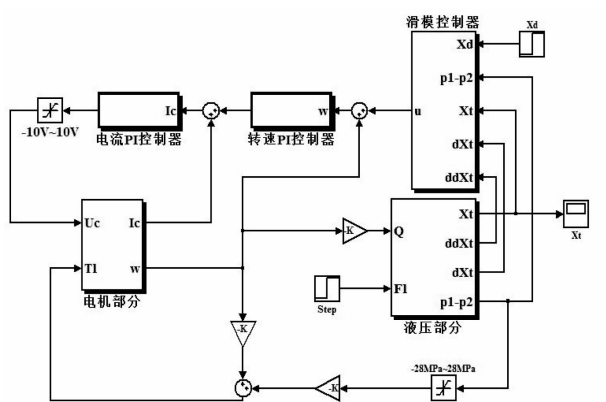


图3 Simulink 仿真模型

下面分别给定阶跃信号和正弦信号,分析控制系统的响应特性。

### 3.1 阶跃信号响应分析

给定位移指令为 10 mm,并以 AGA 优化三环 PID 控制 (PI 控制器用于电流环和转速环,PID 控制器用于位置环)和未优化的普通滑模复合控制作对比,仿真结果如图 4 所示。

分析图 4,与 AGA 优化三环 PID 控制比较,普通滑模复合控制有效减小了超调量,表明了滑模控制对于 EHA 作动筒位置控制的适用性;而 AGA 优化的复合控制则消除了系统超调,且达到稳态的时间更短,验证了 AGA 应用于复合控制参数优化对系统性能改善的有效性。

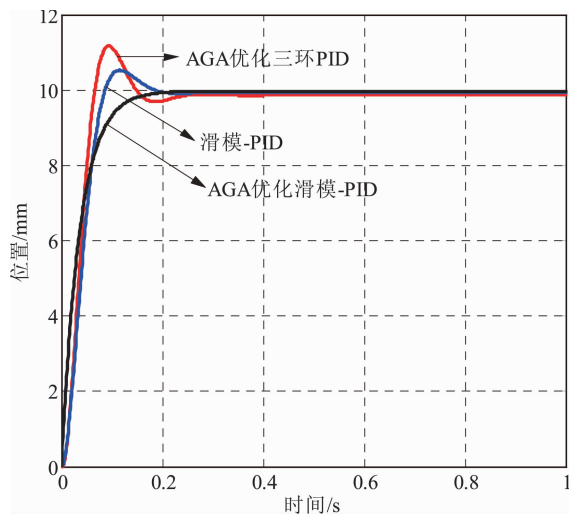


图4 EHA 的阶跃响应

### 3.2 正弦信号响应分析

给定位移信号为  $10\sin(2\pi ft)$  (mm),观察输入

和输出信号的跟踪情况。频率  $f$  为 1 Hz 和 2 Hz 时的跟踪曲线分别如图 5 和 6 所示。

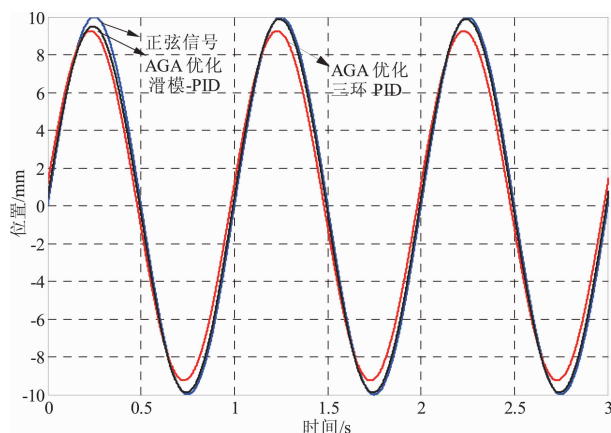


图5 1 Hz 正弦信号跟踪曲线

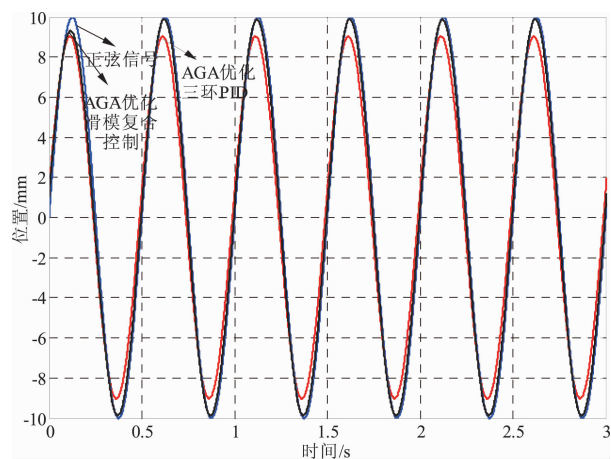


图6 2 Hz 正弦信号跟踪曲线

对于 AGA 优化三环 PID 控制,系统在不同频率下始终存在较明显的跟随误差,且在控制过程中无法减小或消除。随着频率升高,跟随误差也随之增大。

对于 AGA 优化滑模-PID 复合控制,频率 1 Hz 时,有轻微幅值衰减,0.5 s 内基本可以跟踪正弦信号,误差控制在 1.5% 以内;频率 2 Hz 时,系统在初始较明显误差后,一个周期内可以基本跟随正弦信号。这表明,AGA 优化复合控制可在控制过程中逐渐减小或消除跟随误差。

通过对仿真结果的分析,验证了 AGA 优化滑模 PID 控制相较于 AGA 优化三环 PID 控制的优越性。

## 4 结论

本文设计了滑模-PID 复合控制系统,并利用自

适应遗传算法实现了系统优化仿真。仿真结果验证了本文所提出滑模-PID 控制方法的有效性,解决了简单 PID 控制无法达到 EHA 这一非线性系统理想控制效果的问题。

### 参考文献:

- [1] 姜继海,赵进宝,刘乔,刘军龙,赵焕玲. 火箭舵机转速排量复合控制电动静液作动系统设计与仿真[J]. 液压与气动, 2015(1):11-15,48.
- [2] 张谦,李兵强. 一种新型电静液作动飞机刹车系统[J]. 测控技术,2011,30(7): 79-82.
- [3] 杨华勇,丁斐,欧阳小平,陆清. 大型客机液压能源系统[J]. 中国机械工程,2009,20(18):2152-2159.
- [4] 马纪明,付永领,李军,高波. 一体化电动静液作动器(EHA)的设计与仿真分析[J]. 航空学报,2005(01):79-83.
- [5] 康荣杰,焦宗夏, Jean Charles Mare, 尚耀星, 等. 电动静液作动器非线性框图建模与鲁棒控制方法[J]. 航空学报, 2009,30(3): 518-525.
- [6] LING T G, RAHMAT M F, HUSAIN A R. ANFIS modeling and Direct ANFIS Inverse control of an Electro-Hydraulic Actuator system [C]//Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on. IEEE, 2013: 370-375.
- [7] LEE J M, KIM H M, PARK S H, et al. A position control of electro-hydraulic actuator systems using the adaptive control scheme [C]//Asian Control Conference, 2009. ASCC 2009. 7th. IEEE, 2009: 21-26.
- [8] AHN K K, TRUONG D Q, SOO Y H. Self tuning fuzzy PID control for hydraulic load simulator [C]//Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS'07. International Conference on. IEEE, 2007: 345-349.
- [9] 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(07):809-814.
- [10] 李琳. 滑模变结构控制系统抖振抑制方法的研究[D]. 大连:大连理工大学,2006.

### 作者简介

- 洪 辉 男,硕士研究生。主要研究方向:流体传动与控制。E-mail: 1365157825@qq.com
- 高 斌 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:航电系统集成验证。E-mail: gaobin@comac.cc
- 李 晶 女,博士,副教授。主要研究方向:流体传动与控制。E-mail: cynthia\_li@tongji.edu.cn