

基于改进径向基网络的电动舵机滑模控制

李冬辉¹, 王立献², 周满^{1,3}, 江华侨², 曹晓鹏²

(1. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072;

2. 宁波帅特龙集团有限公司, 浙江 宁波 315000;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 针对电动舵机小角度平顶现象引发的弹道抖振问题,以小角度平顶问题为中心,对平顶问题展开研究分析,并提出了一种改进的径向基滑模控制(RBF-SMC)方法,通过设计滑模控制器,削弱摩擦和间隙的不利影响,以提高系统的跟踪精度;针对模型中的不确定项,引入径向基网络进行逼近,提高控制精度,同时降低滑模控制算法的抖振问题;为提高径向基网络的迭代效率,使用2个单参数代替权值矩阵,大幅减少需要迭代估计的参数数量。最后,搭建电动舵机系统实验平台,采用PID控制器和改进的径向基滑模控制器进行对比分析。实验结果表明,相比于传统PID算法,在跟踪 $0.1^\circ/4\text{ Hz}$ 正弦指令时,采用改进的径向基滑模控制算法将位置平顶时间从64 ms降低至9 ms,位置跟踪误差从 0.123° 降低至 0.04° ;在半物理试验时,弹道抖动频率从14.7 Hz降低至6.8 Hz,抖振幅值从 0.079° 降低至 0.034° 。采用改进的径向基滑模控制能有效提高系统的跟踪性能,削弱平顶问题,抑制弹道极限环震荡。

关键词: 电动舵机; 径向基神经网络; 滑模控制; 平顶现象; 弹道抖振

本文引用格式: 李冬辉, 王立献, 周满, 等. 基于改进径向基网络的电动舵机滑模控制[J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44(4): 217-223.

Citation format: LI Donghui, WANG Lixian, ZHOU Man, et al. Sliding mode control of electromechanical actuators based on an improved RBF network[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44(4): 217-223.

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2023)04-0217-07

Sliding mode control of electromechanical actuators based on an improved RBF network

LI Donghui¹, WANG Lixian², ZHOU Man^{1,3}, JIANG Huaqiao², CAO Xiaopeng²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Ningbo Shuaitelong Group Co., Ltd., Ningbo 315000, China;

3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the ballistic chattering caused by the small-angle flat top of an electric actuator, this paper studies the flat top phenomenon by focusing on the small-angle flat top issue, and proposes an improved sliding mode control method of the radial basis function (RBF) network. The sliding mode controller is designed to weaken the adverse effects of friction and backlash so as to improve the tracking precision of the system. Aiming at the uncertainties of the model, the RBF network is introduced to approximate them, which improves the control accuracy and, at the same time, eliminates the chattering of

收稿日期: 2022-06-17; 修回日期: 2022-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(61873180)

作者简介: 李冬辉(1962—),男,博士,教授, E-mail: lidonghui@tju.edu.cn。

通信作者: 周满(1988—),男,博士后,助理研究员, E-mail: zhouman0741@163.com。

the sliding mode control algorithm. In order to improve the iterative efficiency of the RBF network, two single parameters are used to replace the weight estimation matrix, which greatly reduces the number of parameters that need iterative estimation. Finally, the experimental platform of the electromechanical actuator system is built, and the PID controller is compared with the improved RBF sliding mode controller. The experimental results show that, compared with the traditional PID controller, when tracking $0.1^\circ 4\text{ Hz}$ sinusoidal signals, the improved RBF sliding mode controller algorithm reduces the flat-top time from 64 ms to 9 ms, and the position tracking error from 0.123° to 0.04° . In the semi-physical simulation, the frequency of ballistic chattering reduces from 14.7 Hz to 6.8 Hz, and the chattering amplitude reduces from 0.079° to 0.034° . The improved RBF sliding mode controller can effectively improve the tracking performance of the system, weaken the flat-top and restrain ballistic limit cycle oscillation.

Key words: electromechanical actuator; radial basis function neural network; sliding mode control; flat-top; ballistic chattering

0 引言

电动舵机作为飞行器的主要执行机构,对飞行器的机动性、打击精度等有着决定性的作用,其性能决定着飞行器的静态及动态性能^[1-2]。然而,电动舵机系统中不可避免的存在间隙、摩擦等非线性环节,导致小角度跟踪时出现平顶问题,严重影响舵机系统的跟踪精度^[3-5],甚至引发弹道发生极限环震荡。在跟踪精度要求不高的情况下,通过提高加工、装配精度等,传统的PID控制能满足系统指标要求。但随着国内外市场竞争加剧,飞行器性能指标飞速提升,其对电动舵机伺服系统提出更高的指标要求,传统的PID控制理论已经很难满足电动舵机高精度、高动态性能的需求^[6]。

为了补偿非线性摩擦对机电伺服系统性能的影响,Lin等提出了一种基于LuGre模型的自适应滑模控制器,在线估计滑模面参数,并取得较好跟踪效果^[7],但滑模控制器自身存在抖振问题,容易引发系统谐振,破坏系统的稳定性,影响其工程应用^[8-9]。Li等为了满足现代高性能飞机的需求,提出了模糊PID控制策略,该控制策略综合了模糊控制和PID控制的优点,对时变复杂系统具有较好的适应性^[10]。但模糊PID控制器存在量化因子和比例因子等参数的选取过于依赖经验、参数固定等缺点^[11]。自抗扰控制器可以较好的解决电动舵机非线性等问题,为此张明月等,提出了自抗扰控制器,较好的提高了电动舵机系统的动态响应及自适应性能,但其参数整定过程较为复杂^[12]。近年来,智能控制理论因其对扰动具有较强的自适应能力而受到广泛关注,如遗传算法^[13]、蚁群算法^[14]、BP神经网络^[15]等,其中,径向基网络因其对未知项具有较强的逼近能力,在伺服系统上得到研究^[16]。Liu等针对控制系统的非线性、时不变和不确定性等问题,提出了基于径向基网络的转矩控制算法,较好的提高了系统控制精度和鲁棒性^[17]。针对位置伺服系统中的干扰及模型参数确定困难的问题,Li等提出了一种基于反演策略的径向基网络滑模控制策略,解决了外部扰动和模型不确定性问题,并取得较好的控制效果^[18]。但智能算法计算复杂,

工程实现难度大,尤其是飞行器舵机系统这种高实时性系统上应用难度较大^[19-20]。综合分析,各类算法均存在一定的优势及不足,高精度、高动态性能的电动舵机控制策略仍有待进一步研究。

因舵机系统中的摩擦及间隙具有非线性且时变的特点,难以对其进行准确建模^[21],而滑模控制对舵机非线性具有较强的自适应能力,同时径向基网络对未知项具有较好的逼近能力,可以较好的解决模型的不确定性,为此本文提出了基于RBF网络的滑模控制策略,对系统的确定部分采用滑模控制,对不确定部分采用RBF网络进行逼近。同时,为降低计算复杂度,使用2个参数近似替代权值矩阵,便于工程实现,进而提高系统的控制效果,削弱舵机系统的位置平顶。

1 电动舵机数学模型

1.1 电动舵机系统工作原理

本文中使用的电动舵机主要包括三相无刷电机、减速器、编码器、电位计等,如图1所示。

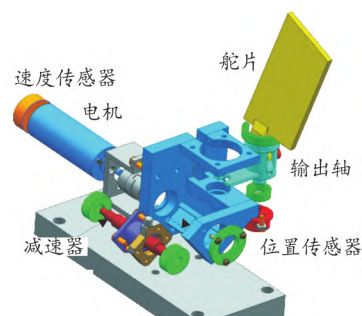


图1 电动舵机系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of EMA system

编码器为速度传感器,与电机输出轴采用直连方式,可有效减小电机输出轴与编码器间的间隙。位置传感器与舵机的输出轴直连,实现位置闭环。电动舵机系统工作时,伺服控制器根据电动舵机角度及角速度误差等,计算得到相应

的控制量,并驱动电机正反转,进而控制减速器旋转,并通过传动机构带动舵机输出轴的旋转,最终实现舵片的角度控制。

1.2 电动舵机数学模型

根据电机电压、力矩平衡方程、系统传动方程得到伺服系统动力学模型,舵机系统可以描述成如下形式:

$$\begin{cases} K_m i_a - T_\tau = J_m d\omega/dt + T_L + F_f + b\omega \\ u = K_e \omega(t) + i_a R_a + L_a di_a/dt \\ T_m = K_m i_a \\ d\theta/dt = \omega/j \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_τ 为间隙扰动 ($N \cdot m$); T_L 为负载力矩 ($N \cdot m$); F_f 为摩擦力矩 ($N \cdot m$); K_e 为伺服电机的反电动势常数 ($V \cdot s/rad$); K_m 为电机的转矩系数 ($N \cdot m/A$); i_a 为电枢电流 (A); J_m 为电机的转子惯量 ($kg \cdot m^2$); j 为减速器的减速比。

令负载 T_L 为零,可得到舵机系统传递函数为:

$$G_{EMA} = \theta/U = \frac{1/(K_e j) - F_f/[(T_m - T_\tau) K_e j]}{s - F_f/(T_m - T_\tau) + \tau_m s^2 + \tau_m \tau_e s^3} \quad (2)$$

其中, $\tau_m = \frac{R_a J_m}{K_m K_e}$, $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$ 。

由于 τ_e 非常小,有 $\tau_e \ll \tau_m$,故可令 $\tau_e = 0$,则电动舵机系统传递模型可描述为如下形式:

$$G_{EMA} = \frac{1/(K_e j) - F_f/[(T_m - T_\tau) K_e j]}{s - F_f s/(T_m - T_\tau) + \tau_m s^2} \quad (3)$$

2 电动舵机平顶现象分析

由于间隙及摩擦等非线性因素影响,采用传统 PID 控制,电动舵机在跟踪小角度指令时存在明显的“平顶现象”,如图 2 所示。

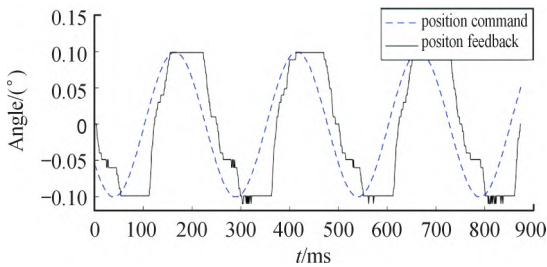


图 2 位置跟踪平顶现象

Fig. 2 The phenomena of flat top

从图可知,位置指令 $0.1^\circ, 4\text{ Hz}$ 时,平顶时间大约 64 ms ,位置跟踪误差为 0.123° ,严重降低了舵机系统对小角度正弦指令的跟踪性能。在舵效较低的情况下平顶问题对飞行器性能影响较小,但在舵效较高时“平顶现象”导致飞行器弹道指令出现极限环震,弹道极限环震荡的频率为 10 Hz 、幅值为 0.25° ,如图 3 所示。

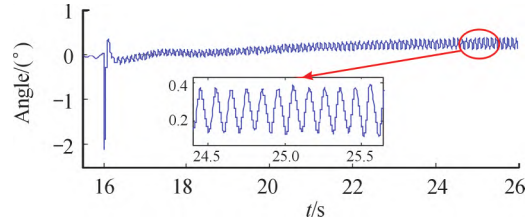


图 3 弹道极限环震荡现象

Fig. 3 The phenomena of limit cycle oscillation

2.1 间隙对平顶问题的影响分析

间隙对舵机系统的影响如图 4 所示。“speedfeedback”为速度反馈,“positionfeedback”为位置反馈。从图可知,由于速度传感器直连在电机轴上,位置传感器直连在舵机输出轴上,由于传动机构的间隙影响,舵机速度在 214 ms 处换向,而位置反馈则在 223 ms 换向,即间隙环节引入了 9 ms 的延迟,这段时间电动舵机输出轴角度不变,形成位置平顶。

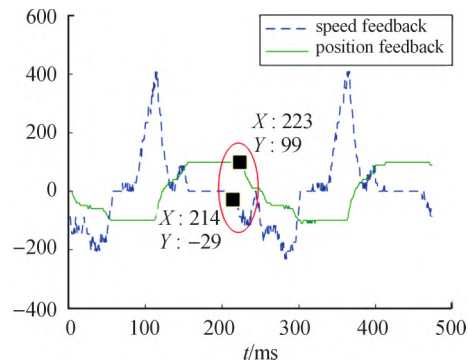


图 4 间隙对舵机系统的影响

Fig. 4 The effect of backlash

2.2 摩擦对平顶问题的影响分析

舵机系统中的摩擦主要包括静摩擦和动摩擦,通常在小角度正弦指令的跟踪过程中,静摩擦力矩对舵机性能指标的影响更大,其对舵机系统的影响如图 5 所示。其中,“PWM”为控制量输出,“speedfeedback”为速度反馈。

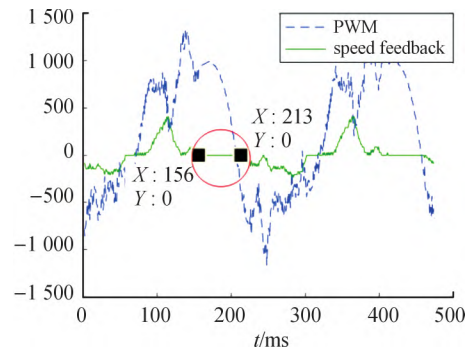


图 5 摩擦对舵机系统的影响

Fig. 5 The effect of friction

从图 5 可知,由于静摩擦力矩的影响,控制量输出一直

处于非零状态,而156~213 ms 速度反馈持续为零,即存在将近 57 ms 的速度死区,导致舵机输出轴位置固定不变。

综上所述,静摩擦为主要影响因素,因此,削弱摩擦非线性因素的影响,可快速、高效的削弱舵机系统的“平顶”现象。但受结构加工及装配精度、结构磨损等影响,舵机系统的间隙及摩擦是随位置、环境的变化而变量,难以精确测量或准确建立其非线性模型。为此,引入滑模控制提高舵机系统对非线性的鲁棒性,同时引入径向基网络对模型中不确定部分进行逼近,从而提高控制精度。

3 改进的 RBF-SMC 控制器设计

3.1 系统描述

对舵机模型进行反 Laplace 变换,

$$\ddot{\theta} = -\frac{1}{\tau_m} \dot{\theta} + \frac{1}{\tau_m K_{d,j}} u + \frac{F_f}{(T_m - T_r)} \left(\frac{1}{\tau_m} \dot{\theta} - \frac{1}{\tau_m K_{d,j}} u \right) \quad (4)$$

在实际工程应用中,由于结构加工精度、温度等因素影响, F_f 、 T_m 、 T_r 是实时变化的,难以精确测量,在控制器设计过程中,将其作为未知量进行设计。

令, $\Delta f = F_f \dot{\theta} / [(T_m - T_r) \tau_m]$, $\Delta b = -F_f / [(T_m - T) \tau_m K_{d,j}] f(\theta, t) = -\dot{\theta} / \tau_m$, $b = 1 / \tau_m K_{d,j}$ 则电动舵机数学模型可简写为:

$$\ddot{\theta} = (f(\theta, t) + \Delta f(\theta, t)) + (b + \Delta b) u(t) \quad (5)$$

3.2 滑模控制器设计

设计滑模面为

$$\begin{cases} s = ce + \dot{e} & c > 0 \\ e = \theta_d - \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中: e 为位置跟踪误差; θ_d 为位置指令角度; θ 为位置反馈角度。

由式(5)、式(6)可得滑模控制律为

$$u(t) = \frac{\ddot{\theta}_d + c\dot{e} - (f(\theta, t) + \Delta f(\theta, t))}{(b + \Delta b)} + \frac{\eta \text{sat}(s)}{(b + \Delta b)} \quad (7)$$

其中, $\text{sat}(s)$ 为饱和函数。

因舵机模型难以精确测量,尤其是摩擦、间隙等为时变的,难以准确测量,为此针对其中的未知不确定项,构建 f^* , b^* 代替 $f(\theta, t) + \Delta f(\theta, t)$ 和 $b + \Delta b$, 即

$$\begin{cases} f^*(\theta, t) = f(\theta, t) + \Delta f(\theta, t) \\ b^* = b + \Delta b \end{cases} \quad (8)$$

则滑模控制器的控制律可改写为:

$$u(t) = \frac{1}{b^*} [\ddot{\theta}_d + c\dot{e} - f^* + \eta \text{sat}(s)] \quad (9)$$

因 f^* 、 b^* 为未知不确定项,且是时变、非常值,为此引入 RBF 网络对其进行逼近,提高补偿精度。

3.3 改进的 RBF-SMC 控制器设计

3.3.1 改进的 RBF 控制器设计

RBF 逼近算法为

$$\begin{cases} f^*(x) = -W^{*T} h_f(x) - \varepsilon_f \\ b^*(x) = V^{*T} h_b(x) + \varepsilon_b \end{cases} \quad (10)$$

式中: W^* 和 V^* 为 RBF 网络理想权值; ε_f 和 ε_b 为逼近误差; h_f 、 h_b 为隐含层输出。

根据 RBF 逼近原理,采取高斯函数为激活函数, RBF 网络输出为

$$\begin{cases} \hat{f}(x) = -\hat{W}^T h_f(x) \\ \hat{b}(x) = \hat{V}^T h_b(x) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\hat{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1l} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2l} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \dots & w_{ml} \end{bmatrix}$, $\hat{V} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1l} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2l} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{ml} \end{bmatrix}$,

为 RBF 网络的估计权值。

权值矩阵中的待估计参数较多,均需要进行迭代计算,计算复杂度较高,严重降低了处理器的计算效率。在电动舵机系统中,其处理器通常为 C2000 系列的 DSP 处理器,其处理能力有限,在保证舵机系统实时性的情况下,难以满足传统 RBF 控制器的计算要求。为此考虑使用 2 个单参数取代权值矩阵,待估的参数数量大幅缩减,迭代效率大幅提升,虽然会降低逼近效果,但滑模控制自身对参数波动具有一定的鲁棒性,因此不会对舵机系统的控制精度造成太大影响。

取正常数 φ 和 ψ 代替 RBF 网络的理想权值 W^* 和 V^* , 即:

$$\begin{cases} \varphi = W^{*2} \\ \psi = V^{*2} \end{cases} \quad (12)$$

令 $\hat{\varphi}$ 和 $\hat{\psi}$ 分别为 φ 和 ψ 的估计,则估计误差 $\tilde{\varphi}$ 和 $\tilde{\psi}$ 可以表示为:

$$\begin{cases} \tilde{\varphi} = \varphi - \hat{\varphi} \\ \tilde{\psi} = \psi - \hat{\psi} \end{cases} \quad (13)$$

因为

$$s^2 \varphi h_f^T h_f + 1 = s^2 (W^{*T} h_f)^2 + 1 \geq 2s W^{*T} h_f \quad (14)$$

可得:

$$s W^{*T} h_f \leq s^2 \varphi h_f^T h_f / 2 + 1/2 \quad (15)$$

同理可得:

$$s V^{*T} h_b \leq s^2 \psi h_b^T h_b / 2 + 1/2 \quad (16)$$

即,设计控制律为:

$$u(t) = [\ddot{\theta}_d + \alpha + c\dot{e} + \eta \text{sat}(s) + \mu s] / \beta \quad (17)$$

其中 $\alpha = s \hat{\varphi} h_f^T h_f / 2$, $\beta = s \hat{\psi} h_b^T h_b / 2$ 为待确定值。

为保证系统的稳定性,直接令 RBF 权值预估值的最大值为权值估计,达到较好的补偿效果。

即有,

$$\eta \geq \varepsilon_N + D \quad \varepsilon_N > 0, D > 0 \quad (18)$$

其中 ε_N 和 D 分别为估计误差和扰动上界。

3.3.2 稳定性分析

为分析所设计控制系统的稳定性,设计 Lyapunov 函数对

RBF-SMC 算法的稳定性进行验证。

对滑模面求导,

$$\dot{s} = \ddot{\theta}_d - \ddot{f}^* - \dot{\hat{b}}u(t) + (\hat{b} - b^*)u - d(t) + c\dot{e} \quad (19)$$

结合控制律对上式整理有,

$$\dot{s} = [W^*{}^T h_f(x) + \varepsilon_f - \alpha] + [-\beta + V^*{}^T h_b(x) + \varepsilon_b]u - d(t) - \eta \text{sat}(s) - \mu s \quad (20)$$

定义李雅普诺夫函数为,

$$L = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2\gamma_f}\tilde{\varphi}^2 + \frac{1}{2\gamma_b}\tilde{\psi}^2 \quad (21)$$

其中, $\gamma_f > 0, \gamma_b > 0$ 。

对上式求导并代入式(20)可得,

$$\dot{L} = s[W^*{}^T h_f(x) + \varepsilon_f - \alpha] + s[-\beta + V^*{}^T h_b(x) + \varepsilon_b]u - s[-d(t) - \eta \text{sat}(s)] - \mu s^2 + \frac{1}{\gamma_f}\tilde{\varphi}\dot{\hat{\varphi}} + \frac{1}{\gamma_b}\tilde{\psi}\dot{\hat{\psi}} \quad (22)$$

令, $\kappa_f = \frac{1}{2}s^2 h_f^T h_f, \kappa_b = \frac{1}{2}s^2 h_b^T h_b$, 由式(17)、式(18)

可得,

$$\begin{aligned} \dot{L} \leq & \left(\kappa_f \varphi + \frac{1}{2} - \alpha \right) + \left(\kappa_b \psi + \frac{1}{2} - \beta \right) u + \\ & s(\varepsilon_f + d + \varepsilon_b u) - \eta |s| - \mu s^2 + \frac{1}{\gamma_f}(\tilde{\varphi}\dot{\hat{\varphi}} + \tilde{\psi}\dot{\hat{\psi}}) = \\ & \tilde{\varphi} \left(\kappa_f - \frac{1}{\gamma_f}\dot{\hat{\varphi}} \right) + \tilde{\psi} \left(\kappa_b u - \frac{1}{\gamma_b}\dot{\hat{\psi}} \right) - \mu s^2 + \frac{1}{2} + \\ & s(\varepsilon_f + d + \varepsilon_b u) - \eta |s| + \frac{1}{2}u \end{aligned} \quad (23)$$

即有,

$$\dot{L} \leq \tilde{\varphi} \left(\kappa_f - \frac{\dot{\hat{\varphi}}}{\gamma_f} \right) + \tilde{\psi} \left(\kappa_b u - \frac{\dot{\hat{\psi}}}{\gamma_b} \right) - \mu s^2 + \frac{1}{2} \quad (24)$$

设定自适应律为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\varphi}} = \frac{\gamma_f}{2}s^2 h_f^T h_f - \lambda_f \gamma_f \hat{\varphi} \\ \dot{\hat{\psi}} = \frac{\gamma_b}{2}s^2 h_b^T h_b u - \lambda_b \gamma_b \hat{\psi} \end{cases} \quad (25)$$

式中, $\lambda_f = 2\mu/\gamma_f, \lambda_b = 2\mu/\gamma_b$, 同时满足 $\gamma_f > 0, \gamma_b > 0, \mu > 0$ 。

则可得,

$$\dot{L} \leq \lambda_f \tilde{\varphi} \hat{\varphi} + \lambda_b \tilde{\psi} \hat{\psi} - \mu s^2 + \frac{1}{2} \quad (26)$$

由于有:

$$\begin{aligned} (\varphi - \tilde{\varphi})^2 \geq 0 & \Leftrightarrow \varphi^2 + \tilde{\varphi}^2 - 2\varphi\tilde{\varphi} \geq 0 \Leftrightarrow \\ \varphi^2 + \tilde{\varphi}^2 - 2(\tilde{\varphi} + \hat{\varphi})\tilde{\varphi} & \geq 0 \Leftrightarrow \varphi^2 - \tilde{\varphi}^2 \geq 2\tilde{\varphi}\hat{\varphi} \end{aligned} \quad (27)$$

同理可得:

$$\psi^2 - \tilde{\psi}^2 \geq 2\tilde{\psi}\hat{\psi} \quad (28)$$

对上式联立整理可得:

$$\begin{aligned} \dot{L} \leq & \frac{\lambda_f}{2}(\varphi^2 - \tilde{\varphi}^2) + \frac{\lambda_b}{2}(\psi^2 - \tilde{\psi}^2) - \mu s^2 + \frac{1}{2} = \\ & \left(\frac{\lambda_f}{2}\varphi^2 + \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{\lambda_b}{2}\psi^2 + \frac{1}{2} \right) - \frac{\lambda_f}{2}\tilde{\varphi}^2 - \\ & \frac{\lambda_b}{2}\tilde{\psi}^2 u - \mu s^2 - \frac{1}{2} \end{aligned} \quad (29)$$

因为 $\lambda_f = 2\mu/\gamma_f, \lambda_b = 2\mu/\gamma_b, \gamma_f > 0, \gamma_b > 0, \mu > 0$, 满足 $\gamma_f > 0, \gamma_b > 0$ 即有,

$$\begin{aligned} \dot{L} \leq & -2\mu \left(\frac{1}{2\gamma_f}\tilde{\varphi}^2 + \frac{1}{2\gamma_b}\tilde{\psi}^2 + \frac{1}{2}s^2 \right) + \\ & \left(\frac{\lambda_f}{2}\varphi^2 + \frac{\lambda_b}{2}\psi^2 + \frac{1}{2} \right) = -2\mu L + Q \end{aligned} \quad (30)$$

其中, $Q = \frac{\lambda_f}{2}\varphi^2 + \frac{\lambda_b}{2}\psi^2 + \frac{1}{2}$ 。

解不等式 $\dot{L} \leq -2\mu L + Q$ 可得,

$$L \leq \frac{Q}{2\mu} + \left(L(0) - \frac{Q}{2\mu} \right) e^{-2\mu t} \quad (31)$$

即有,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} L = \frac{Q}{2\mu} = \frac{\varphi^2}{2\gamma_f} + \frac{\psi^2}{2\gamma_b} + \frac{1}{4\mu} \quad (32)$$

根据 Barbalat 引理可知, $t \rightarrow \infty$, L 存在极限, 且 \dot{L} 一致连续时, 有 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{L} = 0$, 即所设计的控制算法是稳定的。

4 实验验证

为验证 RBF-SMC 控制算法的合理性, 在电动舵机平台上进行算法验证, 实验系统原理如图 6 所示。电动舵机实验平台主要包括电动舵机系统、CAN 信号采集设备、数据处理分析系统、五轴转台等。

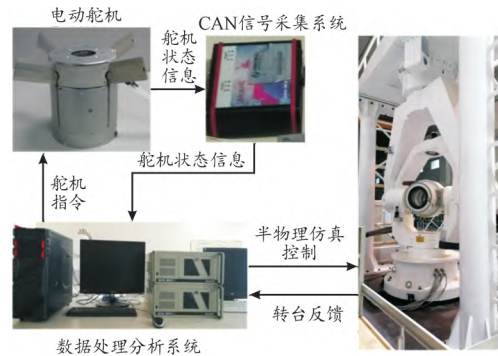


图 6 电动舵机实验原理图

Fig. 6 Schematic diagram of experimental system of electromechanical actuator

基于图 6 的试验平台, 在电动舵机系统上进行算法实现, 并与 PID 控制算法进行对比试验。

4.1 正弦跟踪性能测试

为验证 RBF-SMC 控制算法在小角度下的跟踪性能, 分别采用 PID、RBF-SMC 控制算法控制电动舵机跟随 0.1° 正弦指令, 跟踪性能如图 7 所示。

如图 7(a), “PID”、“RBF-SMC”分别为 PID 和 RBF-SMC 算法的位置反馈, “command”为位置指令。从图可知, 在跟踪 0.1° 正弦舵偏指令时, RBF-SMC 算法的优点得到凸现, 采用 PID 算法存在较为明显的位置跟踪平顶, 平顶时间约为 64 ms, 而 RBF-SMC 算法平顶时间为 9 ms, 平顶时间大幅缩减。

如图 7(b),“PID”为 PID 算法时位置跟踪误差,“RBF-SMC”为 RBF-SMC 算法位置跟踪误差,从图可知,PID 位置跟踪误差为 0.123° ,RBF-SMC 位置跟踪误差为 0.04° 。另外 RBF-SMC 控制算法存在轻微抖动问题。

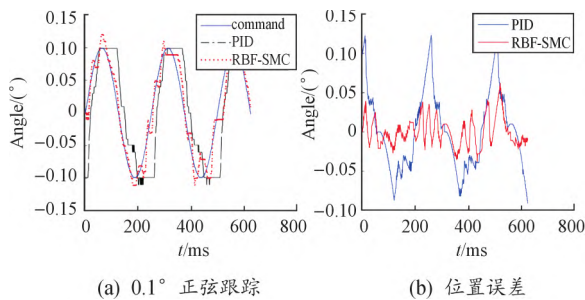


图 7 0.1 正弦跟踪性能对比图

Fig. 7 Comparison of 0.1° sinusoidal tracking performance

PID、RBF-SMC 控制算法的正弦跟踪结果如表 1 所示。在跟踪小角度正弦指令时,RBF-SMC 控制算法相比 PID 控制算法,可以显著提高位置跟踪精度,有效的缩减平顶时间。

通过上述实验,可知采用 RBF-SMC 控制算法能提高电动舵机系统的位置跟踪精度,同时将小角度下的平顶时间从 64ms 缩减至 9ms,但其缺点是仍存在轻微的抖动现象。

表 1 PID、RBF-SMC 控制算法的正弦跟踪对比

Table 1 Tracking comparison between PID and RBF-SMC

指令	PID		RBF-SMC	
	平顶	误差	平顶	误差
0.1°	64 ms	0.123°	9 ms	0.04°

4.2 半物理联调测试

为验证飞行过程中电动舵机系统的性能,在不加入导引头的情况下,使用工控机、五轴仿真转台、电动舵机等系统进行半物理联调测试,模拟飞行器实际飞行过程。总体半物理联调测试中电动舵机系统的测试结果如图 8 和表 2 所示。

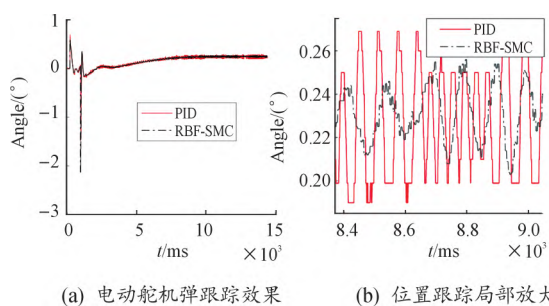


图 8 总体半物理联调测试中电动舵机系统的跟踪效果图

Fig. 8 Tracking comparison of EMA system semi-physical joint debugging

从图 8(a) 可以看到 2 种控制算法均具有较高的响应能力,在大机动下,仍可以较好的跟踪弹道指令,无发散情况发生,但从图(b)可知 2 种控制算法在弹道指令趋于稳定或弹道指令小角度波动情况存在较大差别。

表 2 弹道跟踪性能对比

Table 2 Trajectory tracking performance comparison between PID and RBF-SMC

	PID	RBF-SMC
舵机振荡幅值/ $(^\circ)$	0.079	0.034
舵机振荡频率/Hz	14.7	6.8
弹道极限环振荡	振荡严重	振荡较弱

从表 2 可知,PID 控制算法存在幅值 0.079° 、频率 14.7 Hz 的等幅振荡,导致弹道出现极限环震荡现象,严重影响飞行器的飞行品质;RBF-SMC 控制算法振荡频率有所降低为 6.8Hz,其振荡幅值相比为 0.034° ,幅值及频率较小,与 PID 控制算法相比,不会破坏飞行器控制系统的控制性能。

从以上实验结果可以看出,相比于传统的 PID 控制算法,RBF-SMC 算法能大幅减小位置平顶时间,提高小角度情况下的位置跟踪精度,同时能较好的抑制弹道抖振的问题。

5 结论

针对电动舵机小角度平顶现象引发的弹道极限环振荡问题,本文对平顶现象进行了研究分析,并提出了改进的径向基滑模控制方法,利用滑模算法的强鲁棒性减小平顶时间,利用径向基网络对不确定项自动逼近,抑制滑模控制器抖振、提高跟踪精度。实验结果表明,与传统的 PID 控制算法相比,改进的径向基滑模控制算法在跟踪 0.1° 4 Hz 正弦指令时,平顶时间从 64 ms 缩减至 9 ms,跟踪精度从 0.123° 提高至 0.04° ;半物理试验时,弹道最大抖振幅值从 0.079° 降低至 0.034° ,最大抖振频率从 14.7 Hz 降低至 6.8 Hz,满足飞行试验要求。采用改进的径向基滑模控制方法可有效削弱小角度平顶现象,提高小角度控制精度,进而有效的削弱弹道抖振。但此算法仍存在不足之处,控制算法自身仍存在一定的颤振,弹道抖振现象也未完全消除,为此舵机控制器仍有待进一步研究,在提高跟踪精度同时消除抖振现象。

参考文献:

- [1] 张侦英,钱云鹏,涂宏茂,等. 电动舵机控制系统可靠性仿真与优化[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(3): 107-113.
- ZHANG Shengying, QIAN Yunpeng, TU Hongmao, et al. Reliability simulation and optimization design of electromechanical actuator control system [J]. Journal of Sichuan

- Ordnance 2021 42(3): 107-113.
- [2] 周志明,林凡,姚晓先,等. 电动舵机极限环机理分析和抑制措施[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(3): 773-778.
ZHOU Zhiming, LIN Fan, YAO Xiaoxian, et al. Analysis and suppression of the limit cycle about electric actuator [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(3): 773-778.
- [3] MA D, HUI L, LI B. Chattering-free sliding-mode control for electromechanical actuator with backlash nonlinearity [J]. Journal of Electrical and Computer Engineering 2017(1): 1-8.
- [4] 卢晋,吴志刚,杨超. 电动舵机模块化建模及动刚度仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(4): 765-778.
LU Jin, WU Zhigang, YANG Chao. Modular modeling and dynamic stiffness simulation of electromechanical actuator. [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics 2021 47(4): 765-778.
- [5] 李杰光,梁建,王春艳,等. 舵机系统工作模态特性仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(3): 102-106.
LI Jieguang, LIANG Jian, WANG Chunyan, et al. Simulation research on working mode characteristics of actuator system [J]. Journal of Sichuan Ordnance 2021 42(3): 102-106.
- [6] MAN Z, MAO D, ZHANG M, et al. A hybrid control with pid-improved sliding mode for flat-top of missile electromechanical actuator systems [J]. Sensors 2018, 18(12): 4449.
- [7] LIN X, WANG Z, QIAN X, U, et al. Adaptive sliding mode control of friction compensation in servo system [J]. Journal of University of Jinan(Science and Technology) 2013.
- [8] YANG C H, WANG K C, WU L. Positional regulation of electrostatic micro-electromechanical actuator via adaptive two-stage sliding mode control [J]. Sensors and Materials, 2020, 32(10): 3343.
- [9] WEI R, DONG Q, ZHANG X, et al. Friction compensation control of electromechanical actuator based on neural network adaptive sliding mode [J]. Sensors, 2021, 21(4): 1508.
- [10] LI C, YI W, YIN H, et al. Fuzzy pid control of electromechanical actuator system [J]. Journal of Physics: Conference Series 2021, 1721(1): 012052 (11).
- [11] 李璀璨,易文俊,管军,等. 基于遗传算法的电动舵机系统模糊PID控制[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(3): 162-167.
LI Cuicui, YI Wenjun, GUAN Jun, et al. Fuzzy PID control of electromechanical actuator system based on genetic algorithm [J]. Journal of Sichuan Ordnance 2021 42(3): 162-167.
- [12] 张明月,杨洪波,章家保,等. 改进自抗扰控制谐波式电动舵机伺服系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 99-108.
ZHANG Mingyue, YANG Hongbo, ZHANG Jiabao. Servo system of harmonic drive electromechanical actuator using improved ADRC [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(1): 99-108.
- [13] 武志宏,杨瑞峰,郭晨霞,等. 基于改进自适应遗传算法的舵机系统辨识方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 6.
WU Zhihong, YANG Ruifeng, GUO Chenxia, et al. Steering system identification based on improved adaptive genetic algorithm [J]. Science Technology and Engineering 2020, 20(11): 6.
- [14] 杨英,赵彬,杨立,等. 基于蚁群遗传算法的舵机系统辨识[J]. 机床与液压, 2019, 47(18): 4436-4441.
YANG Ying, ZHAO Bin, YANG Li, et al. The study of parameters identification in steering gear hydraulic servo system based on ant colony genetic algorithm [J]. Machine Tool & Hydraulics 2019 47(18): 4436-4441.
- [15] 胡黄水,赵思远,刘清雪,等. 基于动量因子优化学习率的BP神经网络PID参数整定算法[J]. 吉林大学学报:理学版, 2020, 58(6): 1415-1420.
HU Huangshui, ZHAO Siyuan, LIU Qingxue, et al. BP neural network PID parameter tuning algorithm based on momentum factor optimized learning rate [J]. Journal of Jilin University(Science Edition) 2020, 58(6): 1415-1420.
- [16] LIAO C, MA H, WU H. Adaptive control of series elastic actuator based on rbf neural network [C]//2019 Chinese Automation Congress (CAC). 2019.
- [17] LIU K, WU Y, ZHU T, et al. Improved rbf network torque control in flexible manipulator actuated by pmas [J]. Robotica 2019, 37(2): 264-280.
- [18] LIU D, FANG Y, WANG H, et al. Adaptive novel MSGA-RBF neurocontrol for piezo-ceramic actuator suffering rate-dependent hysteresis [J]. Sensors and Actuators A: Physical 2019, 297: 111553.
- [19] LI W, SHI G, ZHAO C, et al. RBF Neural Network Sliding Mode Control Method Based on Backstepping for an Electrohydraulic Actuator. 2020.
- [20] 林贻翔. 神经网络非线性智能控制在光电跟踪系统中的应用[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 2949-2955.
LIN Yixiang. Application of neural network-based nonlinear intelligent control in electro-optical tracking systems [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(12): 2949-2955.
- [21] KUMAR E. Modeling and simulation of feedback based linear electromechanical actuator [J]. Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT) 2021, 12(2): 970-976.

科学编辑 王宏福 博士(中山大学)
责任编辑 胡君德