

## 基于改进滑膜观测器的光电吊舱地理跟踪实现

苏 熠, 李江勇, 王伟丞, 张子林  
(中电科光电科技有限公司, 北京 100015)

**摘要:**随着战争升级和国际局势的日益紧张,无人机机载光电吊舱对发现某一特定位置目标的需求也日益强烈。为满足传统光电吊舱的反馈闭环控制,通常要在系统里增加编码器,陀螺等诸多传感器,不仅使得吊舱的体积,重量等难以达到要求,还影响系统重心,进一步增加了控制难度。为了解决上述问题,同时满足无人机机载光电吊舱对某地目标的高精度和轻量化实时跟踪需求,本文创新性地将滑膜观测器应用于永磁同步电机三环控制算法,以代替传统物理传感器实现光电吊舱地理跟踪这一功能。在传统电机三环控制的基础上,使用了滑膜观测器代替物理传感器观测电机的角度和速度信息,并且在传统滑膜观测器的基础上进行了趋近律函数的优化,减少了系统输出的抖动,提高了整体的稳定精度。实验结果表明,采用 sat 函数为趋近律的滑膜观测器相较于传统滑膜观测器中使用的 sign 函数,稳定性有明显改善,改进后的超调量与输出量的比值从 5.65% 下降到 0.32%,有助于提升无人机机载光电吊舱地理跟踪的精度。

**关键词:**机载光电吊舱;地理跟踪;滑膜观测器;趋近律函数优化

**中图分类号:**TP391.9;TN976 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2025.04.020

## Implementation of geo-tracking for optoelectronic pods based on improved synovial membrane observer

SU Yi, LI Jiang-yong, WANG Wei-cheng, ZHANG Zi-lin  
(CETC Electro-Optics Technology Co. Ltd., Beijing 100015, China)

**Abstract:** With the escalation of war and the increasing tension in the international situation, the demand for detecting a specific location target in unmanned aerial vehicle (UAV) airborne electro-optical pods is also becoming increasingly strong. To fulfill the feedback closed-loop control of traditional electro-optical pods, encoders, gyroscopes, and many other sensors are usually added to the system, which not only makes it difficult to meet the requirements for the size and weight of the pod, but also affects the center of gravity of the system, further increasing the difficulty of control. In order to solve the above problems and meet the high-precision and lightweight real-time tracking requirements of unmanned aerial vehicle (UAV) airborne optoelectronic pods for a certain target, a sliding film observer is innovatively applied to the permanent magnet synchronous motor three loop control algorithm to replace traditional physical sensors to achieve the geographic tracking function of electro-optical pods. On the basis of traditional three loop control of motors, a sliding film observer is used to observe the angle and speed information of the motor instead of the physical sensors, and the convergence law function is optimized based on the traditional sliding film observer, reducing the vibration of the system output and improving the overall stability accuracy. The experimental results show that the stability of the sliding mode observer using the sat function as the approaching law is significantly improved compared to the sign function used in traditional sliding mode observers. The ratio of the improved overshoot to output is decreased from 5.65% to 0.32%, which helps to improve the accuracy of unmanned aerial vehicle (UAV) airborne optoelectronic pod geographic tracking.

**Keywords:** airborne optoelectronic pod; geographic tracking; synovial membrane observer; optimization of reaching law function

## 1 引言

随着无人机技术的发展,光电侦察型无人机在当今军事领域发挥着越来越重要的作用。光电吊舱作为无人机的“眼睛”,在情报侦察、空中监视、目标指示、电子干扰等众多领域得到了越来越广泛的应用。但当使用光电侦察型无人机进行对地侦察时,会发现由于链路延时引起操纵振荡,会导致任务操纵手很难捕获到地面目标,尤其是在地物背景单一的情况下,单纯利用手动搜索配合图像跟踪模式<sup>[1]</sup>很难实现对目标的快速锁定。特别地,若无人机所处位置还有云层等环境因素进行遮挡,则更容易导致目标“跟丢”。因此,需在光电吊舱中引入地理跟踪技术。首先利用电子地图得到目标点的基本地理位置信息,即目标点的经纬高值,再结合光电吊舱中惯导系统输出的飞机姿态角和位置参数,选取合适的坐标系,进行空中位置关系解算,以实现光电吊舱的数字引导和定位功能,再结合目标跟踪技术,可基本解决目标快速捕获的问题<sup>[2]</sup>。但在实际应用中,传感器常因机体抖动,会获取到一定误差的数据,从而导致光电吊舱地理跟踪的精度差。

针对上述问题,本文创新性地将观测器引入地理跟踪这一过程中,优化传统地理跟踪过程中使用物理传感器进行反馈回路搭建这一过程,使用数字化实现的滑膜观测器代替角度和速度传感器,能消除系统抖动对传感器数据的影响。同时,在传统滑膜观测器的基础上,使用优化后的趋近律函数代替原先趋近律函数,极大提升了系统的稳定精度。本文的主要内容包括:

(1)建立了表示无人机姿态角的机体坐标系,然后通过不同坐标系下的数学变换矩阵,将 WGS-84 坐标系下的飞机和目标的经纬高值转换为地心地固坐标系下的坐标值,再通过地心地固坐标系到机体坐标系的变换矩阵,通过空间三角函数关系式,得到光电吊舱应旋转的方位角和俯仰角。

(2)建立了永磁同步电机(PMSM)的三闭环控制模型。在该模型中加入改进的滑膜观测器作为闭环控制的反馈回路,控制电机输出设置速度以带动光电吊舱转到目标位置。并在传统 SMO 模型上,引入了 sat 函数代替传统的 sign 函数,达到了更高的稳定精度。

## 2 地理跟踪技术研究

### 2.1 地理跟踪中的各坐标系及其变换矩阵

无人机运动学中,有 3 种重要的坐标系。首先是

地球中心坐标系(ECEF 坐标系),该坐标系的原点位于地心,从地心指向赤道与格林尼治线的交点的射线是该坐标系的  $X$  轴,正方向为原点指向交点方向。 $Z$  轴通过坐标原点指向北极。 $Y$  轴与这两轴构成右手坐标系。该坐标系下,电子地图上物体的地理位置用 GPS 坐标中使用的经纬高值(Lon、Lat、Alt 坐标,以下简称 LLA 坐标)表示出来,即为 WGS-84 坐标系。为了后续计算的方便,需要将 LLA 坐标值转化为 ECEF 坐标系下的  $XYZ$  值,转换公式如下式所示:

$$\begin{bmatrix} X_{\text{ecef}} \\ Y_{\text{ecef}} \\ Z_{\text{ecef}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N + \text{alt}) \cos(\text{lat}) \cos(\text{lon}) \\ (N + \text{alt}) \cos(\text{lat}) \sin(\text{lon}) \\ (N(1 - e^2) + \text{alt}) \sin(\text{lat}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2(\text{lat})}}$ 。 $e$  为椭球偏心率,和基准椭球体的极扁率  $f$  存在以下关系:  $e^2 = f(2 - f)$ , WGS-84 坐标系下极扁率  $f$  取值为  $1/298.257223565$ 。 $a$  为基准椭球体的长半径,在 WGS-84 坐标系下  $a$  取值为  $6378137.0 \text{ m}$ 。

ENU 坐标:东北天坐标系下的坐标,该坐标系的原点需要指定,原点向东为  $x$  轴,原点向北为  $y$  轴,原点指向天为  $z$  轴,构成右手直角坐标系,该系下的坐标表示都是米制单位。对于无人机而言,假设某一时刻,无人机所在的位置用 ECEF 坐标表示为  $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ ,待跟踪目标点的位置为  $P = (x, y, z)$ ,  $P_0$  点在 ECEF 坐标系下的 LLA 坐标值为  $P_0 = (x_0, y_0, z_0)$ ,计算目标点在以无人机为坐标原点的 ENU 坐标系下的坐标值  $(e_p, n_p, u_p)$  的计算公式为:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} e_p \\ n_p \\ u_p \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,转换矩阵  $S$  的表达式如下:

$$S = \begin{bmatrix} -\sin(\text{lon}_0) & \cos(\text{lon}_0) & 0 \\ -\sin(\text{lat}_0)\cos(\text{lon}_0) & -\sin(\text{lat}_0)\sin(\text{lon}_0) & \cos(\text{lat}_0) \\ \cos(\text{lat}_0)\cos(\text{lon}_0) & \cos(\text{lat}_0)\sin(\text{lon}_0) & \sin(\text{lat}_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $\text{lon}_0, \text{lat}_0$  分别为无人机在当前时刻的经度值和纬度值。

机体坐标系是以无人机为基础构造的右手系,原点在无人机重心处, $X$  轴指向无人机机头的前进方向, $Y$  轴由原点指向无人机的右侧, $Z$  轴由  $X, Y$  轴

通过右手法则确定,方向为垂直机体平面向下,如图1所示。

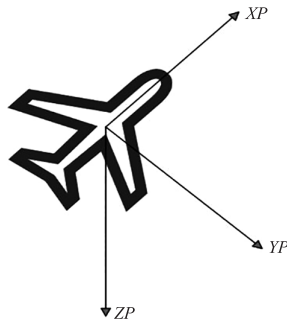


图1 机体坐标系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the body coordinate system

### 2.2 无人机角度坐标系及旋转矩阵

在建立了无人机机体坐标系后,研究发现,在任一时刻,想要唯一确定无人机在空中的姿态,除了无人机的地理位置外,还需要引入无人机姿态角,才能确认该时刻下无人机的运动模式。目前,比较主流的姿态描述方式有欧拉角表示法、方向余弦表示法和四元数表示法。以欧拉角表示为例,无人机在空中的姿态变换过程可看作三个欧拉角的变换序列,这里采用航空航天领域的描述方式<sup>[3]</sup>,称描述无人机姿态的三个欧拉角分别为方位角  $\psi$ 、俯仰角  $\theta$  和横滚角  $\phi$ ,在空中,这三个轴的旋转方式如图2所示。

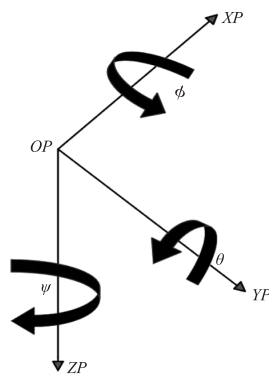


图2 欧拉角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Euler angle

当无人机起飞时,在任一时刻的机体坐标系可以看作是从东北天坐标系经过三次变换得到的。规定惯导输出的飞机姿态角是先绕  $O_p Z_p$  轴旋转  $\psi$  角,然后绕  $O_p Y_p$  轴旋转  $\theta$  角,最后绕  $O_p X_p$  轴旋转  $\phi$  角。整个变换过程如图3所示。

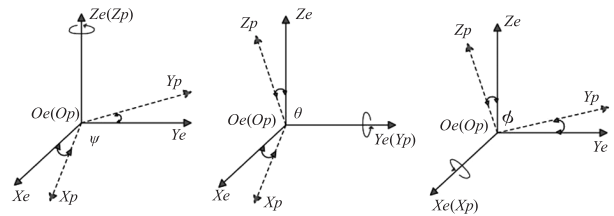


图3 坐标系旋转示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coordinate system rotation

通过三角函数变换关系,不难发现无人机绕  $O_p Z_p$  轴旋转  $\psi$  角的变换矩阵  $B_z(\psi)$  为:

$$B_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

绕  $O_p Y_p$  轴旋转  $\theta$  角的变换矩阵  $B_y(\theta)$  为:

$$B_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

绕  $O_p X_p$  轴旋转  $\phi$  角的变换矩阵  $B_x(\phi)$  为:

$$B_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于规定旋转变换的组合顺序为先绕  $O_p Z_p$  轴,再绕  $O_p Y_p$  轴,最后绕  $O_p X_p$  轴:

$$O_e(X_e Y_e Z_e) \xrightarrow[\text{旋转}\psi\text{角}]{\text{绕}O_e Z_e\text{轴}} O_1(X_1 Y_1 Z_1) \xrightarrow[\text{旋转}\theta\text{角}]{\text{绕}O_1 Y_1\text{轴}} O_2(X_2 Y_2 Z_2) \xrightarrow[\text{旋转}\phi\text{角}]{\text{绕}O_2 X_2\text{轴}} O_p(X_p Y_p Z_p)$$

故无人机在空中的机体坐标系的变换矩阵如式(8)所示:

综上,实现地理跟踪的整个流程图如图4所示。

$$B_e^p = B_x(\phi)B_y(\theta)B_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\theta & \sin\theta \\ \sin\psi\cos\phi + \cos\psi\sin\phi\sin\theta & \cos\psi\cos\phi - \sin\psi\sin\phi\sin\theta & -\cos\theta\sin\phi \\ \sin\psi\sin\phi - \cos\psi\sin\theta\cos\phi & \cos\psi\sin\phi + \sin\psi\sin\theta\cos\phi & \cos\theta\cos\phi \end{bmatrix} \quad (8)$$

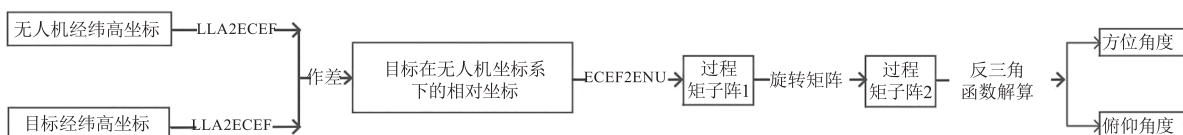


图4 地理跟踪流程图

Fig. 4 Geographic tracking process diagram

### 3 滑膜观测器设计及改进

#### 3.1 状态观测器

为了实现地理跟踪这一功能,设计单 PMSM 电机的工作流程为:PMSM 控制回路的输入为通过地理跟踪算法解算出的吊舱应旋转的方位角度和俯仰角度,通过位置环 PI 控制器解算后,输出为电机应达到的速度值,即图 5 中的  $\omega^*$ ,再通过速度环 PI 控制器,anti-park 运算器解算,结合 SVPWM 技术控制三相逆变器直接输出给电机三相定子电流  $i_a, i_b, i_c$  的电流值大小,再通过反馈元件进行反馈,进一步修正输入。在一过程中,反馈元件可以选择传统的物理传感器,也可以选择使用状态观测器。状态观测器的工作原理为,将电机定子  $\alpha - \beta$  坐标系中  $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$  这 4 个参数作为观测器的输入,通过控制算法解算出电机的反电动势  $E_\alpha, E_\beta$ ,再通过锁相环技术,从  $E_\alpha, E_\beta$  中提取出电机的电角度  $\theta_e$  和电角速度  $\omega_e$ ,完成反馈回路的闭环<sup>[4]</sup>。同样地,使用传统物理传感器,例如陀螺,光电编码器等,也能实现获取电机的电角度和电角速度信息。不过加装物理传感器的劣势在于,不仅进一步挤压了吊舱内部光学传感器的空间,还增加了系统结构设计的难度和闭环控制的难度,故考虑使用数字化的状态观测器完成对传统物理观测器的代替工作。带状态观测器的电流环控制框图如图 5 所示,其中 State Observer 为设计的状态观测器。

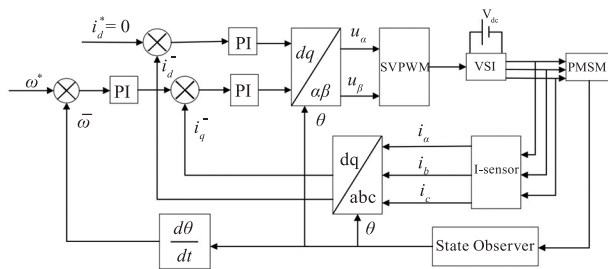


图 5 带状态观测器的电流环控制框图

Fig. 5 Block diagram of current loop control with state observer

#### 3.2 滑膜观测器设计

滑膜控制是一种特殊的非线性控制方法,其与传统 PID 控制的根本区别在于控制的不连续性,可以在工作过程中根据系统当前状态有目的地不断变化,迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动,因此,滑膜控制对扰动有很强的抑制能力,这对于在复杂环境工作下的吊舱来说非常友好。滑膜控制实现的关键在于滑模面函数的选取和滑模增益的选择,滑模面函数决定了观测函

数的准确性,滑模增益决定了估算的收敛速度。因此一个好的滑膜观测器,既要保证滑模面函数的准确性,还需要保证滑模增益大小适合,既能满足收敛速度,又能使得系统稳定运行<sup>[5]</sup>。状态观测器实现的方法有很多种,而滑膜观测器就是将滑膜控制方法应用于状态观测器的设计上,应用在 PMSM 电机控制回路的滑膜观测器工作原理如图 6 所示,其中 SMO 为滑膜观测器本体,通过输入的参数解算出电机的反电动势,再通过锁相环(PLL)解算出需要的电角度和电角速度。

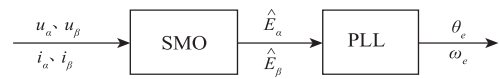


图 6 滑膜观测器工作流程图

Fig. 6 Synovial membrane observer workflow diagram

滑膜观测器的输入量选择为电机定子  $\alpha - \beta$  坐标系的电压和电流信号,即上图中的  $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$ , 以重建电机的反电动势  $E_\alpha, E_\beta$ 。但由于观测器输出的是观测测量,为了区别于真实量,用  $\hat{E}_\alpha, \hat{E}_\beta$  进行区分。电机的反电动势中包含有电机的转子电角度和电角速度等信息,若使用电机转子  $d - q$  坐标系的电压和电流信号进行观测器设计,则在运算过程中,需要一个电角度,而这个电角度无法通过传感器测量得到一个准确值,观测器基于这个存在误差的电角度再去估计电角度,会把误差进一步放大。故选择电机定子坐标系的电压和电流来进行滑膜观测器的设计<sup>[6]</sup>。

已知定子坐标系 ( $\alpha - \beta$  坐标系) 下的电机状态方程如下式:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega_e(L_d - L_q) \\ -\omega_e(L_d - L_q) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_d - L_q)(\omega_e i_d - \frac{d}{dt} i_q) + \psi_f \omega_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $u_\alpha, u_\beta$  是三相定子电压经过 Clark 变换在  $\alpha - \beta$  坐标系下得到的电压值;  $\omega_e$  是电机旋转的电角速度;  $\theta_e$  是电机旋转的电角度;  $L_d, L_q$  是电机转子轴的电感;  $\psi_f$  是转子磁通。反电动势  $E_\alpha, E_\beta$  的表达式如下式:

$$\begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_d - L_q)(\omega_e i_d - \frac{d}{dt} i_q) + \psi_f \omega_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (10)$$

结合式(10),把  $i_\alpha, i_\beta$  的微分放在等式左边,式(9)可变化为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & -\frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} \\ -\frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha \\ E_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此,滑膜观测器的系统状态方程可设计为以下的形式:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & -\frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} \\ -\frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,  $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$  代表的是  $\alpha - \beta$  坐标系下电流的观测值,区别于实际测量得到的  $i_\alpha, i_\beta, v_\alpha, v_\beta$  是滑膜观测器的控制输入,由式(13)表示。其中  $\text{sign}$  是符号函数,当  $\hat{i}_\alpha - i_\alpha > 0$  时,  $\text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)$  为 1,当  $\hat{i}_\alpha - i_\alpha < 0$  时,  $\text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)$  为 -1。 $h$  是滑膜增益系数,为正,是构造滑膜观测器过程中一个十分重要的参数,决定了观测器系统能否稳定以及稳定的情况下,以多快的速度收敛到滑膜面  $\hat{i} = i$  上。

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \cdot \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ h \cdot \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

用式(12)减去式(11),可得观测误差的表达式为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_\alpha \\ \dot{\hat{i}}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & -\frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} \\ -\frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_\alpha \\ \dot{\hat{i}}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} E_\alpha - v_\alpha \\ E_\beta - v_\beta \end{bmatrix} \quad (14)$$

滑膜观测器的最终目的,就是使观测误差最终趋于 0,这样观测器的控制输入  $v_\alpha, v_\beta$  就等于电机的反电动势  $E_\alpha, E_\beta$ 。

### 3.3 系统稳定性分析

滑膜增益  $h$  决定式(14)中观测到的  $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$  能否收敛到  $i_\alpha, i_\beta$ ,即构造的观测器系统能否最终稳定在滑膜面  $\hat{i} = i$  上。为了研究观测器系统的稳定性,首先定义一个滑膜面函数矩阵  $s$ :

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_\alpha \\ \dot{\hat{i}}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} \quad (15)$$

为了研究的方便,以矩阵的第一行  $\dot{\hat{i}}_\alpha$  为例,进行李雅普诺夫稳定性分析,第二行  $\dot{\hat{i}}_\beta$  同理。根据判据可知:若存在系统状态方程为  $\dot{s}_1 = f(s_1)$ ,且系统存在一个平衡点为  $s_1 = 0$ ,此时若存在一个关于  $s_1$  的函数  $U(s_1)$  使得式(16)和式(17)成立,那么  $U(s_1)$  就是自变量  $s_1$  的李雅普诺夫候选函数且该系统  $\dot{s}_1 = f(s_1)$  对于平衡点  $s_1 = 0$  是全局渐进稳定的。

$$U(s_1) \geq 0 \text{ (当且仅当 } s_1 = 0 \text{ 时, 等号成立)} \quad (16)$$

$$\dot{U}(s_1) \leq 0 \text{ (当且仅当 } s_1 = 0 \text{ 时, 等号成立)} \quad (17)$$

选取式(18)作为滑膜面函数  $s_1$  的李雅普诺夫候选函数:

$$U(s_1) = \frac{s_1 \cdot s_1}{2} \quad (18)$$

故  $U(s_1)$  的导数如下所示:

$$\dot{U}(s_1) = s_1 \cdot \dot{s}_1 = \dot{\hat{i}}_\alpha \frac{d}{dt} \dot{\hat{i}}_\alpha \quad (19)$$

明显,式(18)满足式(16),若通过选取合适的  $h$  值使得式(19)满足式(17),则  $\hat{i}_\alpha$  最终能收敛到  $i_\alpha$ 。根据式(14)的第一行,可将式(19)展开可得如下表达形式:

$$\dot{\hat{i}}_\alpha \frac{d}{dt} \dot{\hat{i}}_\alpha = \dot{\hat{i}}_\alpha \left[ -\frac{R_s}{L_d} \dot{\hat{i}}_\alpha - \frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} \dot{\hat{i}}_\beta + \frac{1}{L_d} E_\alpha - \frac{1}{L_d} h \cdot \text{sign}(\dot{\hat{i}}_\alpha) \right] < 0 \quad (20)$$

针对  $\dot{\hat{i}}_\alpha$  的正负,进行分情况讨论:当  $\dot{\hat{i}}_\alpha > 0$  时,式(20)成立的条件则等效于式(21);

$$h > -R_s \dot{\hat{i}}_\alpha + E_\alpha - \omega_e(L_d - L_q) \dot{\hat{i}}_\beta \quad (21)$$

当  $\dot{\hat{i}}_\alpha < 0$  时,式(20)成立的条件则等效于式(22):

$$h > R_s \dot{\hat{i}}_\alpha - E_\alpha + \omega_e(L_d - L_q) \dot{\hat{i}}_\beta \quad (22)$$

将式(21)和式(22)统一,可以得到下列式子:

$$h > -R_s |\dot{\hat{i}}_\alpha| + E_\alpha \cdot \text{sign}(\dot{\hat{i}}_\alpha) - \omega_e(L_d - L_q) \dot{\hat{i}}_\beta \cdot \text{sign}(\dot{\hat{i}}_\alpha) \quad (23)$$

对式(15)中的  $s_2$  进行相同的推导,可得  $h$  的另

一个需满足条件为:

$$h > -R_s | \dot{i}_\beta | + E_\beta \cdot \text{sign}(\dot{i}_\beta) - \omega_e(L_d - L_q) \dot{i}_\alpha \cdot \text{sign}(\dot{i}_\beta) \quad (24)$$

通过比较式(23)和式(24)可发现:当设计滑膜增益  $h$  满足式(23)和式(24)中的较大值后<sup>[7]</sup>,就可以使得观测器最终稳定在  $\hat{i} = i$  的滑膜面上,而实际使用过程中,由于不同电机的额定电流,峰值电流都已确定,故观测电流和实际电流的差值绝对值  $|\hat{i}|$  为一有界值,故设计的增益  $h$  存在下界,理论上,通过合理设计  $h$ , 就可以使得滑膜观测器系统最终趋于稳定。

### 3.4 滑膜观测器的改进及稳定性分析

以上,对基础滑膜观测器构造和稳定性做了详细介绍和分析。然而,在实际应用中,发现滑膜观测器仍存在美中不足之处,例如,稳定后的系统输出仍存在较大幅度的振荡。针对该问题,本文对公式(13)中  $v_\alpha$ 、 $v_\beta$  的趋近函数进行改良<sup>[8]</sup>。在传统滑膜观测器中,使用符号函数乘以增益系数的方式得到估算的反电动势。稍加分析可知:只要观测电流和真实电流之间存在误差,哪怕误差很小,在该趋近律的作用下都会输出最大增益,导致观测电流和实际电流的差值在滑膜面附近存在长时间抖振。为此,对趋近函数进行优化,引入“滑膜边界层  $i_{\text{Err}}$ ”这一概念,基于饱和函数 ( $y = \text{sat}(x)$ ) 重新构造趋近律函数<sup>[9]</sup>。在边界层内,使用基于输入误差的一次函数进行趋近律代替,这样既保证了响应的快速性,又极大地减小了系统稳定后出现的抖振现象。新构造的趋近律函数的表达式如下式:

$$v_\alpha = \begin{cases} h \cdot \text{sign}(\dot{i}_\alpha), & |\dot{i}_\alpha| > i_{\text{Err}} \\ \frac{h}{i_{\text{Err}}} \cdot \dot{i}_\alpha, & |\dot{i}_\alpha| < i_{\text{Err}} \end{cases} \quad (25)$$

类比章节 3.3 中的稳定性分析方式,同样选取式(18)为自变量  $S_1$  的李雅普诺夫候选函数,当满足  $U(s_1)$  为 PD 矩阵,  $\dot{U}(s_1)$  为 ND 矩阵时,系统存在一个渐进稳定的平衡点为  $s_1 = 0$ 。当  $|\dot{i}_\alpha| > i_{\text{Err}}$  时,  $\text{sat}(x) = \text{sign}(x)$ , 由 3.3 节可知,此时系统是渐进稳定的;当  $|\dot{i}_\alpha| < i_{\text{Err}}$  时,系统稳定性证明如下,同样以  $\dot{i}_\alpha$  为例,  $\dot{i}_\beta$  的证明同理:

当  $U(s_1)$  取  $\frac{s_1 \cdot \dot{s}_1}{2}$  时,明显  $U(s_1)$  满足正定条件,将  $U(s_1)$  的导数展开可得下式:

$$\begin{aligned} \dot{U}(s_1) &= s_1 \cdot \dot{s}_1 = \dot{i}_\alpha \frac{d\dot{i}_\alpha}{dt} \\ &= \dot{i}_\alpha \left[ -\frac{R_s \dot{i}_\alpha}{L_d} - \frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} \dot{i}_\beta + \frac{1}{L_d} E_\alpha - \frac{k}{L_d} \dot{i}_\alpha \right] \quad (26) \end{aligned}$$

其中  $k = \frac{h}{i_{\text{Err}}}$ ,  $|\dot{i}_\alpha| < i_{\text{Err}}$ 。分情况讨论,当  $0 < \dot{i}_\alpha < i_{\text{Err}}$  时,  $\dot{U}(s_1)$  为 ND 矩阵等效为  $-\frac{R_s \dot{i}_\alpha}{L_d} - \frac{\omega_e(L_d - L_q)}{L_d} \dot{i}_\beta + \frac{1}{L_d} E_\alpha - \frac{k}{L_d} \dot{i}_\alpha < 0$ , 此时可解得:  $k > -R_s + \frac{E_\alpha}{\dot{i}_\alpha} - \omega_e(L_d - L_q) \frac{\dot{i}_\beta}{\dot{i}_\alpha}$ ; 当  $-i_{\text{Err}} < \dot{i}_\alpha < 0$  时,  $k > -R_s - \frac{E_\alpha}{\dot{i}_\alpha} + \omega_e(L_d - L_q) \frac{\dot{i}_\beta}{\dot{i}_\alpha}$ 。因此,  $k$  需要满足的条件为:  $k > -R_s + \frac{E_\alpha}{|\dot{i}_\alpha|} - \omega_e(L_d - L_q) \frac{\dot{i}_\beta}{|\dot{i}_\alpha|}$ 。同理,

针对  $\dot{i}_\beta$  进行讨论,可得  $k$  需要满足的条件为:  $k > -$

$R_s + \frac{E_\beta}{|\dot{i}_\beta|} - \omega_e(L_d - L_q) \frac{\dot{i}_\alpha}{|\dot{i}_\beta|}$ 。因此,系统渐进稳定的

充要条件是  $k$  要大于二者中的较大值。分析该式可知:  $k$  的下限值理论上存在,因此,通过合理设计滑膜增益  $h$  和滑膜临界层  $i_{\text{Err}}$ , 可以使得改进后的滑膜观测器系统全局渐进稳定。

## 4 实验仿真

按图 5 控制框图在 Matlab2023 中搭建对应 Simulink 仿真模型,设置 PMSM 电机的负载转矩为  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 设置目标速度为  $1000 \text{ rpm}$ , 设置目标角度为从  $0^\circ$  开始,按一次函数关系逐渐增加到  $200^\circ$ , 设置整个系统仿真时间为  $0.5 \text{ s}$ , 设置整个离散系统的仿真时间间隔为  $10^{-6} \text{ s}$  后,运行后,可得到下列运行结果示意图。如下图 7 所示,针对地理跟踪任务中的目标位置,通过 MATLAB 中的数据检查器可以看到滑膜观测器输出的观测位置与设定的目标位置高度重合,展开局部细节,可以看到观测输出在  $0.0184 \text{ s}$  之后,才和真实位置产生了延迟。在  $0.5^\circ$  的目标位置下,观测位置和真实位置仅有  $0.0022 \text{ s}$  的延迟时间。

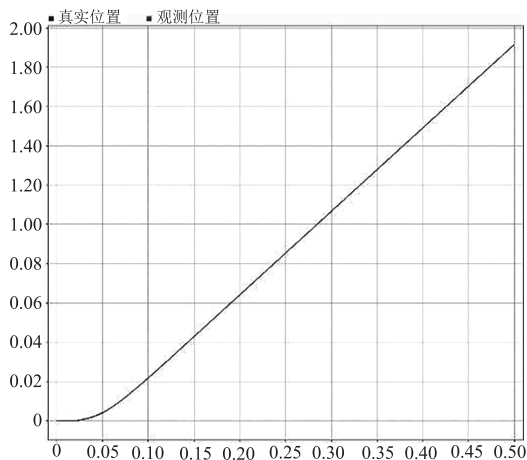


图7 位置对比仿真图

Fig.7 Position comparison simulation diagram

下图9是针对设置的目标速度信号,分别使用sat函数和sign函数进行模拟仿真,并和设置信号进行对比的对比仿真图。从图中可直观看到,sat函数的稳定性和超调量远远优于sign函数。展开局部细节可以观察到sat函数的最大超调量仅为3.2,而sign函数的最大超调量为56.5;sat函数的上升时间为0.1433s,sign函数的上升时间为0.097s。二者在上升时间上差别不大,sat函数略滞后于sign函数,但sat函数的超调要远远优于sign函数。

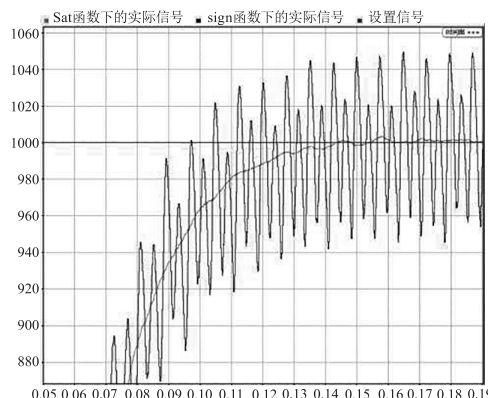


图9 三种速度信号对比仿真图

Fig.9 Comparison simulation diagram of three speed signals

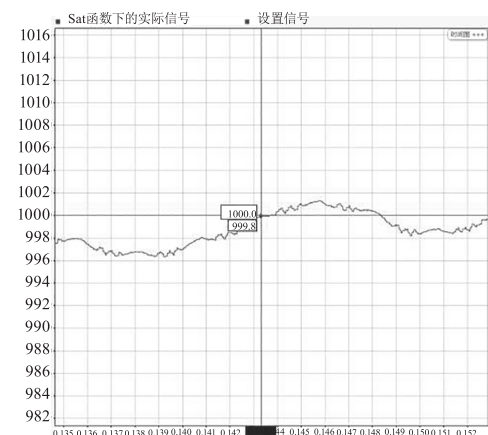
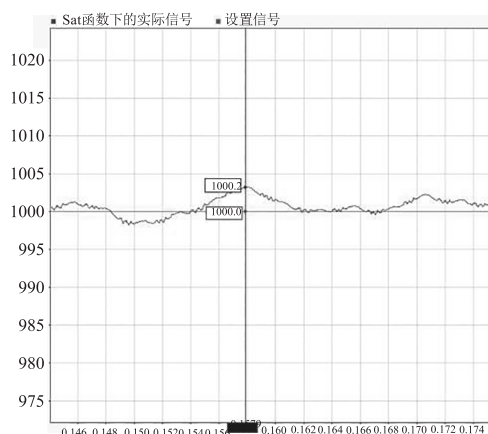


图10 Sat函数的超调量和上升时间

Fig.10 Simulation diagram of the overshoot and rise time of sat function

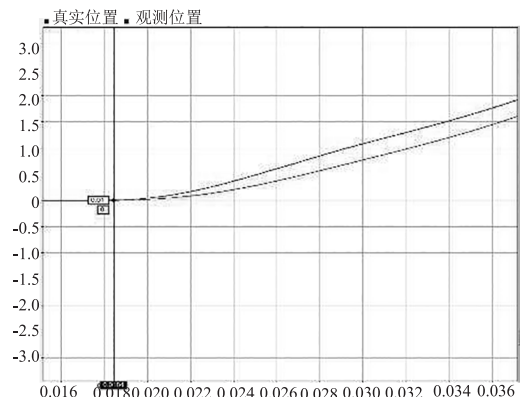
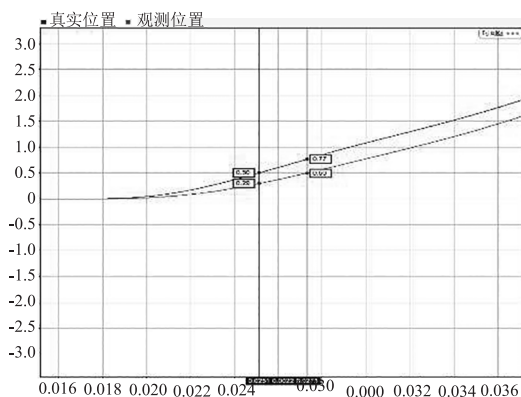
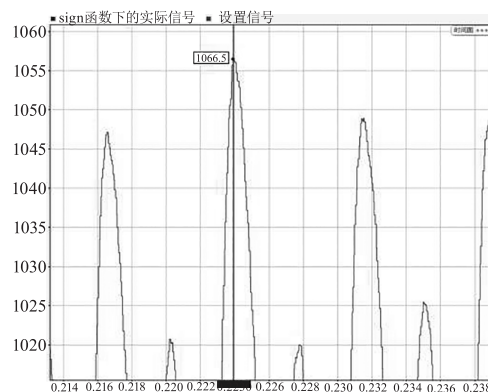


图8 位置对比信号细节放大图

Fig.8 Enlarged diagram of position comparison signal details



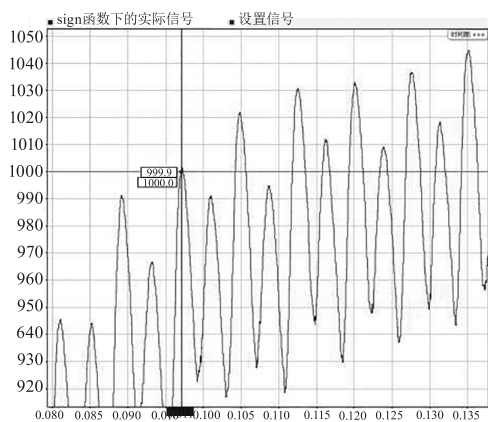


图 11 sign 函数的超调量和上升时间

Fig. 11 Simulation diagram of the overshoot and rise time of sign function

## 5 结论

针对光电吊舱中地理跟踪这一功能,本文搭建了 PMSM 三环控制模型,在传统带有位置和速度传感器的基础上进行改良,通过在控制回路中引入 SMO,完成了无传感器闭环控制回路搭建,并在传统的 SMO 模型基础上,将 sign 函数优化为 sat 函数。最终的仿真结果说明,相比与 sign 函数,使用 sat 函数下的滑膜观测器的超调量和稳定性均有着更优良的表现,超调量与输入量的比值更是从 5.65% 下降到了 0.32%,而其代价仅仅是上升时间延后了 0.0462s。在某些小型光电吊舱的应用场景中,优化后的滑膜观测器具有较重大的实际应用意义。

## 参考文献:

- [1] Wang P, Chen L, An J W. Modeling and simulation of integrated control for UAV and payloads[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004, 24(1): 20-22. (in Chinese)  
王鹏, 陈澜, 安锦文, 等. 无人机任务设备/飞机综合控制的建模及仿真[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(1): 20-22.
- [2] Jia W, Sun M R, Li D J. Geographical tracking algorithm of UAV EO/IR payload [J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(2): 117-119. (in Chinese)  
贾伟, 孙美蕊, 李大健, 等. 无人机光电载荷地理跟踪控制研究[J]. 航空计算技术, 2012, 42(2): 117-119.
- [3] Xing Z L. Permanent magnet synchronous motor drive and control system with load state observer[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)  
邢桢林. 带负载状态观测器的永磁同步电机驱动控制系统[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- [4] Saihi L, Boutera A. Robust sensorless sliding mode control of PMSM with MRAS and Luenberger extended observer [C]//2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). Algiers: IEEE, 2016: 174-179.
- [5] Huang C C, Jin H, Lu W Q. Permanent magnet synchronous motor control based on super-twisting sliding film observer[J]. Electronic Science and Technology, 2023, 36(11): 8-13. (in Chinese)  
黄成成, 金海, 鲁文其. 基于 Super-Twisting 无位置滑膜观测器的永磁同步电机控制[J]. 电子科技, 2023, 36(11): 8-13.
- [6] Jin A J, Wang J Z, Chen Q C, et al. Design of brushless dc motor system based on sliding mode observer[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(8): 1-5. (in Chinese)  
金爱娟, 王居正, 陈启超. 基于滑膜观测器的无刷直流电机系统的设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(8): 1-5.
- [7] Xu J H. A novel sliding-film observer control strategy with variable speed approach[J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(6): 89-90. (in Chinese)  
徐俊虎. 新型变速趋近率滑膜观测器控制策略[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(6): 89-90.
- [8] Yang Y H. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor [J]. Automation Application, 2023, 64(4): 108-111. (in Chinese)  
杨一恒. 永磁同步电机无速度传感器控制[J]. 自动化应用, 2023, 64(4): 108-111.
- [9] Guo D L, Liu X G, Liu J G, et al. The combination of improved sliding-mode observer and I-f startup strategy for PMSM sensorless vector control[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2017, 36(2): 33-38. (in Chinese)  
郭栋梁, 刘喜刚, 刘金国, 等. 改进 SMO 与 I-f 启动相结合的 PMSM 无传感器控制[J]. 沈阳理工大学学报, 2017, 36(2): 33-38.