

文章编号 1004-924X(2016)05-1148-11

航空遥感惯性稳定平台 LuGre 摩擦参数的分步辨识

曾德林*, 肖 凯, 林竹种, 张 立

(国防科学技术大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 由于航空遥感惯性稳定平台框架角运动受限, 本文提出了基于 LuGre 摩擦模型进行参数初步和精确辨识的方法以进一步提高其控制精度。从数字控制系统出发, 构建了摩擦参数辨识系统, 把摩擦参数辨识问题转化为曲线拟合问题。通过限定输入信号幅值和频率, 解决了框架角运动受限导致摩擦参数辨识困难的问题。结合数字控制系统特性, 优先辨识摩擦线性项参数; 根据摩擦静态和动态特性, 提出分步夹逼和分步搜索法依次辨识剩余参数, 完成初步辨识。然后代入初步辨识结果, 用遗传算法完成摩擦参数的精确辨识。仿真结果表明: 摩擦参数初步辨识误差小于 5%, 精确辨识误差小于 0.7%; 用辨识出的摩擦参数构建摩擦补偿器, 系统对基座低频角运动干扰的抑制能力提高了 4 倍。最后, 基于某原理样机开展了摩擦参数辨识和补偿实验, 结果表明控制精度提高了 1 倍, 证实了提出的辨识方法的有效性和工程实用意义。

关键词: 航空遥感; 惯性稳定平台; LuGre 模型; 分步辨识; 遗传算法; 前馈摩擦补偿

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.1148

Sub-step identification of LuGre friction parameters of inertially stabilized platform for airborne remote sensing

ZENG De-lin*, XIAO Kai, LIN Zhu-chong, ZHANG Li

(College of Aerospace Science and Engineering,
National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: 18670387476@163.com

Abstract: A preliminary and accurate LuGre friction parameter identification method was put forward to improve the control precision of an inertially stabilized platform for airborne remote sensing due to its limited gimballed angular motion. From the digital control system, the parameter identification system of a friction model was constructed to transform the identification problem into that of a curve fitting. By limiting the amplitude and frequency of an input signal, the difficulties of parameter identification of friction model caused by the limited gimballed angular motion were solved. On the basis of the digital control system, the linear friction parameter was preferentially identified. Then, according to the stationary and dynamic characteristics of LuGre model, a sub-step bi-directional approach and a sub-step searching method were proposed to identify the remaining friction parameters in turn, and the preliminary identification was completed. Furthermore, the accurate identification was achieved by making full use of preliminary identification results and genetic algorithm. Simulation

收稿日期: 2016-01-22; 修订日期: 2016-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 61503395)

results indicate that parameter errors of preliminary identification are less than 5% while that of accurate identification are down to 0.7%. After adding a friction compensator designed by identified friction parameters, the ability to suppress the interference caused by low frequency angular motion of a base is improved by 4 times. An experiment for the identification and compensation of friction parameters based on a principle prototype, and the results show that the control precision of system is double that of the traditional one, which verified that the validity of identification method proposed and its engineering meanings.

Key words: airborne remote sensing; inertially stabilized platform; LuGre model; sub-step identification; genetic algorithm; feedforward friction compensation

1 引言

航空对地观测成像的精度要求不断提高,因此,作为隔离机体扰动的重要装置的惯性稳定平台得到了广泛的应用^[1]。为满足实时运动的航空高精度成像要求,惯性稳定平台必须能够克服来自平台内外的扰动,实现高精度实时控制和姿态稳定^[2]。由于航空遥感惯性稳定平台的质量和体积都较大,需要使用电机齿轮传动机构来增大电机驱动力矩,由此带来了较低的结构谐振频率,并把控制带宽限制到了很小的范围,使得控制系统对于干扰的抑制能力很有限^[1,3-4]。另外,来自机体的扰动主要为低频角位移扰动,航拍作业时,又要求姿态角变化幅值很小^[4],从而使得摩擦的低速效应尤为明显。

为消除摩擦的干扰,当前主要的做法是先建立准确的摩擦模型,然后设计摩擦补偿器对控制系统进行前馈补偿^[5-6]。因此,摩擦模型的建模精准性至关重要。摩擦模型主要分为动态和静态摩擦模型^[7]。静态摩擦模型提出摩擦力矩决定于相对角速度,而与接触面间的情况无关,在早期的工程中应用较多,典型的有库伦+粘性摩擦模型^[8],指数模型^[9]和 kanorpp 模型^[10]等等。静态模型比较简单,参数辨识也较为简单,然而无法很好地反映摩擦在零速附近的动态效应,而这正好是惯性稳定平台所需要克服的。而基于 Dahl 模型发展起来的 LuGre 模型^[11]能够很好地反映出摩擦的静态和动态效应,代表了当前最高水平,在工程中得到了广泛的应用。

然而由于 LuGre 模型的高非线性和内部状态不可测等因素的影响,模型的参数辨识非常困难,目前还没有很好的辨识办法^[12]。文献^[13]利

用转台在摩擦作用下自由减速曲线中的速度过零现象进行参数辨识,并用遗传算法验证辨识过程的有效性。然而,航空遥感惯性稳定平台是大惯量、高阻尼系统,且框架运动的角度受到了限制,无法用该方法进行辨识。文献^[14]用两步辨识法,先给定角速度使其稳定,再测量其 Strict-back 曲线辨识出静态参数,然后利用临界运动状态的动力学特性辨识动态参数。该方法对于航空遥感惯性稳定平台的方位轴摩擦参数辨识有较好的作用,但是对于横滚和俯仰方向,因其角运动范围很小,通常在 $\pm 10^\circ$ 以内,静态参数辨识过程中,通常不能达到给定的角速度,因此无法使用。文献^[15]基于仿真系统和实际系统的差值建立了目标函数,对 Strict-back 模型采用遗传算法进行摩擦辨识。该方法同样没有解决好角度限制的问题。文献^[16]提出了一种构建速度输入,测量摩擦力输出的单输入单输出辨识系统,并用遗传算法进行参数辨识的新型摩擦辨识算法。该方法对于传统的辨识方法是一种突破,然而由于其没有考虑到实际的控制对象和实际过程中摩擦的静态和动态特性,没有实用性。文献^[17]针对光电稳定平台,在考虑不平衡力矩和摩擦耦合的基础上提出了辨识摩擦非线性参数的方法,该方法同样是通过测量 Strict-back 曲线进行辨识,没有突破角度限制的约束,无法应用到角度有约束的大载荷惯性稳定平台框架上。

本文从惯性稳定平台数字控制系统出发,构建摩擦参数辨识系统,把摩擦参数辨识问题转化为曲线拟合问题。根据实际稳定平台的框架角位移约束,限定输入信号的幅度和频率,以此来解决框架有限角运动摩擦参数辨识问题。通过研究摩擦特性和辨识系统,完成摩擦参数初步辨识;代入初步辨识结果,采用遗传算法进行精确辨识。最

后通过仿真和实验证明了辨识方法的有效性和工程实用性。

2 惯性稳定平台数字控制系统

2.1 三轴惯性稳定平台工作原理

航拍作业时,为了提高光学载荷的成像分辨率,惯性稳定平台必须要能够隔离来自飞机三轴方向的加速度扰动。本文所采用的航空遥感惯性稳定平台如图 1 所示。

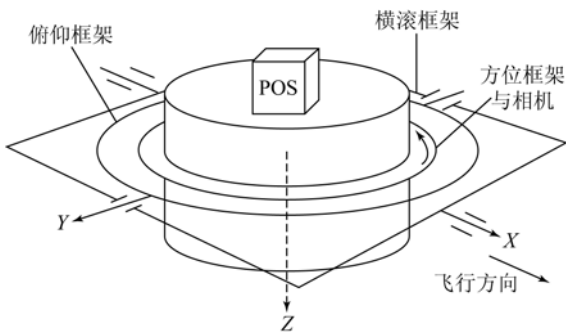


图 1 航空遥感惯性稳定平台结构示意图

Fig. 1 Sketch map of inertially stabilized platform for airborne remote sensing

飞机运动方向如图 1 箭头所示,光学载荷安装在方位框架内。系统工作时,利用控制系统控制框架保持相机视线方向(LOS)竖直向下,且相对惯性系的方位保持不变。正常工作时三轴框架相对于惯性坐标系的角度很小,所以其各轴间的耦合作用也很小,可以将三轴控制系统的设计独立开分别设计^[18-20]。单轴控制系统的原理框图如图 2 所示。控制系统由陀螺稳定回路和位置稳定回路组成,这种二环的控制结构既可以达到较好的控制精度又易于实现。

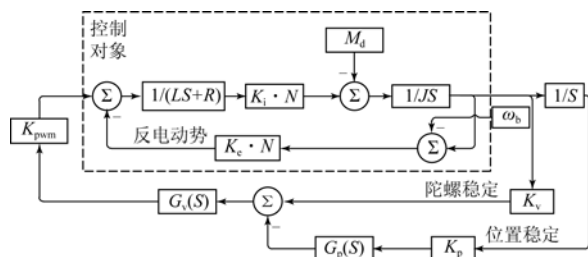


图 2 单轴控制系统结构

Fig. 2 Structure of control system with single axis

图 2 中虚线框内为控制对象,包括了电机的内部动态,具体为:

$$\begin{cases} U_c - U_e = LI + RI \\ T_c = IK_i N \\ J\dot{\omega} = T_c - M_d \end{cases}, \quad (1)$$

式中: U_c 为控制电压输入, $U_e = K_e N\omega$ 为电机反电动势,其中 K_e 为反电动势系数, N 为齿轮传动比, ω 为框架相对基座的相对角速度; I 为电机电感, R 为电机电阻。 T_c 为电机输出力矩,正比于电流,比例系数为 K_i ;框架的转动角加速度 $\dot{\omega}$ 为施加在框架上的外力矩(包括电机的输出力矩减去干扰力矩 M_d 后的值)与框架转动惯量 J 的比。

控制对象的输入信号为电压信号,由数字控制电路给出。首先由传感器(包括陀螺仪和 IMU)采集到角速度和姿态信息,由陀螺比例因子 K_v 和 IMU 单位换算因子 K_p 采集数字信号,将获取到的信息输入到陀螺稳定控制器 $G_v(s)$ 中,计算出的信号经功率放大模块后,得到输入对象的信号,其物理意义为控制电压。图中 $G_p(s)$ 为位置稳定控制器, K_{pwm} 为功放模块的比例因子。

2.2 数字系统辨识原理

图 2 中虚线框之外的控制环节就是采用数字处理信号(Digital Signal Processing, DSP)为核心建立起来的数字控制电路。由于 DSP 的可编程特性,可以建立辨识系统,测试控制对象并进行系统辨识^[21-22],原理如图 3 所示。

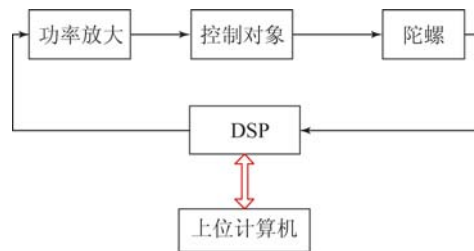


图 3 数字控制系统辨识原理

Fig. 3 Identification principal of digital control system

由上位机对 DSP 进行编程操作,产生正弦信号,经由功率放大电路输入到控制对象(即图 2 虚线框内),再由陀螺采集对象的响应信号传回 DSP 并与上位机进行交互。

基于此种方法可以实现对控制对象的系统辨识。当激励信号输入的是一个频率和幅值给定的

正弦信号时,由于非线性摩擦的影响,响应的信号会是一个大体具有正弦形状且频率和输入信号相同,但是形状不规则的信号。输入输出波形如图 4 所示。

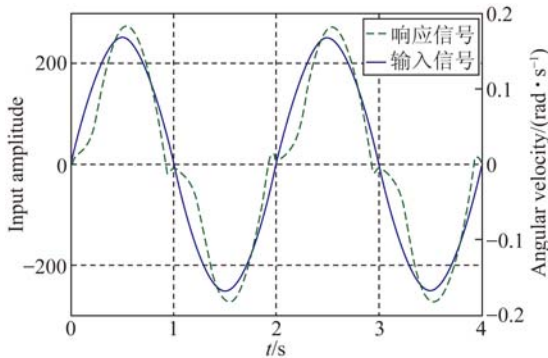


图 4 输入信号与响应信号结果

Fig. 4 Results of input signal and response signal

图 4 中,实线为输入电信号,其为控制系统产生的功率放大之前的控制信号,没有实际的物理意义,幅值和频率均可由编程设置,虚线为响应信号,是陀螺测量的角速度值。本文将根据正弦激励的输入输出结果,结合已知的系统线性模型和设计的摩擦模型,提出一种新型的摩擦参数辨识方法。

3 摩擦模型

LuGre 摩擦模型代表了当前摩擦研究的最高水平,很好地反映出了摩擦的静态和动态特性^[5]。把 LuGre 摩擦模型运用到大载荷、摩擦低速效应明显的稳定平台中并实现摩擦补偿设计已经有了初步的研究,其模型为^[14]:

$$\begin{cases} \dot{z} = \omega_r - \frac{\sigma_0 |\omega_r|}{g(\omega_r)} \cdot z \\ M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \omega_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω_r 为框架与基座之间的相对角速度; z 为摩擦的内部状态,其物理意义可以表征为接触面间的刚毛(bristle)平均位移;通常有:

$$g(\omega_r) = M_c + (M_s - M_c) e^{-\left(\frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2} \quad (3)$$

式(3)以指数的形式反映了零角速度附近的摩擦动态, M_c 为库伦摩擦力矩, M_s 为最大静摩擦力矩, ω_s 被称作 Strict-back 常数,结合指数形式可以表征出 Strict-back 特性中的负斜率。 M_f 为

LuGre 摩擦力矩,其由三部分组成,第一部分正比于内部摩擦状态,比例因子为刚度系数 σ_0 ,用于表征刚毛的刚度;第二部分由状态变化引起,其中 σ_1 为微阻尼因子;最后一部分是库伦摩擦力矩,系数为 σ_2 ,正比于角速度。

4 LuGre 摩擦参数辨识方法

保持基座不动,经上位机编程使 DSP 控制电路产生正弦信号,并输入到控制对象中,由陀螺仪测得输出信号,获取响应信号。建立带 LuGre 摩擦模型的控制对象模型,调整摩擦参数,用获取的仿真信号拟合实际实验信号。这样就把摩擦辨识的问题转化为了曲线离线拟合的问题,进一步分析见图 5。

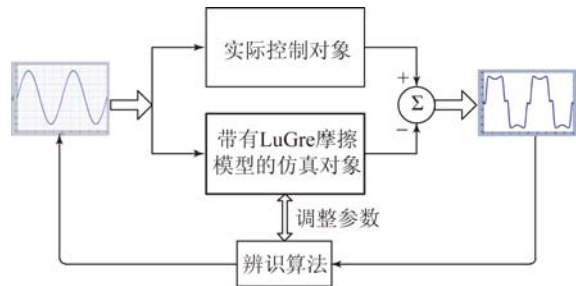


图 5 摩擦参数辨识系统

Fig. 5 Identification system of friction parameters

由图 5 可知,为了更好地进行曲线拟合,将实验所得响应曲线减去仿真所得曲线,通过研究它们之间的差值信号,可以反推出仿真中 LuGre 模型的摩擦参数与实际值之间的偏离程度,调整仿真模型参数,当仿真模型与实际控制对象对于相同的正弦输入信号的响应很接近时,即差值信号很接近零线时,仿真模型参数为实际控制对象的摩擦模型参数,即辨识完成。

考虑到 LuGre 摩擦模型的高非线性,且有 6 个待辨识参数,所以在进行曲线拟合时,较难设计优化目标函数,且计算量大,为此必须要从摩擦特性出发,研究一套快速有效的辨识方法。

4.1 输入信号的设定

本文的研究对象是航空遥感惯性稳定平台,需要分别对 3 个轴方向的框架进行摩擦参数辨识。从引言中可以知道,方向轴的活动范围通常小于 $\pm 30^\circ$,而俯仰方向和横滚方向小于 $\pm 10^\circ$,所

以对输入信号的幅值和频率都要进行一定的限制,从而避免在摩擦辨识过程中,出现框架卡死的情况。

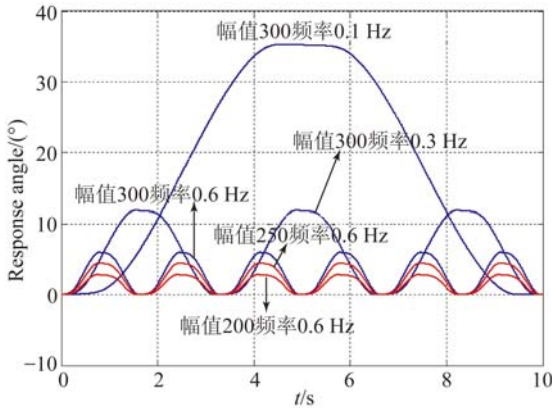


图 6 框架角运动与输入信号幅值和频率的关系

Fig. 6 Relationship between gimbal angle motion and the amplitude and frequency of input signal

图 6 为输入信号取不同幅值和频率时,稳态平台框架的角位移。由图 6 可知,当输入信号的幅值越大,频率越低时,框架运动角度越大。所以在进行摩擦参数辨识之前必须要限定输入信号的幅值和频率。

系统的摩擦效应通常在低角速度情况下较为明显,所以在框架角度允许的范围内,应当尽量选择低频率的输入信号,具体数值要根据实际情况决定。基于此种方法可以对角位移有限制的稳定平台框架进行摩擦辨识。

4.2 摩擦参数初步辨识

4.2.1 系统非线性分离与 σ_2 辨识

实际系统参数与设计参数总是有所区别,系统调试阶段必须要进行参数辨识,一般采用频率响应法。为了排除非线性对响应曲线的干扰,张新勇^[20]用到了输出求差的方法。本文在该方法的基础上,进一步设计了参数 σ_2 的辨识方法。

由图 4 的输出波形可以知道,当基座不动时,框架的响应角速度输出信号大体为正弦信号,因为 ω_r 通常很小,所以在一段时间内会出现 $\omega_r \gg \dot{z}$,即 $\dot{z} \approx 0$,此时摩擦模型变为:

$$M_t = M_c \cdot \text{sign}(\omega_r) + \sigma_2 \cdot \omega_r + M_{\text{nonlinear}}. \quad (4)$$

摩擦力矩由库伦摩擦力矩,粘性摩擦力矩和与 ω_r 无关的非线性项 $M_{\text{nonlinear}}$ 组成,即摩擦力矩分为了线性部分和非线性部分,设 $\omega_r > 0$,可以把

非线性部分当成和 ω_r 没有关系的干扰。对于常值干扰 M_c ,有:

$$\frac{y}{M_c} = \frac{LS+R}{JS \cdot (LS+R) + K_i K_e \cdot N^2}. \quad (5)$$

即 $y_{t \rightarrow \infty} = 0$,事实上 y 值衰减很快,所以 M_c 对稳态输出的影响很小。对于非线性项 $M_{\text{nonlinear}}$,通过给定两个频率相同幅值不同的正弦输入信号,对响应信号作差,可加以消除。

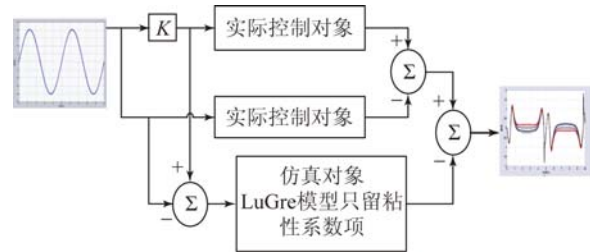


图 7 摩擦参数 σ_2 辨识系统

Fig. 7 Identification system of friction parameter σ_2

图 7 为摩擦参数 σ_2 辨识系统,实际系统通过对具有不同幅值相同频率的两个信号响应作差以消除非线性影响,然后与仅有粘性系数 σ_2 的线性摩擦项的仿真系统的响应信号作差,可以通过差值信号辨识出 σ_2 。图中 K 为幅度放大因子,通常 $1 < K < 2$ 。

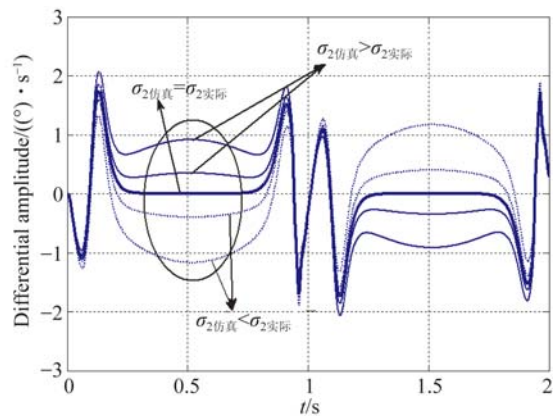


图 8 输出差值信号与 σ_2 辨识

Fig. 8 Identification of σ_2 and output difference signals

当仿真系统中的 $\sigma_{2\text{仿真}} > \sigma_{2\text{实际}}$ 时,差值信号如图 8 中细实线所示,稳态部分(如图椭圆圈起部分)在零线上方,且参数取值比实际大的越多,则稳态部分距零线越远。当 $\sigma_{2\text{仿真}} < \sigma_{2\text{实际}}$ 时,则相反,如图中虚线所示。当 $\sigma_{2\text{仿真}} = \sigma_{2\text{实际}}$ 时,如图 8

中粗实线所示,差值信号稳态部分很接近零线。如此可以利用夹逼的方法快速辨识出 σ_2 的值。

4.2.2 摩擦参数 M_c 、 b 和 ω_s 的辨识

辨识出粘性摩擦参数 σ_2 之后,可以把该项并入到系统的线性部分,计算摩擦力矩时可以排除该项。仍然考虑 $\dot{z} \approx 0$ 的稳态情况,展开非线性项,则摩擦力矩表达式变为:

$$M_f \approx M_c \cdot \text{sign}(\omega_r) + bM_c \cdot e^{-\left(\frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2} \cdot \text{sign}(\omega_r). \quad (6)$$

式中: $b > 0$ 为一常数, $M_s = (1+b)M_c$ 。所以,辨识 M_s 转化为辨识 b ,考虑 ω_r 较大且大于零的时段,式(6)简化为:

$$M_f = M_c. \quad (7)$$

如此,同辨识 σ_2 一样,可用夹逼的方法快速辨识出摩擦参数 M_c 。

当相对角速度 ω_r 较小,但仍然满足 $\dot{z} \approx 0$ 的稳态情况时,因为已辨识出 M_c ,可排除式(6)中该项的影响,故摩擦力矩表述为:

$$M_f = b \cdot M_c \cdot e^{-\left(\frac{\omega_r}{\omega_s}\right)^2} \cdot \text{sign}(\omega_r), \quad (8)$$

式中:由于 M_c 已知, M_f 的取值只与 b 和 ω_s 有关,可以用分步夹逼的方法快速较精确地完成辨识。具体说明如图 9。

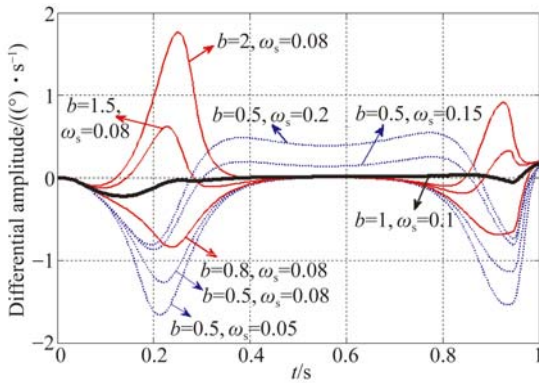


图 9 输出差值信号与 b 和 ω_s 的辨识

Fig. 9 Identification of b , ω_s and output difference signals

图 9 截取半个周期进行说明。设实际系统摩擦参数 $b=1$, $\omega_s=0.1$ 。采用分步夹逼的方法,先设 $b=0.5$,作为初值,调节 ω_s ,当 $\omega_{s\text{仿真}} > \omega_{s\text{实际}}$ 值时,输出差值信号稳态值要偏离零线, $\omega_{s\text{仿真}}$ 比 $\omega_{s\text{实际}}$ 值大得越多,其偏离越大。如图中 $b=0.5$, $\omega_s=0.15$ 和 $b=0.5$, $\omega_s=0.2$ 两条曲线,其差值信号稳态部分大于零,且 $\omega_s=0.2$ 所得的差值信号

稳态值要比 $\omega_s=0.15$ 的大。当 $\omega_{s\text{仿真}} < \omega_{s\text{实际}}$ 时,其差值信号如图中 $b=0.5$, $\omega_s=0.05$ 和 $b=0.5$, $\omega_s=0.08$ 两条曲线所示,它们的输出差值信号稳态值几乎为零,而在稳态之前,如图中 $t=0.2$ s,仿真系统 ω_s 与真实值越接近,其曲线也越接近零线。由此可以用夹逼的方法得到一个较为接近真实值的 ω_s ,并把它作为辨识 b 的初值。如图 9 所示,取 $\omega_s=0.08$,调整 b ,同上述分析,可以用夹逼的方法获得接近真实值的 b 值。如此通过几次迭代就可以快速辨识出 b 和 ω_s 的值。图中,粗实线代表仿真系统与实际系统的 b 和 ω_s 一致时的输出差值信号,除当 ω_r 很小的时段之外,差值信号几乎与零线重合。

综上所述可知,在辨识出 σ_2 后,通过分析摩擦稳态特性,对摩擦模型表达式进行变形,采用夹逼和分步夹逼的辨识方法可以依次快速辨识出 M_c 、 ω_s 、 b 的值。

4.2.3 摩擦参数 σ_0 和 σ_1 辨识

σ_0 、 σ_1 两个参数决定了摩擦的动态特性,在 LuGre 摩擦模型中,当输入相对角速度 ω_r 很小时,其内部状态不为常值,即 $\dot{z} \neq 0$,且为变化的量,去除已经辨识出的线性项 $\sigma_2 \omega_r$,则摩擦力矩为:

$$M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z}. \quad (9)$$

\dot{z} 的表达式如(2)式所示。两个参数的辨识问题仍然是双参数优化问题,由于内部摩擦状态未知,无法用分步夹逼的方法来辨识。但由于其余参数已经完成了精度较高的初步辨识,所以可以采用分步搜索的方法,逐步缩小搜索范围,然后初步辨识 σ_0 和 σ_1 。代入已经辨识出的 σ_2 、 M_c 、 b 、 ω_s 值,先给定一个 σ_1 ,将其作为辨识初值,在较大的范围内搜索 σ_0 的值,然后根据实际系统与仿真系统的差值信号与零线的接近程度,缩小 σ_0 的取值范围,并在较小的范围内取 σ_0 值作为 σ_1 的辨识初值,然后对 σ_1 进行搜索,缩小范围,如此迭代几次,可较为粗略地辨识出 σ_0 和 σ_1 的值,并限制其取值至较小的范围。

4.3 遗传算法精确辨识摩擦参数

上一节中,从摩擦特性出发,快速地辨识出了摩擦参数。然而,不管是 σ_2 辨识时用差分消除非线性影响,还是 M_c 、 b 、 ω_s 辨识过程中 $\dot{z} \approx 0$ 的假设,都存在一定的误差,这直接导致了采用分步搜索法辨识 σ_0 、 σ_1 也存在误差。为进一步精确辨识

出系统的摩擦参数,可以采用遗传算法。

前面已经把摩擦辨识问题转化为了多参数曲线拟合问题,而作为全局优化搜索算法——遗传算法具有简单通用、鲁棒性强、适用多参数情况等特点^[11],故可以用来精确辨识出摩擦参数。由于初步辨识已经把各参数的取值范围限定在了很小的范围内,可以避免采用遗传算法进行辨识的过程中出现“早熟”现象而陷入局部最优,所以基于初步辨识结果进一步使用遗传算法进行参数精确辨识能够获得很好的辨识精度。

目标函数定义为:

$$J = \sum_{i=1}^n e^2(k). \quad (10)$$

式中: $e(k)$ 为图 5 中输出时刻 $k \cdot T_s$ 的差值。当仿真模型的实际控制对象一致时, $J \approx 0$ 。所以辨识问题转化为求目标函数极小值的优化问题,并可以由此设计适应度函数为:

$$f(M_c, \sigma_0, \sigma_1, \omega_s, b) = \frac{1/J_j}{\sum_{j=1}^m (1/J_j)}. \quad (11)$$

其中: J_j 为一组参数取值对应的目标函数值。种群数取 100,最大进化代数取 200,杂交概率取 0.8,变异概率取 0.1。遗传算法辨识出参数后,设定一个判断辨识是否成功的判定参数 J_{final} 。当所得目标函数 J 满足:

$$J < J_{final}, \quad (12)$$

其中: J_{final} 为一常数,其值决定于实际应用。

综上所述,本文提出了一套适用范围较广的高精度摩擦参数辨识方法,具体流程如图 10 所示。

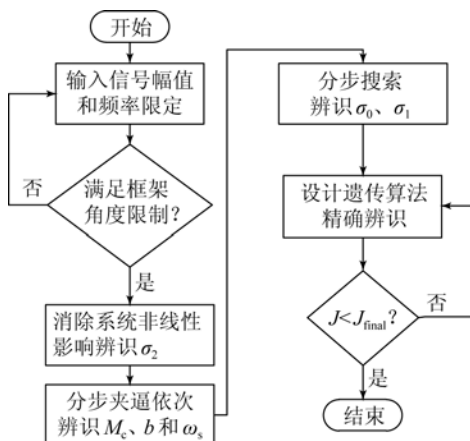


图 10 分步摩擦参数辨识方法流程

Fig. 10 Flow chart of friction parameters identification

5 仿 真

5.1 参数辨识

以某航空遥感惯性稳定平台框架控制系统的俯仰轴为例,构建图 2 的仿真控制对象,引入 LuGre 摩擦模型,仿真参数如表 1。

表 1 仿真系统的各参数值

Tab. 1 Parameters of simulation system

参数	数值	单位
电机电流力矩系数 K_m	0.181	Nm/A
传动比 N	120	—
电机电路电感 L	0.001 892	H
电机电路电阻 R	8.6	Ω
电机反电动势 K_e	0.181	V s/rad
转动惯量(俯仰方向) J	3.1	kg · m ²
俯仰框架角度限制 θ	8	(°)

首先基于俯仰框架的角度限制,设计频率为 0.5 Hz,幅值为 300 的输入信号,采用差分法消除非线性影响时, K 设定为 1.2。然后基于摩擦特性初步辨识出摩擦参数,限定取值范围,在此基础上,代入遗传算法进行高精度辨识,仿真过程中设定实际系统的采样周期为 0.004 s,判定参数 $J_{final} = 1$,参数仿真真实值设置和辨识值结果如表 2。

表 2 仿真辨识结果

Tab. 2 Identification results of simulation

参数	初步辨识			精确辨识		
	实际值	辨识结果	误差/%	限定范围	辨识结果	误差/%
$\omega_2 / (\text{Nms} \cdot \text{rad}^{-1})$	27.2	27.13	0.26	[27.1, 27.3]	27.183 7	0.06
M_c / Nm	3.71	3.73	0.54	[3.7, 3.75]	3.718 7	0.23
b	1	1.05	5	[0.9, 1.1]	1.000 4	0.04
$\omega_s / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.1	0.095	5	[0.09, 1.1]	0.099 3	0.7
$\sigma_0 / (\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	7 236.12	7 100	1.90	[7 000, 7 300]	7 280	0.6
$\sigma_1 / (\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	112.3	110	2	[105, 115]	111.813 8	0.43

此时 $J = 0.05 < J_{final}$ 。从表中可以看出,初步辨识结果的精度已经较高,最大的参数偏差为 5%,而精确辨识的辨识精度又提高了一个量级,摩擦参数最大偏差为 0.7%。

5.2 辨识结果验证

为了验证辨识结果的有效性,基于给定系统

设计摩擦前馈补偿器,对控制效果进行对比,验证辨识方法是否有效。系统的完全控制框图如图 11 所示。

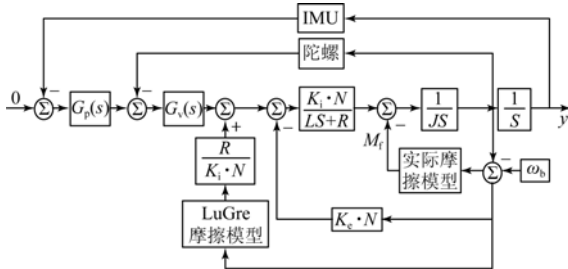


图 11 控制系统摩擦补偿框架

Fig. 11 Friction compensation structure of control system

控制器设计为:

$$G_v(S) = \frac{0.0648 \cdot (S+20.4)^2}{S^2} \quad (13)$$

此时速度稳定回路的控制带宽约为 10 Hz, 为了获得较好的控制效果,设计位置稳定回路控制器,使控制带宽在 1 Hz 以下:

$$G_p(S) = \frac{150 \cdot (S+0.3)}{S} \quad (14)$$

在两个控制器的控制下,系统能够较好地抑制干扰并实现平台的姿态稳定功能。为模拟航拍过程中飞机的机体干扰,设置基座角运动是幅度为 1°频率为 1 Hz 的正弦信号,即 $\omega_b = 2\pi^2/180 \cdot \cos(2\pi \cdot 1t)$,结果如图 12 所示。

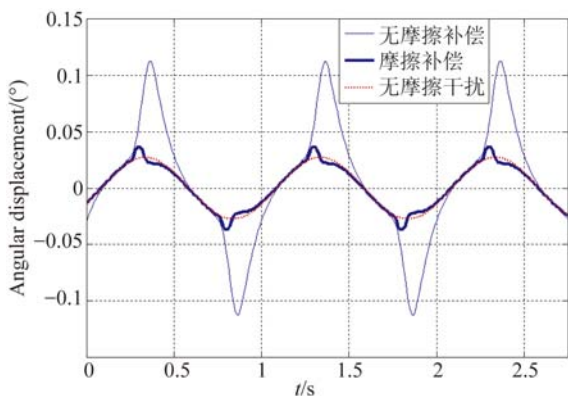


图 12 摩擦补偿仿真效果

Fig. 12 Simulation effect of friction compensation

由图 12 可知,在没有摩擦干扰的影响下,其控制结果如图中的虚线所示,因为反电动势的影响,出现微小角度的角运动。加入摩擦干扰时,控制系统的控制精度大幅下降,用辨识出的摩擦参

数构建摩擦补偿之后,其控制精度提高了 4 倍,很接近没有摩擦干扰的结果,由此证明了辨识方法的有效性。

6 实验

为了进一步验证所提出的辨识方法在工程中的应用效果,本文基于某航空遥感三轴稳定平台原理样机展开了实验验证。

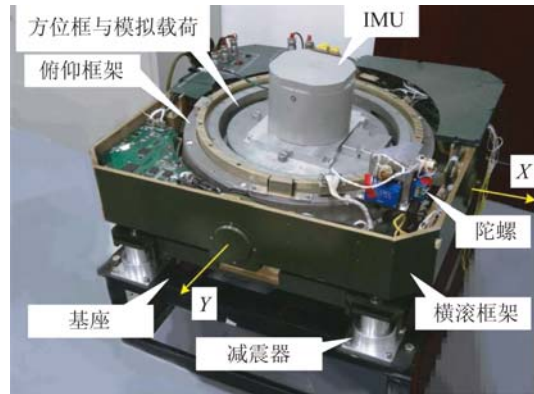


图 13 航空遥感惯性稳定平台原理样机

Fig. 13 Prototype of inertially stabilized platform system

图 13 为原理样机结构图,其由 IMU 和陀螺等传感器采集姿态和角速度信息并反馈给控制系统,再由数字控制电路实现姿态控制。为了验证辨识方法的效果,本文以俯仰轴为例,建立基本的控制模型。原理样机的模型参数和仿真参数与表 1 相同。俯仰轴框架角运动范围为 $\pm 5^\circ$,速度回路输入信号的幅值为 300,频率为 0.5 Hz,为了消除非线性影响,K 取 1.2,然后对响应求差。实验过程中,数字电路的 AD 采样时间为 4 ms,输出数据和串口通信速率保持一致,为 10 ms。采用提出的分步摩擦参数辨识方法,得到结果如表 3 所示。

表 3 原理样机俯仰轴摩擦参数辨识结果

Tab. 3 Identification results of friction parameters of prototype in pitching axis

参数	辨识值
$\sigma_2 / (\text{Nms} \cdot \text{rad}^{-1})$	12.24
M_c / Nm	3.70
b	2 480.02
$\omega_a / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	434.11
$\sigma_0 / (\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.28
$\sigma_1 / (\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	0.99

此时目标函数值 $J=132$, 考虑到实际系统存在各种干扰, 将实验时间设为 10 s, 共有 1 000 个点, 目标函数值是可以接受的, 此时曲线拟合结果如图 14。

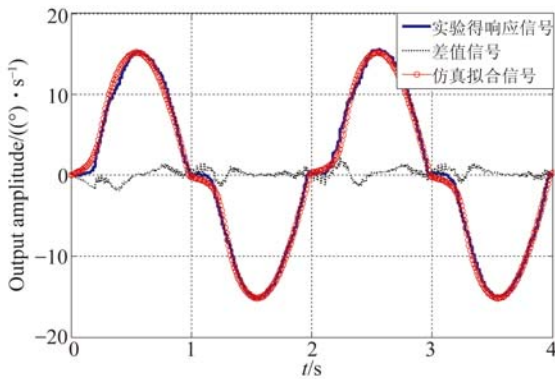


图 14 曲线拟合效果

Fig. 14 Fitting effect

将辨识出的摩擦参数代入仿真系统中, 得到的仿真响应信号如图 14 圈线所示, 很接近实验的响应信号(实线)。对两响应信号作差, 得到很接近零线的差值信号(图中虚线)。

为进一步验证辨识算法的实际效果, 设计原理样机俯仰框架的控制系统, 控制结构见图 2, 速度稳定回路控制器如式(12), 位置稳定回路如式(13), 同仿真模型控制器。用辨识出的摩擦参数(图 13)构建摩擦前馈补偿, 得到的结果如图 15 所示。

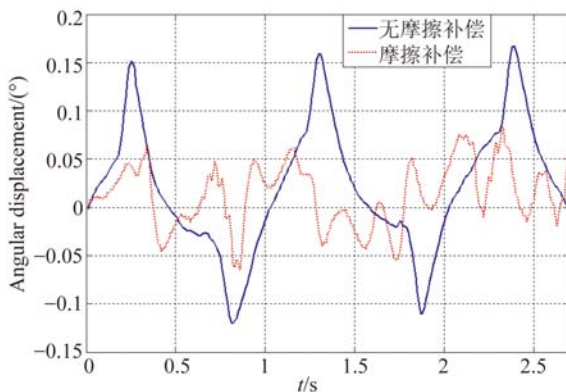


图 15 摩擦补偿实验效果

Fig. 15 Experiment effect of friction compensation

参考文献:

[1] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008:21-46.

图 15 中, 实线为无摩擦补偿的情况, 其在基座角运动干扰下的控制误差大于 0.15° , 而加上摩擦补偿之后, 框架运动角度小于 0.075° , 如图中虚线所示, 可见控制精度提高了 1 倍。

基于某航空遥感三轴惯性稳定平台原理样机的摩擦补偿实验可得, 利用辨识出的 LuGre 摩擦参数所构造的摩擦前馈补偿可以使稳定平台对基座的低频角运动干扰的抑制能力提高 1 倍。由此证明了该辨识方法的有效性和工程实用性。

7 结 论

针对航空遥感惯性稳定平台框架控制系统, 基于 LuGre 摩擦模型进行参数辨识并设计摩擦补偿对提高系统的控制精度有重要意义。然而, 由于 LuGre 摩擦模型的高非线性, 零速摩擦和 Strict-back 效应等动态和静态特性的影响, 使得摩擦参数辨识尤为困难, 且航空遥感惯性稳定平台框架系统的横滚框和俯仰框的角度运动范围很小使得当前的大多数辨识方法都没有效果。本文从惯性稳定平台的数字控制系统出发, 构建了摩擦参数辨识系统, 创造性地把摩擦参数辨识问题转化为曲线拟合问题, 基于此提出了分步辨识方法。

初步辨识过程中, 通过分析、限定输入信号的幅值和频率, 很好地解决了框架系统角运动受限的辨识问题, 拓展了提出的辨识方法的适用范围; 研究输入信号作差消除系统非线性影响的能力, 优先辨识出 LuGre 线性摩擦项参数, 然后根据摩擦静态和动态特性依次采用分步夹逼和分步搜索方法辨识出剩余参数, 该方法易于操作且辨识精度较高, 仿真结果表明参数辨识误差在 5% 以内。带入初步辨识结果, 结合遗传算法完成精确辨识, 可进一步提高辨识精度, 使辨识误差降到 0.7% 以内。最后, 基于某原理样机开展的摩擦参数辨识和补偿实验表明控制精度提高了一倍, 证实了提出的辨识方法的有效性和工程实用意义。

[2] MICHAEL K M. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008(2): 47-63.

[3] ZHOU X Y, GONG G H, LI J P. Decoupling control for a three-axis inertially stabilized platform

- used for aerial remote sensing [J]. *Transactions of the Institute of Measurement & Control*, 2015, 37(9):1135-1145.
- [4] LIN Z CH, LIU K, ZHANG W. Inertially stabilized platform for airborne remote sensing using magnetic bearings [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21(1):288-301.
- [5] KARL JOHAN ÅSTRÖM, CARLOS CANUDAS-DE-WIT. Revisiting the LuGre friction model [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2008(12):101-114.
- [6] 孙高,朱明超,贾宏光,等. 摩擦自适应补偿在导引头稳定平台控制系统中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5):1316-1321.
- SUN G, ZHU M CH, JIA H G, *et al.*. Adaptive friction compensation in seeker stabilized platform servo control system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5):1316-1321. (in Chinese)
- [7] 刘强,尔联洁,刘金瓛. 摩擦非线性环节的特性、建模与控制补偿综述[J]. *系统工程与电子技术*, 2002(24):45-50.
- LIU Q, ER L J, LIU J K. Overview of characteristics, modeling and compensation of nonlinear friction in servo systems [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2002(24):45-50. (in Chinese)
- [8] DOWSON D. *History of Tribology* [M]. London: Longman Ltd, 1966.
- [9] HERSEY M D. *Theory and Research in Lubrication* [M]. New York: John Wiley, 1966.
- [10] KARNOPP D. Computer simulation of stick-slip friction in mechanical dynamic systems [J]. *Journals of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1985, 107:100-103.
- [11] CANUDAS DE WIT C A. New model for control of systems with friction [J]. *IEEE Tran. On Automatic Control*, 1995, 40(3):419-425.
- [12] Y S, GAO H L, FEI X. Practical friction models and friction compensation in high-precision electro-hydraulic servo force control system [J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2014, 42(2):184-199.
- [13] 于伟,马佳光,李锦英. 基于 LuGre 模型实现精密伺服转台摩擦参数辨识及补偿[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11):2736-2743.
- YU W, MA J G, LI J Y. Friction parameter identification and friction compensation for precision servo turning table [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11):2736-2743. (in Chinese)
- [14] 周向阳,刘炜. 航空遥感惯性稳定平台摩擦参数辨识[J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(6):710-714.
- ZHOU X Y, LIU W. Parameter identification of friction model on inertially stabilized platform for aerial remote sensing application [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(6):710-714. (in Chinese)
- [15] 梁青,张剑,王永. 基于遗传算法的伺服系统摩擦模型参数辨识[J]. *仪表技术*, 2011(6):34-36.
- LIANG Q, ZHANG J, WANG Y. The friction model parameters identification of servo system based on genetic algorithm [J]. *Instrumentation Technology*, 2011(6):34-36. (in Chinese)
- [16] 郭彦青,付永领,张朋. 一种新型 LuGre 摩擦模型参数辨识方法[J]. *机床与液压*, 2015, 43(1):149-153.
- GUO Y Q, FU Y L, ZHANG P. A novel parameters identification method for LuGre friction model [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2015, 43(1):149-153. (in Chinese)
- [17] 廖洪波,范世珣,黑墨,等. 光电稳定平台伺服系统动力学建模与参数辨识[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2):477-483.
- LIAO H B, FAN SH X, HEI M, *et al.*. Modeling and parameter identification for electro-optical stabilized platform servo systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):477-483. (in Chinese)
- [18] 李树胜,钟麦英. 基于 PID 的航空遥感三轴惯性稳定平台控制系统设计[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2011, 41(增):275-279.
- LI SH SH, ZONG M Y. Design of control system based on PID of three-axis inertially stabilized platform for airborne remote sensing [J]. *Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition)*, 2011, 41(Supp.):275-279. (in Chinese)
- [19] 朱明超,刘慧,张鑫,等. 惯性稳定平台自适应前馈控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1):141-147.
- ZHU M CH, LIU H, ZHANG X, *et al.*. Adaptive feed-forward control for inertially stabilized platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1):141-147. (in Chinese)
- [20] 房建成,戚自辉,钟麦英. 航空遥感用三轴惯性稳定平台不平衡力矩前馈补偿方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2010, 18(1):38-43.
- FANG J CH, QI Z H, ZHONG M Y. Feedforward

compensation method for three axes inertially stabilized platform imbalance torque [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2010,18(1): 38-43. (in Chinese)

- [21] 庞新良, 范大鹏, 滕旭东, 等. 数字式机载光电伺服系统的实现[J]. 光电工程, 2007, 34(3): 10-15.
PANG X L, FAN D P, TENG X D, *et al.*. Realization of digital airborne opto-electronic servo-system

[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(3): 10-15. (in Chinese)

- [22] 张新勇, 王合龙, 刘昇. 机载光电稳定平台的模型辨识研究[J]. 电光与控制, 2014, 21(3): 62-71.
ZHANG X Y, WANG H L, LIU SH. Study on model identification of airborne electro-optical stabilized platform [J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(3): 62-71. (in Chinese)

作者简介:



曾德林(1992—),男,福建长汀人,博士研究生,2013年、2016年于国防科技大学航天科学与工程学院分别获得学士、硕士学位,主要从事稳定平台控制研究。E-mail: 18670387476@163.com

导师简介:



肖凯(1971—),男,湖南湘潭人,副教授,硕士生导师,1997年、2001年、2006年于国防科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事磁悬浮控制技术,航天器姿态动力学与控制技术研究。E-mail: xiaokai@nudt.edu.cn

(本栏目编辑:马健)

(版权所有 未经许可 不得转载)