

文章编号 1004-924X(2015)02-0477-08

## 光电稳定平台伺服系统动力学建模与参数辨识

廖洪波<sup>\*</sup>, 范世珣, 黑 墨, 范大鹏

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对光电稳定平台伺服系统模型参数辨识问题,提出了线性和非线性模型参数分离辨识方法。在线性模型参数辨识过程中,利用差动逆  $M$  序列信号作为输入,相应的响应信号作为输出,并应用最小二乘方法辨识线性离散模型参数,从而降低非线性因素的影响。在非线性模型参数辨识过程中,以 LuGre 摩擦模型为基础,针对摩擦和不平衡质量相互耦合的问题,提出了考虑不平衡质量的 LuGre 模型静态参数辨识方法;然后,利用电流信号作为摩擦力测量值,对 LuGre 模型动态参数进行辨识,得到包含不平衡质量和动态摩擦的系统非线性部分模型参数。构建了单轴光电稳定平台实验系统,利用本文提出的方法对实验系统动力学模型参数进行了辨识。结果表明:质量不平衡力矩的辨识值为  $0.183 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,略高于理论值  $0.18 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,满足辨识精度要求。实验证实提出的辨识方法可以实现对模型线性与非线性参数的有效辨识。

**关键词:**光电稳定平台;差动逆  $M$  序列;LuGre 模型;不平衡质量;参数辨识

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152302.0477

## Modeling and parameter identification for electro-optical stabilized platform servo systems

LIAO Hong-bo<sup>\*</sup>, FAN Shi-xun, Hei Mo, FAN Da-peng

(College of Mechatronic Engineering & Automation,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

<sup>\*</sup> Corresponding author, E-mail:13975890826@163.com

**Abstract:** A separated model parameter identification method for electro-optical stabilized platform servo systems was presented. The model of servo systems was separated into a linear part and a non-linear part. In the process of parameter identification of the linear model, a differential inverse  $M$  sequence signal was utilized to excited servo systems, and least square method was used to identify the parameters of the linear discrete model part to reduce the influence of the nonlinear dynamics. In the process of parameter identification of the nonlinear model, the coupling dynamics between friction and unbalanced mass was considered, and the static parameters of the LuGre model and the parameters of the unbalanced mass model were firstly identified by using the least square method; Then, the dynamic parameters of the LuGre model were obtained by friction measurement through a current signal. An experimental system for single-axis electro-optical stabilized platform was constructed, and the dy-

收稿日期:2014-07-27;修订日期:2014-08-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51135009)

dynamic model parameters were indentified by proposed method. Experimental results indicate that the identification value of unbalanced mass torque is 0.183 N·m, which is a little larger than the theoretic value 0.18 N·m, and satisfied with the identification precision. So the parameters of linear and non-linear models can be obtained by the presented identification method.

**Key words:** electro-optical stabilized platform; differential inverse M sequence; LuGre model; unbalance mass; parameter identification

## 1 引言

光电稳定平台被广泛应用于车载、机载和舰载武器系统中,其主要作用是隔离载体对光电探测器视轴的扰动,其隔离扰动的能力决定于平台伺服系统的控制精度。为了更好地掌握光电稳定平台伺服系统的动力学特性,从而提高其伺服系统控制精度,需要建立能够合理描述系统特性的动力学模型。

以单轴光电稳定平台伺服系统为基础,研究人员已建立了比较完整的动力学模型,包括线性和非线性两部分<sup>[1-3]</sup>。其中,线性部分模型主要考虑直流电机、功率放大器、减速器、传感器和负载等环节,非线性部分模型主要考虑摩擦<sup>[4-5]</sup>和质量不平衡<sup>[6-7]</sup>等因素。摩擦模型中,由于静态摩擦模型不能描述系统从静止到开始滑动之间的特性,故采用动态摩擦模型。动态摩擦模型中,LuGre模型的耗散特性使其便于进行摩擦补偿器设计,从而越来越受研究人员的关注<sup>[8-9]</sup>。

确定系统模型结构后,需要获取模型中参数的数值,这一般采用解析法和辨识法<sup>[3]</sup>。解析法依据系统先验知识,通过计算得到模型参数值,而模型先验知识是通过理论和经验得到的,与实际系统存在差异,会造成获取的模型参数值不准确,故需要采用实验辨识法。目前,在利用辨识方法进行模型参数辨识过程中,还没有可以同时辨识模型中所有参数的方法,而是普遍采用线性和非线性模型参数分离辨识的方法<sup>[10-11]</sup>。但由于两者参数之间并不完全独立,相互之间存在着耦合,故线性模型参数辨识受非线性的影响较为严重<sup>[12-13]</sup>。非线性部分模型参数辨识中,质量不平衡和摩擦模型之间同样存在耦合,辨识结果相互影响,而且 LuGre 模型参数辨识过程中,需要直接测量系统的摩擦力矩,现有系统很难满足。

本文首先建立包含摩擦与不平衡质量 2 种非线性因素的光电稳定平台动力学模型。然后以此

模型为基础,分别对线性与非线性模型参数进行辨识。最后,构建光电稳定平台单轴实验系统,以此为对象,对系统中的线性与非线性模型参数进行辨识,验证方法的有效性。

## 2 动力学建模

### 2.1 线性部分模型

根据直流电机电压、力矩平衡方程和传动系统力矩平衡方程得到伺服系统动力学模型:

$$\begin{aligned} u_a &= R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + u_e \\ u_e &= K_E \omega_m \\ T_m &= K_T I_a \\ J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m &= T_m - T_{mf} - T_{sm} - T_{ub} \\ J_l \ddot{\theta}_l &= T_l - T_{lf} \\ T_{sm} &= T_l / i_0 \\ T_l &= K_{eq} (\theta_m / i_0 - \theta_l) + C_{eq} (\dot{\theta}_m / i_0 - \dot{\theta}_l) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $u_a$  为电机电枢电压;  $R_a$  为电阻;  $L_a$  为电感;  $u_e$  为反电动势;  $I_a$  为电枢电流;  $K_E$  为反电动势系数;  $\omega_m$  为电机端转速;  $K_T$  为力矩系数;  $T_m$  为电机输出转矩;  $J_m$  为电机端等效转动惯量;  $B_m$  为黏滞阻尼系数;  $\theta_m$  为电机输出转角;  $T_{sm}$  为等效电机端的传动环节扭转力矩;  $J_l$  为负载端等效转动惯量;  $\theta_l$  为负载转动角度;  $i_0$  为传动环节减速比;  $K_{eq}$  为传动环节等效刚度;  $C_{eq}$  为传动环节等效阻尼;  $T_{mf}$  为电机端等效摩擦力矩;  $T_{ub}$  为等效到电机端的不平衡质量力矩;  $T_{lf}$  为负载端摩擦力矩;  $T_l$  为等效到负载端的传动环节扭转力矩。

在光电稳定平台伺服系统中,功率放大器工作于电流闭环模式,其带宽远高于伺服系统正常工作带宽,故可将直流电机模型简化为:

$$T_m = K_T K_a u, \quad (2)$$

式中:  $K_a$  为伏/安转换系数;  $u$  为功率放大器输入指令信号。同时不考虑系统中  $T_{mf}$ 、 $T_{ub}$  和  $T_{lf}$  等非线性因素的影响,得到简化后的伺服系统动力学模型,即线性部分模型为:

$$\begin{aligned}
T_m &= K_T K_a u \\
J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m &= T_m - T_{sm} \\
J_1 \ddot{\theta}_1 &= T_1 \\
T_{sm} &= T_1 / i_0 \\
T_1 &= K_{eq} (\theta_m / i_0 - \theta_1) + C_{eq} (\dot{\theta}_m / i_0 - \dot{\theta}_1)
\end{aligned} \quad (3)$$

对式(3)进行拉普拉斯变换,分别得到电机端转角  $\theta_m$  和负载端转角  $\theta_1$  相对功率放大器输入指令信号  $u$  的传递函数为:

$$\frac{\theta_m(s)}{u(s)} = \frac{K_a K_T i_0^2 (J_1 s^2 + C_{eq} s + K_{eq})}{i_0^2 J_m J_1 s^4 + (i_0^2 J_m C_{eq} + i_0^2 B_m J_1 + C_{eq} J_1) s^3 + (i_0^2 J_m K_{eq} + i_0^2 B_m C_{eq} + J_1 K_{eq}) s^2 + i_0^2 B_m K_{eq} s} \quad (4)$$

$$\frac{\theta_1(s)}{u(s)} = \frac{K_a K_T i_0 (C_{eq} s + K_{eq})}{i_0^2 J_m J_1 s^4 + (i_0^2 J_m C_{eq} + i_0^2 B_m J_1 + C_{eq} J_1) s^3 + (i_0^2 J_m K_{eq} + i_0^2 B_m C_{eq} + J_1 K_{eq}) s^2 + i_0^2 B_m K_{eq} s} \quad (5)$$

## 2.2 非线性部分模型

伺服系统中,摩擦干扰力矩和质量不平衡力矩对伺服性能影响较大,本文建立了包含摩擦和不平衡质量的伺服系统非线性部分模型。相比于静态摩擦模型,LuGre 动态摩擦模型能更好地描述伺服系统的摩擦非线性现象,LuGre 摩擦模型可表示为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned}
\dot{z} &= \omega - \frac{\sigma_0 |\omega| z}{f(\omega)} \\
f(\omega) &= T_c + (T_s - T_c) e^{-|\frac{\omega}{\omega_s}|} \\
T_f &= \sigma_0 z + \sigma_z \dot{z} + \sigma_2 \omega
\end{aligned} \quad (6)$$

式中: $z$ 为刚毛平均变形; $\omega$ 为与摩擦有关的角速度; $\omega_s$ 为 Stribeck 速度; $T_c$ 为库伦摩擦力矩系数; $T_s$ 为静摩擦力矩系数; $\sigma_0$ 为刚度系数; $\sigma_1$ 为阻尼系数; $\sigma_2$ 为黏滞摩擦系数。

机械结构设计与装配造成负载重心偏离回转轴的中心,产生质量不平衡力矩:<sup>[6]</sup>

$$T_{ub} = mg\rho \sin(\alpha_0 + \theta_1) / i_0 \quad (7)$$

式中: $m$ 为等效不平衡质量; $g$ 为重力加速度; $\rho$ 为等效不平衡质量到转动中心轴的距离; $\theta_1$ 为等效不平衡质量重心和转动中心轴的连线与测试轴重心之间的夹角; $\alpha_0$ 为等效不平衡质量重心和转动中心轴的连线与测试轴重心之间的夹角的初始值。

## 3 参数辨识

### 3.1 线性部分模型参数辨识

光电稳定平台伺服系统中,输入为功率放大器指令信号  $u$ ,输出为负载端的转速信号  $\omega_1$ ,由式(5)可得,  $\omega_1$  相对于  $u$  的传递函数。这是一个 3 阶的连续系统模型,而在参数辨识过程中,计算机对输入、输出信号进行离散采样处理,通过辨识准则,得到的是离散化模型参数,因此需要实现连续模型和离散模型之间的相互转化,可得:

$$H(Z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 Z^{-1} + b_2 Z^{-2} + b_3 Z^{-3}}{1 + a_1 Z^{-1} + a_2 Z^{-2} + a_3 Z^{-3}} \quad (8)$$

假设输入  $u(k)$  和输出  $\omega_1(k)$  是可测量的,数据样本长度为  $N$ ,并且测量噪声为零均值的白噪声,准则函数为:

$$V_{\min} = \frac{1}{2} (\mathbf{Y}_1 - \Phi \boldsymbol{\xi}_1)^T (\mathbf{Y}_1 - \Phi \boldsymbol{\xi}_1) \quad (9)$$

其中:

$$\boldsymbol{\xi}_1 = [a_1 \quad a_2 \quad a_3 \quad b_0 \quad b_1 \quad b_2 \quad b_3]^T,$$

$$\mathbf{Y}_1 = [\omega_1(4) \quad \omega_1(5) \quad \cdots \quad \omega_1(N)]^T,$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} -\omega(3) & \cdots & -\omega(1) & u(4) & \cdots & u(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\omega(N-1) & \cdots & -\omega(N-3) & u(N) & \cdots & u(N-3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式(9)中的准则函数取最小值,则通过最小二乘最优方法可以得到式(8)中参数的最佳估计值  $\boldsymbol{\xi}_1$ 。

由于系统中非线性因素的影响,在线性模型参数辨识中应尽量避免, Yung-Yaw Chen 通过设计一种差分形式的方波激励信号,有效避免了摩擦非线性对线性模型参数辨识的影响<sup>[11]</sup>。本文在此基础上,利用不同幅值、其它参数完全相同的 2 组逆 M 序列信号<sup>[14]</sup>对待辨识对象进行激励,分别采集不同激励信号下的响应信号,两组激励信号之差作为输入数据,两组响应信号之差作为输出数据,采用最小二乘优化方法得到模型参数估计值。线性模型参数辨识步骤如下:

(1) 构造激励信号  $u_1(k)$  和  $u_2(k)$ , 两组激励信号为幅值  $A$  不同,而级数  $P$ 、移位脉冲周期相同的逆 M 序列,并根据被辨识对象的先验信息确定  $A$ 、 $P$  和  $\Delta t$  的大小;

(2) 采集被辨识对象在  $u_1(k)$  和  $u_2(k)$  激励下的响应信号  $\omega_{n1}(k)$  和  $\omega_{n2}(k)$ , 计算  $u_1(k) - u_2(k)$  和  $\omega_{n1}(k) - \omega_{n2}(k)$  的值;

(3) 利用  $u_1(k) - u_2(k)$  作为输入数据,  $\omega_{n1}(k) - \omega_{n2}(k)$  作为输出数据, 采用最小二乘优化算法得到式(8)中  $a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$  的估计值;

(4) 对辨识结果进行验证, 如果不满足要求, 则回到(1), 通过重新设计激励信号, 再次进行辨识, 直到得到满意的结果为止。

### 3.2 非线性部分模型参数辨识

在辨识非线性模型参数过程中, 伺服系统线性部分可以等效为一个惯量阻尼环节。其简化后的动力学模型为:

$$\begin{aligned} T_m &= K_T K_a u \\ J\ddot{\theta}_m + B\dot{\theta}_m &= T_m - T_f - T_{ub}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $J$  为等效到电机端的总转动惯量;  $B$  为黏滞阻尼系数;  $\dot{\theta}_m$  为电机端的转速, 可用  $\omega_m$  表示。采用的 LuGre 模型在稳态条件下, 与 Stribeck 模型一致。因此, 通过辨识 Stribeck 模型参数, 获取 LuGre 模型的部分参数值。在稳态条件下, 对式(11)进行离散化, 并对非线性模型参数进行线性化处理, 包括对质量不平衡力矩模型参数和摩擦模型不连续点参数的线性化处理<sup>[15-17]</sup>, 得到包含非线性项的速度差分方程为:

$$\omega_m(k) = K_1 \omega_m(k-1) + K_2 u(k-1) - K_2 d(k-1), \quad (12)$$

$$\Phi_m = \begin{bmatrix} \omega_m(1) & u(1) & -P(\omega_m(1)) & -N(\omega_m(1)) & \sin(\bar{\alpha}_0 + \theta_l(1)) & \cos(\bar{\alpha}_0 + \theta_l(1)) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \omega_m(N-1) & u(N-1) & -P(\omega_m(N-1)) & -N(\omega_m(N-1)) & \sin(\bar{\alpha}_0 + \theta_l(N-1)) & \cos(\bar{\alpha}_0 + \theta_l(N-1)) \end{bmatrix}. \quad (15)$$

假设测量噪声为白噪声, 结合式(14), 利用最小二乘估计算法, 得到参数  $J, B, T_c^+, T_c^-, \alpha_0, mg\rho$  的估计值。摩擦模型中  $T_s^+, T_s^-$  的值可以通过测量系统的启动力矩获取,  $\omega_s$  取经验值。

在完成摩擦模型静态参数辨识的情况下, 需要进一步辨识模型中的动态参数  $\sigma_0, \sigma_1$ 。动态参数描述的是系统受摩擦力作用下从静态到动态这一变化过程, 在参数辨识过程, 需要直接测量摩擦力和转速的大小, 参数估计的准则函数为摩擦力测量值和估计值之差的平方和最小:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{t_n} &= \omega_n - \frac{\sigma_0 |\omega_n| z_{t_n}}{f(\omega_n)} \\ f(\omega_n) &= T_c + (T_s - T_c) e^{-|\frac{\omega_n}{\omega_s}|}, \\ z_{t_n} &= \int_{t_{n-1}}^{t_n} \dot{z}(\tau) d\tau \\ \hat{T}_f(t_n) &= \sigma_0 z_{t_n} + \sigma_1 \dot{z}_{t_n} + \sigma_2 \omega_n \end{aligned} \quad (16)$$

其中:  $\omega_{t_n}$  为  $t_n$  时刻的转速值, 辨识过程的速度数

其中:

$$K_1 = e^{-\frac{B}{J} T_s}; K_2 = \frac{K_T K_a}{B} (1 - e^{-\frac{B}{J} T_s}),$$

$$P(\omega_m(k-1)) = \frac{1}{2} \text{sign}(\omega_m(k-1)) (1 + \text{sign}(\omega_m(k-1))),$$

$$N(\omega_m(k-1)) = -\frac{1}{2} \text{sign}(\omega_m(k-1)) (1 - \text{sign}(\omega_m(k-1))),$$

$$\begin{aligned} d(k-1) &= \frac{T_c^+}{K_T K_a} P(\omega_m(k-1)) + \frac{T_c^-}{K_T K_a} N(\omega_m(k-1)) \\ &+ \frac{mg\rho}{K_T K_a i_0} \sin(\bar{\alpha}_0 + \theta_l(k-1)) + \frac{mg\rho}{K_T K_a i_0} (\alpha_0 - \bar{\alpha}_0) \cos(\bar{\alpha}_0 + \theta_l(k-1)). \end{aligned} \quad (13)$$

采集  $N$  组输入  $u(k)$  和输出  $\theta_l(k), \omega_m(k)$  数据, 根据式(12)构造输出、输入和参数矩阵, 其准则函数为:

$$V_{\min} = \frac{1}{2} (\mathbf{Y}_m - \Phi_m \boldsymbol{\xi}_m), \quad (14)$$

其中:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\xi}_m &= \left[ K_1 \quad K_2 \quad \frac{K_2 T_c^+}{K_T K_a} \quad \frac{K_2 T_c^-}{K_T K_a} \quad \frac{K_2 mg\rho}{K_T K_a i_0} \quad \frac{K_2 mg\rho}{K_T K_a i_0} (\alpha_0 - \bar{\alpha}_0) \right]^T; \\ \mathbf{Y}_m &= [\omega_m(2) \quad \omega_m(3) \quad \cdots \quad \omega_m(N)]^T; \end{aligned}$$

据长度为  $N$ , 通过(16)式可以估计出这  $N$  个时刻的摩擦力大小为  $\hat{\mathbf{T}}_f(T) = [\hat{T}_f(t_1) \cdots \hat{T}_f(t_N)]$ , 同时采集摩擦力的测量值  $\mathbf{T}_f(T)$ , 准则函数为

$$J_{\min} = \frac{1}{2} (\mathbf{T}_f(T) - \hat{\mathbf{T}}_f(T))^2. \quad (17)$$

通过最小二乘优化方法, 利用式(17)可得到参数估计值  $\hat{\sigma}_0, \hat{\sigma}_1$ 。非线性模型参数辨识步骤如下:

(1) 测试待辨识对象的正反两个方向的启动力矩  $T_s^+$  和  $T_s^-$ ;

(2) 以被辨识对象的线性部分模型为基础, 设计扰动观测器和 PID 控制器, 初步估计系统中库伦摩擦力矩、不平衡质量力矩和不平衡质量初始位置的大小, 为后面参数辨识提供初始值;

(3) 以(2)提供的各参数初始值为基础, 利用式(14)原理, 通过最小二乘优化方法, 精确估计  $J, B, T_c^+, T_c^-, \alpha_0$  和  $mg\rho$  的值;

(4)联合(16)和(15)式,利用最小二乘优化方法,辨识  $\alpha_0$  和  $\alpha_1$  值;

(5)仿真与实验对比验证所辨识参数值是否满足要求,如果不满足,则回到(2)步进行重新辨识,直到得到满意的结果为止。

### 4 实验验证

为了验证辨识算法,设计了光电稳定平台单轴伺服系统,如图 1 所示。由直流电机、高分辨率光电编码器、惯量盘、不平衡质量块(为 0.4 kg,  $\rho$  为 0.46 m,产生的不平衡力矩为 0.18 N·m)、动密封组件、功率放大器和 dSPACE 半实物仿真系统等组成。光电编码器用来测量转轴的转角和转速,不平衡质量块用来模拟伺服系统中存在的不平衡质量,动密封组件可以提供不同大小的摩擦阻力,功率放大器工作于电流闭环模式并且电流信号可以通过 dSPACE 系统采集,dSPACE 系统发送指令信号,同时采集各种反馈信号。

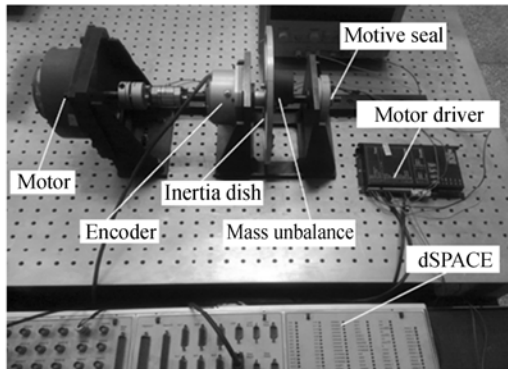


图 1 实验系统  
Fig. 1 Experiment setup

#### 4.1 线性部分模型参数辨识算法实验验证

线性部分模型参数辨识过程中,激励信号的设计是辨识成败的关键。系统最高工作频率  $f_{max}$  为 30 Hz,逆 M 序列的移位脉冲周期  $\Delta t=(0.1\sim 0.3)\frac{1}{f_{max}}$ , $\Delta t$  的值为 0.01 s。系统总转动惯量  $J$  为 0.005 3 kg·m<sup>2</sup>,等效黏滞系数  $B$  为 0.06 N·m/(rad·s<sup>-1</sup>),则逆 M 序列的级数  $P$  可通过  $(2^P-1)\Delta t\geq 3J/B$  求得,可算出  $P$  为 5。逆 M 序列信号幅值  $A$  的大小通过实际测试获取,选取的原则是保证被辨识对象特性被充分激励,但不能过大,防止破坏系统的正常工作。

图 2 中,  $u_1$ 、 $u_2$  分别为幅值 0.8 V、0.7 V 的

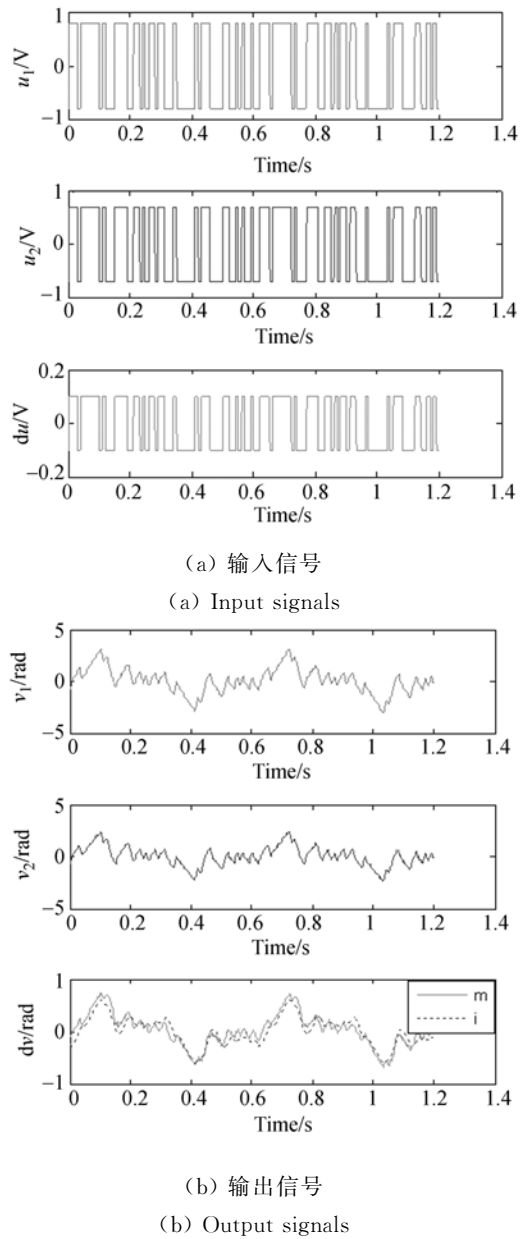


图 2 输入、输出信号与辨识结果  
Fig. 2 Input signals, output signals and identification results

激励信号,  $v_1$ 、 $v_2$  为相应的响应信号,  $du$  为两组激励信号的差分,  $dv$  中,紫红色实线为两组响应信号的差分,蓝色虚线为辨识结果。各参数估计值:  $a_1 = -1.661$ 、 $a_2 = 0.774$ 、 $a_3 = -0.110$ 、 $b_0 = 0.356$ 、 $b_1 = 1.069$ 、 $b_2 = 1.070$ 、 $b_3 = 0.356$ 。

图 3 中,采用“扫频”法对系统进行频率特性测试,在不同幅值激励信号作用下,系统的频率特性相差较大,粗实线表示辨识结果的频率特性,它与激励信号幅值较大的“扫频”结果一致性较好。由于激励信号幅值较大时,可以有效的降低摩擦

对“扫频”结果的影响,故在线性模型辨识过程中,本方法能够有效克服系统的非线性。

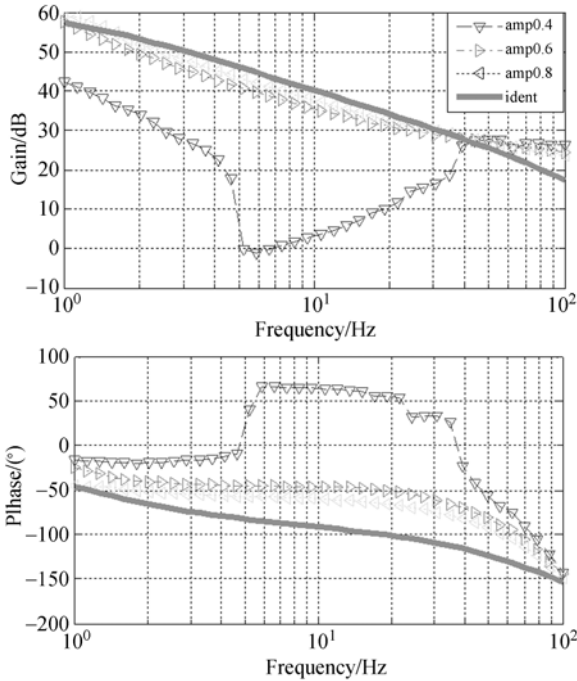


图 3 频域特性分析

Fig. 3 Frequency characteristic analysis

#### 4.2 非线性部分模型参数辨识算法实验验证

由于实验系统中没有直接测量转矩的传感器,采用驱动器的电流信号近似代替,故实验中所测力矩值都来自电流信号的换算值。在静态摩擦和质量不平衡力矩参数测试过程中,激励信号为 1 组幅值大小,持续时间长短不同的阶跃信号,如图 4 所示。在保证系统正常工作的情况下,充分激励系统的非线性特性,而不激发系统的机械谐振。在动态摩擦参数测试过程中,系统工作于速度闭环模式,激励信号为一组低频低幅值的正弦信号,采集系统从静止到产生滑动时间段内的速度和电流信号,作为输入和输出数据。

图 4 中,红色实线为实验测试结果,蓝色虚线为基于辨识参数的模型仿真结果,两者具有较好的一致性(彩图见期刊电子版)。基于此辨识结果,进行动态摩擦参数的辨识,其结果如图 5 所

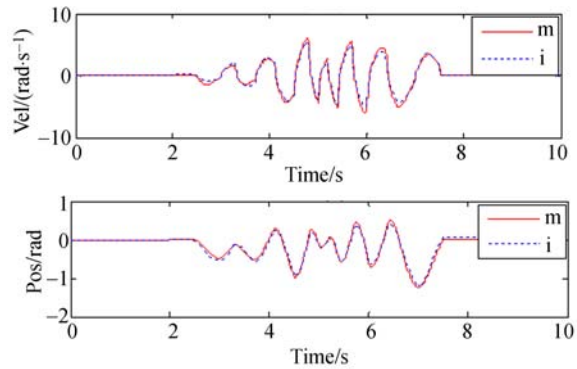
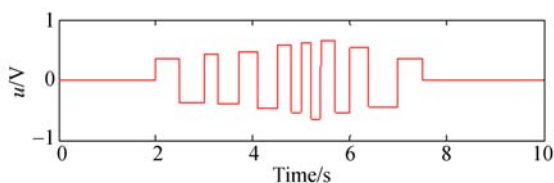


图 4 (3)中的输入、输出信号与辨识结果

Fig. 4 Input signals, output signals and identification results of ‘(3)’

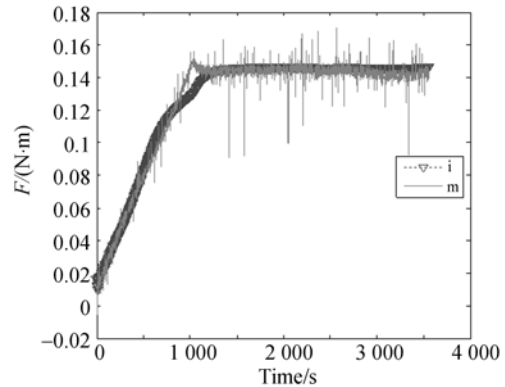


图 5 (4)中的输入、输出信号与辨识结果

Fig. 5 Input signals, output signals and identification results of ‘(4)’

示,系统从静止状态到滑动状态的摩擦力测试数据(红色实线)和模型仿真数据(蓝色虚线)拟合度较好,相应的参数辨识估计值如表 1 所示。

表 1 非线性模型参数辨识值

Tab. 1 Parameter values of nonlinear model

Variable name (Unit)	Value
Inertia $J$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	0.006 25
Coefficient of viscous friction $B^+ / B^-$ ( $\text{N} \cdot \text{m} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ )	0.015 7/0.015 6
Coulomb friction $T_c^+ / T_c^-$ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	0.190/0.190
Static friction $T_s^+ / T_s^-$ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	0.205/0.203
Initial angle of unbalance mass $\alpha_0$ (rad)	0.002
Torque of unbalance mass $mg\rho$ ( $\text{N} \cdot \text{m}$ )	0.183
Coefficient of stiffness $\alpha_0$	73.090
Coefficient of damp $\sigma_1$	0.590

## 5 结 论

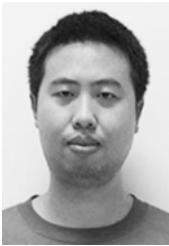
本文以光电稳定平台伺服系统动力学建模和参数辨识为研究背景,建立了较完整的动力学模型。分析了线性与非线性模型参数辨识过程中的模型结构、最优化方法和准则函数,给出了参数辨

识的具体步骤。构建了单轴光电稳定平台实验系统,利用该方法对实验系统动力学模型参数进行了辨识。实验结果表明:质量不平衡力矩的辨识值为  $0.183 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,与理论值  $0.18 \text{ N} \cdot \text{m}$  接近,而在线性与非线性特性对比方面,依据辨识数据建立的动力学模型仿真结果与实验测试结果具有较高的一致性。

### 参考文献:

- [1] TOLGAY K, IYAS E. Nonlinear modeling and identification of a DC motor for bidirectional operation with real time experiments [J]. *Energy Conversion and Management*, 2004, 45(7): 1087-1106.
- [2] LIAO H B, FAN SH X, HEI M, *et al.*. Research on modeling and simulation analysis of direct drive system in simulink and simscape environment [J]. *Key Engineering Materials*, 2013, 579: 699-705.
- [3] 刘栋,陶涛,梅雪松. 伺服系统 Hammerstein 非线性模型及参数辨识方法研究[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(3): 42-46.
- LIU D, TAO T, MEI X S. Nonlinear hammerstein model and parameter identification for servo drive system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(3): 42-46. (in Chinese)
- [4] ARMSRONG H B, DUPONT P, CANUDAS D W. A survey of models analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction [J]. *Automatica*, 1994, 30(7): 1083-1138.
- [5] LI ZH Q, ZHANG ZH Y, ZHOU Q K, *et al.*. Parameter identification of inertially stabilized platforms using current command design [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(2): 342-353.
- [6] 朱华征,范大鹏,张文博,等. 质量不平衡力矩对导引头伺服机构性能影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 767-772.
- ZHU H ZH, FAN D P, ZHANG W B, *et al.*. Analysis of seeker gimbal performance with mass imbalance torque [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 767-772. (in Chinese)
- [7] MCKERLEV C W. A model for a two degree of freedom coupled seeker with mass imbalance [C]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 1996: 84-87.
- [8] CANUDAS D W, HENRIK O, KARL J A, *et al.*. A new model for control of systems with friction [J]. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1995, 3(40): 419-425.
- [9] LI ZH Q, FAN D P, FAN SH X. LuGre-model-based friction compensation in direct-drive inertially stabilization platforms [C]. *6th IFAC Symposium on Mechatronic Systems 2013, China*, 2013: 636-642.
- [10] 刘栋,陶涛,梅雪松,等. 伺服系统线性特性和非线性摩擦的解耦辨识方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(4): 782-788.
- LIU D, TAO T, MEI X S, *et al.*. Study on the decoupling identification method of linear dynamic and nonlinear friction for servo drive system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(4): 782-788. (in Chinese)
- [11] CHEN Y Y, HUANG P Y, YEN J Y. Frequency-domain identification algorithms for servo systems with friction [J]. *Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(5): 654-664.
- [12] 王帅,陈涛,李洪文,等. 光电跟踪伺服系统的频率特性测试与模型辨识[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 79-83.
- WANG SH, CHEN T, LI H W, *et al.*. Frequency characteristic test and model identification for OE tracking servo system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 79-83. (in Chinese)
- [13] 秦来安,侯再红,吴毅. 光电跟踪架传递函数辨识方法及应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2810-2816.
- QIN L A, HOU Z H, WU Y. Transfer function identification method and its application in photoelectrical tracking system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2810-2816. (in Chinese)
- [14] FAIRWEATHER A J, FOSTER M P, STONE D

- A. Battery parameter identification with Pseudo Random Binary Sequence excitation (PRBS) [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(15): 9398-9406.
- [15] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design. Part II: Modeling and identification of feed drives [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2001, 41(10):1487-1509.
- [16] FAN SH X, FAN D P, ZHANG ZH Y, *et al.*. Modeling and identification of high speed high accuracy lightweight stages with flexible arms [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 499: 247-252.
- [17] FAN SH X, FAN D P, HONG H J, *et al.*. Robust tracking control for micro machine tools with load uncertainties [J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(1): 117-127.

**作者简介:**

廖洪波(1986—),男,重庆人,博士研究生,2009年、2011年于国防科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光电稳定平台伺服系统先进控制方法研究。  
E-mail: 13975890826@163.com

**导师简介:**

范大鹏(1964—),男,河南周口人,教授,博士生导师,1991年于华中科技大学获得博士学位,主要从事数控技术,嵌入式系统以及精密光电跟踪平台的测控技术研究。E-mail: fdp@nudt.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)