

文章编号 1004-924X(2014)11-2950-09

## 磁悬浮控制力矩陀螺框架系统谐波减速器的迟滞建模

房建成, 陈 萌\*, 李海涛

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 新型惯性仪表与导航系统技术国防重点学科实验室, 北京 100191)

**摘要:**为了抑制双框架磁悬浮控制力矩陀螺(DGMSCMG)框架伺服系统中谐波减速器固有的迟滞特性对系统精度的影响,提出了一种基于 Preisach 模型的谐波减速器迟滞特性建模方法。首先,使用一阶回转曲线法采集谐波减速器的柔轮输出力矩与扭转角,获得建立谐波减速器迟滞模型的实验数据,其中谐波减速器柔轮的输出力矩是在不使用力矩传感器的条件下用系统动力学模型估计得到的;然后,使用 Preisach 模型对谐波减速器柔轮输出力矩与扭转角迟滞关系进行建模;最后,采用将模型离散化的数字型实现方法辨识模型中的权重函数,并给出模型的离散递归算法使模型利于简化编程与进一步的在线控制。实验结果显示,谐波减速器的迟滞模型误差不超过  $0.005^\circ$ , MSE 值不超过  $(0.000\ 83\%)^\circ$ 。结果显示了所述建模方法的正确性和实用性。

**关键词:**双框架磁悬浮控制力矩陀螺;谐波减速器;迟滞特性;Preisach 模型

**中图分类号:**V241.5;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142211.2950

### Hysteresis modeling for harmonic drive in DGMSCMG gimbal system

FANG Jian-cheng, CHEN Meng\*, LI Hai-tao

(1. School of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering,  
Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Fundamental Science on Novel Inertial Instrument

and Navigation System Technology Laboratory, Beihang University, Beijing 100191, China)

\* Corresponding author, E-mail: chenmeng2398@163.com

**Abstract:** To counteract the hysteresis introduced by a harmonic drive and to improve the precision of a Double Gimbal Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope (DGMSCMG) gimbal system, a modeling method of hysteresis characteristics of the harmonic drive was proposed. Firstly, the first-order reversal curve method was used to capture the outputting torque of the flexible gear and the torsion angle of the harmonic drive and to obtain the data to establish the hysteresis model of the harmonic drive, in which the outputting torque of the flexible gear was estimated by a system dynamic model instead of a direct measurement from the torque sensor. Then, the Preisach model was used to establish the hysteresis relationship between the outputting torque of the flexible gear and the torsion angle of the harmonic drive. Finally, the modeling was discretized and its weighting function was then

收稿日期:2014-03-14;修订日期:2014-04-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61203112)

well mapped by applying mathematical implementation. Furthermore, a discrete recursive algorithm of the model was also provided for simply programming and further on-line controlling. Results of the carefully designed experiments conducted on the DGMSCMG show that the deviation between calculated and measured torsion angles is limited within a  $0.005^\circ$  range, and the MSE value is under  $(0.00083\%)^\circ$ . These results show that the model well predicts the hysteresis of the system.

**Key words:** Double Gimbal Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope (DGMSCMG); harmonic drive; hysteresis character; Preisach model

## 1 引 言

控制力矩陀螺是空间站等大型航天器实现姿态控制的关键执行机构,由陀螺房(陀螺转子、支撑系统、驱动电机)和框架系统等组成<sup>[1-2]</sup>。双框架磁悬浮控制力矩陀螺(Double Gimbal Magnetically Suspended Control Moment Gyroscope, DGMSCMG)不仅具有双框架的控制率设计简单、输出 2 自由度力矩和整体性价比高的特点,且具有磁悬浮转子支撑的优势,目前已成为控制力矩陀螺发展的一个重要方向<sup>[3-4]</sup>。DGMSCMG 的力矩输出精度决定了航天器的姿态控制精度,而其中的框架系统精度是影响其输出力矩精度的重要因素<sup>[5-6]</sup>。由于陀螺效应,DGMSCMG 在输出力矩时,其内、外框架之间存在强耦合力矩,为减小框架系统的体积和质量,一般加入减速器来放大力矩。

谐波减速器具有结构简单,体积小,重量轻,传动比大,传动效率高等优点<sup>[7]</sup>,但谐波减速器中柔性环节与传动中的非线性摩擦会使谐波传动出现迟滞现象,一般指谐波减速器的输出力矩与扭转角呈现的迟滞关系,是谐波减速器的固有特性,无法从自身消除。谐波减速器的迟滞特性直接影响了框架系统的角速率精度,因此有必要研究一种谐波减速器迟滞特性的高精度建模方法,以便于 DGMSCMG 框架伺服系统控制方法的设计与研究。

对于谐波减速器迟滞特性建模的研究,国内外还没形成比较系统的理论。目前,主要有以下三类建模方法:第一类主要着重于分别建立考虑了非线性扭转刚度和传动中摩擦力矩的非线性方程来估计迟滞模型,如 Timothy D. Tuttle 采用扭

转角的一次与三次方描述扭转角与扭转力矩的迟滞关系并结合静态摩擦、动态摩擦、Coulomb 摩擦建立摩擦模型<sup>[8]</sup>; W. Seyffert 等人建立的摩擦模型包含了记忆性元素,与谐波减速器的迟滞特性相符<sup>[9]</sup>; H. D. Taghirad 等人在建立非线性扭转刚度模型时采用扭转角方向函数与扭转角变化速率的立方函数描述迟滞关系<sup>[10]</sup>; Rached Dhaouadi 与 Gandhi 等人提出谐波减速器的迟滞现象是由其本身的非线性刚度元件和非线性动态元件共同作用的结果,提出具有记忆特性的建模成分占主要因素<sup>[11]</sup>。此类建模方法将谐波减速器的迟滞特性分别体现在非线性扭转刚度与非线性摩擦模型中。第二类主要从机械结构与力学角度出发建立模型,如潘峰等人认为谐波减速器的回差现象是柔轮的薄壁圆筒和圆盘部分共同弹性扭转变形所导致,并由机械角度给出回差值(迟滞环的最大差值)的计算公式<sup>[12]</sup>;李俊阳给出谐波减速器齿轮副的回差与其圆周侧隙、刚轮齿数、法面模数的关系,而非线性扭转刚度主要由柔轮的结构强度及柔轮与刚轮间的啮合齿对数决定,且与啮合齿对数成正比<sup>[13]</sup>。此类建模方法一般较复杂,辨识参数较多。第三类是利用现有的迟滞模型对谐波减速器迟滞特性进行建模。2012 年, Curt Preissner 等人首次提出利用 Preisach 模型来描述谐波减速器的迟滞特性,并利用已有的 MRC 模型辨识权重函数<sup>[14]</sup>。此方法构思简单,但是引用其他模型的过程中存在误差,且没有验证具有擦除特性输入时模型的精准度情况。以上谐波减速器迟滞特性的研究在建模过程中均采用了安装力矩传感器测量力矩的方法,而 DGMSCMG 框架系统受重量和体积的限制无法安装力矩传感器,因而上述方法不适用于 DGMSCMG 框架系统中谐波减速器迟滞特性的

建模。

本文针对 DGMSCMG 低速框架系统下的谐波减速器迟滞现象进行建模。避开了大多数研究中的由原理性出发对谐波减速器的柔性环节与非线性摩擦分别建模,采用 Preisach 模型以宏观角度进行谐波减速器迟滞特性的建模。实验中采用电机端的输出力矩估计 DGMSCMG 框架系统内的谐波减速器柔轮的输出力矩;采用 Preisach 模型数字实现法辨识模型中的权重函数,通过建立柔轮输出力矩与负载端扭转角之间的关系,得到谐波减速器迟滞特性的模型。

## 2 基于 Preisach 模型的谐波减速器迟滞建模与参数辨识方法

Preisach 模型最早是为解决铁磁体的迟滞现象提出的一种物理模型,于 1935 年由 F. Preisach 等人提出。随着科学的发展与各领域的技术进步,目前 Preisach 模型已不仅应用于描述磁性系统。还作为一种描述迟滞现象的模型被广泛应用于具有迟滞现象的材料、设备与系统中<sup>[15-17]</sup>。1991 年,Mayergoyz. I. D 出版专著<sup>[18]</sup>,从数学模型的角度,依据不同的实验环境与应用条件对模型进行分类,使得 Preisach 模型更易应用与建模。

应用 Preisach 模型需要满足设备的擦除性与次环全等性,且具有输入信号的频率不影响输入信号与输出信号迟滞关系的性质。研究表明在低频条件下,谐波减速器的扭转角与扭转力矩的迟滞关系满足以上特性<sup>[11,14]</sup>,因而本文选择采用 Preisach 模型进行谐波减速器迟滞特性的建模。

### 2.1 谐波减速器迟滞特性的 Preisach 模型

Preisach 模型可以看作由一系列迟滞单元的加权叠加<sup>[18]</sup>,扩展到连续区间,可表达为:

$$f(T, t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \hat{\gamma}_{\alpha\beta} T(t) d\alpha d\beta, \quad (1)$$

其中:  $T(t)$  为谐波减速器柔轮的输出力矩;  $f(T, t)$  为扭转角;  $\mu(\alpha, \beta)$  为迟滞单元  $\hat{\gamma}_{\alpha\beta} T(t)$  的权重函数。每一迟滞单元都由一对开关量决定,  $\alpha, \beta$  分别为对应开关量的上,下切换值。迟滞单元如图 1 所示。

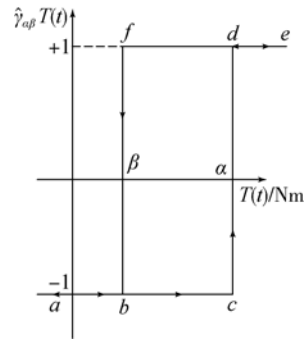


图 1 迟滞单元

Fig. 1 Hysteresis unit

可表达为:

$$\hat{\gamma}_{\alpha\beta} T(t) = \begin{cases} +1, T(t) > \alpha \\ -1, T(t) < \beta \\ m, \beta \leq T(t) \leq \alpha \end{cases}, \quad (2)$$

其中:当  $T(t)$  单调上升时,迟滞单元的输出轨迹为 abcde,  $m$  为  $-1$ ;当  $T(t)$  单调下降时,输出轨迹为 edfba,  $m$  为  $+1$ 。可以看出,迟滞单元的输出与过去时刻的输入相关,可反映谐波减速器的迟滞特性具有记忆性的特点。

谐波减速器迟滞模型的积分区间可表示为三角形  $T$ ,由积分下限直线  $\beta_0$ ,积分上限直线  $\alpha_0$ ,以及直线  $\alpha = \beta$  围成,称为限制三角形,如图 2 所示。

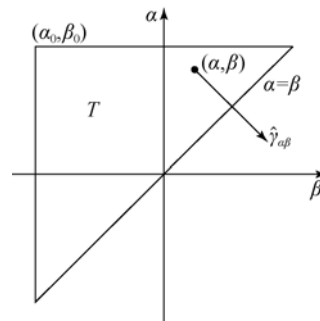


图 2 限制三角形

Fig. 2 Limiting triangle

### 2.2 谐波减速器 Preisach 迟滞模型参数辨识

谐波减速器 Preisach 迟滞模型中的权重函数采用数字型实现的方法辨识,即将模型离散化来确定权重函数。

权重函数  $\mu(\alpha, \beta)$  的确定用到了研究迟滞效应的经典方法——一阶回转曲线法(First-Order Reversal Curve, FORC)。图 3 所示为一阶

回转曲线示意图。表示从负饱和状态  $\beta_0$  输入,输入到  $\alpha'$  位置得到  $f_{\alpha'}$ , 然后折返至  $\beta'$  位置得到  $f_{\alpha'\beta'}$ ,  $\alpha_0$  为正饱和状态。

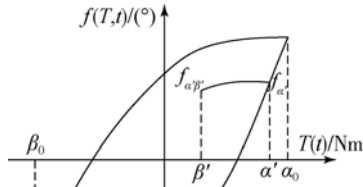


图 3 一阶回转曲线  
Fig. 3 FORC

2.2.1 FORC 法的具体实现方式

Preisach 模型是一个基于实验数据的模型,对实验数据的依赖性很大。在使用模型进行建模前,需要事先采集建模所需的实验数据。根据实际工作时框架力矩电机的输出力矩范围,选定  $\beta_0$  为  $-3.1 \text{ Nm}$ ,  $\alpha_0$  为  $3.1 \text{ Nm}$ 。

利用 FORC 法采集建模所需的数据,将力矩范围区间划分为  $n$  份,自负饱和状态  $-3.1 \text{ Nm}$  给定力矩至每一分割点后依次采集下降到各分割点的扭转角值。本文  $n$  取 16,即以  $0.3875 \text{ Nm}$  作为力矩变化间隔。图 4 所示为给定力矩,以  $2 \text{ s}$  作为力矩变化时间间隔,采集在力矩下降阶段每一分割点的扭转角  $f(T, t)$ 。

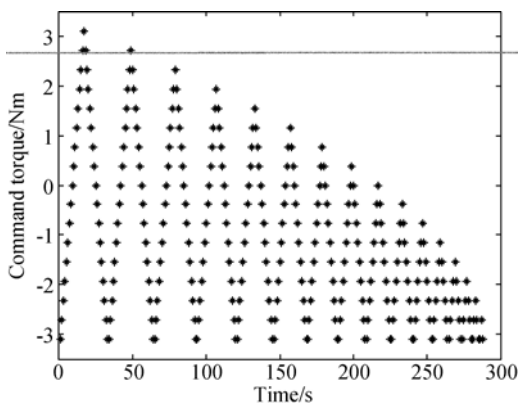


图 4 指令力矩示意图  
Fig. 4 Command torque

采集点在积分区间中的示意如图 5 所示。各点表示控制谐波减速器的柔轮输出力矩上升到

17 个极大值后下降到各采集点时所对应的谐波减速器扭转角,即指令力矩上升至  $\alpha$  值下降到  $\beta$  值时所对应的谐波减速器扭转角。

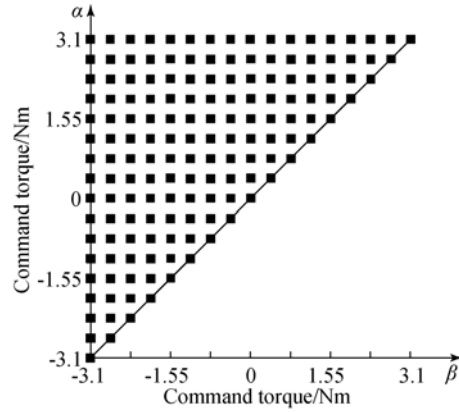


图 5 采集点示意图  
Fig. 5 Collection points

可见  $n$  越大,离散程度越大,模型的精度越高,但需采集的实验数据越庞大,计算越繁琐,计算周期越长,因而应根据实际情况选择  $n$  的大小。

2.2.2 Preisach 模型的数字型实现

将 Preisach 模型离散化进行式(1)中权重函数  $\mu(\alpha, \beta)$  辨识的详细内容参阅文献[18],离散后的模型将权重函数  $\mu(\alpha, \beta)$  体现到利用 FORC 法采集的当前时刻及历史时刻的扭转角信息中,模型可数字型实现如下[18]:

若所测输入  $T(t)$  递减,则:

$$f(T, t) = -f^+ + \sum_{k=1}^{n-1} (f_{M_k m_k} - f_{M_k m_{k-1}}) + f_{M_n T(t)} - f_{M_n m_{n-1}} \quad (3)$$

若所测输入  $T(t)$  递增,则:

$$f(T, t) = -f^+ + \sum_{k=1}^{n-1} (f_{M_k m_k} - f_{M_k m_{k-1}}) + f_{-m_{n-1}} - f_{-m_{n-1}, -T(t)} \quad (4)$$

其中:  $f^+$ ,  $f_{M_k m_k}$ ,  $f_{M_k m_{k-1}}$ ,  $f_{M_n T(t)}$ ,  $f_{M_n m_{n-1}}$ ,  $f_{-m_{n-1}}$ ,  $f_{-m_{n-1}, -T(t)}$  均为事先采集到的谐波减速器扭转角值,  $\{M_k\}$ ,  $\{m_k\}$  为满足 Preisach 模型擦除特性的极大值与极小值序列,  $f^+$  为输入在极大值时的输出值。

为了使式(3)、(4)中的模型更有利于简化编程与进一步在线控制,提高计算的速度和效率,对式(3)、(4)采用离散递归算法加以改进[19]。

若所测输入  $T(t)$  递减,则:

$$f(T, t) = f(t_a) - f_{M_a} + f_{M_a T(t)}, \quad (5)$$

若所测输入  $T(t)$  递增,

$$f(T, t) = f(t_b) + f_{T(t)} - f_{T(t)m_b}, \quad (6)$$

其中:  $M_a$  为满足 Preisach 模型擦除特性而选择的与当前输入  $T(t)$  最近的极大值输入,  $t_a$  为  $M_a$  所对应的时间点;  $m_b$  为满足 Preisach 模型擦除特性而选择的与当前输入  $T(t)$  最近的极小值输入,  $t_b$  为  $m_b$  所对应的时间点。

对于式(5)、(6)中的输入值  $T(t)$  计算  $f(T, t)$  用到的积分三角形采集点  $f_{M_a}$ 、 $f_{M_a T(t)}$ 、 $f_{T(t)}$ 、 $f_{T(t)m_b}$ , 若未采集到相应的输出值, 采用双线性插值算法进行估计, 依据输入值  $T(t)$  落在图 5 中各小正方形或小三角形区域的不同选择不同的算法。

### 3 实验验证

#### 3.1 谐波减速器实验装置与迟滞特性

实验基于北航惯性技术国家级重点实验室 DGMSCMG 框架伺服系统, 所用谐波减速器为中技克美公司的 XBS-80-100 机型, 减速比为 100, 实验所用的 DGMSCMG 如图 6 所示。DGMSCMG 内外框架系统的工作原理完全相同, 谐波减速器的安装方式也相同, 区别在于内框架系统的负载为陀螺房, 而外框架系统的负载为内框架与陀螺房。因而 DGMSCMG 框架系统谐波减速器迟滞特性的建模仅需对一个框架进行实验研究, 以外框架为例。

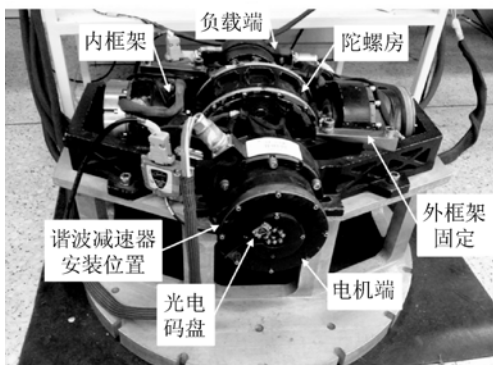


图 6 实验装置 DGMSCMG

Fig. 6 Experiment device DGMSCMG

建立谐波减速器迟滞模型的外框架结构原理如图 7 所示, 主要由力矩电机、谐波减速器、负载

(内框架与陀螺房)、角位置传感器光电码盘、框架轴承等构成。谐波减速器由框架力矩电机驱动, 框架力矩电机的输出轴与波发生器固定, 刚轮固定, 柔轮作为从动输出力矩作用于负载。实验中固定外框架的负载端使得负载端偏转角度为 0, 则折算到负载端的扭转角可通过电机端光电码盘测量的电机端角位置得到。

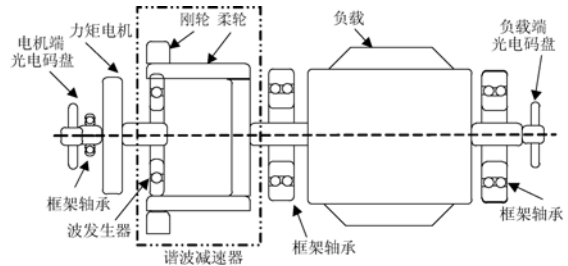


图 7 结构原理

Fig. 7 Structure principle

谐波减速器输入力矩采用电流环控制器进行控制, 通过给定指令电流作为系统的输入来控制谐波减速器的输入力矩。

谐波减速器的迟滞特性如图 8 所示。图中各迟滞环为柔轮输出力矩从  $-3.1 \text{ Nm}$  到各极大值后返回到  $-3.1 \text{ Nm}$  所对应的扭转角值, 其中  $T_{\max}$  为柔轮输出最大力矩。可看到谐波减速器的迟滞特性具有记忆性, 即历史时刻的输出值会影响到后续输出值<sup>[20]</sup>, 柔轮的输出力矩的幅度不同, 迟滞环的形状与趋势也不同。

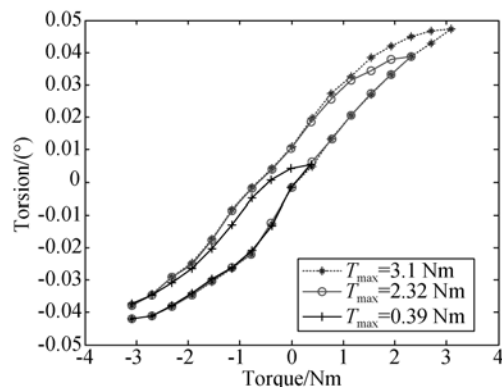


图 8 谐波减速器迟滞特性

Fig. 8 Hysteresis character of harmonic drive

#### 3.2 谐波减速器传动模型

谐波减速器传动模型为:

$$T_m = C_1 I_m, \quad (7)$$

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m + T(t)/N = T_m, \quad (8)$$

$$\theta = \theta_m/N - \theta_1, \quad (9)$$

其中:  $T_m$  为电机输出力矩,  $I_m$  为电机绕组电流, 可由硬件电路中霍尔电流传感器测量得到,  $C_1$  为力矩系数, 取  $C_1 = 0.774$ ;  $\theta_m$  为电机输出轴角位置,  $J_m$  为电机端的转动惯量,  $B_m$  为电机端与电机角速度相关的阻尼系数;  $T(t)$  为具有迟滞特性的柔轮输出力矩,  $\theta$  为折算到负载端的扭转角,  $N$  为减速比。

由于负载端固定,  $\theta_1 = 0$ , 则折算到负载端扭转角为:

$$\theta = f(T, t) = \theta_m/N. \quad (10)$$

由于采用静态测量, 式(8)中电机端的角速度与角加速度可以忽略, 则由惯性与阻尼影响的柔轮的输出力矩部分可忽略不计, 此时柔轮输出力矩可近似为:

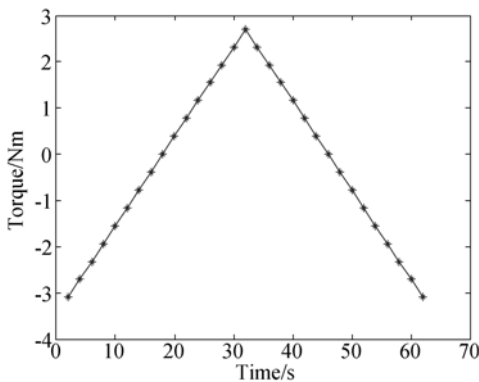
$$T(t) = NT_m = NC_1 I_m. \quad (11)$$

根据实际框架系统所需力矩  $-3.1 \sim 3.1$  Nm, 确定指令电流给定  $-0.04 \sim 0.04$  A, 则电机绕组电流  $I_m$  跟随指令电流同样为  $-0.04 \sim 0.04$  A。

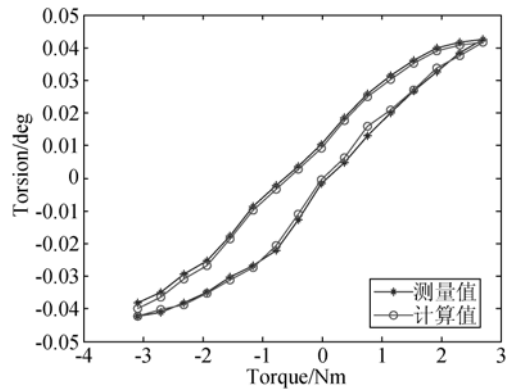
### 3.3 模型验证与误差分析

(1) 无擦除特征输入的模型验证。

如图 9(a) 给定电流由  $-0.04$  A 逐步上升到  $0.035$  A 再下降至  $-0.04$  A, 即柔轮输出力矩为  $-3.1 \sim 2.7$  Nm, 图 9(c) 所示最大误差为  $0.0028^\circ$ , 其均方误差值(MSE)为  $(0.00013\%)^\circ$ 。

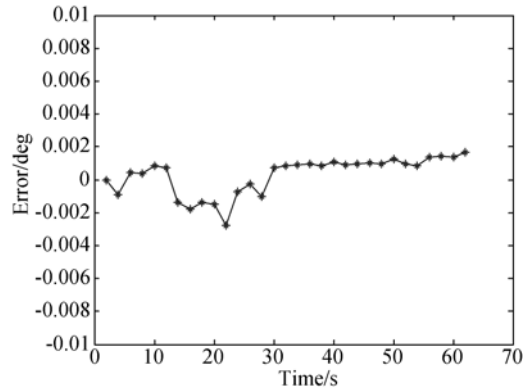


(a) 谐波减速器输出力矩示意图  
(a) Output torque of harmonic drive



(b) 测量扭转角与模型计算扭转角

(b) Measured torsion and calculated torsion



(c) 误差图

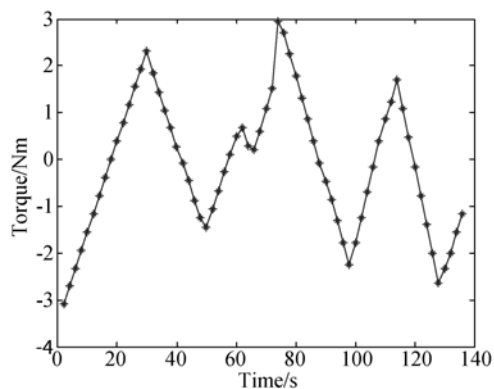
(c) Error

图 9 递增递减输入模型验证

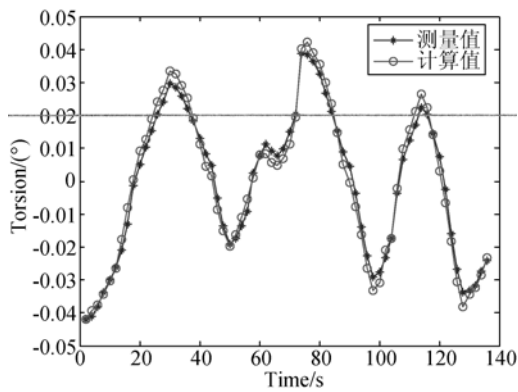
Fig. 9 Model validations of increasing and decreasing inputs

(2) 有擦除特征输入的模型验证。

给定两组任意电流使得柔轮输出力矩如图 10(a)、图 11(a) 所示, 第一组数据最大误差为  $0.005^\circ$ , MSE 值为  $(0.00083\%)^\circ$ ; 第二组数据最大误差为  $0.0043^\circ$ , MSE 值为  $(0.00035\%)^\circ$ 。

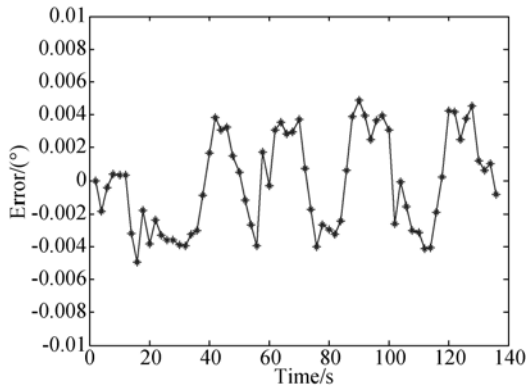


(a) 谐波减速器输出力矩示意图  
(a) Output torque of harmonic drive



(b) 测量扭转角与模型计算扭转角

(b) Measured torsion and calculated torsion

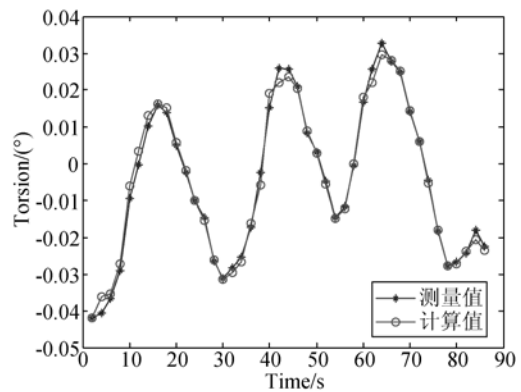


(c) 误差图

(c) Error

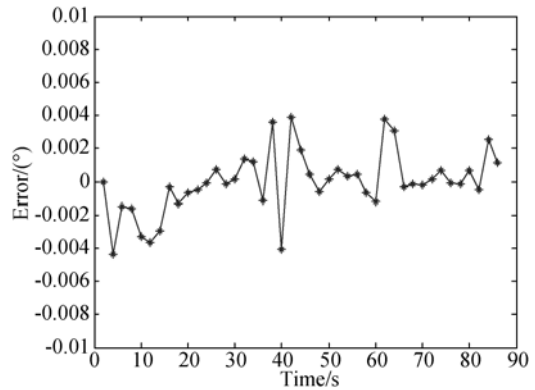
图 10 任意输入模型验证

Fig. 10 Model validation of arbitrary input



(b) 测量扭转角与模型计算扭转角

(b) Measured torsion and calculated torsion

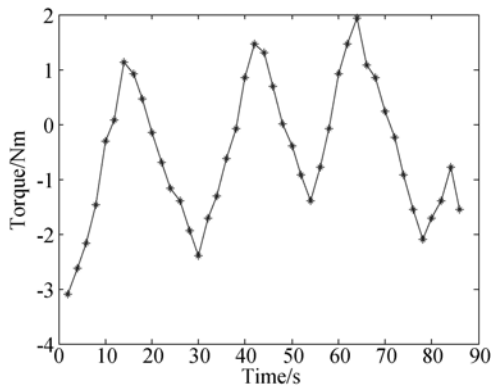


(c) 误差图

(c) Error

图 11 任意输入模型验证

Fig. 11 Model validation of arbitrary input



(a) 谐波减速器输出力矩示意图

(a) Output torque of harmonic drive

由实验结果可得,不论输入是否具有擦除特征,由 Preisach 模型建立的谐波减速器迟滞模型都能够很好地还原系统的扭转角,误差角维持在  $0.005^\circ$  范围之内,衡量建模精度的 MSE 在  $(0.000\ 83\%)^\circ$  之内。

## 4 结 论

本文在不使用力矩传感器的条件下,对应用于 DGMSCMG 的谐波减速器迟滞特性进行建模与参数辨识。采用 Preisach 模型构造谐波减速器的迟滞模型,并首次使用数字实现法辨识模型中的权重函数。避开以往研究中的对谐波减速器柔性环节与非线性摩擦分开建模的繁琐,整体考虑具有迟滞特性的柔轮输出力矩。实验中给定不同变化趋势,不同擦除特征的输入验证模型,误差角维持在  $0.005^\circ$  范围之内, MSE 在  $(0.000\ 83\%)^\circ$  之内,表明了所述建模方法的正确性和实用性。

后续将应用此模型设计 DGMSCMG 框架伺服系统的控制方法,以减少因谐波减速器迟滞特性带来的系统精度影响。

## 参考文献:

- [1] FANG J CH, REN Y. Decoupling control of magnetically suspended rotor system in control moment gyros based on an inverse system method [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2012, 17(6): 1133-1144.
- [2] 魏彤, 郭蕊. 自适应卡尔曼滤波在无刷直流电机系统辨识中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2308-2313.
- WEI T, GUO R. Application of adaptive Kalman filtering in system identification of brushless DC motor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2308-2313. (in Chinese)
- [3] 李海涛, 房建成. 基于扩张状态观测器的 DGMSCMG 框架伺服系统振动抑制方法[J]. *航空学报*, 2010, 31(6): 1213-1219.
- LI H T, FANG J CH. Study on system vibration suppression method based on ESO used in gimbal servo system of DGMSCMG [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(6): 1213-1219. (in Chinese)
- [4] FANG J CH, ZHENG SH Q, HAN B CH. AMB vibration control for structural resonance of double-gimbal control moment gyro with high-speed magnetically suspended rotor [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(1): 32-43.
- [5] FANG J CH, LI H T, HAN B CH. Torque ripple reduction in BLDC torque motor with nonideal back EMF [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(11): 4630-4637.
- [6] 徐向波, 房建成, 李海涛, 等. . 控制力矩陀螺框架系统的谐振抑制与精度控制[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 305-311.
- XU X B, FANG J CH, LI H T, et al. . Resonance elimination and precision control of CMG gimbal system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 305-311. (in Chinese)
- [7] 韩邦成, 马纪军, 李海涛. 谐波减速器的非线性摩擦建模及补偿[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1095-1103.
- HAN B CH, MA J J, LI H T. Modeling and compensation of nonlinear friction in harmonic driver [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1095-1103. (in Chinese)
- [8] TUTTLE T D, SEERING W. Modeling a harmonic drive gear transmission [C]. 1993 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, 1993: 624-629.
- [9] SEYFFERTH W, MAGHZALL A J, ANGELES J. Nonlinear modeling and parameter identification of harmonic drive robotic transmissions [C]. 1995 *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, 1995: 3027-3032.
- [10] TAGHIRAD H D, BELANGER P R. An experimental study on modeling and identification of harmonic drive systems [C]. *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, 1996: 4725-4730.
- [11] DHAOUADI R, GHORBEL F H, GANDHI P S. A new dynamic model of hysteresis in harmonic drives [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2003, 50(6): 1165-1171.
- [12] 潘锋, 董海军, 孙敬. 谐波齿轮传动中柔轮扭转变形产生的回差分析[J]. *机械科学与技术*, 2009, 28(6): 815-818.
- PAN F, DONG H J, SUN J. Analysis of backlash from flexspline torsional deformation in harmonic gearing [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2009, 28(6): 815-818. (in Chinese)
- [13] 李俊阳. 空间润滑谐波减速器失效机理及其加速寿命试验方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- LI J Y. *Failure mechanism theory and accelerated life testing method research for space lubrication harmonic drive*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
- [14] PREISSNER C, ROYSTON T J, SHU D. A high-fidelity harmonic drive model [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2012, 134(1): 011002.
- [15] KREJČI P, O'KANE J P, POKROVSKII A, et al. . Properties of solutions to a class of differential models incorporating Preisach hysteresis operator [J]. *Dynamics and Bifurcations of Nonsmooth Systems*, 2012, 241(22): 2010-2028.
- [16] IVANYI A, IVANYI P, IVANYI M M, et al. . Hysteresis in structural dynamics [C]. *8th International Symposium on Hysteresis Modeling and*

- Micromagnetics*, 2012, 407(9):1412-1414.
- [17] LEE J J, KIM Y K, RHYU S H, *et al.*. Hysteresis torque analysis of permanent magnet motors using Preisach model [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(2):935-938.
- [18] MAYERGOYZ I D. *Mathematical Models of Hysteresis* [M]. New York: Springer, 1991.
- [19] 程建华. 基于 Preisach 模型的超磁致伸缩驱动器迟滞建模与位移控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2008.
- CHENG J H. *Research of Hysteresis Modeling & Displacement Control for Giant Magnetostrictive Actuator Based on Preisach Model* [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [20] 陈远晟, 裘进浩, 季宏丽, 等. 基于双曲函数的 Preisach 类迟滞非线性建模与逆控制[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5):1205-1212.
- CHEN Y CH, QIU J H, JI H L, *et al.*. Modeling and inverse control of Preisach type hysteresis nonlinearity using hyperbola functions [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1205-1212. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈 萌(1989—),女,辽宁沈阳人,硕士研究生,2012 年于西北工业大学获学士学位,主要从事磁悬浮控制力矩陀螺框架伺服系统控制的研究工作。E-mail: chenmeng2398@163.com

#### 导师简介:



房建成(1965—),男,山东临沂人,博士生导师,长江学者特聘教授,1983 年于山东大学获学士学位,1988 年于西安交通大学获硕士学位,1996 年于东南大学获博士学位,主要从事航天器姿态控制系统技术、新型惯性仪表及装置技术、飞行器惯性导航与组合导航技术方面的研究。E-mail: fangjiancheng@buaa.edu.cn