

引用格式:朱海荣,李奇.基于遗传算法的光电搜跟系统摩擦建模与控制[J].电光与控制,2019,26(9):73-78. ZHU H R, LI Q. Genetic algorithm based friction modeling and control of electro-optical tracking system[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(9):73-78.

## 基于遗传算法的光电搜跟系统摩擦建模与控制

朱海荣<sup>1</sup>, 李奇<sup>2</sup>

(1. 江苏工程职业技术学院机电学院, 江苏 南通 226014; 2. 东南大学自动化学院, 南京 210096)

**摘要:**光电搜跟系统在低速跟踪状态工作时,由于转轴之间存在非线性摩擦力矩,会引起跳动或“爬行”现象,非线性摩擦力矩还会降低角分辨率和重复精度,对跟踪精度的影响很大。对此,提出了一种基于遗传算法的摩擦建模与补偿方法:首先,选取 Stribeck 摩擦模型,利用遗传算法辨识光电搜跟系统的 Stribeck 摩擦模型,以获得较高的模型拟合程度,降低拟合误差;在此基础上,对所辨识出的摩擦进行前馈补偿,以减小非线性摩擦力矩对光电搜跟系统性能的影响;仿真和实物实验证明了所提方案的有效性,提高了光电搜跟系统的控制性能,取得了较好的补偿效果。

**关键词:**光电搜跟系统;永磁同步电机;非线性摩擦力矩;遗传算法;摩擦补偿

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2019.09.016

## Genetic Algorithm Based Friction Modeling and Control of Electro-Optical Tracking System

ZHU Hai-rong<sup>1</sup>, LI Qi<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangsu College of Engineering and Technology, Nantong 226014, China;  
2. School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** When Electro-Optical Tracking System (EOTS) is working in a low-speed tracking state, the nonlinear friction torque between shafts of the EOTS may cause “flat-top” or “creeping” phenomenon, and also decrease the angular resolution and repeatability precision, which has a great influence on tracking precision. A friction modeling and compensation method based on Genetic Algorithm (GA) is proposed to solve the problem. Firstly, GA is adopted to model a Stribeck nonlinear friction of the EOTS to obtain a higher degree of model fitting and reduce the fitting error of the friction model. Then, a feedforward compensation is made to the identified friction, and thus to reduce the effect of the nonlinear friction torque on the EOTS. Results in simulation and physical experiments show that the proposed scheme is effective in friction compensation, which can improve the control performance of the EOTS.

**Key words:** Electro-Optical Tracking System (EOTS); permanent magnetic synchronous motor; nonlinear friction torque; genetic algorithm; friction compensation

### 0 引言

光电搜跟系统(EOTS)能隔离运动载体的扰动,在惯性空间保持探测器视轴“稳定”,从而实现对被探测目标的精确跟踪<sup>[1-2]</sup>。光电搜跟系统轴系间的润滑状况、

负载的大小和回转速度是影响摩擦力矩的主要因素<sup>[3]</sup>,当系统在低速跟踪状态下工作时,上述非线性摩擦力矩会造成跳动或“爬行”现象,难以保证光电搜跟系统在低速跟踪状态下的平稳<sup>[4-5]</sup>。

为了减小摩擦对系统性能的影响,摩擦力矩补偿引起了学者的广泛关注,常见的有以下3种策略:基于模型的补偿方法,采用离线或在线辨识的方法对摩擦模型进行辨识,利用所辨识出来的模型进行前馈补偿<sup>[6-9]</sup>;无模型补偿方法,将非线性摩擦力矩当作某种外部扰动,通过扰动补偿算法进行补偿,常见的有高增益PD控制、力矩反馈法、变结构控制和基于观测器的补偿方法<sup>[10-13]</sup>;基于智能控制的摩擦补偿方法,由于计算量相对较大,

收稿日期:2018-09-20

修回日期:2019-08-14

基金项目:国家自然科学基金(51307089);国际科技合作专项(2015 DFA10490);江苏省高校青蓝工程项目;南通市重点实验室建设项目(CP12015007);南通市基础科学研究项目(JC2018028);江苏工程职业技术学院自然科学研究项目(GYKY/2018/2)

作者简介:朱海荣(1979—),男,江苏张家港人,博士,副教授,研究方向为精密伺服控制系统。

很多智能控制算法的研究尚处于仿真阶段,真正应用于实际系统的还比较少<sup>[14-18]</sup>。

本文在广泛调研摩擦模型的基础上,考虑工程实现的可行性,选取 Stribeck 摩擦模型。首先,基于遗传算法辨识出光电搜跟系统的 Stribeck 摩擦模型,以获得较高的模型拟合程度、降低拟合误差,在此基础上对所辨识出的摩擦进行前馈补偿,以减小非线性摩擦力矩对光电搜跟系统性能的影响。最后在某光电搜跟系统进行补偿测试,实验证明补偿效果较好,提高系统的控制精度。

## 1 系统原理及模型

### 1.1 系统工作原理

光电搜跟系统组成如图 1 所示。

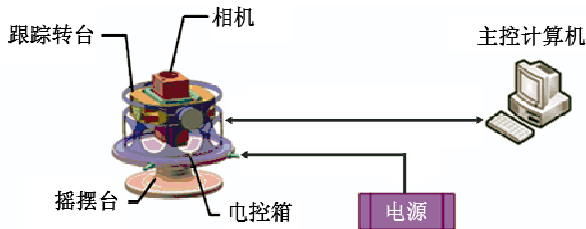


图 1 光电搜跟系统组成图

Fig. 1 Composition chart of electro-optical tracking system

系统由跟踪转台、电控箱、主控计算机、相机、电源和摇摆台几部分组成。光电跟踪转台采用了两轴正交的结构,空间垂直的两个轴系之间满足运动解耦。光电传感器(此处采用 CCD 相机)安装于内框俯仰轴系,外框为方位轴系,两者通过轴承连接在一起,使框架之间能相互转动。

系统工作过程如图 2 所示。

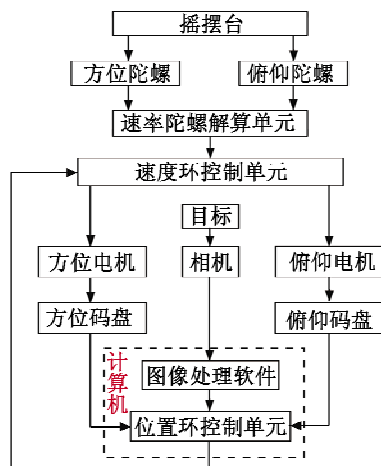


图 2 系统工作过程

Fig. 2 System working process

系统工作时,首先对相机和系统进行初始化,将相机视轴对准指定空域。当目标进入相机视场后,光电成像装置根据目标反射的可见光在相机上进行成像,由图像处理算法计算出偏移指令,引导探测器对目标实现捕获跟踪,同时将图像实时显示在主控计算机界面上。

### 1.2 系统模型

该光电搜跟系统采用永磁同步电机(PMSM)作为力矩驱动装置,PMSM 在  $d-q$  坐标系中的模型为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_e i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega_e i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_d, u_q$  为  $d-q$  坐标系中定子电压; $i_d, i_q$  为  $d-q$  坐标系中定子电流; $R_s$  为定子电阻; $\psi_f$  为转子的磁链; $L_d, L_q$  为  $d-q$  坐标系中等效的定子电感(系统中采用的永磁同步电机为面装式,满足  $L_d = L_q = L$ ); $\omega_e$  为  $d-q$  坐标系中的旋转角速度,满足  $\omega_e = n_p \omega$ ,  $n_p$  为 PMSM 的极对数, $\omega$  为 PMSM 的转速。

PMSM 运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - B\omega - T_L \quad (2)$$

式中: $T_e$  为电磁转矩; $T_L$  为负载转矩; $B$  为粘滞摩擦系数; $J$  为转动惯量。

PMSM 电磁转矩方程为

$$T_e = n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

得到 PMSM 在  $d-q$  坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{n_p \psi_f i_q}{J} - \frac{B\omega}{J} - \frac{T_L}{J} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s i_q}{L} - n_p i_d \omega - \frac{n_p \psi_f \omega}{L} + \frac{u_q}{L} \\ \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s i_d}{L} + n_p i_q \omega + \frac{u_d}{L} \end{cases} \quad (4)$$

通过矢量变换的方法,将 PMSM 中的三相电流进行分解,得到相互垂直的励磁电流和转矩电流,采用类似于直流电机的控制方法分别对其进行调节,从而获得良好的动态特性<sup>[19]</sup>。

将给定输入  $i_d^*, i_q^*$  与实际输入  $i_d, i_q$  相减得到偏差,经电流环控制器  $G_i(s)$  可得到  $d-q$  坐标系下的控制量  $U_d, U_q$  分别为

$$\begin{cases} U_d = G_i(s) (I_d^* - I_d) \\ U_q = G_i(s) (I_q^* - I_q) \end{cases} \quad (5)$$

合并式(4)和式(5)可得

$$\begin{cases} I_d = \frac{G_i(s)}{G_i(s) + R_s + sL_d} I_d^* + \frac{\omega_e L_q}{G_i(s) + R_s + sL_d} I_q \\ I_q = \frac{G_i(s)}{G_i(s) + R_s + sL_q} I_q^* - \frac{\omega_e L_d}{G_i(s) + R_s + sL_q} I_d - \frac{\omega_e \psi_f}{G_i(s) + R_s + sL_q} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,如果把  $G_i(s)$  的增益调至足够大,可使  $\frac{\omega_e L_q}{G_i(s) + R_s + sL_d} I_q \approx 0$ 。在 PMSM 中,电流环中断周期相比速度环中断周期小很多,在电流调节周期中,可认为速度基本不变。若  $G_i(s)$  的增益足够大,且保持  $d$  轴的电流指令  $i_d^* = 0$ , 可得  $i_d^* \approx i_d \approx 0, i_q^* \approx i_q$ , 从而实现 PMSM 线性近似解耦控制。

## 2 摩擦模型辨识

Stribeck 模型能较为准确地描述临界润滑、部分润滑和完全润滑下的摩擦,在工程上得到了广泛的应用,其表达式为

$$F_f = [F_c + (F_s - F_c) e^{-(\dot{\theta}/\dot{\theta}_s)^2}] \text{sgn } \dot{\theta} + B\dot{\theta} \quad (7)$$

式中:  $F_c$  为系统所受到的库伦摩擦力矩;  $F_s$  为系统受到的静摩擦力矩;  $\dot{\theta}$  为转角瞬时速度;  $\dot{\theta}_s$  为 Stribeck 模型的特征角速度;  $B$  为系统的粘滞摩擦系数<sup>[20]</sup>。

PMSM 的机械特性方程为  $J\dot{\omega} = T_e - F_f$ , 由于电机在空载运行时的加速度为零,所以满足  $F_f = T_e$ 。由 PMSM 电磁转矩方程可得  $T_e = n_p \psi_f i_q$ , 理论上,通过测量电机  $q$  轴电流,即可得到电磁转矩。在相同转速条件下施加负载转矩,通过转矩测量仪测量转矩,同时测量电流参数,得到表 1 所示的参数。

表 1 不同负载下电流和转矩关系对比

Table 1 Current and torque under different loads

负载/%	电流/A	转矩/(N·m)	转矩电流比
3	0.167	0.123	0.737
5	0.292	0.183	0.629
10	0.565	0.322	0.570
15	0.848	0.455	0.536

由表 1 可知,电流和转矩之间的比例关系会随两个参数的变化而变化。

依据电流和转矩之间的映射关系,可以建立摩擦力矩所对应的电流模型:对于 PMSM,给定一组不同速度指令序列  $\{\dot{\theta}_i\}_{i=1}^n$ ,可以得到对应的一组电流数据  $\{i_q\}_{i=1}^n$ ,即为摩擦转矩等效电流<sup>[21]</sup>。由于 Stribeck 模型在低速段有明显的非线性,所以在低速段给定指令的间隔较小,而在中高速段给定指令的间隔较大,数量分别为  $N_1$  和  $N_2$ 。对于 PMSM 的速度指令序列  $\{\dot{\theta}_i\}_{i=1}^n$ ,可以计算

得到所对应的电磁转矩序列  $\{T_{ei}\}_{i=1}^n$ ,由于在稳态匀速运行时所受外力矩之和为零,即摩擦力矩序列与对应的电磁转矩序列相等。对于 Stribeck 模型,待辨识的模型参数为  $x = [\hat{F}_c, \hat{F}_s, \hat{\theta}_s, \hat{B}]^T$ 。

定义辨识误差为

$$e(\dot{\theta}_i, x) = F(\dot{\theta}_i) - \hat{F}(\dot{\theta}_i) \quad (8)$$

式中:  $\hat{F}(\dot{\theta}_i)$  为

$$\hat{F}(\dot{\theta}_i) = (\hat{F}_c + (\hat{F}_s - \hat{F}_c) e^{-(\dot{\theta}_i/\hat{\theta}_s)^2}) \text{sgn } \dot{\theta}_i + \hat{B}\dot{\theta}_i \quad (9)$$

取目标函数

$$l = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e^2(\dot{\theta}_i, x) \quad (10)$$

摩擦辨识就是求向量  $x$ ,使目标函数  $l$  极小。

选取适应度函数

$$\begin{cases} l_m = \max_i \{l(x_i)\} \\ f(x_i) = l_m - l(x_i) \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, N, N$  为种群的大小。

辨识算法的具体步骤如图 3 所示。

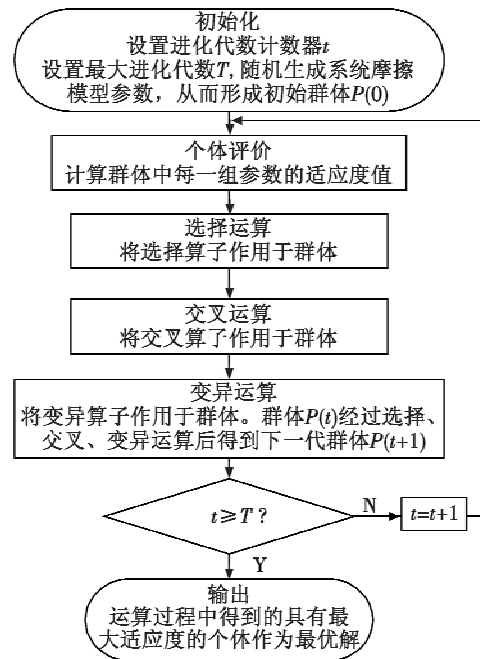


图 3 Stribeck 摩擦模型辨识算法流程图

Fig. 3 Flow chart of Stribeck friction model identification

选择待辨识参数的向量为个体,采用保存当前最优个体的随机选择方法,交叉操作和变异操作中分别采用均匀交叉算子和基本位变异算子<sup>[22]</sup>。选择最大进化代数为  $T = 2500$ ,种群大小为  $N = 25$ ,交叉概率为  $P_c = 0.9$ ,变异概率为  $P_m = 0.05$ ,搜索范围:  $F_c$  为  $[0 \text{ N}, 1 \text{ N}]$ ,  $F_s$  为  $[0 \text{ N}, 1 \text{ N}]$ ,  $B$  为  $[0 \text{ N} \cdot \text{m/s}, 0.001 \text{ N} \cdot \text{m/s}]$ ,  $\dot{\theta}_s$  为  $[0 \text{ r/min}, 20 \text{ r/min}]$ 。经过辨识,得到如表 2 所示的摩擦参数,拟合后得到如图 4 所示的摩擦曲线。

表2 遗传算法辨识的 Stribeck 摩擦模型参数

Table 2 Parameters of Stribeck model based on GA

	$F_c/N$	$F_s/N$	$\dot{\theta}_s/(r \cdot \text{min}^{-1})$	$B/(N \cdot m \cdot s^{-1})$
给定参数	0.28	0.34	10	0.0002
辨识结果	0.2808	0.3409	9.8151	0.0002

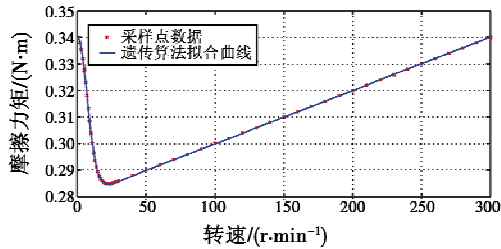


图4 基于遗传算法拟合的 Stribeck 摩擦模型

Fig. 4 Stribeck friction model based on GA

### 3 基于摩擦模型的补偿算法设计

由式(3)可知:电流  $i_q$  决定了电磁转矩的大小,可以将摩擦力矩折合成电流,通过额外的电流对摩擦力矩进行补偿,即

$$J\ddot{\theta} = n_p \psi_f (i_q - i_f) - T_L \quad (12)$$

基于 Stribeck 摩擦模型,额外施加  $q$  轴的电流补偿项,即

$$i_q^* = i_{PI} + i_f \quad (13)$$

式中:  $i_{PI}$  为速度环控制器的输出;  $i_f$  为补偿摩擦力矩所对应的电流。基于摩擦补偿的控制算法如图5所示。

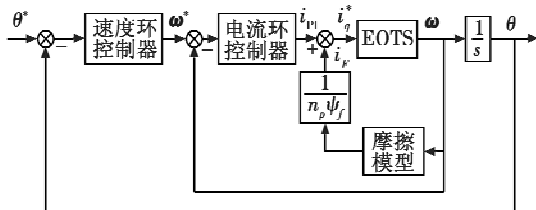


图5 基于摩擦补偿的光电跟踪系统补偿控制算法框图

Fig. 5 Control block diagram based on friction compensation of EOTS

## 4 仿真与实验

### 4.1 仿真结果

为了验证基于 Stribeck 模型的补偿效果,在 Matlab 环境下搭建系统模型, PMSM 仿真参数如表3所示。

表3 PMSM 系统参数

Table 3 Parameters of PMSM

系统参数	值	系统参数	值
额定功率 $P_N/W$	750	惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	$1.78 \times 10^{-4}$
额定电压 $U_N/V$	200	定子电阻 $R_s/\Omega$	1.74
额定电流 $I_N/A$	4.71	极对数 $n_p$	4
定子电感 $L/mH$	4	转子磁链 $\psi_f/Wb$	0.1267

选取 Stribeck 摩擦模型为  $F_f = [0.28 + (0.34 -$

$0.28) e^{-(\omega/10)^2}] \text{sgn } \omega + 0.0002 \omega$ 。将控制器参数调到最优,位置环为比例控制(PI 控制器中比例控制参数  $K_p = 1000$ ),速度环和电流环均为比例积分控制(其中,速度环比例控制参数  $K_p = 0.3$ ,积分控制参数  $K_i = 100$ ,电流环  $K_p = 1000, K_i = 7500$ )。图6~图9所示为传统 PI 控制与基于摩擦模型的补偿控制算法的比较。

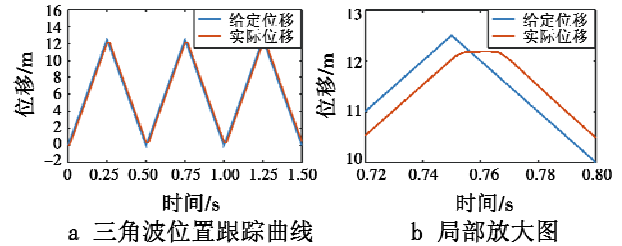


图6 无摩擦补偿时三角波位置跟踪曲线

Fig. 6 Position tracking curve without friction compensation

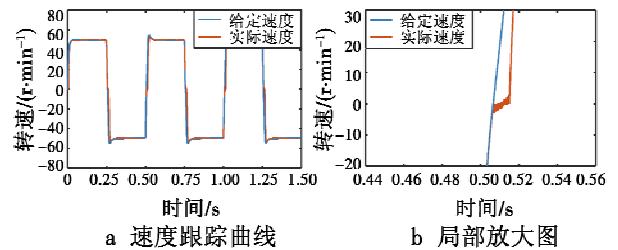


图7 无摩擦补偿时速度跟踪曲线

Fig. 7 Velocity tracking curve without friction compensation

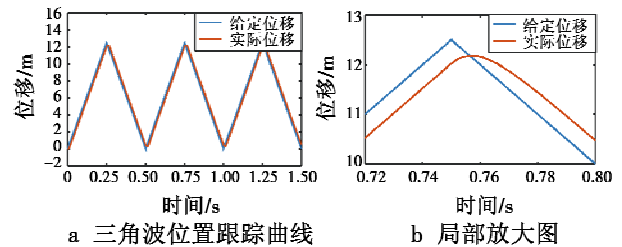


图8 基于 Stribeck 摩擦补偿后三角波位置跟踪曲线

Fig. 8 Position tracking curve with Stribeck friction compensation

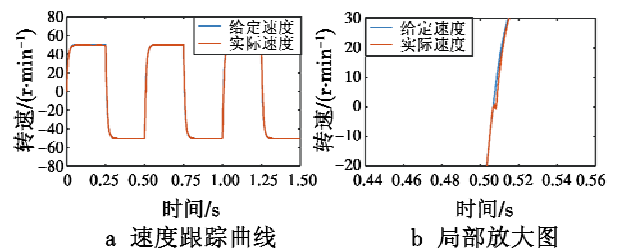


图9 基于 Stribeck 摩擦补偿后的速度跟踪曲线

Fig. 9 Velocity tracking curve with Stribeck friction compensation

图6和图7分别为没有进行摩擦补偿时三角波位

置跟踪曲线和速度跟踪曲线,存在“平顶”和“爬坡”现象。

图8和图9分别为基于Stribeck摩擦补偿后三角波位置跟踪曲线和速度跟踪曲线,由图可见,在跟踪三角波换向时的“平顶”现象和低速时的“爬坡”现象均得到了有效抑制。

#### 4.2 实验结果

为了进一步验证算法的有效性,在某光电搜跟系统进行了摩擦补偿算法实验。系统俯仰和方位轴系均采用角接触球轴承,通过压圈施加适当的预紧力,使轴承具有一定的刚度和回转精度。两个轴系的其中一端安装电机、电限位和机械限位机构,运动限位范围 $\pm 25^\circ$ ,另一端安装17位绝对式光电编码器作为测角单元,分辨率达到 $10''$ 。选用VG091A型光纤陀螺,测速精度优于 $0.02^\circ/s$ ,输出和角速度成正比的模拟电压信号。

当给定 $\pm 10^\circ$ 的角位置信号时,无摩擦与有摩擦补偿下的跟踪曲线如图10所示。图10、图11两组实验结果均验证了摩擦补偿算法的有效性。

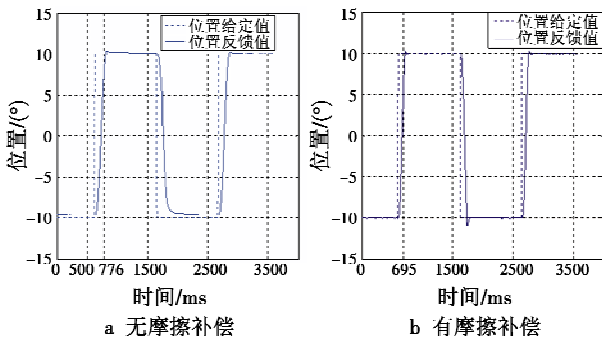


图10 角位置跟踪曲线

Fig. 10 Angular position tracking curve

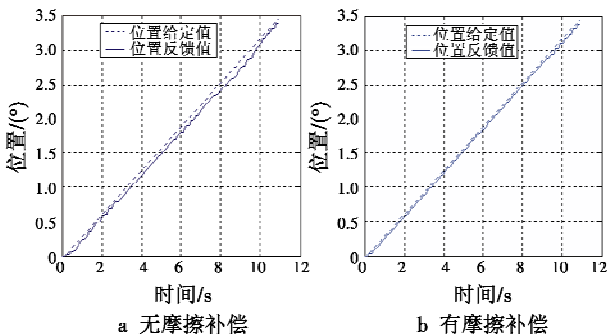


图11 斜坡响应曲线

Fig. 11 Slope response curve

## 5 结束语

为了减小非线性摩擦力矩对光电搜跟系统这类具有相对回转运动的控制系统的影响,首先选取Stribeck摩擦模型,基于遗传算法辨识出光电搜跟系统的Stribeck摩擦模型,以获得较高的模型拟合程度;在此基础

上,利用所辨识的摩擦模型作为前馈补偿加入到控制中,即通过额外的电流所产生的电磁转矩,对摩擦力矩进行补偿。仿真和实验均证明了基于摩擦模型的补偿控制算法的有效性,提高了光电搜跟系统的控制性能。

## 参考文献

- [1] MASTEN M K. Inertially stabilized platforms for optical imaging systems [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1):47-64.
- [2] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2008, 28(1):26-46.
- [3] YAO J Y, JIAO Z X, MA D W. RISE-based precision motion control of DC motors with continuous friction compensation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12):7067-7075.
- [4] HURÁK Z, REZÁČ M. Image-based pointing and tracking for inertially stabilized airborne camera platform [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(5):1146-1159.
- [5] 向红标,谭文斌,李醒飞,等.基于LuGre模型的自适应摩擦补偿[J].机械工程学报,2012,48(17):70-74.
- [6] 张文静,台宪青.基于LuGre模型的火炮伺服系统摩擦力矩自适应补偿[J].清华大学学报:自然科学版,2007,47(s2):1756-1760.
- [7] HUANG S J, CHIU C M. Optimal LuGre friction model identification based on genetic algorithm and sliding mode control of a piezoelectric-actuating table [J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control, 2009, 31(2):181-203.
- [8] LU L, YAO B, WANG Q F, et al. Adaptive robust control of linear motors with dynamic friction compensation using modified LuGre model [J]. Automatica, 2009, 45(12):2890-2896.
- [9] 徐智浩,李胜,张瑞雷,等.基于LuGre摩擦模型的机械臂模糊神经网络控制[J].控制与决策,2014,29(6):1097-1102.
- [10] LI S H, LIU Z H. Adaptive speed control for permanent magnet synchronous motor system with variations of load inertia [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8):3050-3059.
- [11] TSAI M C, CHIU I F, CHENG M Y. Design and implementation of command and friction feedforward control for CNC motion controllers [J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 2004, 151(1):13-20.
- [12] 吴南星,孙庆鸿,冯景华.机床进给伺服系统非线性摩擦特性及控制补偿研究[J].东南大学学报:自然

- 科学版,2004,34(6):771-774.
- [13] LI Z P, CHEN J, ZHANG G Z, et al. Adaptive robust control of servo mechanisms with compensation for nonlinearly parameterized dynamic friction[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(1):194-202.
- [14] WANG Y F, WANG D H, CHAI T Y. Extraction and adaptation of fuzzy rules for friction modeling and control compensation[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2011, 19(4):682-693.
- [15] 丛爽, ALESSANDRO D C. 两种补偿动态摩擦力的先进控制策略[J]. 自动化学报, 1998, 24(2):236-240.
- [16] 王永富, 柴天佑. 一种补偿动态摩擦的自适应模糊控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2):139-143.
- [17] NA J, CHEN Q, REN X M, et al. Adaptive prescribed performance motion control of servo mechanisms with friction compensation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(1):486-494.
- [18] CHOU C H, CHENG C C. A decentralized model reference adaptive variable structure controller for large-scale time-varying delay systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48(7):1213-1217.
- [19] GU W, ZHANG Y, LI S H. Research on friction compensation for PMSM servo systems[C]//Chinese Control and Decision Conference, 2016:6735-6740.
- [20] MARTON L, LANTOS B. Modeling, identification, and compensation of stick-slip friction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1):511-521.
- [21] YOON J Y, TRUMPER D L. Friction modeling, identification, and compensation based on friction hysteresis and Dahl resonance[J]. Mechatronics, 2014, 24(6):734-741.
- [22] LIU D P. Research on the parameter identification of friction model for servo systems based on genetic algorithms[C]//International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2005:1116-1120.

(上接第 41 页)

## 5 结论

针对传统“是非制”导弹状态评估方法的局限性,提出了基于云模型和 BN 的导弹状态评估方法。首先通过云模型对性能测试参数进行状态评估,然后结合 BN 融合各个参数状态得到最终导弹整体的状态等级。某导弹评估实例验证模型的可行性和合理性,主要创新点有:1) 考虑到划分的状态等级之间的模糊性和随机性,采用云模型表征这种不确定性,进一步通过计算测试参数与评语等级云的确定度量化表征测试参数的状态隶属度;2) 融合多参数状态时,将 DS/AHP 方法应用于 CPT 的求解,降低了专家判断的不确定性影响,4 名专家评判的不确定度降低至 5% 以下,随着专家数量的增多和评判标准的细化,不确定度会进一步降低。

## 参 考 文 献

- [1] 裴晶晶, 安进, 王雯珂. 海军导弹装备质量状态等级划分与评估[J]. 计算机与数字工程, 2016, 44(12):2309-2313, 2395.
- [2] 翟保磊, 王文豪, 胡盛华, 等. 基于优化广义回归神经网络的目标威胁评估[J]. 电光与控制, 2015, 22(10):44-47.
- [3] 陈伟南, 黄连忠, 张勇, 等. 基于 BP 神经网络的船舶主机能效状态评估[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(4):127-133, 160.
- [4] 张春, 舒敏. 基于支持向量机的健康状态评估方法[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(3):18-26.
- [5] 余鲲, 杨俊杰, 楼志斌, 等. 基于支持向量机和模糊控制的输电线路覆冰状态评估模型[J]. 电测与仪表, 2016, 53(21):82-88.
- [6] 门志远, 李林宏, 张耀辉. 基于改进证据理论的齿轮技术状态评估方法[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(5):63-66.
- [7] 金永品, 王亮. 基于多层次灰色模型的导弹装备研制风险评估方法[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(1):146-153.
- [8] 李森, 张世琪, 胡顺斌. 灰色模糊综合评判法在变压器状态评估中的应用[J]. 河北大学学报:自然科学版, 2018, 38(2):217-224.
- [9] 高森, 陈英慧, 张建涛. AHP 与马尔科夫模型在封闭式组合电器状态评估中的应用[J]. 黑龙江电力, 2018, 40(4):298-302.
- [10] 蔡忠义, 陈云翔, 张亮, 等. 基于随机 Wiener 过程的剩余寿命预测贝叶斯方法[J]. 电光与控制, 2016, 23(7):93-96.
- [11] 陈兆铭, 马亮, 黄锐, 等. 基于云模型的导弹状态评估方法[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(11):93-97.
- [12] 孙鑫, 孙有朝. 基于贝叶斯网络的试飞风险评估方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5):70-74.
- [13] 张仕新, 笱翔, 李浩. 基于云重心评估法和熵值法的装备技术状态评估[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12):4015-4018.
- [14] 李志强, 徐廷学, 顾钧元, 等. 基于 DS/AHP 的贝叶斯网络条件概率值确定方法[J]. 现代防御技术, 2017, 45(6):178-184.