

基于智能差分算法的摩擦力补偿方法研究*

崔慧敏[✉]

(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 针对光电平台低速转动时, 受摩擦力影响较大, 使得速度跟随曲线出现“死区”现象, 导致跟踪性能明显下降这一问题, 提出了一种基于智能差分进化算法和 Lurje 摩擦模型的摩擦力补偿控制方法。通过采集记录光电转台正、反向匀速运动时的摩擦力大小, 建立转台不同速度和摩擦力之间的对应关系。通过最小二乘法对摩擦模型静态参数进行分段拟合, 采用智能差分进化算法辨识摩擦模型动态参数, 并基于反馈的速度信息和获得的摩擦模型等效为摩擦补偿力矩输入到电流环控制输入端, 实现平台平稳低速运行。实验结果表明: 摩擦力补偿后速度响应误差由补偿前的 $\pm 0.1^\circ/\text{s}$ 减小到 $\pm 0.04^\circ/\text{s}$, 提出方法效果显著。

关键词: 智能差分算法; Lurje 摩擦模型; 参数辨识; 非线性补偿

中图分类号: V19 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)05-0061-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220310002

引用格式: 崔慧敏. 基于智能差分算法的摩擦力补偿方法研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 61–67.

Research on friction compensation method based on intelligent differential algorithm

CUI Huimin

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Aiming at the disadvantage that the photoelectric platform is greatly affected by friction when it rotates at low speed, the "dead zone" phenomenon appears in the speed following curve, and the tracking performance is obviously reduced, a friction force compensation method based on intelligent differential evolution algorithm and Lurje friction model is proposed in the paper. By collecting and recording the friction force when the photoelectric turntable moves at a constant speed in the forward and reverse directions, the corresponding relationship between the different speeds of the turntable and the friction force is established. The static parameters of the friction model are identified with the least square method, and the dynamic parameters of the friction model are identified by the intelligent differential evolution algorithm. Based on the feedback speed information and the obtained friction model, the equivalent friction compensation torque is treated as the input of the current loop to achieve stable low-speed operation of the platform. After friction compensation, the speed response error is reduced from $\pm 0.1^\circ/\text{s}$ to $\pm 0.04^\circ/\text{s}$. The experimental results show that the proposed method in this paper is effective.

Key words: Intelligent differential algorithm; Lurje friction model; Parameter identification; Nonlinear compensation

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220310002

Citation: CUI Huimin. Research on friction compensation method based on intelligent differential algorithm[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(5): 61–67.

引 言

目前, 光电平台已广泛应用于航空侦查、航空测量、地面环境监测、低空动目标跟踪等领域^[1]。由于平台上往往搭载有高精度成像传感器和探测器, 如红外目标探测器、电荷耦合元件 CCD (Charge-coupled Device) 等, 光电平台的视轴稳定精度直接决定了这些光电载荷的成像质量, 进而影

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61903044)

[✉]通讯作者: 崔慧敏 (cui_huimin2012@126.com)

收稿日期: 2022-03-10 收修改稿日期: 2022-04-28

响到后续对目标的瞄准定位精度和精确打击效果。随着科学技术的飞速发展,对目标探测距离和探测精度的要求不断提高,因此,对光电平台的稳定精度和跟踪精度的要求也越来越严格。

光电平台在工作时不可避免地会受到摩擦力、电机齿槽转矩、转台不平衡力矩和传感器噪声等内外非线性力矩的影响,使得实际加在光电平台上的控制力矩和理想输出力矩之间存在偏差,造成光电平台视轴稳定精度下降,成像载荷视轴晃动从而成像模糊,最终导致跟踪目标精度下降,严重时甚至导致目标跑出视场,跟踪失败。

这些干扰力矩中,电机波动力矩、齿槽转矩和不平衡力矩等可通过提高配平精度、改进电机制造工艺、选择高精度传感器等机械或物理手段进行改善;但摩擦力矩跟接触面材料、接触面润滑情况、相对运动速度和转台所在位置等诸多因素有关,是一种复杂的不确定非线性干扰力矩,且无法通过硬件设计或结构调整避免摩擦力对伺服系统性能的影响,因此必须从软件着手,设计实时有效的补偿非线性摩擦力矩的方法,使伺服系统在摩擦力影响下依然保持较高的稳定精度和跟踪精度。

根据文献调研,目前常用的补偿摩擦力矩的方法可归结为两大类:基于摩擦模型的补偿方法和不依赖摩擦模型的补偿方法。文献[2]搭建了舰炮伺服系统仿真模型,选择斯特里贝克 Stribeck 摩擦模型对伺服控制系统进行摩擦补偿试验,仿真结果表明:Stribeck 摩擦模型可以较好地描述出摩擦环节对舰炮伺服系统的影响。文献[3]提出了一种基于改进库伦+黏性摩擦模型的补偿方法,该方法提高了机器人的运动精度和换向过程的运动平稳性。但上述模型较为简单,不能完全描述摩擦力动静态特性,在速度过零点处对摩擦力补偿效果不甚理想。文献[4]针对集成式电子液压制动系统液压力控制中摩擦力给系统带来的振荡和低速爬行现象,采用颤振补偿方法对系统进行液压力控制。颤振补偿能够减轻集成式电子液压制动系统液压力控制中摩擦力所带来的振荡和低速爬行现象。但该方法适用范围有限,且颤振补偿方法容易激发系统的不稳定态,导致系统发散。文献[5]采用模糊自适应算法逼近机器人系统中摩擦力和外部扰动等不确定项,并采用李雅普诺夫稳定性理论保证闭环系统的稳定性,仿真结果表明:该方法可以保证机器人具有良好的跟踪性能。但该方法还只停留在仿真阶段,距离实际工程应用还有一定距离。文献[6]采用干扰观测器,对系统中摩擦力和外界扰动进行观测补偿,但由于摩擦力导致的速度“死区”使得加速度信号不能及时反馈摩擦力正负切换的状态,因此,对摩擦力造成的“死区”问题,不能有效解决。

考虑到实际工程应用中对成本和实时性的要求,本文基于 Lurje 摩擦模型进行摩擦力辨识和补偿。相比于 Stribeck 摩擦模型、库伦摩擦力等,该摩擦模型可以准确描述摩擦过程中的爬行、滑前变形和摩擦记忆等复杂的摩擦动态、静态特性^[7,8]。但该模型为二阶非线性模型,参数较多,且存在内部不可测状态变量,参数辨识较为困难。针对该问题本文提出采用智能差分进化算法^[9]对动态摩擦参数进行快速辨识,相对于传统的网格法、试凑法等,该方法节省了大量参数调试时间,提高了模型辨识的准确性,最终提高了摩擦补偿精度。

1 光电平台伺服系统数学模型建立

永磁同步电机在稳态情况下的电压方程可以表示为^[10]:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \end{cases} \quad (1)$$

上式中, ψ_d 和 ψ_q 分别为 d 轴和 q 轴的磁链, i_q 和 i_d 分别为 q 轴和 d 轴的指令电流, R 为电机的电枢电阻, ω 为电机的电角速度。其中, ψ_d 和 ψ_q 可以表示为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

上式中, ψ_f 为永磁体磁链, L_d 和 L_q 分别为 d 轴和 q 轴的电感。根据光电平台的工作原理,可以推导出

平台的动力学方程如下式所示：

$$T_{em} = \frac{3}{2} p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_{em} - B\omega_r - T_L \quad (4)$$

上式中， p 为电机的极对数， J 为转子的转动惯量， B 为粘滞阻尼系数， T_L 为负载转矩， ω_r 为机械角速度。

光电平台伺服系统采用永磁同步电机作为伺服电机，简化的伺服控制系统框图如图 1 所示。图中利用负载上安装的速率陀螺信息进行速度环闭环，输出交轴和直轴电流指令。FPGA 通过 AD 采样芯片采集永磁同步电机自然坐标系下的三相电流，采用 Clark 变换将三相电流变换到两相静止坐标系下，通过 BISS 协议解出电角度信息，然后进行 Park 变换，将两相电流转换到同步旋转坐标系下，得到同步旋转坐标系下的交轴和直轴电流反馈值。将直轴和交轴误差值分别进行 PI 校正，结合电角度信息，经过反 Park 变换最终得到静止坐标系下的空间电压矢量。在空间矢量脉宽调制 SVPWM (Space Vector Pulse Width Modulation) 模块中，根据空间电压矢量所在扇区，计算三相功率驱动桥的上下桥臂开关切换时间，驱动永磁同步电机按照期望速度进行旋转^[11]。同时，基于差分进化算法辨识摩擦模型，将陀螺速度信息作为模型输入，所输出的摩擦力矩可以等效为控制输入量在电流环输入端进行补偿。

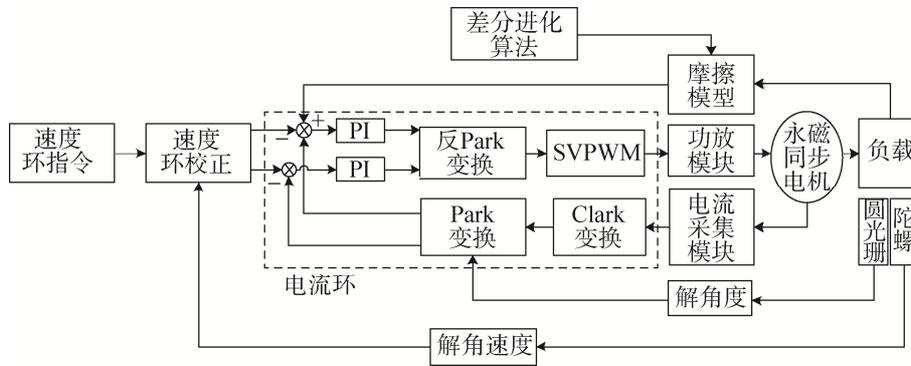


图 1 伺服控制系统框图

Fig. 1 System block of servo control

2 基于差分进化算法和 Lurje 摩擦模型的摩擦力补偿

2.1 Lurje 摩擦模型建立

根据文献调研，目前常用的摩擦力模型包括库伦摩擦、粘滞摩擦模型和 Stribeck 摩擦模型等，这些摩擦模型属于静摩擦模型，不能描述速度过零处摩擦力突变状态。因此，本文选择能够全面描述动、静态摩擦力切换状态的 Lurje 模型作为摩擦模型进行摩擦力补偿。Lurje 模型可用以下表达式进行描述：

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{\theta} \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dt} = \dot{\theta} - \frac{|\dot{\theta}|}{g(\dot{\theta})} z \quad (6)$$

$$g(\dot{\theta}) = F_c + (F_s - F_c) e^{-(\dot{\theta}/\dot{\theta}_s)^2} \quad (7)$$

上式中， σ_0 和 σ_1 为动态摩擦系数， σ_2 为黏性摩擦系数， z 为鬃毛的平均形变量， F_s 为最大静摩擦力， F_c 为库伦摩擦力， $\dot{\theta}_s$ 为切换速度。

2.2 差分进化算法优化过程

由上述摩擦力公式可以看出，针对某特定转台，摩擦力只和转台速度和转台位置有关。为了辨识出该摩擦模型，首先让转台分别从 0 到 15 %s 的转速分阶段做匀速运动，并记录此时电流环控制输入量，

由于转台做匀速运动, 此时电机控制输入力矩全部被用来克服摩擦力矩, 从而得到该速度下的摩擦力大小。同理, 记录转台反方向运动时的摩擦力矩, 即让转台从 0 到 -15% 的转速分阶段做匀速运动, 记录对应速度下的摩擦力大小。为得到摩擦力和速度之间的关系, 使用差分进化算法进行辨识。

差分进化算法是模拟自然界“适者生存, 优胜劣汰”进化规律的一种随机启发式搜索算法^[12]。其基本思想是: 将随机产生的初始种群中任意两个个体进行变异交叉操作, 将产生的新个体与原来某特定个体进行比较, 如果新产生的个体适应度值优于原来的个体, 新个体将取代原来个体参与后续迭代操作, 否则仍使用原来个体, 通过多次迭代, 保留优秀个体, 淘汰劣质个体, 最终得到优化问题最优解。相比于被广泛应用的遗传算法, 该算法保留了遗传算法较强的全局搜索能力, 但降低了遗传算法的复杂性, 可以适时调整当前搜索策略, 保证收敛速度的同时具有较强的鲁棒性。

差分算法基本流程大致可分为初始化、变异、交叉和选择四个步骤。

①初始化: 种群初始化, 假设种群个体数为 m 个, 每个种群个体为 n 维, 通过以下公式产生 m 个种群个体:

$$x_{ij}(0) = \text{rand}(0,1)(x_{ij}^{\max} - x_{ij}^{\min}) + x_{ij}^{\min}, i \in (1,m), j \in (1,n) \quad (8)$$

其中, x_{ij}^{\max} 为第 i 个个体的上界, x_{ij}^{\min} 为第 i 个个体的下界, $\text{rand}(0,1)$ 产生 $[0,1]$ 之间的随机数。

②变异: 从群体中随机选择 3 个个体进行变异操作, 即:

$$h_{ij}(k+1) = x_{m1j}(k) + F(x_{m2j}(k) - x_{m3j}(k)) \quad (9)$$

式中, F 为缩放因子, $m1, m2$ 和 $m3$ 为个体在种群中的序号; $h_{ij}(k+1)$ 为变异操作产生的新个体。

③交叉: 为了增加种群的多样性, 采用如下交叉操作:

$$v_{ij}(k+1) = \begin{cases} h_{ij}(k+1), \text{rand}l_{ij} \leq CR \\ x_{ij}(k), \text{rand}l_{ij} > CR \end{cases} \quad (10)$$

式中, CR 为交叉概率, $\text{rand}l_{ij}$ 为 $[0,1]$ 之间的随机数, $v_{ij}(k+1)$ 为通过交叉操作产生的新的个体。

④选择: 为了决定新产生的个体是否取代旧的个体, 需要对新旧个体的适应度函数值进行比较:

$$x_i(k+1) = \begin{cases} v_i(k+1), f(v_{i1}(k+1), \dots, v_{in}(k+1)) < f(x_{i1}(k), \dots, x_{in}(k)) \\ x_{ij}(k), f(v_{i1}(k+1), \dots, v_{in}(k+1)) \geq f(x_{i1}(k), \dots, x_{in}(k)) \end{cases} \quad (11)$$

由上式可以看出, 如果新产生的个体优于旧的个体, 则用新产生的个体取代旧的个体进行下一次迭代, 否则, 还保留原来的个体进行种群迭代。

3 实验结果及分析

3.1 基于差分进化算法进行摩擦力模型辨识效果及分析

3.1.1 摩擦力静态参数辨识

对转台进行速度闭环, 给速度环输入等间隔速度指令, 让转台从 0 到 15% 的转速进行分阶段匀速运动, 记录转台不同速度运行时某一位置处的控制量, 该控制量即为对应速度下的摩擦力大小。同理, 给速度环输入从 0 到 -15% 的等间隔反向速度指令, 并记录转台不同反向速度运行时, 某一位置处的控制量变化情况。对实际静摩擦模型进行最小二乘法分段拟合, 得到摩擦力逼近结果如图 2 所示。

正向摩擦力静态参数辨识结果为: $\sigma_2 = 0.1860$, $F_c = 0.13$, $F_s = 0.23$, $\dot{\theta}_s = 0.009$

反向摩擦力静态参数辨识结果为: $\sigma_2 = 0.2060$, $F_c = 0.035$, $F_s = 0.07$, $\dot{\theta}_s = -0.005$

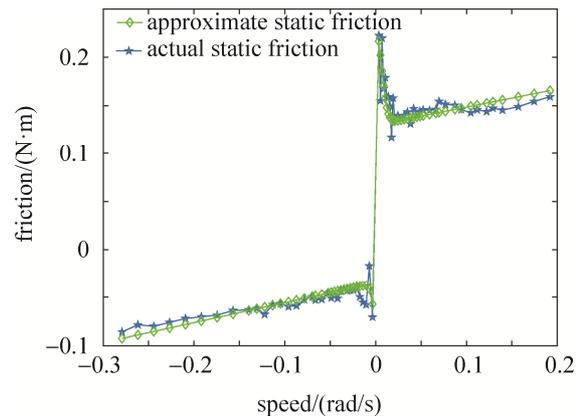


图 2 静态摩擦力逼近效果

Fig. 2 Approximation result of static friction force

从图 2 中可以看出, 辨识模型可以很好地逼近实际正反向摩擦力。

3.1.2 摩擦力动态参数辨识

为了辨识摩擦力动态参数, 需要给定转台初始速度, 让转台只在摩擦力作用下做自由减速运动。利用 DSP 芯片采集转台速度变化值, 采样时间间隔为 1 ms。利用转台实际速度输出和仿真出来的转台自由减速运动时的曲线差值, 作为差分进化算法的适应度函数, 进行 100 次优化迭代, 种群数量选择为 50, 变异因子设为 0.6, 动态参数辨识结果为 $\sigma_0 = 47.92$, $\sigma_1 = 32.36$ 。动态摩擦力逼近效果如图 3 所示。

图 3 中, 左图为采用差分进化算法进行参数辨识时, 适应度函数随迭代次数的变化情况; 右图为在摩擦力模型作用下转台自由减速运动曲线和实际转台运动曲线逼近情况。从图上可以看出, 所辨识摩擦力模型动态参数可以很好地描述系统的动态摩擦特性。

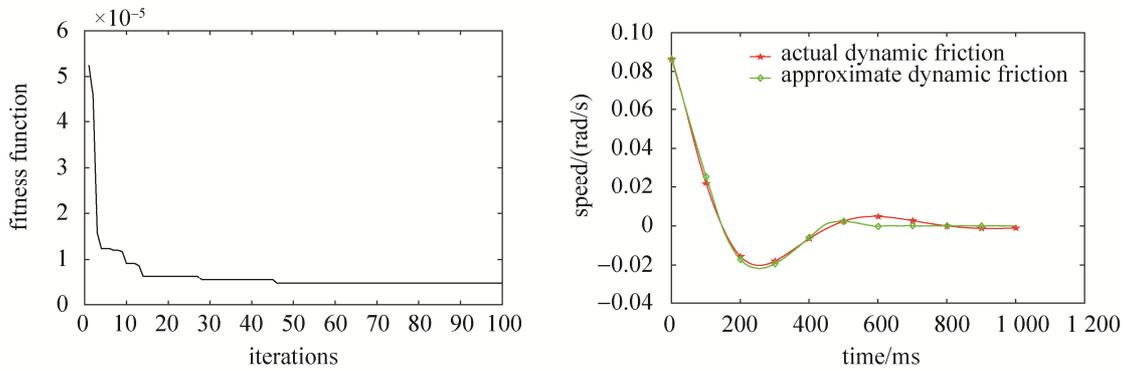


图 3 动态摩擦力逼近效果

Fig. 3 Approximation results of dynamic friction force

为了测得实际摩擦力和拟合摩擦力之间的逼近情况, 对速度环进行闭环, 并给定速度输入指令为幅值为 1° , 周期为 0.5 Hz 的周期信号, 通过测得控制输入指令与负载加速度, 实际摩擦力逼近结果如图 4 所示。间接得到转台摩擦力矩如图 4 左图中蓝线所示; 根据上述辨识出的 Lurje 摩擦模型, 可以得到逼近的摩擦力曲线如图 4 左图中红线所示; 摩擦力逼近误差如图 4 右图所示。从图上可以很明显地看出, 摩擦力模型可以很好地拟合实际摩擦力, 逼近误差在 $\pm 0.02 \text{ N}\cdot\text{m}$ 区间。

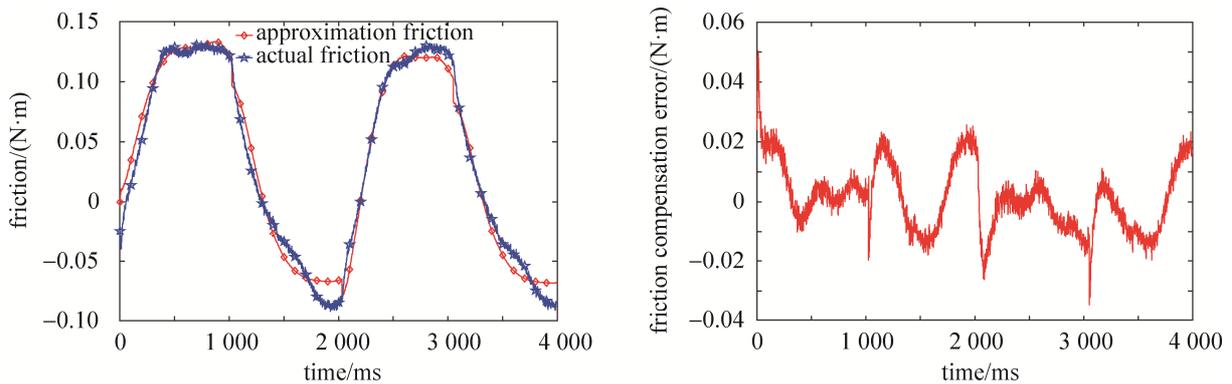


图 4 实际摩擦力逼近结果

Fig. 4 Approximation results of actual friction force

3.2 基于辨识出的摩擦力模型进行摩擦力补偿效果及分析

根据转台反馈速度信息, 输入给摩擦模型, 并将摩擦模型输出的补偿力矩输入到电流环指令输入端, 摩擦力补偿前后速度响应及响应误差对比如图 5 所示。摩擦力模型补偿前后转台速度反馈曲线对比如图 5 左图所示, 从图上可以明显看出进行摩擦力矩补偿后, 速度反馈的“死区”现象得到解决; 速度响应误差如图 5 右图所示, 从图中可以看出摩擦力补偿后, 速度响应误差由补偿前的 $\pm 0.1^\circ/\text{s}$ 减小到 $\pm 0.04^\circ/\text{s}$,

该实验结果说明, 本文提出的基于摩擦模型的补偿方法效果显著。

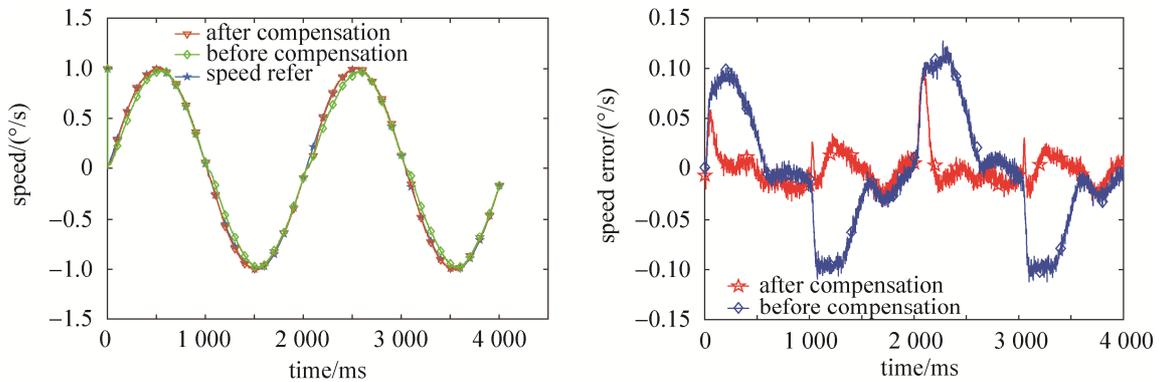


图 5 摩擦力补偿前后速度响应及响应误差对比

Fig. 5 Comparison of speed response and error with or without friction force compensation

因为在低速运行时, 电机主要是要克服摩擦力矩, 对摩擦力矩进行补偿后控制输入会明显减小。图 6 为对转台摩擦力补偿前后, 电流环控制输入指令的对比。从图 6 中可以看出, 在基于 Lurje 摩擦模型进行摩擦力补偿之前, 电流环的控制输入量在 $-200 \sim 600$ 之间波动, 在进行摩擦力补偿之后, 电流环控制输入量在 $-100 \sim 200$ 之间进行波动, 即摩擦力补偿之后控制输入量明显减少, 这与预期效果完全相符。

4 结束语

本文针对光电转台中摩擦力不可避免地会影响平台低速运动平稳性问题, 提出采用基于 Lurje 摩擦模型进行摩擦力补偿的方法, 相对于采用其他静态摩擦模型进行摩擦力补偿的方法, 该模型可以很好地描述动静摩擦切换时的特性。针对动态摩擦参数辨识时人工试凑需要花费大量精力且精度不高的问题, 提出基于智能差分进化算法进行参数辨识组合优化, 算法参数辨识过程速度快且误差小。实验结果表明: 所建立的模型可以很好地逼近转台实际摩擦特性, 补偿结果可以很好地消除速度的“死区”现象, 使得速度跟随误差精度从 $\pm 0.1^\circ/\text{s}$ 提高到 $\pm 0.04^\circ/\text{s}$ 。这对于实际工程中有效补偿摩擦力, 提高光电平台伺服跟踪性能具有重要参考价值。

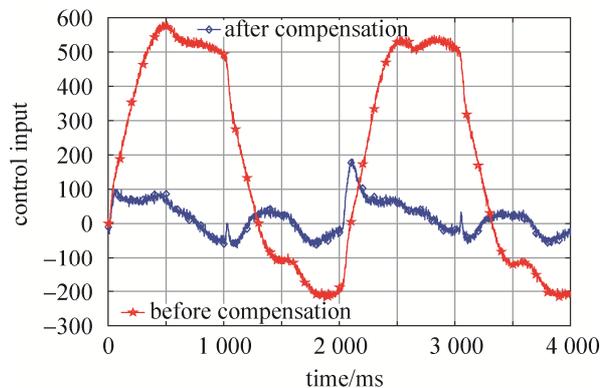


图 6 摩擦力补偿前后控制输入对比

Fig. 6 Comparison of control input with or without friction force compensation

参考文献

[1] 吉书鹏. 机载光电载荷装备发展与关键技术[J]. 航空兵器, 2017(6): 3-12.
JI Shupeng. Development and key technologies of airborne optoelectronic payload equipment[J]. Aviation Weapon, 2017(6): 3-12.

[2] 赵远征, 陈延伟, 程守虎. 基于 Stribeck 模型的舰炮伺服系统摩擦力矩补偿[J]. 兵工自动化. 2016, 35(5): 59-62.
ZHAO Yuanzheng, CHEN Yanwei, CHENG Shouhu. Friction torque compensation of naval gun servo system based on Stribeck model[J]. Ordnance Automation, 2016, 35(5): 59-62.

[3] 陶岳, 赵飞, 曹巨江. 协作机器人关节摩擦特性辨识与补偿技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(4): 28-31.
TAO Yue, ZHAO Fei, CAO Jujiang. Identification and compensation technology of joint friction characteristics of collaborative robot[J]. Combined Machine Tools and Automated Processing Technology, 2019(4): 28-31.

[4] 熊璐, 徐松云, 余卓平. 基于颤振补偿的电子液压制动系统液压力优化控制[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12):

- 100–106.
- XIONG Lu, XU Songyun, YU Zhuoping. Optimal control of hydraulic pressure in electronic hydraulic brake system based on flutter compensation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 100–106.
- [5] 陈思安, 葛为民, 王肖锋, 等. 新型可重构机器人的模糊自适应控制研究[J]. 控制工程, 2017, 24(11): 2399–2404.
CHEN Si'an, GE Weimin, WANG Xiaofeng, et al. Research on fuzzy adaptive control of new reconfigurable robot[J]. Control Engineering, 2017, 24(11): 2399–2404.
- [6] 汪永阳, 戴明, 丁策, 等. 大光电稳定平台中高阶扰动观测器的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 459–466.
WANG Yongyang, DAI Ming, DING Ce, et al. Application of high-order disturbance observer in large photoelectric stabilized platform[J]. Optical Precision Engineering, 2015, 23(2): 459–466.
- [7] 李国丽, 李浩霖, 王群京, 等. 永磁球形电机 Stribeck 摩擦模型参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(4): 121–130.
LI Guoli, LI Haolin, WANG Qunjing, et al. Parameter identification of stribeck friction model for permanent magnet spherical motor[J]. Journal of Electrical Machinery and Control, 2022, 26(4): 121–130.
- [8] 梁英. 基于 LuGre 模型摩擦补偿的转速复合控制系统[J]. 电子设计工程, 2021, 29(5): 129–133.
LIANG Ying. Speed compound control system based on LuGre model friction compensation[J]. Electronic Design Engineering, 2021, 29(5): 129–133.
- [9] 沈孝龙, 王吉芳, 郭子昇, 等. 基于改进差分进化算法的机械臂运动学逆解[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022, (4): 1–6.
SHEN Xiaolong, WANG Jifang, GUO Zisheng, et al. Inverse solution of manipulator kinematics based on improved differential evolution algorithm[J]. Combined Machine Tools and Automated Processing Technology, 2022, (4): 1–6.
- [10] 徐殿胜, 张志锋. 永磁同步电机模型预测转矩控制综述[J]. 微特电机, 2022, 50(03): 60–66.
XU Diansheng, ZHANG Zhifeng. Overview of model predictive torque control for permanent magnet synchronous motors[J]. Micro Motor, 2022, 50(03): 60–66.
- [11] 罗金凤, 王兴波, 张军, 等. 伺服系统中 SVPWM 过调制技术的发展与现状[J]. 机电工程技术, 2022, 51(3): 22–26.
LUO Jinfeng, WANG Xingbo, ZHANG Jun, et al. Development and current situation of SVPWM over modulation technology in servo system[J]. Electromechanical Engineering Technology, 2022, 51(3): 22–26.
- [12] 臧韦菲, 兰巨龙, 胡宇翔, 等. 基于多目标离散差分进化的网络感知虚拟机放置算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(6): 96–102.
ZANG Weifei, LAN Julong, HU Yuxiang, et al. Network-aware virtual machine placement algorithm based on multi-objective discrete differential evolution[J]. Computer Engineering, 2019, 45(6): 96–102.

[作者简介]

崔慧敏 1990年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高精度光学伺服控制、目标检测跟踪、无人系统。

(本文编辑: 杨秀丽)