

DOI:10.11918/201907098

弹药协调器非线性连续时变反馈控制

王 茜,侯保林

(南京理工大学 机械工程学院,南京 210094)

摘要:为解决某弹药协调器的精确快速定位控制问题,研究了一种基于隐式 Lyapunov 函数的连续时变反馈控制方法,该方法在控制律形式上类似 PD 控制,但其中的比例和微分系数取决于系统 Lyapunov 函数,是系统误差变量的可微函数。首先,采用第 2 类 Lagrange 方法建立了系统的动力学模型,在此基础上,针对协调器系统存在的摩擦和小平衡机支反力矩非线性干扰问题,对这两项进行了精细建模,其中摩擦力矩项采用的是 LuGre 模型。建模后,根据动力学模型具体结构设计实验,并通过实验数据采用遗传算法辨识了摩擦力矩和支反力矩模型中的关键参数。为进一步缩短协调器的定位控制时间以提高其协调效率和性能,基于辨识后的模型,在控制中引入了摩擦力矩和支反力矩的前馈补偿项。实验结果表明,所研究的控制方法对负载不确定性有较强的鲁棒性,在负载发生变化的情况下能够始终保证系统的定位时间和定位精度。此外,对于摩擦和小平衡机支反力矩的非线性干扰补偿可以将协调定位时间缩短 25.1%,由为补偿前的 2.07 s 缩短到 1.55 s,同时保证了协调器的运动定位精度,验证了算法的有效性。

关键词: 弹药协调器;连续时变;定位控制;非线性干扰;遗传算法;参数辨识;前馈补偿

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2021)02-0191-10

Nonlinear continuous time-varying feedback control of an ammunition coordinator

WANG Xi, HOU Baolin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For the precise and fast position control of an ammunition coordinator, a continuous time-varying feedback control method based on implicit Lyapunov function was proposed. The method is PD-like in the form of control law, but its proportional and differential coefficients depend on the system Lyapunov function, which are differentiable functions of system error variables. First, the dynamic model of the system was established through the second Lagrange equation. Two main nonlinear disturbance terms of the ammunition coordinator system (i. e., friction torque and balance torque) were modeled in detail, where the friction term was modeled via LuGre model. Then, experiments were designed according to the structure of the dynamic model, and key parameters in the friction torque and balance torque terms were identified through genetic algorithm using experimental data. To further shorten the positioning time of ammunition coordinator and improve its coordination efficiency and performance, the model-based feedforward compensation of the friction torque and balance torque were introduced into the control strategy. Experimental results show that the proposed control method was robust to system payload uncertainty. With varying payload, the positioning time and accuracy of the system were guaranteed. In addition, the nonlinear disturbance compensation of the friction torque and balance torque shortened the positioning time by 25.1%, from 2.07 s to 1.55 s. Meanwhile, the positioning accuracy was guaranteed, which verified the effectiveness of the proposed method.

Keywords: ammunition coordinator; continuous time-varying; position control; nonlinear disturbance; genetic algorithm; parameter identification; feedforward compensation

弹药协调器作为大口径自行火炮弹药自动装填系统中的重要组成部分,安装在火炮车体内弹药仓与炮尾之间,负责将弹药传输到炮尾待装填位置,是

一类特殊的机械臂^[1]. 实现弹药协调器的快速精确定位控制对于提高火炮武器系统的射速从而提升其性能具有重要意义。

现有的火炮武器装备中,弹药自动装填系统包括弹药协调器大多仍采用传统的 PD/PID 控制方法. 然而,弹药协调器是一种复杂的机电一体化系统,在其运动过程中存在负载变化、摩擦、环境外干扰等非线性因素的影响,这些都给协调器的精确稳

收稿日期: 2019-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51175266);江苏省研究生创新项目(KYLX16_0482)

作者简介: 王 茜(1992—),女,博士研究生;
侯保林(1965—),男,教授,博士生导师

通信作者: 侯保林,houbl@njjust.edu.cn

定控制带来了困难,使得传统的 PD/PID 控制方法很难达到控制要求,为解决这一问题,实际系统中只能采用机械抱闸的方式进行辅助定位.这种控制和定位方式虽然保证了运动精度要求,但同时也对弹药协调器的机械结构造成了较大的冲击磨损,缩短了其使用寿命,更严重降低了整个自动装填系统的可靠性.因此,实现各部件的精确鲁棒控制成为弹药自动装填系统研究中的重点和难点问题之一.

类似于弹药协调器这类的机械臂系统在其他领域也有很广泛的应用,例如航天上的自由漂浮空间机械手^[2]、工业机器人^[3]、医疗机器人^[4]等等.对于包含弹药协调器在内的这类机器人来说,运动精度要求都是非常高的,为提高这类机器人的控制性能及可实现性,基于模型的运动控制方法是一种很好的选择,这种方法可以同时将摩擦、扰动等非线性因素纳入考虑,得到真实的控制结果,具有重要的实际意义^[5].

常用的刚性机械系统动力学模型通常由 Newton-Euler 方法、Lagrange 方程法、Kane 方法等来建立.本文基于 Lagrange 方法建立系统的动力学方程,经建模发现影响系统性能的主要非线性因素有两种:系统摩擦和用于平衡弹药协调器重力矩的小平衡机的支反力矩.

摩擦是一个复杂的力学现象,且普遍存在于机械系统中,对机械系统动力学有重要影响,具有非线性、时变等特点,会导致系统出现稳态误差、极限环振荡、滞滑运动、低速爬行等问题,严重影响着系统的性能,因此,对系统的摩擦进行建模和补偿成为机器人控制领域的热点研究问题之一^[6-9].实现摩擦补偿的关键问题和核心步骤是建立合适的摩擦模型.迄今为止,广泛应用的摩擦模型多达数十种,这些模型主要可以分为两大类^[10-11]:静态摩擦模型和动态摩擦模型.前者将摩擦力描述为速度的相对函数,如 Coulomb 模型、Stribeck 模型等;后者将摩擦力描述为相对速度和位移的函数,如 LuGre 模型、Dahl 模型等.相对于静态摩擦模型而言,动态摩擦模型不仅包含了摩擦的静态特性,同时还描述了摩擦的动态特性,能够更为真实地反应摩擦状态.

区别于一般机器人动力学以及运动控制问题,本文研究的弹药协调器系统中存在的另一项特殊的而且具有重要影响的非线性因素是小平衡机的支反力矩.文献[12]用 ADAMS 软件建立了协调器的多体动力学仿真模型,将协调过程中小平衡机的气体变化考虑为绝热过程,将其平衡力简化为一个等效力函数来分析小平衡机气压变化对模型的影响.文献[13]在 RecurDyn 中建立了协调器的仿真模型,

并以小平衡机的支反力和减速器的齿轮齿面磨损作为故障因素研究了其对协调器协调性能的影响.文献[14]在 Simulink 中建立了协调器的动力学和仿真模型,根据协调器协调过程的测试数据,采用区间辨识的方法辨识了包含小平衡机的气体初压和多变指数在内的多个不确定参数.

针对类似弹药协调器这种存在强非线性因素干扰的机器人系统,滑模变结构方法利用控制作用的不连续特性,设计与系统状态相关的滑动模态,并迫使系统按照所设计滑动模态的状态轨迹运动^[15].这种方法中,滑动模态与系统无直接关联,则不受对象参数及扰动变化影响,从理论上讲是一类有效的控制方法^[16-19].除了滑模控制方法,现代鲁棒控制^[20]、自适应控制^[21]、神经网络方法^[22]、模糊控制^[23]等方法也被广泛关注.为更好地处理非线性和不确定性问题,这些方法通常会被结合使用^[24-26]以取得更好的控制效果.本文采用一种基于系统 Lyapunov 函数的非线性控制策略^[27-29]对弹药协调器的定位控制进行研究,这种方法与系统模型及动力学过程密切相关,其从形式上表现为一种连续时变的 PD 控制,其中的比例和微分系数决定于系统的 Lyapunov 函数,是系统误差变量的可微函数,随着系统趋向于控制目标,即误差变量趋近于零,控制增益会趋向于无穷大,但控制力可以始终保持给定的有界约束,可以有效解决系统的不确定性和非线性问题.

本文对某弹药协调器动力学过程进行了深入的分析,并采用 Lagrange 方法详细地建立了其动力学方程.结合实验和理论模型,对于协调器运动过程中对系统性能产生重要影响的摩擦和小平衡机支反力矩这两个非线性项进行了辨识.基于辨识后的摩擦模型和小平衡机支反力矩模型,在控制中引入前馈补偿项.实验结果表明,本文的控制方案在保证定位精度的前提下,显著缩短了协调器的运动定位时间,验证了算法的有效性和正确性.

1 弹药协调器建模

1.1 协调器动力学模型

弹药协调器用于接收弹仓内被推弹器推送出来的弹丸,在控制器的作用下进行弹药协调,使得弹丸轴线与待发射状态下的炮管轴线相平行,再将该弹丸传输到输弹线上,由输弹机输弹入膛,其结构图如图 1(a)所示.协调器的工作原理图如图 1(b)所示,它由两个串励式直流电机并联驱动,减速箱由两级直齿轮传动和一级蜗轮蜗杆传动组成,其中蜗轮与耳轴固联;小平衡机的作用是平衡协调器在协调过

程中的重力矩, 以实现减小电机负载和支撑平稳运动的目的, 其结构上主要由平衡油缸和蓄能器组成。

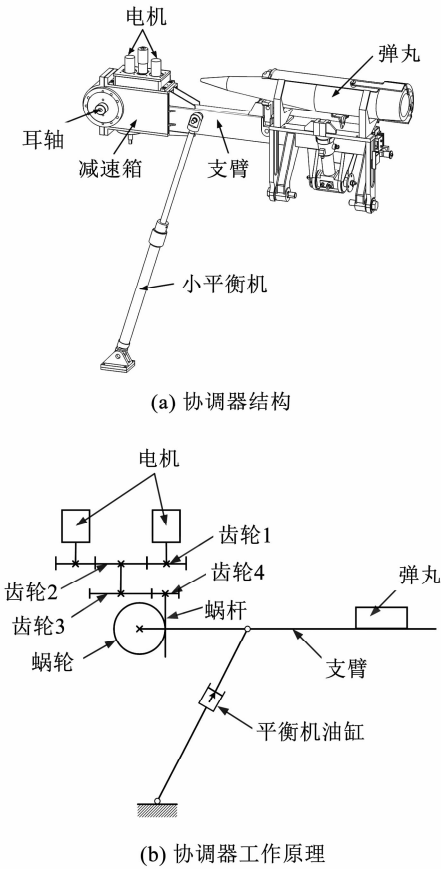


图 1 弹药协调器

Fig. 1 Ammunition coordinator

通过第 2 类 Lagrange 方法, 建立协调器的动力学方程为

$$J_e \ddot{\theta} = M_d i \eta + M_G - M_R - M_f \quad (1)$$

式中: θ 为协调器支臂转角, 相应的, $\ddot{\theta}$ 为支臂的角加速度; $J_e = m_1 L_1^2 + m_2 L_2^2 + I_1 + I_2$ 为系统的等效转动惯量; m_1 、 m_2 分别为协调器支臂和弹丸质量; L_1 、 L_2 分别为支臂和弹丸的质心到耳轴中心的距离; I_1 、 I_2 分别为支臂和弹丸相对质心的转动惯量; $M_d = k_T I$ 为电机的驱动力矩; k_T 为电机的力矩常数; I 为电机电流; M_G 为协调器的重力矩; M_R 为小平衡机的支反力矩; M_f 为系统的摩擦力矩。下文将通过理论建模和辨识的方法来确定。

为方便实验研究, 根据协调器的工作原理, 实验室搭建了协调器的原理样机, 如图 2 所示。

在原理样机中, 支臂通过两个减速器由自带编码器的直流电机驱动, 选用的电机型号为 Maxon-RE50, 减速器 1 选用 Maxon 公司的 GP52C 行星齿轮减速器, 减速比为 230, 减速器 2 选用上海寅通减速器厂生产的 PF90-3 行星齿轮减速器, 减速比为 3, 编码器选用 Maxon 公司的 HEDL5540 光电编码器。

另外, 原理样机中采用气弹簧代替协调器的小平衡机给支臂提供支反力矩, 采用在支臂末端加载的方式代替协调器中的弹丸。

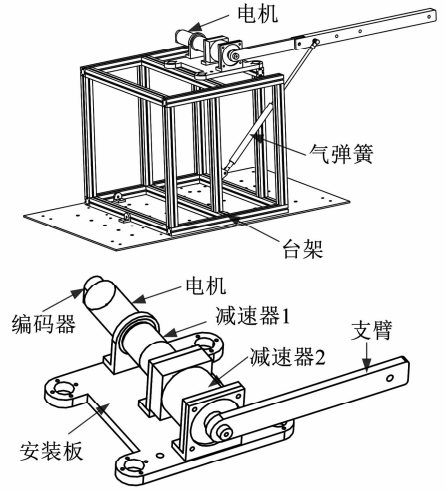


图 2 协调器原理样机结构

Fig. 2 Structure of ammunition coordinator principle prototype

1.2 协调器摩擦建模及参数辨识

本文采用 LuGre 模型对弹药协调器进行摩擦建模, 该模型从微观的角度研究摩擦产生的机理, 在建模中不仅考虑了粘性摩擦和库伦摩擦, 同时还考虑了静态摩擦和 Stribeck 负斜率效应, 是目前较为完善的一种模型。具体表达式如下:

$$\dot{z} = \omega - \frac{\sigma_0}{g(\omega)} z |\omega|, \quad (2)$$

$$g(\omega) = M_{fc} + (M_{fs} - M_{fc}) e^{-|\omega/\omega_s|^{n_s}}, \quad (3)$$

$$M_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 \omega. \quad (4)$$

式中: z 为鬃毛的平均变形; M_f 为系统所受摩擦力矩; σ_0 为鬃毛的刚度; σ_1 为微观阻尼系数; σ_2 为粘性摩擦系数; ω 为支臂角速度; $g(\omega)$ 为描述 Stribeck 效应; M_{fc} 为库伦摩擦力矩; M_{fs} 为静摩擦力矩; ω_s 为 Stribeck 特征速度; n_s 为形状修正系数。

选取模型中待辨识参数为 $\chi = (M_{fc}, M_{fs}, v_s, \sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, n_s)$, 采用遗传算法对这些参数进行辨识。

辨识时, 先断开协调器原理样机中减速输出轴和支臂之间的连接, 则协调器的动力学方程(1)转化为

$$J_e \ddot{\theta} = M_d i \eta - M_f. \quad (5)$$

由式(5)可知, 当 $\ddot{\theta} = 0$ 时, $M_f = M_d i \eta$, 即在匀速运动状态下, 系统的摩擦力矩等于电机经减速后的输出转矩, 结合 $M_d = k_T I$, 则在匀速状态下可以通过电机电流 I 求出系统的摩擦力矩 M_f 。

电机的转速范围为 $[-5\ 950, 5\ 950]$ r/min, 在该转速范围内, 令电机以 38 r/min 为间距的一组恒

定转速 $\omega_j^N, N = 300$ 运动, 并记录对应的不同速度下的平均电流值 $I_j^N, N = 300$. 定义辨识误差 $\text{err}_j(\chi, \omega_j) = i\eta k_T I(\omega_j) - \hat{M}_f(\chi, \omega_j)$, 其中 $\hat{M}_f(\chi, \omega)$ 由 LuGre 模型即式(2)~(4)求得. 取目标函数 $g(\chi, \omega) = \sum_{j=1}^N \text{err}_j^2(\chi, \omega_j)$, 则辨识问题转化为目标函数的极小值问题:

$$\begin{aligned} & \min_{\chi} g(\chi, \omega), \\ \text{s. t. } & \chi \in \chi^I = [\chi^L, \chi^R], \\ & \omega \in \omega^I = [\omega^L, \omega^R]. \end{aligned}$$

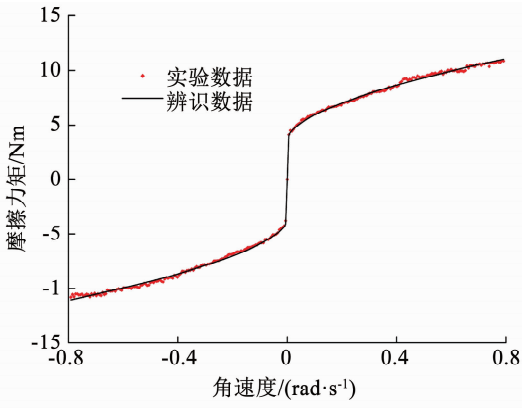


图 3 摩擦力矩辨识和实验结果对比

Fig. 3 Comparison between identification results and experimental data of friction torque

选择个体适应度函数 $f(\chi, \omega) = 1/g(\chi, \omega)$, 取种群大小 $M = 100$, 最大迭代步数 $\text{Gen}_{\max} = 5\,000$, 设定交叉概率 $p_c = 0.9$, 变异概率 $p_m = 0.01$, 进行辨识计算.

图 3 给出了摩擦力矩实验结果和辨识结果的对比图, 图 4 为目标函数在辨识时的收敛过程, 表 1 为参数的具体辨识结果. 由图 3 可以看出辨识结果和实验结果是高度吻合的, 辨识结果合理.

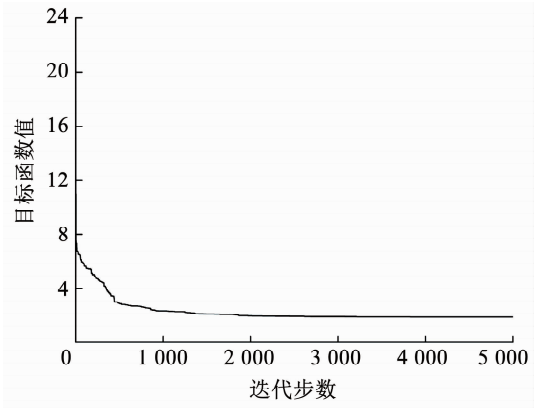


图 4 目标函数收敛过程

Fig. 4 Convergence process of object function

表 1 LuGre 摩擦模型参数辨识结果

Tab. 1 Identification results of parameters in LuGre friction model

辨识参数	M_{fc}/Nm	M_{fs}/Nm	$v_s/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\sigma_0/(\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	$\sigma_1/(\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	$\sigma_2/(\text{Nm} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	n_s
辨识值	44.975 1	3.764 2	12.047 8	1 424.849 3	0.506 1	0.247 0	0.614 7

1.3 小平衡机模型参数辨识

在弹药协调器的工作过程中, 存在带弹和不带弹两种工况, 且同样在带弹这种工况下还存在弹丸种类不同的情形. 由图 1 可知, 这些不同的工作状态和工作模式下, 协调器支臂和弹丸相对回转中心的重力矩区别很大. 为使驱动电机的负载在各工况下能够保持相对恒定, 从而提高协调器工作的平稳性, 采用小平衡机在协调器的协调过程中对协调器支臂产生合适的平衡力矩显得尤为重要.

分别对带弹和不带弹两种工况下, 对协调器绕耳轴的重力矩进行建模, 即

$$M_{G1} = m_1 g L_1 \cos(\theta + \theta_1) + m_2 g L_2 \cos(\theta + \theta_2), \quad (6)$$

$$M_{G2} = m_1 g L_1 \cos(\theta + \theta_1). \quad (7)$$

式中: m_1 为协调器支臂质量; m_2 为弹丸质量; L_1 为协调器支臂质心到耳轴中心的距离; L_2 为位于协调器上的弹丸质心到耳轴中心的距离; θ_1, θ_2 分别为协调器协调角度在 0° 时支臂质心和弹丸质心与耳轴中心连线和水平线之间的夹角.

由式(6)、(7)可知, 在带弹和不带弹两种情况下的重力矩差异较大, 若没有小平衡机提供一定的平衡力矩, 则会导致电机负载的较大差异, 这就会提高电机的负载性能要求. 基于平衡性考虑, 小平衡机提供的平衡力矩应介于式(6)、(7)两种工况下的重力矩之间.

小平衡机由差动液压活塞缸和气囊式蓄能器组成, 在原理样机中, 使用气弹簧代替真实协调器中的小平衡机给支臂提供平衡力矩, 采用在支臂末端加载的方式模拟协调器带弹和不带弹两种工况. 小平衡机的支反力矩取决于平衡油缸的压力以及协调器的协调角度, 具体表达式为

$$M_R = L_R p_0 S [V_0 / (V_0 - \Delta L S)]^n. \quad (8)$$

式中: L_R 为小平衡机支反力矩的力臂, 即耳轴中心到小平衡机的距离; p_0 为蓄能器的初始压强; S 为平衡油缸活塞的面积; V_0 为气体的初始容积; ΔL 为活塞移动距离; n 为气体多变指数. 其中, S, V_0 为已知量, $L_R, \Delta L$ 与支臂的角位移相关, 可以根据协调器的

基本几何尺寸以及支臂在运动过程中的位置角度关系求得。

模型中, p_0, n 为待辨识参数, 和摩擦一样, 这里采用遗传算法对该参数进行辨识. 连接上原理样机中之前断开的支臂, 则系统的运动过程由动力学方程(1)描述, 由式(1)可知, 当 $\ddot{\theta} = 0$ 时, 可以得到:

$$M_R = M_d i \eta + M_C - M_f,$$

则, 在匀速状态下, 根据电机电流, 式(6)、(7)重力矩 M_C , 再带入协调器摩擦模型及参数辨识中辨识出的摩擦力矩 M_f , 就可以求出小平衡机的支反力矩。

同协调器摩擦建模及参数辨识中所述, 令电机在转速范围内以一组恒定转速 ω_j^N 做匀速运动, 并记录不同速度下的平均电流值 I_j^N . 定义辨识参数 $\chi = [p_0, n]$, 辨识误差 $err_j(\chi, \omega_j, \theta_j) = i \eta k_T I(\omega_j) + M_C(\theta_j) - \hat{M}_f(\chi, \omega_j) - \hat{M}_R(\chi, \theta_j)$, 其中 $\hat{M}_f(\chi, \omega_j)$ 由协调器摩擦模型及参数辨识中辨识后的 LuGre 模型求得, $\hat{M}_R(\chi, \theta_j)$ 则根据式(8)求得. 取目标函数

$g(\chi, \omega, \theta) = \sum_{j=1}^N err_j^2(\chi, \omega_j, \theta_j)$, 辨识问题转化为目标函数的极小值问题:

$$\begin{aligned} & \underset{\chi}{\text{ming}}(\chi, \omega, \theta), \\ \text{s. t. } & \chi \in \chi^l = [\chi^L, \chi^R], \\ & \omega \in \omega^l = [\omega^L, \omega^R], \theta \in \theta^l = [\theta^L, \theta^R]. \end{aligned}$$

设定种群大小为 $M = 50$, 最大迭代步数为 $Gen_{\max} = 100$ 进行辨识计算。

气弹簧初压辨识结果为 $p_0 = 1.8007 \times 10^6$ Pa, 气体多变指数辨识结果为 $n = 1.0081$, 图5给出了小平衡机支反力矩实验结果和辨识结果的对比图, 图6为目标函数在辨识时的收敛过程. 由图5、6可以看出, 辨识结果和实验结果高度吻合, 说明辨识后的小平衡机支反力矩项可以有效反映小平衡机在协调过程中的真实情况。

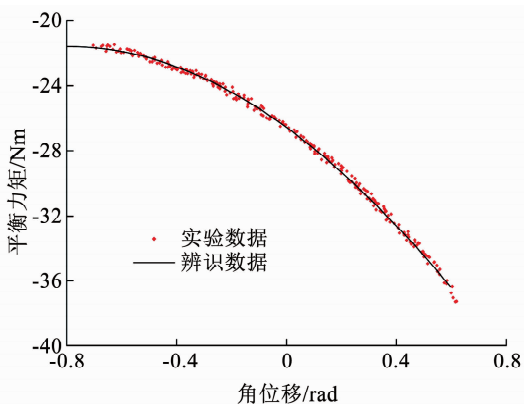


图5 小平衡机支反力矩辨识和实验结果对比

Fig. 5 Comparison between identification results and experimental data of balance torque

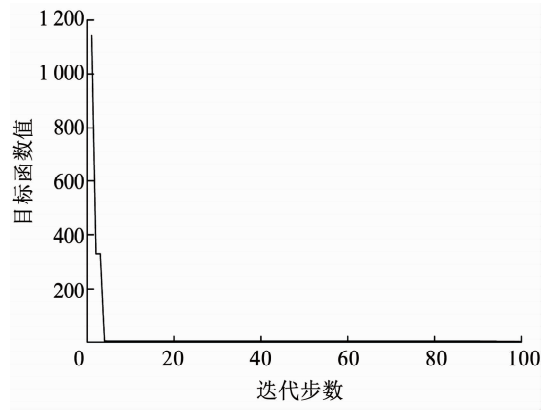


图6 目标函数收敛过程

Fig. 6 Convergence process of object function

2 控制器设计和稳定性分析

为方便控制器设计以及稳定性证明, 记 $U = M_d i \eta, S = M_C - M_R - M_f$, 记广义坐标 $q = \theta$, 则动力学方程(1)重新整理成如下形式:

$$J_e \ddot{q} = U + S. \quad (9)$$

方程(9)存在如下性质:

1) 等效转动惯量 J_e 有界, 即:

$$\lambda_1 \leq J_e \leq \lambda_2, \quad 0 < \lambda_1 \leq \lambda_2. \quad (10)$$

2) 重力矩、平衡力矩、摩擦力矩组成的复合项大小有界, 即

$$|S| \leq S_0, \quad (11)$$

其中, $S_0 > 0$.

此外, 基于实际工程应用的考虑, 本文假设式(9)中的控制力矩也是大小有界的, 即: $|U| \leq U_0$, 其中, $U_0 > 0$.

记系统的期望位置为 q_d , 期望速度为 \dot{q}_d , 定义协调器的角位移误差为 $e = q - q_d$, 则 $\dot{e} = \dot{q} - \dot{q}_d$, 那么对于系统(9), 存在如下连续时变反馈控制律:

$$U = -k_d \dot{e} - k_p e, \quad (12)$$

其中:

$$k_d = J_e \alpha, \quad \alpha(e, \dot{e}) = \frac{U_0}{4} \sqrt{\frac{6}{\lambda_2 V(e, \dot{e})}}, \quad (13)$$

$$k_p = \beta, \quad \beta(e, \dot{e}) = \alpha^2 \lambda_2. \quad (14)$$

$V(e, \dot{e})$ 为系统 Lyapunov 函数, 其表达式为

$$V(e, \dot{e}) = \frac{1}{2} J_e \dot{e}^2 + \frac{1}{2} k_p e^2 + \frac{1}{2} k_d e \dot{e}. \quad (15)$$

控制律增益 k_d, k_p 和系统 Lyapunov 函数 V 由式(13)~(15)明确定义, 三者之间的关系是隐式的. 随着系统误差趋向于0, 即 $V(e, \dot{e})$ 趋近于0, 控制增益 k_p 和 k_d 将趋于无穷大, 尽管如此, 控制力也可以满足以上提出的有界假设。

证明过程如下。

首先,引入如下变量:

$$\begin{aligned} x &= V^{1/2}(e, \dot{e}), \quad \xi = 2\sqrt{2J_e}e^2, \\ \eta &= \frac{2\sqrt{6}U_0}{\sqrt{\lambda_2}}J_e\dot{e}e, \quad \gamma = \sqrt{3}U_0|e|. \end{aligned} \quad (16)$$

显然,对于式(16),当 $(e, \dot{e}) \neq 0$ 时,有

$$\xi^2 + \gamma^2 > 0. \quad (17)$$

此外,根据柯西不等式,有

$$\eta^2 = \frac{24U_0^2}{\lambda_2}(J_e\dot{e}e)^2 \leq 24U_0^2J_e\dot{e}^2e^2 = \xi^2\gamma^2, \quad (18)$$

即

$$|\eta| \leq \xi\gamma. \quad (19)$$

将式(13)、(14)和式(16)代入式(15),可以得到方程:

$$16x^4 - \xi^2x^2 - \eta x - \gamma^2 = 0. \quad (20)$$

对于一元四次方程式(20),有如下定理:

定理 1 满足式(17)和式(19)的方程 $f(x) = 16x^4 - \xi^2x^2 - \eta x - \gamma^2$ 总存在一个重数为1的正实根.

接下来证明 Lyapunov 函数 $V(e, \dot{e})$ 的正定性,及其导数的负定性.

根据柯西不等式, Lyapunov 函数表达式的最后一项中 $k_d\dot{e}e$ 均满足:

$$\begin{aligned} |\alpha J_e\dot{e}e| &= |\alpha| \sqrt{(J_e e^2)(J_e \dot{e}^2)} \leq \\ &\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \frac{1}{2}\alpha^2J_e e^2 \leq \\ &\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \frac{1}{2}\beta e^2. \end{aligned} \quad (21)$$

联立式(15)和式(21),可得:

$$\frac{1}{4}(J_e\dot{e}^2 + \beta e^2) \leq V \leq \frac{3}{4}(J_e\dot{e}^2 + \beta e^2). \quad (22)$$

由式(22)可知,对于任意 $(e, \dot{e}) \neq 0, V(e, \dot{e})$ 全局正定.

对 $V(e, \dot{e})$ 求导,可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= J_e\dot{e}\ddot{e} + \frac{1}{2}\dot{\beta}e^2 + \beta\dot{e}e + \\ &\frac{1}{2}\dot{\alpha}J_e\dot{e}e + \frac{1}{2}\alpha J_e\ddot{e}e + \frac{1}{2}\alpha J_e\dot{e}^2, \end{aligned} \quad (23)$$

其中:

$$\dot{\alpha} = -\frac{1}{2}\frac{U_0}{4\sqrt{\lambda_2}}J_eV^{-3/2}\dot{V} = -\frac{\alpha}{2}\frac{1}{V}\dot{V}, \quad (24)$$

$$\dot{\beta} = -\frac{3U_0^2}{8}V^{-2}\dot{V} = -\frac{\beta}{V}\dot{V}, \quad (25)$$

$$\ddot{e} = \ddot{q} - \ddot{q}_d = \frac{1}{J_e}(U + S). \quad (26)$$

将式(12)、式(24)~(26)代入式(23),可得:

$$\dot{V} = -\alpha\left(\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \frac{1}{2}J_e\alpha\dot{e}e + \frac{1}{2}\beta e^2\right) -$$

$$\frac{\dot{V}}{2V}(\beta e^2 + \frac{1}{2}J_e\alpha\dot{e}e) + S\left(\dot{e} + \frac{1}{2}\alpha e\right), \quad (27)$$

进一步化解式(27),可得:

$$B(e, \dot{e})\dot{V} = -\alpha V + S\left(\dot{e} + \frac{1}{2}\alpha e\right), \quad (28)$$

其中

$$B(e, \dot{e}) = \frac{1}{V}\left(\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \beta e^2 + \frac{3}{4}J_e\alpha\dot{e}e\right). \quad (29)$$

根据柯西不等式与式(10),可得:

$$\begin{aligned} \left(\dot{e} + \frac{1}{2}\alpha e\right)^2 &= \left(\frac{U_0}{8}\sqrt{\frac{6}{\lambda_2}}V e + \dot{e}\right)^2 \leq \\ &\dot{e}^2 + \frac{U_0}{4}\sqrt{\frac{6}{\lambda_2}}V e\dot{e} + \frac{3U_0^2}{32J_eV}e^2 = \\ &\frac{2}{J_e}\left(J_e\dot{e}^2 + \frac{U_0}{8}\sqrt{\frac{6}{\lambda_2}}J_e e + \frac{3U_0^2}{16V}e^2\right) = \\ &\frac{2}{J_e}V \leq \frac{2}{\lambda_1}V. \end{aligned} \quad (30)$$

根据式(11)与式(30),可得:

$$\left|S\left(\dot{e} + \frac{1}{2}\alpha e\right)\right| \leq S_0\sqrt{\frac{2}{\lambda_1}}V^{1/2}, \quad (31)$$

将式(31)代入式(28),可得:

$$B(e, \dot{e})\dot{V} \leq -\alpha V + S_0\sqrt{\frac{2}{\lambda_1}}V^{1/2}. \quad (32)$$

接下来求 $B(e, \dot{e})$ 的上、下界. 根据式(21)和式(29)上、下界分别可得:

$$\begin{aligned} B(e, \dot{e})_{\text{下}} &= \frac{1}{V}\left(\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \beta e^2 + \frac{3}{4}\alpha J_e\dot{e}e\right) \geq \\ &\frac{1}{V}\left(\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \beta e^2 - \frac{3}{4}\left(\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \frac{1}{2}\beta e^2\right)\right) = \\ &\frac{1}{8V}(J_e\dot{e}^2 + 5\beta e^2) > 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B(e, \dot{e})_{\text{上}} &= \frac{1}{V}\left(\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \beta e^2 + \frac{3}{4}\alpha J_e\dot{e}e\right) \leq \\ &\frac{1}{V}\left(\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \beta e^2 + \frac{3}{4}\left(\frac{1}{2}J_e\dot{e}^2 + \frac{1}{2}\beta e^2\right)\right) = \\ &\frac{1}{V}\left(\frac{7}{8}J_e\dot{e}^2 + \frac{11}{8}\beta e^2\right) \leq \frac{11}{8V}(J_e\dot{e}^2 + \beta e^2). \end{aligned}$$

可见, $B(e, \dot{e})$ 始终为正,且大小有界. 进一步改写式(32),可得:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{B(e, \dot{e})}\left(\frac{U_0}{4}\sqrt{\frac{6}{\lambda_2}} - S_0\sqrt{\frac{2}{\lambda_1}}\right)V^{1/2} \quad (33)$$

由式(33)可知,若想使 \dot{V} 全局负定, U_0 和 S_0 之间关系需满足:

$$U_0 > \frac{4}{3}S_0\sqrt{\frac{3\lambda_2}{\lambda_1}}.$$

由此, Lyapunov 函数 $V(e, \dot{e})$ 的正定性及其导数的负定性证明完毕,系统在点 $(e, \dot{e}) = (0, 0)$ 处全局

渐近稳定.

3 实验验证

为验证上述控制算法的有效性以及摩擦和平衡力矩补偿对控制算法性能的提升和改善,采用实验室协调器原理样机进行实验研究,如图 7 所示. 控制器选用与 Maxon 电机配套的 EPOS2 数字位置控制器,该控制器通过 USB 连接到上位机(PC),以此传输通讯数据并执行控制指令.

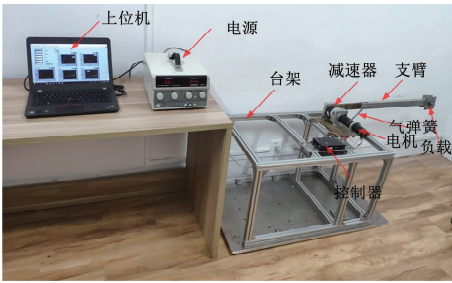


图 7 协调器原理样机实验平台

Fig. 7 Experiment platform of ammunition coordinator principle prototype

采用上文辨识出的基于模型的摩擦和气弹簧支反力矩设计补偿环节,补偿后的控制系统描述为

$$J_c \ddot{\theta} = U + M_C - M_R - M_f + \dot{M}_R + \dot{M}_f.$$

表 2 系统参数及控制参数

Tab. 2 Values of system parameters and control parameters

参数	m_1/kg	m_2/kg	$I_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$I_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	L_1/m	L_2/m	$k_T/(\text{mNm} \cdot \text{A}^{-1})$	
取值	2.95	{0, 0.44, 0.88}	0.174 6	{0.000 297 <i>i</i> , <i>i</i> = 0, 1, 2}	0.38	0.83	38.5	
参数	η	$\theta_1/(\text{°})$	$\theta_2/(\text{°})$	S/m^2	V_0/m^3	$g/(\text{N} \cdot \text{kg}^{-1})$	U_0/Nm	$\lambda_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
取值	0.9	0	0	7.85×10^{-5}	8.792×10^{-5}	9.8	90	20

系统初始状态为: $(q, \dot{q}) = (0, 0)$, 系统控制目标为: $(q_d, \dot{q}_d) = (0.698, 0)$, 即目标角度为 40° .

第 1 组实验以机械臂末端施加一个配重块为例,给出对比结果图,如图 9 ~ 12 所示.

图 9 ~ 12 分别给出了支臂角位移、角速度、系统 Lyapunov 函数、控制电流的有无补偿对比曲线,其中,红色曲线是加摩擦和支反力矩补偿情况下的响应曲线,蓝色曲线是未加补偿情况下的响应曲线.从图中可以看出,在有补偿情况下,系统在 1.55 s 的时间内收敛到目标状态,而相应的未补偿状态下则需要 2.07 s 才能收敛到目标状态,说明补偿有效提高了控制系统的动态响应速度,缩短了协调器的定位时间,这对于提升协调器的协调效率以至于提升整个弹药装填系统的装填效率具有工程实践意义.

控制流程图如图 8 所示,采用的 Maxon 电机自身带有位置控制模式、速度控制模式、电流控制模式等一系列模块化控制策略,其基本原理为三环控制.其中,电流环采用 PI 控制,可以单独使用.本实验采用电机的电流控制模式,即采用系统内嵌的 PI 控制作为电流环,同时采用本文的控制方法作为位置控制环.

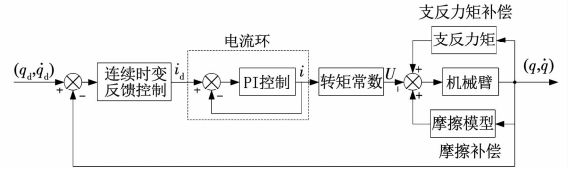


图 8 基于模型的摩擦和支反力矩前馈补偿控制流程

Fig. 8 Flow chart of model-based friction and balance torque feedforward compensation control

实验分为两组,第 1 组考虑基于模型的摩擦力矩和气弹簧支反力矩补偿对控制性能的影响,即做无补偿和加补偿情况下的对比实验;第 2 组在加补偿的情况下,考虑负载变化对控制性能的影响,施加负载情况为:1) 无负载;2) 支臂端加一个负载质量块,质量为 0.44 kg;3) 支臂末端加两个负载质量块,质量为 0.88 kg.

其他系统参数以及控制参数取值见表 2.

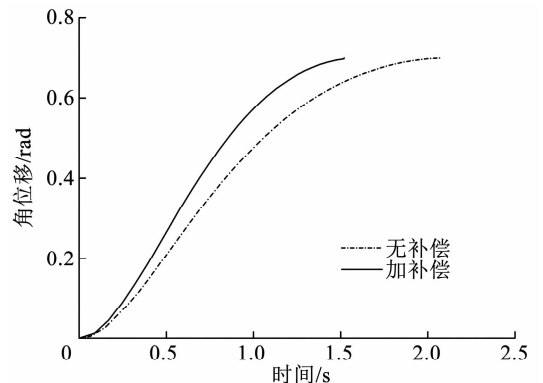


图 9 支臂角位移

Fig. 9 Angular displacement of transfer arm

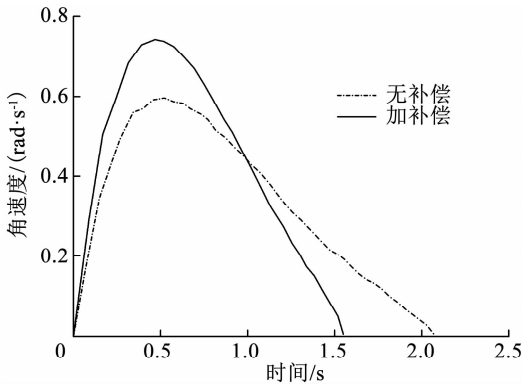


图 10 支臂角速度

Fig. 10 Angular velocity of transfer arm

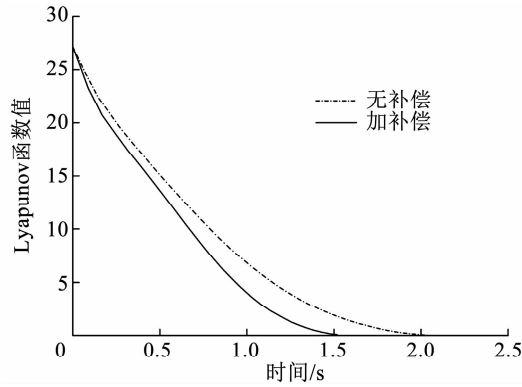


图 11 系统 Lyapunov 函数值

Fig. 11 Values of system Lyapunov function

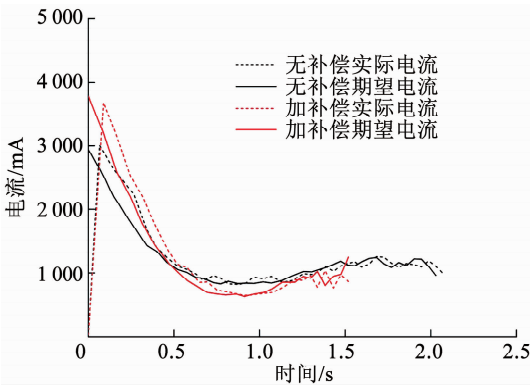


图 12 控制电流

Fig. 12 Control current

第 2 组实验结果如图 13 ~ 17 所示.

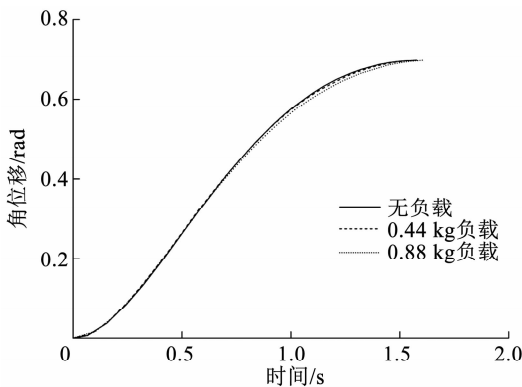


图 13 支臂角位移

Fig. 13 Angular displacement of transfer arm

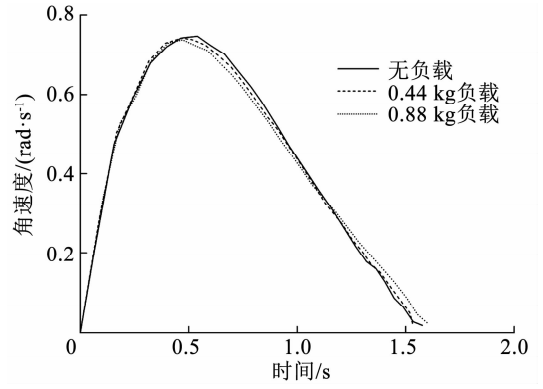


图 14 支臂角速度

Fig. 14 Angular velocity of transfer arm

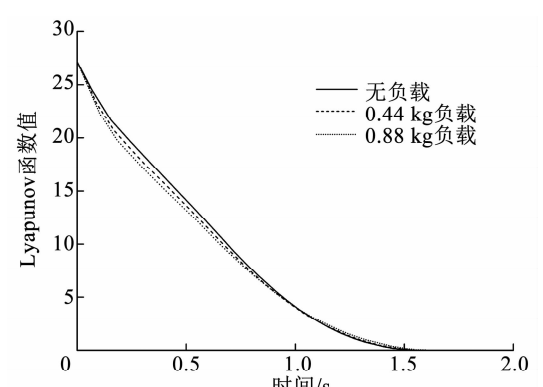


图 15 系统 Lyapunov 函数值

Fig. 15 Values of system Lyapunov function

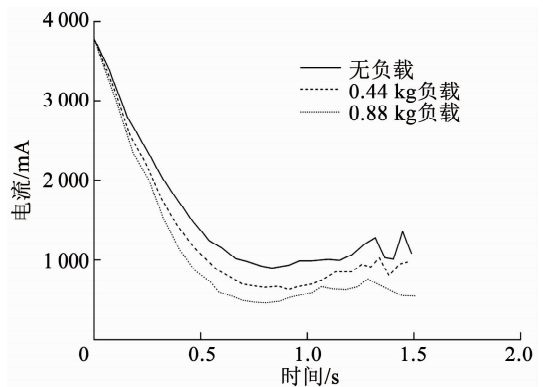


图 16 期望电流

Fig. 16 Desired current

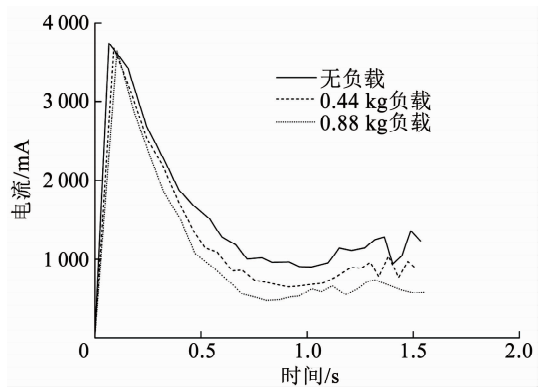


图 17 实际电流

Fig. 17 Actual current

图13~17给出的是不同负载情况下机械臂的运动响应,分别为支臂角位移曲线、支臂角速度曲线、系统Lyapunov函数曲线、期望电流曲线和实际电流曲线。可以看出,在负载发生变化的情况下,系统收敛到目标状态所需要的时间基本没有差别,由此说明了本文中的控制方法对系统惯量变化的鲁棒性。此外,图中,唯一有明显差别的是控制电流,负载质量越大,控制过程中所需要的控制电流反而越小,这是因为在系统的运动过程中,重力做正功,这一点在系统的动力学方程式(1)中体现为重力矩项和电机驱动力矩项符号相同,也即力矩方向相同。

以上两组实验分别说明了本文中基于模型和辨识的摩擦和支反力矩的补偿可以有效提高控制系统的性能以及控制系统对系统负载变化的鲁棒性。相应的,对于实际弹药协调器系统来说,这就意味着本文的方法可以有效解决协调器提高协调速度的问题以及不同带弹情况下的精确定位控制问题,具有工程上的现实指导意义。

4 结 论

1)针对复杂非线性弹药协调器的快速精确位置控制问题,采用一种基于隐式Lyapunov函数的连续时变反馈控制算法设计了位置控制器,实现了其协调定位。

2)过第2类Lagrange方法建立了系统的动力学方程,考虑到系统摩擦力矩以及小平衡机支反力矩会对协调器的运动过程产生影响,对这两项进行了精细建模,其中,摩擦力矩项采用的是LuGre模型。

3)根据动力学方程结构设计实验,根据实验数据采用遗传算法对摩擦模型和小平衡机支反力矩模型中的关键参数进行了辨识,基于辨识后的模型在控制中引入了前馈补偿项。

4)控制方案从控制律的形式上来看类似于PD控制方法,但其中的比例和微分系数取决于系统的Lyapunov函数,是时变连续的。

5)实验结果表明,设计的控制方案可以保证系统在不同负载条件下几乎以同样的时间和运动性能达到控制目标,具有良好的鲁棒性。此外,基于模型的摩擦和支反力矩补偿显著缩短了系统的定位时间,提高了协调器系统的协调性能。

参 考 文 献

[1]侯保林,樵军谋,刘琮敏. 火炮自动装填[M]. 北京:兵器工业出版社,2010:36
HOU Baolin, QIAO Junmou, LIU Congmin. Ammunition automatic loading system of howitzer [M]. Beijing: Publishing House of Ordnance Industry, 2010: 36

[2]RYBUS T, SEWERYN K, SASIADEK J Z. Control system for free-floating space manipulator based on nonlinear model predictive control[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 85(3/4): 491. DOI: 10.1007/s10846-016-0396-2

[3]FAULWASSER T, WEBER T, ZOMETA P, et al. Implementation of nonlinear model predictive path-following control for an industrial robot[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(4): 1505. DOI: 10.1109/TCST.2016.2601624

[4]DO T N, TJAHHJOWIDODO T, LAU M W S, et al. Nonlinear friction modelling and compensation control of hysteresis phenomena for a pair of tendon-sheath actuated surgical robots[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 60/61: 770. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.01.001

[5]JARZEBOWSKA E. Model-based tracking control of nonlinear systems[M]. New York: CRC Press, 2016: 2. DOI: 10.1201/b12262

[6]GUO Kai, PAN Yongping, YU Haoyong. Composite learning robot control with friction compensation: a neural network-based approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7841. DOI: 10.1109/TIE.2018.2886763

[7]CHEN Qiang, TAO Liang, NAN Yurong, et al. Adaptive nonlinear sliding mode control of mechanical servo system with LuGre friction compensation[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2016, 138(2): 021003. DOI: 10.1115/1.4032068

[8]吴晓敏,刘瞰东,贺苗,等. 机器人关节摩擦建模与补偿研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 44
WU Xiaomin, LIU Tundong, HE Miao, et al. Research on friction modeling and compensation of robot manipulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 44. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1803247

[9]PAN Yongping, WANG Huiming, LI Xiang, et al. Adaptive command-filtered back-stepping control of robot arms with compliant actuators[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(3): 1149. DOI: 10.1109/TCST.2017.2695600

[10]丁千,翟红梅. 机械系统摩擦动力学研究进展[J]. 力学进展, 2013, 43(1): 112
DING Qian, ZHAI Hongmei. Research progress on frictional dynamics in mechanical systems [J]. Advances in Mechanics, 2013, 43(1): 112. DOI: 10.6052/1000-0992-12-039

[11]PENNESTRI E, ROSSI V, SALVINI P, et al. Review and comparison of dry friction force models[J]. Nonlinear Dynamics, 2016, 83(4): 1785. DOI: 10.1007/s11071-015-2485-3

[12]李伟,马吉胜,马杨,等. 协调器故障仿真及应用研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(3): 36
LI Wei, MA Jisheng, MA Yang, et al. Study on fault simulation and application of coordinator [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2009(3): 36. DOI: 10.19323/j.issn.1673-6524.2009.03.010

[13]王浩亦,冯广斌,孙华刚,等. 协调器动力学分析及故障仿真研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2013(1): 59
WANG Haoyi, FENG Guangbin, SUN Huagang, et al. Dynamics analysis and fault simulation study on coordinator [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2013(1): 59. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6524.2013.01.015

[14]赵抢抢,侯保林. 火炮弹药协调器区间不确定参数辨识[J]. 兵工学报, 2017, 38(1): 35

- ZHAO Qiangqiang, HOU Baolin. Identification of interval uncertainty parameters of a howitzer shell transfer arm [J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(1): 35. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2017.01.005
- [15] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2015
- LIU Jinkun. Sliding mode control design and MATLAB simulation [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015
- [16] BAEK J, JIN Maolin, SOOHEE H. A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(6): 3628. DOI: 10.1109/TIE.2016.2522386
- [17] CUI Rongxin, CHEN Lepeng, YANG Chenguang, et al. Extended state observer-based integral sliding mode control for an underwater robot with unknown disturbances and uncertain nonlinearities [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6785. DOI: 10.1109/TIE.2017.2694410
- [18] 王尧尧, 顾临怡, 陈柏, 等. 水下机器人-机械手系统非奇异终端滑模控制 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(5): 934
- WANG Yaoyao, GU Linyi, CHEN Bai, et al. Nonsingular terminal sliding mode control of underwater vehicle-manipulator system [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2018, 52(5): 934. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2018.05.013
- [19] WANG Yaoyao, GU Linyi, XU Yihong, et al. Practical tracking control of robot manipulators with continuous fractional-order nonsingular terminal sliding mode [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10): 6194. DOI: 10.1109/TIE.2016.2569454
- [20] 梅生伟, 申铁龙, 刘康志. 现代鲁棒控制理论与应用 [M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008: 120
- MEI Shengwei, SHEN Tielong, LIU Kangzhi. Modern robust control theory and application [M]. 2nd ed. Beijing: Tsing University Press, 2008: 120
- [21] AROM K J, WITTENMARK B. Adaptive control [M]. Second edition. New York: Courier Corporation, 2013
- [22] 尹恩. 非线性系统的神经网络控制算法研究及其应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016
- YIN Zhao. Adaptive neural network control of a class of unknown nonlinear systems and their Applications [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. DOI: 10.7666/d.D00990887
- [23] DE SILVA C W. Intelligent control; Fuzzy logic applications [M]. Boca Raton: CRC press, 2018. DOI: 10.1201/9780203750513
- [24] 葛媛媛, 张宏基. 基于自适应模糊滑模控制的机器人轨迹跟踪算法 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(5): 746
- GE Yuanyuan, ZHANG Hongji. Trajectory tracking algorithm for robot based on adaptive fuzzy sliding mode control [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(5): 746. DOI: 10.13382/j.jemi.2017.05.014
- [25] VEYSI M, SOLTANPOUR M R, KHOOBAN M H. A novel self-adaptive modified bat fuzzy sliding mode control of robot manipulator in presence of uncertainties in task space [J]. *Robotica*, 2015, 33(10): 2045. DOI: 10.1017/S0263574714001258
- [26] YANG Yueneng, YAN Ye. Neural network approximation-based nonsingular terminal sliding mode control for trajectory tracking of robotic airships [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 54: 192. DOI: 10.1016/j.ast.2016.04.021
- [27] GUO Yufei, HOU Baolin. Implicit Lyapunov function-based tracking control of a novel ammunition autoloader with base oscillation and payload uncertainty [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2017, 87(2): 741. DOI: 10.1007/s11071-016-3072-y
- [28] WANG Xi, HOU Baolin. Trajectory tracking control of a 2-DOF manipulator using computed torque control combined with an implicit Lyapunov function method [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(6): 2803. DOI: 10.1007/s12206-018-0537-6
- [29] CHERNOUSKO F L, ANANIEVSKI I M, RESHMIN S A. Control of nonlinear dynamical systems: methods and applications [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 213. DOI: 10.1007/978-3-540-70784-4

(编辑 张 红)