

基于快速终端滑模控制的大惯量火炮 随动控制算法研究

郝坤鹏^{1,2}, 杨国来¹

(1.南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2.西安昆仑工业(集团)有限责任公司, 陕西 西安 710043)

摘要:某大型火炮的机械结构复杂,各部件耦合度高,由于受到材料刚性、加工和装配工艺等限制,电机轴架位与火炮实际架位间的误差不能完全消除,尤其在高速运动中,误差的非线性变化更为明显,容易导致运动过程中出现“抖振”现象。通过对火炮随动控制系统进行建模,建立了从电机控制到火炮实际架位间的驱动方程,提出了基于快速终端滑模控制的随动控制算法,并在火炮系统中进行了验证;实验表明所提算法有效消除了“抖振”现象,使控制端能够直接使用火炮实际架位作为控制变量,提高了火炮随动控制精度和运行稳定性。

关键词:随动控制算法;滑模控制;齿隙;非线性控制

中图分类号:TJ391; TP317

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2023)04-0697-07

在某大型火炮伺服控制系统中,随动计算机通过驱动器带动电机运转,再通过减速器、齿轮等联动,带动火炮运动。由于火炮惯量较大、机械结构复杂,受到当前加工工艺和材料刚性的限制,电机轴架位与火炮齿圈架位间的误差不能完全消除。如果直接使用火炮齿圈架位作为电机的控制量,容易导致火炮运行过程中出现“抖振”现象。为了使系统的输出以大齿圈架位作为控制目标,实现指向更精确的位置控制,需要采取对应措施进行处理。

本文以某型高速转管火炮作为研究对象,应用经过改进的智能控制方法,设计了一套自适应的控制系统,并进行了状态响应分析和实物验证,结果表明新的闭环随动控制系统具有较好的稳定性和自适应能力。

1 伺服系统模型

1.1 系统结构

本文研究的火炮伺服系统结构如图1所示,运行时由随动计算机向驱动器发出控制指令,驱动双电机带动各自的减速器运动,减速器后固连的齿轮

系统带动火炮运动,随动计算机通过安装在电机轴和齿圈的架位传感器进行周期采样,通过随动控制算法,控制火炮的运动转向。

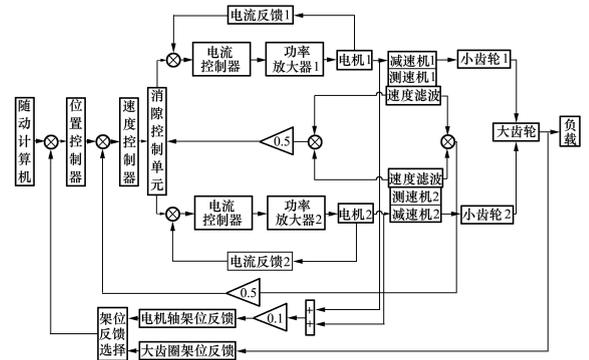


图1 火炮伺服系统结构

1.2 系统分析

电机与减速器结构间以及各传动齿轮间由于加工材料和工艺、装配等原因,不可避免地存在齿隙,导致电机轴架位与载体实际架位间存在差异。如果单纯采用载体实际架位作为随动控制的输入变量,必然会造成反馈的齿圈架位不能如实反映电机轴输出的控制效果,导致随动控制过程的失效,出现载体

剧烈抖动的现象。为了消除这一现象,国内的郭健和朱胜等^[1-2]分别针对输入含齿隙非线性的系统设计了自适应控制器,对齿隙非线性采取了参数化处理,使用光滑非线性函数逼近齿隙非线性,两者本质上都属于对齿隙非线性不同程度近似。马艳玲等^[3]提出了基于反步自适应控制的伺服系统齿隙补偿方法,通过选择 Lyapunov 函数,逐步递推,设计了基于状态反馈的自适应控制器。上述 2 种方法偏重于理论分析,实时性不强,没有针对系统参数调节方法的分析。滑模控制(sliding mode control, SMC)因具有算法相对简单、对系统参数变化不敏感等优点开始逐渐在机器人机械臂控制、水下无人驱动设备控制、船舶航迹控制等实际工程中得到应用^[4-6]。传统滑模控制的问题是收敛速度无法保证,最终的误差只能趋近于平衡状态,在实际应用中无法完全克服抖振问题,因而文献[7]提出了终端(terminal)滑模控制思想,使用 sat 等非线性化函数构建滑模面,使误差在有限时间内收敛。然而该算法严重依赖滑模面参数的选择,不恰当的参数会导致系统运行过程中出现“奇异”现象,加重“抖振”。文献[8]提出了非奇异快速终端滑模控制,通过对滑模面进行非线性分析,保证在不同阶段的收敛速度。当控制系统到达滑模面时,会出现控制参数的高频切换,机械系统不可避免地出现抖振,如何能够快速抑制抖振,成为了重要的研究方向。文献[9]将模糊控制与滑模控制相结合构建控制器,通过模糊特性实现开关增益的幅度调节,从而使系统的抖振得到削弱。综上所述,本文利用非奇异的快速终端滑模控制算法,设计了一种针对特定火炮的随动控制算法,采用经过改进的快速终端滑模控制算法,能够使跟踪误差快速收敛,同时削弱载体的抖振现象,提高了系统运行的精度和稳定度。

2 火炮伺服系统运动模型

根据文献[10],电机的电磁转矩平衡方程为

$$K_{dn}I_n = (J_{dn} + J_{jn})\ddot{\theta}_n + b_{dn}\dot{\theta}_n + \frac{M_n}{i} \quad (1)$$

式中: K_{dn} 为电机的力矩系数; I_n 为驱动电流; J_{dn} 与 b_{dn} 分别为电机的转动惯量和等效黏性摩擦因数; J_{jn} 为减速机的转动惯量; θ_n 为电机轴的转角; M_n 为小齿轮和电机轴之间的弹性力矩; i 为减速机的减速比。

根据小齿轮的受力分析可得,小齿轮的动力学方程为

$$M_n = J_{cn}\ddot{\theta}_{cn} + b_{cn}\dot{\theta}_{cn} + M_{cn} \quad (2)$$

b_{cn} 为小齿轮的等效摩擦因数, J_{cn} 为小齿轮的转动惯量, θ_{cn} 为小齿轮的转角, M_{cn} 为大小齿轮间的弹性力矩。

根据大小齿轮的啮合原理,大齿轮和小齿轮之间的力矩平衡方程为

$$i_m M_{cn} = J_m\ddot{\theta}_m + b_m\dot{\theta}_m = i_m K_{in}(\theta_{cn} - i_m\theta_m) \quad (3)$$

式中: J_m 为大齿轮加载体的转动惯量; b_m 为大齿轮的黏性摩擦因数; θ_m 为大齿轮的转角; K_{in} 为大小齿轮之间的弹性系数; θ_m 为大齿轮的转角; i_m 为大小齿轮间的传动比。由于 θ_n 与 θ_{cn} 有

$$\theta_n = i\theta_{cn}, \quad \dot{\theta}_{cn} = \frac{\dot{\theta}_n}{i}, \quad \ddot{\theta}_{cn} = \frac{\ddot{\theta}_n}{i} \quad (4)$$

联合(1)~(4)式可得

$$\left[i(J_{dn} + J_{jn}) + \frac{J_{cn}}{i} \right] \frac{\ddot{\theta}_n}{i} + \left[ib_{dn} + \frac{b_{cn}}{i} \right] \frac{\dot{\theta}_n}{i} + K_{in} \left(\frac{\theta_n}{i} - i_m\theta_m \right) = K_{dn}I_n \quad (5)$$

(5)式两边同乘以 i^2 后,有

$$\left[i^2(J_{dn} + J_{jn}) + J_{cn} \right] \ddot{\theta}_n + \left[i^2b_{dn} + b_{cn} \right] \dot{\theta}_n + K_{in}(\theta_n - ii_m\theta_m) = i^2K_{dn}I_n \quad (6)$$

令 $J_n = i^2(J_{dn} + J_{jn}) + J_{cn}$, $b_n = i^2b_{dn} + b_{cn}$, $K_n = i^2K_{dn}$, 则(6)式可写为

$$J_n\ddot{\theta}_n + b_n\dot{\theta}_n + K_n(\theta_n - ii_m\theta_m) = K_nI_n \quad (7)$$

由于本系统为两套电机共同作用,由(3)式可得出双电机作用于负载的力矩平衡方程

$$J_m\ddot{\theta}_m + b_m\dot{\theta}_m = 2ii_m * K_{in}(\theta_n - ii_m\theta_m) \quad (8)$$

(7)~(8)式未考虑大小齿轮间存在齿隙的问题,齿隙非线性是造成抖振的重要原因之一。因此现对齿隙进行建模。

设 T_l 为大小齿轮间的实际力矩,大小齿轮间隙为 α ,根据文献[11]有

$$T_l = \begin{cases} K_{in}(\theta_n - ii_m\theta_m - \alpha), & \theta_n - ii_m\theta_m > \alpha \\ 0, & |\theta_n - ii_m\theta_m| \leq \alpha \\ K_{in}(\theta_n - ii_m\theta_m + \alpha), & \theta_n - ii_m\theta_m < -\alpha \end{cases} \quad (9)$$

结合(9)式,将(7)~(8)式更新为

$$J_n\ddot{\theta}_n + b_n\dot{\theta}_n + T_l = K_nI_n \quad (10)$$

$$J_m\ddot{\theta}_m + b_m\dot{\theta}_m = 2ii_m T_l \quad (11)$$

将(10)~(11)式变为

$$\ddot{\theta}_n = \frac{K_n I_n}{J_n} - \frac{b_n \dot{\theta}_n}{J_n} - \frac{T_l}{J_n} \quad (12)$$

从(11)~(12)式可以看出,控制变量 $K_n I_n$ 与电机轴架位相关,与齿圈架位无直接关系,由于要求实际控制变量以齿圈架位为基础,因而将齿圈架位和电机轴架位做统一处理,并假设齿圈架位与电机轴架位存在如(13)式所示的非线性关系

$$\dot{\theta}_m + \eta \theta_m = \theta_n \quad (13)$$

代入(12)式可得

$$\ddot{\theta}_m + \frac{\ddot{\theta}_m}{\eta} = \frac{K_n I_n}{J_n} - \frac{b_n \left(\frac{\dot{\theta}_m}{\eta} + \dot{\theta}_m \right)}{J_n} - \frac{T_l}{J_n} \quad (14)$$

式中, η 为齿圈架位和电机轴架位的非线性关系参数,由于实际系统中电机轴和大齿圈采用相同的旋转编码器采样架位数据,本文中按照 $\eta = 1$ 进行后续计算。

由于实际系统采样周期为 1 ms, $\ddot{\theta}_m$ 在实际系统中取值很小,不妨将其设为 0,因而得到齿圈架位值与电机控制量的关系,如(15) 式所示。

$$\ddot{\theta}_m = \frac{\eta}{\eta J_n + b_n} (K_n I_n - b_n \dot{\theta}_m - T_l) \quad (15)$$

3 基于快速终端滑模控制的随动算法

3.1 滑模面设计

设 θ_{mi} 为期望齿圈架位值,定义系统架位误差、速度误差和加速度误差分别为

$$\begin{cases} e_m = \theta_{mi} - \theta_m \\ \vdots \\ \dot{e}_m = \dot{\theta}_{mi} - \dot{\theta}_m \\ \vdots \\ \ddot{e}_m = \ddot{\theta}_{mi} - \ddot{\theta}_m \end{cases} \quad (16)$$

根据文献[12]构建非奇异快速终端滑模面

$$s = e_m + \frac{1}{\beta} e_m^{p/q} + \gamma |e_m|^z \quad (17)$$

式中: $\beta > 0; \gamma > 0; p, q$ 为正奇数,且 $1 < p/q < 2; z > 1$ 。

设定滑模面为指数趋近率^[13],即

$$\dot{s} = -\sigma \text{sgn}(s) - ks, \sigma > 0, k > 0 \quad (18)$$

为验证滑模面的稳定性,构建 Lyapunov 函数

$$V(t) = \frac{1}{2} s^2, \dot{V}(t) = s\dot{s} \quad (19)$$

可得

$$\dot{V}(t) = s\dot{s} = -(\sigma |s| + ks^2) \leq 0 \quad (20)$$

根据 Lyapunov 稳定性理论^[14],可知滑模面最终趋向稳定。

3.2 控制率推导

对(17)式求导可得

$$\dot{s} = \dot{e}_m + \frac{1}{\beta} \frac{p}{q} e_m^{p/q-1} \dot{e}_m + \gamma z |e_m|^{z-1} \dot{e}_m \quad (21)$$

结合上述(15)、(18)和(21)式可得出控制率的表达式为

$$I_n = \frac{\eta J_n + b_n}{\eta K_n} \left[\int (\sigma \text{sgn}(s) + ks + \frac{\beta q}{p} e_m^{2-p/q} (1 + \gamma z |e_m|^{z-1})) dt - \dot{\theta}_{mi} + \frac{\eta}{\eta J_n + b_n} T_l + \frac{\eta}{\eta J_n + b_n} b_n \dot{\theta}_m \right] \quad (22)$$

再联立(13)式可得最终控制率方程

$$I_n = \frac{\eta J_n + b_n}{\eta K_n} \left[\int (\sigma \text{sgn}(s) + ks + \frac{\beta q}{p} e_m^{2-p/q} (1 + \gamma z |e_m|^{z-1})) dt - \ddot{\theta}_{mi} + \frac{\eta}{\eta J_n + b_n} \cdot \frac{J_m}{2i_m} \left(\ddot{\theta}_m + \frac{b_m \dot{\theta}_m}{J_m} \right) + \frac{\eta}{\eta J_n + b_n} b_n \dot{\theta}_m \right] \quad (23)$$

(23)式中,各参数均为确定参数,便于将控制算法在实际转台中根据随动计算机操作系统的特性进行编程实现。

3.3 收敛速度推导

由(17)式可得,当 $s = 0$ 时,误差变化率为

$$\dot{e}_m = [\beta(-e_m - \gamma |e_m|^z)]^{q/p} \quad (24)$$

说明控制系统向滑模面收敛时,误差收敛速度取决于 $\dot{e}_m = [-\beta\gamma |e_m|^z]^{q/p}$,为指数衰减过程,当控制系统到达滑模面,并向平衡点收敛时,误差收敛速度取决于 $\dot{e}_m = [-\beta e_m]^{q/p}$ 。由于转台系统面对的实际控制场景复杂,涉及到多种形式的运动模式,滑模面切换时必然引起控制量的突变。因而需要在实际系统中对各参数进行调节,一方面保证误差的快速收敛,得到满足系统指标的最终参数,另一方面保证算法在不同控制场景中的相对稳定性。

4 实验验证

为验证所设计的快速终端滑模控制器在大型转

台随动控制系统中的实际效果,根据图 1 所示的火炮伺服系统结构,对其进行建模,可得图 2 所示的 Simulink 仿真模型。通过 Matlab Simulink 混合编程实现了本文提出的算法,并与原伺服系统的 PID 算法进行了对比仿真实验,验证了算法的稳定性和精度。

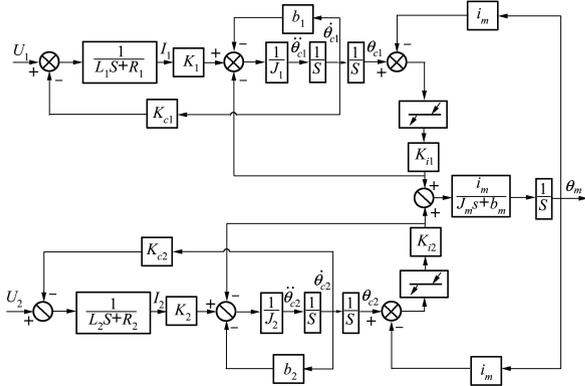


图 2 火炮伺服系统 Simulink 模型

图 2 中包含的主要参数及其取值为:

- $K_{dn} = 0.529\ 4,$
- $J_{dn} + J_{jn} = 0.023\ 9\ \text{kg/m}^2,$
- $b_{dn} = 0.89\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad},$
- $J_{cn} = 0.017\ \text{kg/m}^2,$
- $i = 30, b_{cn} = 3.57\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad},$
- $J_m = 6\ 500\ \text{kg/m}^2,$
- $i_m = 15,$
- $K_{in} = 10\ 507\ 600\ \text{N} \cdot \text{m/rad},$
- $\eta = 1,$
- $R = 0.3\ \Omega, L = 0.15\ \text{mH}.$

对本文提出的快速终端滑模控制参数进行反复调试,得到各参数取值为

- $\beta = 1\ 290,$
- $\gamma = 0.003\ 7,$
- $p = 13,$
- $q = 9,$
- $k = 300,$
- $\sigma = 7 \times 10^5$

为进行性能比对,本文分别对原采用改进 PID 算法的仿真平台和采用新的快速终端滑模控制算法的平台进行了比较,所选的运动模式均为系统进行精度考核时的各种测试工况,方便进行新旧算法的比较。图 3a)~3b) 所示为没有加入齿隙时原平台使用电机轴架位和改进平台使用齿圈架位,进行

90° 调转时的跟踪和误差图形。

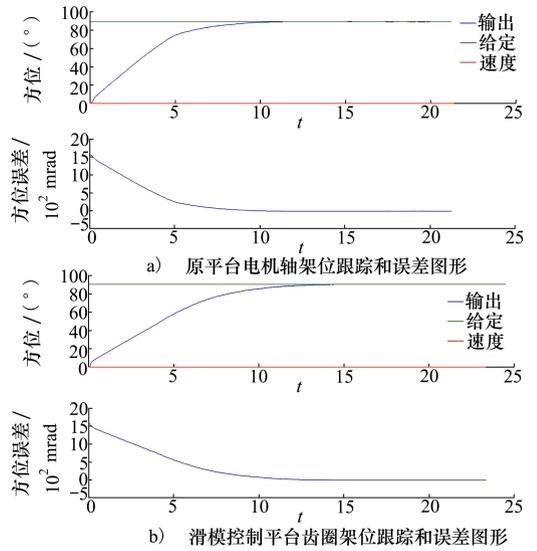


图 3 未加入齿隙的比较

从图 3 中可以看出,在没有加入齿隙时,2 种算法都有较好表现,滑模控制算法稳定时间较长(比原算法长 0.3 s),误差相对较大,但总体稳定。

图 4a)~4b) 分别为加入 5 mrad 齿隙后原改进 PID 算法和本文算法间的图形比较。从图 4 可以看出,出现齿隙后,原平台算法在进行调转运动后出现了较大的过冲现象,本文算法能够较好地抑制过冲,运动过程平稳。

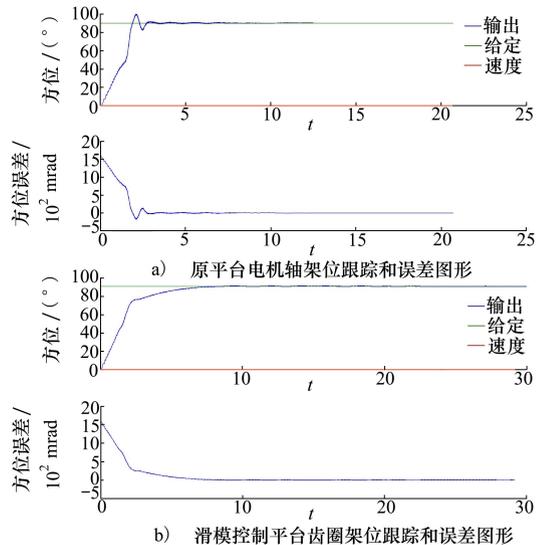


图 4 加入 3 mrad 齿隙后的比较

图 5a)~5b) 为 60°/s 正弦运动时,加入 3 mrad 齿隙时原算法和新算法间的图形比较。图 6a)~6b) 分别为加入 6 mrad 齿隙后原改进 PID 算法和新

算法间的图形比较。

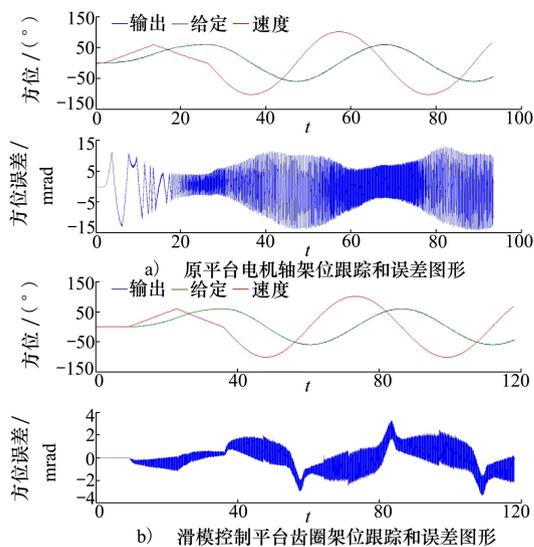


图5 正弦运动时加入齿隙后的比较

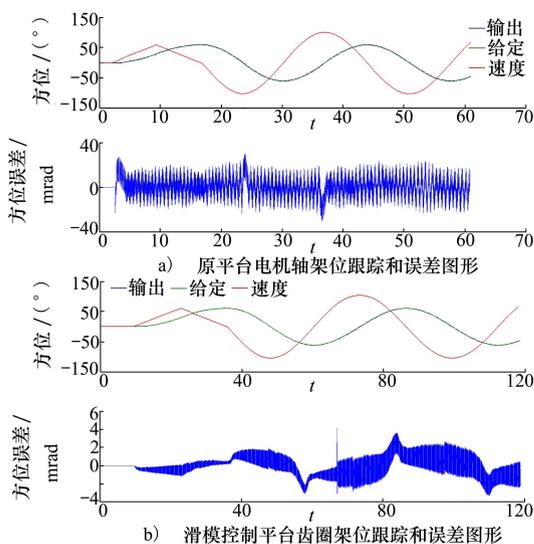


图6 加入6 mrad 齿隙后的比较

从图5可以看出,当加入3 mrad 齿隙时,原平

台算法在换向时误差急剧增大为原来的2倍(从5 mrad增大至10 mrad),新算法平台误差虽有一定变化,但整体在系统要求范围内。图6a)~6b)分别为加入6 mrad 齿隙后原改进PID算法和新算法间的图形比较。

从图6中可以看出,当齿隙增大时,原平台已经出现严重的抖振现象,而新平台误差变化较为平缓,可以保证机械结构的稳定。

上述现象在实物平台中表现更为明显。经过实物平台验证,新的快速终端滑模控制算法能够在齿圈架位作为控制变量时稳定运转,所有指标满足系统要求。

5 结论

大型火炮伺服系统中,需要使用齿圈架位作为最终控制变量,本文基于滑模控制的方法,设计了一套基于快速终端滑模控制的随动算法,得到以下结论:

- 1) 本文算法实现了齿圈架位控制火炮运动的目标,克服了原平台出现的“抖振”现象;
- 2) 使用了快速滑模终端方法,经过参数选择,保证了各项指标满足系统要求;
- 3) 本文算法由于引入滑模控制,在静态误差指标方面,稳定时间比原有算法稍长,但仍在系统指标范围内;
- 4) 本文算法适应性较强,经过系统调参后,可应用于不同转动惯量的大型转台系统。

未来该类型算法还将在转动惯量更大、响应速度更灵敏的转台中应用,如何与硬件平台更好的结合,进一步提升算法精度和稳定度,是今后的主要研究方向。

参考文献:

- [1] 郭健,吴益飞,陈庆伟. 具有输入齿隙的一类非线性系统自适应控制[J]. 兵工学报, 2011, 32(10): 1298-1304
GUO Jian, WU Yifei, CHEN Qingwei. Adaptive control of a nonlinear system with input backlash[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(10): 1298-1304 (in Chinese)
- [2] 朱胜,孙明轩,何熊熊. 输入具有齿隙非线性特性的周期系统的自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(4): 535-538
ZHU Sheng, SUN Mingxuan, HE Xiongiong. Adaptive control of a class of periodically time-varying nonlinear systems with input backlash[J]. Control Theory and Application, 2012, 29(4): 535-538 (in Chinese)
- [3] 马艳玲,黄进,张丹. 基于反步自适应控制的伺服系统齿隙补偿[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(6): 1091-1094

- MA Yanling, HUANG Jin, ZHANG Dan. Backlash compensation in servo systems based on adaptive backstepping-control[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(6): 1091-1094 (in Chinese)
- [4] 李由. 卫星姿态控制的变结构滑模控制方法[J]. *西安交通大学学报*, 2022, 56(7): 56-66
LI You. Variable structure sliding mode control method for satellite attitude maneuver[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(7): 56-66 (in Chinese)
- [5] 韩俊庆, 吴爱国, 董娜. 基于滑模干扰观测器的机械臂终端滑模控制[J]. *中南大学学报*, 2020, 51(10): 2749-2757
HAN Junqing, WU Aiguo, DONG Na. Terminal sliding mode control for robotic manipulator based on sliding mode disturbance observer[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 51(10): 2749-2757 (in Chinese)
- [6] 赵德春, 宋延嵩. 基于扰动观测器的倾斜镜滑模控制[J]. *光子学报*, 2022, 51(6): 1-11
ZHAO Dechun, SONG Yansong. Sliding mode control of tip-tilt mirror based on disturbance observer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(6): 1-11 (in Chinese)
- [7] ZHANG X, SUN L, ZHAO K, et al. Nonlinear speed control for PMSM system using sliding-mode control and disturbance compensation techniques[J]. *IEEE Trans on Power Electron*, 2013, 28(3): 1358-1365
- [8] LIANGY W, XUSD, LIAW D C. A Study of T-S model based SMC scheme with application to robot control[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2008, 55(11): 3964-3971
- [9] 肖宇强, 陈龙森. 含齿隙伺服系统的反步自适应模糊滑模控制[J]. *电气与自动化*, 2016, 45(6): 187-191
XIAO Yuqiang, CHEN Longmiao. Adaptive fuzzy sliding mode control based on backstepping method for position servo system with backlash[J]. *Machine Building & Automation*, 2016, 45(6): 187-191 (in Chinese)
- [10] 杨文清. 双电机消隙伺服系统的研究与应用[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010
YANG Wenqing. Study and application of anti-backlash servo system by double-motor[D]. Xi'an: Xidian University, 2010 (in Chinese)
- [11] 李兵强, 陈晓雷, 林辉. 机电伺服系统齿隙补偿及终端滑模控制[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(9): 162-168
LI Bingqiang, CHEN Xiaolei, LIN Hui. Terminal sliding mode control for mechatronic servo systems with backlash nonlinearity compensation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(9): 162-168 (in Chinese)
- [12] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 4版. 北京:清华大学出版社, 2021
LIU Jinkun. Sliding mode control and matlab simulation[M]. 4th Edition. Beijing: Thsinghua University Press, 2021 (in Chinese)
- [13] 康尔良, 贺建智, 王一琛. 永磁同步电机非奇异终端滑模控制器的设计[J]. *电机与控制学报*, 2021, 25(12): 58-64
KANG Erliang, HE Jianzhi, WANG Yichen. Design of non-singular fast terminal sliding mode controller for permanent magnet synchronous motors[J]. *Electric Machines and Control*, 2021, 25(12): 58-64 (in Chinese)
- [14] ORLOV Y. Discontinuous systems lyapunov analysis and robust synthesis under uncertainty conditions[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2009

Study on position tracking algorithm of large-inertia artillery with terminal sliding mode control

HAO Kunpeng^{1,2}, YANG Guolai¹

(1.School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;)
(2.Xi'an KunLun Industry Group Co.,Ltd, Xi'an 710043, China)

Abstract: The large-inertia artillery has complex structure and high coupling between components. Due to the processing technology, the error between motor shaft position and the actual load position is inevitable and hardly to be compensated. The situation get worse when the system running in high speed, where the error changes more violently and so-called "vibration" phenomenon shows up. The study establishes a detailed mode of servo system including double-motor control, position-loop control, moment model of gears, and feedback of position sensors. Then a position tracking algorithm with terminal sliding mode control is proposed and verified in artillery system. The experiment shows that this algorithm effectively eliminates the "vibration" phenomenon, enables the servo computer to directly use the load position of the artillery as the control variable, and improves the position tracking accuracy and operational stability of artillery system.

Keywords: position tracking algorithm; sliding mode control; backlash; nonlinear control

引用格式: 郝坤鹏, 杨国来. 基于快速终端滑模控制的大惯量火炮随动控制算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(4): 697-703

HAO Kunpeng, YANG Guolai. Study on position tracking algorithm of large-inertia artillery with terminal sliding mode control[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(4): 697-703 (in Chinese)