

基于自抗扰与自适应偏差耦合的 多电机协同控制策略

张立广, 郭伊乔*, 李妍, 胡俊杰

(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

A Multi-Motor Cooperative Control Strategy Based on Active Disturbance Rejection and Adaptive Deviation Coupling

Zhang Liguang, Guo Yiqiao*, Li Yan, Hu Junjie

(Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: [Objective] To address the issue of multi-motor coordination failure in armored vehicle observation platforms caused by strong disturbances and sudden load impacts under complex off-road conditions, this paper proposes a control strategy based on active disturbance rejection control (ADRC) and Gaussian adaptive deviation coupling.

[Methods] ADRC was introduced into the bottom speed loop of the single-axis motor, and both internal parameter variations and external instantaneous shocks were treated as a total disturbance for active compensation, thereby enhancing the anti-disturbance capability and response speed of the individual motor. To address the rigidity of traditional fixed-gain cooperative control and its tendency to cause inter-motor coupling, an adaptive cooperative regulator based on a Gaussian function was designed. During routine spatial motion of the platform, a smooth dead zone was constructed to accommodate the natural phase lag of asymmetric movement.

Conversely, upon sudden strong load impact, the step characteristics of the Gaussian function were leveraged to instantaneously excite high cooperative stiffness, achieving dynamic proportional coordination and deceleration yielding among the multiple axes. [Results] Simulation results showed that, compared with traditional fixed-gain methods, the transient maximum cooperative error was reduced by 60% under equivalent variable load conditions, and the time for the system to recover stability after disturbance was shortened by 40% to 66.7%. [Conclusion] The control strategy proposed in this paper effectively reconciles the smoothness of the system during steady-state operation with its disturbance rejection robustness under extreme impact conditions, providing a reliable theoretical and practical reference for the cooperative control of high-dynamic parallel stabilization

platforms.

Key words: active disturbance rejection control; adaptive deviation coupling; cooperative control; Gaussian function

摘要: 【目的】针对装甲观瞄云台在复杂越野工况下,易受强扰动与突发负载冲击而导致多电机协同失步的问题,本文提出一种基于自抗扰控制(ADRC)与高斯自适应偏差耦合的控制策略。【方法】在单轴电机的底层速度环引入 ADRC,将系统内部的参数变化与外部的瞬间冲击统一视为总扰动进行主动补偿,从而提升单电机的抗干扰能力与响应速度。针对传统固定增益协同控制过于死板、易导致多电机间相互耦合的缺陷,设计了基于高斯函数的自适应协同调节器。该机制在平台进行常规空间运动时,通过构建平滑死区从而包容非对称运动的自然相位滞后,并在突发强载冲击时利用高斯函数的阶跃特性瞬时激发高协同刚度,实现多轴间的动态比例配合与减速退让。【结果】仿真结果表明,与传统的固定增益方法相比,本文所提策略在同等变负载工况下将瞬态最大协同误差降低了 60%,系统在受扰后恢复稳定的时间缩短了 40%~66.7%。【结论】本文所提控制策略有效兼顾了系统稳态运行的平滑性与极端冲击工况下的抗扰鲁棒性,为高动态并联稳定平台的协同控制提供了可靠的理论与应用参考。

关键词: 自抗扰控制;自适应偏差耦合;协同控制;高斯函数

0 引言

装甲车辆在复杂越野工况下执行任务时,其观瞄系统不可避免地承受履带冲击、发动机振动及火炮后坐力等多源强扰动的耦合作用^[1]。传统

串联式伺服云台因悬臂结构刚度不足^[2]、误差逐级累积,其动态响应带宽难以应对极端冲击环境^[3]。

在执行上述复杂工况下的非对称姿态指令时,各驱动支链间存在严苛的非线性几何比例约束及物理作动滞后。传统的偏差耦合控制 (Deviation Coupling Control, DCC) 通常采用固定高增益^[4-5]以强制消除同步误差^[6]。但在非对称轨迹跟踪中,这种刚性协同会无视系统的自然滞后规律^[7],导致各轴间产生剧烈的内部抗衡与高频极限环颤振;反之,若调低协同增益,在遭遇外部突变负载冲击时,又极易因瞬态抗扰刚度不足导致位移失步放大,甚至引发机构物理干涉卡死^[8]。

针对多轴协同控制中稳态柔顺跟踪与瞬态刚性抗扰的矛盾,本文提出一种基于高斯自适应偏差耦合 (Active Deviation Coupling, ADC) 与自抗扰控制^[9] (Active Disturbance Rejection Control, ADRC) 的双层解耦控制策略。该策略在单轴内环引入 ADRC 主动对冲多源瞬态冲击^[10],提升底层执行刚度;在协同外环设计基于高斯函数的变结构增益调节器,利用其平滑死区特性包容非对称运动^[11]的自然滞后以消除机械内耗,并在遭遇突发强载时瞬时激发极高刚度,实现多轴间的动态等比例减速退让^[12]。

1 系统建模与问题描述

1.1 空间逆运动学

为实现空间稳像,需将装甲车底盘的扰动角 ($\theta_{\text{roll}}, \theta_{\text{pitch}}$) 映射为三根推杆的位移指令。根据空间坐标系变换,基座相对于绝对水平面的旋转矩阵为 $\mathbf{R}_{\text{base}}$ 。结合中心等效约束柱的自适应物理补偿矩阵 $\mathbf{R}_{\text{uj}}$,动平台在全局坐标系下保持绝对水平的最优姿态矩阵为

$$\mathbf{R}_{\text{platform}} = \mathbf{R}_{\text{base}} \cdot \mathbf{R}_{\text{uj}} \quad (1)$$

通过空间欧氏距离求解,三根推杆的精确绝对位置指令 $L_i (i=1,2,3)$ 为

$$L_i = ||\mathbf{P}_{pi} - \mathbf{P}_{bi}|| - L_0 \quad (2)$$

式中: $\mathbf{P}_{pi}$ 为连接点相对于绝对水平面的垂直高度向量; $\mathbf{P}_{bi}$ 为连接点相对于基座的垂直高度向量; L_0 为推杆初始长度。

上述逆运动学解算为底层多电机控制系统提

供了具有动态比例关系的实时位移跟踪指令。

1.2 永磁同步电机数学模型

推杆由永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 驱动,在 $d-q$ 旋转坐标系下,其电压方程与电磁转矩方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p_n i_q [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] \quad (4)$$

式中: u_d, u_q 分别为 d, q 轴定子电压; i_d, i_q 分别为 d, q 轴定子电流; L_d, L_q 为 d, q 轴电感; R_s 为定子电阻; ω_e 为电角速度; ψ_f 为永磁体磁链; T_e 为电磁转矩; p_n 为极对数。

在并联云台系统中,电机的机械运动特性不仅受自身转子惯量与黏滞摩擦的限制,更受到并联机构带来的强烈交叉耦合负载转矩 T_L 的干扰。其机械运动动力学方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (5)$$

式中: J 为电机转子与折算到电机轴上的等效转动惯量; ω_m 为电机机械角速度; B 为黏滞摩擦系数; T_L 为外部等效负载转矩。

2 多电机 ADC-ADRC 协同控制

由电机运动学与动力学模型可知,系统在面对高频底座扰动与突发负载冲击时,不仅单轴电机存在机械作动迟滞,多轴之间还会受到强烈的交叉耦合力矩干扰^[13-15]。为了打破传统控制中稳态跟踪与瞬态抗扰之间的矛盾,本文提出了一种全新的柔刚相济分层控制架构:在单轴控制层,利用 ADRC 提升底层单机的动态跟踪刚度;在协同层,设计基于高斯函数的自适应变结构控制器,实现多轴间的柔性与刚性动态切换。多电机 ADC-ADRC 协同控制框图如图 1 所示。

2.1 基于轴向磁场控制的单轴速度环 ADRC 控制器设计

针对单轴推杆在装甲车辆越野机动中所面临的强非线性、时变负载冲击 (如履带冲击、路面不平引起的底座剧烈颠簸) 以及机构间的强耦合力矩,本节基于 ADRC 构建矢量控制底层速度

环^[16]。与传统比例-积分(Proportional-Integral, PI)控制相比,ADRC的核心优势在于其不依赖系统的精确数学模型^[17],而是通过总扰动的概念,

将系统内部的未建模动态、参数摄动以及外部环境干扰进行实时观测与动态补偿^[18]。速度环ADRC控制图如图2所示。

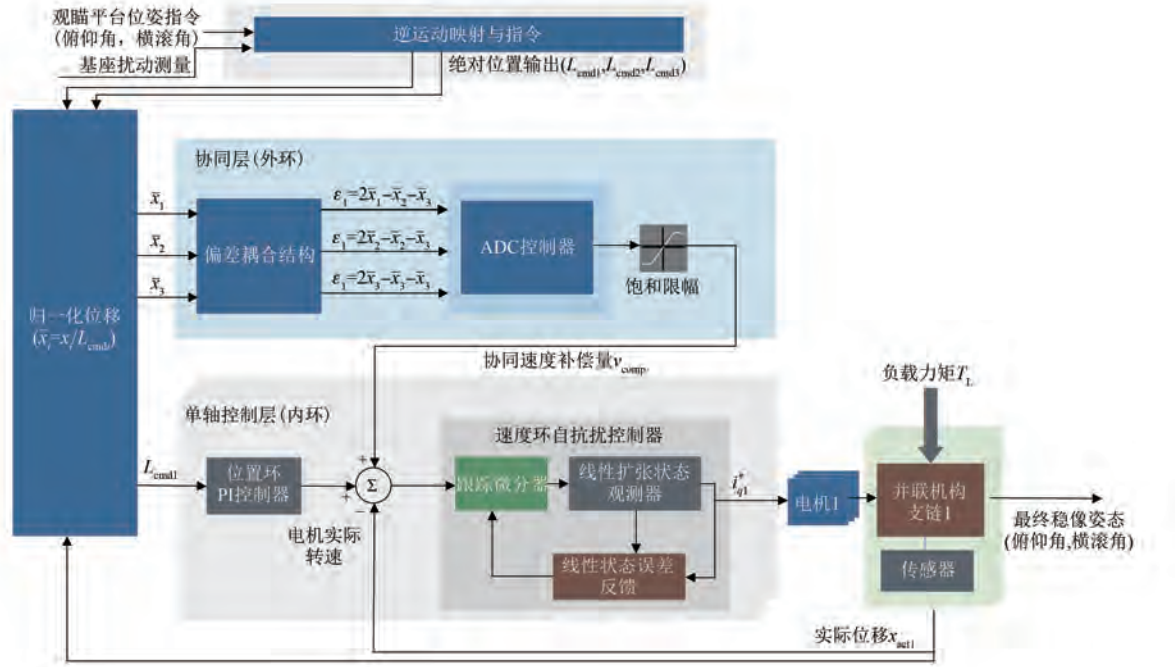


图1 基于ADC-ADRC的多电机协同控制框图

Fig.1 Block diagram of ADC-ADRC-based multi-motor cooperative control



图2 速度环ADRC控制图

Fig.2 ADRC control diagram for the speed loop

图2中, z_1 、 z_2 分别为扩张状态观测器对系统实际转速、总扰动的观测估计值; u_0 为状态误差反馈控制律根据转速偏差计算出的初始控制量; u 为控制量; b_0 为系统控制增益的估算值; i_q^* 为 q 轴电流参考给定值。

由PMSM数学模型可以看出,电机转速仅受 q 轴电流的影响,故令控制量为 i_q ,令系统输出 $y = \omega_m$,控制输入 $u = i_q$ 。将角速度动态视作受扰的一阶系统,可得控制输出量增益为

$$b_0 \approx \frac{1.5p_n\psi_f}{J} \quad (6)$$

则式(5)可等效转换为自抗扰标准形式,如式(7)所示:

$$\dot{y} = f(y, u, t) + b_0 u \quad (7)$$

式中: $f(y, u, t)$ 为系统的广义总扰动,包含了负载突变、摩擦阻尼及未完全掌握的模型参数摄动^[19],即:

$$f(y, u, t) = -\frac{B}{J}\omega_m - \frac{T_L}{J} + (b - b_0)u \quad (8)$$

外环协同层输出的目标转速指令 v_{target} 往往包含阶跃或非连续成分。为避免直接将突变指令引入内环造成极大的机械冲击与 q 轴电流饱和,引入线性跟踪微分器对目标指令进行平滑处理,规划出柔性过渡过程,如式(9)所示:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2 \\ \dot{v}_2 = -r^2(v_1 - v_{\text{target}}) - 2rv_2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: v_1 为平滑后的目标转速跟踪信号; v_2 为其微分信号; r 为决定跟踪速度的频带宽度(速度因子)。

通过合理设置 r , 系统能够在减小作动迟滞的同时, 有效柔化初始冲击^[20]。为获取系统实际状态并实时估计总扰动, 针对上述一阶被控对象构造二阶连续型线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observer, LESO), 如式(10)所示:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - y) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2(z_1 - y) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\dot{z}_1, \dot{z}_2$ 分别为转速观测值、总扰动观测值的瞬时变化率; y 为实际速度反馈; β_1, β_2 为观测器增益, 通常通过配置观测器带宽 ω_o 来确定, 即 $\beta_1 = 2\omega_o, \beta_2 = \omega_o^2$ 。

获取观测状态后, 利用前馈补偿机制实现对系统的线性化处理。采用线性误差状态反馈(Linear State Error Feedback, LSEF)策略, 通过配置控制器带宽 ω_c 使闭环系统在物理层面等效为标准积分链系统。最终生成的 q 轴电流指令 u 为

$$u = \frac{K_p(v_{\text{ref}} - z_1) - z_2}{b_0} \quad (11)$$

式中: K_p 为控制器增益; v_{ref} 为包含协同补偿量后的目标转速。

通过将估计出的总扰动从控制量中直接剔除, ADRC 实现了对外界冲击的主动对冲。

2.2 ADC 控制器设计

在并联稳定平台中, 三台 PMSM 的目标位移指令 $L_{\text{cmd}1}, L_{\text{cmd}2}, L_{\text{cmd}3}$ 呈时变动态比例。传统的等值偏差耦合策略无法直接应用于此类异构指令的同步控制^[21]。为此, 本文引入归一化位移状态量, 将各电机的物理位移映射至统一的无量纲比较空间, 如式(12)所示:

$$\bar{x}_i = \frac{x_{\text{act},i}}{L_{\text{cmd},i}}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

式中: $\bar{x}_i$ 为第 i 台电机的归一化位移; $x_{\text{act},i}$ 为其实际位移反馈量。

在理想协同状态下, 三台电机的归一化位移应时刻保持一致。以电机 1 为例, 定义其与另外两轴的同步误差为 e_{12} 和 e_{13} , 如式(13)所示:

$$\begin{cases} e_{12} = \bar{x}_1 - \bar{x}_2 \\ e_{13} = \bar{x}_1 - \bar{x}_3 \end{cases} \quad (13)$$

为实现全局误差补偿, 对式(13)进行线性聚合, 构建电机 1 的综合协同误差 ε_1 , 如式(14)所示:

$$\varepsilon_1 = 2\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - \bar{x}_3 \quad (14)$$

同理, 推导得到电机 2 与电机 3 的综合协同误差 ε_2 与 ε_3 , 该综合误差项全局反映了单台电机在整个系统空间约束中的瞬态相位超前或滞后程度。

在获取综合协同误差 ε_i 后, 传统的 DCC 通常直接将其与恒定比例增益 K_c 相乘生成补偿指令^[22]。然而, 对于并联稳像云台而言, 其在执行复杂空间指令时, 各推杆不可避免地会产生符合运动学规律的自然微小滞后^[23]。

如果采用固定的高增益 K_c , 系统会对这种正常的非对称动态滞后进行过度的刚性惩罚, 导致各电机之间产生剧烈的内部抗衡, 进而在稳态跟踪时引发极具破坏性的高频极限环颤振; 反之, 若为了平滑性而降低恒定增益, 当系统遭遇装甲车越野颠簸或开火冲击时, 又极易因瞬态抗扰刚度不足导致位移失步放大, 引发并联机构干涉卡死。

为从根本上解决这一矛盾, 本文摒弃了线性耦合机制^[24], 创新性地提出了一种基于高斯函数的非线性自适应增益调节律。高斯函数不仅具有无限可微、曲线极度平滑的数学优势, 其底部的平坦特性与边界的极速衰减特性, 更为控制系统提供了一种能理想适应不同工况的切换机制。

提取系统全局最大绝对协同误差 $\varepsilon_{\text{max}} = \max(|\varepsilon_1|, |\varepsilon_2|, |\varepsilon_3|)$ 作为系统受扰程度的痛觉感知信号, 设计高斯型自适应增益调节器, 如式(15)所示:

$$K_c = K_{\min} + (K_{\max} - K_{\min}) \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\sigma} \right)^2 \right] \right\} \quad (15)$$

式中: $K_{\min}$ 为稳态柔顺增益; $K_{\max}$ 为瞬态极限刚性增益; σ 为敏感死区阈值。

最终输出的协同补偿速度为

$$v_{\text{comp},i} = K_c \cdot \varepsilon_i \quad (16)$$

当系统处于正常非对称运动时, ε_{max} 较小, 增益 K_c 平滑收敛于 $K_{\min}$, 此时各轴依据运动学自然解算平滑运行, 消除内耗颤振; 当某一轴突遭外部阶跃冲击(如 $t = 3 \text{ s}$ 时), ε_{max} 瞬间突破 σ (0.002), 高斯函数极速拉升, 控制器瞬间爆发高

达 $K_{\max}$ 的极高刚度,强行拉动非受扰轴进行等比例减速补偿,可在毫秒级时间内实现对抗动的快速平抑。

本系统采用分层控制架构实现高精度运动控制:外环基于高斯非线性自适应调节器,通过动态增益机制实现协同误差的时变调节;内环采用ADRC替代传统PI速度环^[25],形成双环协同控制结构。外环生成的补偿指令 v_{comp_i} 叠加至基准轨迹速度 V_{target} 后,作为ADRC的输入目标。ADRC通过LESO将推杆机构的非线性摩擦、非对称载荷及机械耦合等复杂动力学统一建模为总扰动,并实施实时估计与前馈补偿,从而将系统简化为具有低通特性的等效模型。在残余扰动有界条件下,Lyapunov稳定性证明保证了闭环系统的全局渐近稳定性,使协同误差收敛于预设残差范围内。该架构实现了物理层面的严格解耦——外环高斯调节器维持多轴空间姿态约束,内环ADRC抑制单轴负载突变,为非线性调节器在精密运动控制中的应用提供了完整的理论框架与工程实现方案。

3 仿真与结果分析

为验证所提基于高斯型自适应非线性DCC策略在极端恶劣工况下的有效性与鲁棒性,在Matlab/Simulink环境中搭建了三台PMSM的仿真模型。为确保仿真结果对实际工程应用的参考价值,电机本体参数主要参照主流工业伺服电机产品系列的典型值。三台电机采用相同的电气与机械参数,以消除个体差异对控制变量对比分析的影响,具体参数如表1所示。

表1 3台PMSM电机的参数

Tab.1 Parameters of 3 PMSM motors

参数名称	参数值
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1 200
额定转矩/($\text{N}\cdot\text{m}$)	10
R_s/Ω	0.958
$L_d=L_q/\text{mH}$	5.25
ψ_f/Wb	0.182 7
$J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.80×10^{-3}
p_n	4

为模拟装甲车辆行驶于复杂越野路面的恶劣工况,本文进行了双重抗扰测试:设定观瞄平台的

目标姿态横滚角为15度,俯仰角为5度,使并联机构的三根推杆处于长短不一的非对称受力状态。

为模拟装甲车辆行驶时履带碾压巨石或火炮击发传导至支链的剧烈冲击,在非对称运动过程中, $t=2\text{ s}$ 、 3 s 、 4 s 时,向电机1轴端依次施加幅值为 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 的阶跃负载冲击。向单轴施加阶跃负载,本质上并非孤立扰动,而是引入了强烈的多轴交叉耦合冲击。在抑制电机1速度跌落的同时,电机2和电机3被迫承受被动耦合力矩并自适应减速,从而构成了多轴耦合冲击测试。同等非对称变负载工况下的协同误差对比图如图3所示。

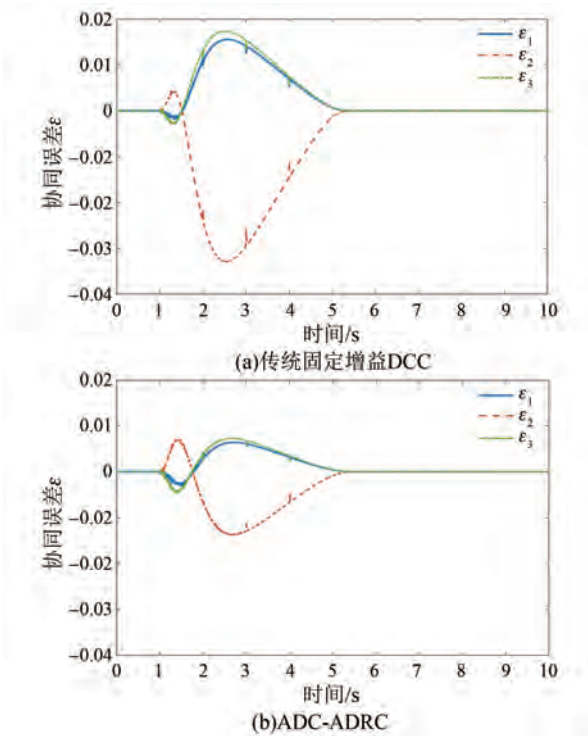


图3 同等非对称变负载工况下的协同误差对比图
Fig.3 Comparison of cooperative errors under equivalent asymmetric variable load conditions

由图3可知,在无突发冲击的常规非对称跟踪阶段(如 $1\text{ s}\sim 2\text{ s}$ 区间),传统控制因采用固定高增益,引发了各轴间的机械耦合内耗,导致其协同误差包络峰值达到0.013。本文控制策略依托高斯函数的宽容死区特性,主动隔离了底层的微小自然滞后,将稳态协同误差峰值严格限制在0.005范围内。稳态协同误差降低了61.5%,有效消除了多轴系统在非对称工况下的内耗与极限环

振荡。

针对突发阶跃负载工况,传统控制因抗扰刚度固定且响应迟滞,协同误差包络值为 0.05;本文所提高斯 ADC-ADRC 策略在误差越界的瞬间激发极高增益,强行拉动非受扰轴等比例配合,将协同误差包络值有效抑制在 0.02 内。该工况下,协同误差降低了 60%。

传统 DCC 与本文所提高斯 ADC-ADRC 策略在非对称变负载工况下的三电机速度时域响应如图 4~7 所示。为验证系统的瞬态抗扰性能,在机构执行不对称空间轨迹(横滚角 15° ,俯仰角 5°)的过程中,分别在 $t=2\text{ s}$ 、 3 s 、 4 s 时,向电机 1 施加幅值为 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 的阶跃负载冲击。

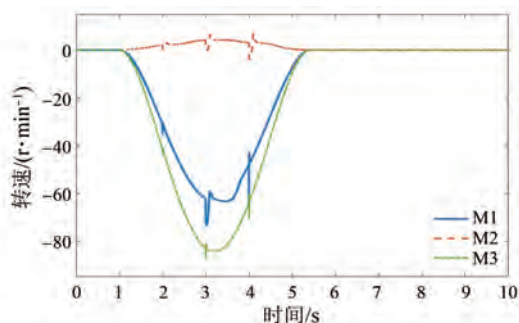


图 4 传统 DCC 变负载三电机转速对比波形

Fig. 4 Comparison waveforms of three-motor speeds under variable load with conventional DCC

由图 5 可知,传统 DCC 策略的抗扰刚度固定且调节迟钝,在面临突发冲击时表现出明显的响应迟滞与调节能力不足。在 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 的阶梯递增负载工况下,受扰轴 M1 不仅产生了显著的转速跌落,且系统重构稳态的瞬态恢复时间分别长达 15 ms 、 20 ms 、 25 ms ,并且非受扰轴 M2 与 M3 在接收到 M1 转速骤降信息后并未及时恢复至系统规划的目标速度,导致三电机在受扰后的速度波形不平滑,甚至产生严重的轴间转速同步误差。

高斯 ADC-ADRC 变负载三电机速度影响局部放大波形如图 7 所示。由图 7 可知,当 M1 遭遇阶跃冲击时,高斯增益函数被越界的综合协同误差瞬间激活并输出高补偿增益。单轴抗扰层面,在 $2\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载下,各电机仅经历微小扰动便能在 5 ms 内迅速恢复至基准轨迹,在 $5\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 强载冲击下,控制器仍能在 10 ms 内强

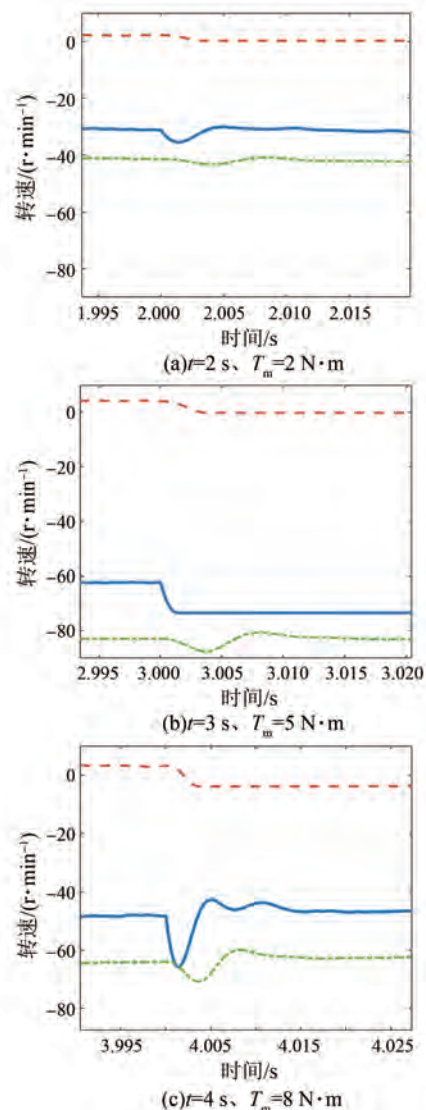


图 5 传统 DCC 变负载三电机速度影响局部放大波形
Fig. 5 Locally enlarged waveforms of the speed influence for three-motor systems under variable load with conventional DCC

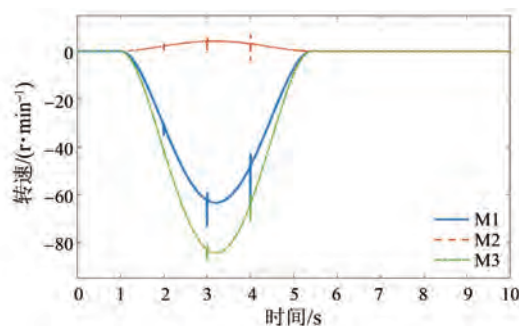


图 6 高斯 ADC-ADRC 变负载三电机转速波形

Fig. 6 Speed waveforms of three-motor systems under variable load with adaptive Gaussian ADC-ADRC

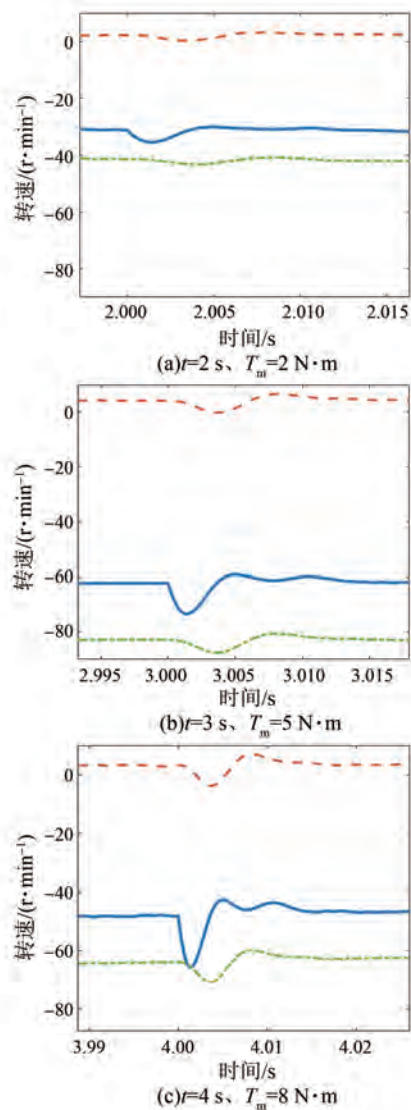


图 7 高斯 ADC-ADRC 变负载三电机速度影响局部放大波形

Fig. 7 Locally enlarged waveforms of the speed influence for three-motor systems under variable load with adaptive Gaussian ADC-ADRC

行将 M1 拉回基准轨迹,相较于传统控制,整体恢复时间大幅缩短了 60% 以上。

此外,在整个受击与恢复的毫秒级周期内,非受扰电机 M2 和 M3 在归一化自适应律与速度环 ADRC 的约束下,能够快速、平滑且等比例地跟随受扰轴进行主动减速让步,解决了非对称工况下强耦合冲击带来的机械干涉问题,验证了本文方法在不同负载下的鲁棒性与自适应优势。

通过对仿真结果进行归纳,两种控制算法在

关键性能指标上的定量对比如表 2 所示。

为直观表现非对称变负载工况下不同控制架构的适应性,结合上述数据与系统拓扑特征,从机制层面与量化指标平面对传统控制与本文策略进行了综合对比,如表 3 所示。

表 2 传统 DCC 与高斯 ADC-ADRC 性能对比
Tab. 2 Performance comparison between conventional DCC and Gaussian ADC-ADRC

控制算法	传统 DCC	高斯 ADC-ADRC	性能提升幅度/%
协同误差峰值	0.017	0.0073	57
协同误差带宽度	0.05	0.02	60
$t=2\text{ s}$ $T_m=2\text{ N}\cdot\text{m}$	15 ms	5 ms	66.7
误差收敛时间 $t=3\text{ s}$ $T_m=5\text{ N}\cdot\text{m}$	20 ms	10 ms	50
$t=4\text{ s}$ $T_m=8\text{ N}\cdot\text{m}$	25 ms	15 ms	40

表 3 传统 DCC 与高斯 ADC-ADRC 综合性能指标对比表
Tab. 3 Comprehensive performance index comparison between traditional DCC and Gaussian ADC-ADRC

比较维度	传统 DCC	高斯 ADC-ADRC
协同控制器	线性固定增益	基于高斯函数的非线性变结构调节
瞬态抗扰鲁棒性	刚度固定且响应迟滞	瞬时激发主动抑制,强制等比例补偿
受扰恢复速度	较慢(25 ms 内缓慢重构)	快(强制拉回,15 ms 内收敛)
底层抗扰机制	PI 误差滞后反馈调节	ADRC (LESO 实时观测与前馈补偿)
算法复杂度	低(基础运算)	适中(引入高斯函数与扩张状态观测器)

另外当前主流的两种先进协同控制算法—滑模同步控制与模型预测同步控制^[26-29]都无法适用本文涉及的工况。

4 结语

本文针对装甲观瞄并联云台的多轴协同控制难题,提出并验证了一种高斯 ADC-ADRC 控制策略。通过在底层速度环构建 ADRC 控制器,将内部非线性耦合与外部负载波动等效为总扰动进行

实时前馈补偿,显著提升了单机执行机构的动态跟踪刚度与抗冲击性能。为突破多轴协同的性能瓶颈,本文在协同外环创新性地引入高斯自适应调节器,消除了传统控制中稳态柔性跟踪与瞬态刚性抗扰之间的矛盾。本文所提策略在常规运动阶段凭借低增益特性有效消除机械内耗,而在遭遇不同强度的冲击时,能够通过增益的自适应实现毫秒级的协同误差收敛。仿真结果表明,所提控制策略在稳态精度上较传统控制提升了 60%,抗扰恢复时间由 25 ms 缩短至 15 ms 以内,有效解决了非对称工况下强耦合冲击带来的机械干涉问题,为新一代高动态装甲稳像装备的控制系统设计提供了切实可行的理论方法与技术支撑。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

张立广进行了方案设计、内容总结,郭伊乔进行了仿真建模分析和论文撰写,李妍、胡骏杰参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and content summarization were conducted by Zhang Liguang. The simulation modeling analysis and paper writing were performed by Guo Yiqiao. The review and revision of the paper were participated in by Li Yan and Hu Junjie. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 冯建鑫,朱振凯,龚柏春,等. 基于改进浣熊优化算法的光电稳定平台改进自抗扰控制[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(3): 257-267.
Feng J X, Zhu Z K, Gong B C, et al. Improved ADRC based on improved COA for optoelectronic stabilization platform control [J]. Infrared and Laser Engineering, 2025, 54(3): 257-267.
- [2] 田冰. 带式输送机多电机协调控制系统研究[J]. 能源与节能, 2025(7): 92-94.
Tian B. Multi-motor coordinated control system for belt conveyors [J]. Energy and Conservation, 2025 (7): 92-94.
- [3] 洪俊杰,赵明郎,黄龙蛰,等. 带扰动补偿的永磁同步电机预测速度控制[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(1): 94-105.
Hong J J, Zhao M L, Huang L Z, et al. Predictive speed control for permanent magnet synchronous motors with disturbance compensation [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(1): 94-105.
- [4] 马雨新,雷子奇,顾萍萍,等. 基于改进型超螺旋滑模线性自抗扰的永磁同步电机速度控制研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 103-112.
Ma Y X, Lei Z Q, Gu P P, et al. Research on PMSM speed control based on improved super-twisting sliding mode linear active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(9): 103-112.
- [5] 李程. 数控绕线机多轴同步控制优化方法及应用研究[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(7): 111-113.
Li C. Research on optimization method and application of multi-axis synchronous control for computerized numerical control winding machine [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(7): 111-113.
- [6] 史婷娜,王敢,曹彦飞,等. 伺服系统多轴协同控制技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(11): 4479-4492.
Shi T N, Wang G, Cao Y F, et al. Review on cooperative control technologies of multi-axis servo systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(11): 4479-4492.
- [7] 王文大. 基于深度强化学习的多电机同步伺服系统自适应协同控制策略[J]. 信息记录材料, 2026, 27(6): 21-23.
Wang W D. Adaptive coordinated control strategy of multi-motor synchronous servo system based on deep reinforcement learning [J]. Information Recording Materials, 2026, 27(6): 21-23.
- [8] 刘长林,陆艳君,安辉,等. 真空镀膜设备收放系统用多电机协同控制分析[J]. 电工技术, 2024(18): 29-33.
Liu C L, Lu Y J, An H, et al. Analysis of multi-motor cooperative control for push-pull systems of vacuum coating apparatuses [J]. Electric

- Engineering, 2024(18): 29-33.
- [9] 刘海平. 永磁同步电机轴承转子速度自抗扰控制方法[J]. 电工技术, 2025(22): 39-41.
- Liu H P. Self-disturbance rejection control method for bearing rotor speed of permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Engineering, 2025(22): 39-41.
- [10] 张龙飞, 毕栋, 张友兵. 基于永磁同步电机的滑模与自抗扰协调速度控制研究[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2024, 21(1): 10-17.
- Zhang L F, Bi D, Zhang Y B. Research on coordinated speed control of sliding mode and active disturbance rejection based on permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2024, 21(1): 10-17.
- [11] Sun Y Q, Chen W L, Xiang F Y, et al. Fast terminal sliding mode speed synchronization control for dual-motor system with anti-disturbance capability [C]// 2025 44th Chinese Control Conference, Chongqing, China, 2025: 3495-3500.
- [12] 丁毓峰, 冉冬东, 龚浩岚. Stewart-Gough 平台的 EtherCAT 总线控制方法[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(1): 169-178.
- Ding Y F, Ran D D, Gong H L. Ether CAT bus control method for Stewart-Gough platform [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(1): 169-178.
- [13] 张超硕, 储剑波. 基于增量模型的 PMSM 鲁棒性模型预测控制算法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 21-32.
- Zhang C S, Chu J B. Research on robust model predictive control method of PMSM based on incremental model [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 21-32.
- [14] 马毓敏, 赵南南, 刘金颂, 等. 永磁直驱风力发电机非奇异终端滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 86-94.
- Ma Y M, Zhao N N, Liu J S, et al. Permanent magnet direct drive wind generator control based on non-singular terminal sliding mode [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 86-94.
- [15] 程梦坤, 储剑波. 基于分数阶扩展滑模扰动观测器的 PMSM 无模型控制算法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(10): 51-63.
- Cheng M K, Chu J B. Research on model-free control algorithm of PMSM based on fractional-order extended sliding mode disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(10): 51-63.
- [16] 王建渊, 王海啸, 尹忠刚, 等. 基于一阶线性自抗扰控制器的同步磁阻电机无速度传感器控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4405-4421.
- Wang J Y, Wang H X, Yin Z G, et al. Sensorless control of synchronous reluctance motor based on first order linear active disturbance rejection controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4405-4421.
- [17] 魏尧, 柯栋梁, 黄东晓, 等. 基于超局部化时间序列的永磁同步电机无模型预测电流滑模控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1022-1032.
- Wei Y, Ke D L, Huang D X, et al. Model-free predictive sliding mode control using ultra-localized time-series for permanent magnet synchronous motor drives [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1022-1032.
- [18] 全力, 刘诗龙, 朱孝勇, 等. 基于 sigmoid 滤波器的永磁轮毂电机自抗扰控制[J]. 农业工程学报, 2024, 40(10): 14-23.
- Quan L, Liu S L, Zhu X Y, et al. Active disturbance rejection control of permanent magnet hub motor based on sigmoid filter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(10): 14-23.
- [19] 方圣龙, 樊继东. 一种基于自抗扰的永磁同步电机复合控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 62-69.
- Fang S L, Fan J D. A composite control strategy of permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(10): 62-69.
- [20] Long Y, Zhang C, He J. Anti-saturation sliding mode synchronization control for multi-motor systems under saturation constraints [J]. IET Power Electronics, 2025, 18(1): e70082.
- [21] 杨玉磊, 王骞, 魏方睿. 基于准谐振自抗扰复合控制的双三相永磁同步电机谐波电流抑制方法[J]. 电机与控制学报, 2025, 29(9): 26-37.
- Yang Y L, Wang Q, Wei F R. Harmonic current suppression method for dual three-phase permanent magnet synchronous motor based on quasi-resonant active disturbance rejection composite control [J].

- Electric Machines and Control, 2025, 29(9): 26-37.
- [22] Xu Y T, Liu C, Huang Z H, et al. Research on coordinated control of multi-pmsm for shaftless overprinting system [J]. Symmetry, 2025, 17(6): 958.
- [23] Liu M H, Zhu Y M, Xu H L, et al. Pre-compensation strategy for tracking error and contour error by using friction and cross-coupled control [J]. Machines, 2024, 12(9): 593.
- [24] Fan B, Zhou H Y, Zhao Y, et al. Synchronization and tracking control method for multi-motor driving systems based on states mean deviation coupling [J]. Nonlinear Dynamics, 2025, 113: 29355-29372.
- [25] 黄利容, 曾喆昭, 章祺昊. 永磁同步电机调速系统的自耦 PID 控制策略 [J]. 机械科学与技术, 2025, 44(7): 1136-1142.
- Huang L R, Zeng Z Z, Zhang Z H. Auto-coupling PID control strategy of permanent magnet synchronous motor governing system [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2025, 44(7): 1136-1142.
- [26] Qin M H, Li Z S, Li X Y, et al. Fixed time fractional order sliding mode synchronization control for dual motor [C]// 2025 2nd International Conference on the Frontiers of Electronic, Electrical and Information Engineering, Yibin, China, 2025; 418-421.
- [27] Gong C, Li Y R, Zargari N R. An overview of advancements in multimotor drives: structural diversity, advanced control, specific technical challenges, and solutions [J]. Proceedings of the IEEE, 2024, 112(3): 184-209.
- [28] Zhang G, Zhang P Z, Hua W, et al. Improved deviation coupling control for multi-motor speed synchronization with PSO-based parameter optimization [J]. Journal of Power Electronics, 2025, 26(5): 1211-1224.
- [29] Jiang C L, Fan B, Hong Q, et al. Synchronization and coordination control based on enhanced deviation coupling for multi-motor rigid connection systems [J]. Engineering Research Express, 2025, 7(1): 015340.

收稿日期:2026-04-03

收到修改稿日期:2026-05-09

作者简介:

张立广(1979—),男,硕士,副教授,研究方向为计算机控制系统、智能控制系统,zhangliguang@xatu.edu.com;

*通信作者:郭伊乔(2001—),女,硕士研究生,研究方向为电机驱动控制,gqygqy1123@outlook.com。