

基于 LESO 单神经元自适应 PID 的 车载增稳云台控制策略研究

严继池^{1,2}, 李纪臻², 陈明帆³, 周慧佳², 于雁南^{1,2*}

- (1. 先进制造与自动化技术重点实验室, 广西壮族自治区 桂林 541006;
2. 桂林理工大学 机械与控制工程学院, 广西壮族自治区 桂林 541006;
3. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

LESO-Based Single-Neural Adaptive PID Control of Vehicle-Mounted Stabilized Gimbal

YAN Jichi^{1,2}, LI Jizhen², CHEN Mingfan³, ZHOU Huijia², YU Yannan^{1,2*}

- (1. Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Automation Technology, Guilin 541006, China;
2. College of Mechanical and Control Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;
3. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: [Objective] To address the issues of poor disturbance rejection performance and slow response speed exhibited by traditional proportional-integral-derivative (PID) control strategy for vehicle-mounted stabilized gimbals operating on unpaved roads, this paper proposes a single-neural adaptive (SNA)-PID control strategy based on a linear extended state observer (LESO). This approach aims to enhance the stability and disturbance rejection capability of the gimbal's posture control. [Methods] Firstly, a mathematical model of the stepper motor was established. Then, based on the LESO principle and the supervised Hebb learning rule, a LESO-based SNA-PID control strategy was designed. The convergence of the proposed control strategy was verified using Lyapunov stability theory. Finally, to validate the effectiveness of the proposed strategy, a practical vehicle-mounted stabilization gimbal platform was constructed, and comparative experiments were conducted under both internal and external disturbances against conventional PID and LESO+PID control strategy. [Results] Compared with traditional PID and LESO+PID control, the

proposed control strategy significantly reduced angle-tracking peak-to-peak values and other performance indices under single disturbance, 1 Hz continuous disturbance, and 8 Hz continuous disturbance conditions. Although a slight increase in overshoot was observed when the reference signal changed, the settling time was substantially reduced. [Conclusion] The proposed LESO+SNA-PID control strategy forms a dual-compensation closed-loop strategy, which effectively enhances the disturbance rejection capability against external disturbances and improves the system's response speed, demonstrating significant value for practical engineering applications.

Key words: stabilized gimbal; linear extended state observer; single-neural adaptive; disturbance rejection capability

摘要:【目的】针对车载增稳云台在非铺装路况下,传统比例-积分-微分(PID)控制策略出现的抗扰动效果较差、响应速度较慢等问题,本文设计一种基于线性扩张状态观测器(LESO)的单神经元自适应(SNA)-PID控制策略,用于提高云台姿态控制的稳定性以及抗扰动性。【方法】首先建立步进电机的数学模型。其次,根据LESO原理以及有监督Hebb学习规则的单神经元自适应算法,设计了一种基于LESO+SNA-PID控制策略,并通过Lyapunov稳定性理论证明了控制策略的收敛性。最后,为验证所提策略的有效性,搭建了实际的车载增稳云台,并在内、外扰动的条件下将其和传统PID以及LESO+PID控制策

基金项目: 国家自然科学基金(52467022); 广西自然科学基金(2025GXNSFAA069219); 桂林市科学研究与技术开发计划(20210226-2)

National Natural Science Foundation of China (52467022);
Natural Science Foundation of Guangxi, China
(2025GXNSFAA069219); Guilin Scientific Research and Technology
Development Program (20210226-2)

略进行对比分析。【结果】所提出的控制策略相较于传统 PID 控制以及 LESO+PID 控制在单次扰动、1 Hz 连续扰动以及 8 Hz 连续扰动情况下,角度跟踪的峰峰值等指标均有大幅度减少;在目标值修改情况下,超调量略微增加,但极大的减少了调整时间。【结论】所提基于 LESO+SNA-PID 控制策略形成的双重补偿闭环策略有效提高了对外界扰动的抗干扰能力,并提升了响应速度,具有较强的工程应用价值。

关键词: 增稳云台;线性扩张状态观测器;单神经元自适应;抗干扰能力

0 引言

作为承载成像装备的重要执行机构,增稳云台通过实时修正载体振动误差,已成为提升移动拍摄画面质量的核心装置。增稳云台被广泛应用于农业植保、电力巡检等动态成像场景中^[1-4],可以代替人工完成繁重和重复性的巡检工作,极大地提高了工作效率^[5-8]。为了满足高质量拍摄的要求,如何改善因抖动而导致的画面模糊,则成了一个关键的技术难点。当前的核心解决方案主要基于以下三类技术路径。

(1)通过视频的后期处理,分析镜头画面,根据镜头运动数据,不断对画面进行变形来稳定画面。

(2)通过机械结构来稳定摄像机轨迹,例如阻尼弹簧,最大限度的减小摄像机录制期间的抖动。

(3)通过电机控制摄像机角度,对抗外部干扰,以此稳定拍摄画面。

Duan^[9]等人、Altan^[10]等人、Königseder^[11]等人根据第三类技术路径设计增稳云台,利用传感器来获取当前姿态数据,通过控制电机进行位姿校正,使得图像平面保持清晰。但是,伴随机械结构的复杂化以及使用者对画面质量要求的提高,对增稳云台的控制策略也提出了较高的要求。针对云台的控制策略研究,各国研究者提出了各种控制算法。文献[12-13]基于传统比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivation, PID)控制,不需要对系统进行精确建模。但 PID 等单纯反馈控制算法在高定位精度、快速性等要求上存在一定局限性^[14],其鲁棒性差,抗干扰能力不足。文献[15-16]采用滑模

自适应控制,控制效果有所提升,但比较依赖模型的建模精度。文献[17-19]提出了非线性自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)估算系统内外扰动。然而,所需要的参数整定工作繁琐,参数与控制性能的关系不明确。随后文献[20]总结了二阶非线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observer, LESO)的参数整定原则。针对 ADRC 难以调参的问题,文献[21]提出了线性自抗扰控制(Linear ADRC, LADRC)理论,提出带宽法,引入了控制器带宽、观测器带宽等概念,将待整定参数进一步降低。此后带宽法逐步发展成 LADRC 参数整定的主流方法^[22-24]。文献[25]给出了 LESO 的参数确定方法,但对于自抗扰算法的整定依旧困难。文献[26]提出了 LESO 的极点配置设计方法,解决了超调量与快速性、抗扰性的矛盾,但增加了参数数量。

针对云台姿态控制中模型复杂、干扰杂乱的问题,本文提出一种基于 LESO 的 PID 控制算法,将内外干扰视为总扰动进行估计和补偿。文献[27-28]引入模糊自适应调节 PID 参数,但是对于系统模型的建模精准度要求较高。文献[29]采用了神经网络自适应,但是仅进行了仿真试验,并未部署在实物上。

考虑到微控制器的局限性导致无法搭载复杂的神经网络系统,本文选择使用单神经自适应(Single-Neural Adaptive, SNA)来调节 PID 的控制器参数,极大地简化了参数整定的工作,并根据外部干扰的变化实时整定参数。由于云台的机械解耦量较小,采用一维云台即可验证所提基于 LESO+SNA-PID 控制策略的有效性。以自主设计并搭建的车载增稳云台为研究对象,试验中采用不同的控制策略进行控制性能对比,验证可得该控制策略具有较强的鲁棒性能和控制效果。

1 基于 LESO+SNA-PID 控制器构建

本文以自主设计并搭建的车载增稳云台为研究对象,试验云台结构矢量图如图 1 所示,其主要由传感器、执行电机、干扰器件、固定平台以及微控制器组成。微控制器实时解析传感器数据,通过控制算法生成指令,驱动执行电机实现被控对象的稳定。

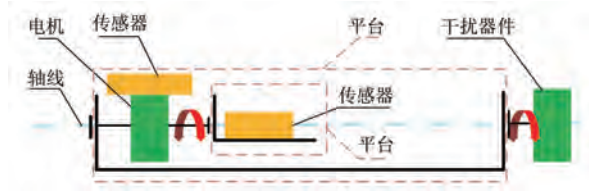


图1 试验云台结构矢量图

Fig.1 Vector diagram of the experimental gimbal structure

1.1 步进电机数学模型

为保证控制电机的精确控制,选取步进电机作为执行元件。为了避免丢步现象,本试验平台在步进电机驱动控制底层采用位置闭环控制。根据文献[30],步进电机相线圈绕组反电动势为

$$\begin{cases} U_A = \omega k_m \sin(Z_r \theta) \\ U_B = \omega k_m \cos(Z_r \theta) \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_A 、 U_B 分别为步进电机 A 相、B 相的线圈绕组反电动势; ω 为转子角速度; Z_r 为转子齿数; k_m 为步进电机反电势系数; θ 为转子机械转角。

步进电机的瞬态电磁转矩为

$$T_e = i_A k_m \sin(Z_r \theta) + i_B k_m \cos(Z_r \theta) \quad (2)$$

式中: i_A 、 i_B 分别为 A 相、B 相绕组电流。

由运动学方程得电机电磁转矩与负载之间关系为

$$T_e = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (3)$$

式中: J 为电机转子和绕臂的总转动惯量; B 为速度比例系数; T_L 为负载转矩。

为简化模型,采用单相励磁,绕臂无外部负载,在任何时刻单相励磁的步进电机只有一相励磁,电机运动方程线性化处理后,进行拉氏变换,代入初始值 0 可得:

$$G(s) = \frac{\theta_0(s)}{\theta_i(s)} = \frac{i_A^2 Z_r^2 L}{2Js^2 + 2Bs + i_A^2 Z_r^2 L} \quad (4)$$

式中: $\theta_0(s)$ 为电机输出的机械角位移; $\theta_i(s)$ 为电机的角位移信号; L 为电机绕组电感。

由式(4)可得传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta_0(s)}{\theta_i(s)} = \frac{270}{s^2 + 0.008s + 270} \quad (5)$$

所用电机型号为 42ZDT40A,电机参数如表 1 所示。

1.2 LESO 环节

针对 ADRC 参数整定困难问题,高志强教授

表 1 42ZDT40A 电机参数

Tab.1 42ZDT40A motor parameters

参数名称	额定电流 i/A	$Z_r/\text{个}$	L/mH	$J/(\text{g} \cdot \text{cm}^2)$	$B/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s})$
参数值	1.4	50	4.2	38	0.3

提出 LADRC^[31],将 ADRC 参数与控制器和观测器的频率联系起来,把参数整定问题转化为带宽调节问题。而 LESO 属于 ADRC 中的核心部分,主要功能是实时估计系统中的内部状态以及外部扰动,其优越性毋庸置疑。以步进电机作为控制目标,构建其状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = \omega \\ \dot{\omega} = \frac{N_r \psi_{\max} i_q}{2J} - B\omega - TL - \frac{T_e}{J} \sin(2N_r x) + h \end{cases} \quad (6)$$

式中: x 为机械位置; N_r 为磁极齿数; i_q 为步进电机 q 轴电流; $\psi_{\max}$ 为最大磁通量; h 为系统的内外扰动; $f = -B\omega - TL - \frac{T_e}{J} \sin(2N_r x)$ 为被控对象动态,简记为 f 。

令 $b = \frac{N_r \psi_{\max}}{2J}$,并假定 $x_1 = x$ 、 $x_2 = \omega$ 、 $x_3 = h + f + bi_q - b_0 i_{q\text{ref}}$,其中, b_0 为 b 的估计值; $i_{q\text{ref}}$ 为参考输入。引入扩张状态,满足式(7):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = \omega(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\omega(t) = \dot{f}(x, \omega)$; $u = i_q^*$ 为控制器的输入。

系统状态变量 x 的扩张状态估计值为 z ,建立系统的扩张状态观测器为

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - z_1 \\ z_1 = z_2 - \ln(e_1) \\ z_2 = z_3 + bu - \ln(e_1) \\ z_3 = -\ln(e_1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: z_1 为系统位置的跟踪信号; z_2 为系统速度的跟踪信号; z_3 为系统未知扰动的实时估计值; e_1 为观测误差,取 $g_1(e_1) = e_1$,即使用 LESO。

1.3 SNA-PID 环节

单神经元学习算法如式(9)所示:

$$\begin{cases} y = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i - \theta \\ \omega_i(t+1) = \omega_i(t) + \eta r_i(t) x_i(t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: y 为神经元输出; ω_i 为第 i 个参数权重; x_i 为第 i 个神经元参数的输入信号 (对应 PID 中的 e 、 $\int e$ 、 $\frac{de}{dt}$); θ 为神经元输出阈值; $\omega_i(t)$ 为 t 时刻的权值; η 为学习常数; $r(t) = y(t)$, r 为学习信号, 即当前神经元输出; $x_i(t)$ 为 t 时刻的第 i 个神经元参数的输入信号。

为了解决 Hebb 学习规则没有弱化连接神经元的过程, 采用有监督的 Hebb 学习规则, 表达式为

$$\Delta \omega_i(t) = \eta [y - Y_i(t)] X_i(t) Y_i(t) \quad (10)$$

式中: $\Delta \omega_i(t)$ 为权重在 t 时刻的差值; y 为期望值; $Y_i(t)$ 为当前神经元的输出; $X_i(t)$ 为当前神经元的输入。

1.4 控制器整体构建

单神经元作为神经网络中的基础结构, 其结构简单、易于搭建, 将单神经元模型与传统 PID 控制策略结合, 使用 LESO 对系统内外扰动进行实时估计, 以此增强系统的稳定性和适应性。控制器结构框图如图 2 所示。

综合控制器的数学模型为

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - y \\ z_1 = (z_2 - \beta_1 e_1) h \\ z_2 = (z_3 - \beta_2 e_1 + b_0 u) h \\ z_3 = -\beta_3 e_1 h \\ e_2 = x - z_1 \\ u_1 = \sum_{i=1}^3 \overline{w_i(k)} x_i(k) \\ \overline{w_i(k)} = w_i(k) / \|w_i(k)\| \\ u = (u_1 - z_3) / b_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中: k 为单神经元的增益系数; β_1 、 β_2 、 β_3 为观测器增益; e_2 为扩张状态观测器中与系统动态状态相关的观测误差; u_1 为经过单神经元自适应后的归一化输出; $\|w_i(k)\|$ 为权重向量的欧几里德范数, 使用 $w_i(k) / \|w_i(k)\|$ 可保证控制器的收敛性, $w_i(k)$ 通过有监督的 Hebb 学习规则进行规范化处理:

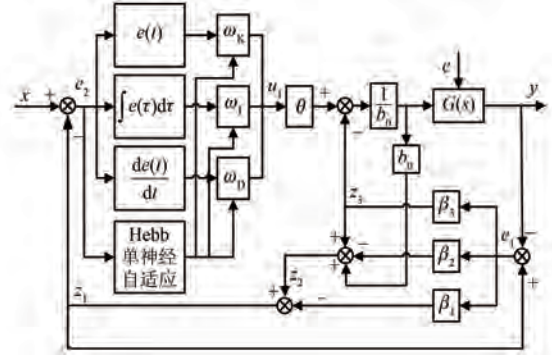


图 2 LESO+SNA-PID 控制器结构框图

Fig. 2 Structural block diagram of the LESO+SNA-PID controller

$$\begin{cases} w_1(k) = w_1(k-1) + \eta_e e(k) p(k) x_1(k) \\ w_2(k) = w_2(k-1) + \eta_e e(k) p(k) x_2(k) \\ w_3(k) = w_3(k-1) + \eta_d e(k) p(k) x_3(k) \end{cases} \quad (12)$$

式(12)描述了基于 LESO+SNA-PID 控制器的工作原理。LESO 估计的状态和总干扰用于调整 PID 控制器的输出, 其 PID 算法参数通过 SNA 算法进行在线调整, 从而提高系统的鲁棒性和控制精度。

根据步进电机传递函数, 式(5)的对应状态为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(t) + b_0 u \end{cases} \quad (13)$$

式中: $x_1 = y$; $x_2 = \dot{y}$; $b_0 = 270$ 。

参考轨迹 $y_d(t) \in \mathbb{C}^2$, 且 $\dot{y}_d$ 、 $\ddot{y}_d$ 有界, 定义观测误差为

$$\tilde{z} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \\ \tilde{z}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 - x_1 \\ z_2 - x_2 \\ z_3 - f \end{bmatrix} \quad (14)$$

将被控对象与 LESO 联立, 则:

$$\dot{\tilde{z}} = A_0 \tilde{z} + B_0 \dot{f}(t) \quad (15)$$

$$\text{式中: } A_0 = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 & 0 \\ -\beta_2 & 0 & 1 \\ -\beta_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}; B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}。$$

按照带宽 ω_0 配置 LESO 增益 β_1 、 β_2 、 β_3 , 使 $s^3 + \beta_1 s^2 + \beta_2 s + \beta_3$ 为 Hurwitz 矩阵, 取 $P = P^T > 0$ 满足 Lyapunov 方程, 则:

$$\begin{aligned} A_0^T P + P A_0 &= -Q \\ Q &= Q^T > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

令 $V_0(\tilde{z}) = \tilde{z}^T P \tilde{z}$, 则沿轨迹:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0(\tilde{z}) &= -\tilde{z}^T Q \tilde{z} + 2\tilde{z}^T P B_0 \dot{f}(t) \leq \\ & -\lambda_{\min}(Q) \|\tilde{z}\|^2 + 2\|P B_0\| \|\tilde{z}\| \|\dot{f}(t)\| \end{aligned} \quad (17)$$

存在常数 $c_0, \mu_0 > 0$ 与常数 $\bar{d} = \sup_t \|\dot{f}(t)\| < \infty$, 使得:

$$\|\tilde{z}(t)\| \leq c_0 e^{-\mu_0 t} \|\tilde{z}(0)\| + \frac{2\|P B_0\| \bar{d}}{\lambda_{\min}(Q)} \bar{d} \quad (18)$$

因此, 若 $\dot{f} \equiv 0$, 则 $\tilde{z}(t)$ 指数收敛到 0; 若 $\dot{f}$ 有界, 则 $\tilde{z}(t)$ 指数收敛到与 $\bar{d}$ 成正比的小邻域。

记 SNA-PID 的输入向量为 $\xi = [e, \int_0^T e, \dot{e}]^T$, 由控制律与系统动态可得:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{y} - \dot{y}_d = f + b_0 u - \dot{y}_d = \\ f + u_1 - z_3 - \dot{y}_d &= u_1 - \tilde{z}_3 - \dot{y}_d \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $u_1 = \omega^T \xi$, 取候选 Lyapunov 函数为

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{1}{2} e^2 + \frac{1}{2} \dot{e}^2 + \\ & \frac{1}{2} \left[\int_0^T e(\tau) d\tau \right]^2 + \frac{1}{2} \tilde{\omega}^T \Gamma^{-1} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $\tilde{\omega} = \omega - \omega^*$, 且 ω^* 为某个存在的常数向量, 满足:

$$\omega^{*T} \xi = \dot{y}_d - k_1 e - k_2 \dot{e} - k_3 \int_0^T e \quad (21)$$

式中: $k_1, k_2, k_3 > 0$ 为任意选定的正数。

沿系统轨迹对 V_c 求导并代入 $\dot{\omega} = \Gamma \text{ep}(t) \xi$, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &= e \dot{e} + \dot{e}(\omega^T \xi - \tilde{z}_3 - \dot{y}_d) + \\ & \left(\int_0^T e \right) \dot{e} + \tilde{\omega}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\omega}} = -k_1 e^2 - \\ & k_2 \dot{e}^2 - k_3 \left(\int_0^T e \right)^2 + \dot{e} \tilde{\omega}^T \xi - \\ & \tilde{e} \tilde{z}_3 + \tilde{\omega}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\omega}} \end{aligned} \quad (22)$$

利用自适应律的具体形式可得:

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\omega}} &= \tilde{\omega}^T \Gamma^{-1} \Gamma \text{ep}(t) \xi = \\ & \text{ep}(t) \tilde{\omega}^T \xi \end{aligned} \quad (23)$$

若 $p(t) \equiv 1$, 交叉项 $\dot{e} \tilde{\omega}^T \xi$ 与 $\tilde{\omega}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\omega}}$ 恰好抵消, 从而得到:

$$\dot{V}_c \leq -k_1 e^2 - k_2 \dot{e}^2 - k_3 \left(\int_0^T e \right)^2 + |\dot{e}| |\tilde{z}_3| \quad (24)$$

对式(24)中最后一项使用 Young 不等式, 任取 $\varepsilon \in (0, 2k_2)$, 则:

$$|\dot{e}| |\tilde{z}_3| \leq \frac{\varepsilon}{2} \dot{e}^2 + \frac{1}{2\varepsilon} \tilde{z}_3^2 \quad (25)$$

因此:

$$\begin{aligned} \dot{V}_c &\leq -k_1 e^2 - \left(k_2 - \frac{\varepsilon}{2} \right) \dot{e}^2 - \\ & k_3 \left(\int_0^T e \right)^2 + \frac{1}{2\varepsilon} \tilde{z}_3^2 \end{aligned} \quad (26)$$

由式(18)可知, 当 $\dot{f} \equiv 0$ 时 $\tilde{z}_3 \rightarrow 0$, $\tilde{z}_3^2(t)$ 指数收敛到与 $\bar{d}^2$ 成比例的常数量。因此存在常数 $\alpha = \min\left\{k_1, k_2 - \frac{\varepsilon}{2}, k_3\right\} > 0$ 与常数 $\Delta = \frac{1}{2\varepsilon} \bar{d}_*^2$ 使:

$$\dot{V}_c \leq -\alpha \left\| \begin{bmatrix} e, \dot{e}, \int_0^T e \end{bmatrix} \right\|^2 + \Delta \quad (27)$$

由此可得出: (1) 若 $\bar{d}_* = 0$ (即 $\dot{f} \equiv 0$, LESO 误差趋于 0), 式(27)退化为 $\dot{V}_c \leq -\alpha \|\cdot\|^2$, V_c 指数衰减, 进而 $[e, \dot{e}, \int_0^T e]$ 指数收敛到零; (2) 若 $\bar{d}_* > 0$, 式(27)则表明闭环对 LESO 残差有界, 跟踪误差最终被限制为

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \left\| \begin{bmatrix} e, \dot{e}, \int_0^T e \end{bmatrix} \right\| \leq \sqrt{\frac{\Delta}{\alpha}} \quad (28)$$

2 试验系统构建与实现

2.1 车载增稳云台系统框架

本试验平台系统总设计如图 3 所示, 该系统以角位移以及角速度作为系统输入, 通过微控制器向步进电机驱动器输出位置数据, 以此控制步进电机驱动的脉冲量。

系统在运行过程中, 由两个姿态传感器分别采集倾角台以及增稳台的位姿状态, 将采集数据作为实时反馈输入到微控制器中, 以上部分均安装在固定平台上。步进电机被安置在倾角台且跟随倾角台旋转, 倾角台和舵机的舵盘固定, 增稳台和步进电机输出轴固定, 以上平台均沿同一轴线旋转运动。微控制器通过控制算法对姿态数据进行运算, 向步进电机发送目标位置数据, 实现增稳台位置控制, 最后通过串口通

信的方式将试验数据传输至上位机观察波形检验效果。

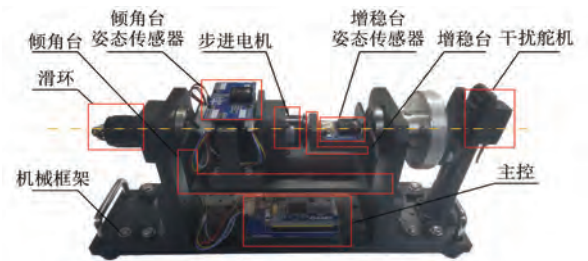


图 3 车载增稳云台系统框架

Fig. 3 Framework of the vehicle-mounted stabilized gimbal system

2.2 车载增稳云台系统硬件设计

采用 STM32F103ZET6 芯片作为微控制器, 使用其内部两个 USART 接口对倾角台以及增稳台姿态传感器进行采集, 通过定时器 TIM 通道输出脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 信号对主动干扰舵机进行控制, 同时利用 USART 接口对步进电机进行细分控制。设计并实现了基于 RS232 接口的上位机通讯系统, 用于实时传输和显示倾角台与增稳台的位姿数据。选用 HWT606 六轴姿态传感器, 通过获取芯片三轴加速度、陀螺仪及磁场数据, 使用卡尔曼滤波融合算法解出三轴角度数据。其 X、Y 轴角度精度在远离磁场干扰时可达 0.01° , 波特率可达 921 600, 回传速率最高可达 1 000 Hz, 满足高速率采样需求。在姿态传感器的电路设计中, 考虑到电压击穿的问题, 设计了防过流、防过压和防反接等保护电路。车载增稳云台系统硬件电路设计图如图 4 所示。

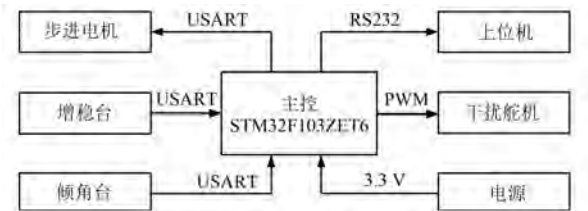


图 4 车载增稳云台系统硬件电路设计图

Fig. 4 Hardware circuit design diagram of the vehicle-mounted stabilized gimbal system

2.3 车载增稳云台系统软件设计

车载增稳云台系统主程序流程图如图 5 所示。系统首先完成各项外设初始化, 如时钟、GPIO、USART 和 RS232 等。主程序采取时间片

轮询机制。MAIN 函数循环控制步进电机的程序以及与上位机的姿态数据传递。设置两个定时器中断, 通过判断标志位来执行定时器任务, 分别将姿态数据的采集以及控制算法写入定时器任务中。

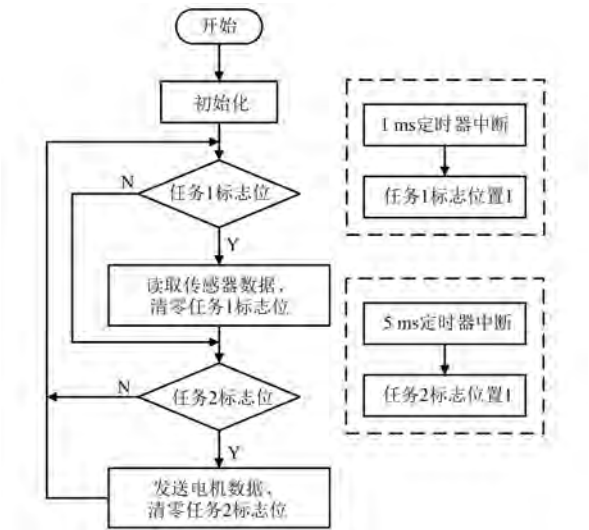


图 5 车载增稳云台系统主程序流程图

Fig. 5 Main program flowchart of the vehicle-mounted stabilized gimbal system

提高系统精度的关键之一就是获取高精度的姿态状态数据, 姿态传感器内部集成姿态解算器, 同时配合卡尔曼滤波算法, 快速求解当前云台的实时姿态角 (滚转角、航向角和俯仰角), 并且将姿态角的数据不断更新存储在数组中, 再通过定时器中断, 将获取的姿态角加载至先进 PID 算法中, 进行干扰补偿。姿态检测流程如图 6 所示。

由于电机负载较小并需要较高精度度, 因此

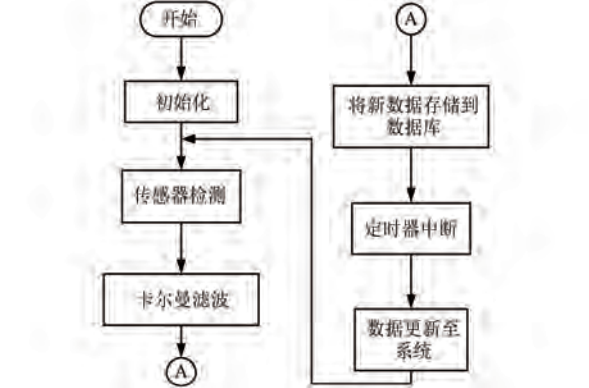


图 6 姿态检测流程图

Fig. 6 Attitude detection flowchart

本系统采用微步进驱动控制算法的步进闭环驱动器,通过 USART 串口进行位置控制,可读取电机的位置以及当前状态,从而准确控制电机。电机控制流程如图 7 所示。

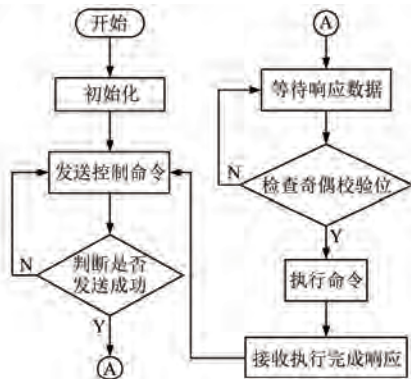


图 7 电机控制流程图
Fig. 7 Motor control flowchart

3 试验测试与结果分析

在完成系统软硬件设计的基础上,进行车载增稳云台的干扰试验验证。车载增稳云台试验如图 8 所示。系统通过舵机摇动把手,用以模拟扰动,并保证算法对比中的扰动变量相同。LESO、SNA 以及 PID 参数设计如表 2 所示, K_{pl} 为外环 PID 参数。

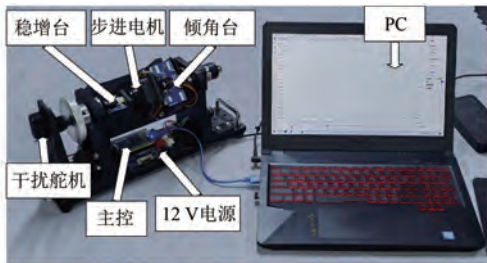


图 8 车载增稳云台扰动试验
Fig. 8 Disturbance rejection test of the vehicle-mounted stabilized gimbal system

试验为模拟车载云台多维扰动工况,设计四类验证场景:(1)极端瞬态冲击测试;(2)低频扰动测试;(3)高频扰动测试;(4)动态重定位测试。试验将从超调量、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 及控制消耗量等角度进行分析。其中,控制消耗量通过 $E = \sum |u(t)| \cdot \Delta t$ 计算。

表 2 控制器参数

控制策略	参数名称	参数值
SNA	K	10
	η_p	0.02
	η_i	0.002
	η_d	0.01
	ω_p	0.1
	ω_i	0.001
	ω_d	0.001
	b_0	6 500
	h	0.007
	r	2 000
LESO	ω_0	90
	ω_c	10
	K_{pl}	0.7
PID	K_p	1.9
	K_i	0.003
	K_d	0.002

3.1 外部给予 110°大幅度单次干扰

舵机设置初始位置 -50° ,随后旋转至 60° ,使倾角台产生 110° 大幅度的旋转,用于模拟机载云台在行驶路况中遭遇极大起伏的情况。由于干扰舵机以及车载增稳云台精度,干扰角度将会有 $\pm 1^\circ$ 的误差。

单次扰动情况下各项指标对比如表 3 所示。由表 3 可知,三种控制策略都可以保证控制的稳定性,但控制效果不同,如图 9 所示,LESO + SNA-PID 控制策略相较于 LESO+PID 以及传统 PID,在峰峰值上,分别减少了 23.79%、40.21% ;

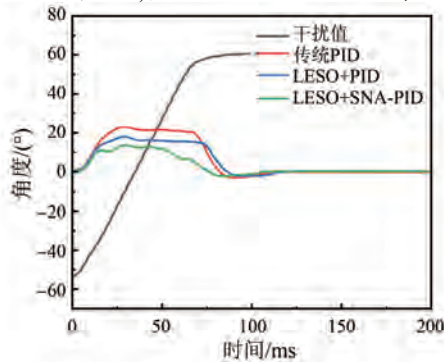


图 9 110°单次扰动角度跟踪图
Fig. 9 Angle tracking plot under a 110° step disturbance

如图 10 所示,在 RMSE 上,分别减少 34.30%、48.22%;在 MAE 上,分别减少 37.65%、49.38%。如图 11 所示,能耗方面,传统 PID 能耗最多,为 1.28 J,LESO+SNA-PID 控制策略能耗最少,为 1.04 J。由此可见 LESO 的加入可以有效的估计系统的误差,从而降低波动角度。而另一方面自适应算法的引入,可实现参数的实时调整,使得控制策略的效果得到明显提升。由于扰动缓慢进行,三种控制策略在调整时间上差距较小。

表 3 单次扰动情况下各项指标对比

Tab.3 Comparison of performance metrics under step disturbance				
控制策略	峰峰值/(°)	RMSE/(°)	MAE/(°)	能耗/J
LESO+SNA-PID	13.71	4.871	2.439	1.04
LESO+PID	17.99	7.414	3.912	1.28
传统 PID	22.93	9.407	4.818	1.31

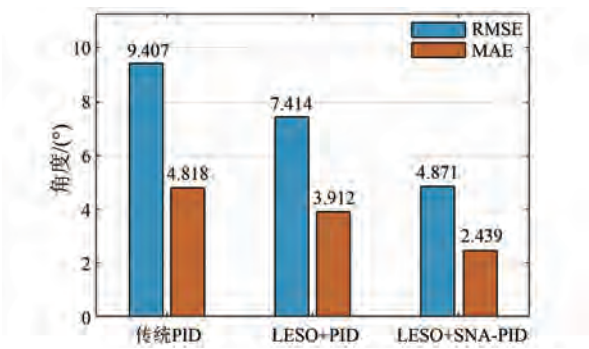


图 10 110°单次扰动误差动态分析图

Fig. 10 Dynamic error analysis plot under a 110° step disturbance

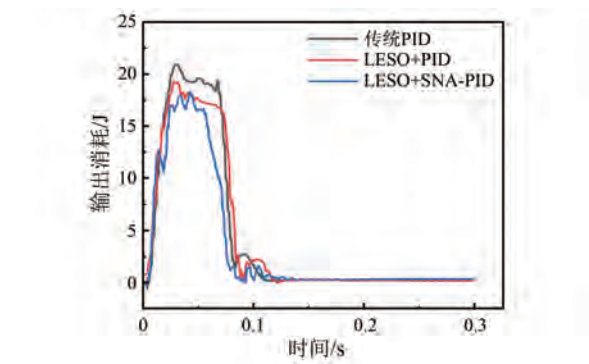


图 11 110°单次扰动控制量消耗图

Fig. 11 Control energy consumption plot under a 110° step disturbance

3.2 外部给予 1 Hz 频率干扰

干扰舵机以 1 Hz 频率产生正弦波,使倾角台

在 76°的幅值内往复旋转,用以模拟机载云台在颠簸路况缓慢行驶的情况。

1 Hz 连续扰动情况下各项指标对比如表 4 所示。各项控制策略在 1 Hz 连续扰动情况下的控制效果分别如图 12~15 所示。图 12 中,LESO+SNA-PID 控制策略相较于 LESO+PID 以及传统 PID,在峰峰值上,分别减少 26.93%、39.10%;图 13 中,在 RMSE 上分别减少 39.72%、57.30%,在 MAE 上分别减少 42.75%、59.30%;图 14 中,能耗方面 LESO+PID 能耗最少,为 7.91 J,LESO+SNA-PID 控制策略能耗最多,为 10.02 J。

表 4 1 Hz 连续扰动情况下各项指标对比

Tab.4 Comparison of performance metrics under 1 Hz contincous disturbance				
控制策略	峰峰值/(°)	RMSE/(°)	MAE/(°)	能耗/J
LESO+SNA-PID	5.78	1.205	1.042	10.02
LESO+PID	7.91	1.999	1.820	7.91
传统 PID	9.49	2.822	2.560	9.91

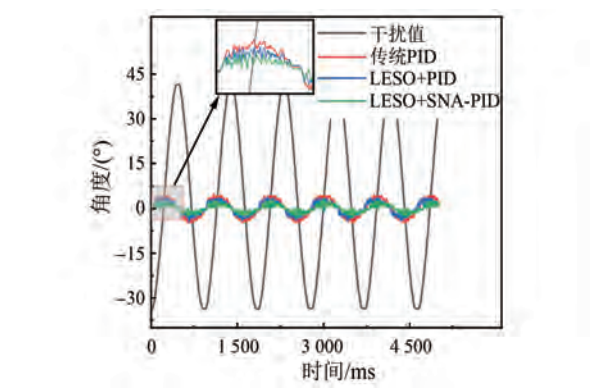


图 12 1 Hz 连续扰动角度跟踪图

Fig. 12 Angle tracking plot under 1 Hz continuous disturbance

3.3 外部给予 8 Hz 频率干扰

干扰舵机以 8 Hz 频率产生正弦波,使倾角台在 70°的幅值内往复旋转,用以模拟机载云台在颠簸路况快速行驶的情况。

8 Hz 连续扰动情况下各项指标对比如表 5 所示。各项控制策略在 8 Hz 连续扰动情况下的控制效果分别如图 16~19 所示。图 16 中,LESO+SNA-PID 控制策略相较于 LESO+PID 以及传统 PID,在峰峰值上,分别减少 23.17%、50.73%;图 17 中,在 RMSE 上分别减少 32.28%、57.30%,在 MAE上分别减少32.07%、57.29%。图18中,能

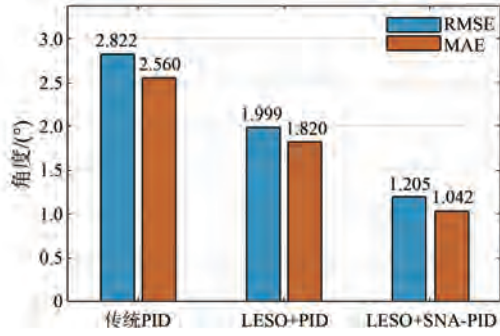


图 13 1 Hz 连续扰动误差动态分析图

Fig. 13 Dynamic error analysis plot under 1 Hz continuous disturbance

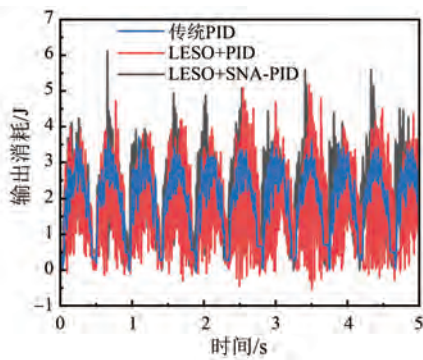


图 14 1 Hz 连续扰动控制量消耗图

Fig. 14 Control energy consumption plot under 1 Hz continuous disturbance

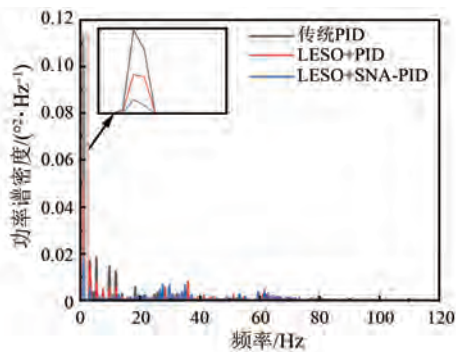


图 15 1 Hz 连续扰动频谱分析图

Fig. 15 Spectrum analysis plot under 1 Hz continuous disturbance

表 5 8 Hz 连续扰动情况下各项指标对比

Tab. 5 Comparison of performance metrics under 8 Hz continuous disturbance

	峰值/(°)	RMSE/(°)	MAE/(°)	能耗/J
LESO+SNA-PID	24.27	7.858	7.243	59.31
LESO+PID	31.59	11.604	10.663	48.49
传统 PID	49.26	18.402	16.959	61.97

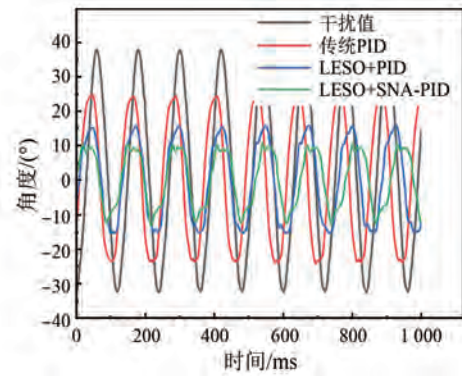


图 16 8 Hz 连续扰动角度跟踪图

Fig. 16 Angle tracking plot under 8 Hz continuous disturbance

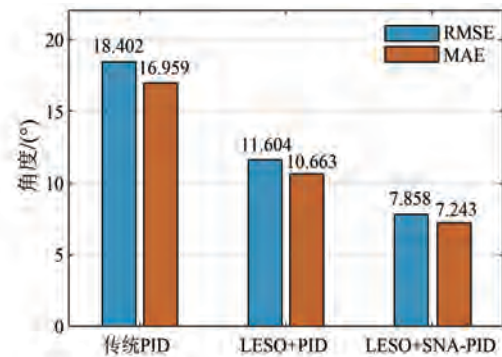


图 17 8 Hz 连续扰动误差动态分析图

Fig. 17 Dynamic error analysis plot under 8 Hz continuous disturbance

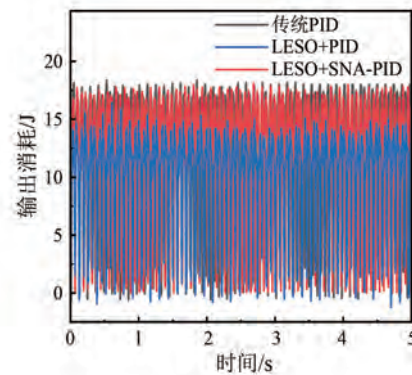


图 18 8 Hz 连续扰动控制量消耗图

Fig. 18 Control energy consumption plot under 8 Hz continuous disturbance

耗方面, LESO+PID 能耗最少, 为 48.49 J, 传统 PID 控制策略能耗最多, 为 61.97 J。由此可见 LESO 有效补偿了系统扰动和模型不确定性, 而 SNA 显著提升了控制系统的鲁棒性和精度, 使系统收敛性能有了极大的提升。

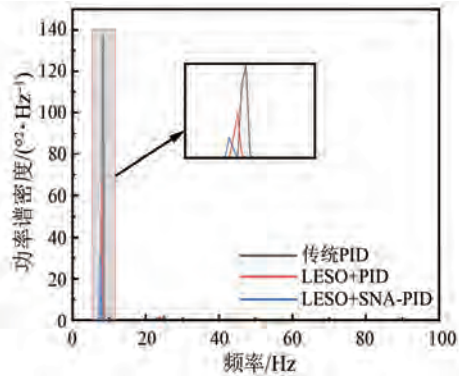


图 19 8 Hz 连续扰动频谱分析图

Fig. 19 Spectrum analysis plot under 8 Hz continuous disturbance

3.4 内部目标值给予 30°干扰

微控制器将控制目标由 0°改为 30°,使增稳台迅速旋转至 30°目标值,以此模拟云台需要更改控制角度的情况。内部扰动角度跟踪图如图 20 所示,内部扰动控制量消耗图如图 21 所示,内部扰动情况下各项指标对比如表 6 所示。

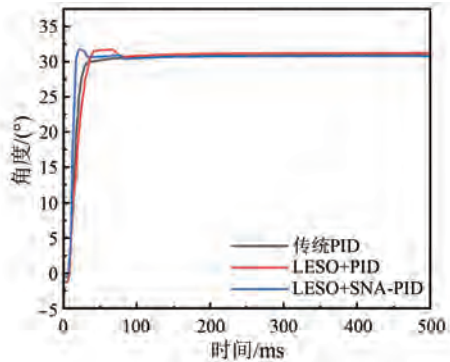


图 20 内部扰动角度跟踪图

Fig. 20 Angle tracking plot under internal disturbance

表 6 内部扰动情况下各项指标对比

Tab. 6 Comparison of performance metrics under internal disturbance

控制策略	超调量/%	调整时间/ms	能耗/J
LESO+SNA-PID	5.7	24	0.76
LESO+PID	5.8	75	0.75
传统 PID	0	39	0.63

由图 20 可知,LESO+SNA-PID 控制策略相较于 LESO+PID 以及传统 PID,超调量为 5.7%,但调整时间分别减少 68.00%、38.46%。由图 21 可知,输出能耗差距较小,传统 PID 能耗为 0.63 J,

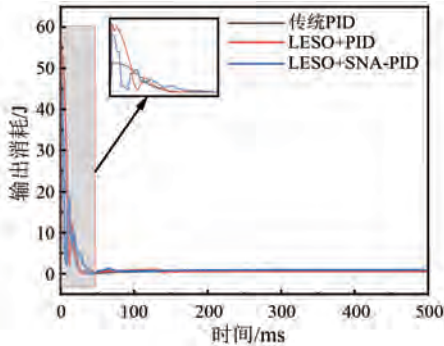


图 21 内部扰动控制量消耗图

Fig. 21 Control energy consumption plot under internal disturbance

LESO+SNA-PID 控制策略能耗为 0.76 J。经研究表明,LESO 与 SNA 可以有效结合,进一步增强控制策略的性能。

4 结语

本文提出一种基于 LESO+SNA-PID 的控制策略,通过车载增稳云台验证,该策略可显著提升系统鲁棒性和抗扰能力。试验表明:(1)单次扰动下,LESO+SNA-PID 控制策略相较于 LESO+PID、传统 PID,峰峰值误差分别减少 23.79% 和 40.21%;连续扰动(1 Hz/8 Hz)下,抗干扰性能均优于对比算法;内部扰动下,超调量低且调整时间短。(2)能耗方面,基于 LESO+SNA-PID 的控制策略在单次扰动下最优,LESO+PID 在连续扰动下占优。本文所提控制策略结合了 LESO 的快速扰动补偿和 SNA 的在线参数调优,降低了部署难度,未来将应用于二维云台控制。

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

严继池、于雁南进行了方案设计、理论指导,李纪臻进行了试验研究与论文撰写,陈明帆、周慧佳进行了设备搭建与内容总结,严继池、李纪臻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 theoretical guidance

were carried out by Yan Jichi and Yu Yannan. The experimental research and paper writing were performed by Li Jizhen. Equipment setup and results summarization were conducted by Chen Mingfan and Zhou Huijia. The manuscript was reviewed and revised by Yan Jichi and Li Jizhen. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] MOYSIADIS V, TSOLAKIS N, KATIKARIDIS D, et al. Mobile robotics in agricultural operations: A narrative review on planning aspects [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 3453.
- [2] 张静. 风机运维机器人的上位机控制界面设计方法[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(1): 95-100.
ZHANG J. Design method of control interface in host computer of operation and maintenance robot for wind generator [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(1): 95-100.
- [3] HUSSAIN M, HE L, SCHUPP J, et al. Green fruit segmentation and orientation estimation for robotic green fruit thinning of apples [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 207: 107734.
- [4] FASIOLO D T, PICHIERRI A, SIVILOTTI P, et al. An analysis of the effects of water regime on grapevine canopy status using a UAV and a mobile robot [J]. *Smart Agricultural Technology*, 2023, 6: 100344.
- [5] RUMSON A G. The application of fully unmanned robotic systems for inspection of subsea pipelines [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 235: 109214.
- [6] LIAW S H, LEE T C. A brief review of artificial intelligence robotic in food industry [J]. *Procedia Computer Science*, 2024, 232: 1694-1700.
- [7] MA W, WANG X, YANG S X, et al. Autonomous inspection robot for dead laying hens in caged layer house [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 227: 109595.
- [8] DU Y R, LIU M, WANG J X, et al. A wall climbing robot based on machine vision for automatic welding seam inspection [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 310 (Part 2): 118825.
- [9] DUAN Q W, ZHOU X, HE Q N, et al. Pointing control design based on the PID type-III control loop for two-axis gimbal systems [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 331: 112923.
- [10] ALTAN A, HACIOGLU R. Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on UAV for real-time target tracking under external disturbances [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138: 106548.
- [11] KONIGSEDER F, KEMMETMULLER W, KUGI A. Attitude control strategy for a camera stabilization platform [J]. *Mechatronics*, 2017, 46: 60-69.
- [12] LIU G P, DALEY S. Optimal-tuning PID control for industrial systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, 9: 1185-1194.
- [13] 蔡清清, 王景存, 文冬. PID 双闭环在吸盘机械手位置控制系统中的应用[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(2): 54-59.
CAI Q Q, WANG J C, WEN D. Application of PID dual-closed-loop in the position control system of suction-type manipulator [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(2): 54-59.
- [14] 吕宏宇, 金刚石, 刘立志, 等. 光电跟踪转台伺服控制策略研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(4): 503-508.
LYU H Y, JIN G S, LIU L Z, et al. Research on servo control strategy of opto-electronic tracking turntable [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(4): 503-508.
- [15] ABRO G E M, BIN M Z S A, ASIRVADAM V S, et al. Dual-loop single dimension fuzzy-based sliding mode control design for robust tracking of an underactuated quadrotor craft [J]. *Asian Journal of Control*, 2023, 25: 144-169.
- [16] 张庆新, 庞济宝, 王书礼. 一种载人电动飞机永磁同步电机的在线辨识滑模控制方法[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(11): 9-15.
ZHANG Q X, PANG J B, WANG S L. A sliding mode control method for online identification of permanent magnet synchronous motor of manned electric aircraft [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(11): 9-15.
- [17] 郝正杰. 基于自抗扰控制的永磁同步电机驱动系统关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
HAO Z J. Research on key technologies of permanent magnet synchronous motor drive system based on active disturbance rejection control [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [18] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. *前沿科学*, 2007,

- (1): 24-31.
- HAN J Q. Auto disturbances rejection control technique [J]. *Frontier Science*, 2007, (1): 24-31.
- [19] 郭伟, 罗力成, 陆江燕, 等. 基于线性自抗扰控制的永磁同步电机无传感器控制[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(8): 1-8.
- GUO W, LUO L C, LU J Y, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on linear active disturbance rejection control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(8): 1-8.
- [20] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. *控制工程*, 2002, 9(3): 13-18.
- HAN J Q. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3): 13-18.
- [21] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]// *American Control Conference*, Denver, Colorado, 2003.
- [22] 袁东, 马晓军, 曾庆含, 等. 二阶系统线性自抗扰控制器频带特性与参数配置研究[J]. *控制理论与应用*, 2013, 30(12): 1630-1640.
- YUAN D, MA X J, ZENG Q H, et al. Research on frequency-band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control of second-order systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(12): 1630-1640.
- [23] 张超, 朱纪洪, 高亚奎. 自抗扰控制器的阶次与参数的选取[J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(11): 1480-1485.
- ZHANG C, ZHU J H, GAO Y K. Order and parameter selections for active disturbance rejection controller [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(11): 1480-1485.
- [24] TAN W, FU C F. Linear active disturbance-rejection control: Analysis and tuning via IMC [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63: 2350-2359.
- [25] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- HAN J Q. Active Disturbance Rejection Control Technique the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [26] 杨赛东, 张士雄, 刘亚奇. 基于极点配置的二阶线性自抗扰控制器[J]. *控制工程*, 2022, 29(11): 2103-2110.
- YANG S D, ZHANG S X, LIU Y Q. Second-order linear active disturbance rejection controller based on pole configuration [J]. *Control Engineering of China*, 2022, 29(11): 2103-2110.
- [27] WANG Z L, LAI Z, SU X J, et al. Hybrid force/position control in workspace of robotic manipulator in uncertain environments based on adaptive fuzzy control [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2021, 145: 103870.
- [28] 李学明, 黄明明, 彭辉, 等. 基于模糊自适应策略的大功率牵引电机定速控制[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(8): 40-46.
- LI X M, HUANG M M, PENG H, et al. Constant speed control of high power traction motor based on fuzzy adaptive strategy [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(8): 40-46.
- [29] LIU H T, WANG R, SUN F, et al. Adaptive self-structuring neural network control for full-state constrained hydraulic systems with disturbance compensation [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2024, 129: 1-24.
- [30] ACARNLEY P. *Stepping Motors: A Guide to Theory and Practice* [J]. 4th ed. London: IET Digital Library, 2002.
- [31] SUN B S, GAO Z Q. A DSP-based active disturbance rejection control design for a 1 kWh-bridge DC-DC power converter [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2005, 52: 1271-1277.

收稿日期:2025-06-16

收到修改稿日期:2025-08-28

作者简介:

严继池(1981-),男,硕士,高级工程师,研究方向为开关电源和智能控制,18646104988@163.com;

*通信作者:于雁南(1979-),女,博士,副教授,研究方向为开关电源、无功补偿,yyannan@126.com。