

文章编号: 1002-1582(2025)06-0660-09

车载光电平台精确跟瞄控制技术研究

陈 燊, 郝小健, 周婧, 郭小虎*, 张雅琼, 孟婷婷
(中国北方车辆研究所, 北京 100072)

摘 要: 为解决车载光电平台在复杂陆域战场条件下对高机动目标的精确跟瞄控制, 提高车载光电平台对高机动目标的对抗能力, 文章在对实车采集的颠簸、速射武器扰动数据分析的基础上研究了复合轴控制技术和视轴稳定控制策略, 设计并优化粗精跟踪系统控制器, 通过搭建复合轴控制系统仿真模型进行验证, 仿真结果表明, 复合轴系统能够显著提高光电跟瞄系统的指向精度与稳定性, 减小视轴的角度晃动误差, 满足系统高精度快速跟瞄的指标要求, 为相关研究提供了技术支撑。

关 键 词: 车载光电平台; 复合轴系统; 控制器; 稳定精度

中图分类号: TH745

文献标识码: A

Research on precise target-tracking control technology for vehicle-mounted electro-optical platform

CHEN Shen, HAO Xiaojian, ZHOU Jing, GUO Xiaohu*, ZHANG Yaqiong, MENG Tingting
(China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: To address the challenge of achieving precise tracking and aiming control for a vehicle-mounted Electro-Optical platform under complex terrestrial battlefield conditions against highly maneuverable targets and to enhance the platform's counter-drone capability, a simulation model for the compound-axis control system is established through the investigation of compound-axis control techniques and aiming line stabilization strategies. By designing and optimizing the controller for the tracking system and validating it with experimental data on vehicle bumpiness and high-rate weapon disturbances, the simulation results demonstrate that the compound-axis system can significantly improve the tracking system's accuracy and pointing stability, reduce angular jitter in the line-of-sight, and meet the requirements for high-precision, rapid tracking. This work provides reliable support for related research.

Keywords: vehicle-mounted electro-optical platform; compound-axis control system; controller; stabilization accuracy

0 引 言

随着无人机平台与侦查通信技术的日趋成熟, 以无人机、反坦克导弹为代表的具有小型、灵活、快速反应等特点的高机动装备, 在情报侦察、低空打击等作战任务中应用日益广泛, 使低空环境更加复杂^[1], 对地面机动平台的战场生存能力构成严重的威胁。车载光电平台是陆域装甲火控系统的重要分

系统之一, 具备目标捕获、跟踪、瞄准和测距等功能。新型复杂化的作战环境对系统精确跟瞄控制的要求越来越高。因此, 基于车载光电平台的精确跟瞄控制技术是突破现有反无及对抗系统瓶颈的关键手段。

目前, 用于目标探测的车载周视光电平台多以两自由度U型架结构为主, 可达到水平 360°, 俯仰近 90° 的运动范围, 通过对转台结构平衡性优化设计及控制算法研究, 稳定精度可以达到

收稿日期: 2025-03-21; 收到修改稿日期: 2025-05-20

作者简介: 陈燊 (2000—), 男, 工程师, 硕士, 从事车辆工程研究。cs995792248@gmail.com

郭小虎 (1986—), 男, 研究员, 博士, 从事光学仪器设计研究。

* 通讯作者: guoxiaohu_0317@163.com

0.2mil(1 σ)。然而,复杂环境存在路面颠簸、车体振动等高频扰动,同时叠加高机动低空目标快速移动特性,传统基于陀螺的单轴惯性稳定平台因带宽、陀螺自身精度限制难以及时完成校正。

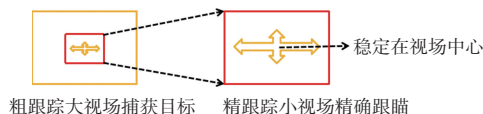


图1 视场切换示意图

面向当前军事应用需求,本文提出以方位/俯仰双轴粗调与快速反射镜精调协同工作的复合轴控制策略^[2-3],该策略通过主轴组成的粗跟踪系统实现大范围调整角度并捕获目标、通过快速反射镜组成的精跟踪系统实现小角度高频扰动快速补偿,能够显著提高跟瞄系统的指向稳定性和目标跟踪精度,是实现光电平台高精度跟瞄的一种有效途径。近年来,自抗扰控制^[4]、最优控制、模糊控制^[5]和智能控制等方法被广泛应用于复合轴控制系统的优化设计,然而不同载体的实际应用场景存在显著差异,环境主要扰动源、控制精度要求等都是需要考虑的问题。例如,舰载复合轴系统主要面对舰体摇摆、海浪冲击等低频大幅度扰动^[6-7],其控制策略更注重低频稳定性与大范围视轴控制;机载复合轴系统^[8]需应对高速飞行带来的气动干扰和机动运动影响,具有较高的频率且能量相对集中,且机载光电吊舱可以采用减振器构成的隔振系统^[9,10]对其有效吸收和衰减,而车载光电平台与火炮平台需要保持刚性连接,以避免柔性特性对连接处引入微小位移和动态滞后,确保姿态和指向的高度一致。此外,车载光电平台需适应路面颠簸、发动机震动、越野急转与加减速导致姿态突变、武器射击后坐力等多动态干扰,其扰动具有随机性、冲击性和宽频带特性,对系统的精确跟瞄控制提出了更高的挑战。

本文围绕车载光电平台复合轴控制系统的建模、控制策略优化及仿真分析展开研究,重点探讨其对高精度跟瞄与抗扰动能力的提升,并对实车采集的车辆颠簸、速射武器扰动数据进行分析,通过对复合轴双轴的控制算法设计,提高系统伺服带宽,抑制平台的高频振动,验证该控制策略的有效性。

1 复合轴控制系统原理

光电平台的复合轴控制通常由方位/俯仰两轴可调的光电平台及其内部安装的快速反射镜系统组成,以下将视场大、带宽较小的方位/俯仰两轴伺服系统称为主轴,也称为粗跟踪系统,视场小、响应快的快速反射镜系统称为子轴,也称为精跟

踪系统。粗精跟踪系统的视场切换如图1所示,当目标进入粗跟踪视场,由光电平台方位/俯仰两轴伺服控制系统完成对目标的粗跟踪,并将目标捕获到精跟踪系统的视场中,同时开启快速反射镜对目标进行更精确的跟瞄控制,使目标能够持续稳定在视场中心。

复合轴系统的原理框图如图2所示。

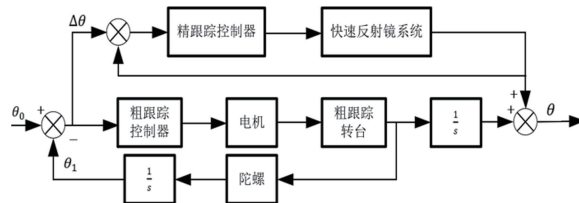


图2 复合轴控制系统原理框图

复合轴系统控制框图及传递函数如图3所示。

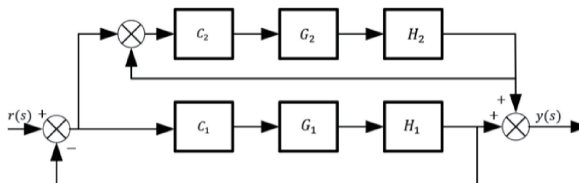


图3 复合轴系统控制框图

粗跟踪系统开环传函和误差函数为

$$P_1(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)} \quad (1)$$

$$E_1(s) = \frac{1}{1 + W_1(s)} \quad (2)$$

精跟踪系统开环传函和误差函数为

$$P_2(s) = \frac{W_2(s)}{1 + W_2(s)} \quad (3)$$

$$E_2(s) = \frac{1}{1 + W_2(s)} \quad (4)$$

系统的闭环传函和误差传函为

$$\Phi_c = \frac{W_1(s)W_2(s) + W_1(s) + W_2(s)}{[1 + W_1(s)][1 + W_2(s)]} \quad (5)$$

$$E(s) = 1 - \Phi_c = E_1(s)E_2(s) \quad (6)$$

式中, $W_1(s) = C_1(s)G_1(s)H_1(s)$; $W_2(s) = C_2(s)G_2(s)H_2(s)$ 。 $C_1(s)$ 、 $C_2(s)$ 为系统控制器, $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 为被控对象传递函数, $H_1(s)$ 、 $H_2(s)$ 为系统探测器传递函数。

由上可知,整个系统的误差等于两个子系统误差传函的乘积,根据关联系统的稳定性判定条件可以得出,系统中粗、精二级控制系统均达成稳定控制后,复合轴系统则实现稳定^[11]。精跟踪系统的功能是对粗跟踪的误差进行校正,最终跟瞄效果是两个系统的叠加,复合轴系统的最终跟踪

误差实际为精跟踪系统的误差，所以复合轴系统的性能由两个方面来决定：一是粗跟踪的光电转台系统，二是快速反射镜的性能。此外，带宽决定了系统能否及时响应扰动并补偿目标运动。通常粗跟踪系统带宽较低（1~10Hz），主要用于大范围目标跟踪；精跟踪系统带宽较高（50~200Hz），用于补偿高频振动和冲击。

2 复合轴系统建模分析

2.1 系统组成与模型

传统的光电平台跟瞄系统主要由控制器、功率放大器、陀螺、有刷力矩电机、负载组成。原理框图如图 4 所示。

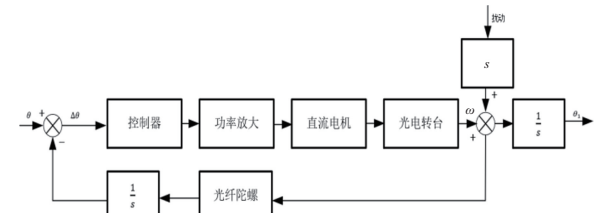


图 4 粗跟踪控制系统原理框图

系统输入给定角度 θ ，与光纤陀螺输出的角速度积分后的角度相减得到差角信号，经过控制器和 PWM 功率放大后生成电压信号送入直流力矩电机，从而引导光电平台跟瞄系统跟随指定目标；当光电平台相对惯性空间有转动时，即电机部分有干扰力矩输入时，光纤陀螺也会输出相应的角速度信号^[12]，经过控制器和功率放大后，控制电机向扰动相反方向转动直至陀螺信号为零，即完成稳定控制。根据需求，本文选定的直流力矩电机各项参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

类型参数	水平电机	垂直电机
$K_b/(\text{V}\cdot\text{RAD}^{-1}\cdot\text{s}^{-1})$	2.9	2.6
$C_m/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1})$	2.9	2.6
K_{pwm}	48	48
R_a/Ω	9.6	15
L_a/mH	12	20.5
$M_f/(\text{N}\cdot\text{m})$	16	13
$f_m/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}))$	2.7	2.4
$J/(\text{Kg}\cdot\text{m}^2)$	1.1	0.57

根据直流力矩电机与负载数学模型搭建的仿真模型如图 5 所示。

系统采用精度较高的光纤陀螺作为感应元件，其工作范围为 $\pm 400^\circ/\text{s}$ ，最小分辨率 $\frac{1}{7000}^\circ/\text{s}$ ，传递函数为

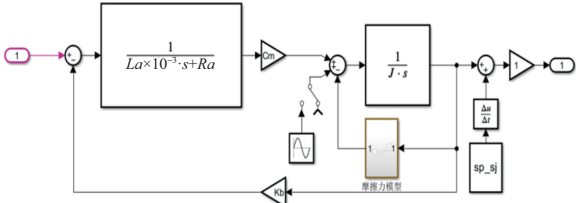


图 5 电机及负载仿真模型

$$G_e(s)=\frac{400}{s/2\pi+400}e^{-0.001s} \tag{7}$$

精跟踪系统主要由位置控制器、音圈电机及电机驱动、快速反射镜和位置传感器等部分构成。原理框图如图 6 所示。

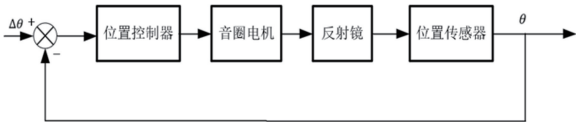


图 6 快速反射镜系统的闭环控制原理框图

本文选用的快速反射镜结构如图 7 所示，反射镜刚性固定于镜架上，两个同型音圈电机对称固定于基座上，采用柔性支撑的结构，通过控制两组电机即可实现对反射镜的精确控制。其中，反射镜尺寸为 $\phi 30\text{mm}$ ，机械偏转角为 $\pm 1.5^\circ$ 。

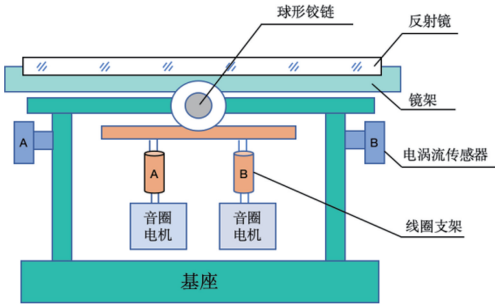


图 7 快速反射镜结构图

快速反射镜的位置控制器根据粗跟踪系统计算的位置差角 $\Delta\theta$ 和镜面转角传感器的反馈信号，控制音圈电机驱动镜面旋转，完成对光束的高精度指向控制。通过实验室模型辨识得到的快速反射镜系统的传递函数为

$$G_2H_2(s)=\frac{46850}{s^2+33s+43473.2} \tag{8}$$

2.2 扰动分析

为了准确描述光电平台的摩擦特性，引入 Lu-Gre 摩擦模型，该模型通过一组动态微分方程在时域上同时刻画了预滑动阶段、Stribeck 现象、静摩擦、滑动摩擦和粘滞摩擦等多种效应。其结构简明，又能为伺服系统提供全面的摩擦补偿^[13]。在本系统中，通过引入一个内部状态变量，用以刻画摩擦接触界面在低速下的 Stribeck 效应及高频动态特性，从而能够更真实地反映转台运动过程中摩擦力与相对速度之间的非线性关系，为系统建模

提供了更为精细的物理依据。

摩擦力输出表示为

$$F_f = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + f_m \nu \quad (9)$$

状态动态方程表示为

$$g(\nu) = F_c + (F_s - F_c) e^{-\left(\frac{|\nu|}{\nu_s}\right)^2}$$

$$\dot{z} = \nu - \frac{|\nu|}{g(\nu)} z \quad (10)$$

式中, σ_0 、 σ_1 为摩擦力模型参数; z 为内部状态; f_m 为粘滞摩擦系数; ν 为相对角速度; F_c 为库仑摩擦力; F_s 为最大静摩擦力。

根据上式搭建摩擦力仿真模型如图8所示, 模型输入为转台角速度, 输出为系统摩擦力矩。

对目标的跟瞄需建立在扰动隔离的基础上, 通过对模型的扰动仿真与分析, 可以评估不同扰动源对系统稳定性的影响, 为控制器的设计与优化提供理论依据, 保证仿真结果的可信度。可以通过快速傅里叶变换获取扰动信号的频谱, 能够分析出振动的主要频率成分, 其中低频部分代表整体车辆运动的不平稳, 而高频部分反映了路面细节对车辆动态的影响, 一些瞬态冲

击和振荡的频谱显示为宽带特性, 包含较高频率的分量。

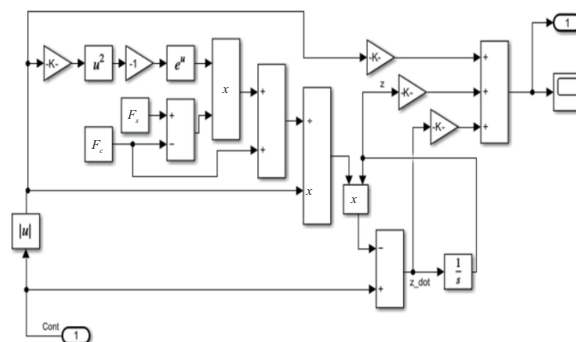


图8 摩擦力仿真模型

车辆运动过程获取的扰动数据主要来源于路面凹凸、与路面接触时产生的随机振动。如图9所示, 图9(a)和(b)分别为车辆运动中陀螺采集的水平向和垂直向角速度信号, 可以看出在运动状态下车载光电平台受到垂直向扰动较大, 最大角速度为 $-1.38^\circ/\text{s}$, 水平向最大角速度为 $0.62^\circ/\text{s}$ 。由频谱图可以看出车辆颠簸产生的振动能量主要集中在10Hz、21Hz的低频范围, 同时伴随一定的高频成分。水平向在43Hz附近也存在较大扰动, 但相比垂直向振动能量较小。

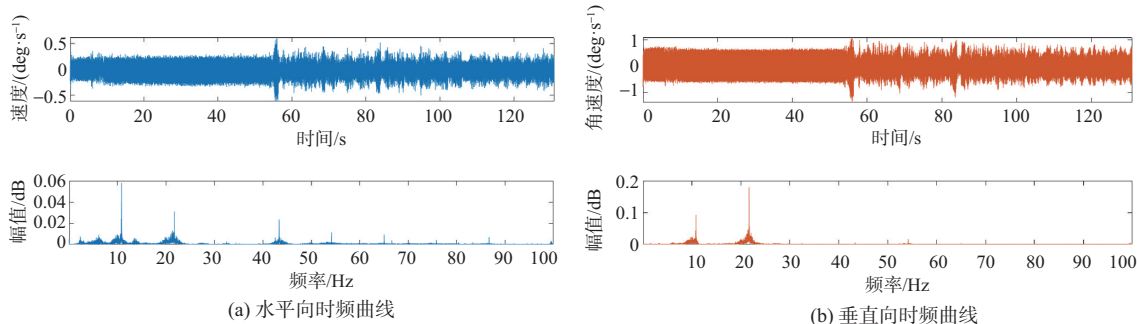


图9 车辆运动陀螺角速度信号时频图

速射武器在连发射击过程中会对光电平台施加高频冲击和振动, 能量集中时间较短, 瞬时峰值较高, 不仅影响武器自身的稳定性, 还容易造成观瞄系统短暂的不稳定, 对系统的响应速度和抗冲击能力提出更高要求。如图10所示, 图10(a)和(b)分别为水平、垂直向对位置传感器采集的信

息求导获得的角速度扰动时频曲线, 水平向最大角速度为 $-5.15^\circ/\text{s}$, 垂直向最大角速度为 $41.2^\circ/\text{s}$ 。由频谱图可见, 主要振动能量集中在11~60Hz之间。且在同一频率下, 垂直向受到的冲击能量远大于水平向, 故增强垂直向控制器抗扰能力, 从而有效抑制垂直向高频振动的影响。

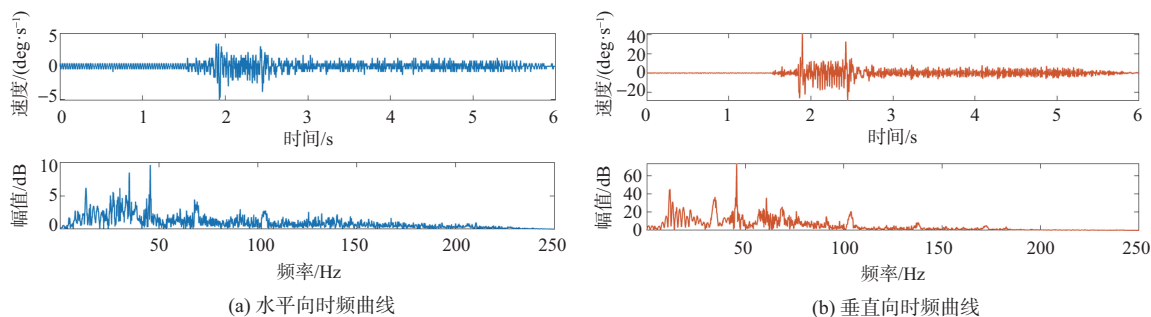


图10 武器连发振动扰动信号时频曲线

2.3 粗跟踪系统控制器设计

传统的光电平台控制器主要通过光纤陀螺消除转台受到的扰动来实现视轴稳定控制，其控制算法主要以PID为主，通过经验调试分段设置不同角度、速度、工况下的PID参数以及限幅保护。PID控制器依赖于误差的反馈，因其参数固定，难以应对时变系统，为克服这一缺点，本文引入模糊控制器。如图11所示，模糊控制器能够根据误差 e 和误差变化率 ec 的大小动态调整比例增益 K_p 、积分增益 K_i 、微分增益 K_d ，这使得模糊PID控制器能在不同工作状态下自适应地优化控制性能，对系统参数变化或外部扰动具有更好的鲁棒性^[14]，即使在系统动态特性发生变化的情况下，也能保持较好的控制效果。

车载武器系统在应对低空高机动目标时通常采用雷达引导光电平台到位后，大惯量的炮塔跟

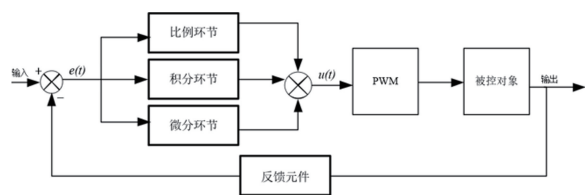


图 11 模糊PID控制器原理图

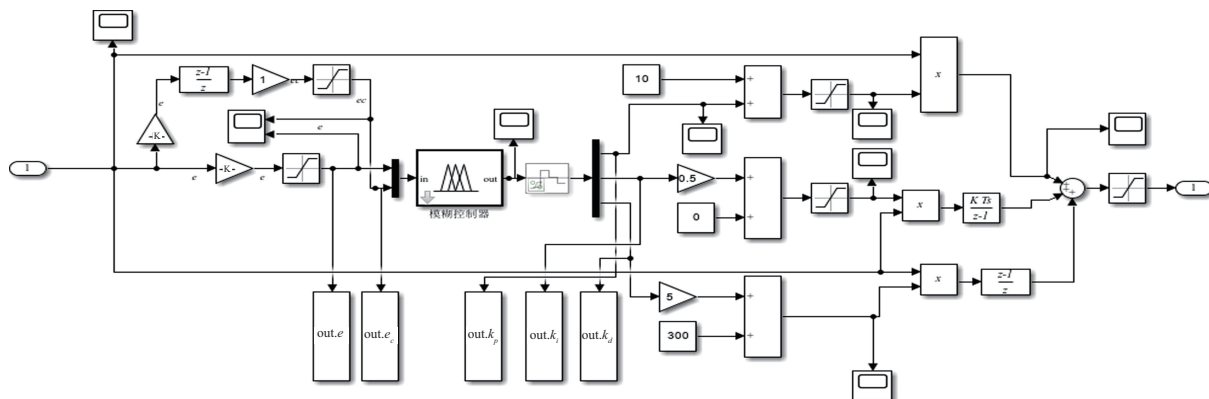


图 12 模糊PID控制器仿真模型图

在仿真模型输入幅值为 15° 的阶跃信号，系统在水平和垂直向响应如图13所示，通过仿真结果可以看出模糊PID初期与PID具有相同的快速响应，在到达目标值前能够逐渐减小控制误差并趋于稳态值，模糊PID控制响应超调量均为0，而PID控制的超调量分别为14.74%、3.78%，且水平和垂直向稳态时间分别为从0.07s、0.06s缩小到0.04s、0.05s，说明模糊PID控制具有更好的动态响应。

2.4 精跟踪系统控制器设计

由于使用传统PID控制器对快速反射镜进行控制时，快速反射镜系统的响应速度过快容易造成对粗跟踪系统的误差信号有较大超调的响应，且在快速反射镜的工作过程中，机械结构特性并

随光电平台转动到位的工况进行目标反制，所以光电平台需跟踪目标，为武器系统输入给定偏差角度。为了避免捕获失败，控制器一般以无超调为设计目的。通常由于电机的限幅保护，增大比例增益对上升阶段影响不大，为了实现输出曲线的平滑、减少超调并能收敛至目标值，需要通过分析接近稳态值前的不同状态来设计调整隶属函数和模糊规则。根据经验设计规则如下：

(1) e 较大时， ec 从0逐渐减小为负大，即系统正在快速接近目标值，应该设定增大初始的 K_p ，让系统在到达稳态前响应快，保持较小的 K_i 和 K_d ，以避免积分饱和和系统超调；

(2) 当误差 e 从正大逐渐接近零时（接近稳态）， ec 在逼近稳态值由负大增大到0。应该减小 K_p 并通过加大 K_d 来增大阻尼以避免超调。随着系统逐渐接近稳态，可以适度增大 K_i ，消除系统的静态误差，并且减小超调的风险；

(3) 当误差为零且误差导数为零时，适当减小 K_p ，并且增加 K_i ，以消除可能的静态误差。

根据上述规则，构建模糊PID控制器仿真模型，如图12所示。

非固定不变，系统参数可能会随负载的变换或者外部随机干扰而变化^[15]，快速反射镜系统模型也会发生变化。对依赖经验调整和误差反馈的PID控制系统而言，在快速反射镜的结构特性改变后，系统的控制参数如果保持不变的话，控制效果必然受到影响，本文引入不依赖于精确数学模型且具有较强扰动抑制能力的线性自抗扰控制器（Linear Active Disturbance Rejection Control, LADRC）。LADRC通过系统的状态观测器^[16]如扩展状态观测器（Linear Expanded State Observer, LESO）实时估计和补偿系统的总扰动，可以实现无超调跟踪输入响应，控制原理框图如图14所示。

针对二阶系统

$$\ddot{y} = bu + f_1(y, \dot{y}, \omega, t) =$$

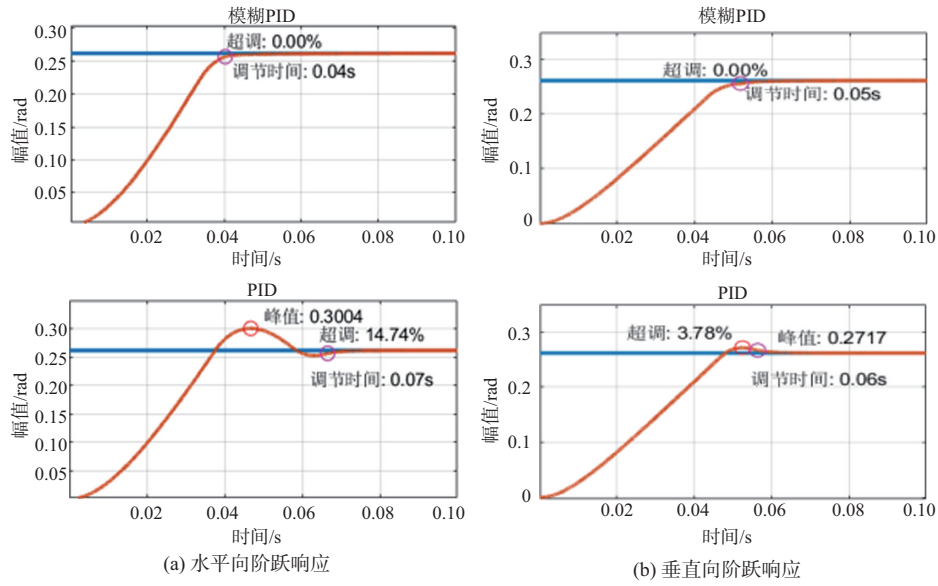


图13 模糊PID与PID阶跃响应仿真结果

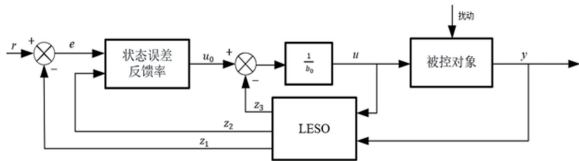


图14 LADRC控制原理框图

$$(b - b_0)u + b_0u - a_1\dot{y} - a_0y + \omega = b_0u + f \quad (11)$$

式中, y, u 分别为系统和控制器的输出; ω 为外部扰动; b 为实际控制量的增益, 由于 b 真实值未知, 设 b_0 为控制通道的标称增益, 将模型或参数的误差部分与外部扰动视为总扰动 f 。LADRC 通过主动估算系统中的扰动, 并调整控制量来抑制这些扰动。

将上式转换为状态空间方程

$$\dot{z} = Az + Bu + E\dot{f} \quad (12)$$

$$y = Cx + Du \quad (13)$$

式中状态变量 $z = [y, \dot{y}, f]^T$,

$$C = [1 \ 0 \ 0], D = [0],$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ b \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

构建三阶 LESO

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + l_1(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + l_2(y - z_1) + bu \\ \dot{z}_3 = l_3(y - z_1) \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{观测器增益 } L = [l_1 \ l_2 \ l_3]^T = [3\omega_0 \ 3\omega_0^2 \ \omega_0^3]^T$$

式中, ω_0 为观测器带宽, 影响 LESO 的收敛速度, ω_0 越大, 跟踪输入信号越快, 扰动估计滞后越小, 但容易导致观测器震荡和发散^[17]; ω_0 越小, 观测器跟踪效果越差。

设计控制律

$$u = (u_0 - z_3)/b_0 \quad (15)$$

代入式 (10) 可得

$$\ddot{y} = b_0(u_0 - z_3)/b_0 + f = u_0 \quad (16)$$

系统简化为双积分器串联的形式, 可以采用 PD 控制器来设计状态误差反馈控制率

$$u_0 = k_p(r - z_1) - k_d z_2 \quad (17)$$

控制器增益 $F = [\beta_1 \ \beta_2]^T = [\omega_c^2 \ 2\omega_c]^T$, 其中 ω_c 为控制器系数。可以通过调节 ω_c 来整定 PD 控制器的 k_p, k_d 。

搭建精跟踪系统仿真模型如图 15 所示。

对精跟踪系统输入幅值为 1 mrad 的阶跃信号, 运用两种控制器对同一角度输入进行仿真对比, 系统响应如图 16 所示, 通过仿真结果可见, 与 PID 控制相比, LADRC 阶跃响应的反应速度更快且能够无超调到达稳态值。

向闭环系统输入幅值为 0.25° 、频率为 1Hz 的正弦信号, 误差结果如图 17 所示。由图中可见两种控制器呈相同频率的起伏变化, LADRC 的误差明显小于 PID, 最大误差从 $34.94\mu\text{rad}$ 减小到 $14.6\mu\text{rad}$ 。经过计算, LADRC 控制器的跟踪误差均方根为 $10.31\mu\text{rad}$, PID 控制器的跟踪误差均方根为 $20.67\mu\text{rad}$, 跟踪精度提升 50.1%。

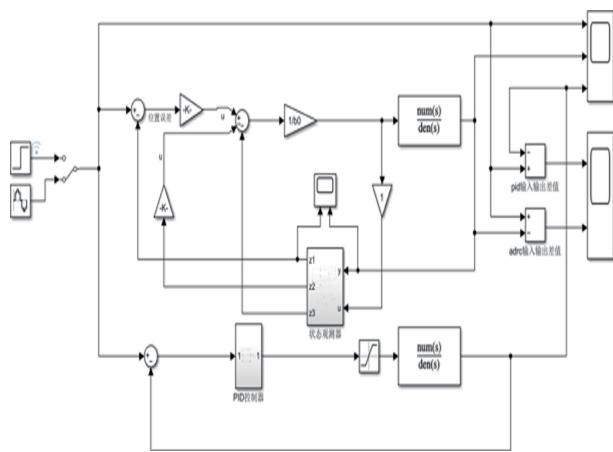


图 15 精跟踪系统仿真模型图

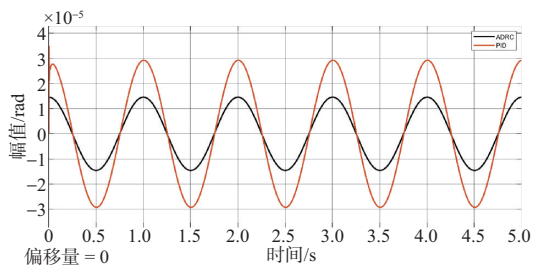


图 17 正弦信号跟随误差曲线

3 实验结果分析

将以上粗精跟踪系统组合成复合轴控制系统，设计控制策略如下：当光电平台响应系统转角到位并在视场内捕获目标，即粗跟踪平台计算的视场误差角小于等于快速反射镜的运动范围时，开启精跟踪系统进行小范围的快速跟随，此时通过对快速反射镜偏转角的闭环控制快速消除粗跟踪

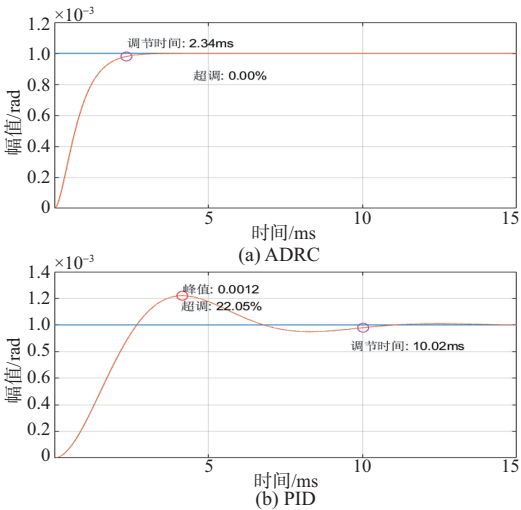


图 16 阶跃响应仿真结果

转台的视场误差角，达到稳态。

搭建的复合轴系统仿真模型如图 18 所示。由于水平向和垂直向为正交关系，两者性能相近，只需对其中一个方位进行仿真即可。

给定输入幅值为 1° 、频率为 1Hz 的正弦信号测试跟随性能，结果如图 19 所示。相较于粗跟踪系统，复合轴系统的最大误差从 0.827mrad 减小到 0.088mrad，误差均方根从 0.2853mrad 降低到 0.0308mrad，目标跟踪精度提升了 9 倍。

给定幅值为 10° 、 5° 、 1.5° 的多级连续的方波信号输入，测试系统瞬态和稳态的跟踪性能，结果如图 20 所示。从图中可以看出，对于不同角度的误差输入，系统能够稳定的跟随，在输出与输入的误差值小于等于 1.5° 时，系统开启快速反射镜跟踪，复合轴系统在粗跟踪系统的基础上快速到达稳态值，且稳态误差远小于粗跟踪系统。

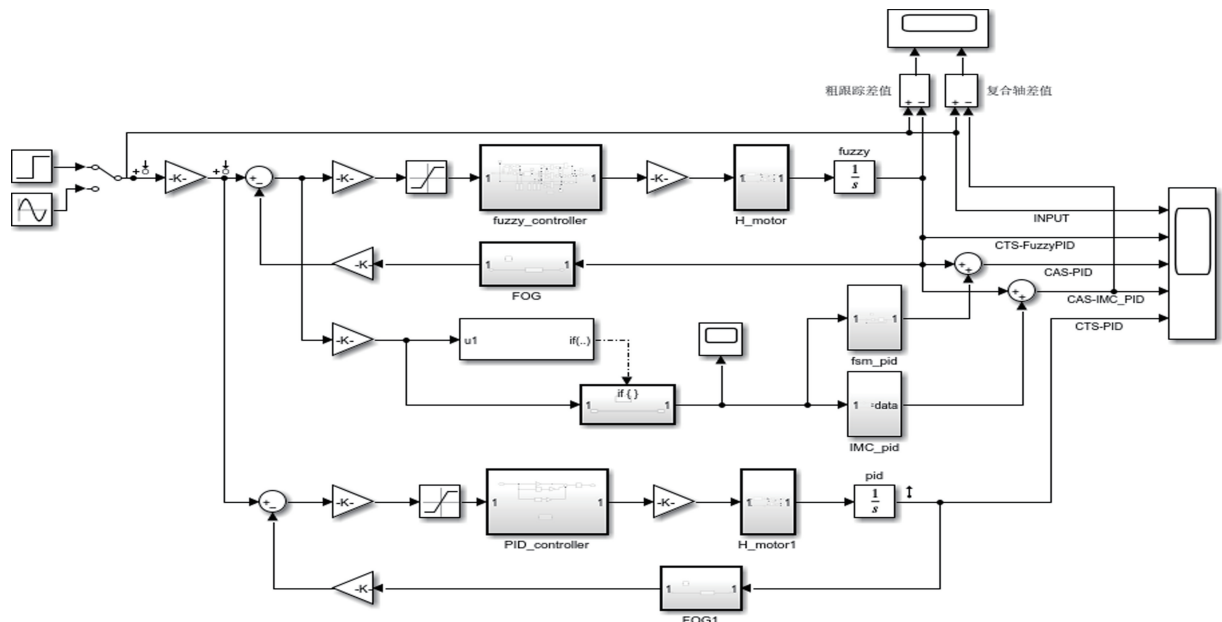


图 18 复合轴控制系统仿真模型

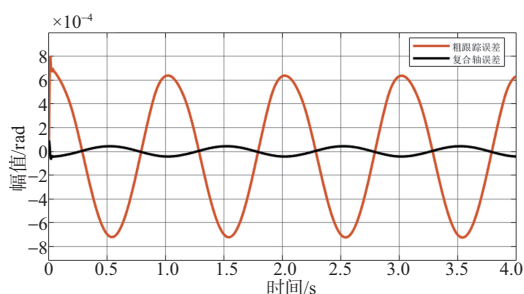


图 19 正弦跟踪误差曲线

在粗跟踪系统扰动端分别输入 8Hz、20Hz、40Hz 的正弦信号, 模拟系统扰动, 对比复合轴系统和粗跟踪系统的扰动误差。分别绘制出对应频率下系统的输出角度误差和相应的频谱图, 仿真结果如图 21 所示。随着扰动频率提高, 复

合轴稳定精度始终高于粗跟踪, 大约为粗跟踪的十分之一, 且在目标频率的干扰有 10~20dB 的大幅抑制能力, 远优于传统的粗跟踪系统, 在降低稳态误差的同时保证了相位和幅值的快速跟踪。

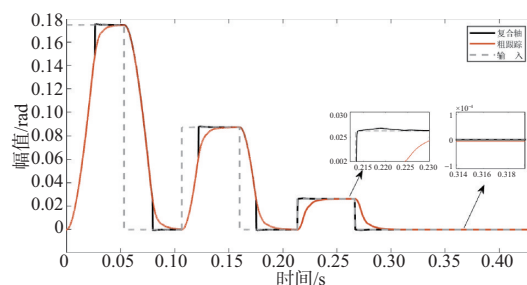


图 20 方波信号响应图

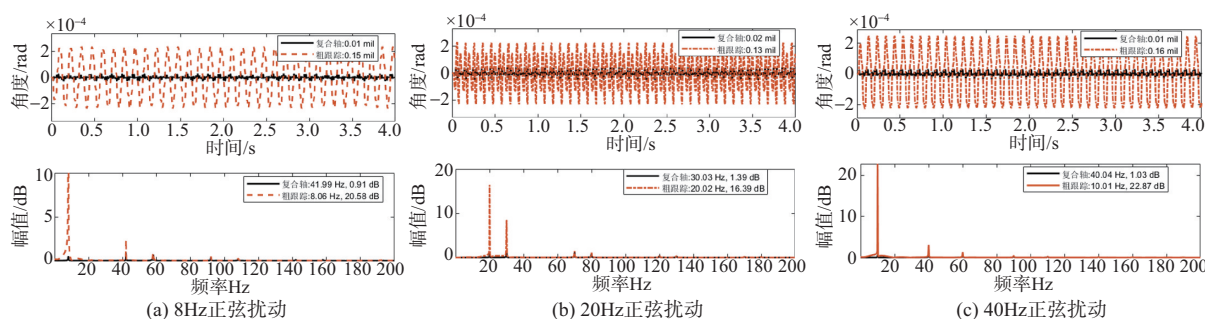


图 21 正弦扰动下系统误差与频谱图

当光纤陀螺端加入车辆运动的角速度扰动时, 对比粗跟踪系统和复合轴系统的输出响应, 如图 22 所示, 水平最大误差由 0.059mil 降低到 0.028mil, 稳定精度从 0.059mil 提高到 0.011mil,

提升了 5 倍; 垂直最大误差由 0.109mil 降低到 0.017mil, 稳定精度从 0.112mil 提高到 0.017mil, 提升了 6 倍。综上可见复合轴系统在车辆行驶时的扰动频率抑制效果明显。

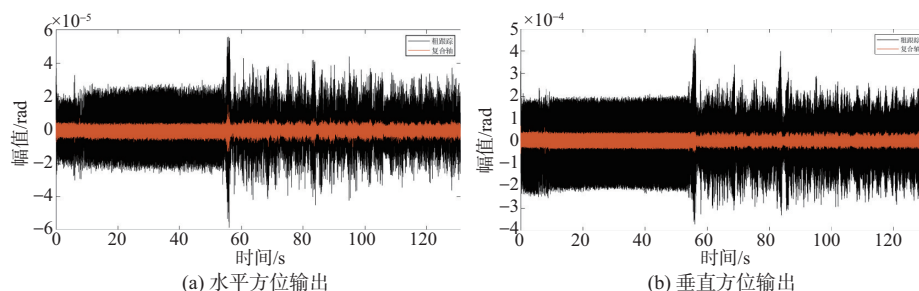


图 22 粗跟踪系统与复合轴系统输出曲线

在负载扰动输入端加入射击实验位置传感器扰动, 如图 23 所示, 扰动幅度在 45Hz 附近达到最

大值, 显然此时冲击幅度最大, 容易造成成像质量下降, 进而导致跟踪目标丢失。对比粗跟踪系统,

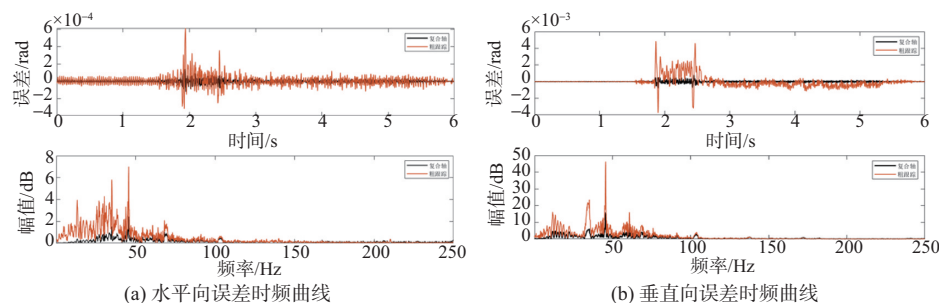


图 23 射击扰动下系统误差频谱图

复合轴系统的曲线尖峰的幅值和持续时间均显著减小。在 13.19Hz、35.05Hz、45.68Hz 处, 水平扰动抑制能力分别提升 3.55dB、4.31dB、4.58dB; 在 35.17Hz、45.68Hz、60.7Hz 处, 垂直扰动抑制能力分别提升 17.28dB、30.28dB、8.88dB; 复合轴系统可在冲击扰动时减小视轴的角度晃动误差, 降低跟瞄丢失几率, 提升系统跟瞄精度与稳定性。

4 结 论

本文针对地面复杂战场低空高机动目标反制的高精度跟瞄需求, 在传统光电平台粗跟踪系统基础上增加快速反射镜, 从而实现具备二级稳定控制的复合轴控制系统。分别对粗、精跟踪系统的伺服稳定控制平台设计了模糊 PID 和 LADRC 控制器协同控制策略并进行建模仿真。仿真结果表明, 复合轴控制系统能够有效降低载体扰动对光电平台跟瞄系统视轴的影响, 显著提高在惯性空间内视轴指向精度与稳定性, 满足系统高精度快速跟瞄的要求, 为车载系统对高机动低空目标反制等研究提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 杨芳, 王萌. 低空监控系统的红外小目标检测方法[J]. 光学技术, 2024, 50(01):120—128.
Yang Fang, Wang Meng. Infrared small target detection method for low-altitude monitoring system[J]. Optical Technique, 2024, 50(01):120—128.
- [2] 郭威. 光电稳瞄平台分数阶控制策略研究[D]. 西安工业大学, 2024.
Guo Wei. Research on fractional-order control strategy for optoelectronic stabilized aiming platform[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2024.
- [3] 杨阳. 运动平台光电跟踪系统复合轴控制及相关技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
Yang Yang. Research on compound axis control and related technologies of optoelectronic tracking system on moving platform[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [4] 高雨轩, 侯远龙, 高强, 等. 机载光电跟踪系统的自抗扰与快速非奇异终端滑模组合控制方法[J]. 兵工学报, 2023, 44(04):1071—1085.
Gao Yuxuan, Hou Yuanlong, Gao Qiang, et al. Active disturbance rejection and fast nonsingular terminal sliding mode composite control method for airborne optoelectronic tracking system[J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(04):1071—1085.
- [5] 李昂昆, 万彦辉, 黎坤, 等. 自适应模糊多环控制在惯导平台稳定回路中的应用[J]. 测控技术, 2018, 37(02):101—104+113.
Li Angkun, Wan Yanhui, Li Kun, et al. Application of adaptive fuzzy multi-loop control in the stability loop of inertial navigation platform[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(02):101—104+113.
- [6] 杨修林, 陆培国, 刘小强, 等. 舰载激光武器复合轴跟踪控制系统仿真分析[J]. 激光与红外, 2015, 45(08):943—947.
Yang Xiulin, Lu Peiguo, Liu Xiaoqiang, et al. Simulation analysis of composite axis tracking control system for shipborne laser weapon[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(08):943—947.
- [7] 谢航, 杨维帆, 李德全, 等. 舰载光电设备视轴稳定技术研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(05):8—14+105.
Xie Hang, Yang Weifan, Li Dequan, et al. Research on line-of-sight stabilization technology for shipborne electro-optical equipment[J]. Computer Simulation, 2023, 40(05):8—14+105.
- [8] 聂光成, 刘敏, 聂宜伟, 等. 机载激光武器跟踪瞄准精度、误差源及控制分析[J]. 光电与控制, 2014, 21(01):73—77.
Nie Guangshu, Liu Min, Nie Yiwei, et al. Tracking and aiming accuracy, error sources, and control analysis of airborne laser weapons[J]. Electro-Optic and Control, 2014, 21(01):73—77.
- [9] 李林, 宣明, 贾宏光, 等. 光电稳定平台隔振系统的设计与优化[J]. 计算机仿真, 2017, 34(03):77—81.
Li Lin, Xuan Ming, Jia Hongguang, et al. Design and optimization of vibration isolation system for optoelectronic stabilization platform[J]. Computer Simulation, 2017, 34(03):77—81.
- [10] 袁美桂, 魏志强, 轩新想. 一种新的机载光电侦察系统目标定位精度分析方法[J]. 光学技术, 2024, 50(02):215—219.
Yuan Meigui, Wei Zhiqiang, Xuan Xixiang. A new method for analyzing target positioning accuracy of airborne electro-optical reconnaissance system[J]. Optical Technique, 2024, 50(02):215—219.
- [11] 刘禹铭. 基于双重复合轴结构的舰载光电跟踪系统控制方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
Liu Yuming. Research on control methods of shipborne optoelectronic tracking system based on dual-loop compound axis structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2020.
- [12] 张雅琼, 郭建都, 徐阳, 等. 基于内模控制的分数阶 PID 算法的稳瞄控制器[J]. 车辆与动力技术, 2022(01):43—51.
Zhang Yaqiong, Guo Jiandu, Xu Yang, et al. Stabilized aiming controller based on internal model control fractional-order PID algorithm[J]. Vehicle & Power Technology, 2022(01):43—51.
- [13] Kyungsoo K, Hak Y, Sangryong L. Friction parameters estimation of the line-of-sight stabilization system on temperature variation[J]. Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 2019, 36(6):543—548.
- [14] 聂光成, 刘敏, 魏瑞轩, 等. 模糊自适应 PID 控制在机载激光武器跟瞄系统中的应用[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(02):121—124.
Nie Guangshu, Liu Min, Wei Ruixuan, et al. Application of fuzzy adaptive PID control in airborne laser weapon tracking and aiming system[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2013, 33(02):121—124.
- [15] 李智斌, 李亮, 张建新. 快速反射镜的复合快速非奇异终端滑模控制[J]. 中国光学(中英文), 2024, 17(04):959—970.
Li Zhibin, Li Liang, Zhang Jianqiang. Composite fast nonsingular terminal sliding mode control of fast steering mirror[J]. Chinese Optics (Chinese and English Edition), 2024, 17(04):959—970.
- [16] Choukri L H, Zhu Q. Path following control of fully actuated autonomous underwater vehicle based on LADRC[J]. Polish Maritime Research, 2018, 25(4):39—48.
- [17] 于子航, 王改云. 惯性稳定平台高精度控制方法[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(11):158—164.
Yu Zihang, Wang Gaiyun. High-precision control method for inertial stabilization platform[J]. Fire Control & Command Control, 2021, 46(11):158—164.