

激光与光电子学进展

改进的内模控制在机载激光通信系统的应用

李燕军^{1,2}, 张敏^{1,2*}, 刘洋^{1,2}, 董岩²¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;²长春理工大学空地激光通信国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 为了减少机载激光通信光电跟踪稳定平台的脱靶量误差,提出一种基于观测器的二自由度内模控制方法。以经过电流环化简后的速度环为被控对象,采用二自由度内模控制对系统进行校正,将干扰观测器的控制律引入到二自由度内模控制中以降低模型误差和外部扰动对系统性能的影响。通过仿真和实验验证了所提方法的高性能。实验结果显示,改进的内模控制在抗干扰能力、鲁棒性和跟踪性能上都优于传统内模控制;将改进的内模控制算法用于实际系统中也有较好的跟踪性能,其跟踪精度约为 $143 \mu\text{rad}$,与传统内模控制相比提高了约 24%。

关键词 光纤光学与光通信; 机载激光通信; 二自由度内模控制; 干扰; 干扰观测器

中图分类号 TP273 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222576

Improved Internal Model Control in Application of Airborne Laser Communication System

Li Yanjun^{1,2}, Zhang Min^{1,2*}, Liu Yang^{1,2}, Dong Yan²¹School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,

Changchun 130022, Jilin, China;

²National Defense Key Discipline Laboratory of Air-Ground Laser Communication, Changchun University of

Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China

Abstract In order to reduce miss distance errors of the photoelectric tracking stabilization platform for airborne laser communication, an observer-based internal model control strategy with two degrees of freedom is proposed. The strategy takes the velocity loop simplified using the current loop as the control object, uses the two-degree-of-freedom internal model control to correct the system, and introduces the observer-based control law into the two-degree-of-freedom internal model control to reduce the model error and influence of external disturbances on system performance. The high performance of the proposed strategy is validated by simulation and experiment. The experimental results show that the improved internal model control is better than the traditional internal model control in terms of anti-interference ability, robustness, and tracking performance. Bringing the improved internal model control algorithm into the actual system also has good tracking performance, and its tracking accuracy is about $143 \mu\text{rad}$, which is about 24% higher than that of traditional internal model control.

Key words fiber optics and optical communication; airborne laser communication; two-degree-of-freedom internal model control; disturbance; disturbance observer

1 引言

由于机载激光通信系统具有高跟踪精度和快通信速率等优点^[1-2],它在光电跟踪稳定平台中得到广泛的应用。机载激光通信光电跟踪稳定平台容易受到摩擦力矩等不确定外部干扰和系统内部参数变动的影

响,从而造成脱靶量误差,在一定程度上限制了机载激光通信的发展,因此提高系统工作时的动态跟踪精度具有重要意义。为了解决这些问题,国内外学者提出了多种先进的控制策略,有鲁棒控制、滑膜控制、自适应控制、自抗扰控制、内模控制,以及其中两种或两种以上控制策略的组合^[3-4]。当前,机载激光通信光电跟踪

收稿日期: 2022-09-20; 修回日期: 2022-10-18; 录用日期: 2022-11-08; 网络首发日期: 2022-11-18

基金项目: 吉林省科技厅自然科学基金(YDZJ202101ZYTS193)

通信作者: *17543015900@163.com

稳定平台大多采用的还是普通的比例积分微分(PID)控制方法,但实际被控对象一般具有非线性、时变不确定性、强干扰等特性,使用普通的PID控制器来达到理想的控制效果还是比较困难的。传统的内模控制具有良好的跟踪性能,特别是抗干扰性的改善和对大时滞系统的控制,具有非常好的效果。它的设计理论比较容易、参数整定规则直观,并对模型失配有一定的鲁棒性。因此,一些研究人员将内模控制应用到实际中来提高系统的性能。文献[5]在系统中添加了干扰观测器,并且引入微分器来改进控制器结构,提高系统的跟踪精度。文献[6]是通过模糊控制器来自动调整内模控制器的参数,实验验证了所提方法的良好控制效果。文献[7]对滑模控制和内模控制进行复合设计,并设计了二自由度增强型内模控制,来改善系统的鲁棒性。文献[8]将自抗扰的鲁棒控制律添加到内模控制结构中,提高系统抗扰动能力,但是只进行了仿真验证。

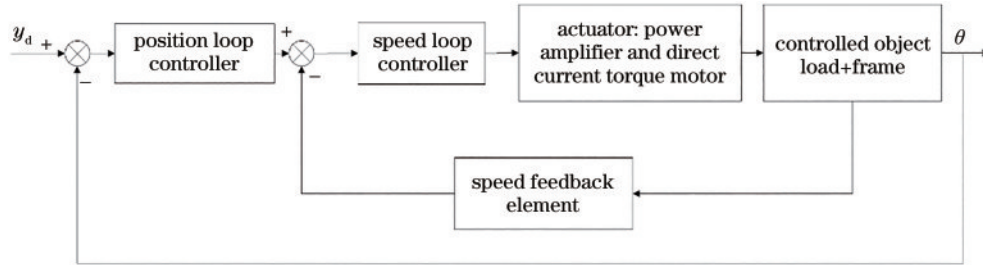


图1 转台伺服系统框图

Fig. 1 Block diagram of turntable servo system

2.1 电机及负载的数学模型

机载激光通信光电跟踪稳定平台采用的是直流力矩电机直接驱动,根据力矩电机原理可分别得到电压平衡方程和转矩方程。力矩电机电压平衡方程为

$$u_i(t) = C_e \dot{\theta}(t) + R_i I_i(t) + L_i \frac{dI_i(t)}{dt}, \quad (1)$$

力矩电机转矩方程为

$$J\ddot{\theta}(t) + M_L = C_o I_i(t), \quad (2)$$

式中: $u_i(t)$ 是电枢控制电压; C_e 是反电势常数; C_o 是电机的转矩系数; M_L 是负载轴等效负载扰动力矩; I_i 是电枢电流; L_i 是电枢的电感; R_i 是电枢的电阻; J 是系统的总转动惯量; θ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\ddot{\theta}$ 分别为电机轴和负载轴的输出角、角速度和角加速度。

对上面公式进行拉氏变换。当 $T_2 \gg T_1$ 时,可以得出力矩电机及负载的传递函数,即机载激光通信光电跟踪稳定平台等效的传递函数(即数学模型)为

$$G_p(s) = \frac{1/C_e}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad (3)$$

式中:机械时间常数 $T_2 = JR/\sqrt{C_e C_o}$;电气时间常数 $T_1 = L_i/R_i$ 。

本文对传统的内模控制进行改进,设计了基于观测器的二自由度内模控制的改进方法,并通过仿真和实验测试验证了这种方法的可靠性,它能够提高系统的抗干扰性和鲁棒性,减少机载激光通信光电跟踪稳定平台的脱靶量误差。相比传统内模控制,改进的内模控制可以更好地抑制系统的未知扰动,提高系统的动态跟踪性能。

2 基本原理

为了实现机载激光通信系统高精度跟踪功能,本文采用速度环和位置环进行控制^[9],如图1所示, y_d 为角位置输入信号, θ 为角位置输出信号。位置环结构中,位置信号误差经过位置环控制器调节后输出给定到速度环;速度环的给定与速度环反馈值的差值经过速度环控制器后输出,执行机构将速度环的输出转换为电流,驱动电机带动负载跟踪到相应的位置。其中,速度环的反馈为陀螺测得的速度信号。

2.2 传统内模控制结构

如图2所示为传统内模控制的结构^[10],其中 Y_f 为输出量, R 为输入量, $G_p(s)$ 是被控对象, $G_m(s)$ 是内部模型, $G_c(s)$ 是内模控制器。

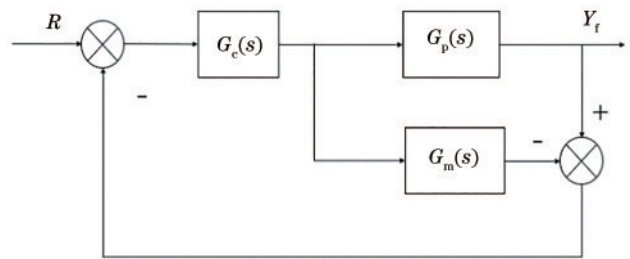


图2 内模控制的基本结构

Fig. 2 Basic structure of internal model control

内模控制器采用两步法设计,即

$$G_c(s) = f(s)/G_{m-}(s), \quad (4)$$

$$f(s) = 1/(1 + \lambda s)^2, \quad (5)$$

式中: $G_{m-}(s)$ 是对象模型中最小相位部分; λ 是内模控制的滤波参数。因为系统是二阶的,所以引入二阶滤波器 $f(s)$ 。内模控制存在一个缺点,只有一个参数可调,它同时控制着系统的动态性能和抗干扰性能,要

想改善其中一种性能必须以牺牲另一种性能为代价,两种性能不可能同时达到最好状态。为了解决这个缺点,在内模控制结构的反馈和前馈上加入滤波器 $Q_1(s)$ 和 $Q_2(s)$,变为二自由度内模控制,其中 $Q_1(s)$ 用来改善系统的动态性能, $Q_2(s)$ 用来改善系统的抗干扰性能。

2.3 二自由度内模控制结构

二自由度内模控制结构如图 3 所示。

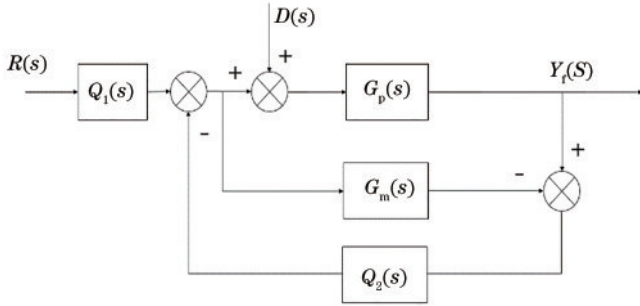


图 3 二自由度内模控制结构

Fig. 3 Structure of two-degree-of-freedom internal model control

可以计算出图 3 中系统的输出为

$$Y_f(s) = \frac{Q_1(s)G_p(s)}{1 + Q_2(s)[G_p(s) - G_m(s)]} R(s) + \frac{[1 - Q_2(s)G_m(s)]G_p(s)}{1 + Q_2(s)[G_p(s) - G_m(s)]} D(s). \quad (6)$$

如果模型无差 [$G_p(s) = G_m(s)$], 则有

$$Y_f(s) = Q_1(s)G_p(s)R(s) + [1 - Q_2(s)G_m(s)]D(s). \quad (7)$$

式(7)表明,通过调节 $Q_1(s)$ 能够改善系统的动态性能,而通过调节 $Q_2(s)$ 能够改善系统的抗干扰性能,并在下文 3.1 节中进行了仿真验证。它们的设计步骤为两步法^[11]。取

$$Q_1(s) = F_1(s)/G_m(s), \quad (8)$$

$$Q_2(s) = F_2(s)/G_m(s), \quad (9)$$

式中,滤波器 $F_1(s)$ 和 $F_2(s)$ 取为下列形式:

$$F_1(s) = \frac{1}{(1 + \lambda_1 s)^\gamma}, \quad (10)$$

$$F_2(s) = \frac{1}{(1 + \lambda_2 s)^\gamma}, \quad (11)$$

式中: λ_1 和 λ_2 为滤波器的调节参数; γ 的值保证 $Q_1(s)$ 和 $Q_2(s)$ 有理。由于控制系统是二阶的,则能够得出 $\gamma = 2$ 。

二自由度内模控制可等效为如图 4 所示的结构形式^[12]。

该系统输出为

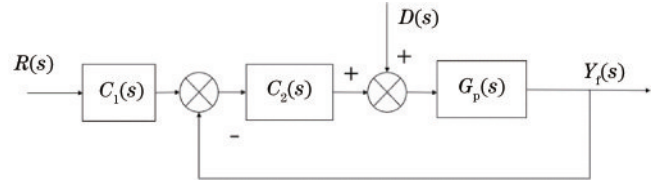


图 4 二自由度内模控制等效结构

Fig. 4 Equivalent structure of two-degree-of-freedom internal model control

$$Y_f(s) = \frac{C_1(s)C_2(s)G_p(s)}{1 + C_2(s)G_p(s)} R(s) + \frac{G_p(s)}{1 + C_2(s)G_p(s)} D(s). \quad (12)$$

将式(6)和式(12)进行逐项比较得出:

$$C_1(s) = \frac{Q_1(s)}{Q_2(s)} = \frac{F_1(s)}{F_2(s)}, \quad (13)$$

$$C_2(s) = \frac{Q_2(s)}{1 - G_m(s)Q_2(s)}. \quad (14)$$

2.4 改进的内模控制结构设计

将内模控制结构改进为二自由度内模控制结构,改善系统动态性能和抗干扰性能,并将干扰观测器的控制律添加到改进的内模控制结构中,对于干扰进一步抑制,减少系统脱靶量误差,设计出如图 5 所示的控制结构,其中 $R(s)$ 为系统输入, $Y_f(s)$ 为系统输出, $D(s)$ 为外部干扰, $G_p(s)$ 为实际的传递函数, $G_m^{-1}(s)$ 为参考模型的倒数, $Q(s)$ 为干扰观测器的低通滤波器。

1) 干扰观测器的设计

干扰观测器对于参考模型参数的摄动和外部干扰有明显的抑制能力,可以提高系统的抗干扰能力^[13],图 5 中的干扰观测器结构的普遍设计方法是 Lee^[14]提出的。其中滤波器公式为

$$Q_{NM}(s) = \frac{\sum_{k=0}^M \alpha_k (\epsilon s)^k}{(\epsilon s + 1)^N} \quad (M = 0, 1, \dots, N - 1), \quad (15)$$

式中: $\alpha_k = \frac{N!}{(N-k)! k!}$ 为系数, N 为分母的阶数; M 为分子的阶数, $N-M$ 为相对阶数; ϵ 为滤波参数。

干扰观测器依据系统的二阶模型取式(15)的形式,即 $N=3, M=1, k=0, 1$:

$$Q(s) = \frac{3\epsilon s + 1}{\epsilon^3 s^3 + 3\epsilon^2 s^2 + 3\epsilon s + 1}. \quad (16)$$

2) 改进的内模控制结构分析

根据梅森公式可以得到从 r 到 y 的传递函数为

$$G_{ry}(s) = \frac{G_p(s)G_m(s)C_1(s)C_2(s)}{G_m(s) + [G_p(s) - G_m(s)]Q(s) + G_p(s)G_m(s)C_2(s)}. \quad (17)$$

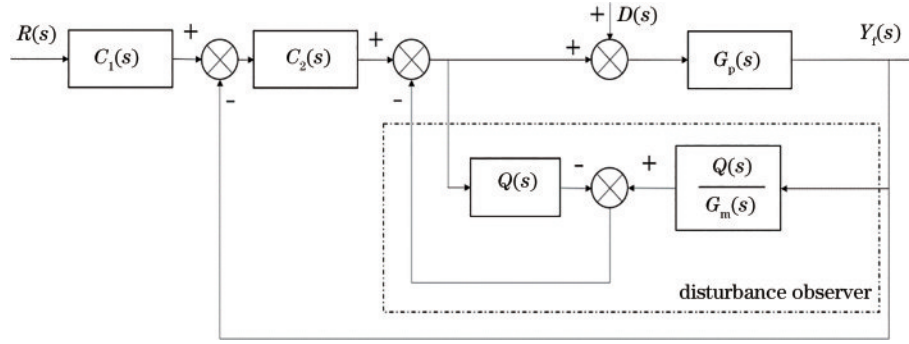


图 5 改进的内模控制结构

Fig. 5 Structure of improved internal model control

根据梅森公式还可以得到从 d 到 y 的传递函数为

$$G_{dy}(s) = \frac{G_p(s)G_m(s)[1 - Q(s)]}{G_m(s) + [G_p(s) - G_m(s)]Q(s) + G_p(s)G_m(s)C_2(s)} \quad (18)$$

由式(17)和式(18),可得该系统输出为

$$Y_i(s) = \frac{G_p(s)G_m(s)C_1(s)C_2(s)R(s) + G_p(s)G_m(s)[1 - Q(s)]D(s)}{G_m(s) + [G_p(s) - G_m(s)]Q(s) + G_p(s)G_m(s)C_2(s)} \quad (19)$$

当系统模型不失配时,即 $G_p(s) = G_m(s)$ 。若 $R(s) \neq 0, D(s) = 0$, 由式(10)~(11)、式(13)~(14)和式(19),可求得系统输出为

$$Y_i(s) = \frac{1}{(1 + \lambda_1 s)^2} R(s) \quad (20)$$

若 $R(s) = 0, D(s) \neq 0$, 则系统输出为

$$Y_i(s) = G_p(s) \left(1 - \frac{1}{(1 + \lambda_2 s)^2} \right) [1 - Q(s)] D(s) \quad (21)$$

由式(20)分析可知,当滤波器参数 λ_1 比较小时,系统输出无限接近输入,稳态误差接近于零;由式(21)推出,当外部干扰 $D(s)$ 为常数时,通过对干扰观测器低通滤波器 $Q(s)$ 进行合理的设计,能够减少脱靶量误差对系统的影响,提高稳定精度,改善系统动态跟踪性能。因此,基于观测器的二自由度控制律能够补偿 $D(s)$, 减小脱靶量误差以及模型失配的影响,从而保证系统快速且稳定地跟踪期望输出轨迹。

3 实验结果及分析

在某两轴两框架机载激光通信光电跟踪稳定平台中,系统速度环对象模型为带负载的直流无刷力矩电机,以方位轴为例,其电机参数为:最大空载转速为 180 r/min,峰值堵转力矩为 4.8 N·m,连续堵转力矩为 2.8 N·m,峰值堵转电流为 3.6 A,连续堵转电流为 1.8 A,电阻为 16 Ω,电感为 0.04 H, $J = 0.007 (\text{kg}\cdot\text{m}^2)$, $C_e = 0.946 [\text{V}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})]$, $C_o = 4.25 (\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}^{-1})$, 计算得到 $T_1 = 0.0025 \text{ s}$, $T_2 = 0.0279 \text{ s}$ 。根据式(5)可以得到系统速度环开环传递

函数模型近似等效为

$$G_p(s) = \frac{1.0571}{(0.0025s + 1)(0.0279s + 1)} \quad (22)$$

3.1 仿真验证

为验证本文所提的控制方法的有效性,采用 Matlab 进行仿真验证,按照图 2 和图 5 的结构方式分别对内模控制和改进的内模控制进行设计,通过差分进化算法对二自由度内模控制的参数进行寻优,取内模控制器的参数 $\lambda = 0.01$,二自由度内模控制的参数 $\lambda_1 = 0.01, \lambda_2 = 0.005$;综合鲁棒稳定与系统性能,选取观测器参数 $\epsilon = 0.001$ 。

1) 二自由度内模控制对系统动态性能和抗干扰性能的影响

系统输入阶跃信号为 1° ,如图 6 所示是 3 条曲线都采用二自由度内模控制的系统输出响应,其中实线起到参照作用;如图中虚线所示,保持 λ_2 不变,改变 λ_1 ,可

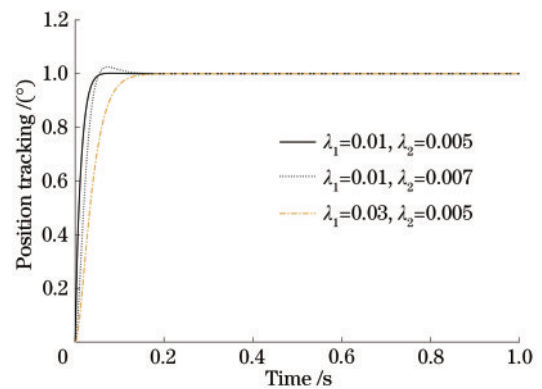


图 6 二自由度内模控制的输出响应曲线

Fig. 6 Output response curve of two-degree-of-freedom internal model control

以调节系统的响应时间;如图中点线所示,保持 λ_1 不变,改变 λ_2 ,可以调节系统的抗干扰性能。验证了在二自由度内模控制结构中,调节 $Q_1(s)$ 能够改善系统的动态性能,调节 $Q_2(s)$ 能够改善系统的抗干扰性能。

2) 阶跃信号仿真实验

给定输入阶跃信号为 1° ,在 1 s 时刻加入外部扰动为 1° 的条件下对几种控制方法的输出性能进行比较,

其中系统有干扰时跟踪期望输出轨迹的最大绝对误差表示为 $\max|e|$,系统的超调量表示为 σ ,系统的调节时间表示为 t_s ,如表 1 所示。图 7 和图 8 中实线是采用内模控制的系统输出响应;虚线是采用二自由度内模控制的系统输出响应;点线是采用改进的内模控制的系统输出响应。如图 8 所示,被控对象发生改变时,其中 J 增大为原来的 1.5 倍。

表 1 阶跃响应分析

Table 1 Step response analysis

Condition of object model	Control method	Transient time	Overshoot $\sigma / \%$	$\max e $
		t_s / s		
Object model is unchanged	Internal model control	0.075	0	1.000
	Two-degree-of-freedom internal model control	0.075	0	0.270
	Improved internal model control	0.075	0	0.015
Object model is changed	Internal model control	0.100	6.0	1.000
	Two-degree-of-freedom internal model control	0.080	3.5	0.210
	Improved internal model control	0.080	3.5	0.011

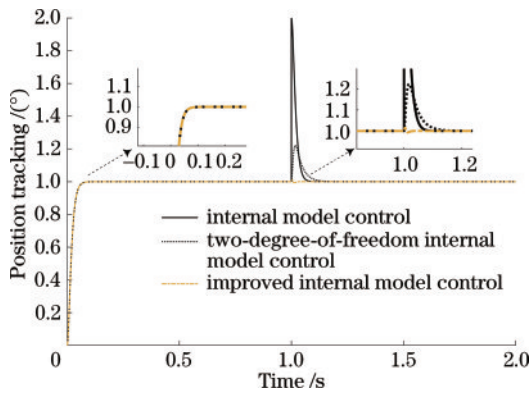


图 7 对象模型不变时系统输出响应曲线

Fig. 7 System output response curve when object model is unchanged

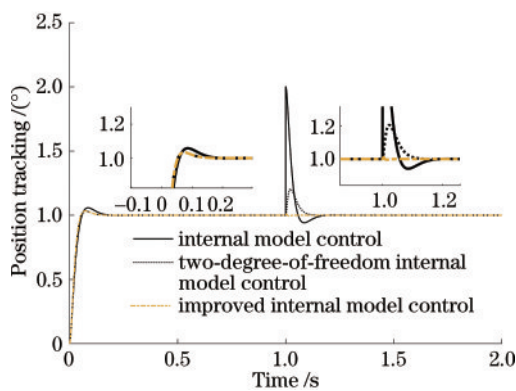


图 8 对象模型改变时系统输出响应曲线

Fig. 8 System output response curve when object model is changed

a) 响应速度验证:当对象模型不变时,从表 1 的 t_s 可以看出,采用内模控制方法、二自由度内模控制和改进的内模控制方法的响应速度相同。

b) 抗干扰能力验证:当对象模型不变时,从表 1 的 $\max|e|$ 值可以看出,改进的内模控制方法具有更好的

抗干扰性能。

c) 参数摄动的抑制能力验证:当对象模型改变时,从表 1 的 t_s 、 σ 、 $\max|e|$ 这三个值分析,采用改进的内模控制方法对系统参数摄动的抑制效果更好。

3) 系统的脱靶量跟踪仿真实验

系统的脱靶量是指目标成像在相机中的位置与中央零点位置的偏差,也称脱靶量误差。根据图 9 构建 Matlab-simulink 系统仿真模型,模拟出伺服系统位置环和速度环的闭环控制结构,其中陀螺反馈的是速度信息。系统模型框图如图 9 所示。

a) 抗干扰性能实验:仿真时系统输入扰动特性为幅值 5° 、频率 0.25 Hz 的正弦信号,模拟飞机平台自身姿态扰动。系统的脱靶量误差曲线如图 10 所示,实线表示采用改进的内模控制后,系统的脱靶量均方根误差约为 $113 \mu\text{rad}$ 。虚线表示采用内模控制后,脱靶量的均方根误差约为 $146 \mu\text{rad}$ 。可以明显看出,采用改进的内模控制后跟踪效果更好,抗干扰能力更强,比内模控制提高了大约 29%。

b) 抗干扰性能实验:仿真时系统输入扰动特性为幅值 5° 、频率 0.5 Hz 的正弦信号。重复上述仿真操作,经过仿真后,系统的脱靶量误差曲线如图 11 所示,图中实线表示采用改进的内模控制后,系统的脱靶量均方根误差约为 $136 \mu\text{rad}$ 。虚线表示采用内模控制后,脱靶量均方根误差约为 $172 \mu\text{rad}$ 。验证了采用改进的内模控制方法,能够提高系统的抗干扰能力,改善跟踪性能,比内模控制提高了大约 26%。

c) 鲁棒性实验:仿真时系统其他条件不变,扰动还是 5° 、0.25 Hz,只有被控对象发生改变,其中 J 增大了 1.5 倍,模拟由于环境变化导致对象模型发生改变的实验。选取这个摄动参数能够表示最恶劣的情况下的跟踪效果。如图 12 所示,实线是采用改进的内模控

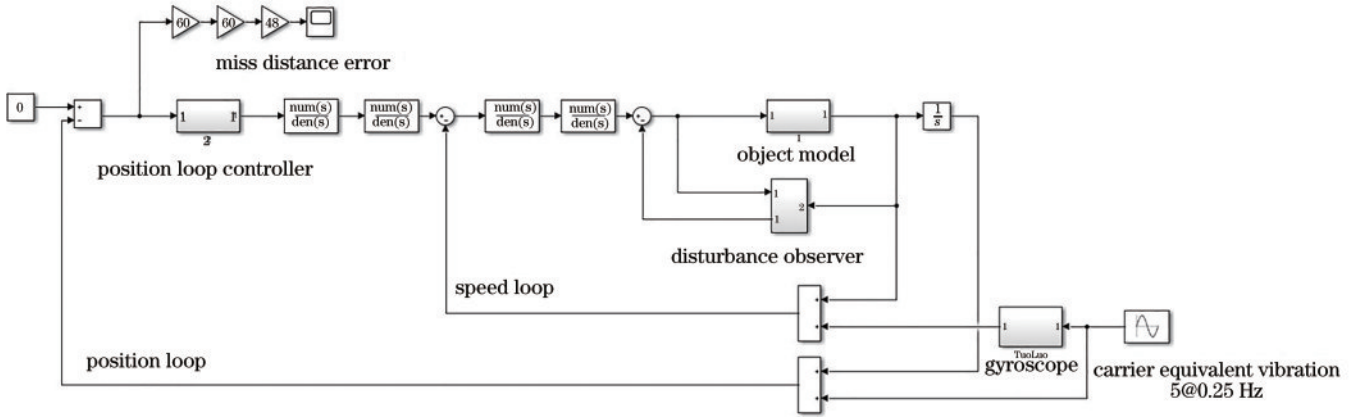


图 9 伺服系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of servo system

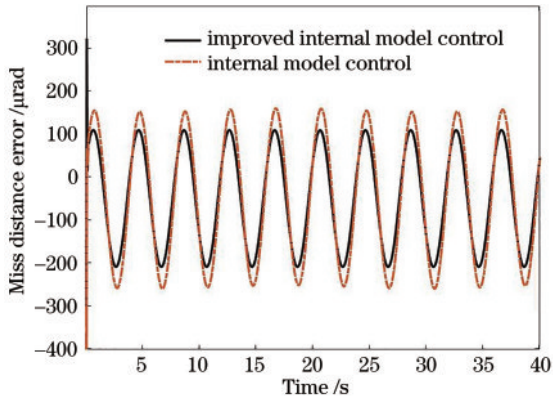


图 10 扰动为 5°、0.25 Hz 时脱靶量误差

Fig. 10 Miss distance error with 5°, 0.25 Hz disturbance

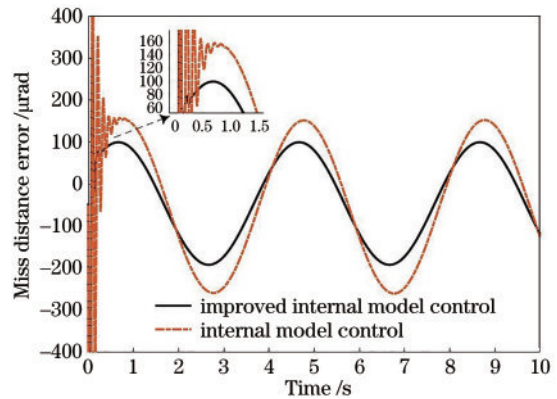


图 12 参数扰动脱靶量误差

Fig. 12 Parameter perturbation miss distance error

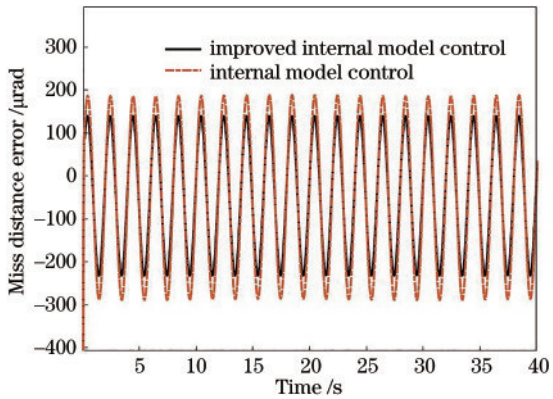


图 11 扰动为 5°、0.5 Hz 时脱靶量误差

Fig. 11 Miss distance error with 5°, 0.5 Hz disturbance

制后的曲线,跟踪效果基本没变,均方根误差为

115 μrad ;虚线是采用内模控制后的曲线,系统出现明显的震荡现象,到达稳定所需要的时间更长,系统误差变大,均方根误差为 158 μrad 。仿真验证了采用改进的内模控制方法抑制系统参数摄动的效果更好,鲁棒性能更优越。

表 2 给出了在抗干扰性能实验和鲁棒性实验下的两种控制方法脱靶量误差均方根(RMS)值的比较,可以得出,改进的内模控制方法的抗干扰性和鲁棒性优于传统内模控制方法,提高了系统跟踪精度。

通过上述不同条件下的仿真实验,验证了改进的内模控制与传统内模控制相比,抗干扰能力更强,系统的鲁棒性更好,减少了脱靶量误差,提高了系统的跟踪精度。在机载激光通信平台的脱靶量跟踪中,对系统的控制效果都优于传统内模控制。

表 2 不同实验条件下两个控制方法的跟踪误差分析

Table 2 Tracking error analysis of two control methods under different experimental conditions

Disturbance condition	Improved internal model control tracking error / μrad	Internal model control tracking error / μrad	
Anti-interference performance test	5°, 0.25 Hz	113	146
	5°, 0.5 Hz	136	176
Robustness test	5°, 0.25 Hz	115	158

3.2 系统实验

将上述的仿真参数分别代入内模控制算法和改进的内模控制算法中,通过双线性变换将算法离散化,经过编程实现数字化控制。采用 STM32 芯片作为其核心控制器,上位机软件基于 Visual Studio 环境编写,伺服控制系统与所有子单元相连并通过 RS-422 串口与上位机通信,由上位机进行统一操控。

如图 13 所示为机载激光通信光电跟踪稳定平台的现场实验照片。将机载激光通信光电跟踪稳定平台固定在六自由度摇摆台上,并且调整机载激光通信光电稳定平台的光轴与 1550 nm 激光器的光轴对准,使 1550 nm 激光器的激光成像在近红外相机的视场中心,调节近红外相机的曝光时间、阈值和焦距等,使激光成像变为一个稳定的光斑,用质心跟踪算法提取光斑的脱靶量。

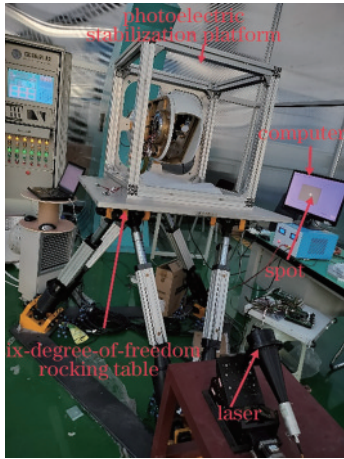


图 13 两轴两框架光电稳定实验平台

Fig. 13 Two-axis two-frame photoelectric stabilization experimental platform

经过测试,飞机横滚方向最大姿态角速度为 $3.8^\circ/\text{s}$,角加速度为 $0.8^\circ/\text{s}^2$ 。航向方向最大姿态角速度为 $3.8^\circ/\text{s}$,角加速度为 $4.2^\circ/\text{s}^2$ 。设计时留取余量后角速度为 $v = 5^\circ/\text{s}$,角加速为 $a = 7^\circ/\text{s}^2$ 。由此可得到此时的等效正弦的幅值 $A = v^2/a \approx 3.57^\circ$,频率 $f = v/(2\pi A) \approx 0.22 \text{ Hz}$ 。

1) 5° 、 0.25 Hz 正弦干扰条件下的脱靶量跟踪实验

考虑设备在工作过程中可能会受到其他干扰的影响,留取余量后设置摇摆台等效正弦最大幅度为 $5^\circ/\text{s}$;最大频率为 0.25 Hz ,以此作为目标跟踪的模拟条件,测试目标的跟踪特性。如图 13 所示,开启图像跟踪功能,跟踪激光器的光斑;让六自由度摇摆台的横滚轴和俯仰轴以幅值为 5° 、频率为 0.25 Hz 进行正弦摇摆,模拟出机载激光通信光电跟踪稳定平台在工作环境中飞机的姿态扰动。通过上位机读取伺服系统状态数据,绘制出光闭环跟踪误差曲线,如图 14、图 15 所示。

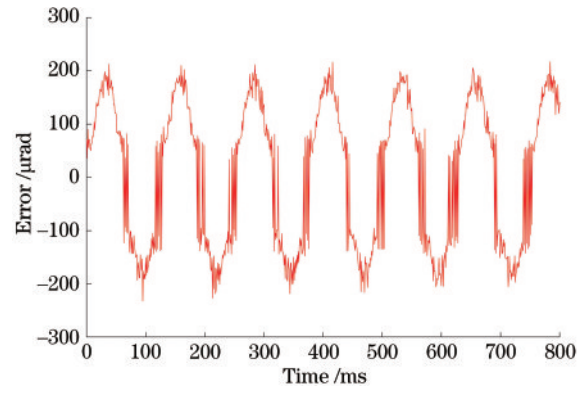


图 14 改进的内模控制脱靶量误差

Fig. 14 Improved internal mold control miss distance error

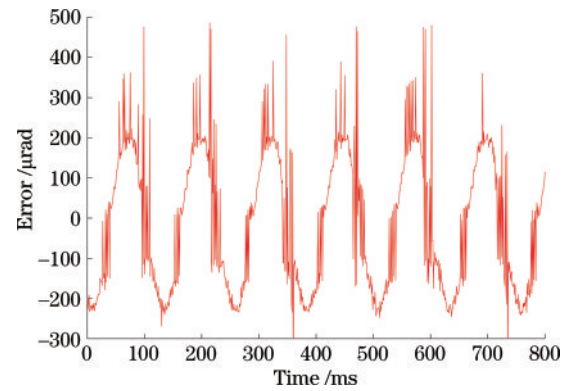


图 15 内模控制脱靶量误差

Fig. 15 Internal mold control miss distance error

图 14、图 15 中横轴为上位机数据采样时间点,采集频率为 100 Hz ,时间间隔为 10 ms 。纵轴为跟踪误差量,单位为 μrad 。计算实验得到的脱靶量误差的 RMS 值,可以得到采用改进的内模控制方法的跟踪误差为 $143 \mu\text{rad}$,采用传统内模控制方法的跟踪误差为 $178 \mu\text{rad}$ 。两种控制方法的数据对比如表 3 所示。

表 3 不同扰动条件下两个控制方法的跟踪误差分析
Table 3 Tracking error analysis of two control methods under different disturbance conditions

Disturbance condition	Improved internal mold control tracking error / μrad	Internal mold controls tracking error / μrad
5° 、 0.25 Hz	143	178
5° 、 0.5 Hz	161	193

2) 5° 、 0.5 Hz 正弦干扰条件下的脱靶量跟踪实验
设置摇摆台等效正弦最大幅度为 $5^\circ/\text{s}$;最大频率为 0.5 Hz ,以此作为目标跟踪的模拟条件,测试目标的跟踪特性。重复上述实验操作,得到如图 16、图 17 所示曲线,采用改进的内模控制方法跟踪误差为 $161 \mu\text{rad}$,采用传统内模控制方法跟踪误差为 $193 \mu\text{rad}$ 。两种控制方法的数据对比如表 3 所示。

表 3 给出了在 5° 、 0.25 Hz 和 5° 、 0.5 Hz 正弦干扰条件下,两种控制方法的脱靶量误差 RMS 值的比较。

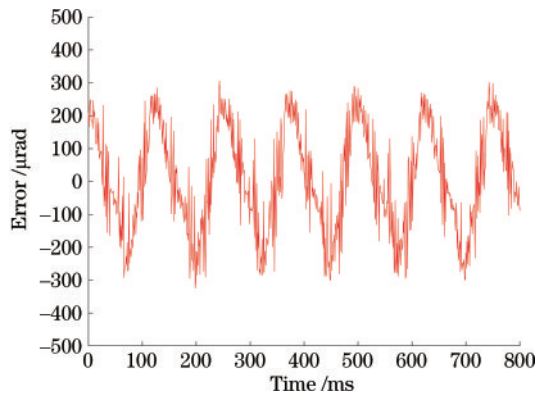


图 16 改进的内模控制脱靶量误差

Fig. 16 Improved internal mold control miss distance error

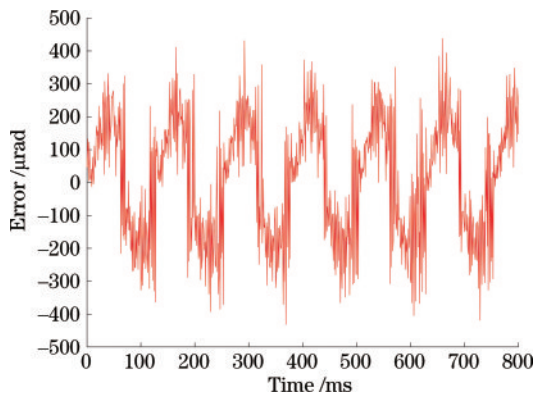


图 17 内模控制脱靶量误差

Fig. 17 Internal mold control miss distance error

通过上述不同条件下的脱靶量跟踪实验能够得出,在实际应用中,改进的内模控制方法与传统内模控制方法相比,减少了脱靶量误差,提高了跟踪精度,验证了改进的内模控制应用在实际中对系统的跟踪精度有了一定的提高。

4 结 论

本文对传统内模控制进行研究,提出了基于观测器的二自由度内模控制算法。以方位轴为例,通过仿真能够验证,在抗干扰性能实验中,不同扰动条件下,改进的内模控制抗干扰能力都能优于传统内模控制;在鲁棒性实验中,在控制算法参数不改变,只改变被控对象参数的情况下,系统的跟踪性能上基本不变,验证了采用改进的内模控制系统鲁棒性良好。将改进的内模控制运用到机载激光通信光电跟踪稳定平台中进行实验,得出了在 5° 、 0.25 Hz 正弦干扰条件下,采用改进的内模控制算法所获得的跟踪精度约为 $143\ \mu\text{rad}$,与传统的内模控制算法相比跟踪精度提高了约 24% ,有效减少了脱靶量误差,提高了系统的跟踪性能。在实际的工程中具有一定的实用价值。在未来的研究中,将内模控制和其他控制结合使用,进行相关的实验,以进一步提高系统跟踪性能。

参 考 文 献

- [1] 徐森,史浩东,王超,等.空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究[J].中国激光,2021,48(12):1206002. Xu M, Shi H D, Wang C, et al. Technology for integrating space object multidimensional detection and laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1206002.
- [2] 何爽,张鹏,魏佳,等.面向大气激光通信的空间光到少模光纤耦合特性研究[J].中国激光,2021,48(23):2306001. He S, Zhang P, Wei J, et al. Analyses of coupling characteristics of space light to few-mode fiber for atmospheric laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(23): 2306001.
- [3] 张洪国,赵辉.前馈伺服控制系统的仿真分析[J].工业技术与职业教育,2020,18(1):41-43. Zhang H G, Zhao H. Simulation analysis of feed forward servo control system[J]. Industrial Technology and Vocational Education, 2020, 18(1): 41-43.
- [4] 曲正,常帅,董岩,等.基于改进加速度惯量反馈的机载激光通信平台稳定策略[J].光学学报,2021,41(23):2306007. Qu Z, Chang S, Dong Y, et al. Stability decision of airborne laser communication platform based on improved acceleration inertia feedback[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2306007.
- [5] 黄延福,吴云洁,刘柏廷.基于干扰观测器的高性能转台伺服系统内模控制方法研究[J].系统仿真学报,2011,23(8):1664-1667. Huang Y F, Wu Y J, Liu B T. Research on internal model control method based on disturbance observer for high performance turntable servo system[J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(8): 1664-1667.
- [6] 朱海荣,李奇,顾菊平,等.基于惯量辨识的测试转台自适应内模控制[J].控制理论与应用,2013,30(2):201-207. Zhu H R, Li Q, Gu J P, et al. Adaptive internal model control of a test turntable based on inertia identification[J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(2): 201-207.
- [7] 袁绩海,郭迎清,厉天凯,等.基于鲁棒滑模策略的电机伺服系统内模控制[J].火力与指挥控制,2022,47(3):27-34. Yuan J H, Guo Y Q, Li T K, et al. Internal model control of motor servo system based on robust sliding mode strategy[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(3): 27-34.
- [8] 王春阳,马帅,梁书宁,等.光电稳瞄平台基于自抗扰的改进内模控制[J].电光与控制,2021,28(2):78-82. Wang C Y, Ma S, Liang S N, et al. Improved internal model control of photoelectric stabilized platform based on ADRC[J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(2): 78-82.
- [9] 罗娜,朱江,李燕.基于智能PID的直流电机控制算法仿真分析[J].红外技术,2020,42(3):218-222. Luo N, Zhu J, Li Y. Simulation of DC motor control algorithm based on intelligent PID[J]. Infrared Technology,

- 2020, 42(3): 218-222.
- [10] 陈春兰. 基于 GA 的二自由度内模控制[J]. 自动化应用, 2020(4): 55-58.
Chen C L. Two degrees of freedom internal model control based on GA[J]. Automation Application, 2020 (4): 55-58.
- [11] 陈凯镔, 徐俊, 陶沙沙, 等. 基于鲁棒滑模策略的伺服电机改进内模控制[J]. 微电机, 2020, 53(7): 25-32.
Chen K B, Xu J, Tao S S, et al. Improved internal model control of servo motor based on robust sliding mode strategy[J]. Micromotors, 2020, 53(7): 25-32.
- [12] Liu J C, Chen N, Yu X. Modified two-degrees-of-freedom internal model control for non-square systems with multiple time delays[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 21(2): 122-128.
- [13] 杨俊威. 基于干扰观测器的光电稳定平台自抗扰控制技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021.
Yang J W. Research on active disturbance rejection control technology of photoelectric stabilized platform based on disturbance observer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.
- [14] Lee H S. Robust digital tracking controllers for high-speed/high-accuracy position systems[D]. Berkeley: University of California, 1994.