

二自由度鲁棒 IMC 控制器设计^{*}

王伟兴 赵华鹤 王福超

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘要: 在航空稳定平台中,为了解决扰动力矩对于视轴稳定性的影响,在鲁棒 IMC 控制原理的基础上,利用局部干扰观测器思想进行改进。结合二自由度控制思想,通过引入一组与误差量无关的控制器,将扰动抑制和跟踪精度分离,在保证控制系统鲁棒性的前提下,提高了稳定平台的抗干扰能力和稳定跟踪能力。对于本文方法进行了仿真和物理实验,设计实验如下:1)平台外框架不动,内框架以 0.5 Hz,1°/s 的正弦信号运动;2)外框架以 1 Hz,6°/s 的正弦信号作为速度扰动,内框架在补偿轴系摩擦力矩的前提下保持稳定。实验结论:二自由度鲁棒内膜控制系统有效的克服了轴系摩擦力矩所带来的影响,使得控制系统具有更好的输入响应特性,并将平台稳定精度从 0.03° 提升到 0.004°,证明了本方法在保证良好输入响应特性的前提下,提高其抗干扰能力。

关键词: IMC 控制;扰动抑制;二自由度控制;局部干扰观测器

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Design of 2-DOF robustness internal model controller

Wang Weixing Zhao Huahe Wang Fuchao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to resolve the moment disturbance to the fast response of tracking moving targets of the stabilized platforms, 2-DOF robustness internal model controller is designed with the part disturbance observer on the foundation of the robustness IMC. First, based on robustness IMC, improve on the system with the part disturbance observer. Following, introducing the controller with no contacting to the error while combining 2-DOF controller, to make the disturbance rejected ability and tracking ability apart. At the precondition of assuring the systemic robustness, improve the anti-disturbance ability and tracking ability. Ultimately, some simulations and experiments were carried out. While outside frame of the platforms was no movement, inside frame of the platforms does sinusoidal movement with the 0.5 Hz, 1°/s, the 2-DOF internal model controller overcome the effect of the friction moment, make the system having better input-respond characteristic; while outside frame of the platforms does sinusoidal movement with the 1Hz, 6°/s to make the disturbance of the velocity, the stabilization precision of platform is increased from 0.03° to 0.004°. The method is testified to improve the anti-disturbance ability when assure the good input-respond characteristic.

Keywords: internal model controller; anti-disturbance; 2-DOF controller; part disturbance observer

1 引言

在航空领域中,稳定跟踪平台具有隔离载体外部扰动,实时反馈平台姿态和位置变化信息等特点,成为了现代光电侦察系统的重要组成部分。也正是由于稳定平台的应用范围越来越广^[1],对稳定平台的稳定性提出了更高的要求,这也成为近些年来光电侦察领域研究重点之一^[2]。

在稳定平台实际工作环境下,影响稳定平台伺服控制性能的因素主要有以下几点:摩擦力矩、不平衡力矩等干扰力矩的影响、平台载体速度干扰扰动和传感器精度和噪声

影响。根据不同扰动因素对于稳定平台的影响程度,重点针对力矩扰动抑制方法进行研究。针对此问题,文献[3]采用添加测速机构成双速度闭环控制的方式,以提高平台对低频段扰动的抑制能力;文献[4]提出设计鲁棒内膜控制器的方法,提高稳定平台的控制鲁棒性;文献[5]采用在闭环控制系统中引入基于速度信号的扰动观测器提高系统的扰动抑制能力。上述方法虽然具有一定的扰动抑制作用,但是提高有限,且对于信号跟踪能力考虑不足。

为了从多方面提升光电稳定平台的控制性能,提出了基于鲁棒 IMC 扰动观测器的二自由度结构,在保证原有控

制系统强鲁棒性的基础上,提升稳定平台抗干扰能力的同时兼顾信号跟踪能力,并进行了相应的理论仿真和实验验证,为提高稳定平台的伺服性能提供了一种可靠实用的方法。

2 控制器设计

2.1 鲁棒内膜控制原理

Garcia 和 Morari 提出的内膜控制^[6],是在控制系统中引入了内部模型,使系统的反馈量由常见的输出反馈变成扰动估计量的反馈。内膜控制(internal model control, IMC)的基本结构如图 1 所示。在 IMC 控制器中,只存在一个可调节的且具有直接意义的参数,只能在动态性能和鲁棒性之间折中处理,因此文献[3]设计了改进鲁棒性的 IMC 控制结构,如图 2 所示。

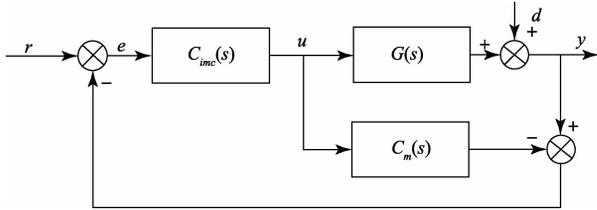


图 1 内膜控制结构

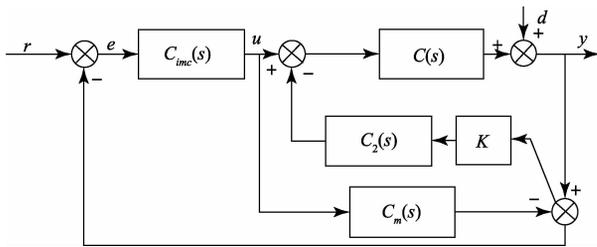


图 2 鲁棒内膜控制结构

图 1 中 y 为被控对象输出量, u 为控制器输出量, r 为给定输入量, d 为外部不可测干扰量;图 2 中控制器 $KC_2(s)$ 用来消除模型误差和干扰的影响。可得输入到输出的传递函数为:

$$T_R(s) = \frac{C_{imc}(s)G(s)[1 + G_m(s)KC_2(s)]}{1 + C_{imc}(s)[G(s) - G_m(s)] + G(s)KC_2(s)} \quad (1)$$

同样可得干扰到输出的传递函数为:

$$T_D(s) = \frac{1 - G_m(s)C_{imc}(s)}{1 + C_{imc}(s)[G(s) - G_m(s)] + G(s)KC_2(s)} \quad (2)$$

将鲁棒内膜控制等效为传统内膜控制时,其被控对象 $G(s)$ 改造成如下等效被控对象:

$$G_c(s) = \frac{G(s)[1 + KC_2(s)G_m(s)]}{1 + G(s)KC_2(s)} \quad (3)$$

通过对建模误差的鲁棒性分析可知,建模误差变为原

来的 $1/(1 + KC_2(s)G(s))$ 。当 $KG_2(s)$ 设计得足够大时,可得出 $G(s) = G_m(s)$,这就大大提高了系统对于建模误差的鲁棒性。

2.2 二自由度鲁棒内膜控制器设计

基于鲁棒内膜控制原理,结合局部干扰观测器思想进行改进,进行二自由度控制结构设计如图 3 所示,其中局部干扰观测器由鲁棒调节控制器 $C_3(s)$ 和内膜控制标称模型 $G_m(s)$ 组成,主要在保证抗干扰能力的同时提高系统的鲁棒性;2-DOF-PID 控制器由两部分组成:抑制干扰串行控制器 $C_1(s)$ 和控制输出前馈控制器 $C_2(s)$,其中引入了另一组与误差量 $e(t)$ 无关的参数,利用 (k_p, k_i, k_d) 去抑制扰动,然后利用 (α, β) 去控制输出^[7-9]。

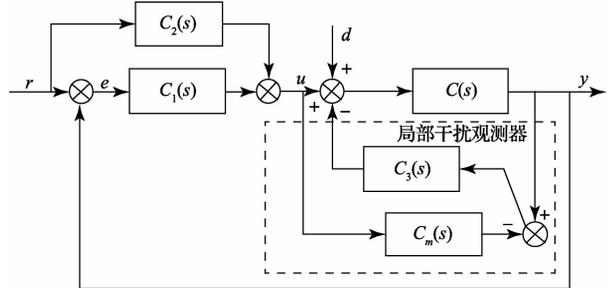


图 3 二自由度鲁棒内膜控制结构

根据图可控制系统的两个输入输出之间的传递函数:

$$T_R(s) = \frac{G(s)[C_1(s) + C_2(s)][1 + G_m(s)C_3(s)]}{1 + G(s)[C_1(s) + C_3(s)] + C_1(s)G(s)G_m(s)C_3(s)} \quad (4)$$

$$T_d(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)[C_1(s) + C_3(s)] + C_1(s)G(s)G_m(s)C_3(s)} \quad (5)$$

鲁棒内膜控制传递函数相比较可知, $T_R(s)$ 中分子含有 $[1 + G_m(s)C_3(s)]$,因此同理可以将建模误差减小,进而提高系统的鲁棒性;由 $T_d(s)$ 可知,在 $C_3(s)$ 调节完毕的基础上,通过调节 $C_1(s)$ 中 (k_p, k_i, k_d) 参数可达到抑制干扰作用,而在 $T_R(s)$ 中,位于传递函数分子上的控制器 $C_2(s)$ 可通过调节参数 (α, β) 控制输入响应,根据二自由度控制原理即可同时达到分别满足输入响应和干扰抑制的效果。

2.3 二自由度鲁棒内膜控制器参数整定

在设计过程中,为了满足系统稳态误差为 0,需具备以下几个条件^[10]:

$$\lim_{s \rightarrow 0} C_1(s) = \infty \quad (6)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{C_2(s)}{C_1(s)} = 0 \quad (7)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} G(s) \neq 0 \quad (8)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} \frac{d(s)}{G(s)} \leq \infty \quad (9)$$

为满足上述条件,便于控制器设计,做出以下设定:

$$C_1(s) = k_p(1 + k_i s + k_d \frac{1}{s}) \quad (10)$$

$$C_2(s) = -k_p(\alpha + \beta k_i s) \quad (11)$$

$$d(t) = d + A \sin(2\pi t) \quad (12)$$

根据设定 $C_1(s)$, $C_2(s)$ 具体形式可知,存在 5 个参数 ($k_p, k_i, k_d, \alpha, \beta$) 需要整定,根据式(5)可以看出,扰动传递函数 $T_d(s)$ 中只受传统 PID 控制器的 3 个增益参数的影响,而输入响应传递函数 $T_R(s)$ 受到 5 个参数的影响,也就是说对于 $T_R(s)$,即使传统 PID 增益参数 (k_p, k_i, k_d) 不能改变,仍然可以通过调整参数 (α, β) 来使输入响应得到优化,基于此原理采用以下的整定方法^[11]:

1)取 $\alpha = 0, \beta = 0$,按照 PID 传统方法整定 $C_1(s)$ 中 3 个参数 (k_p, k_i, k_d),使闭环系统对扰动的抑制响应达到最优。

2)保持上一步整定好的 (k_p, k_i, k_d) 参数固定不变,按照时域性能指标最优的标准调整其他两个参数 (α, β) 使闭环系统的输入响应达到最优。

3 仿真研究

针对鲁棒内膜控制系统与二自由度鲁棒内膜控制系统进行仿真对比实验,其中如图 4 所示,仿真参数如下。平台: $G(s) = \frac{s^2 + 86s + 340}{s^3 + 54s^2 + 534s}$;标称模型: $G_m(s) = \frac{1}{s}$;控制器: $C_3 = \frac{1}{0.035s + 1}$;鲁棒内膜控制器: $C_{imc} = 1 + \frac{10}{s}$;前馈控制器: $C_2 = -0.1 - 0.24s$;响应控制器: $C_1 = 1 + 24s + \frac{0.06}{s}$;力矩扰动: $d(t) = 0.2 + 0.1\sin(2\pi t)Nm$;速度测量噪声:峰-峰值为 $0.02(^{\circ})/s$ 。

图 5 为稳定平台的阶跃响应对比。图中可见,相比较于单纯鲁棒内膜控制结构而言,添加二自由度结构对于阶跃响应改善了其动态性能。

图 6 中为系统对力矩扰动抑制能力的对比,在引入二自由度控制结构后,平台的力矩抑制能力在不影响输入响应的同时有所提高,由力矩扰动引起的速度响应均方值下降了 60%。

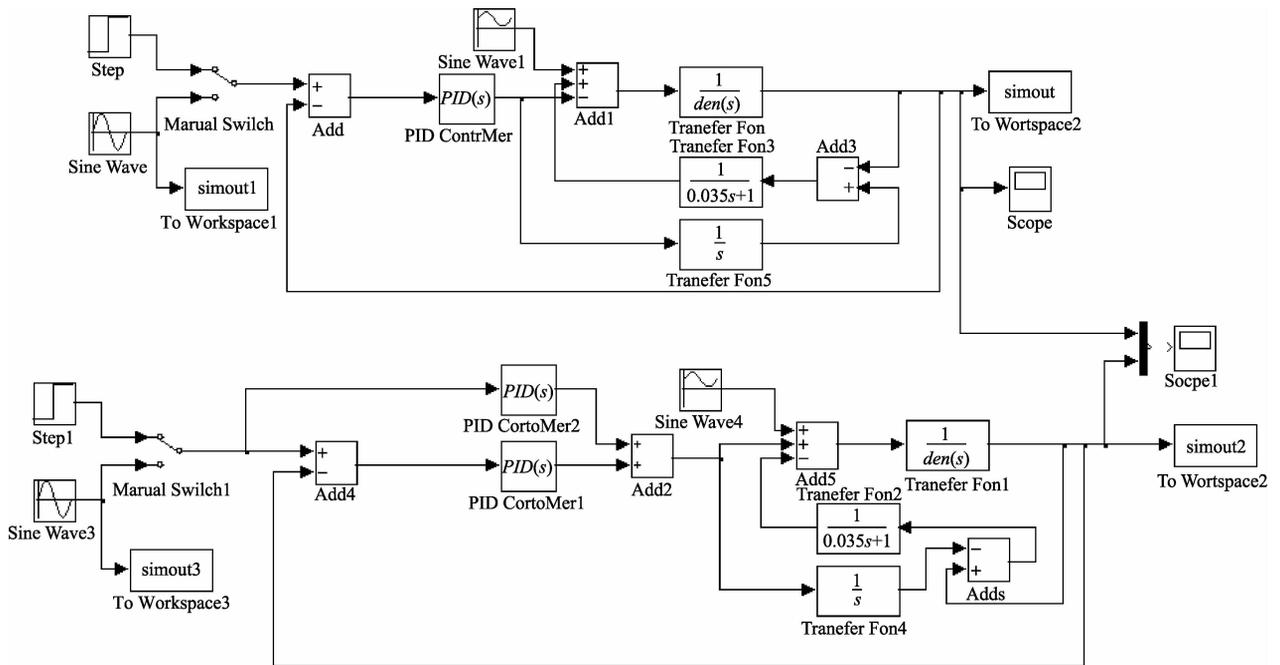


图 4 Simulink 仿真对比实验结构

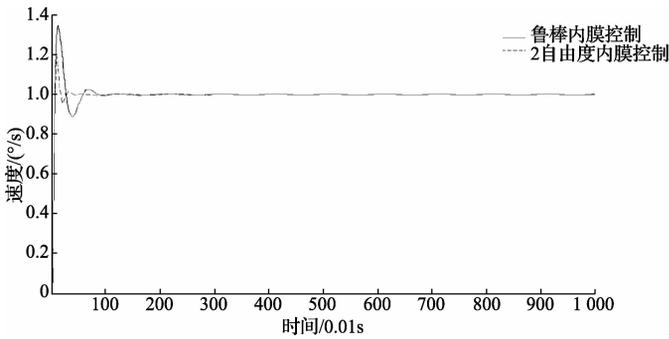


图 5 阶跃响应对比仿真

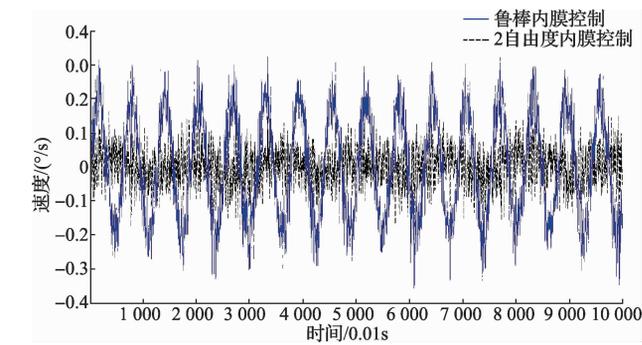


图 6 正弦响应对比仿真

4 实验设计与研究

4.1 实验环境介绍

本次实验研究对象为两轴两框架实验平台,配合半实物仿真系统进行实验研究。应用内框架作为控制对象,外框架作为干扰源,具体实验设备如图 7 所示。实测内框架开环模型为 $G(s) = \frac{1}{0.035s^2}$,针对此模型进行前馈干扰控制器与响应控制器的设计,进行了两组对比实验。



图 7 对比实验设备

4.2 输入响应对比实验

作为干扰源的外框架静止不动,向内框架输入 $0.5 \text{ Hz}, 1^\circ/\text{s}$ 的正弦信号,对于鲁棒内膜控制和二自由度鲁棒内膜控制进行比较实验,通过提取内框架上陀螺信号来对比两种控制方法下的响应情况,实验结果如图 8 所示。

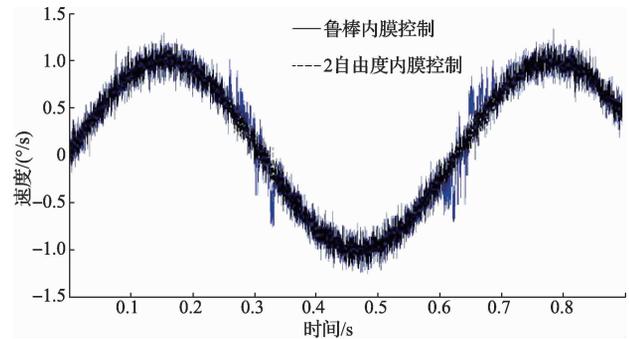


图 8 输入响应对比实验

从图中可以看出,对于鲁棒内膜控制而言,二自由度鲁棒内膜控制使得静摩擦力矩对于平台内框架的影响降低,由于单独的响应控制器的引入,减小了静摩擦力矩的影响,有效克服了转速过零时的爬坡现象,更好地改善了平台内框架的输入响应性能。

4.3 干扰稳定对比实验

外框架按照 $1 \text{ Hz}, 6^\circ/\text{s}$ 速度作正弦运动,而针对控制对象内框架而言,所期望的转速为 0,即在外框架干扰输入的情况下保持内框架稳定,对于鲁棒内膜控制系统与二自由度鲁棒内膜控制系统进行对比实验,实验过程中提取陀螺信号,比较两平台的速度响应。实验结果如图 9 所示。从图中可见,曲线在过零时刻存在尖峰状态,这是由于平台在响应输入信号的过程中,存在轴系摩擦力矩,干扰平台内框架响应,从而造成速度残差增大,表现为换向过程



中曲线出现异常尖峰状态。相比较而言,二自由度鲁棒内膜控制由于引入单独的控制,平台内框架的速度尖峰的幅值和持续时间均显著降低。

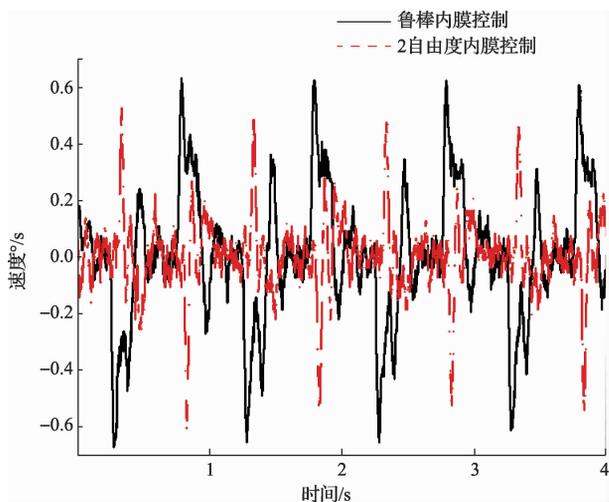


图9 速度稳定对比实验

对于平台干扰抑制能力的对比,在相同干扰条件下使用视轴晃动角度来衡量。在1 Hz, 6°/s的速度干扰下,内框架的视轴晃动误差如图10所示,从图中可知,二自由度鲁棒内膜控制结构减小了视轴的晃动误差,使得稳定精度由0.03°(RMS)提高到0.004°(RMS)的水平。

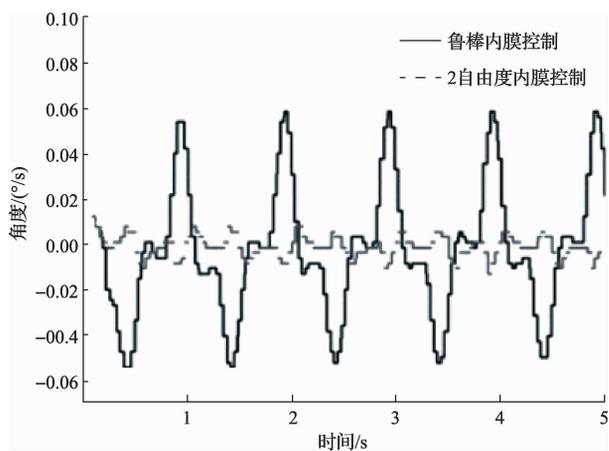


图10 稳定精度对比实验

5 结论

在提高稳定平台的鲁棒性的基础上,提出了基于局部干扰观测器原理的二自由度鲁棒内膜控制,主要目的是将平台的输入响应和干扰抑制两大问题分别对应的设计控制器,特别是在保证系统输入响应好的情况下,提高系统的干扰抑制能力,并与单纯的鲁棒内膜控制方法相比较,

利用仿真实验和物理实验分别论证本方法的有效性。在两轴两框架稳定平台实验中,二自由度鲁棒内膜控制有效克服了摩擦力矩的存在,改善了系统的输入响应;在1 Hz, 6°/s的外框架扰动下,平台稳定精度从0.03°提升到0.004°,在保证良好输入响应的前提下,整体抗干扰性能得到了很大提升。

参考文献

- [1] 刘旭阳. 航空航天与国防电子新形势下自动化测试系统的应用[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(7): 4-5.
- [2] 李海星, 惠守文, 丁亚林. 国外航空光学测绘装备发展及关键技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(5): 469-477.
- [3] 丁策, 尹传力, 汪永阳. 光电陀螺稳定平台中的分数阶伪微分反馈控制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 25-30.
- [4] 姬伟, 李奇, 杨蒲. 陀螺惯性平台视轴稳定双速度环串级控制的研究[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(1): 114-119.
- [5] 夏运霞, 包启亮, 李锦英. 光电跟踪系统视轴稳定的鲁棒内膜控制器设计[J]. 控制与决策, 2013, 28(7): 1117-11120.
- [6] 李嘉全, 丁策, 孔德杰. 基于速度信号的扰动观测器及在光电稳定平台的应用[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 998-1004.
- [7] 宋斌, 齐永龙. 一种卫星通信天线伺服机构设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 49-52.
- [8] 郭红霞, 刘磊. 基于PID控制算法的自动取暖控制器的设计[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2): 29-32.
- [9] ARAKI M, TAGUCHI H. Two-Degree-of-Freedom PID Controllers[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2003, 1(4): 401-411.
- [10] 赵秀伟. 一种高精度2-DOF-PID控制稳定性方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学, 2013.
- [11] 杜井庆, 高世桥, 罗创, 等. 基于PID算法的控制量按任意函数变化的一种控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(6): 1317-1322.

作者简介

王伟兴(通讯作者), 1986年出生, 工学硕士, 研究实习员。主要研究方向为光电稳定平台控制与视轴稳定。
E-mail: w253443397@163.com

赵华鹤, 1986年出生, 工学硕士, 研究实习员。主要研究方向为光电稳定平台结构设计优化。

王福超, 1988年出生, 工学硕士, 研究实习员。主要研究方向为光电稳定平台伺服控制。