

基于双速度环观测器的光电平台稳定方法

高文锐 崔慧敏 尹奎英 赵菁菁

Stabilization method of photoelectric platform based on double speed loop observer

GAO Wen-ru, CUI Hui-min, YIN Kui-ying, ZHAO Jing-jing

引用本文:

高文锐, 崔慧敏, 尹奎英, 赵菁菁. 基于双速度环观测器的光电平台稳定方法[J]. *中国光学*, 2023, 16(5): 1168–1176. doi: 10.37188/CO.2023-0048

GAO Wen-ru, CUI Hui-min, YIN Kui-ying, ZHAO Jing-jing. Stabilization method of photoelectric platform based on double speed loop observer[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1168-1176. doi: 10.37188/CO.2023-0048

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0048>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于伪微分和加速度反馈的航空光电稳定平台控制方法

Control scheme of aerial photoelectrical stabilized platform based on pseudo-derivative and acceleration feedback

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 491 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0491>

星间激光通信终端光学天线的隔离度

Isolation of optical antenna of inter-satellites laser communication terminals

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 462 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0462>

跟踪微分器在陀螺信号去噪方面的应用

Application of tracking differentiator to gyro signal denoising

中国光学 (中英文). 2017, 10(3): 355 <https://doi.org/10.3788/CO.20171003.0355>

谐振式集成光学陀螺系统中用于抑制背散射噪声的相位调制技术

Phase modulation techniques for suppressing backscattering noise in resonator integrated optic gyroscopes

中国光学 (中英文). 2019, 12(6): 1403 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1403>

基于小波神经网络的光纤陀螺误差补偿方法

A fiber optic gyro error compensation method based on wavelet neural network

中国光学 (中英文). 2018, 11(6): 1024 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1024>

用于太阳光谱仪的光电探测系统线性度测试装置

Linearity testing device for the photoelectric detecting system of solar spectrometers

中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 294 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0294>

文章编号 2097-1842(2023)05-1168-09

基于双速度环观测器的光电平台稳定方法

高文锐¹, 崔慧敏^{2*}, 尹奎英¹, 赵菁菁¹

(1. 南京电子技术研究所人脑机实验室, 江苏南京 210039;
2. 北京遥测技术研究所控制系统与技术研究室, 北京 100076)

摘要: 本文设计了一种可以使光电伺服平台对目标对象进行高精度、稳定追踪的基于双速度环的扰动观测器, 可以消除光电平台内部摩擦力矩、外部载体扰动以及传感器噪声的影响, 提升系统的动态响应性能。首先, 根据直流电机工作原理与负载模型, 建立双速度环的数学控制模型。接着, 通过分析多类型传感器的速度信号频谱和响应性能, 选择噪声和延时较小的圆光栅代替传统测速设备, 作为速度控制内环; 同时选择光纤陀螺作为速度外环的反馈设备。然后, 基于陀螺速度信号设计扰动观测器, 对内速度环中的扰动补偿残差和外部载体扰动信号进行观测, 并进行前馈信号补偿。实验结果表明, 双速度环观测器的控制方法可以将系统调节时间降至原来的 45%, 在不同幅值 (0.25°~2°) 和频率 (0.25 Hz~2 Hz) 的正弦扰动信号下, 该方法均能显著提高系统的扰动抑制能力, 并将系统隔离度由原来的 20.9 dB 提升至 30 dB。本文所提出的基于双速度环扰动观测器的控制方法满足光电跟踪平台快速响应、跟踪稳定、抗干扰能力强等要求。

关键词: 视轴稳定; 双速度环; 扰动观测器; 陀螺噪声; 系统隔离度

中图分类号: TP23; TP273.5 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0048

Stabilization method of photoelectric platform based on double speed loop observer

GAO Wen-rui¹, CUI Hui-min^{2*}, YIN Kui-ying¹, ZHAO Jing-jing¹

(1. Link Sense Laboratory, Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China;
2. Control System and Technology Research Office, Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

* Corresponding author, E-mail: cui_huimin2012@126.com

Abstract: To achieve high-precision and stable tracking performance, a novel disturbance observer for the photoelectric platform based on dual velocity loops is designed. This method aims to minimize the impact of internal friction torque, external carrier disturbances and sensor noise, thereby enhancing the dynamic response performance of the system. Firstly, the mathematical model of double speed-loop is established. By analyzing the signal spectrum and response performance of various sensors, we have chosen the circular grating sensor with low noise and short delay to replace the traditional measuring machine for closing the inner speed loop. Moreover, the Fiber Optic Gyro (FOG) is utilized for the feedback device of the outer speed loop.

收稿日期: 2023-03-24; 修订日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61903044)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61903044)

Then, a disturbance observer is designed based on the gyro speed signal to observe the disturbance compensation residual in the inner speed loop and the outer carrier disturbance signal, while the feed-forward compensation is performed. The experimental results demonstrate that the double speed loop observer control method can reduce the system regulation time to 45% of the original. When subjected to sinusoidal disturbance signals with varying amplitudes (0.25° to 2°) and frequencies (0.25 Hz to 2 Hz), this method effectively improves the system's ability to suppress disturbances and increases the isolation degree from the initial 20.9 dB to 30 dB. The disturbance observer with double speed loops meets the system requirements of rapid response, stable tracking, high precision and strong anti-disturbance ability of the photoelectric tracking platform.

Key words: line-of-sight (LOS) stability; double speed loop; disturbance observer; gyro noise; system isolation degree

1 引言

无人机凭借其体积小、机动灵活等优点在民用和军用领域均得到了广泛应用,但同时无人机对国防和社会安全也会造成巨大威胁^[1-4]。在反无人机技术中,车载激光防御系统凭借其布防灵活、打击效率高、具有物理性杀伤等优势,得到了迅速发展^[5-6]。考虑到低空无人机姿态变化剧烈、激光需持续照射目标同一区域等实际情况,光电伺服平台应该具备较快的动态响应能力和抑制内外部扰动能力^[7-8],以便实现对低空无人机目标的快速稳定跟踪。

影响视轴稳定的原因主要可分为3个方面:(1)内部扰动,主要包括摩擦力矩^[9-10]和齿槽转矩^[11];(2)外部载体扰动以及(3)传感器噪声^[12]。针对内部扰动因素,目前常采用的方法是建立摩擦力模型^[13]和齿槽转矩模型,并对其进行插值处理,以实现内部扰动的抑制。然而,基于模型的扰动补偿方法适用范围有限,当系统特性参数或周围环境因素发生变化时,补偿信号很难达到预期效果,甚至会出现跟踪误差增大的现象。针对外部载体扰动,目前在实际工程应用中有显著效果的方法主要包括结构改进和算法补偿两个方面。结构改进方面主要有增加机械结构刚度,设计减震器等^[14]。该方法会使得系统体积和重量增加,不利于小型化和轻型化设计,同时也会增加设计成本。算法补偿方面主要是设计鲁棒性强的控制方法^[15],可以分为基于陀螺速度反馈和前馈的稳定控制方法,以及基于干扰观测器的控制方法

等^[16-18]。其中,基于各类观测器的方法取得了较好的应用效果^[19]。由于干扰力矩对应系统的加速度信号,使用加速度计直接测量会增加系统成本,而通过速度信号进行微分获得加速度信号,又往往包含大量噪声,且延时较大,容易造成系统发散。

为了解决上述问题,本文提出一种基于双速度环干扰观测器的视轴快速稳定方法。双速度环路依靠内速度环抑制内部扰动,依靠外环抑制外部载体扰动。相对于单速度环,双速度环的内部摩擦力和齿槽转矩等扰动力矩信息直接由电机端的同轴圆光栅信号形成闭环,实时感知电机的角速度变化并反馈给速度环路进行调节,以提高伺服系统的动态响应速度。在抑制外部载体扰动方面,引入基于速度信号的扰动观测器,不仅提高了伺服系统的隔离度,也可以避免加速度信号噪声太大导致的系统发散问题。

2 基于双速度环的观测器设计

2.1 双速度环控制模型

双速度环中通常以直流测速机为电机转速测量元件构成模拟速度环,利用陀螺的“空间测速机”功能组成稳定环。本文通过对圆光栅采集的角度信息进行微分,以角速度信号作为速度环反馈信号。由于速度环包含了电机及负载平台,可以用于消除摩擦力矩等非线性因素的影响。稳定环中采用MEMS陀螺作为速度反馈信号,由于陀螺传感器可以感知到平台框架相对于惯性空间的转速,故通过稳定环的控制闭环设计实现对外部载体扰动的隔离,进而达到光电平台视轴稳定的

效果。

双速度环控制系统的结构框图如图 1 所示, 整体结构由位置环、速度环、电流环、电机、负载等部分组成。其中, θ_{ref} 是系统的位置指令输入, ω_{ref} 是系统的速度指令输入, i_{ref} 是系统的电流指

令输入, u_q 是输入给电机的电压指令, i_q 是电机的输出电流, T_e 是电机输出转矩, ω_m 是电机的转速, θ_0 是负载输出角度。此外, 系统还受到摩擦力和外部载体扰动的影响, 其中, T_f 是系统所受到的摩擦力, ω_f 是载体扰动角速度。

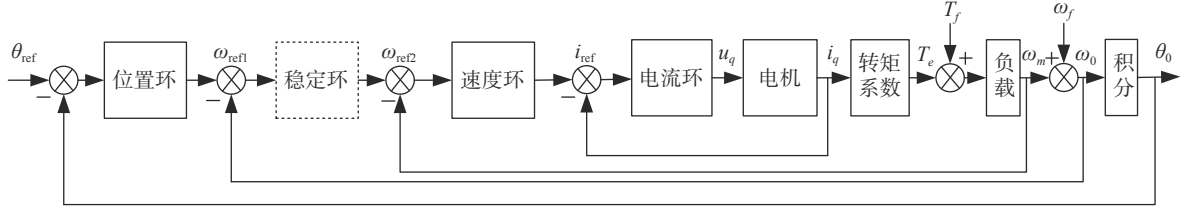


图 1 系统控制结构框图

Fig. 1 Block diagram of system control structure

根据直流电机的工作原理以及负载模型, 可以推导出对应于上述控制框图的数学模型框图, 如图 2 所示。其中, G_p 是系统的位置环数学模型, G_v 是系统的速度环数学模型, G_i 是系统的电流环数学模型, L_q 是电机的电感参数, R_q 是电机电阻参数, K_e 是电机转矩系数, J 是电机和负载的转动惯量。令:

$$G_c(s) = \frac{i_q(s)}{i_{ref}(s)} = \frac{G_i(s)}{Ls + R + G_i(s)} \quad (1)$$

$$G(s) = G_v(s)G_c(s)K_e \quad (2)$$

$$P(s) = \frac{1}{Js} \quad (3)$$

基于上述公式, 可以推导出系统的输出角速度 ω_0 和角速度输入指令 ω_{ref} , 内部摩擦力 T_f 以及外界载体扰动角速度 ω_f 之间的关系:

$$\omega_0(s) = \frac{P(s)T_f + [1 + G(s)P(s)]\omega_f + G(s)P(s)G_s(s)\omega_{ref}}{1 + G(s)P(s)[1 + G_s(s)]} \quad (4)$$

根据设计经验, 可以保证所设计的控制器在控制频带内满足:

$$|G(s)P(s)[1 + G_s(s)]| \gg 1 \quad (5)$$

$$|G(s)P(s)| \gg 1 \quad (6)$$

基于公式(5)和公式(6)的设计经验, 公式(4)可以简化为:

$$\omega_0(s) = \frac{T_f}{G(s)[1 + G_s(s)]} + \frac{\omega_f}{1 + G_s(s)} + \frac{G_s(s)}{1 + G_s(s)}\omega_{ref} \quad (7)$$

同理, 可以推导出单速度环时系统输出和速度指令、摩擦力以及外界载体扰动之间的关系:

$$\omega_0(s) = \frac{T_f}{G(s)} + \frac{\omega_f}{G(s)P(s)} + \omega_{ref} \quad (8)$$

通过比较上述两个公式, 可以发现在双速度环控制结构中, 对内部摩擦力的抑制主要由稳定环控制器 $G_s(s)$ 起辅助调节的作用; 系统对于外部载体扰动 ω_f 的隔离性能完全由 $G_s(s)$ 决定, 而与内部速度环校正环节以及系统特性参数等无关。

在响应速度方面, 单速度环控制结构中, 内部

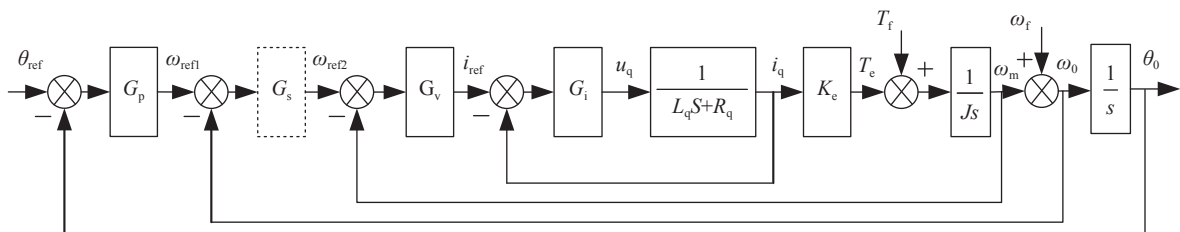


图 2 系统数学模型框图

Fig. 2 Block diagram of system mathematical model

摩擦力等扰动力矩对系统转速的影响需要经过电机和负载的滞后作用, 最终作用到陀螺传感器, 实现信号获取; 而在双速度环控制结构中, 内部摩擦力等扰动力矩对系统转速的影响直接由感知电机转角的圆光栅信号进行微分获得。由于圆光栅的检测频率较高, 电机端的角速度变化可以及时采集和反馈调节, 从而提高了整个系统对抗扰动的响应速度。另外, 圆光栅传感器体积较小、重量较轻, 使用一个圆光栅传感器即可同时获得伺服转轴的角度和角速度信息, 降低了整体系统的体积、重量以及成本。

在抗扰动性能方面, 通过将公式(7)和公式(8)进行比较, 可以发现: (1) 由于惯性环节 $1+G_s(s)$ 的存在, 使得双速度环系统具备更强的摩擦力矩扰动抑制能力; (2) 对于外部载体扰动抑制, 双速度环提高了稳定回路的相位裕度, 增大了开环增益, 其抗扰能力也较单速度环控制有所改善。

2.2 基于双速度环的扰动观测器

为了提高系统隔离扰动的能力, 提出基于陀螺信号的观测器来补偿内速度环的隔离残差和外部载体扰动, 基于双速度环观测器的系统数学模型框图如图 3 所示。

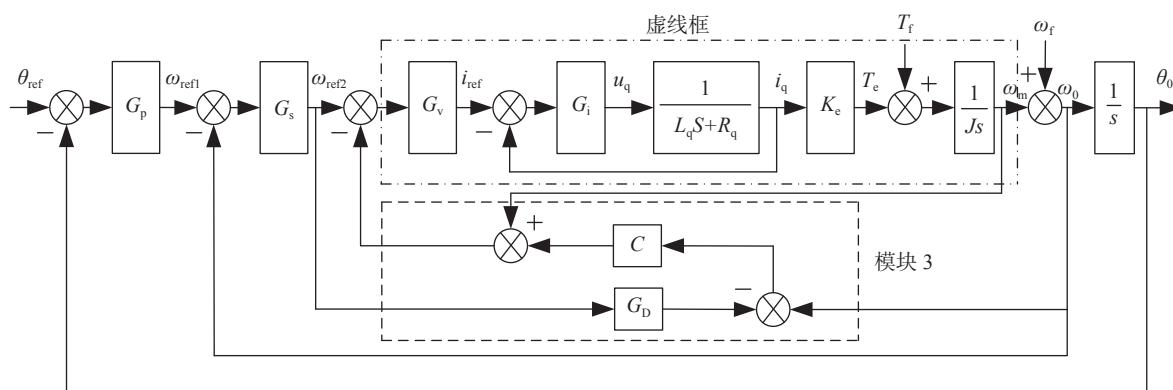


图 3 基于双速度环观测器的数学模型框图

Fig. 3 Block diagram of mathematical model based on double speed loop observer

对于图 3 的双速度环观测器模型, 可以用 $G_D(s)$ 表示虚线框所包围部分的标称传递函数, $C(s)$ 表示速度校正模块。 $G(s)$ 模块后的输出信号经过标称传递函数 $G_D(s)$ 后的输出, 与系统实际输出信号进行比较, 并将比较后的信号经过控制器 $C(s)$ 反馈到内速度环的输入端进行调节, 从而实现对内速度环的隔离残差和外部载体扰动的补偿。

通过公式推导, 双速度环观测器框图中系统输出 ω_0 和内部摩擦力矩扰动 T_f 、外部载体扰动 ω_f 之间的关系, 可表述为公式(9)。若标称模型准确, 即 $G(s)P(s)=G_D(s)$, 则式(9)可简化为公式(10)。

$$\omega_0(s) = \frac{P(s)T_f + \omega_f + G_s(s)G(s)P(s)(1 - C(s)G_D(s))\omega_{ref}}{(1 - C(s)G(s)P(s)) + G_s(s)G(s)P(s)(1 - C(s)G_D(s))} \quad (9)$$

$$\omega_0(s) = \frac{P(s)T_f + \omega_f + G(s)P(s)G_s(s)(1 - C(s)G(s)P(s))\omega_{ref}}{(1 - C(s)G(s)P(s))(1 + G_s(s)G(s)P(s))} \quad (10)$$

比较公式(9)和公式(10), 可以得出: 对于参考输入信号, 系统引入干扰观测器前后并不改变系统输出对输入的映射关系; 另外, 引入干扰观测后, 只要 $1 - C(s)G(s)P(s)$ 引入的是稳定极点, 且满足 $\|1 - C(j\omega)G(j\omega)P(j\omega)\| \gg 1, 0 \leq \omega \leq \omega_b$, 则该系统平台对频率在 $0 \sim \omega_b$ 间的扰动具有抑制能力。

根据鲁棒稳定性原理, 引入观测器后系统鲁棒稳定的充分条件是:

$$\|\Delta(s)C(s)\|_{\infty} \ll 1 \quad (11)$$

其中, $\Delta(s)$ 代表实际模型和标称模型之间的摄动量, 有:

$$G_D(s) = G(s)P(s)(1 + \Delta(s)) \quad (12)$$

本文提出的双速度环+干扰观测器的控制结构, 相对于单纯使用扰动观测器或者单纯使用双速度环的控制方法, 可以进一步补偿内外部扰动的隔离残差, 从而提高整体系统的隔离度。

3 实验研究与讨论

3.1 陀螺信号对比实验

为了测试各种类型速度传感器的信噪比等级和频谱特性,分别将 MEMS 陀螺,光纤陀螺和圆光栅静止放置在平台上,以相同的 1 kHz 的采样频率分别对 3 个传感器的信号进行采集和存储。3 种类型传感器采集的时域信号如图 4(a)(彩图见期刊电子版)所示,其中绿线为采集的静止 MEMS 陀螺信号,红线为采集的静止圆光栅信号经过差分之后的速度信号,蓝线为采集的静止光纤陀螺信号。经过快速傅立叶变换得到的频域信号如图 4(b)(彩图见期刊电子版)所示,图中绿线为对静止状态的 MEMS 陀螺信号进行快速傅立叶变换得到的信号频谱图,红线为对静止状态的圆光栅信号经过差分之后的速度信号进行快速傅立叶变换得到的信号频谱图,蓝线为对静止状态的光纤陀螺信号进行快速傅立叶变换得到的信号频谱图。从图 4 可以看出:①MEMS 陀螺的噪声最大幅值为 $\pm 0.06^\circ/\text{s}$,由圆光栅信号得到的速度信号噪声可达 $\pm 0.02^\circ/\text{s}$,光纤陀螺噪声最小至 $\pm 0.008^\circ/\text{s}$;②通过观察速度环带宽($\leq 50\text{ Hz}$)内的信号频谱

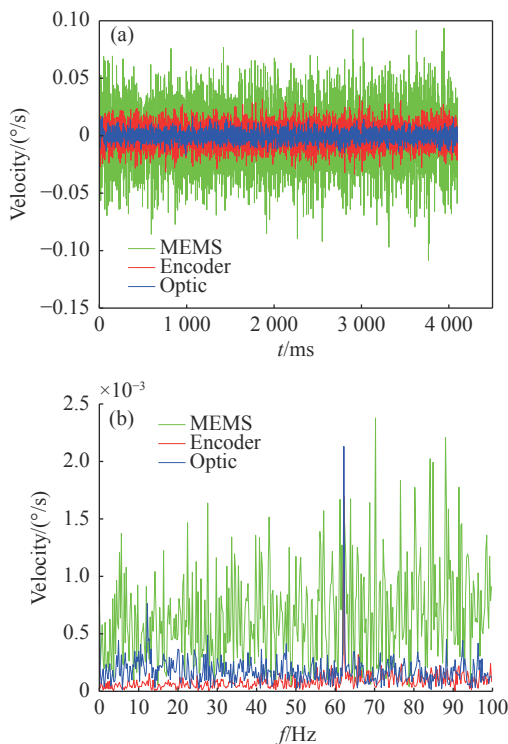


图 4 各传感器信号和频谱对比图

Fig. 4 Comparison of signals and spectra of various sensors

可知,由圆光栅信号得到的速度信号的频谱幅值最小,光纤陀螺信号次之,MEMS 陀螺信号幅值最大。

此外,为了检测 MEMS 陀螺、光纤陀螺、圆光栅三种类型传感器的动态响应性能,将各类传感器分别安装在光电平台方位轴上,通过手动转动设备的方式采集传感器的动态信号。实验发现圆光栅信号得到的速度信号的延时最小,MEMS 陀螺信号的延时最大。基于上述性能测试实验与观察,选择圆光栅的速度信号作为光电平台速度内环的反馈信号,选择光纤陀螺作为速度外环的信号采集设备,进行后续双速度环观测器及其改进模型的硬件实验平台。相对于使用 MEMS 陀螺作为速度外环的控制方法,本文选择延时和噪声均较小的光纤陀螺进行速度外环闭环,可以提高整个系统的闭环带宽,从而提高系统的响应速度。

3.2 低速性能对比实验

3.2.1 阶跃响应实验

通过向光电平台方位轴发送 1° 的阶跃指令信号,可以获得有无干扰观测器条件下的系统时域响应曲线,如图 5(彩图见期刊电子版)所示。比较响应曲线的超调量和超调时间,可以发现:①在没有引入干扰观测器时系统的阶跃响应曲线超调为 40%,调节时间约为 0.055 s;②引入干扰观测器后,系统的阶跃响应曲线超调为 20%,调节时间为 0.025 s。实验结果说明引入干扰观测器后系统的阶跃响应曲线超调量降低了,并且调节时间缩短为原控制系统一半以上。产生上述现象的原因是由于在引入观测器后,局部摩擦力和载体扰动对速度的影响可以及时反馈到系统回

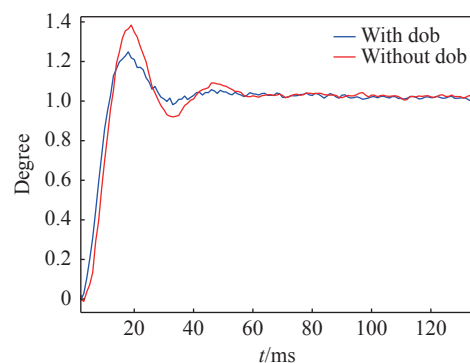


图 5 阶跃响应曲线对比图

Fig. 5 Comparison charts of step response curves

路, 加快了系统的动态响应速度。

3.2.2 正弦响应实验

为进一步测试双速度环观测器的响应性能, 将光电平台固定在摇摆台上, 给方位轴速度环输入幅值为 1° 、频率为 0.5 Hz 的正弦指令信号, 在引入和未引入观测器的双速度环控制系统中分别提取陀螺信号进行存储, 实验结果如图 6(彩图见期刊电子版)所示。图 6(a) 为速度信号跟踪结果, 图中绿线为加入干扰观测器的双速度环控制系统的正弦响应曲线, 红线为未引入干扰观测器的双速度环控制系统的正弦响应曲线, 蓝线为速度环正弦指令信号。图 6(b) 为速度跟踪误差曲线。其中绿线为加入干扰观测器的双速度环控制系统的正弦响应曲线误差, 红线为未引入干扰观测器的双速度环控制系统的正弦响应曲线误差。可以观察到以下现象: ①在图 6(a) 的速度跟踪曲线中可以发现, 在没有引入观测器时, 速度响应曲线在过零点处出现爬坡现象。通过观察跟随曲线的各

局部区域, 可以发现, 引入观测器后, 无论是在速度过零处, 还是达到最大值或者最小值处, 速度响应曲线均可以更好地跟随指令信号; ②进一步分析速度跟踪误差曲线(见图 6(b)), 可以明显观察到, 没有引入观测器时, 速度响应误差在过零点处可达到 $0.1^\circ/\text{s}$, 引入观测器后, 速度响应误差最大不超过 $0.02^\circ/\text{s}$ 。

上述实验结果说明, 引入观测器后的双速度环控制方法可以实时估计并补偿摩擦力, 提高系统的低速响应性能。

3.3 抗扰能力对比实验

抗扰性能通过固定于摇摆台的光电平台进行验证, 由于方位轴所受到的摩擦力较俯仰轴大, 在抗扰实验中以方位轴为对象对双速度环观测器的有效性进行测试。抗扰实验方法为: 分别对摇摆台输入 $(0.25^\circ, 2\text{ Hz})$ 、 $(0.5^\circ, 1\text{ Hz})$ 、 $(1^\circ, 0.5\text{ Hz})$ 、 $(2^\circ, 0.25\text{ Hz})$ 4 组不同的幅值与频率参数, 使其做正弦跟随运动。通过采集光纤陀螺速度信号, 对比其在基于双速度环和基于双速度环观测器两种工作模式下的速度跟踪误差曲线, 如图 7(彩图见期刊电子版)所示。图 7(a) 是在幅度为 2° 、频率为 0.25 Hz 的正弦扰动信号下的速度波动曲线对比结果。其中, 蓝线为未引入干扰观测器时速度曲线波动情况, 红线为引入干扰观测器时速度曲线波动情况(以下同)。图 7(b) 是在幅度为 1° 、频率为 0.5 Hz 的正弦扰动信号下的速度波动曲线对比结果。图 7(c) 是在幅度为 0.5° 、频率为 1 Hz 的正弦扰动信号下的速度波动曲线对比结果。图 7(d) 是在幅度为 0.25° 、频率为 2 Hz 的正弦扰动信号下速度的波动曲线对比结果。可以发现: ①通过观察图 7(a)、7(b) 和 7(c) 中双速度环控制模式的误差曲线, 在 0.25 Hz 、 0.5 Hz 和 1 Hz 频率的正弦扰动信号下和摩擦力等内部扰动力矩的作用下, 出现了幅值为 $\pm 0.2^\circ/\text{s}$ 的速度波动; 而相同条件下基于双速度环观测器的控制方法可以使平台速度几乎没有波动; ②观察并比较 2 Hz 正弦扰动条件下(见图 7(d))的速度跟踪曲线, 可以发现, 没有速度观测器控制模式下的速度波动范围达到 $\pm 0.3^\circ/\text{s}$, 基于双速度环观测器的控制方法使得速度波动幅值减小至 $\pm 0.1^\circ/\text{s}$, 采用双速度环观测器的光电平台系统隔离度由 20.9 dB 提高到 30 dB 。

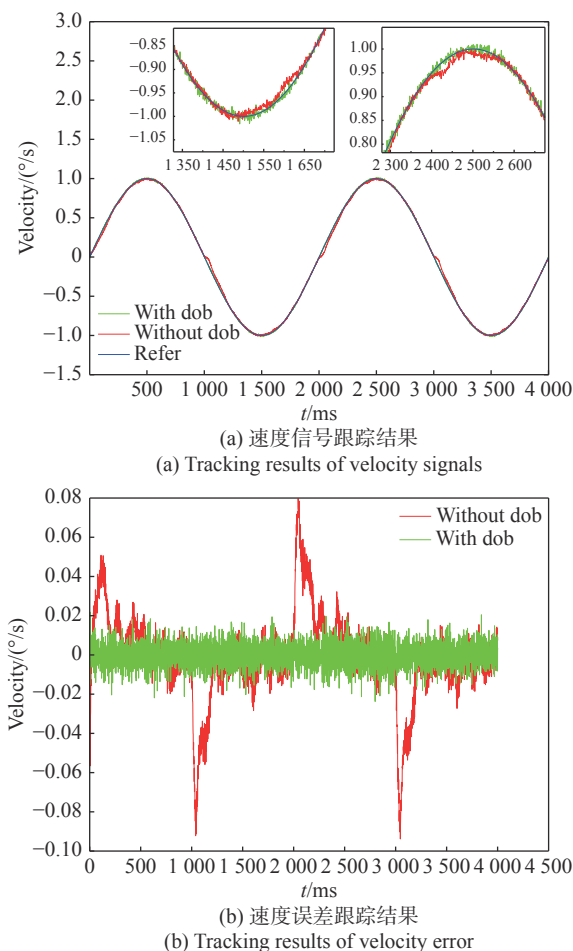


图 6 正弦响应曲线对比图

Fig. 6 Comparison of sinusoidal response curves

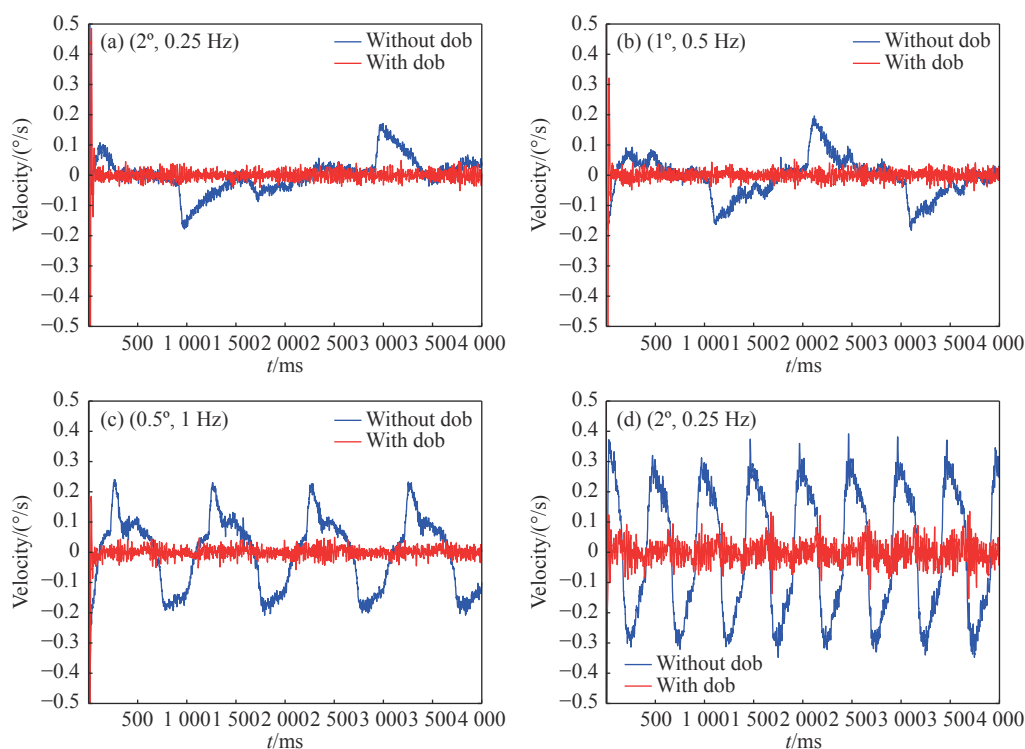


图 7 不同实验条件下的抗扰动能力

Fig. 7 Anti-disturbance abilities under different experiment conditions

上述实验结果验证了引入干扰观测器的双速度环控制方法可以显著提高光电平台对外部载体速度扰动和摩擦力等内部扰动的抑制能力。

4 实验研究与讨论

本文首先建立了光电平台系统的双速度环数学控制模型,在对系统传递函数进行推导分析的基础上,明确了内外速度环各自的反馈信息及作用机理。在传感器选择上,采用噪声和延时较小的圆光栅速度信号实现速度内环闭环,以提高内环的闭环带宽,从而提高系统抑制内部扰动的能

力。接着,通过引入基于陀螺速度信号的观测器控制方法,实现双速度环观测器控制结构,进一步提升了光电平台系统对内部摩擦力和齿槽力矩、外部载荷力矩的抗干扰能力。实验结果表明,引入观测器后的双速度环控制系统开环增益有所提升,系统的响应时间由 0.055 s 降低至 0.025 s;同时具备了对不同频率范围扰动(0.25 Hz~2 Hz)的抑制能力;系统隔离度由 20.9 dB 提升至 30 dB。本文提出的双速度环观测器在实际工程应用中,对于提高光电平台快速响应能力和稳定精度具有较高的参考价值。

参考文献:

- [1] 朱孟真,陈霞,刘旭,等. 战术激光武器反无人机发展现状和关键技术分析[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 20200230.
ZHU M ZH, CHEN X, LIU X, *et al.*. Situation and key technology of tactical laser anti-UAV[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200230. (in Chinese)
- [2] 禹化龙,伍尚慧. 美军定向能武器反无人机技术进展[J]. *国防科技*, 2019, 40(6): 42-47.
YU H L, WU SH H. Progress and development trend analysis on US directed energy weapons against unmanned aerial vehicles[J]. *National Defense Technology*, 2019, 40(6): 42-47. (in Chinese)
- [3] 高博,张乃千,范旭. 反无人机电子战发展[J]. *国防科技*, 2019, 40(1): 35-39.
GAO B, ZHANG N Q, FAN X. Analysis on the development and application of anti-UAV electronic warfare[J]. *National Defense Technology*, 2019, 40(1): 35-39. (in Chinese)

- [4] 李磊. 基于视频的空中标检测技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
LI L. Research on video based airborne target detection technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [5] 薛猛, 周学文, 孔维亮. 反无人机系统研究现状及关键技术分析[J]. 飞航导弹, 2021(5): 52-56,60.
XUE M, ZHOU X W, KONG W L. Research status and key technology analysis of anti UAV system[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021(5): 52-56,60. (in Chinese)
- [6] 李朝龙, 李明辉, 陈玉华. 激光武器在陆军全域作战中的运用[J]. 激光与红外, 2020, 50(5): 515-520.
LI CH L, LI M H, CHEN Y H. The application of laser weapon in the army's whole area operation[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(5): 515-520. (in Chinese)
- [7] 姚杰. 基于双目视觉的无人机目标追踪系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
YAO J. Target tracking system for UAV based on stereo vision[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [8] 张棋. 基于FPGA的运动目标检测与跟踪系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
ZHANG Q. Moving object detection and tracking system design based on FPGA[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [9] 周新力, 李醒飞. 光电跟踪系统积分反步自抗扰控制策略[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2021, 54(4): 379-387.
ZHOU X L, LI X F. Integral backstepping active disturbance rejection control strategy for the electro-optical targeting system[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2021, 54(4): 379-387. (in Chinese)
- [10] 贾桐, 李秀智, 张祥银. 车载惯性稳定平台的神经网络滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(1): 13-22.
JIA T, LI X ZH, ZHANG X L. Neural network sliding mode control for vehicle inertially stabilized platform[J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(1): 13-22. (in Chinese)
- [11] 邢泽智, 王秀和, 赵文良. 基于不同极弧系数组合分段倾斜磁极的表贴式永磁同步电机齿槽转矩削弱措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5737-5747.
XING Z ZH, WANG X H, ZHAO W L. Research on reduction methods of cogging torque based on segmented skewing magnetic poles with different combinations of pole-arc coefficients in surface-mounted permanent magnet synchronous motors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(16): 5737-5747. (in Chinese)
- [12] 刘盟. 光电吊舱伺服控制系统的设计与开发[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
LIU M. Design and development of servo control system for photoelectric pod[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [13] 崔慧敏. 基于智能差分算法的摩擦力补偿方法研究[J]. 遥测遥控, 2022, 43(5): 61-67.
CUI H M. Research on friction compensation method based on intelligent differential algorithm[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2022, 43(5): 61-67. (in Chinese)
- [14] 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(3): 77-81.
LI L, XUAN M, JIA H G, et al.. Design and optimization of vibration isolation system for photoelectric stabilized platform[J]. *Computer Simulation*, 2017, 34(3): 77-81. (in Chinese)
- [15] 邓超. 运动平台预测跟踪技术研究[D]. 长春: 中国科学院光电技术研究所, 2018.
DENG CH. Research on prediction tracking control on moving bed[D]. Changchun: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [16] 王中石, 田大鹏, 石磊, 等. 考虑安装基座影响的光电平台等价捷联惯性稳定控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1344-1352.
WANG ZH SH, TIAN D P, SHI L, et al.. Equivalent strapdown inertial stability control of photoelectric platform considering the effect of mounting base[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(6): 1344-1352. (in Chinese)
- [17] 潘帅, 杨奕, 陈丹丹, 等. 基于干扰补偿的稳定平台控制系统设计[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 22-25.
PAN SH, YANG Y, CHEN D D, et al.. The design of inertial stabilization platform based on disturbance compensation[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2018(1): 22-25. (in Chinese)
- [18] 任彦, 王义敏, 牛志强, 等. 高阶终端滑模控制在稳定平台中的应用[J]. 控制工程, 2021, 28(3): 553-558.
REN Y, WANG Y M, NIU ZH Q, et al.. Application of high-order terminal sliding mode control in stable platform[J]. *Control Engineering of China*, 2021, 28(3): 553-558. (in Chinese)
- [19] 夏先齐, 张葆, 李贤涛, 等. 基于扩张状态观测器的永磁同步电机低速滑模控制[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12):

2628-2638.

XIA X Q, ZHANG B, LI X T, *et al.*. Low speed sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(12): 2628-2638. (in Chinese)

作者简介:



高文锐(1990—),男,辽宁盘锦人,博士,工程师,2021年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事地面无人系统和自主环境导航方面的研究。
E-mail: kangyuan45@126.com



崔慧敏(1990—),女,河南商丘人,博士,高级工程师,2018年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事高精度光束控制和无人系统方面的研究。E-mail: cui_huimin2012@126.com