

## 激光与光电子学进展

## 快速反射镜装配误差扰动抑制方法

艾志伟\*, 陈俊沅, 嵇建波, 张慕帆, 柏元忠

桂林航天工业学院电子信息与自动化学院, 广西 桂林 541004

**摘要** 为了进一步抑制装配误差扰动对快速反射镜控制系统输出性能的影响,提升系统的跟踪精度,基于干扰观测原理,提出了一种具有内、外双干扰观测环节的扰动抑制方法。分析了快速反射镜组件装配误差对控制系统精度的影响,建立了不平衡力矩扰动的等效数学模型;利用内环干扰观测环节实现对中高频扰动的抑制,应用外环干扰观测环节补偿内环干扰观测环节的中低频扰动放大作用并提供中低频扰动抑制;分析了提出方法的输入和误差信号传递过程,设计了扰动抑制系统各控制器的控制参数;搭建了虚拟样机仿真测试平台,对控制系统的性能进行了测试。结果显示,加入双干扰观测环节前后,虚拟样机系统的调节时间误差为 0.54%,对于 15 Hz 等效扰动,扰动抑制能力提升了 25.23%。理论和实验结果表明,双干扰观测环节的引入可以有效抑制装配误差的扰动。

**关键词** 仪器,测量与计量;快速反射镜;扰动抑制;干扰观测器;装配误差

中图分类号 TN219

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222215

## Disturbance Suppression Method for Assembly Errors in Fast Steering Mirrors

Ai Zhiwei\*, Chen Junyuan, Ji Jianbo, Zhang Mufan, Bai Yuanzhong

School of Electronic Information and Automation, Guilin University of Aerospace Technology,  
Guilin 541004, Guangxi, China

**Abstract** To further suppress the effects of assembly error disturbance on the output performance of a fast steering mirror control system and to improve the tracking accuracy of the system, a disturbance suppression method with internal and external disturbance observation links based on the principle of disturbance observation is proposed. The effects of the assembly error of the fast steering mirror on the accuracy of the control system were analyzed, and an equivalent mathematical model of the unbalance torque disturbance was developed. The inner loop interference observation link was used to suppress medium- and high-frequency disturbances, whereas the outer loop interference observation link was used to compensate for the medium- and low-frequency disturbance amplification of the inner loop interference observation link and provide medium- and low-frequency disturbance suppression. The input and error signal transmission process of the proposed disturbance suppression method were analyzed, and the control parameters of each controller of the suppression system were designed. A virtual prototype simulation test platform was built to test the performance of the control system. The results show that the adjustment time error of the virtual prototype system is 0.54% before and after the double interference observation link is added. For a 15-Hz equivalent disturbance, the disturbance suppression capability is improved by 25.23%. Theoretical and experimental results show that the introduction of a double disturbance observation links can effectively suppress the disturbance of the assembly error.

**Key words** instrumentation, measurement, and metrology; fast steering mirror; disturbance suppression; disturbance observation; assembly error

## 1 引言

复合轴光电跟踪系统是由粗、精二级跟踪子系统

共同配合,完成对目标的捕获和跟踪,主要应用在跟踪目标速度快、加速度大以及跟踪精度要求高的光电捕获跟踪瞄准系统中<sup>[1-4]</sup>。在复合轴系统中,粗跟踪部分

收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-02-06; 录用日期: 2023-03-01; 网络首发日期: 2023-03-10

基金项目: 桂林市科技计划(20210210-2)、广西大学生创新创业计划(202211825014)

通信作者: \*aizhiwei752@163.com

的残差需要依靠精跟踪部分对其进行抑制,快速反射镜作为精跟踪子系统最重要的光学装置<sup>[5]</sup>,通过改变反射镜的偏转角度以实现光束传输系统中光束传播方向的精密调整和稳定控制,快速反射镜系统的输出精度是决定复合轴系统跟踪精度的重要因素<sup>[6]</sup>。

快速反射镜在工作过程会受到不同类型扰动信号的影响,根据来源不同,扰动信号可以分为大气湍流引起的宽带扰动、平台上其他设备电机周期运行时引起的窄带扰动以及快速反射镜自身变换引起的扰动三种类型<sup>[7]</sup>。受到干扰信号的影响,快速反射镜控制系统输出精度会降低。快速反射镜控制系统一般采用比例积分微分(PID)控制,不完全微分法PID闭环位置反馈控制对因驱动柔性机构的存在引起的低阶机械谐振具有良好的抑制效果,在系统伺服带宽内不区分宽带扰动和窄带扰动均具有抑制效果,但扰动抑制能力会随着频率的升高而降低。在实际系统中,系统伺服带宽只能做到数十到几百赫兹,因此PID控制对低频段的大气湍流扰动具有较好的抑制效果,但对高幅值的中高频扰动的抑制效果则很难满足要求。在扰动可以测量的情况下,采用前馈扰动结合反馈控制进行扰动抑制也是一种常用的方法。前馈扰动复合控制系统中,误差信号一方面用于调整前馈控制器参数,使得误差信号在某种准则下最优,实现对窄带扰动的抑制,因而对设备周期运行时引起的窄带扰动具有很好的抑制效果。

受到装配工艺的限制,工艺误差会造成零件装配误差的产生,系统运行过程中零件间位置的改变会对系统输出精度产生影响,已有研究显示,该类型的扰动会影响快速反射镜系统的跟踪精度,因此研究快速反射镜自身变换引起的扰动的抑制方法,对于提高复合轴跟踪系统控制精度具有非常重要的意义<sup>[8-9]</sup>。快速反射镜工作过程中自身变换引起的扰动是难以测量甚至是不可测量的,这时候扰动前馈与输出反馈结合的复合控制方法就不能使用了。针对不可测量扰动的抑制问题,一般是在系统中引入干扰观测环节<sup>[10]</sup>。带有扰动的系统输出和名义模型输出间的偏差通过干扰环节控制器后进入被控对象输入端,名义模型的输入端的典型信号有两种:一种是将干扰观测环节的输出与系统控制器输出叠加后再作用到名义模型,这种方法是最典型的干扰观测器的使用方法,可以提高系统对中频和高频扰动的抑制能力,但对中低频扰动具有放大作用<sup>[11]</sup>;另一种是将系统控制器输出信号直接作用于名义模型,然后再进行干扰观测处理,这种方法可以提高系统对低频和中频扰动的抑制能力,但对中高频扰动具有放大作用<sup>[12]</sup>。

针对以上问题,本文提出了一种具有内、外双干扰观测环节的双干扰观测(DDOB)系统的位置反馈不完全微分法PID控制系统,用于实现对全频段范围装配误差扰动的抑制。根据快速反射镜组件之间的装配误

差扰动建立等效扰动模型,基于干扰观测(DOB)环节提出了一种双干扰观测器模型,分析了引入双干扰观测器后系统输出的变化情况,设计了DDOB系统中内、外环控制器参数,进行了时频域仿真测试,并在搭建的快速反射镜虚拟样机模型中对DDOB控制系统进行了性能测试。仿真结果显示,在工作带宽内,DDOB系统对全频段的扰动都具有抑制能力。

## 2 系统设计与分析

快速反射镜的反射镜和音圈电机在进行装配的过程中,由于反射镜质心偏离系统几何中心产生的装配误差在快速反射镜工作时会造成系统中存在不平衡力矩<sup>[8]</sup>,基座角运动到不平衡力矩扰动的传递函数为

$$G_d(s) = \frac{M_d(s)}{\theta_d(s)} = mgl_0, \quad (1)$$

式中: $M_d(s)$ 是反射镜运动方向的不平衡扰动力矩; $\theta_d(s)$ 是快速反射镜基座偏转角; $m$ 是反射镜质量; $g$ 是重力加速度; $l_0$ 是反射镜质心与系统几何中心的偏移距离。不平衡扰动力矩的作用可等效为基座角运动通过等效环节 $G_x(s)$ 作用在控制系统中,等效环节的传递函数可以表示为

$$G_x(s) = 1 + G_m(s)G_d(s), \quad (2)$$

式中, $G_m(s)$ 是快速反射镜机械部分的传递函数。扰动等效环节传递函数的对数幅相特性曲线(Bode图)如图1所示,从图中可以看到,控制系统对频率低于95 Hz的等效环节扰动输入具有放大作用,因此针对扰动抑制系统的设计主要是抑制该频段的扰动放大作用。

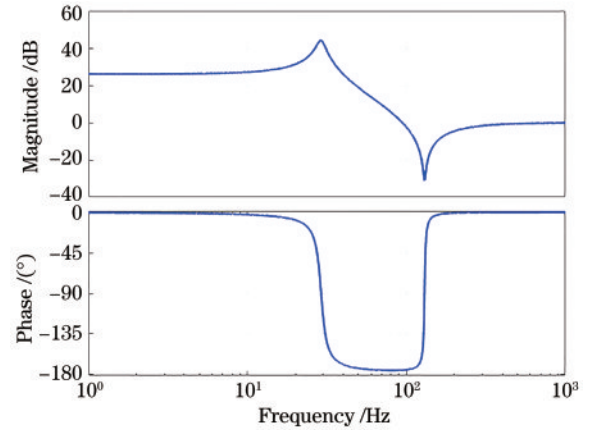


图1 等效扰动环节的Bode图

Fig. 1 Bode diagram of equivalent disturbance link

基于改进DOB设计的快速反射镜等效扰动抑制控制框图如图2所示。图中 $G$ 是被控快速反射镜机电系统的传递函数, $\tilde{G}$ 是快速反射镜机电系统的名义模型, $G_c$ 是干扰观测环节的控制器。由图可知,改进的DOB扰动抑制模型的输出为

$$\theta_{out} = \frac{CG}{1 + CG} \theta_{in} + \frac{G_x}{(1 + CG)(1 - C_e G)} \theta_d. \quad (3)$$

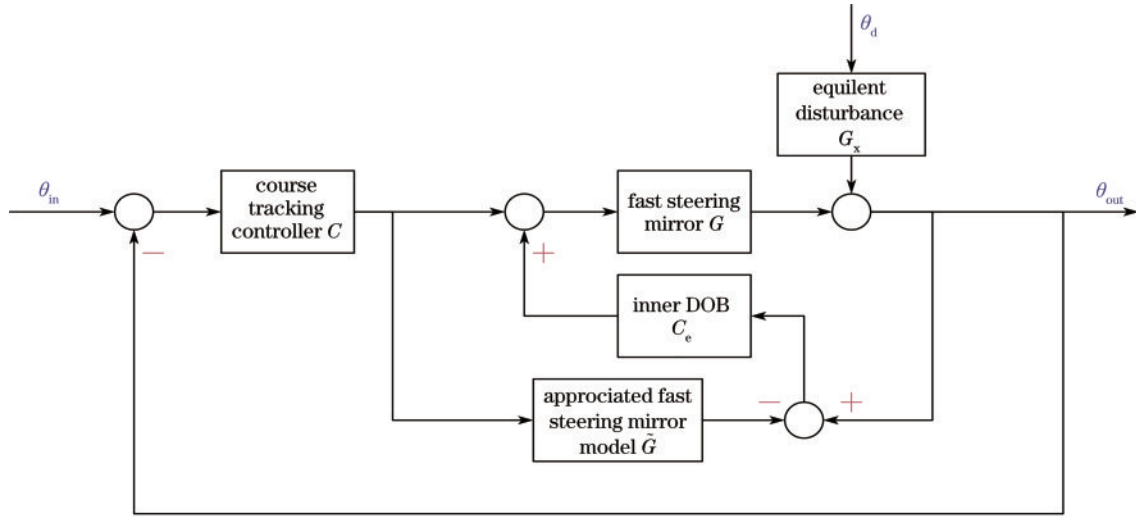


图 2 改进 DOB 扰动抑制模型  
Fig. 2 Improved DOB disturbance suppression model

采用该方法设计的系统对中高频扰动都具有一定的扰动抑制能力,但对于低频段的扰动不仅没有抑制效果,甚至还会放大扰动的作用。由于装配误差造成的不平衡力矩扰动在工作时对控制系统的输出都有影响,仅仅只能抑制中高频扰动的控制系统显然是不够的。

为了实现对全频段干扰信号的抑制,同时使设计的 DOB 环节控制器在工程上可以实现,在保证新的控制系统特征方程不变的情况下,在改进 DOB 系统的基础上,设计了一种 DDOB 扰动抑制系统,DDOB 系统是一个拥有双干扰观测环节的控制系統,如图 3 所示,控制系统由位置环控制器、内环干扰观测环节、外环干扰观测环节、被控对象和测量反馈装置等部分组成,C 是位置环系统控制器,  $G_r$  是 DDOB 的外环控制器,  $G_e$  是 DDOB 的内环控制器。系统位置环控制器采用不完全微分法 PID 控制,对由柔性支承结构的存在引起的机械谐振进行抑制<sup>[13]</sup>。测量反馈装置为非接触式的电涡流位移传感器,用于采集反射镜的输出转角位置信息。内、外环干扰观测环节共用一个快速反射镜名义模型,将名义模型输出数据与带有扰动的输出信号进行对比,并对系统扰动进行两次观测处理。该方法不需要扰动即可测量,扰动抑制频段的范围取决于内、外环干扰观测环节控制器的取值。系统内、外环干扰观测环节的设计与系统位置环控制器的设计相互独立,可以灵活对系统控制器以及干扰观测环节控制器进行独立设计,提高快速反射镜控制系统对特定频段内扰动的抑制能力。

在工作过程中,DDOD 系统通过不完全微分法 PID 控制器的输出控制快速反射镜的名义模型,从而得到在输入信号激励下名义模型的位置响应。将其与实际快速反射镜的输出响应作比较后得到差值,即得到等效扰动带来的位置响应,将该信号通过内环干扰

观测控制器输出控制信号对实际模型进行第一次补偿,通过外环控制器形成的补偿量叠加到不完全微分法 PID 控制器的控制量中去形成第二次补偿,通过内环和外环两个控制器的配合可实现对全频段扰动的抑制。

根据图 3 可知,DDOB 双控制器系统的输出为

$$\theta_{out} = \frac{CG - C\tilde{G}C_eG}{1 + CG - C_eG - C\tilde{G}C_eG - (G - \tilde{G})C_f} \theta_{in} + \frac{G_x(1 - C_f\tilde{G})}{1 + CG - C_eG - C\tilde{G}C_eG - (G - \tilde{G})C_f} \theta_d, \quad (4)$$

式中,在快速反射镜近似模型与名义模型精度偏差较小时,输出式分母最后一项可以被消除,则 DDOB 系统的特征方程变为

$$\Delta = 1 + CG - C_eG - C\tilde{G}C_eG - (G - \tilde{G})C_f = (1 + CG)(1 - C_eG). \quad (5)$$

因此,式(4)可以化简为

$$\theta_{out} = \frac{CG}{1 + CG} \theta_{in} + \frac{G_x}{1 + CG} \frac{1 - C_f\tilde{G}}{1 - C_e\tilde{G}} \theta_d. \quad (6)$$

快速反射镜控制系统未加入 DOB 环节的输出为

$$\theta_{out} = \frac{CG}{1 + CG} \theta_{in} + \frac{G_x}{1 + CG} \theta_d. \quad (7)$$

通过对比式(6)和式(7)可知,加入 DDOB 前后,输入信号引起的系统输出保持不变,也就是说 DDOB 系统的引入不影响系统输出的输出响应,DDOB 双控制器环节在保证系统稳定的情况下,其扰动抑制能力取

决于  $\left\| \frac{1 - C_f\tilde{G}}{1 - C_e\tilde{G}} \right\|$ ,DDOB 中两个干扰观测环节控制器的

设计是决定 DDOB 系统扰动抑制能力的关键,但是两个控制器的设计与系统控制器的设计是互相独立的。



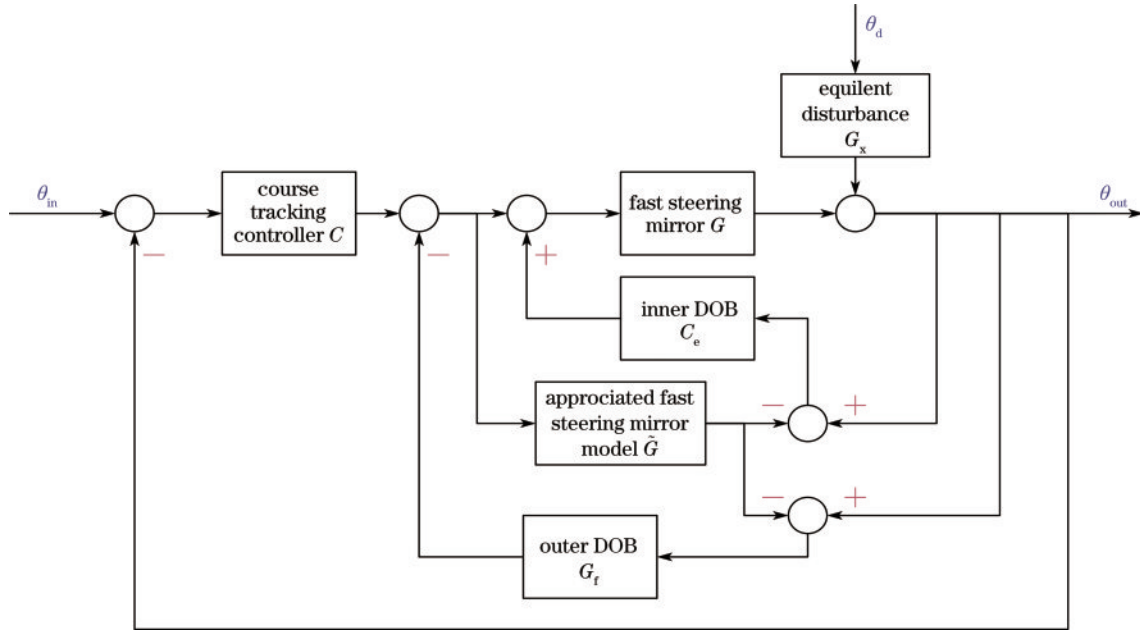


图 3 DDOB 扰动抑制系统模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of DDOB disturbance suppression system model

### 3 系统控制参数设计

容易得到,为了实现进一步抑制扰动的目的,必然有下列不等式关系:

$$\left\| \frac{1 - C_f \tilde{G}}{1 - C_e \tilde{G}} \right\| < 1. \quad (8)$$

上述不等式可以转换成以下关系:

$$\begin{cases} \left\| 1 - C_e \tilde{G} \right\| < 1 \\ \left\| \frac{1 - C_f \tilde{G}}{1 - C_e \tilde{G}} \right\| < 1 \end{cases}, \omega < \omega_1 \text{ and } \begin{cases} \frac{1}{\left\| 1 - C_e \tilde{G} \right\|} < 1 \\ \left\| 1 - C_f \tilde{G} \right\| < 1 \end{cases}, \omega > \omega_1 \quad (9)$$

转换后的关系式形式上看起来变得更复杂了,但是在控制系统设计过程中更容易实现,这是因为该关系式只要求 DDOB 系统的内环控制器在中高频段具有抑制能力,在中低频段可以具有一定的放大作用,若内环控制器在中低频段引入了扰动放大作用,则利用外环控制器在中低频段的抑制能力消除这部分放大作用,然后保证外环控制器在中高频段不放大扰动作用即可。当内环控制器的形式为

$$C_e = \frac{K_e}{T_e s + 1} \quad (10)$$

时,根据文献[5]设计的改进 DOB 系统的结论,可以得到 DDOB 系统的内环控制器作用时,内环干扰观测器引入的扰动抑制能力曲线示意图如图 4 所示。图中的  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  是内环干扰观测器的三个转折频率。从图中可以看到,在内环干扰观测环节的转折频率  $\omega_1, \omega_2$  之间存在一个幅值穿越频率,内环干扰观测器对高于该频率的扰动信号理论上均具有抑制能力,但是当扰

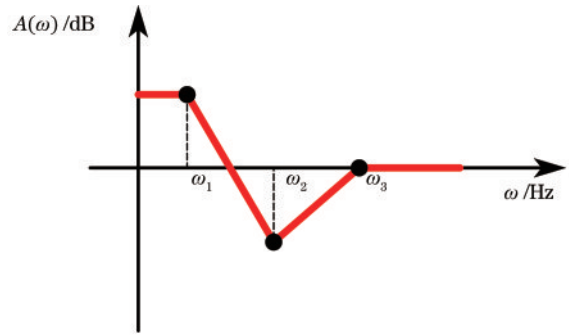


图 4 内环干扰观测环节的抑制曲线

Fig. 4 Suppression curve of inner loop disturbance observation link

动频率高于  $\omega_3$  时,扰动抑制能力会很小,趋近于零。

那么根据式(9)的设计思想,外环干扰观测环节引入的控制效果可以是图 5 所示的两种形式,图中  $\omega_1^1, \omega_2^1, \omega_3^1, \omega_4^1$  和  $\omega_1^2, \omega_2^2$  是两种扰动抑制形式的转折频率。第一种形式的设计思路是利用外环干扰观测器低于转折频率  $\omega_1^1$  的扰动抑制特性,补偿内环干扰观测器对低频扰动的放大作用,并提供对低频扰动的抑制能力,然后利用外环干扰观测器在转折频率  $\omega_1^1, \omega_3^1$  之间扰动抑制特性对中频段扰动进行抑制,内、外环干扰观测器扰动抑制特性的叠加让系统可以得到很好的扰动抑制效果,转折频率  $\omega_2^1$  存在可以保证平缓的转折过程,最后利用转折频率  $\omega_3^1, \omega_4^1$  保证外环控制器的稳定,并提供对高频扰动的抑制。第二种形式的设计思路是利用低于  $\omega_1^2$  的扰动抑制特性,补偿内环干扰观测器对低频扰动的放大作用,并提供对低频扰动的抑制能力,然后利用频率  $\omega_1^2, \omega_2^2$  间的扰动抑制特性提供中高频段的扰动抑制特性。

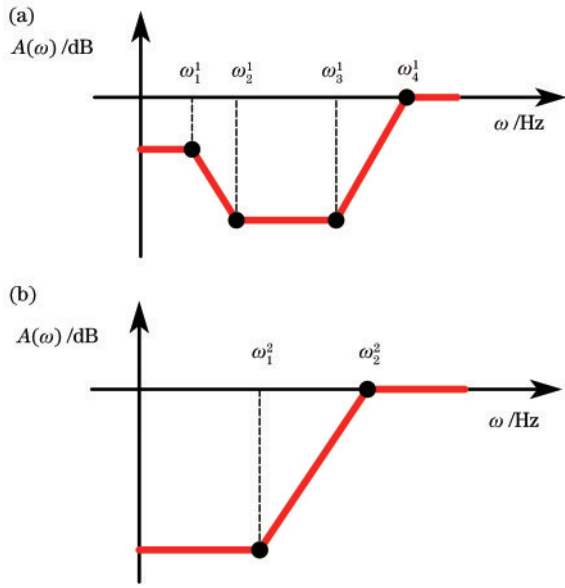


图 5 期望的外环干扰观测环节引入的扰动抑制曲线。  
(a)形式一; (b)形式二

Fig. 5 Desired disturbance suppression curves introduced by outer loop disturbance observation link. (a) Mode one; (b) mode two

很显然,更希望外环控制器引入的抑制效果是第一种形式,这可以极大提高控制系统的扰动抑制能力,但是该方法对外环控制器的设计要求十分复杂,要求有四个调节参数。相比较而言,第二种形式的外环控制引入的扰动抑制能力虽然在中频段的抑制能力会弱于第一种形式,但是得到该形式抑制曲线需要调整的 DDOB 外环控制器参数只有三个。容易得到具有第二种形式频率特性曲线的传递函数为

$$G_r = \frac{s^2 + r_1 s + r_2}{s^2 + r_1 s + r_3}, \quad (11)$$

式中,  $r_1, r_2, r_3$  是常数,则外环控制器的值为

$$C_f = \frac{1 - G_r}{G'} G_r, \quad (12)$$

式中,  $G'$  是利用主导极点对快速反射镜的传递函数进行降阶后系统的二阶模型。本文研究的快速反射镜机电系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{0.834}{4.891e - 7s^3 + 0.001814s^2 + 0.254s + 178.7} \quad (13)$$

进行降阶后,快速反射镜系统的二阶模型为

$$G(s) = \frac{475}{s^2 + 116s + 101700} \quad (14)$$

得到具有图 4 所示频率特性的传递函数后代入式(11)、式(12),可以得到设计的 DDOB 系统的外环干扰观测环节的控制器的传递函数为

$$G(s) = 6.5e3 \frac{s^2 + 116s + 101700}{s^2 + 10800s + 3.24e6} \quad (15)$$

## 4 仿真与测试

DDOB 系统的内环控制器引入的扰动抑制特性曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看到,在内环干扰观测器的作用下,系统对低于 48 Hz 的扰动信号具有放大作用,当扰动信号的频率为 36 Hz 时,放大作用最明显;对高于 48 Hz 的扰动信号理论上都具有抑制能力,当扰动信号的频率为 57 Hz 时,抑制效果最明显。

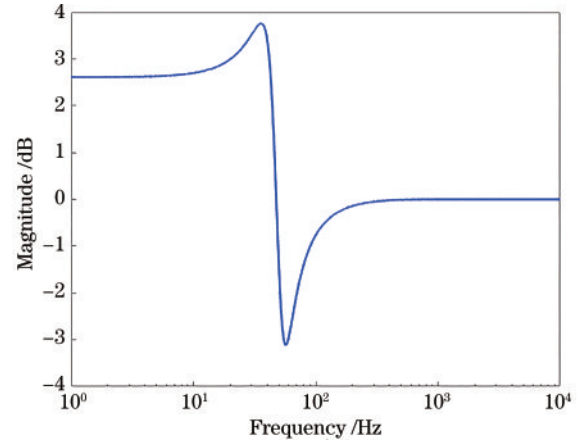


图 6 内环干扰观测环节扰动抑制特性曲线

Fig. 6 Disturbance suppression characteristic curve of inner loop disturbance observation link

DDOB 系统的外环干扰观测器引入的扰动抑制特性曲线如图 7 所示。从图 7 中可以看到,外环干扰观测器对低频段干扰具有较好的抑制效果,抑制能力从低频到高频逐渐降低,但是当扰动信号的频率高于 50 Hz 时,控制系统对扰动信号的抑制能力衰减很快,在 100 Hz 后,扰动抑制能力基本为零。

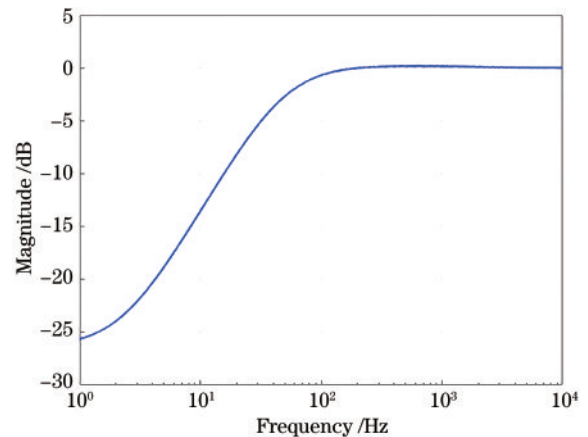


图 7 外环干扰观测环节扰动抑制特性曲线

Fig. 7 Disturbance suppression characteristic curve of outer loop disturbance observation link

DDOB 环节作用下引入的扰动抑制特性如图 8 所示。可以看到,DDOB 系统对频率低于 40 Hz 的扰动信号,扰动抑制能力随着频率的增加快速下降;对频率在 40~60 Hz 的扰动信号,扰动抑制能力随着频率的

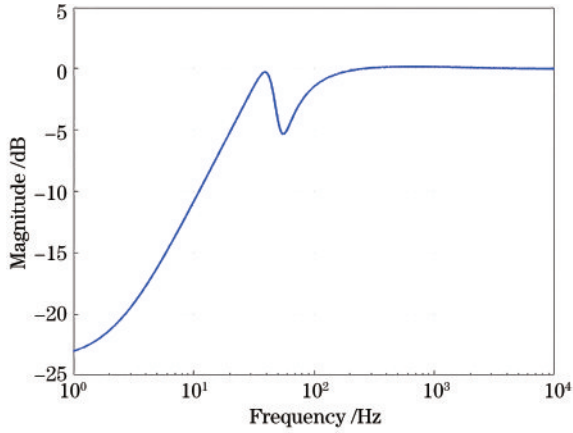


图 8 DDOB 系统扰动抑制特性曲线

Fig. 8 Disturbance suppression characteristic curve of DDOB system

增加而增加;对频率高于 60 Hz 的扰动信号,扰动抑制能力随着频率增加缓慢下降,最终趋近于零。

从图 8 中可以看到,DDOB 双干扰观测环节结合了内环干扰观测环节和外环干扰观测环节的优点,用外环干扰观测环节的低频段的扰动抑制能力补偿内环观测环节的扰动放大作用,用内环干扰观测环节在中频段的扰动抑制能力补偿外环干扰观测环节的抑制能力快速衰减的问题,使得 DDOB 系统对工作带宽的全频段扰动均具有抑制效果,与外环干扰观测器引入的扰动抑制特性相比,DDOB 系统在扰动信号的高于 80 Hz 时抑制效果更强;与内环干扰观测器相比,DDOB 系统在扰动信号低于 48 Hz 时可以更好地抑制扰动作用。

加入 DDOB 前后控制系统的 Bode 图如图 9 所示。从图中可以看到,加入 DDOB 环节前的控制系统对等效扰动也具有一定的抑制能力,与该系统相比,加入 DDOB 后控制系统的扰动抑制传递函数具有更好的衰减效果,在频率 15、40、60、120 Hz 处的扰动抑制能

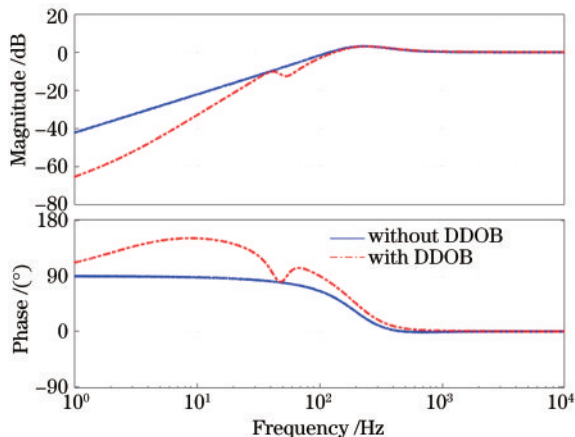


图 9 加入 DDOB 前后系统扰动抑制特性对比

Fig. 9 Comparison of system disturbance suppression characteristics before and after adding DDOB

力分别提升了 24.28%、3.20%、25.65%、0.29%。

为了测试设计的 DDOB 系统的性能指标,搭建了快速反射镜控制系统仿真模型及虚拟样机测试系统。快速反射镜的虚拟样机是利用三维建模软件、多体动力学软件和有限元软件共同完成的。在完成快速反射镜的三维建模后,对于其中的柔性支承结构利用有限元软件生成模态中性文件,并将柔性零件的模态中性文件和刚性零件在多体动力学软件中生成虚拟样机,与 SIMULINK 交互完成控制系统性能测试。

加入 DDOB 系统前后,虚拟样机控制系统的阶跃响应曲线如图 10 所示。从图中可以看到,加入 DDOB 系统前,控制系统的调节时间是 0.0186 s,上升时间是 0.0019 s,超调量为 3.4775%;加入 DDOB 系统后,控制系统的调节时间是 0.0187 s,上升时间是 0.0018 s,超调量为 6.4022%。与加入 DDOB 前的系统相比,调节时间的误差为 0.54%,上升时间的误差为 5.26%,超调量的偏差为 2.9247%,表明 DDOB 的引入对控制系统中由输入信号引起的输出量影响较小。

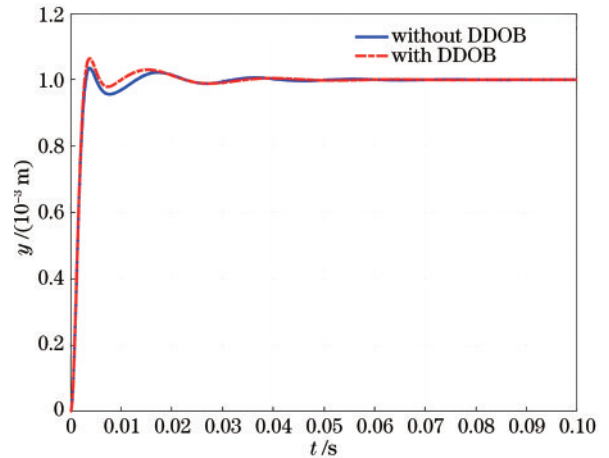


图 10 加入 DDOB 前后虚拟样机系统阶跃响应曲线

Fig. 10 Step response curves of virtual prototype system before and after adding DDOB

进一步地,为了研究 DDOB 环节对装配误差扰动的抑制能力,在加入 DDOB 前后进行了 4 组对照实验,扰动频率分别为 15、40、60、120 Hz,幅值均为 0.001 m,输出曲线如图 11 所示,计算可得与加入 DDOB 之前的系统相比,加入 DDOB 系统之后扰动抑制能力分别提升了 25.23%、3.45%、28.14%、0.27%。对比频域仿真结果,时域理论仿真结果的误差分别为 3.91%、7.81%、9.71%、6.90%,时、频域仿真结果的误差在 10% 以内,如表 1 所示。

图 12 是加入 DDOB 环节后,虚拟样机测试结果与理论仿真结果在 15 Hz 和 60 Hz 的对比,从图中可以看到,同一频率的两条曲线走势一致,但曲线峰值存在偏差,偏差的存在主要是考虑受到控制超调的影响,总体上理论仿真结果和虚拟样机测试结果基本一致。



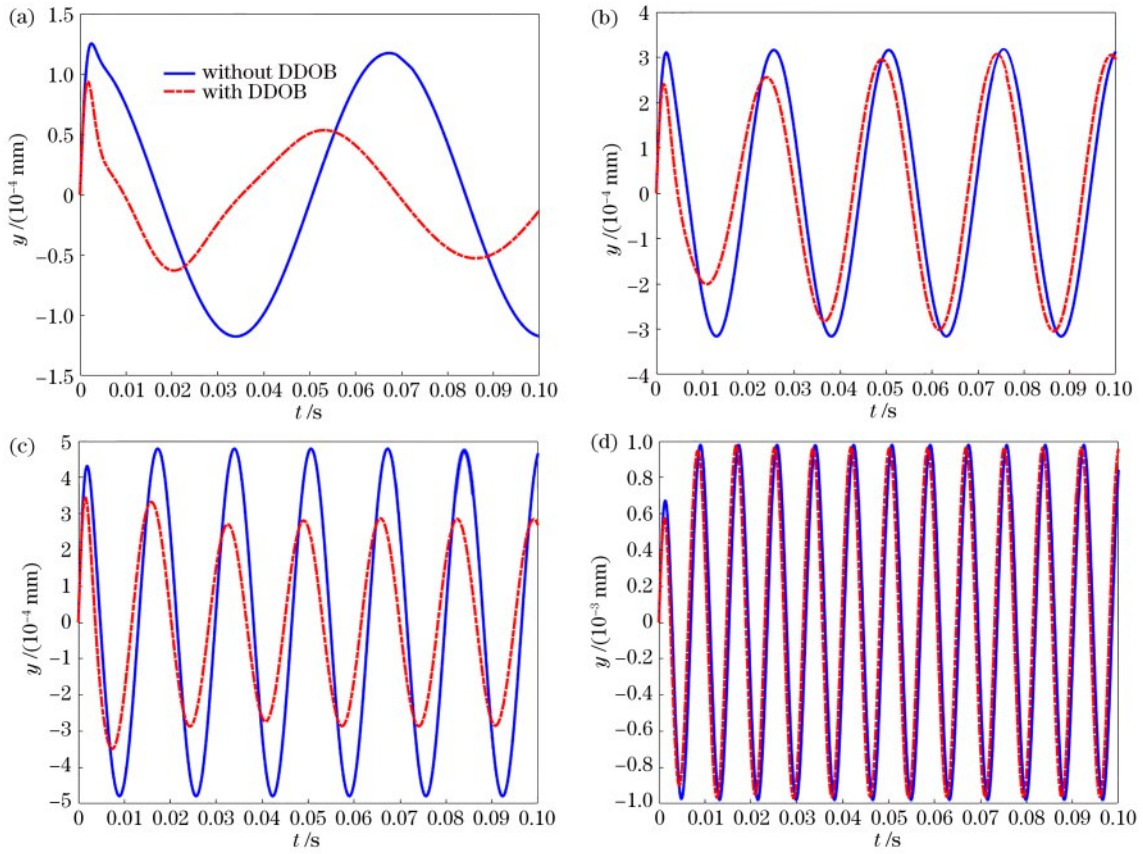


图 11 控制系统在不同频率扰动的理论输出比较。(a) 15 Hz; (b) 40 Hz; (c) 60 Hz; (d) 120 Hz

Fig. 11 Comparison of theoretical output of control system under different frequency disturbances. (a) 15 Hz; (b) 40 Hz; (c) 60 Hz; (d) 120 Hz

表 1 加入 DDOB 前后扰动抑制能力在时、频域的对比

Table 1 Comparison of disturbance suppression capabilities in time and frequency domain before and after adding DDOB

Disturbance signal frequency /Hz	Frequency domain %	Time domain /%	Error /%
15	24.28	25.23	3.91
40	3.20	3.45	7.81
60	25.65	28.14	9.71
120	0.29	0.27	6.90

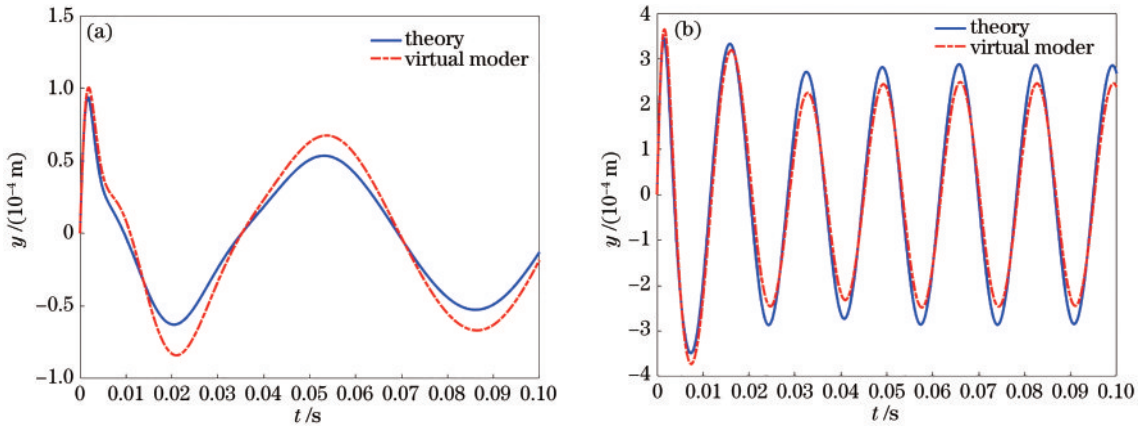


图 12 不同频率扰动下 DDOB 系统虚拟样机输出与理论输出对比。(a) 15 Hz; (b) 60 Hz

Fig. 12 Comparison between virtual prototype and theoretical outputs of DDOB system under different frequency disturbances.

(a) 15 Hz; (b) 60 Hz

## 5 结 论

本文针对快速反射镜自身变换引起的装配误差扰动,设计了一种具有内、外 DDOB 环节的扰动抑制算法。通过分析得到了系统运动时不平衡力矩扰动的等效扰动模型,并得出装配误差的存在会对频率低于 95 Hz 的扰动信号产生放大作用;提出了一种具有内、外环干扰观测环节的扰动抑制方法对该段频率内的等效扰动进行进一步地抑制,利用内环干扰观测环节实现对中高频扰动的抑制,应用外环干扰观测环节补偿内环干扰观测环节的中低频扰动放大作用并提供中低频扰动抑制;对输入信号和误差信号的传递过程进行了分析,分析结果显示,系统内、外环干扰观测环节的设计与系统位置环控制器的设计相互独立,可以灵活地对系统控制器以及干扰观测环节控制器进行独立设计,设计了内、外环干扰观测环节的控制参数;进行了频域和时域理论仿真测试,并将控制系统应用在虚拟样机中。时域仿真结果显示,加入 DDOB 环节后,控制系统对 15 Hz 等效扰动的抑制能力提升了 25.23%,与频域分析结果的误差为 3.91%。虚拟样机测试结果显示,加入 DDOB 环节前后,调节时间的误差为 0.54%,上升时间的误差为 5.26%,扰动作用时,虚拟样机输出与时域理论输出曲线基本一致。理论、仿真和虚拟测试结果表明,在控制系统中引入 DDOB 环节,能够进一步抑制装配误差扰动对控制系统输出的影响,进一步提升快速反射镜系统的跟踪精度。

### 参 考 文 献

- [1] Kluk D J, Boulet M T, Trumper D L. A high-bandwidth, high-precision, two-axis steering mirror with moving iron actuator[J]. *Mechatronics*, 2012, 22(3): 257-270.
- [2] 白杨杨,岑遥遥,孟立新,等.空间激光通信组网从光端机控制技术[J].*光学学报*, 2021, 41(14): 1406001.  
Bai Y Y, Cen Y Y, Meng L X, et al. Control technology of slave optical transceiver in space laser communication network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(14): 1406001.
- [3] 杨亮,张宁.动目标空间位置精度测量系统设计[J].*中国激光*, 2021, 48(13): 1304001.  
Yang L, Zhang N. Measurement system design of spatial position accuracy of dynamic targets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(13): 1304001.
- [4] 刘宗达,董立泉,赵跃进,等.视频中快速运动目标的自适应模型跟踪算法[J].*光学学报*, 2021, 41(18): 1815001.  
Liu Z D, Dong L Q, Zhao Y J, et al. Adaptive model tracking algorithm for fast-moving targets in video[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(18): 1815001.
- [5] 吴琼雁,王强,彭起,等.音圈电机驱动的快速控制反射镜高带宽控制[J].*光电工程*, 2004, 31(8): 15-18.  
Wu Q Y, Wang Q, Peng Q, et al. Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(8): 15-18.
- [6] 徐新行,杨洪波,王兵,等.快速反射镜关键技术研究[J].*激光与红外*, 2013, 43(10): 1095-1103.  
Xu X H, Yang H B, Wang B, et al. Research on key technology of fast-steering mirror[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1095-1103.
- [7] 丁科,黄永梅,马佳光,等.快速反射镜的误差自适应前馈复合控制[J].*中国激光*, 2011, 38(7): 0705007.  
Ding K, Huang Y M, Ma J G, et al. Error adaptive feedforward composite control of fast-steering-mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7): 0705007.
- [8] 艾志伟,嵇建波,李静,等.装配误差对快速反射镜控制精度影响及其抑制方法[J].*红外技术*, 2019, 41(8): 705-711.  
Ai Z W, Ji J B, Li J, et al. Influence and suppression of mirror assembly error on control precision of fast steering mirror[J]. *Infrared Technology*, 2019, 41(8): 705-711.
- [9] 周向阳,赵强.航空遥感三轴惯性稳定平台双速度环控制[J].*中国惯性技术学报*, 2013, 21(4): 439-445.  
Zhou X Y, Zhao Q. Dual rate-loop control method of three-axis inertially stabilized platform for aerial remote sensing application[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(4): 439-445.
- [10] Tian J, Yang W S, Peng Z M, et al. Application of MEMS accelerometers and gyroscopes in fast steering mirror control systems[J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 440.
- [11] 彭树萍,于洪君,王伟国,等.新型快速反射镜伺服系统设计[J].*红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1610-1615.  
Peng S P, Yu H J, Wang W G, et al. Design of servo system for novel fast-steering mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1610-1615.
- [12] Deng C, Tang T, Mao Y, et al. Enhanced disturbance observer based on acceleration measurement for fast steering mirror systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 6802211.
- [13] 谭淞年,王福超,许永森,等.航空光电平台两轴快速反射镜结构设计[J].*光学精密工程*, 2022, 30(11): 1344-1352.  
Tan S N, Wang F C, Xu Y S, et al. Structure design of two-axis fast steering mirror for aviation optoelectronic platform[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(11): 1344-1352.