

文章编号 1004-924X(2019)08-1811-08

## 基于结构滤波器的伺服系统谐振抑制

张士涛<sup>1,2</sup>, 张 葆<sup>1\*</sup>, 李贤涛<sup>1</sup>, 夏先齐<sup>1,2</sup>, 钱 锋<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**针对航空光电稳定平台控制系统面临的机械谐振的问题,在双 T 型陷波器的基础之上提出了一种新型的结构滤波器。这种新型结构滤波器由两个双 T 型陷波器和一个低通滤波器构成,能够将谐振峰和反谐振峰同时抑制,克服了单一陷波器不能处理反谐振峰值的缺陷。同时相比于双二次型滤波器,结构滤波器的参数调节更加灵活,既可以调节峰值大小又可以调节峰值宽度。实验结果显示:相比于双二次型滤波器,结构滤波器拟合的谐振曲线与实际的扫频曲线匹配度更好。加入结构滤波器对模型进行补偿以后,控制系统的稳定精度提高了 5.74 倍,闭环带宽提升了 4.54 倍。新型结构滤波器对于机械谐振的抑制和控制系统的性能提升有明显作用。

**关键词:**机械谐振;控制;陷波器;结构滤波器;建模

中图分类号:TP273 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192708.1811

### A method of servo system resonance suppression based on Structure filter

ZHANG Shi-tao<sup>1,2</sup>, ZHANG Bao<sup>1\*</sup>, LI Xian-tao<sup>1</sup>, XIA Xian-qi<sup>1,2</sup>, QIAN Feng<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: cleresky@vip.sina.com*

**Abstract:** To address the problem of mechanical resonance in the control system of an aeronautical optoelectronic stabilization platform, a novel structural filter based on a double-T notch filter was proposed in this study. The new structure filter, consisting of two double-T notches and a low-pass filter, could suppress both resonant and anti-resonant peaks while overcoming the problem whereby a single notch filter could not deal with anti-resonance. Compared to that of the double quadratic filter, the parameter adjustment of the structural filter was more flexible, and its peak size and width can be simultaneously adjusted. In addition, the experimental results show that the resonance curve fitted by the structural filter matches the actual sweep curve better. The stability accuracy of the control system is improved by 5.74 times and the closed-loop bandwidth is increased by 4.54 times after the structural filter is added to compensate the model. The new structure filter clearly aids in suppressing mechanical resonance and improving the performance of the control system.

**Key words:** mechanical resonance; control; notch filter; structural filter; modeling

收稿日期:2018-12-18;修订日期:2019-02-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61705225)

## 1 引言

机械谐振普遍存在于机电伺服系统中<sup>[1-4]</sup>。它产生的根源在于系统中传动轴、连接轴等轴系与框架之间的弹性形变。实际系统中各个轴系与框架均非刚体,弹性形变在系统工作时不可避免。如本文研究的航空光电稳定平台<sup>[5]</sup>,它包括方位和俯仰两个框架,每个框架和电机之间都是弹性连接。

机电系统的谐振频率由结构的材料特性和负载转动惯量决定,其中谐振频率指谐振处的频率。伺服系统的控制带宽如果覆盖或者接近谐振频率点,会引起控制系统振荡,进而影响控制性能。同时 DOB<sup>[6-7]</sup>等抗扰算法的补偿带宽也会受到机械谐振频率的限制。因此,机械谐振的抑制一直是控制领域研究的重要问题。

目前对于机械谐振的处理方法可以分为以下三种:通过修改机械结构或者更换结构材料来提高机械谐振的峰值频率<sup>[8-9]</sup>,比如改变结构形式减小负载的转动惯量,或者是改用刚性更好的材料。机械谐振频率的提高可以保障控制系统设计更高的带宽,进而提升控制系统的响应速度,扰动抑制能力等各项性能;通过设计控制器,采用不同的控制策略对机械谐振进行抑制。其中 Slobodan 和 Milic<sup>[10]</sup>利用速度环反馈控制方式对机械谐振进行抑制;Krazystof 和 Teresa<sup>[11]</sup>在反馈控制的基础上加入增益-积分速度控制器在双质量体系实现了谐振抑制;杨永梅<sup>[12]</sup>等利用加速度反馈方法设计控制器,从而将谐振抑制到一定范围内;于晶<sup>[13]</sup>等在加速度反馈前提下设计了高阶滑模控制器,有效抑制了机械谐振,在保证动态性能的同时,增强了系统对于负载扰动的鲁棒性<sup>[14-15]</sup>;设计数字滤波器直接消除机械谐振峰值。在此类谐振抑制方法中<sup>[16-18]</sup>,应用陷波器实现机械谐振的抑制,是研究的热点。同时针对反谐振点的抑制,王建敏<sup>[3]</sup>提出了一种双二次型滤波器。这种滤波器具备正反两个谐振峰值,相比于传统的陷波器,它不仅可以抑制谐振点处的高增益,还可以弥补反谐振点处的频率细节缺失。

这些机械谐振抑制方法中,修改机械结构的方法,成本比较高同时效果也不明显,只能在一定程度上提高机械谐振频率并不能直接抑制或解决机械谐振;设计控制器的方法,控制器的设计过程相对繁琐,对系统的性能需要有较强的把握才能保证设计的控制器可用。相比较而言,设计数字滤波器对机械谐振进行抑制是最有效也是研究最多的方法。

目前比较流行的数字滤波器为双二次型滤波器,这种滤波器的优点是它的波形和机械谐振峰值相似比较容易补偿。但同时它也有峰值宽度不可调,正反谐振峰值的大小不能分开调节的缺点。针对这两点,本文提出了一种新的结构滤波器,这种滤波器也具有正反两个谐振峰,且谐振峰的宽度和高度都可根据实际系统的需要,进行调节。

## 2 机械谐振和双二次型滤波器

### 2.1 机械谐振产生机理

对于电机直接驱动的机械伺服系统,一般采用二质量体弹簧质量模型来描述系统动态<sup>[19]</sup>。以航空光电稳定平台方位轴为例,方位框架由转台底座转动惯量和负载转动惯量两部分组成。对应的弹簧质量模型如图 1 所示,模型的传递函数框图如图 2 所示。从图 2 中可以推出电机输出力矩到电机输出位置的传递函数:

$$\frac{\theta_1(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{s^2(J_1 + J_2)} \times \frac{\frac{J_2}{k_1}s^2 + \frac{b_1}{k_1}s + 1}{\frac{J'}{k_1}s^2 + \frac{b_1}{k_1}s + 1} \quad (1)$$

因此从电机输出力矩到电机速度输出速度的传递函数为:

$$\frac{\omega_1(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{s^2(J_1 + J_2)} \times \frac{\frac{J_2}{k_1}s^2 + \frac{b_1}{k_1}s + 1}{\frac{J'}{k_1}s^2 + \frac{b_1}{k_1}s + 1} \quad (2)$$

其中: $J' = \frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2}$ ;  $k_1$  代表连接的刚度系数,  $b_1$  为弹簧阻尼系数,  $J_1$  为电机及底座的转动惯量,  $J_2$  为负载转动惯量,  $\theta_1$  为电机转动角度,  $\theta_2$  为负载转动角度,  $T_e$  为电机输出力矩。

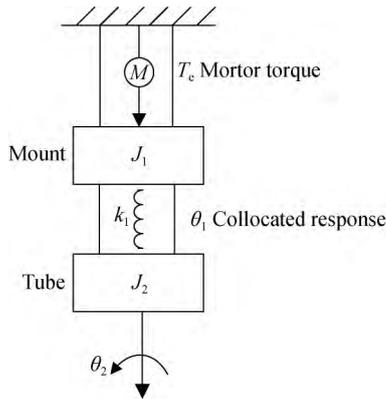


图 1 弹簧质量模型

Fig. 1 Spring mass model

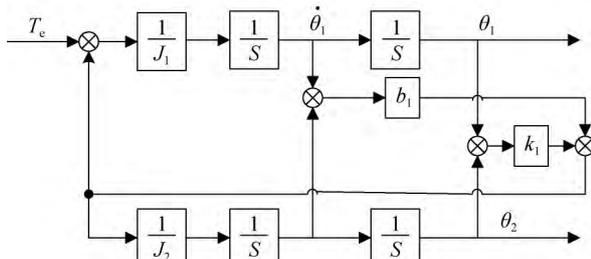


图 2 弹簧质量模型传递函数框图

Fig. 2 Transfer function block diagram of spring mass model

2.2 机械谐振辨识

对航空光电稳定平台的方位轴进行白噪声扫频建模,然后利用 IDENT 工具箱进行数据处理,得到模型的幅频响应曲线和相频响应曲线如图 3 所示。

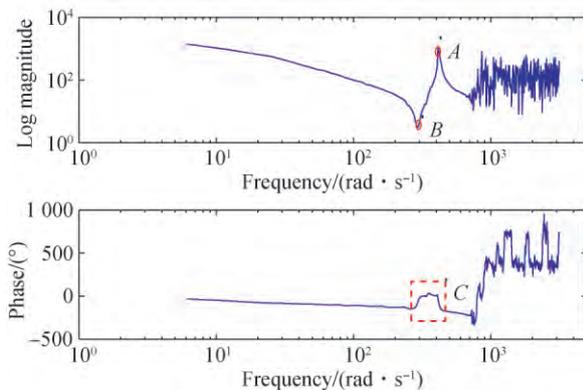


图 3 模型扫频曲线

Fig. 3 Frequency sweeping curve of model

从模型响应曲线中可以看出,模型中存在机械谐振,其中 294.5 rad/s 处为系统的反谐振点

$B, 411.1 \text{ rad/s}$  处为系统的谐振点  $A$ 。同时在两个谐振峰之间,模型的相位也发生突变,如图 3 中  $C$  点所示。

上述的两个谐振峰对系统的闭环控制性能带来很大的影响,首先机械谐振的存在会导致模型辨识不准确,进而导致后续控制器设计不准。其次在闭环控制中,谐振点和反谐振点附近系统增益和相位的突变使得系统容易产生抖振甚至不稳定。因此,采用恰当的方法抑制机械谐振对控制系统设计具有重要的意义。

2.3 双二次型滤波器

正如引言中介绍的一样,双二次型滤波是目前比较有效的机械谐振抑制方法。这种方法最初由王建敏<sup>[3]</sup>在 2014 年提出,它由两个二次低通滤波器构成,如式(3)和式(4)所示:

$$Q_a(s) = \frac{\omega_a^2}{s^2 + 2\xi_a\omega_a s + \omega_a^2}, \quad (3)$$

$$Q_b(s) = \frac{\omega_b^2}{s^2 + 2\xi_b\omega_b s + \omega_b^2}. \quad (4)$$

将这两个低通滤波器组合可以得到一个新的双二次型滤波器  $Q(s)$ ,则:

$$Q(s) = \frac{Q_a(s)}{Q_b(s)} = \frac{\omega_a^2 s^2 + 2\xi_b\omega_a\omega_b s + \omega_a^2\omega_b^2}{\omega_b^2 s^2 + 2\xi_a\omega_a\omega_b s + \omega_a^2\omega_b^2}, \quad (5)$$

其中: $\omega_a$  对应  $a$  点的频率; $\omega_b$  对应  $b$  点的频率。其伯德图如图 4 所示。

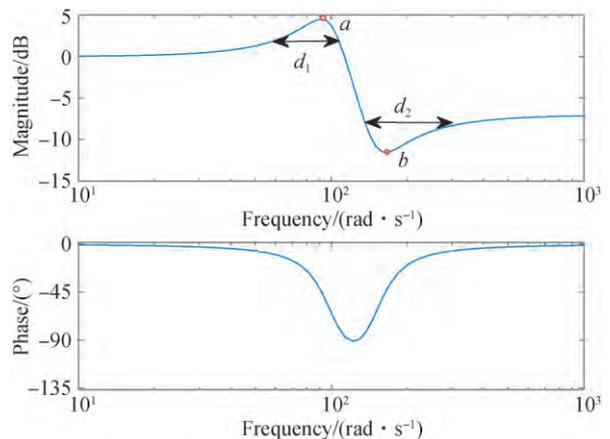


图 4 双二次型滤波器伯德图

Fig. 4 Bode diagram of double quadratic filter

从图 4 可以看出,双二次型滤波器同样有两个谐振峰,分别为  $a$  和  $b$ 。谐振频率分别为  $\omega_a$  和  $\omega_b$ ,峰值大小由  $\omega_a\omega_b$  和  $\xi_a\xi_b$  共同决定。通过调整

滤波器参数的大小可以让两个谐振频率分别与模型中的谐振频率和反谐振频率重合,这样便可以达到补偿机械谐振的目的。同时,从相位图中可以看出,双二次型滤波器在两个谐振频率之间相位是凹陷的,而模型中两个谐振频率之间 C 点的相位是上凸的,这样双二次型滤波器恰好可以补偿其相位偏移。

以上这些优点使得双二次型滤波器对大部分二结构体机械谐振有一定的抑制作用,但是其作用效果也受到自身局限性的限制。这种方法最大的局限性就是两个谐振峰值的宽度(如图 4 所示)  $d_1, d_2$  不可调,这一点极大的限制了双二次型滤波器的匹配精度。针对这一点,提出了一种新的机械谐振抑制方法。

### 3 结构滤波器设计

考虑到双二次型滤波器不能调节峰值宽度的缺陷,本文提出一种新的结构滤波器。不同于双二次型滤波器,这种新型结构滤波器基于陷波器进行组合设计,它的峰值宽度可以通过调节滤波器参数进行调节,克服了双二次型滤波器的不足。本文采用的是二阶双 T 型陷波器如公式(6)所示:

$$T(s) = \frac{as^2 + cs + 1}{as^2 + bs + 1}, \quad (6)$$

其中:  $a = \frac{1}{\omega_n^2}, b = \frac{k_1}{\omega_n}, c = \frac{k_2}{\omega_n}$ , 陷波中心频率为  $\omega_n$ , 双 T 型陷波器的幅频响应曲线如图 5 所示。

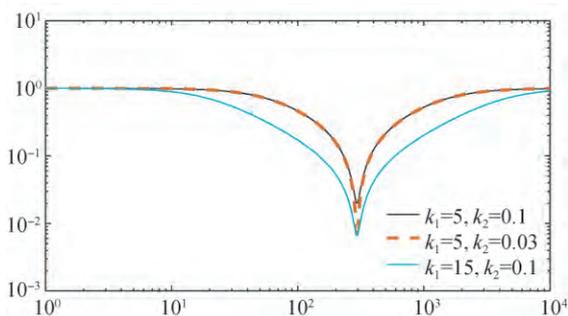


图 5 双 T 型滤波器幅频响应曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency response curve of double T filter

从图 5 中可以看出陷波器参数调整规则:  $k_1$  一定时,  $k_2$  越小陷波越深,  $k_2$  的值不影响陷波宽度;  $k_2$  一定时,  $k_1$  越大, 陷波宽度越大并且陷波越深。也即  $k_1$  同时影响陷波宽度与深度, 而  $k_2$  只影响陷波深度。通过合理地调整  $k_1, k_2$  的参数大小

可以获得理想的谐振峰高度和宽度。

考虑到反谐振峰的存在,采用两个陷波器进行组合构造结构滤波器。两个陷波器的表达式分别为:

$$T_1(s) = \frac{a_1s^2 + b_1s + 1}{a_1s^2 + c_1s + 1},$$

$$T_2(s) = \frac{a_2s^2 + c_2s + 1}{a_2s^2 + b_2s + 1}, \quad (7)$$

通过调整两个陷波器的参数可以让它分别与谐振峰和反谐振峰匹配。另外为了更好地调整两个谐振峰的大小,又引入了一个低通滤波器  $G_{L,PF}(s)$ 。结构滤波器总的表达式为:

$$G(s) = T_1(s) \cdot T_2(s) \cdot G_{L,PF}(s), \quad (8)$$

其结构流程图如图 6 所示,结合第二部分扫频结果,可以确定出两个陷波器的参数:

$$T_1 \text{ 参数: } \omega_{n1} = 294.5, k_{11} = 28, k_{12} = 0.03,$$

$$T_2 \text{ 参数: } \omega_{n1} = 411.1, k_{11} = 35, k_{12} = 0.03.$$

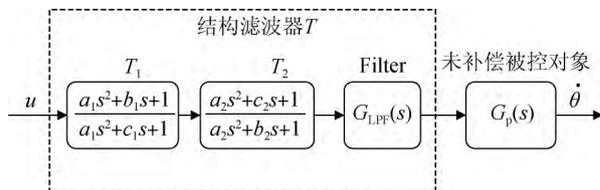


图 6 结构滤波器原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of structural filter

在完成结构滤波器的设计之后,将其反向补偿到控制系统中便可以达到校正模型,抑制谐振的目的。设实际系统模型为  $P(s)$ , 系统理想模型(无机械谐振)为  $P_i(s)$ 。模型的反向补偿是指将拟合好的结构滤波器反向加入到模型中即  $\frac{P(s)}{G(s)}$ , 然后利用理想模型  $P_i(s)$  来判断补偿效果,加入补偿环节之后的曲线与理想模型越接近,则表示补偿效果越好,反之则表示补偿效果不好。加入结构滤波器以后,平台的控制框图如图 7 所示。

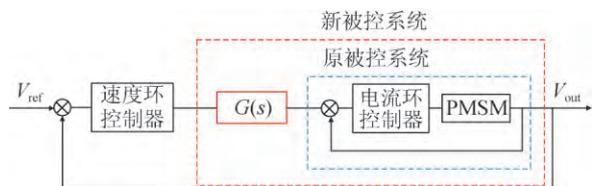


图 7 模型校正示意图

Fig. 7 Schematic diagram of model correction

### 4 实验验证和数据分析

以某型无刷电机驱动的光电稳定平台为对象进行实验。由于本实验只涉及伺服控制部分, 所以实验平台只安装了框架和必要的传感器, 实验平台如图 8 所示。实验在平台方位轴中进行, 控制器采用的是 PI 控制结合 DOB 做扰动补偿。

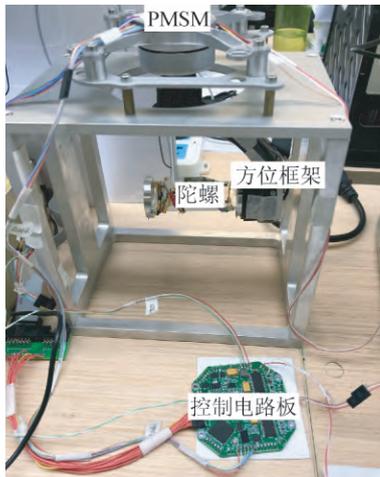


图 8 实验设备

Fig. 8 Experimental equipments

#### 4.1 机械谐振补偿实验

首先针对方位轴机械谐振问题, 分别采用双二次型滤波器和结构滤波器进行拟合并进行反向补偿。拟合效果对比曲线如图 9 所示, 补偿效果对比曲线如图 10 所示。

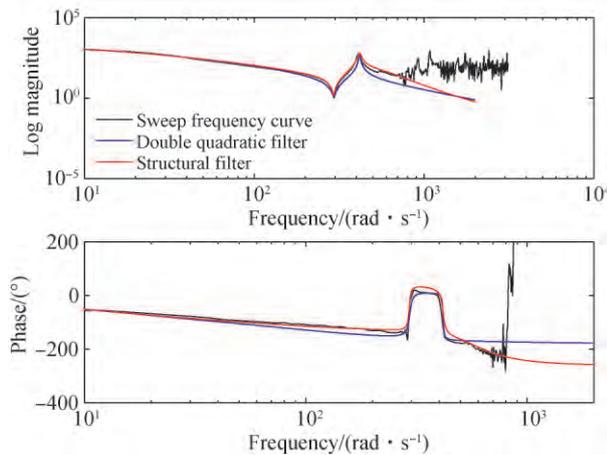


图 9 模型拟合对比图

Fig. 9 Model fitting contrast diagram

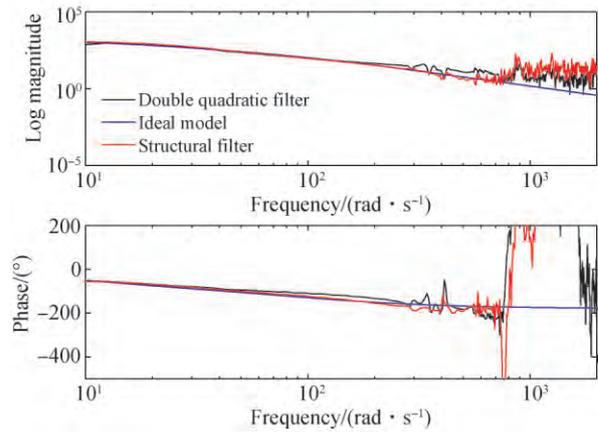


图 10 补偿效果对比图

Fig. 10 Comparing diagram of compensation effect

从图中可以看出, 相比于双二次型滤波器(蓝线), 结构滤波器的拟合曲线(红线)与扫频曲线(黑线)匹配度更高。如第二部分介绍的一样, 双二次型滤波器的主要问题是峰值宽度拟合的精确度不够。根据图 7 所示的补偿方式将两种滤波器反向补偿到模型中, 获得补偿后的模型频谱响应曲线如图 10 所示(彩图见期刊电子版)。从图中可以看出加入结构滤波器以后的模型曲线(红色)更加接近理想模型曲线(蓝色), 直接证明了结构滤波器具有更好的谐振抑制能力。

#### 4.2 模型校正前后控制性能对比

在完成机械谐振的补偿之后, 对系统的控制性能做了测试。分别测试了未补偿和分别加入两种滤波器之后系统的稳态误差, 控制带宽以及跟踪性能, 以及带宽对系统性能的影响, 如图 11~图 14 所示。为了方便对, 将系统重要的性能参数整理成表 1。

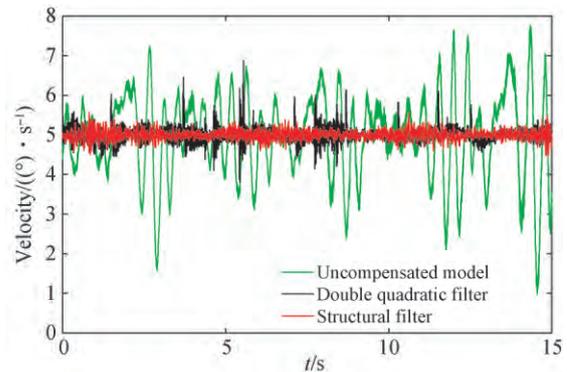


图 11 稳态误差对比图

Fig. 11 Comparing diagram of steady error

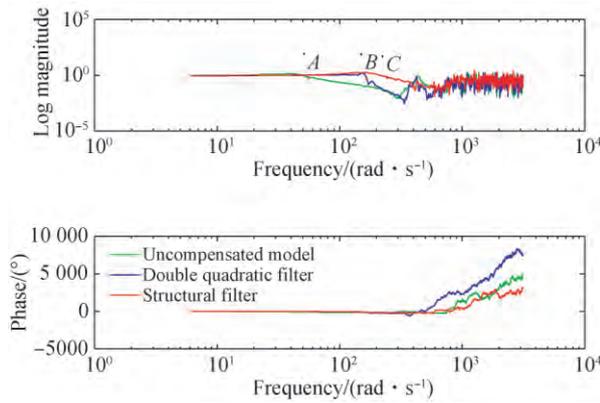


图 12 控制带宽对比图

Fig. 12 Comparing diagram of control bandwidth

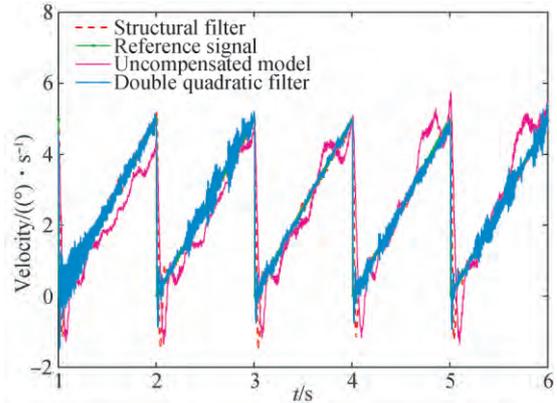


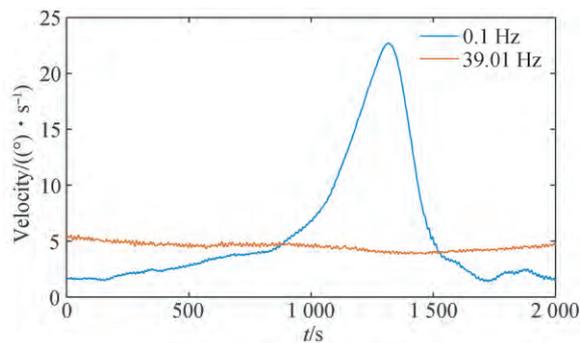
图 13 跟踪性能对比图

Fig. 13 Comparing diagram of tracking performance

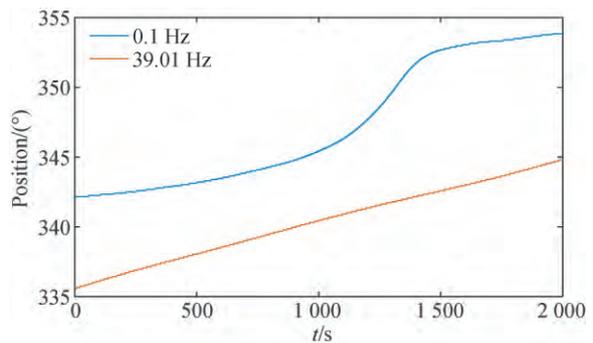
表 1 补偿前后性能对比

Tab. 1 Performance comparison before and after compensation

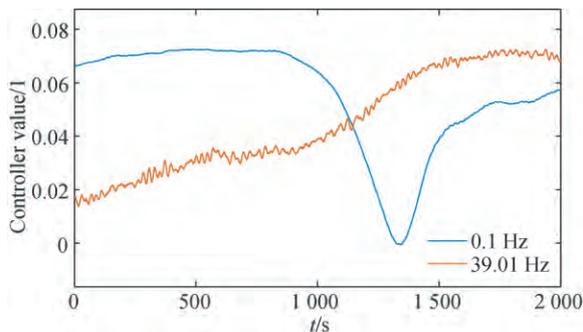
	未补偿	双二次型滤波器	结构滤波器
稳态误差 / ((°) · s <sup>-1</sup> )	2.24	0.82	0.39
控制带宽 / Hz	8.59	26.24	39.01
跟踪误差 / ((°) · s <sup>-1</sup> )	0.682	0.194	0.08



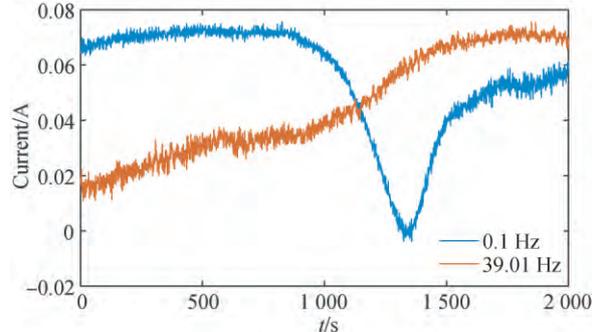
(a) 速度波动  
(a) Velocity fluctuation



(b) 位置波动  
(b) Position fluctuation



(c) 力矩波动  
(c) Torque fluctuation



(d) 电流波动  
(d) Current fluctuation

图 14 带宽对控制性能的影响

Fig. 14 Effect of bandwidth on control performance

图 11 为系统稳态误差对比曲线。测试条件为 PI+DOB 下的闭环控制,给定速度  $5 (^{\circ})/s$ ,其中绿线为未补偿条件下的输出曲线,黑线代表双二次型滤波器补偿,红线代表结构滤波器补偿。结合表 1 可以看出加入结构滤波器以后系统的稳态误差最小,比未补偿条件下的稳态误差小 5.74 倍。同时加入双二次型滤波器以后系统的稳态误差也有提升,但是提升效果不如结构滤波器显著。

图 12 为 3 种状态下系统的闭环带宽测试曲线,图中 A, B, C 3 个点分别代表 3 种状态下控制系统的有效带宽截止点。其中, A 点代表未补偿, B 点代表双二次型补偿, C 点代表结构滤波器补偿。结合表 1 可以清楚的看到两种谐振抑制方法对于闭环带宽的提升效果,相比于双二次型滤波器,结构滤波器对于带宽的提升效果更明显,达到 4.54 倍。

图 13 为 3 种状态下控制系统的跟踪性能,测试过程中系统速度给定为幅值  $5 (^{\circ})/s$ , 频率 1 Hz 的三角波,输出分别如图中红(结构滤波器补偿)、蓝(双二次型滤波器补偿)、绿(未补偿)线所示(彩图见期刊电子版)。将他们分别和输入三角波(褐线)比较,得到跟踪误差如表 1 所示,其中跟踪误差为系统输出速度信号与参考输入信号之间的差值。通过表 1 可以看出加入结构滤波器以后,控制系统的跟踪误差减小了 7.5 倍。

#### 参考文献:

- [1] 邓永停,李洪文,王建立,等. 结构滤波器在望远镜主轴控制系统中的应用 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 900-909.  
DENG Y T, LI H W, WANG J L, *et al.*. Application of structural filter to principal axis system of telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 900-909. (in Chinese)
- [2] 杨立保,李艳红,伞晓刚,等. 应用新轴系结构改善光电跟踪系统谐振频率特性 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(11): 2889-2894  
YANG L B, LI Y H, SHAN X G, *et al.*. Improvement of resonant frequency characteristics of photoelectric tracking system with new bearing structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(11): 2889-2894. (in Chinese)
- [3] 王建敏,吴云洁,刘佑民,等. 基于数字滤波器的伺服系统谐振抑制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(3): 485-491.

图 14 为系统在最大带宽和最小带宽下速度、位置、力矩、电流的波动曲线,其中红线为最高带宽 39.01 Hz 时的波动情况,蓝线为最低带宽 0.1 Hz 时的波动情况(彩图见期刊电子版)。4 组对比曲线显示,系统的闭环控制带宽越高,系统的响应速度越快,控制精度越高,扰动抑制能力也越强。

通过以上四组实验可以看出,使用双二次型滤波器和结构滤波器都可以起到校正模型抑制谐振的作用,但是结构滤波器的抑制效果更加明显,对于控制系统性能的提升也更加突出。

## 5 结 论

针对二质量体机械谐振的问题,本文提出一种新的结构滤波器来抑制机械谐振。相比于目前比较流行的双二次型滤波器,结构滤波器更加灵活。不仅可以调整谐振峰值的大小而且可以同时调节谐振峰的宽度。在航空光电稳定平台上的实验结果表明,结构滤波器对于机械谐振的补偿效果更好。引入结构滤波器以后控制系统的稳态误差、控制带宽和跟踪误差都获得大幅度提升。

目前结构滤波器对于幅值的校正已经可以满足大部分控制算法对于谐振的要求。但是它的相位特性还有待提升,这也是结构滤波器接下来的研究重点。

- WANG J M, WU Y J, LIU Y M, *et al.*. Resonance suppression method based on digital filter for servo system [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(3): 485-491. (in Chinese)
- [4] 殷宗迪,董浩,史文杰,等. 精确模型辨识的光电平台自抗扰控制器 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(9): 926001.  
YIN Z D, DONG H, SHI W J, *et al.*. Active disturbance rejection controller of opto-electronic platform based on precision model identification [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 926001. (in Chinese)
  - [5] 李贤涛,张葆,赵春蕾,等. 基于自适应的自抗扰控制技术提高扰动隔离度 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2015, 45(1): 202-208.  
LI X T, ZHANG B, ZHAO CH L, *et al.*. Improve isolation degree based on adaptive active disturbance rejection controller [J]. *Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition*, 2015, 45

- (1); 202-208. (in Chinese)
- [6] KEMPF C J, KOBAYASHI S. Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table [J]. *Control Systems Technology IEEE Transactions on*, 1999, 7(5):513-526.
- [7] KIM H S, MOON H T, YOUN M J. On-line dead-time compensation method using disturbance observer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2003, 18(6): 1336-1345.
- [8] HUNG J Y. Control of industrial robots that have transmission elasticity [J]. *Industrial Electronics IEEE Transactions on*, 1991, 38(6): 421-427.
- [9] 赵桂军, 许美健, 吴雄君, 等. 陷波器在导引头伺服系统中的应用 [J]. *制导与引信*, 2013(2):1-3. ZHAO G J, XU M J, WU X H, *et al.*. The application of notch filter for the servo system in seeker [J]. *Guidance & Fuze*, 2013, 34(2):1-3. (in Chinese)
- [10] VUKOSAVIC S N, STOJIC M R. Suppression of torsional oscillations in a high-performance speed servo drive [J]. *Industrial Electronics IEEE Transactions on*, 1998, 45(1): 108-117.
- [11] SZABAT K, ORLOWSKA T. Vibration suppression in a two-mass drive system using PI Speed controller and additional feedbacks—comparative study [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(2):1193-1206.
- [12] 杨晓霞, 阴玉梅, 孟浩然, 等. 利用加速度反馈的大型光电设备主轴控制技术 [J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(4):421-424. YANG X X, YIN Y M, MENG H R, *et al.*. Mount control for large optoelectronic equipment by using acceleration feedback [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(4): 421-424. (in Chinese)
- [13] 于晶, 冯勇, 郑剑飞. 基于高阶滑模和加速度反馈的机械谐振抑制方法 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(10):1133-1136. YU J, FENG Y, ZHENG J F. Suppression of mechanical resonance based on higher-order sliding mode and acceleration feedback [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(10):1133-1136. (in Chinese)
- [14] CHEN W H. Disturbance observer based control for nonlinear systems [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2004, 9(4): 706-710.
- [15] AL-MAMUN A, KEIKHA E, BHATIA C S, *et al.*. Integral resonant control for suppression of resonance in piezoelectric micro-actuator used in precision servomechanism [J]. *Mechatronics*, 2013, 23(1):1-9.
- [16] 杨明, 胡浩, 徐殿国. 永磁交流伺服系统机械谐振成因及其抑制 [J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(1):79-84. YANG M, HU H, XU D G. Cause and suppression of mechanical resonance in PMSM servo system [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(1):79-84. (in Chinese)
- [17] 李献斌, 王跃科, 杨俊. 级联陷波器抗窄带干扰设计与实现 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2013, 27(6):492-497. LI X B, WANG Y K, YANG J. Design and implementation of cascade IIR notch filters for narrow-band interferences suppression [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2013, 27(6):492-497. (in Chinese)
- [18] 马跃, 黄宾, 王志成. 基于陷波器的伺服系统共振抑制的研究 [J]. *计算机工程与设计*, 2013, 34(5): 1624-1629. MA Y, HUANG B, WANG ZH CH. Research on resonance vibration in servo system based on notch filter [J]. *Computer Engineering and design*, 2013, 34(5): 1624-1629. (in Chinese)
- [19] 邓永停. 4 m 级望远镜主轴交流伺服控制系统研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015. DENG Y T. *Research on AC Control System for the 4 m Scale Telescope Main Axis* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2015. (in Chinese)

## 作者简介:



张士涛(1991—),男,山东济宁人,博士研究生,2014年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事快速反射镜及视轴稳定控制研究。E-mail: zhangshitao14@mails.ucas.edu.com

## 导师简介:



张 葆(1966—),男,吉林磐石人,研究员,博士生导师,1989年、1994年于长春光机学院分别获得学士、硕士学位,2004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,主要从事航空光电成像技术研究。E-mail: cleresky@vip.sina.com

(本栏目编辑:曹 金)