

# 光电工程

## Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊  
Scopus CSCD

### 快反镜系统滑模复合分层干扰观测补偿控制

罗勇, 刘凯凯, 杨帆, 闻心怡, 黄永梅, 郭珊珊, 任戈, 李涛

#### 引用本文:

罗勇, 刘凯凯, 杨帆, 等. 快反镜系统滑模复合分层干扰观测补偿控制[J]. *光电工程*, 2023, **50**(4): 220330.

Luo Y, Liu K K, Yang F, et al. Observation and compensation control of sliding mode compound layered interference for the fast steering mirror system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, **50**(4): 220330.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.220330>

收稿日期: 2022-12-06; 修改日期: 2023-03-10; 录用日期: 2023-03-14

### 相关论文

#### 量子光通信中位置修正单检测控制方法

李志俊, 毛耀, 亓波, 周翕, 刘琼, 周倩

*光电工程* 2022, **49**(3): 210311 doi: [10.12086/oe.2022.210311](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210311)

#### 基于图像测量的Stewart平台双阶控制技术

张良总, 杨涛, 吴云, 唐涛

*光电工程* 2022, **49**(8): 220019 doi: [10.12086/oe.2022.220019](https://doi.org/10.12086/oe.2022.220019)

#### 中国科学院光电技术研究所的变形反射镜研究进展

官春林, 张小军, 邓建明, 薛丽霞, 张耀平, 周虹, 樊新龙, 程琳, 樊峻棋, 何刚, 牟进博, 龙国云

*光电工程* 2020, **47**(10): 200337 doi: [10.12086/oe.2020.200337](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200337)

#### 光电跟踪系统中精密控制技术研究进展

唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 付承毓, 杨虎, 任戈, 杨文淑, 亓波, 曹雷, 张孟伟, 包启亮, 谭毅, 黄永梅, 毛耀, 王强

*光电工程* 2020, **47**(10): 200315 doi: [10.12086/oe.2020.200315](https://doi.org/10.12086/oe.2020.200315)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



 OE\_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.220330

# 快反镜系统滑模复合分层干扰观测补偿控制

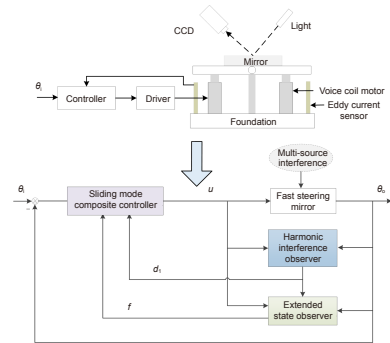
罗勇<sup>1,2</sup>, 刘凯凯<sup>1</sup>, 杨帆<sup>2</sup>, 闻心怡<sup>3</sup>,  
黄永梅<sup>2</sup>, 郭珊珊<sup>4</sup>, 任戈<sup>2</sup>, 李涛<sup>1\*</sup><sup>1</sup>南京信息工程大学自动化学院, 江苏南京 210044;<sup>2</sup>中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209;<sup>3</sup>中国船舶重工集团公司第七一九研究所, 湖北武汉 430064;<sup>4</sup>东北大学信息科学与工程学院, 辽宁沈阳 110167

**摘要:** 音圈电机驱动快反镜是高精度光电跟踪系统中的重要组成部分。在运动平台光电跟踪系统中, 快反镜系统所受各种内外干扰将更加复杂剧烈, 传统的被动干扰抑制方法以及把干扰当作集总干扰处理的主动干扰抑制方法将不足以保证高精度的视轴稳定。因此本文提出一种谐波干扰观测与扩张状态观测结合的滑模复合分层干扰观测补偿控制策略。首先利用谐波干扰观测器对具备先验频率信息的谐波干扰进行观测, 然后采用扩张状态观测器对其他未知干扰进行观测, 最后基于观测的多源干扰, 采用具有抗干扰能力的滑模非线性方法设计复合控制器, 最大程度地对系统所受多源干扰进行抑制。实验表明, 本文提出的滑模复合分层干扰观测补偿方法与传统的单一干扰观测补偿方法相比, 能显著提升快反镜的视轴稳定精度。

**关键词:** 快反镜; 视轴稳定; 复合分层; 谐波干扰观测器; 扩张状态观测器; 滑模

**中图分类号:** TH-39; TP273

**文献标志码:** A



罗勇, 刘凯凯, 杨帆, 等. 快反镜系统滑模复合分层干扰观测补偿控制 [J]. 光电工程, 2023, 50(4): 220330

Luo Y, Liu K K, Yang F, et al. Observation and compensation control of sliding mode compound layered interference for the fast steering mirror system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220330

## Observation and compensation control of sliding mode compound layered interference for the fast steering mirror system

Luo Yong<sup>1,2</sup>, Liu Kaikai<sup>1</sup>, Yang Fan<sup>2</sup>, Wen Xinyi<sup>3</sup>, Huang Yongmei<sup>2</sup>,  
Guo Shanshan<sup>4</sup>, Ren Ge<sup>2</sup>, Li Tao<sup>1\*</sup><sup>1</sup> School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China;<sup>2</sup> Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;<sup>3</sup> 719 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Wuhan, Hubei 430064, China;<sup>4</sup> College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110167, China

**Abstract:** The voice coil motor-driven fast steering mirror is an important part of a high-precision photoelectric

收稿日期: 2022-12-06; 修回日期: 2023-03-10; 录用日期: 2023-03-14

基金项目: 四川省自然科学基金资助项目 (2023NSFSC1438)

\*通信作者: 李涛, litaojia@nuist.edu.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

tracking system. In the photoelectric tracking system of the moving platform, the fast steering mirror system will suffer more complex and intense internal and external interference. The traditional passive interference suppression methods and the active interference suppression methods that treat the interference as lumped interference will not be enough to ensure the high-precision stability of boresight. Therefore, this paper proposes a sliding mode composite layered interference observation and compensation control strategy which combines harmonic interference observation and extended state observation. Firstly, the harmonic disturbance observer is used to observe the harmonic disturbance with a priori frequency information. Then the extended state observer is used to observe other unknown disturbances. Finally, based on the observed multi-source interference, the sliding mode nonlinear method with anti-interference ability is used to design a composite controller to maximize the suppression of multi-source disturbances suffered by the system. The experiment shows that the sliding mode composite layered interference observation compensation method proposed in this paper can significantly improve the LOS stability accuracy of the fast steering mirror compared with the traditional single interference observation compensation method.

**Keywords:** fast steering mirror; LOS stability; composite layered; harmonic disturbance observer; extended state observer; sliding mode

## 1 引言

光电跟踪系统广泛应用在天文观测、靶场测量、光通信等领域<sup>[1-4]</sup>, 为了达到微弧度级别的跟踪精度, 系统通常在由机架驱动的粗跟踪基础上<sup>[5]</sup>, 还会加入一级快反镜视轴稳定装置。快反镜一般选择由高线性度、高灵敏度、高带宽的音圈电机驱动, 以保证整个系统足够的视轴稳定精度<sup>[6]</sup>。近年来, 随着应用的扩展, 光电跟踪系统由安装在地基固定平台向运动平台上扩展, 包括车载式与舰载式激光武器、机载式光电吊舱, 以及星载光通信系统等<sup>[7-10]</sup>。运动平台所处的环境更加恶劣并且载体姿态变化引起的内外干扰将更加复杂剧烈, 导致视轴稳定精度严重下降, 甚至使跟踪目标脱离视场范围而丢失。

为了降低外界环境以及运动平台振动对视轴稳定的影响, 研究人员从硬件或者控制结构方面提出了很多视轴稳定抗干扰方法。文献[11]在机械结构上增加隔振装置, 提升光电平台的被动隔离干扰能力, 但是通过增加隔振装置的干扰隔离结构只能隔离基座的高频振动。文献[12]提出一种由位置环、速度环、加速度环组成的多闭环反馈控制, 通过多闭环的干扰抑制能力的叠加来提升系统视轴稳定精度, 该方法通常需要额外的传感器。文献[13]将分数阶控制方案引入针对量子通信的高精度跟踪控制任务, 有效平衡了系统高误差抑制能力与足够的相位裕度之间的矛盾。但是以上基于反馈闭环的传统干扰抑制方法属于被动抑制方法, 不能获取具体的干扰信息, 只是依靠反馈自

身的特性来抑制干扰, 导致系统的残留干扰较大, 视轴稳定精度依然不足。在这种环境下, 基于干扰估计的主动抗干扰控制方法在视轴稳定中得到了应用。自从上世纪 80 年代以来, 研究者陆续提出了多种基于干扰观测补偿的干扰主动抑制方法, 其中应用最为广泛的是日本科学家 Ohnishi 提出的基于干扰观测器的控制<sup>[14]</sup>以及中国科学家韩京清提出的基于扩张观测器的控制(又称自抗扰控制)<sup>[15]</sup>。

干扰主动抑制方法主要是基于系统的输入、输出、模型等几种要素, 观测出系统外界干扰, 前馈到系统中, 以抵消干扰影响, 可以大幅提升视轴稳定精度。文献[16]提出在快反镜加速度闭环内构建频域干扰观测器, 可以显著提升快反镜的中低频干扰抑制能力。为了降低加速度计噪声和漂移对干扰观测精度的影响, 文献[17]提出将加速度计和 CCD 传感器数据融合来构建干扰观测器, 能够进一步提升系统的视轴稳定能力。文献[18]针对量子通信光束控制系统, 提出了互补双干扰观测器结构, 能够扩展观测器的有效带宽。文献[19]针对望远镜精跟踪系统, 依靠已知模型的辅助, 构建了改进的扩张状态观测器, 提升了干扰观测的准确度。文献[20]将扩张状态观测器与自适应、模糊、滑模控制相结合, 观测平台的未建模干扰, 可以显著降低视轴误差。需要指出的是, 以上干扰主动抑制方法是将系统所受的各种干扰当作一种集总干扰进行估计, 当系统所受干扰较单一的情况下能取得较好的控制效果, 但是当系统所受干扰为复杂多源干扰时, 单一结构的观测器往往不能准确观测出多种干扰, 造

成干扰抑制效果下降。然而, 光电跟踪系统在运行过程中, 往往处于各种内扰(未建模动态、参数摄动等)和外扰(力矩波动、机械振动、风扰等)同时存在的情况, 因此在光电跟踪系统中, 急需能够对多源干扰准确估计和有效抑制的干扰抑制方法。

考虑到运动平台的光电跟踪系统所受干扰多源, 并且往往会包含一些来自平台或者外界环境的固定频率谐波干扰的影响, 本文提出一种谐波干扰观测与扩张状态观测结合的滑模复合分层干扰观测补偿控制策略。首先利用谐波干扰观测器对具备先验频率信息的谐波干扰进行观测, 然后采用扩张状态观测器对其他未知干扰进行观测, 最后基于观测的多源干扰, 采用具有抗干扰能力的滑模非线性方法设计复合控制器, 最大程度地对系统所受多源干扰进行抑制。本文的后续内容按如下展开, 第二部分详细介绍了音圈电机驱动的快反镜平台数学模型, 第三部分给出了滑模复合分层干扰观测补偿的详细设计步骤, 仿真实验部分安排在第四部分, 第五部分是本文的总结与讨论。

## 2 快反镜平台模型

快反镜平台由反射镜、音圈电机、控制器、驱动器、传感器等构成, 具体系统构成如图 1 所示, 其中两个音圈电机驱动同一条轴, 采用推拉的方式使得镜面偏转, 以控制光线的传输角度。安装在快反镜平台上的传感器用于测量镜面偏转角。控制器根据给定信号与传感器反馈信号, 采用相关控制算法, 驱动快反镜偏转, 实现对目标的跟踪任务。

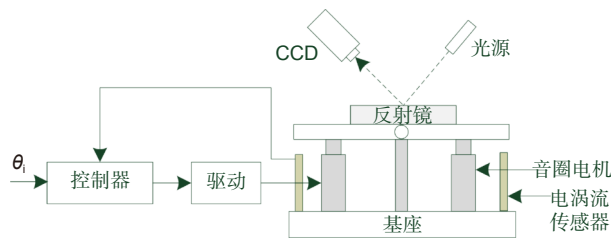


图 1 快反镜系统构成

Fig. 1 Composition of the fast steering mirror system

根据快反镜平台的物理机理建模如下<sup>[21]</sup>, 得到的数学模型如下:

$$\ddot{\theta}_0(t) + a_1 \dot{\theta}_0(t) + a_0 \theta_0(t) = bu(t) + d(t), \quad (1)$$

式中:  $\theta_0(t)$  为快反镜镜面相对于承载座的角位移,  $a_0, a_1, b$  为模型系数;  $u(t)$  为控制量;  $d(t)$  为系统所受多源干扰, 包含已知和未知干扰, 其表示如下:

$$d(t) = d_1 + d_2. \quad (2)$$

系统扰动满足如下假设。

假设 1: 扰动  $d_1$  为谐波干扰, 其表达式为  $d_1 = a \sin(\omega t)$ , 可由如下的外源模型系统描述:

$$\begin{cases} \dot{\zeta} = \mathbf{W}\zeta \\ d_1 = \mathbf{V}\zeta \end{cases}, \quad (3)$$

其中:  $\zeta \in R^r$  是模型 (3) 中的辅助状态变量, 根据谐波干扰表达式, 其状态变量选取  $\zeta = [a \sin(\omega t) \ a \cos(\omega t)]^T$ ,

参数选取  $\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix}$ ;  $\mathbf{V} = [1 \ 0]$ 。

假设 2: 扰动  $d_2$  为有界干扰, 即满足有界条件:

$$|d_2| \leq D, \quad (4)$$

式中:  $D$  为干扰上限。

选取状态变量  $x_1 = \theta_0(t)$ ,  $x_2 = \dot{\theta}_0(t)$ , 系统的状态空间表达式可以表示如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f + bu + d_1 \\ y = x_1 \end{cases}, \quad (5)$$

其中:  $f = -a_0 x_1 - a_1 x_2 + d_2$ 。

## 3 复合分层干扰观测器的设计

快反镜视轴稳定装置在运动平台上往往会受到多重干扰的影响, 而某些干扰信息往往具备先验信息, 比如车载式光电跟踪系统, 会受到与汽车速度相关的谐波干扰影响, 而机载式光电跟踪系统会受到飞机自身振动的谐波干扰的影响, 它们的频率较为固定并且可以事先获取, 因此可以提前设计谐波干扰观测器进行观测补偿。对于系统所受其他未知干扰, 可以利用扩张状态观测器将其作为集总干扰进行观测补偿, 相关控制框图如图 2 所示。

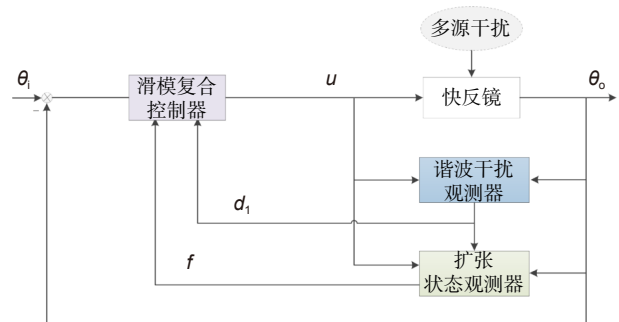


图 2 复合分层干扰观测器控制结构

Fig. 2 Composite layered disturbance observer control

### 3.1 谐波干扰观测器的设计

对谐波干扰  $d_1$  进行估计, 设计如下谐波干扰观测器<sup>[22]</sup>:

$$\begin{cases} \hat{d}_1 = V\hat{\zeta} \\ \hat{\zeta} = (\mathbf{W} - \mathbf{LV})\hat{\zeta} + \mathbf{L}(\dot{x}_2 - \hat{f} - bu) \end{cases}, \quad (6)$$

其中:  $\hat{d}_1$ 表示 $d_1$ 的估计值,  $\hat{\zeta}$ 表示 $\zeta$ 的估计值,  $\mathbf{L}$ 为谐波干扰观测器增益矩阵,  $\hat{f}$ 表示 $f$ 的估计值, 具体求解过程在后续扩张状态观测器设计中将会给出。

令 $\tilde{d}_1 = d_1 - \hat{d}_1$ 表示谐波扰动 $d_1$ 的估计误差, 由式(3)和式(6)得出谐波干扰观测器的估计误差:

$$\dot{\tilde{\zeta}} = (\mathbf{W} - \mathbf{LV})\tilde{\zeta} - \mathbf{L}\tilde{x}_3, \quad (7)$$

式中:  $\tilde{x}_3 = f - \hat{f}$ , 与此同时,  $\tilde{d}_1 = d_1 - \hat{d}_1 = \mathbf{V}\tilde{\zeta}$ 。

### 3.2 扩张状态观测器的设计

选取状态变量 $x_3 = f$ , 可以得到如下状态空间表达式:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = x_3 + bu + d_1 \\ \dot{x}_3 = h \end{cases}, \quad (8)$$

其中:  $h$ 为未知但有界的函数。

根据式(8), 相应估计扩张状态 $x_3$ 的观测器设计如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = bu + \hat{d}_1 + \hat{x}_3 + k_1(x_2 - \hat{x}_2) \\ \dot{\hat{x}}_3 = k_2(x_2 - \hat{x}_2) \end{cases}, \quad (9)$$

其中:  $\hat{x}_2$ 表示状态 $x_2$ 的估计值,  $\hat{x}_3$ 表示状态 $x_3$ 的估计值,  $\hat{d}_1$ 为谐波干扰 $d_1$ 的估计值, 已由谐波观测器计算得出,  $k_1$ 和 $k_2$ 分别为扩张状态观测器的待求观测器增益。基于式(8)与式(9), 扩张状态观测器的估计误差为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{d}_1 + \tilde{x}_3 - k_1\tilde{x}_2 \\ \dot{\tilde{x}}_3 = h - k_2\tilde{x}_2 \end{cases}, \quad (10)$$

其中:  $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$ 和 $\tilde{x}_3 = x_3 - \hat{x}_3$ 分别表示扩张状态观测器状态估计误差。

由式(7)和式(10)得到如下表达式:

$$\dot{e} = \mathbf{M}e + \mathbf{N}h, \quad (11)$$

$$\text{式中: } e = \begin{bmatrix} \tilde{\zeta} \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix}, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} - \mathbf{LV} & 0 & -\mathbf{L} \\ V & -k_1 & 1 \\ 0 & -k_2 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$h$ 为未知但有界函数, 当矩阵 $\mathbf{M}$ 满足Hurwitz矩阵时, 系统(11)将维持在一个稳定的范围之内, 系统观测器的估计值收敛在真实值的一个邻域内。为了说明矩阵 $\mathbf{M}$ 满足Hurwitz矩阵, 且较为方便设计观测器的增益值, 上述设计观测器的增益选取可以采用极点配置法:

$$\left| s\mathbf{I} - \begin{bmatrix} \mathbf{W} - \mathbf{LV} & 0 & -\mathbf{L} \\ V & -k_1 & 1 \\ 0 & -k_2 & 0 \end{bmatrix} \right| = \prod_{i=1}^4 (s + w_i), \quad (12)$$

其中:  $s$ 为复变参数,  $\mathbf{I}$ 为单位矩阵, 式(12)中 $w_i$ 取为正常数, 那么系统(11)是有界输入, 有界输出稳定。

### 3.3 滑模复合控制器设计

滑模控制作为一种非线性控制手段, 最近十几年来得到了广泛应用。相对于传统的PID控制律, 由于其可以使控制系统按照预定“滑动模式”的状态轨迹运动, 对于参数扰动以及外界干扰将具有更强的鲁棒性, 并且响应速度更快, 因此本文采用滑模控制来设计复合分层干扰观测的控制。

基于观测干扰叠加, 设计如下前馈补偿控制律:

$$u = \frac{1}{b}(u_0 - \hat{d}_1 - \hat{x}_3). \quad (13)$$

将式(13)代入式(5), 原始系统模型可以简化为

$$\ddot{y} = u_0 + \Delta d, \quad (14)$$

式中:  $\Delta d$ 为干扰观测器估计值与真实值的误差, 并随着干扰估计精度的提升而逐渐减小。滑模控制器具体设计步骤如下:

1) 确定切换函数

$$s = me_x + \dot{e}_x, \quad (15)$$

式中:  $e_x$ 为系统给定输入 $r$ 与响应输出 $y$ 之间的差值, 即 $e_x = r - y$ ;  $m$ 为滑模面设计参数。

2) 滑模控制律

$$u_0 = m\dot{e}_x + \ddot{r} + n\text{sgn}(s) + ks, \quad (16)$$

式中:  $n, k$ 为正常数, 调整其值大小来改变抖振水平和趋近速度。

假设3: 通过前馈补偿后的扰动 $\Delta d$ 有界, 满足 $|\Delta d| \leq n$ 。

定理1: 若式(14)所描述系统满足假设3, 在式(16)所设计的滑模控制器作用下, 系统误差能收敛于零。

证明: 对于式(15)选择Lyapunov函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2, \quad (17)$$

对式(17)求导:

$$\dot{V} = s\dot{s}, \quad (18)$$

对式(15)求导:

$$\dot{s} = m\dot{e}_x + \ddot{e}_x. \quad (19)$$

因为 $e_x = r - y$ , 基于式(14)、式(16)、式(18)和

式 (19) 得到如下表达式:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} = s(m\ddot{e}_x + \ddot{e}_x) \\ &= s(m\ddot{e}_x + \ddot{r} - \ddot{y}) \\ &= s(m\ddot{e}_x + \ddot{r} - u_0 - \Delta d) \\ &= s(m\ddot{e}_x + \ddot{r} - m\ddot{e}_x - \ddot{r} - n\text{sgn}(s) - ks - \Delta d) \\ &= s(-n\text{sgn}(s) - ks - \Delta d) \\ &= -ks^2 - n|s| - \Delta ds \end{aligned} \quad (20)$$

因为  $|\Delta d| \leq n$ , 则:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -ks^2 - n|s| - \Delta ds < 0 (s \neq 0). \quad (21)$$

因此滑模控制器对于系统的控制是稳定的。

### 4 实验验证

图 3 所示为快反镜实验装置。本实验系统中, 除了快反镜视轴稳定装置以外, 还会在其下方加入一个音圈电机驱动的干扰台。快反镜是一个两轴运动系统, 由于两轴正交互不影响, 因此我们关注其中一个轴的运动。激光源发射激光用于模拟外界目标输入, 经反射镜进入 CCD 装置中。底部干扰台处于开环控制模式下, 将多源干扰引入光路传输当中; 上面的快反镜视轴稳定台处于闭环控制模式下, 抑制干扰以使视轴稳定。实验中被控快反镜装置的轴向直径为 15 cm,

干扰台直径为 50 cm, 所用电涡流传感器和 CCD 传感器参数如表 1、2 所示。

为了验证本文方法的有效性, 我们选取传统的单一扩张状态观测器观测多源干扰作为对比。系统模型参数的获取采用频率拟合的方法。在拟合过程中, 拟合模型可以分别采用一阶、二阶以及更高阶的数学模型。理论上阶数越高的数学模型拟合中的效果越好, 但控制系统的参数设计也更为繁琐。考虑到在我们主要关心的快反镜带宽范围内, 二阶、三阶等数学模型拟合误差大小相近, 故采用型别较低的二阶震荡环节作为拟合模型, 这样既符合实际的需求, 也方便了复合干扰观测器的参数设计。该快反镜的拟合频域传递函数模型为

$$G_\theta(s) = \frac{2.7}{0.00073s^2 + 0.0202s + 1} \quad (22)$$

结合式 (1), 得到模型参数:  $a_0 = \frac{1}{0.00073}$ ;  $a_1 = \frac{0.0202}{0.00073}$ ;  $b = \frac{2.7}{0.00073}$ 。已知谐波干扰  $d_1$  幅值选取 1000", 对应已知干扰频率分别选取 1 Hz、5 Hz、10 Hz。未知干扰  $d_2$  选幅值单位为角秒, 对应选取  $d_2 = 500 \sin(\pi t) + 500 \sin(4\pi t)$ , 单一扩张状态观测器参

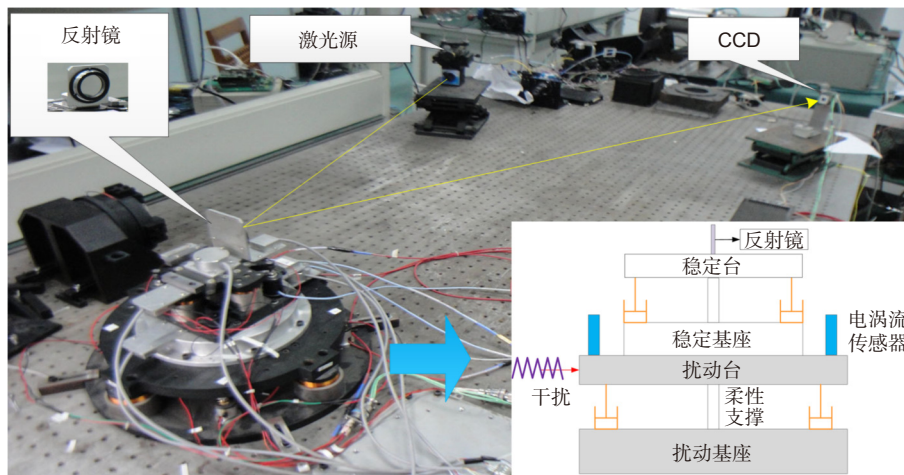


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental devices

表 1 电涡流传感器参数

Table 1 Eddy current sensor parameters

品牌	上海泽赞自动化科技有限公司
型号	SE990
探头直径	5 mm
线性量程	2 mm
非线性误差	≤±1%

表 2 CCD 参数

Table 2 CCD parameters

品牌	Pulnix
型号	TMC-6740CL
像素	640*480
像素大小	7.4 μm

照文献 [23] 设计, 得到观测器表达式如下:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_1(x_1 - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + bu + \beta_2(x_1 - z_1) \\ \dot{z}_3 = \beta_3(x_1 - z_1) \end{cases}, \quad (23)$$

式中:  $z_i (i = 1, 2, 3)$  为扩张状态观测器状态变量, 其观测器带宽选取为 50 rad, 扩张状态观测器增益  $\beta_i (i = 1, 2, 3)$  基于带宽确定. 复合分层干扰观测器参数按照前文方法确定, 最后选取的参数为  $L = [50 \ 550]^T$ ;  $k_1 = 150$ ;  $k_2 = 7500$ .

图 4 展示了单一扩张状态观测器与复合分层干扰观测器观测的不同已知干扰频率下的多源干扰信号. 可以看到, 在不同已知干扰频率下, 由于复合分层干扰观测器对多源干扰更精细的观测, 最后观测的干扰信号将更加接近真实的多源干扰. 同时, 从图 4 的局部放大图中可以明显看出, 复合分层干扰观测器观测相位差更小, 说明滞后更小. 为了更直观的比较二者观测的精确度, 图 5 给出了两种方法对多源干扰的观测误差, 显然复合分层干扰观测在干扰频率不同的情况下, 具有更高的精度.

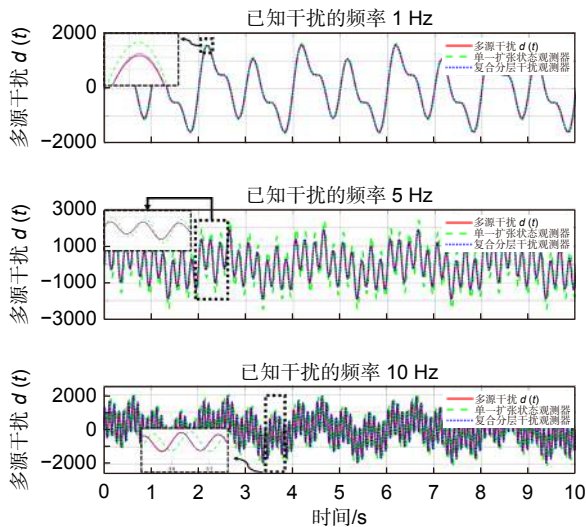


图 4 多源干扰  $d(t)$  观测

Fig. 4 Multi-source interference  $d(t)$  observation

为了在复合分层干扰观测器的基础上继续提升系统的干扰抑制能力, 继续采用滑模控制方法来设计复合控制器. 作为对比, 实验中也给出采用传统比例微分的线性控制器设计方法.

对于观测器干扰补偿后的系统可以近似为串联积分形式:

$$\ddot{y} \approx u_0, \quad (24)$$

设计比例微分线性控制器如下:

$$u_0 = k_p(r - x_1) - k_d x_2, \quad (25)$$

实现对受控对象输出  $y$  的控制, 其中  $k_p$  和  $k_d$  为控制器增益.

比例微分线性控制器的特征方程为

$$G(s) = s^2 + k_d s + k_p, \quad (26)$$

采用极点配置法求解控制器增益, 参数选取为:  $k_p = 4$ ,  $k_d = 4$ .

依据前文设计, 其中滑模面参数  $m$  决定了误差指数收敛速度, 滑模控制律中参数  $n$  决定了运动点趋近切换面的速率, 过大的速率将会导致系统具有较大的抖动问题, 参数  $k$  的设计可以实现系统状态以较快的

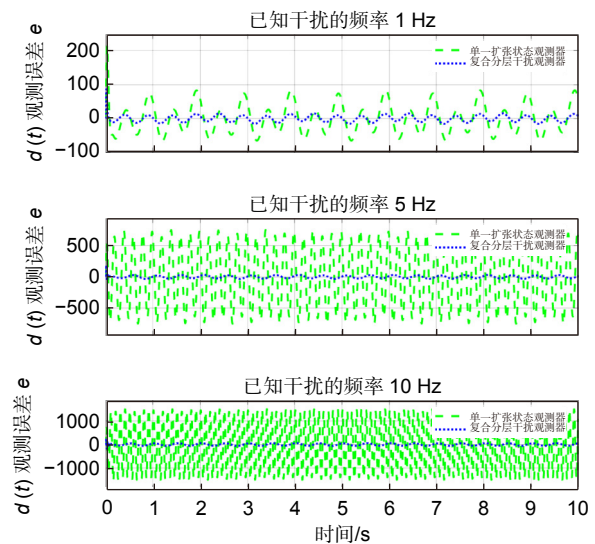


图 5 多源干扰  $d(t)$  观测误差对比

Fig. 5 Multi-source perturbation  $d(t)$  observation error comparison

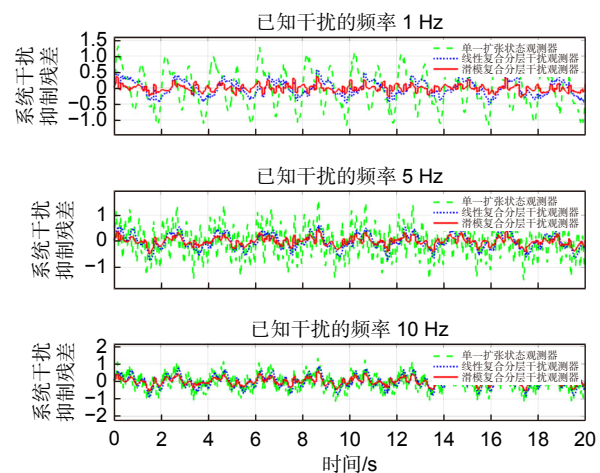


图 6 不同控制策略下系统干扰抑制残差对比

Fig. 6 Comparison of system interference suppression residuals under different control strategies

速度趋近滑模状态。综合考虑, 最终滑模控制器参数为:  $m = 10$ ;  $n = 6$ ;  $k = 4$ 。图 6 展示了单一扩张观测干扰补偿方法、基于比例微分控制的线性复合分层干扰补偿方法与基于滑模复合分层干扰补偿方法的干扰抑制残差对比。可以看到, 与单一扩张观测器相比, 引入复合分层干扰观测器将会显著提升系统的干扰抑制能力, 继续将滑模控制器替换传统的线性控制器方法, 将进一步提升系统的干扰抑制能力, 获得更好的视轴稳定性能。

## 5 结论

运动抗干扰一直是工控领域关注的核心问题, 干扰的抑制级别直接影响到系统整体的稳定精度。在光电跟踪方向, 通常把干扰当作整体来进行抑制, 未考虑干扰的组成和特征, 导致干扰抑制能力很难进一步得到提升。本文尝试对干扰进行细分, 利用复合分层干扰观测器取代常用单一扩张状态观测器, 并结合滑模控制方案, 成功对不同干扰进行针对性的抑制。复合分层干扰观测器与单一扩张状态观测器相比, 能够更准确地估计多源干扰, 并且受干扰频率影响较小, 与此同时, 滑模控制方案的选取进一步增强系统的鲁棒性能。整体设计方案使系统具备更强的干扰抑制性能, 更好的稳定视轴。本文方法不仅适用于光电跟踪系统, 对于存在多源干扰的工业运动控制同样具备应用潜力。考虑到运动控制中不仅需要系统稳定后的残差要小, 而且需要快速达到稳定状态, 后续将针对系统如何在固定时间内达到稳定进行研究。

## 参考文献

- [1] Hu L F, Liu C, Shen W, et al. Advancement of adaptive optics in astronomical observation[J]. *Sci Sin Phys, Mech Astron*, 2017, **47**(8): 084202.  
胡立发, 刘超, 申文, 等. 自适应光学技术在天文观测中的研究进展[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2017, **47**(8): 084202.
- [2] Jia W W, Liu P Z, Tang Z L, et al. Detection method for optical-axis parallelism of photoelectric theodolite in range[J]. *Opt Precis Eng*, 2020, **28**(8): 1670–1677.  
贾文武, 刘培正, 唐自力, 等. 靶场适用的光电经纬仪光轴平行性检测[J]. *光学精密工程*, 2020, **28**(8): 1670–1677.
- [3] Li Z J, Mao Y, Qi B, et al. Research on control technology of single detection based on position correction in quantum optical communication[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(3): 210311.  
李志俊, 毛耀, 亓波, 等. 量子光通信中位置修正单检测控制方法[J]. *光电工程*, 2022, **49**(3): 210311.
- [4] Tang T, Ma J G, Chen H B, et al. A review on precision control methodologies for optical-electric tracking control system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, **47**(10): 200315.  
唐涛, 马佳光, 陈洪斌, 等. 光电跟踪系统中精密控制技术研究进展[J]. *光电工程*, 2020, **47**(10): 200315.
- [5] Zhang L Z, Yang T, Wu Y, et al. Image measurement-based two-stage control of Stewart platform[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, **49**(8): 220019.  
张良总, 杨涛, 吴云, 等. 基于图像测量的Stewart平台双阶控制技术[J]. *光电工程*, 2022, **49**(8): 220019.
- [6] Liu L S, Xia R Q, Lv Y, et al. Research situation of fast steering mirror driven by voice coil motor[J]. *Laser J*, 2020, **41**(9): 1–7.  
刘力双, 夏润秋, 吕勇, 等. 音圈电机快速控制反射镜研究现状[J]. *激光杂志*, 2020, **41**(9): 1–7.
- [7] Zhao L, Ji M, Zhao Z H, et al. Primary-precise compounded control for stabilized platform in shipborne laser weapon[J]. *Laser Infrared*, 2019, **49**(1): 86–92.  
赵磊, 纪明, 赵振海, 等. 舰载激光武器稳定平台粗精复合控制[J]. *激光与红外*, 2019, **49**(1): 86–92.
- [8] Hou Y F, Ye Z T, Yang Y. Research on integrated processing of vehicle-borne array CCD images and laser point cloud based on POS data[J]. *Remote Sens Inf*, 2011(4): 76–79.  
侯艳芳, 叶泽田, 杨勇. 基于POS数据的车载面阵CCD影像与激光点云融合处理研究[J]. *遥感信息*, 2011(4): 76–79.
- [9] Zhu G S. Research on high precision pointing technology for spaceborne optical communication applications[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020.  
朱广颂. 面向星载光通信应用的高精度瞄准技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [10] Gao Z, Jiang Z, Deng L. Research on airborne optoelectronic pod target location method[J]. *J Navig Positioning*, 2013, **1**(4): 74–78.  
高卓, 江泽, 邓麟. 机载光电吊舱目标定位技术研究[J]. *导航定位学报*, 2013, **1**(4): 74–78.
- [11] Du Y L, Ding Y L, Xu Y S, et al. Analysis of coupled vibration in isolation system for airborne optoelectronic pod[J]. *China Mech Eng*, 2015, **26**(21): 2880–2884.  
杜言鲁, 丁亚林, 许永森, 等. 机载光电平台隔振系统振动耦合分析[J]. *中国机械工程*, 2015, **26**(21): 2880–2884.
- [12] Tian J, Yang W S, Peng Z M, et al. Inertial sensor-based multiloop control of fast steering mirror for line of sight stabilization[J]. *Opt Eng*, 2016, **55**(11): 111602.
- [13] Zhou X, Mao Y, Zhang C, et al. A comprehensive performance improvement control method by fractional order control[J]. *IEEE Photonics J*, 2018, **10**(5): 7906811.
- [14] Ohishi K, Nakao M, Ohnishi K, et al. Microprocessor-controlled DC motor for load-insensitive position servo system[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 1987, **IE-34**(1): 44–49.
- [15] Han J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2009, **56**(3): 900–906.
- [16] Deng C, Yao M, Ren G, et al. MEMS inertial sensors-based multi-loop control enhanced by disturbance observation and compensation for fast steering mirror system[J]. *Sensors*, 2016, **16**(11): 1920.
- [17] Luo Y, Huang Y M, Deng C, et al. Combining a disturbance observer with triple-loop control based on MEMS accelerometers for line-of-sight stabilization[J]. *Sensors*, 2017, **17**(11): 2648.
- [18] Deng J Q, Zhou X, Mao Y. On vibration rejection of nonminimum-phase long-distance laser pointing system with compensatory disturbance observer[J]. *Mechatronics*, 2021, **74**: 102490.
- [19] Nie K, Ren W, Zhou X, et al. Virtual dual-loop feedback control with model-construction linear extended state observer for free space optical communication[J]. *Sensors*, 2019, **19**(18): 3846.



- [20] Sui S S, Zhao T. Active disturbance rejection control for optoelectronic stabilized platform based on adaptive fuzzy sliding mode control[J]. *ISA Trans*, 2022, **125**: 85–98.
- [21] Qiao Q, Nie K, Deng J Q, et al. Sliding mode control of the optoelectronic stabilized platform based on the exponential approach law[C]//*Proceedings of the 34th Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation*, Jinzhou, 2019: 407–410. <https://doi.org/10.1109/YAC.2019.8787674>.
- [22] Hou L L, Zong G D. Composite hierarchical anti-disturbance

control for nonlinear time-varying delay interconnected systems with multiple disturbances[J]. *J Syst Sci Math Sci*, 2014, **34**(12): 1595–1603.

侯林林, 宗广灯. 具有多干扰的非线性时变时滞关联系统的复合分层抗干扰控制[J]. *系统科学与数学*, 2014, **34**(12): 1595–1603.

- [23] Gao Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//*Proceedings of the 2003 American Control Conference*, Denver, 2003: 4989–4996. <https://doi.org/10.1109/ACC.2003.1242516>.

## 作者简介



罗勇 (1989-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电跟踪控制、永磁同步电机伺服控制、自适应控制等研究。

E-mail: luoyong@nuist.edu.cn



【通信作者】李涛 (1979-), 男, 博士, 教授, 主要从事非线性系统、随机分布系统等的干扰抑制以及故障诊断理论与应用研究。

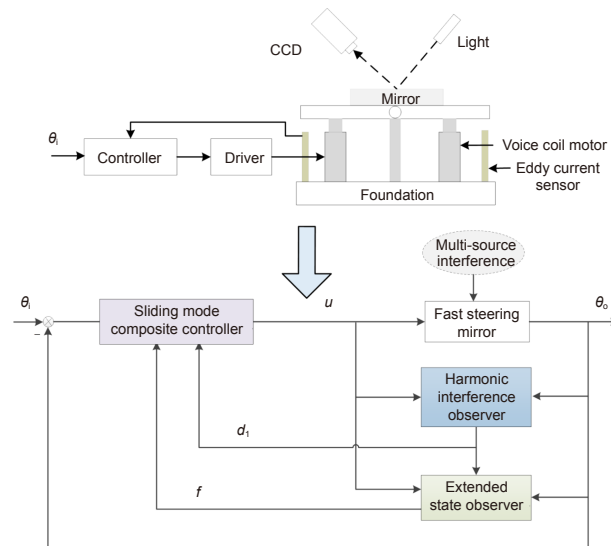
E-mail: litaojia@nuist.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

# Observation and compensation control of sliding mode compound layered interference for the fast steering mirror system

Luo Yong<sup>1,2</sup>, Liu Kaikai<sup>1</sup>, Yang Fan<sup>2</sup>, Wen Xinyi<sup>3</sup>, Huang Yongmei<sup>2</sup>,  
Guo Shanshan<sup>4</sup>, Ren Ge<sup>2</sup>, Li Tao<sup>1\*</sup>



Control block diagram of sliding mode composite layered interference observation compensation

**Overview:** The fast steering mirror is an important component of a high-precision photoelectric tracking system. Fast steering mirrors are generally driven by voice coil motors with high linearity, high sensitivity, and high bandwidth to ensure adequate tracking and anti-interference accuracy of the whole system. In recent years, with the expansion of applications, the photoelectric tracking system has expanded from a fixed platform mounted on a foundation to a moving platform. However, the environment in which the motion platform is located is more severe and the internal and external interference caused by the carrier attitude change will be more complex and intense, leading to a serious decrease in the accuracy of the visual axis stabilization, and even make the tracking target out of the field of view and lose the target. In general, for the photoelectric tracking system in a moving platform, the traditional passive interference suppression methods and the active interference suppression methods that treat the interference as lumped interference will not be enough to ensure the high-precision stability of boresight. Therefore, this paper proposes a sliding mode composite layered interference observation and compensation control strategy which combines harmonic interference observation and extended state observation. Firstly, the harmonic disturbance observer is used to observe the harmonic disturbance with a priori frequency information. Then, the extended state observer is used to observe other unknown disturbances. Finally, based on the observed multi-source interference, the sliding mode nonlinear method with anti-interference ability is used to design a composite controller to maximize the suppression of multi-source disturbances suffered by the system. The experiment shows that the sliding mode composite layered interference observation compensation method proposed in this paper can estimate multi-source interference more accurately, has stronger interference suppression ability, and obtains higher boresight stabilization accuracy for the fast steering mirror compared with the traditional single interference observation compensation method.

Luo Y, Liu K K, Yang F, et al. Observation and compensation control of sliding mode compound layered interference for the fast steering mirror system[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(4): 220330; DOI: [10.12086/oe.2023.220330](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220330)

Foundation item: Natural Science Foundation of Sichuan Province (2023NSFSC1438)

<sup>1</sup>School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China; <sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China; <sup>3</sup>719 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Wuhan, Hubei 430064, China; <sup>4</sup>College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110167, China

\* E-mail: [litaojia@nuist.edu.cn](mailto:litaojia@nuist.edu.cn)