

文章编号 1004-924X(2024)08-1153-11

空间天文望远镜自适应精密稳像闭环控制

张 泉^{1,2}, 魏传新^{1,2*}, 高源蓬^{1,2}, 朱雨霁^{1,2}, 李清灵^{1,2},
房陈岩^{1,2}, 周显宜^{1,2}, 尹达一^{1,2}

(1. 中国科学院 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要:针对空间天文望远镜低频段视轴扰动补偿问题,提出了一种基于主动光学技术的自适应精密稳像闭环控制方法。该方法以精细导星仪(Fine Guide Sensor, FGS)为高精度视轴扰动检测器,以四点支撑压电驱动大口径快摆镜机构(Fast Steering Mirror, FSM)为视轴扰动补偿器。首先,采用位置式PID控制器串联积分环节进行精密稳像闭环控制,得到补偿FGS检测出的二维视轴扰动所需FSM的二维摆动角度,进而根据驱动结构转换为每个支撑点的压电陶瓷执行器(Piezoelectric actuators, PZT)的伸缩量。然后,利用基于广义Bouc-Wen逆模型的压电动态迟滞前馈补偿方法进行高精度的压电陶瓷执行器定位控制。最后,根据有监督的Hebb学习规则,利用具有自学习和自适应能力单神经元对PID控制器参数进行调整,从而得到最优控制器参数。实验结果表明,所提控制方法能够有效地补偿空间天文望远镜的视轴偏差,可以将精细导星仪X方向和Y方向的星点质心位置偏差功率谱密度在0~6 Hz频段内积分值分别抑制了98.54%和98.62%。

关键词:空间天文望远镜;精密稳像;精细导星仪;大口径快摆镜机构;迟滞补偿;单神经元自适应PID控制
中图分类号:P111.2 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243208.1153

Adaptive precision image stabilization control closed-loop method for space astronomical telescope

ZHANG Quan^{1,2}, WEI Chuanxin^{1,2*}, GAO Yuanpeng^{1,2}, ZHU Yuji^{1,2}, LI Qingling^{1,2},
FANG Chenyan^{1,2}, ZHOU Xianyi^{1,2}, YIN Dayi^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology,
Shanghai Institute of Technical Physics, Shanghai 200083, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)
* Corresponding author, E-mail: ls_wcx@mail.sitp.ac.cn

Abstract: An adaptive closed-loop control method for precision image stabilization based on active optical technology was proposed to compensate for low-frequency LOS disturbances in space astronomical telescopes. The fine guide sensor (FGS) was used as a high-precision LOS disturbance detector, and the four-point supporting large-aperture fast steering mirror (FSM) mechanism drove by piezoelectric actuators (PZT) was used as a LOS disturbance compensator in this method. First, a PID controller was connected in series with an integral link for precise image stabilization closed-loop control to obtain the two-dimen-

收稿日期:2023-07-28;修订日期:2023-09-22.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 12103075)

sional swing angles of the FSM required to compensate for the two-dimensional LOS disturbance detected by FGS. Furthermore, the expansion amount of each PZT was calculated through driving structure. Then, the feedforward compensation method based on generalized Bouc-Wen inverse hysteresis model was used for high-precision positioning control of the piezoelectric ceramic actuator. Finally, according to supervised Hebb learning rules, the single neuron with self-learning and adaptive abilities was used to adjust the PID controller parameters, thereby obtaining the optimal controller parameters. The experimental results show that the proposed control method can effectively compensate the LOS disturbance of the space astronomical telescope, and the integral value of PSD of the position error of the star point centroid in the X direction and Y direction of the FGS can be suppressed by 98.54% and 98.62% respectively in the frequency band of 0~6 Hz.

Key words: space astronomical telescope; precision image stabilization; fine guide sensor; fast steering mirror; hysteresis compensation; single-neuron adaptive PID control

1 引 言

空间天文观测突破了地面天文观测的局限性,具有较低的背景噪声且角分辨率能够接近望远镜衍射极限^[1-2]。然而,空间天文望远镜在轨工作环境非常复杂^[3],卫星平台运动、姿态变化、振动以及其他各种扰动源会对空间天文望远镜工作造成不可忽略的影响,因而需要对空间天文望远镜精密稳像技术进行研究。

国外空间天文望远镜相关技术发展较为成熟,哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST)通过精细导星仪给出精确的姿态基准,并经控制系统驱动反作用轮组件来提供机动所需的扭矩和精细指向过程中所需的精确控制扭矩^[4]。詹姆斯·韦布太空望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)是一个主要用于红外天文观测的大型天基天文台,其精细导星仪检测并反馈星点质心偏移量给快摆镜机构以实现图像稳定^[5]。HST 退役后,NASA 计划打造下一代 LUVOIR (Large Ultraviolet Optical Infrared Surveyor)高性能、全波长的空间天文望远镜,为了更精细的观测小范围的目标,LUVOIR 通过控制 FSM 来对低阶波前传感器估计的指向误差进行补偿,实现望远镜稳定成像^[6]。我国关于空间天文望远镜的研究起步较晚,大口径、大视场的空间站巡天望远镜还在研制阶段^[7]。

卫星平台振动显示出低频高幅,高频低幅的特性^[8]。对于高频段(10 Hz 以上)的振动,通常利用隔离系统进行隔离,这种被动隔振的方法对

于高频振动有良好的隔振效果^[9];对低频段(10 Hz 以下)振动,

通过主动光学技术,以快摆镜为执行机构的精密稳像系统来进行补偿。为了实现空间天文望远镜的精密稳像闭环控制,以精细导星仪为高精度检测环节,主要负责空间天文望远镜的视轴偏差检测,以四点支撑压电驱动大口径快摆镜机构为执行器,主要负责对望远镜视轴偏差进行补偿。采用位置式 PID 控制器串联积分环节进行精密稳像闭环控制,得到补偿二维视轴扰动所需的 FSM 的二维摆动角度,进而通过控制策略转换为每个支撑点的压电陶瓷执行器的伸缩量,并利用基于广义 Bouc-Wen 逆模型的压电动态迟滞前馈补偿方法进行高精度的压电陶瓷执行器定位控制。为了能使闭环控制器能适应环境变化,获得最优控制器参数,基于有监督的 Hebb 学习规则,利用具有自学习和自适应能力单神经元对控制器参数进行调整。文中提出的基于广义 Bouc-Wen 的 Hammerstein 逆迟滞模型不用进行繁复的逆模型求解运算,可以表征压电陶瓷执行器迟滞的非对称性和率相关性,所提出的精密稳像闭环控制方法可以自适应整定闭环控制器参数,从而获得最优控制效果。

2 基本原理

2.1 空间天文望远镜精密稳像系统结构

空间天文望远镜精密稳像系统以精细导星仪为高精度检测环节,主要负责空间望远镜的视轴偏

差检测^[10],以大口径快摆镜机构为执行器,主要负责对望远镜视轴偏差进行补偿^[11],如图 1 所示。

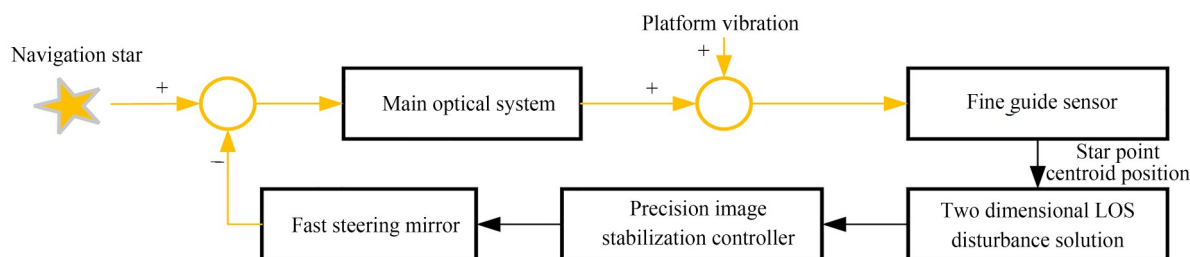


图 1 空间天文望远镜精密稳像系统结构

Fig. 1 Structure of precision image stabilization system for space telescope

短时间内恒星目标的绝对位置保持不变,以某一时刻目标星点质心在精细导星仪坐标系下的位置为参考位置,那么之后任意时刻的目标星点质心位置与该参考位置的偏差即为望远镜指向偏差。精细导星仪对高速 CMOS 探测器实时获取的导航星点图像进行去噪预处理,包括中值滤波^[12]和阈值分割^[13]。中值滤波是一种非线性滤波算法,其可以在减小散粒噪声以及坏元影响的同时,改善星点形状,如式(1)所示:

$$g(x, y) = \text{median}\{P(i, j)\}, (i, j) \in W, \quad (1)$$

其中: $P(i, j)$ 表示原始图像像素的灰度值, $g(x, y)$ 表示中值滤波后像素的灰度值, W 表示 3×3 滑动窗口。

阈值分割的目的是完成星点目标和背景的分离。设包含目标的图像表示为 $f(x, y)$,其中 $x=1, 2, \dots, m, y=1, 2, \dots, n$,阈值分割过程如式(2)所示:

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y), & f(x, y) \geq T \\ 0, & f(x, y) < T \end{cases}, \quad (2)$$

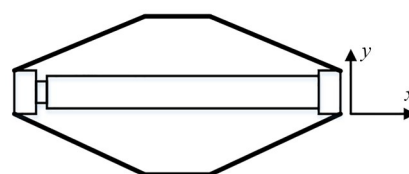
其中, T 为背景阈值。

在星点图像预处理的基础上通过搜索星点最大 DN 值(Digital Number)进行目标星点粗定位,利用平方加权质心法计算星点质心^[14],如式(3)所示:

$$X_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N x_j F^2(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F^2(i, j)}, \quad Y_c = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N y_i F^2(i, j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N F^2(i, j)}, \quad (3)$$

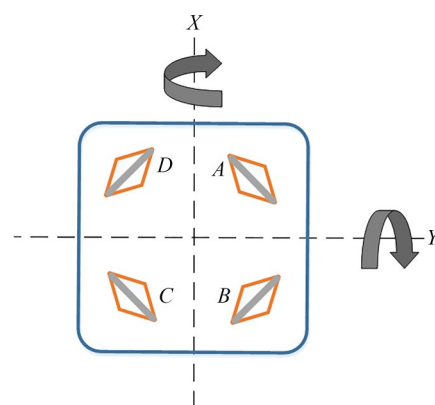
其中: $F(i, j)$ 为开窗内第 i 行和第 j 列像素的 DN 值, x_j 为 X 轴坐标, y_i 为 Y 轴坐标, X_c 和 Y_c 是质心 X 方向和 Y 方向坐标。

空间卫星平台的振动总体呈现出幅值小、频带宽、控制难的特性,根据在实际应用中转角精度要求,大口径快摆镜机构驱动器的位移分辨率要求达到纳米级,所以选择压电执行器作为大口径快摆镜机构的驱动器。大口径快摆镜机构由镜体、压电陶瓷执行器,柔性支撑菱形微位移放大机构组成。柔性支撑微位移放大机构将压电陶瓷执行器的作动位移转化为菱形结构的形变实现大口径快摆镜机构的驱动,如图 2(a)所示。



(a) 柔性支撑微位移放大机构结构图

(a) Structure diagram of micro-displacement amplification mechanism



(b) 快摆镜机构结构图

(b) Structure diagram of the FSM mechanism

图 2 四点支撑压电驱动大口径快摆机构结构图

Fig. 2 Driving structure of large-aperture FSM

菱形结构 y 方向上的输出位移大于压电陶瓷执行器的输出位移,从而实现了位移的放大。快摆镜机构采用四点支撑双自由度驱动,四个压电陶瓷执行器在 XY 平面内对称分布,每两个执行器和中心连线的夹角为 90° ,如图 2(b)所示。

空间天文望远镜精密稳像控制系统中的大口径快摆镜机构快速调整反射镜面的姿态角来实时控制望远镜视轴指向来实现精密稳像光闭环的目的。

2.2 大口径快摆镜机构控制策略

2.2.1 大口径快摆镜机构驱动结构

大口径快摆镜机构通过图 2(a)中 PZT(A)和 PZT(D)的伸缩来进行 X 轴的摆动,通过 PZT(A)和 PZT(B)的伸缩来进行 Y 轴的摆动。压电驱动大口径快摆镜机构的摆动角度根据驱动结构转换为每个支撑点的压电陶瓷执行器的伸缩量,从而将压电驱动大口径快摆镜机构的摆角控制问题转换为压电陶瓷执行器的输出位移定位问题。

四点支撑大口径快摆镜机构控制策略为:

(1)当 PZT_A, PZT_B 和 PZT_C, PZT_D 一伸一缩时,镜子绕 X 轴偏转,其中 PZT_C 和 PZT_D, PZT_A 和 PZT_B 的位移相同, PZT_A 和 PZT_D 的位移相反,摆动角度和压电执行器伸长量的关系如式(4)所示:

$$\begin{cases} \text{elong}X_{\text{PZT}_A} = \tan(\text{angle}_X) \times L \times \sin(45^\circ)/M \\ \text{elong}X_{\text{PZT}_B} = \text{elong}X_{\text{PZT}_A} \\ \text{elong}X_{\text{PZT}_C} = \tan(-\text{angle}_X) \times L \times \sin(45^\circ)/M \\ \text{elong}X_{\text{PZT}_D} = \text{elong}X_{\text{PZT}_C} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $\text{elong}X_{\text{PZT}_A}$, $\text{elong}X_{\text{PZT}_B}$, $\text{elong}X_{\text{PZT}_C}$ 和 $\text{elong}X_{\text{PZT}_D}$ 分别为快摆镜组件 X 轴方向摆动时, PZT_A, PZT_B, PZT_C 和 PZT_D 所需的伸缩量, angle_X 为快摆镜组件 X 轴方向摆动角度, L 为每个位移放大机构的支撑点距离镜面中心距离, M 为图 2 中菱形机构位移放大倍数。

(2)当 PZT_A, PZT_D 和 PZT_C, PZT_B 一伸一缩时,镜子绕 Y 轴偏转,其中 PZT_C 和 PZT_B, PZT_A 和 PZT_D 的位移相同, PZT_A 和 PZT_B 的位移相反,摆动角度和压电执行器伸长量的关系如式(5)所示:

$$\begin{cases} \text{elong}Y_{\text{PZT}_A} = \tan(\text{angle}_Y) \times L \times \sin(45^\circ)/M \\ \text{elong}Y_{\text{PZT}_B} = \tan(-\text{angle}_Y) \times L \times \sin(45^\circ)/M \\ \text{elong}Y_{\text{PZT}_C} = \text{elong}Y_{\text{PZT}_B} \\ \text{elong}Y_{\text{PZT}_D} = \text{elong}Y_{\text{PZT}_A} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\text{elong}Y_{\text{PZT}_A}$, $\text{elong}Y_{\text{PZT}_B}$, $\text{elong}Y_{\text{PZT}_C}$ 和 $\text{elong}Y_{\text{PZT}_D}$ 分别为快摆镜组件 Y 轴方向摆动时, PZT_A, PZT_B, PZT_C 和 PZT_D 所需的伸缩量, angle_Y 为快摆镜组件 Y 轴方向摆动角度, L 为每个位移放大机构的支撑点距离镜面中心距离, M 为图 2 中菱形机构位移放大倍数。

(3)将式(4)和式(5)进行叠加可以实现四点支撑大口径快摆镜组件的二维摆动,如式(6)所示:

$$\begin{cases} \text{elong}_{\text{PZT}_A} = \text{elong}X_{\text{PZT}_A} + \text{elong}Y_{\text{PZT}_A} \\ \text{elong}_{\text{PZT}_B} = \text{elong}X_{\text{PZT}_B} + \text{elong}Y_{\text{PZT}_B} \\ \text{elong}_{\text{PZT}_C} = \text{elong}X_{\text{PZT}_C} + \text{elong}Y_{\text{PZT}_C} \\ \text{elong}_{\text{PZT}_D} = \text{elong}X_{\text{PZT}_D} + \text{elong}Y_{\text{PZT}_D} \end{cases} \quad (6)$$

其中: $\text{elong}_{\text{PZT}_A}$, $\text{elong}_{\text{PZT}_B}$, $\text{elong}_{\text{PZT}_C}$ 和 $\text{elong}_{\text{PZT}_D}$ 分别为 PZT_A, PZT_B, PZT_C 和 PZT_D 总的伸缩量。

2.2.2 压电陶瓷执行器高精度定位控制

以式(6)求得的压电陶瓷执行器的伸缩量为目标,采用基于广义 Bouc-Wen 逆模型的压电迟滞前馈补偿方法^[15]对压电陶瓷执行器进行高精度定位控制。建立前馈补偿器来消除压电陶瓷执行器的迟滞非线性的关键就是逆迟滞建模^[16]。

(1)广义 Bouc-Wen 非对称迟滞模型

静态 Bouc-Wen 模型可以表示为:

$$y = du - h, \quad (7)$$

$$h = \alpha \phi \dot{u} - \beta |\dot{u}| h |h|^{n-1} - \gamma \dot{u} |h|^n, \quad (8)$$

其中: d 为压电系数, u 为输入电压, h 为迟滞状态变量, y 为输出位移, α, β, γ 是迟滞曲线形状系数, n 影响迟滞曲线的光滑度,一般取 1。

为了反映压电迟滞曲线的非对称性质,在式(7)中引入多项式,如式(9)所示:

$$y = f + g \cdot h, \quad f = \sum_{i=0}^N p_i \cdot u^i, \quad g = \sum_{j=0}^M q_j \cdot u^j, \quad (9)$$

其中: f 和 g 是关于 u 的多项式, N, M 分别表示多项式 f 和 g 的阶数, p_i, q_i 分别表示多项式 f 和 g 的系数。

建立迟滞模型的通常做法是先由式(4)~式(5)建立和辨识出广义 Bouc-Wen 迟滞模型,再通过数学变换求得反函数,得到以位移为输入和以电压为输出的迟滞数学模型。但是,在基本模型引入多项式后,逆模型的求解涉及到解多次方程,过程复杂,不利于模型在实际系统中的部署。本文提出一种可以直接建立的广义 Bouc-Wen 非对称迟滞模型,而不用进行繁复的逆模型求解运算。根据逆函数定理,得到广义 Bouc-Wen 非对称迟滞模型描述的是以位移为输入和以电压为输出的迟滞曲线, n 取1,如式(10)~式(11)所示:

$$\dot{h} = \alpha' \dot{y} - \beta' |\dot{y}| h - \gamma' \dot{y} |h|, \quad (10)$$

$$u = f' + g' \cdot h, \quad f' = \sum_{i=0}^N p_i' \cdot y^i, \quad g' = \sum_{j=0}^M q_j' \cdot y^j, \quad (11)$$

其中: f' 和 g' 是关于 y 的多项式, α', β', γ' 是迟滞曲线形状系数, p_i', q_j' 表示多项式 f' 和 g' 的系数。

现实中,实际控制系统为离散系统,当采样率很高时,式(10)~式(11)的差分形式为:

$$\begin{aligned} h(k) - h(k-1) = & \alpha' [y(k) - y(k-1)] \dots \\ & - \beta' [y(k) - y(k-1)] |h(k-1)| \dots \\ & - \gamma' [y(k) - y(k-1)] |h(k-1)|, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} u(k) = & f' + g' \cdot h(k), \\ f' = & \sum_{i=0}^N p_i' \cdot y^i(k), \quad g' = \sum_{j=0}^M q_j' \cdot y^j(k). \end{aligned} \quad (13)$$

从上式可以看出,不用额外的计算,只需要采用智能优化算法辨识出参数 $\alpha', \beta', \gamma', p_i'$ 和 q_j' 就可以得到非对称迟滞模型,该模型可以直接作为压电陶瓷执行器控制系统的前馈补偿器。

(2) Hammerstein 率相关迟滞模型

针对压电陶瓷执行器迟滞的率相关性,采用 Hammerstein 模型来描述压电迟滞特性。Hammerstein 模型由非线性静态模块和线性动态模块级联而成,其中,非线性静态模块利用广义 Bouc-wen 逆模型表征迟滞非线性,线性动态模块采用 ARX 模型表征迟滞率相关特性。

ARX 模型是离散系统传递函数模型,如式(14)所示:

$$G(z^{-1}) = \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m+1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} z^{-d}, \quad (14)$$

式(14)对应的差分方程如式(15)所示:

$$\begin{aligned} out(k) + a_1 out(k-1) + a_2 out(k-2) + \dots + \\ a_n out(k-n) = & b_1 in(k-d) + \\ & b_2 in(k-d-1) + \dots + \\ & b_m in(k-d-m+1) + \varepsilon(k), \end{aligned} \quad (15)$$

其中: $in(k)$ 是输入信号, $in(k-1)$ 是前一采样时刻输入信号, $out(k)$ 是输出信号, $out(k-1)$ 是前一采样时刻输出信号, $\varepsilon(k)$ 为残差信号。

2.3 空间天文望远镜自适应精密稳像闭环控制算法

分别针对精细导星仪视场内目标星点质心在 X 方向和 Y 方向的偏移量,采用位置式PID控制器串联积分环节的闭环控制方法得到大口径快摆镜机构补偿所需的二维摆动角度,再通过四点支撑大口径快摆镜机构控制策略得到每个支撑点压电陶瓷执行器的伸缩量, X 方向的精密稳像控制框图如图3所示。

位置式PID离散化表达式如式(16)所示:

$$\begin{aligned} u(k) = & w_1 \left[\sum_{j=0}^{k-1} e(j) + e(k) \right] + w_2 e(k) + \\ & w_3 [e(k) - e(k-1)], \end{aligned} \quad (16)$$

其中: $e(k)$ 为系统实际输出和期望输出之间误差信号, $e(k-1)$ 为前一采样时刻误差信号, $u(k)$ 为控制器输出信号, w_1, w_2, w_3 为控制器参数。

大口径快摆镜机构绕 X 轴和 Y 轴摆动对应精细导星仪视场内目标星点在 X 方向和 Y 方向的偏移。分别建立二维大口径快摆镜机构摆动角度和精细导星仪目标星点位置偏差传递函数模型。以大口径快摆镜机构镜面绕 X 轴摆动为例,驱动压电执行器使快摆镜机构进行最大幅度为10 arcsec,频率范围为1~10 Hz的正弦扫频摆动,采集对应精细导星仪星点位置偏差信号,采样率为70 Hz,如图4所示。

借助自适应天牛群优化算法^[17]辨识传递函数模型参数,得到大口径快摆镜机构绕 X 轴摆动对应精细导星仪视场内目标星点在 X 方向的偏

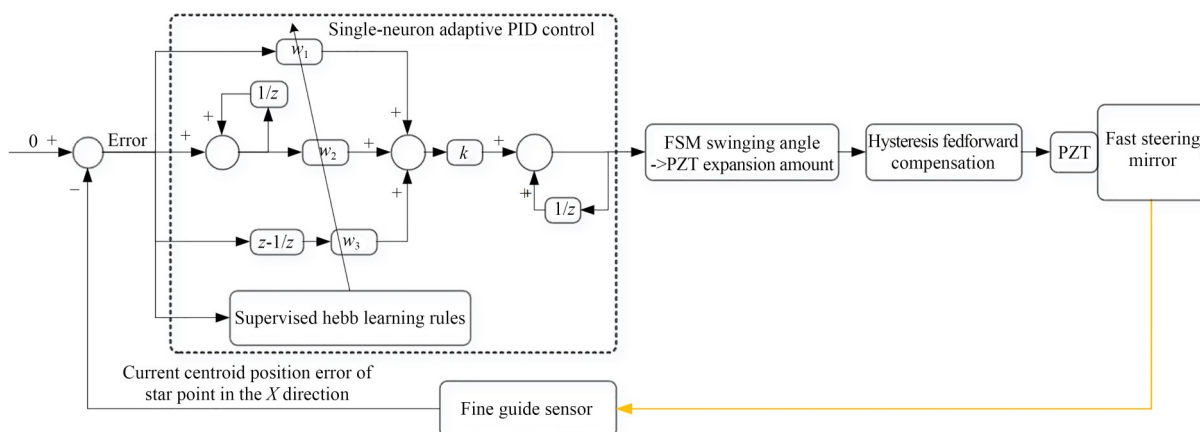


图 3 精密稳像控制方法框图

Fig. 3 Block diagram of precision image stabilization control method

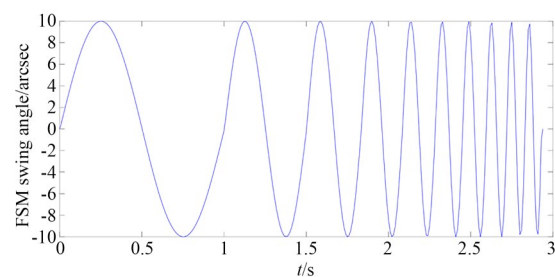
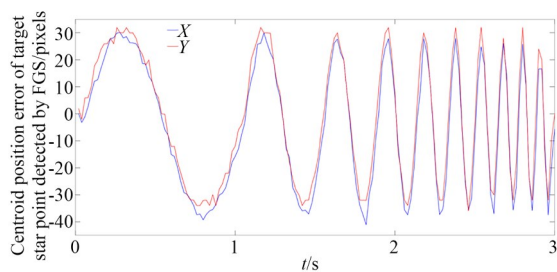
(a) FSM摆动角度
(a) Wwing angle of FSM(b) FGS检测星点质心位置偏差
(b) Centroid position error of target star point detected by FGS

图 4 扫频输入输出数据

Fig. 4 Input and output data of frequency sweep detected by FGS

移的传递函数如式(17)所示:

$$G_x(z) = \frac{2.788 - 0.599z^{-1} - 2.139z^{-2} + 0.898z^{-3}}{1 - 0.541z^{-1} - 0.168z^{-2} - 0.011z^{-3}} \quad (17)$$

得到大口径快摆镜机构绕 Y 轴摆动对应精细导星仪视场内目标星点在 Y 方向的偏移的传递函数如式(18)所示:

$$G_y(z) = \frac{2.233 - 0.681z^{-1} - 1.783z^{-2} + 0.835z^{-3}}{1 - 0.902z^{-1} + 0.088z^{-2} - 0.002z^{-3}} \quad (18)$$

采用 Ziegler-Nichols 法^[18]对 PID 参数进行整定,位置式 PID 控制器串联积分环节的闭环系统仿真 Bode 图如图 5 所示。

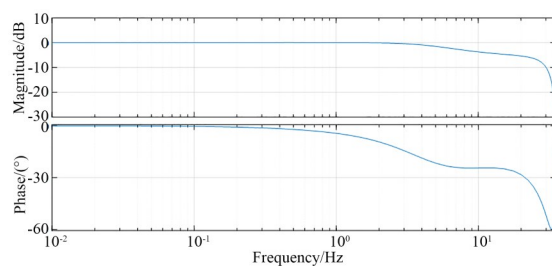
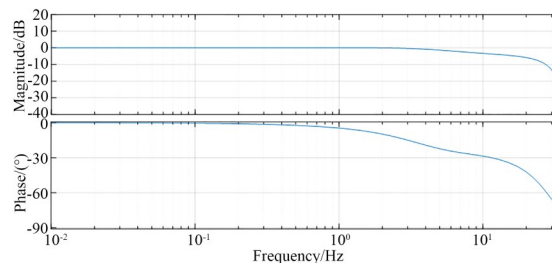
(a) 视轴 X 方向稳像闭环系统
(a) Closed-loop system for image stabilization in the X-direction of LOS(b) 视轴 Y 方向稳像闭环系统
(b) Closed-loop system for image stabilization in the Y-direction of LOS

图 5 精密稳像闭环系统 Bode 图

Fig. 5 Bode diagram of precision image stabilization closed-loop system

鉴于建立传递函数模型的不确定性以及使闭环控制器参数达到最优,利用具有自学习和自适应能力单神经元对PID控制器参数进行调整来实现自适应、自组织功能。参数 w_1, w_2, w_3 调整是根据有监督的Hebb学习规则来实现的。控制算法与学习算法为:

$$w_1(k) = w_1(k-1) + \eta_1 e(k) u(k) \left(\sum_{j=0}^{k-1} e(j) + e(k) \right), \quad (19)$$

$$w_2(k) = w_2(k-1) + \eta_p e(k) u(k) e(k), \quad (20)$$

$$w_3(k) = w_3(k-1) + \eta_D e(k) u(k) [e(k) - e(k-1)], \quad (21)$$

$$w'_i(k) = \frac{w_i(k)}{\sum_{i=1}^3 |w_i(k)|}, \quad (22)$$

$$u(k) = K \left\{ w'_1(k) \left[\sum_{j=0}^{k-1} e(j) + e(k) \right] \dots + w'_2(k) e(k) + w'_3(k) [e(k) - e(k-1)] \right\}, \quad (23)$$

其中: $e(k)$ 为系统实际输出和期望输出之间的误差信号, $e(k-1)$ 为前一采样时刻的误差信号, $u(k)$ 为控制器输出信号, w_1, w_2, w_3 为控制器参数, η_1 为积分系数的学习速率, η_p 为比例系数的学习速率, η_D 为微分系数的学习速率, K 为神经元的正比例系数, $w'_1(k), w'_2(k), w'_3(k)$ 为控制器更新参数。

3 实验结果与分析

3.1 实验系统搭建

搭建实际控制系统用于数据采集和精密稳像地面控制试验。空间天文望远镜精密稳像控制地面试验系统由精细导星仪、激光光源,扰动快摆镜、控制子系统、四点支撑压电驱动快摆镜机构组成。控制子系统是基于恒润HiGale半实物实时仿真平台,扰动快摆镜采用德国PI公司的压电偏摆台S-340,精细导星仪采用 $2k \times 2k$ 高速CMOS探测器,大口径快摆镜机构以德国PI公司的P-845.40压电陶瓷器执行器作为促动器,激光光源为索雷博CPS532大功率激光器。激光光

源生成模拟星点并控制扰动模拟快摆镜的摆动产生模拟星点扰动,然后通过快摆镜机构进入精细导星仪,精细导星仪以70 Hz的频率检测出模拟星点离中心位置的偏差并发送给主控模块来控制大口径快摆镜机构以实现星点偏差的快速补偿。空间望远镜精密稳像模拟实验系统框图如图6所示。

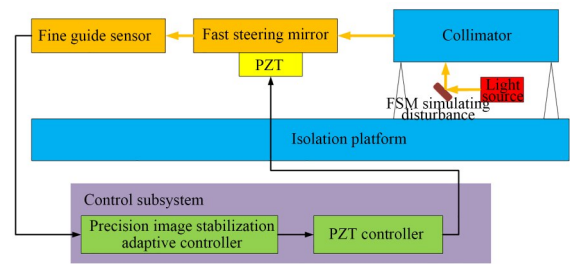


图6 空间望远镜精密稳像实验系统

Fig. 6 Experiment system for precision image stabilization for space telescope

3.2 压电陶瓷执行器定位控制实验

采用自适应天牛群算法对建立的压电陶瓷执行器Hammerstein率相关逆迟滞模型参数进行辨识。

1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, ..., 10 Hz 频率下Hammerstein模型拟合逆迟滞曲线与实际逆迟滞曲线如图7所示。

相应频率下Hammerstein模型拟合逆迟滞曲线与实际逆迟滞曲线的均方根误差和相对误差如表1所示。

表1 迟滞曲线拟合误差

Tab. 1 Model validation errors

频率/Hz	均方根误差/V	相对误差/%
1	0.591	0.74
2	0.619	0.77
3	0.638	0.80
4	0.647	0.81
5	0.651	0.81
6	0.655	0.82
7	0.659	0.82
8	0.663	0.83
9	0.677	0.85
10	0.682	0.85

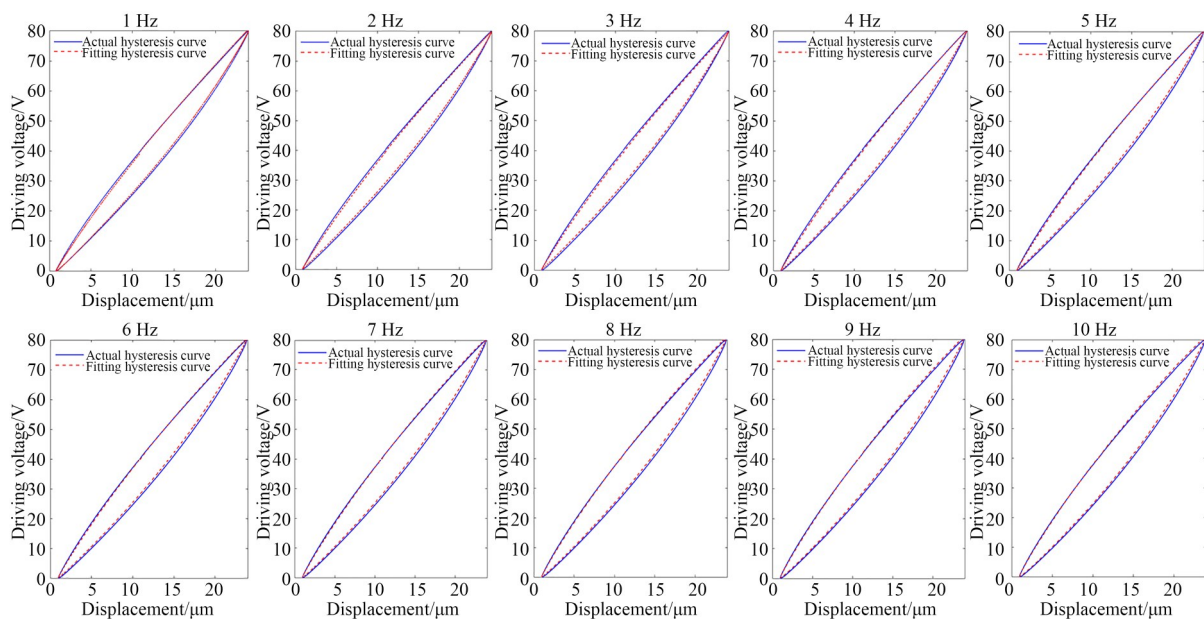
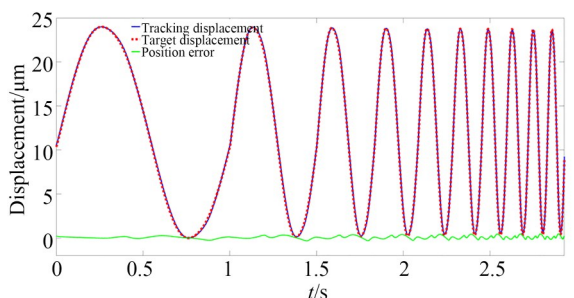


图 7 Hammerstein 逆迟滞曲线与实际逆迟滞曲线

Fig. 7 Experimental hysteresis and the simulation of the identified Hammerstein model

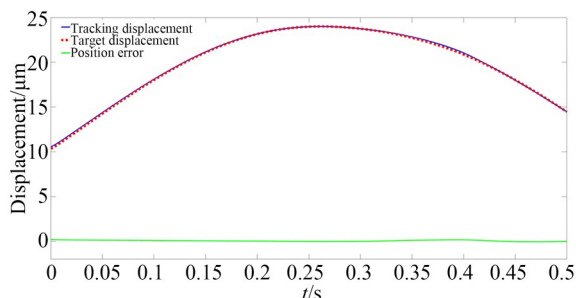
从图 7 和表 1 看出,所建立的动态迟滞逆模型可以有效描述出 1~10 Hz 频率范围内压电迟滞曲线。

实时跟踪频率范围为 1~10 Hz 的变频位移信号,跟踪和误差曲线如图 8 所示。



(a) 实时定位及误差曲线

(a) Real-time positioning and error curves



(b) 实时定位及误差曲线局部放大

(b) Detail view of real-time positioning and error curves

图 8 压电陶瓷执行器实时定位及误差曲线

Fig. 8 Real-time positioning and error curves of PZT

从图 8 可以看出,基于广义 Bouc-Wen 逆模型的压电动态迟滞前馈补偿方法可以有效进行压电陶瓷执行器定位控制,目标位移曲线和跟踪位移曲线的均方根误差为 $0.0568 \mu\text{m}$,如式(24)所示:

$$F = \sqrt{\frac{\sum (D_i - D_i^{\text{target}})^2}{N}}, \quad (24)$$

其中: D 为跟踪位移, D^{target} 为目标位移。

3.3 精密稳像闭环控制实验

精密稳像系统中精细导星仪捕获到目标星点后,以 50×50 pixels 窗口对星点进行采集,星点大小为 11×11 pixels,如图 9 所示。

精细导星仪以星点最大 DN 值所处像素位置为中心取 9×9 pixels 采样窗口,并根据式(3)进行星点质心位置解算,解算完成后向精密稳像控制子系统发送帧号及质心位置二维坐标,控制子系统根据接收到的星点质心位置坐标和基准位置坐标得到二维质心位置偏差,控制和驱动大口径快摆镜机构进行补偿,精密稳像系统检测和控制时序如图 10 所示。

在搭建的验证平台进行精密稳像控制实验,验证该自适应复合控制算法在望远镜视轴偏差补偿中的有效性。实时补偿复合频率星点位置偏差,精细导星仪 X 方向和 Y 方向补偿前后目标星点质心位置偏差及对应快摆镜摆角时域曲线如图 11 所示。

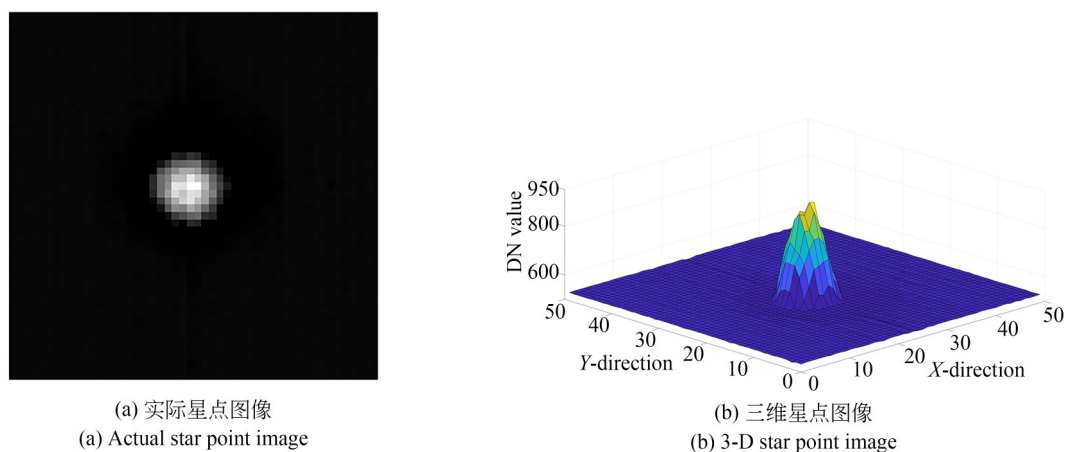


图 9 精细导星仪捕获星点图像

Fig. 9 Star point image captured by FGS

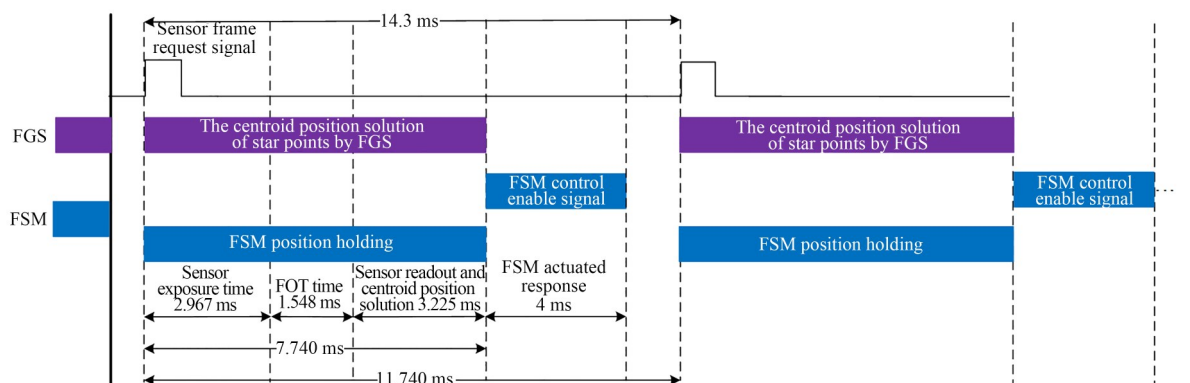


图 10 精密稳像系统检测和控制时序图

Fig. 10 Detection and control sequence diagram of precision image stabilization system

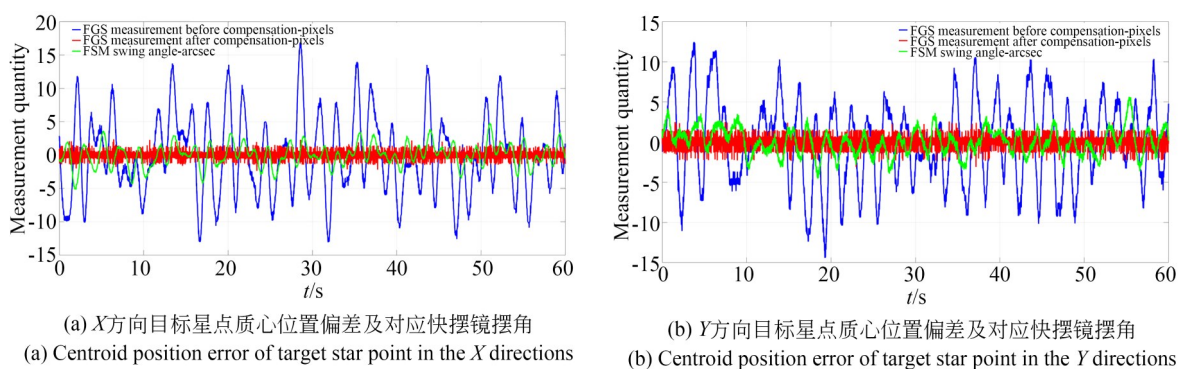


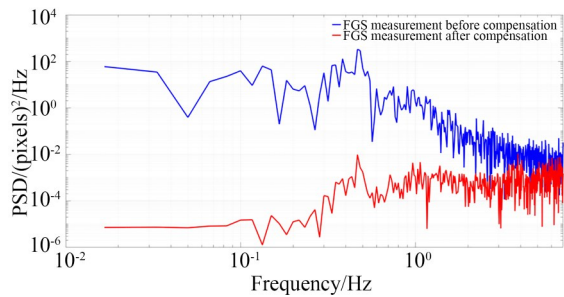
图 11 补偿前后目标星点在 X 方向和 Y 方向质心位置偏差及对应快摆镜摆角时域曲线

Fig. 11 Time domain curve of the centroid position error of target star point before and after compensation in the X and Y directions

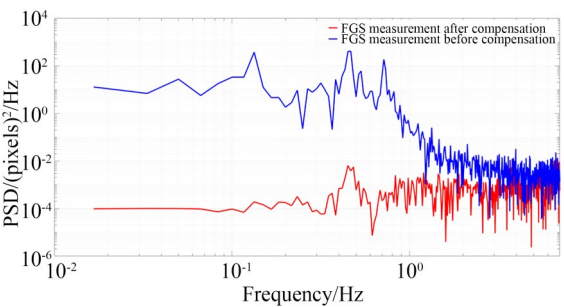
精细导星仪目标星点质心位置在 X 方向和 Y 方向补偿前后偏差时域曲线 0~6 Hz 频段内对

应功率谱密度曲线如图 12 所示。

分别采用传统位置型 PID 和自适应单神经



(a) X方向目标星点质心位置偏差
(a) Centroid position error of target star point in the X direction



(b) Y方向目标星点质心位置偏差
(b) Centroid position error of target star point in the Y direction

图 12 目标星点质心位置在 X 方向和 Y 方向补偿前后偏差 0~6 Hz 频段内功率谱密度曲线

Fig. 12 PSD curve of the centroid position error of target star point before and after compensation in the X and Y directions in the frequency band of 0~6 Hz

元 PID 闭环控制算法情况下,精细导星仪目标星点质心位置在 X 方向和 Y 方向补偿前后功率谱密度在 0~6 Hz 频段内积分值如表 2 所示。

实验结果表明,通过提出的自适应单神经元 PID 闭环控制算法相比于传统位置型 PID 闭环控制算法的稳像效果更好,将精细导星仪 X 方向和

表 2 补偿前后目标星点质心位置偏差功率谱密度 0~6 Hz 频段内积分值

Tab. 2 PSD integral value of the centroid position error of target star point before and after compensation in the frequency band of 0~6 Hz (pixels)

	单神经元自适应 PID 闭环控制算法		传统位置型 PID 闭环控制算法	
	X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
补偿前	5.145	6.025	5.210	6.108
补偿后	0.075	0.083	0.105	0.118

Y 方向的星点质心位置偏差功率谱密度 0~6 Hz 频段内积分值分别抑制了 98.54% 和 98.62%。

4 结 论

主要介绍了一种空间天文望远镜的自适应精密稳像复合控制方法,分别利用精细导星仪和大口径快摆镜机构对视轴扰动进行高精度检测和补偿,借助具有自学习和自适应能力单神经元 PID 控制器串联积分环节进行精密稳像闭环控制,得到补偿二维视轴扰动所需的 FSM 的二维摆动角度,进而通过控制策略转换为每个支撑点的压电陶瓷执行器的伸缩量。利用基于广义 Bouc-Wen 逆模型的压电动态迟滞前馈补偿方法进行高精度的压电陶瓷执行器定位控制。实验结果表明,所提控制方法能够有效地补偿空间天文望远镜的视轴偏差,实时补偿复合频率星点位置偏差,精细导星仪星点质心 X 方向和 Y 方向的位置偏差功率谱密度在 0~6 Hz 频段内积分值分别被抑制了 98.54% 和 98.62%。

参考文献:

[1] KALIRAI J. Scientific discovery with the James Webb Space Telescope[J]. *Contemporary Physics*, 2018, 59(3): 251-290.

[2] JAKOBSEN P, FERRUIT P, DE OLIVEIRA CA, *et al.* The near-infrared spectrograph (nirspec) on the James Webb Space Telescope-I. overview of the instrument and its capabilities[J]. *Astronomy & Astrophysics*. 2022, 661: A80.

[3] ZHU R, ZHANG H Y. An in-orbit thermal design

of optical window in space solar telescope[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2017, 41(4): 601-613.

[4] LI J S, LI D, LIU S, *et al.* *Fine Guidance Sensor Attitude Determination System of the High-Accuracy Satellite Mission*[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022: 11-18.

[5] SHARMA A K. James Webb space telescope[J]. *Resonance*, 2022, 27(8): 1355-1369.

[6] DEWELL L D, SACKS L W, LIU K C, *et al.*

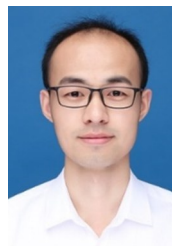
- Preliminary jitter stability results for the large UV/Optical/Infrared (LUVOIR) surveyor concept using a non-contact vibration isolation and precision pointing system[C]. *Space Telescopes and Instrumentation* 2018: *Optical, Infrared, and Millimeter Wave*. June 10-15, 2018. Austin, USA. SPIE, 2018: 1208-1217.
- [7] SHEN X, YUE J P, LIU S T, *et al.* Industrial photogrammetry for the optical mechanical truss of the China survey space telescope[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(5): 055005.
- [8] MA J, LU G Y, TAN L Y, *et al.* Satellite platform vibration influence on acquisition system for intersatellite optical communications[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 138: 106874.
- [9] YU Z L, ZHAO W, SHI X X, *et al.* Research on active vibration isolation system based on piezoelectric actuator for satellite laser communication terminal[C]. *AOPC 2021: Advanced Laser Technology and Applications*. July 23-25, 2021. Beijing, China. SPIE, 2021: 269-275.
- [10] 陈怀宇, 尹达一. 复杂动态环境下精细导星仪拖尾星斑复原方法[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0912002.
- CHEN H Y, YIN D Y. Restoration of smeared star spot for fine guidance sensor under complex dynamic conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0912002. (in Chinese)
- [11] 张泉, 尹达一, 魏传新. 大口径压电快摆镜机构迟滞非线性补偿与控制[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 0218004.
- ZHANG Q, YIN D Y, WEI C X. Hysteresis non-linear compensation and control for large-aperture piezoelectric fast steering mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0218004. (in Chinese)
- [12] JANA B R, THOTAKURA H, BALIYAN A, *et al.* Pixel density based trimmed Median filter for removal of noise from surface image[J]. *Applied Nanoscience*, 2023, 13(2): 1017-1028.
- [13] HE Y Y, WANG H L, FENG L, *et al.* Centroid extraction algorithm based on grey-gradient for autonomous star sensor[J]. *Optik*, 2019, 194: 162932.
- [14] PAN D, ZHOU Q, QU W Z, *et al.* Star spot centroid extraction method in high dynamic condition based on difference hash algorithm[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2235(1): 012020.
- [15] ZHANG Q, GAO Y P, LI Q L, *et al.* Adaptive compound control based on generalized Bouc-Wen inverse hysteresis modeling in piezoelectric actuators[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(11): 115004.
- [16] 司马津甫, 赖磊捷, 李朋志, 等. 三自由度压电偏摆台耦合迟滞模型建模与逆补偿[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(20): 2964-2974.
- SIMA J F, LAI L J, LI P Z, *et al.* Coupled hysteresis model and its inverse compensation for three-degree-of-freedom tip-tilt-piston piezoelectric stage[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(20): 2964-2974. (in Chinese)
- [17] YANG X, JIANG M Q, HU X X, *et al.* Particle swarm optimization algorithm based on beetle antenna search optimization[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1550(2): 022034.
- [18] PATEL V V. Ziegler-nichols tuning method[J]. *Resonance*, 2020, 25(10): 1385-1397.

作者简介:



张 泉(1992—),男,江苏泗阳人,博士,副研究员,2019年毕业于中国科学院上海技术物理研究所,中国空间科学学会会员。主要从事压电陶瓷执行器非线性补偿与控制 and 空间主动稳像控制等方面研究。E-mail: zhangquan@mail.sitp.ac.cn

通讯作者:



魏传新(1989—),男,山东济宁人,博士,副研究员,2016年毕业于中国科学院上海技术物理研究所,上海市宇航学会会员,上海市红外遥感学会会员。主要从事空间精密遥感仪器的光机结构设计、空间柔性微位移机构设计以及遥感仪器的动力学分析等技术研究工作。E-mail: Ls_wcx@163.com