



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——中国科技核心期刊

大型空间光学载荷隔振与指向一体化平台仿真研究

郭怡琳 冯勃 周建 徐明龙

Simulation study on the integrated platform for vibration isolation and pointing of large-scale space optical payloads

GUO Yilin, FENG Bo, ZHOU Jian, XU Minglong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2024122>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于橡胶隔振器的脉冲管制冷机微振动抑制研究

Research on micro-vibration suppression for pulse tube cryocooler based on rubber isolator

航天器环境工程. 2023, 40(5): 501–508 <https://doi.org/10.12126/see.2023045>

用于航天器微振动试验的高静刚度低动刚度隔振器研究进展

Isolators with high static stiffness and low dynamic stiffness for spacecraft micro-vibration experiments

航天器环境工程. 2020, 37(4): 315–322 <https://doi.org/10.12126/see.2020.04.001>

星冕仪制冷机黏弹性隔振平台的非线性振动建模分析

Nonlinear vibration modeling analysis of viscoelastic vibration isolation platform for a cryocooler of the coronagraph

航天器环境工程. 2023, 40(4): 349–355 <https://doi.org/10.12126/see.2023046>

航天器超静平台作动器发展及其关键技术综述

Overview of the development and key technologies of actuator for spacecraft ultra-quiet platform

航天器环境工程. 2022, 39(1): 1–10 <https://doi.org/10.12126/see.2022.01.001>

气驱油源设备的隔振设计及隔振器布局优化

Vibration isolation design of pneumatic oil source equipment and layout optimization of vibration isolators

航天器环境工程. 2024, 41(6): 690–698 <https://doi.org/10.12126/see.2024053>

空间多载荷高精度拼接支撑结构的优化设计

Optimized design of support structure for space multi-load and high-precision splicing

航天器环境工程. 2022, 39(1): 76–82 <https://doi.org/10.12126/see.2022.01.011>

大型空间光学载荷隔振与指向一体化平台 仿真研究

郭怡琳, 冯勃, 周建*, 徐明龙
(西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

摘要: 为减轻航天器微振动对大型空间光学载荷指向精度及成像质量的影响, 并满足轻量化需求, 文章采用音圈电机设计了一种具备俯仰和偏航调节功能的四支腿隔振与指向一体化平台。首先, 建立了该平台的简化动力学模型, 并基于PID控制策略推导了动力学控制方程, 分析了质心偏离及控制参数对控制效果的影响。随后, 设计了带负载的隔振与指向一体化平台, 利用ADAMS刚柔耦合和MATLAB/Simulink控制联合仿真技术, 构建了主动控制仿真模型。仿真结果表明, 该平台共振峰处响应能够实现41 dB的衰减效果, 并在低于共振峰的频段内也有很好的抑制能力, 且圆形跟踪指向误差仅为2.19%, 证实所设计的隔振与指向一体化平台具有良好的隔振和指向能力, 对实际物理样机的制造具有理论指导意义。

关键词: 隔振与指向一体化; 微振动; 音圈电机; 空间光学载荷; ADAMS刚柔耦合

中图分类号: O328; TB115.7 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2025)02-0191-10

DOI: [10.12126/see.2024122](https://doi.org/10.12126/see.2024122)

Simulation study on the integrated platform for vibration isolation and pointing of large-scale space optical payloads

GUO Yilin, FENG Bo, ZHOU Jian*, XU Minglong
(School of Astronautics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To alleviate the impact of micro-vibrations on the pointing accuracy and imaging quality of large-scale space optical payloads, a lightweight, four-legged integrated platform for vibration isolation and pointing was designed. This platform, equipped with pitch and yaw adjustment functions, utilized voice coil motors to achieve both vibration isolation and precise pointing. Firstly, a simplified dynamic model of the platform was established. Dynamic control equations were then derived based on the PID control strategy, and the effects of centroid shift and control parameters on control performance were analyzed. Subsequently, a loaded integrated vibration isolation and pointing platform was designed. An active control simulation model was constructed using ADAMS rigid-flexible coupling and MATLAB/Simulink control joint simulation technology. Simulation results indicated that the platform could achieve a vibration attenuation effect of 41 dB at the resonance peak, with good suppression capabilities at frequencies below the resonance peak. Additionally, the circular tracking pointing error was only 2.19%. The platform confirmed its good vibration isolation and pointing capabilities. This research has theoretical guiding significance for the manufacturing of actual physical prototypes.

Keywords: vibration isolation and pointing integration; micro-vibration; voice coil motor; space optical payloads; ADAMS rigid-flexible coupling

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-04-06

引用格式: 郭怡琳, 冯勃, 周建, 等. 大型空间光学载荷隔振与指向一体化平台仿真研究[J]. 航天器环境工程, 2025, 42(2): 191-200

GUO Y L, FENG B, ZHOU J, et al. Simulation study on the integrated platform for vibration isolation and pointing of large-scale space optical payloads[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2025, 42(2): 191-200

0 引言

在执行空间光学载荷的目标跟踪任务时,通常需要对光学组件进行高精度、高稳定性和大范围的指向调节。然而,星体飞行器内部飞轮等工作产生的微振动会严重干扰光学载荷的跟踪瞄准精度。为减小微振动的影响,并确保大型光学载荷具备高精度的跟踪指向能力,必须将大型光学载荷安装在一个高度稳定且有极高指向精度的平台上。基于Gough-Stewart构型的多自由度并联机构具有指向控制精度高、容错能力强、结构稳定紧凑、位置误差不累积等特点^[1],已成为隔振、指向及隔振与指向一体化平台的首选构型^[2-8]。

现有研究主要围绕系统建模与控制策略展开:在动力学建模方面,提出了超静平台双解耦模型^[9]、整星柔性动力学模型^[10]以及考虑翼板柔性的姿态耦合模型^[11],为控制算法的设计提供了理论支撑;在控制方法层面,主被动复合隔振^[12]、频响函数微控制^[12]和姿态指向协同控制^[11]等策略的应用,显著提升了平台的振动抑制带宽与指向调节精度。此外,虚拟仿真技术的引入^[13-17]为机电系统的设计与控制验证提供了高效的工具,例如ADAMS与MATLAB/Simulink联合仿真技术已在Stewart平台动力学分析中展现出优势。

目前大多数研究集中在轻量级载荷(100 kg以下),而针对大型空间光学载荷(100 kg以上)的隔振与指向一体化平台的研究则相对较少。Du等通过电磁-压电复合作动器验证了Stewart平台对大型载荷的隔振性能^[18]。Tang等利用音圈电机结合模糊PID控制提升了系统鲁棒性^[19]。但传统六自由度平台结构复杂、质量惯性较大,难以满足航天器轻量化与高精度指向的双重需求。

考虑到音圈电机具有大位移、响应速度快和环境鲁棒性强等特点,其非常适合用于空间光学载荷的宽频隔振与指向调节。因此,为减轻航天器微振动对空间光学载荷指向精度的影响,并满足隔振与指向平台轻量化需求,本文提出了基于音圈电机的四支腿结构隔振与指向一体化平台设计。该平台具有俯仰和偏航调节功能(空间光学载荷主要关注这两个方向的控制),通过理论及仿真分析验证结构设计及控制系统的可行性,从而确保载荷能够在更稳定的平台上执行任务。

1 隔振与指向一体化平台理论分析

该二维隔振与指向一体化平台的技术指标要

求为:俯仰和偏航向频率约为2 Hz,指向调节范围为 $\pm 0.5^\circ$,跟踪指向误差小于3%。以满足小角度范围内高精度指向调节的需求。

1.1 基本原理

本文所设计的基于音圈电机的隔振与指向一体化平台结构如图1所示,包括负载平台、4条具有隔振与指向功能的支腿和下平台,为实现对俯仰和偏航两个方向的解耦控制,支腿的布置为:4条支腿位于同一圆周上呈 90° 间隔分布,其中第1、3支腿可完成俯仰方向的控制,第2、4支腿负责偏航方向的控制。单条支腿由1个驱动电机、2个柔性铰链及相应连接部件组成。

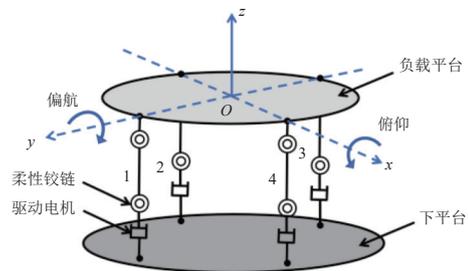


图1 隔振与指向一体化平台结构

Fig. 1 Structure of the vibration isolation and pointing integration platform

隔振与指向一体化平台融合主动隔振和指向控制功能,其基本原理是:测角传感器测得的俯仰角和偏航角传输到控制驱动器,由控制算法分别获得俯仰和偏航控制支腿上驱动电机的驱动电流,其中,第1、3支腿上驱动电流幅值相等、方向相反,第2、4支腿同样如此。这样,通过推拉的方式实现载荷平台的俯仰和偏航向的隔振和指向控制。

1.2 动力学模型

隔振与指向一体化平台采用解耦设计,偏航方向的动力学模型可以简化为图2所示的二自由度动力学系统。其中, k 代表单个支腿上的刚度, c 代表阻尼, f_a 代表电磁驱动力, θ_0 代表扰动输入角, θ 代表载荷的偏角。

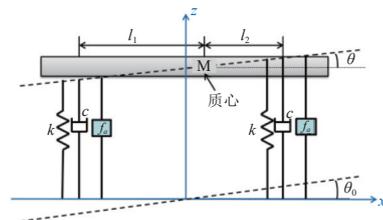


图2 二自由度动力学系统模型

Fig. 2 Model of 2-DOF dynamic system

设 l 为两支腿间距离的一半，偏心系数 $e \in (0,1)$ 为质心到载荷几何中心的距离与 l 的比值，则有 $l_1=l+el, l_2=l-el$ ，由此，可建立如下二自由度动力学方程：

$$J\ddot{\theta} = -2k\theta l^2(1+e^2) + 2k\theta_0 l^2 + 2kxle - 2c\dot{\theta} l^2(1+e^2) + 2c\dot{\theta}_0 l^2 + 2c\dot{x}le + 2lf_a; \quad (1)$$

$$m\ddot{x} = -2kx - 2c\dot{x} + 2k\theta el + 2c\dot{\theta} el. \quad (2)$$

定义状态变量： $y_1 = \dot{\theta}, y_2 = \dot{x}, y_3 = (1+e^2)\theta - \theta_0, y_4 = x, y_5 = \theta$ ，则方程可表达为状态空间的形式，即

$$\begin{cases} \dot{Y} = AY + BU \\ Z = CY + DU \end{cases}, \quad (3)$$

其中，

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{x} \\ (1+e^2)\theta - \theta_0 \\ x \\ \theta \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_0 \\ f_a \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} -2cl^2(1+e^2) & 2cle & -2kl^2 & 2kle & 0 \\ J & J & J & J & 0 \\ \frac{2cle}{m} & -2c & 0 & -2k & \frac{2kel}{m} \\ 1+e^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{2cl^2}{J} & \frac{2l}{J} \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

1.3 控制系统设计

本文采用 PID 控制器来实现对系统隔振和指向功能的控制，PID 控制器根据特定的数学模型进行控制，该模型可以表述为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4)$$

式中： $u(t)$ 是整个控制器的输出； $e(t)$ 是控制器的输入，其代表着给定值与被控机构实际输出之间的偏

差值； K_p 为控制器的比例增益； K_i 为控制器的积分增益； K_d 为控制器的微分增益。

则主动力的表达式可以表示为

$$f_a = -K_p [\theta(t) - \theta_r(t)] - K_i \int [\theta(t) - \theta_r(t)] dt - K_d \frac{d[\theta(t) - \theta_r(t)]}{dt}, \quad (5)$$

其中 $\theta_r(t)$ 为参考目标值。

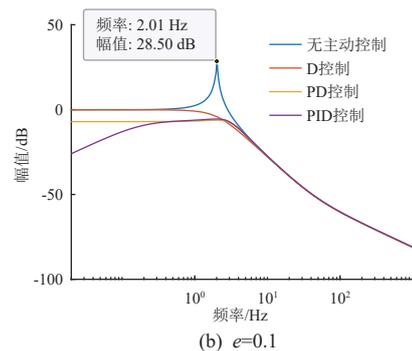
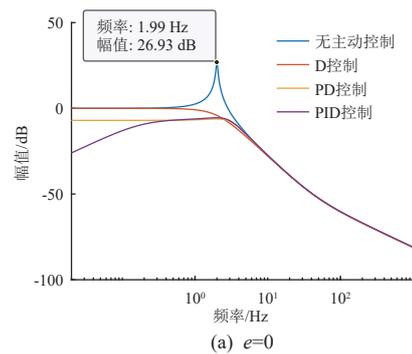
1.4 隔振和指向分析

1.4.1 隔振分析

在实施载荷隔振过程中，参考目标值设为 0，将式 (5) 代入式 (1)，对式 (1) 和式 (2) 进行拉氏变换，得到主动隔振控制下的下平台扰动角与载荷平台响应角之间的传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{\theta_0(s)} = \frac{(ms^2 + 2k + 2cs)(2cl^2 s^2 + 2kl^2 s)}{\{(ms^2 + 2k + 2cs)[Js^3 + 2cl^2 s^2(1+e^2) + 2kl^2 s(1+e^2) + 2l(K_p s + K_i + K_d s^2)] - (2kle + 2csle)^2\}}, \quad (6)$$

模型的系统参数为： $m=260 \text{ kg}, k=20 \text{ kN/m}, c=70 \text{ N}\cdot\text{s/m}, J=40.49 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ，在质心无偏和不同偏心系数条件下，分别采用 D、PD、PID 进行控制，得到的闭环传递幅频特性如图 3 所示。



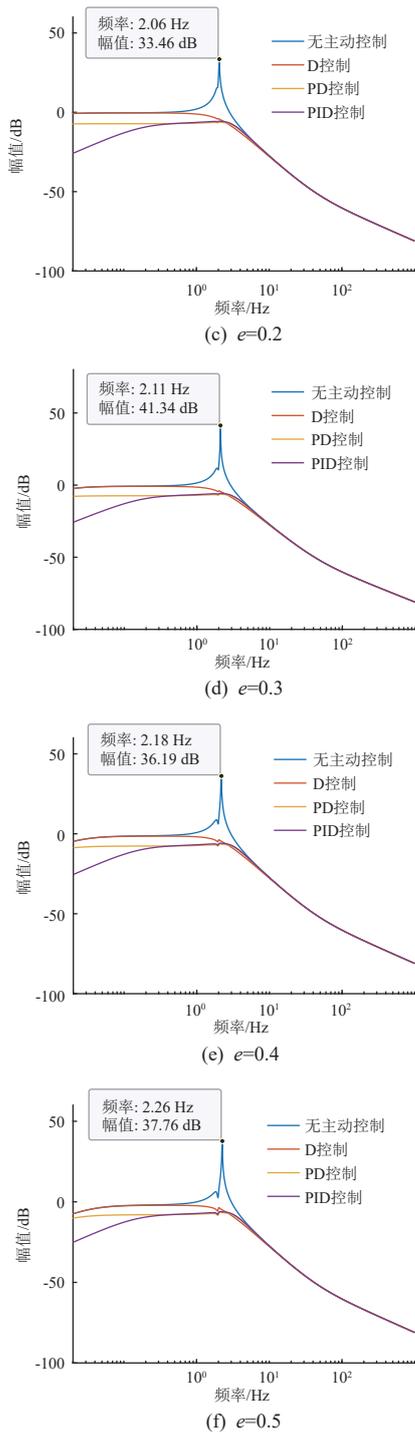


图 3 闭环传递幅频特性

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of closed-loop transmission

由图 3(a) 可知, 由于系统刚度较小而负载转动惯量较大, 导致隔振系统的转动频率较低, 因此, 在无主动控制参与的情况下, 该系统表现为被动隔振系统, 能够有效抑制高频振动, 但在基频处存在明显的峰值。引用 D 控制算法后, 基频附近的峰值减小, 体现了主动阻尼力的作用。进一步采用 PD 控

制算法, 不仅展现了阻尼效应, 还兼具刚度效应, 可以提升低频扰动的控制效果。采用 PID 控制算法后, 低频幅值进一步显著降低, 表明采用主动控制后, 能够对低频振动进行主动补偿和抑制, 在低频段展现更好的控制性能。此外, 由图 3 可知, 在质心偏离的情况下, 系统的频率虽有改变, 但 PID 控制效果并未受到明显影响, 说明 PID 控制具有很好的鲁棒性, 能够确保质心偏离几何中心时闭环隔振控制效果的稳定性。

1.4.2 指向分析

本文分析了 2 种情况下的指向控制性能: 一种是对定点指向 0° 、 0.5° 的精准控制, 另一种是在 0.1 Hz 频率下对正弦波形 $0.5 \times \sin(0.2\pi t)^\circ$ 的跟踪指向。为模拟实际工作环境, 激励端加载了基频下的正弦扰动信号 $5 \times \sin(4\pi t) \mu\text{rad}$, 分析了这 2 种指向在扰动情况下的跟踪效果。图 4~图 6 详细展示了载荷平台在定点指向及跟踪指向下的响应角控制效果和正弦指向误差, 其中最大正弦指向误差均约为 1.55%。由结果可知, 采用 PID 控制策略, 平台能够在有、无扰动情况下均实现对目标的高精度跟踪, 且其性能不受偏心的影响。

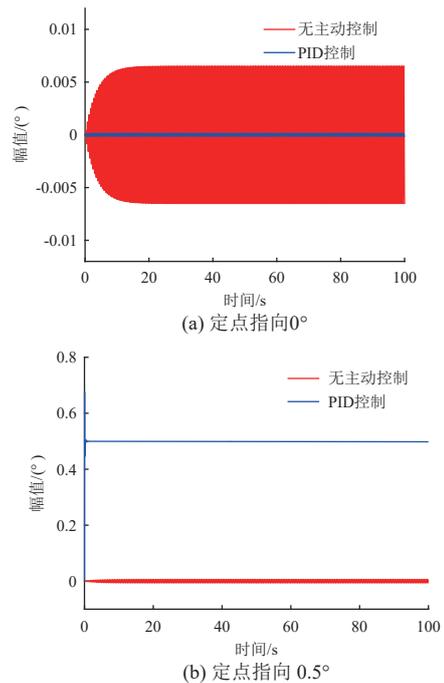


图 4 定点指向控制效果

Fig. 4 Control effect for the fixed pointing

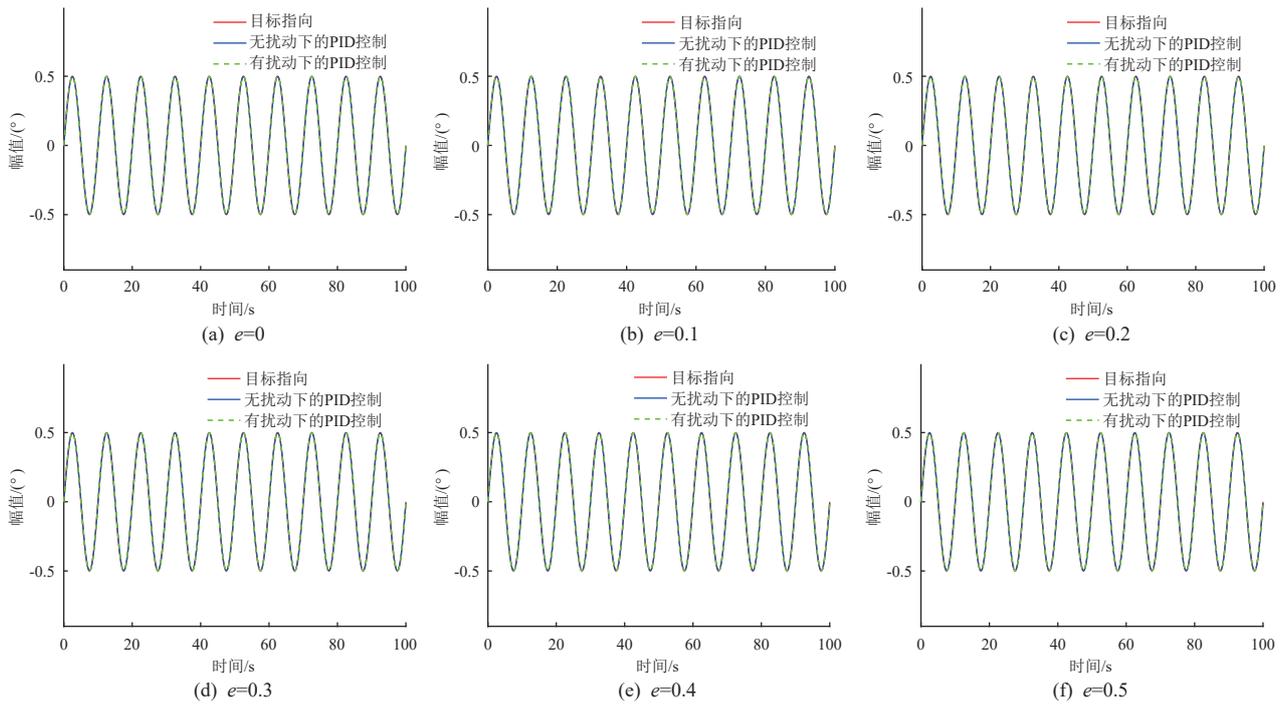


图 5 正弦指向控制效果

Fig. 5 Control effect for the sinusoidal pointing

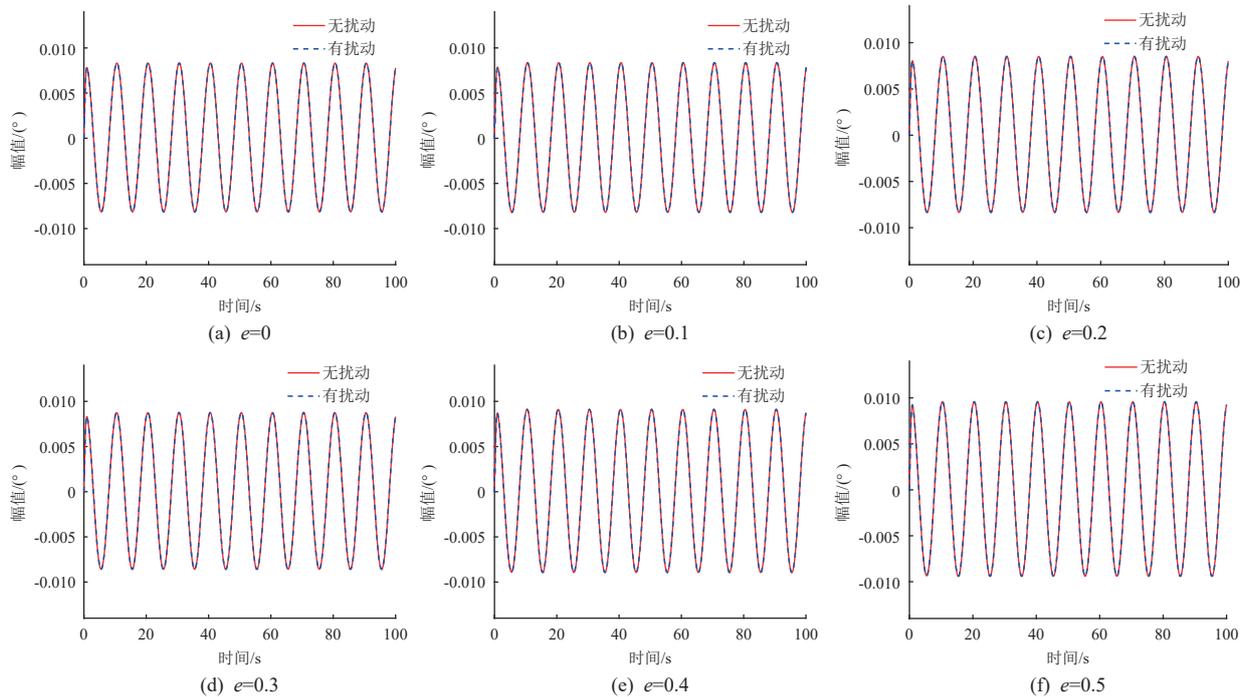


图 6 正弦指向误差

Fig. 6 Pointing error of sinusoidal pointing

2 ADAMS 和 MATLAB/Simulink 联合仿真

2.1 隔振与指向一体化平台设计

图 7 展示了所设计的带负载隔振与指向一体化平台的三维模型，其中模拟光学负载的模型参数如表 1 所示。单支腿的设计如图 8 所示，驱动电机

采用音圈电机及上下 2 个簧片结构，如图 9 所示。为保护负载及平台在发射阶段免受力学冲击，该隔振与指向一体化平台必须配备锁紧装置进行锁定。在卫星进入在轨运行状态后，锁紧装置需被解锁，以实现光学负载的隔振及高精度指向控制功能。

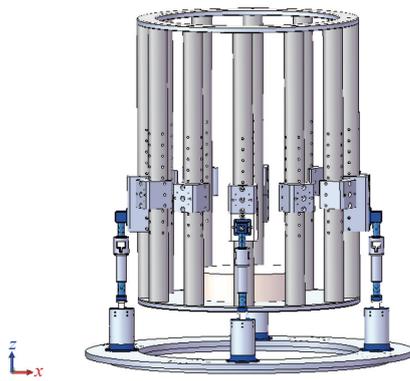


图 7 隔振与指向一体化平台模型

Fig. 7 Model of the integrated vibration isolation and pointing platform

表 1 光学负载模型参数

Table 1 Parameters of the optical load model

主要参数	量值
负载质量/kg	260
负载平台半径/m	0.40
质心距负载底板距离/mm	315.57
转动惯量 J_x /(kg·m ²)	40.49
转动惯量 J_y /(kg·m ²)	40.49
转动惯量 J_z /(kg·m ²)	22.26



图 8 单支腿模型

Fig. 8 Model of a single leg

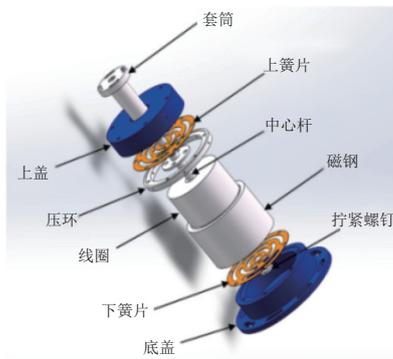


图 9 驱动电机模型

Fig. 9 Model of the drive motor

2.2 ADAMS 刚柔耦合建模

在 ADAMS 刚柔耦合建模的过程中,采用柔性体建模构建支腿部分,在保证机构运动的同时,能

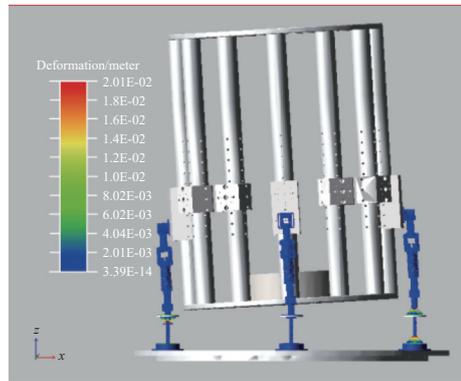
够检测簧片应力情况。载荷端所用的为直径 7 cm、长度 100 cm 的圆柱杆件,以及厚度为 2 cm、直径为 80 cm 的圆盘形厚板,与支腿部分尤其是簧片相比,载荷端的刚度显著更高,因此可以将其近似为刚体来处理。图 10 示出了在 ADAMS 中建立的隔振与指向一体化平台的刚柔耦合模型。



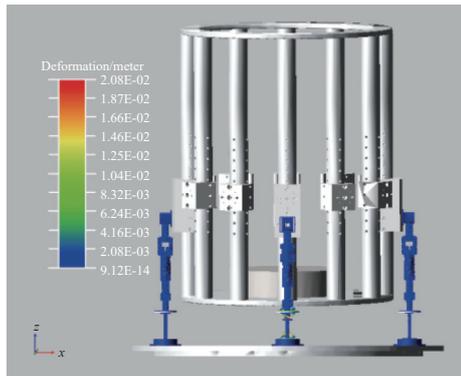
图 10 ADAMS 建立的隔振与指向一体化平台的刚柔耦合模型

Fig. 10 Rigid-flexible coupling model of integrated vibration isolation and pointing platform established by ADAMS

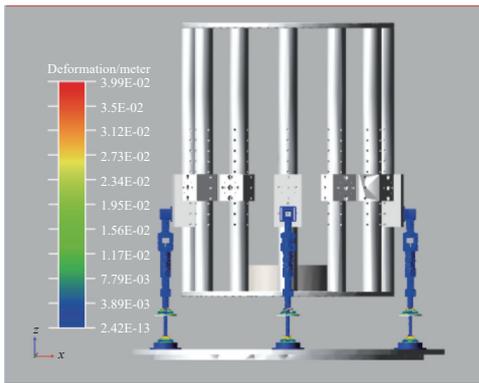
在下平台固支约束的情况下,利用 ADAMS 对隔振与指向一体化平台进行模态分析,如图 11 所示。其前三阶模态频率分别为 2.29 Hz、2.32 Hz 和 3.00 Hz,对应的模态振型分别为俯仰、偏航及轴向振动。



(a) 一阶模态: 2.2947 Hz



(b) 二阶模态: 2.3272 Hz



(c) 三阶模态: 2.9998 Hz

图 11 隔振与指向一体化平台的模态频率及振型

Fig. 11 Modal frequencies and vibration modes of the integrated vibration isolation and pointing platform

2.3 联合仿真

在 ADAMS 中建立了隔振与指向一体化平台的虚拟样机。为了实现对该虚拟样机的控制，需要在 MATLAB/Simulink 中搭建控制系统，定义相应的状态变量，以便与 ADAMS 进行数据传输。

在 ADAMS 中定义输入和输出状态变量，考虑到下平台需要施加角度扰振，因此，模型中的一个输入量为下平台的角度，角度激励施加在与 x 、 y 轴呈 45° 的方向上，从而确保俯仰和偏航方向都能够得到有效激励；另外 4 个输入状态量为作用在 4 个支腿上的驱动力，用于模拟音圈电机对 4 条支腿的电磁驱动力；输出方面，所需的输出量为负载质心所在平面的俯仰和偏航角，在模型中即绕 y 轴和 x 轴的转动角。综上所述，定义下平台的角度、4 个输入力和 2 个输出角共 7 个状态变量，并将状态变量分别与相应的角度驱动、作用力和角度测量进行关联。通过 ADAMS/Control 接口与 MATLAB/Simulink 进行连接，如图 12 所示。

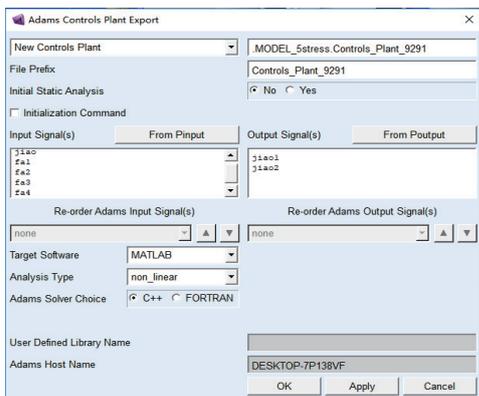


图 12 ADAMS/Control 接口

Fig. 12 ADAMS/Control interface

在 MATLAB/Simulink 中打开 ADAMS_sub 模块，如图 13 所示，左侧 5 个输入通道分别对应输入角和 4 条支腿的输入力，右侧 2 个输出通道分别为负载质心所在平面的俯仰和偏航角。加入控制模块后，搭建好的联合仿真流程如图 14 所示。

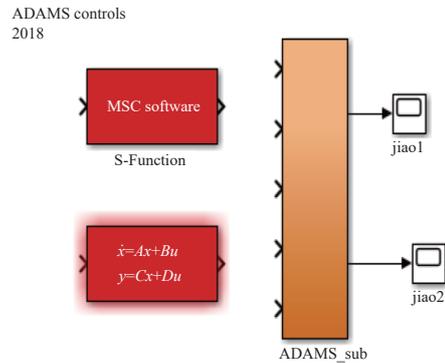


图 13 ADAMS_sub 模块

Fig. 13 Module of ADAMS_sub

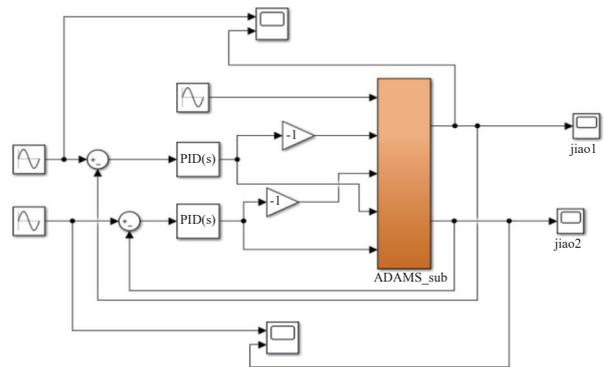
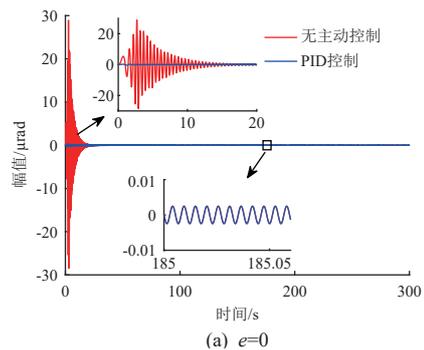


图 14 联合仿真 Simulink 流程

Fig. 14 Simulink flow chart of joint simulation

为验证 PID 控制策略在隔振与指向一体化平台中的效果，在 Simulink 环境中的第一个通道输入角度幅值恒为 $5 \mu\text{rad}$ 、频率范围为 $0.01 \sim 300 \text{ Hz}$ 的正弦扫频信号，扫频时间为 300 s ，仿真计算负载质心所在平面的俯仰角响应，得到无主动控制和 PID 控制情况下的时域仿真结果，如图 15 所示。



(a) $e=0$

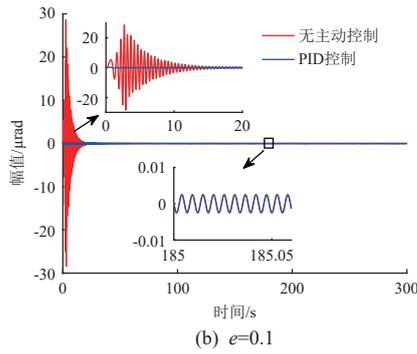


图 15 负载平台俯仰角时域响应

Fig. 15 Time-domain response of the pitch angle of the load platform

从图 15 中可以看出,在低频段,主动控制有效减小了负载端的俯仰角响应;而在高频段,主动控制与无主动控制响应基本一致,与图 3 频域结果相符。这主要是因为高频响应的抑制主要依靠被动控制,而主动控制主要针对低频段进行抑制。此外,主动控制可以使共振峰处的响应从 28.50 μrad 降低到 0.25 μrad ,降幅约为 41 dB。

指向控制仿真信号输入分两种:一种是俯仰角输入 0.5°的恒定指向信号;另一种是俯仰和偏航角均输入幅值为 0.5°、频率为 0.1 Hz,且俯仰和偏航两方向的相位差为 90°的正弦指向信号。图 16 和图 17 分别展示了有无扰动作用下,0.5°恒定指向控制的效果及指向误差。

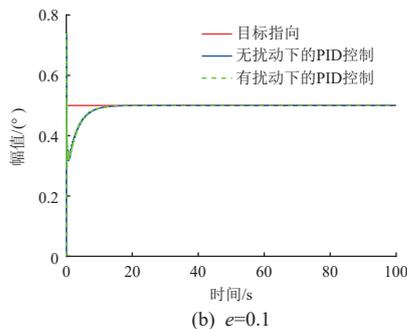
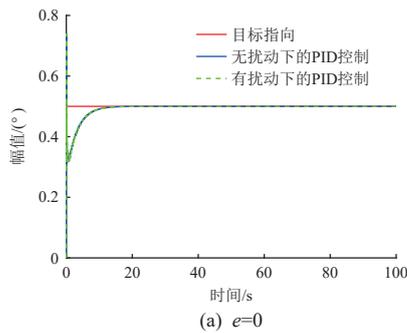


图 16 俯仰角 0.5°定值指向控制效果

Fig. 16 Control effect of fixed pointing with a pitch angle of 0.5°

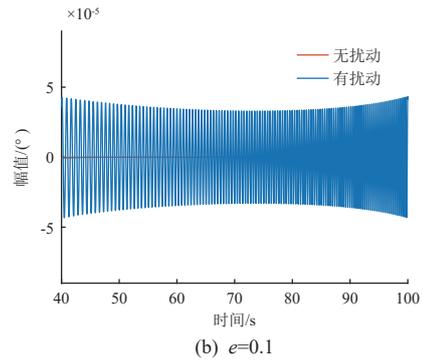
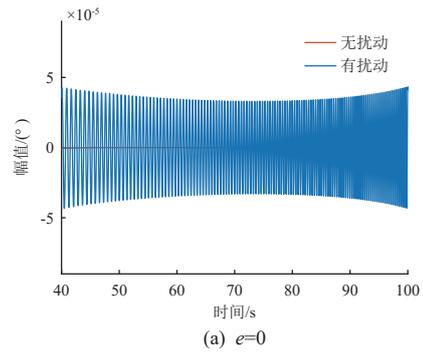


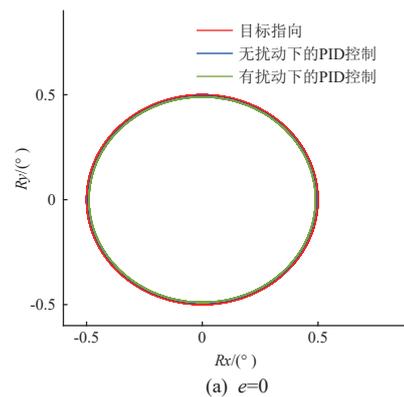
图 17 俯仰角 0.5°定值指向误差

Fig. 17 Fixed pointing error with a pitch angle of 0.5°

仿真结果表明,在扰动作用下,采用 PID 控制策略的平台,无论有无偏心,均能实现对俯仰角 0.5°定点指向的跟踪,且在有扰动影响下,将振动控制在 0.7 μrad 左右,实现了对指向过程中振动的有效抑制。

图 18 给出了圆形指向的跟踪效果:无扰动情况下,指向误差为 2.18%;有扰动情况下,指向误差为 2.19%。总的来说,本文提出的隔振与指向一体化平台在有无扰动情况下均能够满足指向调节范围为 $\pm 0.5^\circ$ 的要求,实现高精度的跟踪指向。

在联合仿真实验中,平台动态指向过程中,弹簧片应力幅值最大位置处的应力变化如图 19 所示。



(a) e=0

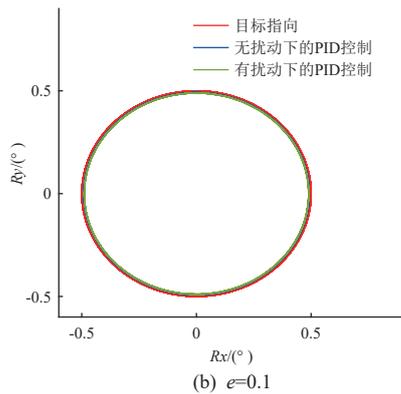


图 18 圆形指向控制效果

Fig. 18 Control effect of circular pointing

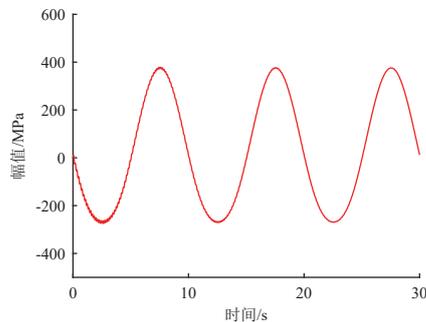


图 19 弹簧片定点处应力变化

Fig. 19 Stress variation at the fixed point of the spring sheet

监测结果显示, 弹簧片应力的最大值为 393 MPa。该隔振与指向一体化平台支腿中弹簧片材料为铍青铜, 其屈服强度为 1105 MPa, 安全系数为 2.8; 此时应力水平低于材料的许用应力, 从而保证了簧片的可靠性。

3 结论

本文设计了一种基于音圈电机的 4 支腿结构隔振与指向一体化平台, 具有俯仰和偏航调节功能; 建立了考虑质心偏离的理论分析模型, 设计了 PID 控制器。通过 ADAMS 和 MATLAB/Simulink 联合仿真技术搭建了隔振与指向一体化平台的主动控制的仿真模型。通过本文的研究, 获得以下主要结论:

1) 采用 D 控制时, 主要表现为主动阻尼力的作用; 采用 PD 控制时, 不仅表现出阻尼效应, 同时有刚度效应, 有效改善了低频扰动的控制效果; 而 PID 控制则进一步降低了低频幅值。

2) 在质心偏离的情况下, 系统频率虽发生改变, 但 PID 控制的效果并未受到显著影响, 证实了 PID 控制器具有较强的鲁棒性。

3) 应用设计的 PID 控制器使隔振与指向平台在基频处的响应减小了 41 dB, 在低于基频的频段内幅值也会降低; 无论有无扰动, 平台的圆形指向跟踪误差均小于 2.19%。

4) 利用 ADAMS 刚柔耦合和 MATLAB/Simulink 联合仿真技术, 不仅实现了隔振与指向一体化平台的设计及控制系统验证, 还能实时显示薄弱结构处的应力状态, 对实际物理样机的制造具有理论借鉴意义。

参考文献 (References)

- [1] 温正方. 大口径望远镜次镜调整机构的技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.
- [2] GENG Z J, HAYNES L S. Six degree-of-freedom active vibration control using the Stewart platforms[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1994, 2(1): 45-53.
- [3] JOSHI A, KIM W. Modeling and 6-DOF vibration reduction for a spacecraft with precision sensors[C]// Proceedings of the American Control Conference. IEEE, Denver, CO, USA, 2003, 2: 1122-1127.
- [4] LIN H, MCINROY J E. Disturbance attenuation in precise hexapod pointing using positive force feedback[J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(11): 1377-1386.
- [5] HANIEH A A, PREUMONT A. Multi-axis vibration isolation using different active techniques of frequency reduction[J]. Journal of Vibration and Control, 2011, 17(5): 759-768.
- [6] ANDERSON E H, FUMO J P, ERWIN R S. Satellite Ultraquiet Isolation Technology Experiment (SUITE)[C]// 2000 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT, USA, 2000, 4: 299-313.
- [7] ZHU G, WEI S M, ZHANG Y, LIAO Q Z. A novel geometric modeling and calculation method for forward displacement analysis of 6-3 Stewart platforms[J]. Mathematics, 2021, 9(4): 442.
- [8] THAYER D, CAMPBELL M, VAGNERS J. Six-axis vibration isolation system using soft actuators and multiple sensors[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2002, 39(2): 206-212.
- [9] 王有懿, 汤亮, 何英姿. 超静平台隔振与指向一体化控制方法[J]. 航天控制, 2016, 34(6): 33-39.
WANG Y Y, TANG L, HE Y Z. Integrated control method for vibration isolation and pointing control of ultra quiet platform[J]. Aerospace Control, 2016, 34(6): 33-39.

- [10] 徐广德, 田蕾, 邓凯文, 等. 基于主被动一体隔振与指向平台的柔性航天器高精高稳指向方法[J]. 航天器工程, 2019, 28(6): 15-23.
XU G D, TIAN L, DENG K W, et al. Method of flexible spacecraft high precision and stability pointing based on active-passive vibration isolation and pointing platform[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(6): 15-23.
- [11] 董艾雷, 吕亮亮, 蔡国平, 等. Stewart 平台卫星动力学建模与姿态指向一体化控制[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(6): 79-88.
DONG A L, LÜ L L, CAI G P, et al. Dynamics modeling and integrated attitude pointing control of a Stewart platform satellite[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(6): 79-88.
- [12] 秦超, 周洪海, 贺帅, 等. 微振动模拟与主被动隔振一体化实验平台[J]. 光学精密工程, 2024, 32(5): 694-703.
QIN C, ZHOU H H, HE S, et al. Integrated platform for micro-vibration simulation and active-passive vibration isolation[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(5): 694-703.
- [13] 王晓东, 毕开波, 周须峰. 基于 ADAMS 与 Simulink 的协同仿真技术及应用[J]. 计算机仿真, 2007, 24(4): 271-274.
WANG X D, BI K B, ZHOU X F. Technology and application of co-simulation based on Simulink & ADAMS[J]. Computer Simulation, 2007, 24(4): 271-274.
- [14] 黎海青, 郭百巍, 徐红. 基于 ADAMS 与 SIMULINK 的舵机虚拟样机建模和仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6886-6888.
LI H Q, GUO B W, XU H. Virtual prototype modeling and simulation analysis of servo based on ADAMS and SIMULINK[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(21): 6886-6888.
- [15] 陈勇军, 韩霄翰, 张炎, 等. 基于 ADAMS 与 Simulink 的六自由度摇摆台系统联合仿真研究[J]. 工程机械, 2021, 52(2): 59-66.
CHEN Y J, HAN X H, ZHANG Y, et al. Research on co-simulation of 6-DOF swaying platform system based on ADAMS and Simulink[J]. Construction Machinery and Equipment, 2021, 52(2): 59-66.
- [16] 焦健, 吴迎, 于开平. 基于 ADAMS 与 SIMULINK 的 Stewart 主动振动控制平台联合仿真[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(5): 234-238.
JIAO J, WU Y, YU K P. Cooperative simulation based on ADAMS and SIMULINK for a Stewart active vibration control platform[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(5): 234-238.
- [17] 刘兵, 王刚. 基于 ADAMS 与 Simulink 的 Stewart 平台仿真运动控制研究[C]//中国力学学会. 中国力学大会-2021+1 论文集(第二册), 2022: 10.
- [18] DU L F, LUO Y J, JI L W, et al. Comprehensive parametric model and decoupling design of a Stewart platform for a large spaceborne optical load[J]. Acta Astronautica. 2025, 226: 119-134.
- [19] TANG J, YANG Y, DOU C H, et al. Micro-vibration control of spaceborne payload with smart parallel struts[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2024, 31: 1-15.

(编辑: 冯露漪)

一作简介: 郭怡琳, 硕士研究生, 研究方向为空间载荷微振动控制。

*通信作者: 周 建, 副教授, 从事空间载荷微振动控制及高精指向等研究。