

文章编号 1004-924X(2026)17-2733-14

大型光学隔振平台视轴稳定性评定

杜一民^{1,2}, 许博谦^{1,2}, 高雁^{1,2}, 张春悦^{1,2}, 梁爽^{1*}

(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. 中国科学院空间光学系统在轨制造与集成重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为解决大型光学隔振系统机械通用隔振指标难以表征因平台弹性振动引发的视轴扰动问题,开展了视轴稳定性评定研究。首先,提出平台弹性振动是导致视轴扰动的主要因素,通过构建平台虚拟视轴模型,揭示了虚拟视轴扰动对光学测试的影响机理;再将视轴扰动分解为高频抖动与低频漂移,并实现二者的精确量化。然后,以某大型光学隔振系统为研究对象,建立了工程分析模型,详细分析了隔振系统的模态特性与平台虚拟视轴扰动随机响应特性,完成了视轴抖动量与漂移量的分析量化。仿真结果表明,隔振系统的第7阶一阶垂向弯曲模态与第11阶一阶扭转弯曲模态分别为视轴俯仰、偏摆方向扰动的主要贡献模态。最后,采用多点同步微振动测量方法进行测试。测试结果表明,俯仰、偏摆方向的视轴抖动RMS值分别为0.094 6, 0.160 nrad, 漂移RMS值分别为0.499, 0.870 nrad, 与仿真分析结果的最大相对误差不超过5%,验证了分析方法的可靠性。该研究对大型光学隔振平台视轴扰动调控具有重要的意义。

关键词: 光学隔振系统; 光学测试; 稳定性; 虚拟视轴; 视轴抖动; 视轴漂移

中图分类号: TH113.1; TB535.1 **文献标识码:** A

doi: 10.3724/OPE.20263417.2733 **CSTR:** 32169.14.OPE.20263417.2733

Evaluation of line-of-sight stability for large optical vibration isolation platforms

DU Yimin^{1,2}, XU Boqian^{1,2}, GAO Yan^{1,2}, ZHANG Chunyue^{1,2}, LIANG Shuang^{1*}

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

2. CAS Key Laboratory of On-orbit Manufacturing and Integration for Space Optics System, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: liangsh@ciomp.ac.cn

Abstract: To address the limitation of conventional mechanical vibration-isolation indices, which cannot effectively characterize elastic-vibration-induced line-of-sight (LOS) disturbances in large optical vibration-isolation systems, an LOS stability evaluation method for such platforms is proposed. Elastic vibration of the platform is identified as the primary source of LOS disturbance. A virtual LOS model is established to investigate the mechanism by which platform-induced LOS disturbances affect optical testing. The LOS disturbance is decomposed into high-frequency jitter and low-frequency drift, enabling accurate quantification of both components. An engineering analysis model is developed for an optical vibration-isolation plat-

收稿日期: 2026-07-08; 修订日期: 2026-07-30.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62305338)

form. The modal characteristics of the platform and the random response characteristics of the virtual LOS disturbance are analyzed in detail, thereby completing the evaluation and quantification of LOS jitter and drift. The results indicate that the seventh-order first vertical bending mode and the eleventh-order first torsional bending mode are the dominant contributors to LOS disturbances in the pitching and yawing directions, respectively. A multi-point synchronous micro-vibration measurement method is subsequently adopted for experimental validation. The measured RMS values of LOS jitter in the pitching and yawing directions are 0.094 6 nrad and 0.160 nrad, respectively, while the corresponding RMS drift values are 0.499 nrad and 0.870 nrad. The maximum relative error between the experimental and simulation results does not exceed 5%, demonstrating the reliability of the proposed analysis method. This approach provides a novel and effective framework for evaluating the stability of large optical vibration-isolation platforms and is of considerable significance for engineering applications.

Key words: optical vibration isolation system; optical testing; stability; virtual line-of-sight (LOS); LOS jitter; LOS drift

1 引言

在空间光学载荷元件制造、系统集成及地面测试等各个阶段,隔振系统作为承载光学系统的关键地面测试保障装置,其动态稳定性直接决定了光学元件或系统的测量精度。随着空间高分辨率观测需求的持续提升,光学载荷的口径与焦距不断扩展^[1-2],配套的光学隔振系统也随之向大型化、重载化方向发展。

目前,国内外在大型光学隔振系统领域已取得显著进展。美国洛克希德·马丁公司的 LOTIS 大型光学测试设施配备了长度为 25 m 的隔振系统,载重约为 110 t。该隔振系统通过 38 组气浮弹簧隔振器实现了 0.72~1.40 Hz 的超低固有频率,同时结合主动姿态闭环控制技术,将平行光管视轴抖动控制在 3 nrad 以内^[3]。针对詹姆斯·韦布空间望远镜的低温光学测试需求,Patterson、Buttaccio 等为美国约翰逊航天中心 Chamber A 设计了分体式独立隔振系统,其一阶固有频率低至 0.5 Hz,在大幅降低热负载质量的基础上,实现了对地基振动与舱内设备扰动的衰减^[4]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的 ZM5600 环境模拟装置配备 13.3 m×8.19 m×2.05 m 的气浮隔振系统,承载能力可达 32 t。该装置采用真空容器与隔振系统分立的技术路线,实现了真空舱体与隔振系统的机械结构解耦,显著提升了隔振系统的隔振性能。经测试,该隔振系统固有频率低于 1 Hz,在 1~100 Hz 频

段内,平台振动速度的有效值低于 1 $\mu\text{m/s}$ ^[5]。

固有频率与平台残余振动量是评价隔振系统性能的两大核心指标^[6-7]。固有频率决定了隔振系统的有效隔振频带宽度^[8-9],平台残余振动反映了扰动隔离后平台的稳态振动水平,是评判隔振系统稳定性的重要依据^[10-11]。在光学测试场景中,平台的稳定性与光学测试精度高度关联:平台受隔振系统未完全隔绝的残余微扰动激励产生微小的弹性形变,引发被测光学系统与测试设备产生相对位姿变化,造成视轴扰动,最终降低光学标定、干涉检测等各类光学实验的测试精度。小型隔振平台刚度大、整体结构性能优异,微变形可基本忽略,采用固有频率、残余振动等传统力学指标,即可有效表征其隔振性能。大型重载光学隔振平台的刚度低、结构柔性显著,在同等微扰动作用下产生更大的弹性形变,对光学视轴稳定性与测试精度的影响更为突出。因此,仅依托隔振系统固有频率、平台残余振动等传统力学指标,无法精准反映大型光学隔振系统适配光学测试的实际综合性能,传统隔振系统性能评价体系存在明显的应用局限性。目前,已有部分研究关注到平台弹性形变引发的光学测量系统视轴扰动^[12-13],但未深入揭示其对光学测试的影响机理,缺少视轴扰动对光学测试精度影响的系统性分析与量化,难以满足大口径光学载荷对平台稳定性的要求。

本文指出平台的弹性振动是引起光学系统视轴扰动的主要原因,构建了平台虚拟视轴

模型。从视轴扰动对光学成像的影响机理出发,将视轴扰动分解为抖动与漂移,并对二者进行量化。在此基础上,以某大型光学隔振系统为研究对象,建立工程分析模型,详细分析了平台虚拟视轴扰动特性,通过多点同步微振动测量方法对平台的视轴扰动进行评定。本研究提供了一种大型光学隔振平台稳定性评定方法,弥补了大型光学隔振系统研究工作中的不足。

2 原 理

2.1 隔振平台虚拟视轴扰动

隔振平台的振动响应可分为平台刚体振动与平台结构内部弹性振动。刚体振动表现为平台整体的平动与转动,是机械通用隔振系统性能评价的主要依据,但仅能表征隔振系统对外部振动扰动的整体抑制能力,无法体现平台内部微小弹性形变对光学测试的影响,难以表征高精度光学测试对平台稳定性的实际要求。弹性振动是平台结构的柔性相对运动,即在外部激励作用下,平台不同位置在振动频率、幅值与相位上的差异,这种空间分布上的振动响应差异直接导致安装于平台的测试设备与被测光学系统间的相对姿态扰动,进而引起光学测试系统的视轴扰动。综上,平台刚体振动指标难以全面、准确地评价光学隔振系统的综合性能。

在光学测试的典型布局中,测试设备与被测光学系统通常位于平台两端,光路贯通整个平台,两端点的局部角运动分别引起测试设备与被测光学系统的视轴指向变化,二者视轴指向的动态变化过程即为光学测试过程中的视轴角扰动。基于上述原理分析,构建了如图 1 所示的光学隔振平台虚拟视轴扰动模型。其中, A, B 两点为平

台两端的安装点,分别对应测试设备与被测光学系统的安装位置。为了剔除测试设备与光学系统自身固有特性对隔振平台稳定性评定的干扰,确保评定结果仅客观反映平台的固有属性,做出如下假设:测试设备与被测光学系统的视轴和平台局部区域呈刚性跟随关系,仅将平台的弹性变形转化为可量化的虚拟视轴角扰动指标。据此, A, B 两点角扰动 $\theta_A(t)$ 和 $\theta_B(t)$ 分别等效为测试设备与被测光学系统的视轴扰动量,由此可推导出平台虚拟视轴扰动量表达式为:

$$\theta(t) = \theta_A(t) - \theta_B(t). \quad (1)$$

虚拟视轴扰动 $\theta(t)$ 剔除了平台刚体位移干扰因素,直接表征平台两端(测试设备与被测光学系统安装位置)的相对角运动状态,其物理内涵与光学测试中测试设备、被测光学系统的视轴实际运动特性一致。

由于公式(1)基于平台局部区域角运动推导出,故其适用条件不依赖于隔振系统模态阶数与振型假设,且可同时适用于俯仰、偏摆两个运动方向,具备良好的通用性。

在工程测试领域,视轴角扰动 $\theta(t)$ 这类随机响应信号通常采用功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)进行量化描述,通过对 $\theta(t)$ 进行 Fourier 变换与功率谱估计,得到对应于 $\theta(t)$ 的 PSD 函数 $S_\theta(f)$,其物理意义为视轴角扰动信号 $\theta(t)$ 在单位频率范围内的能量分布情况。

2.2 隔振平台稳定性指标

隔振平台稳定性评定的本质是对虚拟视轴扰动进行精确量化与分析。虚拟视轴扰动由快速抖动分量与缓慢漂移分量叠加而成,二者对光学测试设备成像质量的影响形式与作用机理存在明显差异,需分别进行分析。

视轴抖动对应视轴扰动的高频分量,表现为光学测试设备探测器在单次曝光时间内的光斑弥散,导致成像模糊、分辨率降低,进而影响光学测试的精度。视轴漂移对应视轴扰动的低频分量,在探测器单次曝光时间内的位移量极小,对单帧图像的成像几乎无影响,主要影响探测器多次曝光图像间的配准精度,降低光学测试设备序列图像的分析效果。

综上,平台虚拟视轴抖动与漂移共同构成了光学隔振平台稳定性的核心评定指标。

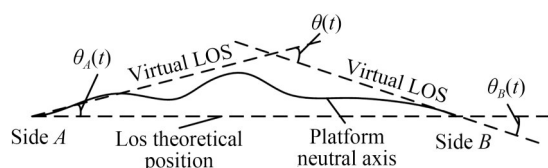


图 1 光学隔振平台虚拟视轴模型

Fig. 1 Virtual line-of-sight (LOS) model of optical vibration isolation platform (OVIP)

2.3 平台虚拟视轴抖动量评定

2.3.1 视轴抖动的定义

视轴抖动是指在探测器曝光时间内,视轴转角围绕其平均指向的快速随机波动,具有频率高、幅值小的特点,其数学表达式为:

$$\theta_{\text{jitter}}(t) = \theta(t) - \frac{1}{T_e} \int_{t_0}^{t_0+T_e} \theta(\tau) d\tau, \quad t \in [t_0, t_0 + T_e], \quad (2)$$

其中: $\theta_{\text{jitter}}(t)$ 为视轴瞬时抖动量, t_0 为探测器曝光开始时间, T_e 为探测器单帧曝光时间。转化为卷积形式为:

$$\theta_{\text{jitter}}(t) = \theta(t) - \theta \times w_{\text{jitter}}(t_0), \quad t \in [t_0, t_0 + T_e], \quad (3)$$

$$w_{\text{jitter}}(t_0) = \left[\frac{1}{T_e} \text{rect}\left(\frac{2t_0 - T_e}{2T_e}\right) \right], \quad (4)$$

其中:rect为矩形窗函数,即:

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1, & -\frac{1}{2} \leq x \leq \frac{1}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

由公式(3)可见,视轴抖动本质为虚拟视轴扰动未被低通滤波的高频残差,具有明显的高通特性。设单次曝光开始时间为 t ,视轴抖动的均方根 σ_{jitter} 表示为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{jitter}}^2(t) &= \frac{1}{T_e} \int_t^{t+T_e} [\theta_{\text{jitter}}(\tau)]^2 d\tau = \\ &= \frac{1}{T_e} \int_t^{t+T_e} [\theta(\tau) - \theta \times w_{\text{jitter}}(t)]^2 d\tau = \\ &= \theta^2 \times w_{\text{jitter}}(t) - [\theta \times w_{\text{jitter}}(t)]^2. \end{aligned} \quad (6)$$

2.3.2 视轴抖动量评定

在实际工程中,公式(6)所示的视轴抖动均方根值计算结果存在统计偶然性。针对这一局限性,求取 σ_{jitter} 的均值:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_{\text{jitter}}^2 &= E\left\{\theta^2 \times w_{\text{jitter}}(t) - [\theta \times w_{\text{jitter}}(t)]^2\right\} = \\ &= E[\theta^2 \times w_{\text{jitter}}(t)] - E\left\{[\theta \times w_{\text{jitter}}(t)]^2\right\} = \\ &= E[\theta^2(t)] - E\left\{[\theta \times w_{\text{jitter}}(t)]^2\right\} = \\ &= R_{\theta}(0) - R_{\theta \times w_{\text{jitter}}}(0), \end{aligned} \quad (7)$$

其中: $R_{\theta \times w_{\text{jitter}}}(\tau)$ 为 $\theta \times w_{\text{jitter}}(t)$ 的自相关函数, $R_{\theta}(\tau)$ 为 $\theta(t)$ 的自相关函数。

根据维纳-辛钦定理,对任意平稳随机过程 X, Y ,有:

$$R_{XY}(\tau) = \int_0^\infty S_{XY}(f) e^{2\pi j f \tau} df, \quad (8)$$

其中: $S_{XY}(f)$ 为 X, Y 间的互功率谱密度, $R_{XY}(\tau)$ 为 X, Y 间的互相关函数。

$$R_{\theta}(0) = \int_0^\infty S_{\theta}(f) df, \quad (9)$$

$$R_{\theta \times w_{\text{jitter}}}(0) = \int_0^\infty S_{\theta}(f) |W(f)|^2 df, \quad (10)$$

其中: $S_{\theta}(f)$ 为视轴角扰动 $\theta(t)$ 的PSD函数, $W(f)$ 是信号 $w_{\text{jitter}}(t)$ 的频率响应函数。

$$|W(f)|^2 = \frac{\sin^2(\pi f T_e)}{\pi^2 f^2 T_e^2} = \text{sinc}^2(\pi f T_e). \quad (11)$$

故视轴抖动的均方根值的均值为:

$$\bar{\sigma}_{\text{jitter}} = \sqrt{\int_0^\infty S_{\theta}(f) [1 - \text{sinc}^2(\pi f T_e)] df}. \quad (12)$$

2.3.3 视轴抖动量评定算法

结合工程实际采样特性,从时域离散计算与频域解析求解两条路径实现视轴抖动量化。

2.3.3.1 时域算法

设视轴角扰动经采样得到离散序列 θ_i ,探测器曝光时长内包含 k 个连续采样点。将公式(6)行离散化处理,则单次曝光视轴抖动的均方根 σ_{jitter} 表示为:

$$\sigma_{\text{jitter}} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\theta_i - \bar{\theta})^2}, \quad (13)$$

其中:

$$\bar{\theta} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \theta_i. \quad (14)$$

为削弱单次采样带来的统计随机性,提升结果稳定性,可对多组连续曝光窗口的抖动均方根取均值,以此作为最终视轴抖动评价结果。

2.3.3.2 频域算法

视轴抖动为视轴扰动信号经高通滤波后的高频分量。设虚拟视轴角扰动 θ_i 的功率谱密度为 $S_{\theta}[f_i]$,将公式(12)行离散化处理,则单次曝光视轴抖动的均方根值的均值为:

$$\bar{\sigma}_{\text{jitter}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N S_{\theta}[f_i] (f_i - f_{i-1}) [1 - \text{sinc}^2(\pi f_i T_e)]}. \quad (15)$$

2.4 平台虚拟视轴漂移量评定

2.4.1 视轴漂移的定义

视轴漂移是指在探测器两次曝光间隔时间

内视轴平均指向的偏移,可以表示为:

$$\theta_{\text{drift}}(t) = \frac{1}{T_e} \int_{t+T_\Delta}^{t+T_e+T_\Delta} \theta(\tau) d\tau - \frac{1}{T_e} \int_t^{t+T_e} \theta(\tau) d\tau, \quad (16)$$

其中: $\theta_{\text{drift}}(t)$ 为视轴漂移量, t 为探测器首次曝光时间点, T_Δ 为探测器曝光时间间隔。卷积转化得到:

$$\sigma_{\text{drift}}^2 = E[\theta_{\text{drift}}^2(t)] = E\left\{\left[\theta \times w_{\text{jitter}}(t+T_\Delta) - \theta \times w_{\text{jitter}}(t)\right]^2\right\} = 2E\left\{\left[\theta \times w_{\text{jitter}}(t)\right]^2\right\} - 2E\left[\theta \times w_{\text{jitter}}(t+T_\Delta) \times \theta \times w_{\text{jitter}}(t)\right] = 2R_{\theta \times w_{\text{jitter}}}(0) - 2R_{\theta \times w_{\text{jitter}}}(T_\Delta), \quad (18)$$

其中: $R_{\theta \times w_{\text{jitter}}}(\tau)$ 为 $\theta \times w_{\text{jitter}}(t)$ 的自相关函数。根据公式(8)维纳-辛钦定理, $R_{\theta \times w_{\text{jitter}}}(\tau)$ 可以表示为:

$$R_{\theta \times w_{\text{jitter}}}(\tau) = \int_0^\infty S_\theta(f) |W(f)|^2 e^{2\pi i f \tau} df. \quad (19)$$

将公式(19)代入公式(18)中,有:

$$\sigma_{\text{drift}} = \sqrt{2 \int_0^\infty S_\theta(f) |W(f)|^2 (1 - e^{i2\pi f T_\Delta}) df} = \sqrt{2 \int_0^\infty S_\theta(f) \sin^2(\pi f T_\Delta) df}. \quad (20)$$

2.4.3 视轴漂移量评定算法

视轴漂移表征相邻两次曝光之间视轴平均指向的缓慢偏移,同样采用时域离散算法与频域算法相结合的方式完成量化计算。

2.4.3.1 时域算法

设探测器相邻两次曝光的时间间隔内包含 m 个完整采样点,将公式(16)离散化,则视轴漂移离散计算表达式为:

$$\theta_{\text{drift}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1+m}^{k+m} \theta_i - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \theta_i. \quad (21)$$

对多组漂移样本计算均方根值,即可得到视轴漂移均方根指标。

2.4.3.2 频域算法

视轴漂移为视轴扰动信号经低通滤波后的低频缓变分量。将公式(20)行离散化处理,则视轴漂移均方根为:

$$\sigma_{\text{drift}} = 2 \sqrt{\sum_{i=1}^N S_\theta[f_i] (f_i - f_{i-1}) \sin^2(\pi f_i T_\Delta)}. \quad (22)$$

综上所述,虚拟视轴抖动与漂移量评定的时域算法无需频谱变换,逻辑简洁,运算高效,适合现场实测数据快速解算;频域算法直接从振动能量分布角度分离高频抖动分量,适用于有限元仿

$$\theta_{\text{drift}}(t) = \theta \times w_{\text{jitter}}(t+T_\Delta) - \theta \times w_{\text{jitter}}(t). \quad (17)$$

由公式(17)可见,视轴漂移本质上是视轴扰动的低通滤波,保留了视轴扰动中的低频缓变成分。

2.4.2 视轴漂移量评定

视轴漂移的均方根可以表示为:

真、频谱特征分析。该组算法针对光学测试设备测量特征设计,可精准区分虚拟视轴抖动与漂移两类扰动分量,实现大型光学隔振平台视轴稳定性的量化评定。

3 隔振平台虚拟视轴稳定性分析

为保障空间光学载荷的测试,对某大型光学隔振系统开展视轴稳定性分析,有限元模型如图2所示。系统整体由空气弹簧隔振器阵列、基台、支撑柱及平台四部分构成。隔振平台包含光学测试设备安装平台、实验载荷安装平台与基台。基台通过多组空气弹簧隔振器形成超静定支撑阵列,实现平台的振动隔离与自动调平。安装平台、支撑柱、基台共同构成典型大跨度柔性结构。

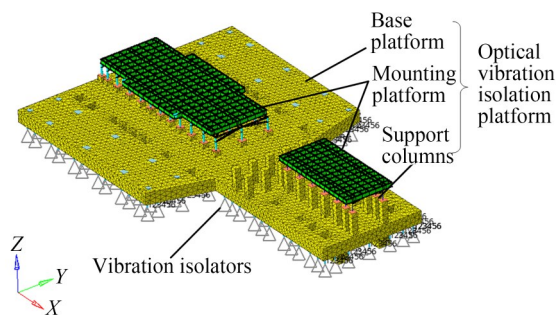


图2 光学隔振系统有限元模型

Fig. 2 Finite element model of vibration isolation system

有限元模型严格按照大型光学隔振系统的实际尺寸、布局进行建立,对隔振系统微小非承力结构进行简化,模型共计 84 303 个单元、134 897 个节点,可在不降低计算精度的前提下,

有效控制单元数量、提升仿真计算效率,符合大型装备有限元建模通用准则。基台采用实体单元网格,支撑柱与安装平台采用梁单元,实体单元与梁单元之间通过多点约束(Multi-point Constraint, MPC)实现力学连接,可有效传递结构弯扭变形,空气弹簧隔振器采用弹簧-阻尼组合单元等效模拟,表征隔振器的弹性支撑、阻尼耗能特性。平台采用多点分布式空气弹簧隔振器超静定支撑,严格按照现场隔振器布置点位、数量、安装高度设置支撑边界。

3.1 隔振系统模态特性

为确定造成视轴俯仰、偏摆扰动的主导模态,对隔振系统开展了模态分析。光学隔振系统的前6阶模态主要表现为平台的刚体模态。如表1所示,空气弹簧隔振器为平台提供弹性支撑,使平台在低频段呈现出典型的刚体模态特征,模态频率由隔振器阵列的支撑刚度与平台质量分布特性共同决定,反映了隔振系统的整体支撑情况,是评价隔振系统承载特性与动力学特性的重要指标。刚体模态对应的振型属于刚体振动,典型特征为隔振平台的整体刚体运动,即平台各位置的振动状态完全同步,体现了平台对外部振动激励的整体响应。

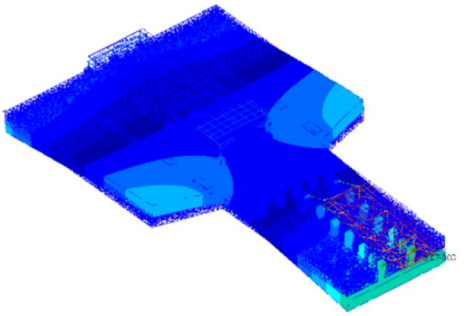
表 1 前六阶模态分析结果

Tab. 1 Modal analysis results of first six natural modes

Mode order	Frequency/Hz	Mode shape
1	0.851	Roll rocking
2	0.856	Pitch rocking
3	0.885	Vertical plunge
4	0.958	Pitch swinging
5	0.997	Yaw
6	1.054	Roll swinging

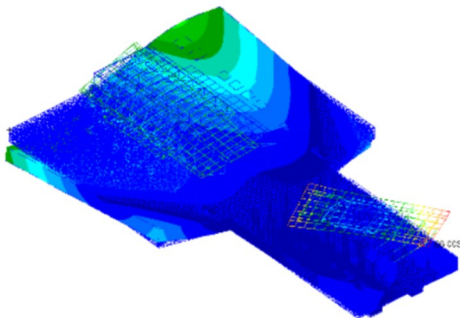
隔振系统的第7阶模态频率为4.67 Hz,模态类型表现为平台的弹性模态,且模态频率较前6阶模态有显著提升,表明平台具备良好的动态刚度与抗振特性。弹性模态对应的振型属于弹性振动,本质是平台结构的柔性相对运动,是引发光学测试视轴扰动的根本原因,图3显示了对平台虚拟视轴扰动影响最为显著的第7阶与第11阶弹性模态:第7阶为一阶垂向弯曲模态,是

视轴俯仰方向扰动的主要贡献模态;第11阶模态为一阶扭转弯曲模态,是视轴偏摆方向扰动的主要贡献模态。



(a) 第7阶模态(4.67 Hz)

(a) The 7th mode(4.67 Hz)



(b) 第11阶模态(6.73 Hz)

(b) The 11th model(6.73 Hz)

图3 光学隔振平台主要弯曲模态

Fig. 3 Bending modes of OVIP

3.2 虚拟视轴扰动随机响应分析

为了量化平台虚拟视轴抖动与漂移,进行了虚拟视轴扰动随机响应分析,为后续实验测试提供仿真对照。

3.2.1 隔振系统振动输入激励采集

对于隔振系统,100 Hz以上的高频激励幅值小、衰减快,且在结构传递过程中阻尼效应显著,对精密光学测试的影响一般可忽略不计。因此,工程实践中一般将分析频率的上限设定在100~110 Hz^[6,14]。本文在此基础上适当放宽频带,对128 Hz以下的振动扰动进行分析、测试。

如图4所示,为获取隔振系统的输入激励,在设备安装基础四角位置设置4个测点,选用941B

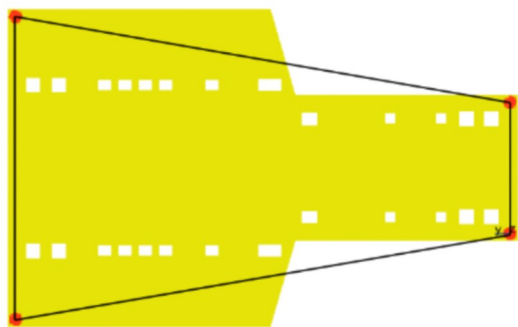


图 4 安装基础振动激励测点位置

Fig. 4 Vibration measurement points on mounting foundation

型超低频测振仪采集地脉动、建筑内设备及附近道路交通等振源引发的建筑基础振动激励信号,测振仪速度信号采集频率为 256 Hz,分辨率为 4×10^{-8} m/s。为了消除传感器基线偏移等因素引起的低频漂移,保留真实振动成分,采用截止频率为 0.1 Hz 的高通滤波器对采集的原始振动速度时程数据进行处理,并进行分段施加汉宁窗以抑制信号截断引起的频谱泄漏,再通过 FFT 变换计算得到隔振系统振动输入的 PSD 曲线。如表 2 所示,各测点在各方向上的 PSD 数据相对一致,故对每个方向上所有测点的 PSD 曲线进行平均处理,得到平均后的 PSD 曲线。

表 2 不同测点振动激励				
Tab. 2 Vibration excitation at each measuring point				
Vibration direction	Vibration velocity RMS/(mm·s ⁻¹)			
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4
X	0.004 53	0.004 42	0.004 60	0.004 50
Y	0.005 54	0.005 72	0.005 76	0.005 66
Z	0.011 3	0.011 1	0.011 3	0.011 5

为避免有限元仿真模态计算误差引起的系统频率响应畸变,同时保证低频段激励输入的准确性,采用带宽为 10 Hz 的矩形窗对 PSD 曲线中 5 Hz 以上频段进行平滑滤波处理。如图 5 所示,滤波后的 PSD 曲线与原始 PSD 的均方根(RMS)幅值基本一致,基本未改变激励信号的整体能量水平,能够表征光学隔振系统振动扰动的能量特性。

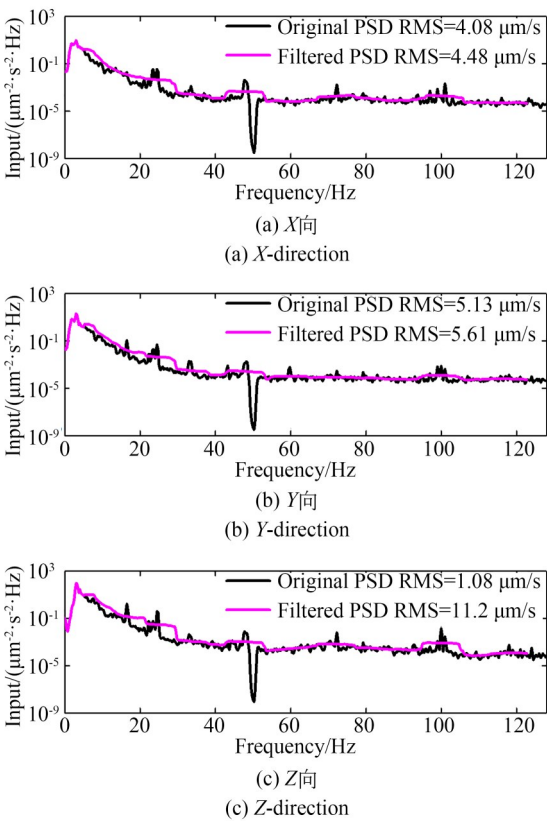


图 5 隔振系统激励输入

Fig. 5 Vibration input to OVIP

3. 2. 2 虚拟视轴扰动随机响应求解

有限元分析能够提取隔振平台两端 A 点、B 点位置的角振动响应,但虚拟视轴扰动无法由仿真软件直接获取。为完成视轴扰动的量化分析,需基于有限元仿真结果对虚拟视轴扰动的随机响应进行求解。

对于平稳随机过程,平台虚拟视轴角扰动的自相关函数可以表示为:

$$R_{\theta}(\tau)=E[\theta(t)\times \theta(t+\tau)]. \tag{23}$$

将公式(1)代入到公式(23)中并展开,利用期望运算的线性性质,可得:

$$R_{\theta}(\tau)=E\{[\theta_A(t)-\theta_B(t)][\theta_A(t+\tau)-\theta_B(t+\tau)]\}=R_{\theta_A}(\tau)-R_{\theta_A\theta_B}(\tau)-R_{\theta_B\theta_A}(\tau)+R_{\theta_B}(\tau), \tag{24}$$

其中: $R_{\theta_A}(\tau)$ 为 $\theta_A(t)$ 的自相关函数, $R_{\theta_B}(\tau)$ 为 $\theta_B(t)$ 的自相关函数, $R_{\theta_A\theta_B}(\tau)$ 为 $\theta_A(t)$ 与 $\theta_B(t)$ 的互相关函数, $R_{\theta_B\theta_A}(\tau)$ 为 $\theta_B(t)$ 与 $\theta_A(t)$ 的互相关函数。

根据维纳-辛钦定理,对任意平稳随机过程

X, Y 有:

$$S_{XY}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{XY}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau, \quad (25)$$

其中: $S_{XY}(f)$ 为 X, Y 间的互功率谱密度, $R_{XY}(\tau)$ 为 X, Y 间的互相关函数。

根据公式(25), 得到平台视轴角扰动的 PSD 函数:

$$S_{\theta}(f) = S_{\theta_A}(f) - S_{\theta_A\theta_B}(f) - S_{\theta_B\theta_A}(f) + S_{\theta_B}(f), \quad (26)$$

其中: $S_{\theta_A}(f), S_{\theta_B}(f)$ 分别为平台两端转角的功率谱密度; $S_{\theta_A\theta_B}(f), S_{\theta_B\theta_A}(f)$ 分别为平台两端转角的互功率谱密度。

对于实平稳随机过程, 互功率谱密度满足共轭对称关系:

$$S_{\theta_A\theta_B}(f) = S_{\theta_B\theta_A}^*(f). \quad (27)$$

因此得到:

$$S_{\theta_A\theta_B}(f) + S_{\theta_B\theta_A}(f) = 2\text{Re}[S_{\theta_A\theta_B}(f)]. \quad (28)$$

将公式(28)代入公式(26), 则平台视轴角扰动的功率谱密度为:

$$S_{\theta}(f) = S_{\theta_A}(f) + S_{\theta_B}(f) - 2\text{Re}[S_{\theta_A\theta_B}(f)]. \quad (29)$$

将隔振系统随机响应分析结果代入公式(29)即可直接求解虚拟视轴扰动的功率谱密度函数。

3.2.3 虚拟视轴扰动分析结果

基于 3.2.1 节获取的光学隔振系统振动输入的功率谱密度曲线, 开展随机响应分析, 将提取的平台两端 A 点、B 点位置的角振动响应仿真结果代入公式(29), 得到虚拟视轴角扰动响应的功率谱密度曲线, 如图 6 所示。响应曲线直观反映了虚拟视轴角扰动在俯仰与偏摆方向不同频率范围的能量分布特征, 明确了各阶模态对于视轴扰动的贡献程度。

由图 6(a) 所示的 PSD 响应曲线可知, 平台俯仰方向视轴扰动能量主峰集中于 4.67 Hz 频率区间, 对应第 7 阶一阶垂向弯曲弹性模态, 是俯仰方向视轴扰动的主要贡献来源, 贡献占比约为 64%, 隔振系统前 6 阶平台刚体模态的贡献占比仅为 3.8%。由图 6(b) 所示的 PSD 响应曲线可知, 平台偏摆方向视轴扰动能量峰值出现在 6.73 Hz 附近, 与隔振系统第 11 阶一阶扭转弯曲弹性模态一致, 是偏摆方向视轴扰动的主要贡献

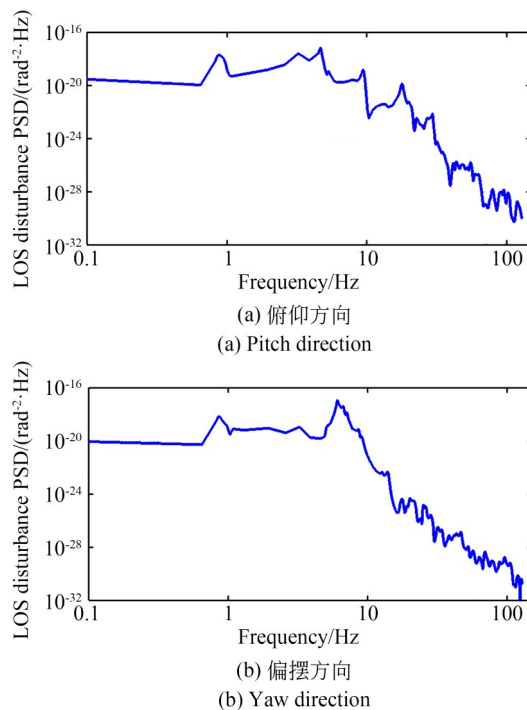


图 6 隔振平台虚拟视轴扰动响应

Fig. 6 Virtual LOS disturbance response of OVIP

来源, 贡献占比约为 72%, 隔振系统前 6 阶平台刚体模态的贡献占比不足 1%。

综上所述, 平台虚拟视轴扰动大部分能量集中于第 7, 11 阶弹性模态频率区间, 验证了弹性振动是光学隔振平台虚拟视轴扰动的主要来源; 前 6 阶刚体模态频率区间内, 视轴扰动能量水平较低, 说明以弹性振动控制为核心的传统机械隔振评价指标, 无法有效反映光学隔振平台的虚拟视轴扰动特性, 不适用于高精度大型光学隔振领域的性能评价。

3.2.4 视轴抖动与漂移分析

某型号光学测试设备探测器的曝光时间 T_e 为 5.7 ms, 两次曝光时间间隔 T_Δ 为 10 ms。基于以上参数, 将图 6 所示的平台虚拟视轴角扰动响应 PSD 曲线分别代入公式(15)与公式(22)进行计算, 得到平台虚拟视轴抖动与漂移的分析结果如表 3 所示。隔振平台虚拟视轴俯仰方向的抖动与漂移值分别为 0.099 3 nrad 和 0.500 nrad, 偏摆方向的抖动与漂移值分别为 0.161 nrad 和 0.975 nrad。

为进一步明确不同方向激励对平台虚拟视轴扰动的影响规律, 优化隔振系统性能、抑制视轴扰动提供精准的数据支撑, 分析了 X, Y, Z 3 个

表 3 平台视轴抖动与漂移分析结果

Tab. 3 Analysis results of LOS jitter and drift of OVIP (nrad)

LOS jitter RMS		LOS drift RMS	
Pitch	Yaw	Pitch	Yaw
0.099 3	0.161	0.500	0.875

方向激励分别作用下平台视轴抖动与漂移。如表 4 所示,不同方向激励对平台视轴抖动与漂移的影响存在差异:X 方向激励主要引发俯仰方向的视轴扰动,其俯仰抖动与漂移值分别为 0.047 6 nrad 和 0.262 nrad;Y 方向激励主要作用于视轴偏摆方向,偏摆方向的抖动与漂移值分别为 0.161 nrad 和 0.874 nrad;Z 方向激励对视轴俯仰方向的扰动最为明显,俯仰方向的抖动与漂移值分别为 0.087 1 nrad 和 0.426 nrad。

表 4 不同方向激励对平台视轴抖动与漂移

Tab. 4 Effects of vibration in different directions on LOS jitter and drift of OVIP (nrad)

Vibration direction	LOS jitter RMS		LOS drift RMS	
	Pitch	Yaw	Pitch	Yaw
X	0.047 6	0.001 52	0.262	0.009 19
Y	0.000 412	0.161	0.002 47	0.874
Z	0.087 1	0.004 84	0.426	0.029 3

4 平台虚拟视轴稳定性测试

气流扰动会改变光路内空气折射率,诱发波前畸变并引入未知测量误差,对长光程光学系统的检测精度影响显著^[15]。测试光路长达 40 m,气流干扰被进一步放大,致使光学测量结果可信度不足,无法作为有效实验依据。

4.1 多点同步微振动测量

为定量测量隔振平台虚拟视轴扰动,采用多点同步微振动测量方案对平台多点动态微振动响应进行同步监测。通过振动信号换算、运算处理实现视轴角扰动的求解,有效区分平台刚体振动与弹性形变引发的视轴扰动。

如图 7 所示,沿视轴方向,在平台两端各布置两组测振仪,共计 4 个测点。测试过程中,同步采集各测点微振动速度时程信号,隔振平台虚拟视

轴扰动角速度表达式为:

$$\omega_i = \omega_{A_i} - \omega_{B_i} = \frac{1}{L} [v_2[i] - v_1[i]] - \frac{1}{L} [v_4[i] - v_3[i]] = \frac{1}{L} [v_2[i] - v_1[i] + v_3[i] - v_4[i]], \quad (30)$$

其中: ω_i 为虚拟视轴扰动角速度信号, $v_1[i], v_2[i]$ 为平台 A 端两组测振仪采集的速度时程信号; $v_3[i], v_4[i]$ 为平台 B 端两组测振仪采集的速度时程信号, L 为两组测振仪的间距。公式(30)基于平台形变的几何关系推导得出,计算平台两端传感器速度信号的差值,可剔除平台刚体振动,保留弹性振动引发的平台内部相对运动,进而将其转化为平台虚拟视轴扰动。

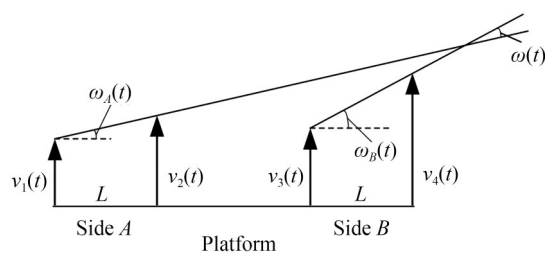


图 7 视轴扰动测量方法

Fig. 7 Measurement method of LOS disturbance

为最终获取轴角扰动信号,对求解得到的角速度时程信号进行数字积分运算:

$$\theta_i = \frac{1}{f} \sum_{j=1}^{j=i} \omega_i, \quad (31)$$

其中 f 为测振仪采样频率。

如图 8 所示,测试采用多组 941B 型超低频测



图 8 单个测点传感器布置

Fig. 8 Sensor layout of single measuring point

振仪采集平台振动信号,采样频率为 256 Hz,分辨率为 4×10^{-8} m/s。所有测点传感器信号实现全通道同步采集,通道间时间同步误差小于 $1 \mu\text{s}$,在振动测量中可忽略不计。同时,在测试前对测振仪进行校准,消除测振仪自身误差对测试结果的影响,确保视轴扰动测量数据的可靠性。

4.2 测量方法的正确性验证

为验证多点同步微振动测量方案的准确性与工程适用性,分别采用有限元仿真功率谱密度对比与光路自准直实测比两种方式开展双重验证,从理论仿真与物理实验两方面进行测量方法有效性校验。

4.2.1 基于 PSD 曲线的仿真对比验证

功率谱密度直接表征信号在不同频率下的能量分布。基于 3.2 节随机响应分析结果,提取平台 4 个测点的微振动速度 PSD 曲线,按照 4.1 节所述视轴扰动求解算法,直接提取平台 4 个测点微振动速度的自功率谱密度曲线 S_1, S_2, S_3, S_4 与互功率谱密度曲线 $S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{23}, S_{24}, S_{34}$, 得到虚拟视轴扰动角速度的功率谱密度为:

$$S_w(f) = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 +$$

$$2\text{Re}[S_{14} - S_{13} - S_{12} - S_{24} + S_{23} - S_{34}], \quad (32)$$

其中: $S_w(f)$ 为虚拟视轴扰动角速度的功率谱密度。将该推演曲线与 3.2 节视轴扰动 PSD 曲线对比,如图 9 所示。

为定量评判 PSD 曲线的吻合程度,对全频段数据开展量化分析,结果表明:俯仰与偏摆方向推演与仿真数据的相关系数分别为 0.998 715, 0.999 895, $p < 0.000 1$, 统计学显著性极强;两种视轴扰动角速度计算方法俯仰方向上的均方值分别为 $0.060 1 \mu\text{rad}$, $0.060 4 \mu\text{rad}$, 偏摆方向上的均方值分别为 $0.102 \mu\text{rad}$, $0.098 2 \mu\text{rad}$, 且两组曲线在幅值大小、变化趋势、频域特征上高度吻合,验证了多点同步微振动测量的有效性与准确性。

4.2.2 基于自准直光路的实测对比验证

自准直法是光学角度测量的经典手段,测量结果可作为真值参照。为了减小气流扰动对光学测量的影响,搭建了 3 m 短距离自准直测试光路作为基准测试系统,如图 10 所示。光路主要由自准直仪、平面反射镜组成,整体布置于台面上。在反射镜、自准直仪周边,沿光路方向布设 4 个测

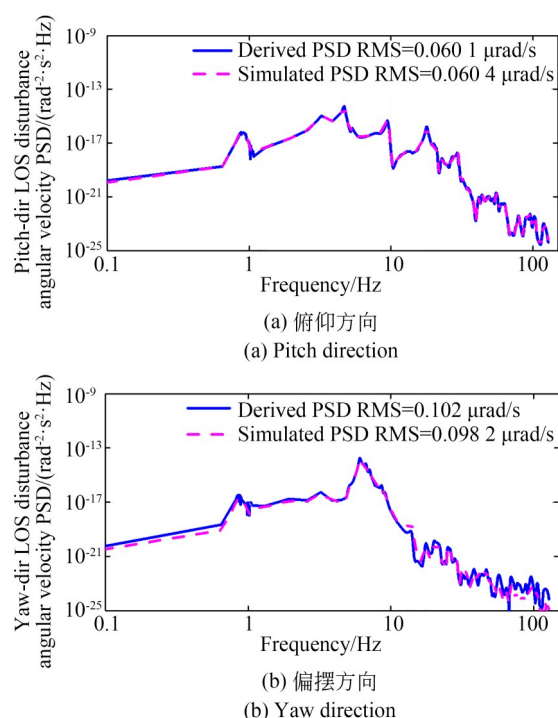


图 9 推演与仿真视轴扰动角速度 PSD 对比

Fig. 9 PSD comparison of LOS disturbance angular velocity between derived and simulation



图 10 自准直光路的实测对比验证

Fig. 10 Experimental verification using autocollimation optical path

点,形成光学基准测量与多点微振动同步测量两套并行测试系统,两套系统测点、光路均固定于同一台面,保证振动激励、环境条件完全一致。自准直仪采用昂科光电 Collapex 数字式光电自准直仪,分辨率为 $0.001''$,测量重复性小于 $0.03''$ 。

为抑制气流扰动与测振仪基线漂移引发的低频干扰,测量数据统一滤除 0.1 Hz 以下频率成分,处理后俯仰、偏摆两个方向的视轴扰动时域曲线如图 11 所示。多点测量与自准直仪测量的波形变化趋势基本吻合,扰动峰值时刻一一对应;俯仰方向两组结果时域均方根值依次为 0.614, 0.683 μrad , 偏摆方向分别为 0.959, 0.877 μrad , 两种测量方法视轴扰动的均方根值接近,幅值偏差在合理范围,仅个别瞬时尖峰位置存在小幅差别。

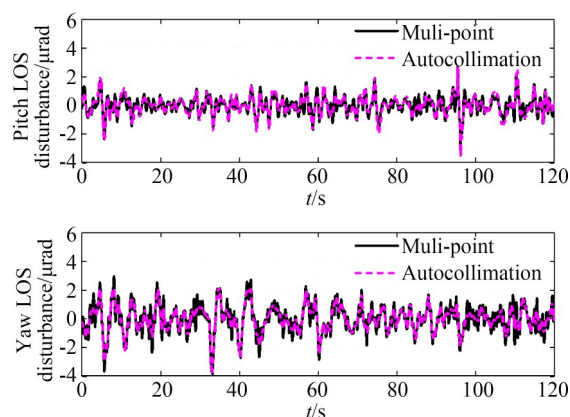


图 11 基于自准直光路的实测结果

Fig. 11 Test results using autocollimation optical path

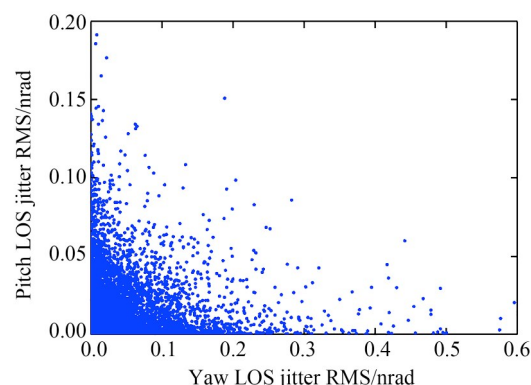
综上所述,结合 PSD 曲线的仿真与自准直光路的实测的对比验证结果,多点同步微振动测量方法求解视轴扰动的精度可靠,可有效替代长光路光学检测方法开展视轴稳定性测试。

4.3 视轴抖动与漂移测试结果

4.3.1 测试流程及结果

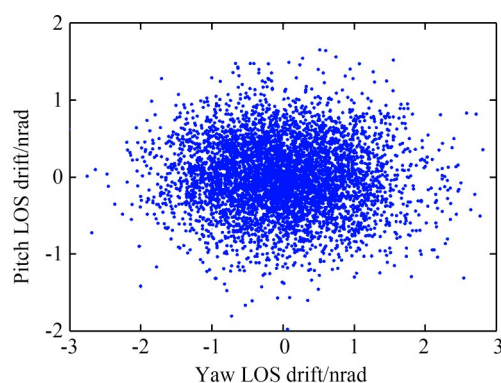
基于 4.1 节平台视轴扰动多点同步微振动测量方法开展光学隔振平台视轴扰动测试。将测振仪测得的速度时程信号代入公式(30),获得平台视轴角速度时域序列,再经公式(31)数值积分得到视轴角扰动原始时域曲线。将视轴角扰动时域数据分别按照曝光时间 T_e 与两次曝光时间间隔 T_Δ 进行分段,并分别代入公式(13)与公式(21),完成隔振平台虚拟视轴抖动与漂移的定量评价,最终得到图 12 所示的视轴抖动与漂移测试结果。

图 12(a)为单次测量视轴漂移的均方根分布,数据点集中于坐标原点周边,整体弥散范



(a) 抖动

(a) Jitter



(b) 漂移

(b) Drift

图 12 视轴抖动与漂移测试结果

Fig. 12 Test results of LOS jitter and drift

围较小,偏摆向扰动幅值明显大于俯仰向;图 12(b)为平台视轴漂移分布,相较于抖动,数据点分布区间明显拓宽,偏摆向的整体漂移程度同样高于俯仰向。图 12 直观反映出该光学隔振平台偏摆向视轴稳定性弱于俯仰向的特点,测试结果分布规律与仿真分析结果相吻合。

4.3.2 视轴抖动与漂移测量不确定度评定

为评估测量结果的可靠性,对视轴抖动与漂移的测试结果开展测量不确定度评定。

4.3.2.1 测量重复性引起的标准不确定度分量

基于贝塞尔公式,测量重复性引起俯仰与偏摆方向视轴抖动的标准不确定度分量分别为 $u_{1jp}=0.000\ 180\ \text{nrad}$, $u_{1jy}=0.000\ 789\ \text{nrad}$;测量重复性引起俯仰与漂移方向视轴漂移的标准不确定度分别为 $u_{1dp}=0.006\ 64\ \text{nrad}$, $u_{1dy}=0.011\ 5\ \text{nrad}$ 。

4.3.2.2 测振仪测量误差引起的标准不确定度分量

经校准,测振仪速度测量误差不大于2%,且误差服从均匀分布,包含因子为 $s=\sqrt{3}$ 。根据测振仪原始测量数据,竖直与水平垂轴方向振动速度最大的通道的RMS值分别为: $\sigma_{vz}=0.48\text{ }\mu\text{m/s}$, $\sigma_{vy}=0.881\text{ }\mu\text{m/s}$,以俯仰方向视轴抖动与漂移测量不确定度评定为例,计算单只测振仪竖直方向速度测量标准不确定度为:

$$u_{vz} = \frac{0.02\sigma_{vz}}{s} = 0.00554\text{ }\mu\text{m/s}. \quad (33)$$

根据公式(30)与公式(31),俯仰方向视轴角扰动测量的标准不确定度为:

$$u_{\theta p} = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial \theta}{\partial v_i} u_{vz} \right)^2} = \frac{2u_{vz}}{Lf}. \quad (34)$$

根据公式(13),测振仪测量误差引起俯仰方向的视轴抖动标准不确定度分别为:

$$u_{2jp} = \frac{u_{\theta p}}{\sqrt{k}} = \frac{2u_{vz}}{\sqrt{k}Lf} = 0.00833\text{ nrad}. \quad (35)$$

根据公式(21),测振仪测量误差引起俯仰方向的视轴漂移标准不确定度分量为:

$$u_{2dp} = \frac{2u_{\theta p}}{\sqrt{k}} = \frac{4u_{vz}}{\sqrt{k}Lf} = 0.0167\text{ nrad}. \quad (36)$$

同理,测振仪测量误差引起偏摆方向视轴抖动与漂移的标准不确定度分量分别为: $u_{2jy}=0.0153\text{ nrad}$, $u_{2dy}=0.0306\text{ nrad}$ 。

4.3.2.3 不确定度合成

由于测试重复性与测振仪测量误差引起的标准不确定度分量相互独立,合成标准不确定度的计算公式为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}, \quad (37)$$

其中: u_1 代表测量重复性引起的标准不确定度分量, u_2 代表测振仪测量误差引起的标准不确定度分量。

经过计算,俯仰与偏摆方向视轴抖动的标准不确定度分别为 $u_{cjp}=0.00833\text{ nrad}$, $u_{cjp}=0.0153\text{ nrad}$;俯仰与偏摆方向视轴漂移的标准不确定度分别为 $u_{cdp}=0.0180\text{ nrad}$, $u_{cdy}=0.0327\text{ nrad}$ 。视轴抖动与漂移的不确定度均处于较低水平,实验结果稳定性与可信度较高。

4.3.3 视轴抖动与漂移测试结果分析

俯仰、偏摆及合成方向视轴抖动与漂移的分析值和测量值如表5所示。由表可知,光学隔振平台虚拟视轴抖动与漂移的仿真分析与实验测量最大相对误差不超过5%(|仿真值-测试值|/测试值 $\times 100\%$)。误差主要来源于传感器的测量误差、环境微小振动干扰及数据处理过程中的微小偏差。整体来看仿真分析与实验测试结果数据一致性较好,整体处于可接受水平,验证了本文所建立的虚拟视轴模型及多点同步微振动测量方案的有效性与可靠性,同时也表明所提出的视轴扰动量化方法能够精准捕捉抖动与漂移特性,为大型光学隔振平台稳定性评定提供了可靠的测试数据支撑。

表5 仿真分析与测量结果对比

Tab. 5 Comparison of simulation analysis and test results (nrad)

Direction	LOS jitter RMS		LOS drift RMS	
	Simulation	Test	Simulation	Test
Pitch	0.0993	0.0946	0.500	0.499
Yaw	0.1610	0.1600	0.875	0.870
Combined	0.1890	0.1860	1.010	1.000

5 结 论

本文围绕大型光学隔振平台稳定性对光学测试的影响开展研究,从扰动机理分析、物理模型构建、分量解耦量化,到动力学仿真、实验验证,揭示了隔振平台弹性振动与视轴扰动的内在

关联,建立一套适用于大型光学隔振平台的稳定性评价方法。首先,明确平台的弹性振动是引起光学系统视轴扰动的主要因素。模态与随机响应分析表明:隔振系统前6阶平台刚体模态对视轴扰动的贡献占比不足4%;而第7阶4.67 Hz平台一阶垂向弯曲模态、第11阶6.73 Hz平台一阶

扭转弯曲模态分别主导俯仰、偏摆方向的视轴扰动,贡献占比分别达 64%,72%。由此证实,隔振平台的弹性振动是造成视轴指向偏差的核心因素,也印证了传统刚体振动类评价指标无法满足光学视轴稳定性评估要求。其次,构建平台虚拟视轴扰动模型,实现视轴抖动与漂移的分解及计算。建立了可有效剔除平台刚体振动干扰的虚拟视轴模型,通过分析视轴扰动对光学测试的影响机理,将视轴扰动分解为抖动与漂移,结合时域、频域算法完成量化计算。仿真得到俯仰、偏摆方向视轴抖动 RMS 值分别为 0.099 3,0.161 nrad,漂移 RMS 值分别为 0.500,0.875 nrad,形成了一套完整的视轴扰动量化评定方法。最后,提出多点同步微振动测量方法,完成工程实测与方法验证。该方法规避了长光路测试中气流扰动的影响,经仿真分析 PSD 曲线比对、自准直光路基准测试双重校验,测量方法可靠稳定。实测

隔振平台俯仰、偏摆方向的虚拟视轴抖动 RMS 值分别为 0.094 6,0.160 nrad,漂移 RMS 值分别为 0.499,0.870 nrad,仿真分析与实验测试的最大相对误差不超过 5% ($|\text{仿真值} - \text{测试值}| / \text{测试值} \times 100\%$),充分证明测量方法精度高、适用性强。

综上所述,隔振平台虚拟视轴扰动评定方法满足大型空间光学载荷高精度测试需求,可为大型光学隔振系统设计优化与性能验证提供参考。

作者贡献声明:

杜一民:方法提出,论文构思与撰写;
 许博谦:论文审核与编辑;
 高 雁:实验设计及数据整理与分析;
 张春悦:实验数据整理;
 梁 爽:论文指导与获取资助。

参考文献:

- [1] 许博谦,鞠国浩,高雁,等. 拼接式空间望远镜大范围高精度自动化共相调校[J]. 光学精密工程, 2025(9): 1353-1364.
 XU B Q, JU G H, GAO Y, *et al.* Automated co-phasing alignment for large-scale high-precision in segmented space telescopes[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025(9): 1353-1364. (in Chinese)
- [2] 朱邦坤,王锐,许博谦,等. 基于多层感知机神经网络的拼接式望远镜补偿校正[J]. 光学精密工程, 2026, 34(5): 816-829.
 ZHU B K, WANG K, XU B Q, *et al.* Compensation and correction of segmented telescopes based on multilayer perceptron neural network [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2026, 34(5): 816-829. (in Chinese)
- [3] BELL R, HUTCHINSON S B, BOROTA S. LOTIS facility successfully reaches initial operation capability[C]. *International Conference on Space Optics-ICSO 2010. October 4-8, 2010. Rhodes Island, Greece*. SPIE, 2019: 501.
- [4] PATTERSON K M, BUTTACCIO C L, PECK G D Jr. Johnson Space Center Vacuum Chamber A as a partial metering structure for the James Webb Space Telescope optical testing[J]. *Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy II*, 2006, 6271: 62710C.
- [5] WANG S, JIANG D, LIU L J. Engineering application of ZM5600 high precision optical imaging quality testing environment simulator[C]. *Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. November 5-7, 2020. Kunming, China*. SPIE, 2021: 127.
- [6] HE W F, XIAO C N, XU H, *et al.* Shaking table test on isolated Air-Floating Micro-Vibration Platform subjected to seismic excitation[J]. *Structures*, 2024, 64: 106505.
- [7] 孙俊东. 微振气浮平台设计与隔振性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2024.
 SUN J D. *Design of Micro-Vibration Air-Bearing Platform and Study on Isolation Performance* [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [8] 刘畅. 气浮式主动隔振平台刚度与阻尼特性研究[D]. 济南: 济南大学, 2025.
 LIU CH. *Study on Stiffness and Damping Characteristics of Air-Floating Active Vibration Isolation Platform* [D]. Jinan: University of Jinan, 2025. (in Chinese)
- [9] YANG S J, SUN X T, QIAN J W, *et al.* Design, optimization, and realization of a magnetic multi-layer quasi-zero-stiffness isolation platform supporting different loads[J]. *Materials*, 2025, 18(7): 1676.

- [10] 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 CH, ZHOU H H, HE SH, *et al.* Integrated platform for micro-vibration simulation and active-passive vibration isolation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(5): 694-703. (in Chinese)
- [11] 何柯达, 李青, 刘磊. 微振动主动隔离自适应复合控制方法[J]. 振动工程学报, 2026, 39(1): 1-10.
- HE K D, LI Q, LIU L. Adaptive compound control method for active isolation of micro-vibration[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2026, 39(1): 1-10. (in Chinese)
- [12] ZHAO H D, LI L P, PENG Q Y, *et al.* Model based forward design of six degrees of freedom vibration isolator for aviation optoelectronic platform[J]. *Optics Express*, 2025, 33(14): 29061.
- [13] GUO Y L, ZHOU J, GAO Z H, *et al.* Integrated design and experiment of a micro-vibration isolation and pointing platform for large space optical payloads based on voice coil motors [J]. *Sensors*, 2025, 25(4): 1179.
- [14] KUNCĖ J, JUREVIČIUS M. Research on vibration isolation systems used in laser and nanotechnologies [J]. *Science-Future of Lithuania*, 2012, 4(6): 559-563.
- [15] 徐抒岩, 张旭升, 范阔, 等. 大型光学系统波前检测中气流扰动的抑制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 80-89.
- XU SH Y, ZHANG X SH, FAN K, *et al.* Suppression of airflow turbulence in wavefront measurement for large-aperture optical systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 80-89. (in Chinese)

作者简介:



杜一民(1991—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,助理研究员,2015年于吉林大学获得学士学位,2018年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事空间光学遥感器结构与机构设计。E-mail: duyimin@ciomp.ac.cn

通讯作者:



梁爽(1979—),男,吉林省吉林市人,高级工程师,2011年于长春理工大学获得博士学位,主要从事精密测控技术与仪器的研究。E-mail: liangsh@ciomp.ac.cn