

激光与光电子学进展

大口径光学望远镜抖动测量与抑制技术研究进展

刘沅果^{1,2}, 杨飞^{1*}, 霍银龙^{1,2}, 朱嘉康^{1,2}, 宋雪松³¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;²中国科学院大学, 北京 100049;³一汽大众汽车有限公司质保部, 吉林 长春 130033

摘要 大口径光学望远镜在未来深空探测技术中具有重要发展意义,其性能提升将对光轴抖动的测量和抑制提出更高要求。本文对国内外有关抖动测量与抑制技术的研究文献进行了整理,涵盖了接触式和非接触式的测量方法,振源设备、传递途径和光学载荷的抑制技术,以及系统集成分析技术。总结了抖动测量与抑制的研究现状,指出目前研究多集中在局部实验或模拟,缺乏整体系统的解决方案,并提出集成分析方法结合测量与抑制技术将成为未来的研究热点。

关键词 抖动; 指向; 测量; 抑制; 集成仿真

中图分类号 TH743

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232677

Research Progress in Jitter Measurement and Suppression Technology for Large-Aperture Optical Telescopes

Liu Yuanguo^{1,2}, Yang Fei^{1*}, Huo Yinlong^{1,2}, Zhu Jiakang^{1,2}, Song Xuesong³¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³Quality Assurance Department, FAW-Volkswagen Automobile Co., Ltd., Changchun 130033, Jilin, China

Abstract Large-aperture optical telescopes are important for the development of the future deep-space detection technology, and their performance improvement will lead to higher requirements for the measurement and suppression of optical axis jitter. In this context, this article summarizes literature on jitter measurement and suppression techniques, published domestically and internationally, covering contact and noncontact measurement methods, suppression techniques for vibration source equipment, transmission pathways, and optical loads, and system integration analysis techniques. The analysis of the current research status regarding jitter measurement and suppression reveals that current research primarily focuses on local experiments or simulations, lacking a comprehensive system solution; hence, it is proposed that integrated analysis methods combined with measurement and suppression technology will become a future research hotspot.

Key words jitter; point to; measurement; suppression; integrated simulation

1 引言

抖动是指系统视轴位置随时间变化而与实际位置产生的偏差差经过修正后在焦面上的角位移量^[1],也是指向控制系统的近随机扰动的响应,一般用均方根(RMS)表示。望远镜系统在工作运行中会因外部环境和内部影响的振动、微振动和颤动而不可避免地产生

生抖动,导致望远镜的视轴发生偏离、光学传递函数下降,从而影响跟踪精度和长时间积分系统的成像质量。随着口径的不断增大、工况的愈加复杂、检测的动态范围更广,抖动的影响不断放大,观测位置和角度不同,获得的频率特性也不尽相同,其扰动源还可应用在统计误差预算中,以各元件的微分运动和转动轴运动的加权组合来估计,强调扰动对视轴偏离的影响。

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-01-19; 录用日期: 2024-01-26; 网络首发日期: 2024-02-20

基金项目: 吉林省科技发展计划项目资助(20230101008JC)、中国科学院青年创新促进会优秀会员(Y202053)、中国科学院国际伙伴计划(181722KYSB20200001)、国家自然科学基金(11973040)

通信作者: *yangflying@163.com

光学望远镜可分为地基望远镜和空间望远镜。地基望远镜抖动的主要原因包括系统跟踪时速度变化引起的颤动、太阳照射导致的热扰动、系统配平不完善引起的晃动、制冷等系统引入的额外振动、系统控制策略本身的误差,以及地基振动和风载干扰等多种因素。对于空间望远镜而言,随着空间任务对深空探测需求的增加,携带的载荷变得更加复杂。太阳帆板转动机构、动量轮与控制力矩陀螺、热变形扰动等因素引起的抖动将影响其指向和姿态控制精度。大口径望远镜的性能指标需要明确抖动规格,以进行后续测试,验证其是否满足需求^[2]。当抖动规格达到角秒级别时,应成为结构设计中的重要考虑因素;当达到毫角秒级别时,需要对系统架构进行设计,实施“从上到下”的测试计划;而在微角秒级别时,则需要在系统架构和设计、分析,以及测试方面应对重大挑战和风险。

不同的科研设备,根据其科学目标,对抖动的抑制有不同的需求。智利的南方天体物理研究望远镜(SOAR)给定抖动水平和垂直方向振幅RMS为0.1"。国际合作项目30 m望远镜(TMT)的研发重点关注了系统抖动的检测,通过在Keck望远镜的试验平台上利用高精度加速度计对观测站地面和部分区域的振动环境进行测试,为TMT提供了数据支持。测试数据表明,平台的振动主要集中在29.4 Hz附近,基座和地面水平方向的振幅RMS约为0.07 nm和0.4 nm,垂直方向约为1 nm和2 nm。太阳光学望远镜(SOT)是由美国和日本共同研制的,是世界上第一台星载可见光望远镜,用于观测太阳底层大气。该望远镜以CCD为反馈单元,通过压电式快速反射镜调整光线偏移,实现焦平面CCD探测器上的太阳图像曝光,望远镜稳定指向不超过0.09"。美国光通信望远镜实验室(OCTL)致力于确保其视轴不偏离大气等晕角,将抖动限制在1"以内。美国宇航局(NASA)和德国航空太空中心合作建造的平流层红外天文观测站(SOFIA)是目前全球最大、也是唯一一座机载红外望远镜,主要依靠陀螺仪抑制抖动。SOFIA面临的主要干扰来自机载上的平台,通过控制和指向系统实现稳像,在隔离壁与振动隔离系统之间采用特殊的气压闭合装置进行隔振。SOFIA中的精细视场导星模块(FFI)位于主光学系统的可见光焦面上,当该模块用于精细导星仪时,指向稳定度可达到0.035"。哈勃太空望远镜(HST)作为韦布空间望远镜(JWST)发射前世界上最出色的空间望远镜,采用了飞行器与望远镜相结合的自由飞行方式,在10 s至24 h的连续观测期间,对指向稳定的要求不超过0.007";相比之下,JWST对稳定性的要求更为严格,即不超过0.005"。HST采用低温冷却和含气涡轮机械技术进行在轨扰动测量,数据预测在突风和稳态运行时分别引起 2.7×10^{-2} "和 4.5×10^{-3} "的抖动均方根。日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)与国家信息和通信技术研究所(NICT)合作,利用激光通信终端

的跟踪特性和转换系数对一颗近地轨道通信卫星进行了角位移扰动测量^[3]。Burge^[4]在理论上分析了光学部件抖动对视轴稳定性的影响,并基于此提出了望远镜指向稳定性的需求,提出光学系统反射镜的固定安装方法并对结果进行了验证。Doyle^[5]研究了导致空间光学系统视轴抖动的原因,认为其主要是由于隔振器和光学载荷的耦合,并通过对试验数据的分析,提出了减少和抑制视轴抖动的几种方法。Genberg^[6]基于固有频率和振型,分析了抖动引起的系统刚体位移和光学镜面变形对于成像质量的影响,得到预期随机载荷下的视差响应以及每个模态贡献对总抖动的百分比,可用于指导大口径光学望远镜的结构设计。JWST中的抖动系统证明可以使用检测器位置的低阶多项式去趋势化,从而使数据接近光子极限^[7]。

相对于国外,我国在光学望远镜探测领域的发展相对滞后,特别是在轨观测时由于抖动效应导致的像质的变化方面。近几年来,国内部分学者在此领域做了相关研究,并取得了一定成果。目前,国内对此领域的研究主要集中在理论分析、地面实验,以及集成建模等方法上。孙中平等对“环境一号”卫星CCD探测器的成像质量进行了评价和分析,并与同期的Landsat TM卫星图像进行了比对分析,给出了“环境一号”图像质量的真实客观评价。李晓云等针对TDICCD卫星的像移对成像质量的影响进行了研究,建立了像移与调制传递函数之间的联系。胡晓斌等以IKONOS卫星图像为例,对卫星在轨微振动响应的图像仿真与光学载荷成像进行了研究分析。庞世伟等^[8]对某卫星进行仿真分析并试验验证了微振动传递动态特性,保证了相机视轴抖动频率处于敏感范围之外。西安应用光学研究所为改善抖动提出了一种用于光电瞄准的柔性平台设计方案,以取代传统的隔离机构和运动轴^[9]。李建聪等^[10-11]基于抖动与波前误差产生的相位噪声提出了对特定像差控制优化的策略。杨欣欣等^[12]分析了跟踪抖动对湍流大气传输远场光斑的影响。

国内在抖动方面的研究主要集中在子系统层面,包括对卫星结构响应的分析、对望远镜系统成像质量的评价和对控制系统闭环情况下的问题分析等。子系统仅解决局部问题,对全局优化以及子系统改进对整体设计的影响考虑不足。

2 抖动测量

2.1 接触式测量

抖动的测量以及数据采集需要选取高精度的测量工具。主要采用的工具包含陀螺仪、编码器、CCD图像传感器、惯性角度传感器和加速度计。

接触式测量主要依赖传感器检测,传感器测量通常采用高精度编码器和加速度计的方式。这两种方法各有优劣:编码器能够进行连续观测,而加速度计可在系统调试前期进行标定检测,并与电控系统结合,作为

主动吸振环节的反馈传感器。加速度计具有精度高、体积小、安装方便等优点,便于合理布置被测装置的位置,并能克服位移传感器的零点漂移等问题。一般采用三轴传感器测量稳态、抖动和瞬态时的加速度,并致力于体积质量更小的设计。

压电片的质量轻、体积小,可以贴在结构表面,几乎不会影响原有结构特性,同时可作为传感器和作动器。在测量时,将压电式加速度计支座与测量平台刚性固定在一起。当测量平台运动时,支座与测量平台以同一加速度运动,由于压电元件的压电效应,在它的两个表面上会产生交变电荷。当振动频率远低于传感器的固有频率时,此交变电荷与作用力成正比,即与平台的加速度成正比,这就是压电加速度计的测量原理。图 1 是在实验室小转台上建立的抖动测量系统,加速度计安装在小转台上,其敏感轴在转台方位轴的旋转平面内,且与旋转半径垂直。

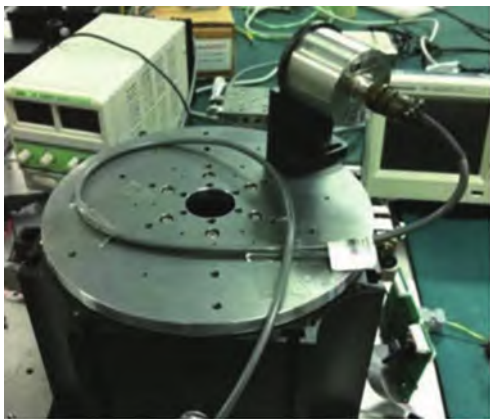


图 1 小转台抖动测量实验

Fig. 1 Jitter measurement experiment of small turntable

在高空分辨率望远镜低速稳定性与图像抖动问题的研究上,高分辨率位置编码器通常是一个非常有效的测试工具。随着高精度传感器设备的出现,天文学家对于望远镜系统的成像质量更加关注,分析低速跟踪天体目标过程中望远镜伺服系统在方位、俯仰两个方向上的位置抖动,并采用控制策略补偿的方法抑制低速抖动,成为目前提高观测目标成像质量的主要方法之一。而作为测试系统抖动的主要传感器,高分辨率位置编码器已被广泛应用于探测大口径望远镜系统的振动状态。

NASA 格伦研究中心研制了空间加速度测量系统(SAMS-II)与高级微重力加速度测量系统(AMAMS),欧空局也研制了一套 PAX 测量系统。目前,在空间领域成功应用的传感器包含磁流体效应角速度传感器(ARS)和流体旋转差动感应角位移传感器(ADS),这些传感器可靠性高、适应性强、耐冲击。我国主要采用石英挠性和压电振动加速度计,其具有体积小和精度高的优点。图 2 展示了长春光学精密机械与物理研究所的安其昌在 TMT 三镜原理演示验证

实验系统中,利用加速度计对抖动进行测量的情况。为了保证测量信号的频域特性,利用频域积分对位置抖动进行计算^[13],克服了时域积分对加速度计测量低频干扰信号放大作用的影响。

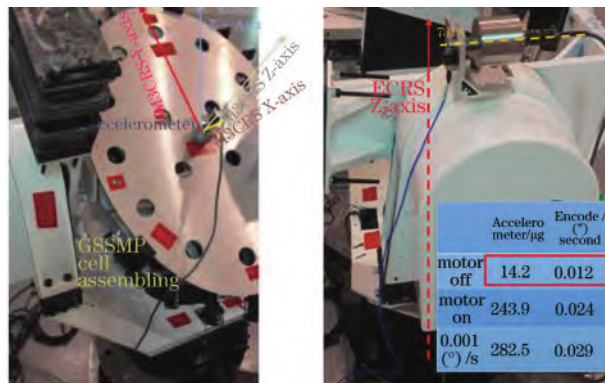


图 2 镜面方向测量与方位轴方向测量

Fig. 2 Mirror direction measurement and azimuth axis direction measurement

2.2 非接触式测量

北京卫星环境研究院利用激光测振仪,对系统模拟件进行了非接触式的测试,并对测试数据的结果进行了分析验证。激光测振发展至今,已经是一种比较成熟的、非接触式的测量技术。它的工作原理是通过多普勒频移和干涉来进行测量,优势在于它对被测目标的结构没有任何影响。但是,这种测量方法应用在太空中较困难,很难对装调好的望远镜内部结构进行测量,并且测点数量也不能太多。

北京空间机电研究所通过双矢量定姿原理对相机焦平面两端设置了激光收发装置,如图 3 所示。联立两台相机的参数就可以获得相机之间的夹角变化关系,通过中央棱镜进行视轴的实时抖动测量标定精度可达 $0.1''$ ^[14]。

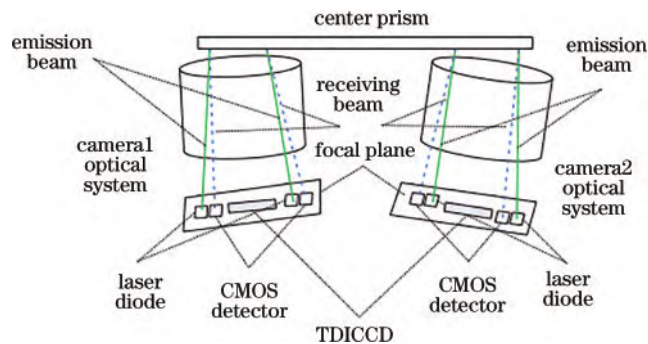


图 3 相机内外参数星上测量简图

Fig. 3 Diagram of on-board measurement of camera internal and external parameters

HST 基于光学技术进行在轨测量,其位姿精度可达毫米级,星上内含 3 个精密导向传感器(FGS)。FGS 可以基于星表数据进行精密的天文定位和高精度的位姿测定,利用固定目标进行干涉信息的探测,同

时还可以进行宽带的微振探测。将探测目标视为一个在惯性空间内的稳定源,目标的轻微抖动会导致其入射光向量发生细微的变化,从而导致其相干特征发生变化,再进行检测。

非接触式测量又分为相干法和非相干法两种。其中,相干法中最常用的有时间平均全息干涉法、激光散斑干涉法和外差干涉法等,非相干法中最常用的主要是激光三角法。时间平均全息干涉法对于以固定频率振动的目标,利用激光照射待测目标,然后利用全息干板来记录反射光和有参考光相干叠加形成的干涉图样。利用干涉图样的明暗分布解调获得待测目标测量点的信息,可以进行非接触测量,具有精度高、灵敏度高优点,但是由于要求待测目标具有固定振幅,且其不能实现实时性测量,在应用上具有一定局限性。而对于激光散斑干涉法,由激光器发出的光经分光片分为参考光和测量光,测量光经过被测物反射后与参考光干涉,由 CCD 记录。当待测目标发生振动时,CCD 记录的干涉条纹也会发生相应的变化,对干涉图样的变化进行解调处理就可以得到测量目标的信息,光路系统简单,可以通过非接触测量得到测量目标的振幅、速度、加速度等信息,检测距离远,且可进行遥感测量。但是该方法本身受待测目标的影响较大,测量结果对比度较低,而且仅适用于小幅度振动的目标。因此,激光散斑干涉法的应用也具有一定的局限性。外差干涉法基于多普勒效应,通过激光器发出的光经过分束镜分束成参考光和测量光,测量光到达待测目标后反射回来,参考光经过频移器到达反射镜再返回的过程中进行了频率调制,最终与测量光相干叠加

发生干涉,利用探测器记录被测物信息。该方法综合利用多普勒效应和外差干涉技术,具有测量精度高、响应速度快等优点,而且适用于电磁干扰、高温、高压等复杂环境下的测振,应用前景广阔。激光三角法利用由于待测目标振动变化在探测器中引起的位置数据变化,反推计算得到待测目标表面激光入射点的位置变化,从而完成振动的测量,具有成本低、结构简单等优点。但是其稳定性较差,待测目标的表面性质、光斑尺寸及反射角度等因素都会很大程度影响到测量精度。此外,激光三角法响应速度较慢,不适用于复杂的测量环境,在具体应用时有一定局限性。

3 抖动抑制

3.1 振源设备抑制

目前,主要应用的抖动抑制可以分为振源设备抑制、传递途径抑制和光学载荷抑制等 3 种技术。高性能要求的光学望远镜均采用 3 种技术中的一种或多种,如 HST 采用了振源抑制,SO FIA 采用了以上 3 种技术^[15]。

抑制抖动最根本的方法是从振源出发,无需引入额外的输入,因此对振源隔离是目前最常用的方法,广泛应用于航天航空领域。最先采用此方法的空间望远镜为 HST,隔振设计采取具有制造成本低、稳定可靠、维护方便等优点的被动隔离技术,此外还有主动隔离、主被动隔离与半主动隔离技术^[16]。该装置通过设计一套被动液体阻尼系统,将其安装在反作用飞轮和固定件之间,以实现隔振效果,具体结构如图 4 所示。

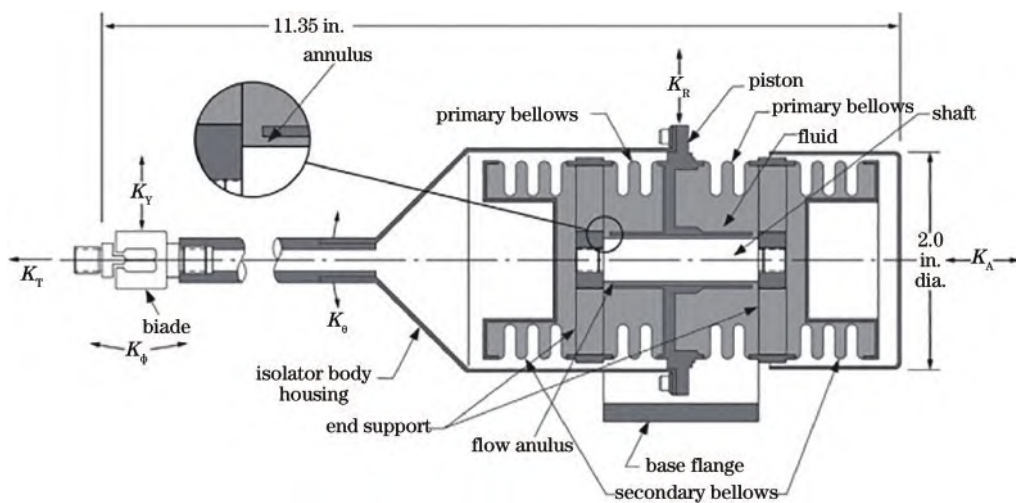


图 4 隔振装置中的阻尼器结构

Fig. 4 Damper structure in vibration isolation device

NASA 采用同样的技术方案发射了高级 X 射线天体物理学设备 (AXAF), JWST 为保证精度也对飞轮实施了隔振措施。Kamesh 等^[17-18]为反作用飞轮设计了一种十字形交叉折叠梁构成的隔振系统,结构如图 5 所示。采用压电片的粘贴方式对表面实施主动隔

振操作,获得了良好的隔振效果。

北京理工大学 Zhang 等^[19-22]针对反作用飞轮提出了吸振和隔振两种方法,并对隔振技术在航天器姿态控制中的应用效果进行了分析,组合系统示意图如图 6 所示。

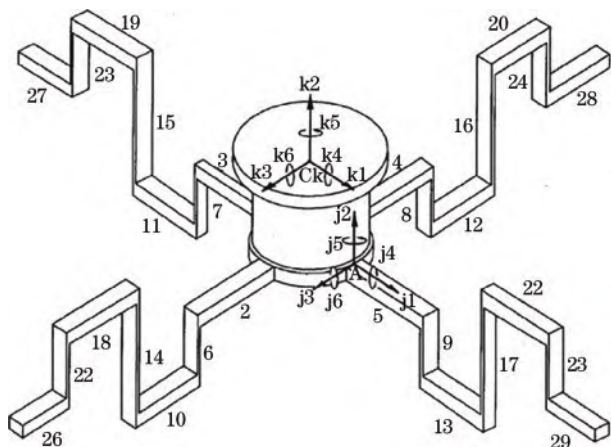


图 5 十字形隔振系统

Fig. 5 Cross vibration isolation system

国防科技大学 Luo 等^[23-24]基于反作用飞轮所引起的微振动试验结果,提出了反作用飞轮的抖动抑制方法,建立并分析了该隔振系统的理论模型和减振性能,如图 7 所示。周伟勇^[25]则从理论建模、数值模拟和地面试验三个角度对反射式飞轮的抖动抑制技术进行了系统和深入的研究。

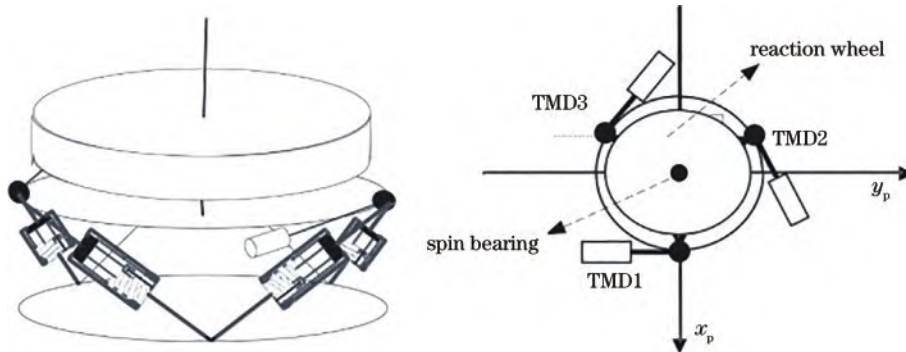


图 6 组合系统示意图

Fig. 6 Schematic diagrams of combined system

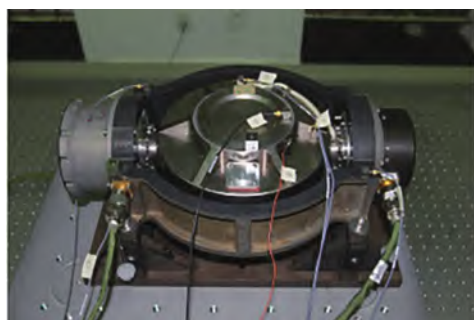


图 7 反作用飞轮及内部抖动示意图

Fig. 7 Reaction flywheel and internal jitter diagram

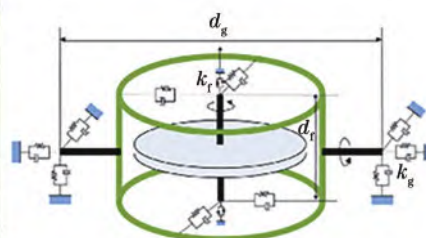
3.3 光学载荷抑制

光学载荷抖动抑制可以划分为两种方式:一种是对光学载荷及其附属设备进行整体抑制,另一种是单独对敏感载荷抑制。两者相比,前者不对总体设计造成影响,而后的抑制对象仅针对光学系统,虽然可以

3.2 传递途径抑制

扰动源产生抖动通过部件传递给光学系统上的载荷,要降低其造成的影响需要改变部件结构从而得到优化后的传递函数。主要方法有:1)优化扰动源和光学载荷的安装位置,理论上位置需要精准定位到两者耦合作用最小的地方。然而,在实际操作中,由于整体设计采用了模块化分工,这使得实施这些更改变得非常困难。2)对部分结构重新设计,通过改变局部构造,获得优化后的模态及频响特性,减小光机与扰动因素之间的耦合。3)采用约束阻尼材料,诺斯罗普格鲁曼公司的航空航天系统实验室在主镜背面利用约束阻尼材料来减小和抑制抖动幅值。4)增添主动耗能元件,在能量传递路径上增添主动耗能元件,减小抖动的负面影响。“太极计划”中因为卫星抖动引起的光程倾斜耦合噪声可采取角度敏感器进行角度信号测量,搭建地基激光抖动抑制系统分析系统反馈控制能力,可有效抑制传输系统中的光束抖动^[26-27]。

美国海军研究生院对拼接望远镜(SMT)上的每块子镜增添了调谐质量阻尼器以抑制抖动^[28],拼接结构如图 8 所示。



设计更小的体积,但往往会影响整体的结构设计,故第一种应用较为常见。JWST 采用的是由石墨制成、表面粘贴约束阻尼橡胶的隔振器,其中的隔离杆属于光学载荷控制中的一环,如图 9 所示,光学载荷设施整体被设置为主要抑制措施,隔振频率达到 1 Hz^[29]。

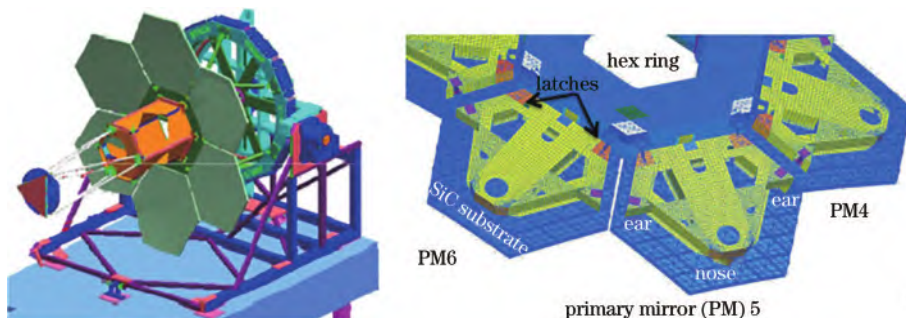


图 8 SMT 拼接及支撑结构

Fig. 8 SMT splicing and support structure

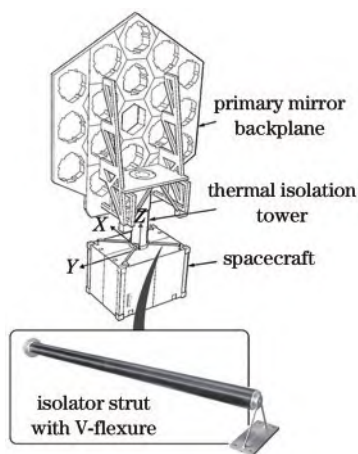


图 9 航天器总线中的隔离杆

Fig. 9 Isolation rod in the spacecraft bus

NASA 承担的空间干涉仪任务(SIM)也采用了石墨隔振器,但布局方式不太相同,整体隔振频率达到 5 Hz。类地行星发现者作为 SIM 计划的延续,也采用了整体抑制,同时利用非接触式主动隔振与被动两级隔振技术。反作用飞轮与光学载荷的隔振频率分别为

2 Hz 和 0.75 Hz。美国海军研究生院的飞船研究设计中心研制出超静平台(UQP)和精密指向平台(PPH)如图 10 所示,由安装在光学载荷上的传感器直接测试姿态,扰动量在动态跟踪中可降低 20 dB。在抖动抑制系统的开发中,通常需要对整体构型和隔振杆进行优化设计,但对于隔振系统的优化和解耦分析方面的研究较少。表 1 综合考虑了振源设备、传递途径和光学载荷等 3 个方面,针对不同的平台,对它们的优势和抑制方法进行了总结和归纳。

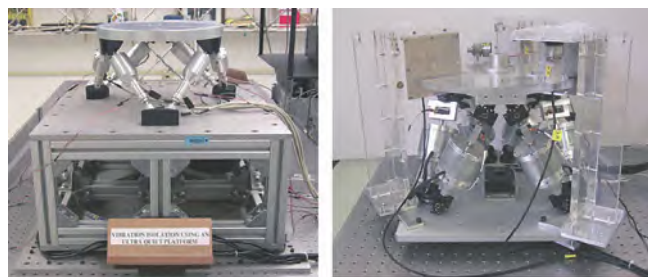


图 10 超静平台和精密指向平台

Fig. 10 Static platform and precision pointing platform

表 1 抖动抑制技术

Table 1 Jitter suppression techniques

Platform	Advantage	Suppression method
HST, AXAF, JWST, SOFIA	Low manufacturing cost, stable and reliable, easy maintenance, no additional input	The vibration isolation system is designed and measures are taken to isolate the vibration source
SMT, SOFIA	The jitter in the delivery path is avoided or reduced	Optimize part of the structure; Using restraint materials; Additional energy dissipating element
JWST, SIM, UQP-PPH, SOFIA	It is suitable for cases where the disturbance input is more complex and the direction and frequency components are more	The optical load and its accessory equipment are suppressed as a whole or the sensitive load is suppressed separately

为了减小抖动对成像质量的影响,还可对大口径光学望远镜采取稳像措施。常见的稳像技术包括微振动抑制、姿态控制和快摆镜技术^[30]。由于扰动频率可达上千赫兹,相较于姿态控制和快摆镜技术在高频段区域控制带宽不足的缺点,微振动抑制技术针对高频扰动有着很好的效果。

目前关于抖动的地面模拟技术,一般采用真实扰

源如控制力矩陀螺和反作用力飞轮等。由于微振动会在光学有效载荷系统中引起抖动问题,因此迫切需要预测其在轨运行期间对成像性能的影响。然而考虑到昂贵的成本条件和安全因素,需要寻找其替代品,而这些替代方案与实际干扰源相比存在差异,开发多维度的地面模拟平台可以显著降低试验成本,减轻模拟技术的工作负担,并进一步推动任务的进展。目前国内

外对地面模拟技术的研究很少,主要难点包括:1)很难对空间中的多个维度进行仿真,目前所用的振动台大多是单轴输出,很少有多维度的输出;2)振幅控制问题,现阶段常用的振动台大多采用液压传动,振幅较大;3)频率变化大,对高、低频段的抖动进行建模较为困难。

4 系统集成分析

集成分析就是将光学、机械和控制模型集成,系统反映抖动对其性能指标的数学模型。通过集成分析模型可以评估抖动的抑制效果以及光学载荷的成像质量,进而对整个系统进行分析和设计。分析固定频率和振幅下产生的抖动对系统结构和光学成像方面的影响,研究指标允许范围内扰动引入的频率和振幅,以及针对各种振动源采取的抑振和隔振措施设计优化,避免了某一个学科对系统的一部分分析和设计的缺点。将扰动源、结构、控制系统、光学等多个物理模块结合,系统研究抖动对成像效果的影响及设计优化方法,可以从更宏观全面的角度系统处理问题。

无论是地面还是空间,对于大口径光学望远镜,光学载荷都会受到周围环境的影响。抖动的来源与光学设计、机械结构和控制系统模型密不可分,而集成分析

包含多学科的交汇,可在试验前期通过设计指标对可能造成负面影响的因素进行充分分析,改善系统成像质量。集成建模分析的本质是对整个系统模型进行集成和分析,包括现实结构、干扰、光学和控制模型及其相互作用^[31],方便数据之间进行电子传输,缩短操作时间,提升分析效率。

目前,国际上许多大口径空间望远镜如 JWST、SIM、下一代太空望远镜(NGST)都采用了集成仿真分析技术。其中,比较成熟的集成建模系统分别是麻省理工学院 MIT 开发的 DOCS 和 NASA 开发的 IME。

DOCS 本质上是集动态、光学、控制、结构为一体的基于 MATLAB 开发的一个工具箱,如图 11 所示。通过建立模型来获得状态空间方程,完成预处理以降低模型阶数并进行修正,在 MATLAB 中分析光学系统的抖动情况,并设计优化以实现集成。该系统具备光轴指向稳定性分析、调制传递函数计算以及灵敏度评价等多项功能。该方法的不足是计算量大、效率低,主要适用于科学研究,优势是可以增加分析模块提升集成能力,凭借其对初始阶段光学系统设计优化和性能评估的分析能力,已被用于类地行星探索者和太空干涉仪项目^[32]。

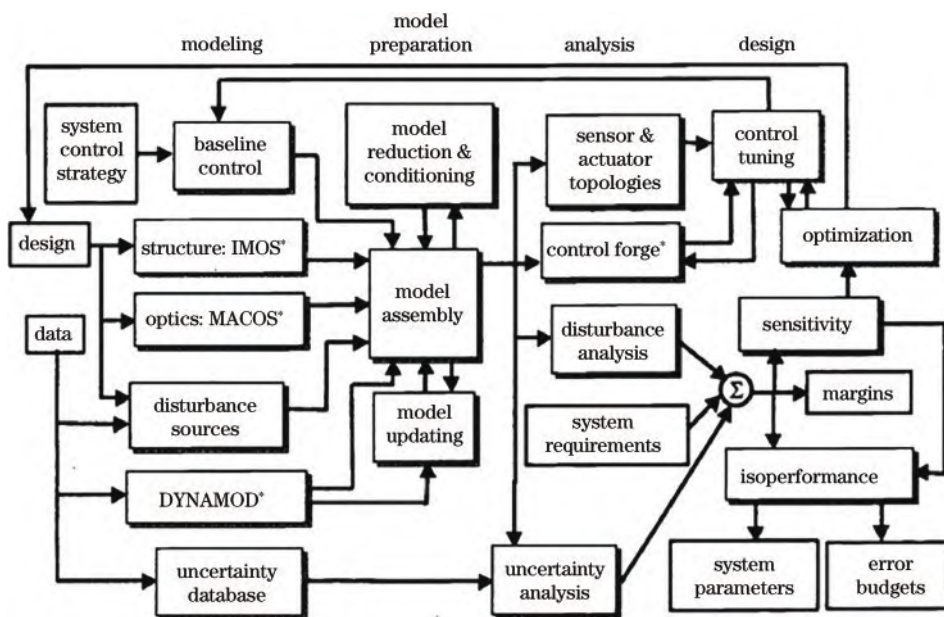


图 11 DOCS 系统分析框架

Fig. 11 DOCS system analysis framework

IME 是基于 MATLAB 环境下应用在 JWST 中的集成建模,系统集成光学、控制、扰源、结构与热控子系统于一体,如图 12 所示。主要分为两部分:一是抖动分析模块,用于光学望远镜的视轴误差和波前误差;二是结构-热-光学分析(STOP)模块,用于热变形下的镜面分析。IME 不仅能够集成建模和抖动评估,还能通过多种通用软件实现子系统间的互联,并提供了文件管理、数据处理和流程管理等便捷功能。与 DOCS 相

比,IME 更加适合于实际工程应用。

此外,斯图尔特天文台提出对惯性指向航天器的控制回路进行估计和控制的算法,并在低频率的环境下进行闭环仿真^[33]。韩国科学技术院利用 MATLAB 开发了一个集反作用轮诱导扰动建模、结构模态空间形式建模、MTF 光学系统建模、图像仿真方法,以及由被动元件和压电堆作动器组成的混合隔振器建模为一体的综合抖动分析框架^[34],如图 13 所

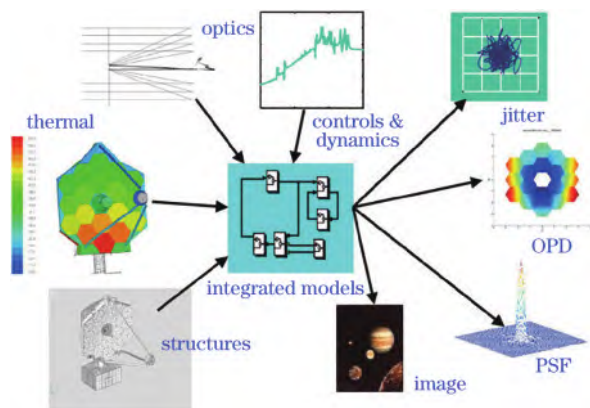


图 12 JWST 的 IME 系统

Fig. 12 IME system for JWST

示。通过隔振器过滤产生的扰动计算结构响应,以图像可视化的方式将计算结果用于评价光学载荷的性能退化。

望远镜工作过程中扰动力较小,系统结构部件一

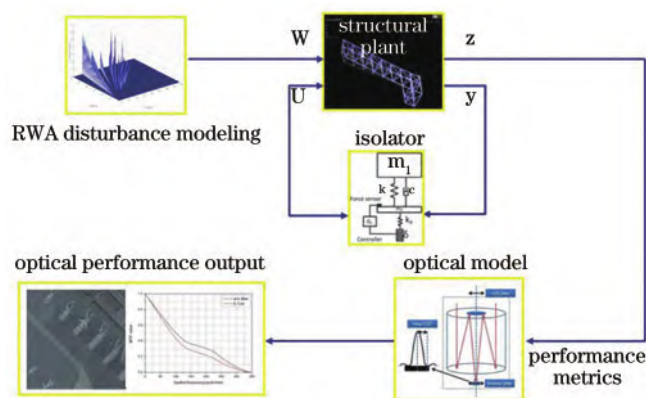


图 13 综合抖动分析框架

Fig. 13 Comprehensive jitter analysis framework

般不会发生损坏,但会使光学系统产生像移从而影响成像质量与观测效率。抖动问题涉及机械结构设计、扰动源输入与光学系统成像方面,为有效解决,表 2 总结了关于国内外集成技术的几种主要方法及其应用。

表 2 关于抖动集成仿真的几种主要方法及其应用

Table 2 Presents several main methods of jitter integrated simulation and their applications

Index	DOCS	IME	Integrated jitter analysis framework
Function	The optical axis directional stability, modulation transfer function and sensitivity evaluation can be calculated	Integrated modeling and jitter evaluation, using a variety of common software to connect subsystems, can easily manage file data	The structural response is calculated by using the disturbance generated by the vibration isolator filtration
Advantage	Suitable for scientific research, it can add analysis modules and improve integration capabilities	It is suitable for practical engineering and integrates optics, control, disturbance source, structure and thermal control subsystem	The vibration isolator model is introduced to eliminate most of the jitter effect, and the results are presented in the form of image visualization
Disadvantage	The calculation is large and the efficiency is low	The system is large and takes a long time	Practical applications need to be further in-depth

目前我国在集成仿真分析领域还没有深入的研究,缺乏系统的工具和专门的软件。南京天文学技术研究所 Yang 等^[35]对地基天文观测系统进行了相关单元的集成仿真研究,着重探讨了光学与结构之间的接口方式。北京空间机电研究所的刘涌等^[36-37]利用 MATLAB 开发了一套编译程序,并把 PATRAN 计算的结果转换成 CodeV 的数据,实现了部分集成。Chen 等^[38]通过集成分析模型计算了扰动源对高分辨率遥感微小卫星中光学载荷成像质量的影响。西安光学精密机械研究所与空间精密测量技术重点实验室合作研究了 fast steering mirrors (FSMs) 的动力学模型,并建立了跟踪系统结构的有限元模型,通过实验验证并预测了其在干扰下的动态响应与光学性能^[39]。

以上工作均需先将其简化,再将模型转化导入 MATLAB 等工具软件。在此基础上,通过对状态空间模型的处理,将其转化为物理模型的数据导入光学软件,进行光学参数的计算。该方法存在两个缺点:1)在模拟时传输大量数据,需要进行多次数据处理转

换,需采用并行的方法来提高计算效率;2)为了减小计算量,必须对高频率模式进行截取,从而对高频率模式的解析精度造成一定的影响。

5 结 论

以大口径光学望远镜的抖动影响因素为研究对象,通过对国内外相关文献的查阅,对测量方法、抑制技术,以及集成分析进行了总结。在测量方面,接触式方法依赖高精度传感器,而非接触式相干法展现了广泛的应用前景。目前,对抑制技术的研究主要聚焦于局部实验或模拟。然而,为了提供全面的系统解决方案以应对高精度要求,必须采用适当的测量方法和抑制措施。在光机集成分析的关键技术方面,应侧重于揭示光学系统、机械结构与有限元分析之间的关联,建立完善的传递链路数学模型,以实现快速计算和数据交互,并提供量化评价方法。在未来的大口径光学望远镜系统领域,成熟的集成控制方法将是不可或缺的,以便进行系统综合评估和优化抖动误差。

参 考 文 献

- [1] Sobek R. Mitigating wind induced telescope jitter[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5810: 1-10.
- [2] Mayo J W. Mechanical jitter measurement results for large ground-based telescopes[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5495: 98-103.
- [3] Toyoshima M, Takayama Y, Kunimori H, et al. In-orbit measurements of spacecraft microvibrations for satellite laser communication links[J]. Optical Engineering, 2010, 49(8): 083604.
- [4] Burge J H. An easy way to relate optical element motion to system pointing stability[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6288: 62880I.
- [5] Doyle K B. Structural line-of-sight jitter analysis for MLCD[J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6665: 66650I.
- [6] Genberg V L. Integrated modeling of jitter MTF due to random loads[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8127: 81270H.
- [7] Rustamkulov Z, Sing D K, Liu R R, et al. Analysis of a JWST NIRSpec lab time series: characterizing systematics, recovering exoplanet transit spectroscopy, and constraining a noise floor[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2022, 928(1): L7.
- [8] 庞世伟, 潘腾, 毛一岚, 等. 某型号卫星微振动试验研究及验证[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(3): 305-311.
Pang S W, Pan T, Mao Y L, et al. Study and verification of micro-vibration test for a satellite[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2016, 33(3): 305-311.
- [9] Qi Y, Wang H L, Xu Q Q, et al. A new flexible gimbal for electro-optical sighting system (EOSS) [J]. Optik, 2021, 242: 167016.
- [10] 李建聪, 林宏安, 罗佳雄, 等. 空间引力波探测望远镜光学系统设计[J]. 中国光学, 2022, 15(4): 761-769.
Li J C, Lin H A, Luo J X, et al. Optical design of space gravitational wave detection telescope[J]. Chinese Optics, 2022, 15(4): 761-769.
- [11] 陈胜楠, 王春艳, 孙浩, 等. 空间引力波望远镜远场相位噪声抑制方法[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0636001.
Chen S N, Wang C Y, Sun H, et al. Method of far-field phase noise suppression for space gravitational-wave detection telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0636001.
- [12] 杨欣欣, 王继红, 任戈. 湍流大气传输中跟踪抖动对远场影响的仿真研究[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(6): 061001.
Yang X X, Wang J H, Ren G. Simulation study on influence of tracking jitter on far field in turbulent atmospheric transmission[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(6): 061001.
- [13] 安其昌, 张景旭, 杨飞, 等. GSSM 系统抖动测量误差分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0217002.
An Q C, Zhang J X, Yang F, et al. Error analysis of the giant steering science mirror jitter testing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(2): 0217002.
- [14] 翟国芳, 于庆盛, 王蕴龙, 等. 双线阵测绘相机视轴抖动实时测量[J]. 中国光学, 2023, 16(4): 878-888.
- [15] Greiner B, Brewster R, Mrzyglod A, et al. Reactivation of the active mass damping system for SOFIA to improve image stability[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11445: 114450W.
- [16] Liu C C, Jing X J, Daley S, et al. Recent advances in micro-vibration isolation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 56: 55-80.
- [17] Kamesh D, Pandiyan R, Modeling Ghosal A., design and analysis of low frequency platform for attenuating micro-vibration in spacecraft[J]. Journal of Sound and Vibration, 2010, 329(17): 3431-3450.
- [18] Kamesh D, Pandiyan R, Ghosal A. Passive vibration isolation of reaction wheel disturbances using a low frequency flexible space platform[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(6): 1310-1330.
- [19] Zhang Y, Zhang J R, Xu S J. Influence of flexible solar arrays on vibration isolation platform of control moment gyroscopes[J]. Acta Mechanica Sinica, 2012, 28(5): 1479-1487.
- [20] Zhang Y, Zhang J R, Xu S J. Parameters design of vibration isolation platform for control moment gyroscopes[J]. Acta Astronautica, 2012, 81(2): 645-659.
- [21] Zhang Y, Xu S J. Vibration isolation platform for control moment gyroscopes on satellites[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 25(4): 641-652.
- [22] Zhang Y, Guo Z X, He H D, et al. A novel vibration isolation system for reaction wheel on space telescopes [J]. Acta Astronautica, 2014, 102: 1-13.
- [23] Luo Q, Li D X, Zhou W Y, et al. Dynamic modelling and observation of micro-vibrations generated by a Single Gimbal Control Moment Gyro[J]. Journal of Sound and Vibration, 2013, 332(19): 4496-4516.
- [24] Luo Q, Li D X, Jiang J P. Coupled dynamic analysis of a single gimbal control moment gyro cluster integrated with an isolation system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(2): 345-363.
- [25] 周伟勇. 航天器飞轮动力学建模与振动控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Zhou W Y. Research on dynamic modeling and vibration control for the flywheel of spacecraft[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [26] 王璐钰, 李玉琼, 蔡榕. 空间激光干涉仪光程倾斜耦合噪声抑制[J]. 光学精密工程, 2021, 29(7): 1491-1498.
Wang L Y, Li Y Q, Cai R. Noise suppression of tilt-to-length coupling in space laser interferometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(7): 1491-1498.
- [27] 王璐钰, 李玉琼, 蔡榕. 空间激光干涉仪激光抖动噪声抑制研究[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1426-1434.
Wang L Y, Li Y Q, Cai R. Noise suppression of laser jitter in space laser interferometer[J]. Chinese Optics, 2021, 14(6): 1426-1434.
- [28] Maly J R, Yingling A J, Griffin S F, et al. Vibration damping for the segmented mirror telescope[J]. Proceedings

- of SPIE, 2012, 8450: 845004.
- [29] Bronowicki A J. Vibration isolator for large space telescopes[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2006, 43(1): 45-53.
- [30] Agrawal B. Jitter control for imaging spacecraft[C]//2009 4th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, June 11-13, 2009, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2009: 615-620.
- [31] Zhang B W, Wang X Y, Hu Y L. Integrated modeling and optical jitter analysis of a high resolution space camera [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8415: 841508.
- [32] Miller D W, de Weck O L, Mosier G E. Framework for multidisciplinary integrated modeling and analysis of space telescopes[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4757: 1-18.
- [33] Douglas E S, Tracy K, Manchester Z. Practical limits on nanosatellite telescope pointing: the impact of disturbances and photon noise[J]. Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2021, 8: 676252.
- [34] Lee D O, Yoon J S, Han J H. Integrated framework for jitter analysis combining disturbance, structure, vibration isolator and optical model[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8341: 834126.
- [35] Yang D H, Jiang Z B, Li X N. Integrated thermal disturbance analysis of optical system of astronomical telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7017: 70171N.
- [36] 刘涌, 胡永力. 动量轮微振动扰振频谱对三反同轴相机的影响[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(5): 31-37.
- Liu Y, Hu Y L. Effects of momentum wheel jitter spectrum on Three-mirror-anastigmatic imaging[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2014, 35(5): 31-37.
- [37] 张博文. 微振动对刚体空间相机图像质量的影响分析[J]. 测绘通报, 2014(S1): 65-69.
- Zhang B W. Analysis on effect of micro-vibration on rigid-body space camera imaging[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(S1): 65-69.
- [38] Chen S B, Xuan M, Zhang L, et al. Simulating and testing microvibrations on an optical satellite using acceleration sensor-based jitter measurements[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1797.
- [39] 王凯迪, 苏秀琴, 李哲, 等. 像移补偿快速反射镜时频特性优化控制[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(S1): S120003.
- Wang K D, Su X Q, Li Z, et al. Time-frequency characteristics optimal control of fast steering mirror for image motion compensation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(S1): S120003. .