

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311025

空间指向测量仪器的多物理场效应研究综述^{*}

赵 琴^{1,2}, 王 立^{1,2}, 郑 然^{1,2}, 武延鹏^{1,2}, 袁 利^{2,3}

(1. 北京控制工程研究所 北京 100190; 2. 空间智能控制技术全国重点实验室 北京 100094;
3. 中国空间技术研究院 北京 100098)

摘 要:空间指向测量技术是航天器研制中的基础性和关键性技术之一。多参量、时变性、强耦合的空间多物理场是制约指向测量精度向毫角秒级提升的瓶颈。本文首先对空间多物理场的复杂效应进行了概述;然后从空间多物理场误差的分析抑制、地面标定和在轨标定3个方面总结了国内外空间多物理场误差标定装置和关键技术的研究现状。本文提出,通过精准模拟与感知多物理场,量化重构空间复杂环境,搭建毫角秒级误差标定系统,揭示多物理场耦合效应及误差演化机理,建立完备的多物理场效应分析和误差补偿模型,是突破高精度空间指向测量技术的重要途径。最后,本文剖析了装置研制和空间多物理场效应研究中的关键难题,并对相关技术的发展给出了若干建议和展望。

关键词:空间指向测量;多物理场;标定

中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Review of the research on the multi-physics field effects of space pointing determination instruments

Zhao Qin^{1,2}, Wang Li^{1,2}, Zheng Ran^{1,2}, Wu Yanpeng^{1,2}, Yuan Li^{2,3}

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China; 2. National Key Laboratory of Space Intelligent Control, Beijing 100094, China; 3. China Academy of Space Technology, Beijing 100098, China)

Abstract: The space pointing determination technology is a basic and key technique in aerospace development. Orbital multi-physics field has distributed-parameterized, strong time-variant, and inter-coupling features, which has become the major obstacle for significant advances in measurement accuracy level. In this article, we firstly introduce the complex effects of space multi-physics fields. Then, the research status of multi-physics field error is summarized from three aspects of analysis and suppression methods, on-ground and on-orbit calibration consist of the facilities and key technologies. By accurately simulating and measuring the multi-physics field as orbital environment, and creating an innovative milliarsecond space pointing calibration system, the infinitesimal error sources caused by space multi-physics field can be unambiguously identified, the inner coupling mechanism of space multi-physics field can be revealed and the theoretical blank in space complex environment effects on pointing determination can be compensated. In this way, the space pointing measurement accuracy is pushed to milliarsecond level. Finally, some suggestions and prospects are given based on the key problems in the research and engineering implementation of space multi-physics field effects.

Keywords: space pointing determination; multi-physics field; calibration

0 引 言

航天器上的光学相机、激光、天线等载荷开展工作首先要瞄准目标,瞄准的角度基准测定称为空间指向

测量。其数学定义为空间指向矢量在惯性天球参考系下的坐标。典型的空间指向测量仪器包括星敏感器、星相机和监视相机等,通过光学系统对恒星背景及目标探测成像,由图像识别恒星并完成姿态解算,得到仪器观测矢量在惯性参考坐标系的坐标(光轴指向);根

收稿日期:2023-02-07 Received Date: 2023-02-07

^{*} 基金项目:青年人才托举工程(2022QNRC001)项目资助

据惯性姿态可进一步求取目标相对于仪器光轴的坐标(目标指向)^[1]。

空间指向测量技术在航天器各类任务的实施中起着至关重要的作用。遥感卫星利用轨道、姿态、星时以及相机参数等建立严密几何成像模型,计算遥感影像上任一点对应于地面上的地理位置,指向测量精度直接决定卫星的平面/高程无控定位精度。星间激光通信链路建立过程中,收发终端需要依据指向信息完成对准、捕获和跟踪,指向测量精度决定了光通信效率和通信距离。全自主卫星导航系统采用基于星相机照相观测的方式获取星座卫星之间的相对位置矢量和惯性空间中的指向信息,对星座的整体旋转形成有效几何约束,从而解决星座组成的空间多面体相对于地心惯性坐标系的定向问题;预警卫星通过监视相机对碎片等空间目标进行捕获、识别和定轨,指向测量精度决定了空间防护和预警能力^[1-3]。

目前,亚角秒级空间指向测量仪器只有少数技术实力较强的机构具有飞行经验,典型代表有:法国索登公司研制的 SED36 星敏传感器,应用于英联邦地球观测 SPOT 系列之昂宿星;美国保尔公司研制的 HAST 星敏传感器,应用于对地观测卫星^[3-8];美国洛克希德·马丁公司研发的 AST-301 自主星敏传感器,应用于喷气推进实验室(jet propulsion laboratory, JPL)的空间红外望远镜装置(space infrared telescope facility, SIRTf)^[9-11];北京控制工程研究所(Beijing Institute of Control Engineering, BICE)研制的甚高精度星敏传感器,应用于高分系列遥感卫星。

毫角秒级空间指向测量技术是目前研究的前沿技术,美国在研的 ACCESS 卫星,要求光轴指向精度达到 5 mas,稳定度达到 1 mas/1 000 s;美国海军计划部署的天基联合毫角秒探路者测量任务卫星(Joint Milli-Arcsecond Pathfinder Survey mission, JMAPS),要求对 14 等亮度的空间目标具有 10 mas 的指向测量精度^[12]。

按照国际现行的空间指向测量误差分类,空间多物理场效应是限制空间指向测量技术精度提升的主要因素^[4-8]。空间指向测量仪器一般安装在在航天器外部,温度起伏、背景杂光、平台振动等多种影响统称为多物理场。随着航天器轨道和姿态变化,仪器所处的多物理场环境呈现时变特性,多场之间相互耦合,仪器对不同物理场的响应特性和表现形式存在不同规律,导致空间多物理场对仪器精度的影响具有高度的复杂性、交叉性和综合性。

0.3"~3"范围内的指向测量仪器,其误差来源主要集中在温度场和应力场,0.3"以上的仪器需要对背景杂光进行分析和修正,0.1"以上的仪器需要对航天器平台微振动建模修正^[9-11]。随着空间指向测量仪器趋向载荷化,测量精度越来越逼近克拉默-拉奥下界,原先小量误

差源的影响更加明显^[12]。国内外关于空间多物理场误差的研究主要集中在 3 个方面:1)从空间指向测量仪器自身设计出发的误差抑制方法,如基于有限元仿真分析、光机热不敏设计和高稳定性材料的选用^[13];2)地面标定和修正,利用精密标定装置和模拟的多物理场环境建立误差模型;3)在轨标定和修正,如基于在轨测量数据或地面定标信息进行建模补偿^[14]。

本文首先对空间多物理场的复杂效应进行了概述;然后分别论述了温度场、光场、应力场和微振动效应对仪器的作用规律、理论分析方法和误差抑制方法;在此基础上,本文介绍了仪器的地面标定和在轨标定方法,总结了国内外空间多物理场误差标定装置和关键技术的研究现状。最后,本文剖析了装置研制、空间多物理场效应和误差抑制研究中的关键难题,并对相关技术的发展给出了若干建议和展望。

1 多物理场效应分析与误差抑制

1.1 温度场

航天器在轨不断调整姿态,由太阳光辐射引起的轨道外热流复杂多变,真空深冷背景、自身热源也影响仪器热传导过程^[14-15]。在此过程中,由于热弹性效应,仪器光学系统的面型和安装位置改变,导致光学系统离焦、畸变^[16]。其次,温度变化会改变光学材料的折射率,使光学系统产生波前差^[17]。一些光学元件在空间循环温度场效应下,还会产生不可逆的损伤,如光学膜层剥落、光学表面形状改变等^[18]。这些都造成仪器测量性能急剧下降^[19]。

光学材料对温度场的响应一般用热光系数和热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)来体现。热光系数定义了光学材料折射率随温度变化的函数关系。玻璃材料的热光系数差别非常大,范围可以从正值到负值^[20]。CTE 的不均匀性可能由于原材料的制造产生和/或晶粒尺寸以及方向的微观机械变化引起,对于均匀的温度变化,CTE 不均匀性的影响与光学系统上的热梯度是等价的^[21]。

热控或无热化设计是抑制温度对测量仪器的影响的主要途径。大多数高精度的空间指向测量仪器均需进行热控设计和结构热稳定设计,通过材料、主被动热控设计等手段可以保证在轨指向测量性能^[22]。如 MAPS 为降低温度场对精度的影响,探测器组件温度需低于 193 K,稳定度小于 10 mK。光学望远镜配件(optical telescope assembly, OTA)在 5 天内温度稳定度优于 0.15 K^[23]。遮光罩、中部和后部光学主体部分要求采用被动热控技术(无活动部件,可以有加热),分别使用了铝合金、碳纤维和碳化硅材料;滤光轮、调焦驱动机构、遮光门等要求与

OTA 隔热;为保证润滑剂使用条件,部分机构需控温到 250 K 以上^[24]。

1.2 光场

杂散光也称为杂散辐射,它指到达光学系统像面的非成像光线,杂散光的来源主要有 3 类^[25]:第 1 类是光学系统视场外部的辐射能量,进入系统后经内部构件多次反射、折射或衍射到达探测器,通常来源于视场外强光源如太阳、月亮及邻近地面强辐射等,因此是指向测量仪器杂散光抑制主要考虑的因素^[26-28];第 2 类是光学系统视场内部的成像光线,经过非光路表面的非正常传递进入探测器,包括因光学表面问题引起的透镜表面散射,玻璃内部闪点、结石、气泡和条纹的散射,光线在光学零件、机械结构元件表面和接收器表面之间的散射、反射等^[29-31]。

杂散光对光学系统的影响表现为像面对比度下降,从而导致信噪比降低和光学传递函数退化,干扰成像信号的识别和提取^[32]。杂散光也会形成多个鬼像,这些鬼像在影响光束质量及传输特性的同时也可能对光学元件造成永久性伤害^[33]。

杂散光评价指标包括点源透射比(point source transmittance, PST)和杂光系数^[34]。PST 是评价不同离轴角度下光学系统杂光抑制能力的主要指标,定义为由离轴光源(点源或者平行光光源)经光学系统抵达探测器的辐照度和光源在光学系统入口上的辐照度之比。太阳等星体近似看作无穷远处的点光源,可用 PST 评价其引起的杂散光影响。杂光系数定义为放在均匀扩展光屏中心的理想黑斑经光学系统在探测器上形成的黑斑像中心的照度与黑斑移去时光学系统探测器上照度之比,实质为探测器上的杂光能量占有所有抵达探测器能量的比例,能够直观的体现仪器杂光的大小^[35-37]。同时使用以上两种指标得到点光源和扩展光源条件下仪器杂散光的大小,能够更为全面的评价仪器受到的杂散光的影响^[38]。另外,杂光分析指标还包括轴外杂光抑制比、遮挡衰减、规范化的辐照度透过率、消光比等^[39]。

遮光罩是抑制杂光的关键措施之一,在光学系统设计的初期,要根据系统杂光抑制能力的指标要求优化遮光罩设计,如提高太阳抑制角等。目前,消杂光技术已经成为一门综合技术,并已发展出众多分支,如系统杂光测试、散射理论、双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)设备与测量、分析软件、材料研究等。

1.3 应力场

应力场指仪器的光学元件和机械结构受本身材料因素、热环境及外力因素,如地面的引力及航天器发射后引力释放等产生的应力分布,主要包括热应力、结构应力、

机械应力等^[40-41]。热应力来自材料热胀冷缩和制备过程中导热不均匀形成并固化在材料内部的应力场^[42]。结构应力主要来源于材料的微观不均质性,如气泡、孔洞、杂质等缺陷导致的结构热膨胀系数非均匀分布^[43];机械应力主要指受到外力作用时由于应变应力关系而在材料内部产生的应力场分布^[44-47]。

由于光弹性效应,光学元件在机械应力效应下会发生应力双折射,由此就会使光学系统产生波前差或偏振误差^[48-49]。光学元件及光学系统结构零件的形变导致的离焦、畸变和像差也会影响光学系统的成像性能。若超过材料的屈服强度,过大的应力会使光学支座以及支承结构产生永久变形,造成光学系统失调^[50]。

为确保仪器在发射和运载过程中不受破坏,不产生残余变形,要求仪器结构在具有足够高刚度的同时具有较低质量,这样才能抑制动力学环境干扰,保证结构具有良好的动态特性,在热环境下具有较好的尺寸稳定性,获得良好的成像质量。应力场效应分析主要依靠有限元仿真和数值计算,误差抑制主要从材料选择与结构构型设计两方面出发。

近年来开发的部分新材料包括高强度碳纤维、高强镁合金、碳化硅、二氧化硅气溶胶复合材料和充气结构用的薄膜材料等^[51]。碳纤维复合材料具备低密度、高比刚度、高强度、高阻尼、抗疲劳、低膨胀等诸多优点,可根据不同的载荷条件和结构形状,对仪器的刚度和热胀系数等进行综合优化设计^[52-53]。同时碳纤维复合材料的成型为累加成型,有利于复杂零件一次整体成型。而高强镁合金在具有极高的比强度、比刚度的同时导热导电性能良好,具有很好的电磁屏蔽特性,良好的阻尼性、减振性、切削加工性等也是一大优点^[54]。

在结构设计方面,常见的方法包括拓扑优化设计和桁架式结构设计。拓扑优化设计是研究承载结构内部传力路径分布的一种有效方法,针对拓扑优化结果中存在很多不规则孔洞、复杂形状、锯齿形边界、灰色单元等细小特征,目前常用开孔、桁架重构的方式进行结果分析^[55-56]。桁架式结构设计整体刚度性能良好,通过合理设计桁架走向、截面形状和尺寸可实现结构承载能力的合理分配,材料承载效率高,适合用作星上质量集中且安装接口简单的设备承力结构构型^[57]。结合拓扑优化设计方法的结构构型设计及增材制造技术的复杂结构加工成型优势,采用面向增材制造技术的结构桁架式设计方法是当前主要发展方向^[58-59]。

此外,探头部分的安装,一般采用运动学支撑形式,减少仪器与安装面的变形耦合,提升指向保持能力。遮光罩等支撑上也可以采用消应力安装设计。例如德国耶拿公司的 ASTRO XP 星敏感器,光学系统与主安装法兰间的连接,采用多处 Bipod 结构,进一步提升了星敏感器

边界条件的定义并进行在轨热平衡计算。将各工况情况下温度场作为热载荷加载于指向测量仪结构有限元模型,进行指向测量仪热弹性分析,获得结构位移场分布。

将各镜面刚体位移和面型变化分析结果进行处理,建立光学系统分析模型。

多物理场效应的分析和抑制方法总结如表 1 所示。

表 1 多物理场效应分析与误差抑制方法

Table 1 Analysis of multi-physics field effect and error suppression method

物理场	来源	分析方法	抑制方法
温度场	轨道外热流、自身热辐射	热光系数、热膨胀系数	热控、无热化设计
光场	外部辐射、内部成像光线	点源透射比、杂光系数	遮光罩设计
应力场	热应力、结构应力、机械应力	有限元仿真、数值计算	材料设计、结构设计
微振动	光压、地磁、喷气冲力、动量轮	有限元仿真、数值计算	主动稳定、被动隔振
耦合效应	-	光机热一体化仿真	-

2 地面标定和修正

对误差进行标定和修正也是提高指向测量仪器精度的重要途径。指向测量仪器标定原理如图 3 所示,光源模拟恒星星场,在待标定仪器像面上成像,仪器根据星点坐标测量当前指向,角度基准提供仪器的理论指向,最终建立测量值与理论值之间的误差模型^[78]。实际工况条件下利用模型进行误差修正。

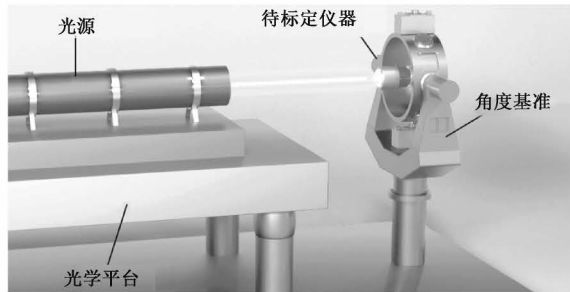


图 3 空间指向测量仪器标定原理

Fig. 3 Calibration principle of space pointing determination instruments

2.1 标定方法和模型

指向测量仪器的理想模型为小孔成像模型,星光经过光学系统在成像探测器上形成弥散斑,星点在星敏感器坐标系下的坐标为 (x, y, z) ,弥散斑中心在探测器坐标系下的坐标为 (u, v) ,则恒星单位矢量在星敏感器坐标系下的坐标为:

$$S_i = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -x_i \\ -y_i \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: f 为光学系统焦距。星场在待标定仪器像面上成像后,根据角度基准偏航角和俯仰角可得到单星矢量在转

台坐标系下的表达式,若角度基准与仪器之间的安装矩阵为已知,则可得到星场矢量在仪器本体坐标系下的表达式^[79-80]。

通过曲面方程可拟合星点位置测量值和理论指向之间的关系,可求解出标定系数 K 。待定系数法可以对仪器系统误差中最主要的、数值最大的、规律性明确的部分误差源进行校正,但对于某些数值相对较小,带有随机性的部分误差源不能有效的识别校正^[81]。同时对于大视场仪器,一个高阶曲面难以在全视场范围内逼近像面,导致待定系数法应用于大视场仪器时标定精度较低,同时标定残差与标定点到视场中心距离相关。为了满足大视场仪器和更精确的标定系数的需求,可以将仪器视场划分为多个区域。分别计算每个区域校正函数,使得标定残差不依赖于采样点到视场中心的距离,获得高精度的标定系数和标定结果,实现仪器误差的精确校正,提高指向测量精度^[82]。

2.2 标定装置

1) 光源模拟

地面标定首先要具备模拟的恒星光源,星模拟器和天穹恒星模拟系统是最常用的装置。星模拟器主要用于模拟恒星的光谱和星等,可以分为静态星模拟器、动态星模拟器和电子星模拟器^[83]。静态星模拟器模拟精度高,但星图显示单一,多用于仪器的性能测试。动态星模拟器模拟精度低,可实现星图连续模拟,用于仪器的功能测试。电子星模拟器根据输入的惯性姿态信息,实时生成与该姿态对应的星图,激励指向测量仪器线路盒^[84]。

天穹恒星模拟系统可以结合静态恒星模拟器、动态星模拟器的优点,同时实现高精度和大立体角的星图模拟。国外在 20 世纪 90 年代已开始天穹恒星模拟系统的研究,主要有 4 种建设方案:光纤式天穹恒星模拟系统、投影式天穹恒星模拟系统、直物镜式天穹恒星模拟系统和多光路天穹恒星模拟系统^[85-88]。

约翰霍普金斯大学应用物理实验室(The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, APL),建立的小型的光纤式天穹模拟系统如图4所示,该系统主要由天穹结构、光纤传像束、光源、支撑结构、运动控制机构和遮光结构等子系统组成。直径约1 m,安装有100个模拟星点,视场大小为 2π 立体角^[89]。国内北京控制工程研究所建立了多光路式天穹恒星模拟系统,系统采用多个单星光管组合的方式模拟恒星星象,主要由单星光管、天穹结构、支撑结构和光源等部分组成,结构示意图如图5所示。



图4 约翰霍普金斯大学光纤式天穹模拟系统
Fig. 4 Optical fiber dome simulation system of Johns Hopkins University

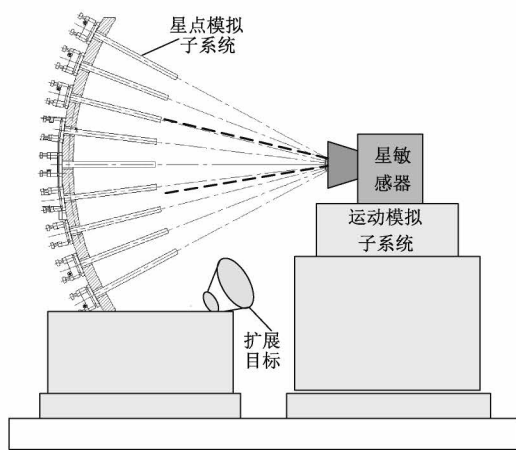


图5 北京控制工程研究所多光路式天穹恒星模拟系统
Fig. 5 Optical path dome star simulation system of BICE

恒星模拟器和天穹目标模拟系统的精度受限于加工工艺和工作原理,都无法突破亚角秒量级。美国航天局ICESat-2 航天器配备的先进地形激光测高仪要求接收激光反射斑点的光学望远镜接收装置 RTA 具备0.1"的指向测量精度,喷气推进实验室为此设计了如图6所示的激光单星点目标模拟系统^[90]。BALL 公司采用双光楔激

光星场模拟技术,实现了30 mas 的目标模拟精度,系统实物图如图7所示^[91]。北京控制工程研究所则利用照相观测原理,通过整体平差的方法构建了高精度星场,星点位置精度优于10 mas,但整体平差构建的星场难以满足大视场仪器的标定。



图6 RTA 单星点激光目标模拟系统
Fig. 6 Single star point laser target simulation system of RTA



图7 BALL 公司双光楔激光星场模拟系统
Fig. 7 Simulation system of laser star field with double optical of BALL

2) 角度基准

角度基准一般采用转台或经纬仪,但精度只能达到亚角秒量级。对于高精度仪器标定的需求,当前典型的解决方案是把转台与激光干涉测量技术组合起来,利用干涉仪外测转台角度来实现毫角秒级参考角度测量。BALL 公司首先提出采用单频激光干涉仪测量转台角度的方案。如图8所示,激光干涉测量系统基于正弦角度测量原理,通过测量光程差与光学臂长进行反正弦运算得到小范围内角度变化,精度可以达到40 mas^[92]。北京控制工程研究所利用双频激光干涉测量技术搭建了真空干涉测量系统。如图9所示,系统由激光干涉测角仪、调整机构、支撑支架等部分组成。通过温度和结构稳定性设计,排除了气流扰动、温度变化等环境变化的影响,保证整个测角系统可10 mas 级的二维角度测量。

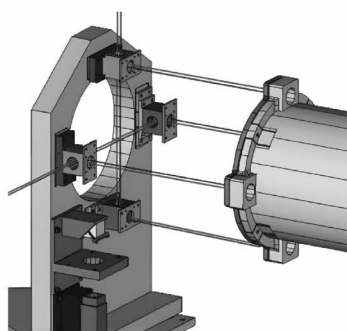


图 8 BALL 公司单频激光干涉系统

Fig. 8 Single-frequency laser interference system of BALL



图 9 双频激光真空干涉测量系统

Fig. 9 Dual-frequency laser vacuum interferometry system

3) 空间多物理场模拟

对于亚角秒级的指向测量仪器而言,传统的地面标定装置只实现了温度场的模拟和误差标定。全轨道周期的热环境一般采用真空罐和热沉来模拟,典型的组成包括真空罐、标准光源、准直系统、指向测量仪器转台等。BALL 公司的温度场模拟装置和北京控制工程研究所的温度场标定试验装置如图 10、11 所示,用于对光轴热稳定性和热漂移进行验证和分析。国内 803 所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等单位也都具备类似的温度场模拟和加载装置。

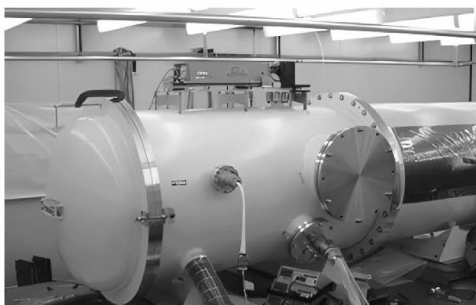


图 10 BALL 公司的温度场模拟装置

Fig. 10 Temperature field simulation facility of BALL



图 11 北京控制工程研究所温度场标定试验装置

Fig. 11 Temperature field calibration facility of BICE

亚角秒级仪器的杂散光和微振动模拟验证需要通过单独的实验装置来实现。

杂散光的模拟验证装置分为两类,第 1 类是高洁净度双柱罐测试装置。以大尺寸的双柱罐测试腔为基础,内壁采用黑色有机玻璃有效抑制内壁散射。如 BALL 公司建成的杂光测试装置,如图 12 所示,该装置对 Operation Land Image 望远镜的杂光水平进行测试,其 PST 测试阈值达到 10^{-9} [93]。第 2 类是采用对测试腔抽真空的方式来控制杂散光的影响,如图 13 所示,如比利时列日大学的航天航空实验中心(Centre Spatial of Liege, CSL)和美国布劳尔特研究中心(Breault Research Organization, BRO)建设的杂光测试装置[94]。国内西安光机所、长春光机所等经过十多年杂散光抑制技术研究,已建立一体化的杂散光仿真分析与测量研究体系,测试波长范围从单波段扩展至连续光谱,PST 测试精度优于 10^{-9} [95]。

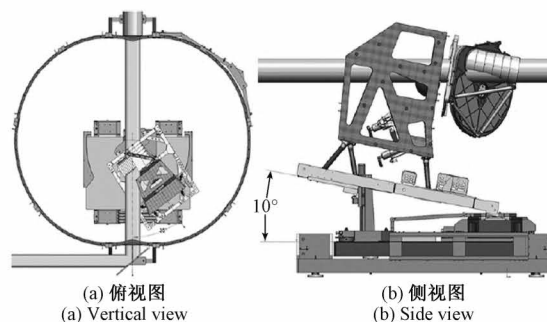


图 12 BALL 公司杂光测试装置

Fig. 12 Stray light testing facility of BALL

最早用于在地面测试空间微振动环境裕度的 6 自由度激振装置为 Stewart 平台,如图 14 所示,它是通过多根支腿、铰链,连接上、下平台形成上平台具有 6 个自由度的并联机构,具有刚度高、结构紧凑、运动误差小等优点[96]。美国空军研究实验室进行航天器超静隔离技术研究中使用的并联机构进行隔振[97],欧空局将 Stewart 平台用于国际空间站上的精确指向仪器,空间站在轨运行期间,该平台带动大气观测仪实现对地心的精确对准。国内北京控制工程研究所、上海交通大学等也对 Stewart 平台进行了深入研究,并应用于精密指向、隔振、激振、运动

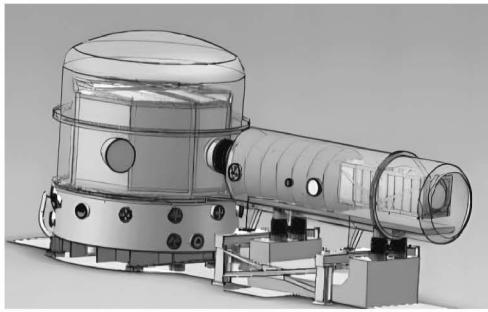


图 13 真空罐式点源透过率杂光测试装置

Fig. 13 Vacuum tank point source transmittance stray light testing facility

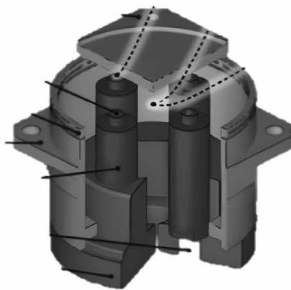


图 14 美国空军研究实验室 Stewart 平台

Fig. 14 US Air Force Research Laboratory's Stewart platform

仿真等领域中^[98]。为测试詹姆斯·韦伯的航天器平台微振动环境耐受能力,美国航天局搭建了波前控制测试平台,该平台采用在光路中插入压电陶瓷驱动的快速偏转镜来模拟平台微振动^[99]。

对于毫角秒级指向测量仪器,温度场、光场和微振动的耦合效应无法忽略,多物理场误差标定需要将传统的单场模拟装置进行扩展,使其具备多场模拟能力。图 15 为北京控制工程研究所在高精度空间指向测量仪器的研究中,设计的温度-光场-微振动模拟与标定装置,该装置实现了真空度 1×10^{-3} Pa、背景温度-173 K、1 个太阳常数、微振频率 5~300 Hz 的多物理场模拟。

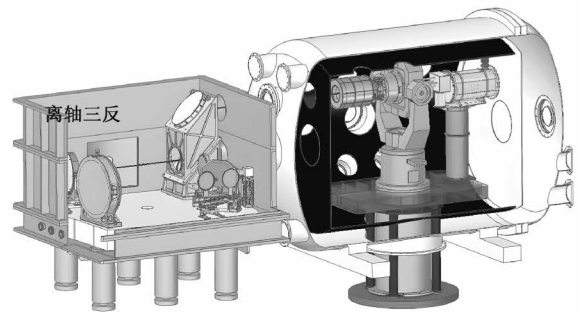


图 15 北京控制工程研究所温度-光场-微振动模拟装置

Fig. 15 Temperature-light-micro-vibration simulation device of BICE

国内外标定装置的研究现状总结如表 2 所示。

表 2 标定装置研究现状

Table 2 Research of the calibration devices

精度	光源	角度基准	物理场	机构
0.3"~0.1"	光管	转台	-	-
	天穹模拟系统	转台	-	应用物理实验室、北京控制工程研究所
	光管	转台	温度场	保尔、北京控制工程研究所
0.1"~10 mas	激光光源	-	-	喷气推进实验室
	双光楔激光	单频激光干涉仪	温度场、光场	保尔
	靶标平差	双频激光干涉仪	温度场、光场、微振动	北京控制工程研究所

3 在轨标定与修正

在轨标定主要针对多物理场导致的安装误差、内部参数如主点坐标、焦距以及成像畸变进行。光源由实际星场提供,参考基准一般采用陀螺仪数据,也可以将星间角距或者恒星之间角度关系的旋转不变性作为参考。

White^[100]最早提出使用四元数为系统状态变量的 Kalman 滤波算法,用于估计姿态敏感器的准线安装误差^[100-104]。JPL 提出了利用神经网络进行星敏感器的在

轨标定的方法,建立了基于在轨测量数据的自主估计非线性畸变模型,可以将误差由 0.1 pixels 降低到 0.034 pixels^[105-106]。哈勃望远镜的观测过程中发展了旋转密集星场方法,让恒星在全视场不同位置出现,对全视场不同位置的误差进行采样和抵消,构建参考值,以提取测量误差,并进行修正^[107-110]。

北京航空航天大学 and 哈尔滨工业大学的研究人员提出了利用陀螺和两个星敏感器来在轨标定星敏间的安装误差角,设计扩展 Kalman 滤波器实时估计状态变量,以消除星敏感器安装误差角以提高航天器定姿系统精

度^[111-113]。文献[114]基于星间角距不随坐标系的变化而改变的特性,对星敏感器的焦距和一阶径向畸变系数进行在轨标定,精度可以达到1.2"。为了解决标定温度对星敏感器透镜畸变的影响,文献[115]提出了星光矢量校正的在轨标定方法。文献[116]设计了后馈神经网络结合Kalman滤波算法,利用星间角距实现了没有先验信息的在轨星敏感器的标定。

北京控制工程研究所将在轨标定技术在多项型号任务中应用:为了提高月球软着陆动力下降过程导航系统的精度,嫦娥三号着陆器设计了在轨自主实施的两层陀螺标定算法^[117]。ZY-3航天器姿态控制系统采用陀螺和星敏感器的常系数、低增益卡尔曼滤波方法,并通过对星敏感器间的相对安装偏差进行在轨估计,进一步提高了姿态确定精度,保证了ZY-3航天器技术指标的实现^[118]。北斗系统基于GNSS定位信息或单颗导航星伪距测量信息的星上自主标定,解决了传感器测量误差在轨动态变化问题,确保天文导航始终保持较高的在轨定位精度^[119]。

4 研究现状分析与未来展望

4.1 研究现状分析

目前,空间指向测量精度难以突破毫角秒,原因在于多物理场之间存在应力释放、热致振动、光热转换等复杂的耦合关系,数值模拟和仿真无法分析多场耦合作用下仪器的误差演化规律;地面标定受多物理场地面模拟设备和标定装置的精度限制,无法辨识高阶非线性项,建立精细化的误差模型;在轨标定过程中,控制系统数据和地标信息精度远低于指向测量敏感器,实时性和可靠性无法保证。

当前研究的瓶颈在于,空间多物理场呈现多参量、时变性、强耦合等特点,对指向测量仪器的作用机理未知,更深入、更精细的研究需要围绕多物理场效应及误差演化理论开展,解决以下科学和技术问题:

- 1) 辨识和解耦多物理场误差,构建完备的误差体系;
- 2) 揭示多物理场耦合作用机理,明确多物理场误差演化规律;
- 3) 建立精细化的误差抑制和修正模型。

从而在仪器设计、误差抑制、标定和修正等多个维度推动空间指向测量技术向毫角秒级跨越。开展相关研究需要解决在标定方法、标定装置等多个层面的难题,在标定方法层面,传统的标定方法和标定模型存在的问题包括:

1) 多物理场误差的标定过程中,温度场、光场、微振动的标定彼此独立,无法体现其相互之间的耦合效应;多物理场误差呈现过程分离、结果耦合的特性,中间经历了

包括光热转换、热致振动、引力释放等多种复杂的非线性相互效应,表现为热噪声、离焦、畸变等多种形式,很难建立直接的映射关系;

2) 传统的多项式模型中,通常只需较低的多项式阶数即可很好地表征标定系数。更精细的误差模型虽然可以使用高阶多项式近似表征,但随着阶数提高,标定系数存在过拟合;提出新的标定模型是解决多项式模型问题的关键。

3) 多物理场感知和误差标定将产生海量数据,数据种类和特征多样,高维大样本建模数据增加了回归模型的运算负担,传统的处理和建模方法不再适用。

在标定装置层面,如表3所示,为满足不同精度水平的指向测量仪器标定需求,标定装置的精度和性能逐步扩展。但对于毫角秒级指向测量仪器而言,传统标定装置存在诸多限制。

表3 研究现状总结
Table 3 Summary of research status

方法	精度	限制条件
误差抑制	0.1"	数值计算和有限元模型精度
地面标定	30 mas	标定方法和标定装置精度
在轨标定	1"	陀螺数据精度、星上资源

1) 角度基准精度难以提升。按照计量学理论,角度基准精度至少高于仪器精度3倍,即角度基准精度需要达到1 mas。然而,在有限激光功率下,双频激光干涉测量精度最终受限于光场量子噪声,这是经典技术所能达到的极限水平——标准量子噪声极限。抑制光场量子噪声,寻求突破标准量子极限的角度基准方案是一大难点。

2) 多约束下的密集恒星模拟。平行光管作为光源模拟单星时,转台带动仪器推扫进行全视场标定,标定点分辨率取决于转台步进间隔,无法有效覆盖像面,建立亚像元精细化误差模型;天穹和双光楔激光可以模拟密集的恒星星场,但系统庞大,无法纳入真空和其他物理场标定装置中用于多物理场误差标定。在体积、视场、环境适应性等多重约束下构建密集恒星星场用于亚像素精细化标定是一大难点。

3) 无法复现完备的空间环境特征。亚角秒级精度的标定装置中能够模拟真空和温度场,但无法兼容杂光和微振动模拟,复现多物理场之间的强耦合性;毫角秒级精度的标定装置中,模拟过程无法实现动态调控,复现多物理场的时变性;模拟方法单一,无法复现多物理场的多参量性。综合多种模拟方法,实现真空、温度场、杂光和微振动的多维度模拟和动态调控,重构空间多物理场环境是一大难点。

4)不具备多尺度在位测量能力。传统标定装置中,传感器只能实现单要素的离散测量,不同测量体制下的数据无法精确地时空同步;多物理场环境下常规方法“测不了”、“测不准”、“难存活”,超/跨量程、大动态范围、高精度等要求难以满足。标定过程中不同尺度下力学、热学、光学等多参量的高分辨、高灵敏、高准确在位测量是一大难点。

4.2 未来展望

基于以上分析和总结,未来解决多物理场耦合作用的重点是标定方法和标定装置。

1) 标定方法与标定模型

在标定方法的研究中,文献[120]首先提出了一种可表征任意成像系统的光线模型,认为图像是像素的离散集合,并以一组虚拟的感光元件“光素”表示每个像素与相关联的空间虚拟光线间的完整几何特性、辐射特性和光学特性。光线模型的标定着重于参数化测量空间中每个像素对应光线的分布,无需严格分析和构建成像系统内部复杂光学结构模型,因而具备一定的便携性和通用性;同时,从一定程度上可避免镜头畸变的多项式近似表征引入的测量误差,为非小孔透视投影模型成像系统的表征提供了一种新的思路,特别是对于成像器件与结构十分复杂的系统,该类非参数化的模型简化了成像建模的复杂度。此外,智能化标定方法作为一种隐式校正方法,逐渐显示出其优越性如实时、普适等,在相机标定技术中得到应用^[121-122]。

特征提取和特征选择是统计机器学习解决高维数据带来的问题的主要手段,统称为降维。特征选择是对原有数据特征进行筛选,去除不相关和冗余的特征,选取的特征是原始特征数据集的子集^[123]。特征提取以各种降维方法为主,对高维数据进行重构得到低维数据。深度学习通过自适应特征学习与提取,克服了浅层模型难以表征数据与结果之间复杂的映射关系的不足,在相对浅层模型已经表现出较好的映射与泛化能力^[124-125]。但难以适应变化的动态参数,不具备能够实时根据所测参量动态调整模型参数以适应新参量下状态识别的能力。迁移学习作为一种新的学习框架,打破了传统机器学习对测试数据与源数据必须具备相同分布的要求,可以实现跨领域、跨任务的学习。迁移学习已在文本分类、图像处理等领域表现出较好的应用前景。在 NIPS 2016 会议上,人工智能和机器学习领域国际权威学者吴恩达(Andrew Ng)表示,在继深度学习之后,迁移学习将引领下一波机器学习技术。

2) 标定装置

在装置的研究中,目标模拟和参考角度测量精度提升是未来首要解决的问题。激光目标模拟精度本质上仍然依赖于光学系统的加工装调精度,优化和提升的空间

有限。对激光干涉测量而言,其精度不仅受限于经典的环境噪声和热噪声,最终还受到光场的量子噪声和激光器功率限制。

近年来,新型衍射元件设计和制作工艺逐渐成熟,利用计算机辅助设计,采用超大规模集成电路制造工艺在基片上或传统光学器件表面刻蚀出二维分布的衍射单元,能够对激光波前位相分布进行精细调控^[126],越来越多地应用在目标模拟方法中。文献[127]提出采用衍射光学元件调控的激光场作为模拟目标对相机进行标定的方法。该方法是采用两个正交放置的光栅,来产生二维的衍射点阵,并通过调整相机与衍射光学元件表面法线的角度,以覆盖相机的全视场。阵列分数器是一种能将入射光束分割成为阵列光束的光学元器件,达曼光栅就是一种典型的阵列分束器,它是一种具有特殊孔径函数的二值相位光栅,激光通过后将在透镜的焦平面上得到间距相等的光斑阵列。文献[128]将达曼光栅目标模拟技术应用于遥感相机的标定中。基于衍射光学理论的目标模拟技术将有望实现更高精度地标定和测量。

如前文所述,激光干涉仪已经应用于参考角度测量中,但对于相干态而言,在退耦合所有的环境噪声和热噪声以后,测量精度将最终被光场的量子噪声和激光器功率限制。在有限的激光功率下,干涉仪测量精度的提高受限于光场的量子噪声,这是由海森堡不确定性原理决定的经典技术所能达到的极限水平。与相干态光场不同,压缩态光场是一种非经典光场,各个正交分量的噪声不相等^[129]。在不违反海森堡不确定原理的前提下,通过增加其中一个分量的噪声起伏来减小与它不对易的另一个分量的噪声起伏,使其中一个正交分量的噪声低于散粒噪声极限^[130]。利用压缩光填补激光干涉仪的真空通道,可以降低干涉仪某一正交分量的噪声,提高测量精度。此外,应用于精密测量领域的技术还包括:光频梳、飞秒激光、数字散斑干涉、光电自准直、基于二维位置探测器(position sensitive detector, PSD)的高精度激光位移测量等^[131],是目前及未来一段时间内的重要研究方向。

精准模拟与感知多物理场,量化重构空间复杂环境是开展地面研究的前提。地面实现多维度、高动态和精细化的多物理场模拟需要考虑:空间多物理场包含真空深冷背景、温度场、光场、应力场、微振动等多个因素;各因素的分布在轨具有时变性;多个因素之间的耦合关系导致模拟过程中存在联动效应。多种模拟方法、多个模拟设备以及精细化的模拟方法构成的复杂系统必不可少。在感知方面,传统的热敏电阻、应变片、测微陀螺等只能实现单个物理参量的单点测量,且动态能力难以覆盖空间多物理场的变化范围。

光纤传感技术由于其灵敏度高、稳定性好、抗电磁波干扰、功率损失小、耐高温腐蚀等诸多优势,在智能结构、

复合材料、土木工程、航空航天等领域得到了广泛应用。分布式多芯光纤传感器是将多根纤芯集合在一起,其感知测量范围最高可达数百千米,测点沿着光纤进行多参量感知,可实现高分辨率、连续的全分布式测量。已有众多学者进行了有关多芯光纤传感的相关室内试验研究工作,包括双芯、三芯、四芯和七芯等。基于空分复用多芯光纤的模式干涉类传感器可以实现弯曲、应变、加速度、流速和扭转等物理参量的同步感知。文献[132]提出了一种弱耦合型七芯光纤,并基于此研制出了一套 Mach-Zehnder 干涉型传感器,应用于温度、应变与曲率的测量^[133-135]。文献[136-139]验证了七芯传感光纤及多参量同步采集装置的有效性和实用性,采用 FBG、ROTDR 和 POFVS 组合的七芯光纤监测方案实现了应变、温度和振动频率的同步测量。利用多芯光纤可实现对温度、应变、微振动等多参量同步一体化感知,可以保证时域和空域的一致性。

5 结 论

通过精准模拟与感知多物理场,量化重构空间复杂环境,搭建毫角秒级误差标定系统,揭示多物理场耦合效应及误差演化机理,建立完备的多物理场效应分析和误差补偿模型,是未来突破高精度空间指向测量技术的主要途径。在此过程中需要解决理论、装置、方法和建模等难题,激光场调控、量子精密测量、分布式光纤传感、机器学习特征建模等多项新技术的融合应用为攻克这些难题提供了方案。未来多物理场误差标定装置需要融合应用多个学科的技术和成果,将成为综合性科学研究装置。

参考文献

- [1] 袁利,王苗苗,武延鹏,等. 空间星光测量技术研究发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(8): 7-18,2.
YUAN L, WANG M M, WU Y P, et al. Development of space starlight measurement technology: Review [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(8): 7-18,2.
- [2] BOZOOIJEN R W H V. SIRTf autonomous star tracker[C]. IR Space Telescopes and Instruments, SPIE, 2003, 4850: 108-121.
- [3] 卢欣,李春艳,李晓,等. 星光导航技术现状与发展综述[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(4): 1-8.
LU X, LI CH Y, LI X, et al. Current situation and development trends of starlight navigation technology[J]. Aerospace Control and Application, 2017, 43(4): 1-8.
- [4] 李林,袁利,王立,等. 从哈勃太空望远镜剖析微振动对高性能航天器指向测量与控制系统的影 响[J]. 光学 精密工程, 2020, 28(11): 2478-2487.
- LI L, YUAN L, WANG L, et al. Influence of micro vibration on measurement and pointing control system of high performance spacecraft from Hubble Space Telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(11): 2478-2487.
- [5] LIN L, LI Y, LI W, et al. Recent advances in precision measurement & pointing control of spacecraft [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34 (10): 191-209.
- [6] LIN L, LI W, LI Y, et al. Micro-vibration suppression methods and key technologies for high-precision space optical instruments[J]. Acta Astronautica, 2021, 180: 417-428.
- [7] 隋杰,程会艳,余成武,等. 星敏感器光轴热稳定性仿真分析方法[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(4): 37-41.
SUI J, CHENG H Y, YU CH W, et al. A thermal stability analysis and simulation method for boresight axis of star sensor [J]. Aerospace Control and Application, 2017, 43(4): 37-41.
- [8] 卢欣,武延鹏,钟红军,等. 星敏感器低频误差分析[J]. 空间控制技术与应用, 2014, 40(2): 1-7.
LU X, WU Y P, ZHONG H J, et al. Low frequency error analysis of star sensor[J]. Aerospace Control and Application, 2014, 40(2): 1-7.
- [9] KLIONER S A. A practical relativistic model for microarcsecond astrometry in space [J]. The Astronomical Journal, 2003, 125(3): 1580.
- [10] BRUMBERG V A. Essential relativistic celestial mechanics[M]. CRC Press, 2017.
- [11] WEIS H S, AUGUSTIN S. Simulation of thermal behavior in high-precision measurement instruments[J]. International Journal of Thermophysics, 2008, 29(3): 1184-1192.
- [12] DORLAND B N, DUDIK R P, DUGAN Z. The joint milli-arcsecond pathfinder survey (JMAPS): Mission overview and attitude sensing applications [J]. ArXiv Preprint, 2009, ArXiv:0904.4516.
- [13] WILL C M. Theory and experiment in gravitational physics[M]. Cambridge University Press, 2018.
- [14] MEDICINE N A O S E. Pathways to discovery in astronomy and astrophysics for the 2020s[J]. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s, 2021, DOI:10.17226/26141.
- [15] GARDNERR J P, MATHER J C, CLAMPIN M, et al. The james webb space telescope [J]. Space Science Reviews, 2006, 123(4): 485-606.
- [16] SPERGEL D, GEHRELS N, BRECKINRIDGE J, et al.

- Wide-field infrared survey telescope-astrophysics focused telescope assets WFIRST-AFTA final report[J]. ArXiv Preprint, 2013, ArXiv:1305.5422.
- [17] JONES M H, BEWSHER D, BROWN D S. Imaging of a circumsolar dust ring near the orbit of Venus [J]. Science, 2013, 342(6161): 960-963.
- [18] PILBRATT G L, RIEDINGER J R, PASSVOGEL T, et al. Herschel space observatory-An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy [J]. Astronomy & Astrophysics, 2010, 518: L1.
- [19] WRIGHT E L, EISENHARDT P R M, MAINZER A K, et al. The wide-field infrared survey explorer (WISE): Mission description and initial on-orbit performance[J]. The Astronomical Journal, 2010, 140(6): 1868.
- [20] SHIBAI H. AKARI (ASTRO-F): Flight performance and preliminary results [J]. Advances in Space Research, 2007, 40(5): 595-599.
- [21] CIEŚLAK M J, GAMAGE K A A, GLOVER R. Coded-aperture imaging systems: Past, present and future development-A review [J]. Radiation Measurements, 2016, 92: 59-71.
- [22] SUTHERLAND W, EMERSON J, DALTON G, et al. The visible and infrared survey telescope for astronomy(VISTA): Design, technical overview, and performance [J]. Astronomy & Astrophysics, 2015, 575: A25.
- [23] ZHONG X, SU Z, ZHANG G, et al. Analysis and reduction of solar stray light in the nighttime imaging camera of Luojia-1 satellite[J]. Sensors, 2019, 19(5): 1130.
- [24] PETERSON G L, JOHNSTON S C, THOMAS J. Specular baffles[C]. SPIE, 1993, 1753: 65-76.
- [25] SCHNEIDER E. Thermal design of retroreflective stray light fore-baffles for space borne optical systems [C]. SPIE, 2001, 4198: 82-95.
- [26] SHOLL M, GROCHOCKI F, FLEMING J, et al. Stray light design and analysis of the SNAP telescope [C]. SPIE, 2007.
- [27] LIN S, WANG H, LIU Y, et al. Research on stray light suppression of space debris detection camera[C]. SPIE, 2019.
- [28] LIN S M, WANG H, LIU Y, et al. A thermalization for the supporting structure of space camera primary and secondary mirrors[C]. SPIE, 2019.
- [29] KAWANO H, SATO Y, MITANI K, et al. New light-shielding technique for shortening the baffle length of a star sensor[C]. SPIE, 2002, 4767: 62-69.
- [30] KAWANO H, SHIMOJI H, YOSHIKAWA S, et al. Solar-light shielding using a near-hemispherical lens for a star sensor [J]. Optical Engineering, 2006, 45(12): 124403.
- [31] WARREN P A, SILVER M J, DOBSON B J, et al. Experimental characterization of deployable outer barrel assemblies for large space telescopes [C]. SPIE, 2013, 8860: 49-61.
- [32] ARENBERG J W, ADAMSON J, HARPOLE G, et al. Determination of emissivities of key thermo-optical surfaces on the James Webb Space Telescope [C]. SPIE, 2014, 9143: 1113-1122.
- [33] AUVERGNE M, BODIN P, BOISNARD L, et al. The CoRoT satellite in flight: Description and performance[J]. Astronomy & Astrophysics, 2009, 506(1): 411-424.
- [34] HAGOPIAN J, EVANS T, BOLCAR M, et al. ICESat-2 ATLAS telescope testing [C]. 2015 IEEE Aerospace Conference, IEEE, 2015: 1-7.
- [35] MACKENTY J W, KIMBLE R A, O'CONNELL R W, et al. Wide Field Camera 3: Science capabilities and plans for flight operation [C]. Space Telescopes and Instrumentation 2008: Optical, Infrared, and Millimeter. International Society for Optics and Photonics, 2008.
- [36] KIMBLE R A, MACKENTY J W, O'CONNELL R W, et al. Wide field camera 3: A powerful new imager for the hubble space telescope [C]. Proc SPIE, 2008, 7010.
- [37] MACKENTY J W, KIMBLE R A, O'CONNELL R W, et al. On-orbit performance of HST wide field camera 3 [C]. Proc. SPIE, 2010, 7731.
- [38] BOUCHEZ A H, ACTON D S, BIASI R, et al. The Giant Magellan telescope adaptive optics program [C]. Adaptive Optics Systems IV. International Society for Optics and Photonics, 2014, 9148: 91480W.
- [39] 朱杨, 张帆, 宋莹, 等. 用于高精度卫星姿态测量的大相对孔径高杂光抑制比星敏感器光学设计 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 1-9.
- ZHU Y, ZHANG F, SONG Y, et al. Optical design of large relative aperture and high stray light suppression ratio star sensor for high precision satellite attitude measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 1-9.
- [40] WONG M H. Amplitude of fringing in WFC3/UVIS narrowband red filters [J]. Space Telescope WFC Instrument Science Report, 2010: 4.
- [41] PIRZKAL N, MACK J, DAHLEN T, et al. Sky flats: Generating improved WFC3 IR flat-fields [J]. STSCI Instrument Science Report WFC3, 2011, 11.
- [42] PIRZKAL N, VIANA A, RAJAN A. The WFC3 IR "Blobs" [J]. WFC3 Instrument Science Report, 2010, 6.
- [43] HILBERT B, PETRO L. WFC3/IR dark current stability [J]. WFC3 ISR, 2012, 11: 2018-03.
- [44] MCCULLOUGH P, MACKENTY J. Considerations for

- using spatial scans with WFC3[J]. Instrument Science Report WFC3, 2012, 8: 2012.
- [45] DE BRUIJNE J, KOHLEY R, PRUSTI T. Gaia: 1 000 million stars with 100 CCD detectors [C]. Space Telescopes and Instrumentation 2010: Optical, Infrared, and Millimeter Wave. International Society for Optics and Photonics, 2010.
- [46] MORA A, BASTIAN U, BIERMANN M, et al. The gaia basic angle: Measurement and variations[J]. European Astronomical Society Publications Series, 2014, 68: 65-68.
- [47] LIU J, LI Y Z, CHANG J, et al. A review of small satellite thermal control systems [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1): 81-86.
- [48] TSAI J R. Overview of satellite thermal analytical model[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, 41(1): 120-125.
- [49] TOTANI T, OGAWA H, INOUE R, et al. Thermal design procedure for micro-and nanosatellite pointing to earth[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2014, 28(3): 524-533.
- [50] REISS P, HAGER P, BEWICK C, et al. New methodologies for the thermal modeling of CubeSats[C]. 26th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2012: 1-12.
- [51] ELHADY A M. Design and analysis of a LEO micro-satellite thermal control including thermal contact conductance[C]. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2010, DOI: 10.1109/AERO.2010.5446763.
- [52] GILMORE D G. Spacecraft thermal control handbook[M]. El Segundo: Aerospace Press, 2002.
- [53] CUNNINGHAM F G. Calculation of the ellipse factor for elliptical satellite orbits: NASA TND-1347 [R]. U. S. Gov. Public, 1962: 1399-1400.
- [54] ESCOBAL P R. Methods of orbit determination [M]. Malabar: Krieger Publishing Company, 1975.
- [55] JACQUES L. Thermal design of the Oufiti-1nanosatellite[D]. Liège: University of Liège, 2009.
- [56] VERLAAN A L, HOGENHUIS H, PIJNENBURG J, et al. LISA telescope assembly optical stability characterization for ESA[C]. SPIE, 2017.
- [57] WEISE D, MARENACI P, WEIMER P, et al. Optomechanical architecture of the LISA instrument [C]. SPIE, 2017, 10566.
- [58] LIVAS J C, SANKAR S R. Optical telescope system-level design considerations for a space-based gravitational wave mission[C]. SPIE, 2016, 9904.
- [59] GONG Y, LUO J, WANG B. Concepts and status of Chinese space gravitational wave detection projects[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(9): 881-889.
- [60] RUAN W H, GUO Z K, CAI R G, et al. Taiji program: Gravitational-wave sources[J]. International Journal of Modern Physics A, 2020, 35(17): 2050075.
- [61] LIGHTSEY P A, WEI Z. James webb space telescope stray light performance status update[C]. SPIE, 2012, 8442: 84423B.
- [62] BOLCAR M R, BALASUBRAMANIAN K, CLAMPIN M, et al. Technology development for the advanced technology large aperture space telescope(ATLAST) as a candidate large UV-optical-infrared (LUVOIR) surveyor [C]. SPIE, 2015, 9602: 86-99.
- [63] TANG H, XIE J, TANG X, et al. On-orbit radiometric performance of GF-7 satellite multispectral imagery[J]. Remote Sensing, 2022, 14(4): 886.
- [64] YAO J, TANG X, LI G, et al. Cloud detection of GF-7 satellite laser footprint image[J]. IET Image Processing, 2021, 15(10): 2127-2134.
- [65] LIU L, XIE J, TANG X, et al. Coarse-to-fine image matching-based footprint camera calibration of the GF-7 satellite[J]. Sensors, 2021, 21(7): 2297.
- [66] ZHOU N, LI C, GAO W, et al. A secondary mirror adjustment system with hexapod structure for optical telescope application[C]. SPIE, 2014.
- [67] ZHONG P, LI C, JING N, et al. Research on lightweight passive deployment mechanism for the secondary mirror in the deployable space telescope[C]. SPIE, 2016.
- [68] ZHAO C, LI C, ZHOU N, et al. Self-deployable structure designed for space telescope for microsatellite application[C]. SPIE, 2016.
- [69] DAI H, LI C, LI L, et al. Design of deployment systems for high-resolution deployable telescope based on CubeSat[C]. SPIE, 2021.
- [70] LEI W, LI C, ZHONG P, et al. Realization and testing of a deployable space telescope based on tape springs[C]. SPIE, 2017.
- [71] LIAN Y, HUO Z, CHENG Y. On the dynamics and control of the sun-earth L2 tetrahedral formation[J]. Astrodynamics, 2021, 5(4): 331-346.
- [72] QUAN H, YINGHONG J, SHIJIE X. Adaptive suppression of linear structural vibration using control moment gyroscopes[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2014, 37(3): 990-996.
- [73] JEDRICH N, ZIMBELMAN D, TURCZYN M, et al. Cryocooler induced micro-vibration disturbances to the hubble space telescope [C]. Proceedings of Cranfield Space Dynamics Conference, 2002.
- [74] ROBERTO U, FLAVIA M. Artemis micro-vibration

- environment prediction, spacecraft structures, materials and mechanical testing [C]. Proceedings of a European Conference, Braunschweig, 1998: 4-6.
- [75] LUO Q, LI D, ZHOU W, 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.
- [76] LIU K C, BLAUROCK C, MOSIER G E. Pointing control system design and performance evaluation of TPF coronagraph. Modeling and systems engineering for astronomy [C]. Proc. SPIE 5497, 2004: 437-448.
- [77] MOSIER G, FEMIANO M, HA M. Fine pointing control for a next generation space telescope [C]. Proc. SPIE 3356, 1998: 1070-1077.
- [78] 易敏, 邢飞, 孙婷, 等. 高精度星敏感器标定方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2154-2160.
YI M, XING F, SUN T, et al. Calibration method of high accuracy star sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2154-2160.
- [79] KNIGHT J S, LIGHTSEY P, BARTO A. Verification of the observatory integrated model for the JWST [C]. Modeling, Systems Engineering, and Project Management for Astronomy IV, SPIE, 2010, 7738: 443-450.
- [80] ANGELI G Z, DIERICKX P. Modeling, systems engineering, and project management for astronomy VII [C]. Proc. of SPIE, 2016, 9911.
- [81] MOSIERA G E, HOWARD A J M, JOHNSTON A J D, et al. The role of integrated modeling in the design and verification of the James Webb space telescope [C]. Space Systems Engineering and Optical Alignment Mechanisms, SPIE, 2004: 96-107.
- [82] LI D, RUAN J. Method adapting to the star sensor's star extraction [J]. Laser and Infrared, 2009, 39(12): 1348-1350.
- [83] LIE C C. Accuracy performance of star trackers-A tutorial [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(2): 587-599.
- [84] SUN G F, ZHANG G Y, ZHENG R, et al. Star sensor calibration research and development [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2010, 33(4): 8-14.
- [85] WANG A, JIA C Y, SUN PENG. Precise apparent position calculation of star in navigation [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 117-120.
- [86] MALAK A S, DANIELE M, JOHN L J. Nondimensional star identification for uncalibrated star cameras [J]. Journal of Astronautical Sci, 2006, 54(1): 1-17.
- [87] TANG J, WANG A G, ZHANG L. The static test method in attitude measurement accuracy [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(5): 115-119.
- [88] SHEARD B S, HEINZEL G, DANZMANN K, et al. Inter satellite laser ranging instrument for the GRACE follow-on mission [J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(12): 1083-1095.
- [89] DUNNE A K, MALLON J, WHELAN P F. A comparison of new generic camera calibration with the standard parametric approach [C]. Proceedings of the IAPR Conference on Machine Vision Applications, 2007.
- [90] LI W, SCHULTE M, BOTHE T, et al. Beam based calibration for optical imaging device [C]. 2007 3DTV Conference, IEEE Press, 2007.
- [91] GROSSBERG M D, NAYAR S K. A general imaging model and a method for finding its parameters [C]. Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision, IEEE Press, 2001: 108-115.
- [92] STURM P, RAMALINGAM S. A generic calibration concept: Theory and algorithms [D]. INRIA, 2003.
- [93] SHAH S, AGGARWAL J K. Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) fish-eye lens camera with distortion model and accuracy estimation [J]. Pattern Recognition, 1996, 29(11): 1775-1788.
- [94] KANNALA J, BRANDT S S. A generic camera model and calibration method for conventional, wide-angle, and fish-eye lenses [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(8): 1335-1340.
- [95] BOTHE T, LI W S, SCHULTE M, et al. Vision ray calibration for the quantitative geometric description of general imaging and projection optics in metrology [J]. Applied Optics, 2010, 49(30): 5851-5860.
- [96] BRÄUER-BURCHARDT C. Correcting lens distortion in 3D measuring systems using fringe projection [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5962: 59620J.
- [97] GIMKIEWICZ C, URBAN C, INNERHOFER E, et al. Ultra-miniature catadioptrical system for an omnidirectional camera [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6992.
- [98] LUCAS B D, KANADE T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision [C]. Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1981: 674-679.
- [99] SONG R J, ZHANG Z Q, LIU H Y. Edge connection based Canny edge detection algorithm [J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2017, 27(4): 740-747.
- [100] WHITE J S. Satellite attitude control utilizing the earth's magnetic field [R]. NASA-TN-D-1068, 1961.
- [101] JAVED A, LEE H, KIM B, et al. Vibration

- measurement of a rotating cylindrical structure using subpixel-based edge detection and edge tracking [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108437.
- [102] WANG S Y, WEI C L, LIU Q R. A quick attitude maneuver algorithm for agile satellite [J]. *Aerospace Control and Application*, 2011, 37(4): 36-40.
- [103] WINTERNITZ L M, BAMFORD W A, HECKLER G W. GPS receiver for high altitude satellite navigation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(4): 541-556.
- [104] YANG J, YANG Y K, LI J S, et al. A novel satellite-equipped receiver for autonomous monitoring of GNSS navigation signal quality [J]. *Science China Technological Sciences*, 2016, 59(7): 1137-1146.
- [105] LONG A, KELBEL D, LEE T, et al. Autonomous navigation improvements for high-earth orbiters using GPS [R]. NASA, Goddard Space Flight Center, 2000: 0092083.
- [106] MULLER V. Laser Ranging Interferometer on GRACE Follow-On: Current Status [C]. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2020: 10566.
- [107] CHANG J S, GENG Y H, GUO J X, et al. Calibration of satellite autonomous navigation based on attitude sensor [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 40(1): 185-191.
- [108] TRUJILLO-PINO A, KRISSIAN K, ALEM Š N-FLORES M, et al. Accurate subpixel edge location based on partial area effect [J]. *Image and Vision Computing*, 2013, 31(1): 72-90.
- [109] ORGHIDAN R. Catadioptric stereo based on structured light projection [D]. Girona: Universitat de Girona, 2006.
- [110] VEERARAGHAVAN A, RASKAR R, AGRAWAL A, et al. Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 69.
- [111] TISCHENDORF J, TRAUTWEIN C, AACH T, et al. Camera calibration for fish-eye lenses in endoscopy with an application to 3D reconstruction [C]. 2007 4th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging, 2007: 1176-1179.
- [112] ZOMET A, FELDMAN D, PELEG S, et al. Mosaicing new views: The crossed-slits projection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 741-754.
- [113] PAJDLA T. Stereo with oblique cameras [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47: 161-170.
- [114] STURM P. Multi-view geometry for general camera models [C]. 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Press, 2005: 206-212.
- [115] YU J Y, MCMILLAN L. General linear cameras [M]. PAJDLA T, MATAS J. *Computer vision-ECCV 2004. Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer, 2004, 3022: 14-27.
- [116] NAYAR S K. Computational cameras: Redefining the image [J]. *Computer*, 2006, 39(8): 30-38.
- [117] HOUGH J, ROBERTSON D, WARD H, et al. LISA-The interferometer [J]. *Advances in Space Research*, 2003, 32(7): 1247-1250.
- [118] RAZA S N, REHMAN H, LEE S G, et al. Artificial intelligence based camera calibration [C]. 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC), 2019.
- [119] WEN J, SCHWEITZER G. Hybrid calibration of CCD cameras using artificial neural nets [C]. *Neural Networks*, 1991.
- [120] JUN J, KIM C. Robust camera calibration using neural network [C]. *Tencon 99 IEEE Region 10 Conference*, 1999.
- [121] LU C H, ZHANG Z Y, AN P. Stereo vision camera calibration based on neural network [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(9): 4.
- [122] WAND V. Interferometry at low frequencies: Optical phase measurement for LISA and LISA pathfinder [D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2007.
- [123] BENDER P L, HALL J L, YE J, et al. Satellite-satellite laser links for future gravity missions [J]. *Space Science Reviews*, 2003, 108(1): 377-384.
- [124] RASKAR R. Less is more: Coded computational photography [J]. *The Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers*, 2008, 62(12): 1952-1958.
- [125] SHERIF S S, CATHEY W T, DOWSKI E R. Phase plate to extend the depth of field of incoherent hybrid imaging systems [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2709-2721.
- [126] TREIBITZ T, SCHECHNER Y, KUNZ C, et al. Flat refractive geometry [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(1): 51-65.
- [127] BAKER S, NAYAR S K. A theory of catadioptric image formation [C]. *Sixth International Conference on Computer Vision*, IEEE Press, 1998: 35-42.

- [128] CAI Z W, LIU X L, PENG X, et al. Ray calibration and phase mapping for structured-light-field 3D reconstruction [J]. *Optics Express*, 2018, 26 (6): 7598-7613.
- [129] NGIAM J, CHEN Z, BHASKAR S, et al. Sparse filtering [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2011, 24.
- [130] REHMAN S U, TU S, HUANG Y, et al. Face recognition: A novel un-supervised convolutional neural network method [C]. 2016 IEEE International Conference of Online Analysis and Computing Science (ICOACS), IEEE, 2016: 139-144.
- [131] LEI Y, JIA F, LIN J, et al. An intelligent fault diagnosis method using unsupervised feature learning towards mechanical big data [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 3137-3147.
- [132] CHEN W T, ZHU A Y, CAPASSO F. Flat optics with dispersion-engineered metasurfaces [J]. *Nature Reviews Materials*, 2020, 5(8): 604-620.
- [133] JOO W J, KYOUNG J, ESFANDYARPOUR M, et al. Metasurface-driven OLED displays beyond 10, 000 pixels per inch [J]. *Science*, 2020, 370 (6515): 459-463.
- [134] PARK J, JEONG B G, KIM S I, et al. All-solid-state spatial light modulator with independent phase and amplitude control for three-dimensional LiDAR applications [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(1): 69-76.
- [135] YAN Z, JIA X, SU X, et al. Cascaded entanglement enhancement [J]. *Physical Review A*, 2012, 85(4): 040305.
- [136] ZHOU Y, JIA X, LI F, et al. Experimental generation of 8.4 dB entangled state with an optical cavity involving a wedged type-II nonlinear crystal [J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4952-4959.
- [137] MENG Y, HU F, LIU Z, et al. Chip-integrated metasurface for versatile and multi-wavelength control of light couplings with independent phase and arbitrary polarization [J]. *Optics Express*, 2019, 27 (12): 16425-16439.
- [138] BAO X, CHEN L. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [139] ROMERO A, GATTA C, CAMPS-VALLS G. Unsupervised deep feature extraction for remote sensing image classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 54 (3): 1349-1362.

作者简介



赵琴, 2021 年于清华大学获得博士学位, 现为北京控制工程研究所工程师, 主要研究方向为空间光电测量。

E-mail: 18810379225@163.com

Zhao Qin received her Ph. D. degree from Tsinghua University in 2021. She is currently a research fellow at Beijing Institute of Control Engineering, China. Her main research interest is space optoelectronic measurement technology.



王立, 2014 年于西北工业大学获得博士学位, 现为北京控制工程研究所研究员, 主要研究方向为空间光电测量。

E-mail: wupeng3992@163.com

Wang Li received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University in 2014. He is currently a research fellow at Beijing Institute of Control Engineering, China. His main research interest is space optoelectronic measurement technology.



袁利 (通信作者), 2018 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为中国空间技术研究院副院长, 研究员, 主要研究方向为制导、导航与控制。

E-mail: yuanli@spacechina.com

Yuan Li (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2018. He is currently a research fellow at China Academy of Space Technology, China. His main research interests include the technology and engineering development of spacecraft control system.