

文章编号 1004-924X(2023)06-0822-17

航天光学相机微振动的光机集成分析现状与展望

马 斌^{1,2,3}, 宗易昕⁴, 李宗轩^{1,3*}, 李清雅^{1,3}, 张德福^{1,3}, 李云峰^{1,2,3}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 天基动态快速光学成像技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

4. 中国科学院 前沿科学与教育局, 北京 101408)

摘要:随着我国航天事业的持续发展和不断进步, 航天光学相机正在朝着大口径、大视场、高分辨、轻量化的趋势发展, 这对相机的设计分析提出了更高的要求。光学系统焦距与光学口径不断增加, 光机系统刚度受质量限制提升空间有限, 其对星上活动部件在轨正常工作所引起的微振动也越来越敏感。航天光学相机的微振动对其在轨成像质量会造成影响。因此, 近年来卫星微振动及其控制问题越来越受到关注。通过对国内外航天光学相机的光机集成分析方法的论述与分析, 探讨了目前光机集成分析的关键技术与发展方向。针对目前国内光机集成分析其存在的局限, 提出了建立微振动传递全链路数学模型进而构建航天光学相机微振动像质退化机理的设想。

关键词:微振动; 航天光学相机; 线性状态空间; 光机集成

中图分类号: V19 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20233106.0822

Status and prospect of opto-mechanical integration analysis of micro-vibration in aerospace optical cameras

MA Bin^{1,2,3}, ZONG Yixin⁴, LI Zongxuan^{1,3*}, LI Qingya^{1,3}, ZHANG Defu^{1,3}, LI Yunfeng^{1,2,3}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Space-Based Dynamic Fast Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

4. Bureau of Frontier Science and Education, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China)

* Corresponding author, E-mail: lizongx@126.com

Abstract: With the continuous development and progress of China's aerospace industry, aerospace optical cameras are becoming more lightweight with large apertures, large fields of view, and high resolution, which results in higher requirements for their design and analysis. The focal length and optical aperture of optical systems continue to increase, whereas the stiffness of optical mechanical systems is limited by mass. They are also increasingly sensitive to micro-vibrations caused by the normal operation of moving satellite parts in orbit. The micro-vibration of space optical cameras affects their imaging quality in orbit.

收稿日期: 2022-05-25; 修订日期: 2022-06-15.

基金项目: 吉林省科技发展计划资助项目 (No. 20200201294JC)

Therefore, in recent years, satellite micro vibration and its control have attracted increasing attention. Based on discussions and analyses of the optical mechanical integration analysis methods of aerospace optical cameras at home and abroad, the key technologies and development directions of optical mechanical integration analysis are discussed. In view of the limitations of optical mechanical integration analysis in China, this study proposes the idea of establishing a mathematical model of the entire link of micro-vibration transmission and then constructing the degradation mechanism of the micro-vibration image quality of space optical cameras.

Key words: micro-vibration; aerospace optical camera; linear state space; opto-mechanical integration

1 引 言

航天光学相机通常作为载荷元件搭载于卫星平台上。因其具备覆盖范围广、回访速度快、不受大气扰动影响和地理条件限制等优势,在资源普查、环境监测、地形测绘、大气和海洋观测、地球辐射测量、军事侦察与预警以及天文观测等诸多领域都得到了广泛应用^[1]。随着航天技术的不断发展,对相机光学系统、成像系统分辨率要求的不断提高,大口径、长焦距、高分辨、轻量化成为近年来航天光学相机发展的主要趋势^[2-3],这对光学相机的设计分析提出了更高的要求。光学相机的地面像元分辨率已经迈入亚米级行列,对平台与光学系统在轨成像期间的稳定性要求也越来越高。光学系统焦距与光学口径不断增加,而光机系统刚度受质量限制提升空间有限,光学相机对星上活动部件在轨正常工作所引起的微振动也越来越敏感,进而影响其在轨成像质量^[4]。为了保证航天光学相机的成像质量,对微振动的研究不可或缺。

航天光学相机的设计研发是涉及光、机、电、热、软等多方面技术的综合应用过程^[5]。如今科研任务对系统整体的要求越来越严苛,虽然光学、机械、电子学等学科都有专业的分析和设计软件,但面对系统整体设计分析中的各学科间动态交叉问题时却显得无能为力^[6]。近年来,现代控制理论中的状态空间模型逐步在其他学科领域推广起来,如结构动力学、弹性力学等。线性状态空间是动态时域模型,以隐含着的时间为自变量,可以反映动态系统在输入变量作用下在系统内部的状态变化以及系统的输出变量及输入变量之间的关系。目前,线性状态空间模型已经成为研究动态系统的重要工具^[7]。

2 微振动的特点及危害

随着航天光学相机对高分辨率的不断追求,微振动已经成为高分辨航天光学相机研制过程中必须攻克的难关。微振动是指航天光学相机在轨运行期间,由空间外界环境和内部转动部件正常工作造成的航天光学相机幅度较小的往复运动或振荡^[8]。微振动具有多样性、固有性、难控性等特点^[9],这些特点也决定了对微振动研究的复杂性。

2.1 微振动的分类及特点

航天光学相机在轨运行期间会受到各种扰振源的影响而产生微振动。扰振源包括两个部分:一部分是来自航天光学相机外部环境的扰振源,主要包括重力场以及太空温度变化等外部环境对航天光学相机的作用力;另一部分是来自航天光学相机内部的扰振源^[10],如图 1 所示,主要包括天线转动机构、太阳帆板转动机构、姿控系统动量轮与力矩陀螺等运动执行机构。

国内外相关研究表明,来自航天光学相机外部环境的扰振源具有不确定性且对航天光学相机本身的影响较小,而来自航天光学相机内部的

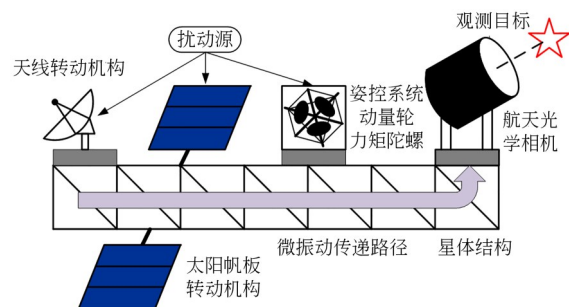


图 1 航天光学相机微振动的内部扰振源

Fig. 1 Internal disturbance source of micro-vibration of aerospace optical camera

扰动源中反作用飞轮和控制力矩陀螺影响较大^[11],因此微振动相关研究主要集中在航天光学相机内部扰振源产生的微振动,表1列举了航天光学相机内部主要扰振源及其相关描述。

表1 航天光学相机内部主要扰振源

Tab.1 Main disturbance source inside aerospace optical camera

序号	扰动源	频率	描述
1	飞轮	中/高	包含一系列转速的谐波运动
2	力矩陀螺	中/高	转动部件不平衡引起的谐波振动
3	伺服机构	低/中/高	驱动电机产生振动
4	热控组件	低/中	制冷机的机械运动

针对国内外学者对微振动展开的相关研究,航天光学相机在轨微振动主要有以下特点:

(1)多样性:航天光学相机在轨运动期间,扰振源相对复杂,外部空间环境和内部转动部件正常工作等都会造成其幅度较小的往复运动或振荡^[8];

(2)固有性:微振动是由航天光学相机内外外部扰振源共同作用的,而非设备故障等其他原因造成,是系统的固有特性,无法消除,只能采取相应手段进行衰减或者抑制^[12];

(3)难控性:微振动属于幅度较小的往复运动或者振荡,很难通过姿态控制系统进行测量,频段范围也无法精确控制;此外,频段覆盖零到数千赫兹范围,需要主动控制以及隔振等多种手段组合才能达到预期效果^[13]。

2.2 微振动的危害及研究意义

航天技术的不断发展使得我们对空间分辨率、系统稳定性以及成像质量的要求越来越高。在这个过程中,航天光学相机的口径和焦距不断增加,相机重量也随之增加,但实际工程中对相机的重量有严格要求,采取轻量化设计会使系统刚度受限,因此光学成像系统对航天光学相机在轨正常工作产生的微振动越来越敏感,在微振动作用下引起成像质量退化。

微振动对于航天光学相机成像质量的影响主要体现在两个方面:首先是像面和探测器相对运动引起的视轴抖动;其次是各光学元件的面形变化及相互之间产生的刚体位移引起光学系统传函下降^[14]。图2是一个典型的卡塞格林两反式光学系统,从波动光学角度考虑:反射镜的面形

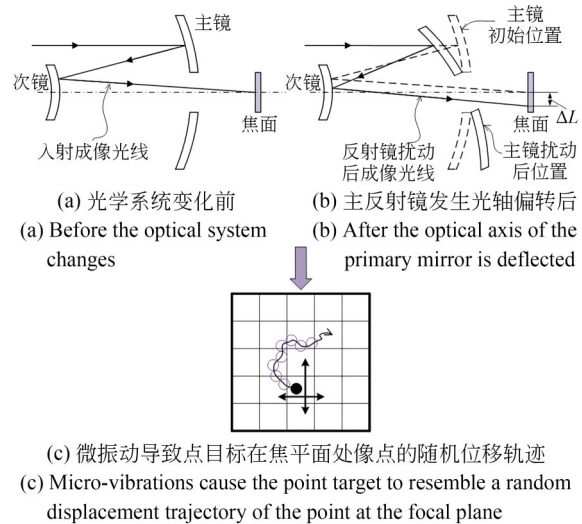


图2 扰动引起视轴抖动产生像移

Fig.2 Perturbation causes boresight jitter to produce image shift

局部如果出现矢高方向大小为 Δ 的变形,将导致反射光的波前局部出现 2Δ 的光程差。同时反射镜的刚体位移也将导致系统总的波前差发生畸变劣化。在航天光学相机实际成像过程中,微振动是一个动态的过程,探测器在积分时间内图像极易受到微振动干扰而产生退化。微振动的主要特点是多样性、固有性、难控性,其产生的位移一般是微米量级甚至更小,但带来的危害却不可忽视。由于航天光学相机的对地观测距离较远,可能会引起巨大误差并严重影响成像质量^[9]。

微振动扰振源多种多样,包括相机内部各类载荷及外部空间环境。航天光学相机在轨正常工作期间不可避免受到微振动的影响,最终会对航天光学相机的稳定性及成像质量造成影响,甚至有可能导致任务失败。在轨微振动严重制约着航天技术的发展,解决这一问题迫在眉睫。

3 光机集成分析发展趋势

光机热集成分析的概念是由美国的 Honeywell 公司光电中心的 Jacob Miller 等人于 1981 年首次提出^[1]。光机热集成分析是一种综合光、机、电、热、软等交叉学科进行航天光学相机总体性能分析的方法。光机热集成分析方法的提出距今已有四十多年,它是综合考虑机械结构、热变形与光学成像这三者之间相互关系的一种系统

分析方法。航天光学相机领域的设计广泛地采用光机热集成分析方法与技术,这也标志着光机热集成分析方法与技术已经逐渐走向成熟^[15]。

目前航天光学相机的微振动的传统光机热集成分析途径是将相机简化为刚体,将星体结构视为弹性体,进而简化为整星结构动力学问题。忽视了遥感器内部光学元件的结构微振动对成像质量的影响。而基于线性状态空间的光机集成方法则将光学系统、机械结构、有限元分析集成于状态空间中,从宏观和微观的角度共同体现微振动对成像质量的影响。

3.1 传统光机集成分析方法

3.1.1 超新星/加速探测器

超新星/加速探测器(Super Nova/Acceleration Probe, SNAP)的主要科学任务分两个交替阶段进行:发现超新星,以及检测到超新星的后续光谱。图3为SNAP航天器的结构及光学系统模型。

NASA将SNAP航天器的微振动问题简化为整星结构动力学问题^[17]。如图4所示,SNAP

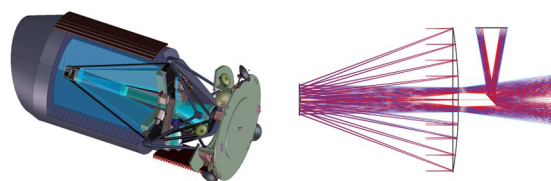


图3 SNAP航天器的结构及光学系统模型^[16]

Fig.3 Structure and optical system model of the SNAP spacecraft^[16]

航天器被简化为刚性耦合的多质量点(Multi-point Constraint, MPC),进而通过反作用飞轮输入的扰动激励航天器内部光学元件与承力结构发生动力学响应,以评估由反作用轮振动引起的镜面抖动幅度。将镜面抖动幅度与光学系统成像时的波前差相对应,实现微振动对SNAP航天器成像质量影响的光机热集成分析。在该模型中,所有的预测都是基于系统的单个组件进行的。最后,NASA根据分析结果对反作用飞轮的最高速度做出限制,并实施调谐减振器等减振技术,将抖动降低到可接受的水平。

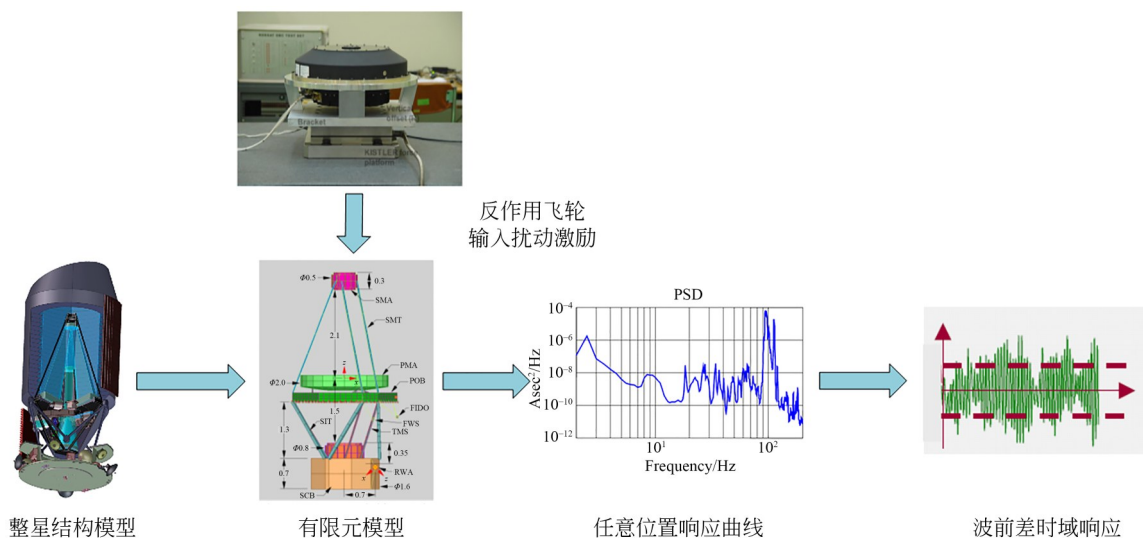


图4 SNAP航天器光机集成分析流程

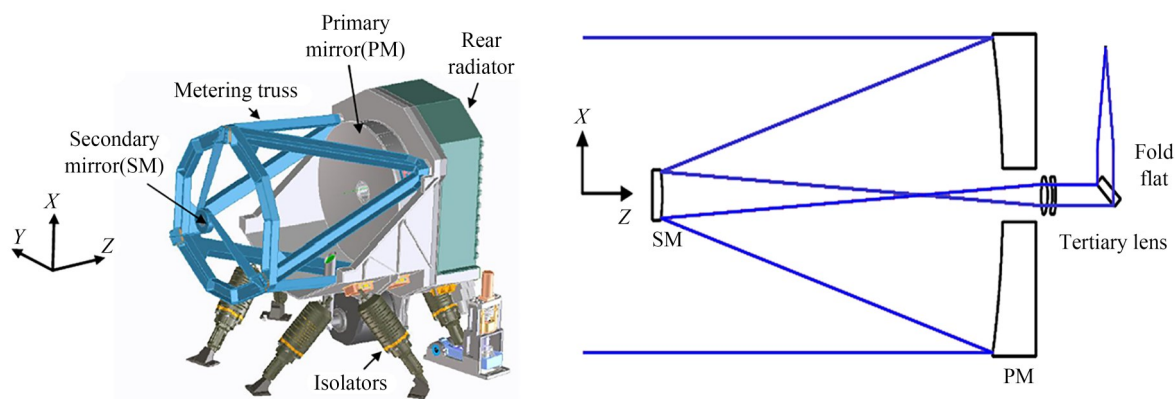
Fig.4 Optical-mechanical integration analysis process of SNAP spacecraft

3.1.2 火星激光通信

火星激光通信示范项目(Mars Laser Communications Demonstration, MLCD)的目标是在轨道火星终端和地面终端之间开发一种光通信链路,数据速率从1 Mbirs/s到50 Mbirs/s。麻省理工学院林肯实验室联合喷气推进实验室和美

国宇航局戈达德太空飞行中心共同承担该项目。火星终端有效载荷及光学系统模型如图5所示。

在火星激光通信终端的光机集成设计中,较为重要的任务是限制光学系统的视轴(LOS)抖动,由于航天器的平移和角运动激励,NASA和MIT合作在火星终端有效载荷中利用有限元模型

图5 火星终端有效载荷模型和光学系统模型^[18]Fig. 5 Mars terminal payload model and optical system model^[18]

对载荷结构进行了LOS抖动分析^[18]。火星激光通信终端载荷的有限元模型如图6所示。基于有限元模型获取系统任意位置的响应,进而得出线性像移方程,计算物空间的视轴误差。线性像移方程利用光学灵敏度系数将有限元分析(Finite

Element Analysis, FEA)预测的光学元件运动与LOS抖动误差联系起来。采用光学分析软件Sig-Fit计算图像运动方程,分别对主镜、次镜、透镜组和平面镜的刚体运动进行抖动分析,可以指导早期的设计工作。

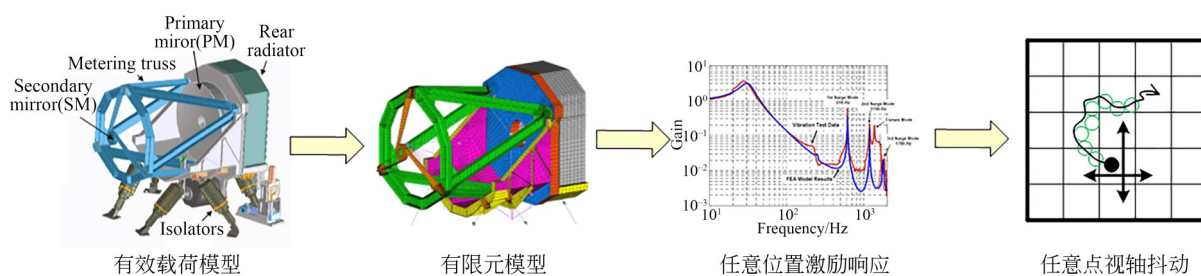


图6 火星终端有效载荷光机集成分析流程

Fig. 6 Optical-mechanical integration analysis process of Mars terminal payload model

3.1.3 风云四号卫星(FY-4)

风云四号卫星(FY-4)是由上海航天技术研究院研制的第二代地球静止轨道(GEO)定量遥感气象卫星,采用三轴稳定控制方案,将接替自旋稳定的风云二号(FY-2)卫星,其连续、稳定运行将大幅提升我国静止轨道气象卫星探测水平^[19]。FY-4卫星与欧美第三代静止轨道气象卫星水平相当。如图7为风云四号卫星。

微振动是一个极其复杂的系统问题。在FY-4卫星研制过程中,其装载的干涉式大气垂直探测仪为光谱类载荷,与通常的成像类卫星不同,正常工作时不仅需要物像间严格的对应关系,更需要确定光谱位置及干涉图对比度的变

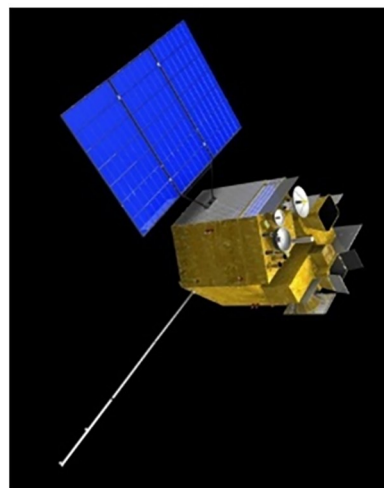


图7 风云四号卫星

Fig. 7 FY-4 satellite

化^[12],因此对微振动的光机集成分析要求更高。

如图 8 所示,董瑶海等结合风云四号在微振动方面的高要求,展开相关研究^[20]。统计星上振源,研究振源特性,进而获取微振动产生机理及频谱成分为后续研究提供依据;研究微振动在星体内的传递链路,对主要活动部件进行振动测量及频谱分析,以掌握并获取整星的局部共振特性;根据整星微振动的局部共振特性规划整星级频谱,有效避开整星潜在的耦合共振因素;最后根据整星级频谱规划和微振动的局部共振特性去进行整星隔振设计。

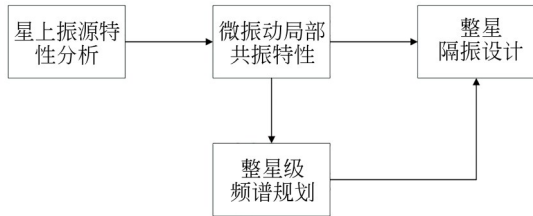


图 8 风云四号光机集成分析
Fig. 8 Optical-mechanical integration analysis of FY-4

3.1.4 “吉林一号”星座(JL-1)

“吉林一号”卫星星座由长光卫星技术有限公司建设,是我国重要的商业光学遥感卫星星座。其覆盖面积累计达 $1.33 \times 10^8 \text{ km}^2$, 预计到 2025 年左右,“吉林一号”将实现 138 颗卫星组网,成为国内规模最大的商业光学遥感卫星星座。如图 9 所示为吉林一号高分 03 卫星模型及其光学系统。

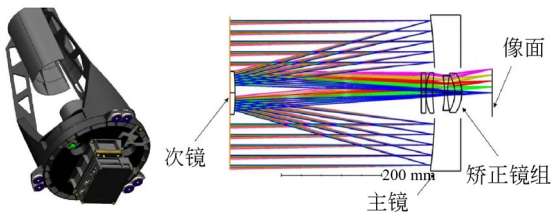


图 9 吉林一号高分 03 卫星模型及其光学系统^[21]
Fig.9 JL-1 Gaofen-03 satellite model and optical system^[21]

在高分辨光学遥感卫星的研制过程中,微振动是影响卫星指向精度和成像质量的重要指标。针对在轨微振动问题,中科院长春光机所的陈善博综合考虑一体化设计理念和在轨约束条件,结

合卫星力学模型建立整星集成模型,利用图 10 所示的微振动集中分析方法^[22],预估了飞轮扰动对光学载荷成像质量的影响。

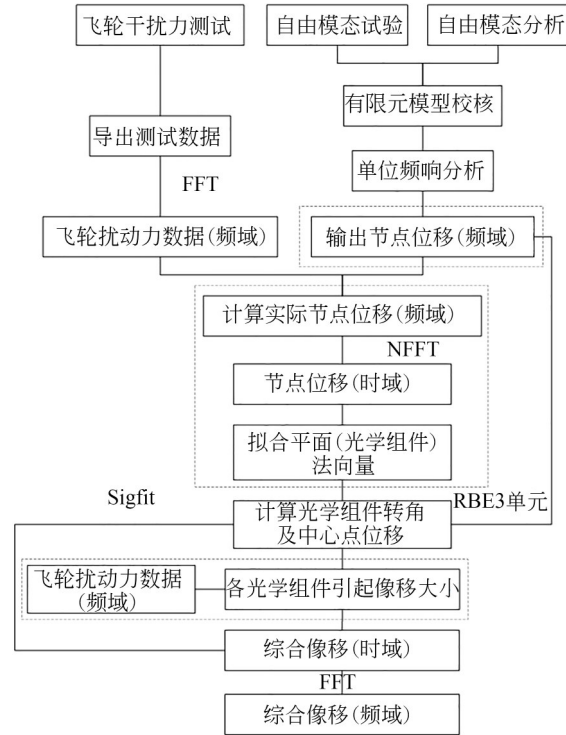


图 10 微振动集中分析流程^[22]
Fig. 10 Micro-vibration centralized analysis process^[22]

如图 10 所示,首先,进行飞轮扰动测试,并将其时域测试结果进行 FFT 变换得到对应的频域结果,建立卫星有限元模型,基于模态法对卫星进行单位频响分析,得到目标点的频域位移结果;然后,将上述步骤中所得对应结果相乘并求和,得到频域下目标点的实际节点位移结果,对各个目标点进行逆傅里叶变换得到时域位移结果;基于拟合算法将目标点拟合得到目标面,并计算目标面与原始光学元件镜面之间的位移及转角;进而计算光学系统的放大系数,并与对应镜面的位移及转角相乘后求和,得到中心像点时域下的偏移情况,对结果进行傅里叶变换即可得到中心像点频域下的偏移情况,评估微振动对系统成像质量的影响。

山东大学的杨林针对吉林一号的微振动光机集成问题提出了一种基于成像缺失的微振动特性模拟和测量方法^[21]。如图 11 所示,采用频率响应分析和光学放大系数,通过建立反射镜组件

位移、像素位移和图像质量 MTF 之间的关系,得到微振动对图像质量的影响。这种方法可以在没有图像作为关键标准的情况下进行闭环微振动分析,并且具有较好的精度。在光学卫星开发的早期阶段,这种方法可以实现系统级分析和微振动优化。

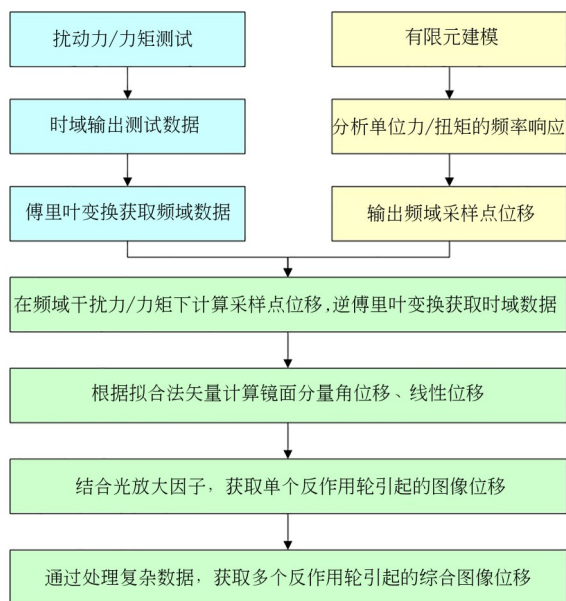


图 11 基于成像缺失的微振动集成模型^[21]

Fig. 11 Micro-vibrational integration model based on imaging deletion^[21]

3.1.5 传统光机集成分析其他相关研究

近几年,随着微振动研究的不断深入,越来越多的学者将模态叠加和模态截断理论引入微振动引起的航天光学相机成像质量研究中。北京空间飞行器总体设计部黄宇飞根据模态叠加理论,推导出反射镜动态面形误差泽尼克系数与每一阶振型对应的泽尼克系数之间的关系^[14],进而从而得到微振动引起的反射镜动态面形误差,提高反射镜面形误差的计算能力和计算速度。

针对阿尔及利亚卫星 Alsat-1B 微振动问题,Senef 提出了一种根据 MTF 评估由微振动引起的图像退化的方法^[23]。基于地面微振动测试结果,获取了全色和多光谱通道由微振动引起的 MTF 变化估计值。然后,通过计算 Alsat-1B 整星系统的 MTF,包括由微振动引起的 MTF 变化估计值,进一步评估微振动的系统 MTF 的影响。

长春光机所邵梦琪针对光机集成分析,提出了一种集成光学性能评价方法的光机结构拓扑优化模型^[24]。如图 12 所示,从相机的光学性能响应量分析方法着手,提出相机视轴稳定性误差和波前误差的系统性能评价方法,并将相机视轴稳定性误差和波前误差集成于光机结构拓扑优化模型,用以实现光机结构构型优化和尺寸参数多目标优化。

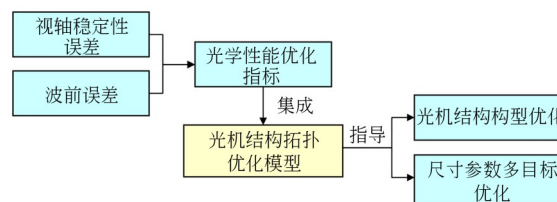


图 12 光机结构拓扑优化模型

Fig. 12 Topology optimization model of opto-mechanical structure

长春工业大学姜东旭采用最小二乘法编写梯度折射率系数拟合程序,建立梯度折射率光学系统模型,以 Fringe Zernike 多项式为基底函数,运用光机热集成分析方法求解不同温度工况下的各个透镜的面形畸变,进而综合建立热弹性变形光学系统模型^[25]。

中科院上海技物所王增伟提出基于刚体运动完备方程的光机热集成分析方法^[26],利用双立方样条插值法对光学面进行修正,建立光学面刚体运动完备方程,采用优化求解方式分离微振动引起的光学镜面刚体运动,最后采用最小二乘法求解 Zernike 多项式系数,实现对光学镜面弹性变形的表征。

3.2 基于线性状态空间的光机集成方法

3.2.1 类地行星探测器

类地行星探测器(Terrestrial Planet Finder, TPF)是美国宇航局的研究任务,它由日冕仪和干涉仪组成,任务目标是寻找围绕其他恒星运行的类地行星^[27]。如图 13 为类地行星探测器和光学系统。面对复杂的任务环境,必须对飞行系统进行全面集成建模,以确保任务提出的严格动态稳定性要求得到满足。

MIT 空间系统实验室开发的分析工具 DOCS 允许用户以状态空间形式创建航天器的光机集成模型,以模拟结构动力学、控制器和光

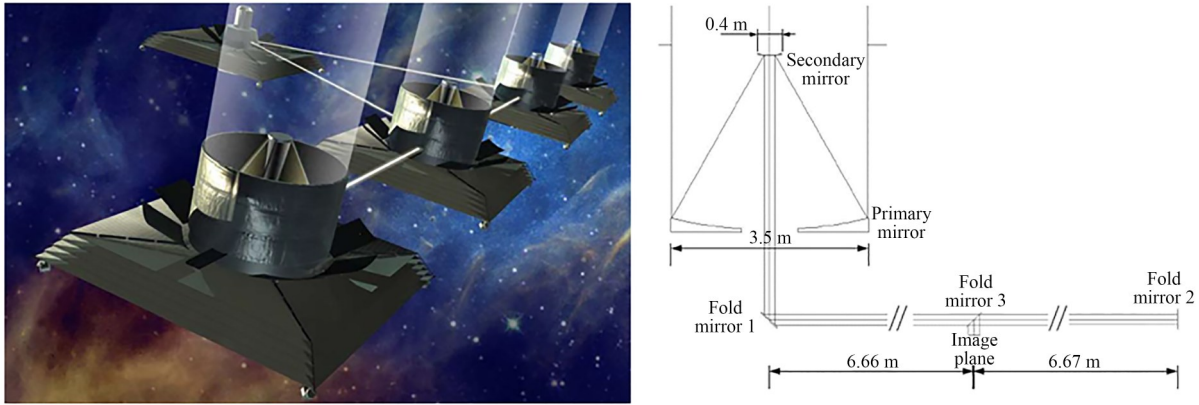


图 13 类地行星探测器(TPF)及其光学系统^[27]

Fig. 13 Terrestrial Planet Finder and the optical system^[27]

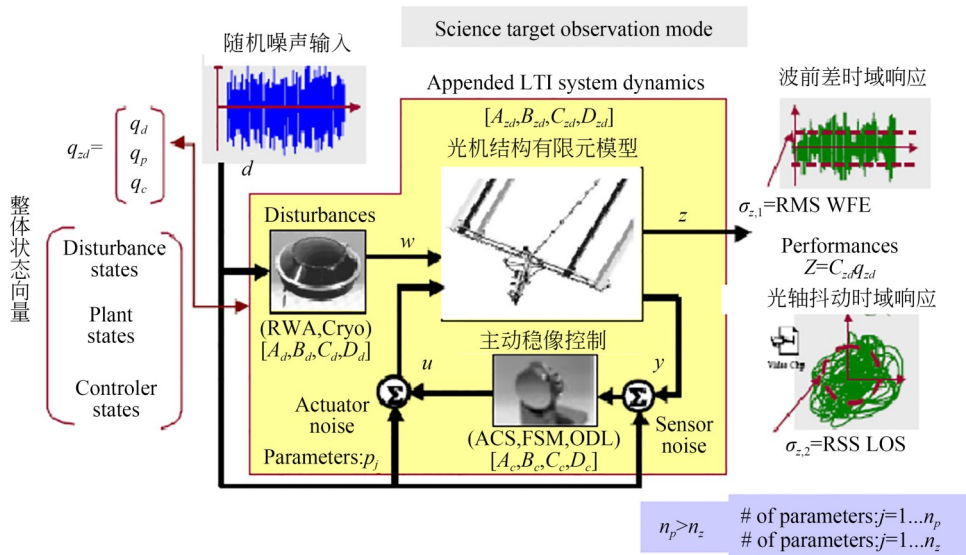


图 14 TPF 集成建模分析^[28]

Fig. 14 TPF integrated modeling analysis^[28]

学布局^[28]。如图 14 所示,基于 DOCS 创建类地行星探测器的集成模型,该集成模型由结构有限元模型、光学性能模型、反作用飞轮隔振和姿态/光学控制系统组成^[29-32]。由于状态空间子系统模型的模块化,集成模型可以进行扩展和升级。此外,集成模型的生成通过使用数学软件实现自动化,通过更改各种设计参数可以轻松重新生成。

3.2.2 太阳动力学天文台

NASA 提出的太阳动力学天文台(Solar Dynamics Observatory, SDO)任务旨在通过了解太阳能的来源、储存和释放以及太阳的内部结构来

研究太阳对地球的影响^[33]。在科学观测期间,对于两台 SDO 仪器,仪器焦平面处的抖动稳定性必须保持在不到几分之一弧秒。为了满足这些严格的要求,需要对于干扰源引起的微振动进行分析和抑制。

SDO 及其有限元模型如图 15 所示。SDO 微振动分析采用集成建模方法,将干扰、结构、控制和性能指标组合成一个动态模型,以预测系统的端到端 LOS 性能^[33-36]。图 16 是集成模型中使用的所有子系统模型的功能图。扰动模型是系统的输入,结构模型是通过有限元分析创建的,ACS 模型用以稳定结构模型的刚体模式,光学模

型将所有光学运动映射到LOS运动,仪器稳定系统(Image Stability System, ISS)对来自仪器控制器的LOS运动衰减进行建模。集成模型的输出是在AIA和HMI电荷耦合设备(CCD)处测量的LOS运动。

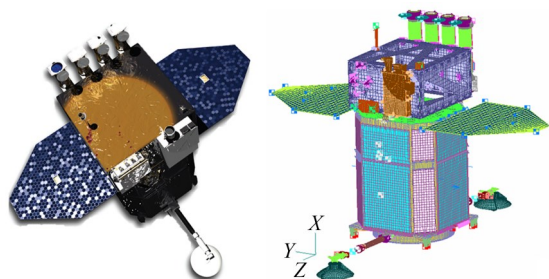


图 15 SDO 及其有限元模型^[34]

Fig. 15 SDO and finite element model^[34]

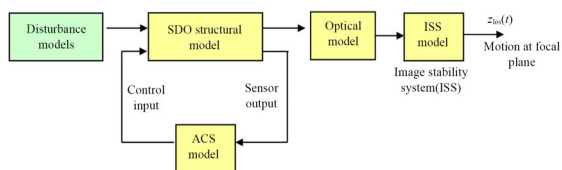


图 16 SDO 集成模型^[33]

Fig. 16 SDO integration model^[33]

3.2.3 灾害监测星座-3

DMC-3(Disaster Monitoring Constellation-3)是一个由3颗卫星将组成一个灾害监测星座。萨里卫星技术有限公司(SSTL)的3颗SSTL-300S1卫星是一种新的小型卫星设计,可提供1 m高分辨率图像和高速下行链路^[37]。通过结合3颗卫星的覆盖范围,DMC-3星座将能够每天重新访问给定区域,这对于变化检测、灾害监测和响应计划至关重要,对于获取无云图像至关重要。图17为SSTL-300S1卫星及有限元模型图片。

萨里大学的Marcello Remedi采用图18所示的Craig-Bampton随机方法(CBSM)对SSTL-

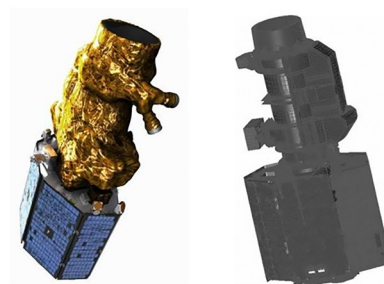


图 17 SSTL-300S1 卫星及其有限元模型^[38]

Fig. 17 SSTL-300S1 satellite and finite element model^[38]

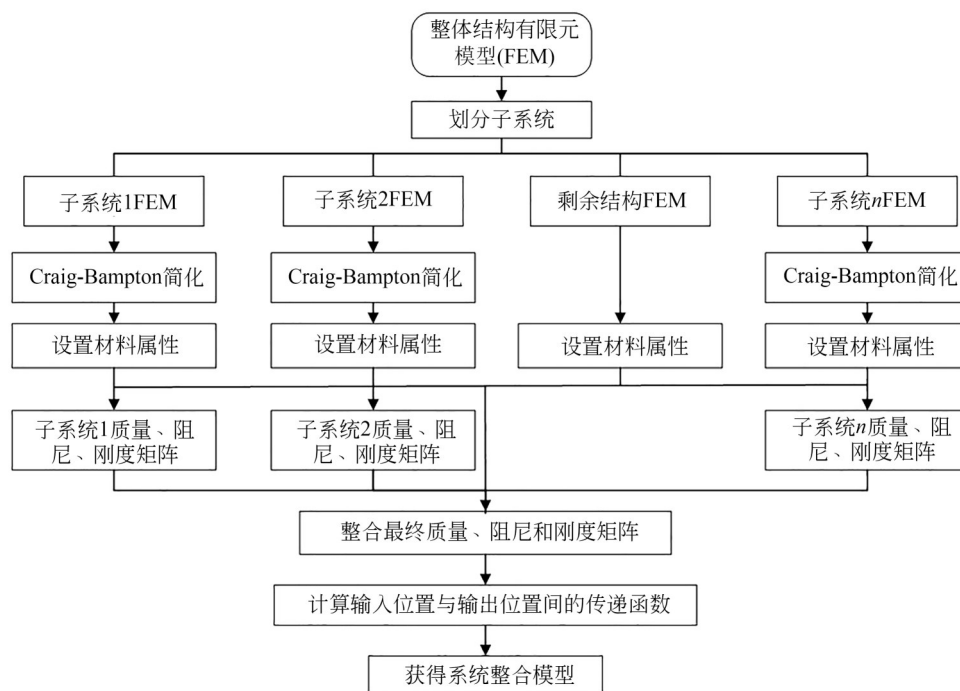


图 18 Craig-Bampton 随机方法流程图^[38]

Fig. 18 Craig-Bampton random method flow chart^[38]

300S1卫星进行微振动分析^[38]。首先,将卫星结构分为不同的子系统,每一个子系统都利用Craig-Bampton方法进行简化,对具有固定耦合界面的子系统施加扰动,通过计算获得每个子系统的质量、阻尼和刚度矩阵。将子系统随机化并为整个结构构建矩阵计算的最终随机模型,使用CBSM可以显著减少计算工作量。

SSTL-300-S1卫星的结构鉴定模型(SQM)采用了上述方法,并使用经验模型进行整合建模。该模型能够给出最坏情况下的现实预测(扩展到中频范围),包括扰动源的动态耦合,并涵盖了影响卫星结构的不确定性因素。

3.2.4 詹姆斯韦伯太空望远镜

詹姆斯韦伯太空望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)是美国航空航天局、欧洲航天局和加拿大航空航天局联合研发的红外观测用太空望远镜,是哈勃空间望远镜的继任者^[39]。詹姆斯韦伯太空望远镜于2021年发射,总质量为 6.2×10^3 kg,约为哈勃空间望远镜(11×10^3 kg)的一半。主反射镜由18个六边形的铍反射镜组成,口径达到6.5 m,面积为哈勃太空望远镜的5倍以上。它能在近红外波段工作、能在接近绝对零度的环境中运行。图19显示JWST设计的原图及光学系统。

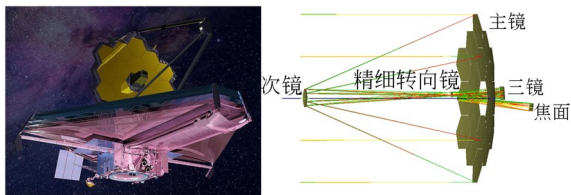


图19 JWST概念模型及其光学系统^[40]

Fig. 19 JWST Conceptual Model^[40]

集成建模是JWST任务的关键,NASA将詹姆斯韦伯太空望远镜光学模型与结构模型和控制模型相结合,建立线性结构/光学/控制集成模型^[40]。JWST的扰振源包括机械振动、噪声等,但最主要的是反作用飞轮组件(RWA)引入的力和力矩。因此NASA研究了RWA的扰振特性,并将其作为集成模型的扰动输入。首先建立JWST的结构动力学模型,利用模态降阶方法对复杂的模型进行简化,然后根据简化后的结构动力学模型构建系统线性光学模型。本质上,光学

灵敏度矩阵就是线性光学模型,通过建立光线追迹模型来提供光学系统光学灵敏度矩阵,表征光线追迹模型在单个自由度上受到扰动对光学系统性能指标的影响。控制模型的指向控制系统由传统的姿态控制系统(ACS)和基于焦平面的精制导回路组成。将建立的结构动力学模型、线性光学模型以及控制模型集成于状态空间中,基于RWA扰振特性进行抖动分析,光机集成模型中的光学灵敏度映射会将镜面节点的微小运动转换为LOS和WFE中的扰动。

如图20所示为JWST光机集成分析模型,利用结构动力学分析评估光学成像视轴抖动和波前误差,即微振动分析^[41]。最大的微振动是由航天器反作用轮组件引起的,这种干扰本质上是谐波的,会激励航天器和望远镜的结构。结构/光学响应由于视轴抖动和动态波前误差而导致图像质量退化。抖动分析结果用于预测成像性能,改进结构设计,并评估干扰源的影响。

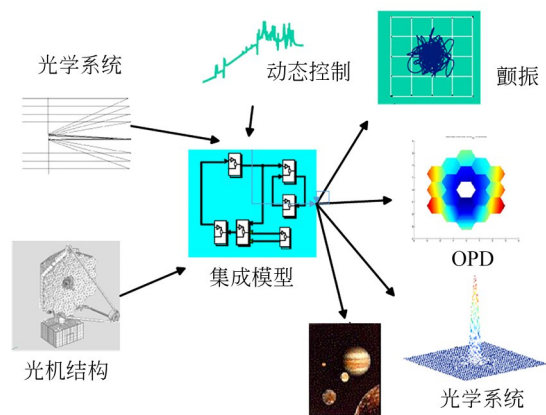


图20 JWST光机集成分析模型^[41]

Fig. 20 JWST opto-mechanical integration analysis model^[41]

3.2.5 线性状态空间光机集成分析其他相关研究

现代控制理论中的状态空间模型在其他学科领域的逐渐推广使得线性状态空间模型成为研究动态系统的重要工具。

纽约城市大学Haber等提出了一种结合热传递原理建模、实验验证、有限元分析和模态降阶方法的协同建模框架^[42]。在配备加热器和温度传感器的反射镜上进行协同建模框架实验验证,

证明反射镜热动力学可以通过低阶状态空间模型来近似。

北京卫星环境工程研究所李建宏宇等分别使用状态空间法和附加刚度法建立航天光学相机的结构-控制-光学一体化模型,使然后用稀疏矩阵LU分解法和迭代法求解系统线性方程^[43],大大提高了微振动响应求解速度。

上海交通大学梁永红等利用线性状态空间模型对带挠性附件三轴稳定卫星的姿态动力学进行研究,并对挠性体的高阶模态作截断处理以简化模型,依据简化模型设计了高阶线性控制器^[44],对具有非线性时变特性的卫星进行有效控制,对帆板等挠性附件的振动有主动抑制功能。

哈尔滨工业大学刘希刚建立整星全链路集成模型,如图 21 所示,结合建立的结构、光学、扰动和控制模,实现整星微振动全链路分析^[28]。通过对比分析,验证了全链路集成模型的正确性。

LIU 等基于线性状态空间表达式对轻型空间反射镜进行了光机结构动力学分析,利用线性结构动力学和线性状态空间理论,建立了基于模态信息的反射镜组件状态空间模型^[45]。采用DC增益方法进行模态降阶,并对降阶后的模态进行

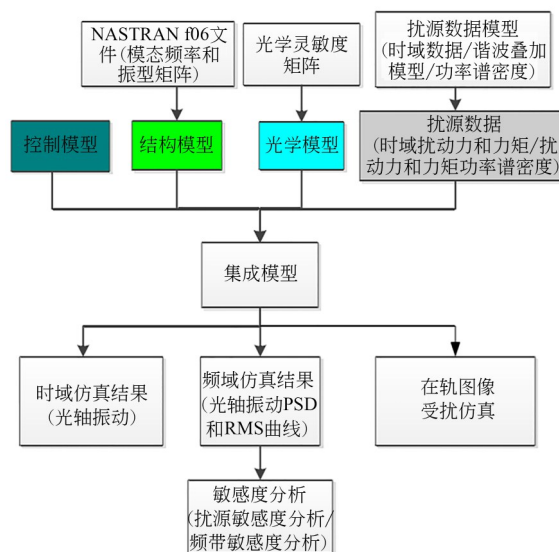
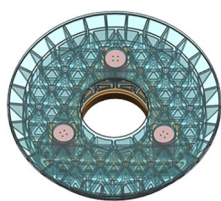


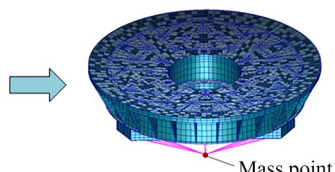
图 21 全链路集成模型^[28]

Fig. 21 Full-link integration model^[28]

频率响应分析,以获得激励输入点和响应输出点之间的频域传递函数,确定每阶模态对总频率响应的贡献。为研究光学和机械结构提供了一种新的方法,有助于高效、准确地分析复杂线性系统的频率响应特性。



反射镜组件模型



有限元模型

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned}$$

线性状态空间模型

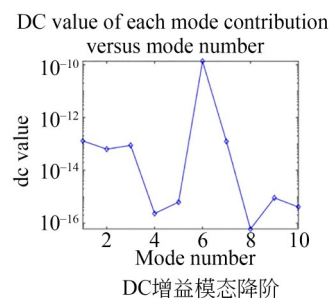


图 22 基于线性状态空间的光机结构动力学分析流程

Fig. 22 Dynamic analysis process of the optical machine structure based on linear state space

4 光机集成分析关键技术

4.1 光机接口

光机集成分析的重点在于建立光学设计与机械建模、动力学响应之间的联系。针对上述光机接口的国内外研究现状,有限元分析(FEA)工具提供的详细位移数据必须转换为大多数光线追迹工具可接受的形式。Zernike多项式可以在

光学设计软件和有限分析软件之间有效的传递FEM数据,首先Zernike多项式可以将有限元分析获得的大量变形数据拟合成十几个多项式,其次Zernike多项式的每一项系数都对应明确的物理意义,很容易和系统像差建立联系。如图 23 所示,反射镜镜面变形引起的系统波前差可以分解为刚体位移(包括平移 Z_0 和倾斜 Z_1)、离焦 Z_2 ,以及减去前 3 项之后的三阶项与高阶面形残差 Z_i 。

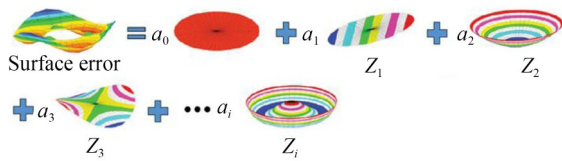


图23 波前差与刚体位移的关系

Fig. 23 Relationship between Wave Front Aberration and Rigid Body Displacement

当光学系统出现光轴抖动或焦面变化时,最终都会体现在系统的波前变化上,而系统的波前可以用Zernike多项式拟合。鉴于目前光学系统的镜面多存在中心遮拦,Zernike圆多项式在环域内存在耦合现象,失去了正交性,因而采用Zernike环多项式,Zernike多项式的特点决定了它是光机集成分析的理想接口工具。在上述的光机接口,基于Zemax的接口多采用动态数据链(DDL)来实现数据交换自动化,而CodeV则采用Windows标准的COM接口来实现数据实时交换。光机接口所提供的实时数据交换,在光机结构的设计分析中有着举足轻重的作用。

4.2 光学灵敏度

前文所述的研究对空间相机光学系统的集成设计和分析优化有很大的指导意义。但是,目前大部分灵敏度分析工作存在着一些共性的不足之处:灵敏度分析仅考虑光学元件单一变化,而没有反映出造成此光学元件变化的结构设计参数的影响程度,无法在光学性能评价之后进行闭环反馈,失去光机集成灵敏度分析的真正意义。光学灵敏度因子的意义在于,按照光学系统波前差WFE的评价标准,给出结构各个节点位移自由度的量化贡献量,建立起结构动力学分析结果与系统波前差的量化关系。

4.3 像质退化机理

实际成像过程中,探测器CCD积分时间内图像极易受到干扰产生退化,这个过程中微振动的影响尤为明显,是一个动态过程。微振动是指卫星在轨运行期间,主要由转动部件正常工作造成的卫星幅度较小的往复运动或振荡。微振动的危害十分显著,尤其对于高轨卫星,由于对地观测距离较远,可能会造成巨大误差并严重影响成像质量^[9]。

目前,光机集成分析相关研究通常利用软件建立光学、力学、控制、信号处理等多学科模型单一分析模型,再将其进行集成分析。微振动分析时主要考核光学传感器与卫星结构的动力学特性,并没有考虑各个反射镜组件微振动对成像质量的动态影响。针对微振动像质退化问题,应该基于线性状态空间建立航天光学相机结构动力学响应的数学物理模型,基于光机接口建立航天光学相机光线追迹模型,以此量化航天光学相机内部光学元件相对运动与自身形变对像质退化的影响,将其映射为光学系统波前差等系统光学性能的变化,得到一个普适的基于状态空间的微振动像质退化机理模型。

5 结 论

目前研究光学相机微振动的主要经典技术途径是将相机简化为刚体,将星体结构视为弹性体,进而简化为整星结构动力学问题。为了避免在运载火箭发射段的正弦激励下发生结构谐振与破坏,相机在进行结构动力学优化时要确保一阶自然频率高于100 Hz。相对于整星结构10~20 Hz的基频而言,其动态刚度要高很多。这就为传统的微振动有限元分析建模时,简化光学相机的结构提供了理论依据。但这种简化也容易导致过度简化:将光学相机简化为单一质量点或刚性耦合的多质量点(MPC),忽视了传感器内部光学元件的结构微振动对成像质量的影响。微振动经过输入隔振器的衰减与星体结构本身的阻尼减振与主动隔振控制,传递至光学相机分系统安装面,再经过输出隔振器衰减传递至光机结构,激励光学传感器内部光学元件与承力结构发生动力学响应,引起光学成像时的视轴抖动与波前差畸变,影响成像质量。

这种传统方法在处理空间光学相机微振动问题上,存在四个层次的不足:

(1)对于结构复杂、模型尺寸巨大的航天光学相机系统,传统分析方法存在计算量大、求解效率低的问题;

(2)进行微振动分析时,建立的星体动力学有限元模型往往将传感器简化为刚体,只考察其

上某一处响应位置(主镜或次镜,或整个遥感器质量点)的空间角位移,忽略了相机内部结构变形对成像质量的影响;

(3)在某些分析方法中,虽然将相机光机结构视为弹性体并建立相应有限元模型,但并未考虑反射镜柔性支撑形变所造成的镜体相对相机结构的角位移,忽略了相机内部光学元件各自的微振动对成像质量的影响^[47];

(4)忽略了单一镜体在动力学响应下的弹性镜面变形对成像光束波前差的影响;没有考虑综合叠加全部光学元件镜面弹性变形后,最终形成对全系统波前差(光学系统成像质量)的量化评价方法。

基于线性状态空间的光机集成分析方法将光学系统、机械结构、有限元分析集成于状态空间中,进而实现微振动的光机集成分析。线性状态空间中设计参数的可更改性使得光机集成分析方法更具普适性;同时其模型数据长度较短,可以借助向量—矩阵等有力的数学工具,使用计算机高效处理问题。基于线性状态空间的光机集成分析方法可以关注到航天光学相机整体以及内部结构变化,从宏观和微观的角度共同体现微振动对成像质量的影响。

6 未来展望

目前,国内的光机集成分析研究,都没有形成系统性的分析,一般只针对单一的镜子(主镜或者次镜)进行分析,或者将光学相机简化为单一质量点或刚性耦合的多质量点,忽视了光学相机内部光学元件的结构微振动对成像质量的影响。

我国航天光学相机已经进入了亚米级分辨率层次,只是单纯地关注主要成像元件的微振动已经无法满足航天事业的发展。未来光机集成分析的研究将逐渐向系统性分析靠近,更多地考虑光学相机内部结构微振动对光学系统成像质量的影响,并且会越来越针对实际情况进行分析。因此,立足国内目前的航天光学相机发展需求,建立航天光学相机的结构动力学线性状态空间模型,侧重于精确表征微振动下的系统结构的动态响应特性。如图 24 所示,首先采用模态降阶方法对系统进行简化,建立并完善微振动传递链路的数学模型,构建航天光学相机微振动像质退化机理,实现快速矩阵计算和数据交互,为整星布局结构设计与星上隔振设计提供量化评价方法,保证光学遥感器的成像质量,对于航天技术的发展具有重大意义。

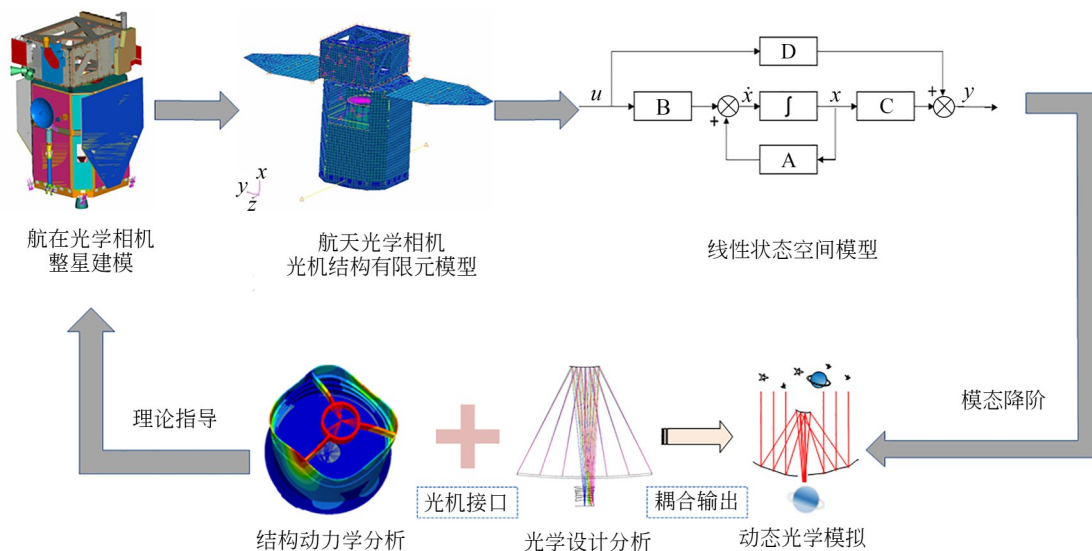


图 24 光机集成分析展望

Fig. 24 Outlook for optical-mechanical integration analysis

参考文献:

- [1] 余金培. 现代小卫星技术与应用[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2004.
YU J P. *Modern Small Satellite Technology and Application* [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2004. (in Chinese)
- [2] 朱俊青, 沙巍, 陈长征, 等. 大口径空间相机像质的微振动频率响应计算[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 1118-1127.
ZHU J Q, SHA W, CHEN CH ZH, *et al.* Frequency response of imaging quality by micro-vibration for large-aperture space-borne telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1118-1127. (in Chinese)
- [3] 刘光. 基于光机热集成的空间相机主动热光学关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
LIU G. *Research of the Key Technologies on Active-thermal Optics for the Space Camera Based on Structural-Thermal-Optical Integration* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese)
- [4] 李林, 王栋, 徐婧, 等. 飞轮组件微振动对高分辨率光学卫星光轴的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2515-2522.
LI L, WANG D, XU J, *et al.* Influence of micro-vibration of flywheel components on optical axis of high resolution optical satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2515-2522. (in Chinese)
- [5] 单宝忠, 陈恩涛, 卢铎, 等. 空间光仪光机热集成分析方法[J]. 光学精密工程, 2001, 9(4): 377-381.
SHAN B ZH, CHEN E T, LU E, *et al.* Thermal/structural/optical integrated analysis of space cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(4): 377-381. (in Chinese)
- [6] 温敬阳. 光机热集成分析方法与技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.
WEN J Y. *Research on Methods and Techniques of Optomechanical Integrated Analysis* [D]. Xi'an: Xidian University, 2008. (in Chinese)
- [7] 张志成. 基于状态空间模型的阵列信号波达方向估计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
ZHANG ZH CH. *Study on Methods of Direction of Arrival of Array Signal Based on State Space Model* [D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese)
- [8] 董瑶海. 航天器微振动: 理论与实践[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2015.
DONG Y H. *Micro-vibration of Spacecraft: Theory and Practice* [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2015. (in Chinese)
- [9] 孟光, 周徐斌. 卫星微振动及控制技术进展[J]. 航空学报, 2015, 36(8): 2609-2619.
MENG G, ZHOU X B. Progress review of satellite micro-vibration and control[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(8): 2609-2619. (in Chinese)
- [10] 梁伟. 巡天相机微振动建模与抑制技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
LIANG W. *Research on Micro-vibration Modeling and Suppression Technology of the Survey Camera* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [11] LASKIN R A, SAN M M. Control/structure System Design of A Spaceborne Optical Interferometer [C]. *Astrodynamics Specialist Conference, Stow, Vermont, P. R. USA: AAS/AIAA*, 1989: 369-395.
- [12] 董瑶海, 周徐斌, 申军烽, 等. FY-4 卫星微振动抑制技术研究[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 20-27.
DONG Y H, ZHOU X B, SHEN J F, *et al.* Study on micro-vibration suppression technology of FY-4 satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(4): 20-27. (in Chinese)
- [13] 张振华, 杨雷, 庞世伟. 高精度航天器微振动力学环境分析[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(6): 528-534, 498.
ZHANG ZH H, YANG L, PANG SH W. Jitter environment analysis for micro-precision spacecraft [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(6): 528-534, 498. (in Chinese)
- [14] 黄宇飞, 白绍竣, 高冀, 等. 大口径空间光学反射镜面形动力学响应分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 20160101.

- 2019, 48(11): 181-186.
- HUANG Y F, BAI SH J, GAO J, *et al.* Dynamic surface response analysis of large-aperture space mirror[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 181-186. (in Chinese)
- [15] MILLER J, HATCH M, GREEN K. Predicting performance of optical systems undergoing thermal/mechanical loadings using integrated thermal/structural/optical numerical methods[J]. *Optical Engineering*, 1981, 20(2):166-174.
- [16] AKERLOF C, ALDERING G, AMIDEI D, *et al.* Supernova/Acceleration Probe (Snap) : An Experiment to Measure the Properties of the Accelerating Universe[C]. *Resource Book on Dark Energy; Contributions from the Snowmass 2001 Workshop on the Future of Particle Physics*, 2001.
- [17] PONSLET E. System level modeling of the SNAP instrument and analysis of reaction-wheel-induced jitter[J]. *Hytec Inc*, 1995.
- [18] DOYLE K B. Structural Line-of-Sight Jitter Analysis for MLCD[C]. *Optical Engineering + Applications. Proc SPIE 6665, New Developments in Optomechanics, San Diego, California, USA. 2007, 6665: 138-149.*
- [19] 邓薇, 郭晗. 风云四号卫星[J]. *卫星应用*, 2017(1): 86.
- DENG W, GUO H. Fengyun-4 satellite[J]. *Satellite Application*, 2017(1): 86. (in Chinese)
- [20] 孟光, 董瑶海, 周徐斌, 等. 风云四号卫星微振动抑制和试验技术研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2019, 49(2): 74-84.
- MENG G, DONG Y H, ZHOU X B, *et al.* Research on micro-vibration control and testing of FY-4 meteorological satellite [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2019, 49(2): 74-84. (in Chinese)
- [21] YANG L, WANG Y S, WEI L, *et al.* Study on microvibration effect of an optical satellite based on the imaging absence method[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(1): 013107.
- [22] 陈善搏. 一体化高分辨遥感微小卫星微振动隔振及试验技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2020.
- CHEN SH B. *Isolation and Experiment Research of Micro-Vibration for Integrated High Resolution Remote Sensing Micro-Satellites*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [23] CHAHIRA S. Estimate of the effect of micro-vibration on the performance of the Algerian satellite (Alsat-1B) imager[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 96: 147-152.
- [24] 邵梦旗. 空间相机光机结构集成优化设计方法研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- SHAO M Q. *Research of the Integrated Optimization Design Method for the Optomechanical Structure of Space Cameras*[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [25] 姜东旭. 机载相机非球面光学系统光机热集成分析与研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2020.
- JIANG D X. *Thermal-Structural-Optical Integrated Analysis and Research of Airborne Camera Aspheric Optical System*[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [26] 王增伟, 赵知诚, 杨溢, 等. 基于刚体运动完备方程的光机热集成分析方法[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 245-262.
- WANG Z W, ZHAO ZH CH, YANG Y, *et al.* Thermal-structural-optical integrated analysis method based on the complete equations of rigid body motion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 245-262. (in Chinese)
- [27] MARTIN S. The flight instrument design for the Terrestrial Planet Finder Interferometer[C]. *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets II, SPIE Proceedings. San Diego, California, USA. SPIE*, 2005.
- [28] 刘希刚. 航天器微振动集成建模与分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- LIU X G. *Research on the Integrated Modeling and Analysis Technologies of Micro-Vibration on Spacecraft*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

- [29] LOBOSCO D M, BLAUROCK C, CHUNG S J, *et al.* Integrated Modeling of Optical Performance for the Terrestrial Planet Finder Structurally Connected Interferometer[C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE* 5497, *Modeling and Systems Engineering for Astronomy, Glasgow, United Kingdom.* 2004.
- [30] LEVINE M, MOORE G, BASINGER S, *et al.* Integrated modeling approach for the Terrestrial Planet Finder (TPF) mission[J]. *SPIE*, 2004.
- [31] KISSIL A, KWACK E, HO T, *et al.* Integrated Modeling Applied to the Terrestrial Planet Finder Mission [C]. *SPIE Proceedings, Optical Modeling and Performance Predictions II. San Diego, California, USA.* SPIE, 2005.
- [32] LI Y Y, HAMLIN L A, WIRZ R, *et al.* Dynamic Simulations for the Terrestrial Planet Finder Interferometer [C]. *UV/Optical/IR Space Telescopes: Innovative Technologies and Concepts II, SPIE Proceedings. San Diego, California, USA.* SPIE, 2005.
- [33] LIU K C, MAGHAMI P, BLAUROCK C. Reaction Wheel Disturbance Modeling, Jitter Analysis, and Validation Tests for Solar Dynamics Observatory[C]. *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii. Reston, Virginia: AIAA,* 2008.
- [34] LIU K C, KENNEY T, MAGHAMI P, *et al.* Jitter Test Program and On-Orbit Mitigation Strategies for Solar Dynamic Observatory[C]. *Proceedings of the 20th International Symposium on Space Flight Dynamics, Annapolis, MD, P. R. USA: NASA/CP,* 2007: 20080012648.
- [35] BLAUROCK C, LIU K C, MULE P. Solar Dynamics Observatory (Sdo) Hgas Induced Jitter [C]. *49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, IL. Reston, Virginia: AIAA,* 2008.
- [36] MORGENSTERN W, BOURKLAND K, HSU O, *et al.* Solar Dynamics Observatory Guidance, Navigation, and Control System Overview [C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Portland, Oregon. Reston, Virginia: AIAA,* 2011.
- [37] PHIL D, ANDREW C, PAUL C, *et al.* The DMC-3 1m Small Satellite Constellation [C]. *8th IAA (International Academy of Astronautics) Symposium on Small Satellites, Earth Observation, Berlin, P. R. Germany: IAA,* 2011.
- [38] REMEDIA M, AGLIETTI G S, RICHARDSON G, *et al.* Integrated semiempirical methodology for microvibration prediction[J]. *AIAA Journal*, 2015, 53(5): 1236-1250.
- [39] 解仁江. 2011未来宇宙“千里眼”——哈勃太空望远镜的继任者: 詹姆斯·韦伯太空望远镜[J]. *博物*, 2004(3): 60-65.
- XIE R J. 2011 future universe super "Qianli Eye" the successor of the Hubble space telescope: James Weber space telescope[J]. *Nature History*, 2004 (3): 60-65. (in Chinese)
- [40] HYDE T T, HA K Q, JOHNSTON J D, *et al.* Integrated modeling activities for the james webb space telescope: optical jitter analysis [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE* 5487, *Optical, Infrared, and Millimeter Space Telescopes, Glasgow, United Kingdom.* 2004.
- [41] JOHNSTON J D, HOWARD J M, MOSIER G E, *et al.* Integrated modeling activities for the James Webb Space Telescope: structural-thermal-optical analysis [C]. *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. Proc SPIE* 5487, *Optical, Infrared, and Millimeter Space Telescopes, Glasgow, United Kingdom.* 2004.
- [42] HABER A, DRAGANOV J E, HEESH K, *et al.* Modeling, experimental validation, and model order reduction of mirror thermal dynamics[J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 24508-24524.
- [43] 李建宏宇, 庞贺伟. 大型航天器结构-控制-光学一体化建模与微振动响应快速计算方法[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(6): 1-6.
- LI J H Y, PANG H W. Model of large spacecraft integrated structure-control-optical and fast calculation of micro-vibration response[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(6): 1-6. (in Chinese)
- [44] 梁永红, 李建勋, 沈毅力. 带挠性附件三轴稳定

- 卫星姿态动力学状态空间模型研究[J]. 上海航天, 2016, 33(3): 55-60.
- LIANG Y H, LI J X, SHEN Y L. Study on state space model of attitude dynamics for three-axis stabilized satellite with flexible appendage[J]. *Aerospace Shanghai*, 2016, 33(3): 55-60. (in Chinese)
- [45] LIU R J, LI Z X, XU W, *et al.* Dynamic analysis and experiment of a space mirror based on a linear state space expression [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(12): 5379.
- [46] DOYLE K B, GENBERG V L, MICHELS G J. Integrated Optomechanical Analysis, Second Edition[J]. *SPIE*, 2012.
- [47] 赵占平, 黄巧林, 赵野, 等. 高分多模卫星高分相机优化设计[J]. 航天器工程, 2021, 30(3): 127-134.
- ZHAO ZH P, HUANG Q L, ZHAO Y, *et al.* Optimal design of high-resolution camera for GFDM-1 satellite [J]. *Spacecraft Engineering*, 2021, 30(3): 127-134. (in Chinese)

作者简介:



马 斌(1997—),男,河南三门峡人,硕士研究生,2020年于西北农林科技大学获得学士学位,主要从事微振动光机集成分析方面的研究。E-mail: binma2020@outlook.com

通讯作者:



李宗轩(1986—),男,河北衡水人,博士,副研究员,2009年于中国科学技术大学获得学士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要进行空间光学仪器设计与集成分析研究。E-mail: li-zongx@126.com