

集成仿真在空间望远镜设计和优化中的应用

张远清，李晓波

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要：针对空间望远镜设计过程中涉及学科多、系统复杂、真实环境验证难度大等特点，集成仿真在空间望远镜设计和优化过程中具有巨大应用价值。本文给出了集成仿真在 NGST、NEXUS 和 JWST 等空间望远镜设计过程中的应用实例，介绍了集成仿真所包括的扰动源、结构、光学、控制和模型集成等方面的具体内容，并给出了集成仿真在性能分析、灵敏度分析、同效性分析、多目标优化和干扰来源定位与缓解等方面的应用。集成仿真技术及其应用案例，对我国在研大型空间望远镜的设计有指导和借鉴意义。

关键词：空间望远镜；集成仿真；性能分析；设计优化

DOI：10.7643/ issn.1672-9242.2016.04.016

中图分类号：TH751

文献标识码：A

文章编号：1672-9242(2016)04-0092-10

Application of Integrated Simulation in Design and Optimization of Space Telescope

ZHANG Yuan-qing, LI Xiao-bo

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China)

ABSTRACT: Considering the characteristics of the space telescope design such as multidisciplinarity, complexity and difficulty of physical test, integrated simulation can play an important role in the design and optimization process of a space telescope. Application of integrated simulation in the design process of space telescopes such as NGST, NEXUS and JWST was presented in this paper. Integrated simulation included disturbance, structure, optics, control and model integration. Integrated simulation could be used for performance analysis, sensitivity analysis, isoperformance analysis, multiobjective optimization, disturbance location and reduction. Integrated simulation and its applications provide guidance and reference for the design of large space telescopes in China.

KEY WORDS: space telescope; integrated simulation; performance analysis; design and optimization

大型空间望远镜作为一个复杂的系统工程，其设计过程涉及光机控等多学科领域。传统望远镜设计，一般采用光机控各子系统设计人员独立负责各自领域，并交流协调的设计理念。这种设计理念对于早期系统构成简单、指标要求低的望远镜较为适

用。随着望远镜日趋大型化、科学任务日益多样化以及精度指标要求的不断提高，空间望远镜系统日益复杂，传统的子系统独立设计并交流协调的设计方法很难满足系统指标要求。因此，在 SIM^[1-2], NGST^[1-3], TPF^[4-5], NEXUS^[1,6-7], JWST^[8,11-15]等大

收稿日期：2016-05-14；修订日期：2016-05-20

Received: 2016-05-14; Revised: 2016-05-20

基金项目：国家自然科学基金青年科学基金（61205143）

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61205143)

作者简介：张远清（1988—），男，河北人，硕士，主要从事空间相机结构设计与集成仿真技术研究。

Biography: ZHANG Yuan-qing(1988—), Male, from Hebei, Master, Research focus: structural design and integrated simulation of space cameras.

型空间望远镜和 EURO50^[16-17], TMT^[18-21]等大型地面望远镜设计过程中, 设计人员开始利用多学科集成建模与系统仿真技术, 从系统工程角度考虑子系统之间的相互影响, 通过整体模拟分析得到初始设计下的整机性能^[22], 给出各子系统参数对整机性能的影响, 并据此对整机参数进行优化设计。另一方面, 空间望远镜因其工作环境的特殊性, 涉及空间热环境、望远镜热控系统、卫星姿态控制、精密稳像等复杂环境^[23-30], 很难在地面上对其实际使用环境(尤其是失重条件)进行贴近真实的模拟。因此, 集成仿真在大型空间望远镜设计过程中有着重要的应用价值。

文中将对集成仿真在 NGST 等空间望远镜设计中的应用进行回顾, 介绍集成仿真工作包含的主要内容, 及其在太空望远镜设计过程中所涉及的灵敏度分析等方面的作用。

1 发展简史与现状

集成仿真在 NGST, NEXUS 和 JWST 等大型空间望远镜的开发论证过程中起着重要作用。

1.1 NGST 望远镜

作为 NASA 起源计划的一部分, NGST (the

Next Generation Space Telescope) 的构想在 1996 年被提出。NGST 望远镜主镜有效口径为 7.2 m, 质量为 2567 kg, 结构形式如图 1 所示。

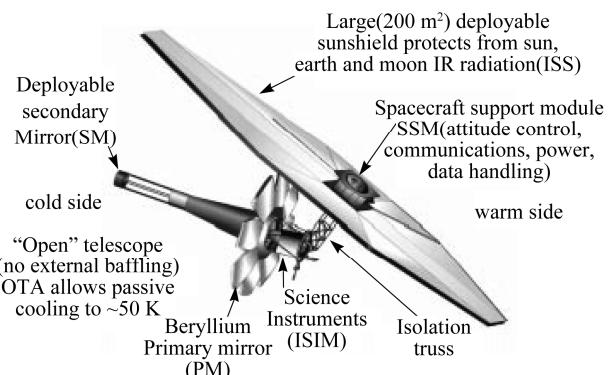


图 1 NGST 望远镜
Fig.1 The Next Generation Space Telescope

NGST 的分析中建立了考虑多重扰动源、结构、光学和控制系统的集成模型, 如图 2 所示, 用来分析望远镜波前误差 WFE 和视轴抖动 LOS 的动态性能。利用有限元软件 MSC/NASTRAN 进行结构分析并提取结果中的特征频率和特征向量, 导入 MATLAB 组成结构子系统的状态空间模型。MACOS 用于光学灵敏度矩阵建模^[31]。在 MATLAB 中对其他子系统进行建模, 并完成各学科模型集成和系统仿真。

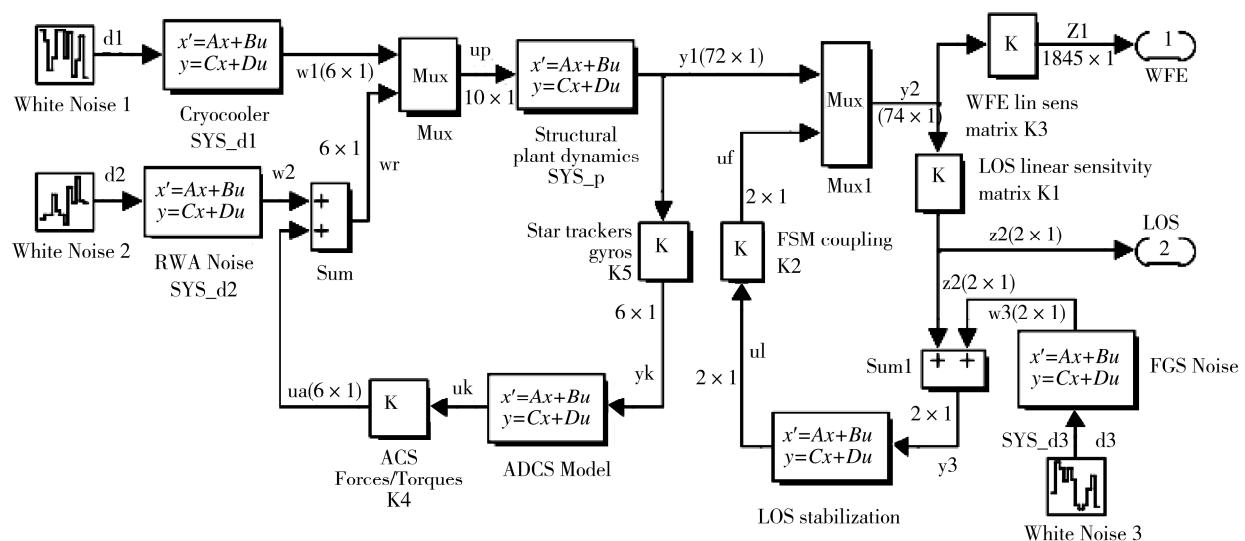


图 2 NGST 集成仿真闭环模块
Fig.2 Closed loop block diagram of NGST integrated model

性能评估采用了时域分析、频域分析及 Lyapunov 分析。分析过程中涉及模型规模较大带来的条件数问题, 以及光学灵敏度矩阵的奇异值分

解等。通过研究设计参数对指标影响的灵敏度, 提出了增加次镜支架刚度、隔离飞轮扰动和增加主动阻尼等改善性能的建议^[3]。

1.2 NEXUS 望远镜

NEXUS 望远镜是 NGST 的原理验证样机，其建模理念和 NGST 是一致的，但在具体的集成仿真实现上有所区别。NEXUS 望远镜主镜有效口径为 2.8 m，质量为 752.8kg，结构形式如图 3 所示。

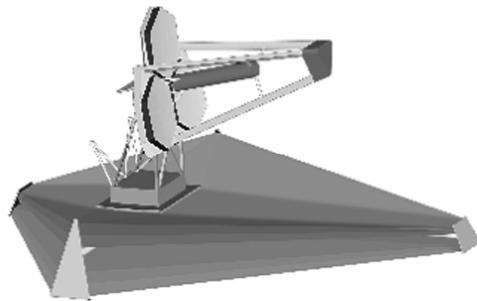


图 3 NEXUS 望远镜
Fig.3 NEXUS space telescope

NEXUS 集成仿真分析流程图如图 4 所示。通过自编程的 IMOS 求解结构的特征值和振型向量。另外，还可通过 DYNAMOD 模块对系统或子系统进行物理实验得到实测结构传递函数，拟合得到 MIMO 测量模型。通过 MACOS 软件追迹大量轴上和轴外光线，得到线性灵敏度矩阵，从而得到波前误差、光程差及波前倾斜等光学性能。扰动模型可以通过白噪声函数等数学模型建立，也可通过试验数据进行输入。通过 ControlForge 完成控制模型的分析和完善。

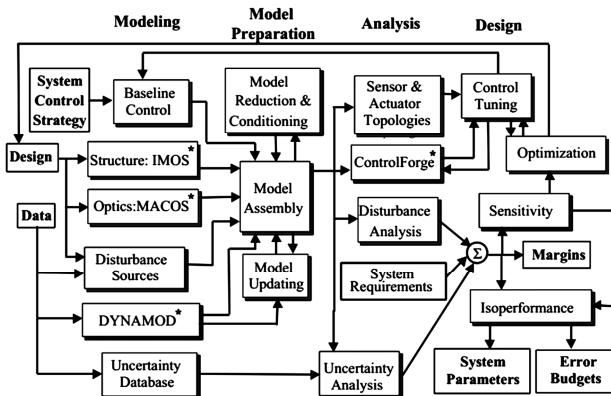


图 4 NEXUS 的集成仿真分析

Fig.4 Framework block diagram of NEXUS integrated model

通过对 NEXUS 的集成仿真，进行了扰动分析、灵敏度分析、同效性分析、多目标优化及误差分配。设计人员利用分析结果，掌握了模型关键参数，对设计进行优化并使 LOS 等光学误差指标显著降低。初始设计与优化设计的参数与结果对比如图 5 所示^[6-7]。

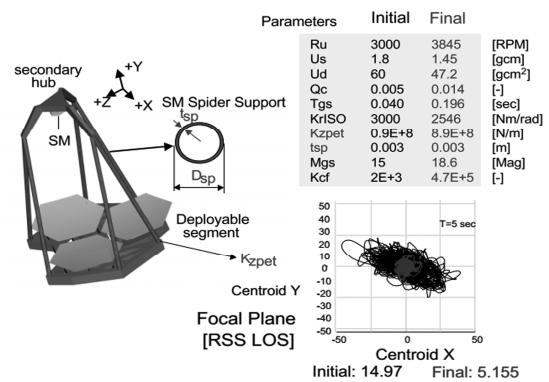


图 5 初始参数与优化后参数的结果对比
Fig.5 Results comparison of initial and optimized parameters

1.3 JWST 望远镜

JWST (James Webb Space Telescope) 是计划于 2018 年发射的红外望远镜，拥有由 18 个子镜组成的 6.5 m 口径主镜，结构如图 6 所示。

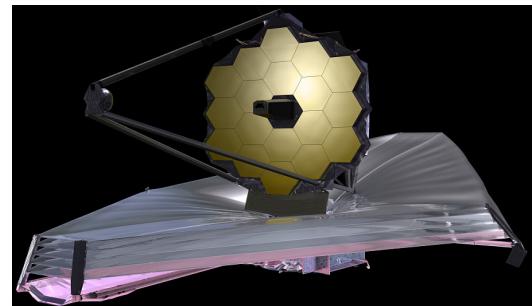


图 6 JWST 望远镜
Fig.6 James Webb Space Telescope

JWST 的集成仿真模型为线性的光机控模型，如图 7 所示。最大的抖动源自卫星平台反作用轮的振动谐波激起的卫星平台与望远镜的振动。光机结构的振动响应引起的像移和动态波像差会导致相位下降。光学抖动结果用于预测成像性能，改善结构设计、评估扰动源的影响^[32]。

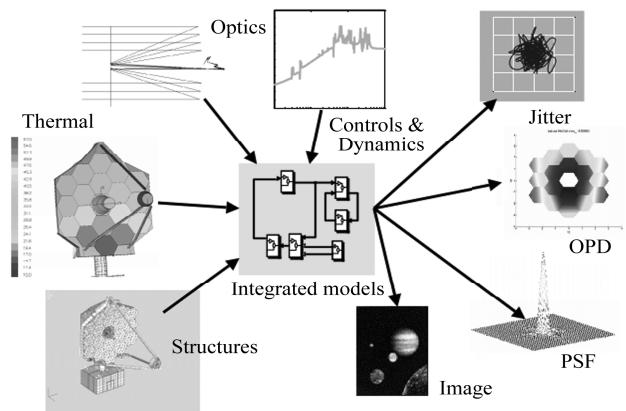


图 7 JWST 集成建模

Fig.7 Integrated modeling for JWST

2 集成仿真主要内容

2.1 扰动源模型

Eyerman 和 Shea^[33]对航天器扰动源进行了全面分析。反作用轮引入的扰动通常被认为是最主要的扰动源^[27,34—35]。其他的扰动源包括斯特林制冷机、姿控传感器噪声、导星噪声等^[6]。扰动模型可以通过白噪声函数等数学模型建立,也可通过试验数据进行输入。对于后续的 Lyapunov 分析和灵敏度分析,需要将扰动信息转换为状态空间形式。

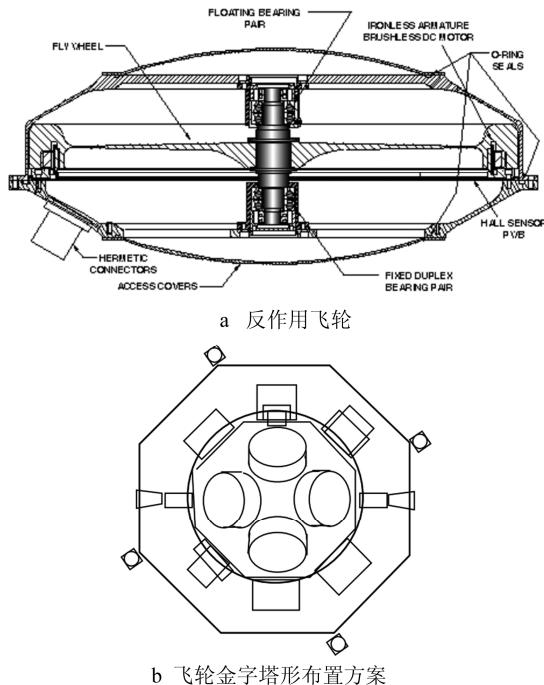


图 8 反作用飞轮及其金字塔形布置

Fig.8 Reaction wheels and RWA pyramidal arrangement

Davis, Melody, Bialke 以及 Masterson^[34]等人对反作用轮扰动模型的建立进行了深入研究。图 8 给出了 NGST 反作用飞轮及其布置方案。反作用轮扰动是由转速谐波带来的一系列正弦形式的力和力矩。谐波的比例由轴承几何及滚动体数量所决定。各谐波(轴向力、径向力、径向力矩)的幅值与转速的平方成比例关系。对于反作用飞轮,Masterson^[34]首先建立一个白噪声驱动的线性滤波器模型,然后通过 MATLAB 优化工具箱对其传递函数进行拟合,使得拟合传递函数的 PSD 与实际 PSD 最为接近。

根据试验数据,斯特林制冷机的扰动,可以建

立近似模型,如图 9 所示,将其谐波近似为二阶微小阻尼系统极点,并转换为状态空间形式^[3]。

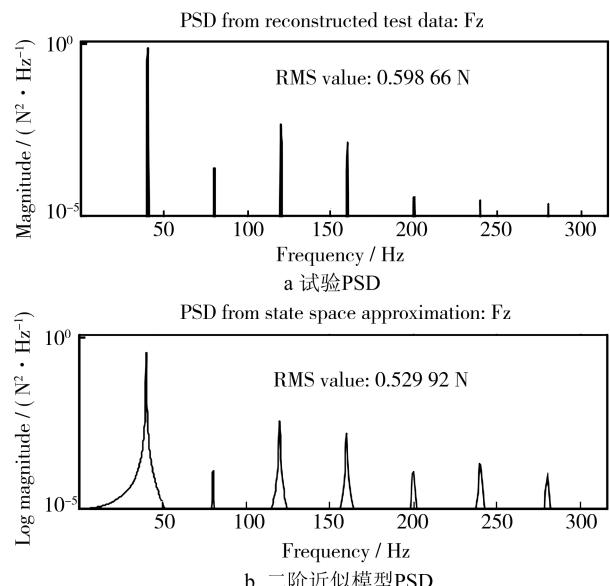


图 9 试验 PSD 和二阶近似模型 PSD 对比

Fig.9 Comparison of experimental PSD and second order approximation

Weck 采用连续的低通滤波器模型代替工作在离散时间系统的精密导星传感器 FGS,获得其传递函数。然后用该传递函数将白噪声转换为 FGS 噪声,并给出其状态空间表达形式。

2.2 结构模型

结构模型通常采用离散化的有限元模型进行分析。结构的刚度矩阵和质量矩阵可由初始设计下的结构模型得到。结构模型可用二阶线性微分方程来表示,并用其来对结构模型进行结构动力学分析,求解动力学方程,得到结构的频率信息对角阵 Ω 和质量归一化后的阵型矩阵 Ψ ^[36—42]。

$$\ddot{q} + 2Z\Omega\dot{q} + \Omega^2 q = \Psi^T f$$

式中: q 为模态坐标系, Z 为模态阻尼, f 为模态力矩阵。

为进行结构与控制的集成分析,通常需要将复杂结构模型以状态空间形式进行表示:

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

按照所选取的状态向量的定义不同,结构模型的状态空间形式也有所不同。常用的是:

$$x = \begin{Bmatrix} q \\ \dot{q} \end{Bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -2Z\Omega \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ \Psi^T \end{bmatrix}$$

$$C = [\Psi \quad 0] \quad D = [0]$$

空间望远镜工作在太空失重无约束环境,因此对于整机性能没有影响的刚体位移模态,需要去掉或采取措施加以稳定。

2.3 光学模型

Weck^[3]给出了 NGST 的两种光学模型:简化光线追迹模型和全光学线性灵敏度矩阵。简化光线追迹模型仅追踪系统的少数关键节点,并基于几何光学计算光程差的波前误差,采用主次镜间的角位移计算波前倾斜。全光学线性灵敏度矩阵通过引入特定自由度上的单位扰动,计算波前和中心点。

Howard^[43-46]和 Knight^[47]归纳了 JWST 团队为集成建模而建立线性光学模型并计算线性灵敏度矩阵的过程。绝对灵敏度矩阵 L 采用相对于正常系统的绝对灵敏度,即参考面采用的是未对光程差数据拟合的原始表面。敏感度矩阵 W 采用从波前数据中去除了偏心和倾斜,用以评估相对波前误差。这也是目前常用光学设计软件标准光程差数据。敏感度矩阵 C 通过 x 和 y 的点中心数据来评估图像的位移量。

计算得到的灵敏度矩阵可通过 OPD 图(或点中心图)和受扰动后系统的光线追迹数据分析两种方式进行验证。经验证,部件扰动达到 $1 \mu\text{m}$ 量级时,通过线性光学模型与光线追迹模型得到的波前结果误差在 1% 以内。线性光学模型可用来处理高频视轴运动及半稳定的热变形过程。JWST 线性光学模型可以描述为追迹光线光程差关于光学元件刚体运动六自由度的一阶泰勒展开,仅考虑了光学元件的刚体位移,而未引入其柔性变形。光学面的柔性变形可以通过 Zernike 多项式等方式实现建模。

2.4 控制模型

控制模型主要包括卫星平台姿态控制(Attitude Control System, ACS)和快摆镜精密稳像控制(Fine Guidance System, FGS)两方面内容,如图 10 所示。姿态控制系统通过接收星敏感器和陀螺仪的信息来稳定平台的刚体模态。稳像控制系统在平台粗级控制的基础上,通过精密导星系统完成光学指标控制。控制系统需要根据结构、光学等子系统的开环传递函数完成初步设计,然后根据系统扰动和光学反馈改进设计方案^[3,19]。

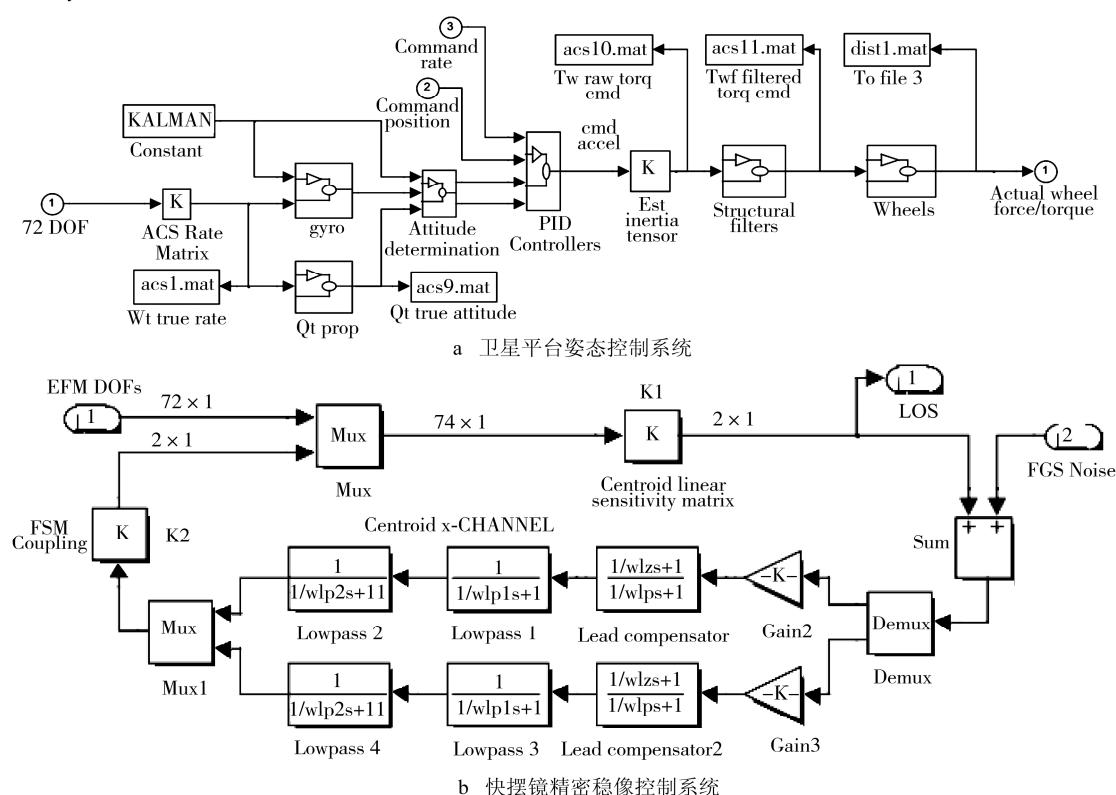


图 10 NEXUS 集成仿真框图
Fig.10 Block diagram of NEXUS integrated model

2.5 集成建模

集成建模考虑了各子系统建模以及各子系统

之间的相互作用^[39,48-49]。通过 MATLAB 软件控制、优化、信号处理以及其他工具箱，对各模块进行集成。NEXUS 集成仿真如图 11 所示。

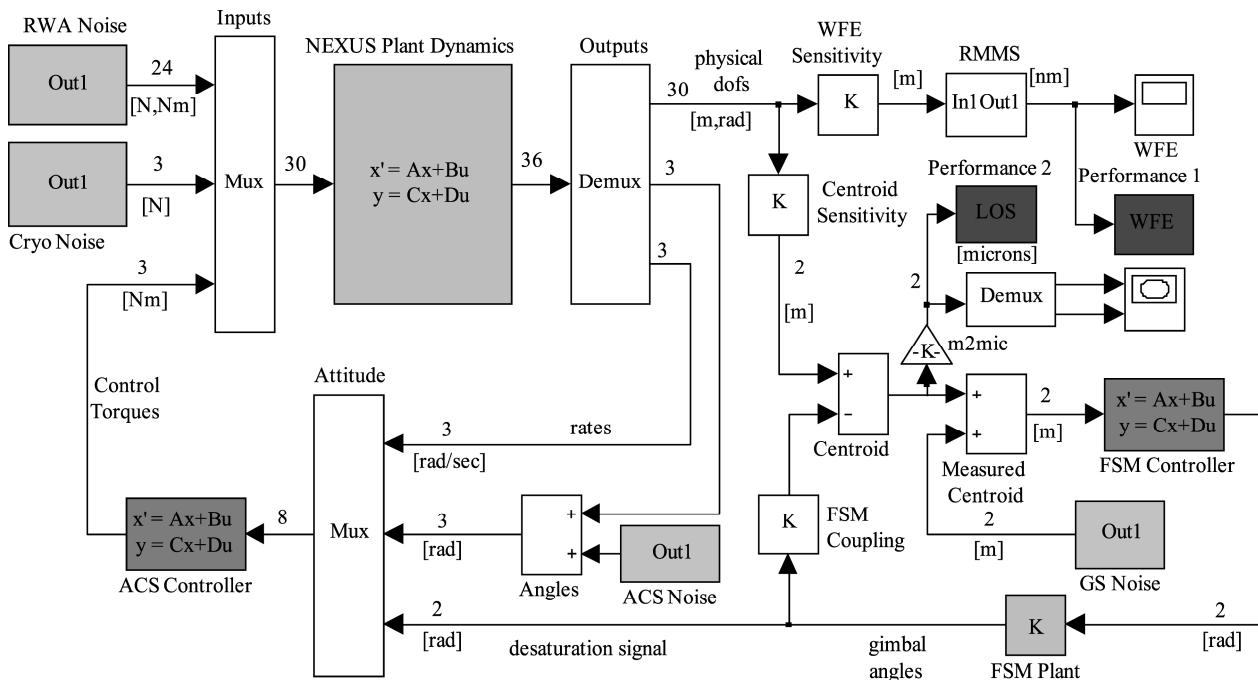


图 11 NEXUS 集成仿真

Fig.11 Block diagram of NEXUS integrated model

模型集成过程需要进行一些简化和假设。比如，飞轮组件的力矩取决于太阳辐射产生的外部力矩；制冷剂工作时的扰动取决于外部热环境和平衡温度等。这些扰动在真实环境中与望远镜是相互作用的，但集成分析中，一般根据其外部环境作用下的典型输出，作为扰动模型中的输入。

模型中涉及的一个关键问题是模型平衡与降阶。模型降阶是在保留大部分原模型动力学特性的前提下，降低状态空间模型的阶数。模型平衡与降阶的好处在于大大缩减了计算时间及所需的计算资源，同时也能改善方程的条件数^[1,39,50-51]。模型降阶的方法包括平衡截断法（DT）、最优 Hankel 范数逼近法、平衡奇异摄动法（SPA）和广义平衡奇异摄动法（GSPA），以及基于信息论的一些方法^[52-54]。

3 集成仿真的指导作用

集成后的模型可用于分析系统在环境条件下的动态响应，验证设计方案的合理性、指标满足度和系统稳定性。此外，集成模型也用于系统设计参数的权衡，以及在扰动输入特性下进行更具针对性的方案优化。

3.1 性能分析

模型集成完成后，可通过时域分析、频域分析及 Lyapunov 分析，分析系统的时域和频率响应信息^[6,27,55-57]，得到当前设计方案下的光学性能。初始设计下的视轴抖动 LOS 如图 12 所示。

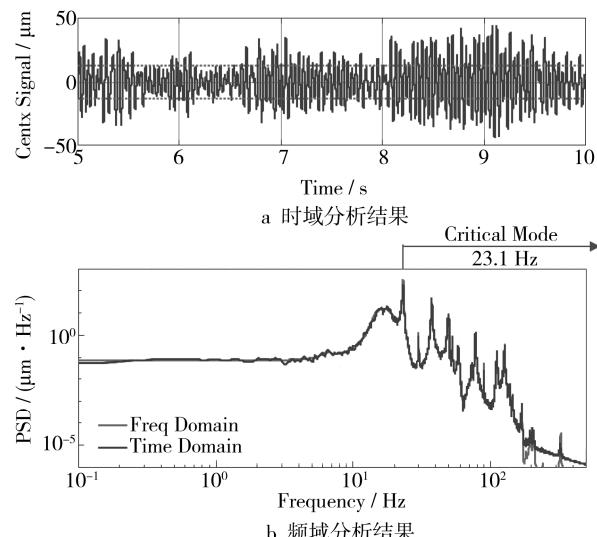


图 12 初始设计下的 NEXUS 视轴抖动

Fig.12 LOS of NEXUS in initial design

3.2 灵敏度分析

灵敏度可以通过在初始设计点 p_o 处的归一化 Jacobian 矩阵得到^[6,55]。

$$\bar{\nabla}J_z = \frac{p_o}{J_{z,o}} \begin{bmatrix} \frac{\partial J_{z,1}}{\partial R_u} & \frac{\partial J_{z,2}}{\partial R_u} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial J_{z,1}}{\partial K_{cf}} & \frac{\partial J_{z,2}}{\partial K_{cf}} \end{bmatrix}$$

式中: J_z 为光学性能评价指标; R_u , K_{cf} 均为设计参数(上部飞轮转速、快摆镜控制增益)。

通过 NEXUS 望远镜的灵敏度分析结果^[6](如图 13 所示)可以看到, 波前误差对飞轮转速上限、飞轮组件隔离器刚度及可展开梁结构刚度等参数的变化较为敏感。设计人员可以通过灵敏度评估该参数变动后对结果的影响程度。

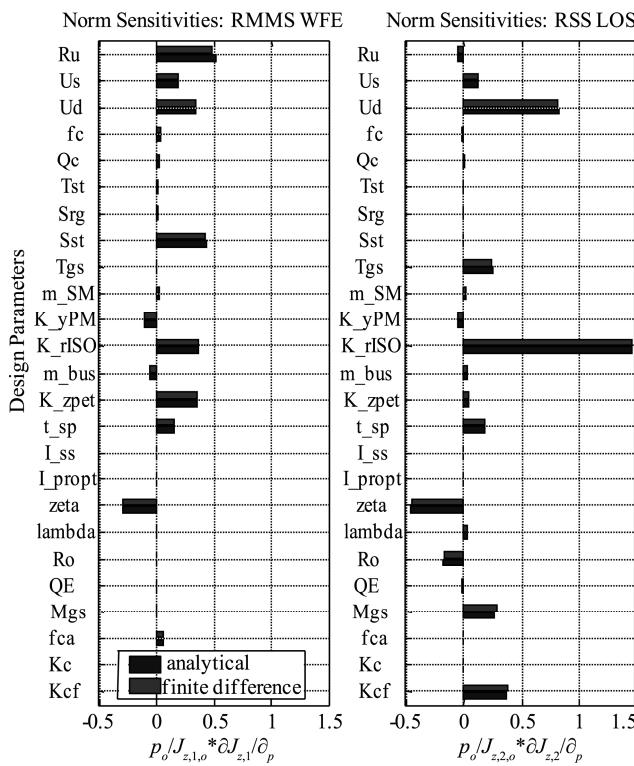


图 13 NEXUS 灵敏度分析结果

Fig.13 NEXUS sensitivity analysis results

3.3 同效性分析

同效性分析, 是在维持当前性能表现的情况下, 选择设计方案中的若干设计参数, 进行权衡与协调。在 NEXUS 设计过程中, 设计人员通过调整飞轮组件的不平衡量和振动隔离装置的柔性, 如图

14 所示, 既保证了良好的扰动量级控制, 又避开了望远镜整机的柔性模态。

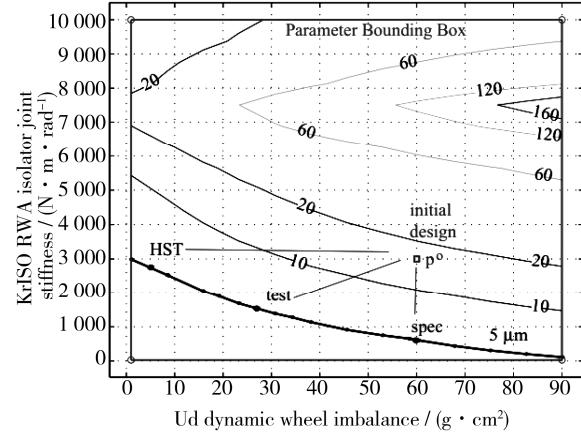


图 14 两变量同效性

Fig.14 Isoperformance contour of 2 parameters

3.4 多目标优化

对设计参数给出上下限, 利用正交试验、拉丁超立方等方法进行试验参数设置, 利用蚁群算法等多目标优化算法, 对成像性能指标、成本、不确定性等指标进行多目标优化, 找出最优的一组或几组解, 从而为设计人员的方案优化给出参考。NEXUS 望远镜分别按照性能均值最优 A、最小快摆镜控制增益 B 和最小性能不确定度 C 得到的最佳方案如图 15 所示。

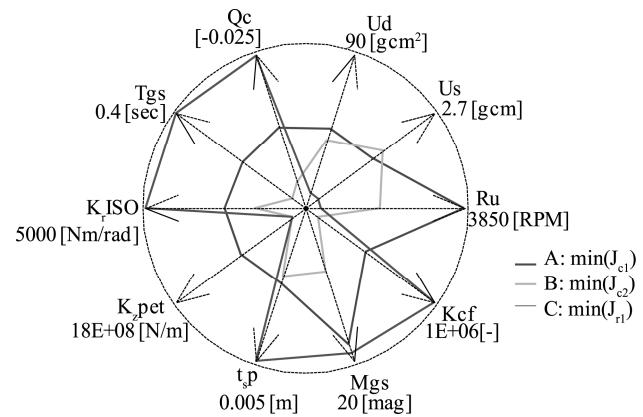


图 15 三种设计方案对比

Fig.15 Comparison of three design schemes

3.5 干扰定位与缓解

通过对灵敏度数据进行分析, 找到相关性较大的设计参数, 并对其进行针对性改进, 可以提高望远镜的性能表现。通过对 NGST 的分析表明, 飞轮的动态不平衡量对性能有较大影响。设计人员给出了通过平衡试验来调整飞轮不平衡量, 或者换用磁

轴承飞轮等方法来改善结果。另外, JPL 开发出了如图 16 所示的六轴主动隔振器来缓解飞轮扰动对望远镜的影响^[3]。

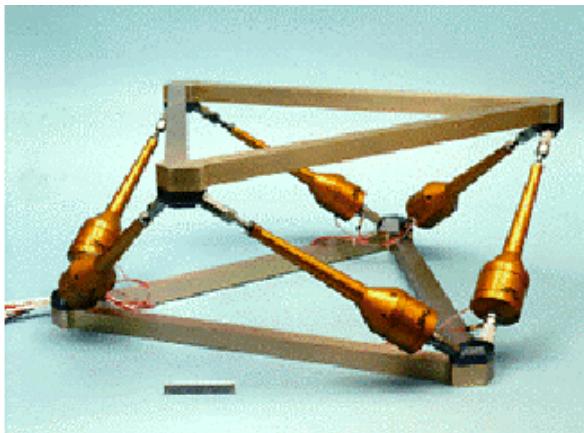


图 16 六轴主动隔振器
Fig.16 Six axis active vibration isolator

4 结语

通过 NGST 等空间望远镜的设计实例可以看出,集成建模与系统仿真在空间望远镜设计过程中有巨大的应用前景。目前,扰动源、结构模型、光学模型和控制模型等单学科研究均有了很多成果。利用这些成果并进行模型集成,可以对空间望远镜进行系统级仿真分析,得到其时域和频域的分析结果,并开展灵敏度分析、多目标优化等数据挖掘来指导设计的优化过程。集成仿真技术及其应用案例对今后我国大型空间望远镜设计有着重要指导和借鉴意义。

参考文献:

- [1] UEBELHART S A. Conditioning, Reduction, and Disturbance Analysis of Large Order Integrated Models for Space-based Telescopes[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [2] MILLER D W, DE WECK O L, UEBELHART S A, et al. Integrated Dynamics and Controls Modeling for the Space Interferometry Mission (SIM)[C]// Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings. IEEE, 2001.
- [3] WECK O L. Integrated Modeling and Dynamics Simulation for the Next Generation Space Telescope[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [4] LEVINE M B, MOORE G, BASINGER S A, et al. Integrated Modeling Approach for the Terrestrial Planet Finder(TPF) Mission[C]// SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2004: 181—192.
- [5] KISSIL A, KWACK E, HO T, et al. Integrated Modeling Applied to the Terrestrial Planet Finder Mission[J]. Proc SPIE, Optical Modeling and Performance Predictions II, 2005, 5867: 586710.
- [6] MILLER D W, DE WECK O L, MOSIER G E. Framework for Multidisciplinary Integrated Modeling and Analysis of Space Telescopes[C]// Workshop on Integrated Modeling of Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2002: 1—18.
- [7] WECK O L, MILLER D W, MOSIER G E. Multidisciplinary Analysis of the NEXUS Precursor Space Telescope[C]// Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2002: 294—304.
- [8] MOSIER G E, HOWARD J M, JOHNSTON J D, et al. The Role of Integrated Modeling in the Design and Verification of the James Webb Space Telescope[C]// Optical Science and Technology, the SPIE 49th Annual Meeting. International Society for Optics and Photonics, 2004: 96—107.
- [9] FITZMAURICE M W, HA K Q, LE C, et al. End-to-End Performance Modeling of the James Webb Space Telescope (JWST) Observatory[C]// Optics & Photonics 2005. International Society for Optics and Photonics, 2005: 58670W-58670W-14.
- [10] ATKINSON C, TEXTER S, HELLEKSON R, et al. Status of the JWST Optical Telescope Element[C]// SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2006: 62650T-62650T-10.
- [11] KNIGHT J S, LIGHTSEY P, BARTO A. Predicted JWST Imaging Performance[C]// Proc of SPIE Vol. 2012, 8442: 84422G-1.
- [12] WHITMAN T L, DZIAK K J, WELLS C, et al. Measuring Segmented Primary Mirror WFE in the Presence of Vibration and Thermal Drift on the Light-weighted JWST[C]//SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2012: 84423J-84423J-7.
- [13] MATTHEWS G, SCORSE T, KENNARD S, et al. JWST Telescope Integration and Test Status[C]// SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2014: 914305-914305-11.
- [14] CLAMPIN M. Recent Progress with the JWST Observatory[C]// SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2014: 914302-914302-5.
- [15] MATTHEWS G W, KENNARD S H, BROCCOLO R T, et al. JWST Pathfinder Telescope Integration[C]// SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2015: 957504-957504-16.
- [16] ANDERSEN T E, BROWNE M T, ENMARK A, et al. Integrated Modeling of the Euro 50[C]// Second Backaskog Workshop on Extremely Large Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2004: 366—378.

- [17] BROWNE M, ENMARK A, ANDERSEN T, et al. Optimised External Computation for the Euro50 MATLAB Based Integrated Model[C]// SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2006: 627103-627103-12.
- [18] DUNN J, ROBERTS S C, KERLEY D, et al. TMT/VLOT Integrated Modeling[C]// Photonics North. International Society for Optics and Photonics, 2004: 323—332.
- [19] DENG Y, LI H, YANG F, et al. Integrated Modeling and Dynamics Simulation for the TMT-M3 Control System[C]// 7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies (AOMATT 2014). International Society for Optics and Photonics, 2014: 92800J-92800J-7.
- [20] SMITH M J, STEINBRING E, HERRIOT G, et al. Integrating MATLAB and IDL: Adding Adaptive Optics to the TMT/VLOT Integrated Model[C]// SPIE Astronomical Telescopes+Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2004: 301—310.
- [21] ANGELI G Z, VOGIATZIS K, MACMYNOWSKI D, et al. Integrated Modeling and Systems Engineering for the Thirty Meter Telescope[C]// Integrated Modeling of Complex Optomechanical Systems. International Society for Optics and Photonics, 2011: 833605-833605-10.
- [22] 段鹏飞, 李东, 雷文平. 空间相机协同设计和集成分析技术研究[J]. 航天器工程, 2014(2): 52—57.
DUAN Peng-fei, LI Dong, LEI Wen-ping. Collaborative Design and Integrated Analysis of Space Camera[J]. Spacecraft Engineering, 2014(2): 52—57.
- [23] 单宝忠, 陈恩涛, 卢锷, 等. 空间光仪光机热集成分析方法[J]. 光学精密工程, 2001(4): 377—381.
SHAN Bao-zhong, CHEN En-tao, LU E, et al. Thermal/Structural/Optical Integrated Analysis of Space Camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2001(4): 377—381.
- [24] 庞世伟, 杨雷, 曲广吉. 高精度航天器微振动建模与评估技术最近进展[J]. 强度与环境, 2007(6): 1—9.
PANG Shi-wei, YANG Lei, QU Guang-ji. New Development of Micro-vibration Integrated Modeling and Assessment Technology for High Performance Spacecraft[J]. Structure & Environment Engineering, 2007(6): 1—9.
- [25] 王栋, 金光. 空间相机光机系统集成仿真设计方法研究[C]// 中国空间科学学会第七次学术年会会议手册及文集. 中国空间科学学会, 2009.
WANG Dong, JIN Guang. Research of Integrated Simulation Design Method for Space Camera Optics and Structure System[C]// 7th Annual Conference Proceedings and Meeting Manual of Chinese Space Science Institute. Chinese Space Science Institute, 2009.
- [26] 刘巨, 薛军, 任建岳. 空间相机光机热集成设计分析及关键技术研究综述[J]. 宇航学报, 2009(2): 422—427.
LIU Ju, XUE Jun, REN Jian-Yue. Review of Research on Integration Design of Structural, Thermal and Optical Analysis with Key Technique of Space Camera[J]. Journal of Astronautics, 2009(2): 422—427.
- [27] 马超. 高精度空间飞行器动力学集成建模方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
MA Chao. The Methodology of Dynamics Integrated Modeling for High Precision Spacecraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [28] 童靖宇, 向树红. 临近空间环境及环境试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 1—4.
TONG Jing-yu, XIANG Shu-hong. Near Space Environment and Environmental Tests[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 1—4.
- [29] 朱建斌, 向树红, 贾萍, 等. 航天器动力学试验评价技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3): 5—10.
ZHU Jian-bin, XIANG Shu-hong, JIA Ping, et al. Summarization of Spacecraft Dynamics Test and Evaluation Technologies[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3): 5—10.
- [30] ZHANG B, WANG X, HU Y. Integrated Modeling and Optical Jitter Analysis of a High Resolution Space Camera[C]// 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies(AOMATT 2012). International Society for Optics and Photonics, 2012: 841508-841508-7.
- [31] MILMAN M, LEVINE M. Integrated Modeling Tools for Precision Multidisciplinary Systems[C]// SMACS (Space Microdynamics and Control) Conference. Toulouse, France. 1997.
- [32] MUHEIM D M, MENZEL M T, MOSIER G, et al. An Update on the Role of Systems Modeling in the Design and Verification of the James Webb Space Telescope[C]// SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2010: 773814-773814-13.
- [33] EYERMAN C E. A Systems Engineering Approach to Disturbance Minimization for Spacecraft Utilizing Controlled Structures Technology[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [34] MASTERSON R A. Development and Validation of Empirical and Analytical Reaction Wheel Disturbance Models[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [35] 杨新峰, 白照广, 杨栋, 等. 动量轮诱导的卫星地面微振动特性研究以及在轨仿真分析[J]. 装备环境工程, 2015, 12(3): 15—21.
YANG Xin-feng, BAI Zhao-guang, YANG dong, et al. Study on Micro-vibration of Satellite Induced by Momentum Wheels and On-orbit Simulation Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(3): 15—21.
- [36] MUELLER M, WILHELM R, BAIER H, et al. Integrated Modeling for the VLTI[C]// Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2003: 881—892.
- [37] GAWRONSKI W. Advanced Structural Dynamics and Active Control of Structures[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2004.
- [38] ANGELI G Z, SEGURSON A, UPTON R, et al. Inte-

- grated Modeling Tools for Large Ground-based Optical Telescopes[C]// Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting. International Society for Optics and Photonics, 2004: 49—63.
- [39] LIEBER M D. Space-based Optical System Performance Evaluation with Integrated Modeling Tools[C]// Defense and Security. International Society for Optics and Photonics, 2004: 85—96.
- [40] HEIMSTEN R, ANDERSEN T, OWNER-PETERSEN M, et al. Integrated Modeling of a Laboratory Setup for a Large Deformable Mirror[C]// Integrated Modeling of Complex Optomechanical Systems. International Society for Optics and Photonics, 2011: 83360N-83360N-9.
- [41] 杜运东, 史宝军, 杨廷毅, 等. 基于状态空间法的结构动力学建模与简化算法[J]. 山东建筑大学学报, 2009(4): 288—292.
- DU Yun-dong, SHI Bao-jun, YANG Ting-yi, et al. Structure Dynamic Modeling and Its Reduced Algorithm Based on State Space Method[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2009(4): 288—292.
- [42] 韩旭, 焦海丽. 大口径红外变焦投影系统环境适应性研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015(6): 16—20.
- HAN Xu, JIAO Hai-li. Research on Environmental Adaptability of Large Diameter Infrared Zoom Projection System[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015(6): 16—20.
- [43] HOWARD J M. Optical Modeling Activities for the James Webb Space Telescope (JWST) Project: I The Linear optical Model[C]// Optical Science and Technology, SPIE's 48th Annual Meeting. International Society for Optics and Photonics, 2004: 82—88.
- [44] HOWARD J M. Optical Modeling Activities for NASA's James Webb Space Telescope (JWST): III. Wavefront Aberrations Due to Alignment and Figure Compensation[C]// Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2007: 667503-667503-11.
- [45] HOWARD J M. Optical Modeling Activities for NASA's James Webb Space Telescope (JWST): IV. Overview and Introduction of MATLAB Based Toolkits Used to Interface with Optical Design Software[C]// Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2007: 666804-666804-10.
- [46] HOWARD J M. Optical Integrated Modeling Activities for the James Webb Space Telescope (JWST)[C]// Integrated Modeling of Complex Optomechanical Systems. International Society for Optics and Photonics, 2011: 83360E-83360E-8.
- [47] KNIGHT J S, LIGHTSEY P, BARTO A, et al. Image quality verification analysis of the JWST[C]// SPIE Astronomical Telescopes+ Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2010: 77381Z-77381Z-8.
- [48] 葛东明, 邹元杰. 高分辨率卫星结构-控制-光学一体化建模与微振动响应分析[J]. 航天器环境工程, 2013(6): 586—590.
- GE Dong-ming, ZOU Yuan-jie. Structure-Control-Optics Integrated Modeling and Micro-vibration Analysis for High Resolution Satellite[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013(6): 586—590.
- [49] 葛东明, 邹元杰, 张志娟, 等. 基于全柔性卫星模型的控制闭环微振动建模与仿真[J]. 航天器工程, 2012(5): 58—63.
- GE Dong-ming, ZOU Yuan-jie, ZHANG Zhi-juan, et al. Control Closed-loop Micro-vibration Modeling and Simulation Based on Flexible Satellite Model[J]. Spacecraft Engineering, 2012(5): 58—63.
- [50] MUELLER M, BAIER H. SMI: A Structural Dynamics Toolbox for Integrated Modeling[C]// Workshop on Integrated Modeling of Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2002: 41—50.
- [51] 杨德华, 徐灵哲. 系统仿真在天文望远镜设计中的应用综述[J]. 系统仿真学报, 2009(10): 2801—2805.
- YANG De-hua, XU Ling-zhe. Application Review of System Simulation Technique in Astronomical Telescope Design[J]. Journal of System Simulation, 2009(10): 2801—2805.
- [52] 刘天雄, 华宏星, 石银明. 结构动力模型一体化降阶技术[J]. 强度与环境, 2003(1): 31—36.
- LIU Tian-xiong, HUA Hong-xing, SHI Yin-ming. Study on United Model Reduction Method for Dynamic Model[J]. Structure & Environment Engineering, 2003(1): 31—36.
- [53] 姜立强, 郭铮, 何鸣. 一种近似广义奇异摄动模型降阶算法[J]. 弹箭与制导学报, 2008(1): 96—98.
- JIANG Li-qiang, GUO Zheng, HE Ming. A Quasi-generalized Singular Perturbation Model Reduction Method[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008(1): 96—98.
- [54] 王景, 李爱军, 兖锐. 弹性飞机模型降阶软件设计[J]. 测控技术, 2012(8): 91—95.
- WANG Jing, LI Ai-jun, KANG Rui. Design of the Model Reduction Software for Flexible Aircraft[J]. Measurement and Control Technology, 2012(8): 91—95.
- [55] GUTIERREZ H L. Integrated Modeling and Analysis Methodology for Precision Pointing Applications[C]// Workshop on Integrated Modeling of Telescopes. International Society for Optics and Photonics, 2002: 214—223.
- [56] DE WECK O L, MILLER D W, MALLORY G J, et al. Integrated Modeling and Dynamics Simulation for the Next Generation Space Telescope (NGST)[C]// Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2000: 920—934.
- [57] 邹元杰, 王泽宇, 张志娟, 等. 航天器微振动稳态时域响应分析方法[J]. 航天器工程, 2012(6): 37—42.
- ZOU Yuan-jie, WANG Ze-yu, ZHANG Zhi-juan, et al. Analysis Method of Steady Time-domain Reponse for Spacecraft Micro-vibration[J]. Spacecraft Engineering, 2012(6): 37—42.