

文章编号 1004-924X(2018)11-2764-12

大口径空间光学望远镜重力卸载点布局优化方法

何 煦^{1*}, 杨 雪¹, 李 颐², 张晓辉¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:伴随空间光学载荷口径增大,“天地力学环境不一致”导致光学系统在轨像质严重下降,需要地面装调测试过程卸载重力。但定量的卸载点布局分析、优化方法有待完善。首先研究了大口径光学载荷 1 g 重力下变形机理,分别基于位置闭环和受力闭环,建立优化卸载点布局的数学模型,并通过协同仿真获得卸载点布局优化结果。利用仿真卸载实验验证不同卸载参数下,光学载荷的实际卸载效果。基于位置闭环的卸载方法将高敏感光学组件的位态平均变化量由 370 μm 、36"改善至 72.9 μm 、0.3",而基于受力闭环卸载方法的最大相对偏差约为 7.4%。基于位置闭环的卸载分析方法可获得更接近 0 g 的卸载效果,但误差敏感度极高,不易工程实现。基于受力闭环的卸载方法总卸载率约 75%,对卸载残差的敏感度相对较低,可满足半物理仿真实验对力学环境的模拟需求。

关键词:大口径空间光学望远镜;装调与测试;重力卸载;卸载点布局

中图分类号: TB853.29 **文献标识码:** A **doi:**10.3788/OPE.20182611.2764

Gravity compensation optimization algorithm for large aperture spatial optical telescope

HE Xu^{1*}, YANG Xue¹, LI Yi², ZHANG Xiao-hui¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: hexu_ciom@sinacomp.com

Abstract: Following the increase in the aperture of space optical telescopes, the inconsistency in space and ground mechanical environment results in serious degradation of the system image quality in orbit. Gravity needs to be compensated during the alignment and test procedure of a space telescope. However, quantitative analysis and optimization methods for unloading the point coordinate have not been completely developed. First, the deformation mechanism of a large-aperture telescope under 1g gravity was studied. According to the separate closed-loop location and closed-loop mass, a mathematical algorithm was developed to optimize the position of the unloading points. By performing co-simulation, we were able to optimize the coordinates. Subsequently, simulation experiments were performed to verify the actual effect of the telescope model under different unloading parameters. The closed-loop location analysis method improves the displacement of the highly sensitive optical

收稿日期:2018-05-02;修订日期:2018-05-23.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61875190, No. 61675198)

components from $370\ \mu\text{m}$, $36''$ to $72.9\ \mu\text{m}$, $0.3''$. The maximum relative deviation of the closed-loop mass method from the set value is approximately 7.4%. The closed-loop location gravity-compensation method can achieve a value closer to 0 g. However, its error sensitivity is high, and realizing the engineering results is difficult. The total unloading rate is approximately 75% based on the closed-loop mass gravity-compensation model, and the sensitivity is low. This model can satisfy the demand for mechanical environment of semi-physical simulation experiments using gravity unloading.

Key words: large-aperture spatial optical telescope; alignment and teasting; 0 g gravity simulation; unloading point coordinates

1 引 言

根据重力场作用原理,难以在地面装调和像质测评过程中,为大口径空间光学载荷长时间模拟各维度失重状态。但可通过重力平衡手段,抵消重力效应、缓解装配应力,为半物理仿真实验预测光学组件在轨状态模拟力学环境。

伴随空间光学载荷口径增大,天地重力环境不一致对地面装调、测试的影响日益显著^[1-4],国内外在这一领域报道了诸多研究进展。齐乃明等系统分析各类微重力环境模拟方法的优缺点,提出空间飞行器三维空间微重力模拟设想^[5]。李煜琦等分析了用于空间机械臂重力卸载的悬吊机构总卸载率,并基于力矩方程建立其与残余应力间作用关系^[6]。高海波等基于空间载荷静力学平衡方程,推导重力补偿公式,初步给出吊点力优化方法^[7]。李玲等基于某同轴反射式空间光学载荷变形分析结果,给出多个重力卸载方案,并以系统MTF相对变化量最小作为寻优目标^[8]。Olyvia Han等针对卫星地面装调过程中自身刚度不足问题,设计重力卸载机构,并与现有方法比对^[9]。Yogeshkumar R. Chheta基于重力平衡方程分析多关节机械臂重力卸载残差与电机控制冗余间作用关系^[10]。Giulio Spagnuolo等基于人体运动学模型,建立随动式重力卸载装置的力和力矩平衡方程^[11]。丛强等根据空间载荷地面试验特点,初步给出地面重力卸载装置的设计原则^[12]。杨巧龙等针对卫星在轨姿态,报道了柔性太阳翼地面展开试验的重力卸载方案,研究了力矩干涉对卸载精度的影响^[13]。此外,Jason R. Norcross、He

ZHANG、Donelan J. M.,以及Brown H. B.等均在领域报道了重要研究进展^[14-17]。

目前研究现状表明:(1)现有重力卸载分析方法大多针对机械臂或卫星平台等刚度相对较大的空间载荷,而大口径空间光学系统受光机系统布局所限,刚度普遍较低,针对上述特点的卸载位置定量优化方案未见报道;(2)卸载点布局需依据光学载荷变形机理及载荷构型特点分析,而类似的分析方法尚未统一;(3)空间光学载荷对卸载精度要求极高,而大型光机桁架绝对形貌特征的高精度测量手段尚不完善,上述矛盾需通过建立卸载点和卸载力定量分析、优化流程予以解决,相关方法有待研究。

针对上述问题,并结合某大口径空间光学望远镜的光学稳定性公差和重力卸载实际需求,论文分析了力学环境变化导致空间光学载荷像质变化机理,据此给出重力卸载的分析原则和卸载点布局优化方程。利用有限元分析和数学仿真等手段,分别基于位置和质量边界条件,优选卸载点布局。最后进行仿真卸载试验。基于试验数据,比选卸载方案并得到初步结论。

2 卸载原理与分析模型

2.1 重力补偿原理

空间光学载荷在轨成像质量,主要受地面装调精度及其与在轨状态一致性影响。光学载荷中的大口径光学元件及支撑桁架,在地面装调、测试过程中始终受重力场作用,而在轨则处于失重状态。上述力学环境变化导致入轨重力释放后,桁架变形并引发其上各光学元件相对位置和姿态变

化,使像质下降。相对于面形变化而言,桁架状态变化对光学载荷在轨像质的显著影响更加显著。对此,可通过半物理仿真实验预估重力释放后,高敏感光学组件的位置和姿态,并在发射前预装定位姿加以解决。为确保计算精度,需要在地面装调及半物理试验过程中,精确补偿重力效应,并使桁架变形在其线性范围内。

如图 1 所示,光学装调过程中载荷受 $1g$ 重力作用,大尺寸光机桁架除自身重力变形外,还会由其上加载的科学仪器、幅冷系统等所受重力引入附加变形。光学载荷入轨后处于 $0g$ 状态,由重力引起的各种变形得以释放,导致各光学元件间相对位姿变化,光学系统产生较大失调,引起像质大幅下降。

为此,需地面光学装调过程中,对光学载荷部分组部件的重力进行补偿。一方面适当保留桁架自身重力变形,用于半物理试验,计算高敏感光学元件预装定位姿;另一方面,缓解桁架整体变形量,使其处于线性区间、提高仿真计算精度。

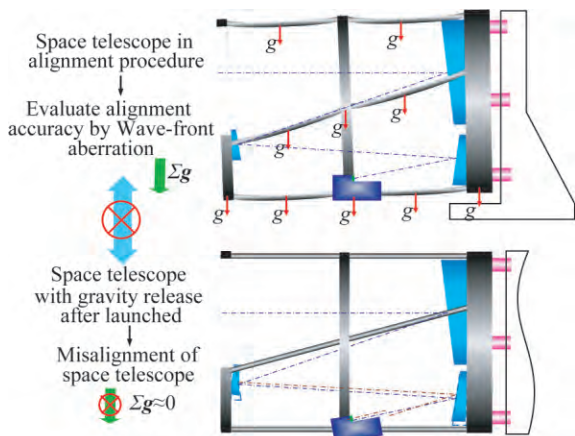


图 1 天-地力学环境不一致引发像质下降

Fig. 1 Principle of imaging quality reduction generated by inconformity of space-ground mechanics environment

2.2 分析模型简述

本文用于分析和验证的简化模型及其组成如图 2 所示,模拟离轴 TMA 主光路,并采用桁架模型的空间望远镜光机结构。图 2 模型中包括基板、主桁架、科学仪器及其安装架。模型中的基准面 M1、M2、M3 作为特征面用于分析,并分别代表光学载荷中主、次、三镜的连接基准面。分析涉

及的坐标系及其与重力加速度矢量间坐标关系如图 2, y 轴代表光轴指向, z 轴为重力加速度 $+g$ 方向,卸载点设置在模型 $+z$ 一侧。

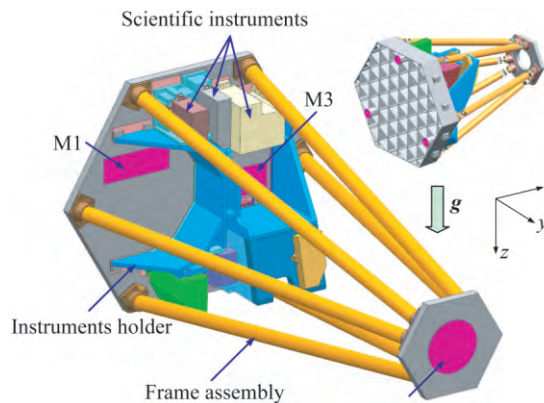


图 2 简化分析模型组成示意图

Fig. 2 Schematic of constituent part in analysis model

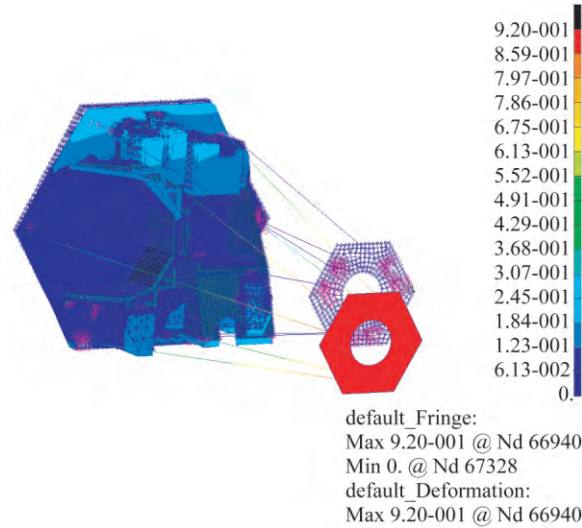
2.3 光学载荷 $1g$ 重力下变形机理分析

对图 2 所示模型进行有限元划分,再逐个单件、组件计算其 $1g$ 重力下变形。以基板为基础,之后逐次加入仪器安装架、桁架组件、科学仪器,形成具有不同结构特性的组合体。分析过程中,基板 $-y$ 方向设置 3 个定长杆用于定位。桁架、科学仪器与基板之间均设置为铰接。对上述各组合体分别进行 $1g$ 重力、无卸载条件下的变形分析。经数据拟合后获得 M1、M2、M3 面 5 个自由度的刚体位移,以及拟合的面形误差。上述结果如表 1 所示,部分分析结果如图 3 所示。

表 1 和图 3 分析结果显示,科学仪器与桁架集成后, M1、M3 面 5 个方向的刚体位移均有所增加。其中 M1 面沿 x 向刚体位移增加较大, M3 面绕 x 轴旋转和沿 z 向刚体位移反向。结合基板与桁架组合体变形数据,分析其原因在于,科学仪器质量所引入力矩对桁架引入的力矩起平衡作用。这导致基板上特征面附近的变形趋势反向,但其变形的绝对量并未显著改变。此外, M2 面沿 x 向、 y 向刚体位移增大,沿 z 向(重力方向)刚体位移减小,也印证上述组合体绕质心方向的不平衡力矩有所缓解的分析结果。由科学仪器重力及其非对称分布的重力加载,导致基板内部扭曲变形放大,使得桁架连接点附近的相对变形增大,进而附加至桁架变形中,使 M2 面沿另两个方向的刚体位移增大。

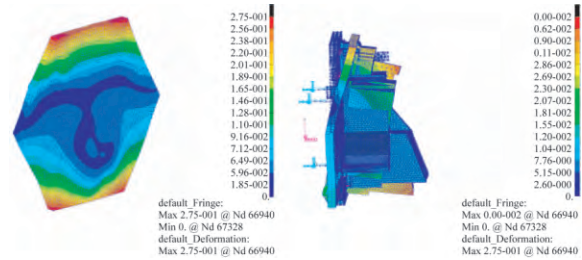
表 1 模型各级组合体在 1 g 重力下的特正面刚体位移和面形分析结果
Tab. 1 Finite element analysis results of each subassemblies inmodel applied by 1 g gravity

分析项目		转角/(°)		刚体位移/ μm			面形/ μm	
		X	Z	X	Y	Z	PV	RMS
基板	M1	-2.641	0.209	-9.46E-03	1.25E-02	1.254	4.03E-01	5.90E-02
	M3	0.398	-0.931	2.81E-02	-8.87E-01	1.215	1.174	0.109
基板 & 安装架	M1	-1.57E+01	-7.45E-02	4.01E-01	2.96E-01	6.038	2.205	4.14E-01
	M3	-4.98E-01	-5.168	1.76E-01	-6.354	7.314	7.673	7.13E-01
基板 & 桁架	M1	-7.11E+01	-6.63E+00	8.34E-01	6.44E+00	2.55E+01	1.54E+01	2.75E+00
	M3	-1.86E+01	-4.07E+01	-4.40E-01	-2.49E+01	2.69E+01	3.73E+01	5.03E+00
	M2	-7.22E+01	-1.40E+00	4.89E+01	-1.40E+01	1.09E+03	7.50E+00	1.83E+00
基板 & 安装架 & 桁架	M1	-1.02E+02	-9.085	9.55E-02	5.061	3.33E+01	1.62E+01	3.239
	M3	-2.32E+01	-2.89E+01	-1.501	-3.81E+01	-3.41E+01	4.41E+01	4.66
	M2	-8.67E+01	2.103	-4.84	-8.837	1.17E+03	7.29	1.784
全部组件	M1	-1.00E+02	-3.07E+01	5.738 533	8.951 613	3.70E+01	1.59E+01	3.039
	M3	1.09E+01	-3.77E+01	2.31E-01	-2.42E+01	4.56E+01	3.78E+01	4.724
	M2	-5.19E+01	-2.00E+01	2.04E+02	2.04E+01	8.93E+02	8.479 192	2.038



(a)整体重力变形云图

(a)Distorted nephogram of modle applied by 1 g gravity



(b)基板和科学仪器组合体重力变形云图

(b)Distorted nephogram of basal plate and instrument combined applied by 1 g gravity

图 3 模型未卸载状态下变形分析结果

Fig. 3 Analysis results of model without gravity unload

基于上述分析结果,可归纳光机结构 1 g 重力下变形机理。首先,仪器安装架并未加强基板刚度,仅作为负载引起基板产生附加的“C”形变形。并且由于负载质量分布不对称,还伴有轻微“马鞍形”扭曲变形;其次,桁架组件对基板起进一步拉伸作用,使基板产生绕 x 轴向旋转,进而引起 M2 面较大刚体位移;最后,科学仪器作为负载,一方面平衡前桁架引起的不平衡力矩,另一方面加大基板前端面的内部扭曲变形,恶化桁架根部连接区域的面形,在 M2 面上引入附加位移。

3 基于位置的卸载点寻优策略

3.1 基于位置闭环的卸载点优选方法

基于上述变形机理,从缓解基面 M2 刚体位移的目标出发,卸载点选取应遵循如下 3 项原则:通过重力平衡,抵消不平衡力矩引起的前桁架沿重力方向位移;卸载科学仪器及其安装架质量,在一定程度上有助于缓解基板内部形变,进而消除桁架前端 M2 镜安装面附加位移;卸载点需布置于传力路径上且局部刚度较好位置。

根据上述原则,构建如公式(1)~(4)的数学模型,并在数学仿真软件中编写计算控制程序,用于控制有限元仿真软件逐次迭代寻优,直至满足设定的优化目标:

$$\begin{cases} x_i \in (N_{x1}, N_{x2}), y_i \in (N_{y1}, N_{y2}), \\ z_i \in (N_{z1}, N_{z2}), i \leq 5 \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_i, y_i, z_i \in (N_{xj}, N_{yj}, N_{zj}) \\ N_j \in (\text{node-point}), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} DOF_{xi}=0, DOF_{yi}=0, DOF_{zi}=1 \\ DOF_{\theta xi}=0, DOF_{\theta yi}=0, DOF_{\theta zi}=0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial (L(z_{M1}-z_{M2})^2)}{\partial Z_{M2}}=0 \\ RMS[M1, M2, M3]=\min \end{cases}. \quad (4)$$

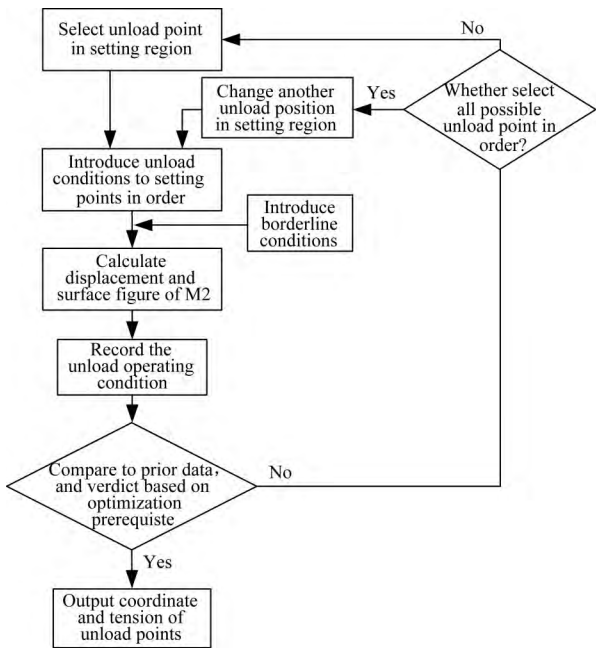


图 4 基于位置闭环的卸载点位置协同仿真分析流程

Fig. 4 Synergy analysis flow based on location-closed loop

公式(1)表示卸载点 x_i, y_i, z_i 坐标在设定区域内选择,其有限元编号为 N_i, i 表示卸载点数量。公式(2)表示卸载点位于筋板交汇点所在的

有限元位置 N_j 上。公式(3)表示卸载点 z 向为固定约束,其余自由度无约束。公式(4)代表设定的优化目标,使 $M2$ 镜特征有限元的 z 向位移 Z_{M2} 与 $M1$ 镜特征有限元 z 向位移 Z_{M1} 之差最小,同时 $M1, M2, M3$ 安装面有限元拟合的面形均方根误差值最小。

根据上述数学模型,利用数学模拟和有限元分析软件进行协同仿真,步骤框图如图 4 所示。

3.2 卸载点与卸载力分析结果

基于图 4 仿真流程,经局部微调后获得的卸载点位置如图 5 所示。3 个卸载点分别位于仪器安装架和基板上,其中 2 个卸载点位于仪器安装架 z 向,另一卸载点位于基板 z 向。

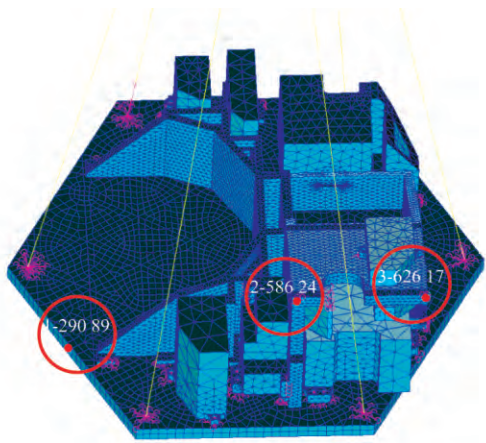


图 5 基于位置闭环寻优的卸载点布局

Fig. 5 Unload point layout based on location-closed loop

确定卸载点坐标后,对上述卸载点附近有限元所受的支撑反力进行积分,可获得卸载力和对应的背部 3 点支撑力,结果如表 2 所示。

表 2 基于位置闭环解算的卸载点坐标和对应卸载力列表

Tab. 2 Coordinate and force of unload point calculate based on location-closed loop

背支点	背部支点 1/N			背部支点 2/N			背部支点 3/N			合力/N
方向	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	Z
支撑力	-89.213	267.279	-52.438	37.724	-130.080	31.602	51.489	-137.199	-137.199	-158.035
卸载点	卸载点 1(29 089)			卸载点 2(58 624)			卸载点 3(62 617)			Z
卸载力	-351.570(z 向)			-1 056.682(z 向)			-682.664(z 向)			-2 090.92

3.3 位置闭环重力卸载仿真实验

完成卸载点布局优化后,可通过仿真验证上述优化结果。将卸载位置和卸载力分析结果迭代回光学载荷模型中,通过模拟加载平衡力,评估光学载荷卸载重力后的实际效果,卸载力模拟加载原理如图 6 所示。

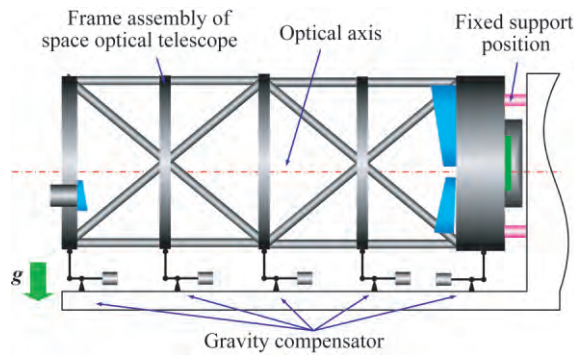


图 6 给定卸载点施加卸载力原理示意图

Fig. 6 Principle schematic of applied unload force at setting unload locations

卸载力加载的本质是实现多点不等力、等刚度超静定支撑。使每个卸载点的输出刚度一致,且均小于光学载荷沿重力方向的局部刚度。也就是说,各卸载点仅用于平衡重力和力矩,不能限制桁架的自由度。而依靠背板的固定连接点确定载荷 6 维自由度。为此在模拟实验中,将解算的卸载力施加在对应的有限元上,并同时释放加载力的 6 维自由度,以模拟上述支撑工况支撑。

依据表 2 计算结果,利用有限元软件模拟重力卸载。在 3 个卸载点分别施加卸载力,同时释放该加载力 6 维自由度,并通过背部三支撑点约束模型的 6 维自由度,以此仿真重力卸载过程。经卸载后,光学载荷的变形分析结果如图 7 所示。光学载荷上 3 个特征位置 M1、M2、M3 面的位移和面形计算结果如表 3 所示。

表 3 模拟重力卸载后(基于位置闭环)各特征面位移和面形数据列表

Tab. 3 Simulated experiment data of displacement and surface figure with unload gravity

分析项目	转角/($^{\circ}$)		刚体位移/ μm			面形/ μm	
	X	Z	X	Y	Z	PV	RMS
M1 面	-1.85E+01	-3.278	0.376	1.177	4.919	6.649	1.139
M3 面	6.5	-6.421	7.25E-02	6.261	4.926	8.875	0.865
M2 面	2.44E-01	3.45E-01	9.084	-3.279	2.13E+02	5.130	1.163

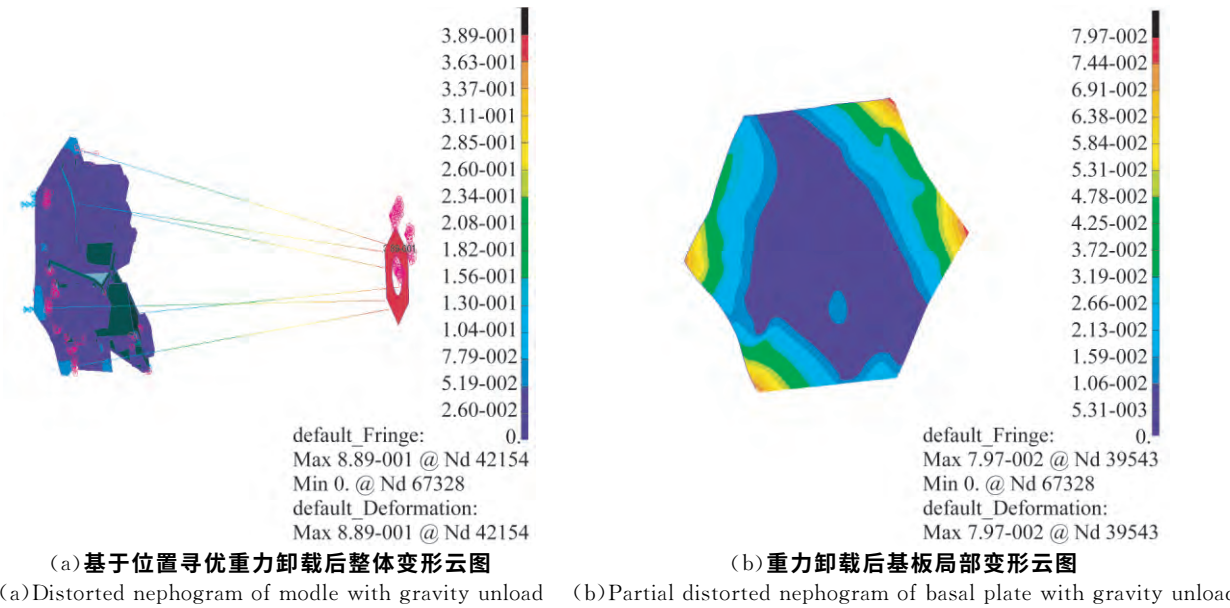


图 7 基于位置闭环优化的重力卸载模拟加载实验结果

Fig. 7 Simulated experiment results with gravity unload based on location-closed loop

表 3 所列分析结果表明,卸载率约为 93%。比较表 1 和表 3 数据可发现,重力卸载前,基板上 M1、M3 面线量方向刚体位移均值约 20 μm ,最大值为 45.6 μm 。卸载后,3 个线量方向刚体位移均值减小至约 2.95 μm ,最大值减至 6.2 μm 。重力卸载前特征平面 M1、M3 面角量刚体位移均值约 39",最大值为 100"。经重力卸载后,2 个角量方向刚体位移均值减小至约 5.4",最大值减至 18"。

卸载前,M2 面线量方向位移均值约 370 μm ,最大值为 0.89 mm(z 方向)。角量方向刚体位移均值约 36"。经卸载,M2 面线量方向刚体位移均值缓解至 72.9 μm ,最大值为 0.21 mm。角量方向的位移均值约减至 0.3"。此外经重力卸载后,特正面 M1、M3、M2 的面形均有所改善。上述结果表明,重力卸载有助于恢复桁架前端的位置和姿态,并且改善基板上用于光学元件安装的特征面变形。

4 基于局部质量的卸载点寻优策略

4.1 基于局部质量闭环的卸载点优选方法

除上述思路外,还可依据需要卸载的局部总质量及其分布特性,优选卸载点位置。根据光学载荷结构特点和布局,科学仪器及其安装架是加载于桁架的主要负载,将 M2 面的附加变形引入半物理仿真实验,从而降低 M2 镜预装定位姿计算精度。因此,需要卸载科学仪器及其安装架的局部质量。

基于质量闭环的卸载点选取,可遵循如下原则:将基板、科学仪器、安装架视为一个组合体;以组合体质心作为优选坐标系参考中心;卸载力之和等于组合体总质量;卸载点位于传力路径,且各卸载点到参考中心距离接近。基于上述卸载点优化原则,建立如公式(5)~(8)所示数学模型,并利用数学软件编写算法,与有限元分析软件协同仿真。

$$\begin{cases} x_i \in (N_{x1}, N_{x2}), y_i \in (N_{x1}, N_{x2}) \\ z_i \in (N_{x1}, N_{x2}), i \leq 5 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_i, y_i, z_i \in (N_{xj}, N_{yj}, N_{zj}) \\ P(x_i, y_i, z_i) - O(x_o, y_o, z_o) \approx R, \\ Nj \in (\text{node-point}) \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} DOF_{xi}=0, DOF_{yi}=0, DOF_{zi}=1 \\ DOF_{\theta xi}=0, DOF_{\theta yi}=0, DOF_{\theta zi}=0 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^5 F_i = m_i g. \quad (8)$$

公式(5)与公式(1)物理意义相同。公式(6)在公式(2)基础上增加了边界条件,限定卸载点位于组合体局部质心为原点、半径为 R 的球面上。公式(7)与公式(3)物理意义一致。公式(8)表示卸载点优化目标,使各卸载点附近支撑反力的合力等于组合体总重。依据上述数学模型,可通过协同仿真计算卸载点最优位置,其基本步骤如框图 8 所示。

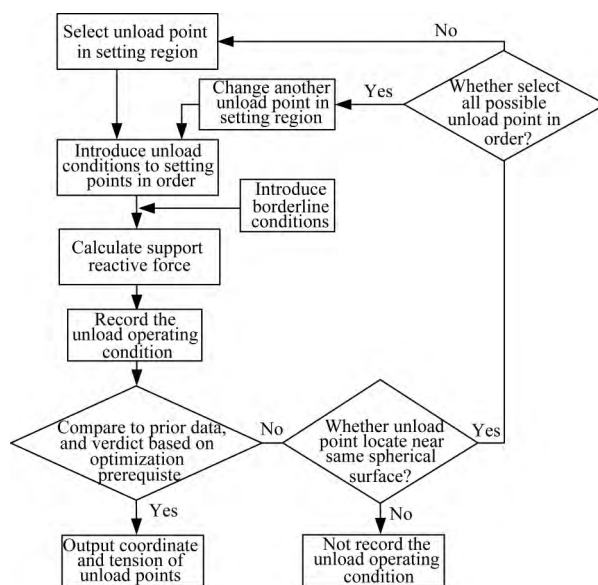


图 8 基于局部质量闭环的卸载点分析流程

Fig. 8 Synergy analysis flow based on partial mass-closed loop

4.2 卸载点与卸载力分析结果

基于图 8 所示分析流程,优化后获得的卸载点坐标如示意图 9。共包含 3 个卸载点,其中 2 点位于基板,1 点位于科学仪器支架。

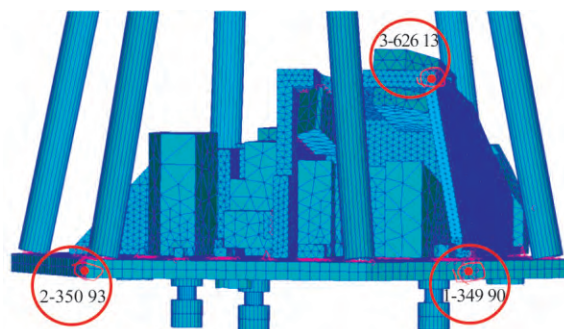


图 9 基于局部质量闭环寻优的卸载点布局

Fig. 9 Unload point layout based on partial mass-closed loop

对 3 个卸载点附件的有限元支撑反力进行积分,可获得各点卸载力如表 4 所示。表中数据表明,3 点卸载力总和等于组合体总重,且 3 点均位于筋板交汇处,距组合体质心接近一致,与设定优化目标相同。

4.3 局部质量闭环重力卸载仿真实验

基于上述优化获得的卸载点位置 and 反算的卸

载力,利用有限元分析软件模拟重力卸载实验,模拟方法与 3.3 节一致。其中,基板背部 3 点限定光学载荷 6 维自由度,在 +z 向 3 个卸载点施加表 4 所示卸载力,并释放卸载点 6 维自由度。在 1 g 重力、y 轴水平状态下计算 M1、M2、M3 面的线量和角量刚体位移,以及面形如表 5 所示。经重力加卸载后的光学载荷变形分析部分结果如图 10 所示。

表 4 基于局部质量闭环解算的卸载点坐标和对应的卸载力列表

Tab. 4 Coordinate and force of unload ponit calculate based on partial mass-closed loop

背支点	背部支点 1/N			背部支点 2/N			背部支点 3/N			合力/N
方向	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	Z
支撑力	-114.62	1 240.78	-105.82	200.47	-609.03	-123.76	-85.85	-631.75	-325.27	-554.85
卸载点	卸载点 1/N			卸载点 2/N			卸载点 3/N			Z
卸载力	-382.599(z 向)			-691.253(z 向)			-575.443(z 向)			-1 649.295

表 5 模拟重力卸载后(基于局部质量闭环)各特正面刚体位移和面形数据列表

Tab. 5 Simulated experiment data of displacement and surface figure with unload gravity

分析项目	转角/($^{\circ}$)		刚体位移/ μm			面形/ μm	
	X	Z	X	Y	Z	PV	RMS
M1 面	-6.19E+01	-1.75E+01	1.984 948	5.984 259	20.225 84	12.024 7	2.443 586
M3 面	-7.546079	-3.42E+01	0.453 909 7	-16.979 181	21.948 68	24.421 53	2.608 705
M2 面	-4.98E+01	-1.20E+01	61.597 5	11.289 58	985.486 5	6.760 836	1.617 145

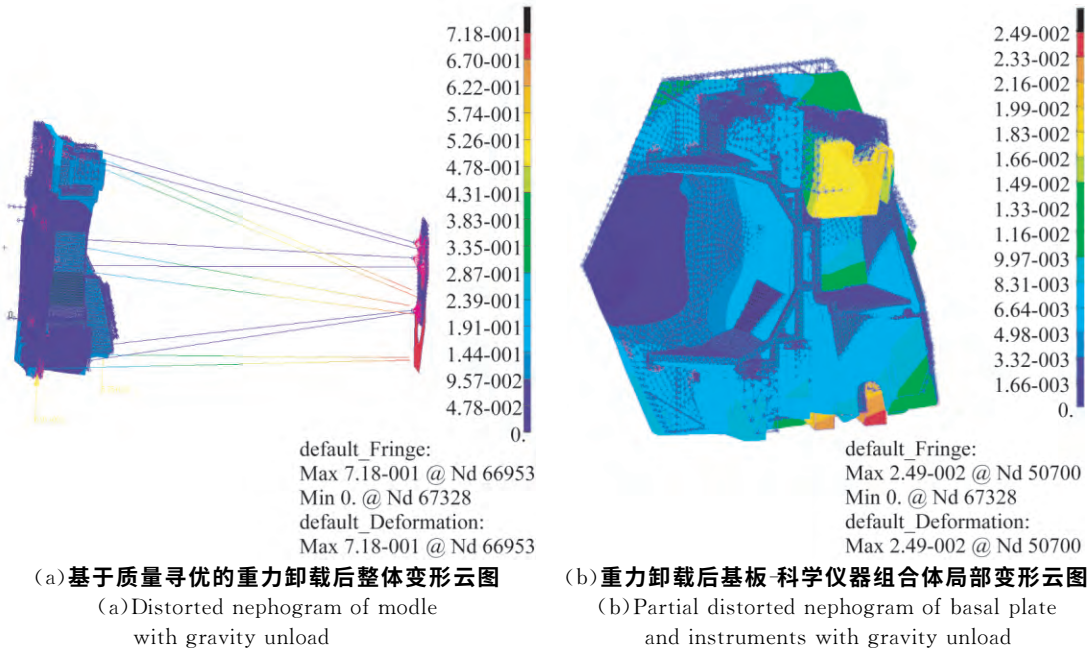


图 10 基于局部质量闭环优化的重力卸载模拟试验结果

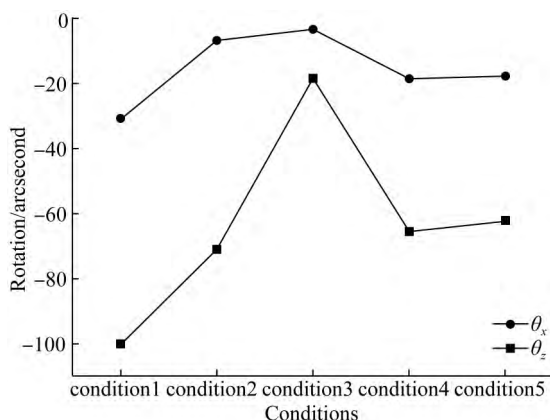
Fig. 10 Simulated experiment results with gravity unload based on partial mass-closed loop

比较表 5 与表 1 中工况 3 中数据显示, M2 面 3 个线量方向刚体位移均值互差约为 $22.2 \mu\text{m}$ (6.1%), 两个角量刚体位移均值互差约为 $5.9''$ (7.4%)。上述结果表明, 基于质量闭环的重力卸载方法一方面起到提升桁架前端 M2 面的效果, 并且有助于缓解特征面 M1、M2、M3 的面形误差, 另一方面通过卸载, 可获得接近由基板与桁架所构成组合体的变形特性。

5 两种卸载方案分析与比选

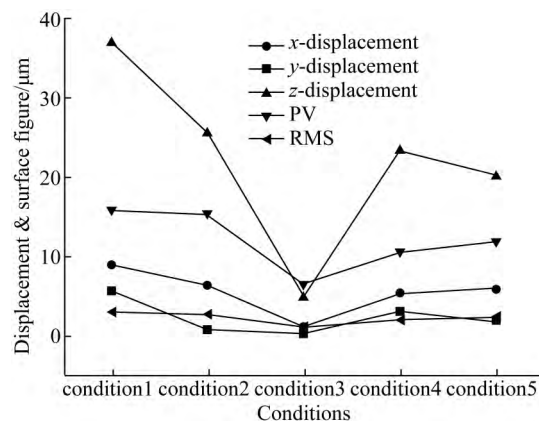
基于上述有限元分析结果进行数学仿真, 逐一比对各种工况下 M1、M2、M3 面位移和面形。工况 1 对应 $1g$ 重力、无卸载状态, 待测光学载荷固连点仅设置在背部 3 点。工况 2 对应基板和桁架组合体背部 3 点支撑、底部无卸载。工况 3 对应位置闭环卸载方案施加后, 各特正面变形。工况 4 对应工况 3 中加入 $\pm 2\%$ 的卸载力随机误差并施加卸载后的结果。工况 5 对应局部质量闭环卸载方案施加后, 各特正面变形。M1、M2、M3 特征面的位移和面形分析数据比对曲线如图 11~13 所示。

图 11 中曲线表明, 基于位置闭环的卸载方案(工况 3)对 M1 面线量、角量变形的改善幅度最大, 但其对卸载误差较为敏感, $\pm 2\%$ 卸载力误差将导致光机结构变形状态发生较大变化。而在优化位置施加基于局部质量闭环分析所获得的卸载力, 光机结构变形状态与仅为桁架系统、 $1g$ 重力下的变形状态(工况 2)较为接近。



(a) M1 面转角变化规律曲线

(a) Rotate angle variation curves of M1 surface

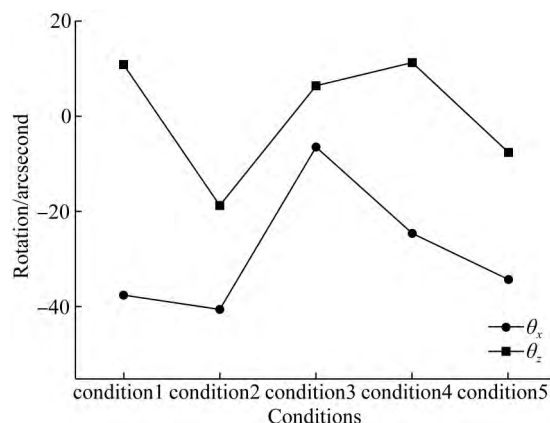


(b) M1 面刚体位移和面形变化规律曲线

(b) Rigid body displacement variation curves of M1 surface

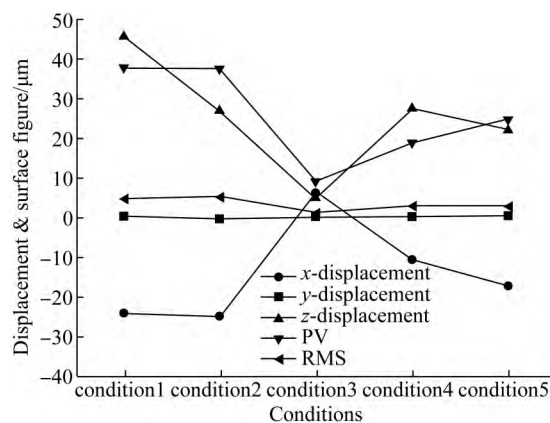
图 11 不同力学条件下 M1 面位移和面形变化曲线

Fig. 11 Displacement and surface figure variation curves of M1 surface under different mechanics environment



(a) M3 面转角变化规律曲线

(a) Rotate angle variation curves of M3 surface



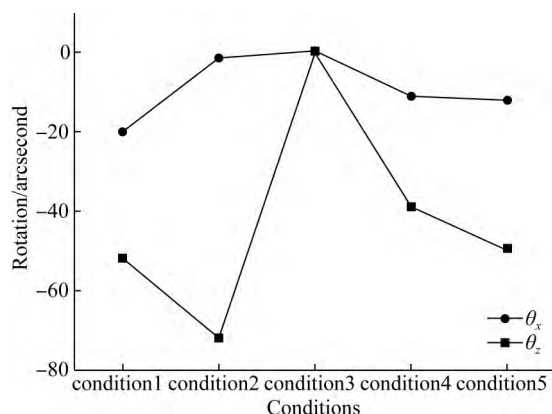
(b) M3 面刚体位移和面形变化规律曲线

(b) Rigid body displacement variation curves of M3 surface

图 12 不同力学条件下 M3 面位移和面形变化曲线

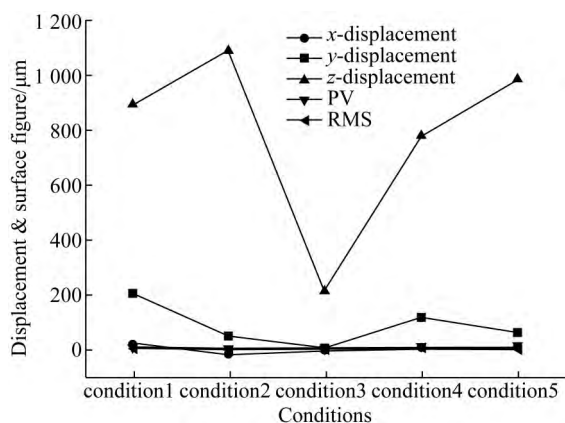
Fig. 12 Displacement and surface figure variation curves of M3 surface under different mechanics environment

图 12 数据显示,特征面 M3 在两种卸载方案下的形变规律与 M1 面类似。但即使采用基于质量闭环的卸载方法,光机结构变形状态依然与桁架系统单独在 $1g$ 、未卸载状态下有所差异。



(a) M2 面转角变化规律曲线

(a) Rotate angle variation curves of M2 surface



(b) M2 面刚体位移和面形变化规律曲线

(b) Rigid body displacement variation curves of M2 surface

图 13 不同卸载条件下 M2 面位移和面形变化曲线

Fig. 13 Displacement and surface figure variation curves of M3 surface under different mechanics enviroment

图 13 曲线表明,基于位置闭环的卸载方案对于 M2 面移改善幅度最大,但对卸载误差相对敏感。基于质量闭环的卸载方案,可获得更接近桁架系统单独 $1g$ 重力下的变形状态。

若大口径光学载荷在地面装调、测试过程中进行重力卸载的主要目的,是为半物理仿真模拟所需力学环境,从而估算入轨重力释放后,高敏感光学组件的相对位姿。上述仿真曲线及模拟卸载试验均表明,基于位置闭环的卸载点优化流程,虽

可大幅改善光机结构整体形变,使其比较接近在轨状态,但工程实现难度较大。半物理仿真需要桁架系统仅保留自身在 $1g$ 重力下的变形,且变形量在线性区间。而施加基于质量闭环所获得的卸载力,可获得更接近上述要求的卸载状态。

但上述数据也显示,即使施加工况 5 所对应的卸载参数,依然与桁架系统自身变形存在差异。上述差异产生原因主要在于:光机结构中传力路径不完整,卸载力难以传递至整个结构中;刚度较弱的科学仪器等自身变形较大,将改变卸载力的传递路径。

6 结 论

大口径空间光学载荷地面装调、测试过程,需抵消重力效应,为半物理实验解算在轨重力释放后光学元件相对位姿,模拟所需力学环境。为此,论文报道了一种光学载荷重力卸载点及其布局的优化方法。基于 $1g$ 重力下光机结构变形机理,提出分别基于位置闭环和质量闭环的两种卸载点寻优方案。利用数学模拟和有限元分析进行协同仿真,优选卸载点坐标。通过模拟重力卸载实验,验证不同卸载策略下,光机系统的变形特征。研究表明:所提卸载点寻优方法均可在设定的优化目标下,解算出最佳卸载点坐标及卸载力;基于位置闭环的重力卸载策略,可最大幅度改善高敏感光学组件的位姿,以及安装面的面形,获得与 $0g$ 状态接近的卸载效果。高敏感光学组件位移均值由 $370 \mu m$ 缓解为 $72.9 \mu m$ 。适用于光学载荷全物理仿真条件下的装调、测试。但其对卸载精度要求较高,卸载装置的工程实现难度较大;基于质量闭环的重力卸载策略,可满足半物理仿真实验对光学载荷力学环境模拟需求。卸载后与桁架系统自身 $1g$ 重力下的变形状态比较接近,但仍然存在一定误差。高敏感光学组件 3 个线量方向刚体位移均值互差约为 6.1% ,两个角量刚体位移均值互差约为 7.4% 。上述误差由光机系统构型、材料属性等特点决定,需在光机结构设计过程中,综合考虑重力卸载的传力路径等,加以解决。

参考文献:

- [1] 杨帅, 沙巍, 陈长征, 等. 空间相机碳纤维框架的设计与优化 [J]. 光学 精密工程, 2017, 25 (3): 697-705.
YAHG SH, SHA W, CHEN CH ZH, *et al.*. Design and optimization of carbon fiber framework for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25 (3): 697-705. (in Chinese)
- [2] 李威, 刘宏伟, 郭权锋, 等. 空间相机主次镜间的薄壁筒和支杆组合支撑结构 [J]. 光学 精密工程, 2010, 18(12): 2633-2641.
LI W, LIU H W, GUO Q F, *et al.*. Combined supporting structure of thin wall joint cylinder and supporting bar between primary mirror and second mirror in space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2633-2641. (in Chinese)
- [3] 史朝龙, 孙红胜, 王加朋, 等. 光谱可调谐式高分辨率光学载荷校准技术 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 197-202.
SHI CH L, SUN H SH, WANG J P, *et al.*. Calibration technology for high-resolution optical load by spectrally tunable source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 197-202. (in Chinese)
- [4] 韩春杨, 徐振邦, 吴清文, 等. 大型光学载荷次镜调整机构优化设计及误差分配 [J]. 光学 精密工程, 2016, 24(5): 1093-1103.
HAN CH Y, XU ZH B, WU Q W, *et al.*. Optimization design and error distribution for secondary mirror adjusting mechanism of large optical payload [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24 (5): 1093-1103. (in Chinese)
- [5] 齐乃明, 张文辉, 高九州, 等. 空间微重力环境地面模拟试验方法综述 [J]. 航天控制, 2011, 29(3): 95-100.
QI N M, ZHANG W H, GAO J ZH, *et al.*. The Primary discussion for the ground simulation system of spatial microgravity [J]. *Aerospace Control*, 2011, 29(3): 95-100. (in Chinese)
- [6] 李煜琦, 邵珠峰, 田斯慧, 等. 基于吊丝配重的空间机械臂零重力模拟装置卸载率分析及评价 [J]. 机器人, 2016, 38(3): 293-300.
LI Y Q, SHAO ZH F, TIAN S H, *et al.*. Analysis and evaluation on unloading ratio of zero-g simulation device of space manipulator based on suspension system [J]. *ROBOT*, 2016, 38(3): 293-300. (in Chinese)
- [7] 高海波, 郝峰, 邓宗全, 等. 空间机械臂收拢状态零重力模拟 [J]. 机器人, 2011, 33(1): 9-15.
GAO H B, HAO F, DENG Z Q, *et al.*. Zero-g simulation of space manipulator in furlled status [J]. *ROBOT*, 2011, 33(1): 9-15. (in Chinese)
- [8] 李玲, 赵野. 大口径空间相机地面装调时的重力卸载方法 [J]. 航天返回与遥感, 2016, 37(5): 69-76.
LI L, ZHAO Y. A gravity unloading method of on-ground alignment for large aperture remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(5): 69-76. (in Chinese)
- [9] OLYVIA H, DAVID K, PAUL J, *et al.*. Gravity-offloading system for large-displacement ground testing of spacecraft mechanisms [C]. *Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Kennedy Space Center, May 12-14, 2010*: 119-132.
- [10] KRISHAN K G, MANOAH S M. A review on passive gravity compensation [J]. *International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology ICECA 2017, IEEE*, 2017: 184-189.
- [11] GIULIO S, MATTEO M, ALESSANDRO S, *et al.*. Passive and active gravity-compensation of LIGHTArm, an exoskeleton for the upper-limb rehabilitation [J]. 2015 *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, 2015: 440-445.
- [12] 从强. 空间机构地面重力补偿设备跟踪研究 [J]. 航天器环境工程, 2012, 29(1): 92-99.
CONG Q. An investigation into gravity compensation equipment for space mechanisms [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(1): 92-99. (in Chinese)
- [13] 杨巧龙, 闫泽红, 任守志, 等. 套筒驱动的大型可展柔性太阳翼地面展开重力卸载研究 [J]. 载人航天, 2017, 23(8): 536-545.
YANG Q L, YAN Z H, REN SH ZH, *et al.*. Study on gravity compensation in ground deployment tests of large retractable flexible solar array driven by telescopic boom [J]. *Manned Spaceflight*, 2017, 23(8): 536-545. (in Chinese)
- [14] JASON R N, STEVEN P C, KURT G C, *et al.*. Characterization of partial-gravity analog environments for extravehicular activity suit testing [R]. *National Aeronautics and Space Administration*,

- Johnson Space Center, Houston, TX 77058, 2010* (12): 1-45.
- [15] ZHANG H, KOU B Q, Y X, *et al.*. Modeling and Analysis of a New Cylindrical Magnetic Levitation Gravity Compensator With Low Stiffness for the 6-DOF Fine Stage [J]. *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, 2015, 62 (6): 3629-3639.
- [16] DONELAN J M, KRAM R. Exploring dynamic similarity in human running using simulated reduced gravity [J]. *J. Exp Biol*, 2000, 203(16): 2405-2415.
- [17] BROWN H B, DOLAN J M. A novel gravity compensation system for space robots[C]. *A Novel Gravity Compensation System for Space Robots*, 1993,11.

作者简介:



何 煦(1981—),男,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光学系统装调、成像质量评价的研究。E-mail: hexu__ciomp@sina.com

(本栏目编辑:秦 思)