

文章编号 1004-924X(2016)07-1677-08

空间相机柔性减振支撑结构的优化设计

李林^{1,2}, 王栋^{1,3*}, 杨洪波¹, 谭陆洋^{1,2}, 孙战磊^{1,2}

(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;

3. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要: 根据高分辨率空间相机性能要求, 设计了一种倒圆角直梁复合组成的双脚架柔性减振支撑结构。首先, 根据某卫星结构要求初步设计了相机底部支撑结构, 建立了以随机响应为目标的优化设计模型。利用尺寸优化设计了双脚架结构支腿的柔性环节, 得到柔性环节最小厚度为 2.5 mm。然后, 对相机底部支撑结构进行了工程分析。分析结果表明, 设计的支撑结构组件重量 1.26 kg, 基频达到 1 624 Hz。最后, 对空间相机底部支撑结构组件进行了随机振动试验, 试验结果显示: 与相机结构连接处的最大响应 RMS 值为 21.4 grms, 随机响应最大相对放大率为 0.93, 满足空间相机支撑结构的减振要求。得到的结果验证了设计和分析的可靠性, 对同类卫星相机底部支撑结构的设计具有一定的指导意义。

关键词: 空间相机; 支撑结构; 柔性减振; 随机振动; 加速度响应; 优化设计

中图分类号: V447.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162407.1677

Optimization design of flexible and damping support structure of space camera

LI Lin^{1,2}, WANG Dong^{1*}, YANG Hong-bo¹, TAN Lu-yang^{1,2}, SUN Zhan-lei^{1,2}

(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. *Chang Guang Satellite Technology LTD., Changchun 130033, China)*

* *Corresponding author, E-mail: simest@163.com*

Abstract: According to the performance requirements of a high-resolution space camera for the bottom support structure, a flexible and damping support structure composited by a fillet feet frame and a straight beam was designed. Firstly, the bottom supporting structure of the space camera was designed based on the request of a satellite structure, and an optimized design model for the random response was established. The flexible link for the leg of two-feet frame structure was proposed with the size optimization technology, and the minimum thickness of the flexible link is 2.5 mm. Then, the support structure at the bottom of the camera was analyzed in engineering. The analysis results show that the weight of support structure components is 1.26 kg, and the fundamental frequency is 1 624 Hz. Finally, the support structure components of the space camera were tested by the random

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2015-12-13.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA121502)

vibration test, obtained results show that the structure joint maximum response RMS value of the camera is 21.4 grms, and the random response maximum relative magnification is 0.93, satisfying the requirement of the support structure vibration of the space camera. These results verify the reliability of the design and analysis in this paper and provide a guiding for design of camera support structures of similar satellites.

Key words: space camera; support structure; flexible and damping; random vibration; acceleration response; optimization design

1 引言

空间相机是一种高精度的光学仪器,底部支撑结构作为连接空间相机与卫星平台的关键组件,是满足空间相机成像质量的重要保证^[1]。卫星在地面运输阶段,火箭发射阶段以及卫星在轨相机成像阶段,空间相机底部支撑结构依靠自身的结构功能特点,一方面直接对空间相机提供定位、支撑、抵御外部变形的作用;另一方面,可避免外部力矩通过卫星平台耦合到相机上,降低卫星平台精度,使相机可以适应苛刻的力学环境,保证了相机在苛刻力学环境下的结构稳定性。

国内外有许多研究机构对柔性铰链的性能进行了研究。薛闯和颜昌翔^[2]利用双脚架柔性机械接口,一定程度上抑制了卫星平台结构变形对相机主结构的扭曲作用。郭权锋^[3]设计双曲线型柔性槽的支撑结构有效地释放了空间坐标系 3 个方向上的变形和应力。周子云、高云国和邵帅等^[4]采用柔性铰链设计的快速反射镜结构获得了较好的发射光束控制精度。J. M. PAROS 和 L. WEISBORD^[5]在 1965 年推导出的柔性铰链设计的计算公式一直沿用至今,给柔性铰链的设计计算带来极大方便。

上述支撑结构有效地解决了支撑结构设计柔性支撑中静力变形问题,但并未考虑支撑结构所承受的动载荷对相机结构的影响。本文针对某高分辨率空间相机对其底部支撑结构的性能要求,设计了倒圆角直梁复合组成的双脚架柔性减振支撑结构,在满足柔性支撑的基础上,对支撑结构进行了动力学设计分析,并通过有限元方法和振动试验验证了所设计的空间相机底部支撑结构的性能,满足相机支撑结构的减振要求,弥补了对空间相机底部支撑结构研究工作中的不足。

2 空间相机底部支撑结构设计

底部支撑结构作为空间相机力学条件承载点,需要在相机与卫星平台连接之前完成一系列环境试验,因此,设计相机底部支撑结构时需要充分考虑动静态力学性能要求^[6]。根据某卫星结构要求,初步设计了空间相机底部支撑结构。

2.1 相机底部支撑结构拓扑优化

采用 Altair OptiStruct 中基于变密度法(SIMP 方法^[7-8])的拓扑优化模块对支撑结构模型进行优化设计。根据相机对支撑结构性能的要求,需要使支撑结构刚度最大化,刚度最大化通常等效为柔度最小问题,柔度则用应变能定义^[9]。拓扑优化模型以结构应变能最小为目标,体积比作为约束,以材料分布密度为变量,拓扑优化模型为:

$$\text{find: } x = \{x_1, x_2, \dots, x_i\} \in R^n, i = 1, \dots, N$$

$$\text{Minimize: } C(x) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{i=1}^N x_i^p \mathbf{u}_i^T \mathbf{k}_0 \mathbf{u}_i$$

$$\text{Subject to: } V = f \cdot V_0 = \sum_{i=1}^N x_i v_i \leq V^*$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U}$$

$$0 < x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max} \leq 1, (1)$$

式中: x_i 为单元的相对密度; N 为结构离散单元总数; C 为结构的总体柔度; p 为惩罚因子; \mathbf{k}_i 为优化后单元刚度矩阵; f 为优化体积比; \mathbf{K} 为优化前结构总体刚度矩阵, \mathbf{U} 和 \mathbf{F} 分别是位移列阵、力矢量; \mathbf{k}_0 为初始单元刚度矩阵; \mathbf{u}_i 为单元位移列矢量; x_{\min} 、 x_{\max} 分别是单元相对密度的最小极限值和最大极限值; v_i 为优化后单元体积; V_0 为设计域的初始体积; V 为优化后的结构体积。

根据某卫星结构设计要求,设计了空间相机底部支撑结构,建立空间相机底部支撑结构的有限元模型。采用 OptiStruct 模块对支撑结构模

型材料分布进行拓扑优化,其中相机用集中质量点代替,有限元模型如图 1 所示。

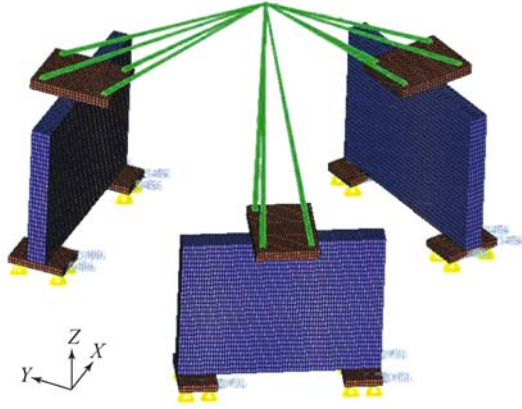


图 1 初步设计的支撑结构有限元约束模型

Fig. 1 Preliminary design of support structure finite element model of constraint

经过 14 步迭代优化之后得到类似双脚架的结构,其材料分布模型如图 2 所示。每个双脚架由 2 根成一定角度的支腿组成。双脚架结构可实现类似 V 型块的 2 个自由度约束。3 个双脚架以圆周形式均布在支撑目标底面,从而实现支撑目标的 6 自由度约束。用变密度法得到的拓扑优化结构式密度等值分布图,其中密度为中间值所对应的区域为假想的材料,在实际工程中是没法实现,因此在得到最优拓扑图形后需要对这些区域进行人为处理以适应实际工程需要。

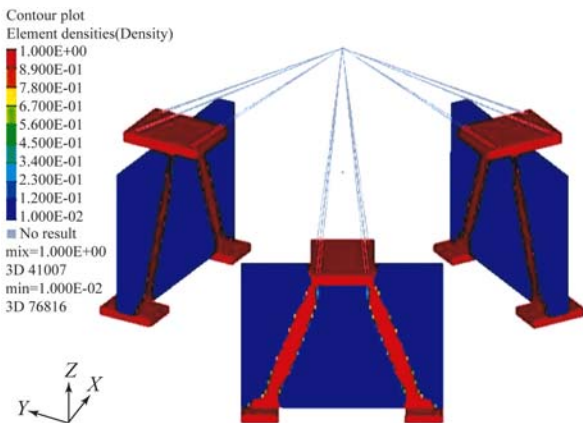


图 2 支撑结构材料分布拓扑优化结果

Fig. 2 Topology optimization results of support structure material distributed

2.2 双脚架支撑结构柔性减振设计

柔性铰链结构具有无间隙、无机械摩擦、高灵敏度等特点而被广泛应用^[10-14]。卫星结构中,相机主体通过 3 个双脚架组件固定到卫星底板上,为了避免外力耦合到相机结构上降低相机成像质量。需对双脚架结构支腿进行柔性减振设计。以目标点随机响应相对放大率为衡量减振效果依据。

2.2.1 随机响应理论

绝对坐标系下,由基础支撑运动引起的多自由度系统运动方程为:

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = U, \quad (2)$$

$$U = CE_u \dot{u} + KE_u u, \quad (3)$$

式中: E_u 为指示向量, \dot{u} 和 u 量分别表示基础运动速度和位移。

基础运动加速度功率谱密度(PSD)为 $S_{\ddot{u}}(\omega)$ 已知,根据虚拟激励法^[10],式(2)所述的随机振动问题可转化为求解强迫振动稳态响应问题。构造虚拟激励:

$$\ddot{u}(t) = \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)} e^{j\omega t}. \quad (4)$$

根据微分关系:

$$\dot{u} = \frac{-j}{\omega} \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)} e^{j\omega t}, \quad (5)$$

$$u = \frac{-1}{\omega^2} \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)} e^{j\omega t}. \quad (6)$$

将式(4)、(5)代入(2)、(3)得强迫振动稳态响应方程:

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = Pe^{j\omega t}, \quad (7)$$

其中:

$$P = P_R + jP_I, \quad (8)$$

$$P_R = KE_u \left[-\frac{1}{\omega^2} \right] \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)}, \quad (9)$$

$$P_I = CE_u \left[-\frac{1}{\omega} \right] \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)}. \quad (10)$$

利用虚拟激励法可求得加速度响应自谱密度在频点 ω 处的值为:

$$S_{\ddot{y}}(\omega) = \omega^4 [y_R^2 + y_I^2], \quad (11)$$

则加速度响应均方值为:

$$\begin{aligned} \sigma_{\ddot{y}}^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} S_{\ddot{y}}(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^4 [y_R^2 + y_I^2] d\omega = \\ &= 2 \sum \omega^4 [y_R^2 + y_I^2] \Delta\omega. \end{aligned} \quad (12)$$

2.2.2 随机响应优化模型

建立以相机主支撑结构基频和体积分数为约束,相机安装点的加速度均方响应 RMS 值最小为设计目标的尺寸优化模型。设计变量为:

$$T' = (t_1, t_2, \dots, t_e, \dots, t_n)^T, \quad (13)$$

式中： t_e 表示柔性环节的厚度。

某卫星要求相机主支撑结构基频 f_1 大于相机基频，设定相机主支撑结构基频不小于 200 Hz。体积约束可以反映质量约束，体积分数 α 一般取值 20%~60%，取 α 为 40% 作为优化的约束条件。

相机主支撑结构尺寸优化目标函数为相机安装点随机振动加速度响应均方根值 RMS，用式 (14) 表示。

相机支撑结构尺寸优化的数学模型为：

$$\begin{aligned} \text{find: } T' &= (t_1, t_2, \dots, t_e, \dots, t_n)^T \\ \text{Minimize: } C(x) &= \sigma_{yy}^2 \\ \text{Subject to: } \alpha &= \frac{\sum_{e=1}^n V_s^e}{\sum_{e=1}^n V^e} \leq 0.4 \\ f_1 &\geq 200 \\ 0 &\leq t_i \leq t_e \leq 1, \end{aligned} \quad (14)$$

式中： t_e 表示柔性环节厚度； α 为体积分数，表示柔性环节优化后的体积与优化前的体积比； f_1 表示支架结构基频。

2.2.3 相机主支撑结构随机响应优化结果

采用 OptiStruct 对柔性环节详细设计尺寸进行离散变量优化，为了兼顾加工工艺性，设定优化步长为 0.5 mm。优化过程中，结构阻尼系数暂采用整星结构阻尼系数 0.02。在保证结构刚度需求的基础上，得到柔性环节最小厚度为 2.5 mm，倒圆角半径 2 mm，以随机响应为目标的相机支撑结构优化后的模型如图 4 所示。

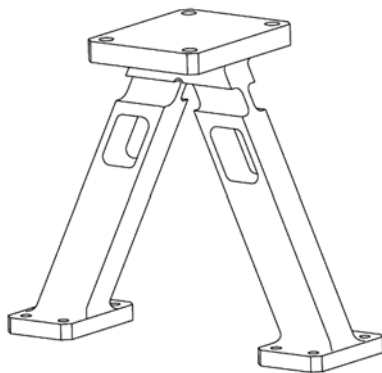


图 4 倒圆角直梁复合组成的双脚架柔性减振支撑结构模型

Fig. 4 Fillet bipod straight beam composite composition

3 相机底部支撑结构分析计算

3.1 底部支撑结构动力学频率特性

在相机底部支撑结构设计中主要的考核指标为结构的低阶模态。模态分析用于确定设计中结构的振动特性，即系统结构的固有频率和振型，是考察动态刚度的重要指标，结构低阶模态也是修改底部支撑结构的重要依据。考察其一阶固有模态是否与卫星相机载荷一阶固有模态重叠或相近，当底部支撑组件的低阶模态与卫星载荷重叠或相近时，必须对结构进行改进。

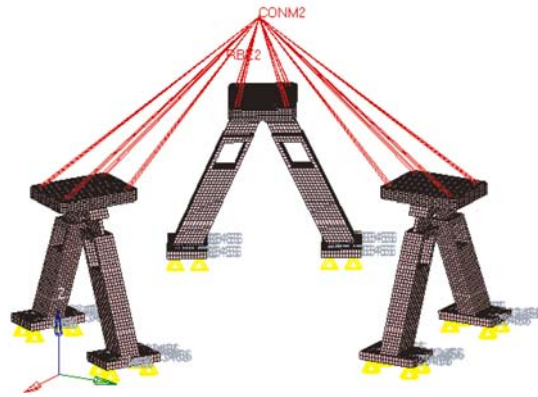


图 5 支撑结构组件有限元约束模型

Fig. 5 Support structure assembly finite element constraint model

按照某小卫星结构的实际安装状态对相机底部主支撑结构组件进行约束，主支撑结构材料选用密度小、强度高、弹性模量为 $10\ 900\ \text{kg/mm}^2$ 的金属材料 TC4，倒圆角直梁复合组成的双脚架支撑柔性减振结构组件有限元约束模型如图 5 所示。表 1 列出了相机主支撑结构的前 4 阶固有频率和振型，支撑结构前 4 阶阵型如图 6 所示，结果表明，支撑结构的基频远高于相机基频 110 Hz，满足设计要求。

表 1 相机底部支撑结构前 4 阶模态分析结果

Tab. 1 Results of analysis structure of the first 4 order modal camera support at bottom

阶次	频率/Hz	振型
1	1 624	支撑结构组件顶部 x 向摆动
2	1 626	支撑结构组件顶部 y 向摆动
3	2 156	整个支撑结构绕 Z 轴转动
4	3 286	双脚架结构支腿各自扭曲

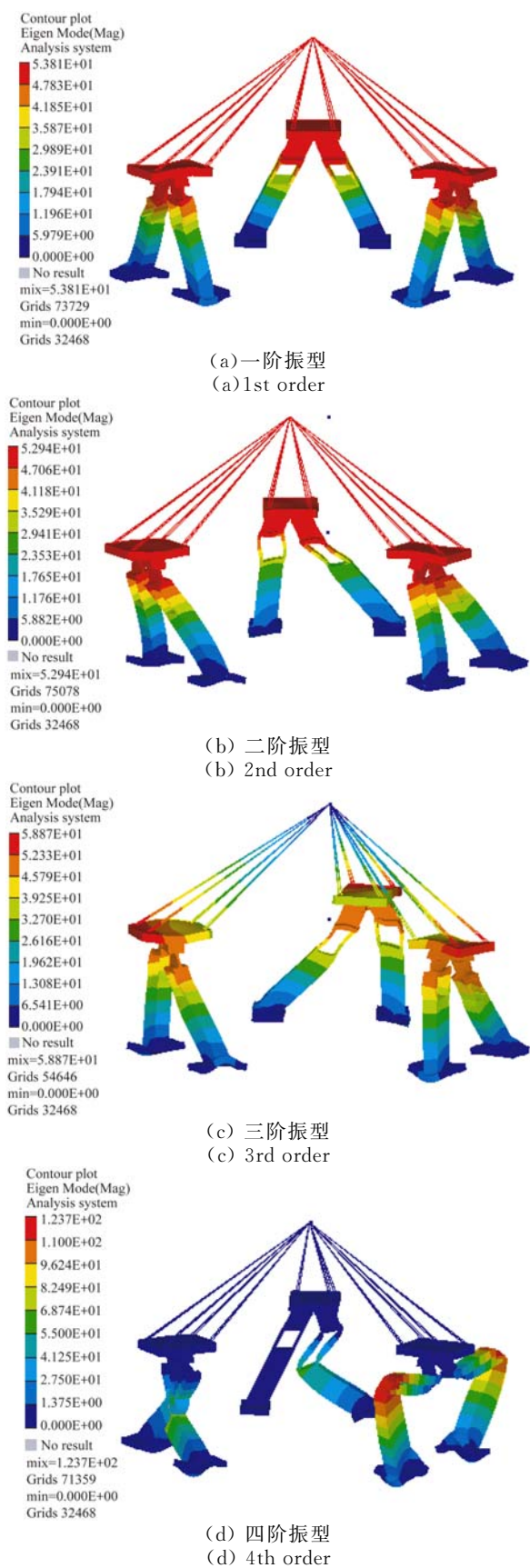


图 6 支撑结构前 4 阶振型
Fig. 6 The first 4 order vibration mode of support structure

3.2 支撑结构随机振动响应分析

在设计时需要底部支撑结构在随机振动环境中的可靠性进行考核。为此,在设计过程中本文用 MSC. Patran & Software 公司的大型结构有限元软件 Nastran 对相机底部支撑结构组件在随机振动激励下的动强度和加速度响应进行了分析和计算。

根据目前国内航天领域计算随机振动加速度响应最常用的全频段法^[17],即将加速度响应谱密度函数在 20~2 000 Hz 的全频段进行积分,从而得出其均方根值。某卫星运载提供的随机振动强迫加速度功率谱条件如表 2 所示,其 RMS 值为 10.16 grms。

表 2 激励加速度功率谱(PSD)

Tab. 2 Acceleration power spectrum(PSD)

频率/Hz	功率谱密度
20~150	+3 dB/oct
150~280	0.08 g ² /Hz
280~320	0.30 g ² /Hz
320~380	0.20 g ² /Hz
380~850	0.10 g ² /Hz
850~1 000	0.04 g ² /Hz
1 000~2 000	0.01 g ² /Hz

利用 MSC. Patran & Nastran 对空间相机底部支撑结构组件分别对 x 、 y 、 z 3 个方向进行随机振动进行分析,表 3 列出了相机安装采样点随机响应结果。

表 3 随机振动响应分析结果

Tab. 3 Analysis results of random vibration response

方向	x	y	z
RMS 值	17.11	12.15	10.47

4 试验验证

对某卫星相机模型样机进行振动试验,主要包括相机、相机底部支撑结构、对接环、卫星底板

以及某卫星工装。振动试验目的是为了验证结构的稳定性,获取各部件的响应大小,暴露材料和结构等方面的缺陷。试验各部件安装关系如图 7 所示。

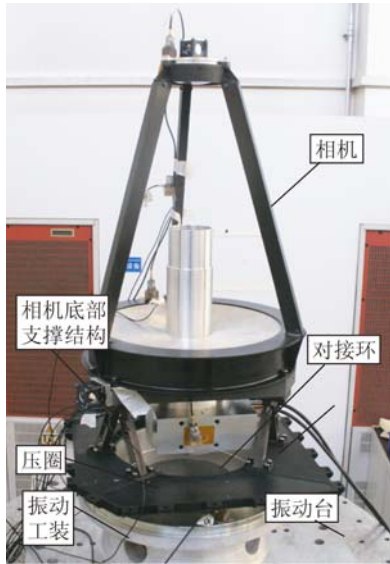
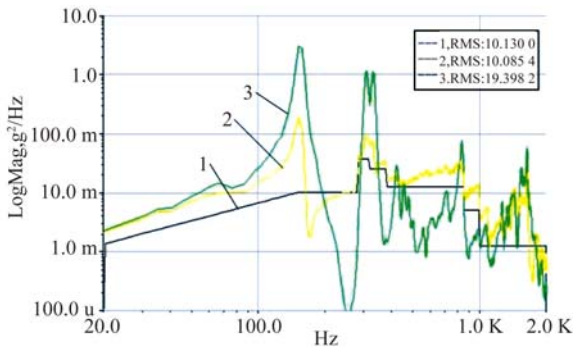


图 7 试验各部件安装位置关系

Fig. 7 Positional relationship between each test component installation

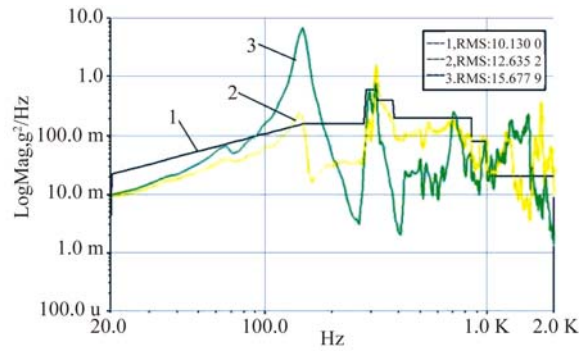
按照试验要求,在室温条件下分别对 x 、 y 、 z 3 个方向进行随机振动试验。

试验得到相机底部支撑结构随机振动试验结果如图 8 所示,曲线 1 为试验系统输入激励加速度功率谱,曲线 2 为相机底部支撑结构底端采集结果,曲线 3 为相机底部支撑结构顶端响应采集结果。



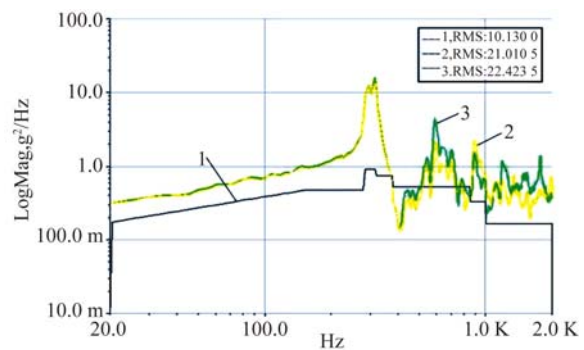
(a) x 向随机振动响应曲线

(a) x -random vibration response curve



(b) y 向随机振动响应曲线

(b) y -random vibration response curve



(c) z 向随机振动响应曲线

(c) z -random vibration response curve

图 8 支撑结构随机振动试验结果

Fig. 8 Test results of random vibration of supporting structure

表 3 所示为 x 、 y 、 z 向系统输入的 RMS 值、相机底部支撑结构底端和相机底部支撑结构顶端的 RMS 值。曲线 1 的 RMS 值验证了系统输入的正确性,据表 4 可分别得出相机底部支撑结构 x 、 y 、 z 3 个方向的随机振动响应相对放大率分别为 0.93、0.24、0.07,在卫星总体要求相对放大率不大于 1 的要求内,由此验证了空间相机主支撑结构所采用设计方法的合理性和可靠性。

表 4 x 、 y 、 z 向 RMS 值

Tab. 4 RMS value of x , y , z direction

	x /grms	y /grms	z /grms
曲线 1	10.130 0	10.130 0	10.130 0
曲线 2	10.085 4	12.635 2	21.010 5
曲线 3	19.398 2	14.309 1	21.423 5
相对放大率	0.93	0.24	0.07

5 结 论

本文根据某卫星设计中对空间相机性能要求,设计了一种倒圆角直梁复合组成的双脚架柔性减振支撑结构,建立了以随机响应 RMS 值为目标的优化设计模型,利用 CAE 分析软件对支

撑结构进行了有限元分析。最后对倒圆角直梁复合组成的双脚架柔性减振支撑结构进行了试验,结果表明支撑结构的随机响应最大相对放大率为 0.93,满足卫星总体相对放大率不大于 1 的要求,验证了设计和分析的准确性和合理性。所设计的相机柔性减振支撑结构可以为其它的空间相机支撑结构设计提供一种新的设计思路。

参考文献:

- [1] 刘强. 超宽覆盖空间遥感器底部支撑结构研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
LIU Q. *Research on the bottom support structure of the extra-wide coverage remote sensor* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [2] 薛闯,颜昌翔. 空间相机主支撑结构设计与分析[J]. 科学技术与工程,2011,11(35):8894-8897.
XUE CH, YAN CH X. Primary structural design and mechanical analysis of space camera [J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, 11 (35): 8894-8897. (in Chinese)
- [3] 郭权锋. 同轴三反空间相机结构稳定性研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2012.
GUO Q F. *Research on Structure Stability of Three-Mirror Casse grain Space Camera* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [4] 周子云,高云国,邵帅,等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程,2014,22(6):1547-1554.
ZHOU Z Y, GAO Y G, SHAO SH, *et al.*. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1547-1554. (in Chinese)
- [5] PAROS J M, WEISBORO L. How to design flexure hinges [J]. *Machine Design*, 1965, 37 (27): 151-157.
- [6] 柯受权. 卫星环境工程和模拟试验(下)[M]. 北京:中国宇航出版社,2005:23-31.
KE SH Q. *Satellite environment engineering and simulation experiment(2)* [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005:23-31. (in Chinese)
- [7] 左孔天. 连续体结构拓扑优化原理与应用研究[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
ZUO K T. *Research of theory and application about topology optimization of continuum structure* [D]. Wuhan: Hua Zhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [8] 郭中泽,张卫红,陈欲泽. 结构拓扑优化综述[J]. 机械设计,2007,24(8):1-4.
GUO ZH Z, ZHANG W H, CHEN Y Z. Review of topology optimization design [J]. *Journal of Machine Design*, 2007, 24(8):1-4. (in Chinese)
- [9] 洪清泉,赵康,张攀,等. OptiStruct & HyperStudy · 理论基础与工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2012:25-30.
HONG Q Q, ZHAO K, ZHANG P, *et al.*. *OptiStruct & HyperStudy · The theoretical basis and engineering application* [M]. Beijing: China Machine Press. 2012:25-30. (in Chinese)
- [10] CHOI K B, LEE J J, KIM M Y. *Cartwheel flexure-based compliant stage for large displacement driven by a stack-type piezoelectric element* [C]. International Conference on Control, Automation and Systems, Seoul, 2007: 2754-2758.
- [11] HOWELL L L. *Compliant Mechanisms*[M]. New York: Wiley, 2001.
- [12] 鲁亚飞,范大鹏,范世珣,等. 快速反射镜两轴柔性支承设计[J]. 光学精密工程,2010,18(12):2574-2582.
LU Y F, FAN D P, FAN SH X, *et al.*. Design of two axis elastic support for fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (12): 2574-2582. (in Chinese)
- [13] 辛宏伟,关英俊,李景林,等. 大孔径长条反射镜支撑结构的设计[J]. 光学精密工程,2011,19(7):1560-1568.
XIN H W, GUAN Y J, LI J L, *et al.*. Design of support for large aperture rectangular mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7): 1560-1568. (in Chinese)
- [14] HOWELL L L. *Compliant Mechanisms*[M]. New York: Wiley, 2001.
- [15] OGUAMANAM D C D, HANSEN J S, HEPPLER

G R. *Dynamics of a three-dimensional overhead crane system*[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001,242(3): 411-426.

[16] 宋学峰,魏晓平. 运筹学[M]. 南京:东南大学出版社,2003:10-20.

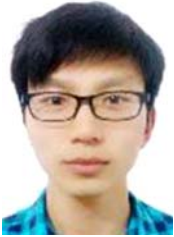
SONG X F, WEI X P. *Operations Research*[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2003: 10-

20. (in Chinese)

[17] 杨宝宁. 随机振动条件下设计载荷的确定[J]. *航天器工程*,2006,15(3):89-96.

Yang B N. Engineering methods for determining quasi-static limit load for structures under random vibration[J]. *Spacecraft Engineering*, 2006, 15 (3):89-96. (in Chinese)

作者简介:



李 林(1989—),男,湖北十堰人,博士研究生,2013年于北华大学获得学士学位,主要从事航天器结构与优化分析、微振动技术研究。E-mail:ucas_lilin@163.com

导师简介:



杨洪波(1963—),男,黑龙江人,研究员,博士生导师,主要从事光机热集成仿真技术的研究开发与应用、计算机辅助工程技术、光机电一体化技术研究。E-mail: yanghb@vip.163.com



王 栋(1982—),男,山东聊城人,博士,副研究员,2008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,主要从事航天器热控制、小卫星总体结构设计等方面的研究。E-mail: simest@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)