

文章编号 1004-924X(2016)06-1352-07

微小卫星星敏感器支架的优化设计与试验

李 林^{1,2}, 王 栋^{1,3*}, 谭陆洋^{1,2}, 孔 林¹, 杨洪波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; 3. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130033)

摘要:针对卫星结构中星敏感器支架在随机激励下加速度响应均方根(RMS)值过大的问题,提出了星敏感器支架优化设计方法。简述了星敏感器安装点随机响应的基本理论,对卫星结构进行了模态和加速度响应灵敏度分析。以星敏感器安装点 RMS 值最小为目标,以基频和体积分数为约束,建立了星敏感器支架随机响应优化模型,并对支架进行了拓扑优化设计。最后,利用 MSC. PATRAN&NASTRAN 对优化处理后的支架模型进行了工程分析。结果显示:星敏感器安装点随机响应 RMS 值降低了 20% 以上,支架结构轻量化率达到了 50%。另外,利用振动试验台对支架进行了振动试验。实验显示:有限元分析结果与试验数据相对误差低于 15%,表明设计的支架的性能参数满足设计指标,验证了所采用优化方法的可行性。

关键词:微小卫星;星敏感器;支架;随机响应;有限元;拓扑优化

中图分类号: V448.222.2; V423.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1352

Optimization design and test for bracket of star sensor in micro-satellite

LI Lin^{1,2}, WANG Dong^{1,3*}, TAN Lu-yang^{1,2}, KONG Lin¹, YANG Hong-bo¹

(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., Co., Changchun 130033, China)*

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

Abstract: An optimization design method for the bracket of a star sensor was proposed to overcome a larger acceleration response value (Root Mean Square(RMS)) under random excitation of a micro-satellite. The basic theory of random response of the star sensor at an installation point was described, and the structure modal and acceleration response sensitivity of the satellite structure were analyzed. By taking the minimum random response RMS value at the installation point as the target, and the nature frequency and volume fraction for the restraint, an optimized model for the bracket of the star sensor was established and the topological optimization was performed for the model. Finally, the engineering analysis was carried out on the optimized model by using MSC. PATRAN& NASTRAN.

收稿日期:2015-08-09;修订日期:2015-09-17.

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

The results show that the random response RMS value of the star sensor at the installation point has reduced more than 20%, the lightweight rate of the support structure has reached 50%. Furthermore, the bracket of star sensor was tested with a random vibration test platform. The results indicate that the relative error of the finite element analysis results and the experimental data is less than 15%, which shows that the designed performance parameters meet the design requirements and verifies the feasibility of the optimization method.

Key words: micro-satellite; star sensor; bracket; random response; finite element; topology optimization

1 引言

星敏感器是高精度卫星姿态测量装置,其工作的可靠性在卫星姿态测量和控制系统中起着重要作用^[1-3],卫星在发射过程中受到运载火箭产生的随机振动激励,环境激励通过卫星结构经星敏感器支架作用于星敏感器结构上,将影响设备的性能和可靠性。通常卫星结构要求在一定的频带范围内,需要保证结构对外激励具有良好的动响应特性,这就需要对卫星结构在给定频带内的动态性能进行优化设计。

自1988年Bendsoe等^[4]开展连续体拓扑优化研究以来,拓扑优化理论得到快速发展。目前常见的拓扑优化方法包括均匀化方法、变密度法(SIMP)、水平集方法(Level Set Method, LSM)、进化结构法(ESO)、拓扑函数描述法、基于非协调元和杂交元的方法和独立连续映射变量法(ICM)等^[5]。变密度法由于易于理解和实现而得到广泛应用。国内外许多研究者已将拓扑优化技术应用于实际工程项目中。Ananthasuresh等^[6]首先将拓扑优化的均匀化方法引入到柔性机构设计中,开辟了柔性机构设计的新途径;Diaz A R等^[7]研究了静力变形与频率约束下的拓扑优化问题;王栋,高雯丽^[8]研究了在给定频带随机激励作用下,桁架结构动力尺寸优化设计问题;左孔天^[9]对连续体结构拓扑进行了优化。

上述结构拓扑优化研究多为基于静态力学特性参数或者频率特性,而基于结构动态力学性能参数的优化问题研究较少。本文针对某星敏感器安装点随机响应RMS值过大问题,以星敏感器安装点随机响应为目标,以基频和体积分数为约束,建立了随机响应模型,并进行了灵敏度分析。利用OptiStruct软件对星敏感器安装支架进行

了拓扑优化设计,得到了安装点随机响应小的星敏感器安装支架。利用MSC.PATRAN & NASTRAN对优化处理后的模型进行了工程分析,并对整星进行了振动试验,所设计星敏感器支架力学性能指标均满足设计要求,该结构设计方法可为其它结构设计提供一定的借鉴意义。

2 随机响应基本原理

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:

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = U, \quad (1)$$

$$U = CE_u \dot{u} + KE_u u, \quad (2)$$

式中: E_u 为指示向量, \dot{u} 和 u 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(1)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。先构造虚拟激励:

$$\ddot{u}(t) = \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)} e^{j\omega t}, \quad (3)$$

根据微分关系:

$$\dot{u} = \frac{-j}{\omega} \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)} e^{j\omega t}, \quad (4)$$

$$u = \frac{-j}{\omega^2} \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)} e^{j\omega t}, \quad (5)$$

将式(4)、(5)代入(1)、(2)得强迫振动稳态响应方程:

$$M\ddot{Y} + C\dot{Y} + KY = P e^{j\omega t}, \quad (6)$$

其中:

$$P = P_R + jP_I, \quad (7)$$

$$P_R = KE_u \left(-\frac{1}{\omega^2}\right) \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)}, \quad (8)$$

$$P_I = CE_u \left(-\frac{1}{\omega}\right) \sqrt{S_{\ddot{u}}(\omega)}. \quad (9)$$

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:

$$S_{uu}(\omega) = \omega^4 [y_R^2 + y_I^2], \quad (10)$$

则加速度响应均方值为:

$$\sigma_{yy}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{yy}(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{+\infty} \omega^4 [y_R^2 + y_I^2] d\omega = 2 \sum \omega^4 [y_R^2 + y_I^2] \Delta\omega. \quad (11)$$

2.2 灵敏度分析

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结构的重要依据。对结构模态灵敏度^[11]进行如下分析:

设 λ_i 和 $\{\varphi_i\}$ 为第 i 个孤立特征值和对应的模态向量,则满足特征方程:

$$([\mathbf{K}] - \lambda_i [\mathbf{M}]) \{\varphi_i\} = 0, \quad (12)$$

令 $\lambda_{i,j}$ 和 $\{\varphi_{i,j}\}$ 为 λ_i 和 $\{\varphi_i\}$ 对设计变量 t_j ($j=1, 2, \dots, L$) 的导数, $[\mathbf{K}_{,j}]$ 和 $[\mathbf{M}_{,j}]$ 为 $[\mathbf{K}]$ 和 $[\mathbf{M}]$ 对 t_j 的导数矩阵,则特征值的灵敏度 $\lambda_{i,j}$ 和模态向量的灵敏度 $\{\varphi_{i,j}\}$ 为:

$$\lambda_{i,j} = \{\varphi_i\}^T ([\mathbf{K}_{,j}] - \lambda_i [\mathbf{M}_{,j}]) \{\varphi_i\}, \quad (13)$$

$$\{\varphi_{i,j}\} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n \frac{1}{\lambda_i - \lambda_k} (\{\varphi_k\}^T ([\mathbf{K}_{,j}] - \lambda_i [\mathbf{M}_{,j}]) \cdot \{\varphi_i\}) - 1/2 (\{\varphi_i\}^T [\mathbf{M}_{,j}] \{\varphi_i\}) \{\varphi_i\}, \quad (14)$$

式(5)、(6)在计算 $\lambda_{i,j}$ 和 $\{\varphi_{i,j}\}$ 时,需要计算 $[\mathbf{K}_{,j}] = \frac{\partial [\mathbf{K}]}{\partial t_j} = \sum \frac{\partial [\mathbf{K}]^e}{\partial t_j}$ 、 $[\mathbf{M}_{,j}] = \frac{\partial [\mathbf{M}]}{\partial t_j} = \sum \frac{\partial [\mathbf{M}]^e}{\partial t_j}$ 。

有限元分析的单元采用厚度为 t 的壳单元,因此给出了壳单元的刚度矩阵 $[\mathbf{K}]^e$ 的导数矩阵和质量矩阵 $[\mathbf{M}]^e$ 的导数矩阵:

$$\frac{\partial [\mathbf{K}]^e}{\partial t_j} = \frac{[\mathbf{K}]^e}{t_j}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial [\mathbf{M}]^e}{\partial t_j} = \frac{[\mathbf{M}]^e}{t_j}. \quad (16)$$

对式(11)求导,得到随机加速度响应的灵敏度:^[12]

$$(\sigma_{yy}^2)' = \{2 \sum \omega^4 [y_R^2 + y_I^2] \Delta\omega\}' = 4 \omega^4 \sum (y_{RyR}' + y_{IyI}') \Delta\omega. \quad (17)$$

至此,基于虚拟激励法,将随机振动均方响应问题转为确定性谐响应分析问题,并对模态灵敏度和随机加速度响应灵敏度进行了分析。采用有限

元软件对星敏传感器支架进行有限元建模优化分析。

3 星敏传感器支架优化模型提取

3.1 拓扑优化模型

建立以星敏传感器支架基频和体积分数为约束,体积分数可以反映结构轻量化率,星敏传感器安装点的加速度均方响应 RMS 值最小为设计目标的拓扑优化模型。采用变密度法 (SIMP)^[13-14] 的连续体拓扑优化方法,设第 j 个单元的密度为 t_j ,单元密度取 0~1 之间连续值,优化后单元密度为 1 或者接近 1,表示此处材料需保留,反之为 0,可去除。设计变量表示为:

$$\mathbf{T}' = (t_1, t_2, \dots, t_e, \dots, t_n)^T, \quad (18)$$

式中: t_e 表示第 e 个单元的单元密度。

某卫星要求卫星次结构基频 f_1 不小于 150 Hz,设定星敏传感器支架基频不小于 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。

星敏传感器支架优化目标函数为星敏传感器安装点随机振动加速度响应均方根值 RMS,如式(11)表示。

星敏传感器支架拓扑优化的数学模型:

$$\begin{aligned} \text{find: } & \mathbf{T}' = (t_1, t_2, \dots, t_e, \dots, t_n)^T \\ \text{Minimize: } & C(x) = \sigma_{yy}^2 \\ \text{Subject to: } & \alpha = \frac{\sum_{e=1}^n V_s^e}{\sum_{e=1}^n V^e} \leq 0.4, \quad (19) \\ & f_1 \geq 200 \\ & 0 \leq t_i \leq t_e \leq 1 \end{aligned}$$

式中: t_e 表示第 e 个单元的单元密度; α 为体积分数,表示优化后的体积与优化前的体积比; f_1 表示支架结构基频。

3.2 模型提取

星敏传感器安装支架选用牌号为 2A12 的铝合金材料,密度为 2 800 Kg/m³,弹性模量为 68 000 MPa,泊松比 0.33。某卫星 x 、 y 、 z 3 个方向随机振动强迫加速度功率谱 (PSD) 条件如表 1 所示,其 RMS 值为 7.19 grms。支架分析结构阻尼系数暂取整星结构阻尼为 0.02,选择星敏传感器安装点 (node476) 的加速度响应均方值为目标,采用 OptiStruct 软件对支撑结构模型材料分布进行拓

扑优化, 其有限元模型如图 1 所示。

表 1 激励加速度功率谱(PSD)

Tab.1 Acceleration power spectrum (PSD)

频率 (Hz)	功率谱密度
20~150	+3 dB/oct
150~280	0.04 g ² /Hz
280~320	0.15 g ² /Hz
320~380	0.10 g ² /Hz
380~850	0.05 g ² /Hz
850~1 000	0.02 g ² /Hz
1 000~2 000	0.005 g ² /Hz

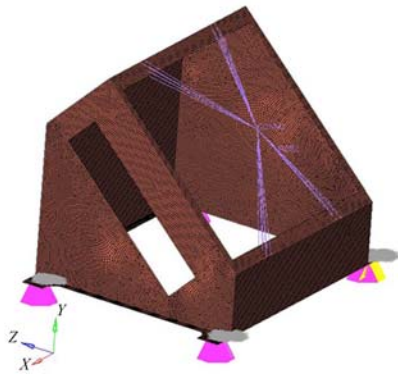


图 1 支撑结构有限元约束模型

Fig. 1 Support structure finite element model of constraint

用变密度法得到的拓扑优化结构密度等值分布图, 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。经过 67 步迭代优化, 结果收敛之

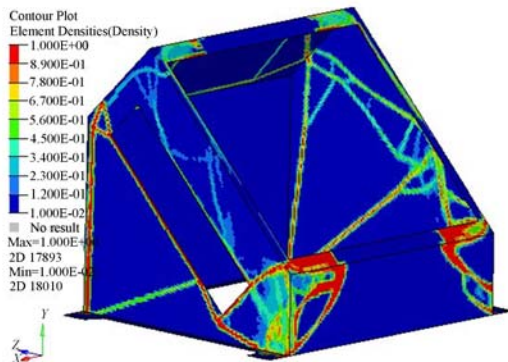


图 2 拓扑优化结果

Fig. 2 Result of topology optimization

后, 支架材料分布模型如图 2 所示, 可见优化后模型具有较高的参考价值, 迭代过程收敛曲线如图 3 所示。为了兼顾加工工艺和装配工艺, 设定的支架结构左右对称, 处理后的模型如图 4 所示。

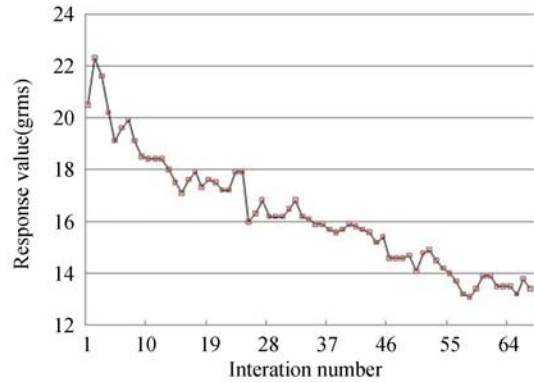


图 3 迭代收敛曲线

Fig. 3 Iterative convergence curve

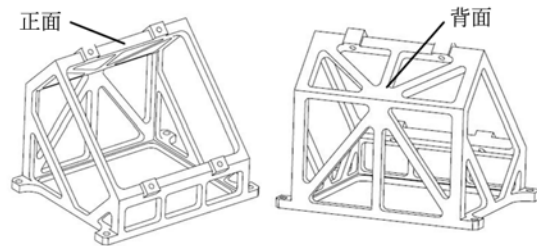


图 4 优化后的模型

Fig. 4 New model after optimizing

3.3 优化结构的有限元分析

对优化处理后的星敏感器支架建立有限元模型, 并进行模态和随机振动分析。星敏感器支架基频为 488.3 Hz, 满足整星结构性能要求。表 2 列出了星敏感器安装点 x 、 y 、 z 3 个方向优化前与优化后的随机振动分析结果对比, 星敏感器安装点 X 、 Y 、 Z 3 个方向的随机振动加速度响应均方根值均在设计指标之内。证明了本文方法能够保证星敏感器支架力学性能指标满足设计要求, 星敏感器安装点的随机振动加速度响应较低。

表 2 随机振动响应分析结果

Tab.2 Analysis results of random vibration response

方向	优化前(grms)	优化后(grms)	降低百分比/%
x	13.9	8.7	37.4
y	20.5	13.4	34.6
z	17.3	12.5	27.7

4 试验验证

为验证本文中优化设计方法的可行性和有限元数值分析结果的准确性,利用振动试验台对整星进行振动试验。试验现场如图 5 所示,用加速度传感器经数据采集仪采集目标位置加速度响应值,为了有助于有限元分析结果与振动试验结果的对比分析,地面整星振动试验中的测点布置选择在采样点邻近位置。图 6 所示为星敏传感器支架安装点 x 、 y 、 z 3 个方向随机振动响应的试验曲线,表 3 给出了随机振动响应试验结果与分析数据的对比。

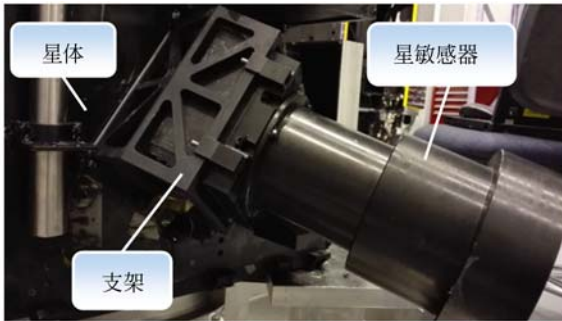
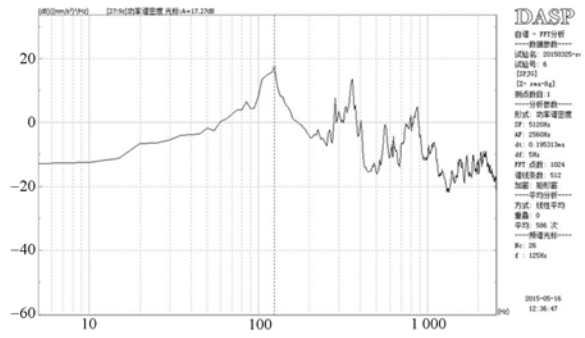


图 5 卫星的振动测试现场

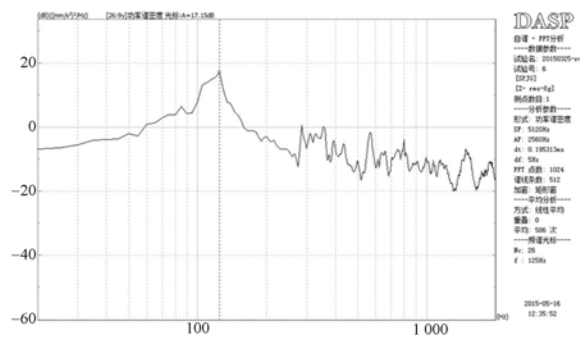
Fig. 5 Placement of random vibration test

根据表 3,有限元分析结果较试验结果偏小,阻尼作为结构重要动力特性之一,对动力响应结果影响较大,有限元分析时支架结构阻尼取整星结构阻尼 0.02,可通过修正阻尼系数来优化有限元分析结果。经优化设计后的星敏传感器支架星敏安装点随机振动响应有限元分析数据与振动试验数据误差在 15% 以内,该结果验证了模型的准确



(b) y 向

(a) y axis



(c) z 向

(a) z axis

图 6 采样点 PSD 响应曲线

Fig. 6 PSD response curve to sampling points

性和以随机响应 RMS 值最小为优化目标的结构优化设计方法的可行性。

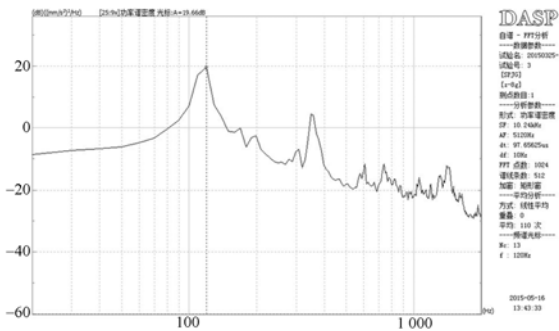
表 3 试验与分析数据对比

Tab. 3 Compare data of tests and analysis

方向	优化分析 (grms)	试验 (grms)	相对误差 /%
x	8.7	9.6	9.3
y	13.4	15.7	14.6
z	12.5	13.4	6.7

5 结论

本文针对某卫星结构中星敏传感器支架在随机激励下加速度响应 RMS 值过大的问题,提出了以随机响应 RMS 值最小为目标的拓扑优化设计的方法。建立了随机响应优化的数学模型,对模型进行了模态和加速度响应灵敏度分析。对支架进行了拓扑优化分析,得到了星敏传感器支架结构。



(a) x 向

(a) x axis

利用 MSC. PATRAN&NASTRAN 对优化处理后的模型进行了工程分析,星敏感器安装点随机响应 RMS 值降低 20%以上,同时,优化后支架结构质量 0.25 kg,轻量化率达到 50%。对支架进行了振动试验,结果表明:有限元分析结果与试验

数据相对误差低于 15%,设计的支架性能参数满足设计指标,验证了所采用优化方法的可行性。本文的结构设计方法可为其它结构设计提供一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 廖志波,付瑞敏,宗肖颖. 星敏感器遮光罩的优化设计[J]. 中国激光,2010,37(4),987-990.
LIAO ZH B, FU R M, ZONG X Y. Optimal designing of baffle of star sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4):987-990. (in Chinese)
- [2] 刘海波,谭吉勇,沈本剑. 星敏感器光学系统的热/结构/光分析[J]. 宇航学报,2010,31(3),875-879.
LIU H B, TAN J Y, SHEN B J. Thermal/structural/optical analysis of optical system of star sensor [J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3):875-879. (in Chinese)
- [3] 屠善澄. 卫星姿态动力学与控制[M]. 北京:中国宇航出版社 2001.
TU SH CH. *Attitude Dynamics and Control of Satellite*[M]. Beijing: China Astronautics Press, 2001. (in Chinese)
- [4] BENDSOE M P, KIKUCHI N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization Method [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1988, 71(2): 197-224.
- [5] 周向阳,陈立平,黄正东. 用 SIMP_SRV 方法进行柔性机构拓扑优化设计[J]. 中国机械工程,2008,19(6),631-635.
ZHOU X Y, CHEN L P, HUANG ZH D. Topology optimization design of compliant mechanism with the SIMP- SRV method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(6):631-635. (in Chinese)
- [6] ANANTHASURESH G K, KOTA S. Designing compliant mechanisms[J]. *Mechanical Engineering*, 1995, 117(11) : 93-96.
- [7] DIAZ A R, KIKUCHI N. Solution to shape and topology eigen value optimization problems using a homogenization method [J]. *Int . J for Num. Meth. In Eng.* 1992,35.
- [8] 王栋,高雯丽. 基于频响函数约束的桁架结构尺寸优化设计[J]. 应用力学学报,2015,32(1):101-107.
WANG D, GAO W L. Sizing optimization of truss structure under constraint of frequency response function [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2015, 32(1):101-107(in Chinese)
- [9] 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: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [10] 刘宝山,赵国忠. 随机激励下结构振动声辐射的灵敏度分析和优化设计[J]. 振动工程学报,2011,24(3):309-314.
LIU B SH, ZHAO G ZH. Sensitivity analysis and design optimization of acoustic radiation from random excited structures [J]. *Journal of Vibration Engineering*. 2011,24(3):309-314. (in Chinese)
- [11] 贾建援,曹玉玲,仇原鹰. 以随机响应为目标的方舱结构动力修改[J]. 应用力学学报,1996,13(2):49-56.
JIA J Y, CAO Y L, QIU Y Y. Structural dynamics modification for a shelter with targets of random responses [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*. 1996,13(2): 49-56. (in Chinese)
- [12] 张桥,张卫红,朱继宏. 动力响应约束下的结构拓扑优化设计[J]. 机械工程学报,2010,46(15):45-51.

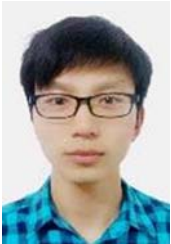
ZHANG Q, ZHANG W H, ZHU J H. Topology optimization of structures under dynamic response constraints [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15) : 45-51. (in Chinese)

[13] 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)

[14] BENDSOE M P, SIGMUND O. Material interpolations in topology optimization [J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999, 69(9): 635-654.

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,主要研究方向为航天器结构动力学、微振动技术与光机结构优化设计。
E-mail:ucas_lilin@163.com



王 栋(1982—),男,山东聊城人,博士,副研究员,硕士生导师,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、小卫星总体技术等方面的研究。
E-mail:simest@163.com

导师简介:



杨洪波(1963—),男,黑龙江人,研究员,博士生导师,主要研究方向: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。
E-mail: yanghb@vip.163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)