

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2020.03.061

初永志, 陆振玉, 刘昌儒, 等. 航天产品振动工装设计 [J]. 机电工程技术, 2020, 49 (03): 167-169.

# 航天产品振动工装设计

初永志, 陆振玉, 刘昌儒, 韩哈斯教其尔\*

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

**摘要:** 为满足某型航天产品振动试验要求, 设计了一个航天产品的振动工装。利用Unigraphics NX (UG) 软件对设计的振动工装进行建模, 利用Hypermesh软件进行有限元分析前处理, 利用MSC.Patran/Nastran软件进行有限元分析。分析振动工装的基频、正弦振动时的加速度、应力与应变响应以及随机振动时的应力响应, 分析结果表明所设计的振动工装能满足试验要求。

**关键词:** 振动工装; Unigraphics NX (UG); Hypermesh; MSC.Patran/Nastran; 基频; 正弦振动; 随机振动

**中图分类号:** TB53

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-9492(2020)03-0167-03

## Vibration Tooling Design of Aerospace Products

CHU Yongzhi, LU Zhenyu, LIU Changru, HAN Hasiaoqier

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

**Abstract:** In order to meet the vibration test requirements of a aerospace product, a vibration tooling for aerospace product was designed. Unigraphics NX (UG) software was used to model the designed vibration tooling, Hypermesh software was used for pre-processing of finite element analysis, and MSC.patran/nastran software was used for finite element analysis. The basic frequency of vibration tooling, acceleration, stress and strain response during sinusoidal vibration, and stress response during random vibration were analyzed. Through analysis, it can be preliminarily confirmed that the designed vibration tooling can meet the test requirements.

**Key words:** vibration tool; Unigraphics NX (UG); Hypermesh; MSC.Patran/Nastran; basic frequency; sinusoidal vibration; random vibration

### 0 引言

在航天产品发射升空过程中, 由于发动机工作、发动机级间分离与POGO效应等原因, 航天产品会发生的不可避免的振动<sup>[1-2]</sup>。因此航天产品发射升空前, 都需要进行振动试验, 通过地面的振动试验考核航天产品是否能经受发射时的振动<sup>[3-4]</sup>。各种型号的航天产品在振动试验过程中都需要一定的工装进行辅助, 以确保振动试验正常开展。振动工装为产品与振动台间连接件, 是否能将振动台输出的力与位移尽量无损地传递到产品上, 是振动试验能否正常开展的关键因素之一。现有的振动试验工装, 大多通过计算机辅助设计(CAD/CAE)进行设计与分析。有的先用Computer Aided Tri-Dimensional Interface Application (CATIA)软件进行建模, 再利用MSC.Patran/MSC.Nastran软件进行力学分析<sup>[5]</sup>; 有的先用Pro/Engineer软件进行建模, 再利用ANSYS Workbench软件进行力学分析<sup>[6-7]</sup>。UG作为常用结构设计软件, 也可进行振动试验工装建模。本文根据某型航天产品需求, 设计了一个振动工装, 并先用UG软件进行了建模, 再利用Hypermesh和MSC.Patran/Nastran软件进行有限元分析, 初步检验振动工装的动态刚度与结构强度。

### 1 工装设计

振动试验工装为振动试验台与航天产品件连接件, 因此其结构尺寸应符合两者的接口尺寸。此外, 还需要振动工装的固有频率 $f_n$ 尽量增大, 以满足试验需求, 如式(1)所示。

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

由式(1)可知, 当振动工装质量 $m$ 减小, 结构刚度 $k$ 增加时, 工装固有频率 $f_n$ 会提高。常用的减重方法为选择比刚度高的材料; 常用的增加刚度方法为设计加强筋。因此常用的工装材料为铝镁合金, 常见工装结构为框架型。

以某型航天产品接口尺寸与振动实验台接口尺寸为依据, 利用UG软件进行建模, 设计了如图1所示工装。工装质量 $m=650$  kg, 外轮廓尺寸 $L=2\ 250$  mm,  $B=2\ 280$  mm,  $H=645$  mm。平面与产品接触, 带有光孔平面与振动台相连。由于该航天产品尺寸大, 轮廓尺寸 $L \times B \times H=2\ 000$  mm $\times$ 2 000 mm $\times$ 600 mm, 具有多个锁紧面, 各面间具有复杂的空间关系, 各面间尺寸精度要求高。此外工装质量不得超过1 000 kg, 为满足要求, 将工装整体尺寸调整为可均匀分布20 mm加强筋与200 mm $\times$ 200 mm减重镂空的结构。

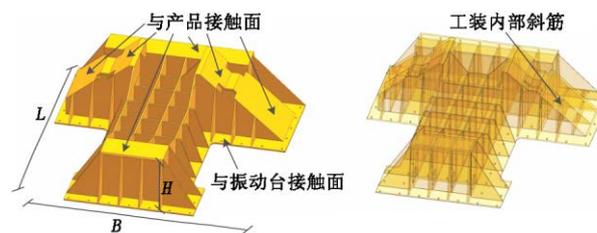


图1 工装结构示意图

考虑振动工装对结构刚度要求较高, 宜采用整体成型工艺进行加工, 因此该工装采用铸造成型, 再对各接触面进行机加工。各平面间利用加强筋相连, 降低工装质量的同时尽

收稿日期: 2019-12-10

量使工装满足振动强度要求。工装材料为比刚度较高的铝镁合金，材料性能如表1所示。

表1 工装材料铝镁合金属性表

弹性模量 /GPa	泊松比	密度 / (t·m <sup>-3</sup> )	屈服极限 /MPa
71	0.3	2.8	450

### 2 有限元分析

为确保航天产品在发射过程中不被破坏，在发射前都会对其进行地面振动试验，并在试验前进行相应的有限元分析，例如分析航天产品的动态刚度与结构强度等。动态刚度主要指产品基频，结构强度主要指产品在正弦振动时的加速度、应力、应变响应与随机振动时的应力响应。作为航天产品的振动工装，也需要对其进行相应的分析，以验证工装是否能满足航天产品的试验要求。

首先将UG模型导入Hypermesh中，对模型进行网格划分，底板螺栓连接处建立RBE2刚性单元；然后将网格模型导入到MSC.patran，加载边界条件，模型节点数为41326，单元数为22107，最后利用MSC.nastran进行求解，有限元模型如图2所示。

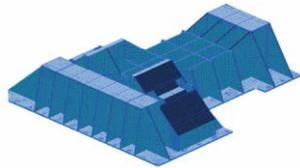


图2 有限元模型

工装底面与螺栓孔内表面全约束。对工装进行模态分析，如图3所示。从图中不难看出，前三阶模态分析中，相对变形量最大处均为非接触面的斜筋处。提取前3阶固有频率如表2所示。

表2 工作固有频率表

阶数	固有频率 /Hz	振型描述
1	306.5	筋板局部凹陷
2	414.6	整体弯曲
3	442.4	筋板局部凹陷

工装前三阶基频都远大于产品振动试验时所需的振动频率，达到产品基频3倍，满足振动工装一阶频率远大于试件的一阶固有频率（100 Hz）的要求<sup>[8]</sup>。

为从设计角度检验所设计的工装，在正弦振动时的加速度、应力与应变响应，对所设计工装进行正弦振动分析，正弦振动条件如表3所示。

表3 正弦振动条件

方向	频率范围 /Hz	量级
X、Y、Z	50-100	1g

利用MSC.patran/nastran中频率响应分析功能，采用模态叠加法分析，继承上文模态分析中模态求解数据。分别求解出X、Y、Z方向正弦振动条件下工装最大加速度和最大变形情况，如图4所示。图4(a)中，工装最大加速度为1.07g，放大1.07倍，最大应力为0.74MPa，小于材料屈服极限450MPa，最大位移为0.027mm；图4(b)中，工装最大加速度为1.24g，放大1.24倍，最大应力为0.68MPa，小于材料屈服极限450MPa，最大位移为0.032mm；图4(c)中，工装最大加速度为1.07g，放大1.07倍，最大应力为1.33MPa，小于材料屈服极限450MPa，最大位移为0.027mm。

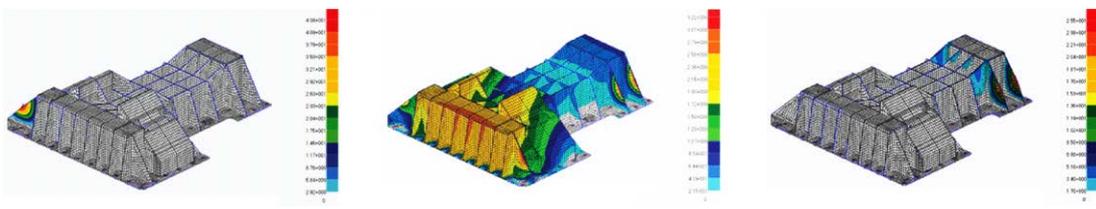


图3 各阶模态图

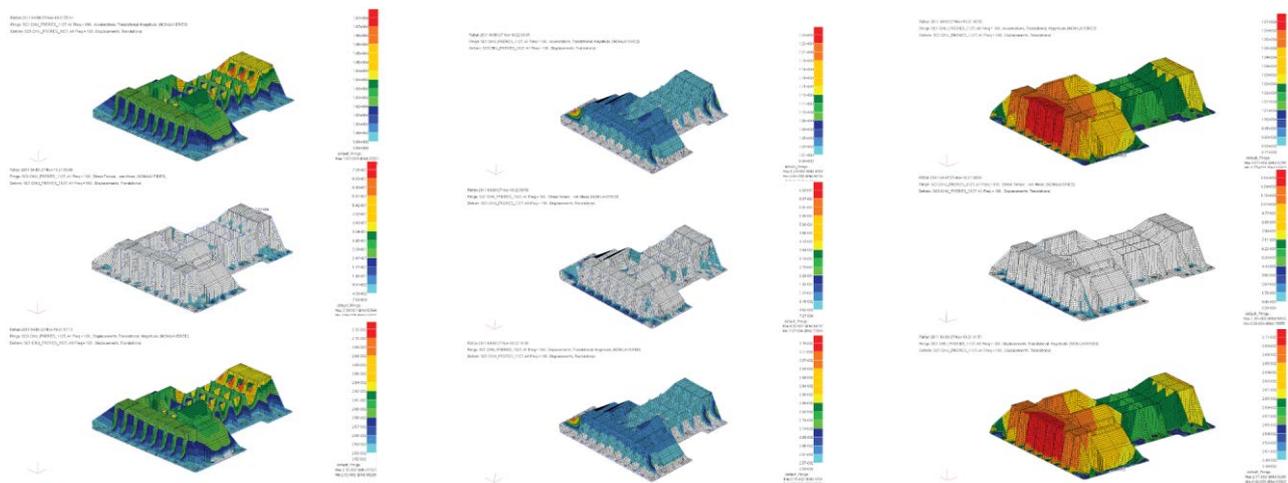


图4 正弦振动响应图

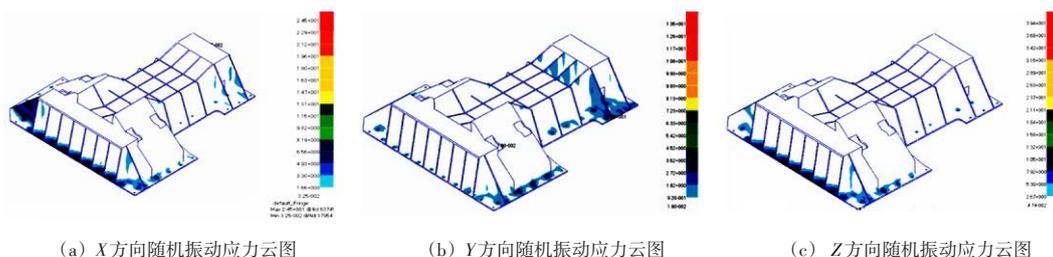


图5 XYZ方向随机振动RMS应力(3δ)云图

为从设计角度检验所设计的工装在随机振动时的应力响应, 对所设计工装进行随机振动分析, 随机振动条件如表4所示。

表4 随机振动条件

频率范围/Hz	20~80	80~350	350~2 000
功率谱密度	+3dB/oct	0.04g <sup>2</sup> /Hz	-3dB/oct
总均方根加速度	6.056g <sub>rms</sub>		
试验方向	XYZ方向		

随机振动结构阻尼取0.03, 图5所示为XYZ方向随机振动RMS应力(3δ)云图。随机振动峰值应力结果(3δ)如表5所示。

表5 随机振动峰值应力与均方根加速度统计表

X向应力/MPa	Y向应力/MPa	Z向应力/MPa
24.5	13.6	39.4

计算结果表明随机振动工装最大应力为39.4 MPa, 小于材料屈服极限450 MPa, 因此可初步判定所设计工装结构能承受总体提出的随机振动条件。

### 3 结束语

本文针对某航天产品设计了振动工装, 利用UG进行结构建模, 再通过Hypermesh软件进行有限元分析前处理, 并利用MSC.Patran/Nastran对结构进行分析。分析结果表明, 所设计工装一阶基频远大于产品一阶基频; 频率响应分析Y方向振动最大加速度1.24 g, 放大1.24倍, Z方向振动最大应力1.33 MPa, 小于材料屈服极限450 MPa; Y方向振动最大位移

为0.032 mm; 随机振动工装最大应力为39.4 MPa, 小于材料屈服极限450 MPa, 因此工装结构满足试验要求。

### 参考文献:

- [1] 次永伟, 邱大芦, 付乐平, 等. 航天器振动试验控制技术进展 [J]. 动力学与控制学报, 2014 (3): 193-200.
- [2] 韩增尧, 马兴瑞, 于登云. 火箭力学环境分析与试验技术研究进展 [J]. 宇航学报, 2006, 27 (3): 323-330.
- [3] 姜节胜, 高跃飞, 顾松年. 环境振动试验技术的若干新进展 [J]. 机械强度, 2005, 27 (3): 307-311.
- [4] 潘忠文, 廉永正, 曾耀祥, 等. 运载火箭振动环境试验条件解析 [J]. 导弹与航天运载技术, 2013 (06): 34-37.
- [5] 侯瑞. 振动台动力学建模和夹具设计研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [6] 吕福庭. 机载机箱结构分析与仿真技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [7] 陈顺昌. 某型舱段三轴振动夹具的频响分析与结构优化设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015.
- [8] 张志旭, 朱学旺. 振动夹具一阶共振频率的试验数据识别 [J]. 航天器环境工程, 2009, 26 (S1): 62-64.

**第一作者简介:** 初永志 (1991-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 研究实习员, 硕士研究生, 研究领域为机械制造, 已发表论文1篇。  
**※通讯作者简介:** 韩哈斯敖其尔 (1986-), 男, 内蒙古人, 博士, 助理研究员, 研究领域为空间机构设计, 并联机构运动学分析。

(编辑: 刁少华)

(上接第148页)

### 参考文献:

- [1] 张宁. 基于EDEM的带式输送机转载溜槽结构优化 [J]. 电子技术与软件工程, 2019 (14): 30-32.
- [2] 唐树峰, 王鹏. 带式输送机自移机尾自动清浮煤装置研究 [J]. 价值工程, 2019 (20): 44-46.
- [3] 张有狮, 荆德吉, 贺龙祥, 等. 基于气固两相流的带式输送机转载点控尘技术研究 [J]. 中国煤炭, 2014 (10): 87-89.
- [4] 王联合, 高会岐, 李红选, 等. 带式输送机中间转载装置设计研究 [J]. 煤矿机械, 2016 (02): 60-63.
- [5] 赵澜, 花彩华. 井下胶带输送机转载装置的设计及应用 [J]. 能源技术与管理, 2017 (03): 95-97.

- [6] 王永凯, 邢艳慧. 煤仓溜煤眼施工隐患综合治理 [J]. 山东煤炭科技, 2010 (02): 81-83.
- [7] 张旭波. 输送机转载点防堵口保护装置的改造 [J]. 煤, 2012 (02): 41-43.
- [8] 冯亚飞. 螺旋溜槽在胶带输送机转载点的应用 [J]. 企业导报, 2013 (06): 71-74.

**作者简介:** 宋文杰 (1994-), 男, 山西省广灵县人, 大学本科, 助工, 研究领域为采煤技术。

(编辑: 刁少华)