

光学测量平台航空运输性能仿真与试验验证

徐志文¹, 张晗¹, 王强龙^{1, 2}, 刘震宇¹, 王晓明¹

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2.中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:光学测量平台在航空运输的过程中会受到各种类型的振动载荷,若不进行一定的保护会导致设备失效,因此在设备运输前要对其进行各种振动环境的模拟考核试验。基于模型修正理论,首先建立了与模态试验结果保持一致的有限元模型;然后计算了平台在正弦和随机振动载荷下的加速度响应,平台在两种载荷作用下加速度响应较小。最后,参考喷气式运输机的宽带随机振动功率谱在振动台上进行振动试验,得到了设备关键部位在该载荷下的加速度响应。通过对比,仿真分析结果和振动台试验结果基本保持一致,验证了设备在该载荷下运输的可能性。

关键词:航空运输;模型修正;随机振动响应;振动台试验;

中图分类号: U8

文献标志码:A

文章编号:1672-9870(2021)04-0001-06

Simulation and Experimental Verification of Air Transportation Performance of Optical Measurement Platform

XU Zhi-wen¹, ZHANG Han¹, WANG Qiang-long^{1, 2}, LIU Zhen-yu¹, WANG Xiao-ming¹

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;

2.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Abstract: The optical measurement platform will be subjected to various loads during air transportation. Failure to provide certain protection will cause equipment failure, therefore, it is necessary to carry out a variety of vibration environment simulation assessment tests to the equipment before transportation. Based on the model updating theory, this paper established a finite element model consistent with the modal test results. The acceleration response of the optical measurement platform under sinusoidal load and random load was calculated by dynamic analysis, and the acceleration response of the platform under two kinds of loads was small. Finally, referring to the broadband random vibration power spectrum of the jet transporter, a random vibration test was carried out on the shaking table, and the acceleration response of the key parts of the equipment under the load were obtained. By comparison, the simulation results are basically consistent with the shaking table test results, which verifies the possibility of equipment transportation under this load.

Key words: air transportation; model updating; random vibration response; shaking table test

对于光学测量平台等精密仪器,其在运输过程中的稳定性和安全性是十分值得关注的问题^[1-3]。在地面运输过程中,会经历连续力学载

荷,载荷的特点一般是以随机振动为主(频率范围约为5~200 Hz),兼有周期性载荷^[4]。而在航空运输中,载荷更加复杂和严峻:在飞机起飞、

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 吉林省科技厅重点科技研发项目(20180201118GX)

作者简介: 徐志文(1993-),男,硕士,研究实习员, E-mail: xuzhiwenjlu@163.com

通讯作者: 王晓明(1984-),男,博士,副研究员, E-mail: 13604311978@163.com

降落、跑道滑行等过程中会受到冲击载荷作用,在过程中会受到宽带随机振动、窄带随机振动和正弦振动等几种载荷作用^[5]。

如果在运输过程中没有对设备进行隔振等保护,可能对设备结构造成一定损伤,使得设备后续使用安全性存在隐患^[6-7]。对于光学测量平台这类精密仪器,会在振动过程中出现关键设备或零部件松动,丢失精度等情况,导致设备无法正常工作^[8]。

为保证设备能承受运输过程中的振动环境,在使用前,必须对其进行各种振动环境的模拟考核试验(简称振动试验)^[9]。本文参考喷气式运输机的宽带随机振动功率谱对光学测量平台进行随机振动试验,验证设备在航空运输载荷作用下的振动性能。并且在随机振动试验之前,先通过有限元模拟的方法计算设备对振动载荷的响应,保证其在振动台试验时不会损坏。

1 模态分析

1.1 有限元模型

光学测量平台主体采用大理石装配而成,大理石作为一种优质的抗振材料,近年来被广泛应用于各类精密平台。其材料阻尼因子相较一般的金属高,可将结构的振动快速衰减。

对光学测量平台的几何模型进行网格划分,平台上安装的镜筒及各类组件等由于对结构整体的刚度影响不大,所以简化为质量点,使用刚性单元固定在结构表面,最终的有限元模型如图1所示。

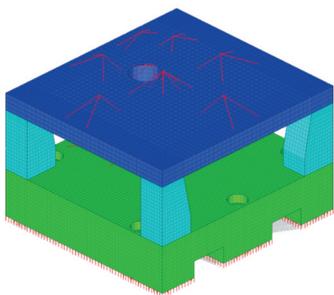


图1 光学测量平台有限元模型

部凹槽长度方向为X轴方向,Y轴按照右手定则确定。

1.2 无工装模态敲击试验及模态修正

为了使建立的有限元模型更加符合实际状态,根据模型修正理论,先进行模态试验,再通过试验的结果对建立的有限元模型参数进行修改,使模型的动力学特性和实际保持一致^[10-11]。对正常工作状态(无隔振工装)下的设备进行模态敲击试验,通过敲击得到的频域响应曲线峰值判断出结构的模态频率。再对有限元模型进行模态分析,通过调整大理石的属性将模态频率向试验模态结果靠近,最终大理石的属性如表1所示。

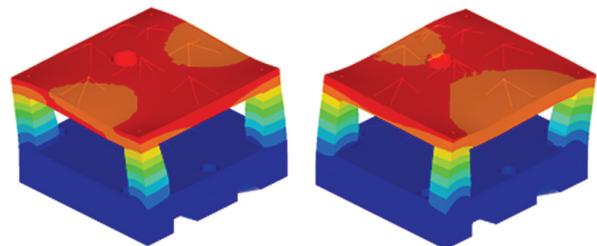
表1 光学测量平台大理石的属性

弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m ³)	材料阻尼因子
5.4	0.3	3 000	0.24

最终的模态分析结果如表2所示,表中给出了结构前4阶模态的频率、振型描述以及与敲击试验的对比结果,对应的模态振型图如图2所示。

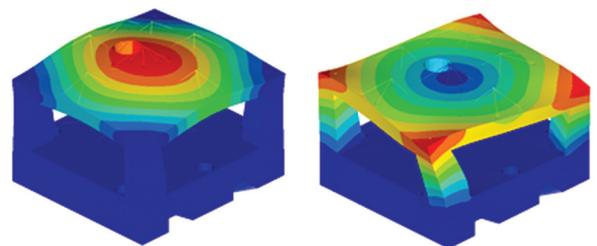
表2 无隔振工装前4阶模态及振型描述

模态阶数	计算值/Hz	振型描述	试验值/Hz
1	53.98	整体Y向一阶弯曲	51.75
2	58.42	整体X向一阶弯曲	53.71
3	66.05	上平台Z向振动	/
4	87.88	整体绕Z轴扭转	93.75



(a) 一阶模态振型

(b) 二阶模态振型



(c) 三阶模态振型

(d) 四阶模态振型

在模型中,规定竖直向上为Z轴方向,沿底

图2 模态振型图

模态分析和模态试验结果的模态频率误差最大为 8.8%, 可以认为有限元模型与实际结构的动力学特性基本保持一致, 后续可以使用该有限元模型进行动力学分析。从模态振型图可以看出, 第 3 阶模态为上平台 Z 向振动模态, 由于上平台表面安装了大量的光学零部件, 不方便敲击, 所以在敲击试验中未能体现出此阶模态。

1.3 隔振工装下的模态分析

在前一节的基础上, 分析设备在隔振工装下的模态, 得到前 4 阶模态如表 3 所示。由于隔振工装的刚度较小, 整体的一阶模态频率有明显下降。

表 3 有隔振工装前 4 阶模态及振型描述

模态阶数	计算值/Hz	振型描述
1	14.38	整体 Y 向一阶弯曲
2	16.12	整体 X 向一阶弯曲
3	23.83	整体 Z 向一阶振动
4	71.78	上平台 Z 向振动

2 动力学响应分析

为了检验光学测量设备的动力学特性, 为后续的振动台试验做准备, 需要对其进行有限元动力学分析。在设备上选取 3 个关键部位作为评价点, 如表 4 所示。

表 4 光学测量平台动力学分析的评价点

评价点编号	评价点位置
1	分光镜顶部
2	筒镜安装处
3	大理石下平台

2.1 频率响应分析

频率响应分析是在一定的频域范围内对有限元模型施加一定的激励, 包括位移、速度、加速度和力激励等, 可以计算出设备在该激励下某些评价点的响应, 由此判断出设备在该频段内的动力学特性, 是较为常见的动力学响应分析。

基于上一节建立的有限元模型, 分别施加 3 个方向的频率范围在 0~500 Hz 的单位加速度激

励, 计算设备在安装隔振工装的条件下, 各个方向对加速度激励载荷的放大。得出的频率响应曲线如图 3-图 5 所示。

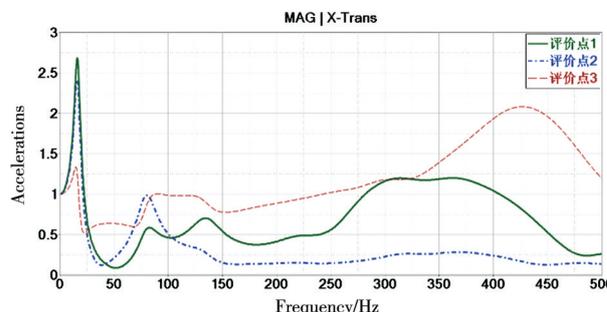


图 3 X 方向激励时, 评价点在 X 方向的加速度响应曲线

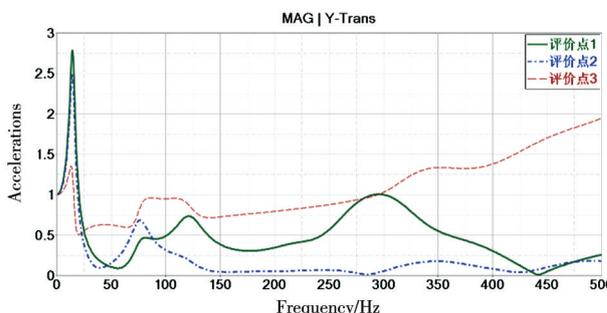


图 4 Y 方向激励时, 评价点在 Y 方向的加速度响应曲线

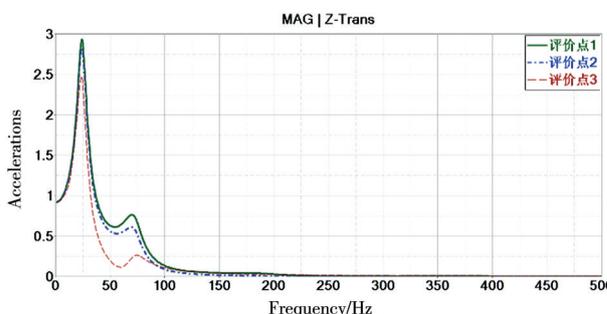


图 5 Z 方向激励时, 评价点在 Z 方向的加速度响应曲线

图 3-图 5 分别是三个评价点在 X/Y/Z 方向单位加速度载荷激励下, 对应方向的加速度响应曲线。从曲线中可以看出, 无论激励方向如何, 在低频段都有明显的峰值。而在隔振设计中, 往往是低频的振动难以消除, 所以要关注设备在低频段内对加速度激励的放大情况, 如表 5 所示。

在 Z 方向施加激励时, 三个评价点共振频率较为一致, 在 24 Hz 左右, 根据模态分析结果, 判断为整体 Z 方向一阶振动模态的共振; 从放大倍数来看, 三个点在共振点对加速度的放大在 2~3

倍之间,对于一般结构来说属于正常范围;X和Y方向激励时,对应方向峰值放大倍率略小于Z方向,峰值所在频率集中在13~16 Hz,从模态结果来说属于整体的一阶弯曲模态。

表5 各评价点的加速度频域响应峰值及所在频率

编号	X方向		Y方向		Z方向	
	峰值	频率/Hz	峰值	频率/Hz	峰值	频率/Hz
1	2.68	16.12	2.79	14.38	2.93	24.18
2	2.42	16.00	2.50	14.38	2.83	24.18
3	1.33	14.81	1.35	13.00	2.47	23.83

据此,判断此结构关键部位的三个评价点对加速度的放大都在正常范围内,这也与大理石较高的材料阻尼因子有关。

2.2 随机振动响应分析

为了验证设备在航空运输中的性能,参考喷气式运输机的宽带随机振动量值,给出本次随机振动试验的功率谱曲线,如表6所示。

表6 随机振动试验功率谱

频率点/Hz	功率谱密度/ $l((m/s^2)^2/Hz)$	总均方根/ $l(m/s^2)$	测试时间/min	激励方向
10	0.027	4.51	10	Z向
170	0.027			
250	0.04			
500	0.04			

对有限元模型进行随机振动响应分析,将功率谱曲线沿Z方向加载,得到如图6所示的各评价点Z方向的功率谱密度曲线,图中可以看出,响应主要集中在低频段。将均方根值统计,与输入的均方根值做商得到振动加速度的传递率,如表7所示。

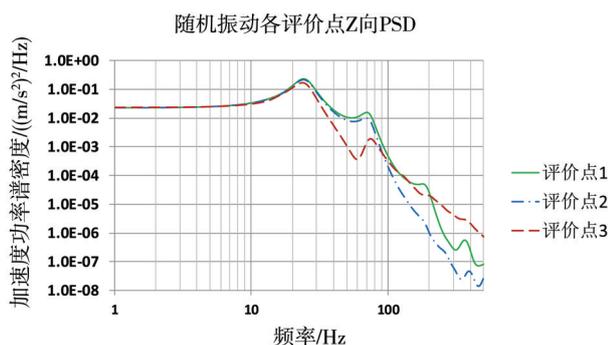


图6 各评价点Z方向的功率谱密度曲线

表7 各评价点的响应均方根值及加速度传递率

编号	仿真RMS/(m/s^2)	传递率/%
1	1.893	41.97
2	1.799	39.89
3	1.505	33.37

从表中可以看出,在3个关键部位的评价点加速度传递率都不足50%,均方根值最大为1.893 m/s^2 ,说明工装的隔振效果较好,能有效地将喷气式运输机在飞行过程中产生的宽带随机振动降低,对设备起到了明显的保护作用。

3 振动台试验

在实际测试过程中,大理石平台底面四角通过螺栓与隔振工装连接,隔振工装再通过螺栓和压板与振动台连接。在与动力学仿真中3个评价点相同的位置粘贴加速度传感器,采集振动试验过程中关键部位的加速度响应。试验现场情况如图7所示。

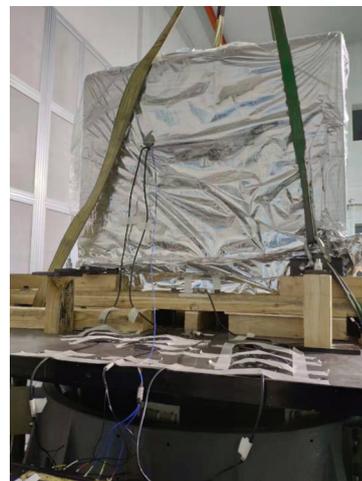


图7 振动台试验现场照片

3.1 正弦扫频试验

在随机振动试验开始之前,先进行一次正弦扫频试验,输入条件如表8所示。

表8 正弦扫频试验输入条件

频率范围/Hz	激励幅值/ $l(m/s^2)$	扫频率/ $l(oct./min)$	激励方向
10~500	1	4	Z向

正弦扫频试验约进行85 s,在3个评价点位

置测得的Z向加速度时域信号如图8所示,图8

中可明显看出,结构在 26 s 左右出现明显峰值,说明此时达到结构的共振频率范围。

对 23~29 s 范围内的信号进行快速傅里叶变换获得其频谱,如图 9 所示。可以看出,3 处评价点的最大响应均出现在 24 Hz,与仿真结果一致,为结构整体的 Z 向振动模式。

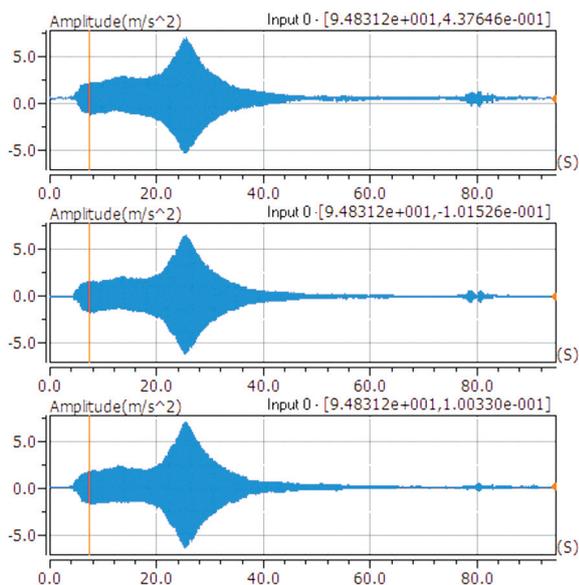


图 8 正弦扫频试验 3 评价点的加速度时域信号

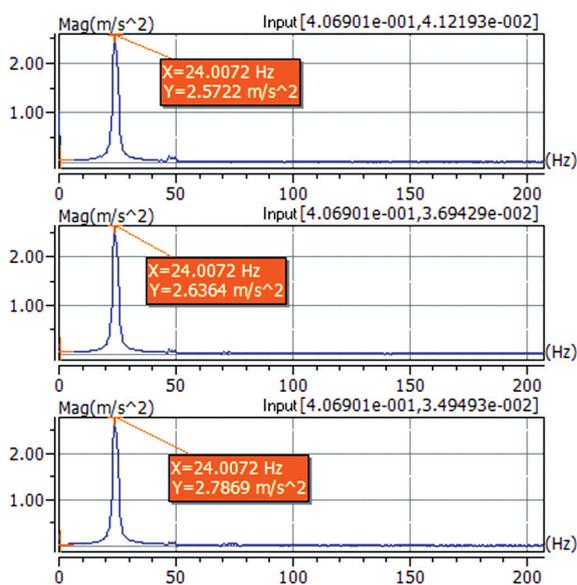


图 9 正弦扫频试验 3 评价点时域信号的 FFT

将振动试验幅值与振动台激励相除得到加速度响应的放大倍率,结果如表 9 所示。从表 9 中结果看出,试验和仿真结果相差最大为 13%,较为接近,误差存在的原因主要是有限元模型未能对隔振工装的阻尼特性进行准确地描述。

表 9 正弦试验与仿真加速度放大倍率结果对比

评价点编号	仿真结果	试验结果	误差/%
1	2.93	2.57	12.3
2	2.83	2.64	6.7
3	2.47	2.79	13.0

3.2 随机振动试验

按表 6 给出的随机振动试验功率谱进行振动台试验,通过之前粘贴的 3 个加速度传感器采集所在评价点的加速度响应时域信号,使用 MATLAB 编写程序计算得到相应的 PSD 曲线,如图 10 所示。

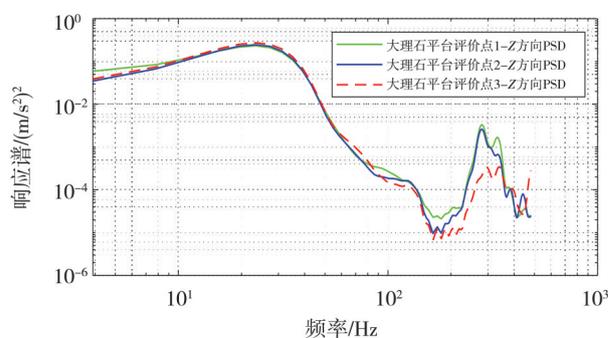


图 10 随机振动试验中各评价点的 PSD 曲线

图 10 中可看出,曲线在共振频率点 24 Hz 左右出现峰值,随后有明显下降;3 处评价点响应曲线的特性相似,说明结构整体刚度较好;相比于仿真结果,在高频区存在响应峰,但量级较小可以忽略。对响应时域信号进行计算得到对应评价点的加速度 RMS 值,如表 10 所示,与仿真分析结果对比发现,振动台试验的结果明显偏大,两者结果的吻合性不好。

表 10 随机振动试验 3 评价点的加速度响应 RMS

评价点编号	试验 RMS/(m/s ²)	仿真 RMS/(m/s ²)
1	2.475	1.893
2	2.461	1.799
3	2.579	1.505

经过对振动台输入信号的统计,振动台实际输入的加速度 RMS 值为 6.246 m/s²,要高于设计值的 4.51 m/s²,基于此,统计振动台随机试验的加速度传递率并与仿真结果对比,结果如表 11 所示。

表 11 随机振动试验与仿真加速度传递率对比

评价点编号	试验传递率/%	仿真传递率/%
1	39.63	41.97
2	39.40	39.89
3	41.29	33.37

在表 11 中可以看出,仿真与试验的结果比较接近,加速度的传递率都保持在了 40% 左右。

4 结论

为了验证光学测量设备的航空运输性能,本文首先建立了设备的有限元模型,基于模态修正理论,建立了与模态试验结果保持一致的有限元模型。

使用建立的有限元模型进行了频率响应分析,在 Z 向载荷激励时,结构在 24 Hz 时出现共振峰,对加速度的放大在 2-3 倍之间;又进行了随机振动响应分析,在 3 个关键部位的评价点加速度传递率最大为 41.97%,均方根值最大为 1.893 m/s^2 ,据此判断设备整体的振动量级较小,对喷气式运输机的宽带随机振动激励有较为明显的衰减。

最后,在振动台上进行了正弦扫频试验和随机振动试验,试验结果和仿真分析结果基本保持一致,再次说明了设备在典型的喷气式运输机宽带随机振动载荷下的航空运输可行性。

参考文献

- [1] 苏德辉. 装备运输振动试验设计及测试效果分析[J]. 现代制造技术与装备, 2020, 56(11): 40-43.
- [2] Park Jongmin, Choi Sangil, Jung Hyun Mo. Measurement and analysis of vibration levels for truck transport environment in Korea [J]. Applied Sciences, 2020, 10(19): 6754.
- [3] 杨楠, 薛帆, 张小峰. 精密电子设备运输预警系统实现[J]. 雷达与对抗, 2020, 40(3): 47-51.
- [4] 徐波涛, 刘玉刚, 方志开, 等. 运输包装箱的多载荷减振设计研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(8): 45-50.
- [5] 赵世宜, 吴娟, 霍东芳, 等. 军用物资航空运输振动冲击环境条件研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(2): 21-24.
- [6] 黄锐彬, 蔡春波, 程珺斌. 大型装备海洋运输过程中的振动及倾角监测方法研究[J]. 中国水运, 2021(1): 87-89.
- [7] 钱义先, 高晓东, 梁伟. 高分辨率航空相机隔振系统动力学特性分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2008, 31(3): 24-27.
- [8] 李广寅, 沈金梅, 刘永新. 大型精密仪器的隔震运输设计[J]. 仪器仪表与分析监测, 1997(3): 28-32+44.
- [9] 孙忠涛, 车英. 振动试验台夹具设计及频率响应特性研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2010, 33(2): 61-63+67.
- [10] Hosseinlou Farhad. Structural model updating of jacket platform by control theory using vibration measurement approach [J]. China Ocean Engineering, 2021, 35(1): 96-106.
- [11] 黄树强. 基于贝叶斯理论和子集模拟优化的有限元模型修正方法及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 23-45.