

干涉测量框架结构设计及稳定性分析

周 烽 王 辉 王 丽 萍

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要 干涉测量的面形重复精度一定程度上依赖于测量框架结构的稳定性,从测量框架高稳定性的使用要求出发,对测量框架的机械结构进行了设计。在此基础上针对检测框架在随机振动下的稳定性问题,建立了检测框架的有限元模型,以实际测量的随机振动速度功率谱密度(PSD)为激励,运用 ANSYS 有限元分析软件中的随机振动分析模块,对该结构的随机振动响应进行了分析计算。通过分析计算得出测量框架在随机振动下的稳定性为 0.5144 nm,实验测量出 5 s 内的稳定性为 0.653 nm,二者基本吻合。分析表明,测量框架的结构设计以及振动环境满足稳定性的指标要求。

关键词 测量;稳定性分析;干涉测量框架;有限元分析;随机振动分析

中图分类号 TH122 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1108007

Design and Stability Analysis of Interferometry Frame

Zhou Feng Wang Hui Wang Liping

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

Abstract Repeatability of interferometry depends on the stability of metrology frame to a certain extent, according to the requirements of stability, structure of the frame is designed. Aiming at the stability problem of high precision metrology frame caused by random vibration, the finite element model of a metrology frame is established, the power spectral density (PSD) measured on the fixed platform is used as the excitation, and then the random vibration response of the frame is analyzed with the PSD module of ANSYS. The analyzed result of stability is 0.5144 nm, and the experimental value is 0.653 nm, they are in good agreement, and the structure of frame and the actual vibration condition meet the stability requirements of metrology frame.

Key words measurement; stability analysis; interferometry frame; finite-element analysis; random vibration analysis

OCIS codes 120.3180; 120.3940; 120.7280

1 引 言

用干涉测量方法检测光学元件面形,其检测精度的提高一定程度上受限于干涉测量框架的结构稳定性。要实现高稳定测试环境,一方面可以通过提高干涉测量框架的刚度,另一方面可以通过隔离外界振动的办法来实现。通过公差分配,要实现深亚纳米量级的面形重复性,干涉测量框架的(5 s 内)稳定性要优于 2 nm,因此,在框架结构设计过程中有必要对其稳定性进行评估,使得框架结构设计能够

满足指标要求。

评估框架稳定性精度的方法有两种,一种是直接测试检测框架的动力响应;另一种是对框架模型输入相应激励仿真分析求解输出响应,并且可以根据分析结果对结构进行优化设计,该方法已经成为提高产品可靠性的关键技术手段^[1,2]。本文采用的是有限元分析的方法,建立检测框架的有限元模型,在分析其固有模态的基础上,以实际测量的振动速度功率谱密度(PSD)为激励,利用 ANSYS 随机振

收稿日期: 2012-06-10; **收到修改稿日期**: 2012-07-17

基金项目: 国家科技重大专项基金资助课题。

作者简介: 周 烽(1985—),男,硕士,研究实习员,主要从事光学元件机械结构方面的研究。

E-mail: zhoufeng0565@sohu.com

动模块仿真得出框架结构体的位移响应统计量^[3], 以此来评估框架的稳定性, 进而对框架的结构设计和振动环境给出评估参考。

2 干涉测量框架结构设计

干涉测量框架是用于光学元件的面形检测, 框架结构分为上、下两层平台, 干涉仪放置于工件台上, 可以根据测量需求上下移动, 光学元件及其调整机构置于固定平台上, 如图 1 所示。

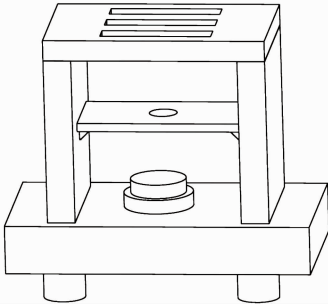


图 1 检测框架结构示意图

Fig. 1 Structure of metrology frame

结构设计过程中, 材料选择方面应予以考虑, 除了材料的刚性, 还要保证材料的低热膨胀系数, 以消减温度变化对检测结果的影响。经综合考虑, 检测框架的龙门框架、工件台和固定平台均选用花岗石材料。在达到纳米量级的高精度检测中, 环境温度水平的变化对面形具有重要的影响^[4], 花岗石材料的热膨胀系数小, 因此可以很好地消减环境温度变化的影响, 同时还具有质量轻、刚度好等优点。调整机构选用的铸铁, 附属连接件的材料选用 45# 钢。

为了保证结构的高稳定性, 在零部件连接方面, 被检光学元件与调整台之间、干涉仪与工件台之间以及工件台与龙门框架之间均为传统的刚性连接, 以消除接触薄弱环节其对框架稳定性的影响。经分析, 对框架稳定性的影响主要集中于两个平台在随机振动影响下垂直方向上的相对位置变化, 因此, 为了保证检测框架的高稳定性, 整个框架固定于隔振装置上, 其隔振水平达到 VC-E 水平。

3 测量框架稳定性分析

测量框架稳定性分析是利用 ANSYS 对框架结构进行动力学仿真分析, 首先对测量框架的模态进行分析, 在此基础上进行了随机振动分析, 通过分析计算得出了测量框架在随机振动影响下的稳定性。

3.1 测量框架模型及激励

分析计算时为了保证模型的准确性, 仿真模型

和实验时采用的模型一致, ANSYS 软件建模时龙门框架及工件台选用花岗石材料, 工件台与滑块之间的连接件材料为 45# 钢, 光学元件调整平台材料选用铸铁。为了分析能在 ANSYS 中顺利进行, 在不影响框架结构形式的前提下, 对原模型进行了合理的简化, 其基本原则是不降低模型的刚度^[5], 图 2 为简化模型以及网格划分图。仿真分析中所选模型材料的参数见表 1。

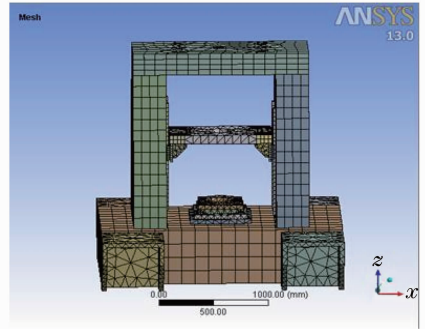


图 2 检测框架模型及网格划分图

Fig. 2 Grid generation figure of metrology frame

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

| Material | E | γ | ρ |
|-----------|----------------------|----------|--------|
| Granite | 8.1×10^{10} | 0.129 | 3000 |
| 45# | 2.0×10^{11} | 0.3 | 7800 |
| Cast iron | 1.1×10^{11} | 0.28 | 7200 |

模态分析是随机振动有限元分析的重要前提, 用于确定设计结构或机械部件的固有频率和振型, 是结构设计中的重要参数^[6]。模态分析是一个纯粹的线性分析, 当结构中有非线性因素时, 应该进行近似线性化处理。在后续的随机振动分析时, 各阶模态均以参与质量来表征其对分析结果的影响, 通常认为参与质量的总和达到 80% 以上进行随机振动分析为最佳。经分析知, 需选取 30 阶模态, 此时框架结构在 X、Y、Z 三个方向上的总参与质量分别为 91.4%、83.9%、82.1%。

测量框架的低阶模态对框架的影响起着重要的作用^[7], 测量框架的 1、2、5 阶模态分别对应 X、Y、Z 三个方向的振型, 其变形云图如图 3 所示。根据模态分析结果可以看出, 三个方向的激励对结果的影响相当, 分析时应输入三个方向的激励。

ANSYS 随机振动谱分析是一种定性分析, 分析的输入、输出数据都只代表它们在一特定值时发生的可能性^[8], 其中输入激励功率谱密度有位移功率谱密度、速度功率谱密度、加速度功率谱密度、力功率谱密度等形式^[9]。本文分析计算的激励输入为

速度功率谱密度,是通过振动测试仪所测得的,测量时测试仪的传感器放置于经过隔振后的固定平台上,从而得到固定平台的速度功率谱密度,测试方向为 X 向(水平长方向)、Y 向(水平短方向)、Z 向(垂

直方向),测试频率范围为 0~100 Hz。分析时,把 X 向、Y 向、Z 向激励的速度功率谱施加于框架的固定平台上。检测框架所施加的 0~100 Hz 速度功率谱密度曲线如图 4 所示。

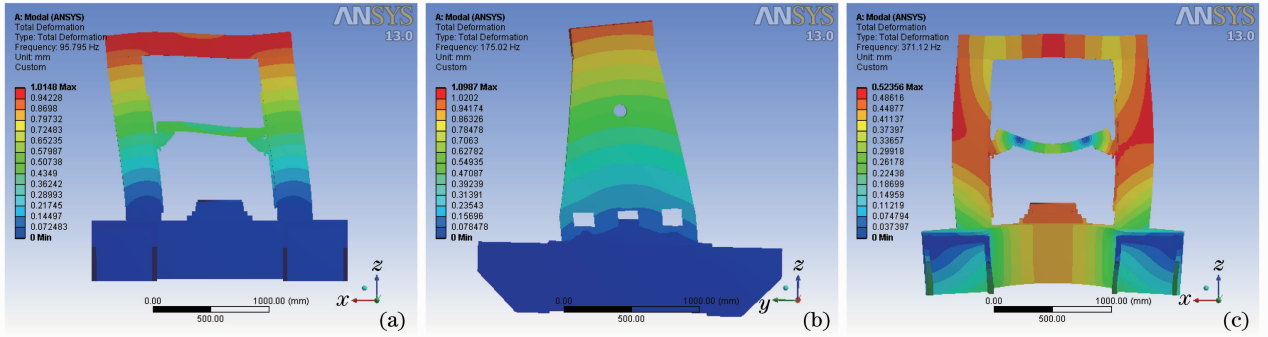


图 3 (a) 1、(b) 2、(c) 5 阶模态变形云图

Fig. 3 Mode contours of the (a) first, (b) second and (c) fifth

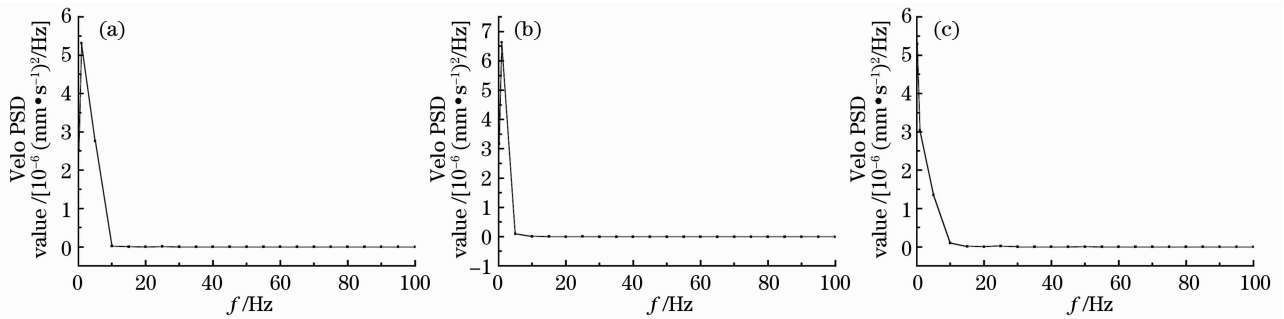


图 4 固定平台随机振动功率谱密度。(a) X 向;(b) Y 向;(c) Z 向

Fig. 4 Random vibration PSD of fixed platform. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

3.2 测量框架动态响应及稳定性

随机振动谱分析结果是该激励条件下的概率统计值,已知载荷的功率谱密度函数,有限元软件可以求出结构上某点的加速度、位移、应力张量等概率统计特性^[10,11],可以有效预示结构关键部位在力学环境条件下的响应,为结构顺利通过力学环境鉴定试验提供理论依据^[12]。

本文随机振动谱分析的目的是求取检测框架受激励影响下,工件台与固定平台之间垂直方向的相对变化量,所以在分析结果中提取了检测框架在输入激励影响下 Z 向的位移变化量,如图 5 所示。

通过 ANSYS 软件中的探测器工具在模型中工件台上靠近通光孔附近提取一点,其位移变化量 ΔZ_1 为 5.707×10^{-7} mm,在光学元件调整台上表面对应位置提取一点,其位移变化量 ΔZ_2 为 5.626×10^{-8} mm,如图 5 所示。经计算求得在随机振动的影响下测量框架的稳定性为 $\Delta Z_1 - \Delta Z_2 = 5.144 \times 10^{-7}$ mm。

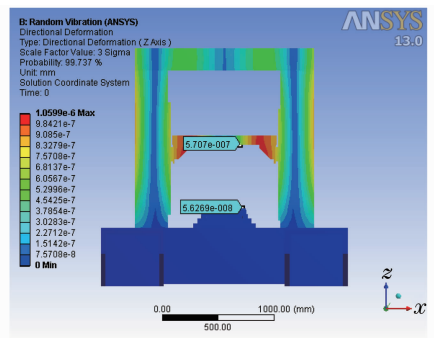


图 5 检测框架 Z 向变形云图

Fig. 5 Z direction contour of metrology frame

3.3 实验及结果

在分析计算的基础上,通过实验,对检测框架的稳定性进行了测量,测量点与分析计算时选取的一致,测量工具为双频激光干涉仪,其测试频率为 100 Hz,测试时间为 5 s,测量数据曲线如图 6 所示。经计算得出测量框架的稳定性为 6.53×10^{-7} mm。

与实际测量值相比,通过 ANSYS 随机振动谱分析计算的结果有微小误差,主要的误差源有两个,

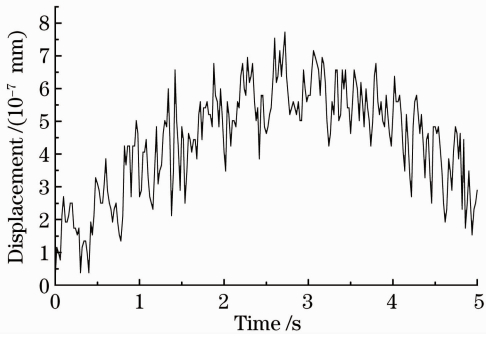


图 6 两平台相对位移变化曲线

Fig. 6 Comparative displacements of the two platforms

一是分析计算时对模型进行了简化,由于简化假定、边界条件的近似性、某些物理参数的误差等原因导致分析计算存在一定的误差^[13~15]。二是由于测量值为亚纳米级别,环境的其他因素(气流扰动、噪声等)会对双频激光干涉仪的测量结果产生细微的影响。比较实际测量值与分析计算结果,表明分析计算过程是正确的。

4 结 论

本文根据测量框架的功能要求及高稳定性要求,对干涉测量框架及其调整机构进行研制,在满足功能要求的基础上,利用有限元仿真软件 ANSYS 中的随机振动谱分析模块对测量框架在随机振动影响下的稳定性进行了分析。分析计算得出的干涉测量框架结构的稳定性为 0.5144 nm,实际通过双频激光干涉仪测量值为 0.653 nm,两者基本吻合。实验表明分析计算过程是正确的,其对框架结构设计具有一定的指导意义,为设计过程中指标要求提供重要依据,同时也表明框架的结构设计及减振装置所提供的振动环境满足检测框架稳定性(2 nm)的要求。

参 考 文 献

- 1 Niu Xiaoming. Application of CAE in the design of optical and mechanical structure for space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, **7**(6): 23~28
牛晓明. CAE 技术在空间相机光机结构设计中的应用[J]. *光学精密工程*, 1999, **7**(6): 23~28
- 2 Dong Deyi, Xin Hongwei, Yang Liwei *et al.*. Random vibration analysis and its verification for large aperture mirror component [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, **30**(11): 74~78
董得义, 辛宏伟, 杨利伟等. 大孔径反射镜组件随机振动响应分析与试验[J]. *振动与冲击*, 2011, **30**(11): 74~78
- 3 Feng Bin, Zhou Yi, Zhang Junwei. Analysis on ground random vibration response of large-scale precision mirror mount [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(3): 356~360

- 冯 斌,周 忆,张军伟. 大型精密镜架地面随机微振动响应分析[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(3): 356~360
- 4 Chen Hua, Shi Zhenguang, Sui Yongxin *et al.*. Thermal deformation analysis of optical surfaces caused by environmental temperature during interferometric testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112007
陈 华,史振广,隋永新等. 干涉检测中环境温度引起的镜面变形分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112007
- 5 Zhang Junwei, Wang Xiao, Lin Donghui *et al.*. Analysis of the effect of the large-aperture mirror mount parameters on its dynamic response[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0112010
张军伟,王 道,林东晖等. 大口径光栅拼接架动力响应控制分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0112010
- 6 Yu Xudong, Long Xingwu, Tang Jianxun. Random vibration analysis of mechanically dithered ring laser gyroscope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(11): 1760~1766
于旭东,龙兴武,汤建勋. 机械抖动激光陀螺的随机振动响应分析[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(11): 1760~1766
- 7 Zhang Junwei, Chen Wei, Zhou Yi *et al.*. Analysis of the effect of the large-aperture mirror mount parameters on its dynamic response[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s116005
张军伟,陈 伟,周 忆等. 大口径反射镜架特征参数对其动态响应影响分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s116005
- 8 Liu Shihua, Zhao Desheng, Tan Tianshui *et al.*. Application of ANSYS in random vibration analysis of steel-truss structure[J]. *Mechanical*, 2004, **31**(4): 54~56
刘士华,赵德胜,谭天水等. ANSYS 在钢架结构随机振动分析中的应用[J]. *机械*, 2004, **31**(4): 54~56
- 9 M. D. Nickerson, R. L. Meeks, G. J. Pentland. Finite element analysis of the Gemini laser launch telescope subjected to random vibration[C]. *SPIE*, 2004, **5490**: 1105~1116
- 10 Guo Wancun, Wu Qingwen, Liu Hongwei *et al.*. Engineering method based on static strength theory for random vibration[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2012, **34**(1): 31~36
郭万存,吴清文,刘宏伟等. 用静强度理论考查结构随机振动响应的工程分析方法[J]. *机械强度*, 2012, **34**(1): 31~36
- 11 D. E. Neulann. Introduction of Random Vibration and Spectrum Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 1980
D. E. Neulann. 随机振动与谱分析概论[M]. 北京:机械工业出版社, 1980
- 12 Pan Dahu, Wu Qingwen, Liu Hongwei *et al.*. Simulation analysis for random vibration of the primary mirror subassembly in a spaceflight camera[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2011, **33**(2): 290~295
潘大虎,吴清文,刘宏伟等. 航天相机主镜组件随机振动仿真分析[J]. *机械强度*, 2011, **33**(2): 290~295
- 13 Han Zengyao, Qu Guangji. Wide-band random vibration response prediction study of the spacecraft structures[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2002, **2**(2): 24~30
韩增尧,曲广吉. 航天器宽带随机振动响应分析[J]. *中国空间科学技术*, 2002, **2**(2): 24~30
- 14 Mao Guobin. Random vibration response prediction of some spacecraft attitude-control thruster set[J]. *Aerospace Shanghai*, 2007, (3): 54~57
毛国斌. 某航天器姿态控制机组随机振动响应分析[J]. *上海航天*, 2007, (3): 54~57
- 15 Xu Xiaocheng, Wang Chenghua, Han Zengyao. Study on random vibration response analysis of reentry vehicle complex structure [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2002, **29**(3): 1~5
徐孝诚,王成华,韩增尧. 载人飞行器复杂结构随机振动响应分析研究[J]. *强度与环境*, 2002, **29**(3): 1~5