

文章编号 1004-924X(2007)11-1760-07

机械抖动激光陀螺的随机振动响应分析

于旭东,龙兴武,汤建勋

(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:对机抖激光陀螺进行了随机振动响应分析,以考察其承受动力学环境的能力。介绍了基础激励下结构随机振动响应的分析方法,利用有限元分析软件 ANSYS 建立了机抖激光陀螺的有限元模型并进行了模态分析,与试验结果对比表明,计算误差 $<7\%$,验证了模型的合理性和精确性。对机抖激光陀螺的轴向和横向随机振动激励进行了有限元计算,对轴向激励下随机振动的试验结果和有限元分析结果进行了对比,通过分析对结构加速度响应的功率谱密度等统计量,研究了随机振动试验中机抖激光陀螺结构的随机响应,指出了现有结构设计的薄弱环节,提出了改进意见,为机抖激光陀螺的研发和设计提供了参考依据。

关键词:激光陀螺;随机振动;有限元分析;模态分析

中图分类号:V241.558;U666.1 **文献标识码:**A

Random vibration analysis of mechanically dithered ring laser gyroscope

YU Xu-dong, LONG Xing-wu, TANG Jian-xun

(College of Photo-electric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to research the performance of mechanically dithered Ring Laser Gyroscope(RLG) against the dynamic environment, the random vibration analysis is presented. The analysis method of structural random vibration response by the base excitation is described. The finite element model of mechanically dithered RLG is established and its modal analysis is performed by the finite element software ANSYS. It has been proved by the experiments that the model is reasonable and accurate, and the calculate error is less than 7% . The responses on axial and transversal random vibrations of mechanically dithered RLG are analyzed with the finite element model and the experiments and analysis results are compared. By analyzing the Power Spectrum Density (PSD) of acceleration response, the random vibration characteristic of mechanically dithered RLG is assessed. By analyzing the weakness of the present structure, an anti-vibration suggestion is put forward, which is useful to improve the structure design and reform for the further development of RLG.

Key words: ring laser gyroscope; random vibration; finite element analysis; modal analysis

收稿日期:2007-05-31;修订日期:2007-08-20.

基金项目:国防科技预研基金资助项目(No. 51309050301)

1 引言

激光陀螺具有结构简单、体积小、重量轻、精度高等优点,是捷联惯导系统的理想器件,已大量成功地运用于航空、航天、航海以及地面定位与定向等领域^[1-2]。但是,许多应用场合尤其是军事领域,环境十分恶劣,而机抖激光陀螺存在活动的机械部件,机械结构的振动特性对陀螺各方面带来的影响严重制约了陀螺的应用和精度的进一步提高,因此,在研发和生产过程中按照各种型号的应用要求进行振动试验,找出消除或减小环境随机振动对激光陀螺性能影响的办法是非常必要的。

本文针对机抖激光陀螺振动台激励下的随机振动试验状况,介绍了基础激励下随机振动响应的分析方法和途径,利用有限元分析软件 ANSYS,对机抖激光陀螺及安装盒的有限元模型进行了模态分析和随机振动分析。通过有限元计算,研究了机抖激光陀螺经受此动力学环境的能力,找出了抖动结构及安装盒设计中的薄弱环节,指出了机抖激光陀螺的各阶谐振放大了基础随机振动,但可通过改进结构以提高 2、3 阶谐振频率和采用减震器削弱基础随机振动的方法来减少基础随机振动对机抖激光陀螺的影响,为激光陀螺抖动结构和安装盒的设计以及提高振动环境下的抗过载能力提供了参考。

2 随机振动响应分析的基本原理

2.1 基础激励随机振动响应的分析方法

激光陀螺随机振动试验中机械结构受到的随机振动通常认为是线性、平稳、各态历经的随机物理过程。线性结构系统受到基础随机振动激励,结构的系统动力学方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ff} & \mathbf{M}_{fr} \\ \mathbf{M}_{rf} & \mathbf{M}_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_f \\ \ddot{\mathbf{u}}_r \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ff} & \mathbf{C}_{fr} \\ \mathbf{C}_{rf} & \mathbf{C}_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{u}}_f \\ \dot{\mathbf{u}}_r \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ff} & \mathbf{K}_{fr} \\ \mathbf{K}_{rf} & \mathbf{K}_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_f \\ \mathbf{u}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 表示系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$ 、 \mathbf{u} 表示加速度、速度和位移向量;角标 f 代表自由,r 代表约束。

自由位移 \mathbf{u}_f 可以分解为伪静态位移 \mathbf{u}_s 和动态位移 \mathbf{u}_d 两部分:

$$\mathbf{u}_f = \mathbf{u}_s + \mathbf{u}_d, \quad (2)$$

其中伪静态位移可由消去方程(1)左侧的前两组,忽略 $\ddot{\mathbf{u}}_s$ 、 $\dot{\mathbf{u}}_s$ 并用 \mathbf{u}_s 代替 \mathbf{u}_f 得:

$$\mathbf{u}_s = -\mathbf{K}_{ff}^{-1} \mathbf{K}_{fr} \mathbf{u}_r, \quad (3)$$

将方程(2)、(3)代入方程(1)并忽略阻尼的影响,可以得到:

$$\mathbf{M}_{ff} \ddot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{C}_{ff} \dot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{K}_{ff} \mathbf{u}_d \approx \mathbf{F} - (-\mathbf{M}_{ff} \mathbf{K}_{ff}^{-1} \mathbf{K}_{fr} + \mathbf{M}_{fr}) \ddot{\mathbf{u}}_r. \quad (4)$$

对于基础激励而言, $\mathbf{F} = \mathbf{0}$, $\ddot{\mathbf{u}}_r$ 、 $\dot{\mathbf{u}}_r$ 、 \mathbf{u}_r 可用基础激励加速度 $\ddot{\mathbf{u}}_g$ 、基础激励速度 $\dot{\mathbf{u}}_g$ 、基础激励位移 \mathbf{u}_g 代替,则有

$$\mathbf{M}_{ff} \ddot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{C}_{ff} \dot{\mathbf{u}}_d + \mathbf{K}_{ff} \mathbf{u}_d = \mathbf{M}_{ff} \mathbf{K}_{ff}^{-1} \mathbf{K}_{fr} \ddot{\mathbf{u}}_g - \mathbf{M}_{fr} \ddot{\mathbf{u}}_g, \quad (5)$$

上式右侧相当于基础激振力。对上式符号做一些简化处理,确定性结构在基础激励下的动力学方程表示为:

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{M} \mathbf{K}^{-1} \mathbf{K}_g \ddot{\mathbf{u}}_g - \mathbf{M}_g \ddot{\mathbf{u}}_g, \quad (6)$$

其中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 表示结构非约束自由度的 $n \times n$ 阶质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \mathbf{M}_g 、 \mathbf{K}_g 表示与约束自由度相关的 $n \times m$ 阶质量、刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}$ 、 $\dot{\mathbf{u}}$ 、 \mathbf{u} 表示非约束自由度的动态加速度、动态速度和动态位移列阵; $\ddot{\mathbf{u}}_g$ 表示基础激励加速度。

2.2 随机振动响应分析

随机激励振动响应的统计特性可通过频响函数计算,即先由频率响应分析得到结构的频响函数(传递函数) $H(\omega)$,再求得响应的功率谱密度。

根据线性平稳随机振动理论^[3-4],若 $H_i(\omega)$ 为激励 $x_i(\omega)$ 对于响应 $y_i(\omega)$ 的传递函数,即

$$y_i(\omega) = H_i(\omega) x_i(\omega). \quad (7)$$

那么响应 $y_i(\omega)$ 的功率谱 $S_{y_i}(\omega)$ 与输入功率谱密度 $S_{x_i}(\omega)$ 的关系为:

$$S_{y_i}(\omega) = |H_i(\omega)|^2 \cdot S_{x_i}(\omega). \quad (8)$$

若多个激励 $x_1(\omega)$ 、 $x_2(\omega)$ 、 $x_3(\omega) \cdots$ 互相独立不相关,则系统的总响应功率谱密度 $S(\omega)$ 等于各激励引起的系统响应功率谱密度之和。

$$S_y(\omega) = \sum S_{y_i}(\omega) = \sum |H_i(\omega)|^2 \cdot S_{x_i}(\omega). \quad (9)$$

3 机抖激光陀螺有限元模型及模态分析

3.1 机抖激光陀螺有限元模型

由于陀螺、抖轮、安装盒形状比较复杂,决定

其实际结构的参数很多,利用 ANSYS 建模时,要分析结构的薄弱环节,确定关心的部位,对实际结构进行适当简化。通过分析发现,安装盒四壁和陀螺腔体上附着的输出镜、腔平面镜和阴、阳极等细微结构对陀螺的振动特性影响较小,故将陀螺

和安装盒的四壁进行适当简化,抖轮结构和安装盒的支柱按照实际情况精确计算,以保证计算的准确性和精度,机抖激光陀螺及安装盒的简化示意图如图 1 所示。

根据实际情况,对结构的各个部件指定材料属性(包括弹性模量、密度、泊松比等),对机抖激光陀螺结构进行网格划分,有限元模型如图 2 所示。

3.2 模态分析

模态分析用于确定设计结构或机械部件的固有频率和振型,是动力载荷结构设计中的重要参数。得到模态频率值和特征向量后,根据给定的基础振动功率谱密度函数计算每个振动模式每一自由度方向的模态响应幅值。将模态响应幅值作用于模态特征向量,可以得到每个模态每一自由度方向的响应量。将各个模态下的响应叠加,就得到了系统在谱激励下的响应,因此模态分析是随机振动分析的基础。本文给出了结构的前 10 阶模态,1~4 阶振型如图 3 所示,计算结果如表 1 所示。

表 1 机抖激光陀螺模态分析结果和试验测试结果

Tab.1 Results of model analysis and experimental measurements for mechanically dithered RLG

阶数	模态分析频率 (Hz)	实测频率 (Hz)	相对误差	对应振型
1	395	374	5.61%	陀螺和抖轮绕中心轴的扭转运动
2	762	724	5.25%	陀螺和抖轮相对于安装盒的水平俯仰运动
3	783	735	6.53%	陀螺和抖轮相对于安装盒的水平俯仰运动
4	1 138	1 084	4.98%	陀螺和抖轮相对于安装盒的竖直运动
5	1 243	1 187	4.72%	陀螺和抖轮相对于安装盒的平动
6	1 311	1 245	5.30%	陀螺和抖轮相对于安装盒的平动
7	1 866			安装盒四壁的弯曲运动
8	2 456			安装盒四壁的弯曲运动
9	2 576			安装盒四壁的弯曲运动
10	2 615			安装盒四壁的弯曲运动

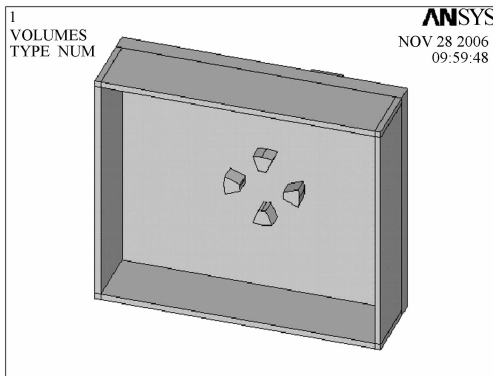
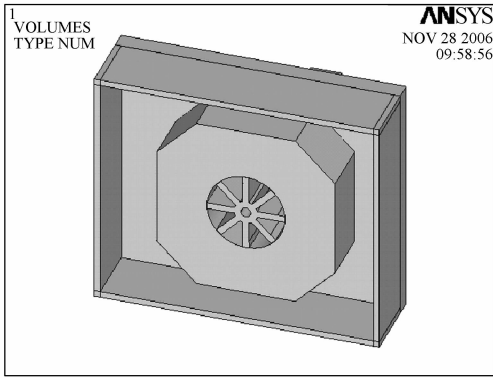


图 1 机抖激光陀螺及安装盒简化示意图

Fig.1 Schematics of mechanically dithered RLG and mounting case

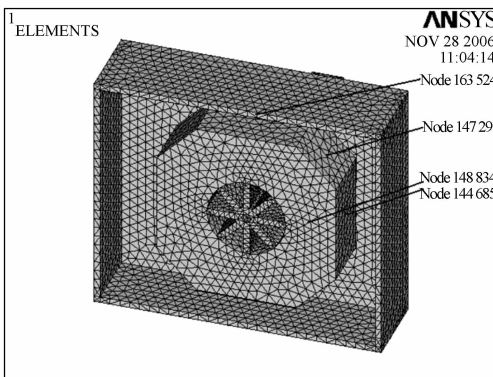
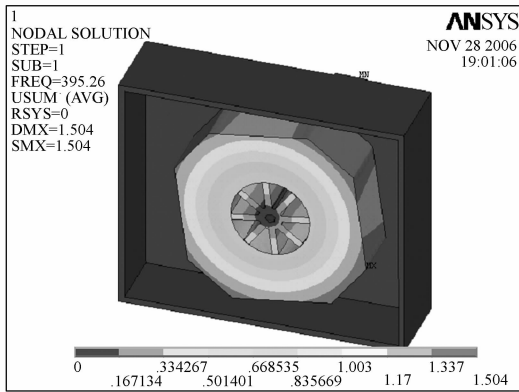


图 2 机抖激光陀螺结构有限元模型

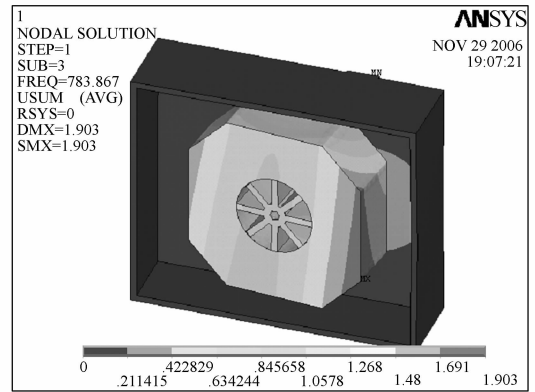
Fig.2 Finite element model of mechanically dithered RLG

图 3(a)的结构运动形式是陀螺和抖轮绕中心轴的往复扭转运动,模态分析中 1 阶模态是产生抖动偏频的机械运动,实际机抖激光陀螺系统就是利用 1 阶模态的往复抖动来消除闭锁的。因此 1 阶模态的谐振频率的大小和振动幅度都将直接影响陀螺的精度和性能。在受到基础随机振动时,这一机械运动带来的基础随机激励放大是不可避免的。从图 3(b)~(d)的各阶模态中可以看出,在各阶谐振频率处,陀螺腔体的变形是不均匀的,在这些谐振频率处的基础随机振动可以激励系统的机械结构产生谐振,使激光陀螺腔体产生不同程度的变形。当基础随机振动严重时,甚至使激光陀螺的光路产生失谐,从而严重影响激光陀螺的性能。



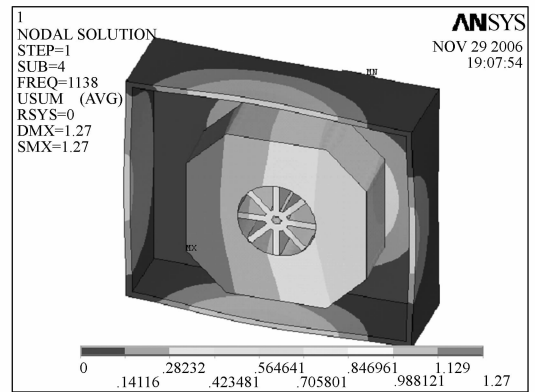
(a)陀螺和抖轮绕中心轴的扭转运动

(a)Yawing rotation of RLG and dither mechanism to the central axis



(c)陀螺和抖轮相对于安装盒的水平俯仰运动

(c)Horizontal pitch of RLG and dither mechanism relative to mounting case

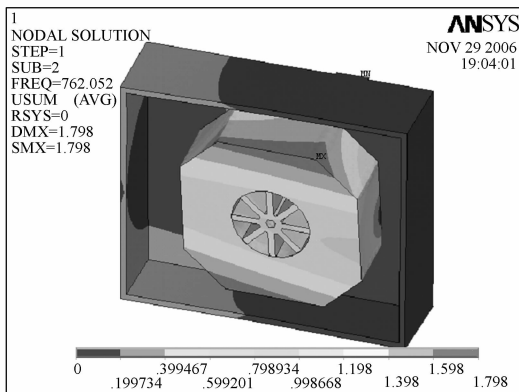


(d)陀螺和抖轮相对于安装盒的竖直运动

(d)Vertical motion of RLG and dither mechanism relative to mounting case

图 3 机抖激光陀螺典型振型

Fig. 3 Typical models of mechanically dithered RLG



(b)陀螺和抖轮相对于安装盒的水平俯仰运动

(b)Horizontal pitch of RLG and dither mechanism to mounting case

表 1 给出了机抖激光陀螺前 10 阶模态的固有频率和振型,其中第 1 阶模态就是抖动模态,有限元分析得到的 1 阶模态频率为 395 Hz,与机抖激光陀螺的抖动频率 374 Hz 很接近,其他各阶频率与机抖激光陀螺实测频率的相对误差在 5% 左右,说明所建有限元模型是合理的。但有限元模态分析结果普遍偏大,原因是忽略了陀螺上输出镜、腔平面镜、阴阳极等结构所引起的陀螺转动惯量的减少。

从表 1 还可以看出,部分频率值很接近,这是由陀螺和抖轮结构的对称性引起的,但又不完全相同是由安装盒底面约束的不对称性和有限元分析中自由划分网格引起的。从机抖激光陀螺模态

分析中可以看出,较低振动频段的振动模态为陀螺和抖轮的运动,较高振动频段的振动模态为安装盒四壁的运动。

4 机抖激光陀螺结构随机响应分析

4.1 随机振动激励的载荷谱

机抖激光陀螺受到的随机振动激励为安装盒底面 3 个约束位置的加速度激励,加速度激励的功率谱密度谱型如表 2 所示。

表 2 机抖激光陀螺随机振动的加速度激励谱

Tab. 2 Acceleration exciting spectrum of random vibration for mechanically dithered RLG

频率范围(Hz)	功率谱
20~80	+3 db/Oct
80~350	$0.1 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-4} / \text{Hz}$
350~2 000	-6 db/Oct

4.2 机抖激光陀螺结构随机响应计算

确定作用在机抖激光陀螺上的随机载荷,计算在随机载荷作用下陀螺的结构响应,根据随机载荷响应进行结构设计和优化以及结构可靠性评估等是机抖激光陀螺机械结构设计的重要任务。在随机激励下,陀螺及安装盒上各关键位置响应的功率谱密度可以用来衡量其随机振动的响应情况。因此,机抖激光陀螺结构的随机响应分析对于缩短研制周期、降低研制成本以及保证结构可靠性有重要的意义。

在有限元分析中,设定系统的阻尼比为 5%,对安装盒底面的约束位置分别施加轴向和横向基础激励,考察陀螺和安装盒关键位置的响应情况。节点 147 291 位于陀螺侧壁的输出镜或腔平面镜处,主要考察基础随机振动对合光片和腔平面镜的影响;节点 144 685 位于陀螺侧壁的阴极处,主要考察基础随机振动对侧壁的影响;节点 148 834 位于陀螺光学谐振腔的光路上,主要考察基础随机振动对光学谐振腔的影响;节点 163 524 位于安装盒的外壁的中间位置,主要考察基础随机振动对安装盒侧壁的影响,具体位置如图 2 所示。在模态分析的基础上,进行随机振动分析,机抖激

光陀螺轴向和横向激励下的加速度响应功率谱密度分布如图 4、5 所示。

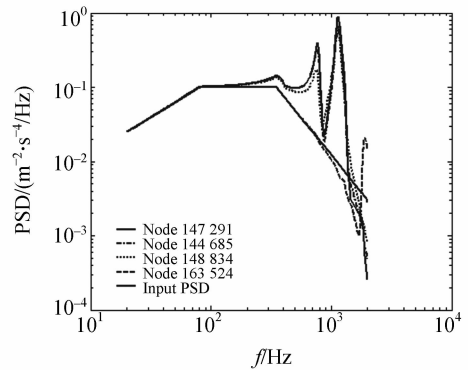


图 4 机抖激光陀螺轴向激励下加速度响应的功率谱密度

Fig. 4 Power spectral density of acceleration response excited on axial direction for mechanically dithered RLG

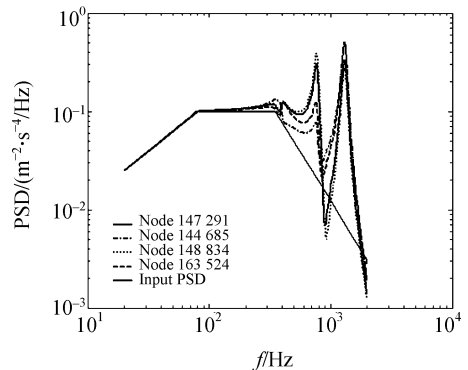


图 5 机抖激光陀螺横向激励下加速度响应的功率谱密度

Fig. 5 Power spectral density of acceleration response excited on transversal direction for mechanically dithered RLG

4.3 试验测试

为了验证有限元分析中激光陀螺各阶模态的随机振动加速度响应情况,利用专用的测试系统对某型号机抖激光陀螺进行了随机振动试验。将加速度传感器贴于陀螺腔体的上表面,位于光路的上方,检测了机抖激光陀螺在轴向激励下陀螺腔体上表面随机振动的加速度响应情况,对试验测试结果和有限元分析结果进行了对比,结果如图 6 所示。

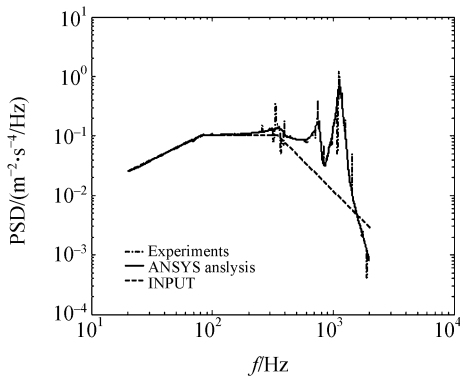


图 6 试验测试和有限元分析得到的加速度响应的功率谱密度对比结果

Fig. 6 Comparison of power spectral density of acceleration response from experiments and finite element analysis

4.4 结果分析

(1)从图 4、5 可知,节点 148 834 处产生的加速度响应略小于节点 147 291、144 685 处,说明基础随机振动对光学谐振腔的影响要略小于对陀螺侧壁和镜片的影响。对于轴向激励下结构的加速度响应,安装盒外壁的加速度响应几乎和激励谱一致,说明安装盒四壁没有将基础的轴向随机振动放大。

(2)从图 6 可以看出,随机振动试验得到的各阶谐振频率处的加速度响应与有限元分析得到的结果基本一致,说明了有限元分析的正确性和可靠性。但结果也存在一定的误差,这一方面是由于振动实验中陀螺腔体贴有加速度传感器,一定程度上影响了系统的测试精度,同时测试系统存在一定的系统误差;另一方面由于在有限元随机振动分析中,结构的阻尼系数的设定存在一定的误差,无法与实际系统的阻尼系数完全一致,另外在机抖激光陀螺建模时,略去了一些细节,也会带来一定的误差。

(3)机抖激光陀螺在频率 395、762、783、1 138、1 243、1 311 Hz 左右产生了较明显的加速

度响应,将基础的随机振动放大。其中 1 138、1 243、1 311 Hz 处的响应剧烈,使机抖激光陀螺的工作性能变坏,严重制约了机抖激光陀螺的应用。

(4)从模态分析和随机振动响应分析可以看出,陀螺产生较大加速度响应的频率是机抖激光陀螺的前几阶模态的谐振频率。为了减少基础振动对机抖激光陀螺的影响,可以在安装盒上安装减震器,削弱基础振动对陀螺的影响。实际上,减震器在较高频率处($>1\ 000$ Hz)的减震效果明显,所以机抖激光陀螺在 1 138、1 243、1 311 Hz 处的加速度响应可以利用减震器削弱基础振动的影响,而 762、783 Hz 处的加速度响应则需要采用其它的方法进行改进。

实验还表明,可以通过改进结构的设计,提高 2、3 阶谐振频率,使其达到 1 000 Hz 以上,利用减震器削弱基础振动的影响。通过分析发现:提高 2、3 阶谐振频率,可以增加安装盒的厚度和改变安装盒的约束位置,减少基础振动的传递;改变抖轮与安装盒的连接方式,改变安装盒支柱的设计,提高安装盒与抖轮的连接刚度,使 2、3 阶谐振频率提高到 1 000 Hz 以上。

5 结 论

本文利用 ANSYS 建立了机抖激光陀螺有限元模型并进行了模态分析,通过与试验对比,结构振型一致,计算误差 $<7\%$,证明了所建有限元模型的正确性。完成了轴向和横向激励下机抖激光陀螺的随机振动响应分析,并对轴向激励下的机抖激光陀螺的随机振动响应进行了实验验证,分析了机抖激光陀螺经受此动力学环境的能力。指出了随机振动中的较大的加速度响应是由于陀螺和抖轮相对于安装盒的水平俯仰运动和竖直运动产生的,提出了改进方案,对今后机抖激光陀螺结构的改进具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] CHOW W W, BANACLOCHE J G, PEDROTTI L M, *et al.*. The ring laser gyro [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1985, 57: 61-104.

- [2] 高伯龙,李树棠.激光陀螺[M].长沙:国防科技大学出版社,1984.
GAO B L, LING S H T. *Laser Gyroscopes* [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1984. (in Chinese)
- [3] D. E. 纽兰.随机振动与谱分析概论[M].北京:机械工业出版社,1980.
NEULANN D E. *Introduction of Random Vibration and Spectrum Analysis* [M]. Beijing: China Machine Press, 1980. (in Chinese)
- [4] 陈英俊,甘幼琛,于希哲.结构随机振动[M].北京:人民交通出版社,1993.
CHEN Y J, GAN Y CH, YU X ZH. *Structure Random Vibration* [M]. Beijing: People Communications Press, 1993. (in Chinese)
- [5] 小珮工作室.最新经典 ANSYS 及 Workbench 教程[M].北京:电子工业出版社,2004.
XIAO SH ATELIER. *Advanced Classical Tutorial of ANSYS and Workbench* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
- [6] LAHHAM J I, BRAZELL J R. Acoustic noise reduction in the MK 49 ship's inertial navigation system (SINS) [J]. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 1992;32-39.
- [7] LAHHAM J I, WIGENT D J, COLEMAN A L. Tuned support structure for structure-borne noise reduction of inertial navigator with dithered ring laser gyros (RLG) [J]. *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, 2000;419-428.
- [8] 汤建勋.机械抖动激光陀螺抖动偏频系统的研究与设计[D].长沙:国防科技大学,2000.
TANG J X. *Research and design for dither bias system of mechanically dithered ring laser gyroscopes* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2000. (in Chinese)
- [9] 冯斌,周忆,张军伟,等.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):356-361.
FENG B, ZHOU Y, ZHANG J W, et al.. Analysis on ground random vibration response of large-scale precision mirror mount [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 356-361. (in Chinese)
- [10] 张志杰,袁怡宝.单边导角形柔性铰链的计算与性能分析[J]. 光学 精密工程,2007, 15(3):384-389.
ZHANG ZH J, YUAN Y B. Design calculation and analysis of half corner-filletted flexure hinge[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 384-389. (in Chinese)
- [11] 车录锋,卢云,徐志农.铰链式高冲击微加速度传感器封装的有限元模拟[J]. 光学 精密工程,2007,15(2):199-205.
CHE L F, LU Y, XU ZH N. Finite element simulation on packaging of hinged high-gmicromachined accelerometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):199-205. (in Chinese)

作者简介:于旭东(1982—),男,吉林长春人,国防科技大学光电科学与工程学院博士研究生,主要从事机械抖动激光陀螺的研究;E-mail:wind0909@163.com

龙兴武(1958—),男,国防科技大学教授,博士生导师。E-mail:Lxw208@gfkd.mtn