

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0142- 05

机抖激光陀螺减振系统的模态分析*

度洲慧, 李如华, 江明明

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:通过对惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)进行减振,可以减小外部冲击、振动对IMU正常工作和测量精度的影响,提高系统导航精度。基于patran/marc有限元分析软件对激光陀螺IMU的减振系统进行模态分析,得到减振系统主要的模态及频率。主要通过仿真分析了减振橡胶块的温度、轴向压缩量和径向压缩量三项关键因素对减振系统模态的影响,提出了一种IMU减振系统的优化设计方案。结论表明:可通过改变结构参数方式来调整减振系统参数,从而满足机抖激光陀螺惯导的应用要求。

关键词:机抖激光陀螺;减振系统;压缩量;模态分析

中图分类号:U666.1 文献标识码:A

Modal Analysis of the Laser Gyro Damping System

TUO Zhou-hui, LI Ru-hua, JIANG Ming-ming

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The use of damping system can significantly reduce the shock and vibration experienced by inertial measurement unit (IMU), and improve the measurement accuracy and the final navigation result. Firstly, modal analysis of IMU damping system was studied using finite element software Patran/Marc and the damping system main modal frequencies and shapes were obtained. Secondly, the influence on the modal analysis imposed by three key factors, such as temperature, axes-compression and radial-compression of damping rubber module, were analyzed with the simulation method. Then an optimized design of an IMU damping system was presented. The results show that the parameters in the damping system can be adjusted by changing the structure parameters, and the application demand of diher laser gyro INS are satisfied.

Key words: laser gyro; damping system; compression; modal analysis

基于机抖激光陀螺的捷联惯性导航系统具有导航精度高、可靠性稳定、应用范围广等特点,目前广泛应用于舰船、飞机、战车等,是武器装备的重要精密导航装置之一^[1-5]。由于战车、舰船、飞机和导弹等载体通常都是在最恶劣的环境下工作的,而捷联惯性导航系统中的IMU直接固联到载体上,容易受到载体振动和冲击的影响,形成动态误差,造成惯性器件输出精度降低,工作时产生较大的噪声,甚至会影响仪器使用寿命^[4-6]。

为了解决振动、冲击引起的捷联系统动态误差,保证系统的导航定位精度,可以对捷联系统或IMU进行减振,避免或减少外部振动、冲击对IMU正常工作的影响^[7-10]。因此,针对IMU进行减振系统设计,并对IMU及其减振系统通过有限元方法进行模态分析,得到减振系统的固有频率及可能失效形式,再对减振系统的结构与材料进行修改,以保证减振系统的性能,最大限度地降低外部振动、冲击对IMU的影响。

1 IMU减振结构及其有限元建模

通过对各种IMU减振器布局方案进行数值仿真得到较优的减振器布局方案,来设计采用某新型机抖激光陀螺的IMU系统。图1所示为IMU的结构装配图,主要由4部分组成:IMU框架、3个机抖激光

* 收稿日期:2010-06-06

基金项目:国家安全重大基础研究项目(61334010302)

作者简介:度洲慧(1972-),男,讲师,硕士。

陀螺、3 个加速度计以及 4 组减振器, 其中 IMU 框架的主要作用是为惯性传感器及减振器提供安装保障, 为保证惯性传感器之间的相对位置精度被设计为具有很高的结构刚度。IMU 框架是通过固联在系统外框架中(图中未显示)的减振支架和减振橡胶块支撑的, 其中减振橡胶块起到减振阻尼作用, 减振支架起到固联及调整减振结构参数的作用。

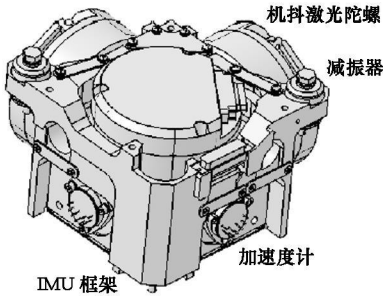


图 1 IMU 减振结构示意图
Fig.1 IMU damping structure diagram

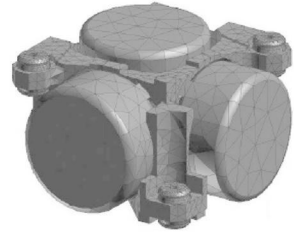


图 2 IMU 减振系统有限元模型
Fig.2 IMU damping system finite element model

在 MSC. Patran 中导入 IMU 系统的装配体文件, 并对各个零部件分别划分网格。由于各个零部件形状复杂, 因此采用四面体网格进行自动划分。同时为了得到更为精确的结果, 对减振器、框架部分采用四面体十节点进行划分, 并根据各部件尺寸不同选用不同的网格密度, 以在计算效率和计算精度之间进行优化。图 2 即为划分好网格的 IMU 减振系统的有限单元模型。

IMU 减振系统的 4 个减振器通过螺钉与基座紧固连接。因此可以将 4 个减振器的上下端盖看成基础的一部分。采用 MSC. Marc 求解器能够很好地定义接触条件, 在定义接触条件时我们把所有接触体都定义为变形体, 并设置好各个接触面的摩擦系数。

2 模态分析

利用 MSC. Marc 对 MSC. Patran 所建立的有限元模型进行模态求解, 求解时扩展了 20 阶模态, 获得有限元模型的固有频率以及主要振型。以工作环境温度为 20℃, 减振器预紧量为 1mm, 过盈量为 0mm 的边界条件进行分析, 得到 IMU 减振系统的各阶模态振型。

对模态求解结果进行分析后可以看到, IMU 减振系统的第 1~ 6 阶模态的振型主要是 IMU 框架及惯性传感器的整体振动, 相应的模态频率和振型描述如表 1 所示。图 3 所示的是系统各阶模态振型。从模态分析结果中可以看出, 系统的前 6 阶模态频率对整体的振动影响较大。

表 1 IMU 减振系统前 6 阶模态频率和振型列表

Tab.1 IMU damping system before the 6-order modal frequencies and mode shapes list

阶次	模态频率/Hz	振型描述
1	110.5	沿平行 y 轴方向直线运动
2	118.5	沿平行 x 轴方向直线运动
3	210.3	沿平行 z 轴方向直线运动
4	392.2	绕 z 轴旋转运动
5	433.9	绕垂直于 z 轴, 与 x 轴约成 30° 角的轴 x' 旋转运动
6	445.3	绕垂直于 z 轴, 与 y 轴约成 30° 角的轴 y' 旋转运动

在 IMU 的第 7~ 20 阶模态频率在 2560~ 3746Hz, 其模态及振型主要表现为减振橡胶块的局部变形, 而 IMU 框架基本无相对位移。考虑产品应用条件及高频振动的阻尼衰减增强作用, 对第 7 阶以上模态暂不做深入分析。

从计算结果的前 6 阶模态频率来看, 模态频率在 110~ 446Hz 之间, 主要集中在 115Hz、210Hz 和 430Hz 这 3 个频率点附近, 满足捷联系统中的 IMU 减振系统模态频率不分散的要求。而 IMU 所使用的

机抖激光陀螺的抖动频率在 700Hz 左右,由此可以判断目前所使用的 IMU 减振系统符合捷联惯导系统减振的要求。

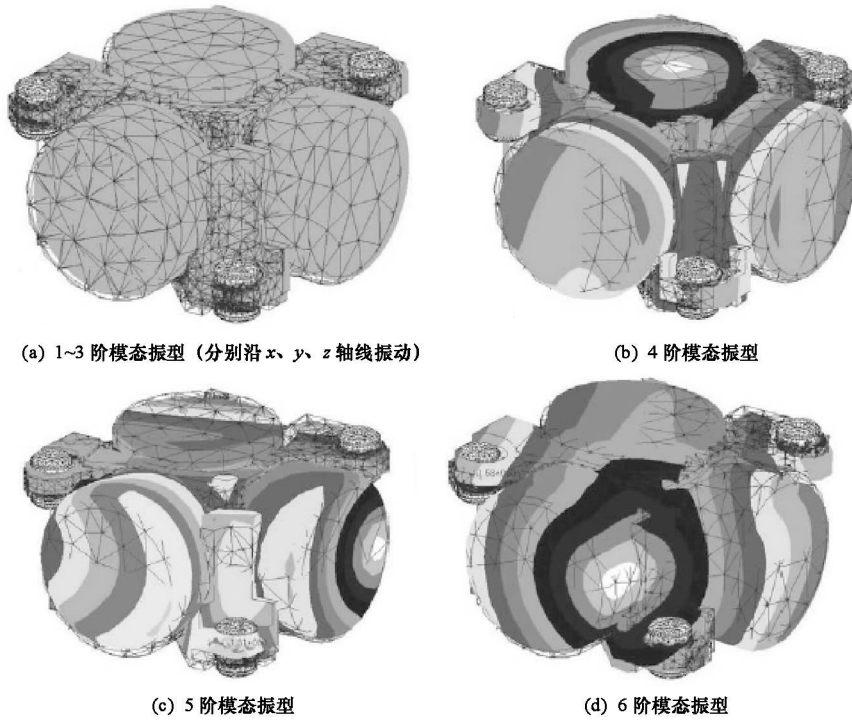


图3 IMU 减振系统各阶模态振型

Fig. 3 IMU damping system modal vibration mode

3 影响减振系统模态的几个因素

影响 IMU 减振系统模态的因素主要是减振橡胶块温度、轴向压缩量和径向压缩量。为研究这 3 项因素对 IMU 模态的影响特性,拟分别将其作为输入变量进行模态仿真。

3.1 减振橡胶块温度影响

由于减振器橡胶块的材料特性受温度特性影响较大,从生产厂家提供的数据可知,在 $-50^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 的温变范围内,其弹性模量的参数变化达到一倍左右。为分析减振系统在全温范围内的参数稳定性,在减振支架轴向压缩量为 1mm 和径向压缩量为 0mm 情况下,将减振橡胶块的温度弹性模量曲线按非线性模式导入仿真软件分析得到温度-模态频率曲线如图 4。

从图 4 中可以看出,IMU 的前 6 阶模态频率均随温度的升高而呈下降趋势,其主要原因就是温度越高,减振橡胶材料的弹性模量越小,单元的刚度矩阵越小,因而模态频率会下降。以 20°C 为基准可给出温度-模态频率关系简表见表 2。

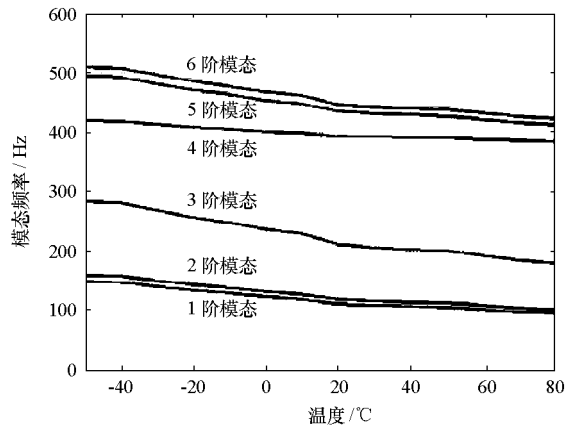


图4 IMU 减振系统温度-模态频率曲线

Fig. 4 IMU damping system curve between temperature and the modal frequency

表 2 温度-模态频率关系简表

Tab. 2 Relationship between temperature and the modal frequency

模态阶次	20℃基准模态频率(Hz)	模态频率的温度相对增量系数(%)							
		-50℃	-30℃	-10℃	10℃	30℃	50℃	70℃	80℃
1	110.5	33.9	26.6	16.2	7.6	-2.4	-5.0	-12.7	-15.0
2	118.5	33.5	26.2	15.9	7.3	-2.4	-5.0	-12.7	-15.1
3	210.3	34.4	27.2	17.2	8.6	-2.3	-5.0	-12.6	-15.0
4	392.2	6.6	5.1	3.1	1.5	-0.4	-0.8	-2.0	-2.3
5	434.0	13.7	10.7	6.5	3.0	-0.9	-1.8	-4.5	-5.3
6	445.3	14.3	11.2	7.0	3.5	-0.9	-1.8	-4.5	-5.4

从表中可以看出, 线振动模态频率较低, 但受温度影响较大(约 50%); 而角振动模态频率较高, 但受温度影响相对较小(约 20%)。该组模态变化规律对机抖激光陀螺惯导系统的影响较小, 有利于减小系统误差。

3.2 轴向压缩量影响

减振器的橡胶块一次成型后其参数就已确定, 如果实验所测参数不合适, 常规的改进方法就是调整配方重新生产, 所以惯导级减振器的生产定型周期往往较长, 且工艺稳定性较差。由于橡胶是体积不可压缩的可变形体, 通过对其增加特定的压缩量来改变其结构参数从而获得理想的减振参数是一种新的探索。

假定减振橡胶块的温度 20℃, 分别按轴向压缩量为 0mm、0.2mm、0.4mm、0.6mm、0.8mm 和 1mm 时的仿真分析得到轴向压缩量-模态频率曲线如图 5。

以轴向压缩量为 0mm 时作为基准可给出轴向压缩量-模态频率关系简表如表 3。

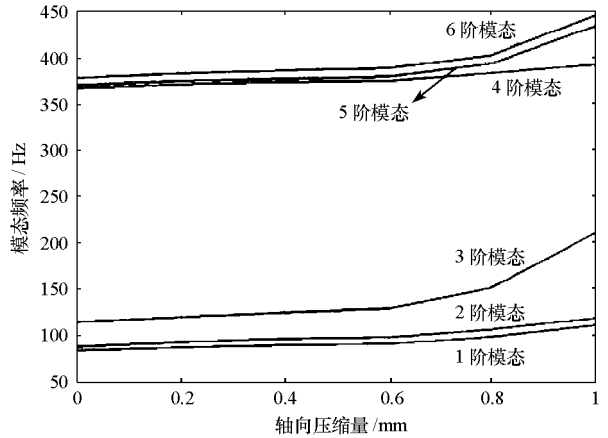


图 5 IMU 减振系统轴向压缩量-模态频率关系
Fig. 5 IMU damping system curve between axis reduce value and model frequency

表 3 轴向压缩量-模态频率关系简表

Tab. 3 Relationship between axes compression and the modal frequency

模态阶次	轴向压缩量为 0mm 基准模态频率/Hz	模态频率的轴向压缩量相对增量系数/ %				
		0.2mm	0.4mm	0.6mm	0.8mm	1.0mm
1	82.8	3.6	6.8	8.7	18.2	33.5
2	86.8	6.0	10.4	17.5	21.9	36.5
3	114.3	4.6	8.9	12.9	31.8	84.0
4	367.0	1.1	1.8	2.1	4.4	6.9
5	370.3	1.2	1.8	2.5	6.2	17.2
6	377.7	1.3	2.1	2.9	6.6	17.9

从表中可以看出, 模态频率随轴向压缩量递增, 且当轴向压缩量超过 0.8mm 后激增。其中第 3 阶模态随轴向压缩量递增趋势最为明显, 其主要原因就是该模态谐振方向与压缩方向重合。在轴向压缩量小于 0.8mm 的情况下相应的增量系数并不大, 说明减振橡胶块的较小的压缩变形情况下其力学特性变化小, 达到一定程度后才有明显的调节作用。经比较分析结果可知, 适当调整轴向压缩量可以对减振

系统参数进行调整。

3.3 径向压缩量影响

径向压缩量同样也对模态频率产生影响,但径向压缩量过大会难以装配。假定减振橡胶块的温度 20℃,分别按径向压缩量为 0mm、0.1mm 仿真分析得到数据如表 4。

表 4 径向压缩量-模态频率关系简表

Tab. 4 Relationship between radial-compression and the modal frequency

模态阶次		1	2	3	4	5	6
径向压缩量 0mm	模态频率/ Hz	82.8	86.8	114.3	367.0	370.3	377.7
径向压缩量 0.1mm	模态频率/ Hz	85.6	92.0	116.3	370.6	373.6	381.3
	频率相对增量/ %	3.4	6.0	1.7	1.0	0.9	1.0

对照表 3 相应数据,径向压缩量在较小时对模态频率的影响与轴向压缩量相当,但径向压缩量增大后会带来安装定位问题,故一般不采用该方案。

从上面的仿真可以看出,当温度、轴向压缩量和径向压缩量改变时,都会对减振橡胶块的材料参数产生影响,从而影响到 IMU 的谐振模态。综合考虑上述仿真结果发现,当轴向压缩量为 0.6mm 且径向压缩量为 0.1mm 时,IMU 的模态频率较为集中,相应的敏感频段较窄,有利于系统的正常工作。某激光陀螺惯导系统设计时采用了此参数的减振器,在后续试验验证中取得了较好的减振效果。

4 结论

- (1) 通过有限元分析,掌握了某型减振系统的模态分析方法,为惯导减振系统设计提供了新的思路;
- (2) 分析了温度、轴向压缩量和径向压缩量对模态频率的影响,提出了某惯导减振系统的优化设计方案,并在应用中满足了系统应用的要求。

参考文献:

- [1] Lahham J I, Wigent D J, Coleman A L. Tuned Support Structure-borne Noise Reduction of Inertial Navigation with Dithered Ring Laser Gyros (RLG) [C]//Proceeding of the IEEE Position Location and Navigation Symposium, 2000: 418-428.
- [2] Clough R W, Perzien J. Dynamics of Structures[M]. New York: McGraw-hill. 1975.
- [3] Daniel A T, John G, Mark R E. Ring Laser Gyroscope Dither Drive System and Method [P]. The United States: 4981359. Jan. 1, 1991.
- [4] Curby R D, Valle S, McCammon G H. Dither Controller for Ring Laser Angular Rotation Sensor [P]. The United States: 4740084. Apr. 26, 1988.
- [5] Lahham J I, Brazell J R. Acoustic Noise Reduction in the MK49 Ship's Inertial Navigation System (SINS) [C]//Proceeding of the IEEE Position Location and Navigation Symposium, 1992: 32-39.
- [6] 谢燕,雷勇军,周建平,等.惯导减振系统结构参数的优化[J].强度与环境,2005,32(4):39-45.
- [7] 刘建锋,丁传红,郝春朝,等.基于 B 样条小波有限元 IMU 结构的模态分析[J].系统工程与电子技术,2007,29(11):1958-1961.
- [8] 孙保和,杨朋军.惯性平台台体动态分析及动力修改[J].弹箭与制导学报,2006,26(3):53-58.
- [9] 魏冬,张志杰.微机械陀螺仪模态分析[J].传感器与微系统,2007,26(4):34-39.
- [10] 杨秀丽,贾宏光,冯长有.陀螺稳定平台的有限元模态分析[J].计算机仿真,2008,25(9).