

基于有限元法的半球谐振陀螺谐振子分析

余 波,方 针,蒋春桥

(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要:利用有限元分析软件 ANSYS,建立了半球谐振陀螺核心部件谐振子有限元模型并进行了模态分析,确定了各阶振动形式和频率,通过与实际测试结果比较,验证了模型的合理性和准确性。分析谐振子结构参数对各阶振型和频率的影响,对其进行了优化设计。优化后的结构工作频率与其他振型频率的差大于 1 kHz,有效避免谐振子的工作谐振与其他各阶振动的模态耦合。

关键词:半球谐振陀螺;谐振子;模态分析;模态耦合;优化设计

中图分类号:V241.03

文献标识码:A

Finite Element Analysis Based on Optimized HRG Resonator

YU Bo, FANG Zhen, JIANG Chunqiao

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

Abstract: The finite element model of the resonator of hemispherical resonator gyro(HRG) was established, the modal analysis about the resonator was performed in the application of the element software ANSYS. The natural frequency and correlative vibrating model of the resonator were confirmed. It has been proved that the model is reasonable and the calculation result is accurate which is consistent with the natural frequencies obtained from the experiments. The parameters of structure that had effect on natural frequency and vibrating model of the resonator were analyzed. Through optimum design the resonator's frequency was less than other natural frequencies by 1 kHz and the vibrating modal coupling was avoided.

Key words: hemispherical resonator gyro; resonator; modal analysis; modal coupling; optimum design

0 引言

由高品质熔融石英玻璃材料加工制作而成的半球谐振陀螺,具有优良的性能,是近年来发展起来的一种新型固体陀螺,能广泛应用于航天、航空、舰船、兵器等武器装备中,是惯性导航制导、载体姿态稳定控制、惯性测量单元等现有武器系统中的关键部件^[1-5]。石英谐振子是半球谐振陀螺的核心部件,为有效避免谐振子的工作谐振与其他各阶振动的模态耦合,在研发和生产过程中需分析影响振动特性的诸多因素,进行优化设计,提高半球谐振陀螺的性能。

本文利用有限元分析软件 ANSYS,建立了谐振子有限元模型并进行模态分析,确定各阶振动形式和频率,通过与实际测试结果比较,验证了模态分析的准确性。分析了 30 mm 谐振子球壳壁厚、支撑轴、球面与支撑轴的过渡圆角等几何尺寸和约束位

置对各阶振动形式和频率的影响,结合石英玻璃谐振子的加工工艺特性,对其进行优化设计。

1 半球谐振陀螺的工作原理

半球谐振陀螺的敏感器件全部用熔融石英加工而成,其组成如图 1 所示。半球谐振子是敏感旋转

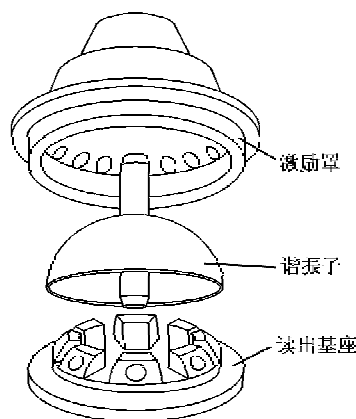


图 1 半球谐振陀螺的基本组成

收稿日期:2015-06-25

基金项目:“八六三”计划课题基金资助项目(2012AA121501,2015AA043301)

作者简介:余波(1970-),女,重庆人,高级工程师,主要从事惯性振动陀螺的研究。E-mail:hrg@sipat.com。

的元件,它以一个小的间隙置于激励罩和读出基座之间。石英元件的表面全部金属化并在激励罩上形成一个环形电极和 16 个等间距的分离激励电极,同时在读出基座上形成 8 个等间距的读出电极,使半球振子和激励电极间、半球振子和读出电极间形成多个小电容,用于信号读出和谐振子的静电控制^[1]。

半球谐振陀螺是利用半球壳唇缘的径向驻波振动来感测基座旋转角速率的装置。当振动的谐振子沿输入轴旋转时,驻波会产生进动,进动率接近 30%。通过检测波节处的振动分量幅度和相位可反映出基座旋转角速率大小和方向。进动原理如图 2 所示。图中 ω_1 为输入角速率; θ_{out} 为输出角度。

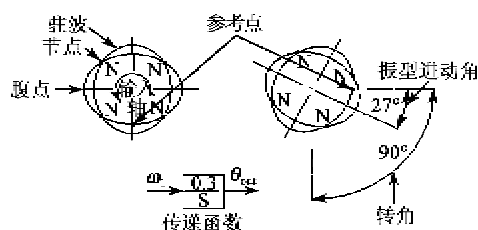


图 2 半球谐振陀螺的进动原理

2 有限元模型分析

2.1 有限元模型建立

为使谐振子能产生 4 个波幅点和 4 个波节点的理想驻波,就必须准确控制谐振子的激振频率即谐振子在该振型下的固有频率。为此,本文利用有限元分析软件 ANSYS 建立 30 rim 谐振子有限元模型进行结构计算,分析各阶固有频率和振型。采用先生成面单元,对过渡圆角处细分处理,再旋转生成实体单元的方法,以提高模型计算精度。模型对两个轴端进行了位置约束。谐振子有限元模型如图 3 所示。

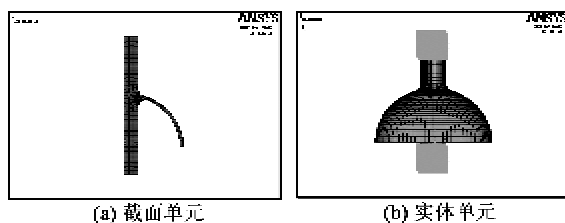


图 3 半球谐振子有限元模型

2.2 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。线性多度系统的振动方程为

$$m\{\ddot{x}\} + c\{\dot{x}\} + k\{x\} = f(t) \quad (1)$$

式中: m 、 k 、 c 、 $f(t)$ 分别为系统的质量矩阵、刚度矩阵、等效粘性阻尼矩阵和节点载荷向量。

若 $c=[0]$, $f(t)=0$, 则系统作无阻尼自由振动。

$$m\{\ddot{x}\} + k\{x\} = 0 \quad (2)$$

这是系统的自由振动方程,又称为动力特性方程,由此可求解出系统的固有频率和固有振型。利用 ANSYS 软件的分块 Lanczos 法对谐振子模型进行分析求解,给出了结构的前 12 阶模态,计算结果如表 1 所示,振型如图 4、5 所示。

表 1 谐振子各阶振型对应固有频率

阶数	频率	对应振型	振型图
一阶	4 854.6	球壳二阶弯曲振动	图 4
二阶	4 854.6	球壳二阶弯曲振动	
三阶	6 390.9	球壳一阶弯曲振动	
四阶	6 390.9	球壳一阶弯曲振动	图 5(a)
五阶	7 492.9	轴挠性振动	图 5(b)
六阶	11 386.0	球壳三阶弯曲振动	图 5(c)
七阶	11 386.0	球壳三阶弯曲振动	
八阶	20 456.0	球壳四阶弯曲振动	图 5(d)
九阶	20 456.0	球壳四阶弯曲振动	
十阶	20 687.0	沿支撑轴的半球振动	图 5(e)
十一阶	23 473.0	轴弯曲振动	
十二阶	23 473.0	轴弯曲振动	图 5(f)

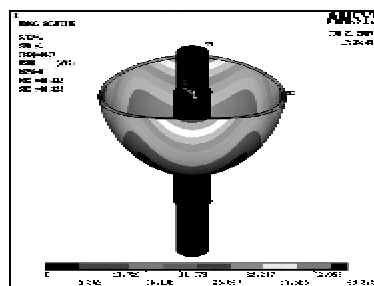
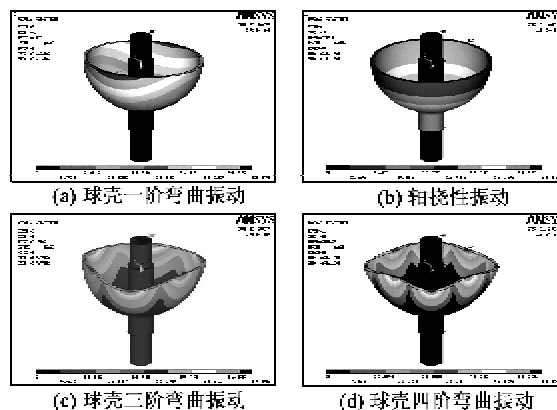
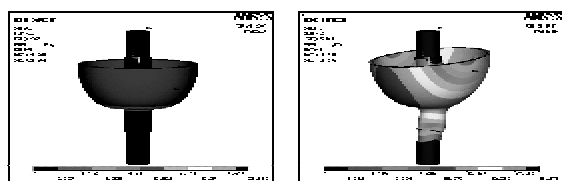


图 4 谐振子的二阶谐振图





(c) 沿支撑轴的半球振动

(d) 弯曲振动

图5 谐振子对应其他各阶振型图

由计算结果和振型图可见,半球谐振子受激会产生多种形式的振动,与半球球壳有关的振动就有一到四阶直至更高阶的谐振,而与支撑轴相关的振动分别有挠性振动、弯曲振动及沿着支撑轴的半球振动等。半球谐振陀螺工作振型是有4个波节和波幅的二阶谐振。

2.3 频率校核

为了验证有限元模型的可靠性,利用测试系统对谐振子进行试验,测试其二阶谐振频率。表2为随机选择几个不同批次的谐振子,代入实际几何尺寸计算其谐振频率与实测频率的比较,有限元分析结果与实测结果基本一致,其误差属于合理区间,表明该有限元模型是合理的。

表2 谐振子谐振频率分析计算与试验测试结果

谐振子编号	模态分析频率/Hz	实测频率/Hz	相对误差/%
66#	4 990	4 853	2.82
84#	4 863	4 741	2.57
166#	4 801	4 637	3.54
168#	4 895	4 791	2.17

3 半球谐振陀螺的优化设计

通过修改有限元模型的几何尺寸,改变结构的质量和刚度,研究在不同尺寸参数下半球谐振陀螺谐振子结构对固有频率和振型的影响,确定优化目标。同时结合加工工艺的要求,对谐振子结构进行优化设计。谐振子结构简图如图6所示。图中, L 为约束长度; Φ 为支撑轴直径; δ 为球壳壁厚; r 为过渡圆角半径。

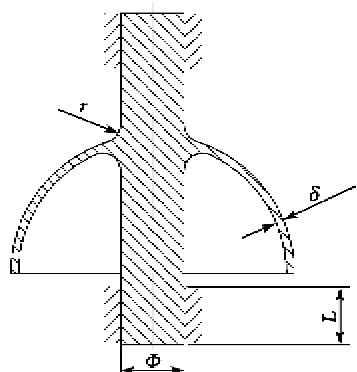
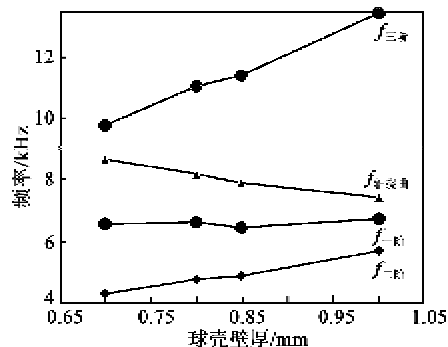


图6 谐振子结构简图

3.1 谐振子结构尺寸对谐振频率的影响

1) δ 对结构固有频率的影响。谐振子 δ 与结构固有频率的关系如图7所示。由图可知,随着 δ 的增加,球壳的一、二阶谐振频率与轴挠性振动频率差值缩小,易产生频率耦合,而 δ 越小,谐振子的磨削加工难度越大,难以保证各种声学参数达到设计的要求,需根据实际加工工艺选择合适的谐振子壁厚。

图7 δ 与结构固有频率的关系

2) 支撑轴直径对结构固有频率的影响。谐振子支撑轴直径与结构固有频率的关系如图8所示。由图可知,随着轴径的变化,谐振子低阶的几个振型频率会有交叉耦合,这是结构设计中必须极力避免的。支撑轴直径减小,刚度降低,轴挠性振动成为频率最低的振型而易被激励,这对谐振子来说是有害振动。支撑轴直径越大结构刚度越高,谐振子的工作频率即二阶谐振频率越高。

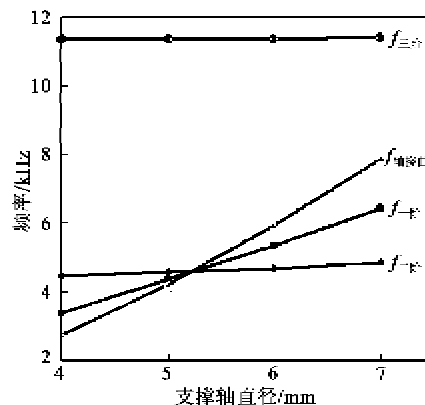
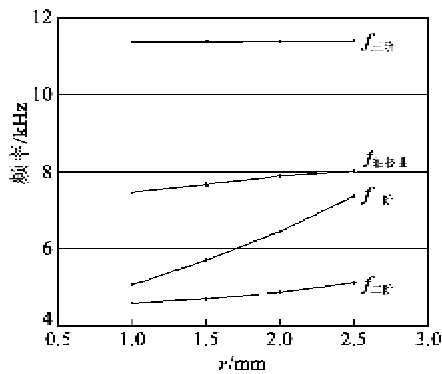


图8 支撑轴直径与结构固有频率的关系

3) r 对结构固有频率的影响。从谐振子 r 与结构固有频率的关系如图9所示。由图可知,随着 r 的减小,谐振子一、二阶谐振频率趋近,而随着圆角的增大,一阶谐振与轴挠性振动频率趋近。 r 越大结构刚度越高,谐振子的工作频率即二阶谐振频率越高。

图9 r 与结构固有频率的关系

4) 约束位置对结构固有频率的影响。从谐振子约束位置与结构固有频率的关系如图 10 所示。由图可知,约束位置的改变对谐振子的前 4 种振型频率影响很小,可忽略,仅从陀螺的整体设计上考虑选择。

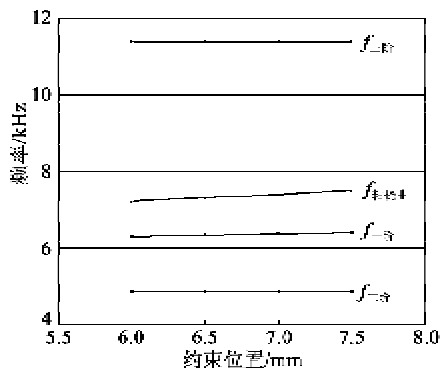


图10 约束位置与结构固有频率的关系

3.2 优化设计

半球谐振陀螺谐振子结构参数的确定,综合考虑结构刚度、加工工艺性能、陀螺的整体设计和性能要求,优化参数间相互矛盾,如壁厚越小越好,但随着刚度降低,加工工艺性能不好;过渡圆角增大则一阶谐振与轴挠曲振动易耦合,减小则二阶谐振与一阶谐振易耦合,且圆角过小加工工艺不能满足要求。综合上述的分析,选取优化参数。

4 结束语

针对半球谐振陀螺谐振子结构的有限元模型的分析与优化设计,结合谐振子的振型与对应的频率,及结构尺寸对固有频率的影响,利用 ANSYS 进行分析计算,结果工作频率与其他各阶振型频率相差大于 1 kHz,有效避免振型间频率耦合。经过优化设计后的谐振子已在实际应用中,其合理性和可行性得到了很好的验证。

参考文献:

- [1] 吕志清. 半球谐振陀螺在宇宙飞船上的应用[J]. 压电与声光, 1999, 21(5): 349-353.
LV Zhiqing. The application of HRG in the spacecraft [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 1999, 21(5): 349-353.
- [2] EMILY L B, ALLAN Y L. In-flight characterization of cassina inertial reference units [C]//August: AAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Hilton Herd, South Carolina, 2007: 20-23.
- [3] 陈雪, 任顺清, 赵洪波, 等. 半球谐振子薄壁厚度不均匀性对陀螺精度的影响[J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(3): 29-33.
CHEN Xue, REN Shunqing, ZHAO Hongbo, et al. Effect of thickness nonuniformity of resonator on the HRG accuracy[J]. Aerospace Control and Application, 2009, 35(3): 29-33.
- [4] 杨勇, 胡晓东, 谭文跃, 等. 基于优化半球陀螺谐振子性能的工艺技术[J]. 压电与声光, 2014, 36(2): 221-224.
YANG Yong, HU Xiaodong, TAN Wenye, et al. Technology based on optimized HRG resonator performance[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(2): 221-224.
- [5] 王旭, 方针, 吴文启, 等. 基于二维质点振动模型的半球谐振陀螺谐振子进动分析[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(5): 621-626.
WANG Xu, FANG Zhen, WU Wenqi, et al. Precession analysis of HRG resonator based on two dimensional mass vibrations[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(5): 621-626.
- [6] 陈帅. 激光陀螺捷联惯性导航系统算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [7] 魏国, 龙兴武. 基于动态 Allan 方差的机抖激光陀螺随机误差研究[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2975-2979.
- [8] 张代兵. 一种基于 Allan 方差方法的激光陀螺性能评价方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 715-717.
- [9] 段奇奇, 李邓华, 伊丽娜. 光纤陀螺随机漂移的建模与滤波研究[J]. 压电与声光, 2011, 33(5): 738-741.
DUAN Keke, LI Denghua, YI Li'na. Study on modeling and filtering of the fiber optic gyroscope random drift [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2011, 33(5): 738-741.
- [9] 何书元. 应用时间序列分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005: 195-224.
- [10] 白俊卿, 张科, 卫育新. 光纤陀螺随机漂移建模与分析[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(5): 621-624.

(上接第 560 页)

- [5] 陈帅. 激光陀螺捷联惯性导航系统算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [6] 魏国, 龙兴武. 基于动态 Allan 方差的机抖激光陀螺随机误差研究[J]. 中国激光, 2010, 37(12): 2975-2979.
- [7] 张代兵. 一种基于 Allan 方差方法的激光陀螺性能评价方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 715-717.
- [8] 段奇奇, 李邓华, 伊丽娜. 光纤陀螺随机漂移的建模与