

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.03.013

# 全角半球陀螺谐振子结构设计研究

张传忠<sup>1</sup>, 徐海刚<sup>1</sup>, 范文良<sup>2</sup>, 朱毅<sup>1</sup>

(1. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074;

2. 国家检察官学院信息技术部, 北京 102206)

**摘要:** 围绕全角半球谐振陀螺的典型使用环境特征, 对谐振子结构方案进行了深入研究。仿真分析了“等壁厚”“上薄下厚”“上厚下薄”3种结构方案的振动特性差异, 发现在谐振子平均尺寸相同的情况下, “上厚下薄”方案的工作频率最高, 相邻模态频率间隔最大, 且受冲击影响最小。进一步, 定量仿真分析了内球面半径、内圆角半径及内支撑柱直径等结构参数对“上厚下薄”谐振子振动特性以及抗冲击性能的具体影响, 为陀螺的设计加工提供了有效参考。

**关键词:** 谐振子; 模态频率; 抗冲击能力; 结构设计

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)03-0128-08

## Research on the structure design of the full-angle hemispherical resonant gyroscope harmonic oscillator

ZHANG Chuanzhong<sup>1</sup>, XU Haigang<sup>1</sup>, FAN Wenliang<sup>2</sup>, ZHU Yi<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China;

2. Department of Information Technology, National Prosecutors College of People's

Republic of China, Beijing 102206, China)

**Abstract:** A comprehensive study has been conducted on the structure of harmonic oscillator for the full-angle hemispherical resonant gyroscope, with a focus on its typical operational environmental characteristics. Simulation analysis is carried out to compare the vibration characteristics of three structure designs which are “equal wall thickness”, “thin top and thin bottom”, and “thick top and thin bottom”. It is found that, with an identical average resonant oscillator size, the “thick top and thin bottom” design exhibits the highest operating frequency, the widest frequency interval between adjacent modes, and the least sensitivity to impact. Furthermore, quantitative simulations are performed to investigate the specific effects of structural parameters, including inner spherical radius, inner fillet radius, and inner support column diameter, on the vibration characteristics and impact resistance of the “thick top and thin bottom” resonant oscillator. These findings offer valuable insights for guiding the design and manufacturing of the gyroscopes.

**Key words:** Harmonic oscillator; Modal frequency; Impact resistance; Structure design

收稿日期: 2023-12-04; 修订日期: 2024-04-09

作者简介: 张传忠(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事惯性器件方面的研究。

通信作者: 范文良(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事计算机信息技术和电子技术方面的研究。

## 0 引言

陀螺作为惯导系统的核心部件,在很大程度上决定了系统的精度性能、体积、成本、质量及功耗等关键参数。随着装备的发展,对惯导系统综合性能的要求也日益提高,而满足这一需求的核心是研制更高精度、更小体积及更低成本的陀螺。半球谐振陀螺(为叙述方便以下简称半球陀螺)是一种基于哥氏振动原理的陀螺。与传统陀螺相比,半球陀螺在保持同等精度的情况下,具有明显的优势,如成本、体积和质量方面的数量级提升,是惯性技术领域的主要研究方向之一<sup>[1]</sup>。

半球陀螺具有力平衡和全角两种工作模式。2000年之前,主要发展的是力平衡模式,仅能应用于航天器等小角速度场合;2000年之后,重点发展可在陆海空天各领域全面应用的全角模式。本文重点探讨全角半球陀螺。谐振子是半球陀螺的核心敏感部件,它决定了陀螺的精度和环境适应性。在全角模式下,陀螺不仅要具备较大的角速度测量范围,还必须能够承受强振动和大冲击的力学环境。因此,有必要研究振动和冲击对谐振子振动特性的影响,选择合适的谐振子结构方案,以实现最优的力学环境适应性。

针对谐振子的结构设计,黄帅等<sup>[2]</sup>通过建立关键结构参数的数学模型,将人工蜂群算法应用于谐振子结构设计中,提升了谐振子振动性能。谭品恒等<sup>[3]</sup>研究了壁厚和支撑柱尺寸对谐振子振动性能和抗冲击性能的影响,给出了壁厚和支撑柱尺寸的设计范围。李毅轩等<sup>[4]</sup>分析了谐振子球壳半径、厚度和支撑柱直径对振动性能以及进动系数的影响,为谐振子结构设计提供了参考。胡强等<sup>[5]</sup>设计了一种变壁厚结构形式的谐振子,在保证工作模态频率基本不变的情况下,通过增大唇沿面积有效提高了激励和检测电容面积。以上研究都没有考虑谐振子结构形式对力学环境适应性的影响。实际上,结构形式是谐振子结构设计的前提,应重点考虑。

本文围绕全角半球陀螺的应用特点,基于有限元分析,对“等壁厚”“上薄下厚”“上厚下薄”3种结构形式的谐振子进行了模态分析和半正弦波冲击仿真。根据仿真结果,得到不同结构形式下谐振子抗干扰能力和力学环境适应性的差异,通过深入分析给出了谐振子的结构优化设计建议。

## 1 半球陀螺谐振子的结构形式

典型全角半球陀螺的基本组成如图1所示,主要包括谐振子和基座两部分<sup>[6-7]</sup>。

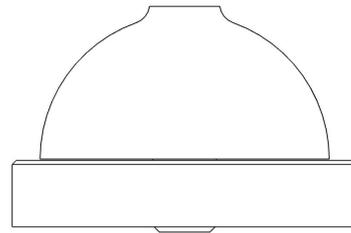
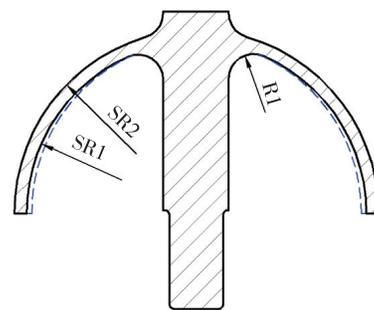


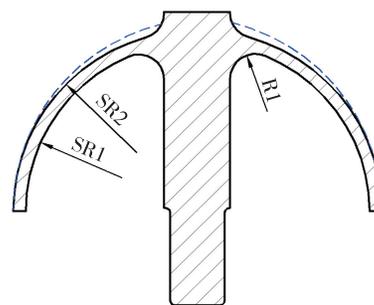
图1 半球谐振陀螺的基本组成

Fig. 1 Basic composition of hemispherical resonator gyro

谐振子作为半球陀螺的核心敏感部件,工作时形成固体振动驻波,波形位置的变化反映了载体的角运动。传统半球谐振子的结构形式为“等壁厚”,即顶部和唇沿厚度相等。通过内球面向下偏心可以得到顶部薄、唇沿厚,即“上薄下厚”,谐振子如图2(a)所示,通过外球面向上偏心可以得到顶部厚、唇沿薄,即“上厚下薄”,谐振子如图2(b)所示。



(a) “上薄下厚”谐振子结构形式



(b) “上厚下薄”谐振子结构形式

图2 变壁厚半球谐振子的结构形式

Fig. 2 The structural form of hemispherical harmonic oscillator with variable wall thickness

图2中,“上薄下厚”和“上厚下薄”的谐振子都是由等壁厚谐振子内外球面球心沿轴向的偏移而来,“上薄下厚”谐振子的顶部厚度与“上厚下薄”谐振子唇沿厚度相等,两种谐振子壁厚过渡趋势相同,即平均尺寸相等。本文基于有限元分析,通过模态分析和半正弦波冲击仿真,研究不同结构形式对谐振子的抗干扰以及抗冲击性能的影响。

## 2 不同结构形式谐振子的有限元分析

### 2.1 结构形式对谐振子抗干扰性能的影响

谐振子的结构形式和关键结构参数决定其振动特性,通过有限元分析软件进行模态分析可以得到谐振子各阶模态的固有频率,谐振子采用的熔融石英<sup>[8]</sup>属于硬脆材料,主要力学参数如表1所示。

表1 熔融石英材料参数

Tab.1 The parameters of fused silica material

材料名称	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗弯强度/MPa
熔融石英	2.201	7×10 <sup>4</sup>	0.17	50	67

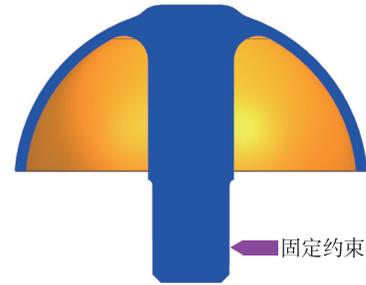
按照图2所示的谐振子结构形式,选用如表2所示的谐振子关键结构参数进行仿真分析。

表2 谐振子的关键结构参数

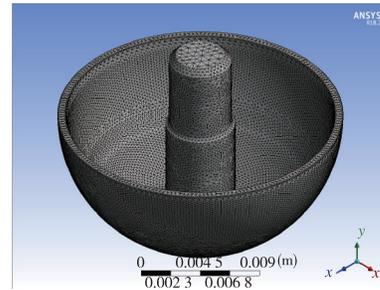
Tab.2 The key structural parameters of hemispherical harmonic oscillator

关键结构参数	mm		
	等壁厚	上薄下厚	上厚下薄
内球面半径	10.20	10.20	10.20
内圆角半径	1.50	1.50	1.50
内支撑柱直径	5.30	5.30	5.30
外球面半径	10.90	10.90	10.90
偏心距离	0.00	0.45	-0.45

在有限元分析软件中,根据表2中谐振子的关键结构参数,建立如图3所示的谐振子三维模型和有限元分析模型。



(a) 谐振子三维模型



(b) 谐振子有限元模型

图3 谐振子三维模型及有限元模型

Fig.3 The three-dimensional model and finite element model of harmonic oscillator

依据谐振子与基座装配的实际情况,在谐振子的内支撑柱下部建立固定约束,通过解算得到3种结构形式谐振子的各阶模态频率,如表3所示。

由表3可知,不同结构形式谐振子模态仿真的差异有:各阶模态的频率不一致,“上厚下薄”谐振子的模态频率偏高,工作频率最大,“上薄下厚”谐振子的模态频率偏低,工作频率最小;工作模态与相邻模态的频率间隔不一致,“上厚下薄”谐振子的频率间隔最大,“上薄下厚”谐振子的频率间隔最小。

表3 3种结构形式谐振子的各阶模态频率

Tab.3 The modal frequency of three kinds of harmonic oscillator

结构形式	Hz					
	模态频率					
	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶
等壁厚	8 036(工作频率)	8 036(工作频率)	8 820	8 945	8 945	15 742
上薄下厚	6 548(工作频率)	6 548(工作频率)	7 054	7 054	9 267	14 532
上厚下薄	8 318	9 457	9 458	11 126(工作频率)	11 126(工作频率)	16 340

通过对上述仿真结果进行分析,“上厚下薄”谐振子的频率间隔最大,工作时受相邻模态频率的影响更小,能更好地避免出现振动耦合,具有较强的抗干扰能力。

### 2.2 结构形式对谐振子抗冲击性能的影响

谐振子在强振动和大冲击场景下工作时,除了需具备优异的振动性能外,还需具备更强的抗干扰性能及抗冲击性能。谐振子的材料为熔融石英,受到过度载荷会发生崩角和破碎等情况,引起谐振子失效,因此需要对谐振子的抗冲击性能进行分析,保证谐振子受到的最大应力小于熔融石英材料的抗压强度及抗拉强度。

相较于冲击振动,随机振动在频率域有一个连续较宽的频谱,当随机振动激励造成的应力过大时,会使得结构产生裂纹和断裂,特别是在严重的共振状况下更为显著。但根据上述模态仿真的结构可知,半球谐振子的谐振频率远远大于随机振动频率上限,谐振子对随机振动不敏感,因此重点研究冲击对不同结构形式谐振子的影响。

根据比较苛刻的冲击指标要求,沿谐振子的轴向和径向输入半正弦冲击,如图 4 所示,具体工况条件见表 4。



图 4 半正弦波冲击输入方向

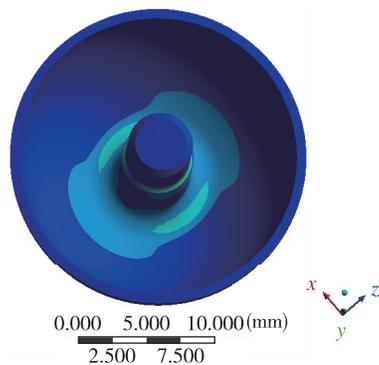
Fig. 4 The input direction of half-sine wave shock

表 4 半正弦冲击工况条件

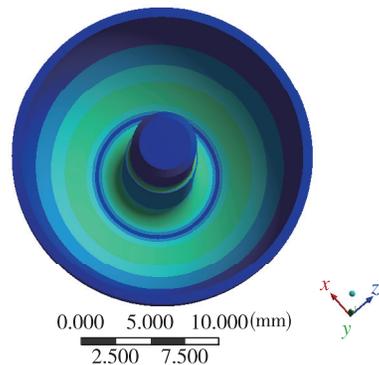
Tab. 4 Parameters of half-sine wave shock test

方向	冲击幅值	脉宽/ms
轴向	$30 \times g$	11
径向	$30 \times g$	11

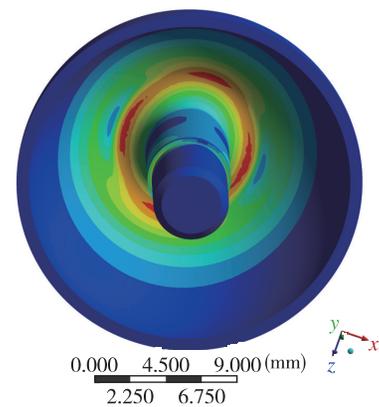
在上述工况下,利用有限元软件对 3 种结构形式谐振子的抗冲击能力进行仿真,得到谐振子应力分布云图如图 5 所示,应力极值如表 5 所示。



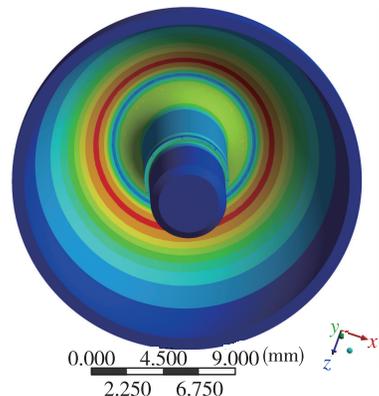
(a) 等壁厚谐振子轴向冲击



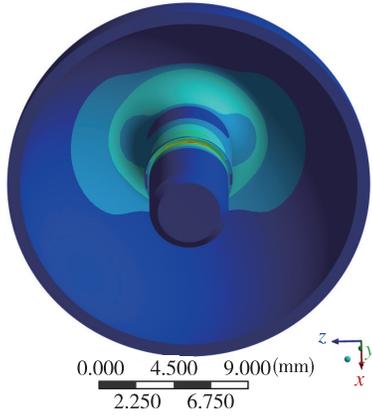
(b) 等壁厚谐振子径向冲击



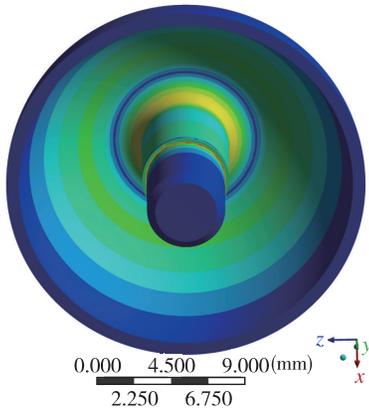
(c) “上薄下厚”谐振子轴向冲击



(d) “上薄下厚”谐振子径向冲击



(e) “上厚下薄”谐振子轴向冲击



(f) “上厚下薄”谐振子径向冲击

图5 谐振子在半正弦波冲击下的应力云图

Fig. 5 The stress cloud of harmonic oscillator under half-sine wave shock

表5 半正弦冲击下谐振子的应力极值

Tab. 5 The maximum stress of harmonic oscillator under half-sine wave shock

冲击方向	kPa		
	等壁厚	上薄下厚	上厚下薄
轴向	476.14	508.88	307.68
径向	87.945	97.660	57.264

由3种结构形式谐振子在半正弦波冲击下的响应可知:不同结构形式的谐振子受轴向冲击的影响远大于受径向冲击的影响,应力最大的位置均为球壳与内支撑柱的交界处。“上厚下薄”谐振子在同等冲击条件下的应力极值最小,抗冲击能力较强。“上薄下厚”谐振子在同等冲击条件下的应力极值最大,抗冲击能力较弱。

综合以上结构形式对谐振子抗干扰和抗冲击性能的影响,“上厚下薄”的结构形式相较于平均尺寸相同的“等壁厚”和“上薄下厚”的结构形式,抗干

扰能力和抗冲击能力更强,具有更好的力学环境适应性,更适用于振动环境复杂/冲击过载较大的应用场景。下一步,选用“上厚下薄”结构形式的谐振子,定量仿真分析内球面半径、内圆角半径及内支撑柱直径等结构参数对“上厚下薄”谐振子抗干扰以及抗冲击性能的具体影响,为陀螺的设计加工提供有效参考。

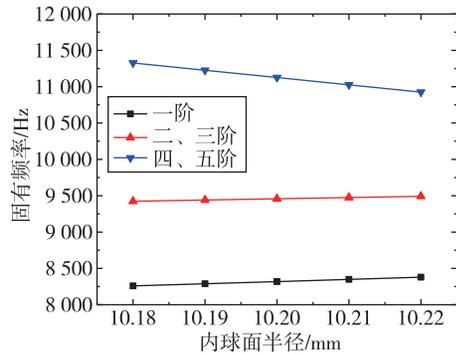
### 3 结构参数对“上厚下薄”谐振子抗干扰及抗冲击性能的影响

#### 3.1 对抗干扰性能的影响

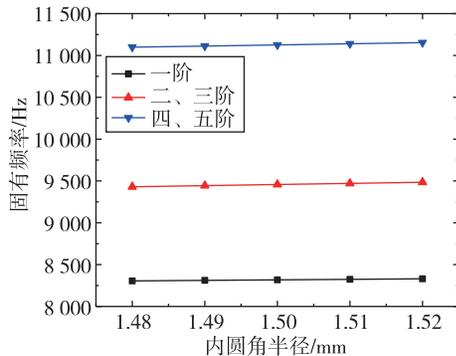
“上厚下薄”谐振子的关键结构参数包括内球面半径、内圆角半径、内支撑柱直径、外球面半径及内外球面偏心值(偏心距离)。接下来,对不同结构参数的“上厚下薄”谐振子进行有限元仿真,得到结构参数对“上厚下薄”谐振子工作模态频率的影响规律(见图6)。

对上述影响曲线进行拟合,得到各结构参数对“上厚下薄”谐振子工作模态频率的相关系数,如表6所示。

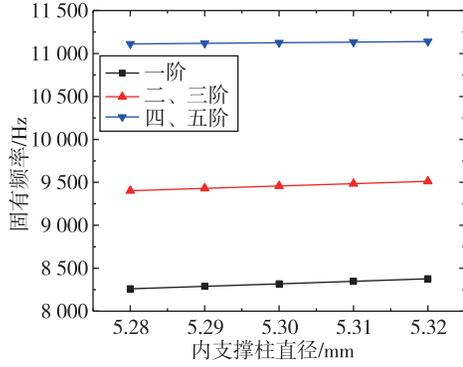
由仿真结果可知:对工作模态频率影响最显著的参数是内球面半径,其次是外球面半径、偏心距



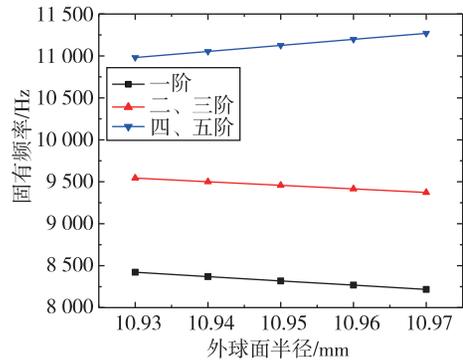
(a) 内球面半径对模态频率的影响



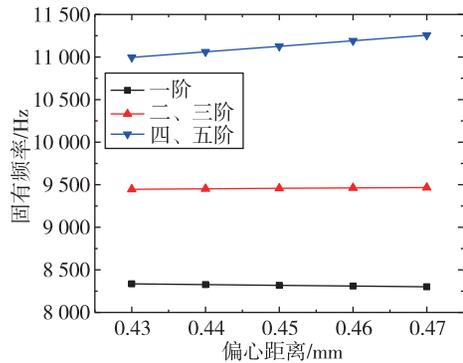
(b) 内圆角半径对模态频率的影响



(c) 内支撑柱直径对模态频率的影响



(d) 外球面半径对模态频率的影响



(e) 偏心距离对模态频率的影响

图 6 “上厚下薄”谐振子关键结构参数对模态频率的影响规律  
Fig. 6 Influence of key structural parameters of “thick top and thin bottom” harmonic oscillator on modal frequency

表 6 结构参数与谐振子工作模态频率的相关系数  
Tab. 6 The correlation coefficient of structural parameters and operational modal frequency of harmonic oscillator

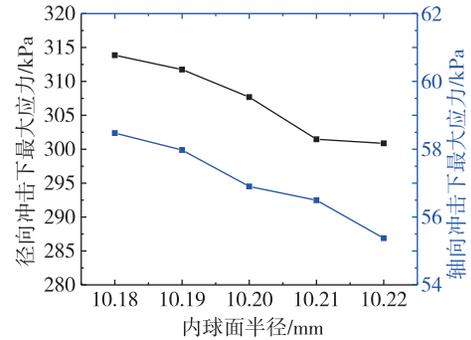
结构参数	内球面半径	内圆角半径	内支撑柱直径	外球面半径	偏心距离
相关系数	-10 050	1 358.6	676.11	7 204.4	6 500

离、内圆角半径及内支撑柱直径,工作模态频率随内球面半径的增大而减小,随内圆角半径、内支撑

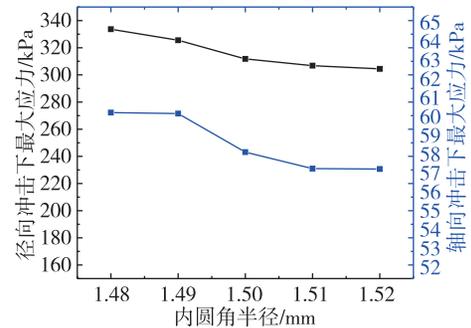
柱直径、外球面半径和偏心距离的增大而增大;对工作模态与相邻模态频率间隔影响最显著的参数是内外球面半径,频率间隔随内球面半径的增大而减小,随外球面半径、内圆角半径、内支撑柱直径及偏心距离的增大而减小。

### 3.2 对抗冲击性能的影响

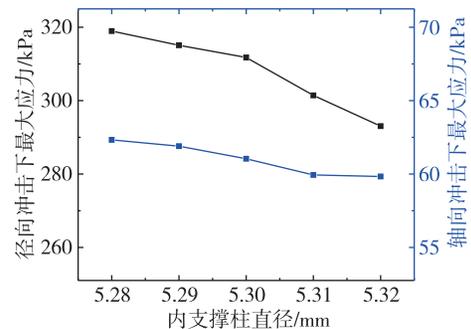
以表 2 的“上厚下薄”谐振子结构参数为基准,对不同结构参数的谐振子进行半正弦波冲击仿真,分析谐振子受不同方向冲击的最大应力值随结构参数的变化情况,其中内圆角采用圆心不变、半径值增大的方式,变化后,顶部的厚度相对变厚,仿真结果如图 7 所示。



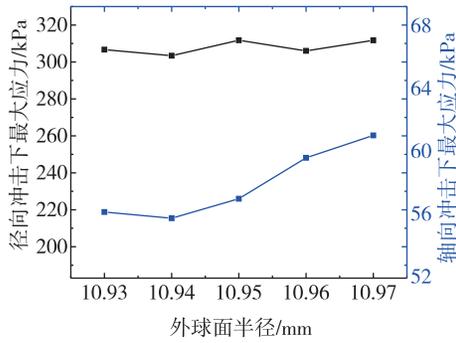
(a) 内球面半径对抗冲击性能的影响



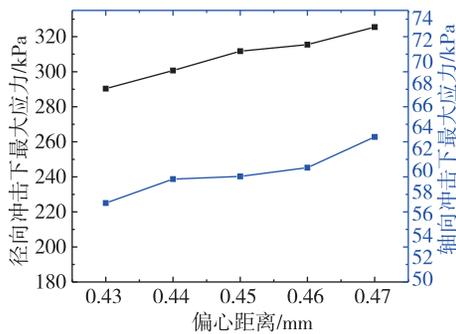
(b) 内圆角半径对抗冲击性能的影响



(c) 内支撑柱直径对抗冲击性能的影响



(d) 外球面半径对抗冲击性能的影响



(e) 偏心距离对抗冲击性能的影响

图7 各结构参数对“上厚下薄”谐振子抗冲击性能的影响规律

Fig. 7 Influence of key structural parameters of “thick top and thin bottom” harmonic oscillator on half-sine wave

从图7所示仿真结果可知,“上厚下薄”谐振子抵抗冲击能力随着内球面半径、内圆角半径和内支撑柱直径的增大而增强,随着外球面半径和偏心距离的增大而减弱。

综上所述,根据结构形式对谐振子抗干扰以及抗冲击性能的影响,在全角半球陀螺谐振子结构设计时,为保证谐振子具有最优的力学环境适应性,可以选择“上厚下薄”结构形式。根据结构参数对谐振子抗干扰以及抗冲击性能的影响规律,提出了“上厚下薄”谐振子结构参数设计方向:内外球面和偏心距离要控制在合理的尺寸范围,使谐振子抗干扰以及抗冲击性能综合最优;内支撑柱和内圆角的尺寸在满足基座装配和可加工的前提下,应设计的尽量大,以增强抗干扰能力和抗冲击能力。

## 4 结论

围绕全角半球陀螺的典型使用环境特征,研究了“等壁厚”“上薄下厚”“上厚下薄”3种结构形式对谐振子力学环境适应性的影响。通过模态分析及半正弦波冲击仿真得出,“上厚下薄”谐振子相较于

平均尺寸相同的“等壁厚”和“上薄下厚”谐振子,工作模态与相邻模态频率间隔更大,抵抗频率串扰、避免振型耦合的能力更强,在相同冲击条件下,应力极值更小,抵抗冲击过载的能力更强。在进一步研究结构参数对“上厚下薄”谐振子抗干扰以及抗冲击性能的影响规律之后,提出了“上厚下薄”形式谐振子的结构参数设计方向,为陀螺的设计加工提供了有效参考。

## 参考文献

- [1] 徐海刚,潘兴旺,邱丽玲,等.半球谐振陀螺惯性系统设计探讨[J].导航定位与授时,2019,6(6):14-18.  
XU Haigang, PAN Xingwang, QIU Liling, et al. Research on inertial system design of hemispheric resonant gyro[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(6): 14-18(in Chinese).
- [2] 黄帅,柳凯,党建军,等.改进人工蜂群算法在谐振子参数优化中的应用[J].自动化与仪表,2021,36(11):96-99+102  
HUANG Shuai, LIU Kai, DANG Jianjun, et al. Improved artificial bee colony algorithm in parameter optimization design of HRG resonator[J]. Automation & Instrumentation, 2021, 36(11): 96-99+102(in Chinese).
- [3] 谭品恒,方针,方仲祺,等.基于工程应用的半球谐振陀螺结构设计研究[J].压电与声光,2021,43(2):265-269.  
TAN Pinheng, FANG Zhen, FANG Zhongqi, et al. Research on structure design of hemispherical resonator gyro based on engineering applications[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(2): 265-269(in Chinese).
- [4] 李毅轩,周怡,苏岩,等.半球谐振陀螺的结构参数对工作模态以及进动系数的影响[J].飞控与探测,2021,4(1):46-51.  
LI Yixuan, ZHOU Yi, SU Yan, et al. The effect of structural parameters of hemispherical resonator gyroscope on operation mode and angular gain[J]. Flight Control & Detection, 2021, 4(1): 46-51(in Chinese).
- [5] 胡强,滕霖,岳亚洲,等.变壁厚半球谐振子设计及参数优化[J].中国惯性技术学报,2020,28(6):789-793.  
HU Qiang, TENG Lin, YUE Yazhou, et al. Design and parameter optimization of hemispherical resonator with variable wall thickness[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2020, 28(6): 789-793(in Chinese).
- [6] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro:

- from wineglass to the planets[J]. *Advances in the Astronomical Sciences*, 2013, 134: 1157-1178.
- [ 7 ] DELHAYE F. HRG by SAFRAN: the game-changing technology[C]// *Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. Lake Como: IEEE, 2018: 1-4.
- [ 8 ] DELEAUX B, LENOIR Y. The world smallest, most accurate and reliable pure inertial navigator: ONYX™ [C]// *Proceedings of 2018 DGON Inertial Sensors and Systems (ISS)*. Braunschweig: IEEE, 2018: 1-24.

(编辑:黄利华)