

涉密论文 ☐ 公开论文 ☐

浙江大学

本科生毕业论文（设计）



题目 MEMS 四质量块陀螺仿真分析

姓名与学号 张凯瑜

指导教师 郑旭东

年级与专业 大四 飞行器设计与工程

所在学院 航空航天学院

提交日期 2022.5.22

浙江大学本科生毕业论文（设计）承诺书

1. 本人郑重地承诺所呈交的毕业论文（设计），是在指导教师的指导下严格按照学校和学院有关规定完成的。
2. 本人在毕业论文（设计）中除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 浙江大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。
3. 与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。
4. 本人承诺在毕业论文（设计）工作过程中没有伪造数据等行为。
5. 若在本毕业论文（设计）中有侵犯任何方面知识产权的行为，由本人承担相应的法律责任。
6. 本人完全了解 浙江大学 有权保留并向有关部门或机构送交本论文（设计）的复印件和磁盘，允许本论文（设计）被查阅和借阅。本人授权 浙江大学 可以将本论文（设计）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索和传播，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编本论文（设计）。

作者签名：

导师签名：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

致谢

时光匆匆，转眼间，四年的大学本科生活即将结束。回想起 18 年入学之际，看着偌大的校园与青春洋溢的身影，我心里既有着对未来的迷茫与忐忑，也充满了克服一切困难挑战自我的决心与斗志。四年里，从“小萌新”到“老油条”，求是园里的老师、同学、山山水水、一草一木均给予了我美好的回忆。

感谢我的导师郑旭东老师，郑老师以其丰富的科研、人生经验指导我，耐心地给我讲解知识，为我在科研的路上指明方向，让我对原本一无所知的领域从零开始一步步深入下去，使我受益匪浅。郑老师工作十分辛苦，但总会抽出时间加班加点来指导我的学习与工作，同时，他对研究求是、严谨以及对细节的深入追寻使我深受感染。再一次由衷地感谢郑老师，祝老师工作顺利，身体健康。

感谢课题组王雪同师兄对我的帮助，耐心地为我讲解理论知识，引导我入门，帮助我解决实验、仿真上的难点与疑点。希望我们大家以后能够共同进步、学业有成。感谢我的班主任石老师，辅导员王老师，教学科周老师等教师们，关心我们在学习与生活中遇到的困难，在我迷茫的时候指明方向，提供宝贵的建议。

感谢我的室友们，四年里，我们一同学习、一同玩乐，在欢乐的日常中共同进步共同成长。感谢我的挚友郑浩然和高天阳，我们一起游戏、一起聊天，陪伴我度过了许多无聊郁闷的夜晚。

感谢浙大蓝田新媒体的小伙伴们，大家一起办活动、打比赛，相互交流相互学习，给予了我许多经验与技能，给我留下了深刻而宝贵的回忆。愿大家都有美好的未来。

最后，感谢父母对我的养育之恩，始终支持着我、鼓励着我，希望自己日后坚守理想，以知识和技能武装自己，以严谨求是的态度学习、科研，好好生活、发光发热，以天下为己任，以真理为依归。

摘要

MEMS四质量块微陀螺仪自出现以来,在航空航天、汽车电子以及工业自动化等领域得到了广泛的应用,随着如今电脑技术的不断发展,仿真分析成为了陀螺设计制备过程中必不可少的一环,能够在设计阶段就找出陀螺结构可能存在的缺陷,极大地提高了陀螺研发的效率。

本文首先介绍了微机械陀螺的主要性能指标以及典型分类方式,列举了四质量块陀螺仪在国际上比较典型的陀螺模型与性能参数。

其次本文针对加州大学、斯坦福大学、清华大学以及上海交通大学的四质量块微陀螺仪的结构特性进行了分析,并通过L-edit软件对其结构进行了模型绘制。并搭建了四质量块微陀螺仪的多物理场基本仿真体系,其中包括模态仿真、抗冲击性能仿真、应力适应性仿真、热弹性阻尼Q值仿真,对不同四质量块微陀螺仪进行了仿真验证,确定其工作模态的谐振频率,从加速度冲击情况、锚区应力影响情况等角度分析不同陀螺的环境适应能力,并从热弹性阻尼角度计算其品质因数,验证了基本仿真体系的可行性。

最后本文运用搭建的基本仿真体系,以加州大学的四质量块结构与音叉结构为例,对两种结构进行对比分析,验证了四质量块结构在模态匹配、抗冲击性能、应力适应能力方面的优越性。

关键词: MEMS 陀螺; 四质量块结构; 音叉结构; 仿真分析; 环境适应性

Abstract

Since its emergence, MEMS four-mass micro-gyroscopes have been widely used in aerospace, automotive electronics and industrial automation. With the continuous development of computer technology, simulation analysis has become indispensable in the design and preparation of gyroscopes. One link, the possible defects of the gyro structure can be found out at the design stage, which greatly improves the efficiency of gyro research and development.

This paper firstly introduces the main performance indicators and typical classification methods of micromachined gyroscopes, the typical gyro models and performance parameters of four mass gyroscope in the world are listed.

Secondly, this paper analyzes the structural characteristics of the four-mass microgyroscopes of the University of California, Stanford University, Tsinghua University and Shanghai Jiaotong University, and draws the model of its structure through L-edit software. And built the multi-physics basic simulation system of the four-mass micro-gyroscope, including modal simulation, shock resistance simulation, stress adaptability simulation, thermoelastic damping Q value simulation, and carried out different four-mass micro-gyroscopes. Simulation and verification, determine the resonant frequency of its working mode, analyze the environmental adaptability of different gyroscopes from the perspective of acceleration impact, anchor area stress, etc., and calculate its quality factor from the perspective of thermoelastic damping, which verifies the feasibility of the basic simulation system.

Finally, using the basic simulation system built in this paper, taking the four-mass structure and the tuning fork structure of the University of California as an example, the two structures are compared and analyzed, and the four-mass structure is verified in terms of modal matching, impact resistance and stress adaptability. the superiority.

Keywords: MEMS gyroscope; four-mass structure; tuning fork structure; simulation analysis; environmental adaptability

目录

第一部分 毕业论文（设计）

1	绪论	1
1.1	微机械陀螺概述.....	1
1.1.1	微机械陀螺主要性能指标.....	1
1.1.2	微机械陀螺主要类型.....	2
1.2	四质量块微陀螺仪的研究概况.....	3
1.3	论文研究内容.....	7
2	四质量块微陀螺仪结构图与模型绘制.....	8
2.1	不同大学的四质量块微陀螺仪结构图与特性分析.....	8
2.1.1	加州大学四质量块微陀螺仪.....	8
2.1.2	斯坦福大学四质量块微陀螺仪.....	8
2.1.3	清华大学四质量块微陀螺仪.....	9
2.1.4	上海交通大学四质量块微陀螺仪.....	10
2.2	四质量块微陀螺仪模型绘制.....	10
3	四质量块微陀螺仪的多物理场基本仿真体系.....	12
3.1	模态仿真.....	12
3.1.1	加州大学四质量块微陀螺仪.....	12
3.1.2	斯坦福大学四质量块微陀螺仪.....	13
3.1.3	清华大学四质量块微陀螺仪.....	14
3.1.4	上海交通大学四质量块微陀螺仪.....	15
3.2	抗冲击性能仿真.....	16
3.2.1	加州大学四质量块微陀螺仪.....	16
3.2.2	斯坦福大学四质量块微陀螺仪.....	21
3.2.3	清华大学四质量块微陀螺仪.....	25
3.2.4	上海交通大学四质量块微陀螺仪.....	28
3.3	应力适应性仿真.....	32
3.3.1	加州大学四质量块微陀螺仪.....	32

3.3.2 清华大学四质量块微陀螺仪.....	35
3.3.3 上海交通大学四质量块微陀螺仪.....	37
3.4 热弹性阻尼 Q 值仿真.....	40
3.4.1 热弹性阻尼简介.....	40
3.4.2 热弹性阻尼仿真步骤.....	41
3.4.3 仿真结果.....	41
3.4.4 计算验证.....	42
4 四质量块结构与音叉结构对比分析.....	43
4.1 模态对比分析.....	43
4.2 抗冲击性能对比分析.....	44
4.3 应力适应性仿真对比分析.....	48
5 总结与展望.....	55
5.1 全文总结.....	55
5.2 展望.....	55
参考文献.....	57
附录.....	59
作者简历（示例）.....	60
《浙江大学本科生毕业论文（设计）任务书》	
《浙江大学本科生毕业论文（设计）考核表》	

1 绪论

1.1 微机械陀螺概述

微机械陀螺^{[1][2]}是一种测量角速度和角位移的惯性传感器，微机械陀螺以硅微机械加工工艺为基础，与传统的光学陀螺、机械转自陀螺比较，其体积较小、功耗较低，并且可靠性要更加优秀，在军事领域、消费电子领域等有着更加光明的应用前景，因此微机械陀螺一直受到各个研究机构的重视。

1.1.1 微机械陀螺主要性能指标

微机械陀螺导航定位的精确性由其性能^{[3][4]}所决定，大致可以划分为惯导级、战术级以及速率级三个等级，其划分标准如下。

参数	速率级	战术级	惯导级
标度因子非线性度/%FS	0.1~1	0.001~0.1	<0.001
零偏稳定性/deg/h	10~1000	0.01~10	<0.01
角度随机游走系数/deg/√h	>0.5	0.001~0.5	<0.001
动态范围/deg/s	50~1000	>500	>400
带宽/Hz	>70	~100	~100

表 1-1 微陀螺仪性能等级^[4]

(一) 标度因子非线性度

标度因子是陀螺仪输出量与输入角速率变化的比值，通常用某一特定的直线斜率表示，而标度因子非线性度则指运用最小平方方法来近似的曲线与原本曲线的偏移程度。

(二) 零偏稳定性

微陀螺仪在没有外界输入角速度的状态下，由于构造缺陷和电路噪声的影响，依旧可能产生少许输出，零偏应理解为陀螺仪的输出信号围绕其均值的起伏或波动，在角速度输入为零时，陀螺仪的输出是一条复合白噪声信号缓慢变化的曲线，曲线的峰-峰值就是零偏值。

(三) 角度随机游走系数

角度随机游走系数是表示在没有外界输入角速度的状态下受到噪声干扰的参数，是指在一段时间内因为白噪声导致的随机输出误差，可以由Allen方差曲线来表示。

(四) 动态范围

微机械陀螺在正、反方向能检测到的输入角速率的最大值表示了陀螺的测量范围，而量程与阈值的比被称为陀螺的动态范围，用来反映陀螺对于外交转动情况的敏感性。

(五) 带宽

带宽是指微机械陀螺实际可以检测到的最小角速度和最大角速度的频率的差值，用来表示陀螺反应外界变化的动态性能。

综上所述，更加优秀的微机械陀螺性能指标是MEMS陀螺研究的不懈追求，微机械陀螺在实际检测过程中会受到各种各样的环境因素影响，包括加速度冲击、应力影响、温度干扰等，这些因素都制约了微机械陀螺实际应用的范围。因此，微机械陀螺的环境适应性也不可忽视，本项目搭建了四质量块微陀螺仪的基本仿真体系，从仿真角度检测和优化陀螺的环境适应性。

1.1.2 微机械陀螺主要类型

微机械陀螺具有很多的分类方式^[4]，以工作原理为判断标准，主要可以分为四类，包括基于柯氏效应的微振动陀螺仪、基于萨格纳克效应的光纤陀螺仪、基于静电悬浮原理的静电转子陀螺仪以及基于原子自旋或干涉效应的原子陀螺仪。

(一) 微振动陀螺

1851年用来验证地球自转的傅科摆是微振动陀螺最初的祖先，微振动陀螺的基本原理是利用柯氏力进行能量的传递，将谐振器的一种振动模式激励到另一种振动模式，后一种振动模式的振幅与输入角速度的大小成正比，通过测量振幅实现对角速度的测量。

(二) 光纤陀螺

光纤陀螺仪是基于萨格纳克效应来检测外界输入角速度的，萨格纳克效应是相对惯性空间转动的闭环光路中所传播光的一种普遍的相关效应，即在同一闭合光路中从同一光源发出的两束特征相等的光，以相反的方向进行传播，最后汇合到同一探测点。若绕垂直于闭合光路所在平面的轴线，相对惯性空间存在着转动角速度，则正、反方向传播的光束走过的光程不同，就产生光程差，其光程差与旋转的角速度成正比。因而只要知道了光程差及与之相应的相位差的信息，即可得到旋转角速度。

(三) 静电转子陀螺

在电路设计和电子设计合理的情况下, 静电转子陀螺能使其转子承受的总力为零, 以保持真空悬浮的状态, 因此不会受到锚点阻尼等影响, 能达到极低的零漂值, 从而获得非常优秀的性能。但是相对应的, 其要求更高的真空度, 静电悬浮的控制难以达成, 且其抗冲击性能较差。

(四) 原子陀螺

原子陀螺根据工作原理的区别可以分为利用原子自旋的核磁共振式和利用原子干涉的冷原子式。相较于其他陀螺类型, 原子陀螺具有更优秀的动态响应能力、更好的测量精度和更强的可靠性, 未来的发展前景十分优秀。

1.2 四质量块微陀螺仪的研究概况^[4]

微机电系统最初出现于上世纪七十年代, 自从第一个微机械陀螺发明至今只有三十余年, 然而就是在这三十余年中, 微机械陀螺经历了快速技术迭代, 许多研究人员对其进行了探索, 在现代生活中扮演着越来越关键的角色。本文搭建了四质量块微陀螺仪仿真体系, 并对于四质量块结构与音叉结构进行了仿真对比分析, 接下来将介绍现今主要的几种四质量块陀螺仪的发展情况和性能参数, 为本文的研究打下基础。

四质量块微陀螺仪是由音叉陀螺结构改进而来, 以消除音叉陀螺结构驱动模态和检测模态的非对称性, 减小两者的频率分裂, 提高陀螺性能。如今, 虽然四质量块结构的研究才刚刚起步, 但其展现出来的研究前景非常光明。

从2011年开始^{[6]-[11]}, 加州大学尔湾分校的Andrei M.Shkel等^{[12][13]}研究员便对于四质量块结构进行了工艺和理论的研究。其品质因子从最开始的31万提升到了2016^[14]年的170万。在进行真空封装后, 达到了超越200万^[15]的品质因数, 其角度随机游走系数和零偏稳定性分别达到了 $0.015\text{deg}/\sqrt{\text{h}}$ 和 0.09deg/h 。

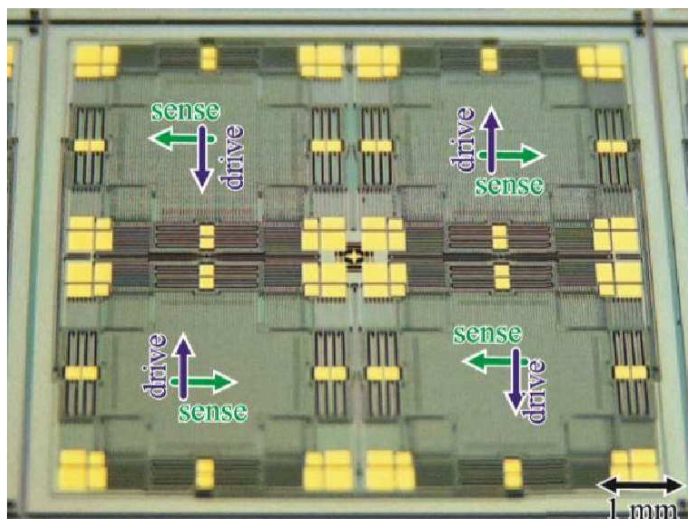


图 1-1 加州大学四质量块微陀螺仪

2013年，东南大学夏敦柱教授等^[16]研究人员提出的四模匹配三轴硅微陀螺，在双静电调谐条件下，成功地将四模的分频降低到30Hz以下。在热弹性阻尼模拟下，检测和驱动模态的Q值分别达到19507和23816。

2016年斯坦福大学S.Wisher、P.Shao等^[18]研究员提出了一种单驱动工作模式的“高频”谐振三轴音叉陀螺仪。该四质量器件是在一个2x2 mm²真空封装模具上实现的，使用epi-seal工艺，使其成为最小的圆片级封装的三轴陀螺之一。与常规谐振式TFGs相比，谐振频率设计为相对较高(~138 kHz)，允许模式匹配操作的高带宽，并增强了抗冲击和振动性能。实验测得其X、Y、Z轴的角度随机游走系数为0.29deg/√h、0.35deg/√h和0.028deg/√h。

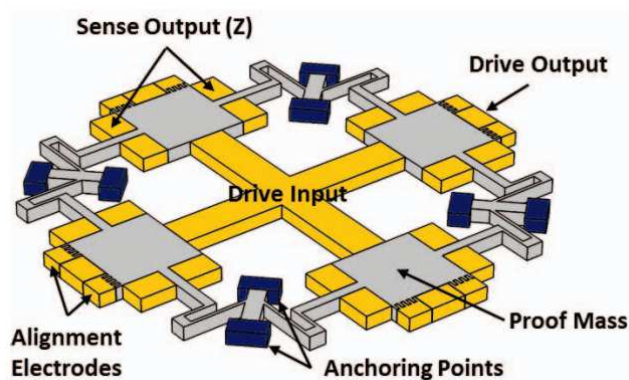


图 1-2 斯坦福大学的单驱动四质量三轴 TFG 示意图

2017年，清华大学张嵘研究组^{[19]-[21]}提出了一种中心支撑的四质量陀螺仪^{[22][23]}。如上图，在四个主要方向上分布着四个质量块，它们之间以弹性梁连接到中心支撑锚点。实验结果表明，驱动模式下的品质因数为8500，白噪声水平约为0.72deg/h/√Hz，Allen方差稳定性为0.12deg/h。

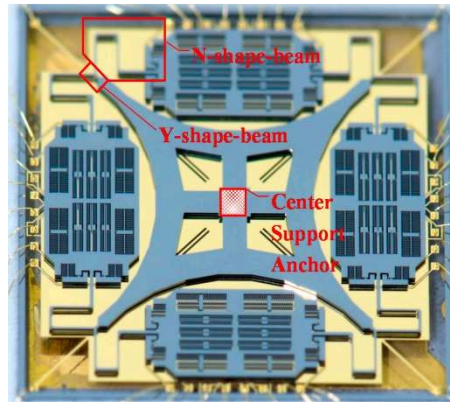


图 1-3 清华大学的中心支撑四质量块微陀螺仪

2018年，一种以环形分布结构为基础的四质量块微机械陀螺^[23]被西安飞行自动控制研究所的王永等研究员^[22]提出，其实验测得的品质因数为200000，在常温常压下，其零漂小于4deg/h，带宽为60Hz。

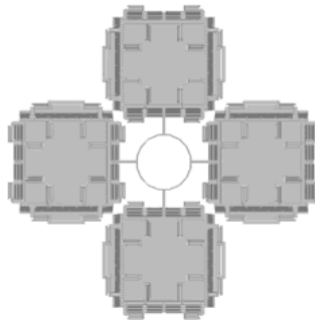


图 1-4 航空工业西安飞行自动控制研究所的环式分布的四质量块陀螺结构简图[12]

2018年，新加坡创新科技署微电子研究所吴国强研究组^[25]设计了一种特殊的四质量块陀螺仪，QMG通过机械抑制大大降低了由于加速度和振动而产生的共模信号。驱动和传感方向的动量和扭矩平衡有助于通过锚的超低能量耗散，从而获得高质量因子(Q)和高分辨率。实验测试其艾伦方差零偏稳定性为5.9deg/h，为实现高精度惯性测量单元的高性能陀螺仪设计提供了一种新方法。

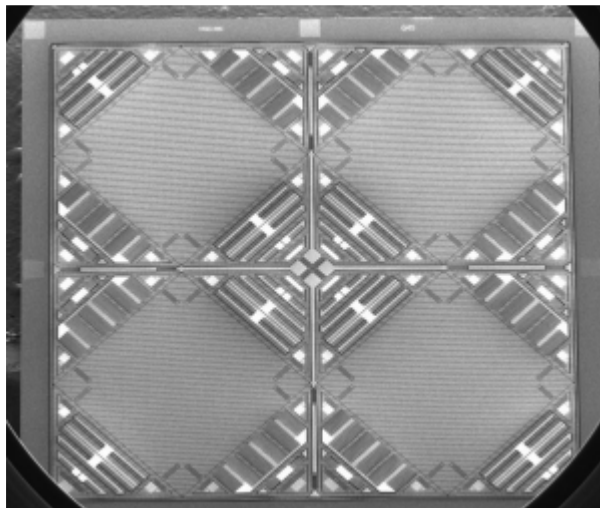


图 1-5 新加坡创新科技署微电子研究所的四质量块结构

2020年，上海交通大学李敏阳等^[4]设计了一种四质量块微陀螺仪，采用新型的结构解耦方式使得其驱动模态和检测模态实现完全匹配，通过二自由度和质量块间采用杠杆互连的方式，有效提高了陀螺的环境适应性和模态匹配能力。

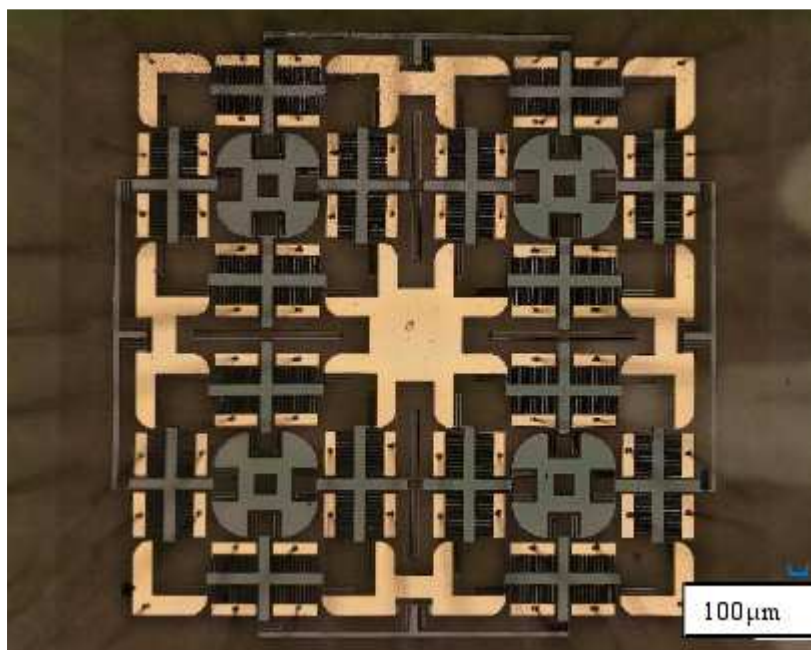


图 1-6 上海交通大学的四质量块结构

上述是四质量块结构目前几乎全部的国内外研究情况。相对于单质量块陀螺和双质量块陀螺，四质量块陀螺在提高品质因子和抗加速度冲击的方面具有巨大的优势，上述研究将对于本文的设计有重大的启迪作用。

1.3 论文研究内容

本研究基于加州大学、斯坦福大学、清华大学以及上海交通大学的四质量块微陀螺结构模型，对多种典型结构进行Comsol多物理场仿真，搭建四质量块结构基本仿真体系，并在此基础进行一定的结构优化尝试。

全文的内容结构如下：

第一章，绪论。主要介绍了微机械陀螺的性能指标以及几种主要类型，并列举了国际上主要几种四质量块结构的结构特征与性能参数，。

第二章，四质量块微陀螺仪模型绘制与特征分析。仿照上海交通大学、清华大学、加州大学、斯坦福大学的四质量块结构图进行了L-edit模型绘制，并通过文献对其进行了特征分析。

第三章，四质量块微陀螺仪的多物理场基本仿真体系。对于上海交通大学、清华大学、加州大学、斯坦福大学的四个典型四质量块结构进行Comsol仿真分析，包括模态仿真、抗冲击性能仿真、应力适应性仿真以及热弹性阻尼仿真。在此基础上，总结分析不同结构特点对于陀螺性能的影响。

第四章，四质量块结构与音叉结构对比仿真，以加州大学的四质量块结构与音叉结构为例，对两种结构进行对比分析。

第五章，总结和展望。

2 四质量块微陀螺仪结构图与模型绘制

2.1 不同大学四质量块微陀螺仪结构图与特性分析

2.1.1 加州大学四质量块微陀螺仪

与传统的音叉设备不同，该方案运用的杠杆式四重质量架构对沿驱动轴和传感轴的外部振动和机械冲击能够产生机械抑制作用，其结构对称性抑制了由制造缺陷和温度变化引起的频率漂移，提高了环境鲁棒性，极大的提高了陀螺仪的性能。但是四质量块结构会导致更多的连接梁和锚区，从而引入更多的误差因素，增加设计和制造难度。

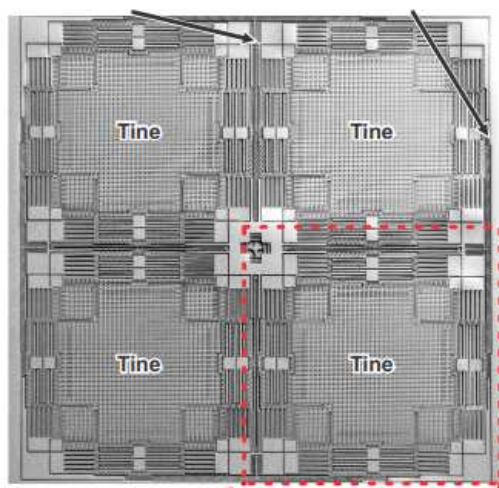


图 2-1 四质量块结构图

2.1.2 斯坦福大学四质量块微陀螺仪

该方案由四个质量块组成，它们通过“鱼钩”弯曲连接到锚，以支持平面内和平面外运动。该器件具有更高的工作频率，以增加带宽和动态范围，同时提高抗冲击和线性振动的能力，器件尺寸更小。但由于其采用了模态分离操作，其X、Y检测模态的灵敏度以及噪声性能相对较差

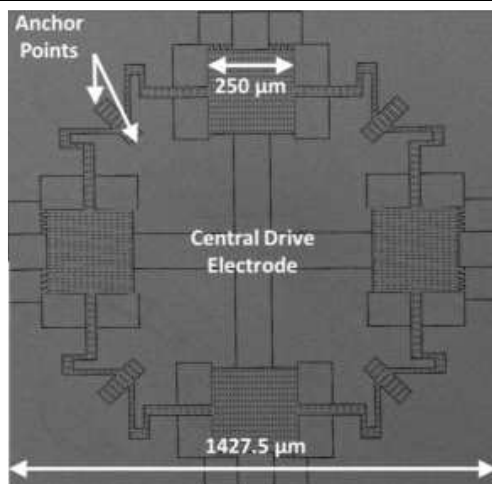


图 2-2 四质量块结构图

2.1.3 清华大学四质量块微陀螺仪

该方案将半球谐振陀螺仪转化为平面结构，采用弯曲模式与中心支撑结构，使TFG（大质量和高分辨率）和HRG（完全对称和高 Q ）的优点集成到单一的平面结构。相较于常规四质量块陀螺，其结构更加简单，更少的连接梁数量与单锚区的设计减少了误差因素与锚区损耗，同时保留了四质量块的优势，能够通过平面内双音叉谐振器和差分信号提取，消除了加速度和冲击等共模线性和离心干扰，增强了环境鲁棒性。

但是其集总质量扭转运动与检测模态运动之间存在耦合分量，间接影响了集总质量平面运动过程中驱动模态和检测模态的耦合振荡，增大了两个工作模态之间的频率分裂，降低了陀螺的性能。

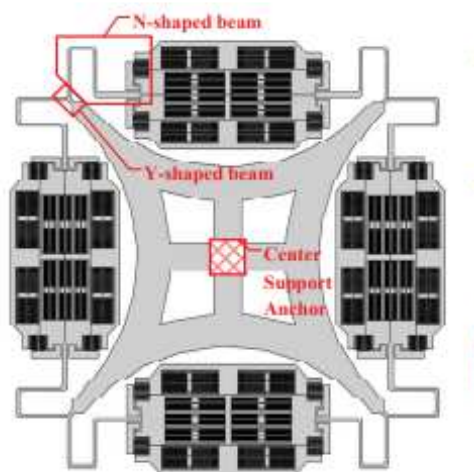


图 2-3 四质量块结构图

2.1.4 上海交通大学四质量块微陀螺仪

该方案^[4]通过折叠梁刚度的合理选择以及二自由度的结构设计使得两个工作模态实现了完全解耦。同时，相邻质量块之间通过同步耦合杠杆连接，使得四个质量块能够实现机械同步，四质量块的驱动模态与检测模态成 90° 的完全对称，使得其频率分裂最小化。

虽然该四质量块微陀螺仪的频率分裂很小，但是其低频模态过多，极大的影响了其工作的稳定性，容易受到外部振动的干扰。

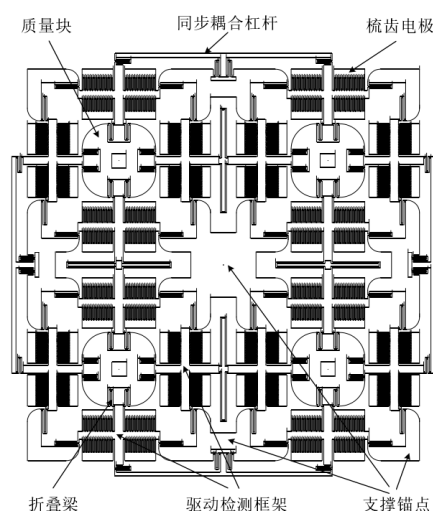


图 2-4 四质量块结构图

2.2 四质量块微陀螺仪模型绘制

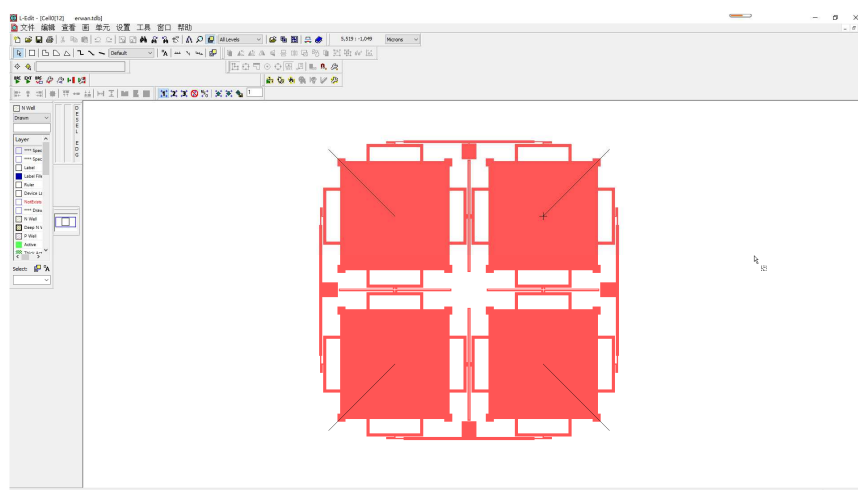


图 2-5 加州大学陀螺仪模型绘制

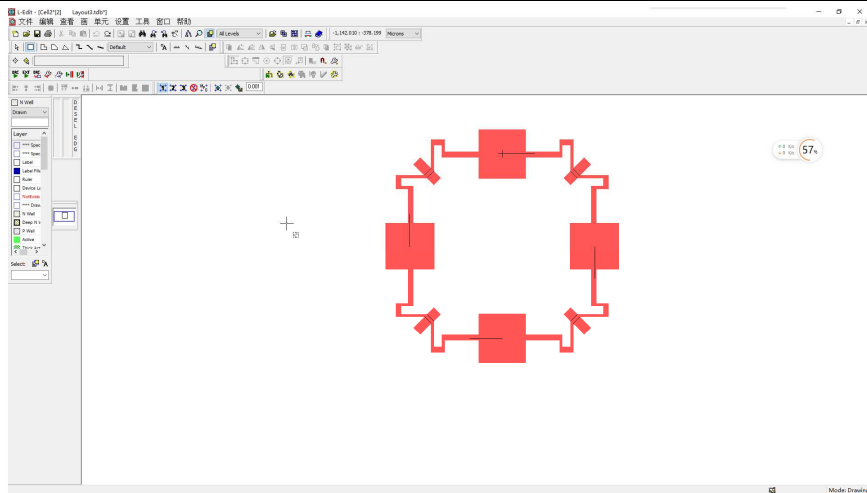


图 2-6 斯坦福大学陀螺仪模型绘制

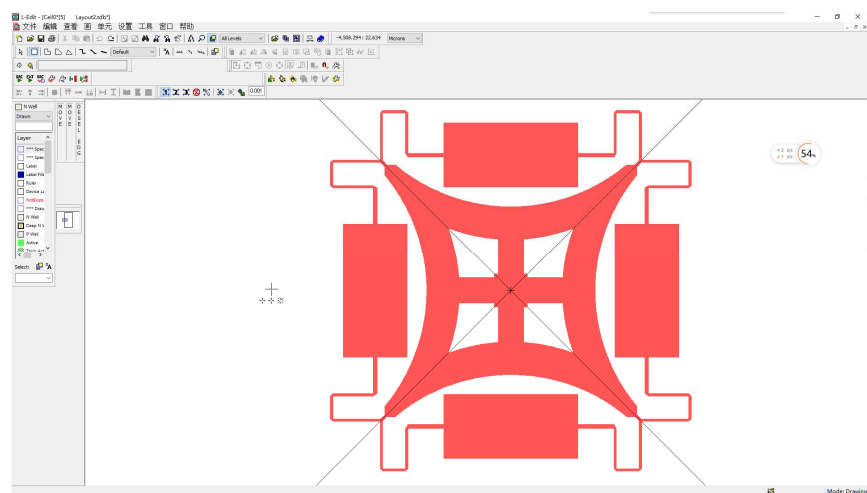


图 2-7 清华大学陀螺仪模型绘制

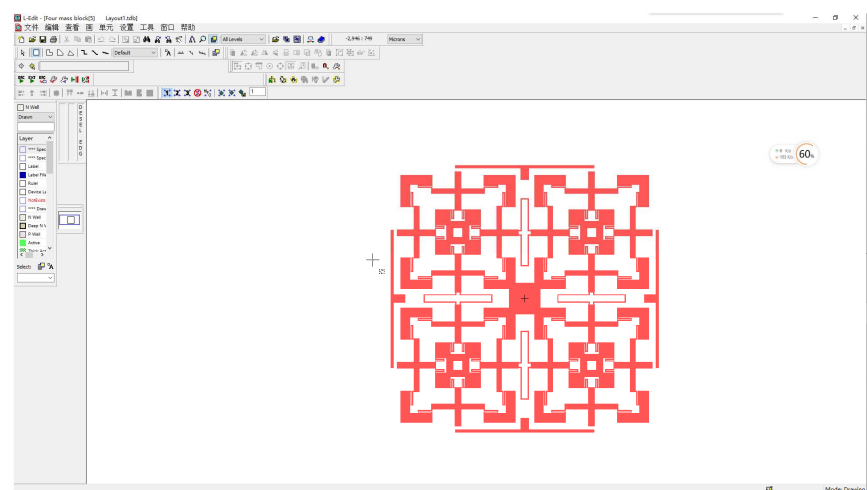


图 2-8 上海交通大学陀螺仪模型绘制

3 四质量块微陀螺仪的多物理场基本仿真体系

陀螺的设计与制备是一个繁琐复杂的过程，一个优秀的仿真体系能使陀螺在设计过程中就发现结构中存在的某些缺陷，本节将从模态仿真、抗冲击性能仿真、应力适应性仿真以及热弹性阻尼仿真四个方面构建基础仿真体系，分析不同结构四质量块陀螺的性能特点，为后续的结构优化做好铺垫。

为了便于仿真分析的比较，本次分析仅从结构设计角度出发，将L-eidt绘制的四质量块微陀螺仪结构模型导入到Comsol仿真软件当中，进行超细化半导体模型的网格划分，统一设置其材料为Comsol材料库中的Si - Silicon (single-crystal, isotropic)，并在四质量块微陀螺仪锚区部分添加固定约束。

属性	值	单位
定压热容	700	J/(kg · K)
密度	2329	kg/m ³
导热系数	130	W/(m · K)
杨氏模量	1. 7E+11	Pa
热膨胀系数	0. 28	1
泊松比	2. 6E-6	1/K
相对介电常数	11. 7	1

表 3-1 Si - Silicon (single-crystal, isotropic)材料属性

3.1 模态仿真

陀螺的工作模态是了解陀螺性能的基础，本节将对于上海交通大学、清华大学、加州大学、斯坦福大学的四个典型四质量块结构进行COMSOL工作模态仿真分析。

3.1.1 加州大学四质量块微陀螺仪

通过COMSOL结构力学的特征频率分析，得到其驱动模态与检测模态的特征频率与振型，并与原文献对比：

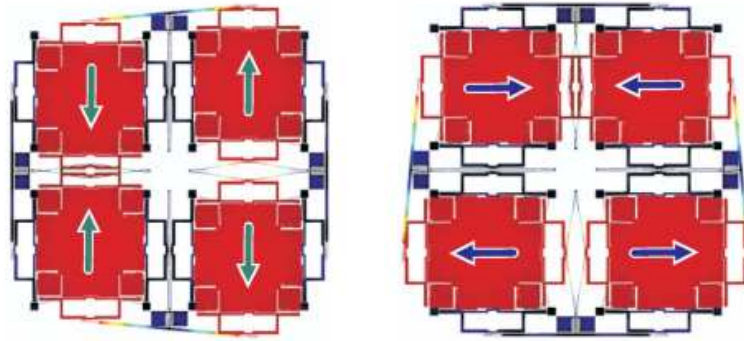


图 3-1 驱动、检测模态（原文）



图 3-2 驱动、检测模态（仿真）

该四质量块陀螺的驱动模态与检测模态特征频率分别为2780Hz与2789.7Hz，位于特征频率的第七、八位，可以看出该陀螺的驱动模态和检测模态的频率分裂很小，但与原文提到的2170Hz工作频率有较大偏差，推测其频率偏移产生的主要原因因为结构图绘制过程中的参数误差以及仿真选择的硅材料不完全一致。

3.1.2 斯坦福大学四质量块微陀螺仪

通过COMSOL结构力学的特征频率分析，得到其驱动模态与检测模态的特征频率与振型，并与原文献对比：

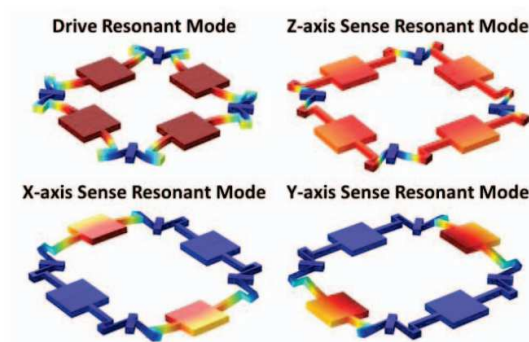


图 3-3 驱动模态、Z 轴检测模态、X 轴检测模态、Y 轴检测模态（原文）

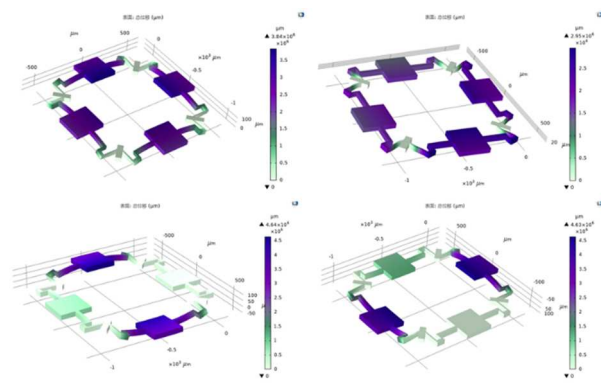


图 3-4 驱动模态、Z 轴检测模态、X 轴检测模态、Y 轴检测模态（仿真）

该四质量块陀螺的以下四种模态特征频率分别为148.7kHz、163.0kHz、147.3kHz、147.4kHz，位于特征频率的五到八位，与原文中提到的138kHz的谐振频率相差不大。

3.1.3 清华大学四质量块微陀螺仪

通过COMSOL结构力学的特征频率分析，得到其驱动模态与检测模态的特征频率与振型，并与原文献对比：

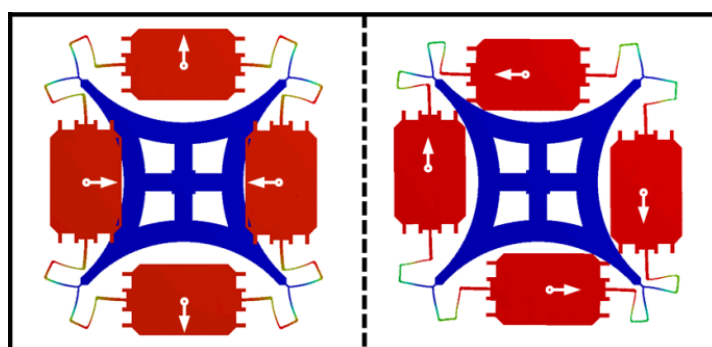


图 3-5 驱动、检测模态（原文）

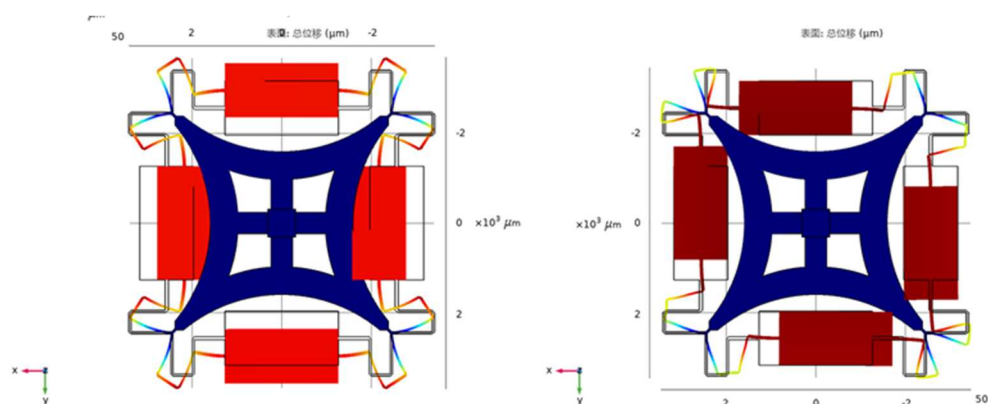


图 3-6 驱动、检测模态（仿真）

该四质量块陀螺的驱动模态与检测模态特征频率分别为 6952.2Hz 与 6706.8Hz，位于特征频率的第七、八位，可以看出该陀螺的驱动模态和检测模态的固有频率是基本匹配的，且与原文的仿真结果 6930Hz、6605Hz 差异较小。

3.1.4 上海交通大学四质量块微陀螺仪

通过 COMSOL 结构力学的特征频率分析，得到其驱动模态与检测模态的特征频率与振型，并与原文献对比：

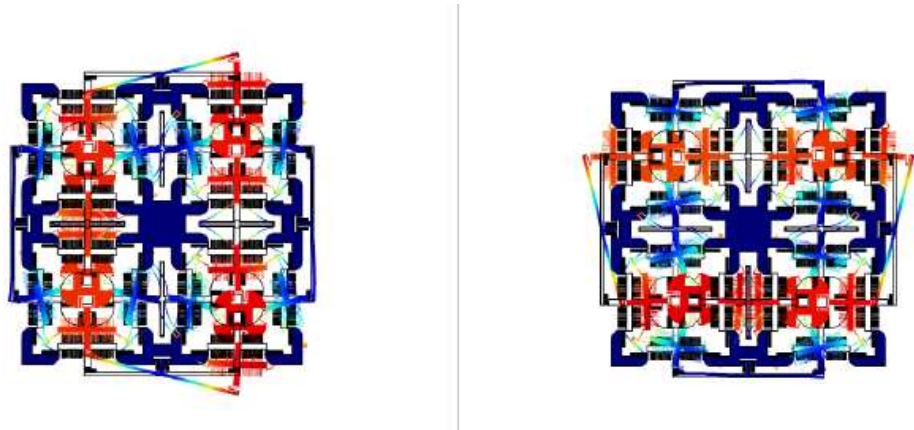


图 3-7 驱动、检测模态（原文）

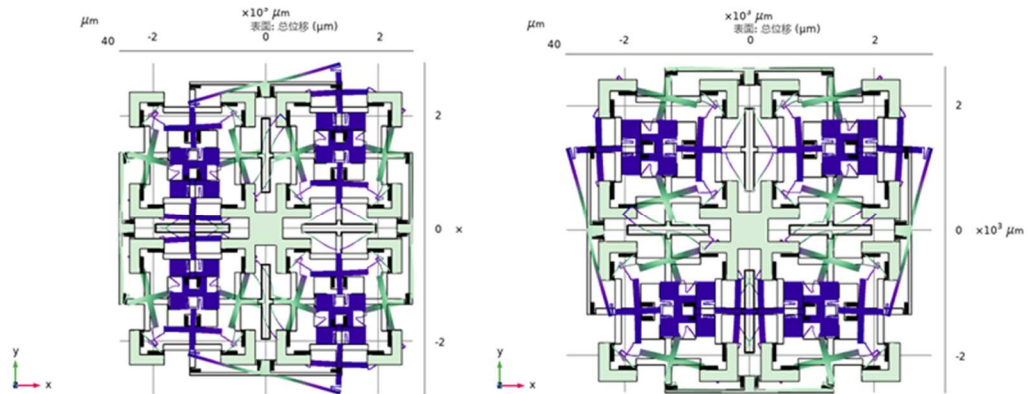


图 3-8 驱动、检测模态（仿真）

该四质量块陀螺的驱动模态与检测模态特征频率分别为 35640Hz 与 35634Hz，位于特征频率的十一、十二位，可以看出该陀螺的驱动模态和检测模态的频率分裂很小的，且与原文的仿真结果 38653Hz、38660Hz 差异较小。

3.2 抗冲击性能仿真

陀螺的抗冲击性能是判断一个四质量块结构设计优劣的一个重要指标,直接关系到陀螺的对于环境的适应能力,本节将对于上海交通大学、清华大学、加州大学、斯坦福大学的四个典型四质量块结构进行Comsol抗冲击性能仿真分析。

3.2.1 加州大学四质量块微陀螺仪

(一)不同方向加速度冲击的稳态分析

1) X轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度,加速度方向指向X轴正向,大小为1000G,通过COMSOL结构力学的稳态分析,得到其应力与位移场的分布如下所示:

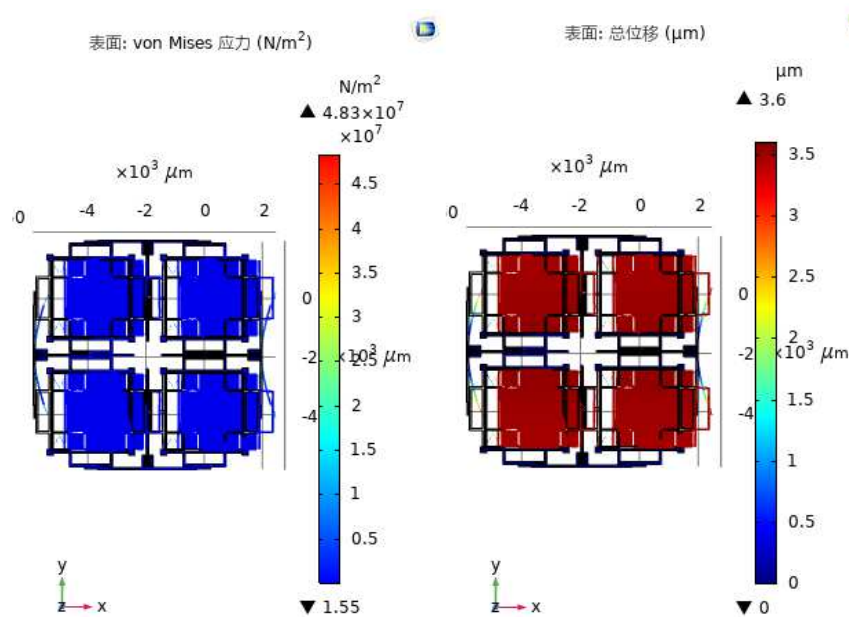


图 3-9 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

2) Z轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度,加速度方向指向Z轴正向,大小为1000G,通过COMSOL结构力学的稳态分析,得到其应力与位移场的分布如下所示:

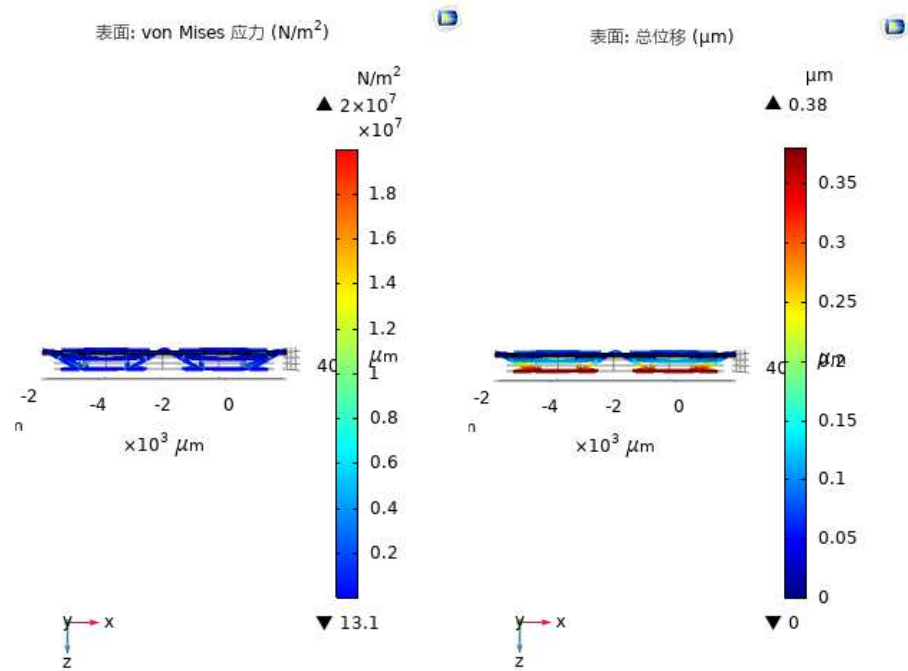


图 3-10 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

3) XY方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿X轴、Y轴的角平分线方向，大小为1000G，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

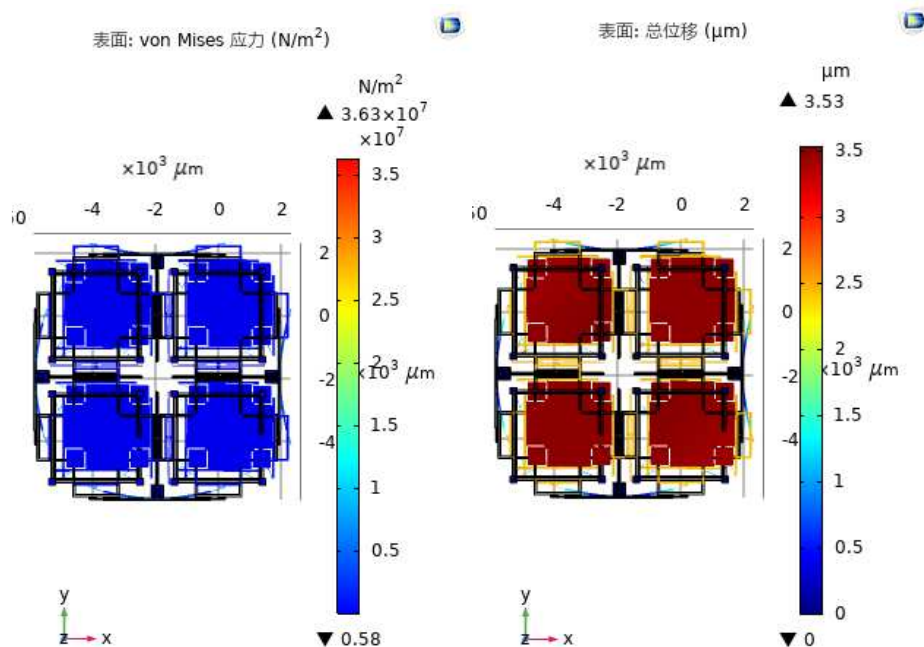


图 3-11 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

4) XZ方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿X轴、Z轴的角平分线方向，大小为1000G，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

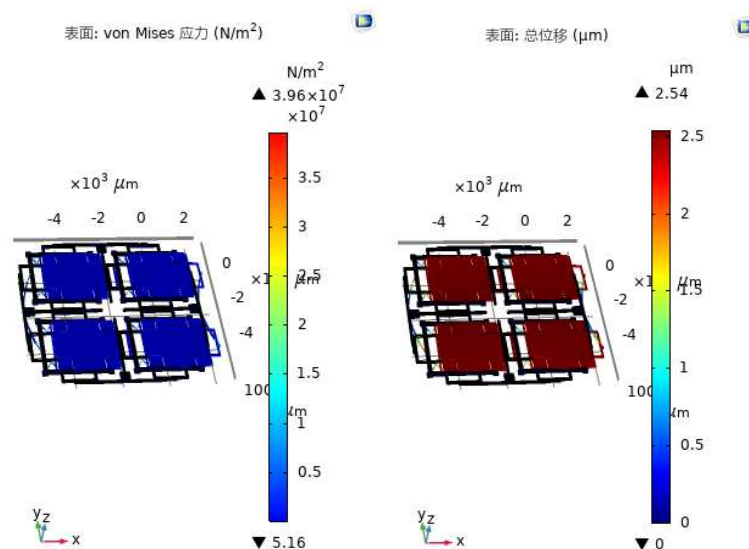


图 3-12 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

5) XYZ方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿X轴、Y轴、Z轴为边的正方体对角线方向，大小为1000G，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

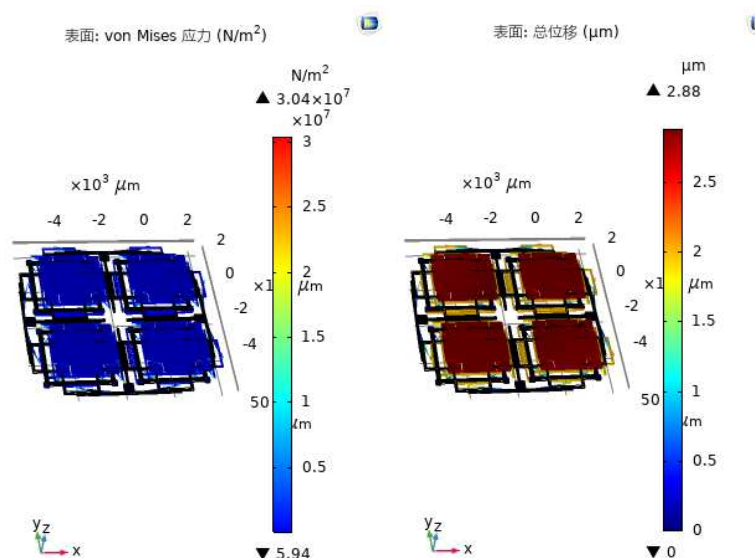


图 3-13 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

	X轴方向	Z轴方向	XY方向	XZ方向	XYZ方向
应力/MPa	48.3	20.0	36.3	39.6	30.4
位移/ μm	3.6	0.38	3.53	2.54	2.88

表 3-2 加速度冲击稳态仿真结果

由表一可知，加州大学的四质量块微陀螺仪在受到各个方向1000G的加速度时，Z轴方向产生的应力和位移都远小于其他方向，也就是说该陀螺对于Z轴分量的加速度冲击适应性最好。虽然其他方向受加速度冲击所产生的应力仍远小于硅的许用应力，但其产生的位移相对于其陀螺尺寸来说已不可忽略（陀螺本身尺寸为6.8mm*6.8mm）。

(二)不同方向加速度冲击对工作频率的影响

在弹性梁与质量块上添加不同方向的重力加速度，大小为1000G，通过COMSOL结构力学的特征频率-预应力分析，得到其受加速度影响下的工作频率与振型如下：

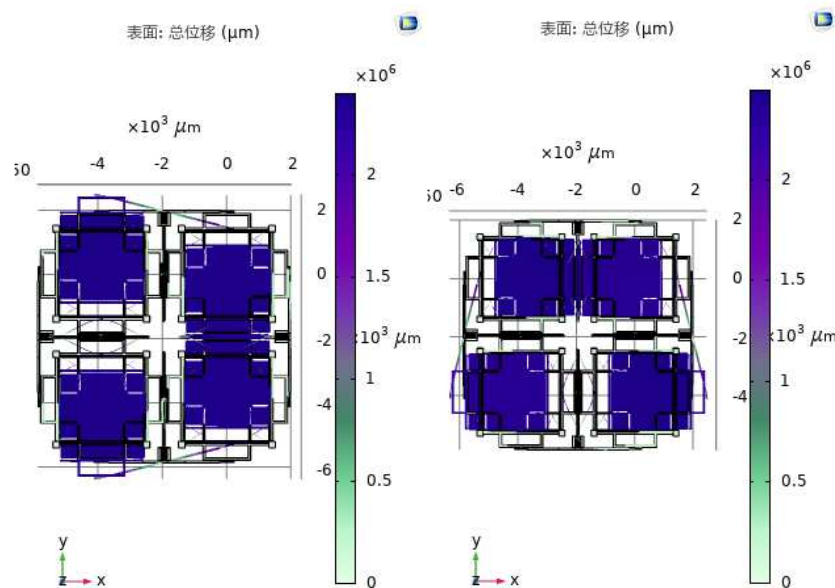


图 3-14 加速度冲击下的工作模态振型（X、Z、XZ 方向）

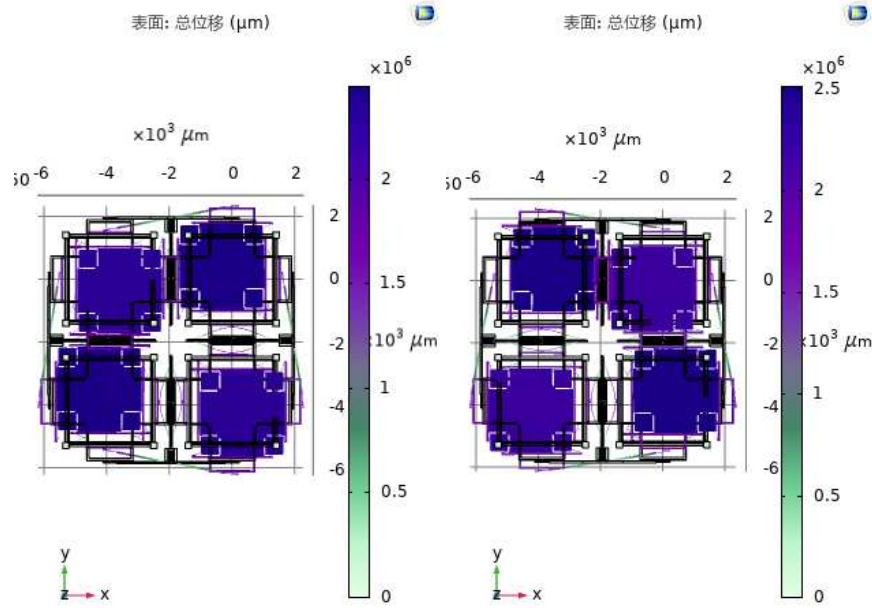


图 3-15 加速度冲击下的工作模态振型偏移（XY 方向、XYZ 方向）

	驱动模态/Hz	检测模态/Hz
无	2719.7	2720.4
X轴方向	2722.5	2835.4
Z轴方向	2720.4	2721
XY方向	2777.1	2781.0
XZ方向	2721.4	2778.6
XYZ方向	2758.3	2761.0

表 3-3 加速度冲击频率仿真结果

可以看到，在受到不同方向1000G加速度的情况下，该四质量块工作模态的振型皆产生了不同程度的偏移，XY、XYZ方向的冲击破坏了正常的工作模态振型，对陀螺产生了极大的影响；X、XZ方向的冲击虽然对陀螺的振型影响不大，但是检测模态的特征频率变化较大，会导致陀螺的灵敏度下降；Z轴方向的冲击对于陀螺的振型与工作频率几乎没有产生影响。不难看出，该四质量块结构Z轴方向的抗冲击性能较好，而易受到平面方向的加速度冲击影响。

综合上述分析可知，该陀螺能很好的消除Z轴方向受到的加速度冲击，而XY平面的加速度冲击会对陀螺的性能产生极大的影响，总体来说该四质量块结构抗冲击性能不太理想。

3.2.2 斯坦福大学四质量块微陀螺仪

(一)不同方向加速度冲击的稳态分析

1) X轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向指向 X 轴正向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

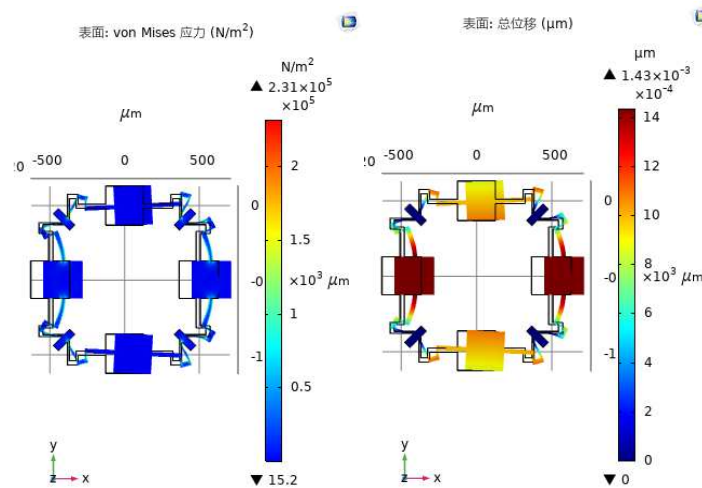


图 3-16 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

2) Z轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向指向 Z 轴正向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

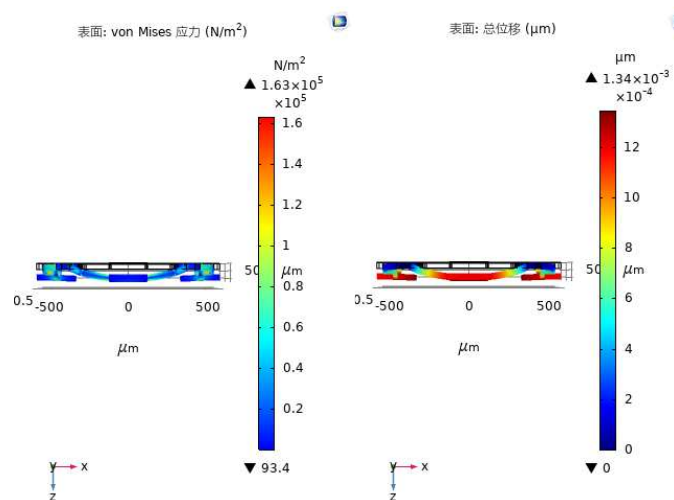


图 3-17 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

3) XY方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Y 轴的角平分线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

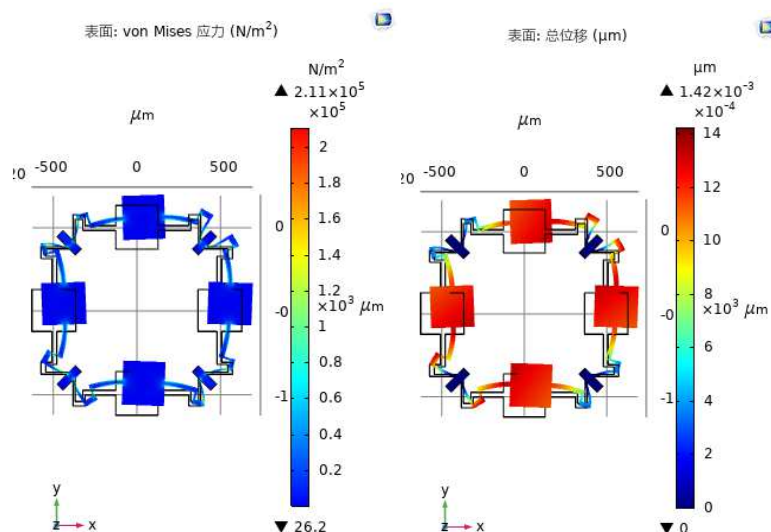


图 3-18 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

4) XZ方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Z 轴的角平分线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

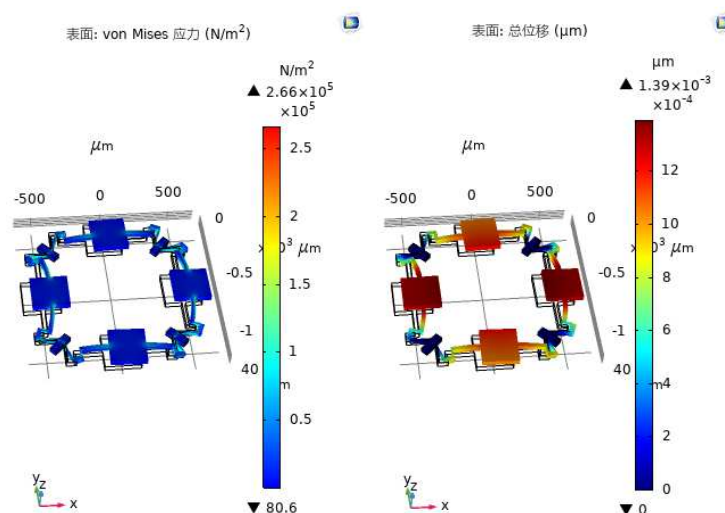


图 3-19 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

5) XYZ方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Y 轴、Z 轴为边的正方体对角线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

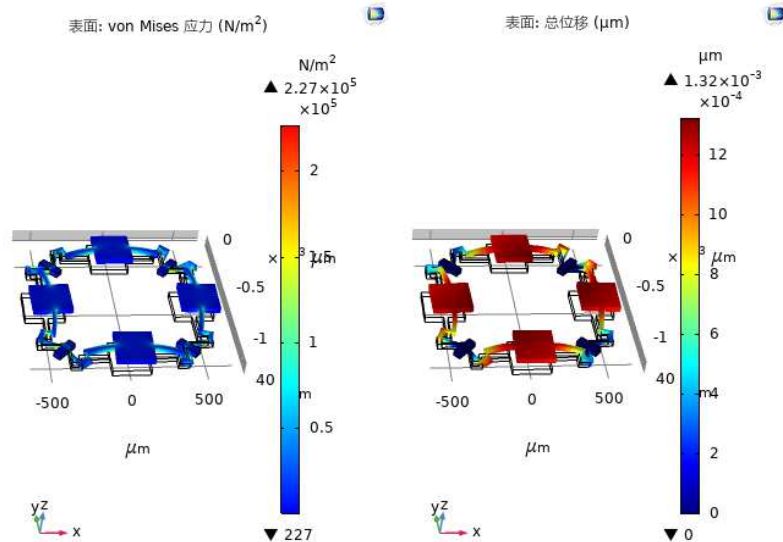


图 3-20 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

	X 轴方向	Z 轴方向	XY 方向	XZ 方向	XYZ 方向
应力/MPa	0.231	0.163	0.211	0.266	0.227
位移/nm	1.43	1.34	1.42	1.39	1.32

表 3-4 加速度冲击稳态仿真结果

由表一可知，斯坦福大学的四质量块微陀螺仪在受到 1000G 的加速度时，各个方向产生的应力都位于 0.16-0.27MPa 之间，产生的位移都位于 1.3-1.5nm 之间，考虑到陀螺本身尺寸为 1.2mm*1.2mm，因此可以忽略不计。Z 轴方向产生的应力和位移略小于其他方向，也就是说该陀螺对于 Z 轴的加速度分量的适应性最佳，易受到 XY 平面的加速度分量影响。

(二)不同方向加速度冲击对工作频率的影响

在弹性梁与质量块上添加不同方向的重力加速度，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的特征频率-预应力分析，得到其受加速度影响下的工作频率与振型如下：

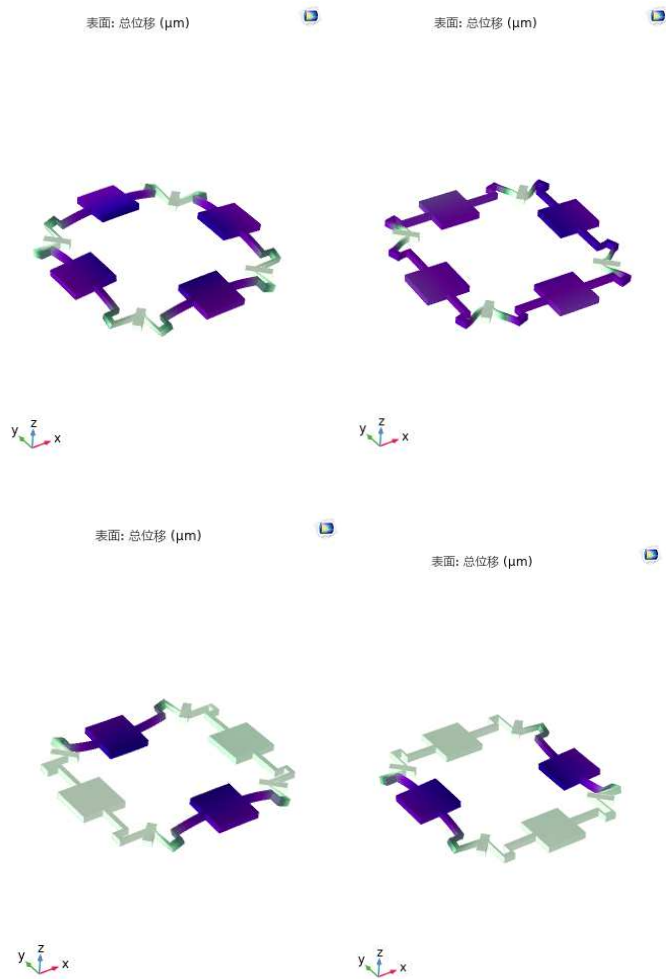


图 3-21 加速度冲击下的工作模式振型

	驱动模式/kHz	Z 轴检测模式 /kHz	X 轴检测模式 /kHz	Y 轴检测模式 /kHz
无	144.22	158.95	142.95	142.90
X 轴方向	144.22	158.95	142.95	142.90
Z 轴方向	144.22	158.95	142.95	142.90
XY 方向	144.22	158.95	142.95	142.90
XZ 方向	144.22	158.95	142.95	142.90
XYZ 方向	144.22	158.95	142.95	142.90

表 3-5 加速度冲击频率仿真结果

可以看到，在受到 1000G 加速度的情况下，该四质量块工作模式的振型几乎没有变化，驱动模式和三轴检测模式的频率变化也可以忽略不计，表现出优秀的抗冲击性能。

综合上述分析可知，该陀螺能很好的消除 Z 轴方向受到的加速度冲击，而 XY 平面的加速度分量更容易对陀螺的性能产生影响，但总体来说该四质量块结构具有优秀的抗冲击性能，对各个方向的加速度冲击都有较好的适应性。

3.2.3 清华大学四质量块微陀螺仪

(一)不同方向加速度冲击的稳态分析

1) X轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向指向 X 轴正向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

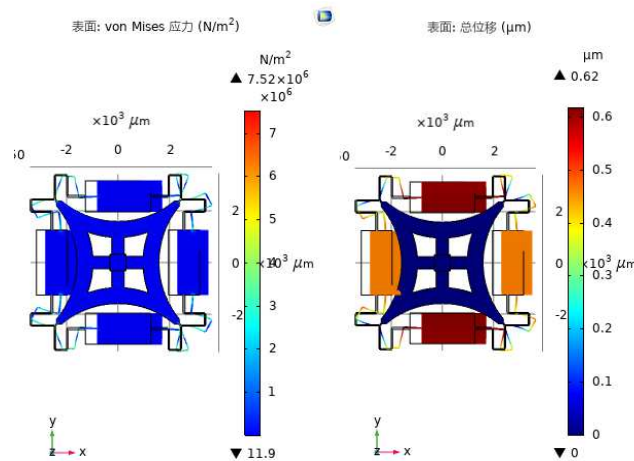


图 3-22 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

2) Z轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向指向 Z 轴正向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

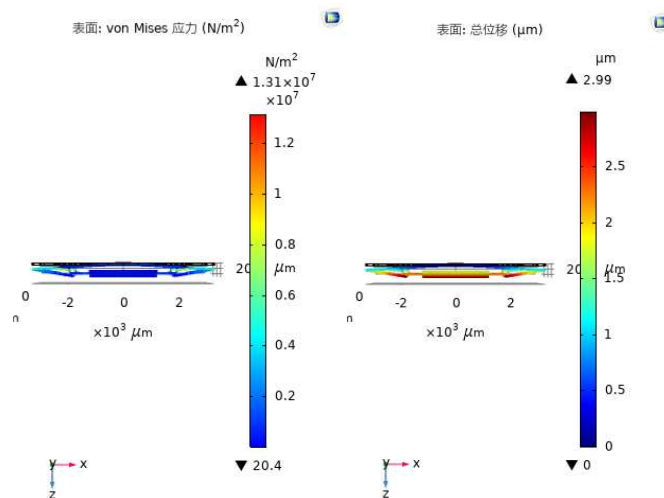


图 3-23 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

3) XY方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Y 轴的角平分线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

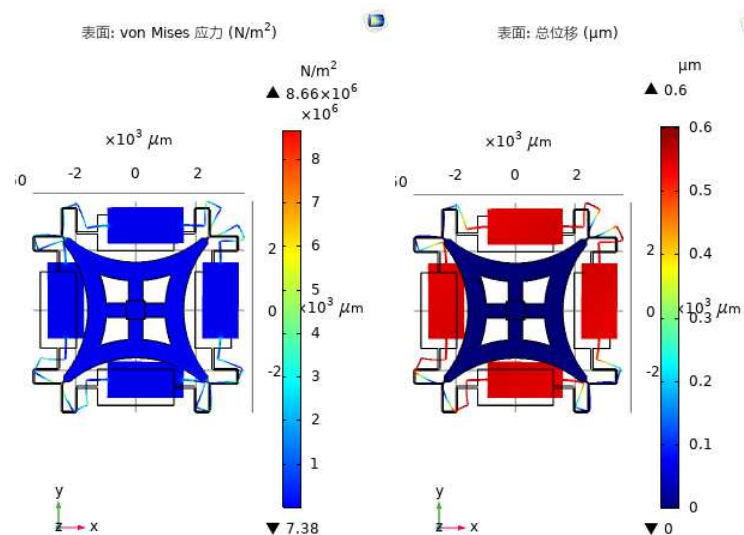


图 3-24 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

4) XZ方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Z 轴的角平分线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

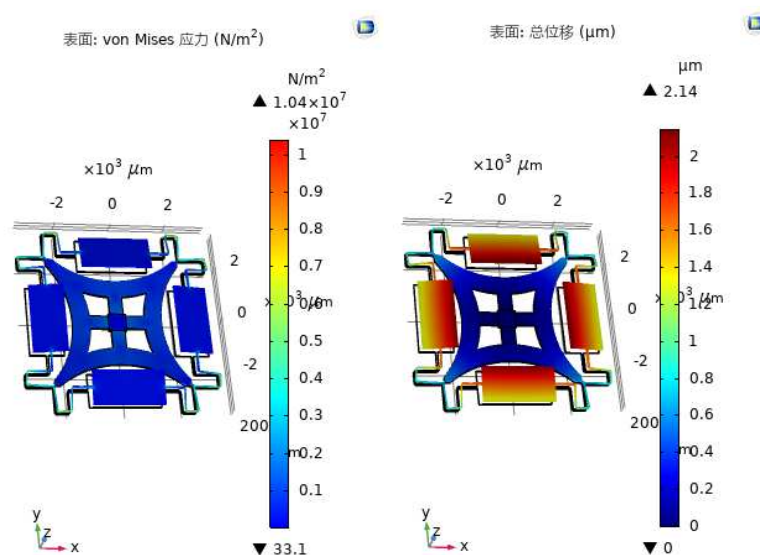


图 3-25 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

5) XYZ方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Y 轴、Z 轴为

边的正方体对角线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

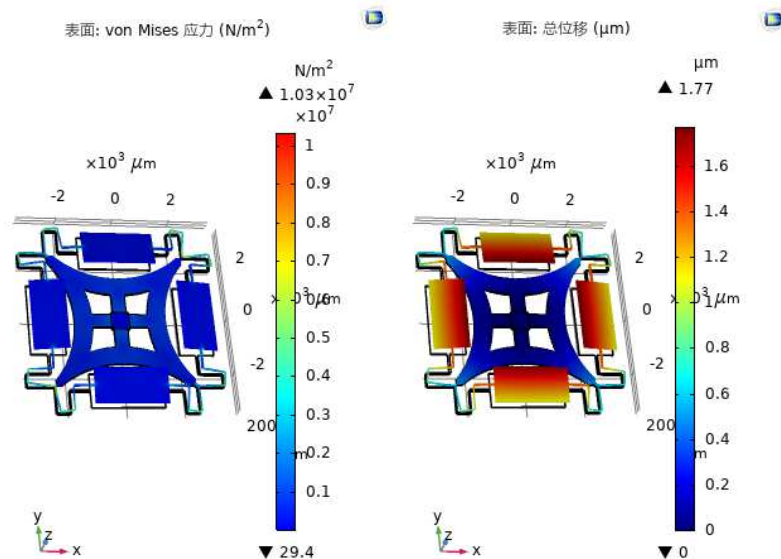


图 3-26 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

	X 轴方向	Z 轴方向	XY 方向	XZ 方向	XYZ 方向
应力/MPa	7.52	13.1	8.66	10.4	10.3
位移/ μm	0.62	2.99	0.6	2.14	1.77

表 3-6 加速度冲击稳态仿真结果

由表一可知，清华大学的四质量块微陀螺仪在受到 1000G 的加速度时，各个方向产生的应力都在 7-14MPa 之间，远小于硅的许用应力，加速度的 Z 轴方向分量容易产生更大的应力；虽然 X 轴方向和 XY 方向的位移都小于 $1\mu\text{m}$ ，但是其他含有 Z 轴加速度分量影响的方向产生的位移都在 $1.7\text{-}3.0\mu\text{m}$ 之间，考虑到陀螺本身尺寸为 $6.8\text{mm}\times 6.8\text{mm}$ ，其产生的影响不可忽略。不难看出，加速度的 Z 轴方向分量容易产生更大的应力和位移，对陀螺的性能产生更大的影响。（陀螺本身尺寸为 $6.8\text{mm}\times 6.8\text{mm}$ ）

(二) 不同方向加速度冲击对工作频率的影响

在弹性梁与质量块上添加不同方向的重力加速度，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的特征频率-预应力分析，得到其受加速度影响下的工作频率与振型如下：

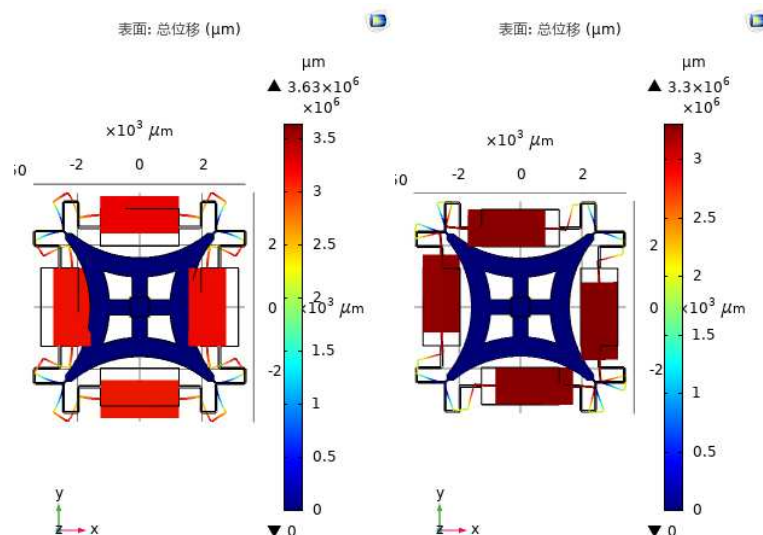


图 3-27 加速度冲击下的工作模态振型

	驱动模态/Hz	检测模态/Hz
无	6952.2	6706.8
X 轴方向	6957.1	6707.7
Z 轴方向	6961.5	6708.5
XY 方向	6957.1	6707.7
XZ 方向	6959.2	6708.1
XYZ 方向	6958.5	6708.0

表 3-7 加速度冲击频率仿真结果

可以看到，在受到 1000G 加速度的情况下，该四质量块工作模态的振型几乎没有变化，驱动模态频率变化仅在 4.9-9.3Hz 之间，检测模态频率变化仅在 0.9-1.7Hz 之间，而 XY 平面的加速度分量对于陀螺特征频率的影响要小于 Z 轴方向的加速度分量。

综合上述分析可知，该陀螺能很好的消除 XY 平面内受到的加速度冲击，而 Z 轴的加速度分量更容易陀螺的性能产生影响，虽然加速度冲击对于四质量块位移的影响较大，但对于工作模态几乎没有影响，总体来说该四质量块结构具有良好的抗冲击性能。

3.2.4 上海交通大学四质量块微陀螺仪

(一)不同方向加速度冲击的稳态分析

1) X轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向指向 X 轴正向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下

所示:

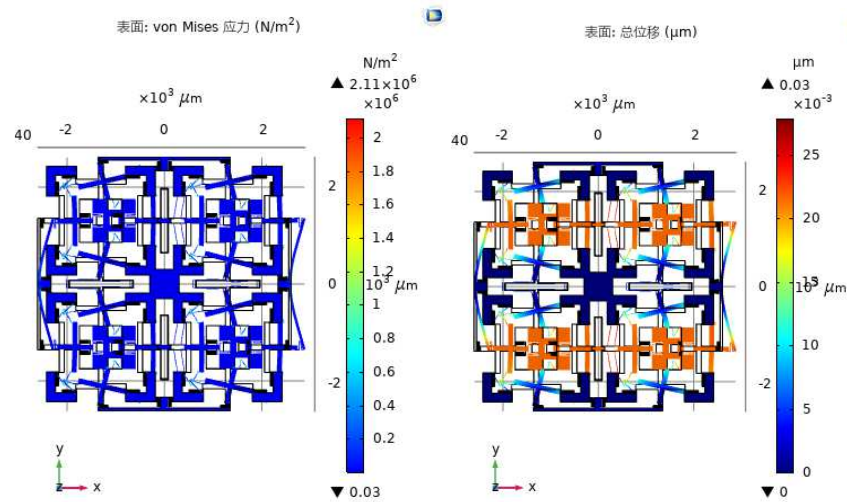


图 3-28 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

2) Z轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向指向 Z 轴正向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示:

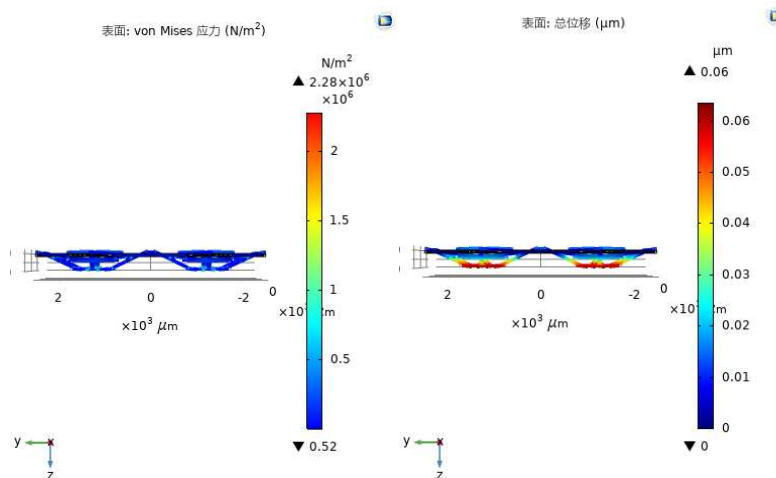


图 3-29 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

3) XY方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Y 轴的角平分线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示:

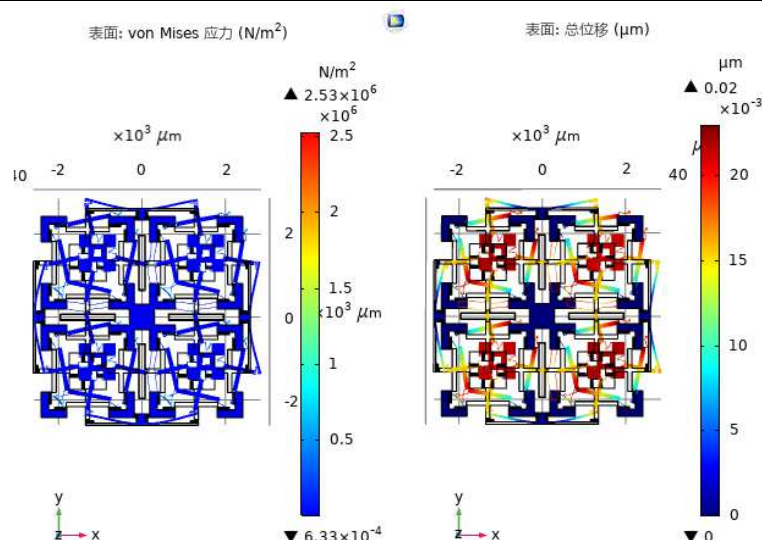


图 3-30 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

4) XZ方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Z 轴的角平分线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

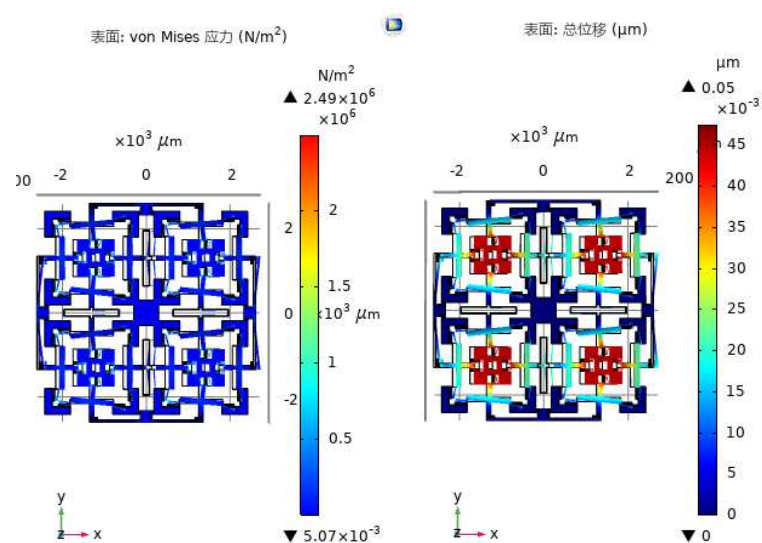


图 3-31 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

5) XYZ方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向沿 X 轴、Y 轴、Z 轴为边的正方体对角线方向，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

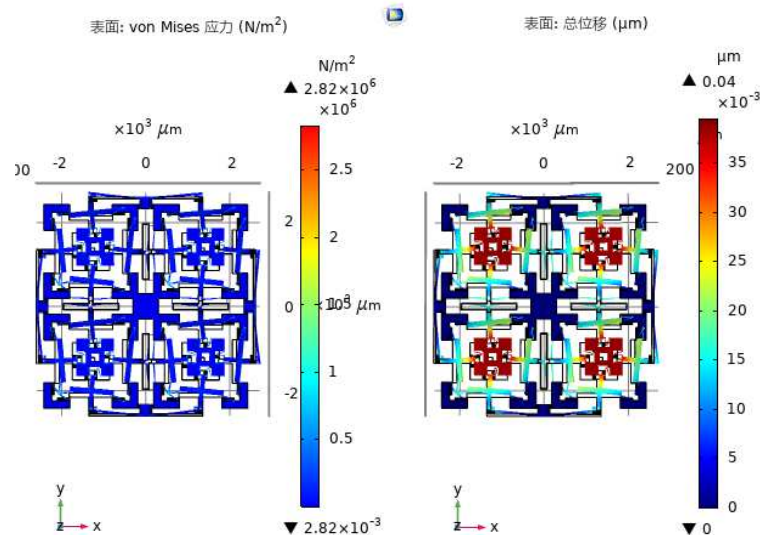


图 3-32 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布

	X 轴方向	Z 轴方向	XY 方向	XZ 方向	XYZ 方向
应力/MPa	2.11	2.28	2.53	2.49	2.82
位移/nm	0.03	60	0.02	0.05	0.04

表 3-8 加速度冲击稳态仿真结果

由表一可知，上海交通大学的四质量块微陀螺仪在受到 1000G 的加速度时，各个方向产生的应力都位于 2-3MPa 之间，虽然受到 Z 轴方向加速度时，最大位移达到了 60nm，但其他方向上的位移皆小于 0.1nm，考虑到陀螺本身尺寸为 5mm*5mm，因此可以忽略不计。

(二) 不同方向加速度冲击对工作频率的影响

在弹性梁与质量块上添加不同方向的重力加速度，大小为 1000G，通过 COMSOL 结构力学的特征频率-预应力分析，得到其受加速度影响下的工作频率与振型如下：

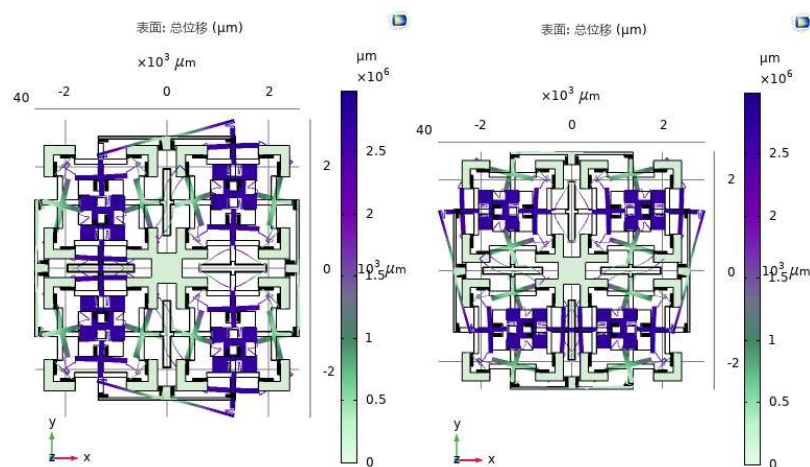


图 3-33 加速度冲击下的工作模态振型

	驱动模态/Hz	检测模态/Hz
无	35640	35634
X 轴方向	35640	35634
Z 轴方向	35641	35634
XY 方向	35640	35634
XZ 方向	35640	35634
XYZ 方向	35640	35634

表 3-9 加速度冲击频率仿真结果

由表二可以看到，在受到 1000G 加速度的情况下，该四质量块工作模态的特征频率与振型几乎没有变化，表现出优秀的抗冲击性能。

综合上述分析可知，该陀螺能很好的消除 XY 平面内受到的加速度冲击，而相同加速度冲击下，Z 轴的加速度分量更容易对陀螺的工作模态产生影响，但总体来说该四质量块结构具有优秀的抗冲击性能。

3.3 应力适应性仿真

陀螺的应力适应性直接关系到陀螺对于环境的适应能力，微机械陀螺受到应力大部分来自于加工过程中的残余应力、环境温度变化导致的热应力以及实际使用过程中外界施加的外部应力，而这些应力大多通过锚区传递，本节将从锚区所受应力的角度，对上海交通大学、清华大学、加州大学、斯坦福大学的四个典型四质量块结构进行Comsol应力适应性仿真分析，检测其承受单向载荷与模拟拉伸情况载荷时的环境适应能力。

在四质量块结构下方添加略大于陀螺尺寸的长方体作为衬底，设置其材料为SiO₂ - Silicon oxide，连接其锚区与衬底，并更改固定约束位置为玻璃板底面。

3.3.1 加州大学四质量块微陀螺仪

(一) 锚区应力影响的稳态分析

1) X轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，方向指向X轴正向，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

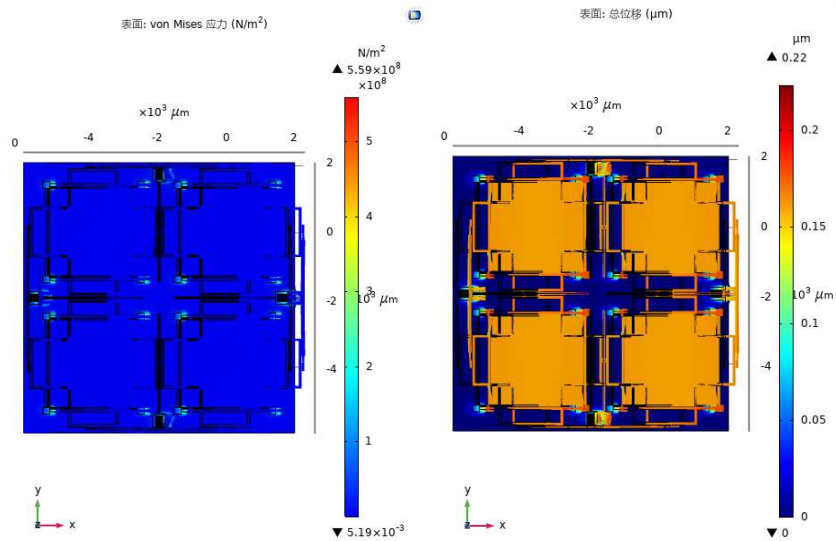


图 3-34 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

2) Z轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，方向指向Z轴正向，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

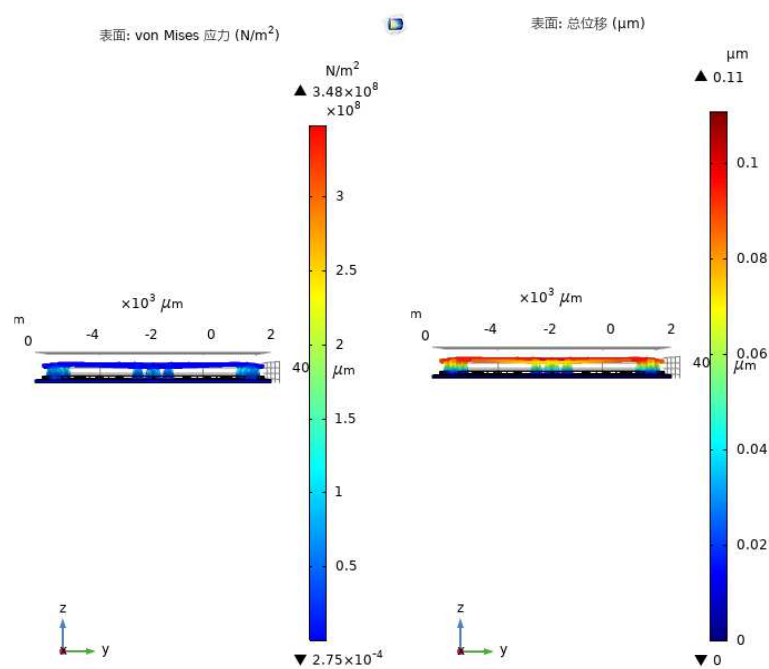


图 3-35 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

3) 多方向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，中心区域受到Z轴方向载荷，四周区域受到中心指向锚区方向载荷，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

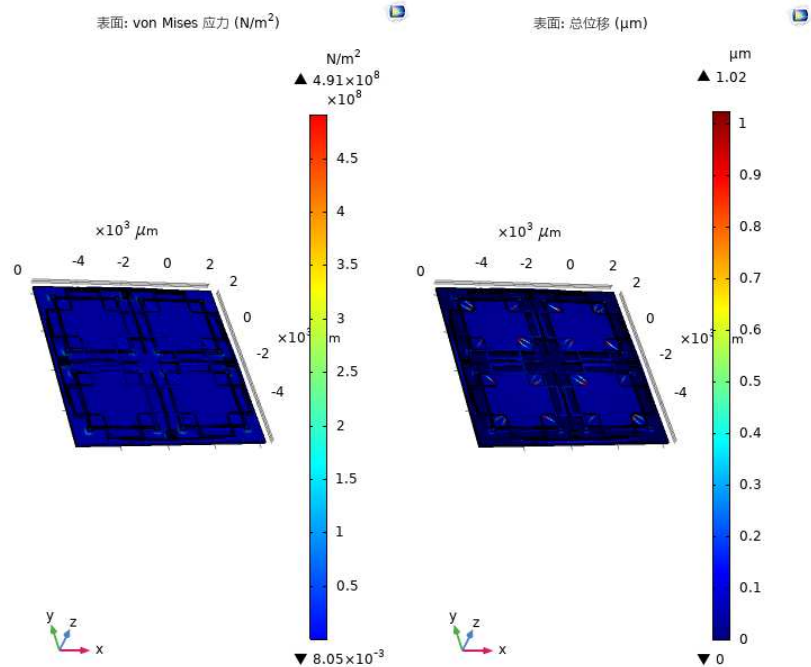


图 3-36 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

	应力/MPa	最大位移/ μm
X 轴单向载荷	482	0.22
Z 轴单向载荷	348	0.11
多方向载荷	491	1.02

表 3-10 应力影响稳态仿真结果

可以看出，该四质量块陀螺更容易受到X轴载荷分量的影响，对于Z轴载荷分量的适应性较好，不同锚区多个方向施加载荷对陀螺的影响最大，其产生的最大位移要远远大于受到单向载荷作用。三种情况下产生的应力皆处于1e8量级，小于陀螺的许用应力，而最大位移也仅有1 μm 。

(二)锚区应力影响的特征频率分析

在锚区与衬底连接面添加不同简化情况的边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的特征频率-预应力分析，得到其受应力影响下的工作频率与振型如下：

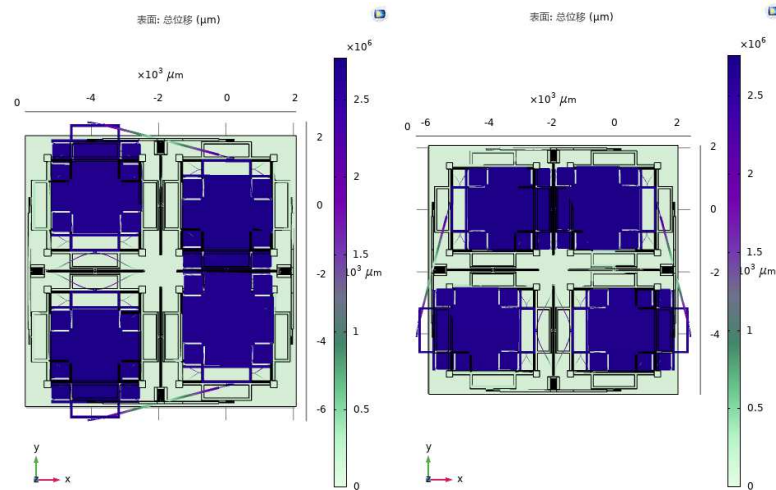


图 3-37 应力影响下的陀螺振型

	驱动模态/Hz	检测模态/Hz
无应力干扰	2806.7	2809.8
X 轴单向载荷	2806.8	2809.9
Z 轴单向载荷	2806.7	2809.8
多方向载荷	2817.8	2820.8

表 3-11 应力影响频率仿真结果

可以看出，在受到单向载荷的情况下，陀螺的驱动、检测模态工作频率与振型几乎没有产生变化，而在受到多方向载荷影响时，振型几乎不变，驱动、检测模态工作频率仅变化了约11Hz，并仍保持了优秀的模态匹配，频率分裂仅有3Hz，可以忽略不计。

综上所述加州大学四质量块微陀螺仪在应对锚区应力影响时，表现出非常优秀的应力适应性。

3.3.2 清华大学四质量块微陀螺仪

(一) 锚区应力影响的稳态分析

1) X轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，方向指向X轴正向，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

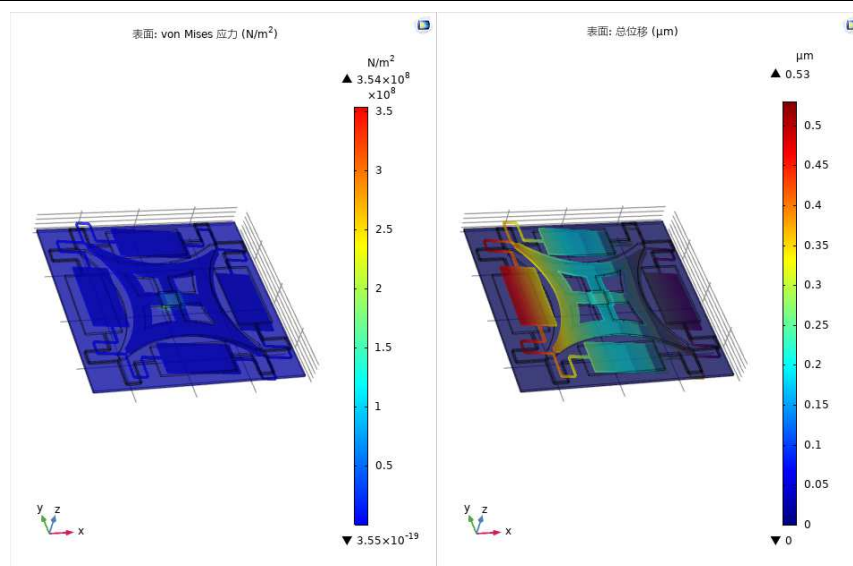


图 3-38 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

2) Z轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，方向指向Z轴正向，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

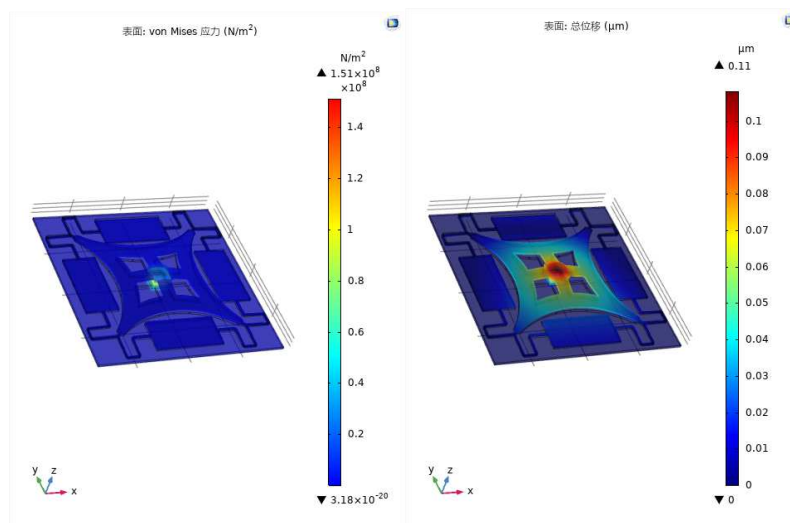


图 3-39 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

	应力/MPa	最大位移/ μm
X 轴单向载荷	361	0.53
Z 轴单向载荷	153	0.11

表 3-12 应力影响稳态仿真结果

可以看出，该四质量块陀螺对于X轴载荷分量的适应性较差，对于Z轴载荷分量的适应性较好，在X轴单向载荷作用下，其产生的位移和应力皆大于Z轴单向载荷。两种情况下产生的应力皆处于 $1\text{e}8$ 量级，皆小于陀螺的许用应力。

(二) 锚区应力影响的特征频率分析

在锚区与衬底连接面添加不同简化情况的边界载荷, 设置载荷类型为单位面积力, 大小100MPa, 通过COMSOL结构力学的特征频率-预应力分析, 得到其受应力影响下的工作频率与振型如下:

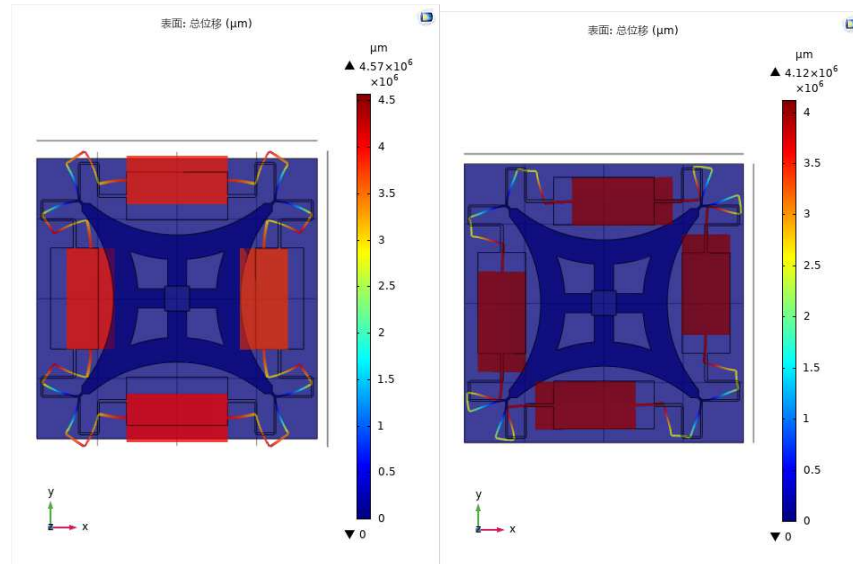


图 3-40 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

	驱动模态/Hz	检测模态/Hz
无应力干扰	6981.4	6763.8
X轴单向载荷	6981.4	6763.9
Z轴单向载荷	6981.8	6763.9

表 3-13 应力影响频率仿真结果

可以看出, 在受到单向载荷的情况下, 陀螺的驱动、检测模态工作频率与振型几乎没有产生变化。

综上所述清华大学四质量块微陀螺仪在应对锚区应力影响时, 表现出非常优秀的应力适应性。

3.3.3 上海交通大学四质量块微陀螺仪

(一) 锚区应力影响的稳态分析

1) X轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷, 设置载荷类型为单位面积力, 方向指向X轴正向, 大小100MPa, 通过COMSOL结构力学的稳态分析, 得到其应力场与位移分布如下:

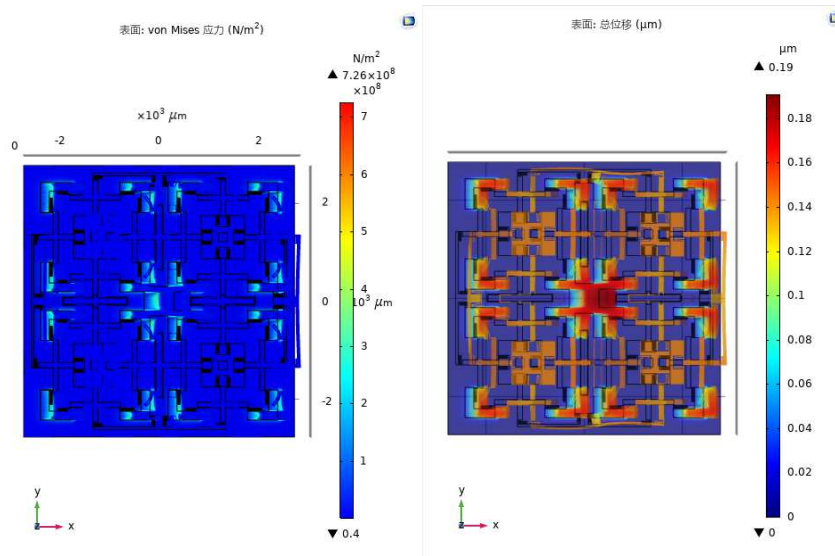


图 3-41 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

2) Z轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，方向指向Z轴正向，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

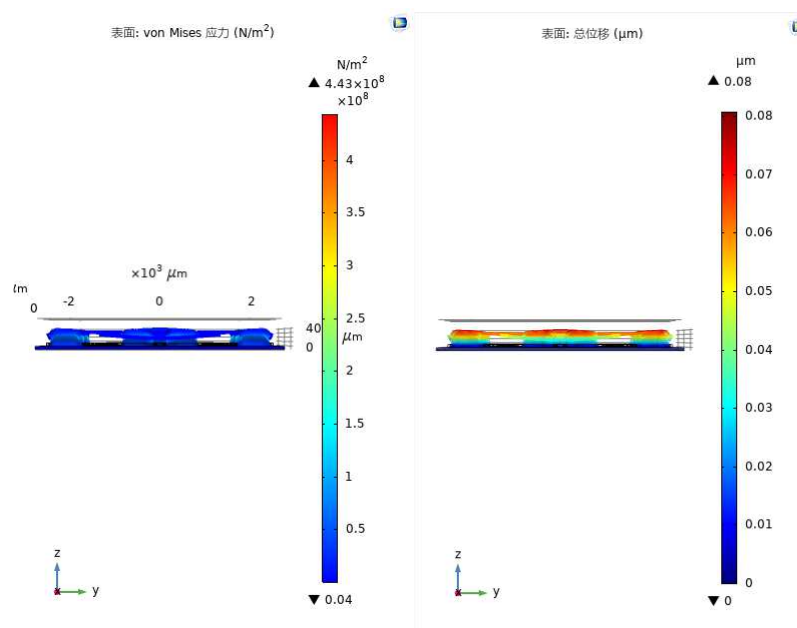


图 3-42 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

3) 多方向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，中心区域受到Z轴方向载荷，四周区域受到中心指向锚区方向载荷，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

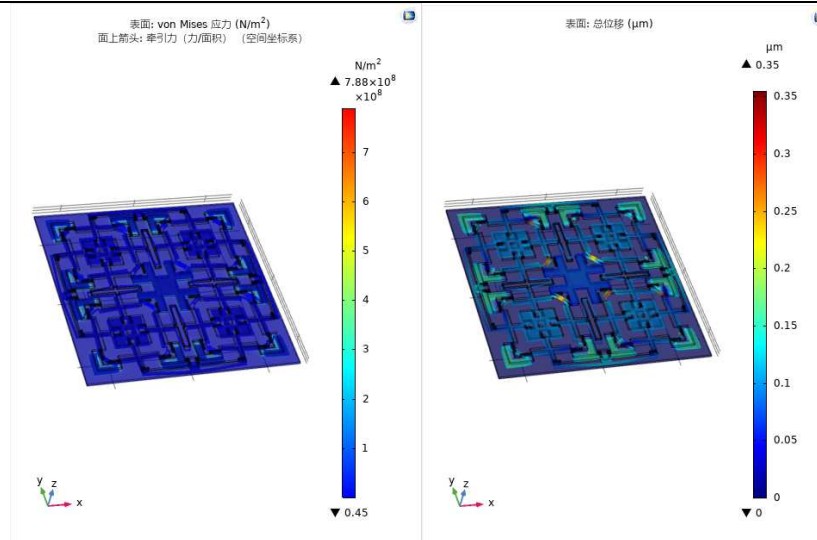


图 3-43 应力影响下陀螺的应力与位移场分布

	应力/MPa	最大位移/ μm
X轴单向载荷	726	0.19
Z轴单向载荷	443	0.08
多方向载荷	788	0.35

表 3-14 应力影响稳态仿真结果

可以看出，该四质量块陀螺更容易受到X轴载荷分量的影响，对于Z轴载荷分量的适应性较好，在X轴单向载荷作用下，其产生的位移和应力皆大于Z轴单向载荷。不同锚区多个方向施加载荷对陀螺的影响最大，其产生的最大位移大于受到单向载荷作用。三种情况下产生的应力皆处于 $1\text{e}8$ 量级，小于陀螺的许用应力。

(二) 锚区应力影响的特征频率分析

在锚区与衬底连接面添加不同简化情况的边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，大小 100MPa ，通过COMSOL结构力学的特征频率-预应力分析，得到其受应力影响下的工作频率与振型如下：

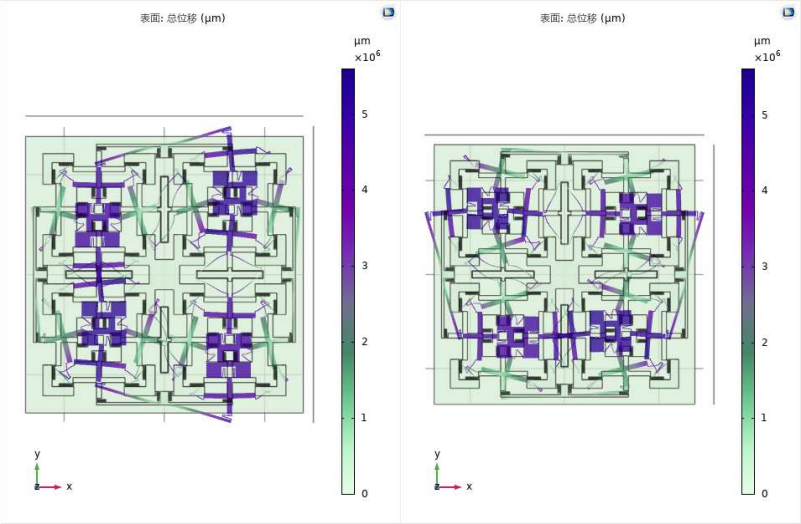


图 3-44 应力影响下的陀螺振型

	驱动模态/Hz	检测模态/Hz
无应力干扰	35511	35519
X轴单向载荷	35511	35519
Z轴单向载荷	35514	35522
多方向载荷	35497	35505

表 3-15 应力影响频率仿真结果

可以看出，该陀螺更容易受到Z轴载荷分量的影响，在受到单向载荷的情况下，陀螺的驱动、检测模态工作频率与振型几乎没有产生变化，而在受到多方向载荷影响时，振型几乎不变，驱动、检测模态工作频率仅变化了约14Hz，并仍保持了优秀的模态匹配，频率分裂仅有8Hz，可以忽略不计。

综上所述上海交通大学大学四质量块微陀螺仪在应对锚区应力影响时，表现出非常优秀的应力适应性。

3.4 热弹性阻尼 Q 值仿真

3.4.1 热弹性阻尼简介

在机械振动中^[26]，由于结构变形会产生应变场，在交变的应变场影响下，结构中会产生局部温度场。局部温度场的温度梯度和应变场发生耦合，导致产生不可逆热流，该不可逆热流给系统提供了一种能量耗散机制，这种能量耗散机制就被叫作热弹性阻尼。

3.4.2 热弹性阻尼仿真步骤

- 1) 首先在固体力学物理场中进行特征频率研究,得到驱动模态和检测模态的固有谐振频率。
- 2) 在热弹性物理场中进行频域研究,为质量块在运动方向上添加体载荷,体载荷方向对应工作模态运动方向,以固有谐振频率为中心频率设置频率变化范围,进行频域-预应力研究,可以得到质量块在不同驱动频率驱动力作用下的运动情况。
- 3) 计算结束后,对得到的数据集进行全局计算,选择进行“频率质量因子”计算,可以得到在各个驱动频率下的品质因子。
- 4) 对计算得到的品质因子取倒数即可表征热弹性阻尼值的大小。

3.4.3 仿真结果

(一)加州大学四质量块陀螺

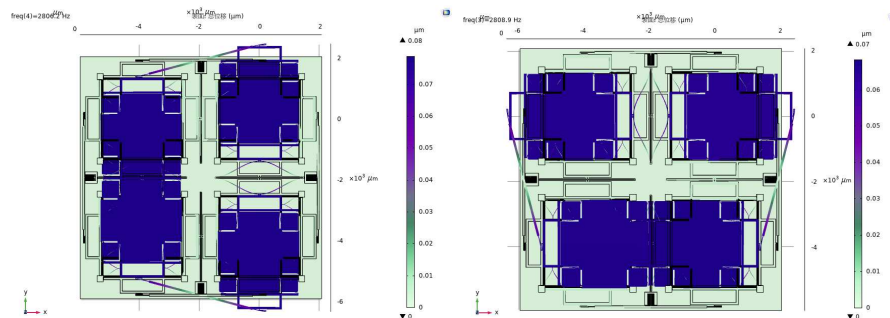


图 3-45 驱动、检测模态扫频

	驱动模态	检测模态
热弹性阻尼	3.22E-7	3.23E-7
热弹性阻尼品质因子	3.11E+6	3.09E+6

表 3-16 热弹性阻尼 Q 值

(二)上海交通大学四质量块陀螺

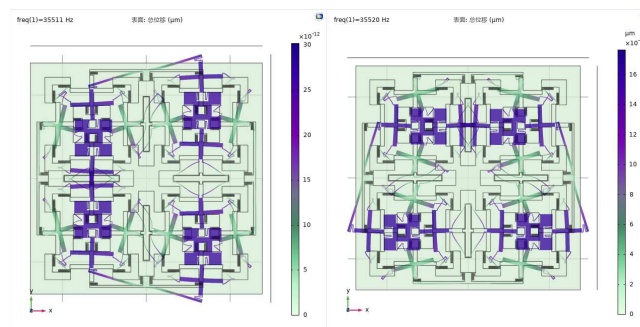


图 3-46 驱动、检测模态扫频

	驱动模态	检测模态
热弹性阻尼	1.92E-5	1.91E-5
热弹性阻尼品质因子	5.20E+4	5.24E+4

表 3-17 热弹性阻尼 Q 值

3.4.4 计算验证

Zener 标准模型提供了一种计算细长梁热弹性阻尼的公式：

$$\Delta_E = \frac{E\alpha^2 T_0}{\rho c} \quad (3-1)$$

$$\tau_Z = \frac{w^2 \rho c}{\pi^2 \chi} \quad (3-2)$$

$$Q_{TED}^{-1} = \Delta_E \frac{\omega \tau_Z}{1 + (\omega \tau_Z)^2} \quad (3-3)$$

其中， χ 为弹性体的热扩散系数， W 为梁宽， ρ 为材料密度， c 为材料常压热容， α 为材料热膨胀系数， ω 为固有谐振频率， E 为材料弹性模量。

经过计算可以得到

	驱动模态	检测模态
仿真结果	3.14E+6	3.14E+6
计算结果	3.08E+6	3.07E+6
相对误差	1.9%	2.3%

表 3-18 加州大学品质因数理论结果与仿真结果

	驱动模态	检测模态
仿真结果	5.20E+4	5.21E+4
计算结果	5.34E+4	5.34E+4
相对误差	2.6%	2.4%

表 3-19 上海交通大学品质因数理论结果与仿真结果

可以看到，理论分析与仿真分析的误差不超过 3%，热弹性阻尼 Q 值仿真具有可行性。

4 四质量块结构与音叉结构对比分析

从结构和工艺^[4]上来看,单质量块结构简单,设计方便,加工快捷,但是共模干扰大,陀螺仪的整体性能上限低;而双质量块结构由于其差分检测的特性,环境产生的共模影响能够被更有效的消除,但是双质量块结构也有一定的缺陷,其两种工作模态具有不对称性,其驱动模态与检测模态的固有频率会产生差异,频率分裂大,影响了陀螺的性能。而四质量块结构不仅保留了音叉结构差分检测等优点,相较于音叉结构,其对称性更加好,驱动模态与检测模态的固有频率差异较小,几乎不存在频率分裂,且其对于环境冲击的适应性也更加优秀。

本节将从COMSOL仿真的角度,以加州大学音叉陀螺与四质量块陀螺为例,分析对比音叉结构与四质量块结构的在模态匹配与抗冲击性能的优劣。将L-eidt绘制的音叉微陀螺仪结构与四质量块微陀螺仪结构模型导入到Comsol仿真软件当中,其仿真模型如下图,统一设置其陀螺材料与衬底材料分别为Comsol材料库中的Si - Silicon (single-crystal, isotropic)和SiO₂ - Silicon oxide,并在衬底底面添加固定约束,并进行超细化半导体模型的网格划分。

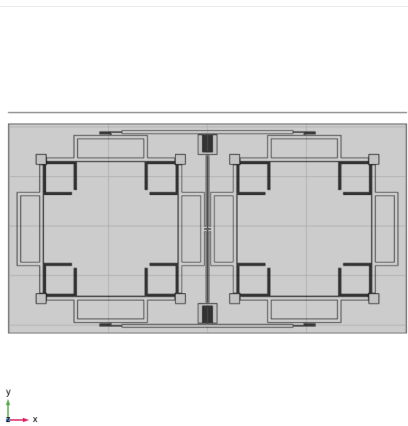


图 4-1 音叉结构仿真模型

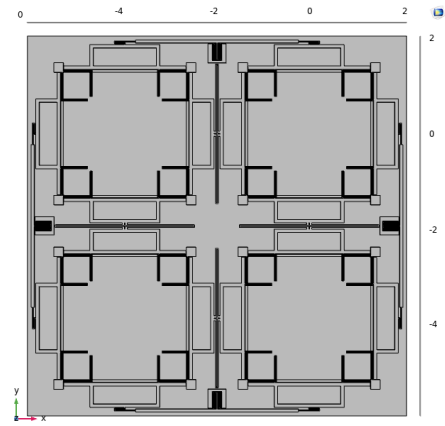


图 4-2 四质量块结构仿真模型

4.1 模态对比分析

通过COMSOL结构力学的特征频率分析,得到音叉结构与四质量块结构驱动模态与检测模态的特征频率与振型如下所示:

	驱动模态/Hz	检测模态/Hz	频率分裂/Hz
音叉结构	2440.8	2709.9	269.1
四质量块结构	2806.7	2809.8	3.1

表 4-1 驱动、检测模态特征频率

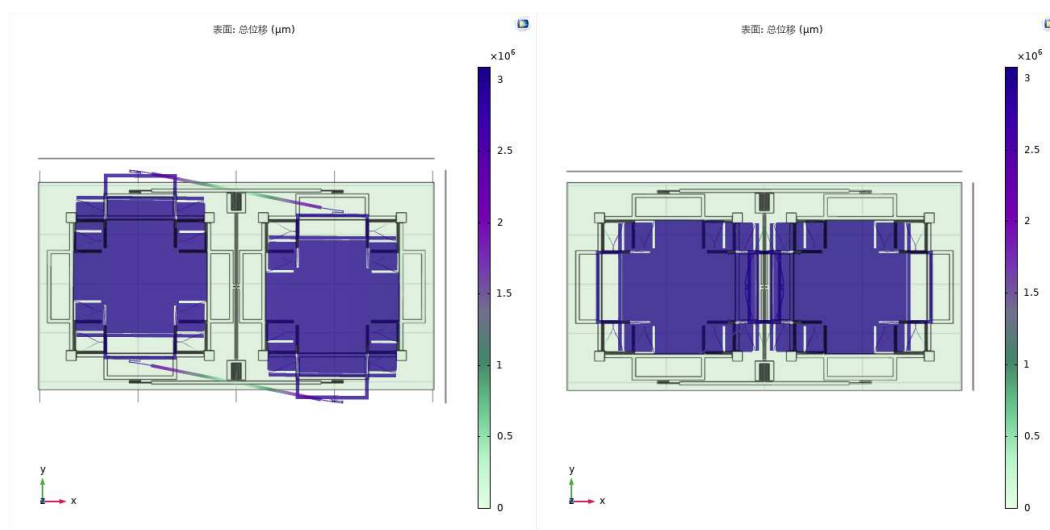


图 4-3 音叉结构驱动、检测模态

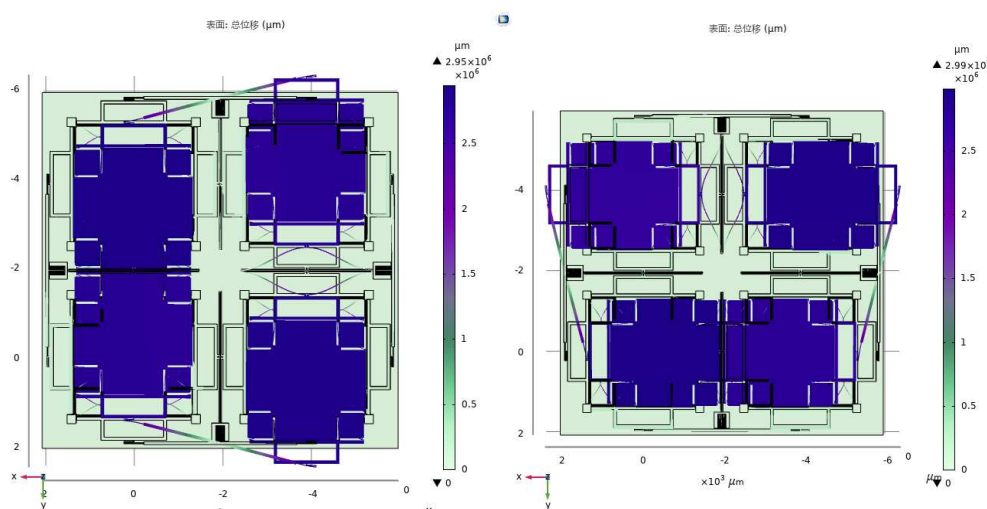


图 4-4 四质量块结构驱动、检测模态

不难看出，音叉结构在驱动模态与检测模态存在较大的不对称性，频率分裂达到了270Hz；而四质量块结构的驱动模态与检测模态成90°的完全对称，因此其频率分裂仅有3.1Hz，模态匹配非常优秀。

4.2 抗冲击性能对比分析

本文为了简化操作，在绘制过程中使得四质量块结构与音叉结构尺寸比为2比1，而在实际情况中，两者结构尺寸相差不大，因此为了确保抗冲击仿真的准确性，设置音叉结构承受重力加速度大小为四质量块结构两倍，以仿真实际中两者承受相同冲击情况下的变化。

(一)不同方向加速度冲击的稳态分析

1) X轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向指向X轴正向，音叉结构重力加速度大小为1000G，四质量块结构大小为500G，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

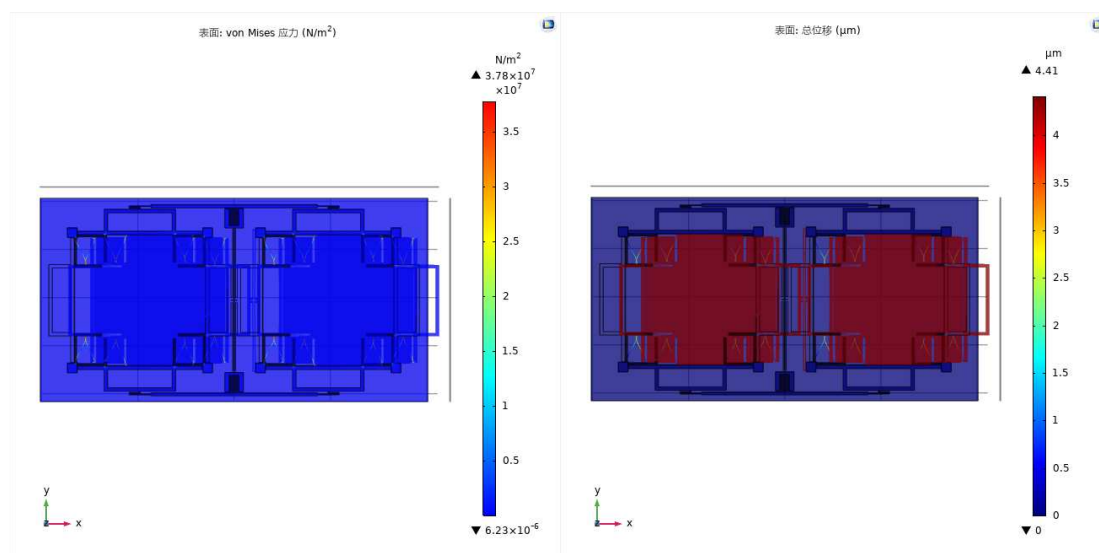


图 4-5 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布（音叉结构）

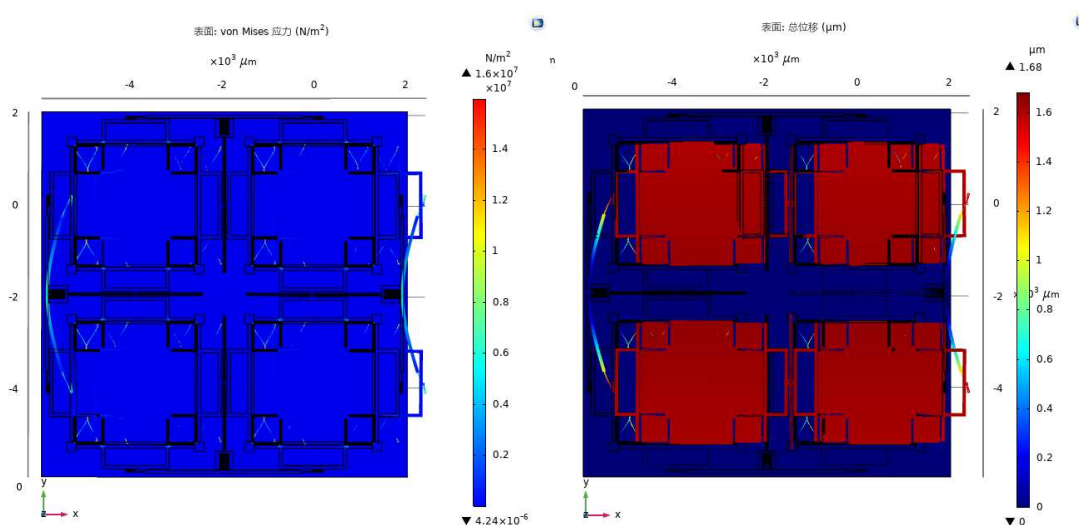


图 4-6 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布（四质量块结构）

2) Y轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向指向Y轴正向，音叉结构重力加速度大小为1000G，四质量块结构大小为500G，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

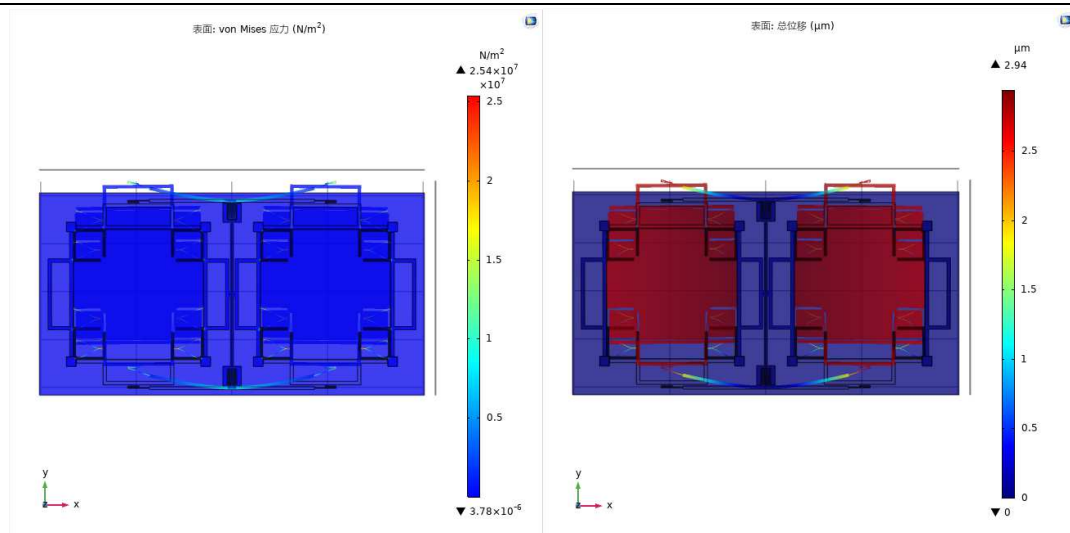


图 4-7 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布（音叉结构）

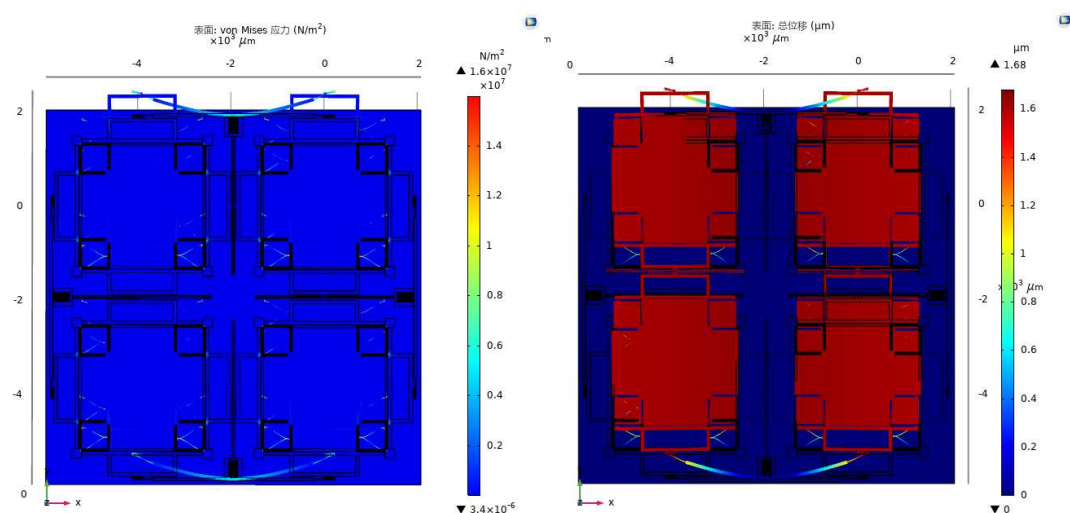


图 4-8 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布（四质量块结构）

3) Z轴方向

在弹性梁与质量块上添加重力加速度，加速度方向为Y三轴方向，音叉结构重力加速度大小为1000G，四质量块结构大小为500G，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力与位移场的分布如下所示：

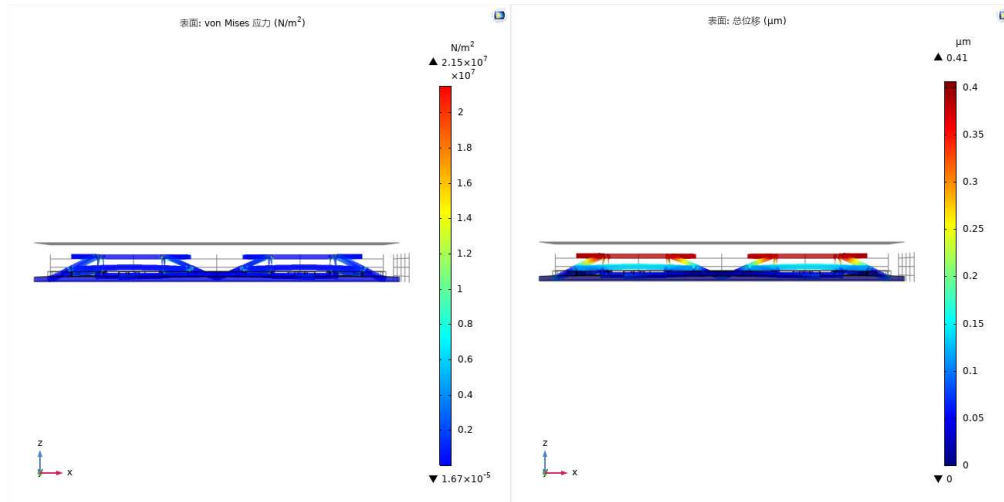


图 4-9 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布（音叉结构）

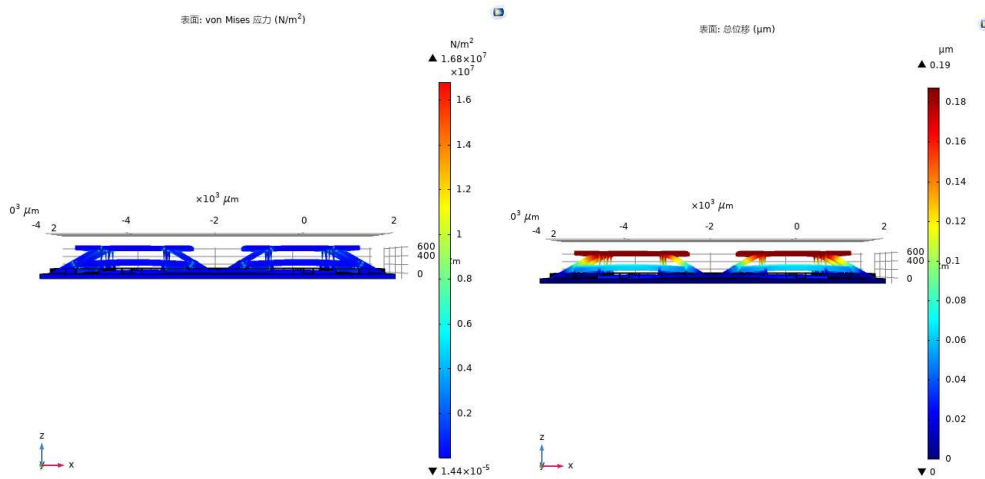


图 4-10 加速度冲击下陀螺的应力与位移场分布（四质量块结构）

		音叉	四质量块
X轴方向	应力/MPa	37.8	16.0
	位移/ μm	4.42	1.68
Y轴方向	应力/MPa	25.4	16.0
	位移/ μm	2.94	1.68
Z轴方向	应力/MPa	21.5	12.0
	位移/ μm	0.41	0.19

表 4-2 加速度冲击稳态仿真结果

可以看出，在受到相同重力加速度冲击时，音叉结构产生的应力与位移在三个方向上均大于四质量块结构。四质量块结构由于其优秀的结构对称性，其受到 X、Y 轴加速度冲击时，产生的位移与应力完全相同，抗冲击性能基本一致；音叉结构更容易受到 X 轴的加速度分量影响，而由于杠杆的存在，其对于 Y 轴的加速度分量适应性更好；两者皆表现出对于 Z 轴加速度分量的优秀适应性。

(二)不同方向加速度冲击对工作频率的影响

在弹性梁与质量块上添加不同方向的重力加速度，音叉结构重力加速度大小为 1000G，四质量块结构大小为 500G，通过 COMSOL 结构力学的特征频率-预应力分析，得到其受加速度影响下的工作频率与振型如下：

		音叉	四质量块
无加速度冲击	驱动模态/Hz	2440.8	2806.7
	检测模态/Hz	2709.9	2809.8
X轴方向	驱动模态/Hz	2443.9	2807.0
	检测模态/Hz	2884.2	2832.9
Y轴方向	驱动模态/Hz	2531.1	2810.8
	检测模态/Hz	2712.7	2830.1
Z轴方向	驱动模态/Hz	2441.2	2806.9
	检测模态/Hz	2711.1	2809.9

表 4-3 加速度冲击工作频率仿真结果

可以看出，在受到 XY 平面的加速度冲击时，音叉结构的驱动检测模态特征频率变化较大。受到 X 轴方向加速度时，由于其检测模态质量块在 X 轴方向上运动，更容易受到该方向加速度冲击影响，其检测模态特征频率变化达到了 174.3Hz；受到 Y 轴方向加速度时，由于其驱动模态质量块在 Y 轴方向上运动，更容易受到该方向加速度冲击影响，其驱动模态特征频率变化达到了 90.3Hz；受到 Z 轴方向加速度时，其特征频率几乎没有变化。

在受到 XY 平面的重力加速度冲击时，四质量块结构驱动模态频率变化仅在 0.3-4.1Hz 之间，检测模态频率变化仅在 20.3-23.1Hz 之间。虽然其驱动模态与检测模态同样容易受到其对应运动方向的加速度冲击影响，但是由于四质量块更优秀的结构对称性，有效地抑制了加速度冲击对特征频率的影响，其产生的频率变化仅为 20Hz 左右；受到 Z 轴方向加速度时，其特征频率几乎没有变化。

综上所述，四质量块的抗冲击性能更加优秀，尤其是在应对 XY 方向的加速度分量影响时。

4.3 应力适应性仿真对比分析

(一)锚区应力影响的稳态分析

1) X轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，方向指向X轴正向，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

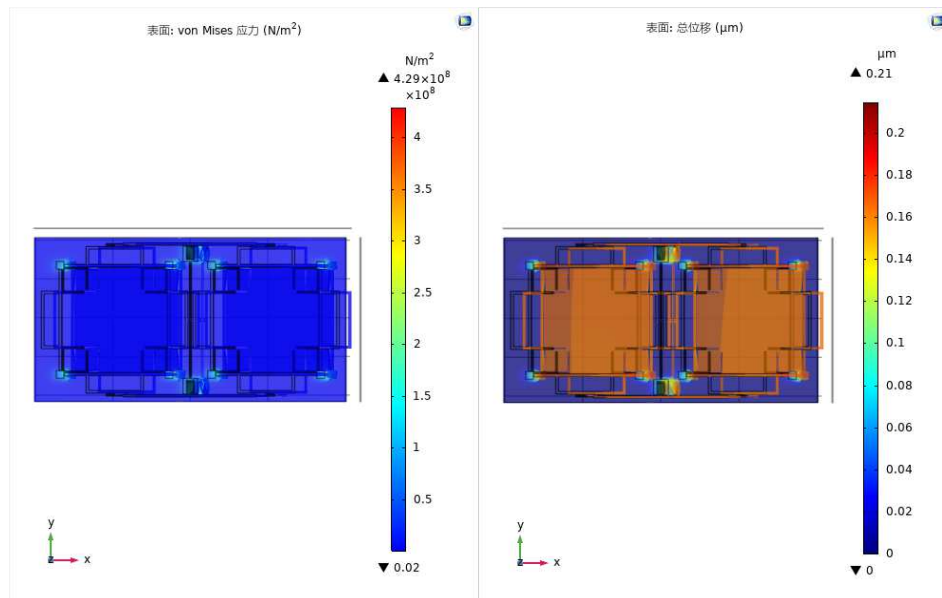


图 4-11 应力影响下陀螺的应力与位移场分布（音叉结构）

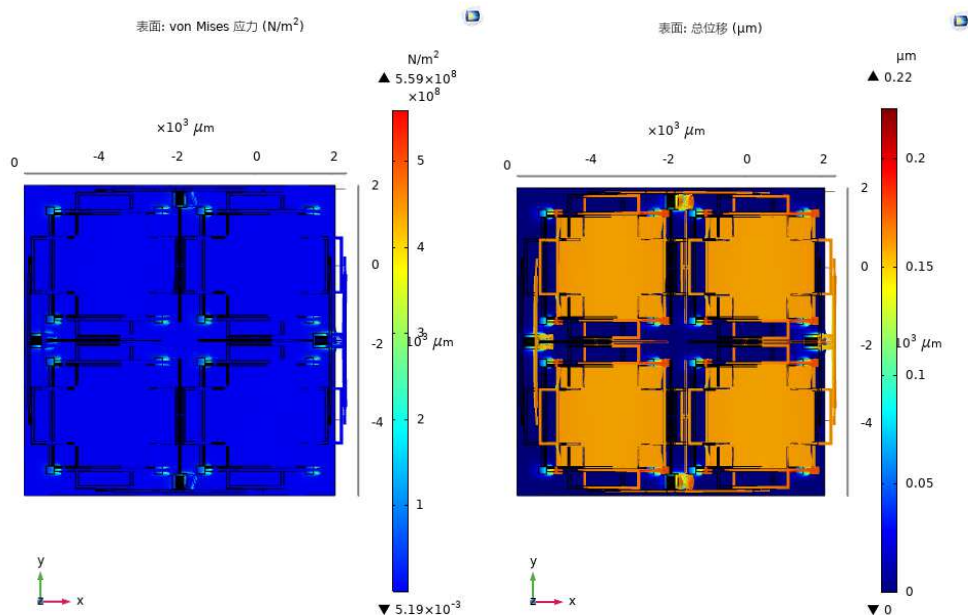


图 4-12 应力影响下陀螺的应力与位移场分布（四质量块结构）

2) Y轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，方向指向Y轴正向，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

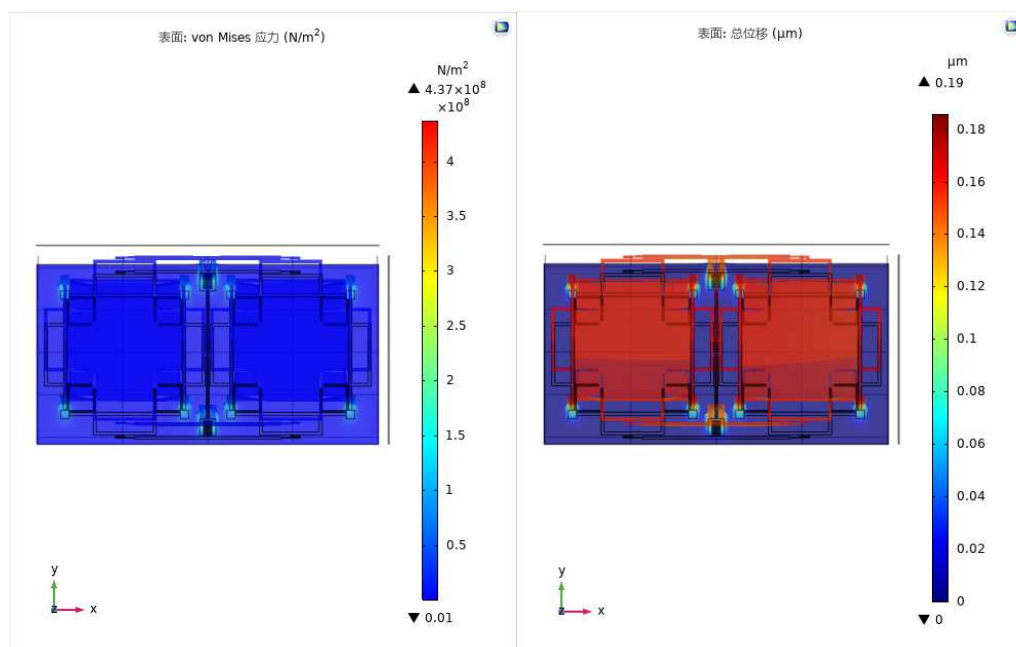


图 4-13 应力影响下陀螺的应力与位移场分布（音叉结构）

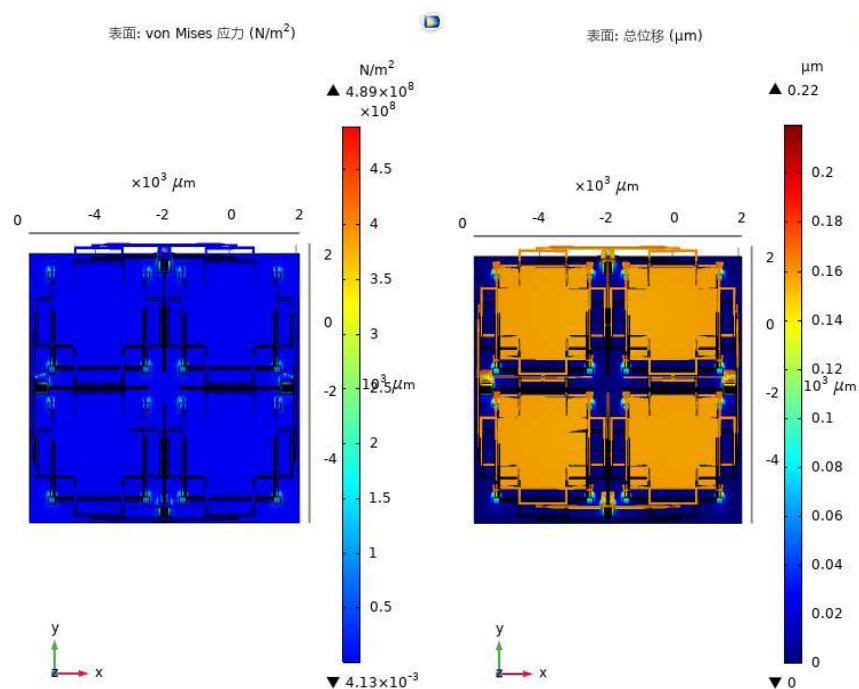


图 4-14 应力影响下陀螺的应力与位移场分布（四质量块结构）

3) Z轴单向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，方向指向Z轴正向，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

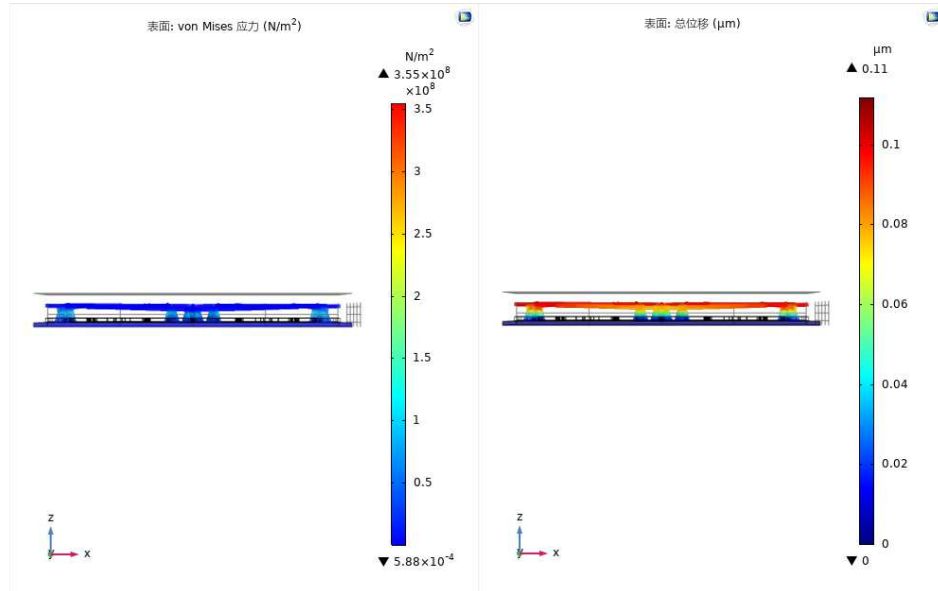


图 4-15 应力影响下陀螺的应力与位移场分布（音叉结构）

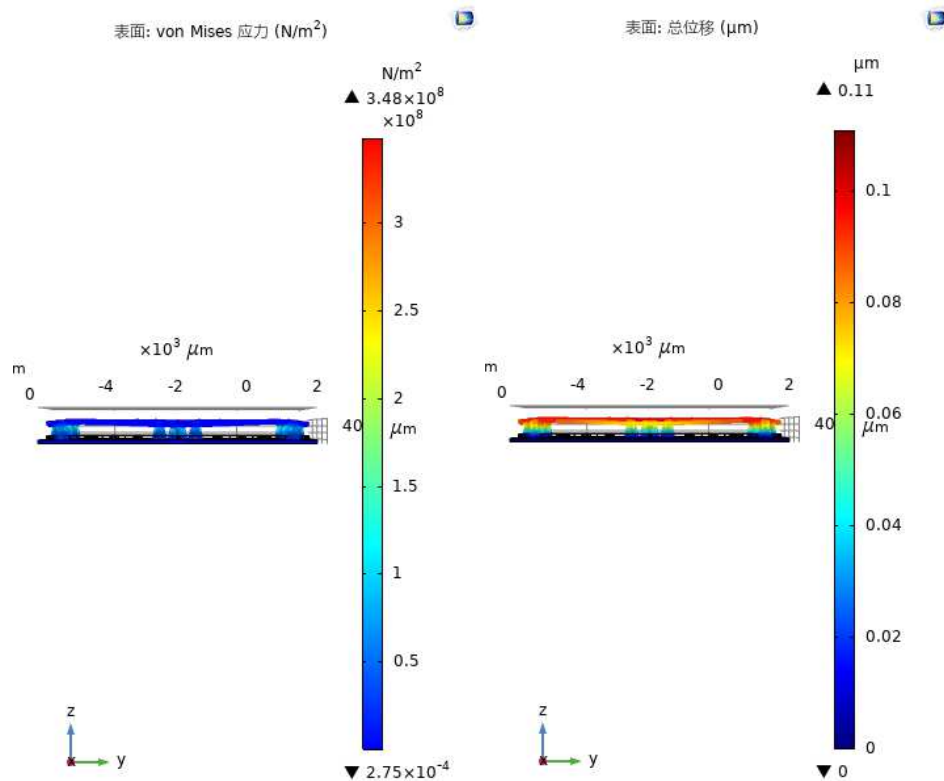


图 4-16 应力影响下陀螺的应力与位移场分布（四质量块结构）

4) 多方向载荷

在锚区与衬底连接面添加边界载荷，设置载荷类型为单位面积力，中心区域受到Z轴方向载荷，四周区域受到中心指向锚区方向载荷，大小100MPa，通过COMSOL结构力学的稳态分析，得到其应力场与位移分布如下：

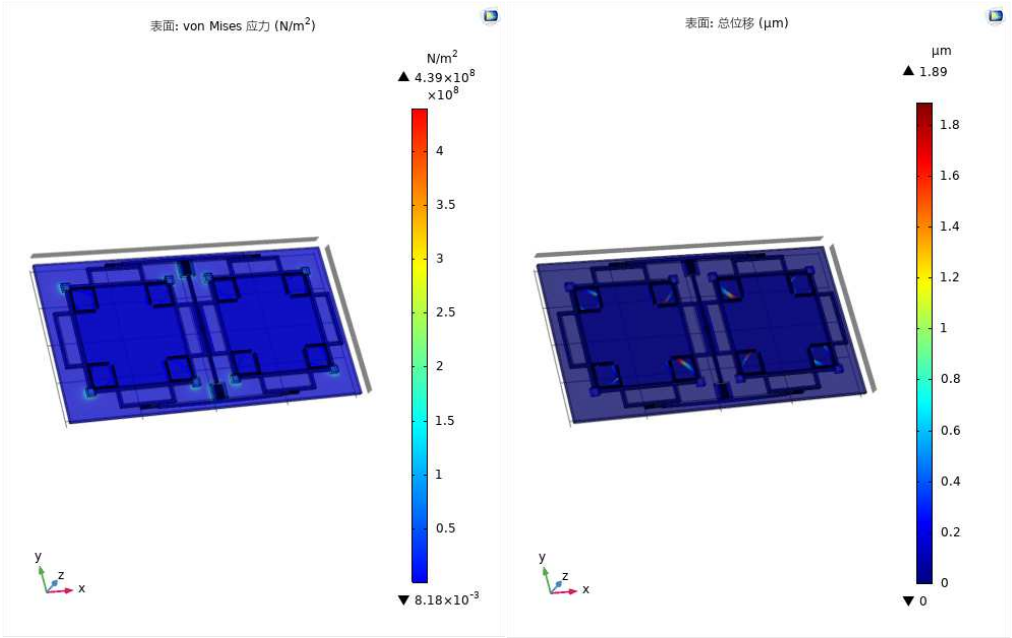


图 4-17 应力影响下陀螺的应力与位移场分布（音叉结构）

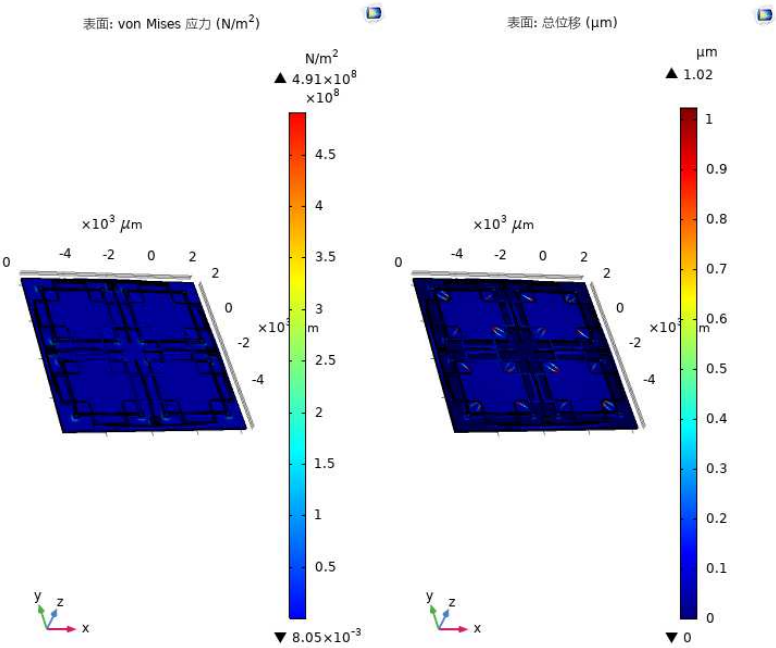


图 4-18 应力影响下陀螺的应力与位移场分布（四质量块结构）

		音叉	四质量块
X轴单向载荷	应力/MPa	432	482
	位移/μm	0.21	0.22
Y轴单向载荷	应力/MPa	456	482

	位移/ μm	0.19	0.22
Z轴单向载荷	应力/MPa	355	348
	位移/ μm	0.11	0.11
多方向载荷	应力/MPa	442	491
	位移/ μm	1.88	1.02

表 4-4 应力影响稳态仿真结果

可以看出,四质量块结构与音叉结构在受到单向载荷时,四质量块结构产生的应力要略大于音叉结构,而产生的位移两者几乎没有区别。而在承受多方向载荷时,音叉结构产生的最大位移几乎为四质量块结构的两倍。

(二)锚区应力影响的特征频率分析

在锚区与衬底连接面添加不同简化情况的边界载荷,设置载荷类型为单位面积力,大小100MPa,通过COMSOL结构力学的特征频率-预应力分析,得到其受应力影响下的工作频率与振型如下:

		音叉	四质量块
无应力干扰	驱动模态/Hz	2440.8	2806.7
	检测模态/Hz	2709.9	2809.8
X轴单向载荷	驱动模态/Hz	2440.9	2806.8
	检测模态/Hz	2709.9	2809.9
Y轴单向载荷	驱动模态/Hz	2441.0	2806.8
	检测模态/Hz	2709.9	2809.9
Z轴单向载荷	驱动模态/Hz	2440.9	2806.7
	检测模态/Hz	2709.9	2809.8
多方向载荷	驱动模态/Hz	2452.9	2817.8
	检测模态/Hz	2738.5	2820.8

表 4-5 应力影响频率仿真结果(载荷大小 100MPa)

可以看出,四质量块结构与音叉结构在受到单向载荷时,两者驱动模态和检测模态的工作频率几乎没有变化。而在承受多方向载荷时,音叉结构的工作频率受到了更大的影响。

为了进一步验证两种结构的应力适应性优劣,将载荷大小提高到1GPa,使两者的频率变化更加明显,得到其仿真结果如下:

		音叉	四质量块
无应力干扰	驱动模态/Hz	2440.8	2806.7
	检测模态/Hz	2709.9	2809.8
X轴单向载荷	驱动模态/Hz	2446.2	2810.3
	检测模态/Hz	2716.3	2815.1
Y轴单向载荷	驱动模态/Hz	2458.7	2812.6

Z轴单向载荷	检测模态/Hz	2714.7	2813.1
	驱动模态/Hz	2442.1	2807.5
	检测模态/Hz	2710.9	2810.5
多方向载荷	驱动模态/Hz	3033.4	3368.9
	检测模态/Hz	4258.8	3375.1

表 4-6 应力影响频率仿真结果（载荷大小 1GPa）

可以看出，在受到单向载荷时，四质量块结构的驱动模态频率变化在0.8-5.9Hz之间，检测模态频率变化在0.7-5.3Hz之间，音叉结构的驱动模态频率变化在1.3-17.9Hz之间，检测模态频率变化在1.0-6.4Hz之间，可见四质量块结构在受到单向载荷时的应力适应性要略优于音叉结构，两者皆表现出优秀的单向应力适应能力。

而在受到多方向载荷时，四质量块结构驱动模态频率变化为562.2Hz，检测模态频率变化为565.3Hz，音叉结构驱动模态频率变化为592.6Hz，检测模态频率变化为1549.9Hz。虽然两者都受到了极大的影响，但是四质量块结构仍保持了优秀的模态匹配，检测模态产生的频率变化也远小于音叉结构，而音叉结构在受到载荷影响后，其频率分裂进一步拉大，对陀螺的性能产生了极大的影响，

综上所述，在受到单向载荷时，四质量块结构与音叉结构皆展现了优秀的应力适应性；而在受到多方向载荷时，四质量块结构的应力适应能力要远优于音叉结构。

5 总结与展望

5.1 全文总结

本文主要针对MEMS四质量块微陀螺仪，提出了一种基于COMSOL的多物理场基本仿真体系，对于四所大学提出的不同类型四质量块微陀螺仪进行了模型绘制与仿真分析，并对比分析了音叉结构与四质量块结构优劣，其具体的研究内容如下所述：

- (1) 介绍了微机械陀螺的主要性能指标以及典型分类方式，列举了四质量块陀螺仪在国际上比较典型的陀螺模型与性能参数。
- (2) 针对加州大学超高Q值四质量块微陀螺仪、斯坦福大学单驱动三轴检测四质量块微陀螺仪、清华大学中心支撑四质量块微陀螺仪以及上海交通大学结构解耦四质量块微陀螺仪的结构特性进行了分析，并通过L-edit软件对其结构进行了模型绘制。
- (3) 搭建了四质量块微陀螺仪的多物理场基本仿真体系，其中包括模态仿真、抗冲击性能仿真、应力适应性仿真、热弹性阻尼Q值仿真，对加州大学、斯坦福大学、清华大学以及上海交通大学的四质量块微陀螺仪进行了仿真验证，确定其工作模态的谐振频率，从加速度冲击情况、锚区应力影响情况等角度分析不同陀螺的环境适应能力，并从热弹性阻尼角度计算其品质因数，验证了基本仿真体系的可行性。
- (4) 运用搭建的基本仿真体系，以加州大学的四质量块结构与音叉结构为例，对两种结构进行对比分析，验证了四质量块结构在模态匹配、抗冲击性能、应力适应能力方面的优越性。

5.2 展望

四质量块微陀螺仪自出现以来，在航空航天、汽车电子以及工业自动化等领域得到了广泛的应用，其自身的性能参数也在不断的提升，随着如今电脑技术的不断发展，仿真分析成为了陀螺设计过程中必不可少的一环。本文以COMSOL仿真软件为基础，搭建了MEMS四质量块微陀螺仪基本仿真体系，对四质量块典型

结构进行了分析，并从仿真角度验证了四质量块结构相对于音叉结构的优势，但由于疫情原因，在以下两个方面还有所欠缺：

- （1）模型绘制的精细程度需要进一步加强。本文主要参照了相关文献中的陀螺结构图进行仿照绘制，对其质量块与驱动框架的具体细节进行了简化处理，也导致了少许仿真误差。后续可以通过提高其模型精细度的方式，来减少仿真误差的出现。
- （2）仿真体系只是搭建了一个基础的框架，仍有一些仿真情形没有被考虑到。本文主要对加速度冲击与锚区应力影响两种情况进行了分析，后续可以仿真更多可能的环境冲击对陀螺性能的影响，搭建更完备的仿真体系。

参考文献

- [1] 谷庆红. 微机械陀螺仪的研制现状[J]. 中国惯性技术学报, 2003, 11(5):6.
- [2] 成宇翔, 张卫平, 陈文元,等. MEMS 微陀螺仪研究进展[C]// 2010(第三届)中国微纳电子技术交流与学术研讨会. 0.
- [3] 张宪起, 董冀, 俞瑛. 微机械陀螺仪性能指标测试及计算方法[J]. 集成电路通讯, 2009(4):6.
- [4] 李敏阳. 基于 SOI 的结构解耦四质量块微陀螺仪的设计与制备探究[D].上海交通大学,2020.DOI:10.27307/d.cnki.gsjtu.2020.002103.张霞. 振动式微机械陀螺仪的研究现状与展望[J]. 固体电子学研究进展, 2013, 33(5):8.
- [5] 张霞. 振动式微机械陀螺仪的研究现状与展望[J]. 固体电子学研究进展, 2013, 33(5):8.
- [6] Trusov A A , Prikhodko I P , Zotov S A , et al. Ultra-high Q silicon gyroscopes with interchangeable rate and whole angle modes of operation[C]// IEEE. IEEE, 2010.Prikhodko I P, Trusov A A, Shkel A M. Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature self-sensing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2013, 201(Complete):517-524
- [7] Prikhodko I P , Trusov A A , Shkel A M . Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature self-sensing[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 201(Complete):517-524.Prikhodko I. P., Trusov A. A., Shkel A. M. North-finding with 0.004 radian precision using a silicon MEMS quadruple mass gyroscope with Q-factor of 1 million [J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2012: 164-167.
- [8] Prikhodko I P , Zotov S A , Trusov A A , et al. Foucault pendulum on a chip: Angle measuring silicon MEMS gyroscope[C]// IEEE. IEEE, 2011.Trusov A A , Atikyan G , Rozelle D M , et al.Flat is not dead: Current and future performance of Si-MEMS Quad Mass Gyro (QMG) system[C] 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014.IEEE,2014:252-258.
- [9] Prikhodko I P , Trusov A A , Shkel A M . North-finding with 0.004 radian precision using a silicon MEMS quadruple mass gyroscope with Q-factor of 1 million[J]. Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2012:164-167.
- [10] Prikhodko I P , Zotov S A , Trusov A A , et al. Sub-degree-per-hour silicon MEMS rate sensor with 1 million Q-factor[C]// Solid-state Sensors, Actuators & Microsystems Conference. IEEE, 2011.
- [11] Trusov A A , Member, IEEE, et al. Low-Dissipation Silicon Tuning Fork Gyroscopes for Rate and Whole Angle Measurements[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(11):2763-2770.
- [12] Trusov A A , Atikyan G , Rozelle D M , et al. Flat is not dead: Current and future performance of Si-MEMS Quad Mass Gyro (QMG) system[C]// 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium - PLANS 2014. IEEE, 2014.
- [13] Trusov A A , Atikyan G , Rozelle D M , et al. Force rebalance, whole angle, and self-calibration mechanization of silicon MEMS quad mass gyro[C]// 2014 International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS). IEEE, 2014.
- [14] Askari S , Asadian M H , Kakavand K , et al. Vacuum sealed and getter activated MEMS Quad Mass Gyroscope demonstrating better than 1.2 million quality factor[C]// 2016 IEEE

- International Symposium on Inertial Sensors and Systems. IEEE, 2016.
- [15] Asadian M H , Askari S , Shkel A M . An Ultrahigh Vacuum Packaging Process Demonstrating Over 2 Million Q-Factor in MEMS Vibratory Gyroscopes[J]. IEEE Sensors Letters, 2017:1-4.
- [16] 夏敦柱, 孔伦,虞成.四模态匹配三轴硅微陀螺仪[J].光学精密工程, 2013,21(9): 2326-2332.
- [17] Taheri-Tehrani P , Kline M , Izyumin I , et al. Epitaxially-encapsulated quad mass gyroscope with nonlinearity compensation[C]// 2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). IEEE, 2016.
- [18] Wisher S , Shao P , Norouzpour-Shirazi A , et al. A high-frequency epitaxially encapsulated single-drive quad-mass tri-axial resonant tuning fork gyroscope[C]// 2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). IEEE, 2016.
- [19] Zhang T , Zhou B , Yin P , et al. Optimal Design of a Center Support Quadruple Mass Gyroscope (CSQMG)[J]. Sensors, 2016, 16(5):613.
- [20] Zhou B , Tian Z , Peng Y , et al. Innovation of flat gyro: Center Support Quadruple Mass Gyroscope[C]// IEEE International Symposium on Inertial Sensors & Systems. IEEE, 2016.
- [21] Song M , Zhou B , Tian Z , et al. Parametric drive of a Micro Rate Integrating Gyroscope using discrete electrodes[C]// 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). IEEE, 2017.
- [22] Zhang T , Zhou B , Song M , et al. Structural Parameter Identification of the Center Support Quadruple Mass Gyro (CSQMG)[J]. IEEE Sensors Journal, 2017:1-1.
- [23] Tian Z , Zhou B , Peng Y , et al. Multi-order system dynamic model of the Center Support Quadruple Mass Gyro (CSQMG)[C]// 2016 IEEE SENSORS. IEEE, 2016.
- [24] 王永, 孟冰, 陈旭辉,et al.一种环式分布的四质量块微机械陀螺研究[C]W12018 惯性技术发展动态发展方向研讨会文集.2018:174-177.
- [25] Wu G , Chua G L , Singh N , et al. A Quadruple Mass Vibrating MEMS Gyroscope With Symmetric Design[J]. IEEE Sensors Letters, 2018, 2:1-4.
- [26] 姜劲栋. 硅微机械陀螺敏感结构的理论研究[D]. 南京理工大学, 2015.

附录

作者简历（示例）

姓名：张凯瑜 性别：男 民族：汉

出生年月：2000.2.18 籍贯：浙江省台州市

2015.09-2018.07 浙江省台州市黄岩中学

2018.09-2022.07 浙江大学攻读学士学位

获奖情况：2019-2020 学年：浙江大学暑期社会实践优秀团队；2020-2021 学年：

国家级科技创新项目优秀；2021-2022 学年：浙江大学三等奖学金。

参加项目：国家级科技创新项目“信天翁仿生长航时智能无人机研究”

发表的学术论文： 无

本科生毕业论文（设计）任务书

一、题目：

二、指导教师对毕业论文（设计）的进度安排及任务要求

2022 年 12-1 月：充分四质量块微陀螺仪的发展现状，掌握微机械陀螺仪工作原理，撰写文献调研与开题报告。

2022 年 1 月：分析不同大学四质量块微陀螺仪的结构特征，并仿照其结构图完成 L-edit 模型绘制。

2022 年 2-3 月：搭建基本仿真分析体系，针对不同大学的典型四质量块结构进行仿真分析，包括模态仿真、抗冲击仿真、应力适应性仿真、热弹性阻尼仿真。

2022 年 4 月：运用搭建的仿真体系，对比分析音叉结构与四质量块结构的环境适应能力优劣。

2022 年 5 月：总结整理，撰写毕业论文并准备毕业答辩。

起讫日期 20 年 月 日至 20 年 月 日

指导教师（签名）_____ 职称_____

三、系或研究所审核意见

负责人（签名）_____

年 月 日

毕 业 论 文（设计） 考 核

一、指导教师对毕业论文（设计）的评语

该生主要针对 MEMS 四质量块微陀螺仪，搭建了一种基于 COMSOL 的多物理场基本仿真体系，对于四所大学提出的不同类型四质量块微陀螺仪进行了模型绘制与仿真分析，并在此基础上对比分析了音叉结构与四质量块结构优劣。

虽然论文在创新性上有所欠缺，但总体来说内容完整、层次分明、撰写规范，达到了本科生毕业论文的要求。

指导教师(签名) _____
年 月 日

二、答辩小组对毕业论文（设计）的答辩评语及总评成绩

论文内容充足、结构完整、条理清晰，但是创新程度不足，总体而言满足本科毕业论文要求。

成绩 比例	文献综述 占（10%）	开题报告 占（15%）	外文翻译 占（5%）	毕业论文(设计) 质量及答辩 占（70%）	总评成绩
分值	8	13.5	4	64	90

答辩小组负责人（签名） _____
年 月 日

