

航空航天学院本科毕业论文（设计）中期检查表

学生姓名	张凯瑜	学号	3180101377	专业	飞行器设计与工程
指导教师姓名	郑旭东	职称	副研究员	所在单位	先进技术研究院
毕业论文（设计） 题目	MEMS 四质量块陀螺仿真分析				
目 前 已 完 成 任 务	主要内容：（学生填写，毕业论文进展情况，字数不少于 1000 字）				
	<p>MEMS 陀螺仪大多采用基于科氏效应的线性或扭转振动结构来检测外角速率。MEMS 陀螺仪的机械振动会造成短期的输出误差，降低设备的性能。因此，对环境噪声(振动、加速度和冲击)的高抑制是 MEMS 陀螺仪可靠运行的必要条件。为了解决这些问题，四质量块 MEMS 陀螺被提出，相对于一般的单质量块陀螺和音叉陀螺，四质量块陀螺不仅解决了单质量块陀螺存在的共模干扰问题，且由于四质量块结构的完全对称性，双质量块因驱动、检测模态的不对称所导致的两种模态固有频率差异以及检测模态振幅较小问题也得到了解决，并显著降低了振动和加速度误差。随着科技的发展，各种传感器的精度要求越来越高，环境适宜性要求亦越来越高，四质量块微陀螺仪在这一领域的独特优势决定了其之后发展的必要性与必然性。</p>				
	<p>因此本次毕业设计以微机械陀螺的四质量块结构为研究对象，通过理论分析，仿真计算等手段，从机械结构层面对微机械陀螺的动力学等效模型进行研究，对比分析不同研究所提出的四质量块结构模型，搭建四质量块基本分析模型，并在此基础上对本研究所现有的陀螺进行结构优化。</p>				
	<p>当前毕设主要进展：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>● 不同陀螺的模型绘制</li></ul>				
	<p>使用 L-edit 软件对于清华大学中心支撑四质量块陀螺仪、斯坦福大学单驱动四质量三轴谐振音叉陀螺仪、上海交通大学基于 SOI 的结构解耦四质量块陀螺仪等进行了结构图绘制，并依照区域与功能的差别进行分层，以方便后续的仿真与参数修改。</p>				
	<p>1.1 斯坦福大学单驱动四质量三轴谐振音叉陀螺仪</p> <p>斯坦福大学 S.Wisher、P. Shao 等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 <math>2 \times 2 \text{ mm}^2</math> 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。</p>				

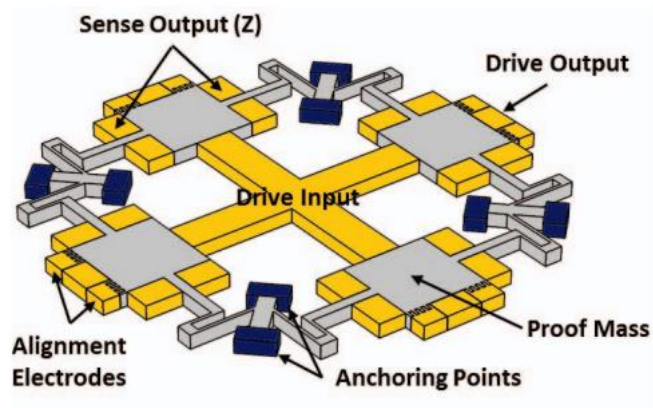


图 1 单驱动四质量三轴 TFG 示意图

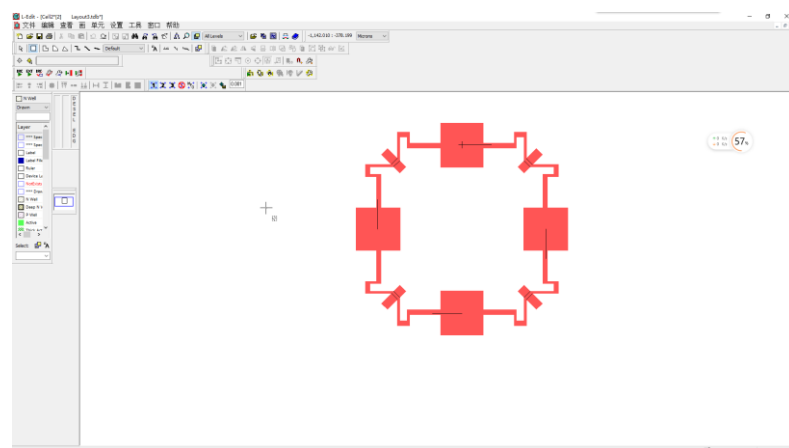


图 2 单驱动四质量三轴 TFG 结构模型

## 1.2 清华大学中心支撑四质量块陀螺仪

清华大学张嵘课题组设计并制备了一种中心支撑四质量块陀螺仪，如图 1 所示，四个质量块独立分布，通过折叠梁连接在一中心支撑锚点上。驱动和检测模态的振型类似半球和圆盘多环陀螺仪，因而锚点阻尼相对较小。

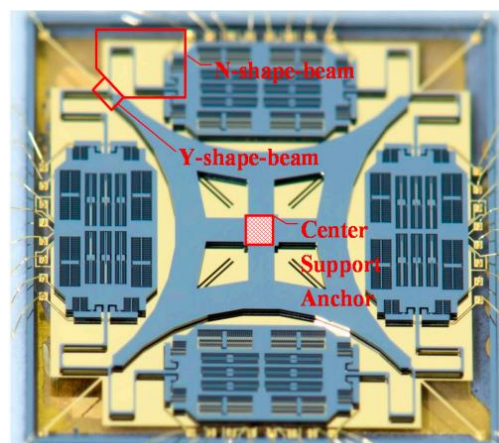


图 3 中心支撑四质量块陀螺仪光学图片

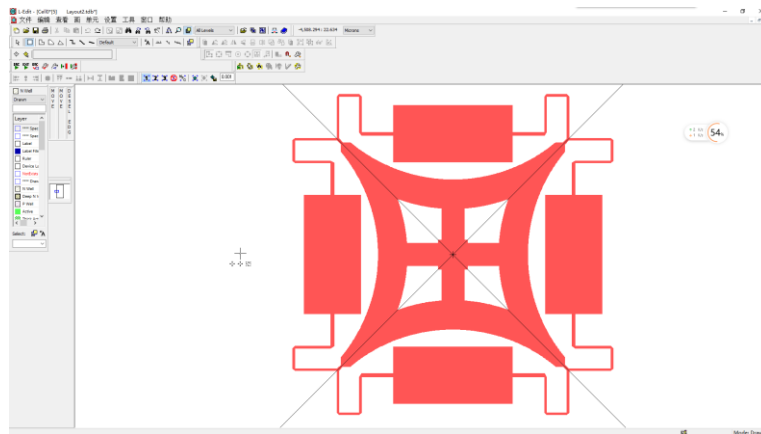


图 4 中心支撑四质量块陀螺仪结构模型

### 1.3 上海交通大学基于 SOI 的结构解耦四质量块陀螺仪

四质量块谐振子由 9 个支撑锚点、16 个驱动和检测框架、4 个质量块、4 个同步耦合杠杆和多个折叠梁组成。4 个质量块中心部分分别进行了挖空处理,降低耦合机构的承受应力,每个质量块的周围设计有 4 个十字形的驱动和检测框架,驱动和检测框架的一端通过折叠梁与质量块相连,另一端与支撑锚点相连,折叠梁刚度的合理选择以及二自由度的结构设计有效地实现了驱动与检测模态之间的模态解耦。同时,相邻质量块的驱动和检测框架之间通过同步耦合杠杆和框形梁连接,形成质量块之间的机械同步,使得四质量块的两个工作模态模态具有高度的对称性,从结构上减小了陀螺仪的频率分裂。

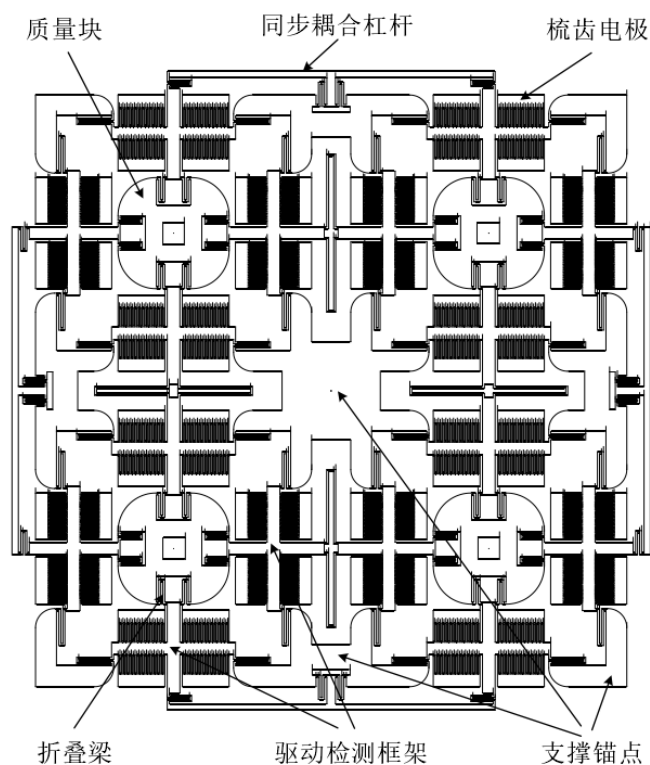


图 5 基于 SOI 的结构解耦四质量块陀螺示意图

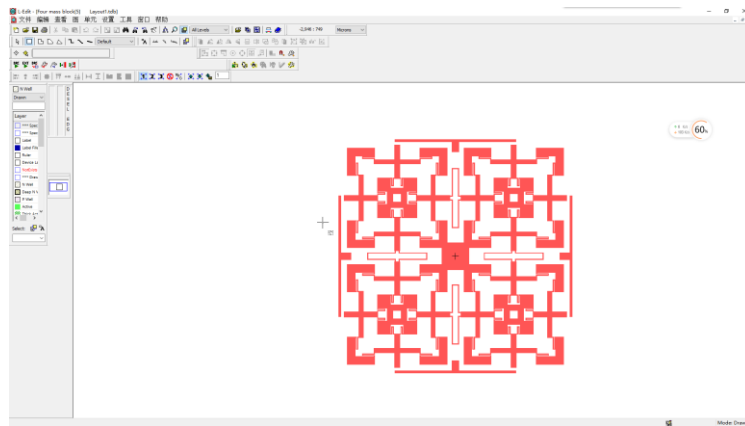


图 6 基于 SOI 的结构解耦四质量块陀螺结构图

## ● 不同陀螺的仿真分析与特征分析

将 L-edit 软件绘制的四质量块结构图导入 comsol 仿真软件，在完成区域的划分，添加相应的固定约束，设定对应材料后，进行固体力学的物理场特征频率仿真，得到以下驱动模态和检测模态的特征频率。

### 2.1 斯坦福大学单驱动四质量三轴谐振音叉陀螺仪

#### 2.1.1 Comsol 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、147.4kHz、147.3kHz，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，其偏移产生的主要原因推测为结构图绘制过程中的参数误差、选择的硅材料不完全一致以及梳齿电极的省略，之后会做进一步分析验证。

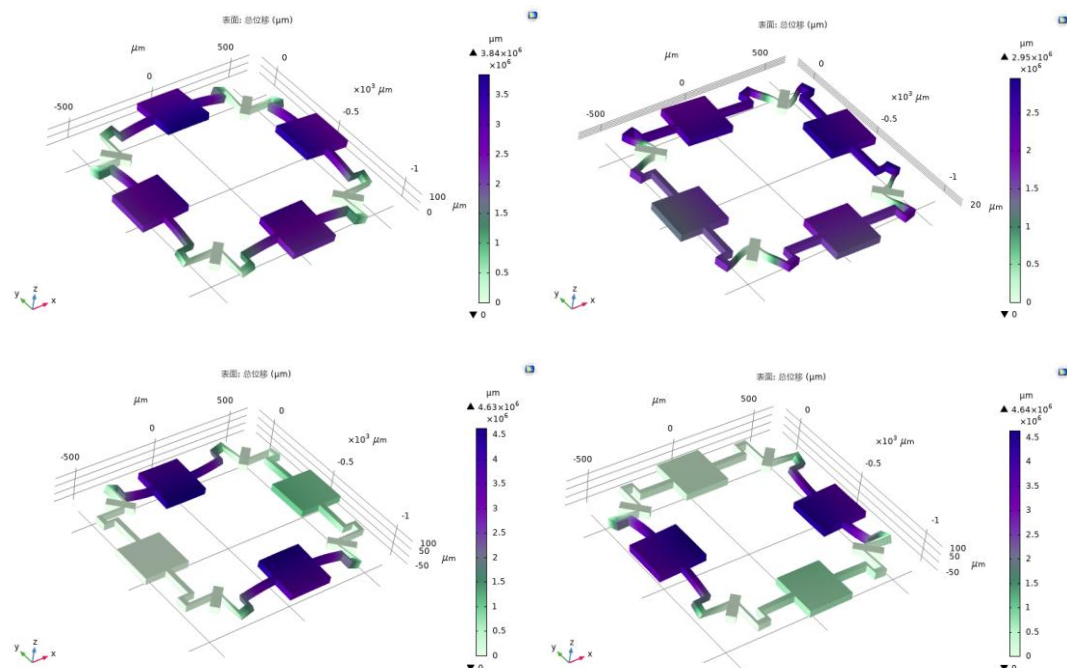


图 7 驱动模态、Z 轴检测模态、X 轴检测模态和 Y 轴检测模态

#### 2.1.2 特征分析

与传统的谐振音叉陀螺相比，该器件设计为具有相对较高的谐振频率，通过将音叉陀螺的谐振频率提高到远高于外部振动频率，以提高模式匹配条件下的器件带宽并增强对冲击和振动的鲁棒性。

但由于其采用了模式分离操作，其 X、Y 检测模态的灵敏度以及噪声性能相对较差，需要在未来的工作中研究一种减少模式失准影响的方案。

2.2 清华大学中心支撑四质量块陀螺仪

2.2.1 Comsol 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 7031.9Hz 与 6860.4Hz，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，其频率偏移产生的主要原因推测为结构图绘制过程中的参数误差以及选择的硅材料不完全一致，之后会做进一步分析验证。

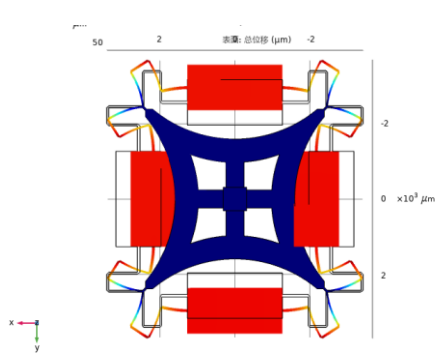


图 8 驱动模态

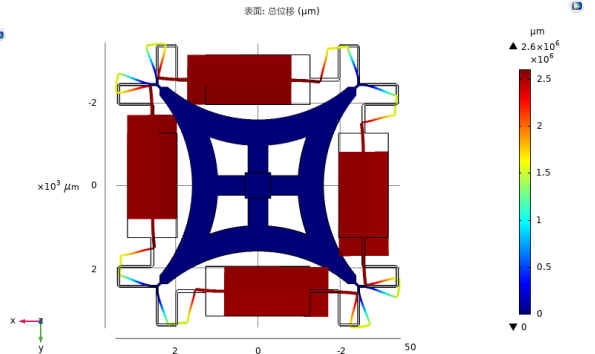


图 9 检测模态

2.2.2 特征分析

该方案设计的陀螺仪引入了一种采用更简单的弯曲模式和单中心支撑锚来支撑四个质量块的新结构，它将 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扁平结构（如图 1 所示）。与传统的平面结构相比，新设计形成了完全对称的配置，并通过蛇形梁调整模式频率分布，从而增强了制造工艺的鲁棒性。

此外，引入 Y 型耦合梁组件解决了同相和反相模式频率混淆问题，该设计增强了工作模式的同步机制。驱动和检测模态的振型类似半球和圆盘多环陀螺仪，因而锚点阻尼相对较小。实验测得其主要性能指标如下：

Q 值（驱动模态）	Q 值（检测模态）	Allan 方差稳定性	白噪声水平
8500	500	0.12deg/h	0.72deg/h/√Hz

表 1 主要性能参数

其在白噪声水平方面表现十分优秀，但是品质因数相对于其他四质量块微陀螺仪仍有一些差距，之后的研究方向将集中在品质因数提升上。



## 2.3 上海交通大学基于 SOI 的结构解耦四质量块陀螺仪

### 2.3.1 Comsol 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固有频率是基本匹配的, 且与原文的仿真结果 38653Hz、38660Hz 差异较小, 其频率偏移产生的主要原因推测为结构图绘制过程中的参数误差以及选择的硅材料不完全一致, 之后会做进一步分析验证。

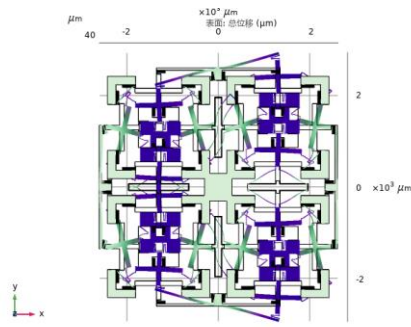


图 10 驱动模态

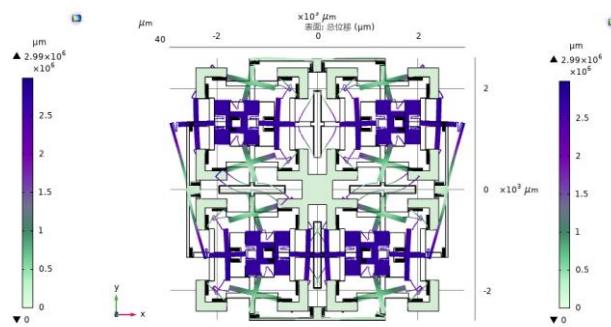


图 11 检测模态

### 2.3.2 特征分析

该四质量块微陀螺仪当外界没有输入角速度时, 在每个质量块的驱动电极上施加周期性的正弦交流信号, 得到如图 10 显示的驱动模态; 当质量块所搭载的载体发生转动时, 驱动模态的能量通过科氏效应形成如图 11 所示的检测模态的振动。可以看到, 驱动模态和检测模态成  $90^\circ$  的完全对称, 因此解决了双质量块音叉微陀螺仪所固有的工作模态不对称问题, 从结构上减小了陀螺仪的频率分裂。

虽然该四质量块微陀螺仪的频率分裂很小, 但是仿真发现其低频率模态过多, 极大的影响了其工作的稳定性, 容易受到外部振动的干扰, 后续将尝试设计新的连接梁结构减少其低频杂乱模态。

## ● 陀螺仪结构优化尝试

### 3.1 不同类型弹性梁分析

弹性梁是影响四质量块微陀螺仪的系统刚度的主要因素之一, 其类型和参数对结构解耦的效果有很大的影响, 直接关系到微陀螺仪的谐振频平和整体性能。因此, 需要对弹性梁进行详细的选型分析。目前, MEMS 硅微工艺下的弹性梁主要有直梁、L 形梁、U 形梁以及折叠梁等几种类型, 以下分别对这四类弹性梁进行建模和仿真分析。

为了便于仿真分析的比较, 统一设置四种类型的弹性梁的梁长、梁宽和梁厚为  $150\ \mu\text{m}$ 、 $15\ \mu\text{m}$ 、 $45\ \mu\text{m}$ 。然后, 通过有限元仿真软件 COMSOL 分别对以上四类弹性梁进行位移和应力的分析。将几何模型导入其中, 弹性梁的材质为 COMSOL 材料库自带

的硅。对不同地方施加载荷和约束，载荷大小统一为 0.01N，四类弹性梁 X、Y 轴方向的位移和应力进行仿真分析的结果如下。

### 3.1.1 弹性梁位移云图与应力分布——左右端

固定约束和载荷施加的位置分别在弹性梁的左右两端，载荷方向为 X 轴方向，大小为 0.01N，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到四类弹性梁的位移云图和应力分布如下所示：

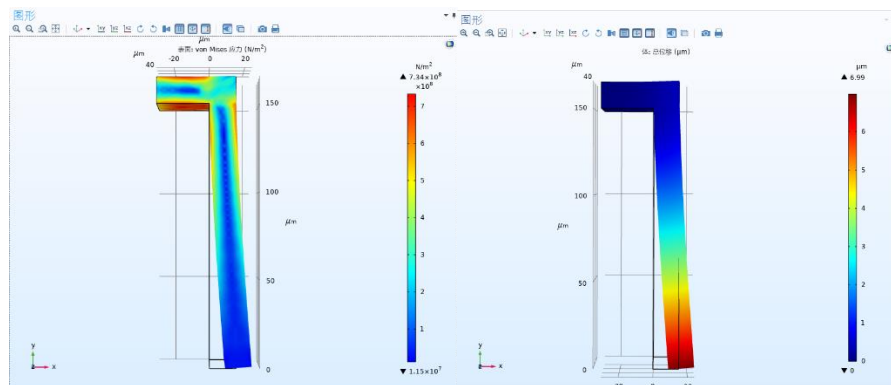


图 12 L 型梁应力分布与位移云图

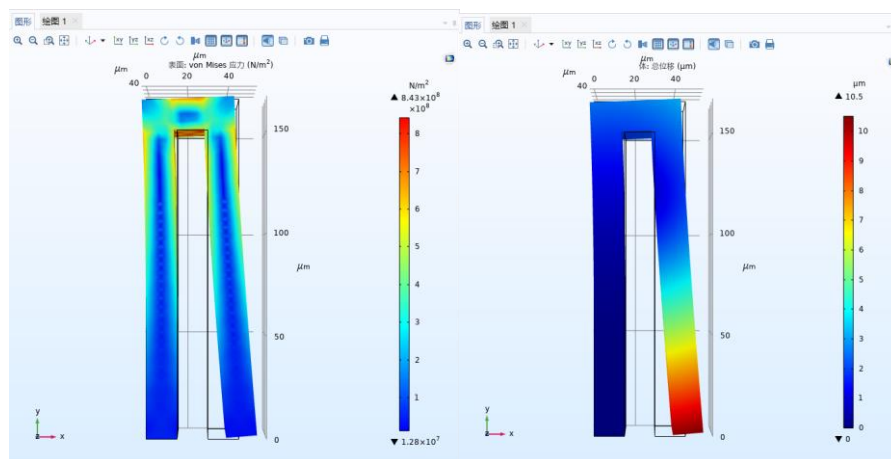


图 13 U 型梁应力分布与位移云图

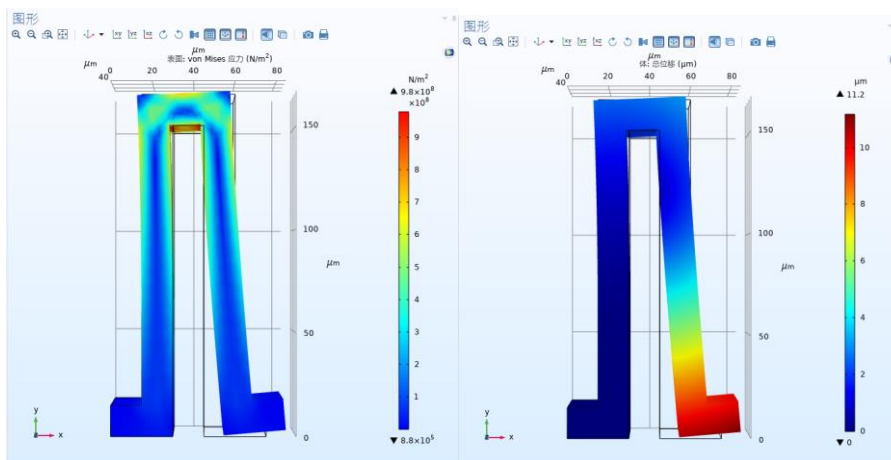


图 14 折叠型梁应力分布与位移云图

### 3.1.2 弹性梁位移云图与应力分布——上下端

固定约束和载荷施加的位置分别在弹性梁的上下两端，载荷方向为 X 轴方向，

大小为 0.01N，通过 COMSOL 结构力学的稳态分析，得到四类弹性梁的位移云图和应力分布如下所示：

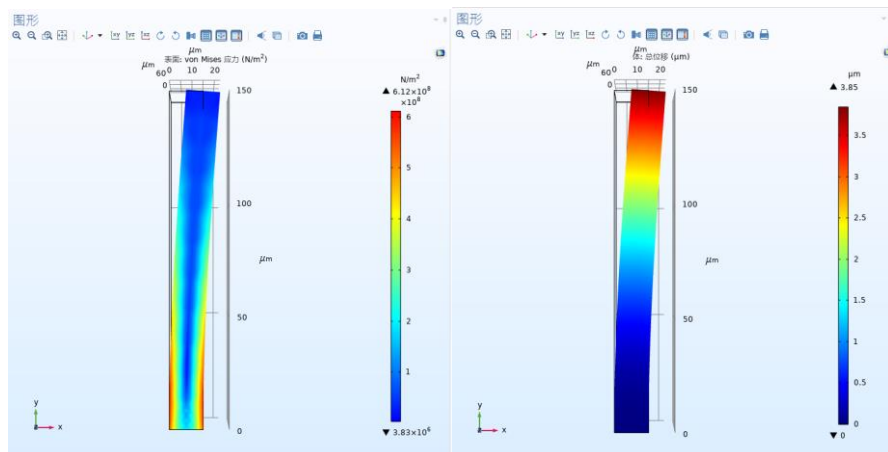


图 15 直梁应力分布与位移云图

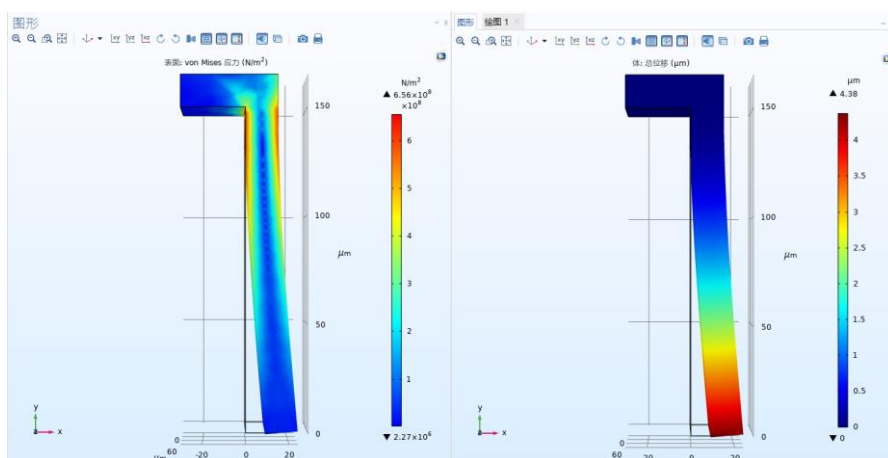


图 16 L 型梁应力分布与位移云图

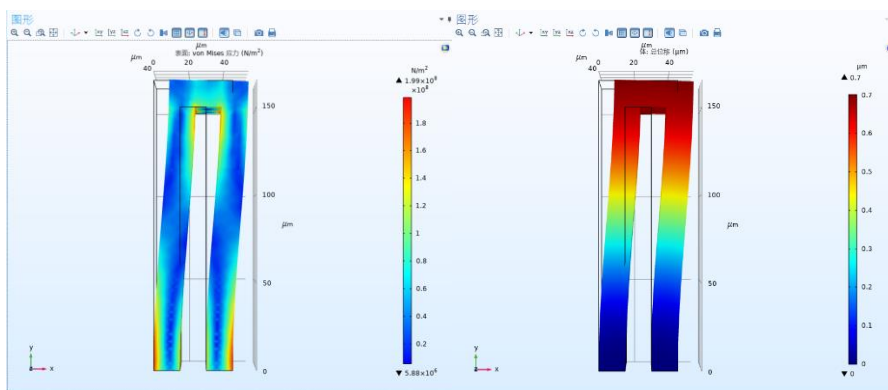


图 17 U 型梁应力分布与位移云图



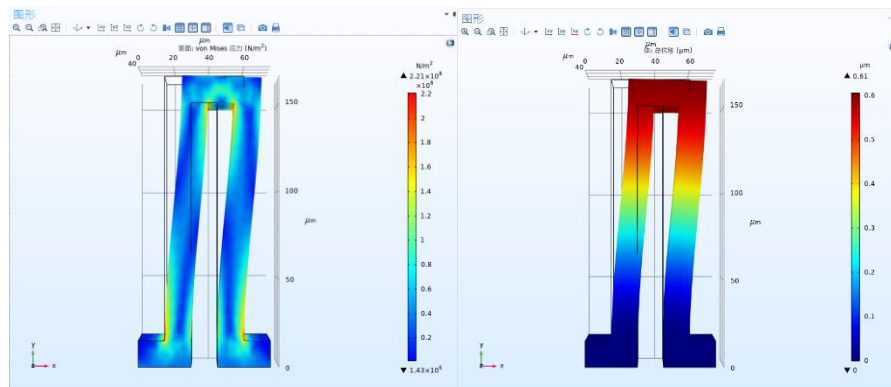


图 18 折叠型梁应力分布与位移云图

	直梁	L 型梁	U 型梁	折叠梁
位移-上下端/ $\mu\text{m}$	/	4.38	0.7	0.61
应力-上下端/Mpa	/	656	199	221
位移-左右端/ $\mu\text{m}$	3.85	6.99	10.5	11.2
应力-左右端/Mpa	612	734	843	980

表 1 弹性梁仿真结果

由上述仿真结果可知，直梁和 L 形梁 X、Y 方向上的刚度相差很小，过多的采用这两种弹性梁会导致驱动模态和检测模态存在较高的耦合效应，相反，U 形梁和折叠梁表现出优良的解耦性能，其在 X、Y 轴方向的刚度比较小。

### 3.2 负刚度内部杠杆设计

为了使上海交通大学设计的四质量块微陀螺仪反向模态特征频率低于同相模态，并减少其低频模态数量，以达到抑制共模加速度、提高品质因数以及陀螺稳定性的目的，目前正开展负刚度内部杠杆的设计，采取了一些尝试，暂时仍未取得最佳方案。

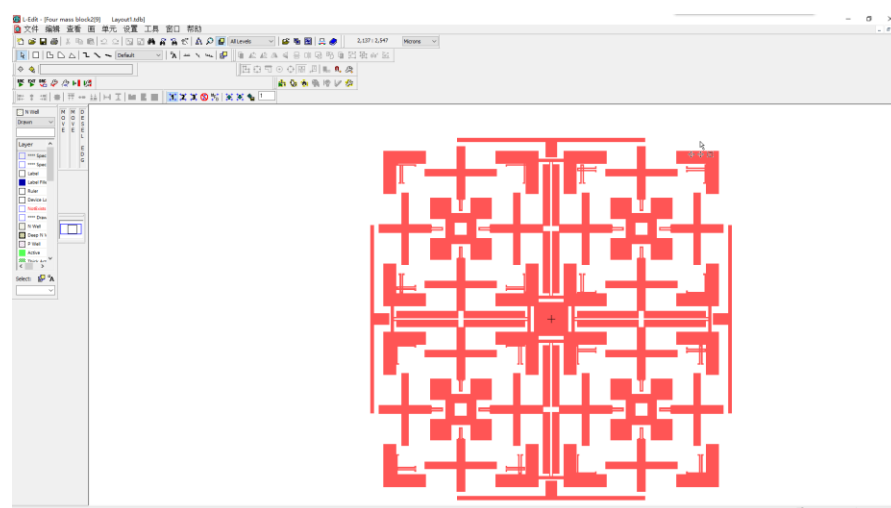


图 19 采用负刚度内部杠杆连接的四质量块模型

是否符合任务书要求的进度（导师填写）

尚 需 完 成 的 任 务	（学生填写）  1. 绘制其他经典的四质量块仿真模型，理解各种实施方法的特点，搭建完善的四质量块微陀螺仪基本分析模型。  2. 对已有的四质量块微陀螺仪进行结构优化，分析不同结构参数对于陀螺性能的影响，并提高陀螺的抗冲击性能。  3. 与单质量块、音叉结构对比，分析其灵敏度、环境适应性等性能的优劣。		
	存 在 的 问 题 和 解 决 办 法	存 在 问 题	1. 对于 comsol 仿真掌握仍有不足，对于如何设定更加真实的物理场存在疑问。 2. 锚区、质量块的结构参数对于性能的影响无法完全确定。 3. 对小尺寸本身的特征频率不了解，会影响陀螺的工作模态。
拟 采 取 的 办 法	1. 观看更多 comsol 教程，并针对可能的使用环境设定专门的物理场条件，提高掌握程度。 2. 多建几个四质量块模型，从经典模型里面理解原理。		
指导教师 签字		日期	

## 学院中期抽查

抽 查 小 组 意 见	学生对已完成部分的掌握情况，是否能按时完成论文？（由抽查组督导填写） 抽查最终评分：按“优、良、合格、不合格”打分。		
	检查组老师签字：		

请正反面打印