

中山大学大学生创新训练项目申请书

项目编号			
项目名称	基于 COMSOL 的 MEMS 热对流式倾角传感器仿真设计研究		
项目负责人	徐睿琳	联系电话	19065336106
所在学院	微电子科学与技术学院		
学号	23342107	专业班级	微电子科学与工程（微电子科学与技术学院）
指导教师	罗华煌		
E-mail	xurlin7@mail2.sysu.edu.cn		
申请日期	2024 年 12 月 15 日		
项目期限	一年期		

中山大学 教务部

一、基本情况

项目名称	基于 COMSOL 的 MEMS 热对流式倾角传感器仿真设计研究						
所属学科	学科一级类： 工学 学科二级类： 电子信息类						
项目来源	<input checked="" type="checkbox"/> A、学生自主选题，来源于自己对课题的长期积累与兴趣 <input type="checkbox"/> B、来源于教师科研项目选题 <input type="checkbox"/> C、学生承担社会、企业委托项目选题 <input type="checkbox"/> D、学科竞赛（未申请立项大创项目） <input type="checkbox"/> E、参加教师科研项目（未申请立项大创项目）						
申请金额	12000.00 元	项目期限	一年期	拟申报项目级别		校级	
负责人	徐睿琳	性别	男	民族	汉族	出生年月	年 月
学号	23342107	联系电话	手机： 19065336106				
指导教师	罗华煌	联系电话	手机： 17759852806				
项目简介	<p>本研究基于已完成的二维与初步三维仿真成果，进一步深化 MEMS 热对流倾角传感器的建模与仿真优化。项目旨在通过精细化的二维与三维多物理场耦合仿真模型，系统探索传感器的关键设计参数及其对性能的影响，包括薄膜厚度、器件尺寸、热源布局、气体种类等。通过综合调节这些参数，优化传感器的灵敏度、稳定性及抗干扰能力。本研究特别注重设计参数与结构的创新性组合，探索新型设计方案，力求实现性能的显著提升。同时，研究成果将为 MEMS 热对流倾角传感器在高精度、低功耗及高抗干扰应用场景中的实际需求提供理论依据和设计指导，推动相关技术的发展和落地。</p>						
负责人曾经参与科研	暂无						

的情况						
指导教师承担科研课题情况		无				
指导教师对本项目的支持情况		非常支持				
项目 组主 要成 员	姓名	学号	学院	专业班 级	联系电话	项目分工
	徐睿琳	23342107	微电子科学与技术学院	微电子科学与工程（微电子科学与技术学院）	19065336106	管理、技术研究、论文编写
	杨林溶	23342112	微电子科学与技术学院	微电子科学与工程（微电子科学与技术学院）	13299198207	技术研究、仿真建模
	李锦辉	23342046	微电子科学与技术学院	微电子科学与工程（微电子科学与技术学院）	13242002962	技术研究、数据分析
指导 教师	姓名	工号	学院/单位	职称	联系电话	电子邮件
	罗华煌	230060	微电子科学与技术学院	讲师(高校)	17759852806	luohh23@mail.sysu.edu.cn

二、 立项依据（可加页）

1. 研究目的

本研究旨在通过基于 COMSOL 的多物理场仿真技术，对 MEMS 热对流式倾角传感器的关键参数和结构进行系统优化，提升传感器的灵敏度、响应速度和稳定性。通过探索创新性的结构设计和参数组合，研究其在不同工况下的性能表现，解决传统热对流传感器在精度和适应性方面的局限性，为实现高性能、高可靠性的 MEMS 热对流式倾角传感器设计提供理论依据与技术支持，同时为其在工业、航空、医疗等领域的广泛应用奠定基础。

2. 研究内容

本研究围绕 MEMS 热对流式倾角传感器的仿真设计与优化展开，旨在通过基于 COMSOL 的多物理场耦合仿真技术，探索新型传感器结构及其性能优化方案。研究内容包括以下几个方面：

首先，构建二维热对流传感器模型，分析关键参数（如薄膜厚度、腔体尺寸、热源与探测器位置、气体种类等）对传感器灵敏度和稳定性的影响，完成二维模型的优化；

其次，将优化结果拓展至三维模型，通过精细化的三维仿真，研究复杂环境下的传感器性能表现；

最后，尝试在腔体结构、微纳薄膜设计等方面进行创新，结合多工况仿真对传感器的灵敏度、响应速度和环境适应性进行系统评估。通过这一系列研究，旨在为 MEMS 热对流式倾角传感器的高性能设计提供理论支持与技术参考。

3. 国、内外研究现状和发展动态

近年来，微机械系统（MEMS）热对流式倾角传感器在材料结构、建模仿真及应用领域取得了显著进展。早在 2004 年，Fuxue Zhang 率先提出了一种基于自然对流气体摆的加速度计和倾角传感器设计（图 1），该传感器通过气体摆动特性实现加速度和倾角的检测，具备 $\pm 8g$ 和 $\pm 45^\circ$ 的测量范围，非线性误差低于 1%FS，分辨率达到 0.01° ，并展示出优异的抗冲击性和快速响应能力。然而，其在气体特性与环境条件适应性方面仍存在不足，亟需优化以提升在多变环境下的稳定性和精度。

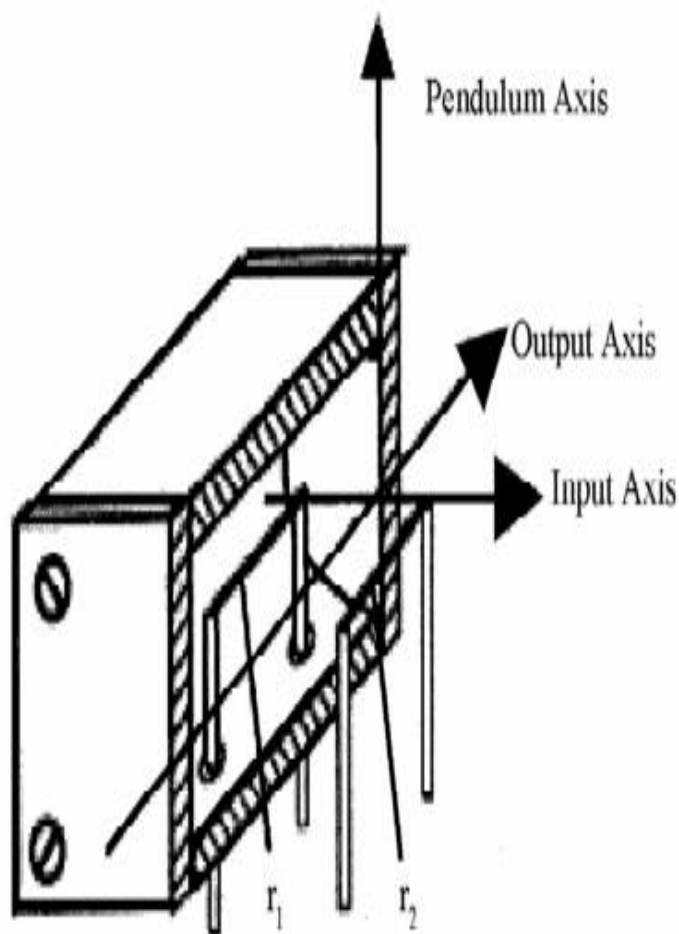


图 1 对流气体摆式倾斜传感器的结构

在建模与仿真方面，Courteaud 等（2007）首次提出并仿真了基于热交换原理的机械热倾角仪，利用加热电阻器与温度探测器测量倾斜角度。通过数值模拟与实验验证，研究发现 CO_2 气体压力对温度分布和灵敏度具有显著影响，最佳灵敏度出现在 11 bar 气体压力下（图 2），并通过 Grashof 数模型确认灵敏度与气体浮力成正比。然而，该方法在不同环境气体压力下的应用广泛性受到限制，需进一步优化结构以增强其适应性。Nguyen 等人则采用二维有限元建模的方法针对平面外第三轴测量做了一系列模拟仿真（图 3），并基于仿真分析的结果设计了一种有效的三轴微热对流加速度计。与三维模型相比，二维模型效率更高，且能够很好地展示传感器的工作原理，并确定控制传感器响应的关键参数。但其分析结果也表明，在二维建模中存在热泡尺寸和传感器灵敏度被高估的缺点。此外，在其他不同的工作中，研究者们也利用模拟仿真和实验结果对影响微热传感器性能的不同关键参数进行了分析。Mailly 与其同事们利用经验参数建模与模拟，并对热对流传感器的加热器长度、腔深、加热器位置等参数进行了研究，得到了与仿真结果吻合程度较好的实验测量结果，验证了模型的有效性。Thu 等人基于单轴电容式微热传感器的仿真建模，对应力条件下硅敏感元件所受机械应力和产生的形变进行模拟和研究（图 ），并基于对结果的分析，对器件中硅膜的长度和宽度、电极的重叠面积、电容梳齿的数量等设计参数进行了优化，实现了器件灵敏度的提高。Mezghani 等人对单轴微热传感器进行了三维有限元建模和仿真，并给出了用于模拟的传感器几何模型，其模拟结果发现三维有限元模型能够很好地预测传感器的灵敏度和功耗。Abdellatif 等人提出了一种适用于三轴微热传感器的优化加热器设计，这种加热器通过优化其几何形状，提高了单位功耗下的灵敏度。这种加热器形成一个空心方形框架，在方形框架的四个角都形成一个翼状结构，并在翼状结构的延伸部分安装了加热电阻，用于将产生热量集中在温度探测器区域附近。

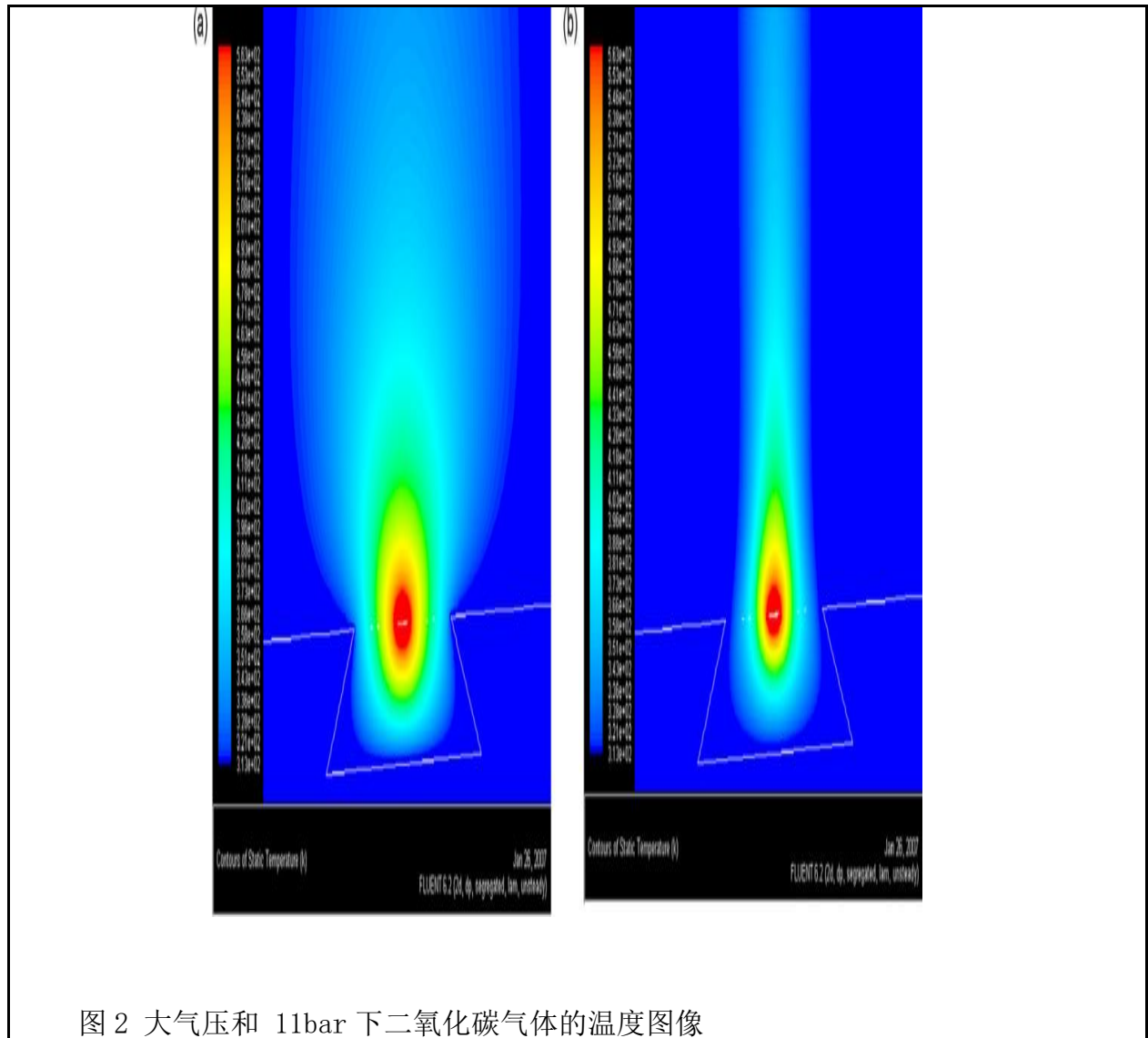


图 2 大气压和 11bar 下二氧化碳气体的温度图像

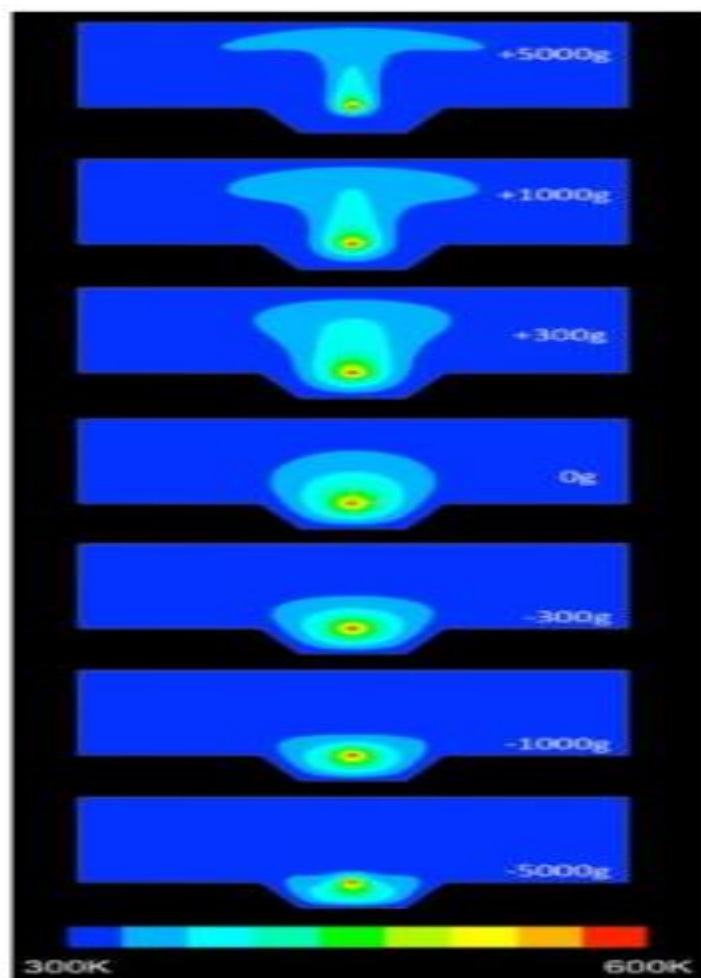


图 3 平面外应力下的流体等温线分布仿真结果

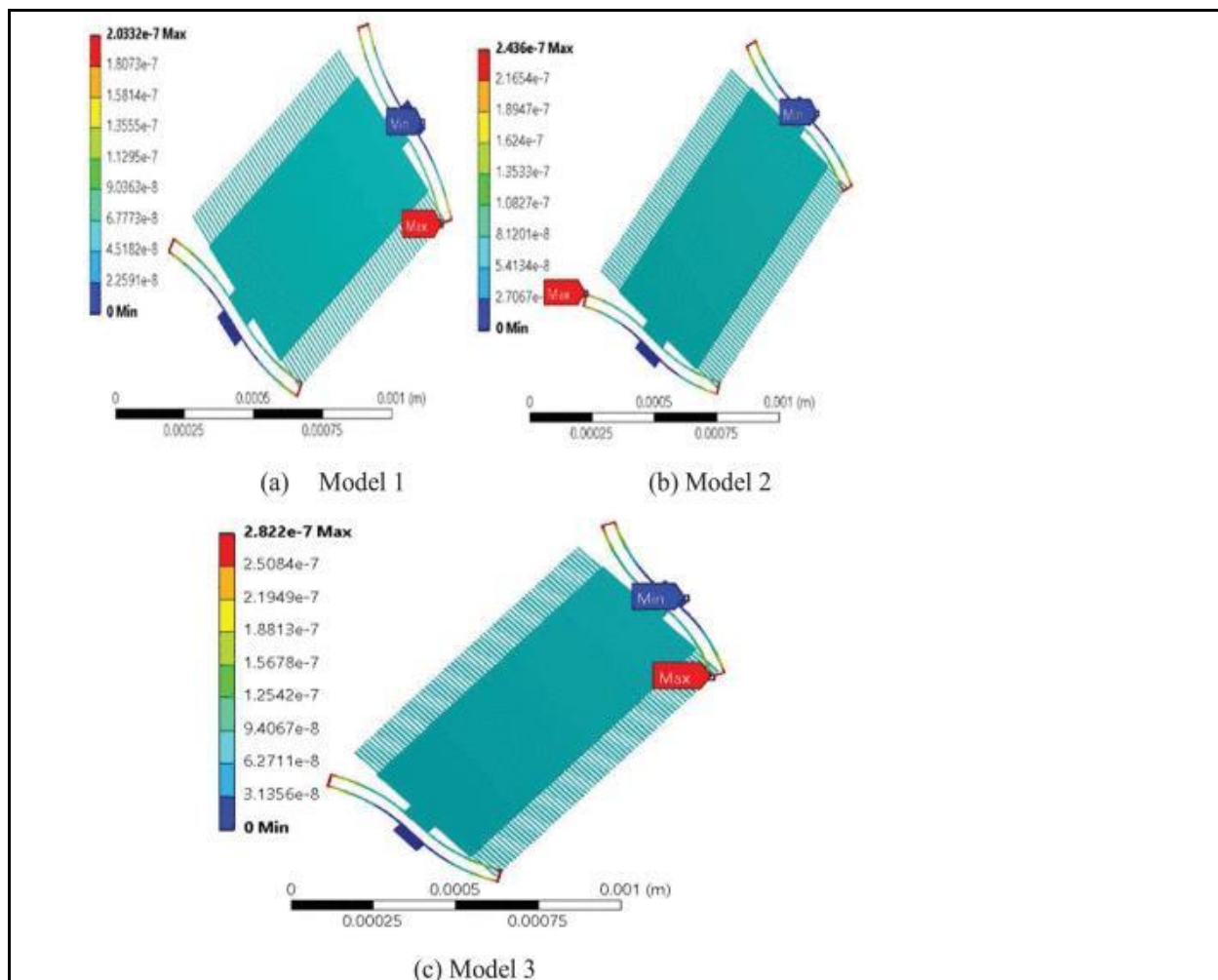


图 4 硅敏感元件在 300g 加速度范围下的形变模拟结果

在材料结构创新方面，Ye 等（2024）提出了一种基于硅玻璃基（Silicon-in-Glass, SIG）的 MEMS 热对流加速度计（图 5）。该设计通过 SIG 基板显著降低了热传导损耗并避免了传统硅膜结构中的应力影响，从而提升了传感器的稳定性与耐用性。优化的加热器和温度传感器布局使得传感器在 -90° 到 90° 范围内实现高精度测量，灵敏度达到 $1.6\text{mV}/^{\circ}$ 。快速响应时间（108 毫秒）和硅玻璃基对器件的封装简化凸显了该设计的优势，但在功耗及动态性能方面的研究仍需深入。

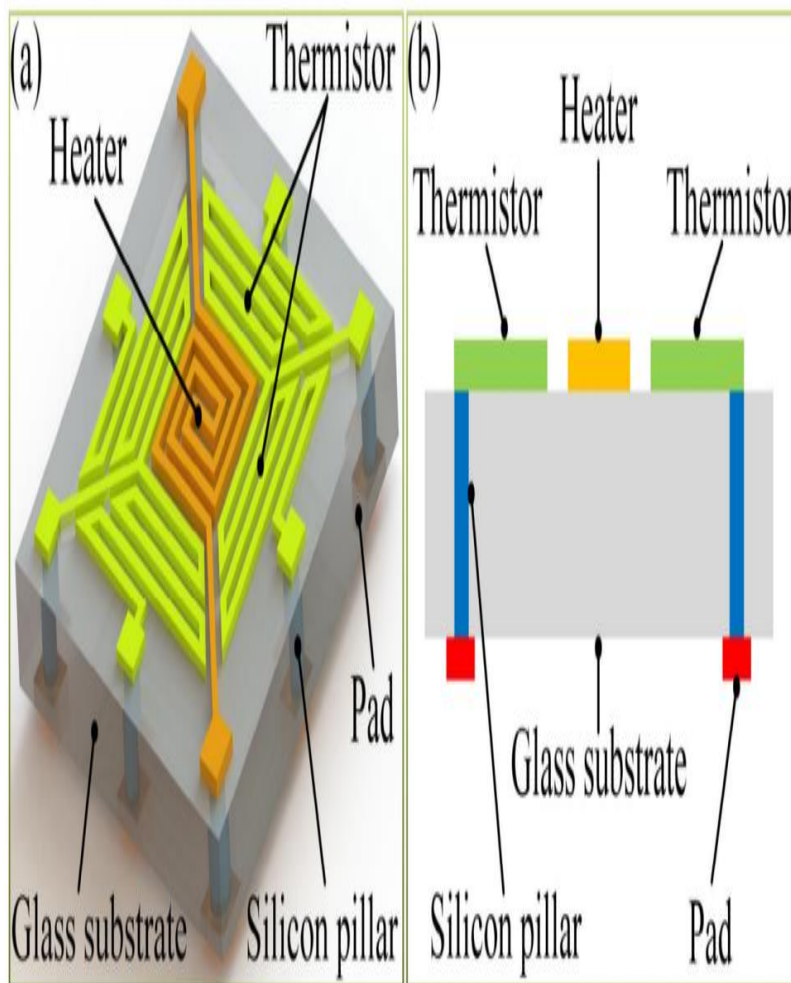


图 5 基于 SIG 基底的 MEMS 热对流加速度计的透视图和截面图

Ju Chan Choi 与 Seong Ho Kong 提出了一种基于对流的倾斜传感器（见图 6），该传感器集成了薄膜热电装置，以最小化环境温度波动对传感器性能的影响。通过热电装置的加热与冷却功能，传感器能够维持封闭空气介质的对称温度分布，从而实现稳定的空气对流。这一设计显著提高了传感器在不同外部温度条件下的输出一致性，输出电压的波动率控制在 2% 以内，适用于 $\pm 90^\circ$ 的倾斜测量范围。该传感器无需额外的复杂电路或封装，即可有效抑制外部热效应，简化了设计与制造过程。然而，该传感器在极端温度条件下的适应性仍需进一步提升。此外，热电装置的热传导和焦耳加热现象对温度

分布的影响尚需优化，以进一步提升传感器的整体性能与可靠性。

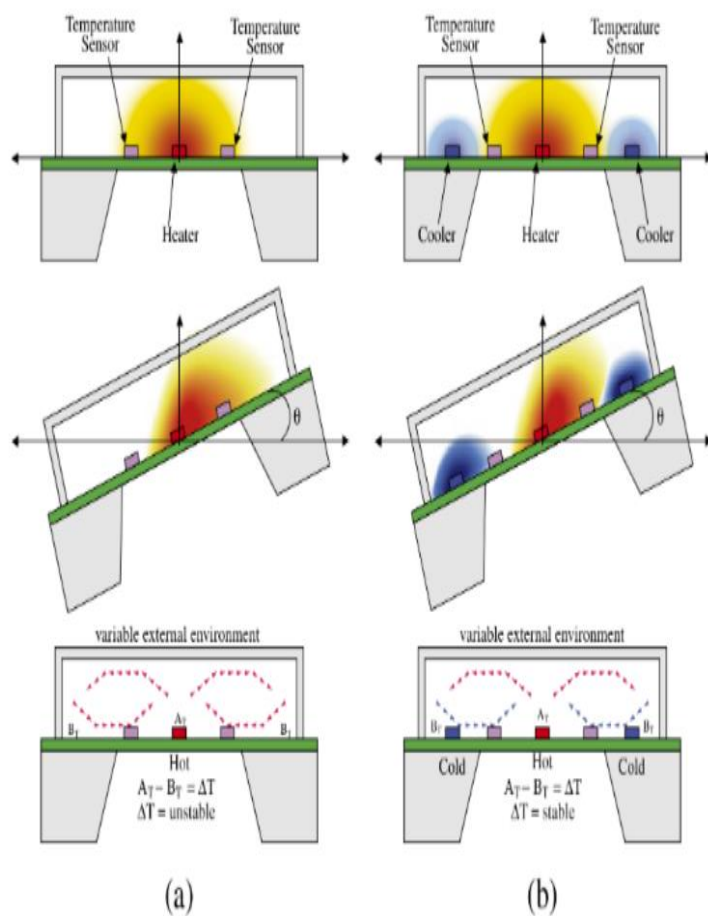


图 6 倾斜传感器及其结构和操作机制

近年来，材料复合与工艺创新也成为研究热点。基于 CNTs/PDMS 复合材料的双轴热对流倾角仪（图 7）研究表明，该传感器在 360° 范围内具备高稳定性和重复性，适用于广泛的角位置测量应用，但在极端环境下的适应性仍需验证。

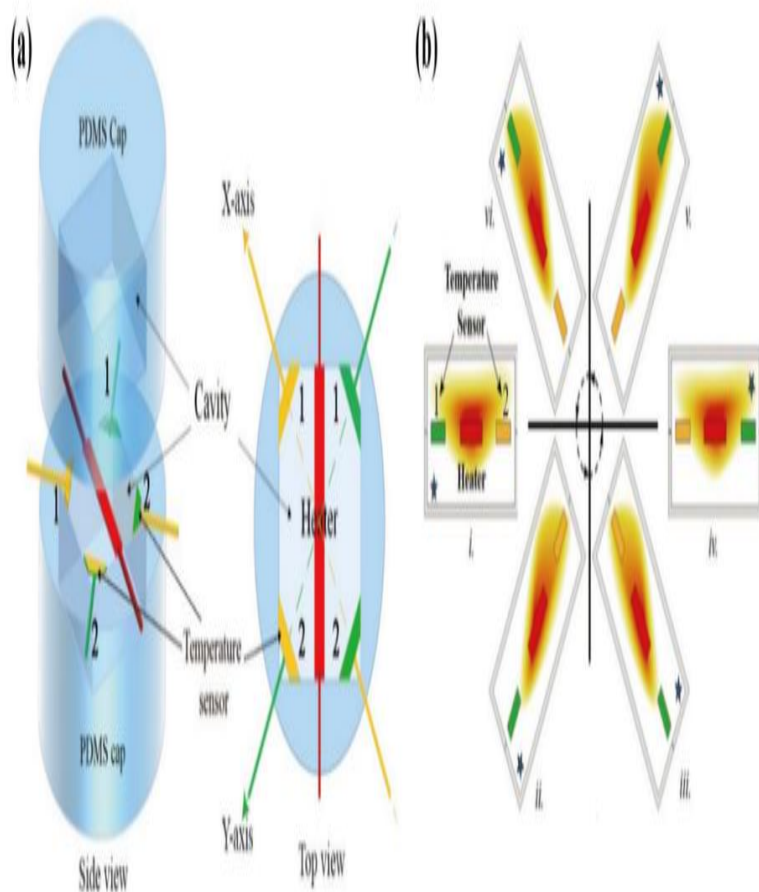


图 7 CNTs/PDMS 复合材料的双轴倾角仪

一种基于热空气质量自由对流运动的倾斜仪（图 8）则采用厚膜技术进行开发。该传感器通过测量因倾斜引起的内部热传递变化，利用重力作为输入，功能上等同于传统的质量证明加速度计。创新之处在于其采用气体作为证明质量，相较于传统固体证明质量，具有显著优势，包括避免颗粒污染和粘附问题，提供更高的冲击耐受性，从而降低故障率和装配过程中的损失。此外，该传感器的灵敏度高，重复性良好，能够在 0.1°

的分辨率下实现约 2% 的全尺度输出精度。尽管该传感器在小倾斜角度下具有较高的灵敏度（约 $8 \text{ mV}/^\circ$ ），但在大于 60° 的倾斜角度时，输出变化非常小，这使得在接近 90° 的情况下难以准确测量倾斜角度。这种非线性特性限制了传感器在极端倾斜情况下的应用。且主要基于重力的变化进行倾斜测量，因此在一些非重力环境下（如太空或微重力环境）可能无法正常工作，限制了其应用范围。

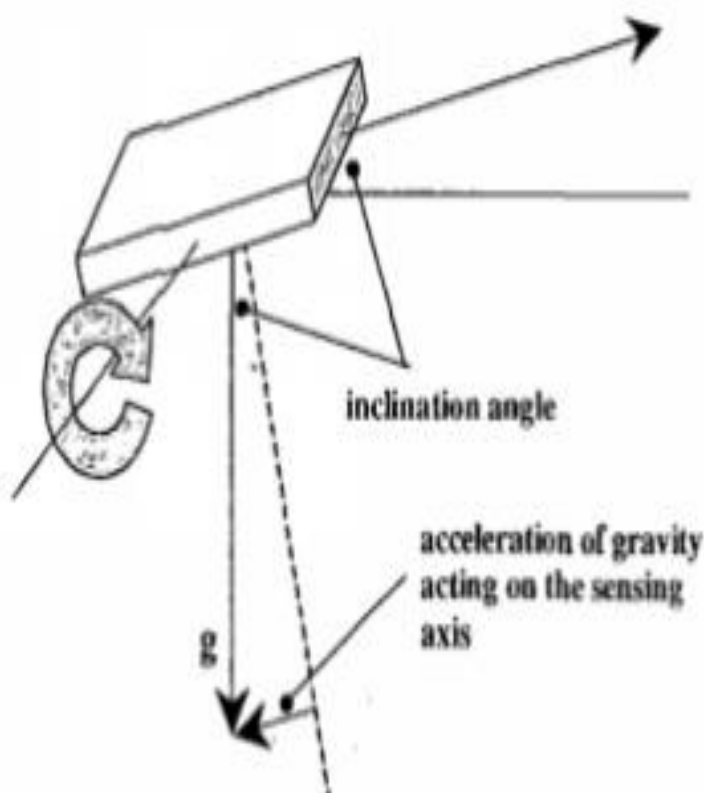


FIGURE 5 – Graphic example of an inclination from a horizontal initial position

图 8 倾斜仪从水平初始位置倾斜的图示

一种基于对流的倾斜传感器（图 9）提出了其制造工艺和性能提升方法，尤其是利用空气介质替代电解液以避免金属电极腐蚀和电解质劣化等问题。该传感器通过检测气体介质的温度分布来实现倾斜测量，研究表明，气体压力和类型对传感器的灵敏度有

显著影响。采用 Peltier 装置进行包装，能够有效减小环境温度波动对传感器性能的影响，从而提高其可靠性和稳定性。创新点在于通过优化气体介质和包装设计，显著提升了传感器的灵敏度和适应性，具有较强的应用潜力。然而，虽然提出了多种优化方案，但在实际应用中，如何平衡传感器的体积、成本与性能之间的关系仍需进一步探讨。其次，关于不同气体介质对传感器性能的长期稳定性和耐用性缺乏系统性的实验数据支持。

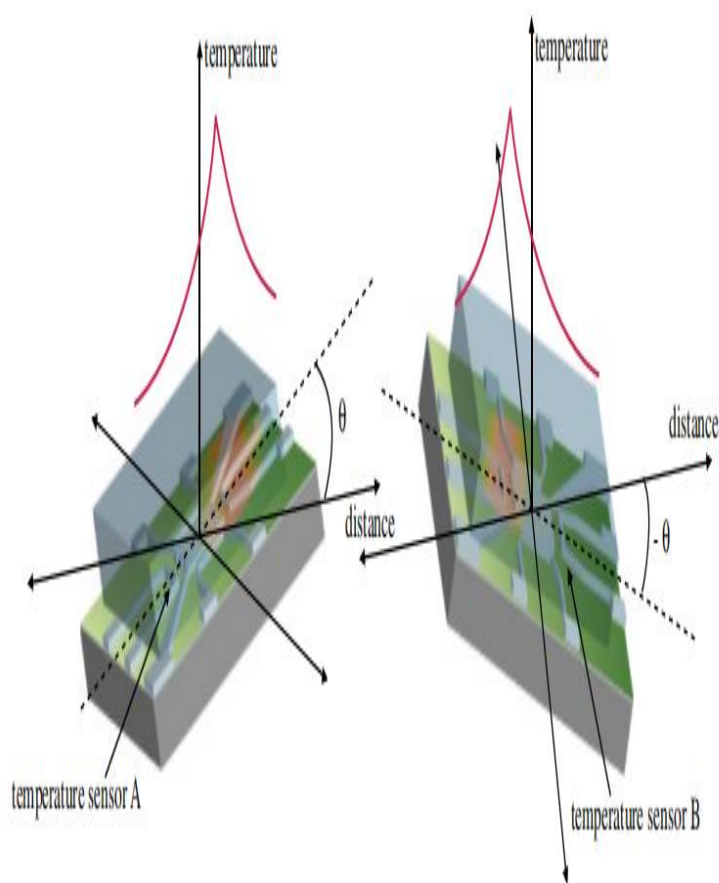


图 9 基于对流的倾角传感器的工作原理

综上所述，国内外在 MEMS 热对流式倾角传感器的研究中，材料结构创新、建模仿真方法及多轴检测技术取得了诸多突破，提升了传感器的灵敏度、稳定性和应用范围。

然而，传感器在不同环境条件下的适应性、长期稳定性及高精度动态测量能力仍是未来研究的主要挑战。通过进一步优化材料选择、结构设计及仿真模型，有望推动 MEMS 热对流式倾角传感器在工业、航空航天等领域的广泛应用。

参考文献:

- [1] Zhang, F. (n.d.). The accelerometer and tilt sensor based on natural convection gas pendulum. Sensor Research Center, Beijing Information Technology Institute, Beijing, 100101, China.
- [2] Courteaud, J., Combette, P., Crespy, N., Cathebras, G., & Giani, A. (n.d.). Thermal simulation and experimental results of a micromachined thermal inclinometer. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 22(10), 105007.
- [3] Ye, Y., Wan, S., Li, S., Peng, Y., He, X., & Qin, M. (n.d.). Fabrication and characterization of a MEMS thermal convective accelerometer on silicon-in-glass substrate. *IEEE Transactions on Sensors*, 16(3), 456-463.
- [4] Choi, J. C., & Kong, S. H. (n.d.). Convection-based tilt sensor with minimized temperature fluctuation. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 29(8), 084001.
- [5] Zhang, S., Chen, C., Bin, W., Zheng, X., San, H., & Hofmann, W. (n.d.). Dual-axis thermal convective inclinometer based on CNT/PDMS composite. *Sensors and Actuators A: Physical*, 248, 116-122.
- [6] Crescini, D., Marioli, D., Romani, M., Sardini, E., & Taroni, A. (n.d.). An inclinometer based on free convective motion of a heated air mass. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 24(5), 055012.
- [7] Choi, J. C., & Kong, S. H. (n.d.). Performance analysis of a convection-based tilt sensor. *Journal of Micromechanics and*

Microengineering, 29(9), 095006.

[8] Zhang, L., & Yang, Z. (2022). Thermal convection-based MEMS tilt sensor for high-performance angle sensing in industrial applications. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 32(4), 043001.

[9] Xu, R., & Zhao, Y. (2020). Development of a MEMS thermal convection tilt sensor with enhanced angular accuracy and environmental robustness. *Sensors and Actuators A: Physical*, 307, 111887.

[10] Li, H., & Chen, W. (2019). MEMS-based thermal convection tilt sensor with improved sensitivity for precise angle measurement. *IEEE Transactions on Sensors*, 19(12), 4792–4799.

[11] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K J P o t I. Micromachined inertial sensors [J]. 1998, 86(8):1640–59

[12] Luo X, Li Z, Guo Z, et al. Study on linearity of a micromachined convective accelerometer [J]. 2003, 65(1-2): 87–101.

[13] Mukherjee R, Basu J, Mandal P, et al. A review of micromachined thermal accelerometers [J]. 2017, 27(12): 123002

[14] Leung A, Jones J, Czyzewska E, et al. Micromachined accelerometer based on convection heat transfer; proceedings of the Proceedings MEMS 98 IEEE Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems (Cat No 98CH36176, F, 1998 [C]. IEEE.

4. 创新点与项目特色

创新点:

①仿真参数的创新性调优: 在前人设计的传感器参数基础上, 我们深入开

展仿真模拟，通过对关键器件参数的创新性调节（如薄膜厚度、器件尺寸、热源功率、元件布局、流体特性等），系统地优化传感器的性能。这种针对参数的精细调优，不仅提高了加速度计的灵敏度和稳定性，还为器件设计提供了新的理论依据。

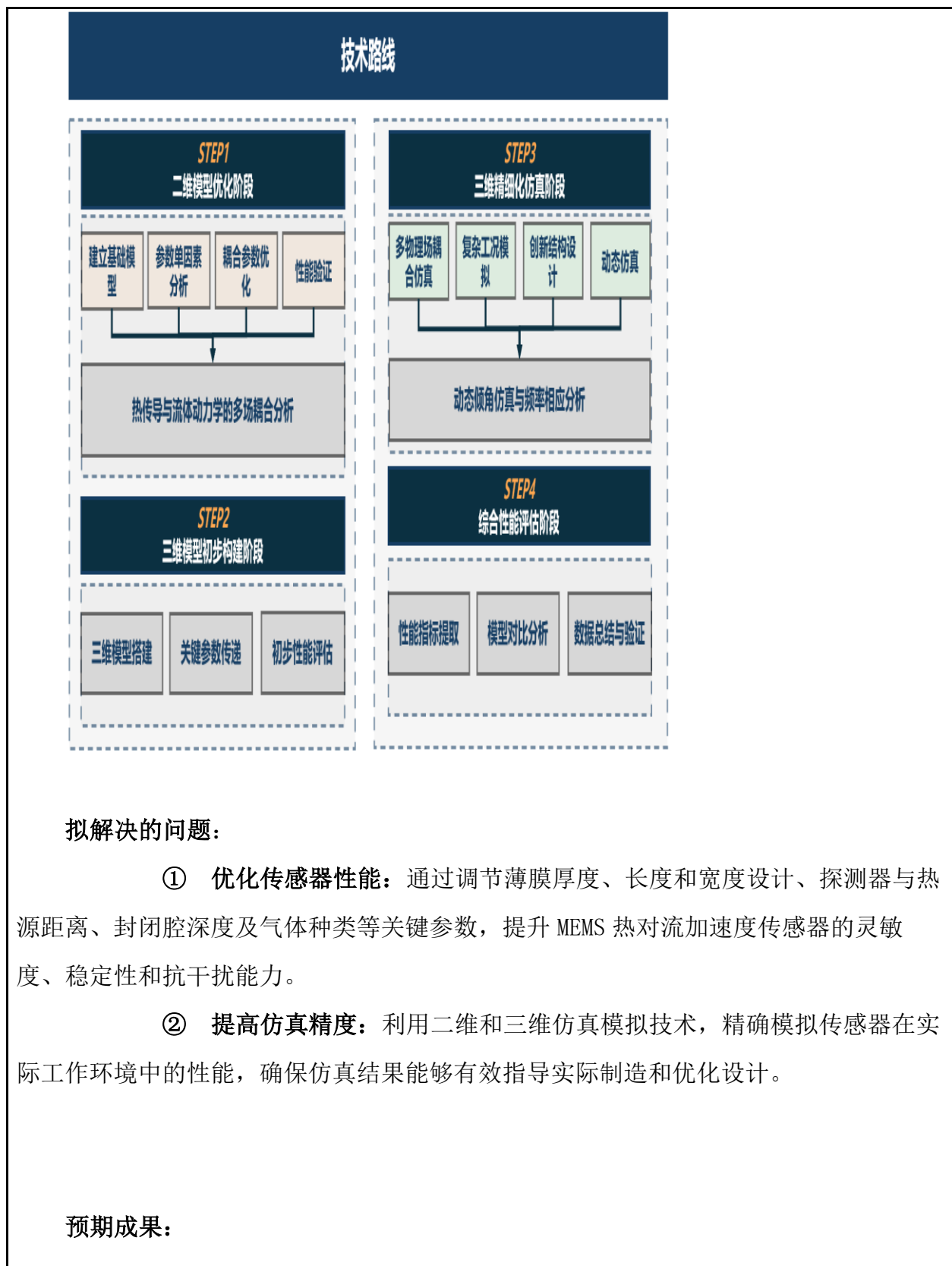
②传感器结构的创新性尝试：本研究将在 MEMS 热对流式倾角传感器的结构设计上进行了多方面的创新尝试，提出多层热源与探测器布局优化方案，通过非对称腔体设计增强信号响应速度与稳定性，引入新型微纳结构薄膜以优化热对流传输路径并降低功耗。此外，设计集成化封闭腔体以提高抗震能力与环境适应性，并创新性地开发可调节气体类型与压力的腔体结构，以满足不同场景的性能需求。结合模块化设计理念，传感器结构具备更高的灵活性与适配性，显著提升了性能表现，为未来传感器的开发提供了新思路。

项目特色：

本项目的特色在于基于 COMSOL 平台对 MEMS 热对流式倾角传感器进行系统的仿真设计与优化。我们不仅对传感器的关键参数（如薄膜厚度、传感器长度与宽度、探测器与热源的距离、声腔深度以及封闭腔内气体种类等）进行了全面的优化，还在器件结构设计上进行了创新尝试。通过二维仿真，我们精确测定了各关键参数对传感器灵敏度的影响，并在此基础上开展了三维仿真以进一步提升仿真精度和真实模拟效果。与现有研究相比，本项目在优化性能参数的同时，探索了新的设计思路，为 MEMS 热对流传感器的应用拓展了新的研究方向，并为相关领域的技术发展提供了理论支持和实践指导。

5. 技术路线、拟解决的问题及预期成果

技术路线：



1. 精细化仿真模型

构建一套基于多物理场耦合的精细化二维与三维仿真模型，涵盖热传导、流体动力学和结构力学等物理场，能够准确模拟 MEMS 热对流倾角传感器的性能响应。

2. 优化设计参数

系统分析关键参数（如薄膜厚度、腔体尺寸、气体种类、热源布局等）对灵敏度、稳定性及抗干扰能力的影响，提出最优设计参数组合。

3. 创新性结构方案

提出并验证若干新型结构设计方案（如非对称腔体、微纳结构薄膜等），显著提升传感器的性能指标，特别是在高精度、低功耗和抗干扰能力方面。

4. 性能提升数据

获取一系列优化设计的仿真数据，量化性能提升效果，为后续研究和实际应用提供数据支持。

5. 理论支持与设计依据

提供针对 MEMS 热对流倾角传感器优化设计的理论框架，形成对不同参数与结构的优化指导，为相关领域的研发提供参考。

6. 高质量学术输出

撰写一篇或多篇高质量学术论文，阐述研究过程、优化策略及成果，争取发表在相关领域的权威期刊或会议上。

探索技术成果的专利申请可能性，形成知识产权布局。

7. 推动领域发展

为 MEMS 热对流倾角传感器在高精度、低功耗和高抗干扰需求场景中的应用提供优化方案和设计依据，推动相关技术在工业、航空、医疗等领域的实际应用。

6. 项目研究进度安排

2024 年 12 月 - 2025 年 2 月

阶段目标：关键参数优化与结构尝试

- 梳理已有的二维仿真数据，总结影响性能的主要参数（如薄膜厚度、腔体尺寸、气体种类等）。
- 通过单参数分析，逐步优化二维模型，提升灵敏度和稳定性。
- 开展粗略的三维仿真，验证三维模型的基本性能。

2025 年 3 月 - 5 月

阶段目标：三维精细化仿真

- 在二维优化的基础上，精细化构建三维模型，进一步优化关键参数。
- 引入多物理场耦合仿真（如热、流体、力学），分析复杂环境下传感器的性能表现。
- 探索结构创新（如非对称腔体、微纳结构薄膜），对比不同设计方案的灵敏度与稳定性。

2025 年 6 月 - 8 月

阶段目标：综合性能评估

- 对三维优化后的模型进行多工况仿真，验证传感器在不同温度、压力、倾角下的稳定性。
- 总结各参数对灵敏度和稳定性的影响规律，进一步完善结构设计。
- 完成最终的传感器模型，输出仿真数据并进行对比分析。

2025 年 9 月 - 12 月

阶段目标：成果总结与模型推广

- 对全年仿真结果进行整理，完成关键性能指标的总结。
- 撰写学术论文或技术报告，详细阐述优化过程及性能提升的研究成果。
- 探讨后续研究方向（如进一步复杂工况仿真或优化其他参数）。

7. 已有基础

（1）与本项目有关的研究积累和已取得的成绩

在前期的研究工作中，我们已经取得了一系列重要的研究成果，为后续的深入研究奠定了基础：

二维热对流传感器的仿真与制造：

我们完成了基于 MEMS 技术的二维热对流传感器的设计与仿真。该传感器利用密闭空腔内流体的自然对流传热原理来检测外界倾角信号。通过精确控制薄膜厚度、腔体尺寸、热源配置等关键参数，我们成功实现了传感器的高灵敏度与稳定性，为后续优化提供了有效的数据支持。

三维模型的粗略仿真与验证：

在二维模型的基础上，我们进一步拓展了传感器的设计，开展了三维模型的粗略仿真。通过对三维模型进行初步的热对流与力学行为分析，我们验证了其在更复杂的三维空间中的工作原理和性能表现，为后续更精细化的三维仿真和实际器件制造提供了理论依据。

初步器件制造与测试：

基于以上仿真结果，我们制造了初步的 MEMS 热对流式倾角传感器，并进行了初步的实验测试。测试结果表明，传感器能够成功获取一定范围内的倾角信号，验证了其在实际应用中的可行性。然而，现有设计在灵敏度、响应速度等方面仍存在一定的优化空间，后续研究将针对这些问题进行进一步的改进。

(2) 已具备的条件，尚缺少的条件及解决方法

已具备的条件：

高性能仿真软件：针对二、三维的热传导以及流体动力学仿真，可使用 COMSOL 软件进行操作。

尚缺少的条件：

①量子级别的仿真与多物理场耦合：

目前，我们的仿真工作主要基于传统的 COMSOL 模拟平台，虽然可以涵盖多物理场的基本耦合，但对于 MEMS 热对流式倾角传感器的高精度需求，尚未能够深入到纳米尺度上的量子效应。量子级别的微观仿真能够更精准地模拟材料在极小尺度下的电子、热、电磁等行为，这需要配备更为专业的量子物理仿真软件（如 QuantumESPRESSO、VASP 等）和相应的硬件支持（如高性能 GPU 或量子计算平台）。此外，多物理场的高级耦合（如热、流体、力学、电磁学等）的模拟也要求对现有仿真工具进行更复杂的定制和优化，因此在软件和计算硬件的要求上仍有一定差距。

②原位表征与实时监控系统：

为了获得传感器在实际应用中的真实响应，我们需要建立一个原位表征与实时监控系统。这一系统可以实时监测传感器的温度场、应力场、热流分布等性能指标，帮助我们更好地评估传感器的工作状态。要实现这一目标，我们需要先进的实验设备，例如微型热成像仪、应变计、激光位移传感器等，这些设备尚未在我们的实验室中配备。更重要的是，原位表征系统需要高精度的数据采集与分析平台，结合硬件和软件的实时联动，能够动态展示传感器的响应，这涉及到数据实时处理与高效存储技术的支持，当前的硬件设施尚无法完全满足此类需求。

③高性能并行计算集群：

目前，项目中的仿真大多依赖单台工作站进行计算，面对复杂的多物理场耦合问题和高维度优化任务时，计算时间长且效率不高。为了加速仿真过程，特别是在涉及大量数据的复杂计算时，缺乏一个高性能并行计算集群的支持。高性能计算集群能够实现并行计算，显著提高仿真效率，并加速优化过程中的参数探索。需要搭建大规模的计算集群或使用云计算平台，并结合高效的计算资源调度系统，这在现有条件下仍需进一步的硬件投资与计算资源配置。

解决方法：

1. 量子级别的仿真与多物理场耦合

为弥补现阶段无法深入量子效应的限制，可以优化现有的 COMSOL 仿真流程，聚焦宏观参数对性能的影响，同时通过数据驱动方法（如利用已有的量子计算数据库）间接引入纳米尺度效应。此外，可尝试与具备量子仿真能力的研究团队合作，借用其 QuantumESPRESSO 或 VASP 平台进行部分微观仿真

计算。同时，可以利用高性能 GPU 加速传统仿真中多物理场耦合的运算，尽可能提高现有工具的计算精度，为后续的量子仿真探索奠定基础。

2. 原位表征与实时监控系统

在短期内，可以利用现有实验室设备开展间接监测，通过红外成像仪或应变计进行数据采集，并与仿真数据结合，间接推测传感器的工作状态。同时，可以搭建简化版的监控系统，基于低成本的温度传感器和数据采集模块，完成实时性能测试的初步框架。为进一步提升监控精度，可以寻求与拥有高端实验设备的实验室或机构合作，共享仪器资源并联合开展测试研究。

3. 高性能并行计算集群

面对计算资源的限制，可以利用云计算平台（如 AWS、Google Cloud 或国家超级计算中心）进行按需租赁，临时解决高性能并行计算的需求。同时，可以优化仿真任务的流程，采用分阶段仿真（先二维粗算再三维细算）或精简模型复杂度的方式，降低计算需求。对于长期需求，可以申请学校或研究机构的计算资源，或者加入学术计算网络，利用共享的并行计算集群进行复杂任务的模拟和优化。

三、 经费预算

开支科目	预算经费 (元)	主要用途	阶段下达经费计划 (元)	
			前半阶段	后半阶段

开支科目	预算经费 (元)	主要用途	阶段下达经费计划 (元)	
			前半阶段	后半阶段
预算经费总额	12000.00	用于项目所需的书籍、数据分析软件和计算工具采购用于项目所需的书籍、数据分析软件和计算工具采购	5750.00	6250.00
1. 业务费	8000.00	用于建模仿真、优化分析以及项目技术支持	3750.00	4250.00
(1) 计算、分析、测试费	3000.00	用于二维、三维数值仿真以及计算资源和软件费用	1500.00	1500.00
(2) 能源动力费	1000.00	用于设备与软件运行所需能源支出用于设备与软件运行所需能源支出	500.00	500.00
(3) 会议、差旅费	3000.00	用于学术会议、调研差旅以及成果展示	1500.00	1500.00
(4) 文献检索费	500.00	文献检索以及获取相关研究资料费用	250.00	250.00
(5) 论文出版费	500.00	用于学术论文发表以及版面费支出	0.00	500.00
2. 仪器设备购置费	2000.00	用于辅助设备采购, 如高性能计算资源等	1000.00	1000.00
3. 实验装置试制费	2000.00	用于数据存储空间租赁以及高性能计算资源的按需使用用于数据存储空间租赁以及高性能计算资源的按需使用	1000.00	1000.00
4. 材料费	0.00	无	0.00	0.00
学校拨款				
财政拨款				

四、 指导教师意见

同意立项。

导师：罗华煌
2024 年 12 月 15 日

五、 院系推荐意见

盖 章：
年 月 日