



本科生毕业论文（设计）

题目：《基于一维模型的高灵敏度微热
加速度计的参数分析及优化》

姓 名 李瑞林
学 号 20342019
院 系 微电子科学与技术学院
专 业 微电子科学与工程
指导教师 罗华煌 助理教授

2024 年 4 月 15 日

《基于一维模型的高灵敏度微热加速度计的 参数分析及优化》

Parameter analysis and optimization of high-
sensitivity micro-thermal accelerometer based
on 1D model

姓 名	李瑞林
学 号	20342019
院 系	微电子科学与技术学院
专 业	微电子科学与工程
指导教师	罗华煌 助理教授

2024 年 4 月 15 日

学术诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业论文（设计），是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文（设计）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本论文（设计）的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文（设计）的知识产权归属于培养单位。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：李瑞林

日期：2024 年 4 月 15 日

摘要

本文以微热加速度计为研究对象，基于对目前已有的关于微热加速度计性能及理论建模的研究工作的探究和分析，总结出了其中存在的不足，并在接下来的工作中，针对这些不足，对微热加速度计设计参数对性能的影响进行了分析和优化，提出了一种高效的一维常微分方程理论模型，并利用 CFD 软件 ANSYS FLUENT 构建仿真模型，得到微热加速度计工作原理和流体速度场方程的仿真结果，通过将一维理论模型的计算结果与仿真结果进行对比，验证了一维理论模型的有效性。针对微热加速度计中的流体工作介质，本文利用所建立的一维模型，探究了对于 10 种不同的流体，微热加速度计的加热器与温度探测器间距、腔深、薄膜厚度、加热器温度 4 个关键设计参数对器件灵敏度和功耗的影响，并基于对研究结果的分析，对关键设计参数进行了优化，得到了一组能提高微热加速度计灵敏度的最优设计参数。此外，本文还引入了流体瑞利数的概念，研究了当微热加速度计使用优化后的设计参数时，不同瑞利数的流体工作介质对器件灵敏度的影响，并基于所得结果，对流体类型进行了优化，用以提高器件的灵敏度。此外，本文还针对电阻温度系数对器件输出电压信号的影响进行了研究和分析，实现了对器件输出的优化。

关键词：微热加速度计，灵敏度，参数优化，电阻温度系数。

ABSTRACT

In this thesis, we take the micro-thermal accelerometer as the research object. Based on the investigation and analysis of the existing research work on the performance and theoretical modeling of micro-thermal accelerometers, we summarize the shortcomings of them. In the following work, we analyze the influence of the design parameters of the micro-thermal accelerometer on the performance, propose an efficient one-dimensional (1D) theoretical model, build a simulation model by using CFD software ANSYS FLUENT , and obtain the simulation results about the working principle and the fluid velocity equation of the micro-thermal accelerometer. Also, we validate the 1D model by comparing the calculation results with the simulation results. Aiming at the fluid working medium in the micro-thermal accelerometer, this thesis uses the established 1D model to explore the influence of four key design parameters, namely, the distance between heater and temperature detector, cavity depth, film thickness and heater temperature, on the device sensitivity and power consumption with the 10 different fluids. Based on the analysis of the research results, we optimize the key design parameters, and get a set of optimal design parameters which can improve the sensitivity of the micro-thermal accelerometer. Furthermore, the concept of fluid Rayleigh number is adopted to study the influence of fluid working medium on the sensitivity of the device when the optimized design parameters are used in the micro-thermal accelerometer. Based on the obtained results, the fluid type is optimized to improve the sensitivity of the device. In addition, the influence of temperature coefficient of resistance (TCR) on the output voltage signal of the device is studied and analyzed for optimization.

Keywords: micro-thermal accelerometer, sensitivity, parameter optimization, temperature coefficient of resistance.

目录

绪论.....	1
一、研究背景和意义.....	1
二、国内外研究现状.....	2
三、研究内容和目的.....	8
(一) 构建一维理论模型.....	8
(二) 构建 CFD 仿真验证模型.....	8
(三) 微热加速度计设计参数对性能影响的研究.....	9
(四) 微热加速度计设计参数的优化.....	9
四、研究工作可行性论述.....	9
(一) 构建一维理论模型的可行性.....	9
(二) 构建 CFD 仿真验证模型的可行性.....	10
(三) 参数分析的可行性.....	10
微热加速度计的参数分析与优化.....	13
一、微热加速度计工作原理.....	13
二、一维理论模型的构建.....	13
(一) 能量方程.....	14
(二) 圆形循环流场.....	15
(三) 温度线性分布.....	16
(四) 一维常微分方程推导.....	16
(五) 功耗计算模型.....	17
三、ANSYS FLUENT 仿真模型的搭建及验证.....	18
(一) 搭建仿真模型.....	18
1、仿真模型的几何结构.....	19
2、设置网格尺寸.....	19

3、设置仿真参数.....	21
(二) 仿真结果验证.....	24
1、速度场仿真结果及验证.....	24
2、温度场仿真结果.....	25
3、ANSYS FLUENT 仿真结果与一维模型计算结果比较	26
四、高灵敏度的微热加速度计.....	27
(一) 微热加速度计设计参数分析及优化.....	27
1、以空气为工作介质.....	27
2、以氦气为工作介质.....	28
3、以氖气为工作介质.....	29
4、以氮气为工作介质.....	30
5、以二氧化碳为工作介质.....	30
6、以氧气为工作介质.....	31
7、以五氟乙烷为工作介质.....	31
8、以三氟一氯甲烷为工作介质.....	32
9、以 2-甲基丙烯为工作介质.....	33
10、以六氟化硫为工作介质.....	33
(二) 微热加速度计流体工作介质分析及优化.....	37
五、微热加速度计输出电压信号.....	38
结论.....	40
参考文献.....	41
附录 A.....	43
附 A1 计算微热加速度计灵敏度的 MATLAB 代码.....	43
附 A2 计算微热加速度计功耗的 MATLAB 代码.....	44
致谢.....	45

绪论

一、 研究背景和意义

随着科技不断发展，人们对于精确测量和控制物体运动的需求也越来越高，特别是在航空航天、汽车工程、军事、智能电子设备等领域。加速度计（图 1）便是一种用于测量物体在运动过程中加速度的仪器。加速度是物体速度变化率的物理量，表示物体单位时间内速度的增加量。加速度计应用的基本原理是利用牛顿第二定律对物体运动状态进行测量。加速度计的基本模型通常由一个可移动的检测质量和与之相连的弹簧以及信号输出器、阻尼器和外壳等组成。当物体受到加速度时，根据牛顿定律，具有一定惯性的质量体会趋于保持原来的运动状态不变，质量体便会相对于外壳产生位移，使得弹簧材料发生形变，该形变是与施加在传感器上的加速度相关联的，通过检测形变转换成的信号输出器的信号变化，就可以计算得到传感器受到的加速度。

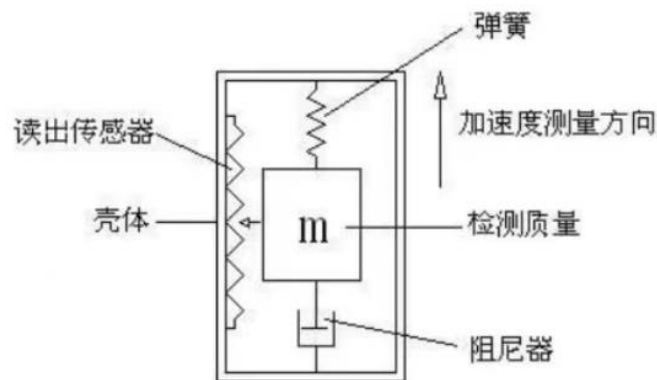


图 1. 加速度计基本模型

随着半导体微纳制造技术的发展，基于微机电系统（MEMS）传感器原理的微机械加速度计得到快速发展，如图 2 所示，其利用微细的弹性结构和压电材料来检测加速度变化，并通过电信号转换为数字信号进行处理和分析。它通常具有较高的频率响应范围和低噪声特性，在提供精确的加速度测量和数据分析方面发挥了重要作用，同时还具有小尺寸、低功耗、低成本等特点，被广泛应用于多个领域，具有极大的商业价值。如用于汽车、飞机、航海中的导航系统，微机械加速度计是惯性导航系统的重要组成部分，可用于测量飞行器、车辆或船只的加速度，从而计算出位置、速度和姿态等信息；用于智能手机、虚拟现实设备、可穿戴运动设备、摄像机中的图像稳定，它可以用于自动旋转屏幕、智能手势识别、计步器和运动跟

踪等功能，通过检测设备的加速度，可以提供更多智能化的功能和用户体验；用于军事领域，它在导弹的精准制导系统中起到十分重要的作用，还可以协助战术无人机编队实现高精度的飞行控制和编队协同；此外，微机械加速度计还被用于生物医学领域中的健康监测、太空微重力测量、地震预测等^[1]。因此，微加速度计的研究对于这些领域的技术发展有着重要的意义。

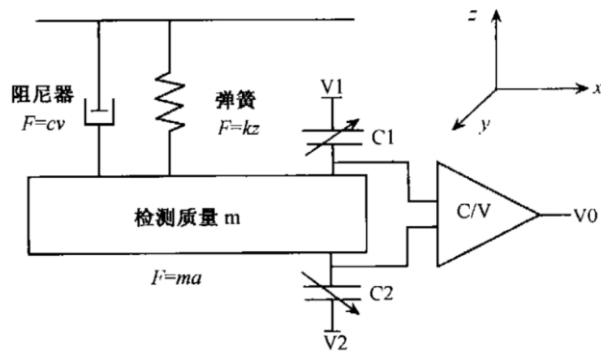


图 2. 电容式微机械加速度计模型

在微机械加速度计中，可以采用不同的传感机制，包括电容式传感、压阻式、压电式测量和谐振频移。而基于这些传感机制的微加速度计结构中都应用了一个可移动的固体质量块，作为测量输入加速度的关键组件。由于固体质量块的存在，这类微加速度计通常需要复杂的制造工艺，不适用于集成电路技术，在长期使用后运动部件会出现机械疲劳，且具有较低的抗冲击能力，难以应用到要求高抗震性的领域^[2]。为了解决这些缺点，人们研究出了一种基于流体自然热对流现象的微热加速度计，其利用流体代替了质量块，利用加速度对流体自然热对流流动模式的影响，通过测量流体传热引起的温度不均匀分布来计算加速度，具有优良的抗冲击能力^[3]。相比起基于惯性的微加速度计，此类基于热对流的微加速度计能够适用于工业物联网中需要高抗震性的应用，且测量范围更大，结构更简单，成本更低，在众多领域得到了广泛应用，具有巨大的商业前景。

二、 国内外研究现状

基于热对流的微加速度计拥有的优良特性使得众多研究人员纷纷加入到其研究系列当中。

在微热加速度计的结构方面， Leung 等人^[4,5]首次提出了基于硅衬底的微热加速度计（图 3），其基本结构是悬浮于空腔上方的一个微加热器和一对对称分布于加热器两侧的温度探测器，以及密封罩内的流体，当对传感器施加加速度时，通过

温度探测器测量热对流造成的两边的温度差就能够计算出对应的加速度。Leung 等人提出的微热加速度计属于单轴加速度计，沿微加热器与温度探测器的分布方向定义了一个敏感轴，器件只能测量施加在该轴方向上的加速度，测量范围较为单一。

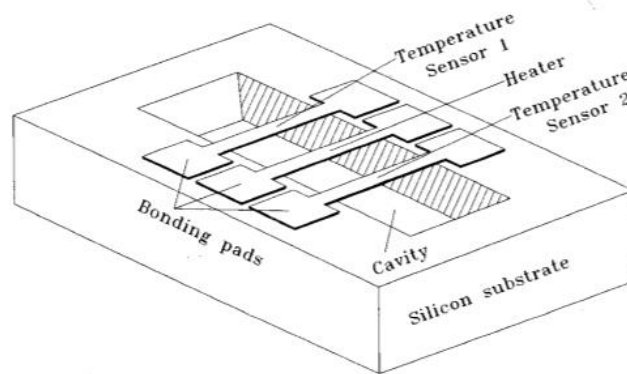


图 3. 单轴微热加速度计的基本模型

此后，该基本模型被众多研究人员应用到他们的工作中，并在其基础上对微热加速度计的结构与性能进行了拓展及优化，如双轴微热加速度计。Park 和 Kim 等人^[6]提出了一个完整的双轴微热加速度计（图 4），通过对多对加热器与温度探测器进行布局，实现了对施加在两个互相垂直方向的加速度的测量，此外，他们还探究了几种不同的加热器布局方式对器件灵敏度的影响，并最终采用菱形布局方式，在低功耗条件下实现了高灵敏度，并改善了线性度和响应时间。Mukherjee 等人^[7]采用了一种新的加热器结构以提高双轴微热加速度计的灵敏度，在该工作中，他们分析比较了三种不同形状的加热器结构对加速度计的性能影响（图 5），包括曲线形、扩角菱形和方形，并最终在方形加热器结构下得到了较高的灵敏度。Jayanetti 等人^[8]设计了一种基于 SOI 的电容式双轴微热加速度计（图 6），该器件采用体微加工技术，利用梳状电容的“X”形对称分布来测量两个方向上的加速度，并使用了蛇形弹簧设计来提高测量质量块的灵活性。

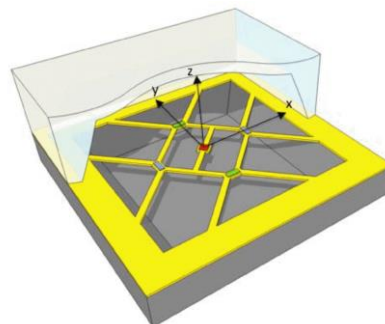


图 4. 双轴微热加速度计，加热器在中心，探测器对称放置在平面内 x 和 y 轴上

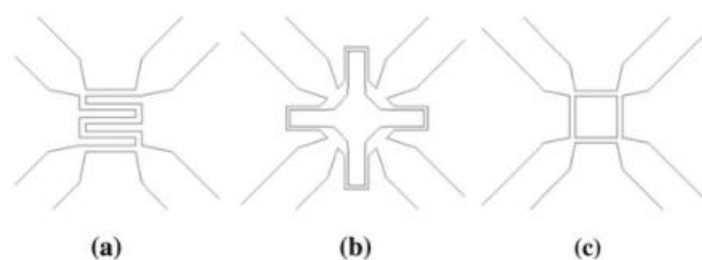


图 5. 用于双轴微热加速度计的三种不同几何形状的加热器结构

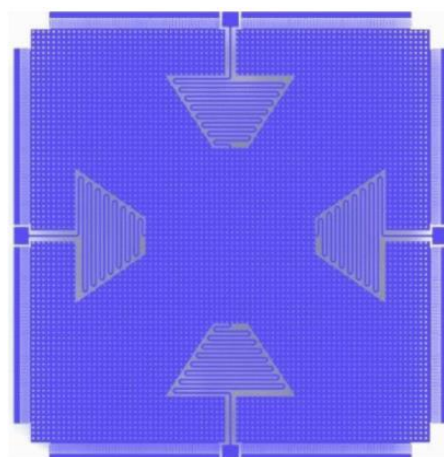


图 6. 电容式双轴微热加速度计

单轴与双轴微热加速度计通常只能够测量平面内的加速度，工业应用范围受到了一定限制。若要进行三维加速度测量，则需要通过组装两个或三个加速度计来实现，这将显著增加封装尺寸和成本。因此，研究者们提出了能用于测量平面外第三轴加速度的三轴微热加速度计。如 Tsang 等人^[9]便提出了两种基于不同机械结构的新型三轴微热加速度计，利用热电偶和加热器的不同布局方式来实现对施加在三个互相垂直的方向上的加速度的测量（图 7）。他们还分析了三个方向上的灵敏度，并提出能够通过增加热电偶的数量来提高灵敏度。Qu 等人^[10]提出了一种采用后 CMOS 微加工工艺制造的基于单晶硅的电容式三轴微热加速度计（图 8），其中独特的垂直传感机制使其利用单个检测质量即可实现三个方向的加速度测量。其通过采用传感电极的对称结构和全差分配置，大大减少了三个轴之间的交叉耦合。此外，他们还通过牺牲一个互连金属层实现了在相同的器件占位面积下获得更高的灵敏度。Abdellatif 等人^[11]提出了一种适用于三轴微热加速度计的优化加热器设计（图 9），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。

这种加热器设计与传统的单一中央加热器设计相比，能够在较低的加热温度下，表现出更好的输出，因此可在相同的功耗下实现更高的灵敏度。

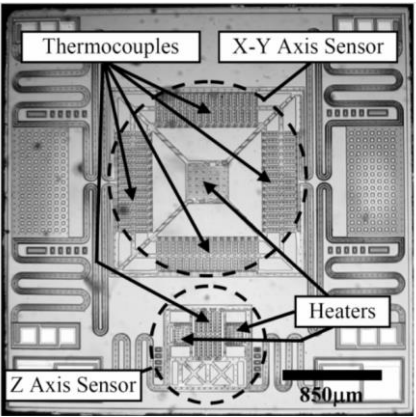


图 7. 三轴微热加速度计

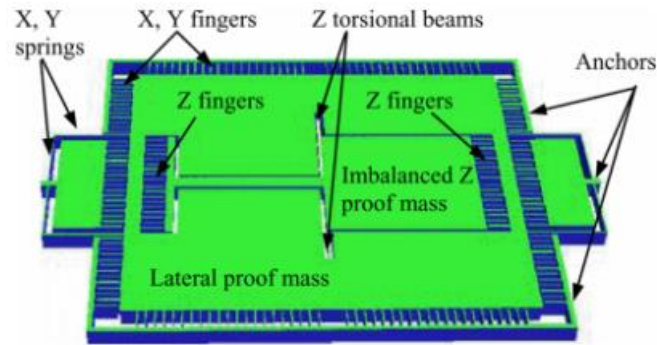


图 8. 基于单晶硅的电容式三轴微热加速度计

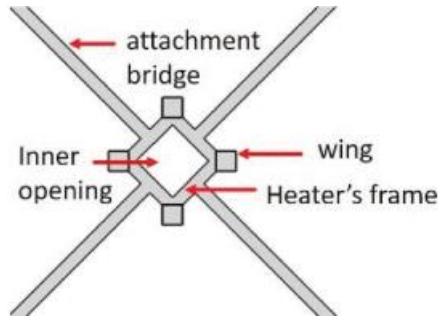


图 9. 适用于提高三轴微热加速度计灵敏度的优化加热器结构

在上述这些工作中，研究者们提出了多种不同的方式以实现微热加速度计性能的提升，但他们都是从器件的设计结构出发来研究其性能，比如单轴或多轴，或是不同的加热器和温度探测器的布局方式对器件灵敏度的影响，而并没有关注微热加速度计的数学建模方面的研究。此外，这些工作也缺乏对微热加速度计一些关键设计参数（如加热器与温度探测器间距、薄膜厚度、腔深、加热器温度等）对器件灵敏度影响的研究。

在建模仿真方面，Mezghani 等人^[12, 13]对单轴微热加速度计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（图 10），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。此外，他们还利用给出的结果探究了温度探测器位置和加热器长度对传感器灵敏度与功耗的影响（图 11），并给出了达到最大灵敏度的最佳值。但对于其他关键参数，他们的工作中缺乏了更详细的分析，且他们所使用的三维模型仿真效率较低。Nguyen 等人^[14]则采用二维有限元建模的方法针对平面外第三轴的加速度测量做了一系列模拟仿真（图 12），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加速度计性能的不同关键参数进行了分析。Mailly 与其同事们^[15, 16]利用经验参数建模与模拟，并对微热加速度计的加热器长度、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^[17]基于单轴电容式微热加速度计的仿真建模，对加速度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 13），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。在这些工作中，研究者们对器件参数进行分析时使用的方法主要都是基于 CFD 模型的模拟结果和实验数据，且模拟效率较低，缺乏一个高效的数学模型来对器件的参数进行有效的分析。

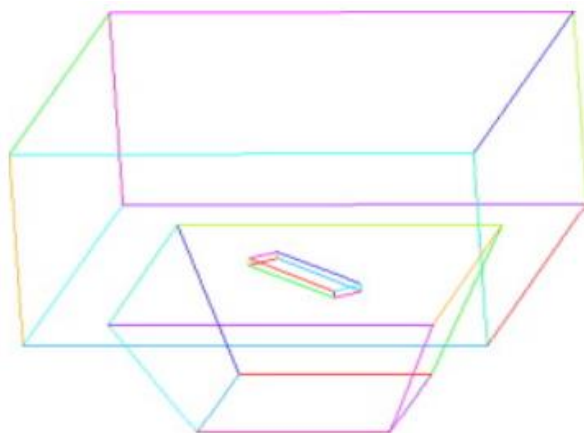


图 10. 微热加速度计模型的 3D 线视图

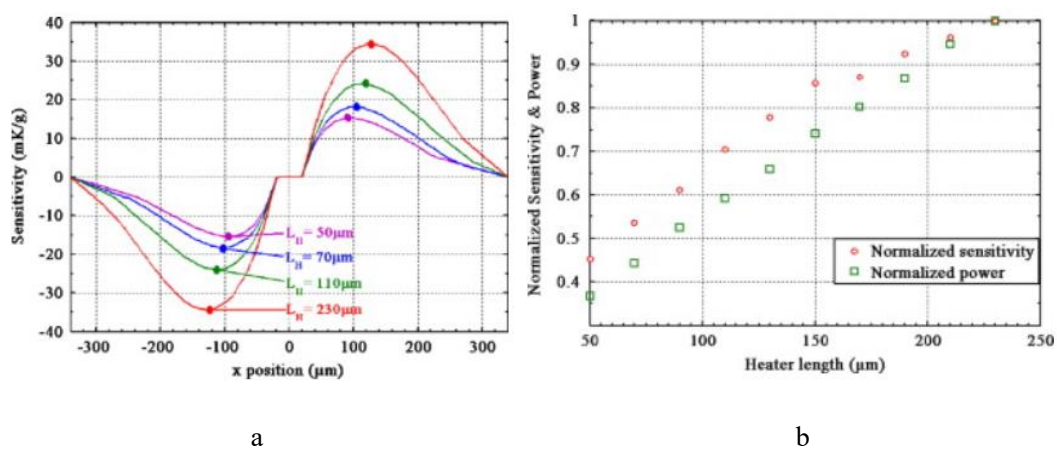


图 11. a 灵敏度作为加热器长度与温度探测器位置的函数的仿真结果；
b 灵敏度与功耗作为加热器长度的函数的仿真结果。

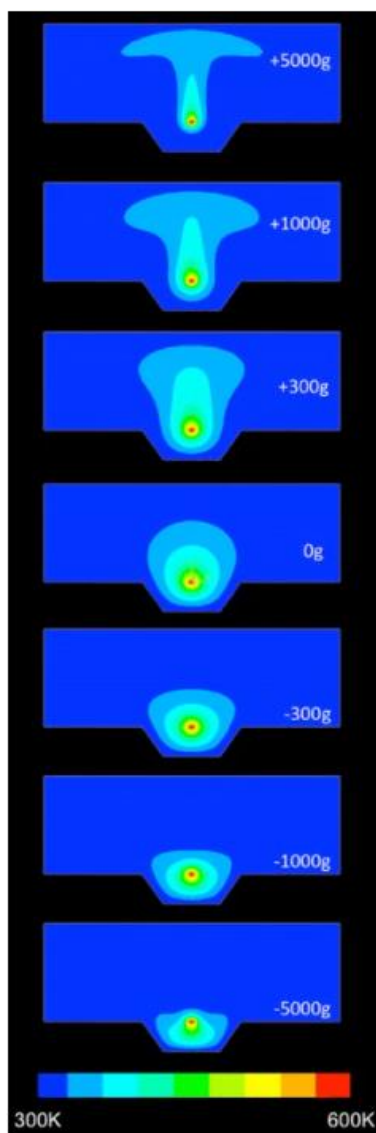


图 12. 平面外加速度下的流体等温线分布仿真结果

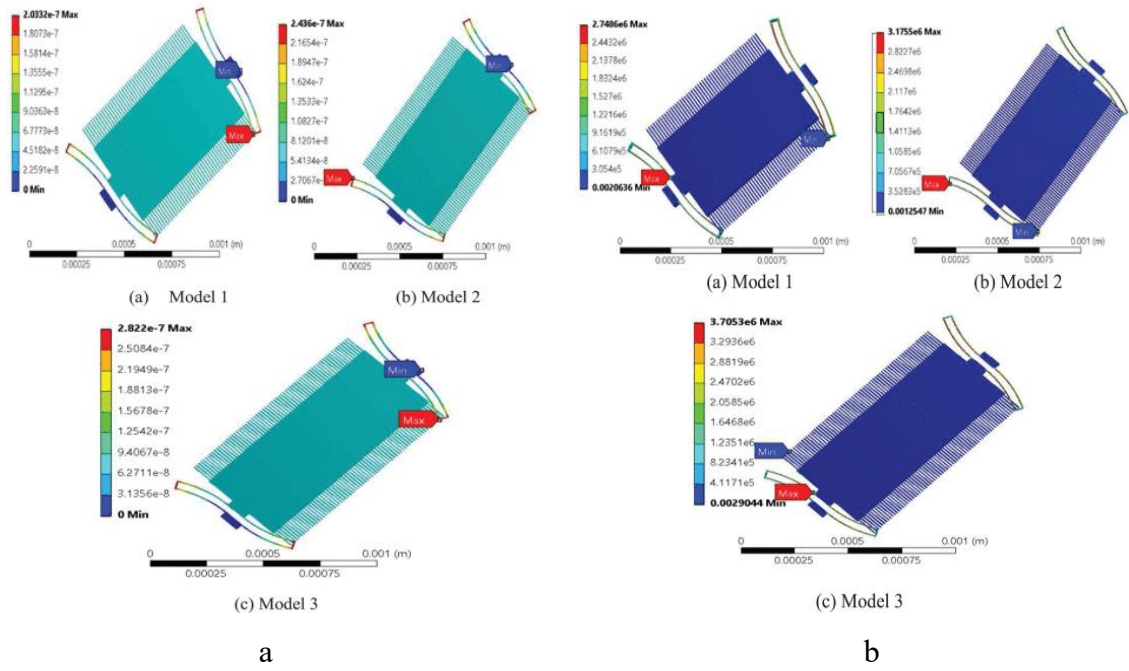


图 13. a 在 300g 加速度范围下硅敏感元件的形变模拟结果；

b 在 300g 加速度范围下结构上的机械应力模拟结果。

总而言之，在上述研究工作当中，虽然研究者们对微热加速度计的结构设计和性能等方面都从多种不同的角度进行了研究和分析，但他们均缺乏对传感器关键参数（如膜厚、腔深、加热器温度等）一个总的更详细的分析，且在这些工作中，并没有建立一个有效的数学理论模型用于器件的分析。

三、研究内容和目的

本论文将针对先前研究工作中的存在的一些缺陷，在对微热加速度计的研究中实现以下目的：

（一）构建一维理论模型

基于能量守恒方程以及对流体的温度和速度分布情况简化后的假设，通过数学推导得到一维常微分方程，目的是建立一个能够准确有效地用于预测微热加速度计性能的一维理论模型。

（二）构建 CFD 仿真验证模型

利用商用 CFD 软件 ANSYS FLUENT 构建仿真模型，拟合出自然对流的速度分布公式，并模拟微热加速度计预测输出 ΔT 作为输入加速度 a 的函数，得到 CFD

模型的仿真结果，并将仿真结果与一维模型计算结果作对比，目的是验证一维理论模型的有效性。

（三）微热加速度计设计参数对性能影响的研究

利用一维模型对微热加速度计的加热器与温度探测器间距、薄膜厚度、腔深、加热器温度和流体类型等一系列关键参数对器件灵敏度和功耗的影响进行研究和分析，目的是得到各关键参数与这些性能之间的关系，为接下来的参数优化提供数据支持。

（四）微热加速度计设计参数的优化

基于关键参数分析得到的数据，在综合各方面影响的情况下，对各参数进行优化设计，得出系列提高传感器灵敏度的参数设计值，目的是得到一个高灵敏度的微热加速度计。

四、研究工作可行性论述

本论文通过建立一个一维理论模型，对基于热对流的微加速度计的一系列参数进行分析，并基于分析的结果，对参数进行优化设计，最终得到一个高灵敏的微热加速度计理论模型。下面将从几个方面论述该研究的可行性：

（一）构建一维理论模型的可行性

本论文的研究对象是一个常见的单轴微热加速度计，而单轴微热加速度计的工作原理中一个非常重要的点就在于薄膜上沿着器件敏感轴的温度分布情况，因此，在本论文工作中将建立一个关于该温度分布情况的一维常微分方程，该一维常微分方程是通过对一系列公式进行数学推导得到，这些公式则是在能量守恒准则以及对流体温度场和速度场的假设的基础上得到。为了验证该一维常微分方程模型是准确有效的，需要构建一个二维 CFD 仿真模型进行结果对比。Rekik 与其同事们^[18, 19]在他们的工作中研究蚀刻缺陷、封装模式、封装高度等因素对单轴微热加速度计灵敏度的影响时，利用二维 CFD 模型的模拟结果（图 14）来验证所建传感器行为模型的有效性，并得到了非常好的一致性。因此，有理由相信对于本论文所建立的一维常微分方程模型，也能够通过构建二维 CFD 模型，将其模拟结果与一维模型所得结果作对比以验证其有效性。

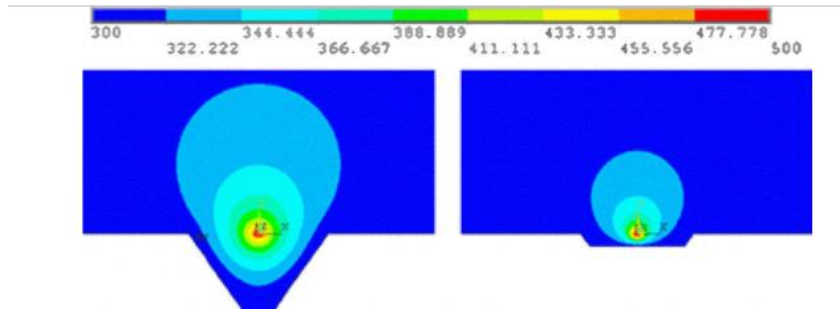


图 14. 二维 CFD 模型温度分布模拟结果

(二) 构建 CFD 仿真验证模型的可行性

在推导该一维常微分方程时，其中的一个推导基础是在加速度存在的情况下，流体的速度分布公式。这就涉及到流体的圆形循环流场（图 15）：当沿着敏感轴施加加速度 a 时，远离加热器且质量密度高于热流体的冷流体向腔体后部(即与加速度方向相反)流动，而加热器周围的热流体则向加速度方向推进。然后，在腔体的顶部和底部引起流体的圆周运动。本论文的工作要利用的便是流体做圆周运动时的速度分布公式，且需要借助软件 ANSYS FLUENT 建立 CFD 仿真模型来拟合该速度曲线以验证所用速度分布公式的有效性。正如第（一）部分中所提及过的，二维 CFD 仿真模型已在其他研究者的工作中被证明能用于验证结果的有效性，因此有理由相信在本论文中通过拟合二维 CFD 仿真模型所得结果以验证速度分布公式是有效可行的。

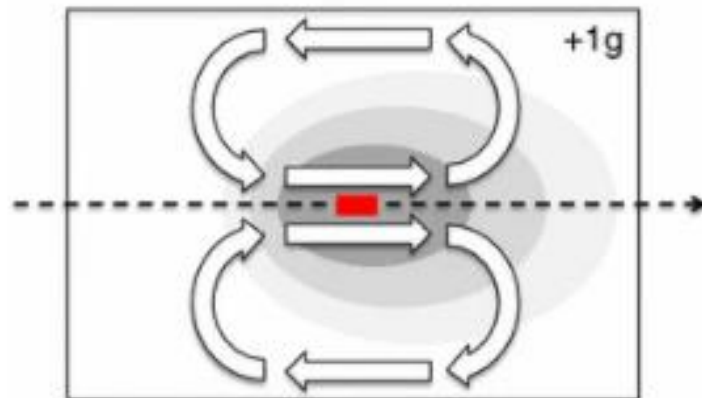


图 15. 加速度存在时（朝右）的流体圆形流场

(三) 参数分析的可行性

在建立一维常微分方程之后，通过解方程将得到以薄膜上沿着敏感轴 x 轴的温度分布为因变量的函数，即 $T(x)$ 。 $T(x)$ 是关于微热加速度计关键设计参数的函数，

包括加热器与温度探测器间距、加热器长度、薄膜厚度、腔深、加热器温度和流体参数等。本论文所做工作的目的便是研究这些参数是如何影响器件灵敏度的。而关于这些参数与器件灵敏度之间的关系，之前众多研究者们在他们的研究工作中都探究过它们对灵敏度的影响，并且得到了有效的结果，比如 Mezghani 等人^[20,21]研究了加热器长度（图 16）、腔深（图 17）对灵敏度的影响，Mailly 等人^[22,23]研究了加热器与温度探测器间距对灵敏度的影响（图 18），Luo 等人^[24]研究了加热器温度对灵敏度的影响（图 19），说明这些参数确实与器件灵敏度之间存在一定关系。因此，在本论文的工作中，利用建立的一维模型，并借助 MATLAB 等软件对微热加速度计的一系列关键设计参数进行分析，相信将能得到这些参数与器件灵敏度之间的关系。

$L_H (\mu m)$	230	210	190	170	150	130	110	90	70	50
$S (mK/g)$ for $d=125\mu m$	66.72	64.22	61.64	58.09	57.18	51.9	47.01	40.79	35.77	30.25
$T_{CM} (K)$ for $d=125\mu m$	371.8	371.8	369.2	367.5	364.7	359.9	356.1	350.7	344.7	337.7

图 16. 加热器长度对灵敏度的影响

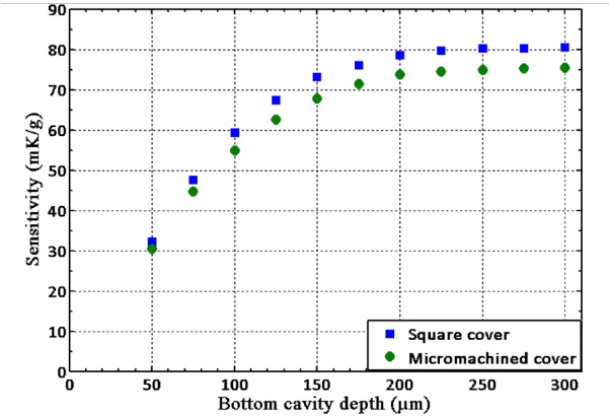


图 17. 腔深对灵敏度的影响

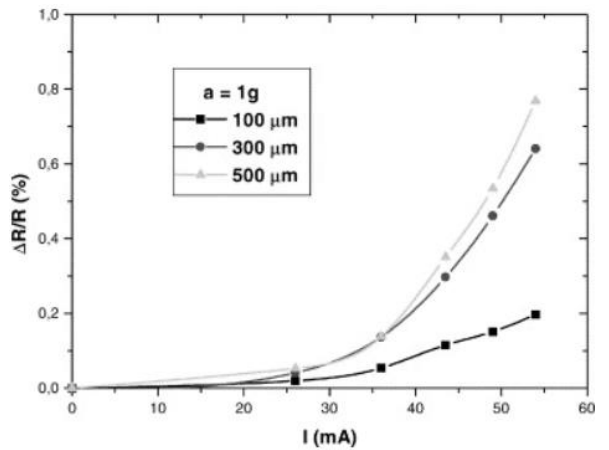


图 18. 加热器与温度探测器间距对灵敏度的影响

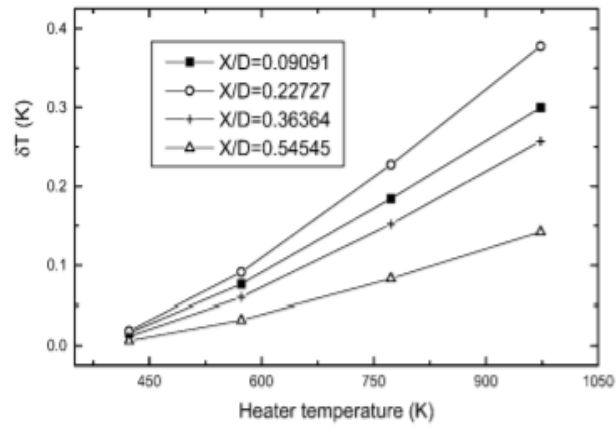


图 19. 加热器温度对灵敏度的影响

微热加速度计的参数分析与优化

一、微热加速度计工作原理

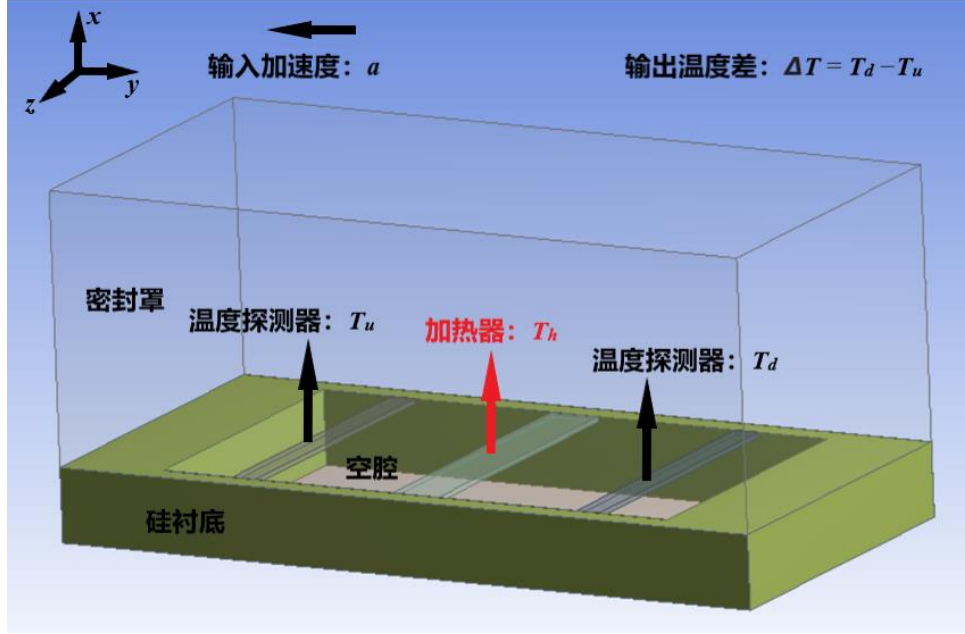


图 20. 微热加速度计结构示意图

如图 20 所示，本文所研究的微热加速度计属于单轴微热加速度计，主要结构包括一个加热器和两个温度探测器，通过悬臂梁结构与硅衬底相连。三者位于同一平面，两个温度探测器对称的分布于加热器两侧，定义一个敏感轴，能够测量施加在这一轴方向上的加速度。密封外罩的作用是防止环境气流影响器件工作。利用蚀刻技术在衬底上形成一个空腔，起到与环境隔热的作用。加热器用于加热流体，当加速度作用于流体时，可以产生自由对流。微加热器提供工作温度 T_h ，两个对称的温度探测器可以分别感知局部温度 T_u 和 T_d 。在没有加速度的情况下，薄膜上敏感轴方向的温度分布是以加热器为中心对称分布的。在敏感轴方向输入加速度 a 时，由于偏置自由对流效应，腔内自由对流环流模式将发生改变。对流流动的改变会改变温度分布。然后，可以检测两个温度探测器之间的输出温度差($\Delta T = T_d - T_u$)。

二、一维理论模型的构建

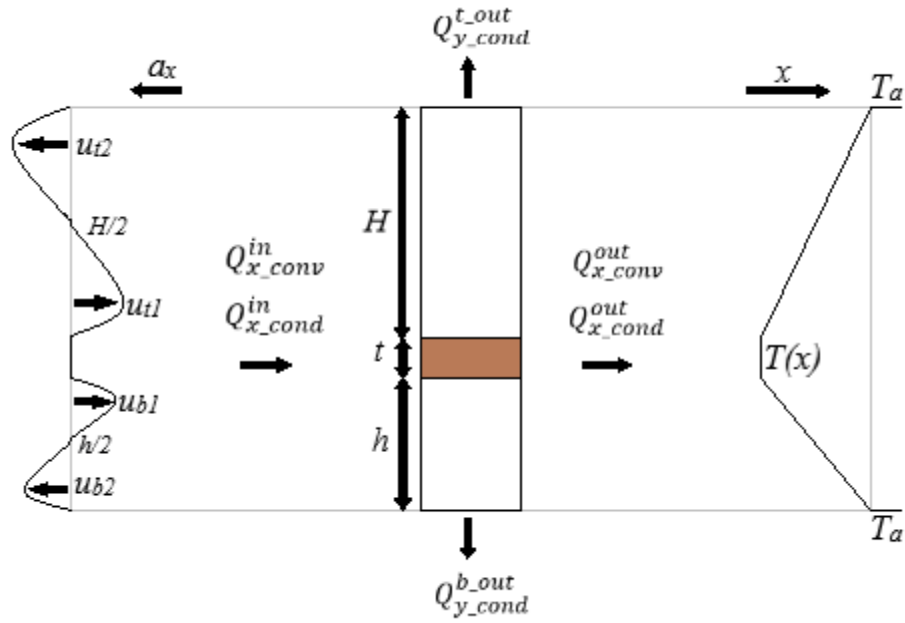


图 21. 集总元素法中的速度和温度分布

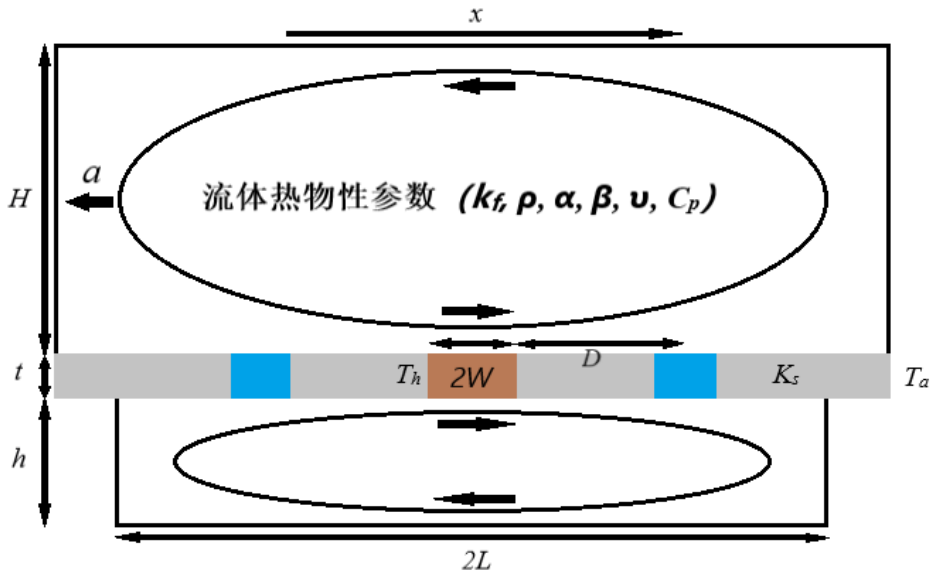


图 22. 简化的速度场和微热加速度计的关键参数

本文根据热力学第一定律和集总单元法，得到微热加速度计集总单元内的能量守恒模型，并在忽略 z 方向的速度流场的条件下，假设微热加速度计从薄膜分别到密封罩和空腔边界的温度变化均为线性分布。此外，在认为器件内的流体工作介质产生自然对流时形成圆形循环流场的条件下，假设得到流体沿 x 方向的流速公式，最终推导得到一维常微分方程模型。模型的基本构建过程如下：

（一）能量方程

根据热力学第一定律和集总单元法，得到微热加速度计集总单元内的能量守恒如图 21 所示，能量守恒表示为式（1）：

$$Q_{x_cond}^{in} + Q_{x_conv}^{in} = Q_{x_conv}^{out} + Q_{x_cond}^{out} + Q_{y_cond}^{b_out} + Q_{y_cond}^{t_out} \quad (1)$$

其中输入对流热通量和传导热通量可计算为式（2）：

$$\begin{cases} Q_{x_cond}^{in} = -k_f \int_0^H \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dy - k_s \int_0^t \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dy - k_f \int_0^H \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dy \\ Q_{x_conv}^{in} = \rho C_p \int_0^H u_t T(x,y) dy + \rho C_p \int_0^h u_b T(x,y) dy \end{cases} \quad (2)$$

输出对流热通量和传导热通量可计算为式（3）：

$$\begin{cases} Q_{x_conv}^{out} = \rho C_p \int_0^H u_t \left(T(x,y) + \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dx \right) dy + \\ \quad \rho C_p \int_0^h u_b \left(T(x,y) + \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dx \right) dy \\ Q_{x_cond}^{out} = -k_f \int_0^H \frac{\partial T(x,y) + \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dx}{\partial x} dy - k_s \int_0^t \frac{\partial T(x,y) + \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dx}{\partial x} dy \\ \quad - k_f \int_0^h \frac{\partial T(x,y) + \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dx}{\partial x} dy \\ Q_{y_cond}^{b_out} = k_f \frac{T(x)}{H} dx \\ Q_{y_cond}^{t_out} = k_f \frac{T(x)}{h} dx \end{cases} \quad (3)$$

上标 b, t 分别表示薄膜下方和薄膜上方的流体；下标 $conv$ 和 $cond$ 分别表示热对流和热传导； k_f 和 k_s 分别为流体和薄膜的导热系数； H, h 分别为密封罩的高度和空腔的深度； t 为膜厚， u_t 和 u_b 分别为薄膜上方和下方流速； ρ 是流体密度； C_p 是流体的热容。

（二）圆形循环流场

在没有加速度的情况下，热泡和相应的等温线沿 x 轴和 y 轴对称：两个温度探测器关于加热器对称地放置在 x 轴上，测量相同的温度。当沿着 x 轴施加加速度 a 时，在加速度和加热器加热的共同作用下，流体形成的自由对流会使热泡变形，温度分布变得不对称，温度探测器检测到温差。产生这种现象的原因是，当对装置施加加速度时，自然对流中远离加热器且质量密度高于热流体的冷流体向腔体后部（即与加速度方向相反）流动，而加热器周围的热流体则向加速度方向推进，在该过程中发生的热传导和热对流使原本的等温线发生变形。在这种情况下，对于薄膜上、下两侧自然对流的速度场分布，其将形成一个圆形循环流场（图 22）。基于该循环流场，本文假设流体沿 x 方向的流速^[25]可以表达为式（4）：

$$\begin{cases} u_t = \begin{cases} \frac{\beta a_x \frac{(T_h - T_a)}{2} H}{4\nu} y \left(1 - \frac{y}{H/2}\right)^2, & 0 \leq y \leq \frac{H}{2} \\ -\frac{\beta a_x \frac{(T_h - T_a)}{2} H(H-y)}{4\nu} \left(1 - \frac{H-y}{H/2}\right)^2, & \frac{H}{2} \leq y \leq H \end{cases} \\ u_b = \begin{cases} \frac{\beta a_x \frac{(T_h - T_a)}{2} h}{4\nu} y \left(1 - \frac{y}{h/2}\right)^2, & 0 \leq y \leq \frac{h}{2} \\ -\frac{\beta a_x \frac{(T_h - T_a)}{2} h(h-y)}{4\nu} \left(1 - \frac{h-y}{h/2}\right)^2, & \frac{h}{2} \leq y \leq h \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

其中 T_a 和 T_h 分别为环境温度和加热器温度； β 和 ν 分别为流体的热膨胀系数和运动粘度。

(三) 温度线性分布

假设流体的温度沿 y 轴方向的分布是线性变化的，在薄膜处温度为 $T(x)$ ，在边界处（ $y=H$ ， $y=h$ ）温度为环境温度 T_a ，忽略温度在 z 方向的分布变化，则温度沿着 y 轴变化的函数 $T(y)$ 可表达为式（5）：

$$T(y) = \begin{cases} \frac{T_a - T(x)}{H} y + T(x), & 0 \leq y \leq H \\ T(x), & 0 \leq y \leq t \\ \frac{T_a - T(x)}{h} y + T(x), & 0 \leq y \leq h \end{cases} \quad (5)$$

(四) 一维常微分方程推导

将式（2）、（3）代入式（1），得到式（6）：

$$0 = \rho C_p \int_0^H u_t \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dx dy + \rho C_p \int_0^h u_b \frac{\partial T(x,y)}{\partial x} dx dy - k_f \int_0^H \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} dx dy - k_s \int_0^t \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} dx dy - k_f \int_0^h \frac{\partial^2 T(x,y)}{\partial x^2} dx dy + k_f \frac{T(x)}{H} dx + k_f \frac{T(x)}{h} dx \quad (6)$$

将式（4）、（5）代入式（6），得到最终的一维常微分方程：

$$A \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + B \frac{dT(x)}{dx} + C T(x) = 0 \quad (7)$$

A、B、C 定义为如下常数：

$$\begin{cases} A = H + 2 \frac{k_s}{k_f} t + h \\ B = -\frac{1}{320} \frac{\rho C_p \beta a \frac{(T_h - T_a)}{2 k_f} (H^3 + h^3)}{\nu} \\ C = -2 \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{h} \right) \end{cases} \quad (8)$$

微热加速度计的衬底为硅材料，具有 $150 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的高导热系数，因此两端温度可视为环境温度 T_a 。定义过热温度计算公式为 $\Delta T_h = T_h - T_a$ 。则微热加速度计的边界条件可以表达为：

$$T(-L) = 0; T(-W) = \Delta T_h; T(L) = 0; T(W) = \Delta T_h \quad (9)$$

结合式 (7)、(8)、(9) 求得一维常微分方程的解为：

$$\begin{cases} T(x) = \frac{\Delta T_h}{e^{-r_2 W} - e^{-r_2 L - r_1(W-L)}} (e^{r_2 x} - e^{-r_2 L + r_1(x+L)}); & -L \leq x \leq W \\ T(x) = \Delta T_h; & -W \leq x \leq W \\ T(x) = \frac{\Delta T_h}{e^{r_2 W} - e^{r_2 L + r_1(W-L)}} (e^{r_2 x} - e^{r_2 L + r_1(x-L)}); & W \leq x \leq L \end{cases} \quad (10)$$

其中 r_1 和 r_2 分别为：

$$r_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}; \quad r_2 = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (11)$$

一维常微分方程的解即为微热加速度计的薄膜上沿 x 轴的温度分布情况。

微热加速度计的灵敏度 S 定义为式 (12)：

$$S = \frac{T(x)}{a} \quad (12)$$

(五) 功耗计算模型

在微热加速度计的的实际应用中，不仅需要考虑器件是否具有优秀的灵敏度，同时功耗也是器件性能是否优异的一个标准，因此需要构建微热加速度计的功耗计算模型，用于探究器件各设计参数与器件功耗间的关系。

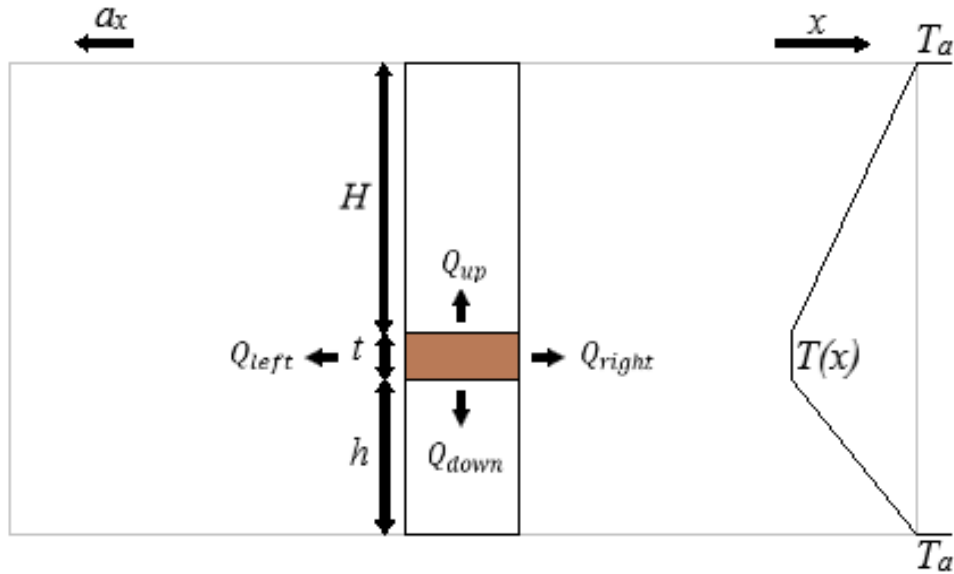


图 23. 微热加速度计功耗计算模型

如图 23，加热器上、下界面的热量散失可分别表达为式 (13)、(14)：

$$Q_{up} = k_s \frac{(T_h - T_a)}{H} (2WLength_{Heater}) \quad (13)$$

$$Q_{down} = k_f \frac{(T_h - T_a)}{h} (2WLength_{Heater}) \quad (14)$$

加热器左、右界面的热量散失可分别表达为式 (15)、(16)：

$$Q_{left} = T_{left} k_s t Length_{Heater} \quad (15)$$

$$Q_{right} = -T_{right} k_s t Length_{Heater} \quad (16)$$

其中， T_{left} 、 T_{right} 表达为式 (17)、(18)：

$$T_{left} = \frac{T_h - T_a}{e^{-r_2 W} - e^{-r_2 L - r_1(W-L)}} (r_2 e^{-r_2 W} - r_1 e^{-r_2 L + r_1(-W+L)}) \quad (17)$$

$$T_{right} = \frac{T_h - T_a}{e^{r_2 W} - e^{r_2 L + r_1(W-L)}} (r_2 e^{r_2 W} - r_1 e^{r_2 L + r_1(W-L)}) \quad (18)$$

微热加速度计的功耗 P 定义为加热器各界面的热量散失之和：

$$P = Q_{up} + Q_{down} + Q_{left} + Q_{right} \quad (19)$$

其中 T_a 和 T_h 分别为环境温度和加热器温度； k_f 和 k_s 分别为流体和薄膜的导热系数； W 为微加热器半宽； $Length_{Heater}$ 为加热器长度； t 为薄膜厚度； H 、 h 分别为密封罩的高度和空腔的深度。

将式 (13)、(14)、(15)、(16) 分别代入式 (19)，可得：

$$\begin{aligned} P = & \left(\frac{k_s}{H} + \frac{k_f}{h} \right) (T_h - T_a) (2WLength_{Heater}) + k_s t Length_{Heater} (T_h - \\ & T_a) \left[\frac{1}{e^{-r_2 W} - e^{-r_2 L - r_1(W-L)}} (r_2 e^{-r_2 W} - r_1 e^{-r_2 L + r_1(-W+L)}) - \right. \\ & \left. \frac{1}{e^{r_2 W} - e^{r_2 L + r_1(W-L)}} (r_2 e^{r_2 W} - r_1 e^{r_2 L + r_1(W-L)}) \right] \end{aligned} \quad (20)$$

式 (20) 即为微热加速度计功耗的计算表达式。

三、 ANSYS FLUENT 仿真模型的搭建及验证

在前面的工作中，通过对微热加速度计工作原理的研究，构建了一个可用于探究微热加速度计灵敏度的一维模型。但模型的构建是在一系列公式和假设的理论基础上得到，其应用的有效性还需要进一步验证。因此，在接下来的工作中，本文将利用 CFD 软件 ANSYS FLUENT 对微热加速度计进行模型构建及仿真，以验证所得一维模型的有效性。

(一) 搭建仿真模型

1、仿真模型的几何结构

在对微热加速度计的工作原理进行仿真时，本文采用的是二维模型，因为二维模型能够提高仿真的效率，同时也能够很好地展示微热加速度计的工作原理。如图 24 所示，该模型的几何结构是一个由两个不同大小的长方形组成的封闭腔体，大长方形表示密封罩，小长方形表示空腔，其中密封罩与空腔的交界处为一层固体薄膜，在薄膜中央分布有一个固体发热源作为微加热器。密封罩与空腔内均分布有流体工作介质。该几何结构中沿坐标轴所定义的 x 轴方向即为微热加速度计的敏感轴方向。该几何结构的尺寸如下：密封罩长度 $L_{cover}=1800\text{ }\mu\text{m}$ ，高度 $H=1400\text{ }\mu\text{m}$ ；空腔长度 $L_{cavity}=1600\text{ }\mu\text{m}$ ，深 $h=120\text{ }\mu\text{m}$ ；薄膜厚度 $t=4\text{ }\mu\text{m}$ 。

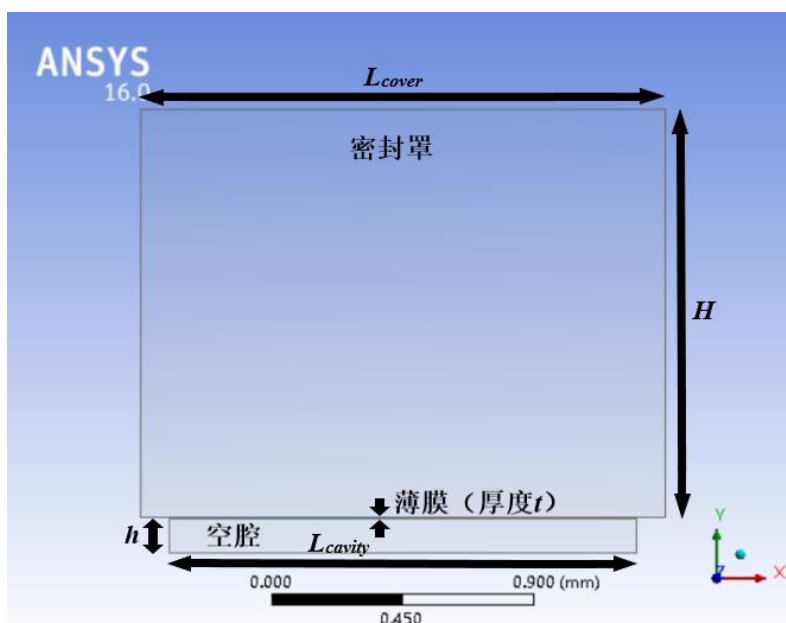


图 24. 二维仿真模型几何结构示意图

2、设置网格尺寸

在对仿真模型进行结果求解时，本文采用的计算方法是有限元分析法，因此在求解前需先对仿真模型进行网格划分。网格的最小尺寸是影响有限元分析法求解结果的一个非常重要的因素，不同的最小网格尺寸会影响求解结果的准确性与精度。而对于微热加速度计的仿真，求解结果优劣性的一个关键判断标准则是器件的灵敏度，而灵敏度又与输出温度差直接相关，因此本文需要探究在其它参数相同的条件下，不同的最小网格尺寸对输出温度差的影响。

图 25 为网格划分及最小网格尺寸 s 的定义，图 26 为当输入加速度为 100 m/s^2 时，最小网格尺寸 s 对输出温度差的影响：

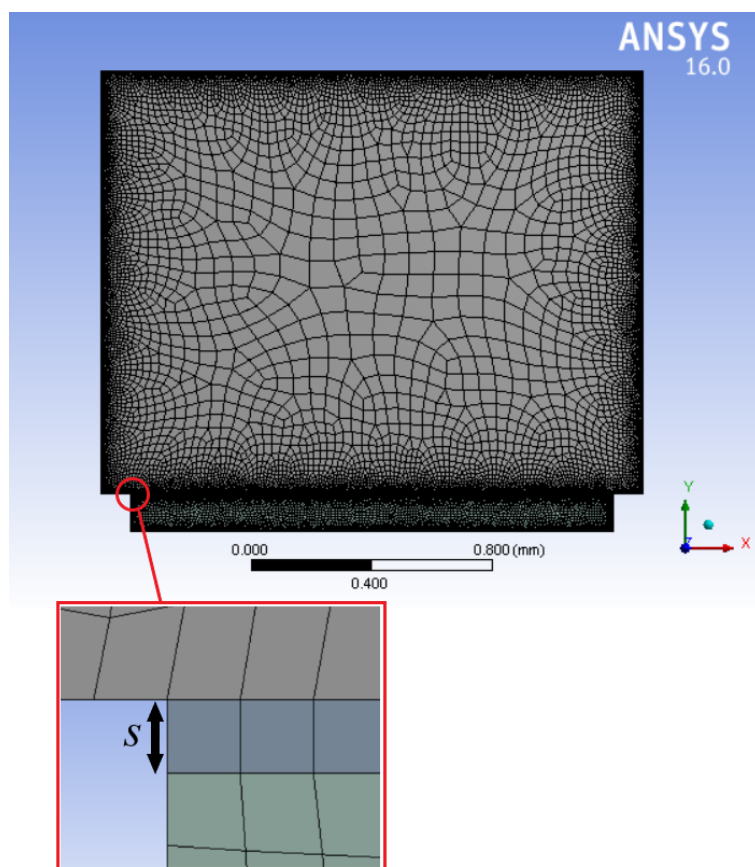


图 25. 最小网格尺寸 s 及 $s=4\ \mu\text{m}$ 时的网格划分

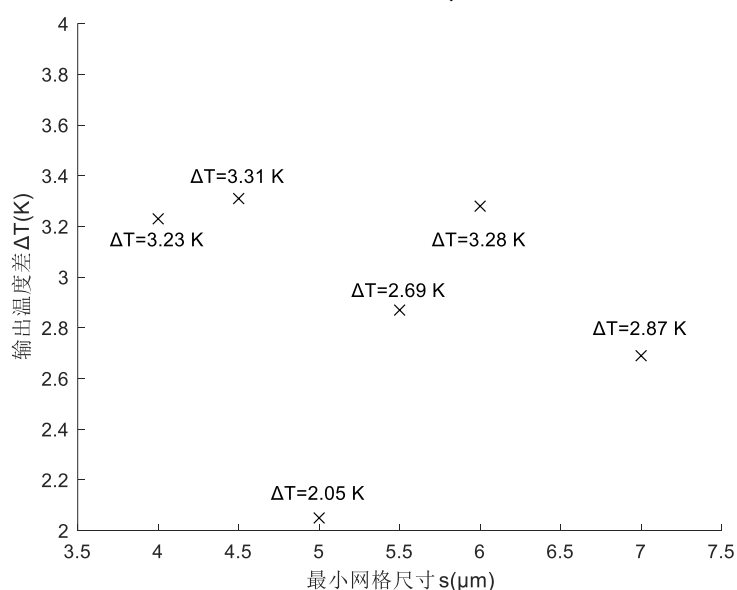


图 26. 相同输入加速度下最小网格尺寸对输出温度差的影响

可以发现，当最小网格尺寸 s 的值取 $4\ \mu\text{m}$ 、 $4.5\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$ 三种情况时，得到了较大的输出温度差， ΔT 的值均大于 $3.2\ \text{K}$ ，表明这三种情况下求解结果效果最好。而对于这三种情况的比较，当 s 分别取 $4.5\ \mu\text{m}$ 和 $6\ \mu\text{m}$ 时，所得 ΔT 相较于 s 取 $4\ \mu\text{m}$ 时，其值的增幅分别为 2.48% 和 2.17% 。但 s 取 $4\ \mu\text{m}$ 时划分的网格会更

精细，从而得到更精确的仿真结果。因此，在增幅较小的情况下，更倾向于取 s 为 $4\text{ }\mu\text{m}$ 的值来划分网格，共划分网格数 $n=16603$ （图 25）。

3、设置仿真参数

General: 如图 26，设置求解器 Solver 时，选择的求解器类型为基于压力的类型 Pressure-Based，此类型求解器使用的是压力修正算法，擅长求解不可压缩流体。在速度方程 Velocity Formulation 的设置中，仿真模型采用的是固定坐标轴，因此选择为绝对速度 Absolute，即计算的是流体相对固定参考系的速度。时间类型 Time 选择为稳态 steady。沿 y 轴方向设置重力加速度 9.8 m/s^2 ，沿微热加速度计敏感轴 x 轴方向添加加速度 100 m/s^2 。

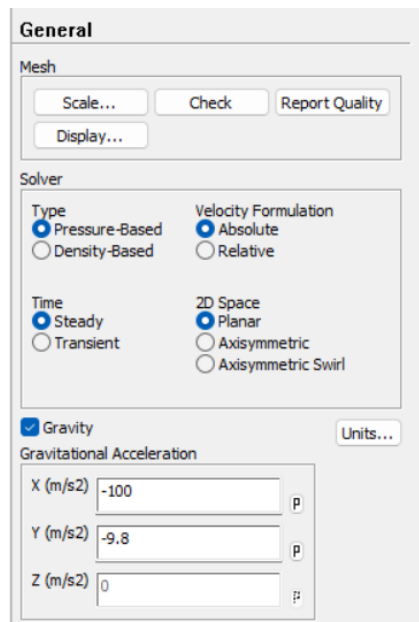


图 26. 求解器和加速度设置

Energy Equation: FLUENT 模块中的能量方程 Energy Equation 描述了流体内部的能量传递和转换过程，是用于解决热传导和对流换热问题的基本方程。对该微热加速度计模型进行仿真时，只考虑流体的热传导和热对流现象，而忽略热辐射现象。因此，在图 27 中把能量方程打开，用于模拟热传导和热对流现象。

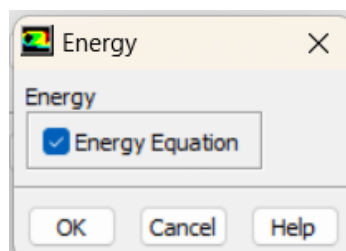


图 27. 设置能量方程

Viscous Model: 对于加速度计内部发生的自然热对流现象，采用的是湍流模型。在图 28 的粘度模型 Viscous Model 中选择用于描述湍流的 Realizable k-epsilon(2 eqn)模型。在湍流近壁面处理 Near-Wall Treatment 中选择 Thermal Effects-Enhanced Wall Treatment，这种处理方式能够在整个湍流近壁区域都适用。

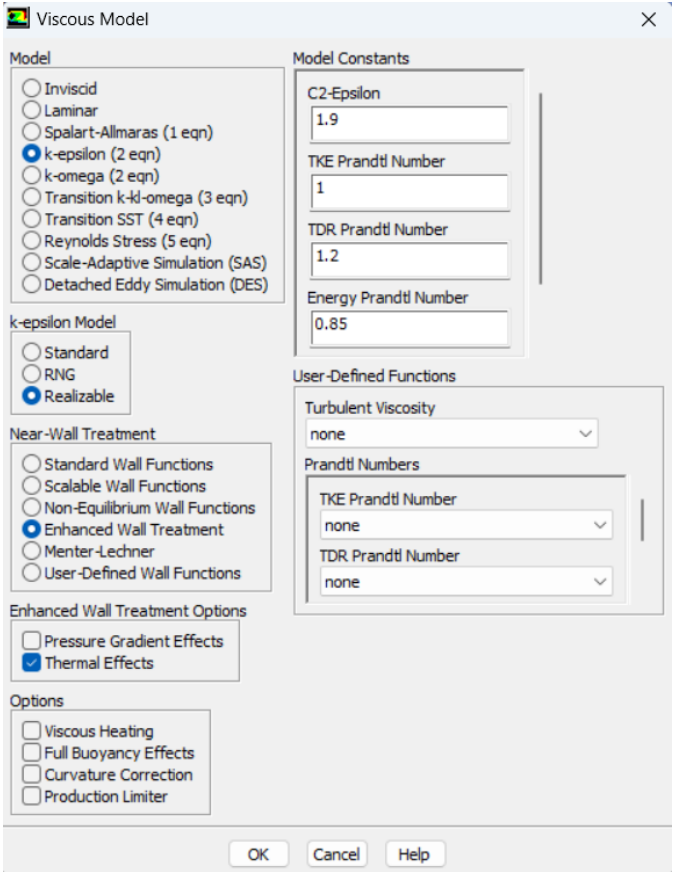


图 28. 设置流体粘度模型

Materials: 对于模型中各部分结构所使用的材料，密封罩与空腔内的流体工作介质所用材料为 air（空气）；薄膜所用材料为 silicon-dioxide（二氧化硅）；固体发热源所用材料为 silicon（硅）。

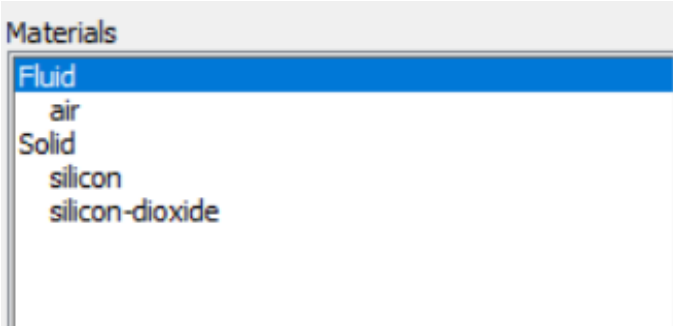


图 29. 模型各部分结构所用材料

流体性质：模型中采用的流体介质为空气，在图 30 中将空气的密度参数选择为 `incompressible-ideal-gas`，即不可压缩的理想气体状态方程，因为在微热加速度计的工作原理中，形成自由对流的空气流体的密度变化主要由温度的变化引起，而压力引起的变化非常微小，而不可压缩理想气体状态方程适用于压力变化很小，但介质密度与温度变化相关的情况。

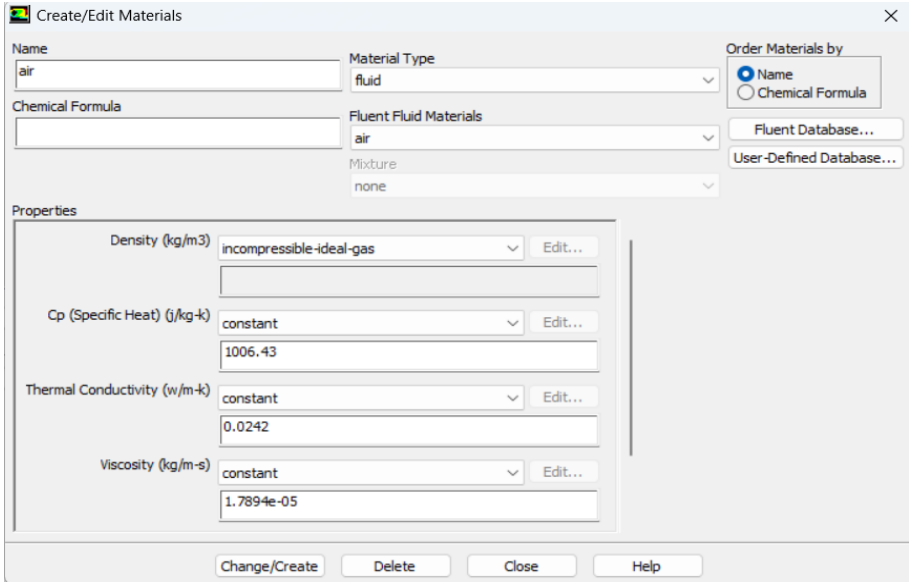


图 30. 设置流体参数

Boundary Conditions: 设置边界条件 **Boundary Conditions** 时，腔体壁面的温度等于环境温度，为 300 K；加热器温度为 650 K，向腔体内的流体提供温度。

Solution Method: 在前面的设置中，选择的是基于压力的求解器类型，因此，在图 31 中设置求解方法 **Solution Method** 时，将压力-速度耦合方式 **Pressure-Velocity Coupling** 选择为 **Coupled**，即采用基于压力的耦合算法，该算法更适合于稳态的计算，且对描述单相流的实现有更强的鲁棒性和有效性。

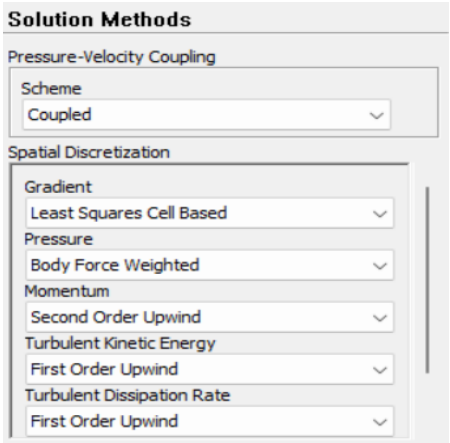


图 31. 设置求解方式

（二）仿真结果验证

1、速度场仿真结果及验证

通过仿真得到了微热加速度计在工作时腔体内流体工作介质的速度场分布结果如图 32。从图中可以看出，在沿器件敏感轴 x 轴负方向的输入加速度 a 的作用下，微热加速度计中的流体工作介质形成了沿逆时针方向流动的圆形循环自然对流流场。同时云图部分也显示了流体沿 x 轴方向的速度场分布。

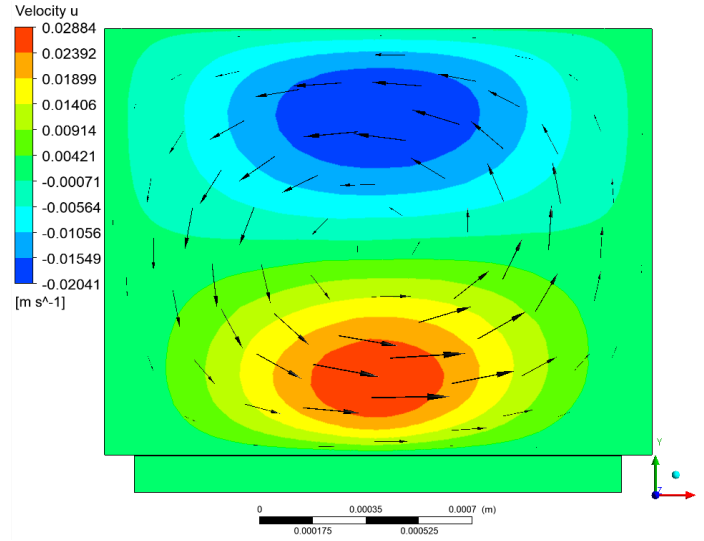


图 32. 速度场分布图

此外，在之前构建一维模型的工作中，所得结果一维常微分方程是通过各种公式推导得到，推导过程中使用到的一个公式即为流体沿 x 方向的流速公式（4），该流速公式是微热加速度计工作时，介质流体在输入加速度的作用下形成圆形循环自然对流流场，并基于该循环流场假设得到，且该流速公式的形式为三次阶一元方程。上面 ANSYS FLUENT 软件的仿真结果，已经验证了流体形成圆形循环自然对流流场的有效性，接下来还需要通过拟合沿 x 方向的速度场公式，以验证公式（4）的有效性。

取速度场分布图的中线上的值为样本，得到沿 y 轴变化的速度曲线如图 33。利用数据处理软件 Origin lab 对速度曲线进行 3 次阶拟合，拟合结果如图 34，得到拟合函数的形式为式（21）：

$$u' = B_1 y^3 + B_2 y^2 + B_3 y + B_4 \quad (21)$$

其中， B_1 、 B_2 、 B_3 、 B_4 分别为：

$$\begin{cases} B_1 = 1.773e^8 \pm 9.822e^5 \\ B_2 = -3.656e^5 \pm 2.094e^3 \\ B_3 = 1.594e^2 \pm 1.263 \\ B_4 = 0.00818 \pm 2.045e^{-4} \end{cases} \quad (22)$$

函数拟合指标 $R^2=0.99253$ ，可认为该结果拟合效果良好，即流体沿 x 轴的速度可用三次阶一元函数的形式描述，从而验证了公式（4）的有效性。

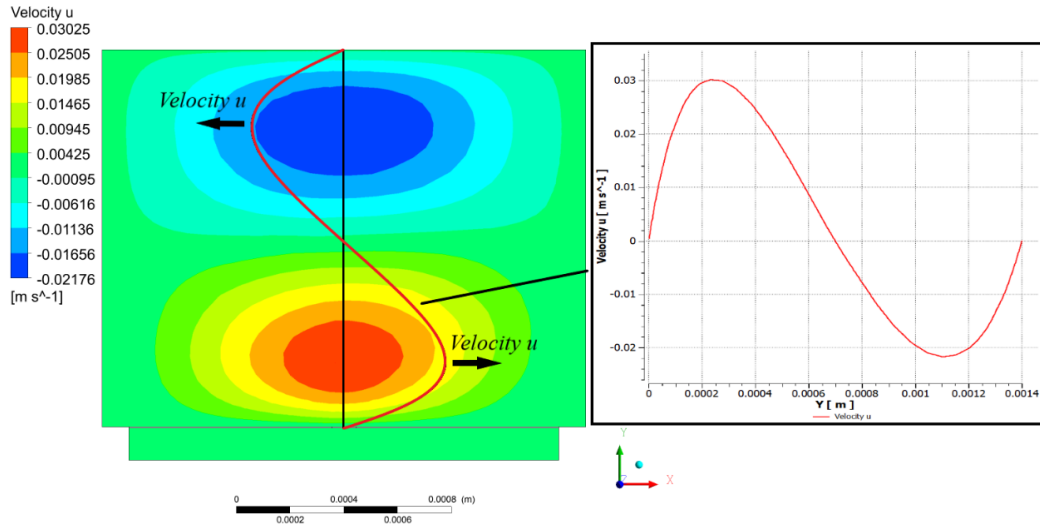


图 33. 流体沿 x 方向的速度曲线图

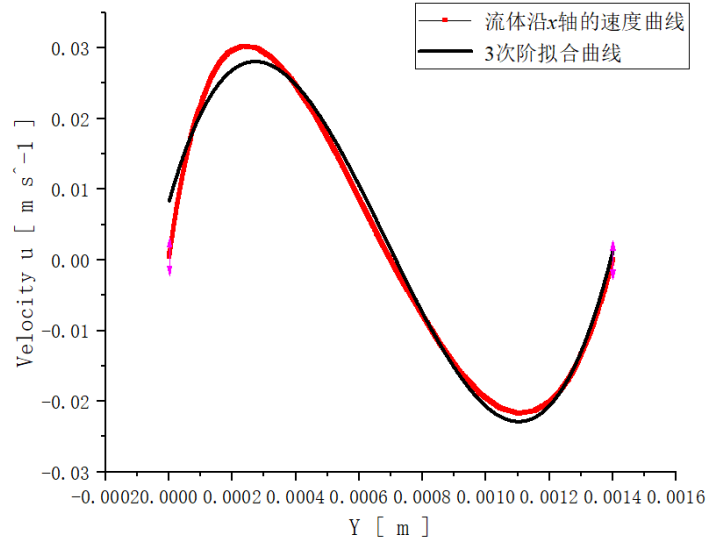


图 34. 对速度曲线进行函数拟合

2、温度场仿真结果

通过仿真得到了微热加速度计在输入加速度为零时的温度场分布如图 35.a，输入加速度为 100 m/s^2 时的温度场分布如图 35.b。可以得知，在输入加速度的作用

下，器件内流体形成的圆形循环自然对流通通过热传导和热对流的作用，使温度分布相较于没有输入加速度时的情况发生了偏移，从而在薄膜上加热器两侧的温度探测器处产生了温度差。

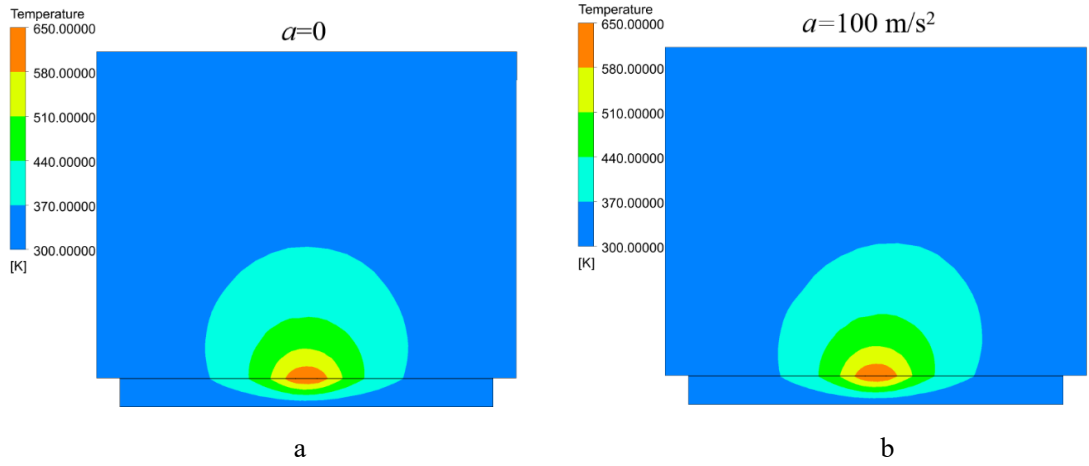


图 35. a 输入加速度 $a=0$ 时的温度分布云图；b 输入加速度 $a=100 \text{ m/s}^2$ 时的温度分布云图。

3、ANSYS FLUENT 仿真结果与一维模型计算结果比较

利用仿真模型计算不同输入加速度下，分布在加热器两侧 $430 \mu\text{m}$ 处的温度探测器产生的输出温度差 ΔT 如图 36. a。利用 MATLAB 软件使用一维模型计算相同条件下的输出温度差 ΔT 如图 36. b。一维模型所得输出温度差随输入加速度的变化趋势与仿真模型的结果一致，但对于同一输入加速度，两者计算的输出温度差的具体数值则有所不同。考虑到一维模型的构建过程中使用了多种假设与条件简化，因此该情况的出现在合理误差范围内，可认为一维模型的计算结果是有效的。此外，一维模型计算效率为 0.002116 s ，为仿真模型计算效率 10.502 s 的 4963 倍。

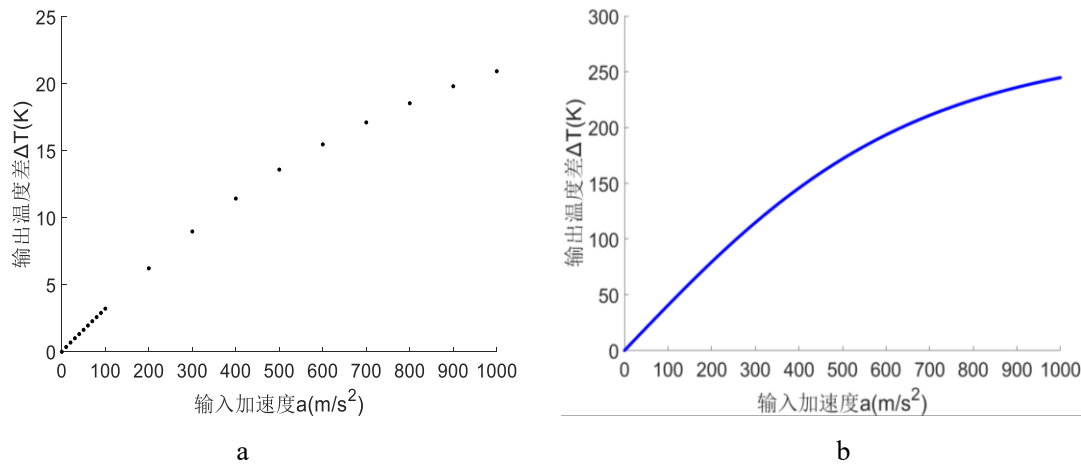


图 36. a 利用 ANSYS FLUENT 仿真模型计算得到的输出温度差；

b 利用一维模型计算得到的输出温度差。

四、高灵敏度的微热加速度计

（一）微热加速度计设计参数分析及优化

利用 ANSYS FLUENT 软件所得到的对微热加速度计的仿真结果已验证了一维常微分方程模型的有效性,在接下来的工作中,将利用一维常微分方程模型和功耗计算模型研究对于不同的流体工作介质,微热加速度计的归一化加热器与温度探测器间距 (D/L)、腔深、薄膜厚度及加热器温度 4 个设计参数对器件灵敏度和功耗的影响,并最终得出能使器件得到最优灵敏度的设计参数。

通过查阅文献和资料,得到在温度 300 K、气压 1 atm 时,10 种不同流体的各性质参数如表 1。

表 1 流体的性质参数

流体	密度 (kg/m^3)	比热容 ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	导热系数 ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	运动粘度 (m^2/s)
空气	1.225	1006.7	0.026	1.517e-5
氦气	0.1625	5193.2	0.156	1.227e-4
氟气	0.8191	1030.6	0.0492	3.888e-5
氮气	1.1378	1044.05	0.0267	1.604e-5
二氧化碳	1.7959	870.49	0.0183	8.455e-5
氧气	1.3003	919.2	0.0273	1.626e-5
五氟乙烷	4.9481	799.2	0.0142	2.636e-6
三氟一氯甲烷	4.2802	646.4	0.0125	3.375e-6
2-甲基丙烯	2.351	773.1	0.0126	1.713e-6
六氟化硫	5.9985	664.3	0.0133	2.575e-6

在 MATLAB 软件中构建 function 函数(参考附录 A),计算灵敏度和功耗结果如图 37-46。

1、以空气为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 37. a-d:

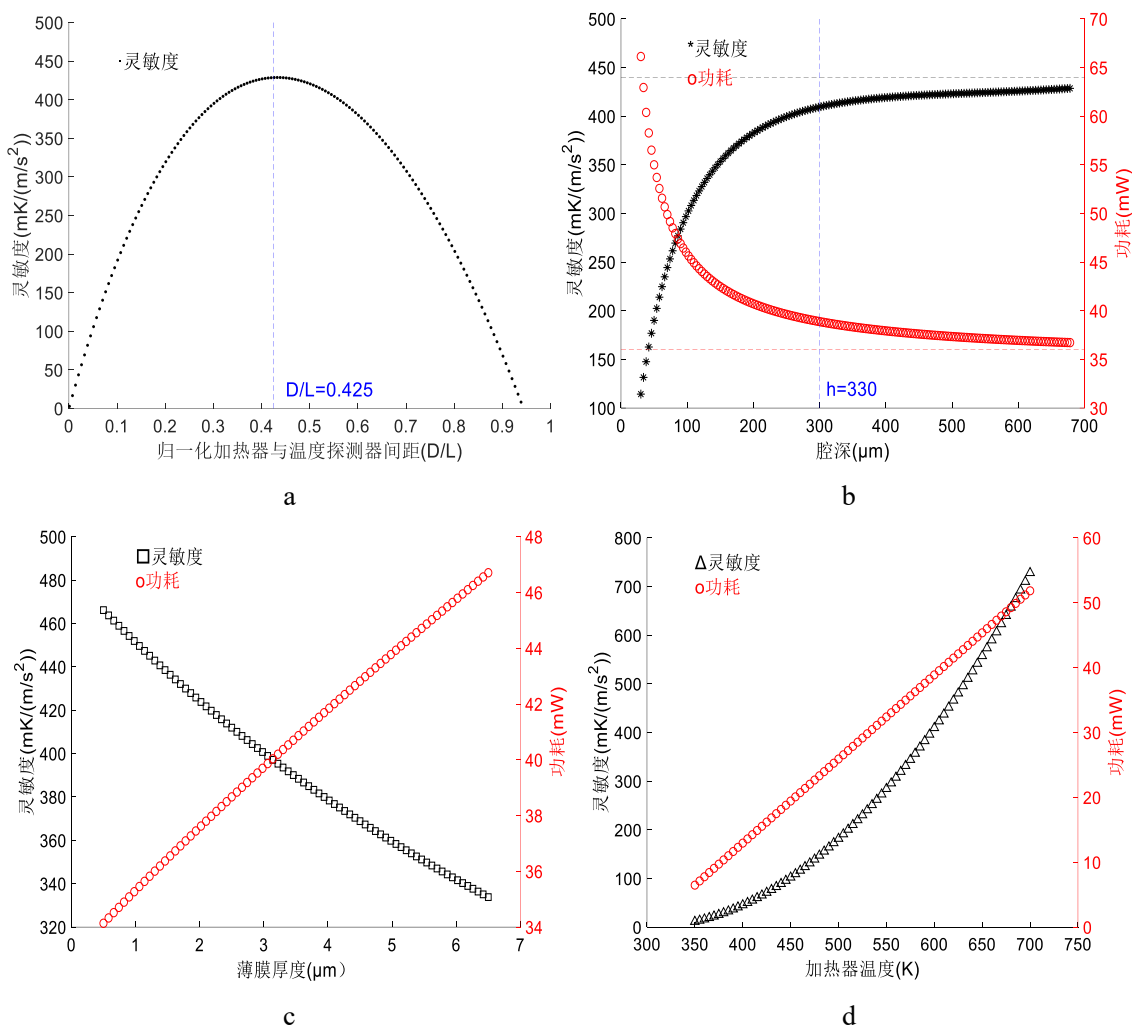
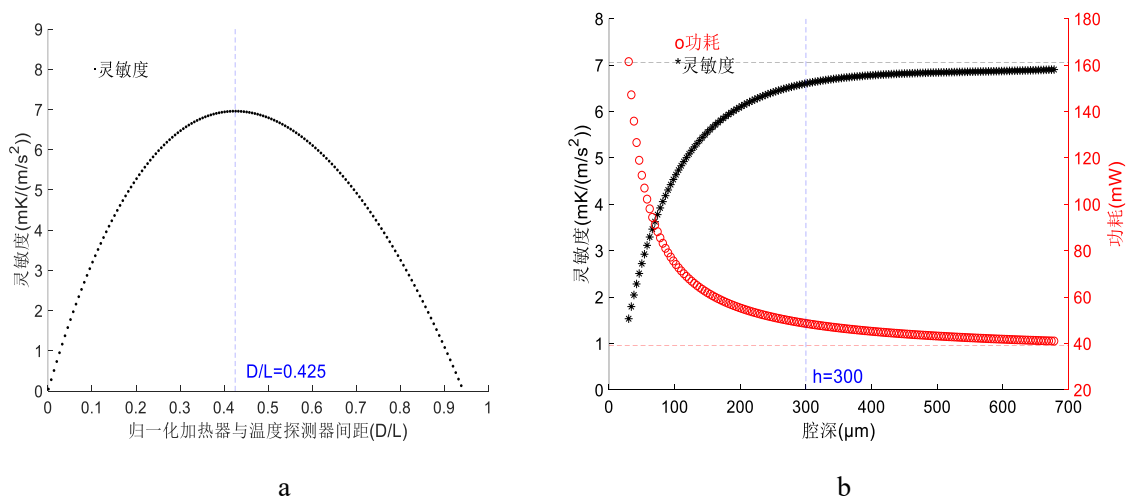


图 37. a-d 以空气为工作介质

2、以氢气为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 38. a-d:



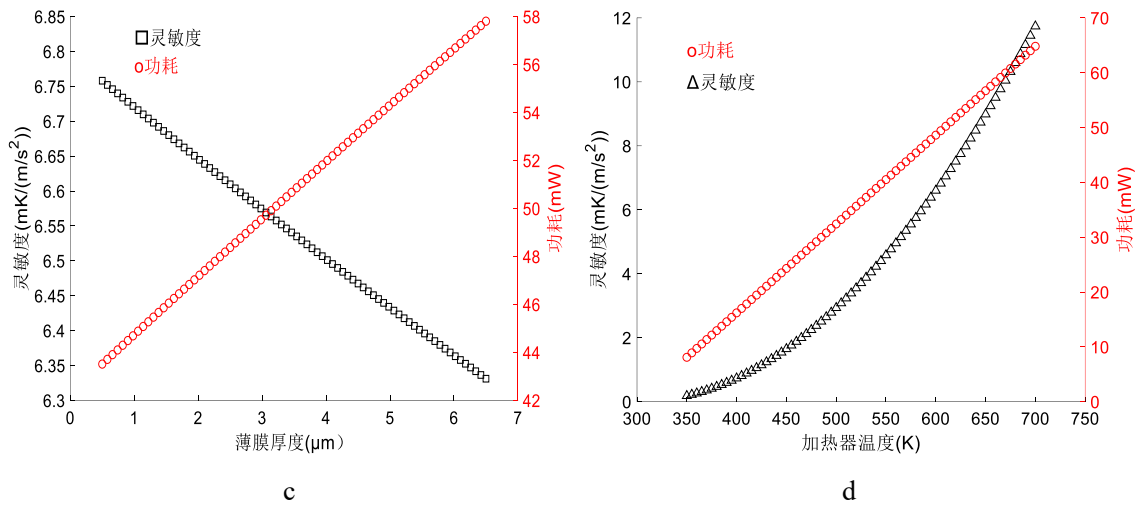


图 38. a-d 以氦气为工作介质

3、以氦气为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 39. a-d:

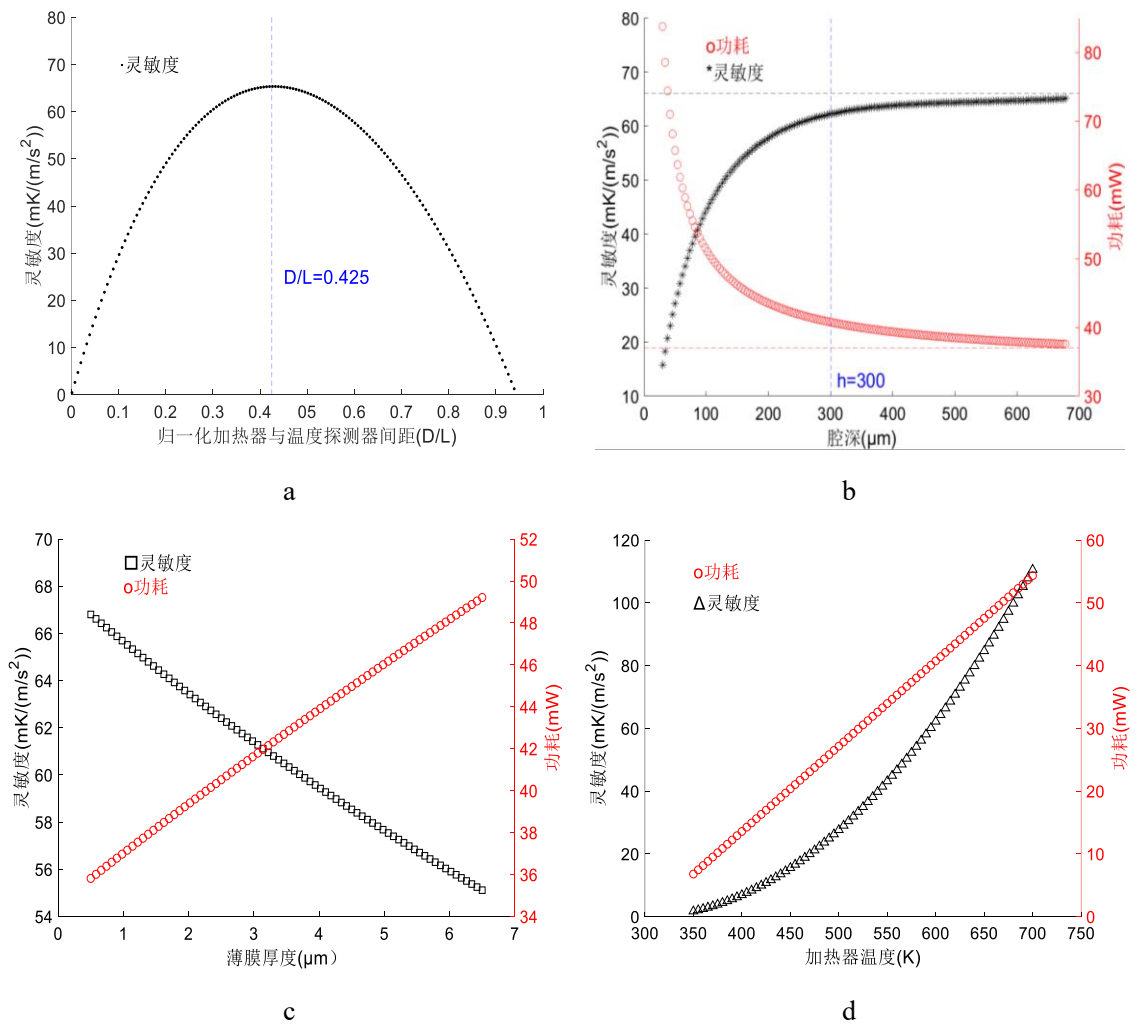


图 39. a-d 以氦气为工作介质

4、以氮气为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 40.a-d:

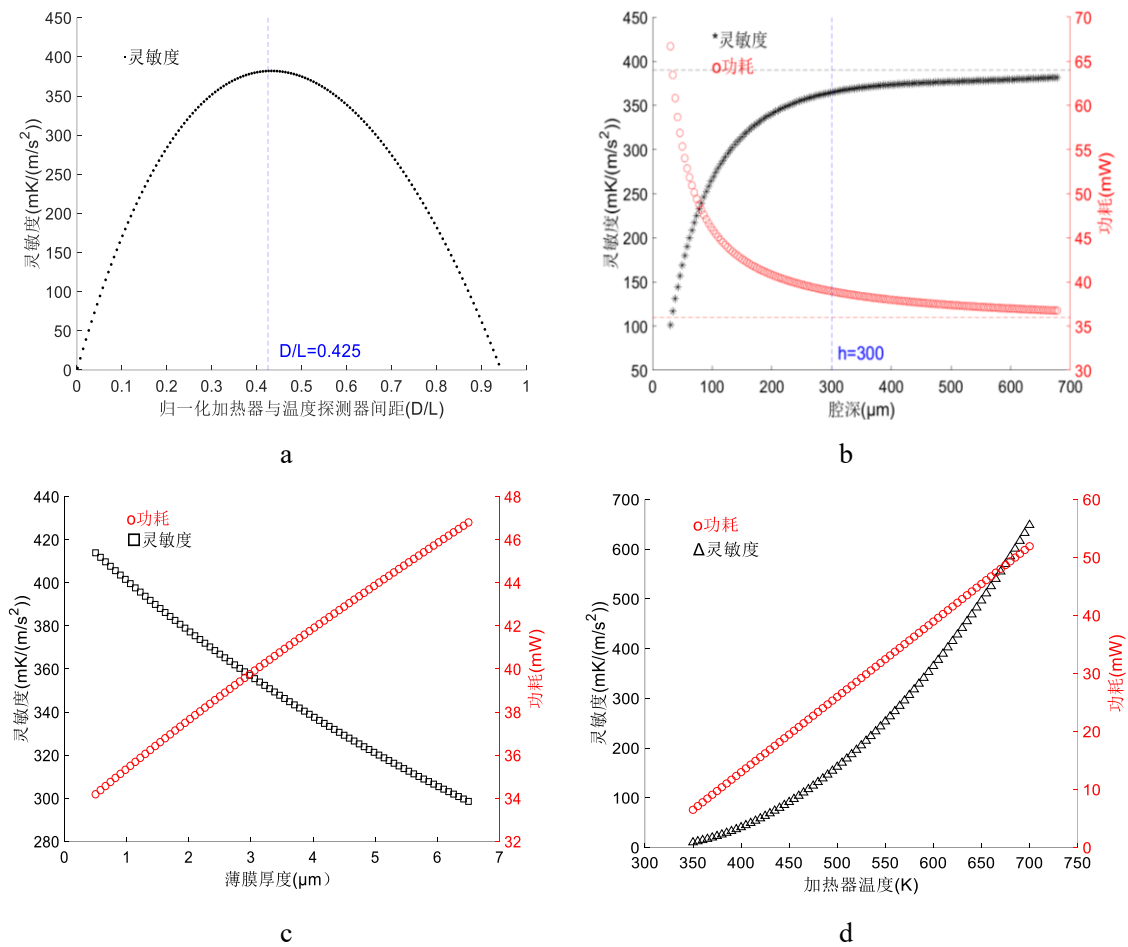
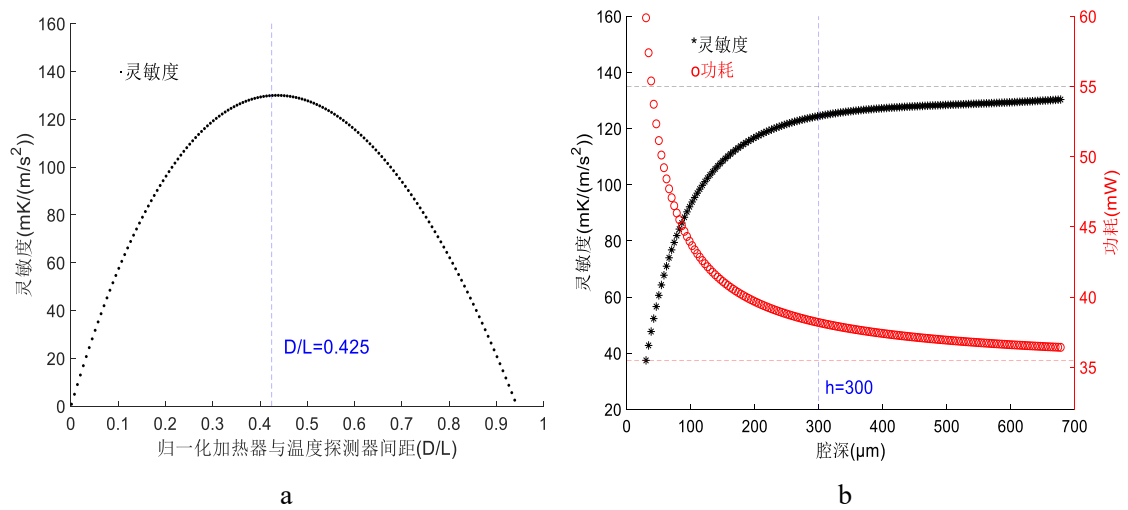


图 40. a-d 以氮气为工作介质

5、以二氧化碳为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 41.a-d:



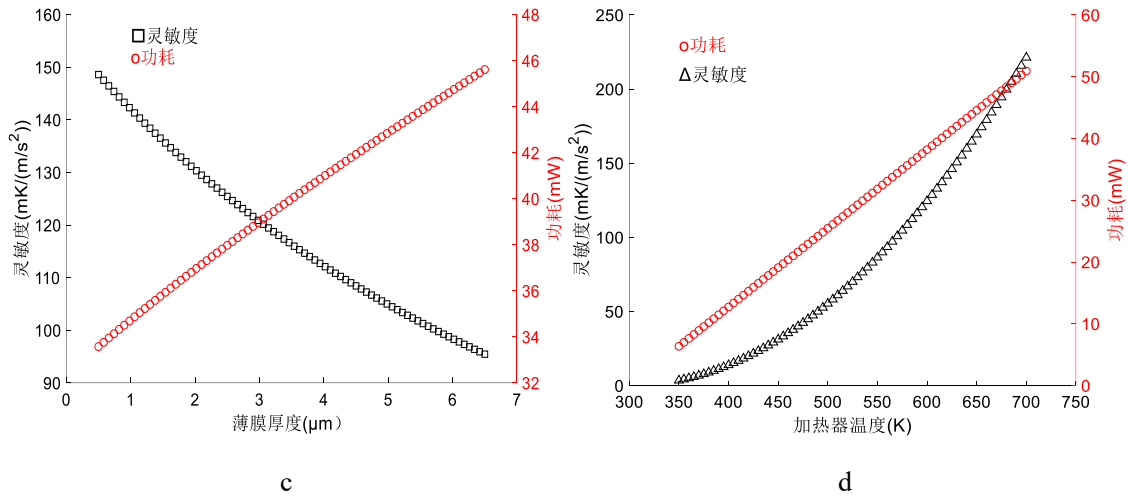


图 41. a-d 以二氧化碳为工作介质

6、以氧气为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 42.a-d:

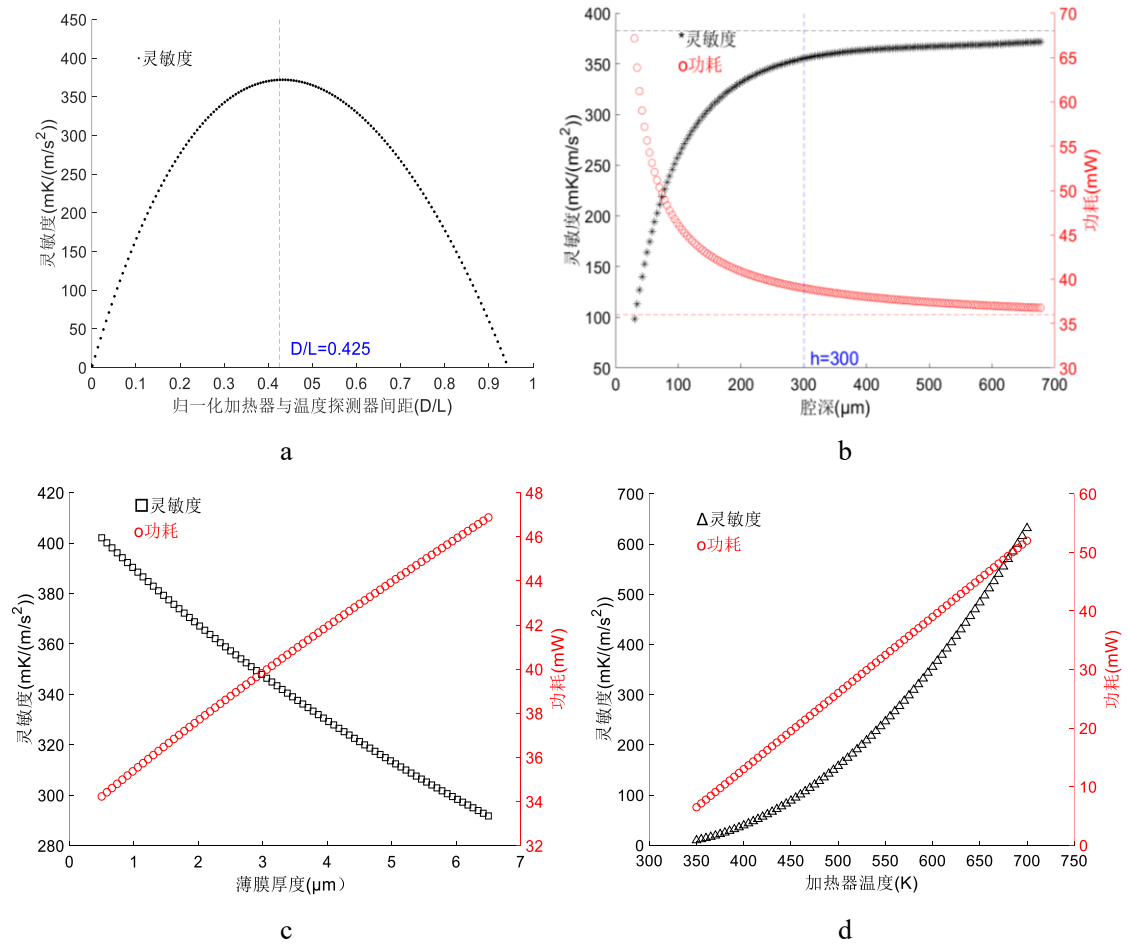


图 42. a-d 以氧气为工作介质

7、以五氟乙烷为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 43.a-d:

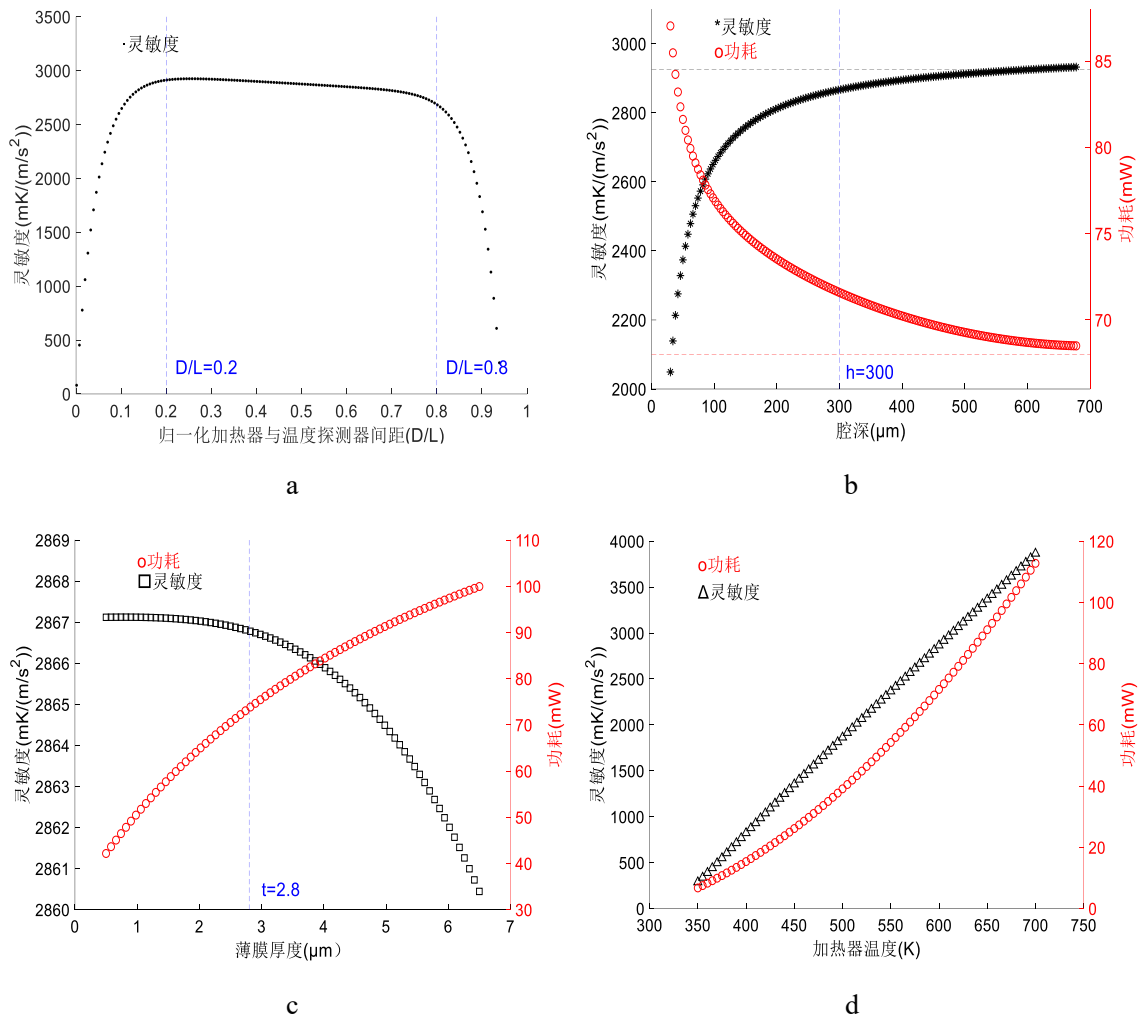
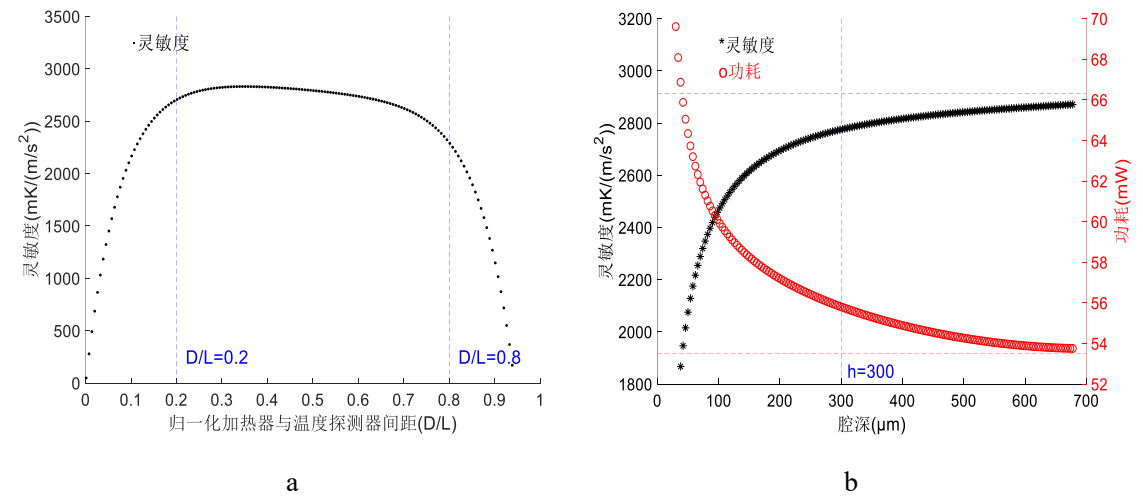


图 43. a-d 以五氟乙烷为工作介质

8、以三氟一氯甲烷为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 44.a-d:



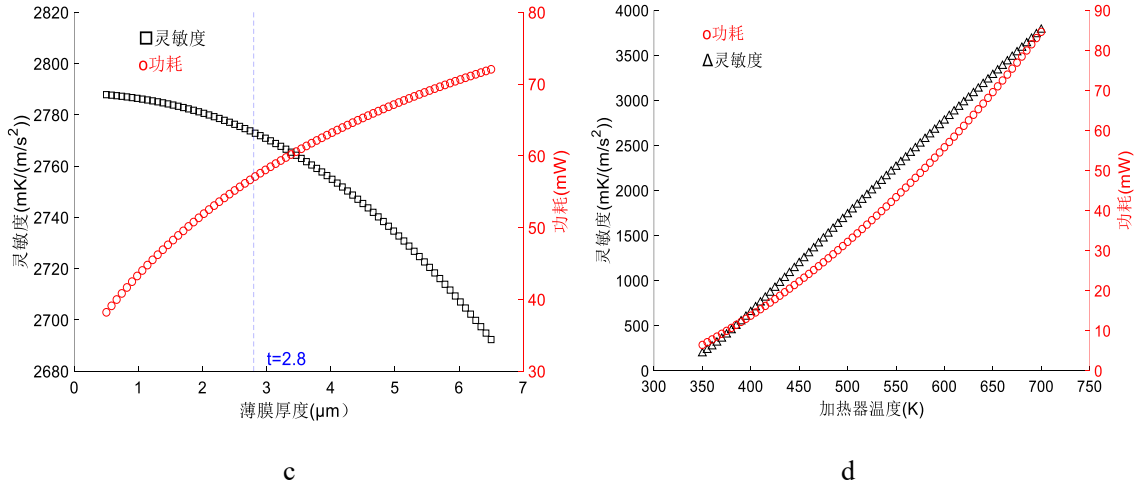


图 44. a-d 以三氟一氯甲烷为工作介质

9、以 2-甲基丙烯为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 45.a-d:

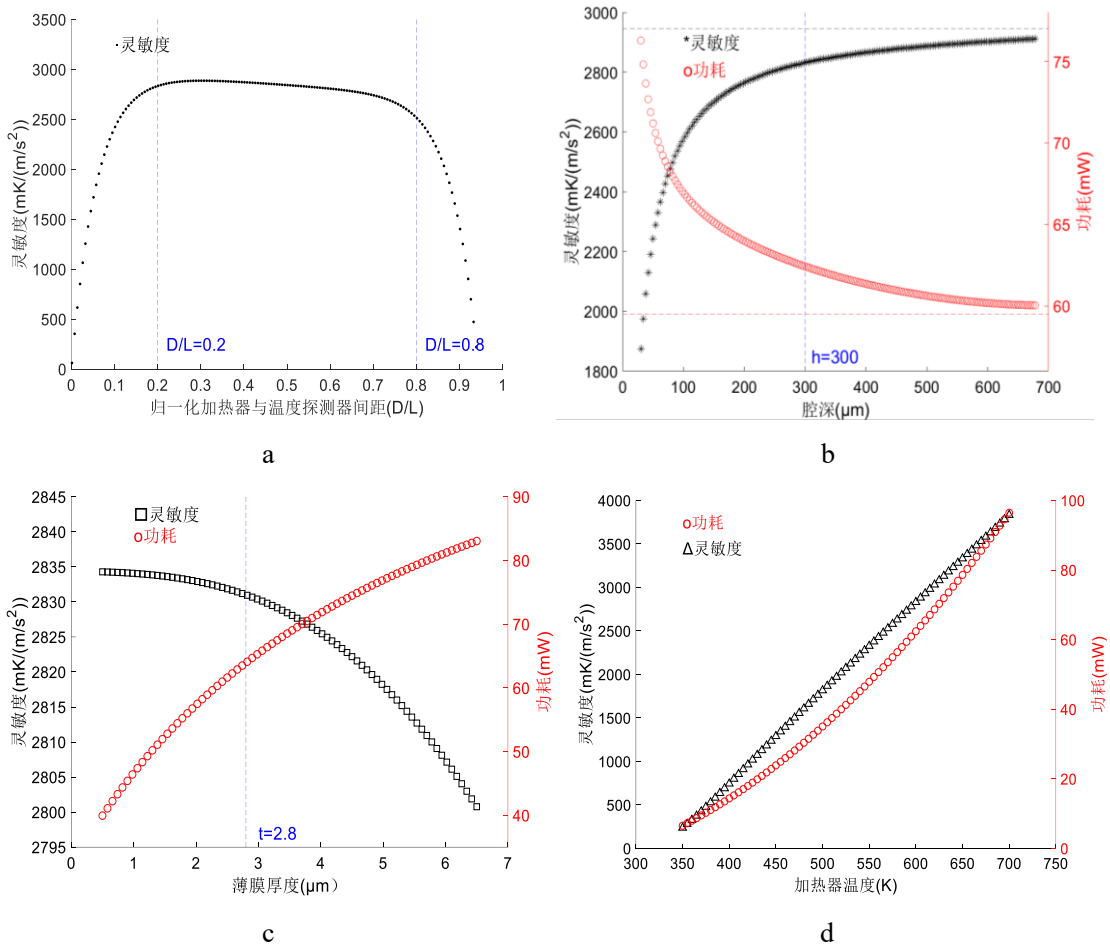


图 45. a-d 以 2-甲基丙烯为工作介质

10、以六氟化硫为工作介质

参数对性能影响的计算结果如图 46.a-d:

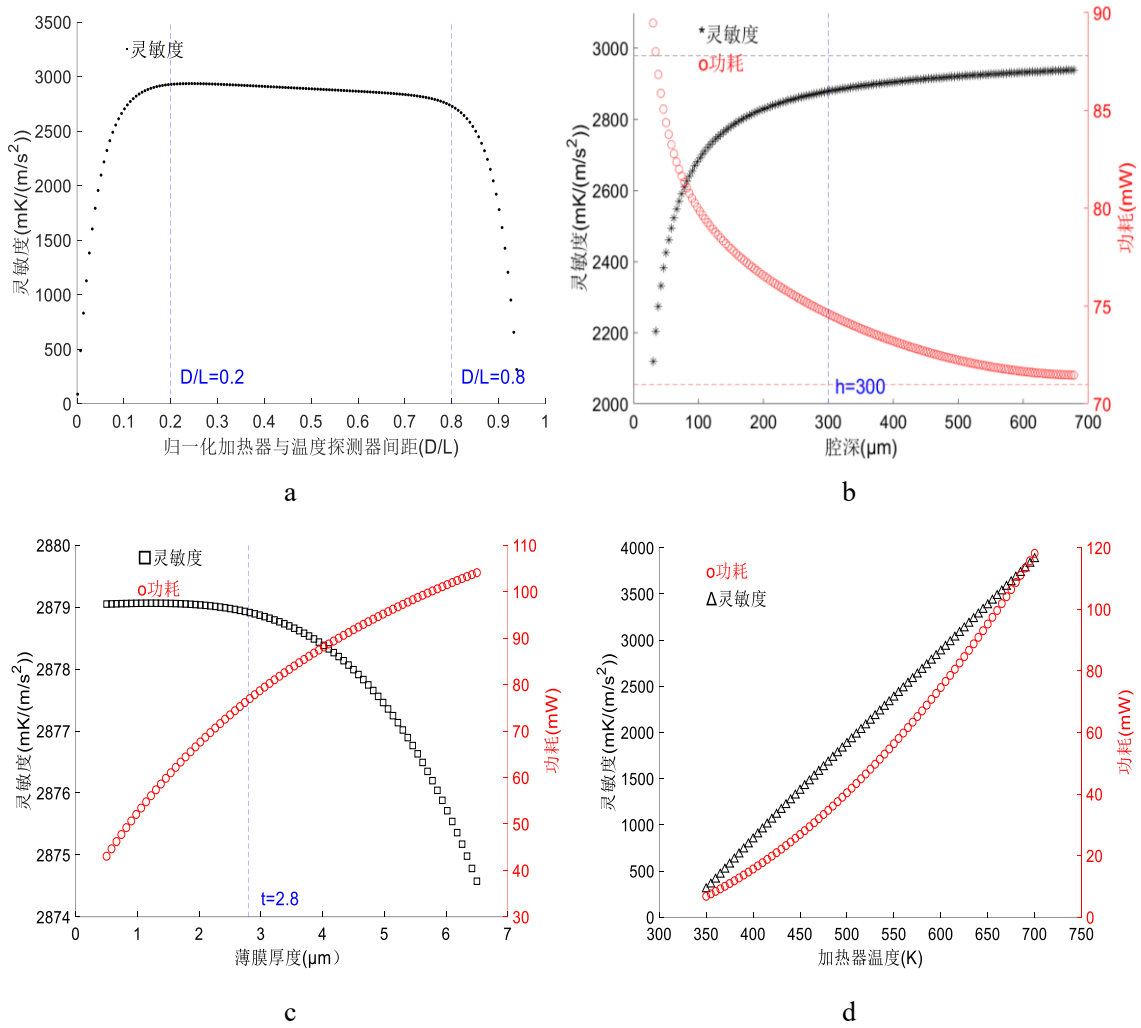
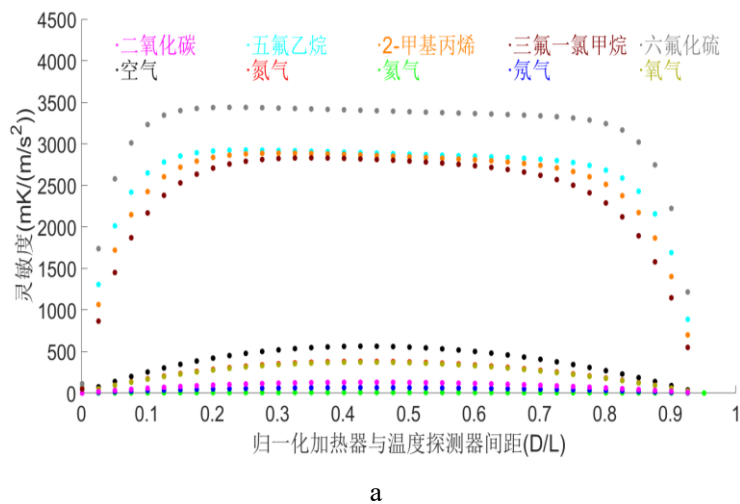
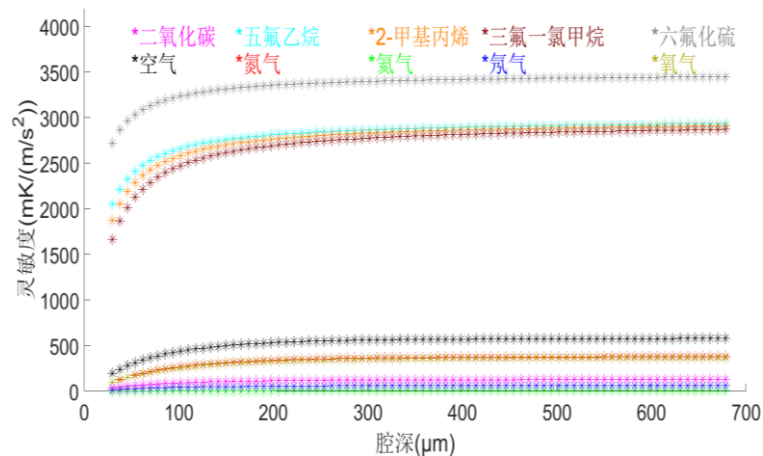


图 46. a-d 以六氟化硫为工作介质

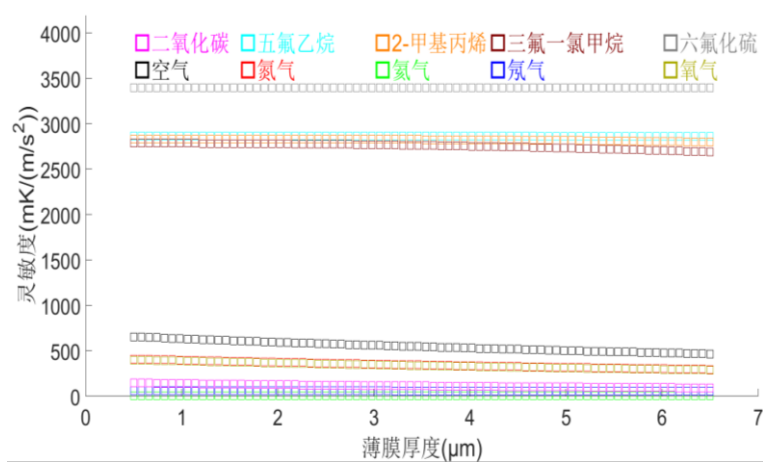
将上述所得结果进行比较（图 47.a-d），可以发现当器件使用不同的流体作为工作介质时，4 个参数对器件灵敏度影响的变化趋势基本相同，且工作介质使用六氟化硫时，器件能够得到最大的灵敏度，而使用氦气时，器件的灵敏度则最小。



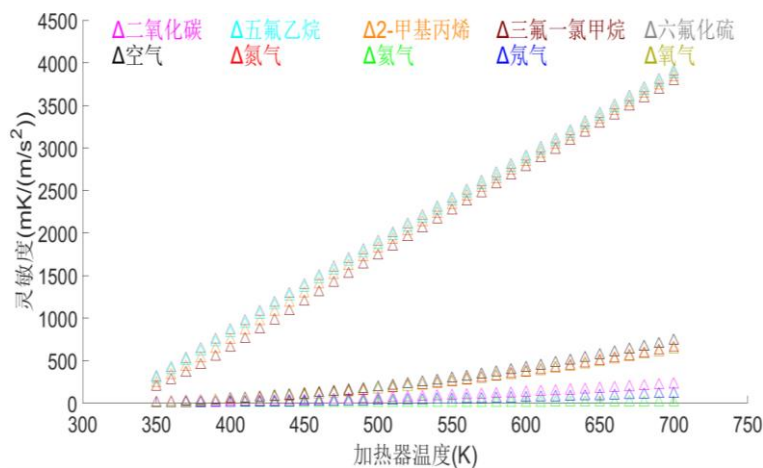
a



b



c



d

图 47.a-d 不同流体工作介质条件下设计参数对灵敏度的影响

此外,通过对比分析各流体条件下的不同结果可以发现,当改变归一化加热器与温度探测器间距 (D/L) 的值时,对于所有流体均存在一个最佳值或最佳范围,使微热加速度计的灵敏度达到最优,即温度探测器与加热器之间存在一个最佳间距使器件产生最大输出。对于空气、氦气等前面 6 种流体,灵敏度的最优值产生在

$D/L=0.425$ 处，而对于五氟乙烷等后面 4 种流体，在 $D/L=0.2$ 至 $D/L=0.75$ 的范围内，灵敏度的值达到最优且随 D/L 的值变化不大，因此在选取器件加热器与温度探测器间距的最佳设计值时，可取 $D/L=0.425$ ，即间距 $D=340\text{ }\mu\text{m}$ 。

对于腔深，可以发现在不同流体的条件下，当腔深的值增大时，器件灵敏度的值均随之增大，而功耗的值则均随之减小，出现该现象的原因可能是对于越深的空腔，器件的加热器通过底部空腔的热量散失越小。但同时也可以发现，当腔深的值增大到 $300\text{ }\mu\text{m}$ 至 $400\text{ }\mu\text{m}$ 范围时，灵敏度和功耗的变化均几乎达到饱和，超过这一范围后再增大腔深，两者的增值幅度较小。此外，过深的空腔还会导致制造工艺上的问题，如利用湿法蚀刻时需要更大的蚀刻窗口，而干法蚀刻则会出现严重的过蚀刻问题。因此，超过 $300\text{ }\mu\text{m}$ 后再增大腔深，所带来的器件性能上的收益已低于随之带来的风险的增长。所以在选取腔深的最佳设计值时，以灵敏度的饱和点为标准，选取 $h=300\text{ }\mu\text{m}$ 。

对于薄膜厚度，当工作介质所用流体为空气、氦气等前面 6 种流体时，可以发现灵敏度的值随着薄膜厚度的减小而增大，而功耗则随着薄膜厚度的减小而减小，即更薄的薄膜厚度设计可以使器件同时获得更高的灵敏度和更低的功耗。但对于五氟乙烷等后面 4 种流体，虽然器件的功耗仍随着薄膜厚度的减小而减小，但灵敏度的增大却在薄膜厚度减小到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 至 $3\text{ }\mu\text{m}$ 范围时达到饱和，几乎不再随之变化。此外，薄膜厚度还受到制造工艺和机械强度的限制，过薄的薄膜将增大器件制造时的风险。因此，在综合考虑下，选取薄膜厚度的最佳设计值 $t=2.8\text{ }\mu\text{m}$ ，此时既能得到较高灵敏度及较低功耗的同时，也能够避免过度增大制造工艺的难度。

对于加热器温度，可以看到无论是哪种流体，器件的灵敏度和功耗均随加热器温度的增大而增大，也即若要得到更高的灵敏度，势必也会带来更高的功耗。因此，在实际情况中，应该根据对灵敏度和功耗的不同需求来权衡决定加热器的温度。在本文中，选取加热器温度为 $T_h=650\text{ K}$ 。

最终，得到一组器件的最优关键设计参数如表 2：

表 2 优化的微热加速度计设计参数

加热器与温度探测器间距 (μm)	腔深 (μm)	薄膜厚度 (μm)	加热器温度 (K)
360	300	3	650

（二）微热加速度计流体工作介质分析及优化

为了描述相同条件下，不同流体工作介质与器件灵敏度的关系，本文引入瑞利数的概念。流体的瑞利数是描述自由对流强度的无量纲数，瑞利数的值越大，流体的自然对流越强，定义微热加速度计上腔和下腔内流体的瑞利数分别为 Ra^H 和 Ra^h ：

$$\begin{cases} Ra^H = \frac{\rho C_p \beta a \frac{(T_h - T_a)}{2} (H^3)}{k_f \nu} \\ Ra^h = \frac{\rho C_p \beta a \frac{(T_h - T_a)}{2} (h^3)}{k_f \nu} \end{cases} \quad (19)$$

图 48 为当输入加速度 $a=5 \text{ m/s}^2$ 时，器件使用 10 种不同流体时得到的输出温度差。可以看出，当流体的瑞利数越大时，器件产生的输出温度差越大，也即器件的灵敏度越高。因此，可以通过使用优化的流体工作介质来得到更高灵敏度的器件。

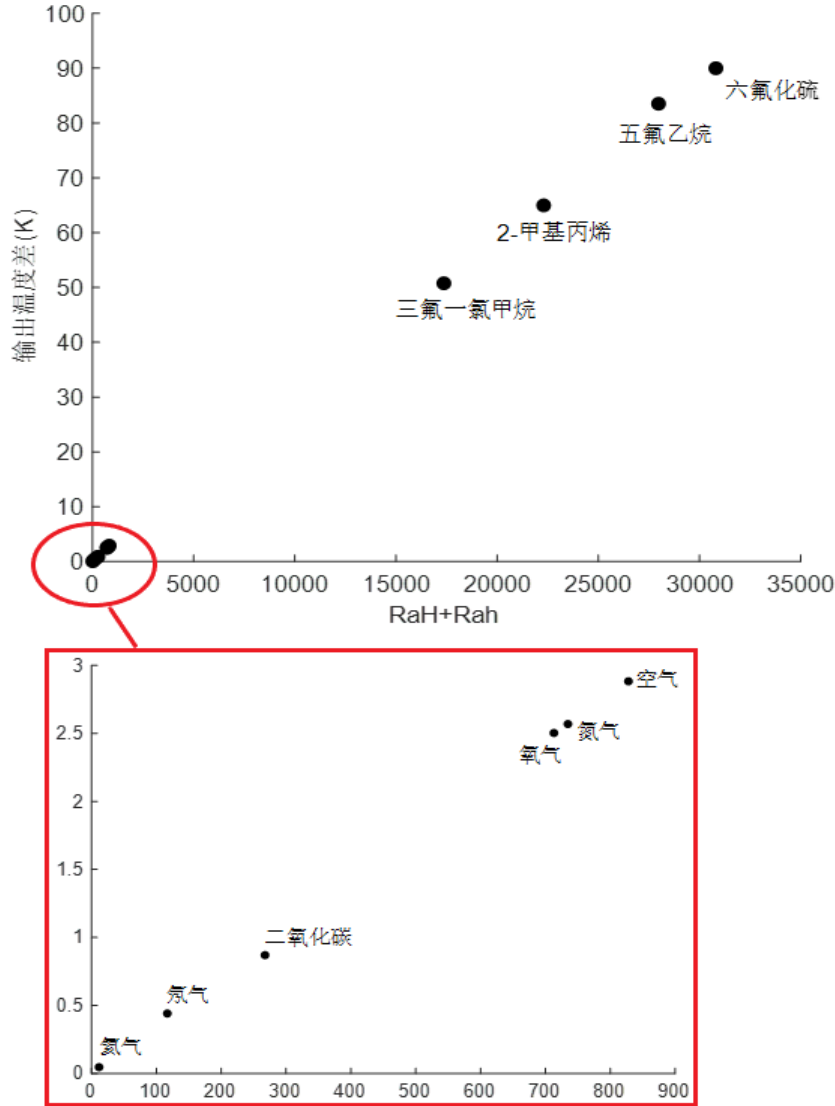


图 48. 流体的瑞利数对输出温度差的影响

在使用表 2 中的设计参数，以及以空气作为工作介质的条件下，微热加速度计相对功耗的归一化灵敏度的理论计算值为 14.57 mK/g/mW，相较于表 3 中其他研究者的工作所得的灵敏度均有所提高。

表 3 不同研究工作中器件灵敏度的对比

归一化灵敏度 (mK/g/mW)			
Mezghani 等人 ^[13]	Guha 等人 ^[7]	Mukherjee 等人 ^[26]	本论文
9.48	8.32	12.16	14.57

五、 微热加速度计输出电压信号

本文中的微热加速度计的主要工作原理是利用对称分布于微加热器两侧的温度探测器检测流体的不均匀温度分布，并产生输出温度差，从而检测输入加速度。而要得到输出温度差的值，则需要通过电路将其转换为电压差。此外，温度探测器所用材料为金属，而金属的电阻随其自身温度的变化而变化，且变化程度可以用电阻温度系数 α_{TCR} 来描述。因此，当两个温度探测器检测的温度不同时，两者的电阻值也会产生差值，且该差值与 α_{TCR} 有关。分别用 R_u 、 R_d 表示两个温度探测器的电阻，在恒压模式下，通过图 49 中的惠斯通电桥读出电路则可以将 R_u 和 R_d 间的电阻差转换为输出电压 V_o 。

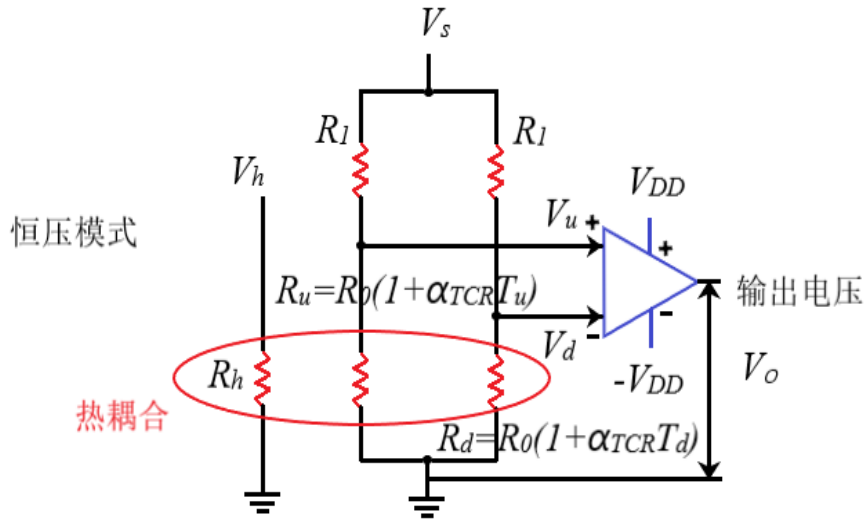


图 49. 惠斯通电桥读出电路

R_u 和 R_d 的阻值可分别表示为式 (20)、(21)：

$$R_u = R_o(1 + \alpha_{TCR}T_u) \quad (20)$$

$$R_d = R_o(1 + \alpha_{TCR}T_d) \quad (21)$$

电压差 $V_u - V_d$ 可表达为式 (22):

$$V_u - V_d = \frac{R_1 \alpha_{TCR} (T_u - T_d)}{R_0^2 (1 + \alpha_{TCR} T_u) (1 + \alpha_{TCR} T_d) + R_0 R_1 [(2 + \alpha_{TCR} (T_u + T_d))] + R_1^2} \quad (22)$$

电压差 $V_u - V_d$ 经过一个放大系数为 λ 的放大器后, 得到输出电压 V_o :

$$V_o = \lambda(V_u - V_d) \quad (23)$$

通过上述等式, 可以将温度探测器的输出温度差 $T_u - T_d$ 与输出电压 V_o 联系起来, 从而用电压信号表征微热加速度计的输出。

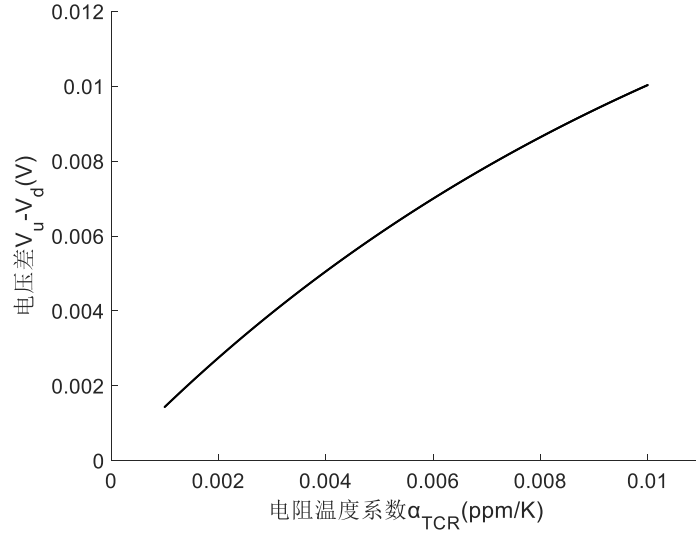


图 50. 电阻温度系数对读出电压差的影响

由式 (22) 可知, $V_u - V_d$ 可表达为 α_{TCR} 的函数, 二者的关系如图 50。在其他条件相同的情况下, 当金属温度探测器的 α_{TCR} 的值越大时, 得到的电压差越大。因此, 可以选择 α_{TCR} 的值更大的金属材料制作温度探测器, 从而得到输出电压信号更明显的微热加速度计。

结论

本文首先对微热加速度计的工作原理、应用领域、商业价值和国内外研究现状进行了调研和分析，并对研究人员目前已进行的研究工作中存在的不足进行了分析和总结，提出了理论上的解决方案，在此基础上确立了本文的研究工作内容，包括一维理论模型的构建、CFD 仿真模型的构建、对微热加速度计设计参数与性能的分析 and 优化、对微热加速度计输出电压信号的分析 and 优化。本文还在研究人员先前的工作基础上论证了上述研究工作的可行性。最终，通过完成以上工作，本文的目的是实现一个高灵敏度的微热加速度计的优化设计。

本文中通过理论推导，构建了用于对微热加速度计参数与性能之间的关系进行分析的一维常微分方程模型，并利用 CFD 软件 ANSYS FLUENT 构建仿真模型，验证了一维模型的有效性。然后，本文首先利用一维模型对微热加速度计的腔深、薄膜厚度、加热器温度、加热器与温度探测器间距 4 个设计参数对器件灵敏度和功耗的影响进行了探究，并在综合分析所得结果的基础上得出了能提高器件性能的优化参数。此外，本文还分析了不同流体工作介质对器件灵敏度的影响。最后，本文通过对电阻温度系数的分析，提出了能提高微热加速度计输出电压信号的方法。

总而言之，本文通过一系列工作，成功地构建了一个高效的一维理论模型，并通过对微热加速度计的关键设计参数进行分析和优化，最终得到一个归一化灵敏度为 14.57 mK/g/mW 的高灵敏度微热加速度计。因此，所构建的一维理论模型将为微热加速度计的性能优化提供设计指导准则。

然而，本文只关注了微热加速度计的关键设计参数对其灵敏度和功耗两方面性能的影响，而缺乏关于其他性能如频率响应、非线性度等的研究工作。此外，本文从理论建模的角度出发研究如何通过优化器件结构提升性能，但所建立的一维模型只适用于单轴微热加速度计，而由于测量方向的单一性，单轴微热加速度计在工业中的应用受到较大的限制。因此，在未来的研究工作中，应致力于进一步优化所提出的理论模型，使其适用于研究器件更多方面的性能，以及适用于具有更复杂结构的多轴微热加速度计。

参考文献

- [1] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K J P o t I. Micromachined inertial sensors [J]. 1998, 86(8): 1640-59.
- [2] Luo X, Li Z, Guo Z, et al. Study on linearity of a micromachined convective accelerometer [J]. 2003, 65(1-2): 87-101.
- [3] Mukherjee R, Basu J, Mandal P, et al. A review of micromachined thermal accelerometers [J]. 2017, 27(12): 123002.
- [4] Leung A M, Jones J, Czyzewska E, et al. Micromachined accelerometer with no proof mass; proceedings of the International Electron Devices Meeting IEDM Technical Digest, F, 1997 [C]. IEEE.
- [5] 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.
- [6] Park U, Kim D, Kim J, et al. Development of a complete dual-axis micromachined convective accelerometer with high sensitivity; proceedings of the SENSORS, 2008 IEEE, F, 2008 [C]. IEEE.
- [7] Mukherjee R, Guha P, Mandal P J M T. Sensitivity improvement using optimized heater design for dual axis thermal accelerometers [J]. 2016, 22: 2475-85.
- [8] Jayanetti V, Jayathilaka W, Talawatta K, et al. Design and simulation of a MEMS based dual axis capacitive accelerometer; proceedings of the 2015 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon), F, 2015 [C]. IEEE.
- [9] Tsang S-H, Ma A H, Karim K S, et al. Monolithically fabricated polymermems 3-axis thermal accelerometers designed for automated wirebonder assembly; proceedings of the 2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, F, 2008 [C]. IEEE.
- [10] Qu H, Fang D, Xie H. A single-crystal silicon 3-axis CMOS-MEMS accelerometer; proceedings of the SENSORS, 2004 IEEE, F, 2004 [C]. IEEE.
- [11] Abdellatif S, Mezghani B, Mailly F, et al. New high efficiency heater design for a 3-axis CMOS MEMS convective accelerometer; proceedings of the 2020 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP), F, 2020 [C]. IEEE.
- [12] Mezghani B, Brahim A, Tounsi F, et al. From 2D to 3D FEM simulations of a CMOS MEMS convective accelerometer; proceedings of the ICM 2011 proceeding, F, 2011 [C]. IEEE.
- [13] Mezghani B, Tounsi F, Rekik A A, et al. Sensitivity and power modeling of CMOS MEMS single axis convective accelerometers [J]. 2013, 44(12): 1092-8.

- [14] Nguyen H B, Mailly F, Latorre L, et al. A new monolithic 3-axis thermal convective accelerometer: principle, design, fabrication and characterization [J]. 2015, 21: 1867-77.
- [15] Leman O, Chaehoi A, Mailly F, et al. Modeling and system-level simulation of a CMOS convective accelerometer [J]. 2007, 51(11-12): 1609-17.
- [16] Chaehoi A, Mailly F, Latorre L, et al. Experimental and finite-element study of convective accelerometer on CMOS [J]. 2006, 132(1): 78-84.
- [17] Thu P S, Kalugin V V, Kochurina E S, et al. Structural design and modeling of MEMS-based single axis capacitive accelerometer; proceedings of the 2024 Conference of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElCon), F, 2024 [C]. IEEE.
- [18] Rekik A, Azaïs F, Dumas N, et al. Modeling the influence of etching defects on the sensitivity of MEMS convective accelerometers; proceedings of the 2010 IEEE 16th International Mixed-Signals, Sensors and Systems Test Workshop (IMS3TW), F, 2010 [C]. IEEE.
- [19] Rekik A, Azaïs F, Dumas N, et al. A study of package effects on the behavior of MEMS convective accelerometers; proceedings of the 2010 Symposium on Design Test Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), F, 2010 [C]. IEEE.
- [20] Mezghani B, Tounsi F, Masmoudi M, et al. Efficiency modeling of a CMOS MEMS convective accelerometer; proceedings of the 7th International Conference on Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era, F, 2012 [C]. IEEE.
- [21] Mezghani B, Tounsi F, Masmoudi M. Sensitivity modeling of dual-axis CMOS MEMS convective accelerometers using FEM and spherical model; proceedings of the 2013 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), F, 2013 [C]. IEEE.
- [22] Mailly F, Martinez A, Giani A, et al. Design of a micromachined thermal accelerometer: thermal simulation and experimental results [J]. 2003, 34(4): 275-80.
- [23] Mailly F, Giani A, Martinez A, et al. Micromachined thermal accelerometer [J]. 2003, 103(3): 359-63.
- [24] Luo X, Li Z, Guo Z, et al. Thermal optimization on micromachined convective accelerometer [J]. 2002, 38(7): 705-12.
- [25] Holman J P. Heat transfer [Z]. McGraw Hill Higher Education. 2010
- [26] Mukherjee R, Basu J, Guha P K. High sensitivity and power efficient heater structure for bulk micromachined thermal accelerometer; proceedings of the 2021 25th International Symposium on VLSI Design and Test (VDAT), F, 2021 [C]. IEEE.

附录 A

附A1 计算微热加速度计灵敏度的MATLAB代码

```
function S=Sensitivity(p1,Cp1,Kf1,v1,H,h,L,W,D,Th,Ta,a,t)
%% 微热加速度计各设计参数代表量
% H:密封罩高度(μm), h:腔深(μm), L:空腔半长(μm), W:加热器半宽(μm)
% D:加热器与温度探测器间距(μm)
% Th:加热器温度(K), Ta:环境温度(K), a:加速度(m/s^2), t:薄膜厚度(μm)

%% 流体工作介质各参数数值
p=p1; %密度(kg/m^3)
Cp=Cp1; %比热容(J/kg/K)
Kf=Kf1; %流体导热系数(W/(m*K))
v=v1; %流体运动粘度(m^2/s)
b=0.00367; %流体热膨胀系数(/K)

%% 灵敏度
Th1=Th-Ta; %过热温度(K)
Ks=2.3; %薄膜导热系数(W/(m*K))
A=H+2*(Ks/Kf)*t+h;
B=-(1/320)*(p*Cp*b*a*(Th-Ta)*(H^3+h^3)/(2*Kf*v));
C=-2*(1/H+1/h);
r1=(-B+sqrt(B^2-4*A*C))/(2*A);
r2=(-B-sqrt(B^2-4*A*C))/(2*A);
Sensitivity=((Th1/(exp(r2*W)-exp(r2*L+r1*(W-L)))*(exp(r2*(D+W))-
exp(r2*L+r1*(D+W-L))))-(Th1/(exp(-r2*W)-exp(-r2*L-r1*(W-L)))*(exp(r2*(-D-W))-
exp(-r2*L+r1*(-D-W+L)))/a; %灵敏度
end
```

附A2 计算微热加速度计功耗的MATLAB代码

```
function P=Power(p1,Cp1,Kf1,v1,H,h,L,W,Th,Ta,a,t)

%% 微热加速度计各设计参数代表量

% H:密封罩高度(μm), h:腔深(μm), L:空腔半长(μm), W:加热器半宽(μm)
% Th:加热器温度(K), Ta:环境温度(K), a:加速度(m/s^2), t:薄膜厚度(μm)


%% 流体工作介质各参数数值

p=p1; %密度(kg/m^3)
Cp=Cp1; %比热容(J/kg/K)
Kf=Kf1; %流体导热系数(W/(m*K))
v=v1; %流体运动粘度(m^2/s)
b=0.00367; %流体热膨胀系数(/K)

%% 功耗

Ks=2.3; %薄膜导热系数(W/(m*K))
A=H+2*(Ks/Kf)*t+h;
B=(-(1/320)*(p*Cp*b*a*(Th-Ta)*(H^3+h^3)/(2*Kf*v)));
C=-2*(1/H+1/h);
r1=(-B+sqrt(B.^2-4*A*C))/(2*A);
r2=(-B-sqrt(B.^2-4*A*C))/(2*A);
Qup=Ks*(Th-Ta)/H*2*W*H_length;
Qdown=Kf*(Th-Ta)/h*2*W*H_length;
T_right=(Th-Ta).*(r2.*exp(r2.*W)-r1.*exp(r2.*L+r1.*(W-L)))/(exp(r2.*W)-exp(r2.*L+r1.*(W-L)));
T_left=(Th-Ta).*(r2.*exp(-r2.*W)-r1.*exp(-r2.*L+r1.*(-W+L)))/(exp(-r2.*W)-exp(-r2.*L-r1.*(W-L)));
Qright=-T_right*Ks*t*H_length;
Qleft=T_left*Ks*t*H_length;
P=Qup+Qdown+Qright+Qleft; %功耗

end
```

致谢

在这里，首先要感谢我的指导老师罗老师，在完成研究工作和撰写论文的过程中，罗老师投入了很多心血和精力，对我悉心指点，对于遇到的很多困难和疑惑，罗老师耐心解答，给予了许多宝贵的意见，帮助我解决问题。同时，还要感谢中山大学在本科四年过程中为我提供的学习平台和资源，感谢微电子科学与技术学院的所有老师对我的教导，感谢同学们给予我的帮助，感谢四年一起度过的时光。

此外，在这里还要感谢我的家人在我整个求学过程中给予我的支持和陪伴。