

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.01.01

微流量测量方法及其技术的发展

胡纯, 樊尚春, 郑德智

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 归纳了近五年来基于 MEMS 技术的微流量传感器结构及性能参数。根据国际上热门的研究方法推断微流量测量技术可能的发展方向与研究趋势, 即集成两种或两种以上的测量方法, 实现优势互补, 提高测量精度或扩大量程比。最后基于现有的技术基础, 提出了融合科氏效应与差压效应的微流量测量方法, 阐述了传感器的工作原理与理论基础, 并对其可行性进行了分析与论证。

关键词: 微流量传感器; MEMS; 科氏效应; 差压效应; 数据融合

中图分类号: TB937; TP212.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)01-0001-08

The Approaches and Development of the Micro Flow Measurement

HU Chun, FAN Shangchun, ZHENG Dezhi

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: This paper summarizes the structures and performance parameters of various micro flow sensors based on MEMS technology. The possible development direction of micro flow measurement technique is inferred according to international popular research, which is the combination of two or more approaches with complementary advantages, aiming to improve the measurement accuracy and expand the range ratio. Finally, the integrated method of Coriolis effect and pressure loss effect is proposed based on existing technology. The operating principle and theoretical basis of the sensor are described to verify the feasibility of the approach.

Key words: micro flow sensor; MEMS; Coriolis effect; pressure loss effect; data fusion

0 引言

随着生物工程、精细化工、半导体制造、生物医学、微型飞行器等行业的发展, 微流量的测量与控制需求越来越迫切, 显然, 传统的流量传感器由于制造工艺及材质的限制而无法完成微流量的精确测量。近年来, 随着物理、机械、材料工程、医学等相关科学领域对 MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) 的积极深入研究, 促进了 MEMS 技术的快速发展并获得广泛的应用。MEMS 技术应用于传感器制造领域中, 使得传感器向着低功耗、小体积、智能化、高可靠性方向发展, 引起了传感器制造技术的变革。MEMS 流量传

感器由于其管径小、可测量更为微小的流量且集成化程度高^[1], 正成为微流量测量领域的研究热点。

微流量测量方法各异。有的直接测量流体质量流量, 如热式流量传感器、科氏流量传感器; 有的敏感体积流量, 如差压式流量传感器。本文对近五年来国内外微流量传感器的新颖结构和性能参数进行了归纳总结, 推断出可能的发展方向与研究趋势, 最后提出了融合科氏效应与差压效应的流量测量方法, 并对其可行性进行了分析与论证。

1 国外微流量传感器研究现状

1.1 热式流量计

M. Piotto 等^[2]设计的风速计在圆柱周围开孔, 气流从某一方向通过这些孔流入传感器, 再被分为两股, 这两股气体流量大小与流量方向呈现正弦关系, 通过双通道热式流量计敏感两个流量, 减小尺寸, 简化装配过程。传感器集成在单个芯片上, 可同时测流量和方向。结果显示, 传感器能测量 0.4 ~ 7.9 m/s 的流量。其结构如图 1 所示, 图 2 为传感器测量曲线, 由图 2 可得, 最大的角度误差是 $\pm 5^\circ$, 速度误差是 8%。

收稿日期: 2014-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61121003); 教育部创新团队资助项目(IRT1203); 教育部新世纪人才资助项目

作者简介: 胡纯(1987-), 男, 博士研究生, 研究方向为先进传感与智能仪器; 樊尚春(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为传感器技术及应用、MEMS; 郑德智(1978-), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为流量传感器及信号检测与处理。

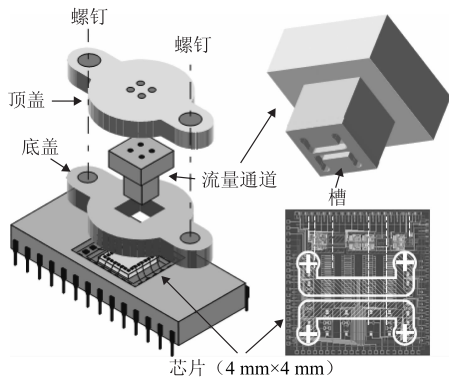


图1 传感器爆破图(左)和敏感元件放大图(右)

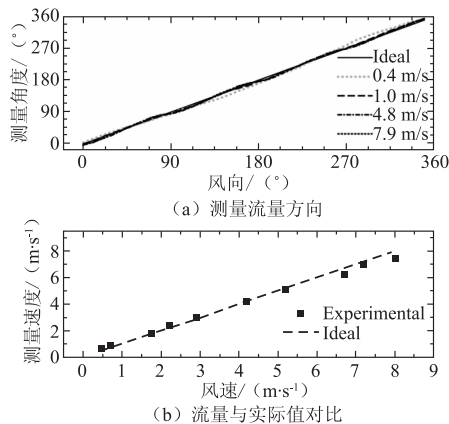


图2 传感器测量曲线

Konstantinos Kontakis 等^[3]提出一种将微管道加工在PCB板上的热式流量传感器。微通道壁由在Pt传感元件列表面的SU-8构成，SU-8上表面的PMMA板(树脂玻璃)热粘接实现微通道的密封，由于该材料的导热率较低，传感元件具有优良的热隔离特性。水流量测量实验表明，传感器具有较高灵敏度和较宽的测量范围。结构如图3所示，其中，微管道宽500 μm，深100 μm，电阻长1500 μm。在恒流模式下，可测流量达到400 μL/min，最小可测流量为1 μL/min。

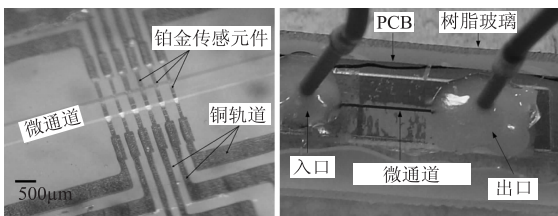


图3 传感器正面图(左)和传感器反面图(右)

F. Hedrich 等^[4]提出用于肺呼吸功能监测的微流量传感器，精度高，响应时间短(<1 ms)，功耗低(<10 mW)。此外，加热结构被添加到芯片上，以防止结露。传感器结构如图4所示。

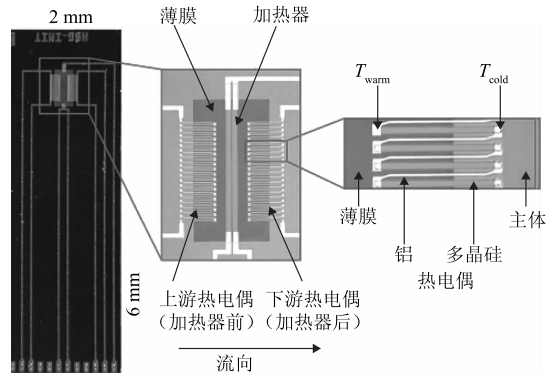


图4 传感器敏感结构实物图

R. J. Wiegerink 等^[5]使用表面通道技术加工出微管道，该微管道在一个硅晶片的表面上，具有半圆形横截面。利用这种技术设计的热式微流量传感器，将加热电阻和热电偶传感器集成在悬浮管道的顶部，能实现nL/min的流量分辨力。传感器结构如图5所示。

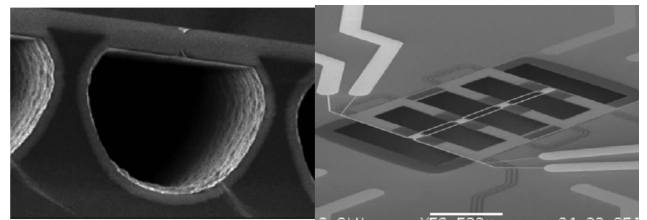


图5 传感器半圆形通道(左)和传感器结构(右)

1.2 差压式流量计

A. G. P. Kottapalli 等^[6]提出了用于测量流速和方向的微流量传感器，利用基于液晶聚合物(LCP)膜的压阻传感器敏感流体的压力，金薄膜压电阻沉积在LCP膜上。传感器灵敏度是3.695 mV/(m·s⁻¹)，测量范围是0.1~10 m/s，平均满量程误差为3.6%。传感器结构如图6所示。

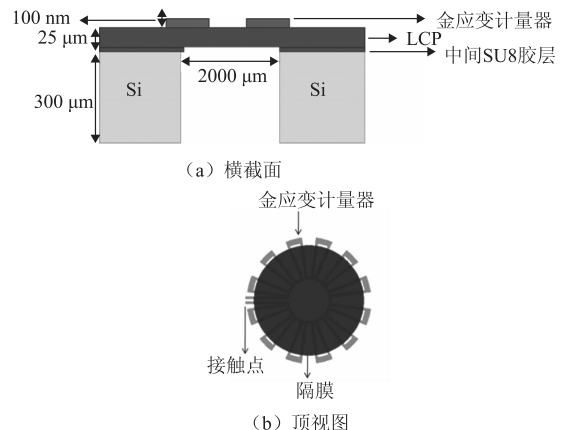


图6 传感器结构

1.3 科里奥利质量流量计

J. Haneveld 等^[7]利用表面通道技术加工出微管道,作为微型科氏质量流量传感器的流体通道。设计的传感器是单管矩形结构,利用洛伦兹力激励梳齿电容检测的方式测量微流量。传感器在最大 1 bar 的压损下,测量的流量范围为 0~1.2 g/h,测量误差为 1%。传感器结构如图 7 所示。通道的直径为 40 μm,传感器尺寸为 7.5 mm×15 mm。

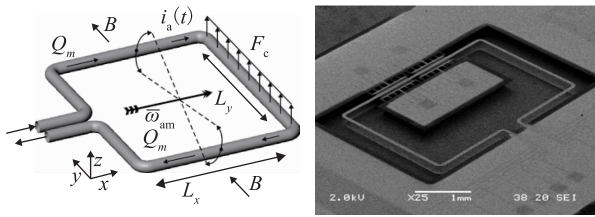


图 7 传感器工作原理图(左)和传感器实物图(右)

1.4 其他原理微流量传感器

D. Petrak 等^[8]描述了一种实验方法,该方法能够测定 mL/h 量级的液体流量。管道中牛顿液体层流的体积流量可以通过测量中心线速度和 Hagen Poiseuille 方程确定。微流量计的主要单元是激光二极管系统、双光纤阵列传感器和微通道。使用注射泵产生流量,测试传感器测量精度。这种牛顿液体的流量测量方法不需要校准,测量结果不受温度、压力和牛顿液体的性质的改变的影响。通过应用二维微通道流量的条纹模型确定粘度函数。流量计装置结构如图 8 所示。

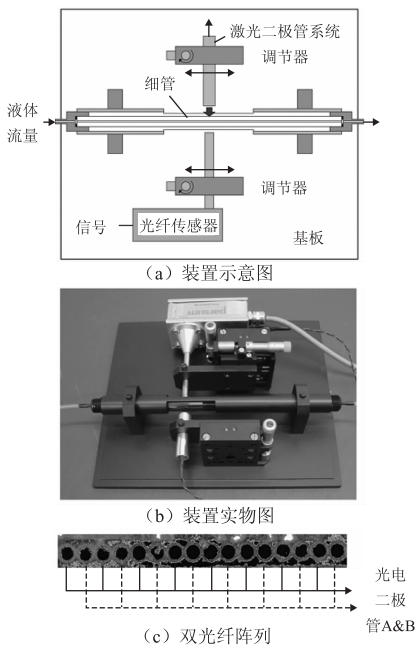


图 8 微流量计装置结构

Nicolas André 等^[9]展示了基于外平面的可移动悬臂微流量传感器,气流引起悬臂的挠度变化。接口电路是 CMOS 环形振荡器(RO),利用 SOI (Silicon-On-Insulator) 技术制作在同一芯片上,使得传感器尺寸小、功耗低、抗干扰性强。当气流从 0 m/s 变化到 120 m/s,微系统 RO 频率变化 10%,静态功耗为 1 μW 量级。图 9 为其结构。

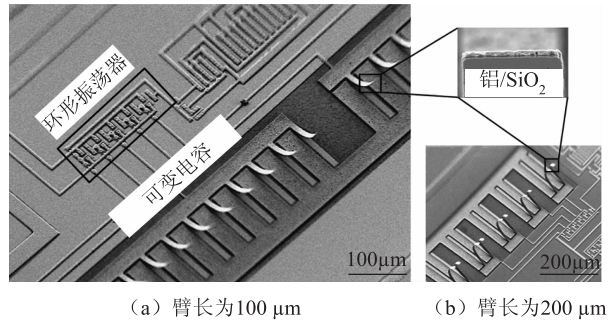


图 9 传感器结构图

2 国内微流量传感器研究现状

2.1 热式流量计

Peng Liu 等^[10]使用薄膜沉积处理和标准印刷电路技术,实现了一种新型的热膜式流量传感器。传感器电极和电子电路预先印刷在聚酰亚胺(PI)柔性基板上,即柔性印刷电路板(FPCB),敏感元件由温度系数大约为 2000×10⁻⁶/K 的铬/镍/铂制成,由磁控溅射技术或脉冲激光沉积(PLD)制作在 FPCB 上。该传感器可以与信号处理电路高密度地集成封装在一起而不需要额外衬垫,减少加工时间,降低了成本。对传感器的稳态和瞬态特性进行了测试,验证了该传感器的测量有效性。传感器结构如图 10 所示。

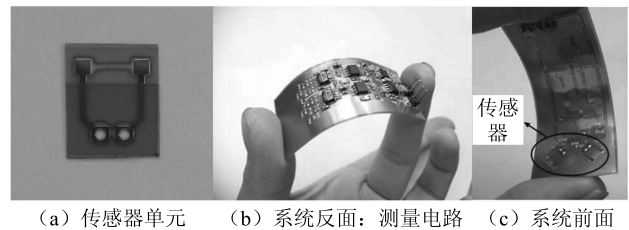


图 10 热膜式流量传感器

徐永青等^[11]研制的 MEMS 热膜式质量流量传感器由 Si 腔体、Si₃N₄ 薄膜、加热电阻及温度检测电阻组成。基体结构采用 Si,加热元件和敏感元件在薄膜上,薄膜下是 Si 腔体,起到减小热容和绝热的作用,从而提高传感器的响应时间和灵敏度。测试表明,该器件的测量量程达到 0.5~200 m³/h,精度 1.5 级,

响应时间 20 ms, 量程比 1:400。传感器结构如图 11 所示。



图 11 MEMS 膜式质量流量传感器结构

侍艳华等^[12]设计了一种基于 MEMS 技术的热膜式微流量传感器, 传感器结构如图 12 所示。两个 Pt 热敏薄膜电阻构成 Sandwich 结构。当热敏电阻间距为 200 μm 、工作温度为 150 $^{\circ}\text{C}$ 、气体流量在 -5 ~ 5 mL/min 时, 传感器输出信号与气体流量成线性关系, 灵敏度约为 299 mV/(mL · min⁻¹)。微流量传感器气体流量理论检测下限约为 1.7 $\mu\text{L}/\text{min}$, 在气体流量为 6 $\mu\text{L}/\text{min}$ 时, 响应和恢复时间(90%)分别为 16 ms 和 34 ms。

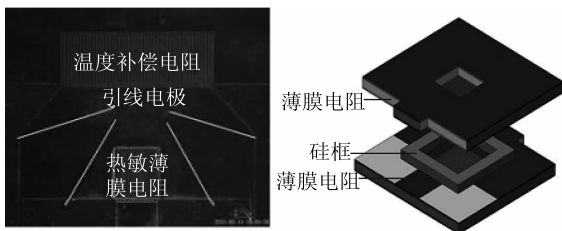


图 12 薄膜电阻芯片(左)和传感器结构(右)

Yuan-Qing Wu 等^[13]使用双加热器三检测器结构, 加宽了管道中的温度场宽度, 扩大传感器测量范围, 提高了传感器的响应速度。图 13 所示为传感器结构示意图和实物图, 图中每根加热器和温度传感器的线宽为 20 nm。

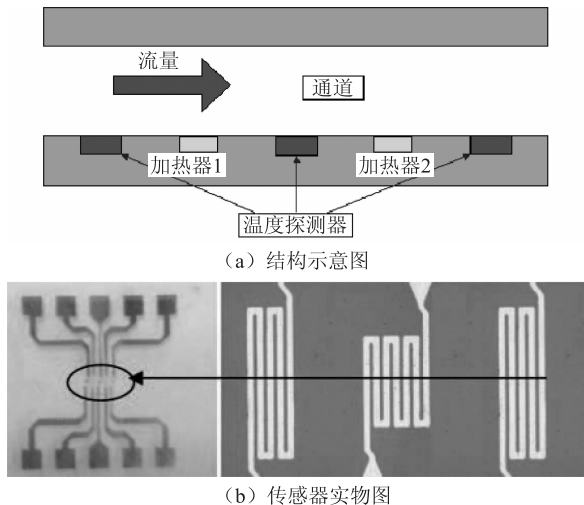


图 13 双结构传感器

2.2 差压式流量计

光玲玲等^[14]提出了一种基于 Lamb 波的压差式微流量传感系统。该系统由两个 Lamb 波薄膜组成的腔体和一个微通道组成。微通道长 20 mm, 宽 1 mm, 高 50 μm , 连接两个腔体。由于液体压力对 Lamb 波薄膜的挤压, 使得薄膜的谐振频率变化, 该变化反映了液体压力的大小, 由于采用上下游差动测压模式, 使得温度的影响得以消除, 流量测试实验的结果显示, 上下游 Lamb 波薄膜的谐振频率之差与微流量呈线性关系, 可测量的最小流量为 0.627 $\mu\text{L}/\text{s}$ 。传感器结构示意图如图 14 所示。

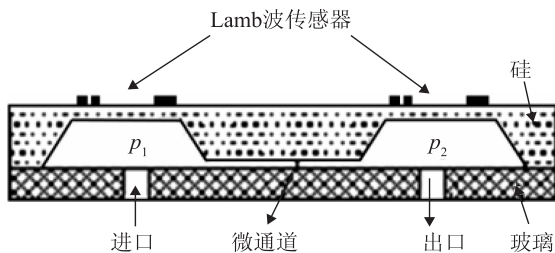


图 14 传感器结构示意图

杨晓亚等^[15]开发了一种基于压差原理的微流量传感器。传感器使用初始厚度为 400 μm 的双面抛光 N 型硅片进行加工, 主要包括硅杯结构、微通道以及压阻条的设计。压阻条加工在硅杯顶部的薄膜上, 形成压力检测腔, 压阻条通过键合引线与基底的 PCB 板连接, 微通道前后两端的压力检测腔的压力差则反映了微流量的大小。当流体流过时, 由于流体的挤压, 导致薄膜顶部的压阻条阻值发生变化, 通过电桥的方式读取压力信号。利用有机玻璃进行保护封装, 封装后的传感器直径为 26 mm, 厚度 11 mm, 如图 15 所示。传感器实流标定实验表明, 响应时间小于 4 ms, 流量检测误差为 0.65% (CV)。

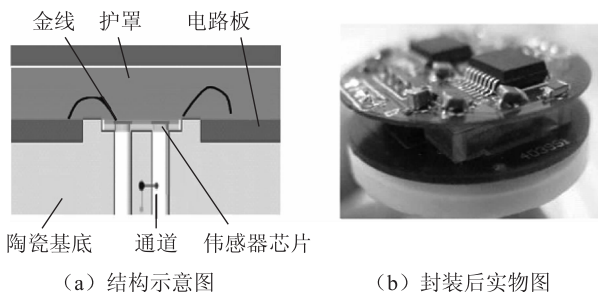


图 15 基于压差原理的微传感器

Chen Liguó 等^[16]设计的差压式微流量传感器芯片

由两个压阻传感器和微机械加工通道组成。设计的传感器包括两个方形硅膜，厚 $50\ \mu\text{m}$ × 宽 $2000\ \mu\text{m}$ × 长 $2000\ \mu\text{m}$ ，并且通道被设计为长 $2005\ \mu\text{m}$ ，宽 $1000\ \mu\text{m}$ ，深 $30\ \mu\text{m}$ 。传感器芯片的整体尺寸为 $4.5\ \text{mm} \times 9.0\ \text{mm} \times 0.9\ \text{mm}$ 。测量系统和该传感器芯片的示意图如图 16。校准传感器的灵敏度为 $100\ \text{mV}/(\mu\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$ 。基于校准曲线与拟合曲线之间的偏差，得到流量传感器的非线性特性为 0.51% 。

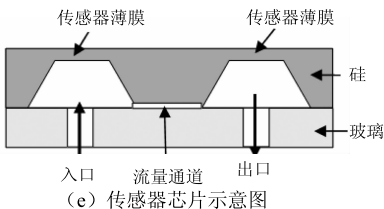
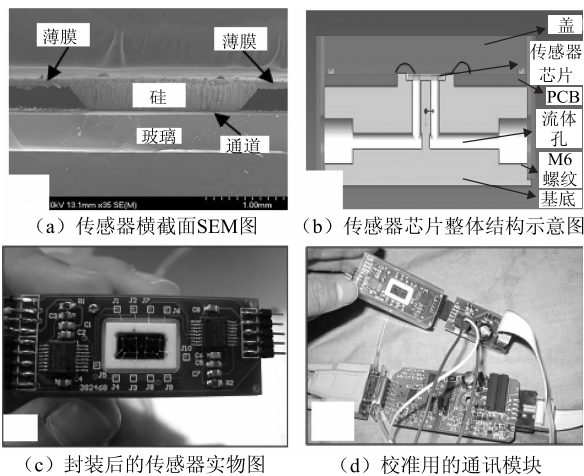


图 16 测量系统和传感器芯片示意图

2.3 振动式微流量传感器

郭然等^[17]提出了一种新颖的微机械谐振式微流量传感器。该传感器采用电磁激励方式，主要由 1 个 $3\ \mu\text{m}$ 厚 H 型谐振器、1 个 $40\ \mu\text{m}$ 厚的悬臂梁平板 ($2000\ \mu\text{m} \times 5000\ \mu\text{m}$) 以及连接平板和框架的 2 根 $40\ \mu\text{m}$ 厚的支撑梁组成。谐振器采用低应力富硅氮化硅 SiN 制作，可以方便地使用湿法腐蚀释放谐振器，从而简化工艺流程，提高成品率，如图 17 所示。文中分析了理论模型、有限元仿真 (FEA)、工艺制造和测试结果。测试结果显示，传感器在 1SLM (标准 L/min) 流量下，频率漂移为 $500\ \text{Hz}$ ，分辨力达到 0.5% ，但在输出 (谐振器频率漂移) 和输入 (气体流量) 间存在二次曲线关系。

Po-Yau Ju 等^[18]提出了一种检测速度和粘度的微流量传感器，特别是对超低粘度的应用。一根蚀刻的直径为 $9\ \mu\text{m}$ 的光纤被嵌入在一个微流体芯片中，耦合照射在微流体通道的激光束，流量导致的振动引起光纤

悬臂周期性振荡运动，通过频率分析，能够检测和识别流体流量和粘度，如图 18 所示。实验结果表明，开发的传感器能够检测流速为 $2.5 \sim 15\ \text{mL}/\text{min}$ 和粘度为 $0.306 \sim 1.2\ \text{mPa} \cdot \text{s}$ 的液体样品。此外，各种流量的空气样品 ($0.0148\ \text{mPa} \cdot \text{s}$) 也能检测。

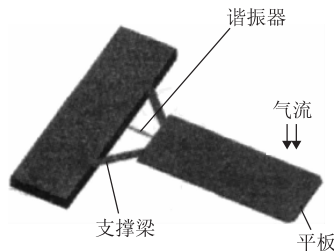


图 17 传感器敏感结构

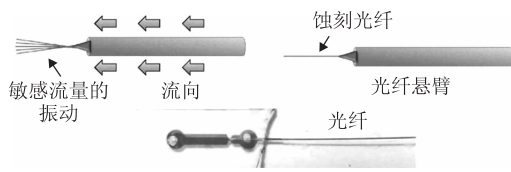


图 18 传感器工作原理和实物图

3 微流量传感器发展方向

由近五年来国内外微流量测量研究现状可看出，热式微流量传感器的研究是比较热门的，因为热式流量传感器测量流量范围较宽，具有很高的灵敏度，流量下限也很低。目前，对其研究已向进一步微型化方向发展，且能分辨出流动方向。由于其输出是非线性的，且受基体隔热效果的影响，适合用于精度不太高的微流量测量。

基于 MEMS 的微流量测量技术发展至今已经历了四十多年，探索新的测量方法是其中的一个发展方向，如振动式、光电式测量等。另外结合多种测量方法，进行多源信息融合的微流量测量技术也是一个重要的发展方向。

3.1 多种方法结合的微流量测量方法

早在 2000 年，Yong Xu 等^[19]就结合了热式和差压式原理测量微流量，将剪应力、压力和温度传感器集成到一个芯片上。热式流量传感器在低流量范围灵敏度较高，差压式流量传感器只敏感较大的流量，且与流量呈线性关系，两种方法优势互补，结合这两种方法，大大提高微流量传感器的性能。

陈则等^[20]结合了温差式和风速计式两种检测原理，设计并制造了一种新型结构的 MEMS 热式流量计。在对温差式流量计的灵敏度、量程等特性进行了有限

元仿真的基础上, 优化设计了器件结构。测试结果表明该新设计比传统 MEMS 热式流量计灵敏度提高近 4 倍。

Joost C. Lötters 等^[21]将热式与科氏测量方法结合, 集成到单个芯片上测量微流量, 能够测量超宽的动态流量范围, 从 100 nL/h 到 18 mL/h。流量从 0.1 L/h 到 40 L/h 时, 误差为 ± 0.1 L/h, 流量从 40 L/h 到 18 mL/h 时, 误差为 ± 4 L/h, 响应时间为 0.2 s。

3.2 科氏效应与差压效应融合的流量测量方法

科氏效应流量检测方法通过测量流体流过测量管所产生的科氏力导致的输出信号相位差测量质量流量, 具有精度高、可靠性高、无可移动部件等优点。但是当流量较小时, 科氏力变得微弱, 由科氏力引起的相位差很小, 检测精度难以保证。同时, 压损大是科氏质量流量传感器的普遍缺点。根据伯努利方程, 流体在管道中的流动是由于管道中上游与下游的压差导致的, 通过测量科氏质量流量传感器入口与出口端的压力差可检测出流体流量。因此考虑将科氏质量流量传感器压损大的缺点转变为一种测量手段, 将科氏效应与差压效应集成在一起, 在不同的流量范围按照一定的规则将两种方法的测量结果进行融合, 以提高测量精度, 扩大量程比。

为保证传感器测量精度, 测量管必须选择灵敏度较高的管型, 同时又要兼顾低的零点稳定性, 因此, 选择矩形测量管作为传感器的敏感单元。为获得流体的压差, 在传感器入口端和出口端分别设计了取压口。初步设计的传感器结构如图 19 所示。

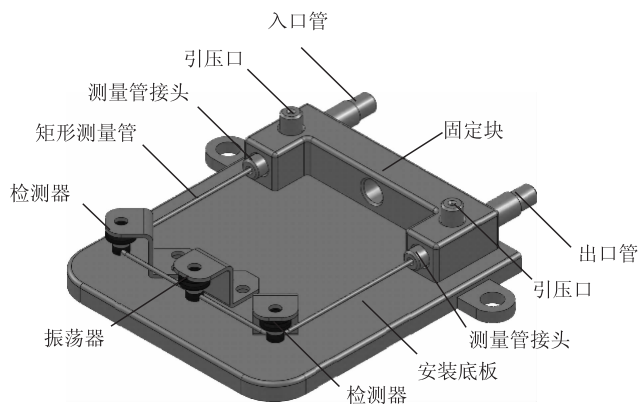


图 19 科氏效应与差压效应集成的传感器结构

图 20 为单管小口径科氏质量流量计 (Coriolis Mass Flowmeter, CMF) 的矩形测量管示意图, 进出口直管段 AB 及 A'B' 的长度为 l , 中间直管段 CC' 的长度为 $2b$, 圆弧段 BC 及 B'C' 的半径为 R 。

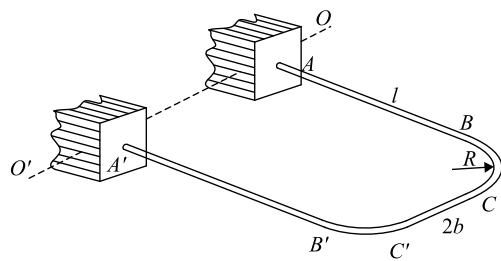


图 20 测量管结构示意图

两端固支的测量管为高次静不定系统, 在测量管上施加科氏力, 利用科氏力分布反对称、结构对称的特点, 将测量管从中心位置 H 处对称分开, H 截面上受剪力 X_1 和扭矩 X_2 , 如图 21 所示。

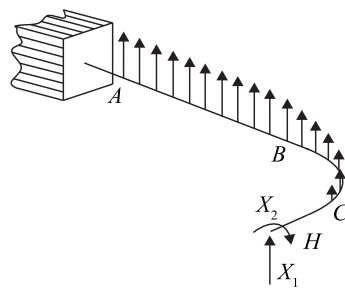


图 21 测量管科氏力分布图

设流体经过时, AB 段所受的单位长度科氏力为 q , 使用力学分析, 得到测量管在科氏力 q 、剪力 X_1 和扭矩 X_2 作用下的沿轴位移曲线, 如图 22 所示。图中横坐标是沿轴曲线坐标, 纵坐标是测量管的位移。

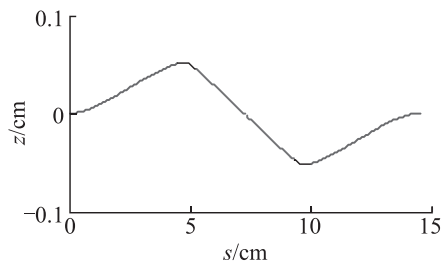


图 22 科氏力作用下沿轴位移曲线图

则传感器的灵敏度 K 为

$$K = \frac{\Delta t}{Q_m} = \frac{4}{EIl} \left[\frac{1}{2} (\bar{X}_1 R + \bar{X}_2 + \frac{1}{2} R^2) l^2 + \frac{1}{3} (\bar{X}_1 + R) l^3 + \frac{1}{8} l^4 \right] \quad (1)$$

式中: E 为测量管弹性模量; I 为传感器转动惯量。

利用 ANSYS 对测量结构进行模态分析, 获得传感器的一阶振动模态, 根据流量大小, 求出矩形管微元的科氏力, 添加科氏力, 进行静态分析, 获得测量管最大扭转位移, 从而仿真得到灵敏度。静态分析中测

量管位移矢量图如图 23 所示。

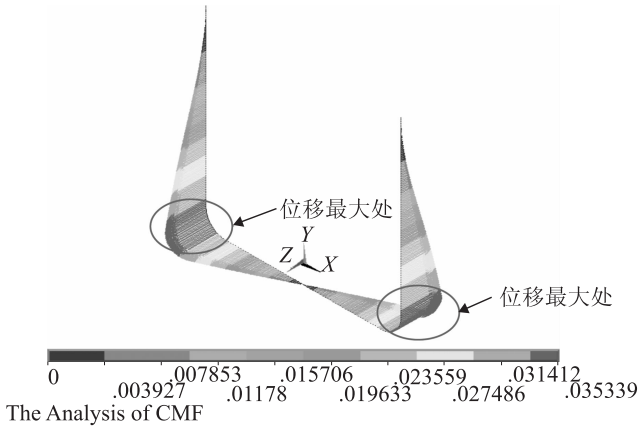


图 23 测量管位移矢量图

计算得到最大扭转角为 $\theta_{\max} = 1.24078^\circ$ ，灵敏度 $K = 1.1046 \mu\text{s}/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 。理论分析得到的最大扭转角为 $\theta_{\max} = 1.21759^\circ$ ，最大灵敏度 $K = 1.092 \mu\text{s}/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$ 。

流体在管道中流动，存在压损，分析流体在层流状态和湍流状态时的沿程压力损失和局部压力损失，得到流量与压差的关系。

沿程压损为

$$\Delta p_c = \begin{cases} \frac{32vl_e}{900\pi D^4} Q & (Re < 2000) \\ \frac{1.443 \times 10^{-7} v^{0.25} l_e}{\rho^{0.75} D^{4.75}} Q^{1.75} & (Re \geq 2000) \end{cases} \quad (2)$$

式中： Δp_c 为沿程压力损失； Q 为流量； v 为流体的动力粘度， m^2/s ； l_e 为管道等效长度； D 为管道内径； ρ 为流体密度； Re 为雷诺数。

根据管道局部元件的结构特点可近似确定管道的局部损失系数，从而得到局部压损为

$$\Delta p_j = \zeta \rho \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

式中： v 为流速。弯管的局部压力损失系数 ζ 可根据 Richter 的实验公式求得^[22]，公式为

$$\zeta = 0.00705 \alpha \theta^{1.1} Re^{-\beta} \quad (4)$$

式中： $\alpha = 0.48 \frac{R}{D} (2 \leq \frac{R}{D} \leq 36)$ ， R 为圆弧半径； θ 为弯管角度； $\beta = 0.235$ 。

因此，测量管弯管段的总压力损失为

$$\Delta p = \Delta p_c + \Delta p_j \quad (5)$$

压损与流量的关系曲线如图 24 所示。

利用 FLUENT 软件仿真分析测量管的压损，利用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行分析计算，得到的压强分布云图如图 25 所示。

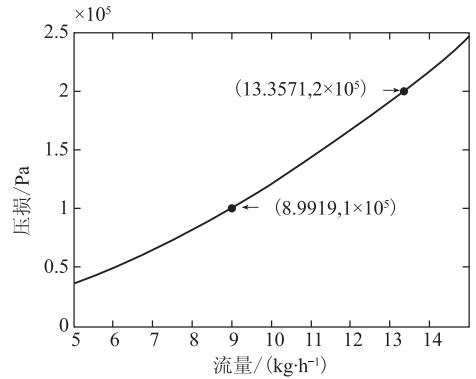


图 24 流量与压损曲线图

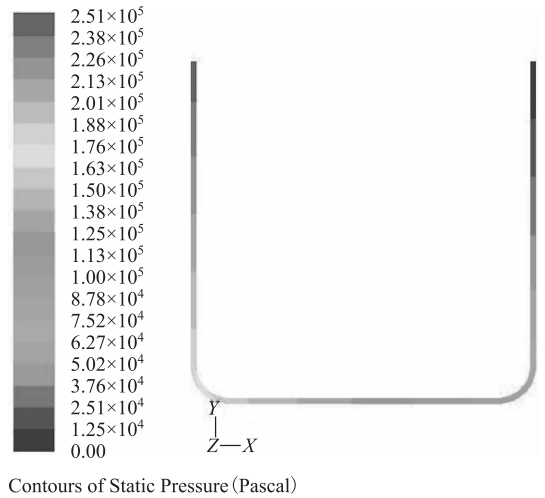


图 25 测量管内压强分布云图

由测量管内压强分布云图可见，从测量管入口处到出口处，压强逐渐减小，符合圆管流动压降的原理。仿真得到的压损为 251442.05 Pa，理论计算得到的压损为 245060 Pa。理论与仿真基本一致，因此，通过压损测量流体速度是有可行的。

最后，利用数据融合算法对两种方法获得的测量数据进行融合。初步采用多维回归分析法进行融合。

设 Q_{mk} 和 Q_{vk} 分别为实流标定时科氏质量流量传感器和差压传感器获得的 k 组数据，每组数对应的流量值为 Q_k 。

若二维坐标 (Q_{mk}, Q_{vk}) 对应的 Q_k 在一个平面上，则可利用二次曲面方程来描述实际流量 Q 与测量的质量流量 Q_m 及体积流量 Q_v 的关系，即

$$Q = \alpha_0 + \alpha_1 Q_m + \alpha_2 Q_v + \alpha_3 Q_m^2 + \alpha_4 Q_m Q_v + \alpha_5 Q_v^2 + \varepsilon \quad (6)$$

如果公式(6)中的各常系数已知，那么二次曲面方程也就确定了。由此可见，多维回归分析法实现函数逼近的过程，就是求解函数表达式(6)中各常系数 $\alpha_0 \sim \alpha_5$ 的过程^[23]。通常使用最小二乘法确定常系数，

从而求得最终的数据融合结果,达到融合效果。

4 结论

MEMS技术的进步使得各种类型传感器的精密制造成为可能,相比于传统的宏观尺度传感器,微尺度传感器具有更高灵敏度,更低成本,更容易实现集成化和便携化。自从MEMS技术应用到微流量测量领域以来,纵观近五年来国内外微流量测量技术的发展,除了基于已有的测量原理从结构上进行创新以外,还在利用科技的发展不断探索新的测量方法,同时,多种方法结合提高传感器性能也是其中的一个重要发展方向。此外,文中提出了一种科氏效应与差压效应相结合的测量方法,通过理论与仿真手段系统的论述此方法的可行性,初步确定使用多维回归分析法对两种方法的测量结果进行处理,以期提高流量测量精度,扩大量程比。

参 考 文 献

- [1] Wang Yu-Hsiang, Chen Chang-Pen, Chang Chih-Ming, et al. MEMS-based gas flow sensors [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2009, 6(3): 333-346.
- [2] Piotta M, Pennelli G, Bruschi P. Fabrication and characterization of a directional anemometer based on a single chip MEMS flow sensor[J]. *MICROELECTRONIC ENGINEERING*, 2011, 88(8): 2214-2217.
- [3] Kontakis Konstantinos, Petropoulos Anastasios, Kaltsas Grigoris, et al. A novel microfluidic integration technology for PCB-based devices; Application to micro flow sensing[J]. *MICROELECTRONIC ENGINEERING*, 2009, 86(4-6): 1382-1384.
- [4] Hedrich F, Kliche K, Storz M, et al. Thermal flow sensors for MEMS spirometric devices[J]. *SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL*, 2010, 162(2): 373-378.
- [5] Wiegerink R J, Lammerink T S J, Dijkstra M, et al. Thermal and Coriolis type micro flow sensors based on surface channel technology [C]//Brugger J, Briand D. *PROCEEDINGS OF THE EUROSENSORS XXIII CONFERENCE*. SWITZERLAND: Procedia Chemistry, 2009: 1455-1458.
- [6] Kottapalli A G P, Tan C W, Olfatnia M, et al. A liquid crystal polymer membrane MEMS sensor for flow rate and flow direction sensing applications[J]. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 2011, 21(8): 1-11.
- [7] Haneveld J, Lammerink T S J, de Boer M J, et al. Modeling, design, fabrication and characterization of a micro Coriolis mass flow sensor[J]. *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 2010, 20(12): 1-10.
- [8] Petrak D, Rauh H. Micro-flow metering and viscosity measurement of low viscosity Newtonian fluids using a fibreoptical spatial filter technique [J]. *FLOW MEASUREMENT AND INSTRUMENTATION*, 2009, 20(2): 49-56.
- [9] Andre Nicolas, Rue Bertrand, Scheen Gilles, et al. Out-of-plane MEMS-based mechanical airflow sensor co-integrated in SOI CMOS technology [J]. *SENSORS AND ACTUATORS A-PHYSICAL*, 2014, 206: 67-74.
- [10] Liu Peng, Zhu Rong, Que Ruiyi. A Flexible Flow Sensor System and Its Characteristics for Fluid Mechanics Measurements [J]. *SENSORS*, 2009, 9(12): 9533-9543.
- [11] 徐永青, 吕树海, 徐爱东, 等. MEMS热膜式微型流量传感器的研制[J]. *微纳电子技术*, 2010, 47(4): 228-231.
- [12] 侍艳华, 何秀丽, 高晓光, 等. MEMS热膜式微流量传感器[J]. *MEMS与传感器*, 2013, 50(7): 434-441.
- [13] Wu Yuan-Qing, Yao Su-Ying. MEMS Thermal Mass Flow Meter with Double-Heater Structure [C]//IEEE International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). IEEE, 2011.
- [14] 光玲玲, 贾宏光. Lamb波压差式微流量传感器的研究[J]. *压电与声光*, 2010, 32(1): 63-66.
- [15] 杨晓亚, 刘亚欣, 陈立国, 等. 微流量传感器及其在压电泵闭环控制中的应用[J]. *中北大学学报: 自然科学版*, 2010, 31(3): 306-312.
- [16] Chen Liguang, Liu Yaxin, Sun Lining, et al. Intelligent Control of Piezoelectric Micropump Based on MEMS Flow Sensor [C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Taipei: IEEE/RSJ, 2010: 3055-3060.
- [17] 郭然, 陈德勇, 王军波. 一种基于MEMS技术的新型谐振式微流量传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2009(12): 1-9.
- [18] Po-Yau Ju, Chien-Hsiung Tsai, Lung-Ming Fu. Microfluidic flow meter and viscometer utilizing flow-induced vibration on an optic fiber cantilever [C]//International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference TRANSDUCERS' 11. United States: IEEE Computer Society, 2011: 1428-1431.
- [19] Yong Xu, Chen-Wei Chiu, Fukang Jiang, et al. Mass Flowmeter using a multi-sensor chip [C]//International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). United States: IEEE, 2000: 541-546.
- [20] 陈则, 曾祥宇, 张晟, 等. 一种结合温差式和风速计式的新结构MEMS热式流量计[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(7): 934-940.
- [21] Lotters Joost C, Lammerink Theo S J, Groenesteijn Jarno, et al. Integrated Thermal and Microcoriolis Flow Sensing System with a Dynamic Flow Range of More Than Five Decades [J]. *MICROMACHINES*, 2012, 3(1): 194-203.
- [22] 王松岭. *流体力学* [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 110-111.
- [23] 严家明, 毛瑞娟, 谢永宜. 两种数据融合算法对扩散硅压力传感器的温度补偿[J]. *计算机测量与控制*, 2008, 16(9): 1363-1365.