光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023101801

具有温度补偿的微细圆柱基 MEMS 流速传感器研究

黄皓凯[1,2]，胡致远[1,2]，叶丰明[1,2]，杨卓青[1*]

（上海交通大学 1.微米纳米加工技术全国重点实验室；
2.电子信息与电气工程学院 微纳电子系，上海 200240）

摘　要： 目前常见的流速传感器由于尺寸原因，只能介入管径较大的管道进行液体流速测量。设计并制造了一种可介入小管径管道的、具有温度补偿功能的圆柱基流速传感器，器件采用旋转投影曝光和微机电系统（MEMS）技术制作而成，包含一个薄膜型加热电阻和一个稳定补偿电阻，基于热阻原理可实现对不同温度流体流速的精确测量。测试结果表明：该流速传感器的温度系数为 0.2236%/℃，灵敏度为 4.25 mV/(cm·s^{-1})。研制的圆柱基 MEMS 流速传感器可在内径为 2 mm 的管道中对具有一定温度变化的流体进行流速测量，有望应用于工业、生物医学等领域。

关键词： 微机电系统；微细圆柱基底；热阻式；温度补偿；流速传感器

中图分类号： TN929.11　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0029－07

Research on Micro-cylindrical Based MEMS Flow Rate Sensor with Temperature Compensation

HUANG Haokai[1,2], HU Zhiyuan[1,2], YE Fengming[1,2], YANG Zhuoqing[1]

(1. National Key Lab. of Advanced Micro and Nano Manufacture Technology; 2. Dept. of Micro/Nano Electronics, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, CHN)

Abstract: Due to size reasons, current common flow rate sensors can only be inserted into pipes with larger diameters to measure liquid flow rate. To be placed into a micro pipeline, a cylindrical thermal-resistance micro-electromechanical system (MEMS) flow sensor with temperature compensation was designed and fabricated. It is composed of a heating resistor and a temperature-measuring resistor to measure the flow rate through the working principle of heat loss. The experimental results show that the temperature coefficient of resistance (TCR) is 0.2236%/℃ and the sensitivity was 4.25 mV/(cm·s^{-1}). The designed circuits demonstrate an excellent effect of temperature compensation for accurate measuring results. The proposed flow sensor can measure the flow rate in a pipe with an inner diameter of 2 mm, and is expected to be applied to the industrial, biomedical and other fields.

Key words: MEMS; micro-cylindrical substrate; thermal-resistance; temperature-compensate; flow rate sensor

0　引言

流速的检测在日常生活、科研工作和工业中发挥着非常重要的作用[1]。当流体通过传感器时，通过检测其电压、温度和压力等特性的变化可以实现对流速的测量[2-4]。传统的流速传感器由于体积大、测速不稳定，以及容易受到环境因素的影响等原因，其应用场景受到限制[5]。而基于微机电系统（MEMS）技术的流速传感器因其具有尺寸小、功耗低、响应速度快以及集成度高等特点，近年来受到越

收稿日期：2023－10－18.
基金项目：国家自然科学基金项目(61974088).
* **通信作者：**杨卓青

来越多的关注[6-8]。随着传感监测应用领域的不断扩展，基于平面 MEMS 工艺制备的传感器已经难以满足目前众多领域的监测需求[9-10]。在细小管道以及面向人体健康监测的应用领域中，圆柱衬底表面的 MEMS 器件具有更大的优势。例如，在体积相同的情况下，圆柱衬底与传统长方体相比具有更大表面积，能够在其表面上制备面积更大的传感器，从而获得更强的信号输出[11]。另外，微细直径的圆柱形衬底能够置于狭小的测量区域，比如细的航空发动机管道或人体血管内部，实现更为精确的信号采集[12]。此外，基于圆柱形衬底的传感器还能够在整个环状表面同时采集来自不同方向的外界信号，使测量结果具有更好的均匀性[13]。

目前应用最广的 MEMS 流速传感器是基于热阻式的流速传感器，其基本原理是一个加热的电阻在外界流体冲刷作用下会导致其电阻(即温度)的变化，从而通过监测阻值或电压的变化来反推出流速的变化，实现对外界流体流速的测量[14-16]。基于该原理的热阻式流速传感器理论上能够检测到极小的流速变化[17]，然而，环境温度常常会导致传感器测量阻值的变化，影响了器件对流速变化的敏感，因此通常需要将流速传感器与相应的测控电路进行匹配集成，常见的解决方法有通过惠斯顿电桥或使用差分放大电路、减法器以及增加测温补偿电阻等[18-19]。

本文设计了一种微细流速传感器，该传感器通过课题组自主研发的旋转可编程紫外光刻系统在微细不锈钢管表面进行加工制造[20]，且由于圆管的外径仅有 700 μm，因此可以较为方便地进入其他狭小管道内部。整个传感器根据热阻原理采用多匝薄膜铂(Pt)线圈作为敏感单元来检测流速信号，同时在同一衬底上制备一个相同形状的薄膜线圈作为温度监测元件，最后开发了传感器相应的测控电路，主要采用差分放大电路以及减法器来消除温度的影响，并搭建了相关的测量装置对传感器进行测量实验。

1 流速传感器设计及其仿真

1.1 传感器件的设计

基于圆柱衬底表面 MEMS 器件的加工工艺，设计了一种微细型流速传感器，如图 1 所示，器件包含两个多匝线圈，四根引线以及不锈钢微管。本文所提出的流速传感器设计具有以下特点：(1)器件敏感结构为具有对称性和周期性的线圈，在旋转曝光的过程中可以通过多点曝光的方法有效地提高图形的制备效率；(2)微细圆管表面上的器件设计分布方式能够有效延长器件敏感单元的整体长度，增加敏感结构与水流的接触面积，提高流速检测的灵敏性；(3)器件整体设计为圆柱表面的周向覆盖形式，对圆柱衬底表面的利用率较高，能够测量任意方向的水流。此外，整体为微细管状的流速传感器能够方便地进入到各种狭窄管道中实现流速的精确测量。其中，传感器的敏感单元材料为 Pt 薄膜，敏感单元与不锈钢衬底之间的绝缘层采用聚酰亚胺(PI)。

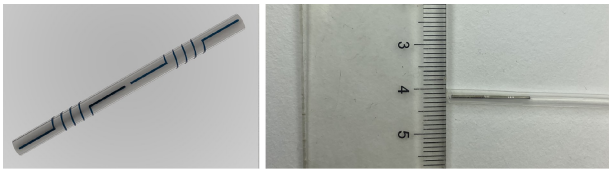
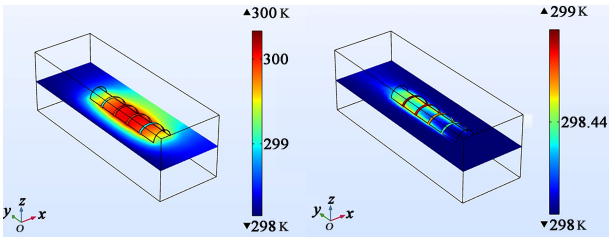
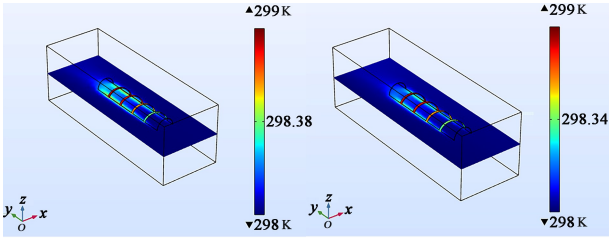


图 1 微细圆柱基流速传感器设计及其实物照片

为了模拟水流对传感器温度分布的影响，本文借助 COMSOL 有限元软件对水流速度和器件表面温度进行了相关的仿真分析，所使用的关键材料属性设置见表 1，传感器被置于 25 ℃的常温水中，并在敏感单元线圈中通以 10 mA 的直流电。图 2(a)为无流速环境下流速传感器表面温度分布的仿真结果，可以看出，最高温度点 300.33 K 位于微线圈的中心，温度从中心向外逐渐减小。当分别施加 5，10 和 20 cm/s 的水流速度时，最高温度分别降为 298.62，298.50 和 298.45 K，如图 2(b)、(c)和(d)所示，证明随着水流速度的提高，线圈表面温度降低，从而使得线圈电阻降低，电压信号也会随之降低，从而可得到电压随流速变化的曲线。



(a) 无流速环境下 (b) 5 cm/s 速度下



(c) 10 cm/s 速度下 (d) 20 cm/s 速度下

图 2 流速传感器温度分布的仿真结果

表 1　仿真模型中所用材料的属性设置

材料	电导率/(S/m)	密度/(kg/m^3)	导热系数/(W/(m·K))	杨氏模量/Pa
Pt	8.9×10^6	21 450	71.6	168×10^9
聚酰亚胺(PI)	/	19 300	317	70×10^9
405 不锈钢	1.7×10^6	7 750	24.2	200×10^9

为了验证流体流速和传感器表面温度分布之间的关系，对热平衡公式进行分析和计算。热平衡公式可以表示为：

$$Q=Q_0+Q_1 \tag{1}$$

式中，Q 表示由直流电产生的焦耳热，可以写为：

$$Q=I^2R_0[1+\alpha(T_h-T_0)] \tag{2}$$

式中，I 为施加到传感器上的电流，R_0 为微线圈在 T_0 温度时的阻值，α 为敏感材料的电阻温度系数(TCR)，T_h 为微线圈表面温度，Q_0 表示对流传热量，可表示为：

$$Q_0=\mathrm{sh}(T_h-T_f)=n\pi Ddh(T_h-T_f) \tag{3}$$

式中，S 为微线圈与水流的接触面积，h 为对流传热系数，n 为微线圈的匝数，D 为不锈钢管的外径，d 为微线圈的线宽，T_f 为水流温度。根据努塞尔数 $Nu=hL/k$，以及雷诺数 $\mathrm{Re}=\rho vL/\mu$ 可以简化公式，其中 L 为特征长度，k 为流体的导热系数，ρ 为流体的密度，v 为流速，μ 为流体的粘度系数。式(3)可以简化为：

$$Q_0=A+B\sqrt{\rho v}(T_h-T_f) \tag{4}$$

其中，A 和 B 为常数，Q_1 为热传导热量，如下式：

$$Q_1=-\lambda n\pi Dd\Delta T \tag{5}$$

式中，λ 为微线圈的热导率，ΔT 为衬底和微线圈接触单位面积的温度变化。结合公式(1)，(2)，(4)和(5)，v 可以被写作：

$$v=\left\{\frac{I^2R_0[1+\alpha(T_h-T_0)]+\lambda n\pi Dd\Delta T}{z(T_h-T_f)}-X\right\}^2 \tag{6}$$

式中，X 和 Z 都是常数。式(6)表示了流体流速与微线圈表面温度之间的关系，而温度又会影响传感器的输出电压，因此流体流速可以通过传感器的输出电压幅值表示，从而实现流速的测量。

2　流速传感器的微制造工艺

2.1　材料的选择

本文采用不锈钢金属圆管作为支撑衬底，其不易弯折，能够在流体流过表面时无形变产生。采用聚酰亚胺(PI)作为绝缘层，其在全固化后能够耐受丙酮和酸碱等的腐蚀，并且可以较为均匀地涂覆在不锈钢管的表面。常见金属的温阻系数如表 2 所示，从表中可以看出铂的温阻系数在常见金属中较高，而温阻系数更高的钛则电阻率太高，在通电后将发热严重，并且在相同电阻下线圈的长度将会被缩短，影响器件的灵敏度，因此本文选用 Pt 作为器件的敏感材料。

表 2　常见金属的温阻系数

材料	电阻温度系数(20 ℃)
金	0.003 24
铂	0.003 74
铬	0.00300
钛	0.004 10

2.2　器件制备工艺

流速传感器的制作工艺如图 3 所示，具体步骤如下：

(a)首先采用外径为 700 μm、壁厚为 50 μm、长度为 100 mm 的不锈钢管作为圆柱形衬底，并使用 3%的 HCl 溶液和 5%的 NaOH 溶液浸泡导管，除去表面的颗粒和油污，之后使用去离子水对其进行超声清洗；

(b)清洗导管后，用 Dipping 的方法涂覆 5 μm 厚的 PI 胶，并在烘箱里进行全固化流程，从而在表面形成一层绝缘层；

(c)接着再用 Dipping 方法涂覆 4 μm 厚的正光刻胶，并置于烘箱中在 50 ℃条件下烘烤 30 min，之后升温至 90 ℃再烘烤 30 min，待表面光刻胶固化后通过旋转可编程紫外光刻系统对其进行曝光，从而形成两个微线圈敏感结构图形；

(d)采用磁控溅射工艺在经光刻显影后的细管表面上溅射 Pt 薄膜，厚度为 120 nm，具体溅射工艺参数见表 3，之后，通过 lift-off 图形化工艺将光刻胶剥离，形成 Pt 微线圈结构；

(e)用激光切割将不锈钢管的非图形敏感区切除，使用直径 80 μm 的铜漆包线对传感器敏感部分进行引线连接，之后喷涂绝缘漆，最终得到完整的流速传感器。

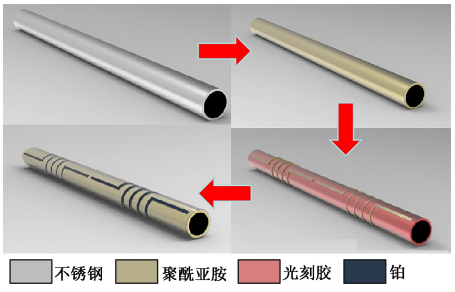


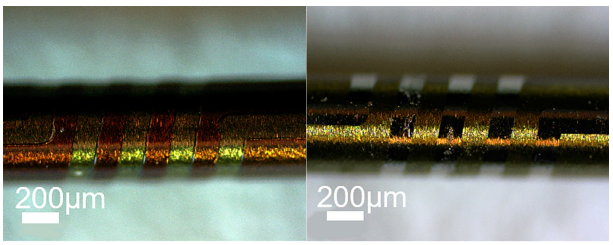
图 3　流速传感器的工艺流程示意图

表 3 流速传感器溅射工艺参数

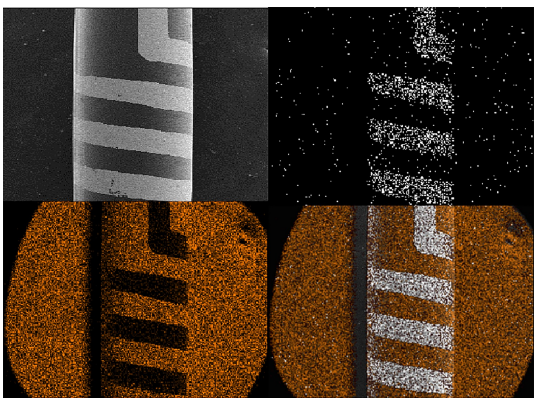
工艺参数	参数值
腔室气体	高纯氩气
本底真空度/Pa	5×10^{-4}
工作气压/Pa	0.5
气体流量/(cm^3/min)	40
溅射功率 P_{Pt}/W	150
溅射时间 t_{Pt}/s	1 200

2.3 器件的表征

通过光学显微镜观察了器件制备过程中的微结构表面，图 4(a)为微线圈曝光和显影后的光学照片，微线圈图案的线宽为 190 μm，间距为 150 μm，形成边缘清晰的微线圈图形。Lift-off 剥离后的薄膜金属层如图 4(b)所示，可以看出，敏感结构图案连续、表面平整。此外，通过 EDS 测量了器件表面的元素分布，如图 4(c)所示，可以看出主要包括铂、碳元素。其中，富含碳的区域显示为黄色，对应于裸露的 PI 绝缘层，富含铂的区域显示为白色，对应于微线圈敏感结构，并与 SEM 图像中的微线圈区域保持一致。基于传感器的元素组成分析和表面形貌可以看出，所制备的微细不锈钢圆管表面的流速传感器整体结构完整。



(a) 显影后的形貌图 (b) 溅射后的形貌图



(c) 流速传感器表面 EDS 元素分布图

图 4 所制备的微细流速传感器形貌表征结果

3 流速传感器的电路设计

为了消除流体温度对传感器流速测量的影响，在器件研制时设计了两个阻值相同的微线圈结构，其中一个微线圈结构作为流速测量的敏感单元，另一个微线圈结构用于温度补偿。同时，还设计了相应的电路用以实现对流速传感器的温度补偿，如图 5 所示。由于本研究中流速传感器的工作原理是基于热阻效应测量流速的大小，电流通过传感器的敏感单元使电阻加热，温度升高，因而，在电路设计中拟给上述两个微线圈通以大小差距 10 倍的恒流，通过较大电流的微线圈将被加热，使得流体流过时带走热量，导致电压的变化而实现流速的测量，另一个微线圈则通很小的电流，自身几乎不加热，因此将仅受到温度的影响而几乎不受流速影响。由于施加的恒流相差 10 倍，因此室温对 SENSOR1 与 SENSOR2 的电阻 R_{S1} 与 R_{S2} 产生的影响差距约为 10 倍，因此需要搭建电路补偿 SENSOR1 与 SENSOR2 输出电压 V_{out1} 与 V_{out2}，使输出电压处于同一量级，以补偿室温差。电路中 U_1，U_2 和 U_3 均为 LM358 芯片，分别用于实现不同功能，U_{1A} 与 U_{1B} 分别用于搭建分压电路，提供给 SENSOR1(测量流速的微线圈)与 SENSOR2(测量温度的微线圈)的电压分别为 V_1 与 V_2，其中 $V_1=10V_2$，流经两个传感器的电流大小关系为 $I_1=10I_2$。

利用 U_{2A} 和 U_{2B} 搭建流转压电路，将前级 U_{1A} 与 U_{1B} 产生的电流转换为电压信号，前端 U_{1A} 与 U_{1B} 产生的电压 V_1、V_2 分别加到 R_{S1} 与 R_{S2} 上，此时 SENSOR1 电流 $I_{S1}=V_1/R_{S1}$，SENSOR2 电流 $I_{S2}=V_2/R_{S2}$，I_{S1} 与 I_{S2} 流经 U_{2A} 与 U_{2B} 构建的流转压电路，通过电阻 R_7，R_8 得到输出电压 $V_{out1}=V_1R_8/R_{S1}$，$V_{out2}=V_2R_7/R_{S2}$，由于 $V_1=10V_2$，为了保证 V_{out1} 与 V_{out2} 相等，因此 $R_7=10R_8$。之后 V_{out1} 与 V_{out2} 分别输入至 U_{3A} 同相端与反相端，U_{3A} 搭建差分放大器电路，U_{3A} 的输出电压 $V_{out}=V_{out1}-V_{out2}$，式中，$V_{out1}$ 受室温与流速的影响，而 V_{out2} 仅受室温的影响，因此 V_{out} 的变化体现出流速变化，最后 V_{out} 通过 U_{3B} 搭建的运算放大器将信号放大，以采集到更加明显的电压信号。

假设流体温度一直保持常温 T_f，初始流速为 0，SENSOR1 与 SENSOR2 的电阻值为 R_{S1f0} 与 R_{S2f0}，输出电压 V_{out} 表示为：

$$V_{out}=\left(\frac{V_{ref1}R_3}{R_{S1f0}}R_8-\frac{V_{ref2}R_6}{R_{S2f0}}R_7\right)R_{14} \tag{7}$$

由于温度相同，流速为 0，$R_{S1f0}=R_{S2f0}$，所以 V_{out} 为 0。当流速变化为 v_1 时，SENSOR1 阻值变化为 R_{S1fv}，而 SENSOR2 电阻几乎不变，仍为 R_{S2f0}，最终

输出电压 V_{out} 将变大，从而得出输出电压与流速变化的关系曲线。

当流体温度 T_1 低于常温时（$T_1 < T_f$），由于热传导和热对流的影响，测速电阻 SENSOR1 不仅会受到流速影响，还会受到温度的影响，假设受到流速影响的电阻值变化为 R_{S11v}，受到温度影响的电阻变化为 R_{S210}，由于 R_2 与 R_3 的初始电阻值和 TCR 一致，二者受到的温度影响一致，因此，$R_{S1fv} - R_{S11v} = R_{S2f0} - R_{S210}$，通过减法器相减之后，能够极大地消除温度对输出电压的影响，从而实现温度补偿。

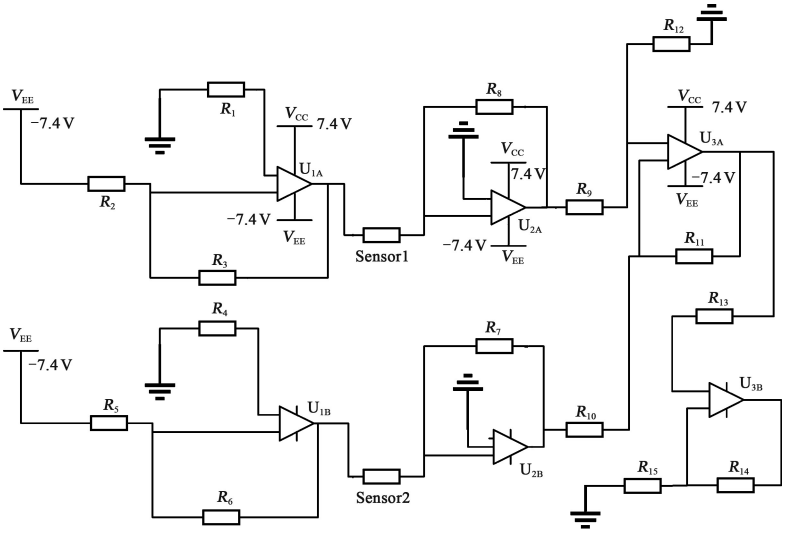


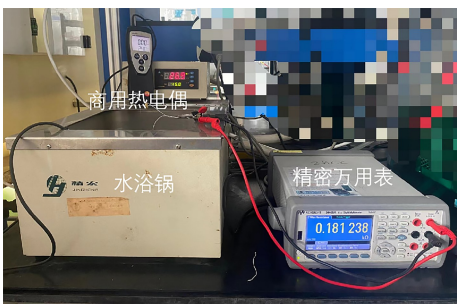
图 5　加热电阻测量流速的整体电路

4　流速传感器的测速实验

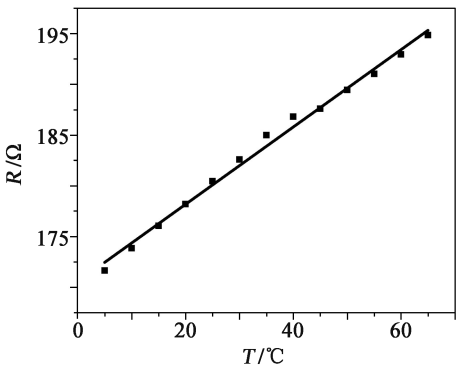
4.1　传感器的 TCR 标定

流速传感器 TCR 的标定测量所用装置如图 6(a)所示，主要由一个商用标准热电偶、一个恒温水浴槽和一台精密万用表组成。测量方法如下：将制作好的流速传感器置于水浴槽中进行加热，在紧靠传感器的旁边放置一个商用热电偶进行实际温度的标定，水浴槽温度变化范围为 5～65 ℃，每隔 5 ℃测量一次流速传感上热敏电阻的阻值。

图 6(b)所示为温度与加热电阻（流速测量单元）的变化关系，可以看出，传感器的电阻阻值随温度升高呈线性关系，符合 Pt 薄膜具有正的 TCR 的特性规律，实验测试中加热电阻和测温电阻的 TCR 均为 0.223 6%/℃。



(a) 传感器敏感单元的 TCR 测量装置



(b) 加热电阻的温度系数

图 6　传感器 TCR 测量装置及结果

4.2　流速测量实验

对研制的流速传感器进行流速测量实验，其整体测试系统如图 7 所示，主要包括示波器、温度补偿控制电路板、微小流量控制装置、内径为 2 mm 的细管以及电脑。通过电脑计算机程序设置压力可以使微流控装置在细管内产生 30 cm/s 以下的低流速，研制的流速传感器可置于细管道内用以测试流速。

对流速传感器在有温度补偿和无温度补偿的情况下分别进行测试，测试结果如图 8 所示，从测得的输出电压差值随流速变化的曲线图可以看出，温度补偿之前，5 ℃时的电压信号与 25 ℃时的电压信号

差值为 60 mV，而经过温度补偿之后，电压信号差值降低至 18 mV。由测量结果可知，测量电路实现了一定的温度补偿效应，抑制了流体温度对于流速测量的影响，提高了流速传感器测量的稳定性。图 9 为采用补偿电路后 25 ℃水温下流速传感器输出电压随流速变化的曲线，从图中可以得出传感器的灵敏度大约为 4.25 mV/(cm·s^{-1})。

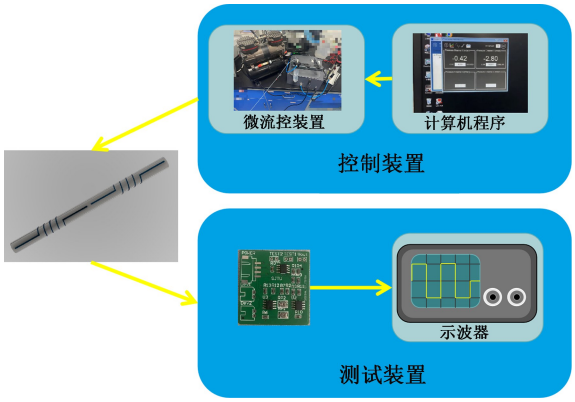


图 7 流速传感器进行微细管道内流速测量实验装置图

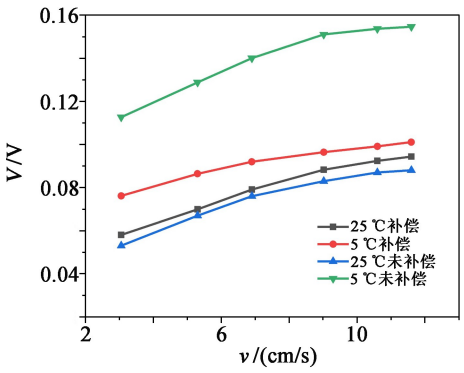


图 8 不同温度下有温度补偿和无温度补偿时的流速传感器输出电压信号

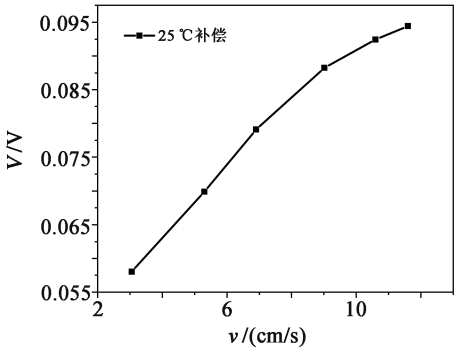


图 9 采用补偿电路后 25 ℃水温下流速传感器输出电压随流速的变化

5 结论

本文提出了一种基于微细圆柱衬底的热阻式 MEMS 流速传感器，用于解决传统流速传感器难以测量狭窄管道内流速的问题。所研制的流速传感器选取直径为 700 μm 的不锈钢圆管作为衬底，PI 作为绝缘层，Pt 薄膜作为加热电阻和测温电阻的敏感材料，并采用旋转投影曝光系统以及 lift-off 工艺实现微加工制作，此外，还利用减法器和差分放大完成了流速传感器测量电路的设计与制作。测试结果表明，制作的微细流速传感器其薄膜热敏电阻的 TCR 为 0.223 6%/℃，并能够实现 3～15 cm/s 的水流流速测量，且灵敏度为 4.25 mV/(cm·s^{-1})。同时，测量电路能够有效地抑制流体温度对传感器信号的影响，具有良好的温度补偿效应。

参考文献：

[1] 时 慧. 智能热式气体质量流量计的研制——传感器系统的研究[D]. 保定：河北大学，2012.
Shi Hui. Development of intelligence thermal gas mass flowmete：Sensor system [D]. Baoding：Hebei University，2012.

[2] 杨 刚，崔 峰，樊 冬，等. 柔性 MEMS 流速传感器的制造及其电路设计[J]. 半导体光电，2017，38(3)：309-314.
Yang Gang，Cui Feng，Fan Dong，et al. Fabrication and circuits design of flexible mems flow sensor[J]. Semiconductor Optoelectronics，2017，38(3)：309-314.

[3] 贾振安，杨凯庆，赵显锋，等. 一种新型 FBG 热式液体流量传感器[J]. 光子学报，2021，50(2)：45-51.
Jia Zhenan，Yang Kaiqing，Zhao Xianfeng，et al. A new FBG thermal liquid flow sensor[J]. Acta Photonica Sinica，2021，50(2)：45-51.

[4] 毕丹娟. 基于模间干涉的热式气体流速传感器研究[D]. 沈阳：东北大学，2015.
Bi Danjuan. Study on hot-typed gas flow rate meter based on inter-mode interference principle[D]. Shenyang：Northeastern University，2015.

[5] 芦 琦. 基于测热式原理的集成微流体流量传感器的设计、制作及信号处理[D]. 上海：上海交通大学，2011.
Lu Qi. Design，manufacturing and signal conditioning of an integrated micro flow sensor based on calorimetric theory[D]. Shanghai：Shanghai Jiaotong University，2011.

[6] 朱晓航. 仿鱼侧线器官的柔性 MEMS 流速计的设计与制作[D]. 太原：中北大学，2021.
Zhu Xiaohang. Design and fabrication of a flexible MEMS velocimeter imitating the lateral organ of fish[D]. Taiyuan：North University of China，2021.

[7] Ejeian F，Azadi S，Razmjou A，et al. Design and applications of MEMS flow sensors：A review[J]. Sensors and Actuators A：Physical，2019，295：483-502.

[8] Xu W，Wang X，Mousa B，et al. A CMOS MEMS thermal flow sensor for gas and liquid with parylene-C coating[J].

IEEE Trans. on Electron Devices, 2020, 68(2): 919-922.

[9] Herbert R, Lim H R, Rigo B, et al. Fully implantable wireless batteryless vascular electronics with printed soft sensors for multiplex sensing of hemodynamics[J]. Science Advances, 2022, 8(19): eabm1175.

[10] Park J, Kim J K, Kim D S, et al. Wireless pressure sensor integrated with a 3D printed polymer stent for smart health monitoring[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 280: 201-209.

[11] Zhu C, Guo D, Ye D, et al. Flexible PZT-integrated, bilateral sensors via transfer-free laser lift-off for multimodal measurements[J]. ACS Appl. Materials & Interfaces, 2020, 12(33): 37354-37362.

[12] Li H, Liu H, Sun M, et al. 3D interfacing between soft electronic tools and complex biological tissues[J]. Advanced Materials, 2021, 33(3): 2004425.

[13] Fang Y, Wang S, Liu Y, et al. Development of Cu nanoflowers modified the flexible needle-type microelectrode and its application in continuous monitoring glucose in vivo [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2018, 110: 44-51.

[14] 余柏林，甘志银，刘　胜，等. 新型空气质量流量传感器的建模与设计[J]. 传感技术学报，2007(7)：1517-1521.
Yu Bolin, Gan Zhiying, Liu Sheng, et al. Modeling and design of a new type air mass flow sensor[J]. Chinese J. of Sensors and Actuators, 2007(7): 1517-1521.

[15] Kim T H, Kim S J. Development of a micro-thermal flow sensor with thin-film thermocouples [J]. J. of Micromechanics and Microengineering, 2006, 16(11): 2502.

[16] Ashauer M, Glosch H, Hedrich F, et al. Thermal flow sensor for liquids and gases[C]// Proc. MEMS 98 IEEE, 1998: 351-355.

[17] 车啸婷，王振宇，管轶华，等. 液体低流速测量热分布式微纳传感器制造与测试[J]. 传感器与微系统，2022，41(4)：73-76.
Che Xiaoting, Wang Zhenyu, Guan Yihua, et al. Microfabrication and testing of micro-nano sensors based on thermal distribution suitable for liquid low flow velocity measurement[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(4): 73-76.

[18] 梁荫娟. 压力传感器温度补偿与实现研究[J]. 轻工标准与质量，2022(5)：72-74.

[19] Li Z, Wang J, Zhong X, et al. Temperature-compensated fiber-optic gas flow speed sensor based on the 'Hot-wire' principle[J]. Optik, 2021, 241: 166118.

[20] Zhang H D, Zhang P L, Li Y H, et al. A wearable ultrathin flexible sensor inserted into nasal cavity for precise sleep respiratory monitoring [J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 2021, 68(8): 4090-4097.

作者简介：

黄皓凯(2001－)，男，上海市人，硕士生，主要研究方向为 MEMS 流速传感器；

杨卓青(1982－)，男，山西省应县人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为 MEMS 器件与柔性电子技术。