

# 水下 MEMS 壁面剪应力传感器标定 不确定度分析研究

沈雪, 田于逵\*, 张璇, 孙海浪, 谢华, 张楠

(中国船舶科学研究中心 水动力学国防科技重点实验室, 江苏 无锡 214082)

**摘要:**针对 MEMS 壁面剪应力传感器进行了标定及其不确定度分析工作。标定基于压力梯度法,使用扁平校验收水槽作为主要的试验装置。测量不同壁面剪应力下的 MEMS 输出电压信号,通过最小二乘拟合可获得标定系数。反复进行壁面剪应力及电压测量,同时查找相关产品说明书获得壁面剪应力及标定系数的不确定度。试验结果表明,剪应力测量的相对扩展不确定度小于 7%,且外流速度越大,剪应力测量的不确定度越小,因此扁平校验收水槽能够提供较高精度的剪应力输入;电压测量的相对扩展不确定度小于 7%,且外流速度越大,电压测量的不确定度越小,因此传感器能够可靠地用于流体壁面剪应力的测量;标定曲线具有合理的形态且拟合相关性较高,因此标定公式具有较好的可靠性。

**关键词:**MEMS 传感器;壁面剪应力;标定;压力梯度法;扁平水槽

**中图分类号:**TV131; TH823 **文献标识码:**A

## Calibration and uncertainty analysis of MEMS wall shear stress sensor

Shen Xue, Tian Yukui\*, Zhang Xuan, Sun Hailang, Xie Hua, Zhang Nan

(China Ship Scientific Research Center, National Key Laboratory of Science and Technology on Hydrodynamics, Wuxi Jiangsu 214082, China)

**Abstract:** In this paper, the calibration and uncertainty analysis of the MEMS shear stress sensor are undertaken. Shear stress is generated by the pressure gradient method, the main test equipment is the flat verification water channel. Different voltage outputs are measured under different wall shear stress conditions, and the calibration coefficient can be got through matching the shear stress and voltage with the least square method. The shear stress uncertainty and calibration coefficient uncertainty can be got through measuring the pressure and voltage repeatedly and checking the related product manual. As the result indicated, the uncertainty of the shear stress measurement is within 7%, it tends to be smaller as the free-stream velocity gets higher. The uncertainty of the voltage measurement is within 7%, and it also tends to be smaller as the free-stream velocity gets higher, so that the sensor can be used to wall shear stress measurement reliably. The shape of calibration curve is reasonable, its correlation coefficient of fitting is large enough, it means that the calibration equation is reliably.

**Keywords:** LDV; boundary layer parameters; CFD; underwater flat plate

## 0 引言

流体壁面剪应力测量对于流动减阻、湍流结构机理研究等方面都具有重要作用,但是这一物理量较难测得。近年来, MEMS 技术的发展推动了传感器尺寸的微小化, MEMS 传感器为壁面剪应力的测量提

供了一种准确有效的手段。国内外许多研究机构已经开展了各类 MEMS 壁面剪应力传感器的设计制造。为了关联壁面剪应力和输出信号,评估传感器的工作性能指标,许多研发单位开展了传感器的标定研究工作,但是至今为止尚未有统一的标定方法形成。

Xu Yong<sup>[1]</sup>等人使用微型扁平水槽对水下 MEMS

收稿日期: 2016-12-15; 修订日期: 2017-05-22

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ040911)

\* 通信作者 E-mail: tyk702@sina.com

引用格式: Shen X, Tian Y K, Zhang X, et al. Calibration and uncertainty analysis of MEMS wall shear stress sensor. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2017, 31(3): 66-71. 沈雪, 田于逵, 张璇, 等. 水下 MEMS 壁面剪应力传感器标定不确定度分析研究. 实验流体力学, 2017, 31(3): 66-71.

剪应力传感器进行了标定。尽管该方法能够产生稳定可靠的壁面剪应力,但剪应力量级较小。另外,层流底层速度剖面是线性的,而二维泊肃叶流动的主流速度剖面为抛物线,因此该壁面剪应力公式不适用于层流底层。Allan J. Zuckerwar<sup>[2]</sup>和 Khoo B. C.<sup>[4]</sup>对旋转流道标定方法进行了研究,并就轮子的直径、宽度和安装传感器的位置对标定的影响进行了一系列的公式修正。旋转流道法的标定量程大,但是它只适用于层流标定。L. Löfdahl<sup>[5]</sup>采用平板试验方法完成了对 MEMS 热传感器的标定,其使用多项式拟合和修正的 King 公式 2 种方法对输出电压和输入剪应力建立了函数关系。国内的项志杰等人<sup>[6]</sup>也采用平板流动法标定了 MEMS 传感器。平板方法适用于层流和湍流标定,传感器安装方便,但是粘性底层速度剖面测量具有难度,使用外推法获得的壁面剪应力存在一定的误差。Aravind Padmanabhan 等人<sup>[7-8]</sup>和田于逵等人<sup>[9-11]</sup>均采用压力梯度法进行了标定研究。压力梯度法的试验装置为扁平槽道,在扁平槽道中不论流动状态是层流还是湍流,压力梯度与壁面剪应力的关系都能成立,且产生壁面剪应力的数值范围较大,因此较多地用于壁面剪应力传感器的标定。

本文针对恒流驱动式热膜型 MEMS 壁面剪应力传感器进行水中标定及不确定度分析。标定采用压力梯度法,使用扁平校验水槽作为主要的试验装置。通过各个工况下输入壁面剪应力与输出电压的采集与分析获得了传感器的标定曲线,通过系统分析及重复多次测量分析输入及输出信号的不确定度,从而判断 MEMS 传感器性能的可靠性及壁面剪应力信号的准确性。

### 1 试验设备和测量仪器

标定试验在扁平校验水槽完成,试验段为长×宽×高=2350mm×250mm×20mm 的扁平槽道,流速范围为 0~5m/s,湍流度小于 1%,流场品质优良。扁平水槽的高度远小于水槽宽度和长度,且流场均匀,符合压力梯度法的理论模型。

本文标定对象为热膜型 MEMS 壁面剪应力传感器阵列,阵列尺寸长×宽×厚=70mm×50mm×0.075mm,包含 8 个敏感单元,各单元尺寸长×宽=3mm×0.55mm,间距 6.3mm,如图 1 所示。

热膜型 MEMS 壁面剪应力传感器采用恒流驱动模式,在恒流模式下,传感器内的电流保持恒定,流动带走热量使得热敏电阻两端电压发生变化,壁面剪应

力的大小可通过电压值来判断。本文对图 1 中 2、5、6 和 7 这 4 个敏感单元进行标定和应用检验研究(由于制造和安装过程中的磕碰,最后能够正常工作的只有编号为 2、5、6 和 7 的 4 个单元),在 20℃下,这 4 个单元的电气参数分别如表 1 所示。

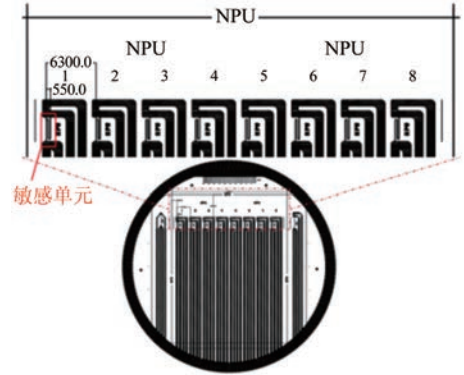


图 1 MEMS 壁面剪应力传感器阵列示意图  
Fig. 1 MEMS wall shear stress sensor array diagram

表 1 4 个敏感单元的电气参数

敏感单元编号	2	5	6	7
基础阻值/ $\Omega$	15.25	15.98	15.36	15.9
电阻温度系数/( $\text{ppm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	4800	4276	4415	4358

MEMS 传感器及信号带用可去除胶粘贴于盖板内侧,信号带通过矩形通孔引出,对引线孔作水密处理,如图 2 所示。

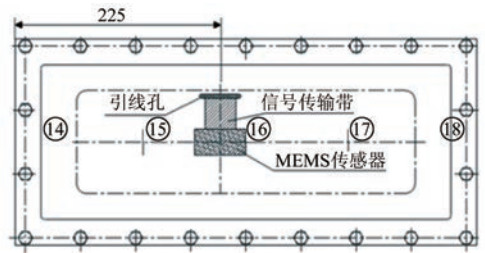


图 2 MEMS 传感器安装示意图

Fig. 2 MEMS sensor installation instruction

盖板布置在距离试验段前缘 1675mm 处,如图 3 所示。测压孔分布情况如图 4 所示。

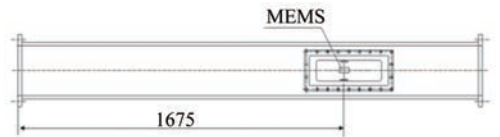


图 3 盖板布置图

Fig. 3 Diagram of coverplate

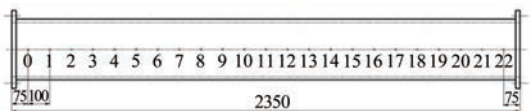


图 4 测压孔分布图

Fig. 4 Diagram of pressure taps

## 2 标定公式

根据 Bellhouse 的公式<sup>[3]</sup>, 焦耳加热的二维线性层流热边界层可以表示为:

$$\frac{EI}{T - T_f} = A_T (\tau_w)^{1/3} + B_T \quad (1)$$

由于强制对流热传输假设受制于传感器的有效长度, 同时热边界层也不可能完全是线性的, 因此在实际的湍流流动, 将 Bellhouse 公式修正为:

$$EI = (K_1 + K_2 \tau_w^n) \times (T - T_f) \quad (2)$$

若已知热敏元件的电阻温度系数  $\alpha$ , 温度  $T_{\text{ref}}$  下的电阻值  $R_{\text{ref}}$ , 则在温度  $T$  时, 热敏元件的电阻值  $R$  为:

$$R = R_{\text{ref}} (1 + \alpha(T - T_{\text{ref}})) \quad (3)$$

当输入壁面剪应力为 0 时, 热敏元件的电阻值为:

$$R_0 = R_{\text{ref}} (1 + \alpha(T_0 - T_{\text{ref}})) \quad (4)$$

由公式(1)和(2)可得:

$$T_0 - T = I \left( \frac{E_0}{K_1} - \frac{E}{K_1 + K_2 \tau_w^n} \right) \quad (5)$$

由公式(3)和(4)可得:

$$T_0 - T = \frac{E_0 - E}{IR_{\text{ref}} \alpha} \quad (6)$$

传感器采用恒流供电方式工作, 则由公式(5)和(6)可得:

$$E_0 - E = \frac{K_1 \tau_w^n}{1 + K_2 \tau_w^n} \quad (7)$$

$E$ 、 $E_0$  和  $\tau_w$  均为试验测得,  $K_1$ 、 $K_2$  和  $n$  为标定系数, 在相同温度下为常值, 通过最小二乘法可以获得标定系数的数值<sup>[12]</sup>。

## 3 实验结果及其不确定度分析

标定需建立输入壁面剪应力和输出电压之间的关系:

$$E = f(\tau_w) \quad (8)$$

壁面剪应力的计算公式为:

$$\tau_w = \frac{\delta}{2} \frac{dp}{dx} \quad (9)$$

根据标定和不确定度分析的要求, 需对标定装置扁平试验段高度、压力梯度和输出电压进行独立重复测量<sup>[13-14]</sup>。

### 3.1 电压的测量结果及其不确定度分析

MEMS 传感器的输出电压由 24 位 NI 数据采集卡直接进行采集。在相同温度下进行 8 次独立重复测量。

$E_0 - E$  的不确定度分析数学模型为:  $\Delta E = E_0 -$

$E$ , 以多次测量的平均值作为测量结果。  $\Delta E$  的不确定度来源于  $E_0$  和  $E$  的不确定度, 而  $E_0$  和  $E$  的不确定度来源于: (1) A 类标准不确定度, 可由多次重复测量评定。一般情况下, 当独立重复测量次数  $n \geq 6$  时, GJB3756-99 推荐使用贝塞法计算实验标准偏差  $s(x)$ 。单次测量值作为测量结果时, 由重复性引入的测量不确定度  $u_A = s(x)$ , 算术平均值作为测量结果时 A 类标准不确定度的计算公式为  $u_A = s(\bar{x}) = s(x) / \sqrt{n}$ ; (2) 数据采集系统引入的 B 类标准不确定度, 数据采集系统测量精度较高, 可忽略其影响。因此合成标准不确定度  $u_c(E) = u_A(E)$ ,  $u_c(E_0) = u_A(E_0)$ 。

$E_0$  和  $E$  的测量相互独立, 由不确定度合成法则可知  $u_c(\Delta E) = \sqrt{u_c^2(E_0) + u_c^2(E)}$ 。在 95% 置信概率下, 包含因子取  $k=2$ , 则  $E_0 - E$  的扩展不确定度  $U(\Delta E) = 2 \cdot u_c(\Delta E)$ 。  $\Delta E$  的相对扩展不确定度  $U_{\text{rel}}(\Delta E) = U(\Delta E) / \Delta E$ , 经计算,  $U_{\text{rel}}(\Delta E)$  均小于 7%, 因此 MEMS 传感器输出电压信号较稳定。

### 3.2 壁面剪应力测量结果及其不确定度分析

根据壁面剪应力的计算公式(9)可知, 壁面剪应力的测量不确定度来源于试验段槽道高度  $\delta$  及  $dp/dx$  的测量不确定度, 因此可分 4 步来求取  $\tau_w$  的不确定度: (1) 计算压力测量结果  $p$  的合成标准不确定度  $u_c(p)$ ; (2) 求  $dp/dx$  的合成标准不确定度  $u_c(dp/dx)$ ; (3) 计算  $\delta$  的合成标准不确定度  $u_c(\delta)$ ; (4) 获得  $\tau_w$  合成标准不确定度  $u_c(\tau_w)$  及其扩展不确定度  $U(\tau_w)$ 。

(1) 压力测量结果  $p$  的合成标准不确定度  $u_c(p)$

压力信号的获取过程如下: 压力信号-压力变送器-信号转换器-数据采集系统, 因此压力测量结果  $p$  的标准不确定度来源于: (1) A 类标准不确定度  $u_A(p)$ ; (2) 压力传感器引入的 B 类标准不确定度  $u_{B1}(p)$ , 该压力传感器的测量精度为 0.1%; (3) 信号转换器引入的 B 类标准不确定度  $u_{B2}(p)$ , 其测量精度为 0.5%; (4) 数据采集系统引入的 B 类标准不确定度  $u_{B3}(p)$ , 其设备等级为 0.5 级。则压力测量结果  $p$  的合成标准不确定度为  $u_c(p) = \sqrt{u_A^2(p) + u_{B1}^2(p) + u_{B2}^2(p) + u_{B3}^2(p)}$ 。

(2)  $dp/dx$  的合成标准不确定度  $u_c(dp/dx)$

$u_c(dp/dx)$  的不确定度来源于: (1) 压力  $p$  的测量不确定度传递给  $dp/dx$  的不确定度  $u_{c1}(dp/dx)$ ; (2) 最小二乘法线性拟合引入的不确定度  $u_{c2}(dp/dx)$ 。

已知试验数据  $x_1, x_2, \dots, x_n$  和  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , 使用最小二乘法进行过原点线性拟合, 即要求直线  $y = bx$

使得残差平方和  $\sum_{i=1}^n (y_i - bx_i)^2$  最小。因为:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (y_i - bx_i)^2 &= \sum_{i=1}^n (y_i^2 - 2bx_i y_i + b^2 x_i^2) \\ &= \sum_{i=1}^n y_i^2 - \sum_{i=1}^n 2bx_i y_i + \sum_{i=1}^n b^2 x_i^2 \\ &= b^2 \sum_{i=1}^n x_i^2 - 2b \sum_{i=1}^n x_i y_i + \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \right)^2 + \\ &\quad \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \right)^2 \\ &= \left( b \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} - \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \right)^2 + \\ &\quad \sum_{i=1}^n y_i^2 \left( 1 - \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2}} \right)^2}{\sum_{i=1}^n y_i^2} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

显然,当且仅当  $b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}$  时,上式取最小值。一般而言,  $x_i$  的不确定度较小可以忽略,根据不确定度合成法则,拟合线斜率  $b$  的不确定度可以表示为:

$$u(b) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial b}{\partial y_i} u(y_i) \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} u(y_i) \right)^2} \quad (11)$$

对压力测量结果  $p$  和位置参数  $x$  进行线性拟合,其斜率  $dp/dx$  可通过最小二乘法获得,则  $u_{c1}(dp/dx)$  的计算可基于公式(10)和(11)。则根据上述分析,若已知压力在各个测点处的测量不确定度  $u_c(p_i)$  ( $i=1, 2, \dots, 22$ ),则由  $u_c(p_i)$  引起的  $dp/dx$  的不确定度可表示为:

$$u_{c1}(dp/dx) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} u_c(p_i) \right)^2} \quad (12)$$

由于测压孔的制造安装等造成的随机误差,压力测量值会偏离拟合线。 $u_{c2}(dp/dx)$  用于表征该类随机影响因素造成的不确定度。线性模型的矩阵形式可以写成  $\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{E}$ , 其中  $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ ,  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ,  $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$ ,  $\mathbf{E} = (\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n)^T$ , 按照最小二乘准则,求得的系数矩阵  $\mathbf{B}$  应满足:  $\mathbf{Q} = \mathbf{E}^T \mathbf{E} = (\mathbf{Y} - \mathbf{B}\mathbf{X})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{B}\mathbf{X}) = \mathbf{Y}^T \mathbf{Y} + \mathbf{B}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{B} - \mathbf{B}^T \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$  取最小值。由矩阵微分法可得  $\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \hat{\mathbf{B}}} - 2\mathbf{X}^T \mathbf{Y} = 0$ , 因此  $\hat{\mathbf{B}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$ 。由上式可导出  $\sigma_B^2 = C_{ii} \sigma_\epsilon^2$ , 其中  $C_{ii}$  为  $(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}$  的对角元素。

由上述分析可知,对于过原点最小二乘线性拟合,系数矩阵仅含拟合线斜率  $b, \hat{b}$  的不确定度可表示为  $\sigma_b^2 = \sigma_\epsilon^2 / (\sum_{i=1}^n x_i^2)$ , 即  $u_{c2}(dp/dx) = \sqrt{\sigma_\epsilon^2 / (\sum_{i=1}^n x_i^2)}$ 。

由不确定度合成法则可知,压力梯度的合成标准不确定度为:

由不确定度合成法则可知,压力梯度的合成标准不确定度为:

$$\sqrt{u_c(dp/dx) = \sqrt{u_{c1}^2(dp/dx) + u_{c2}^2(dp/dx)} \quad (13)$$

(3)  $\delta$  的合成标准不确定度  $u_c(\delta)$

取多次测量的平均值作为水槽高度  $\delta$  的测量结果,其不确定度来源于:(1) A类标准不确定度;(2) 游标卡尺示值误差引入的 B类标准不确定度;(3) 游标卡尺分辨率引入的 B类标准不确定度。 $\delta$  的合成标准不确定度为  $u_c(\delta) = \sqrt{u_A^2(\delta) + u_{B1}^2(\delta) + u_{B2}^2(\delta)} = 0.077\text{mm}$ 。

扁平试验段高度  $\delta$  与沿程压力梯度  $dp/dx$  的测量值彼此独立不相关,则根据  $\tau_w = \frac{\delta}{2} \frac{dp}{dx}$  可知,壁面剪应力  $\tau_w$  的合成标准不确定度为:

$$\begin{aligned} u_c(\tau_w) &= \sqrt{\left( \frac{\partial \tau_w}{\partial \delta} u_c(\delta) \right)^2 + \left( \frac{\partial \tau_w}{\partial (dp/dx)} u_c(dp/dx) \right)^2} \\ &= \frac{1}{2} \sqrt{\left( \frac{dp}{dx} u_c(\delta) \right)^2 + (\delta u_c(dp/dx))^2} \end{aligned} \quad (14)$$

在 0.95 置信概率下,包含因子  $k=2$ ,即壁面剪应力的扩展不确定度为  $U(\tau_w) = 2u_c(\tau_w)$ ,具体计算结果如表 2 所示。从表中可以发现,流速越高壁面剪应力的测量不确定度越小,校验水槽在高流速下具有

表 2 壁面剪应力的测量值及其扩展不确定度  
Table 2 Measured values and their uncertainties of wall shear stress

流速/(m·s <sup>-1</sup> )	$\tau_w$ /Pa	$U(\tau_w)$ /Pa	$U_{rel}(\tau_w)/\%$
0.67	0.444	0.028	6.4
0.97	1.064	0.029	2.8
1.27	2.097	0.032	1.5
1.57	3.492	0.039	1.1
1.89	5.075	0.049	0.96
2.2	6.96	0.06	0.87
2.51	8.992	0.074	0.83
2.81	11.378	0.092	0.81
3.13	14.023	0.111	0.79
2.51	8.992	0.074	0.83

较高的流场品质。

### 3.3 标定曲线的计算及其精度分析

将壁面剪应力数据作为输入信号,电压测量数据作为输出信号,通过标定公式  $E_0 - E = \frac{K_1 \tau_w^n}{1 + K_2 \tau_w^n}$  建立输入输出之间的关系。采用曲线拟合方法获得标定系数  $K_1, K_2, n$  的大小<sup>[16]</sup>。

设置偏差函数  $\varphi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(\Delta E(\text{拟合}) - \Delta E(\text{试验}))^2}$ , 其中  $N$  为试验测量点数,  $\Delta E(\text{拟合})$  为拟合获得的电压差,  $\Delta E(\text{试验})$  为试验测得的电压差, 通过求解偏差函数  $\varphi$  的最小二乘法就可以获得最佳的  $\Delta E(\text{拟合})$  值, 也就可以获得相应的  $A, B$  和  $n$ , 最小二乘法的拟合结果如表 3 所示。

在曲线拟合中  $R^2$  为拟合值和试验值之间相关

系数的平方, 在所有测量数据等权情况下  $R^2$  的计算

公式为:  $R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$ , 其中  $\hat{y}_i$  表示拟合值,  $y$  表示试验值,  $\bar{y}$  表示测量数据平均值,  $n$  为测量数据点数。  $R^2$  值反映了拟合曲线优劣,  $R^2$  越接近于 1 表明拟合优劣越好。在 4 组剪应力-电压拟合中, 拟合相关系数均较高, 因此标定公式  $E_0 - E = \frac{K_1 \tau_w^n}{1 + K_2 \tau_w^n}$  能够很好地反映输入壁面剪应力和输出电压之间的关系。曲线拟合结果如图 5~8 所示。从图中可以发现, 传感器的灵敏度在  $\tau_w < 2\text{Pa}$  时较大, 约为  $15\text{mV/Pa}$ , 在  $2\text{Pa} < \tau_w < 4\text{Pa}$  时, 灵敏度逐渐减小, 在  $\tau_w > 4\text{Pa}$  时灵敏度大幅减小。因此, 该传感器用于测量  $0 \sim 4\text{Pa}$  之间的剪应力信号具有较高的测量精度。

表 3 标定公式拟合结果

Table 3 Fitting results of calibration equation

热敏单元编号	标定系数	拟合结果	95%置信区间	$R^2$	标定结果
2	$K_1$	0.1475	(0.1262, 0.1688)	0.999	$E_0 - E = \frac{0.1475 \tau_w^{0.9963}}{1 + 2.763 \tau_w^{0.9963}}$
	$K_2$	2.763	(2.296, 3.23)		
	$n$	0.9963	(0.8824, 1.17)		
5	$K_1$	0.1487	(0.1248, 0.1727)	0.999	$E_0 - E = \frac{0.1487 \tau_w^{0.9561}}{1 + 2.692 \tau_w^{0.9561}}$
	$K_2$	2.692	(2.179, 3.205)		
	$n$	0.9561	(0.7654, 1.147)		
6	$K_1$	0.1493	(0.1233, 0.1753)	0.998	$E_0 - E = \frac{0.1493 \tau_w^{0.9284}}{1 + 2.623 \tau_w^{0.9284}}$
	$K_2$	2.623	(2.076, 3.17)		
	$n$	0.9284	(0.7241, 1.133)		
7	$K_1$	0.152	(0.1237, 0.1804)	0.998	$E_0 - E = \frac{0.152 \tau_w^{0.8911}}{1 + 2.498 \tau_w^{0.8911}}$
	$K_2$	2.498	(1.932, 3.064)		
	$n$	0.8911	(0.6759, 1.106)		

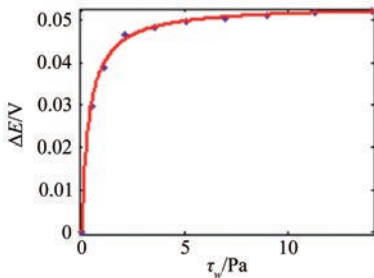


图 5 2号热敏单元标定曲线

Fig. 5 Calibration curve of No. 2 sensor element

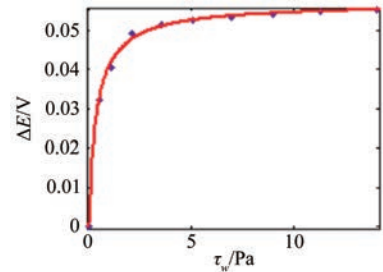


图 7 6号热敏单元标定曲线

Fig. 7 Calibration curve of No. 6 sensor element

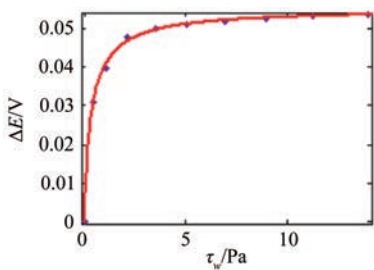


图 6 5号热敏单元标定曲线

Fig. 6 Calibration curve of No. 5 sensor element

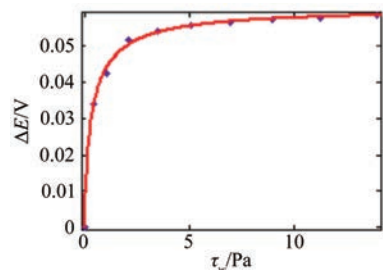


图 8 7号热敏单元标定曲线

Fig. 8 Calibration curve of No. 7 sensor element

## 4 结 论

针对热膜型 MEMS 壁面剪应力传感器进行了标定分析工作。标定采用压力梯度法,使用扁平校验水槽作为主要的试验装置。通过各个工况下壁面剪应力信号与输出电压信号的采集与分析获得了传感器的标定曲线;通过重复多次测量数据分析了壁面剪应力测量的不确定度以及电压信号测量的不确定度。

试验结果表明,剪应力测量的相对扩展不确定度小于 7%,且外流速度越大,剪应力测量的不确定度越小,因此扁平校验水槽能够提供较高精度的剪应力输入;电压测量的相对扩展不确定度小于 7%,且外流速度越大,电压测量的不确定度越小,因此传感器能够可靠地用于流体壁面剪应力的测量;标定系数曲线的相关系数较大,因此标定公式具有较高的可靠性。

### 参考文献:

- [1] Xu Y, Lin Q, Lin G, et al. Micromachined thermal shear-stress sensor for underwater applications[J]. *Microelectromechanical Systems*, 2005, 14(5): 1023-1030.
- [2] Zuckerwar A, Michael A S. A rotary flow channel for shear stress sensor calibration[C]//24<sup>th</sup> AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Portland, 28 June-1 July, 2004.
- [3] Bellhouse B J, Schultz D L. Determination of mean and dynamic skin friction, separation and transition in low-speed flow with a thin-film heated element[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1966, 24: 379-400.
- [4] Khoo B C, Chew Y T, Lim C P, et al. The flow between a rotating and a stationary disc: application to near-wall hot-wire calibration[J]. *Measurement Science & Technology*, 1998, 9(4): 650-658.
- [5] Löfdahl L, Chernoray V, Haasl S, et al. Characteristics of a hot-wire microsensor for time-dependent wall shear stress measurements [J]. *Experiments in Fluids*, 2003, 35(3): 240-251.
- [6] 项志杰, 马炳和, 邓进军, 等. 浮动式剪应力微传感器的标定 [J]. *微纳电子技术*, 2014, (4): 236-242.  
Xiang Z J, Ma B H, Deng J J, et al. Calibration of floating-element micro wall shear stress sensor[J]. *Micro-nano-electronic Technology*, 2014, (4): 236-242.
- [7] Padmanabhan A. Silicon micromachined sensors and sensor arrays for shear-stress measurements in aerodynamic flows[R].

Aerospace Computational Design Laboratory, Dept of Aeronautics & Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 1997.

- [8] De Luca A, Haneef I, Coull J, et al. High sensitivity single thermopile SOI CMOS MEMS thermal wall shear stress sensor [J]. *IEEE Xplore*, 2015: 1.
- [9] 黄欢, 孙海浪, 田于逵, 等. 水下 MEMS 剪应力标定试验压力监测方案设计[C]. 全国水动力学学术会议暨全国水动力学研讨会, 青岛: 2014.  
Huang H, Sun H L, Tian Y K, et al. Pressure monitor project design of under water MEMS shear stress calibration test[C]. *Proceedings of National Congress on Hydrodynamics & National Conference on Hydrodynamics*, Qingdao: 2014.
- [10] 田于逵, 谢华, 黄欢, 等. MEMS 壁面剪应力传感器阵列水下标定实验研究[J]. *实验流体力学*, 2015, 29(2): 8-12, 25.  
Tian Y K, Xie H, Huang H, et al. Calibration research of MEMS shear stress sensor array[J]. *Experimental Fluid Mechanics*, 2015, 29(2): 8-12, 25.
- [11] Tian Y K, Xie H, Huang H, et al. Calibration of MEMS wall shear-stress-sensors array for underwater applications [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015: 8-12.
- [12] 李晓莹, 李雁冰, 马炳和, 等. 微型热膜传感器的水下壁面剪应力标定研究[J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(10): 11-13.  
Li X Y, Li Y B, Ma B H, et al. Under water wall shear stress calibration reserch of micro thermal sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(10): 11-13.
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. JJF1059-1999 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国计量出版社, 1999.  
JJF1059-1999. Evaluation and expression of measurement uncertainties[S]. Beijing: State Administration for Quality Supervision and Inspection and Quarantine, 1999.
- [14] 钱绍圣. 测量不确定度[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.  
Qian S S. Measurement uncertainty[M]. Beijing: Tinghua University Press, 2002.
- [15] 林洪桦. 测量误差与不确定度评估[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.  
Lin H Y. Measurement error and uncertainty evaluation[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [16] 范影乐. MATLAB 仿真应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.  
Fan Y L. MATLAB simulation and application examples[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2001.

### 作者简介:



沈雪(1991-),女,江苏宜兴人,助理工程师。研究方向:实验流体力学。通信地址:江苏省无锡市滨湖区山水东路 222 号。E-mail: 1273660770@qq.com