

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.06.02

浮动元件壁面剪切应力传感器研究进展

付政伟, 杨水旺, 张琦, 苏一鸣, 张洁

(北京振兴计量测试研究所, 北京 100074)

摘要: 介绍了浮动元件的类型和浮动元件壁面剪切应力测量的方法, 阐述了基于浮动元件的电容式、压阻式和光学式壁面剪切应力传感器的基本原理和研究现状, 分析了上述3种类型的浮动元件壁面剪切应力传感器的优缺点, 指出可通过优化浮动元件与传感器封装件之间的移动间隙以及浮动元件与被测面间的平齐度来提升浮动元件壁面剪切应力传感器的性能。展望了浮动元件壁面剪切应力传感器在湍流测量、判断边界层转捩、维护飞行器安全和优化飞行器结构等领域的发展方向, 提出未来可通过发展MEMS技术、优化传感器后端处理电路和温度补偿方式、采用一体化设计加工方式等, 进一步提升浮动元件壁面剪切应力传感器的小型化程度、检测壁面剪切应力极低值时的灵敏度和精度、测量的可靠性和准确性。

关键词: 浮动元件传感器; 壁面剪切应力测量; 电容式; 压阻式; 光学式

中图分类号: TB93; TH823

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2023) 06-0020-10

Research progress on floating element wall shear stress sensors

FU Zhengwei, YANG Shuiwang, ZHANG Qi, SU Yiming, ZHANG Jie

(Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China)

Abstract: This paper introduces the types of floating elements and the measurement method of wall shear stress of floating elements. The basic principles and research status of capacitive, piezoresistive and optical wall shear stress sensors based on floating elements are described. The advantages and disadvantages of the three types of floating element wall shear stress sensors are analyzed. It is pointed out that the performance of the floating element wall shear stress sensor can be improved by optimizing the moving gap between the floating element and the sensor package, as well as the flatness between the floating element and the measured surface. The development direction of wall shear stress sensor with floating element in turbulent flow measurement, boundary layer transition judgment, aircraft safety maintenance and optimization of aircraft structure is also discussed. In the future, it is suggested that the MEMS technology can be developed, the back-end processing circuit and temperature compensation of the sensor can be optimized, and the moving gap and uniformity between the floating element sensor structures can be optimized by the integrated design and processing method to further improve the miniaturization of the floating element wall shear stress sensor, the sensitivity and accuracy of detecting the extremely low value of wall shear stress, and the reliability and accuracy of measurement.

Key words: floating element sensor; wall shear stress measurement; capacitive; piezoresistive; optical type

收稿日期: 2023-11-16; 修回日期: 2023-12-20

基金项目: 北京振兴计量测试研究所青年创新项目(99300004636)

引用格式: 付政伟, 杨水旺, 张琦, 等. 浮动元件壁面剪切应力传感器研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 20-29.

Citation: FU Z W, YANG S W, ZHANG Q, et al. Research progress on floating element wall shear stress sensors[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 20-29.



0 引言

壁面剪切应力(Wall shear stress)也被称为摩阻应力,是流体经过物体表面产生的粘性阻力,它有助于判断边界层中的流动转变、分离和再附着,是评估飞行器设备性能和表面摩擦分布的一个重要参数^[1-3]。精确测量壁面剪切应力可以帮助研究人员进一步了解边界层内部结构,监测飞行器周围流体的运动状态,防止因流动分离引发失速,对于维护飞行器的飞行安全具有重要意义^[4]。同时,精确测量壁面剪切应力对获取飞行器的粘性阻力、优化飞行器结构具有重要意义,减小壁面剪切应力可降低运载工具能耗并提高其性能。

根据测量方式的不同,精确测量壁面剪切应力的方法可以分为间接测量法和直接测量法两类。其中,间接测量法通过测量流体的其他物理量(例如温度、速度分布等),进而推导出壁面剪切应力;直接测量法通过测量浮动元件或浮动头在壁面剪切应力作用下产生的偏移量,由该偏移量得出相对应的壁面剪切应力值^[2-3]。利用直接测量法测量壁面剪切应力时无需提前了解流体环境,因此该方法受到研究人员的广泛关注。通过浮动元件测量壁面剪切应力是直接测量法中最常用的一种方法^[5]。浮动元件传感器已被证明在直接测量边界层中的壁面剪切应力方面具有良好的应用前景^[6]。

本文首先对浮动元件及浮动元件壁面剪切应力测量技术的基本原理进行阐述,之后对基于浮动元件原理的电容式、压阻式和光学式壁面剪切应力传感器的原理、研究现状、优缺点进行分析,最后对该类传感器的发展方向进行总结与展望。

1 浮动元件壁面剪切应力测量

1.1 浮动元件壁面剪切应力直接测量法

飞行器翼面壁面剪切应力示意图如图1所示,将流体壁面剪切应力 τ_w 定义为与壁面法向速度剖面成正比的力^[7],则

$$\tau_w = \mu \left. \frac{du}{dy} \right|_{y=0} \quad (1)$$

式中: μ 为流体粘度, u 为流向速度, y 为流动距离。流体壁面剪切应力与壁面法向速度剖面成正比。

浮动元件壁面剪切应力直接测量法的原理为:

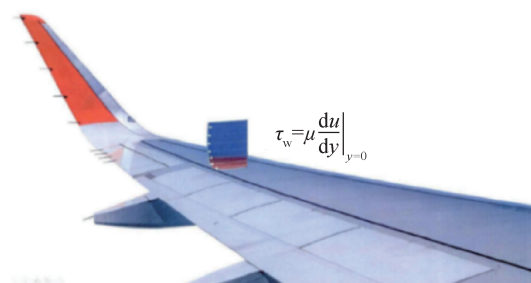


图1 飞行器翼面壁面切应力示意图

Fig.1 Schematic diagram of surface shear stress on the wing wall of aircraft

将受力元件放置在平行于流体流动壁面的位置上,壁面剪切应力直接作用于浮动元件,通过测量浮动元件在壁面剪切应力作用下产生的偏移量,计算得出相应的壁面剪切应力^[2-3, 7]。

1.2 浮动元件

1.2.1 常规浮动元件

典型浮动元件壁面剪切应力传感器结构示意图如图2所示,浮动元件通过微系绳悬空,当其表面有流体流过时,在壁面剪切应力的作用下会产生横向偏移^[2],偏移量可由电容^[8-13]和光学^[14-15]等方法检测得出。

浮动元件传感器顶面示意图如图3所示,浮动

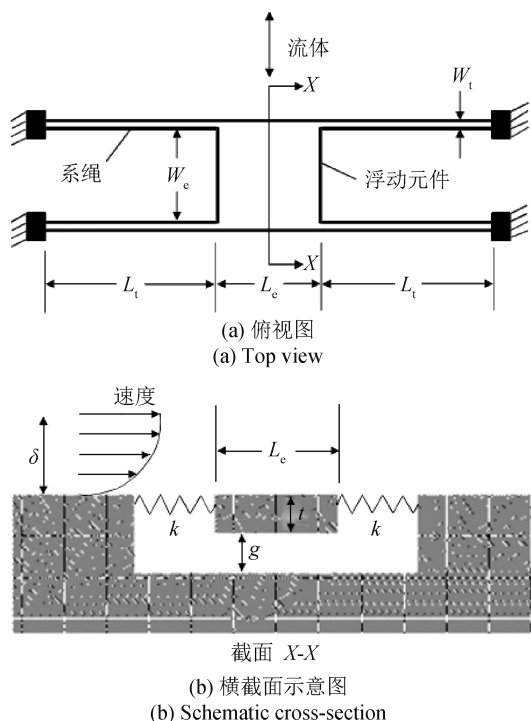
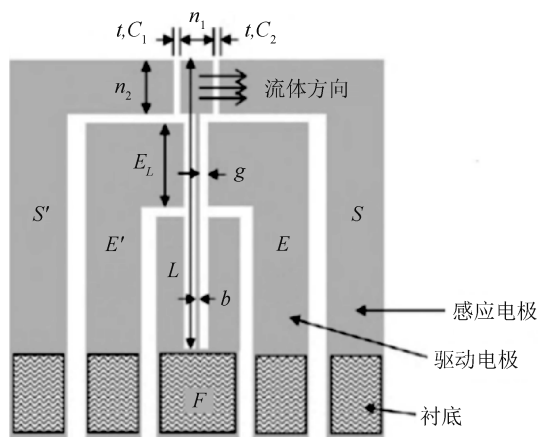


图2 典型浮动元件壁面剪切应力传感器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of typical floating element wall shear stress sensor structure

图3 浮动元件传感器顶面示意图^[16]Fig.3 Schematic view of the top surface of floating element sensor^[16]

元件壁面剪切应力传感器的器件结构由浮动元件组成，该浮动元件连接到悬臂梁的末端，作为微弹簧产生谐振频率。其中，光束结构与另外2个电极一起在光束两侧的壁上形成差分电容系统，可通过差分电容测量浮动元件的位移变化。

1.2.2 单悬臂梁浮动元件

单悬臂梁浮动元件壁面剪切应力传感器结构原理图如图4所示，浮动元件与壁面齐平安装。单悬臂梁绕一个固定点偏移^[2]，通过在悬臂梁根部安装的应变计，测量浮动元件由于壁面剪切应力作用而产生的偏移位移以及悬臂梁根部产生的应变。剪切应力很小时，单悬臂梁浮动元件传感器也能表现出很高的灵敏度特性^[17]，然而，浮动元件与周围壁面的失准会使传感器产生测量误差^[18-19]。

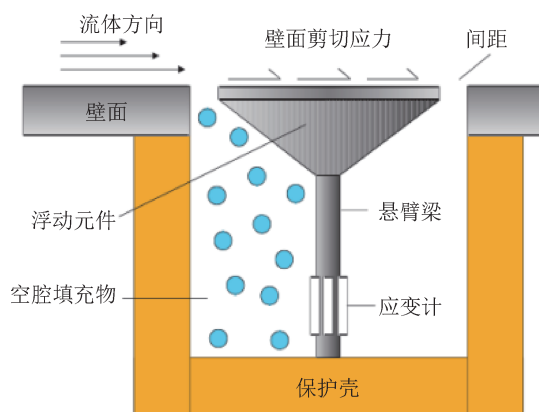


图4 单悬臂梁浮动元件壁面剪切应力传感器结构原理图

Fig.4 Structure principle diagram of wall shear stress sensor of single cantilever beam floating element

2 浮动元件壁面剪切应力传感器

浮动元件壁面剪切应力传感器示意图如图5所示，在壁面剪切应力的作用下，微弹簧发生弹性形变，可移动浮动元件结构产生的位移与壁面剪切应力大小直接相关，由位移的变化量可计算得出相应的壁面剪切应力^[20]。浮动元件是悬浮的，当流体在器件上流动时，微弹簧的构造可使浮动元件沿流体流动的方向移动，同时保持固定衬底与表面平行。

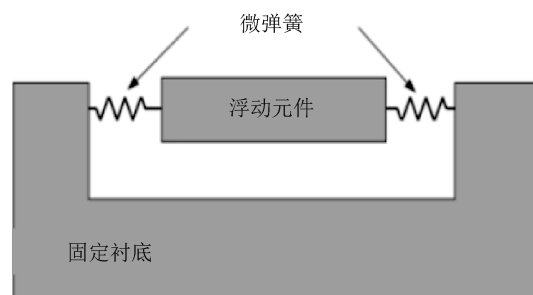


图5 浮动元件壁面剪切应力传感器示意图

Fig.5 Schematic diagram of floating element wall shear stress sensor

传统浮动元件传感器的器件由多个组装部件制成^[21]，小型化器件所采用的现有的集成化加工方式尚不完善、浮动元件传感器结构间的平齐度和移动间隙会对传感器的测量准确度产生影响。因而传统浮动元件传感器测量误差的主要来源为浮动元件与被测面间的平齐度引入的误差、浮动元件与传感器封装件之间的移动间隙引入的误差。

微机电系统^[22-23] (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS)的内部结构一般在微米甚至纳米量级，是一个独立的智能系统。随着工艺水平的不断提高，MEMS技术能够实现壁面剪切应力传感器的小型化，平齐度和移动间隙引入的测量误差在基于MEMS技术的浮动元件器件中可以忽略不计^[24]。

直接法测量壁面剪切应力的微传感器，根据测量原理可分为电容式^[24-29]、压阻式^[24, 30-31]和光学式^[26, 32-35]等。上述3类壁面剪切应力微传感器的特点见表1。

2.1 浮动电容式传感器

浮动电容式壁面剪切应力传感器结构如图6所示

表1 电容式、压阻式和光学式壁面剪切应力微传感器特点

Tab.1 Characteristics of capacitive, piezoresistive and optical wall shear stress microsensors

传感器类型	优点	缺点
压阻式	灵敏度高、结构简单，工艺相对成熟	受温度影响较大，需进行温度补偿；无法长时间工作
电容式	测量范围广、线性特性好、测量分辨率高、动态响应快	易受温度、分布电容影响、强度低、不能定量分析
光学式	可非接触测量、灵敏度高	系统相对复杂、测量精度低

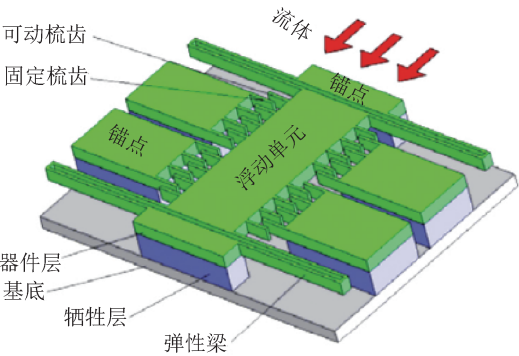


图6 浮动电容式壁面剪切应力传感器结构^[25-30]
Fig.6 Structure of floating capacitive wall shear stress sensor^[25-30]

示，浮动电容式传感器由浮动单元组成，该浮动单元由微弹性梁系住悬空，通过在浮动单元两侧和微弹性梁之间设计不对称间隙的梳齿，形成差动电容器。差分电容式传感器的原理图如图7所示，流体壁面剪切应力作用于浮动电容式传感器^[25-30]的浮动元件，使其带动可动梳齿相对于固定梳齿产生微小位移，导致输出电容值发生变化，通过检测电容变化量可以直接得出剪切应力的大小^[30]。

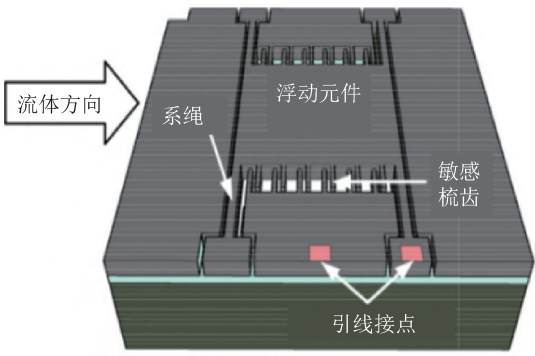
2.2 浮动压阻式传感器

浮动压阻式传感器的结构示意图如图8所示，浮动压阻式传感器^[25, 31-32]由硅体和易感测元件组成，硅体在封装过程中起到安全防护的作用，易感测元件用于感测压差。流向栅栏结构的流体会导致传感元件弯曲，由此产生的弯曲应力与壁面剪切应力成比例，可通过位于梯形梁根部的四个电阻器组成的惠斯通电桥直接测量。

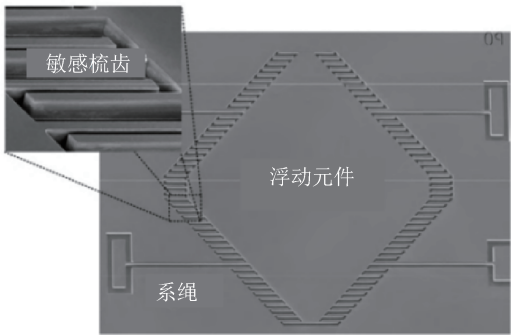
电阻变化 $\Delta R/R$ 可以定义为^[32]

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{1}{2}(\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp})\pi_{44} \tag{2}$$

式中： $\sigma_{\parallel}$ 和 $\sigma_{\perp}$ 分别为纵向应力和横向应力， π_{44} 为压阻系数。增加纵向应力和横向应力之间的差值(通过增加悬臂结构的高度或减小感测元件的厚度来实现)，可提高传感器的灵敏度。



(a) 原理图
(a) Schematic view



(b) 传感器的扫描电镜图像
(b) SEM image of capacitive sensor

图7 差分电容式传感器的原理图^[26]

Fig.7 Schematic view and SEM image of differential capacitive sensor^[26]

2.3 浮动光学式传感器

浮动光学式传感器的结构示意图如图9所示，浮动光学传感器^[27, 33-36]由浮动元件和易感测光学元件组成。在没有任何流体流动的情况下，2个易感测光学元件(对入射光)的暴露面积相同(光电流也相同)，因此差分光电流 ΔI_{photo} 为0 mA；在存在流动的情况下，浮动元件在壁面剪切应力的作用下发生偏转，使得前缘易感测光学元件上的暴露面积增加，而后缘易感测光学元件上的暴露面积减小。由此产生的微分光电流与壁面剪切应力的大小成比例，表达式为^[38]

$$\Delta I_{photo} \propto \tau_w \tag{3}$$

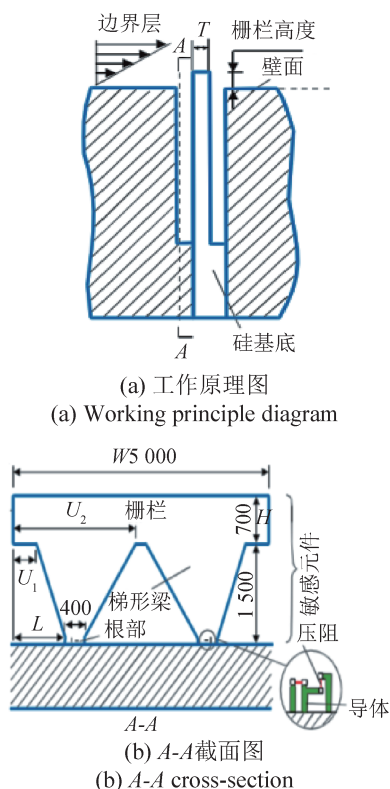
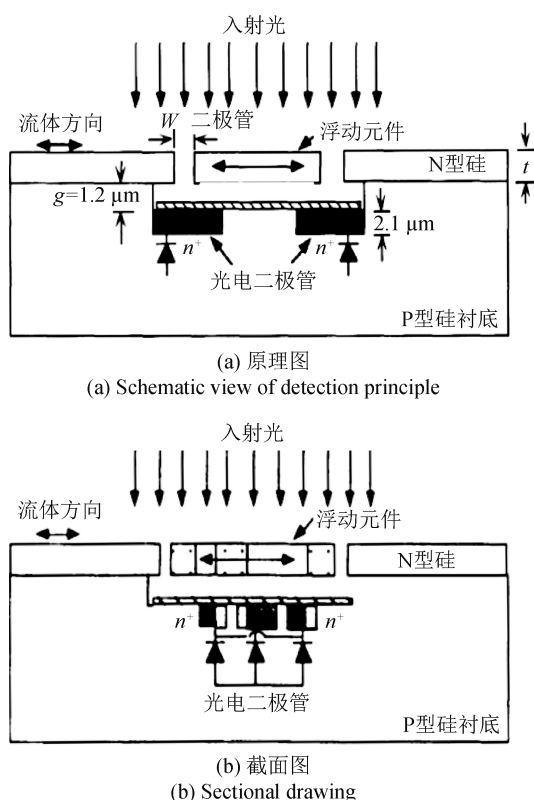


图8 浮动压阻式传感器的结构示意图

Fig.8 Structural diagram of floating piezoresistive sensor

图9 浮动光学式传感器示意图^[38]Fig.9 Structural diagram of floating optical sensor^[38]

3 国内外研究进展

多年来,国内外科研人员已经开展了大量有关浮动元件壁面剪切应力传感技术的研究工作,提出了多种壁面剪切应力直接测量方法,如浮动电容法、浮动压阻法、浮动光学法等。

3.1 国外研究进展

2004年,Horowitz等人^[39]采用几何莫尔条纹干涉法作为转换技术,开发了一种光学MEMS壁面剪切应力传感器,最小可检测壁面剪切应力值为6.2 mPa。

2008年,Ioppolo等人^[40]研究了一款使用电介质微谐振器的回音壁模式^[41](Whispering Gallery Mode, WGM)偏移的光学MEMS壁面剪切应力传感器。在0~2 Pa的校准范围内,测量到该器件的谐振频率为300 Hz,灵敏度为15.145 pm/Pa,线性度高达100 Hz。此外,2011年,Ayaz等人^[42]在Ioppolo等人的基础上,也进行了相关研究。

2009年,Chandrasekharan等人^[25-26]利用非对称梳齿状结构开发了一种差分电容式壁面剪切应力传感器,该传感器的灵敏度为7.66 mV/Pa,谐振频率为6.2 kHz,最小可检测壁面剪切应力信号为14.9 μPa。该传感器容易受到湿度的影响,引起壁面剪切应力平均值的漂移,只能用于检测波动壁面的剪切应力。

2011年,Chandrasekharan等人^[43]报道了一种用于湍流边界层中测量的电容式直接壁面剪切应力传感器。该传感器采用不对称梳状结构和金属化电极设计,以声学产生的斯托克斯层激励为动态特征。在10 V的偏置电压下,传感器表现出7.66 mV/Pa的线性动态灵敏度,最高可达1.9 Pa的测试极限,谐振频率为6.2 kHz,动态范围大于102 dB。

2015年,Mills等人^[44]报道了基于几何莫尔光学变换的高温蓝宝石微机械壁面剪切应力传感器。其采用了铂薄膜光栅和不锈钢封装,理论最高工作温度超过800 °C,剪切应力的动态灵敏度为76.8 μV/Pa。

2016年,Kim等人^[45]开发了一种带有浮动元件的压电传感器,其可用频率范围最高达800 Hz;在湍流中的信噪比为(15.8 ± 2.2) dB,灵敏度为

$(56.5 \pm 4.6) \text{ pC/Pa}$ 。

2019年, IC2公司开发了 Direct Shear™ CS-0110型电容式剪切应力传感器, 该传感器是一种微机械浮动元件装置, 可实现时间分辨、一维、直接平均和动态壁面剪切应力测量, 动态范围为 $0.1 \text{ mPa} \sim 50 \text{ Pa}$, 尺寸为 $2 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 。此外, IC2公司开发的另一款光学剪切应力传感器 OS-0110也是一种微机械浮动元件装置, 其使用的双光纤阵列封装在圆柱形不锈钢外壳内, 其动态范围为 $0.2 \text{ mPa} \sim 100 \text{ Pa}$, 尺寸为 $1 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$, 最高工作温度可达 425°C 。

2021年, Nima^[46]研究了一种基于MEMS技术的光学传感器, 在壁面剪切应力在 $0 \sim 5.32 \text{ Pa}$ 的层流装置中对该传感器进行校准, 得到其误差为 $1.4\% \sim 2.36\%$, 重复性范围为 $0.68\% \sim 1.96\%$, 能检测到的壁面剪切应力值的最小范围为 $17 \sim 593 \mu\text{Pa}$, 产生的最小和最大动态范围值分别为 79 dB 和 109 dB 。动态表征结果显示, 谐振频率范围为 $1 \sim 8.3 \text{ kHz}$ 。

国外对壁面剪切应力测量及对浮动元件传感技术的研究起步较早, 对浮动电容式、浮动压阻式、浮动光学式壁面剪切应力传感器的研究较多, 针对传感器的性能提升方案相对成熟。

3.2 国内研究进展

2005年, Zhe等人^[16]设计并开发了差分电容式浮动元件传感器。层流通道内的空气流动实验结果表明, 在 $0.04 \sim 0.2 \text{ Pa}$ 的壁面剪切应力范围内, 其灵敏度为 337 mV/Pa , 最小检测壁面剪切应力为 0.04 Pa , 误差为 8% 。

2009年, Cheng^[47]提出了一种新型的电容式壁面剪切应力传感机制, 传感阵列由微机械PDMS结构和柔性印刷电路板组成^[47]。该传感器的最大测量灵敏度为 $1.67\%/\text{mN}$ 。

2010年, 吕海峰等人^[49]设计了一种浮动式壁面剪切应力传感器, 其加工工艺简单, 成品率高。该传感器的整体尺寸为 $3.4 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$ 。在风速范围为 $0 \sim 30 \text{ m/s}$ 的风洞内进行试验, 结果显示传感器的灵敏度为 51.2 mV/Pa 。

2013年, 吕海峰等人研发了一种浮动式剪应力微传感器^[27,50]。通过可动梳齿与固定梳齿之间的电容量变化, 推算出壁面剪应力的^[50-51]。2018

年, 马骋宇也进行了类似研究, 采用耐高温底层隔板式加工工艺制造了壁面剪应力微传感器, 浮动式壁面剪应力微传感器示意图如图10所示, 其性能表现优异^[51]。

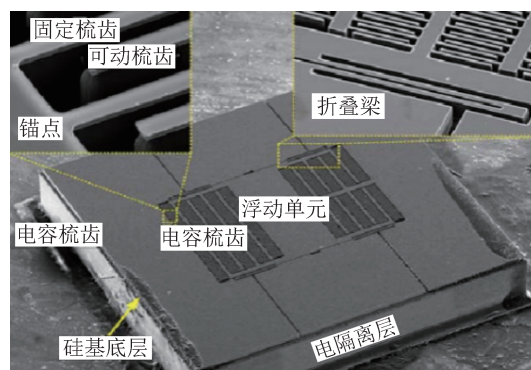


图10 浮动式壁面剪应力微传感器^[50]

Fig.10 Floating wall shear stress microsensor^[50]

2017年, 丁光辉等^[52]提出了电容式浮动单元壁面剪切应力传感器的分析模型。该传感器分析模型能测量的最大壁面剪切应力值为 63 Pa , 非线性为 $1.57\% \text{ FS}$, 最大动态灵敏度为 86.97 mV/Pa 。

2019年, 西北工业大学的Yan等人^[30]研发了一种利用浮动元件传感器来测量壁面剪切应力的仪器。在风洞中对平板进行了基准实验。结果显示, 带有浮动元件传感器的仪器具有 0.92% 的相关归一化标准偏差和 1.5% 的良好线性。动态校准结果表明, 该仪器具有高达 6500 Hz 的动态响应。

2020年, 蒋子蛟^[7]利用浮动元件测力天平对湍流边界层的壁面剪切应力进行研究, 使用测力天平对不同风速下的壁面剪切应力进行测量, 结果表明相对误差不超过 4% 。

相较于国外, 国内对壁面剪切应力测量及对浮动元件传感技术的研究起步较晚, 国内的研究主要集中在浮动电容式、浮动压阻式壁面剪切应力传感器领域, 未见针对浮动光学式壁面剪切应力传感器研究成果的报道。浮动元件传感器国内外研究进展见表2。

为了弥补国内对浮动光学式壁面剪切应力传感器研究的空白, 北京振兴计量测试研究所联合西北工业大学, 在Mills等人^[44]相关研究的基础上, 设计了一款壁面剪切应力测量上限不低于 100 Pa 、测量不确定度为 $1 \text{ Pa} (k=2)$ 的蓝宝石光纤^[53]浮动

表2 浮动元件传感器国内外研究进展对比

Tab.2 Comparison of research progress on floating element sensors at home and abroad

传感器类型	国外研究进展	国内研究进展
浮动压阻式	能检测的最大壁面剪切应力值为 100 Pa; 频率最高可达 1 000 Hz; 最大动态灵敏度为 61.1 mV / Pa	能检测的最大壁面剪切应力值为 60 Pa; 最大动态灵敏度为 51.2 mV / Pa
浮动电容式	能检测到的壁面剪切应力值动态范围为 0.1 mPa ~ 50 Pa; 最大动态灵敏度在 10 mV / Pa 以内	能检测的最大壁面剪切应力值为 63 Pa; 最大动态灵敏度范围为 50 ~ 90 mV / Pa
浮动光学式	能检测到的壁面剪切应力最小值范围为 17 ~ 593 μ Pa; 误差不超过 2%, 重复性达 1%	暂无相关成果报道

光学式壁面剪切应力传感器, 目前传感器敏感芯片和后端处理电路已经完成, 待封装完毕后可进行初步试验。

4 总结与展望

浮动电容式壁面剪切应力传感器的结构简单, 加工容易, 使用差分电容可以消除其对温度的敏感性。然而, 此类传感器容易受到电磁干扰和寄生电容的影响, 可能会影响传感器的噪声基底, 从而影响其可检测到的剪切应力的最小值。此外, 为了保证电容式壁面剪切应力传感器测量液体流量时能够正常使用, 需要进一步开发封装工艺来隔离传感器。

浮动压阻式壁面剪切应力传感器可用于测量气体和液体流体, 通过使用惠斯通电桥来测量由于壁面剪切应力引起的阻力变化。此类传感器易受温度变化影响, 使得平衡惠斯通电桥受到干扰, 从而影响壁面剪切应力测量值的准确性。

浮动光学式壁面剪切应力传感器不包含电子器件, 传感器管芯无电连接, 因此不受电磁干扰和温度效应的影响。此类传感器可用于测量流体流动的情况。但是, 与电容式和压阻式传感器相比, 浮动光学壁面剪切应力传感器的封装更加复杂, 并且光学系统中若存在元件未对准的问题, 会导致传感器的性能降低。

近年来浮动元件壁面剪切应力传感器有了很大的发展, 但现有的浮动元件壁面剪切应力传感器大多缺乏足够的灵敏度和精度来检测壁面剪切应力的极低值。现有的浮动元件壁面剪切应力传感器在校准环境下表现出良好的性能, 但在湍流环境下对其进行测试的报道较少, 仍有待研究。同时, 浮动元件壁面剪切应力传感器在湍流环境

下测试时, 应避免流体中的颗粒物卡在浮动元件间, 从而导致浮动元件受损, 甚至不能正常工作。此外, 在浮动元件传感器加工过程中, 需要格外注意浮动元件与传感器封装件之间的移动间隙以及浮动元件与被测面间的平齐度对壁面剪切应力测量的影响, 应控制形位误差以及避免浮动元件凸起形成逆向台阶。

针对以上问题, 可从优化传感器后端处理电路着手, 例如采用低噪声电学器件、增加电磁屏蔽处理、优化温度补偿方式等, 提高浮动元件传感器检测壁面剪切应力极低值时的灵敏度和精度。也可从优化传感器加工工艺着手, 例如采用一体化设计加工方式提升浮动元件与被测面间的平齐度、改善浮动元件与传感器封装件之间的移动间隙、使用准直夹具提升封装过程中对准操作的可靠性、增加防风沙保护罩等, 提高浮动元件传感器的测量精度。

MEMS技术的不断提升, 使得浮动元件壁面剪切应力传感器朝着微尺度、小型化、一体化方向发展, 为浮动元件传感器应用于湍流测量、判断边界层转捩、维护飞行器安全和优化飞行器结构等领域提供有利的空间和时间分辨力。

参考文献

[1] SHEPLAK M, CATTAFESTA L, NISHIDA T. MEMS shear stress sensors: promise and progress[C]. 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Oregon, USA: AIAA, 2004: 79-104.

[2] 雷强, 高杨, 王雄. MEMS壁面剪切应力传感器研究进展[J]. 中国测试, 2016, 42(7): 1-8.

LEI Q, GAO Y, WANG X. The development progress of MEMS wall shear stress sensors[J]. China Measurement & Test, 2016, 42 (7): 1-8. (in Chinese)

- [3] 周厚祚. 埋藏式SiC高温剪应力传感器的研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
ZHOU H Z. Study on SiC high temperature buried shear stress sensor [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019. (in Chinese)
- [4] NAUGHTON J W, SHEPLAK M. Modern developments in shear-stress measurement [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6): 515-570.
- [5] 高南, 刘玄鹤. 实用化壁面切应力测量技术的综述与展望[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(3): 1-24.
GAO N, LIU X H. A review of wall-shear stress measurement techniques for practical applications [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(3): 1-24. (in Chinese)
- [6] SHEPLAK M, CATTAFESTA L, NISHIDA T, et al. MEMS shear stress sensors: promise and progress [C]. 24th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, Oregon, USA: AIAA, 2004: 1-13.
- [7] 蒋子蛟. 利用浮动平面测量湍流边界层壁面剪切应力的测力天平研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
JIANG Z J. Wall shear stress measurements of turbulent boundary layers using a floating element force balance [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] SCHMIDT M, HOWE R T, SENTURIA S D, et al. Design and calibration of a micro fabricated floating-element shear-stress sensor [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, 35(6): 750-757.
- [9] PAN T, HYMAN D, MEHREGANY M, et al. Micro-fabricated shear stress sensors [J]. AIAA Journal, 1999, 37(1): 66-72.
- [10] HYMAN D, PAN T, RESHOTKO E, et al. Micro-fabricated shear stress sensors [J]. AIAA Journal, 1999, 37(1): 73-78.
- [11] PATEL M P, RESHOTKO E, HYMAN D. Micro-fabricated shear-stress sensors [J]. AIAA Journal, 2002, 40(8): 1582-1588.
- [12] ZONG Z. MEMS floating element sensor array for wall shear stress measurement under a turbulent boundary layer [D]. Massachusetts: Tufts University, 2014.
- [13] ZHAO Z, LONG K R, GALLMAN J, et al. Flow testing of a MEMS floating element shear stress sensor [C]. 52nd American Institute of Aeronautics and Astronautics Aerospace Sciences Meeting, Maryland, USA: AIAA, 2014: 13-21.
- [14] PADMANABHAN A, SHEPLAK M, BREUER K S, et al. Micro-machined sensors for static and dynamic shear stress measurements in aerodynamic flows [C]. IEEE on Solid State Sensors and Actuators International Conference, Chicago, USA: IEEE, 1997(1): 137-140.
- [15] PADMANABHAN A, GOLDBERG H, BREUER K D, et al. A wafer-bonded floating-element shear stress micro-sensor with optical position sensing by photodiodes [J]. Journal of Micro-electro-mechanical Systems, 1996, 5(4): 307-315.
- [16] ZHE J, MODI V, FARMER K R. A micro-fabricated wall shear-stress sensor with capacitive sensing [J]. Journal of Micro-electro-mechanical Systems, 2005, 14(1): 167-175.
- [17] SCHETZ J A. Direct measurement of skin friction in complex flows [C]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, USA: AIAA, 2010: 1-28.
- [18] MERIT T, RYAN J. Direct measurements of skin friction at AEDC hypervelocity wind tunnel 9 [C]. 3rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, USA: AIAA, 2015: 25-37.
- [19] MERIT T, RYAN J. Error source studies of direct measurement skin friction sensors [C]. 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, USA: AIAA, 2015: 97-111.
- [20] NAUGHTON J W, SHEPLAK M. Modern developments in shear-stress measurement [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2002, 38(6): 515-570.
- [21] SCHOBBER M, OBERMERIER E, PIRSKAWETZ S, et al. A MEMS skin friction sensor for time resolved measurements in separated flows [J]. Experiments in Fluids, 2004; 36(4), 593-599.
- [22] 饶成明, 杜伟略, 蒋松昊. 新型MEMS压力传感器的设计与制造 [J]. 传感器与微系统, 2022, 41(6): 70-73, 77.
RAO C M, DU W L, JIANG S H. Design and manufacture of new type of MEMS pressure sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(6): 70-73, 77. (in Chinese)
- [23] 沈伟强, 杨俊超, 马薇, 等. MEMS微热板研究进展 [J]. 传感器与微系统, 2023, 42(7): 6-10.
SHEN W Q, YANG J C, MA W, et al. Research progress of MEMS micro-hot plate [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2023, 42(7): 6-10. (in Chinese)
- [24] SELLS J, CHANDRASEKHARAN V, MELOY J, et al.

- Micro fabricated silicon - on - pyrex passive wireless wall shear stress sensor[J]. *Sensors*, IEEE, 2011: 77-80.
- [25] CHANDRASEKHARAN V, SELLS J, MELOY J, et al. A micro - scale differential capacitive direct wall - shear - stress sensor[J]. *Micro-electromechanical System*, 2011, 20(3): 622-635.
- [26] CHANDRASEKHARAN V, SELLS J, ARNOLD D P, et al. Characterization of a MEMS-based floating element shear stress sensor[C]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, USA: AIAA, 2009: 1-11.
- [27] LYU H, JIANG C, XIANG Z, et al. Design of a micro floating element shear stress sensor[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2013, 30: 66-74.
- [28] BARLIAN A A, PARK S J, MUKUNDAN V, et al. Design and characterization of micro-fabricated piezoresistive floating element-based shear stress sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2007, 134(1): 77-87.
- [29] NATARAJAN V, KATHIRESAN M, THOMASH K A, et al. MEMS sensors for underwater applications[M]. Springer India: Micro and Smart Devices and Systems, 2014: 487-502.
- [30] YAN Y C, JIANG C Y, MA B H, et al. An instrument for wall shear stress measurement[C]. 19th International Symposium on Precision Mechanical Measurements, Chongqing, China; Proceedings of SPIE, 2019: 113-124.
- [31] SEO D, KWON S, BAE N, et al. MEMS wall shear stress sensor for real time onboard monitoring of flow separation over a wing surface[C]. 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting, Texas, USA: AIAA, 2013: 1-8.
- [32] MA B H, MA C Y. A MEMS surface fence for wall shear stress measurement with high sensitivity[J]. *Micro system Technology*, 2016, 22(2): 239-246.
- [33] SULLIVAN D J, KLINE J F, SALAMON M. An optically interrogated, micro fabricated pillar array for wall shear stress sensing[C]. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Nashville, TN, USA: AIAA, 2012: 1-12.
- [34] CHEN T A, MILLS D, CHANDRASEKHARAN V, et al. A miniaturized optical package for wall shear stress measurements in harsh environments[C]. Proceedings of SPIE, Baltimore, MD, USA: 2014.
- [35] AYAZ U K, IOPPOLO T, OTUGEN V. High resolution micro - optical wall shear stress sensor[C]. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Florida, USA: AIAA, 2011: 1-9.
- [36] HOROWITZ S, CHEN T A, CHANDRASEKHARAN V, et al. A wafer-bonded, floating element shear-stress sensor using a geometric moire optical transduction technique[R]. Florida University: Esville Mechanical and Aerospace Engineering, 2007.
- [37] 丁光辉, 马炳和, 邓进军, 等. 浮动电容式剪应力微传感器结构设计解析模型[J]. *实验流体力学*, 2017, 31(3): 53-59.
- DING G H, MA B H, DENG J J, et al. Analytical model for structure design of floating element wall shear stress micro-sensor with capacitive sensing[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2017, 31(3): 53-59. (in Chinese)
- [38] PADMANABHAN A, GOLDBERG H. A wafer - bonded floating-element shear stress microsensor with optical position sensing by photodiodes[J]. *Journal of Micro- electro-mechanical Systems*, 1996, 5(4).
- [39] HOROWITZ S, CHEN T A, CHANDRASEKHARAN V, et al. A micro machined geometric moiré interferometric floating - element shear stress sensors[C]. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada USA: AIAA, 2004: 1037-1042.
- [40] IOPPOLO T, AYAZ U, OTUGEN V, et al. A micro-optical wall shear stress sensor concept based on whispering gallery mode resonators[C]. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Nevada USA: AIAA, 2008: 261-273.
- [41] 温棚宇, 龙桂鲁, 王敏. 回音壁模式光学微腔传感研究进展[J]. *计测技术*, 2023, 43(4): 33-43.
- WEN P Y, LONG G L, WANG M. Review of whispering-gallery-mode microcavity sensing[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(4): 33-43. (in Chinese)
- [42] AYAZ U, IOPPOLO T, OTUGEN M. Wall shear stress sensor based on the optical resonances of dielectric microspheres[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(7).
- [43] CHANDRASEKHARAN V, SELLS J. A microscale differential capacitive direct wall - shear - stress sensor[J]. *Journal of Microelectromechanical System*, 2011, 3(4).
- [44] MILLS D, BLOOD D, SHEPLAK M. Development of a sapphire optical wall shear stress sensor for high-temperature applications[C]. Transducers international Conference on Solid - state Sensors, Anchorage, AK, USA: IEEE, 2015.
- [45] KIM T, SAINI A, KIM J, et al. A piezoelectric shear stress sensor[J]. *International Society for Optics and Pho-*

- tonics, 2016.
- [46] EBRAHIMZADE N. Optical MEMS sensors for wall-shear stress measurements [D]. Newcastle: Newcastle university, 2021.
- [47] CHENG M, HUANG X, MA C, et al. A flexible capacitive tactile sensing array with floating electrodes[J]. Journal of Micromechanics & Microengineering, 2009, 19(11).
- [48] 叶亚龙. 基于石墨烯和银纳米线复合的柔性应力传感器的设计与研制[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- YE Y L. Design and development of flexible stress sensor based on graphene and silver nanowire composite [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019. (in Chinese)
- [49] 吕海峰, 姜澄宇, 邓进军, 等. 用于壁面切应力测量的微传感器设计[J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 54-60.
- LYU H F, JIANG C Y, DENG J J, et al. Design of micro sensor for wall shear stress measurement [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 54-60. (in Chinese)
- [50] LYU H F, JIANG C Y, XIANG Z J, et al. Design of a micro floating element shear stress sensor[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, 30: 66-74.
- [51] 马骋宇. 耐高温底层隔板式壁面剪应力微传感器制造工艺[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- MA C Y. Design and fabrication of high temperature mems surface fence for wall shear stress measurement[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018. (in Chinese)
- [52] DING G H, MA B H, YUAN W Z, et al. Development of the floating element wall shear stress sensor with an analytical model[C]. 2017 IEEE Sensors, Glasgow, UK: IEEE, 2017.
- [53] 王楠楠, 师钰璋, 王高等. 蓝宝石光纤高温测量技术进展[J]. 计测技术, 2018, 38(6): 61-68.
- WANG N N, SHI Y Z, WANG G, et al. Review of High Temperature Measurement with Sapphire Monocrystalline Fiber[J]. Metrology & Measurement Technology, 2018, 38(6): 61-68. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 付政伟 (1998—), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为力学计量及检测技术。