DOI: 10.3901/JME.2021.08.013

基于微机械电子技术的黏度测量传感器*

黄琳雅^{1,2,3,4} 赵立波^{1,2,3,4} 罗国希^{1,2,3,4} 李支康^{1,2,3,4} 吴德志⁵
林启敬^{1,2,3,4} 杨 萍^{1,2,3,4} 蒋庄德^{1,2,3,4}

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049;

2. 教育部微纳制造与测试技术国际合作联合实验室 西安 710049;

3. 西安交通大学(烟台)智能传感技术与系统研究院 西安 710049;

4. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049;

5. 厦门大学机电工程系 厦门 361005)

摘要: 黏度作为流体特性的基本问题,在生物化工等诸多工程中是控制生产流程、保证安全生产、进行医学诊断及科学研究的基础性热物数据,为满足各个领域高精度与高效快捷的黏度测量需求,近年来黏度测量手段已不局限于如毛细管法、旋转法等传统意义的宏观测量方法,基于微纳米尺度的黏度测量技术已展现出其突出的发展与应用前景。微机械电子系统(Micro-electromechanical systems, MEMS)技术的蓬勃发展促使黏度测量集成化、智能化与实时性,多样化黏度测量方法不断涌现,其中谐振式黏度测量受到颇为广泛而深入的关注,并显示了瞩目的检测性能。首先回顾传统的黏度测量方法,然后再介绍了基于微机械电子技术的谐振式黏度测量方法,并分别总结了各自的特点。最后,对 MEMS 谐振式黏度测量方法的发展趋势进行了展望。

关键词: 流体黏度; 测量方法; 微机械电子系统; 谐振

中图分类号: TP212

Review on Viscosity Measurement Sensor Based on Micro-electromechanical Systems Technology

HUANG Linya^{1,2,3,4} ZHAO Libo^{1,2,3,4} LUO Guoxi^{1,2,3,4} LI Zhikang^{1,2,3,4} WU Dezhi⁵
LIN Qijing^{1,2,3,4} YANG Ping^{1,2,3,4} JIANG Zhuangde^{1,2,3,4}

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

2. International Joint Laboratory for Micro/Nano Manufacturing and Measurement Technologies,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

3. Xi'an Jiaotong University (Yantai) Research Institute for Intelligent Sensing Technology and System,

Xi'an 710049;

4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

5. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005)

Abstract: Viscosity has been regarded as an essential issue of fluid characteristics in a widespread field, such as biochemical engineering, since it is the basic thermal property to control the production process, ensure safe production, and conduct medical diagnosis and scientific research. In order to achieve a high-precision and high-efficiency viscosity measurement in various fields, in recent years, the viscosity measurement methods have not been limited to traditional macro measurements, such as capillary method, and rotational method. But the viscosity measurement technology under micro-nano scale has shown its outstanding development and application prospects. The rapid development of micro-electromechanical systems (MEMS) technology has promoted the viscosity

* 国家自然科学基金(51890884、51875449)、中央高校基本科研业务费(xpt012020004)和国家重大研究计划(2020YFB2009100)资助项目。
20201230 收到初稿, 20210210 收到修改稿

measurement to integration, intelligence and real-time. Meanwhile, diversified viscosity measurement methods have continuously emerged. The resonant viscosity measurement has received extensive and in-depth attention, which has shown remarkable performance. The traditional viscosity measurement methods are briefly recalled, and then the resonant methods for viscosity determination based on micro-electromechanical system technology are introduced, with summarizing their outstanding characteristics. Finally, the development trend of viscosity measurement methods based on MEMS resonance technology is prospected.

Key words: fluid viscosity; measurement method; micro-electromechanical system; resonant vibration

0 前言

黏度是衡量流体黏性大小的物理量,黏度测量在石油开采与油品评定、食品与制药科学的质量控制,以及疾病诊断的体液黏度测定等领域^[1-4],可帮助更充分地掌握系统行为,并且对其做出相当程度的评测与控制。随着社会科技的快节奏发展,能源生化工程对高效率、低成本的应用需求日益突出,使得小样品量、低功耗、快速响应以及高精度、大范围地在线监测流体黏度^[5-7],已成为不可忽视的发展趋势与迫切需求。

典型的传统黏度测量方法有毛细管法、旋转法、落体法、振动法、平板法、黏度杯法^[8-10]等。基于这些黏度测量方法而衍生出多种黏度计与流变仪,这些黏度计可满足低黏至高黏流体的高精度测量(精度可达 0.01%)^[10],但通常其结构复杂,且普遍为大样本量的非原位测量,或者百赫兹以下的低频检测,导致由于采样环境与测试环境不同,引入显著的黏度测量偏差与不确定度;或者为了得到不同条件下待测参数的变化规律,不得不采用多次多点取样法进行分析,这种做法工作量大,效率低,误差较大,响应时间长,难以实现实时测量以及输出多路模拟量信号^[11]等黏度测量需要。

微纳机械电子系统(Micro-electromechanical systems, MEMS)的基本特征是尺度微型化和系统集成化^[12],近年来 MEMS 技术的发展为流体黏度传感器提供了新的发展前景,基于 MEMS 技术的谐振式传感器具有精度高、分辨率高、响应快、低功耗、抗干扰能力强等优点^[13-14],能够为流体黏度高性能、实时检测提供可靠的技术基础。同时,扩宽检测范围、提升高黏度流体中的黏度测量稳定度与精度,也是微纳谐振式传感器亟待解决的关键问题。

此外,随着基于 MEMS 技术的传感器技术、电子技术、光学技术、半导体技术、声学和材料技术等科学的不断进步,一大批黏度测量方法和装置不断地涌现。而基于谐振原理的微纳传感器成为国内外十分突出的研究热点,已经在设计理论、制造工

艺、测量机理^[15-20]等方面取得了瞩目的研究成果。由于流体流动与 MEMS 谐振器的振动本征模式之间复杂的相互作用,基于 MEMS 谐振器的流体传感将继续成为未来研究的重点^[21]。

本文以 MEMS 谐振式黏度测量为主要介绍内容,分为电磁激励黏度谐振器、压电激励黏度谐振器、热激励黏度谐振器、声波黏度谐振器四个方面,从其激励方式、工作机理、振动模式等角度进行结构特点与检测性能分析与阐述,最后对 MEMS 技术黏度测量方法进行展望。

1 电磁激励黏度谐振器

电磁激励黏度谐振器是通过为谐振器提供外置磁场与输入电流/电压的方式,利用磁场与电流/电压的交互作用产生交变洛伦兹力,从而为黏度谐振器提供一定频率的交变驱动力,使其在流体中产生稳定谐振,并辅以谐振参数与电信号的检测与处理,实现黏度测量。

1.1 基于微悬臂梁的流体黏度测量

微悬臂梁结构具有结构简单、操作灵活、快速响应、免标记等特点,是谐振器件中应用最为广泛的结构^[13, 22],其在具有复杂物理性质的流体,特别是液体环境中仍能实现可靠的黏度测量。早在 19 世纪末,ODEN 等^[23-24]分别开展了利用 AFM(原子力显微镜)的微悬臂梁谐振频率、品质因子、振动幅值等动态特性来进行流体黏度的测量。在 ODEN 的试验装置中,所需样品不足 1 mL,黏度测量范围为 1~104 mPa·s。在 AHMED 的设备中,所需样品仅为 50 μ L,且时间分辨率为 1 Hz。基于 AFM 装置实现黏度的测量对样品的需求量小,并且可以实现对多个测量点的测量。

美国学者 GOODWIN 等^[25-28]采用基于 MEMS 技术矩形悬臂梁的振动法进行黏度测量,如图 1 所示。他们在微悬臂梁上制作有环绕的铝线圈,将线圈通交流电后然后将其置于磁场中,微悬臂梁由于受到交变的电磁力而发生振动,振动电信号通过惠斯通电桥输出。他们通过测量微悬臂梁在真空中的谐振频率和品质因子以及在被测流体中的谐振频率

和品质因子来得到被测流体的黏度。基于此黏度测量方法, 测量了温度在 323~423 K 之间和压强在 0.1~68 MPa 之间等条件下的甲苯和辛烷的黏度; 温度在 323~423 K 之间和压强达 68 MPa 时氩的黏度; 温度在 297~373 K 之间和压强在 1~62 MPa 之间氩、氮和甲烷的黏度以及温度在 313~373 K 和压强达 60 MPa 时氮、甲苯、水、1-丙烯、六氟氧化聚合物等六种流体以及黏度范围在 0.038~275 mPa·s 之间的标准流体的黏度。黏度测量精度约为 10%。

图1 电磁激励矩形微悬臂梁

同样采用电磁激励-压阻检测方式, 西安交通大学 ZHAO 等^[29-30]对用于流体黏度检测的电磁激励式悬臂梁也进行了深入研究。通过增加悬臂梁宽度而增加雷诺数的方式, 降低流体黏性力对其影响, 提升品质因子并有助于实现无黏流体建模^[31], 从而获得流体黏度与密度的解耦测量工作方程。此外, 悬臂梁较大表面积为线圈的灵活布置提供便利, 该团队利用线圈的非对称布置, 通过电磁激励实现变截面微悬臂梁的多模态激发, 即一阶弯曲与二阶扭转模态, 且针对扭转模态下微悬臂梁的洛伦兹力特性, 提出双侧边激发方式(图 2), 有效避免模态串扰, 提升微悬臂梁的高阶振动稳定性与拾振电信号输出。在黏度范围在 0.217~0.961 mPa·s 间的正戊烷, 正己烷, 环己烷等烷烃类与甲基苯七种液体中, 以及梯形与矩形两种微悬臂梁扭转模态下, 黏度测量精度可至 1.5%。

图2 双侧边电磁激励微悬臂梁

由于微悬臂梁采用单晶硅制作, 质量负载能力并不高, 在高黏流体下其谐振形态及稳定性受到显著约束; 此外, 微悬臂梁结构的品质因子受流体黏性影响显著^[32], 特别是在低阶模态下, 低品质因子微悬臂梁会在黏性液体中产生谐振失稳、信噪比低、谐振点捕捉难度大等问题。

1.2 基于面内振动的流体黏度测量

品质因子是与传感器检测极限 (Limit of detection, LOD) 直接相关的重要指标, 是共振峰尖锐程度的量化表示并为最小可检测频移设置极限, 对提升微纳谐振式传感器黏度测量精度、适用范围、稳定度等综合性能有着至关重要的作用。用于流体检测的谐振器品质因子可表征如下^[33]

$$\frac{1}{Q_{total}} = \frac{1}{Q_i} + \frac{1}{Q_a} + \frac{1}{Q_f} \approx \frac{1}{Q_f}$$

式中, Q_{total} 为浸没于流体中谐振器的品质因子之和, Q_i 与谐振器自身材料与结构引起的内部阻尼损耗相关; Q_a 为与谐振器支撑引起的锚固阻尼损耗相关; Q_f 为与谐振器所在流体的黏性损耗相关。对于浸没于流体中的谐振器而言, 黏性阻尼为主导阻尼且远大于其他阻尼, 因而对谐振器的品质因子起决定性作用。为提升微机械谐振器在流体中的品质因子, 降低谐振器所受黏性阻尼成为优化设计谐振器结构及其振动模式的重要方向。由此, 相较微悬臂梁常见的面外振动, 基于面内振动的谐振器在流体检测领域被广泛提出。对电磁激励谐振器而言, 则可通过结构设计、振型优化与磁场配置实现面内振动下流体黏度测量。

维也纳科技大学 RIESCH 等^[34]提出一种电磁激励“H”梁面内振动结构, 即通过电磁作用产生横向洛伦兹力激发 H 梁的一阶面内弯曲振动(图 3), 并指出面内模式下谐振器在流场中激发剪切波, 相较面外模式下谐振器在流场中激发压缩波使其自身受到相当大的流体阻尼, 面内谐振器通过改变振动方式引起流体阻尼作用形式转变为滑膜阻尼主导, 大大降低传感器在黏度测量时所受流体阻尼。所提出传感器在 1.06~10.97 mPa·s 黏度范围内, 输出电压可至 10 μV。

奥地利学者 ABDALLAH 等^[35-36]采用镍黄铜金属薄板为基底研制了基于电磁激励、电磁拾振的对称面内平板谐振器(图 4), 即通过四根折叠梁与双平板结构的对称设计, 通过产生横向洛伦兹力驱动谐振器产生面内振动, 并利用电磁感应将振动信号转换为电信号输出。采用高阶对称面内振动模式, 旨在减小由支撑端引起的锚固阻尼损耗, 如图 5 所示为该结构下的对称与非对称振动模态, 空气(黏度约

0.018 mPa · s) 中品质因子高达 5 000, 在 3.33 ~ 70.65 mPa · s 液体黏度范围内, 黏度测量精度优于 10%。

图 3 H 梁面内振动谐振器

图 4 金属薄板面内谐振器

图 5 金属薄板面内对称与非对称振动模式

电磁激励黏度谐振器具有模态激发方式灵活、驱动力强等优点, 驱动力大小与方向均可由磁场及输入电压/电流灵活调控, 但同时引入了外界干扰磁场, 且该类谐振器往往需要外置磁铁, 降低了传感器的微型化集成与封装。因此, 外置磁场的优化设计与封装成为提升电磁激励黏度传感器应用可行性的重要研究方面。

2 压电激励黏度谐振器

随着 MEMS 制备技术的发展, 铌酸锂、锆钛酸

铅压电陶瓷(PZT)、氮化铝、氧化锌等压电晶体具有更稳定的制备工艺, 使其在流体黏密度、压力、加速度、滤波器等多类谐振器中得到更广泛的应用。压电激励黏度谐振器是采用压电晶体或沉积压电薄膜等方法, 利用压电材料的逆压电效应为谐振器提供交变驱动力, 从而实现谐振器的稳定谐振与黏度检测。

2.1 基于音叉的流体黏度测量

压电音叉在黏度测量领域, 特别在高黏、高压、高温等复杂流体环境^[37-38]中的颇受关注, 其中石英音叉可依赖于晶体自身压电性与高品质因子, 且音叉谐振器具有结构稳定性高、抗干扰能力强等优点, 但其与 M/NEMS 工艺兼容性差, 使其制备难度大、成本高, 难以满足小分辨率流体检测的传感器微型集成化需求, 因而探索新型的压电晶体, 如铌酸锂晶体、钽酸锂晶体, 并使其与 M/NEMS 工艺具有更好的兼容性, 成为压电音叉的进一步发展方向。

美国学者 GONZÁLEZ 等^[39]利用 TE Connectivity 公司制备的铌酸锂晶体压电音叉(图 6), 通过在叉体沉积金属层使叉体一端利用逆压电效应为音叉提供谐振驱动力, 叉体另一端则通过压电效应将振动转换为电信号输出, 设计搭建闭环反馈电路实现压电音叉的自激振荡, 从而实现油田流体等非牛顿流体黏度的快速在线测量, 时间分辨率达 1 ms, 且可分辨毫米级液滴, 黏度测量范围至 158 cP。

图 6 铌酸锂压电音叉

2.2 基于 AlN 的流体黏度测量

相较 PZT、ZnO 等压电材料, 氮化铝(AlN)压电层具有介电常数小、热稳定高、无污染、绝缘性好、电极布置灵活等优点, 使其在低频至高频, 纳米至微米尺度以及弯曲、扭转及厚度剪切^[40-42]等不同谐振模式下、在滤波器、表面波及体声波器件、加速度计以及流体黏密度传感器等方面受到国内外学者的青睐。

维也纳科技大学 SCHMID 团队^[33, 43-47]近十年来从事用于流体检测的 AlN 压电谐振器研究, 已在流体黏度测量领域进行了非常深入且系统的研究:

通过压电电极的交替分布，激发微悬臂梁高阶屋顶瓦形振动模式，如图 7、8 所示，利用高阶模式增加谐振器固有储存能量同时减小流体阻尼能量耗散，使其适用于高黏与超高黏流体测量，黏度测量范围可至 615cP；设计搭建 PLL 振荡器与反馈接口电路，实现谐振器的自激励自检测，以及流体黏度的在线检测与实时分析，所需样品量少于 7 mL，黏度分辨率优于 $1 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，5~286 cP 黏度范围内精度优于 16%；研究对比面内与面外模式谐振器对流体测量的影响，指出对于流体浸没式谐振器，面内模式更适用于黏度评定，而面外模式更适用于密度评定；基于 AlN 压电激励下的长度伸缩模态板状谐振器，如图 9 所示，提出平衡谐振器的声学损耗与黏性损耗可获得最大品质因子，因而为利用流体声波的干扰并降低声损耗，通过四分之一波长流体腔设计，将该谐振器在异丙醇(黏度约 $2 \text{ mPa}\cdot\text{s}$)中的品质因子提升 40%。

图 7 AlN 压电微悬臂梁

图 8 压电微悬臂梁高阶模式下谐振频率-品质因子曲线图

图 9 AlN 压电面内伸缩模态谐振器

2.3 基于薄膜结构的黏度测量

西安科技大学 LU 等^[48]提出 PVDF 压电激励薄膜实现微量流体的黏度测量，图 10 为检测示意图。

膜整体采用“三明治”结构，即顶部电极，压电薄膜和底部电极，膜的边界完全固支。膜下面是一个空腔，用于连接到真空系统以在膜中产生应力；膜的顶表面与被测液体接触，用于感受流体不同黏度并引起频率偏移。黏度测量所需流体样品仅为 12~48 nL(薄膜尺寸 2~4 mm)，黏度范围可至 1 733 cP。

图 10 压电激励薄膜黏度检测示意图

压电激励黏度谐振器相较电磁谐振器无需外置磁场，通过金属电极沉积即可激发谐振器振动，具有更好的微型化封装特性与抗干扰能力，是当前在流体黏度领域十分有潜力的谐振器研发方向之一。但当前国内对 PZT、AlN、铌酸锂等压电材料的工艺还远不成熟，其他新型压电材料多数仍处实验室研发阶段，提高了该类器件的制备成本与难度，也使压电材料的研发与应用成为该类谐振器亟待解决的关键问题。

3 热激励黏度谐振器

热激励黏度谐振器是利用谐振器产生的热应力作为其谐振驱动力从而进行黏度测量，且根据热应力产生方式不同，主要可分为电热激励与光热激励。电热激励是利用谐振器上热电阻的热效应产生温度梯度应力进行谐振激励；光热激励则利用镀有吸热材料的谐振器，在受到光照之后产生热应力作为其谐振激励力。

美国罗切斯特理工学院 PUCHADES 等^[49]采用电热激励和压阻拾振原理，设计了一种基于 MEMS 双金属热致动器的振动黏度计。当硅/铝双金属膜片受热时，由于硅膜片和铝膜片的热扩散系数不同便会产生双金属效应，并且这种效应会加强硅膜片的弯曲变形效应。通过有限元分析可知，放在硅膜片上的铝膜片将会引起硅膜片向上挠曲，然后用一个集成的压阻式多晶硅惠斯通电桥测得硅膜片垂直的运动量。当激励偏置保持常数时，黏度的变化就与硅/铝双金属膜片的振动幅度的变化相关。以此获得被测流体的黏度值，整套装置是 CMOS 兼容的，价格较低而且运行可靠，但文献中未见其具体的黏度

测量范围以及测量精度。此外,美国佐治亚理工学院 JAE 等^[50]也利用电热激励-压阻拾振原理,提出一种面内振动圆盘结构(图 11)用以生化流体的传感领域,空气中品质因子可达 5 800,水(黏度约 1 mPa·s)中品质因子可至 100。

图 11 电热激励面内圆盘结构

电热激励通常是利用热电阻伸缩为谐振器提供驱动力,其谐振器简单可靠,但具有响应较慢、功耗大的不足,相较之下,光热激励谐振器因其工作可靠、容易控制、无寄生振动且无相位畸变等优点在驱动微结构振动方面具有突出的吸引力,但其需要搭建较为复杂的光学系统。

巴塞尔大学 BIRCHER 等^[51]提出一种微量流体实时性测量的微纳米悬臂梁黏度传感器,工作原理如图 12 所示,悬臂振动是由光热激励驱动的,并由使用不同波长的两个激光束的光束偏转系统进行拾振,通过两相配置与微流体流通池相结合,实现连续流动流体下 5 nL 样品黏度的实时测量,在黏度范围 1~20 mPa·s 内(甘油浓度范围为 30.5%~73.0%),测量精度约 25%。

图 12 光热激励-光学检测试验装置示意图

4 声波黏度谐振器

声波黏度谐振器是利用谐振器激发出能够在流体中传递的声波,通过在接收端采集并输出声波信

号,分析获取其声学参数而进行黏度测量。

法国学者 PATOIS 等^[52-53]采用近场声学原理,如图 13 所示,将一个连接在机电式谐振器上的球形探头浸没在被测流体中,当探头发生振动时,此时探头作为亚波长声源与被测流体相互作用,而且探测深度与声源的半径有关。被测流体以一个复杂的声学负载作用在球形探头上,并最终转化为机电式谐振器的频移和共振阻尼。通过测量机电式谐振器的频移和品质因子,我们就能得到被测流体的黏度。整套装置所需样品体积较小,仅为 3 μL;可以实现 1~100 mPa·s 范围内的黏度测量,测量精度约为 5%。

图 13 近场声波的流体黏度测量装置

美国学者 YILDIRIM 等^[7]提出一种声表面波黏度传感器,结构如图 14 所示,输入与输出叉指换能器用于激发与接收瑞利波,并将铌酸锂压电基底与聚二甲基硅氧烷(PDMS)微流体道键合,微流体道用于充满微量待测流体,利用不同黏度液体使得瑞利波向其发射压缩波而使自身波损耗程度不同实现黏度测量,试验采用去离子水,以及去离子水中浓度为 10%、20%、30%和 40%的甘油进行测试,得到瑞利波插入损耗与频移都随甘油浓度而变化,即当微通道为空时,插入损耗幅度最低,甘油的浓度越高,损耗幅度越大,相移越大。

图 14 瑞利声表面波黏度传感器结构示意图

山东科技大学 CHEN 等^[54]提出了薄膜体声波谐振器(FBAR)实现血液的凝血监测(图 15)。通过横向电场激励是谐振器在剪切模式下以 1.9 GHz 频率工作,样品消耗量仅需 1 μL,血液黏弹性变化引起明显的频率响应梯阶曲线,并结合由振荡器,频率信号处理和读出电路组成的便携式测试系统,用以直接输出数字信号,以此实现微量血液凝血监控。

该传感器具有体积小、重量轻、成本低、样品消耗少等优点，在小型化、自动化与在线性流体设备分析系统中具有很好的应用潜力。

图 15 FBAR 传感器黏度检测装置示意图及其显微照片以及结构横截面示意图

声波黏度谐振器中以声表面波黏度谐振器和体声波黏度谐振器更为常见，该类传感器具有体积小、所需样品量少等优点，更有利于实现实时在线地流体黏度测量；但声波在流体中传递伴随着显著的声波能损失，降低了谐振器品质因子，这也制约了该类传感器的黏度测量范围。此外，也有在非谐振声波检测流体黏度方面，日本庆应大学 EBISUI 等^[55]设计了一种基于激光诱导表面张力波的微型光学黏度传感器，如图 16 所示。在他的试验装置中，利用两个激光光束在流体表面发生干涉就产生了 LiCW(激光诱导表面张力波)，并用探测激光观察包含所测流体的表面信息 LiCW 的特性，就能得到待测流体的黏度和表面张力。这种基于激光诱导表面

图 16 微型光学黏度传感器

张力波的的光学黏度传感器，可以实现完全非接触式测量，微秒级的高速度测量和微升级的小样本测量。由于采用光学仪器实现黏度的测量，因此装置的安装和调试较为复杂，同时，测量对周围的环境要求较高。此外，也不适用于多个测量点的测量。

5 结论与展望

针对传统的黏度测量方法所存在的问题并结合基于微机械电子系统技术的谐振式黏度测量方法，黏度测量主要将朝着以下几个方向发展。

(1) 黏度测量方法多样化。随着科学技术的发展，将会出现更多基于不同原理的黏度测量装置，以满足低黏至高黏流体、牛顿与非牛顿流体，静态与持续流动流体、以及动态高低温度与压力条件下的黏度测量，其中基于压电材料的谐振器在流体检测中具有工艺简单、易集成、驱动力大、工作模式灵活可控等优点，使近年来黏度传感器呈现突出的多学科研究活力。

(2) 黏度测量综合性能提升。高黏及动态压力、温度等复杂流体条件下，黏度测量精度浮动大、精度不高的问题依旧是当前 MEMS 谐振式黏度传感器亟待解决的关键，使得研究机械、电学、声场与流场的多物理场耦合理论，从而获得更精确的频域建模以指导谐振器参数优化与黏度方程解耦表达式，对促进黏度测量精度、分辨率与适用范围的提升具有显著的研究必要性与重要性。

(3) 黏度测量系统智能化与便捷化。虽然当前黏度测量方法日益成熟完善，但仍存在设备结构复杂、局限为静态流体离线检测、流体样本消耗大的弊端，因而设计自激自检型谐振式传感器并将其与微纳米集成技术、计算机自动化技术相结合，以实现微量流体的黏度自动在线测量，也是当前黏度测量展现出的重要趋势。

参 考 文 献

- [1] KHAN M F, SCHMID S, LARSEN P E, et al. Online measurement of mass density and viscosity of pL fluid samples with suspended microchannel resonator[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 185: 456-461.
- [2] ZHANG C, KALUVAN S, ZHANG H, et al. PMN-PT based smart sensing system for viscosity and density measurement[J]. Measurement, 2017, 101: 15-18.
- [3] 丁晓炯. 化纤行业在线黏度和实验室黏度测量数据转

- 换研究[J]. 高科技纤维与应用, 2020, 45(2): 41-48.
- DING Xiaojiong. Study on data conversion of online viscosity and laboratory viscosity measurement in chemical fiber industry[J]. Hi-Tech Fiber and Application, 2020, 45(2): 41-48.
- [4] 王敏杰, 田慧卿, 赵丹阳. 聚合物熔体微尺度剪切黏度测量方法与黏度模型[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 21-29.
- WANG Minjie, TIAN Huiqing, ZHAO Danyang. Micro-scale shear viscosity testing approach and viscosity model of polymer melts[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16): 21-29.
- [5] MARQUEZ S, ALVAREZ M, FARINA S D, et al. Array of microfluidic beam resonators for density and viscosity analysis of liquids[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2017, 26 (4): 749-757.
- [6] HUANG L, ZHAO L, LU D, et al. A Novel resonator based on in-plane mode for fluid density and viscosity measurements[C/CD]// The 14th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Thailand, Bangkok, April 11-14, 2019.
- [7] YILDIRIM B, SENVELI S U, GAJASINGHE R W R L, et al. Surface acoustic wave viscosity sensor with integrated microfluidics on a PCB platform[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(6): 2305-2312.
- [8] 陈惠钊. 粘度测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 2002.
- CHEN Huizhao. Viscosity measurement[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2002.
- [9] 高桂丽, 李大勇, 石德全. 液体粘度测定方法及装置研究现状与发展趋势简述[J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(2): 65-70.
- GAO Guili, LI Dayong, SHI Dequan. Research situation and development trend of measurement methods and devices of liquid viscosity[J]. Chemical Automation and Instrumentation, 2006, 33(2): 65-70.
- [10] 黄漫国, 刘德峰, 李欣, 等. 液体黏度测量技术的发展现状与展望[J]. 测控技术, 2015(4): 1-4.
- HUANG Manguo, LIU Defeng, LI Xin, et al. Development and trend of liquid viscosity measurement technology[J]. Measurement and Control Technology, 2015(4): 1-4.
- [11] 苏尔皇. 液体的粘度计算和测量[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- SU Erhuang. Calculation and measurement of liquid viscosity[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986.
- [12] SOLGAARD O, GODIL A A, HOWE R T, et al. Optical mems: From micromirrors to complex systems[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2014, 23(3): 517-538.
- [13] ZHAO L, HUANG L, HU Y, et al. Temperature compensation in fluid density measurement using micro-electromechanical resonant sensor[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(12): 125001.
- [14] BALOCH S K, JONÁŠ A, KIRAZ A, et al. Determination of composition of ethanol-CO₂ mixtures at high pressures using frequency response of microcantilevers[J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2018, 132: 65-70.
- [15] ZHAO L, HUANG L, LUO G, et al. An immersive resonant sensor with microcantilever for pressure measurement[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111686.
- [16] REZAZADEH G, GHANBARI M. On the mathematical modeling of a MEMS-based sensor for simultaneous measurement of fluids viscosity and density[J]. Sensing and Imaging, 2018, 19: 27.
- [17] XU T, ZHAO L, JIANG Z, et al. Equivalent circuit models of cell and array for resonant cavity-based piezoelectric micromachined ultrasonic transducer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2020, 67(10): 2103-2118.
- [18] ZHAO L, ZHAO Y, XIA Y, et al. A novel CMUT-based resonant biochemical sensor using electrospinning technology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7356-7365.
- [19] SCHULTZ J A, HEINRICH S M, JOSSE F, et al. Lateral-mode vibration of microcantilever-based sensors in viscous fluids using timoshenko beam theory[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2015, 24(4): 848-860.
- [20] GAO R, WANG X, WANG M, et al. Nonlinear dynamics of lateral micro-resonator including viscous air damping[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 20(3): 75-78.
- [21] PLATZ D, SCHMID U. Vibrational modes in MEMS resonators[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2019, 29(12): 123001.
- [22] JOHNSON B N, MUTHARASAN R. Biosensing using dynamic-mode cantilever sensors: A review[J]. Biosens Bioelectron, 2012, 32(1): 1-18.

- [23] ODE N P I, CHEN G Y, STEELE R A, et al. Viscous drag measurements utilizing microfabricated cantilevers[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(26): 3814-3816.
- [24] AHMED N, NINO D F, MOY V T. Measurement of solution viscosity by atomic force microscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(6): 2731-2734.
- [25] GOODWIN A R H, DONZIER E P, VANCAUWENBERGHE O, et al. A vibrating edge supported plate, fabricated by the methods of micro electro mechanical system for the simultaneous measurement of density and viscosity: Results for methylbenzene and octane at temperatures between (323 and 423) K and pressures in the range (0.1-68) MPa[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2006, 51(1): 190-208.
- [26] GOODWIN A R H, FITT A D, RONALDSON K A, et al. A vibrating plate fabricated by the methods of microelectromechanical system (MEMS) for the simultaneous measurement of density and viscosity: Results for argon at temperatures between 323 and 423 K at pressures up to 68 MPa[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2006, 27(6): 1650-1676.
- [27] GOODWIN A R H. A MEMS vibrating edge supported plate for the simultaneous measurement of density and viscosity: Results for argon, nitrogen, and methane at temperatures from (297 to 373) K and pressures between (1 and 62) MPa[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2009, 54(2): 536-541.
- [28] GOODWIN A R H, JAKEWAYS C V, DE LARA M M. A MEMS vibrating edge supported plate for the simultaneous measurement of density and viscosity: Results for nitrogen, methylbenzene, water, 1-propene, 1, 1, 2, 3, 3-hexafluoro-oxidized-polymd, and polydimethylsiloxane and four certified reference materials with viscosities in the range (0.038 to 275) mPa·s and densities between (408 to 1834) kg·m⁻³ at temperatures from (313 to 373)K and pressures up to 60 MPa[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2008, 53(7): 1436-1443.
- [29] ZHAO L, HU Y, WANG T, et al. A MEMS resonant sensor to measure fluid density and viscosity under flexural and torsional vibrating modes[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 1-15.
- [30] HU Y, ZHAO L, WANG T, et al. The fluid viscosity measurement based on variable cross-section MEMS cantilever under torsional excitation[C]//2015 IEEE SENSORS. IEEE, 2015: 1-4.
- [31] VAN EYSDEN C A, SADER J E. Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope: Arbitrary mode order[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(4): 044908.
- [32] WANG G, TAN C, LI F. A contact resonance viscometer based on the electromechanical impedance of apiezoelectric cantilever[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 267: 401-408.
- [33] KUCERA M, WISTRELA E, PFUSTERSCHMIED G, et al. Design-dependent performance of self-actuated and self-sensing piezoelectric-AlN cantilevers in liquid media oscillating in the fundamental in-plane bending mode[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 200: 235-244.
- [34] RIESCH C, REICHEL E K, JACHIMOWICZ A, et al. A suspended plate viscosity sensor featuring in-plane vibration and piezoresistive readout[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2009, 19(7): 075010.
- [35] ABDALLAH A, REICHEL E K, VOGLHUBER-BRUNMAIER T, et al. Symmetric mechanical plate resonators for fluid sensing[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 232: 319-328.
- [36] ABDALLAH A, REICHEL E K, HEINISCH M, et al. Symmetric plate resonators for viscosity and density measurement[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 87: 36-39.
- [37] LIU Y, DIFOGGIO R, SANDERLIN K, et al. Measurement of density and viscosity of dodecane and decane with a piezoelectric tuning fork over 298-448K and 0.1-137.9 MPa[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, 167(2): 347-353.
- [38] 廖敬晓. 基于石英音叉传感器的油品特性测试方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- LIAO Jingxiao. Research on testing method of oil characteristic based on quartz tuning fork sensor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [39] GONZALEZ M, SEREN H R, HAM G, et al. Viscosity and density measurements using mechanical oscillators in oil and gas applications[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(4): 804-810.
- [40] XU W, APPEL J, CHAE J. Real-time monitoring of whole blood coagulation using a microfabricated contour-mode film bulk acoustic resonator[J]. *Journal of*

- Microelectromechanical Systems, 2012, 21 (2): 302-307.
- [41] WU G, XU J, ZHANG X, et al. Wafer-level vacuum-packaged high-performance AlN-on-SOI piezoelectric resonator for sub-100-MHz oscillator applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2018, 65(4): 3576-3584.
- [42] HUI Y, GOMEZ-DIAZ J S, QIAN Z, et al. Plasmonic piezoelectric nanomechanical resonator for spectrally selective infrared sensing[J]. Nature Communications, 2016, 7: 11249.
- [43] SCHNEIDER M, PFUSTERSCHMIED G, PATOCKA F, et al. High performance piezoelectric AlN MEMS resonators for precise sensing in liquids[J]. Electrotechnik and Informations, 2020, 137(3): 121-127.
- [44] MANZANEQUE T, HERNANDO J, RODRÍGUEZ-ARAGÓN L, et al. Analysis of the quality factor of AlN-actuated micro-resonators in air and liquid[J]. Microsystem Technologies, 2010, 16(5): 837-845.
- [45] TOLEDO J, RUIZ-DÍEZ V, PFUSTERSCHMIED G, et al. Flow-through sensor based on piezoelectric MEMS resonator for the in-line monitoring of wine fermentation[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 254: 291-298.
- [46] PFUSTERSCHMIED G, KUCERA M, WISTRELA E, et al. Temperature dependent performance of piezoelectric MEMS resonators for viscosity and density determination of liquids[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(10): 105014.
- [47] RUIZ-DÍEZ V, HERNANDO-GARCÍA J, MANZANEQUE T, et al. Viscous and acoustic losses in length-extensional microplate resonators in liquid media[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(8): 083510.
- [48] LU X, HOU L, ZHANG L, et al. Piezoelectric-excited membrane for liquids viscosity and mass density measurement[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 261: 196-201.
- [49] PUCHADES I, FULLER L. Design and evaluation of a MEMS bimetallic thermal actuator for viscosity measurements [C]//2008 17th Biennial University/Government/Industry Micro/Nano Symposium. IEEE, 2008: 93-97.
- [50] JAE H S, BRAND O. High Q-factor in-plane-mode resonant microsensor platform for gaseous/liquid environment[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2008, 17(2): 483-493.
- [51] BIRCHER B A, DUEMPELMANN L, RENGGLI K, et al. Real-time viscosity and mass density sensors requiring microliter sample volume based on nanomechanical resonators[J]. Analytical Chemistry, 2013, 85(18): 8676-8683.
- [52] PATOIS R, VAIRAC P, CRETIN B. Measurement of fluid properties with a near-field acoustic sensor[J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(2): 295-297.
- [53] PATOIS R, VAIRAC P, CRETIN B. Near-field acoustic densimeter and viscosimeter[J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(10): 3860-3863.
- [54] CHEN D, SONG S, MA J, et al. Micro-electromechanical film bulk acoustic sensor for plasma and whole blood coagulation monitoring[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2017, 91: 465-471.
- [55] EBISUI A, TAGUCHI Y, NAGASAKA Y. Novel optical viscosity sensor based on laser-induced capillary wave[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2008, 6887: 8870.

作者简介: 黄琳雅, 女, 1994 年出生, 博士研究生。主要研究方向为微机电系统(MEMS)谐振式传感器及其在生化物质检测领域的应用。

E-mail: hly2016icg@stu.xjtu.edu.cn

赵立波(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微纳制造与先进传感技术。

E-mail: libozhao@mail.xjtu.edu.cn

罗国希, 男, 1987 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为微纳制造。

E-mail: luoguoxi@mail.xjtu.edu.cn

李支康, 男, 1987 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为电容式微加工超声换能器(CMUT)及其在生化物质检测领域的应用。

E-mail: zhikangli@xjtu.edu.cn

吴德志, 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微纳制造与装备、柔性可穿戴、柔性智能感知技术、软体机器人和 MEMS/NEMS。

E-mail: wdz@xmu.edu.cn

林启敬, 男, 1983 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为微纳制造与光纤传感器。

E-mail: xjjingmi@163.com

杨萍, 女, 1986 年出生。主要研究方向为微纳制造技术、微机电系统(MEMS)传感器技术。

E-mail: ipe@mail.xjtu.edu.cn

蒋庄德, 男, 1955 年出生, 博士, 教授, 中国工程院院士。主要研究方向为微纳制造、先进传感技术、精密超精密加工与测试技术及装备。

E-mail: zdjiang@xjtu.edu.cn