

DOI: 10.7652/xjtub201403009

采用微传感器的黏/密度实验系统及其性能测试

宋渤¹, 徐龙起², 张桂铭², 赵立波², 王晓坡¹, 刘志刚¹

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了快速、准确地获得流体的密度和黏度数据, 研制了一套采用微型传感器的密度/黏度实验系统。在激励装置的驱动下, 微型传感器在流体中周期性振动, 通过测量传感器的谐振频率和品质因子来获取流体的密度和黏度。分别采用标准物质甲苯和正庚烷对实验系统进行了标定和测试, 测量的温度范围为 283.15~303.15 K, 压力为 0.1 MPa, 将实验值与文献值进行了比较, 结果表明, 密度测量值与文献值的平均绝对偏差为 0.93%, 最大偏差为 1.26%, 黏度测量值与文献值的平均绝对偏差为 7.08%, 最大偏差为 16.67%, 验证了实验系统的可靠性。

关键词: 微型传感器; 密度; 黏度; 正庚烷

中图分类号: TK123; TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0044-05

Development of Density and Viscosity Measurement System by Microelectromechanical Systems Sensor

SONG Bo¹, XU Longqi², ZHANG Guiming², ZHAO Libo², WANG Xiaopo¹, LIU Zhigang¹

(1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experimental system was constructed for the simultaneous measurement of density and viscosity of fluids by microelectromechanical systems (MEMS) sensor. The experimental system determined the density and viscosity data via the measurement for sensor resonance frequency and quality factor. The density and viscosity of toluene and n-heptane were obtained. The measurements were carried out for five times in the temperature range from 283.15 to 303.15 K and under pressure of 0.1 MPa. The experimental data were compared with those of the literatures. The mean absolute deviation and the maximum deviation for density reach 0.93% and 1.26%; the mean absolute deviation and the maximum deviation for viscosity reach 7.08% and 16.67% respectively.

Keywords: microelectromechanical systems sensor; density; viscosity; n-heptane

密度和黏度是流体两个基本的物性参数, 在石油、化工、食品及医疗等行业发挥着重要作用, 密度/黏度的准确性和可靠性关系到生产的成本和产品的质量。目前, 传统的物性实验装置具有测量精度高、适用范围广的特点, 但同时设备的质量体积较大, 并

且所需的测试时间和样品量也较多。基于微机电系统(MEMS)技术的传感器具有尺寸小、质量轻、响应快等优点, 有望弥补传统实验室测量手段的局限和不足, 从而进一步实现流体热物性的在线测量。因此, 在课题组已有的高精度密度计^[1]和黏度计^[2]

收稿日期: 2013-05-23。 作者简介: 宋渤(1986—), 男, 博士生; 王晓坡(通信作者), 男, 副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50836004; 51375378)。

网络出版时间: 2013-12-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131211.0844.001.html>

的基础上,本文研制了一套基于 MEMS 技术的微型密度/黏度实验系统,并采用标准物质对实验系统进行了标定和测试。

1 实验系统构建

1.1 实验原理

根据测量参数的不同,微型密度/黏度传感器主要分为流动式和振动式。Igarashi 等人利用微型热线风速仪测量流体的流量,再结合流动压差,确定流体的密度和黏度值,所需测量仪表较多^[3]。Patois 等人开发了压电材料驱动的微型悬臂梁,带动微型圆球在流体中振动,由振动参数计算密度和黏度数据,数学模型较为简单,但结果精度不高^[4]。

本文设计的微型密度/黏度传感器采用振动法,基本测量原理是:通过激励装置的驱动,一端固定的弹性元件(悬臂梁)在流体中周期性振动,悬臂梁的谐振频率和品质因子与悬臂梁所处流体的密度和黏度有关。因此,可以通过振动物体和流体运动方程之间的关系,在测量得到物体的谐振频率和品质因子后计算流体的密度和黏度。结合力学中的 Euler-Bernoulli 栋梁理论、悬臂梁振动方程并考虑空气中的修正等因素,可得到微型密度/黏度传感器的工作方程。其推导过程在文献[5]中已有详细描述,在这里仅给出其工作方程

$$\rho = \frac{C_1}{f_r^2} + C_2 \quad (1)$$

$$\eta = \frac{C_3}{\rho f_r^3} \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_0} \right)^2 \quad (2)$$

$$Q = \frac{f_r}{2g} \quad (3)$$

式中: ρ 和 η 分别表示待测流体的密度和黏度; f_r 表示悬臂梁在待测流体中的谐振频率; Q 和 Q_0 分别表示悬臂梁在待测流体和空气中的品质因子; g 表示悬臂梁在待测流体中的谐振半峰宽; C_1 、 C_2 和 C_3 为未知常数,决定于传感器的材料性质和尺寸,需要利用标准物质标定的方法来确定。

1.2 实验系统

基于振动法测量流体密度/黏度的基本原理,本文研制了一套 MEMS 黏/密度实验系统,如图 1 所示,主要包括传感器实验装置、振动参数测量系统、温度控制系统和数据采集分析系统。

传感器实验装置是整个实验系统的关键,由微型芯片、PCB 电路板、封装结构和相关连接部件组成。传感器芯片使用 n 型双面抛光硅片经 MEMS

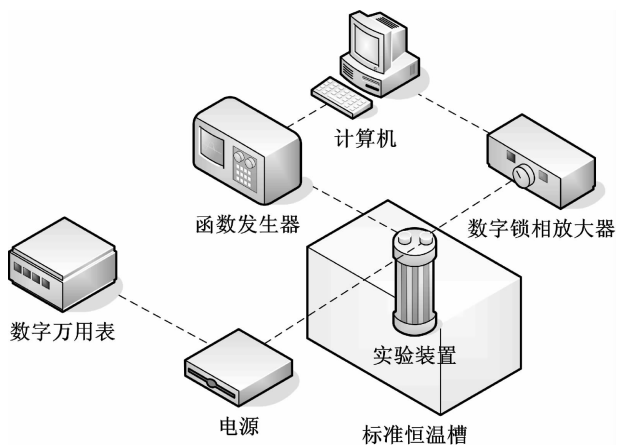


图1 微型密度/黏度实验系统示意图

技术加工而成,弹性元件为矩形悬臂梁,长度为 1.7 mm,宽度为 2.5 mm,厚度为 30 μm ,表面分布有惠斯通电桥,由 4 根压敏电阻构成,以检测悬臂梁的形变;绕组线圈由金线构成,驱动悬臂梁的振动;焊盘及连接导线提供芯片内部线路与外部线路的电气连接。为了获得良好的传感器工作状态,在加工完成后对芯片进行退火处理以去除表面应力的影响。微型芯片与 PCB 电路板采用 DG-3 型改性环氧树脂胶来进行固化黏合,由金线键合的方法将两者的焊盘相连。芯片和 PCB 板位于封装结构内,通过螺钉固定,为其提供物理保护。实验本体的材料为不锈钢(1Cr18Ni9Ti),底部布置有方形钕钴永久磁铁,以提供传感器振动所需的匀强磁场,中心磁场强度约为 0.3 T。

本文建立的振动参数测量系统包括函数发生器、数字锁相放大器、直流电源和电路板。函数发生器(Agilent 33220A)发射的正弦交流信号输入至传感器表面的绕组线圈,在磁场力的作用下将电信号转化为机械振动,引起传感器芯片不断振动。惠斯通电桥将芯片形变转换为电信号,输出至数字锁相放大器(SR830),数字锁相放大器的参考信号为函数发生器信号。电桥所需的直流信号由电源(Agilent E3611A)结合自行设计的电路板提供。传感器芯片与测量系统的电气连通由 PCB 电路板实现。

传感器实验装置位于恒温槽(Fluke 7008)提供的恒温环境中,恒温槽的控温范围是 $-5\sim 110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于本文所测量温度范围在 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此选用的恒温介质为蒸馏水,温度场的稳定性优于 $\pm 0.0007\text{ }^{\circ}\text{C}$,均匀性优于 $\pm 0.003\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。所有测量仪表均通过 GPIB 接口与计算机相连,采用 Labview 虚拟仪器开发系统和 Matlab 数学软件编写了数据采集程序,由数字锁相放

大器检测惠斯通电桥的感应电压,经非线性拟合后可以得到相应的振动参数,实现了测量自动化。

2 实验系统标定和测试

由于微型密度/黏度传感器采用的是相对测量法,因此在实验之前需要用标准物质对传感器进行标定。已知可靠密度和黏度数据的物质主要有水、甲苯等。实验室获得的水的纯度难以保证,并且可能导致传感器和磁铁被腐蚀,因此本文选用甲苯对装置进行标定。实验中所用甲苯由天津富宇化学试剂厂提供,纯度(质量分数)为99.5%。甲苯的密度和黏度数据取自文献[6],密度标定在0.1 MPa下进行,采用293.15 K和303.15 K的密度值,分别为 $867.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $858.0\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,而黏度标定选择在0.1 MPa、293.15 K状态下进行,黏度值为 $591\text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。方程(1)~(3)中,传感器振动的谐振频率和品质因子由感应电压经非线性拟合后获得, $T=293.15\text{ K}$ 时, $f_r=10\,965.675\text{ Hz}$, $Q=37.249$,感应电压 $u+iv$ 与振动频率 f 的关系如图2所示,而 $T=303.15\text{ K}$ 时,拟合得到的谐振频率 $f_r=11\,006.558\text{ Hz}$ 。再结合常压下 $T=284.07\text{ K}$ 时传感器在空气中的品质因子 $Q_0=136.589$,可以最终确定方程(1)和(2)中常数 C_1 、 C_2 和 C_3 的具体取值,见表1。

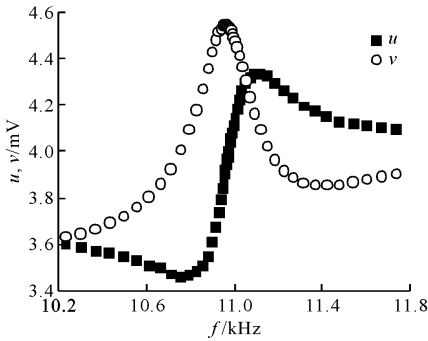


图2 感应电压与振动频率的关系

表1 标定常数 $C_1\sim C_3$ 的取值

$C_1/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-2}$	$C_2/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$C_3/\text{kg}^2\cdot\text{m}^{-4}\cdot\text{s}^{-4}$
1.506×10^{11}	-3.848×10^2	1.771×10^{15}

为了测试装置的可靠性,本文对正庚烷的密度和黏度依次进行了实验研究。正庚烷由天津红岩化学试剂厂生产,纯度(质量分数)高于98.5%。实验测量的温度范围为283.15~303.15 K,压力为0.1 MPa。实验测得的正庚烷的密度与黏度数据见表2。

表2 正庚烷密度和黏度测量结果

T/K	f_r/Hz	g/Hz	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\eta/\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
283.15	11 785.434	153.257	699.1	546
288.15	11 864.719	148.594	684.7	484
293.15	11 902.094	146.362	678.0	458
298.15	11 945.416	135.443	670.3	361
303.15	11 953.217	131.285	668.9	329

利用表2的实验结果,本文分别拟合得到了正庚烷的密度和黏度计算方程,以方便与文献中报道的实验值进行比较

$$\rho/\rho_0 = b_0 + b_1(T/T_0) + b_2(T/T_0)^2 + b_3(T/T_0)^3 \quad (4)$$

$$\eta/\eta_0 = d_0 + d_1(T/T_0) + d_2(T/T_0)^2 + d_3(T/T_0)^3 \quad (5)$$

式中: $T_0=283.15\text{ K}$, $\rho_0=699.1\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $\eta_0=546\text{ }\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$,为相应的参考值;方程中各拟合系数的值见表3。图3和表4给出了本文关联式计算结果和密度实验数据的比较,同时,正庚烷黏度的偏差分布情况如图4和表5所示。通过和大量实验数据的对比可以发现,在研究的温度范围内,正庚烷密度的平均绝对偏差为0.93%,最大偏差为1.26%,黏度的平均绝对偏差为7.08%,最大偏差为16.67%。

表3 方程(4)和(5)中系数的值

b_0	43.976 33	d_0	-889.322 82
b_1	-114.995 15	d_1	2 587.760 1
b_2	102.326 14	d_2	-2 501.275 24
b_3	-30.307 65	d_3	803.831 6

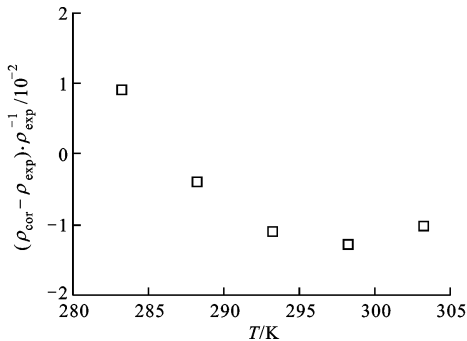


图3 方程(4)密度计算结果与实验数据[7]的偏差

在MEMS黏/密度实验系统中,影响密度和黏度测量精度的因素主要有温度、标准物质的密度和黏度值、谐振频率和品质因子。实验装置整体位于恒温槽中,自身散热量对于温度波动的影响很小。

表 4 正庚烷密度关联式与实验值的相对偏差

实验值来源	偏差范围/%	平均绝对偏差/%
文献[7]	-1.26~0.93	0.93
文献[8]	-1.05~0.96	1.00
文献[9]	-1.22~0.96	0.91
文献[10]	-1.22~0.33	0.77
文献[11]	-1.08	1.08

实验测量的温度环境由恒温槽控制,稳定性和均匀性小于±3 mK,相比其他因素,温度所引起的误差可以忽略不计。本文选取甲苯作为标准物质,用来对密度和黏度的工作方程进行标定。甲苯的密度和黏度数据来自文献[6],在本文的测量范围内,密度的不确定度为 0.03%,而黏度的不确定度为 2%。谐振频率和品质因子都属于传感器的振动参数,测量精度主要决定于仪表自身的精度、信噪比和非线性拟合的精度。综合考虑上述各类因素,结合与正庚烷文献数据的对比结果,对于本实验系统,密度的不确定度估计为±1%,黏度的不确定度估计为±10%。

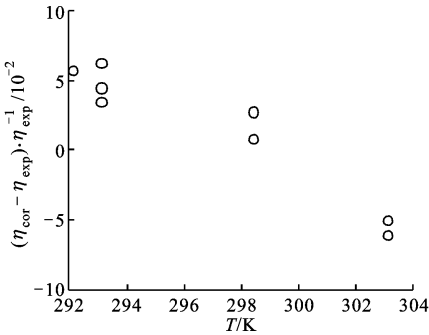


图 4 方程(5)黏度计算结果与实验数据^[12]的偏差

表 5 正庚烷黏度关联式与实验值的相对偏差

实验值来源	偏差范围/%	平均绝对偏差/%
文献[7]	-12.49~16.67	10.51
文献[12]	-6.08~6.26	4.33
文献[13]	-11.11	11.11
文献[14]	-11.30~6.89	7.11
文献[15]	-10.30~8.26	7.32

从本实验系统的误差分析可以看出,密度的测量精度主要由标准物质的密度和谐振频率决定,而影响黏度测量精度的因素较多,包括标准物质的密度和黏度、传感器在待测流体中振动时的谐振频率和品质因子、传感器在空气中振动时的品质因子。

在文献[6]中,甲苯黏度的不确定度为 2%,比密度的不确定度 0.03%大了近 2 个数量级,会影响到黏度工作方程中标定常数的准确性。同时,相比谐振频率,品质因子的测量会受到更多因素的干扰,准确程度也会有所下降,这都会导致黏度测量结果的不确定度增大。

3 结 论

本文建立了一套基于 MEMS 技术的微型密度/黏度实验系统,并利用甲苯作为标准物质对实验系统进行标定,得到了实验装置的标定常数。对常压下温度为 283.15~303.15 K 的烷烃类燃料正庚烷进行了测量,获得了正庚烷的密度和黏度实验数据,密度测量值与文献数据的平均绝对偏差为 0.93%,最大偏差为 1.26%,黏度测量值与文献数据的平均绝对偏差为 7.08%,最大偏差为 16.67%,验证了实验系统的可靠性,为开展流体热物理性质的在线测量奠定了基础。

参考文献:

[1] 尹建国,孟现阳,吴江涛. 高压振动管密度计实验系统研制 [J]. 工程热物理学报, 2012, 33(10): 1659-1662.

YIN Jianguo, MENG Xianyang, WU Jiangtao. Vibrating tube densimeter for compressed liquid density measurement [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(10): 1659-1662.

[2] 张建波,孟现阳,邱国盛,等. 高压振动弦黏度计实验系统的研制 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(11): 30-34.

ZHANG Jianbo, MENG Xianyang, QIU Guosheng, et al. Development of vibrating-wire viscometer for liquid at high pressure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(11): 30-34.

[3] IGARASHI K, KAWASHIMA K, KAGAWA T. Development of simultaneous measurement system for instantaneous density, viscosity and flow rate of gases [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2007, 140(1): 1-7.

[4] PATOIS R, VAIRAC P, CRETIN B. Near-field acoustic densimeter and viscosimeter [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(10): 3860-3863.

[5] 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 to 68) MPa [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2006, 51(1): 190-208.
- [6] ASSAEL M J, AVELINO H M T, DALAOUTI N K, et al. Reference correlation for the viscosity of liquid toluene from 213 to 373 K at pressures to 250 MPa [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2001, 22(3): 789-799.
- [7] LANDAVERDE-CORTES D C, ESTRADA-BALTAZAR A, IGLESIAS-SILVA G A, et al. Densities and viscosities of MTBE+heptane or octane at $p=0.1$ MPa from (273.15 to 363.15) K [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2007, 52(4): 1226-1232.
- [8] FANDIÑO O, PENSADO A S, LUGO L, et al. Compressed liquid densities of squalane and pentaerythritol tetra (2-ethylhexanoate) [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2005, 50(3): 939-946.
- [9] KAHL H, WADEWITZ T, WINKELMANN J. Surface tension of pure liquids and binary liquid mixtures [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2003, 48(3): 580-586.
- [10] MURINGER M J P, TRAPPENIERS N J, BISWAS S N. The effect of pressure on the sound velocity and density of toluene and n-heptane up to 2600 bar [J]. *Physics and Chemistry of Liquids*, 1985, 14(4): 273-296.
- [11] SCHILLING G, KLEINRAHM R, WAGNER W. Measurement and correlation of the (p, ρ, T) relation of liquid n-heptane, n-nonane, 2, 4-dichlorotoluene, and bromobenzene in the temperature range from (233.15 to 473.15) K at pressures up to 30 MPa for use as density reference liquids [J]. *Journal of Chemical Thermodynamics*, 2008, 40(7): 1095-1105.
- [12] BRUNSON R R, BYERS C H. Viscosities of alcohol-hydrocarbon systems in the critical region; a dynamic laser light scattering approach [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 1989, 34(1): 46-52.
- [13] ASSAEL M J, OLIVEIRA C P, PAPADAKI M, et al. Vibrating-wire viscometers for liquids at high pressures [J]. *International Journal of Thermophysics*, 1992, 13(4): 593-615.
- [14] WILL S, LEIPERTZ A. Viscosity of liquid n-heptane by dynamic light scattering [J]. *International Journal of Thermophysics*, 1997, 18(6): 1339-1354.
- [15] YANG C S, XU W, MA P S. Excess molar volumes and viscosities of binary mixtures of dimethyl carbonate with chlorobenzene, hexane, and heptane from (293.15 to 353.15) K and at atmospheric pressure [J]. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2004, 49(6): 1802-1808.

(编辑 荆树蓉)

(上接第27页)

- WEN Jihong, WANG Gang, LIU Yaozong, et al. Research on vibration band gaps of one dimensional phononic crystals consisted of metal and nitrile butadiene rubber [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2005, 18(1): 1-7.
- [17] 胡家光, 张晋, 张茜, 等. 一维花岗岩/丁腈橡胶声子晶体的带隙及其应用 [J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2006, 28(6): 504-508.
- HU Jianguang, ZHANG Jin, ZHANG Xi, et al. Band gaps and application of one-dimensional phononic crystals consisted of granite and nitrile rubber [J]. *Journal of Yunnan University: Natural Science*, 2006, 28(6): 504-508.
- [18] ZHAO Y P, WEI P J. The band gap of 1D viscoelastic phononic crystal [J]. *Computational Materials Science*, 2009, 46(3): 603-606.
- [19] WEI P J, ZHAO Y P. The influence of viscosity on band gaps of 2D phononic crystal [J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2010, 17(6): 383-392.
- [20] MERHEB B, DEYMIER P A, JAIN M, et al. Elastic and viscoelastic effects in rubber/air acoustic band gap structures: a theoretical and experimental study [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(6): 064913.
- [21] MERHEB B, DEYMIER P A, MURALIDHARAN K, et al. Viscoelastic effect on acoustic band gaps in polymer-fluid composites [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2009, 17(7): 075013.
- [22] LIU Yaozong, YU Dianlong, ZHAO Honggang, et al. Theoretical study of two-dimensional phononic crystals with viscoelasticity based on fractional derivative models [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2008, 41(6): 065503.
- [23] LAHES R. *Viscoelastic materials* [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 2009: 63-64.

(编辑 管咏梅)