

The Comparison Analysis of Two Typical Torsional Vibration Viscosity Probe Sensitivity*

SUN Peiyuan, ZHAO Meirong*, MA Jinyu

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problems in torsional vibration viscosity measurement that sensitivity is influenced by different shapes of probe subjected to different viscous force, the measuring accuracy and sensitivity of cylindrical probe and spherical probe are studied according to the principle of viscosity measurement based on FBG micro-torsional vibration. Through the mathematical model built for different probes, corresponding voltage-viscosity formulas are derived, then in laboratory environment, the undetermined coefficient is got from calibration experiment, and the measuring characteristics are compared between the two probes. The experimental data shows that cylindrical probe is more accurate and more sensitive than spherical probe, which verifying the theoretical analysis. At the same time, we also analysis the measuring error sources to provide theoretical basis for the further study.

Key words: viscosity measurement; sensitivity analysis; viscos force; probe; calibration

EEACC: 7230 doi: 10. 3969/j. issn. 1004-1699. 2013. 01. 012

两种典型扭振式粘度测头的灵敏度对比分析*

孙培元, 赵美蓉*, 马金玉

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 针对扭振式粘度测量中, 不同测头形状所受到的粘性力不同, 进而对测量灵敏度产生影响的问题, 基于 FBG 扭矩微振粘度测量原理, 研究柱形与球面两种测头装置的测量精度及灵敏度。通过对不同形状的测头建立数学模型, 得出相应的电压-粘度关系式, 在实验室环境下通过标定实验确定待定系数, 并比较两种测头的测量特性。实验数据表明, 柱形测头的测量精度及灵敏度高于球面测头, 验证了理论分析。同时, 对测量误差来源进行了分析, 为后续研究提供了理论基础。

关键词: 粘度测量; 灵敏度分析; 流体粘性力; 测头; 标定

中图分类号: TP23

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)01-0053-05

流体的粘度是在流体微团间发生相对滑移时产生切向阻力的度量^[1], 反映流体抵抗剪切变形的能力, 由于直接对液层之间的运动阻力进行测量难度较大, 因此粘度值通常由其它相关物理量间接导出^[2]。适用于现场环境下的粘度测量方法主要采用活塞式^[3]、旋转式^[4]和微振式^[5]三种原理。基于 FBG 扭矩微振的粘度测量原理, 采用高精度的 FBG 传感器感应测头的扭转幅度, 从而获得流体的粘性剪切力, 已被证明是有效的方法^[6], 但对不同形式测头的机械结构差异对测量灵敏度及精度的影响, 尚需深入研究。根据流体力学, 对于同种待测流

体, 不同形状的测头所受到的流体粘性力矩会有所差异, 对最终的测量灵敏度及精度会产生较大影响。因此, 本文重点探讨两种典型测头(柱面及球面)对电压-粘度特性的影响, 并通过实验比较柱面和球面两种测头的灵敏度及精度, 同时, 对影响测量精度的众多因素进行分析, 为提高 FBG 扭矩微振粘度测量的效果具有一定的参考意义。

1 系统结构及测量原理

FBG 微振式粘度测量的基本结构示意图如图 1 所示。包括振动驱动单元、机械传动单元、固定单

元、FBG 传感解调单元等。振动驱动单元包括驱动线圈和带有磁极片的悬梁。机械传动单元为驱动轴,与悬梁中心及测头刚性联接。固定单元包括固定杆和套管,二者之间为刚性联接,套管通过支架与底座固定,从而保证固定杆固定不动。FBG 振动敏感结构内置于测头内的等强度梁上。

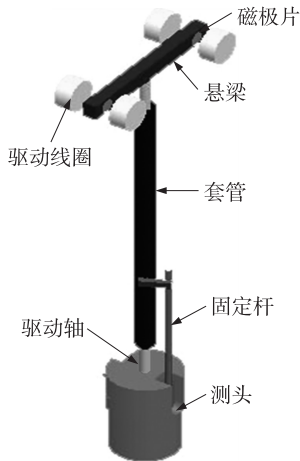


图1 FBG 微振式粘度测量系统总体结构

悬梁是整个机械结构中很重要的部分,不但磁片的固定点是在横梁上,同时也将磁力传导到主动轴上,使整个装置周期性往复振动,是整个装置的动力源。悬梁设计的时候要考虑相关的因素,包括磁力矩、磁片的形状和尺寸、主动轴的尺寸。磁力矩没必要过大,因为过大会使横梁的外形尺寸增加,增大整个装置的结构;如果磁力矩太小则横梁转动将会变得困难。最后确定其长度尺寸为 100 mm。本装置选择的磁片是圆形的,其主要依据是线圈的形状,其尺寸为直径 9 mm,厚度 1.5 mm。因为磁片需要完全固定在横梁上,因此采用了过盈配合来固定磁片。而根据磁片的尺寸便可以确定横梁上沉孔的位置以及尺寸。横梁和主动轴的配合方式是盈配合,所以横梁的高度不应过小,过小的横梁在配合过程中容易变形,而过大则会增大横梁的转动惯量,考虑主动轴直径为 5 mm,最后决定横梁高度为 8 mm。

系统原理图如图 2 所示。首先由驱动电路提供方波,对电磁线圈进行快速交替式供电,激励悬梁、驱动轴及测头外壁进行扭转式振动,产生一定的微振幅,振幅可由测头内部的 FBG 敏感结构^[7]测得。进行流体粘度测量时,将测头浸入被测流体中,此时由粘度产生的阻力矩将使测头振幅产生衰减。振幅的衰减通过 FBG 光的中心波长来体现,通过加驱动电压,使得中心波长恢复原来数值,由此获得一个补偿电压。因此,流体粘度的数值可以由补偿电压值进行推算。

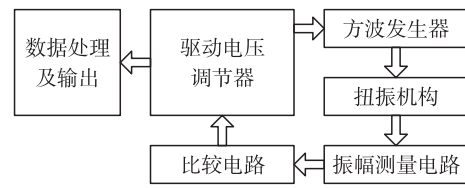


图2 系统原理图

2 FBG 微振式粘度敏感结构

微振幅测量基于 FBG 原理予以实现。固定杆延伸至测头内部,通过等强度梁与测头外壁进行刚性联接,由此可将测头的扭转变换为等强度梁的弯曲应变,并由贴置于等强度梁上的 FBG 传感器进行感测,应变将引起 FBG 的中心波长移动,借助 FBG 动态解调技术^[9],即可测得测头的扭动振幅。等强度梁的受力模型及测头剖面图如下,图 5 中 L 为等强度梁的有效工作长度, P 为梁末端的作用力, h 为梁厚。

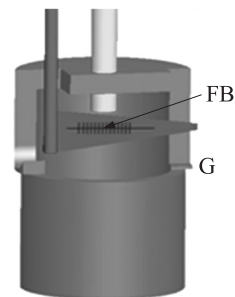


图3 柱面测头

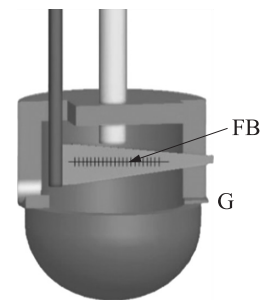


图4 球面测头

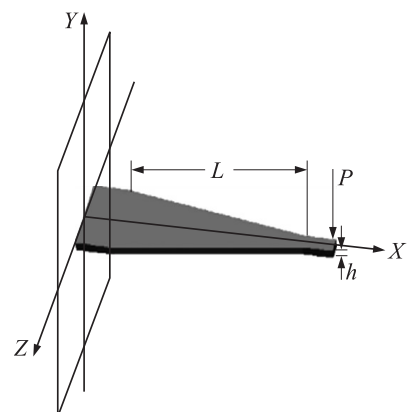


图5 等强度梁受力模型

3 粘度测量数学模型

3.1 微振动激励方式

测头微振动与悬梁的往复扭转运动近似同步,而该运动来自于驱动电压方波所产生的电磁激励。为保证微振动的均匀性,需令悬梁围绕初始对称中心线进行等幅摆动。

经计算,为维持等幅振动,图 6 中电磁线圈的理想激励方波占空比为:

$$1:(\sqrt{2}+1):2\sqrt{2}:2\sqrt{2}:2\sqrt{2}:\dots$$

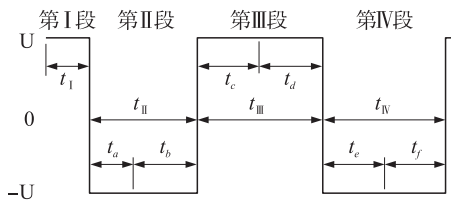


图6 方波占空比

3.2 柱面测头

柱面测头收到的阻力矩包括两部分:测头侧面的粘性力矩和液体对底面的阻力矩。

由粘性液体剪切应力公式^[10],可得:

$$M_1 = 4\pi h\omega r^2 \eta \quad (1)$$

其中, η 是液体粘度, ω 是测头的角速度, h 是测头浸入液体的长度, r 是测头的半径, M_1 则是测头侧面所受的粘性力矩。

设圆柱测头距离容器底部距离为 z ,当测头以角速度 ω 旋转时,因为 z 较小,可以认为测头和容器底部之间的液体层的角速度均匀变化,即 $d\omega/dz$ 为常量。

对面积为 $dS = 2\pi R dR$ 的面元进行积分,可得圆柱底面所受的摩擦力矩 M_2 为:

$$M_2 = \int_0^r R\eta R \frac{\omega}{z} ds = \frac{\pi\eta r^4}{2} \frac{\omega}{z} \quad (2)$$

考虑测头微振运行稳定后的情况,取方波第 III 段,测头的角速度:

$$\omega = \omega_{II} \pm Kt = Kt - \sqrt{2} Kt_1 \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)和式(2),得液体对测头的阻力 F_1 和 F_2 为:

$$F_1 = 4\pi h\omega r \eta = 4\pi h r \eta (Kt - \sqrt{2} Kt_1) \quad (4)$$

$$F_2 = \frac{\pi\eta r^3}{2} \frac{\omega}{z} = \frac{\pi\eta r^3}{2} \frac{(Kt - \sqrt{2} Kt_1)}{z} \quad (5)$$

测头随时间振动的距离 S 为:

$$S = \theta r = -\sqrt{2} Kt_1 t r + \frac{1}{2} Kt^2 r \quad (6)$$

F_1 和 F_2 在第 III 段内做的功 W 为:

$$W = \int_0^{2\sqrt{2}t_1} F_1 dS + \int_0^{2\sqrt{2}t_1} F_2 dS = \frac{16\sqrt{2}hz + 2\sqrt{2}r^2}{3z} \pi K^2 r^2 t_1^3 \eta \quad (7)$$

液体阻力做功的功率 P 为:

$$P = \frac{W}{2\sqrt{2}t_1} = \frac{8hz + r^2}{3z} \pi K^2 r^2 t_1^2 \eta \quad (8)$$

当运动粘度计空载时,即当测头不浸入流体中时,由驱动电路部分驱动机械结构进行扭动,驱动电路耗费的功率为:

$$U_0 \times I_0 = P_0 \quad (9)$$

其中, U_0 、 I_0 分别为加在驱动电路两端的电压和驱动电路中的电流, P_0 则是空载时驱动电路耗费的能量。

当测头被浸入到液体中后,测头振幅降低。对驱动电压进行调整,使振幅恢复至初始值。设电压增量为 ΔU ,则:

$$(U_0 + \Delta U) \times (I_0 + \Delta I) = P_0 + P \quad (10)$$

其中 P 是系统为了恢复振幅而额外消耗的能量, R_0 为驱动电路电阻。将上式变形:

$$(\Delta U^2 + 2\Delta U \times U_0) / R_0 = P \quad (11)$$

联立得:

$$\frac{8hz + r^2}{3z} \pi K^2 r^2 t_1^2 \eta = \frac{(\Delta U^2 + 2\Delta U \times U_0)}{R_0} \quad (12)$$

解得:

$$\eta = \frac{3\pi z K^2 r^2 t_1^2 \Delta U^2 + 6\pi U_0 z K^2 r^2 t_1^2 \Delta U}{(8hz + r^2) R_0} \quad (13)$$

3.3 球面测头

球面测头只需考虑粘性力 F_1 ,设球的半径是 R ,浸入液体高度为 h

$$W = \iint dF dS = \frac{16\sqrt{2}}{3} \pi \eta R K^2 t_1^3 A \quad (14)$$

其中, A 为一常数 ($A = \frac{R^2}{2} \arccos \frac{R-h}{R} - \frac{R-h}{2} \sqrt{2Rh-h^2}$)。

$$P = \frac{W}{2\sqrt{2}t_1} = \frac{8}{3} \pi \eta R K^2 t_1^2 A = (\Delta U^2 + 2\Delta U \times U_0) / R_0 \quad (15)$$

解得:

$$\eta = \frac{3}{8\pi R K^2 t_1^2 A R_0} \Delta U^2 + \frac{3U_0}{4\pi R K^2 t_1^2 A R_0} \Delta U \quad (16)$$

4 系统标定

FBG 的振动参量可通过动态解调,由其中心波长变化规律测得。首先,对数据进行频谱分析,信号的频率约为 5 Hz,毛刺的频率约在 50 Hz 左右,采用低通滤波器^[11],截止频率为 10 倍的信号频率,也就

是 50 Hz, 阻带增益 -40 dB, 对数据进行平滑滤波。然后对数据进行求导, 计算出导数为 0 时即为峰值, 再判断峰值左右两端的值, 比较其大小, 即可求出波峰及波谷, 进而得出峰峰值。图 7 中可以看到 FBG 的输出信号呈一个完整的正弦波信号, 其反映的便是测头实时的振幅, 其中, 波形的单周期峰峰值可用来表征振幅。

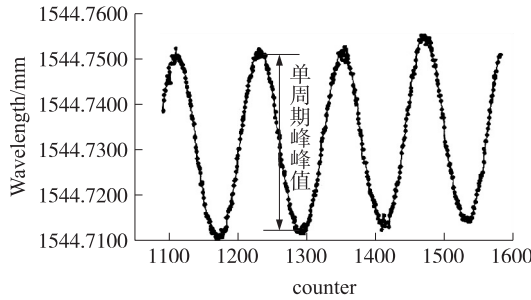


图 7 用于 FBG 振幅测量的波形图

根据本文粘度测量原理, 驱动电压为 15 V, 此时测头空载, 测头的振幅一定, 即用来反映光栅中心波长信息的波形峰峰值一定, 测头浸入液体后, 对应的振幅减小, 波形峰峰值也相应减小, 此时增加驱动电压, 使单周期峰峰值变回空载时的数值, 即得到电压增量 ΔU 与粘度值 η 的数值关系, 由此完成粘度传感器的标定。本文选取 20 MPa·s ~ 1 000 MPa·s 范围内的 5 组标准粘度液体, 分别获得表 1、表 2 中数据。

表 1 圆柱测头用于标定的 ΔU 与 η 的数值关系

序号	$\eta_{\text{圆柱}} / (\text{MPa}\cdot\text{s})$	$\Delta U / \text{V}$
1	48.83	0.943
2	199.8	1.435
3	384.4	2.051
4	500	2.395
5	1000	3.456

表 2 球面测头用于标定的 ΔU 与 η 的数值关系

序号	$\eta_{\text{球}} / (\text{MPa}\cdot\text{s})$	$\Delta U / \text{V}$
1	48.83	0.726
2	199.8	1.227
3	384.4	1.578
4	500	1.827
5	1000	2.425

从表 1、表 2 的数据可以看出, 测量相同的粘度, 圆柱测头的电压变化比球面测头的大, 这是因为粘度敏感的物理量是阻力矩, 圆柱测头由于存在液体对底面的阻力, 所以圆柱测头的灵敏度更高, 可将同一粘度范围, 进行更加准确的细分, 因此圆柱测头更加适合本测量原理。

式(16)可简化为:

$$\eta = A\Delta U^2 + B\Delta U \quad (17)$$

即确定 η 与 ΔU 之间为二次函数关系。为提高标定精度, 补偿系统误差, 此处引入常数项 C , 将式(17)变为:

$$\eta = A\Delta U^2 + B\Delta U + C \quad (18)$$

采用最小二乘法对表 1 数据进行拟合, 对式(18)中的待定系数进行标定, 最终确定粘度 η 与 ΔU 之间的数学表达式如下:

$$\eta_{\text{圆柱}} = 76.661\Delta U^2 + 32.189\Delta U + 0.174 \quad (19)$$

5 精度实验与误差分析

前面我们对两种探头的灵敏度进行了分析, 圆柱探头的灵敏度更高, 所以这里选取粘度值分别为 168.74 MPa/s、384.4 MPa/s、540.74 MPa/s 三种标准甲基硅油, 对圆柱探头进行相应的精度实验。对于牛顿流体, 粘度和温度的关系可以用 andrade 公式^[12]表示: $\eta = Ae^{B/T}$, 其中 η 是粘度, T 是热力学温度。在本实验中为了补偿温度对液体本身粘度产生的影响, 给实验装置配备分度值为 0.01 °C 的精密温度计, 用来实时检测液体的温度, 已知常温常压下, 当温度变化 1 °C 时, 硅油的变化率约为 $\pm 2\%$, 所以可以通过以下公式进行温度修正: $\eta_{\text{修}} = \eta_{\text{标}} - [\eta_{\text{标}} \times 2\% \times (T_{\text{实}} - T_{\text{标}})]$ 。实验环境温度为室温 25 °C, 温度修正后的实验数据见表 3。

表 3 测量实验数据

实际值/ (MPa·s)	测量值/ (MPa·s)	均值/ (MPa·s)	相对误差/ %
168.74	171.17	170.63	1.12
	170.02		
	170.79		
	171.56		
	169.63		
384.4	380.54	379.97	1.15
	379.97		
	379.41		
	381.10		
	378.85		
540.74	531.87	533.74	1.29
	534.54		
	533.87		
	533.20		
	535.21		

上述实验数据表明, 圆柱测头已经达到较高的测量精度, 但分析系统仍存在影响测量精度的因素, 主要包括: 二次流的影响、驱动力不平衡带来的影响、密封/支撑件的影响、温度的影响。

(1)二次流的影响。在研究二次流的过程中,假定被测流体为牛顿流体,初始状态为静态,并存放于圆柱式容器中。容器与测头构成两个同心圆柱。当内外两圆柱以相反的方向旋转时,会产生内圆柱附近的主流,以及靠近外圆柱附近的和主流方向相反的微弱二次流;当外圆柱静止,内圆柱旋转时,则不会产生外圆柱附近的二次流^[13]。在本研究中,粘性剪切力主要发生在内圆柱表面的固液分界面,因此二次流对本实验的影响可以忽略不计。

(2)驱动力不平衡带来的影响。扭振过程中,电磁磁极对横梁的驱动力,理论上是对称的,但由于很多因素(制造、装配、振动等),实际是不对称的,它会让测头摆动的幅度出现偏差,就会出现图 7 中单周期波峰、波谷的跳动,影响测量的精确值。

(3)密封/支承带来的影响。密封的影响是:连接部分密封不严,有缝隙,使得前一级的扭振不能完全传到下一级,有回程误差;支承件的影响是:支承件不是绝对的刚体,在传递扭矩的过程中会发生变形,从而产生误差。

(4)温度的影响。FBG 用于单纯的应变场或温度场测量时具有很强的优势,但实际使用的环境中,FBG 反射光中心波长的移动量要受到应变和温度的同时作用,中心波长变化与温度的关系式为: $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = K_T \Delta T$, K_T 为温度灵敏度系数,是与热膨胀系数和热光系数有关的物理量,这就是 FBG 测量中存在的应变和温度交叉敏感问题。可以在离等强度梁近的区域粘贴另一个光栅^[14],一方面作为参考光栅解决应变和温度交叉敏感问题,另一方面作为温度传感器检测现场温度。

6 总结

测头形状直接影响 FBG 扭矩微振粘度测量系统的灵敏度,柱形测头比球面测头更能提高系统的精度。在 200 MPa/s 至 500 MPa/s 区间,测量相对误差低于 1.5%,克服文中提出的可能带来误差的

影响因素,可以进一步提高精度,从而应用于现场实际测量。

参考文献:

- [1] 陈惠钊. 动力粘度测量[M]. 北京:中国计量出版社,2002.
- [2] Nakamura Yuichi. Establishment of Simple Pressure Evaluation in Diamond-Anvil Pressure Cell Apparatus and High-Pressure Viscosity Measurements of Lubricant Oils [J]. *Toraibarajisuto Journal of Japanese Society of Tribologists*, 2008, 53 (5): 332-338.
- [3] 刘文鹏,张庆礼,殷绍唐. 粘度测量方法进展[J]. *人工晶体学报*, 2007, 36(2): 382-383.
- [4] Liu K, Jing W C, Peng G D, et al. Investigation of PZT Driven Tunable Optical Filter NonLinearity Using FBG Optical Fiber Sensing System[J]. *Optics Communications*, 2008, 281 (12): 3286-3290.
- [5] 王美章. 电磁式粘度测定仪. 中华人民共和国,实用新型专利: 00245791.1, 2001-09-12.
- [6] 王翔. FBG 扭振式黏度测量方法研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
- [7] 冯丹琴,盛秋琴,赵启大. 提高光纤光栅应变传感和振动传感测量精度的一种方法[J]. *传感技术学报*, 2001, 14 (2): 116-118.
- [8] Liu K, Jing W C, Peng G D, et al. Investigation of PZT Driven Tunable Optical Filter NonLinearity Using FBG Optical Fiber Sensing System[J]. *Optics Communications*, 2008, 281 (12): 3286-3290.
- [9] 郭绍兵. 基于电磁感应的液体粘度测量方法研究[D]. 天津:天津大学, 2010.
- [10] Manchec A, Quendo C, Rius E, et al. Synthesis of Dual Behavior Resonator (DBR) Filters with Integrated Low-Pass Structures for Spurious Responses Suppression [J]. *Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, 16: 4-6.
- [11] Arthur K Doolittle. Studies in Newtonian Flow. I. The Dependence of the Viscosity of Liquids on Temperature[J]. *J Appl Phys*, 1951, 22: 1031-1035.
- [12] Manfred Wimmer. Experiments on the Stability of Viscous Flow between Two Concentric Rotating Spheres[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2006, 103: 117-131.
- [13] 孙华,刘波,周海滨,等. 一种基于等强度梁的光纤光栅高频振动传感器[J]. *传感技术学报*, 2009, 22(9): 1271-1274.



孙培元(1987-),男,汉族,山东省潍坊市人。2009年于天津大学获得工学学士学位。2010年至今就读于天津大学精密仪器及光电子工程学院,攻读测试计量技术硕士学位。主要研究方向为光纤光栅传感,444962581@qq.com;



赵美蓉(1967-),女,工学博士,教授,现任中国计量测试学会几何量专业委员会委员、全国金属切削机床标准化技术委员会委员、中国仪器仪表学会青年工作委员会委员、天津市光学学会激光技术委员会委员,meirongzhao@tju.edu.cn。