

## Research of Fluid Viscosity Measurement Technique with ZLJ-C Series Coriolis Mass Flowmeter

ZHOU Bo<sup>1</sup>, REN Jian-xin<sup>1\*</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>

1. College of Automatic, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072, China;  
2. Xi'an DONGFENG Machinery & Electronic Co. LTD, Xi'an 710068, China

**Abstract:** This article focuses on the topics of the viscosity measurement of the fluid passing the Coriolis mass flowmeter. The paper put the tube and the fluid into the cylindrical coordinates to analyse systematically. According to the study of relation of vibration parameter and dynamic viscosity, a new method was proposed firstly. After using dimensional analysis dealt with the problem, the result was tally with the theory which put forward. The paper translated the equation to a linear equation showed. And the correctness of the theory was proved by the experiments. The modification for the execution carried in the real Coriolis mass flow meter was small, even not necessary. And the operation of viscosity measurement was easy, appropriate and accurate in practice.

**Key words:** Coriolis mass flowmeter; viscosity; dimensional analysis; vibration

EEACC:7320Z

## 基于 ZLJ-C 系列科里奥利质量流量计 的流体粘度测量技术研究

周波<sup>1</sup>, 任建新<sup>1\*</sup>, 张鹏<sup>2</sup>

1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072;  
2. 西安东风机电有限公司, 西安 710068

**摘要:** 采用 ZLJ-C 系列科里奥利质量流量计进行流体粘度检测的技术与方法; 将流体及传感器敏感管(以下简称传感器管)置于柱坐标下对流体动力粘度和科里奥利质量流量计振动时的参数进行了系统分析; 提出了一种新的粘度检测方法; 用量纲分析法对相关结论进行了验证。实际实验数据表明该方法是可行的。该技术简单、有效, 可在不改变科里奥利质量流量计原有结构的条件下实施。

**关键词:** 科里奥利质量流量计; 粘度; 量纲分析; 振动

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)05-0891-05

粘度是液体的重要物理性质和技术指标之一, 粘度的准确测定在许多工业部门和科学研究领域中都具有重要意义, 特别是在石油化工、医药、冶金、食品等行业中。如在石油化工中, 准确测定石油的粘度, 可以提高其产品的质量和产量; 在医学上, 人体内正常血液循环要求血液粘度保持在合适的水平上, 血液粘度异常会导致微循环和组织的新陈代谢出现障碍, 因而血液粘度的准确测量将有助于病情的及时诊断和疾病的有效预防; 在基础研究中, 粘度

的测定也占有非常重要的地位, 如研究胶体稀溶液的粘度可以帮助了解质点的大小与形状、质点与介质间的相互作用等。粘度测量数据可以提供产品的品质、反应的进程、流程的影响、配方的改变以及流体随时间的变化状况, 以帮助我们更进一步的了解流体系统的行为, 做出相应的判断。因此, 粘度测定技术一直以来都受到极大的关注。

对流体粘度的测量, 传统方法无非是基于泊肃叶(Poiseuille)定律的毛细管粘度计, 基于 Couette

收稿日期: 2007-09-02 修改日期: 2007-11-19

及与之相似原理的旋转粘度计、落球粘度计和检测驱动能量的振动粘度计。而这些粘度计应用于工业在线检测时,存在需要送实验室,监测不及时或者需要在管线上设置旁路<sup>[1]</sup>,增加设备等缺点。

近些年,美国 MicroMotion 公司的 Paul Kalotay 提出了利用科里奥利质量流量计(以下简称科氏流量计)在线测量流体粘度的方法<sup>[2]</sup>,其测量原理是牛顿流体层流运动的哈根-泊肃叶(Hagen-Poiseuille)定律,需要测量流体的质量流量、密度和两点间的压力差,为能检测两点间的压力差,在科氏流量计的正对位置接一只压力变送器。德国 E+H 公司<sup>[3-4]</sup>在单直管上应用文献[5]的扭转振动方法,产生流体内部摩擦,实现了对粘度的测量。采用质量流量计进行粘度检测不仅解决了传统粘度计存在的问题,而且在原有功能上拓展了一种新功能,监测更多的变量,因此应用科氏流量计测量粘度对工业生产而言具有重要意义。本文对采用科氏流量计进行粘度测量的各种方法进行了分析,提出了一种全新的粘度测量方法。

## 1 粘性流体的内摩擦力

流体在受到外部剪切力作用时发生变形(流动),即为流体粘度。其内部相应要产生对变形的抵抗,并以内摩擦的形式表现出来。所有流体在有相对运动时都要产生内摩擦力,这是流体的一种固有物理属性,称为流体的粘滞性或粘性。牛顿内摩擦定律<sup>[6]</sup>或牛顿剪切定律对流体的粘性作了理论描述,即流体层之间单位面积的内摩擦力或剪切应力与速度梯度或剪切速率成正比。用公式表示如下:

$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy} = \rho \nu \frac{dv_x}{dy} \quad (1)$$

其中,  $\tau$  为剪切应力(平行流动方向的单位面积上的内摩擦力);  $\frac{dv_x}{dy}$  为剪切速率(垂直到流动方向的流速梯度);  $\eta$  为粘度(动力粘滞系数);  $\rho$  为流体密度;  $\nu$  为流体运动粘度系数。

上式又称为牛顿剪切应力公式,式中的比例系数  $\eta$  就是代表流体粘滞性的物理量,反映了流体内部摩擦力的大小,称为流体的动力粘滞系数或粘度,它与流体密度的比值称为运动粘度  $\nu$ 。流体的粘度与温度有密切的关系。液体的粘度随着温度升高而下降,而气体的粘度则随着温度的升高而升高。在物理意义上,牛顿剪切应力公式表明有一大类流体,它们的剪切应力与速度梯度呈线性关系。这类流体被称为牛顿流体。另一方面,如果上式的函数关系是

非线性的,所描述的流体就被称为非牛顿流体。流体的剪切应力与剪切速率之间的变异关系用图形表示则称为流变曲线。本文的研究对象为牛顿流体。

## 2 柱坐标中的流体

将传感器管置于柱坐标下,如图1所示。可以知道文献[2]是在坐标轴的 Z 轴方向做出的,而文献[3-4]应用文献[5]的方法在坐标的切向产生振动,从而在流体内部产生摩擦力,检测出流体粘度值。文献[5]指出粘度  $\eta = \nu \cdot \rho$  与驱动电流的平方成正比。故检测电流即可得到流体粘度。而如果在径向产生流体剪切力,也能检测出流体粘度值。

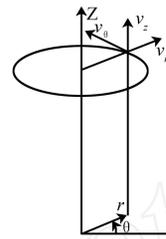


图1 柱坐标示意图

## 3 弯曲振动测量流体粘度

可以将科氏流量计传感器管看作一悬臂梁,如图2所示。则有初位移,无初速度的悬臂梁<sup>[7]</sup>的一阶自由振动方程为

$$y(x, t) = aA(x)T(t) = aA(x)\cos(pt) \quad (2)$$

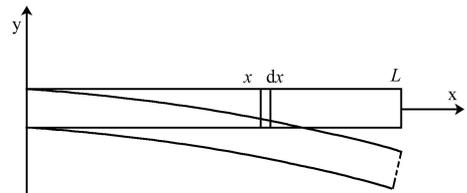


图2 悬臂梁振动示意图

其中:  $A(x)$  为振型函数,或者说是梁上分布各点自由振动的振幅,与角频率  $p$  无关;  $a$  为与振幅相关的量;  $T(t) = \cos(pt)$  为与时间相关量。

### 3.1 弯曲振动中的粘滞力

圆柱坐标系内,在径向,由于流体在管内,其流动受管壁约束,并随着管壁运动而运动。由于科氏流量计传感器管刚度不是无穷,故其振动为弯曲振动。假设  $x$  处流管的挠度为  $y(x, t)$ ,有截面转角为

$$\theta(x, t) = \frac{\partial y(x, t)}{\partial x} = a\dot{A}(x)T(t) \quad (3)$$

角速度为

$$\dot{\theta}(x, t) = \frac{\partial^2 y(x, t)}{\partial t \partial x} = a\ddot{A}(x)\dot{T}(t) \quad (4)$$

在  $x + dx$  处的线速度为

$$v + dv = (v + dv)(x + dx) = vx + xdv + dx \cdot v + dx \cdot dv \quad (5)$$

忽略最后一项,得到从  $x$  层到  $x + dx$  层液体的速度增量为

$$dv = xdv + dx \cdot v \quad (6)$$

故,速度梯度为

$$\frac{dv}{dx} = x \frac{dv}{dx} + v \quad (7)$$

上式右边第二项并不产生任何剪切运动,剪切运动仅由  $x \frac{dv}{dx}$  引起,由此表示其剪切速率

$$\dot{\gamma} = x \frac{dv}{dx} \quad (8)$$

所以剪切力

$$F = \eta \cdot S = \eta \cdot x \frac{d(x, t)}{dx} \quad (9)$$

式中:  $\eta$  为流体动力粘度。粘滞力可以表示为

$$F = \eta \cdot S = \eta \cdot R^2 = \eta \cdot x \frac{d(x, t)}{dx} \cdot R^2 = \eta \cdot x a A(x) \dot{T}(t) R^2 \quad (10)$$

其中:  $R$  为流管内径。

### 3.2 弯曲振动耗能计算

假设在  $dx$  段内单位能耗相同,每个周期做功为:

$$\begin{aligned} W_1 &= \int_0^L \int_0^T F \cdot v dt dx = \int_0^L \int_0^T F \cdot x dx dt = \\ &= \int_0^L \int_0^T (\eta \cdot x a A(x) \dot{T}(t) R^2) \cdot a A(x) \dot{T}(t) x dx dt = \\ &= R^2 a^2 \int_0^L \int_0^T (x^2 \dot{A}(x) \dot{A}(x) \dot{T}(t) \dot{T}(t)) dt dx = \\ &= R^2 a^2 \int_0^T [\dot{T}(t) \dot{T}(t)] dt \cdot \int_0^L [x^2 \cdot \dot{A}(x) \dot{A}(x)] dx = \\ &= K \int_0^T [\dot{T}(t) \dot{T}(t)] dt \quad (11) \end{aligned}$$

其中:  $K = R^2 a^2 \cdot \int_0^L [x^2 \cdot \dot{A}(x) \dot{A}(x)] dx$  在振幅不变时为定值。

式(11)中

$$\begin{aligned} \int_0^T (\dot{T}(t) \dot{T}(t)) dt &= 2 \int_0^{\frac{T}{2}} [\cos(pt)] [\cos(pt)] dt \\ &= 2p^2 \int_0^{\frac{T}{2}} \sin^2(pt) dt = 2^2 f \quad (12) \end{aligned}$$

将式(12)代入式(11),有

$$W_1 = 2^2 f \cdot K \quad (13)$$

$$\frac{W_1}{2^2 f \cdot K} = \quad (14)$$

又因为流体每周周期消耗的驱动能量为

$$W_1 = \frac{P - P_L}{f} \quad (15)$$

其中:  $P$  为激振功率;  $P_L$  为传感器管阻尼所耗功率;  $f$  为在传感器管含不同流体时的谐振频率。则有

$$\begin{aligned} \frac{P - P_L}{f} &= \frac{P - P_L}{2^2 f \cdot K} = \frac{P - P_L}{2^2 f^2 \cdot K} \quad (16) \end{aligned}$$

弯管段相似,可折算为一段直管。

### 3.3 传感器管结构阻尼能耗<sup>[7]</sup>

由于受交变载荷,产生由内阻引起的能量耗散即为结构阻尼能耗。实验指出,应力每改变一周所耗散的能量与频率无关,而大致与应变幅值的平方成正比,即

$$E = A^2 \quad (17)$$

为与频率无关的常数;

### 3.4 流体粘度与振动关系

设其在空管时消耗的功率为  $P_0$ ,则在振动频率为  $f$  时的流体消耗的功率为

$$P_L = \frac{f}{f_0} P_0 \quad (18)$$

故粘度计算式为

$$\begin{aligned} \frac{P - \frac{f}{f_0} P_0}{2^2 f^2 \cdot K} &= \quad (19) \end{aligned}$$

即

$$= \frac{K}{f^2} (P - \frac{f}{f_0} P_0) \quad (20)$$

其中:  $K = \frac{1}{2^2 K}$ ; 则运动粘度为

$$v = \frac{K}{f^2} (P - \frac{f}{f_0} P_0) \quad (21)$$

式中:  $\rho$  为流体密度。

就式(20)而言,参数  $P$ 、 $P_0$ 、 $f$ 、 $f_0$  均可经电子设备检测得到,  $K$  值需通过标定得到。故粘度值可由此式得出。

## 4 对粘度测量进行量纲分析<sup>[8]</sup>

假设传感器管带动流体以稳定的振幅振动,由于流体粘滞力消耗的功率为

$$P_f = g(\rho, f, v, A, R, l) \quad (22)$$

其中  $\rho$  为流体动力粘度,  $f$  为振动频率,  $v$  为振动速度,  $A$  为振动振幅,  $R$  为传感器管内径,  $l$  为传感器管长度。上述各量的量纲分别为  $MLT^{-2}$ 、 $L \cdot T^{-1}$  (力的量纲为:  $MLT^{-2}$ )、 $ML^{-1}T^{-1}$ 、 $T^{-1}$ 、 $LT^{-1}$ 、 $L$ 、 $L$ 、 $L$ ; 其中有 3 个独立量纲, 所以有

$$P_f = (f^2 l^3) g(\frac{\rho}{f l}, \frac{R}{l}, \frac{A}{l}) \quad (23)$$

如果其中有轴向流速  $v_1$ , 其量纲为  $LT^{-1}$ , 可以看出  $v_1$  并非为必需量,  $v_1 = 0$  即可看出; 所以可以看出,

如果  $A$ 、 $R$ 、 $L$  给定, 则  $\frac{\nu}{f_l}$  为定值,  $P$  与  $f^2$  成正比, 将其他变量的函数看成常数  $K_d$ , 则有

$$P_f = f^2 K_d \quad (24)$$

又根据式(15)、式(18), 有

$$P_f = P - \frac{f P_0}{f_0} \quad (25)$$

所以有粘度公式为

$$= K_d \frac{P - \frac{f P_0}{f_0}}{f^2} \quad (26)$$

由于假设中并没有限定弯曲振动, 所以当振动为扭转振动时, 该公式也同样适用, 并且文献[5]认为  $f$  的变化  $< 3\%$ , 可以看成是不变的量, 线圈阻抗也就不变, 所以粘度与功耗(电流的平方)基本成正比, 与文献[5]结论一致。

## 5 实验及数据分析

将式(20)变形:

$$f = K \left( \frac{P}{f} - \frac{P_0}{f_0} \right) \quad (27)$$

将式(27)看作

$$y = K(x + B) \quad (28)$$

其中  $y = f$ ,  $x = \frac{P}{f}$ ,  $B = -\frac{P_0}{f_0}$ ; 可以看出  $x$  和  $y$  成线性关系; 采用不同标号的硅油和西安东风机电某

型科氏流量计<sup>[9]</sup>进行实验, 保持振幅不变、振动为谐振、驱动力与振动速度相位差不变状态, 可以得到表1数据。

表1 粘度测量实验

序号	硅油运动 粘度/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	硅油密度 $\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$	振动频率 / Hz	驱动电流 / mA
1	62.195 1	0.972 6	103.29	4.076 5
2	202.595 3	0.970 1	103.21	4.472 5
3	462.835 9	0.966 0	103.25	4.880
4	670.911 4	0.819 0	104.59	4.988 7
5	898.580 0	0.825 1	104.51	5.241
6	1 826.451 2	0.969 9	103.22	6.900

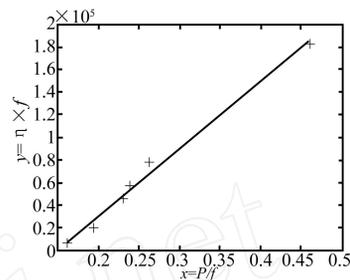


图3 实验数据处理

采用 Matlab 的 polyfit 命令进行回归, 得到关系式如下:

$$y = 10^5 (5.9348x - 0.8797) \quad (29)$$

从图3可以看出实验数据基本成线性关系, 本粘度测量方法可行, 验证了理论分析的正确性。

序号	1	2	3	4	5	6
硅油动力粘度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	60.491 0	196.537 7	447.099 5	549.476 4	741.418 4	1771.475 0
测量值/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	72.707 9	262.087 0	473.704 6	509.130 8	650.751 1	1799.748 1
相对误差/%	20.20	33.35	5.95	7.34	12.23	1.60

与乌式粘度计检测的结果相比, 有一定的测量误差, 特别是前两点误差稍大, 可能有以下几方面原因。

所选对比用乌氏粘度计量程不合适;

所采用流量计传感器管有部分管段作非谐振扭转振动, 在小粘度流体情况下, 影响更明显;

实验用硅油有一定的非牛顿流体特性存在;

由于实验用科氏流量计电子装置并非专为粘度检测而设计, 故其对前述实验要求满足不是很好, 在做针对性改进使其满足条件后, 相对误差应该会有较大减小。

由于本实验为验证原理性实验, 误差稍大并不影响实验目的。而减少测量误差正是下一步的工作重点之一。另外, 由于实验用流体密度变化不大, 因而谐振频率变化不大, 故频率在式中的作用还有待

进一步讨论。这就需要更多的实验来用于验证和分析。

## 6 结论

文献[5]在直管科氏流量计上实施时需要更改其结构或者加装扭转驱动装置, 这对流量测量有影响, 且在弯曲科氏流量计上实现比较困难; 而采用本文方法则可以在大部分形式的科氏流量计上实现且不改变其结构、也不增加压力变送器、不影响其他变量测量方法和精度。

采用科氏流量计测量流体粘度无需侵入流体, 也不用在工艺管线中设立旁路, 很好的解决了传统粘度计存在的问题。该方法不对现有科氏流量计传感器作任何结构改动, 即可得到流体的粘度值, 增加了一种新的功能, 拓展了科氏流量计的应用领域。

参考文献:

[1] 陈惠钊. 粘度测量[M]. 北京:中国计量出版社,2003.

[2] Paul Kalotay. Density and Viscosity Monitoring Systems Using Coriolis Flow Meters [J]. ISA Transactions, 1999, 38: 303-310.

[3] 恩德斯+豪斯流量技术股份有限公司. 粘度测量仪器:中国专利,02816604.3[P].2004.11.17

[4] Wolfgang Drahm, Hege Bjonnes, et al. A Coriolis Meter with Direct Viscosity Measurement[J]: IEE Computing and Control Engineering 2003: 14:42-43.

[5] National Metal and Refining Company, Ltd., Edison, N. J. In-line Vibratory Viscometer-Densitometer. United States Patent, 4, 524, 610[P]. Jun. 25.1985.

[6] 王松岭. 流体力学[M]. 北京:中国电力出版社,2004.11.

[7] 方同,薛璞. 振动理论及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998.5.

[8] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2005.8.

[9] 西安东风机电有限公司. ZLJB1D 型质量流量变送器使用说明书[S]. 西安:2003.11



周 波(1979-),男,西北工业大学硕士研究生,主要从事检测仪器研究,zhoubo@mail.nwpu.edu.cn



张 鹏(1967-),男,西安东风机电有限公司总工程师,本科学历,主要从事质量流量计的研发及生产管理工作。



任建新(1968-),女,西北工业大学副教授,博士,中国航空学会测试专业委员会委员,现主要从事检测技术、惯性仪器及导航方面的研究。

www.cnki.net