

一种测量液体粘滞系数的新方法*

郭 敏¹⁾

(陕西师范大学计算机科学学院 西安 710062)

摘 要 文章报道了一种测量液体粘滞系数的新方法——微机控制超声多普勒法。它将超声技术与计算机技术相结合,利用超声多普勒效应接收液体中下落小球的频移信号,将此信号送微机进行采集、比较、判断、计算并显示出粘滞系数。应用本方法能快速准确地测量多种液体的粘滞系数。

关键词 粘滞系数,超声多普勒效应,频移信号,微机控制

A NOVEL METHOD TO MEASURE THE VISCOSITY FACTOR OF LIQUIDS

GUO Min

(Computer College, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract A new method to measure the viscosity factor of liquids by the ultrasonic Doppler effect is reported. The method combines ultrasonic and microcomputer techniques. The frequency shifting signal of a dropping ball in the liquid is received via ultrasound. Under the control of the microcomputer the data are collected, processed and analysed, and the result is displayed on the screen. The viscosity factors of many kinds of liquids can be detected quickly and accurately by this method.

Key words viscosity factor, ultrasonic Doppler effect, frequency shifting signal, under the control of the microcomputer

1 引言

粘滞系数是流体的重要物理性质,了解流体的粘滞系数不仅有助于物性的研究,而且在工业生产和科学研究中也具有重要的实际意义,因此,流体粘滞系数的测定在许多领域日益受到重视。1687年,牛顿在把流体力学运用于天体力学中的问题时,首次提出了流体力学中粘度的概念。他把单位流体表面上所受的阻力与沿该面法线方向上速度梯度的比值这个常数定义为流体的粘滞系数,它表示流体内部抵抗流体剪切运动的一种物理性质。流体粘滞系数的研究成为定量描述流体流动性质的基础。

国内外研究者对粘度进行了深入的研究,关于粘度方面的文献很多。1798年库仑发明了振动盘式粘度计,50年后,泊肃叶、魏德曼、哈根和斯托克斯对毛细粘度计进行了改进。到1890年,库爱特发明了同心圆柱式粘度计,拉登布尔格的1907次落球式粘度实验克服了斯托克斯早期遇到的困难。人们在经历数百年坚持不懈的研究中,不断发现与改进了测量粘度的新方法。到目前为止,粘度测量的方法和仪器已达数百种,而计算机技术介入其中也只是近

十几年内的事情。目前,测量粘滞系数的常用方法有旋转法、毛细管法和落球法等。落球法因其特别简单而被普遍采用,但传统的落球法有明显的缺点,在对一般液体进行精密测量时遇到许多问题:如手工计时和测量存在误差,使得精度无法保证,较难判断小球是否已作匀速运动,降低了测量值的可靠性;当需要大量实验数据时,无法做到快速、准确的测量,不能测量不透明液体的粘滞系数等等。本文将计算机实时数据采集系统与超声波探测技术相结合,克服了上述困难,为传统的落球法赋予了新颖的设计思想,用连续不断发射的超声波探测液体中下落的小球,接收经小球反射后的超声波,微机系统自动采集多普勒频移信号,迅速准确地计算出液体粘滞系数。本方法具有快速测量、微机判断计算、自动显示结果、结果精度高等特点,尤其适合于测量不透明或有毒液体的粘滞系数。

2 原理

当直径为 d (半径为 r) 密度为 ρ 的光滑圆球,

* 2000-09-07 收到初稿,2000-10-10 修回

1) 现在陕西师范大学应用声学研究所攻读博士学位

以速度 v 在密度为 ρ_0 、粘滞系数为 η 、雷诺数 $Re = \rho_0 v d / \eta < 1$ 的液体中下落时, 小球受三个力的作用 (1) 重力 $4\pi r^3 \rho g / 3$ (2) 液体浮力 $4\pi r^3 \rho_0 g / 3$ (3) 粘滞阻力 $f = 6\pi \eta v r$ (斯托克斯公式). 当小球匀速下落时, 有

$$4\pi r^3 \rho g / 3 - 4\pi r^3 \rho_0 g / 3 - 6\pi \eta v r = 0,$$

可得粘滞系数为

$$\eta = \chi (\rho - \rho_0) g r^2 / 9 v. \quad (1)$$

用 (1) 式计算液体的粘滞系数是不准确的, 必须对 (1) 式进行修正, 这是因为在解斯托克斯方程时, 是假设小球在无限宽广的液体中下落, 而实际小球只能在有限的筒内下落, 筒的直径和液体的深度都是有限的, 故作用在筒中小球上的粘滞力将和斯托克斯公式给出的不同. 但当圆筒直径较之小球直径甚大时, 其差异是微小的, 在对斯托克斯公式进行修正后就可用于描述实际小球所受到的粘滞力. 对于在有限液体中运动的小球, 其所受到的阻力将会比在无限宽广的液体中的阻力为大.

如果小球在内半径为 R_0 圆筒中下落, 筒内液体高度为 h , 考虑器壁的影响 (1) 式修正为

$$\eta = [(\rho - \rho_0) g d^2 / 18 \chi (1 + 2.4 d / 2 R_0) \cdot (1 + 3.3 d / 2 h)]. \quad (2)$$

我们已知, 当频率为 f_s 的声源与接收器之间有相对运动时, 接收器接收到的频率便不再是 f_s 而是 f_r , 这种由于相对运动而引起的频移现象称为多普勒效应. 接收信号频率 f_r 与声源频率 f_s 之差 f_d 称为多普勒频移, 相应的差频信号 ϕ 称为多普勒信号^[1,2].

由于多普勒效应, 接收信号频率 f_r 与声源频率 f_s 之间的关系为

$$f_r = (c + v_r) f_s / (c - v_s), \quad (3)$$

式中 v_r 和 v_s 分别为接收器朝着声源方向运动的速度及声源朝着接收器方向运动的速度, 如果接收器的运动方向与其朝着声源的方向的夹角为 θ_r , 声源运动方向与其朝着接收器的方向的夹角为 θ_s (3) 式应修正为

$$f_r = (c + v_r \cos \theta_r) f_s / (c - v_s \cos \theta_s). \quad (4)$$

多普勒频移则为

$$f_d = f_r - f_s = (v_r \cos \theta_r + v_s \cos \theta_s) f_s / (c - v_s \cos \theta_s). \quad (5)$$

通常, 接收器的运动速度远小于介质的声速, 故 (5) 式可以简化为

$$f_d = (v_r \cos \theta_r + v_s \cos \theta_s) f_s / c.$$

对于声波入射于运动的反射体的情况, 如果声源和接收器为同一换能器, 或位于很靠近的位置, 且静止不动, 这时, 可将反射体既当作运动的接收器, 又当作运动声源来处理, 也就是说, 对于声源而言, 此反射体接收声波, 可视为运动接收器, 而对接收器而言, 此物体又可为运动声源. 因而, 接收器所接收到的信号的多普勒频移包含了运动反射体的两种作用, 故可以表示为

$$f_d = 2 v \cos \theta f_s / c, \quad (6)$$

式中 v 为反射体 (小球) 的运动速度, θ 为其运动方向与其朝着换能器方向间的夹角. 在本实验中, $\theta = 0^\circ$, 故 $\cos \theta = 1$. 将超声波发射、接收两换能器粘并在一起, 并固定, 使发射换能器对准下落小球发超声波, 接收换能器同时接收由小球反射回的超声波, 频移信号频率 f_d 又可表示为 $f_d = f_r - f_s = f / T$ (单位时间内接收脉冲个数与发射脉冲个数之差). 这时 (6) 式可表示为

$$v = c f / (2 f_s T), \quad (7)$$

式中 v 为小球下落速度, c 为声波在待测液体中声速, f 为 T 时间间隔内接收脉冲个数与发射脉冲个数之差, f_s 为发射超声波的频率. 本装置采用 3MHz 频率. 当频率较高时, 波长短, 能量集中, 发现小球的能力强, 定位准确. 3MHz 的频率对于直径在 1mm 左右的小球都能发现, 是较为理想的频率. 将 (7) 式代入 (2) 式, 可得

$$\eta = [(\rho - \rho_0) g d^2 f_s T / 18 \chi (1 + 2.4 d / 2 R_0) \cdot (1 + 3.3 d / 2 h)]. \quad (8)$$

这样, 由 8031 单片机控制, 采集各个 T 时间间隔内的频移信号脉冲个数差值 f , 送 PC 机, 经判断取出小球匀速下落时的 f 数, 代入 (8) 式计算出液体粘滞系数 η .

另外, 考虑到斯托克斯公式适用的条件是小球速度很小, 球半径很小, 即要求雷诺数 Re 很小. 这是因为在解斯托克斯方程时略去了有 Re 因子的非线性项. 如果 Re 不是很小, 便不能忽略, 斯托克斯方程的解为: $f = 6\pi \eta v r (1 + 3Re/16 - 19Re^2/1080 + \dots)$ 此时, 还须对 (8) 式加修正项, 可以把 $3Re/16$ 与 $19Re^2/1080$ 看作是斯托克斯公式的一级修正项和二级修正项.

如果用一级修正, 则有 $f = 6\pi \eta_1 v r (1 + 3Re/16)$. 将 $Re = \rho_0 v d / \eta$ 一起代入 (8) 式, 则得到

$$\eta_1 = [(\rho - \rho_0) g d^2 f_s T / 18 \chi (1 + 2.4 d / 2 R_0) \cdot$$

球下落时启动单片机,使单片机开始采集频移信号。



$$(1 + 3.3d/2h)] - 3\rho_0 vd/16 = \eta_0 - 3\rho_0 vd/16, \quad (9)$$

η_1 是一级修正后的结果, η_0 是由(8)式计算出的结果。

如果用二级修正,则有 $f = 6\pi\eta_2 vr(1 + 3Re/16 - 19Re^2/1080)$ 并得到

$$\eta_2 = [1 + \sqrt{1 + 19(\rho_0 vd)^2/270\eta_1^2}] \eta_1/2. \quad (10)$$

计算液体的粘滞系数时要根据 $3Re/16$ 的大小决定如何修正: $3Re/16$ 在 0.5% 以下时,用(8)式计算粘滞系数,无须修正; $3Re/16$ 在 0.5%—10% 时,用(9)式作一级修正; $3Re/16$ 在 10% 以上时,用(10)式作二级修正。

3 硬件装置



图1 硬件结构框图

(1 发射电路; 2 发、收换能器; 3 接收电路; 4 差频电路)

硬件结构框图如图1所示。

发射电路以 3MHz 的振荡信号激励发射换能器,连续向液体中下落的小球辐射超声波,接收换能器则将小球反射回来的超声信号转换为相应的电信号送接收电路,加以放大、整形后送差频电路,对发射和接收电信号进行差频,得到多普勒频移信号 ϕ 的个数,送单片机 8031 予以采集^[3]。8031 既用作定时器,时间间隔定为 $T = 100\text{ms}$,又用作计数器,采集每一个 T 时间间隔内的频移信号个数 f ,通过串口传送给 PC 机。PC 机主要用于数据处理,采用 C 语言和汇编语言混合编程,自动对源源不断传来的 f 值进行判断,当小球是变速运动时,每一 T 时间间隔内采集到的 f 数不等,只有当小球作匀速运动时,各 T 间隔内所测得的 f 应相等,找到小球匀速下落时对应的频移信号数 f 后,代入(8)式,计算出 η ,PC 机计算出 9 次测量的平均值,并自动进行修正。

4 实验

将发、收换能器垂直固定在液面正上方,将换能器密封部分浸入待测液体中,如图2所示。然后用镊子夹住小球,正放在换能器的下方,轻轻松开镊子,小



图2 超声测量粘滞系数示意图
(T 为发射换能器, R 为接收换能器)

在温度 20.0℃ 时对甘油粘滞系数进行测量:

$$f_s = 3 \times 10^6 \text{ Hz}, T = 0.1 \text{ s}, g = 9.80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, \\ \rho = 7.770 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \rho_0 = 1.2610 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \\ d = 3.100 \times 10^{-3} \text{ m}, c = 1888.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \\ R_0 = 6.080 \times 10^{-2} \text{ m}, h = 2.293 \times 10^{-1} \text{ m}.$$

$\eta = 0.6968 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 由于 $3Re/16$ 在 0.5% 到 10% 以内,可知应对 η 进行一级修正,修正后的 η 为: $\eta = 0.6637 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 相同温度下用传统的落球法测得甘油 $\eta = 0.6654 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 同时与文献[4]给出甘油 20.0℃ 时 η 为 0.6605 Pa·s 比较,说明微机超声法更准确可靠(见表1)。

表1 甘油粘滞系数

次	1	2	3	4	5	6	7	8	9
η	0.6651	0.7126	0.7126	0.6651	0.7126	0.6651	0.7126	0.7126	0.7126

5 结论

实验结果表明,本方法测量液体粘滞系数速度快、精度高、数据可靠且重复性好,测量值的相对误差在 0.5% 以内,这一结果为液体粘滞系数的测量提供了一种新的方法。

参考文献

- [1] 尚志远. 检测声学原理及应用. 西安: 西北大学出版社, 1996 [SHANG Zhi-Yuan. The Principle and Apply in Ultrasonic Inspection and Measurement. Xi'an: Northwest University Press, 1996 (in Chinese)]
- [2] 应崇福. 超声学. 北京: 科学出版社, 1990 [YING Chong-Fu. Ultrasonics. Beijing: Science Press, 1990 (in Chinese)]
- [3] Boonlua Phongdara. Phys. Educ., 1998, 33: 306
- [4] J. J 图马. 物理计算手册. 北京: 新时代出版社, 1985 [J. J Tuma. Handbook of Physical Calculations. Beijing: New Times Press, 1985 (in Chinese)]