

落球法测液体粘滞系数实验仪器的改进

柯莎^{*1} 米松涛² 宫成杰² 陈梦飞² 吴玉洲²

(1. 银川能源学院 基础课教学部 宁夏 银川 750105)

(2. 银川能源学院 机械与汽车工程学院 2019级(本科)机械设计制造及其自动化 宁夏 银川 750105)

[摘要]以FD-VM-II落球法液体粘滞系数测定仪为基础,分析了该实验设备测量液体粘滞系数的固有缺陷和缺点,并针对仪器的缺点提出新的改进方法,包括:用温度传感器来测温,设计并制作锥形玻璃罩,利用电磁铁来控制并释放小球等,这些措施消除了原设备的固有缺陷,研究结果表明改进之后的实验装置调节容易,实验成功率高,数据测量准确,误差小,保养难度和成本降低,为各兄弟院校的物理实验教学和仪器维护提供了参考。

[关键词]粘滞系数;缺陷;改进

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-6288.2021.07.642

液体粘滞系数又称液体黏度,是液体的重要性质之一,在工程、生产技术及医学方面有着重要的应用。^[1]如:石油在封闭管道中长距离输送时,其输运特性与粘滞性密切相关,因而在设计管道前,必须测量被输石油的黏度;现代医学发现,许多心血管疾病都与血液黏度的变化有关,血液黏度的增大会使流入人体器官和组织的血流量减少,血液流速减缓,使人体处于供血和供氧不足的状态,这可能引起多种心脑血管疾病和其他许多身体不适症状。因此,测量血黏度的大小是检查人体血液健康的重要标志之一。由此可见,液体的粘滞系数的准确测量具有非常重要的实际意义。银川能源学院基础课教学部大学物理实验中心有落球法测液体粘滞系数的实验仪器,其实验结构图如图1所示,由图可见该仪器采用激光光电传感器结合单片机计时可以克服人工秒表计时的视差和反应误差,但也存在一些固有缺陷和缺点,给实验教学带来了很大的障碍,严重影响实验教学效果。

1 实验原理

各种实际液体具有不同程度的粘滞性,当液体流动时,平行于流动方向的各层流体速度都不相同,即存在着相对滑动,于是在各层之间就有摩擦产生,这一摩擦称为粘滞力,它的方向平行于接触面,其大小与速度梯度及接触面积成正比,比例系数 η 称为黏度,它是表征液体粘滞性强弱的重要参数。

我们采用落球法来测蓖麻油的粘滞系数,这是一种绝对法来测液体的粘滞系数。当小球在蓖麻油中铅直下落时,由于附着于球面的液层与周围其他液层之间存在着相对运动,因此小球受到粘滞阻力,它的大小与小球下落的速度有关。当小球作匀速运动时,测出小球下落的速度,就可以计算出液体的黏度。

具体原理如下:

当金属小球在黏性液体中下落时,它受到三个铅直方向的力:小球的重力 mg (m 为小球质量)、液体作用于小球的浮力

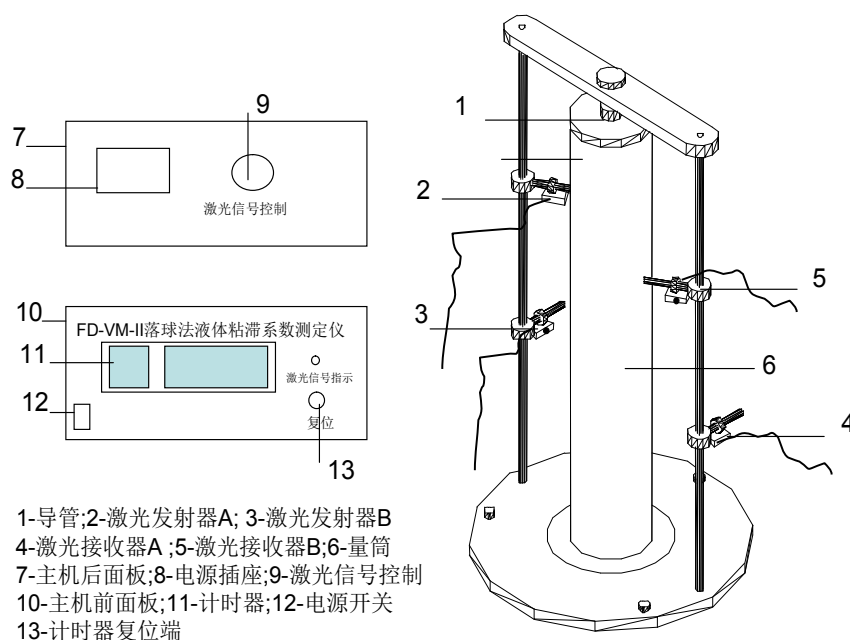


图1 FD-VM-II球法液体粘滞系数测定仪结构图

ρgV (V 是小球体积, ρ 是液体密度) 和粘滞阻力 F (其方向与小球运动方向相反)。如果液体无限深广, 在小球下落速度 v 较小情况下,

$$F = 6\pi\eta r v \quad (1)$$

上式称为斯托克斯公式, 其中 r 是小球的半径; η 称为液体的黏度, 其单位是 $Pa \cdot s$ 。

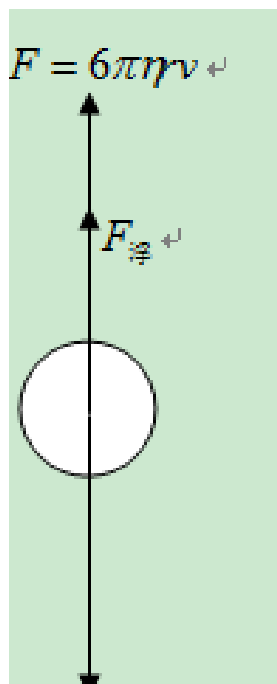


图2 小球受力分析示意图

小球开始下落时, 由于速度尚小, 所以阻力也不大; 但随着下落速度的增大, 阻力也随之增大。最后, 三个力达到平衡, 其受力分析示意图如图2所示, 即:

$$mg = \rho gV + 6\pi\eta r v$$

于是, 小球作匀速直线运动, 由上式可得:

$$\eta = \frac{(m - V\rho)g}{6\pi r v}$$

令小球的直径为 d , 并用 $m = \frac{\pi}{6}d^3\rho'$, $v = \frac{l}{t}$, $r = \frac{d}{2}$ 代入上式得

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \quad (2)$$

其中 ρ' 为小球材料的密度, l 为小球匀速下落的距离, t 为小球下落 l 距离所用的时间。

实验时, 待测液体必须盛于容器中 (如图3所示), 故不能满足无限深广的条件, 实验证明, 若小球沿筒的中心轴线下落, 式 (2) 须做如下改动方能符合实际情况:

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \frac{1}{(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 1.6\frac{d}{H})} \quad (3)$$

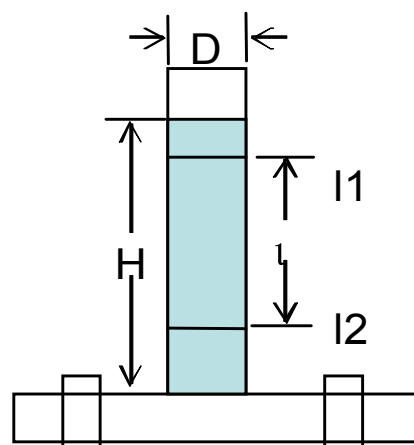


图3 实验装置

其中 D 为容器内径, H 为液柱高度。

2 原仪器的固有缺陷和不足

通过项目的研究, 我们发现原实验设备存在很多缺陷和弊端, 主要包括: (1) 不能准确直观地测量液体的温度。在实验时利用夹子来悬挂温度计并将其放入蓖麻油中测温, 导致实验仪器维护难度大, 粘在温度计上的油难以清洗; 同时温度计读数不方便, 误差较大; (2) 实验仪器调节困难、耗时费力。学生需要对两个光电门进行位置上的调节, 使激光光束正好通过装有蓖麻油量筒的直径位置, 并且还要与量筒上方的导管中心处在同一条竖直线上, 也就是说必须要确保小球下落时经过两束激光^[2], 肉眼观察调节本来就不准确, 再加上光的折射, 油质的污染等因素, 使调节非常困难; (3) 实验成功率低, 误差较大。采用在实验架横梁上导管内手动法来释放小球, 很容易使小球产生横向速度, 不能保证小球每次都沿中心轴线下落, 小球下落时难以扫上激光, 实验成功率低; 同时采用手动法来释放小球, 这或多或少都给小球施加了一定的外力, 使小球以一定的初速度进入液体, 不满足实验条件, 人为引进了误差; (4) 裸露在空气中的油保养难度大。量筒没有密封, 暴露在空气中的油容易被灰尘等杂质污染, 致使实验设备难以保养和维护。

3 新的改进措施和改造方案

我们主要从以上四个方面的实际问题出发对实验设备进行改造和研究, 改造以后的实验仪器如图4所示, 由图4我们可以看出, 对原有设备的改造主要体现在以下三个方面: (1) 用温度传感器来测量液体的温度。利用我校导热系数实验室的温

理论研究

度传感器来测量油的温度，使温度测量方便、直观、准确，综合利用实验设备，节约实验成本，也减小了实验误差；（2）设计并制作了锥形玻璃罩。设计的玻璃罩刚好盖住量筒的开口，并让锥罩的中心开口（直径3.5mm）与量筒的中心轴线完全重合，降低了肉眼观察的不准确性，使仪器调节起来更加容易，减小调节难度，节约调节时间，可实现在有效时间内进行多次测量的目的；同时也实现了小球沿量筒中心轴线下落的要求，小球容易扫上激光，提高了实验成功率；另外也相当于对容器进行了密封处理，可以保护油质少受污染，降低保养难度，节约保养成本；（3）利用电磁铁来控制并释放小球。在实验过程中让电磁铁吸住小铁钉，再让小铁钉吸住小球，并把小球放在锥罩的中心开口接近液面的位置处，实现了小球无初速度和横向速度下落的要求，测量结果好，实验误差小。

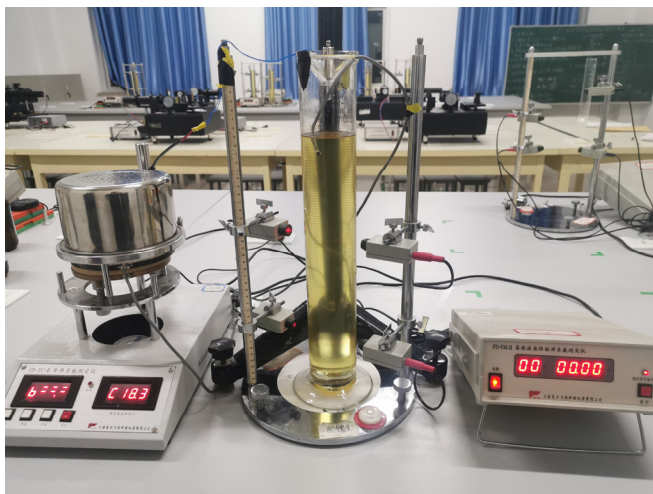


图4 改造后的实验仪器

表1和表2是利用了温度传感器和玻璃罩，没有使用电磁铁释放小球的测量数据。表3和表4是既利用了温度传感器和玻璃罩，又使用了电磁铁释放小球的测量数据。其中蓖麻油的密度 $\rho = 0.960 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，小球的密度 $\rho' = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，小球下落距离 $l = 14.10 \text{ cm}$ ，量筒的内径 $D = 26.20 \text{ mm}$ ，液柱高度 $h = 33.30 \text{ cm}$ ，本地重力加速度 $g = 9.832 \text{ m/s}^2$ 。

表1 未使用电磁铁时d=2.0mm的小球下落时间

测量次数n	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
下落时间t/s	12.43	12.49	12.43	12.53	12.49	12.47	12.39	12.40	12.454

平均油温 $T = 18.3^\circ\text{C}$ ， $\eta_{\text{测量值}} = 1.19 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $\eta_{\text{公认值}} = 1.15 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ^[5]，
相对误差 $E = 3.5\%$ 。

表2 未使用电磁铁时d=2.5mm的小球下落时间

测量次数n	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
下落时间t/s	8.18	8.18	8.16	8.15	8.20	8.11	8.09	8.09	8.145

平均油温 $T = 18.1^\circ\text{C}$ ， $\eta_{\text{测量值}} = 1.22 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $\eta_{\text{公认值}} = 1.16 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ^[5]，
相对误差 $E = 5.2\%$ 。

表3 使用电磁铁时d=2.0mm的小球下落时间

测量次数n	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
下落时间t/s	11.68	11.57	11.59	11.67	11.64	11.67	11.66	11.62	11.638

平均油温 $T = 18.8^\circ\text{C}$ ， $\eta_{\text{测量值}} = 1.11 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $\eta_{\text{公认值}} = 1.10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ^[5]，
相对误差 $E = 0.9\%$ 。

表4 使用电磁铁时d=2.5mm的小球下落时间

测量次数n	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
下落时间t/s	7.67	7.62	7.62	7.57	7.55	7.59	7.56	7.60	7.598

平均油温 $T = 18.7^\circ\text{C}$ ， $\eta_{\text{测量值}} = 1.13 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ， $\eta_{\text{公认值}} = 1.11 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ^[5]，
相对误差 $E = 1.8\%$ 。

通过对比表1、表2和表3、表4的测量数据及计算结果，我们发现利用电磁铁释放小球的测量结果要比没用时好很多，这说明改进后的实验设备不仅操作容易、读数方便，成功率高，重要的是测量结果也非常好，用电磁铁释放小球时实验误差更小，基本控制在2%以内，可以在以后的大学物理实验教学中推广。

4 结论

通过对落球法测液体粘滞系数实验仪器的改进，把原设备的固有缺陷和缺点消除了，把实验中存在的实际问题解决了，并为以后的物理实验教学和设备的保养、维护等方面提供参考。新改进的实验设备降低了仪器调节难度，既省时又省力，让学生在有限的时间内进行多次测量；设计的锥形玻璃罩能保证小球沿量筒的中心轴线下落，提高了实验成功率；用温度传感器温度测量，读数方便、简洁；锥罩起到密封油筒的作用，为实验设备的保养和维护提供方法，节约仪器保养成本；利用电磁铁释放小球，严格满足实验条件，测量误差小；还综合利用已有实验仪器，降低了实验成本。本文中实验设备的改造成果，为各兄弟院校的物理实验教学提供了参考。

参考文献

- [1] 龙卧云, 谭玉等. 落球法测定液体粘滞系数实验设备的操作技巧[J]. 实验室科学, 2009(6).
- [2] 董大兴*, 洪涵真等. 落球法测定液体粘滞系数实验仪的一点改进[J]. 大学物理实验, 2020, 33(4).
- [3] 王恒通, 徐春媛等. 不同温度下液体粘滞系数实验的理论计算[J]. 实验科学与技术, 2017.

作者简介:

柯莎(1985-), 女, 陕西汉中, 硕士, 主要从事大学物理及实验方面的教学和研究工作。

基金项目: 自治区级大学生创新创业训练计划项目(NXCX2018394)