

文章编号:1005-4642(2021)08-0039-04

搭建激光网面改进液体黏度测量实验

黄运米^{a,b}, 蔡建秋^{a,b}, 罗海军^{a,b}

(温州大学 a. 数理学院; b. 温州市微纳光电器件重点实验室, 浙江 温州 325035)

摘 要:落球法测定液体黏度实验中, 由于实验钢珠直径较小, 光电计时采用的激光光束较细, 钢珠下落过程中难以通过激光光束触发计时而导致实验成功率低。为解决此问题, 将盛液体的圆柱形容器改成方形容器, 在方形容器的对面分别装有小平面镜, 利用反射原理, 激光光束在 2 面平面镜之间来回反射组成激光网平面, 从而确保在沿方形容器中心轴附近下落的钢珠能触发计时。实验结果表明, 改进后的实验装置降低了实验仪器的调节难度, 提高了实验的成功率, 并保证了实验结果的准确性。

关键词:黏度; 落球法; 光电计时; 激光网面

中图分类号: O351.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.08.007

液体黏度是液体的重要性质之一, 在工程、生产技术和医学方面有着重要的应用。黏度的测量方法有很多, 如毛细管法^[1]、黏度计法^[2-3]、落球法^[4-7]、转筒法^[8]等。其中落球法是最常见、最基本的测量方法, 该方法一般用来测量透明或半透明、黏度较大液体的黏度。采用落球法测量液体黏度, 物理现象明显, 概念清晰, 实验操作和训练内容多, 非常适合大学低年级的物理实验教学。

1 现有实验装置的不足

本校测量液体黏度的仪器采用的是上海复旦天欣科教仪器有限公司生产的 FD-VM-II 型落球法液体黏度测定仪。该测定仪用激光光电传感器结合单片机计时, 测量钢珠下落速度的准确度高, 能够引导学生掌握新型计时、测速、计数的方法。通过精心设计底盘水平和立杆垂直调节装置及漏斗形钢珠下落引导管, 可保证钢珠从量筒中心下落。该实验装置 2 束严格平行的激光, 可以准确测量钢珠的下落时间和下落距离, 降低了手工按秒表、视差及钢珠下落偏离中心等因素的影响, 提高了实验精度。但在学生实际实验操作过程中, 该仪器存在不足之处^[9-14]。该测定仪改变了实验者凭眼睛和经验从容器上方沿中线轴线用镊子释放钢珠的操作方式, 而是采用漏斗形装置释放钢

珠^[15-16], 手动秒表计时也改为激光光电传感器结合单片机计时, 这些改进有利于简化实验操作, 提高实验成功率。但是学生在进行实验前, 需要调节 2 个光电门的位置, 以确保激光发射端发出的激光光束正好通过盛放液体的量筒, 并在另一端被激光接收器接收。而且也要与量筒上方的漏斗中心处在同一竖直面上, 也就是要确保钢珠落下时能经过 2 束激光从而进行计时。但用肉眼判断 2 束激光与漏斗中心处是否在同一竖直面上本身就很难, 再加上液体中的杂质和光的折射等问题, 使调节变得十分困难, 增加了操作难度。在实际实验过程中, 常常由于无法上下 2 次挡光而造成计时失败^[17]。针对此问题, 本文对激光光路进行设计优化, 让激光光束在液体中来回反射形成 1 张高效拦截钢球的激光网, 增加了激光光束与钢珠的接触几率。只要钢珠在中心轴附近下落就能确保钢珠在下落过程中能 2 次挡光, 降低了操作难度, 提高了实验的成功率和学生实验的兴趣。

2 实验装置改进

FD-VM-II 型落球法液体黏度测定仪挡光计时失败的原因是激光光束直径细小, 钢珠直径也较小。钢珠下落过程中, 必须沿着 2 束激光所在平面下落, 并经过 2 次挡光才能自动计时, 但是实

收稿日期: 2021-02-27; 修改日期: 2021-04-20

基金项目: 浙江省高等教育十三五第一批教学改革研究项目 (No. jg20180298)

作者简介: 黄运米 (1979—), 男, 湖北黄冈人, 温州大学数理学院讲师, 硕士, 主要从事微纳器件设计和大学物理实验教学的研究。E-mail: huangym@wzu.edu.cn



验中释放钢球后经常没有 2 次挡光而造成实验失败. 其失败原因有 2 种情况: 1) 释放钢球时就已经偏离了激光光束所在平面; 2) 钢球进入液体时液体一侧产生气泡或者液体密度不均匀造成钢球偏离了激光光束所在平面. 如果激光光束能来回反射几次形成 1 张激光网面, 即使钢珠下落时偏离了激光光束所在的平面也能挡光成功从而自动计时, 这样就能够避免实验失败. 按照这一思路对仪器进行改装. 由于厂家配置的圆柱形容器, 无法安装平面镜, 故将圆柱形容器换成方形容器.

圆柱形容器的直径为 D_0 , 液体高度为 h , 液体密度为 ρ_0 , 钢球直径为 d , 密度为 ρ , 钢球匀速下落高度为 l , 时间为 t , 则黏度的计算公式为^[18]

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2t}{18l\left(1 + 2.4\frac{d}{D_0}\right)\left(1 + 1.65\frac{d}{h}\right)}. \quad (1)$$

对于方形容器, 取容器的当量直径^[19] D_d 为管道横截面积与周长之比的 4 倍, 设方形管道的长和宽分别为 A 和 B , 则

$$D_d = 4 \times \frac{AB}{2(A+B)} = \frac{2AB}{A+B}. \quad (2)$$

假设方形容器边长为 a , 即 $A=B=a$, 则方形容器的当量直径

$$D_d = \frac{2 \times a \times a}{a+a} = a, \quad (3)$$

由此可知方形容器中液体的黏度计算公式为

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2t}{18l\left(1 + 2.4\frac{d}{a}\right)\left(1 + 1.65\frac{d}{h}\right)}, \quad (4)$$

根据误差传递可得黏度的相对不确定度 $\Delta\eta$.

在方形容器相对 2 面各安装 1 面平面镜, 位置错开, 如图 1 所示. 激光光束从容器一侧斜入射, 到达另一侧平面镜后, 被平面镜反射回来, 然后再反射回平面镜, 如此循环, 直到激光束从平面镜边缘射出, 并被激光接收器接收. 该设计的优点在于: 只要激光光束的入射角度适当, 经过多次反射就能形成 1 张高效“拦截”钢球的激光网平面. 该激光网平面的大小相比单束激光大的多, 如果钢珠经此下落, 只要经过该激光网平面任何一处, 必定能挡住激光光束, 其穿过之后激光束又能再次被激光接收器接收, 从而完成计时. 实际的激光网平面效果图如图 2 所示, 改装后整体实物装置图如图 3 所示.

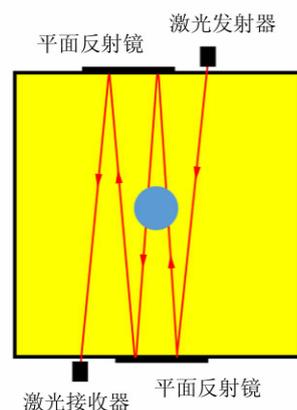
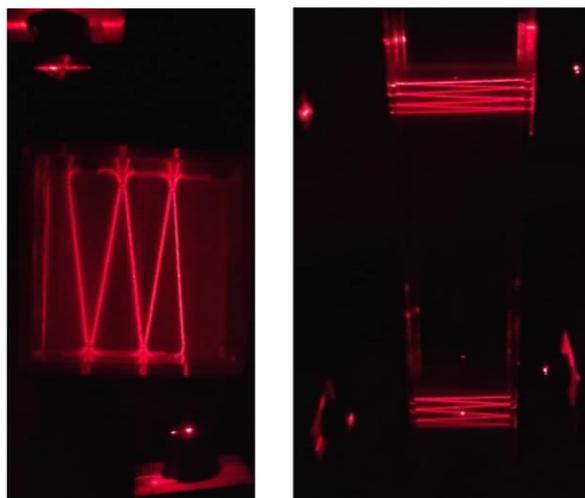


图 1 激光网平面光路示意图



(a) 激光网面俯视图 (b) 激光网面整体正视图

图 2 激光网平面效果图

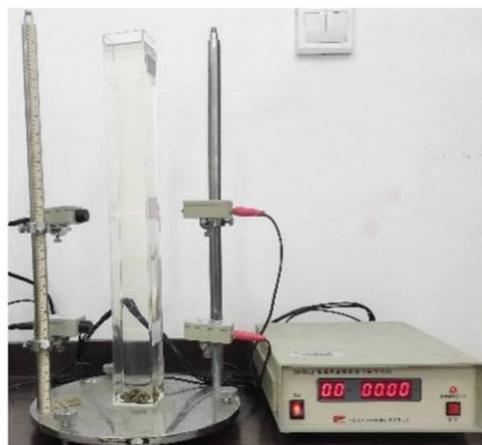


图 3 改装后整体实物装置图

3 实验结果及分析

3.1 反射次数测试

计时成功与否主要取决于钢球能否挡光成功,挡光成功率主要取决于激光网平面的光束密度.激光网的光束条数越多越容易成功挡光,这就需要尽可能增加激光光束的反射次数.本文测试了激光光束在平面镜上反射次数分别是 1,2,3,4 次时的实验结果.每次落 100 颗小钢球,并分别记录计时成功与计时失败次数,如表 1 所示.计时失败有 2 种情况:1)钢球没有挡光,计时器计时失败;2)钢球挡光成功,但未能触发计时器计时.括号内是钢球没有挡光,计时器计时失败的次数.

表 1 激光光束在平面镜上不同反射次数的测试结果

镜面反射次数	实验次数	计时成功次数	计时失败次数	计时成功率
1	100	62	38(32)	62%
2	100	82	18(10)	82%
3	100	89	11(0)	89%
4	100	91	9(0)	91%

钢球经过激光网面时挡光成功,但计时失败的情况有 2 种:1)计时器没有任何反应,即未触发计时器,这属于仪器方面原因;2)计时器有反应但是在经过第一激光网面后就停止了计时,说明在第一激光网已经挡光 2 次了.实验发现当钢球经过激光光束的边缘时就会产生这种情况,这属于钢球下落的位置设计不当.这 2 种都是有挡光但未能正常计时的情况,为了避免分类过多,我们把这 2 种情况都归类为未能触发计时器计时.

由表 1 可知,反射次数为 1 次时,经过容器中心区域的激光只有 1 束,跟仪器未改装时的情况类似,所以计时成功率跟未改装仪器的成功率相当.反射超过 2 次相比反射 1 次的计时成功率有显著的提高.反射超过 3 次后的激光光束密度足够覆盖方形容器中心轴附近区域,能保证钢球挡光成功,但未能触发计时器计时,这应该是实验仪器方面的原因.虽然反射 4 次的总体挡光成功率比反射 3 次的成功率有所提高,但提高幅度并不大,这是由于激光光束反射次数越多,最终的出射激光强度就越弱,而且激光光束的光斑也变得大而模糊,从而导致激光接收器不容易接收甚至无

法接收出射激光信号,并增加了仪器调试的难度.经过综合考虑,在实验时镜面反射 3 次最佳.

3.2 对比实验

为了更好地说明改装后的实验装置更有优势,本文利用传统手机秒表计时、FD-VM-II 测定仪光电计时和改装实验装置计时进行对比实验.在对比实验中,方形容器高度为 430 mm,内宽 47 mm,洗洁精液体高度为 400 mm,钢珠平均直径为 6.005 mm,100 颗钢珠总质量为 89.05 g,洗洁精密度为 1.05 g/cm³,实验时室温为 15.8 °C.假设钢珠在洗洁精中无初速度下落 150 mm 后做匀速运动,计时始末测试点高度范围为 245 ~ 100 mm(从底部开始计算高度),各进行 1 组 50 次落球实验,计算出测量时间的均值 t 、时间不确定度 Δt 、挡光成功率 E 、洗洁精的黏度 η (式 4)以及黏度不确定度 $\Delta\eta$,如表 2 所示.

表 2 不同计时装置的测量结果

实验装置	t/s	$\Delta t/s$	E	$\eta/(Pa \cdot s)$	$\Delta\eta/(Pa \cdot s)$
手机秒表	17.50	0.205	100%	12.03	0.33
FD-VM-II 测定仪	17.60	0.048	65%	12.10	0.19
激光网平面	17.59	0.051	90%	12.09	0.19

实验时其他条件相同,唯一不同的是计时装置.由表 2 可知,手机秒表计时,开始和结束需要手动点击,故随机误差较大.后 2 种都是激光计时器自动计时,结果接近.改进后的实验装置计时成功率达 90%,相比于原有的 FD-VM-II 测定仪,极大地提高了计时成功率.最终 3 组实验测得洗洁精黏度结果相差不大,由此可见改装后的实验装置即保证了实验精度的要求,还极大地提高了实验成功率.因此,将改装实验装置引入实验教学即可以锻炼学生发现实验方法与技术的不足,也能够培养学生的创新能力.

4 结束语

采用搭建激光网面的液体黏度测定仪装置实用可靠,降低了仪器调节难度,提高了实验的成功率.让学生体会到改进后仪器的优点,激励学生主动地进行实验方案优化和实验设备改进,激发学生的创新思维,培养学生的创新能力.

参考文献:

[1] 钱钧,惠王伟,张春玲,等.毛细管法测量液体黏度

- 实验再设计[J]. 物理实验, 2012, 32(6): 1-4.
- [2] 傅洪波, 魏悦姿, 丁有得, 等. 微元分析法与奥氏粘度计的测量原理[J]. 中国医学物理学杂志, 2017, 34(8): 848-849.
- [3] 冯朝岭, 贾芳. 流体黏滞系数测量方法的改进[J]. 实验技术与管理, 2005, 22(4): 32-33.
- [4] 高德文, 赵英. 落球法测量液体黏滞系数的实验研究[J]. 北京石油化工学院学报, 2016, 24(1): 64-66.
- [5] 刘迁, 汪华莲, 张毅, 等. 探究落球法黏滞系数实验的最佳实验条件及误差修正[J]. 大学物理实验, 2018, 129(2): 103-105.
- [6] 杨志军, 尹文庆, 卢伟, 等. 金属感应式落球法液体黏度系数测量方法研究[J]. 仪表技术与传感器, 2015(10): 91-94, 97.
- [7] 程玉梅. 落球法测液体黏滞系数的研究[J]. 科技创新导报, 2018, 15(25): 107-109.
- [8] 宁日波, 徐志洁, 胡杰. 转筒黏度计测量液体黏度方法研究[J]. 大学物理, 2012, 31(8): 21-24.
- [9] 刘晓彬. 液体黏滞系数测量实验的改进[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(8): 260-262.
- [10] 祝昆, 粟云. 视频图像法测量液体黏滞系数[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(8): 30-32.
- [11] 张海林, 张爱军. CCD 落球法液体黏滞系数测定仪[J]. 实验技术与管理, 2006, 23(4): 49-51.
- [12] 徐欣, 乐飞, 陆申龙, 马秀芳. 用激光光电传感器测液体的黏滞系数——经典的测量液体黏滞系数的改进[J]. 实验技术与管理, 2002, 19(5): 43-46.
- [13] 黄秋萍. 落球法液体黏滞系数实验的改进[J]. 大学物理实验, 2015, 28(3): 38-41.
- [14] 郝杰. 落球法测定液体黏滞系数实验的测时装置改进[J]. 长春师范大学学报, 2020, 39(2): 18-20, 66.
- [15] 边红霞, 屠鹏, 张小平, 等. 一种液体黏滞系数测定实验装置[P]. 中国: CN201420025385. 2, 2014-6-18.
- [16] 黄卫立. 液体黏滞系数测定实验用小球释放精确定位架[P]. 中国: CN201510457639. 7, 2015-10-21.
- [17] 代伟, 杨晓晖. 落球法液体黏滞系数测定仪的改进[J]. 大学物理实验, 2006, 19(4): 36-38.
- [18] 金清理. 大学物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 88-93.
- [19] 王静波. 管道当量直径的计算[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2005, 25(3): 69-70, 75.

Modified experiment for measuring liquid viscosity by building laser mesh

HUANG Yun-mi^{a,b}, CAI Jian-qiu^{a,b}, LUO Hai-jun^{a,b}

(a. College of Mathematics and Physics; b. Wenzhou Key Laboratory of Micro-nano Optoelectronic Devices, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: In the traditional experiment of measuring liquid viscosity by using the falling-ball method, it is difficult to trigger the timing during the falling process of the steel ball just because the experimental steel ball with the small diameter cannot pass through the thin laser beam of photoelectric timing, which inevitably results in the low success rate of the experiment. To solve the problem, a square container containing liquid was used in stead of the cylindrical container, and a small plane mirror was fixed on two facing sides of the container. Based on the reflection principle, a planar laser network was formed while the laser beam reflected back and forth between the two mirrors to ensure that the timing could be triggered by the falling steel ball along the central axis of the container. The experimental results showed that the improved experimental device could ensure the accuracy of the experimental results, and reduced the difficulty of the experimental instruments adjustment.

Key words: viscosity; falling-ball method; photoelectric timing; laser mesh

[责任编辑:郭 伟]