



落球法测量液体粘滞系数的研究与改进

余森源, 唐锐涛, 余其旺, 卞小贝, 王茂香*

(南京理工大学 物理实验中心, 南京 210094)

摘要: 该文对落球法测量透明液体粘滞系数的实验进行了改进和深入研究。介绍了视频分析法测量液体粘滞系数实验步骤, 使用开源软件 Kinovea 对小球下落过程进行录像追踪, 剔除不合格实验过程, 对合格实验过程进行逐帧分析。该方法将实验测量精度提高至 240 帧/S, 实验误差减小至少 50%。同时深入研究了尺寸效应、边缘效应对实验测量结果的影响。

关键词: 液体粘滞系数; 落球法; 视频分析法; 实验误差

中图分类号: O4-34

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230486

Study and Improvement on Measuring Liquid Viscosity Coefficient with Falling Balls

YU Senyuan, TANG Ruitao, YU Qiwang, BIAN Xiaobei, WANG Maoxiang*

(Center of Experimental Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: This article improves the measurements of liquid viscosity coefficient with falling ball and gives an intensive study. We briefly introduce the experimental steps for measuring the viscosity coefficient of liquids using video analysis. It employs the open-source software Kinovea to record and track the falling process of a ball, excluding any unqualified experimental procedures and analyzing qualified experiments frame by frame. This method enhances the experimental measurement accuracy to 240 frames per second and reduces experimental error by at least 50%. Moreover we intensively study the effects of size and edge on the experimental results.

Key words: liquid viscosity coefficient; falling ball method; video analysis; experimental error

液体粘滞系数又称为内摩擦系数或粘度, 是描述流体内部摩擦力性质的重要物理量。测定流体的粘度在化学、医学、水利工程、材料科学、机械工业及国防建设中都有着重要意义。液体粘滞系数的测定方法很多, 如落球法^[1-5]、滚筒法^[6-8]、毛细管法^[9-11]等。相较而言, 落球法具有操作简单、原理简单、成本低廉的特点。同时, 落球法是通过小球的运动带动流体运动来反映流体粘滞系数的, 这种运动相对较轻微, 不会产生过多扰动而影响实验结果。因此, 大部分高校将落球法测定液体粘滞系数的实验作为基本实验项目之一。

液体中作下落运动, 所受的重力 G 、浮力 F 和粘滞力 f 作用如图 1 所示。



图 1 小球在粘滞液体中的受力示意图

1 实验原理

质量为 m , 体积为 V 的小球在密度为 ρ 的粘滞

如果液体是无限广延的, 液体的粘滞性较大, 小球的半径很小, 且在运动时不产生旋涡,

收稿日期: 2023-10-16; 修回日期: 2023-12-02

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11204132); 国家自然科学基金理论物理专项基金(11047163/A05); 中国博士后科学基金面上项目(2014M551543); 江苏省博士后科研资助计划(1302013B)。

作者简介: 余森源(2001-), 男, 本科生, 通信工程专业。

*通信作者: 王茂香(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要从事物理与化学、生命科学等交叉学科方面的研究。E-mail: wangmx@njjust.edu.cn

那么根据斯托克斯定律, 小球受到的粘滞力为:

$$f = 6\pi\eta r v_1 \quad (1)$$

式中: η 为液体粘滞系数, 单位 $\text{Pa}\cdot\text{s}$; v_1 为下落速度, 单位 m/s 。由式(1)可知小球所受粘滞阻力随其下落速度的增大而增大, 当速度达到稳定时, 三力作用达到平衡, 因此有:

$$mg = \rho Vg + 6\pi\eta r v_2 \quad (2)$$

式中: v_2 为小球匀速下落的速度, 也称为收尾速度, 单位 m/s ; m 为小球质量, 单位 kg ; V 为小球体积, 单位 m^3 。由式(1)和式(2)可得液体粘滞系数:

$$\eta = \frac{m - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho}{6\pi r v_2} g \quad (3)$$

由于斯托克斯公式运用需要满足无限宽广的液体中运动以及不产生涡流这两个条件, 因此在实际情况中我们应该考虑量筒直径和小球直径以及湍流效应带来的影响, 将其修正为^[12]:

$$\eta = \frac{\left(m - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho\right) g}{6\pi r v_3 \left(1 + 2.4 \frac{r}{R}\right) \left(1 + 3.3 \frac{r}{h}\right)} \quad (4)$$

式中: r 为小球的半径, 单位 m ; h 为油面到筒中液体的深度, 单位 m ; R 为量筒的内半径, 单位 m ; v_3 为实际测量的收尾速度, 单位 m/s 。

2 实验装置及测量方法

传统实验方法通过秒表计时^[1-5], 虽然简便可行, 但也存在一些缺陷, 如目测判断计时起止点无法有效控制测量误差, 无法准确判断小球在何处进入收尾速度等^[13]。因此我们对实验装置进行了改进, 如图2所示, 将量筒放置在半封闭的挡光罩中, 背后安装无影灯, 提高录像的清晰度。具体实验有如下6个步骤。

1) 实验准备

在量筒特定高度处架设录像装置, 打开恒温水浴装置, 确保实验过程中液体的温度保持不变。

2) 录像

用镊子夹取小球, 在量筒中心处释放, 同时开启录像, 直至小球落至量筒底部关闭录像。

3) 视频分析

将录像导入视频分析软件(如开源软件 Kinovea)进行分析。

4) 帧图挑选

挑选出小球与刻度线重合度最好的帧图, 如图3中的图片, 记录该图的帧数。

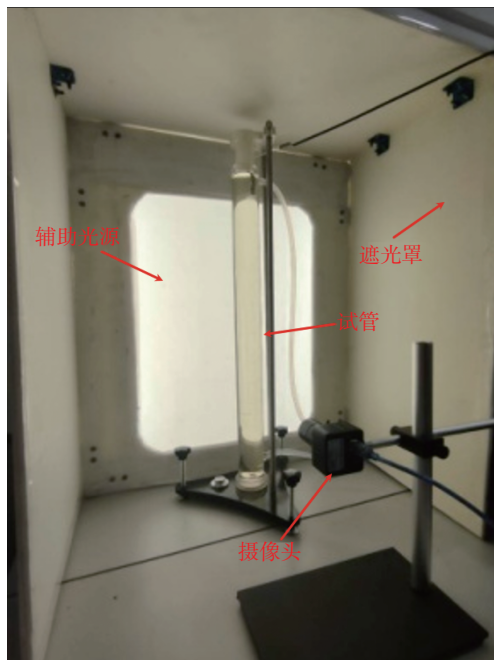


图2 实验仪器

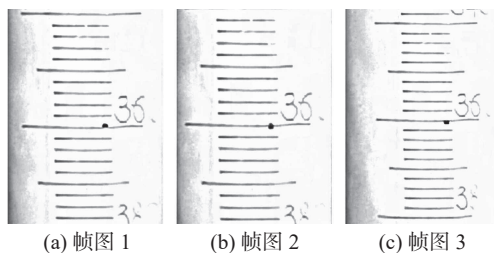


图3 帧图挑选

5) 数据处理

将所得的帧数统计在 Excel 表格里, 如表1所示, 计算出帧数差、时间差、每段的平均速度等。

表1 数据记录与处理

帧数	刻度/mm	帧数差/帧	时间差/s	平均速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)
2829	390			
2878	392	49	0.204 167	9.795 918
2928	394	50	0.208 333	9.6
2977	396	49	0.204 167	9.795 918
3027	398	50	0.208 333	9.6
3077	400	50	0.208 333	9.6

6) 结果分析

分析不同条件下的下落数据, 相互比对, 得到不同影响因素对实验误差的影响。

3 实验结果

实验测量小球在不同温度下的下落过程，采用苹果手机的慢动作摄像，精度可达 $\frac{1}{240}$ s。如图 4 所示，通过线性拟合我们可以求出小球下落速度 v_3 ，而且每条拟合直线的相关系数都接近或等于 1，可以看出小球在下落后期(300~400 mm)满足匀速运动的条件，而且随着温度升高，小球下落加快，表明液体的粘滞系数变小。

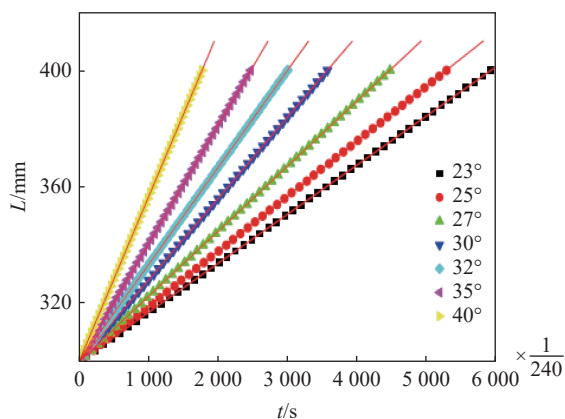


图 4 直径 1 mm 的小球下落后期的运动过程

另一方面，我们还将测量结果与传统秒表计时测量的结果进行了比较，如表 2 所示。可以看出，视频分析法的测量误差远远小于秒表计时法，特别是在 40 °C 时的测量结果，误差降低 90% 以上。

表 2 两种测量方法所得结果的比较

$T/^\circ\text{C}$	$\eta_{\text{理论值}}/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	秒表计时法/ 相对误差 E	视频分析法/ 相对误差 E
30	0.451	0.430/4.6	0.453/0.71
32	0.400	0.382/5.0	0.392/2.20
35	0.313	0.317/1.3	0.311/0.38
40	0.230	0.218/5.2	0.229/0.46

η —Pa·s; E —%。

4 实验拓展

4.1 计速区间对实验误差影响

小球在下落过程中所受粘滞阻力随其下落速度的增大而增大，当速度稳定时，重力、浮力和粘滞力会三力平衡，最终保持匀速运动，而该速度称为收尾速度。因此判断小球的收尾速度是本实验的关键。

我们在刻线范围内(两头的非匀速运动应该在刻线范围外)对小球的 下落速度进行了分析，如图 5 所示。其中 x 轴为平均速度，可以看出，小球在 0~300 mm 区间下落速度波动较大，而在 300~400 mm 区间，速度波动较小，这说明实验中选取收尾速度的必要性，也说明测速区间选用 300~400 mm 时误差更小。

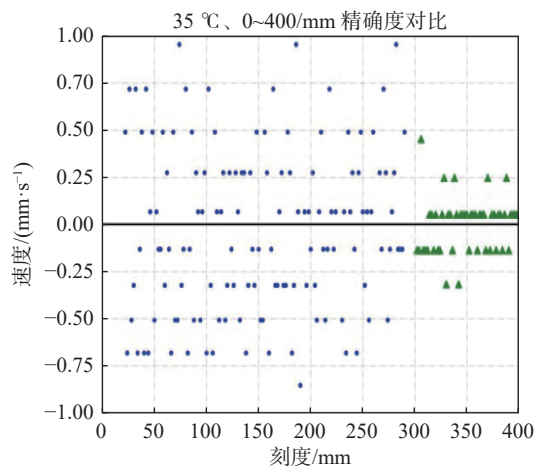


图 5 0~400 mm 下落区间的速度涨落

4.2 不同球径对实验误差影响

斯托克斯公式运用的前提：小球在无限宽广的液体中运动并且运动时不产生旋涡。但在实验过程中不可能做到无限宽广液体，因此我们需要考虑量筒直径和小球直径的影响。本实验装置量筒直径约为 45 mm。不同直径的小球在不同温度下测量蓖麻油粘滞系数的实验结果如表 3 所示。可见球径 1 mm 的相对误差极小，实验精度更高。

表 3 不同直径的小球测量粘滞系数的结果

小球直径/mm	$\eta_{\text{理论值}}/T$	$\eta_{\text{实测值}}/$ 相对误差 E
1	0.75/23	0.774/3.3
1	0.60/25	0.579/1.8
2	0.60/25	0.112/443
4	0.60/25	0.025 1/2 290
8	0.60/25	0.021 5/2 688

η —Pa·s; T —°C; E —%。

4.3 边缘效应对实验误差影响

在实验过程中并不是每一个球都会沿着量筒中心下落，而偏离中心下落的球往往会造成较大误差。为了解和减小量筒边缘的影响，本实验也设计了中心下落小球和边缘下落小球的对照组。

根据视频回放,评估边缘效应对实验误差的影响,如表4所示。通过设置不同的落球位置,选取直线下落不偏的实验小球进行分析。由表4和表5可知,小球下落时离中心越远,测量结果的误差越大。说明边缘效应在本实验中是不可忽略因素。

表4 沿中心下落结果

$T/^\circ\text{C}$	距中心 距离/cm	速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	η 测量值/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	相对误差 $E/\%$
30	0.00	6.910	0.4532	0.706
32	0.00	8.003	0.3913	2.177
35	0.00	9.695	0.3213	0.376
40	0.00	13.280	0.2335	1.522

表5 距中心 1.10 cm 下落结果

$T/^\circ\text{C}$	距中心 距离/cm	速度/ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	η 测量值/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	相对误差 $E/\%$
30	1.10	7.108	0.4406	2.098
32	1.10	8.173	0.3831	4.215
35	1.10	10.010	0.3112	3.653
40	1.10	13.180	0.2353	2.301

5 结束语

液体粘度测量是大学物理实验课程中与流体物理衔接的经典实验之一,实验方法也一直在不断改进,除了秒表计时法还有光电捕捉法^[14-15],前者会因人的主观判断、操作技巧和读数视角等因素造成实验结果的精确度低,而后者又存在对下落小球捕捉率低的缺点。本文采用的视频分析方法,不仅测量数据精度高(目前使用的录像帧速为240帧/s),测量过程直观可控(回看视频时可直接剔除不合格下落过程),而且还可以进一步对物体在流体中的运动进行细致分析,如边缘效应、尺寸效应等对实验的影响,甚至还能将现有实验内容进行扩展,如多球协同运动等。另一方面,此方法基于开源视频分析软件,学生可以利用自己的录像设备(如手机)来进行测量和研究,这也

有利于提高学生对物理实验的参与程度和参与热情,培养他们独立分析、解决问题的能力。

参考文献

- [1] 马娟莉,雷君裕,马进超,等.落球法液体粘度系数实验的改进研究[J].广西物理,2017(4):27-29.
- [2] 郝杰.落球法测定液体粘度系数实验的测试装置改进[J].长春师范大学学报,2020(4):18-21.
- [3] 濮兴庭,戚世瀚,王楠.落球法测定液体粘滞系数误差的研究[J].实验室科学,2014,17(1):22-24.
- [4] 王宁,李小亮,高景霞,等.落球法测液体粘滞系数误差的探索与研究[J].实验科学与技术,2017,15(1):128-130.
- [5] 刘迁,汪华莲,张毅,等.探究落球法粘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(2):103-105.
- [6] 贾达,邹益民.基于虚拟仪器技术的自由旋转粘度计[J].计算机工程与设计,2009,30(3):779-781.
- [7] 童刚,陈丽君,冷健.旋转式粘度计综述[J].自动化博览,2007,24(1):68-70.
- [8] 盖同祥,吴金哲,李洪波,等.旋转粘度计检测机理的进一步分析[J].延边大学学报(自然科学版),2009,25(2):83-86.
- [9] 姜碧垂,惠绍楠,程祥瑞.工作毛细管粘度计粘度常数测量结果不确定度评定[J].科技展望,2015(6):116.
- [10] 吴阳平,滕召胜,林海军,等.基于电容传感器的毛细管粘度计液位自动检测方法[J].传感技术学报,2009,22(7):1061-1065.
- [11] 朱震钧,王明时.新型全自动毛细管式粘度测量系统的设计[J].化工自动化及仪表,2001,28(3):54-57.
- [12] 程玉梅.落球法测液体粘滞系数的研究[J].科技创新导报,2018,15(25):107.
- [13] 庞玮,陈峻,李志伟,等.利用Tracker视频分析软件测量液体黏度[J].大学物理,2012(31):25-27.
- [14] 董大兴,洪涵真,尤建军,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(4):49-51.
- [15] 徐欣,乐飞,陆申龙,等.用激光光电传感器测液体的粘滞系数[J].实验技术与管理,2002,19(5):43-46.

编辑 钟晓