

文章编号: 1007-2934(2023) 01-0012-03

利用密立根油滴实验仪测定空气粘滞系数

杨厚发¹ 沈云才¹ 陈壮壮¹ 曹伟¹ 赵圆磊¹ 李文²,
吕宪魁¹ 易庭丰^{1*} 郑永刚¹ 刘文广¹ 冯洁¹

(1. 云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500; 2. 昆明市外国语学校, 云南 昆明 650041)

摘 要: 以传统落球法测量液体粘滞系数为背景, 结合密立根油滴实验, 将空气中的油滴模拟成液体中运动的小球, 如此即可将落球法测量液体粘滞系数的思想应用到测量空气粘滞系数中. 借助 CCD 成像系统捕捉油滴状态并使用智能手机记录其运动过程, 并利用 tracker 软件对相关物理量进行采集, 最终通过计算得出空气粘滞系数.

关键词: 气体粘滞系数; 密立根油滴实验; 落球法; Tracker

中图分类号: O 4-34 文献标志码: A DOI: 10.14139/j.cnki.cn22-1228.2023.01.003

《大学物理实验》投稿网址: <http://dawushiyuan.jlct.edu.cn>

气体粘滞力是一种微观形式下, 气体分子间相互影响的作用力, 其粘滞系数是表征流体内摩擦性质的重要物理量. 目前, 常见的测量空气粘滞系数的方案如下: 单摆法^[1]、气垫导轨法^[2]、阻尼振动法^[3]等. 但是以上方案在实际操作过程中都存在各自的不足, 例如: 人工计时误差较大、原理晦涩、实验步骤繁琐操作不便.

基于上述分析中的不足, 本文利用密立根油滴实验仪类比落球法测液体粘滞系数^[4]的思想, 将油滴看做匀速下落的小球. 结合 CCD 成像系统捕捉油滴状态和手机对油滴运动过程的视频拍摄, 利用 Tracker^[5] 软件对视频进行分析, 测量油滴半径及油滴运动过程中相关物理量, 将数据代入公式计算后即可得到气体粘滞系数. 本方案也为测量空气粘滞系数提供了一种新的研究方法.

1 实验装置简介

实验器材如下: OM99SCCD 密立根油滴实验仪、直流高压稳压电源、手机、电脑等, 如图 1 所示:



图 1 油滴实验仪实物图

2 实验原理及实验结果

在水平放置的空气平行板电容器内, 设有半径为 r 的油滴. 在不加电场时, 油滴在重力 F_g 、空气浮力 F_σ 、以及斯托克斯粘滞力 F_η 三个力的作用下以速度 v 匀速自由下落. 对油滴进行受力分析, 结果如图 2 所示:

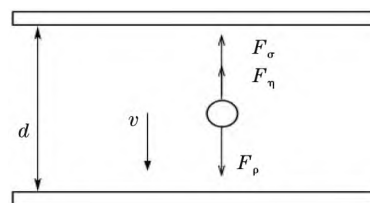


图 2 油滴受力分析示意图

收稿日期: 2022-10-01

基金项目: 云南省省级线下一流课程“基础物理学实验(二)”; 西南地区物理学术竞赛类教育教学改革研究项目(SWPTJG2105); 教育部产学研合作协同育人项目(202002281001); 高等学校教学研究项目(DWJZW202142xn); 高等学校教学研究项目(DWJZW202235xn)

* 通讯联系人

通过受力分析得到空气粘滞系数的表达式^[6]

$$\eta = \frac{2r^2(\rho - \sigma)g}{9v} \quad (1)$$

上述粘滞系数 η 是微小油滴在空气中的粘滞系数, 与较大的物体在空气中的粘滞系数 η_0 有一定差别, η_0 即为本实验需要测定的空气粘滞系数, 而 η 又与 r 有关, 通过对比 r 跟空气分子的平均自由程 λ 可得: r 越小粘滞作用也越小。

η 和 η_0 r 的一级近似关系为

$$\eta = \eta_0 \left(1 + \frac{b}{rp} \right) \quad (2)$$

(2) 式中 p 是电容器内的气压, $b = 8.226 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}$ 。(1) 式中的 v 可通过油滴自由下落

的距离 l 及对应时间 t 算出, 则(1)式可变为

$$\eta_0 = \frac{2r \left(r + \frac{b}{p} \right) (\rho - \sigma) g t}{9l} \quad (3)$$

通过(3)式易得: 仅需测出油滴半径 r 、自由下落的距离 l 、自由下落的时间 t , 即可计算出空气的粘滞系数 η_0 。

Tracker 是一款强大的视频分析软件, 提供的各项功能极大方便对物理现象定量分析、动态显示及有关物理量参量的分析。利用 Tracker 软件的自动追踪功能和数据分析工具对均匀下落油滴的实验视频进行分析得到油滴半径 r 、自由下落的距离 l 、自由下落的时间 t 。其中半径进行多组测量取平均。其数据分析界面如图3所示。

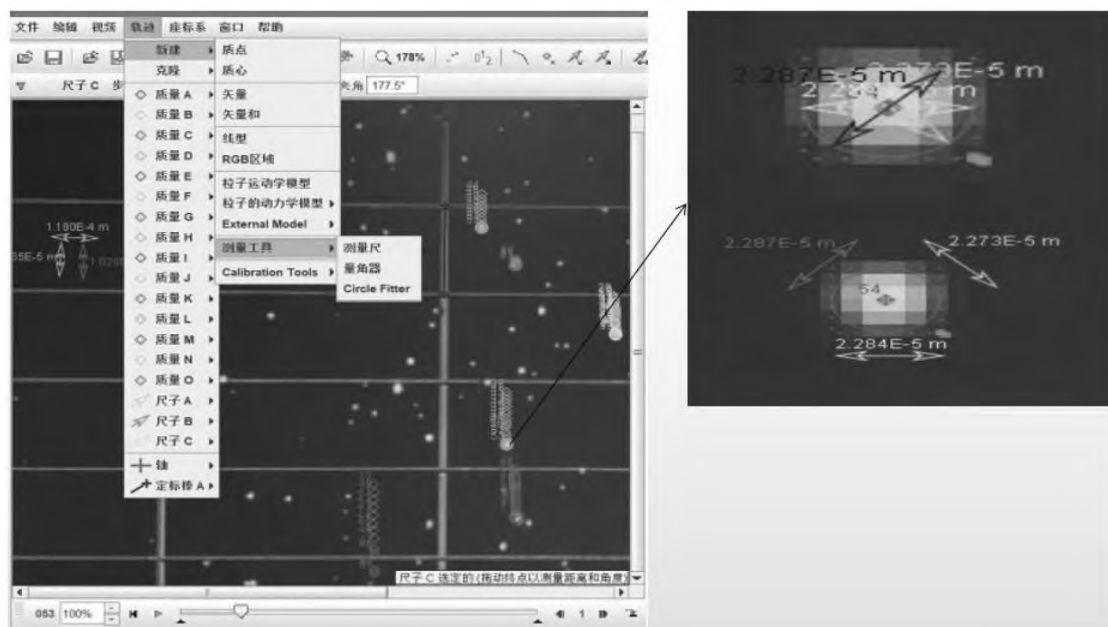


图3 Tracker 分析油滴示意图

实验数据采集过程中也针对较小的油滴进行了数据采集与分析, 但计算出的值与标准值进行比较误差较大故舍弃了对小油滴的测量, 只选取了一些下落速度均匀、大而明亮的油滴进行数据采集。对同一个油滴直径测量3组数据, 分别为 D_1 、 D_2 、 D_3 , 由于 CCD 的放大倍数为 60 倍, 即的油滴平均半径为 $r = (D_1 + D_2 + D_3) / 360$ 。测量结果如下表1所示:

表1 空气粘滞系数测量数据及结果

下落时间 t/s	下落距离 l/m	油滴半径 r/m	空气粘滞系数 η_0
2.806	6.49E-04	2.13E-07	1.64E-05
1.946	4.83E-04	2.46E-07	1.82E-05
1.735	4.09E-04	2.33E-07	1.81E-05
1.419	3.71E-04	2.59E-07	1.81E-05

续表

下落时间 t/s	下落距离 l/m	油滴半径 r/m	空气粘滞系数 η_0
0.906	2.24E-04	2.43E-07	1.80E-05
1.954	4.75E-04	2.43E-07	1.83E-05
1.88	5.18E-04	2.88E-07	1.92E-05
1.102	3.38E-04	3.31E-07	2.00E-05
1.968	6.19E-04	3.41E-07	2.00E-05
1.702	4.45E-04	2.77E-07	1.95E-05
2.836	7.19E-04	2.65E-07	1.92E-05

表2 相关物理参量表

已知条件: 油的密度 $\rho = 850 \text{ kg/m}^3$	空气密度 $\sigma = 1.034 \text{ kg/m}^3$
昆明当地重力加速度 $g = 9.7837 \text{ m/s}^2$	修正系数 $b = 8.226 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}$

续表

昆明当地大气压强 $P = 81\,000\text{ Pa}$	平行极板间距 $d = (5.00 \pm 0.01)\text{ mm}$
空气粘滞系数标准值 $\eta = 1.832 \times 10^{-5}\text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	实验室温度 $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

利用 r 与 v 的关系

$$\eta_0 = \frac{2 \times r \left(r + \frac{b}{p} \right) (\rho - \sigma) g t}{9l} \quad (4)$$

令 $y = 2 \times r \left(r + \frac{b}{p} \right) (\rho - \sigma) g$, $x = v$, $k = \frac{9\eta_0}{(\rho - \sigma) g}$, 则有 $y = kx + b$, 利用 Origin 进行数据拟合得斜率 k , 带入数值计算得到空气粘滞系数。如图 4 所示。

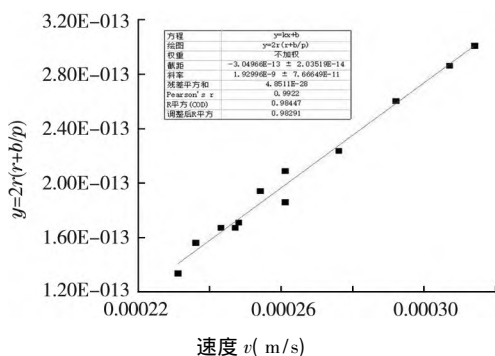


图 4 油滴 y 与油滴下落速度 v 线性拟合图

由上述斜率 $k = \frac{9\eta_0}{(\rho - \sigma) g}$, 变换得 $\eta_0 = \frac{k(\rho - \sigma) g}{9}$ 计算得出空气粘滞系数的平均值 $\eta_0 = 1.7812 \times 10^{-5}\text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 相对误差 $\varphi = \frac{|\eta_0 - \eta|}{\eta} \times 100\% = 2.77\%$

3 误差分析及改进意见

(1) 利用智能手机在视频拍摄过程中,不能

够保证手机与显示屏处于严格平行状态,若二者不平行将会产生系统误差。因此,在拍摄之前通过水平仪调节显示器与手机保持平行,且选取目标油滴时主要选择下落速度适中,且成像较大保持明亮的油滴,以减小时间的测量误差。

(2) 当采用标准的显示屏每格 0.25 mm 时,软件能够精确到的数量级与油滴半径的数量级存在一定差距,并且测量过程中油滴并非真正的理想球体导致了圆的选取形状规格不一,从而导致实际测量值与理论值相差较大。利用 Tracker 软件对小油滴的下落运动进行自动追踪分析,可使实验数据更为精确。

4 结 语

实验测量结果表明:该方法测量空气粘滞系数可行,且实验装置具有结构简单,测量准确率高的特点。但是本方案也存在一些不足之处,例如利用 Tracker 软件对油滴半径分析时,油滴处于匀速运动状态,利用智能手机拍摄的过程存在光影成像误差;实验过程中外界影响因素如温度、压强可通过附加需要装置进行人为控制。因此在对密立根油滴试验仪进行完全密封的状态下,可充入其他特定气体,通过该实验方法测定其粘滞系数。

参考文献:

- [1] 黄睿.利用单摆测量空气粘滞系数的实验设计[J].科技创新导报,2017,2(40):40-43.
- [2] 罗友仁,闫秀莲,王杰.在气轨上测定空气粘滞系数[J].物理实验,1997,6(4):247-248.
- [3] 何国恩,程振西.用阻尼振动法测定空气的粘滞系数[J].大庆石油学院学报,1989,13(4):99-102.
- [4] 杨述武.普通物理实验(一、力学与热学部分)[M].5版.北京:高等教育出版社,2015.
- [5] 曹海宾,侯娟,李金平,等.运用 Tracker 视频分析软件对液体黏度实验的分析[J].物理实验,2015,35(12):29-32.
- [6] 吴先球.近代物理实验教程[M].2.北京:科学出版社,2009.

Determination of Air Viscosity Coefficient by Millikan Oil Drop Tester

YANG Houfa¹, SHEN Yuncui¹, CHEN Zhuangzhuang¹, CAO Wei¹, ZHAO Yuanlei¹,
LI Wen², LÜ Xiankui¹, YI Tingfeng^{1*}, ZHENG Yonggang¹, LIU Wenguang¹, FENG Jie¹

(1. School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Kunming Foreign Language School, Kunming 650041, China)

Abstract: Based on the traditional falling ball method to measure the liquid viscosity coefficient, combined with Millikan oil drop experiment, the oil drop in the air is simulated as a small ball moving in the liquid, so that the idea of measuring the liquid viscosity coefficient by falling ball method can be applied to the measurement of air viscosity coefficient. The CCD imaging system is used to capture the state of oil droplets and use intelligent phones to record their movement process. The "Tracker" software is used to collect relevant physical quantities and finally the air viscosity coefficient is calculated.

Keywords: gas viscosity coefficient; Millikan oil drop experiment; drop ball method; Tracker