

仪器使用说明

TEACHER'S GUIDEBOOK

注意：一定不要打翻蓖麻油，否则很难清理!!!

FD-VM-II

落球法液体粘滞系数测定仪

授课教师：李玉

说明：红色为强调内容，红色且有下划线的为授课教师补充内容

注意：一定不要打翻蓖麻油，否则很难清理!!!

FD-VM-II 型 落球法液体粘滞系数测定仪使用说明

一、概述

液体粘滞系数又称液体粘度，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。采用落球法测量液体粘滞系数，物理现象明显，概念清晰，实验操作和训练内容较多，非常适合大学一、二年级实验教学；但以往此方法由于受手工按秒表、视差及小球下落偏离中心等因素影响，测量下落速度准确度不高。由复旦大学物理实验教学中心与本公司联合研制的 FD-VM-II 型落球法液体粘滞系数测定仪具有以下优点：

1. 用激光光电传感器结合单片机计时，克服人工秒表计时的视差和反应误差，测量小球下落速度的准确度高，引导学生掌握一种新型计时、测速、计数的方法。
2. 设计底盘水平和立杆垂直调节装置及横梁中心小球下落引导管，保证小球从量筒中心下落。
3. 两个严格平行的激光束，不仅可以精确测量下落时间，而且可以精确测量下落距离。用手工计时，激光照明测距，可消除视差，便于两种计时方法的比较和误差分析。

本仪器既保留原实验装置的操作和实验内容，又增加了激光光电计时器的原理及使用方法，扩大了知识面，提高了测量精确度，体现了实验教学的现代化。本仪器可用于高等院校、中专的基础物理实验和设计研究性实验、演示实验。

二、仪器简介

落球法液体粘滞系数

测定仪实验装置如下图

所示：



图 1 落球法液体粘滞系数测定仪实验装置

三、技术指标

- | | | |
|----------------------------|------------|-----------|
| 1. 激光光电开关在立柱上沿柱移动的距离标尺量程: | 40cm | 分度值 1mm |
| 2. 激光光电计时器量程 | 99.99s | 分辨率 0.01s |
| 3. 盛待测液体量筒规格 | 1000mL | 高度 40cm |
| 4. 直径 2mm 小钢珠在液体中下落测量速度的误差 | 小于 1% | |
| 5. 液体粘滞系数测量误差 | 小于 3% | |
| 6. 计时器工作电源 | AC 220±20V | |

四、实验项目

1. 学习用激光光电传感器测量时间和物体运动速度的实验方法
2. 用斯托克斯公式采用落球法测量油的粘滞系数（粘度）
3. 观测落球法测量液体粘滞系数的实验条件是否满足，必要时进行修正。

五、注意事项

1. 主机的使用方法
 - 1) 打开电源开关，按仪器面板上的复位键，使显示器显示初始状态：“Fd ----”。
 - 2) 仪器从激光接收器的第一次触发（有指示灯和显示器显示）开始计时（显示器从 0 开始），到激光接收器第二次触发停止计时，此时间就为小球下降 L 距离所花费的时间。
2. 小钢珠直径可用读数显微镜读出，也可以用千分尺测量，但千分尺必须正确使用，防止将钢珠（直径 1mm）压扁，而引起误差。
3. 测量液体温度时，须用精确度较高的温度计，若使用水银温度计，则必须定时校准。（使用室内温度即可）
4. 实验时，可用手控秒表与激光开关同时计数，以增加实验内容，增强动手能力及误差分析的训练。
5. 激光束不能直射人的眼睛，以免损伤眼睛。

落球法测量液体粘滞系数

(本实验讲义由复旦大学基础物理实验中心协助提供)

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力产生，这一摩擦力称为粘滞力，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 称为粘度，它是表征液体粘滞性强弱的重要参数。

液体的粘滞性的测量是非常重要的，例如，现代医学发现，许多心血管疾病都与血液粘度的变化有关，血液粘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，测量血粘度的大小是检查人体血液健康的重要标志之一。又如，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粘度。

测量液体粘度有多种方法，本实验所采用的落球法是一种绝对法测量液体的粘度。如果一小球在粘滞液体中铅直下落，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粘度。

【实验目的】

1. 学习用激光光电传感器测量时间和物体运动速度的实验方法
2. 用斯托克斯公式采用落球法测量油的粘滞系数（粘度）
3. 观测落球法测量液体粘滞系数的实验条件是否满足，必要时进行修正。

【实验原理】

1. 当金属小球在粘性液体中下落时，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 $\rho g V$ (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，有

$$F = 6\pi\eta rv \quad (1)$$

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

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，即

$$mg = \rho g V + 6\pi\eta rv$$

于是，小球作匀速直线运动，由上式可得：

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

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

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

(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。

2. 实验时，待测液体必须盛于容器中（如图 2 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：

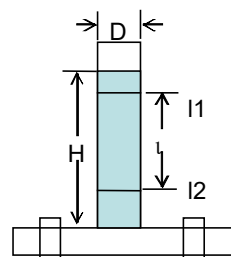


图 2 实验装置

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

其中 D 为容器内径， H 为液柱高度。

3、实验时小球下落速度若较大，例如气温及油温较高，钢珠从油中下落时，可能出现湍流情况，使公式（1）不再成立，此时要作另一个修正（详见附录 1）。

【实验装置】

实验装置主要有：落球法粘滞系数测定仪（参见图 3）、小钢球、蓖麻油、米尺、千分尺、游标卡尺、液体密度计、电子分析天平、激光光电计时仪、温度计和比重瓶等。（若实验室给出钢球材

料密度，可不必用电子分析天平）

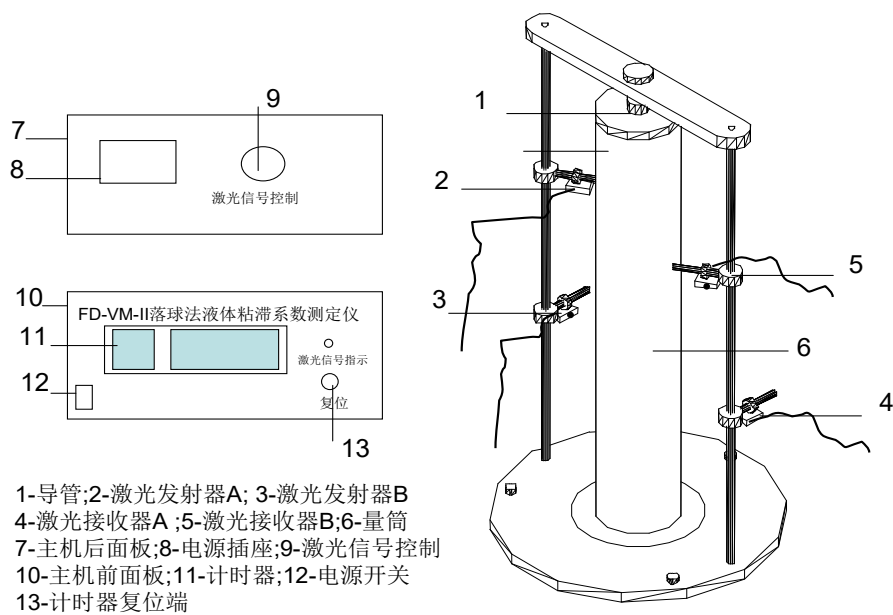


图 3 FD-VM-II 落球法液体粘滞系数测定仪结构图

【实验内容】 （按如下步骤进行，并把数据记录到表 1 中）

1. 调整粘滞系数测定仪及实验准备 （要认真！否则会导致 5）失败，采不到数据！）

- 1) 调整底盘水平，在仪器横梁中间部位放重锤部件，调节底盘旋纽，使线不摆动时重锤对准底盘的中心圆点。
- 2) 将实验架上的上、下两个激光器接通电源，可看见其发出红光。调节上、下两个激光器，使其红色激光束平行地对准锤线。
- 3) 收回重锤部件，然后调节接收器，使发射的激光正好对准接收器中心小孔，将盛有被测液体的量筒放置到实验架底盘中央，微调量筒位置，使激光打到接收器中间圆孔上，并在实验中保持位置不变。
- 4) 在实验架上放上钢球导管。小球用乙醚、酒精混合液清洗干净，并用滤纸吸干残液，备用。
- 5) 将小球放入铜质球导管（手不要触碰导球管，否则导球管口移动位置，落球挡不住激光，），看其是否能阻挡光线，若不能，微调量筒位置，使激光打到接收器中间圆孔上的同时落球又能挡住激光，若还不能，则适当微调调整激光器位置，或重复 1) 至 5) 步。

2. 记录用室内温度 T 作为实际油温。
3. 用直尺测量油柱深度 H 。
4. 测量上、下二个激光束之间的距离 l 。
5. 将所选直径（直径为 1.5mm, 2.0mm, 2.5mm 三种规格，每一规格重复测量两次）的小球放入导管，当小球落下，阻挡上面的红色激光束时，光线受阻，此时用秒表开始计时，到小球下落到阻挡下面的红色激光束时，计时停止，记录小球经过上下两个光电门之间距离的时长 t ，每一规格重复测量两次。

【已知数据】

待测液体是蓖麻油。

用激光光电传感器测量全程和半程时间。

小球密度 $\rho = 7.90 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$, 油的密度 $\rho = 0.960 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$

量筒直径 $\phi = 6.72\text{cm}$;

表 1 小球下落平均速度数据

	小 球 直 径 d/mm	两 光 电 门 之 间 时 间 t/s	同一直径钢球 两光电门之间 时长 $t_{\text{平均 } d=x}/\text{s}$	两光电 门之间 距 离 l/cm
1	1.5		$\overline{t}_{d=1.5}$	
2	1.5			
3	2		$\overline{t}_{d=2.0}$	
4	2			
5	2.5		$\overline{t}_{d=2.5}$	
6	2.5			

将 $d, D, H, \overline{t}_{d=x}$ 带入公式（3），计算得 $\eta_{d=x}$ 。然后计算 3 种不同半径钢球粘滞系数的平均值。

【思考题】

1. 如何判断小球在作匀速运动？
2. 如果遇到待测液体的 η 值较小，而钢珠直径较大，这时为何须用（5）式计算？
3. 用激光光电开关测量小球下落时间的方法测量液体粘滞系数有何优点？

【参考文献】

1. 沈元华、陆申龙，基础物理实验. 北京：高等教育出版社，2003，12
2. 贾玉润等，大学物理实验. 上海：复旦大学出版社，1988，1：142~146
3. 贾起民、郑永令、方小敏，力学. 第二版. 北京：高等教育出版社，2002

【附录一】

为了判断是否出现湍流，可利用流体力学中一个重要参数雷诺数 $R_e = \frac{\rho d v}{\eta}$ 来判断。当 R_e 不很

小时，式（1）应予修正，但在实际应用落球法时，小球的运动不会处于高雷诺数状态，一般 R_e 值

小于 10，故粘滞阻力 F 可近似用下式表示：

$$F = 6\pi\eta'vr(1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2) \quad (4)$$

式中 η' 表示考虑到此种修正后的粘度。因此，在各力平衡时，并顾及液体边界影响，可得

$$\begin{aligned} \eta' &= \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \frac{1}{(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 3.3\frac{d}{2H})} \frac{1}{(1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2)} \\ &= \eta(1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2)^{-1} \end{aligned}$$

式中 η 即为式（3）求得值，上式又可写为

$$\eta' = \eta \left[1 + \frac{A}{\eta} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{\eta} \right)^2 \right]^{-1} \quad (5)$$

式中 $A = \frac{3}{16}\rho d v$ 。式（5）的实际算法如下：先将式（3）算出的 η 值作为方括弧中第二、三项的 η'

代入，于是求出答案为 η_1 ；再将 η_1 代入上述第二、三项中，求得 η_2 ；……，因为此两项为修正项，

所以用这种方法逐步逼近可得到最后结果 η' （如果使用具有贮存代数公式功能的计算器，很快可得

到答案）。一般在测得数据后，可先算出 A 和 η ，然后根据 $\frac{A}{\eta}$ 的大小来分析。如 $\frac{A}{\eta}$ 在 0.5% 以下（即

Re 很小），就不再求 η' ；如 $\frac{A}{\eta}$ 在 0.5%—10%，可以只作一级修正，即不考虑 $\frac{1}{2}(\frac{A}{\eta})^2$ 项；而 $\frac{A}{\eta}$ 在 10%

以上，则应完整地计算式（5）。

【附录二】

表 2 蓖麻油的动力粘度

温度/°C	0	10.00	15.00	20.00	25.00	30.00	35.00	40.00
粘度 η/P	53.00	24.18	15.14	9.50	6.21	4.51	3.12	2.31

注：1. $1P(\text{Poise})=1(dgn \cdot s)/cm^2=0.1Pa \cdot s$

2. 实际使用上表时，请各实验中心将上表数据作图，画出光滑曲线 $\eta - \theta$ 图，以备学生实验时查阅。

蓖麻油粘度与温度关系如图 4 所示。

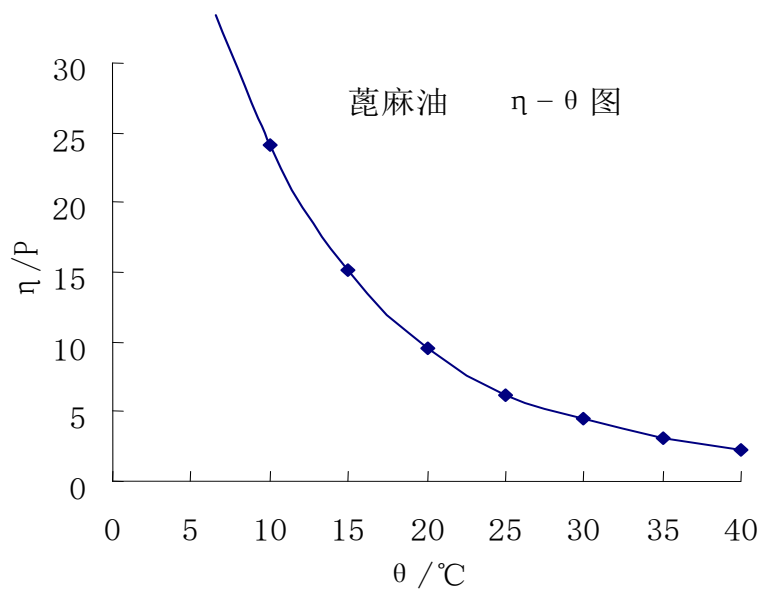


图 4 $\eta - \theta$ 关系示意图



上海复旦天欣科教仪器有限公司

FD-VM-II 型落球法液体粘滞系数测定仪 装 箱 清 单

您购买的产品与装箱清单中是否符合，请验收。

日期： 年 月 日

编号	名称	数量	备注
1	实验架	壹个	
2	仪器主机	壹台	
3	半导体激光发射器	贰只	
4	激光接收器	贰只	
5	七芯航空插头(带引线)	壹根	
6	量筒	壹只	
7	Φ1.5mm 小钢珠	壹包	
8	Φ2.0mm 小钢珠	壹包	
9	Φ2.5mm 小钢珠	壹包	
10	小磁钢	壹块	
11	电源线	壹根	
12	说明书	壹份	
13	合格证	壹份	

14	装箱清单	壹份	
15			
16			