基于拉脱法测量液体表面张力系数的实验改进

王志全[通信作者] 侯可人 张 莹

渭南师范学院 物理与电气工程学院物理学系，中国·陕西 渭南 714099

【摘 要】液体表面张力系数是描述液体表面特性的一个关键物理量，表示液体表面相邻两部分间单位长度的相互牵引力，液体表面张力系数的测量在多个领域都有重要应用，拉脱法是液体表面张力系数测量的常用方法之一，具有实验技术简单、可直接测量、适用范围广以及相对高精度的优点，但同时其结果的精度又受到诸如吊环角度、液面倾角等因素的影响。针对以上因素，通过对拉脱法的实验装置加以改进，能够精确量化液体表面吊环的倾角对实验结果造成的误差，从而在整体上显著减小该实验的测量误差，有效地提高大学物理实验中该实验的教学效果。

【关键词】拉脱法；表面张力；仿真

【基金项目】陕西省教育厅专项科研计划（批准号：23JK0435）；渭南市科技局重点研发计划（批准号：2024ZDYFJH-529）；渭南师范学院2023人才科研计划（批准号：202311）。

引言

液体的表面张力是指液体表面上的分子相互吸引力导致的表面上产生的一种张力或力量。这个力量使得液体表面趋向于减小表面积，因此液体表面会形成一个尽可能小的表面区域。表面张力的主要原因是液体分子之间的相互作用力[1]。液体内部的分子会受到来自周围分子的吸引力，但表面上的分子只有一侧有吸引力，因为它们没有周围的同类分子。这导致表面上的分子聚集在一起，形成一个较为紧密的层，从而减小了表面积[2,3]。表面张力对于液滴的形状、液体在容器中的高度以及液体在毛细管中的上升都有重要影响。表面张力是液体表面上的一种特殊性质，这一性质对于理解液滴和毛细管现象等在日常生活和科学研究中的现象具有重要意义，液体表面张力系数的测量在许多领域都有实际应用，包括化学、生物学、医学、工程和材料科学等。大学生通过这种实验可以培养精细的实验操作技巧、有助于培养学生的实验技能和科学思维。测定液体表面张力系数的方法通常有拉脱法、毛细管升高法和液滴侧重法等，其中拉脱法具有实验技术简单、可直接测量、适用范围广以及相对精度高等优点。

本文基于拉脱法对液体表面张力系数的测量设备进行改进，并对改进后的装置进行受力分析，旨在通过消除与液体表面所接触的吊环所承受拉力不平衡的误差从而达到减小整体实验测量误差的目的。

1 实验部分

1.1实验原理

表面张力是分子力的一种表现，它产生的原因是液体跟气体接触的表面存在一表面层，表面层里的分子比液体内部稀疏，分子间的距离比液体内部大些，分子间的相互作用表现为引力，所以液面具有收缩的趋势。拉脱法测量液体表面张力系数的方法为：设在液面上任作一长为L的线段作为分界线，表面张力存在于液体表面上任何一条分界线两侧间的液体的相互作用拉力，其方向沿液体表面，且恒与分界线垂直，大小与分界线的长度成正比，即：

$$f = \alpha L \tag{1}$$

式中，α称为液体的表面张力系数。实验表明，表面张力系数的大小与液体的温度、纯度、种类和它上方的气体有关，温度越高，液体中所含杂质越多则表面张力系数越小。

将金属环悬挂在传感器上，并将其下表面浸入盛水的玻璃器皿中。当缓慢地向上提起金属环时，金属环将会带起一层液膜，液膜受到的表面张力为f，液膜表面的切线与金属环表面的切线之间的夹角称为接触角φ。当金属环缓慢拉出水面时，表面张力f的方向将随液面方向的改变而改变，接触角φ逐渐减小而趋于零，此时f的方向趋于垂直向下。在液膜将要破裂前各力保持平衡及拉力F应当是金环重力G与水柱拉引金属环的表面张力f之和。

若力敏传感器拉力为F时，数字式电压表的示数为U，则有，

$$F = \frac{U}{B} \tag{2}$$

式中，B表示力敏传感器的灵敏度。吊环拉断液面前的

一瞬间，吊环受到的拉力为F_1=G+f；拉断时的瞬间，吊环受到的拉力为F_2=G。若吊环拉断液膜前的一瞬间数字电压值为U_1，拉断时的瞬间数字电压表的读数值为U_2，则有，

$$F_1 = G + f = \frac{U_1}{B} \tag{3}$$

$$F_2 = G = \frac{U_2}{B} \tag{4}$$

则，

$$\alpha = \frac{\Delta U}{\pi(D_1 + D_2)B} \tag{5}$$

1.2传统仪器存在的不足

为了获得准确的结果，拉脱法对实验条件要求较为严格，如液体纯净度、温度控制、液滴或气泡形状的稳定性等。在具体操作中，液体表面张力系数的测量误差主要来源于三个方面：液面的水平性、吊环的水平角度和受力稳定性[4]。

1.2.1液面的水平性

液面的水平度是指液滴或气泡的底部与水平面的角度。在拉脱法实验中，液面或气泡应当处于静止状态，即不受外力的扰动。如果液面或气泡在实验过程中受到振动或外力干扰，其形状会发生变化，从而影响表面张力的测量。为了获得较为准确的表面张力系数测量结果，实验中应保持液面水平，确保液面或气泡的形状对称。如果液面或气泡的形状和液面状态不能得到有效控制，可能会导致测量结果的误差增大，从而影响到液体表面张力系数的准确性。

1.2.2吊环的水平程度

传统实验通常调节吊环水平平衡的工具为吊环上方固定的三根金属丝，而金属丝长度和应力难以调节，无法准确把握吊环的水平程度，如果吊环的水平程度不够好，导致吊环与液面的不对称性，进而影响吊环受力的均衡性，从而影响表面张力系数的测量。此外，吊环的水平程度会影响液面的稳定性，如果液面不稳定发生形状的变化，将使得测量结果不准确。

1.2.3吊环的受力稳定性

在拉脱法测量液体表面张力系数的实验中，吊环的受力稳定性是非常重要的，吊环受力稳定性对实验测量的影响主要表现为：（1）在拉脱法实验中，吊环要受到液体表面张力和重力两个竞争性力的作用，只有当吊环的受力达到均衡时，才能获得准确的测量结果；（2）液体在吊环周围上升或下降的速度可影响吊环的受力均衡性，进而影响测量的准确性和实验可重复性。

1.2.4实验仪器

实验装置由FD-NST-I型液体表面张力系数测定仪、改进的圆形吊环、硅压阻力敏传感器和表面张力测定仪组成，使用的工具有：水平仪、游标卡尺、质量为0.5g的片码，镊子等，连接力敏传感器与吊环的材料为金属导线。涉及改进的装置有两处：（1）将传统的金属线或棉线连接的提拉吊环改为圆盖形的吊环，在圆盖中心打孔，并将圆滑小球作为提拉圆盖移动的着力点，小球与圆盖中心无固定连接，圆盖两侧打孔，用于保证圆盖与液体接触时的圆盖内外气压相同；（2）传统液体托盘的升降位移精度粗糙，将一维精密平移台代替传统液体托盘的升降旋钮[5]。

2 结果与讨论

2.1静态受力仿真

图1 拉脱法测量液体表面张力的可行性仿真

对改进后的装置采用SolidWorks进行静态受力分析仿真，圆环材质为304不锈钢，受力载荷为吊环横截面，受力方向垂直向下。如图1所示，从仿真结果中可知：（1）小球与吊环接触部分为对称性受力，表示此时吊环均匀受力，同时表明此方案的可行性。与小球接触的吊环上表面发生形变，吊环中心受力最大，边缘处受力较小，颜色变化表示受力大小的递进，蓝色为受力最小，红色表示受力最大，为清晰表示其应力形变效果，仿真中受力部分的形变效果扩大了167.7倍，可看到与小球所接触的吊环部分周围受力的良好对称性；（2）吊环最大形变应力为5.3×10^7 N/m^2，而其屈服力则达到2.06×10^8 N/m^2，屈服力大于应力表明该结构的合理性。

2.2传感器灵敏度测量

由图测量数据可得斜率k，进而得到力敏传感器灵敏度B，

$$k=\frac{\overline{U}}{M}=30.253V/\mathrm{kg}$$

$$B=\frac{\mathrm{k}}{\mathrm{g}}=\frac{30.253}{9.79}=3.09V/N$$

3 液体表面张力系数的计算

由表1所测数据进行不确定度计算，

$$\Delta U\pm U_{\Delta U}=30.2\pm0.16\mathrm{mV}$$

表1 液体表面张力系数测量数据

次数	1	2	3	4	5	6
U_1/mV	-92.9	-93.4	-92.4	-936.	-93.1	-93.0
U_2/mV	-62.8	-63.0	-63.2	-62.5	-62.8	-62.9
U/mV	30.1	30.4	30.2	30.1	30.3	30.1

由上述实验数据进而计算液面表面张力系数α，

$$\alpha=\frac{\Delta\overline{U}}{\pi B\overline{D}}=\frac{30.2}{3.142\times3.09\times43.01}=7.23\times10^{-2}N/\mathrm{m}$$

其不确定度，

$$U_{\alpha}=\alpha\cdot U_r(\alpha)=7.23\times10^{-2}\times0.17\%=1.23\times10^{-4}N/m$$

$$\alpha\pm U_{\alpha}=(7.23\pm0.01)\times10^{-2}N/m$$

与理论值比较，并求得相对误差，水温在23℃时，$\alpha_{理}=7.20\times10^{-2}N/m$，

$$E=\frac{|\alpha-\alpha_{理}|}{\alpha_{理}}\times100\%=\frac{|7.23-7.20|}{7.20}=0.41\%$$

经过改进的实验误差来源主要为：（1）液体温度变化：液体温度的变化可以引起液体的密度和表面张力系数的变化，而实验所涉及的环境并非是恒温实验室；（2）表面张力不均匀性：液体表面张力可能在液体表面上不均匀分布，特别是在液体表面存在异物或污染物时，这可能导致测量误差。该实验在23℃的水温下进行，采用了拉脱法测定液体表面张力系数α，由于实验所用水为自来水，里面参夹较多表面活性物质，致使水的表面张力系数变小，与资料数据有所出入：故排除实验操作的绝对误差，在相对误差允许的范围内，本实验测定的表面张力系数为7.23×10^{-2} N/m。

此外，为对比装置改进前后测量数值的差异性，对改进前后的装置分别进行10次测量，其测量值分布如图2所示。由图2可知，改进后的装置测量结果分布离散程度小，数值分布较为集中，而改进前的装置测量结果离散程度较大。同时，由数值分布图分析可知，改进前的装置测量结果均低于改进后的数值，原因主要为改进前的吊环装置与液面之间始终存在一个难以消除的夹角，导致吊环脱离液面前后的拉力差值较小，即ΔU较小，导致测量的液面张力系数较小。

图2 装置改进前后测量值分布图

4 结论

在利用拉脱法测量液体表面张力系数的实验中，吊环的倾角是影响测量结果精度的最大因素，本文基于对拉脱法实验装置的改进，改变吊环结构和形状，精确定位吊环水平角度，使得吊环所受液面拉力具有优良的对称性和均衡性，减小液体表面吊环的倾角对实验结果造成的误差，从而在整体上显著减小该实验的测量误差，有效地提高大学物理实验中该实验的教学效果。

参考文献：

[1]Fletcher N H. Surface structure of water and ice[J]. Philosophical Magazine,1962,7(74):255-269.

[2]杨能勋,王晓红,崔凯.拉脱法测量液体表面张力系数实验装置的改进[J].延安大学学报(自然科学版),2013,32(03):38-40+44.

[3]蒋权,王建江,王珊,等.不同反应条件及表面活性剂对氨水表面张力的影响研究[J].应用化工,2023,52(06):1726-1729.

[4]曹旭东,冯秀绒,王文伟.浅谈大学物理关于液体表面张力演示实验的应用[J].科技视界,2016,(25):95.

[5]李艳红,王升宝,常丽萍.表(界)面张力测定方法的研究进展[J].日用化学工业,2007,(02):102-106.

作者简介：

王志全（1991-），男，河南商丘人，渭南师范学院讲师，博士，研究方向：太赫兹光电导天线阵列方面的研究。