

普通物理学实验 II

电子实验报告

实验名称：常见物质水溶液表面张力系数测定
与比较

指导教师：王宙洋

班级：图灵 2303

姓名：张晋恺

学号：3230102400

实验日期：2024年 11 月 13 日 星期 三 上午

浙江大学物理实验教学中心

一、 实验综述

1.1 实验背景

表面张力是液体物质的一种物理现象，它是由分子引力作用产生的结果。液体表面分子既受液体外部化学性质相同物质吸引，又受液体内部分子吸引，但内部分子引力大于液体外部分子引力，这样，液体表面分子向内收缩，这种向内收缩的力叫做“表面张力系数”，又叫内聚力。

表面张力是液体表面的重要特性。它类似于固体内部的拉伸应力，这种应力存在于极薄的表面层内，是液体表面层内分子力作用的结果。在宏观上，液体的表面就像一张拉紧了橡皮薄膜，存在有沿着表面并使表面趋于收缩的应力，这种力称为表面张力。液体的许多现象与表面张力有关（例如毛细现象、润湿现象、泡沫的形成等），工业生产中的浮选技术、动植物体内液体的运动、土壤中水的运动等也都与液体的表面现象有关，此外，在船舶制造、水利学、化学化工、凝聚态物理中都有它的应用。因此，研究液体的表面张力，可为工农业生产、生活及科学研究中有关液体分子的分布和表面的结构提供有用的线索。

1.2 实验原理

1.2.1 表面张力系数的静力学测量

表面张力系数的静力学测量可以通过测量液体表面的形状来实现。当液体静止时，液体表面呈现出一个平衡状态，表面张力使得液体表面趋于最小化。根据杨-拉普拉斯方程，液体表面的曲率与表面张力之间存在关系：

$$\Delta P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

其中， ΔP 是液体表面的压强差， σ 是表面张力系数， R_1 和 R_2 分别是液体表面在两个正交方向上的曲率半径。当

液体表面为球面时， $R_1 = R_2 = R$ ，此时有：

$$\Delta P = 2\sigma/R$$

通过测量液体表面的压强差和曲率半径，可以计算出表面张力系数。在实验中，常用的测量方法有气泡法、滴下法和悬滴法等。

在气泡法中，可以利用气泡在液体中的形成和膨胀来测量表面张力系数。通过测量气泡的压强差和半径，可以计算出表面张力系数。

在滴下法中，可以利用液滴在液体中的形成和下落来测量表面张力系数。通过测量液滴的体积和下落速度，可以计算出表面张力系数。

在悬滴法中，可以利用液滴在固体表面上悬挂的形态来测量表面张力系数。通过测量液滴的形态和重力平衡条件，可以计算出表面张力系数。

1.2.2 表面张力系数的动力学测量

动态法液体表面张力系数测量是基于“气泡幅频当量法”，其基本思想就是变静力学测量为动力学测量，将缓慢吹气变为每秒钟吹若干个气泡，同时不再测量泡内最大绝对压力，而改为测量气泡内相对压强差和气泡生成的周期。

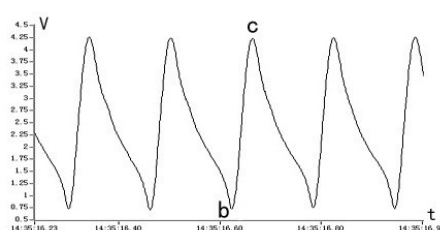


图 1: 气泡幅频当量法测量表面张力系数

将毛细管插入液体中另一端接一个气流量可调的气源，向被测液体吹气，检测气泡不断形成、长大和破灭的过程，可获得 1 条等幅振荡曲线。上图即为实验获得的气泡内压强幅值与气泡形成时间关系曲线。

图中才 c、b 分别对应气泡曲率半径最小和气泡即将脱离管口，即气泡压强最大和最小的两种状态。该曲线的纵坐标为气泡内压强变化值，横坐标为时间，表示气泡形成速度。由于气泡内压强差和气泡形成速度与液体表面张力系数密切相关，因此，可以根据曲线的振幅和频率求解出一个与真实表面张力系数相当的数值，称之为当量表面张力系数。由于该方法是以一定时间内所形成的气泡压强幅值和频率为测量参数来求解当量表面张力系数，故称为“气泡幅频当量法”。

该方法可将计算表面张力系数的公式写成以下形式：

$$\sigma_d = a\Delta P + bT + c$$

(式中： σ 为液体当量表面张力系数， ΔP 为气泡内压强变化幅值， T 为气泡生成周期， a, b, c 为修正系数，由实验数据确定)

通过实验也可以得出，在气流量不变的条件下，毛细管插入越深，测得的越小，而气泡生成的周期越大，反之亦然。因此毛细管入深度所带来的影

响是互补的。如果实验测量时保持毛细管的插入深度不变,即可消除其对表面张力计算产生的影响。温度对液体表面张力有不同程度的影响,在测定表面张力的同时,必须给出温度参数。

二、 实验内容

2.1 确定当量法修正系数

- 建立表面张力系数气泡幅频当量法数学模型公式,确定公式中的系数
- 开启气泵后,将测量仪器毛细管插入合适深度,保持该深度不变,启动 MPS-010501 数据采集软件对不同的温度下的水进行数据采集
- 之后使用 MPS Signal Replay Software 软件将数据导出为文本文件在 5 个不同的温度下进行测量,共得到不同温度下的 5 组实验数据
- 使用 matlab 对数据进行处理通过测量水在不同温度下气泡内压强差 ΔP 和气泡生成的周期 T
- 查表结合已知该温度下水的表面张力系数,即可确定公式中的系数

由导出的文本文件转换为 matlab 图像的代码如下:

```
% 加载数据
data = load('water.txt');

% 提取数据中的变化幅值和周期 (假设每列为一个变量)
amplitude = data(:, 1); % 这里假设第一列是幅值
period = (1:length(amplitude))' / 10000; % 根据采样率计算周期

% 定义拟合函数 (比如多项式拟合或指数拟合)
% 以线性多项式拟合为例
p = polyfit(period, amplitude, 1); % 一阶多项式拟合

% 生成拟合曲线
fitted_amplitude = polyval(p, period);

% 寻找峰值及其对应的周期
[peaks, locs] = findpeaks(amplitude);
peak_periods = period(locs);
```

```

% 绘制结果
figure;
plot(period, amplitude, 'b-', 'DisplayName', 'Original Data');
hold on;
plot(period, fitted_amplitude, 'r--', 'DisplayName', 'Fitted Curve');
xlabel('Period (s)');
ylabel('Amplitude');
legend;
title('Amplitude vs. Period Fitting');
grid on;

% 输出峰值及其对应的周期
disp('Peaks and Corresponding Periods:');
for i = 1:length(peaks)
    fprintf('Peak %d: Amplitude = %.4f, Period = %.4f s\n', i, peaks(i), peak_peri
end

```

生成的图片如下

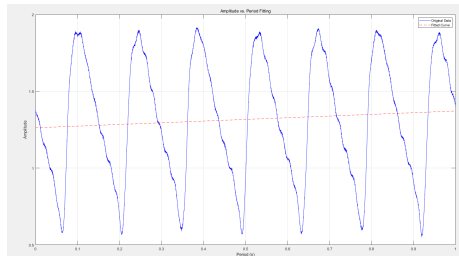


图 2: 拟合图像

表 1: 表面张力系数与温度的关系

水温 ($^{\circ}C$)	30.7	32.7	34.7	36.7	38.0
ΔP (V)	1.36	1.39	1.40	1.43	1.31
$T(ms)$	182.3	166.3	174.6	165.5	160.1
已知表面张力系数 $\sigma \times 10^{-3}(N/m^{-1})$	71.12	70.80	70.48	70.15	69.80

求出气泡幅频当量法计算公式为

$$\sigma_d = 0.4010\Delta P + 0.06263T + 59.8865$$

2.2 计算其它溶液表面张力系数

配置过饱和食盐溶液和过饱和糖溶液，测量其表面张力系数，利用求出来的系数，计算饱和食盐溶液和饱和糖溶液的表面张力系数，具体操作步骤与上述相同。

表 2: 研究饱和食盐溶液的表面张力系数

饱和盐溶液温度 ($^{\circ}C$)	29.7	31.7	33.7	35.7	37.7
ΔP (V)	1.52	1.61	1.70	1.64	1.69
$T(ms)$	169.5	166.5	166.0	165.3	164.4
计算表面张力系数 $\sigma \times 10^{-3}(N/m^{-1})$	71.11	70.96	70.96	70.89	70.85

表 3: 研究饱和糖溶液的表面张力系数

饱和糖溶液温度 ($^{\circ}C$)	30.6	34.7	36.7	38.7	40.7
ΔP (V)	2.00	2.09	2.01	1.99	1.93
$T(ms)$	209.1	192.2	183.1	180.1	180.4
计算表面张力系数 $\sigma \times 10^{-3}(N/m^{-1})$	73.78	72.75	72.16	71.96	71.94

2.3 误差分析

本实验中，主要的误差来源有以下几个方面：

1. 实验仪器的误差：实验仪器的精度和灵敏度会影响实验结果的准确性。在实验中，使用的仪器有毛细管、气泵、数据采集软件等，这些仪器的精度和灵敏度会影响实验结果的准确性。
2. 温度的变化：温度的变化会影响液体的表面张力系数，但是在实验中，我们很难维持温度的恒定，这会导致实验结果的误差，同时加热装置与温度传感器的精度也会影响，传感器显示的温度与实际温度之间存在一定的误差。
3. 数据处理精度的丢失：在实验中，我们需要对实验数据进行处理，包括数据的导出、转换、处理等，这些过程中可能会存在误差，特别是用

matlab 进行数据处理时，由于 matlab 的计算精度有限，可能会导致误差的积累。

4. 由于温度梯度不大， ΔP 变化较小，进行峰值分析后拟合出的 a, b, c 并不是很准确。
5. 实验时要保持毛细管插入深度不变，但是实际上仍然会有一定的误差，这会影响实验结果的准确性。

2.4 实验总结

本次实验虽然有一定误差，但是我们通过实验，了解了表面张力系数的测量方法，掌握了表面张力系数的测量原理和方法，提高了实验操作能力和数据处理能力。同时实验最后的结果也基本符合预期，表面张力系数会随着温度的升高而降低，这与理论预期相符。

三、 实验拓展

3.1 解释“最大泡压法”基本原理

- 将毛细管插入液体，并施以一定的压力，在毛细管管口处就会形成气泡，气泡的半径在形成过程中的先由大变小，然后再由小变大。
- 则气泡内外的压力差 Δp 、气泡的半径 r 、液体表面张力系数 σ 之间的关系可以用拉普拉斯公式表示：

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{r}$$

- **最大泡压**是气泡在上升过程中，因气泡体积增大而达到的最大压力。这个压力通常发生在气泡刚刚开始膨胀的时刻，即气泡的半径和表面张力共同作用的最大压力点，此时气泡半径等于毛细管管半径，故有

$$\Delta p_{\max} = \frac{2\sigma}{R}$$

3.2 设计一个新的或改进的液体表面张力测量方法：动态悬滴法

3.2.1 测量方法和基本原理

悬滴法（Pendant Drop Method）是一种常用于测量液体表面张力的方法，基于观察液体在垂直毛细管末端形成的悬滴形状。在经典悬滴法的基础

上，可以改进成“动态悬滴法”，通过实时监测滴液的体积变化和形状演变，更精确地测量表面张力。

1. 基本原理：

- 液体从垂直毛细管末端缓慢滴出，形成悬滴。在重力和表面张力的共同作用下，悬滴逐渐变大并最终脱离毛细管。
- 悬滴的形状（尤其是曲率）与液体的表面张力相关。通过分析悬滴的形状和体积，可以计算出表面张力。
- 改进后的动态悬滴法利用高速相机记录滴液形成过程中的连续图像，并结合形状因子和曲率变化，得到液体的表面张力随时间的变化情况，适合动态表面张力的测量。

2. 测量步骤：

- 将液体缓慢滴入毛细管，让液滴逐渐形成悬滴。
- 使用高速相机记录悬滴在形成过程中的形状变化。
- 通过图像处理软件，计算悬滴的曲率和体积。
- 结合形状因子公式，计算出表面张力 γ ：

$$\gamma = \frac{\Delta\rho g R^2}{H}$$

其中：

- $\Delta\rho$ 为液体与空气的密度差，
- g 为重力加速度，
- R 为悬滴的半径，
- H 为形状因子。

3.2.2 实验误差分析

1. 光学误差：

- 高速相机的分辨率和拍摄角度会影响悬滴轮廓的精确识别，从而影响曲率和半径的测量精度。

2. 环境因素：

- 温度和湿度的变化会影响液体的表面张力。因此，实验需要在恒温 and 干燥的环境下进行。

3. 液滴形状不规则性:

- 液滴在形成过程中可能受到震动或空气流动的影响，导致形状偏离理想的旋转对称状态，增加测量误差。

4. 数据处理误差:

- 图像处理算法的误差可能影响形状因子的精确性，进而影响表面张力的计算结果。

3.2.3 总结

动态悬滴法改进了传统悬滴法，适合测量液体表面张力的动态变化，尤其适用于界面活性剂等溶液的测量。然而，实验的光学系统和环境控制对精确度至关重要，需要谨慎处理。