

透明液体浓度的测量

目 录

2.实验器材	3
3.实验原理	3
3.1 折射定律	3
3.2 全反射定律	4
3.3 理论推导	4
4.装置实现	7
5.光斑高度影响因素	9
5.1 折射率和入射角	9
5.2 液面高度	9
5.3 平面镜 3 倾斜角度	10
6.实验步骤	10
7.数据与分析	11
7.1 数据处理思路	11
7.2 数据分析	11
7.4 实验分析	17
8.误差分析	17
8.1 系统误差分析	17
8.2 偶然误差分析	18
9.创新点	18
10.性能指标	19
1.精确度	19
2.响应时间	20
3.实验操作	20
12.结论与展望	20
13.参考文献	20
14.附录	21

1. 研究目的

- 1.1 设计制作一种表征并测量透明液体浓度的装置；
- 1.2 测量透明液体浓度；
- 1.3 掌握透明液体浓度与高度差的关系；
- 1.4 进一步理解光的折射定律与反射定律；
- 1.5 探究控制变量法在物理学中的应用。

2. 实验器材

表 1 实验器材表

水槽×1	三脚架×1	激光笔×1	接收屏×1
平面镜×5	电子秤×1	烧杯×1	量角器×1
$NaCl$ 若干	水平仪×1	刻度尺×1	搅拌棒×1

3. 实验原理

3.1 折射定律

入射光线、折射光线和法线在同一平面内，入射光线与折射光线分居在法线两侧，入射角的正弦与折射角的正弦之比为一常数 n 。 则 n 用公式表示为：

$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (1)$$

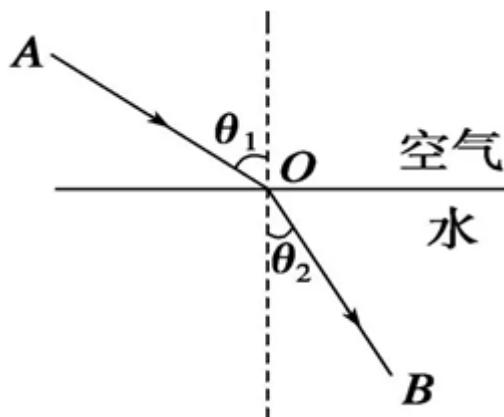


图 1 折射定律示意图

3.2 全反射定律

当光从光密介质进入光疏介质，入射角达到某一值（临界角）时，不再有折射光而全部被反射——全反射，其临界角的大小记为 i_c 。

$$i_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

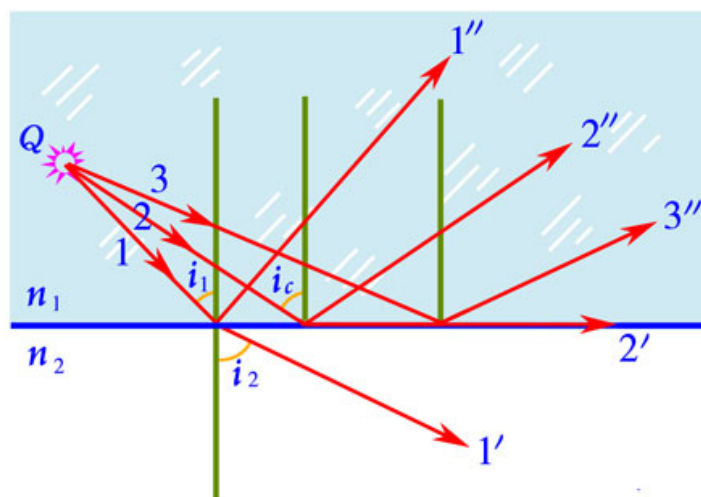


图 2 全反射定律示意图

3.3 理论推导

激光束在空气中平面镜 3 上发生反射，后打到接收屏上。

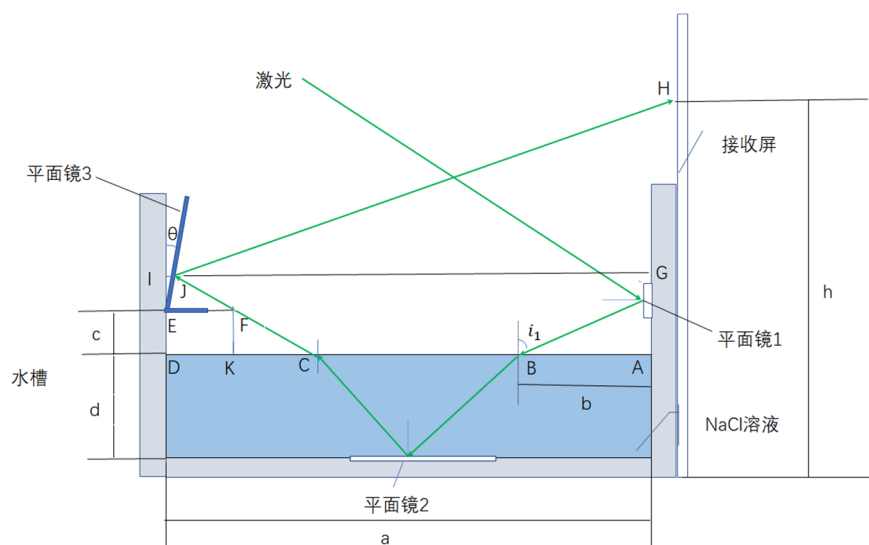


图 3 光路示意图

由图 3 中几何关系可知：

$$h = AG + GH + d = DE + IE + GH + d \quad (3)$$

式中 d 为液面高度, h 为光斑高度 (下同),

IE 可在 $\triangle IEF$ 中由三角函数计算得到表达式, 即:

$$IE = \frac{EF}{\tan i_1} \quad (4)$$

式(4)中,

$$EF = CD - KC = a - b - \frac{2d \sin i_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} - c \tan i_1 \quad (5)$$

式中 n 为不同浓度的 $NaCl$ 溶液的折射率, a 为水槽内壁的长, b 为激光束的入射距离, c 为液面到平面镜 3 底部的垂直距离 (下同)。

当平面镜 3 的倾斜角 $\theta = 0^\circ$ 时, GH 可在 $\triangle GIH$ 中由三角函数计算得到表达式, 即:

$$GH = IG \tan i = a \tan i \quad (6)$$

式(6)中, $i = \frac{\pi}{2} - i_1$

式中 i_1 为激光束的入射角, i 为激光束在平面镜 3 上的反射角 (下同)。

所以, 接收屏上光斑高度公式为:

$$h = a \tan\left(\frac{\pi}{2} - i_1\right) + \frac{a - b - 2d \frac{\sin i_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} - c \tan i_1}{\tan i_1} + c + d \quad (7)$$

设 $NaCl$ 浓度为 0% 时, 光斑高度为 h_0 , 即:

$$h_0 = a \tan\left(\frac{\pi}{2} - i_1\right) + \frac{a - b - 2d \frac{\sin i_1}{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 i_1}} - c \tan i_1}{\tan i_1} + c + d \quad (8)$$

式中 n_0 为 $NaCl$ 溶液浓度为 0% 时的折射率 (下同)。

此时的高度差为:

$$\Delta h = h - h_0 \quad (9)$$

当平面镜 3 的倾斜角 $\theta \neq 0^\circ$ 时, HG 在 $\triangle JGH$ 中由三角函数计算得到表达式,
即:

$$HG = JG \tan i \quad (10)$$

式(10)中, $i = \frac{\pi}{2} - i_1 - 2\theta$, $JG = AD - IJ$,

在平面镜 3 倾斜角 $\theta = 0^\circ$ 时, 我们已经计算出了 IE 的表达式, 所以, 此时接收屏上光斑高度公式为:

$$h = a \tan\left(\frac{\pi}{2} - i_1 - 2\theta\right) - \frac{\left(a - b - 2d \frac{\sin i_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} - c \tan i_1\right) \cos i_1}{\sin(\theta + i_1)} \left(\sin \theta \tan\left(\frac{\pi}{2} - i_1 - 2\theta\right)\right) + c + d \quad (11)$$

设 $NaCl$ 浓度为 0 时, 光斑高度为 h_0 , 即:

$$h_0 = a \tan\left(\frac{\pi}{2} - i_1 - 2\theta\right) - \frac{\left(a - b - 2d \frac{\sin i_1}{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 i_1}} - c \tan i_1\right) \cos i_1}{\sin(\theta + i_1)} \left(\sin \theta \tan\left(\frac{\pi}{2} - i_1 - 2\theta\right)\right) + c + d \quad (12)$$

此时的高度差为

$$\Delta h = h - h_0 \quad (13)$$

需要满足水到空气的入射角小于临界角 $\arctan = \frac{\sin i_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}}$, 若大于临界角

, 则发生全反射, 此时在接受屏上没有光斑。

4.装置实现



图 5 平面镜 3 不倾斜实物图



图 6 平面镜 3 倾斜实物图

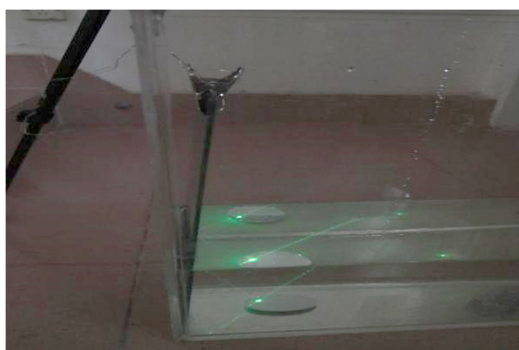


图 7 平面镜 3 倾斜实物图

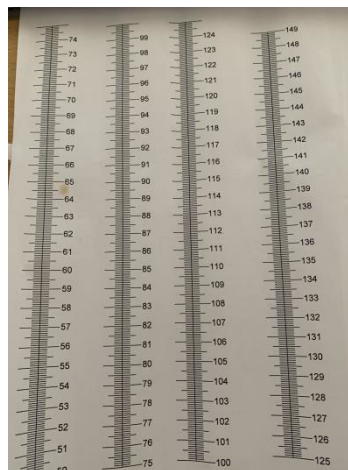


图 8 自制刻度尺实物图

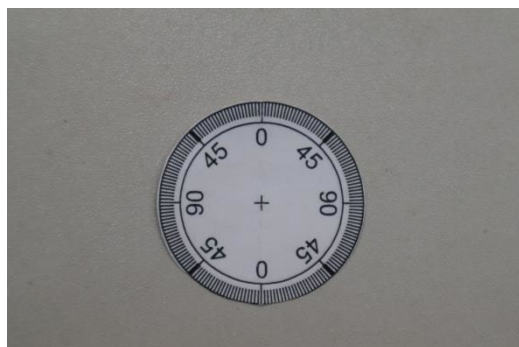


图 9 自制刻度盘实物图



图 10 激光调节装置实物图

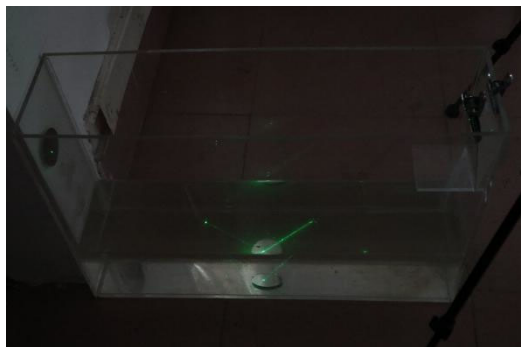


图 11 实验现象实物图

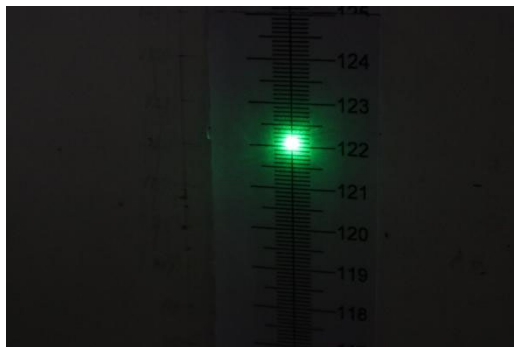


图 12 光斑打在接收屏上实物图

4.1 装置特点

水槽内底部和水槽壁两端都放置一块平面镜，选用激光笔作为光源，以某一角度照射到平面镜 1 上，经平面镜 1 反射的激光束到平面镜 2 上，再折射到平面镜 3 上，平面镜 3 反射的激光束照射到接收屏上，此时接收屏上出现一个亮斑。



图 13 实验装置实物图

4.2 实验装置的设计

对于装置的设计，需要考虑以下几点：

- (1) 三脚架是否水平；
- (2) 平面镜是否与水槽壁完全贴合；
- (3) 如何方便快捷的调节入射角；

(4) 如何固定平面镜 3 的倾斜角；

为解决上述内容，对装置进行如下设计：

(1) 在三脚架放置激光笔位置用水平仪调水平，确保在未调节激光入射角度前平面是完全水平的。

(2) 利用水的表面张力，将平面镜浸湿，则可以让平面镜紧贴在水槽壁上。

(3) 三脚架上的云台可调节角度，确定圆心，在平面圆盘上粘贴刻度，转动云台即可随时调节入射角且读取入射角的读数，此时读出的角度与激光束入射角度 i_1 互余。

(4) 使用细铁丝，以及燕尾夹固定平面镜 3 的倾斜角，用量角器测量出倾斜角 θ （或利用三角函数计算出倾斜角 θ ）。

5.光斑高度影响因素

5.1 折射率和入射角

根据式（7）和式（11）可知， $NaCl$ 溶液折射率 n 与入射角 i_1 影响光斑高度变化，随着 $NaCl$ 浓度增大（或减小），折射率 n 增大（或减小），光斑高度 h 升高（或降低）。例如，当液面高度为 10.00cm，入射角为 45.0° ，平面镜 3 倾斜 0° ， $NaCl$ 浓度从 3%增加到 15%时，折射率从 1.334 到 1.372，增加 0.038，通过 *excel* 电子表格计算可知，光斑高度从 118.70cm 升高到 119.18cm，升高了 0.48cm；入射角 i_1 增大（或减小），光斑高度降低（或升高），例如，液面高度为 10.00cm，平面镜 3 倾斜 0° ， $NaCl$ 浓度为 12%，入射角从 43.0° 增加到 47.0° 时，通过 *excel* 电子表格计算可知，光斑高度从 127.52cm 降低到 111.23cm，降低了 16.29cm。

5.2 液面高度

根据式（7）、式（11）可知，随着液面高度 d 的增大（或减小），光斑高度 h 降低（或升高），例如，当入射角为 45.0° ， $NaCl$ 浓度为 12%，平面镜

3 倾斜 0° ，液面高度从 10.00cm 增加到 20.00cm 时，通过 *excel* 电子表格计算可知，光斑高度从 119.05cm 降低到 116.84cm，降低了 2.21cm。

5.3 平面镜 3 倾斜角度

由式 (7) 和式 (11) 可知，随着平面镜 3 的倾斜角度的增大（或减小），光斑高度 h 降低（或增高）。例如，当液面高度为 10.00cm，入射角为 45.0° ，*NaCl* 浓度为 12%，平面镜 3 倾斜角从 0° 增加到 9.5° 时，通过 *excel* 电子表格计算可知，光斑高度从 119.05cm 降低到 77.85cm，降低了 41.20cm。

式 (18) 光斑高度的变化是多个影响因素共同作用的结果。倾斜角度改变时，其光斑高度随溶液浓度增大而减小，也可能随溶液浓度增大而增大。如当入射角为 45.0° ，液面高度 $d=20.00\text{cm}$ 时，光斑高度有以下几种情况：①当平面镜 3 倾斜 0° 时，光斑高度随着 *NaCl* 溶液浓度的增大而升高；平面镜 3 倾斜 3.0° 和 4.0° 时，光斑高度随 *NaCl* 溶液浓度的增大而降低；改变液体高度，其光斑高度随液面高度增大而减小，也可能随液面高度增大而增大。平面镜 3 倾斜 3.0° 时光斑高度有以下情况：①当液面高度 $d=20.00\text{cm}$ 时，光斑高度随着 *NaCl* 浓度的增大而降低；液面高度 $d=25.00\text{cm}$ 和 $d=30.00\text{cm}$ 时，光斑高度随着 *NaCl* 浓度的增大而升高。

6.实验步骤

- (1) 用温度计测量实验室的室温并记录；
- (2) 用刻度尺测量水槽中液面高度 d ；
- (3) 配置 *NaCl* 溶液:计算出测量的浓度所需要的 *NaCl* 的质量。打开电子称的电源，将烧杯放置在电子称上，读出烧杯的质量 m 并记录，再向烧杯内倒入 *NaCl* 固体读出示数 M ， $M-m$ 即为 *NaCl* 的质量，将 *NaCl* 固体倒入水槽中搅拌至溶解；
- (4) 以墙壁为接收屏，分别在水槽的底部和水槽壁两端放上平面镜；

- (5) 用激光笔以一定的角度照射到平面镜 1，调节平面镜 2 和平面镜 3 的位置，使接收屏上出现光斑，并记录此时光斑的位置 $h1$ ；
- (6) 改变溶液浓度，记录光斑的位置 $h2$ 、 $h3$ 、 $h4$ 并将测量值记录到表格中；
- (7) 分别改变入射光的角度、平面镜 3 倾斜的角度，溶液的高度 d ，重复步骤 (5) (6)。

7.数据与分析

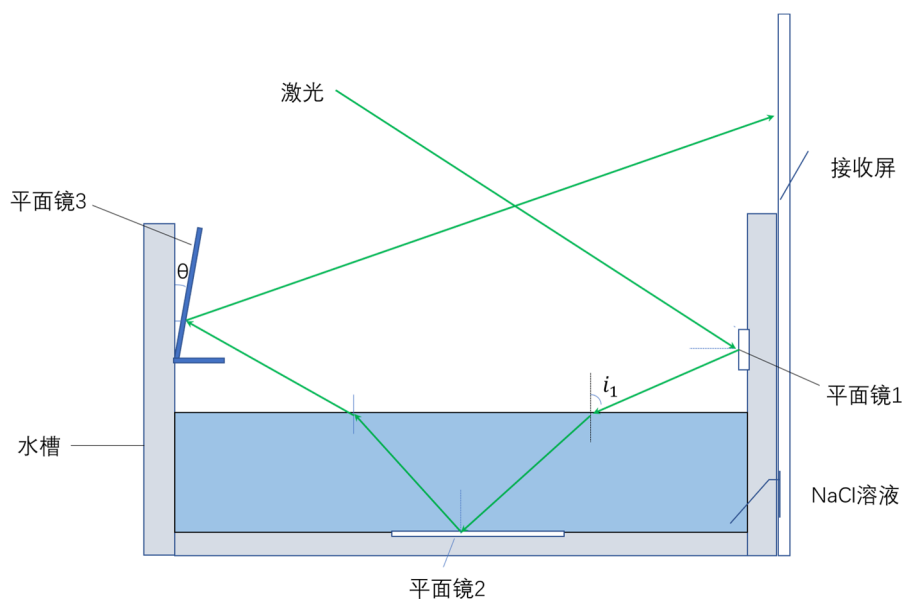
7.1 数据处理思路

通过 *python* 的作图功能将不同情况下光斑打在接收屏的实际高度差与理论高度差绘制在同一幅图中进行数据比较。对实际数据与理论数据有很大误差且不在误差允许条件下的实际值进行修正操作，减小误差。最后通过 *python* 的基本拟合功能拟合出不同情况下高度差与液体浓度公式。做出修正拟合后的图我们会直观发现误差明显减小, 通过计算我们算出误差减小 2.7%。

7.2 数据分析

1. 其他条件不变，改变倾斜角度的数据分析

根据倾斜角的改变，如图 3 所示依次测量经不同溶液浓度折射后光斑的高度差，溶液浓度从 3%到 15%。为了减少误差，每一个浓度测量三次，对三组数据进行取平均值，最后用实验计算出的高度差与理论计算出的高度差进行对比，在误差允许的条件下，比较数据是否合理。



1.1 平面镜 3 倾斜 0° 、入射角为 45.0° 的光斑高度测量和数据分析

表 2 入射角 45.0° 的光斑高度数据记录表

AB=27.90cm $d=10.00\text{cm}$ 接收屏到槽内壁: 1.35cm 入射角 45.0° 平面镜倾斜 0° (单位: cm)							
浓度	第一组	第二组	第三组	均值	理论值	实际高度差	理论高度差
0%	118.70	118.70	118.71	118.70	118.68	0	0
3%	118.70	118.70	1188.70	118.70	118.70	-0.003	0.02
6%	118.80	118.85	118.84	118.83	118.83	0.13	0.15
9%	119.00	119.00	118.97	118.99	118.95	0.29	0.27
12%	119.04	119.00	119.05	119.03	119.05	0.33	0.37
15%	119.20	119.15	119.18	119.18	119.18	0.47	0.50

表 2 经 *python* 处理后得图 14:

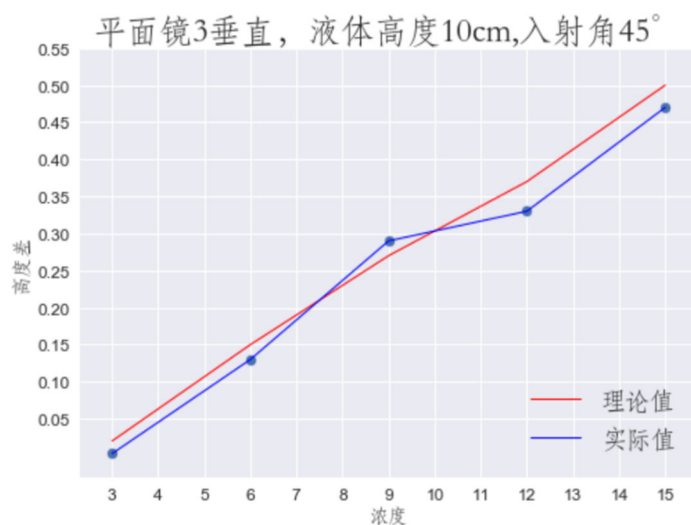


图 14 入射角 45.0° 的光斑高度差曲线图

对实际高度差进行拟合，得到四阶多项式方程：

$$\Delta h = p_1 x^4 + p_2 x^3 + p_3 x^2 + p_4 x + p_5 \quad (21)$$

式中， Δh 为光斑高度差， x 为 $NaCl$ 液体浓度， p_1, p_2, p_3, p_4 为系数（下同）
设修正方程为：

$$n = ax + c \quad (22)$$

n 为修正因子， a, c 为系数（下同）。

根据表 2 数据，经过多次修正：

$$n = -0.002x + 0.002 \quad (23)$$

45.0° 入射角高度差测液体浓度公式为：

$$\Delta h = 0.0001579x^4 - 0.00546x^3 + 0.06369x^2 - 0.2489x + 0.305 \quad (24)$$

修正后得曲线图 15：

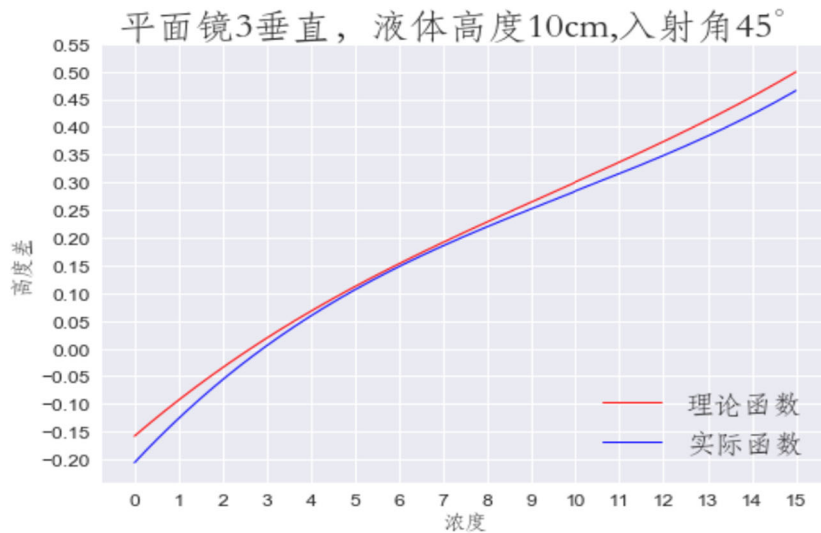


图 15 入射角 45.0° 的高度差拟合曲线图

由图 15 我们可以发现，修正后的公式的拟合曲线与理论公式的拟合曲线变化趋势基本一致，且修正后的公式误差减少了 1%，基本符合理论值。

1.2 平面镜 3 倾斜 8.7° 、入射角为 45.0° 的光斑高度测量和数据分析

表 3 平面镜 3 倾斜 8.7° 、入射角 45.0° 的光斑高度数据记录表

$AB=27.90\text{cm}$ $d=10.00\text{cm}$ 接收屏到槽内壁: 1.35cm 入射角 45.0° 平面镜 3 倾斜 8.7° (单位: cm)						
浓度	第一组	第二组	第三组	均值	理论值	实际高
						理论高

						度差	度差
0%	80.40	80.35	80.35	80.37	80.36	0	0
3%	80.40	80.35	80.38	80.38	80.37	0.01	0.01
6%	80.50	80.50	80.51	80.50	80.47	0.14	0.11
9%	80.60	80.61	80.60	80.60	80.58	0.24	0.22
12%	80.68	80.65	80.65	80.66	80.65	0.29	0.29
15%	80.80	80.75	80.75	80.77	80.76	0.40	0.40

表 3 经过 *python* 处理后得到图 16:

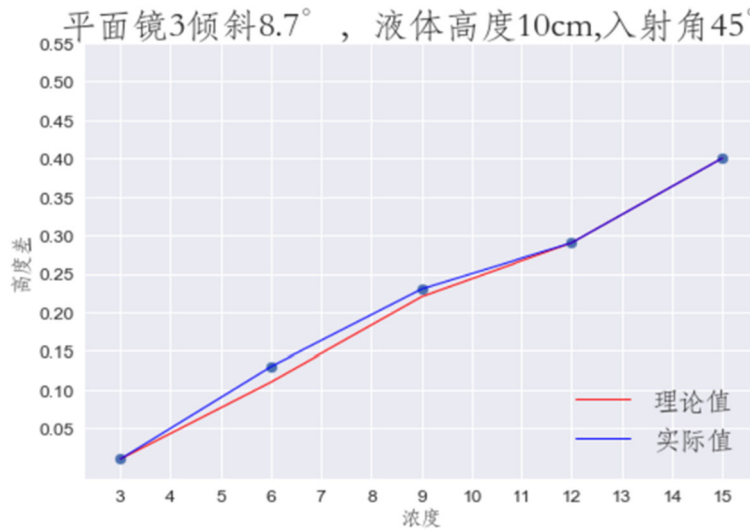


图 16 入射角 45.0° 的光斑高度差曲线图

根据图 16 我们利用 *python* 的拟合功能，精度选取到四次方，得到实际高度差的拟合公式：

$$\Delta h = p_1 x^4 + p_2 x^3 + p_3 x^2 + p_4 x + p_5 \quad (25)$$

为进一步精确实验方程，设修正方程为：

$$n = ax + c \quad (26)$$

根据表 3，经过多次修正：

$$n = -0.0009x + 0.0187 \quad (27)$$

平面镜 3 倾斜 8.7° 、入射角 45.0° 的高度差液体浓度公式为：

$$\Delta h = 5.658 \times 10^{-5} x^4 - 0.001821 x^3 + 0.01894 x^2 - 0.03861 x + 1.092 \times 10^{-14} \quad (28)$$

修正后得曲线图 17:

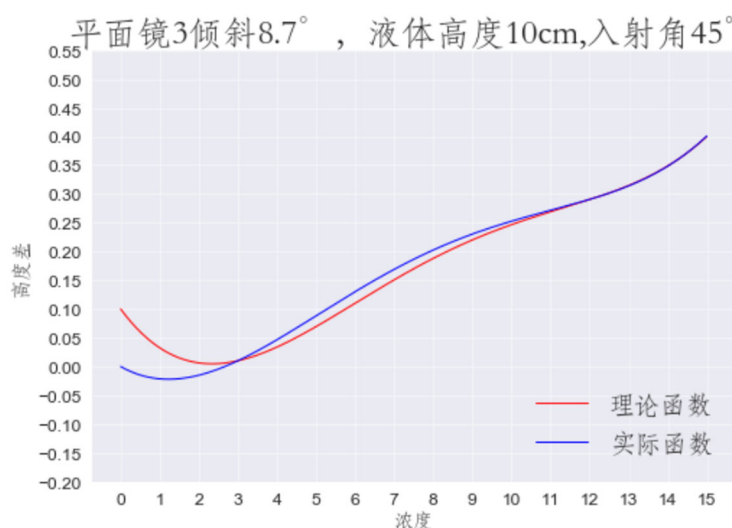


图 17 平面镜 3 倾斜 8.7° 入射角 45.0° 的高度差拟合曲线图

由图 17 我们可以发现，修正后的公式拟合曲线与理论公式的拟合曲线在液体浓度从 11% 之后拟合度非常高，且在 3% 到 11% 之间实际与理论误差小了 0.8%，基本符合理论值。

1.3 平面镜 3 倾斜 9.5° 入射角为 45.0° 的光斑高度测量和数据分析

表 4 平面镜 3 倾斜 9.5° 入射角 45.0° 的光斑高度数据记录表

$AB=27.90\text{cm}$ $d=10.00\text{cm}$ 接收屏到槽内壁: 1.35cm 入射角 45.0° 平面镜 3 倾斜 9.5° (单位: cm)							
浓度	第一组	第二组	第三组	均值	理论值	实际高度差	理论高度差
0%	77.56	77.55	77.57	77.56	77.59	0	0
3%	77.58	77.59	77.59	77.59	77.60	0.03	0.01
6%	77.70	77.70	77.69	77.70	77.71	0.14	0.12
9%	77.78	77.79	77.75	77.77	77.80	0.21	0.21
12%	77.90	77.89	77.85	77.88	77.88	0.32	0.29
15%	78.05	78.00	78.00	78.02	77.99	0.46	0.40

表 4 经过 *python* 处理后得到图 18:

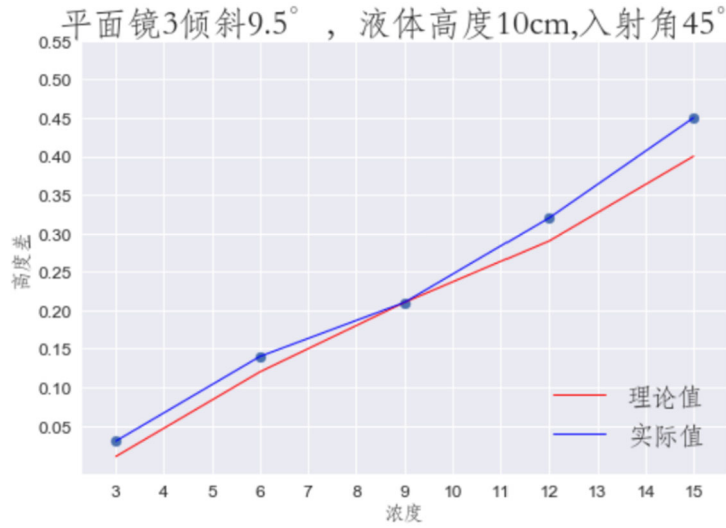


图 18 平面镜 3 倾斜 9.5° 入射角 45.0° 的光斑高度差曲线图

根据图 18 我们利用 *python* 的拟合功能，精度选取到四次方，得到实际高度差的拟合公式：

$$\Delta h = p_1 x^4 + p_2 x^3 + p_3 x^2 + p_4 x + p_5 \quad (29)$$

设修正方程为：

$$n = ax + c \quad (30)$$

根据表 4 数据，经过多次修正：

$$n = 0.003333x - 0.0094 \quad (31)$$

平面镜 3 倾斜 9.5°、入射角 45.0° 的高度差测液体浓度公式为：

$$\Delta h = -3.086 * 10^{-5} x^4 + 0.001235 x^3 - 0.01639 x^2 + 0.1156 x - 0.2 \quad (32)$$

修正后得曲线图 19：

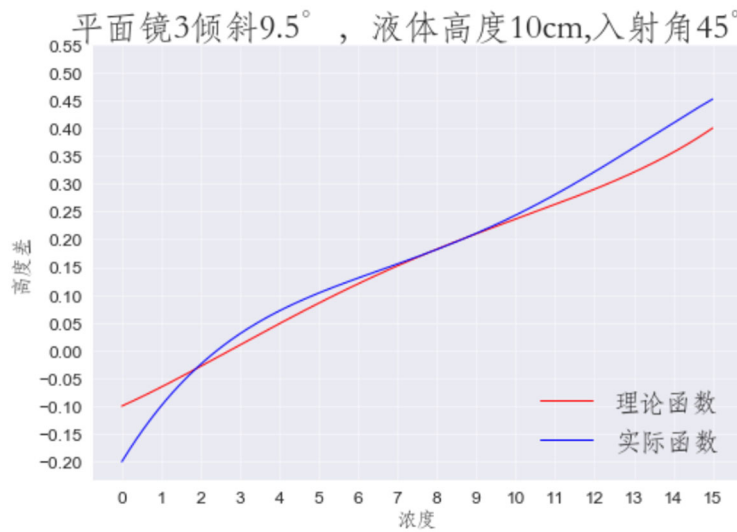


图 19 平面镜 3 倾斜 9.5° 入射角 45.0° 的高度差拟合曲线图

由图 19 我们可以发现，修正后的公式拟合曲线与理论公式的拟合曲线在液体浓度 0%到 5%和 9%到 15%之间实际与理论误差减少了 0.6%，且在 5%到 9%之间实际值与理论值基本重合。实际函数变化趋势也和理论函数变化趋势一致。

综合上述数据分析，我们可以得知在改变平面镜 3 倾斜角的角度，光斑高度随倾斜角度的增大而减小。如选取 $NaCl$ 浓度为 0%时，其他条件不变。当倾斜角为 0° 时，光斑实际高度为 118.70cm；当倾斜角为 8.7° 时，光斑实际高度为 80.37cm，当倾斜角为 9.5° 时，光斑实际高度为 77.56cm。其中，所对应的高度差随 $NaCl$ 浓度的增加而增加。

7.4 实验分析

在数据拟合中，我们会看到其实际值与理论值拟合度非常高，误差较小，但也有部分数据即使修正之后误差还是相对比较大。纵观所有的数据图和数据我们会发现，在误差允许条件下所有实际值的变化趋势与理论值变化趋势是一致的，说明实际值的变化规律符合理论值的变化规律。有的数据图中高度差的拐点变化幅度特别大，理论上将其变化幅度应该相对较小，实际值的拐点变化幅度太大，理论上应该实际函数曲线的变化幅度较小。造成这种幅度较大的原因可能是因为组员在实验是未等待液体液面静止时便开始实验、测量，导致客观因素严重影响到了实验数据。

8.误差分析

8.1 系统误差分析

- (1) 制造装置的过程中，存在一定的公差。
- (2) 装置的水槽壁不是绝对的垂直，导致平面镜粘贴时有角度的变化。
- (3) 刻度盘的粘贴与实际圆心存在一定偏差，导致角度读数的误差。
- (4) 在接收屏上选取光斑中心位置存在误差，导致光斑高度与实际高度有偏差。
- (5) 用测量工具测量相关量时存在的误差，导致光斑高度测量不准确。

8.2 偶然误差分析

(1) 室温

该实验是在室温 27℃ 条件下进行的，测量过程中处于的环境无法达到绝对的 27℃。液体折射率与温度成反比，温度越高，分子越活跃，分子密度越小，折射率越小。

(2) 光斑大小

1. 激光束直径越小实验结果越准确，实验所用到的激光束直径不能达到理想效果。
2. 激光束经过光学系统在接收得到一个激光光斑，其亮度虽然很高，但是边缘有很强的衍射光芒，并且由于光学系统的像差影响，使光斑的形状发生变形，中心位置会与理想光斑中心位置产生偏差。

9.创新点

9.1 实验装置简单易得，实验成本低廉，对环境没有污染。实验装置主要由水槽，激光笔，三角架，平面镜组成，实验对于水槽的大小没有特定的要求，可以根据具体情况调节入射距离，平面镜的位置等来调整，使打在接受屏上的光斑达到合适的效果。结合仿真结果，进行实验结果讨论，增加了实验的多样性。



¥5800

图 22 迈克尔逊干涉仪价格示意图



¥1520

图 23 阿贝折射仪价格示意图

相较于大多数测量液体折射率实验装备，如阿贝折射仪实验装置，迈克耳逊干涉仪等，价格较贵的仪器，本实验所用的仪器价格便宜。

9.2 实验设备简单，测量方便，可行性强。相比较传统的掠入射法，牛顿环干涉法等测量液体的折射率，我们的实验可以直接用肉眼观察实验现象，并配合尺子进行测量，不需要借助精密工具的配合，增加了实验的可行性。

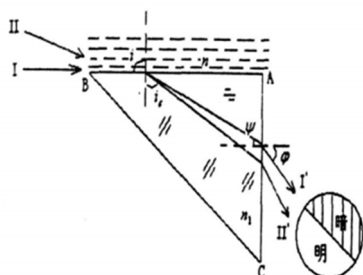


图 24 掠入射法实验现象示意图

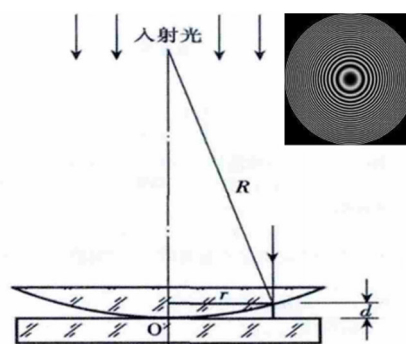


图 25 牛顿环干涉法实验现象示意图

9.3、利用 *python* 的最小二乘法拟合函数，使实验结果更为准确。理论上，次方数越高，则拟合出的函数精度越高。所以我们人为地让精度从一次方往上选取，直至选取的精度能达到拟合效果最佳。当精度选取到三次方时，仍有少量数据并不在曲线上。然而当精度选取到四次方时，曲线便可以经过所有数据。如果精度选取到五次方则函数结果过于繁琐和多余，而且四次方的拟合效果已经达到最佳，所以我们只需要选取到四次方即可。得到的实际函数与理论值的误差平均为 3%，所以我们选取精度为四次方进行拟合。……

10.性能指标

1.精确度

刻度：刻度范围为 0° 到 180° ，最小刻度为 1° ，可以估读 0.1°

距离：刻度尺最小刻度为 1mm ，可以估读 0.1mm

2.响应时间

由于为光学实验，现象几乎无延迟。

3.实验操作

操作简单，易上手，且实验现象较为容易调出。对实验环境要求不高，不易于被外界干扰。

12.结论与展望

本实验设计成功地探究出高度差与液体浓度的关系，并采用了两种情况的方案得出实验结论，两种情况巧妙展现在不同情形下的实验结果，同时利用控制变量法的思想进行研究，可以拓展学生思维能力，动手能力，创造能力，实践能力。本实验设计还可以稍做改装，即把单色光光源变为白光，就可以观察到虹与霓的现象。这一实验装置巧妙利用了光学知识，是实验教学的好设备。同时在实验中，这一套实验仪器容易准备、实验操作简单，如在中学的课堂教学中，老师可以用来探究光的折射、反射定律，探究折射率大小对折射角的影响，再现虹与霓现象等。当然本实验还是存在许多的不足，还需要继续改进，使之更适合实验教学。

13.参考文献

- [1]刘正兵, 聂优, 何京鸿. 利用折射表征盐水浓度[J]. 楚雄师范学院学报, 2013, 28(3):5.
- [2]张夏春, 翁存程, 冯尚源. 一种测量光透明液体折射率的方法[J]. 实验室科学, 2019, 22(03):29-31.
- [3]石静瑜, 张海涛, 刘志存, 卫芬芬, 张宗权. 液体折射率测量实验教学实践与探索[J]. 中国现代教育装备, 2021(17):62-64+71.
- [4]许释文, 徐怡冰, 邱妙婵, 李德安. 自制仪器测量不同质量分数的盐水折射率

14.附录

附录 1：查看资料可知，在室温 27℃条件下，不同浓度的 *NaCl* 溶液的折射率见下表：

表 24 不同 *NaCl* 溶液浓度及其对应折射率

<i>NaCl</i> 溶液浓度/%	折射率
0	1. 333
3	1. 334
6	1. 344
9	1. 354
12	1. 362
15	1. 373

附录 2：主要实验装置规格

水槽：外：75.00cm×20.00cm×50.00cm、内：73.50cm×18.50cm×49.25cm、亚克力板：10.00cm×10.00cm，距离水槽内底面高 30.20cm

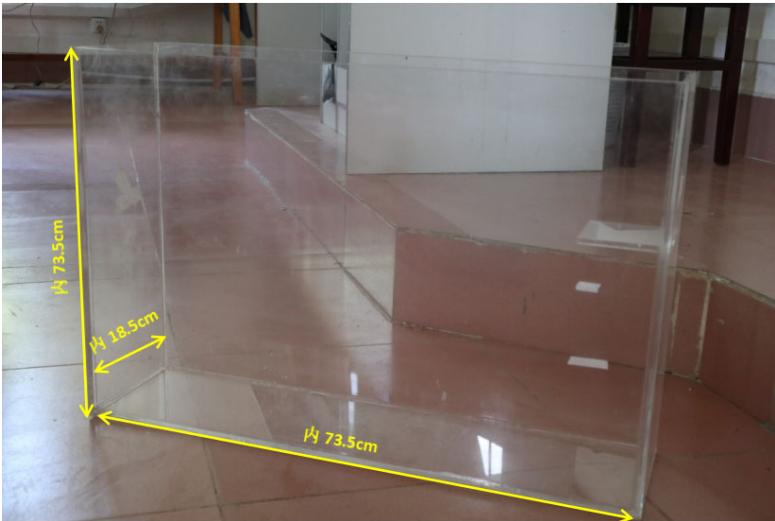


图 24

平面镜：厚度 0.10cm

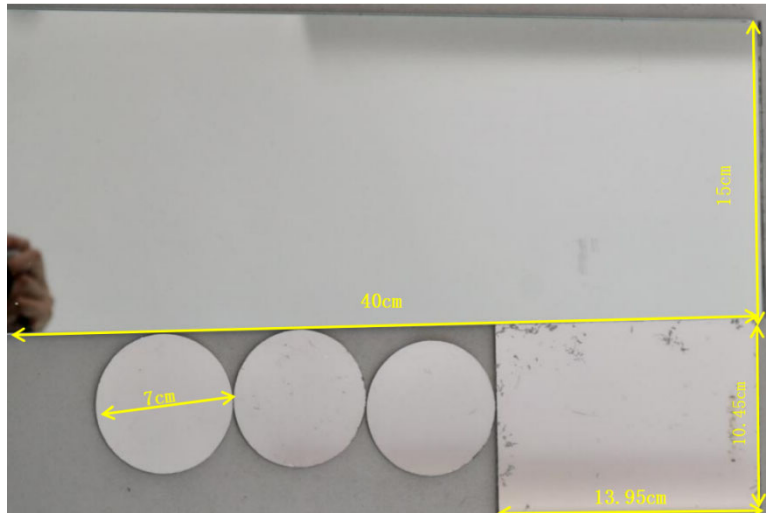


图 25

激光笔出射光源直径:



图 26

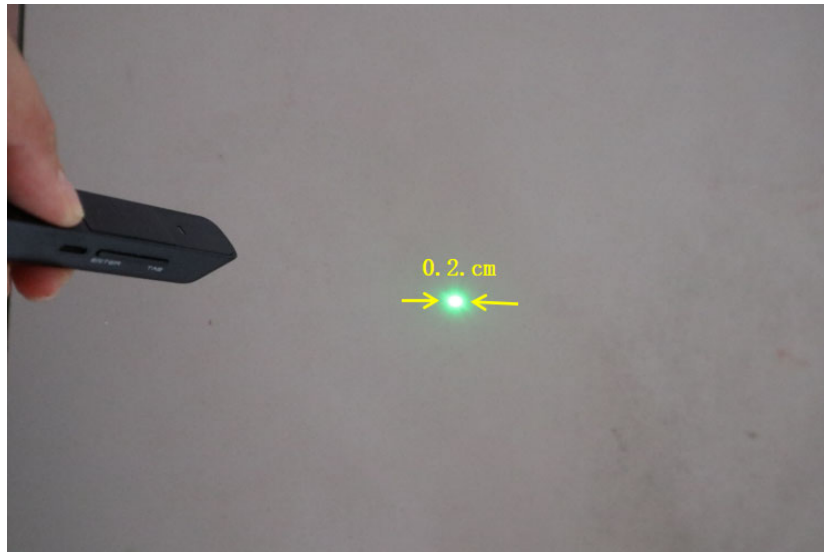


图 27

电子秤:



图 28

成本：552.9 元（借用除外）