



北京大学

物理化学实验报告

题目： 稀溶液法测定极性分子的偶极矩

姓 名：	王宇哲
学 号：	1800011828
组 别：	11 组 3 号
实验日期：	2020.12.30
室 温：	289.75 K
大气压强：	103.43 kPa

摘 要 本实验通过稀溶液法测定正丁醇的偶极矩，通过测定不同浓度正丁醇-环己烷溶液密度、介电常数和正丁醇折射率，计算正丁醇摩尔极化度 $\bar{P}_2^\infty = (88.6 \pm 0.7) \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，最终计算正丁醇偶极矩 $\mu = (1.78 \pm 0.01) \text{ D}$ ，与文献值的相对偏差 $\xi = 11\%$ ，并讨论了温度变化对实验结果的影响。

关键词 偶极矩；电子极化；介电常数；正丁醇-环己烷体系

1 引言

略

2 实验部分

2.1 仪器和试剂

正丁醇 (AR), 环己烷 (AR), 丙酮 (AR), 乙醇 (AR), 去离子水。

PCM-1A 型精密电容测量仪, 电容池, 玻璃注射器, 洗耳球, 50 mL 磨口锥形瓶, 滴管, 吸量管, 比重管, DE45 型数字密度计, 烧杯 (200 mL 两个), 电子天平, 阿贝折射仪, 循环水真空泵。

2.2 实验内容¹

2.2.1 溶液的配制

取 2 个磨口锥形瓶用于盛正丁醇和环己烷, 另外 5 个用于配制摩尔分数分别为 0.05、0.08、0.10、0.12、0.15 的正丁醇/环己烷溶液各 15 mL。根据预定摩尔分数算出每份溶液所需的正丁醇和环己烷的体积, 按计算结果用移液管从锥形瓶中移取环己烷和正丁醇, 用电子天平准确称出空锥形瓶的质量 m_0 、加入正丁醇后质量 m_1 、加入环己烷后质量 m_2 , 摇晃均匀, 算出各自的摩尔分数, 塞好盖子防止挥发。

2.2.2 介电常数的测定

打开精密电容测定仪电源, 预热 ~ 20 min。拔下电容池与测定仪的连接插头使电路断开, 按下“校零”按钮使仪表读数为 000.00。保证电容池内干净干燥, 将插头重新插入仪器面板插座内, 记录测定仪示数, 即为该电容池以空气为介质的电容值 C'_E (E 即 Empty)。

取下电容池上盖, 放在专用支架上, 用干燥的滴管吸取环己烷 ~ 2 mL 加入电容池内至满池。轻放电容池上盖盖好电容池, 读取电容值 $C'_S = C'_{Cy}$ (S 即 Sample)。

用胶头滴管吸出电容池腔中的液体, 再用吹风机冷风吹干电容池腔和上盖, 使电容池内干净干燥, 盖上池盖, 记录 C'_E , 重新装样再测电容值 $C'_S = C'_{Cy}$, 直到两次测定数据差不大于 0.01 pF。

用同样的方法测定各溶液的电容 C'_S , 同样要求两次测定数据差不大于 0.01 pF。

2.2.3 密度的测定

用注射器吸取 ~ 7 mL 环己烷, 向 DE45 型数字密度计样品池中注入 ~ 5 mL 环己烷, 排出气泡, 按下“MEASURE”键测量环己烷密度; 记录读数后再向样品池中注入 ~ 1 mL

环己烷，重复测量过程，共进行 3 次密度测量。测量完毕后排空样品池，长按“PUMP”键吹气除去样品池中剩余溶液。用同样的方法测定其余 5 种溶液及正丁醇的密度。

练习使用比重管，向比重管中注入去离子水，定容至刻度线，小心擦干比重管外壁，用电子天平称量比重管质量。倒干比重管中去离子水，重复上述测量过程，直至两次测定比重管质量差 $< 2 \text{ mg}$ 。用同样的方法测定装入正丁醇的比重管质量，只测一次。用乙醇洗涤比重管，在循环水泵上抽干，用电子天平称量空比重管的质量。根据实验数据计算正丁醇的密度。

2.2.4 折射率的测定

利用阿贝折射仪测定正丁醇的折射率。

3 数据与结果

3.1 实验数据记录及处理

3.1.1 溶液的配制及 χ_{BuOH} 的计算

配制 5 个不同浓度的正丁醇-环己烷溶液，分别用电子天平准确称出空锥形瓶的质量 m_0 、加入正丁醇后质量 m_1 、加入环己烷后质量 m_2 ，计算加入正丁醇的质量

$$m_{\text{BuOH}} = m_1 - m_0$$

加入环己烷的质量

$$m_{\text{Cy}} = m_2 - m_1$$

则正丁醇的摩尔分数 χ_{BuOH} 可由下式求算：

$$\chi_{\text{BuOH}} = \frac{m_{\text{BuOH}}/M_{\text{BuOH}}}{m_{\text{Cy}}/M_{\text{Cy}} + m_{\text{BuOH}}/M_{\text{BuOH}}}$$

以溶液 1 为例，计算

$$m_{\text{BuOH}} = m_1 - m_0 = 49.142 \text{ g} - 48.639 \text{ g} = 0.503 \text{ g}$$

$$m_{\text{Cy}} = m_2 - m_1 = 60.269 \text{ g} - 49.142 \text{ g} = 11.127 \text{ g}$$

故

$$\chi_{\text{BuOH}} = \frac{m_{\text{BuOH}}/M_{\text{BuOH}}}{m_{\text{Cy}}/M_{\text{Cy}} + m_{\text{BuOH}}/M_{\text{BuOH}}} = \frac{0.503/74.121}{0.503/74.121 + 11.127/84.16} = 0.0488$$

配制 5 个不同浓度的正丁醇溶液的相关实验数据及 χ_{BuOH} 的计算值如表 1 所示。

表 1 正丁醇溶液配制相关实验数据及 χ_{BuOH} 计算值Table 1 Correlative experimental data of n – BuOH solution preparation and χ_{BuOH} calculated value

编号	$V_{\text{BuOH}}/\text{mL}$	V_{Cy}/mL	m_0/g	m_1/g	m_2/g	m_{BuOH}/g	m_{Cy}/g	χ_{BuOH}
1	0.64	1.36	48.639	49.142	60.269	0.503	11.127	0.0488
2	1.03	0.97	46.923	47.711	58.558	0.788	10.847	0.0762
3	1.29	0.71	37.675	38.679	49.326	1.004	10.647	0.0967
4	1.55	0.45	64.419	65.614	76.081	1.195	10.467	0.1148
5	1.95	0.05	43.249	44.793	54.860	1.544	10.067	0.1483

3.1.2 介电常数的测定

用精密电容测量仪测量环己烷及 5 个不同浓度的正丁醇溶液对应的电容值，直至相邻两次测定数据差不大于 0.01 pF，分别计算电容池以空气为介质的电容值的平均值 $\overline{C'_E}$ 及以待测溶液为介质的电容值的平均值 $\overline{C'_S}$ ，相关数据如表 2 所示。

表 2 各溶液电容值测定相关实验数据

Table 2 Correlative experimental data of determination of capacitance of each solution

编号	C'_{E1}/pF	C'_{S1}/pF	C'_{E2}/pF	C'_{S2}/pF	C'_{E3}/pF	C'_{S3}/pF	$\overline{C'_E}/\text{pF}$	$\overline{C'_S}/\text{pF}$
Cy	4.38	7.02	4.29	6.91	4.30	6.92	4.30	6.92
1	4.30	7.07	4.30	7.07			4.30	7.07
2	4.30	7.21	4.30	7.21			4.30	7.21
3	4.30	7.33	4.29	7.33			4.30	7.33
4	4.29	7.49	4.29	7.45	4.29	7.45	4.29	7.45
5	4.29	7.77	4.30	7.78			4.30	7.78

3.1.3 密度的测定及计算

用 DE45 型数字密度计准确测定各溶液的密度，计算溶液密度平行测定值的平均值 $\bar{\rho}$ ，结果如表 3 所示。

表 3 各溶液密度测定相关实验数据

Table 3 Correlative experimental data of determination of density of each solution

编号	$\rho_1/\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$	$\rho_2/\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$	$\rho_3/\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$	$\bar{\rho}/\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$
Cy	0.77859	0.77859	0.77859	0.77859
1	0.77889	0.77890	0.77890	0.77890
2	0.77930	0.77930	0.77930	0.77930
3	0.77964	0.77960	0.77962	0.77962
4	0.77994	0.77994	0.77994	0.77994
5	0.78057	0.78055	0.78056	0.78056
BuOH	0.80964	0.80964	0.80964	0.80964

练习使用比重管测定液体密度，相关数据如表 4 所示，其中 M_1 、 M_2 为加入去离子水后比重管质量的两次测量结果， M_{BuOH} 为加入 BuOH 后比重管质量的测量结果、 M_0 为空比

重管质量的测量结果。

表 4 使用比重管测定液体密度相关实验数据

Table 4 Correlative data of determination of liquid density using pycnometer

M_1/g	M_2/g	M_{BuOH}/g	M_0/g
30.105	30.107	29.238	25.400

故两次测量时水的质量

$$m_1 = M_1 - M_0 = 4.705 \text{ g}$$

$$m_2 = M_2 - M_0 = 4.707 \text{ g}$$

水的质量的平均值

$$m = \frac{m_1 + m_2}{2} = 4.706 \text{ g}$$

测量正丁醇密度时，正丁醇的质量

$$m_{\text{BuOH}} = M_{\text{BuOH}} - M_0 = 3.838 \text{ g}$$

查手册知室温 $T = 18.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 下水的密度 $\rho = 0.99845 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ，故计算正丁醇的密度

$$\rho_{\text{BuOH}} = \frac{m_{\text{BuOH}}}{m} \rho = \frac{3.838 \times 0.99845}{4.706} = 0.81429 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$$

3.1.4 折射率的测定

使用阿贝折射仪测定正丁醇的折射率

$$n_{\text{BuOH}} = 1.4011$$

并记录阿贝折射仪上温度计示数为 $12.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3.2 数据处理结果与分析

3.2.1 介电常数的计算

环己烷的介电常数 ε_{Cy} 与温度 T 的关系为

$$\varepsilon_{\text{Cy}} = 2.023 - 0.0016 \left(\frac{T}{\text{K}} - 293 \right)$$

室温 $T = 289.15 \text{ K}$ ，故计算

$$\varepsilon_{\text{Cy}} = 2.023 - 0.0016 \times (289.15 - 293) = 2.029$$

电容器的电容 C_0 可由下式求算：

$$C_0 = \frac{C'_{\text{Cy}} - C'_E}{\varepsilon_{\text{Cy}} - 1}$$

分布电容 C_D (D 即 Distribution) 可由下式求算：

$$C_D = C'_E - C_0$$

则样品的介电常数 ε_S 可由下式求算：

$$\varepsilon_S = \frac{C_S}{C_0}$$

其中

$$C_S = C'_S - C_D$$

根据表 2 数据，以 C'_E 、 C'_S 的平均值作为真实值，计算各溶液的介电常数 ε_S 。首先根据环己烷的相关数据，计算

$$C_0 = \frac{C'_{\text{Cy}} - C'_E}{\varepsilon_{\text{Cy}} - 1} = \frac{6.92 - 4.30}{2.209 - 1} \text{ pF} = 2.17 \text{ pF}$$

$$C_D = C'_E - C_0 = 4.30 \text{ pF} - 2.17 \text{ pF} = 2.13 \text{ pF}$$

可以近似认为分布电容 C_D 为常数，在实验过程中保持不变，以溶液 1 为例，计算

$$C_0 = C'_E - C_D = 4.30 \text{ pF} - 2.13 \text{ pF} = 2.17 \text{ pF}$$

$$C_S = C'_S - C_D = 7.07 \text{ pF} - 2.13 \text{ pF} = 4.94 \text{ pF}$$

$$\varepsilon_S = \frac{C_S}{C_0} = 2.278$$

类似地，计算各溶液的介电常数 ε_S ，结果如表 5 所示。

3.2.2 正丁醇折射度 R 的计算

正丁醇的折射度 R 可由下式求算：

$$R = \frac{n_{\text{BuOH}}^2 - 1}{n_{\text{BuOH}}^2 + 2} \times \frac{M_{\text{BuOH}}}{\rho_{\text{BuOH}}}$$

表 5 各溶液介电常数 ε_S 计算数据Table 5 Calculation data of dielectric constant ε_S of each solution

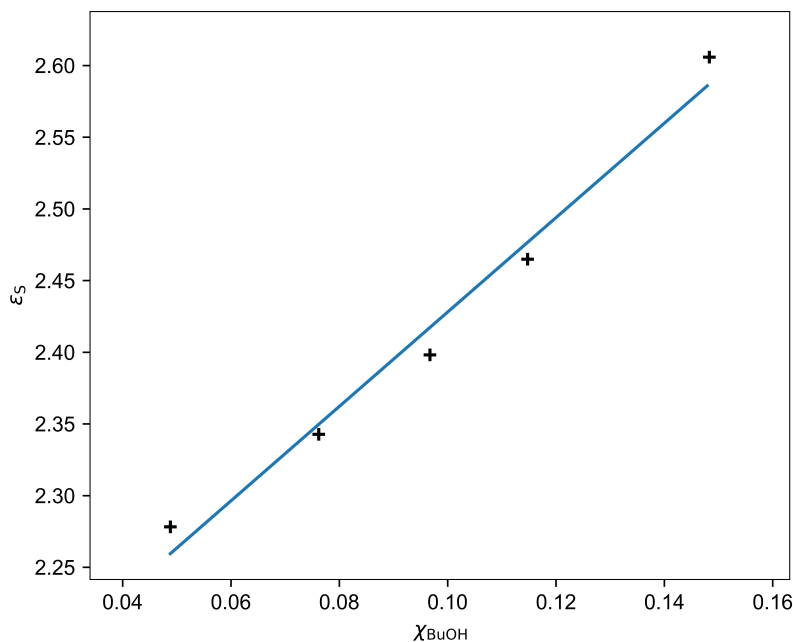
编号	χ_{BuOH}	C_0/pF	C_S/pF	ε_S
1	0.0488	2.17	4.94	2.278
2	0.0762	2.17	5.08	2.343
3	0.0967	2.17	5.20	2.398
4	0.1148	2.16	5.32	2.465
5	0.1483	2.17	5.65	2.606

由 3.1.4 知正丁醇的折射率 $n_{\text{BuOH}} = 1.4011$, 由 3.1.3 知正丁醇的密度 $\rho_{\text{BuOH}} = 0.80964 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$, $M_{\text{BuOH}} = 74.12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, 代入公式计算得

$$R = \frac{n_{\text{BuOH}}^2 - 1}{n_{\text{BuOH}}^2 + 2} \times \frac{M_{\text{BuOH}}}{\rho_{\text{BuOH}}} = \frac{1.4011^2 - 1}{1.4011^2 + 2} \times \frac{74.12 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{0.80964 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}} = 22.247 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

3.2.3 $\varepsilon_S - \chi_{\text{BuOH}}$ 图

根据表 5 数据, 作出 $\varepsilon_S - \chi_{\text{BuOH}}$ 关系的散点图, 并用 python SciPy linalg 进行线性拟合, 作出拟合直线, 如图 1 所示。

图 1 $\varepsilon_S - \chi_{\text{BuOH}}$ 关系图及线性拟合Fig. 1 $\varepsilon_S - \chi_{\text{BuOH}}$ diagram and linear fit

拟合直线的方程为

$$\varepsilon_S = (3.3 \pm 0.3)\chi_{\text{BuOH}} + (2.10 \pm 0.03), \quad R = 0.9901$$

故直线截距

$$\varepsilon_1 = 2.10 \pm 0.03$$

直线斜率

$$a = 3.3 \pm 0.3$$

3.2.4 $\bar{\rho} - \chi_{\text{BuOH}}$ 图

根据表 1 及表 3 数据, 作出 $\bar{\rho} - \chi_{\text{BuOH}}$ 关系的散点图, 并用 python SciPy lingress 进行线性拟合, 作出拟合直线, 如图 2 所示。

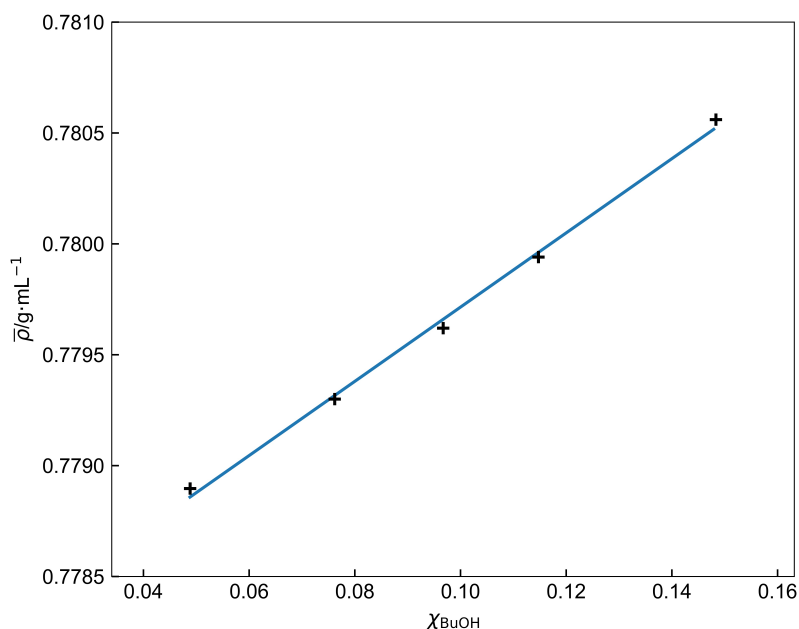


图 2 $\bar{\rho} - \chi_{\text{BuOH}}$ 关系图及线性拟合
Fig. 2 $\bar{\rho} - \chi_{\text{BuOH}}$ diagram and linear fit

拟合直线的方程为

$$\bar{\rho} / \text{g} \cdot \text{mL}^{-1} = (0.0167 \pm 0.0005) \chi_{\text{BuOH}} + (0.77804 \pm 0.00005), R = 0.9984$$

故直线截距

$$\rho_1 = (0.77804 \pm 0.00005) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$$

直线斜率

$$b = (0.0167 \pm 0.0005) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$$

3.2.5 \overline{P}_2^∞ 的计算

正丁醇的摩尔极化度 \overline{P}_2^∞ 可由下式近似求算：

$$\overline{P}_2^\infty = A(M_2 - bB) + aC$$

其中，

$$A = \frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_1 + 2} \times \frac{1}{\rho_1}$$

$$B = \frac{M_1}{\rho_1}$$

$$C = \frac{3M_1}{(\varepsilon_1 + 2)^2 \rho_1}$$

由 3.2.3 和 3.2.4 知 $\varepsilon_1 = 2.10 \pm 0.03$, $a = 3.3 \pm 0.3$, $\rho_1 = (0.77804 \pm 0.00005) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$, $b = (0.0167 \pm 0.0005) \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$, 代入计算得

$$A = \frac{2.10 - 1}{2.10 + 2} \times \frac{1}{0.77804 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}} = 0.345 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$B = \frac{84.16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{0.77804 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}} = 108.169 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$C = \frac{3 \times 84.16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}}{(2.10 + 2)^2 \times 0.77804 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}} = 19.3 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

故

$$\overline{P}_2^\infty = (0.345 \times (74.12 - 0.0167 \times 108.2) + 3.3 \times 19.3) \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1} = 88.6 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

不确定度

$$\sigma_A = \sqrt{\left(\frac{3}{(\varepsilon_1 + 2)^2} \times \frac{1}{\rho_1}\right)^2 \times \sigma_{\varepsilon_1}^2 + \left(\frac{\varepsilon_1 - 1}{\varepsilon_1 + 2} \times \frac{1}{\rho_1}\right)^2 \sigma_{\rho_1}^2} = 0.007 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\sigma_B = B \frac{\sigma_{\rho_1}}{\rho_1} = \frac{108.2 \times 0.00005}{0.77804} \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 0.007 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\sigma_C = C \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\varepsilon_1}}{\varepsilon_1 + 2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_1}}{\rho_1}\right)^2} = 19.3 \times \sqrt{\left(\frac{0.03}{2.10 + 2}\right)^2 + \left(\frac{0.00005}{0.77804}\right)^2} \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1} = 0.1 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

故

$$A = (0.345 \pm 0.007) \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$B = (108.169 \pm 0.007) \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$C = (19.3 \pm 0.1) \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

故 \overline{P}_2^∞ 的不确定度

$$\sigma_{\overline{P}_2^\infty} = \sqrt{(M_2 - bB)^2 \sigma_A^2 + A^2 B^2 \sigma_b^2 + A^2 b^2 \sigma_B^2 + C^2 \sigma_a^2 + a^2 \sigma_C^2} = 0.7 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

故

$$\overline{P}_2^\infty = (88.6 \pm 0.7) \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

3.2.6 正丁醇偶极矩 μ 的计算

正丁醇的偶极矩 μ 可由下式求算：

$$\mu = 12.81 \sqrt{\left(\frac{\overline{P}_2^\infty}{\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} - \frac{R}{\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} \right) \left(\frac{T}{\text{K}} \right)} \text{ D}$$

由 3.2.5 知 $\overline{P}_2^\infty = (88.6 \pm 0.7) \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，由 3.2.2 知 $R = 22.247 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$ ， $T = 289.75 \text{ K}$ ，代入公式计算得

$$\mu = 12.81 \times \sqrt{(88.6 - 22.247) \times 289.75} \text{ D} = 1.78 \text{ D}$$

考虑室温的波动，取 $\sigma_T = 1 \text{ K}$ ，计算 μ 的不确定度

$$\sigma_\mu = \frac{12.81^2}{2} \sqrt{\left(\frac{T}{\mu} \right)^2 \sigma_{\overline{P}_2^\infty}^2 + \left(\frac{\overline{P}_2^\infty - R}{\mu} \right)^2 \sigma_T^2} = 0.01 \text{ D}$$

故

$$\mu = (1.78 \pm 0.01) \text{ D}$$

查阅 *CRC Handbook of Chemistry and Physics*²，知正丁醇偶极矩的文献值 $\mu = (1.66 \pm 0.03) \text{ D}$ ，故相对误差

$$\xi = \frac{1.78 - 1.66}{1.66} \times 100\% = 11\%$$

实验测量值与参考值偏差较大，其原因将在第 4 部分进行讨论。

4 讨论与结论

4.1 实验讨论

4.1.1 温度 T 对实验误差的影响

本实验在数据处理过程中,以实验室内的大气压-温度仪示数 $t = 18.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 作为实际的温度 T ,代入公式中进行计算。但在实验过程中,使用阿贝折射仪测定正丁醇的折射率时,由于阿贝折射仪放置于实验室背阴角落处,阿贝折射仪上温度示数仅为 $t = 12.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;在使用吹风机冷风吹干电容池时,明显可感觉到电吹风出风温度不同于室温,估测出风温度 $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

温度变化对折光率和介电常数测定造成了一定的影响,查阅手册知正丁醇在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下折射率 $n_{\text{BuOH}} = 1.3993$,该温度与室温接近,依此计算实验测量的折射率与实际的折射率的相对偏差

$$\xi_n = \frac{1.4011 - 1.3993}{1.3993} \times 100\% = 0.13\%$$

按照参考值计算正丁醇折射度

$$R = \frac{1.3993^2 - 1}{1.3993^2 + 2} \times \frac{74.12}{0.80964} \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1} = 22.159 \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$$

实验测量的折射度的相对偏差

$$\xi_R = \frac{22.247 - 22.159}{22.159} \times 100\% = 0.40\%$$

而如前文所述,吹风机出风温度高于室温,电容池内温度高于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,故温度对折射度 R 带来的相对偏差甚至大于上述结果。

环己烷的介电常数根据公式

$$\varepsilon_{\text{Cy}} = 2.023 - 0.0016 \left(\frac{T}{\text{K}} - 293 \right)$$

得到,取实际温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,计算

$$\varepsilon_{\text{Cy}} = 2.015$$

故室温下的计算值相对上述实际值的相对偏差

$$\xi_{\varepsilon} = \frac{2.029 - 2.015}{2.015} \times 100\% = 0.7\%$$

可见温度的不同对实验过程中大量物理量的测量引入了误差,最终导致 μ 的实验值偏离参考值。

4.1.2 实验改进

根据以上讨论，对实验的改进建议如下：

控制实验室恒温，或在实验的主要仪器加装恒温水浴装置，避免不同测量仪器处温度不同，从而减少温度变化对各物理量测量的影响。

4.2 实验结论

本实验通过稀溶液法测定正丁醇的偶极矩，通过测定不同浓度正丁醇-环己烷溶液密度、介电常数和正丁醇折射率，计算正丁醇摩尔极化度 $\bar{P}_2^\infty = (88.6 \pm 0.7) \text{ mL} \cdot \text{mol}^{-1}$ ，最终计算正丁醇偶极矩 $\mu = (1.78 \pm 0.01) \text{ D}$ ，与文献值的相对偏差 $\xi = 11\%$ ，并讨论了温度变化对实验结果的影响。

经计算，温度变化为正丁醇折射率 n_{BuOH} 、正丁醇折射度 R 、介电常数 ε 等物理量的测量都引入了一定的误差，从而最终导致实验测得正丁醇偶极矩偏离文献值。控制实验室恒温能够有效减小实验误差。

参考文献

- [1] 北京大学化学与分子工程学院物理化学实验教学组, 物理化学实验; 2020.
- [2] Haynes, W. M. *CRC handbook of chemistry and physics*; CRC press, 2014.