



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

## 实验九 偶极矩的测定

### 稀溶液法测定正丁醇的偶极矩

王子宸 210001873

周四 19 组 8 号

化学与分子工程学院

实验日期：2023 年 10 月 19 日

温度：23.2°C

大气压强：101.20 kPa

---

**关键词：**国家精品课 物理化学实验 磁化率 Gouy 磁天平 磁矩

**摘要：** 摘要：本次实验以莫尔盐作为标准样，通过古埃磁天平法测得 23.2°C 下五水硫酸铜摩尔比的磁化率为  $(1.90 \pm 0.05) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，分子磁矩为  $(1.89 \pm 0.03)\mu_B$ ，有  $(1.14 \pm 0.02) \approx 1$  个单电子。三水合黄血盐的摩尔磁化率为  $-(4 \pm 2) \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，无单电子。均与理论预测相符。未知样品的比磁化率为  $(2.00 \pm 0.03) \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

# 1 引言

## 1.1 实验目的与原理

年 月 日 第 15 页

### 实验十 磁化率的测定

**[实验目的]**

- 掌握 Gouy 磁天平原理/使用方法
- 使用 Gouy 天平测磁化率, 计算 mole 磁化率, 估算不成对电子数

**[实验原理]**

· 磁场中  $B = B_0 + B' = \mu_0 H + \mu_0 K H$   
(内部磁感 外加磁感 附加磁感)

- $\mu_0$  真空磁导  $4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$
- $K$ : 体积磁化率

· 磁化率  $\chi = K/\rho$   $\chi_m = \chi M = \frac{KM}{\rho}$  
 $\left\{ \begin{array}{l} K > 0 \text{ 顺磁} \\ K < 0 \text{ 反磁} \\ K \text{ 与 } H \text{ 有关 铁磁} \end{array} \right.$ 
  
(单位质量磁化率) mole

·  $\chi_m = \chi_{\text{顺}} + \chi_{\text{反}} \quad (\chi_{\text{顺}} \approx (10^2 \sim 10^3) \chi_{\text{反}})$

·  $\chi_m \approx \chi_{\text{顺}} = \frac{N_A M^2 \mu_0}{3kT}$

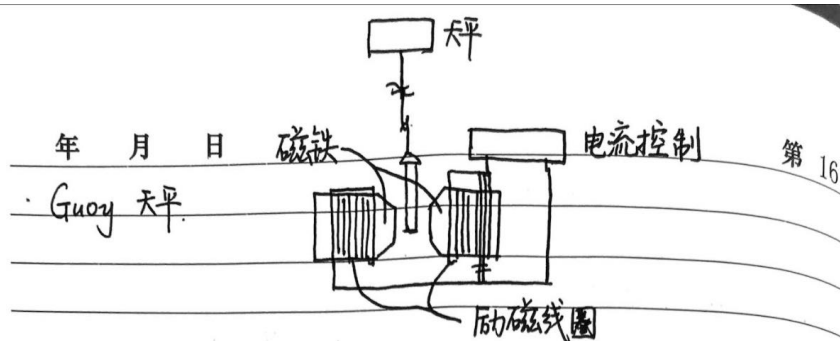
·  $\mu = \sqrt{\frac{3kT}{N_A \mu_0 \chi_{\text{顺}}}} = 7.3972 \times 10^{-21} \sqrt{\frac{\chi_{\text{顺}}}{\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} \left(\frac{\text{J}}{\text{K}}\right)} (\text{J} \cdot \text{T}^{-1})$   
 $= 797.7 \times \sqrt{\frac{\chi_{\text{顺}}}{\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} \left(\frac{\text{J}}{\text{K}}\right)} \mu_B$

·  $1 \mu_B = 9.274078 \text{ J} \times 10^{-24} \text{ J} \cdot \text{T}^{-1}$

·  $\mu \approx \sqrt{(n+2) \cdot n} \mu_B$

·  $n = \sqrt{797.7^2 \frac{\chi_{\text{顺}}}{\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} \left(\frac{\text{J}}{\text{K}}\right) + 1} - 1$

图 1: 预习报告: 实验的目的与原理



$$dF = (K - K_0) H \frac{dH}{dz} dV = (K - K_0) H A dH$$

$$dA = A dz$$

▪  $K$  待测物  $K_0$  空气

$$F = \int_{H_1}^{H_0} (K - K_0) A H dH = -\frac{1}{2} (K - K_0) A (H_1^2 - H_0^2)$$

▪  $H_1$  极缝中心  $H_0$  样品顶端  $K_0 \sim 0$

$$F = \int -\frac{1}{2} K A (H_1^2 - H_0^2)$$

高斯计  
标准标定

$$F = (\Delta m_{\text{样}} - \Delta m_{\text{空}}) g$$

· 标定  $A(H_1^2 - H_0^2)$

$$\frac{-2F_{\text{标}}}{K_{\text{标}}} = A(H_1^2 - H_0^2) = \frac{-2F_{\text{样}}}{K_{\text{样}}}$$

$$K_{\text{样}} = K_{\text{标}} \frac{F_{\text{样}}}{F_{\text{标}}} = K_{\text{标}} \frac{\Delta m_{\text{样}} - \Delta m_{\text{空}}}{\Delta m_{\text{标}} - \Delta m_{\text{空}}}$$

$$\chi_{m_{\text{样}}} = \frac{K_{\text{样}}}{\rho_{\text{样}}} \cdot M_{\text{样}} = K_{\text{样}} \frac{V}{m_{\text{样}}} \cdot M_{\text{样}} = K_{\text{标}} \frac{\Delta m_{\text{样}} - \Delta m_{\text{空}}}{\Delta m_{\text{标}} - \Delta m_{\text{空}}} \frac{V}{m_{\text{样}}} M_{\text{样}}$$

$$= \chi_{\text{标}} \frac{\Delta m_{\text{样}} - \Delta m_{\text{空}}}{\Delta m_{\text{标}} - \Delta m_{\text{空}}} \times \frac{M_{\text{样}}}{m_{\text{样}}}$$

图 2: 预习报告: 实验的目的与原理

## 2 实验

### 2.1 仪器、药品、实验步骤与条件

年 月 日	第 17 页
<b>[仪器/试剂]</b>	
• mole 盐 (A.R.), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (A.R.) $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ (A.R.) 未知样	
• Guoy 天平, 研钵, 试管	
<b>[步骤]</b>	
1. 将固体样品研细, 在小广口中备用, 盖盖防风化.	
↓	
2. 打开 Guoy 天平前: 确定 I min. I 调钮左旋 min.	
↓	
① 干净空管挂上, 调细缝使两边等距, 调线长使底位于中心 (或略高)	
↓	
② $I=0\text{A}$ 称重 $\rightarrow I=3.0\text{A}/4.0\text{A}$ 称重 $\rightarrow 4.5\text{A}$ 停 <del>5 s</del> (min) (s)	
$I=0\text{A}$ 称 $\leftarrow I=3.0\text{A}/4.0\text{A}$ 称 $\leftarrow$ 回调 1 min.	
■ 注意 0A 时 示数 ~ 时间	
↓	
3. 使用 mole 盐, 装 5 cm. 重复 2. $\rightarrow$ 装 6 cm. 重复 2. $\rightarrow$ 倒出, 用脱脂棉擦净	
↓	
4. 使用 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ / $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 重复 3.	
↓	
5. 使用未知样 重复 3. $\times 2$ 次 (每个高度 $\times 2$ 次, 倒出再装)	
↓	
6. 调节 $I=0$ , 关电源	

图 3: 预习报告: 仪器、药品、实验步骤与条件

3 数据处理与结果呈现

3.1 实验数据记录

本实验的原始数据如表 1。

表 1: 实验中测定的磁场强度与其对应的质量

励磁电流/A		0	3	4	4.5	4	3	0	
空管	$B/\text{mT}$	4.7	226.4	300.5	/	301.1	227.4	4.7	
	$m/\text{g}$	8.5340	8.5530	8.5320	/	8.5322	8.5329	8.5338	
莫尔盐	5 cm	$B/\text{mT}$	4.4	226.1	300.4	/	301.0	227.0	4.5
		$m/\text{g}$	11.2174	11.2575	11.2876	/	11.2880	11.2581	11.2174
	6 cm	$B/\text{mT}$	4.4	226.2	300.6	/	301.1	227.2	4.6
		$m/\text{g}$	11.7525	11.7934	11.8243	/	11.8248	11.7937	11.7522
硫酸铜	5 cm	$B/\text{mT}$	4.6	226.0	300.2	/	300.9	227.1	4.3
		$m/\text{g}$	11.3733	11.3803	11.3855	/	11.3859	11.3905	11.3731
	6 cm	$B/\text{mT}$	4.2	226.1	300.3	/	301.1	227.1	4.3
		$m/\text{g}$	11.8690	11.8762	11.8819	/	11.8820	11.8767	11.8690
黄血盐	5 cm	$B/\text{mT}$	4.3	226.1	300.6	/	301.1	227.4	4.4
		$m/\text{g}$	10.9767	10.9683	10.9669	/	10.9673	10.9682	10.9694
	6 cm	$B/\text{mT}$	4.4	225.8	300.3	/	301.4	227.1	4.5
		$m/\text{g}$	11.5262	11.5251	11.5236	/	11.5241	11.5251	11.5261
未知样	5 cm	$B/\text{mT}$	4.2	226.0	300.3	/	301.2	227.2	4.3
		$m/\text{g}$	10.9231	10.9404	10.9529	/	10.9533	10.9406	10.9231
	6 cm	$B/\text{mT}$	4.3	226.2	300.4	/	301.3	227.2	4.3
		$m/\text{g}$	11.3090	11.3257	11.3382	/	11.3385	11.3257	11.3087
	5 cm	$B/\text{mT}$	4.2	226.1	300.7	/	301.3	227.1	4.3
		$m/\text{g}$	10.9690	10.9865	10.9993	/	10.9993	10.9862	10.9689
	6 cm	$B/\text{mT}$	4.2	226.0	300.5	/	301.2	227.2	4.4
		$m/\text{g}$	11.3602	11.3772	11.3905	/	11.3905	11.3775	11.3596

3.2 莫尔盐的比磁化率

实验温度  $T = 273.15 + 23.2 = 296.4^{\circ}\text{C}$ ，根据公式，计算莫尔盐的比磁化率：

$$\chi_0 = \frac{9500 \times 10^{-9}}{T + 1} \times 4\pi = 4.028 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### 3.3 样品摩尔磁化率与比磁化率的计算

以励磁电流为 0 A 时，正向的质量作为基准，考虑空管在不同励磁电流下的质量变化，计算每组实验中样品的质量及其绝对质量变化：

$$\begin{aligned} m_a &= m_{a+e} - m_e \\ \Delta m_a &= (m_a - m_{0A,a}) - (m_e - m_{0A,e}) \end{aligned} \quad (1)$$

根据式 (1)，计算得到表 2。

**表 2:** 不同条件下样品的绝对质量变化

样品	距离	$m/\text{g}$	$\Delta m_{3A}/\text{g}$	$\Delta m_{4A}/\text{g}$	$\Delta m'_{4A}/\text{g}$	$\Delta m'_{3A}/\text{g}$	$\Delta m'_{0A}/\text{g}$
空管		8.5340	-0.0010	-0.0020	-0.0018	-0.0011	-0.0002
莫尔盐	5 cm	2.6834	0.0411	0.0722	0.0724	0.0418	0.0002
	6 cm	3.2185	0.0419	0.0738	0.0741	0.0423	-0.0001
黄血盐	5 cm	2.4427	-0.0004	-0.0008	-0.0001	-0.0006	-0.0001
	6 cm	2.9922	-0.0001	-0.0006	-0.0003	0.0000	0.0001
硫酸铜	5 cm	2.8393	0.0080	0.0142	0.0144	0.0183	0.0000
	6 cm	3.3350	0.0082	0.0149	0.0148	0.0088	0.0002
未知样	5 cm	2.3891	0.0183	0.0318	0.0320	0.0186	0.0002
	6 cm	2.7750	0.0177	0.0312	0.0313	0.0178	-0.0001
	5 cm	2.4350	0.0185	0.0323	0.0321	0.0183	0.0001
	6 cm	2.8262	0.0180	0.0323	0.0321	0.0184	-0.0004

对于已知化学式的样品：硫酸铜  $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$  与黄血盐  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6] \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ ，使用公式 (2) 计算摩尔磁化率，得到表 3。

$$\chi_{m,a} = \chi_0 M_a \frac{\Delta m_a}{\Delta m_0} \times \frac{m_0}{m_a} \quad (2)$$

对于未知化学式的未知样，使用公式 (3) 计算其比磁化率，得到表 4。

$$\chi_a = \chi_0 \frac{\Delta m_a}{\Delta m_0} \times \frac{m_0}{m_a} \quad (3)$$

**表 3:** 硫酸铜与黄血盐的摩尔磁化率 (单位:  $10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ )

样品		$\chi_{3A}$	$\chi_{4A}$	$\chi'_{4A}$	$\chi'_{3A}$
硫酸铜	5 cm	1.850	1.869	1.891	1.887
	6 cm	1.900	1.960	1.939	2.019
黄血盐	5 cm	-0.4319	-0.4917	-0.3678	-0.4247
	6 cm	-0.1041	-0.3522	-0.1754	0.000

**表 4:** 未知样的比磁化率 (单位:  $10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )

样品		$\chi_{3A}$	$\chi_{4A}$	$\chi'_{4A}$	$\chi'_{3A}$
未知样	5 cm	2.028	2.006	2.014	2.027
	6 cm	1.987	1.989	1.987	1.980
	5 cm	2.012	2.000	1.982	1.957
	6 cm	1.984	2.022	2.001	2.009

由于励磁电流下行时, 样品会存在剩磁现象; 而且根据表 1 励磁电流相同时, 下行时的磁场会比上行时略强。故本次实验中, 只取电流上行时的数据计算最终结果。

分别对 2 种样品高度, 2 种励磁电流时的 4 组数据取平均, 得到硫酸铜与黄血盐的摩尔磁化率 (根据表 2, 硫酸铜与未知样的  $\Delta m$  有三位有效数字, 黄血盐的  $\Delta m$  只有一位有效数字):

$$\bar{\chi}_{m, \text{硫酸铜}} = 1.90 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\bar{\chi}_{m, \text{黄血盐}} = -4 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

分别对 4 种样品高度, 2 种励磁电流时的 8 组数据取平均, 得到未知样的比磁化率:

$$\bar{\chi}_{\text{未知样}} = 2.00 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

### 3.4 样品分子磁矩的计算

根据公式 (4), 通过摩尔磁化率, 计算各个条件下硫酸铜的分子磁矩, 得到表 5。

$$\mu = 797.7 \sqrt{\frac{\chi_m}{\text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}} \left( \frac{T}{K} \right)} \mu_B \quad (4)$$

**表 5: 硫酸铜的分子磁矩**

样品		$\mu_{3A}/\mu_B$	$\mu_{4A}/\mu_B$	$\mu_{4A'}/\mu_B$	$\mu_{3A'}/\mu_B$
硫酸铜	5 cm	1.868	1.878	1.888	1.887
	6 cm	1.893	1.922	1.912	1.952

对励磁电流上行时的数据取平均，得到：

$$\bar{\mu}_{\text{硫酸铜}} = 1.89 \mu_B$$

### 3.5 不成对电子数的计算

不成对电子数可以由公式 (5) 计算得到：

$$\mu = \sqrt{n(n+2)}\mu_B \quad (5)$$

公式 (5) 也可以写作一元二次方程形式：

$$n^2 + 2n - \mu^2 = 0 \quad (6)$$

方程 (6) 的解为：

$$n = \frac{-2 + \sqrt{4 + 4\mu^2}}{2} = \sqrt{1 + \mu^2} - 1 \quad (7)$$

可以求得硫酸铜中单电子数：

$$n_{\text{硫酸铜}} = \left( \bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}^2 + 1 \right)^{0.5} - 1 = \left( (1.89)^2 + 1 \right)^{0.5} - 1 = 1.14$$

## 4 结果与讨论

### 4.1 误差分析

#### 4.1.1 莫尔盐比磁化率的不确定度

假设温度测定的允差为  $0.1^\circ\text{C}$ ，由于室温变化导致的误差为  $0.2^\circ\text{C}$ ，故温度测定的误差可以计算得到（为了方便书写，本报告中所有误差的省略单位，其单位与其对应的物理量的单位保持一致）：

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{0.1}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.2}{\sqrt{3}}\right)^2} = 0.13$$



莫尔盐比磁化率的误差：

$$\frac{\partial \chi_0}{\partial T} = -\frac{0.00011938}{(T+1)^2} = -\frac{0.00011938}{((296.35)+1)^2} = -1.3 \times 10^{-9}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\chi_0} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \chi_0}{\partial T} \sigma_T\right)^2} \\ &= \sqrt{(-1.3 \times 10^{-9} \times 0.13)^2} \\ &= \sqrt{(-1.8 \times 10^{-10})^2} \\ &= 1.8 \times 10^{-10} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}\end{aligned}$$

最终，得到莫尔盐比磁化率及其误差：

$$\chi_0 = (4.015 \pm 0.002) \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$$

#### 4.1.2 样品摩尔磁化率与比磁化率的不确定度

假设，本实验中使用的万分之一分析天平的允差为 0.1 mg，则考虑其误差：

$$\sigma_m = \frac{0.1 \times 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 5.8 \times 10^{-5}$$

根据公式 (1)，可以得到，质量与质量差的误差：

$$\begin{aligned}\sigma_{m_a} &= \sqrt{2} \sigma_m = 8.2 \times 10^{-5} \\ \sigma_{\Delta m_a} &= \sqrt{4} \sigma_m = 1.2 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

根据公式 (2)、(3)，不妨记：

$$r = \frac{\Delta m_a}{\Delta m_0} \times \frac{m_0}{m_a}$$

有：

$$\begin{aligned}\chi_{m,a} &= \chi_0 M_a r_a \\ \chi_a &= \chi_0 r_a\end{aligned}\tag{8}$$

可得以下公式，求得  $r$  的误差，得到表 6：

$$\sigma_r = |r| \sqrt{\left(\frac{\sigma_{m_0}}{m_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{m_a}}{m_a}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta m_0}}{\Delta m_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta m_a}}{\Delta m_a}\right)^2}$$

**表 6:** 比例系数  $r$  及其不确定度

样品	距离	$r_{3A}$	$r_{4A}$	$r'_{3A}$	$r'_{4A}$
黄血盐	5 cm	$-0.0088 \pm 0.0027$	$-0.0101 \pm 0.0015$	$-0.0075 \pm 0.0015$	$-0.0087 \pm 0.0026$
	6 cm	$-0.0022 \pm 0.0027$	$-0.0076 \pm 0.0015$	$-0.0038 \pm 0.0015$	/
硫酸铜	5 cm	$0.2060 \pm 0.0031$	$0.2081 \pm 0.0018$	$0.2105 \pm 0.0018$	$0.2101 \pm 0.0031$
	6 cm	$0.2028 \pm 0.0030$	$0.2092 \pm 0.0017$	$0.2070 \pm 0.0017$	$0.2156 \pm 0.0030$
未知样	5 cm	$0.3964 \pm 0.0028$	$0.3921 \pm 0.0016$	$0.3935 \pm 0.0016$	$0.3962 \pm 0.0028$
	6 cm	$0.3642 \pm 0.0027$	$0.3645 \pm 0.0015$	$0.3642 \pm 0.0015$	$0.3628 \pm 0.0027$
	5 cm	$0.4085 \pm 0.0029$	$0.4060 \pm 0.0017$	$0.4023 \pm 0.0016$	$0.3973 \pm 0.0028$
	6 cm	$0.3772 \pm 0.0027$	$0.3843 \pm 0.0016$	$0.3804 \pm 0.0015$	$0.3820 \pm 0.0027$

根据公式 (8), 有:

$$\begin{aligned}\sigma_{\chi_m} &= M_0 \sqrt{(r\sigma_{\chi_0})^2 + (\chi_0\sigma_r)^2} \\ \sigma_{\chi} &= \sqrt{(r\sigma_{\chi_0})^2 + (\chi_0\sigma_r)^2}\end{aligned}\quad (9)$$

根据公式 (9), 可以求得摩尔磁化率与比磁化率的不确定度, 如表 7、8。

**表 7:** 硫酸铜与黄血盐的摩尔磁化率的不确定度 (单位:  $10^{-10} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ )

样品		$\sigma_{\chi_{3A}}$	$\sigma_{\chi_{4A}}$	$\sigma_{\chi'_{4A}}$	$\sigma_{\chi'_{3A}}$
硫酸铜	5 cm	3.167	1.805	1.801	3.116
	6 cm	3.043	1.731	1.723	3.021
黄血盐	5 cm	10.68	6.077	6.060	10.50
	6 cm	10.72	6.089	6.064	/

**表 8:** 未知样的比磁化率的不确定度 (单位:  $10^{-10} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )

样品		$\sigma_{\chi_{3A}}$	$\sigma_{\chi_{4A}}$	$\sigma_{\chi'_{4A}}$	$\sigma_{\chi'_{3A}}$
未知样	5 cm	11.48	6.547	6.533	11.29
	6 cm	10.82	6.162	6.137	10.71
	5 cm	11.72	6.691	6.663	11.47
	6 cm	11.04	6.312	6.276	10.96

对于平均值，可以使用公式 (10) 计算不确定度：

$$\begin{aligned}\sigma_{\bar{\chi}_m} &= \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\chi_{m,i}})^2 + s^2} \\ \sigma_{\bar{\chi}} &= \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\chi_i})^2 + s^2}\end{aligned}\quad (10)$$

根据 10 计算得到：

$$\begin{aligned}\sigma_{\bar{\chi}_m, \text{黄铁盐}} &= 1.76 \times 10^{-9} \\ \sigma_{\bar{\chi}_m, \text{硫酸铜}} &= 5.10 \times 10^{-10} \\ \sigma_{\bar{\chi}_{\text{unknown}}} &= 2.61 \times 10^{-9}\end{aligned}$$

最终，得到各样品（摩尔）比磁化率及其不确定度：

$$\begin{aligned}\bar{\chi}_m, \text{黄血盐} &= -(4 \pm 2) \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \\ \bar{\chi}_m, \text{硫酸铜} &= (1.90 \pm 0.05) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \\ \bar{\chi}_{\text{未知样}} &= (2.00 \pm 0.03) \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}\end{aligned}$$

#### 4.1.3 样品分子磁矩的不确定度

根据公式 (4)：

$$\begin{aligned}\frac{\partial \bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}}{\partial T} &= \frac{398.85 (T \bar{\chi}_m, \text{硫酸铜})^{0.5}}{T} = \frac{398.85 \times ((296.35) \times (1.895 \times 10^{-8}))^{0.5}}{(296.35)} = 0.0032 \\ \frac{\partial \bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}}{\partial \bar{\chi}_m, \text{硫酸铜}} &= \frac{398.85 (T \bar{\chi}_m, \text{硫酸铜})^{0.5}}{\bar{\chi}_m, \text{硫酸铜}} = \frac{398.85 \times ((296.35) \times (1.895 \times 10^{-8}))^{0.5}}{(1.895 \times 10^{-8})} = 5.0 \times 10^7 \\ \sigma_{\bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}} &= \sqrt{\left( \frac{\partial \bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}}{\partial T} \sigma_T \right)^2 + \left( \frac{\partial \bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}}{\partial \bar{\chi}_m, \text{硫酸铜}} \sigma_{\bar{\chi}_m, \text{硫酸铜}} \right)^2} \\ &= \sqrt{(0.0032 \times 0.13)^2 + (5.0 \times 10^7 \times 5.1 \times 10^{-10})^2} \\ &= \sqrt{(0.00041)^2 + (0.025)^2} \\ &= 0.026 \mu_B\end{aligned}$$

最终，得到硫酸铜的分子磁矩及其不确定度：

$$\bar{\mu}_{\text{硫酸铜}} = (1.89 \pm 0.03) \mu_B$$

#### 4.1.4 单电子数的不确定度

根据公式 (??):

$$\begin{aligned}\frac{\partial n_{\text{硫酸铜}}}{\partial \bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}} &= \frac{1.0 \bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}}{\left(\bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}^2 + 1\right)^{0.5}} = \frac{1.0 \times (1.89)}{\left((1.89)^2 + 1\right)^{0.5}} = 0.88 \\ \sigma_{n_{\text{硫酸铜}}} &= \sqrt{\left(\frac{\partial n_{\text{硫酸铜}}}{\partial \bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}} \sigma_{\bar{\mu}_{\text{硫酸铜}}}\right)^2} \\ &= \sqrt{(0.88 \times 0.025)^2} \\ &= \sqrt{(0.022)^2} \\ &= 0.022\end{aligned}$$

最终，得到：

$$n_{\text{硫酸铜}} = (1.14 \pm 0.02) \quad (11)$$

在  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  中，Cu(II) 的 d 电子排布为  $(b_{1g})^1 (a_{1g})^2 (b_{2g})^2 (e_g)^4$ ， $n = 1$ ，这与实验测得的结果基本吻合。

而测得黄血盐为抗磁性，无法通过顺磁性物质的计算公式计算其磁矩与单电子数。低自旋 Fe(II) 的 d 电子排布为  $(t_{2g})^6 (e_g)^0$ ，黄血盐并没有单电子，因此  $\chi_{\text{顺}} = 0$ ， $n = 0$ 。

## 4.2 结论

本次实验以莫尔盐作为标准样，通过古埃磁天平法测得  $23.2^\circ\text{C}$  下五水硫酸铜摩尔比的磁化率为  $(1.90 \pm 0.05) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，文献值<sup>[1]</sup>为  $1.835 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，与文献值的偏差为 3.2%，可以认为在仪器误差范围内。五水硫酸铜的分子磁矩为  $(1.89 \pm 0.03)\mu_B$ ，有  $(1.14 \pm 0.02) \approx 1$  个单电子。

三水合黄血盐的摩尔磁化率为  $-(4 \pm 2) \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，文献值<sup>[1]</sup>为  $-2.165 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ ，与文献值的偏差为 85%，但是，由于测定黄血盐时质量变化微小，实验测定的仪器误差与相当大，文献值仍然在实验误差范围内。

未知样品的比磁化率为  $(2.00 \pm 0.03) \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 4.2.1 误差来源

本实验中的的误差主要来源于：

1. **装样的误差：**实验要求在每次装样时都要确保样品的粗细程度和紧密度保持一致。然而，在实际的操作过程中，这种一致性很难完全达到，从而产生了装样误差。

2. **样品管位置的误差**：在实验中，由于悬挂的铜丝并非刚性，可能在装样时受力改变形状，每次悬挂样品管的高度可能会有所不同，这会导致样品管位置的误差。
3. **关于磁场强度的误差**：尽管我们在相同的电流条件下进行实验，但磁场强度并不总是完全相同。这意味着即使在相同的电流下，磁场的实际强度仍可能出现微小的变化。
4. **磁滞效应导致的误差**：磁滞效应是指在励磁电流逐渐减小时，磁场的读数会偏向于偏大的方向。这种效应在实验中也可能引起误差。

#### 4.2.2 测量磁化率的理想条件

1. **装样的标准化**：尽量采用标准化的方法来装样，确保每次的粗细和紧密度都相似。例如，可以使用特定的工具或模板来帮助进行装样。
2. **固定样品管的位置**：使用固定装置或标记来确保样品管每次都被放在相同的位置，从而消除位置误差。
3. **稳定的磁场**：确保磁场来源稳定，并使用校准工具定期检查磁场强度。在相同的电流下，磁场强度应该是恒定的。任何偏差都应该被记录并在最后的结果中进行校正。
4. **磁滞效应的补偿**：由于磁滞效应可能导致读数偏大，我们可以考虑在测量过程中适当地调整励磁电流，或者使用软磁材料来减少磁滞。
5. **环境控制**：确保实验室的温度、湿度和其他可能影响磁场或样品的因素都被控制在一定范围内。
6. **经验和技能**：操作者应该受过充分的培训，熟悉所有的操作步骤和潜在的误差来源。
7. **校准和复查**：定期使用已知磁化率的标准样品来校准磁天平，并对结果进行复查，以确保测量的准确性。

### 4.3 思考题

#### 思考题 1

1. **在相同的励磁电流下，测得的结果仍然会有区别**：根据表 1，
  - 对于两次平行的实验：这是因为仪器在相同励磁电流下，磁场可能会有一定的偏差所致，或者样品管的位置发生变化所致。
  - 对于装样高度不同的实验：这是因为装样高度的区别导致样品所受磁场不同，或者样品管的位置发生变化所致。
  - 对于同一组实验：这是因为反向调节励磁电流时，相同电流时磁场强度与正向不同，以及样品的磁滞效应所致。
2. **不同励磁电流下的样品磁化率**：
  - 根据表 1，这并没有显著的区别，根据表 7、8，这在实验误差范围内。

## 思考题 2

### 1. 样品的装填高度及其在磁场中的位置有何要求？

样品的装填高度应该是一致的，并且为了得到准确的结果，样品需要被放置在磁场的相同位置。最理想的位置是将样品管的底部放置在极缝的中心，以确保样品均匀地受到磁场影响。

### 2. 如果样品管的底部不在极缝中心，对测量结果有影响吗？

如果样品管的底部不在极缝中心，样品会处于一个非均匀的磁场中，这会导致测量的磁化率值偏离真实值。方程 (12) 不成立。

$$F = \int_{H_1}^{H_0} (\kappa - \kappa_0) A H dH = -\frac{1}{2} (\kappa - \kappa_0) A (H_1^2 - H_0^2) \quad (12)$$

### 3. 装填高度不一致对实验有何影响？

装填高度的不一致会导致样品的质量与所受磁场的不同，会导致测量值平行性的偏差，从而导致磁化率的测量结果偏差增大。

### 4. 不同装填高度对实验有何影响？

不同的装填高度意味着样品的质量和体积都会有所不同。如果样品装填高度高，相同质量的样品收到的磁场作用增强，会显现出更强的顺/抗磁性，反之亦然。

## 思考题 3

1. **装样不平行所引入的误差：**当装样不是完全平行时，会导致样品的部分区域受到的磁场强度与其他区域不同，从而引入误差。此误差的大小取决于偏离的程度。越不平行，所引入的误差就可能越大。

2. **影响本实验结果的主要因素：**主要因素包括装样的高度、样品在磁场中的位置、磁场的均匀性，以及样品装填的平行度。这些因素都会影响到样品所受的磁场强度，进而影响到测量结果。

3. **如何得到准确的数据：**为了得到准确的数据，需要确保：

- 样品装填高度一致；
- 样品管的底部应放在极缝中心，确保样品处于磁场的均匀区域；
- 磁场应保持稳定且均匀；
- 样品装填应尽量平行，避免引入不必要的误差。

## 4.4 意见与建议

### 1. 实验仪器的改进：

- 使用更加现代化的古埃磁天平，例如将电子天平与磁线圈一体化，而非由两个独立的仪器拼接得到：两个仪器拼接并不紧密，中间会有一小段暴露的区域，

会导致铜线受气流影响而摆动，影响实验测量。

- 将用于悬挂样品的铜丝改为更加粗和坚固的铜线，以避免其发生形变影响实验结果的一致性。

## 2. 实验方法的改进：

- 使用更加先进的装样方法，保证每次装样的一致性，例如第一次装样后，第二次装样的质量要与第一次的质量保持完全一致，在质量和高度两个维度都要保持一致性。
- 实验的平行性实际取决于磁场强度而非励磁电流的大小，因此，更科学的方法应当是保持每组实验间的磁场强度一致，而不仅仅是励磁电流一致。

## 参考文献

[1] HAYNES W M, LIDE D R, BRUNO T J. Crc handbook of chemistry and physics[M]. CRC Press, 2016.

[2] 北京大学化学学院物理化学实验教学组. 物理化学实验[M]. 4 版. 北京: 北京大学出版社, 2002: 5.

# 附录

$T = 23.2^{\circ}\text{C}$      $p = 101.20 \text{ kPa}$

年    月    日

第 18 页

I		0	3	4	4	3	0
空	Bo	4.7	226.4	300.5	301.1	227.4	4.7
	m	8.5340	8.5330	8.5320	8.5322	8.5329	8.5338
5cm	Bo	4.4	226.1	300.4	301.0	226.9	4.5
	m	11.2174	11.2575	11.2876	11.2880	11.281	11.2174
6cm	Bo	4.4	226.2	300.6	301.1	227.0	4.6
	m	11.7525	11.7934	11.8243	11.8248	11.7937	11.7522
5cm	Bo	4.3	226.1	300.76	301.1	227.2	4.4
	m	10.9697	10.9683	10.9669	10.9673	10.9682	10.9694
6cm	Bo	4.4	225.8	300.3	301.4	227.4	4.5
	m	11.5262	11.5251	11.52396	11.5241	11.5251	11.5261
5cm	Bo	4.6	226.0	300.2	300.9	227.1	4.3
	m	11.3733	11.3803	11.3855	11.3859	11.3805	11.3731
6cm	Bo	4.2	226.1	300.3	301.1	227.1	4.3
	m	11.8690	11.8762	11.88189	11.8820	11.8767	11.8690
5cm	Bo	4.2	226.0	300.3	301.2	227.2	4.3
	m	10.9623	10.9404	10.9529	10.9533	10.9406	10.9231
6cm	Bo	4.3	226.2	300.4	301.3	227.2	4.3
	m	11.3090	11.3257	11.3382	11.3385	11.3257	11.3087
5cm	Bo	4.2	226.1	300.7	301.3	227.1	4.3
	m	10.9690	10.9865	10.99933	10.9993	10.9862	10.9689
6cm	Bo	4.2	226.0	300.5	301.2	227.2	4.4
	m	11.3602	11.3772	11.3905	11.3905	11.3775	11.3596
$\chi_{\text{样}} = \chi_{\text{mole}} \cdot A_{\text{mole}} \cdot 0.47617 = \frac{1.912}{4.875 \times 10^{-7}} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$							
$\chi_{\text{mole}} = 4.015 \times 10^{-7}$							
$M_{\text{mole}} = 392.14 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$							

23.10.19

实验报告：原始数据记录