
大学物理实验 I+II 指导书

实验班 · 2020 春延期+秋季学期

霍中生 姚列明 陈群宇 陈中均

电子科技大学物理实验中心

2020 年 9 月

目 录

第一章 大学物理实验学习须知	2
英才学院 2020 秋《大学物理实验 II》和 2020 春《大学物理实验 I》延期上课课程表	2
第二章 大学物理实验内容提要	3
(一) “实验误差及数据处理”内容摘要	3
(二) 基本实验方法和基本技能学习内容提要	8
第三章 理论课考试模拟试题及参考解答	9
大学物理实验理论考试模拟试题 1	9
模拟试题 1 参考答案	11
大学物理实验理论考试模拟试题 2	13
模拟试题 2 参考答案	15
大学物理实验理论考试模拟试题 3	17
模拟试题 3 参考答案	19
第四章 物理实验	21
实验 I-1. 用拉伸法测金属丝的杨氏模量	21
实验 I-2. 示波器的使用	25
实验 I-3. 波尔共振实验	27
实验 I-4. 激光全息照相	32
实验 I-5. 迈克尔逊干涉仪的调整与使用	35
实验 I-6. 偏振光实验	41
实验 I-7. 声光效应实验	44
实验 II-1 落球法测量液体的粘滞系数	46
实验 II-2. 用电流场模拟静电场	51
实验 II-3. 电子束实验	53
实验 II-4. 霍尔效应法测量磁场	55
实验 II-5. 磁阻效应综合实验	59
实验 II-6. 脉冲电磁波的发射与接收综合实验	70
实验 II-7. 密立根油滴实验——电子电荷的测定	77
实验 II-8. 弗兰克—赫兹实验	79
实验 II-9. 分光计的使用和光栅测波长	84

注 意

本书仅为教材《结构化大学物理实验》(第二版)的实验补充,预习和做实验都必须携带、阅读教材。

请同学们携带铅笔、直尺、计算器和坐标纸到课,以便随时进行实验数据处理。

第一章 大学物理实验学习须知

英才学院 2020 秋《大学物理实验 II》和 2020 春《大学物理实验 I》延期上课课程表

上课时间		星期三 9-12 节			
班级		英才 1 班	英才 2 班	英才 3 班	英才基科班
大学物理实验 I	授课教师	姚列明	陈群宇	陈中均	霍中生
	理论课 1: 第 1 周星期三 9-12 节	科 A102	科 A204	科 A106	科 A206
	理论课 2: 第 2 周星期三 9-12 节				
	实验名称	实验地点	教学周次	教学周次	教学周次
	拉伸法测量金属丝的杨氏模量	科 A108	7	6	4
	示波器的调整与使用	科 A121	——	——	——
	玻尔共振实验	科 A106	8	7	3
	全息照相实验	科 A118	——	——	——
	迈克尔逊干涉仪实验	科 A102	4	3	6
	偏振光实验	科 A104	——	——	——
	声光效应实验	科 A113	6	4	7
大学物理实验 II	授课教师	姚列明	陈中均	陈群宇	霍中生
	实验名称	实验地点	教学周次	教学周次	教学周次
	落球法测量液体的粘滞系数	科 A233	9	11	8
	静电场模拟	科 A117	12	10	9
	电子束实验	科 A123	——	——	——
	霍尔效应实验	科 A119	11	9	10
	磁阻效应实验	科 A119	——	——	——
	电磁波的发射与接收	科 A233	10	12	11
	密立根油滴实验	科 A107	——	——	——
	弗兰克—赫兹实验	科 A105	14	13	12
	分光计的使用和光栅测波长	科 A101	15	14	13
英才\基科班: 每课 1\2 学分、20\32 学时、上 6\9 次课。每节 150\160 分钟 (3.33\3.56 学时)					
备注: (1) 教材为《结构化大学物理实验》(第二版)。(2) 请按老师要求, 行政班集体领取每人实验报告纸 20 张和坐标纸 4 张。(3) 实验课前要按规定写好预习报告。(4) 第 5 周国庆放假没有排课, 其它法定节假日放假由任课老师与学生协商补课。(5) 大学物理实验 I 理论课考试(闭卷)与期末大面积考试一同安排; 大学物理实验 II 最后一个实验(实验 II-9)为操作考试(开卷), 预习报告与其它实验相同, 要求下课前完成数据处理并交报告, 请提前准备好坐标纸、计算器和其它文具。(6)《大学物理实验 I》和《大学物理实验 II》按先后顺序拉通上课。(7) 电磁波的发射与接收实验由科研团队进行实验准备并协助操作辅导。					

第二章 大学物理实验内容提要

(一) “实验误差及数据处理”内容摘要

一、测量与误差

1. 测量

(1) 测量的含义(强调测量是一个过程)、测量的读数(被测量与计量单位的比值)和测量的数据(强调单位)。

(2) 测量的四要素: 测量对象、测量单位、测量方法和测量准确度。

(3) 测量的分类

A. 按测量方法分: 直接测量和间接测量。

B. 按测量条件(结果)分: 等精度测量与非等精度测量。

2. 误差

(1) 误差的表述

A. 绝对误差($\Delta'N$):

$$\Delta'N = N_i \text{ (测量值)} - N \text{ (真值)},$$

它是误差的定义式, 有大小、方向(符号)和单位。

偏差(ΔN): 用算术平均值 \bar{N} (近真值)代替真值算出的误差称为偏差, 表达式为

$$\Delta N = N_i - \bar{N}。$$

B. 相对误差 E (常表示为百分误差形式):

$$E = \frac{\Delta'N}{N} \times 100\%,$$

其中 N 定义为真值, 在实际计算时, 一般多次测量用平均值 \bar{N} 、单次测量用测量值 N_i 代替。它的大小可反应测量精度(准确度)的高低。

C. 修正值 Δ : $\Delta = N \text{ (真值)} - N_i \text{ (测量值)}$ 。它与误差的绝对值相等, 符号相反, 单位相同。

(2) 误差的来源(设备、方法、环境和人员)。

(3) 误差的分类(按性质分)

A. 系统误差: 系统误差的含义, 特征——确定性; 已定系统误差和未定系统误差。

B. 偶然误差: 偶然误差的含义, 特征——随机性; 大多数偶然误差遵从正态分布。

正态分布的性质: 单峰性、有界性和对称性。

◆ 系统误差与偶然误差的关系及如此分类法的不足。

◆ 粗大误差: 明显歪曲测量结果的误差, 完全是一种错误(测量结果中不允许粗差的存在)。

(4) 精密度、正确度及准确度等名词的含义。

二、系统误差的处理

1. 系统误差的发现（理论分析法、对比测量法、数据分析法）。

2. 如何消除系统误差

(1) 对已定系统误差的消除

A. 消除产生系统误差的根源

B. 找出修正值对测量值进行修正

$$\text{真值} = \text{测量值} + \text{修正值}$$

(2) 对未定系统误差的消除

A. 代替法； B. 交换法； C. 异号法； D. 半周期偶次观测法。

注意：多次测量既不能减小系统误差，更不能消除系统误差。

三、偶然误差的估算（不考虑系统误差）

1. 用算术平均值（即近真值、最佳值）表示测量结果：

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$$

2. 用算术平均值（ \bar{N} 对真值）的标准偏差表示偶然误差：

$$S_{\bar{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n(n-1)}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

其中 S 是任一次测量值 N_i 的标准偏差，常用于拉依达准则剔除坏值

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}}$$

偶然误差可通过多次测量减小之，但不能消除。

(2) 置信概率

结果表达式表明真值以概率 P 出现在区间 $[\bar{N} - \Delta N, \bar{N} + \Delta N]$ 中。其中概率

$$P = \int_{-\Delta N}^{+\Delta N} f(\Delta N) d\Delta N$$

称为置信概率。当 $\Delta N = 3S$ 时， $P = 99.7\%$ 。

(3) 坏值的剔除

极限误差 $3S$

拉依达准则

5. 误差均分定理

四、实验不确定度（测量结果不确定度、不确定度）

1. 不确定度（ σ ）的概念

它是表征被测量的真值或者误差在某个量值范围内的一个评定，其大小可反映测量结果可信赖程度的高低，用它来评定测量结果的质量比用误差来评定更合适。

2. 不确定度（ σ ）的两个分量：

(1) A 类不确定度 (统计不确定度) 分量 u_A 。

$$u_A = \sqrt{u_{A_1}^2 + u_{A_2}^2 + \Lambda + u_{A_m}^2}$$

注意：在教学实验中，对同一物理量进行多次测量， u_A 只有一个分量。

(2) B 类不确定度 (非统计不确定度) 分量 u_B 。

$$u_B = \sqrt{u_{B_1}^2 + u_{B_2}^2 + \Lambda + u_{B_n}^2}$$

注意：不确定度分为 A 类和 B 类，与误差分为偶然误差与系统误差之间没有完全对应的关系。

3. 直接测量不确定度的计算方法

(1) A 类 (统计) 不确定度分量的计算方法：

A 类不确定度计算方法与偶然误差的标准偏差估计相同。

$$u_A = S_{\bar{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n(n-1)}}$$

(2) B 类 (非统计) 不确定度分量的计算方法：

最常采用的是“近似标准差”估计的方法，如果误差是高斯分布，有

$$u_j = \Delta/3$$

如果误差是均匀分布，有

$$u_j = \Delta/\sqrt{3}$$

式中 Δ 是“误差极限值”。

B 类不确定度主要考虑仪器误差分量 $u_{\Delta_{\text{仪}}}$ 和估读误差分量 $u_{\Delta_{\text{估}}}$ ，分布全视为均匀分布。即

$$u_{\Delta_{\text{仪}}} = \Delta_{\text{仪}}/\sqrt{3}$$

$$u_{\Delta_{\text{估}}} = \Delta_{\text{估}}/\sqrt{3}$$

A. 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 的确定：

<1>. 由仪器说明书指示计算。

<2>. 指针式电表等：量程 $\times a\%$ ， a 为仪器的准确度等级。

<3>. 数显电表等： $N \cdot m\% + n$ ， N 为测量值， $m\%$ 为相对误差系数， n 是绝对误差项。

<4>. 未知仪器误差的可估读的连续均匀分度的仪器：估计为最小分度值的一半。

<5>. 未知仪器误差的不可估读的数字式仪表和游标尺等：估计为最小分度值。

<6>. 若测量条件较差，可根据经验估计。

B. 估读误差 $\Delta_{\text{估}}$ 的确定：

<1>. 满足仪器规定的测量条件时，

可连续读数仪器的估读误差取最小刻度的 1/5。

不可估读的数字式仪表和游标尺等不存在估读误差。

<2>. 不满足仪器规定的测量条件时，

可连续读数仪器按经验放大估读误差。比如测杨氏模量实验中, 镜尺距离 D 取 $\Delta_{D\text{估}}=2\text{mm}$ 。

不可估读的数字式仪表也要按经验取一定的估读误差。比如测杨氏模量实验中, 卡尺测量光杠杆长度 b , 因无法对准而存在估读误差 $\Delta_{b\text{估}}=0.2\text{mm}$ 。

注意: 对一个物理量进行多次测量, 结果既存在 A 类不确定度分量又存在 B 类不确定度分量, 而单次测量只考虑 B 类不确定度分量。即一个测量可以只考虑 B 类不确定度分量, 但不能只考虑 A 类不确定度分量, 换言之, 没有 B 类不确定度的测量是不存在的。

4. 合成不确定度 (σ)

$$\sigma = \sqrt{u_A^2 + u_{\Delta_{\text{估}}}^2 + u_{\Delta_{\text{估}}}^2}; \quad \sigma = \sqrt{u_{\Delta_{\text{估}}}^2 + u_{\Delta_{\text{估}}}^2} \quad (u_A \text{ 很小时}); \quad \sigma = u_{\Delta_{\text{估}}} \quad (\Delta_{\text{估}} \text{ 也很小时})$$

5. 总不确定度 (U):

$$U = C\sigma$$

C 是置信因子, 如果误差分布是高斯分布

$C=1$, 即 $U=\sigma$, 置信概率 $P=0.683$;

$C=2$, 即 $U=2\sigma$, 置信概率 $P=0.954$;

$C=3$, 即 $U=3\sigma$, 置信概率 $P=0.997$ 。

6. 不确定度的传递 (间接测量的不确定度的计算)

$$\sigma_{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \sigma_{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \sigma_{\bar{y}}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \sigma_{\bar{z}}\right)^2 + \Lambda}$$
$$\frac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x} \sigma_{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial y} \sigma_{\bar{y}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln f}{\partial z} \sigma_{\bar{z}}\right)^2 + \Lambda}$$

注意: 不确定度的传递是对间接测量而言的, 即所有间接测量量的不确定度 σ , 都要通过传递公式来计算; 同时, 传递是每个直接测量量的 σ_i 的传递, 不是 A 类不确定度分量 S 或 B 类不确定度分量 u 分别的传递, 必须要把每个直接测量量的 S 和 u 合成为 σ_i 后才能传递。

◆ 微小误差准则——简化误差计算

7. 用总不确定度表示测量结果

$$N = \bar{N} \pm U \quad (\text{单位}) \quad (\text{置信度 } P=?)$$

$$N = \bar{N} \pm \sigma \quad (\text{单位}) \quad (P=0.683)$$

$$N = \bar{N} \pm 2\sigma \quad (\text{单位}) \quad (P=0.954)$$

$$N = \bar{N} \pm 3\sigma \quad (\text{单位}) \quad (P=0.997)$$

上面的表达式中的 P 都是针对误差分布是正态分布的, 若不是正态分布 P 值不尽相同; 我们约定, 总不确定度 $U=C\sigma$ 中的 C 都取 1, 置信度 P 也可不再书写了。

五、有效数字和数据处理

1. 有效数字的概念

(1) 有效数字的含义及科学记数法:

A. 强调: 测量值可表示为几位可靠加几位可疑数字, 但可疑数字中只有最靠左的一位是有效数字。

B. 牢记: 误差决定有效数字, 而不是有效数字决定误差。

C. 记住: $5.2\text{mm} \neq 5.20\text{mm}$, 末尾的 0 该添则添, 不该添一定不能添。

- D. 注意：十进制单位换算与有效数字的位数无关。
E. 应用：未定的误差、不确定度、相对不确定度都是可疑数字。

(2) 科学表达式的有效数字规定。

(3) 有效数字取位的一些规（约）定：

- A. 不知道仪器误差、不计算不确定度、有效数字算式中表示为几位可靠加 1 位可疑数字；
B. 不确定度计算的中间过程，表示为几位可靠数字加 1-3 位可疑数字；
C. 不确定度结果表达式中，表示为几位可靠数字加 1-2 位可疑数字，可疑位必须对齐；
D. 已定的绝对误差、相对误差的有效位数取决于测量值与公认值之差的有效位数。
E. 自然数、常数、无理数的有效数字为无穷多位，运算时可根据所需取位。

(4) 直接测量的有效数字——如何读数：

读至产生误差的最左一位或下一位。读至下一位时须申明仪器误差、估读误差的大小。

(5) 间接测量的有效数字——有效数字的计算：

- A. 根据有效数字定义的计算法则的计算（积、差、商、乘方、开方、对数、指数、三角函数的经验规则）。
B. 根据不确定度的传递公式确定有效数字的计算方法。

2. 数据处理

(1) 列表法（作用与要求）

(2) 作图法：

- A. 作图规则（注意：关系曲线与校准曲线作图时的区别）。
B. 求直线的斜率与截距。
C. 曲线改直的方法与应用。
D. 作图法可用来进行直线拟合和求经验公式。

(3) 逐差法

(4) 最小二乘法

A 估读误差。最小二乘法原理。

B. 一元一次线性回归

数学模式： $y = bx + a$

则

$$b = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y} - \overline{xy}}{\bar{x}^2 - \overline{x^2}}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}$$

注意：实际应用中包括 \bar{x} 、 \bar{y} 、 \overline{xy} 、 $\overline{x^2}$ 共 6 个步骤缺一不可；所有计算步骤中不能按有效位数规则计算，应保留尽可能多的位数；一般 a 的有效位数同 y ， b 的有效位数用有效数字规则由下式算出

$$b \approx \frac{y_{\max} - y_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$$

- C. 相关系数为 Y 。
D. 最小二乘法可用来进行直线拟合和求经验公式。
E. 实际应用时要注意数据间隔尽量选大一些。

(二) 基本实验方法和基本技能学习内容提要

1. 基本的实验方法和测量方法

- (1) 比较法 (典型实验是“电桥测电阻”);
- (2) 模拟法 (典型实验是“静电桥模拟”);
- (3) 放大法 (典型实验是“拉伸法测金属丝的杨氏模量”);
- (4) 补偿法 (典型实验是“用电势差计测电动势”);
- (5) 干涉法 (典型实验是“用牛顿环测平凸透镜曲率半径”);
- (6) 转换测量法 (典型实验是“超声声速的测定”);
- (7) 示波法 (典型实验是“示波器的调整与使用”中的“李萨如图形测频率”);

2. 基本实验仪器的结构、测量原理; 技术性能; 调整使用方法。应掌握的基本仪器;

- (1) 测长计时类: 米尺 (卷尺)、游标卡尺、螺旋测微计、移测显微镜 (读数显微镜); 秒表。
- (2) 测温仪器类: 酒精温度计、水银温度计、温差电偶。
- (3) 电学仪器类: 稳压电源、电阻箱、滑线变阻器、电流表、电压表、多用表、惠斯登电桥、电势差计、检流计、平衡指示仪、标准电池、示波器、信号发生器等。
使用电学仪器的安全操作方法。
- (4) 光学仪器类: 透镜、光具座、观测望远镜、移测显微镜、精密分光计、光源 (白炽灯、钠光灯、汞灯、氦-氖激光器)。
光学仪器的维护保养知识。

第三章 理论课考试模拟试题及参考解答

(每套题均为 90 分钟闭卷笔试)

大学物理实验理论考试模拟试题 1

一、填空题，每空 2 分，共 30 分

1. 测量过程中产生误差的来源有_____误差、_____误差、_____误差、_____误差。
2. $N = \bar{N} \pm \sigma$ 的置信概率是_____； $N = \bar{N} \pm 3\sigma$ 的置信概率为_____。
3. 遵循有效数字的传递法则，计算 $50 \div 0.100 =$ _____ $\times 10^2$ ，
 $50 \div 0.100 + 8848.13 =$ _____ $\times 10^3$ 。
4. 在进行十进制单位换算时，有效数字的位数_____。
5. 用 1.0 级 1V 档的电压表测电压，刚好满度时的测量值为_____ V。
6. 用零差为 2mA 的电压表，测量某电压读数为 26 mA，则修正值是_____。
7. 仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 是相应_____类不确定度分量的 $\sqrt{3}$ 倍。
8. 凡是可以通过_____方法来计算不确定度的称为 A 类不确定度。
9. 作图时，“o”、“△”、“□”、“▽”等数据标记的_____应准确地落在数据坐标上。
10. 最小二乘法的中间计算过程不宜用有效数字的运算法则，否则会引入较大的_____误差。

二、单选题，每题 2 分，共 20 分

1. 校正曲线的各相邻校验点之间用（ ）连接起来
A. 直线段 B. 曲线 C. 平滑曲线 D. 以上三种都对
2. 对于最小二乘法，如果测量数据只有 3 组，（ ）
A. 无法计算 B. 必须再测 3 组 C. 每组计算两次 D. 也可以计算
3. 计算不确定度时，角度应该使用哪种单位？（ ）
A. 弧度 B. 度、分、秒 C. 带小数的度 D. 以上三种都对
4. 单摆法测周期时，摆长 $l = 1000\text{mm}$ ，重力加速度 g 取（ ）最合适。
A. 10 m/s^2 B. 9.8 m/s^2 C. 9.79 m/s^2 D. 9.792 m/s^2
5. 如果两个测量值的有效位数都是 3 位，说明两者的（ ）
A. 绝对误差相同 B. 相对误差相同
C. 绝对误差接近 D. 相对误差相近
6. $100^2 \times \sqrt{100} =$ （ ）
A. 10^5 ， B. 100×10^3 C. 100000 D. 1.00000×10^5
7. 多次测量可以（ ）
A. 消除偶然误差 B. 消除系统误差

- C. 减小偶然误差 D. 减小系统误差
8. 下列测量结果正确的表达式是 ()
- A. $T = (12.5 \pm 0.07) \text{ s}$ B. $Y = (1.6 \pm 7 \times 10^{-2}) \times 10^{11} \text{ Pa}$
- C. $V = 23.68 \pm 0.09$ D. $I = (6.563 \pm 0.012) \text{ mA}$
9. 对于间接测量 $N = \frac{x-y}{x+y}$, 正确的不确定度传递关系是 ()
- A. $\sigma_N = \sqrt{\frac{4x^2\sigma_x^2}{x^2+y^2} + \frac{4y^2\sigma_y^2}{x^2+y^2}}$ B. $\sigma_N = \sqrt{\frac{4y^2\sigma_x^2}{x^2+y^2} + \frac{4x^2\sigma_y^2}{x^2+y^2}}$
- C. $\sigma_N = \frac{\sigma_x}{x-y} - \frac{\sigma_y}{x+y}$ D. 都不对
10. 对于间接测量 $Z = \frac{1}{2}Y^3 - X$, 正确的不确定度传递关系是 ()
- A. $\sigma_Z = \frac{1}{2}Y^2\sigma_Y - \sigma_X$ B. $\sigma_Z = \frac{3}{2}Y^2\sigma_Y + \sigma_X$
- C. $\sigma_Z = \frac{3}{2}\sigma_Y + \sigma_X$ D. 以上三种表示都不对

三、应用题 (3 个小题, 共 50 分, 要求步骤完整)

1. 用最小刻度 1Ω 、仪器误差 1Ω 的可估读惠斯登电桥测一电阻, 共测 10 次, 其测量值 $R_i = 242.3, 242.2, 242.3, 242.0, 242.1, 242.8, 242.4, 241.9, 242.7, 242.3$ (单位 Ω)。求电阻的测量结果 (仪器误差和估读误差视为均匀分布)。(15 分)

- 答: (1) 计算电阻 R 的平均值 \bar{R} (3 分)
- (2) 计算电阻 R 的 A 类不确定度 u_{A_R} (4 分)
- (3) 计算电阻 R 的 B 类不确定度 u_{B_R} (3 分)
- (4) 计算电阻 R 的合成不确定度 σ_R (3 分)
- (5) 写出测量结果表达式 (2 分)

2. 给一电阻加上 220V 电压 (电压用 1.0 级 500V 档测得, 忽略估读误差), 电阻发热, 热稳定后测得电阻值为 $(244.9 \pm 0.8)\Omega$, 求发热功率、不确定度和相对不确定度? (20 分)

- 答: (1) 求发热功率 $P = \frac{V^2}{R}$ (2 分)
- (2) 求电压表的仪器误差 Δ_V (2 分)
- (3) 求 Δ_V 的 B 类不确定度分量 u_{Δ_V} (2 分)
- (4) 求电压测量值的不确定度 σ_V (2 分)
- (5) 求功率的相对不确定度 (3 分)
- (6) 求功率的不确定度 σ_P (2 分)
- (7) 写出结果表达式 (2 分)

3. 用伏安法测电阻数据如下表, 绘出拟合直线如右图, 指出图中不合作图规则的地方, 并用最小二乘法求出电阻值 R 。(15 分)。

已知线性方程 $y = a + bx$ 的最小二乘法计算公式为 $a = \frac{\bar{x} \cdot \overline{xy} - \bar{y} \cdot \overline{x^2}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}$ 、 $b = \frac{\bar{x} \cdot \overline{y} - \overline{xy}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}$

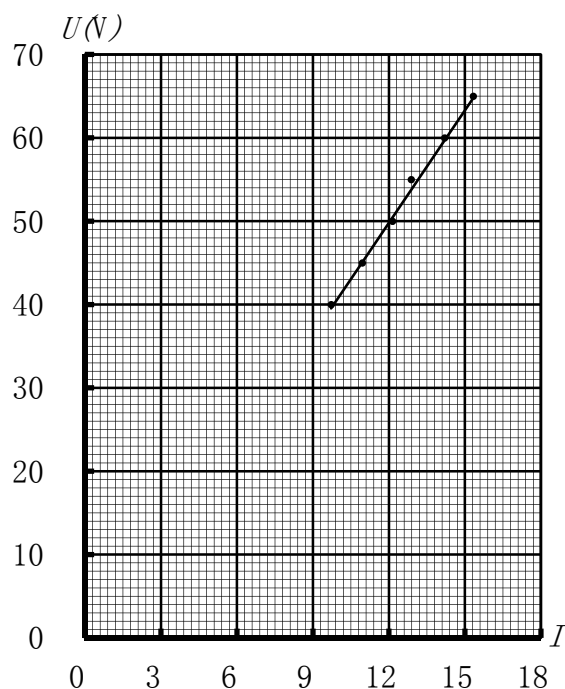
电压 U / V	40.00	45.00	50.00	55.00	60.00	65.00
电流 I / mA	9.72	10.95	12.14	12.88	14.20	15.33

答：(1) 图中不符合作图规则的地方有：（每个 1 分，共 6 分）

- (a) _____ (b) _____
 (c) _____ (d) _____
 (e) _____ (f) _____

(2) 用最小二乘法求电阻值 R （共 9 分）

- (a) 写出线性方程（2 分）
 (b) 分别求出 \bar{I} 、 \bar{V} 、 \bar{I}^2 、 \bar{IV} （共 4 分）
 (c) 求电阻值 R （3 分）



模拟试题 1 参考答案

一、填空题，每空 2 分，共 30 分

1. 仪器、环境、方法、人员。 2. 0.683(68.3%)；0.997(99.7%)。
 3. 5.0，9.35。 4. 不变。 5. 1.00。 6. -2mA。
 7. B。 8. 统计。 9. 中心（重心）。 10. 计算。

二、单选题，每题 2 分，共 20 分

1. (A) 2. (D) 3. (A) 4. (D) 5. (D) 6. (B) 7. (C) 8. (D) 9. (D) 10. (D)

三、应用题（3 个小题，共 50 分，要求步骤完整）

1. 答：(1) $\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \frac{1}{10} (242.3 + 242.2 + 242.3 + 242.0 + 242.1 + 242.8 + 242.4 + 241.9 + 242.7 + 242.3) = 242.30(\Omega)$ （3 分）

$$(2) u_{A_R} = \sqrt{\frac{\sum (R_i - \bar{R})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.0^2 + 0.1^2 + 0.0^2 + 0.3^2 + 0.2^2 + 0.5^2 + 0.1^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 0.0^2}{10(10-1)}} = 0.089(\Omega) \quad (4 \text{ 分})$$

- (3) 因为 $\Delta_{R_{\text{估}}} = \text{最小刻度}/5 = 1\Omega/5 = 0.2\Omega < 1/3(\Delta_{\text{电桥}}) = 1/3 \times 1\Omega$ ，所以略去 $\Delta_{R_{\text{估}}}$ ，

$$u_{B_R} = \frac{\Delta_{\text{电桥}}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.58(\Omega) \quad (3 \text{ 分}) \quad (\text{或 } 0.6\Omega)$$

$$(4) \sigma_R = \sqrt{u_{A_R}^2 + u_{B_R}^2} = \sqrt{0.089^2 + 0.58^2} = 0.58(\Omega) \quad (3 \text{ 分}) \quad (\text{或 } 0.6\Omega)$$

(5) $R = (242.30 \pm 0.58)\Omega$ (2 分) (或 $R = (242.3 \pm 0.6)\Omega$)

2. 答: (1) $P = \frac{V^2}{R} = \frac{220^2}{244.9} = 197.6(\text{W})$ (2 分) (或 198W)

(2) $\Delta_{V_{\text{仪}}} = \text{量程} \times \text{精度等级} = 500 \times 1.0\% = 5.0(\text{V})$ (2 分) (或 5V)

(3) 因忽略估读误差, 所以 $u_{B_V} = \frac{\Delta_{V_{\text{仪}}}}{\sqrt{3}} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 2.9(\text{V})$ (2 分) (或 3V)

(4) $\sigma_V = \sqrt{u_{A_V}^2 + u_{B_V}^2} = u_{B_V} = 2.9(\text{V})$ (2 分) (或 3V)

(5) $\frac{\sigma_P}{P} = \sqrt{\left(\frac{2\sigma_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2 \times 2.9}{220}\right)^2 + \left(\frac{0.8}{244.9}\right)^2} = 2.6\%$ (3 分) (或 3%)

(6) $\sigma_P = P \times \frac{\sigma_P}{P} = 197.6 \times 0.026 = 5.2(\text{W})$ (2 分) (或 5W) (或 6W)

(7) $P = (197.6 \pm 5.2)\text{W}$ 或 $P = (198 \pm 5)\text{W}$ 或 $P = (198 \pm 6)\text{W}$ (2 分)

3. 答: (1) 图中不合作图规则的地方有: (每个 1 分, 共 6 分)

- (a) 无标题, _____ (b) 坐标范围不合理, _____
 (c) 横坐标无单位, _____ (d) 横坐标不应该用 3 倍放大, _____
 (e) 标点不应该用小圆点, _____ (f) 数据点不应该在直线一旁。 _____

(2) (a) 线性方程为 $U = U_0 + R \cdot I$ (2 分)

(b) $\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i = \frac{1}{6} (9.72 + 10.95 + 12.14 + 12.88 + 14.20 + 15.33) = 12.536667(\text{mA})$ (1 分)

$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = \frac{1}{6} (40.00 + 45.00 + 50.00 + 55.00 + 60.00 + 65.00) = 52.5(\text{V})$ (1 分)

$\overline{I^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i^2 = \frac{1}{6} (9.72^2 + 10.95^2 + 12.14^2 + 12.88^2 + 14.20^2 + 15.33^2) = 160.7173(\text{mA})$ (1 分)

$\overline{IU} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i U_i = \frac{1}{6} (9.72 \times 40.00 + 10.95 \times 45.00 + 12.14 \times 50.00 + 12.88 \times 55.00 + 14.20 \times 60.00 + 15.33 \times 65.00) = 674.2333(\text{mW})$ (1 分)

(c) $R = \frac{\bar{I} \cdot \bar{U} - \overline{IU}}{\overline{I^2} - \bar{I}^2} = \frac{12.536667 \times 52.5 - 674.2333}{12.536667^2 - 160.7173} = 4.52(\text{k}\Omega)$ (3 分)

大学物理实验理论考试模拟试题 2

一、填空题，每空 2 分，共 40 分

1. 根据获得测量结果的不同方法，测量可分为_____测量和_____测量。
2. 误差的来源主要有_____、_____、_____、和_____。
3. 测得某物理量为 593.2nm，该量理论值为 589.3nm，则该测量的相对误差为_____%，修正值为_____。
4. 遵循有效数字的运算法则，计算 $10.0 \times 0.020 + 48.13 =$ _____， $10^2 / (114.3 - 14.2987) =$ _____。
5. 对某量进行多次等精度测量，用拉依达准则剔除坏值的依据是：误差大小超出_____的概率为 0.3%。
6. 用量程 1.5mA，刻有 75 小格的 1.0 级毫安表测电流，指针指在 25 小格上，则测量值为_____，仪器误差为_____，估读误差为_____。
7. 对某物理量进行多次等精度测量，其精密度反映_____误差的大小。
8. 对同一物理量进行多次测量，测量次数越多，_____不确定度越小。
9. 电阻测量值的平均值为 5.81447 K Ω ，不确定度为 0.06 K Ω ，则测量结果应表示为_____。
10. 测量结果表达式 $N = \bar{N} \pm \sigma$ (单位) 表示的物理意义是：_____。
11. 校正曲线中相邻实验点之间用_____连接，因此校正曲线是_____图。

二、单选题，每题 2 分，共 20 分

1. 单次测量中具有 ()
A. A 类不确定度 B. 最小误差 C. A 类和 B 类不确定度 D. B 类不确定度
2. 关于有效数字的说法，正确的是：()。
A. 有效数字的最后一位一定是误差所在位。D. “0” 在数字末尾时不算作有效数字。
B. 有效数字位数的多少只与仪器的准确度有关。C. 单位换算会影响有效数字位数。
3. 下列测量结果中，测量准确度最低的是 ()。
A. (154.98 \pm 0.02)mm B. (5.498 \pm 0.002)mm C. (1.5498 \pm 0.0002)mm
D. (2.214 \pm 0.001)mm
4. 对于作图法，下列说法正确的是：()。
A. 作图时不宜选用三、六、七等小格对应可靠数字的最后一位。
B. 作图时纵坐标和横坐标的比例一定要相同。
C. 坐标原点要与变量的零点一致。
D. 连线的时候一定要使所有的数据点都落在曲线上。
5. 下述测量长度的读数中，可能是用 50 分度游标卡尺读出的是 ()；可能是用千分尺读出的是 ()。

A. 3.02mm B. 2.25mm C. 3.657mm D. 2.75mm

6. 下列测量结果正确的表达式是 ()。

A. $R=(5.21\pm0.007)\Omega$ B. $\lambda=(654\pm100)\text{nm}$ C. $L=(15.2\pm0.61)\text{cm}$
D. $Y=(1.89\pm0.03)\times10^{11}\text{Pa}$

7. 对于间接测量 $N = \frac{x-y}{x+y}$, 正确的不确定度传递关系是 ()

A. $\sigma_N = \frac{2}{(x+y)^2} \sqrt{x^2\sigma_x^2 + y^2\sigma_y^2}$ B. $\sigma_N = \frac{1}{(x+y)^2} \sqrt{x^2\sigma_x^2 + y^2\sigma_y^2}$
C. $\sigma_N = \frac{2}{(x+y)^2} \sqrt{x^2\sigma_y^2 + y^2\sigma_x^2}$ D. $\sigma_N = \frac{1}{(x+y)^2} \sqrt{x^2\sigma_y^2 + y^2\sigma_x^2}$

8. 下列说法正确的是: ()。

A. 仪器误差是 A 类不确定度。 B. 仪器误差等于 B 类不确定度。
C. 估读误差是 A 类不确定度的分量之一。 D. 数显仪器一般不存在估读误差。

9. 测量约 1.5 伏特的电压时要求其结果的相对误差小于 1.5%, 如果不考虑估读误差, 应选用下列哪种规格的伏特表? ()

A. 0.5 级, 量程 5 伏; B. 1.0 级, 量程 3 伏;
C. 2.5 级, 量程 1.5 伏; D. 0.5 级, 量程 3 伏。

三、应用题 (2 个小题, 共 40 分, 要求计算步骤完整)

1. 用 50 分度游标卡尺测某物理量 L (单位: mm), 数据如下:

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_i / mm	142.32	142.70	141.94	142.46	142.88	142.14	142.04	141.82	142.28	142.36

求物理量 L 的测量结果 (仪器误差视为均匀分布)。(16 分)

答: (1) 计算物理量 L 的平均值 \bar{L} (4 分)
(2) 计算 L 的 A 类不确定度 $u_{A\bar{L}}$ (4 分)
(3) 计算 L 的 B 类不确定度 $u_{B\bar{L}}$ (3 分)
(4) 计算 L 的合成不确定度 $\sigma_{\bar{L}}$ (3 分)
(5) 写出 L 的结果表达式 (2 分)

2. 通过测周期 T 和摆长 l 来测定重力加速度 g 的公式是 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 。现在用最小分度是 0.01s 的电子秒表测量周期 T 五次, 其数据为 2.001, 2.004, 1.997, 1.998, 2.000 (单位为 s); 用仪器误差为 $\Delta_{\text{卷尺}} = (0.2 \cdot L + 0.3) \text{ mm}$ (式中 L 是测量长度, 单位为米) 的钢卷尺测得摆长一次, $l = 100.00 \text{ cm}$ 。试求重力加速度 g 及合成不确定度 $\sigma_{\bar{g}}$, 并写出结果表达式。(24 分)

答: (1) 求周期 T 的平均值 \bar{T} (2 分)
(2) 求重力加速度 g 的平均值 \bar{g} (2 分)
(3) 求摆长 l 的不确定度 σ_l (2 分)

- (4) 求周期 T 的 A 类不确定度 u_{A_T} (3 分)
- (5) 求周期 T 的 B 类不确定度 u_{B_T} (2 分)
- (6) 求周期 T 的合成不确定度 $\sigma_{\bar{T}}$ (3 分)
- (7) 求重力加速度 g 的相对不确定度 $\frac{\sigma_{\bar{g}}}{g}$ (4 分)
- (8) 求重力加速度 g 的合成不确定度 $\sigma_{\bar{g}}$ (3 分)
- (9) 写出重力加速度的结果表达式。(3 分)

模拟试题 2 参考答案

一、填空题，每空 2 分，共 40 分

- 1、直接，间接 2、仪器（或设备）误差，方法误差，环境误差，人为误差
- 3、0.66 (0.67 或 0.7)，-3.9nm 4、48.33，1.0 5、3s
- 6、0.50mA，0.015mA 0.004mA 7、偶然 8、统计(或 A 类)
- 9、5.81±0.06 (KΩ) 11、直线（线段），折线
- 10、真值（或测量值、结果）落在 $(\bar{N}-\sigma) \sim (\bar{N}+\sigma)$ 范围内的概率是 0.683（或 68.3%）

二、单选题，每题 2 分，共 20 分

- 1, **D** 2, **A** 3, **D** 4, **A** 5, **A C** 6, **D** 7, **C** 8, **D** 9, **D**

三、应用题（2 个小题，共 40 分，要求计算步骤完整）

1. (1) 物理量 L 的平均值 \bar{L} (4 分): $\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i = \frac{1}{10} (142.32 + 142.36) = 142.294 \text{ mm}$

(2) L 的 A 类不确定度 u_{A_L} (4 分):

$$u_{A_L} = \sqrt{\frac{\sum (L_i - \bar{L})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.026^2 + 0.066^2}{10(10-1)}} = 0.1 \text{ mm} (0.10 \text{ mm}, 0.104 \text{ mm})$$

(3) L 的 B 类不确定度 u_{B_L} (3 分): $u_{B_L} = \frac{\Delta_{\text{卡尺}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.01 \text{ mm} (0.012 \text{ mm}, 0.0115 \text{ mm})$

(4) L 的合成不确定度 $\sigma_{\bar{L}}$ (3 分): $\sigma_{\bar{L}} = \sqrt{u_{A_L}^2 + u_{B_L}^2} = \sqrt{0.1^2 + 0.01^2} = 0.1 (0.10 \text{ mm})$

(5) L 的结果表达式 (2 分): $L = \bar{L} \pm \sigma_{\bar{L}} = 142.29 \pm 0.10 (\text{mm}) = 142.3 \pm 0.1 (\text{mm})$

2. (1) 周期 T 的平均值 \bar{T} : $\bar{T} = \frac{2.001 + 2.004 + 1.997 + 1.998 + 2.000}{5} = 2.000 (\text{s}) (2.0000 \text{ s})$

(2) 重力加速度 g 的平均值 \bar{g} (2 分): $\bar{g} = \frac{4\pi^2 l}{\bar{T}^2} = \frac{4 \times 3.142^2 \times 1.0000}{2.000^2} = 9.872 (\text{m/s}^2)$

(3) 摆长 l 的不确定度 σ_l (2 分): $\Delta_{\text{卷尺}} = (0.2 \cdot L + 0.3) \text{ mm} = (0.2 \cdot 1 + 0.3) \text{ mm} = 0.5 \text{ mm}$,
估读误差 $\Delta_{\text{估}} = \text{卷尺的最小刻度} / 5 = 1 / 5 = 0.2 \text{ mm}$, 所以

$$\sigma_l = \sqrt{u_{B_{\Delta_{\text{卷尺}}}}^2 + u_{B_{\Delta_{\text{估}}}}^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{卷尺}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\text{估}}}{\sqrt{3}}\right)^2} = \sqrt{\frac{\Delta_{\text{卷尺}}^2 + \Delta_{\text{估}}^2}{3}} = \sqrt{\frac{0.5^2 + 0.2^2}{3}} = 0.3\text{mm} (0.31\text{mm}, 0.289\text{mm})$$

(4), 周期 T 的 A 类不确定度 $u_{A_{\bar{T}}}$ (3 分):

$$u_{A_{\bar{T}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (T_i - \bar{T})^2}{5 \times (5-1)}} = \sqrt{\frac{0.001^2 + 0.004^2 + 0.003^2 + 0.002^2 + 0.000^2}{20}} = 0.001(\text{s})(0.0012\text{s})$$

(5), 周期 T 的 B 类不确定度 $u_{B_{\bar{T}}}$ (2 分): $u_{B_{\bar{T}}} = \frac{\Delta_{\text{秒表}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.006 \text{ s} (0.0058 \text{ s})$

(6), 周期 T 的合成不确定度 $\sigma_{\bar{T}}$ (3 分):

$$\sigma_{\bar{T}} = \sqrt{u_{A_{\bar{T}}}^2 + u_{B_{\bar{T}}}^2} = \sqrt{0.0012^2 + 0.0058^2} = 0.0058\text{s} (0.006\text{s})$$

(7), 重力加速度 g 的相对不确定度 $\frac{\sigma_{\bar{g}}}{g}$ (4 分):

$$\frac{\sigma_{\bar{g}}}{g} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_l}{l}\right)^2 + \left(2 \frac{\sigma_T}{T}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.289}{1000.0}\right)^2 + \left(2 \times \frac{0.006(\text{或}0.0058)}{2.000}\right)^2} = 0.006(\text{或}0.0058)$$

(8), 重力加速度 g 的合成不确定度 $\sigma_{\bar{g}}$ (3 分):

$$\sigma_g = g \cdot \left(\frac{\sigma_g}{g}\right) = 9.872 \times 0.006(\text{或}0.0058) = 0.059\text{m/s}^2 (\text{或}0.06\text{m/s}^2)$$

(9), 写出重力加速度的结果表达式。(3 分): $g = (9.872 \pm 0.059)\text{m/s}^2$
或 $(9.87 \pm 0.06)\text{m/s}^2$

大学物理实验理论考试模拟试题 3

一、填空题，每空 2 分，共 40 分

1. 测量的四要素为_____、_____、_____和_____。
2. 某测量值为 $1.72 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，理论值为 $1.64 \times 10^{11} \text{Pa}$ ，则测量的相对误差为_____。
3. 遵循有效数字的运算法则，计算 $100 \div 0.0200 = \underline{\hspace{1cm}} \times 10^3$ ， $10.0 \times 0.02 + 48.13 = \underline{\hspace{1cm}}$ 。
4. 温度的测量值为 23.45°C ，已知绝对误差为 0.06°C ，则修正值为_____，测量结果为_____。
5. 0.5 级毫安表 100mA 档的仪器误差为_____，如果不考虑估读误差，指针刚好指在满度的四分之一时测量值为_____。
6. 测量数据重复性好，说明测量中所用仪器的_____高。
7. 用仪器误差为 0.02mm 的游标卡尺测量长度，则测量值的 B 类不确定度为_____mm。
8. 凡是可以通过_____方法来计算的不确定度称为 A 类不确定度。
9. 作图时，在纵横坐标上应标出_____、_____和_____。
10. 电阻测量值的平均值为 $5.687 \text{K}\Omega$ ，不确定度为 $0.07 \text{K}\Omega$ ，则测量结果应表示为_____。
11. 金属丝的长度为 1000mm，如要保留两位有效数字，则应表示为_____mm。
12. 测得单摆 100 个周期的时间 t 求周期 T ，已知 t 的仪器误差为 0.5s，不存在估读误差，则 T 的 B 类不确定度为_____。

二、单选题，每题 2 分，共 20 分

1. 10.20 厘米的有效数字的位数为（ ）。
A. 4 位 B. 3 位 C. 2 位 D. 5 位
2. 以下关于估读误差的说法正确的是（ ）。
A. 估读误差是仪器误差的一部分 B. 任何情况下估读误差都是最小刻度的 1/5
C. 有些测量不存在估读误差 D. 估读误差可以修正
3. 角度测量值用于复杂的不确定度传递时，应选用以下那种表达式？（ ）
A. $(59.67 \pm 0.02)^\circ$ B. $(1.0467 \pm 0.0004) \text{rad}$
C. $60.02^\circ \pm 0.05^\circ$ D. 以上三种表达式都对
4. 已知圆的半径 $R=50.23 \text{cm}$ ，间接测量圆的周长时， π 取（ ）最合适。
A. 3.14 B. 3.14156 C. 3.1416 D. 3.1
5. 下列测量结果中，测量准确度最高的是（ ）
A. $(12.45 \pm 0.06) \text{mm}$ B. $(8.67 \pm 0.06) \text{mm}$
C. $(65.23 \pm 0.06) \text{mm}$ D. $(562.78 \pm 0.06) \text{mm}$
6. 球的面积 $= 4\pi R^2$ ，如 $R=100 \text{mm}$ ，则该球的面积为（ ）
A. $1.26 \times 10^5 \text{mm}^2$ B. 12.56×10^4 C. $12.6 \times 10^4 \text{m}^2$ D. 12.568mm^2

7. 单次测量中必然具有 ()
- A. A 类不确定度 B. 最小误差 C. A 类和 B 类不确定度 D. B 类不确定度
8. 下列测量结果正确的表达式是 ()
- A. $T=(12.5\pm0.07)\text{s}$ B. $Y=(1.6\pm0.2)\times10^{11}\text{Pa}$
- C. $V=23.68\pm0.09$ D. $I=(6.563\pm0.08)\text{mA}$
9. 对于间接测量 $N = \frac{8LDF}{\pi d^2 b n}$, 正确的不确定度传递关系是 ()
- A. $\sigma_N = \sqrt{\frac{\sigma_D^2}{D^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2} + \frac{\sigma_F^2}{F^2} + \frac{\sigma_L^2}{L^2} + \frac{\sigma_n^2}{n^2} + \frac{\sigma_b^2}{b^2}}$
- B. $\sigma_N = \sqrt{\frac{\sigma_D^2}{D^2} + \frac{4\sigma_d^2}{d^2} + \frac{\sigma_F^2}{F^2} + \frac{\sigma_L^2}{L^2} + \frac{\sigma_n^2}{n^2} + \frac{\sigma_b^2}{b^2}}$
- C. $\sigma_N = N \cdot \sqrt{\frac{\sigma_D^2}{D^2} + \frac{\sigma_d^2}{d^2} + \frac{\sigma_F^2}{F^2} + \frac{\sigma_L^2}{L^2} + \frac{\sigma_n^2}{n^2} + \frac{\sigma_b^2}{b^2}}$
- D. $\sigma_N = N \cdot \sqrt{\frac{\sigma_D^2}{D^2} + \frac{4\sigma_d^2}{d^2} + \frac{\sigma_F^2}{F^2} + \frac{\sigma_L^2}{L^2} + \frac{\sigma_n^2}{n^2} + \frac{\sigma_b^2}{b^2}}$
10. 对于间接测量 $Z = Y^3 - X^2$, 正确的不确定度传递关系是 ()
- A. $\sigma_Z = 3Y^2\sigma_Y - \sigma_X$ B. $\sigma_Z = 3Y^2\sigma_Y + 2X\sigma_X$
- C. $\sigma_Z = \sqrt{9Y^4\sigma_X^2 + 4X^2\sigma_Y^2}$ D. 以上三种表示都不对

三、应用题 (3 个小题, 共 40 分, 要求计算步骤完整)

1. 用螺旋测微计测量金属丝的直径 (仪器的最小分度值为 0.01mm, 仪器误差为 0.01mm 零差为 0.003mm), 共测量 9 次, 其测量值 $D=0.789, 0.756, 0.767, 0.782, 0.786, 0.765, 0.775, 0.761, 0.788$ (单位: mm)。求直径的测量结果 (仪器误差视为均匀分布)。(15 分)

答: (1) 计算金属丝直径 D 的平均值 \bar{D} 。(3 分)

(2) 计算 A 类不确定度 $u_{A_{\bar{D}}}$ 。(4 分)

(3) 计算 B 类不确定度 $u_{B_{\bar{D}}}$ 。(3 分)

(4) 计算合成不确定度 $\sigma_{\bar{D}}$ 。(3 分)

(5) 写出结果表达式 (2 分)

2. 通过测定直径 D 以及高 h , 求圆柱体的体积 V ($V=\pi D^2 h / 4$)。用游标卡尺测量高 $h=32.24\text{mm}$ (只测一次, 卡尺的仪器误差为 0.02mm), 用螺旋测微计测量直径, 多次测量后计算出 $\bar{D}=12.342\text{mm}$, D 的 A 类不确定度为 0.006mm, 螺旋测微计的仪器误差为 0.01mm, 不考虑螺旋测微计的估读误差, 求圆柱体的体积以及体积的不确定度和相对不确定度? (19 分)

答: (1) 求圆柱体的体积 (2 分)

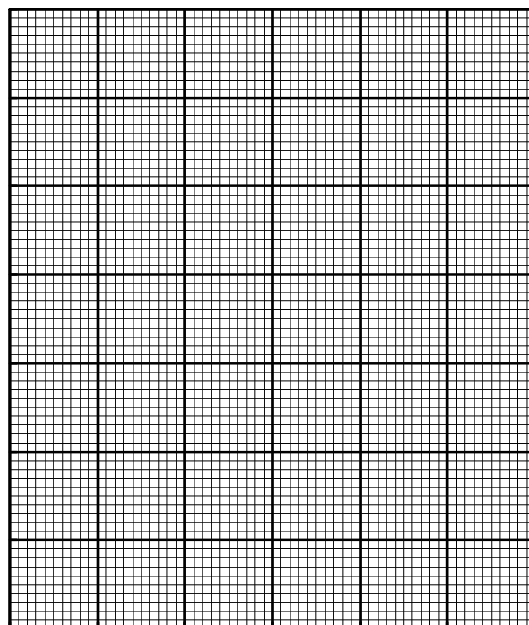
(2) 求高 h 的 B 类不确定度及合成不确定度 (2 分)

(3) 求直径 D 的 B 类不确定度 (2 分)

- (4) 求直径 D 的合成不确定度 (3 分)
 (5) 求体积 V 的相对不确定度 (4 分)
 (6) 求体积 V 的合成不确定度 (3 分)
 (7) 写出体积 V 的结果表达式 (3 分)

3. 下表是一只热电偶的温度与电动势的对应值, 请按规范的作图法, 在右边的坐标纸中画出热电偶的电动势随温度变化的拟合直线。(6 分)

温度 $t / ^\circ\text{C}$	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0
电动势 E / mV	0.772	0.981	1.165	1.375	1.792	1.964



模拟试题 3 参考答案

一、填空题 (每空 2 分, 共 40 分)

1. 测量对象、测量单位、测量方法、测量准确度。
2. 4.9% (或 5%)。
3. 5.00 , 48.3。
4. -0.06°C , 23.39°C 。
5. 0.5 mA , 25.0mA。
6. 精密度。
7. 0.01 (或 0.011、0.012)。
8. 统计。
9. 物理量 (符号)、单位 和 分度值。
10. $(5.69 \pm 0.07) \text{ K}\Omega$ 。
11. 10×10^2 (或 1.0×10^3)。
12. 0.0029s (或 0.003s)。

二、单选题, (每题 2 分, 共 20 分)

1. A 2. C 3. B 4. C 5. D 6. A 7. D 8. B 9. D 10. C

三、应用题 (3 个小题, 共 40 分)

1. 答: (1) 计算金属丝直径 D 的平均值 \bar{D} (3 分)

减去零差后的直径值 $D_i = 0.786, 0.753, 0.764, 0.779, 0.783, 0.762, 0.772, 0.758, 0.785 (\text{mm})$ (1 分)

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{n} = \frac{0.786+0.753+0.764+0.779+0.783+0.762+0.772+0.758+0.785}{9} = 0.7713(\text{mm}) \text{ 或 } 0.771(\text{mm}) \quad (2 \text{ 分})$$

- (2) 计算 A 类不确定度 $u_{A_{\bar{D}}}$ (4 分)

$$u_{A_{\bar{D}}} = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{0.015^2 + 0.018^2 + 0.007^2 + 0.008^2 + 0.012^2 + 0.009^2 + 0.001^2 + 0.013^2 + 0.014^2}{9 \times 8}} \\ = \sqrt{0.001253/72} = 0.0042(\text{mm}) \text{ 或 } 0.004(\text{mm})$$

- (3) 计算 B 类不确定度 $u_{B_{\bar{D}}}$: (3 分)

$$\text{因为 } \Delta_{D_{\text{估}}} = 0.2 \times \text{最小刻度} = 0.2 \times 0.01 = 0.002(\text{mm}) < \frac{\Delta_{\text{螺}}}{3} = \frac{0.01}{3} = 0.0033(\text{mm}),$$

$$\text{所以 } u_{B_{\bar{D}}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{\text{螺}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{D_{\text{估}}}}{\sqrt{3}}\right)^2} \approx \frac{\Delta_{\text{螺}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.0058 \text{ (mm)} \text{ 或 } 0.006 \text{ (mm)}$$

(4) 计算合成不确定度 $\sigma_{\bar{D}}$ (3 分)

$$\sigma_{\bar{D}} = \sqrt{u_{A_{\bar{D}}}^2 + u_{B_{\bar{D}}}^2} = \sqrt{0.0042^2 + 0.0058^2} = 0.0072 \text{ (mm)} \text{ 或 } 0.007 \text{ (mm)}$$

(5) 写出结果表达式 (2 分)

$$D = (0.7713 \pm 0.0072) \text{ mm} \text{ 或 } D = (0.771 \pm 0.007) \text{ mm}$$

2. 答: (1) 求圆柱体的体积 (2 分)

$$V = \pi D^2 h / 4$$

(注: π 应取 3.142 或 3.1416, 取 3.14 扣 1 分)

$$= 3857.1 \text{ (mm}^3\text{)} \text{ 或 } 3857 \text{ (mm}^3\text{)}$$

(2) 求高 h 的 B 类不确定度和合成不确定度 (2 分)

因为是单次测量, 且游标卡尺是非连续读数仪器, 不存在估度误差, 所以

$$\sigma_h = u_{B_h} = \frac{\Delta_{\text{卡}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.02}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ (mm)} \text{ 或 } 0.01 \text{ (mm)}$$

(3) 求直径 D 的 B 类不确定度 (2 分)

测量 D 因不考虑螺旋测微计的估读误差, 所以

$$u_{B_{\bar{D}}} = \frac{\Delta_{\text{螺}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.0058 \text{ (mm)} \text{ 或 } 0.006 \text{ (mm)}$$

(4) 求直径 D 的合成不确定度 (3 分)

$$\sigma_{\bar{D}} = \sqrt{u_{A_{\bar{D}}}^2 + u_{B_{\bar{D}}}^2} = \sqrt{0.006^2 + 0.0058^2} = 0.0083 \text{ (mm)} \text{ 或 } 0.008 \text{ (mm)}$$

(5) 求体积 V 的相对不确定度 (4 分)

$$\frac{\sigma_V}{V} = \sqrt{\left(\frac{2\sigma_{\bar{D}}}{\bar{D}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_h}{h}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{2 \times 0.0083}{12.342}\right)^2 + \left(\frac{0.012}{32.24}\right)^2} = 0.14\% \text{ 或 } 0.1\%$$

(6) 求体积 V 的合成不确定度 (3 分)

$$\sigma_V = V \cdot \frac{\sigma_V}{V} = 3857.1 \times 0.14\%$$

$$= 5.4 \text{ (mm}^3\text{)} \text{ 或 } 5 \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$\text{或 } 4 \text{ (mm}^3\text{)}$$

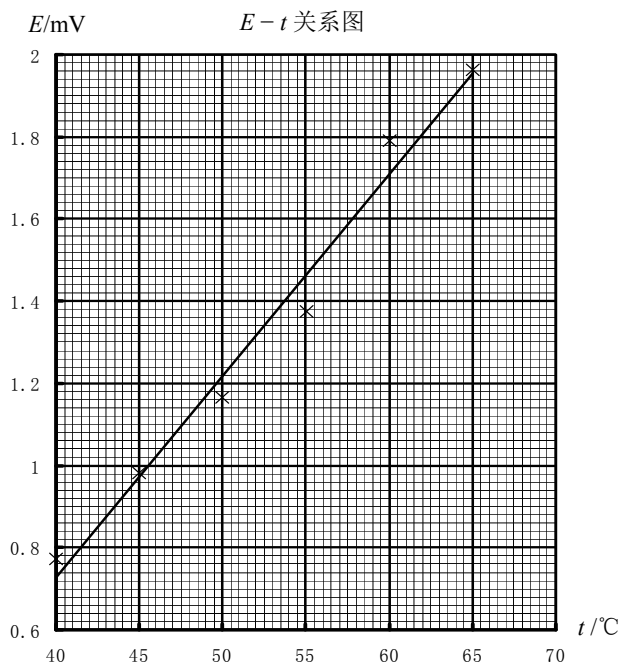
(7) 写出体积的结果表达式 (3 分)

$$V = (3857.1 \pm 5.4) \text{ mm}^3$$

$$\text{或 } V = (3857 \pm 5) \text{ mm}^3$$

$$\text{或 } V = (3857 \pm 4) \text{ mm}^3$$

3. 答: 见右图。



第四章 物理实验

实验 I-1. 用拉伸法测金属丝的杨氏模量

【安全操作须知】

- (一) 不使用光杠杆时, 应将其放在桌子上, 以防摔落损坏!
- (二) 不得用力拧螺旋测微计的鼓轮, 以免损坏仪器! 正确方法是: 将螺旋测微计旋紧时应该旋转其尾部(右侧)小手轮, 直至听到“咔咔”声后即可读数。
- (三) 在望远镜物镜调焦时, 不得用力旋转, 否则会损坏望远镜! 如果旋转有阻力, 表示调焦旋钮已旋到尽头, 只能反向调节。
- (四) 实验完成后, 关闭电源, 整理仪器。凳子归位, 与实验无关的杂物请带离实验室, 保持室内清洁卫生。

【实验原理】

详见教材:《结构化大学物理实验》(第二版) 实验 3.9 (参考页码 P.132-134)。

【实验目的】

- (一) 熟练掌握直尺、游标卡尺、螺旋测微计的使用方法;
- (二) 学习用拉伸法测试金属丝的杨氏模量;
- (三) 学习光杠杆放大法测量微小长度。

【实验内容】

测量金属丝的杨氏模量。

【实验器材】

拉伸法杨氏模量实验仪, 直尺、游标卡尺、螺旋测微计, 白炽台灯

【实验步骤及操作】

(一) 测量前的调整

1. 在杨氏模量仪的挂钩上先预置 2.00kg 砝码, 让其拉直金属丝。
2. 通过底座螺钉的调节使平台保持水平(避免圆柱体与平台孔壁相碰而出现的摩擦)。
3. 调整平台高低位置, 让平台面与圆柱体的上柱面在一个水平面上。
4. 把光杠杆放在平台上, 让其前面的两足在平台的槽内, 后足在与金属丝连接的圆柱体的上平面上, 不要把后足放在圆柱体上柱面的孔中或圆柱体与平台孔壁的缝隙中, 调节光杠杆镜面仰角, 使镜面竖直。

(二) 用望远镜找通过光杠杆镜面反射的标尺的像

1. 升降望远镜的高度, 通过目测, 使望远镜镜筒的高度与光杠杆的反光镜面基本等高。
2. 将望远镜旁的标尺调到竖直, 目测其零刻度线近似与望远镜光轴等高, 用台灯照亮标尺。
3. 自己目测指挥, 请同学帮忙调节光杠杆反光镜的仰角, 使得望远镜与反光镜中望远镜的像等高。

4. 调节望远镜仰角和水平偏向角。对于老式望远镜，使眼睛视线通过望远镜上的“缺口”顶部中心和“准星”的锥形底部平台中心瞄准时，正好对准光杠杆的反光镜顶部中心，如图 2-1 (a) 所示。对于新式望远镜，使眼睛视线通过望远镜上的“瞄准圆孔”中心和“准星”的顶端平台中心瞄准时，正好对准光杠杆的反光镜圆心，如图 2-1 (b) 所示。

5. 保持以上瞄准状态，将望远镜左右整体平移，直到标尺的像正好也落在反射镜的中间，形成眼睛、缺口、准星、反射镜、标尺像“五点一线”。

6. 调节望远镜目镜焦距到叉丝最清晰，旋转目镜镜筒到叉丝其中的一条完全水平。

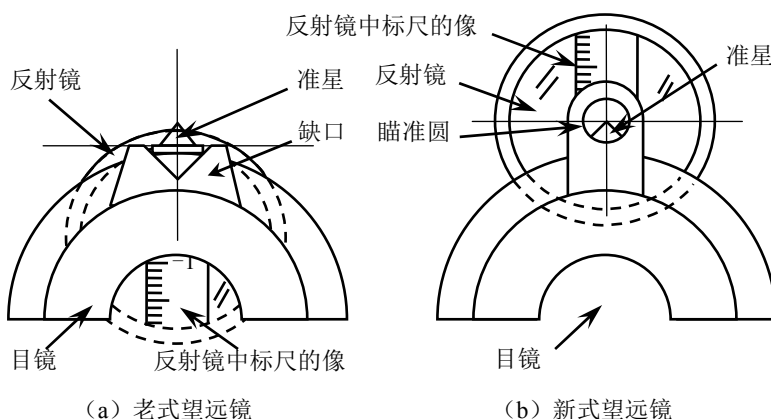


图 2-1 望远镜瞄准示意图

7. 改变望远镜物镜焦距，直至看清楚镜子的边框，微调调节望远镜仰角、水平偏向角，使镜子的中心与望远镜视场的中心重合。继续改变望远镜物镜焦距直至看到清晰的标尺像。如果标尺的“0”刻度偏离视场中心较远，需要对前面几步进行反复细致的调节。

8. 如确认已对准等高仍看不到像，需要冷静思考，认真核对前面几步是否准确完成。

(三) 测量

1. 如果叉丝横线与标尺像的“0”刻度线很近，可通过望远镜的俯仰角使其对准；如果不是很近，没必要对准“0”刻度，只要把读数记录下来即可。

2. 在挂钩上加重量为 1.00kg 的砝码(加减砝码一定要轻拿轻放，尽量不引起冲击和摇摆)，每加一个 1.00kg 砝码，通过望远镜的目镜读一次叉丝对准标尺的刻度(注意，要在砝码基本不摆动时读数)，直到 9.00kg；记录完标尺的刻度后，再增加 1.00kg 砝码到 10.00kg，不用记录刻度，再取下这个砝码，记录 9.00kg 砝码的刻度(为什么?)，然后每减一个砝码读一次标尺刻度，直到剩下起始的 2.00kg 砝码，读出最后一个标尺刻度。

3. 请同学帮忙用钢卷尺测量镜尺距离 D ，同学牵到尺的刻度面，自己判断镜面位置并读数。(D 和 L 的测量误差是否就是钢卷尺的仪器误差？估读误差为多少较合适？)

4. 将光杠杆从平台上取下，将光杠杆的三尖足压在铺平的实验报告纸 3-4 页中部空白处，压出三尖的位置痕迹，用三角板、0.5mm 铅笔绘出前两足连线和后足到前两足连线的垂线，用游标卡尺测量垂线长度为光杠杆臂长 b 。(本测量为何不直接测？测量误差能否达到游标卡尺的仪器误差？) 测量后不带磁性的光杠杆必须放在桌的中间，以免跌落损坏。

5. 用米尺测量金属丝原长 L 。注意原长是上夹紧区的下部到光杠杆平台夹紧区的上部之间的长度，每台仪器各不相同，要认真观察，切不可一概认为是裸露部分金属丝的长度。

6. 用螺旋测微计测量金属丝的直径 d (在上、中、下三个部位不同的方向测 9 次)。记住：螺旋测微计不能直接拧紧读数，要记录下螺旋测微计的“零差”，测量后必须旋松后保存。

(四) 注意事项

1. 调平台水平时，以不发生摩擦（即圆柱体不与平台壁接触）为好，不一定要完全水平。
2. 在测量 Δn 的过程中，一定要让挂钩上的砝码静止下来才读数，否则误差较大。

【实验数据及分析】

(一) 测量 Δn 数据记录表 仪器误差 $\Delta_{\text{米尺}} = 0.15\text{mm}$ 、估读误差 $\Delta_{\Delta n\text{估}} = \text{mm}$

砝码总质量 M/Kg	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00	8.00	9.00
增加砝码标尺读数 n'_i/mm								
减少砝码标尺读数 n''_i/mm								
平均标尺读数 n_i/mm $n_i = \frac{1}{2}(n'_i + n''_i)$								

(二) 其他直接测量数据记录表

$g_{\text{本地}} = 9.79\text{m/s}^2$ (成都) 单位: mm

直径 d_i	零差		仪器误差 $\Delta_{\text{螺}}$				0.004	估读误差 $\Delta_{d\text{估}}$		
	测量次数 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	读数值 d_i'									
	$d_i = d_i' - \text{零差}$									
钢卷尺的仪器误差 $\Delta_{\text{卷尺}} = (0.2 \times \text{测量值}/1000 + 0.3)$							光杠杆长度测量			
测量 D 的原始读数			测量 L 的原始读数				臂长 b 卡尺原始读数			
仪器误差 $\Delta_{D\text{卷尺}}$			仪器误差 $\Delta_{L\text{卷尺}}$				仪器误差 $\Delta_{b\text{卡尺}}$			
估读误差 $\Delta_{D\text{估}}$		5	估读误差 $\Delta_{L\text{估}}$			2	估读误差 $\Delta_{b\text{估}}$			0.2
镜尺距离 D 测量值 (有效数字)			金属丝原长 L 测量值 (有效数字)				臂长 b 测量值 (有效数字)			

(二) 数据处理: (以下内容时预习不写, 仅供参考, 必须有详细的带入计算过程)

1. 分别计算 $(n_7 - n_3)$ 、 $(n_6 - n_2)$ 、 $(n_5 - n_1)$ 、 $(n_4 - n_0)$, 判断 $n - F$ 是否线性关系。

2. 合理选择两组数据，计算：
$$\frac{\Delta F}{\Delta n} = \frac{(M_j - M_i) \cdot g_{\text{本地}}}{n_j - n_i}$$

4. 计算 \bar{d} ：
$$\bar{d} = \frac{1}{9}(d_1 + d_2 + \Lambda + d_9)$$

5. 计算杨氏模量 \bar{Y} ：
$$\bar{Y} = \frac{8LD}{\pi \bar{d}^2 b} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta n}$$

6. 计算 Y 的不确定度。对于直接测量 L 、 D 、 b ，因为是单次测量，不考虑 A 类不确定度，且仪器误差都小于估读误差的 1/3，所以：

$$\sigma_L = \sqrt{u_{A_L}^2 + u_{\Delta_{\text{卷尺}}}^2 + u_{\Delta_{L\text{估}}}^2} \approx u_{\Delta_{L\text{估}}} = \frac{\Delta_{L\text{估}}}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma_D = \sqrt{u_{A_D}^2 + u_{\Delta_{\text{卷尺}}}^2 + u_{\Delta_{D\text{估}}}^2} \approx u_{\Delta_{D\text{估}}} = \frac{\Delta_{D\text{估}}}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma_b = \sqrt{u_{A_b}^2 + u_{\Delta_{\text{卡尺}}}^2 + u_{\Delta_{b\text{估}}}^2} \approx u_{\Delta_{b\text{估}}} = \frac{\Delta_{b\text{估}}}{\sqrt{3}}$$

对于直接测量 d ：
$$u_{A_d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (d_i - \bar{d})^2}{9(9-1)}}$$

$$u_{\Delta_{\text{螺}}} = \frac{\Delta_{\text{螺}}}{\sqrt{3}}$$

$$u_{\Delta_{d\text{估}}} = \frac{\Delta_{d\text{估}}}{\sqrt{3}}$$

$$\sigma_d = \sqrt{u_{A_d}^2 + u_{\Delta_{\text{螺}}}^2 + u_{\Delta_{d\text{估}}}^2} \approx \sqrt{u_{A_d}^2 + u_{\Delta_{\text{螺}}}^2}$$

Δn 可以当作单次直接测量（因读数始终轻微晃动，估读误差 $\Delta_{\Delta n\text{估}}$ 取经验值 1mm）：

$$\sigma_{\Delta n} = \sqrt{u_{A_{\Delta n}}^2 + 2u_{\Delta_{\text{米尺}}}^2 + 2u_{\Delta_{\Delta n\text{估}}}^2} \approx \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \Delta_{\Delta n\text{估}}$$

根据实验条件， $\frac{\sigma_{\Delta F}}{\Delta F} \ll \frac{\sigma_{\Delta n}}{\Delta n}$ ，可以忽略 $\frac{\sigma_{\Delta F}}{\Delta F}$ ，所以：

$$\sigma_Y = \bar{Y} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta n}}{\Delta n}\right)^2}$$

6. 结果表达式：
$$Y = (\bar{Y} \pm \sigma_Y) N \cdot m^{-2}$$

【选作 1】：用作图法或者求相关系数判断 $n-F$ 是否线性关系。

【选作 2】：合理选择 5 组数据，用最小二乘法计算 $\frac{\Delta F}{\Delta n}$ 。（6 个步骤写全）

【选作 3】：用最小二乘法计算 $\sigma_{\Delta F/\Delta n}$ 。（估读误差 $\Delta_{\Delta n\text{估}}$ 为 0.2mm，步骤要写全）

【选作 4】：用最小二乘法计算 $\sigma_{\Delta F/\Delta n}$ 时，上式中 $\frac{\sigma_{\Delta n}}{\Delta n}$ 替换为 $\frac{\sigma_{\Delta F/\Delta n}}{\Delta F/\Delta n}$ 。

实验 I-2. 示波器的使用

【安全操作须知】

- (一) 不要擅自调换示波器和信号源。
- (二) Q9 插头线必须捏住金属部分旋转插拔。
- (三) 关闭数显函数发生器 (A 源) 功率开关, 不要打开 A 源与 B 源的其它功能开关。
- (四) 实验完成后, 关闭电源, 整理仪器。凳子归位, 与实验无关的杂物请带离实验室, 保持室内清洁卫生。

【实验原理】

详见教材:《结构化大学物理实验》(第二版) 实验 2.4 (参考页码 P64-72)。

【实验目的】

- (一) 掌握用示波器观测波形和测量波形的的方法。
- (二) 掌握用李萨如图形测量频率和相位的方法。

【实验内容】

- (一) 调整示波器, 观察各种波形。
- (二) 测量正弦波的峰-峰值电压 V_{pp} 和周期。
- (三) 用李萨如图形测量正弦波的频率。

【实验器材】

双踪示波器一台, 数显低频信号发生器一台 (含 50.00Hz 固定信号源), 指针式低频信号发生器一台, 电缆若干。

【实验步骤及操作】

- (一) 测正弦波的峰-峰值电压和周期

将模拟信号源 (以下简称 B 源) 的 50.00Hz 市电 (误差范围约 $\pm 0.03\text{Hz}$) 正弦波输出接口 (也可以用数显信号源 (以下简称 A 源) 背面注有 “ \sim ” 标记的 50.00Hz 市电正弦波输出接口) 与示波器的 “CH2” 通道相连, 将示波器输入信号耦合开关置于 “AC”, 按下 “CH2” 键, 适当调节 CH2 通道灵敏度和扫描频率, 直至荧光屏上出现稳定的正弦波, 测量其峰-峰值电压 V_{pp} 和周期 T 。(注: 按厂家使用说明书提供的技术规范, 绿杨 YB4320/20A 模拟示波器 CH1、CH2 的电压灵敏度和扫描时间的相对仪器误差都是 $\pm 5\%$ 。)

- (二) 用李萨如图形法校准指针式信号源

1. 保持连接 “CH2” (Y) 通道 50.00Hz, 示波器选择 “X-Y” 工作方式, B 源信号源输出端与示波器的 CH1 (X) 通道相连, B 源信号输出选择正弦波, 输出频率范围开关选 “100” (Hz), 旋转频率调节旋钮 (如图 5-1) 到 25Hz 附近, 改变 B 源频率, 观察荧光屏上图形的变化, 使得屏幕上出现尽可能稳定的李萨如图形, 对照数据表中各李萨如图形, 与屏幕符合时, 将此时的信号源频率记入相应的 f_x 表格中, 已知 “CH2” (Y) 输入信号为标准源——市电频率 50.00Hz, 计算 “CH1” (X) 通道信号的频率, 并与信号源的输出频率比较。计算出 B 源 25-100Hz 几个测量点的频率修正值。(注意: 如果每个修正点的误差全部为正或全部为负, 且误差较大, 应检查旋钮调节范围是否与刻度范围吻

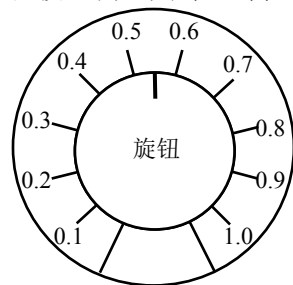


图 5.1 被校信号源 (B源) 频率调节旋钮和刻度结构

合，不吻合的要将旋钮拔下，如图 5.1 对准按上后再进行测量。）

2. 将 B 源 50.00Hz 插头转插到 A 源信号源输出端（50Ω），A 源信号输出也选择正弦波，分别改变 A 源频率为 500Hz、5000Hz，将 A 源可调频率作为标准源，用李萨如图形法对 B 源 100、1k、10kHz 频段进行校准，测出 B 源频率的频率修正值。



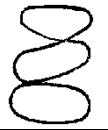
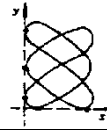
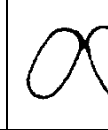
3. 【选作】校准 B 源的其它频段。

【实验数据及分析】

1. 测正弦波的峰—峰值电压和周期

	测量电压峰峰值		测量周期	
倍率	$V/(V/Div)$		$T/(ms/Div)$	
长度	H/Div		L/Div	
测量结果	$V_{pp} = V \cdot H / V$		$T = t \cdot L / ms$	

2. 用李萨如图形法校准 B 源正弦波的频率（如果频段很宽，本表可以继续加行）

标准频率 f_y / Hz	李萨如图形					
	N_x	1	1	1	2	2
	N_y	1	2	3	3	1
	$f_y : f_x$	1: 1	1: 2	1: 3	2: 3	2: 1
50.00	f'_x (被校频率) / Hz					
	$f_x = \frac{N_y}{N_x} f_y$ (标准值) / Hz					
	$f_{x\text{修正}} = f_x - f'_x$ / Hz					
500	f'_x / Hz					
	f_x / Hz					
	$f_{x\text{修正}}$ / Hz					
5000	f'_x / Hz					
	f_x / Hz					
	$f_{x\text{修正}}$ / Hz					

1. 画出 B 源的校准曲线。（提示：由于频率、修正值跨度大、数据间隔不均匀，建议采取分段坐标。）

【思考题】

1、为什么用市电频率而不是 A 源 50Hz 作为校准 B 源 100Hz 波段的标准频率？A 源、B 源频率测量值的有效数字位数如何确定？B 源频率调节旋钮位置如图 5.1，测量结果是几位有效数字？

2、简叙示波器的扫描电路和同步电路的工作原理，说明模拟示波器如何显示稳定的波形？

你认为数字示波器的扫描、同步原理是否相同？为什么？

3、示波器测量电压、周期的仪器误差分别应该是多少？测量结果的有效数字应该读几位？为什么？（提示：实验用）

4、如果示波器已连接电源且电源开关已经打开，已经在 CH1 通道接上待测外接交流电压信号，但屏幕上看不到波形，你认为是示波器的那些操作不正常造成的？为什么？

实验 I-3. 波尔共振实验

【安全操作须知】

1. 波尔共振齿轮盘不能偏转太大幅度，否则容易损坏。
2. 测量相位的时候，闪光灯容易产生强光，请注意保护眼睛。

【实验原理】

详见教材：《结构化大学物理实验》P.73-74。仔细研读原理后回答以下问题：

问题 1：什么叫受迫振动？什么情况下会出现共振？

问题 2：什么叫幅频特性和相频特性？

问题 3：本实验所用的波尔共振仪，是用什么方法实现对自由振荡，阻尼振荡的周期及振幅的测量？受迫振荡的周期和相位差又是如何测量的呢？

【实验目的】

- （一）研究波尔共振仪中弹性摆轮受迫振动的幅频特性和相频特性；
- （二）研究不同阻尼力矩对受迫振动的影响，观察共振现象；
- （三）学习用频闪法测定运动物体的相位差。

【实验内容】

- （一）测定阻尼系数 β ；
- （二）测定受迫振动的幅频特性和相频特性曲线；
- （三）测定自由振荡周期。

【实验器材】

ZKY-BG 型波尔共振仪一套，包括振动仪和电器控制箱。

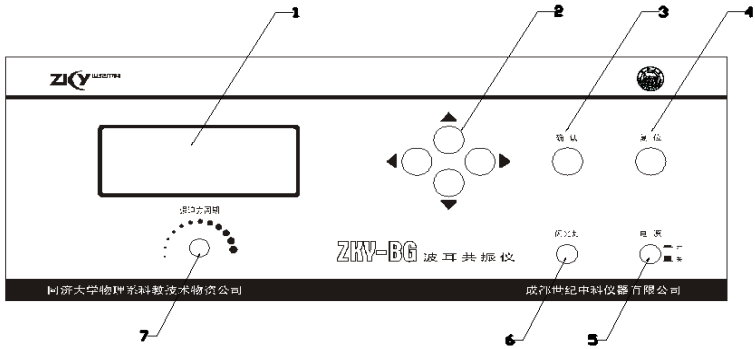


图 3-1 波尔共振仪前面板示意图

- 1、液晶显示屏 2、方向控制键 3、确认按键 4、复位按键
5、电源开关 6、闪光灯开关 7、强迫力周期调节电位器

【实验步骤及操作】

(一) 仪器介绍 (参见教材 P.75-77)。

波尔共振仪电气控制箱的前面板和后面板分别如图 3-1 和图 3-2 所示。

波尔共振仪可以通过软件控制阻尼线圈内直流电流的大小, 达到改变摆轮系统的阻尼系数的目的。选择开关可分 4 档, “阻尼 0”档阻尼电流为零, “阻尼 1”档电流约为 280mA, “阻尼 2”档电流约为 300mA, “阻尼 3”档电流最大, 约为 320mA, 阻尼电流由恒流源提供,

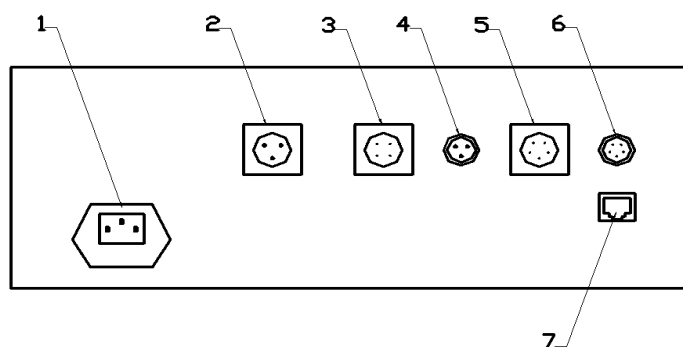


图 3-2 波尔共振仪后面板示意图

1、电源插座（带保险） 2、闪光灯接口 3、阻尼线圈
4、电机接口 5、振幅输入 6、周期输入 7、通讯接口

实验时根据不同情况进行选择（可先选择在“2”处，若共振时振幅太小则可改用“1”，切不可放在“0”处），振幅不大于 150。

闪光灯开关用来控制闪光与否，当按住闪光按钮、摆轮长缺口通过平衡位置时便产生闪光，由于频闪现象，可从相位差读盘上看到刻度线似乎静止不动的读数（实际有机玻璃 F 上的刻度线一直在匀速转动），从而读出相位差数值，为使闪光灯管不易损坏，采用按钮开关，仅在测量相位差时才按下按钮。

电机是否转动使用软件控制，在测定阻尼系数和摆轮固有频率 ω_0 与振幅关系时，必须将电机关断。

1. 开机介绍

按下电源开关后，屏幕上出现欢迎界面，其中 NO.0000X 为控制箱与主机相连的编号。过几秒钟后屏幕上显示如图 3-3 中 A 菜单——“按键说明”。符号“◀”为向左移动；“▶”为向右移动；“▲”为向上移动；“▼”向下移动。建议做实验的顺序为先做阻尼振荡，再做强迫振荡，当仪器充分运转到轴承摩擦阻力最小后，最后才做自由振荡。

2. 自由振荡

在 A 菜单按确认键，显示 B 菜单所示的实验类型，默认项为“自由振荡”，字体反白为选中。

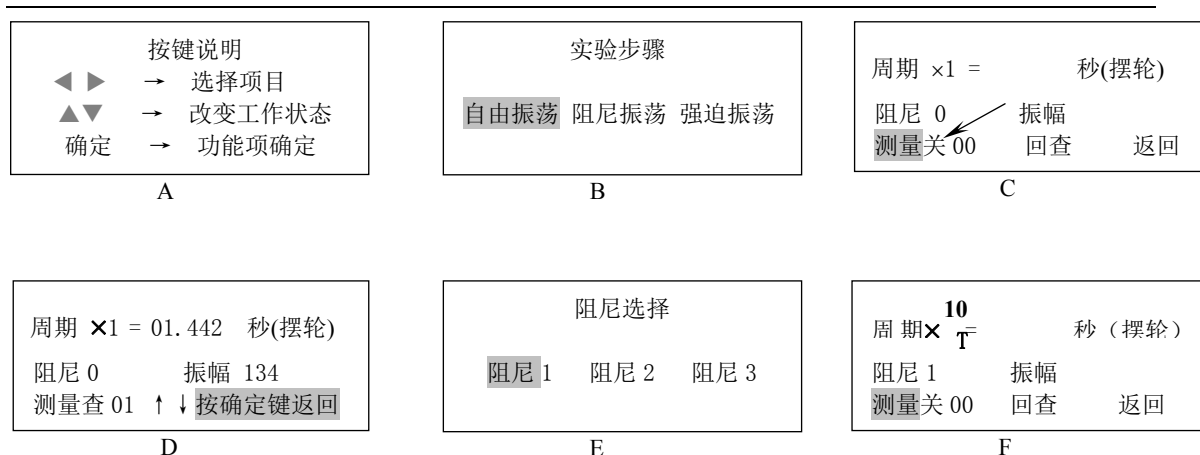


图 3-3 液晶屏幕的各级菜单选项及显示的测量值

再按确认键显示 C 菜单

用手转动摆轮 160 度左右，放开手后按“▲”或“▼”键，测量状态由“关”变为“开”，控制箱开始记录实验数据，振幅的有效数值范围为：160-50(振幅小于 160 测量开，小于 50 测量自动关闭)。测量显示关时，此时数据已保存并发送主机。

查询实验数据，可按“◀”或“▶”键，选中“回查”，再按确认键如 D 菜单所示，表示第一次记录的振幅为 134，对应的周期为 1.442 秒，然后按“▲”或“▼”键查看所有记录的数据，该数据为每次测量振幅相对应的周期数值，回查完毕，按确认键，返回到 C 菜单，若进行多次测量可重复操作，自由振荡完成后，选中“返回”，按确认键回到前面 B 菜单进行其它实验。

3. 阻尼振荡

在图 3-3 菜单 B 状态下，根据实验要求，按“▶”键，选中“阻尼振荡”，按确认键显示阻尼：如菜单 E。阻尼分三个档次，阻尼 1 最小，根据自己实验要求选择阻尼档，例如选择“阻尼”1 档，按确认键显示如菜单 F。用手转动摆轮 160 度左右，放开手后按“▲”或“▼”键，测量由“关”变为“开”并记录数据，仪器记录 10 组数据后，测量自动关闭，此时振幅大小还在变化，但仪器已经停止记数。阻尼振荡的回查同自由振荡类似，请参照上面操作。若改变阻尼档测量，重复阻尼 1 的操作步骤即可。

注意：为避免剩磁影响，阻尼开关不要随便拨动；否则由于电磁铁剩磁而引起 β 值变化。若要改变阻尼档位，只有在某一阻尼系数 β 的所有实验数据测试完毕后，才可以改变。

4. 强迫振荡

在图 3-3 菜单 B 状态下，选中“强迫振荡”，按确认键显示如图 3-4 的 G 菜单（注意：在进行强迫振荡前必须选择阻尼档，否则无法实验）。默认状态选中“电机”。

按“▲”或“▼”键，电机启动，如菜单 G 所示。此时不能立即进行实验，因为摆轮的周期还不稳定（菜单 G 中默认状态周期为 1，屏幕实时显示一个周期的测量结果），待观察到摆轮周期和电机的周期相同，受迫振动稳定时，再开始测量。菜单 H 中，测量前先选中“周期”，按“▲”或“▼”键把周期由 1 改为 10，选中“测量”，按“▲”或“▼”键把测量打开，经过 10 个周期后，屏

幕显示数据为 10 个周期的时间和，目的是通过多次测量减少偶然误差。此后受迫振动仍在继续，菜单 H 中的测量已关，若无任何菜单操作，数据保持不变。



图 3-4

液晶屏幕的各级菜单选项及显示的测量值

测量相位时应把闪光灯放在电动机转盘前下方，按下闪光灯按钮，根据频闪现象来测量，仔细观察相位位置。

强迫振荡测量完毕，按“◀”或“▶”键，选中“返回”，按确定键，重新回到菜单 B。

5. 关机

在菜单 B 状态下，按住复位按钮保持不动，几秒钟后仪器自动复位，此时所做实验数据全部清除，然后按下电源按钮，结束实验。

(二) 测量内容

1. 测定阻尼系数 β 。

测量阻尼系数时，电机电源必须切断，将有机玻璃转盘 F 转动到白线对准 0 度和 180 度。记录所选阻尼档位，从液晶窗口读出摆轮作阻尼振动时的 10 组振幅数值 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_{10}$ ，以及 10 个周期所用时间 $10T$ 。所测数据按逐差法处理，利用公式求出 β 值，式中 n 为阻尼振动的周期次数， θ_n 为第 n 次振动时的振幅， T 为阻尼振动周期的平均值。

$$\ln \frac{\theta_0}{\theta_n} = \ln \frac{\theta_0 e^{-\beta t}}{\theta_0 e^{-\beta(t+nT)}} = n\beta T$$

$$\beta = \frac{1}{5T} \left(\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}} \right), \text{ 求出 } \beta \text{ 值。}$$

2. 测定受迫振动的幅度特性和相频特性曲线（参照教材 P.73）。

保持阻尼档位不变，选择强迫振荡进行实验。必须在受迫振动稳定后，也就是液晶显示屏上同时显示的摆轮弹簧的振动周期与强迫力——电动机的有机玻璃转盘的振动周期相等后才能读取摆轮的振幅值，并利用闪光灯频闪法测定受迫振动位移与强迫力间的相位差。可以通过调节调速电位器读数来改变电动机的转速，即改变强迫外力矩频率 ω 。调速电位器上方小窗口为主刻度，电位器读数只具有相对意义，测量时需记录电位器读数，对电动机的转速大致定位，方便回测数据。菜单 G 中打开电机开关，周期保持 1 不变，通过改变电机转速调整强迫力频率 ω ，找到振幅最大位置。待受迫振动稳定正式测量时再如菜单 H 所示将周期改为 10 位置，并利用闪光灯测定受迫振动相位差，在数据表格中记录振幅最大， $\varphi=90^\circ$ 时的数值。通过调节调速电位器读数，改变强迫力周期，在靠近 $\varphi=90^\circ$ 左右各测 3 个点，相位差间距 $\Delta\varphi$ 控制在 10° 左右，离 $\varphi=90^\circ$ 稍远些左右各测 2 个点相位差间距 $\Delta\varphi$ 控制在 20° 左右（例如 90° 右边的相位差为

98 110 120 142 161)。可先测相位差在 $90^\circ \sim 160^\circ$ 范围内的数据，也可先测相位差在 $90^\circ \sim 20^\circ$ 范围内的数据。每次改变电机的转速，都需等受迫振动稳定后，再测量记录数据（至少测 11 组数据，且必须有受迫振动达到共振的数据）。可以根据需要在已测数据之间进行插值测量，直到数据足够密集为止。由于 $\omega_i = 2\pi/T_i$, $\omega_0 = 2\pi/T_0$ 为转轮弹簧的固有角频率，所以表中 $\omega_i/\omega_0 = T_0/T_i$ 。

3. 测定自由振荡周期

在菜单 B 下选择自由振荡，在 120 度左右测量 8 次振荡周期后取平均值作为转轮弹簧对应的固有周期 T_0 。

【实验数据及分析】

（所有的实验数据、计算过程和结果都要按教材第一章规定的有效数字相关规定书写；所有的计算必须推理严谨，公式、代入过程完整；计算结果包括中间计算结果必须写单位）

（一）阻尼系数测量数据记录表： 阻尼档位_____ $10T=$ _____秒

i	振幅 $\theta_i / \text{度}$	振幅 $\theta_{i+5} / \text{度}$	$\frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$	$\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$	$\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$ 平均值
1					
2					
3					
4					
5					

（二）幅频特性和相频特性测量数据记录表： 阻尼开关位置_____

测量次数	强迫力矩周期 $T_i / \text{秒}$	振幅 $\theta / \text{度}$	频闪法测相位差值 $\varphi / \text{度}$	频率比例 $\omega_i/\omega_0 = T_0/T_i$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

11				
12				
13				
14				
15				

(三) 自由振荡测量数据记录表 $\bar{T}_0 =$ _____ 秒

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8
振幅/度								
周期/秒								

(四) 阻尼系数 β 的计算

对测量数据进行逐差计算，得到出五组数据的 $\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$ 值 ($\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}$ 相当于 $\ln \theta_i - \ln \theta_{i+5}$)，

然后根据公式 $\beta = \frac{1}{5T} \left(\overline{\ln \frac{\theta_i}{\theta_{i+5}}} \right)$ 计算阻尼系数。

(五) 根据实验数据以频率比例 ω_i/ω_0 作横坐标，以 θ 为纵坐标作幅频特性曲线。

(六) 以频率比例 ω_i/ω_0 作横坐标，以相位差值 φ 为纵坐标作相频特性曲线。

实验 I-4. 激光全息照相

【安全操作须知】

- (一) 不得直视激光束，以免灼伤眼睛！
- (二) 禁止用手触摸光学元件面！注意不要擦伤、损伤光学元件和全息干板。
- (三) 全息干板要避光保存。
- (四) 激光器不得频繁开关！实验完成后再关激光器电源。
- (五) 曝光过程中切勿触及全息实验台，不要随意走动，以免引起振动或气流扰动，影响全息图质量。
- (六) 实验完成后，关闭电源，整理仪器。凳子归位，与实验无关的杂物请带离实验室，保持室内清洁卫生。

【实验目的】

- (一) 了解全息照相的基本原理和主要特点。
- (二) 学习由全息图再现物像的原理。

(三) 学习并掌握全息照相的基本实验技术和技巧。

【实验原理】

详见教材：《结构化大学物理实验》（第二版）实验 10.4（参考页码 P.428-434）。

【实验仪器】

He-Ne 激光器（1—3mW），全息平台及其光学附件【分束镜，全反射镜（2 个），扩束镜（2 个），有关光学元件调整架】，电磁快门，搪瓷盘，全息干板，洗相设备(显影、定影及漂白药水)，安全灯。

【实验内容与方法提示】

本实验的关键是如何拍到一张较高质量的全息图，理解并掌握拍摄的技术要点。

1. 实验光路。拍摄全息图的光路如图 3-1 所示。

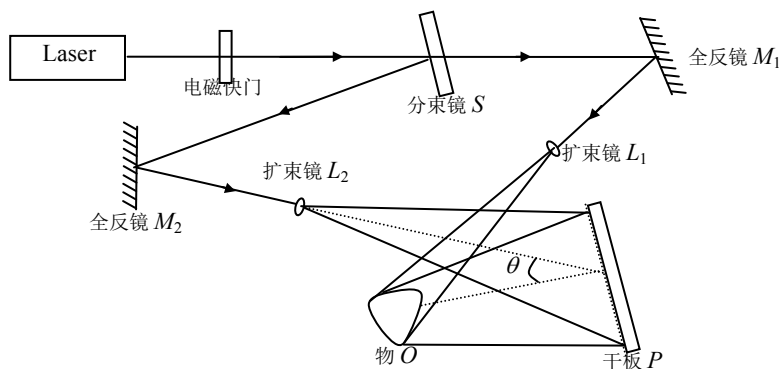


图 3-1 全息照相光路

2. 光路调节

光路调节是本实验的重要内容，也是拍好全息图的关键。首先了解各仪器的结构与功能，熟练掌握其使用与调节方法。并在干板架上插入白屏（用以接收光），然后按图 4 在全息平台上布置光路。

光路调节要点：

（1）激光器发出的光线及经过全反射镜（total mirror）、分束镜反射后的光线构成的平面应与平台平面平行。

具体作法是，在光具座上插入带有十字刻线的白屏（也可利用扩束镜的通光小孔），首先调节激光器的俯仰，使十字屏在平台上移动到不同位置时，细激光束始终照在十字中心，说明激光器出射的细光束与平台平行（这一步实验室已经调节好）。然后，按图布置各元件（先不要放置扩束镜，且各元件合理分布在平台的较大范围，不要挤在一块。分束镜反射的光作为参考光，其透射光（transmission light）作物光）。调节分束镜、反射镜的高低、俯仰，使它们反射的细激光束均照在白屏的十字中心，这样，细激光束构成的平面与全息平台平行。调节物体的高低，使细激光束照在物的中心。

（2）参考光与物光中心线的夹角 θ 约为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 左右。物离干板在 10~20cm 为宜，太远则物光太弱。 M_1 反射的细激光束尽量照在物的正面，且尽量使干板平面正对物的正面（如同一般照相时，灯光从人的正前方照射，照相机也在人的正面拍摄一样）。

（3）为了保证物光和参考光相干，用分束镜将一束光分为两束光，它们经过不同的路径在干板平面相遇干涉，但**必须保证物光光程与参考光光程相等**。物光与参考光的起点是分束镜，终点是干板平面。实验中用线绳测量判断两束光的光程是否相等。

（4）细激光束直射在物中心和白屏中心，最后加入扩束镜， L_1 扩束的光把物均匀照亮，

L_2 扩束的光把白屏均匀照亮。然后去掉白屏，眼睛处于干板位置的后方观察，微微转动物（不可移动，否则改变光程）使看到的物形象最好，且反射的光最强。

(5) 物光与参考光光强之比满足要求。具体做法是，关掉照明灯和电磁快门，在干板架上插好光电池，打开灵敏电流计，调节零点；再打开电磁快门，挡住物光测量参考光照射时灵敏电流计偏转的格数；然后挡住参考光测量物光照射时灵敏电流计偏转的格数，格数之比即为光强之比。如果不满足要求，可以调节 L_1 到物或 L_2 到干板的距离，再次测量。（注意：测量时不要碰任何元件，防止光路变化；测量完毕，把电流计旋置短路。）

注意：光路调节中严禁用手触摸所有的光学元件表面，也不允许用擦镜纸、干棉花、手帕擦拭。发现有污垢或灰尘，请教师处理。

本实验所用分束镜透过率为 70% 左右，故选用透过光作为物光源，针对实际情况，可先调节物光。在调节激光器、分束镜、反射镜的高低、俯仰，使它们出射、反射的细激光束均照在白屏的十字中心的基础上，按图 4 放置分束镜 S 、全反镜 M_1 、被拍物及白屏。调节 M_1 反射角度以及物的高低，使反射的点光束射在物体中部，旋转放置物体的底座或白屏的角度，使白屏接收到的被物体反射的光斑最强且在白屏中部，然后在 M_1 及物体之间加入扩束镜 L_1 ，以将 M_1 反射的点光束扩束并正好照亮整个物体，此时沿着被物体反射的光线方向在白屏中应看到清晰的物体轮廓像，至此物光调节完毕。然后按照物光、参考光等光程、夹角合适的要求，调整分束镜 S 的反射角度以及全反镜 M_2 的位置与反射角度，使参考光入射到白屏中部，再加扩束镜 L_2 将点光束扩束合适。

3. 干板曝光

一切准备工作就绪后，关掉电磁快门，在全暗或极暗绿灯下放置干板，乳胶面朝着物体（用干净的手指拿着干板的棱边，用手指在干板一角的两面轻轻一摸，粗糙者即为乳胶面）。曝光时间与光强大小、显影温度有关，视具体情况而定。

注意：一切准备就绪后，稳定几秒钟再打开电磁快门曝光；在曝光过程中严防震动，身体不要接触平台，不能说话和来回走动。

4. 干板的冲洗

曝光后的干板在暗室冲洗，按显影—水洗—定影—水洗—晾干的程序处理。显影时间由实验室提供，显影过程中可在暗绿光下观察，防止显影不足和过度。显影时须注意：干板不能长时间置于绿灯下，以防干板二次曝光，影响衍射光的透过率。

注意：显影时干板不能长时间置于绿灯下，以防干板二次曝光，影响衍射光的透过率；显影液和定影液不要搞混；干板的乳胶面朝上；不要用手摸乳胶面，防止脱落；水洗后自然晾干；保持暗室的卫生整洁。

干板的冲洗详细操作流程是分别在暗室的操作台 1 和 2 上完成。

操作台 1（暗室进门左前方靠窗户处）：**极暗**绿灯辅助照明（绿光灯朝向墙壁）。

显影（1 分钟） \longrightarrow 水洗 \longrightarrow 定影（3 分钟）

操作台 2（暗室进门右侧）：

漂白（黑色消失，观察到玻璃透明即可） \longrightarrow 水洗 \longrightarrow 冷风吹干

5. 全息图再现

虚像观察：将晾干的全息图放回原位置，用原参考光照射，去掉物，在全息图的后方观察，即可看到位置、大小与原物一模一样的清晰逼真的三维立体像。

(1) 改变参考光到物的距离，可以使再现像放大或缩小，此时，再现像的清晰程度有所改变。

(2) 挡掉全息图的一部分，仍然可看到完整的物体像。

实像观察：去掉扩束镜，用细激光束照射（增大再现光的强度），在全息图的另一边用白屏可以接收到共轭实像。

【实验结果及分析】

1. 全息照相是否成功？为什么？有哪几条成功的经验？
2. 分析全息照相与普通照相的异同。

【分析与思考】

为什么用全息图的一部分也能再现整个物体的像？

全息照相的实验技术要求是什么？

为什么要求光路中的物光与参考光的光程尽量相等？

为什么个别光学元件安置不牢靠，将导致拍摄失败？

用两个激光器分别作为物光源和参考光源，能否记录全息图，为什么？

直接记录干涉图的底片在显影后形成一张全息负片，用此负片可复制全息图正片，试问正片和负片的重现像有何区别？重现像的反衬是否相反（如同普通照相的正负片），为什么？

若全息片不小心打碎，用其中一个块再现来观察其虚像，下面哪种说法是正确的？

()

- (1) 再现原物的一部分。
- (2) 完全不能再现虚像。
- (3) 能再现完整的虚像，和没打碎的整块全息照片再现的虚像毫无差别。
- (4) 能再现完整的虚像，但衍射效率降低。
- (5) 能再现完整的虚像，但分辨率降低。
- (6) 能再现完整的虚像，和整块全息片再现的虚像毫无差别，仅仅观察起来不太方便。

用投影仪和显微镜观察到的条纹是什么条纹？它们是不是同一性质的条纹？作了这一对比观察后你有什么体会？

做实验时，如何调整判断实验光路中各器件的共轴？

实验 I-5. 迈克尔逊干涉仪的调整与使用

【安全操作须知】

1. 激光属强光，会灼伤眼睛，注意不要让激光直接照射眼睛。
2. 鼓气阀门不要用力旋转，以免损坏。
3. 仪器应妥善放置，防止震动。

【实验原理】

详见教材：《结构化大学物理实验》P.104-111。仔细阅读原理后在实验报告上回答以下问题：

问题 1：请画出迈克尔逊干涉仪的基本光路图？

问题 2：在放扩束镜前，屏上有两组红色光点，为什么必须将两组光电中最亮的两个光点调成完全重合？

问题 3：当调整好干涉仪后，旋转微动鼓轮时，干涉圆环就向外冒（或向内收缩），这是改变了什么量？和波长是什么关系？

补充：迈克尔逊干涉仪的结构、调整与应用

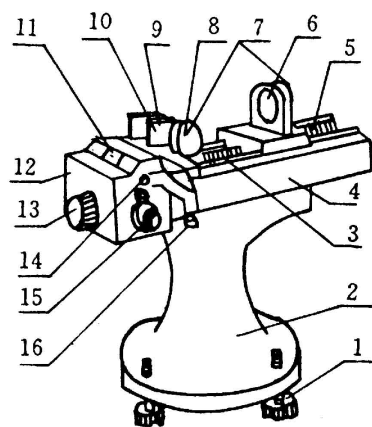


图 2-1 迈克尔孙干涉仪结构图

迈克尔逊干涉仪有多种多样的形式，其基本结构如图 2-1 所示。机械台面 4 的铸铁底座 2 下有三个调节螺钉 1，用来调节台面的水平。在台面上装有螺距为 1mm 的精密螺杆 3，丝杆的一端与齿轮系统 12 相连接。转动手轮 13 或微动鼓轮 15 都可以使丝杆转动，从而使骑在丝杆上的反射镜 M_1 镜（6）沿导轨 5 移动。 M_1 镜的位置及移动的距离可从装在台面 3 一侧的毫米标尺（图中未画出）、读数窗 11 及微动鼓轮 15 上共同读出。手轮 13 分为 100 分格，它每转过一分格， M_1 镜就平移 $1/100\text{mm}$ （由读数窗读出）。微动鼓轮 15 每转一周，手轮随之转过 1 分格，鼓轮又分为 100 格，所以鼓轮每转过一格， M_1 镜平移 10^{-4}mm ，还可估读一位至 10^{-5}mm 。这样，将毫米标尺、读数窗和微动鼓轮上的读数相加，就可读出 M_1 镜的位置。 M_2 镜（8）是固定在镜台上的。 M_1 和 M_2 镜的背面各有两个螺钉 7，可调节镜面的倾斜度。 M_2 镜台下还有一个水平方向的拉簧螺丝 14 和垂直方向的拉簧螺丝 16，其松紧使 M_2 镜台产生一个极小形变，从而可对 M_2 镜的倾斜度作更精细的调节。9 和 10 分别为分束镜 G_1 和补偿板 G_2 ，它们的位置和方向都完全固定。 G_1 的后表面为半反射面，镀有银或其他介质膜。手轮 13 前方可安装观察屏，用来接收干涉条纹。

实验中迈克尔逊干涉仪按测量的任务不同，分成：“测量激光波长”和“测量空气的折射率”两种仪器组合。同学们的座位号对应的是没有空气室的，就按激光波长实验调节和操作仪器；有空气室的就按空气折射率的测量调节和操作仪器。调好测完后不要破坏仪器状态，与另一组的同学互换座位，不必再进行调节第二种测量的仪器，直接测量就可以了。

调整迈克尔逊干涉仪和测量的具体方法如下：

（一）仪器的水平调整

将干涉仪放置于工作台上，使导轨尽量与工作台前边缘垂直。借助气泡水准仪或目视观察，调节底座螺钉 1 使仪器水平。

（二）光路调整

1. （有空气室的只能在原坐标附近进行微调，不能使 M_1 太远产生悬空，也不能使 M_1 太靠近空气室，以免损坏仪器！）转动手轮 13 将反射镜 M_1 调至 40mm 附近某一位置，使 M_1 、 M_2 镜与分束镜 G_1 上反射膜的距离大致相等。

2. 打开 He-Ne 激光器，调节其高度和倾角，使激光束沿水平方向垂直于导轨入射到分束镜 G_1 的中部。这时在观察屏上能看到分别由 M_1 、 M_2 镜反射的两个圆形最亮光斑（视场中还有较暗的光斑，调整时可不管它们）。

3. 调节 M_2 镜背面的两个螺钉，使两个圆形最亮光斑完全重合，这时 M_2 镜与 M_1 镜大致垂直。实验室已将 M_1 镜的法线调至与导轨平行，实验者一般不要动它背后的两个螺钉，只需调 M_2 镜使之与 M_1 镜垂直即可。

4. 在激光器与分束镜之间放入扩束镜。反复仔细地调整扩束镜的方位，直到观察屏上出现非定域干涉条纹。微调 M_2 镜背面的螺钉，使条纹变圆、变粗。

5. 若眼睛上下或左右晃动观察时看到有条纹“冒出”或“缩进”，则需要细调 M_2 镜台下的水平与垂直拉簧螺丝，直到眼睛晃动观察时无条纹移动，说明 M_1 镜与 M_2 镜完全垂直。

（三）读数系统的调整

转动微动鼓轮时，手轮会随之转动；但转动手轮时，鼓轮并不随之转动。为了避免空程差，在整个测量过程中只能以同方向转动鼓轮使 M_1 镜移动，不能反向转动鼓轮，更不能直接转动手轮。而且开始测量前应将鼓轮按原方向转动若干周，直到干涉条纹稳定移动后方可开始计数测量。

（四）用非定域圆形条纹测激光波长

完成仪器的调整后，缓慢转动鼓轮让调好的非定域圆形干涉条纹从中心“冒出”或“缩进”，如图 2-2 所示。测出圆环中心“冒出”或“缩进”的个数 Δm 和所对应的 M_1 镜移动距离 Δd （单位：mm），即可由公式

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta m} = \frac{2(d - d_0)}{m - m_0} \quad (2-1)$$

计算激光的波长（单位用 nm 表示）。式中 m_0 表示起始环（第 0 环），对应的 M_1 坐标为 d_0 ； m 为第 Δm 环，对应的 M_1 坐标为 d 。

（五）观察白光干涉（等倾干涉和等厚干涉条纹）

完成上述测量后，转动粗动手轮 13，使圆形条纹变粗变大。当只剩下一个粗大圆环时（此时 M_1 与 M'_2 相隔很近， d 很小），在激光器与 G_1 镜间插入扩展白光光源。用眼睛代替观察屏作为接受器，沿 M_1 镜方向可看到彩色圆形干涉条纹，这就是等倾干涉条纹。调节拉簧螺丝 14、16 使 M_1 、 M'_2 有一很小的夹角。缓慢转动粗动手轮让 M_1 镜向前（即向着 G_1 方向）移动，使弯曲条纹逐渐向圆心移动，直到视场中 M_1 镜上出现彩色直线干涉条纹，这就是等厚干涉条纹。当彩色条纹的对称中心（即中央条纹）处于 M_1 镜中央时，记下 M_1 镜的位置。

进行此项测量时，由于白光干涉条纹很少，所以调节必须特别耐心细致，切忌急躁。测量前应先调整零点。调节和测量过程中， M_1 镜应始终向前移动。

（六）空气折射率的测量（详见教材：《结构化大学物理实验》P.109-111）。

【实验目的】

- （一）初步掌握迈克尔逊干涉仪的调整方法；
- （二）掌握用迈克尔逊干涉仪测量波长和空气折射率的方法。

【实验内容】

- （一）将迈克尔逊干涉仪调到能正常观测的状态；
- （二）测量 He—Ne 激光的波长；
- （三）（选做）观察白光干涉；

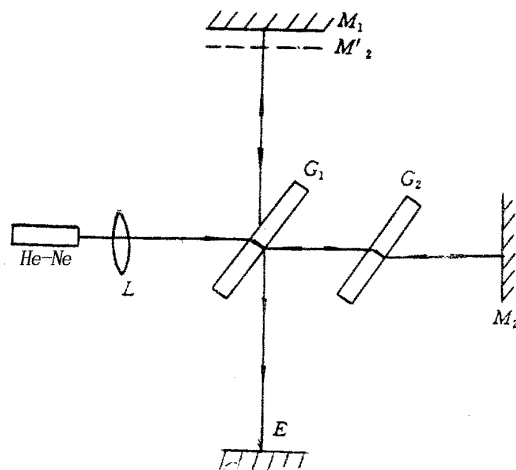


图 2-2 迈克尔逊干涉仪光路图

(四) 在加装了空气室的迈克耳逊干涉仪上测量空气的折射率。

【实验器材】

迈克尔逊干涉仪, He-Ne 激光器, 扩束镜, 日光灯, 接收屏, 加装了空气室的迈克耳逊干涉仪 (包括加压用橡皮球、气压计)

【实验步骤及操作】

(一) 熟悉仪器

对照仪器, 仔细阅读仪器介绍部分内容, 掌握本仪器调节使用的注意事项。充分理解各部件作用, 以便正确、顺利地进行操作。

(二) 调节

1. 仪器水平调节

安置迈克逊干涉仪, 使其机械平面 (即导轨) 大体垂直桌子边缘, 调迈克逊干涉仪水平 (旋底座三个调节螺丝) 目测水平即可。

2. 读数系统调节

同时转动粗动轮和微动轮使其能啮合, 测量时, 为避免空程误差, 在测量同一组数据中, 所有读数必须由微动轮沿同一方向转动获取。

3. 光源调节

放置 He-Ne 激光器, 使光源 S 与分光板 G_1 反射镜 M_2 的中心大致等高, 且三者的连线一致垂直 M_2 镜 (目测即可), 开启激光电源、顺着激光束看去, 激光点正好落在分光板 G_1 的中部, 且检查光点是否落在 M_1 、 M_2 反射镜的中部。

4. 调出等倾干涉圆环

(1) 转动手轮, 尽量使 M_1 、 M_2 两反射镜距分束板后表面反射膜的距离相等;

(2) 粗调 M_2 镜, 使 M_2 镜垂直 M_1 镜:

A. 实验室已将 M_1 镜面法线调至与丝杆水平, 实验者不要动 M_1 镜背面的两个调节螺丝, 此时第①条光线经反射后返回与光源基本重合, 目测即可。

B. 放置接收屏使平面反射镜 (新仪器接收屏在图中 E 处的位置), 在接收屏上可以看见几个圆的光点, 调节 M_2 镜背面两个螺丝使接收屏上两个最亮的光点完全重合 (视场中还有较暗的光点它们与调整无关), 此时第②条光线与第①条光线重合。

(3) 细调 M_2 镜使 M_1 、 M_2 镜严格相互垂直:

A. 放扩束镜于光源 S 与 G_1 板之间, 使扩束镜的中心大致与 G_1 板的中心等高, 前后、左右移动扩束镜, 使 G_1 板上激光光斑最强最亮, (用白纸靠近 G_1 板进行比较) 此时眼睛可以看到接收屏上的干涉条纹。

B. 调 M_2 镜台下的水平与垂直拉簧螺丝, 对 M_2 作细致调节调出等倾干涉圆环, 并将圆心调到视场的中心, 且条纹间距适中, 移动 M_1 时圆心应保持不动。

(三) 测量及观察

1. 测 He-Ne 激光波长。观察环形条纹由中心向外“冒出”或由外向内“缩进”现象，记录干涉条纹“冒出”或“缩进”50 条（ $\Delta K=50$ ）相对应的 M_1 的坐标 d 值，如此连续 6 次，记录于数据表格中。测量时必须注意仪器空程差对测量精度的影响，必须沿一个方向转动微动鼓轮。

2. (选做) 调节和观察等厚干涉及日光干涉。观察条纹的疏密变化，观察在移动 M_1 可动镜时干涉条纹弯曲程度怎样变化，把干涉条纹间距调到 3mm 左右的平行条纹。用日光作光源，置日光台灯于 G_1 分束板前方，转动微动轮用眼直接观察白光源产生的彩色干涉条纹，直至调到中心条纹，记录 M_1 的坐标 d 。

3. 测量空气的折射率。在迈克耳逊干涉仪的一支光路中加入一个长度为 L 的空气室，空气室与加压用橡皮球、气压计相连，如教材图 3.5-7 所示，气压计用来测管内气压，它的读数为管内压强高于室内大气压强的差值。在 O 处用毛玻璃作接收屏，在它上面可看到干涉条纹。调好光路后，先将空气室充气，使管内压强与大气压的差大于 0.09 MPa，读出数字气压计数值 p_1 ，取对应的 $m_1=0$ 。然后微调阀门慢慢放气，此时在接收屏上会看到条纹移动，当移动 40 个条纹时，记一次数字仪表数值 p_2 。然后再重复前面的步骤测 3 次，记录于数据表格中。

【实验数据及分析】

(所有的实验数据、计算过程和结果都要按教材第一章规定的有效数字相关规定书写；所有的计算必须推理严谨，公式、代入过程完整；计算结果包括中间计算结果必须写单位)

(一) 测量 He—Ne 激光波长的实验数据记录表

m_i / 条	0	50	100	150	200	250
d_i / mm						

(二) 测量空气折射率的实验数据记录表

室温 $t =$ _____ $^{\circ}\text{C}$ ；大气压 $p_b = 1.01325 \times 10^5$ Pa； $L=95.0/70.0\text{mm}$ ； $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ ； $m = 40.0$ 。

测量次数	1	2	3
p_1 / MPa			
p_2 / MPa			
$ p_1 - p_2 $ / MPa			
平均值 p_p / MPa ($p_p = \overline{ p_1 - p_2 }$)			

(三) 选用两组最合理的数据，计算 He—Ne 激光波长、相对误差、不确定度（ m_0 和 m 的仪器误差略，估读误差为 0.2 条； d_0 和 d 的仪器误差为 0.0001mm，估读误差为 0.00002mm）并写出测量结果表达式。

(四) 计算空气折射率

求出移动 40 个条纹所对应的管内压强的变化值的绝对值 $|p_1 - p_2|$ 和其平均值 p_p ，算出空

气折射率的实验值为： $n = 1 + \frac{\lambda_0}{2L} \frac{40}{p_p} p_b$ ，其中大气压强 $p_b = 1.01325 \times 10^5$ Pa。

计算实验温度和大气压下的空气折射率的理论值，计算实验值的相对误差。

【数据处理公式参考】（以下内容预习时不必写）

1. 计算激光波长 λ

(1) 从实验数据表中选两组最合适的数据 (m_0, d_0) 和 (m, d) ，

$$(2) \lambda = \left| \frac{2(d - d_0)}{m - m_0} \right|;$$

2. 计算 λ 的相对误差： $E_\lambda = \frac{\lambda - \lambda_{\text{公认}}}{\lambda_{\text{公认}}} \times 100\%$ ，其中 $\lambda_{\text{公认}} = 632.8 \text{ nm}$ ；

3. 计算激光波长 λ 的不确定度 σ_λ ：

(1) m_0 、 m 、 d_0 、 d 是单次测量，所以，不考虑 A 类不确定度；

(2) m_0 、 m 只考虑 B 类确定度中的估读误差分量，仪器误差忽略：

$$\sigma_{m_0} = \sigma_m = \sqrt{\mu_{\Delta_{\text{估}}}^2 + u_{\Delta_{\text{估}}}^2} = \mu_{\Delta_{\text{估}}} = \frac{\Delta_{\text{估}}}{\sqrt{3}};$$

(3) d_0 、 d 因估读误差小于仪器误差的 1/3，只考虑 B 类确定度中的仪器误差分量：

$$\sigma_{d_0} = \sigma_d = \sqrt{\mu_{\Delta_{\text{仪}}}^2 + u_{\Delta_{\text{估}}}^2} = \mu_{\Delta_{\text{仪}}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}};$$

(4) 计算 λ 的相对不确定度 $\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}$

$$\frac{\sigma_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{\sigma_d^2 + \sigma_{d_0}^2}{(d - d_0)^2} + \frac{\sigma_m^2 + \sigma_{m_0}^2}{(m - m_0)^2}} = \sqrt{\frac{2}{3} \left[\frac{\Delta_{\text{仪}}^2}{(d - d_0)^2} + \frac{\Delta_{\text{估}}^2}{(m - m_0)^2} \right]}$$

(5) 计算 λ 的相对不确定度 σ_λ

$$\sigma_\lambda = \lambda \cdot \frac{\sigma_\lambda}{\lambda}$$

4. 写出测量结果表达式： $\lambda = \lambda \pm \sigma_\lambda$ 。

5. 按公式： $n = 1 + \frac{\lambda_0}{2L} \frac{60}{p_p} p_b$ 计算空气折射率的实验值。计算实验温度和大气压下的空气折射率的理论值（参见下面给出公式），计算实验值的相对误差。

$$n_0 = 1 + \frac{2.8793p}{1 + 0.003671 \times T} \times 10^{-9}$$

实验 I-6. 偏振光实验

【安全操作须知】

- (一) 不得直视激光束，以免灼伤眼睛！
- (二) 偏振镜、玻片不得从光具座上取下，玻砖应轻拿轻放！
- (三) 不得乱拿其它仪器配套的偏振镜、玻片、光具座等。
- (四) 实验完成后，关闭电源，整理仪器，玻砖放回盒子里，所有光具座放在导轨上，光强传感器的遮光罩旋紧。凳子归位，与实验无关的杂物请带离实验室，保持室内清洁卫生。

【实验原理】

详见教材：《结构化大学物理实验》（第二版）实验 3.6（参考页码 P.111-120）。

【实验目的】

- (一) 理解光的各种偏振特性；
- (二) 学会鉴别圆偏振光、线偏振光、椭圆偏振光和部分偏振光；
- (三) 验证马吕斯定律；
- (四) 通过测布儒斯特角求材料的相对折射率。

【实验内容】

- (一) 观察起偏和消光现象；
- (二) 鉴别圆偏振光、线偏振光、椭圆偏振光和部分偏振光；
- (三) 了解 $1/4$ 波片和 $1/2$ 波片的作用；
- (四) 验证马吕斯定律；
- (五) 通过测布儒斯特角求材料的相对折射率。

【实验器材】

半导体激光器 1 个，具有测量垂直旋转角度功能的偏振片 2 个、 $1/4$ 波片 1 个和 $1/2$ 波片 1 个，带底座玻片 1 个，布儒斯特角专用旋转工作台和转动支架 1 个，普通光具座若干，光学导轨（两组合用）1 条，光强传感器和相对光强测量仪 1 套。

【实验步骤及操作】

进行以下操作时，应保证激光束与光学导轨平行，且激光束垂直穿过所有镜片的圆心，到达传感器的中心。

(一) 观察起偏和消光现象。

1. 起偏：将激光投射到屏上，在激光束中插入一块偏振片，使偏振片在垂直于光束的平面内转动，观察透过光强的变化，并据此判断激光束（光源）的偏振情况。

2. 消光：在第一块偏振片和屏之间加入第二块偏振片，将第一块固定，转动第二块偏振片，观察现象，能否找到一个消光位置，此时两偏振片的位置关系怎样？

(二) 验证马吕斯定律

数据记录表见表 1-1。首先在光源后放上 P_1 ，使激光束垂直通过 P_1 中心，旋转 P_1 使光强最强（光电流的读数应在 200-1500 之间），记下 P_1 的角度坐标，再在 P_1 之后加入 P_2 ，使光线垂直通过 P_2 中心，旋转 P_2 到透过之光最强，记下 P_2 的度数，此时 P_1 和 P_2 的夹角为 $\theta=0^\circ$ 或 180° ，保持 P_1 不动，旋转 P_2 ，每隔 10° 记录一次对应的光强值 I_θ ，直到旋转 180° 。注意光强测试仪的读数与光强成线性关系，但没有定标，所以 I_θ 不代表绝对光强，可以不写单位。

(三) 1/4 波片和 1/2 波片的作用

1. 1/4 波片的作用：

数据记录及分析表见表 1-2。保持 P_1 不动，记下 P_1 的度数，旋转 P_2 到看到消光现象，记下 P_2 的度数，然后在 P_1 、 P_2 之间插入 1/4 波片 C_1 ，并使 C_1 转动到再次出现消光现象，记下此时 C_1 的度数，然后使 C_1 由消光位置分别再转过 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 时，每次都应将 P_2 逐步旋转 360° ，观察其间光强的变化情况，试问能看到几次光强极大和极小的现象？各次之间有无变化？为什么？并说明各次由 C_1 透出光的偏振性质。

2. 1/2 波片的作用

数据记录表见表 1-3。保持 P_1 不动，记下 P_1 的度数，旋转 P_2 到看到消光现象。

(1) 在 P_1 和 P_2 之间插入一个 1/2 波片，将此波片旋转 360° ，能看到几次消光？

(2) 将 1/2 波片任意转过一个角度，破坏消光现象，再将 P_2 旋转 360° ，能看到几次消光？

(3) 改变 1/2 波片的光轴与激光通过 P_1 后偏振方向之间夹角 θ 的数值，使其分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° ，把 P_2 旋转 360° 寻找消光位置，记录相应的角度 θ_{p_2} ，解释上面实验结果，并由此总结出 1/2 波片的作用。

(四) 通过测布儒斯特角求材料的相对折射率

要测量玻璃的相对折射率，首先要测出空气中平面玻璃的布儒斯特角。为此，必须在光具座上安装旋转工作台和转动支架。参考图 1-1，具体步骤如下：

1. 在光具座上装一个移动座，其后再放入专用移动座，并把旋转支架装到专用移动座上，再把旋转工作台装入到专用移动座上，把接收屏装入旋转支架的末端，把偏振片装在工作台与接收屏之间。

2. 在移动座上装上光源。并调整反射光、偏振片光轴、接收器光轴在同一平面内。

3. 将平面玻璃样品置于旋转工作台中心，并使反射面通过旋转中心，并用压片把样品砖固定。使反射面垂直于入射光，读出此时工作台度数 i_0 。

转动载物台以改变入射角，致使反射光为线偏振光，即旋转接收屏前的偏振片时会出现消光现象，读出此时旋转工作台的度数 i_1 ，记录到表 1-4。重复 3 次，取 i_1 平均值。

4. $\bar{i} = \left| \bar{i}_1 - \bar{i}_0 \right|$ ， \bar{i} 为所测得布儒斯特角。由此公式求出相对折射率：

$$\tan \bar{i} = n_2/n_1$$

$$n_2 = n_1 \cdot \tan \bar{i}$$

式中 n_2 为要求的相对折射率， n_1 为空气的折射率，值为 1。（ n_1 是多少位有效数字？）

(五) 实验操作注意事项

1. 半导体激光器功率较强，不要用眼睛直接观察激光，以免损坏眼睛。
2. 测量时要使偏振系统的出射光射入探测器的中间部位。
3. 不要触摸任何光学镜面。

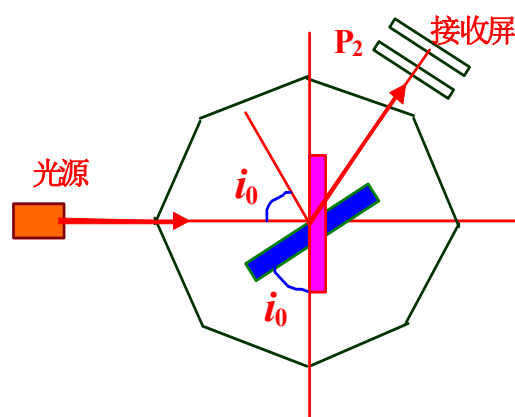


图 1-1. 测量布儒斯特角

【实验数据记录及数据处理和分析】

（一）验证马吕斯定律

1. 表 1-1. 验证马吕斯定律数据记录表

$P_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $P_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

P_1 和 P_2 之间的夹角 θ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
光电流 I_θ / μA										
P_1 和 P_2 之间的夹角 θ	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°	
光电流 I_θ / μA										

2. 绘制出 $I_\theta - \theta$ 和 $I_\theta - \cos^2 \theta$ 曲线图。

3. 分析 $I_\theta - \theta$ 和 $I_\theta - \cos^2 \theta$ 曲线的含义（紧跟在图后回答）。

（二）1/4 波片的作用

1. 表 1-2. 1/4 波片记录分析表

$P_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $P_2 = \underline{\hspace{2cm}}$, 1/4 波片 $C_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

C_1 由消光位置起转动的角度	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
P_2 旋转 360° , 光强有几次极大和极小							
极大和极小之间光强变化的程度							
C_1 透出光的偏振性质							

2. 根据上表总结 1/4 波片的作用（紧跟在表 1-2 后回答）。

（三）1/2 波片的作用（通过实验回答 1、2 问）

1. 在 P_1 和 P_2 之间插入一个 1/2 波片，将此波片旋转 360° ，能看到几次消光？

2. 将 1/2 波片任意转过一个角度，破坏消光现象，再将 P_2 旋转 360° ，又能看到几次消光？

3. 改变 1/2 波片的光轴与激光通过 P_1 后偏振方向之间夹角 θ 的数值（表 1-3）（注意记录 P_2 旋转 360° 消光所对应的位置 θ_{P_2} ）。

表 1-3 1/2 波片数据记录表

$P_1 = \underline{\hspace{2cm}}$, $P_2 = \underline{\hspace{2cm}}$, 1/2 波片 $C_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
P_2 所在的消光位置 θ_{P_2} : (位置 1) (位置 2)							

4. 依据上面实验结果，总结 1/2 波片的作用（紧跟在表 1-3 后回答）。

（四）通过测布儒斯特角求玻璃的折射率

1. 表 1-4 测量布儒斯特角实验数据表

测量次数	1	2	3	平均值
i_0				
i_1				
$\bar{i} = \bar{i}_1 - \bar{i}_0 $				

2. 求玻璃的折射率。玻璃的折射率理论值是 1.45845，求其相对误差。（要求有公式和计算过程）

实验 I-7. 声光效应实验

【安全操作须知】

不能直接用眼睛去看激光束，以免造成永久性的损伤。

【实验原理】

参考教材：《结构化大学物理实验》P.175-179，仔细研读原理后回答以下问题：

问题 1：什么是声光效应？

问题 2：什么是喇曼-奈斯型衍射？

问题 3：什么是布拉格衍射？

【实验目的】

（一）学会利用声光效应来测定声速。

（二）通过对声光器件衍射效率，中心频率的测量，加深对其概念的理解。

（三）观察声光偏转和声光调制现象。

【实验内容】

（一）在布喇格衍射下，测量偏转角，计算超声波声速。

（二）在布喇格衍射下，固定超声波功率，测量衍射光相对于 0 级衍射光的相对强度与超声波的频率，确定声光器件的中心频率。

（三）在布喇格衍射下，将功率信号源的超声波频率固定在声光器件的中心频率上，记录衍射 0 级光光强 (I_0) 和 1 级光光强度 (I_1) 以及超声波功率 (P_s)。

（四）测定布喇格衍射下的最大衍射效率。

【实验器材】

声光器件（材料为 $\text{P}_{10}\text{MoO}_3$ 晶体），光具座，半导体激光器，功率信号源，频率计，CCD 光强分布测量仪，示波器。

【实验步骤及操作】

（一）展开仪器，完成声光效应实验的安装调试：

（1）调节光路时让声光器件尽量靠近激光器。

（2）激光光束尽量平行穿过声光晶体的中心。

(3) 示波器选择“外触发”。

(4) 如在示波器顶端只有一条直线而看不到波形，这是 CCD 器件已饱和所致。可试着减弱环境光强、减小激光器的输出功率，问题就可得以解决。

(二) 调出布喇格衍射后，通过微调激光头的入射角度、声光晶体的方位、CCD 阵列的上下左右位置，使衍射光强最大。

(三) 用示波器测量衍射角，先要解决“定标”的问题，即示波器 X 方向上的 1 格等于 CCD 器件上多少象元，或者示波器上 1 格等于 CCD 器件位置 X 方向上的多少距离。方法是调节示波器的“时基”档及“微调”，使信号波形一帧（注：此处一帧指的是 CCD 传感器电路正好重复扫描全部像元的时间）正好对应于示波器上的某个刻度数。本实验测量光强采用的是一维阵列 CCD，该 CCD 阵列总长 30.24 mm，共 2160 个像元，每个像元的长度为 $14\mu\text{m}$ 。如果波形一帧正好对应于示波器上的 8.0 大格，则每小格对应实际空间距离为 $2160 \text{ 个像元} \div (8.0 \text{ 大格} \times 5) \times 14\mu\text{m} = 0.76\text{mm}$ 。

(四) 布喇格衍射下，固定超声波功率（对应电流为 80mA），测量不同超声波频率（即电信号频率） f_s 下，衍射光相对于入射光的偏转角 α 、衍射光 I_1 以及零级衍射光 I_0 在荧光屏上的高度，并计算声速 v_s ($v_s = \frac{\lambda_0}{\alpha} f_s = \frac{\lambda_0}{d/L} f_s$)，并定出声光器件的中心频率 f_c (对应 I_1 最大的那个频率)。

注意：(1) L 是声光介质的光出射面到 CCD 线阵光敏面的距离，应为两者底座的同侧距离减 60.0mm。

(2) 超声波在 $\text{P}_{10}\text{MoO}_3$ 晶体中的传播的速度公认值为 3632 m/s。

$L/\text{mm} = \underline{\hspace{2cm}}$ $i_s = 80\text{mA}$ $\lambda_0 = \underline{650} \text{ nm}$

次数	0 级光与 1 级光的偏转小格数	偏转距离 d/mm	偏转角 $\alpha = d/L$	f_s/MHz	I_0 (小格数)	I_1 (小格数)
1				80		
2				90		
3				100		
4				110		
5				120		

(四) 布喇格衍射下，将功率信号源的超声波频率固定在声光器件的中心频率 f_c 上，测出衍射光强度与超声波功率(对应电流 $I=50\text{-}100\text{mA}$)。

次数	$P_s(I)/\text{mA}$	I_0 (小格数)	I_1 (小格数)
1	50		

2	60		
3	70		
4	80		
5	90		
6	100		

(五) 测定布喇格衍射下的最大衍射效率，衍射效率 $= I_1 / I_0$ ，其中， I_0 为未发生声光衍射时“0 级光”的强度， I_1 为发生声光衍射后 1 级光的强度。 I 的测量是在布拉格衍射下，将信号源频率固定在中心频率上，并将信号源电流调到 100mA，记录 1 级光的强度为 I_1

【实验数据及分析】

要求所有的实验数据、计算过程和结果都要按教材第一章规定的有效数字相关规定书写；所有的计算必须推理严谨，公式、代入过程完整；计算结果包括中间计算结果必须写单位。

(一) 在布喇格衍射下，测量声光偏转量，计算超声波声速，和公认值比较计算相对误差。

(二) 在布喇格衍射下，固定超声波功率，确定声光器件的中心频率。

(三) 阐述在布喇格衍射下，固定超声波频率时衍射光强度如何随超声波功率变化。

(四) 测定布喇格衍射下的最大衍射效率。

$$\text{最大衍射效率为 } \eta_{\max} = \frac{I_1}{I_0} \times 100\%$$

实验 II-1 落球法测量液体的粘滞系数

液体流动时，平行于流动方向各层流体速度都不相同，即存在着相对滑动，于是在各层之间就有摩擦力产生，这一摩擦力称为粘滞力，它的方向平行于接触面，其大小与速度梯度及接触面积成正比，比例系数 η 称为粘滞系数，它是表征液体粘滞性强弱的重要参数。液体的粘滞系数和人们的生产、生活等方面有着密切的关系，比如医学上常把血粘滞系数的大小做为人体血液健康的重要标志之一。又如，石油在封闭管道中长距离输送时，其输运特性与粘滞性密切相关，因而在设计管道前，必须测量被输石油的粘滞系数。

测量液体粘滞系数可用落球法，毛细管法，转筒法等方法，其中落球法适用于测量粘滞系数较高的透明或半透明的液体，比如：蓖麻油、变压器油、甘油等。本实验用落球法测量蓖麻油的粘滞系数。

【预习思考题】

1. 为何要对公式 (4) 进行修正？
2. 如何判断小球在液体中已处于匀速运动状态？
3. 影响测量准确度的因素有哪些？

【实验原理】

处在液体中的小球受到铅直方向的三个力的作用：小球的重力 mg （ m 为小球质量）、液体作用于小球的浮力 ρgV （ V 是小球体积， ρ 是液体密度）和粘滞阻力 F （其方向与小球运动方向相反）。如果液体无限深广，在小球下落速度 v 较小情况下，有

$$F = 6\pi\eta rv \quad (1)$$

上式称为斯托克斯公式，其中 r 是小球的半径； η 称为液体的粘滞系数，其单位是 Pa·s。

小球在起初下落时，由于速度较小，受到的阻力也就比较小，随着下落速度的增大，阻力也随之增大。最后，三个力达到平衡，即

$$mg = \rho gV + 6\pi\eta v_0 r \quad (2)$$

此时，小球将以 v_0 作匀速直线运动，由（2）式可得：

$$\eta = \frac{(m - V\rho)g}{6\pi v_0 r} \quad (3)$$

令小球的直径为 d ，并用 $m = \frac{\pi}{6}d^3\rho'$ ， $v_0 = \frac{l}{t}$ ， $r = \frac{d}{2}$ 代入（3）式得

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \quad (4)$$

其中 ρ' 为小球材料的密度， l 为小球匀速下落的距离， t 为小球下落 l 距离所用的时间。

实验过程中，待测液体放置在容器中，故无法满足无限深广的条件，实验证明上式应进行如下修正方能符合实际情况：

$$\eta = \frac{(\rho' - \rho)gd^2t}{18l} \cdot \frac{1}{(1 + 2.4\frac{d}{D})(1 + 1.6\frac{d}{H})} \quad (5)$$

其中 D 为容器内径， H 为液柱高度。

当小球的密度较大，直径不是太小，而液体的粘滞系数值又较小时，小球在液体中的平衡速度 v_0 会达到较大的值，奥西思-果尔斯公式反映出了液体运动状态对斯托克斯公式的影响：

$$F = 6\pi\eta v_0 r (1 + \frac{3}{16}Re - \frac{19}{1080}Re^2 + \dots) \quad (6)$$

其中， Re 称为雷诺数，是表征液体运动状态的无量纲参数。

$$Re = \frac{\rho dv_0}{\eta} \quad (7)$$

当 $Re < 0.1$ 时，可认为（1）、（5）式成立；当 $0.1 < Re < 1$ 时，应考虑（6）式中1级修正项的影响，当 Re 大于1时，还须考虑高次修正项。

考虑（6）式中1级修正项的影响及玻璃管的影响后，粘滞系数 η_1 可表示为：

$$\eta_1 = \frac{(\rho' - \rho)gd^2}{1.8v_0(1 + 2.4d/D)(1 + 3Re/16)} = \eta \frac{1}{1 + 3Re/16} \quad (8)$$

由于 $3Re/16$ 是远小于1的数，将 $1/(1 + 3Re/16)$ 按幂级数展开后近似为 $1 - 3Re/16$ ，（8）式又可表示为：

$$\eta_1 = \eta - \frac{3}{16} v_0 d \rho \quad (9)$$

已知或测量得到 ρ' 、 ρ 、 D 、 d 、 v_0 等参数后，由（5）式计算粘滞系数 η ，再由（7）式计算 Re ，若需计算的 Re 的1级修正，则由（9）式计算经修正的粘滞系数 η_1 。

【实验目的】

1. 学习和掌握一种测量液体的粘滞系数的原理和方法。
2. 学习激光光电门的校准方法。
3. 用落球法测量蓖麻油的粘滞系数。

【实验内容】

1. 测试架调整，使得测试仪能可靠测得小球在两光电门之间的下落时间。
2. 测量落球法测量液体粘滞系数相关物理参数。

【实验器材】

DH4606落球法液体粘滞系数测定仪，钢直尺，螺旋测微器，电子天平，游标卡尺，直径约3mm的钢球若干。

【实验步骤和操作】

一、仪器组成

DH4606落球法液体粘滞系数测定仪由两部分组成。图1-1为测试架结构图，图1-2为测试仪面板图。

二、仪器调试、操作和测量方法

1. 装配传感器：如图1所示的测试架上端装光电门 I，下端装光电门 II，且两发射端装在一侧，两接收端装在另一侧。

2. 传感器连线：将测试架上的两光电门“发射端 I”、“发射端 II”、“接收端 I”和“接收端 II”的连接线插头分别对应插到图2所示测试仪面板的“发射端 I”、“发射端 II”、“接收端 I”和“接收端 II”上。

3. 光电门的对准判断：对准检查无误后，按下测试仪后面板上的电源开关，此时数码管将循环显示两光电门的状态：

“L-1-0”表示光电门 I 处于没对准状态；

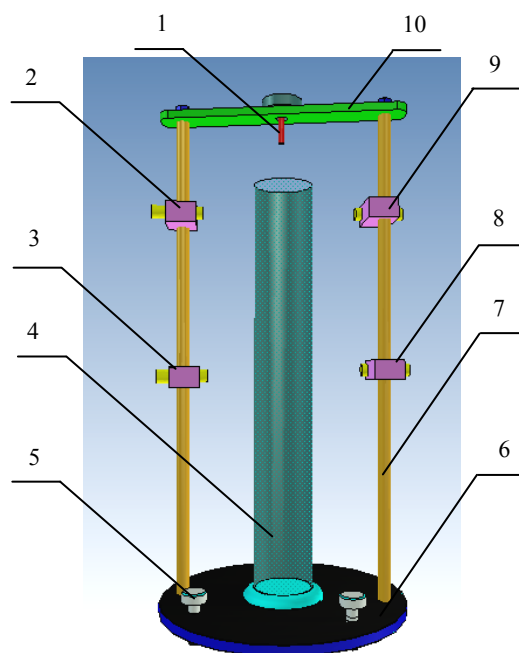


图 1-1 测试架结构图

- | | | |
|---------|-----------|-----------|
| 1. 落球导管 | 2. 发射端 I | 3. 发射端 II |
| 4. 量筒 | 5. 水平调节螺钉 | 6. 底盘 |
| 7. 支撑柱 | 8. 接收端 II | 9. 接收端 I |
| 10. 横梁 | | |

- “L-1-1”表示光电门Ⅰ处于对准状态；
“L-2-0”表示光电门Ⅱ处于没对准状态；
“L-2-1”表示光电门Ⅱ处于对准状态。

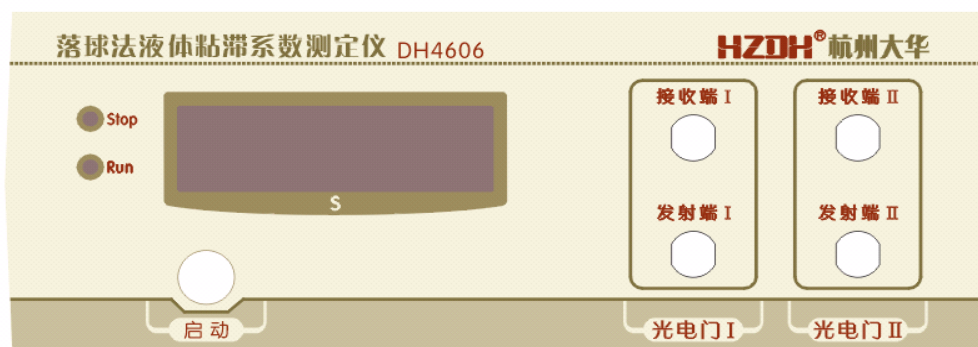


图 1-2 测试仪面

4. 调节测试架竖直，使得两对光电门都对准从落球导管自由下落小球的运动轨迹。该操作分以下五步进行：

- (1) 将线锤装在支撑横梁中间部位，调整粘滞系数测定仪测试架上的三个水平调节螺钉，使线锤对准底盘中心圆点；
- (2) 将光电门按仪器使用说明上的方法连接。接通测试仪电源，此时可以看到两光电门的发射端发出红光线束。调节上下两个光电门发射端，使两激光束刚好照在线锤的线上；
- (3) 收回线锤，将装有测试液体的量筒放置于底盘上，并移动量筒使其处于底盘中央位置；
- (4) 将落球导管安放于横梁中心，两光电门接收端调整至正对发射光（可参照上述测试仪使用说明校准两光电门）；
- (5) 待液体静止后，将小球用镊子从导管中放入，观察能否挡住两光电门光束（挡住两光束时会有时间值显示），若不能，适当调整光电门的位置。

5. 测量小球在两光电门之间的下落时间：

- (1) 当两光电门都处于对准状态时，按下测试仪前面板上的“**启动**”键，此时数码管将显示“HHHHH”，表示启动状态；
- (2) 待液体静止后，将小球用镊子从导管中放入；
- (3) 当下落小球经过上面的光电门（光电门Ⅰ）而未经过下面光电门（光电门Ⅱ）将显示“-----”，表示正在测量状态；
- (4) 若测量时间超过99.999s则显示超量程状态“88888”；当小球经过光电门Ⅱ后将显示小球在两光电门之间的下落时间；
- (5) 对同一小球进行重复测量时，重新按下“**启动**”键后，小心用磁钢在量筒外壁将钢球吸住并慢慢沿量筒外壁拖出到边缘时，用镊子捏住钢球放到纸巾上擦干（或用酒精清洁干净），再用镊子从导管中放入测量。依次类推，完成全部实验测量。

6. 若在实验过程中，不慎碰到光电门，使光电门偏离，将重新循环显示两光电门状态，此时需重新校准光电门。

三、测量内容

1. 设计判断小球在液体中处于匀速运动状态及提高测量小球运动速度准确度的实验方法，并自拟表格（表1-1仅供参考）记录相关实验数据。

2. 具体测量包括：

- (1) 用钢直尺测量光电门I和II之间的距离和液柱高度。
- (2) 用游标卡尺测量量筒内径。
- (3) 用螺旋测微器测量小球的直径。
- (4) 用电子天平测量小球的质量。
- (5) 用温度计测量待测液体（或环境）温度，测试前和测试后各测1次。
- (6) 用测试仪测量小球在两光电门之间的下落时间。
- (7) 【选做】用密度计测量待测液体密度（蓖麻油出厂密度为 $0.97\times 10^3\text{kg/m}^3$ ）。

全部实验完毕后，用磁钢将钢球吸出，用镊子捏住钢球放到纸巾上擦干（或用酒精清洁干净），以备下次实验用。

【数据记录及处理】

表 1-1 落球法测量液体粘滞系数数据记录表 小球材料：钢($\rho=7.925\times 10^3\text{kg/m}^3$) 液体材料：蓖麻油

测量次数 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均值
小球直径 d_i/mm										
小球质量 m_i/g										
下落时间 t_i/s										
发送器 I、II 距离 l_1/mm			接收器 I、II 距离 l_2/mm				光电门（小球下落） 距离平均值 l/mm			
量杯直径 D/mm			液柱高度 H/mm				液体密度 $\rho/\text{kg/m}^3$			
测量前液体温度 $T_0/^\circ\text{C}$			测量后液体温度 $T_1/^\circ\text{C}$				液体温度平均值 $\bar{T}/^\circ\text{C}$			

根据表 1-1 测量和中间计算结果，代入公式（5），计算液体的粘滞系数 η ，并与图 3 中该温度 \bar{T} 下的粘滞系数相比较计算相对误差并进行误差分析。

【选做】用（7）式计算雷诺数，用（8）式计算修正后的粘滞系数 η_1 ，比较 η 和 η_1 的差异，计算 η_1 的相对误差并进行误差分析。

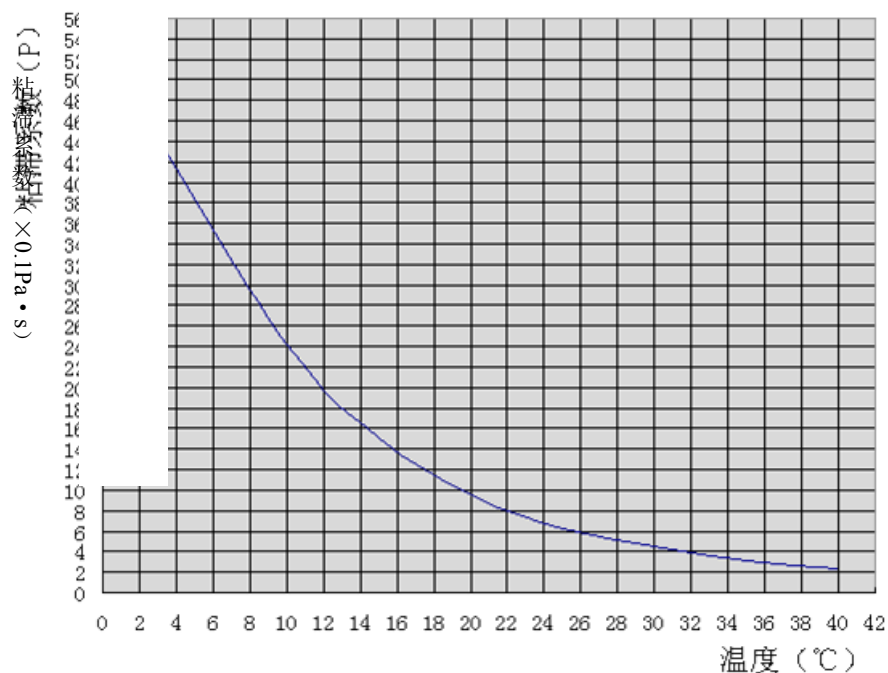


图1-3 蓖麻油粘滞系数与温度关系曲线

实验 II-2. 用电流场模拟静电场

【实验原理】

详见教材：《结构化大学物理实验》P.277-283。

学习了实验原理后，回答以下问题，写在实验报告纸上

- 1、从实验结果能否说明电极的电导率远大于导电介质的电导率？如不满足这条件会出线什么现象？
- 2、导电微晶与记录纸的同步测量记录，能否模拟出点电荷激发的电场或同心圆球壳型带电体激发的电场？为什么？
- 3、能否用稳恒电流场模拟稳定的温度场？为什么？

【实验目的】

1. 学习用模拟方法来测绘具有相同数学形式的物理场。
2. 描绘出分布曲线及场量的分布特点。
3. 加深对各物理场概念的理解。

【实验内容】

从长同轴圆行电缆的静电场、平行导线形成的静电场、劈尖形电极的静电场、聚焦电极的静电场中这四种类型的静电场中，自行选择两种静电场，用稳恒电流场分别进行模拟，画出模拟的静电场分布图。

【实验器材】

GVZ-3 型导电微晶静电场描绘仪（包括电源），A4 白纸 1 张，磁性压条 2 根

【实验步骤及操作】

（一）仪器调节。把静电场描绘专用电源，“电压调节”旋钮逆时针旋到底；连接电源输出电压端钮与导电微晶静电场描绘仪输入端钮；连接探针测量端钮与探针端钮；调节好上下探针的高低；接通电源，打开电压调节“开关”，“校正”“测量”开关调至校正，调节电压调节旋钮，使电压输出在 8.00V；“校正”“测量”开关调至“测量”利用探针进行等电位点测试。

（二）绘图前的准备。将 A4 纸对折，压出一条痕迹，也就是每张图的幅面为 A5（210×148mm），按电极在图幅中心对称位置的原则对准，用磁性压条压好纸张，之后不得中途移动纸张位置，以免图形错位。

（三）绘制电极。为了保证模拟精度，通电测是螺钉，而是螺钉周围的金黄色导电区域）：圆形电极矩形和其它电极要先测出各定点，用直尺协助绘成测出三角形和矩形共 7 个顶点的位置，再绘出对应

（四）等势线分布图测绘将导电微晶号表内外电压表正负极分别与同步探针及电源负极相连接，求相邻两等位线间的电位差为 1 伏，分别绘制选定翻转后，要重新插接电线。

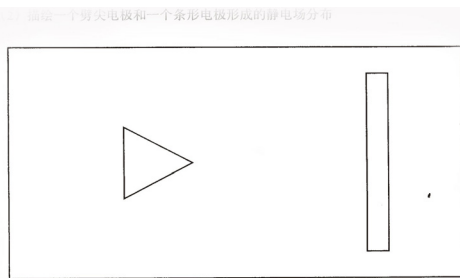


图 2-1 劈尖形电极示意图

（五）由于纸的正反面都要绘图，所以压点时力度要合适，既要保证痕迹能看清楚，也要保证每个点不要戳穿纸。

（六）测量绘制等势点和等势线的基本原则是等势线曲率半径越小，实验数据就越密集。直线和曲率半径大的每 10-20mm 测一个等位点即可；靠近电极、曲率半径很小的每 2-4mm 就要测一个等位点，其余以此类推。要求当堂完成等势线描绘（按作图规则，必须标明图名、数据点标记“×”、每条曲线名——电势值）。实验完毕后，将电压调节旋钮逆时针旋到底，关闭电源，拆除所有连接线，并整理好仪器。

（七）选作内容：用实验证明边缘畸变。（相关原理：由于导电微晶边缘处电流只能沿边流动，因此等位线必然与边缘垂直，使该处的等位线和电力线严重畸变，这就是用有限大的模拟模型去模拟无限大的空间电场时必然会受到的“边缘效应”的影响。如果减小这种影响，则使用“无限大”的导电微晶进行实验，或者人为地将导电微晶的边缘切割成电力线的形状。）

【注意事项】

1. 移动探针时，手不要太用力，以免接触点过大。
2. 模拟是有限大小的，考虑边缘附近场畸变影响，对某些电流场等势点的测找不宜在边缘进行。
3. 电源的表头既可显示输出的电压值，也可显示输入的电势差值，关键是通过电表指示开关控制：“校正”显示输出，“测量”显示输入。

【实验数据及分析】

(一) 根据等位线和场强之间的正交原理描绘各场的电力线分布图, 要求电力线的方向正确、密度能正确反映场强的大小, 图形要求对称、美观。

(二) 通过实验证实静电场模拟一定存在“边缘畸变”。

实验 II-3. 电子束实验

【实验原理】

详见教材:《结构化大学物理实验》P.185-191。仔细研读原理后回答以下问题:

问题 1: 电子射线示波管一般分为哪几部分? 各有何功能?

问题 2: 推导电偏灵敏度和磁偏灵敏度的计算公式, 并说明其含义。

问题 3: 测量电偏灵敏度和磁偏灵敏度前如何保证测量的初始状态?

【实验目的】

(一) 观察电子射线的静电聚焦现象, 测量静电透镜的组合聚焦比。

(二) 测量示波管的电偏灵敏度, 验证其与电偏电压的关系。

(三) 测量示波管的磁偏灵敏度, 验证其与磁偏电流的关系。

【实验内容】

(一) 观察电子束的控制与加速

(二) 观察电偏转与磁偏转现象并进行电偏灵敏度与磁偏灵敏度的测量

(三) 模拟示波器

【实验器材】

XD-JD-DZS 型电子束示波器综合实验仪、稳压电源

【实验步骤及操作】

(一) 通电前的准备工作

1. 将“功能转换”红色按钮弹起, 使仪器处于“电子束”工作状态;
2. 在“电子枪”功能区中, 给电子枪各极连线接好(该区为高压电! 必须确保在断电状态下连线, 连好后必须经老师检查才能通电);
3. 阴极 K 电压 V_K 、聚焦极 A_1 电压 V_1 、辅助聚焦极 A_2 电压 V_2 的调节电位器分别调到中间位置(中间位置即该旋钮左右旋到头之一半位置); 将栅极 G 电压 V_G 反时针转到底;
4. 将“偏转系统”功能区中各偏转电极连线, 水平偏转板 X 接电压 V_X 、水平偏转板 X' 电压 $V_{X'}$ 、垂直偏转板 Y 接电压 V_Y 、垂直偏转板 Y' 接电压 $V_{Y'}$;
5. 将 V_X 、 $V_{X'}$ 、 V_Y 、 $V_{Y'}$ 调节电位器分别调到中间位置;
6. 将“数显高压表”黑(一)表笔插入任一黑色接线孔(仪器内部所有黑色接线孔都已用导线连通); 红(+)表笔插入任一需要测量电压的接线孔。

(二) 实验观察电子束的控制与加速

1. 打开电源开关(电源指示灯亮), 预热两分钟。

2. 观察示波管荧光屏上有无光点,若无,则先把改变偏转电压 V_x 和 V_y 的旋钮置中间位置,再把 X 、 Y 调零旋钮置中间位置,然后再顺时针调节栅极电压 V_G ,直到光点出现。仔细调栅极电压,使光点亮度适中。

3. 调节 Y 、 X 偏转板对地电位 $V_Y=0V$, $V_X=0V$ (用电压表测量,不是反时针转到底);再微调 Y 、 X 调零电位器 $V_{X'}$ 、 $V_{Y'}$,使光斑处于荧光屏中央。

4. 调节聚焦旋钮 A_1 和辅助聚焦旋钮 A_2 使光斑最小,注意光斑变小后亮度会增加,为避免烧坏荧光粉,应随时调低亮度。调的偏暗一点较适合观察。

5. 光斑调好经老师检查后,记录 V_K 、 V_G 、 V_1 、 A_2 到表 3-1 中。

(三) 观察电偏转现象,测量电偏转灵敏度

1. 将偏转电压 V_x 和 V_y 置零,然后用 X 、 Y 调零旋钮 $V_{X'}$ 、 $V_{Y'}$ 将光点调至屏的中心。测量调零电压 $V_{X'}$ 、 $V_{Y'}$,记录到表 3-2 中

2. 当确定了电偏转的方向后,用调该方向偏转电压的调节旋钮将光点调至测量的起点(一般选在网格的左端,或上端处),测出其偏转电压,然后改变偏转电压,待光点每改变一格(5.0mm),测一次偏转电压值(V)至网格的右端,或下端为止,并将它们逐一记录在表 3-2 中。

(四) 观察磁偏转现象,测量磁偏转灵敏度

1. 保持电偏转连线不变,在 V_x 和 V_y 置零时,调节 $V_{X'}$ 、 $V_{Y'}$ 将光点调至屏的中心。

2. 将外接的励磁电源开关打开,接通磁场线圈的供电电路,逐渐增大线圈电流 I_s ,观察光点偏转的方向后将 I_s 调回零。

3. 根据光点的偏移方向用 Y 置零旋钮把光点调至测量标尺中点,然后逐步增大 I_s ,待光点每移 1 格记下相应的 I_s 值到光点到 4 格为止。

4. 拨动励磁电流开关,改变励磁电流方向,重复步骤(3),把相应的 D 和 I_s 值记入表 3-3 中。

(五) 模拟示波器

1. 将“功能转换”红色按钮按下,使仪器处于“示波器”工作状态。

2. 将正弦波信号经放大后加到 Y 偏转板上。

3. 将扫描信号经放大后加到 X 偏转板上。

4. 将 Y 偏转板上的信号加到同步输入端。

5. 调出稳定的正弦波图形,经老师检查后进行下一步操作。

6. 重新连线将原来的水平正弦波图形旋转 90 度。

【注意事项】

(1) 操作时谨防触电,示波管的阴极和栅极电位约为 1000 多伏的负电压。

(2) 高压表用于测量加速电压等高电压,其量程为 1500V,低压表用于测偏转电压,实验中宜选用 100V 量程,用低压表测高电压会损坏电表。

(3) 在实验过程中将“辉度”调节适宜,绝不能过强,以免严重损坏荧光屏上的发光物质,从而延长示波管的寿命。

【实验数据及分析】

表 3-1 电子枪电压参数表

电极	阴极电压 V_K	栅极电压 V_G	聚焦极电压 V_1	辅助聚焦极电压 V_2
电压 / V				

表 3-2 电偏数据记录表 调零电压 $V_{X'}$ = _____ V, $V_{Y'}$ = _____ V

偏转距离/mm	-25.0	-20.0	-15.0	-10.0	-5.0	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
V_x /V											
V_y /V	——										——

表 3-3 磁偏数据记录表 调零电压 $V_{X'}$ = _____ V, $V_{Y'}$ = _____ V

偏转距离/mm	-20.0	-15.0	-10.0	-5.0	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0
I /mA									

- (1) 画 $D-V_d$ 曲线 (即 $D-V_x$ 和 $D-V_y$ 曲线)。绘曲线时注意 V_d 为横坐标。分析以上曲线, 从中归纳出电子在横向电场中偏转的规律来。
- (2) 画 $D-I_s$ 曲线。注意画曲线时应以 I_s 为横坐标。分析上图, 总结出磁偏转的规律来。
- (3) 下课前画出模拟示波器时间轴在水平方向显示正弦波图形的接线框图, 要求包括实验过程中每根导线的连接, 并且阐述该波形合成过程。课后画出时间轴在垂直方向显示正弦波图形的导线连线方式。

实验 II-4. 霍耳效应法测量磁场

【安全操作须知】

- (一) 改变霍尔元件位置时, 不得拉扯导线, 请推拉管状连杆。
- (二) 不要频繁拨动工作电流和励磁电流的换向开关! 应测一组数据 (即: 改变霍尔元件的所有位置或改变励磁电流的全部大小) 后才拨动一次换向开关。以免影响开关寿命和读数的稳定性。
- (三) 认真检查各插头和连线, 确保连接正确后才能通电! 常规仪器的电源开关在仪器背后右侧。模块化仪器不要插拔各组电源, 直接按接线板开关即可。
- (四) 如发现电路异常要果断断电! 然后检查电路, 排除故障。
- (五) 拔插头时不得拉电线, 应另一只手压住模块或线圈。
- (六) 整理好模块、电线, 凳子归位, 清理杂物后才能离开实验室。

【实验原理】

详见教材:《结构化大学物理实验》(第二版) 实验 5.3 (参考页码 P.221-224)。

【实验目的】

- (一) 学习用霍尔效应法测量磁场的方法。
- (二) 掌握消除霍尔效应负效应（系统误差）的方法。

【实验内容】

- (一) 测量螺线管轴线上各点霍尔电压测量值。
- (二) 测量螺线管轴线上中点霍尔电压测量值随螺线管励磁电流的变化。

【实验器材】

(1) 常规仪器：LV528 型测量磁场综合实验仪 1 台，霍尔传感器组件 1 套（霍尔灵敏度 $K=171 \text{ mV/mA/T}$ ）；600mm 双头香蕉插头硅胶线红色、黑色各 1 根。

(2) 模块化仪器：螺线管组件 1 套，霍尔传感器组件 1 套（霍尔灵敏度 $K=171 \text{ mV/mA/T}$ ），YB1725B 电源 1 台，5V 稳压电源 3 个，12V 直流电源 1 个，双刀双掷换向开关模块 2 个，2-6mA 可调恒流源模块 1 个，200mV 数字电压表模块 1 个，20mA 和 2A 数字电流表模块各一个，双香蕉插头硅胶线一套（250mm 红色 3 根、黑色 5 根，600mm 红色、黑色各 2 根）。

【实验操作步骤】

1. 操作常规仪器的同学（第一组或由老师指定。操作模块化仪器的同学请从步骤 2 开始）按图 4-1 接好电路。霍尔传感器标尺杆的 1 脚（红色插头）、3 脚（黑色插头）为工作电流输入端，分别接仪器面板“ I_H 电源”的正、负端；2 脚（黄色插头）和 4 脚（黄色插头）为霍尔电压输出端，分别接仪器面板“传感器输出电压 V_H ”的两端。完成后跳到第 4 步。

2. 操作模块化仪器的同学（第二组由老师指定）在关闭电源的情况下，把 YB1725B 可调直流稳压/稳流电源的 4 个旋钮

要全部反时针转到底，再按图 4-2 连接电路。将 5V、12V 电源插头插入相应的模块。通电前要认真检查电路是否连接正确，以免烧毁电表和传感器！

3. 模块化仪器 YB1725B 可调直流稳压/稳流电源的操作方法：在 I_M 换向开关按向中间位置“O”的情况下，将电源的恒压调节“CV”旋钮使输出电压约为 8V，旋转恒流调节“CC”的“Fine”旋钮，使励磁电流 I_M 为需要值。注：YB1725B 电源上的读数误差大， I_M 应读取 2A 模块上的读数。

模块化仪器恒流调节 I_M 的方法是旋转恒流“CC”的“Fine”多圈电位器旋钮，如果调节范围不够，也可用粗调旋钮“Coarse”辅助调节。

4. I_H 和 I_M 的调节方法：通过调节常规仪器面板上或模块化仪器对应模块上的相应多圈电

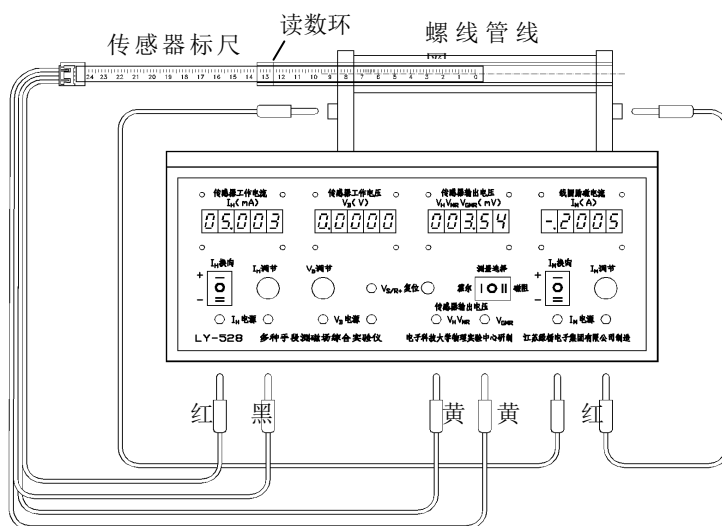


图 4-1 常规仪器做霍尔效应实验连线图

位器旋钮调节 I_H 和 I_M 。由于所有测量数显表精度等级为 0.1%，超出了 I_H 、 I_M 电位器的调节分辨力，如果无法准确调节到 $I_H=5.000\text{mA}$ 、 $I_M=0.2000\text{A}$ 等，就调到附近的稳定数值，比如 4.992mA 、 5.003mA 、 0.1998A 、 0.2005A 等，并修改相应的数据表格即可。

5. I_H 和 I_M 换向开关都是三态开关，除了按 “一” 接通 “+” (“b”)、按 “二” 接通 “-” (“a”) 外，按向中间位置 “O” 则全断开。在 I_M 换向开关按向中间位置 “O” 时， $I_M=0$ ，可以方便读取磁场为零时霍尔电压的零差读数。

6. 霍尔传感器标尺杆坐标 x' 如图 4-3 所示。标尺杆坐标与表 4-1 中位置坐标 x 相差 50.0mm 。所以， $x=x'-50.0\text{mm}$ ，即表中读数 x 值为 “标尺杆读数- 50.0mm ”；或 $x'=x+50.0\text{mm}$ ，即标尺杆读数为表中 $x+50.0\text{mm}$ 。例如：表中第一列 $x=-30.0\text{mm}$ ，就应该将标尺杆的 $x'=-30.0+50.0=20.0\text{mm}$ 对准读数环。图 4-3 中 “标尺杆读数”= 125.0mm ，则 $x=125.0-50.0=75.0\text{mm}$ 为霍尔传感器在线圈轴线中点的位置（螺线管长度约 150mm ）。

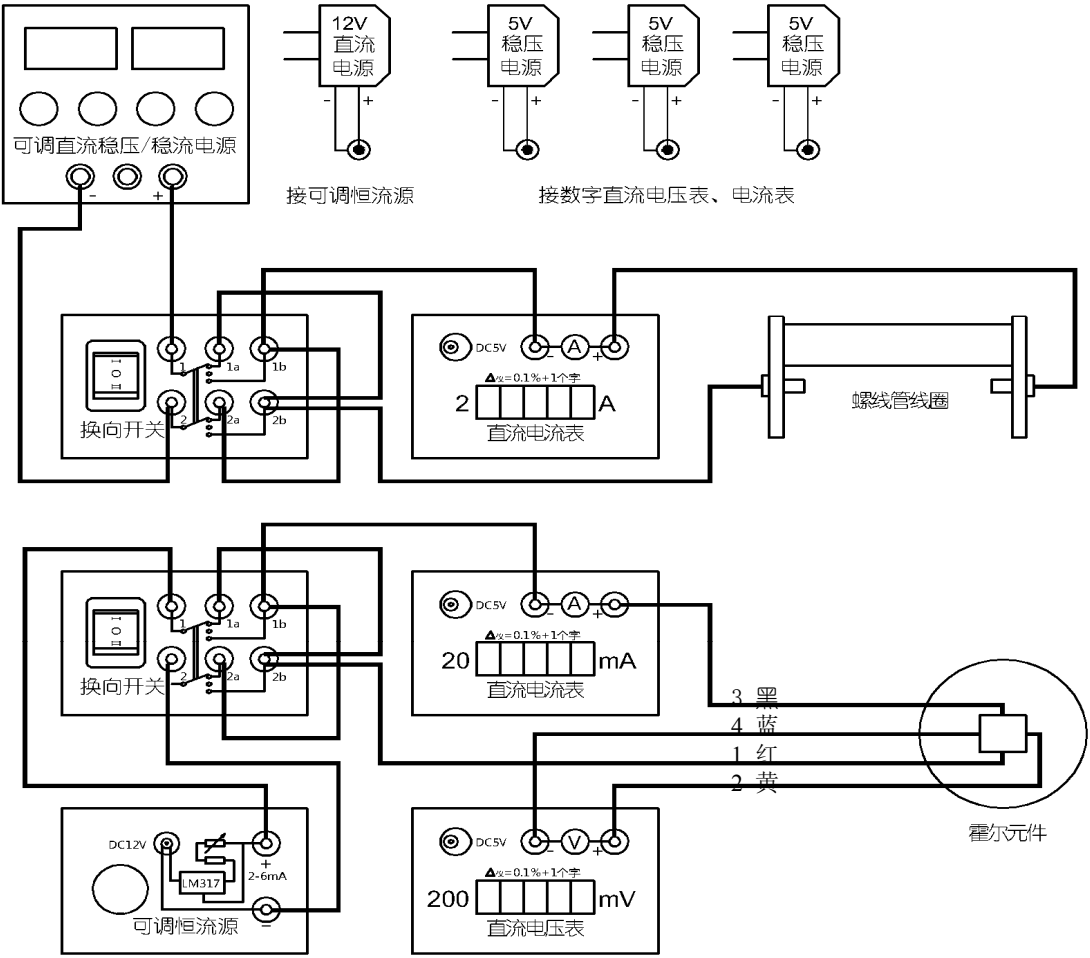


图 4-2 模块化仪器霍尔传感器在线圈中位值的读数示意图

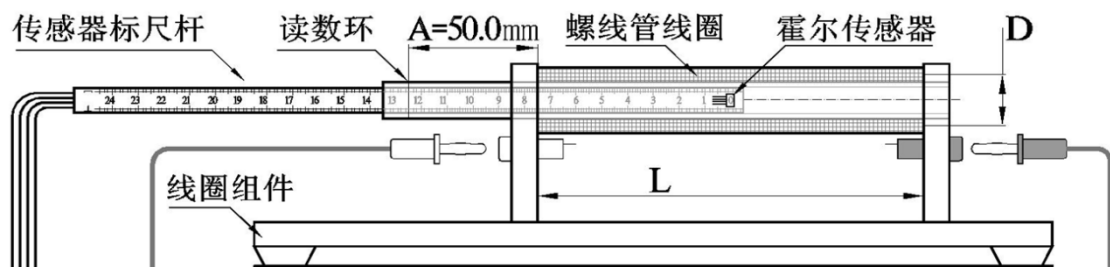


图 4-3 霍尔传感器在线圈轴线中点 ($x=75.0\text{mm}$) 时标尺杆读数 (125.0mm) 示意图

测量时在螺线管最左端附近应对称地多测几组数据，推荐的测量点详见表 4-1。测量结果记入表 4-1。

7. 将霍尔元件往螺线管中间推动。读出霍尔元件在不同位置时毫伏表读数 V_i ，对应的霍尔电压就是 $V_{Hi} = V_i - V_{0i}$ 。其中零差 V_{0i} 是 I_H 和 I_M 相同开关方向时，未加磁场 (I_M 调为 0.000A ，或霍尔元件位于螺线管外较远处，或模块化仪器将励磁电流换向开关置于“O”) 测得的霍尔电压值。

8. 为消除副效应，改变霍尔片的工作电流方向和磁场方向测量对应的霍尔电压。

9. 将霍尔元件调距螺线管中部 $x=75.0\text{mm}$ 处 ($x'=125.0\text{mm}$)，调节 I_M 旋钮，使 I_M 在 $0.0 - 220.0\text{mA}$ 范围内变化，每改变 20.0mA 测一组霍尔电压记入表 4.1-2。测量时要注意副效应的消除。

10. 记下霍尔元件的霍尔灵敏度 $K=171\text{ mV/mA/T}$ 和霍尔工作电流 I_H 。

11. 将印在仪器上的螺线管参数包括编号、匝数 N 、长度 L 、平均半径 R 全部作为原始数据进行记录。注意每台仪器的螺线管参数不一样。螺线管线圈左右接线柱 (即“红”、“黑”) 分别接励磁电流，即仪器面板“ I_M 电源”的“正”、“负”端，这时磁场方向为左边 N 右边 S。

12. 【选作】：第一组 (常规仪器) 将“电压表量程”选择按键开关置于“20” mV 挡，第二组 (模块化仪器) 不用改变电压表。把霍尔传感器从线圈中取出，不断改变方向测量地磁场，能否大致判断地磁场 S 极方向？能否定量地测定水平分量方向 (相对于实验桌前边)？霍尔传感器能否当指南针用？为什么？

【实验数据及分析】

1. 数据记录参考表格

实验分组：第_____组， 实验采用 常规 / 模块化 仪器 螺线管编号：No. _____，
线圈匝数： $N=$ _____， 线圈长度： $L=$ _____， 线圈平均直径： $D=$ _____，
励磁电流： $I_M=$ _____， 霍尔灵敏度 $K=$ _____， 霍尔工作流： $I_H=$ _____。

表 4-1. 螺线管轴线上各点霍尔电压测量值和磁场强度计算值及误差

零差 ($I_M=0.0000\text{A}$ 时)： $V_{01}=$ _____， $V_{02}=$ _____， $V_{03}=$ _____， $V_{04}=$ _____

测量项目 \ x / mm	-30.0	-20.0	-12.0	-7.0	-3.0	0.0	3.0	7.0	12.0	20.0	40.0	75.0
V_i / mV												
$V_i - V_{0i} / \text{mV}$												

V_2 / mV												
$V_2 - V_{02} / \text{mV}$												
V_3 / mV												
$V_3 - V_{03} / \text{mV}$												
V_4 / mV												
$V_4 - V_{04} / \text{mV}$												
V_H / mV												
B / mT												
$B_{\text{理}} / \text{mT}$												
$B - B_{\text{理}} / \text{mT}$												
相对误差 / %												

注：1、下课前计算出各点处霍尔电压值和螺线管中点处磁场强度的理论值后老师检查。

实验 II-5. 磁阻效应综合实验

【操作注意事项】

1. 由于磁阻效应传感器容易被“强磁场”磁化，造成灵敏度急剧下降，测量时要避免强磁场、顺磁性物体靠近磁阻传感器；随时注意观察数据，如有疑问时就要按动“复位”按钮，使传感器去磁，恢复灵敏度。

2. 实验时励磁电流不要随意增大，因为励磁电流大于 0.1A 后，磁阻传感器的灵敏度逐渐下降，会带来测量误差。

3. 接线或测量数据时，要特别注意检查移动两个线圈的距离和位置，是否满足亥姆霍兹线圈的条件。

【实验原理】

详阅原理后回答以下问题：

问题 1：如果大小恒定、方向可变的外加弱磁场（不会导致灵敏度下降）与图 8-1 中“敏感方向”相同或相反时；与图 8-1 中“磁化方向”相同或相反时，传感器电桥上每一个臂的坡莫合金薄膜电阻如何变化？电桥输出电压如何变化？

问题 2：为什么测量各向异性磁阻传感器的输出电压时，要改变 $B_{\text{测}}$ 为相反方向（或改变励磁电流方向）各测量一次？

问题 3：为什么亥姆霍兹线圈轴线中点附近磁场是均匀的？本实验两线圈之间距离多少毫米、两线圈间及与电源如何连接时可以组成亥姆霍兹线圈？请画出接线图。

（一）各向异性磁阻效应和磁阻传感器原理

磁阻传感器体积小，灵敏度高、易安装，在弱磁场测量方面有广泛应用前景，如磁力计、电子罗盘、线性和角位置传感器，车辆探测，GPS 导航等。本实验采用 HMC1021 型各向异性磁阻效应传感器（Anisotropic Magneto-Resistive, AMR），灵敏度达到 1.0 mV/V/Oe，分辨率达到 8.5nT，可以准确测量 0.000~0.600mT 的磁感应强度。

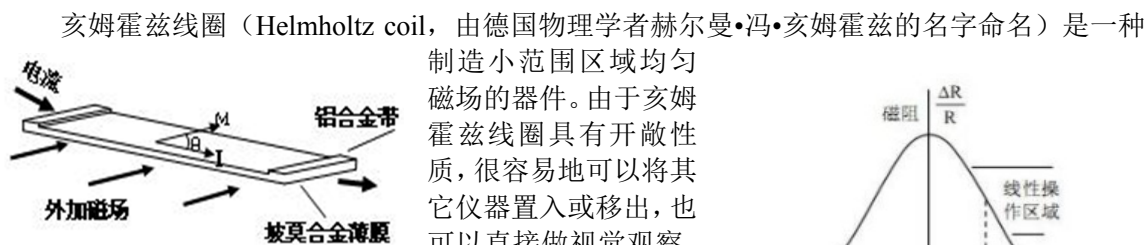


图 8-1 各向异性磁阻传感器构造

证磁场叠加原理、测试线圈轴线磁场分布的基础上，对磁阻传感器进行定标。

地磁场作为一种天然磁源，常由于导航，在军事、工业、医学、探矿等科研中有重要用途。地磁场的量值比较小，约 μT 量级，但在直流磁场测量，特别是弱磁场测量中，往往需要知道其大小和方向，并设法消除其影响。本实验采用磁阻传感器测定地磁场磁感应强度的大小及方向。从而掌握磁阻传感器的特性及测量地磁场的一种重要方法。

物质在磁场中电阻率发生变化的现象称为磁阻效应。对于铁、钴、镍及其合金等磁性金属，当外加磁场平行于磁体内部磁化方向时，电阻几乎不随外加磁场变化；当外加磁场偏离金属的内部磁化方向时，此类金属的电阻减小，这就是强磁金属的各向异性磁阻效应。

实验用各向异性磁阻传感器为长的薄膜状坡莫合金(铁镍合金)，用集成电路制作工艺将铁镍合金薄膜附着在硅片上。如图 8-1，薄膜的电阻率 $\rho(\theta)$ 与磁化强度 M 和电流 I 方向间的夹角 θ 的关系为

$$\rho(\theta) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \theta \quad (8-1)$$

其中 ρ_{\parallel} 、 ρ_{\perp} 分别是电流 I 平行于 M 和垂直于 M 时的电阻率。当沿着铁镍合金带的长度方向通以一定的直流电流，而垂直于电流方向施加一个外界磁场时，合金带自身的阻值会生较大的变化，利用合金带阻值这一变化，可以测量磁场大小和方向。

磁阻随 θ 角的变化关系如图 8-2 所示， θ 在接近于 $\pm 45^\circ$ 时磁阻与 θ 为近似线性关系，称为线性操作区域。如图 8-3，本实验采用的 HMC1021S 型一维各项异性磁阻传感器元件包含结构相同或对称的 4 个磁阻传感器，组成了如图 9-4 的非平衡电桥电路，优点是提高了灵敏度并减小了磁阻的温度漂移和外界电磁干扰。图 8-3 中，磁阻传感器通过在平行于磁化（偏置磁场 M_0 ，即待测外加磁场 B 为零时磁化强度）方向的坡莫合金薄膜上增加许多 45° 的电带的方法，使 M_0 （ B 为零时的磁化强度）和电流 I 方向间的夹角设置成 $\pm 45^\circ$ 。

对于 $B \ll M_0$ ，由式 9-1：

(1) 当 $B \parallel M_0$ 时，4 个磁阻同时增加或减小，电桥维持平衡，输出电压 U 为零，所以这两个方向对待测磁场不敏感。

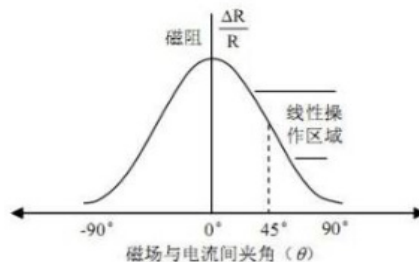


图 8-2 磁阻随 θ 角变化关系

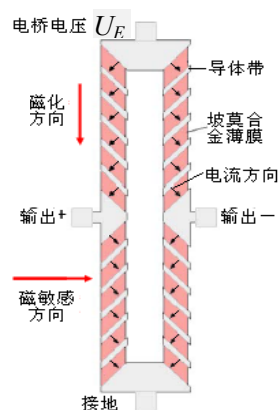


图 8-3 各向异性磁阻传感电桥结构

(2) 当 $B \perp M_0$ 时, 如图 9-5, 电桥左上和右下臂的 $\theta=45^\circ+\delta$, 磁阻减小, 电桥右上和左下臂的 $\theta=45^\circ-\delta$, 磁阻增大, 则非平衡电桥电压 U 最大, 这两个方向是磁敏感方向。由于 $B \ll M_0$, δ 是小量, 所以 B 正比于 δ , 也即 B 正比于 U , 实现了线性化的磁场测量。

(3) 一般地, B 的既不平行、也不垂直于 M_0 , 仅 $B \perp$

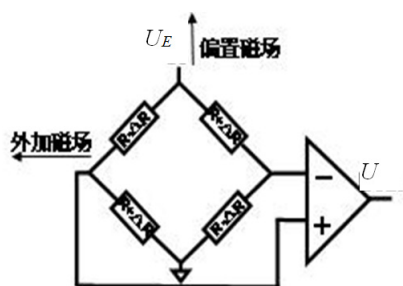


图 8-4 磁阻元件由 4 个磁阻传感器组成非平衡电桥电路量地磁场方向。

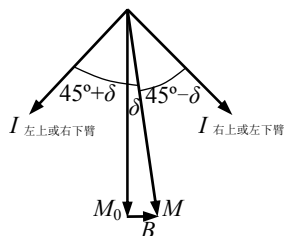


图 8-5 外磁场 $B \ll M_0$ 且垂直于 M_0 时, 各磁阻传感器磁化强度 M 的大小和方向变化

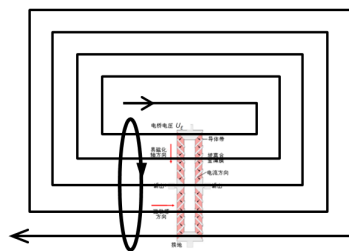


图 8-7 一条电流带与电桥关系示意图

M_0 的分量可以被测得, 对于 B 的大小确定的情况下, 改变传感器方向, 测得 $|U|$ 最大时即确定了 B 的方向, 应用之一就是测

如图 8-6a 所示, 传感器遇到强磁场感应时, 磁畴排列将紊乱, 导致灵敏度下降, 所以, 传感器硅片上设计了两条铝制电流带, 一条是置位与复位带, 可以用来置位或复位极性。电流带结构及与电桥关系如图 8-7 所示。复位的原理示意如图 8-6b 和图 8-6c 所示; 另一条是偏置磁场带, 用于产生一个偏置磁场, 补偿环境磁场中的弱磁场部分, 使磁阻传感器输出显示线性关系, 本实验没有使用偏置电压, 因此, 测量时需要用异号法消除环境磁场的影响。

实验采用的磁阻传感器是面贴合封装的磁场传感器, 它能测量与管脚平行方向的磁场。如果定义 S 为磁阻效应传感器的灵敏度, 则电桥电阻相对变化项与磁阻传感器磁敏感方向的外磁场 B 成正比、与灵敏度 S 成正比。因而电桥输出电压 U 可以用下式表示为

$$U = \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \times U_E = S U_E B \quad (8-2)$$

式中 $U_E = U_B$ 为电桥电源电压 (LY528 仪器面板标注为 U_B , 下文中 U_E 即表示 U_B , 不再另行说明)。

实验中 B 主要包含被测磁场和地磁场在传感器易磁化方向的分量 $B_{\text{测}}$ 和 $B_{\text{地}}$ 。 $B_{\text{地}}$ 大小恒定, 但量值未知, 另外电桥还存在 U_E 一定时也是常数的零差电压 U_0 , 于是测量时要用异号法消除 $B_{\text{地}}$ 和 U_0 的影响, 即改变 $B_{\text{测}}$ 的方向 (改变励磁电流方向) 各测量一次, 有

$$\begin{cases} U_1 = S U_E (-B_{\text{测}} - B_{\text{地}}) + U_0 \\ U_2 = S U_E (+B_{\text{测}} - B_{\text{地}}) + U_0 \end{cases} \quad (8-3)$$

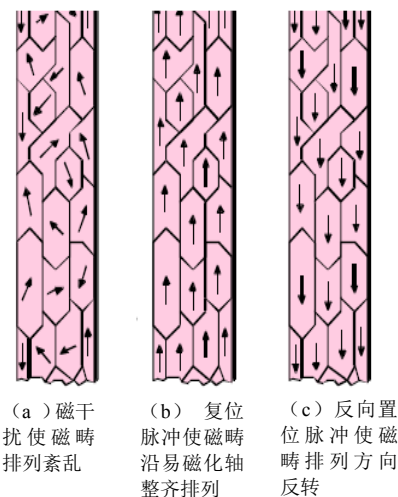


图 8-6 复位脉冲

由式 (8-2) 和 (8-3) 得到

$$U = \frac{U_2 - U_1}{2} = S U_E B_{\text{测}} \quad (8-4)$$

由式 (9-4), 如果 U_1 、 U_2 和 $B_{\text{测}}$ 已知, 也可测出磁阻传感器的灵敏度 S

$$S = \frac{U}{U_E B_{\text{测}}} \quad \text{或} \quad S = \frac{U_2 - U_1}{2 U_E B_{\text{测}}} \quad (8-5)$$

(二) 亥姆霍兹线圈磁场分布及磁阻传感器定标

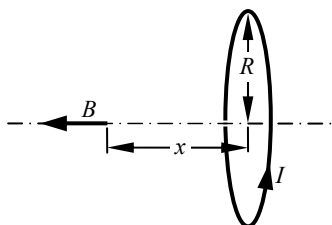


图 8-8 载流圆线圈轴线上的磁感应强度

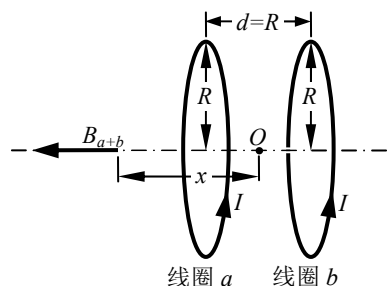


图 8-9 亥姆霍兹线圈轴线上的磁感应强度

(1) 如图 8-8, 根据毕奥—萨伐尔定律, 载流线圈在轴线 (通过圆心并与线圈平面垂直的直线) 上某点的磁感应强度为:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \bar{R}^2}{2(\bar{R}^2 + x^2)^{3/2}} N \cdot I \quad (8-6)$$

式中 μ_0 为真空磁导率, \bar{R} 为线圈的平均半径, x 为圆心到该点的距离, N 为线圈匝数, I_M 为通过线圈的电流强度。因此, 圆心处的磁感应强度 B_0 为:

$$B_0 = \frac{\mu_0}{2\bar{R}} N \cdot I_M \quad (8-7)$$

轴线外的磁场分布计算公式较为复杂, 这里忽略。

(2) 如图 8-9, 亥姆霍兹线圈是一对彼此平行且连通的共轴圆形线圈, 两线圈内的电流方向一致, 大小相同, 线圈之间的距离 d 正好等于圆形线圈的平均半径 \bar{R} 。这种线圈的特点是能在其公共轴线中点附近产生较广的均匀磁场区, 所以在生产和科研中有较大的使用价值, 也常用于弱磁场的计量标准。

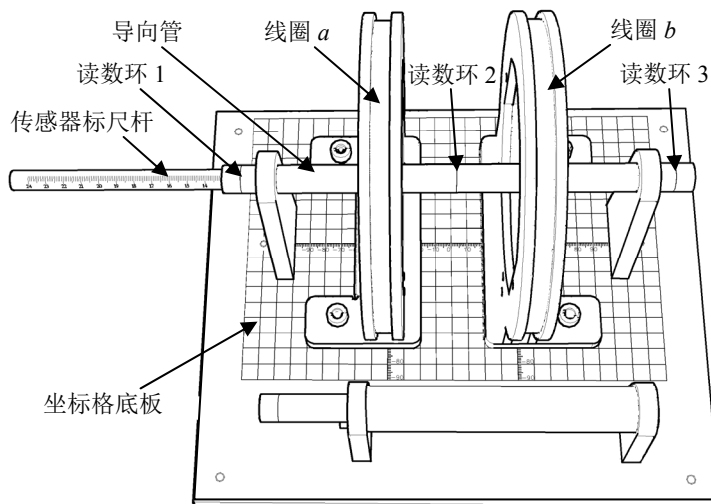


图 8-10 亥姆赫兹线圈和传感装置外形图

本实验用亥姆霍兹线圈和磁场测量装置外形和 8-10 所示。

线圈 a 和 b 参数相同，圈数为 $N=520$ 匝，平均半径为 $\bar{R}=80.0\text{mm}$ ，每个线圈的接线柱在所在线圈一侧的侧板上，当两个线圈电流同向时，轴线上中心处磁场最强；反之，当两个线圈电流反向时，轴线上中心处磁场为零。

实验仪器分 LY528 型常规仪器和模块化仪器两种(注：第二组的部分同学操作模块化仪器，其他同学操作 LY528 型常规仪器，具体由任课老师安排)。

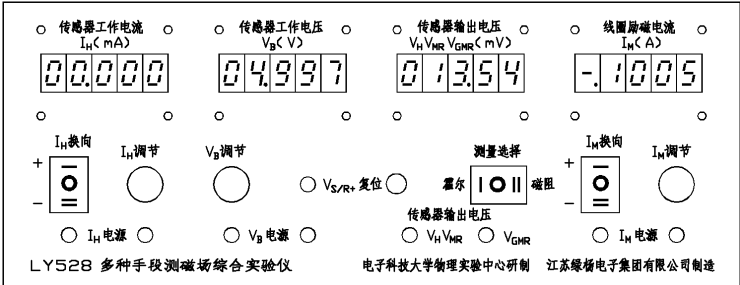


图 8-11 LY528 型常规仪器面板

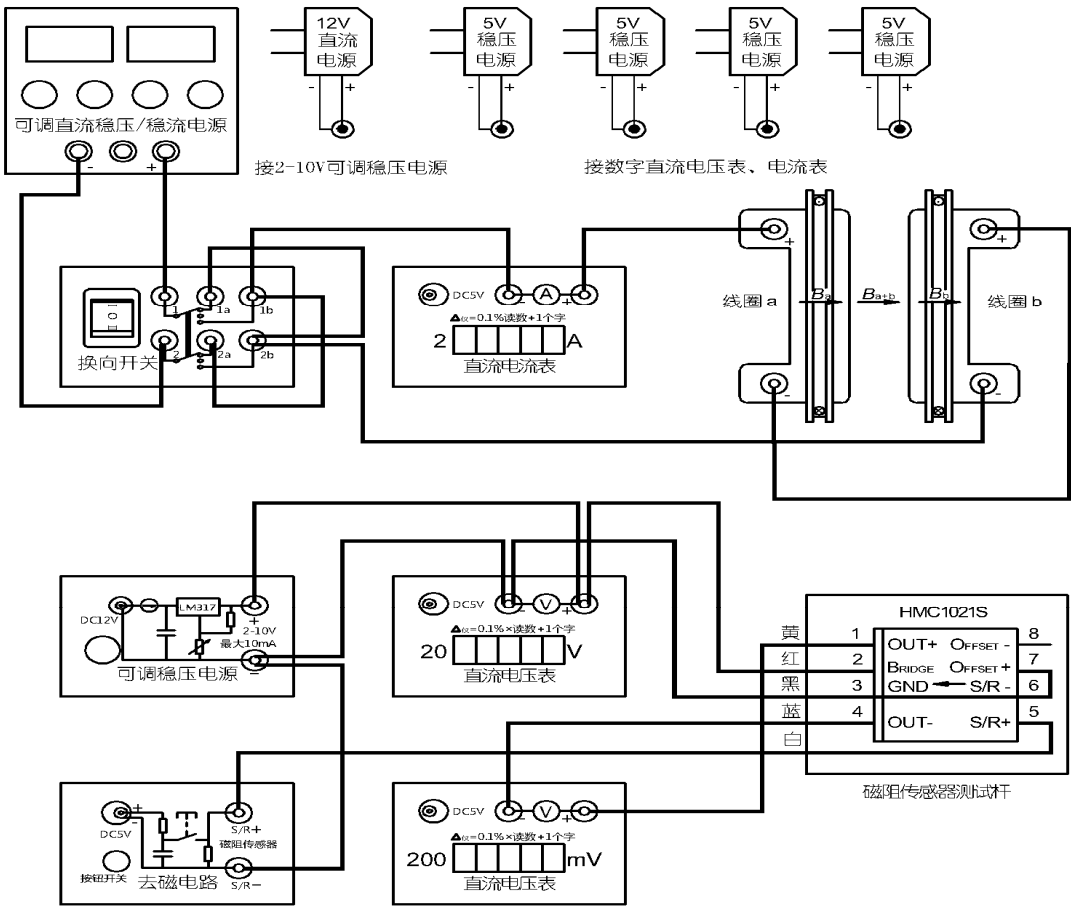


图 8-12 模块化仪器电路连线图

对于 LY528 型常规仪器，只要按图 8-12 将两线圈（与模块化仪器相同）串联后接到如图

8-11 所示的仪器面板上 I_M 的两个插孔，将传感器杆连线的红色插头接 V_B 电源正、黑色插头接 V_B 电源负、两黄色插头接 V_{MR} 、绿色插头接 $V_{S/R+}$ 即可。注意开机前应先将“测量选择”开关置于“磁阻”。

对于模块化仪器，电路连线图如图 8-12 所示。

设 x 为亥姆霍兹线圈中轴线上某点离中心点 O 处的距离，则亥姆霍兹线圈轴线上任意一点的磁感应强度为：

$$B_{理} = \frac{1}{2} \mu_0 \cdot N \cdot I_M \cdot \bar{R}^2 \left\{ \left[\bar{R}^2 + \left(\frac{\bar{R}}{2} + x \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[\bar{R}^2 + \left(\frac{\bar{R}}{2} - x \right)^2 \right]^{-3/2} \right\} \quad (8-8)$$

亥姆霍兹线圈上中心 O 处的磁感应强度 $B_{理0}$ 可由 (9-8) 简化为

$$B_{理0} = \frac{8}{5^{3/2}} \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_M}{\bar{R}} \quad (8-9)$$

用式 (8-9) 中 $B_{理0}$ 代替式 (9-5) 中 $B_{测}$ ，得到磁阻传感器灵敏度

$$S = \frac{U}{U_E B_{理0}} \quad \text{或} \quad S = \frac{U_2 - U_1}{2U_E B_{理0}} \quad (8-10)$$

定标之后的磁阻传感器就可以求传感器易磁化方向，也就是线圈和传感器标尺杆轴线方向的磁感应强度了，即

$$B_{测} = \frac{U}{U_E S} = \frac{U_2 - U_1}{2U_E S} \quad (8-11)$$

磁阻传感器安装在传感器标尺杆 0.0mm 处，传感方向为标尺杆轴线向右，按图 8-7 接线，励磁电流 I_M 方向开关按向“一”时，两线圈产生磁场的 N 极向左，输出电压为负，反之，励磁电流 I_M 方向开关按向“二”时输出电压为正。

为了测量方便，实验仪器在坐标底板上标有对称的二维米尺刻度，当亥姆霍兹线圈分别摆放在左右 $\pm 40.0\text{mm}$ 处、前后 0.0mm 处时，导向管的轴线正好与亥姆霍兹线圈的轴线重合，且左、中、右三个读数环的坐标为 -120.0mm、0.0mm、120.0mm，所以以图 8-8 中的左读数环作为参照，以传感器标尺杆的读数 x' 确定空间位置时，式 (8-8) 中

$$x = x' - 120.0\text{mm} \quad (8-12)$$

本实验用两个线圈的底座长度都是 140.0mm，宽度都是 40.0mm（如果含接线柱座，宽度是 70.0mm），为对称结构，所以如图 8-8，线圈座的前部坐标为 -70.0mm、两线圈内侧的坐标分别为 $\pm 20.0\text{mm}$ 时，就满足了亥姆霍兹线圈的位置条件，且传感器标尺杆位置满足式 (8-12)。

如果要测量轴外或非亥姆霍兹线圈状态的磁场分布，可自行设计摆放线圈，但要注意非对称摆放时 (8-12) 式可能失效，需要实验者自己标定传感器标尺杆的读数 x' 与空间坐标 x 的关系。

(三) 地磁场测量

本实验测量地磁相对于实验室的方向，将坐标格底板摆放到与实验桌对正，而实验桌与实验室是对正的，所以，测量时将如图 8-13，桌子的左右为 x 方向，传感器标尺杆安装传感器的一端朝右为 $x+$ 向，朝左为 $x-$ 向，朝前为 $y+$ 向，朝后（指向自己一方）为 $y-$ 向，朝上为 $z+$ 向，朝下为 $z-$ 向。用经过定标的磁阻传感器分别测量 $x+$ 、 $x-$ 、 $y+$ 、 $y-$ 、 $z+$ 、 $z-$ 六个方向的输出电压 U_{x+} 、 U_{x-} 、 U_{y+} 、 U_{y-} 、 U_{z+} 、 U_{z-} ，用式 (8-11) 计算出 x 、 y 、 z 三个方向的磁场分量

$$B_x = \frac{U_{x+} - U_{x-}}{2U_E S} \quad (8-13)$$

$$B_y = \frac{U_{y+} - U_{y-}}{2U_E S} \quad (8-14)$$

$$B_z = \frac{U_{z+} - U_{z-}}{2U_E S} \quad (8-15)$$

再按图 8-9 进行合成，求出水平分量 $U_{//}$ 和水平偏向角 θ

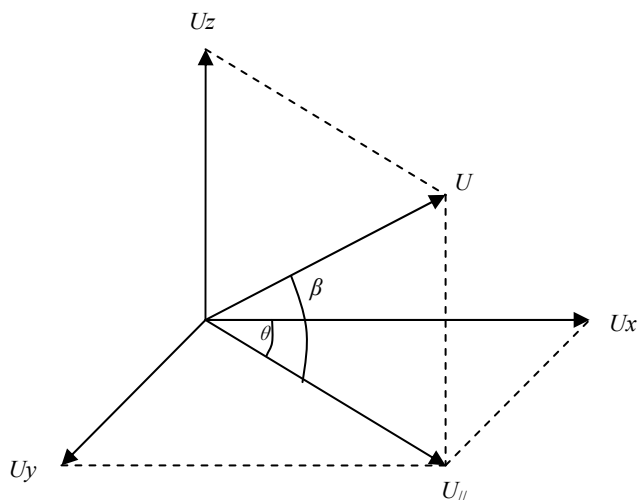


图 8-13 测量地磁方位示意

$$B_{//} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (8-16)$$

$$\theta = \arctg \frac{B_y}{B_x} \quad (8-17)$$

再求出地磁场的大小 $B_{地}$ 和磁倾角 β

$$B_{地} = \sqrt{B_{//}^2 + B_z^2} \quad (8-18)$$

$$\beta = \arctg \frac{B_z}{B_{//}} \quad (8-19)$$

【实验目的】

- (1) 了解各向异性磁阻效应原理和传感电路的组成。
- (2) 掌握应用各向异性磁阻效应测量弱磁场的方法。
- (3) 掌握亥姆霍兹线圈空间轴线上磁场的计算和测量方法。
- (4) 掌握用亥姆霍兹线圈的对磁阻传感器进行定标的方法。
- (5) 掌握用磁阻传感器测量地磁场的方法。

【实验内容】

- (1) 用亥姆霍兹线圈磁场对磁阻传感器定标，测量电源电压对传感器灵敏度的影响。
- (2) 测量两线圈，比较两线圈极性不同、距离不同时轴线磁感应强度分布。
- (3) 用磁阻效应传感器测量地磁场的大小和方位。

【实验器材】

(1) LY528 型磁场测量综合实验仪：仪器主机 1 台，二维坐标底座 1 个，亥姆霍兹线圈和磁阻传感器组件 1 套，红、黑、黄色 600mm 双香蕉插头硅胶线各 1 根。

(2) 模块化磁场测量综合实验仪：含亥姆霍兹线圈和磁阻传感器组件 1 套，YB1725B 电源 1 台，5V 稳压电源 4 个，2-10V 可调稳压电源 1 个，双刀双掷换向开关模块 1 个，去磁电路模块 1 个，200mV 数字电压表模块 1 个，2A 数字电流表模块 1 个，双香蕉插头硅胶线：250mm 红色 3 根、黑色 5 根，600mm 红色、黑色各 2 根。

【实验步骤及操作】

注：以下操作步骤同时适用于 LY528 型常规仪器与模块化仪器，个别不同的地方单独注明。

(1) 用亥姆霍兹线圈对磁阻传感器进行定标。先按图 8-10、8-11、8-12 接线及摆放线圈 a 、 b 为亥姆霍兹线圈 $a+b$ ，励磁电流 I_M 调为 0.100A（注意电流调节时必须精确到 3 位有效数字，电表上最后一位调不准没关系，常规仪器 U_B 、模块化仪器 U_E 也同法调节），传感器电源电压 U_E 按表 1 调到 2.00 - 8.00V 之间， I_M 换向开关按向“一”，测量传感器在中心点 O 处（标尺杆对准左读数环的坐标为 $x' = 120.0\text{mm}$ ）的传感电压 U_1 ，再将 I_M 换向开关按向“二”，测得传感电压 U_2 ，用式 (8-10) 求出磁阻传感器的灵敏度 S ，计算并总结规律。有关数据和计算结果记入表 8-1。注意： I_M 换向后，由于换向瞬间电流的冲击，传感灵敏度会急剧降低，需按复位键恢复灵敏度。

【选做】(2) 测量磁阻传感器的线性度。传感器电源电压 U_E (U_B ，下同) 调到 5.00V，测量励磁电流 I_M 从零逐步变化到最大时输出电压的变化情况，计算并总结规律。有关数据和计算结果记入表 8-2。

(3.1) 方法同步骤 (1)，将励磁电流 I_M 调为 0.100A，传感器电源电压 U_E (U_B ，下同，不再重述) 调到 5.00V，改变接线（要特别注意线圈的正负极性关系），分别测量单个线圈 a 、 b 以及亥姆霍兹线圈 $a+b$ 在轴线上各处产生的传感电压记入表格，再计算出相应的磁感应强度 B_a 、 B_b 、 B_{a+b} ，将 $B_a + B_b$ 与 B_{a+b} 进行比较，求出各处磁感应强度的相对误差，证明磁场迭加原理。有关数据和计算结果记入表 8-3。

(3.2) 在步骤 (3.1) 的基础上，重新接线，改变线圈 b 的电流方向，测量线圈组 $a+b$ 在轴线上各处产生的传感电压记入表格，再计算出相应的磁感应强度 B_{a-b} ，将 $B_a - B_b$ 与 B_{a-b} 进行比较，求出各处磁感应强度的相对误差，进一步证明磁场迭加原理。有关数据和计算结果记入表 8-3。

【选做】(4) 将线圈 b 的接线恢复到步骤 (3.1)，其余不变，对称地改变线圈 a 、 b 的间距分别为 $d = 60.0\text{mm}$ ($d < \bar{R}$) 和 $d = 100.0\text{mm}$ ($d > \bar{R}$)，分别测量线圈 $a+b$ 在轴线上各处产生的传感电压，计算出相应的磁感应强度分布。求出每种情况下两线圈轴线中部附近磁感应强度不均匀度为 1%（即磁感应强度大于等于中心点 O 处 99%）的 x 坐标范围，并与步骤 (3) 测出的磁感应强度不均匀同为 1% 的 x 坐标范围进行比较，分析哪种情况下 x 坐标范围最宽。有关数据和计算结果记入表 8-4.1 和表 8-4.2。

【选做】(5) 在步骤 (3.1) 的基础上，测量轴外磁场分布，确定中心点 O 处轴外附近磁

感应强度不均匀度为 1%的 y 坐标范围。有关数据和计算结果记入表 8-5。

【选做】(6) 将亥姆霍兹线圈电流调到零，取消外加磁场，测量其它仪器产生的磁场是否会影响本传感器的读数，以及影响有多大？如果影响大，应该采取什么措施？

(7) 测量地磁场的各分量，注意参照桌边即仪器坐标格底板确定传感器标尺杆的 x 、 y 方向， z 方向即竖直方向需用实验者用三角板或书本辅助确定传感器标尺杆是否竖直。有关数据和计算结果记入表 8-6。

【测量数据及处理】

(1) 求不同电源电压下磁阻传感器的灵敏度 S ，数据及计算结果记入表 8-1，总结规律于表后。

表 8-1 $I_M = 0.100\text{A}$ ， $d = \bar{R} = 80.0\text{mm}$ ， $x' = 120.0\text{mm}$ ， $B_{理0} = \underline{\hspace{2cm}}\text{mT}$

$U_B = U_E / \text{V}$	2.00	4.00	5.00	6.00	8.00
U_1 / mV					
U_2 / mV					
U / mV					
$S / (\text{mV} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mT}^{-1})$					

【选做】(2) 测量磁阻传感器的线性度，数据及计算结果记入表 8-2，绘平滑曲线及拟合直线并总结规律于表后。

表 8-2 $U_B = U_E = 5.00\text{V}$ ， $d = \bar{R} = 80.0\text{mm}$ ， $x' = 120.0\text{mm}$ ， $S = \underline{\hspace{2cm}}\text{mV} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{mT}^{-1}$

I_M / A	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125	0.150	0.175	0.200	0.225
U_1 / mV									
U_2 / mV									
U / mV									
$B_{测} / \text{mT}$									

(3) 证明磁场迭加原理，线圈 a 、 b 、 $a+b$ 及 $a-b$ 轴线传感电压测量值数据及计算结果记入表 8-3，绘平滑曲线并总结规律于表后。

表 8-3 $U_B = U_E = 5.00\text{V}$ ， $I_M = 0.100\text{A}$ ， $d = \bar{R} = 80.0\text{mm}$ ， $x_a = -40.0\text{mm}$ ， $x_b = 40.0\text{mm}$ ， $S = \underline{\hspace{2cm}}$

	x' / mm	40.0	60.0	80.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	160.0	180.0	200.0
只接 a 线圈	x_a / mm	-40.0	-20.0	0.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	80.0	100.0	120.0
	U_{a1} / mV											
	U_{a2} / mV											
	U_a / V											
	B_a / mT											
只接 b 线圈	x_b / mm	-120.0	-100.0	-80.0	-60.0	-50.0	-40.0	-30.0	-20.0	0.0	20.0	40.0
	U_{b1} / mV											
	U_{b2} / mV											

	U_b/mV											
	B_b/mT											
亥姆霍兹线圈 $a+b$	x_{a+b} 或 x_{a-b}/mm	-80.0	-60.0	-40.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	40.0	60.0	80.0
	$U_{(a+b)1}/\text{mV}$											
	$U_{(a+b)2}/\text{mV}$											
	U_{a+b}/mV											
	B_{a+b}/mT											
叠加	B_a+B_b/mT											
相对误差	$E/\%$											
反相线圈组合 $a-b$	$U_{(a-b)1}/\text{mV}$											
	$U_{(a-b)2}/\text{mV}$											
	U_{a-b}/mV											
	B_{a-b}/mT											
叠加	B_a-B_b/mT											
相对误差	$E/\%$											

将各处测得磁场 B_{a+b} 与相应亥姆霍兹线圈磁场理论值 $B_a + B_b$ 进行对比; B_{a-b} 与 $B_a - B_b$ 进行对比, 证明叠加原理。

【选做】(4) 分别将 $d = 60.0\text{mm}$ 、 $d = 100.0\text{mm}$ 时, 线圈 $a+b$ 轴线上传感电压测量值及计算结果记入表 8-4.1、表 8-4.2。

表 8-4.1 $U_B=U_E = 5.00\text{V}$, $I_M = 0.100\text{A}$, $d = 60.0\text{mm} < \bar{R}$, $x_a = -30.0\text{mm}$, $x_b = 30.0\text{mm}$, $S =$ _____

x'/mm	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0
x_{a+b}/mm	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0
$U_{(a+b)1}/\text{mV}$							
$U_{(a+b)2}/\text{mV}$							
U_{a+b}/mV							
B_{a+b}/mT							

表 8-4.2 $U_B=U_E=5.00\text{V}$, $I_M=0.100\text{A}$, $d=100.0\text{mm} > \bar{R}$, $x_a = -50.0\text{mm}$, $x_b = 50.0\text{mm}$, $S =$ _____

x'/mm	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0
x_{a+b}/mm	-50.0	-40.0	-30.0	-20.0	-10.0	0.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0
$U_{(a+b)1}/\text{mV}$											
$U_{(a+b)2}/\text{mV}$											
U_{a+b}/mV											
B_{a+b}/mT											

在一张坐标纸上描绘 d 为 60.0mm 、 80.0mm 、 100.0mm 时 B_{a+b} 的平滑曲线, 图解法分别求出磁感应强度变化不超过最大值的 1% 的 x 坐标的最大范围, 比较并说明线圈间距为多少时轴线上磁场分布均匀的区域最宽?

【选做】(5) 测量中心点 O 处轴外磁场变化规律：轴外传感电压测量值数据及计算结果记入表 8-5，绘平滑曲线并总结规律于表后，求出不均匀度为 1% 的 y 坐标范围。

表 8-5 $U_B=U_E=5.00V$, $I_M=0.100A$, $d=\bar{R}=80.0mm$, $x_a=-40.0mm$, $x_b=40.0mm$, $S=$ _____

y/mm	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
$U_{(a+b)1}/mV$									
$U_{(a+b)2}/mV$									
U_{a+b}/mV									
B_{a+b}/mT									

(6) 测定地磁场各方向的传感器输出电压 U_{x+} 、 U_{x-} 、 U_{y+} 、 U_{y-} 、 U_{z+} 、 U_{z-} ，数据记入表 8-6，表后计算地磁场磁感应强度和水平偏向角、磁倾角，进行误差分析。

表 8-6 $U_B=U_E=5.00V$, $I_M=0.000A$, $d=\bar{R}=80.0mm$, $x_a=-40.0mm$, $x_b=40.0mm$, $S=$ _____

U_{x+}/mV		U_{y+}/mV		U_{z+}/mV	
U_{x-}/mV		U_{y-}/mV		U_{z-}/mV	
U_x/mV		U_y/mV		U_z/mV	
B_x/mT		B_y/mT		B_z/mT	
		$B_{//} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} / mT$		$B_{地} = \sqrt{B_{//}^2 + B_z^2} / mT$	
		$\theta = \arctg(B_y / B_x)$		$\beta = \arctg(B_z / B_{//})$	

表 4-2. 不同励磁电流下螺线管中点霍尔电压测量值和磁场强度计算值及误差零差 ($I_M=0.0000A$ 时): $V_{01}=$ _____, $V_{02}=$ _____, $V_{03}=$ _____, $V_{04}=$ _____

测量项目 \ I_M / A	0.0000	0.0200	0.0400	0.0600	0.0800	0.1000	0.1200	0.1400	0.1600	0.1800	0.2000	0.2200
V_1 / mV												
$V_1 - V_{01} / mV$												
V_2 / mV												
$V_2 - V_{02} / mV$												
V_3 / mV												
$V_3 - V_{03} / mV$												
V_4 / mV												
$V_4 - V_{04} / mV$												
V_H / mV												
B / mT												

2. 数据处理

(1) 计算各个 V_H 和 B 值 ($B = \frac{V_H}{KI_H}$)，填在表中。本实验不易按教材上的方法直接判断 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 的顺序，可以先不管顺序，自行任意约定 V_i 对应的 I_H 和 I_M 开关方向，测完后先减去零差 V_{0i} 。在螺线管中部附近，减去零差 V_{0i} 后为正值的两组 V_i 规定为 V_1 和 V_3 ，为负

值的另外两组 V_i 规定为 V_2 和 V_4 ，再代入公式 $V_H = [(V_1 - V_{01}) - (V_2 - V_{02}) + (V_3 - V_{03}) - (V_4 - V_{04})] \div 4$ 计算。

(2) 由坐标纸绘制 $B-x$ 曲线。

(3) 绘制 $B-I_M$ 曲线，说明磁感应强度和励磁电流的关系。

(4) 如图 4-4，螺线管轴线上磁场的理论值按照

公式 $B = \frac{\mu_0}{2} n I_M (\cos \beta_2 - \cos \beta_1)$ 进行计算，式中真

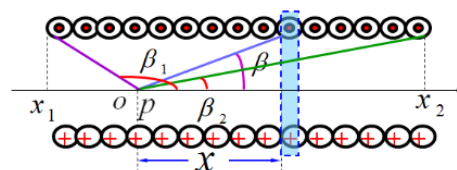


图 4-4 螺线管轴线上磁场的计算

空的导磁率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ ，本实验已知线圈直径、长度和轴线上被测点坐标，计算公式变换为如下（注：下式中 D 为轴上任一点 x 到螺线管轴线上中点 $x=75.0\text{mm}$ 的距离）：

$$\text{螺线管轴线上中点 } (x=75.0\text{mm}) \text{ 处: } B_{\text{理}} = \frac{\mu_0 n I_M}{\sqrt{L^2 + D^2}};$$

$$\text{螺线管轴线上端点 } (x=0.0\text{mm}) \text{ 处: } B_{\text{理}} = \frac{\mu_0 n I_M}{2\sqrt{L^2 + (D/2)^2}}。$$

分析这两点 $B_{\text{理论}}$ 与实测值 B 不能吻合的原因。

(5) 【选作】：在前面的 $B-x$ 图内绘出 $B_{\text{理论}} \sim x$ 曲线，两曲线进行比较。磁场的理论值为：

$$B_{\text{理}} = \frac{\mu_0 n I_M}{2L} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + (D/2)^2}} + \frac{L-x}{\sqrt{(L-x)^2 + (D/2)^2}} \right)$$

分析两曲线不能吻合的原因。

实验 II-6. 脉冲电磁波的发射与接收综合实验

【实验原理】

1. 时域信号源

时域信号源的产生主要是基于一些特殊固态器件的高速开通或关断来实现的。常用于产生时域脉冲信号的高速固态器件有雪崩晶体管、阶跃恢复二极管、隧道二极管、FETs以及双极性晶体管等。

本实验使用的为基于雪崩三极管MARX电路设计的时域信号源，雪崩三极管是在一个本征半导体中由三层n型半导体和p型半导体构成的，具有的NPN型和PNP型结构。和通用晶体三极管的命名方法相同。雪崩晶体管有4个工作区域：饱和区、线性区、截止区与雪崩区。利用雪崩效应可以产生高压短脉冲。

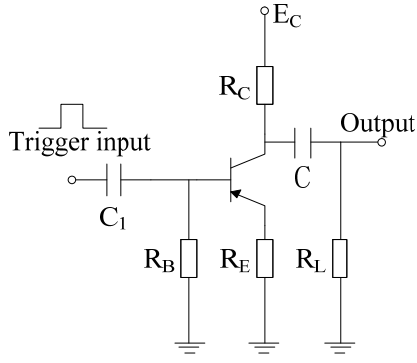


图1 雪崩管的工作原理图

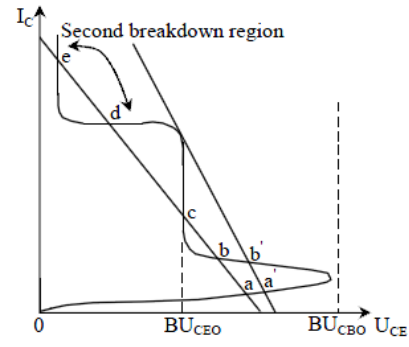


图2 雪崩管的雪崩击穿曲线

雪崩晶体管的基本工作电路如图1所示，当基极没有触发信号时，晶体管处于关闭状态，负载 R_L 上没有偏压，雪崩晶体管工作在截止区。可得到电路方程：

$$i = i_R + i_A \quad (1)$$

$$U_{CE} = E_C - i_R R_C \quad (2)$$

$$U_{CE} = u_C(0) - \frac{1}{C} \int_0^{t_A} i_A dt - i_A R_L \quad (3)$$

其中， i 是总电流， i_R 是 R_C 上的电流， i_A 是雪崩电流， $u_C(0)$ 是电容 C 上的初始电压， R_L 是负载， C 是储能电容， t_A 是雪崩时间，由方程1、2和3联立可得：

$$U_{CE} = u_C(0) - \frac{1}{C} \int_0^{t_A} \left[i + \frac{U_{CE} - E_C}{R_C} \right] dt - \left[i + \frac{U_{CE} - E_C}{R_C} \right] R_L \quad (4)$$

通常， R_C 的阻值在几千到几十千欧姆，而负载 R_L 为50欧姆，所以 $R_C \gg R_L$ ，即可以看出雪崩电流 i_A 远大于静态电流 i_R ，所以 i 约等于 i_A 。方程4可以简化为：

$$U_{CE} = u_C(0) - \frac{1}{C} \int_0^{t_A} i dt - i R_L \quad (5)$$

$$U_{CE} = E'_C - i R_L$$

其中： $E'_C = u_C(0) - \frac{1}{C} \int_0^{t_A} i dt$ ， E'_C 是动态电压。

雪崩晶体管的雪崩击穿曲线如图2，直线 ae 是穿过两个负阻区的负载阻抗线。如果初始提供适当的驱动，工作点 a 会穿过位于第一个负阻区的 b 点移动到 c 点。如果雪崩晶体管驱动电容很大，那么 c 点通常是不稳定的。因此它会穿过位于第二个负阻区的 d 点移动到 e 点。工作点从 a 点移动到 e 点总共穿过两个负阻区。也就是说，电压或者电流信号将因为正反馈而得到加强，所以幅度和获得到的信号速度是很大的。

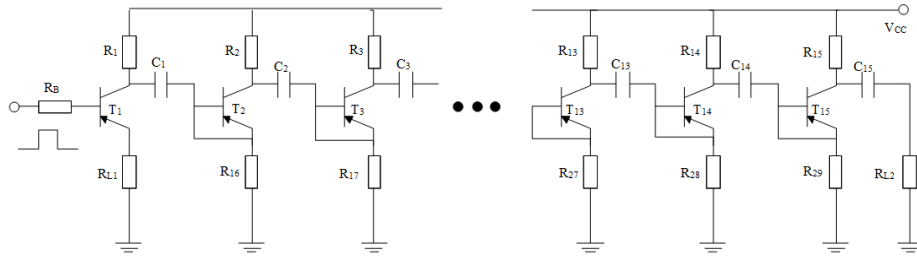


图3 十五级 MARX 电路的示意图

图3为十五级 MARX 电路原理框图，当触发信号为低电平时，各级雪崩管处于临界雪崩的截止状态。电容 $C_1 \sim C_{15}$ 并联充电至电源电压 E_c 。当触发信号变换为高电平时，雪崩管 T_1 雪崩击穿，于是 C_1 通过 R_{L1} 和 R_{16} 放电，由于 R_{16} 远大于 R_{L1} ，所以在 T_1 雪崩的瞬间 C_1 的电压几乎全部加在 R_{16} 上，此时 C_2 右端对地电压接近 $2E_c$ ，加在 T_2 上的电压瞬间高于其雪崩电压， T_2 发生雪崩。以此类推 $T_3 \sim T_{15}$ 将相继雪崩，电容 $C_1 \sim C_{15}$ 相当于串联。在负载上得到的峰值电压之和约等于 $15E_c$ 。为了减少脉冲源放电回路自身的反射，在电路的两端分别接了 R_{L1} 、 R_{L2} 两个负载，当然这种做法会使单个负载上得到的脉冲幅度减半。

通过 MARX 电路输出的脉冲波形近似为一个零阶高斯信号，而零阶高斯脉冲的大部分能量集中在直流或低频分量上，这样就会使得用来辐射这类脉冲的天线体积大、效率低且成本高，给天线的设计增加了难度。所以通常会设计波形整形电路，将零阶高斯信号转换为一阶高斯信号，这样更有利于天线辐射和小型化设计。如图4所示为利用微带反射形成一阶高斯脉冲的原理图，通过合理的设计微带线输出端和短路端的宽度和长度，优化电容 C 和电阻 R 的值，其中电容 C 可以调节输出端微带线的输出阻抗，而电阻改变 R 可以调整对反射脉冲的衰减量，从而可以得到正负脉冲幅度比以及脉宽比接近1:1的一阶高斯脉冲，在输入端串联一个肖特基二极管可以有效的减小脉冲拖尾。

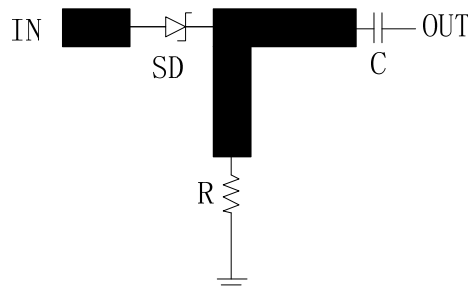


图4 脉冲形成网络即产生一阶高斯脉冲的微带反射网络

2. 时域天线

时域天线(Time-domain Antenna)是超宽带天线中的一各分支。狭义的时域天线是指辐射冲激信号的超宽带天线，因此又称脉冲天线或瞬态天线(Transient antenna)。它是伴随上世纪八十年代，基于冲激信号的无线通信技术快速发展的背景下出现的一个天线分支领域。

一方面，时域天线既然是超宽带天线的一个分支，因而基于频域概念的超宽带天线的应用基础理论研究结果和工程设计方法对时域天线仍然有很好的借鉴价值；另一方面，时域天线辐射的是 ns、亚 ns 量级的冲激信号，这些信号的频谱覆盖了从 101 MHz-101 GHz 的很宽频带，具有比通常意义超宽带天线更高的相对带宽；再一方面，时域天线服务于无线时域通信，旨在利用电磁波的时间资源，因而描述时域天线性能参数也与基于频域概念的超宽带天线有所不同。因此，时域天线的理论分析与工程设计方法既与频域超宽带天线有相通之处，也有自身的特殊要求。概括起来，在进行时域天线分析与设计时，应注意其以下特征：其一，宽带特征。即要求时域天线阻抗、方向图、辐射效率、有效长度、极化特征都具有宽带一致性，这使得时域天线设计时，往往需要对这些参数进行折中设计，甚至与时域天线相关的馈电、接收电路也必须具有宽带特征；其二，高波形保真性。时域天线辐射或接收冲激信号的拖尾信号幅度、持续时间都必须得到严格控制，同时要求不同角方向的冲激信号具有较高的波形保真系数，以便接收系统的相关接收并避免影响接收系统对目标反射信号的有效识别；其三，一体化设计特征。与基于频域无源天线设计不同，时域天线设计往往需要将信号源、馈电和接收电路作一体化设计，因此必须考虑天线与信号源和接收系统的宽带匹配与电磁隔离等复杂问题。通常，对数周期天线、平面渐变天线等典型的宽带天线都可以用作时域天线设计；在一定条件下，诸如偶极子、单极子这样的典型谐振窄带天线也可以通过加载等方法用作时域天线。通常时域天线性能用如下特征参数来表示。

(1) 波形保真系数

两个信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的自相关和它们之间的互相关定义为

$$\begin{cases} \rho_{11}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t-\tau)f_1(\tau)d\tau \\ \rho_{22}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_2(t-\tau)f_2(\tau)d\tau \\ \rho_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t-\tau)f_2(\tau)d\tau \end{cases} \quad (6)$$

两个时域信号的波形保真系数为最大归一化互相关系数

$$f = \max_t \left(\frac{|\rho_{12}(t)|}{\sqrt{\rho_{11}(0)\rho_{22}(0)}} \right) \quad (7)$$

如果 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 分别取输入信号的时间导数和空间辐射场 $E_{\text{trans}}(\theta, \varphi, t)$ ，则 f 表示此天线的发射波形保真系数；如果 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 分别取接收信号和入射场 $E_{\text{inc}}(\theta, \varphi, t)$ ，则 f 表示此天线的接收波形保真系数。波形保真系数对脉冲形状是敏感的，同一副天线可能对一种脉冲的波形保真系数大而对另一种脉冲的波形保真系数小。

(2) 能量方向性系数

超宽带的方向性不再由单一频率时的天线方向图，而改由能量方向图来描述。

$$f_e(\theta, \varphi) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} E^2(\theta, \varphi, t) dt}{\max_{\theta, \varphi} \int_{-\infty}^{\infty} E^2(\theta, \varphi, t) dt} \quad (8)$$

能量方向系数定义为

$$D(\theta, \varphi) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |E_{trans}(\theta, \varphi, t)|^2 dt}{\frac{1}{4\pi} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{t=-\infty}^{\infty} |E_{trans}(\theta, \varphi, t)|^2 \sin \theta d\theta d\varphi dt} \quad (9)$$

(3) 能量辐射效率

$$e = \frac{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{t=-\infty}^{\infty} \frac{|E_{trans}(r, \theta, \varphi, t)|^2}{\eta_0} r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |V_{input}(t) I_{input}(t)| dt} \quad (10)$$

其中

$$\eta_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120 \cdot \pi \quad (11)$$

(4) 天线输入反射系数

$$\Gamma = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |V^-(t)| dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |V^+(t)| dt} \quad (12)$$

(5) 天线传输因子

$$TAF(\theta, \varphi) = \frac{|E_{trans(1meter)}(\theta, \varphi)|_{\max}}{|V_{input}|_{\max}} \quad (13)$$

(6) 辐射阻抗

$$R_{rad} = \frac{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{t=-\infty}^{\infty} \frac{|E_{trans}(r, \theta, \varphi, t)|^2}{\eta_0} r^2 \sin \theta d\theta d\varphi dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |I_{input_{\max}}(t)|^2 dt} \quad (14)$$

(7) 增益

$$G(\theta, \varphi) = 4\pi r^2 \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|E_{trans}(\theta, \varphi, t)|^2}{\eta_0} dt}{\int_{-\infty}^{\infty} V_{in}(t) I_{in}(t) dt} \quad (15)$$

(8) 极化特性

$$\gamma(\theta, \varphi) = \tan^{-1} \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |E_{\theta_{max}}(\theta, \varphi, t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_{\varphi_{trans}}(\theta, \varphi, t)|^2 dt} \right] \quad (16)$$

(9) 天线波束角

$$\Omega_a = \frac{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{t=-\infty}^{\infty} |E_{trans}(\theta, \varphi, t)|^2 \sin \theta dt d\theta d\varphi}{\left[\int_{-\infty}^{\infty} |E_{trans}(\theta, \varphi, t)|_{\max}^2 dt \right]} \quad (17)$$

(10) 能量因子

$$AF_{energy}(\theta, \varphi) = \left[\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |E_{inc}(t)|^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} |V_{load}(\theta, \varphi, t)|^2 dt} \right]^{1/2} \quad (18)$$

(11) 有效面积

$$A_e(\theta, \varphi) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |V_{re}(t) I_{re}(t)| dt}{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|E_{in}(t)|^2}{\eta_0} dt} \quad (19)$$

$V_{re}(t)$ 为接收信号电压, $I_{re}(t)$ 为接收电流, $E_{in}(t)$ 为入射电场

【实验目的】

- 1、学习和理解电磁波发射与接收系统的组成、传输过程, 掌握系统调节方法
- 2、掌握时域信号源的测试方法以及时域天线的设计方法;
- 3、通过定量测量能流密度 I 与距离的关系, 以及时间分辨力, 加深对电磁波及天线的理解;

【实验内容】

- 1、按照实验指导书的说明, 正确连接实验仪器, 完成时域信号源相关参数的测试。

- 2、搭建电磁波发射与接收系统，定量测量能流密度 I 与接收距离 L 的关系。
- 3、通过电磁波发射与接收实验，测量系统的时间分辨力。

【实验器材】

时域信号源 1 台，平板蝶形天线 1 对， 30° 夹角蝶形天线 1 对， 50Ω 同轴电缆 3 根，信号衰减器 1 台，双通道示波器 1 台。

【实验步骤】

一、时域信号源测试



图 5 时域脉冲波形、幅度等参数测试框图

1、将时域信号源小心地摆放在实验台，确保电源开关处于关闭状态，触发开关处于未触发状态。

2、插上电源线，用同轴电缆将信号源，信号衰减器，示波器按照下图的顺序连接好（注意衰减器的输入端与输出端不可以接反），示波器 1 通道 CH1 接信号源的输出信号，2 通道 CH2 接信号源的触发信号输出。

3、脉冲波形测试

（1）设置示波器 CH1 和 CH2 的相关参数，选择合适的刻度，并将输入阻抗设置为 50Ω ，选择 CH2 的信号作为 CH1 的触发。

（2）首先打开信号源的开关，然后将触发开关向上拨至“自动”状态，使之输出 1KHz 的脉冲信号。

（3）示波器观测通道 CH1 的信号，记录波形并测量脉冲的幅度、脉宽、上升沿，频谱等参数。

4、信号源输出信号与理想一阶高斯信号比较

示波器观测并比较信号源输出脉冲波形及频谱的变化，比较实测波形与理想高斯信号的差异，并根据原理分析造成波形变化的原因。

二、能流密度衰减测试

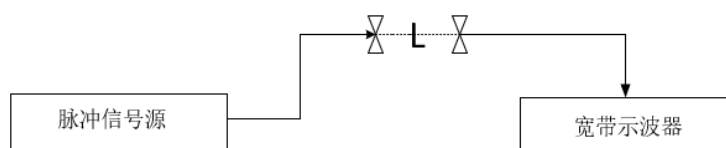


图 6 能流密度衰减实验原理图

1、固定发射天线，将相距一定距离 L ($<1\text{m}$) 的接收天线和示波器相连接，测试电磁脉冲的波形。注意：发射天线、接收天线是同一类型天线，且在同一直线，彼此正对。

2、固定发射天线，改变接收天线距离 L ，示波器上测出电磁脉冲波形的峰峰值幅度，研究峰峰值幅度随着接收天线距离变化的趋势。

三、系统时间分辨力测试

1、固定发射天线，并正确连接发射天线与信号源，并将信号源的触发信号输出与示波器通道 1 相连接，接收天线和示波器通道 2 相连接。

2、改变接收天线距离 L ，观察示波器上通道 2 接收到的信号的变化，记录接收天线距离的变化值 ΔL 与示波器通道 2 接收到的信号在时间轴上移动的时间 Δt ，将实验数据与理论值做对比，体会时域天线在时间分辨力方面的性能。

【实验数据及处理】

老师将在课前提供具体的实验数据测量要求，请按照要求完成实验数据测量、处理和相关讨论。

极坐标打印来源：<https://incompetech.com/graphpaper/polar/>

实验 II-7. 密立根油滴实验——电子电荷的测定

【实验原理】

详见教材：《结构化大学物理实验》P.299–304。仔细研读原理后回答以下问题：

问题 1：选取油滴时为什么不能选下落速度太快或太慢的油滴？

问题 2：在这个实验中，为什么要测油滴下落速度？

问题 3：在这个实验中，如何理解用已知的电子电荷值来求电子电荷值？

【实验目的】

学习用密立根油滴法测量量子化电量——电子电荷。

【实验内容】

- (一) 观察带电油滴在电场中的运动。
- (二) 测电子电荷。

【实验器材】

密立根油滴实验仪，喷油壶

【实验步骤及操作】

- (一) 调节

1. 目测仪器是否水平，发现不平的请老师调节，不要自己擅自调节，以免误差更大。将工作电压调为零。

2. 将显微镜筒向里移动至观察口，然后向油雾室喷油，喷油的方法是：竖拿喷雾器，食

指堵住出气孔，喷雾器对准油雾室的喷雾口，轻轻喷入少许油滴即可。喷油后必须将喷雾器嘴朝上放到杯中。切勿将喷雾器插入油雾室，甚至将油倒出来，否则会把油滴盒周围搞脏，甚至把落油孔堵塞。

3. 注意每次测量只能喷一次，通过显微镜仔细观察，同时将显微镜筒慢慢地向外移动，直到看清向下漂落的小油滴。如看不到油滴可能是显微镜物镜焦距不对、显示器电源、同步、亮度、对比度调节不对，不要反复喷油。

4. 在测量油滴过程中，要时刻微调显微镜物镜焦距，跟踪油滴，否则油滴会漂移失踪，无法重复测量。

5. 看到油滴后，将开关拨到“平衡”位置，改变工作电压，电压值的大小由面板上的数字电压表指示。当工作电压由小到大变化，观察是否有小油滴静止。

(二) 测量

1. 找到静止的小油滴后，则记录此时的工作电压值，即公式中的 V_n ，然后将开关拨到“上升”位置，将静止小油滴移动到最上的一条刻度线。

2. 小油滴到达最上一条刻度线后，将开关拨到“下降”，此时工作电压为 0V，即撤去所有电压，让油滴做匀速下落运动，当它下降到第一小格 (0.5mm) 时，立即按动“计时”按钮启动秒表，油滴继续下降四小格 ($l = 2.00 \times 10^{-3} m$) 时停止计时，记下油滴运动所用的时间 t 。

3. 记下油滴匀速运动四小格所用时间后，要马上将开关拨到“平衡”，加上工作电压，使其平衡静止，以便重复测量。

4. 本实验测 10 个油滴，每个油滴反复测 3 次。要求每个油滴所带的电荷数不超过 10 个根据经验，平衡电压应在 200V 左右 (100-300V)，下落时间应在 20s 左右 (10-30 秒)。

5. 用实验室的电脑当堂计算电量每个油滴的带电量，带电量超过 $1.6 \times 10^{-18} C$ 的油滴数据要剔除，并进行补充测量，直到 10 个油滴的电量都满足要求为止。

【实验数据及分析】

(一) 原始数据记录表格：

油滴号	平衡电压 $V_n (v)$	匀速运动时间 $t(s)$	带电量 $Q (\times 10^{-19} C)$	油滴号	平衡电压 $V_n (v)$	匀速运动时间 $t(s)$	带电量 $Q (\times 10^{-19} C)$
1				6			
2				7			
3				8			
4				9			
5				10			

(二) 数据处理: (预习时不写, 必须有带入及计算过程, 用其它自拟方法计算得符加分)

以第一个油滴为例, 说明数据处理过程。

1. 求油滴的平均电量: 将第一个油滴的 3 组平衡电压、下落时间分别求平均值后代入公式
- 2, 算出第一个油滴的平均电量 \overline{Q}_1

$$Q_1 = ne = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{\left[\overline{t}_1 (1 + 0.02 \sqrt{\overline{t}_1}) \right]^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{1}{V_{n1}} \quad (6-1)$$

2. 求油滴的电荷数: 假设单元电荷为 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑, 则第一个油滴的电荷数

$$\overline{n}_1 = \left[\frac{\overline{Q}_1}{e} \right] \quad (\text{注意: 应为四舍五入法求整}) \quad (6-2)$$

3. 求油滴的电子电荷: 第一个油滴的电子电荷为

$$e_1 = \frac{\overline{Q}_1}{\overline{n}_1} \quad (6-3)$$

用同样的方法, 分别计算出第 2~10 个油滴的电子电荷 e_i , 最后求出电子电荷的平均值。

$$\overline{e} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} e_i \quad (6-4)$$

最后将 \overline{e} 与电子电荷的公认值进行比较, 算出相对误差 E 。

$$E = \frac{|\overline{e} - e|}{e} \times 100\% \quad (6-5)$$

其中 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑。

实验 II-8. 弗兰克—赫兹实验

【实验原理】

详见教材:《结构化大学物理实验》P.155-159。仔细研读原理后回答以下问题:

问题 1: 简述原子的能级理论, 说明第一激发电势与能级的关系。

问题 2: 在电子与氩原子碰撞过程中, 什么是弹性碰撞, 什么是非弹性碰撞? 满足什么条件的电子能够激发氩原子?

问题 3: 随着电压 V_{G2K} 的增加, 板极电流 I_A 出现周期性的极大值和极小值, 请解释原因, 并说明其中的规律。

问题 4: 实验参数 V_1 、 V_2 、 V_3 对 $I_A - V_{G2K}$ 曲线有何影响, 请一一讨论。(该问题可以在预习时思考, 在实验中求证, 最后完成实验报告时再进行讨论。)

【实验目的】

通过测量充氩弗兰克—赫兹管的 $I_A - V_{G2K}$ 曲线，证明原子能级的存在，并求解氩原子的第一激发电势。

【实验内容】

测量充氩弗兰克——赫兹管的 $I_A - V_{G2K}$ 曲线，计算氩原子第一激发电势。

【实验器材】

CAT-9000 型程控弗兰克—赫兹实验仪，或者 ZKY-FH-2 弗兰克—赫兹实验仪，多媒体计算机。

【实验步骤及操作】

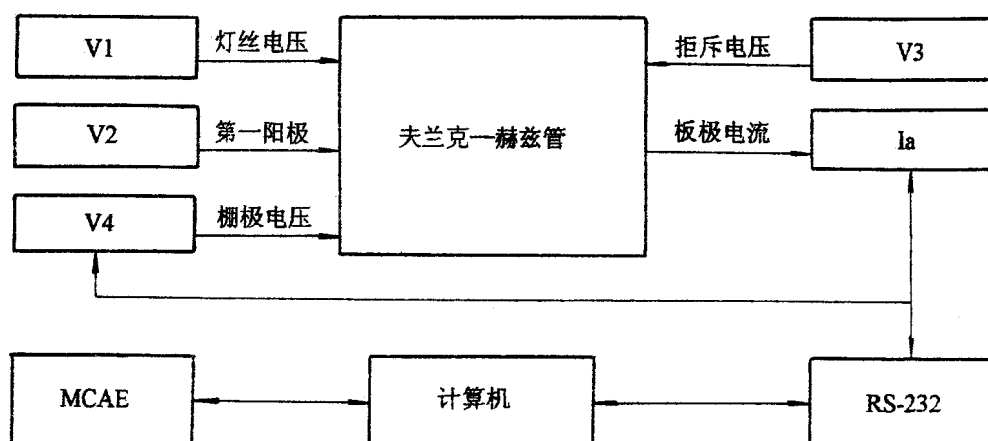


图 7-1 弗兰克—赫兹实验系统结构示意图

（一）仪器的操作方法

1. 程控直流稳压电源 V_1 , V_2 , V_3 , V_4 ;

V_1 输出电压范围 0—5V，限流 500mA。

V_2 输出电压范围 0—12V，限流 100mA。

V_3 输出电压范围 0—12V，限流 100mA。

V_4 输出电压范围 0—100V，限流 50mA。

弗兰克—赫兹实验系统结构如图 7-1 所示，该系统的程控直流稳压电源，具有过流保护、过热保护、短路保护功能，输出电压可以切换显示。按“ V_1 ”、“ V_2 ”、“ V_3 ”、“ V_4 ”键可以切换显示和输入对象，按“ \leftarrow ”、“ \rightarrow ”可以改变输入位，按“ \uparrow ”键或“ \downarrow ”键可调节电压。接受输入时，相应的输入位闪烁，按“ \uparrow ”键和“ \downarrow ”键则相应的输入位加一或减一，若发生进位或错位，则向高一位累进。按相应的功能键则可改变当前输入位。

2. 程控直流微电流表 I_a :

程控直流微电流表 I_a 测量范围 1nA-10mA，分四档量程。具有过载保护功能。量程可通过仪表面板键盘设定，也可由计算机或其它智能设备控制。

3. 串行通讯:

通过串口与计算机连接, 串口延长线应插入计算机 COM 口。

4. 多媒体计算机辅助实验 MCAE

多媒体计算机辅助实验系统软件 MCAE 用于监控实验测量过程, 具有多媒体实验资料查阅、实验装置自动控制、实验过程适时监控、实验数据自动采集、实验数据处理及检验、实验数据打印及存档等功能, 此外 MCAE 还具有实验数据异常报警功能, 当实验数据出现异常时, MCAE 会自动关闭栅极电压, 并显示警告信息, 提醒实验人员检查实验装置和实验装置是否恰当, 以免损坏仪器。

5. 弗兰克——赫兹管的构造

图 7-2 为弗兰克——赫兹实验原理图, 一般的弗兰克——赫兹管是在圆柱状玻璃管壳中沿径向轴向依次安装加热灯丝、阴极 K 、网状栅极 G_2 及板极 A , 在阴极 K 和栅极 G_2 之间还安装有第一阳极 G_1 。将管内抽至高真空后, 充入高纯氩气或其他元素气体。

弗兰克——赫兹管的灯丝电压、第一阳极电压、拒斥电压由 V_1 , V_2 , V_3 提供。栅极电压由 V_4 提供, 既可手动设定, 也可由计算机控制,

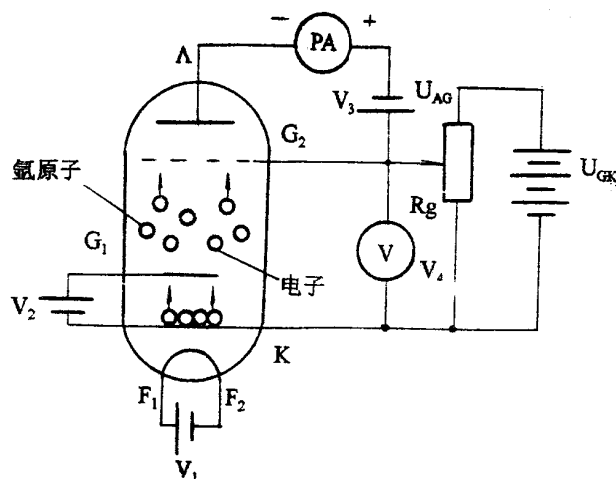


图 7-2 弗兰克——赫兹实验原理图

程控直流微电流表 I_a 测量板极电流, 测量范围为 1nA - 10mA , 共有四档, 测量数据可从面板读出, 同时可以自动传送给计算机。测量过程由多媒体计算机辅助实验系统软件 MCAE 进行监控。

(二) 数据测试

1. 测量前先熟悉实验装置结构及使用方法。为了避免频繁插拔导线引起接触不良, 通常实验室已经将连线接好, 同学们只需按照实验要求检查实验线路是否连接正确。如果导线中有一根是黄色的, 该线内含过流保护电阻, 专门用于板极回路, 即电流表 PA 的正极或负极。检查无误后开机, 开机后要密切关注电流值是否太大, 如发现异常要立即断电检查。

2. 运行测控软件 MCAE (软件的简单使用方法见附录), 进行实验装置联机测试, 按照每台仪器给定的参数 (V_1 、 V_2 、 V_3 和电流表量程) 进行设置, 由计算机自动采集数据, 并描绘实验曲线。观察曲线是否与理论分析相符, 若不相符, 则需要适当调整实验参数, 重新采集数据和描绘曲线。若基本相符, 请在草稿纸上记录每个波峰和波谷处的坐标 (此时暂不将数据记录在数据表格中)。

3. 保持 V_1 、 V_2 、 V_3 不变, 重新自动采集实验数据, 描绘实验曲线, 并在草稿纸上记录每个波峰和波谷处的坐标 (此时暂不将数据记录在数据表格中)。在没有改变 V_1 、 V_2 、 V_3 的情况下, 试分析实验数据和曲线有没有变化? 为什么?

4. 分别改变 V_1 、 V_2 、 V_3 中的任一个, 重复进行实验测量, 观察实验曲线各有什么变化? 板极电流对哪个参数更敏感? 为什么? 如果同时改变多个参数是否有利于分析阳极电流的变化规律?

5. 选一组曲线效果好的数据记录在表格中。

6. 再次调整实验参数,使得此次测量到的最大电流大约是前一组记录在表格中的最大电流的 2 倍或者一半,并将测量数据记录在表格中。
7. 选作: 半定量分析 V_1 、 V_2 、 V_3 对 I_A 曲线的影响。

【实验数据及分析】

1. 采用两组不同的 V_1 、 V_2 、 V_3 参数 (在限制范围内适当调整,以阳极电流不饱和为前提),由电脑自动采集得到两组 $I_A - V_{G2K}$ 数据,完成表 7-1 和表 7-2。注意:两次测量时,应使三个参数有一个不同,并使得两表中的最大电流值有大约 2 倍的差异,以便作图。

表 7-1 V_1 _____, V_2 _____, V_3 _____, 电流表量程_____

I_A (nA) V_{GK} 个位 (V) V_{GK} 十位(V)	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
0										
10										
20										
30										
40										
50										
60										
70										

表 7-2 V_1 _____, V_2 _____, V_3 _____, 电流表量程_____

I_A (nA) V_{GK} 个位 (V) V_{GK} 十位(V)	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
0										
10										
20										
30										
40										
50										
60										
70										

2. 在坐标纸上描绘 $I_A - V_{G2K}$ 曲线,要求将两条曲线描绘在同一个坐标系里,描点至少要

包括所有的波峰和波谷，可以适当选取其他数据进行描点，使曲线更加真实和平滑。

3. 在两条平滑曲线中读出各个波峰或波谷对应的电压 V_{G2K} ，可依次记为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 等，并列表记录在报告纸上；根据各波峰或波谷处的电压，采用逐差法分别求出氩原子的第一激发电势，并分别与公认值（13.1V）比较计算相对误差。（要求明确列出波峰或波谷处的电压值，计算时写出求解过程）。

4. 选做内容

（1）取一条曲线的波峰处的电压值，用最小二乘法计算氩原子的第一激发电势和仪器的接触电势差。注意，如果要计算接触电势差，则只能取波峰处的数据。

（2）分析参数 V_1 、 V_2 、 V_3 对曲线的影响和对第一激发电势的影响。

（3）本实验测得的氩原子的第一激发电势通常比公认值小很多，试查阅文献分析原因（简单讨论见附录）。

【注意事项】

灯丝电压 V_1 对板极电流的影响特别显著，在调整 V_1 时，为保护灯丝，避免其快速老化，每次增加 V_1 的幅度应不超过 0.5V，建议每次只调整 0.1V-0.2V，并且不要使板极电流超量程。否则，不仅加速灯丝老化，而且阴极温度起伏太大，测量数据不易稳定。每次调整 V_1 ，需反复采集数据以判断阴极温度是否稳定。

【附录】

1. 关于氩原子的第一激发电势大小的讨论

目前，关于氩原子第一激发电势的公认值并不统一，基本上存在两种观点。其一，认为氩原子第一激发电势的公认值为 13.1V，而测得的实验值通常在 11V 到 12V 之间，原因是在基态和第一激发态之间存在两个亚稳态，且电子在亚稳态的停留时间比在第一激发态的停留时间长得多，这两个亚稳态对应的电势分别是 11.55V 和 11.72V，与实验测量值非常接近 [何忠蛟,汪建章. 修正 F-H 实验中的氩原子第一激发电位[J]. 大学物理实验. 2004,17(2)]。其二，认为 13.1V 的公认值有误，应该修正为 11.65V [郑则坡,郑凯飞. 氩原子第一激发电位研究[J]. 科协论坛. 2008(10)]。

2. CAT-9000 型程控弗兰克—赫兹实验仪的 MCAE 软件简单使用方法

（1）确定仪器导线和串口线连接正确，打开仪器电源，预热 10~30 分钟。

（2）点击计算机上软件图标，以管理员身份登录（用户：123；密码：null）。进入界面后，点击菜单“数据通讯→连接实验仪”，电脑自动检测并连接相应仪器，此时请记下连接成功的仪器编号，同时相应仪器面板上的“工作模式”指示灯显示为自动模式。

（3）点击菜单“数据通讯→开始新实验”，录入相关信息并设置密码，注意正确选择已经连接成功的实验仪器，然后点击图标“自动测试”。

（4）根据实验仪上方标签，填入相应实验参数，“测试步距”和“时间步距”根据实际需要设置，确认无误后，点击图标“设置”，立即启动测试，之后系统开始自动采集数据并描绘曲线。

(5) 如果曲线不理想, 需要调整实验参数, 可以点击菜单“数据通讯→实验参数设置→智能弗兰克赫兹实验仪”, 重新设置参数。如果不需要调整实验参数, 只是重新采集数据, 可以点击菜单“数据通讯→启动实验”。

(6) 数据采集过程中在“实验结果查看”窗口可以看到数据和曲线, 可以调整坐标系尺度让曲线全屏显示, 点击窗口中的图标“分析曲线”, 系统会自动读取曲线的峰谷电压值, 点击图标“计算”, 系统会根据上述峰谷电压值计算氩原子的第一激发电势。

3. ZKY-FH-2 弗兰克—赫兹实验仪的 MCAE 软件简单使用方法

(1) 确定仪器导线和串口线连接正确, 打开仪器电源, 预热 10~30 分钟。鼠标右键“我的电脑”, 点击“设备管理器→端口”, 在串口线接入后, “端口”下方会增加一个“com”连接显示, 记下该编号, 后面需要使用。

(2) 按仪器面板上的“工作方式”键, 将仪器设置为“自动”工作状态(“自动”绿灯亮)。

(3) 点击计算机上软件图标, 以管理员身份登录(用户: sa; 密码: sa)。进入界面后, 点击菜单“系统管理→实验装置管理”, 选择已有设备并点击“修改”(或者新建设备点击“增加”), 将“通讯端口”选为(1)中记下的 com 编号。

(4) 在主界面, 点击菜单“数据通讯→开始实验”, 录入相关信息并设置密码后“下一步”。

(5) 根据实验仪上方标签, 填入相应实验参数, “测试步距”和“时间步距”根据实际需要设置, 确认无误后, 再次点击下一步, 之后系统开始自动采集数据并描绘曲线。如果曲线不理想, 需要调整实验参数, 请重复(4)。

(6) 数据采集完成后点击“数据通讯→数据检验”, 然后输入(4)中设置的密码, 开始数据处理, 将鼠标移动到相应编号的峰或者谷, 此时窗口下方将出现该峰或谷坐标, 将对应电压值填入右边表格, 并点击检验, 系统会计算出第一激发电势。

实验 II-9. 分光计的使用和光栅测波长

【实验原理】

详见教材:《结构化大学物理实验》P.100-104, P.237-240。仔细研读原理后回答以下问题:

问题 1: 分光计的读数装置为什么要有两个读数窗口?在测量角度时, 读数应注意什么?

问题 2: 分光计的度尺根据游标原理刻成, 在用分光计测量前是否需记下零读数(零差)?为什么?

问题 3: 测角 θ 时, 望远镜由 α_1 经 0 刻线转到 α_2 , 例如 $\alpha_1 = 340^\circ 20'$, $\alpha_2 = 16^\circ 1'$, 试写出计算 θ 的通用公式。

补充分光仪的使用方法:

(一)分光仪 的结构

分光仪的外形如图 8-1。在底座 (23) 的中央固定一圆柱形中心轴., 底盘 (21) 和游标盘套在中心轴上, 可以绕中心轴旋转, 度盘上刻有 720 等分的刻线, 每一格的格值为 30 分, 对径方向设有两个游标读数装置, 测量时, 然后取平均值, 这样可消除偏心引起的误差。

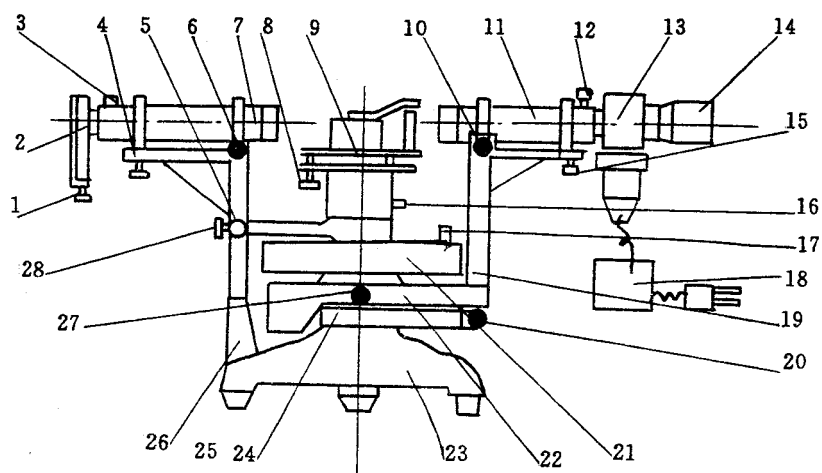


图 8-1 分光仪结构

1. 狭缝宽度调节手轮 2. 狭缝体 3. 狭缝体锁紧螺钉 4. 狭缝体高低调节手轮
5. 游标盘微调手轮 6. 平行光管水平调节螺钉 7. 平行光管部件 8. 载物台调平螺钉 9. 载物台 10. 望远镜水平调节螺钉 11. 望远镜部件 12. 目镜锁紧螺钉 13. 阿贝式自准直目镜 14. 目镜视度调节手轮 15. 望远镜光轴高低调节螺钉 16. 载物台锁紧螺钉 17. 放大镜 18. 变压器 19. 支臂 20. 望远镜微调螺钉 21. 度盘 22. 转座 23. 底座 24. 望远镜止动螺钉 25. 制动架 26. 立柱 27. 度盘止动螺钉 28. 游标盘止动螺钉

立柱 (26) 固

定在底座上, 平行光管 (7) 安装在立柱上, 平行光管的光轴位置可以通过立柱上的调节螺钉 (4、6) 来进行微调, 平行光管带有一狭缝装置 (2), 可沿光轴移动和转动, 狭缝的宽度在 0~2mm 内可以调节。

阿贝式自准直望远镜 (11), 安装在支臂 (19) 上, 支臂与转座 (22) 固定在一起, 并套在度盘上, 当松开止动螺钉 (27) 时, 转座与度盘可以相对转动, 当旋紧止动螺钉时, 转座与度盘一起旋转, 旋转制动架 (26) 与底座上的止动螺钉 (24) 时, 借助制动架末端上的调节螺钉 (20) 可以对望远镜进行微调 (旋转), 望远镜系统的光轴位置, 也可以通过调节螺钉 (10) (15) 进行微调。望远镜系统的目镜 (13) 可以沿光轴移动和转动, 目镜的视度可调节。分划板视场的参数如图 2-3 所示:

载物台 (9) 套在游标盘上, 可以绕中心旋转, 旋紧载物台锁紧紧螺钉 (16) 和制动架与游标盘的止动螺钉 (28) 时, 借助立柱上的调节螺钉 (5) 可以对载物台进行微调 (旋转)。放松载物台锁紧螺钉时, 载物台可根据需要升高或降低。调到所需位置后, 再把锁紧螺钉旋紧, 载物台有三个调平衡螺钉 (8) 用来调节使载物台面与旋转中心线垂直。

(二) 使望远镜能接收平行光

1. 望远镜目镜调焦。开启电源, 照亮目镜视场, 观察分划板上的“≠”叉丝和“十”字灯光是否清晰, 如不清晰, 缓慢旋转目镜调节至最清楚、舒适为止。

2. 望远镜物镜调焦。将三棱镜的任一光学面紧贴物镜, 观察十字窗口经三棱镜反射回来的“十”字像, 调节物镜直到“十”字像与分划板上的“≠”叉丝和“十”字灯光一样清晰为止 (注意:

旋转物镜时，如果已到尽头就不能再往这个方向旋转，否则有损坏仪器的危险)。

(三) 粗调望远镜、载物台方向。在熟悉分光计的基础上，用眼睛观察判断，通过望远镜和平行光管俯仰调节螺钉，使它们的光轴尽量垂直于仪器中心轴，通过载物台三个调平螺钉的调节，使载物台平面尽量与仪器中心轴垂直。

(四) 调整望远镜光轴和载物平台垂直于仪器中心轴。将三棱镜如图 8-2 那样放置(也可按其它方法放置)，让载物台的两个调平螺钉(如图中的 a, b)与三棱镜的毛玻璃面(非光学面)一致，而另一个调平螺钉(如 c)对正顶角 A。

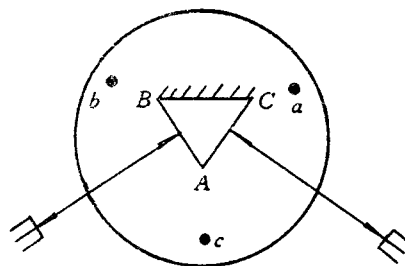


图 8-2 三棱镜在载物台上的放法

把望远镜交替正对三棱镜的两个光学面，通过目镜观察分划板上是否都有有无反射的“十”字像。如都无此像或只有一面有此像，可再通过目测，仔细调节望远镜的俯仰调节螺钉和载物台的三个调平螺钉。总之通过上述调节，直到两面都出现“十”字像为止。

一般来讲，两个面的“十”反射像是不等高的。如图 8-3 中 (a)、(b)) 两图，“十”字像同在不等高的叉丝的上交点的上方(或下方)，这种情况多半是望远镜不垂直仪器中心轴，载物台基本垂直仪器中心轴，如图 (c)、(d) 在上交点的上、下方，这种情况多半是载物台不垂直仪器中心轴，而望远镜基本垂直仪器中心轴。但是，在 (a)、(b)、(c)、(d) 四图的情况下，往往两

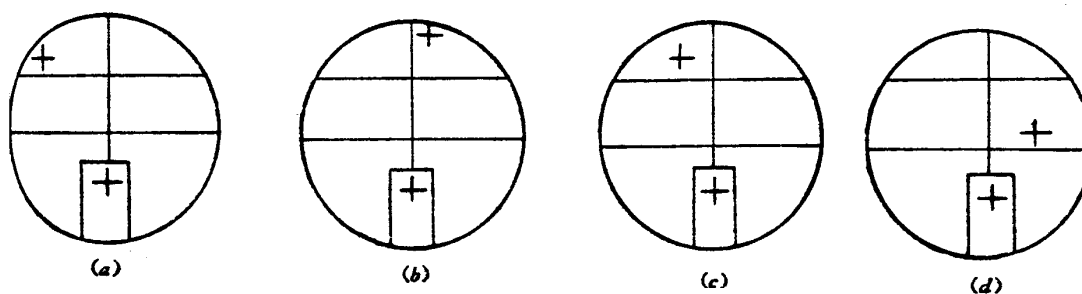


图 8-3 三棱镜两面“十”反射像不等高的几种情况

种情况都存在。要把两个光学面反射像都调成图 1-5 那样(它是望远镜光轴和载物台平面都垂直仪器中心轴的标志)，最简单的方法是：将 AB 面对正望远镜，调节螺钉 a，使“十”字像与分划板的上横线的高度减小一半，然后调节望远镜的俯仰调节螺钉使“十”字像精确地成像在分划板的上横线上；然后又将 AC 面正对望远镜，调节螺钉 b，使“十”字像与分划板的上横线的高度减小一半，然后调节望远镜的俯仰调节螺钉使“十”字像精确地成像在分划板的上横线上；如此反复调节数次，则可使分别由 AB 面和 AC 面反射回来的“十”字像都精确地成像在分划板的上横线上。

(五) 自准直法测定等边三棱镜的顶角(教材 P.101)

(六) 调节平行光管

1. 平行光管对准光源。打开汞灯，直接通过平行光管物镜对准汞灯观察，调整狭缝宽度到 0.5mm。搬动分光仪，使平行光管完全对准汞灯，这时通过狭缝的光线最明亮。

2. 使平行光管发出平行光。通过望远镜对准平行光管观察，调节平行光管物镜焦距，即移动狭缝的前后位置，使看到的狭缝边缘的像最清晰。这时狭缝就处在平行光管物镜的焦平面上。调节狭缝宽度使观测到的狭缝像的宽度约 0.3~0.5mm 宽（注意：不要把狭缝关死，更不能关死后，还继续往这个方向旋转鼓轮，这会损坏狭缝刀口！）。

3. 使平行光管的光轴与望远镜转轴垂直。将狭缝旋转成水平，调节平行光管的俯仰调节螺钉，使狭缝像落在分划板的下面一条横线上。然后旋转狭缝成竖直。注意旋转过程中要保证狭缝边缘的像最清晰。

（七）（选做）反射法测三棱镜顶角（教材 P.101）

（八）（选做）最小偏向角法测折射率（教材 P.102-103）

（九）透射式光栅原理（教材 P.237-238）

本实验只测汞灯一级衍光谱中的绿、黄₁、黄₂三条谱线的衍射角 φ ，即 k 取 ± 2 ，则

$$d \sin \varphi = 2\lambda \quad (8-1)$$

式中， d 为光栅常数， φ 为衍射角， λ 为波长，波长的单位一般用纳米（nm）表示。

本实验假定绿光波长 $\lambda_{\text{绿}}$ 是已知的，而 $\lambda_{\text{黄1}}$ 、 $\lambda_{\text{黄2}}$ 是未知的，由公式（1-1），光栅常数

$$d = \frac{2\lambda_{\text{绿}}}{\sin \varphi_{\text{绿}}} \quad (8-2)$$

式 8-2 的结果带入公式 1-1，即求出两个未知波长

$$\lambda_{\text{黄1}} = \frac{d}{2} \sin \varphi_{\text{黄1}} \quad (8-3)$$

$$\lambda_{\text{黄2}} = \frac{d}{2} \sin \varphi_{\text{黄2}} \quad (8-4)$$

（十）光栅测波长时分光计的调整

前面望远镜、平行光管都已经调到与转轴垂直，因为光栅的刻痕方向可能与其底座不垂直，所以载物台的方向还必须重调。具体方法是

1. 调节入射光与光栅面相垂直。将光栅如图 8-4 放到载物台上。

在望远镜中看到清晰的“十”字反射像后，将载物台转 180°，找到由光栅另一面的反射“十”字像，调节载物台升降螺钉

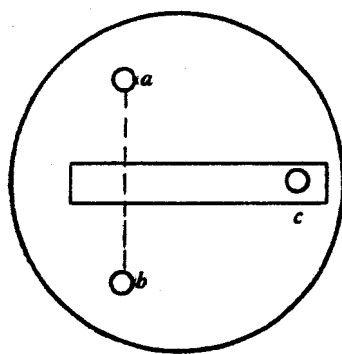


图 8-4 光栅放在载物台的位置

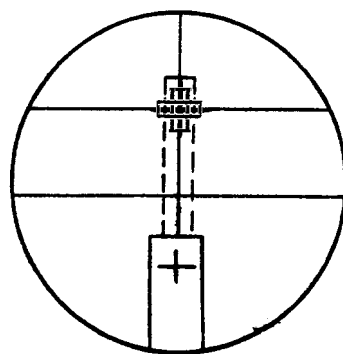


图 8-5 载物台调好的标志

a 或 b，使两面反射的“十”字像都与“≠”叉丝的上交点重合，如图 8-5 所示。

2. 调节平行光管的狭缝与光栅刻痕平行，转动望远镜，观察中央亮条纹两边分布的谱线

是否一样高，若不一样高，可调节载物台上过光栅面的那颗调平钉 c ，使两边的谱线一样高。

将望远镜再度对准中央亮线，看“十”字像与上十字叉丝是否重合，再调节螺钉 a 、 b ，使它们重合。再看两边谱线是否一样高，若不一样高，再调螺钉 c ，使它们一样高，这样重复进行，直到最后既使入射光与光栅面垂直，又使两边的光谱线一样高。

【实验目的】

- (一) 学会调节分光仪；
- (二) 了解半周期偶次计数法在分光仪测量角度中的应用；
- (三) 体会自准直法在光学测量中的重要作用；
- (四) 用分光仪测量三棱镜的顶角光栅光谱的波长；
- (五) (选做) 用分光仪测量三棱镜玻璃的折射率。

【实验内容】

- (一) 正确调整分光计，使其处于正常工作状态。
- (二) 用自准直法测量三棱镜的顶角；
- (三) (选做) 用反射法测三棱镜顶角；
- (四) (选做) 最小偏向角法测玻璃的折射率。
- (五) 用透射式光栅测汞灯黄₁和黄₂光谱的波长。

【实验器材】

分光仪，三棱镜，光栅，汞灯。

【实验步骤及操作】

- (一) 用自准法测三棱镜顶角

完成所有光学调整之后，如图 8-5 那样固定载物台（即毛玻璃面靠近平行光管并与平行光管的轴线垂直），转动望远镜正对三棱镜的一个光学面，当“十”字反射像如图 8-6 时（即“十”字像与“十”叉丝的上交点完全重合），即可读数。分别从左右窗口读出方位角 θ_1 、 θ'_1 ；读完后又转动望远镜让其对准另一光学面，当“十”字像如图 8-6 时，分别从左右窗口读出方位角 θ_2 、 θ'_2 。如此反复测 2 次以验证读数是否准确。

分光计的读数与游标卡尺完全一样，如何读数可仔细阅读教材读数部分。只有一点提醒大家注意，当两次方位角读数时，第二次是超过 360° （即 0° ）时，不能是两项读数之差，而应是 $360^\circ - (\theta_1 - \theta_2)$ 。比如 θ_1 为 $355^\circ 45'$ ， θ_2 是 $115^\circ 43'$ ， α 不是 $355^\circ 45' - 115^\circ 43' = 240^\circ 2'$ ，而是 $360^\circ - 240^\circ 2' = 119^\circ 58'$ 。

- (二) (选做) 用反射法测三棱镜顶角

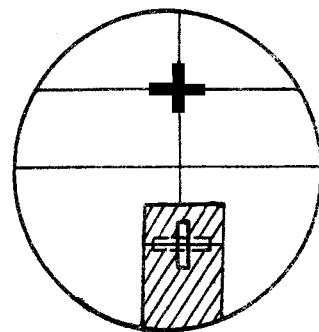


图 8-6 望远镜测量角度时的对准位置

将狭缝旋转至竖直方向，把三棱镜如图 1-6 那样放置在载物台上（即让顶点 A 靠近载物台中心，毛玻璃面与平行光管轴线垂直并靠望远镜这边），平行光管发出的平行光束同时入射到三棱镜的 AB 和 AC 面，通过望远镜可接收其反射光，接收到反射光位置两个窗口的读数就是方位角 θ_1 、 θ'_1 和 θ_2 、 θ'_2 。代入公式就可算出顶角 A。共测量 2 次。

（三）（选做）最小偏向角法测玻璃的折射率（测量方法自拟）

（三）测量衍射角

1. 测量衍射角示意图如图 8-7 所示。
2. 完成所有光学调整之后望远镜向左转，经过绿光（G）、黄₁（ y_1 ）和黄₂（ y_2 ）的 -1 级和 -2 级谱线后，让叉丝的竖线分别对准黄₂（ y_2 ）、黄₁（ y_1 ）、绿光（G）的 -2 级谱线，读出谱线的方位角，把望远镜向右转，到右边 +2 级光谱，读出叉丝竖线对准的绿光（G）、黄₁（ y_1 ）、黄₂（ y_2 ）的方位角，重复测两次，记录于表中。

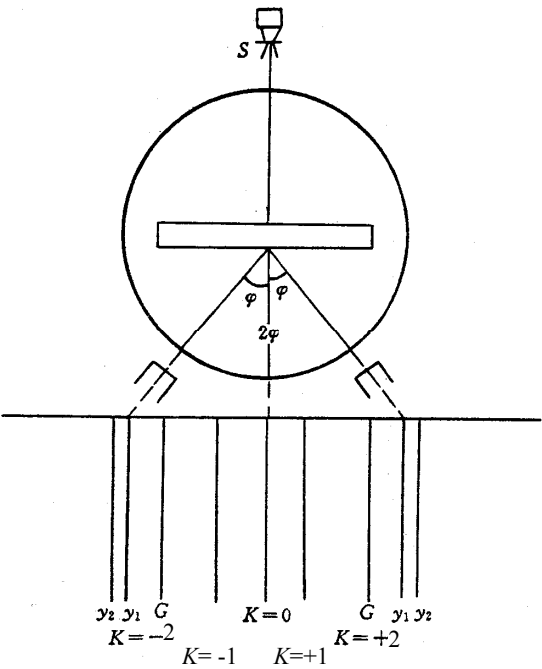


图 8-7 测量衍射角示意图

（四）操作注意事项

1. 切勿用手指、纸巾、手帕擦拭光栅表面，以免造成光栅永久性的损伤。
2. 测量时动作要轻，不能振动或碰动三棱镜、光栅位置、望远镜镜筒。
3. 只有调整载物台到如图 1-7 那样和中央亮条纹两边的谱线等高时，方可进行光栅光谱角度测量，否则测量数据无效。

【实验数据及分析】

（所有的实验数据、计算过程和结果都要按教材第一章规定的有效数字相关规定书写；所有的计算必须推理严谨，公式、代入过程完整；计算结果包括中间计算结果必须写单位）

（一）自准直法测顶角数据记录表

分光仪的仪器误差： 1'

望远镜位置	望远镜向左转		望远镜向右转	
测量次数	左窗读数	右窗读数	左窗读数	右窗读数
	θ_1 (°、')	θ'_1 (°、')	θ_2 (°、')	θ'_2 (°、')
1				
2				
3				

平均值				
-----	--	--	--	--

(二) (选做) 反射法测顶角数据记录表 (参照自准直法自拟)

(三) (选做) 最小偏向角法测玻璃的折射率数据记录表 (自拟)

(四) 光栅测光波数据记录表

级次 谱线 读数 次数	$K = -2$						$k = +2$					
	黄 ₂		黄 ₁		绿		绿		黄 ₁		黄 ₂	
	$\varphi_{左}$	$\varphi_{右}$	$\varphi_{左}$	$\varphi_{右}$	$\varphi_{左}$	$\varphi_{右}$	$\varphi'_{左}$	$\varphi'_{右}$	$\varphi'_{左}$	$\varphi'_{右}$	$\varphi'_{左}$	$\varphi'_{右}$
1												
2												
平均值												

(五) 计算自准直法测得三棱镜顶角。

(六) (选做) 计算反射法测得三棱镜顶角: (公式自拟)。

(七) (选做) 最小偏向角法测玻璃的折射率: (公式自拟)。

(八) 计算汞灯光谱中, 黄₁的波长 $\lambda_{黄1}$, 黄₂的波长 $\lambda_{黄2}$:

1. 利用公式 $\bar{\varphi} = \frac{1}{4}(|\varphi_{左} - \varphi'_{左}| + |\varphi_{右} - \varphi'_{右}|)$, 计算出 $\bar{\varphi}_{绿}$ 、 $\bar{\varphi}_{黄1}$ 、 $\bar{\varphi}_{黄2}$;

2. 计算光栅常数: $d = \frac{2\lambda_{绿公认值}}{\sin \bar{\varphi}_{绿}}$; ($\lambda_{绿公认值} = 546.07\text{nm}$);

3. 计算出黄₁、黄₂的波长: $\lambda_{黄1} = \frac{d}{2} \sin \bar{\varphi}_{黄1}$, $\lambda_{黄2} = \frac{d}{2} \sin \bar{\varphi}_{黄2}$ 。

4. 计算 $\lambda_{黄1}$ 的相对误差: $E_{\lambda_{黄1}} = \frac{\lambda_{黄1} - \lambda_{黄1公认值}}{\lambda_{黄1公认值}} \times 100\%$, ($\lambda_{黄1公认值} = 576.96\text{nm}$),

同理计算: $E_{\lambda_{黄2}}$, ($\lambda_{黄2公认值} = 579.07\text{nm}$)。