

目 录

第一章 大学物理实验内容提要.....	1
(一)《绪论》学习要点.....	1
(二)“实验误差及数据处理”内容摘要.....	1
(三)基本实验方法和基本技能学习内容提要.....	7
第二章 必做基本物理实验.....	9
(一)薄透镜焦距的测定.....	9
(二)牛顿环测曲面半径和劈尖干涉.....	13
(三)分光计的使用和光栅测波长.....	20
(四)迈克尔逊干涉仪的调整与使用.....	32
(五)电势差计测电动势.....	35
(六)光电效应.....	39
(七)伏安法测固定电阻和非线性电阻.....	42
(八)光栅单色仪的定标.....	50
(九)密立根油滴实验——电子电荷的测定.....	53
(十)示波器的使用与超声声速的测定.....	58
(十一)音频信号光纤传输技术实验.....	63
(十二)用拉伸法测金属丝的杨氏模量.....	70
(十三)非平衡电桥与压力传感器特性研究及其应用.....	73
(十四)霍耳效应法测量磁场.....	82
(十五)夫兰克——赫兹实验.....	85
(十六)光学全息照相.....	88
第三章 选做物理实验.....	90
(十七)惠斯登电桥测电阻.....	90
(十八)静电场模拟.....	96
(十九)电子束的静电聚焦与电磁偏转.....	98
(二十)偏振光的特性.....	104
(二十一)光的横波性——偏振.....	110
第四章 模拟试题及其参考解答.....	114
模拟试题 I.....	114
模拟试题 I 参考解答.....	118
模拟试题 II.....	120
模拟试题 II 参考解答.....	123

第一章 大学物理实验内容提要

（一）《绪论》学习要点

一、大学物理实验课的地位、作用 and 任务。

二、物理实验课的进行程序及各环节教学要求。

（二）“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（ $\Delta'N$ ）： $\Delta'N = N_i$ （测量值） $- N$ （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 ： $\Delta = N$ （真值） $- N_i$ （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——恒定性; 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高斯分布,

分布函数 $f(\Delta x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2s^2} \Delta N^2\right]$ 为高斯函数, 其性质是: 单峰性、有界性和对称性。

偶然误差可通过多次测量减小之, 但不能消除。

◆ 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

真值 = 测量值 + 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、偶然误差的估计 (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. 用算术平均偏差估计偶然误差;

(1) 直接测量;

(A) 单次测量: $\Delta N = \Delta_{\text{仪}}$

式中 $\Delta_{\text{仪}}$ 为测量该量的仪器的仪器误差, $\Delta_{\text{仪}}$ 可由以下几方面给出:

1. 由仪器说明书指示计算。

2. 量程 $\times a\%$, a 为仪器的准确度等级。

3. 最小分度值的一半, 适用于可估读的连续均匀分度的仪器, 如米尺等。

4. 最小分度值, 适用于数字式仪表和游标尺等。

若测量条件较差, 可具实估计。

(B) 多次测量:

$$\overline{\Delta N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |N_i - \bar{N}|$$

(2) 间接测量: $N = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$

(A) 绝对误差:

$$\Delta N = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|$$

(B) 相对误差:

$$\frac{\Delta N}{N} = \sum_{i=1}^m \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right|$$

3. 用标准偏差估计误差

(1) 直接测量

(A) 单次测量

$$S_N = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad \text{对均匀分布}$$

或

$$S_N = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{3} \quad \text{对高斯分布}$$

(B) 多次测量

多次测量中任一次测量的标准偏差

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

算术平均值的标准偏差

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

(2) 间接测量

(A) 绝对误差:

$$S_{\bar{N}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} S_{x_i} \right)^2}$$

(B) 相对误差:

$$\frac{S_{\bar{N}}}{\bar{N}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} S_{x_i} \right)^2}$$

4. 用误差评价表达测量结果

(1) 结果表达形式

$$N = \bar{N} \pm \Delta N$$

式中 ΔN 可分别为算术平均偏差, 平均值的标准偏差或其 2 倍, 3 倍等。本实验室规定用算术平均偏差或平均值的标准差。

(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. 不确定度的分类:

(1) A 类不确定度（统计不确定度） S 。

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + \cdots + S_m^2}$$

注意: 在教学实验中, 对同一物理量进行多次测量, S 只有一个分量。

(2) B 类不确定度（非统计不确定度） u 。

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_m^2}$$

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。

平均值 $\bar{N}$ 的不确定度为:

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

其中

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}} \text{——称为贝塞尔公式，它是测量值 } N_i \text{ 的不确定度。}$$

(2) B类(非统计)不确定度的计算方法:

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”。

◆ 误差极限值 Δ 的计算(估计)

A. 用仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ 作为误差极限值 Δ ,即 $\Delta = \Delta_{\text{仪}}$ (会确定仪器的仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$)。

B. 根据实际测量估计误差极限值 Δ 。比如测杨氏模量实验中,用米尺测镜尺距离 D ,误差极限值 Δ 可取至5mm,而不是米尺的仪器误差0.5mm。

注意:对一个物理量进行多次测量,结果既存在A类不确定度又存在B类不确定度,而单次测量只存在B类不确定度。即没有A类不确定度的测量存在,而没有B类不确定度的测量是不存在的。

4. 合成不确定度(σ)

$$\sigma = \sqrt{S^2 + u^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m S_i^2 + \sum_{j=1}^n u_j^2}$$

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 $P=0.68$

$C=2$, 即 $U = 2\sigma$, 置信概率 $P=0.95$

$C=3$, 即 $U = 3\sigma$, 置信概率 $P=0.99$

6. 不确定度的传递(间接测量的不确定度的计算)

(1) 方和根的传递(合成)方式

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

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

在我们的实验中,计算间接测量量的不确定度,都用这种合成的方式。

(2) 算术传递(合成)方式

$$\sigma_{\bar{N}} = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \sigma_{\bar{x}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \sigma_{\bar{y}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \sigma_{\bar{z}} \right| + \dots$$

$$\frac{\sigma_{\bar{N}}}{\bar{N}} = \left| \frac{\partial \ln f}{\partial x} \sigma_{\bar{x}} \right| + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial y} \sigma_{\bar{y}} \right| + \left| \frac{\partial \ln f}{\partial z} \sigma_{\bar{z}} \right| + \dots$$

此种传递方式仅在分析问题时用，不用它来计算间接测量量的不确定度 σ 。

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 和 B 类不确定度分量 u 的传递，必须要把每个直接测量量的 S 和 u 合成为 σ_i 后再进行传递。

◆ 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

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

$$N = \bar{N} \pm \sigma \quad (\text{单位}) \quad (P = 0.68)$$

$$N = \bar{N} \pm 2\sigma \quad (\text{单位}) \quad (P = 0.95)$$

$$N = \bar{N} \pm 3\sigma \quad (\text{单位}) \quad (P = 0.99)$$

上面的表达式中的 P 都是针对误差分布是高斯分布的，若不是高斯分布 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：只能有一位可疑数字算作有效数字的位数，或有效数字（位数）的最后一位是误差所在位。

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：5.2mm ≠ 5.20mm，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。

(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. 不确定度或绝对误差只取 1 位有效数字。

B. 相对误差（不确定度）的有效数字： $E < 1.0\%$ ，取一位； $E \geq 1.0\%$ ，取二位。

C. 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（读至产生误差的那一位）。

(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:

A. 逐差法的适用条件。

B. 逐项逐差与分组逐差的用途 (计算时我们都采用分组逐差)。

C. 逐差法可用来进行直线拟合和求经验公式。

(4) 最小二乘法

A. 最小二乘法原理。

B. 一元一次线性回归

数学模式: $y = bx + a$

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

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

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。

(三) 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。

第二章 必做基本物理实验

(一) 薄透镜焦距的测定

一、实验内容

1. 对简单光学系统进行共轴调节
2. 用自准直法测量薄凸透镜的焦距
3. 用位移法测量薄凸透镜的焦距
4. 用物距-像距法测量薄凸透镜的焦距
5. 用物距-像距法测凹透镜的焦距
6. 组装显微镜

二、观测依据

1. 自准直法测薄凸透镜的焦距

根据焦平面的定义，用图 1 所示的光路，可方便地测出透镜的焦距

$$f = |x_i - x_0|$$

2. 物距——像距法测透镜焦距

在傍轴光线成像的情况下，成像规律满足高斯公式

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v}$$

如图 2 所示，式中 u 和 v 分别为物距和像距， f 为焦距。对 $\bar{f}$ 求解并以坐标代入则有

$$\bar{f} = \frac{|x_L - x_0| \cdot |\bar{x}_i - x_L|}{|x_i - x_0|}$$

3. 位移法测透镜焦距

如图 3 所示，当物像间距 D 大于 4 倍焦距即 $D > 4f$ 时，透镜在两个位置上均能对给定物成理想像于给定的像平面上。两次应用高斯公式并以几何关系和坐标代入，则得到

$$\bar{f} = \frac{D^2 - d^2}{4D} = \frac{(\bar{x}_i - x_0)^2 - (x_{L2} - x_{L1})^2}{4|\bar{x}_i - x_0|}$$

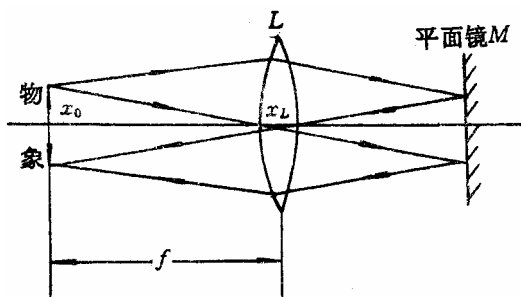


图 1

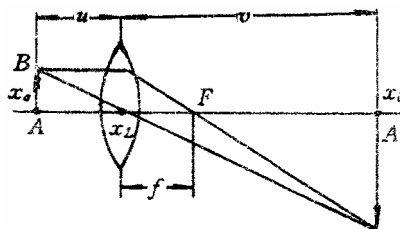


图 2

三、实验做法

1. 自准直法测焦距

如图 1 布置光路，调透镜的位置，高低左右等，使其对物成与物同样大小的实像于物的下方，记下物屏和透镜的位置坐标 x_0 和 x_L 。

2. 物距——像距法测焦距

如图 2 布置光路，固定物和透镜的位置，使它们之间的距离约为焦距的 2 倍；移动像屏使成像清晰；调透镜的高度，使物和像的中点等高；左右调节透镜和物屏，使物与像中点连线与光具座的轴线平行；用左右逼近法确定成理想像时，读像屏的坐标。重复测量 5 次。

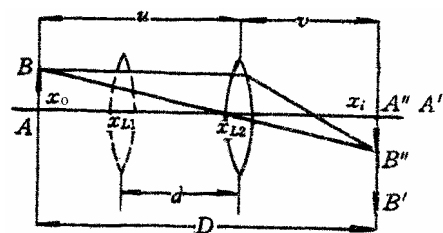


图 3

3. 共轴调节

参照图 3 布置光路，放置物屏和像屏，使其间距 $D > 4f$ ，移动透镜并对它进行高低、左右调节，使两次所成的像的顶部（或底部）之中心重合，需反复进行数次调节，方能达到要求。

4. 位移法测焦距

在共轴调节完成之后，保持物屏和像屏的位置不变，并记下它们的坐标 x_0 和 x_i ，移动透镜，用左右逼近法确定透镜的两次理想位置坐标 x_{L1} 和 x_{L2} 。测量 5 次。

5. 用物距——像距法测量凹透镜的焦距，要求测三次。

6. 组装显微镜并测其放大率。

四、数据记录和处理

1. 自准直法

物（像）位置坐标 x_0 (mm)	
透镜的位置坐标 x_L (mm)	

2. 物距——像距法

物坐标 $x_0 =$ mm 透镜坐标 $x_L =$ mm

测量次数	1	2	3	4	5
像屏位置					
左逼近读数 x'_i (mm)					
右逼近读数 x''_i (mm)					
$x_i = \frac{1}{2}(x'_i + x''_i)$ (mm)					

测量结果用不确定度表示：

$$f = \bar{f} \pm \sigma_{\bar{f}}$$

$$\bar{f} = \frac{(x_0 - x_L)(x_L - \bar{x}_i)}{|x_0 - \bar{x}_i|} \quad (\text{注: } x_0 > x_L > x_i)$$

$$\sigma_{\bar{f}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_0}\right)^2 \sigma_{x_0}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_L}\right)^2 \sigma_{x_L}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \sigma_{x_i}^2}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_0} = \frac{(x_0 - \bar{x}_i)(x_L - \bar{x}_i) - (x_0 - x_L)(x_L - \bar{x}_i)}{(x_0 - \bar{x}_i)^2} = \frac{(x_L - \bar{x}_i) - f}{x_0 - \bar{x}_i}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_L} = \frac{(x_0 - x_L) - (x_L - \bar{x}_i)}{x_0 - \bar{x}_i}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\bar{f} - (x_0 - x_L)}{x_0 - \bar{x}_i}$$

上式中，完成不确定度 σ_{x_0} 、 σ_{x_L} 和 σ_{x_i} 计算如下：

因为 x_0 和 x_L 都只测量了一次，只有非统计不确定度，即

$$\sigma_0 = u_0 = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} = \sigma_L = u_L$$

x_i 是多次测量，其统计不确定度为

$$S_i^2 = \sum (x_{ii} - \bar{x}_i)^2 / [k(k-1)]$$

非统计不确定度为

$$u_i = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} = u_0 = u_L$$

x_i 的合成不确定度为

$$\sigma_i = \sqrt{S_i^2 + u_i^2}$$

式中的 $\Delta_{\text{仪}}$ 是光具座上米尺的仪器误差。

这里说明一点，在分析 x_0 、 x_i 和 x_L 的非统计不确定度时，除了仪器误差引起的不确定度外。为简单起见，我们把仪器误差取为 1mm（按规定米尺应为 0.5mm），就不再计算读数引起的不确定度了。

3. 位移法

按下表记录数据：

测量 次数	透镜第一位置			透镜第二位置		
	x'_{L_1} (mm) (左逼近)	x''_{L_1} (mm) (右逼近)	$x_{L1} = \frac{1}{2}(x'_{L1} + x''_{L1})$	x'_{L_2} (mm) (左逼近)	x''_{L_2} (mm) (右逼近)	$x_{L2} = \frac{1}{2}(x'_{L2} + x''_{L2})$
1						
2						
3						
4						
5						
物坐标 x_0 (mm)				像坐标 x_i (mm)		

数据处理只要计算出焦距 f 的平均值就可以了。

4. 测凹透镜的焦距：数据记录表格自拟，计算出焦距 f 的平均值。

五、注意事项

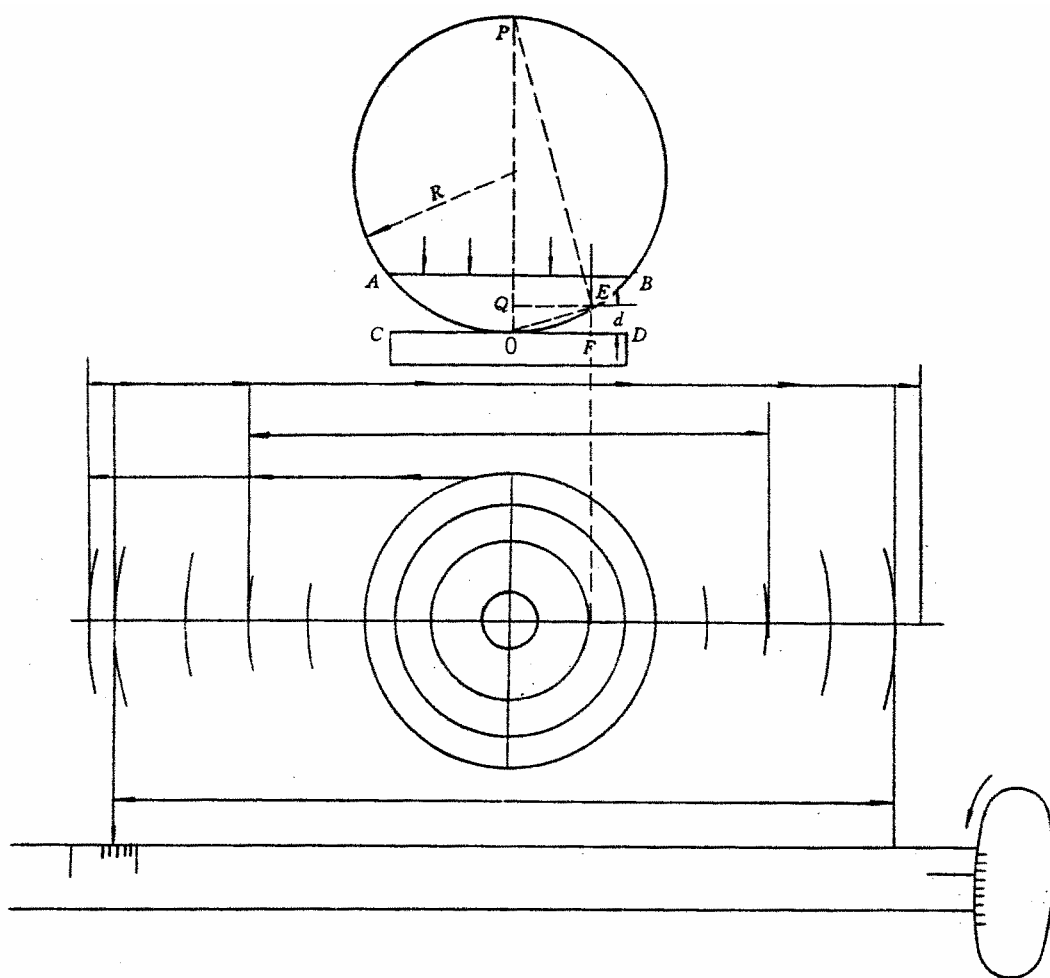
1. 物屏应紧靠光源
2. 自准直法测焦距时，平面反射镜距物屏最好不要超过 35 厘米
3. 用位移法测焦距时，大、小像不要相差太悬殊

(二) 牛顿环测曲面半径和劈尖干涉

(I) 牛顿环

一、实验内容

用牛顿环测量平凸透镜的曲率半径 R



二、观测依据

1. 测试光路如图所示

$$2. R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda}$$

上式中：

(1) R —平凸透镜之凸球面的曲率半径, 单位为米;

(2) D_m^2 —第 m 条暗环直径的平方, 单位为 (毫米)², 实验中 m 为 20、19、18、17、16 条暗环, 用移测显微镜测以上暗环两端的坐标 $D_{m左}$ 及 $D_{m右}$ 。

(3) D_n^2 —第 n 条暗环直径的平方, 单位为 (毫米)², 实验中 n 为 10、9、8、7、6 条暗环, 用移测显微镜测以上暗环两端的坐标 $D_{n左}$ 及 $D_{n右}$ 。

(4) m —外环环数, $m=20、19、18、17、16$

n —内环环数 $n=10、9、8、7、6$

(5) λ —入射光波长, $\lambda_{\text{钠}} = 589.3\text{nm}$

三、实验做法:

1. 调整及定性观察

(1) 将牛顿环调到牛顿环仪的中点。

在日光或白炽灯之下, 用手调节固定平凸透镜凸面与平板玻璃刚好接触的三个螺钉, 松紧适度, 不要调得太紧, (太紧会压坏牛顿环仪), 也不能太松 (太松牛顿环不稳定, 容易跑动, 无法准确进行测量), 调好后, 可用肉眼观察到彩色的牛顿环。

(2) 接通钠光灯电源, 放置牛顿环仪于移测显微镜载物台上, 调节移测显微镜的镜筒, 使物镜端的 45° 反射镜接近牛顿环、并将载物台下面反光镜挡光。

(3) 用眼睛观察目镜, 旋转调节 45° 反射镜, 使钠黄光能充满整个显微镜视场。

(4) 调节显微镜目镜看清叉丝, 然后调节显微镜调焦旋钮, 对干涉圆环调焦, 并使叉丝和圆环像之间无视差 (注意: 调焦时, 镜筒只能由下向上调节, 以免碰伤牛顿环), 此时观察到的可能是一些圆弧。

(5) 用手移动牛顿环仪, 使十字叉丝中心交点处于牛顿环的中心。

(6) 转动鼓轮, 定性观察待测的各圆环左右是否都清晰, 并且都是否在移测显微镜主尺的读取范围之内, 否则, 要重新用手移动牛顿环, 使待测各环左右都在主尺的读数范围内。

2. 定量测量

由公式 $R = \frac{D_m^2 - D_n^2}{4(m-n)\lambda}$ 知, R 为待测半径, λ 为钠光波长, R 、 λ 均为常数, 若 $(m-n)$

为一确定值 (实验中, $m-n=10$), 则 $D_m^2 - D_n^2$ 也为一常数, 即凡是级数相差为 10 的两暗环, 它们直径的平方差应该不变。为此, 为了测量方便和提高测量精度可以相继测出各环直径, 再用逐差法处理数据, 具体做法如下:

(1) 如测试光路图所示, 用眼睛观察目镜, 用手移动牛顿环, 使叉丝十字交点大致位于牛顿环中心。

(2) 开始测量读数:

①为避免螺旋空程引入误差,在整个测量过程中,鼓轮只能沿一个方向转动,不许反转。若有反转,全部数据作废,需重新进行测量。正确的操作方法是:用眼睛观察目镜,顺时针(或反时针)转动鼓轮,使叉丝向左(或向右)移动,边转动鼓轮边读环数,如果需从 20 环暗环读数,叉丝至少要压着 25 环后再反转鼓轮,使叉丝向反方向移动,叉丝反向移动引入的空程误差在不测量读数的环数中进行。

②叉丝反向移动后,退到 20 环暗环时,使竖直叉丝压着 20 环暗环中心时开始读数,在移测显微镜主尺上读整数,在鼓轮上读小数,单位为毫米,且估读到千分位,记为 $D_{20左}$,分别读出 $D_{19左} \cdots \cdots D_{16左}$ 后, $D_{15左} \cdots \cdots D_{11左}$ 不读数,当竖直叉丝压着左第 10 环暗环中心时,又开始读数 $D_{10左} \cdots \cdots D_{6左}$ 。继续转动鼓轮,使叉丝越过干涉圆环中心,再分别读出 $D_{6右} \cdots \cdots D_{10右}$ 及 $D_{16右} \cdots \cdots D_{20右}$ 。将数据记录于表格中。

四、数据记录和处理

1. 数据记录表格

牛顿环编号 _____

环的级数	m	20	19	18	17	16	平 均
环的位置 (mm)	左						
	右						
环的直径 (mm)	D_m						
环的级数	n	10	9	8	7	6	
环的位置 (mm)	左						
	右						
环的直径 (mm)	D_n						
$D_m^2(mm)^2$							
$D_n^2(mm)^2$							
$D_m^2 - D_n^2(mm)^2$							

2. 数据处理: 利用公式计算出曲率半径 R 的平均值 ($\bar{R}$), 不确定度 $\sigma_{\bar{R}}$ 并写出结果表达式。

$$\bar{R} = \frac{\overline{D_m^2 - D_n^2}}{4(m-n)\lambda}$$

在这里我们视 $(\overline{D_m^2 - D_n^2})$ 为逐差法处理后的多次测量，它与拉伸法测杨氏模量中的 $\overline{\Delta n}$ 类似。

故

$$\sigma_{(D_m^2 - D_n^2)} = \sqrt{S_{(D_m^2 - D_n^2)}^2 + u_{(D_m^2 - D_n^2)}^2}$$

其中

$$S_{(D_m^2 - D_n^2)}^2 = \sqrt{\frac{\sum [(D_m^2 - D_n^2)_i - \overline{D_m^2 - D_n^2}]^2}{5(5-1)}}$$

$$u_{(D_m^2 - D_n^2)} = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad \sigma_{\bar{R}} = \frac{\sigma_{(D_m^2 - D_n^2)}}{4(m-n)\lambda}$$

其中 Δ 是参变量 $(D_m^2 - D_n^2)$ 的误差极限值，可粗略地估计为 0.1mm^2 。

$$R = \bar{R} \pm \delta_{\bar{R}}。$$

五、注意事项

1. 应尽量使叉丝对准干涉暗环中央读数；
2. 由于计算 R 时，只需知道环数差 $m-n$ ，故以哪一环作为第一环（习惯就以第一环作为第一环）可以任意选择，但一经选定，在整个测量过程中就再不能改变；
3. 注意不要数错环数，读数时测量显微镜始终向一个方向转动，防止空转误差，否则全部数据作废。
4. 在测量过程中，要防止实验台震动引起干涉环的变化。
5. 实验时要把移测显微镜载物台下的反射镜翻转过来，不要让光从窗口经反射镜把光反射到载物台上，以免影响对暗环的观测。

(II) 用劈尖干涉法测微小厚度

一、目的:

测一薄纸的厚度

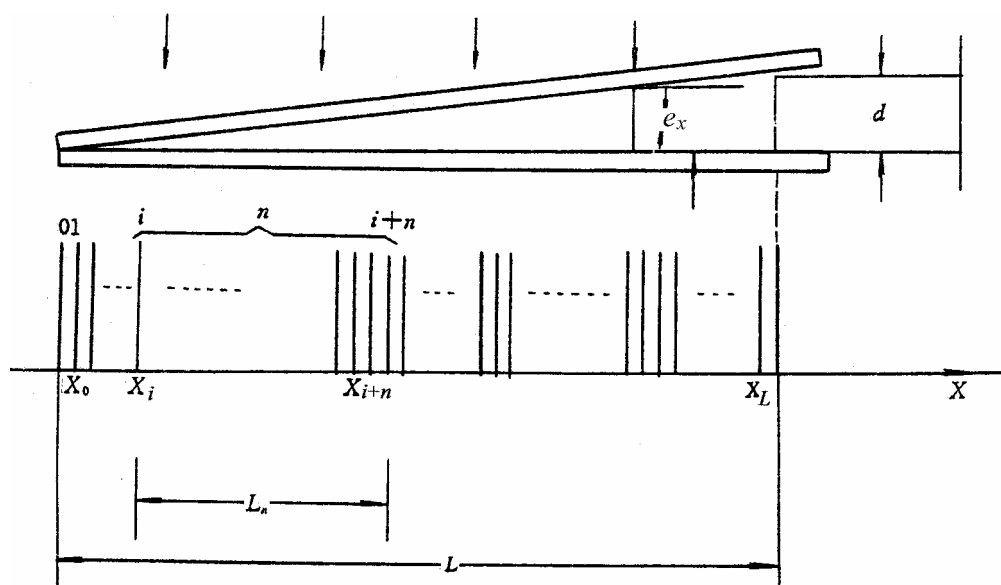
二、要求:

测量的相对误差 $E_d < 1.0\%$

三、设计:

1. 原理:

1) 用劈尖干涉法测薄纸厚度示意图:



2) 简述原理:

将两小块光学平玻璃迭在一起，在一端插入薄纸条，则在两玻璃板间形成一空气劈尖。单色光垂直照射时，单色光在该劈尖（空气隙）的两表面反射，迭加产生两光束干涉，当光程差为

$$\Delta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

时发生相消干涉，形成暗点。此种干涉为等厚干涉，其干涉条纹如图中所示，光程差

$$\Delta = 2e_k + \frac{\lambda}{2}$$

这里 e_k 是第 k 级暗条纹的厚度。由 (1) 式得

$$e_k = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

由(2)式 $k=0$ 处, $d=0$, 即在两玻璃板接触处为零级暗条纹, 如在薄纸条处呈现 $k=N$ 级条纹, 则待测薄纸的厚度为

$$d = N \frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

为测量简便和准确, 只须测出 n 条干涉条纹所对应的长度 L_n 和劈尖端头到夹纸处的总长度 L 由(3)式有

$$d = N \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{n}{L_n} L \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

(4) 式中, n ——干涉条纹数 (实验中 $n=40$) 条

L_n —— n 条暗条纹对应的长度 (nm)

λ ——钠黄光的波长 (nm)

d ——待测薄纸的厚度 (mm)

2. 仪器

移测显微镜, 钠光灯 ($\lambda = 589.3 \text{ nm}$), 劈尖 (两小块光学平玻璃), 薄纸条各一件。

四、观测要点:

1. 调整及观察

- 1) 开启钠光灯;
- 2) 布置光路、放置移测显微镜;
- 3) 用薄纸条与两小块光平玻璃构成劈尖, 并将劈尖放置于移测显微镜载物台上;
- 4) 显微镜调焦, 在显微镜下, 调整劈尖及薄纸条位置, 使之观察到清晰的干纹条纹, 且使干涉条纹与显微镜主尺垂直;
- 5) 调节显微镜目镜及劈尖方向, 使叉丝走向与干涉条纹平行或垂直。

2. 测量

- 1) 测出相隔 $n=40$ 条干涉条纹的长度 $L_n = |x_{i+n} - x_i|$ 测三次, 求其平均值;
- 2) 测劈尖端头到夹纸处的总长度 L 测三次, 求其平均值;
- 3) 测量过程中, 叉丝只能朝一个方向移动, 且防止读数鼓轮空转。

五、数据记录处理

1. 数据记录

被测量 测量次数	x_0 (mm)	x_i (mm)	x_{i+n} (mm)	x_L (mm)
1				

2				
3				
平均值				

$$n = 40.0$$

2. 数据处理:

$$\overline{L_n} = |\overline{x_{i+1}} - \overline{x_i}|$$

$$\overline{L} = |\overline{x_L} - \overline{x_0}|;$$

$$\overline{d} = \frac{n}{L_n} \frac{\lambda}{2} L$$

结果表达 $d = (\overline{d} \pm \sigma_d) mm$

（三）分光计的使用和光栅测波长

（I）分光计的使用

一、实验内容

1. 正确调整分光计，使其处于正常工作状态。
2. 测定等边三棱镜的顶角（自准直法和反射法）。

二、观测依据

1. 实验器材，本实验所用仪器有分光计一台，汞灯一只，三棱镜一个。
2. 自准直法测三棱镜的顶角

图 1 是自准直法测顶角的示意图。

$$A = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - \frac{1}{2}[(\theta_1 - \theta_2) + (\theta'_1 - \theta'_2)]$$

式中 θ_1 、 θ'_1 和 θ_2 、 θ'_2 分别是望远镜对准三棱镜的 AB 和 AC 面时的“方位角”，它可以通过分光计的读数盘上的两个窗口直接读出，单位是“°”和“′”。 α 角不需进行测量。

3. 反射法测三棱镜顶角

图 2 是反射法测三棱镜顶角 A 的示意图。

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2}[(\theta_2 - \theta_1) + (\theta'_2 - \theta'_1)]$$

其中 θ_1 、 θ'_1 和 θ_2 、 θ'_2 是图中望远镜所在的两个位置（即在这两个位置上从望远镜中观察到的十字窗口的像与叉丝的上十字相交重合）的“方位角”，同样可以从读数盘上的两个窗口分别读出。

三、实验做法

1. 分光计的调整

（1）调整要求：

- A. 使平行光管能发出平行光，
- B. 望远镜能接收平行光；
- C. 望远镜与平行光管共轴，且垂直于仪器中心轴，载物台面垂直于仪器中心轴。

（2）调整方法：

- A. 粗调（目测，为细调达到上述三条要求创造条件）

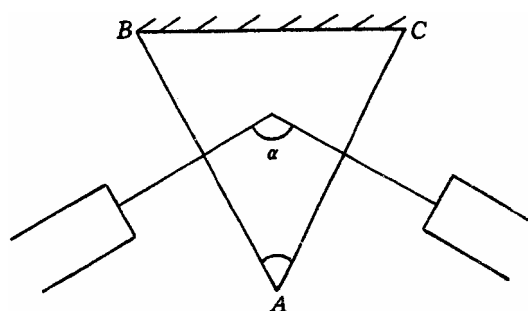


图 1

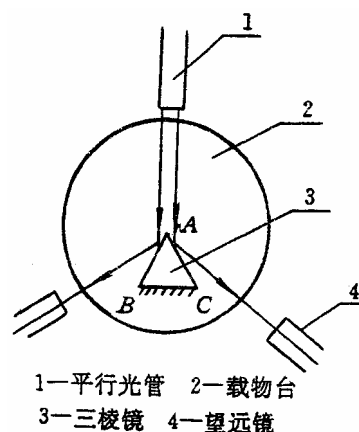


图 2

在熟悉分光计的基础上，通过望远镜和平行光管俯仰调节螺钉的调节，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（都用眼睛观察判断）。

B. 细调

①调节望远镜能接收平行光（自准直法）

A. 开启电源，照亮目镜视场，观察十字窗口的“十”字和分划板上的“≠”叉丝是否清晰，如不清晰，缓慢旋转目镜调节让其清晰。

B. 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”字像能否看到和清晰，如看不到或不清晰，调节物镜直到清晰为止（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 1）。

C. 将三棱镜如图 3 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。

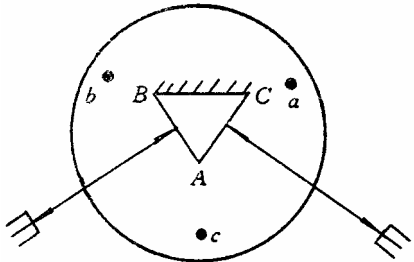


图 3

把望远镜正对三棱镜的某一光学面（如 AB），通过目镜观察分划板上是否有十字窗口的“十”字像。如无此像，可稍稍左右旋转一下载物台（或望远镜），还看不见“十”字像，就要调节望远镜的俯仰调节螺钉和载物台的三个调平螺钉了。总之通过上述调节，直到“十”字像的出现。如像不清晰，还需再调节物镜让像清晰，并左右观看无视差，望远镜就能接收平行光了。

②调整望远镜光轴和载物平台垂直于仪器中心轴

在一个光学面（AB 面）已找到十字窗口的“十”字像的基础上，转动载物台（或望远镜）让望远镜正对另一光学面（AC 面），找这个光学面反射的“十”字像。如果没有“十”字像，可按找 AB 面反射像的调节方式进行。一般来讲，两个面的“十”反射像找到之后是不等高的。如图 4 中（a）、（b）两图，“十”字像同在上交点的上方（或下

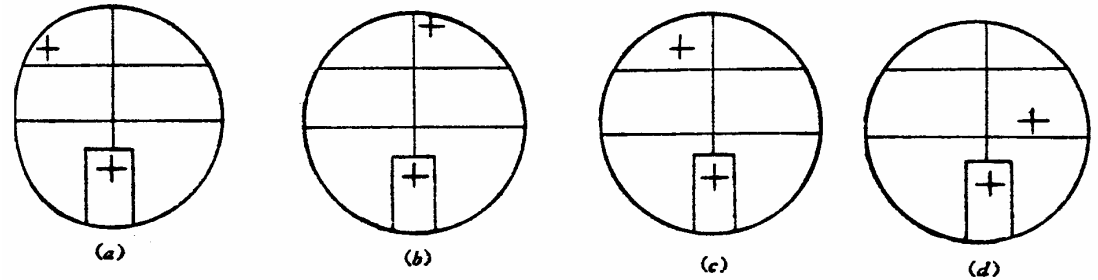


图 4

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，往往两种情况都存在。要把两个光学面反射像都调成图 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 AC 面反射回

来的“十”字像之间的高度差减小一半；然后将 AC 面正对望远镜，调节螺钉 b，使“十”字像与 AB 面反射回来的“十”字像在分划板上高度差再减少一半，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”字像在视场中等高。最后，调节望远镜的俯仰调节螺钉，使“十”字像的位置（指两个面的反射像）如图 5 那样，此步调节完成。

2. 用自准法测三棱镜顶角

完成上述调整之后，如图 3 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 5 时（即“十”字像与“±”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 5 时，分别从左右窗口读出方位角 θ_2 、 θ'_2 。如此反复测 5 次。

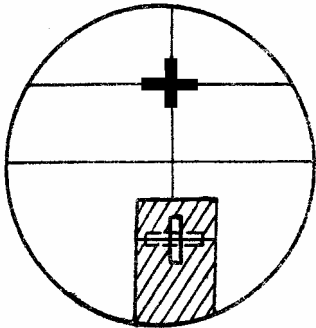


图 5

3. 用反射法测三棱镜顶角

(1) 调节平行光管，使其发射平行光并与望远镜光轴共轴

取下三棱镜，点燃汞灯，使望远镜、平行光管和汞灯的一个窗口的中央共线排列，通过望远镜观察平行光管的狭缝，通过调节狭缝轴向（前后）位置让像清晰；调节（旋转）狭缝让像与望远镜“±”叉丝的竖线重合；调节平行光管的俯仰调节螺钉使像位置适中。调节狭缝宽度，使其像呈细锐亮线。完成后平行光管就能发出平行光了。

旋转狭缝成水平取向，调节平行光管的俯仰调节螺钉，使水平狭缝像与“±”叉丝下面那条水平线重合。此时，平行光管与望远镜的光轴就共轴了。

(2) 用反射法测顶角

将狭缝旋转至竖直方向，把三棱镜如图 2 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 5 次，

四、数据记录与处理

1. 数据表格

(1) 自准直法测顶角

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				

4				
5				

(2) 反射法测顶角

可参考(1)自拟。

2. 数据处理

(1) 自准直法测顶角需算出 A 的平均值、 σ_A 和写出表达式

$$\bar{A} = 180^\circ - \left[\left| \bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2 \right| + \left| \bar{\theta}'_1 - \bar{\theta}'_2 \right| \right] / 2$$

$$\sigma_{\theta_1} = \sqrt{S_{\theta_1}^2 + u_{\theta_1}^2}, \quad \sigma_{\theta'_1} = \sqrt{S_{\theta'_1}^2 + u_{\theta'_1}^2},$$

$$\sigma_{\theta_2} = \sqrt{S_{\theta_2}^2 + u_{\theta_2}^2}, \quad \sigma_{\theta'_2} = \sqrt{S_{\theta'_2}^2 + u_{\theta'_2}^2},$$

$$S_{\theta_1} = \sqrt{\frac{\sum (\theta_i - \bar{\theta}_1)^2}{5(5-1)}}, \quad S_{\theta'_1}, S_{\theta_2}, S_{\theta'_2} \text{ 类似 } S_{\theta_1} \text{ 计算};$$

$$u_{\theta_1} = u_{\theta'_1} = u_{\theta_2} = u_{\theta'_2} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} \quad (\text{分光计仪器误差为 } 30'' \text{ 或 } 1')$$

$$\sigma_A = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{\theta_1}^2 + \sigma_{\theta'_1}^2 + \sigma_{\theta_2}^2 + \sigma_{\theta'_2}^2}$$

$$A = \bar{A} \pm \sigma_A \quad (\text{注意: 要用弧度算})$$

(2) 反射法只算出 $\bar{A}$ 即可。

五、注意事项

1. 教材中的四条注意事项必须注意。

2. 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 $360^\circ - 240^\circ 2' = 119^\circ 58'$ 。

附：JJY 型 (FGY) 1' 分光仪使用说明书

一、结构原理

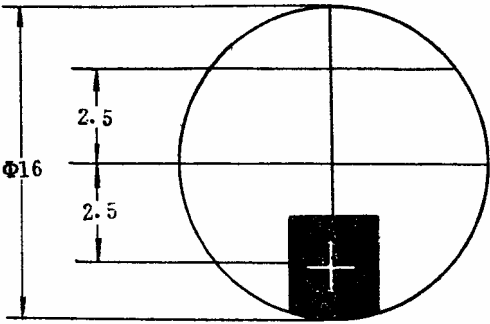
分光仪的外形如图二所示。

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

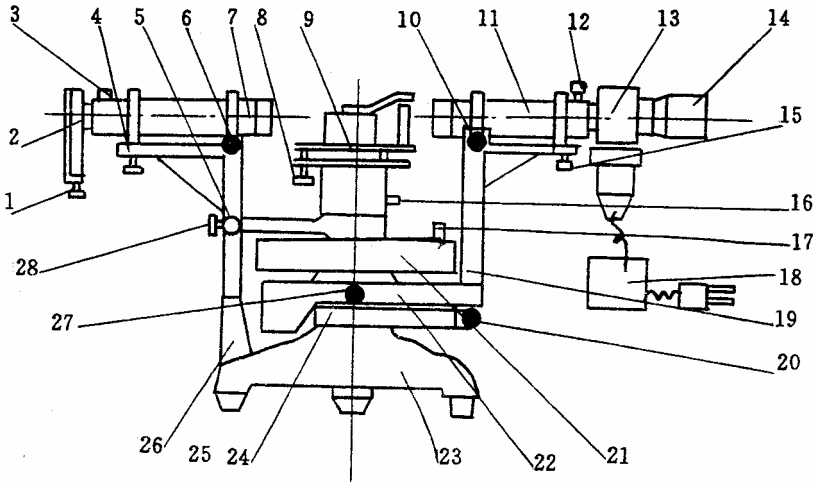
绕中心轴旋转，度盘上刻有 720 等分的刻线，每一格的格值为 30 分，对径方向设有两个游标读数装置，测量时，通过放大镜读出两个读数数值，然后取平均值，这样可消除偏心引起的误差。

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一所示：



图一



图二 仪器结构

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

载物台(9)套在游标盘上,可以绕中心旋转,旋紧载物台锁紧螺钉(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、仪器的调整

L. 目镜的调焦

目镜调焦的目的是使眼睛通过目镜能很清楚地看到目镜中分划板上的刻线。

调焦方法:

先把目镜调焦手轮(14)旋出,然后一边旋进,一边从目镜中观察,直到分划板刻线成像清楚,再慢慢地旋出手轮,至目镜中的像的清楚度将被破坏而未破坏时为止。

2. 望远镜的调焦

望远镜调焦的目的是将目镜分划板上的十字线调整到物镜的焦平面上,也就是望远镜对无穷远调焦。其方法如下:

- 1) 接上灯源。将目镜灯源插头与变压器插座相接。
- 2) 把望远镜光轴位置的调节螺钉(10, 15)调到适中的位置。
- 3) 将三棱镜放在载物台的中央,其反射面对着望远镜物镜,且与望远镜轴大致垂直。
- 4) 通过调节载物台的调平螺钉(8)和转动载物台,使望远镜的反射像和望远镜在一直线上。

5) 从目镜中观察,此时可以看到一亮斑,前后移动目镜,对望远镜进行调焦,使亮十字线成清晰像,然后利用载物台上的调平螺钉和载物台微调机构,把这个亮十字线调节与分划板上的十字线重合,往复移动目镜,使亮十字和十字线无视差地重合。

3. 调整望远镜的光轴垂直与旋转主轴

1) 调整望远镜光轴上下位置调节螺钉(15),使反射回来的亮十字精确地成像在十字线上。

2) 把游标盘连同载物台三棱镜旋转 180° 时观察到的亮十字可能与十字丝有一个垂直方向的位移,就是说,亮十字可能偏高或偏低。

3) 调节载物台调平螺钉,使位移减少一半。

4) 调整望远镜光轴上下位置调节螺钉(15),使垂直方向的位移完全消除。

5) 把游标盘连同载物台,三棱镜再转过 180° 检查其重合程度。重复 3) 或 4) 使偏差得到安全校正。

4. 将分划板十字线调成水平和垂直

当载物台连同三棱镜相对于望远镜旋转时,观察亮十字是否水平地移动,如果分划板的水平刻线与亮十字的移动方向不平行,就要转动目镜,使亮十字的移动方向分划板的水平刻线平行,注意不要破坏望远镜的调焦,然后将目镜锁紧螺钉旋紧。

5. 平行光管的调焦

目的是把狭缝调整到物镜的焦平面上，也就是平行光管对无穷远调焦。

方法如下：

1) 去掉目镜照明器上的光源，打开狭缝，用漫射光照明狭缝。

2) 在平行光管物镜前放一张白纸，检查在纸上形成的光斑，调节光源的位置，使得在整个物镜孔径上照明均匀。

3) 除去白纸，把平行光管光轴左右位置调节螺钉（6）调到适中的位置，将望远镜管正对平行光管，从望远镜目镜中观察，调节望远镜微调机构和平行光管上下位置调节螺钉。

（4）使狭缝位于视场中心。

4) 前后移动狭缝机构，使狭缝清晰地成像在望远镜分划板平面上。

6. 调整平行光管的光轴垂直于旋转主轴调整平行光管光轴上下位置调节螺钉（4），升高或降低狭缝像的位置，使得狭缝对目镜视场的中心对称。

7. 将平行光管狭缝调成垂直

旋转狭缝机构，使狭缝与目镜分划板的垂直刻线平行，注意不要破坏平行光管的调焦，然后将狭缝装置锁紧螺钉旋紧。

(II) 用光栅测光波波长

一、实验内容

测汞光谱中和黄 I 和黄 II 的波长

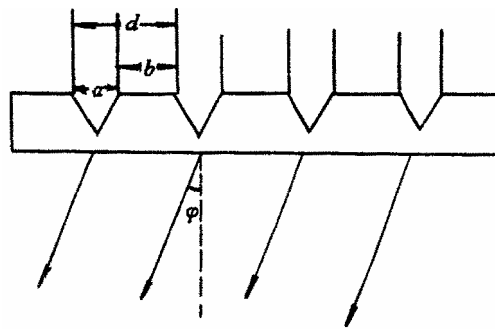


图 1

二、观测依据

1. 实验原理简图
2. 实验原理公式

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

如果级数 k 取 ± 1 有

$$d \sin \varphi = \lambda$$

式中, d 为光栅常数, 单位为 m ; φ 为衍射角, 单位为度、分、秒; λ 为波长, 单位为纳米 (nm)。

光栅常数 d 用已知绿光波长 $\lambda_{\text{绿}}$, 测出绿光的衍射角 $\varphi_{\text{绿}}$, 利用公式算出 d , 即

$$d = \frac{\lambda_{\text{绿}}}{\sin \varphi_{\text{绿}}}$$

在求出 d 的基础上, 测黄光 I 和黄光 II 的衍射角 $\varphi_{\text{黄1}}$ 和 $\varphi_{\text{黄2}}$, 再利用公式可算出 $\lambda_{\text{黄1}}$ 和

$\lambda_{\text{黄2}}$, 即

$$\lambda_{\text{黄1}} = d \sin \varphi_{\text{黄1}}, \quad \lambda_{\text{黄2}} = d \sin \varphi_{\text{黄2}}$$

实际上测量就是分别测出绿光、黄 I 光、黄 II 光的衍射角 φ 。

三、实验做法

1. 分光计的调整

原则上按实验八分光计的调整那样进行调整, 达到调整的三个要求后再进行衍射实

验的调整，现将两部分调整内容合并在一起进行调整。

(1) 粗调：调节望远镜、平行光管和载物台的有关螺钉，让它们都尽量水平（用眼睛观察）。

(2) 细调

A. 调节入射光与光栅面相垂直

(A) 调节望远镜能接收平行光

开启分光计电源，调节望远镜目镜，看清“≠”形二丝及十字窗口的“十”字。用光栅面贴近望远镜物镜，调节物镜使十字窗口通过光栅反射回来的“十”像清晰。然后如图2所示放置光栅（即光栅面前后各有一载物台调平螺钉，而第三个调平螺钉通过光栅面），通过望远镜找“十”像，其方法与实验八完全相同，找到清晰像后望远镜就能接收平行光了。

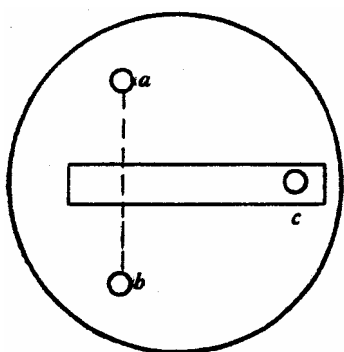


图2

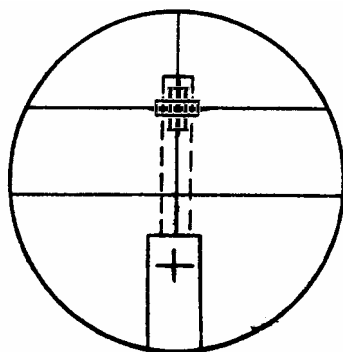


图3

(B) 调节望远镜光轴垂直于分光计主轴

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，找的方法与实验19完全相同，调好的标志如图3所示（即两个面的反射“十”字像都与“≠”叉丝的上交点重合）。

(C) 调平行光管能产生平行光其光轴垂直于分光计主轴

用调好的望远镜正对平行光管，观察狭缝的像。调节平行光管上狭缝和透镜的距离（前后拉动狭缝），直到在望远镜看到狭缝的像，并使狭缝像与叉丝无视差。这时，平行光管发出的光就是平行光了，然后把狭缝的宽度调到 1mm 左右即可（注意：不要把狭缝关死了，更不能关死后，还在往这个方向旋转鼓轮，它会损坏狭缝！）

转动狭缝体使狭缝处于水平位置，以望远镜为基准，调节平行光管俯仰螺钉，使光缝处于望远镜分划板中心十字线水平中央，然后将狭缝竖起，并锁紧螺钉。

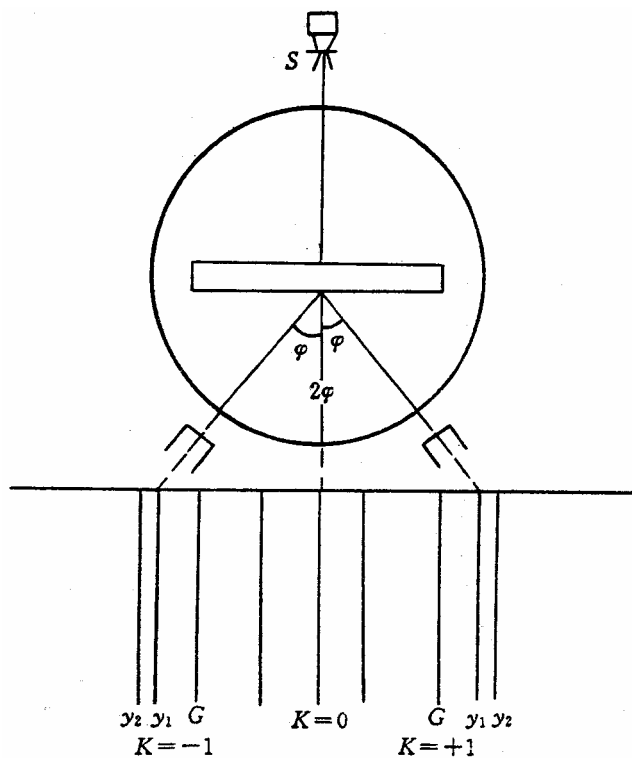
以上调整步骤完成后，转动光栅（或载物台）让“十”窗口的像与狭缝的像通过望远镜在同一位置观察如图3所示，入射光与光栅面就垂直了。

B. 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

(1) 测试示意图如图 4 所示。



读出它们的方位角，继续把望远镜向右转，读出叉丝竖线对准的绿光（ G ）、黄 I（ y_1 ）和黄 II（ y_2 ）的方位角，重复测五次，记录于表中。

四、数据记录与处理

[illegible]

3												
4												
5												
平均												

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

3. 分别算出 $\bar{\lambda}_{\text{黄I}}$ 和 $\bar{\lambda}_{\text{黄2}}$; 计算黄 II 的波长 $\bar{\lambda}_{\text{黄2}}$ 的不确定度 $\sigma_{\lambda_{\text{黄2}}}$, 并写出它的结果表

达式。已知 $\lambda_{\text{绿}} = 546.07(\text{nm})$

$$(1) \quad \bar{\lambda}_{\text{黄I}} = \frac{\lambda_{\text{绿}}}{\sin \varphi_{\text{绿}}} \cdot \sin \bar{\varphi}_{\text{黄I}}, \quad \bar{\lambda}_{\text{黄2}} = \frac{\lambda_{\text{绿}}}{\sin \varphi_{\text{绿}}} \cdot \sin \bar{\varphi}_{\text{黄2}}$$

$$(2) \quad \frac{\sigma_{\lambda_{\text{黄2}}}}{\lambda_{\text{黄2}}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\cos \varphi_{\text{黄2}}}{\sin \varphi_{\text{黄2}}} \sigma_{\varphi_{\text{黄2}}}\right)^2}$$

$$\frac{\sigma_d}{d} = \frac{\cos \varphi_{\text{绿}}}{\sin \varphi_{\text{绿}}} \sigma_{\varphi_{\text{绿}}} = \text{ctg} \varphi_{\text{绿}} \sigma_{\varphi_{\text{绿}}}$$

$$\sigma_{\varphi_{\text{绿}}}^2 = \frac{1}{16} (\sigma_{\varphi_{\text{绿左}}}^2 + \sigma_{\varphi'_{\text{绿左}}}^2 + \sigma_{\varphi_{\text{绿右}}}^2 + \sigma_{\varphi'_{\text{绿右}}}^2)$$

$$\sigma_{\varphi_{\text{黄2}}}^2 = \frac{1}{16} (\sigma_{\varphi_{\text{黄2左}}}^2 + \sigma_{\varphi'_{\text{黄2左}}}^2 + \sigma_{\varphi_{\text{黄2右}}}^2 + \sigma_{\varphi'_{\text{黄2右}}}^2)$$

$$\sigma_{\varphi_{\text{绿右}}}^2 = S_{\varphi_{\text{绿右}}}^2 + u_{\varphi_{\text{绿右}}}^2 \quad (\text{另 7 个可写成类似形式})$$

$$S_{\varphi_{\text{绿右}}} = \sqrt{\frac{\sum (\varphi_{\text{绿右}} - \varphi'_{\text{绿右}})^2}{5(5-1)}} \quad (\text{另 7 个类似})$$

$$u_{\varphi_{\text{绿右}}} = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = u_{\varphi'_{\text{绿左}}} = u_{\varphi'_{\text{绿右}}} \quad (\Delta_{\text{仪}} = 1' \text{ 或 } 30'')$$

$$u_{\varphi_{\text{黄2右}}} = u_{\varphi'_{\text{黄2右}}} = u_{\varphi_{\text{黄2左}}} + u_{\varphi'_{\text{黄2左}}}$$

根据这些式子代入传递公式即可求出 $\sigma_{\lambda_{\text{黄2}}}$ 。

$$(3) \quad \text{结果表达式: } \lambda_{\text{黄2}} = \bar{\lambda}_{\text{黄2}} \pm \sigma_{\lambda_{\text{黄2}}} \quad \text{单位}$$

五、注意事项

1. 只有调整到如图 3 那样和中央亮条纹两边的谱线等高时，方可进行测量，否则测量数据无效。
2. 测量时动作要轻，不能振动或碰动光栅位置。
3. 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。

（四）迈克尔逊干涉仪的调整与使用

一、实验内容

1. 初步掌握迈克尔逊干涉仪的调整方法；
2. 用迈克尔逊干涉仪测 *He-Ne* 激光的波长；
3. 观察白光干涉。

二、观测依据

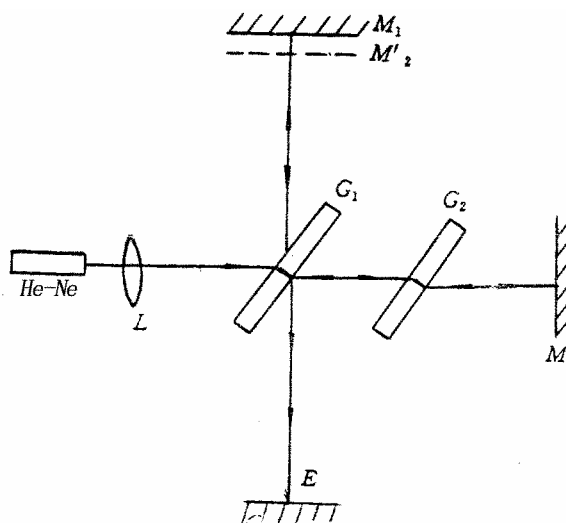
迈克尔逊干涉光路如图所示：

$$\lambda = \frac{2\Delta d}{\Delta m}$$

λ — *He-Ne* 激光的波长、单位为纳米。

Δd — 动镜 M_1 移动的距离，单位为毫米。

Δm — 干涉条纹冒出（或缩进）的环数。



三、实验做法

1. 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。

2. 调节

（1）仪器水平调节

安置迈克尔逊干涉仪，使其机械平面（即导轨）大体垂直桌子边缘，调迈克尔逊干涉仪水平（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 C 的距离相等;

2) 粗调 M_2 镜, 使 M_2 镜垂直 M_1 镜:

①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 镜背面的三个调节螺丝, 此时第①条光线经反射后返回与光源基本重合, 目测即可。

②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 镜背面三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:

①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。

②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。

3. 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 d 值, 如此连续6次, 记录于数据表格中。

(2) 调节和观察等厚干涉现象。观察条纹的疏密变化。把干涉条纹间距调到 $1mm$ 左右, 观察在移动 M_1 可动镜时干涉条纹弯曲程度有怎样的变化。

(3) 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。

四、数据记录和处理

Δm (条)	0	50	100	150	200	250
d (mm)						

有关量值的计算

1. 用逐差法求 $\lambda_{\text{实验}}$ 值, 用不确定度将结果表示成

$$\lambda = \bar{\lambda} \pm \sigma_{\bar{\lambda}}$$

2. $\lambda_{\text{实验}}$ 与 $\lambda_{\text{公认}}$ 比较求相对误差 E

$$\lambda_{\text{公认}} = 632.8 \text{ 纳米 (nm)}$$

3. 写一个利用迈克尔逊干涉仪测平板玻璃厚度的实验方案。

五、注意事项

不能直接用眼睛去看激光束，以免造成永久性的损伤。

（五）电势差计测电动势

一、实验内容

1. 电势差的调节；
2. 测温差电偶（铜——康铜）的温差电动势。

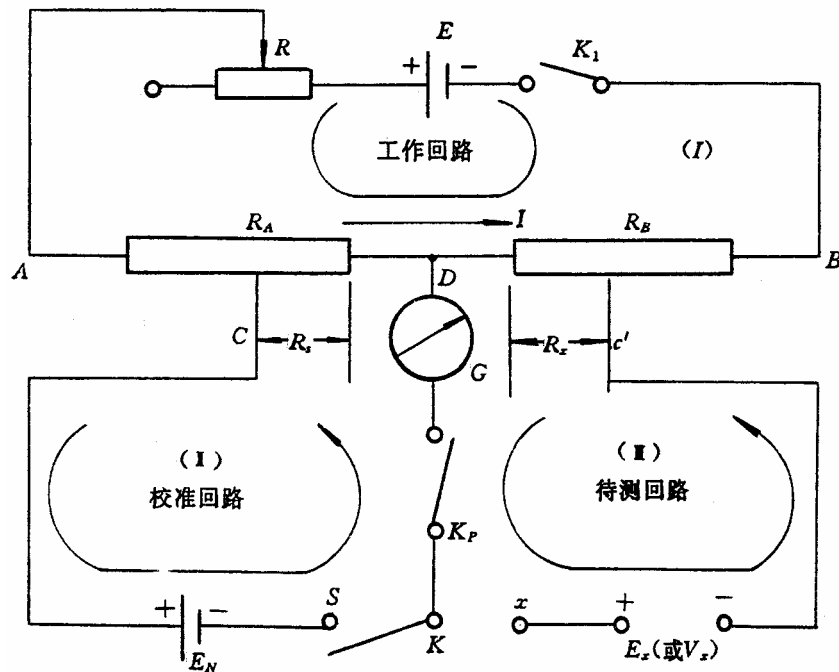


图 1 UJ31 电势差计原理图

二、观测依据

1. UJ31 电势差计的原理图
图中文字代表的意义见教材该实验。
2. UJ31 电势差计的面板及接线图
3. 面板图中各旋钮介绍如下表：

标 记	名 称	作 用
K	操作步骤 选择开关	就是图 1 中的 K。在进行校准时应旋至“校准”；在进行测量时应旋至“未知 1”或“未知 2”；不用时旋至“断”
R_S	温度补偿盘	就是图 1 中的 R_S ，不同的是刻度不是阻值而是乘上 10.000mA 后的电动势值。校准前必须把它旋至根据温度修正公式算出的标准电池在室温下电动势 E_N 值的位置上。

粗 (R_1) 中 (R_2) 细 (R_3)	电流调节盘	就是图 1 中的电阻 R_0 “粗”、“中”、“细”表示 R 不同的可变阻值。校准时，必须通过它的调节达到平衡，即 $I = 10.000 \text{ mA}$ 。
C	倍率选择开关	被测电动势的值分为两档：放在 $\times 1$ 档直接读数；放在 $\times 10$ 档读数后乘上 10。
I (R_{x1}) II (R_{x2}) III (R_{x3})	测量调节盘	就是图 1 中的电阻 R_x ，不同的是刻度不是阻值而是乘上 10.000 mA 后的电动势值。通过它的调节平衡后，即可读出被电动势的值。
粗 细 短路	接通检流计的按钮开关	这组开关就是图 1 中的 K_p 。校准和测量都要用它，先按“粗”按钮，待检流计指针在“0”附近摆动时再按“细”按钮。“短路”按钮可进行平衡指示仪“电调零”。

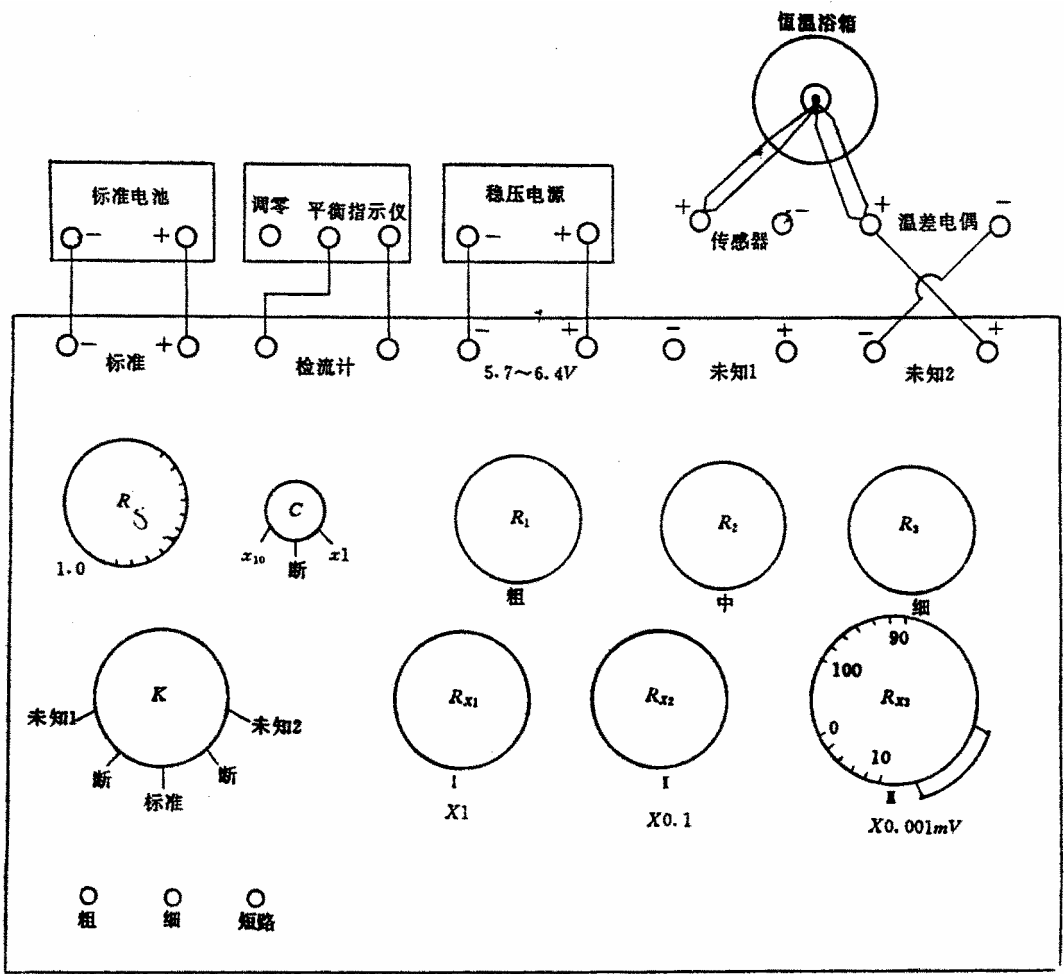


图 2 UJ31 电势差计面板与接线图

4. UJ31 电势差计中的一些参数

(1) 可测范围：0.001—170.00mV；分两档， $\times 1$ 档为 0.001—17.000mV（最小分度 $1\mu V$ ）， $\times 10$ 档为 0.01—170.00mV（最小分度 $10\mu V$ ）。

(2) 准确度等级为 0.05 级，基本误差为

$$\Delta U_x = \pm(0.05\%U_x + \Delta U)$$

式中， U_x 是被测电动势值（即示值）， ΔU 取值倍率为 $\times 10$ 时， $\Delta U = 5\mu V$ ；倍率为 $\times 1$ 时， $\Delta U = 0.5mV$ 。

(3) 要求环境温度为 $20^\circ C$ 。

5. 多用恒温水浴简介

恒温水浴是一台能提供温度变化又能让其稳定在某个值的装置。图 3 是恒温水浴的面板图，当打开开关时，恒温水浴的加热装置就让容器（烧杯）里的水加热，其温度可由温度显示（数显）中显示出来，图中的“快”、“慢”选择开关是控制升温快慢的。如要让温度升到某个值就恒温，则可通过预置温度按键控制。比如要在 $30^\circ C$ 时恒温，就可以通过按键（按一下“+”，就在原数字的基础上加 1，按“-”则减 1）让其出现“30”的数字，它就可在此 $30^\circ C$ 时恒温了，“ON”、“OUT”是两个灯。升温过程“OUT”灯亮（绿灯），恒温时“ON”灯亮（红灯）。“定标”“控温”是一选择开关，我们只用“定标”位置。在顶部还有两对接线柱，我们只用“温差电偶”这对接线柱。

温差电偶的热端放在烧杯内，冷端是室温，“温差电偶”接线柱就是温差电偶的冷热两端。

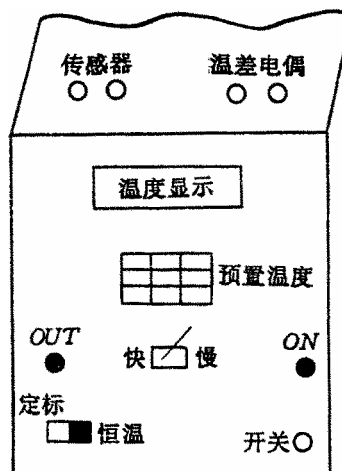


图 3

三、实验做法

1. 把 R_s 旋至标准的电动势值的位置。
2. 按图 2 正确连线（注意：标准电源与工作电压的极性不要接反!）
3. 打开提供工作电压的稳压电源的开关（在开之前先把稳压电源电压输出“细调”旋钮向左旋至最小），把电压预调至表盘红色标志中（6.0V 左右）。
4. 平衡指示仪零点调节：先机械调零，后电调零（按下 UJ31 “短路” 钮，调平衡指示仪的“调零” 旋钮）。
5. 校准工作电流 $I (=10.000mA)$ ，将平衡指示仪灵敏度拨在最低挡（1 档），“K” 开关旋至“标准”；按先粗后细的原则调电阻 R （即面板中的粗、中、细三个旋钮），调好一个电阻值之后，按下检流计的“粗” 按钮开关，如果平衡指示仪的指针摆动厉害，立即放松按钮开关，使其断开，再调 R ，再按下“粗” 钮，直到指针摆动不超过两端刻度时，方可把“粗” 钮锁死（即按下“粗” 钮后，顺时针旋转就可锁死）继续调 R ，当指针在 0 附近时，按下“细” 按钮并顺时针旋转锁死，再调 R 直至平衡。此时将灵敏度旋钮拨至 III 档，又调平衡之后，立即把两个按钮放松，断开检流计。
6. 测温差电偶的电动势 E_x ：将开关 K 从“校准” 旋至“未知 1” 或“未知 2”（视被

测电动势接入那一对接线柱而定), 调 R_x (即面板中的 I、II、III 调节盘, 使平衡指示仪指零 (调节过程与 5 完全相同, 不同的是 5 是调 R , 这里是调 R_x), 这时从调节盘指示的值就是被测电动势的值。

注意: 最小分度是 $1\mu V$ ($\times 1$ 档), 第三调节盘有游标, 以 mV 为单位可读至小数第四位, 即 $0.1\mu V$ 位。

特别提醒: 在测被测电动势的调节中, 只能调 R_x , 不能再动 R !

7. 重复 5、6 两步, 测不同温度下的温差电动势 (35、45、55、65、75、85 $^{\circ}C$)。

另: 恒温水浴的调节作用。先调预置温度按键把预置温度调到第 1 个温度点, 如 30 $^{\circ}C$, 然后开启电源加热升温 (此时 “OUT” 绿灯亮), 烧杯中水的温度可由温度显示窗口显示: 当升至预置温度时, “OUT” 灯灭, “ON” 灯亮, 即进入恒温阶段。“定标” “控温” 选择开关放在 “定标” 端, 用 “温差电偶” 接线柱与电势差计联接。这一步最好是电势差计校准工作电流即第 5 步后进行。

注意:

1. 在进行校准调节时, 始终调不平衡, 你可以检查: ①K 开关是否放在 “校准”; ②标准电池与工作电压极性是否接反; ③工作电压是否合适。如果都没错, ④你可以改变一下工作电压的电压值, 因为稳压电源电压表的指示不准, 指在这个范围, 实际已不在这个范围了。当然只能 6.0 伏附近改变, 不要距此太远。假如都试过了, 很可能是联接标准电池与工作电源的导线不通, 这时你可以检查这些导线通与不通。

2. 在测量过程中, 任何温度下应尽量调至使平衡指示仪指零, 以便在温度上升时, 能迅速准确测量所要求温度下的温差电动势。

四、数据记录和处理

温差电偶材料_____ 冷端温度 (室温) _____
电势差计倍率_____

$t/^{\circ}C$	35	45	55	65	75	85
$E(mV)$						

1. 作图法: 用坐标纸绘制 $E \sim t$ 关系图, 在图中求 E_0 、 θ , 并写出方程 $E = E_0 + \theta t$
2. 用最小二乘法求 E_0 、 θ , 并写出方程 $E = E_0 + \theta t$
3. 将以上两种方法求出的方程进行比较, 并指出差别和原因。

(六) 光电效应

一、预习提要

1. 什么是光电效应?它具有什么实验规律?光电效应的伏安特性含义是什么?
2. 什么是截止电压?如何用实验来测定?
3. 什么是截止频率?如何用实验来测定?
4. 本实验中如何测定普朗克常量?

二、实验要求

1. 学习测定普朗克常量的一种实验方法;
2. 学习用滤色片获得单色光的方法;
3. 学习用实验研究验证理论的方法,加深光电效应对光量子理论的理解。

三、实验目的

1. 通过测试光电效应基本特性曲线,使学生进一步认识理解光的量子性。
2. 通过对五种不同频率的反向截止电压的测定,由 $U_s - \nu$ 直线图形,求出“红限”频率。
3. 验证爱因斯坦光电方程,求普朗克常数。

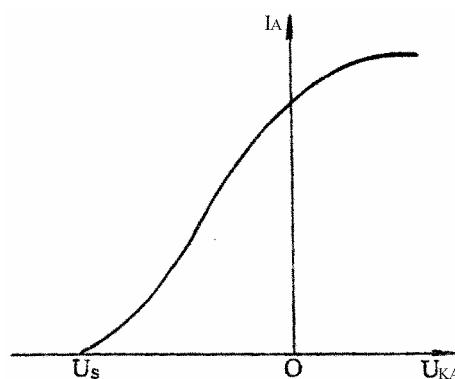
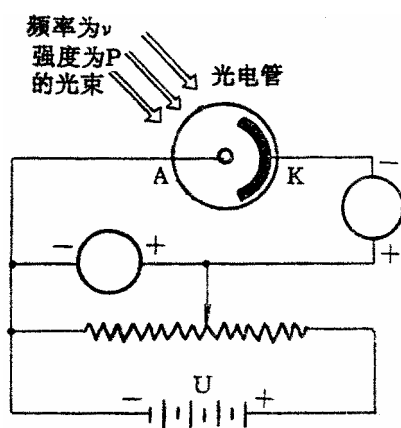


图1 原理实验图

图2 光电管的起始 $I-V$ 特性

四、实验原理

五、仪器及仪器简介

(1) GDH—1型光电管：阳极为镍圈，阴极为银—氧—钾 ($Ag-O-K$)，光谱响应范围 340.0~700.0 纳米，光窗为无铅多硼硅玻璃，最高灵敏波长是 $(4.1 \pm 0.1) \times 10^2$ 纳米，

阴极光灵敏度约 $1\mu\text{A/Lm}$ ，暗电流约 10^{-12}A 。

为了避免杂散光和外界电磁场对微弱电流的干扰，光电管安装铝质暗盒中，暗盒窗口可以安放 $\Phi 5\text{mm}$ 的光阑孔和 $\Phi 36\text{mm}$ 的各种带通滤色片。

(2) 光源采用 $\text{NJ}-50\text{WHg}$ 仪器用高压汞灯。在 $303.2\sim 872.0$ 纳米的谱线范围内有 365.0 、 404.7 、 435.8 、 491.6 、 546.1 、 577.0 纳米等谱线可供实验使用。

(3) NG 型滤色片：是一组外径为 $\Phi 36\text{mm}$ 的宽带通型有色玻璃组合滤色片。它具有滤选 365.0 、 404.7 、 546.1 、 577.0 纳米等谱线的能力。

(4) $\text{GT}-\text{IIIA}$ 型微电流测量放大器：电流测量范围在 $10^{-7}\sim 10^{-13}\text{A}$ ，分七档十进制变换，机内设有稳定度 $<1.0\%$ ，精密连续可调的光电管工作电源，电压量程分 $-2\sim 0\text{V}$ 、 $0\sim +20\text{V}$ 两档，读数精度为 0.001V ，测量放大器可以连续工作 8 小时以上。

六、实验内容

1. 测试前准备

(1) 首先了解 $\text{GY}-\text{IIIA}$ 型光电效应测试仪中的使用方法和注意事项。

(2) 放置好仪器，用光窗盖分别盖住光电暗盒的光窗口和光源光窗口。接通光源的电源开关，并预热 20—30 分钟。

(3) 将微电流测试仪与光电管暗盒之间的导线连接好，调节光源光窗口与光电管暗盒光窗口等高，间距为 30cm 为宜。

2. 测试

(1) 旋转滤色片转盘，选择透射波长为 365 的滤色片。用“电压调节”旋钮将电压为 -2V 缓慢升高到 $+20\text{V}$ ，记录相应的电流值。测量点至少应该有 20 个，尤其在一 2V 至 0V 间电流开始变化区间细测一下，多记几个点，并仔细找到电流为 0 时所对应的电压值，将记录数据记入表二。

(2) 依次选择 405 、 436 、 546 和 577 型滤色片，重复步骤 (1)，测出其伏安特性。

(3) 改变光阑，重复上述步骤。

七、数据处理

1. 在坐标纸上绘制不同频率入射光照射下光电管的伏安特性曲线，准确找出不同频率对应的截止电压；

2. 作出不同频率下截止电压 U_s 和频率 ν 的关系曲线，求出普朗克常量 h ，截止频率 ν_0 和逸出电势 U_ϕ 。

3. 作出不同光强下的 $I-V$ 特性曲线。

八、注意事项

1. 由于暗电流等的存在截止电压不在光电流 $I=0$ 处而较难准确确定，故在电流开始变化的“始头点”附近细心地多测几个点以保证较准确地确定截止电压。

2. 保护滤色片。更换滤色片时注意避免污染，不能用手触摸，如发现灰尘等可用镜头纸擦净，保证良好透光。

3. 保护光电管。实验前或实验完毕后用遮光罩盖住光电管暗盒进光窗，避免强光直接

照射阴极缩短光电管寿命。

4. 保护光源。高压汞灯的功率较大，温度很高，实验完毕应及时关闭电源，以免影响使用寿命。

5. 光源与光电管暗盒之间相距宜取 $30\sim 50\text{cm}$ ，从光源出光孔射出的光必须直照光电管阴极面，暗盒可作左右及高低调节。为避免光线直射阳极带来反向光电流增大，测试时光窗口宜加 $\phi 5\sim \phi 8\text{mm}$ 的光阑。

6. 光电管入射窗口不要面对其它强光源（如窗户等）以减少杂散光干扰。

7. 仪器不宜在强磁场、强电场、高湿度及温度变化率大的场合下工作。

九、思考题

1. 测量到的光电流是否完全是光电效应概念中的光电流？它还受到哪些因素的影响？
2. 你是如何减小截止电压的测量误差的？
3. 光电效应是如何验证光量子理论的？

（七）伏安法测固定电阻和非线性电阻

（I）用伏安法测固定电阻

一、用伏安法测：

1. R_{x1} 约为 51Ω ，允许功率为 $1W$ 的固定电阻。
2. R_{x2} 约为 $5.1K\Omega$ ，允许功率为 $1W$ 的固定电阻。

二、要求：

确定测量条件，修正系统误差（电表的电阻影响）及相对误差

$$E_R = \frac{\Delta R_x}{R_x} \leq 3.0\%$$

三、设计

1. 原理：由欧姆定律 $R = \frac{V}{I}$

式中： V —电阻两端的电压（V）；

I —流经电阻的电流（A）；

R —待测电阻（ Ω ）。

2. 测试分析：

- 1) 条件：

① C_{43} 型直流电压表 1.0 级（1.5V/3V/7.5V）相应内阻（ $1518\Omega/3000\Omega/7500\Omega$ ）一只；

② C_{43} 直流电流表 1.0 级（1.5mA/7.5mA/30mA）相应内阻（ $65.6\Omega/34.0\Omega/8.0\Omega$ ）一只；

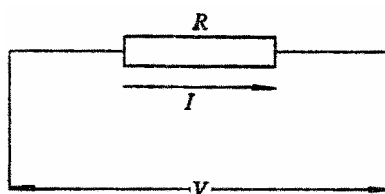
③ 稳压电源（0—30V，1A）一台；

④ $B_x 7-14$ 型（ $49\Omega/3A$ ）变阻器一台；

⑤ 开关一个，导线若干。

- 2) 电流表接法：

- ① 电流表外接，如图（1）所示



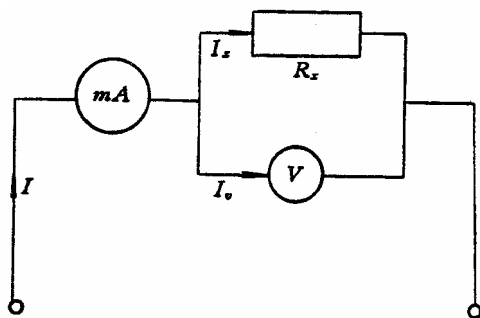
R_x 两端电压为 V_x ， $I = I_x + I_v$ ，由电流表和电压表读数计算的结果实际是 R_x 与电压

表内阻 R_v 的并联电阻 $R'_x = \frac{R_x R_v}{R_x + R_v}$ ，所引入的方法误差是相对误差表示：

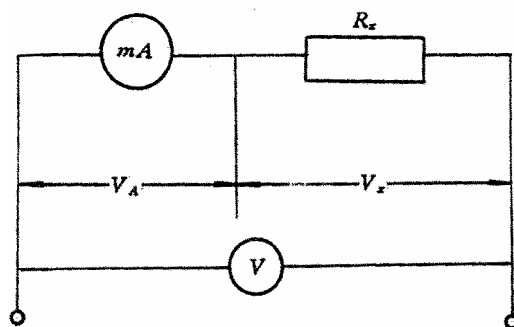
$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_x}{R_x + R_v} \quad (1)$$

由(1)知, 当 $R_x \ll R_v$ 时, 宜采用电流表外接线路, 方法误差较小。

②电流表内接, 如图(2)所示:



图(1)



图(2)

$$V = V_A + V_x, \quad I = I_x, \quad \text{则 } R' = \frac{V}{I_x} = \frac{V_A + V_x}{I_x} = R_A + R_x$$

$$\text{引入的方法误差用相对误差表示: } \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x} \quad (2)$$

3) 电表的选择

$$\text{由题给条件: } \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta I}{I} \leq 3.0\%$$

$$\text{再由误差均分原则有 } \frac{\Delta V}{V} \leq 1.5\%, \quad \frac{\Delta I}{I} \leq 1.5\%$$

故选 1.0 级电压表和 1.0 级电流表。

4) 确定测量条件:

量程的选择应根据 R_x 的估值来定

①若 $R_{x1} = 51\Omega$ (电流表外接)

对 1.0 级电压表, 当量程 0—1.5V 档

$$I_{\max} = \frac{V}{R_{x1}} = \frac{1.5}{51} = 19.4 < 30\text{mA}$$

故电压表选 0—1.5V 档, 电流表选 0—30mA 档。

根据误差要求计算电压及电流的测量范围。

$$\Delta V \leq V_{\max} \times 1.0\% = 1.5\text{V} \times 1.0\% = 0.015(\text{V})$$

$$\text{又 } \frac{\Delta V}{V} = \frac{0.015}{V} \leq 1.5\% \quad \therefore V \geq \frac{0.015}{1.5\%} \geq 1.00(V)$$

故电压测量范围 $1.00 \leq V \leq 1.50(V)$

同理: $\Delta I \leq I_{\max} \times 1.0\% \leq 30mA \times 1.0\% = 0.30(mA)$

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{0.30}{I} \quad I \geq \frac{0.30}{1.5\%} \geq 20.0(mA)$$

故电流的测量范围 $20.2 \leq I \leq 30.0(mA)$

②若 $R_{x2} = 5.1K\Omega$ (电流表内接) 分析方法同①

选 1.0 级电压表 0—7.5V 档, $5.00 \leq V \leq 7.50$

选 1.0 级电流表 0—1.5mA 档, $1.00 \leq I \leq 1.50(mA)$

5) 确定工作电压

① $R_x = 51\Omega$, $P=1W$, 由 $P \geq \frac{V^2}{R}$, 有 $V \leq \sqrt{PR} \leq \sqrt{1 \times 51} \leq 7(V)$

由 $V \leq \sqrt{PR}$ 及电流表有量限 取 $E = 1.5V$

② $R_{x2} = 5.1K\Omega$, $P=1W$, 取 $E = 7.5V$

6) 控制电路及滑线变阻器的选择:

① $R_{x1} = 51\Omega$ 比较小, 本可采用限流电路, 但因变阻器全电阻

$R_0 \geq E / I_{\min} = 2V / 20mA = 100\Omega$, 由给出仪器条件所限, 故采用分压电路。

② $R_{x2} = 5.1K\Omega$ 比较大, 采用分压电路。

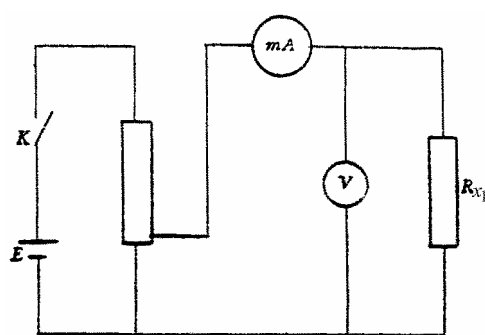


图 (3)

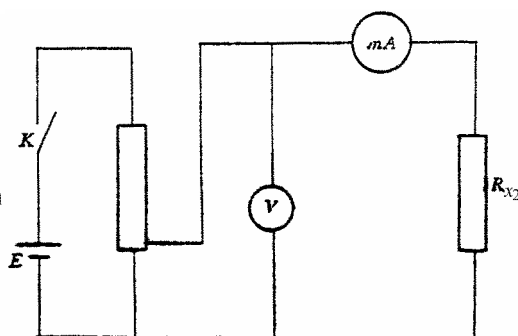


图 (4)

四、观测要点:

1. $R_{x1} = 51\Omega$, 采用电流表外接, 测试线路如图 (3) 所示。

1) 照图 (3) 连接线路;

2) 测量时 $\textcircled{V}$ 表, $\textcircled{mA}$ 表的机械零点是否指零;

3) 滑动变阻器, 取电压 v , 读取电流值 mA , 只测一次。

2. $R_x = 5.1K\Omega$, 采用电流表内接, 测试线路如图 (4) 所示, 观察要点参照 1、1)、2)、

3) 进行。

五、数据记录及数据处理:

1. 对 51Ω 电阻测量及数据处理。

$V_m = 1.5V$, $I_m = 30mA$, $R_v = 1518\Omega$, 两表等级均为 1.0 级。

电压表指示值 $V(V)$	1.40
电流表指示值 $I(mA)$	28.2
电流校正值 $I' = I - V/R_v(mA)$	27.3
电阻校正值 $R' = V/I'(\Omega)$	51.3

相对误差:

$$E_{R'} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta V}{V} = \frac{30.0 \times 1.0\%}{27.3} + \frac{1.50 \times 1.0\%}{1.40} = 2.2\%$$

绝对误差:

$$\Delta R' = R' \times E_{R'} = 51.3 \times 2.2\% = 1\Omega$$

结果表达 $R_x = (51 \pm 1)\Omega$

结果分析: 由上计算知, 相对误差为 2.2% 小于 3.0%, 满足测量要求, 测量结果成立。

2. 对 $5.1K\Omega$ 电阻测量记录与处理。

$V_m = 7.5v$, $I_m = 1.5mA$, $R_A = 65.6\Omega$, 两表等级均为 1.0 级。

电压表指示值 $V(V)$	7.11
电流表指示值 $I(mA)$	1.40
电流校正值 $V' = V - IR_A(mA)$	7.02
电阻校正值 $R' = V'/I(K\Omega)$	5.01

相对误差：

$$E_{R'} = \left(\frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta V}{V'} \right) = \frac{1.50 \times 1.0\%}{1.40} + \frac{7.5 \times 1.0\%}{7.02} = 2.1\%$$

绝对误差：

$$\Delta R' = R' \times E_{R'} = 5.01 \times 2.1\% = 0.1(K\Omega)$$

结果表达 $R = (5.0 \pm 0.1)K\Omega$

结果分析：由上计算知，相对误差为 2.1% 小于设计要求的 3.0%，满足测量要求，测量结果成立。

(II) 伏安法测非线性电阻

一、实验内容

1. 用伏安法测稳压二极管的伏安特性；
2. 绘制稳压二极管的伏安特性曲线。

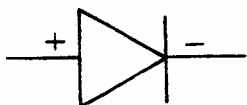


图 1

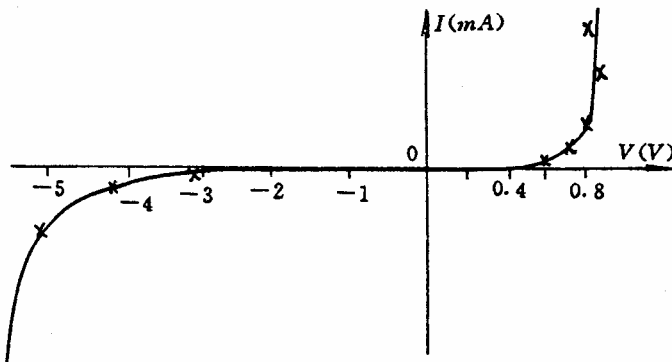


图 2

二、观测依据

1. 二极管的伏安特性

图 1 是二极管的符号, 图 2 是二极管正、反方向的伏安特性曲线, 其电阻为 $R = dV/dI$, 可通过曲线上各点斜率求得。

2. 测量线路图

电流 I 由毫安表测定, 单位为 mA ; 电压 V 由伏特表测定, 单位为伏。正向用外接法 (见图 3), 反向用内接法 (见图 4)。

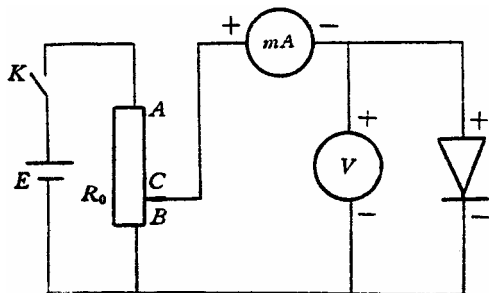


图 3

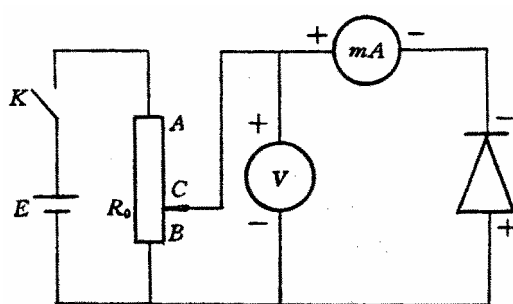


图 4

三、实验做法

1. 测二极管的正向特性

1) 按图 (3) 所示电路连线, 滑线变阻器滑动头置于固定端 B。(注意外接法: 滑线变

阻器是分压器不要连成限流器，它的三个接线柱都要用上，电源输出的电压一定要接在滑线变阻器固定端的接线柱上）。

经教师检查后再接通电源，电压：1~2V。

2) 测量前分别算出电流表、电压表各档的 $\Delta_{\text{仪}}$ ，以便读数取位。（例：电流表是 1.0 级表，对 1.5mA 档， $\Delta_{\text{仪}}=1.5 \times 1\%=0.015=0.02\text{mA}$ ，如使用这一档读数一定读到以 mA 为单位的小数点后第 2 位，也只能读至这位，多了、少了都不正确；30mA 档 $\Delta_{\text{仪}}=30 \times 1\%=0.3\text{mA}$ ，以 mA 为单位，这一档就只能读到小数后 1 位了）。

3) 正向电压变化范围 0~1V，电流变化 0~30mA。使用电流表时注意换档，即开始用 1.5mA 档，后换 7.5mA 档，最后换成 30mA 档，保证测量相对误差小。

4) 滑动滑动头 C，缓缓地增加电压（例如取 0.10、0.40、0.60、0.70、0.72、0.74、0.76、0.77V……最后一个点让电流为 30mA，共 10 个点以上），记下电压和相应的电流值。

2. 测二极管的反向伏安特性

(1) 按图 4 所示电路连接，滑动头 C 置于 B 处，检查线路无误后方可接通电源，电源电压 E=5~6 伏。

(2) 电压变化范围 0~6 伏左右（视不同型号稳压二极管而定），电流变化范围 0~30mA。使用时注意电流、电压表的换档。

(3) 逐步改变电压，记录电压和相应的电流值。要求读取 10 组数据以上，电流变化小的地方电压值少取几个点，电流变化大的地方多取几个点，最后一个点在电流为 30mA 处。（参考取点为：0.00、3.00、4.00、4.50、4.70、4.90、5.00、5.10、5.15、… V_0 ）

四、数据记录和处理

1. 记录表格自行设计

2. 数据处理

用坐标纸在同一坐标上，绘制稳压二极管正、反方向的伏安特性曲线。

注：由于正反向电压值相差较大，其坐标分度可选不同值。

五、注意事项

1. 接线或拆线时，注意不要让电源短路。最好是接好再开启电源，断电后再拆线路，如共用电源而做不到断电操作也必须做到接线时后接电源端，拆线时先拆电源端，切忌把接电源的两根导线的另一端相碰而短路。

2. 测量二极管正向伏安特性时，毫安表的读数不得超过二极管的最大正向电流（本实验不要超过 30mA）。

3. 测二极管反向特性时，加在二极管上的电压不得超过该管的最大允许电压（实验时，反向电流为 30mA 对应的那个电压）。

4. 使用电压（电流）表时要合理选择量程，量程太小可能烧坏电表；太大测量的误差会增大。

5. 特别提醒：我们使用的稳压电源面板上的电压表的指示与“档”的关系同一般电压表不一样。一般的电流（电压）表是满刻度的值与档对应，比如 7.5mA 档，满刻度的值就

是 7.5mA，30mA 档满刻度值就是 30mA。而电源的电压表满刻度的值是确定的（如 24V），与“档”无关。比如 0~6 伏档，满刻度值是 24V。0~12 伏档满刻度值仍然是 24 伏。它的“档”的含义是 0~6 伏档，把细调调到最大，它只能输出 6 伏电压，而 0~12 伏档指它最大输出为 12 伏。

（八）光栅单色仪的定标

一、实验内容：

1. 了解平面光栅单色仪的结构及使用方法。
2. 对 WDP500-2A 型平面光栅单色仪的波长读数度盘定标。

二、观测依据：

1. 什么是单色仪的定标曲线？

单色仪的读数窗口读出的波长数值 R 与出射光的波长 λ ，有一一对应关系，以 R 为纵坐标， λ 为横坐标，画出 $R - \lambda$ 曲线，称为单色仪的标准曲线（又叫定标曲线）。

单色仪出厂时虽附有标准曲线的数据或图表供查阅，但经过运输、长期使用或重新装调后，其数据会有偏离，因此需要重新标定，作出标准曲线，这样就可以由波长显示器上的读数得知出射光的波长，便于使用。

2. 如何对单色仪进行定标？

本实验在可见光范围内进行标定，即用一复色光源照亮入射狭缝 S_1 ，经过光栅后，复色光波分解成单色光，在可见光范围内的各种颜色的光的波长是已知的，可通过查表一获得，而各单色光可按波长顺序依次从出射狭缝 S_2 射出，其值可从读数窗口读出，于是可得到 λ 与 R 的对应值。

表 1 常用高压汞灯在可见光波段的主要谱线

颜色	波长（nm）	相对强度	颜色	波长（nm）	相对强度
红	708.19	极弱	绿	536.51	弱
	Δ690.75	强		535.41	弱
	Δ671.65	弱	青	Δ496.03	弱
橙	Δ623.44	强度相近		Δ491.60 ✓	强
	Δ612.33 ✓		蓝	Δ435.84 ✓	强
	Δ607.26			434.75	弱
黄	588.96	弱		433.92	弱
	587.20	弱		紫	410.84
	585.94	弱	Δ407.78 ✓		次强
	Δ579.07 ✓	强	Δ404.66 ✓		强
	Δ576.96 ✓	强	紫外	398.40	几乎看不见
绿	567.59	弱		390.64	
	Δ546.07 ✓	强	389.39		

3. 实验仪器

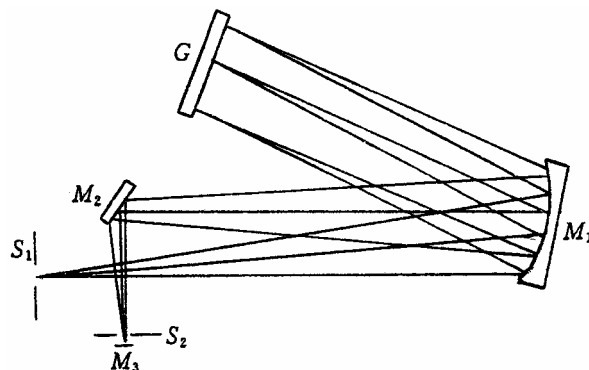
WDP500-2A 型平面光栅单色仪、光电二极管硅光电池、光电压显示表、汞灯、钠灯。

4. 平面光栅单色仪的结构和工作原理：

WDP500-2A 平面光栅单色仪是用光栅衍射的方法获得单色光的仪器，它可以把紫外光、可见光及红外光三个光谱区的复合光分解为单色光。

(1) 光学系统：如图一所示

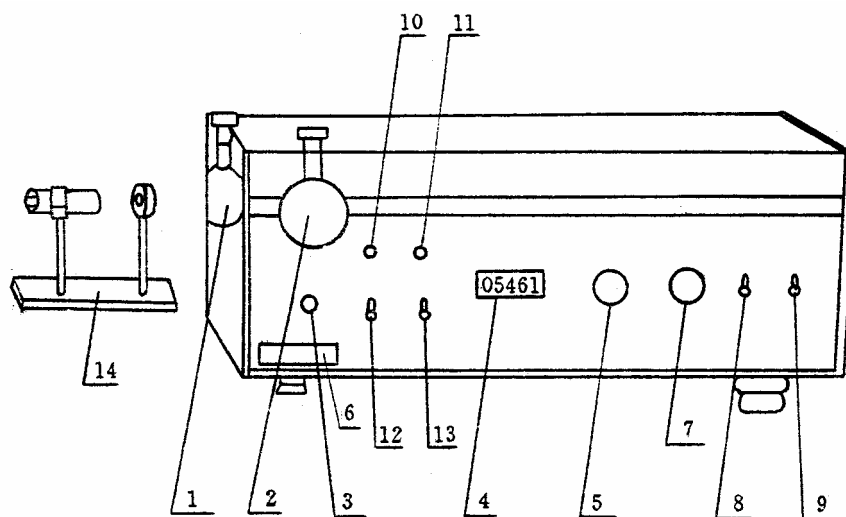
(2) 工作原理；参考教材



图一 光学系统图

S_1 ：入射狭缝； S_2 ：出射狭缝； M_1 ：离轴抛物镜；

G ：光栅； M_2 ：反光镜； M_3 ：滤光片



图二 仪器结构

(3) 仪器结构：如图二所示。

- | | | |
|-----------|------------|----------------|
| 1. 入射狭缝； | 2. 出射狭缝； | 3. 出射狭缝前后调节螺钉； |
| 4. 波长显示器； | 5. 手动扫描旋钮； | 6. 仪器铭牌； |

三、实验做法：

1. 观察实验装置，看清各部分及各旋钮的作用。
2. 点亮高压汞灯，调节光源，使其正对入射狭缝 S_1 ，移动会聚透镜，使光源成像在入射狭缝 S_1 处。
3. 接通单色仪电源，将“本机 / 计算机”转换开关打到本机，将 S_1 缝宽调到 $0.5mm$ 左右， S_2 缝宽调到 $1.5mm$ 左右，当旋转“手动扫描”旋钮时，可以看到单色光带。
4. 在正式测定校准曲线之前，要先定性观察全谱线，即打开“自动扫描”开关，从红光到紫光再从紫光到红光通过扫描方向开关控制，观察汞灯的所有谱线并认准谱线（对照表一，从谱线的颜色、强弱、谱线间距等方面去辨认），同时观察波长读数窗口的读数变化，其单位为 nm 。
5. 将光电探测器安装在单色仪的出射狭缝上，注意动作要轻，以免损坏机械结构。将出射狭缝调到 $0.5mm$ 。
6. 将光电流放大器的量程放到第三档，打开单色仪的自动扫描开关，注意观察电表指针的偏转情况，在出现谱线的位置关闭自动扫描开关，用手动扫描手轮找到使指针偏转最大的位置（量程根据指针的偏转情况调整）并记下读数。
7. 将光电探测器后盖上的接头轻轻拔下（捏住接头的前端），放松光电探测器后面的螺钉，将后盖卸下，换上另外一个探头（接线时捏住接头的后端），缓慢转动探头，找到合适的位置并固定，重复第 6 步。
8. 在同一张坐标纸上分别画出单色仪的波长校正图线。
9. 把汞灯移开，换上钠灯，测量钠灯的谱线波长（ $590.0nm$ 附近）。再利用上面的校正图线得出其修正后的值，并和理论值比较。

四、注意事项：

1. 狭缝宽度不能调为 0，以免损坏刀口。
2. 用“手动扫描”时，波长读数不能超过 $9999nm$ ，否则会损坏读数系统。
3. 如用高压汞灯作光源时，在实验过程中不宜随时关掉电源，因为关掉后不能马上启动，需要一段冷却时间才能重新点燃。
4. 实验完毕，应将仪器罩盖好，防止灰尘进入仪器。

(九) 密立根油滴实验——电子电荷的测定

一、实验内容:

1. 观察带电油滴在电场中的运动。
2. 测电子电荷。

二、观测依据:

1. 理论公式

设油滴所带电量为 Q , 则有:

$$Q = ne = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t(1 + \frac{b}{pa})} \right]^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{d}{V_n} \quad (1)$$

式中油滴半径 $a = \sqrt{\frac{9\eta l}{2\rho g t}}$

油的密度 $\rho = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

重力加速度 $g = 9.80 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-2}$

空气粘滞系数 $\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{sec}^{-1}$

油滴匀速下降距离 $l = 2.00 \times 10^{-3} \text{ m}$

修正常数 $b = 6.17 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{cm(Hg)}$

大气压强 $P = 76.0 \text{ cm(Hg)}$

平行极板间距离 $d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$

将以上数据代入公式得:

$$Q = ne = \frac{1.43 \times 10^{-14}}{\left[t(1 + 0.02\sqrt{t}) \right]^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{1}{V_n} \quad (\text{库仑}) \quad (2)$$

$$\text{油滴半径 } a = \frac{4.15 \times 10^{-6}}{\left[t(1 + 0.02\sqrt{t}) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (\text{米})$$

$$\text{油滴质量 } m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho = 4.09 \times 10^{-3} \cdot a^3 \text{ (千克)}$$

由式 (2) 可知, 只要测出油滴平衡不动时的电压 V_n 及油滴在不加电场时匀速下降四小格所用时间 t , 即可计算出油滴所带电量 Q , 从而推出电子电荷 e 。

2. 实验仪器

实验中所用的仪器有 MOD-5 型密立根油滴仪、秒表、喷雾器和钟表油。

油滴盒 (1-1) 是由两块经过精磨的平行极板 (上、下电极板) 中间垫以胶木圆环组成。平行极板间的距离为 d 。胶木圆环上有进光孔和观察孔。油滴盒放在有机玻璃防风罩 (1-2) 中。上电极板中央有一个 $\Phi 0.4$ 毫米的小孔, 油滴从油雾室 (1-3) 经油雾孔落入小孔, 进入上、下电极板之间, 整套装置如图 (1)、图 (2) 和图 (3) 所示。油滴由照明装置 (2-1)、(2-2)、(2-3) 照明。油滴盒防风罩前装有测量显微镜 (4-1), 通过胶木圆环上的观察孔观察平行极板间的油滴。目镜头 (4-2) 中装有分划板, 其垂直总刻度相当于线视场中的 0.300

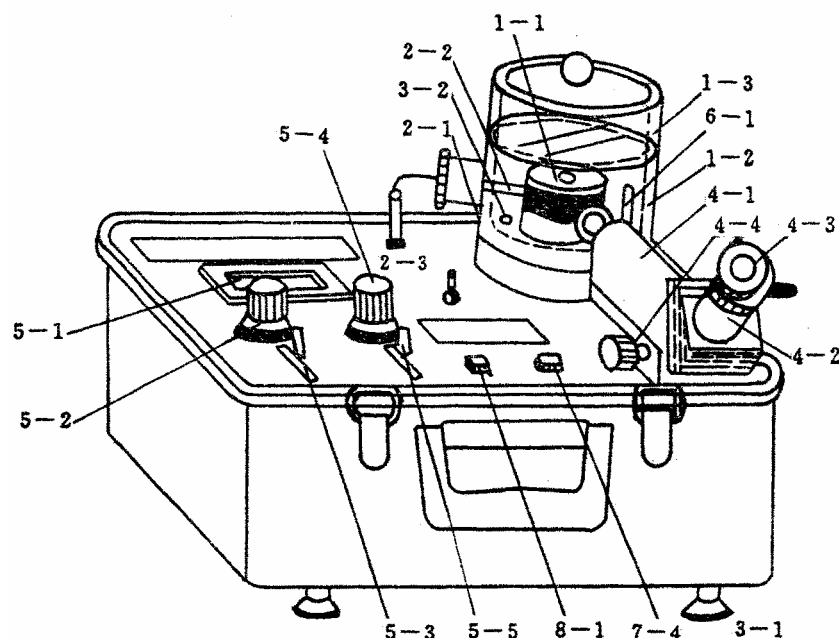


图 1

- 1—1 油滴盒 1—2 有机玻璃防风罩 1—3 有机玻璃油雾室
- 2—1 油滴照明灯 2—2 导光棒 2—3 照明灯电源插座
- 3—1 调平螺丝 3—2 水准泡 (在防风罩内) 4—1 测量显微镜
- 4—2 目镜头 4—3 接目镜 4—4 调焦手轮
- 5—1 数字电压表 5—2 工作电压调节旋钮 5—3 工作电压反向开关
- 5—4 升降电压调节旋转 5—5 升降电压反向开关
- 6—1 低压汞灯 (在 B 型、BC 型油滴仪防风罩内)
- 6—2 汞灯按钮 (在显微镜右侧, 图 1 上看不见, 对 5A、5AC 型油滴仪为虚设, 无用)
- 7—4 CCD 电源插座
- 8—1 计时器插座

厘米（每小格 0.050 厘米），用以测量油滴运动的距离 l ，视场所见分划板的刻度如图（3）所示。

外接计时器插座（8—1），与工作电压反向开关（5—3）联动，可以很方便地测定油滴的运动时间，本实验室用秒表计时，未用此插座。

电源部分提供四种电压：

1. 3.6V 油滴照明电压：从插座（2—3）引出。

2. 500V 直流工作电压：该电压可以连续调节，从数字电压表（5—1）上直接读出，并由工作电压反向开关（5—3）反向，以改变上、下电极板的极性。反向开关处于“+”侧时（上电极板为负极），能达到平衡的油滴带正电，反之带负电。反向开关处在“0”位置时，上、下电极板短路，并且不带电。

3. 200V 左右的直流升降电压：该电压可通过升降电压反向开关（5—5）叠加（加或减）在平衡电压上，以控制油滴在视场中的上、下位置。升降电压高，油滴移动速度快，反之则慢。

4. 12VCCD 电源电压：CCD 电源插座（7—4）的中心电极为正极。

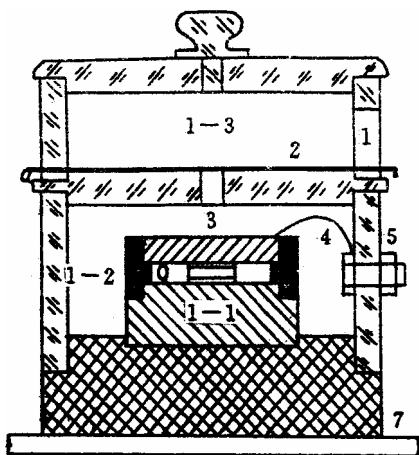


图 2

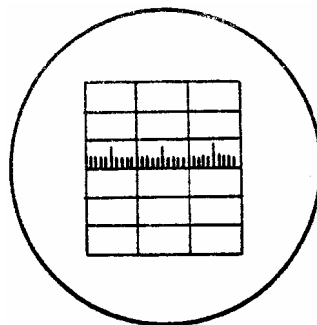


图 3

- 1 喷雾口 2 油雾孔开关 3 油雾孔 4 上电极板压簧
5 外接电源插孔 6 油滴盒基座 7 油滴仪面板

三、实验做法

1. 将仪器放平稳，调整左右两只调平螺丝（3—1），使水准泡（3—2）指示水平，这时油滴盒处于水平状态，并将“工作电压”和“升降电压”反向开关置于“0”位置。

2. 将显微镜筒向里移动至观察口，然后向油雾室喷油，并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。

3. 看到油滴后，则将工作电压加上（正、负任选）。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。

4. 找到静止的小油滴后，则记录此时的的工作电压值，即公式中的 V_n ，然后加升降电压，将静止小油滴移动到上极板。

5. 小油滴到达上极板后，将“工作电压”和“升降电压”开关都置“0”位置，即撤去所有电压，让油滴做匀速下落运动，当它下降一小格后，就开始计时，记下油滴运动四小格（ $l = 2.00 \times 10^{-3} \text{ m}$ ）所用的时间，即公式中的 t 。

6. 记下油滴匀速运动四小格所用时间后，要马上加工作电压，使其平衡静止，以便重复测量。

7. 本实验要求测 5 个油滴，每个油滴反复测 5 次。

四、数据记录和处理：

1. 原始记录表格：

油滴号	平衡电压 $V_n(\text{V})$	匀速运动时间 $t(\text{s})$
1		
⋮	⋮	⋮

2. 数据处理：

以第一个油滴为例，说明数据处理过程。

将第一个油滴的五组数分别代入公式 2，算出对应的电量 Q_i ，将 5 个油滴电量值平均，

算出第一个油滴的平均电量 $\overline{Q}_1$ ，然后由式

$$\overline{Q}_1 = \bar{n}_1 e \quad (3)$$

将 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑 代入上式，则

$$\bar{n}_1 = \left[\frac{\overline{Q}_1}{e} \right] \quad (4)$$

即将比值 $\overline{Q}_1/e$ 取整获得 $\bar{n}_1$ ，求出 $\bar{n}_1$ 后再代入（4）式，计算出对应的电子电荷

$$e_1 = \frac{\overline{Q}_1}{\bar{n}_1} \quad (5)$$

用同样的方法，计算出对应不同油滴的电子电荷 e_i ($i=1, 2, 3, \dots, 5$)，最后求出电子电荷的平均值。

$$\bar{e} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 e_i \quad i=1, 2, \dots, 5$$

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

$$E = \frac{|\bar{e} - e|}{e} \times 100\%$$

其中 $e = 1.602 \times 10^{-19}$ 库仑

五、注意事项：

1. 喷雾时喷雾器应竖拿，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。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。
2. 在测量油滴下落时间时，显微镜镜筒可进行移动，跟踪油滴，否则油滴会漂移失踪，无法重复测量。

(十) 示波器的使用与超声声速的测定

一、实验内容

1. 调整示波器，观察各种波形。
2. 测量正弦波的峰—峰电压 V_{pp} 。
3. 测量方波的周期。
4. 用李萨如图形测量正弦波的频率。
5. 用共振干波法和位相比较法测量超声波在空气中的传播速度。

二、观测依据

双踪示波器一台，低频信号发生器一台，超声声速测定仪，电缆若干。

三、实验做法

(一) 示波器的使用

1. 测正弦波的 V_{pp}

用示波器观察正弦波波形，若该信号输入通道的标度因子为 V ，单位是伏/厘米(V/cm)，被测正弦波的正、负峰之间距离在荧光屏上所占的高度为 H 厘米，则

$$V_{pp} = V \cdot H$$

2. 测量方波周期 T

用示波器观察方波波形，若该信号的时间扫描轴单位是 t/cm ，被测方波一个周期在荧光屏上横坐标的长度是 Lcm ，则

$$T = t \cdot L$$

3. 李萨如法测频率

设 f_x 和 f_y 分别为加在示波器水平和垂直通道上的正弦信号的频率， N_x 和 N_y 分别为平行于 x 轴与 y 轴的直线和李萨如图形相切的切点个数，则有

$$f_x = \frac{N_y}{N_x} f_y$$

具体做法：

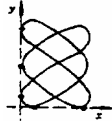
1. 将信号源的100Hz 的正弦波输出接口与示波器的 $CH1$ 通道相连，将示波器输入信号耦和开关置于“AC”位，按下“ $CH1$ ”键，适当调节 $CH1$ 通道灵敏度和扫描频率，直至荧光屏上出现稳定的正弦波，测量其峰—峰值电压 V_{pp} 。

2. 将信号源调到方波输出，将其信号输出端与示波器的 $CH2$ 通道相连，按下 $CH2$ 键

（将 CH1 键弹出）使荧光屏上只显示 CH2 通道的信号。调信号源输出频率，使之成为 1KHz，将示波器输入信号耦合开关置于“AC”位，适当调节 CH2 通道的灵敏度和扫描频率，使方波在荧光屏上稳定，测量方波的周期，再换算成频率与信号源的输出频率相比较。

3. 将示波器的“CH1”和“CH2”以及“叠加”同时按下，并选择“X—Y”工作方式，将信号源的信号输出调为正弦波，与示波器的 CH1 通道相连，频率分别调在 50Hz、100Hz、150Hz、200Hz、300Hz 附近，观察荧光屏上图形的变化，已知“CH2”（Y）输出信号的频率为 100.58Hz，计算“CH1”（X）通道信号的频率，并与信号源的输出频率比较（画出不同频率下的李萨如图）。

表一

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
f_y' (被校频率)(Hz)					
f_x (标准频率)(Hz)	100.58	100.58	100.58	100.58	100.58
$f_y = \frac{N_y}{N_x} f_x$ (Hz) (标准值)					
Δf_y (Hz) (修正值)					

（二）超声声速测定

设超声波在空气中的传播速度为 v 、波长为 λ 、频率为 f ，则有

$$v = \lambda f$$

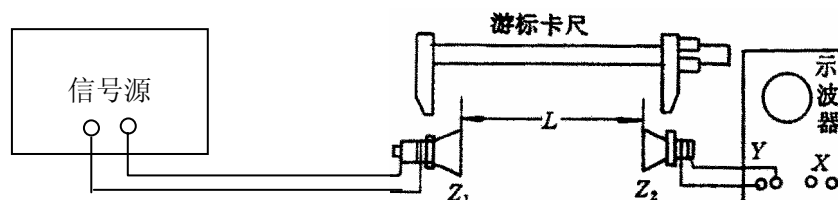
由此可见，在实验中，我们用频率计测量出作为辐射换能器驱动源的低频信号发生器输出的电信号频率——也就是超声波频率；分别用共振干涉（驻波）法和位相比较（行波）法测量出波长 λ ，代入上式就可算出传播速度 v 。

1. 共振干涉法测波长

实验装置如图一所示，在辐射换能器和接收换能器之间的距离满足一定条件时，其间有超声驻波场存在，相邻二波腹（或波节）之间的距离为 ΔL ，则有

$$\lambda = 2\Delta L$$

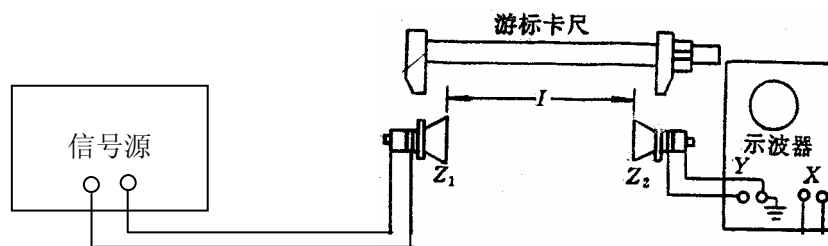
显然，如果在实验中，我们将辐射换能器和位置固定，连续改变接收换能器的位置，用示波器判断波腹（或波节）出现时接收换能器的位置，并用游标卡尺测量它的坐标。那末，用逐差法就可算出波长 λ 。



图一

2. 位相比较法测波长 λ

超声波在传播过程中，波的位相随传播距离作周期性的变化。传播距离每改变 $\Delta L = \lambda$ ，位相则变化 2π 。因此，我们如图二所示布置实验装置，将示波器作 $x-y$ 应用。将加在辐射换能器的驱动信号与接收换能器将声波转换成的电信号分别加在示波器的垂直和水平通道上，比较发射换能器和接收换能器表面声波的位移。固定辐射换能器的位置，连续改变接收换能器的位置，当二者间的距离每增大或减小 λ 时，示波器上出现相同的李萨如图形。用游标卡尺测量相同的李萨如图形如斜线相继出现时接收换能器的位置坐标，就可求出波长 λ 。



图二

• 具体作法

1. 寻找与测量共振频率 f

- (1) 按图一接好电路，并调妥示波器
- (2) 将接收换能器移近辐射换能器，使二换能器表面彼此接近并平行，其表面法线尽可能与接收换能器的移动轴线一致。
- (3) 将信号源功率开关打开，功率输出调为 4V，频率在 34KHz 附近。
- (4) 调节低频信号发生器的输出电平，使示波器接收到一定强度的信号，改变驱动信号的频率，使由示波器观察到的电信号幅值最大，此时的频率即为共振频率。由频率计读出并记下此频率 f 。

2. 共振干涉法测波长 $\lambda_{\text{共}}$

在上述步骤完成之后，固定辐射换能器的位置，连续移动接收换能器，记录示波器上

波形相继出现 10 个极大值所对应的接收换能器的坐标 L_i ($i=1, 2, \dots, 10$)。

3. 位相比较法测波长 $\lambda_{\text{位}}$

将示波器置于 $X-Y$ 工作方式。固定辐射换能器坐标，连续移动接收换能器，记录相继出现 10 个相同的李萨如图形（如斜线）时，接收换能器所对应的坐标 l_i ($i=1, 2, \dots, 10$)。

4. 测量实验室室温 T

四、数据记录和处理

1. 数据记录

可按下表记录数据

	$f =$ Hz , $T =$ K			
次数	1	2		10
L_i (mm)				
l_i (mm)				

2. 数据处理

(1) 由公式 $V_{\text{认}} = 331.30\sqrt{T/T_0}$ ($T_0 = 273.15\text{K}$) 计算在该室温下，超声波在空气中传播速度的公认值 $V_{\text{认}}$ 。

(2) 由公式 $\bar{\lambda}_{\text{共}} = \frac{2}{25} [|L_{10} - L_5| + |L_9 - L_4| + \dots + |L_6 - L_1|]$ 和 $\bar{V}_{\text{共}} = \bar{\lambda}_{\text{共}} f$ 。计算共振干涉法测出的超声波在空气中的传播速度 $v_{\text{共}}$ ，将 $v_{\text{共}}$ 与 $V_{\text{认}}$ 比较求相对误差。

(3) 由公式 $\bar{\lambda}_{\text{位}} = \frac{1}{25} [|l_{10} - l_5| + |l_9 - l_4| + \dots + |l_6 - l_1|]$ 和 $\bar{V}_{\text{位}} = \bar{\lambda}_{\text{位}} \cdot f$ 。计算用位相比较法所测出的超声波在空气中的传播速度 $V_{\text{位}}$ ，将 $V_{\text{位}}$ 与 $V_{\text{认}}$ 比较求相对误差。

(4) 试比较两个相对误差的大小，说明原因。

(5) 不确定度计算：

(A) λ 的合成不确定度（共振干涉法）

$$l_i = L_{i+5} - L_i$$

$$\bar{l} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 l_i$$

$$S_{\bar{l}} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 (l_i - \bar{l})^2 / [5(5-1)]}$$

$$u = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3}$$

$$\sigma_l = \sqrt{S_l^2 + u^2}$$

$$\sigma_\lambda = \frac{2}{5} \sigma_l$$

(B) 频率 f 的合成不确定度

对频率进行单次测量，只有非统计不确定度 u ，故 $\sigma_f = u_f = \Delta_{\text{仪}} / \sqrt{3} = 0.1 \text{KHz} / \sqrt{3}$

(C) 声速 V 的合成不确定度

$$E = \sigma_{\bar{V}} / \bar{V} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_\lambda}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2}$$

$$\sigma_{\bar{V}} = \bar{V} \cdot E$$

(6) 测量结果表示为

$$V = \bar{V} \pm \sigma_{\bar{V}}$$

五、注意事项

1. 示波器的光迹不能调太亮，否则，不仅易使荧屏损坏，而且对眼睛的损伤也较大。
2. 不能长时间让光点处在荧屏的同一个位置，以保护荧屏。

（十一）音频信号光纤传输技术实验

【目的要求】

1. 了解音频信号光纤传输系统的结构及选配各主要部件的原则
2. 熟悉半导体电光/光电器件的基本性能及其主要特性的测试方法
3. 学习分析音频信号集成运放电路的基本方法
4. 训练音频信号光纤传输系统的调试技术

【仪器设备】

1. YOF-A 型音频信号光纤传输技术实验仪；
2. DOP-A 型光功率计；
3. 信号发生器；
4. 双踪示波器；
5. 数字万用表。

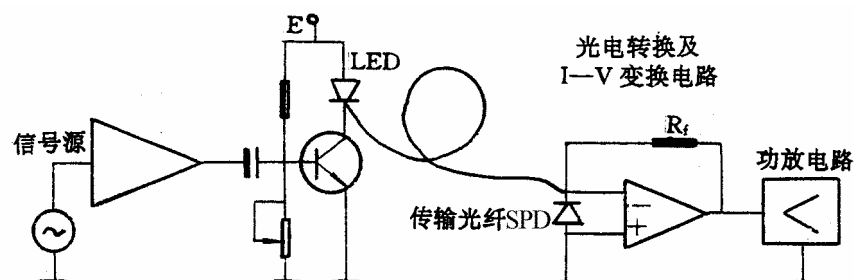


图1 音频信号直接光强调制光纤传输系统结构原理图

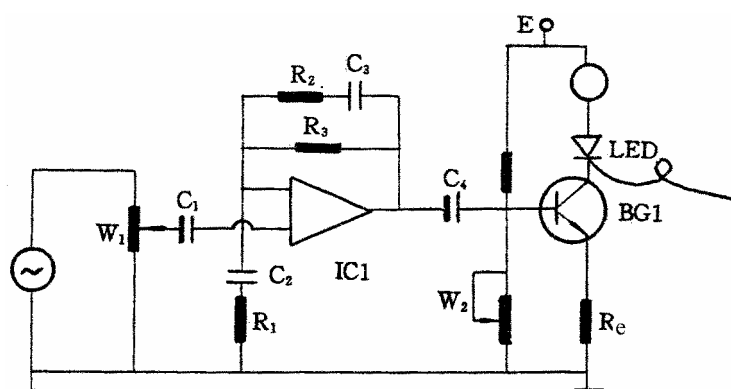


图2 LED的驱动和调制电路

【实验内容】

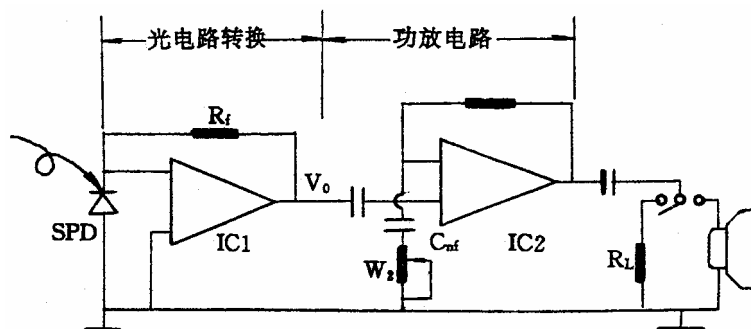


图3 光信号接收器的电路原理图

一、光信号的调制与发送实验

1. LED——传输光纤组件电光特性的测定

测试电路如图4示，该电路除光功率计、LED及传输光纤外，全安装在光信号发送器内，调 W_2 ，使偏置电流为0mA，调光功率计的零点，使之读数为0，然后调节 W_2 使毫安表指示从零逐渐增加，每增加5mA读取一次光功率计指示值，直到50mA为止。列表记录下测量数据，根据测量数据用直角坐标纸描绘LED——传输光纤组件的电光特性曲线，并确定出其线性度较好的线段。

2. LED 偏置电流与无截止畸变最大调制幅度关系的测定

在图2中，把信号源的正弦波频率调为1KHz左右，把双踪示波器的一条输入通道跨接在 R_e 两端，然后在LED偏置电流为5mA~50mA，每增加5mA的各种情况下，调节信号源输出幅度，使其从零逐渐增加，并同时观察示波器上的波形变化，直到波形快出现截止现象时记录下 R_e 上电压波形的峰一峰值，根据已测得的LED的电光

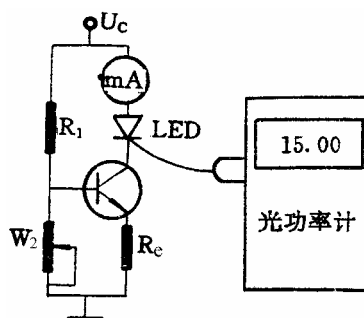


图4 LED—传输光纤组件电光特性的测定

特性曲线和 R_e 的阻值计算出LED在不同偏置电流情况下出纤光功率的最大调制幅度。(每次调偏置电流时，使信号源的输出幅度为0)

3. 光信号发送器调制放大电路幅频特性的测定

参看图2，保持调制放大器输入端信号不变($V_i = 20mV$)，在20Hz、40Hz、60 Hz、80 Hz、100Hz、500Hz、1KHz、5KHz、10KHz、12KHz、14KHz、16KHz、18KHz、20KHz的频率下，用双迹示波器观测放大器输入 V_i 和输出端 V_o 波形的峰一峰值。观测时信号源频率变化间隔的选取，在上、下截止频率附近应予特别注意，在幅频特性平顶部分对应的频率范围内可以变化大些。列表记录观测结果。在坐标纸上绘出幅频特性曲线(频率轴以 $\log f$

进行分度)、确定出带宽及增益,并与理论计算结果比较(偏置电流为 20mA)。

二、光信号的接收实验

1. 硅光电二极管光电特性及响应度的测定

测试电路如图 5 示,调节 LED 驱动电路中的 W_2 ,使 LED 的偏置电流从零逐渐增加,每增加 5mA ,用万用表的 $\overline{mV}$ 档读取一次由接收器 $IC1$ 组成的电流—电压变换电路的输出电压 V_0 (mV)。最后,在测量系统完全断电的情况下,测量 $I-V$ 变换电路中的 R_f 值。列表记录测量结果,并根据测量结果和 LED 的电光特性描绘 SPD 的光电特性和计算它在 $0.85\mu\text{m}$ 波长处的响应度 R 值。

2. 光信号的检测

把发送端 LED 的偏置电流设置为 50mA 的情况下,调节发送端音频信号源的频率和幅度,用示波器观测接收端 $I-V$ 变换电路输出电压的波形变化情况,并记录下某一确定频率下(比如 1KHz)这一波形无截止畸变的最大峰—峰值,根据 $I-V$ 变换电路中 R_f 值与光电二极管的响应度 R 值计算与此情况对应的光信号光功率变化的幅值,并与由 LED ——传输光纤组件的电光特性曲线确定的最大调制幅度情况下光功率变化幅值比较。

3. 光电信号的放大

在前面各项实验联接的基础上,把发送端调制放大电路的反馈电阻 R_f 调至最大和接收端功放电路的电位器 W_{Nt} (功放增益调节)调至最小。然后在保持发送端输入信号幅度不变(其值以 LED 的光信号不出截止失真和功放电路输出不出现饱和失真为宜)的情况下,改变发送端信号源频率,用示波器观测和记录接收功放电路输出电压随信号频率的变化。列表记录测量结果。

增大功放电路中电位器 W_{Nt} 的阻值,重复上述实验内容的观测,并把结果与 W_{Nf} 阻值最小时的情形比较、分析比较结果。

4. 语音信号的传输

把发送器的输入端接入收音信号,接收器功放输出端接上 4Ω 的扬声器,试验整个音频信号光纤传输系统的音响效果。试验时,可适当调节发送器的 LED 偏置电流、调制放大电路反馈电阻及接收器功放电路的 W_{Nt} 等系统参数,考察传输系统的听觉效果并用示波器监测系统的输入和输出信号的波形变化。

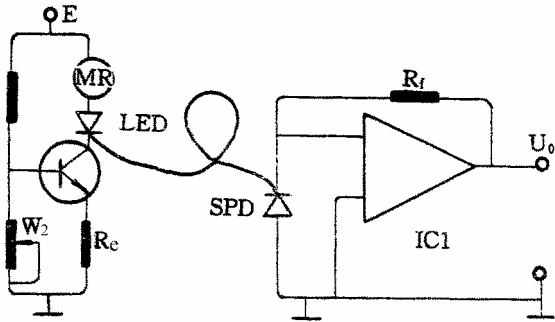


图 5 硅光二极管光电特性的测定

附：YOF-A 型音频信号光纤传输技术实验仪使用说明书

一、保证仪器安全运行的注意事项

1) 本实验系统的半导体发光二极管 *LED* 处于驱动电路晶体三极管的集电极电路中，在实验过程中，应避免它的引脚与实验系统和测试仪器的地线相碰，否则会造成 *LED* 的永久性损坏。

2) 为了 *LED* 的安全使用，*LED* 的偏置电流不要大于 50mA，调制信号的幅度也不要过大，否则会使 *LED* 的发光性能迅速下降。

3) 实验过程中进行传输光纤的输出端与光电二极管入照窗口的耦合联接时，应注意光纤端面的保护，并按光纤的自然弯曲状态进行操作，不得强行弯折。光纤信道从传输系统脱离联接后，要注意保护好传输光纤的输出端面 and 光电二极管的入照窗口，使它们不受异物损伤及灰尘遮盖。

二、仪器的结构及工作原理

本实验系统主要由以下四大部分组成：

1. 光信号发送器，
2. 光纤信道；
3. 光信号接收器；
4. 光功率指示器。

光信号发送器含半导体发光二极管 (*LED*) 的驱动电路和 *LED* 发光强度调制信号的放大电路。光纤信道一端是光源器件，传输光纤是芯径为 $50\mu\text{m}$ 、包层直径 $125\mu\text{m}$ 对 $\lambda = 0.85\mu\text{m}$ 的光波具有低损耗的多模石英光纤。光源器件 *LED* 输出的光功率与传输光纤是用活动的标准插件进行光耦合的，而 *LED* 的正、负极是通过光纤绕线盘上的电流插口，用单芯电缆线与发送器 *LED* 的调制驱动器电路进行联接。传输光纤的输出端经一金属同轴插孔引出，同轴插孔也固定在光纤绕线盘的端面上，光纤信道未接入传输系统时，这一同轴插孔是用橡皮套封好的，以免灰尘等异物沾污传输光纤输出端面。光信号接收器采用 S_i 光电二极管作光电检测元件，其响应波谱为 $0.4\sim 1.1\mu\text{m}$ ，峰值响应波长在 $0.9\mu\text{m}$ 附近。光功率指示器与光信号接收器共用同一个硅光电二极管，其读数用电光特性已知、发光中心波长为 $0.86\mu\text{m}$ 的半导体发光二极管作标准光源进行了定标。

本实验系统的工作过程如下：在测得半导体发光二极管的电光特性后，根据实际需要，选择一个适当的偏置电流（为了减少非线性失真，一般选为 *LED* 电光特性曲线线段中点对应的驱动电流），在此基础上被传音频信号经适当衰减和放大后在 *LED* 的电光特性的线性范围内调制 *LED* 的驱动电流使 *LED* 发出光强随被传音频信号变化的光信号，光信号经传输光纤至远端后，通过 S_i 光电二极管、 $I-V$ 变换电路及功放电路实现信号的再生。有关本实验系统的电路结构、工作原理的详细论述见《音频信号光纤传输技术实验》实验讲义。

三、利用本实验仪能进行的实验内容

3.1 LED—光纤组件电光特性的测定

首先将两端带电流插头的电缆线的一头插入光纤绕线盘上的电流插孔，另一头插入发送器前面板上的“LED 插孔”，然后把光纤绕线盘上引出传输光纤输出端的同轴插孔的橡皮套揭去，将光功率指示器（量程选择 $0\sim 200\mu W$ 挡）的光电探头插入同轴插孔内。完成以上联接后，打开发送器电源开关便可进行测试。

测试时先旋动发送器前面板上的“偏流调节”旋钮，使 LED 的偏置电流 I_D 在 $20\sim 50mA$ 范围的任一值，并观察光功率指示器读数，在保持 LED 偏置电流不变的情况下，将插入同轴插孔中的光电探头沿同轴插孔轴线方向适当旋动，直到光功率指示器的读数尽量接近最大的位置时为止，在以后整个实验过程中注意保持传输光纤输出端面与光电探头的这一耦合状态不变。

然后旋动“偏流调节”旋钮，使发送器前面板上的毫安表的示值（即 LED 的驱动电流 I_D ）在 $0\sim 100mA$ 范围内变化，从零开始，每隔 $10mA$ 读取一次光功率指示器的示值 P_0 ，直到 $I_D = 100mA$ 为止。根据以上测量数据，以 P_0 为纵坐标， I_D 为横坐标，便可在 (P_0, I_D) 坐标系中画出传输光纤输出端与光电二极管之间在以上耦合状态下的 LED—光纤组件的电光特性曲线。

3.2 半导体光电二极管光电特性的测定

测量光电二极管光电特性的步骤如下：

1) 完成 3.1 项测试后，把光电二极管带香蕉插头的两条引线（与红色香蕉插头对应的引脚为负极、黑色为正极）从光功率指示器的两个输入插孔拔出改接到接收器前面板左侧标有“SPD”记号的相应颜色的插孔内；把数字万用表（ $2V$ 或 $200mV$ 档）接至接收器前面板上电流—电压变换电路输出端和地端所对应的两个插孔内。

2) 开启发送器和接收器的电源开关，调节发送端 LED 的驱动电流，从零开始，每增加 $10mA$ 读取一次接收端 $I-V$ 变换电路的输出电压，然后根据已测得的 LED—光纤组件的电光特性曲线和 $I-V$ 变换电路的反馈电阻 R_f 值（它可在发送器、接收器断电情况下，

用数字万用表电阻档由接收器前面板上标有“ R_f ”记号的两插孔测得）便可由这些测量数据算出被测光电二极管的光电特性曲线，由这一特性曲线，按以下公式就可计算出被测光电二极管的响应度：

$$r = \frac{\Delta I_0}{\Delta P_0} (\mu A / \mu W)$$

其中 ΔP_0 表示两个测量点对应的入照光功率的差值， ΔI_0 是对应的光电流的差值。根据实验数据，利用线性拟合实验数据处理方法即可以求得被测光电二极管的响应度。

3.3 光讯号的调制实验

与其它光源比较，半导体发光二极管的优点就在于只需调制它的驱动电流就可简单地实现光信号的调制。进行光信号调制时，首先根据 **LED** 的电光特性曲线选择一个适当的偏置电流（一般选为其电光特性线性度较好线段中点对应的驱动电流），然后把 **1KHZ** 的正弦信号经电流插头引至发送器前面板的“信号输入”插孔，并用示波器观测发送器前面板右侧标明的晶体三极管发射极电阻 R_e 两端的电压波形。由于 $V_e = R_e I_D$ ，所以 V_e 的波形反映了 **LED** 驱动电流 I_D （在 **LED** 电光特性的线性范围内也即代表了传输光纤中传输的光功率）随时间的变化波形，若观察到的这一波形具有严重的截止削波失真，适当减小调制信号幅度、或旋动发送器前面板上控制输入信号幅度的“输入衰减”旋钮，可使光讯号的波形为一正弦波。

如果 **LED** 的电光特性曲线在驱动电流从零至其允许的最大电流范围内线性度较好，则大幅度调制引起的光信号非线性失真很小，此时调制幅度主要受截止削波失真的限制，在此情况下，为了获得最大幅度的光信号（因在接收器灵敏度一定时，光信号幅度愈大，光信号传输的距离就愈远），**LED** 偏置电流可以选为其最大允许驱动电流的一半。本实验仪采用的 **LED** 允许的最大工作电流为 **100mA**，故在进行光讯号的调制实验时，偏置电流最大不得超过 **50mA**。

在 **LED** 不同偏置电流情况下，调节调制信号幅度用示波器可以观测到无截止削波失真的光信号最大幅度随 **LED** 偏置电流变化的情况。

在调制幅度小于 **LED** 的偏置电流时，无截止削波失真发生，故流过 **LED** 的平均电流应等于原来设定的偏置电流，故发送器前端的毫安表指示保持不变，当调制幅度过大时，出现截止削波失真，**LED** 平均电流大于原来设定的偏置电流，在此情况下，毫安表指示要随调制幅度增加而增加。因此，根据以上分析，不用示波器只是根据发送器前面板上毫安表的指示有无变动情况也可判断在信号传输过程中调制信号幅度是否过大。在传输话音信息时，由于信号幅度是随机变化的，当其调制幅度过强时，毫安表指示会在原来设定的偏置电流的附近左、右摆动。此时应适当减小调制信号的幅度。

3.4 发送器音频放大电路幅频特性的测定

为了减小传输过程中因系统带宽有限引起的谐波失真，要求传输系统幅频特性的带宽能覆盖被传信号的频谱范围，对于话音信号，其频谱在 **300—3400Hz** 的范围内，对于音乐信号，是在 **20—2000Hz** 范围内。在光纤传输系统中，作为信道的光导纤维，其带宽远大于音频范围带宽，故在音频信号光纤传输系统中，系统的带宽主要取决于电子放大电路。

测量发送器音频放大电路（电路具体结构见实验讲义）幅频特性的步骤如下：

1) 把音频信号源的输出经电流插头插入光信号发送器前面板左侧的“信号输入”插孔，为了避免有害 **LED** 性能的幅度过大的调制，插入之前，必须调节好信号源输出的正弦信号的幅度使其峰——峰值限制在 **50mV** 以下。

2) 调节光信号发送器前面板左侧的“输入衰减”电位器，使调制信号放大电路的输入信号峰——峰值为 **20mV**（用示波器观测发送器前面板“ V_i ”插孔的电压波形即可确定）。

然后在保持调制信号放大电路输入信号幅度不变的情况下，在 20Hz — 20KHz 范围内，改变调制信号源的频率，用示波器观测发送器前面板标明的调制信号放大器输出端“ V_0 ”电压波形的峰—峰值，并记下不同频率 V_i 和 V_0 的测量结果。关于测量时频率变化的间隔程度，实验人员可根据实验情况合理确定，在上、下截止频率附近，频率间隔应适当密集一些。

根据以上测试条件下的 V_i 值和各测试频率 f 所对应的 V_0 值，便可绘出发送器调制信号放大电路的幅频特性。

3. 5 系统的组成及光讯号的传输试验

- 1) 保持 3. 4 项测试电路及系统的联接状态不变。
- 2) 按选定的 LED 的偏置电流，对光信号进行正弦调制，并用示波器观测发送端 LED 驱动电路中 R_e 的电压波形，适当调节调制信号幅度，使这波形无削波失真。
- 3) 用示波器观察接收器 $I-V$ 变换电路及功放电路的输出波形，改变调制信号幅度和频率，通过示波器观察传输效果。

3. 6 语音信号的传输实验

在 3. 5 项实验内容的基础上，用收音机或随身听放音机代替信号发生器，把本实验仪配置的小音箱接入接收器前面板上标有扬声器记号的插孔内，与此同时把接收器面板上的负载电阻 R_L 和扬声器之间的切换开关倒向扬声器一侧，即可进行话音传输实验。为了获得较好的音响效果，根据实验情况适当调节发送器一侧的输入信号幅度、 LED 的偏置电流或接收器前面的“功放增益调节”旋钮。

(十二) 用拉伸法测金属丝的杨氏模量

一、实验内容

测金属丝（康铜）的杨氏模量。

二、观测依据

根据教材中推导出的公式

$$\bar{Y} = \frac{8LD}{\pi \bar{d}^2 b} \frac{F}{\Delta n}$$

进行杨氏模量 $\bar{Y}$ 的测量，它是间接测量量。其中 L —金属丝原长，单位为米，用卷尺测量一次； D —镜尺距离，单位为米，用卷尺测量一次； $\bar{d}$ —金属丝直径，单位为米，用螺旋测微计测 9 次后的平均值，（上、中、下部位，每个方位测 3 次，共 9 次）； b —光杠杆臂长，单位为米，用游标卡尺测一次； F —施加的拉力，实际是砝码重量，单位是牛顿，直接读出； Δn —放大后的伸长量，单位为米，通过望远镜观察在标尺（米尺）上读数的平均值。

三、实验做法

1. 测量前的调整

- （1）在杨氏模量仪的挂钩上先预置一个 2KG 的砝码（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；同时保证光杠杆的镜面与望远镜等高共轴（其实望远镜的高低也可升降，即也可通过望远镜位置高低的调节或两者配合调节达到此目的）。
- （4）把光杠杆放在平台上，让其前面的两足在平台的槽内，后足在圆柱体的上柱面上（注意一定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），要使光杠杆的臂长与镜面垂直。

2. 用望远镜找通过光杠杆镜面反射的标尺的像

- （1）让望远镜旁的标尺位于竖直方向，其零刻度线近似与望远镜光轴等高，用台灯照亮标尺。
- （2）通过望远镜上的“缺口”和“准星”观察光杠杆镜面中标尺的像，如果看不见像，你可观察这时望远镜上下、左右的位置是否与镜面对准等高，若未对准等高，就可调整望远镜上下、左右的位置对准等高，你认为已对准等高仍看不到像，应调节镜面的倾角。通过这些调节一般就能从“缺口”和“准星”处看到标尺的像。
- （3）完成上一步之后就可以调节物镜的焦距，找到标尺的像；调节望远镜的目镜（焦距），看清望远镜中的叉丝，并让叉丝与标尺的像无视差。

四、测量

1. 如果叉丝横线没有对准标尺像的“0”刻度线，可通过望远镜俯仰角的调节完成此要求。如果达不到此要求，叉丝对准“0”刻度线附近的某一刻度也可以，但必须记录下来，作为第0次测量的读数。

2. 这时，可以在挂钩上加重量为1公斤的砝码，每加一个砝码，通过望远镜的目镜读一次叉丝对准标尺的刻度（注意，要让砝码不再摆动时读数），共加7个1公斤的砝码；当你记录下第7个1公斤砝码标尺的刻度后，就可以进行减砝码程序，每减一个砝码读一次标尺刻度，直到把7个砝码减完（不要忘记减完7个砝码的这次读数）。

3. 用米尺测量镜尺距离 D 和原长 L ；用游标卡尺测量臂长 b （将光杠杆的三尖足压在铺平的白纸上，压出三尖的位置痕迹，量后足到前两足连线的垂直距离）。

4. 用螺旋测微计量金属丝的直径（在上、中、下三个部位不同的方向共测9次）。记住：要记录下螺旋测微计的“零差”。

五、数据记录与处理

1. 记录表格（参考），

$\overline{\Delta n}$ 测量数据记录表格：

次 数	0	1	2	3	4	5	6	7
砝码总质量 (Kg)	2	3	4	5	6	7	8	9
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 $n_i = \frac{1}{2}(n'_i + n''_i)(mm)$								

其他直接测量量表格：

次数	零差	1	2	3	4	5	6	7	8	9
直径 d (mm)										
镜尺距离 $D(m)$		原长 $L(m)$				臂长 b (mm)				

2. 用逐差法处理数据求 $\overline{\Delta n}$

$$\overline{\Delta n} = \frac{1}{4}[(n_7 - n_3) + (n_6 - n_2) + (n_5 - n_1) + (n_4 - n_0)]$$

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

4. 计算 Y 的不确定度

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

其中：

$$\sigma_L = \sqrt{S_L^2 + u_L^2} = u_L = \frac{2}{\sqrt{3}} \text{ mm} \quad (\text{单次测量, } S_L = 0)$$

$$\sigma_D = \sqrt{S_D^2 + u_D^2} = u_D = \frac{5}{\sqrt{3}} \text{ mm} \quad (\text{单次测量, } S_D = 0)$$

$$\sigma_b = \sqrt{S_b^2 + u_b^2} = u_b = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{ mm} \quad (\text{单次测量, } S_b = 0)$$

$$\sigma_d = \sqrt{S_d^2 + u_d^2}, \quad \text{其中 } S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (d_i - \bar{d})^2}{9(9-1)}}, \quad u_d = \frac{0.005}{\sqrt{3}} \text{ mm}$$

$$\sigma_{\Delta n} = \sqrt{S_{\Delta n}^2 + u_{\Delta n}^2}, \quad \text{其中 } S_{\Delta n} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 (\Delta n_i - \overline{\Delta n})^2}{4(4-1)}}, \quad u_{\Delta n} = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \text{ mm}$$

说明：B 类不确定度 u 对误差为均匀分布其计算 $u = \Delta/\sqrt{3}$ ， Δ 是误差极限值，可取仪器误差 $\Delta_{\text{仪}}$ ，也可根据实际测量来估计。上述 L 、 D 、 b 就是按后者进行的，而不是用 $\Delta_{\text{仪}}$ ； d 和 $\overline{\Delta n}$ 就是用的 $\Delta_{\text{仪}}$ 。

5. 如果表达式

$$Y = (\bar{Y} \pm \sigma_Y) N \cdot m^{-2}$$

五、注意事项

1. 调平台水平的主要目的是让圆柱体不要与平台壁发生摩擦，但有的装置会出现平台调平后反而会发生摩擦，如果出现这种情况，在调水平的过程中，以不发生摩擦（即圆柱体不与平台壁接触）为准，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停止下来才读数，否则误差较大。

（十三）非平衡电桥与压力传感器特性研究及其应用

【预习提要】

1. 什么是电阻应变效应？
2. 本实验所用压力传感器的构造原理。
3. 了解实验中所用仪器及测量量。

【学习要求】

1. 了解非电量的转换及测量方法。
2. 了解电阻应变式传感器的构造及应用。
3. 练习用逐差法处理数据。

【实验目的】

1. 测量压力传感器的灵敏度及物体的重量。
2. 测量传感器电源电压与电桥输出电压的关系。

【实验器材】

电阻应变片，压力传感器，压力传感特性测试仪，各种重量的砝码，测试样品。

【实验原理】

非电量电测系统一般由传感器、测量电路和显示记录三部分组成，如图一所示。用应变电阻片做成的压力传感器是将“力”的测量转变为“电压”测量的电测系统，其基本组成与图一类似。

（一）非平衡电桥电压输出特性研究

电桥是将电阻、电容、电感等电参数变化量变换成电压或电流值的一种电路。电桥电路在检测技术中应用非常广泛。根据激励电源的性质不同，可把电桥分为直流电桥和交流电桥两种。根据桥臂阻抗性质的不同，可分为电阻电桥、电容电桥和电感电桥三种。根据电桥工作时是否平衡来区分，可分为平衡电桥和非平衡电桥两种。平衡电桥用于测量电阻、电容和电感，而非平衡电桥在传感技术和非电量测量技术中广泛用作测量信号的转换。

一、实验目的

1. 了解非平衡电桥的工作原理。
2. 研究非平衡电桥电压输出特性。

二、实验仪器

电桥接线板、电阻箱、稳压电源、 UJ_{36a} 电位差计、电压表等。

三、实验原理

1. 单臂输入时电桥电压输出特性

图 1 是惠斯登电桥的基本电路。当

电桥平衡时， $R_1 : R_2 = R_3 : R_4$ ，电路中 A、B 两点间电位差 $U_{AB} = 0$ ，若此时使一个桥臂的电阻（如 R_3 ）增加很小的电阻 ΔR ，即 $R_3 = R_0 + \Delta R$ ，则电桥失去平衡，电路中 A、B 两点间存在一定的电势差 U_{AB} 。该电势差即为电桥不平衡时输出电压。

若电桥供电电源的电压为 U_0 ，根据串联电阻分压原理，图 1 若以电路中 C 点为零电势参考点，则电桥的输出电压为

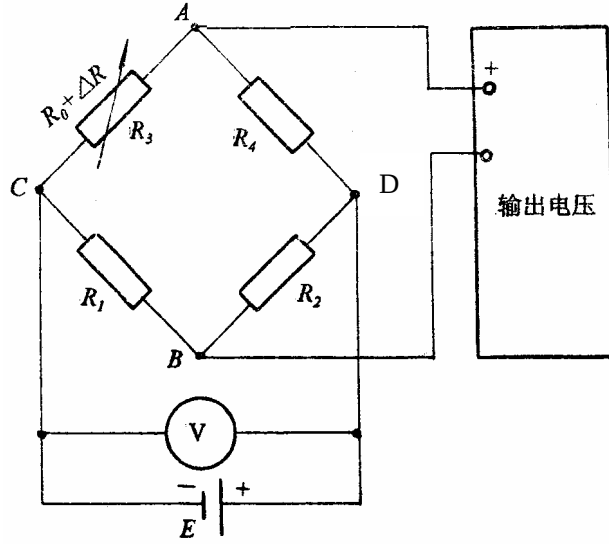


图 1 单臂原理

$$U_{AB} = U_A - U_B = \left(\frac{R_0 + \Delta R}{R_0 + \Delta R + R_4} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \cdot U_0$$

$$= \frac{R_2 \cdot \Delta R}{(R_0 + \Delta R + R_4)(R_1 + R_2)} \cdot U_0 = \frac{\Delta R}{R_0(1 + \Delta R/R_0 + R_4/R_0)(1 + R_1/R_2)} \cdot U_0$$

令电桥比率 $K = \frac{R_1}{R_2}$ ，根据电桥平衡条件， $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_0}{R_4}$ ，且当 $\Delta R \ll R_0$ 时，略去分母中

的微小项 $\frac{\Delta R}{R_0}$ ，有

$$U_{AB} = \frac{K \cdot U_0}{(1 + K)^2 \cdot (R_0 / \Delta R)} \quad (1)$$

若 $\frac{\Delta R}{R_0}$ 不能略去，则 (13-1) 式应为

$$U_{AB} = \frac{\Delta R / R_0}{(1 + K) + (\Delta R / R_0)K} \cdot \frac{K}{1 + K} U_0 \quad (2)$$

定义 $S_u = \frac{U_{AB}}{\Delta R}$ 为电桥的输出电压灵敏度，则有

$$S_u = \frac{KU_0}{(1+K)^2 \cdot R_0} \quad (3)$$

则(1)式可知, 当 $\frac{\Delta R}{R_0} \ll 1$ 时, 非平衡电桥输出电压与 ΔR 成线性关系。由(3)式可知, 电桥的输出电压灵敏度由选择的电桥比率 K 及供电电源电压决定。电桥供电电压一定, 当 $K=1$ 时, 电桥输出电压灵敏度最大, 且为

$$S_{\max} = \frac{U_0}{4R_0} \quad (4)$$

2. 双臂输入时电桥的电压输出特性

在惠斯登电桥电路中, 若相邻臂内接入两个变化量相、而变化量符号相反的可变电阻, 这种电桥电路称为半桥差动电路。如图2所示。

对于半桥差动电路, 若电桥开始时是平衡的, 则 $R_1:R_2 = R_3:R_4$ 。在对称情况下,

$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$, $\Delta R_3 = \Delta R_4 = \Delta R$, 则半桥差动电路输出电压为

$$U_{AB} = \frac{U_0 \cdot \Delta R}{2R_0} \quad (5)$$

电桥的输出电压灵敏度为

$$S = \frac{U_0}{2R_0} \quad (6)$$

可见, 半桥差动电路的输出电压灵敏度比单臂输入时的最大电桥电压灵敏度提高了一倍。

3. 四臂输入时电桥的电压输出特性

在惠斯登电桥电路中, 若电桥的四个臂均采用可变电阻, 即将两个变化量符号相反的可变电阻接入相邻桥臂内、而将两个变化量符号相同的可变电阻接入相对桥臂内, 这样构成的电桥电路称为全桥差动电路。

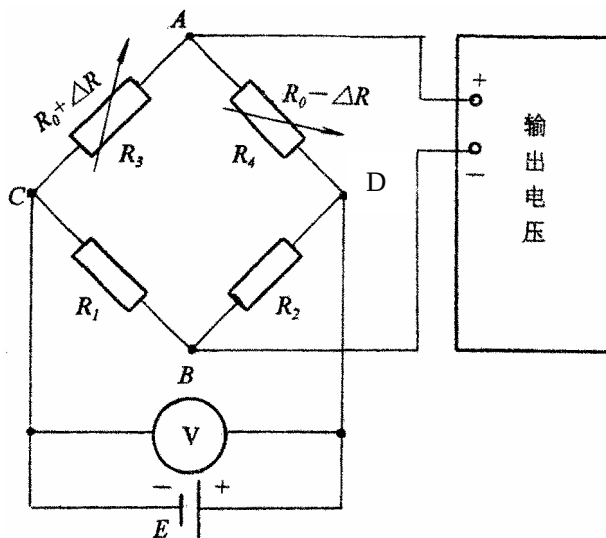


图2 双臂原理

四、实验内容和步骤

1. 测定单臂输入时电桥的电压输出特性

(1) 按实验电路接好测量电路。其中 R_1 和 R_2 在实验板上为固定电阻, R_{x1} 和 R_{x2} 用电阻箱, 调节供电电源电压 $E_0 = 6.00$ 伏。

(2) $R_1 = R_2 = 1M\Omega$, 即 $K=1$; 再调节 $R_{x1} = R_{x2} = 10K\Omega$, 即使 $U_{AB} = 0$ 。但由于电阻

箱存在一定误差，以及接触电阻等因素的影响，此时电桥未必能平衡，即 $U_{AB} \neq 0$ ；为此需要微调电压表，使 $U_{AB} = 0$ 。

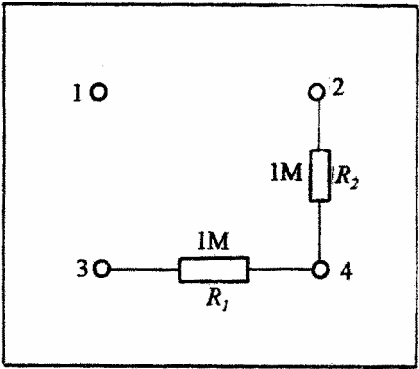


图3 实验板示意图

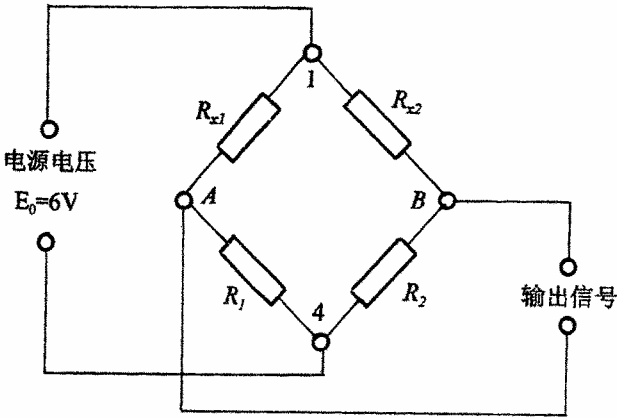


图4 实验电路

(3) 使 R_{x1} 每次增大 200Ω ，用电压表测出电桥相应的输出电压 U_{AB} ，直到 R_{x1} 增大 $1.2000K\Omega$ 。

2. 测定双臂输入时电桥的电压输出特性

(1) 调节 $R_{x1} = R_{x2} = 10k\Omega$ ，使电桥平衡。

(2) 使 R_{x1} 每次增大 200Ω ，而 R_{x2} 相应每次减少 200Ω ，测出电桥的相应输出电压 U_{AB} 。直到 R_{x1} 、 R_{x2} 的最大改变量为 $1.2000 K\Omega$ 。

五、实验数据记录及处理

1. 数据记录表格（参考）

(1) 单臂输入时电桥的电压输出特性

$$E_0 = 6V \quad R_{x1} = 10K\Omega$$

$R_{x1} (K\Omega)$	10.2000	10.4000	10.6000	10.8000	11.0000	11.2000
U_{AB}						

(2) 双臂输入时电桥的电压输出特性

$$E_0 = 6V \quad R_{x1} = R_{x2} = 10K\Omega$$

$R_{x1} (K\Omega)$	10.2000	10.4000	10.6000	10.8000	11.0000	11.2000
$R_{x2} (K\Omega)$	9.8000	9.6000	9.4000	9.2000	9.0000	8.8000
U_{AB}						

2. 数据处理要求

讨论前面两项实验结果，并分析原因。

(二) 压力传感器

金属导体的电阻随着它所受机械形变（伸长或缩短）的大小而发生变化，其原因是导体的电阻与材料的电阻率以及它的几何尺寸（长度和截面）有关，导体在承受机械形变过程中，其电阻率、长度和截面都要发生变化，从而导致其电阻发生变化，因此电阻应变片能将机械构件上应力的变化转换为电阻的变化。

电阻应变片一般由敏感栅、基底、粘合剂、引线、盖片等组成。电阻应变片的结构如图 5 所示。图中 l 称为应变片的标距或称工作基长， b 称为应变片的工作宽度， $b \times l$ 称为应变片的使用面积。应变片的规格一般以使用面积和电阻值来表示，如 3×10 平方毫米，350 欧姆。

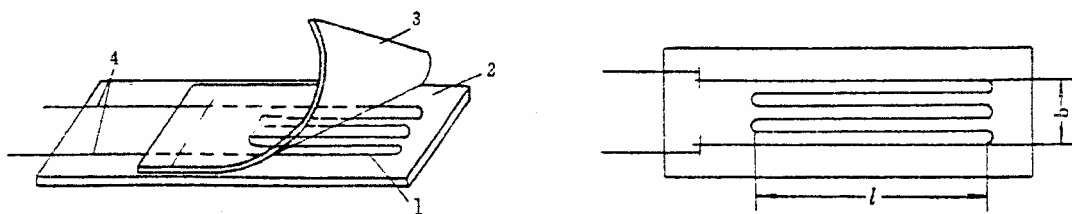


图 5 电阻丝应变片结构示意图

1—电阻丝 2—基片 3—覆盖层 4—引出线

敏感栅由直径约 0.01~0.05 毫米高电阻系数的细丝弯曲成栅状，它实际上是一个电阻元件，是电阻应变片感受构件应变的敏感部分。敏感栅用粘合剂将其固定在基片上。基底应保证将构件上的应变准确地传递到敏感栅上去。因此基底必须做得很薄，一般为 0.03~0.06 毫米，使它能与试件及敏感栅牢固地粘结在一起，另外它还应有良好的绝缘性、抗潮性和耐热性。基底材料有纸、胶膜和玻璃纤维布等。引出线的作用是将敏感栅电阻元件与测量电路相连接，一般由 0.1~0.2 毫米低阻镀锡铜丝制成，并与敏感栅两输出端相焊接，盖片起保护作用。

在测试时，将应变片用粘合剂牢固地粘贴在被测试件的表面上，随着试件受力形变应变片的敏感栅也获得同样的形变，从而使其电阻随之发生变化，通过测量电阻值的变化可反映出外力作用的大小。

压力传感器是将四片电阻片分别粘贴在弹性平行梁 A 的上下两表面适当的位置，如图 6 所示。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 是四片电阻片，梁的一端固定，另一端自由用于加载荷外力 F 。

弹性梁受载荷作用而弯曲，梁的上表面受拉，电阻片 R_1 、 R_3 亦受拉伸作用电阻增大，梁的下表面受压， R_2 、 R_4 电阻减小。这样外力的作用通过梁的形变而使四个电阻值发生变化，这就是压力传感器。

[测量电路]

应变片可以把应变的变化转换为电阻的变化。为了显示和记录应变的大小，还需把电阻的变化再转换为电压或电流的变化。最常用的测量电路为电桥电路。

为了消除电桥电路的非线性误差，通常采用不平衡电桥进行测量。传感器上的电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 接成如图 7 所示的直流桥路， cd 两端接稳压电源 E ， ab 两端为电桥电压输出端，输出电压为 U_0 ，由图 7 可得：

$$U_0 = E \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (7)$$

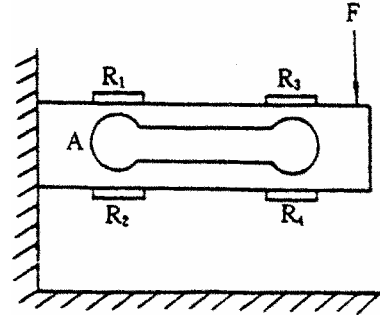


图 6 压力传感器

当电桥平衡时， $U_0 = 0$ ，于是可得：

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (8)$$

(8) 式就是我们熟悉的电桥平衡条件。在传感器上贴的电阻片是相同的四片电阻片，其电阻值相同，即有

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R \quad (9)$$

所以当传感器不受外力作用时，电桥满足平衡条件， a 、 b 两端输出的电压 $U_0 = 0$ 。

当梁受到载荷 F 的作用时， R_1 和 R_3 增大， R_2 和 R_4 减小，如图 8 所示，这时电桥不平衡，并有：

$$U_0 = E \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 - \Delta R_2} - \frac{R_4 - \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 - \Delta R_4} \right) \quad (10)$$

假设：

$$\Delta R_1 = \Delta R_4 = \Delta R_3 = \Delta R_2 = \Delta R \quad (11)$$

将 (9)、(11) 式代入 (10) 式后得：

$$U_0 = E \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (12)$$

由（12）式可知电桥输出的不平衡电压 U_0 与电阻的变化 ΔR 成正比，如测出 U_0 的大小即可反映外力 F 的大小。由（12）式还可说明电源电压不稳定将给测量结果带来误差，因此电源电压一定要稳定。另外若要获得较大的输出电压 U_0 ，可以采用较高的电源电压，但 E 的提高受两方面的限制，一是应变片的允许温度，一是应变电桥电阻的温度误差。

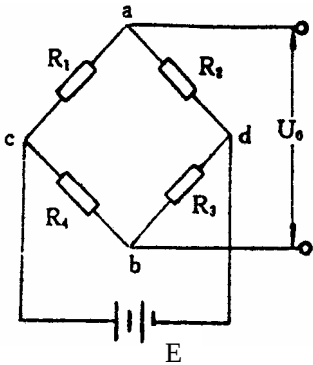


图 7

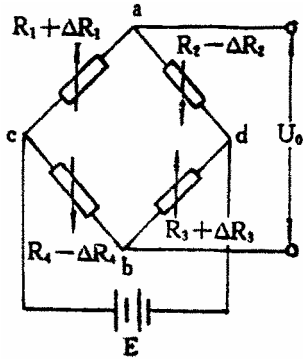


图 8

【实验内容】

1. 仪器连接

仪器的连接如图 9 所示，电源电压接压力传感特性测试仪的电源输出端，为传感器提供工作电源，传感器输出端接压力传感特性测试仪的信号输入端，从而对不平衡电桥（即压力传感器）的输出电压进行放大、测量和显示。图 10 为压力传感特性测试仪的原理框图。

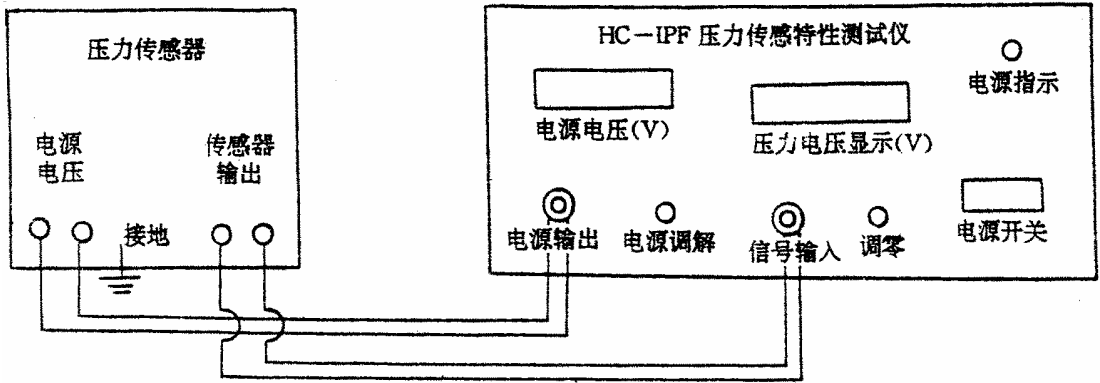


图 9 仪器连接

2. 仪器调节

先将仪器电源打开，预热十五分钟以上，这时可观察仪器，做测量前的准备工作，然后调节电压调节旋钮，使电源电压为 10.0 伏，再旋转调零旋钮，使压力电压显示值为 0.000 伏。

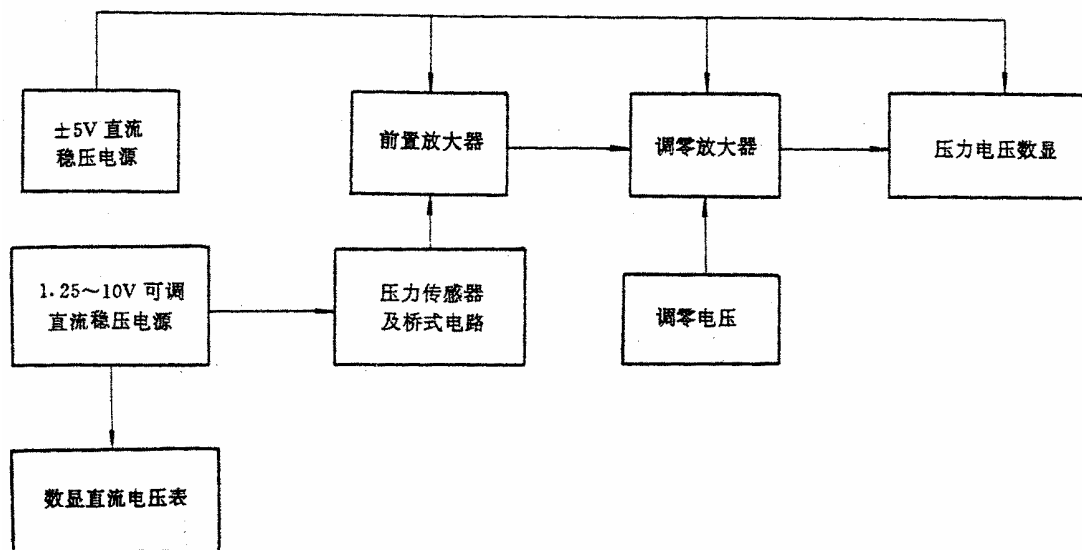


图 10 仪器原理框图

3. 测量

(1) 将压力传感器与测试仪器连接如图 9 所示，然后按顺序增加砝码的数量（每次增加 1 千克，共 9 次），记录每次加载时的输出电压值 U_0 。

(2) 再按相反次序将砝码逐一取下，记录输出电压值 U_0 。

(3) 用逐差法求出传感器的灵敏度 S 。

$$S = \frac{\Delta U_0}{\Delta F} \quad (\text{伏/千克}) \quad (13)$$

4. 用压力传感器测量任意物体的重量

(1) 将一个未知重量的物体放置于加载平台上，测出电压 U'_0 ，同一物体测量三次求出平均值 U'_0 。

(2) 物体的重量

$$W = U'_0 \times \frac{1}{S} \quad (14)$$

(3) 共测三个未知重量的物体，样品由实验室提供或学生自己提供被测物体。

5. 测量传感器电源电压 E 与电桥输出电压 U_0 的关系，保持加载砝码的质量为 1 千克。

(1) 改变 HC-IPF 压力传感特性测试仪的电源电压，使其由 2.0 伏变至 10.0 伏，每隔 1.0 伏记录一个输出电压值 U_0 。

(2) 作 $E-U_0$ 关系曲线, 分析是否为线性关系。

6. 测出本实验系统的最小分辨重量。

用实验室提供的砝码 1 克至 9 克, 由 1 克加载, 每加 1 克记录传感器输出电压值 U_0 。

分析测量结果, 给出实验系统所能测出的最小重量以及能分辨的最小重量。

【数据记录】

所有数据记录表格由学生自己设计。

【数据处理】

1. 总结非平衡电桥的电压灵敏度与各臂电阻变化的关系。
2. 用逐差法处理数据, 求压力传感器的灵敏度 S (伏 / 千克)。
3. 计算物体重量 $\overline{W}_1, \overline{W}_2, \overline{W}_3$ 。
4. 作 $U_0 \sim E$ 的关系曲线, 从而说明电桥输出电压 U_0 与传感器电源电压 E 的关系。
5. 分析给出本系统的最小分辨重量。

【注意事项】

在实验前应预热十五分钟以上, 实验中所加重量不能超过 10 千克, 加减砝码时要轻拿轻放, 以免损坏应变片。

【思考题】

1. 传感器不受外力作用时, 理论上电桥处于初始平衡状态, 但实际测量时, 电桥总是有点不平衡, 为什么?
2. 传感器的灵敏度与电源电压有何关系? 电源电压能无限制地加大吗? 为什么?
3. 本实验所用系统能当电子称使用吗?

【参考文献】

樊光汉编. 压力传感器特性研究及其应用实验指导

刘迎春编. 传感器原理设计与应用, 国防科技大学出版社, 1995.4

吴绍琳、孙祖达编. 检测与转换技术, 西安交通大学出版社, 1989.12

（十四）霍耳效应法测量磁场

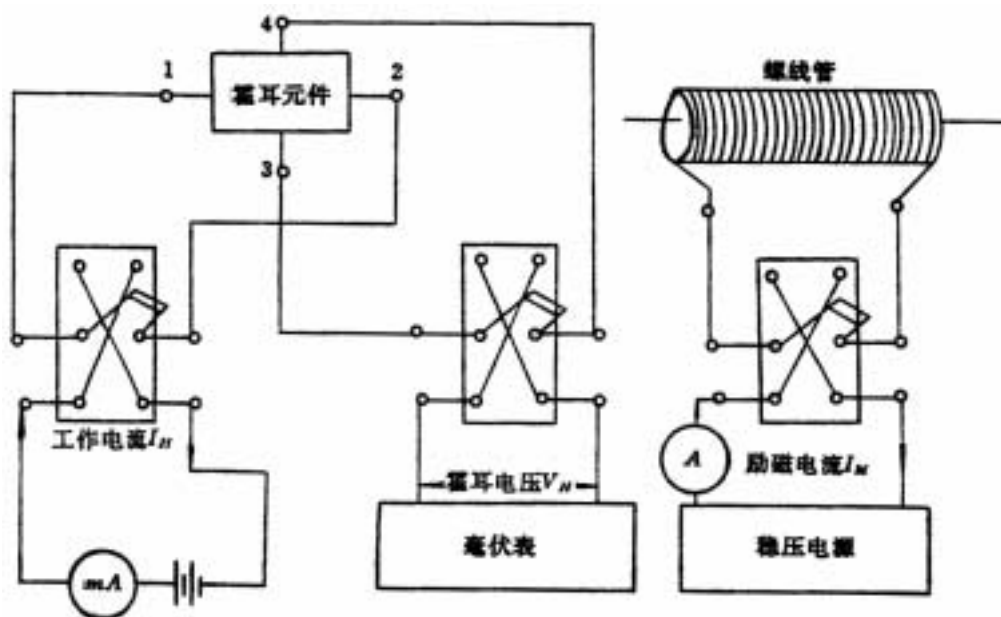
一、实验内容

1. 霍耳效应法测量通电长直螺线管轴线上的磁场分布。
2. 测量通电长直螺线管内、轴线上一点随励磁电流而变化的磁场。

二、观测依据

由霍耳效应有 $B = V_H / (KI_H)$

式中 B 为待测磁场的磁感应强度，单位为特斯拉； V_H 为霍耳电压，单位为毫伏，实验中用数字式毫伏表测量； I_H 为霍耳工作电流，单位为毫安，用直流毫安表测量，由 2 节 1 号电池提供； K 为霍耳灵敏度，单位是 $\text{mV} / (\text{mA} \cdot \text{T})$ 。由厂家给出，附在霍耳效应测量装置上。霍耳元件的位置用米尺读出，励磁电流由稳压电源提供，需用直流安培表测量。其测定装置如下图所示。



三、实验做法

1. 按图接好电路，闭合稳压电源开关，记下霍尔工作电流 I_H 为 10mA 左右。
2. 取 $x_0 = 0\text{mm}$ （即将游标卡尺拉到最左端，使霍尔片位于螺线管的入口处），记下毫伏表的读数 V_0 （此时励磁电流为 0，霍尔工作电流 I_H 仍保持不变）。
3. 调输出电压调节钮使励磁电流为 $I_M = 500\text{mA}$ 。

- #### 四、数据记录和处理

表一 测出当 $I_m = 0$ 时, 对应不同方向的 I_H 和 B_1 时的 V_H 即

$$V_{01} = \quad V_{02} = \quad V_{03} = \quad V_{04} =$$

$$K = \quad I_m = 500mA \quad I_H =$$

[illegible]

表二 测出当 $I_m = 0$ 时, 对应不同方向的 I_H 和 B1 时的 V_H 即

$$V_{01} = \quad V_{02} = \quad V_{03} = \quad V_{04} =$$

$$K = \quad \quad \quad \chi = 100.00mm \quad \quad \quad I_H =$$

[illegible]

2. 数据处理

(1) 计算各个 V_H 和 B 值，填在表一中，由坐标纸绘制 $B-X$ 曲线。

(2) 完成表二，绘制 $B-I_m$ 曲线，说明磁感应强度和励磁电流的关系。

(3) 由实验室给出的数据，计算通电长直螺管中部轴线上的磁感应强度理论值 $B_{理} = \frac{\mu_0 NI_m}{L}$ ，再与 $I_m = 500mA$ ， $x = 100.00mm$ 处的测量值 B 进行比较，求出相对误差。

五、注意事项

1. 霍耳元件的电流不得超过 15 毫安。
2. 励磁电流不得大于 600 毫安，以免损坏螺线管。

（十五）夫兰克——赫兹实验

一、实验内容：

测量充氩夫兰克——赫兹管的 $I_A - V_{GK}$ 曲线。

二、实验仪器

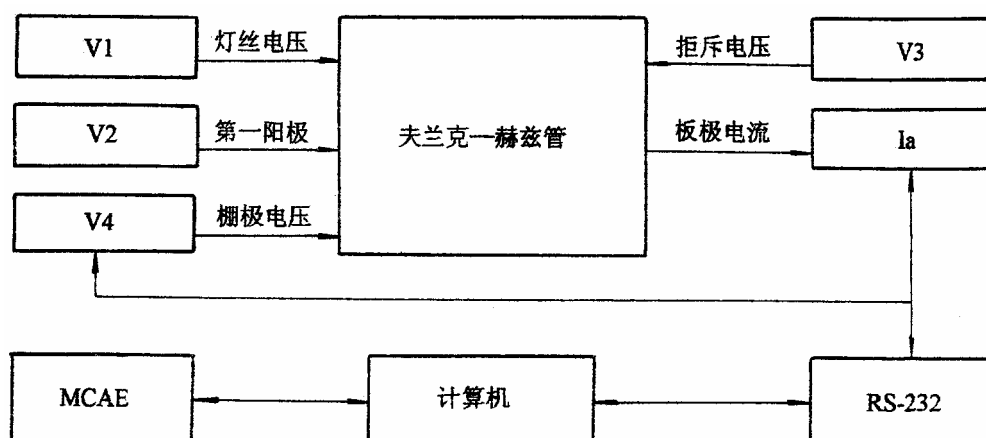
CAT — 9000 型程控夫兰克——赫兹实验仪多媒体计算机。

三、仪器特点

CAT — 9000 型程控夫兰克——赫兹实验仪用于测定氩原子的第一激发电位，证明原子能级的存在。该仪器采用模块化结构，数字面板显示，轻触按键操作，外形美观实用，性能稳定可靠。

CAT — 9000 型程控夫兰克——赫兹实验仪采用当今国际最新单片微机进行设计，高度智能化。该系列仪表的测量模块采用模数混合结构，提高了测量的线性度、精度和稳定性。该系列仪表除进行常规的可靠性设计外，还对仪器和电路的结构作了重点研究，尽量避免使用故障率较高的元器件，从而降低了整机故障率，提高产品可靠性。

实验测量过程可以手工完成，也可由多媒体计算机辅助实验系统软件 MCAEV1.1 进行监控。MCAE 工作于 32 位 Windows 操作环境，采用消息响应机制，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参数是否恰当，以免损坏仪器。



图一： CAT — 9000 型程控夫兰克——赫兹实验仪结构示意图

四、仪器结构:

五、操作方法

1. 程控直流稳压电源 V1, V2, V3, V4;

V1 输出电压范围 0—5V, 限流 500mA。

V2 输出电压范围 0—12V, 限流 100mA。

V3 输出电压范围 0—12V, 限流 100mA。

V4 输出电压范围 0—100V, 限流 50mA。

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“V1”、“V2”、“V3”、“V4”键可以切换显示和输入对象, 按“←”、“→”可以改变输入位, 按“↑”键或“↓”键可调节电压。

CAT9000 采用动态设置法, 接受输入时, 相应的输入位闪烁, 按“↑”键和“↓”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:

CAT9000 通过串口与计算机连接, 九芯串口延长线应插入计算机 COM1 或 COM2。

4. 多媒体计算机辅助实验系统实验 MCAE

多媒体计算机辅助实验系统软件 MCAE V1.1 用于监控实验测量过程。MCAE 工作于 32 位 Windows 操作环境, 采用消息响应机制, 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。

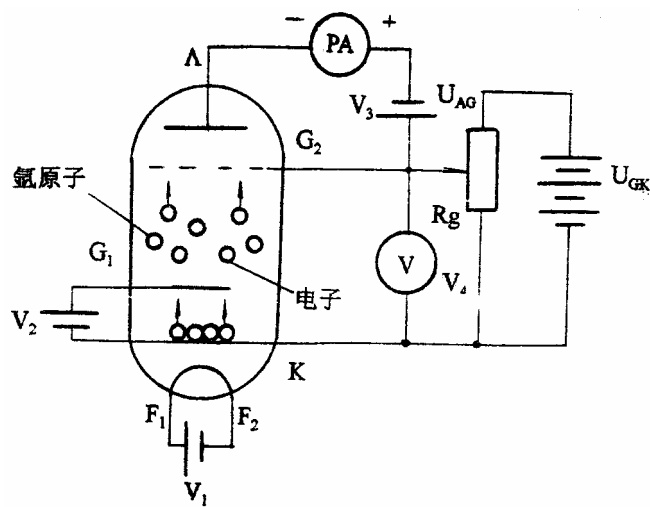
四、仪器结构:

图二为夫兰克——赫兹实验原理图, 一般的夫兰克——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 及板极 A, 在阴极 K 和栅极 G 之间还安装有第一阳极 G1。将管内抽至高真空后, 充入高纯氩气或其他元素气体。

夫兰克——赫兹管的灯丝电压、第一阳极电压、拒斥电压由 V1, V2, V3 提供。栅极电压由 V4 提供, 既可手动设定, 也可由计算机控制, 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 V1.1 进行监控。

1. 测量前先熟悉实验装置结构及使用方法。按照实验要求设计并连接实验线路, 检查无误后开机, 开机前检查调节电位器是否置零。

2. 先将系统各参数调至适当的值 (由实验室提供)。



图二：夫兰克——赫兹实验原理图

3. 运行测控软件 *MCAE V1.L*，进行实验装置联机测试。
4. 输入实验参数，自动采集实验数据，测量氙原子的第一激发电位。注意栅极电压不能大于 80 伏，以免损坏夫兰克—赫兹管。改变灯丝电压、第一阳极电压以及拒斥电压，重复进行实验测量，观察实验曲线各有什么变化，分析原因。
5. 保持实验参数不变，人工采集实验数据，每伏一个点，栅压从 0 到 60 伏。

七、数据处理

将人工测量的数据在坐标线上画出 $I_A - V_{GK}$ 曲线，在图中算出氙原子的第一激发电位。

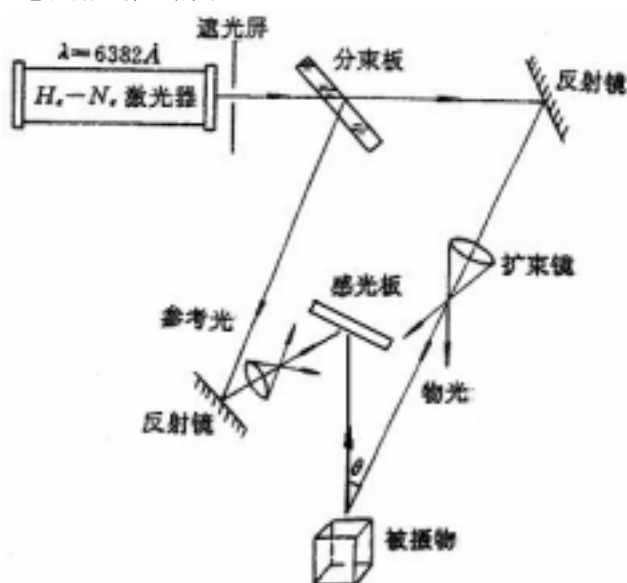
(十六) 光学全息照相

一、实验内容：

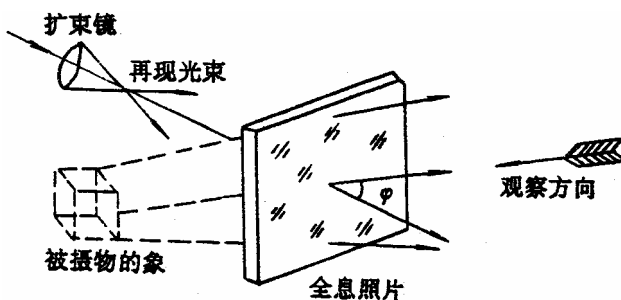
拍摄制作静物全息照片及物象再观察，了解全息照相的原理及特点。

二、观测依据：

如图 1 所示为全息照相的光路图：



如图 2 所示为全息照片的再现观察光路图：



所用的仪器有：

氦氖激光源 (1—3mW)，全息工作台，分束板，全反射镜 (2 个)，扩束镜 (2 个)，全息干板，有关光学元件调整架，显影、定影及漂白水，搪瓷盘，安全灯。

三、实验做法：

A. 拍摄

1. 按全息照相的光路图布置好光学元件。

2. 使物光和参考光的光程差尽量小（几厘米以内）。
3. 使物光和参考光的夹角为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 。
4. 使物光和参考光的光强比为 2:1—10:1。
5. 光路中各光学元件牢固稳定。
6. 避免杂光干扰，无振动和气流的扰动。
7. 被摄物及全息感光板应被均匀地照明。
8. 安置感光板时用遮光板遮住激光，并注意感光胶面应向着激光束，移动感光板曝光，经显影定影处理，漂洗凉干，即成全息照片。

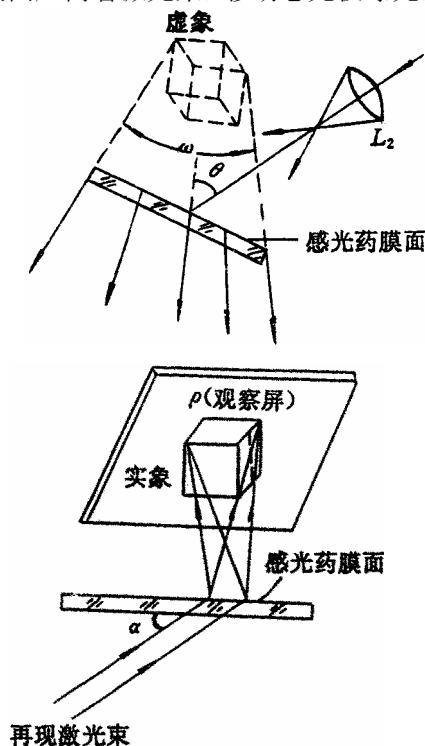
（拍摄的具体参数由实验室提供）

B. 再现物象

1. 虚象观察：可利用下图所示的光路，将全息照片放入一束被扩大了光束截面的激光束中，用眼睛透过全息照片，朝照片后观察，寻找再现物象。

2. 实象观察：按如图所示的再现光路观察再现实象，即利用未扩束的激光直射全息照片的玻璃片基板（反面），选取适当的夹角 α 利用毛玻璃漫射观察屏 p 来接收。注意：再现入射光束的入射点不同时，再现实象视差和清晰程度不同，若观察屏与全息照片距离不同时，屏上所截得象的大小和清晰程度也不同，只有象质最佳的位置才为实象的位置。

3. 将再现激光换成钠光灯（ $5890 \text{ \AA}$ 和 $5896 \text{ \AA}$ ）、汞灯（ $4358 \text{ \AA}$ 和 $5461 \text{ \AA}$ ）或日光灯甚至点状白炽灯作为再现光源，观察并记录全息照片再现物象的变化。



四、总结观察结果：

分析全息照相与普通照相的异同

五、注意事项

1. 不能直接用眼睛直视未扩束的激光束，以免造成视网膜永久损伤。
2. 切勿用手指、手帕、毛巾或纸片擦拭各元件的光学表面，以免损坏元件。
3. 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。

第三章 选做物理实验

(十七) 惠斯登电桥测电阻

一、实验内容

1. 自组电桥测电阻；
2. 用箱式电桥测电阻；
3. 测箱式电桥的灵敏度。

二、观测依据

1. 电桥原理图

右图是惠斯登电桥的原理图， R_1 、 R_2 和 R_s 是三个电阻，

R_x 是被测电阻， G 是检流计， E 是电源。

平衡时有：

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s = K R_s$$

$K = \frac{R_1}{R_2}$ ，称为倍率，实验中 K 取 10 的整数次幂。

2. 如果测

(1) 自组电桥： R_1 、 R_2 和 R_s 是电阻箱，其阻值可以直接读出，单位是欧姆。读出它

们的值后就可以算 R_x 。

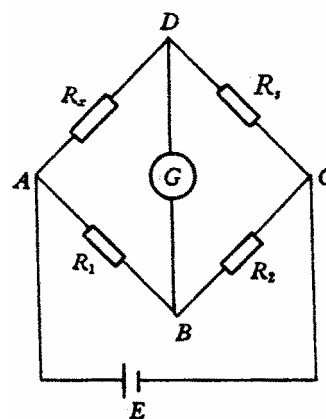
(2) 箱式电桥：它不能分别读出 R_1 和 R_2 ，只能从“倍率”钮指示读出 $K(= R_1/R_2)$ ，

K 是一纯数； R_s 可以从箱式电桥的对应旋钮指示读出，单位为欧姆。

3. 电桥灵敏度 S 定义为：

$$S = \frac{\Delta n}{\Delta R_s / R_s}$$

其中， Δn 是平衡后， R_s 改变 ΔR_s 时检流计偏转的格数。



三、实验做法

1. 自组电桥

(1) 按原理图接好线路。(接线建议：先把 R_1 、 R_2 、 R_s 和 R_x 串联起来，然后在一条对角线上接检流计，在另一条对角线接电源)。

(2) 接好线并检查无误后就可以进行测量。

A. 测一个几十欧 (R_{x1}) 的电阻，测量 5 次 (平衡之后读取第一次数据，旋转 R_s 破坏平衡，再调 R_s 达到平衡，读取第二次数据。反复 5 次读数就完成了 5 次测量。注意：不要动 R_1 、 R_2 ，只动 R_s)。

B. 选择两个合适倍率，测一个几百欧的电阻 (R_{x2})，每个倍率只测 1 次。

C. 用交换法测一个几千欧的电阻 (R_{x3})，交换前后都只测一次。(建议交换 R_s 与 R_x 的位置；倍率选为 1)。

特别提醒：

(1) 要让倍率为 10 的整数次幂和测量结果至少有四位有效数字的关键是 R_1 和 R_2 的选取。

如测一个几百欧的电阻 (如 500.0Ω 左右)：

当 R_1 取 100.0Ω (请注意电阻箱的最小一档是 $\times 0.1\Omega$)， R_2 取 100.0Ω ，即 $K=1.000$ ， $R_s=512.4\Omega$ ， $R_x=KR_s=512.4\Omega$ ；

当 R_1 取 100.0Ω ， R_2 取 1000.0Ω ，即 $K=0.1000$ ， $R_s=5124.3\Omega$ ， $R_x=KR_s=512.4\Omega$ ；(按有效数字运算法则结果只能有 4 位)，以上两个倍率都符合我们要求。

当 R_1 取 10.0Ω ， R_2 取 100.0Ω ，即 $K=0.100$ ， $R_s=5123.4\Omega$ ， $R_x=KR_s=512\Omega$ ；尽管倍率对了，由于凡取值不当，未能保证结果有 4 位有效数。看来 R_1 和 R_2 必须选 $\times 100$ 这档以上，否则测量结果不能保证 4 位有效数字。

当 R_1 取 1000.0Ω ， R_2 取 100.0Ω ，即 $K=10.00$ ，只能读到 51.2Ω ，因为， $R_x=KR_s=10.00\times 51.2\Omega=512\Omega$ ，不能保证结果有 4 位有效数字。看来 R_1 和 R_2 的比，即 K 是不能任意选取的，否则不能保证测量结果的有效数字位数。

(2) 实际上电阻箱的相对误差也要求我们用 $\times 100$ 档以上的档，因为 $\times 100$ 档以上的相对误差是 $1/1000$ ，而 $\times 100$ 档以下相对误差大于 $1/1000$ ，越小的档，相对误差越大。

2. 箱式电桥

分别用箱式电桥测 R_{x1} 、 R_{x2} 、 R_{x3} 的电阻值，其中 R_{x2} 即几百欧的那个电阻测量 5 次，其余的只测 1 次即可。

(1) 根据被测电阻的阻值范围，选取合适的比率 K (注意，箱式电桥是不能选 R_1 、 R_2 的)。

还是测一个 500.0 欧左右的电阻， K 取 0.1， $R_s = 5124\Omega$ ， $R_x = K \cdot R_s = 0.1 \times 5124\Omega = 512.4\Omega$ ，测量，保证结果有效数字有 4 位。

如果 $K=1$ ， $R_s = 512\Omega$ (箱式电桥 R_s 有 $\times 1000$ 、 $\times 100$ 、 $\times 10$ 、 $\times 1$ 四档，没有 $\times 0.1$ 档)， $R_x = KR_s = 512\Omega$ ，测量结果没有 4 位有效数字，比率选择不当，只有选 $\times 0.1$ 档才能保证有效数字为 4 位。

其实测任何一个范围内的电阻，比率 K 只能选一个，而不象自组电桥可以选一个以上。

(2) 5 次测量的测量法与自组电桥相同。

3. 测箱式电桥的灵敏度

三个被测电阻的灵敏度都测。

当测某一电阻平衡时 (检流计指针指在 0) 记录 R_s 的值，然后改变 R_s ，记录下 R_s 的改变量 ΔR_s ，同时记下检流计指针偏转的格数 Δn ，代入公式中就可算出它的灵敏度 S 。

其实不需要把每个电阻测量完后 (即完成了 2 的步骤后) 再进行占的测量，在测量电阻的同时就可以进行 S 的测量。

四、数据记录和处理

1. 记录表格

自组电桥

	$R_1(\Omega)$		$R_2(x)$		$R_s(\Omega)$			$R_x(\Omega)$
	数值	等级	数值	等级	数值	等级		
R_{x1} (几十欧)					1			
					2			
					3			
					4			
					5			
					平均			
R_{x2} (几百欧) (选不同比率)								平 均

R_{x3} (几千欧) (交换法)								平 均

箱式电桥：准确度等级： $a =$

	K	$R_s(\Omega)$		$\Delta R_s(\Omega)$	Δn (格)	$R_x(\Omega)$		S (格)
R_{x1} (几十欧)								
R_{x2} (几百欧)		1				1		
		2				2		
		3				3		
		4				4		
		5				5		
		平均				平均		
R_{x3} (几千欧)								

2. 数据处理 (计算不确定度)

(1) 自组电桥只计算 R_{x1} 的不确定度

$$\frac{\sigma_{R_{x1}}}{R_{x1}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_1}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_2}}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_s}}{R_s}\right)^2}$$

其中

$$\sigma_{R1}^2 = S_{R1}^2 + u_{R1}^2 = u_{R1}^2 = \left(\frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_1 \% \cdot R_1}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (R_1 \text{ 是单次测量, } S_{R1} = 0)$$

$$\sigma_{R2}^2 = S_{R2}^2 + u_{R2}^2 = u_{R2}^2 = \left(\frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{a_2 \% \cdot R_2}{\sqrt{3}}\right)^2 \quad (R_2 \text{ 是单次测量, } S_{R2} = 0)$$

$$\sigma_{Rs}^2 = S_{Rs}^2 + u_{Rs}^2 = \left[\sqrt{\frac{\sum (R_{si} - \bar{R}_s)^2}{5(5-1)}} \right]^2 + \left(\frac{a_3 \% \cdot R_s}{\sqrt{3}} \right)^2$$

上列几式中, $\Delta_{\text{仪}} = a\% \cdot R$ 是电阻箱仪器误差计算的公式, 其中 $a\%$ 是相对误差 (对 ZX21 电阻箱, 不同阻值的档相对误差不尽相同。比如 $\times 100$ 、 $\times 1000$ 、 $\times 10000$ 档相对误

差是 0.1%，而 $\times 10$ 、 $\times 1$ 、 $\times 0.1$ 档分别为 0.2%、0.5% 和 1.0%。前面已经提到，我们要求使用 $\times 100$ 档以上的阻值，这样相对误差都是 0.1%，即 $a_1 = a_2 = a_3 = 0.1$ ；而 R 是电阻箱的示值（即使用的阻值）。

如果代入传递公式中有

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{Rx1}}{R_{x1}} &= \sqrt{\left(\frac{0.1\% \cdot R_1 / \sqrt{3}}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{0.1\% \cdot R_2 / \sqrt{3}}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{0.1\% \cdot R_s / \sqrt{3}}{R_s}\right)^2 + \left[\sqrt{\frac{\sum (R_{si} - \bar{R}_s)^2}{5(5-1)}} / R_s\right]^2} \\ &= \sqrt{3 \left[\frac{0.1\%}{\sqrt{3}}\right]^2 + \left[\sqrt{\frac{\sum (R_{si} - \bar{R}_s)^2}{5(5-1)}} / R_s\right]^2} = \sqrt{(0.1\%)^2 + \left[\sqrt{\frac{\sum (R_{si} - \bar{R}_s)^2}{5(5-1)}} / R_s\right]^2} \\ \sigma_{Rx1} &= R_{x1} \cdot \sqrt{(0.1\%)^2 + \left[\sqrt{\frac{\sum (R_{si} - \bar{R}_s)^2}{5(5-1)}} / R_s\right]^2} \end{aligned}$$

(2) 箱式电桥只计算 R_{x2} 的不确定度

A 类不确定度为

$$S_{Rx2} = \sqrt{\frac{\sum (R_{x2i} - \bar{R}_{x2})^2}{5(5-1)}}$$

B 类不确定度为

$$u_{Rx2} = \Delta_{ix} / \sqrt{3} = K \cdot R_{\max} \cdot a\% / \sqrt{3}$$

式中 K 是倍率， $R_{\max}$ 是电桥 R_s 的最大值，即 $R_{\max} = 9999\Omega \approx 10000\Omega$ （计算时都取 10000Ω ）。

$$\sigma_{Rx2} = \sqrt{S_{Rx2}^2 + u_{Rx2}^2}$$

最后都要写成

$$R_x = \bar{R} \pm \sigma_{Rx}$$

五、注意事项

1. 为了保证测量精度和保护检流计，使用检流计按钮时要采用“跃接法”。介绍跃接法前先介绍一下检流计。

检流计上有两个按钮开关。一个标有“电计”的按钮开关，按下之后检流计接通，放

松后检流计断开，如果按下按钮后顺时针旋转 90° 左右即可把开关锁死，使检流计一直处于接通状态。实验过程中，需接通检流计时，按下此按钮（一定不要旋转锁死），观察检流计指针的偏转。如果指针偏转很大（比如超过了表头刻度两端的刻度线），应立即松开按钮断开检流计。待调整电路阻值后，再按下按钮观察检流计指针偏转，只有当指针偏转较小之后才能旋转按钮锁死进行下一步的调整，直到指针指到零（千万不要在指针偏转很大时把按钮锁死来进行调整，使指针指到零，这很容易损害检流计）。这就是“跃接法”。

检流计上还有另外一个“短路”按钮，按下它之后检流计短路，可让摆动的指针很快停下来。另外，检流计上还有搬钮，当它指向白点时，检流计指针被锁死不动，平时不使用时应指向这个位置，当它指向红点时，检流计指针自由，实验时当然应当指向这个位置。

2. 在做实验时，特别是做自组电桥时，会碰到检流计指针始终不动或始终调不平衡。

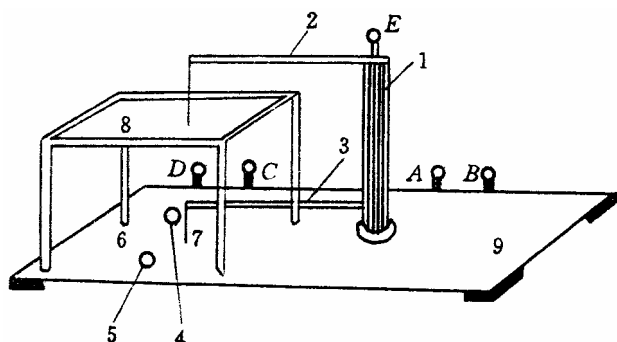
（1）如果不动，你首先看检流计的按钮指在红点还是白点，如果在白点就要般向红点；假如已指在红点仍不动，你就要看电源有无电压输出；如果有输出也不动，就需检查联接检流计的两根导线或联接电源的两根导线有没有不通的。经过这几步后，一般能找出不动的原因。

（2）如果始终不平衡，你首先看你选择的倍率与 R_s 的乘积是否在被测电阻的标称值左右（如一个 500Ω 左右的电阻，你可以在 $300\sim 700\Omega$ 的范围内调节），如果已达到这个要求还调不平，就可以检查联接三个电阻箱与被测电阻的四条导线是否有不通的，一般就可找出原因（当然电阻箱和被测电阻是好的是它的前提条件）。

(十八) 静电场模拟

一、实验内容

模拟各种电极间的静电场分布。



1—探针架 2、3—簧片
4、5—电极 6—导电玻璃
7—探针 8—记录纸 9—平台
E、A、B、C、D—接线柱

图 1 模拟装置图

二、观测依据

图 1 中的 4、5 是“点状对电极”的两个电极，它固定在放有导电玻璃 6 的板上。两极与接线柱 D、C 分别连通。当电压从电源的“输出”接线柱通过导线输给 D、C 接线柱时，4、5 两个电极就有一电势差，在导电纸上形成电场。7 是探针（导体），它能采集导电玻璃上任一位置与低电势电极之间的电势差（电压），它可以通过 E 接线柱利用导线把这一电势差从电源的“输入”接线柱输入电表，电表就能把电压指示出来（注意：由于地线是连通的，故由探针探得的电压输入到电源的电压表时，只接一根导线即可，地线就不需接了）。探针可以移动，能够达到导电玻璃的任何位置，每一个位置，都能在电源的电压表中读出电压值（如果把低电势电极的电势视为 0，这个电压值就是该点的电势），电压值相等的点，就是等势点。

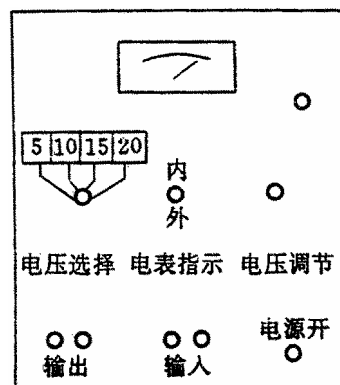


图 2 电源图

三、实验做法

1. 将电源的“输出”端分别与模拟装置的“D、C”接线柱相接，再将探针上的接线柱“E”与电源的“输入”端接通（只接一根导线到输入的“+”极）。
2. 将电源的“电表指示”开关拨向“内”，“电压选择”开关放在“10V”档，利用“电压调节”旋钮（它可使电压连续变化）将表头指针调到“10V”的位置上。当到达 10V 后就可把“电表指示”拨向“外”了（此时显示的电压值不再是输出的电压，而是输入的电势差了）。

3. 首先将探针分别放在电极上，找出电极所在位置。
4. 移动探针，先找出“5V”对应的系列等势点。
5. 相邻等势线间电压取“1V”，分别找出其余各等势点，一共应描出 9 条等势线。
6. 若要画其它电极的电场分布时，将导线接到相应的接线柱即可。

四、数据记录和处理

将记录在记录纸上的各等势点按作图法画出光滑的等势曲线簇，并标出每条等势线的电势值，同时画出电力线。

分析你描出的等势线。

五、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：“内”显示输出，“外”显示输入。

(十九) 电子束的静电聚焦与电磁偏转

一、实验内容

1. 观察静电聚焦现象及测量组合聚焦比。
2. 静电偏转现象观察与电偏灵敏度的测量。
3. 磁偏现象与磁偏灵敏度的测量。

二、观测依据

1. 本实验的所有内容都是通过 SI—SS 电子束实验仪和五组导联线（六个插头一组，五个插头一组，二个插头三组）来完成。

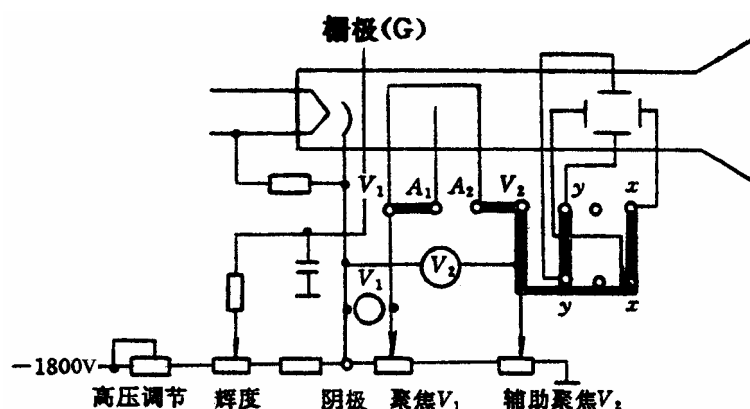


图 1 电聚焦接线原理

2. 电聚焦

电聚焦电路原理图如图 1 所示。图中粗线所示即为电聚焦实验时示波管内各极工作电压的连通状态。

其组合聚焦比 $K = V_2 / V_1$ ，其中 V_1 为聚焦电压， V_2 为辅助聚焦电压，它们都可以直接从电子束实验仪上读出，单位为伏。

3. 电偏转

图 2 是电偏转接线原理图，图中粗线所示即为电偏转实验时示波管内各电极工作电压的连通状态。

$$\text{电偏灵敏度: } \delta_{\text{电}} = \frac{S}{V}$$

其中 V 为偏转电压（即电偏压）， S 为加上偏转电压后亮点的偏转量，它们都可以从电子束实验仪上直接读出。 V 的单位是伏特， S 的单位为 cm 。

4. 磁偏转

图 3 是磁偏转接线原理图。图中粗线所示即为电偏转实验时示波管内各电极工作电压

的连通状态。

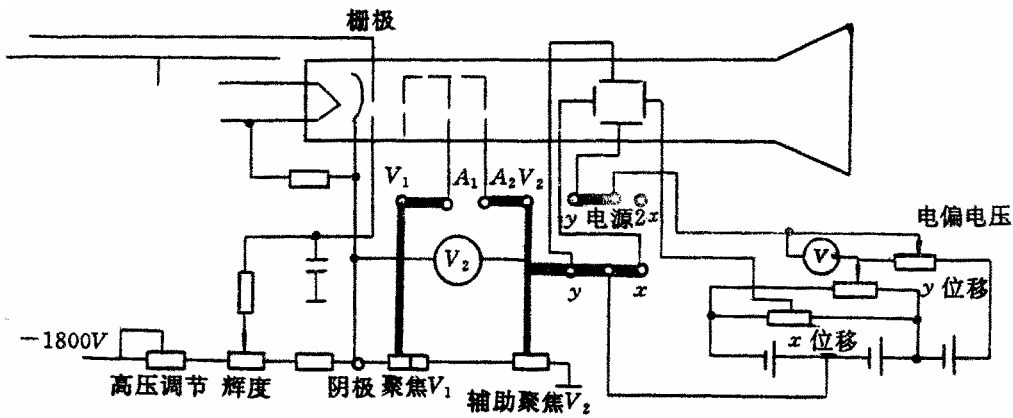


图 2 Y 电偏接线原理

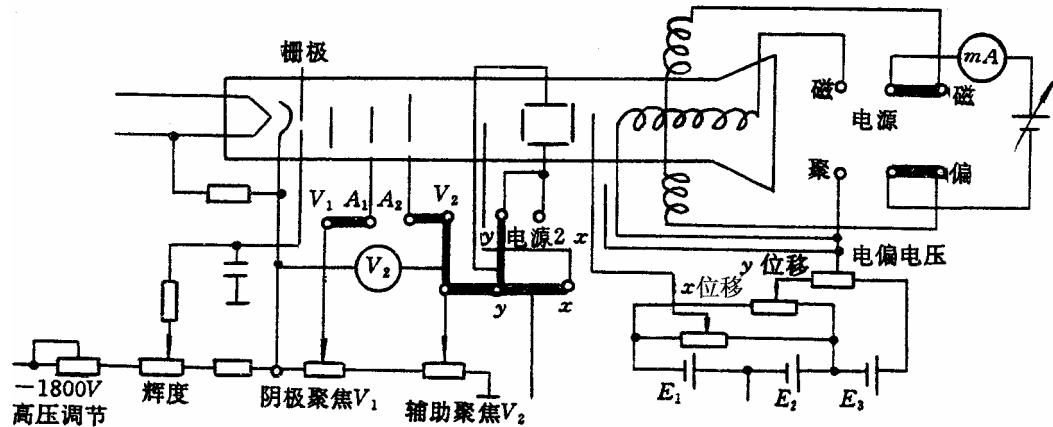


图 3 磁偏转接线原理

$$\text{磁偏灵敏度: } \delta_{\text{磁}} = \frac{S}{I}$$

其中 I 为励磁电流，单位为毫安； S 为加上励磁电流 I 后亮点的偏转量，单位为 cm ，它们都可以从电子束实验仪上读出。

三、实验做法

1. 电聚焦

(1) 如图 4 那样进行连线（连线时一定要关掉电源，严禁带电连线），再将“功能选择”开关置于“电聚”位置并检查连线无误后就可接通电源。

(2) 调节“辅助聚焦” V_2 ，使“KV”表 V_2 指示为 800V。

(3) 调节“辉度”适中（不要太亮），再调“聚焦” V_1 使光点为一小圆点（即聚焦）

读出“mA-V”表的指示值。

(4) 改变 V_2 ，重复 3 的操作步骤，测出对应的 V_1 值，要求测 6 组数据。

2. 电偏转

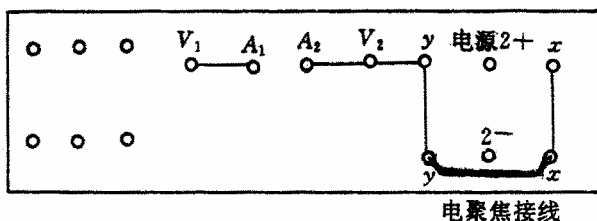


图 4 电聚焦接线

(1) 水平偏转

(A) 如图 5 那样进行连线（同样要关掉电源后进行），再将“功能选择”开关置于“X 电偏”位置并检查连线无误后，接通电源。

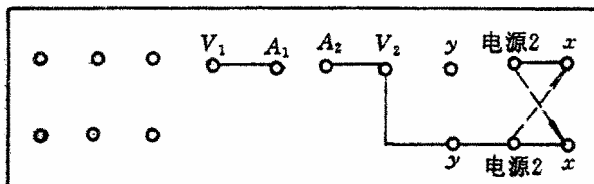


图 5 x 电偏接线

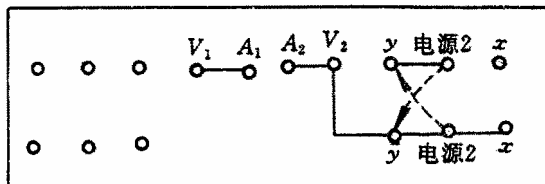


图 6 y 电偏接线

(B) 调节“辉度”适中，将“辅助聚焦” V_2 调至 1.00×10^3 状，再调“聚焦” V_1 让光点聚焦（出现清晰的圆点）。

(C) 调节“电偏压”旋钮使“mA-V”表指示为零，再调节“X 位移”和“Y 位移”将光点移至坐标原点（这一步要严格照此调节，调好后，X、Y 位移应保持不变）。

(D) 改变电偏电压。读取“mA-V”表中相应的电偏电压值 V 和荧光屏上光点偏移量 S 。要求测量 7 组数据（包括偏移量 $S=0$ 那一组）。

(2) 垂直偏转

(A) 关掉电源后，按图 6 所示的那样进行连线（严禁带电连线！），将“功能选择”开关置于“Y 电偏”位置。

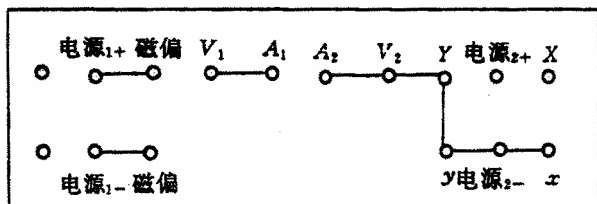


图 7 磁偏转功能接线

(B) 以下步骤与水平偏转相同。也是要求测量 7 组数据。

3. 磁偏转

(1) 关掉电源，按图 7 那样连线（严禁带电连线!），再把“功能选择”开关置于“磁偏”位置并检查连线无误后，就可接通电源。

(2) 调节“辅助聚焦” V_2 于 1.00×10^3 伏，再调“聚焦” V_1 让光点聚焦，同时把“辉度”调得适中（注意保持 V_2 不变）。

(3) 调节“励磁电流”旋钮，反时针旋到零（这一步一定不要马虎，否则有损坏仪器的危险），接通“励磁电源”开关，顺时针调节“励磁电流”旋钮，使光点偏移，每偏移 0.50cm (s)，读出相应的励磁电流 I。

要求测量出 6 组数据（包括 s=0.00 那一次）。

四、数据记录与处理

1. 记录表格

表 1 电聚焦观测记录

辅助聚焦电压 U_2 (伏)	8.0×10^2	9.0×10^2	1.00×10^3	1.10×10^3	1.20×10^3	1.30×10^3
聚焦电压 U_1 (伏)						

表 2 电偏数据测试表 $V_2 = 1.00 \times 10^3$ (伏)

偏移量 S (cm)	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
Y 电偏电压 V (伏)							
X 电偏电压 V (伏)							

表 3 磁偏数据测试表

测试条件	加速电压 $V_2 = 1.00 \times 10^3$ (伏)					
测量次数	1	2	3	4	5	6
偏移量 S (cm)	0.00	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
励磁电流 I (mA)						

2. 数据处理

(1) 用逐差法处理数据，求出组合聚焦比 K 的平均值 $\bar{K}$ ，不确定度 $\sigma_{\bar{K}}$ 并写出结果表达式。

(A) 逐差法求 K 的平均值

$$\bar{K} = \frac{(V_{26} - V_{23}) + (V_{25} - V_{22}) + (V_{24} - V_{21})}{(V_{16} - V_{13}) + (V_{15} - V_{12}) + (V_{14} - V_{11})}$$

(B) 求不确定度

$$\frac{\sigma_{\bar{K}}}{\bar{K}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_2}}{V_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_1}}{V_1}\right)^2} \quad \sigma_{\bar{K}} = \bar{K} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{V_2}}{V_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{V_1}}{V_1}\right)^2}$$

其中 $\sigma_{V_2} = \sqrt{S_{V_2}^2 + u_{V_2}^2} = u_{V_2}$ (用逐差法处理后, V_2 视为单次测量)

$\sigma_{V_1} = \sqrt{S_{V_1}^2 + u_{V_1}^2}$ (逐差法处理后, V_1 是多次测量)

其中 $u_{V_2} = \frac{2000 \times 1.5\%}{\sqrt{3}}$ (伏) (KV 表是 1.5 级表, 满量程是 2000 伏)

$u_{V_1} = \frac{50 \times 3 \times 1.5\%}{\sqrt{3}}$ (伏) (mA-A 表是 1.5 级表, 满量程是 50×3 伏)

$$S_{V_1} = \sqrt{\frac{\sum (V_{1i} - \bar{V}_1)^2}{3(3-1)}}$$

(C) 结果表达式

$$K = \bar{K} \pm \sigma_{\bar{K}}$$

(2) 用表 2 数据在直角坐标纸上作 S-V 图。按图说明 X、Y 偏移量与相应的电偏电压的关系, 然后用图解法求出电偏灵敏度 δ_x 、 δ_y 。

(3) 用逐差法求磁偏灵敏度 $\delta_{\text{磁}}$ 。

$$\delta_{\text{磁}} = \frac{(S_4 - S_1) + (S_5 - S_2) + (S_6 - S_3)}{(I_4 - I_1) + (I_5 - I_2) + (I_6 - I_3)}$$

不求不确定度。

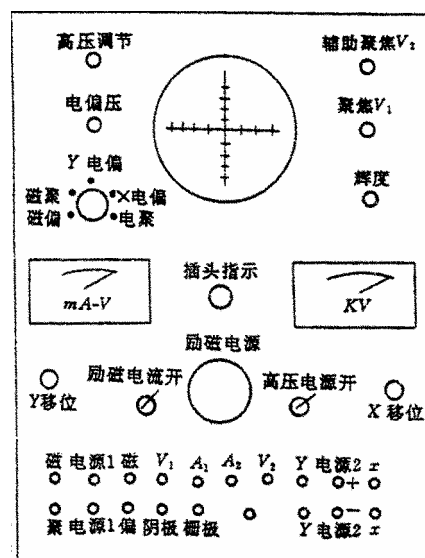
五、注意事项

1. 对电子束实验仪作一些介绍。

(1) 辅助聚焦 V_2 是高压, 它的大小需要用“辅助聚焦 V_2 ”旋钮和“高压调节。旋钮配合调节才能达到我们的要求, 特别是 800V 以上, 电压值的显示由“KV”表完成。

(2) 聚焦电压 V_1 的大小可通过“聚焦 V_1 ”旋钮调节, 它的大小可以从“mA-V”表读出。

在这里说明一点: “mA-V”表是磁偏电流、磁聚焦电流、电偏电压和电聚焦电压 V_1 共同使用的表。



电流是 mA，电压单位是 V，最大刻度是 50。在表头上标有 $\times 1$ ， $\times 20$ — $\times 3$ ， $\times 15$ 字样，它分别表示：磁偏电流满量程是 $50 \times 1\text{mA} = 50\text{mA}$ ，磁聚焦电流满量程是 $50 \times 20\text{mA}$ ，电偏电压满量程是 $50 \times 3\text{V}$ ，电聚焦电压满量程是 $50 \times 15\text{V}$ 。

(3)“励磁电源”是提供励磁电流的，旋转此旋钮可改变其大小，I 的值可以从“mA—V”表中读出。励磁电流通与不通专门有一“励磁电流”开关控制，向上为导通，向下为断开。特别提醒：在打开“励磁电流”开关前，一定先要向左旋转“励磁电源”旋钮至零，切切不可忘记!!! 另外，不用励磁电流时，一定要关掉。

(4)“高压电源”开关是整个仪器的开关，注意：连线和拆线都要关掉此开关!!!

2. 此实验有高压工作，严禁带电操作，确保安全。

连线上除注意上述要关掉“高压电源”开关外，如只需五个插头的不要用六个插头；若用了必然有一插头悬空而带电，很不安全。

（二十）偏振光的特性

光的干涉和衍射现象揭示了光的波动性，而光的偏振现象却直接有力地证明了光波是横波。光的偏振现象已广泛运用于光开关、光调制器、应力分析等科研和生产实际中。本实验通过对偏振光的观察和分析，加深对光的偏振基本规律的理解。

一、实验目的

1. 观察光的偏振现象，掌握产生偏振光的方法和检验方法。
2. 学习用光电转换的方法测定相对光强，验证马吕斯定律。
3. 了解波片的作用及椭圆偏振光产生和检验方法。

二、实验仪器

激光器，白光源， $\lambda/4$ 波片， $\lambda/2$ 波片，起偏器，检偏器，微电流放大器，光电池，光具座

三、实验原理

1. 自然光和偏振光

光波是横波，光波电矢量的振动方向垂直于光的传播方向。通常光源发出的光波，其电矢量的振动在垂直于光的传播方向上作无规则的取向。从统计规律看，在空间所有可能的方向上，光波电矢量的分布可看作是机会均等的，它们的总和与光的传播方向对称。这种光称为自然光。由于自然光通过媒质的折射、反射、吸收和散射后，使光波的电矢量的振动在某个方向具有相对的优势，而使其分布对传播方向不再对称。具有这种取向作用的光，统称为偏振光。

偏振光可分为部分偏振光、平面偏振光（线偏振光）、圆偏振光和椭圆偏振光。如果光波电矢量的振动在传播过程中只是在某一确定的方向上占有相对优势，则这种偏振光称为部分偏振光。如果光波电矢量的振动方向只局限在某一确定的平面内，则这种偏振光称为平面偏振光；因其电矢量的末端的轨迹为一横线，故又称为线偏振光，如图 1 所示。如果光波电矢量随时间作有规则的改变，即电矢量末端在垂直于传播方向的平面的轨迹呈圆形或椭圆形，则称为圆偏振光或椭圆偏振光，如图 2 所示。

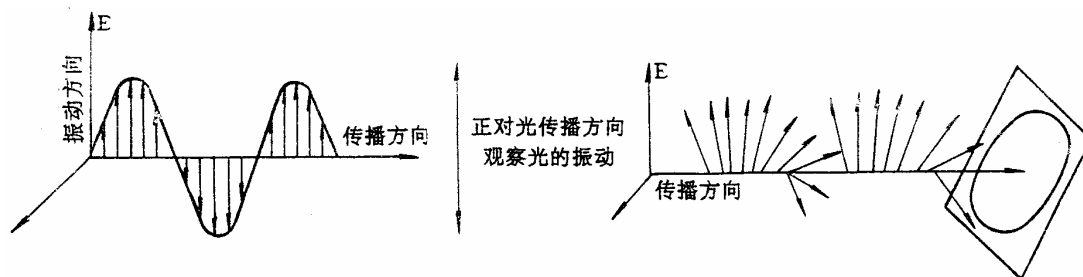


图 1 平面偏振光 图 2 椭圆偏振光

能使自然光变成偏振光的装置或器件，称为起偏器。用来检验偏振光的装置或器件，称为检验器。实际上，任何起偏器都可看作为检偏器。

2. 平面偏振光的产生和特性

产生平面偏振光的方法有：反射产生偏振，多次折射产生偏振，双折射产生偏振和选择性吸收产生偏振。本实验采用具有选择吸收的偏振片产生平面偏振光。

有些晶体对两个振动方向相互垂直的光波电矢量具有不同的吸收本领，这种选择性吸收，称为二向色性。当自然光通过二向色性晶体时，振动的电矢量与晶体光轴垂直时几乎被完全吸收；电矢量与光轴平行时几乎没有损失，于是，透射光就成为平面偏振光。

偏振光是用人工方法制成的薄膜，具有二向色性，是用特殊方法使选择性吸收很强的微晶体在透明胶质层中作有规律的排列而制成，它允许透过某一电矢量振动方向的光（此方向称为偏振化方向），而吸收与它垂直方向振动的光。因此，自然光通过偏振片后，透射光基本上成为平面偏振光。由于偏振片易于制作，所以它是普遍使用的偏振器。

如图 3 中， MM' 和 NN' 分别表示起偏器和检偏器的“偏振化方向”，夹角为 θ ，令 A_0 为通过起偏器的振幅，将 A_0 分解为 $A_0 \cos \theta$ 和 $A_0 \sin \theta$ ，其中只有平行于检偏器 NN' 的分量 $A_0 \cos \theta$ 可以通过检偏器。设 I_0 和 I 分别为透过起偏器和检偏器的光强，透过检偏器的光振幅 $A = A_0 \cos \theta$ ，因光强度与振幅平方成正比，所以 $I/I_0 = A^2/A_0^2$ ，故透过检偏器的光强为

$$I = I_0 A_0^2 \cos^2 \theta / A_0^2 = I_0 \cos^2 \theta \quad (1)$$

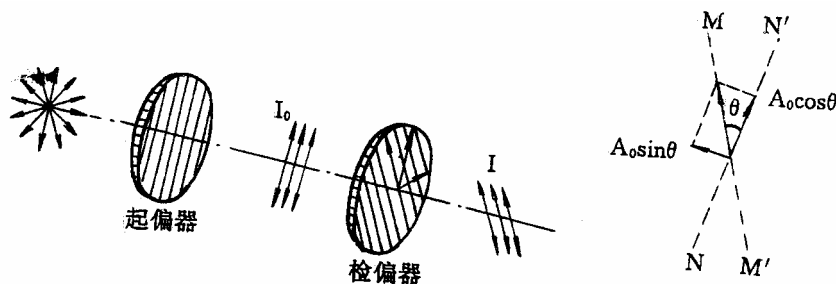


图 3 自然光通过起偏器和检偏器的变化

式 (1) 称为马吕斯定律。

根据马吕斯定律，平面偏振光透过检偏器的光强随偏振面和检偏器的“偏振化方向”之间夹角 θ 而变化。当 $\theta = 0$ 或 π 时，透射光强度最大，而当 $\theta = \pi/2$ 或 $3\pi/2$ 时，透射光强为零，即当检偏器转动一周时会出现两次消光现象。

3. 椭圆和圆偏振光的产生： $\lambda/4$ 波片的作用

波片是从单轴双折射晶体上平行于光轴方向切下的薄片。若平面偏振光垂直入射波片，且其振动面（振动方向与传播方向所确定的平面）与波片的光轴成 α 角，则在波片内入射

光就分解为振动方向互为垂直的两束平面偏振光，称为 o 光和 e 光，如图 4 所示。它们的传播方向一致，因在晶体内传播速度不同而产生一定的位相差，当它们经过厚度为 D 的波片时，光程差为 $(n_0 - n_e) d$ ，即相应的位相差为

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_0 - n_e) d \quad (2)$$

式中： λ 为入射光波长； n_0 和 n_e 分别为波片对 o 光和 e 光的折射率。

显然，通过晶片后的偏振光，将是沿同一方向传播的两个平面偏振光叠加的结果。由于 o 光和 e 光的振幅不等，有一定相位差，且振动方向互相垂直，一般合成为椭圆偏振光。椭圆的形状随 o 光和 e 光的相位差 δ 值的不同而改变，对于同种晶体，决定椭圆形状的因素是入射光的振动方向与光轴的夹角 α 以及晶片的厚度 d 。如图 5 所示。

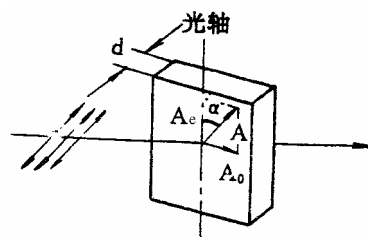


图 4 平面偏振光透过波片

若位相差 $\delta = 2K\pi$ ， $K = 1, 2, 3, \dots$ ，则

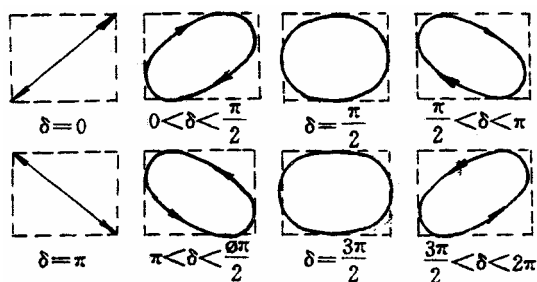


图 5 不同 δ 值的椭圆形状

$$2K\pi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_0 - n_e) d$$

$$d = \frac{k\lambda}{(n_0 - n_e)} \quad (3)$$

故波片的厚度为波长的整数倍，称为全波片。从波片透射的光为平面偏振光。

当 $\delta = (2K+1)\pi$ ， $K = 1, 2, 3, \dots$ ，则

$$d = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{(n_0 - n_e)} \quad (4)$$

称为 $\frac{1}{2}\lambda$ 波片，从波片透射出的光为平面偏振光，但振动面相对于入射光转过 2α 角。

当 $\delta = (2K+1)\pi/2$ ， $K = 1, 2, 3, \dots$ ，则

$$d = \frac{\lambda}{4} \frac{1}{(n_0 - n_e)} \quad (5)$$

称为 $\frac{1}{4}\lambda$ 波片。一般透射光为椭圆偏振光。但是，当 $\alpha = 0$ 或 $\alpha = \pi/2$ 时，透射光为平面偏

振光。当 $\alpha = \pi/4$ 时，透射光为圆偏振光。如图 6 所示。

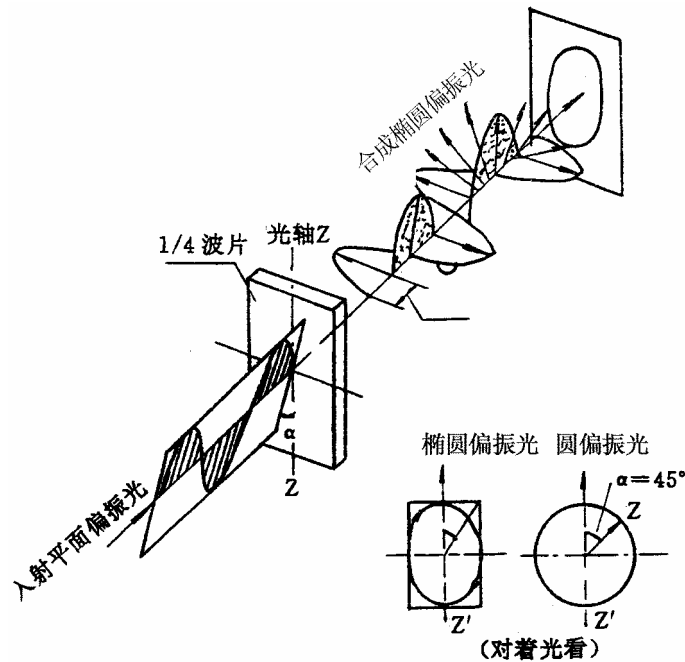


图 6 圆、椭圆偏振光

4. 偏振光干涉及人为双折射现象

如图 7 所示，在两个正交放置的偏振片之间（即两个偏振化方向处于垂直）插入一块双折射物质（例如石英片、玻璃纸等），从 P_2 的一端迎光望去，就可以看到偏振光干涉产生的美丽的颜色。但是，如果插入的是一块透明的各向同性物质 C （例如透明的塑料、玻璃等），一般就没有光从 P_2 中透出，可是一旦使 C 受到挤压或拉伸，其内部立即会沿受力方向出现人为的“光轴”，使 C 显现出人为双折射性。线偏振光通过 C 被分解为振动方向互相垂直、彼此间又具有一定位相差的两束线偏振光，故通过检偏器 P_2 后引导到同一振动方向而产生干涉。

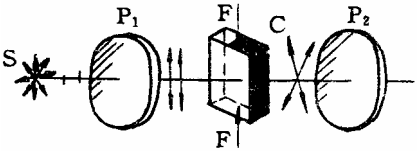


图 7 观察人为双折射

因光源 S 是白光，所以出现彩色的干涉条纹。工业上常用模拟实验的方法来分析某些机械部件或工程构件在实际使用条件下内部的应力分布。

四、实验内容和步骤

1. 研究平面偏振光特性和验证马吕斯定律

转动起偏器 p_1 ，使 p_1 与 p_2 的偏振化方向平行（或正交），此时电表示值为最大（或最小），即此时 p_1 、 p_2 的偏振化方向夹角 $\theta = 0$ （或 $\theta = \frac{\pi}{2}$ ）；转动起偏器 p_1 ，使 α 角每改变

15°记录一次电表读数，直至 p_1 旋转一周。

2. 研究椭圆偏振光、圆偏振光的特性

(1) 转动 p_1 ，使 p_1 、 p_2 两个偏振化方向正交；在 p_3 处放置 $\frac{\lambda}{4}$ 波片，使 P_1 转过一个适当的角度，即使入射 $\frac{\lambda}{4}$ 波片的平面偏振光的振动面与波片的光轴成一定的夹角 α 。

(2) 转动 p_2 ，使之每转 15°角记录一次电表的读数，直至 p_2 旋转一周。

(3) 转动 p_1 ，使 $\alpha = 45^\circ$ ；缓慢转动 p_2 一周，观察电表读数的变化，并作出相应的记录。

(4) 转动 p_1 ，使 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ；缓慢转动 p_2 一周，观察电表读数的变化，并作出相应的记录。

3. 观察偏振光的干涉及人为双折射现象

用白光源调节 P_1 和 P_2 的偏振化方向垂直，使视场全黑。然后，将厚度不同的具有双折射性质的玻璃纸劈插入 P_1 和 P_2 的光路中间，则全暗的视场出现鲜明的干涉色彩；将 P_1 转过 90°，即由原来的正交系统变成平行系统，原来产生相长干涉（或相消干涉）的光变成相消干涉（或相长干涉），因此，同一厚度处的颜色变为对应的互补色（能合成白色的任何两种色称为互补色）。

(2) 在 P_1 和 P_2 之间换插一块各向同性的环氧树脂板，并侧向对其施加压力，观察人为双折射现象。要注意施力大小不同时，颜色条纹的变化：从干涉花样就可分析介质内部的应力分布。

五、数据记录和处理

1. 研究平面偏振光特性

(1) 数据记录

$\theta/^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	105
U/mV								
$\theta/^\circ$	120	135	150	165	180	195	210	225
U/mV								
$\theta/^\circ$	240	255	270	285	300	315	330	345

U/mV								
--------	--	--	--	--	--	--	--	--

(2) 以 U 为极轴，用极坐标纸作 $U-\theta$ 图线，以 I/I_0 为纵坐标、 $\cos^2 \theta$ 为横坐标，用直角坐标纸作 $I/I_0 - \cos^2 \theta$ 图线；分析实验结果。

2. 研究椭圆偏振光特性

(1) 数据记录 $\alpha =$

$\theta/^\circ$	0	15	30	45	60	75	90	105
U/mV								
$\theta/^\circ$	120	135	150	165	180	195	210	225
U/mV								
$\theta/^\circ$	240	255	270	285	300	315	330	345
U/mV								

(2) 以 U 为极轴，用极坐标纸作 $U-\theta$ 图线，分析实验结果。

(3) 记录当 $\alpha = 45^\circ$ 、 0° 、 90° 时所观察的现象。

(二十一) 光的横波性——偏振

一、实验内容：

1. 观察光的偏振现象，进一步理解有关光偏振的概念
2. 分别鉴别自然光和线偏振光
3. 验证马吕定律
4. 验证布儒斯特定律

二、观测依据：

1. 光的横波性和偏振状态：如图-1 所示。

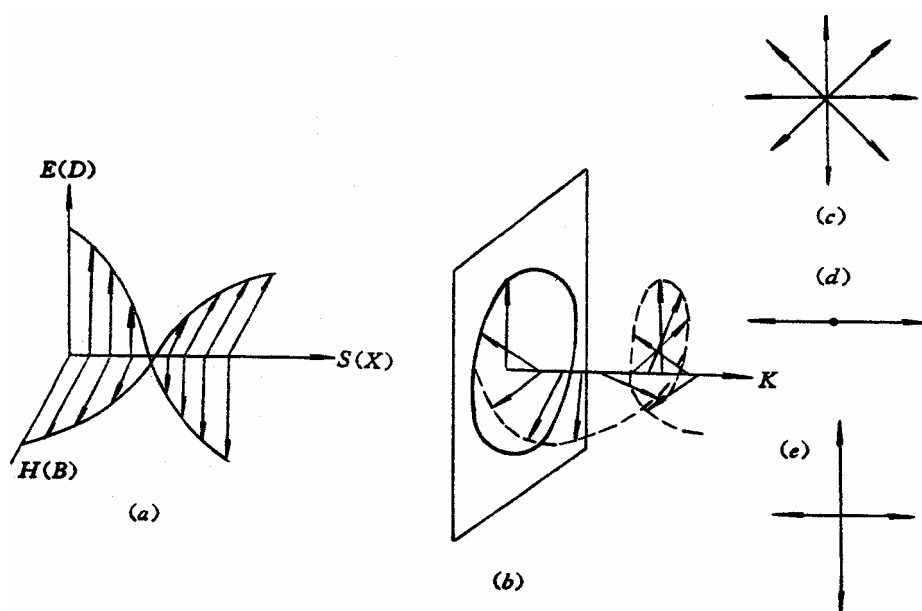


图 -1

2. 偏振光的产生：

1) 反射起偏：如图-2 所示，当入射角 Φ_p 满足布儒特定律：

$$\tan \Phi_p = n = n_2 / n_1$$

时，反射光只含振动方向垂直于入射面的成分。

- 2) 透射起偏——片堆：见图-3。
- 3) 自然双折射起偏：见图-4。
- 4) 二向色性起偏。

*5) 椭圆偏振光的产生——波片。

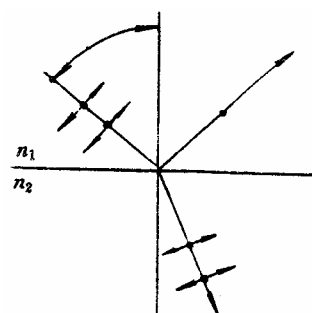


图-2

如图-4 所示, 当晶片的厚度使 e 光和 o 光通过它之后产生的光程差为波长的整倍数时, 该晶片称为全波片; 若光程差为半波长的奇倍数时, 该晶片称为半波片; 若光程差为 $\frac{\lambda}{4}$ 的奇数倍时, 该晶片称为 $\frac{1}{4}$ 波片, 简称 $\frac{\lambda}{4}$ 片。

3. 偏振光的分析与鉴别。

如图-5 所示, 当起、检偏器允许通过的光的振动方向成 θ 角时, 透射光的强度 I 由马吕定律给出:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

4. 实验器材

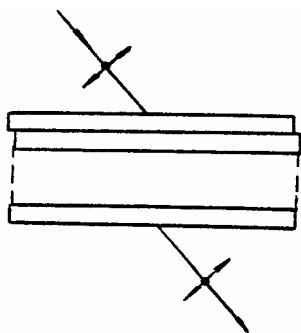


图-3

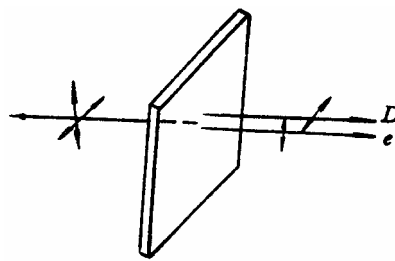


图-4

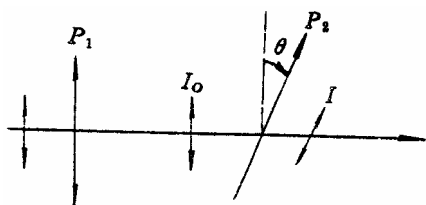


图-5

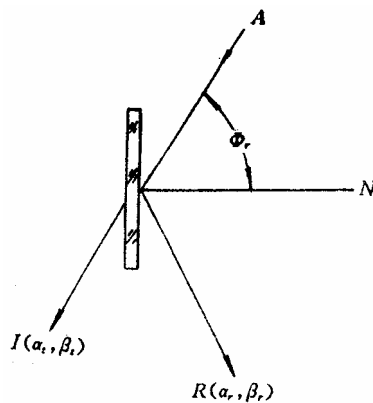


图-6

在实验中, 我们选用钠光灯, 以获得波长为 589.3 纳米的原色光; 用分光计产生、接收平行光, 并用它测量角度; 起、检偏器用二片人造偏振光; 以玻璃片作反射器以便得到部分偏振或线偏振器。

三、实验做法:

1. 打开钠光灯和分光计电源开关, 调分光计使其达到正常工作状态 (见分光计的调整

和使用实验)。

2. 观察分析光的偏振现象 (应用马吕定律)

(1) 将检偏器罩在望远镜物镜端端口并旋转之, 通过望远镜观察由平行光管射出的钠光的强度变化情况;

(2) 将起偏器罩在平行光管的接近载物台的端口。并旋转之, 通过望远镜和检偏器观察光强度变化的情况。注意观察起、检偏器的偏振方向夹角 θ 为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 和 360° 时的光强。

(3) 取走起偏器, 在载物台上放置平板玻璃片, 旋转检偏器, 通过望远镜和检偏器观察反射光的强度变化情况。

3. 验证布儒斯特定律

改变光对平板玻璃片的入射角, 直至反射光成为线偏振光, 测出此种状态下的入射角 Φ_p , 如图-6 所示。

四、数据记录和处理:

1. 数据记录

(1) 光偏振现象的观察 (马吕定律验证) 参考记录表

$\theta/^\circ$	0	90	180	270	360
I					

(2) 折射率测量参考记录表验证布儒斯特定律数据记录表

测量次数 被测量	1	2	3	4	5
$\alpha_t/^\circ, ', ''^0$					
$\beta_t/^\circ, ', ''$					
$\alpha_r/^\circ, ', ''$					
$\beta_r/^\circ, ', ''$					
$\Phi_p/^\circ, ', ''$					

2. 有关量值计算:

$$\Phi_p = \left[\pi - \frac{|\alpha_x - \alpha_t| + |\beta_x - \beta_t|}{2} \right] / 2$$

$$\bar{n} = \tan \bar{\Phi}_p$$

$$\sigma_{\bar{n}} = \sec^2 \bar{\Phi}_p \cdot \sigma_{\bar{\Phi}_p}$$

$$n = \bar{n} \pm \sigma_{\bar{n}}$$

结论：已知 K_{gn} 的 $n_D = 1.5100$ 。

若 n_D 处于区间 $[\bar{n} - 3\sigma_{\bar{n}}, \bar{n} + 3\sigma_{\bar{n}}]$ 中，表明布儒斯特定律得到验证。

五、注意事项：

在验证布儒斯特定律实验中，尽量找准全消光的位置，若眼睛感到疲劳，应休息一会儿，再仔细寻找。

第四章 模拟试题及其参考解答

大学物理实验模拟试卷（1）

考试时间：120 分钟

班级_____姓名_____学号_____总成绩_____

题号	1	2	3	4	5
分数					

第一大题（填空题，总分 50 分，每空 1 分）

1. 测量四要素是_____，_____，_____，_____。
2. 绝对误差为_____。修正值为_____。
3. 误差按来源分类可分为_____，_____，_____，_____。
4. 在计算标准偏差时，S 表示_____， $S_{\frac{1}{N}}$ 表示_____。
5. 计算公式 $L=2\pi R$ ，其中 $R=0.02640\text{m}$ ，则式中 R 为_____位有效数字，2 为_____位有效数字， π 为_____位有效数字。
6. 分光计由_____，_____，_____，_____组成。
7. 在牛顿环实验中应注意消除_____误差。
8. 在杨氏模量实验中用_____法消除系统误差。
9. 示波器的最基本组成部分是_____，_____，_____，_____。
10. 电势差计的基本原理是_____。它的三个重要组成部分是_____，_____，_____。
11. 用一只准确度级别为 1.0 级，量程为 30mA，最小分度为 1mA 的电流表测电流。如果电表指针正好指在 21mA 上，应读作_____mA。
12. 用米尺测量某一长度 $L=6.34\text{cm}$ ，若用螺旋测微计来测量，则有效数字应有_____位。
13. 使用逐差法的条件是：自变量是严格_____变化的，对一次逐差必须是_____关系。

14. 天平砝码的准确性产生的误差为_____误差, 用_____类不确定度来评定。
15. 在分光计的实验中采用_____法来消除偏心差。
16. 作图连线时, 一般应连接为_____直线或曲线, _____通过每个测量数据点。而校正图线应该连接为_____线, _____要通过每个测量数据点。
17. 偶然误差的分布具有三个性质, 即_____性, _____性, _____性。
18. 对于不连续读数的仪器, 如数字秒表、分光计等, 就以_____作为仪器误差。
19. 在伏安法测非线性电阻的实验中, 由于电流表内接或外接产生的误差为_____误差。
20. 在示波器的水平和垂直偏转板上分别加上两个正弦信号, 当二电压信号的频率比为____比时荧光屏上出现稳定_____的图形, 称为_____图形。
21. 作薄透镜焦距测量的实验中, 首先要进行_____调节, 这是因为薄透镜成像公式在_____的条件下才能成立。

第二大题 (选择题, 总分 20 分, 每题 2 分)

1. 下列测量结果正确的表达式是:

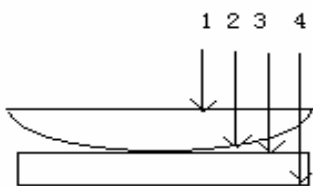
A. $L=23.68 \pm 0.009\text{m}$

B. $I=4.09 \pm 0.10\text{mA}$

C. $T=12.56 \pm 0.01\text{s}$

D. $Y=(1.67 \pm 0.5) \times 10^{11}\text{Pa}$

2. 在牛顿环实验中, 我们看到的干涉条纹是由哪两条光线产生的?



A. 1 和 2

B. 2 和 3

C. 3 和 4

D. 1 和 4

3. 在电势差计的实验中, 校正工作电流时平衡指示仪的指针始终偏向一边, 可能的原因是:

A. 没开工作电源

B. 接标准电源的导线不通

C. 平衡指示仪的导线极性接反

D. 工作电源电压偏高或偏低

4. 在示波器实验中, 时间轴 X 轴上加的信号为

A. 正弦波

B. 方波

C. 三角波

D. 锯齿波

5. 下列不确定度的传递公式中, 正确的是:

A. $N = \frac{x-y}{x+y}$

$\sigma_N = \sqrt{\frac{y^2 \sigma_y^2}{x^2 + y^2} + \frac{x^2 \sigma_x^2}{x^2 + y^2}}$

B. $L = x + y - 2z$

$\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 2\sigma_z^2}$

C. $M = \frac{V}{\sqrt{1+at}}$

$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sigma_V^2}{1+at} + \frac{a^2 V^2 \sigma_t^2}{(1+at)^3}}$ (a 为常数)

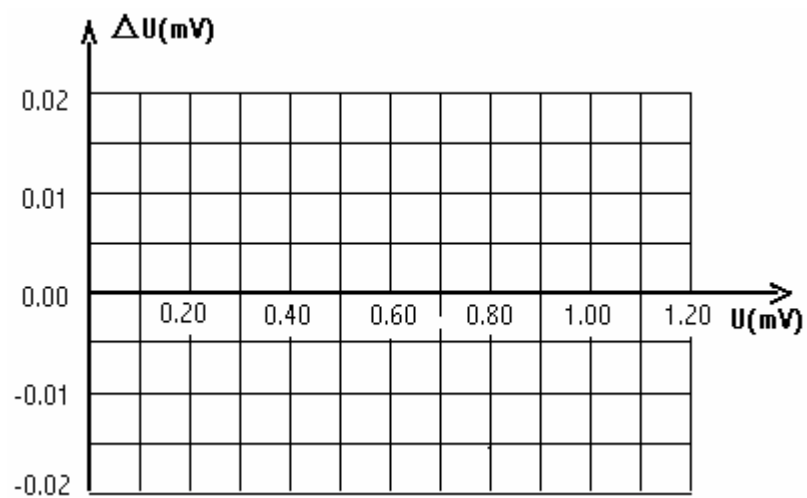
$$D. V = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad \sigma_V = \sqrt{4d\sigma_d^2 + \sigma_h^2}$$

6. 用分度值为 0.02 mm 的游标卡尺测长度，正确的数据记录为：
 A. 67.88 mm B. 5.67 mm
 C. 45.748 mm D. 36.9 mm
7. 用示波器观察波形，如果看到了波形，但不稳定，为使其稳定，可调节：
 A. "扫描频率" 调节 B. "扫描频率" 与 "聚焦" 配合调节
 C. "触发电平" 调节 D. "扫描频率" 与 "触发电平" 配合调节
8. 下列正确的说法是
 A. 多次测量可以减小偶然误差 B. 多次测量可以消除系统误差
 C. 多次测量可以减小系统误差 D. 多次测量可以消除偶然误差
9. 在牛顿环实验中，下列哪种措施可以减小误差？
 A. 将半径的测量变成直径的测量 B. 用单色性好的光源
 C. 用逐差法处理数据 D. 测量时保持显微镜的测距手轮单向移动
 E. 以上全部
10. 在静电场模拟实验中，若画出的等势线不对称，可能的原因是：
 A. 电压表的分流作用 B. 电极与导电基质接触不良或不均匀
 C. 导电基质不均匀 D. 以上全部

第三大题（计算题，总分 30 分，每题 10 分）

1. 用复摆公式 $T = 2\pi\sqrt{I/g}$ ，通过测量周期 T 来测量摆长 L。如果已知 g 的标准值，并测得 $T \approx 2$ s，周期测量的极限误差为 $\Delta T = 0.1$ s，若想要 L 的不确定度小于 1.0%，测量周期时至少应测量多少个周期？
2. 用电势差计校准量程为 1mV 的毫伏表，测量数据如下（表中单位均为 mV）。在如图所示的坐标中画出毫伏表的校准曲线，并对毫伏表定级别。

毫伏表读数	0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900	1.000
电势差计读数	0.1050	0.2150	0.3130	0.4070	0.5100	0.6030	0.6970	0.7850	0.8920	1.0070
修正值 ΔU	0.005	0.015	0.013	0.007	0.010	0.003	-0.003	-0.015	-0.008	0.007



3 . 根 据 公 式 $\rho = \frac{4M}{\pi D^2 H}$ 测 量 铜 圆 柱 体 的 密 度 。 已 知 :

$M=45.038 \pm 0.004(\text{g})$, $D=1.2420 \pm 0.0004(\text{cm})$, $H=4.183 \pm 0.003(\text{CM})$. 试 计 算 ρ 的 不 确 定 度 σ_ρ , 并 写 出 结 果 表 达 式。

大学物理实验模拟试卷（1）参考答案

第一大题（填空题，总分 50 分，每空 1 分）

1. 对象，方法，条件，准确度。
2. 测量值-真值，真值-测量值。
3. 仪器误差，方法误差，环境误差，人员误差。
4. 多次测量中任一次测量值的标准偏差，算术平均值对真值的偏差。
5. 4，无穷，无穷。
6. 望远镜，载物台，平行光管，读数盘。
7. 空转。
8. 异号法。
9. 示波管，电源，电压放大器，同步扫描系统。
10. 补偿原理，工作回路，校准回路，待测回路。
11. 21. 0
12. 5.
13. 等间距，线性。
14. 系统，B。
15. 半周期偶次测量。
16. 平滑，不一定，折，一定。
17. 单峰，有界，对称。
18. 最小分度。
19. 方法（系统）。
20. 整数之，封闭，李沙如。
21. 共轴，近轴光线。

第二大题（选择题，总分 20 分，每题 2 分）

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

第三大题（计算题，总分 30 分，每题 10 分）

1. 解：因为 （4分）

$$\frac{\sigma_l}{l} = 2 \frac{\sigma_T}{T} = 2 \frac{\sigma_t}{nT} \quad (t = nT, \sigma_t = n\sigma_T)$$

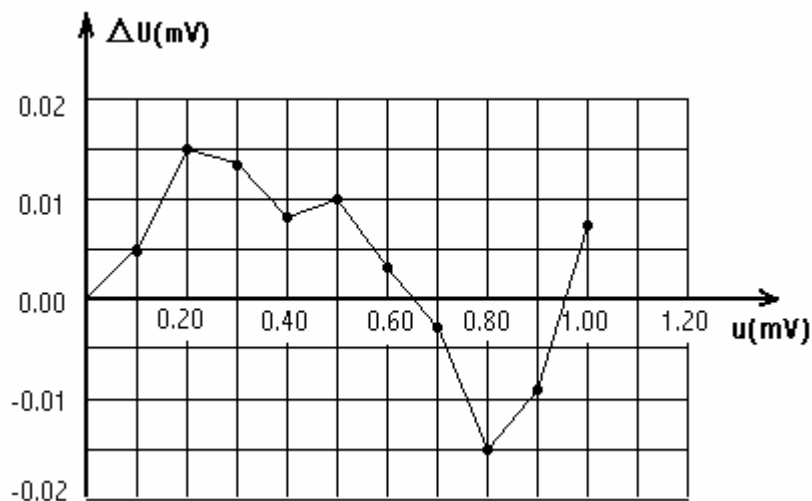
所以 （4分）

$$\frac{\sigma_l}{l} = 2 \frac{0.1}{2n\sqrt{3}} \leq 1.0\%$$

由此算出 （2分） $n \geq 6$ 次

2. 解:

$$\text{级别 } a = \frac{\Delta_{\max}}{\text{量程}} \times 100\% = \frac{0.015}{1.00} \times 100\% = 1.5 \quad (5 \text{ 分})$$



(5 分)

3. 解: 计算测量值 ρ

$$\rho = \frac{4M}{\pi D^2 H} = 8.887(\text{gcm}^{-3}) \quad (2 \text{ 分})$$

计算 ρ 相对合成不确定度

$$\frac{\sigma_{\rho}}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2 + \left(2\frac{\sigma_D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_H}{H}\right)^2} \quad (2 \text{ 分})$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0.004}{45.038}\right)^2 + \left(2 \times \frac{0.0004}{1.2420}\right)^2 + \left(\frac{0.003}{4.183}\right)^2} \quad (2 \text{ 分})$$

$$= 9.6 \times 10^{-4} \quad (1 \text{ 分})$$

求 ρ 的合成不确定度

$$\sigma_{\rho} = \rho \frac{\sigma_{\rho}}{\rho} = 0.009(\text{g.cm}^{-3}) \quad (1 \text{ 分})$$

测量结果表示: $\rho = 8.887 \pm 0.009(\text{g.cm}^{-3})$ (2 分)

大学物理实验模拟试卷（2）

考试时间：120 分钟

班级_____姓名_____学号_____总成绩_____

题号	1	2	3	4	5
分数					

第一大题（填空题，总分 42 分，每空 1 分）

1. 测量结果的有效数字的位数由_____和_____共同决定。
2. 50 分度的游标卡尺，其仪器误差为_____。
3. 量程为 10mA 电流表，其等级为 1.0，当读数为 6.5mA 时，它的最大误差为_____。
4. 不确定度 σ 表示_____。
5. $\lg 35.4 =$ _____。
6. 在分光计实验中，望远镜的调节用的是_____法。
7. S 是表示多次测量中每次测量值的_____程度，它随测量次数 n 的增加变化很_____，
 $S_{\bar{N}}$ 表示_____偏离真值的多少，它随测量次数 n 的增加变化很_____。
8. 在杨氏模量实验中，若望远镜的叉丝不清楚，应调节望远镜_____的焦距，若观察到的标尺像不清楚则应调节望远镜_____的焦距。钢丝的伸长量用法来测定。
9. 计算标准偏差我们用_____法，其计算公式为_____。
10. 表示测量数据离散程度的是_____，它属于_____误差，用_____误差（偏差）来描述它比较合适。
11. 用 20 分度的游标卡尺测长度，刚好为 15mm，应记为_____mm。
12. 根据获得测量结果的不同方法，测量可分为_____测量和_____测量；根据测量的条件不同，可分为_____测量和_____测量。
13. 电势差计实验中，热电偶的电动势与温差的关系为_____关系，可用_____法、_____法和_____法来求得经验方程。
14. $789.30 \times 50 \div 0.100 =$ _____。
15. $10.1 \div 4.178 =$ _____。
16. $225^2 =$ _____。
17. 用分光仪测得一角度为 30° ，分光仪的最小分度为 $1'$ ，测量的结果为_____。

18. 对于连续读数的仪器，如米尺、螺旋测微计等，就以_____作为仪器误差。
19. 分光计测角度时由于度盘偏心引起的测量角度误差按正弦规律变化，这是_____误差。
20. 在示波器内部，同步、扫描系统的功能是获得_____电压信号，这种电压信号加在偏转板上，可使光点匀速地沿 X 方向从左向右作周期性运动。
21. 系统误差有_____的特点，偶然误差有_____的特点。
22. 在测量结果的数字表示中，由若干位可靠数字加上_____位可疑数字，便组成了有效数字。
23. 在进行十进制单位换算时，有效数字的位数_____。
24. 静电场模拟实验应用了_____法，它利用了静电场和_____的相似性。

第二大题（单项和多项选择题，总分 30 分,每题 3 分）

2. 下列测量结果正确的表达式是：

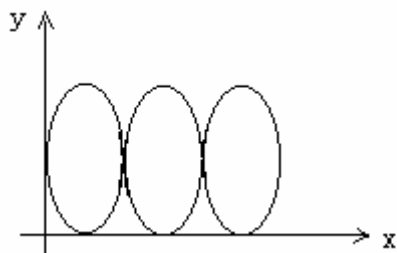
A. $L=23.68 \pm 0.03\text{m}$

B. $I=4.091 \pm 0.100\text{mA}$

C. $T=12.563 \pm 0.01\text{s}$

D. $Y=(1.67 \pm 0.15) \times 10^{11}\text{Pa}$

2. 在下面的李萨如图中，如果在 X 轴方向信号的频率是 100Hz，那么在 Y 轴方向信号的频率是：



A. 100Hz

B. 33Hz

C. 300Hz

D. 200Hz

3. 在静电场模拟实验中，若提高电源电压，则：

A. 等势线的分布更密集

B. 电场分布会有畸变

C. 等势线的形状不会发生改变

D. 电力线会产生变化

4. 在示波器实验中，时间轴 X 轴上加的信号为

A. 正弦波

B. 方波

C. 三角波

D. 锯齿波

5. 下列不确定度的传递公式中，正确的是：

A. $N = \frac{x-y}{x+y}$ $\sigma_N = \sqrt{\frac{y^2 \sigma_y^2}{x^2 + y^2} + \frac{x^2 \sigma_x^2}{x^2 + y^2}}$

B. $L = x + y - 2z$ $\sigma_z = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + 4\sigma_z^2}$

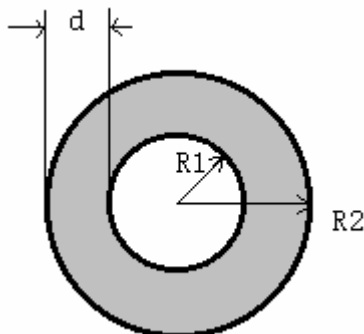
C. $M = \frac{V}{\sqrt{1+at}}$ $\sigma_M = \sqrt{\frac{\sigma_V^2}{4(1+at)} + \frac{a^2 V^2 \sigma_t^2}{(1+at)^3}}$ (a 为常数)

$$D. V = \frac{\pi d^2 h}{4} \quad \sigma_V = \sqrt{4d\sigma_d^2 + \sigma_h^2}$$

6. 测量一约为 1.5 伏的电压时要求其结果的相对误差不大于 1.5%，则应选用下列哪种规格的电压表：
- A. 0.5 级，量程为 5 伏 B. 1.0 级，量程为 2 伏
C. 2.5 级，量程为 1.5 伏 D. 0.5 级，量程为 3 伏
7. 实验中，牛顿环的中心条纹为：
- A. 暗纹 B. 亮纹 C. 零级条纹 D. 不确定
8. 下列正确的说法是
- A. A 类不确定度评定的都是偶然误差 B. 系统误差都由 B 类不确定度决定
C. A 类不确定度可以评定某些系统误差 D. 偶然误差全部可以用 A 类不确定度来评定
9. 在杨氏模量实验中，下列哪种原因产生系统误差？
- A. 实验前钢丝没拉直 B. 支架不铅直
C. 砝码的误差 D. 标尺的刻度误差
E. 以上全部
10. 在静电场模拟实验中，若画出的等势线不对称，可能的原因是：
- A. 导线有一定的电阻 B. 电源电压过高
C. 导电基质不均匀 D. 以上全部

第三大题（综合题，总分 28 分）

1. 用 50 分度的游标卡尺测圆环的宽度，其数据如下： $m=15.272, 15.276, 15.268, 15.274, 15.270, 15.272, 15.274, 15.268, 15.274, 15.272\text{cm}$ ，求合成不确定度。（10 分）
2. 测量某圆柱体的高 $h=13.322\pm 0.006\text{cm}$ ，直径为 $d=1.541\pm 0.005\text{cm}$ ，计算圆柱体的体积 V 的值并写出结果表达式。（10 分）
3. 利用读数显微镜测量一微小圆环的内环半径 R_1 、外环半径 R_2 和厚度 d 。试说明测量方法和测量步骤。（8 分）



大学物理实验模拟试卷（2）参考答案

第一大题（填空题，总分 42 分，每空 1 分）

1. 被测量的大小，测量仪器。
2. 0.02mm。
3. 0.01mA。
4. 误差以一定的概率被包含在量值范围 $(-\sigma \sim +\sigma)$ 之中，或测量值的真值以一定的概率落在量值范围 $(\bar{N} - \sigma \sim \bar{N} + \sigma)$ 之中。
5. 1.549。
6. 自准直。
7. 分散，慢，平均值，快。
8. 目镜，物镜，放大法。
9. 贝塞尔，（公式略）。
10. 精密度，偶然，标准。
11. 15. 00
12. 直接，间接，等精度，非等精度。
13. 线性，作图，逐差，最小二乘。
14. 3.9×10^3 。
15. 2.42。
16. 5.06×10^4 。
17. 0.5236 ± 0.0003 弧度
18. 最小分度/2。
19. 系统。
20. 锯齿波，X。
21. 确定性，随机性。
22. 1。
23. 不变。
24. 模拟，电流场。

第二大题（单项和多项选择题，总分 30 分，每题 3 分）

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

第三大题（综合题，总分 28 分）

1. 解：
$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (m_i - \bar{m})^2}{n(n-1)}} = 0.003 \text{ (cm)} \quad (3 \text{ 分})$$

$$\Delta_{\text{仪}} = 0.002\text{cm}$$

$$u = \frac{\Delta_{\text{仪}}}{\sqrt{3}} = \frac{0.002}{\sqrt{3}} = 0.001(\text{cm}) \quad (4 \text{ 分})$$

$$\sigma = \sqrt{S_m^2 + u^2} = \sqrt{(0.003)^2 + (0.001)^2} = 0.003(\text{cm}) \quad (3 \text{ 分})$$

$$2. \text{ 解: } V = \frac{\pi}{4} d^2 h = \frac{1}{4} \times 3.1416 \times 0.541^2 \times 13.322 = 24.85(\text{cm}^3) \quad (2 \text{ 分})$$

$$\sigma_V = \frac{\pi}{4} \sqrt{(2hd\sigma_d)^2 + (d^2\sigma_h)^2} = (\text{数据代入式}) = 0.2\text{cm}^3 \quad (4 \text{ 分})$$

$$V = 24.9 \pm 0.2 (\text{cm}^3) \quad (3 \text{ 分})$$

3. 解:

主要是注意空转误差的消除。(4 分)

R1 和 R2 的测量转化为直径的测量。(4 分)

模拟试题 I

一、填空题：

- 物理实验课教学的程序分为_____、_____和_____三步进行。
- 根据获得测量结果的不同方法，测量可分为_____测量和_____测量；根据测量条件的不同，测量可分为_____测量和_____测量。
- _____之比称为相对误差，实际计算中一般是用_____之比。
- 在实验中，进行多次（等精度）测量时，若每次读数的重复性好，则_____误差一定小，其测量结果的_____高。
- 指出下列各数的有效数字的位数。(1)0.005m 是_____位，(2) 2.9×10^6 mm 是_____位，(3) 100.00mg 是_____位，(4) 自然数 10 是_____位。
- 计算： $\frac{100 \times 0.1}{17.3021 - 7.3021} + \lg 1000 =$ _____，其中 $17.3021 - 7.3021 =$ _____， $100 \times 0.1 =$ _____， $\lg 1000 =$ _____，式子的前一项 $\frac{100 \times 0.1}{17.3021 - 7.3021} =$ _____。
- _____与_____之比称为组合聚焦比，相当于静电透镜组的_____。
- 下列实验中，分别使用了一种物理实验测量方法。用电桥测量电阻使用了_____法；用电位差计测电动势使用了_____方法；静电场的分布使用了_____，测杨氏模量中用光杠杆测微小伸长量使用了_____法。
- 在电场模拟实验中，我们是用_____场中的_____分布，模拟_____的_____分布。
- 测焦距时要测量像（屏）的位置。为了克服眼睛分辨本领不足造成的测量象的位置的误差，在测量时我采用了_____法，在测量焦距前先要进行_____调整；在多次测量焦距的方法中，要测出一个放大和一个缩小的像时透镜位置的方法是_____法。

二、选择题：

- 用伏安法测约 210 欧姆的电阻，电压表内阻 10 千欧，电流表内阻为 10 欧，选用最佳测量线路，量得 $I = 40.0\text{mA}$ ， $V = 8.50\text{V}$ ，则测量结果的方法误差是（ ）。
A. -2 欧； B. -5 欧； C. -7 欧； D. -10 欧。
- 用最大误差 0.01mA，最大刻度是 10mA 的电流表测一电流，读数是 6.00mA，算出读数的相对误差是 0.2%，那么此表是（ ）。
A. 0.1 级表； B. 0.5 级表； C. 0.2 级表； D. 1.0 级表。
- $N = X + \frac{1}{2}y^3$ ，其标准差正确的是（ ）。

- A. $S_N = S_x + \frac{1}{2}y^2S_y$; B. $S_N = S_x + \frac{3}{2}y^2S_y$;
C. $S_N = S_x + \frac{3}{2}S_y$; D. A, B, C 都不对。

4. 在示波器实验中, 用李萨如图形校正低频发生器的频率。如果 Y 轴输入一个 50 赫的信号, 低频信号发生器的信号从 X 轴输入, 经调整后得到图形如 ∞ , 那么, 低频信号发生器这时的频率应当是 () 赫兹。

- A. 25; B. 50; C. 75; D. 100。

5. 在组装电桥实验中, 联结好进行测量调节, 无论如何调, 检流计指针始终偏向一边, 可能的原因有 ()。

- A. 有一根导线不通; B. 有一个电阻箱不通;
C. 被测电阻断路; D. 被测电阻短路。

6. 对比法是发现系统误差的方法之一。现分别用单摆、复摆和自由落体测得的四组重力加速度如下, 其中至少两种方法存在系统误差的一组是 ()。

- A. $g_1 = 980 \pm 1\text{cm/s}^2$, $g_2 = 980.2 \pm 0.2\text{cm/s}^2$, $g_3 = 980.13 \pm 0.03\text{cm/s}^2$;
B. $g_1 = 982 \pm 1\text{cm/s}^2$, $g_2 = 980.2 \pm 0.2\text{cm/s}^2$, $g_3 = 977.63 \pm 0.03\text{cm/s}^2$;
C. $g_1 = 980 \pm 2\text{cm/s}^2$, $g_2 = 980.0 \pm 0.2\text{cm/s}^2$, $g_3 = 981.04 \pm 0.03\text{cm/s}^2$;
D. $g_1 = 982 \pm 2\text{cm/s}^2$, $g_2 = 983.2 \pm 0.2\text{cm/s}^2$, $g_3 = 977.63 \pm 0.03\text{cm/s}^2$ 。

7. 提高电势差计灵敏度的方法是 ()。

- A. 提高工作电源电压; B. 增加工作电流;
C. 更换灵敏度高的检流计; D. 使用级别更高的标准电池。

8. 对某物进行长度测量, 得到的数据如下: L (米) = 1.63, 1.66, 1.62, 1.67, 1.65, 1.61, 1.68, 1.63, 1.67, 2.17。在用极限误差 $3S$ (拉依达法测) 剔出坏值后, 算得 S_L 是 () 米。

- A. 0.002; B. 0.005; C. 0.008; D. 0.001。

9. 在看清叉丝的情况下只看到钠黄光, 看不到牛顿环, 原因可能是 ()。

- A. 反射镜位置放错; B. 牛顿环装置的位置不恰当;
C. 物镜聚焦不对; D. 目镜聚焦不对。

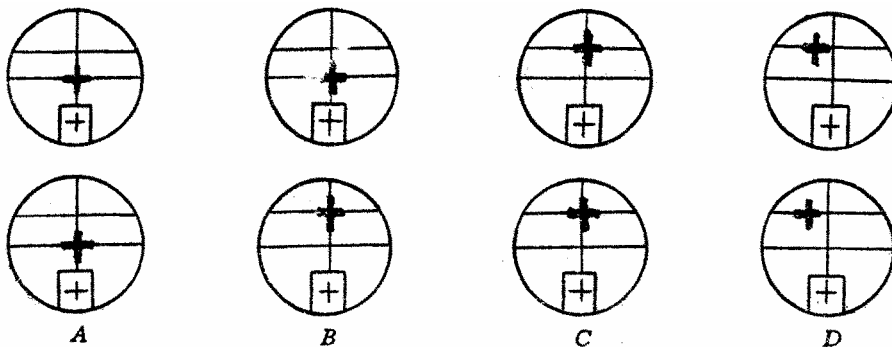
10. 用自准直法调整分光仪的望远镜工作状态时, 若从望远镜的视场中所看到的三棱镜的两个面的反射十字像如下图所示, 其中表明望远镜的工作状态已经明显调好的是 ()。

11. 下列几个测量结果中, 测量准确度最低的是 ()

- A. $L_1 = 154.98 \pm 0.02\text{cm}$; B. $L_2 = 5.498 \pm 0.002\text{cm}$;
C. $L_3 = 1.5498 \pm 0.0002\text{cm}$; D. $L_4 = 2.214 \pm 0.001\text{cm}$ 。

12. 测量边长为 1cm 的正方形面积，要求测量相对不确定度 $E_A \leq 0.6\%$ ，选用最合适的量具有（ ）。

- A. 标准米尺；
B. 20 分度游标卡尺；
C. 50 分度游标卡尺；
D. 螺旋测微计。



三、计算题及其它：

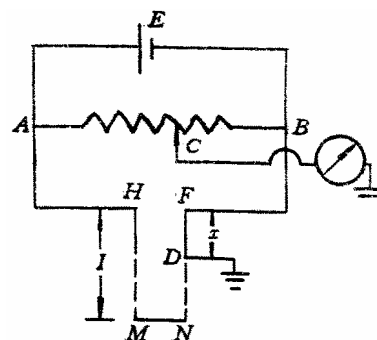
1. 用三线摆测物体转动惯量时，若摆动周期约为一秒，一次连续测量若干个摆动周期的计时误差为 0.1 秒，现要求仅周期测量因素对转动惯量测量的相对不确定度的影响为 1.0%，问一次连续测量摆动周期的数目不得少于多少？

2. 已知量 X 和 Y 的一组实验数据如下表：

X_i	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
$Y_i = f(X_i)$	1.90	4.10	5.95	8.05	10.08

试用作图法和最小二乘法进行一次线性拟合，求其经验方程。

3. 用电桥线路可查出电缆中一根导线（电缆中有两根以上导线）由于绝缘损坏而接地的位置，如图所示。 AB 是长为 1.000 米的均匀电阻丝，滑动端 C 可在 AB 上移动。已知电缆长度 $L = 8.00$ 千米， AH 、 BF 和 MN （连接两根电缆线的导线）的长度相对于 L 可以略去。当滑动端 C 移到与 A 相距为 $l = 64.0$ 厘米时，检流计中无电流流过。试找出电缆绝缘损坏处 D 离检查地点 F 的距离 x 。



4. 实验设计：

用箱式电势差计测电阻。要求写出简单的原理，画出实验线路图，说明实验步骤。所用仪器如下：

可调精密电阻箱（可作标准电阻）1 只，稳压电源一台，电流表一只，单刀单掷开关一个；箱式电位差计一台（附标准电池和干电池），被测电阻一只。

模拟试题 I 参考解答

一、填空题：

1. 实验前的预习，实验中的观测，实验后的报告。2. 直接，间接，等精度，非等精度。3. 误差与真实值，误差与测量值。4. 偶然，精密度。5. (1) 1, (2) 2, (3) 5, (4) 无穷, 6. 4, 10.0000, 0.1×10^2 , 3.000, 1。7. 第二阳极电压，第一阳极电压，焦距。8. 比较、补偿、模拟、放大法。9. 稳恒电流场，电势，静电场，电势。10. 左右逼近，等高共轴，共轭。

二、选择题：

1. (B)。2. (A)。3. (D)。4. (A)。5. (A, B, C, D)。6. (B)。7. (C)。8. (C)。9. (A, B, C)。10. (C, D)。11. (D)。12. (B)

三、计算及其它：

1. $n \geq 12$ 。提示： $\frac{2\sigma_T}{T} \leq 1.0\%$ ，解出结果。

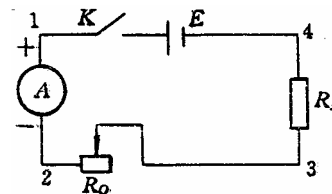
2. $y = -0.078 + 2.03x$ 。提示：可直接代入求 a ， b 的公式中进行计算，但要求掌握公式的推导，作图法用坐标纸进行，求出的斜率与截距同最小二乘法求出的 2.03 和 -0.078 接近即可。

3. $x = 5.76$ 千米。提示：HM 和 FN 是电缆线中任意根电缆线，总长为 $2L$ 。当此电桥线路平衡时有 $l/(100-l) = (2L-X)/X$ 解出结果。

四、实验设计：

(1) 实验线路如右图：

(2) 原理



接通上述电路后在 R_x 和 R_0 两端都有电势差。在保证电

流不变的情况下，通过电势差计可以分别测出这两个电压。如果电流为 I ，则有 $I = V_0/R_0 = V_x/R_x$ ，可得 $R_x = (V_x/V_0)R_0$ 。

(3) 步骤

A) 调整可变精密电阻箱 R_0 的阻值，使电流表有适当偏转，如能使 R_x 和 R_0 相接近

B) 将 3 点接电势差计的 $E_x^{(+)}$ ，4 点接 E_x^- ，测出 V_x 。

C) 保持电流不变，将 2 点接 $E_x^{(+)}$ ，3 点接 E_x^- ，测出 V_0 。

D) 读出 R_0 的阻值可以用公式 $R_x = (V_x/V_0)R_0$ ，算出 R_x 。

模拟试题 II

一、填空题：

1. 物理学从本质上说是一门_____科学，物理规律的发现和物理理论的建立，都必须以严格的_____为基础，并受到_____的检验。
2. 测量的四要素是_____、_____、_____和_____。
3. 误差按性质可分为_____和_____误差。
4. 表示重复测量数据离散程度的是_____度，它属于_____误差，用_____误差（偏差）来描述它比较合适。
5. 指出下列各数的有效数字的位数。（1） 0.050cm 是_____，（2） $4.321\times 10^{-3}\text{mm}$ 是_____位，（3）周长 $=2\pi R$ 中的 2 是_____，（4） $(3.842\pm 0.012)\text{kg}$ 中的 3.842kg 是_____位。
6. 计算 $\frac{\sqrt{100.00}}{0.326+9.647}\times 0.01=$ _____，其中 $\sqrt{100.00}=$ _____， $0.326+9.647=$ _____， $\frac{\sqrt{100.00}}{0.326+9.647}=$ _____。
7. 分光仪的四大组成部分是_____、_____、_____和_____。
8. 在牛顿环实验的调节过程中，若发现视场中半明半暗，应调节_____，若发现视场非常明亮，但却调节不出干涉环，其原因是_____，若干涉环不够清晰应调节_____。
9. 试举出米尺(类)外的三种测量长度的仪器(具)：(1)_____ (2)_____ (3)_____。
10. 在落球法测液体的粘度系数中，要测小球的运动速度，这个速度应是小球作_____运动的速度；如果实验时，液体中有气泡，可能使这个速度_____，从而使 η 值的测量值_____。

二、选择题：

1. 选出下列说法的正确者（ ）。
 - A. 可用仪器最小分度或是最小分度的一半作为该仪器的一次测量的误差；
 - B. 可以用仪器精度等级估算该仪器一次测量的误差；
 - C. 只要知道仪器的最小分度值，就可以大致确定仪器误差的数量级；
 - D. 以上三种说法都正确。
2. 测量一约为 1.5 伏特的电压时要求其结果的相对误差小于 1.5%，则应选用下列哪一种规格的伏特表（ ）。
 - A. 0.5 级，量程为 5 伏；
 - B. 1.0 级，量程为 2 伏；
 - C. 2.5 级，量程为 1.5 伏；
 - D. 0.5 级，量程为 3 伏。
3. 在示波器实验中，用李萨如图形校正低频发生器的频率。如果 Y 轴输入一个 50 赫的信号，低频信号发生器的信号从 X 轴输入，经调整后得到图形 8，那么，低频信号发生

器这时的频率应是（ ）赫兹。

- A. 25; B. 50; C. 75; D. 100。

4. 在牛顿环实验中，观察到的干涉条纹图形是  其原因是（ ）。

- A. 凸透镜内有气泡; B. 平板玻璃有凸起之处;
C. 平板玻璃内有气泡; D. 平板玻璃有凹处。

5. 对某量进行直接测量，有如下说法，正确的是（ ）。

- A. 有效数字的位数由所使用的量具确定;
B. 有效数字的位数由被测量的大小确定;
C. 有效数字的位数主要由使用的量具确定,
D. 有效数字的位数由使用的量具与被测量的大小共同确定。

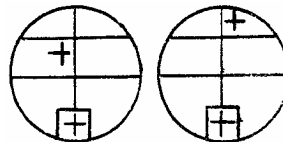
6. 用单臂电桥测量电阻时，如果出现了下述情况，选出不能继续正常进行测量的情况（ ）。

- A. 有一个桥臂电阻短路; B. 电源正负极性接反了;
C. 有一个桥臂电阻开路; D. 电源与检流计之接线位置互换。

7. 对某物进行长度测量，得到的数据如下：L（米）=1.63, 1.66, 1.62, 1.67, 1.65, 1.61, 1.68, 1.63, 1.67, 1.61, 1.81。在用极限误差 $3S$ （拉依达法测）剔出坏值后，算得 S_L 是（ ）

- A. 0.008; B. 0.02; C. 0.03; D. 0.06。

8. 在分光计实验中，要调节望远镜及载物台平面使之都垂直于分光计主轴，用自准直法调节时发现三棱镜两面的反射十字像的位置分别如图，下列说法正确的是（ ）。



- A. 载物台不垂直主轴;
B. 望远镜光轴不垂直主轴;
C. 载物台和望远镜光轴都不垂直主轴;
D. 望远镜基本垂直主轴。

9. 在测杨氏模量实验中，当负荷按比例增加或减少，读出相应的标尺数据时，发现标尺读数的增量 Δn 不按比例增减，相差较大，可能的原因（ ）。

- A. 起初砝码太轻，尚未将金属丝完全拉直，
B. 金属丝锈蚀，粗细不均匀使金属丝产生剩余形变;
C. 光杠杆后足位置安放不当，与平台有摩擦;
D. 杨氏模量仪支柱未调整铅直，造成丝一端的夹头不能在平台圆孔中上下自由滑动。

10. 用伏安法测得 210 欧的电阻，电压表的内阻为 10 千欧，电阻测量值经方法系统误差修正之后的阻值是（ ）。

- A. 211 欧; B. 209 欧; C. 208 欧; D. 215 欧。

11. 求 $Y = B + C + D - E$ ，其中， $B = 17.32 \pm 0.02cm$ ， $C = 2.684 \pm 0.001cm$ ， $D = 100 \pm 2cm$ ， $E = 20.004 \pm 0.005cm$ ，其结果是（ ）。

- A. $Y = 100.0 \pm 0.2cm$; B. $Y = 100 \pm 2cm$;
C. $Y = 100.00 \pm 0.02cm$; D. $Y = 100.000 \pm 0.003cm$ 。

三、计算题：

1. 圆柱体的体积 $V = \frac{\pi}{4} D^2 h$ ，现在通过测量直径 D 和高 h 来测量 V ，可选的量具是米尺 ($\Delta_{\text{米}} = 0.05\text{cm}$)、游标卡尺 ($\Delta_{\text{游}} = 0.002\text{cm}$) 和螺旋测微计 ($\Delta_{\text{螺}} = 0.0005\text{cm}$)，如果要求 V 的相对不确定度 (E_v) $\leq 0.6\%$ ，问选择什么量具最佳，其中 $D \approx 1\text{cm}$ ， $h = 1\text{cm}$ 。

2. 在拉伸法测量金属丝的杨氏模量实验中，使用了公式 $E = \frac{8LD}{\pi d^2 b} \cdot \frac{\Delta F}{\Delta n}$ ，测量的数据结果如下： $D \sim 1$ 米左右， $L = 80$ 厘米左右， $b = 7.000 \pm 0.005\text{cm}$ ， $d = 0.800 \pm 0.005\text{mm}$ ， $\overline{\Delta n}$ 的有关数据如下表：

- (1) 在此实验中哪些量是直接测量，哪些量是间接测量？
- (2) 根据测量条件和可能， L 、 D 、 b 和 d 选择最合适的仪器是什么？
- (3) 用逐差法处理数据，求 $\overline{\Delta n}$ ；
- (4) 求出 $\overline{\Delta n}$ 的测量带给 E 的相对误差。

砝码个数 (2Kg/个)		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
标 尺 读 数	X (加砝码) (cm)	0.73	1.25	1.74	2.27	2.78	3.25	3.74	4.23	4.76	5.28
	X' (减砝码) (cm)	0.75	1.31	1.78	2.25	2.80	3.29	3.80	4.29	4.74	5.28
	X (cm)										

四、实验设计：

用电势差计测量 $E \approx 3\text{V}$ 的电池组的电动势及其内阻。要求写出原理、画实验电路、写出实验步骤。提供以下仪器：

可调精密电阻箱 2 只；单刀单掷开关一个；电势差计 (最大量程 1.61V) 一台；导线若干；被测电池一组 ($E \approx 3\text{V}$)。

模拟试题 II 参考解答

一、填空题：

1. 实验，实验，实验。2. 测量对象，测量单位，测量方法，测量准确度。3. 系统，偶然。4. 精密度，偶然，标准。5. (1) 2, (2) 4, (3) 无穷, (4) 3 位。6. 0.01, 10.000, 10.000, 1.0000。7. 望远镜，平行光管，载物台，读数装置。8. 45° 反射镜角度或光源位置，反光玻片放反，显微镜调焦手轮。9. 游标卡尺，螺旋测微计，移测显微镜。10. 匀速，增大，减小。

二、选择题：

1. (A, B, C, D); 2. (B, D); 3. (D); 4. (B); 5. (D); 6. (A, C); 7. (C); 8. (A, D); 9. (A, B, C, D); 10. (D); 11. (B)。

三、计算题及其它：

1. 游标尺即可，使用螺旋测微计更保险。提示：

$\sigma_V/V = 2\sigma_D/D + \sigma_h/h \leq 0.6\%$ ， 如 果 选 用 米 尺 ， 则

$2\sigma_D/D = \frac{2 \times 0.05/\sqrt{3}}{1} = 5.8\% > 0.6\%$ 这 不 行 ； 如 果 选 游 标 卡 尺

$2\sigma_D/D = \frac{2 \times 0.002\sqrt{3}}{1} = 0.23\%$ ， $\sigma_h/h = \frac{0.002/\sqrt{3}}{1} = 0.12\%$ ，

$\sigma_V/V = 0.23\% + 0.12\% \leq 0.6\%$ 达到要求。

2. $\bar{X} = 0, 74, 1.28, 1.76, 2.26, 2.79, 3.27, 3.77, 4.26, 4.75, 5.28$ 。

(1) 直接测量： L 、 D 、 d 、 b ；

间接测量： Δn ， E 。

(2) L 选米尺， D 选米尺， b 选游标卡尺， d 选螺旋测微计。

(3) $\Delta n_1 = \bar{n}_9 - \bar{n}_4 = (5.28 - 2.79)cm = 2.49cm$

$\Delta n_2 = \bar{n}_8 - \bar{n}_3 = (4.75 - 2.26)cm = 2.49cm$

$\Delta n_3 = \bar{n}_7 - \bar{n}_2 = (4.26 - 1.76)cm = 2.50cm$

$\Delta n_4 = \bar{n}_6 - \bar{n}_1 = (3.77 - 1.28)cm = 2.49cm$

$\Delta n_5 = \bar{n}_5 - \bar{n}_0 = (3.27 - 0.74)cm = 2.53cm$

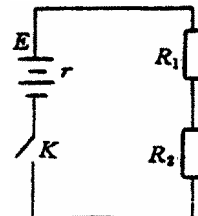
$$\overline{\Delta n} = 2.50\text{cm}, \quad \overline{\Delta \Delta n} = 0.01\text{cm}$$

(4) Δn 给 E 带来的相对误差 $= (0.01 / 2.50) \times 100\% = 0.4\%$ 。

四、实验设计：

(1) 实验线路图见右图： R_1 ， R_2 是两个电阻箱， E 是电动势。

(2) 原理：电路接通后电阻 R_2 两端的电势差，其大小可通过电位差计测出。



当 R_2 取值 R_{21} ， R_1 取值 R_{11} 时，测出 U_{x1} ；当 R_2 取值 R_{22} ， R_1 取值

R_{12} 时，测出 U_{x2} ，可列方程：

$$\frac{U_{x1}}{R_{21}}(R_{11} + R_{21} + r) = E$$

$$\frac{U_{x2}}{R_{22}}(R_{12} + R_{22} + r) = E$$

其中 R_{11} ， R_{12} ， R_{21} ， R_{22} 都可从电阻箱读出，解联立方程就可求出 E 和 r 。

(3) 步骤

A) 按实验线路图接好电路；

B) 调节好电势差计；

C) 把 R_2 两端接入电势差计（注意正、负极），测出 U_{x1} ，读出 R_{11} ， R_{21} 。

D) 改变 R_1 ， R_2 的值，测出 U_{x2} ，读出 R_{12} ， R_{22} 。

E) 带入联立方程，解出 E ， r 。

模拟试题 III

一、填空题：

1. 凡可用仪器量具直接读出某物理量值称为_____测量，例如：_____；在直接测出与被测量具有一定函数关系的几个量后，通过函数关系式确定被测量的大小的测量称为_____测量，例如：_____。

2. 误差按其来源可分为_____误差，_____误差，_____误差和_____误差。

3. 用伏安法测中值电阻时，由实验电路引入的误差属于_____，当电流表外接时，所测电阻 R_x 偏_____，当电流表内接时，所测电阻 R_x 偏_____。

4. 三角形三内角和的测量值是 $179^\circ 43' 30''$ ，其绝对误差等于_____，修正值是_____。

5. 在表达式 $100.00 \pm 0.100\text{cm}$ 中的 100.00 的有效数字是_____位； $100.00 \pm 0.10\text{cm}$ 中的 100.00 的有效数字是_____位； $100.0 \pm 0.1\text{cm}$ 中的 100.0 的有效数字是_____位。

6. 计算： $(10^2 / (114.3 - 14.2987)) + 1000^2 =$ _____，其中 $114.3 - 14.2987 =$ _____， $10^2 / (114.3 - 14.2987) =$ _____， $1000^2 =$ _____。

7. 示波器最基本的四大部分是_____、_____、_____和_____。

8. 从测量方法上消除系统误差的方法有（举出五种）_____法、_____法、_____法、_____法和_____法。

9. 改变示波器屏上的亮度，是调节示波管内的_____电压，改变其清晰度是调节示波管内的_____电压，观察波形时一般要使用示波器的_____系统，如果观察波形时显示屏幕上只看到一条水平线条，这时一定是与_____信号有关的部分有问题。

10. 有两只准确度级别分别为 0.5 级和 1.0 级的毫安表，量限均为 100mA，若用它测量 80mA 的电流，则一般认为两只表的读数最大可能相差_____。

二、选择题：

1. 仪器仪表准确度等级的含义是：（ ）
- A. 最大误差与满刻度值的百分数的分子表示；
 - B. 就是仪器仪表值引用误差；
 - C. 仪器仪表用百分数表示的示值相对误差中的分子表示；
 - D. 仪器仪表值误差与指示值的百分数的分子表示。

2. 用量程为 15mA ，准确度等级为 0.5 级的电流表测量某电流的指示值为 10.00mA ，其测量结果的最大误差为 ()

- A. 0.75mA ; B. 0.08mA ; C. 0.05mA ; D. 0.008mA 。

3. 在示波器实验中，用李萨如图形校正低频发生器的频率。如果 Y 轴输入一个 50 赫的信号，低频信号发生器的信号从 X 轴输入，经调整后得到图形如下图，那么，低频信号发生器这时的频率应当是 () 赫。



- A. 25; B. $33\frac{1}{3}$; C. $66\frac{2}{3}$; D. 75。

4. 做分光计实验时必须调整分光仪，当望远镜的叉丝与物镜的距离使“+”字反射像正好落在叉丝平面上，左右观察叉丝与“+”字反射像无视差时，就可以说 ()

- A. 望远镜可以接收平行光了 B. 平行光管可以发射平行光了
C. 望远镜的光轴与中心轴垂直了 D. 望远镜的光轴和载物台面都与中心轴垂直了

5. 选出消除系统误差的测量方法 ()。

- A. 交换法; B. 放大法 C. 模拟法; D. 代替法。

6. 牛顿环的干涉条纹应当是以凸透镜与平板玻璃的接触点为圆心的同心圆，实际上多数情况是出现一个大黑斑。下列说法正确的是 ()。

- A. 凸透镜与平板玻璃压得太紧 B. 接触处有灰尘;
C. 黑斑的出现对实验结果有影响; D. 黑斑的出现对实验结果无影响。

7. 对某物进行长度测量，得到的数据如下; L (厘米) = 9.92, 9.89, 9.94, 9.87, 9.86, 9.90, 9.91, 9.90, 9.89, 9.93, 置信率为 95.4%，其测量结果为 ()。

- A. $L = 9.90 \pm 0.02\text{cm}$; B. $L = 9.90 \pm 0.04\text{cm}$;
C. $L = 9.90 \pm 0.01\text{cm}$; D. $L = 9.90 \pm 0.03\text{cm}$ 。

8. 用箱式电势差计测量未知电势差时，发现旋转数值最小的一个旋钮时，在一定范围内，检流计指针不动，其原因可能是 ()。

- A. 电源电压过低 B. 标准电池不准;
C. 电流灵敏度过低; D. 检流计电路中断

9. 用导电纸的实验装置来模拟空气中的静电场，若发现描绘的等位线和电力线发生了不应有的畸变，可能的原因有 ()。

- A. 导电纸的电导率不均匀 B. 电极与导电纸接触不良;
C. 检流计的灵敏度不够; D. 提供电压的电流电压不够。

10. 下列测量的结果表达式正确的有 ()

- A. $S = 2560 \pm 100\text{mm}$; B. $A = 8.32 \pm 0.02$;
C. $R = 82.3 \pm 0.3\Omega$; D. $f = 2.485 \times 10^4 \pm 0.09 \times 10\text{Hz}$ 。

11. 求 $X = \frac{m}{n}y$ ，其中 $m = 1.00 \pm 0.02\text{cm}$ ； $n = 10.00 \pm 0.03\text{cm}$ ， $y = 5.00 \pm 0.01\text{cm}$ ，其结果表达式为 ()。

- A. $X = 0.50 \pm 0.02\text{cm}$; B. $X = 0.50 \pm 0.03\text{cm}$;
C. $X = 0.50 \pm 0.04\text{cm}$; D. $X = 0.50 \pm 0.01\text{cm}$ 。

三、计算题及其它:

1. 用惠斯通电桥测未知电阻 R_x 时, R_x 按下式 $R_x = (l_1 / l_2)R$ 测出, 式中 R 为已知, l_1 , l_2 是一根滑线电阻用触头分为的两部分, 问触头应如何放, 才能使 R_x 的相对误差极小 (只考虑 l_1 和 l_2 产生的误差)。

2. 现用物距像距法测一凸透镜的焦距 f , 物位置 A 和透镜位置 B 是进行单次测量, 结果是 $A=100.00\text{cm}$, $B=60.00\text{cm}$ (用米尺测量), 像位置 C 共测量了 6 次, 其数据是: 10.16, 20.07, 19.84, 20.28, 19.90, 19.75 (cm)。根据测量算出焦距 f , 不确定度 $\sigma_{\bar{f}}$ 并写出结果表达式。

3. 用单摆测定重力加速度, 其公式为 $g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$ 。其测量数据为: $T = (2.000 \pm 0.002)\text{s}$, $l = (1.000 \pm 0.001)\text{m}$, 计算 $\bar{g}$ 和 $\sigma_{\bar{g}}$, 并写出结果表达式。

四、实验设计

用箱式电势差计校准电流表, 提供的仪器 (具) 如下: 工作电源 1 台; 精密电阻箱一个; 固定电阻一个; 单刀单掷开关十个, 待测电流表一只; 箱式电势差计及附属部件一套; 导线若干; 要求 (1) 绘出自己设计的测试线路图; (2) 简述原理与步骤; (3) 设计记录表格。

模拟试题 III 参考解答

一、填空题：

1. 直接，用米尺测长度，间接，用 $V = S/t$ 测速度。2. 设备，环境，人员，方法。3. 系统误差，小，大。4. $-16'30''$ ， $16'30''$ 。5. 4，4，4。6. 1000×10^3 ，100.0，1.0， 1000×10^3 。7. 电压放大器，整步扫描系统，电子射线示波管，电源。8. 交换，补偿，替换，异号，半周期偶次测量。9. 栅极和阴极间的、第一阳极，扫描，输入。10. $1.5mA$ 。

二、选择题

1. (A)。2. (B)。3. (D)。4. (A)。5. (A, D)。6. (A, D)。7. (A)。8. (C, D)。9. (A, B)。10. (C)。11. (D)。

三、计算题及其它

1. 提示：只考虑 l_1 和 l_2 带来的相对误差是：

$$E_1 = \frac{\sigma_{R_x}}{R_x} = \frac{\sigma_{l_1}}{l_1} + \frac{\sigma_{l_2}}{l_2} = \frac{\sigma_{l_1}}{l_1} + \frac{\sigma_{l_1}}{l-l_1} = \frac{l\sigma_{l_1}}{l_1(l-l_1)}$$

令 $\frac{dE_1}{dl_1} = 0$ ，有：

$$\frac{l(l-2l_1)\sigma_{l_1}}{l_1^2(l-l_1)^2} = 0$$

得 $l_1 = l/2$ ，又因 $\frac{d^2E_1}{dl_1^2} > 0$

故 $l_1 = l/2$ 时， E 有极小值，即当触头放在中间位置相对误差最小。

2. $f = 20.00cm$ ， $S_f = 0.08cm$ ， $f = (20.00 \pm 0.03)cm$ 。

提示： $S_{\bar{C}} = \sqrt{\frac{\sum (C_i - \bar{C})^2}{6(6-1)}} = 0.08cm$ ， $\bar{C} = 20.00cm$ 。

$$f = (A-B)(B-\bar{C})/(A-\bar{C}) = 20.00cm。$$

$$\frac{\partial f}{\partial A} = ((B-\bar{C})-f)/(A-\bar{C}) \approx 20/80$$

$$\frac{\partial f}{\partial B} = ((A - B) - (B - \bar{C})) / (A - \bar{C}) \approx 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial C} = (f - (A - B)) / (A - \bar{C}) \approx -20 / 80$$

$$U_{\bar{C}} = U_B = 0.1 / \sqrt{3} \approx 0.06 \text{ cm}。$$

$$\bar{C}_A = \bar{C}_B = U_A = U_B \quad \bar{C}_C = \sqrt{S_C^2 + U_C^2} = \sqrt{0.08^2 + 0.06^2} = 0.1 \text{ cm}$$

$$\delta_{\bar{f}} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 \delta_A^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B}\right)^2 \delta_B^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C}\right)^2 \delta_C^2} = 0.03 \text{ cm}$$

$$f = (20.00 \pm 0.03) \text{ cm}。$$

$$3. \quad \bar{g} = 9.87 \text{ m/s}^2, \quad \sigma_{\bar{g}} = 0.02 \text{ m/s}^2, \quad g = (9.87 \pm 0.02) \text{ m/s}^2。$$

$$\text{提示: } \bar{g} = 4\pi^2 l / T^2 = 9.87 \text{ (米/秒}^2\text{)}$$

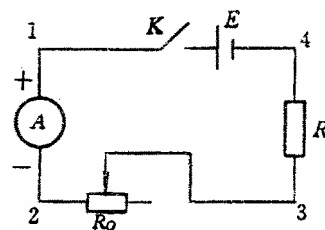
$$\frac{\sigma_{\bar{g}}}{\bar{g}} = \sqrt{(\sigma_l / l)^2 + (2\sigma_T / T)^2} \approx 0.002$$

$$\sigma_{\bar{g}} = 9.87 \times 0.002 \approx 0.02 \text{ (米/秒}^2\text{)}$$

$$g = (9.87 \pm 0.02) \text{ (米/秒}^2\text{)}$$

四、实验设计

(1) 测试线路如图。图中 E 为工作电源， R_0 是精密电阻箱， R 为固定电阻， k 为开关，Ⓐ 为被校表。



(2) 电路接通后 R_0 两端存在电势差，由于串联电路，流过 R_0 和电流表的电流相等为 $I = V_{R_0} / R_0$ 。

因为 V_{R_0} 通过电势差计能准确测定， R_0 也可以由精密电阻箱读出，故 I 能得到准确的值，达到校准目的。

(3) 步骤：

A) 将线路接好，固定电阻起保护作用；

B) 调整好电势差计；

C) 将 2 点接入电势差计的 $E_x^{(+)}$ ，3 点接入 $E_x^{(-)}$ ，使电流表指示第一个校准点，测出 R_0

两端电势差 V_0 ，得第一校准点 $I_1 (= V_0 / R_0)$ ；

D) 改变 R_0 ，测出 R_0 两端电势差，得出 I_2 、 $I_3 \cdots$ ；

E) 作出校准曲线。