

自考“土木工程”（专升本）

同济大学物理实验手册

准考证号 _____

姓 名 _____

同济大学自学考试办公室

绪论

1. 物理学对社会的重要性

物理学——研究物质、能量和它们的相互作用的学科——是一项国际事业，它对人类未来的进步起着关键的作用。对物理教育的支持和研究，在所有国家都是重要的。

2. 如何进行物理实验

一、做好预习报告

预习是做好实验的基础和前提，预习的基本要求是仔细阅读教材，了解实验目的、原理、方法和仪器设备等。预习报告内容包括：

(1) 目的：说明本实验的目的。

(2) 原理摘要：在理解的基础上，简要阐述实验原理，切忌整段照抄。力求做到图文并茂，图系指原理图、电路图或者光路图。写出实验所用的主要公式，说明式中各物理量的意义和单位以及公式的适用条件，画好有关数据表格。

(3) 完成预习作业。

二、实验操作与记录

记录内容包括：

(1) 仪器：记录实验所用主要仪器的编号和规格。记录仪器编号是一个好的工作习惯，便于以后必要时对实验进行复查。记录仪器规格可以使同学逐步地熟悉它，以培养选用仪器的能力。

(2) 实验内容和现象观测记录：实验过程中要随时记下现象、问题和想法，特别当实际情况和预期不同时，要记下有何不同，分析为何不同。

(3) 数据：数据记录应做到整洁清晰而有条理，尽量采用列表法。注意不能用铅笔记录。在根据数据特点设计表格时，力求简单明了，分类清楚而有条理，表格中物理量要注明单位。实验中确实测错而无用的数据，可在旁边注明“作废”字样，或用笔在无用数据上划一条斜线，而不要乱涂乱擦，影响整洁。

三、数据处理与讨论分析

(1) 作图、计算结果与不确定度估算：作图要按图解法要求，绘制图线要用铅笔。计算结果时，先将文字公式化简，再代入数值进行运算。不确定度估算要写出公式。并写出计算过程，以便检查复核。

(2) 实验结果：按标准形式写出实验的结果。在必要时，注明结果的实验条件。

(3) 思考题：思考题有难有易，可自行选做或由教师指定做哪些。

(4) 分析实验不确定度的主要原因和改进方法。

(5) 附注：对实验中出现的说明和讨论，或写出实验心得和建议等。

不确定度表达和数据处理方法

1. 任意一次测量值的标准偏差

某一次测量值 x_i 的误差 δ_i 是测量值 x_i 与真值 T_x 的差值。由于真值不知道，误差 δ_i 无法计算。根据算术平均值是接近真值的最佳值的结论，在实际估算时采用算术平均值 \bar{x} 代替真值，用各次测量值与算术平均值的差值。

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

σ_x 称之为任意一次测量值的标准偏差，它是测量次数有限多时，标准误差 σ 的一个估算值。其代表的物理意义为，如果多次测量的随机误差遵从正态分布，那么，任意一次测量，测量值误差落在 $-\sigma_x$ 到 $+\sigma_x$ 区域之间的可能性（概率）为 68.3%。或者说，它表示这组数据的误差有 68.3% 的概率出现在 $-\sigma_x$ 到 $+\sigma_x$ 的区间内。

2. 不确定度的概念

一个完整的测量结果不仅要给出该量值的大小（即数值和单位），同时还应给出它的不确定度。用不

确定度来表征测量结果的可信赖程度。于是测量结果应写成下列标准形式：

$$X = x \pm u \quad (\text{单位}), \quad u_r = \pm \frac{u}{x} \times 100\%$$

式中 x 为测量值，对等精度多次测量而言， x 为多次测量的算术平均值； u 为不确定度， u_r 为相对不确定度。

有效数字及其运算规则

1. 有效数字

在测量某一物理量时，由于种种原因（不易测准或在读数估计时有某种程度的不确定等），导致测量结果的末位数字不可能完全准确，所以物理量的测量结果要用有效数字来表示。例如，用米尺测量某物体的长度，得到 10.56cm 的结果，其中的末位数 6 由于是在 1mm 中估计得到的，所以不可能完全正确。这就组成了一个 4 位的有效数字，其中前三位是准确数字，末位为可疑数字。

测量结果的有效数字不受其所取单位的影响。如上例中 10.56cm ，如用 m 为单位表示，则为 $0.1056m$ ；用 km 为单位表示，则为 $0.0001056km$ （通常用数量级表示为 $1.056 \times 10^{-4}km$ ），均为 4 位有效数字，即数字 1 前面的用以表示小数点位置的“ 0 ”均不是有效数字，但在“ 1 ”和“ 5 ”之间的“ 0 ”应属有效数字。

2. 有效数字的运算规则

有效数字运算规则指的是由直接测量得到的各量有效数字位数与复合量的有效数字位数之间的关系。

1. 加、减的运算规则

在几个数字相加或相减时，计算结果的末位数应与这几个数据中不确定度最大项的末位有效数字对齐。例如：

$$103.\underline{3} + 12.561 - 1.652 = 114.\underline{2}$$

2. 乘、除的运算规则

在几个数字相乘或相除时，计算结果的有效数字位数应与这几个数据中有效数字位数最少者相同。例如：

$$\underline{2.81} \times 0.5437 \times 5.6724 = \underline{8.67}$$

所以，对于一个间接测量值，如果它是由几个直接测量值相乘除而计算得到的，那么，在进行测量时应考虑各个直接测量值的有效数字位数要基本相仿，或者说，它们的相对不确定度要比较接近。如果相差悬殊，那么，精度过高的测量就失去了意义。

还须指出，在求复合量时，如运算过程可分几步，则中间结果的有效数字应比根据运算规则所得的多保留一位，以免由于舍入过多影响最后结果的精确性。

实验1 集成霍尔传感器

1879年，二十四岁的霍尔，是美国霍普金斯大学二年级研究生，他在研究载流导体在磁场中受力性质时，发现一种电磁效应，即如果在电流的垂直方向加上磁场，则在与电流和磁场都垂直的方向上将建立一个电场，这个效应后来被称为霍尔效应。近30多年来，由高电子迁移率的半导体制成的霍尔传感器广泛用于磁场测量、自动化、计算机和信息技术等方面。在电流体中的霍尔效应也是目前研究中的“磁流体发电”的理论基础。霍尔元件具有结构简单牢靠，使用方便、成本低廉等优点，所以它在许多方面得到了普遍应用。

霍尔效应的研究一直在发展，量子霍尔效应的发现是20世纪凝聚态物理学的一项辉煌成就。1980年和1982年，德国物理学家冯·克利青及美籍华裔物理学家崔琦等人，在强磁场和极低温条件下先后发现了整数量子霍尔效应和分数量子霍尔效应，并取得了重要应用，例如用于确定电阻的自然基准，用于精确测定光谱精细结构常数等。他们分别获得了1985年度和1998年度诺贝尔物理学奖。

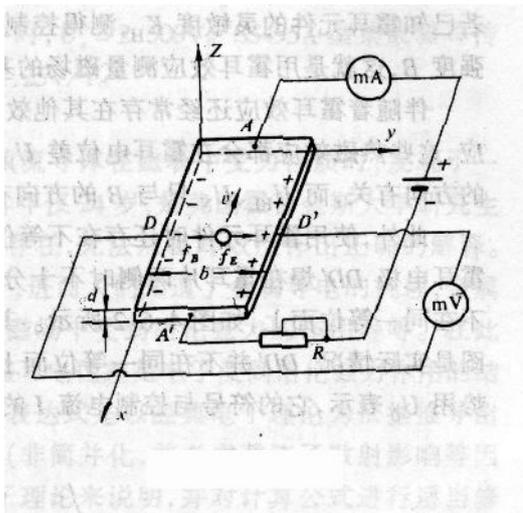
一、目的

1. 了解霍尔效应。
2. 学习用集成霍尔传感器测量磁感应强度的原理和方法。
3. 学会采用螺线管中心点磁感应强度理论值来校准集成霍尔传感器灵敏度的方法。

二、原理

1. 霍尔效应

如图1所示，把一块半导体薄片(锗片或硅片)放在垂直于它的磁场B中(B的方向沿z轴自



下而上)。在薄片的四个侧面A, A', D和D'分别引出两对电极。当沿AA'方向(x轴方向)通过电流I时，薄片内定向移动的载流子受到洛伦兹力 f_B 的作用，载流子受力偏转的结果使电荷在DD'两侧积聚而产生电位差(图1中设载流子是负电荷，故 f_B 沿负y轴方向)，这一现象称为霍尔效应。这个电位差称为霍尔电位差。

2. 集成霍尔传感器

集成霍尔传感器是把霍尔元件、集成电路放大器和薄膜电阻剩余电压补偿器组合而成的一种微型测量磁感应强度的器件。集成电路放大器将霍尔元件只有毫伏数量级的霍尔电位差加以放大到伏特数量级。剩余

电压补偿器将在无磁场情况下，由于半导体材料结晶不均匀、各种副效应以及电极不对称等因素引起的剩余电压，采用电压补偿法加以消除。集成霍尔传感器的输出电压 U_S 与磁感应强度B的关系式为

$$B = (U_S - 2.500) / K \quad (1)$$

式中K为霍尔传感器的灵敏度。

3. 通电螺线管内部轴向磁场的计算

设螺线管长为L半径为r，螺线管上均匀地绕了N匝，当 $N \gg r$ 时，就可以把螺线管看作“无限长”。根据理论分析，“无限长”螺线管内部轴线附近各点磁场是均匀的，当流过线圈的励磁电流为I时，它们的磁感应强度为：

$$B = \mu_0 \frac{N}{L} I_m \quad (2)$$

式中 μ_0 为真空中的磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m \cdot A^{-1}$ 。

三、仪器与器材

实验装置分为三部分，见图4-5-2。

1. SS495A型集成霍尔传感器

该传感器的线性测量范围是 $-67\sim+67\text{mT}$ ，工作电压为DC $4.5\sim 5.5\text{V}$ 。在 0 T 时，零点电压为 $(2.500\pm 0.075)\text{V}$ ，功耗(在 5V 时)为 7mA ，灵敏度为 $(31.3\pm 1.3)\text{V/T}$ ，线性误差为 1% ，温度误差 $<0.06\%/^{\circ}\text{C}$ 。内含激光修正的薄膜电阻剩余电压补偿器，不必考虑剩余电压影响。

2. 螺线管

螺线管长度 $L=(260\pm 1)\text{mm}$ ，内径 $D_1=(25.0\pm 0.2)\text{mm}$ ，外径 $D_2=(45.0\pm 0.2)\text{mm}$ ，层数 $M=10(\text{层})$ ，匝数 $N=(3000\pm 20)$ 匝，螺线管中心均匀磁场范围大于 100mm 。

3. 电源和数字电压表组合仪

组合仪分为三个部分：

(1)组合仪面板的左侧是数字直流稳流源。它提供螺线管的励磁电流，精密多圈电位器用于调节输出电流的大小，从零到 0.500A ，调节精度为 1mA ，电流大小由三位半数字电流表显示。

(2)中间为四位半数字电压表，钮子开关切换量程 $0\sim 19.999\text{V}$ 或 $0\sim 1999.9\text{mV}$ 。

(3)右侧为直流稳压电源。 $4.8\sim 5.2\text{V}$ 可微调直流电源为传感器提供工作电压，“+”红色接线柱接传感器的1脚(V+，红色导线)，“-”黑色接线柱接传感器的2脚(V-，黑色导线)。 $2.4\sim 2.6\text{V}$ 可微调直流电源为传感器提供补偿电压。传感器的3脚(OUT，输出电压脚，黄色

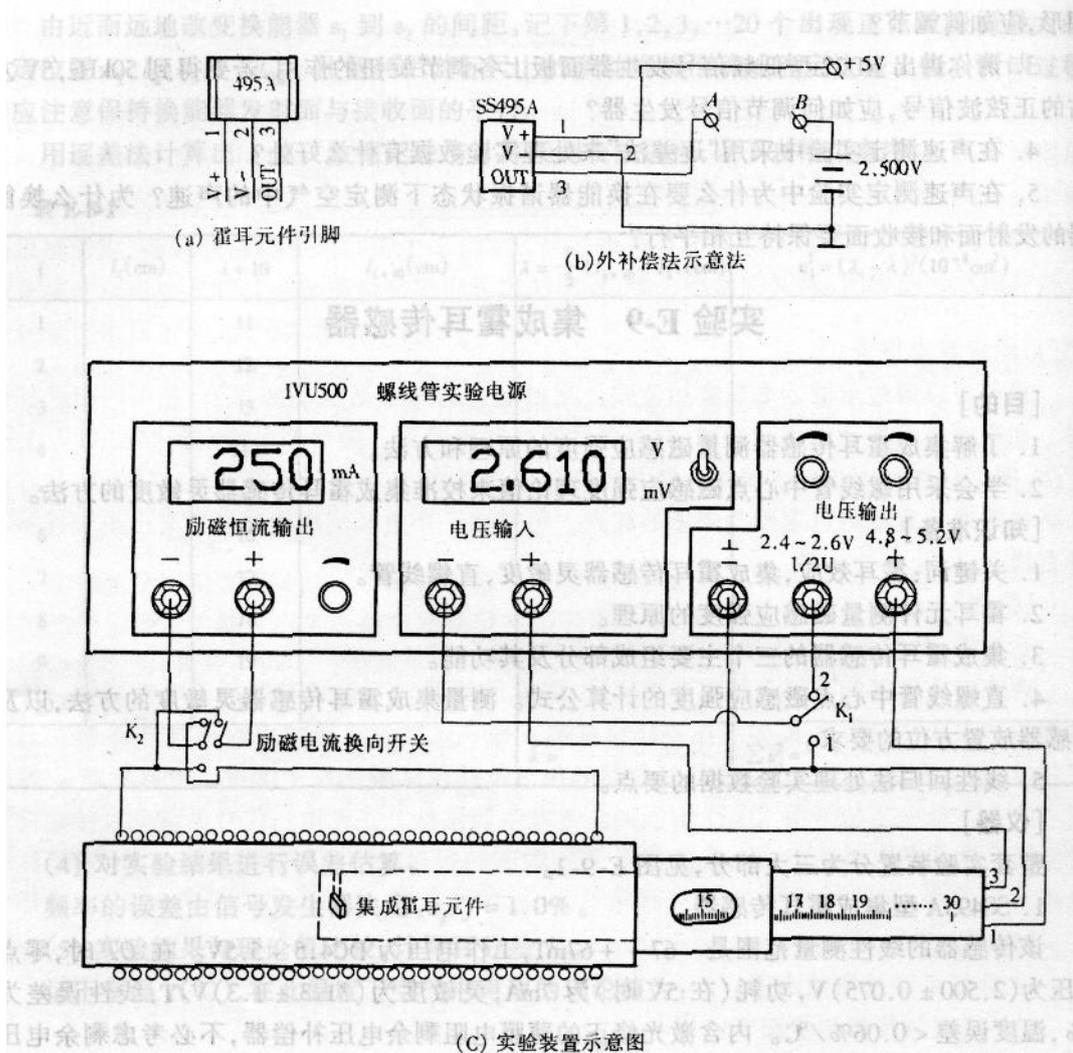


图 4-5-2 集成霍尔元件和实验装置示意图

导线)与数字电压表的“+”红色接线柱连接，电压表的“-”黑色接线柱与电源的“-”黑色接线柱连接，数字电压表切换到V档(即钮子开关拨向上)。

四、预习作业

- 1.什么是霍尔效应？霍尔传感器有哪些应用？
- 2.本实验如何测定集成霍尔传感器的灵敏度K？

五、实验内容

- 1.对集成霍尔传感器的进行定标，即测定传感器的灵敏度K。

(1)在熟悉实验装置的基础上，接好实验电路(见图4-5-2)。注意：电源极性不能有误，以免损坏传感器。传感器移置在螺线管中央部位。

(2)把传感器调整到标准化工作状态，即在零磁场时，传感器输出电压为2.500V。在螺线管励磁电流为零的条件下，调节方法如下：单刀双掷开关K置于1，调节“4.8~5.2V”电源输出电压，使数字电压表示数为2.500V。

(3)接通螺线管励磁电流，在0~250mA的范围内，每隔25mA测一点传感器的输出电压 U_s 。用作图法处理数据，利用螺线管中心点磁感应强度的理论公式，求出传感器的灵敏度。

2.把集成霍尔传感器置于零磁场状态下，用一个外接的2.500V电位差与传感器输出电压2.500V进行补偿，于是可得传感器输出电压 U 与磁感应强度 B 的关系式为 $B=U/K$ 。在此条件下，测量螺线管通以200mA励磁电流时的磁场分布，即管内磁感应强度 B 与位置刻度 x 的关系。

补偿方法如下：断开换向开关K2，使励磁电流为零；保持传感器工作电压不变，将开关K1置于2，调节“2.4~2.6V”电源的输出电压，使数字电压表的示数为零(此时数字电压表量程开关应拨在mV档)。

测量螺线管磁感应强度时，集成霍尔传感器的输出电压可取螺线管通以正向和反向励磁电流时两个输出电压的平均值，即 $U=(U'+|U''|)/2$ 。

六、数据处理

表1 螺线管电流I与螺线管中心霍尔传感器输出电压 U_s 的关系

I/mA	0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250
U_s/V											

- 1.测定集成霍尔传感器的灵敏度K。

考虑到实验使用的螺线管为有限长，则其内部轴向磁场的计算公式为

$$B = \frac{\mu_0 N}{\sqrt{L^2 + D^2}} I \quad (\text{式中 } D = \frac{\Phi_1 + \Phi_2}{2})$$

由表4-5-1中数据作 $U_s \sim I$ 图，可求得直线斜率 $\Delta U_s / \Delta I$

则霍尔传感器灵敏度

$$K = \frac{\Delta U_s}{\Delta B} = \frac{\sqrt{L^2 + D^2}}{\mu_0 N} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta I} =$$

表2 螺线管内磁感应强度与位置的关系

x/cm											
U' / mV											
U'' / mV											
U / mV											
B/mT											

- 2.绘出通电螺线管 $B \sim x$ 曲线图。

实验 2 示波器的使用

阴极射线示波器（简称示波器）是用来直接、观察和测量电压波形的电子仪器，它把原来肉眼看不见的电压波形变换成可见的图像，它还可以测量频率、相位等。一切可转化成电压的电学量，如电流、电阻等，以及利用传感器可以转化为电压的一些非电学量，如温度、压力、光强等，它们的动态过程均可用示波器来观察和测量。由于电子质量非常小，几乎没有惯性，因而可以在很高的频率范围内工作。现代示波器的频率响应可从直流至 10^9Hz ；它可观察连续信号，也能捕捉到单个的快速脉冲信号并将它贮存起来，定格在屏幕上供仔细分析研究。示波器是用途极为广泛的一种通用现代测量工具。

一、目的

1. 了解示波器为什么能把看不见的变化电压变换成看得见的图象。
2. 学会使用示波器观测电压波形。
3. 学会用示波器观察李萨如图形并用李萨如图方法测量正弦信号的频率。

二、原理

1. 结构

示波器主要由三部分组成：阴极射线示波管；控制电路；电源系统。

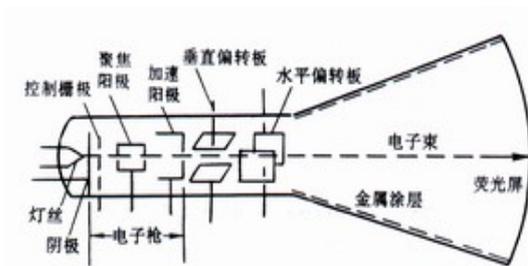


图 1

示波管内部结构如图 1 所示。阴极被量电子，经聚焦、加速后高速轰击荧光屏，在靠近阴极处设置控制栅极，（相对阴极为来控制电子束流强度，使荧光“辉度”改变。在电子束路径两旁设置两对平行板电极，改变加在其上电压，可控制电子束的运动。

2. 电偏转

在示波管内有两对平行板电极，垂直方向的一对平行板电极为水平（或 X ）偏转板，水平方向的一对平行板电极为垂直（或 Y ）偏转板。在 X 、 Y 偏转板上加电压时，其电场致使运动电子沿水平、垂直方向发生偏移，这种现象称为电偏转。当 Y 偏转板上电压为零时，电子束正好射在荧光屏正中 P 点。如果 Y 偏转板上加上电压，则电子束受到电场力作用，运动方向发生偏移（见图 2）。如果所加的电压不断发生变化， P 点的位置也跟着在铅垂线上移动。在屏上看到的是一条铅直的亮线。荧光屏上亮点在铅直方向的位移 Y 和加在 Y 偏转板的电压 U_y 成正比。若在 X 偏转板上加上一个变化的电压，那么，荧光屏上亮点在水平方向的位移 X 也与加在 X 偏转板的电压 U_x 成正比，于是在屏上看到的则是一条水平的亮线。

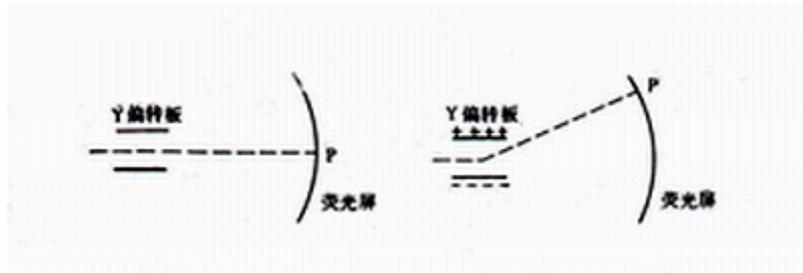


图 2 Y 偏转板使电子束作铅直方向运动

3. 示波器显示波形的原理

如果在 Y 偏转板上加上一个随时间作正弦变化的电压， $U_y = U_{ym} \cdot \sin \omega t$ ，我们在荧光屏上仅看到一条铅直的亮线，而看不到正弦曲线。只有同时在 X 偏转板上加上一个与时间成正比的锯齿形电压 $U_x = U_{xm} \cdot t$ （见图 3），才能在荧光屏上显示出信号电压 U_y 和时间 t 关系曲线，其原理如图 4 所示。

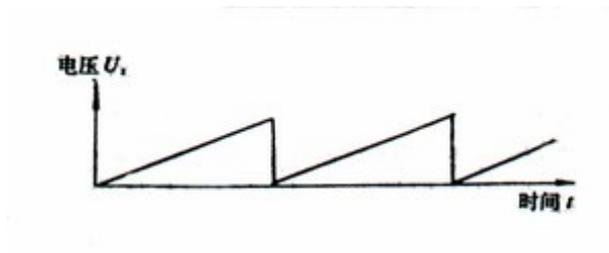


图 3 锯齿形电压

设在开始时刻 a , 电压 U_y 和 U_x 均为零, 荧光屏上亮点在 A 处, 时间由 a 到 b , 在只有电压 U_y 作用时, 亮点沿铅直方向的位移为 bB_y , 屏上亮点在 B_y 处, 而在同时加上 U_x 后, 电子束既受 U_y 作用向上偏转, 同时又受 U_x 作用向右偏转 (亮点水平位移为 bB_x), 因而亮点不在 B_y 处, 而在 B 处。随着时间推移, 以此类推, 便可显示出正弦波形来。所以, 在荧光屏上看到的正弦曲线实际上是两个相互垂直的运动 ($U_y=U_{ym} \cdot \sin \omega t$ 和 $U_x=U_{xm} \cdot t$) 合成的轨迹。

推, 便可显示出正弦波形来。所以, 在荧光屏上看到的正弦曲线实际上是两个相互垂直的运动 ($U_y=U_{ym} \cdot \sin \omega t$ 和 $U_x=U_{xm} \cdot t$) 合成的轨迹。

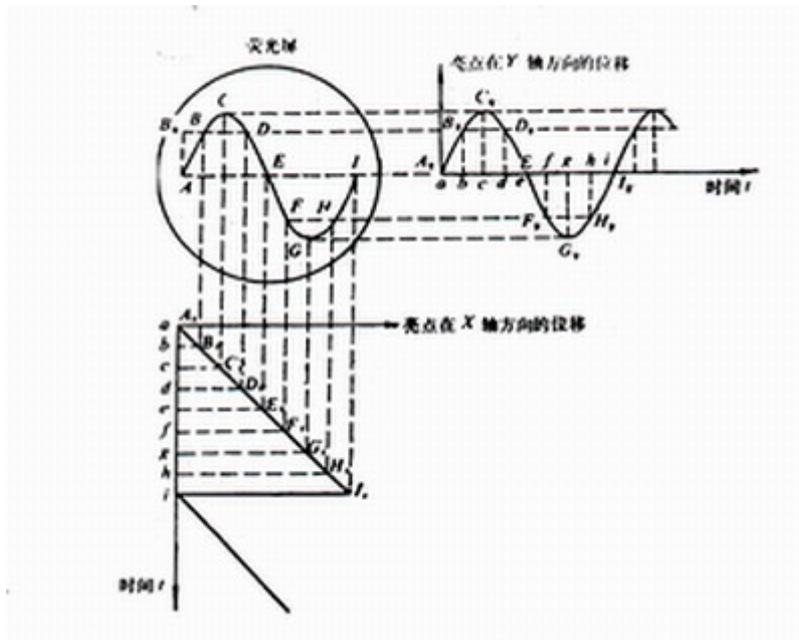


图 4 示波器显示波形的原理

由上可见, 要想观测加在 Y 偏转板上电压 U_y 的变化规律, 必须在 X 偏转板上加上锯齿形电压, 把 U_y 产生的垂直亮线“展开”。这个展开过程称为“扫描”, 锯齿形电压又称为扫描电压。

怎样才能使荧光屏上显示的波形稳定, 这是示波器使用的一个重要问题。如果显示的波形处于不断变化的状态, 那么, 测量就无法进行。通常所用的示波器只能测量周期性变化的电压信号。对于周期性电压信号只要保证每次扫描起始点 (如图 4 中的 A 点) 位置不变, 就可以达到显示波形稳定不变的目的 (见下面“同步电路”的叙述)。

综上所述, 示波器显示稳定波形的条件是: 第一, Y 偏转板上必须加上足够大的待测信号; 第二, X 偏转板上必须加上锯齿波电压; 第三, 保持每次扫描起始点的位置不变。

三、实验内容

1. 示波器使用前的校准

- (1) 示波器面板上各控制器置于表 1 的位置。
- (2) 接通电源, 指示灯亮, 稍待片刻, 仪器进入正常工作状态。用电缆线连接校准信号方波输出端和 Y 轴输入端。
- (3) 适当调节辉度旋钮, 此时屏上显示出方波。

(4) 将“LEVEL”电平旋钮反时针转动直至方波稳定(同步),然后将Y轴输入灵敏度“微调”旋钮和X轴扫描“微调”旋钮顺时针旋足,如果屏上显示的方波Y轴坐标刻度为5.0div(大格),方波周期在X轴坐标刻度为10.0div,说明示波器性能基本正常。如果不符,应向教师反映,调节正常后,才能进行测量。

对于XJ4210型示波器,它的标准信号亦为方波, $U_{P-P} = (1.00 \pm 0.02)V$, $f = (1.00 \pm 0.22)kHz$ 。若示波器性能正常,荧光屏上显示出方波,幅值为5.0div ($U_{P-P} = 5.0div \times 0.2V/div = 1.0V$),周期宽度为10.0div ($T = 10.0div \times 0.1ms/div = 1.0ms$)。

2. 观察波形

- (1) “AC ⊥ DC”转换开关置于“AC”。
- (2) 先观察正弦波。将待测信号直接输入Y轴输入端。
- (3) 调节V/div选择开关,使屏上波形的垂直幅度在坐标刻度以内,调节t/div扫描开关,使屏上出现一个变化缓慢的正弦波形。调节“LEVEL”电平旋钮,使波形稳定。
- (4) 改变扫描电压的频率(t/div),观察正弦波形的变化,使屏上出现两个、三个、……正弦波形。试考虑t/div应增加还是减小,为什么?

3. 交流电压的测量

设荧光屏上波形如图9所示。根据荧光屏Y轴坐标刻度,读得信号波形的峰-峰值为 $D_y div$ (图9中 $D_y = 3.6$ 格)。如果V/div档级标称值为0.5V/div,则待测信号峰-峰值为

$$U_{P-P} = 0.5V/div \cdot D_y div = 0.5 \times 3.6V = 1.8V$$

电压峰-峰值的测量要注意选择适当的V/div值,即在满足测量范围的前提下,V/div值尽可能选得小些,使所显示的波形尽可能大些,以提高测量精度。

读数前应检查一下,V/div选择开关的红色微调旋钮是否已顺时针旋足。

4. 时间测量

图9中PQ两点的時間间隔t就是正弦电压 U_y 的周期 T_y 。根据荧光屏X轴坐标刻度,读得信号波形PQ两点的水平距离为 $D_x div$ (图9中 $D_x = 4.2$ 格)。如果t/div扫描开关档级的标称值为0.5ms/div,则PQ两点的時間间隔

$$t = 0.5ms/div \cdot D_x div = 0.5 \times 4.2ms = 2.1ms$$

所以正弦电压的频率

$$f_y = \frac{1}{T_y} = \frac{1}{2.1ms} = 4.8 \times 10^2 Hz$$

5. 当正弦波观测完毕,可以继续观测半波整流、全波整流、三角波、方波和衰减振荡等波形,并分别测量它们的电压峰-峰值及其周期、频率等。

6. 观察李萨如图形,测量正弦信号频率。

在示波器X偏转板上加上锯齿电压进行扫描时,在一个扫描周期内,扫描电压随时间成正比地增加,因此锯齿形电压扫描的过程又称为线性扫描。除了线性扫描以外,在X偏转板(即X轴输入端)上也可以加上其它波形的扫描电压,称为非线性扫描。

如果在示波器的X和Y偏转板上分别输入两个正弦信号,且它们频率的比值为简单整数比,这时荧光屏上就呈现出李萨如图形,它是两个互相垂直的简谐振动合成的结果。若 f_x 和 f_y 分别代表X与Y轴输入信号的频率, n_x 和 n_y 分别为李萨如图形与假想水平线及假想垂直线的切点数目,则 n_x 、 n_y 与 f_x 、 f_y 的关系是:

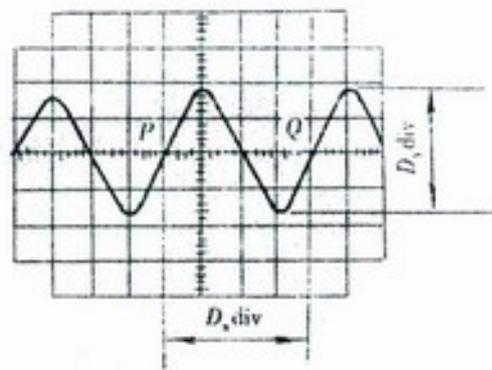


图9 U_{P-P} 值和时间的测量

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{n_x}{n_y} \qquad f_y = f_x \frac{n_x}{n_y}$$

如图 10 所示，如果 f_x 已知，从荧光屏上的图形求出 n_x 及 n_y ，由上式可算出 f_y ，因而用李萨如图形可以测量正弦信号的频率。

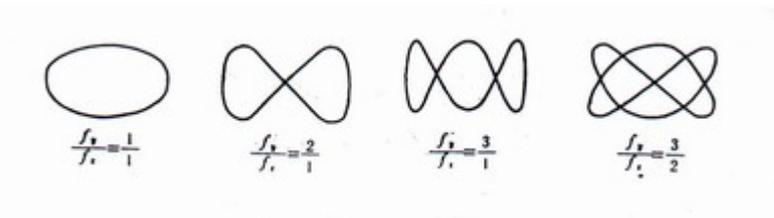


图 10 李萨如图

把 X 轴控制部分的“触发信号极性开关”拨到“EXT X”，将实验室自制的待测信号源产生的正弦信号送入示波器的“ Y 轴输入”，再将 XD-22 型低频信号发生器产生的正弦信号送入“ X 轴输入”，变化此信号的频率，可在示波器上看到李萨如图形。分别调节 $n_y:n_x$ 为 1:1、2:1、3:1、1:2、1:3 等，求出自制信号源正弦信号频率的平均值。

四、数据记录与计算（列于下面表中）

表 2 观察与测量电压波形

待测信号波形	电压峰-峰值			周 期			频 率 f_y (kHz)
	V/div	div	U_{P-P} (V)	ms/div	div	T_y (ms)	

表 3 观察李萨如图形，测量正弦信号频率

李萨如图形	f_x (kHz)	n_y	n_x	$f_y = \frac{n_x}{n_y} f_x$ (kHz)
				$\bar{f}_y =$ (kHz)

实验3 空气中声速的测量

声波是一种在弹性介质中传播的机械波，为弹性纵波。声速是描述声波在介质中传播特性的一个重要物理量，它的传播过程与介质的性质和状态有着密切的关系，因此，借助声速的测量常常可以间接地完成诸如材料的弹性模量测定、气体成分的分析、液体密度和溶液浓度的测定等。

本实验在超声波范围内（频率一般在 20KHz 以上）作声速测量，优点是实验者可不受干扰。采用压电陶瓷换能器作为发射和接受超声波的器件，它发射的超声波频率单纯，方向性强，有利于提高测量准确度。

声速测量的常规方法可分为两种，一种是根据公式 $v=S/t$ ，测出声波传播路程 S 所需的时间 t ，再求声速 v ；另一种是利用公式 $v=f \cdot \lambda$ ，测出声波的频率和波长，再求声速。

本实验采用后一方法。

一、目的

1. 了解估算声速的温度比较法。
2. 学会用驻波法测声速。
3. 培养综合使用仪器的能力。

二、原理

1. 温度比较法

在气体中传播的声波，在假定气体为理想气体时，其传播速度可借助热力学与气体动理论的有关原理而求得

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{T_0}} \quad (1)$$

式中 v_0 ——被测空气处于零摄氏度时的声速；

T_0 —— $T_0=273.15\text{K}$ ； t ——空气的摄氏温度。

实验测得，当空气中水蒸气、碳酸气含量和风速处于正常条件下，气温 0°C 时的声速 $v_0=331.45\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2. 驻波法(波腹示踪法)测声速

根据波动理论，声速 v 可表示为

$$v=f \lambda \quad (2)$$

在声波频率 f 已知的前提下，只要精确测定空气中声波波长 λ 就可确定声速 v 。实验室中常采用驻波法，即波腹示踪法测声波波长 λ 。

设一平面发射源 a 发出频率为 f 的平面声波，经过空气传播到达平面接收器 b 。如果接收面与发射面之间严格平行，且又距离适当，入射波在接收面上将垂直反射，从而导致入射波与反射波相干涉形成驻波。设沿 X 轴正方向发射的平面波方程为

$$y_1 = A \cos(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x)$$

则反射波方程为

$$y_2 = A \cos(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} x)$$

两波叠加，在空间某点的合振动方程为

$$y = y_1 + y_2 = \left| 2A \cos(2\pi \frac{x}{\lambda}) \right| \cos(2\pi \frac{t}{T}) \quad (3)$$

该式称为驻波方程。

改变接收器与发射器之间的距离 x ，如果下列等式成立：

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = k\pi$$

即

$$x = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (k \text{ 为正整数})$$

则该点的声振动振幅最大，称为波腹(见图1)。显然，每个最大值均位于半波长的整数倍位置上，故相邻两波腹之间的距离为半波长 $\lambda / 2$ 。因此，在已知频率 f 的条件下，只要测得接收面分别位于两相邻波腹位置上时接收器间的距离差 Δx

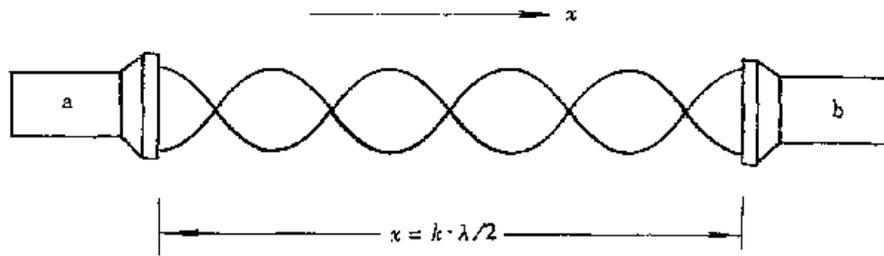


图 2.8.1 驻波的形成

就可求得波长 λ ，通过式(2)，便可测定声速 v ，即

$$v = f\lambda = f \cdot 2\Delta x \quad (4)$$

测量声速的实验装置如图2所示。其中声波发射器与接收器是由压电陶瓷片构成的电声与声电转换元件，由音频信号发生器产生的正弦电压施加在发射器上，转换成机械波(声波)，接收器接受入射声波，并将其转换成正弦电压信号，此信号输入示波器进行显示观察。发射器和接收器分别安装在大型游标卡尺的固定端和活动端上，从而保证在一定的长度范围内可连续自如地改变和精确地测量距离 x 。此外，还附有能精确测量音频振动信号频率的数字频率计。

三、仪器与器材

带有两个压电换能器的大型游标卡尺、信号发生器、数字频率计(两者也可

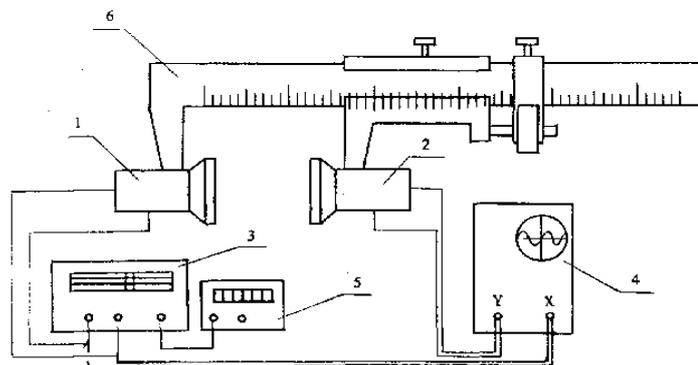


图 2-8-2

声速测量实验装置

1—声波发射器；2—声波接收器；3—音频信号发生器；
4—示波器；5—数字频率计；6—大型游标卡尺

合一)、

示波器、温度计。

四、预习作业

1. 在空气中传播的声波是纵波还是横波?图2中在接收头2与发射头1之间为什么会出现驻波现象?

2. 怎样用示波器观察两个互相垂直的简谐振动的叠加振动和位相差?

3. 怎样测定声波波长?实验时只测定一个波长间隔可以吗?为什么?

五、实验内容与步骤

1. 测出室温 t 用温度比较法,利用式(1)求出声速。

2. 波腹示踪法测波长。

(1)按图2连接线路。

(2)调整游标卡尺,先使发射器端面与接收器端面靠近,调整信号发生器、示波器,使示波器屏上出现正弦信号。

(3) 寻找共振频率：调节信号发生器输出频率，使示波器屏上观察到的信号最大，此时的频率就是共振频率（即换能器的固有频率） f_0 。在共振频率时换能器有最大的转换效率，声波能传得较远，测量灵敏度也较高。

(4) 测波腹位置：在共振频率条件下，将接收器向远离发射器方向缓慢移动（利用游标卡尺上的微调装置），当示波器屏上依次出现信号振幅最大时，分别记下游标卡尺上的读数 $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$ ，共12点。

六、数据处理

1. 数据记录与计算

开始室温 $t =$ $^{\circ}\text{C}$ ； 结束室温 $t' =$ $^{\circ}\text{C}$ 。

开始频率 $f_0 =$ Hz ； 结束频率 $f_0' =$ Hz

表 3-13 **波腹位置记录与计算波长 λ 表**

i	x_i (cm)	$i+6$	x_{i+6} (cm)	$\lambda_i = \frac{1}{3} x_{i+6} - x_i $ (cm)	$\Delta\lambda_i = \lambda_i - \bar{\lambda} $ (cm)
1		7			
2		8			
3		9			
4		10			
5		11			
6		12			
				$\bar{\lambda} =$ (cm)	$\overline{\Delta\lambda} =$ (cm)

$$\bar{f}_0 = \frac{f_0 + f_0'}{2} = \quad \text{Hz} \quad \quad \quad v = \bar{f}_0 \bar{\lambda} = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. 温度比较法计算

$$v = v_0 \sqrt{1 + \frac{t}{T}} = 331.45 \times \sqrt{1 + \frac{t+t'}{2 \times 273.15}} = \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. 计算声速相对不确定度 $U_r = \frac{U_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{U_{f_0}}{f_0}\right)^2 + \left(\frac{U_{\lambda}}{\lambda}\right)^2}$,

式中 $\frac{U_{f_0}}{f_0}$ 由实验室给出，例如 $\frac{U_{f_0}}{f_0} = 0.5\%$ ，波长不确定度 $U_{\lambda} = \sqrt{u_{\lambda A}^2 + u_{\lambda B}^2}$ ，式中

$$u_{\lambda A} = \sqrt{\frac{\sum (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{n-1}}, \quad u_{\lambda B} = 0.002 / \sqrt{3} \text{ cm}$$

4. 计算不确定度，由 U_r 可求得声速不确定度 $U_v = U_r \cdot v =$ 则实验结果 $v \pm U_v =$

计算百分差

$$\Delta v = |v_{\lambda} - v_T| = \quad \quad \quad E_r = \frac{\Delta v}{v_t} \times 100\% =$$

实验4 迈克尔逊干涉仪的应用

迈克尔逊干涉仪是1883年美国物理学家迈克尔逊和莫雷合作，为研究“以太”漂移而设计的精密光学仪器，是利用分振幅法产生双光束以实现干涉的一种仪器。迈克尔逊与其合作者曾用此仪器进行了三项著名的实验，即测光速实验、标定米尺及推断光谱线精细结构，迈克尔逊运用它进行了大量的反复的实验，动摇了经典物理的以太说，为相对论的提出奠定了实验基础。该仪器设计精巧，用途广泛，不少其它干涉仪均由此派生出来，所以说迈克尔逊干涉仪是许多近代干涉仪的原型。而迈克尔逊也因发明干涉仪和光速的测量而获得1907年诺贝尔物理学奖。直至今日，迈克尔逊干涉仪仍被广泛地应用于长度精密计量和光学平面的质量检验（可精确到十分之一波长左右）及高分辨率的光谱分析中。

一、目的

1. 了解迈克尔逊干涉仪的原理并掌握调节方法。
2. 观察等倾干涉、等厚干涉的条纹，并能区别定域干涉和非定域干涉。
3. 测定 He - Ne 激光的波长。

二、原理

1. 迈克尔逊干涉仪的构造

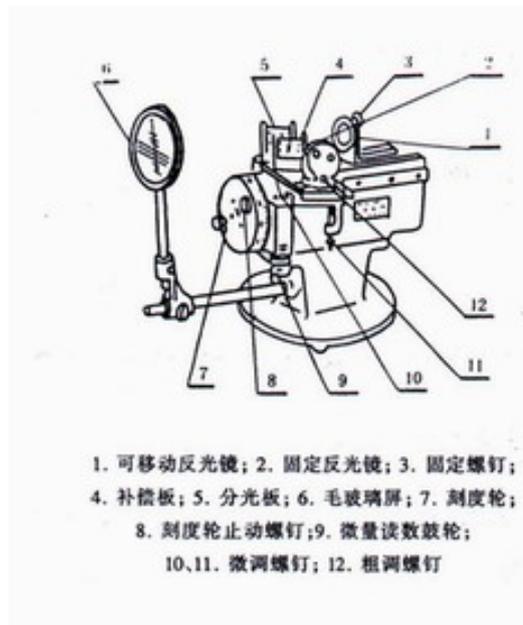


图 1

干涉仪的构造如图1所示。其主要部件是精密的机械传动系统和四片精细磨制的光学镜片。图中5和4即分光板 G_1 和补偿板 G_2 ，是两块几何形状、物理性能相同的平行平面玻璃。其中 G_1 的第二面镀有半透明铬膜，称为分光板，它可使入射光分成振幅（或光强度）近似相等的一束透射光和一束反射光。 G_2 起补偿光程作用，称为补偿板。 M_1 和 M_2 是两块表面镀铬加氧化硅保护膜的反射镜。 M_2 固定在仪器上，称为固定反射镜， M_1 装在可由导轨前后移动的拖板上，称为移动反射镜。确定 M_1 的位置有三个读数装置：

①主尺——在导轨的侧面，最小刻度为毫米；②读数窗——可读至 $0.01mm$ ；③带刻度盘的微调读数鼓轮，可读至 $0.0001mm$ ，估读到 $10^{-5}mm$ 。 M_1 和 M_2 镜架背后各有三个调节螺丝，可用来调节 M_1 和 M_2 的方位。（ M_1 镜架背后螺丝已调好，不必再调）。此外，还可通过调节水平拉簧螺丝与垂直拉簧螺丝使干涉图像作上下左右移动。而仪器水平可通过调整底座上三个调节螺丝来达到。

2. 迈克尔逊干涉仪的光路

干涉仪的光路如图2所示。光源上一点 S 发出的一束光线经分光板 G_1 而被分为两束光线（1）和（2）。这两束光分别射向相互垂直的全反射镜 M_1 和 M_2 ，经 M_1 和 M_2 反射后又

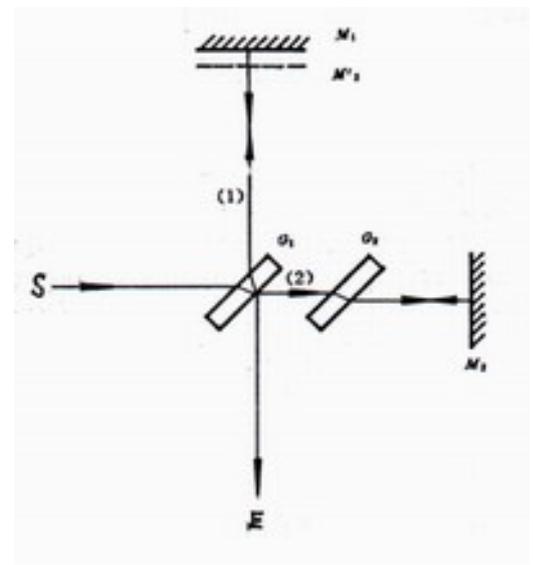


图 2

汇于分光板 G_1 ，这两束光再次被 G_1 分束，它们各有一束按原路返回光源（设两束光分别垂直于 M_1 、 M_2 ），同时各有一束光线朝 E 的方向射出。由于光线（1）和（2）为两相干光束，因此可在 E 的方向观察到干涉条纹。

G_2 为补偿板，它的引进使两束相干光的光程差完全与波长无关（由于分光板 G_1 的色散作用，光程是 λ 的函数，因此作定量检测时，没有补偿板的干涉仪只能用准单色光源，有了补偿板就可消除色散的影响），且保证了光束（1）和（2）在玻璃中的光程完全相同，因而对不同的色光都完全可将 M'_2 等效为 M_2 。

3. 三种不同干涉类型及特点

用迈克尔逊干涉仪可观察定域干涉和非定域干涉，这取决于光源的性质，而定域干涉又可分为等倾干涉和等厚干涉，这取决于 M_1 和 M_2 是否垂直，也就是说 M_1 和 M'_2 是否平行。

M'_2 是反射镜 M_2 被分光板 G_1 反射所成的虚像。

当使用扩展的面光源时，只能获得定域干涉。

(1) 等倾干涉 当 M_1 和 M'_2 互相平行时，得到的是相当于平行平板的等倾干涉条纹，

其干涉图

样定位于无限远，如果在 E 处放一会聚透镜，并在其焦平面上放一屏，则在屏上可观察到一圈圈的同心圆。对于入射角 i 相同的各束光，如图 3 所示，其光程差均为：

$$\Delta = 2d \cos i \quad (1)$$

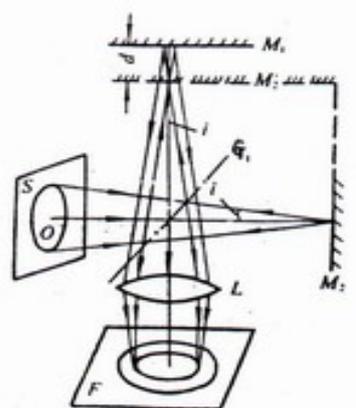
对于第 K 级亮条纹显然是由满足下式的入射光反射而成的：

$$\Delta = 2d \cos i = k\lambda \quad (2)$$

在同心圆的圆心处 $i = 0$ ，干涉条纹的级数最高，此时有：

$$\Delta = 2d = k\lambda \quad (3)$$

当移动 M_1 使间隔 d 增加时，圆心的干涉级次增加，我们就可看到中心条纹一个一个向外“冒”出；反之，当 d 减小时，中心条纹将一个地“缩”进去。每“冒出”或“缩进”一个条纹， d 就增加或减小了 $\frac{\lambda}{2}$ 。如果测出 M_1 移动的距离 Δd ，数出相应的“冒出”或“缩进”的条纹个数 Δk ，就可以算出激光的波长 $\lambda = 2\Delta d / \Delta k$ 。



M_1 、 M_2 —平面反光镜； G_1 —分光板；
S—扩展面光源；L—成像物镜；
F—观察屏

图 3 等倾干涉光路原理图

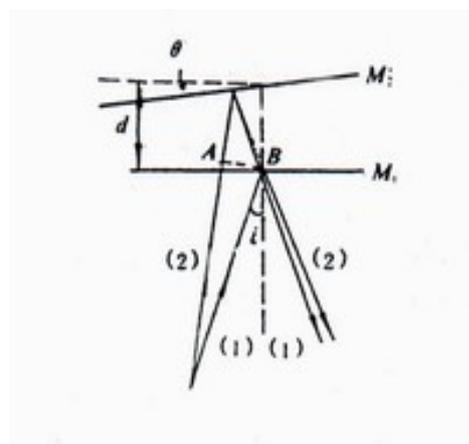


图 4

(2) 等厚干涉 当 M'_2 和 M_1 不平行而有一个很小的角度时, 形成一个楔形的空气层, 就会出现等厚干涉条纹, 如图 4 所示。当 d 很小, 即 M_1 和 M'_2 相交时, 由面光源上发出的光束经楔形空气薄层两面反射所产生的等厚干涉条纹定位于楔形空气层的表面。要看清楚这些条纹, 眼睛必须聚焦在 M_1 镜附近。此时, 相干处的光程差公式仍为 $\Delta = 2d \cos i$, 由于在 M_1 和 M'_2 交线处附近 d 很小, 光程差 Δ 的变化主要决定于 d 的变化, $\cos i$ 项影响很小, 可以忽略不计。因此在空气楔上厚度相同的地方有相同的光程差, 就可以观察到平行的等厚干涉条纹。当 d 变大时, 入射角 i 的变化对光程差带来的影响不能忽略, 此时将引起干涉条纹的弯曲。当 i 变大时, $\cos i$ 减小, 要保持相同的光程差, d 必须增加, 所以看到的条纹是二端弯向厚度增加的方向, 而凸向厚度减小的方向。

以上讨论的等倾干涉及等厚干涉, 形成的干涉条纹都有一定的位置, 故称这种干涉为定域(位)干涉。

(3) 非定域干涉 用 He - Ne 激光做光源, 使激光束通过扩束镜会聚后发散, 此时就得到一个相干性很好的点光源。它发出的球面波先被分光板 G_1 分光, 然后射向两全反镜, 经 M_1 、 M_2 反射后, 在人眼观察方向就得到两个相干的球面波, 它们如同是由位于 M_1 后的两个虚点光源 S_1 、 S_2 产生的, 如图 5 所示。由两虚点光源产生的两列球面波, 在空间相遇处, 都能进行干涉, 干涉条纹不定域, 故称非定域干涉。非

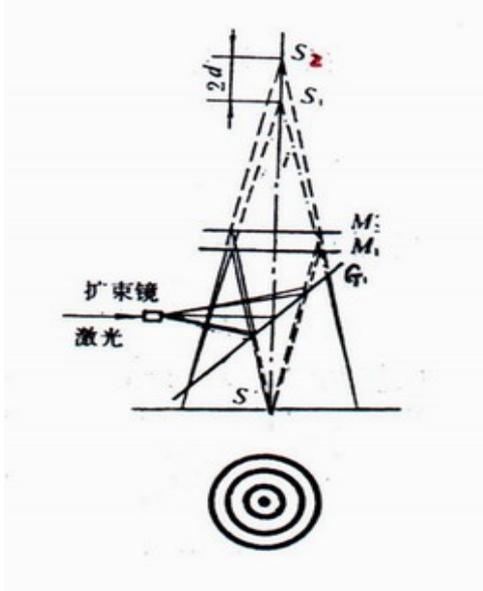


图 5

定域干涉的图样, 随观察屏的不同方向和位置而异。当观察屏垂直于 S_1 、 S_2 连线时, 则是同心圆条纹, 圆心就是 S_1 、 S_2 连线延长线和屏的交点。如转动观察屏不同角度, 则可看到椭圆、双曲线和直线几种干涉图样。

如调节反射镜 M_2 的微调螺钉, 使 $M_1 \parallel M'_2$, 此时和 M_1 平行放置的观察屏上就出现同心圆条纹, 圆心在光场的中心。两虚点光源间距为 M_1 和 M'_2 间距 d 的两倍, 即圆心处光程差为 $2d$ 。与前面讨论等倾干涉情况类似, 当 d 增加时, 中心条纹一个个“冒出”, 反之, 一个个“缩进”。此时同样也可用公式 (3) 来计算波长。

4. 相干长度

从理论上讲, 单色点光源发出的光经干涉仪后总是能够产生干涉现象的。然而实际上并不如此。在迈克尔逊干涉仪中, 如果 M_1 和 M'_2 之间的距离超过一定限度时就观察不到干涉条纹。为了简便起见, 考虑 $i = 0$ 的情况, 此时光程差 $L = 2d$, 再不断增加 d , 当 d 增加到某一个值 d_{max} 时就看不见干涉现象, 这个最大的光程差 $L_{max} = 2d_{max}$ 叫做该光源的相干长度。

不同的光源有不同的相干长度, 反映了光源相干性的好坏。光源的单色性越好, 相干长度越长。单模

He - Ne 激光器发出的 $632.8nm$ 的激光单色性很好, 相干长度有几米到几十米范围。而钠光相干长度只有几个厘米, 白光相干长度则只有波长数量级。

三、仪器与器材

迈克尔逊干涉仪、He - Ne 激光器及电源、小孔光阑、扩束镜（短焦距会聚透镜）、毛玻璃屏。

四、预习作业

1. 说明迈克尔逊干涉仪中各光学元件的作用。
2. 什么是定域干涉？什么是非定域干涉？如何调出非定域干涉条纹？
3. 什么是等倾干涉？什么是等厚干涉？观察等厚干涉条纹时，能否用点光源？
4. 如何利用非定域干涉条纹测量 He - Ne 激光的波长？
5. 测量时，如何避免空程误差？

五、实验内容

1. 非定域干涉条纹的调节和激光波长的测量

移动迈克尔逊干涉仪或激光器，使激光投射在分光镜 G_1 和全反镜 M_1 、 M_2 的中部，激光束大致与 M_2 垂直。靠近激光器处放一小孔光阑，让激光束穿过小孔，用纸片在 M_2 前挡住激光束，观察由 M_1 反射产生的光点在小孔光阑上的位置，如光点横向偏离小孔，则应轻轻转动仪器底座；如光点高低不对，则应调节激光管的高低或倾斜度，使三个光点中的最亮点与小孔重合，如光阑高度不当，必要时也要升降。然后用纸片挡住 M_1 ，调节 M_2 后的三个螺钉，直至 M_2 反射亮点与小孔重合。这时 M_1 与 M_2 大致垂直。

在光阑后放一扩束镜使光束汇聚，形成点光源，并使其发出的球面波照射到 G_1 上，再在 E 处放置一毛玻璃屏 H ，这时在屏上就可看到干涉条纹。此时再调节 M_2 的两个微调螺钉，使 M_1 和 M_2' 严格平行，在屏上就可看到非定域的同圆心条纹，且圆心位于光场的中部。

转动手柄使 M_1 前后移动，观察中心条纹冒出或缩进，判断 M_1 和 M_2' 之间的距离是增大还是减小？

观察间隔 d 自较大的值逐渐变小至零，然后又由零逐渐往反向变大时，干涉条纹的粗细与密度变化，并解释之。

锁紧刻度盘止动螺钉，转动微调读数鼓轮，使 M_1 移动，数出在圆心处冒出或缩进干涉条纹的个数 ΔK ，并记录 M_1 对应的移动距离 Δd ，便可由公式 $\lambda = 2 \frac{\Delta d}{\Delta K}$ 求出激光的波长。

实验要求取 $\Delta K = 30$ ，连续测量 10 次，即总共数 300 次变化数，计算测量结果的标准偏差，并写出结果表达式。

将波长平均值与标准值 $\lambda_0 = 632.8nm$ 比较，求百分差。

注意事项

1. 不可触及激光器两端的高压电极。
2. 不要让激光射入眼内。

六、数据处理

1. 自拟表格，记录测量数据，用逐差法计算 Δd 。

2. 计算 Δd 的标准偏差 $\sigma_{\Delta d} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta d_i - \overline{\Delta d})^2}{n(n-1)}}$

3. 由公式 $\lambda = 2\Delta d / \Delta K (\Delta K = 30)$ ，计算激光波长 λ 及标准偏差 $\sigma_\lambda = \frac{2}{\Delta K} \sigma_{\Delta d}$

4. 将 λ 与公认值 $\lambda_0 = 632.8nm$ 比较，求百分差。

实验5 夫兰克—赫兹实验

1914年，即玻尔理论发表后的第二年，夫兰克（F.Franck）和赫兹（G.Hertz）采用慢电子轰击原子的方法，利用两者的非弹性碰撞将原子激发到较高能态，令人信服地证明了原子内部量子化能级的存在，给玻尔理论提供了独立于光谱研究方法的直接的实验证据。因此他们获得了1925年度诺贝尔物理学奖。

通过这一实验，学习夫兰克和赫兹为揭示原子内部量子化能级所作的巧妙构思以及采用的实验方法，可以了解气体放电现象中低能电子与原子间相互作用的机理，电子与原子碰撞的微观过程是怎样与实验中的宏观量相联系的，并可用于研究原子内部的能量状态与能量交换的微观过程。

一、目的

1. 了解夫兰克—赫兹实验的原理和方法。
2. 测定氩（或汞）原子的第一激发电位，验证原子能级的存在。

二、原理

玻尔的原子理论指出，原子只能较长久地停留在一些稳定状态（即稳态）。原子的每一状态具有一定能量，称能级。各能级的能量值彼此分立，原子能量不论通过什么方式发生改变时，只能使原子从一个状态跃迁到另一个状态（一个能级跃迁到另一个能级）。原子从一个状态跃迁到另一个状态时发射或吸收的能量是一定的。若用 E_1 和 E_2 表示两个状态的能量，则发射和吸收的幅射光子频率 ν 由下式决定：

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (1)$$

式中， h 为普朗克常数，1986年推荐值为 $h = (6.6260755 \pm 0.0000040) \times 10^{-34} J \cdot s$ 。

能量最低的状态称基态，能量较高的状态称激发态，能量最低的激发态称第一激发态。原子只能吸收或释放两状态间的能量差，若要原子状态发生改变，所具备的能量不能少于原子从基态跃迁到第一激发态所需要的能量。为使原子从低能级向高能级跃迁，可以通过具有一定频率的光子来实现，也可以通过具有一定能量的电子与原子碰撞进行能量交换的办法来实现。本实验采用后者。

实验装置如图1所示，它的核心是夫兰克-赫兹管（简称F-H管）。在密封的玻璃管内充有汞或其他惰性气体（如氩、氖等）。灯丝 f 通电后炽热，使旁热式阴极 K 受热而发射电子。第一栅极 G_1 的作用主要是消除空间电荷对阴极电子发射的影响。在阴极 K 和第二栅极 G_2 之间施加一加速电压 U_2 ，电子在 U_2 的加速下，以动能 eU_2 穿过第二栅极 G_2 而飞向板极 P 。在 G_2 与 P 之间加有一减速电压 U_3 ，形成一个减速电场。在穿越 G_2 的电子中，只有能量大于 eU_3 的电子才能达到板极 P 而形成板极电流 I_p 。板流 I_p 用微电流测试仪 A 测量。在保持 U_1 和 U_3 不变的情况下，改变加速电压 U_2 的大小，测出相应的板流 I_p ，将得到如图2的 I_p-U_2 特性曲线。

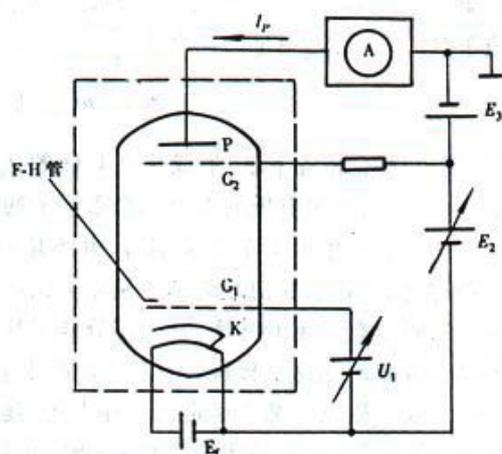


图1 夫兰克—赫兹实验装置示意图

当加速电压 U_2 从零开始增大时，板流 I_p 随之增大，表示电子动能增加，到达板极的电子数目必随之增多。这说明电子在飞行途中尽管会与管内的氩原子碰撞，但不损失能量，是弹性碰撞。

当 U_2 增大到氩原子的第一激发电位 U_0 时, I_P 转为下降, 表示到达板极的电子数目减少。说明有些电子与氩原子发生了非弹性碰撞, 把能量传递给氩原子, 再也不能穿越减速电场而到达板极。加速电压 U_2 继续增大, 板流 I_P 又逐渐回升, 这说明电子与氩原子碰撞后的剩余能量尚能使电子穿越减速电场而到达板极。当 U_2 增大到 $2U_0$ 时, I_P 又转为下降, 说明电子与氩原子发生了第二次非弹性碰撞。同样的道理, 随着加速电压 U_2 的继续增大, 电子会在第二栅极 G_2 附近与氩原子发生第三次、第四次、……非弹性碰撞, 从而引起板流 I_P 的相应下跌。可见, 凡满足加速电压

$$U_2 = nU_0 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

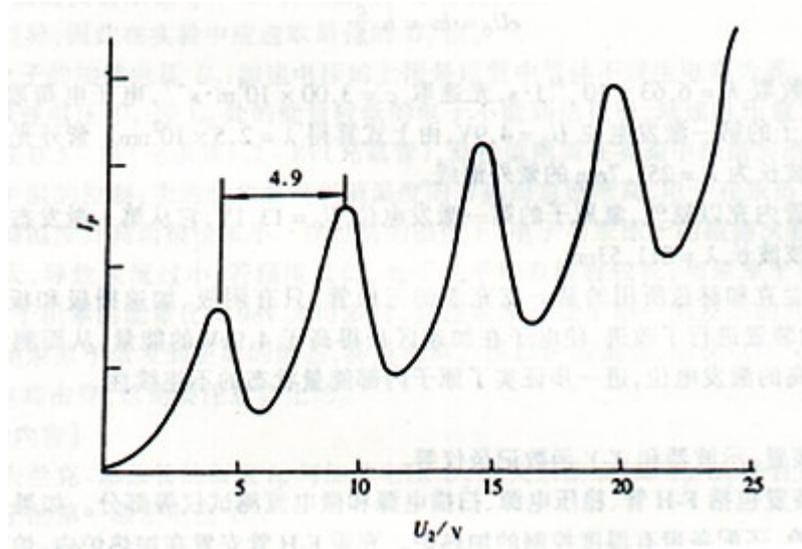


图 2 充汞的 F-H 管的 I_P - U_2 特性曲线

时, 板流 I_P 都会相应下跌, 形成规则起伏的 I_P - U_2 特性曲线, 而与相邻两板流极大值 (或极小值) 所对应的加速电压的差值就是氩原子的第一激发电位 U_0 , 它的公认值为 $11.55V$ 。

从 I_P - U_2 特性曲线可见, 板流 I_P 并不是突然下降, 有一个变化过程, 这是因为阴极发射出来的电子, 它们的初始能量不是完全相同的, 服从一定的统计规律。另外, 由于电子与氩原子的碰撞有一定的几率, 在大部分电子与氩原子碰撞而损失能量的时候, 还会存在一些电子没有碰撞而到达了板极, 所以板流 I_P 不会降到零。

原子处于激发态是不稳定的。在上述实验中, 被电子碰撞的氩原子从基态跃迁到第一激发态, 吸收了 eU_0 电子伏特的能量: 当它再跳回基态时, 就应该有 eU_0 电子伏特的能量发射出来。如果上述分析成立, 就应该能看到氩原子从第一激发态跃迁回到基态时所发出的辐射。进行这种跃迁时, 氩原子是以放出光量子的形式向外辐射能量的。这种光辐射的波长 λ 由下式决定,

$$eU_0 = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

式中普朗克常数取 $h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$, 光速取 $c = 3.00 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$, 电子电荷取 $e = 1.60 \times 10^{-19} C$, 氩原子的第一激发电位 $U_0 = 11.955V$, 由上式算得 $\lambda = 811.5 nm$ 。紫外光谱仪测量确实观测到了波长为 $\lambda = 811.53 nm$ 的紫外谱线。

1914 年夫兰克和赫兹所用的是一支充汞的三极管, 只有阴极、加速栅极和板极, 实验测得汞原子的第一激发电位 $U_0 = 4.9V$ 。1920 年他们对实验装置进行了改进, 使电子在加速区获得高于 $4.9 eV$ 的能量, 从而测量出汞原子的一系列较高的激发电位, 进一步证实了原子内部能量状态的不连续性。

三、仪器与器材

F-H 实验装置, 包括 F-H 管、稳压电源、扫描电源和微电流测试仪等部分。如果采用充

汞的 F-H 管

做实验，还配备带有温度控制的加热炉。充汞 F-H 管安置在加热炉内，炉的工作温区为 100~210℃。对于充氩气的 F-H 管，实验时就无需加热。

灯丝电压 U_f 、控制栅电压 U_1 和减速电压 U_3 。请参考实验室给出的建议值，可略有改变，但不能过高过低。灯丝电压过高使阴极发射能力过强，管子易老化，电压过低，会使阴极不能正常工作，也会损坏管子。

加速电压 U_2 由扫描电源供给，输出波形为锯齿波，扫描分为手动和自动两种。

四、预习作业

1. 简要说明 I_p-U_2 特性曲线的形成原因。
2. 由弹性碰撞的动量守恒、动能守恒公式可知电子与原子弹性碰撞时所损失的能量为

$$\Delta E = \frac{4m_e}{M} E_K \quad (\text{式中 } E_K = \frac{1}{2} m_e v^2, M \text{ 为原子质量, } m_e \text{ 为电子质量})。$$

计算电子与氩（或汞）原子碰撞一次的能量损失率 $\Delta E / E_K$ 。

五、实验内容

1. 根据实验指示卡提供的数据，调节灯丝电压 U_f 、控制栅电压 U_1 和减速电压 U_3 。
2. 测量前先进行粗测，即手动调节加速电压 U_2 连续增大，从电流表（一般用 $\times 10^{-8} \text{A}$ 档）观察电流

I_p 的起伏变化，若前六个峰、谷差值均明显，最大的峰值接近电流表满量程，则接下来可以细测。若后几个峰值很小，则可略微增大 U_f ，同时注意观察电流，约几分钟后 I_p 趋于稳定，只要 I_p 已较大但未超出量程即可。若 I_p 超出量程，则可微微减小 U_f 。

3. 缓慢增加 U_2 ，逐点测量前六组峰、谷及其间的点的电流 I_p 和相应的电压 U_2 ，尽量测准峰、谷点，

且峰、谷附近测量点要稍密一些。总之，选取分布合适的测量点，以使能完整真实地绘出 I_p-U_2 曲线。

六、实验步骤

1. 用毫米方格纸作 I_p-U_2 图，由图得相邻峰一峰（或谷一谷）电位差，求出平均值，即为实验所求的

第一激发电位 U_0 ，其不确定度且用公式 $u = [\sum (U_{0i} - \bar{U}_0)^2 / (n-1)]^{\frac{1}{2}}$ 求出，则实验结果为：
 $U_0 \pm u$ 。

2. 也可用最小二乘法处理数据，将峰或谷序数定义为 x ， $x = 1, 2, \dots, 5, 6$ ，相应的电位值 U_2 定义

为 y ，则 $y = a + bx$ 。计算可得截距 a 、斜率 b 及相关系数 r 。 a 即接触电位差， b 即第一激发电位 U_0 。

3. 将实验测得氩原子的第一激发电位 U_0 与公认值 11.55V 比较，求百分差。

实验 6 密立根油滴法测定电子电荷

1897 年和 1898 年, 爱尔兰物理学家道孙德 (J.S.E.Townsend) 和英国物理学家汤姆逊 (J.J.Th omson) 都尝试了测量基本电荷, 由于方法缺陷, 实验误差很大。从 1909 年开始, 美国物理学家密立根对实验作了重大改进和深入研究, 直至 1917 年, 发表了基本电荷测量结果 $e = (4.770 \pm 0.005) \times 10^{-10}$ 静电单位 $= (1.592 \pm 0.002) \times 10^{-19} \text{C}$, 这一著名“油滴实验”轰动了整个科学界。电子电荷的现代值 $e = 1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{C}$ 。

密立根油滴实验依据的原理是基本的物理规律, 实验方法也非常简单, 由测量电压和时间这两个宏观量, 却能精确地得到基本电荷这一微观量。油滴实验构思之巧妙、方法之简捷、数据处理之严谨, 被誉为实验物理的典范。

密立根油滴实验极富生命力, 多少年来, 它在许许多多学校, 启迪着千千万万青年学生。

到了 20 世纪 60 年代末, 美国斯坦福大学实验小组, 用铯球代替油滴, 用磁悬浮代替空气悬浮, 极板间抽高真空, 在低温超导情况下进行实验, 用统计方法处理数据, 测出基本粒子夸克所带电荷为 $e/3$ 。

一、目的

1. 通过密立根油滴实验来验证电荷的“量子化”, 即油滴电量不是连续变化的, 而是基本电荷 (电子电量的绝对值) 的整数倍。
2. 测定电子的电荷量 e 。

二、原理

1. 基本原理

用喷雾器将油滴喷入两块相距为 d 的水平放置的平行板之间, 如图 1 所示, 油滴在喷射时由于摩擦, 一般都是带电的。设油滴的质量为 m , 所带电量为 Q , 两极板间所加的电压为 U , 则油滴在平行板间将同时受到两个力的作用, 一个是重力 mg , 一个是静电力 $QE = Q \frac{U}{d}$, 两个力的方向如图所示。如果调节两极板间的电压 U , 可使两力相互抵消而达到平衡, 此时 $mg = Q \frac{U}{d}$, 故有

$$Q = mg \frac{d}{U} \quad (1)$$

可见测出了 U , d , m , 即可知道油滴的带电量 Q 。由于油滴的质量很小 (约 10^{-15}kg), 必须采用特殊的方法才能加以测定。

2. 油滴质量 m 的测定

平行板未加电压时, 油滴受重力作用而加速下降, 但空气对油滴所产生的粘滞阻力 f 与速度成正比, 油滴走了一小段距离到达某一速度 v_g 后, 粘滞阻力与重力平衡 (见图 1, 空气浮力忽略不计), 油滴

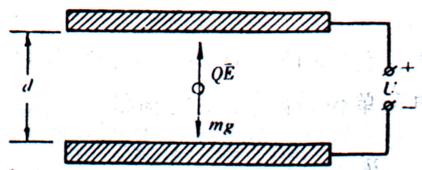


图 1



图 2

将匀速下降，由斯托克斯定律可知

$$f_r = 6\pi a \eta v_g = mg \quad (2)$$

式中， η 是空气的粘度， a 是油滴的半径（由于表面张力的原因，油滴近乎呈小球状）。设油滴的密度为 ρ ，则油滴的质量 m 也可用下式表示

$$m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho \quad (3)$$

合并式 (2) 和式 (3)，得油滴的半径为

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2\rho g}} \quad (4)$$

对于半径小到 10^{-6}m 的小球，油滴半径近似于空气中孔隙的大小，空气介质不能再认为是连续的，而斯氏定律只能对连续介质才正确，因而斯氏定律应修正为

$$f_r = \frac{6\pi a \eta v_g}{1 + \frac{b}{pa}}$$

式中， b 为一修正常数， $b = 8.22 \times 10^{-3} \text{m} \cdot \text{Pa}$ ， P 为大气压强，单位为帕 (Pa)。于是得

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}}} \quad (5)$$

上式根号中还包含油滴的半径 a ，但因它是处于修正项中，不需要十分精确，故它仍可用式 (6-2-4) 计算。将式 (5) 代入式 (3)，得

$$m = \frac{4}{3} \pi \left[\frac{9\eta v_g}{2\rho g} \frac{1}{1 + \frac{b}{pa}} \right]^{3/2} \rho \quad (6)$$

3. 匀速下降速度 v_g 的测定

当两极板间的电压 $U=0$ 时，设油滴匀速下降的距离为 l ，时间为 t ，则

$$v_g = \frac{l}{t} \quad (7)$$

4. 理论计算公式

由式 (1)，(6)，(7) 得

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

实验发现，对于同一油滴，如果我们改变它所带的电量，则能够使油滴达到平衡的电压 U ，必须是某些特定的值 U_n ，这表示与它相对应的电量 Q 是不连续的，即

$$Q_n = ne = mg \frac{d}{U_n}$$

式中， $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ ，而 e 则是一个不变的值。

对于不同的油滴，可以发现同样的规律，而且 e 值是 Q_1, Q_2, \dots, Q_n 的最大公约数，这就证明了电荷的不连续性，并存在着最小的电荷单位，即电子的电荷值 e 。

$$ne = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \left[\frac{\eta l}{t \left(1 + \frac{b}{pa} \right)} \right]^{3/2} \frac{d}{U_n} \quad (8)$$

上式就是用静态平衡法测定油滴所带电荷的理论公式。

5. 实验公式

将式 (4) 代入式 (8) 得

$$ne = \frac{k}{\left[t(1 + k'\sqrt{t}) \right]^{3/2}} \frac{1}{U_n} \quad (9)$$

式中

$$k = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} (\eta l)^{3/2} d \quad (10)$$

和

$$k' = \frac{b}{p} \sqrt{\frac{2\rho g}{9\eta l}} \quad (11)$$

其中油的密度	$\rho = 981 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
重力加速度	$g = 9.794 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
空气的粘度	$\eta = 1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
油滴匀速下降的距离取	$l = 1.50 \times 10^{-3} \text{ m}$
修正常数	$b = 8.22 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{Pa}$
大气压强	$P = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$
平行极板距离	$d = 5.00 \times 10^{-3} \text{ m}$

将以上数据代入公式 (10) 和式 (11) 得

$$k = 0.928 \times 10^{-14} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-\frac{1}{2}}$$

和

$$k' = 0.0226 \text{ s}^{-\frac{1}{2}}$$

将 k 和 k' 代入式 (9) 得

$$ne = \frac{0.928 \times 10^{-14}}{\left[t(1 + 0.0226\sqrt{t}) \right]^{3/2}} \cdot \frac{1}{U_n} \quad (12)$$

显然，由于油滴的密度 ρ 、空气的粘度 η 都是温度的函数，大气压强 p 又随实验地点和条件的变化而变化。因此，上式的计算是近似的。一般情况下，由于它们引起的误差仅 1% 左右。而这样做可以使计算大为简化，对学生实验而言，此法是可取的。

参考资料

1. 潘人培等主编. 物理实验参考书. 北京：高等教育出版社，1990，P285-298.
2. 吴祥兴、忻贤堃主编. 近代物理实验. 上海：科技教育出版社，1998，P17-24
3. 实验室提供的仪器说明书
4. 王庆有等编. CCD 应用技术. 天津：天津大学出版社，1993.

三、仪器与器材

密立根油滴仪由油滴盒、油滴照明装置、调平系统、测量显微镜、电源、计时器和喷雾器等部分组成。有的油滴仪还装备有 CCD（电荷耦合器件）电子显示系统。

四、预习作业

1. 为什么密立根油滴实验能从宏观量 U 、 t 的测量，得到微观量——基本电荷 e ？
2. 选择适当的油滴是做好本实验的关键，如果油滴太大、太小或带电量太多，一般会有较大误差，

试分析其原因。

3. 数据处理可以用作图法、逐差法或最小二乘法，了解并学会使用这些方法。

五、实验内容

1. 仪器调节

油滴盒水平调节和显微镜调焦，然后喷雾，要求观察到清晰可见的油滴。

2. 测量练习

(1) 练习控制油滴。平行极板加上平衡电压（约 300V 左右，“+”或“-”均可），驱走不需要的油滴，直到剩下几滴为止。注视其中的一颗，仔细调节平衡电压，使这颗油滴静止。然后去掉平衡电压，让它匀速下降。下降一段距离后再加上平衡电压和升降电压，使油滴上升。如此反复练习，以掌握控制油滴的方法。

(2) 练习选择油滴。要做好本实验，很重要的一点是选择好被测量的油滴。油滴的体积既不能太大，太大则必须带的电荷很多才能取得平衡，结果不易测准。也不能太小，太小则由于热扰动和布朗运动，运动涨落很大，也不容易测准。一般， $U > 300V$ 和 $t > 20s$ 的油滴，带的电荷数 n 较小。

(3) 练习测量速度：任意选择几个下降速度快慢不同的油滴，测出它们下降一段距离所需要的时间，以掌握测量油滴速度的方法。

3. 测量

测量平衡电压必须经过仔细的调节，而且应该将油滴悬挂于分格板上某条横线附近，以便准确判断

出油滴是否静止。

在测量油滴匀速下降距离 l 所需要的时间 t 时，为保证油滴下降速度均匀，应先让它下降一段距离后，再测时间，选定测量的一段距离，应该在平行板之间的中央部分，即视场中分格板的中央部分。若太靠近上电极板，小孔附近有气流，电场也不会均匀，会影响测量结果。太靠近下电极板，测量完时间 t ，油滴容易丢失，影响重复测量，一般取 $l = 0.150cm$ 比较合适。

由于有涨落，对于同一颗油滴必须进行 5 次测量。同时还应该对不同的油滴（不少于 5 个）进行反复测量。这样才能验证不同油滴所携带的电荷是否都是基本电荷，即电子电荷的整数倍。

六、数据处理

密立根油滴法测量电子电量的过程中，希望油滴所带的电量越小越好，也即在静态法测量过程中，平衡电压要大些，下降速度要慢些（也不能太慢，否则会带来热扰动等引起的误差）。

用密立根油滴法测量电子电量，必须通过实验取得大量的实验数据，综合地运用分析统计的方法，才可能正确地估算出实验结果。假如通过计算，已得到一组（20 个以上）油滴所带的电量值 $Q_1, Q_2, Q_3 \cdots Q_m$ 。把这些数据标在数轴上，通过图形可以直观地看到数据形成疏密有致一簇一簇的有序分布。其中间距较大的应该是基本电荷数 n 的差异，而间距较小的应该是测量随机误差形成的差异。对同一簇数据求平均，可得一组按不同基本电荷数排列的数据 $q_1, q_2 \cdots q_n$ 。对这些数据进行逐差处理，也即 $e_1 = q_2 - q_1, e_2 = q_3 - q_2 \cdots, e_n = q_n - q_{n-1}$ 。只要测量数据足够多，通过分析差值结果，可以得出结论，最小差值 e 的平均值是电子电量的最佳估计值。以上得到的结果仅是一个粗略的估计值。

以此电子电量估计值 e 为基础，运用最小二乘法，进一步优化测量结果，以期求得更好的测量值 e 。

把已得到的一组油滴所带的电量值 $Q_1, Q_2 \cdots Q_m$ 除以电子电量估计值 e ，并取整数得到 $n_1, n_2, n_3 \cdots n_m$ ，整理得

$$Q_1 - en_1 = \pm \Delta e_1$$

$$Q_2 - en_2 = \pm \Delta e_2$$

.....

$$Q_m - en_m = \pm \Delta e_m$$

对方程组两边求平方和可得

$$\sum_{i=1}^m (Q_i - en_i)^2 = \sum_{i=1}^m (\Delta e_i)^2$$

把 e 作为变量，对方程左式求导，并令导数为 0，以期求得使 $\sum (\Delta e_i)^2$ 为最小值的 e ，也即电子电量实验值 e 的最优值，得

$$\frac{\partial}{\partial e} \sum_{i=1}^m (Q_i - en_i)^2 = 0$$

求导数得

$$\sum n_i Q_i - \sum en_i^2 = 0$$

解方程得到电子电量最优值为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^m n_i Q_i}{\sum_{i=1}^m n_i^2}$$