

目 录

实验一	碰撞打靶实验	1
实验二	拉伸法测杨氏弹性模量	4
实验三	液体黏度的测定	8
实验四	薄透镜焦距的测定	12
实验五	惠斯通电桥与伏安特性	19
实验六	DIY 实验——磁耦合谐振式无线电力传输实验研究	27
实验七	声速的测量	35
实验八	用示波器观测磁滞回线	42
实验九	电子电荷的测定——密立根油滴法	48
实验十	霍尔效应传感器和各向异性磁电阻传感器	56

实验一 碰撞打靶实验

一、实验预习指导

1. 碰撞的分类（按能量转移分类、撞角度分类）；
2. 动量守恒、机械能守恒的条件；
3. 推导理想情况下摆球的下落高度 h_0 与载球支柱高度 y 、预设靶心 x_0 、摆球质量 m_1 、被撞球质量 m_2 、被撞球半径 r 的关系式。

二、实验任务

1. 研究两体碰撞问题的现象和规律；
2. 应用运动学原理、机械能守恒和转化规律解决打靶的实际问题，研究碰撞过程中的能量损失；
3. 掌握游标卡尺等通用仪器的使用方法；

三、实验原理

1. 碰撞：两运动物体相互接触时，运动状态发生迅速变化的现象。“正碰”是指两碰撞物体的速度都沿着它们的质心连线方向的碰撞；其他碰撞则为“斜碰”。“弹性碰撞”是指在碰撞过程中没有机械能损失的碰撞；“非弹性碰撞”是指碰撞过程中机械能不守恒，其中一部分转化为非机械能（如热能）的碰撞。
2. 碰撞时的动量守恒：在不受外力或所受外力之和为零的情况下，两物体碰撞前后总动量不变。
3. 机械能守恒：任何物理系统在势能和动能相互转化的过程中，若合外力对该物体系统所做的功为零，内力都是保守力（无耗散力），则物体系统的总机械能（即势能和动能的总和）保持恒定不变。
4. 平抛运动：将质量为 m 的物体用一定的初速度 v_0 沿水平方向抛出，物体所做的运动为平抛运动（不计空气阻力），运动学方程为 $x = v_0 t$ ， $y = \frac{1}{2} g t^2$ ，初始动能为 $E_k = \frac{1}{2} m v_0^2$ 。

四、实验仪器

实验装置如图 1-1 所示。势能柱上装有可升降的磁场方向与杆平行的电磁铁，杆上有刻度尺；势能柱滑块上设置有电磁铁部件，滑块可以沿势能柱上下滑动，用于调节主击球高度，改变其势能；电磁铁中心位置、摆球（钢球）质心与被击球质心在碰撞前后处于同一垂直于底板且过两立柱中心的平面内，由于事先两球质心被调节成同一高度，一旦切断电磁铁电源，摆球将自由下摆，并能与被击球正碰，被击球将做平抛运动，最终落到贴有目标靶的底板上。

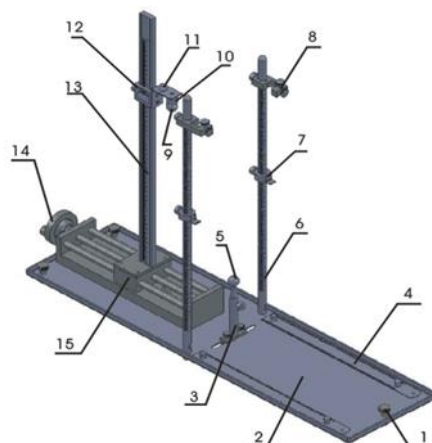


图 1-1 碰撞打靶实验仪

1.水平调节机脚；2.底板；3.载球支柱；4.压纸尺；5.被击球；

6.立柱；7.拉线长度调节滑座；8.固线座；9.摆球；10.电磁铁；

11.电磁铁控制输入插座；12.势能柱滑块；13.势能柱；14.鼓轮；15.水平滑座

碰撞过程如图 1-2 所示。质量为 m_2 的被撞球置于高度为 y 的载球支柱上，质量为 m_1 的摆球下落 h_0 高度后，与被撞球在水平方向发生正碰，被撞球做平抛运动，水平位移为 x_0 （预先设定好，建议取 20cm）。实验开始前，需要推导理想情况下 h_0 与 y 、预设的 x_0 （建议取 20cm）、 m_1 、 m_2 、 r 的关系式，并计算出摆球的预设高度 $h = h_0 + r + y$ 。

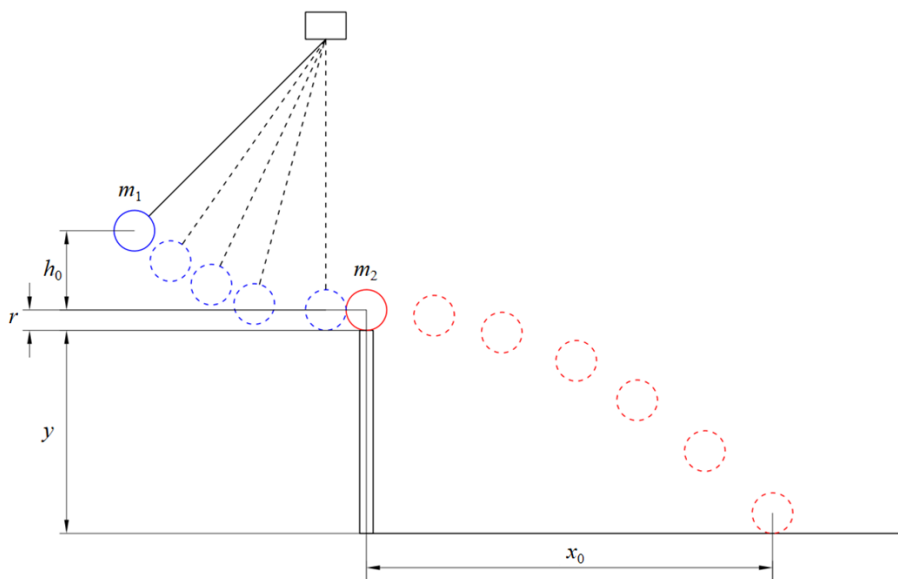


图 1-2 碰撞打靶过程

五、操作要点

1. 调节仪器底盘上的螺丝，使其底盘和导轨水平。
2. 使用钢球做被撞球，用电子称测量钢球的质量，并以此作为摆球的质量。利用游标卡尺测量出被撞球的直径。
3. 移动载球支柱，使其左右居中，调节两对锁紧螺钉，使其分别等高。

4. 取出一张记录被撞球落点的白纸，对折出折痕，利用底盘上的一对钢尺卡好白纸，使折痕、载球支柱和刻度板在同一条直线上。
5. 将被撞球放在载球支柱上，通过调节上侧的锁紧螺钉调整摆球的高低和左右位置，并调节载球支柱高度，使摆球在摆动的最低点能和被撞球进行正碰。
6. 利用游标卡尺测出载球支柱的高度 y 。根据设定的靶心 x_0 ，计算出理想情况下摆球相对被撞球球心的高度差 h_0 。
7. 将复写纸覆盖在记录用白纸上。给电磁铁线圈通电，将摆球吸在电磁铁的铁芯上，根据设定的势能差（即 h_0 ）来确定势能柱上滑块的高度（即摆球的预设高度） $h = h_0 + r + y$ ；移动平移架，使拉线松紧合适。
8. 关闭电源，摆球自动下落并碰撞被撞球。
9. 测量钢球被击出的距离 x (碰撞 10 次，测量 10 个落点的位置，取平均值)。记录数据。
10. 观察两个小球在碰撞前后的运动状态，对摆球的高度作调整后，再重复若干次试验，以确定能击中靶心 x_0 的 h' 值；被撞球击中靶纸的位置后记下此时的 h' 值。
11. 选用另外两个被撞球分别重复上述实验，观察实验现象的异同，并分析讨论。

六、注意事项

1. 本实验需要事先自备一张 A4 纸用于打靶。
2. 被撞球落点不能偏离白纸上折痕超过 1cm。
3. 每进行一次撞击，需立刻测量被记录落点位置，然后才能进行下一次撞击。
4. 需要特别注意摆球初始位置的计算和设置。

七、报告要求

本实验需要测量和记录的数据包括被撞球的质量和直径、预设位置 x_0 和载球支柱高度 y ，推导理想情况下的高度差 h_0 （要有推导过程）。三组实验中， x_0 和 y 值应不变。每组实验过程中，需记录 10 次落点的位置，以及击中预设位置 x_0 的高度 h' 。根据 10 次落点位置的平均值 \bar{x} 计算损失的机械

$$\text{能百分比 } \Delta E = \frac{h' - h}{h_0 + h' - h}。$$

实验二 拉伸法测杨氏弹性模量

一、实验预习指导

1. 杨氏模量的物理意义是什么?国标单位是什么?
2. 光杠杆法的原理是什么, 是如何实现微小量放大的? (画出测量原理光路图)。
3. 本实验需要测量哪些物理量来间接得到杨氏模量?

二、实验目的

1. 学习用光杠杆测量微小长度变化的原理;
2. 研究用拉伸法测量金属丝的杨氏弹性模量;
3. 掌握用逐差法处理实验数据。

三、实验原理

1. 杨氏模量

以最简单的形变为例, 如棒状物体原长为 L , 当其延长度方向受力时, 棒长的改变量为 ΔL , $\Delta L/L$ 称为应变。如果棒的截面积为 S , 拉力由 F 增加到 F' , 棒伸长了 ΔL , 按胡克定律有

$$\frac{F' - F}{S} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (2-1)$$

其中, $(F' - F)/S$ 为应力的改变量; 比例系数 E 为杨氏模量, 也称为弹性模量, 国际单位制中 E 的单位为 N/m^2 。

对于直径为 d 的钢丝, $S = \frac{1}{4} \pi d^2$, 杨氏模量表示为

$$E = \frac{4(F' - F)}{\pi d^2} \frac{L}{\Delta L} \quad (2-2)$$

一般情况下 ΔL 很小, 如何准确测量长度的微小改变量是本实验的关键。本实验中我们将采用光杠杆来测量长度的微小伸长量。

2. 光杠杆原理

光杠杆的结构图如图 2-1 (a), 由一个装有可转动平面镜的支架构成, 支架的下部安置三个支脚, 前两个支脚连线与镜面平行, 后支脚与钢丝夹接触。钢丝夹能随钢丝的伸缩而上下运动, 当后支脚随金属丝长度改变而上升或下降微小距离 ΔL 时, 镜面法线转过 θ 角, 见图 2-1 (b)。当 θ 角很小时, 有

$$\tan \theta \approx \theta \approx \frac{\Delta L}{D} \quad (2-3)$$

式中, D 为光杠杆的臂长, 即后支脚到两前支脚的垂直距离。当镜面转动 θ 角时, 反射光线转动 2θ 角, 因此

$$\tan 2\theta \approx 2\theta \approx \frac{\Delta x}{H} \quad (2-4)$$

式中, Δx 为标尺读数改变量, H 为镜面到标尺的距离。消去 θ 角则得到,

$$\Delta x = \frac{2H}{D} \cdot \Delta L \quad (2-5)$$

因此光杠杆的放大原理是, 利用平面镜转动, 将微小角位移放大成较大的线位移后进行测量微小长度变化, 即将很难测量的 ΔL , 转换为易于测量的标尺差 Δx , $\frac{2H}{D}$ 即为放大倍数。

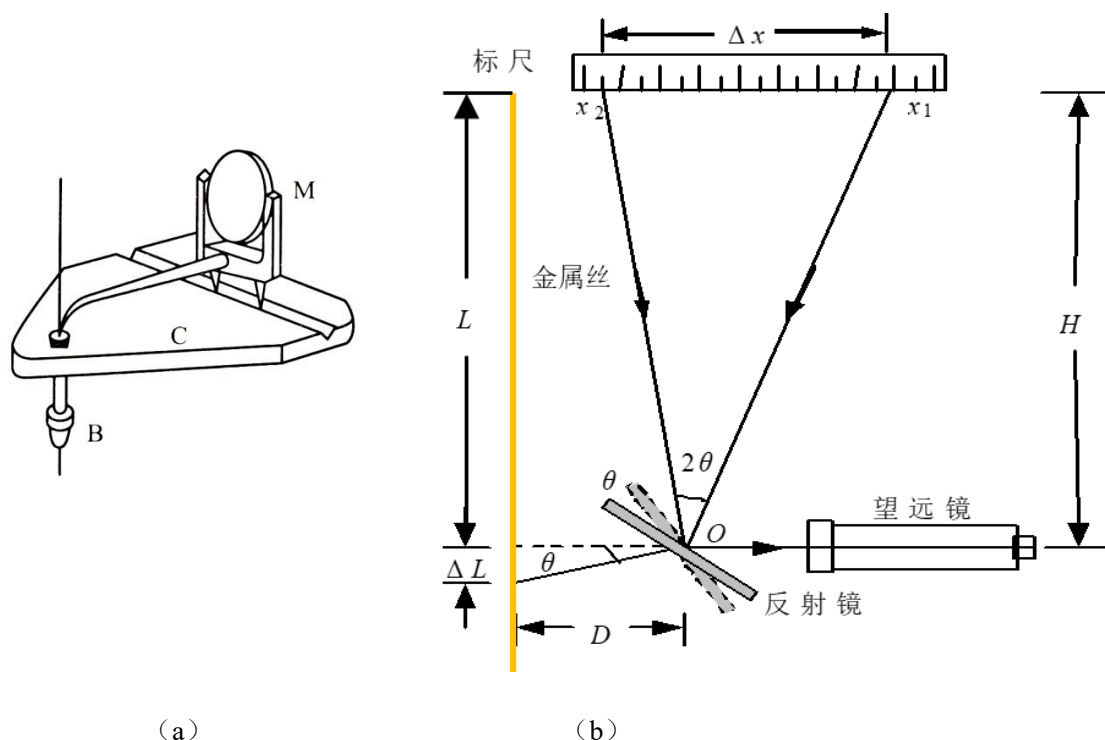


图 2-1 光杠杆的放大原理

四、操作要点

1. 调节实验架:

实验前应保证上下夹头均夹紧金属丝, 防止金属丝在受力过程中与夹头发生相对滑移, 且反射镜转动灵活。

(1) **接线:** 将拉力传感器信号线接入数字拉力计信号接口, 用 DC 连接线连接数字拉力计电源输出孔和背光源电源插孔。

(2) **开电源:** 打开数字拉力计电源开关, 预热 10 min。背光源应被点亮, 标尺刻度清晰可见。数字拉力计面板上显示此时加到金属丝上的力。

(3) **初始化:** 旋转施力螺母, 给金属丝施加一定的预拉力 f_0 ($3.00 \pm 0.02 \text{ kg}$), 将金属丝原本存在弯折的地方拉直。

2. 调节望远镜

(1) **调位置:** 将望远镜移近并正对实验架平台板 (望远镜前沿与平台板边缘的距离在 0~30 cm 范

围内均可)。调节望远镜使从实验架侧面目视时反射镜转轴大致在镜筒中心线上,同时调节支架上的三个螺钉,直到从目镜中看去能看到背光源发出的明亮的光。

(2) **微调:** 调节目镜视度调节手轮,使得十字分划线清晰可见。调节调焦手轮,使得视野中标尺的像清晰可见。

(3) **初始化:** 调节支架螺钉(也可配合调节平面镜角度调节旋钮),使十字分划线横线与标尺刻度线平行,并对齐 $\leq 2.0\text{ cm}$ 的刻度线(避免实验做到最后超出标尺量程)。水平移动支架,使十字分划线纵线对齐标尺中心。

3. 数据测量

(1) 选择合适的长度测量仪器分别测量 L 、 H 、 D 、 d

用钢卷尺测量金属丝的原长 L ,钢卷尺的始端放在金属丝上夹头的下表面(即横梁上表面),另一端对齐平台板的上表面。

用钢卷尺测量反射镜转轴到标尺的垂直距离 H ,钢卷尺的始端放在标尺板上表面,另一端对齐垂直卡座的上表面(该表面与转轴等高)。

旋松光杠杆动足上的锁紧螺钉,调节光杠杆动足至适当长度(以动足尖能尽量贴近但不贴靠到金属丝,同时两前足能置于台板上的同一凹槽中为宜),用三足尖在平板纸上压三个浅浅的痕迹,通过画细线的方式画出两前足连线的高(即光杠杆常数),然后用游标卡尺测量光杠杆常数的长度 D 。将光杠杆置于台板上,并使动足尖贴近金属丝,且动足尖应在金属丝正前方。

以上各物理量为一次测量值,记录实验数据。

用螺旋测微器测量不同位置、不同方向的金属丝直径视值 $d_{\text{视}j}$ (至少6处),注意测量前记下螺旋测微器的零差 d_0 。将实验数据记入**错误!未找到引用源。**中,计算直径视值的算术平均值 $\overline{d_{\text{视}}}$,并根据 $\overline{d} = \overline{d_{\text{视}}} \pm d_0$ 计算金属丝的平均直径。

(2) 测量标尺刻度 x 与拉力 f

点击数字拉力计上的“清零”按钮,记录此时对齐十字分划线横线的刻度值 x_1 。

缓慢旋转施力螺母加力,逐渐增加金属丝的拉力,每隔 $1.00(\pm 0.02)\text{ kg}$ 记录一次标尺的刻度 x_i^+ ,加力至设置的最大值,数据记录后再加 0.5 kg 左右(不超过 1.0 kg ,且不记录数据)。

然后,反向旋转施力螺母至设置的最大值并记录数据,同样地,逐渐减小金属丝的拉力,每隔 $1.00(\pm 0.02)\text{ kg}$ 记录一次标尺的刻度 x_i^- ,直到拉力为 $0.00(\pm 0.02)\text{ kg}$ 。

记录实验数据。

(3) 实验完成后,旋松施力螺母,使金属丝自由伸长,并关闭数字拉力计。

五、注意事项

1.在调节好望远镜后,后续的实验步骤中不再调整望远镜。保证实验桌不要有震动,以保证望远镜稳定。

2.实验架含有最大加力限制功能,实验中最大实际加力不应超过 13.00 kg 。

- 3.严禁改变限位螺母位置，避免最大拉力限制功能失效。
- 4.加力和减力过程，施力螺母不能回旋。
- 5.实验完毕后，应旋松施力螺母，使金属丝自由伸长，并关闭数字拉力计。

六、报告要求

- 1.用逐差法处理数据。
- 2.求出杨氏模量及其不确定度，给出完整的测量结果表达形式。
- 3.回答以下讨论题。

七、讨论题

- 1.材料相同，但粗细、长度不同的两根钢丝，它们的杨氏模量是否相同？
- 2.从误差分析的角度分析为什么同是长度测量，需要采用不同的量具？
- 3.实验过程中为什么加力和减力过程，施力螺母不能回旋？
- 4.用逐差法处理数据的优点是什么？应该注意什么问题？

实验过程中需用到的测量工具及其相关参数：

量具名称	量程	分辨率	误差限
标尺(mm)	80.0	1	0.5
测微尺(mm)	10.0	0.1	--
钢卷尺(mm)	3000.0	1	0.8
游标卡尺(mm)	150.00	0.02	0.02
螺旋测微器(mm)	25.000	0.01	0.004
数字拉力计(kg)	20.00	0.01	0.005

实验三 液体黏度的测定

一、实验预习指导

1. 学习液体黏度的定义与测量方法；
2. 学习斯托克斯定律及其适用条件；
3. 学习读数显微镜的构造与原理。

二、实验任务

1. 利用温控仪设定蓖麻油的温度；
2. 利用读数显微镜测量小球的直径；
3. 利用落球法测量蓖麻油的黏度。

三、实验原理

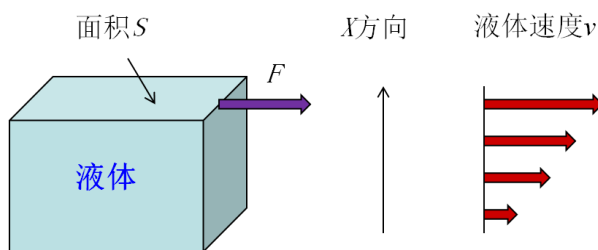


图 3-1 黏滞力 F 与面积 S 、速度 v 的关系

液体的黏滞力 F 与面积 S 以及速度 v 成正比，与距离成反比，即

$$F = \eta S \frac{v}{x} \quad (3-1)$$

比例系数 η 即为黏度，单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 或 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

当小球在液体中缓慢下落时，它受到重力、浮力和黏滞力的作用。如果小球的运动满足下列条件：(a) 在液体中下落时速度很小；(b) 小球体积很小；(c) 液体在各个方向上都是无限宽广的，斯托克斯 (S. G. Stokes) 指出，这时的黏滞力为：

$$F = 6\pi\eta rv \quad (3-2)$$

v 为小球下落的速度； r 为小球半径。可见，黏滞力是随着小球下落速度增加而增加的，如果小球从液面开始下落，最初是加速运动，当速度增大到一定程度时，达到受力平衡，开始做匀速运动。

$$\frac{4\pi}{3} r^3 \rho g = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho_0 g + 6\pi\eta rv \quad (3-3)$$

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_0)gr^2}{9v_0} = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0} \quad (3-4)$$

ρ 为小球密度， ρ_0 为液体密度， d 为小球直径。

由于液体盛在容器中，不是无限宽广的，需要考虑边界对小球运动带来的影响。对于圆筒形容器，如果液体高度为 H ，圆筒内径为 D ，公式 (3-4) 应修正为：

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0 \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right) \left(1 + 3.3 \frac{d}{2H}\right)} \quad (3-5)$$

由于高度 H 远大于小球直径 d ，而且实际用于测量球速的上下标线远离上下界面，因此可以将关于 H 的修正项忽略掉，而将上式写为：

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18v_0 \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right)} = \frac{(\rho - \rho_0)gtd^2}{18L \left(1 + 2.4 \frac{d}{D}\right)} \quad (3-6)$$

L 为上下标线的距离； t 为小球经过两标线下落时间。

四、实验装置

1. 读数显微镜

读数显微镜是测量微小距离或长度的常用仪器之一。主要由一个显微镜和测微螺旋机构组成。显微镜由目镜、物镜和镜筒组成。目镜前方安有分划板（刻有十字叉丝的平板玻璃）。使用时，应先调整目镜看清叉丝，并调整叉丝方位，旋转测微鼓轮，使叉丝移动的方向与显微镜的走向一致。将待测物放在工作台上，转动调焦螺丝，可以上下移动镜筒，改变物镜与待测物的间距（物距），从而达到聚焦、看清待测物的目的。

测量方法：

(1) 检查叉丝的水平线是否与显微镜走向一致（视野中叉丝水平移动）。调节小球与叉丝的水平线相切，转动测微鼓轮，使显微镜向左或向右移动足够长的距离，检查小球是否一直保持与水平线相切，如果不相切，重新调整目镜和叉丝。

(2) 小球直径的测量。转动测微鼓轮，使叉丝的竖直刻线与小球像相切，继续转动测微鼓轮，使叉丝的竖直刻线在另一侧与小球像相切，两次相切时测微鼓轮上的读数 x_1 与 x_2 之差即为小球直径 d 。（注意：视野中观察到小球随测微鼓轮转动而移动）

(3) 为消除回程差，单次测量中要保证显微镜单向移动（视野中小球朝一个方向移动）。

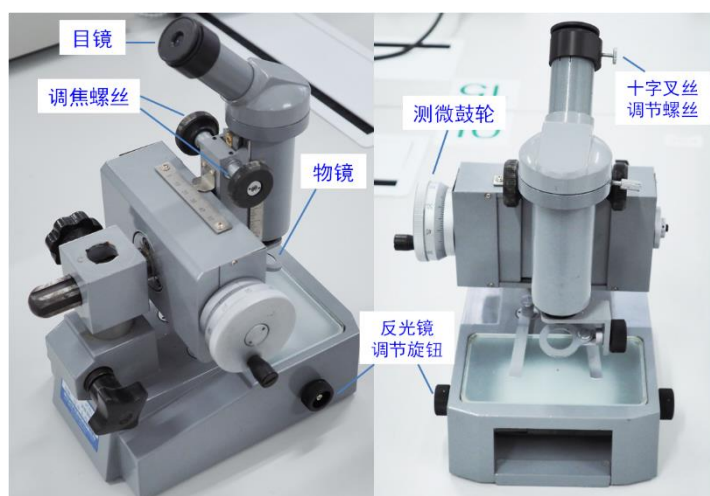


图 3-2 读数显微镜的结构

2. 落球法变温粘度测量仪

落球法变温粘度测量仪由温控实验仪和圆形容器组成，如图 3-3 所示，待测液体装在圆形容器中，可以使液体温度较快地与加热水温达到平衡，样品管壁上标有刻度线，用于测量小球下落的距离。样品管外的加热水套连接到温控仪，通过热循环水加热样品。底座下有调节螺钉，用于调节样品管至竖直方向。

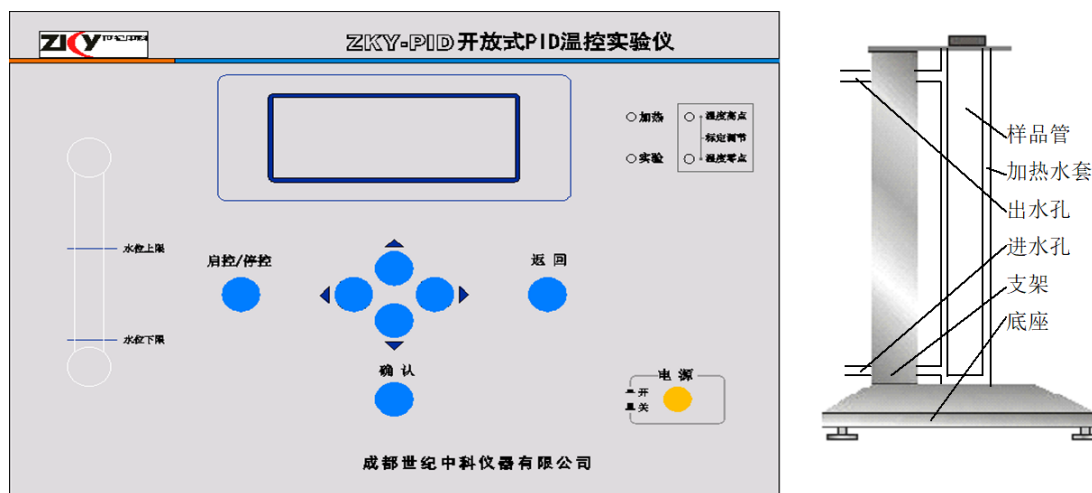


图 3-3 落球法变温粘度测量仪示意图

温控实验仪包含水箱，水泵，加热器，控制及显示电路等部分。开机后，水泵开始运转，显示屏显示操作菜单，可选择工作方式，输入序号及室温，设定温度参数。使用◀▶键选择项目，▲▼键设置参数，按确认键进入下一屏，按返回键返回上一屏。

进入测量界面后，屏幕上方的数据栏从左至右依次显示序号，设定温度，初始温度，当前温度，当前功率，调节时间等参数。图形区以横坐标代表时间，纵坐标代表温度（以及功率），并可用▲▼键改变温度坐标值。仪器每隔 15 秒采集 1 次温度及加热功率值，并将采得的数据标示在图上。温度达到设定值并保持两分钟温度波动小于 0.1 度，仪器自动判定达到平衡，并在图形区右边显示过渡时间 t_s ，动态偏差 σ ，静态偏差 e 。一次实验完成退出时，仪器自动将屏幕按设定的序号存储（共可存储 10 幅），以供必要时查看、分析及比较。

五、操作要点

1. 开启温控仪后，设置实验室温度值和目标温度设定值。
2. 在温度达到设定值后（30℃、32℃、34℃、36℃、38℃、40℃、42℃、44℃、46℃、48℃、50℃、52℃、54℃、56℃、58℃或60℃，每位同学所选的温度不要跟其他同学的重复）需要再等约 10 分钟，使圆筒中的待测液体的温度与加热水温完全一致，才能开始测量液体的黏度。
3. 在等待温控仪调温的时间，调整读数显微镜的目镜、物镜，消除视差，并调整叉丝水平刻线使之与显微镜的走向一致，然后用读数显微镜反复测量小球直径 d ，一共测 5 个小球，每个小球测最少 5 次，注意消除回程差。
4. 通过气泡水平仪调整圆筒为垂直，将小球从中心孔投入到圆筒中，用秒表记录小球经过上

下两标线所需的时间，然后利用修正公式计算黏度。

5. 在不同的温度设定值下重复落球实验，探索液体黏度与温度的关系，每颗小球投入一种温度的蓖麻油，所选取的蓖麻油温度间隔不低于 6°C 。

6. 有关数据

小球密度 $\rho = 7.80 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;

重力加速度 $g = 9.78 \text{ m/s}^2$;

蓖麻油密度 $\rho_0 = 0.95 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$;

圆管内部的已固定直径 $D = 2.00 \times 10^{-2} \text{ m}$

测定时间的不确定度为 0.2 s 。

六、注意事项

1. 通电前，应保证水位指示在水位上限和下限之间，否则严禁开启电源，要通知老师做漏斗加水处理。
2. 开始实验前，先确定圆筒容器为垂直状态。
3. 温控仪温度达到设定值后再等约 10 分钟，使圆筒容器中的待测液体温度与加热水温完全一致，才能开始测量液体黏度。
4. 在圆筒容器顶端的轴心位置投球，以减少容器边界的影响。

七、报告要求

1. 计算各温度下蓖麻油的黏度，绘出「黏度-温度」曲线。
2. 推导出 η 的相对不确定度公式，然后计算某个温度下 η 的不确定度，并完整表达测量结果。

实验四 薄透镜焦距的测定

一、实验预习指导

1. 掌握薄透镜光路分析和调整的方法及成像规律；
2. 掌握几种测量薄透镜焦距的方法；
3. 练习基本的光路调节方法。

二、实验任务

1. 光具座上各元件的共轴调节；
2. 用自准法测凸透镜的焦距；
3. 用位移法（两次成像法、共轭法）测凸透镜的焦距；
4. 用物距—像距法测凹透镜的焦距；
5. 用自准法测量凹透镜的焦距；

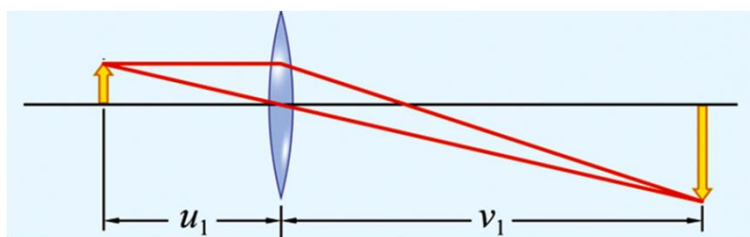
三、实验原理

1. 薄透镜是指厚度比其两个球形表面中任何一个的曲率半径小得多，或者比其焦距 f 小得多的透镜。

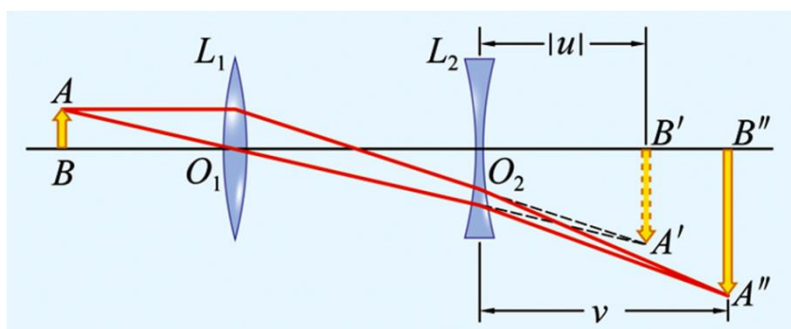
在近轴光线的条件下，薄透镜的成像公式为 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ ；式中， u 、 v 、 f 分别表示物距、像距和透镜的焦距，需要注意公式中各量的符号。当物为实物时 u 取正值，为虚物时取负值。当像为实像（由实际光线汇聚而成，可用光屏承接，例如照相机成像）时 v 取正值，为虚像（由实际光线的反向延长线汇聚而成，不能用光屏承接，例如放大镜成像）时取负值；凸透镜的焦距 f 为正值，凹透镜的焦距 f 为负值。

2. 用物距-像距法测凸、凹透镜焦距如图 4-1(a)和(b)所示。在图 4-1(a)中， $\frac{1}{u_1} + \frac{1}{v_1} = \frac{1}{f}$ ，在

图 4-1(b)中， $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 。注意在图 4-1(b)中，物距 u 为负值（虚物），像距 v 为正值（实像）。



(a) 物距-像距法测凸透镜焦距



(b) 物距-像距法测凹透镜焦距

图 4-1 物距-像距法测透镜焦距

3. 用自准法测凸透镜焦距如图 4-2 所示。在凸透镜后面垂直主光轴放一平面镜，由物 AB（放在凸透镜焦平面上）发出的光线经过凸透镜 L 后，被平面镜 M（放在凸透镜焦平面上）反射回来，再次经凸透镜后成像在焦平面上且为倒立的实像 A'B'，据此可测出焦距 $f = |O-B|$ 。

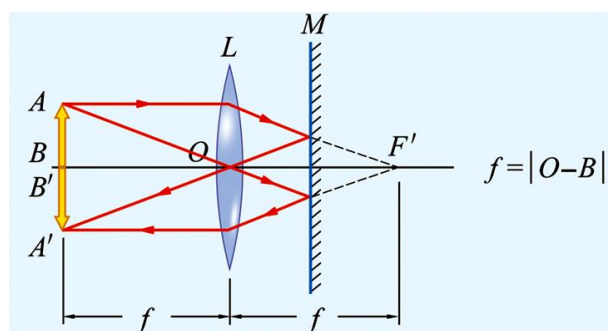


图 4-2 自准法测凸透镜焦距

4. 用自准法测凹透镜焦距如图 4-3 所示。图中，利用凸透镜 L_1 和凹透镜 L_2 的组合镜组来获得平行光。首先用凸透镜 L_1 将物 AB 成像于 B' 处，然后将凹透镜 L_2 及平面镜 M 垂直主光轴依次放在凸透镜 L_1 后面。调整凹透镜 L_2 位置使其光心 O' 到 B' 距离 $O'B'$ 恰好等于凹透镜 L_2 的焦距 f ，此时物 AB 某一点上发出的光线透过凹透镜 L_2 后会成为平行光，经平面镜 M 反射回来再经凹透镜 L_2 及凸透镜 L_1 会成像于物平面上。据此，可测出凹透镜 L_2 的焦距 $f = -|O'-B'|$ 。

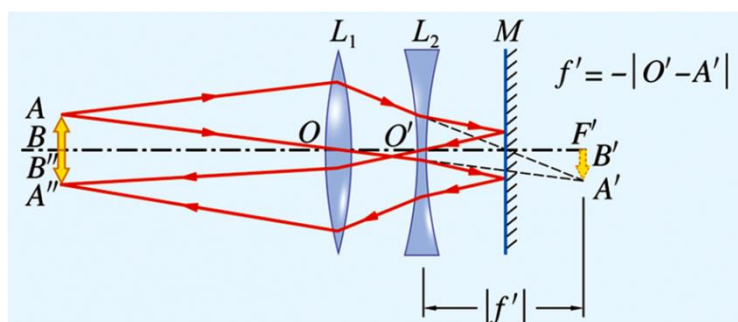


图 4-3 自准法测凹透镜焦距

5. 在学习位移法（两次成像法、共轭法）测凸透镜的焦距原理之前，需要先熟悉凸透镜成像规律，如图 4-4 所示。当物距 $u > 2f$ 时，凸透镜成倒立缩小的实像，此时像距 v 满足 $f < v < 2f$ ；当物距 $u = 2f$ 时，凸透镜成倒立等大的实像，此时像距 v 满足 $v = 2f$ ；当物距 u 满足 $f < u < 2f$ 时，凸透镜成倒立放大的实像，此时像距 v 满足 $v > 2f$ ；当物距 $u = f$ 时，凸透镜不成像；当物距 u 满足 $0 < u < f$ 时，凸透镜成正立放大的虚像。

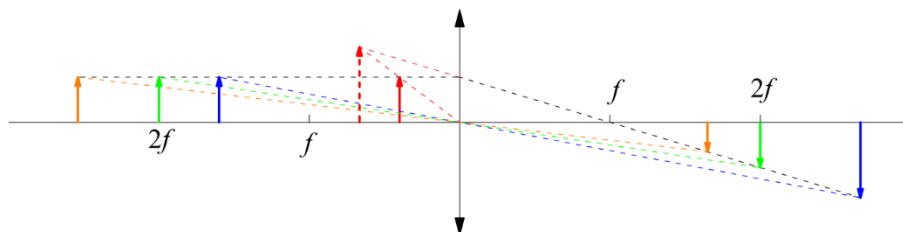


图 4-4 薄凸透镜成像规律

6. 位移法（两次成像法、共轭法）测凸透镜的焦距原理如图 4-5 所示。图中，物屏和像屏之间的距离 $L > 4f$ 。当凸透镜在 1 位置时，呈现清晰倒立的放大实像 $B'A'$ ，当凸透镜在 2 位置时，呈现的是清晰倒立的缩小的实像 $B''A''$ 。透镜的位置 1 和位置 2 之间的距离为 C 。根据成像原理可知，： $u = v'$ ， $v = u'$ 。则

$$L - C = u + v' = 2u \quad (4-1)$$

其中所有量均为绝对值，得到 $u = \frac{L-C}{2}$ ， $v = u' = L - v' = L - u = \frac{L+C}{2}$ ，将 u 和 v 的

表达式带入薄透镜成像公式中得到凸透镜的焦距为 $f = \frac{uv}{u+v} = \frac{L^2 - C^2}{4L}$ 。因此，保持物

屏与像屏距离 L 不变，改变透镜位置分别得到放大的清晰实像和缩小的清晰实像，测出两次成像时透镜位置的间距 C ，即可得到透镜的焦距。

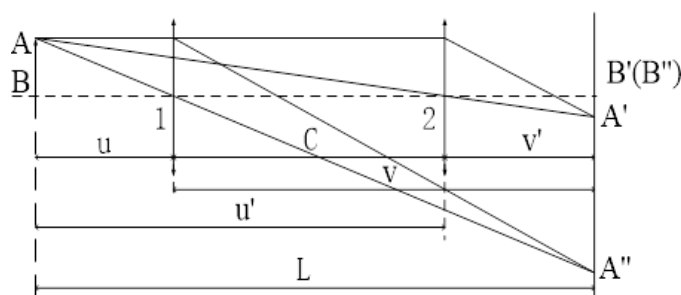


图 4-5 位移法（两次成像法、共轭法）测凸透镜的焦距原理

四、 操作要点

1. 光具座上各元件的等高、共轴调节

(1) 粗调：将光具座上光源、透镜、物屏、像屏等光学元件靠在一起，用眼睛仔细观察，调节各

光学元件高低和左右，使光源中心、物中心、透镜中心、像屏中心大致在一条与光具座平行的直线上。

(2) 细调：单透镜细调的具体操作过程是：

出亮度均匀完整的像：将物屏与像屏在导轨上拉开足够大的距离（大于 $4f$ ），使会聚透镜在物屏和像屏之间移动时，像屏上可分别形成放大和缩小的清晰像。要求所形成的像必须完整且亮度均匀，否则应适当调整光源和物屏。

调节像中心位置竖向等高（即**大像追小像**）：移动透镜 L 使像屏上出现清晰的放大像，记下其中心位置 O' ，再移动透镜 L 使像屏上出现清晰的缩小像，记下其中心位置 O'' ，如图 4-6 所示。若两像中心不等高，则将透镜 L 向物屏方向移动使像屏上重新出现清晰放大像，然后调节物的中心位置高度使 O' 点向 O'' 点靠拢（即放大像的中心向缩小的像中心靠拢），至 O' 点与 O'' 点等高；再使透镜 L 向像屏移动使像屏上出现清晰缩小像，检查 O' 点与 O'' 点等高程度。注意：若 O' 点在 O'' 点上方，则物中心 O 点低于调节光轴，此时应将物中心 O 点上移，使 O' 点下降向 O'' 点靠拢，反之则应将为 O 点下移。

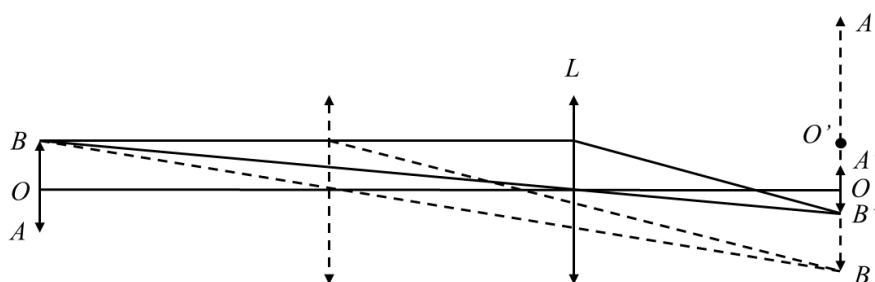


图 4-6 共轴调节示意图

2. 自准法测凸透镜的焦距

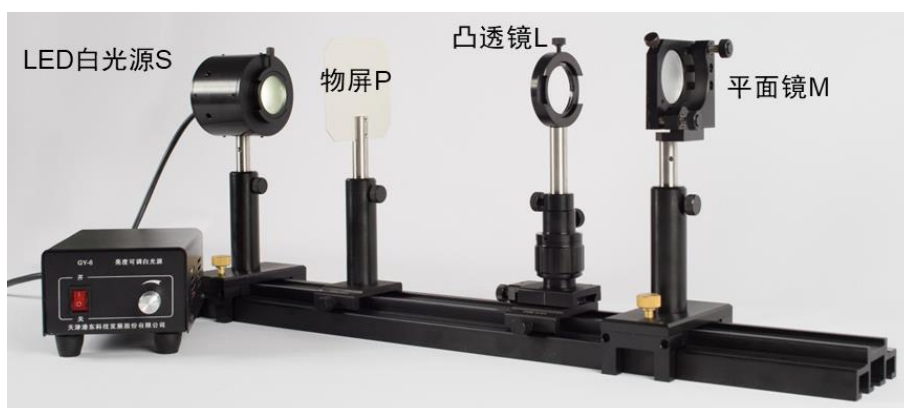


图 4-7 自准法测量凸透镜的焦距实验装置图

(1) 依据图 4-7 安装好实验器材，然后进行光路共轴调节。

(2) 打开光源 S ，调节亮度，采用左右逼近法，即先从左向右，然后再自右向左移动透镜 L ，使

得物屏的背面出现倒立等大的实像。通过调节凸透镜 L 的前后及左右位置，最后使得物屏上的“品”字形透光孔与其反射回去的像形成完全互补的模式，其外沿是一个完整的圆，如图 4-8 所示。分别记下从左向右和从右向左透镜 L 的位置 x_L ，以及物屏 x_p 的位置于表 1 中，重复上述实验 5 次（要求每次重新测量前，改变物屏的距离），计算焦距 $f = |\bar{x}_L - x_p|$ ，精确到 mm ，最后计算不确定度，科学表达计算结果。



图 4-8 准直时形成的物象图案

表 4-1 自准法测凸透镜焦距数据记录

次数	物屏位置读数 x_p	凸透镜位置读数 x_L		\bar{x}_L	$f = \bar{x}_L - x_p $
		左 \rightarrow 右	右 \rightarrow 左		
第 1 次					
第 2 次					
第 3 次					
第 4 次					
第 5 次					

3. 位移法（两次成像法、共轭法）测凸透镜焦距



图 4-9 位移法（两次成像法、共轭法）测凸透镜焦距实验装置图

- (1) 按图 4-9 布置各器件并调至共轴，再使物屏与像屏距离大于 4 倍透镜焦距长度，记录物屏和像屏的位置 A_1 , A_2 ;
- (2) 开启光源，将透镜紧靠物屏，慢慢地向像屏移动，使被照亮的物屏图案在像屏上成一清晰的放大像，记下透镜的位置 l_1 。再移动透镜，直至在像屏上成一清晰的缩小像，记下透镜的位置 l_2 ，记 $L = |A_1 - A_2|$ ， $C = |l_1 - l_2|$ ，则透镜焦距为

$$f = \frac{L^2 - C^2}{4L} \quad (4-2)$$

- (3) 重复测量 5 次，得到 5 组原始测量数据 (A_1 , A_2 , l_1 , l_2)。要求每次重新测量前，改变物屏和像屏距离。

4. 用物距一像距法测凹透镜焦距



图 4-10 物距一像距法测凹透镜焦距实验装置图

- (1) 按图 4-10 布置各器件并调至共轴，先不放待测凹透镜 L_2 ;
- (2) 开启光源，使被面光源照亮的物屏 P_1 通过凸透镜 L_1 在像屏 P_2 上成清晰像时记下 P_2 的位置读数 x_{P2} ；为减小误差，凸透镜应成缩小像（物距大于 2 倍焦距）。
- (3) 在凸透镜 L_1 和像屏 P_2 之间加入待测的薄凹透镜 L_2 ，调同轴，向远处移动像屏，然后固定像屏位置（此时像屏记作 P_2' ），调节凹透镜 L_2 的位置，使像屏 P_2 上出现清晰的像。记下 L_2 和像屏 P_2' 的位置读数 x_{L2} , $x_{P2'}$;
- (4) 注意：调节凹透镜的时候要注意像的变化（亮度，形状，清晰度），若像屏位置不动凹透镜位置发生变化但是像不发生变化（亮度，形状，清晰度不变）则该像为凸透镜所成的像，此时需要校准光路。
- (5) 以 $L_2 P_2$ 距离为物距 $u = -|x_{P2} - x_{L2}|$ ，以 $L_2 P_2'$ 距离为像距 $v = |x_{P2'} - x_{L2}|$ ，将数值代入式

$$f = \frac{uv}{u + v}, \text{ 计算被测透镜的焦距。}$$

(6) 重复测量 5 次，得到 5 组原始测量数据 (x_{P2} , x_{L2} , $x_{P2'}$)。要求每次重新测量前，改变物屏和像屏距离。

5. 自准法测凹透镜焦距：

(1) 同实验 4 步骤 1；

(2) 同实验 4 步骤 2；

(3) 在凸透镜 L_1 和像屏 P_2 之间依次加入待测的薄凹透镜 L_2 和平面镜 M ，调节 L_2 和 M ，使得物屏上的“品”字形透光孔与其反射回去的像形成完全互补的模式，其外沿是一个完整的圆。记录 P_1 通过凸透镜 L_1 在像屏上成清晰像的位置 x_{P2} 以及 L_2 的位置 x_{L2} 。则凹透镜焦距为 $f = -|x_{P2} - x_{L2}|$ 。重复测量 5 次。

五、 注意事项

1. 光学元件切忌用手直接触摸；
2. 在使用、搬动时防止碰伤导轨，以免引起导轨变形。

六、 报告要求

1. 根据每个实验内容要求，自拟数据记录表格，记录所有原始测量数据；
2. 计算各种测量方法的相对误差；
3. 计算“自准法测凸透镜焦距实验”中 f 的不确定度 Δf ，并将结果表示成 $f \pm \Delta f$ 的形式。

七、 讨论题

1. 用位移法（两次成像）测薄凸透镜焦距，为什么必须使物屏与像屏距离大于 4 倍透镜焦距长度？
2. 从自准法测凸透镜的光路图可知物距、像距和焦距三者是相等的，但这三个量显然不满足透镜成像公式，请解释原因。

实验五 惠斯通电桥与伏安特性

实验预习指导

1. 了解惠斯通电桥的构造和测量原理；
2. 熟悉调节电桥平衡的操作步骤；
3. 练习连接电路，熟悉电阻箱、检流计等基本电学仪器的使用方法；
4. 了解线性与非线性元件的伏安特性；

二、实验目的

1. 用伏安法绘制线性元件和非线性元件的伏安特性曲线；
2. 利用惠斯通电桥测试线性元件的阻值及电桥灵敏度。

三、实验原理

1. 线性电阻和非线性电阻的伏安特性

流过一个元件的电流随外加电压变化的关系曲线，称为该元件的伏安特性曲线。加在该元件两端的电压 U 与由此而引起的流过该元件的电流 I 之比即为该元件的电阻 R 。一般金属导体的电压与电流呈比例关系，即 R 在一定条件下是一个常量，此时的伏安特性曲线为一条直线，如图 5-1

(a) 所示，这类元件称为线性元件。很多种电子元器件的电压与电流关系并不呈线性，而是按非线性规律变化，这类元件称为非线性元件，如半导体二极管、发光二极管、热敏电阻、光敏电阻等。图 5-1 (b) 为半导体二极管的伏安特性曲线。非线性元件的电阻不仅随外加电压会有很大的变化，而且还与电流的方向有着密切的关系。我们将 $R_Q = \frac{V}{I}$ 称为非线性元件在工作电压 V 下的静态电阻；而将其在某个工作电压 V 附近电压的改变量与电流的改变量之比 $R_D = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ 称为非线性元件在工作电压 V 下的动态电阻。

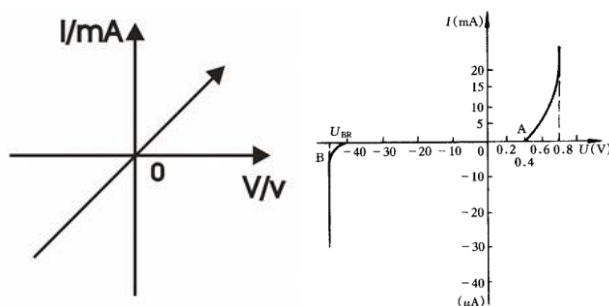


图 5-1 线性电阻 (a) 和半导体二极管 (b) 的伏安特性曲线

2. 电流表外接和内接

测量电阻伏安特性时，连接电流表的方法有两种，即电流表外接和电流表内接，如图 5-2(a)、

(b)所示。由于电流表和电压表都有内阻，因此，电表在工作时改变了待测电路的工作状态，这就不可避免地给测量带来了系统误差。换句话说，从原理上看，用伏安法测电阻就必然存在着系统误差。我们能够做的事情，第一是根据各项参量（例如电压表内阻 R_V 、电流表内阻 R_A ，以及被测电阻 R_x ，的估计值）选择一个最合理的电路（内接或是外接），使得引起的系统误差最小。第二是估算出所用方法引起的系统误差的数值，在测量结果中加以消除。

$$\text{电流表内接时, } R_x = R_{\text{测}} - R_A, \quad E = \frac{R_{\text{测}} - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}, \quad \text{电流表外接时, } R_x = \frac{R_V R_{\text{测}}}{R_V - R_{\text{测}}},$$

$$E = \frac{R_{\text{测}} - R_x}{R_x} = \frac{R_x}{R_x + R_V}, \quad \text{由上述公式可得, 当 } R_x \ll R_A \text{ 时, 采用电流内接电路误差较小, 而当}$$

$R_x \ll R_V$, 宜采用电流外接电路误差较小。

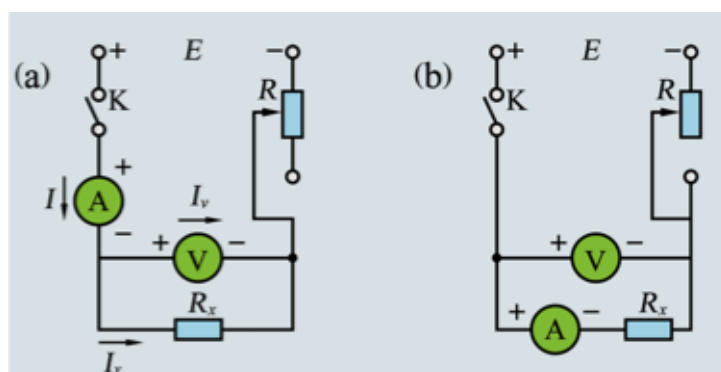


图 5-2 伏安法测电阻：(a)电流表外接；(b)电流表内接

3. 制流电路或分压电路

按照实验的需要用滑动变阻器调节电路中电流（或是电压）时，应该有良好的调节性能，亦即电流（或电压）应该能够流畅地、线性地得到控制和调节。为了达到这一目的，必须按照负载电阻的大小 R （在本实验中就是我们的被测电阻）和滑动变阻器的最大阻值 R_{max} 来确定制流电路或分压电路。

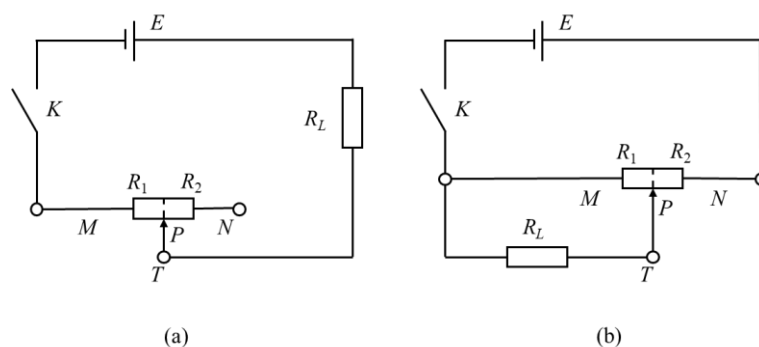


图 5-3 (a)制流电路，(b)分压电路

1) 制流电路

评价制流电路性能优劣的一个主要指标是看它调节电流范围的大小。如图 5-3 (a) 所示的电路，如果我们忽略电源、电压表和电流表内阻的影响，MP 之间电阻为 R_1 ，NP 之间电阻为 R_2 ， $R_1+R_2=R$ ，则流过负载电阻 R_L 的电流为

$$I = \frac{E}{R_L + R_1} = \frac{E}{R_L + R - R_2} = \frac{\frac{R_L E}{R R_L}}{\frac{R_L}{R} + 1 - \frac{R_2}{R}} = \frac{K I_0}{1 + K - X} \quad (5-1)$$

其中， $K = \frac{R_L}{R}$ 为负载电阻与滑线电阻的比值， $X = \frac{R_2}{R}$ 代表滑动点的位置， $I_0 = \frac{E}{R_L}$ 为 $R_L=0$

时电路的最大电流。于是得到制流比 I/I_0 与滑动点位置 X 的关系为

$$\frac{I}{I_0} = \frac{K}{1 + K - X} \quad (5-2)$$

相应的关系曲线为

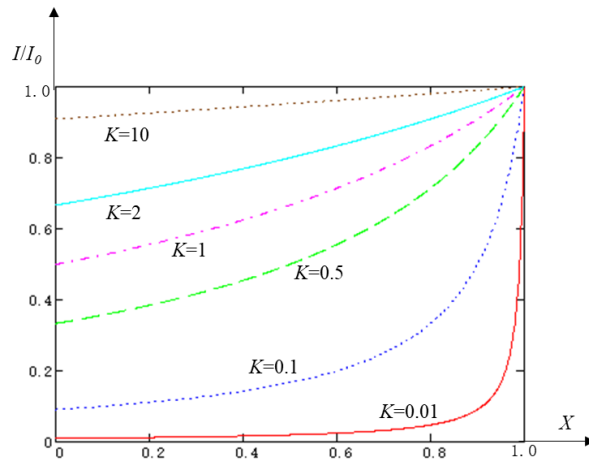


图 5-4 制流电路的制流比特性曲线

从图 5-4 可以看到，当 K 越大，调节的线性越好，但是调节范围越小。综合考虑， K 值取 0.5~1 较为合适。

2) 分压电路

对于分压电路来说，不论 R 和 R_L 的取值为多少，我们调节滑动变阻器的滑动接头，总能使加在负载电阻 R_L 上的电压由 0 增加到 E 。也就是说。它们的调节范围都是一样大的。对于分压电路来说，调节性能的好坏是主要考虑的指标，也就是说，主要是看随着滑动接头的位置由左向右调节时， R_L 上的电压是否随之大致呈线性地增大。

在分压电路中，电路中总电流为

$$I = \frac{E}{R_2 + \frac{R_L R_1}{R_L + R_1}} \quad (5-3)$$

负载电阻上的电压为

$$V = I \frac{R_L R_1}{R_L + R_1} \quad (5-4)$$

由式 (5-3)、(5-4) 及 $R_1 + R_2 = R$ 得到

$$V = \frac{R_L R_1 E}{R(R_L + R_1) - R_1^2} = \frac{\frac{R_L R_1}{RR} E}{\frac{R_L}{R} + \frac{R_1}{R} - \frac{R_1^2}{R^2}} \quad (5-5)$$

以 $K = \frac{R_L}{R}$ 表示负载电阻与滑线电阻的比值， $X = \frac{R_2}{R}$ 代表滑动点的位置，得到分压比

V/E 与滑动头相对位置 X 的关系为

$$\frac{V}{E} = \frac{KX}{K + X - X^2} \quad (5-6)$$

相应的关系曲线为

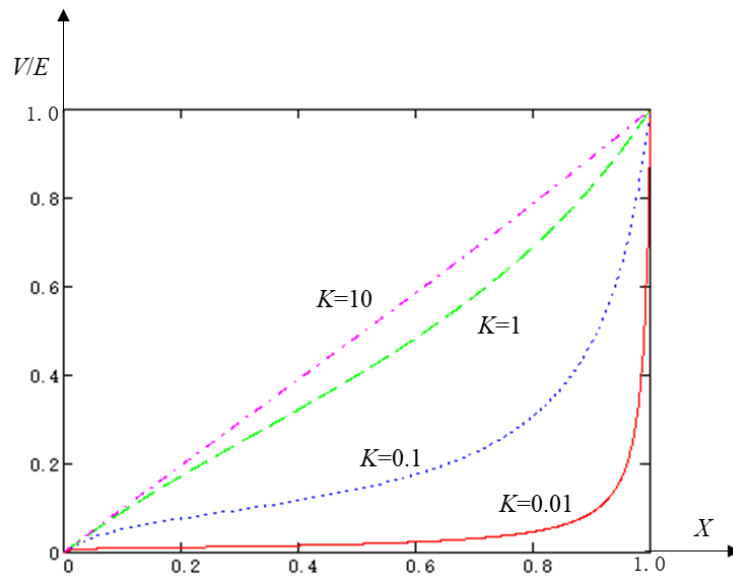


图 5-5 分压电路的分压比特性曲线

从图 5-5 可以看到，当 $K > 1$ 时，分压比与滑动头的相对位置基本呈线性关系。

4. 电路元件的额定功率 P

对于线性元件不论是固定电阻还是可变电阻，使用时除了注意其阻值 R 的大小，还必须

考虑其额定功率 P ，即在使用中不能超过允许通过的电流： $I = \sqrt{P/R}$ ，或者允许加在电阻两端的电压 $U = \sqrt{PR}$ 。否则，轻则因为发热， R 的实际值将偏离标准值，重则元件将被烧。

对于非线性元件，大也都存在类似的会引起元件性能变化或损毁的极限工作参量，如半导体二极管正向最大电流值、反向击穿电压等。在测试中必须加以注意，不得超过。

5. 惠斯通电桥的构造及测量原理

惠斯通电桥是用来测量阻值在 $1 \sim 10^6 \Omega$ 范围内的电阻的一种较为精密的电学仪器。它具有操作简便，测量精度较高，对电源稳定性要求不高，携带方便等优点。

图 5-6 显示的是惠斯通电桥的构造，四个电阻 R_x 、 R 、 r_x 和 r_R 称作电桥的四个臂，组成一个四边形 ABCD， r_x 和 r_R 称为比例臂， R 称为比较臂。对角 C 和 D 之间连接检流计 G，构成“桥”，用以比较桥两端的电位。当 C 和 D 两点的电位相等时，检流计指零，电桥达到了平衡状态。注意所测电阻 R_x 有效位数是由比值 N 和比较臂 R 的有效位数所决定的。一般 N 的选取要使 R 用到最高位，保证测量结果达到 4 位以上有效数字。

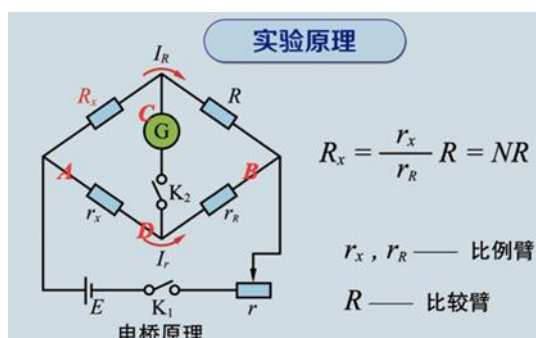


图 5-6 惠斯通电桥

6. 惠斯通电桥的灵敏度

在实验中，是依据检流计 G 的指针有无偏转来判断电桥是否平衡的。然而，检流计的灵敏度是有限的。例如，选用电流灵敏度为 1 格每微安的检流计作为指零仪。当通过检流计的电流 I 小于 10^{-7}A 时，指针偏转不到 0.1 格，难于觉察，就会认为电桥已达到平衡，因而带来测量误差。

为此，引入电桥灵敏度的概念。它的定义为 $S = \frac{\Delta n}{\Delta R/R}$ ，其中 ΔR 为在电桥平衡后比较臂

电阻 R 的微小变化， ΔRn 为相应的检流计偏转格数。

电桥灵敏度 S 的单位是格。 S 越大，电桥越灵敏，测量误差越小。电桥灵敏度包含了检流计灵敏度和线路灵敏度。所以选用灵敏度高、内阻低的检流计，适当提高电源电压，会提高电桥灵敏度。对自组电桥，适当减小桥臂电阻、尽量把桥臂配置成均匀状态。

四、操作要点

1. 伏安特性测试

- (1) 判断电阻测试采用内接法还是外接法。
- (2) 对于二极管正向伏安特性，二极管正向导通，电阻较小，采用电流表外接。
- (3) 二极管正向电流不得超过 20 mA。
- (4) 按如下表格分别记录待测电阻和二极管伏安特性曲线的数据。

测量序 数	1	2	3	4	5	6	7	8
$U(V)$								
$I(mA)$								

2. 惠斯通电桥测试

- (1) 选择电源电动势 2 V， R_s 电阻箱选择 99.9999 k Ω 档。
- (2) 根据待测电阻的初略阻值，选择合适的 N 值。
- (3) 调节电桥平衡：先选择检流计在低灵敏状态下，间断的按下检流计按钮“G”，探测电桥是否平衡，如果不平衡，调节 R_s 电阻箱电阻（ R_s 的调节按照“先大后小”的原则），使得电桥趋于平衡；然后增加检流计灵敏度，重复以上操作，直至检流计灵敏度到最大，记录此时电桥平衡时 R_s 值。
- (4) 用电桥法测量阻值为 1 k Ω 和 10 k Ω 的电阻，并计算电桥灵敏度。

电阻（阻值）	N	R_s (Ω)	R_x (Ω)	ΔR_s (Ω)	Δn (格)	S (格)
1 K Ω	1					
10 K Ω	1					

- (9). 选择不同的 N 值，通过测试电阻 1 k Ω ，分析电桥灵敏度的变化。

N	R_s (Ω)	R_x (Ω)	ΔR_s (Ω)	Δn (格)	S (格)
0.01					
0.1					
1					
10					
100					

五、讨论题

1. 电桥测电阻为什么不能测量小于 $1\ \Omega$ 的电阻？
2. 用什么方法保护电流计，不至于因电流过大而损坏？
3. 当电桥平衡后，若互换电源和检流计位置，电桥是否仍然平衡？并证明。

附录 主要技术参数

1. 电阻箱：调节范围 $0\sim 99999.9\Omega$ ，准确度 0.1 级；最小步进 0.1Ω ；

步进盘	$\times 10k\Omega$	$\times 1k\Omega$	$\times 100\Omega$	$\times 10\Omega$	$\times 1\Omega$	$\times 0.1\Omega$
准确度%	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.5	± 2
额定电流 (A)	0.005	0.015	0.05	0.15	0.5	1.5

2. 标准电流表：2mA，20mA，2000mA 三量程，四位半数显，准确度 $\pm 0.5\%$ ；电流表量程及所对应内阻如下表所示

电流表量程	2mA	20mA	2000mA
电流表内阻	100Ω	10Ω	0.1Ω
准确度	0.2%	0.2%	0.5%

3. 标准电压表：2V，20V 二量程，四位半数显，准确度 $\pm 0.2\%$ ；电压量程和对应的电压表内阻

电压表量程	2V	20V
电压表内阻	$1.6M\Omega$	$1.6M\Omega$
准确度	0.2%	0.2%

4. 滑线变阻器：阻值 2K，功率 150W；
5. 比例电阻： $\times 10^{-3}$ 、 $\times 10^{-2}$ 、 $\times 10^{-1}$ 、 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 10^2$ 、 $\times 10^3$ 共 7 档可调；
6. RJ-2W-1k $\Omega \pm 5\%$ ：金属膜电阻器，安全电压：20V；
7. RJ-2W-10k $\Omega \pm 5\%$ ：金属膜电阻器，安全电压：20V；
8. IN4007 二极管，最高反向峰值电压 1000V，最大正向平均电流 1A，最大正向电压 1.1V；



图 5-7 DIY 综合电学器件设计实验装置

实验六 DIY 实验——磁耦合谐振式无线电力传输实验研究

一、实验预习指导

1. 磁耦合谐振的物理原理是什么？
2. LC 谐振电路的固有频率以及线圈的电感参量如何计算？
3. 本实验采用的磁耦合谐振式无线电力传输系统包括开关电路，发射电路和接收电路，画出系统图，理解开关电路的原理，振荡电路采用什么形式的信号？发射电路和接收电路分别采用哪种 LC 谐振电路？

二、实验背景

无线输电即利用无线电磁波或变化电磁场进行电能的无线传输。这一技术不受空间限制，能够克服有限输电方式各种弊端，不仅在工业场地机器人、深水勘探、核能反应堆调试、油田矿井、航空航天、电动汽车充电站、无线感知网络等领域具有重要的应用价值。又如无绳家用电器、植入医疗器械充电等民用领域也具有极大应用价值和发展空间。无线输电技术主要有以下三种：

1. 电磁感应式无线输电系统（Inductively Coupled Power Transfer）

是应用麦克斯韦方程组所阐述的电磁场理论，即变化中的电场会产生变化磁场，同样变化磁场又会转变成变化电场。此技术已经较为成熟，其传输机制类似松耦合变压器，原边和副边线圈相互进行电磁互感耦合，所以电磁感应式无线输电的传输距离非常近，一般在数十毫米之内，属于气隙级别的传输方案。如电动牙刷充电、手机充电板、生物医学诊疗装置等。

2. 电磁微波辐射式无线输电（Microwave Power Transfer）或者平行激光束（Laser Power Transfer）

实现电能定向无线传输，属于远场的无线电能传输技术，传输距离最远可达到数千米，该技术的原理为发射端经天线定向向空间发出高能量的高频微波束，接收端则用高增益定向天线来接收微波束并转换为直流电能为用电设备供电。这类型的无线输电方案由于是定向远距离传输电能，所以传输过程中会造成大量的能量损耗，即传播介质损耗、电能和光能与其他形式能量之间的转换，所以传输效率非常低。为了提高系统的发射接收能力，传输频率也非常高，一般在 GHz 等级。同时激光和高频电磁微波会对生物体造成不同程度的伤害。

3. 电磁共振技术 (Magnetic Resonant Wireless Power Transfer)

基于共振的原理,在发射和接收设备间产生共振能量传输通道,进而高效的传输电能。设计工作频率相同的振荡电路,当系统的激励源发射这个频率的电能,此系统就可以使相隔一定距离的设备产生磁耦合共振,电能通过强耦合的共振通道以电磁场为媒介进行非辐射无线传输。电磁共振型无线输电系统属于中近场(传输距离大于发射线圈的半径)无线电能传输技术,相对前两种无线输电技术,此方案更具实用价值,传输距离可以从数十厘米到数十米,而且对距离不敏感,在较远的距离也可以高效率进行电能传输,频率一般在 50kHz~10MHz 范。因为共振波长数倍于振荡器尺寸,所以能量在传输过程中能够绕开或者穿透附近非磁性物体,对方向性不敏感,传输效率相对稳定。此类无线输电系统具有共振频率的选择性,而且所用电磁场频率较低,对周围人或其它生物相对安全。

磁耦合共振式无线输电技术相比于电磁感应式和微波辐射式具有以下优点:

- (1) 磁耦合共振式无线输电技术对位置和距离相对不敏感,在较远的距离也可高效的进行传输;
- (2) 磁耦合共振式无线输电技术是非辐射的,能量损耗较小。
- (3) 由于利用共振的原理实现无线传输电能,所以仅具有相同频率的两物体间传送电能,与其他物体几乎没有能量传输,所以相对安全。

该技术是 2006 年末由麻省理工学院马林·索尔贾希克(Marin Soljačić)教授和他的物理研究小组提出,并为该技术命名为 WiTricity (Wireless Electricity)。马林教授和他的团队从理论到实验都进行了验证此方案的可行性,重新引起了世界对无线电能传输技术的关注。随后的几年,磁耦合共振技术发展迅速,众多国家和公司投入大量资金研究这一领域,使这项无线输电技术商业化,如移动电脑、手机等小功率电子移动设备,勘探钻井平台、电动汽车充电等各个方面。

本次实验就是第三种方式,磁耦合共振式无线电力传输的应用与探究实验。

三、实验原理

1. 磁耦合谐振原理

磁耦合是指两个线圈通过磁场产生相互作用,线圈间的耦合是通过电磁感应来实现的。线圈 1 为一次侧线圈,2 为二次侧线圈。如果 1 和 2 通过磁场耦合时一次侧电路和二次侧电路的谐振频率相同,则 1 和 2 发生磁耦合谐振,电能通过磁场传输媒介到达二次侧线圈,驱动

2 所连接的负载。

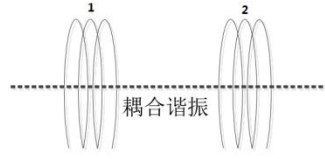


图 6-1 耦合谐振系统原理图

当振荡电路的振荡频率和发射电路的固有频率相一致时，发射电路会在空间产生最大的交变磁场，而当接收电路的固有频率也和发射电路的振荡频率一致时，电磁感应也会在接收电路中产生最大的电能吸收，这时电力传输效率最高，我们把这种交变磁场产生的耦合叫做**谐振式磁耦合**。

LC 谐振电路固有频率的计算公式为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (6-1)$$

2. LC 串联谐振特性

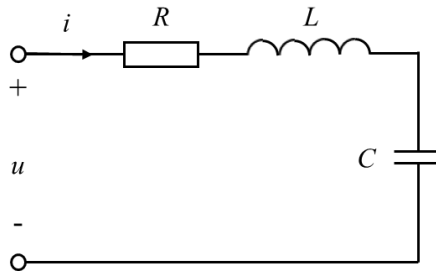


图 6-2 LC 串联电路

串联谐振线路阻抗为

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (6-2)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = R\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega RC}\right)^2} = R\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2} \quad (6-3)$$

其中，品质因数 $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ，固有频率 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。当激励频率 ω 与固有频率 ω_0 相同时，电容和电感的交流阻抗大小相等，相位相反，回路总阻抗最小，等于 R ，表现为纯电阻性，电阻电压等于电源电压。这时如果线路的 $Q \gg 1$ ，则电感和电容两端电压远大于电源电压，所以串联谐振也称为**电压谐振**，常用于信号电压的放大。

3. LC 并联谐振特性

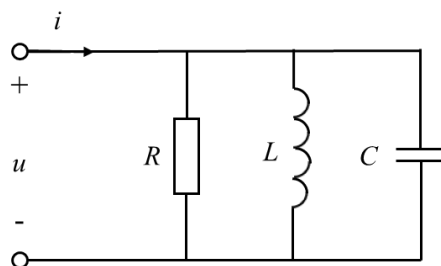


图 6-3 LC 并联电路

并联谐振线路阻抗为

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} \quad (6-4)$$

$$|Z| = \sqrt{\frac{R^2}{1 + R^2\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)^2}} \quad (6-5)$$

当 $\omega = \omega_0$ 时，电路发生谐振，此时电感和电容上的电流大小相等，等于电阻上电流的 Q 倍，相位相反，电阻电流与电源电流相等。若 $Q \gg 1$ ，则电感和电容上的电流远大于电源电流，因此并联谐振也称为**电流谐振**。

四、实验装置

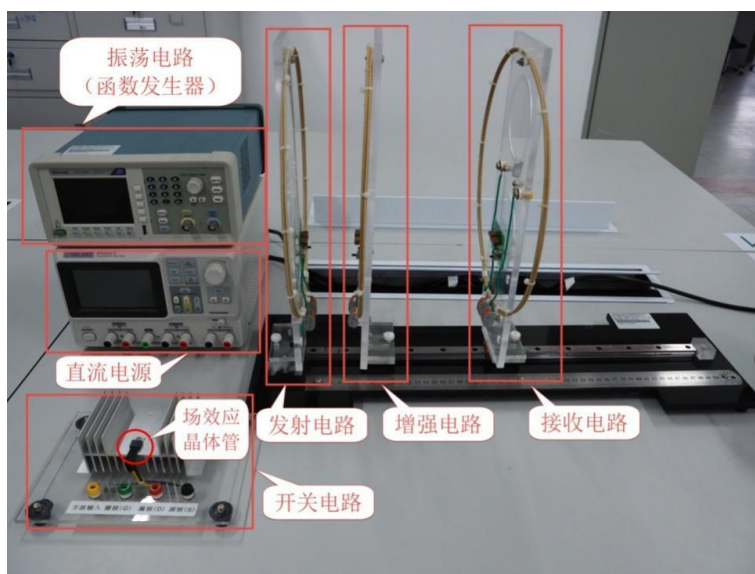


图 6-4 实验装置图

1. 开关电路

开关电路的作用是控制主电路的通断，进而实现发射电路的间歇充放电，让线圈产生交变磁场。本实验采用型号为 IRF840 的 N 沟道增强型场效应晶体管来实现电路开关。管脚 G(1)称

为栅极，是控制极，S(2)称为源极，D(3)称为漏极。在栅极上加电压，可以控制源极与漏极连通，不加电压，可控制源极与漏极断开。

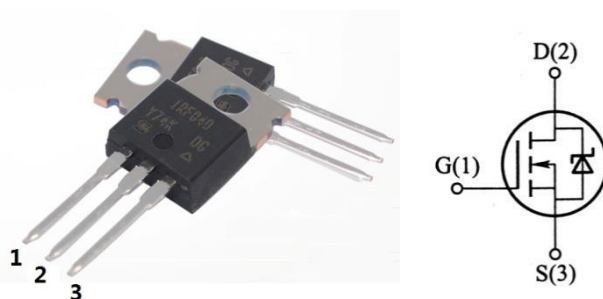


图 6-5 IRF840 场效应晶体管

2. 振荡电路

采用函数信号发生器输出**方波信号**控制开关电路工作，信号线的红色线连接控制极栅极（G），黑色线接地（与源极共地），方波高电平设置 6-8V，低电平设置 0V，当信号为高电平时，源极 S 与漏极 D 连通，低电平时断开，实现间歇充放电，让发射电路产生交变磁场。

3. 发射电路与接收电路

本实验装置的发射电路采用 LC 并联电路（谐振时，流过电源的电流较小），接收电路为 LC 串联电路（谐振时，流过小灯泡负载的电流较大），发射电路、接收电路与增强电路的固有频率一致（其中线圈电感值 $L=3.4\mu\text{H}$ ，电容值 $C=1.5\text{nF}$ 。仪器通过实验台上一个接口电路板上的“选择开关”，可以选择并联两个电容进入电路，电容值为 3nF ）。

当振荡电路（函数信号发生器）调节到共振频率附近时，发射电路的线圈中会产生幅值最大的交变电流，在空间中激发出最大的交变磁场，接收电路通过磁耦合共振效应接收电能，驱动负载（小灯泡）工作。

五、实验内容

1. 确定 LC 谐振电路的固有频率。

根据实验提供的发射电路和接收电路的电感和电容，计算其固有频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。

2. 按照下图完成实验系统的连接。

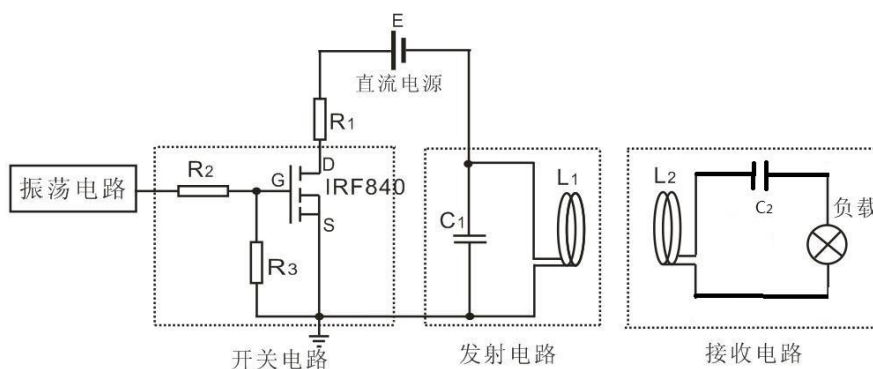


图 6-6 实验原理图

3. 选取振荡信号，确定谐振频率 f_0 。

- (1) 利用信号发生器输出频率可调的方波振荡信号，信号高电平设置 6-8 V，低电平 0V，设置好后打开通道开关。
- (2) 直流电源电压设置 12-15V、电流 1 A，设置好后打开对应通道开关。
- (3) 调节信号发生器的振荡频率在 LC 谐振电路的固有频率 f 附近，通过接收电路上的负载小灯泡的亮度定性观察磁耦合谐振电能传输现象，当小灯泡最亮，其两端电压信号（通过示波器观察）为标准正弦信号且峰峰值最大时，记录此时振荡频率 f_0 ，即为实验仪器的谐振频率。

4. 研究振荡频率对电力传输效率的影响

固定接收线圈与发射线圈的距离，如 25 厘米，找到增强电路使传输效果最好的位置固定下来。改变振荡频率，利用示波器测量接收电路负载的电压信号峰峰值，完成表格 6-1 并绘制幅度-频率曲线。

表 6-1 接收电路电阻电压峰峰值与振荡电路频率关系

频率(kHz)	$f_0-160\text{kHz}$	$f_0-80\text{kHz}$	$f_0-50\text{kHz}$	$f_0-30\text{kHz}$	f_0	$f_0+30\text{kHz}$	$f_0+50\text{kHz}$	$f_0+80\text{kHz}$	$f_0+160\text{kHz}$
峰峰值(V_{pp})									

5. 研究无线电力传输的距离对传输效果影响

调节信号发生器输出频率的大小使电路工作在谐振频率 f_0 之下，改变接收线圈与发射线圈的距离，利用示波器测量接收电路的信号幅度，完成表格 6-2 并绘制灯泡电压-距离曲线。

表 6-2 接收电路电阻电压峰峰值与距离关系

距离(cm)	10	13	16	19	22	25	28	31
峰峰值(V_{pp})								

6. 自制无线电力传输系统

利用实验室提供的铜线自制 2 个电感线圈（可以和实验室提供的形状、匝数不同），选择合适的电容（提供型号为 152、102、103 三种型号电容），用数字电桥测量绕制电感线圈的电

感值及电容值后，一个电感线圈焊接电容作为发射线圈，另一个电感线圈焊接发光二极管作为接收线圈。将发射线圈接入开关电路，调节振荡频率，观察发光二极管的亮度变化，描述你看到的实验现象并尝试给出解释。

调节频率，并不断拉开接收线圈与发射线圈间距，直到发光二极管只有微微亮度，再左右调节频率时亮度消失，记录这个频率，即为最终测得的自制无线电力传输系统的实测谐振频率，与理论计算值进行比较，并分析误差产生的原因。

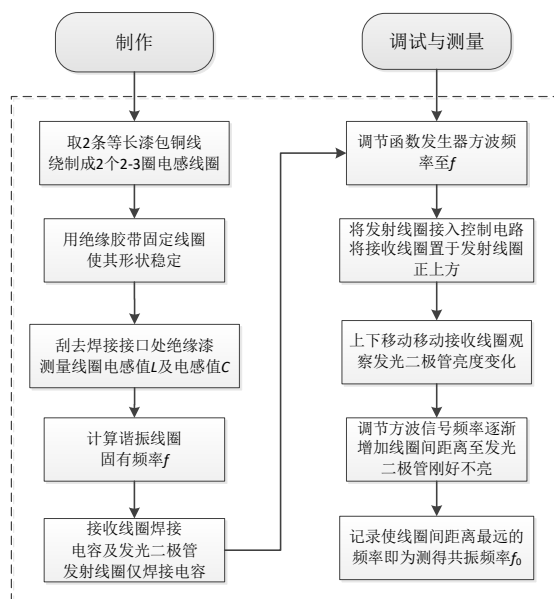


图 6-6 自制无线电力传输系统实验内容

密集绕制的线圈，如果绕制规则，则线圈电感大小可以用如下公式进行计算：

$$L = N^2 R \mu_0 \left[\ln \left(\frac{8R}{a} - 1.75 \right) \right] \quad (6-6)$$

式中， N 为线圈匝数， μ_0 为真空磁导率， R 为线圈半径， a 为铜线半径。

六、注意事项

实验时在偏离谐振频率的情况下，电源电压要调低一些，一般不要超过 15 伏，以防电流过大损坏仪器，另外不要让系统长时间工作在远离谐振频率的区域，离开实验设备时，请关闭振荡电路的通道开关。

七、报告要求

1. 用坐标纸或软件分别绘制频率和距离与接收电路电阻两端电压峰峰值关系曲线，总结传输规律。
2. 记录绕制线圈电感、选择的电容值以及实测的谐振频率，与理论计算值进行对比，并对

自制无线电力传输系统的传输效果做分析和总结。

3. 回答以下讨论题。

八、讨论题

1. 为什么当振荡频率和 LC 电路的频率一样时，发射线圈能在周围产生大的交变磁场？
2. 你认为提高磁耦合谐振式无线电力传输系统能量传输效率的方式有哪些？

实验七 声速的测量

一、实验预习指导

1. 极值法（驻波法）、相位比较法、波形移动法和时差法测量声速的原理是什么？
2. 极值法（驻波法）、相位比较法、波形移动法和时差法测量声速所用的实验装置及连接方式是什么？

二、实验任务

1. 用极值法（驻波法）、相位比较法、波形移动法和时差法测量声速；
2. 观察声波的反射、吸收等现象；
3. 进一步熟悉示波器等仪器的使用。

三、实验原理

1. 超声波与压电陶瓷换能器

频率 20Hz - 20kHz 的机械振动在弹性介质中传播形成声波，高于 20kHz 称为超声波。超声波具有波长短、易于定向发射等优点。声速实验所采用的声波频率一般都在 $20\sim 60\text{kHz}$ 之间，在此频率范围内，采用压电陶瓷换能器作为声波的发射器、接收器效果最佳。

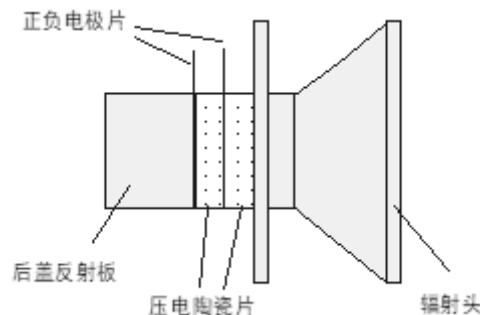


图7-1 纵向换能器的结构简图

压电陶瓷换能器根据它的工作方式，分为纵向（振动）换能器、径向（振动）换能器及弯曲振动换能器。本实验中采用纵向换能器。图7-1为纵向换能器的结构简图。

2. 共振干涉法（驻波法）测量声速

假设在无限声场中，仅有一个点声源 S_1 （发射换能器）和一个接收平面（接收换能器 S_2 ）。当点声源发出声波后，在此声场中只有一个反射面（即接收换能器平面），并且只产生一次反射。

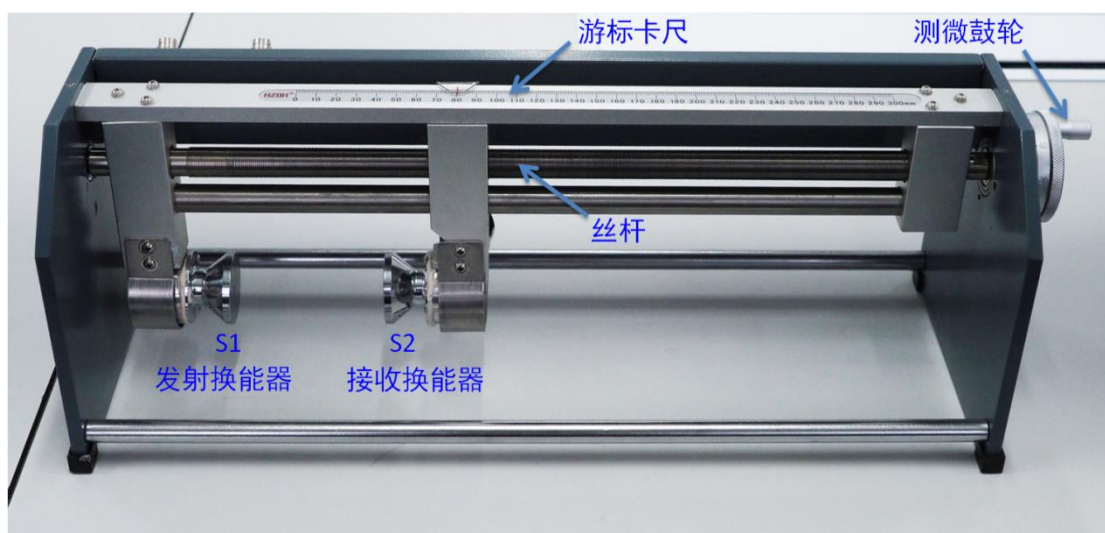


图7-2 声速测试架的实物图

在上述假设条件下，发射波 $y_1 = A_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right)$ 。在S2处产生反射，考虑到换能器表面为金属，反射波存在半波损，反射波 $y_2 = A_2 \cos\left(\omega t + \frac{2\pi x}{\lambda} + \pi\right)$ ，其中A为声波振幅， $\omega = 2\pi f$ 。入射波与反射波叠加的结果为：

$$y = y_1 + y_2 = (A_1 - A_2) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos(\omega t) + (A_1 + A_2) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin(\omega t) \quad (7-1)$$

空气由于声扰动而引起的超出静态大气压强的那部分压强称为声压，根据声学理论，声压 p 为：

$$p = -\rho_0 v^2 \frac{\partial y}{\partial x} \quad (7-2)$$

因此接收换能器表面声压为：

$$p = \rho_0 \omega v \left[(A_1 - A_2) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos(\omega t) - (A_1 + A_2) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin(\omega t) \right] \quad (7-3)$$

式中 ρ_0 为空气的静态密度，由于实验中使用的超声波换能器损耗较小，因此 $A_2 \approx A_1$ ，式（3）中

$$(A_1 - A_2) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos(\omega t) \approx 0。$$

由此可见，接收换能器表面声压的振幅随 $\cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)$ 呈周期变化，相位随 $\frac{2\pi x}{\lambda}$ 呈周期变化。

在图7-2中S1和S2为压电陶瓷换能器。S1作为声波发射器，它由信号源供给频率为数十千

赫的交流电信号，由逆压电效应发出一平面超声波；而S2则作为声波的接收器，压电效应将接收到的声压转换成电信号。将它输入示波器，我们就可看到一组由声压信号产生的正弦波形。由于S2在接收声波的同时还能反射一部分超声波，接收的声波、发射的声波振幅虽有差异，但二者周期相同且在同一直线上沿相反方向传播，二者在S1和S2区域内产生了波的干涉，形成驻波。我们在示波器上观察到的实际上是这两个相干波合成后在声波接收器S2处的振动情况。

移动S2位置（即改变S1和S2之间的距离），从示波器显示上会发现，当S2在某位置时振幅有最大值。根据波的干涉理论可以知道：任何两相邻的振幅最大值的位置之间（或两相邻的振幅最小值的位置之间）的距离均为 $\lambda/2$ 。为了测量声波的波长，可以在一边观察示波器上声压振幅值的同时，缓慢的改变S1和S2之间的距离。示波器上就可以看到声振动幅值不断地由最大变到最小再变到最大，两相邻的振幅最大之间的距离为 $\lambda/2$ ，S2移动过的距离亦为 $\lambda/2$ 。超声换能器S2至S1之间的距离的改变可通过转动鼓轮来实现，而超声波的频率又可由声速测试仪信号源频率显示窗口直接读出。

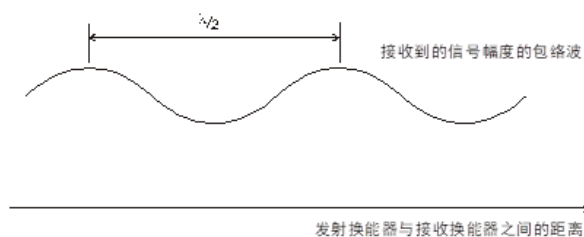


图7-3 换能器间距与合成幅度

在连续多次测量相隔半波长的S2的位置变化及声波频率 f 以后，我们可运用测量数据计算出声速，用逐差法处理测量的数据。

3. 相位法测量原理

由前述可知入射波与反射波叠加，形成波束

$$y = (A_1 - A_2) \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \cos(\omega t) + (A_1 + A_2) \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) \sin(\omega t), \text{ 相对于发射波束}$$

$$y_1 = A_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi x}{\lambda}\right) \text{ 来说，在经过 } \Delta x \text{ 距离后，接收到的余弦波与原来位置处的相位差为}$$

$\varphi = \frac{2\pi \Delta x}{\lambda}$ 。因此可以通过示波器，用李萨如图法观察测出声波的波长。将发射端和接收端信号分别输入到示波器CH1和CH2通道，将示波器的工作模式设置为X-Y模式，移动接收换能器，改变两换能器之间的距离，相位差 φ 发生变化，李萨如图形也随之变化。当相位差为0或 π 时，图形为直

线，只是斜率正负不同，而每发生一次这种斜率正负变化，对应接收换能器移动的距离为半波长。

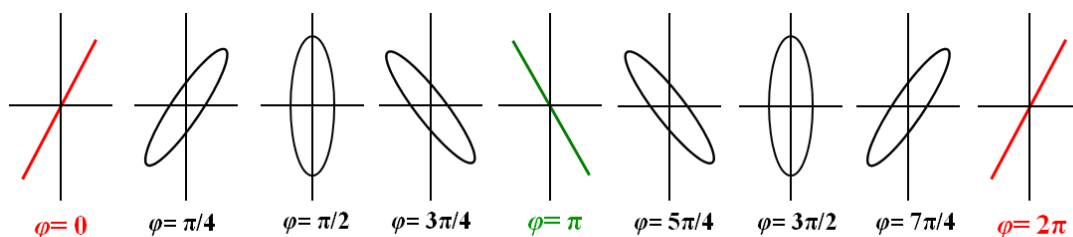


图7-4 相位差与李萨如图

4. 波形移动法

在示波器上将CH1和CH2的波形同时显示出来，然后移动接收换能器，会发现CH1上的波形固定不动，CH2的波形跟着移动。在某个瞬间，两个波形会发生重叠（相位上），接着移动接收换能器，波形会再次重叠，两次重叠对应的接收换能器移动的间距为一个波长。

5. 时差法测量原理

连续波经脉冲调制后由发射换能器发射至被测介质中，声波在介质中传播，如图7-5所示，经过 t 时间后，到达 L 距离处的接收换能器。由运动定律可知，声波在介质中传播的速度可由以下公式求出： $v = \frac{L}{t}$ 。如果移动接收换能器，改变两换能器之间的距离，相应的接收时间也随之变化，可以利用距离与时间的变化量计算出当前介质下的声波传播速度： $v = \frac{\Delta L}{\Delta t}$ 。

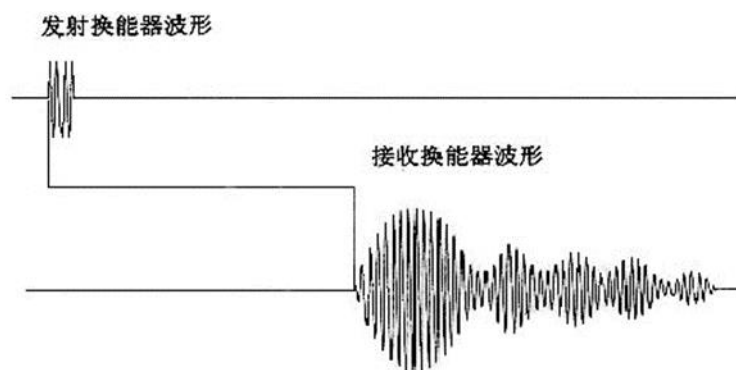


图7-5 发射波与接收波

四、操作要点

1. 开启信号发生器和示波器电源。
2. (1) 检查连线：信号发生器的发射端同时连到左侧换能器 S1 和示波器的 CH1 通道，接收端同时连到右侧换能器 S2 和示波器的 CH2 通道（如图 7-6 所示）。

(2) 设置信号发生器：输出频率预设为 37 kHz 左右，输出波形为正弦波。

(3) 设置示波器：调整示波器，调出 CH1 和 CH2 的波形。

调节信号发生器的频率，使 CH2 的波形幅值最大。（本实验所采用的换能器的固有频率为 $37\pm 3\text{ kHz}$ ）。

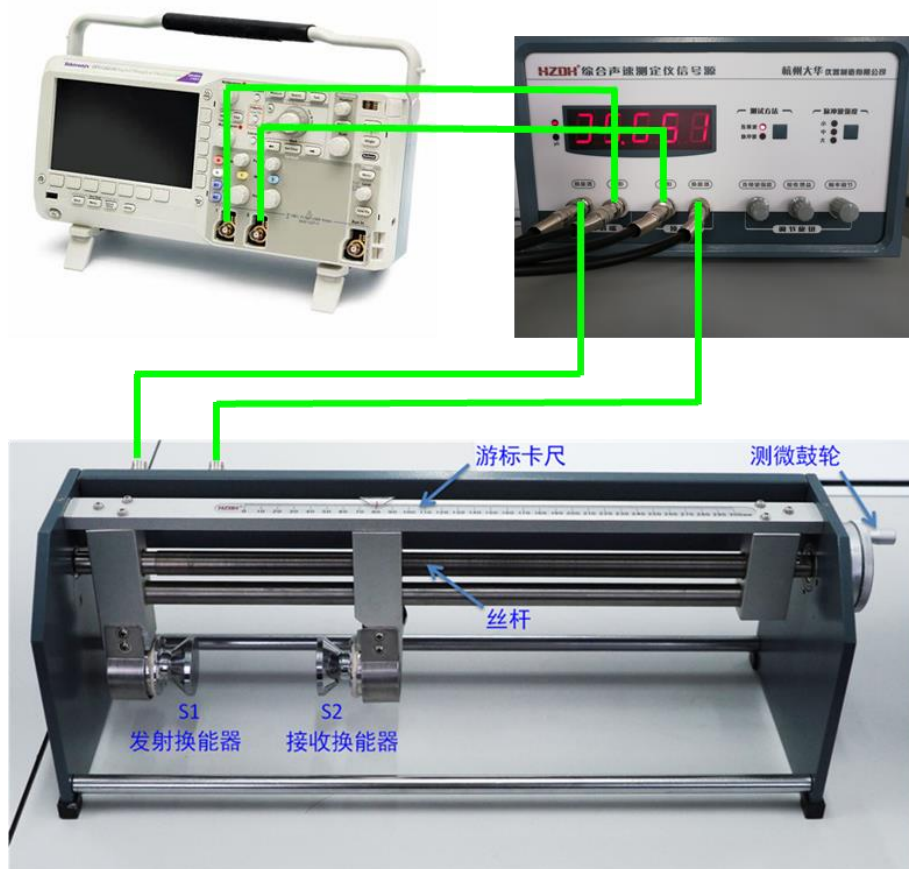


图 7-6 测试连接线路示意图

3. 用极值法测声速

(1) 先由近及远（或由远及近）移动接收换能器，观察接收（CH2）信号幅值的变化情况。

(2) 改变换能器的间距（两换能器的间距不得小于 10 mm ），连续记录波幅取极大值时接收器的位置。记录 10 组数据。

4. 用相位比较法测声速

在示波器上调出李萨如图形，改变换能器的间距（两换能器的间距不得小于 10 mm ），连续记录出现正斜率和负斜率直线时接收器的位置。记录 10 组数据。

5. 波形移动法测声速

在示波器上同时调出 CH1 和 CH2 的波形，以 CH1 为参考，移动接收器，当两波形重叠时，记录接收器所在位置，接着移动接收器，连续记录波形重叠时接收器的位置，记录 10 组数据。

6. 时差法测声速

将测试方法设置到“脉冲波”方式。此时示波器的 CH1、CH2 通道分别用于观察发射和接收波形。将测试方法设置到脉冲波方式，选择合适的脉冲发射强度。将 S2 移动到离开 S1 一定距离($\geq 50\text{ mm}$)，选择合适的接收增益，使显示的时间差值读数稳定。然后记录此时的距离值和显示的时间值 l_i 、 t_i 。(时间由声速测试仪信号源时间显示窗口直接读出)；移动 S2，记录下此时的距离值和显示的时间值 l_{i+1} 、 t_{i+1} 共测 10 组数据。

$$v = \frac{l_{i+1} - l_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (7-4)$$

7. 测量有机玻璃棒和铝棒中的声速

如图 7-7 连接设备图。将发射换能器发射端面朝上竖立放置于托盘上，在换能器端面和固体棒的端面上涂上适量的耦合剂，再把固体棒放在发射面上，使其紧密接触并对准，然后将接收换能器接收端面放置于固体棒的上端面上并对准，利用接收换能器的自重与固体棒端面接触。这时计时器的读数为 t_i ，固体棒的长度为 l_i 。移开接收换能器，将另 1 根固体棒端面上涂上适量的耦合剂，置于下面一根固体棒之上，并保持良好接触，再放上接收换能器，这时计时器的读数为 t_{i+1} ，固体棒的长度为 l_{i+1} 。每种材料有三个不同长度的样品（样品长度由短到长分别标记为 A、B、C），测量 BA 和 BC 样品组合下计时器读数，即可利用时差法算出声速。

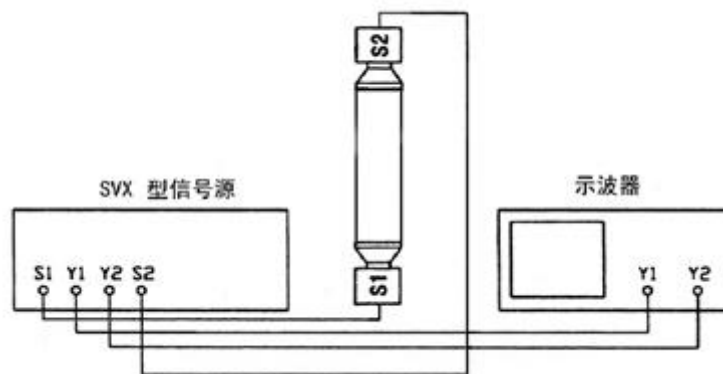


图 7-7 测量固体介质中的声速连接线路图

8. 记录室温。

9. 调整两换能器的间距（100 mm 附近），使接收信号尽可能强。分别将套管、纱布和钢笔等置于两换能器之间，观察波形幅值的变化。

四、注意事项

1. 为了得到较清晰的接收波形，应将外加的驱动信号频率调节到换能器 S1、S2 的谐振频率处时，才能较好的进行声能与电能的相互转换（实际上有一个小的通频带），S2 才会有一定

幅度的电信号输出，才能有较好的实验效果。先找共振频率，并保持此频率不变，然后测量波长；

2. 在操作过程中，换能器 S1 与 S2 不能相碰，以免损坏压电晶体；
3. 测量时朝一个方向转动超声测定仪的测微螺旋；S2 的测量必须要连续进行，不可跳跃式测量。

五、报告要求

1. 用逐差法处理数据，求出波长，然后计算三种方法测得的声速。计算室温（ $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）下声速的

理论值 $v_t = 331.45\sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$ (m/s)，分别计算三种方法得到的声速测量值与理论值的相对误差。

2. 根据时差法测量数据计算空气中和固体介质中的声速，并将空气中的声速测量值与理论值进行比较，计算相对误差。

3. 分析讨论以上四种方法测出的空气中的声速结果为何存在差异，从原理和操作上说明各自的优缺点。

实验八 用示波器观测磁滞回线

一、实验预习指导

1. 掌握基本概念：什么是剩磁、矫顽力、基本磁化曲线、动态磁滞回线？
2. 理解磁滞回线实验电路图：示波器测量的 X 轴信号 U_x 是谁的电压？和磁场强度 H 是什么关系（写出公式）？示波器测量的 Y 轴信号 U_y 是谁的电压？和磁感应强度 B 是什么关系（写出公式）？

二、实验目的

1. 认识并掌握磁滞、磁滞回线和磁化曲线的概念；
2. 学会用示波器测绘基本磁化曲线和磁滞回线；
3. 研究不同材料的动态磁滞回线的区别，并确定特定频率下各个材料的剩磁和矫顽力。

三、实验原理

1. 铁磁材料的分类和应用

随着材料科学的发展，铁磁材料在工程技术和科学研究中应用十分广泛，它已成为一种重要的智能材料。如扬声器、开关、传感器、磁阻器件、磁黑板、变压器等。铁磁材料受外磁场作用时显示很强的磁性，它们都有很大的磁导率 μ 以及明显的磁滞效应。铁磁材料主要包括软磁材料、硬磁材料和矩磁材料。

磁导率：表征磁介质磁性的量。常用符号 μ 表示， μ 为介质的磁导率，或称绝对磁导率。高磁导率是铁磁材料应用特别广泛的主要原因。磁滞：铁磁体在反复磁化的过程中，它的磁感应强度的变化总是滞后于磁场强度，这种现象叫磁滞。磁滞特性使永磁体的制造成为可能，但在许多其他应用中也带来不利影响。当铁磁材料处于交变磁场中被反复磁化的过程中要消耗额外的能量，以热的形式释放，这种能量损耗称为磁滞损耗，磁滞损耗不仅造成能量的浪费，而且使铁芯的温度升高，导致绝缘材料的老化。

软磁材料，指的是当磁化发生在 H_c 不大于 1000A/m ，这样的材料称为软磁体。典型的软磁材料，可以用最小的外磁场实现最大的磁化强度。软磁材料具有低矫顽力和高磁导率的磁性材料。软磁材料易于磁化，也易于退磁，广泛用于电工设备和电子设备中。应用最多的软磁材料是铁硅合金(硅钢片)，主要用来制作各种变压器、电动机和发电机的铁芯以及各种软磁铁氧体多用在无线电用天线线圈、无线电中频变压器等。

硬磁材料，又称永磁材料、恒磁材料，是具有宽磁滞回线、高矫顽力、高剩磁，一经磁化即能保持恒定磁性的材料。硬磁材料常用来制作各种永久磁铁、扬声器的磁钢和电路中的记忆元件

等。在电学中硬磁材料的主要作用是产生磁力线，然后让运动的导线切割磁力线，从而产生电流。

矩磁材料，这里是指具有矩形磁滞回线的铁氧体材料。它的特点是，当有较小的外磁场作用时，就能使之磁化，并达到饱和，去掉外磁场后，磁性仍然保持与饱和时一样。这种铁氧体材料主要用于各种电子的存储器磁芯等方面。

2. 铁磁材料的磁滞现象

当将一块未磁化的铁磁材料置于磁场中时，它将被磁化。如图 3-31-1 所示，磁化开始时，磁感应强度 B 随磁场强度 H 的增加而增加，即曲线的 Oa 段，称为起始磁化曲线。可以看出，当 H 增加到一定值时， B 的增加趋于缓慢，逐渐达到饱和。此时，如果将 H 由 H_a 变到 $-H_a$ ，再由 $-H_a$ 变到 H_a ， B 将随 H 的变化而变化，形成一条闭合曲线（即 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow f \rightarrow a$ ），这就是该铁磁材料的一条“磁滞回线”。

从图 8-1 中还可以看出，铁磁材料经磁化以后就显示出明显的“磁滞”现象，即 B 的变化总是落后于 H 的变化。当 $H=0$ 时，即去掉磁化磁场， B 不为零，其值为 B_r ，这个量就是铁磁材料的剩磁。如果使 B 变为零，则必须加一反向磁场 H_c ， H_c 即为铁磁材料的矫顽力。如铁磁材料置于周期性变化的磁场中，它将被反复磁化，由此得到的磁滞回线称为动态磁滞线。

如果由小到大选取不同的最大磁场强度 H_m ，则可得到一系列由小到大的磁化曲线图 3-31-2 所示。将这些曲线的顶点连接起来（ $0 \rightarrow a_1 \rightarrow a_2 \rightarrow a_3 \rightarrow a_4 \rightarrow a$ ），得到的 $B-H$ 曲线为铁磁材料的基本磁化曲线。

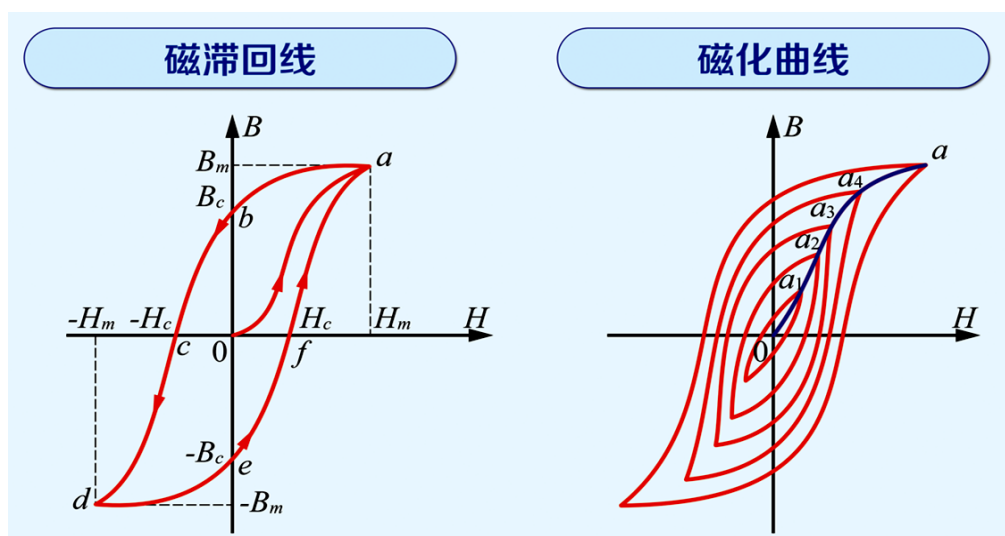


图 8-1 磁滞回线和磁化曲线

铁磁材料在磁化过程中有剩磁存在，表明磁化过程的不可逆性。对于已经磁化了的铁材料，简单地加一反向磁场，并不能使之退磁。如欲退磁，可将其置于线圈中，先在线圈中通大电流，使磁

铁达到磁饱和状态。然后，一边来回改变电流方向一边减小电流，直至电流减为零。用交流电退磁，因电流方向自动改变，只需逐渐减小电流大小即可。

3. 用示波器显示动态磁滞回线

示波器显示 B - H 曲线的实验线路如图 8-1 所示。本实验研究的铁磁物质是一个环形样品，在样品上绕有励磁线圈 N_1 匝和测量线圈 N_2 匝。若在线圈 N_1 中通过电流 i_1 时，此电流在样品中产生磁场，根据安培环路定律得出磁场强度 H 为 $H=N_1 i_1/L$ ，其中 L 为环形样品的平均磁路长度。示波器 X 轴输入电压为

$$U_X = R_1 i_1 = \frac{LR_1 H}{N_1} \quad (8-1)$$

则有：

$$H = \frac{N_1}{LR_1} U_X \quad (8-2)$$

由于 N_1 、 L 、 R_1 都是已知量，因此输入到示波器 X 端的电压 U_X 与磁场强度 H 成正比关系。

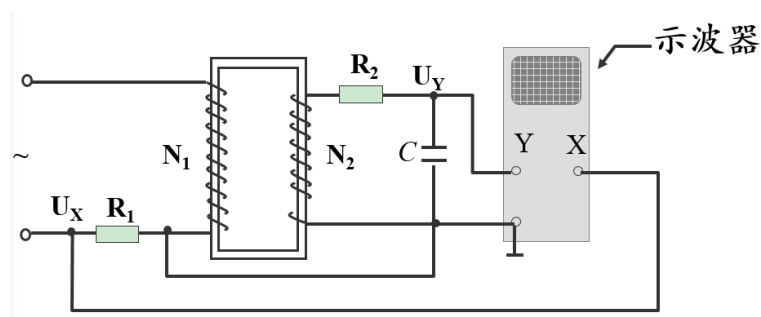


图 8-2 观察磁滞回线的线路示意图

根据法拉第定律，一个开路线圈内的磁通发生变化时，其两端产生感应电压

$$\varepsilon(t) = -\frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (8-3)$$

如果线圈横截面积 S 、匝数 N 均为定值，则

$$\varepsilon(t) = -NS \frac{dB(t)}{dt} \quad (8-4)$$

对感应电压积分有

$$\int \varepsilon(t) dt = -NS \int \frac{dB(t)}{dt} dt \quad (8-5)$$

则有

$$B(t) = -\frac{1}{NS} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (8-6)$$

为了测量磁感应强度 B ，在次级线圈 N_2 上串联电阻 R_2 和电容 C 构成回路。取电容 C 两端电压 U_C 至示波器 Y 轴输入， R_2C 串联电路的时间常数远大于所加交流电的周期时，则可认为

$$i_2 = \frac{U_{R_2}}{R_2} = \frac{\varepsilon_2}{R_2} \quad (8-7)$$

式中 i_2 为测量线圈 N_2 回路中的电流， U_{R_2} 为电阻 R_2 上的电压。则有

$$N_2 S \frac{dB}{dt} = R_2 i_2 \quad (8-8)$$

式中 S 为环形铁芯的截面积。而

$$i_2 = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU_C}{dt} \quad (8-9)$$

于是得到

$$dB = \frac{R_2 C}{N_2 S} dU_C \quad (8-10)$$

最终可以得出

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_C \quad (8-11)$$

由于 R_2 、 C 、 N_2 、 S 都是已知量，所以示波器 Y 端电压 U_C 正比于铁芯内的磁感应强度 B 。

四、操作要点

1. 磁特性综合测量实验仪中测试样品的参数：

参数	样品 1	样品 2
平均磁路长度 $L (m)$	0.130	0.075
铁芯实验样品截面积 $S (m^2)$	1.24×10^{-4}	1.20×10^{-4}
线圈匝数 N_1	150	150
线圈匝数 N_2	150	150

2. 线路连接：按照图 8-2 连接好线路（选择样品 1）。接通电源，预热 5 分钟后才能开始测量。

选定一个信号频率如 40 Hz ，调节各元件，使示波器输入的两路信号都有稳定的波形。然后选择 X-Y 显示模式，逆时针调节信号源幅度旋钮，直到磁滞回线最后显示为一点；将光点调至显示屏中心（设为坐标原点）。

3. 退磁处理：在每次更换信号频率测量之前，都需要进行退磁处理。具体操作是：首先顺时针

调节幅度旋钮，使磁滞回线缓慢达到饱和，然后逆时针调节幅度旋钮，直到磁滞回线最后显示为一点。

4. **测绘饱和磁滞回线：**在 40 Hz 的信号频率下，调节幅度、电阻、电容等，获得饱和磁滞回线，要求磁滞回线图形典型而美观，且饱和磁滞回线顶点水平方向的读数至少在三格以上。记录 R_1 , R_2 , C 的值；并读出线上多个点的坐标值 (U_X , U_Y)，要求获得整条曲线上大致均匀分布的至少 20 个坐标点，列成表格如下。

频率	R_1	R_2	C		1	2	3	...	20
40 Hz				U_X					
				U_Y					

5. **测绘基本磁化曲线：**信号频率为 40 Hz ，获得饱和磁滞回线，**保持 R_1 , R_2 , C 不变**，首先将幅度调为零，然后由小到大调节幅度，得到一系列磁滞回线，直到达到饱和。分别测出这一系列磁滞回线在第一象限的顶点坐标，列成如下表格（要求至少 10 个点）。

	1	2	3	...	10
U_x					
U_y					

6. **换样品 2，重复 4**（信号频率分别为 40 Hz 和 100 Hz ）、**5**（信号频率为 40 Hz ）两个步骤。

五、注意事项

1. 调节信号强度时，应单调增加或减小信号源幅度。
2. 使用仪器前先将信号源输出幅度调至最小。
3. 测绘磁滞回线和磁化曲线时，保持示波器上 X 、 Y 输入增益和 C 、 R_1 、 R_2 值固定不变。
4. R_2 和 C 应适当选择大一点，否则磁滞回线会出现打结现象。

六、报告要求

1. 通过公式换算出 H , B 的值，分别绘制两个样品的饱和磁滞回线图和基本磁化曲线图；
2. 计算饱和磁滞回线时剩磁和矫顽力的大小。

七、讨论题

1. 某两种材料的磁滞回线，一个很宽一个很窄，它们各属于哪类磁性材料？分别可以应用于什么场合？
2. 一钢制部件不慎被磁化，请设计一种退磁方案。

八、研究性实验（选做）：

观测直流磁化场对动态磁滞回线的退化影响，学习和理解直流磁化场对铁磁材料的磁性能影响。按图 8-3 连接好线路。先调节仪器的输出幅度，出现一饱和磁滞回线。缓慢、小幅度地增加直流电流，观测磁滞回线的变化。进一步加大直流电流，观测磁滞回线的退化现象。

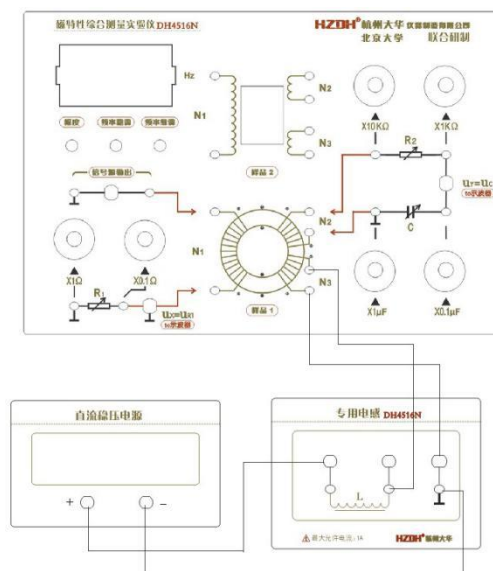


图 8-3 动态磁滞回线的直流调制示意图

磁带录音原理：硬磁性材料被磁化以后，会留有剩磁，剩磁的强弱和方向随磁化时磁性的强弱和方向而定。录音磁带是由带基、粘合剂和磁粉层组成。带基一般采用聚碳酸酯或氯乙烯等制成。磁粉是用剩磁强的 γ -Fe₂O₃ 或 CrO₂ 细粉。录音时，是把与声音变化相对应的电流，经过放大后，送到录音磁头的线圈内，使磁头铁芯的缝隙中产生集中的磁场。随着线圈电流的变化，磁场的方向和强度也作相应的变化。当磁带匀速地通过磁头缝隙时，磁场就穿过磁带并使它磁化。由于磁带离开磁头后留有相应的剩磁，其极性和强度与原来的声音相对应。磁带不断移动，声音也就不断地被记录在磁带上。

实验九 电子电荷的测定——密立根油滴法

一、实验预习指导

1. 密立根油滴法测量电子电荷的实验原理；
2. 推导出本实验中油滴电荷电量的计算公式；
3. 绘制出实验装置结构示意图；
4. 如何定性判断油滴的体积大小和电量的多少？

二、实验任务

1. 观察带电油滴在重力场及电场中的运动规律；
2. 选取合适的油滴，测定它所带的电荷值 q ；
3. 求出电子电荷值 e ，并与公认值比较，作出适当的结论。

三、实验原理

将油滴经喷雾器喷出时，细微的油滴由于摩擦会带电，其带电量 q 为元电荷（电子电荷量的绝对值，质子的电荷量） e 的整数倍，其数值通过观察和测定带电油滴在电场中的运动规律进行测定。

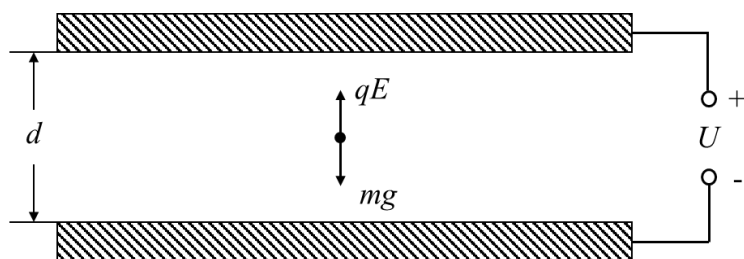


图9-1 平行极板中的带电油滴

将质量为 m 、带电量为 q 的油滴置于电压为 U_n 、间距为 d 的平行极板之间，如图9-1所示，油滴将同时受到重力和电场力的作用（空气浮力相对电场力、重力很小，可忽略）。选择合适的电压极性和电压值，使油滴所受的电场力与重力平衡，即

$$mg = \frac{qU_n}{d} \quad (9-1)$$

则油滴将悬浮在电场中并保持平衡。因此，测出油滴的质量 m 、平衡电压 U_n 以及平行极板的间距 d ，即可由

$$q = \frac{mgd}{U_n} \quad (9-2)$$

求得油滴所带电荷量 q 。

由于油滴所带电荷量 q 为元电荷 e 的整数倍，即 $q = ne$ ($n = \pm 1, \pm 2, \dots$)，因此对于同一

个油滴，如果其带电荷量 q_1, q_2, q_3, \dots ，则通过实验测得的其平衡电压 $U_{n1}, U_{n2}, U_{n3}, \dots$ ，只能是一些不连续的特定值（离散的）。

在实验中，我们测出各个电荷值 q_1, q_2, q_3, \dots ，然后求出它们的最大公约数，此最大公约数即为元电荷 e 。

实验中，油滴的质量 m 的数量级大约为 $10^{-15}kg$ ，直接测量极为困难，因此需要通过以下间接测量方法得到。

油滴在表面张力的作用下一般呈球状，其质量可表示为

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho a^3 \quad (9-3)$$

式中， ρ 是油的密度， a 是油滴的半径，在已知 ρ 的前提下，测出 a ，即可由式（3）得到油滴的质量 m ，油滴半径 a 可通过以下方式测得。

如果撤掉平行极板上的电压，使油滴受到的电场力为零，则油滴将会下落。油滴下落过程中会受到重力 $G=mg$ 、空气浮力 $F_1 = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho' g$ 以及空气对其黏滞摩擦阻力 F_2 的作用，其中 ρ' 是空气的密度。由斯托克斯（Stokes）定律可知

$$F_2 = 6\pi a \eta v \quad (9-4)$$

式中， v 是油滴下落的速度， η 是空气的黏度。

由于空气对油滴的黏滞摩擦阻力与油滴的下落速度成正比，因此，油滴最初做加速下落，随着下落速度增大，黏滞摩擦阻力亦随之增大，加速度逐渐减小。当下落速度增加到某一值 v_s 时，油滴受到的外力平衡，即 $G=F_1+F_2$ ，此时油滴做匀速下落，即

$$\frac{4\pi}{3} a^3 \rho g = \frac{4\pi}{3} a^3 \rho' g + 6\pi \eta a v_s \quad (9-5)$$

由上式可以得到油滴半径为

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2g(\rho - \rho')}} \quad (11-6)$$

由于 $\rho \gg \rho'$ ，即空气对于油滴的浮力可忽略不计，因此上式可简化为

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2g\rho}} \quad (9-7)$$

另一方面，由于油滴尺寸非常细微，其直径与空气分子之间的间隙相比，空气不能看作连续、均匀的介质，因此需要将斯托克斯定律进行修正，空气对油滴的黏滞摩擦阻力修正为

$$F_2 = \frac{6\pi a \eta v_s}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (9-8)$$

式中, p 为大气压强, 单位为 Pa , 修正常数 $b=8.22 \times 10^{-3} m \cdot Pa$, 修正后的油滴半径表达式为

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2g\rho \left(1 + \frac{b}{pa}\right)}} \quad (9-9)$$

上式中右端含有的未知量 a 处于修正项 $(1+b/pa)$ 中, 并不需要十分精确, 因此仍然用式(7)计算其数值。

将式 (9-9) 带入式 (9-3), 得到油滴质量的表达式为

$$m = \frac{4\pi}{3} \rho \left(\frac{9\eta v_s}{2g\rho \left(1 + \frac{b}{pa}\right)} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (9-10)$$

将上式带入式 (9-2) 中, 得到油滴所带电荷量表达式为

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2g\rho}} \cdot \frac{d}{U_n} \left(\frac{\eta v_s}{1 + \frac{b}{pa}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (9-11)$$

上式中还需要测定油滴匀速下落的速度 v_s , 可以通过观测油滴匀速下落某段距离 l 所用的时间 t 来确定, 即

$$v_s = \frac{l}{t} \quad (9-12)$$

则式 (9-7) 变为

$$a = \sqrt{\frac{9\eta l}{2g\rho t}} \quad (9-13)$$

将式 (11-12) 和 (11-13) 带入式 (11-11), 得到油滴所带电荷量表达式为

$$q = \frac{18\pi}{\sqrt{2g\rho}} \cdot \frac{d}{U_n} \left(\frac{\eta l}{t \left(1 + \frac{b}{p \sqrt{\frac{2g\rho t}{9\eta l}}}\right)} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (9-14)$$

在已知油的密度 ρ 、重力加速度 g 、空气的粘滞系数 η 、大气压强 p 、修正常数 b 、平行极

板间距 d 、油滴匀速下落的距离 l 的前提下，只需要测出平衡电压 U_n ，然后撤掉电压，让油滴在空气中自由下落，油滴只需很短的时间即可达到匀速下落，测出其下落给定距离 l 所用的时间 t ，即可计算得到电荷电量 q 。

实验中需要测定不同油滴所带电荷量，以验证电荷量的不连续性，计算元电荷 e 的数值。由于实验误差的存在，采用最大公约数法精确计算元电荷数值很困难，因此可采用以下方法进行处理：

用公认的元电荷数值 $e=1.602\times 10^{-19}C$ 去除实验中测得的油滴所带电荷量 q ，若实验是成功的，那么 q/e 将会非常接近某个整数值 n ，可以认为这个 n 值就是该油滴所带的元电荷(或电子)的数目， q/n 即为实验测得的元电荷数值。

需要注意的是，对同一油滴，必须耐心地进行多次测量(5次)，以避免自然涨落的影响。

四、操作要点

1. 仪器调整

(1)水平调整

调整实验仪主机的调平螺钉旋钮(俯视时，顺时针平台降低，逆时针平台升高)，直到水准泡正好处于中心（注：严禁旋动水准泡上的旋钮）。将实验平台调平，使平衡电场方向与重力方向平行以免引起实验误差。极板平面是否水平决定了油滴在下落或提升过程中是否发生左右的漂移。

(2)喷雾器调整

将少量钟表油缓慢地倒入喷雾器的储油腔内，使钟表油淹没提油管下方，油不要太多，以免实验过程中不慎将油倾倒至油滴盒内堵塞落油孔。将喷雾器竖起，用手挤压气囊，使得提油管内充满钟表油。

(3)实验仪联机使用

(a)打开实验仪电源及 LCD 监视器电源。

(b)按主机上任意键：监视器出现参数设置界面，首先，设置实验方法，然后根据该地的环境适当设置重力加速度、油密度、大气压强、油滴下落距离。“ \leftarrow ”表示左移键、“ \rightarrow ”表示为右移键、“+”表示数据设置键。

(c)按确认键后出现实验界面：计时“开始/结束”键为结束、“0V/工作”键为 0V、“平衡/提升”键为“平衡”。

(4) CCD 成像系统调整

打开进油量开关，从喷雾口喷入油雾，此时监视器上应该出现大量运动油滴的像。若没有看

到油滴的像，则需调整调焦旋钮或检查喷雾器是否有油雾喷出。

2. 挑选合适的实验油滴

若油滴过小，布朗运动影响明显，平衡电压不易调整，时间误差也会增加；若油滴过大，下落太快，时间相对误差增大，且油滴带多个电子的几率增加，合适的油滴最好带 10 个以下的电子。

常规操作方法：按下“0V/工作”键，将初始工作电压调为约 150~250V。喷入油滴，调节调焦旋钮，使屏幕上显示大部分油滴，可见带电多的油滴迅速上升出视场，不带电的油滴下落出视场，约 10s 后油滴减少。选择那种上升缓慢的油滴作为暂时的目标油滴，切换“0V/工作”键，这时极板间的电压为 0V，在暂时的目标油滴中选择下落速度为 0.2~0.5 格/s 的作为最终的目标油滴，调节调焦旋钮使该油滴最小最亮。

为了更快速筛选出带电量合适的油滴，也可将初始工作电压设置为 350~400V，这样带电荷量多的油滴将更加迅速地上升移出视场，视场中的油滴迅速减少，寻找上升速度较为缓慢的油滴作为目标，并在此基础上逐渐减小工作电压的数值（减少至 150~250V），直至油滴上升运动速度减缓达到平衡状态。

3. 平衡电压的确认

将目标油滴聚焦到最小最亮后，仔细调整平衡时的“电压调节”使油滴平衡在某一格线上，等待一段时间（大约两分钟），观察油滴是否飘离格线。若油滴始终向同一方向飘离，则需重新调整平衡电压；若其基本稳定在格线或只在格线上下做轻微的布朗运动，则可以认为油滴达到了力学平衡，这时的电压即为平衡电压。

4. 控制油滴的运动

将油滴平衡在屏幕顶端的第一条格线上，将工作状态按键切换至“0V”，绿色指示灯点亮，此时上、下极板同时接地，电场力为零，油滴在重力、浮力及空气阻力的作用下作下落运动。油滴是先经一段变速运动，然后变为匀速运动，但变速运动的时间非常短（小于 0.01s，与计时器的精度相当），所以可以认为油滴是立即匀速下落的。当油滴下落到有 0 标记的格线时，立刻按下“计时”键，计时器开始记录油滴下落的时间；待油滴下落至有距离标志（1.6）的格线时，再次按下计时键，计时器停止计时，此时油滴停止下落。“0V/工作”按键自动切换至“工作”，“平衡/提升”按键处于“平衡”，可以通过“确认”键将此次测量数据记录到屏幕上。将“平衡/提升”按键切换至“提升”，这时极板电压在原平衡电压的基础上增加约 200V 的电压，油滴立即向上运动，待油滴提升到屏幕顶端时，切换至“平衡”，找平衡电压，进行下一次测量。每颗油滴共测量 5 次。

五、注意事项

1. CCD 盒、紧定螺钉、摄像镜头的机械位置不能变更，否则会对像距及成像角度造成影响。
2. 注意调整进油量开关，应避免外界空气流动对油滴测量造成影响。
3. 仪器内有高压，避免用手接触电极。
4. 实验前须调节两个极板平行，来保证电场垂直、与重力平行；
5. 建议选择平衡电压在 150~250V 左右、下落 1.6mm 需要 16-40s 的油滴，这样的油滴带电量适中，适合实验测量；

实验中所用的有关参考数据

$$\text{油滴密度: } \rho = 981 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\text{重力加速度: } g = 9.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$$

$$\text{空气粘度系数: } \eta = 1.83 \times 10^{-5} \cdot \text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\text{油滴匀速下降距离: } l = 1.60 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{修正常数: } b = 8.22 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{Pa}$$

$$\text{大气压强 (深圳): } P = 1.0098 \times 10^5 \text{ Pa}$$

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

六、报告要求

1. 自行设计表格，自变量为平衡电压 U_n 和下落时间 t ，因变待测量为被测油滴所带电荷量 q 。测量 3 个油滴，每个油滴测量 5 次。
2. 至少测量 3 颗油滴，记录每颗油滴的电荷量 q_i ，计算 $\frac{q_i}{e}$ ，对商四舍五入取整后得到每颗油滴所带电子个数 n_i ；再得到每次测量的基本电荷 e_i ，再求出 n 次测量的 \bar{e} ，与理论值比较求百分误差及不确定度。

七、讨论题

1. 当跟踪观察某一油滴时，原来清晰的像变模糊了，可能是什么原因造成的？
2. 由于油的挥发，油滴的质量会不断下降。当长时间跟踪测量同一个油滴时，由于油滴的挥发，会使哪些测量量发生变化。

扩展内容

以上实验中，我们采用了“静态法”或“平衡法”来测量电子电荷测量，与之对应的还有一种“动态法”，即找到合适油滴并确定平衡电压后，可将油滴提升至 0 刻线以上，然后去掉工作电压使油滴下落，记录油滴下落 1.6mm 所用时间 t_1 ，然后再提高电压使油滴做上升运动，记录上升 1.6mm

所用的时间 t_2 和上升工作电压 U 。

油滴下落过程，由斯托克斯定律，粘滞流体（此处为空气）对球形运动物体的阻力与物体速度成正比，其比例系数 $6\pi\eta a$ ，此处的 η 为空气粘度， a 为物体半径， ρ 和 ρ' 分别为油滴和空气密度，设油滴以速度 v_s 匀速下落，则有

$$\frac{4\pi}{3}a^3\rho g = \frac{4\pi}{3}a^3\rho'g + 6\pi\eta av_s \quad (9-15)$$

油滴上升过程，设油滴以速度 v_r 匀速上升，则有

$$\frac{4\pi}{3}a^3\rho g + 6\pi\eta av_r = \frac{4\pi}{3}a^3\rho'g + qE \quad (9-16)$$

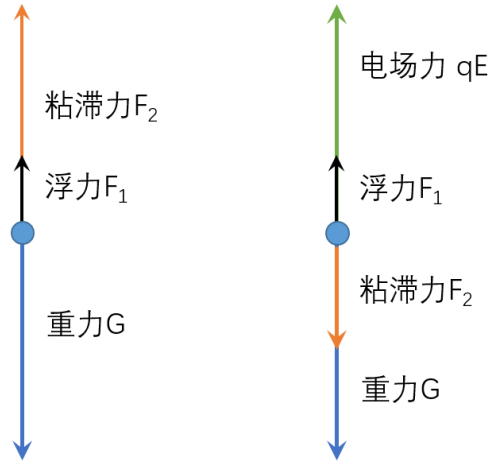


图 9-2 左图为重力场中油滴下落时受力示意图，右图为电场中油滴上升时受力示意图

由于油滴密度远大于空气，所用空气对油滴的浮力可忽略，则 q 为

$$q = \frac{4\pi a^3(\rho - \rho')g}{3Ev_s}(v_s + v_r) \approx \frac{4\pi a^3\rho g d}{3Uv_s}(v_s + v_r) \quad (9-17)$$

忽略浮力，则由公式（9-15）可得：

$$v_s = \frac{2ga^2}{9\eta}\rho \quad (9-18)$$

因此

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2\rho g}} \quad (9-19)$$

油滴匀速下落 l 距离用的时间为 t_1 ，匀速上升 l 距离用的时间为 t_2 ，则 v_s 和 v_r 分别为 $v_s = l/t_1$ ， $v_r = l/t_2$ ，

考虑到油滴的直径与空气分子的间隙相当，空气已不能看成是连续介质，其空气粘度 η 需修正为 η'

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{pa}} \quad (9-20)$$

此处 p 为空气压强， b 为修正常数， $b=0.00823\text{N/m}$ ，因此式 (9-18) 可修正为

$$a = \sqrt{\frac{9\eta v_s}{2\rho g \left(1 + \frac{b}{pa}\right)}} \quad (9-21)$$

由于半径 a 也在修正项中，当精度要求不是太高时，修正项中 a 由式 (9-18) 计算即可。

将 (9-20) 代入 (9-17) 中，得

$$q = \frac{4\pi \left[\frac{9\eta v_s}{2\rho g \left(1 + \frac{b}{pa}\right)} \right]^{\frac{3}{2}} \rho g d (v_s + v_r)}{3Uv_s} = \frac{18\pi}{\sqrt{2\rho g}} \cdot \frac{d}{U} \cdot \left(1 + \frac{t_1}{t_2}\right) \left[\frac{\eta l}{t_1 \left(1 + \frac{b}{p \sqrt{\frac{2\rho g t_1}{9\eta l}}}\right)} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (9-22)$$

“动态法”数据记录表如下：

密立根油滴实验数据记录表[动态法] ($l=1.60\text{ mm}$)

上升电压 U/V						
下落时间 t_1/s						
上升时间 t_2/s						

实验十 霍尔效应传感器和各向异性磁电阻传感器

一、实验预习指导

1. 霍尔效应产生的原理是什么？
2. 如何利用霍尔效应测量磁场？
3. 霍尔电压测量中存在哪些系统误差？用什么方法消除这些误差？
4. 各向异性磁阻传感器的工作原理是什么？

二、实验目的

1. 理解霍尔传感器和各向异性磁阻传感器的工作原理；
2. 测量霍尔传感器霍尔电压与磁感应强度、工作电流的关系，并计算霍尔系数；
3. 测量螺线管轴线上磁感应强度的大小和分布；
4. 测量各向异性磁阻传感器输出电压与磁感应强度（励磁电流）之间的关系并计算其灵敏度。

三、实验原理

磁传感器广泛用于现代工业和电子产品中，用于测量磁场或以感应磁场强度来测量电流、位置、方向等物理参数。在现有技术中，有许多不同类型的传感器用于测量磁场和其他参数，例如采用霍尔（Hall）元件和各向异性磁电阻（Anisotropic Magneto Resistance, AMR）元件。

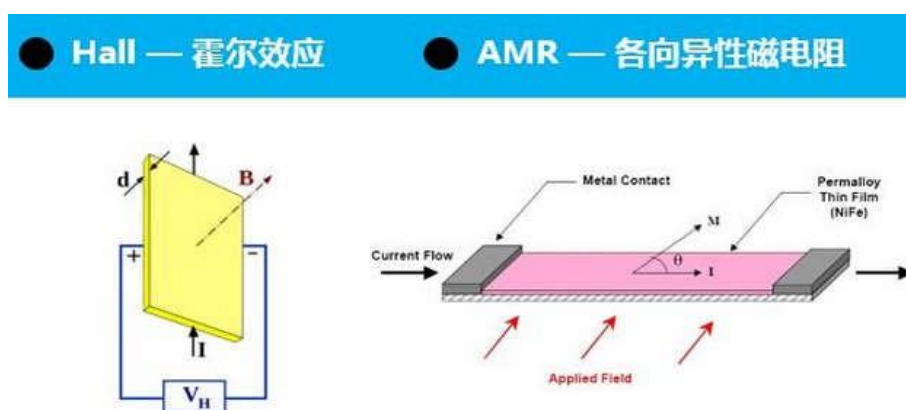


图 10-1 霍尔传感器和各向异性磁电阻传感器技术原理图

表 10-1 Hall 元件和 AMR 元件的技术参数对比（仅作参考。）

技术	功耗 (mA)	尺寸 (mm)	典型灵敏度 (mV/V/Gs)	线性工作范围(Gs)	分辨率 (mGs)	温度特性 (°C)
Hall	5~20	1×1	0.05	1~1000	500	<150
AMR	1~10	1×1	1	0.001~10	0.1	<150

1. 霍尔效应

运动的带电粒子在磁场中受洛伦兹力 f_L 的作用而偏转。当带电粒子（电子或空穴）被约束在固体材料中，这种偏转就导致在垂直电流和磁场的方向上产生正负电荷在不同侧的聚积，从而形

成附加的横向电场。

如图 10-2 所示，磁场 B 沿 Z 正向，与之垂直的半导体薄片上 X 正向通以工作电流 I_s ，假设载流子为电子（N 型半导体材料），它沿着与电流 I_s 相反的 X 负向运动。洛伦兹力用矢量式表示为：

$$f_L = -e\bar{V} \times B \quad (10-1)$$

式中 e 为电子电量， \bar{V} 为电子运动平均速度， B 为磁感应强度。

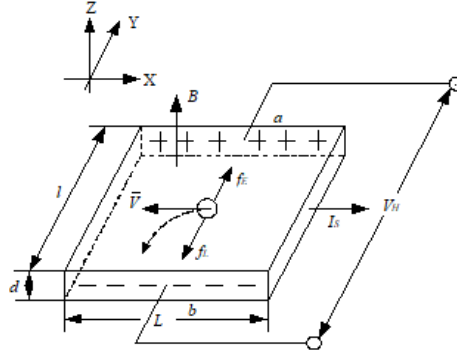


图 10-2 霍尔效应示意图

由于洛伦兹力 f_L 的作用，电子向图中虚线箭头所指的位于 Y 轴负方向的 b 侧偏转，并使 b 侧积累电子，而相对的 a 侧形成正电荷积累。与此同时运动的电子还受到由于两种积累的异种电荷形成的反向电场力 f_E 的作用。随着电荷积累量的增加， f_E 增大，当两力大小相等（方向相反）时， $f_L = -f_E$ ，则电子积累便达到动态平衡。这时在 a 、 b 两端面之间建立的电场称为霍尔电场 E_H ，相应的电势差称为霍尔电势 V_H 。

电场作用于电子的力为：

$$f_E = -eE_H = -eV_H / l \quad (10-2)$$

当达到动态平衡时：

$$\bar{V}B = V_H / l \quad (10-3)$$

设霍尔元件宽度为 l ，厚度为 d ，载流子浓度为 n ，则霍尔元件的工作电流为：

$$I_s = ne\bar{V}ld \quad (10-4)$$

由 (10-3)、(10-4) 两式可得：

$$V_H = \frac{1}{ne} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (10-5)$$

即霍尔电压 V_H 与 I_s 、 B 的乘积成正比，与霍尔元件的厚度成反比，比例系数 $R_H = 1/ne$ 称为霍

尔系数，它是反映材料霍尔效应强弱的重要参数。

当霍尔元件的厚度确定时，设：

$$K_H = R_H / d = 1 / ned \quad (10-6)$$

则（10-5）式可表示为：

$$V_H = K_H I_s B \quad (10-7)$$

K_H 称为霍尔元件的灵敏度，它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位工作电流下的霍尔电压大小，其单位是 $[V/(A \cdot T)]$ ，一般要求 K_H 愈大愈好。

由于金属的电子浓度 n 很高，所以它的 R_H 或 K_H 都不大，因此不适宜作霍尔元件。此外元件厚度 d 愈薄， K_H 愈高，所以制作时，往往采用减少 d 的办法来增加灵敏度。

应当注意，当磁感应强度 B 和霍尔元件平面法线成一角度时（如图 10-3 所示），作用在元件上的有效磁场是其法线方向上的分量 $B \cos \theta$ ，此时 $V_H = K_H I_s B \cos \theta$ ，所以一般在使用时应调整元件方位，使 V_H 达到最大，即 $\theta=0$ 。

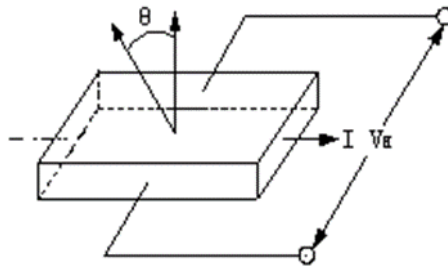


图 10-3 霍尔元件与磁感应强度夹角示意图

霍尔元件测量磁场的基本电路如图 10-4 所示，将霍尔元件置于待测磁场的相应位置，并使元件平面与磁感应强度 B 垂直，在其控制端输入恒定的工作电流 I_s ，霍尔元件的霍尔电压输出端接毫伏表，测量霍尔电压 V_H 的值。

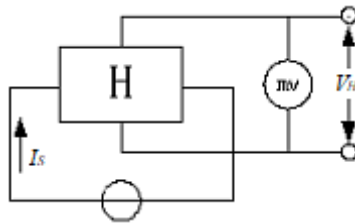


图 10-4 霍尔元件测量电路示意图

2. 霍尔效应的负效应及其消除

测量霍尔电势 V_H 时，不可避免地会产生一些副效应，由此而产生的附加电势叠加在霍尔电势

上，形成测量系统误差，这些副效应有：

1) 不等位电势 V_0

实际的霍尔元件因封装方式不同，接线方式也有差异，两个霍尔电极不可能绝对对称地焊在霍尔元件两侧（图 10-5 a）、霍尔元件电阻率不均匀、工作电流极的端面接触不良（图 10-5 b）都可能造成 C、D 两极不处在同一等位面上，此时虽未加磁场，但 C、D 间存在电势差 V_0 ，称为不等位电势， $V_0 = I_S R_0$ ， R_0 是 C、D 两极间的不等位电阻。由此可见，在 R_0 确定的情况下， V_0 与 I_S 的大小成正比，且其正负随 I_S 的方向改变而改变。

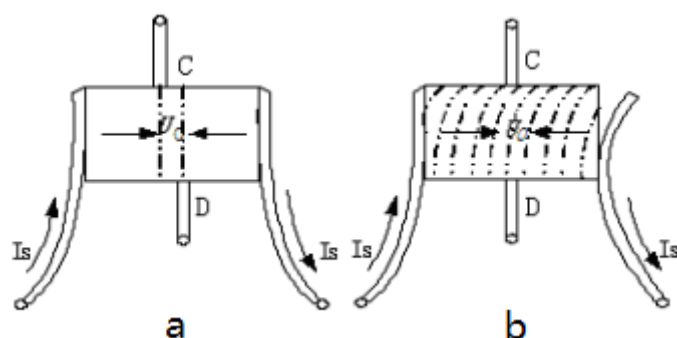


图 10-5 不等位电势

2) 爱廷豪森 (Etinghausen) 效应

当霍尔元件的 X 方向通以工作电流 I_S ，Z 方向加磁场 B 时，由于霍尔元件内的载流子速度服从统计分布，有快有慢。在达到动态平衡时，在磁场的作用下慢速与快速的载流子将在洛伦兹力和霍尔电场的共同作用下，沿 Y 轴分别向相反的两侧偏转，这些载流子的动能将转化为热能，使两侧的温度不同，因而造成 Y 方向上两侧出现温差 ($\Delta T = T_C - T_D$)。

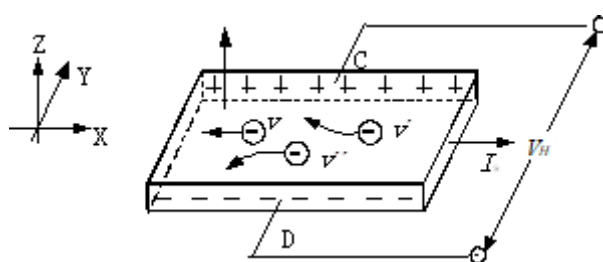


图 10-6 霍尔元件中电子实际运动情况 (图中 $v' < v$, $v'' > v$)

因为霍尔电极和元件两者材料不同，电极和元件之间形成温差电偶，这一温差在 C、D 间产生温差电动势 V_E ， $V_E \propto I_S B$ 。

这一效应称爱廷豪森效应， V_E 的大小及正负符号与 I_S 、 B 的大小和方向有关，跟 V_H 与 I_S 、 B 的关系相同，所以不能在测量中消除。

3) 伦斯脱 (Nernst) 效应

由于工作电流的两个电极与霍尔元件的接触电阻不同，工作电流在两电极处将产生不同的焦耳热，引起工作电流两极间的温差电动势，此电动势又产生温差电流（称为热电流） I_Q ，热电流在磁场作用下将发生偏转，结果在 Y 方向上产生附加的电势差 V_N 且 $U_N \propto I_Q B$ ，这一效应称为伦斯脱效应，由上式可知 V_N 的符号只与 B 的方向有关。

4) 里纪-勒杜克（Righi-Leduc）效应

如 3) 所述霍尔元件在 X 方向有温度梯度，引起载流子沿梯度方向扩散而有热电流 I_Q 通过霍尔元件，在此过程中载流子受 Z 方向的磁场 B 作用，在 Y 方向引起类似爱廷豪森效应的温差 $\Delta T = T_C - T_D$ ，由此产生的电势差 $V_R \propto I_Q B$ ，其符号与 B 的方向有关，与 I_S 的方向无关。

在确定的磁场 B 和工作电流 I_S 下，实际测出的电压是 V_H 、 V_0 、 V_E 、 V_N 和 V_R 这 5 种电势差的代数和。上述 5 种电势差与 B 和 I_S 方向的关系如下：

V_H		V_0		V_E		V_N		V_R	
B	I_S	B	I_S	B	I_S	B	I_S	B	I_S
有关	有关	无关	有关	有关	有关	有关	无关	有关	无关

为了减少和消除以上效应引起的附加电势差，利用这些附加电势差与霍尔元件工作电流 I_S 、磁场 B （即相应的励磁电流 I_M ）的关系，采用对称（交换）测量法测量 C、D 间电势差：

当 $+I_M$ ， $+I_S$ 时， $V_{CD1} = +V_H + V_0 + V_E + V_N + V_R$

当 $+I_M$ ， $-I_S$ 时， $V_{CD2} = -V_H - V_0 - V_E + V_N + V_R$

当 $-I_M$ ， $-I_S$ 时， $V_{CD3} = +V_H - V_0 + V_E - V_N - V_R$

当 $-I_M$ ， $+I_S$ 时， $V_{CD4} = -V_H + V_0 - V_E - V_N - V_R$

对以上四式作如下运算：

$$\frac{1}{4}(V_{CD1} - V_{CD2} + V_{CD3} - V_{CD4}) = V_H + V_E \quad (10-8)$$

可见，除爱廷豪森效应以外的其他副效应产生的电势差会全部消除，因爱廷豪森效应所产生的电势差 V_E 的符号和霍尔电势 V_H 的符号，与 I_S 及 B 的方向关系相同，故无法消除，但在非大电流、非强磁场下， $V_H \gg V_E$ ，因而 V_E 可以忽略不计，故有：

$$V_H \approx V_H + V_E = \frac{1}{4}(V_{CD1} - V_{CD2} + V_{CD3} - V_{CD4}) \quad (10-9)$$

3. 载流直螺线管内部的磁场

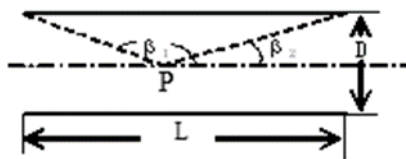


图 10-7 螺线管中的磁场

均匀地绕在圆柱面上的螺旋线圈称为螺线管。设螺线管的直径为 D ，总长度为 L ，单位长度内的匝数为 n 。若线圈用细导线绕得很密，则每匝线圈可视为圆形线圈。

由描述电流产生磁场的毕奥-萨伐尔-拉普拉斯定律，经计算可得出通电螺线管内部轴线上某点 P 的磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu_0}{2} n I_M (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (10-10)$$

式中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，为真空中的磁导率， n 为螺线管单位长度的匝数， I_M 为励磁电流强度， β_1 和 β_2 分别表示 P 点到螺线管两端的连线与轴线之间的夹角，如图 10-7 所示。在螺线管轴线中央， $-\cos \beta_1 = \cos \beta_2 = L / (L^2 + D^2)^{1/2}$ ，(10-10) 式可表示为：

$$B = \mu_0 n I_M \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}} = \frac{\mu_0 N I_M}{\sqrt{L^2 + D^2}} \quad (10-11)$$

式中 N 为螺线管的总匝数。

1) 如果螺线管为“无限长”，即螺线管的长度较直径很大时，(10-10) 式中的 $\beta_1 \rightarrow \pi$ ， $\beta_2 \rightarrow 0$ ，所以 (10-10) 可以改写为：

$$B = \mu_0 n I_M \quad (10-12)$$

这一结果说明，任何绕得很紧密的长螺线管内部沿轴线的磁场是匀强的，由安培环路定律易于证明，无限长螺线管内部非轴线处的磁感应强度也由 (10-12) 式描述。

2) 在无限长螺线管轴线的端口处 $\beta_1 = \pi/2$ ， $\beta_2 \rightarrow 0$ ，磁感应强度：

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 n I_M \quad (10-13)$$

上式表明，长直螺线管轴线端点处的磁感应强度恰好是内部磁感应强度的一半。载流长直螺线管所产生的磁感应强度 B 的方向沿着螺线管轴线，指向可按右手法则确定。

4. 一对共轴线圈的磁场

图 10-8 为一对共轴线圈，且绕线方向一致。当两线圈都通以电流 I_M ，且中心间距 l 等于线圈的等效半径 R 时，可在线圈的轴线上得到不太强的均匀磁场，这时这对共轴线圈称为亥姆赫兹线圈。

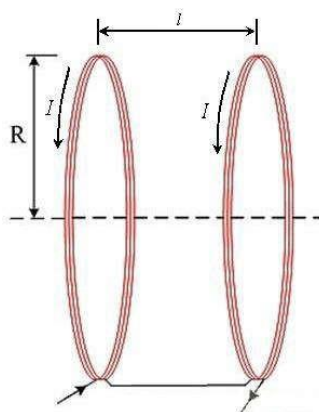


图 10-8 共轴线圈

当这一对共轴线圈的间距不等于半径时，轴线上的磁场分布就不均匀，呈现欠耦合、过耦合状态，线圈的耦合度可以通过霍尔元件来检测。 $l > R$ 、 $l = R$ 和 $l < R$ 时，两线圈磁场分布见图 10-9。

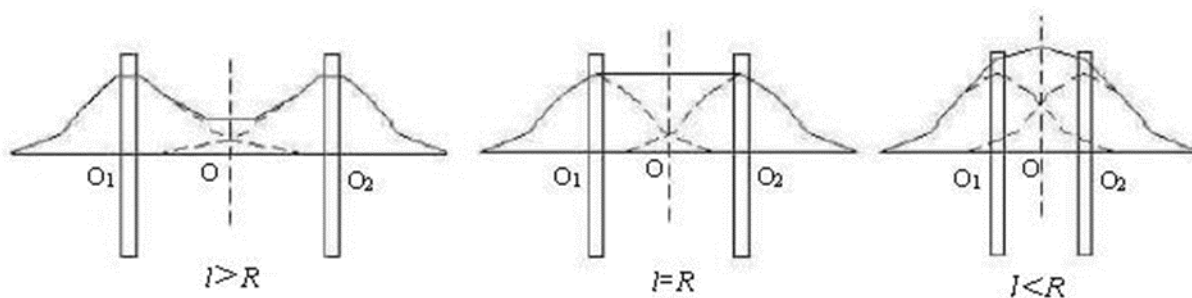


图 10-9 不同间距下共轴线圈的磁场分布情况

通过测量单个和两个线圈的磁场分布，可证明磁场叠加原理。

1) 单个载流圆线圈轴线上的磁场测量

由毕奥—萨伐尔定律得，载流圆线圈在线圈轴线上某点的磁感应强度为：

$$B = \frac{\mu_0 N I_M R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad (10-14)$$

式中， N 为线圈的总匝数， I_M 为通过圆线圈励磁电流的强度， R 为圆线圈的等效半径， x 为该点到线圈轴线中心的距离。在单线圈中心处，即 $x=0$ 处，有：

$$B = \frac{\mu_0 N I_M}{2R} \quad (10-15)$$

在线圈无穷远处，即当 $x \gg R$ 时，有：

$$B = \frac{\mu_0 N I_M R^2}{2x^3} \approx 0 \quad (10-16)$$

2) 载流亥姆赫兹线圈磁场测量，证明叠加原理

亥姆赫兹线圈中，若以两线圈中点为坐标原点，则轴线上任意一点的磁感应强度是两线圈在该点产生的磁感应强度之和：

$$B(x) = \frac{\mu_0 N I_M R^2}{2[R^2 + (\frac{R}{2} + x)^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_0 N I_M R^2}{2[R^2 + (\frac{R}{2} - x)^2]^{\frac{3}{2}}} = B_0 \frac{5^{\frac{3}{2}}}{16} \left\{ \frac{1}{[1 + (\frac{1}{2} + \frac{x}{R})^2]^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{[1 + (\frac{1}{2} - \frac{x}{R})^2]^{\frac{3}{2}}} \right\} \quad (10-17)$$

式中 B_0 是 $x=0$ 时，赫姆霍兹线圈公共轴线中点的磁感应强度，即：

$$B_0 = \frac{8\mu N I_M}{5^{\frac{3}{2}} R} \quad (10-18)$$

下表列出了 x 取不同值时 $B(x)/B_0$ 值的理论计算结果。

位置 x	$-0.5R$	$-0.4R$	$-0.3R$	$-0.2R$	$-0.1R$	0	$0.1R$	$0.2R$	$0.3R$	$0.4R$	$0.5R$
$B(x)/B_0$	0.946	0.975	0.992	0.998	1.000	1.000	1.000	0.998	0.992	0.975	0.946

从表中可以看出，亥姆赫兹线圈轴线上两线圈中心之间可看成是均匀磁场。当在需要把样品放在均匀磁场上进行测试，且所需的磁场不太强时，使用亥姆赫兹线圈是比较方便的。

在亥姆赫兹线圈轴线上，分别测量直流电流通过单个圆线圈，即左线圈 a 和右线圈 b 产生的磁感应强度 B_a 和 B_b ，再测量将两个线圈串联起来组成的亥姆赫兹线圈产生的磁场 B_{a+b} ，由实验数据来验证磁场叠加原理。也可改变左右线圈间距离，分别使线圈中心间距 $l > R$ 和 $l < R$ ，再进行测量和验证。

5. 各向异性磁阻传感器

各向异性磁阻传感器 AMR (Anisotropic Magneto-Resistive Sensors) 由沉积在硅片上的坡莫合金 ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) 薄膜形成电阻。沉积时外加磁场，形成易磁化轴方向。铁磁材料的电阻和电流与磁化方向的夹角有关，电流与磁化方向平行时电阻 R_{\max} 最大，电流与磁化方向垂直时电阻 R_{\min} 最小，电流与磁化方向成 θ 角时，电阻可表示为：

$$R = R_{\min} + (R_{\max} - R_{\min}) \cos^2 \theta \quad (10-19)$$

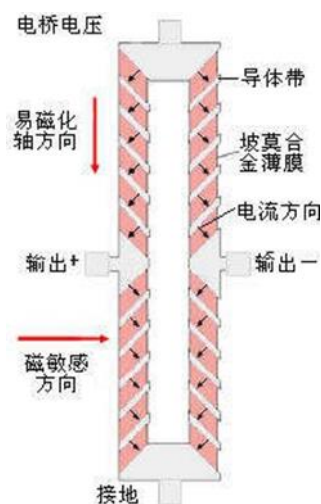


图 10-10 各向异性磁阻电桥

在磁阻传感器中，为了消除温度等外界因素对输出的影响，由四个相同的磁阻元件构成惠斯通电桥，结构如图 10-10 所示。其中，易磁化轴方向与电流方向的夹角为 45° 。理论分析与实践表明，采用 45° 偏置磁场，当沿与易磁化轴垂直的方向施加外磁场，且外磁场强度不太大时，电桥输出与外加磁场强度成线性关系。

无外加磁场或外加磁场方向与易磁化轴方向平行时，磁化方向即易磁化轴方向，电桥的四个桥臂电阻阻值相同，输出为零。当在磁敏感方向施加如错误!未找到引用源。-9 所示方向的磁场时，合成磁化方向将在易磁化方向的基础上逆时针旋转。结果使左上和右下桥臂电流与磁化方向的夹角增大，电阻减小 ΔR ；右上与左下桥臂电流与磁化方向的夹角减小，电阻增大 ΔR 。通过对电桥的分析可知，此时输出电压可表示为：

$$V_{out} = V_s \times \Delta R / R \quad (10-20)$$

式中 V_s 为电桥工作电压， R 为桥臂电阻， $\Delta R / R$ 为磁阻阻值的相对变化率，与外加磁场强度成正比，故 AMR 磁阻传感器输出电压与磁场强度成正比，可利用磁阻传感器测量磁场。

传感器灵敏度定义为给传感器单位激励信号（电压 V_s 或者电流 I_s ），并将传感器置于单位磁场 B 内，传感器输出的相应电信号（一般为电压信号 V_{out} ），传感器的定义式为：

$$s = \frac{V_{out}}{(V_s \cdot B)} \quad (10-21)$$

四、操作要点

1. 仪器的连接与预热

- 1) 使用红黑香蕉线将 COC-MCES 电磁学综合实验仪“I/V 输出”正负端接入 COC-MCES-Z 电磁学通用转接盒传感器控制区的“输入”接口，红黑端各自对应；

- 2) 使用红黑香蕉线将 COC-MCES 电磁学综合实验仪“I/V 输入”正负端接入 COC-MCES-Z 电磁学通用转接盒传感器控制区的“输出”接口，红黑端各自对应；
- 3) 使用红黑鱼叉线将 COC-PS 通用电源正负端与 COC-MCES-Z 电磁学通用转接盒励磁电路控制区的“I_M 电压输入”红黑端相连；
- 4) 将霍尔转接盒的“霍尔/磁阻效应”切换开关切至“霍尔效应”，将两个方向切换开关均切至正向；
- 5) 将二维移动座安装于导轨上并锁紧，使用四芯线将二维移动座背部的插座与 COC-MCES-Z 电磁学通用转接盒的“信号输入”插座相连；
- 6) 打开 COC-MCES 电磁学综合实验仪电源，预热 15 分钟以上。

注意事项：禁止将通用电源输出端或“励磁电路控制区”的接线柱与“传感器控制区”的接线柱连接，以免损坏霍尔元件。

2. 使用螺线管测量霍尔电压 V_H 与磁感应强度 B 的关系

- 1) 将螺线管的正负接线柱与转接盒的“I_M 电压输出”正负接线柱相连，将轴向霍尔传感器模块插入二维移动座插孔槽内；
- 2) 将轴向霍尔传感器模块插入螺线管中，使传感器模块中心的霍尔元件处于螺线管中心位置（螺线管边缘对应传感器模块的刻度读数 150mm 处）；
- 3) 将通用电源打开，设置电压为 31V，电流为 0A；
- 4) 从 COC-MCES 电磁学综合实验仪的主界面选择“自动配置——霍尔效应（HALL）”或选择“手动配置——输出模式：稳流，输出范围：0~19.99mA；测量模式：电压 2，测量范围：0~±199mV”，确认并进入实验界面；
- 5) 在实验界面设置工作电流 $I_S=5.000\text{mA}$ ，调节通用电源，输出励磁电流 I_M 范围为 0-1.0A（10 组数据），并由（11）式算出螺线管中央相应的磁感应强度（本实验中，螺线管线圈总长 300mm，线圈内径 30mm，外径 42mm，共 3200 匝，线径 0.6mm，长时间使用时励磁电流 $\leq 0.8\text{A}$ ，两端挡板厚 15mm）。分别测量霍尔电压 V_H 值填入表 1，为消除副效应对测量结果的影响，对每一测量点都要通过霍尔转接盒上的换向开关改变 I_M 及 I_S 的方向，将测得的电压值填入表格。依据测量结果绘出 V_H - B 曲线。

测量 V_H - I_M 关系

$I_S=5.000\text{mA}$

I_M (A)	B (mT)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	V_3 (mV)	V_4 (mV)	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$ (mV)
		$+I_M, +I_S$	$-I_M, +I_S$	$-I_M, -I_S$	$+I_M, -I_S$	

0.1						
0.2						
0.3						
0.4						
...						
1.0						

3. 测量霍尔电压 V_H 与工作电流 I_S 的关系

- 1) 移动轴向霍尔元件，使霍尔元件处于螺线管中心位置(霍尔筒刻度读数 165mm 处)；
- 2) 调节励磁电流 I_M 为 0.500A；
- 3) 调节工作电流 I_S 范围为 0-10.0mA（10 组数据），分别测量霍尔电压 V_H 值填入表 2。为消除副效应对测量结果的影响，对每一测量点都要通过霍尔转接盒上的换向开关改变 I_M 及 I_S 的方向，将测得的电压值填入表格。依据测量结果绘出 V_H - I_S 曲线。

测量 V_H - I_S 关系

$I_M=0.500A$

I_S (mA)	V_1 (mV)	V_2 (mV)	V_3 (mV)	V_4 (mV)	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$ (mV)
	$+I_M, +I_S$	$-I_M, +I_S$	$-I_M, -I_S$	$+I_M, -I_S$	
0					
1.000					
2.000					
.....					
10.000					

4. 计算霍尔元件的灵敏度 K_H

由于 K_H 与载流子浓度 n 成反比，而半导体材料的载流子浓度与温度有关，故 K_H 会随温度而变，本实验中使用的铋化锑霍尔传感器具有较好的温度稳定性，可视为其灵敏度 K_H 在一定温度范围内保持不变。

根据 (7) 式，已知 V_H ， I_S 及 B ，即可求得 K_H ，也可由 V_H - B 或 V_H - I_S 直线的斜率求得 K_H 。

4. 测量螺线管中磁感应强度 B 的大小及分布情况

- 1) 将霍尔元件置于螺线管中心，调节 $I_S=5.000\text{mA}$ ， $I_M=0.500\text{A}$ ，测量相应的 V_H 。
- 2) 将传感器模块从左侧缓慢伸进螺线管，从螺线管 0mm 处起每间隔 10mm（取 30 组数据），记录一次的对应的 V_H 值，并填入表 3（螺线管两侧壁厚 15mm，在实验过程中，需在传感器模块探入螺线管的读数上减去 15mm 即为此时霍尔片探入螺线管线圈的深度）。为消除副效应对测量结果的影响，对每一测量点都要通过霍尔转接盒上的换向开关改变 I_M 及 I_S 的方向，将测得的电压值填入表格。
- 3) 已知 V_H ， K_H 及 I_S 值，由（7）式计算出各点的磁感应强度，并绘出 B - X 图，显示螺线管内 B 的分布状态。

测量 V_H - X 关系

$I_M=0.500\text{A}$ $I_S=5.000\text{mA}$

$x(\text{mm})$	$V_1 (\text{mV})$	$V_2 (\text{mV})$	$V_3 (\text{mV})$	$V_4 (\text{mV})$	$V_H = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4} (\text{mV})$	$B(\text{mT})$
	$+I_M, +I_S$	$-I_M, +I_S$	$-I_M, -I_S$	$+I_M, -I_S$		
0						
10						
20						
30						
.....						

5. 各向异性磁阻传感器（AMR）特性

- 1) 将各向异性磁传感器模块（AMR）置于亥姆赫兹线圈轴线（即X轴方向）的中心，指示线与0刻度对齐，用四芯线将传感器与转接盒相连，并将转接盒“霍尔/磁阻效应”开关切换至“磁阻效应”位置，传感器控制区与励磁电流控制区的换向开关均切换至“正向”。
- 2) 从COC-MCES电磁学综合实验仪的主界面选择“自动配置——各向异性磁阻传感器（AMR）”或选择“手动配置——输出模式：稳压，输出范围：0~9.99V；测量模式：电压，测量范围：0~±199mV”，确定并进入实验界面；
- 3) 将传感器工作电压设置为 $V_S=4\text{V}$ ，缓慢调节励磁电流 I_M 的大小和方向，测量AMR传感器的输出电压 V_{out} ，将获得的数据记录在表6中。表6中第2列磁感应强度可通过公式（18）计算得到（本实验中共轴线圈是一对大小相同、匝数相等的圆线圈。绕线部分有效半径为 100mm，匝数为310匝，线径0.6mm，长时间使用时励磁电流 $\leq 0.8\text{A}$ 。）。

注：复位按钮每按下一次会输入一次复位脉冲电流，仅在需要时使用。

AMR 的 V_{out} - I_M 关系

$V_S=4.00\text{V}$

$I_M(\text{mA})$	$B(\text{Gs})$	$V_{out}(\text{mV})$	$I_M(\text{mA})$	$B(\text{Gs})$	$V_{out}(\text{mV})$
600			-50		
550			-100		
500			-150		
450			-200		
400			-250		
350			-300		
300			-350		
250			-400		
200			-450		
150			-500		
100			-550		
50			-600		
0					

4) 根据表3 的数据作出 V_{out} - B 关系曲线, 在线性范围($\pm 6\text{Gs}$)内, 根据公式(21)计算各向异性磁阻传感器的灵敏度 S_A 。

6. 各向异性磁阻传感器(AMR)输出电压与角度之间的关系

将 AMR 传感器置于亥姆赫兹线圈的中心位置, 以 Z 轴为轴心, 旋转角度, 记录不同角度 θ 下传感器的输出电压 V_{out} , 将数据记录在表 4 中。

AMR 的 V_{out} - θ 关系

$V_S=4.00\text{V}$ 、 $I_M=150\text{mA}$

$\theta (^{\circ})$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$V_{out} (\text{mV})$										
$\theta (^{\circ})$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	
$V_{out} (\text{mV})$										

根据上表数据作各向异性磁阻传感器的 V_{out} - θ 关系曲线, 确认输出电压与转角的关系。

五、注意事项

1. 禁止将通用电源输出端或“励磁电路控制区”的接线柱与“传感器控制区”的接线柱连接, 以免损坏霍尔元件。
1. 长时间使用线圈时励磁电流 $\leq 0.8\text{A}$ 。

六、报告要求

1. 画 V_H-I_M 和 V_H-I_S 曲线，用最小二乘法计算斜率 K ，计算霍尔元件灵敏度 K_H ；
2. 画 $B-X$ 图，描述螺线圈内 X 方向上 B 的分布特征；
3. 作出 $V_{out}-B$ 关系曲线，在线性范围 ($\pm 6\text{Gs}$) 内，根据公式计算各向异性磁阻传感器的灵敏度 S_A ；
4. 作各向异性磁阻传感器的 $V_{out}-\theta$ 关系曲线，确认输出电压与转角的关系。

七、讨论题

1. 如何根据 B 、 I_H 和 U_H 方向判断霍尔片的导电类型 (N 或 P 型半导体)，要求画图说明。(注： N 型半导体中，载流子为电子； P 型半导体中将载流子视为正离子)；
2. 估算本实验所用霍尔片的载流子浓度。