

联立解之可得

$$r = \frac{R_{02}^2 - R_1^2 - R_{01}^2}{2R_1}$$

$$X = \sqrt{R_{01}^2 - r^2}$$

则 Z_x 就可求得, 由 $X = 2\pi f L$ 及 $X = 1/(2\pi f C)$ 可得

$$L_x = \frac{X}{2\pi f}, \quad C_x = \frac{1}{2\pi f X}$$

实验 17 用磁聚焦法测定电子荷质比

电子电荷 e 和电子质量 m 之比 e/m 称为电子荷质比, 它是描述电子性质的重要物理量。历史上就是首先测出了电子的荷质比, 又测定了电子的电荷量, 从而得出了电子的质量, 证明原子是可以分割的。

测定电子荷质比可使用不同的方法, 如磁聚焦法、磁控管法、汤姆逊法等。作为基础实验是为了对电子荷质比有一个感性认识, 因此介绍一种简便测定 e/m 的方法——纵向磁场聚焦法。它是将示波管置于长直螺线管内, 并使两管同轴安装。当偏转板上无电压时, 从阴极发出的电子, 经加速电压加速后, 可以直射到荧光屏上打出一亮点。若在偏转板上加一交变电压, 则电子将随之而偏转, 在荧光屏上形成一条直线。此时, 若给长直螺线管通以电流, 使之产生一轴向磁场, 那么, 运动电子处于该磁场中, 因受到洛伦兹力作用而在荧光屏上再度会聚成一亮点, 这就叫做纵向磁场聚焦。由加速电压、聚焦时的励磁电流值等有关参量, 便可计算出 e/m 的数值。

一、实验目的

- ① 加深对电子在电场和磁场中运动规律的理解;
- ② 了解电子射线束磁聚焦的基本原理;
- ③ 学习用磁聚焦法测定电子荷质比 e/m 的值。

二、仪器用具

长直螺线管, 阴极射线示波器, 电子荷质比测定仪电源, 直流稳压电源(励磁用), 直流电流表, 装有选择开关及换向开关的接线板, 导线等。

三、实验原理

由电磁学可知, 一个带电粒子在磁场中运动要受到洛伦兹力的作用。设带电

粒子是质量和电荷分别为 m 和 e 的电子,则它在均匀磁场中运动时,受到的洛伦兹力 f 的大小为

$$f = evB \sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}) \quad (1)$$

式中 v 是电子运动速度的大小, B 是均匀磁场中磁感应强度的大小, (\mathbf{v}, \mathbf{B}) 则是电子速度方向与磁感应强度方向(即磁场方向)间的夹角。下面对式(1)进行讨论:

① 当 $\sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}) = 0$ 时, $f = 0$, 表示电子速度方向与磁场方向平行(即 \mathbf{v} 与 \mathbf{B} 方向一致或反向)时,磁场对运动电子没有力的作用。说明电子沿着磁场方向作匀速直线运动。

② 当 $\sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}) = 1$ 时, $f = evB$, 表示电子在垂直于磁场的方向运动时,受到的洛伦兹力最大,其方向垂直于由 \mathbf{v}, \mathbf{B} 组成的平面,指向由右手螺旋定则决定。由于洛伦兹力 f 与电子速度 \mathbf{v} 方向垂直,所以, f 只能改变 \mathbf{v} 的方向,而不能改变 \mathbf{v} 的大小,它促使电子作匀速圆周运动,为电子运动提供了向心加速度,即

$$f = evB = m \frac{v^2}{R}$$

由此可得电子作圆周运动的轨道半径为

$$R = \frac{v}{\frac{e}{m} B} \quad (2)$$

式(2)表示,当磁场的 B 一定时, R 与 v 成正比,说明速度大的电子绕半径大的圆轨道运动,速度小的电子绕半径小的圆轨道运动。

电子绕圆轨道运动一周所需的时间为

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi}{\frac{e}{m} B} \quad (3)$$

式(3)表示电子作圆周运动的周期 T 与电子速度的大小无关。也就是说,当 B 一定时,所有从同一点出发的电子尽管它们各自的速度大小不同,但它们运动一周的时间却是相同的。因此,这些电子在旋转一周后,都同时回到了原来的位置。如图 2-98 所示。

③ 当 $\sin(\mathbf{v}, \mathbf{B}) = \theta$ ($0 < \theta < \frac{\pi}{2}$) 时, $f = evB \sin\theta$, 表示电子运动方向与磁场方向斜

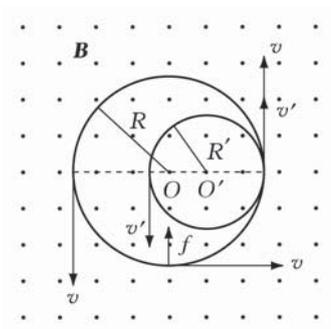


图 2-98 电子在磁场中的圆周运动

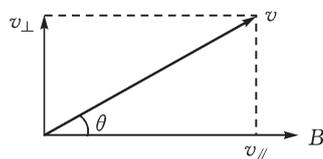


图 2-99 电子运动方向与磁场斜交

交。这时可将电子速度 \mathbf{v} 分解成与磁场方向平行的分量 v_{\parallel} 及与磁场方向垂直的分量 v_{\perp} , 如图 2-99 所示。这时 v_{\parallel} 就相当于上面 ① 的情况, 它使电子在磁场方向作匀速直线运动。而 v_{\perp} 则相当于上面 ② 的情况, 它使电子在垂直于磁场方向的平面内作匀速圆周运动。因此, 当电子运动方向与磁场方向斜交时, 电子的运动状态实际上是这两种运动的合成, 即它一面作匀速圆周运动, 同时又沿着磁场方向作匀速直线运动向前行进, 形成了一条螺旋线的运动轨迹。这条螺旋轨道在垂直于磁场方向的平面上的投影是一个圆, 如图 2-100 所示。与上面 ② 的情况同理, 可得这个圆轨道的半径为

$$R_{\perp} = \frac{v_{\perp}}{\frac{e}{m}B} \quad (4)$$

周期为

$$T_{\perp} = \frac{2\pi R_{\perp}}{v_{\perp}} = \frac{2\pi}{\frac{e}{m}B} \quad (5)$$

这个螺旋轨道的螺距, 即电子在一个周期内前进的距离为

$$h = v_{\parallel} T_{\perp} = \frac{2\pi v_{\parallel}}{\frac{e}{m}B} \quad (6)$$

由以上三式可见, 对于同一时刻电子流中沿螺旋轨道运动的电子, 由于 v_{\perp} 的不同, 它们的螺旋轨道各不相同, 但只要磁场的 B 一定, 那么, 所有电子绕各自的螺旋轨道运动一周的时间 T_{\perp} 却是相同的, 与 v_{\perp} 的大小无关。如果它们的 v_{\parallel} 相同, 那么, 这些螺旋轨道的螺距 h 也相同。这说明, 从同一点出发的所有电子, 经过相同的周期 T_{\perp} 、 $2T_{\perp}$ 、 \dots 后, 都将会聚于距离出发点为 h 、 $2h$ 、 \dots 处, 而 h 的大小则由 B 和 v_{\parallel} 来决定。这就是用纵向磁场使电子束聚焦的原理。

根据这一原理, 我们将阴极射线示波管安装在长直螺线管内部, 并使两管的中心轴重合。在实验 14 中已经知道示波管内部的结构, 当给示波器灯丝通电加热时, 阴极发射的电子经加在阴极与阳极之间直流高压 U 的作用, 从阳极小孔射出时可获得一个与管轴平行的速度 v_1 , 若电子质量为 m , 根据功能原理有

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = eU$$

则电子的轴向速度大小为

$$v_1 = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad (7)$$

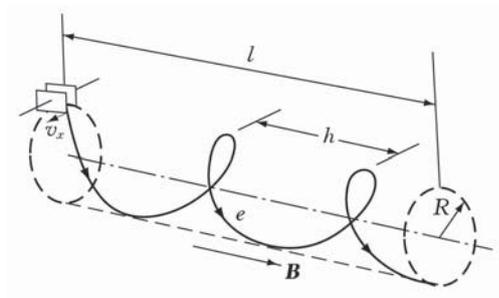


图 2-100 电子在磁场中的螺旋运动

实际上电子在穿出示波管的第二阳极后,就形成了一束高速电子流,射到荧光屏上就打出一个光斑,为了使这个光斑变成一个明亮、清晰的小亮点,必然将具有一定发散程度的电子束沿示波管轴向会聚成一束很细的电子束(称为“聚焦”),这就要调节聚焦电极的电势,以改变该区域的电场分布。这种靠电场对电子的作用来实现聚焦的方法,称为静电聚焦,可调节“聚焦”旋钮来实现。

若在Y轴偏转板上加一交变电压,则电子束在通过该偏转板时即获得一个垂直于轴向的速度 v_2 。由于两极板间的电压是随时间变化的,因此,在荧光屏上将观察到一条直线。

由上述可知,通过偏转板的电子,既具有与管轴平行的速度 v_1 ,又具有垂直于管轴的速度 v_2 ,这时若给螺线管通以励磁电流,使其内部产生磁场(近似认为长直螺线管中心轴附近的磁场是均匀的),则电子将在该磁场作用下做螺旋运动。这与前面③的情况完全相同,这里的 v_1 就相当于前面的 $v_{//}$, v_2 相当于 v_{\perp} 。

将式(7)代入式(6),可得

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{h^2 B^2} \quad (8)$$

式中 B 为载流长直螺线管轴线处的磁感应强度,计算公式为

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{L^2 + D^2}}$$

将 B 代入式(8),得

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U(L^2 + D^2)}{(\mu_0 NIh)^2} = \frac{8\pi^2 (L^2 + D^2)}{(\mu Nh)^2} \cdot \frac{U}{I^2} \quad (9)$$

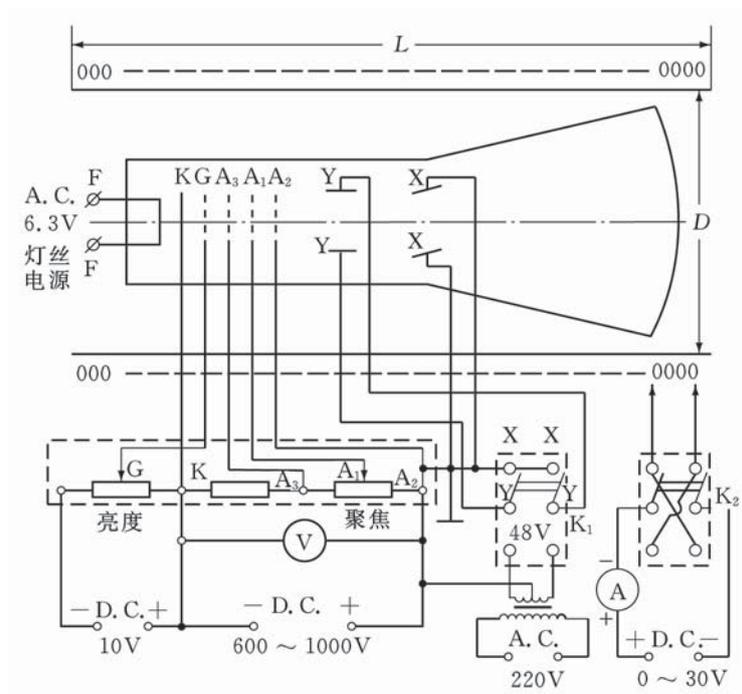
式中 μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, N 为螺线管线圈的总匝数, L 、 D 分别为螺线管的长度和直径, h 为螺距。这里 N 、 L 、 D 、 h 的数值由实验室给出。因此测得 I 和 U 后,就可求得电子荷质比 $\frac{e}{m}$ 的值。

四、实验装置和内容

1. 实验装置

图2-101是本实验的实验装置及线路图,该图可分成两部分来讨论:一是示波管的线路连接,另一是螺线管的线路连接。

①图中上部是示波管及长直螺线管,将示波管管座引出的标有K、G、 A_3 、 A_1 的引线与“电子荷质比测定仪电源”面板上的接线柱对应相接,F、F插入面板插孔内,示波器标有X、X、Y、Y的引出线与开关 K_1 相接, A_2 接在面板上的“ \perp ”处。再

图 2-101 纵向磁场聚焦法测 e/m 实验装置及线路图

按图另用导线将 X、X 与“⊥”接通。K₁ 下面两个接线柱与“测定仪电源”的“测试”接线柱连线。螺线管的两根引出线，接到开关 K₂ 一侧的接线柱上，再将直流稳压电源(0~30 V)、电流表和 K₂ 的中间两个接线柱串连在一起。

②图中左下部的电路均在“电子荷质比测定仪电源”内部。而开关 K₁ 和 K₂ 及显示励磁电流的电流表安装在接线板上。右下部的 K₂ 的连接直流电源(0~30 V)是励磁用的。

2. 实验内容及操作步骤

①将螺线管方位调整到与当地的地磁倾角相同(西安地区为 $50^{\circ}29'$)，使管内轴向磁场和地球磁场方向一致，按图 2-101 接线，细心检查无误后，开始操作。

②将选择开关 K₁ 扳到接“地”一边，电流换向开关 K₂ 断开。接通“电子荷质比测定仪电源”开关，加速高压 U 调至 600 V，适当调节亮度和聚焦旋钮，使荧光屏上出现一明亮的细点。

③将选择开关 K₁ 扳向另一边，Y 偏转板接通交流电源。由于电子获得了垂直于轴向的速度而发生偏转，荧光屏上出现一条直线。

④将电流换向开关 K₂ 扳向任一边，接通直流稳压电源(即励磁电源)，从零逐

渐增加螺线管中的电流强度 I , 使荧光屏上的直线光迹一面旋转一面缩短, 当磁场增强到某一程度时, 又聚焦成一细点。第一次聚焦时, 螺旋轨道的螺距 h 恰好等于 Y 偏转板中点至荧光屏的距离。记下聚焦时电流表的读数。

⑤ 调节高压 U 为 700 V、800 V、900 V、1000 V, 分别记录每次聚焦时螺线管中的电流值。

⑥ 将高压从 1000 V 逐次降到 600 V, 重复上述步骤。

⑦ 将电流换向开关 K_2 扳到另一边, 重复上述操作, 记下聚焦时的电流表读数。

⑧ 断开电流换向开关 K_2 及选择开关 K_1 , 关断励磁电源及测定仪电源。

⑨ 记录螺线管的 N 、 L 、 D 及螺距 h 的值。

五、数据处理

① 设计记录数据的表格, 记录数据。

② 求出在各不同高压下电子束聚焦时电流强度 I 的平均值, 用式(9) 计算各 e/m 值, 并求出 e/m 的平均值及其绝对误差 $\Delta(\frac{e}{m})$ 。测量结果表示为 $\frac{e}{m} = (\bar{\frac{e}{m}}) \pm \Delta(\frac{e}{m})$

③ 将求得的 e/m 值与公认值(见附录二) 进行比较, 求出相对百分误差。

六、注意事项

① 实验线路中因有高压, 操作时需加倍小心, 以防电击。

② 为了减小干扰, 各种铁磁物体应远离螺线管。

③ 螺线管应南高北低放置。聚焦光点应尽量细小, 但不要太亮, 以免难以判断聚焦的好坏。

④ 在改变螺线管电流方向以前, 应先调节励磁电源输出为“零”或最小, 然后再扳动换向开关 K_2 , 使电流反向。

⑤ 改变加速高压 U 后, 光点亮度会改变, 这时应重新调节亮度, 若调节亮度后加速高压有变化, 再调到规定的电压值。

七、思考题

① 调节螺线管中的电流强度 I 的目的是什么?

② 实验时螺线管中的电流方向为什么要反向? 聚焦时电流值有何不同? 为什么?

③ 静电聚焦($B=0$)后,加偏转电压时,荧光屏上呈现的是一条直线而不是一个亮点,为什么?

④ 加上磁场后磁聚焦时,如何判定偏转板到荧光屏间是一个螺距,而不是两个、三个或更多?

小 结

电磁学实验是物理实验中最重要的一部分。一是由于其内容丰富,仪器众多;二是因为随着科学技术的发展,物理学科其他分支的物理量及所有工程技术类学科的实验技术都要用到电磁学实验方法,很多量都可以通过传感器转化为电压、电流来测量。

在本节中,实验内容非常丰富,我们学习了线性电阻、非线性电阻的多种测量方法,交直流电压的测量方法,频率、相位、阻抗的测量方法,电磁场的测量方法,还研究了电子束在电磁场中的聚焦和偏转,电子荷质比测定仪就是利用这种原理制作的仪器。学习使用了磁电系电表、数字电表、电桥、示波器、电源等仪器。本节中还学习了很多实验方法,例如补偿法、模拟法、平衡法、示波法等,这些都是电磁学实验最基本的知识,在工程技术领域应用广泛。

2.3 光学、声学物理量的测量与研究

基本知识

光学实验是大学物理实验的一个重要部分,它所使用的仪器,所运用的实验技能,以及对元件和仪器的维护等,均有别于其它物理实验,有其特殊性。因此,在做光学实验以前,了解有关光学元件和仪器的使用、维护要求,基本调节技术和实验中常用的光源等有关知识是十分重要,初学者应认真阅读和学习这些内容。

一、光学元件和仪器的使用和维护

组成光学仪器的各种光学元件,如透镜、棱镜、反射镜、光栅等,大多数是用光学玻璃制成的,其光学表面都经过研磨和抛光,有些还镀有一层或多层薄膜。光学仪器的机械传动部分也都经过精密加工。所以光学元件和仪器的特点是精密度高、容易损坏,因此在使用和维持上有其特殊要求,使用时一定要注意下列事项: