

电子束实验

在近代科学技术应用中，带电粒子在电场和磁场中的运动，是许多领域中都经常遇到的一种物理现象，尤其是其中的特例——电子束。

前文介绍过的示波器中用来显示电信号波形的示波管，电视机、摄像机里显示图像的显像管、摄像管，虽然它们的型号和结构不完全相同，但都需要产生电子束、对电子束进行加速、并通过聚焦和偏转电子束使之在荧光屏上清晰成像。

对电子束的聚焦和偏转，可以利用电极形成的静电场实现，也可以利用电流形成的恒磁场实现。前者称为电聚焦和电偏转，后者称为磁聚焦和磁偏转。随着科技的发展，利用静电场或恒磁场使电子束偏转、聚焦的原理和方法还被广泛地用于扫描电子显微镜、回旋加速器、质谱仪等许多仪器设备之中。

在下面一系列实验中，我们要研究电子束在匀强电场和均匀磁场中的运动规律。实验的主要内容是：

实验 1：研究电场对电子束的加速和聚焦作用，电子束在匀强电场作用下的偏转。

实验 2：电子束在横向磁场作用下的偏转。

实验 3：电子束在纵向磁场中作螺旋运动的规律及电子荷质比的测定。

实验中采用的 EB-III 型电子束实验仪，直流稳压电源，数字万用表等相关技术指标见前文实验设备介绍中部分。

实验 1 电子束的加速和电偏转

【实验原理】

电子是带负电的粒子,电子在电场中受到库仑力的作用,力的方向和电场方向相反。本实验研究电子在电场中的加速、聚焦和偏转,是所有射线管如示波管、显象管和电子显微镜等都必须解决的问题。

在阴极射线管中,阴极被灯丝加热发射电子。电子受阳极产生的正电场作用而加速运动,同时又受栅极产生的负电场作用只有一部分初始动能较大的电子能通过栅极小孔而飞向阳极。栅极电压一般比阴极电压低 $20\sim 100\text{ V}$, 初始动能较小的电子受到栅极和阴极间减速电场的作用而被阻拦; 改变栅极电位能控制通过栅极小孔的电子数目, 从而控制荧光屏上的辉度。当栅极上的电位负到一定的程度时, 可使电子射线截止, 辉度为零。

人们最初提出的产生电子束的方法是让电子束穿过一个小孔, 只要孔径足够小, 原则上可形成很细的电子束。然而这种方案是行不通的。因为热电子从阴极发射出来具有各个不同方向的速度, 只有很少一部分刚好能穿过小孔, 结果使荧光屏的亮斑暗得难以观察。所以我们利用适当形状的电场来改变初速度不在电子管轴线方向的那些电子的运动方向, 把电子会聚成较强的电子束, 从而在荧光屏上形成明亮的光点。

下图中画出了某一方向散离轴线的电子的运动轨迹。电子在电场中受到与电力线相切的电场力 F 的作用, 现在将 F 分为轴向分量 F_z 和径向分量 F_r , F_z 使电子沿轴向加速运动, 而 F_r 在电子透镜前半部, 使电子运动轨迹向 Z 轴弯曲, 在电子透镜后半部则背离 Z 轴。由于 F_z 的作用, 电子一直处于加速状态, 所以在电子透镜后半部, 电子停留时间较短, 径向力的总效果将使电子运动轨迹向 Z 轴方向弯曲, 电子透镜对电子束起着聚焦作用。电子束通过电子透镜后能否聚焦荧光屏上, 与第一阳极电压 V_1 和第二阳极电压 V_2 的单值无关, 取决于它们的比值 V_1/V_2 ; 改变第一阳极与第二阳极的电势差, 相当于改变电子透镜的焦距, 选择合适的 V_1 与 V_2 的比值, 就可以使电子束的汇聚点恰好落在示波器的荧光屏上。

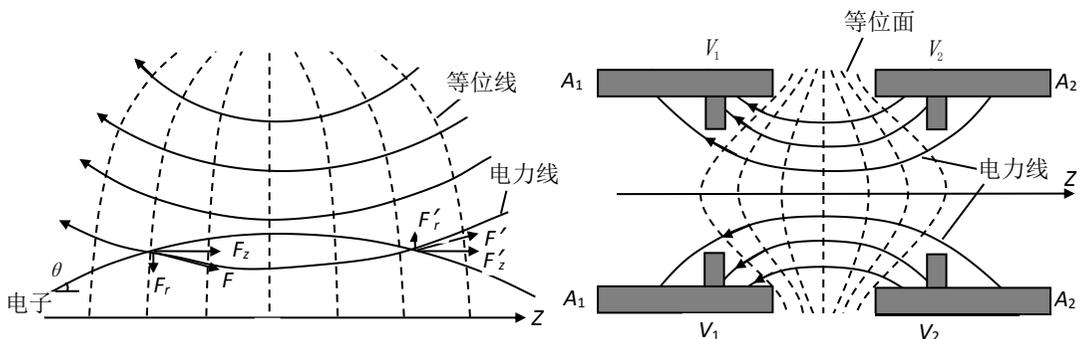


图 1

第一阳极和第二阳极是由同轴的金属圆筒组成。由于各电极上的电位不同，在它们之间形成了弯曲的等位面、电力线。这样就使电子束的路径发生弯曲，类似光线通过透镜那样产生了会聚和发散，这称为电子透镜。改变电极间的电位分布，可以改变等位面的弯曲程度，从而达到了电子束的聚焦。第一阳极主要用来改变比值 V_1/V_2 ，便于聚焦，故称聚焦极。当然改变 V_2 亦能改变比值 V_1/V_2 ，故第二阳极又能起辅助聚焦作用。

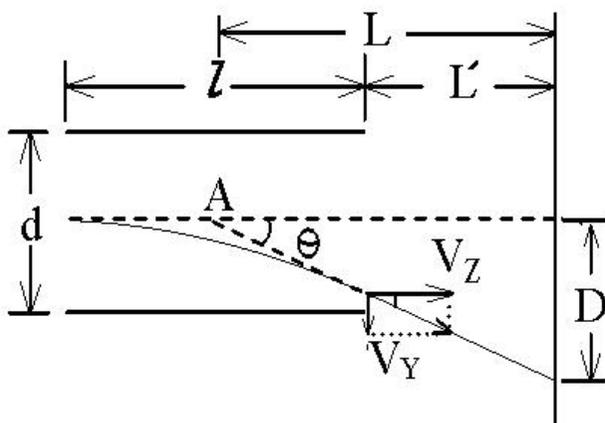
电子经过加速和聚焦形成电子束后，将进入偏转系统。我们取一个直角坐标系来研究电子的运动，令 Z 轴沿示波管的管轴方向，从荧光屏看 X 轴为水平方向， Y 轴为垂直方向。

电子在两偏转板之间穿过时，如果两板间电位差为零，电子笔直地穿过偏转板之间打在荧光屏中央形成一个小亮斑；

现在假定从电子枪阴极发射出来的电子的初始动能忽略不计，管中阳极 A_2 相对于阴极 K 具有几百甚至几千伏的正电位 V_2 ，它产生的电场使得以阴极 K 发散出来的电子

沿轴向加速。电子从 A_2 射出的动能为：
$$\frac{1}{2}mv_z^2 = eV_2$$

通常在电子束运动的垂直方向加一横向电场，电子在该电场作用下将要发生横向偏转。下图显示了电子束在垂直电场作用下的偏转情况。



我们来看一下电偏转系统中偏转电场的形成与简化：在两排平行板间加电压 V_d 就可以形成电场。偏转板长度为 l ，两电极相距为 d ，当平行板间的距离 d 比长度 l 小得多时，可以认为它形成的空间电场是均匀的，且在平行板的界外电场为零。

电偏转的原理:电子在均匀电场中以 v_z 从平行于板的方向进入电场,在电场力的作用下,它将获得一纵向的速度 v_y ,但不改变轴向速度分量 v_z 。在 y 方向(垂直 v_z 方向)产生偏转位移。

电子离开偏转电场后不受电场力作用,将作匀速直线运动,等效从 A 点(极板中点位置)直接射出,直线的倾角就是电子偏转后的速度方向。荧光屏上亮斑在垂直方向偏转距离 D (忽略荧光屏的微小弯曲)为:

$$D = \left(\frac{l}{2} + L' \right) \tan \theta = \left(\frac{l}{2} + L' \right) \frac{v_y}{v_z} = \left(\frac{l}{2} + L' \right) \frac{V_d}{V_2} \frac{l}{2d}$$

$$\text{令 } \frac{l}{2} + L' = L, \quad \text{有 } D = \frac{V_d}{V_2} \frac{LL}{2d}。$$

这一式子表明,偏转量随 V_d 增加而增加,还与 l 成正比;电极板愈长,偏转电场作用时间愈长,引起的偏转愈大。所以,我们可将示波管当作测量电压的工具;若改变加速电压 V_2 ,适当调节 V_1 到最佳聚焦,可以测量 $D-V_d$ 斜率随 V_2 改变的变化情况。

【实验内容】

1. 垂直偏转的测量(上、下偏转分别记录):保持加速电压 V_2 和聚焦电压 V_1 不变,测量 D_y 随 V_{dy} 的变化,每 0.5cm 测量一次。画出 D_y 随 V_{dy} 变化的曲线,分析该曲线为何形状,为什么?注意记下 V_2 , V_1 的数值。
2. 改变加速电压,重新测量垂直偏转:改变 V_2 的大小,再调节 V_1 到最佳聚焦,重复观察 D_y 随 V_{dy} 的变化关系,至少对两个以上 V_2 值进行重复测量。画出 D_y 随 V_{dy} 的变化曲线,把这些曲线画在同一张坐标纸上并进行分析,你能预计会得到怎样的曲线图形吗?能否验证上文中的偏转距离 D 的公式?

实验 2 电子束的磁偏转

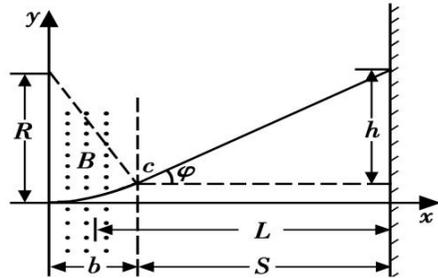
本实验中将要观察电子束在与之相垂直的磁场作用下的偏转现象。

【实验原理】

为使电子束偏转，通常在电子枪和荧光屏之间放置一对线圈，当线圈通以励磁电流 I 时，在横向水平方向上将产生与电子束方向垂直的一均匀磁场，如图所示。当电子以速度 v_z 垂直射入磁场时，必受洛仑兹

力 $f = ev_z B$ 作用而在磁场区域内作圆周运动，洛仑兹力就是向心力 mv_z^2/R ，

所以电子旋转的半径：
$$R = \frac{mv_z}{eB} ;$$



电子离开磁场区域之后不受任何作用力，应沿圆切线方向作匀速直线运动，打在荧光屏上。由上图可知，当 φ 角不很大时， $\tan \varphi = \frac{b}{R} = \frac{h}{L} ;$

由此可得磁偏转距离 h 和外加磁场 B 、加速电压 V_2 的关系为：

$$h = bLB \sqrt{\frac{e}{2mV_2}} .$$

式中磁感应强度 B 通常用产生磁场的载流线圈中电流的安培匝数表示，即：

$B = K \mu_0 n I ;$ 式中 μ_0 为真空中的磁导率， n 是载流线圈单位长度匝数， I 是通过线圈的励磁电流， K 是比例系数，是与载流线圈几何尺寸和磁介质有关的常量。

所以， $h = bLK \mu_0 n I \sqrt{\frac{e}{2mV_2}} ;$ 由此可知，磁偏转距离 h 与励磁电流 I 成正比，励磁电流越大，磁偏距离也越大。

比较之后发现，使用磁偏转时，提高电子束的加速电压来增加荧光屏上图象亮度水平比使用电偏转有利，而且磁偏转便于得到电子束的大角度偏转，更适合于大屏幕的需要。因此显像管往往采用磁偏转。但是载流线圈不利于高频使用，而且由于它的体积与

质量较大，都不及电偏转系统，所以示波管往往采用电偏转。

【实验内容】

1. 磁偏转：不同加速电压 V_2 下，测量磁偏转量 h 随励磁电流 I 的变化，绘出相应的曲线。你能事先估计出这种曲线的形状吗？
2. 再把 $I/\sqrt{V_2}$ 作为独立变量（横坐标轴），画出偏转量 h 随这独立变量而变化的曲线，结果应该是什么样子，意味着什么？
3. 地球磁场：不加任何偏转电场或磁场，当改变加速电压，屏上光点也会随之改变，产生这一现象原因之一就是地球磁场。把整个仪器转动 360° ，可找到光点上下移动的最高位置和最低位置，你能否找到示波管放在某一方向时光点不会发生偏转？管轴的方向与地球磁场方向之间有什么关系？找出光点偏转量最大时管子的取向，利用公式计算地球磁场 B 的大小。

实验3 电子螺旋运动及电子荷质比的测量

【实验原理】

把示波器放在螺线管磁场中，将示波管的聚焦阳极，第二阳极，水平偏转和垂直偏转板都连在一起，使电子进入聚焦阳极后在等电位的空间运动，由于栅极和聚焦阳极之间距离很短，阳极电压又非常高，而电子从阴极发射出来时初始速度可以忽略不计，故认为电子的轴向速度 v_z 是一样的，经阳极加速后的电子速度由阳极电压 V_2 来决定，此时电子束运动方向与螺线管磁场方向平行。

再给其中一对偏转板加上交变电压，电子束将获得垂直于轴向的分速度（用 v_r 表示），电子束在磁场中将要受到洛伦兹力（ $f = ev_r B$ ）的作用（ v_z 方向受力为零），这使电子束在垂直于磁场（也垂直于螺线管轴线）的平面内作圆周运动，设其圆周运动的轨道半径为 R ，则有：

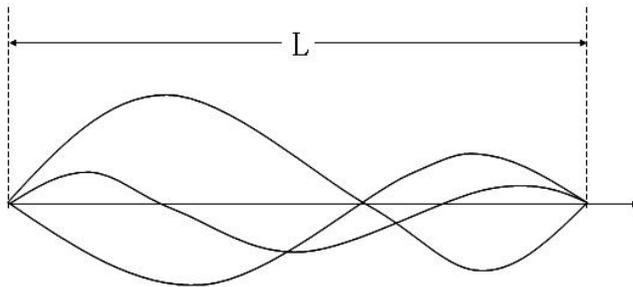
$$R = \frac{m v_r}{e B},$$

式中 m 为电子质量，电子旋转一周所用时间为：
$$T = \frac{2\pi R}{v_r} = \frac{2\pi m}{eB},$$

由此可见，只要 B 保持不变，周期 T 就是相同的。

由于电子在 B 的方向上以相同的轴向速度 v_z 做匀速直线运动，所以电子的运动轨

迹是因 v_r 而异的螺旋线，螺距都为：
$$L = v_z T = \frac{2\pi m}{eB} v_z = \frac{2\pi}{B} \sqrt{\frac{2mV_2}{e}};$$



也就是说从第一交叉点出发的电子束，虽然各个电子径向速度 v_r 不相同，但因 v_z 相同，各电子将沿不同螺旋线前进，经过距离 L 后，将重新汇聚一点（上图），这就是磁聚焦现象。

同时可得电子的荷质比为：
$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 V_2}{h^2 B^2}$$
，对于有限长螺线管，B 近似取其

轴线上的中心值，即：
$$B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{L^2 + D^2}}$$
，式中 μ_0 为真空磁导率，N、L 分别为

螺线管的匝数和长度，D 为螺线管的直径，I 为螺线管的励磁电流，代入前式得：

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 V_2 (L^2 + D^2)}{\mu_0^2 N^2 h^2 I^2}$$

【实验内容】

(1) 观察电子束磁聚焦现象。为了使电子束聚焦，将螺线管接上电源，即加上均匀磁场 B ，再调节螺线管中的励磁电流 I ，即可观察到磁聚焦现象（屏上的光斑逐渐会聚成小的光点）。继续增加电流，以增加螺线管中磁场 B ，这时将观察到第二次聚焦、第三次聚焦。试用前面讨论过的理论解释观察到的现象。

(2) 测量电子荷质比：电子荷质比的测定时选择合适的加速电压，记下第一次、第二次、第三次聚焦时的励磁电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ，并重复多测几次求其平均值，将数据代入公式计算电子荷质比。

(3) 改变加速电压 V_2 ，测定电子荷质比：在另外两种不同 V_2 的条件下，重新测量电子荷质比，将实验值与公认标准值 $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{C/kg}$ 相比较，并对结果加以分析讨论。

【思考题】

1. 示波管一般采用电偏转，而电视机显象管采用磁偏转，为什么？
2. 在示波管中的垂直偏转板上加一正弦信号电压，在水平偏转板上加一锯齿波电压，会观察到什么现象？联系示波器原理说明之。
3. 用磁聚焦法测电子荷质比，其误差主要因素有哪些？
4. 电子束磁聚焦与电聚焦在机理上有何不同？