

从一道高考题看加速器的引出装置

——物理教学联系高科技的一个事例

叶晟波

(浙江省慈溪中学 浙江 宁波 315300)

(收稿日期:2017-08-27)

摘要:加速器在原子核实验、放射性医学、放射性化学、高能物理等领域大放异彩,对大多数加速器而言,其引出装置直接关系到加速器引出束流的品质和引出效率.以2015年高考题最后一计算题为切入点,主要分析了回旋加速器的3种引出装置,并简单介绍浙江省高中物理教材中提到的另外两种加速器的引出装置.

关键词:加速器 引出装置 磁屏蔽通道法 静电偏转法 负离子束的引出

加速器不仅仅是我们探索自然的一种工具,对其他物理学科、生物学研究、临床医学等都有直接应用,创造了巨大的经济效益和社会效益.

对大多数加速器而言,其引出装置直接关系到加速器引出束流的实质和引出效率,而加速器中的引出原理涉及的是电磁学的有关知识.为体现物理教学联系生活实际,联系高科技,在此,特此对几种加速器引出装置原理作以下简明介绍.

1 回旋加速器的引出装置

2015年的理综高考物理题第25题原题如下:使用回旋加速器的实验需要把离子束从加速器中引出,离子束引出的方法有磁屏蔽通道法和静电偏转法等.质量为 m ,速度为 v 的离子在回旋加速器内旋转,旋转轨道是半径为 r 的圆,圆心在 O 点,轨道在垂直纸面向外的匀强磁场中,磁感应强度为 B .为引出离子束,使用磁屏蔽通道法设计引出器.引出器原理如图1所示,一对圆弧形金属板组成弧形引出通道,通道的圆心位于 O' 点(O' 点图中未画出).引出离子时,令引出通道内磁场的磁感应强度降低,从而使离子从 P 点进入通道,沿通道中心线从 Q 点射出.已知 OQ 长度为 L , OQ 与 OP 的夹角为 θ ,有以下3问:

- (1) 求离子的电荷量 q 并判断其正负;
- (2) 离子从 P 点进入, Q 点射出,通道内匀强磁场的磁感应强度应降为 B' ,求 B' ;
- (3) 换用静电偏转法引出离子束,维持通道内

的原有磁感应强度 B 不变,在内外金属板间加直流电压,两板间产生径向电场,忽略边缘效应.为使离子仍从 P 点进入, Q 点射出,求通道内引出轨迹处电场强度 E 的方向和大小.

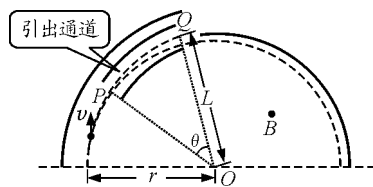


图1 原题题图

回旋加速器离子引出装置的作用就是把离子束引出加速器外,并通过输送系统送到靶室,这是个比较复杂的问题,该高考题考查的磁屏蔽通道法和静电偏转法引出离子束是比较早期的两种引出方式,下面结合高考题逐一分析.

1.1 磁屏蔽通道法

为了保证各种能量的离子束能准确进入靶室,引出系统安装一个高效能的磁屏蔽通道是很有必要的,屏蔽通道干扰磁场,并提供低磁阻的磁通路,用磁屏蔽的方法来解决电磁干扰问题最大的好处是不会影响电路的正常工作.对于加速质子(10 MeV到30 MeV),屏蔽通道全长35 cm左右,通道的屏蔽效率可达99%.离子在进入磁屏蔽通道前和后的运动(图2)分别满足关系式

$$Bqv = \frac{mv^2}{r}$$

$$B'qv = \frac{mv^2}{R}$$

B 和 B' 分别为进入磁屏蔽通道前和后的平均磁场, r 和 R 分别为进入磁屏蔽通道前和后的离子轨迹曲率半径, 通过以上两式可得出曲率半径的增量为

$$\Delta R = R - r = \frac{mv(B - B')}{qBB'}$$

进入磁屏蔽通道后磁场变小, 曲率半径增大, 离子离开原来的轨道, 进入磁场迅速减弱的边缘地区, 最后引出真空加速室. 分析清楚后, 高考题的解答马上迎刃而解. 在这里为了提高磁屏蔽效率, 磁屏蔽通道应该选取钢、铁、镍合金等高磁导率的材料, 高考题的第(3)小题考查了静电偏转法引出离子束的方法.

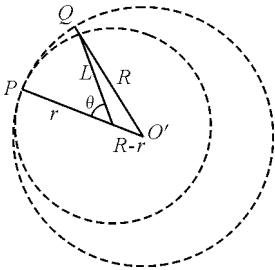


图2 离子在进入磁屏蔽通道前和后的运动

1.2 静电偏转引出装置

静电偏转引出装置适用于非相对论回旋加速器, 它由一对弧形金属电极构成, 如图1所示在内侧板和外侧板加直流高压 U , 其中内侧板接地, 两板间形成一个朝外的电场, 静电偏转引出通道入口的平均磁场为 B , 那么离子在进入偏转电场前和后的运动分别满足下列关系式

$$Bqv = \frac{mv^2}{r}$$

$$Bqv - Eq = \frac{mv^2}{R}$$

其中

$$E = \frac{U}{d}$$

d 为金属电极的间距, 曲率半径的增量为

$$\Delta R = R - r$$

对于非相对论回旋加速器离子的动能

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

通过以上两式可得出

$$\Delta R = \frac{2E_k r}{2E_k - Eq} - r = \frac{Eq r^2}{2E_k - Eq}$$

由于

$$Bqv \gg Eq$$

即

$$mv^2 = 2E_k \gg Eq r$$

最终得到

$$\Delta R = \frac{Uqr^2}{2E_k d}$$

曲率半径增大使离子离开原来的平衡轨道, 最后被引出真空加速器, 与上面磁屏蔽通道法相比, 静电偏转引出的优点在于电场径向分布范围明确, 它的边界控制在 0.1 mm 范围, 但是跟磁屏蔽通道法一样缺点都是引出效率不高^[2]. 相对以上两种引出装置负离子束的引出非常方便而且高效.

1.3 负离子束的引出

如果回旋加速器加速的是负离子, 那么可以在引出半径上安装一个电子剥离膜, 当负离子穿过该膜时电子被剥离转变成正离子, 那么轨道曲率半径反转, 正离子自动弹出加速器, 这种引出方法效率非常高, 而且改变剥离膜的位置, 就可以在不改变加速器其他参数的条件下, 改变引出离子的能量. 回旋加速器的引出装置除了以上3种方式外还有共振引出, 其原理是利用有害共振在一定条件下可以有效用来引出离子, 对于高中生来说原理相对复杂, 不求掌握, 在这里不详细介绍.

对于加速器, 现行高中教材浙江省普通高中课程标准实验教科书《物理》还介绍了电子感应加速器和直线加速器的原理, 在这里笔者也简单分析下它们的引出装置.

2 电子感应加速器及其引出装置

《物理·选修3-2》第四章第5节提到的电子感应加速器, 具有容易制造、便于调整使用, 价格较便宜等优点, 其结构示意图如图3所示. 从1940年建成第一台电子感应加速器以来, 一直到70年代, 电子感应加速器在国民经济的各方面被广泛采用, 主要用于工业 γ 射线探伤和射线治疗癌症(利用电子或 γ 射线)等方面. 它利用变化的磁场产生感生电场来加速电子, 根据麦克斯韦方程, 该电场需要满足

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

将电子注入到旋涡电场进行加速的同时利用磁场将电子控制在恒定的轨道加速, 满足式子

$$F = B(t)ev = \frac{mv^2}{r}$$

理论证明,要使电子在不断增长的磁场中沿着一个半径不变的圆形轨道加速运动,必须保持该轨道所包围的面积内的平均磁感应强度为轨道上的磁感应强度 $B(t)$ 的 2 倍. 当电子能量逐渐增加时,根据动力学理论,加速粒子在加速状态下向外辐射电磁波,从而损失能量. 电子能量的增长率因为辐射而逐渐减慢,而磁场比仍按 2 : 1 上升,这就使电子能量的增长率与轨道上的磁感应强度 $B(t)$ 的增长率失去平衡,电子就容易碰到真空壁上损失. 所以电子感应加速器电子的引出时刻必须选在电子没有碰到真空壁以前.

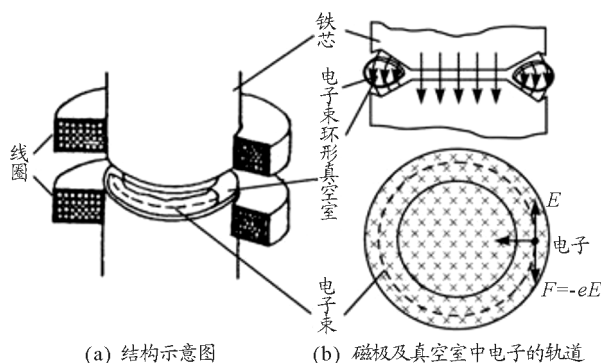


图3 电子感应加速器

那么如何来引出电子束呢? 根据以上的原理分析,可以采用引出线圈法,也就是破坏磁场的 2 : 1 关系. 在磁极上加一个引出线圈,如图 4 所示,经加速后电子所能达到的最高电子能量是有限的,到了所需能量,就要及时引出电子束并利用,此时给引出线圈加一个脉冲电流,产生一个附加旋涡电场,使电子加速,则圆弧运动的半径增大,打到外靶上[图 5(a)],也可以使电子减速,则圆弧运动的半径减小,打到内靶上[图 5(b)],从而引出电子束,引出原理比较简单. 电子感应加速器能量最高是 320 MeV,但是从加速效率角度考虑,加速到数十 MeV 比较合理^[3].

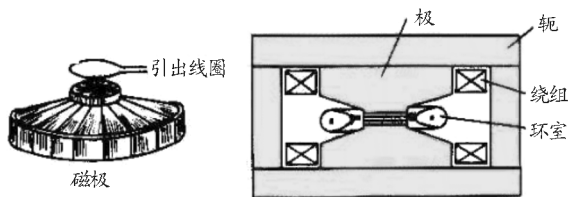


图4 在磁极上加一个引出线圈

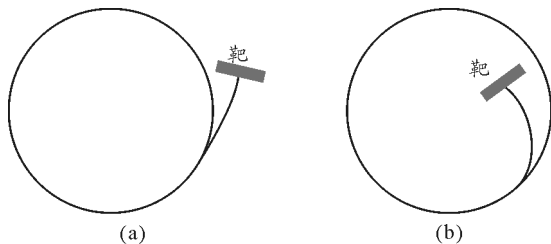


图5 引出的电子束的运动轨迹

3 直线加速器

如果按被加速粒子的种类,可分为电子直线加速器、质子直线加速器和重离子直线加速器. 我们以电子直线加速器为例,相比电子感应加速器,自 20 世纪 90 年代以来,电子直线加速器明显增长,2000 年进入高速发展期,它以能量大、操作安全、工作效率高等优点取代电子感应加速器. 利用电场使带电粒子加速的直线加速器,为了使粒子获得的能量越高,可以采用多次加速,即多级加速器^[3],但是这种加速器设备庞大,长度可以达到几 km 甚至几十 km. 需要强调的是直线加速器可不必设计复杂的粒子束引出的装置,粒子走到直线加速器尽头,就自动地射出,而且加速的粒子聚集为很窄的一束,能量相当均匀.

对于高中物理教学所碰到的 3 种加速器,在实验和应用中都要把粒子束引出加速器外,引出方法有些简单有些复杂. 比如回旋加速器粒子流的引出就是一个复杂的问题,它一直限制着回旋加速器性能的提高. 早期的磁屏蔽通道法和静电偏转法引出效率不高,但是现在仍旧普遍使用,后来发展起来的负离子引出和共振引出在引出效率上有较大提高,但是也存在着一定的局限性,所以往往可以结合两种方法如静电偏转法和共振引出以提高引出效率. 粒子的引出效率和引出粒子的品质问题都是科学家从理论到实验不断要研究的问题,所以也是我们高考的热点问题.

参考文献

- 1 陈佳洱. 加速器物理基础. 北京:北京大学出版社,2012. 218 ~ 220
- 2 姚泽恩, 电子感应加速器, <http://www.docin.com/p-105617908.html&s=86b10d55a29ba109e34d700dcae-6f740>
- 3 普通高中课程标准实验教科书《物理》选修 3-1(第二版). 北京:人民教育出版社,2009. 101