

第 8.3 节 带电粒子在组合场中的运动

要点一 质谱仪与回旋加速器

1. 质谱仪

(1)构造: 如图 8-3-1 所示, 由粒子源、加速电场、偏转磁场和照相底片等构成。



图 8-3-1

(2)原理: 粒子由静止被加速电场加速, $qU = \frac{1}{2}mv^2$ 。

粒子在磁场中做匀速圆周运动, 有 $qvB = m\frac{v^2}{r}$ 。

由以上两式可得 $r = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2mU}{q}}$, $m = \frac{qB^2r^2}{2U}$, $\frac{q}{m} = \frac{2U}{B^2r^2}$ 。

2. 回旋加速器



图 8-3-2

(1)构造: 如图 8-3-2 所示, D_1 、 D_2 是半圆形金属盒, D 形盒的缝隙处接交流电源, D 形盒处于匀强磁场中。

(2)原理: 交流电的周期和粒子做圆周运动的周期相等, 粒子经电场加速, 经磁场回旋, 由 $qvB = m\frac{v^2}{r}$, 得 $E_{km} = \frac{1}{2}q^2B^2r^2/m$, 可见粒子获得的最大动能由磁感应强度 B 和 D 形盒半径 r 决定, 与加速电压无关。

[典例 1] (多选)如图 8-3-3 所示, 一束带电粒子以一定的初速度沿直线通过由相互正交的匀强磁场(磁感应强度为 B)和匀强电场(电场强度为 E)组成的速度选择器, 然后粒子通过平板 S 上的狭缝 P 进入另一匀强磁场(磁感应强度为 B'), 最终打在 A_1A_2 上, 下列表述正确的是()



图 8-3-3

- A. 粒子带负电
- B. 所有打在 A_1A_2 上的粒子, 在磁感应强度为 B' 的磁场中的运动时间都相同
- C. 能通过狭缝 P 的带电粒子的速率等于 $\frac{E}{B}$
- D. 粒子打在 A_1A_2 的位置越靠近 P , 粒子的比荷 $\frac{q}{m}$ 越大

[典例 2] 回旋加速器是用来加速带电粒子, 使它获得很大动能的仪器, 其核心部分是两个 D 形金属扁盒, 两盒分别和一高频交流电源两极相接, 以便在盒间的窄缝中形成匀强电场, 使粒子每次穿过狭缝都得到加速, 两盒放在磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 磁场方向垂直于盒底面, 粒子源置于盒的圆心附近, 若粒子源射出的粒子带电荷量为 q , 质量为 m , 粒子最大回旋半径为 R_m , 其运动轨迹如图 8-3-4 所示。问:



图 8-3-4

- (1) D 形盒内有无电场?
- (2) 粒子在盒内做何种运动?
- (3) 所加交流电压频率应是多大, 粒子运动的角速度为多大?
- (4) 粒子离开加速器时速度为多大? 最大动能为多少?
- (5) 设两 D 形盒间电场的电势差为 U , 盒间距离为 d , 其间电场均匀, 求把静止粒子加速到上述能量所需时间。

[针对训练]

1. (多选)如图 8-3-5 是质谱仪的工作原理示意图。带电粒子被加速电场加速后,进入速度选择器。速度选择器内相互正交的匀强磁场和匀强电场的强度分别为 B 和 E 。平板 S 上有可让粒子通过的狭缝 P 和记录粒子位置的胶片 A_1A_2 。平板 S 下方有强度为 B_0 的匀强磁场。下列表述正确的是()

{INCLUDEPICTURE"15WL8-78.TIF"}

图 8-3-5

- A. 质谱仪是分析同位素的重要工具
- B. 速度选择器中的磁场方向垂直于纸面向外
- C. 能通过狭缝 P 的带电粒子的速率等于 E/B
- D. 粒子打在胶片上的位置越靠近狭缝 P , 粒子的电荷量越小

2. 回旋加速器是加速带电粒子的装置,其主体部分是两个 D 形金属盒。两金属盒处在垂直于盒底的匀强磁场中, a 、 b 分别与高频交流电源两极相连接,下列说法正确的是()

{INCLUDEPICTURE"15WL8-79.TIF"}

图 8-3-6

- A. 离子从磁场中获得能量
- B. 带电粒子的运动周期是变化的
- C. 离子由加速器的中心附近进入加速器
- D. 增大金属盒的半径, 粒子射出时的动能不变

要点二 带电粒子在交变电、磁场中的运动

(一)交变磁场

[典例 1] 如图 8-3-7 甲所示,间距为 d 、垂直于纸面的两平行板 P 、 Q 间存在匀强磁场。取垂直于纸面向里为磁场的正方向,磁感应强度随时间的变化规律如图乙所示。 $t=0$ 时刻,一质量为 m 、带电量为 $+q$ 的粒子(不计重力),以初速度 v_0 由 Q 板左端靠近板面的位置,沿垂直于磁场且平行于板面的方向射入磁场区。当 B_0 和 T_B 取某些特定值时,可使 $t=0$ 时刻入射的粒子经 Δt 时间恰能垂直打在 P 板上(不考虑粒子反弹)。上述 m 、 q 、 d 、 v_0 为已知量。

{INCLUDEPICTURE"14GS-20.TIF"} {INCLUDEPICTURE"14GS-21.TIF"}

图 8-3-7

- (1)若 $\Delta t = \frac{1}{2}T_B$, 求 B_0 ;
- (2)若 $\Delta t = \frac{3}{2}T_B$, 求粒子在磁场中运动时加速度的大小;
- (3)若 $B_0 = \frac{4mv_0}{qd}$, 为使粒子仍能垂直打在 P 板上, 求 T_B 。

(二)交变电场+恒定磁场

[典例 2] 如图 8-3-8 甲所示,带正电粒子以水平速度 v_0 从平行金属板 MN 间中线 OO' 连续射入电场中。 MN 板间接有如图乙所示的随时间 t 变化的电压 U_{MN} , 两板间电场可看作是均匀的,且两板外无电场。紧邻金属板右侧有垂直纸面向里的匀强磁场 B , 分界线为 CD , EF 为屏幕。金属板间距为 d , 长度为 l , 磁场的宽度为 d 。已知: $B=5\times 10^{-3}\text{ T}$, $l=d=0.2\text{ m}$, 每个带正电粒子的速度 $v_0=10^5\text{ m/s}$, 比荷为 $\frac{q}{m}=10^8\text{ C/kg}$, 重力忽略不计, 在每个粒子通过电场区域的极短时间内, 电场可视作是恒定不变的。试求:

{INCLUDEPICTURE"15WL8-85.TIF"}

图 8-3-8

- (1)带电粒子进入磁场做圆周运动的最小半径;
- (2)带电粒子射出电场时的最大速度;
- (3)带电粒子打在屏幕上的范围。

(三)交变磁场+恒定电场

[典例 3] 电视机显像管中需要用变化的磁场来控制电子束的偏转。图 8-3-9(a)为显像管工作原理示意图，阴极 K 发射的电子束(初速不计)经电压为 U 的加速电场后，进入一圆形匀强磁场区，磁场方向垂直于圆面(以垂直圆面向里为正方向)，磁场区的中心为 O ，半径为 r ，荧光屏 MN 到磁场区中心 O 的距离为 L 。当不加磁场时，电子束将通过 O 点垂直打到屏幕的中心 P 点。当磁场的磁感应强度随时间按图(b)所示的规律变化时，在荧光屏上得到一条长为 $2\sqrt{3}L$ 的亮线。由于电子通过磁场区的时间很短，可以认为在每个电子通过磁场区的过程中磁感应强度不变。已知电子的电荷量为 e ，质量为 m ，不计电子之间的相互作用及所受的重力。求：

{INCLUDEPICTURE"15WL8-87.TIF"}

图 8-3-9

(1)电子打到荧光屏上时速度的大小；

(2)磁感应强度的最大值 B_0 。

(四)交变电、磁场

[典例 4] 某空间存在着一个变化的电场和一个变化的磁场，电场方向向右(如图 8-3-10 甲中由 B 到 C 的方向)，电场变化如图乙中 $E-t$ 图像，磁感应强度变化如图丙中 $B-t$ 图像。在 A 点，从 $t=1\text{ s}$ (即 1 s 末)开始，每隔 2 s ，有一个相同的带电粒子(重力不计)沿 AB 方向(垂直于 BC)以速度 v 射出，恰能击中 C 点，若 $AC=2BC$ 且粒子在 AB 间运动的时间小于 1 s ，求：

(1)图线上 E_0 和 B_0 的比值，磁感应强度 B 的方向；

(2)若第 1 个粒子击中 C 点的时刻已知为 $(1+\Delta t)\text{ s}$ ，那么第 2 个粒子击中 C 点的时刻是多少？

{INCLUDEPICTURE"15WL8-89.TIF"}

图 8-3-10

要点三 带电粒子在四类组合场中的运动

(一)先电场后磁场

[典例 1] 离子推进器是太空飞行器常用的动力系统。某种推进器设计的简化原理如图 8-3-13 甲所示，截面半径为 R 的圆柱腔分为两个工作区。I 为电离区，将氙气电离获得 1 价正离子；II 为加速区，长度为 L ，两端加有电压，形成轴向的匀强电场。I 区产生的正离子以接近 0 的初速度进入 II 区，被加速后以速度 v_M 从右侧喷出。

I 区内有轴向的匀强磁场，磁感应强度大小为 B ，在离轴线 $\frac{R}{2}$ 处的 C 点持续射出一定速率范围的电子。假设射出的电子仅在垂直于轴线的截面上运动，截面如图乙所示(从左向右看)。电子的初速度方向与中心 O 点和 C 点的连线成 α 角($0 < \alpha \leq 90^\circ$)。推进器工作时，向 I 区注入稀薄的氙气。电子使氙气电离的最小速率为 v_0 ，电子在 I 区内不与器壁相碰且能到达的区域越大，电离效果越好。已知离子质量为 M ；电子质量为 m ，电量为 e 。(电子碰到器壁即被吸收，不考虑电子间的碰撞)

(1)求 II 区的加速电压及离子的加速度大小；

(2)为取得好的电离效果，请判断 I 区中的磁场方向(按图乙说明是“垂直纸面向里”或“垂直纸面向外”)；

(3) α 为 90° 时，要取得好的电离效果，求射出的电子速率 v 的范围；

(4)要取得好的电离效果，求射出的电子最大速率 v_{\max} 与 α 角的关系。

{INCLUDEPICTURE"14LZZJ12.TIF"}

图 8-3-13

[典例 2] 如图 8-3-14 所示的空间中有场强为 E 的匀强电场和磁感应强度为 B 的匀强磁场， y 轴为两种分界线，图中虚线为磁场区的右边界，现有一质量为 m 、带电量为 $-q$ 的带电粒子(不计重力)，从电场中 P 点以初速度 v_0 沿 x 轴正方向运动。已知 P 点的坐标为 $(-L, 0)$ ，且 $L = \frac{mv_0^2}{Eq}$ 。试求：

{INCLUDEPICTURE"15WL8-93.TIF"}

图 8-3-14

- (1)要使带电粒子能穿过磁场区而不再返回到电场中，磁场的宽度 d 应满足什么条件？
- (2)要使带电粒子恰好不能从右边界穿出磁场区，则带电粒子在磁场中运动的时间为多少？

(二)先磁场后电场

[典例 3] 如图 8-3-16，在第一象限存在匀强磁场，磁感应强度方向垂直于纸面(xOy 平面)向外；在第四象限存在匀强电场，方向沿 x 轴负向。在 y 轴正半轴上某点以与 x 轴正向平行、大小为 v_0 的速度发射出一带正电荷的粒子，该粒子在 $(d,0)$ 点沿垂直于 x 轴的方向进入电场。不计重力。若该粒子离开电场时速度方向与 y 轴负方向的夹角为 θ ，求

{INCLUDEPICTURE"14DG-42.TIF"}

图 8-3-16

(1)电场强度大小与磁感应强度大小的比值；

(2)该粒子在电场中运动的时间。

(三)先后两个不同磁场

[典例 4] 如图 8-3-17 所示,在坐标系 xOy 的第一、第三象限内存在相同的匀强磁场,磁场方向垂直于 xOy 平面向里;第四象限内有沿 y 轴正方向的匀强电场,电场强度大小为 E 。一带电量为 $+q$ 、质量为 m 的粒子,自 y 轴上的 P 点沿 x 轴正方向射入第四象限,经 x 轴上的 Q 点进入第一象限,随即撤去电场,以后仅保留磁场。已知 $OP=d$, $OQ=2d$ 。不计粒子重力。

{INCLUDEPICTURE"15WL8-96.tif"}

图 8-3-17

- (1)求粒子过 Q 点时速度的大小和方向。
- (2)若磁感应强度的大小为一确定值 B_0 ,粒子将以垂直 y 轴的方向进入第二象限,求 B_0 。
- (3)若磁感应强度的大小为另一确定值,经过一段时间后粒子将再次经过 Q 点,且速度与第一次过 Q 点时相同,求该粒子相邻两次经过 Q 点所用的时间。

(四)先后多个电、磁场

[典例 5] 如图 8-3-18 所示，足够大的平行挡板 A_1 、 A_2 竖直放置，间距 $6L$ ，两板间存在两个方向相反的匀强磁场区域 I 和 II，以水平面 MN 为理想分界面。I 区的磁感应强度为 B_0 ，方向垂直纸面向外。 A_1 、 A_2 上各有位置正对的小孔 S_1 、 S_2 ，两孔与分界面 MN 的距离均为 L 。质量为 m 、电荷量为 $+q$ 的粒子经宽度为 d 的匀强电场由静止加速后，沿水平方向从 S_1 进入 I 区，并直接偏转到 MN 上的 P 点，再进入 II 区， P 点与 A_1 板的距离是 L 的 k 倍，不计重力，碰到挡板的粒子不予考虑。

{INCLUDEPICTURE"14GD-20.TIF"}

图 8-3-18

(1)若 $k=1$ ，求匀强电场的电场强度 E ；

(2)若 $2 < k < 3$ ，且粒子沿水平方向从 S_2 射出，求出粒子在磁场中的速度大小 v 与 k 的关系式和 II 区的磁感应强度 B 与 k 的关系式。