# 第十章 5 带电粒子在电场中的运动

## 问题？

电子被加速器加速后轰击重金属靶时，会产生射线，可用于放射治疗。图中展示了一台医用电子直线加速器。



电子在加速器中是受到什么力的作用而加速的呢？

## 带电粒子在电场中的加速

在现代科学实验和技术设备中，常常利用电场来改变或控制带电粒子的运动。利用电场使带电粒子加速，就是其中一种简单的情况。在这种情况中，带电粒子的速度方向与电场强度的方向相同或相反。

分析带电粒子加速的问题，常常有两种思路：一种是利用牛顿第二定律结合匀变速直线运动公式来分析；另一种是利用静电力做功结合动能定理来分析。

当解决的问题属于匀强电场且涉及运动时间等描述运动过程的物理量时，适合运用前一种思路分析；当问题只涉及位移、速率等动能定理公式中的物理量或非匀强电场情景时，适合运用后一种思路分析。

你能说一说本章第 3 节例题中运用了哪种解决思路吗？

### 【例题1】

如图 10.5-1 甲，某装置由多个横截面积相同的金属圆筒依次排列，其中心轴线在同一直线上，圆筒的长度依照一定的规律依次增加。序号为奇数的圆筒和交变电源的一个极相连，序号为偶数的圆筒和该电源的另一个极相连。

图 10.5-1

1

3

5

7

交变

电流

*u*

*− u*

*T*

2*T*

3*T*

0

*t*

*U*

乙

甲

2

0

4

6

8

交变电源两极间电势差的变化规律如图 10.5-1 乙所示。在 *t* = 0 时，奇数圆筒相对偶数圆筒的电势差为正值，此时位于和偶数圆筒相连的金属圆板（序号为 0）中央的一个电子，在圆板和圆筒 1 之间的电场中由静止开始加速，沿中心轴线冲进圆筒 1。

为使电子运动到圆筒与圆筒之间各个间隙中都能恰好使静电力的方向跟运动方向相同而不断加速，圆筒长度的设计必须遵照一定的规律。若已知电子的质量为 *m*、电子电荷量为 *e*、电压的绝对值为 *u*，周期为 *T*，电子通过圆筒间隙的时间可以忽略不计。则金属圆筒的长度和它的序号之间有什么定量关系？第 *n* 个金属圆筒的长度应该是多少？

**分析** 如图 10.5-1，由于金属导体内部的电场强度等于 0，电子在各个金属圆筒内部都不受静电力的作用，它在圆筒内的运动是匀速直线运动，只是在相邻圆筒的间隙中才会被加速。

为使电子在所有相邻圆筒的间隙中都能受到向右的静电力，电子所到达间隙处的电场强度都必须向左。在同一间隙中，电场强度的方向是周期性变化的，每半个周期，电场强度的方向左右变化一次。如果电子匀速穿过每个圆筒运动的时间恰好等于交变电压的周期的一半，它就能踏准节奏，每到达一个间隙，恰好是该间隙的电场强度变为向左的时刻。

由于电子通过每一个间隙所增加的动能都等于 *eu*，由此可知电子在各个圆筒内的动能和速度，而各个圆筒的长度应该等于电子在该圆筒中的速度大小与交变电压的半个周期的乘积。

**解** 设电子进入第 *n* 个圆筒后的速度为 *v*，根据动能定理有

*neu* =*mv*2

得

*v* =

第 *n* 个圆筒的长度为

*l* = *vt* ==

圆筒长度跟圆筒序号的平方根 成正比，第 *n* 个圆筒的长度是 。

## 带电粒子在电场中的偏转

带电粒子的初速度方向跟电场方向垂直时，静电力方向跟速度方向不在同一直线上，带电粒子的运动轨迹将发生偏转。

在匀强电场中，带电粒子的运动轨迹是一条抛物线，类似平抛运动的轨迹。对这种带电粒子运动的分析思路，跟分析平抛运动是一样的，不同的仅仅是平抛运动物体所受的是重力，而上述带电粒子所受的是静电力。

### 【例题2】

如图 10.5-2，两相同极板 A 与 B 的长度 *l* 为 6.0 cm，相距 *d* 为 2 cm，极板间的电压 *U* 为 200 V。一个电子沿平行于板面的方向射入电场中，射入时的速度 *v*0 为3.0×10 7 m/s。把两板间的电场看作匀强电场，求电子射出电场时沿垂直于板面方向偏移的距离 *y* 和偏转的角度 *θ*。

*d*

*e*

*l*

*y*

+ + + + + + + + + +

*v*0

A

B

− − − − − − − − − −

图 10.5-2

**分析** 电子在垂直于板面的方向受到静电力。由于电场不随时间改变，而且是匀强电场，所以整个运动中在垂直于板面的方向上加速度是不变的。

**解** 电子在电场中运动的加速度是

*a* = = = （1）

电子射出电场时，在垂直于板面方向偏移的距离为

*y* = *at*2 （2）

其中 *t* 为飞行时间。由于电子在平行于板面的方向不受力，所以在这个方向做匀速直线运动，由 *l* = *v*0*t* 可求得

*t* = （3）

把（1）（3）式代入（2）式得到

*y* =

代入数值后，解得

*y* = 0.35 cm

即电子射出时沿垂直于板面的方向偏离 0.35 cm。

由于电子在平行于板面的方向不受力，它离开电场时，这个方向的分速度仍是 *v*0（图10.5-3），垂直于板面的分速度是

*v*⊥ = *at* =

*v*⊥

*v*

*v*0

*θ*

图 10.5-3

则离开电场时的偏转角度 *θ* 可由下式确定

tan*θ* = =

代入数值后，解得

*θ* = 6.7°

电子射出电场时沿垂直于板面方向偏移的距离是 0.35 cm，偏转的角度是 6.7°。

### 拓展学习

**示波管的原理**

有一种电子仪器叫作示波器，可以用来观察电信号随时间变化的情况。示波器的核心部件是示波管，图 10.5-4 是它的原理图。它由电子枪、偏转电极和荧光屏组成，管内抽成真空。电子枪的作用是产生高速飞行的一束电子，前面例题 2 实际上讲的就是示波管的原理。

亮斑

电子枪

X

+

偏转电极

X′

−

X′

X

Y

Y′

亮斑

荧光屏

Y

Y′

图 10.5-4 示波管原理图

甲 示波管的结构

乙 荧光屏（从右向左看

如果在偏转电极 XX′之间和偏转电极 YY′之间都没有加电压，电子束从电子枪射出后沿直线运动，打在荧光屏中心，在那里产生一个亮斑。

示波管的 YY′偏转电极上加的是待测的信号电压。XX′偏转电极通常接入仪器自身产生的锯齿形电压（图 10.5-5），叫作扫描电压。如果信号电压是周期性的，并且扫描电压与信号电压的周期相同，那么，就可以在荧光屏上得到待测信号在一个周期内随时间变化的稳定图像了。

*t*1

2*t*1

3*t*1

*t*

*U*X

*O*

图 10.5-5扫描电压

## 科学漫步

**范德格拉夫静电加速器**

范德格拉夫静电加速器由两部分组成，一部分是产生高电压的装置，叫作范德格拉夫起电机；另一部分是利用高电压加速带电粒子的加速管。

图10.5-6是起电机部分的示意图。金属球壳固定在绝缘支柱顶端，绝缘材料制成的传送带套在两个转轮上，由电动机带动循环运转。E 和F是两排金属针（叫作电刷）。

电刷F

接高压电源

电刷E

绝缘支座

传送带

金属球壳

图 10.5-6 范德格拉夫起电机示意图

当电刷 E 与几万伏的直流高压电源的正极接通时，E 与大地之间就有几万伏的电势差。由于尖端放电，正电荷被喷射到传送带上，并被传送带带着向上运动。当正电荷到达电刷 F 附近时，F 上被感应出异号电荷。由于尖端放电，F 上的负电荷与传送带上的正电荷中和，从而使传送带失去电荷，而 F 上剩下了正电荷。由于导体带电电荷只能存在于外表面，所以，F 上的正电荷立即传到金属壳的外表面。这样，由于传送带的运送，正电荷不断从直流电源传到球壳的外表面，从而在金属壳与大地之间形成高电压。

由于电晕放电、局部尖端放电和漏电等现象，球壳与大地间的电压不能无限制提高。目前可达数百万伏。

带电粒子的加速是在加速管中进行的。加速管安装在起电机的绝缘支柱里面，管内抽成真空。管顶有离子发生装置，即粒子源，底部是靶。粒子源产生的正离子在强电场的作用下，经过加速可以获得很大的动能。由于粒子加速运动的轨迹是直线，这类加速器是一种直线加速器。

在医院，用直线加速器产生的粒子束（射线）治疗某些癌症，称为放射治疗。与使用钴 60 等放射性物质的放射治疗相比，使用直线加速器不需要放射源，不开机时完全没有射线，更加安全，也便于管理。

## 练习与应用

本节练习共 6 道题，既有知识运用训练，也有思想方法的提炼，还有理论联系实际的应用。第 1 题要求归纳该题的几种解法，比较这些解法哪种更简便。归纳和比较非常有意义，既可以开阔学生的思路，又可以使学生发现动能定理的优越性。第 2 题以光电效应实验作为背景，求电子的最大初速度。此题对运算的要求并不高，关键是要理解在什么条件下电流表会没有电流。本题通过分析电子的受力情况和运动情况，强化学生应用功能关系的意识，提高综合分析能力。第 3、4、5 题都是带电粒子在匀强电场中的偏转问题，其中第 4 题实质上是证明题。证明题使用的语言应该简洁、严密、逻辑性强，要对学生加强这方面的训练。第 6 题通过动能定理来研究带电粒子在电场中的运动，物理情景十分典型。

1．真空中有一对平行金属板，相距 6.2 cm，两板电势差为 90 V。二价的氧离子由静止开始加速，从一个极板到达另一个极板时，动能是多大？这个问题有几种解法？哪种解法比较简便？

**参考解答**：2.9×10−17 J

2．某种金属板 M 受到一束紫外线照射时会不停地发射电子，射出的电子具有不同的方向，速度大小也不相同。在 M 旁放置一个金属网N。如果用导线将 M、N 连起来，从 M 射出的电子落到 N 上便会沿导线返回 M，从而形成电流。现在不把 M、N 直接相连，而按图 10.5-7 那样在 M、N 之间加电压 *U*，发现当 *U* > 12.5 V 时电流表中就没有电流。

M

N

*+*

*U*

A

图 10.5-7

问：被这束紫外线照射出的电子，最大速度是多少？

**参考解答**：2.10×106 m/s

3．先后让一束电子和一束氢核通过同一对平行板形成的偏转电场，进入时速度方向与电场方向垂直。在下列两种情况下，分别求出电子偏转角的正切与氢核偏转角的正切之比。

（1）电子与氢核的初速度相同。

（2）电子与氢核的初动能相同。

**参考解答**：（1）；（2）1

4．让一价氢离子、一价氦离子和二价氦离子的混合物由静止开始经过同一加速电场加速，然后在同一偏转电场里偏转，它们是否会分离为三股粒子束？请通过计算说明。

**参考解答**：得 tan *θ* = ，可见粒子的偏转角度相同；粒子在静电力方向的偏转距离为 *y* = *at*2 = = ，可见粒子的偏转距离也相同，所以这些粒子不会分成三股。

5．电子从静止出发被 1 000 V 的电压加速，然后沿着与电场垂直的方向进入另一个电场强度为 5 000 N/C 的匀强偏转电场。已知偏转电极长 6 cm，求电子离开偏转电场时的速度及其与进入偏转电场时的速度方向之间的夹角。

**参考解答**：1.9×107 m/s．8.53°

6．某些肿瘤可以用“质子疗法”进行治疗。在这种疗法中，质子先被加速到具有较高的能量，然后被引向轰击肿瘤，杀死其中的恶性细胞，如图 10.5-8 所示。若质子的加速长度为 4.0 m，要使质子由静止被加速到 1.0×107 m/s，加速匀强电场的电场强度应是多少？

图 10.5-8

**参考解答**：1.30×105 N/C