

2023年重庆高考物理压轴题的分析与启示

李忠相 吕海斌

(重庆市第一中学校 重庆 400030)

(收稿日期:2023-06-27)

摘要:2023年高考重庆卷物理压轴题延续2022年压轴题的特点,综合性强、思维难度大.文中给出此题目的分析与解答,总结分析了试题的几个显著特点以及对学习和备考的启示.

关键词:高考真题;压轴题;备考建议;核心素养;关键能力

1 问题源起

2023年高考物理贯彻党的二十大精神,落实立德树人根本任务,依托高考评价体系,衔接高中课程标准,注重深化基础,丰富问题情境,增强探究性,突出思维考查,激发学生崇尚科学、探索未知的兴趣,引导学生夯实知识基础、发展物理学科核心素养,服务拔尖创新人才选拔、新时代教育评价改革和教育强国建设.

2023年高考重庆卷物理第15题,作为全卷的压轴题,综合性强、思维难度大,突出体现了对学生关键能力和综合素质的考查.据了解,完整解出此题的考生数量极少,本文给出此题的分析和求解过程,并分析此题对高考备考的启示.

【题目】某同学设计了一种粒子加速器的理想模型.如图1,在 xOy 平面内 x 轴下方充满垂直于纸面向外的匀强磁场. x 轴上方被某边界分割成两部分,一部分充满匀强电场,电场强度与 y 轴负方向成 α 角,另一部分无电场.该边界与 y 轴交于 M 点,与 x 轴交于 N 点.与 x 轴正方向成 α 角斜向下运动的带电粒子才能进入磁场.从 M 点向电场区内发射一个比荷为 $\frac{q}{m}$ 的带电粒子A,其速度大小为 v_0 ,方向与电场方向垂直,仅在电场中运动时间 T 后从 N 点进入磁场,且通过 N 点的速度大小为 $2v_0$.忽略边界效应,不计粒子重力.

(1)求 α 角的大小以及 M 、 N 两点的电势差 U_{MN} ;

(2)在该边界上任意位置沿垂直于电场强度方向射入的带电粒子,只要速度大小合适就能通过 N 点进入磁场,求 N 点的横坐标及电场的边界方程;

(3)若粒子第一次进入磁场时磁感应强度为 B_1 ,之后粒子每次经过 N 点磁感应强度变为原来的一半.则粒子A从 M 点发射后,每次加速后均能通过 N 点,求 B_1 及粒子A从发射到第 n 次通过 N 点的时间 t_n .

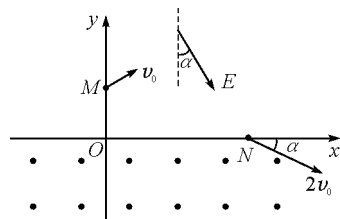


图1 题目题图

2 分析与解

(1)粒子以垂直于电场的方向进入电场后,由于合外力恒定且与初速度垂直,故粒子做类平抛运动.由题意,粒子经过 M 点和 N 点时的速度矢量关系如图2所示.

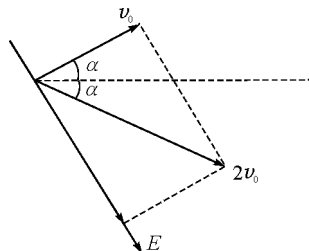


图2 速度关系图

由几何关系有

$$\cos 2\alpha = \frac{v_0}{2v_0} = \frac{1}{2} \quad (1)$$

得

$$\alpha = \frac{\pi}{6} \quad (2)$$

从M点到N点,由动能定理有

$$qU_{MN} = \frac{1}{2}m(2v_0)^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (3)$$

得M、N两点的电势差为

$$U_{MN} = \frac{3mv_0^2}{2q} \quad (4)$$

(2)如图3所示,对于边界上任意一点P,设其坐标为(x,y).

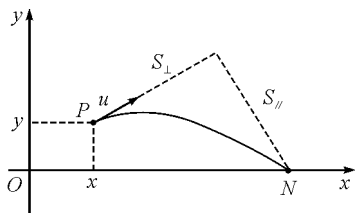


图3 位移关系图

由该点垂直于电场方向射入电场,若速度大小为u的粒子能从N点进入磁场,在沿电场方向的分运动为初速度为零的匀加速运动,将该粒子在电场中的加速度设为a,在垂直于电场方向的分运动为匀速直线运动,从P点到N点的时间设为t,则在N点处

$$v_{//} = at \quad (5)$$

$$v_{\perp} = u \quad (6)$$

粒子能进入磁场,要求

$$\frac{v_{//}}{v_{\perp}} = \tan 2\alpha \quad (7)$$

从P点到N点的过程中,沿电场和垂直于电场方向的位移分别为

$$S_{//} = \frac{1}{2}at^2 \quad (8)$$

$$S_{\perp} = ut \quad (9)$$

能刚好到达N点,则

$$x_N = x + S_{\perp} \cos \alpha + S_{//} \sin \alpha \quad (10)$$

$$y_N = y + S_{\perp} \sin \alpha - S_{//} \cos \alpha = 0 \quad (11)$$

得

$$t = \frac{\sqrt{3}u}{a} \quad (12)$$

$$x = x_N - \frac{9u^2}{4a} \quad (13)$$

$$y = \frac{\sqrt{3}u^2}{4a} \quad (14)$$

对于M点,将 $x=0, u=v_0, t=T$ 代入,可得N点的横坐标为

$$x_N = \frac{3\sqrt{3}v_0T}{4} \quad (15)$$

粒子在电场中的加速度a为

$$a = \frac{\sqrt{3}v_0}{T} \quad (16)$$

边界的方程为

$$y = \frac{v_0T}{4} - \frac{\sqrt{3}}{9}x \quad \left(x \leq \frac{3\sqrt{3}v_0T}{4} \right) \quad (17)$$

可见边界就是过M、N两点的直线.

(3)粒子在磁场中运动时速度大小不变,故粒子第2次进入电场时,其速度大小为 $2v_0$,将其代入u,可得第1次磁场偏转后经过边界上的点 P_1 坐标为

$$x_1 = -\frac{9\sqrt{3}v_0T}{4} \quad (18)$$

$$y_1 = v_0T \quad (19)$$

粒子出磁场时速度方向与x轴的夹角仍为 α ,出磁场后到 P_1 点之前做匀速直线运动,设粒子第1次在磁场中运动的半径为 R_1 ,由几何关系有

$$2R_1 \sin \alpha = x_N - x_1 + \frac{y_1}{\tan \alpha} \quad (20)$$

得

$$R_1 = 4\sqrt{3}v_0T \quad (21)$$

粒子在磁场中,所受洛伦兹力提供其做圆周运动的向心力,即

$$q \cdot 2v_0B_1 = m \frac{(2v_0)^2}{R_1} \quad (22)$$

得

$$B_1 = \frac{\sqrt{3}m}{6qT} \quad (23)$$

粒子第1次在电场中的用时为

$$t_{1电} = T \quad (24)$$

粒子第1次在磁场中的用时为

$$t_{1\text{磁}} = \frac{2\pi - 2\alpha}{2\pi} \cdot \frac{2\pi R_1}{2v_0} = \frac{10\sqrt{3}}{3}\pi T \quad (25)$$

粒子第1次在无场区的用时为

$$t_{1\text{无}} = \frac{y_1}{2v_0 \sin \alpha} = T \quad (26)$$

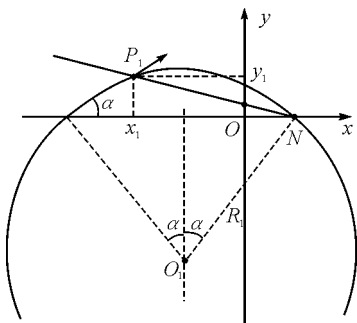


图4 第1次磁场偏转

粒子第2次进入磁场后,速度是第1次进入磁场时速度的2倍,磁感应强度减半,故出射点到N点的距离变为4倍,恰好满足能再一次通过N点进入磁场的要求.粒子在空间做轨迹形状不断扩大的周期运动.若将电场中的运动、磁场中的运动和无场区中的运动视为一个周期,则第一个周期的用时为

$$\tau_1 = t_{\text{电}} + t_{\text{磁}} + t_{\text{无}} = \left(2 + \frac{10\sqrt{3}}{3}\pi\right) T \quad (27)$$

容易发现之后每个周期的时间均为上一个周期的2倍,故从初始状态到第n次经过N点共经历了n-1个周期和单独一次电场中的运动,于是有

$$t_n = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_{n-1} + t_{n\text{电}} = (1 + 2 + \dots + 2^{n-1})\tau_1 + 2^{n-1}t_{1\text{电}} \quad (28)$$

代入数据有

$$t_n = \left[(2^{n-1} - 1) \left(2 + \frac{10\sqrt{3}}{3}\pi\right) + 2^{n-1} \right] T \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (29)$$

3 启示

连续两年高考重庆卷物理的压轴题难度都特别大,这些题目的特点对将来的复习备考有重要的启示.

3.1 基于典型结论 引导学生夯实知识基础

本题目主要讨论带电粒子在电场中的类平抛运动和在磁场中的匀速圆周运动.这两部分都是高中

物理的重点主干知识,本题目分别使用了两种运动的典型结论.

结论一:如图5所示,从同一点开始以不同速度做平抛运动的物体,当其位移方向一定时(比如回到同一斜面),其速度方向也相同(与斜面的夹角也相同).

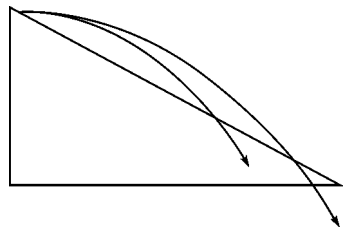


图5 平抛运动典型结论

结论二:如图6所示,从同一点以不同速度大小、相同方向射入匀强磁场的粒子,从同一边界射出时出射方向均相同,它们和边界的夹角等于入射速度与边界的夹角.

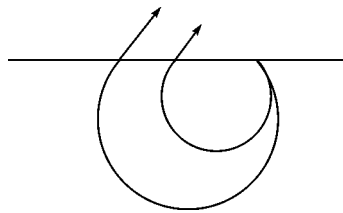


图6 磁偏转典型结论

只有对这两种典型结论足够熟悉,才能迅速找到这道题目的模型特点,才有可能在规定的有限时间内完成求解.这要求广大师生在备考中务必要重视基础知识的理解和基本模型的训练.

3.2 巧妙组合设计 引导学生发展核心素养

要利用前述两种典型结论构造出周期性运动很容易,比如电场和磁场的边界重合,即可实现粒子在电场和磁场中的交替运动.但题目为了体现思维能力的考查,做了两点重要调整.

调整一:将结论一中同一点出发调整为末状态经过同一点.考生需要利用逆向思维来突破类平抛运动中的关系.为了实现这样的运动,磁感应强度也必须要相应每次调整为原来的一半,这些都客观上增加了情景的复杂度,对考生提出了更高的要求.

调整二:隐去电场边界形状的信息.考生需要根据题目对粒子运动的约束来倒推边界的形状,如果

对结论一足够熟悉可能会迅速猜得结果,但要直接解出需要有较强的数学功底.

基于这两点关键的调整,本题虽是基本结论的组合,但组合方式极具创新.题目给出的已知信息的来源也非常分散,环环相扣,充满悬疑.学生必须根据题目给定的信息,综合分析才能得到解题路径,大大增加了试题的灵活性.这要求我们在备考中要注重理解,发展学科核心素养,减少死记硬背和“机械刷题”.

3.3 优化梯度设置 服务拔尖创新人才选拔

作为全卷的压轴题,承担着识别拔尖创新人才的重任.题目通过设置更多的任务让测试结果更具可靠性,最大限度减小偶然偏差.试题共有3个小问,每个小问又有2个待求目标,整个题目有6个具体任务要求出最后结果,这6个具体任务既相互独立又彼此衔接,梯度非常明显,形成了一个测量范围很大的测量工具.第(1)问的两个小任务,只需要掌握了类平抛运动的基本规律、动能定理以及电势和电势差等基本概念即可顺利完成.第(2)问则需要较强的思维能力、数学推理能力等才能完成求解.第(3)问是在第(2)问基础之上进行更加深远的考查,是第(2)问的递进,将试题的测量上限提到了很高的位置.

3.4 虚构理想情境 规避模型科学性争议

题目中的静电场有一条理想边界,按题目要求运动的粒子每次经过 N 点的速度均为上一次通过

N 点速度的2倍,即粒子的动能增加了.对于相邻两次通过 N 点之间的闭合路径,只有电场力作功,由动能定理可知电场力做功一定大于零,即

$$\int_{\text{闭合}} q\mathbf{E} \cdot \mathbf{l} > 0$$

考虑到其中 q 为常数,意味着 $\int_{\text{闭合}} \mathbf{E} \cdot \mathbf{l} > 0$,这违背了静电场的环路定理.2015年高考重庆卷压轴题曾经出现过这个问题,引起了较多关于电场理想边界科学性的讨论.本题再次面临这种模型,第一句就先声明这是“某同学设计了一种粒子加速器的理想模型”,那么后续求解就只能按照题目约定的信息进行,至于违背环路定理那是这种设计的不合理之处,不影响在理想假设的前提下对带电粒子运动情况的讨论.这也给教学中处理类似问题提供了一种思路.

参考文献

- [1] 程力,李勇.基于高考评价体系的物理科考试内容改革实施路径[J].中国考试,2019(12):38-44.
- [2] 赵祎萌,任建英,孟秀兰.香港高考物理试题特点分析及对高考命题改革的启示[J].物理教学,2022,44(4):64-69,31.
- [3] 朱联星.构建物理模型 落实学科核心素养——以2021年福建高考物理压轴题为例[J].物理教师,2022,43(5):87-89.
- [4] 李忠相,栾丽.2022年重庆高考物理压轴题的分析与启示[J].物理教师,2022,43(11):79-81.

Analysis and Enlightenment of the Physics Final Question of Chongqing College Entrance Examination in 2023

LI Zhongxiang LYU Haibin

(Chongqing No. 1 Secondary School, Chongqing 400030)

Abstract: The physics final question of Chongqing College Entrance Examination in 2023 continues the characteristics of last year's final question, which is comprehensive and difficult to think about. This paper gives the analysis and solution of this question, summarizes and analyzes several prominent features of the question and the enlightenment to study and prepare for the exam.

Key words: college entrance examination final question; preparation suggestion; core quality; key ability