

# 深挖物理模型 提升思维能力

——2023年高考浙江省6月物理第22题的深入探讨

徐富锋

(苏州工业园区星海实验高级中学 江苏 苏州 215000)

(收稿日期:2023-08-06)

**摘要:**从核心素养的角度出发对浙江省2023年6月高考物理第22题进行深入分析,研究试题情境中所蕴含的相互作用观、能量观等物理观念,剖析学生在该试题中所暴露的思维短板及其背后的原因,寻求提高学生思维能力的教学策略.

**关键词:**理想化模型;相互作用观;能量观;思维能力;教学策略

2023年高考浙江省物理推陈出新,与学生所熟悉的题型有所不同,尤其是第22题,以一种火箭回收装置模型为情境,突显新颖性和综合性,难度较大,对学生的综合分析能力要求较高.

## 1 真题再现

**【例题】**某兴趣小组设计了一种火箭落停装置,简化原理如图1所示,它由两根竖直导轨、承载火箭装置(简化为与火箭绝缘的导电杆MN)和装置A组成,并形成闭合回路.装置A能自动调节输出电压确保回路电流 $I$ 恒定,方向如图所示.导轨长度远大于导轨间距,不论导电杆运动到什么位置,电流 $I$ 在导电杆以上空间产生的磁场近似为零;在导电杆所在处产生的磁场近似为匀强磁场,大小为 $B_1 = kI$ (其中 $k$ 为常量),方向垂直于导轨平面向里;在导电杆以下的两轨道间产生的磁场近似为匀强磁场,大小为 $B_2 = 2kI$ ,方向与 $B_1$ 相同.火箭无动力下降到导轨顶端时与导电杆粘连,以速度 $v_0$ 进入导轨,到达绝缘停靠平台时速度恰好为零,完成火箭落停.已知火箭与导电杆的总质量为 $M$ ,导轨间距为 $d = \frac{3Mg}{kI^2}$ ,导电杆电阻为 $R$ .导电杆与导轨保持良好接触滑行,不计空气阻力和摩擦阻力,不计导轨和装置A的内阻.

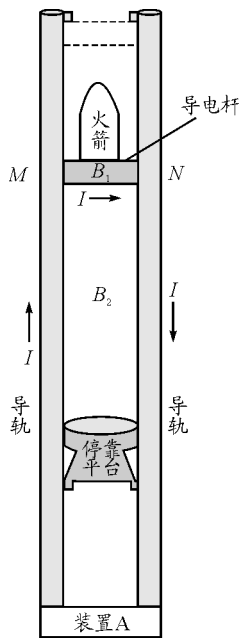


图1 例题题图

在火箭落停的过程中:

- (1) 求导电杆所受安培力的大小 $F$ 和运动的距离 $L$ ;
- (2) 求回路感应电动势 $E$ 与运动时间 $t$ 的关系;
- (3) 求装置A输出电压 $U$ 与运动时间 $t$ 的关系和输出的能量 $W$ ;
- (4) 若 $R$ 的阻值为零,装置A用于回收能量,给出装置A可回收能量的来源和大小.

本题在原有模型的基础上进行大量的简化处

理,考查学生的模型理解能力、模型建构能力以及物理规律的综合应用能力,充分体现了核心素养背景下对学生物理学科关键能力考查的要求,主要包括理解能力、信息加工能力、模型建构能力、科学推理能力等.本文主要从以下3个方面对本题中学生存在的认识误区进行分析,并给出相应的教学策略.

## 2 理解相互作用观 构建理想化模型

本题第(1)问着重考查学生对安培力和运动学等基本公式的运用,但从答题情况看,发现大量学生对该理想化模型不甚清晰,错误分析磁场的来源,导致对各个位置的磁场大小不能正确判断,计算安培力时误将导电杆所处位置的磁场大小认为是 $B_1$ 和 $B_2$ 的叠加或者是 $B_2$ .该部分,我们将重点剖析试题理想化情境,帮助学生厘清情境的理想化过程,深化学生对基本物理规律的认识深度.

### 2.1 理解电磁相互作用 加强可视化教学

认为是 $B_1$ 和 $B_2$ 叠加的学生暴露了认知上的短板——电磁相互作用观点没有正确建立,因为通电直导线不会受到自身所产生磁场的作用.电磁相互作用本质上是两个磁场之间的相互作用,本质上 $B_1$ 是两根无限长直导线上的电流在端点处形成的磁场, $B_2$ 是两根无限长载流直导线上的电流在任意位置处所产生的磁场(忽略导电杆上电流产生的磁场的前提下).

与重力、弹力和摩擦力等相互作用观不同的是,电磁相互作用更加抽象、更加复杂,学生对它的理解难度更大.为此,教师需要在日常教学中通过各种手段化抽象为形象,化复杂为简单,帮助学生更好地理解电磁相互作用.例如,对于通电直导线、环形电流、通电螺线管等周围的磁感应强度,教师可以通过传感器进行测量,或使用手机软件phyphox中的磁力计进行测量,从而使抽象的磁场变得数字化、形象化,便于学生加深对它的理解.

### 2.2 重视理想化模型的过程教学 构建理想化模型

题目情境模型运用了大量的近似处理,其中需要注意的是:“导轨长度远大于导轨间距,不论导电

杆运动到什么位置,电流 $I$ 在导电杆以上空间产生的磁场近似为零;在导电杆所在处产生的磁场近似为匀强磁场,大小为 $B_1 = kI$ (其中 $k$ 为常量),方向垂直于导轨平面向里;在导电杆以下的两轨道间产生的磁场近似为匀强磁场,大小为 $B_2 = 2kI$ ,方向与 $B_1$ 相同.”

考生认识误区主要有两点:

(1)认为导电杆处所产生的磁场为导电杆上的电流形成,而导电杆以下的磁场为导轨上的电流所形成.

(2)认为导电杆运动后处于磁感应强度为 $B_2$ 的磁场中.

这两个误区产生的原因都在于没有正确建构理想化模型,对于情境中的磁场来源无法判断.本题中的磁场很特殊,并不是外加磁场而是仅仅由经过回路的电流所形成的,与回路和电流自身密切相关,每个位置的磁场应当由经过整个回路的电流叠加而成.由于导轨长度远大于导轨间距,可认为导电杆上的电流在周围所形成的磁场忽略,本题磁场为两根无限长载流直导线上的电流所形成的.这是整个理想化模型的理想化过程分析.

高考中不少情境直接采用了理想化模型,但学生却难以理解模型的理想化处理.归根到底,是教师在教学过程中缺少了理想化模型建构过程的教学所致.例如,对于通电螺线管的磁场,教师往往都是直接告诉学生通电螺线管内部的磁场等效为匀强磁场,但为什么可以等效,如何等效,教师却没有引导学生进行推理与论证分析.实际上,教师在教学中可以引导学生探究长度、疏密、直径不同的通电螺线管,让学生通过传感器或者phyphox中的磁力计进行磁感应强度的测量,在分析数据的基础上,判断什么形状和什么部位的通电螺线管内部的磁场更接近于匀强磁场.通过体验式的探究活动,学生会发现通电螺线管的两端磁场不能近似为匀强磁场,当螺线管越长时,近似处理成匀强磁场的合理性更强.通过这样的探究过程,学生不仅可以更好地理解匀强磁场这一概念,还可以学会如何进行理想化模型的建构并把握好理想化建构的条件.

### 2.3 定性分析 准确把握理想化模型的适用条件

对于题目中的假设条件,我们可以这么理解:依题意可知,导轨长度远大于导轨间距,于是我们可认为左右均为无限长的电路导线,则两导轨间可近似认为是磁感应强度为  $B$  的匀强磁场. 在中间导电杆位置,磁场强度可认为是上部分导轨与下部分导轨的磁感应强度的相加. 因此,上、下两部分导轨分别贡献的磁感应强度为  $\frac{B}{2}$ ,如图 2 所示.

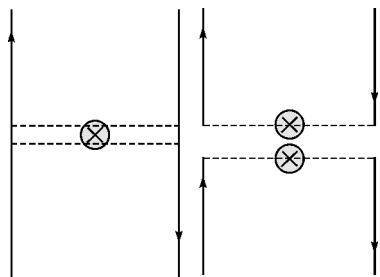


图 2 理想化分析

理想化处理的严谨性讨论:题目中情形是导电杆上部分的导轨没有电路,因而只存在下部分的磁场. 根据无限长导轨的对称性可知,在导电杆位置处只有近似一半的导轨贡献了  $\frac{B}{2}$  的磁感应强度. 而在距离导电杆较远的下方某一位置,仍然可以将该处的磁感应强度  $B$  视为向两侧无限延伸的导轨各贡献了  $\frac{B}{2}$  大小的磁感应强度. 然而对于距离导电杆较近的位置的磁感应强度则不能直接视为题目条件中的两倍关系,因为该处两侧的导轨电流不能都视为无限长. 这里的较近的位置是相对导轨间距而言的,当两侧导轨电流长度远大于导轨间距时可视为无限长电流.

当导电杆距离停靠平台较远时,满足可将某一位置处两侧导轨电流视为无限长的合理区域较多,因而题目条件成立合理性较强. 当导电杆不断靠近停靠平台时,满足合理位置条件的区域变少,因而题目条件的合理性降低. 因此,我们得到如下结论:该题目的导电杆处和其下方的磁感应强度关系是准确性比较低的近似,严谨性不够. 要使题目条件保持较好的准确性和科学性,我们给题目加上一个说明条件:停靠平台到装置 A 的距离远大于两导轨的间距

大小.

### 2.4 定量分析 厘清模型的来龙去脉

既然磁场为两根无限长直导线上的电流所形成,为什么会存在两种不同大小的磁感应强度呢? 对理想化后的模型的磁感应强度大小进行定量的计算.

模型给出导轨长度远大于两导轨间距的假设,可以认为是两电流方向相反的无限长轨道. 导轨间某一点的磁场由左右两根导轨的电流所形成的磁场叠加而成的,先求解左边的无限长直导线在某一点形成的磁场.

如图 3 所示,设有长度为  $L$  的载流直导线,其中的电流为  $I$ ,计算距离直导线为  $a$  的  $P$  点处的磁感应强度.

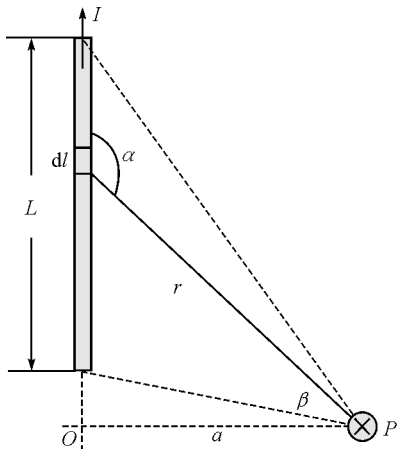


图 3 磁感应强度分析图

根据毕奥-萨伐尔定律,距离  $P$  点距离为  $r$  的电流元  $I dl$  在  $P$  点产生的磁感应强度为

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}$$

方向垂直纸面向里. 由于导线上所有电流元在  $P$  点形成的磁场方向相同,故直接进行标量积分得

$$B = \int^L dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int^L \frac{I dl \sin \alpha}{r^2} \quad (1)$$

式中  $l, \alpha, r$  均为变量,可以统一用  $\beta$  来表示,其中

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \cos \beta & r &= a \sec \beta \\ l &= a \tan \beta & dl &= a \sec^2 \beta d\beta \end{aligned}$$

可得

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int^L \frac{I dl \sin \alpha}{r^2} =$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{l \cos \beta}{a} = \frac{\mu_0}{4\pi a} (\sin \beta_2 - \sin \beta_1) \quad (2)$$

可知,对于无限长直导线而言

$$\beta_1 = -\frac{\pi}{2} \quad \beta_2 = \frac{\pi}{2}$$

可得

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left[ \sin \frac{\pi}{2} - \sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) \right] = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (3)$$

即无限长直导线在其距离相等点处产生的磁感应强度大小相同.而当导轨长度远大于导轨间距时,有限长通电直导线两端的磁感应强度可近似认为是通电导线端点处的磁感应强度,有

$$\beta_1 = -\frac{\pi}{2} \quad \beta_2 = 0$$

故其磁感应强度为

$$B' = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \left[ \sin 0 - \sin \left( -\frac{\pi}{2} \right) \right] = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \quad (4)$$

可知,一个无限长载流直导线在两端处产生的磁感应强度大小满足

$$B' = \frac{1}{2} B$$

两根无限长直导线在端点处与其他部分也近似满足上述规律.因此,本题中导电杆所在处磁场的大小与导电杆下部磁场大小存在两倍关系.

同时对两根无限长直导线之间的磁场分布进行计算.若两导轨间距离为 $d$ .则可知导轨在 $P$ 点产生的磁感应强度大小满足

$$B_{\text{右}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi(d-a)}$$

方向同样垂直纸面向里.可知,在两根无限长导轨之间的某一处,磁感应强度大小为

$$B_{\text{总}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} + \frac{\mu_0 I}{2\pi(d-a)} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{d-a} \right) \quad (5)$$

可见,在两导轨内部磁场并非匀强磁场,并且在 $0 \sim d$ 的范围内,磁感应强度分布应该是两端高、中间低.取平均值后,可将其等效为匀强磁场.原题中近似为匀强磁场的表述容易让学生产生误解,若改为等效为匀强磁场更能帮助学生理解该理想化模型的处理过程.

题中模型在磁场处理上确实做了大量的简化,虽然简化过程有迹可循,但对理想化模型的建构和电磁相互作用的认识要求很高,十分考验学生的物理建模水平和综合分析能力.从另一个角度说,教师不仅需要熟练掌握高中物理知识,更要理解和掌握大学物理知识.要给学生一碗水,教师要有一桶水.只有教师站得高,才能带领学生看得远,学生的核心素养才能更好的提高.

### 3 挖掘隐含的感生电动势产生机制 提升思维能力

本题第(2)小问,求解回路感应电动势 $E$ 与运动时间 $t$ 的关系.由于模型将导电杆处和导电杆以下的磁场简化为两种不同的匀强磁场,并且不发生变化.不少学生会产生回路中的磁感应强度总是不变的错误认知,简单的将感应电动势归结为只有动生电动势.

实际上,着眼整个装置回路,导电杆的运动引起闭合回路区域的磁通量变化,因而产生感应电动势.导电杆在运动过程中,切割回路中其余部分激发的磁场 $B_1$ ,因此动生电动势的大小为 $E_1 = B_1 dv$ ,由右手定则可知其方向为顺时针.

导电杆在运动过程中,导电杆激发的磁场在随导电杆一起向下移动,导电杆激发的磁场在空间各点处的强度随时间而变化,进而在周围空间激发涡旋电场.同时,导电杆以上部分的导轨中电流也因为导电杆经过后瞬间变为零,这部分激发的磁场也是一个随时间变化的磁场,它也会激发涡旋电场.不过,这两个涡旋电场具体分布如何却不便于定量计算,因此,感应电动势似乎无法直接计算.因为导电杆下方的回路中的电流大小保持不变,故回路之外导轨中消失的电流磁场激发的涡旋电场不影响导电杆以下回路中电场的分布,即等价于涡旋电场在回路中产生的总感应电动势为零.因此可以忽略涡旋电场对回路中感应电动势的影响.根据法拉第电磁感应定律,我们可以只用导电杆处磁场运动来计算感生电动势.导电杆处产生的磁场满足

$$B_1 + B_{\text{导电杆}} = B_2$$



因而导电杆产生的磁感应强度大小为  $B_2 - B_1$ . 导电杆磁场运动引起的感生电动势  $E_2$ , 可以通过变换参考系来计算:

取导电杆为参考系, 则有装置 A 在向上运动切割导电杆磁场, 故

$$E_2 = (B_2 - B_1)dv$$

由右手定则可知, 其方向也是顺时针.

由于两个电动势均为顺时针方向, 故回路总电动势为两个分电动势之和, 即有

$$E = E_1 + E_2 = B_1 dv + (B_2 - B_1)dv = B_2 dv$$

当然, 这个总电动势也可以用前文的磁通量变化计算

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B_2 \Delta S}{\Delta t} = B_2 \frac{v\Delta t d}{\Delta t} = B_2 dv$$

学生平时求解感应电动势时, 往往只是遇到感生电动势或者动生电动势的情况, 对于导电杆在切割磁感线, 同时产生感生电动势的新情境很少遇到. 那么面临新情境, 可以从哪些方面提高教学质量呢?

第一, 重视概念的建立过程, 明确概念的运用条件. 动生电动势和感生电动势的适用条件是不同的, 面临不同的情境, 教师需要引导学生思考到底是那种电动势还是两者都有.

第二, 多引导学生将实际情境转化为物理情境. 物理中的动生电动势和感生电动势, 学生都比较熟悉, 然而对于诸如本题中的实际情境, 学生却难以区分和判断. 因此, 教师需要多引导学生分析实际情境, 提高学生的综合分析能力与辩证思考能力.

第三, 实际情境可逐步陌生化、复杂化、综合化. 在学生解决简单、熟悉的实际情境的基础上, 教师可以增设陌生、复杂和综合的实际情境, 提高学生的分析与推理能力.

## 4 理解磁场能的来源 完善能量守恒观

### 4.1 探讨不同能量观下解法存在差异的原因

对于本题第(3)问, 从不同角度思考问题, 得到截然不同的结果. 为进一步揭示问题的本质, 也为展示知识间的迁移关系和知识构建框架, 把学习推向纵深, 简要介绍一下物理学中常见的场: ① 引力场,

也称作重力场; ② 电磁场; ③ 弱核力场; ④ 强相互作用场. 前面两种场是中学物理常遇到的场, 也是我们生活中触手可及的场. 根据所学知识可知, 物体在重力场中具有重力势能, 带电物体在电场中具有电势能. 类比推理, 物体在磁场中具有能量吗? 或者说产生磁场的场源物体本身具有能量吗?

**解法 1:** 根据右手定则和欧姆定律可得

$$U + E = IR \quad (6)$$

解得

$$U = IR - E = IR - \frac{6Mg}{I}(v_0 - 2gt) \quad (7)$$

电源输出能量的功率为

$$P = UI = (IR - E)I = \left[ IR - \frac{6Mg}{I}(v_0 - 2gt) \right] I = I^2 R - 6Mg v_0 + 12Mg^2 t \quad (8)$$

在  $0 \sim \frac{v_0}{2g}$  时间内输出的能量为对应  $P-t$  图像的面积, 可得

$$W = \frac{(I^2 R - 6Mg v_0) + \left( I^2 R - 6Mg v_0 + 12Mg^2 \frac{v_0}{2g} \right)}{2} \cdot \frac{v_0}{2g} = \frac{(I^2 R - 6Mg v_0) + I^2 R \frac{v_0}{2g}}{2} = \frac{I^2 R v_0}{2g} - \frac{3Mv_0^2}{2} \quad (9)$$

**解法 2:** 从能量守恒观点出发, 电源提供的能量, 导电杆与火箭减少的机械能, 都转化为回路产生的焦耳热, 可得

$$W + \Delta E_{\text{机械能}} = I^2 R t \quad (10)$$

全过程减少的机械能为

$$\Delta E_{\text{机械能}} = \left( \frac{1}{2} M v_0^2 + Mg \frac{v_0^2}{4g} \right) - 0 = \frac{3}{4} M v_0^2 \quad (11)$$

即有

$$W = I^2 R t - \Delta E_{\text{机械能}} = \frac{I^2 R v_0}{2g} - \frac{3}{4} M v_0^2 \quad (12)$$

**疑问:** 解法 1 和解法 2 分别从不同的角度出发解决问题, 显然得到不同的结果, 差别明显. 究竟是什么原因导致的差别呢? 到底是哪一种解法的结果是正确的呢?

对于第二种解法,从能量守恒定律的角度看待问题,考虑到了电源提供的能量,导电杆与火箭的机械能以及回路产生的焦耳热.那么整个装置系统中,仅仅考虑这3类能量全面吗?回顾物理课本必修第三册磁场相关章节可知,规则运动的电荷形成的电流周围会产生磁场,即回路的电流会产生磁场.又由前文的介绍类比推理可知,磁场也具有相应的磁能.分析式(9)和(12)可知,解法2所得的结果比解法1得到的结果要大,显然是忽略了某一种能量所致的错误.实际上,学生在学习电磁振荡这一内容时就接触了电磁能与电场能的相互转化,但学生缺乏对磁场能来源的理解.

#### 4.2 计算磁场能的大小 完善能量守恒观点

从定量计算的角度看,设整个回路的自感系数为 $L_B$ ,此时回路中导轨有电流的长度为 $L$ .

由 $\Phi = B_2 L d$ 可得自感系数为

$$L_B = \frac{\Phi}{I} = \frac{B_2 L d}{I} = 2kLd \quad (13)$$

磁场能量为

$$E_B = \frac{1}{2} L_B I^2 \quad (14)$$

可知回路初始状态的自感系数为

$$L_{B0} = 2kd(L_0 + L) \quad (15)$$

末状态的自感系数为

$$L_{B1} = 2kdL_0 \quad (16)$$

则初末状态的磁场能减少量为

$$\Delta E_B = \frac{1}{2} L_{B0} I^2 - \frac{1}{2} L_{B1} I^2 = kI^2 L d \quad (17)$$

代入

$$d = \frac{3Mg}{kI^2}$$

可得

$$\Delta E_B = 3MgL \quad (18)$$

代入 $L = \frac{v_0^2}{4g}$ 可得

$$\Delta E_B = \frac{3}{4} Mv_0^2 \quad (19)$$

因此装置A输出的能量为

$$W = Q - W_A - \Delta E_B \quad (20)$$

式中, $Q$ 为焦耳热, $W_A$ 为克服安培力做功.

即有

$$W = \frac{I^2 R v_0}{2g} - \frac{3}{2} Mv_0^2 \quad (21)$$

此时我们得到与解法1相同的结果.这里的定量计算中运用到了自感系数的定义式和磁能的表达式,超出了高中物理知识范围,但能为强基优生进一步深入思考问题和一线教师解答学生疑惑提供适当的参考.

#### 4.3 能量守恒观点的迁移运用

对于本题的第(4)问,我们根据能量守恒定律可知,装置A回收的能量等于全过程减少的机械能和减少的磁能之和,由式(11)和(19)可得

$$E_{\text{回收}} = \Delta E_{\text{机械能}} + \Delta E_{\text{磁能}} = \frac{3}{4} Mv_0^2 + \frac{3}{4} Mv_0^2 = \frac{3}{2} Mv_0^2 \quad (22)$$

随着火箭和导电杆向下运动,闭合磁场区域减小,产生涡旋电场,减少的磁场能转化为电能.

#### 5 结束语

针对不少学生物理建模能力薄弱这一现象,教师在日常教学中应注重落实物理模型建构教学,多引入包含实际情景的物理问题,注重引导学生对试题信息进行提取并加工处理,锻炼学生从真实情境中建构符合要求的物理模型的能力,并进行多角度的科学推理与验证,以提升学生运用所学知识解决实际问题的能力.这样才能在复杂多变的物理领域中,抓住主要因素,忽略次要因素,把握问题的本质,从容应对困难并化解困难.

#### 参考文献

- [1] 刘月霞,郭华.深度学习:走向核心素养[M].北京:教育科学出版社,2018.
- [2] 梁灿彬,秦戎戎,梁竹健.普通物理学教程·电磁学[M].北京:高等教育出版社,2018.
- [3] 蒋炜波,张芳.物理学科科学思维评价研究的综述与启示[J].中学物理,2023,41(7):8-13.
- [4] 韩泽宇,苏咏梅.“科学思维”及其层次共识——基于国际科学教育与教育心理学的视角[J].物理教学,2023,45(1):7-10.