注重拓展探究 培养科学思维*

——以 2019 年高考全国卷 Ⅲ 理综第 19 题的探究教学为例

陈志军

（安徽省绩溪中学　安徽 宣城　245300）

（收稿日期：2021－11－19）

摘　要：通过对 2019 年高考全国卷 Ⅲ 理综第 19 题的深度剖析与探究教学，以促进深度学习，培养学生迁移能力、科学思维能力和学科核心能力，落实物理学科核心素养教学目标.

关键词：科学思维　拓展探究　核心素养　深度学习

在中学物理教学中有意识地安排多角度分析问题的训练，从不同的角度、不同的思路、不同的方法多方位地去分析解决问题，可以有效培养学生的想象力、思维能力和创造能力，锻炼学生思维的灵活性，优化思维品质. 教学中引导学生应用迁移、拓展探究，突出知识的形成过程、思维品质的训练，有助于提高学生解决实际问题的能力. 这就要求指向科学思维培养的习题教学注重对知识的拓展探究和迁移拓展. 本文以 2019 年高考全国卷 Ⅲ 理综第 19 题的教学为例，谈问题分析思路的拓展探究、思维品质的优化和科学思维的培养.

1　原题及解析

【原题】如图 1 所示，方向竖直向下的匀强磁场中有两根位于同一水平面内的足够长的平行金属导轨，两相同的光滑导体棒 ab 和 cd 静止在导轨上. $t=0$ 时，棒 ab 以初速度 v_0 向右滑动. 运动过程中，ab 和 cd 始终与导轨垂直并接触良好，两者速度分别用 v_1 和 v_2 表示，回路中的电流用 I 表示. 下列图像中可能正确的是（　　）

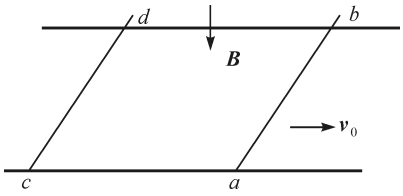
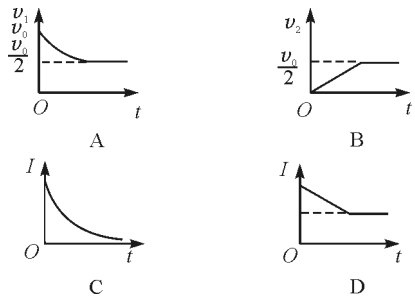


图 1　原题题图



解析：导体棒 ab 切割磁感线产生由 a 到 b 的感应电流，导体棒 ab 受到向左的安培力 F 作用，向右做减速运动，导体棒 cd 受到向右的安培力 F 作用，向右做加速运动，感应电流 $I=\frac{Bl(v_1-v_2)}{R}$，两棒的相对速度减小，感应电流减小，安培力 F 的大小随电流的减小而减小，则两棒的加速度大小 a 减小，直到 $v_1=v_2=v$ 时，$a=0$，电流为零，两棒开始做匀速运动，两棒组成的系统动量守恒，两导体棒最终的速度为 $v=\frac{v_0}{2}$，A 正确，B 错误. v_1-v_2 随时间减小得越来越慢，最后为零，则感应电流 I 随时间减小得越来越慢，最后为零，C 也正确，D 错误.

2　对原题的拓展探究

2.1　推理分析快速判断

因本题是多项的选择题，在判断的时候，可以定性推理，借助排除法进行快速判断：最终两棒共速，

* 安徽省教育科学研究项目 2018 年度立项课题“基于科学思维培养的物理教学研究与实践”的研究成果，项目编号：JK18098；宣城市 2020 年教育科学研究立项课题“基于深度学习的中学物理教学案例研究”的研究成果，项目编号：XCJK20055

作者简介：陈志军（1979－　），男，中教高级，主要从事中学物理教学研究.

故此时电路中电流为零，即 C 正确，D 错误；由选项 C 电流的变化知 $F_{安}$ 不是线性变化，故两棒速度 v 也不是线性变化，即 A 正确，B 错误.

2.2　两导体棒速度的定量变化分析

两导体棒运动过程中动量守恒

$$mv_0 = mv_1 + mv_2 \tag{1}$$

设两导体棒电阻均为 R，对导体棒 cd，由电磁感应定律和牛顿第二定律得

$$\frac{B^2 l^2 (v_1 - v_2)}{2R} = ma_2 = m\frac{\mathrm{d}v_2}{\mathrm{d}t}$$

式(1) 代入可得

$$\frac{B^2 l^2 (v_0 - 2v_2)}{2R} = m\frac{\mathrm{d}v_2}{\mathrm{d}t}$$

整理取积分得到

$$\int_0^{v_2} \frac{\mathrm{d}v_2}{v_0 - 2v_2} = \int_0^t \frac{B^2 l^2}{2mR}\mathrm{d}t$$

解得导体棒 cd 的速度

$$v_2 = \frac{v_0}{2}\left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{B^2 l^2}{mR}t}\right) \tag{2}$$

导体棒 ab 的速度

$$v_1 = \frac{v_0}{2}\left(1 + \mathrm{e}^{-\frac{B^2 l^2}{mR}t}\right) \tag{3}$$

2.3　回路中的电动势和电流

回路中的总电动势 $\varepsilon = Bl(v_1 - v_2)$，将式(2)、(3) 代入可得

$$\varepsilon = Blv_0 \mathrm{e}^{-\frac{B^2 l^2}{mR}t}$$

$$I = \frac{Blv_0}{2R}\mathrm{e}^{-\frac{B^2 l^2}{mR}t} \tag{4}$$

可以看出回路中的电动势和电流都是逐渐减小的，并且减小得越来越慢.

2.4　两导体棒达到速度相等所需的时间

(1) 根据速度关系式判定

根据两导体棒运动的速度随时间变化的关系式(2)、(3) 可以看出：导体棒 ab 做初速度为 v_0，加速度越来越小的减速运动，当 $t \to \infty$ 时，$v_1 \to \frac{v_0}{2}$；导体棒 cd 做初速度为零，加速度越来越小的加速运动，当 $t \to \infty$ 时，$v_2 \to \frac{v_0}{2}$；根据式(2)、(3) 可以画出两导体棒运动的速度随时间变化的关系图像如图 2 所示，从图中很清楚地看出两导体棒的运动情况.

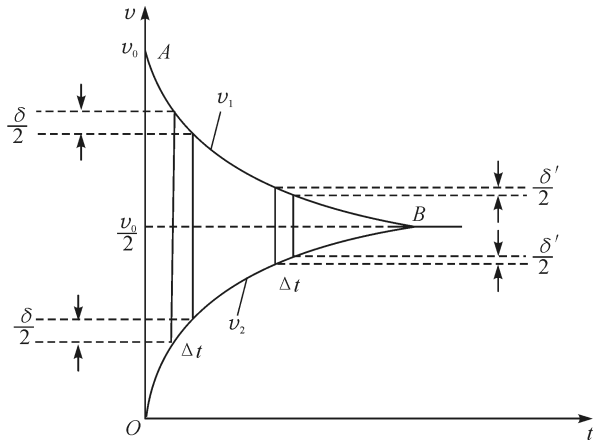


图 2　两导体棒的速度时间变化图像

(2) 根据电流极值判定

由电流关系式(4) 可知：当 $t \to \infty$ 的时候，$\varepsilon \to 0$，$I \to 0$，此时两导体棒速度相等开始做匀速直线运动.

(3) 根据动量定理判定

假设导体棒 cd 从静止出发到达到最大速度所需时间为 t，对该过程运用动量定理有

$$\int_0^t F\mathrm{d}t = \int_0^t BIl\,\mathrm{d}t = m\frac{v_0}{2} - 0$$

代入电流关系式(4) 得

$$\int_0^t \frac{B^2 l^2 v_0}{2R}\mathrm{e}^{-\frac{B^2 l^2}{mR}t}\mathrm{d}t = m\frac{v_0}{2}$$

解得 $\mathrm{e}^{-\frac{B^2 l^2}{mR}t} = 0$，只有在 $t \to \infty$ 的时候，导体棒 cd 的速度才趋向于 $\frac{v_0}{2}$，与上述结果一致.

2.5　两导体棒能否一起做匀速运动的讨论

对两导体棒的运动分析，可知两导体棒速度相等时加速度都减小到零，两棒开始做匀速运动，而根据式(2)、(3) 可知，只有在 $t \to \infty$ 的时候，两导体棒速度才趋向于相等、电流趋向于零，原题中 A 和 C 两个选项表达并不一致，好像存在“瑕疵”：选项 A 中两棒已达到速度相等并匀速运动而选项 C 中电流并没有等于零，当然，仅就题干而言，题目是要求选择“可能正确”的选项，也就不存在问题了. 通过深入分析，我们知道在理想的情况下，通过数学推理得出两导体棒达到速度相等需要无限长的时间，也就是不存在匀速运动的阶段和电流等于零的情况. 理查德·费曼(Richard Feynman) 在关于数学与物理的区别中分析了数学与物理认识论的差异、实用范围的差

异等等，其实本题是在理想的情况下进行数学推理，与实际情况存在差异，原题是为了说明当速度相等以后会做匀速运动且电流为零这一理论推理，更符合物理研究实际. 这个问题与空气中下落雨滴模型最终获得收尾速度具有相似之处，在物理的教学中，我们要注重数学知识的应用，也要注重物理实际的分析.

2.6　电流变化快慢的分析

在教学中发现，学生要理解感应电流 I 随时间减小得越来越慢，也就是理解 v_1-v_2 随时间减小得越来越慢存在模糊，对于这一问题很有必要进行深入探究.

方法一：根据函数性质确定

由前述式(4) 的指数函数图像的性质不仅可以确定回路中的电动势和电流都逐渐减小，而且可以确定减小得越来越慢.

方法二：根据速度关系推导

结合动量守恒方程(1) 推导出 $v_1-v_2=v_0-2v_2$，学生探究得出 v_2 增加则 v_1-v_2 减小，v_2 增加得越来越慢则 v_1-v_2 减小得越来越慢，电流减小得也越来越慢.

方法三：根据速度图像确定

如图 2 所示，v_1-v_2 为图像中某时刻两曲线间的竖直距离，在图像中取相同的时间间隔 Δt，可以看出该距离的变化值 $\delta>\delta'$，即相同时间内 v_1-v_2 的变化值越来越小，故 v_1-v_2 变化越来越慢，则电流变化越来越慢.

2.7　磁通量与电动势

(1) 磁通量

假设初始时两棒的间距为 x_0，在 t 时刻，两棒之间的距离为

$$x_t=x_0+x_1-x_2=x_0+\int_0^t v_1\mathrm{d}t-\int_0^t v_2\mathrm{d}t$$

结合式(2)、(3) 可得

$$x_t=x_0+\frac{mRv_0}{B^2l^2}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{B^2l^2}{mR}t}\right) \tag{5}$$

通过闭合回路的磁通量为

$$\Phi_t=Blx_t=Blx_0+\frac{mRv_0}{Bl}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{B^2l^2}{mR}t}\right) \tag{6}$$

(2) 电动势

对式(6) 进一步分析可以得出 t 时刻的瞬时感应电动势 $\varepsilon=\frac{\mathrm{d}\Phi_t}{\mathrm{d}t}=Blv_0\mathrm{e}^{-\frac{B^2l^2}{mR}t}$，与前述直接求解得到的式(4) 一致.

2.8　两棒间距离的最大增量和通过导体棒横截面的电荷量

(1) 两棒间距离的最大增量

方法一：利用两棒之间的距离关系式

根据式(5)，可知经过时间 t 两棒之间的距离的增量

$$x=x_t-x_0=\frac{mRv_0}{B^2l^2}\left(1-\mathrm{e}^{-\frac{B^2l^2}{mR}t}\right)$$

当 $t\to\infty$ 时，两棒之间的距离增大到最大，最大增量

$$x_\mathrm{m}=\frac{mRv_0}{B^2l^2}$$

方法二：利用分割与积累

将导体棒 cd 运动过程分割成无数个极短的时间间隔为 Δt 的运动，在任意 Δt 内，两棒之间的距离增量 $\Delta x=(v_1-v_2)\Delta t$，而导体棒 cd 的加速度

$$a=\frac{B^2l^2(v_1-v_2)}{2mR}$$

有

$$\Delta x=\frac{2mRa\Delta t}{B^2l^2}=\frac{2mR}{B^2l^2}\Delta v_2$$

考虑到全过程导体棒 cd 的速度 v_2 从零增加到 $\frac{v_0}{2}$，则两棒间距离的最大增量

$$x_\mathrm{m}=\sum\Delta x=\frac{2mR}{B^2l^2}\sum\Delta v_2=\frac{mRv_0}{B^2l^2}$$

方法三：利用平均值法

两棒所受安培力用平均值表示，对导体棒 cd 运动全过程应用动量定理

$$\frac{B^2l^2(\bar{v}_1-\bar{v}_2)}{2R}t=m\frac{v_0}{2}-0$$

即

$$\frac{B^2l^2}{2R}x_\mathrm{m}=m\frac{v_0}{2}$$

故 $x_\mathrm{m}=\frac{mRv_0}{B^2l^2}$.

方法四：利用微元求和方法

将两导体棒运动过程分割成无数个极短的相同的时间间隔为 Δt 的运动，在第 i 个 Δt 内，安培力大

小为$\frac{B^2l^2(v_{i1}-v_{i2})}{2R}$,利用求和并对导体棒 cd 运动全过程应用动量定理得

$$\sum\frac{B^2l^2(v_{i1}-v_{i2})}{2R}\Delta t=m\frac{v_0}{2}-0$$

即 $$\frac{B^2l^2}{2R}\sum(v_{i1}-v_{i2})\Delta t=\frac{B^2l^2}{2R}x_{\mathrm{m}}=m\frac{v_0}{2}$$

故 $x_{\mathrm{m}}=\frac{mRv_0}{B^2l^2}$.

方法五:利用积分思想方法

两棒间距离的最大增量即图 2 中两条速度图线围成的 OAB 部分面积,即

$$x_{\mathrm{m}}=\int_0^{\infty}v_1\,\mathrm{d}t-\int_0^{\infty}v_2\,\mathrm{d}t$$

将式(2)、(3) 代入可得

$$x_{\mathrm{m}}=\int_0^{\infty}v_0\mathrm{e}^{-\frac{B^2l^2}{mR}t}\,\mathrm{d}t=\frac{mRv_0}{B^2l^2}$$

(2) 通过导体棒横截面的电荷量

方法一:利用磁通量变化求解

两棒之间磁通量的变化 $\Delta\Phi_{\mathrm{m}}=Blx_{\mathrm{m}}=\frac{mRv_0}{Bl}$,则通过导体棒横截面的电荷量 $q=\bar{I}\Delta t=\frac{\Delta\Phi_{\mathrm{m}}}{2R}=\frac{mv_0}{2Bl}$. 也可以由式(6) 得出 $\Phi_0=Blx_0$,$\Phi_{\infty}=Blx_0+\frac{mRv_0}{Bl}$,也可以求出 $\Delta\Phi_{\mathrm{m}}=\frac{mRv_0}{Bl}$ 后再求出电荷量.

方法二:利用平均值结合动量定理求解

对导体棒 cd 运动全过程应用动量定理 $B\bar{I}lt=m\cdot\frac{v_0}{2}-0$,即 $Blq=m\frac{v_0}{2}$,故 $q=\frac{mv_0}{2Bl}$.

方法三:利用微元求和方法

与两棒间距离的最大增量求解类似,也可以将导体棒 cd 运动全过程分割成无数个极短的相同的时间间隔为 Δt 的运动,在第 i 个 Δt 内,安培力大小为 BI_il,利用求和并对导体棒 cd 运动全过程应用动量定理得 $\sum BI_il\Delta t=m\frac{v_0}{2}-0$,即 $Bl\sum I_i\Delta t=Blq=m\frac{v_0}{2}$,故 $q=\frac{mv_0}{2Bl}$.

方法四:利用积分思想方法

通过导体棒横截面的电荷量也可以用积分思想结合动量定理求解,对导体棒 cd 从静止出发到达到最大速度全过程运用动量定理

$$\int_0^{\infty}BIl\,\mathrm{d}t=\int_0^{q}Bl\,\mathrm{d}q=m\frac{v_0}{2}-0$$

解得 $q=\frac{mv_0}{2Bl}$.

2.9　焦耳热与克服安培力做功

(1) 焦耳热

对全过程能量转化进行分析,系统减少的动能转化为焦耳热,因此焦耳热

$$Q=\frac{1}{2}mv_0^2-\frac{1}{2}(2m)\left(\frac{v_0}{2}\right)^2=\frac{1}{4}mv_0^2$$

注意电流通过两棒均会产生焦耳热,各自产生的焦耳热根据电阻大小进行分配.

(2) 系统克服安培力做功

在 t 时刻,两棒所受安培力大小

$$F_t=\frac{B^2l^2(v_1-v_2)}{2R}$$

两棒之间距离的增量 $\mathrm{d}x=(v_1-v_2)\mathrm{d}t$,全过程系统克服安培力做功

$$W=\int_0^{\infty}F_t\,\mathrm{d}x=\int_0^{\infty}\frac{B^2l^2(v_1-v_2)^2}{2R}\mathrm{d}t$$

结合式(2)、(3) 可得

$$W=\int_0^{\infty}\frac{B^2l^2v_0^2}{2R}\mathrm{e}^{-\frac{2B^2l^2}{mR}t}\,\mathrm{d}t=\frac{1}{4}mv_0^2$$

此结果进一步验证了功能关系,即系统克服安培力做功转化为系统增加的焦耳热.

3　结束语

本题考查牛顿运动定律、电磁感应定律和动量守恒规律,利用速度的变化关系和全过程的动量守恒,可以很快判断出电流变化越来越慢并最终等于零,但本题模型是典型的电磁感应中的双杆模型,涉及加速度、功、磁通量、反电动势等物理概念和牛顿运动定律、动量定理、动量守恒定律、能量守恒定律、功能关系的综合运用,还涉及图像信息的获取和微元法处理变加速问题. 促进深度学习、提升科学思维的探究点比较多,教学中不拘泥于原题本身,针对物理学科核心素养的发展点有针对性地进行拓展探究. 学生在教师的引导下积极参与科学探究活动,主动获取知识、发展探究能力,在解决实际问题的探究中深入理解原有的认知结构,构建新的物理知识结构体系,有助于培养学生的科学思维能力,落实物理学科核心素养教学目标.