

运动的磁场? 兼谈一道高考题

黎小鹿 黄亦斌 欧阳方平

⁽¹⁾ 南昌市第二中学, 江西 南昌 330038; ⁽²⁾ 江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022;⁽³⁾ 中南大学物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410083)

摘要 针对学生不易察觉出问题的“运动磁场”这一短语进行了分析, 指出磁场不能谈论是否运动, 也不能谈论“粒子相对于磁场的速度”。洛伦兹力和动生电动势中的速度都是相对于观测者的, “运动的磁场”本意应指运动的磁场源(如磁铁)。做此修正后, 运动的磁场源产生变化的磁场, 故而感生出电场, 从而非静电力不止有洛伦兹力(的一个分力), 还有感生电场力, 电动势也相应有两个成分。这些都可以在可接受的范围内进行计算。最后强调了电场磁场和动生感生电动势的相对性。这些分析有助于学生正确理解电磁场参考系变换。

关键词 电磁感应; 洛伦兹力公式; 观测者; 感生电场; 参考系变换; 操作型定义

MOVING MAGNETIC FIELD?

ALSO ON A PROBLEM IN COLLEGE ENTRANCE EXAMINATION

LI Xiaolu¹ HUANG Yibin² OUYANG Fangping³⁽¹⁾ Nanchang No. 2 Middle School, Nanchang, Jiangxi 330038;⁽²⁾ School of Physics, Communication and Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022;⁽³⁾ School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha, Hunan 410083)

Abstract The phrase “moving magnetic field” which is problematic but commonly used by students is analyzed. It is pointed out that it makes no sense to say “the magnetic field is moving or static” and “a particle is moving relative to the field”. The velocity in Lorentz force and motional electromotive force is relative to the observer, and “the moving magnetic field” is in fact the moving source of magnetic field (magnet, for example). After this correction, moving source results in varying magnetic field, which induces the electric field. Thus, non-electrostatic force has not only (a component of) Lorentz force but also the induced electric field force, and the electromotive force also has two corresponding components. All these can be calculated within the acceptable range. The relativity of magnetic and electric fields is also emphasized. These analysis are helpful for students to grasp the transformation of electromagnetic field reference system.

Key words electromagnetic induction; Lorentz force formula; observer; induced electric field; transformation of reference system; operational definition

电磁学和电动力学的教学中, 都会涉及磁场的参考系变换问题。这是一个重要的知识点,

对学生而言也有难度。中学学习对学生有很深的影响, 有学生拿出相关的高考题来询问, 表现出只

收稿日期: 2022-03-29

基金项目: 江西省教育科学“十四五”规划重点课题(21ZXZD004)和湖南省教育教学改革重点研究项目(HNJG-2021-0015)。

作者简介: 黎小鹿, 男, 中小学高级教师, 主要从事中学物理教学和研究工作, 164740499@qq.com。

通讯作者: 黄亦斌, 男, 副教授, 主要从事理论物理教研工作, huangyb31@aliyun.com; 欧阳方平, 男, 教授, 主要从事电磁学教学和纳米物理与二维材料领域的研究工作, 国家级一流本科专业建设点负责人, oyfp@csu.edu.cn。

引文格式: 黎小鹿, 黄亦斌, 欧阳方平. 运动的磁场? 兼谈一道高考题[J]. 物理与工程, 2022, 32(2): 14-19, 24.

Cite this article: LI X L, HUANG Y B, OUYANG F P. Moving magnetic field? Also on a problem in college entrance examination[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(2): 14-19, 24. (in Chinese)

能机械记忆电磁场变换关系,不清楚该关系与(同一惯性系中的)电磁规律是相容的,也不能发现相关题目中的不当之处。这类题有一定代表性,其背后所默认的观念也值得分析。故作此文,以澄清教学中的一些相关概念。

1 问题

这类题目主要是指“磁场运动”导致电磁感应的习题。例如,2007年高考上海卷就有下题(有删减):

如图 1(a)所示,光滑的平行长直金属导轨置于水平面内,导轨左端接有电阻,导体棒垂直跨接在导轨上。在导轨平面上有一矩形区域内存在着竖直向下的匀强磁场,大小为 B 。开始时,导体棒静止于磁场区域的右端,当磁场以速度 v_1 匀速向右移动时,导体棒随之开始运动,同时受到水平向左、大小为 f 的恒定阻力,并很快达到恒定速度,此时导体棒仍处于磁场区域内。下略。

2017 年高考江苏卷也有一道类似的题,其附图见图 1(b)。此外,还有许多习题都使用了这种模型,比如一道涉及超导磁悬浮列车的题,其附图见图 1(c)。这类题目的共同特点是,题干中言明“磁场以某速度运动”,而解答中都是算出导体棒“与磁场之间的相对速度”,从而得到“杆切割磁感线的速度”,再代入公式 $E = BLv$ 得到感应电动势。多文^[1-5]对这种题进行了类似的讨论和解答。

显然,这里默认的基本概念是:磁场可以作为参考系,可以运动,尤其是在用磁感线明显地表现磁场时,更是如此:“你看那一根根的线条,都可以运动或静止”。当导体棒跟磁感线之间有速度差时,就存在切割磁感线, $E_{\text{动}} = BLv$ 中的速度正是这个速度差,正是导体棒相对于磁场的速度。

然而,这一切都是不符合物理学认识的。

2 概念

先考虑一个更根本问题:洛伦兹力公式 $f = qvB$ 中,速度 v 是指带电粒子相对于什么的速度? 相对于磁场,还是相对于磁场源(比如磁铁)? 都不对,是相对于观测者^[6]自己! 动生电动势作为洛伦兹力(的一个分力)的宏观体现,其中的速度当然也是相对于观测者的。

“相对于磁场源”不对,是因为场源可能会相对于观测者有运动,而“相对于磁场”不对,则是因为磁场(和电场)根本就不能谈论是否运动,也无法成为合法的参照物或参考系。说“一个电荷相对于磁场在运动”是无意义的,非法的。

只有实物粒子(电子、质子、中子等)才能成为参照物,它们的共同特征是速度小于光速 c ,且大小可变。光子可以谈速度,但它的速度(真空中)只能为 c 。它不能成为参照物,我们无法把参考系建立在光子上。磁场源(磁铁、载流线圈)由实物粒子构成,可以谈论静止或运动,也可以成为参照物。但说“一个磁场是静止的”“一个电场以某速度在运动”是完全没有意义的。虽然我们经常说电磁波以光速运动,但那说的是相速度或群速度:盯着一个波峰或波包看,它确实在运动,确实可以谈速度。但电磁场本身不能谈速度。

能谈的是什么? 是变化与否。电磁场是场,而场的基本概念是,空间每一点都有同一种量。比如磁场就是空间每一点都有一个 $\mathbf{B}$,从而存在一个分布 $\mathbf{B}(x, y, z)$ 。每一点的这个量是可以随时间变化的,故一般的磁场就是 $\mathbf{B}(x, y, z, t)$ 。如果磁铁经过某个区域,那么,这个区域的磁场先是为零,然后增加,然后又减为零。这里,运动的是磁铁,而磁场不能谈是否运动,只能谈是否变化。前面的三个题目中,如果所谓“磁场运动”是源自于磁铁运动,那么就只能说“磁铁以某速度运

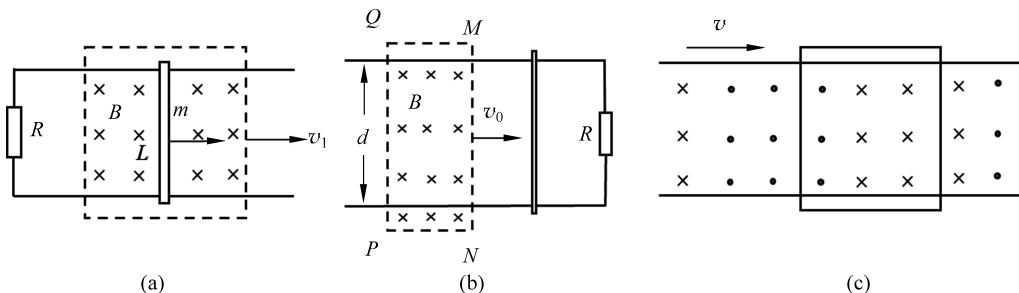


图 1 几道电磁感应题目的示意图

动”,而不应该谈磁场运动。

这里又涉及电磁场($\mathbf{E}, \mathbf{B}$)的操作型定义^[7]。操作型定义其实是非常基本的东西,它关系到一个物理量如何量化,中学和大学都应该涉及,但实际情况并不乐观。就电磁场而言,它的基本效应是对放入其中的带电粒子有力的作用,这个效应就可以用来对电磁场进行度量。具体地,对于任何一个观测者(注意“观测者”出现了),如果他想知道空间某点的电磁场情况,他可以让不同的电荷以不同的速度经过该点(包括静止于该点),测得每次粒子的受力。总结这些海量数据($q_i, \mathbf{v}_i, \mathbf{F}_i$),发现只需要六个数(或两个矢量($\mathbf{a}, \mathbf{b}$))就可以用一个式子统一表达所有这些数据的规律: $\mathbf{F}_i = q_i(\mathbf{a} + \mathbf{v}_i \times \mathbf{b})$ 。换一个点,重做实验,仍然如此,只是两个矢量($\mathbf{a}, \mathbf{b}$)变了。于是,称 $\mathbf{a}$ 为电场强度,改写为 $\mathbf{E}$;称 $\mathbf{b}$ 为磁感应强度,改写为 $\mathbf{B}$ 。它们都是空间坐标的函数,成为场,而那个电荷受力的规律写成

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

称为洛伦兹力公式。这个过程有操作(实验),有规律,有定义,构成电磁场的操作型定义。

从这个定义中,你可以找出“磁场静止”是什么意思吗?完全没有谈论,完全没有意义。另外,可以看出这里的速度是相对于谁的吗?开宗明义就指明了是观测者。

费曼在其物理学讲义第二卷^[8]中指出(汉译有改动):

倘若我们把 $\mathbf{E}$ 场和 $\mathbf{B}$ 场想象成“线”,就不能赋予它们过多的真实性。……做这样的陈述是没有意义的:当我挪动一块磁铁时,它会带着它的磁场一起动,因而 $\mathbf{B}$ 线也就在移动。一般说来,谈论“场线的运动速度”毫无意义。场是我们用来描述在空间某点情况的方法。具体地, $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 告诉我们通过该点的运动粒子如何受力。如果问“运动磁场作用于电荷的力是什么”,那这没有任何确切意义。力就是由电荷处的 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 给出,而公式(1)不会由于 $\mathbf{E}$ 或 $\mathbf{B}$ 的源在运动而改变(是 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{B}$ 之值才会由于源的运动而改变)。我们的数学描述只针对某一惯性系中作为时空坐标函数的场。后面会提到“在空间行进的电场和磁场的波”,比如光波。与此类似的说法是波在一根弦上传播。此时,我们并非指弦线的某部分随着波前进,而是指弦线的位移先出现在某处,继而又出现在另一处。同理,在谈论电磁波时,行进的是波,

但场只是值在变化。所以,今后如果有人说“运动的场”,你就应该把它理解为“变化的场”的同义词,在某种背景下这样称呼可能更好理解。

关于洛伦兹力公式中的速度,文[6]进行过比较正确的解读(但未能指出“相对于磁场静止”是无意义的)。文[3,4]引用了该文,但却仍然认为那个速度是“以相对于磁场静止的观测者为参考系”(即杆与磁场的速度差),甚至还出现了“导体棒相对于磁场静止的观测者的速度”这种难以读懂的短语。

3 剖析

就以第一道高考题为例,我们来剖析一下“运动的磁场”到底是指什么,意味着什么,该如何处理。

首先,原题显然是指磁场源是运动的。磁场源可以是磁铁,或者载流线圈。通电的无限长直螺线管(无论横截面形状如何),其内部为匀强磁场,外部磁场为零,边界清晰,因此是此题中场源最好的候选者。但无需如此细致,毕竟蹄形磁铁也通常默认为产生匀强磁场,只要忽略边缘效应。于是就将题设改为:一块蹄形磁铁静止时产生矩形区域的匀强磁场,大小为 B 。今让磁场如图垂直穿过导轨平面,而磁铁以速度 v 平行于导轨方向匀速向右移动,见图2(a)。

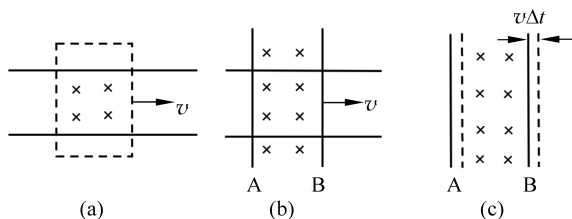


图2 运动的磁铁

不妨将此题中的参考系设为地面系,即观测者静止于地面。那么磁铁运动会使各处的磁场会发生变化。而变化的磁场产生感生电场,故而地面系中除磁场外还有电场。(注意:题设中并没有说地面系中只有磁场,而只是说有磁铁在运动。)此外,地面系中的磁场有多大?题设中的 B 只是磁铁系中测得的磁场大小,跟地面系中的测量值原则上是两码事。但由于我们默认此题中只是低速,相对论效应很小,故地面系中的磁场几乎没变。

可以看出,虽然此题没有考查电磁场的参考系变换(中学也不考查这个),但这一场景不可避免地会涉及参考系变换。这应该不是出题者的初衷。

接下来,地面系中有电场和磁场,磁场已知,那电场如何?使用电磁场变换是直截了当的。电磁理论满足洛伦兹协变性。对于同一电磁现象,从不同的参考系观测,所测得的电场与磁场的情况不同。此题中,磁铁系中只有磁场,通过变换,就可求得地面系中的电场和磁场。有人将此称为:电场是靠协变出来的。但为什么可以这样变换?是某种麦克斯韦方程组之外的新机制吗?当然不是。

所以,我们需要在地面系中只使用电磁场规律本身来得到这个电场,让学生意识到电磁场的参考系变换不是无本之木,它一定是与电磁场本身的规律相协调的,而不是某种另起炉灶的东西。而我们所用的知识很简单,只包括电动势、法拉第电磁感应定律和感生电场:电动势是非静电力(此时为感生电场力)对单位电荷做的功,而回路的感生电动势等于其磁通量的变化率。不过要注意:此处说的回路是指静止的回路,而且是泛指任一闭合回路(例如图 3(b)中的回路),不是指题中那个导轨和导体棒构成的变化回路(还要考虑动生电动势)。

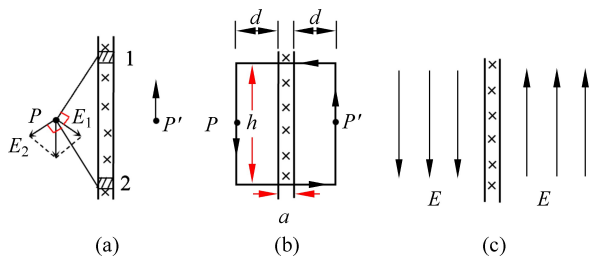


图 3 单层变化磁场产生的感生电场

如果磁场的边界是任意的或矩形的,要得到电场将需要较多的处理(包括物理上和数学上),会冲淡主题。为得到尽量简单又不失本质的处理方案,还需要磁场区域向上下两头无限延伸。于是题设又改一下:一块蹄形磁铁静止时产生长条形区域(长边远大于短边)的匀强磁场,大小为 B 。今让磁场居中垂直穿过导轨平面,区域短边与导轨平行,而磁铁以速度 v 沿短边匀速向右移动,见图 2(b)。这样的修改不影响原题的计算。

磁铁移动导致磁场变化,但显然只有两条边

界 A 和 B 处的磁场发生变化,其他地方的磁场此刻都维持原值。这两处地方就是产生感生电场的源头。图 2(c)中是间隔为 Δt 的两临近时刻的边界,其中 A 处磁场减少, B 处磁场增加。

先考虑一长窄条(宽度为 a)区域内有均匀磁场增加导致的感生涡旋电场。由于变化磁场产生电场的规律 $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\iint \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S}$ 与电流产生磁场的规律 $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \iint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}$ 在数学上相同,故后一情况下计算磁场的方法可以照搬过来。图 3(a)中的部分 1 为切出的一个微元(实为沿磁场方向的一长条),它在 P 点产生涡旋电场 E_1 。在另一边对称的地方取相同大小的微元 2,其在 P 点产生涡旋电场 E_2 。显然,二者必然大小相等(因为源的强度相等且距离相等),且合场强在图示平面内且平行于窄条。而整个窄条区域可以分成无数个这样的微元对,每一对产生的电场都沿平行方向,故最终的合场强必沿平行方向。而对称点 P' 处的电场必然也如此,只是反向而已,大小是一样的。

于是,我们可以过 P 点和 P' 点作图 3(b)所示的矩形环路(与题设中的实际环路无关)。先看电动势。由于感生电场只沿平行方向,故在两条垂直的路径上电场力做功为零。在平行路径上各点的场强显然都相等,因为 P 点的位置并不特殊,系统具有沿平行方向的平移不变性。于是,在两条平行路径上皆为恒力做功,功都是 qEh ,故整个回路的电动势为 $2Eh$ 。根据法拉第电磁感应定律,电动势应该等于回路包围的磁通量的变化率,

故有 $2Eh = \frac{\Delta B}{\Delta t} ah$,于是得到

$$E = \frac{a}{2} \frac{\Delta B}{\Delta t} \quad (2)$$

该结果跟 P 点到窄条的距离 d 无关,故马上得到,两个区域内都是匀强电场,大小相等但方向相反,如图 3(c)所示。

现在可以回到图 2(c)了。B 处窄条内磁场在增加,必在其两边产生都产生匀强电场,方向见图 4(a)(用 E_B 表示),大小用式(2)计算为

$$E = \frac{v \Delta t}{2} \frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{1}{2} v \Delta B = \frac{1}{2} v (B - 0) = \frac{1}{2} v B \quad (3)$$

而 A 处窄条内磁场在减小,变化快慢跟 B 处一样,只是正好相反,故 A 两侧的电场大小仍为

式(3),只是方向要反过来,在图4(a)中用 E_A 表示。两个场合成之后发现,在A、B之外的区域,合场强为零,而在内部,合场强为 vB ,方向向下(图4(b))。这就是最终的感生电场。(其实,这个电场也是变化的,形成位移电流,又会产生新的磁场跟原磁场叠加。但此题中皆为低速,故新磁场是高阶小量,忽略。)

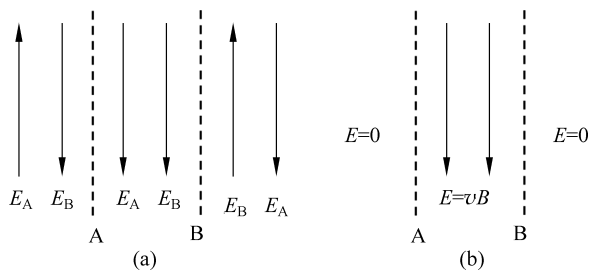


图4 双层变化磁场产生的感生电场

于是,由题设,当磁铁运动时,地面系中两虚线之间不仅有磁场 B ,还有向下的匀强电场 $E = v_1 B$ (见图5(a))。二者都是因磁铁而起。电场与磁场共同存在,导体棒中的载流子显然既受电场力又受洛伦兹力。不过它们都是非静电力,都宏观体现为电动势:一个是感生电动势 $E_{\text{感}} = EL = v_1 BL$,一个是动生电动势 $E_{\text{动}} = BLv_2$,二者方向相反(见图5(b)),总电动势为

$$E_{\text{mf}} = E_{\text{感}} - E_{\text{动}} = BL(v_1 - v_2) \quad (4)$$

在它们的作用下,电荷重新分布,各处的电荷积聚又在各处产生静电场(因杆在动,故实为似稳场:仅看某一时刻,无法将其与静电场区分,仍可定义电势),于是静电力和电压就出现了。

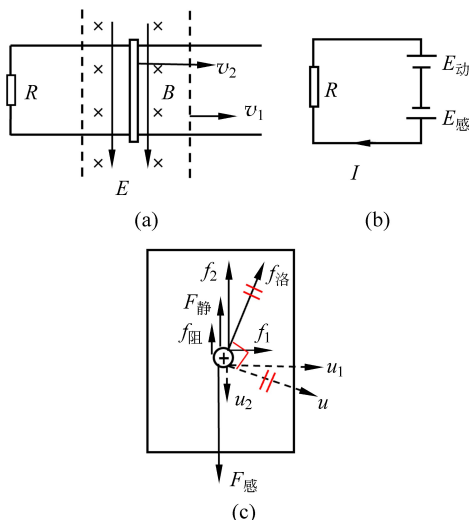


图5 磁铁运动时的复杂情况

有必要专门分析一下导体棒中载流子(假设为正电荷)的受力情况。图5(c)中, u 为载流子实际对地(即观测者)速度, u_1 为随杆平移的速度, u_2 为在导体中定向运动速度(宏观体现为电流 $I = nqSu_2$)。它受的洛伦兹力 f 也有两个分力,其中与导体棒垂直的 $f_1 = qu_2 B$ 宏观体现为安培力 $F_{\text{安}} = Nf_1 = Nqu_2 B = nqu_2 SLB = IBL$,做正功,与导体棒平行的 $f_2 = qu_1 B$ 宏观体现为动生电动势 $E_{\text{动}} = f_2 L/q = BLu_1$,做负功。两功之和显然为零(洛伦兹力不做功)。此外还有向下的感生电场力 $F_{\text{感}} = qE$ 和向上的、因电荷积聚导致的静电力 $F_{\text{静}}$ 。如果导体棒中还有电阻,那么载流子还将受到晶格阻力 $f_{\text{阻}}$,做负功,产生焦耳热。竖直方向上四力平衡。作为实际情况,载流子为负电子,则图中水平方向的量(u_1 和 f_1)都不变,而竖直方向的量(u_2 、 f_2 、 $F_{\text{感}}$ 、 $F_{\text{静}}$ 和 $f_{\text{阻}}$)全部反向即可。

此题中,用不当的概念(如“跟不上磁感线造成切割”),可以迅速得到式(4),而用法拉第电磁感应定律亦可得出。用后一方法者,会保守认为所得为总效应。而用前一方法者,会认为电动势就是动生的,就是洛伦兹力(的垂直分量)的宏观体现。此时就会得出矛盾:安培力做正功,而电动势(误认为就是动生电动势)也做正功,违背洛伦兹力不做功的结论。

4 换系

还应该从磁铁系中重新看待这一切。根据题设,在跟磁铁一起匀速运动的惯性系(磁铁系)中,会看到的是这样的场景(见图6):产生匀强磁场 B 的磁铁静止,电阻、导轨和导体棒一起以 v_1 向左运动。导体棒进入磁场区域后受安培力减速,而其他部分仍然保持匀速向左。设杆的速度为 v' ,则由题设有 $v' + v_2 = v_1$ (低速,忽略相对论效应)。动生电动势向下,大小为 $E'_{\text{动}} = BLv' = BL(v_1 - v_2)$,这就是全部电动势。而一旦减速,导体棒与导轨之间就出现题设中的恒定阻力 f ,阻

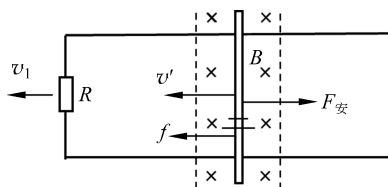


图6 磁铁系中的场景

止导体棒减速。随着速度 v' 减少,电动势和电流减小,安培力减小,直至最后安培力等于阻力,导体棒做匀速运动。

对比两个惯性系中的结论会发现,杆中的总电动势、安培力、电流等量都相同(再次强调:这里只是低速,忽略相对论时空效应),但电动势的构成和电场磁场情况却不同^[10]。地面系中有向下的动生电动势和向上的感生电动势,磁铁系中只有向下的动生电动势。磁铁系中只有磁场,而且是稳定的,故无感生电场;而地面系中有磁场,而且是变化的,还有感生电场。当然,静电场在两个系中基本相同。

总之,两惯性系中的观测结果有相同有不同,“不同”包括动生和感生电动势,还有电场和磁场。场源静止时,运动导线回路中只有动生电动势;场源运动导致磁场变化时,静止回路只有感生电动势。这里的“静止”和“运动”都是相对观测者而言的。有些结论确与观测者无关,有些结论则与观测者有关。

在低速时,相对论时空效应没什么体现,但电磁场的变换却体现得很明显。而狭义相对论的突破口,正是电磁理论。实际上爱因斯坦 1905 年关于狭义相对论的文章题目就是《论动体的电动力学》,针对的就是同一电磁现象从不同惯性系中观测结果的不同和相同之处。

费曼在提醒不能赋予场线过多真实性时也说^[8]：“由于我们改变坐标系时,电场和磁场会以不同组合方式显示出来,所以如何看待 E 场和 B 场就必须小心谨慎。例如,倘若我们把 E 场和 B 场想象成“线”,就不能赋予它们过多的真实性。”以该题为例,他是在说,在地面系中看到了电场线,可等我跑到跟磁铁一样快,电场线就不见了。如果我跑得再快些,则会又看到电场线,但反向了。从这个角度看,电场线是不真实的。

5 例外

第 2 节所引费曼之言最后一句,其实并未完全否定在某些场合使用“运动磁场”的做法。一个典型的情况是三相鼠笼异步电动机这一电磁驱动的应用场合(而非理论场合)。费曼在其书中后面谈感应电动机^[8]时,先谈了磁极旋转可用于驱动,然后说可以用三相电实现同样的“旋转”磁场(加

了引号),再谈旋转磁场时引号都没了。赵凯华^[11]和梁灿彬^[12]都使用过“旋转磁场”的字眼。原因很简单:这是应用场合,我们不关心其中的物理,只关心电流、电压这些东西,而且这个字眼也很形象。这些都是可以理解的。

中学教材^[13]谈电磁驱动时分为两段:“如果磁场相对于导体转动,在导体中会产生感应电流,感应电流使导体受到安培力的作用,安培力使导体运动起来,这种作用常常称为电磁驱动。交流感应电动机就是利用电磁驱动的原理工作的。配置的三个线圈连接到三相电源上,就能产生类似上面演示实验中的旋转磁场,磁场中的导线框也就随着转动。”这里第二段算应用场合,但第一段应属于理论场合,“磁场相对于导体转动”处应加以合适的文字,说明此时其实是产生了感生电场。中学教学本来就对参考系和参考系变换的观念强调得很少,在合适的场合不做说明可能会偏离物理初心。

教材^[14]在相关章节也使用了“磁场相对于导体运动”“导体在磁场中运动”等短语。后一短语其实没什么问题,但需要老师提醒其危险,因为学生可能觉得它跟“动物在树林中跑动”是一样的,其背后的潜意识是:磁场跟树林一样,可以谈论运动或静止。

参 考 文 献

- [1] 陈连余. 电磁感应问题中电路消耗的电功率究竟等于什么? [J]. 物理教师, 2013, 34(6): 63-64.
CHEN L Y. What is the electric power consumed by the circuit in the problem of electromagnetic induction[J]. Physics Teacher, 2013, 34(6): 63-64. (in Chinese)
- [2] 朱晓安, 张凤英. “电磁感应”教学中需要澄清的几个问题 [J]. 物理教师, 2018, 39(5): 23-26+29.
ZHU X A, ZHANG F Y. Several problems to be clarified in the teaching of electromagnetic induction [J]. Physics Teacher, 2018, 39(5): 23-26+29. (in Chinese)
- [3] 李永. 只有动生电动势的电磁感应现象中的功能关系——关于克服安培力做功的参考系的思考 [J]. 物理教学, 2021, 43(4): 60-61+80.
LI Y. Work-energy relation in electromagnetic induction with only motional electromotive force—On the reference system of work against ampere force [J]. Physics Teaching, 2021, 43(4): 60-61+80. (in Chinese)
- [4] 闫来贵. 正确认识动生电磁感应现象中的功能关系成立的参考系 [J]. 物理教师, 2021, 42(5): 58-60.

(下转第 24 页)

增大而减小,变化趋势趋于平缓,即在 b 较大时,继续增大 b 对于提高出膛速度效果并不明显。

对比三条曲线,可以发现对于相同的 b ,考虑 h 或增加 h 会减小出膛速度,会使 v 随 b 的增加速度变慢,曲线更平滑,这点与前面图 4 中 h 对 v 随 a 的变化的影响是相似的,而在 b 较大时,曲线并不会重合,这点与 v 随 a 的变化是不同的。

2.3 出膛速度 v 随 h 的变化

取 $a=0.5\text{m}$, $b=1\text{m}$,出膛速度 v 随平板轨道厚度 h 的变化如图 7 所示。

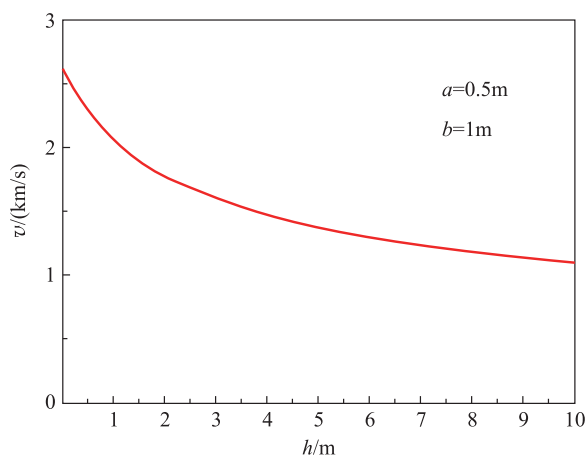


图 7 v 随 h 的变化情况

由图可知:出膛速度 v 会随着极板厚度 h 的增大而较小,且变化趋势与图 4 中 v 随 a 的变化趋势相似,这点从图 4 中对于确定的 a ,当 h 较大时 v 较小可看出,从图 5 中确定的 b ,当 h 较大时

v 较小也可看出。从理论上来看: a 一定时,增加 h ,相当于沿 x 方向增大平板轨道的横截面积,也会“稀释”电流,被稀释到左侧的电流由于距离场点更远,产生的磁场更弱,总磁场也会减弱,从而减小了出膛速度,所以该曲线与图 4 中曲线的变化趋势很相似。

3 结语

综上所述,加入厚度 h 以后,出膛速度 v 随 I 、 L 、 a 、 b 的增减性并未改变,所以增大弹丸出膛速度的方法依然是增大电流、增大轨道长度、减小轨道宽度、增大轨道距离,需要注意的是,在 b 较大时,继续增大它并不能起到很好的效果,只能通过其他手段来实现。但由于电流被“稀释”,会使 v 随 a 或 b 的变化速度变慢。另外,出膛速度会随平板轨道厚度 h 的增大而减小,应尽量让平板轨道薄一些。以上结论都是运用大学物理知识得出,既可以提高学生应用物理知识解决实际问题的能力,也能对未来的新式武器的发射原理有一定了解,从中感受大学物理的魅力。

参 考 文 献

- [1] 张相炎. 新概念火炮技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.
- [2] 康颖. 大学物理[M]. 4 版. 北京:科学出版社, 2019.
- [3] 陈蕾蕾. 物理与军事[M]. 北京:高等教育出版社, 2016.
- [4] 费恩曼, 莱顿, 桑兹. 费恩曼物理学讲义(新千年版·第 2 卷·中文版)[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2013:170, 209.
- [5] 黄亦斌, 郝继光, 吴泽宇. I_r 是内电压吗? IR 是外电压吗? [J]. 物理与工程, 2018, 28(3): 121-126.
- [6] HUANG Y B, HAO J G, WU Z Y. Is I_r the internal voltage? Is IR the external voltage? [J] Physics and Engineering, 2018, 28(3): 121-126. (in Chinese)
- [7] 杰克逊 J D. 经典电动力学(上册)[M]. 北京:人民教育出版社, 1978:232-234.
- [8] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2011:533.
- [9] 梁灿彬. 三相鼠笼电动机修理[M]. 北京:农业出版社, 1979:21.
- [10] 普通高中教科书·物理(选择性必修第二册)[M]. 北京:人民教育出版社, 2019:36.
- [11] 普通高中教科书·物理(选择性必修第二册)[M]. 广州:广东教育出版社, 2020:56.
- [12] 颜辉, 王素云, 饶华东. 追本溯源 破难之道——关于电磁感应中恒定磁场驱动下功率问题的求解[J]. 物理教学, 2021, 43(12): 51-52+70.
- [13] YAN H, WANG S Y, RAO H D. Tracing the source and breaking through the difficulty—Solution of power problem of constant magnetic field drive in electromagnetic induction[J]. Physics Teaching, 2021, 43(12): 51-52+70. (in Chinese)
- [14] 封小超. 洛伦兹力公式中的 v 究竟是什么[J]. 大学物理, 1984(7): 10-12.
- [15] FENG X C. What exactly is v in Lorentz force formula? [J]. College Physics, 1984(7): 10-12. (in Chinese)
- [16] 梁灿彬, 秦光戎, 梁竹健. 电磁学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2012:236.

(上接第 19 页)

YAN L G. Correct understanding of the reference system in which the work-energy relation about motional electromotive force holds[J]. Physics Teacher, 2021, 42(5): 58-60. (in Chinese)

[5] 颜辉, 王素云, 饶华东. 追本溯源 破难之道——关于电磁感应中恒定磁场驱动下功率问题的求解[J]. 物理教学, 2021, 43(12): 51-52+70.

YAN H, WANG S Y, RAO H D. Tracing the source and breaking through the difficulty—Solution of power problem of constant magnetic field drive in electromagnetic induction[J]. Physics Teaching, 2021, 43(12): 51-52+70. (in Chinese)

[6] 封小超. 洛伦兹力公式中的 v 究竟是什么[J]. 大学物理, 1984(7): 10-12.

FENG X C. What exactly is v in Lorentz force formula? [J]. College Physics, 1984(7): 10-12. (in Chinese)

[7] 梁灿彬, 秦光戎, 梁竹健. 电磁学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社, 2012:236.