

对有电磁作用时的牛顿第三定律的讨论

赵超先

在电磁学中经常可以看到这样一个例子, 两个稳恒电流元 $I_1 dl_1$ 和 $I_2 dl_2$ 之间的作用力并不符合牛顿第三定律。对该问题的解释往往是: 稳恒电流元不可能单独存在, 稳恒电流总是形成闭合回路, 可以证明两个载有稳恒电流的闭合回路之间的相互作用是符合作用反作用定律的。那么电流随时间变化的两个闭合回路之间的相互作用是否符合作用反作用定律? 或进一步说, 两个运动电荷间的作用力是否服从牛顿第三定律?

一、两个运动电荷间的作用力并不符合作用反作用定律

考虑两个某时刻分别沿 X 轴和 Y 轴的正方向运动的带电质点, 其带电量皆为 q , 运动速度皆为 v , 讨论它们之间的作用力。

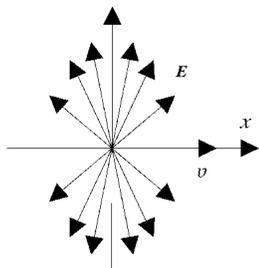


图 1

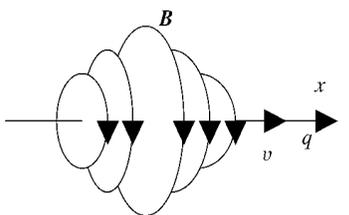


图 2

根据相对论, 运动电荷激发的电场并不由库仑定律给出, 但电场方向总是沿径向(图 1)。因此两个电荷所受电场力在其连线上,

分别用 F_e 表示; 同时运动点电荷产生的也不是稳恒电流, 其磁场不由毕奥-萨伐尔定律给出, 但其磁感线依然是环绕其运动轴线的闭合回线(图 2)。由此我们可以判断出某时刻这两个运动电荷所受磁力的方向, 分别用 F_m 表示。由图 3 可见, 这两个运动电荷所受电磁力并不符合牛顿第三定律。

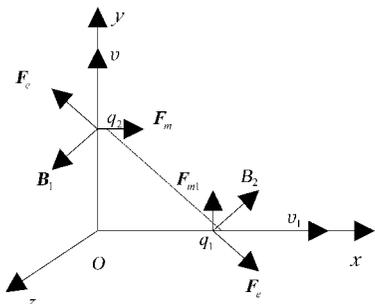


图 3

在力学中, 牛顿第三定律是推导动量守恒定律的重要依据。根据牛顿第三定律, 系统内部的互作

用力(内力)大小相等、方向相反, 因此在没有外力作用的条件下, 该系统的动量守恒。但现在这两个运动电荷间的作用不符合牛顿第三定律, 那么该系统的动量是否守恒? 在有电磁作用存在时, 动量守恒定律的形式如何?

二、电磁场和电荷体系的动量守恒定律和动量流密度张量

按照经典力学, 物体受的力等于它的动量的变化率, 两个物体的作用反作用相等表示动量在两个物体间的传递。在上述例子中, 电磁力会改变载荷体的动量, 但在载荷体之外, 还有可以独立存在和传播的电磁场。如果动量在电磁作用下也有守恒性, 那么电磁场本身必须具有动量, 并且能相应改变自己的动量, 以使整个体系的动量保持守恒。两个运动电荷所受的力不满足牛顿第三定律的原因, 正是因为还有电磁场存在。这两个点电荷并不构成封闭系统, 必须把它们的电磁场也包括在内才能构成一个封闭系统。

设对电磁场中某体积 V 内的载荷体单位时间的电磁作用力为 $\int_V f dV$ 。如果我们用 g 来表示电磁场的动量密度, 则 $(d/dt) \int_V g dV$ 是体积 V 内电磁场动量的增量。电磁场在传播时, 它的动量也会流动, 此动量流必须用二阶张量 T 来表示, 它有九个分量, 对任意面元 dS , $T \cdot dS$ 表示单位时间内流过此面元的电磁动量。则单位时间内通过体积 V 的界面 σ 流入的电磁动量为 $-\int_{\sigma} T \cdot dS$ 。为使 V 内的载荷体和电磁场总动量在电磁作用下保持动量守恒, 则必须满足

$$\int_V f dV + \frac{d}{dt} \int_V g dV = - \int_{\sigma} T \cdot dS. \quad (1)$$

我们可以从麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式导出动量密度 g 和动量流密度张量 T 的具体形式:

$$g = \epsilon_0 E \times B, \quad (2)$$

$$T = - \epsilon_0 E E - \frac{1}{\mu_0} B B + \frac{1}{2} I (\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2). \quad (3)$$

从力学观点来看, 质点组的动量守恒和牛顿第三定律是等价的。但对一个包含有两个或两个以上的有相互作用的带电粒子系统来说, 应理解为此粒子系统的总动量与它们的电磁场的动量之和在运动

中保持守恒。只有电磁场的动量变化可忽略时,才会有粒子组的动量守恒。当然力学中涉及的绝大部分力(如弹力、摩擦力和碰撞力)在本质上都是电磁作用的宏观表现。对宏观电中性物体,两者必须相接触才会有相互作用,在这种作用下电磁场的变化微不足道,若能不计这一电磁场的变化,才有牛顿第三定律的成立。

稳恒情况下静电力是通过电场应力来传递的按照公式(1),单位时间内流入体积 V 的电磁动量应为 $-\int_V \mathbf{T} \cdot d\mathbf{S}$ 。那末对体积 V 的任一面元 $d\mathbf{S}$ 来说, $-\mathbf{T} \cdot d\mathbf{S}$ 可理解为 $d\mathbf{S}$ 前方的电磁场对 $d\mathbf{S}$ 后方的电磁场的应力。我们可引入电磁场应力张量

$$\Phi = -\mathbf{T} = \epsilon_0 \mathbf{E}\mathbf{E} + \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B}\mathbf{B} - \frac{1}{2} \mathbf{I} (\epsilon_0 E^2 + \frac{1}{\mu_0} B^2) \quad (4)$$

来表示这一作用。

如果用 $\mathbf{F} = \int_V \mathbf{f} dV$ 表示(1)式中载荷体受的作用力,则方程(1)可改写为

$$\mathbf{F} = -\frac{d}{dt} \int_V \mathbf{g} dV + \int_V \Phi \cdot d\mathbf{S} \quad (5)$$

在稳恒电磁场的情况下,场的动量不随时间变化,(5)式右边第一项为零,此时载荷体所受的力即为作用于边界上的电磁应力

$$\mathbf{F} = \int_V \Phi \cdot d\mathbf{S} \quad (6)$$

应力的提出深入表明了电磁作用力是如何通过电磁场应力传递的。下面我们通过几个例子来证明。

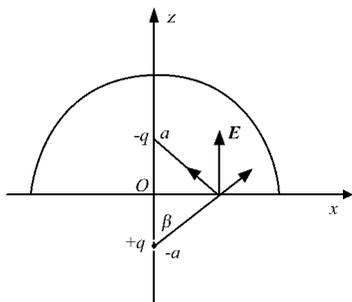


图4

试求两个点电荷 q 和 $-q$ 之间的作用力。选择一个仅包围电荷 $-q$ 的封闭面 S ,由 $z=0$ 的平面和球心在原点、半径 $R \rightarrow \infty$ 的半球面组成(图4)。 $-q$ 所受的电场力可通过应力张量沿封闭面 S 的积分得到,由于仅存在静电场,故 $\mathbf{B} = 0$ 。这样:

$$\mathbf{F} = \int_V \Phi \cdot d\mathbf{S} = \epsilon_0 \int_V d\mathbf{S} \cdot (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{I}) \quad (7)$$

考虑到数量级,在半径 $R \rightarrow \infty$ 的半球面上的积分为零,所以只要计算 $z=0$ 的平面上的积分。由

对称性,在 $z=0$ 的平面上的电场强度沿 Z 方向:

$$\mathbf{E} = 2E_z \cos\theta \mathbf{e}_z = \frac{qa}{2\pi\epsilon_0(a^2 + \rho^2)^{3/2}} \mathbf{e}_z \quad (8)$$

将其代入(7)式,并考虑到 $z=0$ 的平面的外法线沿负 Z 方向,平面面元的表示式为 $d\mathbf{S} = -dS \mathbf{e}_z = -\rho d\rho d\varphi \mathbf{e}_z$ 。积分可得 $-q$ 所受的电场力:

$$\mathbf{F} = \epsilon_0 \int_V d\mathbf{S} \cdot (\mathbf{E}\mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{I}) \quad (9)$$

$$= -\frac{q^2 a^2}{8\pi^2 \epsilon_0} \mathbf{e}_z \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty \frac{\rho d\rho}{(a^2 + \rho^2)^3} = -\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(2a)^2} \mathbf{e}_z$$

可见与库仑定律的结果是一致的。对库仑力,我们往往批驳超距作用的观点,本例清楚地表明两个点电荷间的作用力是如何通过电磁场应力来传递的。

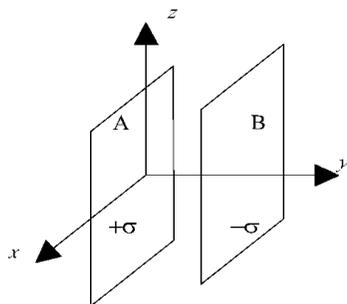


图5

求平板电容器极板上单位面积受的力。设我们求平板电容器 A 极板上单位面积受的力(图5),平板电容器极板间的电场为:

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \mathbf{e}_y \quad (10)$$

由于仅存在静电场,有 $\mathbf{B} = 0$ 。且极板间的电场为(10)式表示的均匀场,故应力张量只有一个分量

$$\Phi_{yy} = \epsilon_0 E_y E_y \mathbf{e}_y \mathbf{e}_y - \frac{1}{2} \epsilon_0 E_y^2 \mathbf{e}_y \mathbf{e}_y = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_y^2 \mathbf{e}_y \mathbf{e}_y \quad (11)$$

电容器 A 板上面元 $d\mathbf{S}$ 所受的电场应力为:

$$d\mathbf{f} = d\mathbf{S} \cdot \Phi = dS \mathbf{e}_y \cdot \Phi_{yy} \mathbf{e}_y \mathbf{e}_y = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_y^2 dS \mathbf{e}_y \quad (12)$$

代入 $E_y = \sigma/\epsilon_0$ 可导出 A 极板上单位面积受的力为 $(\sigma^2/2\epsilon_0) \mathbf{e}_y$,这是我们熟知的导体表面电荷受力的表示式。

从上述讨论可知:(1)在力学中我们从牛顿定律导出了通常所熟知的动量守恒定律的表示式,但更普遍的动量守恒定律并不依靠牛顿定律。动量概念不仅适用于以速度 v 运动的质点或粒子,同时也适用于电磁场。电磁场也有动量,它可以同带电体交换动量。不同的是,物体一方动量变化率可用物体所受的力表示,但对电磁场的动量不再能用 $m\mathbf{v}$ 这

实施新课程标准,提高物理课堂效率

董书生



爱因斯坦说:“要是没有那些能够独立思考,有创造能力的个人,社会的向前发展是不可想象的。”可见,创造能力的培养无论是对于个体的成长,还是整个民族的发展和人类的进步,都具有重大而深远的意义。为此,物理教科书改进了,改变了传统教育中的重书本知识轻实践、轻能力、轻创新的模式,变成了图文并茂、注重实践和能力且有利发展学生思维的教科书。那么,物理教育工作者,在素质教育教学观念的指导下,新课程标准的理念驱动下,有必要充分利用教材,结合学生的个体来提高物理课堂教学的效率。本文就个人的教学实践谈几点看法。

一、呈现丰富的学习材料,激发学生的学习兴趣

普通高中教育仍属于基础教育,注重全体学生的共同基础,同时针对学生的兴趣、发展潜能和今后的职业需求,设计供学生选择的物理课程模块,以满足学生的不同学习需求,促进学生自主地、富有个性地学习。为此,教师不能单调地应用“一支粉笔、一张嘴”的授课方法,而应该充分利用新教材,展示物理学科的魅力。

新课程中的栏目有:课题研究、实验探究、做一做、说一说、信息浏览与STS栏目等。课题研究,提供学生选择研究,让他们体验探索的激动,充分展示他们的才智;实验探究,学生根据提示的问题设计方案,动手做一些有趣的实验,进行科学探究,品味探索科学奥秘的喜悦;还有信息浏览,STS栏目,开阔学生的眼界,了解物理学史上的经典事例,科学家小故事……对于课本上的实验,应该尽可能地开足开全学生实验、演示实验。对于一些受到场地或其他条件限制的实验,则可以利用现代化电教手段来弥补,模拟实验内容。例如拍摄小球做自由落体运动的照片,分子间的相互作用力,天体运动的模拟等。

样的形式表示。在考虑有电磁作用在内的系统所发生的过程时,电磁场本身的动量必须计算在内,这样才能正确使用牛顿第三定律。(2)在稳恒电磁场的情况下,场的动量不随时间变化,于是两个带电体之间的作用力将等值反号。但不能说电磁场不参与动

课外小制作、研究活动、STS栏目也要作相应指导,从而强化课上内容的直观性教学,课后学习的主动性教育,提高学生的兴趣。

二、面向全体学生,制定合适的教学目标,实施“分层次”教学

根据布鲁姆的理论,世界上任何一个人能够学会的东西,几乎所有的人也能学会——只要向他们提供适当的前期和当时学习条件。教育工作者应为学生提供理想的“学习条件”,根据不同学生的实际,设计多层次的教学目标,适用具有个性特点的方法进行教学。例如:基础知识和基本概念的教学尺度,一般以中等偏下的学生为基准,以大容量提问、多向度训练为载体,保证大多数学生能够达到要求。当然也设置一些“高难度”的拓展问题,满足优等学生的学习要求,做到基础问题“差生答”、拓展问题“优生”答。使所有学生在原有基础上均有所得,先后达标,实现“共同发展”与“差别发展”的统一。

实施分层教学,客观全面地把握学生的实际。班级分层次教学,同一班级,学生个体之间的知识、兴趣、能力、毅力、潜力等方面的差异较大,针对不同层次的学生,教学要求与教学内容是不统一的,教师要根据每个学生的个性特点和学习情况,层中再分层,区别对待,实施异步教学,因势利导,突出了学生的个性发展。教学内容的分层次教学,同一班级的学生,原有的物理基础知识存在差别,接受物理知识的能力不同,教师在备课时,不仅要备教材、备教法,更要备学生。充分考虑学生原有的知识准备,使新授内容位于学生的最近发展区,即学生“跳一跳,就能摘到好蜜桃”。针对不同层次的学生,提出不同的

量交换,虽然它本身的动量不变,但它是带电体间动量交换的媒介。从上述例子可见,静电力是通过电场应力来传递的。也就是说,电磁场对载荷体的作用力是通过电磁应力来传递的。

(江苏省南京市晓庄学院物理系 210017)

现代物理知识