

牛顿第三定律的适用范围辨析

王胜华 侯 恕

(东北师范大学 物理学院 吉林 长春 130024)

牛顿第三定律作为牛顿力学中的重要基础,在经典力学领域占有很重要的位置.下面我们来简单回顾一下牛顿发现牛顿第三定律的过程.

牛顿根据笛卡儿和惠更斯关于碰撞的研究成果,引入冲量和动量定理,考虑到:碰撞的两个物体的动量改变大小相等,方向相反,因此,两个物体的冲量也等大反向,又因为作用时间相同,所以,两个物体受到的力等大、反向.从而,牛顿得出了牛顿第三定律:两个物体间的作用力和反作用力总是大小相等,方向相反,作用在同一条直线上.这个定律告诉我们,存在于两个物体间的相互作用力总是等大、反向,共线.

在由赵凯华和陈熙谋编写的《电磁学》中,有一个这样的例子,

例1 求一对垂直放置的电流元间的相互作用力,如图1,其中电流元1沿水平方向放置,电流元2沿竖直方向放置.由安培定律

$$d\vec{F}_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 \cdot d\vec{l}_1 \times (I_2 \cdot d\vec{l}_2 \times \vec{r}_{21})}{r_{21}^2}$$

可以判断出:电流元1受到沿竖直向下的力,而电流元2没有受力.从这一结果看,这一对电流元受到的力的情况并不满足牛顿第三定律.难道牛顿第三定律是错误的吗?

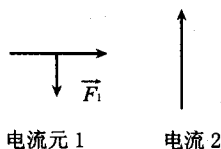


图1

通过阅读物理学史,我们发现,在牛顿生活的时代,物理学家们研究的相互作用都是沿着存在相互作用的两个物体的连线方向上,而且这两个物体运动的速度都处于常速范围内.在这个背景下,牛顿发现了牛顿第三定律.牛顿运动定律是建立在绝对时空观和超距作用的基础上的.所谓绝对时空观,就是空间和时间与物质及其运动无关,它们彼此也不相关,而一切物理过程都用相对于它们的空间坐标和时间坐标来描述.超距作用是指分离物体间不需要任何介质,也不需要时间来传递它们之间的相互作用,也就是说

相互作用以无穷大的速度传递.

在相当长的一段时间内,牛顿力学的思想统治了整个物理学,直到19世纪,物理学界发现了电和磁之间的关系,建立了电场、磁场的概念.在麦克斯韦建立了系统的电磁场理论后,证实了,电磁作用是通过电磁场以光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 来传递的,超距作用被否定.同时,物理学家发现:运动的电荷在磁场中受到洛伦兹力,并且运动的电荷仍能激发出磁场,这个磁场又将作用于另外一个运动电荷,因此,这两个运动电荷之间也存在相互作用.那么,两个运动电荷之间的电磁作用力满足牛顿第三定律吗?由于运动电荷之间的库仑力是满足牛顿第三定律的,因此,我们仅来讨论物体在磁场中的受力的情况.

1 运动电荷间的相互作用力是否满足牛顿第三定律

例2 如图2,一个带正电的电荷A,以速度 \vec{v}_A 水平向右运动,在它的正右方,有一个同样带正电的电荷B,以速度 \vec{v}_B 竖直向上运动.由安培定律判断得出:A受到一个竖直向下的力 \vec{F}_A ,但是,B不受力.在这个例子中, $F_A \neq F_B$,很明显牛顿第三定律不成立.但是所有的运动电荷间的相互作用力都不满足牛顿第三定律吗?

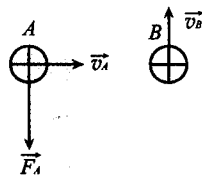


图2

一些文章认为:“电荷A受到由电荷B激发的磁场所施加的作用力,同理,B受到由A激发出的磁场所施加的作用力,这两个力根本就不是一对相互作用力,因此判定两个运动电荷之间作用力不满足牛顿第三定律”.我认为这种想法太片面,因为电荷之间的相互作用是通过电荷激发的电磁场来实现的,因此在研究电磁场中作用力问题时,应该把电荷和它所激发的场作为一个研究对象.因此,可以通过间接研究两个电荷受到的力是否等大、反向,来判断牛顿第三定律是否适用!

1.1 运用动量守恒定律定量分析

我们知道运动电荷产生的磁场随时间变化,从而激发涡旋电场. 当我们只考虑磁相互作用时,有

$$\frac{d}{dt}[m_A \vec{v}_A + q_A \vec{A}_B + m_B \vec{v}_B + q_B \vec{A}_A] = 0 \quad (1)$$

其中 $m\vec{v}$ 是运动电荷的动力动量, $q\vec{A}$ 是运动电荷的磁势动量.

$$\text{即 } m_A \vec{v}_A + q_A \vec{A}_B + m_B \vec{v}_B + q_B \vec{A}_A = \text{常量} \quad (2)$$

以上式子就是电荷在电磁场中运动的动量守恒定律,表明两个运动电荷的总正则动量守恒. 又当牛顿第三定律成立时,有

$$\frac{d}{dt}[m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2] = 0 \quad (3)$$

$$\text{所以 } \frac{d}{dt}[q_1 \vec{A}_2 + q_2 \vec{A}_1] = 0 \quad (4)$$

$$\text{最后得到 } \vec{r}_{12} \times (\vec{v}_1 \times \vec{v}_2) = 0 \quad (5)$$

对于图2所示例子,我们可以看出并不满足以上条件,所以运动电荷之间的相互作用力不满足牛顿第三定律.

1.2 定性分析

如果把两个运动电荷和它们激发的场看做一个系统的话,这是一个封闭的系统,系统总动量守恒. 但是,由于电磁场也是一种物质,具有动量和角动量,在非恒定情况下,它的动量和角动量会随时间变化,而且它可以和运动电荷交换动量和角动量,因此,两个电荷之间的总动量发生变化,两个电荷动量变化量的大小不等,从而作用力不满足牛顿第三定律. 但是运动电荷和磁场在一起的总的动量和角动量是守恒的.

从以上分析我们可以得出结论:运动电荷之间的相互作用力,不满足牛顿第三定律.

2 电流间的相互作用力满足牛顿第三定律吗?

我们知道在电磁场中的基本研究对象除了运动电荷外还有电流,那么两个电流之间的相互作用力满足牛顿第三定律吗?

由于电流的基本单位是电流元,所以我们首先来研究一下电流元的受力情况. 对于文章开头的例1,两个电流元是稳恒电流元,但是稳恒电流的电场线是无头无尾的闭合曲线,因此载有稳恒电流元的电路必须是闭合的,可见孤立的稳恒电流元并不存在. 所以研究稳恒状态下孤立的电流元之间的作用力是否满足牛顿第三定律没有意义. 因此我们在讨论稳恒电流之间相互作用力时,不用通过研究电流元的情况来讨论.

2.1 定量分析

我们知道常见的电流包括:闭合稳恒电流、非稳恒电流和非稳恒回路电流. 对于闭合稳恒电流来说,

对于两个闭合载流回路 L_1 和 L_2 , 计算它们之间的相互作用力,需要将安培定律沿着两个闭合回路进行积分:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{12} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{L_1} \oint_{L_2} \frac{I_2 \cdot d\vec{l}_2 \times (I_1 \cdot d\vec{l}_1 \times \vec{r}_{12}^0)}{r_{12}^2} \\ &= \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{L_1} \oint_{L_2} \left[\frac{(d\vec{l}_2 \cdot \vec{r}_{12}^0) d\vec{l}_1}{r_{12}^2} - \frac{(d\vec{l}_2 \cdot d\vec{l}_1) \vec{r}_{12}^0}{r_{12}^2} \right] \\ &= -\frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{L_1} \oint_{L_2} \left[\frac{(d\vec{l}_2 \cdot d\vec{l}_1) \vec{r}_{12}^0}{r_{12}^2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_{21} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{L_1} \oint_{L_2} \frac{I_1 \cdot d\vec{l}_1 \times (I_2 \cdot d\vec{l}_2 \times \vec{r}_{21}^0)}{r_{21}^2} \\ &= \frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{L_1} \oint_{L_2} \left[\frac{(d\vec{l}_1 \cdot \vec{r}_{21}^0) d\vec{l}_2}{r_{21}^2} - \frac{(d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2) \vec{r}_{21}^0}{r_{21}^2} \right] \\ &= -\frac{\mu_0 I_1 I_2}{4\pi} \oint_{L_1} \oint_{L_2} \left[\frac{(d\vec{l}_1 \cdot d\vec{l}_2) \vec{r}_{21}^0}{r_{21}^2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

由于 $\vec{r}_{12}^0 = -\vec{r}_{21}^0$, 所以 $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$, 由此可见两个闭合稳恒电流间的相互作用力满足牛顿第三定律.

2.2 定性分析

因为两个电流和它们激发的电磁场组成的系统动量守恒. 因为稳恒电流所激发的电磁场是稳恒的, 因此电磁场的动量不改变, 但是电磁场仍参与和两个电流交换动量, 因此, 两个电流的总动量不改变. 所以, 两个电流的动量变化量大小相等, 方向相反, 其相互作用力大小相等, 方向相反, 满足牛顿第三定律.

一个运动的电荷可以看做是一个非稳恒的电流元. 对于非稳恒电流和非稳恒回路电流来说, 我们可以通过研究非稳恒电流元即运动电荷来分析, 因为它们激发的电磁场是非稳恒的, 电磁场的动量和角动量会随时间变化, 所以, 两个电荷之间的总动量发生变化, 因此, 它们之间的作用力必然不会等大、反向. 由此可知非稳恒电流和非稳恒回路电流间的相互作用力不满足牛顿第三定律. 所以, 两个电流之间的作用力要想满足牛顿第三定律, 必须是稳恒、闭合的.

3 结论

通过分析, 我们知道: 在电磁场中的电流和运动电荷之间的相互作用力并不一定满足牛顿第三定律. 牛顿第三定律适用于物体之间的接触作用, 相互作用力的方向在两个物体的连线上, 并且, 力的传递速度远大于物体的速度, 不考虑延迟作用. 在电磁场中并不一定适用. 总结一下牛顿第三定律的适用范围是: 在有心力(相互作用力的方向在两个物体的连线上)作用下, 相互作用的两个物体的运动速度远小于相互作用的传递速度. 在高中物理中, 我们研究的相互作用力, 如弹力、拉力和摩擦力, 都符合牛顿第三定律.

word版下载: <http://www.ixueshu.com>
