

比翼齐飞的电荷吸引还是排斥及相关问题的思考

程靖龙

(陕西省瀚普思教育咨询有限公司 陕西 西安 710072)

吴晓松

(重庆市涪陵第五中学 重庆 408000)

(收稿日期:2016-09-07)

摘要:对比翼齐飞的两个点电荷之间的相互作用力进行了定量计算,得出在低速运动情形下只需要考虑库仑力的结论,并据此进一步思考了库仑定律和牛顿第三定律的适用条件等几个与运动电荷之间作用力相关的问题.

关键词:运动电荷相互作用 电流磁效应 库仑定律 牛顿第三定律 动量守恒定律

1 问题的提出

设有两个带正电荷的物体,均可看作点电荷,以较小的间距并排沿某方向运动,可谓之比翼齐飞.一方面,同种电荷相互排斥,两正点电荷之间存在着斥力;另一方面,两正点电荷同向等速近距离运动,等效于两段平行同向电流,根据同向电流相互吸引,它们之间又存在引力.那么,比翼齐飞的这两个带电体之间究竟是吸引还是排斥呢?就这个问题,笔者通过网络进行了广泛的讨论,讨论对象包括理工科博士生、硕士生还有为数不少的一线中学物理教师,可是,讨论一直没有令人满意的结果.

大家基本上都会有这样的认识:速度较小时同性相斥占主导,速度较大时,同向电流相吸占主导,相吸还是相斥得看速度的大小了.这样的说法,似乎也能讲得通.可是,当笔者指出,若把比翼齐飞的情形通过重新选定参考系从而变成两个点电荷都静止的情形,考虑到两个点电荷之间的相互作用是客观存在的,不应该随着参考系的人为改变而有所不同,讨论便中止了.

到底是什么原因导致了这样的局面呢?

直到有一天重庆市的吴晓松老师联系到笔者,给出了如下定量分析,使得问题可以进一步思考.立足定量分析结果,我们进一步对中学物理教师普遍存在困惑的几个问题进行了充分的沟通,两人合力成文与同行交流.

2 问题分析

建立如图1所示的坐标系 xyz ,其中一个带电

体的电荷量为 q_1 ,另一个带电体的电荷量为 q_2 ,两者速度相同,间距为 r ,相对地面的速度均为 v .设两个带电体均沿 x 方向以速度 v 匀速运动,某时刻,带电体 q_1 刚好运动到坐标原点 O ,带电体 q_2 刚好运动到 y 轴上坐标为 $(0, r, 0)$ 的位置.下面计算此刻 q_1 对 q_2 的作用力.

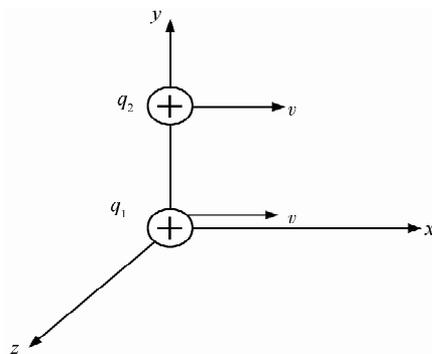


图1 分析图

要计算 q_1 对 q_2 的作用力,需先求出 q_1 在 q_2 所处位置产生的电场和磁场.

假设存在这样一个参考系 $x'y'z'$,它和 q_1, q_2 一起沿 x 轴正方向以速度 v 匀速运动,则在这个参考系中, q_1 和 q_2 均处于静止状态,这样, q_1 只激发电场,不激发磁场.在参考系 $x'y'z'$ 中, q_1 在 q_2 所处位置处激发的电场和磁场分别为

$$E_x' = 0 \quad E_y' = \frac{kq_1}{r^2} \quad E_z' = 0 \quad (1)$$

$$B_x' = 0 \quad B_y' = 0 \quad B_z' = 0 \quad (2)$$

由电磁场参考系的变换原理^[1],将上述电场和磁场变换到图1中静止的参考系 xyz 中,即为带电体 q_1 在 q_2 位置 $(0, r, 0)$ 处的电场和磁场.

在 q_2 位置 $(0, r, 0)$ 处, q_1 不产生 x 方向的电场和磁场

$$E_x = 0 \quad B_x = 0 \quad (3)$$

在 q_2 位置 $(0, r, 0)$ 处, q_1 会产生 y 方向的电场, 不产生 y 方向的磁场

$$E_y = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} E_{y'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{kq_1}{r^2} \quad (4)$$

$$B_y = 0$$

在 q_2 位置 $(0, r, 0)$ 处, q_1 不产生 z 方向的电场, 但会产生 z 方向的磁场

$$E_z = 0 \quad (5)$$

$$B_z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{v}{c^2} E_{y'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{v}{c^2} \frac{kq_1}{r^2}$$

由于 q_2 也在以速度 v 运动, 故带电体 q_1 在 q_2 位置处产生的电场和磁场都对 q_2 有作用力, 即 q_2 既受到电场力也受到磁场力, 其中电场力是排斥力, 磁场力是吸引力。

q_1 对 q_2 的电场力方向沿 y 轴正方向且

$$F_{\text{电}} = q_2 E_{1y} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{kq_1 q_2}{r} \quad (6)$$

q_1 对 q_2 的磁场力方向沿 y 轴负方向且

$$F_{\text{磁}} = q_2 v B_{1z} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{v^2}{c^2} \frac{kq_1 q_2}{r^2} \quad (7)$$

合力为

$$F = F_{\text{电}} - F_{\text{磁}} = \frac{1 - \frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{kq_1 q_2}{r^2} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \frac{kq_1 q_2}{r^2} \quad (8)$$

对真实带电体必有 $v < c$, 式中根式始终有意义且值为正, 可见 q_2 所受合力的方向为 y 轴正方向, 即 q_2 所受的力总为排斥力, 如图 2 所示。

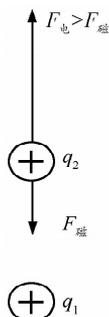


图 2 对 q_2 受力分析

同理, 可算出 q_2 对 q_1 的作用力也为排斥力. 可见, 比翼齐飞的两个带电体之间有电场力, 也有磁场力, 且电场力大于磁场力。

式(8)中, 令 $v = 0.1c$, 计算可得

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 0.995$$

即两运动电荷之间的排斥力为

$$F \approx 0.995 \frac{kq_1 q_2}{r^2}$$

考虑到第一宇宙速度为 7.9 km/s , 而 $0.1c = 3.0 \times 10^7 \text{ m/s} = 3.0 \times 10^4 \text{ km/s}$, 很显然, $v = 0.1c$ 这样的速度, 对地球上通常的带电体来说也是遥不可及的。

综上, 除非是高能粒子实验中的情形, 实际分析两个运动带电体之间的相互作用时, 无需考虑磁场力, 仅考虑库仑力即可。

3 问题讨论

基于上述结论, 笔者对以下几个相关问题进行了思考。

(1) 两平行通电导线, 若其内部运动电荷同向而等速, 为什么却能相互吸引呢?

对于通电导线, 不同于运动电荷流, 没有净电荷, 每根导线都是电中性的, 故导线之间的电场力为零. 这样, 通电导线之间的相互作用就只有磁场力。

(2) 库仑定律是否适用于运动电荷之间?

因为速度不同的运动电荷之间的相互作用力比较复杂, 我们以一静一动的情形予以说明(速度不同的两运动电荷总可通过参考系的变换化为一静一动的情形), 在图 1 中, 假设 q_2 静止在 y 轴坐标 $(0, r, 0)$ 处, q_1 以速度 v 沿 x 轴匀速运动, 且此瞬间刚好运动到原点, 此瞬间, 静止电荷 q_2 对运动电荷 q_1 的作用力大小为

$$F_{21} = q_1 E_{21} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

又因为 q_2 静止, 运动电荷 q_1 产生的电场和磁场中, 只有电场对其施加作用力(磁场对静止电荷无作用力), 即

$$F_{12} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{kq_1 q_2}{r}$$

假设两个运动带电体之间的相对速度等于第三宇宙速度 16.7 km/s 即 $1.67 \times 10^4 \text{ m/s}$, 光速 $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$, 计算出上式中根号值为 0.9999997 ,

等号前的系数为 1.000 000 3,若考虑这个系数,带来的相对误差为 0.000 03%!这样的误差,是完全可以忽略的!由此可见,除非是高速运动的基本粒子,计算两个带电体(宏观物体)之间的相互作用时,无需考虑磁效应.

(3) 牛顿第三定律对运动电荷之间是否仍适用?

前文中比翼齐飞的两个电荷间的力的确是大小相等、方向相反的,但这仅仅是特殊情况,不妨设图 1 中 q_2 的速度沿 y 轴正向,如图 3 所示,运动电荷 q_1 通过激发的磁场作用于 q_2 的力,由右手螺旋可知沿 F_{12} 方向,并不沿 $q_1 q_2$ 的连线,据毕奥-萨伐尔定律,运动电荷 q_2 激发的磁场在此刻 q_1 处为零,因此 q_2 对 q_1 电荷却无磁场作用力(图 3 中并未画出它们之间的库仑力),由此可见磁场力 F_{12} 此刻不存在反作用力,作用与反作用定律在这里失效了,故牛顿第三定律并不是对一切相互作用都是适用的.如果说静止电荷之间的库仑力是沿两个电荷的连线方向,静电作用可当做以“无穷大速度”传递的超距作用,因而牛顿第三定律仍适用的话,那么对于速度不同的运动电荷之间的相互作用,牛顿第三定律就不一定适用了.实验证明,对于以电磁场为媒介传递的近距离作用,总存在着时间的推迟,对于存在推迟效应的相互作用,牛顿第三定律显然是不适用的^[3].虽然在理论分析上两运动电荷之间的相互作用因为磁场力的缘故并非总是等大反向,但是根据前文的分析结论,在实际情形中磁场力相比于电场力可以忽略不计,所以,实际分析两运动电荷之间的相互作用时,可以认为牛顿第三定律依然适用.

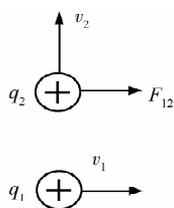


图 3 牛顿第三定律是否适用的分析图

(4) 动量守恒定律对运动电荷系统是否适用?

毋庸置疑,在牛顿力学体系中,与牛顿第三定律密切相关的动量守恒定律是一个普遍的自然规律.在有电磁相互作用参与的情况下,动量的概念应从实物的动量扩大到包含场的动量,从实物粒子的机械动量守恒扩大为全部粒子和场的总动量守恒,这样动量守恒在电磁作用中也仍是适用的^[4].速度不同的运动电荷之间的相互作用不满足牛顿第三定律

正是因为电磁场这个第三者存在.力学中物体所受的力等于动量的变化率,物体间的作用和反作用表示动量在这两个物体间的传递.电磁场也有动量,它同带电体也可交换动量,但在物体一方,动量变化率仍可用物体所受的力表示,而电磁场的动量变化率却不能再用力来表示了.

(5) 由文中的计算结果可知,理想情况下即当时,比翼齐飞的两个电荷之间的作用力为零,而两个电荷之间的力是客观存在的,这怎么理解呢?

从文中计算出的结果可知,比翼齐飞的两个带电体之间的作用力是与齐飞的速度大小有关系的,因为在相对论中,力、质量等物理量对不同惯性系均不是相对论性不变量,它们各自存在变换关系^[2].对于运动电荷之间的作用力来讲其中存在磁场力,而磁场力是与速度有关的,总的电磁力为 $\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$,它是满足协变性的.比翼齐飞的两电荷间合力为零一点也不奇怪,因为文中计算的合力其实就是总的电磁力,它的大小可以在零到某个特定值之间,究竟取这个区间的哪一个值就要看速度的大小了.结果取零是其中一种非常特殊的情况,即速度为光速的时候.而两个电荷都静止时,结果就取某个特定值 $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$.不管结果是零也好,某个特定值也好,它都是一个规律得出的结果,零和那个特定值都是一系列值中的两个,相互作用的规律仍然是满足的,并没有被破坏.

(6) 两个正对均匀带电圆环以相等的速度同向转动,它们之间的力是否跟两个比翼齐飞运动电荷的情形一样?如果转动的速度足够大,能不能表现为相互吸引呢?

如果选择转动的物体为参考系,显然不再是惯性系,所以这个不能简单类比比翼齐飞的情形,只能算是比翼齐飞的一种变形.虽然如此,笔者仍倾向于比翼齐飞的结论.不过真实情况究竟怎么样希望有条件的同行能做做这个实验,真心期待同行的反馈.

参考文献

- 1 郭硕鸿.电动力学(第2版).北京:高等教育出版社,1997
- 2 刘树田,蔡琦.一个电磁学悖论的消除.物理教学,2008(06):47~49
- 3 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.物理1必修教师教学用书(第3版).北京:人民教育出版社,2014.5
- 4 邝向军,廖旭.运动电荷间的相互作用.电子科技大学学报,2003,3(6):666~668