



## 关于洛伦兹力与安培力关系的思想碰撞

陈璐畅

(华南师范大学物理与电信工程学院 广东 广州 510006)

邓有鸿

(广州市第二中学 广东 广州 510530)

(收稿日期:2017-03-09)

**摘要:**洛伦兹力与安培力的关系,是中学物理教学的难点.洛伦兹力与安培力关系的争论中存在困惑,为什么洛伦兹力永不做功而其宏观表现的安培力常常可以做功?从“合力说”“碰撞传递”“霍尔电场”3种观点进行分析,分析了安培力产生的微观机理,深入探讨了两者的关系.

**关键词:**洛伦兹力 安培力 关系 微观机理 霍尔电场

### 1 问题的提出

自然界一种叫做“火石”的石头,若发生强有力的碰撞就会产生火花,同样人类的思想只有在相互交流、碰撞与冲突中才能蹦出“思想的火花”.俗话说:两个人手里分别拿着一个苹果,它们交换后每人还是一人一个苹果;若两个人每人有一种思想,他们交流过后,每人就拥有了两种思想.思想源于碰撞,一个人的认识只有在不断地与他人的思想进行交流与“交锋”中才能得以改进与完善,这就是笔者撰写此拙文的初衷.

有关洛伦兹力与安培力关系的争论起因是中学物理教材认为:载流导体所受磁场的安培力就是作用在导体内所有自由电子上的洛伦兹力的宏观表现.困惑是为什么洛伦兹力永不做功而其宏观表现的安培力常常可以做功呢?对于这个问题笔者查阅了许多电磁学方面的教科书也包括国外的很多优秀教材,对安培力产生的微观机理有以下几种不同的观点.

### 2 “合力说”观点

这种观点认为,导体中自由电荷的定向运动形成了电流.电荷定向运动时所受洛伦兹力的合力,表

现为导体所受的安培力,如图1所示.

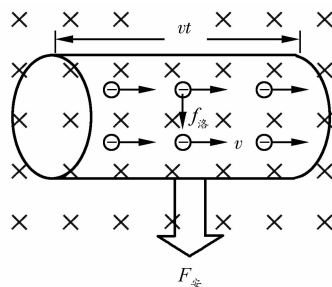


图1 洛伦兹力与安培力示意图

设磁感应强度为  $B$ ,导线中每个带电粒子定向移动的速度都是  $v$ ,电荷量为  $q$ ,并考虑  $B$  与  $v$  垂直的简单情况,则每个带电粒子所受洛伦兹力为

$$f_{\text{洛}} = qvB$$

设导体中单位体积内粒子数为  $n$ ,在时间  $t$  内通过截面  $S$  的粒子数为

$$N = nSvt$$

$N$  个粒子所受洛伦兹力的合力为

$$f_{\text{洛合}} = Nf_{\text{洛}} = nSvtqvB$$

又因为

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{Nq}{t} = \frac{nSvtq}{t} = nSvq$$

导线长度

$$L = vt$$

作者简介:陈璐畅(1996-),女,在读本科生,物理学(师范)专业.

指导教师:邓有鸿(1977-),男,中教高级,主要从事高中物理竞赛指导及高中物理教学.

所以

$$f_{\text{洛合}} = nSvtqvB = BIL = F_{\text{安}}$$

于是验证了运动电荷所受洛伦兹力的合力等于宏观的安培力<sup>[1]</sup>. 这种观点直观简单地建立起了洛伦兹力与安培力之间的关系,易于初学者接受,尤其是在中学教学中采用此观点更方便学生的学习. 但是此观点有两个困惑一直不好解释,其一是洛伦兹力永不做功,但为什么安培力可以做功,我们称它为困惑 1;其二是洛伦兹力是怎样传递给导体表现为宏观的安培力,我们称它为困惑 2<sup>[2]</sup>.

### 3 “碰撞传递”观点

早期很多教材中这样写到:“因为导体中的电流是由自由电子的定向运动形成的,在磁场中电子受到洛伦兹力作用而向侧向漂移时,与晶格上的正离子碰撞,把力传给了导线,所以载流导线在磁场中也要受到磁力的作用,通常把这个力叫做安培力.”这段话清楚地阐明了“碰撞传递”的观点. 以上观点摘自程守洙、江之永主编的《普通物理学》第3版(1979年2月),与这种观点相同的教科书还有赵凯华、陈熙谋(北京大学物理系)编著的《电磁学(第1版)》(1978年4月)<sup>[3]</sup>,王少杰、顾牡、毛骏健(上海同济大学)主编的面向新世纪课程教材《大学物理(第2版)》(2002年2月)<sup>[4,5]</sup>等.

如果按照“碰撞传递”的观点也有两个困惑:其一是安培力是自由电子因受洛伦兹力而发生侧向运动,并与晶格发生碰撞的宏观效果,那么当无外加磁场时,自由电子因纵向漂移运动和晶格发生碰撞(这正是电阻形成的原因),在宏观上也应表现为导体受到一纵向力,但是在实验上我们从未发现这个力的存在,我们称它为困惑 3. 其二是自由电子真的不断做侧向运动吗,我们称它为困惑 4.

### 4 “霍尔电场”观点

《普通物理学》第5版(1998年6月),第二册第249页写道:“每个自由电子在洛伦兹力作用下做侧向漂移,结果在导线侧堆积负电荷,上侧堆积正电荷,在上、下两侧间形成一横向霍尔电场,这个电场阻碍自由电子的侧向漂移,当电场力与洛伦兹力平衡时,自由电子便不再做侧向漂移,而晶格中的正离子只受到霍尔电场的作用. 这些正离子所受到的霍

尔电场的合力的宏观效果便是电流元在磁场中所受到的安培力.”这段话清楚地阐明了“霍尔电场”观点<sup>[6]</sup>.

如果按照“霍尔电场”观点同样存在一个困惑:“霍尔电场力”是导体内部之间的作用力,从宏观上把导体看作一个整体,那么这对作用力与反作用力属于内力,作用效果可以抵消,对外并不表现为安培力,我们称它为困惑 5.

为了清楚了解安培力的经典微观机制,我们对一段载流导体进行受力分析,如图2所示.

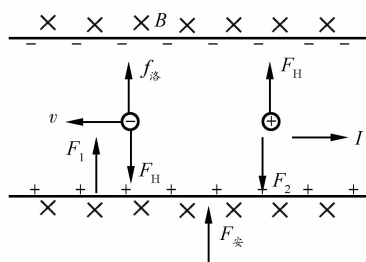


图2 载流导体受力分析图

当导体内部处于动态平衡时,受力情况分析如下.

(1) 所有自由电子受力  $Nf_{\text{洛}} = NF_{\text{H}}$ ;

(2) 所有晶格离子受力  $NF_{\text{H}}$ ;

(3) 形成霍尔电场的电荷受力,所有自由电子反作用于霍尔电场的正、负电荷上的力  $F_1$ ,此力方向向上,传递给导体;

(4) 所有晶格离子反作用于霍尔电场的正、负电荷上的力  $F_2$ ,此力方向向下,也传递给导体.

由此易得  $F_1 = NF_{\text{H}}$ ,对整段导体作用效果抵消<sup>[7~9]</sup>. 同理,  $F_2 = NF_{\text{H}}$ 对整段导体作用效果也抵消. 这样整段导线只剩下一个力,就是所有自由电子受到的洛伦兹力,所以导体受到的安培力  $F_{\text{安}} = Nf_{\text{洛}}$ ,在整个过程中霍尔电场力仅起到传递力作用效果的作用<sup>[10]</sup>.

下面再分析洛伦兹力永不做功但安培力可以做功的情况,当导体以速度  $u$  垂直磁场运动时,设导体中自由电子的定向漂移速度为  $v$ ,霍尔电场的方向与  $u$  的方向相同,如图3所示.

载流导体所受的安培力就是导体中所有自由电子所受垂直电流方向的横向力,即

$$F_{\text{A}} = NevB$$

安培力的元功为

$$dW_{\text{A}} = F_{\text{A}} u dt = eNvBudt$$

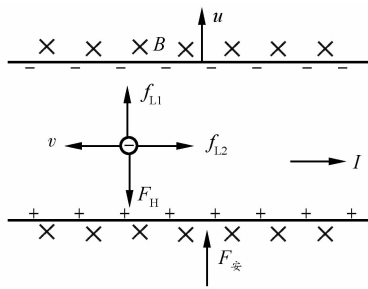


图3 霍尔电场示意图

洛伦兹力方向总是与电子运动速度方向垂直, 是不做功的. 在这里电子的合速度为  $(v+u)$ , 洛伦兹力为

$$f_L = -e(v+u) \times B$$

如果将洛伦兹力分解为两个分力, 大小为

$$f_{L1} = evB \quad f_{L2} = euB$$

其方向如图3所示, 则这两个分力是可以做功的, 只要它们分别做的功总是等值异号, 就不与洛伦兹力不做功相违背<sup>[1]</sup>.

对于一段载流导体中, 所有  $N$  个定向运动的自由电子所受洛伦兹力沿与导线垂直方向的分力大小为

$$F_{L1} = Nf_{L1} = NevB$$

与导线平行方向的分力大小为

$$F_{L2} = Nf_{L2} = NeuB$$

方向与电子运动方向相反.

在  $dt$  时间内, 这两个分力所做的元功各为

$$dW_{L1} = F_{L1}udt = NeuBvdt \quad (1)$$

$$dW_{L2} = F_{L2}udt = -NevBudt \quad (2)$$

由式(1)、(2)可见, 两分力的元功等大异号, 这就证明了洛伦兹力永不做功. 但是自由电子随导线以速度  $u$  运动而受到的洛伦兹力  $F_{L2}$  对定向运动电子做负功, 这样电子的定向漂移的速度必定减小, 如果导体中要维持电流不变, 即电子定向漂移速度  $v$  保持不变, 只有增加这段导体两端的电压, 即增大导线中的场强才能做到, 而且场强的增加值  $E'$  必须满足  $-eE' + f_{L2} = 0$ , 即增加的对电子的电场力与洛伦兹力分力  $f_{L2}$  平衡, 才能保持电子漂移速度  $v$  不变. 下面我们作定量分析:

洛伦兹力沿导线的分力  $f_{L2}$  是作用于传导电子的非静电力, 非静电场场强

$$E' = \frac{f_{L2}}{e} = u \times B$$

这样就会在沿电流运动方向产生一个反向电动势  $\epsilon_i$ , 这个电动势就是动生电动势

$$\epsilon_i = \int_l (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = uBl$$

为了保持导线中电流不变, 两端的电压必须增加

$$U' = \epsilon_i = uBl$$

从能量转化的角度看, 在磁场中, 导线以速度  $u$  垂直于导线运动的情况下, 电源输入导线的电功就要增加

$$dW = I\epsilon_i dt = IuBl dt$$

又因为

$$I = e \frac{N}{l} v$$

所以

$$dW = eNvuBdt$$

此值正是安培力做功的大小. 由此我们可以得出以下结论: 作用于电子的洛伦兹力的两个分力做等值异号的功, 它们在把电源输入的部分电功转化为安培力对导线做功的机制中起着关键的作用.

在电动机中, 导线置于磁场中, 导线中有电流时, 受到安培力

$$F_{安} = f_{洛合} = nSvtqvB = BIL$$

的作用, 使导线产生运动; 同时, 导线中产生反电动势

$$\epsilon_i = \int_l (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = uBl$$

这个过程中两个现象的产生都是运动电荷在磁场中运动受洛伦兹力的结果, 完成了由电能向机械能的转化.

在发电机中, 导线做切割磁感线运动时, 导线中随导线运动的电荷受洛伦兹力作用产生定向移动, 即产生了电动势

$$\epsilon_i = \int_l (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = uBl$$

同时, 运动电荷受安培力的作用

$$F_{安} = f_{洛合} = nSvtqvB = BIL$$

阻碍导线的运动. 这个过程中两个现象的产生都是运动电荷在磁场中受洛伦兹力作用的结果, 完成了机械能向电能的转化.

## 5 结论

综上所述我们得到以下结论:

(1) 当金属导体固定不动时,正如高中教材推导,安培力是所有运动电荷所受洛伦兹力的宏观表现;

(2) 当金属导体垂直  $B, I$  方向运动时,安培力应是垂直于  $B, I$  方向上洛伦兹力的分力的宏观表现;

(3) 自由电子通过霍尔电场把洛伦兹力传递给导体;

(4) 洛伦兹力在此过程中起着传递能量的作用;

(5) 霍尔电场在此过程中扮演的角色是保证导体始终是一个有机的整体.

这样就很好地解释了前面产生的几种困惑.

《庄子·天下》文中曰:“判天地之美,析万物之理,……天下之人各为其所欲焉以自为方”.大概意思是说:明白天地之美,理解万物之理,自然是扑朔迷离的,并非清楚地表现在人面前,所以天下之根据自己的了解,得到自己的种种道理,这就是仁者见仁,智者见智.

#### 参考文献

- 程稼夫. 中学奥林匹克竞赛物理教程·电磁学篇(第2版). 合肥:中国科学技术大学出版社,2014. 305 ~ 307
- 蔡才福. 再辨洛伦兹力与安培力. 物理教学,2007(3): 13 ~ 14
- 赵凯华,陈熙谋. 电磁学. 北京:高等教育出版社,1986. 387 ~ 389
- 陈钦生,武步宇. 大学物理·上册. 北京:科学出版社,2002. 201 ~ 202
- 高兴茹,陈键. 工科大学物理. 北京:中国计量出版社,2001. 207 ~ 208
- 程守洙,江之永. 普通物理学(第5版)(第二册). 北京:高等教育出版社,1998. 236 ~ 238
- 李国昌,李果华. 安培力作用的微观机理研究. 物理与工程,2004,14(3):9 ~ 12
- 封小超. 关于安培力的微观机制. 大学物理,1987,1(4): 21 ~ 24
- 韩继明,丛选忠. 对安培力微观机制的看法. 河北联合大学学报(自然科学版),1990(2):18 ~ 20
- Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands. 费曼物理学讲义·第2卷. 上海:上海科学技术出版公司,2006. 161 ~ 162
- 林辉庆. 洛伦兹力能对电荷做功吗?物理教学,2007(9): 14 ~ 15

## Thinking Collision on the Relationship between Lorentz Force and Ampere Force

Chen Luchang

(Physics and Telecommunication Engineering Institute, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006)

Deng Youhong

(Guangzhou NO. 2 Middle School, Guangzhou, Guangdong 510530)

**Abstract:** Purpose The relationship between Lorentz force and Ampere force is the difficulty of physics teaching in secondary schools. In the debate of Lorentz force and Ampere forces there is confusion: why Lorentz force never work and its macro performance Ampere force can often do work? Method From the three perspectives, “The doctrine of cohesion”, “Collision transfer” and “Hall electric field”, the microscopic mechanism of Ampere force is analyzed, and the relationship between them is discussed in depth.

**Key words:** Lorentz force; Ampere force; relationship; micro mechanism; Hall electric field