# 69．安培力与洛伦兹力是怎样的关系？

安培力是洛伦兹力的宏观表现，洛伦兹力是安培力的微观本质。但不能简单地认为所有运动电荷受到的洛伦兹力的和（矢量和）就是安培力。因为磁场对每个运动电荷的作用力都不做功，这些不做功的力的和，怎么能成为做功的安培力呢？这里必须要有“其他物体”的作用，而这个“其他物体”就是电流的载体——固体导线。

说安培力是洛伦兹力的宏观表现，是基于下面的事实：通电导线中的电流是由于其内部的自由电荷定向移动而形成的，这些定向移动的电荷（或说带电粒子）在磁场中都要受到洛伦兹力的作用，正是由于有了这种作用，才会使得通电导线“整体”上受到磁场的作用力，即安培力。反过来说，如果没有磁场对带电粒子的洛伦兹力，就不会有磁场对通电导线的安培力，从这个意义上说安培力是洛伦兹力的宏观表现是有道理的。但是，对这句话要正确理解，为什么对在真空、气体和液体中的电流，磁场同样对里面的带电粒子有洛伦兹力，却不能转化为安培力呢？显然在这里“导线”起了关键作用，也正是由于忽视了“导线”起的这种关键作用，才有了前面的“安培力是磁场对电流的作用力”这一说法。

## 一、安培力是所有定向运动的电荷受到的洛伦兹力的总和吗？

在高中物理课堂教学中，老师们通常按照如图 1 所示的思路由安培力出发推导出洛伦兹力的表达式。如图 1 所示画的是一段通电导体 ab，里面示意性地画出了 8 个定向运动的带正电的粒子，它们定向移动的速度方向向右（即电流方向向右），速度大小为 *v*，ab 的长度等于 *vt*，截面积为 *S*，空间存在着匀强磁场，磁感应强度方向垂直纸面向里，大小等于 *B*。图中每个带电粒子受到的洛伦兹力的方向都向上，大小等于 *F*洛。

a

b

*vt*

*B*

*S*

*F*洛

*F*安

*v*

图 1 运动电荷所受洛伦兹力的合力在宏观上表现为安培力

设单位体积内可以自由移动的带电粒子数目为 *n*，每个粒子所带电荷为 *q*，则时间 *t* 内通过上面这段导体某截面的带电粒子总数为 *N*= *nvtS*，导线中的电流 *I* = *Nq*/*t* = *nvSq*，它受到的安培力 *F*安 = *Blvt* = *B*·*nvSq*·*vt*。

按照图示“运动电荷所受洛伦兹力的合力在宏观上表现为安培力”，则 *NF*洛 = *F*安，即 *nvtS*·*F*洛 = *B*·*nvSq*·*vt*，得出洛伦兹力 *F*洛 = *Bqv*。

上面的推导是在通电导线静止不动的情况下进行的，对此，教科版高中物理选修 3–1（2006 年版）第 94 页上的表述比较准确：既然电流是电荷的定向运动形成的，那么，静止的通电导线在磁场中受到的安培力，在数值上等于大量定向运动电荷受到的洛伦兹力的总和。之所以说它的表述比较准确，是因为这三个关键词：①强调了“静止的”，只有静止的通电导线才满足这个关系；②“在数值上”，二者只是在数值上相等，二者的受力对象不同，不能用“就是”这样的词汇；③是“总和”，而不是“合力”，合力与分力，受力对象是同一个物体，不同物体受到的力不能求合力，对“大量定向运动电荷”受到的力，用“总和”比用“合力”显然要确切得多。

如果通电导体不是静止的，又会怎样呢？如图 2 所示为导体 ab 在安培力的作用下开始向上运动。为了简便，图中只示意性地画出了一个带电粒子，它带正电，*v*1 是它随导体一起向上运动而具有的分速度，*v*2 是它在导线内定向运动而形成电流的分速度，其合速度为图中的 *v*，它受到的洛伦兹力 *F*洛 的方向与 *v* 垂直，指向斜上方。这时安培力 *F*安 的方向与 *F*洛 的方向不相同，其大小也不等于大量运动电荷受到的洛伦兹力的总和，即 *F*安 ≠ *NF*洛，而是满足 *F*安 = *N*·*Bqv*2。

a

b

*B*

*S*

*F*洛

*F*安

*v*

*v*2

*v*1

图 2 通电导线运动时的情况

## 二、为什么洛伦兹力不做功，而安培力却可以做功呢？

洛伦兹力一个显著的特点就是它的方向总与带电粒子的速度方向垂直，因此洛伦兹力对所有运动的带电粒子都不做功，如果仅只有磁场对运动电荷的洛伦兹力，这些洛伦兹力合起来也不会做功，那么安培力又为什么可以做功呢？

这里一定有其他物体的作用，这个其他物体就是导线。最常用的导线是金属导线，下面我们就以金属导线为例予以说明，金属导线中的自由电荷是带负电的自由电子，每个电子的电荷量为 *e*。如图 3（a）所示，它画的是图 2 那段导线 ab 的剖面图，电流方向向右，其中一个自由电子在导线中定向移动的分速度为 *v*2（与电流，的方向相反），随导线一起向上运动的分速度为 *v*1，受到的洛伦兹力 *F*洛 方向垂直于速度 *v* 而指向右上方。部分电子将会在导线上方聚集而形成带负电的薄层，而导线下方则会由于缺少电子而出现带正电的薄层，这就是霍尔效应，如图3（b）所示。我们把电子受到的洛伦兹力 *F*洛 分解为沿电流 *I* 方向的 *F*1 和沿导线运动方向的 *F*2，其中 *F*1 的大小等于 *ev*1*B*，方向与 *v*2 反向；*F*2 的大小等于 *ev*2*B*，方向与 *v*1 同向。

图 3 运动的通电导线内电子受力情况

*B*

*v*

*v*1

*v*2

*F*洛

a

b

（a）

*I*

−*e*

*B*

*v*

*F*洛

a

b

（b）

−*e*

*F*1

*F*2

*B*

*F*洛

a

b

（c）

−*e*

*F*1

*F*2

*F*霍

导线上、下两端带电薄层所形成的电场称为霍尔电场，它与静电场性质相同。自由电子除了受到洛伦兹力 *F*洛 以外，还要受到霍尔电场的作用力 *F*霍，它的方向与导体运动方向相反，即与 *F*洛 的分力 *F*2 方向相反，当 *F*霍 增大到等于 *F*2 时，电子在这个方向上受力平衡，合力方向向右，待电薄层稳定下来，也就是霍尔电场稳定下来，形成如图 3（c）所示的图像。自由电子受到的洛伦兹力的两个分力中，*F*2 做正功，*F*1 做负功，正、负功的绝对值相等，总的来说洛伦兹力不做功，而 *F*霍 对它做负功。通电导线中的自由电子还要受到产生恒定电流必须存在的恒定电场的电场力 *F*电，这个力我们在图 3 中没有画出，它的方向与电流 *I* 的方向相反，对电子做正功。

以上分析的各个力都是自由电子受到的力，而不是通电导线受到的力，即不是安培力。*F*霍 是霍尔电场对自由电子的作用力，而霍尔电场是导线上、下两个带电薄层形成的电场，因此从本质上说，*F*霍 是形成霍尔电场的电荷对导线中的自由电子的电场力，这个力的反作用力就作用在形成霍尔电场的这些电荷上，而它们是附着在通电导线的上、下两个薄层上的，可以说 *F*霍 的反作用力作用在导线上，ab 这段通电导线内所有自由电子受到的 *F*霍 的反作用力的总和就是磁场对 ab 这段通电导线的安培力。

下面从能量转化的角度分析这个过程：通电导线中如果通的是恒定电流，则能量来自电源，电源把其他形式的能量转化为电能，具体表现为导线中的恒定电场对其中的自由电子施加静电力 *F*电，*F*电 对电子做正功。在磁场中电子受到洛伦兹力 *F*洛，*F*洛 不做功。通电导线在安培力的作用下开始运动，同时由于在导线中形成霍尔电场，其中的自由电子还要受到霍尔电场的作用力 *F*霍，*F*霍 对电子做负功，它的反作用力对导线做正功，在它们的共同作用下，消耗一部分电能转化为导线的机械能。

以上仅是对一个具体例子的分析：通电导线是金属导线、导线中通的是恒定电流，能量由直流电源提供，导线位于匀强磁场中，且电流方向与磁场方向垂直，导线通电后在安培力作用下沿安培力的方向开始运动。如果通电导线还受到其他作用力，它的运动方向与安培力的方向不一致，情况会更复杂一些，这里不进一步深入讨论。但不管哪种情况，洛伦兹力对运动电荷不做功是确定的，对“安培力是洛伦兹力的宏观表现”的说法要正碗理解。下面的表格是一个简单的总结：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 安培力 | 洛伦兹力 |
| 受力对象 | 通电导线 | 运动电荷 |
| 力的方向 | 垂直于电流 *I* 与磁场 *B* 所决定的平面 | 垂直于速度 *v* 与磁场 *B* 所决定的平面 |
| 是否做功 | 可以做功 | 不做功 |
| 二者关系 | ①导线静止时，二者方向相同，所有运动电荷受到的洛伦兹力的总和在数值上等于安培力  ②导线运动时，二者方向不同，所有运动电荷受到的洛伦兹力的总和在数值上不等于安培力 | |