# 72．什么是感应电动势中的非静电力？

对于感生电动势，导体静止不动，由于磁场的变化而产生涡旋电场，涡旋电场对导体内的自由电荷的作用力就是产生电动势的非静电力。对于动生电动势，则较为复杂：导线中的运动电荷受到的洛伦兹力起着关键作用，但洛伦兹力不做功，说它是产生动生电动势的非静电力，并不合适。

一个电源的电动势一般定义为：把单位正电荷从负极通过电源内部移到正极时，非静电力所做的功。如果把正电荷 *q* 从负极通过电源内部移到正极时，非静电力所做的功为 *W*非，则电源的电动势 *E* = 。

由于电磁感应而产生的电动势称为感应电动势，本文将探讨产生感应电动势时的非静电力问题。

## 一、产生感生电动势的非静电力

产生感生电动势的非静电力是涡旋电场的电场力。

麦克斯韦的电磁理论指出，变化的磁场在其周围会激发出感应电场，这种电场不是静电场，理由有两点：第一，它不是由电荷激发的，而是由变化的磁场激发的；第二，它的电场线是闭合的，而不是像静电场那样由正电荷出发而终止于负电荷（或指向无穷远），正是由于它的电场线是闭合的曲线，因此称为涡旋电场。涡旋电场对其中的电荷有作用力，这种作用力不是静电力，而是“非静电力”。

如图 1 所示，当方向竖直问下的磁场 *B* 减小时，就会产生感应电场，其电场线如图所示呈闭合的环形曲线，这就是涡旋电场。

*B*（减小时）

图 1 磁场变化产生涡旋电场

*E*涡旋

涡旋电场之所以不是静电场，是因为它不是保守力场，或者通俗地说，把电荷沿涡旋电场的电场线方向移动一周回到原处，电场力做功不等于零。如果一个闭合线圈恰与涡旋电场的某条电场线重合，场强大小处处等于 *E*涡旋，则电荷 *q* 沿线圈移动一周的过程中，非静电力的大小 *F*非 = *E*涡旋·*q*，方向沿电场线的切线方向，如果移动一周的路径长度为 *l*，则非静电力做功 *W*非 = *E*涡旋·*q*·*l*，感生电动势 *E*感生 = = = *E*涡旋·*l*。这种情况已无法区分内电路和外电路，整个电路都有非静电力做功，都是电源（同时在整个电路中也都在消耗电能转化为其他形式的能量）。

## 二、产生动生电动势的非静电力

在赵凯华、陈熙谋所著的《电磁学》（高等教育出版社 2018 年第 4 版）第 274 页上写道：动生电动势可以看成是第四章讲过的洛伦兹力所引起的。这里使用了一种委婉的说法，更多书籍干脆使用“产生动生电动势的非静电力就是洛伦兹力”的说法。有一个回避不了的问题存在：洛伦兹力对运动电荷不做功，而产生电动势的非静电力是要对电荷做功的，因此这里一定还存在着其他作用。

以最常见的金属导线切割磁感线运动为例，如图 2（a）所示，金属棒 CD 与 U 形金属框架 AB 组成闭合回路，CD 棒以速度 *v*1 向右做切割磁感线运动，产生沿 CDABC 方向流动的电流 *I*。示意性地画出一个自由电子（− *e*），它随导线向右运动的速度为 *v*1，沿导线定向运动形成电流的速度为 *v*2，合速度为 *v*，它受到的洛伦兹力 *F*洛 与电流 *I* 的方向不在一条直线上。如图 2（b）所示，把 *F*洛 进行正交分解，其中 *F*1 与 *v*2 方向相同，对电子做正功；*F*2 与 *v*1 方向相反，对电子做负功。不难看出，*F*1 做的正功与 *F*2 所做负功的绝对值相等，即洛伦兹力对运动电荷不做功。

(a) 洛伦兹力方向与电流方向不一致

(b) 洛伦兹力不做功

(c) 霍尔电场力做正功

−*e*

−*e*

−*e*

*B*

*B*

*B*

*F*洛

*F*洛

*F*2

*F*1

*F*洛

*F*2

*F*1

*F*霍

*I*

D

A

B

C

*v*

*v*1

*v*2

*v*

*v*1

*v*2

D

C

图 2 动生电动势与洛伦兹力

由于洛伦兹力方向与导线 CD 不在一条直线上，导线左侧会聚集多余的电子而带负电，右侧则由于缺少电子而带上正电，这两个带电薄层在导线内部产生电场，称为霍尔电场，电子要受到霍尔电场力 *F*霍，方向与 *F*2 相反，当 *F*霍 = *F*2 时，霍尔电场稳定下来，电子在与导线垂直的方向上受力平衡，这时 *F*霍 对自由电子做正功，如图 2（c）所示。*F*洛 与 *F*霍 的合力方向沿 DC 方向，即与电流方向，相反，*F*洛 与 *F*霍 的合力对电子所做的功就是非静电力做的功。

导体内的自由电子受到 *F*洛 与 *F*霍 这两个力的作用，其中，*F*洛 是非静电力，但它不做功，显然不应该说它是产生动生电动势的非静电力。对自由电子做正功的只有 *F*霍，它是由在导体两侧聚集的电荷形成的霍尔电场给予的作用力，而导体两侧聚集的电荷并不是静止的，它们随导线移动，因此霍尔电场不是静电场，而是变化的电场，*F*霍 不是静电力。*F*洛 的分力 *F*2 = *Bev*2，它做的负功的绝对值与 *F*霍 做的正功相等，*F*洛 的另一个分力 *F*1 = *Bev*1，它做正功，也就是 *F*洛 与 *F*霍 的合力所做的功就是非静电力做的功。要说产生动生电动势的非静电力是 *F*霍，也是可以的。霍尔电场的产生是由于洛伦兹力的存在，因此《电磁学》中说“动生电动势可以看成是洛伦兹力所引起的”是准确的，而说“产生动生电动势的非静电力是洛伦兹力”或者说“产生动生电动势的非静电力是 *F*洛 的分力 *F*1”，是不够准确的。

## 三、产生动生电动势过程中的能量转化

其实，问题的关键并不是给谁冠以非静电力的名号，弄清楚能量是如何转化的才是问题的关键所在。

仍以上面所说的金属导体在磁场中做切割磁感线运动产生动生电动势为例。自由电子受到的电场力 *F*霍，它是形成霍尔电场的电荷体系施加的，它的反作用力就作用在形成霍尔电场的电荷体系上，而这些电荷分布在 CD 导线的两侧，与导线间存在着相互作用，我们把 CD 导线与形成霍尔电场的电荷看成一个整体，可以说 *F*霍 的反作用力是作用在 CD 导线上的。所有在 CD 导线中定向运动的自由电子受到的 *F*霍 的反作用力的总和就等于通电导线 CD 受到的安培力 *F*安。

导线 CD 要维持匀速运动，必须有向右的外力作用，这个过程中，外力克服安培力做功消耗机械能，这部分能量通过其内部的一系列相互作用，包括霍尔电场的作用、洛伦兹力的作用等，最终落实为洛伦兹力 *F*洛 沿导线方向的分力 *F*1 对电子做正功，外界输入的机械能转化成电能，电流又要克服导体的电阻而做功，最终这些能量都转化为内能而散失。这里洛伦兹力 *F*洛 的一个分力 *F*1 对电子做正功，而另一个分力 *F*2 对电子做负功，正、负功的绝对值相等，洛伦兹力不做功，它在这个过程中起到了使能量发生转换的关键作用，而这种作用也离不开另一个作用，即霍尔电场的作用。

如果增大对 CD 导线向右的外力作用，则导线将做加速运动，从而洛伦兹力的分力 *F*1 将变大，动生电动势变大，随之电流变大，同时分力 *F*2 也变大，两侧的薄层带电量将变多，霍尔电场增强，*F*霍 随之变大，在 *F*霍 未增大到与 *F*2 相等的过程中，外力做功消耗的机械能一部分转化为随导线速度增加而增加的动能，另一部分则通过克服安培力做功而转化为电能，并最终转化为焦耳热。

如果在 CD 导线匀速运动的过程中撤去向右的外力，安培力将做负功而使导线减速，从而洛伦兹力的分力 *F*1 将变小，动生电动势变小，随之电流变小，同时分力 *F*2 也变小，两侧的薄层带电量将变少，霍尔电场减弱，*F*霍 随之变小，最终停止下来，相应地，霍尔电场也减到零。在这个过程中，没有外力做功，消耗的是导线自己的动能，消耗的动能转化为电能，最终转化成焦耳热。