

# 从微观角度分析电磁感应中的动生电动势和感应电流的形成及能量的转化

李 超

(渭南市杜桥中学 陕西 渭南 714000)

(收稿日期:2019-09-09)

**摘要:**以“动电动模型”和“电电动模型”为例,从微观的角度出发,对感应电动势、感应电流的形成以及能量的转化进行分析,目的在于将宏观的认知和微观的内在本质统一起来,以期深入浅出地进行有效教学.

**关键词:**微观 自由电子 洛伦兹力 非静电力 感应电流 感应电动势

在高中物理电磁感应部分,动生电动势及所对应的感应电流的分析建立于感生电动势的产生、大小计算的基础上,通过数学推导而来,是宏观逻辑思维方法.通过现象去分析本质是物理学科的核心素养之一,而研究孤立的金属棒切割磁感线产生感应电动势,电动机工作时的“反电动势”等问题时不够深入彻底.因此,本文将从微观角度出发以“动电动模型”和“电电动模型”为例,对感应电动势、感应电流的形成以及能量的转化进行分析,以期深入浅出地进行有效教学.

## 1 微观分析动生电动势及感应电流的形成

### 1.1 微观分析动—电—动模型

**模型描述:**如图1所示,水平面内,在置于匀强磁场中的连接有定值电阻的光滑导轨上,有一获得向右运动速度的金属棒 $ab$ ,金属棒长度与导轨间距相等.

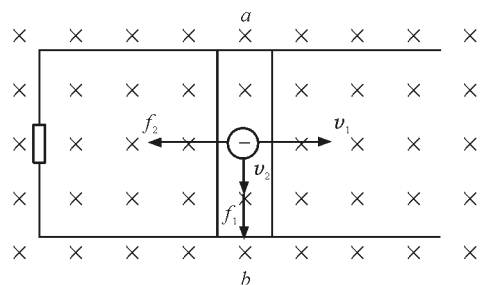


图1 动—电—动模型

从微观角度分析,金属棒的运动使其内部的自由电子获得向右速度 $v_1$ .因此自由电子受到沿金属

棒方向的洛伦兹力 $f_1$ .在 $f_1$ 的作用下自由电子在金属棒内部沿 $ab$ 方向运动,速度以 $v_2$ 表示.可认为 $f_1$ 是非静电力,对自由电子做功形成感应电动势,产生感应电流.该过程中,自由电子沿 $ab$ 方向运动,产生与金属棒运动方向相反的洛伦兹力 $f_2$ .自由电子同时参与了垂直于 $ab$ 方向和沿 $ab$ 方向的两种运动; $f_1$ 对自由电子做正功, $f_2$ 对其做负功,二者代数和为零.即洛伦兹力对运动电子不做功.证明如下.

设 $f_1, f_2$ 分别对自由电子做功为 $W_{f_1}, W_{f_2}$

$$W_{f_1} = e v_1 B v_2 \Delta t \quad (1)$$

$$W_{f_2} = -e v_2 B v_1 \Delta t \quad (2)$$

$$W_{f_1} + W_{f_2} = 0 \quad (3)$$

由于 $n f_2 = F_{安}$ ( $n$ 为 $ab$ 金属棒中的自由电子总数),宏观表现为 $F_{安}$ 对金属棒 $ab$ 做负功,使金属棒动能减小,速度减小,即随后从 $a$ 端出发的自由电子向右的速度 $v_1$ 减小,故 $f_1$ 减小,对后续自由电子做的正功减小, $v_2$ 相对之前减小,对应的 $f_2$ 减小.以此类推,对于大量从金属棒 $a$ 端出发,随金属棒运动的电子而言

$$v_1 = 0 \text{ 时, } f_1 = 0, f_2 = 0, E_{ab} = 0, I = 0$$

### 1.2 微观分析电—动—电模型

**模型描述:**如图2所示,水平面内,在置于匀强磁场中的连接有电源的光滑导轨上,有一金属棒 $ab$ ,金属棒长度与导轨间距相等.通电后金属棒中有由 $a$ 向 $b$ 的电流,内部自由电子自 $b$ 向 $a$ 定向移动,速度为 $v_1$ ,受向右洛伦兹力 $f_1$ .大量定向移动的自由电

子所受洛伦兹力宏观表现为水平向右的安培力  $F_{安}$ <sup>[1]</sup>. 因此金属棒沿导轨水平向右运动, 其内部自由电子获得水平向右的速度  $v_2$ . 自由电子同时参与沿  $ba$  方向和垂直  $ba$  向右的两种运动, 其向右运动时受洛伦兹力  $f_2$ ,  $f_2$  阻碍电子沿金属棒方向运动, 使电子沿  $ba$  方向的速度  $v_1$  变小, 所以  $f_1$  变小. 宏观表现为通过金属棒的电流  $I$  变小,  $F_{安}$  变小. 因此金属棒向右加速度  $a$  不断减小, 但速度  $v_2$  仍不断增大, 即做了加速度减小的加速运动. 当自由电子速度  $v_2$  不断增大,  $f_2$  也不断增大,  $v_1$  不断变小,  $f_1$  不断变小.

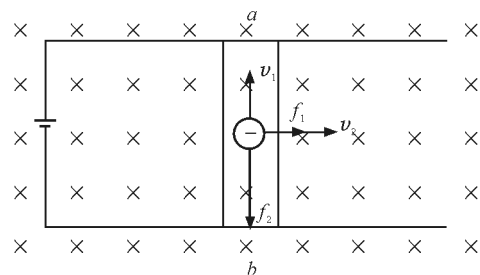


图2 电—动—电模型

当  $f_1 = 0$  时,  $a = 0$ ,  $v_1 = 0$ ,  $v_2$  达到最大值且不再变化(匀速), 此时自由电子不再沿金属棒方向移动, 回路中无电流, 金属棒在水平方向不受力, 向右做匀速运动.

说明: 在以上研究过程中金属棒内部电子和金属骨架有碰撞, 但暂不考虑, 其后说明.

## 2 微观分析法对“动电动模型”和“电动电模型”中能量转化的理解

(1) 如图1所示在“动电动模型”中, 非静电力  $f_1$  对自由电子做的功就等于金属棒内的电场力做功和外电路的电场力做功之和.

$$W_{f_1} = U_{内}e + U_{外}e \quad (4)$$

$$W_{f_1} + W_{f_2} = 0 \quad (3)$$

$$-W_{f_2} = U_{内}e + U_{外}e \quad (5)$$

对大量自由电子, 则有

$$-nW_{f_2} = U_{内}(ne) + U_{外}(ne) \quad (6)$$

根据大学《电磁学》教材中所言, “在一段金属两端加上电压, 金属内部就有电场. 自由电子就在电场力作用下发生定向移动, 并在这个过程中不断与金属骨架相碰撞. 在两次碰撞之间, 电子在电场力作

用下加速运动, 其电能的增加由电场力做功转化而来. 当电子与金属骨架碰撞时, 就把定向运动的动能传给骨架, 使骨架围绕平衡位置的振动加剧, 其宏观效果便是金属的温度升高, 即金属放出热量. 可见, 焦耳热实际是电场力的功转化而成的……”<sup>[2]</sup>

所以在电路中电场力对大量电荷做功产生了焦耳热. 因此式(6)可变形为

$$-nW_{f_2} = Q_{内} + Q_{外} \quad (7)$$

$f_2$  宏观表现出的  $F_{安}$  对金属棒做负功, 使金属棒动能减小, 转化为内、外电路的焦耳热.

$$W_{F_{安}} = \Delta E_k \quad (8)$$

$$-W_{F_{安}} = Q_{内} + Q_{外} \quad (9)$$

(2) 如图2所示在“电动电模型”中,  $f_1$  做正功  $W_{f_1}$ ,  $f_2$  做负功  $W_{f_2}$ , 二者代数和为零.

在无磁场时, “焦耳热实际是电场力的功转化而成的……”<sup>[2]</sup>

对大量自由电子

$$U(ne) = \frac{1}{2}(nm_{电子})v^2 \quad (10)$$

$$U(ne) = Q \quad (11)$$

$$Q = \frac{1}{2}(nm_{电子})v^2 \quad (12)$$

(注:  $U$  为“电动电模型”中金属棒两端的电压)

在本模型中, 金属棒内部沿  $ba$  方向运动的自由电子受到电场力  $F_{电}$  和洛伦兹力  $f_2$ , 规定电场力方向为正向, 则洛伦兹力方向为负向, 自由电子所受合力为  $F_{合} = F_{电} - f_2$ , 所以沿金属棒方向自由电子合力做功使自由电子沿  $ba$  方向动能增加, 即

$$(F_{电} - f_2)l = \frac{1}{2}m_{电子}v_1^2 \quad (13)$$

或可写为

$$Ue + W_{f_2} = E_{k电子} \quad (14)$$

对大量自由电子有

$$n(F_{电} - f_2)l = \frac{1}{2}(nm_{电子})v_1^2 \quad (15)$$

即

$$U(ne) + nW_{f_2} = nE_{k电子} \quad (16)$$

而

$$Q = \frac{1}{2}(nm_{电子})v_1^2$$

所以

$$U(ne) + nW_{f_2} = Q \quad (17)$$

可变形为

$$U(ne) = -nW_{f_2} + Q \quad (18)$$

又因

$$W_{f_1} + W_{f_2} = 0$$

所以

$$U(ne) = nW_{f_1} + Q \quad (19)$$

由以上推导可知,金属棒内部电场力对大量自由电子做功本欲将动能全部转化为金属棒的焦耳热;实际上因为 $f_2$ 做负功,使自由电子 $ab$ 方向的动能相对无磁场时减小,所以产生的焦耳热也相对减少.减少的动能(焦耳热),通过 $f_1$ 做正功转化为垂直 $ab$ 方向的动能.即电场力对大量自由电子做的正功让电能转化为自由电子水平方向的动能和 $ab$ 方向的动能(焦耳热).

又因大量自由电子的 $f_1$ 做的功 $nW_{f_1}$ 从能量值上等效于金属棒的安培力对金属棒做的功;即

$$nW_{f_1} = W_{安} \quad (20)$$

所以宏观表现为

$$U(ne) = W_{安} + Q \quad (21)$$

且

$$W_{安} = E_{k金属棒} \quad (22)$$

所以

$$U(ne) = E_{k金属棒} + Q \quad (23)$$

因此,本模型在宏观表现上为:电源提供电能,通过电功和安培力做功,分别转化为焦耳热和金属棒的动能<sup>[3]</sup>.

### 3 总结

本文主要通过从微观形式出发,在“动电动模型”和“电动电模型”两种理想模型中研究电流及电动势形成的本源,研究其能量的转化.通过探究模型的本质,探索其内在动力;增强学生“格物致知”的探究精神和探究能力;进一步深入浅出地解释高中物理电磁学部分的许多知识难点和模糊点;比如,在文章首段提出的,“电动机工作时,所谓的反电动势”其实际上是不存在的,是自由电子在电场方向的运动相对减慢而导致的,从形式上等效于反向的感应电动势,只是为了便于初步的理解以及电路工程中的一种叫法而已.这些都需要通过研究其微观本质才能真正的融汇贯通.

### 参考文献

- 1 梁灿彬,秦光戎,梁竹健.电磁学[M].北京:高等教育出版社,2010
- 2 束炳如,何润伟.普通高中课程标准实验教科书物理·选修3-1[M].上海:上海科技教育出版社,2007
- 3 束炳如,何润伟.普通高中课程标准实验教科书物理·选修3-2[M].上海:上海科技教育出版社,2007
- 4 中华人民共和国教育部.普通高中物理课程标准(2017年版)[S].北京:人民教育出版社,2018

## Analysis on the Formation of Motional Electromotive Force and Induced Current and Its Energy Transformation in Electromagnetic Induction from the Microcosmic Angle

Li Chao

(Duqiao High School, Weinan, Shaanxi 714000)

**Abstract:** Taking two models as example, this article analyzes the formation of induced electromotive force, induced current and energy transformation from the micro perspective, with the purpose of unifying the macroscopic cognition and the microcosmic essence, so as to carry out effective teaching.

**Key words:** micro; free electron; Lorentz force; non electrostatic force; induced current; induced electromotive force; energy conversion