

# 非闭合导体回路电磁感应现象形成机制的探讨\*

张轶炳 祁瑞娟 王芳芳

(宁夏大学物理电气信息学院 宁夏 银川 750021)

(收稿日期:2015-06-01)

**摘要:**很多教材只讨论闭合导体回路的电磁感应现象,事实上非闭合导体中也会产生感应电流.大块导体即使外形上不闭合,但当周围磁场发生变化时,导体内部带电粒子也会在涡旋电场作用下形成涡流.本文利用涡流的形成及其磁效应原理对楞次定律演示环及楞次定律演示仪的实验现象进行解释推理.

**关键词:**非闭合回路 感应磁场 感应电流 涡流

## 1 问题的提出

高中物理教材对电磁感应现象描述为“只要穿过闭合导体回路的磁通量发生变化,闭合导体回路中就有感应电流”<sup>[1]</sup>.感应电流产生的磁场叫感应磁场,应用楞次定律可以判断出感应磁场的方向,即当引起感应的磁通增加时,感应电流的磁通与该磁通方向相反(阻碍它的增加);当引起感应的磁通减小时,感应电流的磁通与该磁通方向相同(阻碍它的减小).

高中教学中一般用楞次定律演示环验证楞次定律(见图1),当条形磁铁插入或拔出闭合铝环时,铝环会随着条形磁铁的运动而运动,而插入、拔出非闭合铝环时,铝环则不会随之运动.现在要问非闭合回路能否产生感应磁场?

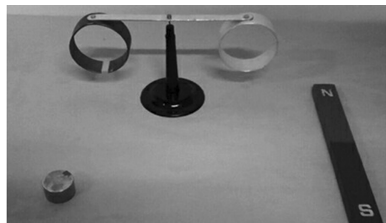


图1 楞次定律演示环

## 2 实验及其现象

以下是用以两个实验来观察非闭合回路电磁感应现象.

### 2.1 楞次定律演示环

#### (1) 实验装置

图1为楞次定律演示环实验,所用到的实验器材为闭合铝环、非闭合铝环、支座、普通条形磁铁、磁性较强的磁铁.闭合铝环、非闭合铝环通过横杆来连接,横杆由支座支撑可以绕支座自由转动.

#### (2) 实验现象

将普通条形磁铁的磁极迅速靠近闭合铝环,铝环会逃离.原因是磁铁靠近闭合铝环时,铝环会产生感应电流,感应电流产生的感应磁场与原磁场相反,因此与磁铁发生排斥现象,即产生“逃离”运动,相反若拔出磁铁,铝环上感应电流的磁场与原磁场相同,因相互吸引而靠近磁铁.

若用该磁铁靠近或远离非闭合铝环,此导体环不随之运动,一般解释原因是由于导体回路不闭合.但当换一个磁性较强的磁铁插入非闭合铝环时,发现非闭合铝环也会与磁铁发生排斥现象,只是现象没有闭合铝环那么明显.有人猜测,其运动是由于移动磁铁所引起的空气流动推动了非闭合环,对于这

\* 宁夏高等学校科学研究项目,编号:NGY2013044;2015年宁夏大学研究生创新项目“中美物理探究教学比较及探究实验开发”.

作者简介:张轶炳(1964-),女,教授,主要从事大学物理教学及研究.

些叙述,文献[2]给予了解释论证,否定了猜测.为了进一步验证实验,我们把环的开口逐渐变大,发现铝环仍然会运动.

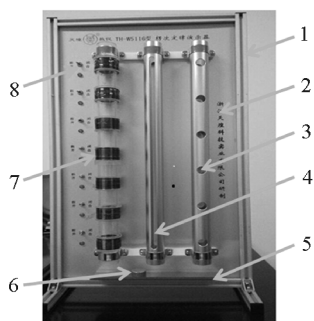
最初分析原因认为当磁铁磁性较强时,即使没有插入闭合铝环,磁铁周围的变化磁场也会影响旁边闭合回路的磁通量,闭合铝环中仍然会产生感应电流,非闭合铝环的运动仍然是由于闭合铝环感应磁场的作用,是这个原因吗?

我们又设计了单个非闭合导体环实验,将一个单个的非闭合铝环用细绳悬挂起来,将磁铁迅速靠近和远离非闭合导体环,这个非闭合铝环仍会产生明显的与磁铁相斥或吸引运动.这个现象说明非闭合导体也会产生感应电流.

## 2.2 楞次定律演示仪(管式)

### (1) 实验装置

楞次定律演示仪(管式)由外框、面板、绕线圈的有机玻璃管、铝管、磁铁接板等组成.如图2所示.



1.铝型材外框 2.面板 3.开圆孔铝管 4.开长条孔铝管 5.磁铁接板 6.磁铁( $\phi 25\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ) 7.绕线圈的有机玻璃管 8.开关

图2 楞次定律演示仪(管式)

### (2) 实验现象

将面板上开关拨到“断开”状态,将磁铁( $\phi 25\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ )从有机玻璃管上口放入,在磁铁经过每一组线圈的时候,线圈旁边的发光二极管发光,说明线圈中会产生感应电流.将磁铁从开长条孔铝管的上口放入,可以观察到磁铁的下落速度明显慢于自由落体;将磁铁从开圆孔铝管的上口放入,可以观察到磁铁的下落速度略慢于磁铁从开长条铝管中下落的速度.这两种现象说明,有一种力在阻碍着磁铁的运动.这也说明即使是开孔的回路也会有感应电流.

## 3 涡流产生的机制

对上述闭合导体铝环与磁铁相斥或吸引的现象可以用楞次定律进行解释,即磁铁接近和远离闭合导体铝环时,导体铝环因为回路闭合而出现感生电场,感生电场使金属环中的电子运动引起感应电流,而感应电流产生的磁场阻碍或补偿电路中磁通的改变,使铝环发生运动.然而,非闭合导体环的运动现象及楞次定律演示仪(管式)实验现象又该如何解释呢?下面我们来进一步分析其原理.

### 3.1 感应电流

大量电荷做定向运动形成电流,电荷的携带者可以是自由电子、质子、正负离子,这些带电粒子也称为载流子.当闭合回路的一段导体在磁场中做切割磁力线运动时,或闭合回路中磁场随时间变化时,此闭合回路中的磁通量一定会发生变化,在闭合回路中就产生了感应电动势,从而产生了电流,这种电流称为感应电流<sup>[3]</sup>.这也是一些物理教材中提到的感应电流,即在闭合导体回路中会产生感应电流<sup>[4,5]</sup>.

### 3.2 涡流

事实上感应电流不仅能够出现在闭合导体回路内出现,而且大块金属导体与磁场有相对运动或处在变化的磁场中时,这块导体中也会激起感应电流.

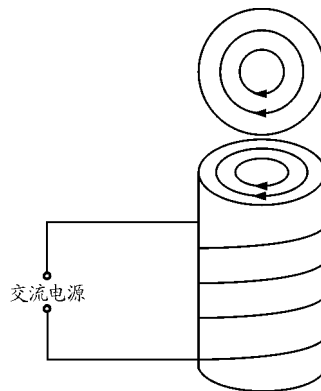


图3 大块圆柱形导体的涡电流

在圆柱形的铁芯上绕上线圈,当线圈中通有交变电流时,铁芯就处在交变磁场中,我们把金属块看作由一层一层半径逐渐变化的圆柱状金属薄壳组成,每一薄层相当于一个回路.在交变磁场中,通过

这些薄壳的磁通量都在不断发生变化,每一薄层回路中都将形成环形的感应电流.从铁芯的上端俯瞰铁芯中的感应电流时,感应电流的电流线呈闭合的涡旋状,即感应电流在导体内自行闭合,如图3所示,这种在大块导体内流动的感应电流,叫做涡电流,简称涡流<sup>[6]</sup>.

根据麦克斯韦理论,无论空间是否有导体,变化的磁场空间都会出现感应电场,也称为涡旋电场,涡旋电场的电场线是闭合的<sup>[7]</sup>.当有导体放入时,导体中的带电粒子在涡旋电场(非静电场)作用下发生定向移动,在任一闭合回路中都会产生感应电动势,即闭合回路的感应电动势总是等于涡旋电场沿该闭合回路的环路积分.

若用  $E_k$  来表示感应电场,则沿任意闭合回路的感应电动势为

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \oint_L \mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{L} = -\frac{d\Phi}{dt} \\ \Phi &= \int_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \\ \varepsilon_i &= \oint_L \mathbf{E}_k \cdot d\mathbf{L} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = -\int_S \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \end{aligned} \quad (1)$$

上式表明,只要存在变化着的磁场,就一定要有感应电场<sup>[6]</sup>.当大块金属导体与磁场有相对运动或处在变化的磁场中时,由于导体内部处处可以构成闭合回路,任意回路所包围面积的磁通量都在变化,就会产生涡旋电场,导体中的载流子在非静电场——涡旋电场的作用下发生定向移动,由于涡旋电场是闭合的,所以产生的感生电动势也是闭合的,在此闭合回路中就产生了涡电流.

涡流与传导电流是有区别的.传导电流是由电源和导线构成的闭合回路中的电流,电源部分是非静电力做功,电源之外是静电力做功,传导电流可以用电流表直接测出电流大小.而涡流是由大块导体处于涡旋场中产生的,处于变化磁场中的导体可以分为无数个环路,每个环路中处处有非静电力对带电粒子做功而形成涡流,单个涡流很小,无法用电流表直接测出其电流大小,其磁效应也不明显,大量涡流产生的磁效应就比较强.

## 4 对实验现象的解释

### 4.1 单个非闭合铝环实验现象分析

根据上述涡电流产生机制的阐述,我们来具体分析单个非闭合铝环周围磁场发生变化时铝环发生运动的原理.图4(a)为磁铁插入非闭合铝环的截面图.

当磁铁的N极迅速插入非闭合铝环时,铝环周围的磁感应强度  $B$  逐渐变大,通过铝环的磁通量增大,铝环中就会产生涡旋电场,铝环中就会产生一系列小涡流.

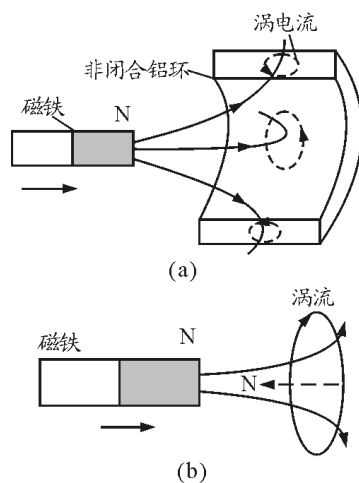


图4 导体中的涡电流及其产生的磁场

每一个微小涡电流周围存在着磁场,根据楞次定律,涡电流的磁场与原磁场方向相反,铝环各个位置涡电流的方向如图4(a)虚线箭头所示.为了方便说明实验现象,我们取非闭合铝环中的一个小涡流圈来单独分析,如图4(b)所示.涡电流的方向与磁铁产生的磁感应强度  $B$  的方向相垂直,满足右手螺旋法则,沿逆时针方向.涡电流产生的感应磁场方向与磁场产生的原磁场方向相反,阻碍引起涡电流磁通量的变化.每一个微小涡电流都像一个小磁极,其指向如图4(b)中虚线箭头  $N$  所示.导体中有无数个这样的小涡流,其产生的感应磁场相互叠加形成较强的磁场,与原磁场发生同名磁极相互排斥的现象,致使导体向远离磁铁的方向转动.

## 4.2 楞次定律(管式)演示仪实验现象分析

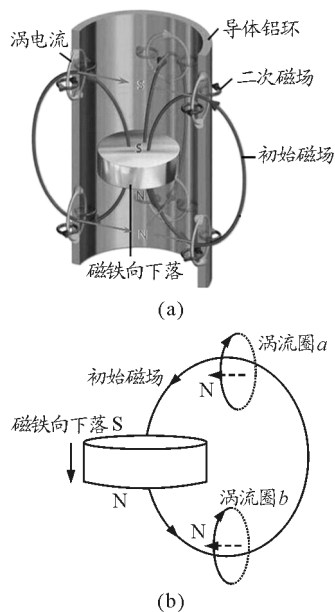


图 5 楞次定律演示仪(管式)中涡电流的存在形式及其产生的感应磁场

由上述涡电流产生的原理及对非闭合导体环实验现象的分析,我们也可以解释楞次定律(管式)演示仪实验中磁铁运动的现象.铝管可看作为大块导体,磁铁下落的过程中,铝管与磁场发生相对运动,铝管导体内出现涡电流,其涡电流的存在形式及其产生的感应磁场如图 5(a)所示.磁铁向下落时,铝管处在变化的磁场里,取铝管中产生的两涡流圈  $a$  和  $b$ ,  $a$  在磁铁下落位置的上方,  $b$  在下方,如图 5(b)所示.磁铁向下运动时,通过  $a$  的磁通量减少,涡电流产生的感应磁场方向与原磁场相同,补偿磁通量的减少,异名磁极相吸;通过  $b$  的磁通量增加,涡电

流产生的感应磁场方向与原磁场相反,阻碍磁通量的增加,同名磁极相斥.两种效应共同作用阻碍磁铁的下落.由于铝是良导体,电阻很小,其电阻率在常温下( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时)为  $2.83 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ,所以涡电流产生的涡旋磁场很强.即使开孔或槽的铝管,其阻碍作用也很明显,磁铁受到了一个向上的磁力,使磁铁的下落加速度远小于重力加速度,因此比自由落体慢得多.

## 5 总结

因此,我们通常理解的只有在闭合导体回路中才会有感应电流产生的说法是不全面的.在磁通量变化的空间,无论是由导体构成的外形上闭合的回路,还是大块导体中带电粒子在涡旋场作用下自我构成的闭合回路,都会产生感应电流,遵从楞次定律.

## 参考文献

- 1 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.普通高中课程标准实验教科书物理(选修 3-2).北京:人民教育出版社,2014.7
- 2 席桑田.对楞次定律演示器的探讨.物理通报,1994(7)
- 3 梁灿彬,秦光戎.电磁学(第二版).北京:高等教育出版社,2004.220 ~ 221
- 4 詹佑邦.普通物理.南京:南京大学出版社,2001.246
- 5 胡友秋.电磁学.上海:华东师范大学出版社,1994.301
- 6 马文蔚.物理学,中册.北京:高等教育出版社,1999.211, 215 ~ 217
- 7 王楚,李椿.电磁学.北京:北京大学出版社,2000.132 ~ 133

## Discussion on the Formation Mechanism of Electromagnetic Induction Phenomenon of Non-closed Conductor Loop

Zhang Yibing Qi Ruijuan Wang Fangfang

(School of Physics and Electrical Information, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

**Abstract:** Many textbooks only discuss the closed conductor loop electromagnetic induction phenomenon. In fact, a non-closed conductor will produce induced current as well. When the ambient magnetic field of a chunk conductor changes, the charged particles inside will form a eddy current in the vortex electric field, even though it is non-closed. This paper mainly explains the phenomenon on the Lenz's Law demonstration ring and the instrument by using the eddy current formation and principle of magnetic effect.

**Keywords:** non-closed loop; induced magnetic field; induction current; eddy current