

# 电磁感应现象的认识过程

薛志宇

(内蒙古广播电视大学伊盟分校 东胜 017000)



电磁感应现象的研究几乎经历了整个 19 世纪,吸引了一大批著名的物理学家,设计了许多精密实验.经历了从奥斯特、安培到法拉第、楞次再到麦克斯韦、洛仑兹等几个研究阶段.最后揭开了全部电磁感应现象及其本质,并为物理学开辟了新的研究领域.今天重温电磁感应现象的认识过程,在于激励后人如何学习前辈科学家的研究方法和探求自然规律的精神,并从中领略到每一重大科学、技术的发现和发明都将直接影响着人类社会的繁荣和发展,更进一步使人们认识到科学、技术是推动社会进步的决定性力量.

## 一、法拉第电磁感应定律的建立

19 世纪初由于发现各种自然现象之间有其内在的联系,另一方面在德国古典哲学关于自然界统一思想的影响下,部分自然科学家开始寻求电与磁的联系.1812 年,丹麦物理学家奥斯特提出电与磁之间存在着联系,并经过反复研究于 1820 年 7 月发现了通电导体附近磁针转动的现象.这一惊人发现在物理学界引起以法国物理学家安培为代表的许多物理学家的思考、探索、研究.在奥斯特的发现两个月后,安培提出通电线圈与磁铁相似的报告.1812 年—1825 年安培对通电平行导线间相互作用力的研究得出电流元之间相互作用力  $dF \propto I_1 I_2 dl_1 dl_2$  的规律,提出电能可以转化为磁能,磁起源于电,得到磁与电有本质联系的结论.1827 年安培将对电磁感应的研究成果综合在《电动力学现象的数学理论》一书中.安培不仅为电磁感应现象的研究作出了阶段性成果,也为电磁学的发展奠定了基础.但由于研究始终是在稳态情况下进行的,所以没有获得成功.英国实验物理学家法拉第不为名家所吓倒,勇于实践,他认为:既然电流能够产生磁,那么磁也应该产生电.顺着这一思路,在总结前人研

究的基础上,又经历了多次失败之后,终于在 1831 年总结出法拉第电磁感应定律.即当回路内部的磁通量发生变化时,回路上产生的感应电动势同总磁通量的时间变化率成正比.1834 年俄国物理学家楞次发现了判断感应电流或感应电动势的方向的楞次定律,即闭合回路中感应电流的方向总是使它所产生的磁场阻碍引起感应电流的磁通量的变化.1845 年,诺埃曼将法拉第电磁感应定律与楞次定律合在一起用简洁的数学式表达出来.

$$\mathcal{E} = -d\varphi/dt \quad (1)$$

(1) 式就是普遍称为法拉第电磁感应定律的数学式.其一,它给出导体闭合回路产生感应电动势的原因是穿过回路的磁通量发生变化;其二,它给出感应电动势的大小与磁通量的变化率成正比;其三,它给出磁电之间的联系及其定量关系.也给出磁生电的途径.麦克斯韦应用斯托克斯定理从 (1) 式导出  $\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$ , 因此,法拉第电磁感应定律是建立经典电磁场理论的基础;发电机、变压器又是直接应用这一原理制成的.因此说法拉第电磁感应定律又是电力、电信工程发展的理论依据.近、现代科学技术、文化教育以及经济建设的各个领域无不与电有密切的联系.尤其当代人类的生活、生产、工作等都离不开电,仅以家庭生活为例,照明、取暖、电话、收录机、电视机、电冰箱、空调、计算机等,且随着社会的发展用电设备逐趋繁多.社会的进步和发展充分体现在电的广泛应用上,电的应用程度已成为一个国家发达的标志之一.可以说,法拉第电磁感应定律的发现开辟了人类社会文明的新纪元.然而这一定律只揭示了电磁感应的部分现象(可构成回路的电磁感应现象).电磁感应的全部现象及其本质是在法拉第 1867 年过世后,麦克斯韦建立了电磁场方程组,洛仑兹于 1895 年给出运动电荷在磁场中受力的洛仑兹力

公式之后才被揭示出来。

## 二、两种感应电势

从法拉第电磁感应定律  $\mathcal{E} = -d\phi/dt$  出发定义两种感应电势。如果闭合回路固定,引起磁通量变化的原因只能是磁场随时间变化,即  $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r}, t)$ , 由于  $\vec{B}(\vec{r}, t)$  随时间变化产生的感应电势,称为感生电势,用  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  表示,于是就有:

$$\mathcal{E}_{\text{感}} = -d\phi/dt \quad (2)$$

如果磁场不随时间变化,即  $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r})$ , 而导体闭合回路相对于磁场作切割磁力线运动,引起闭合回路中磁通量变化产生的感应电动势,称之为动生电动势,用  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  表示,即有:

$$\mathcal{E}_{\text{动}} = -d\phi/dt \quad (3)$$

(2)和(3)说明,从法拉第电磁感应定律出发定义的感生电动势和动生电动势其数学表达式是相同的,即都等于磁通量对时间的变化率的负值,这样的定义既没有反映两种电动势产生的本质,同时易使人误解  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  和  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  是相对的。也就是说用法拉第电磁感应定律定义的  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  和  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  是不确切的。

从经典电磁场理论  $\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$  和  $\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B})$  出发定义两种电动势。 $\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$  揭示了随时间变化的磁场在其周围空间激发出涡旋电场  $\vec{E}$ ,  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  与  $\vec{E}$  对应;有  $\vec{E}$  存在的空间就有  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  存在,于是  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  的定义为:

$$\mathcal{E}_{\text{感}} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (4)$$

(4)式就是感生电动势的本质定义,即由涡旋电场产生的感应电动势,或说随时间变化的磁场产生的感应电动势就是感生电动势。

如果磁场不随时间变化,即  $\vec{B} = \vec{B}(\vec{r})$ , 当导体在磁场中切割磁力线运动时,导体上的自由电荷受到洛仑兹力  $\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B})$  的作用而发生移动,依电动势定义得动生电动势  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  为:

$$\mathcal{E}_{\text{动}} = \int_L (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (5)$$

(5)式给出动生电动势的本质定义,即由洛仑

兹力产生的感应电势就是动生电动势,动生电动势是洛仑兹力的一种表现。(4)和(5)式中的  $L$  可以是闭合回路,也可以是非闭合回路。(4)和(5)式给出普遍情况的电磁感应现象,并给出  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  和  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  产生的本质原因。就一般情况而言,  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  和  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  是依  $\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$  和  $\vec{F} = q(\vec{V} \times \vec{B})$  定义的,据两种独立的理论因此,  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  和  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  是彼此独立的。是  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  还是  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  完全取决于是涡旋电场产生的还是洛仑兹力产生的,不能用坐标变换来实现  $\mathcal{E}_{\text{感}}$  和  $\mathcal{E}_{\text{动}}$  的相互转换。

## 三、对电磁感应定律两种形式的讨论

电磁感应定律的两种形式是:

$$\mathcal{E} = -d\phi/dt \quad (1)$$

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \iint \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_L (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (6)$$

笔者认为两种形式出现的背景不同,反映的内容不尽一致。在1895年以前经典电磁场理论尚未完全建立,电磁感应定律以(1)式的形式出现,反映了当时人们对电磁之间规律的一定的认识深度,即只认识可构成回路的电磁感应现象,不可构成回路的电磁感应现象(1)式不能反映。对可构成回路的电磁感应现象的认识也是知其然而不知其所以然。但(1)式表达简洁,对那些可构成回路的电磁感应现象用(1)式计算是很方便的。(6)式是在经典电磁场理论建立之后出现的,它反映了电磁感应现象与涡旋电场及洛仑兹力有关。它全面深刻地反映了电磁感应现象,同时揭示了电磁感应现象的本质,所以(6)式才是电磁感应定律的普遍表达式。对那些可构成回路的电磁感应现象,(1)和(6)式是等价的。法拉第于1831年发现电磁感应定律之后,对电和磁继续进行研究,于1837年提出“电场”和“磁场”的概念,并对电场和磁场进行详细研究,得出电场和磁场可以相互转化的结论。场概念的提出为建立电磁场理论奠定了基础。麦克斯韦在法拉第等人的研究基础上,进一步指出电和磁是不可分割的,有电场存在就有磁场存在,反之亦然,从而把电场和磁场统一为电磁场。麦克斯韦和洛仑兹建立的电磁场理论使电磁感应现象得到了完美的解释。