

DIS 实验新探

DIS 法拉第电磁感应实验器(上)

冯容士 李鼎 (上海市中小学数字化实验系统研发中心 上海 200072)

前 言

自 1820 年奥斯特发现电流的磁效应起,人们就开始思考:既然电流能产生磁,反过来磁是不是也能产生电呢?英国物理学家法拉第发现:变化的磁场能使闭合导线中产生电流。这种现象称为电磁感应。后经过十年坚持不懈的研究,法拉第从大量的实验现象中以近乎天才的直觉总结出了法拉第电磁感应定律。

定律指出:任何封闭电路中感应电动势的大小,等于穿过这一电路磁通量的变化率。本定律可用以下的公式表达:

$$\epsilon = \frac{d\Phi_B}{dt}$$

中学物理教材中,公式简写为: $E = n\Delta\phi/\Delta t$ 。

电磁感应现象是电磁学中最重大的发现之一,它揭示了电与磁相互联系和转化的重要特性,其发现在科学上和技术上都具有划时代的意义。

电磁感应现象发现之后,物理学家逐渐注意到法拉第定律居然是一个描述两种现象的方程:由磁力在移动中的电线中产生的动生电动势,及由磁场转变而成的电力所产生的感应电动势。

诺贝尔物理学奖得主理查德·P·费恩曼在《费恩曼物理学讲义》中写到:“我们不知道在物理学上还有其他地方,可以用到一条如此简单且准确的通用原理,来明白及分析两个不同的现象。”

从这个角度来说,法拉第电磁感应定律是神奇的。也正是这种神奇,使得物理教育领域对于法拉第电磁感应定律的实验验证,注定充满了挑战。

一、教材实验回顾

为了验证法拉第电磁感应定律,传统教材中设计了多种实验。这些实验基本上都以各种类型的电

磁感应模型为基础,并将电磁感应的基础归结为穿过线圈的磁通量变化。

图 1、2、3 为传统教材中常见的电磁感应实验装置。图 1 中磁铁插入线圈或从线圈中抽出时;当图 2 中电键闭合或断开时,以及电键闭合后,用变阻器改变线圈 A 的电流强度时;或保留线圈 A 中的电流强度不变而使它上下移动时;都会使穿过线圈 B 的磁通量发生变化,这时线圈 B 中都会产生感应电流。如图 3 所示的闭合导线一部分在磁场中切割磁感线,同样会使闭合电路的磁通量发生变化而产生感应电流。

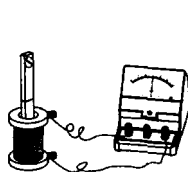


图 1

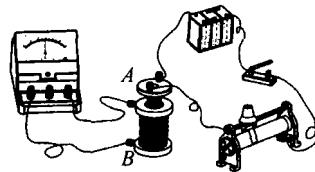


图 2

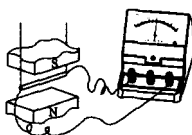


图 3

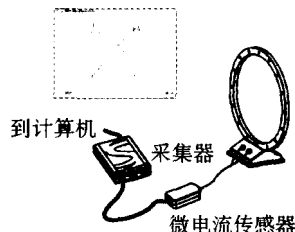


图 4

上海二期课改高中物理教材中,还增加了应用 DIS 微电流传感器,观察穿过线圈平面的磁场的磁通量发生变化,而产生的感应电流的实验(图 4)。

上述实验方案,可令学生直观地感受电磁感应现象,便于学生知识的延续和递进。但上述方案的欠缺也是显而易见的:

(1) 只能对电磁感应规律进行定性说明,无法提供定量验证的基础;

(2) 通过灵敏电流计或微电流传感器测得的感应电流来研究感应电动势,无法直接获得感应电动

势的大小；

(3) 方案中有的研究导体切割磁力线产生动生电动势($E = BLV$),有的研究磁场强弱变化产生感生电动势($E = \Delta\varphi/\Delta t$)。虽然两者均可称为因磁通量的变化产生的感应电动势,但是两者内在生成机理并不相同。单独以一种电动势(动生或者感生)来研究电磁感应本身,都具有以偏概全的逻辑缺憾,而且模糊了动生电动势和感生电动势本来具有的差异。尽管中学教学中并不强调两者的区别,却容易让学生将来深入研究法拉第电磁感应定律时产生误解。

上海二期课改高中物理拓展型课程 II 中,设置了学生实验:“用 DIS 研究回路中感应电动势大小与磁通量变化快慢的关系”。为完成该实验,并借助数字化实验手段将电磁感应实验提高到量化水平,上海市中小学数字化实验系统研发中心在 2005 年推出了法拉第电磁感应定律实验装置原型(图 5)。

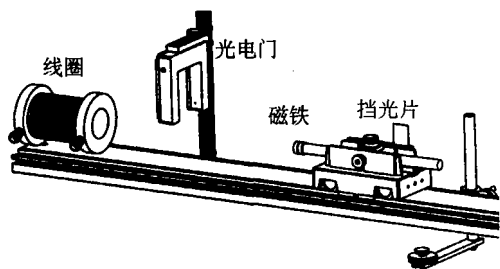


图 5

该装置利用 DIS 成熟的“轨道-小车系统”,线圈安装在轨道低端,连接 DIS 电压传感器,线圈之前固定有 DIS 光电门传感器,两传感器接入 DIS 数据采集器,采集器通过串口连接电脑;小车上安装有磁铁和挡光片。

其工作原理如下:实验时,从轨道的高端释放小车,小车上的挡光片经过光电门并使磁铁进入线圈。光电门记录挡光时间 Δt ,电压传感器记录磁铁进入线圈过程中线圈端电压的变化,以此计算出螺线管的感应电动势 E (平均)。

这个原型装置的设计存在致命缺陷:教材主编张越老师在“关于法拉第电磁感应定律 DIS 实验的问题和改进建议”一文中指出:该实验的关键,在于获得平均电动势 E 。在这个实验中,首先针对 Δt 时间内所获得的 $E-t$ 图线进行积分得出了 $\Delta\varphi$ (图 6),然后根据公式 $\Delta\varphi/\Delta t = E$ (平均) 计算得出了 E ,而所使用的这

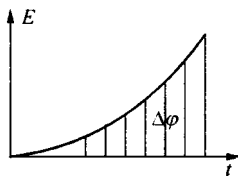


图 6

个公式,就是法拉第电磁感应定律的表达式。这实际上已经构成了循环论证。

二、DIS 法拉第电磁感应实验器(I)的研发

在张越老师的及时提醒下,研发中心充分认识到了法拉第电磁感应定律蕴含的物理内容的复杂性和实验验证该定律的难度。为了教材的完善,研发中心决心彻底解决该实验难题。为此,不仅充分调动了中心的研发力量,而且在陆伯鸿等专家的提议下,将“电磁感应”课题列入了上海市物理 DIS 名师培养基地的重点教学探讨内容,发动学员对此课题的背景、意义、过程,以及研究方法和思路进行了充分深入的讨论,并将实验器材的完善提升到了研究的首要位置。

2007 年~2008 年,研发中心工程师结合新一代 DIS 产品的研发,重构了高速数据采集系统,确保了多路信号采集的同步性,为研制新一代实验器奠定了良好的硬件基础。

有了高速数据采集系统为基础,研发中心随后构造了全新的实验装置(图 7),即“DIS 法拉第电磁感应实验器(I)”。该装置是脱离 DIS 采集器的独立 USB 设备,这种系统构造极大地增强了应用的灵活性和教学的适应性。

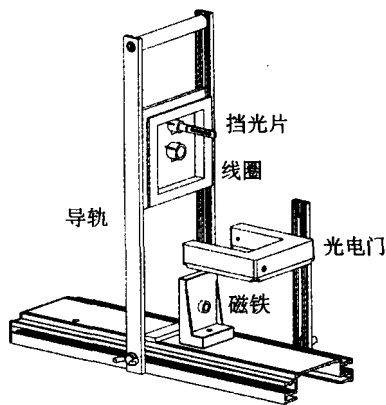


图 7

该实验器的基本构成如下:在 DIS 配套实验器材标准底座上安装竖直轨道和长方形扁平磁铁(磁场水平指向);线圈可在轨道中从不同高度自由下落,线圈通过柔软的细导线(确保不会影响到线圈的顺利下落)连接 DIS 电压传感器;挡光片固定在线圈上端;实验器底座上安装有光电门。电压和光电门传感器均接入实验器采集电路并与计算机实现 USB 通信。

实验时,当线圈下落,其底边掠过磁铁端部切割

磁感线时,DIS 电压传感器测得线圈端电压 U 的同时,线圈上的挡光片完成一次挡光,由此测出线圈的运动速度。线圈还有多个抽头,不同抽头对应不同的线圈匝数 n 。

由端电压 U 与感应电动势 E 的关系: $U = E - Ir$ (I 为回路中的电流, r 为切割磁感线的金属导线的电阻),可得 $U = E - (U/R) \times r$ (其中 R 为 DIS 电压传感器内阻),经过公式换算,可得 $U = E \times R / (R + r)$ 。

在此实验中,当切割磁感线的线圈电阻忽略不计时, $E = BLv$ 既是电源电动势 E , 又是外电路电压 U ; 当切割磁感线的线圈电阻不可忽略时, $E = BLv$ 表示的是感应电动势 E , 外电路电压 $U = E \times R / (R + r)$, 则端电压 U 与感应电动势 E 成正比。

由于 E 值由系统根据端电压 U 的测量值计算得来,这就避免了实验器原型设计所犯的循环论证错误。

图 8 为“DIS 法拉第电磁感应实验器(I)”的专用软件界面。其中的三条图线分别为不同线圈匝数(100、200、300)的电动势与速度的关系图线。每一条图线均显示电动势与切割速度成正比关系;当速度取一定值时,三条图线对应的电动势之比接近 $1:2:3$ 。

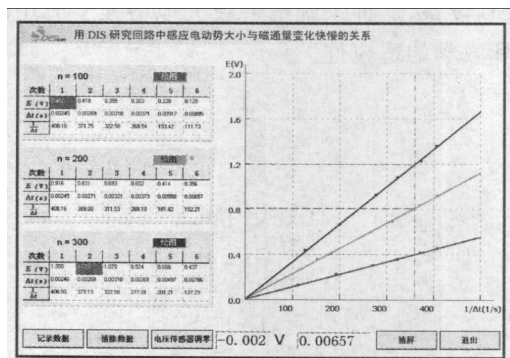


图 8

由这个实验可以初步验证感应电动势表达式之一: $E = BLv$ 。

2010 年 5 月,研发中心应上海市北中学王苏梅、高斌老师的要求,在“DIS 法拉第电磁感应实验器(I)”中进一步增加了 DIS 磁感应强度传感器,又将图 7 中固定在实验器底座上的磁铁改为可移动式,以改变磁场的强弱,使该实验器具备了以控制变量法研究 $E = BLv$ 公式中“ B ”的功能。硬件的改造伴随着软件的完善,该装置很好地支持了王老师的公开课,她与高斌老师合写的论文《探究导体切割磁感线时,影响感应电动势大小的因素——从一堂教学展示课谈起》(《物理教学》2011 年 6 期)详细记录了这次教学与研发积极互动的过程。

王苏梅老师的提议,促进了“DIS 法拉第电磁感应实验器(I)”的定型。随后该实验器进行了小批量生产,并先后在徐汇、闸北等区进行了公开课应用,获得了专家和一线教师的好评。大家除了对实验效果表示满意之外,还对该实验器所采用的独立 USB 架构也给予了充分的肯定。

但同时,也有老师和专家提出:该实验装置主要用于验证动生电动势的产生规律,即 $E = BLv$,说明它符合法拉第电磁感应定律。至于电磁感应的另一个表现形式——感生电动势的产生规律,本实验装置则没有涉及。尽管 $E = BLv$ 可以通过一系列变换导出法拉第电磁感应定律 $E = n\Delta\phi/\Delta t$, 但毕竟不是直接验证。因此,张越老师提出的教材建设目标——“改变磁感应强度大小,用 DIS 实时显示感应电动势(感应电动势应该包含动生和感生电动势两种形态!)与磁通量的变化率之间的关系”,尚未完全实现。

(未完待续)

(上接第 41 页)

教学过程中由学生可能会出现结论入手,设计实验证明错误,不断向正确结论靠近,最终在得到 $F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2$ 的同时,获得力臂的概念。学生课上思维始终跟着主线在走,经历提出问题、作出猜想、收集数据、形成解释、评价结果等过程,因为是自己思考所得,印象较深、理解良好。

本节课上没有进行任何作图训练,但是课后作图能独立进行,正确率高。

综上所述,在教学中,教师要切实将学生视为学

习的构建者,而不仅仅是学习的接受者。在教学中遇到抽象的、学生认知缺乏的知识点时要加强实验探究,补充和增强学生的感性体验。设计探究性实验时,注重逻辑推理在教学中的应用,努力通过层层递进的探究实验来引导学生研究隐含的规律,以量变来实现质变,使概念的形成自然而然。以优化概念的形成过程来减少习题量,而不是以加大习题量来强化概念本身。让学生的头脑在课堂上保持活跃,在理解的基础上形成概念。