

定量验证法拉第电磁感应定律的实验

李 鼎¹,冯容士²,赵 进²

1.西南大学科学教育研究中心、西南民族教育与心理研究中心,重庆 400715
2.上海市中小学数字化实验系统研发中心,上海 200072

摘 要:法拉第电磁感应定律的发现,奠定了现代电磁学理论的基础。但是,该定律的定量实验验证在物理教育界却并不多见。作者团队通过开发两套新型实验系统,实现了对该定律的动生电动势公式 $E=BLv$ 和感生电动势公式 $E=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ 的定量验证。文章对上述两方案进行了介绍。

关键词:法拉第电磁感应定律;动生电动势;感生电动势;定量验证

中图分类号:G633.7

文献标识码:A

文章编号:1003-6148(2019)8-0013-4

1 问题的提出

按照中国中学物理教材的表述,法拉第电磁感应定律指的是:电路中感应电动势的大小,跟穿过这一电路的磁通量的变化率成正比^[1]。教材进而指出:如果用 E 表示感应电动势,它的单位是伏特(V),磁通量和时间的单位分别为韦伯(Wb)和秒(s),法拉第电磁感应定律可以用公式表示为 $E=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ 。其中,感应电动势表现为两种形式:一是感生电动势 $E=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ (在线圈匝数为 n 的情况下,记为 $E=n\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$),二是动生电动势 $E=BLv\sin\theta$ (θ 为 B 与 v 的夹角,在 θ 默认为 90° 的时候记为 $E=BLv$)。反观美国中学物理教材,往往直接给出 $E=BLv$,对 $E=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ 则很少提及^[2]。但无论是中国还是美国的中学物理教材,都没有设计定量验证法拉第电磁感应定律的实验,只依靠几种定性实验来帮助学生认识该定律。一线教师反映,由于缺乏定量验证实验,学生对法拉第电磁感应定律的认知在一定程度上受到了影响。

据了解,教材中未编入法拉第电磁感应定律

的定量验证实验,主要在于传统实验所使用的测量方法和工具手段在过程性实验数据采集,尤其是多数据同步采集功能方面的欠缺,以致难以获得定量验证所需的相关数据。因此,引入新的实验数据采集和分析技术(如传感器和相应的计算机分析系统),是获得相关数据,进而实现定量验证的关键。

2 动生电动势公式 $E=BLv$ 的实验验证

2.1 实验原理

由动生电动势公式 $E=BLv$ 可知,闭合导线的一部分导体在磁场中切割磁感线,在导体中会产生感应电动势,在闭合电路中会产生感应电流。因此,需要通过构建一个三变量系统,分别控制 B 、 L 、 v 的变化,并测量其相关数值,同时测量动生电动势 E 在 B 、 L 、 v 发生变化时的结果数据。

经过公式推导,确定动生电动势 E 的测量方法是整个实验的关键。因为动生电动势 $E=U\frac{(R+r)}{R}$ (其中 R 为实验使用的电压传感器内阻, r 为导体内阻),由于公式中 R 远大于 r , $\frac{(R+r)}{R}\approx 1$,故 $E\approx U$ 。所以,只要测得了导体的端电压 U ,就得

收稿日期:2019-05-04

基金项目:本文为教育部人文社会科学重点研究基地重大项目“基于‘互联网+’的民族地区科学普及研究”(批准号16JJD880034)的研究成果。

作者简介:李鼎(1969-),男,西南大学科学教育学博士研究生在读,主要从事数字化实验及科学教育研究,曾获上海市教学成果特等奖;冯容士(1941-),男,物理特级教师,上海市特级校长,曾获全国教育系统先进工作者;赵进(1986-),男,主要从事数字化实验系统硬件开发工作,参与研发的无线向心力实验器获得2014年世界教具联合会大奖。

到了公式中的 E 。

2.2 实验装置

通过引入电压、磁感应强度和光电门传感器,最终形成的实验装置如图 1 所示:

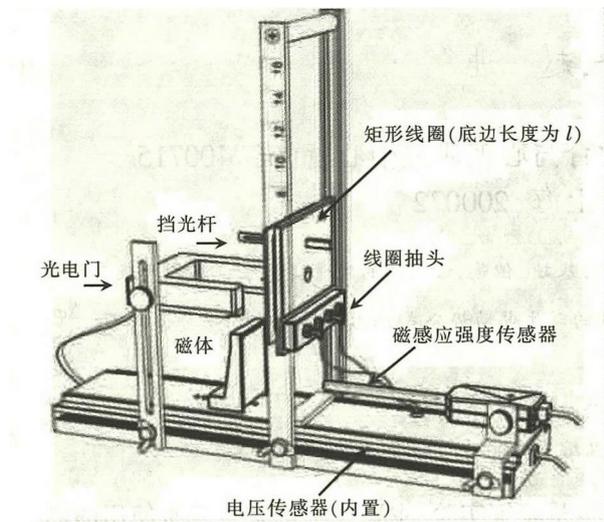


图 1 实验装置

(1) 总体构成

在底座上安装磁体、限位框和方形线圈及上述传感器,其中电压传感器内置于底座内。上述传感器均连接至计算机。

(2) 控制与测量磁感应强度 B

安装在底座上的磁体可产生一个水平方向的稳定磁场,其强度记为 B ;通过水平移动磁体,可改变 B 的大小。通过与磁体正对安装且测量端朝向磁体中心位置的磁感应强度传感器,可测量出 B 的数值。

(3) 控制与测量导体的长度 L

让一个方形线圈在磁体和磁感应强度传感器之间下落,切割磁体产生的磁场。长度为 l 的线圈的底边可视为导体。线圈上设置抽头对应匝数 n ,选择不同的抽头,即可通过该抽头对应的线圈匝数 n 和线圈底边的长度 l 得出导体的总长度 $L, L=nl$ 。

(4) 控制与测量线圈下落速度 v (即导体垂直切割磁感线的速度)

改变线圈沿限位框下落的起始点高度,即可获得不同的速度 v 。通过在线圈上端安装挡光杆,下落时通过光电门的光路,即可测量出线圈的下落速度 v 。光电门的安装需保证:当挡光杆通过光电门时,下落中的线圈的底边正好位于磁体中心位置。

(5) 测量感应电动势 E

使用柔软的细导线(确保不影响线圈的自由

下落)连接线圈的抽头与电压传感器,即可测得导体的端电压 U 。实验原理已述, U 与感应电动势 E 等效。

(6) 确保多数据同步测量

通过将线圈挡光杆在下落时对光电门触发设定为系统的启动开关,即可在获得下落速度 v 的同时,借助电压传感器和磁感应强度传感器测得导体两端的电压 U (即感应电动势 E) 和磁场强度 B 。

2.3 实验验证

该实验配套的软件包含了采用控制变量法进行的三个实验步骤。每次改变公式中的一个变量,可记录多组 E 与 B, L 和 v 之间的关系数据,并可以此绘出相关图线。图 2 即为其中的某次实验获得的 E, v 数据及关系图像,可见在 B, L 不变的情况下, E, v 呈正比关系。

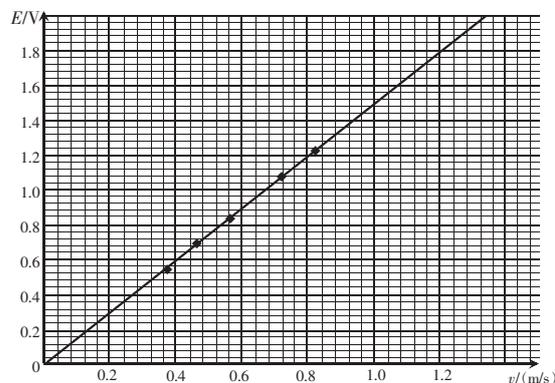


图 2 $E-v$ 图像

根据实验结果,可知动生电动势 E 与磁感应强度 B 、导体长度 L 和导体切割磁感线的速度 v 均呈正比关系,故有 $E=kBLv$ 。适当选择物理量的单位,可使 $k=1$,则动生电动势公式 $E=BLv$ 成立。

经过多次验证,所获数据均符合上述规律。这样就完成了动生电动势公式 $E=BLv$ 的定量验证。

3 感生电动势公式 $E=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ 的实验验证

3.1 实验原理

根据定义:当线圈/导体回路静止不动,只要磁场发生变化,穿过回路的磁通量 φ 就会变化,由此在回路中激发的感应电动势称为感生电动势。其中,磁通量 φ 等于磁感应强度 B 乘以线圈在垂直于 B 方向上的投影面积 S ,即 $\varphi=BS$ 。因此, $E=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}=\frac{\Delta B}{\Delta t}S$,因此当 S 一定时, $E\propto\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 。故验证 $E=\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ 可转化为验证 $E\propto\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 。

由公式 $E \propto \frac{\Delta B}{\Delta t}$ 可知:

(1) 当 B 发生变化时才会产生 E , B 不变则 E 不会产生;

(2) 当 B 均匀变化时, E 的大小不变;

(3) B 均匀上升或下降时, $B-t$ 图线的斜率与 E 的绝对值成正比。

因此, 可推导出一个 $B-t$ 图线和 $E-t$ 图线之间的关系模型(图 3)。其中, B 的变化(上方图线)为因, E 的变化(下方图线)为果。

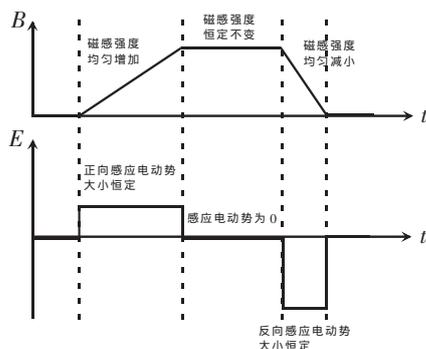


图 3 B 与 E 的关系

综上, 只要能够实现对 B 的变化率, 即 $B-t$ 图线的斜率($\frac{\Delta B}{\Delta t}$)以及 E 的测量, 并证明两者呈正比关系, 那么即可完成对感生电动势公式的定量验证。

3.2 实验装置

(1) 总体构成

实验装置的核心是嵌套在一起的两个线圈——位于内部的是细长的初级线圈, 套在外部的是短粗的次级线圈。线圈和磁感应强度传感器安装在底座上, 电压传感器置于底座内, 上述传感器均连接至计算机(图 4)。

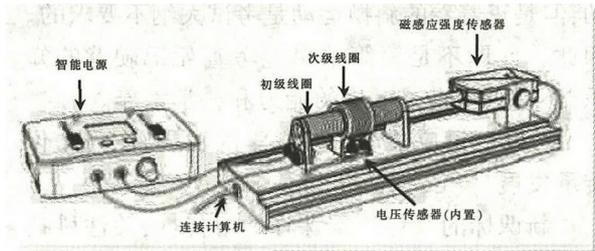


图 4 实验装置

(2) 实现初级线圈磁场的受控变化

将本实验专用的智能电源与初级线圈相连接。该电源可稳定输出梯形波和连续锯齿波, 进而实现磁场的受控变化。

(3) 测量 B 的连续变化

将磁感应强度传感器插在初级线圈中心位

置, 可测量并记录 B 的连续变化数据, 进而可以绘出 $B-t$ 图线。

(4) 测量 E 的连续变化

将电压传感器连接在次级线圈上, 可测量并记录 U 的连续变化, 从而绘出 $U-t$ 图线。与动生电动势公式的验证同理, $E \approx U$ 。 $U-t$ 图线即为 $E-t$ 图线。

3.3 实验验证

令电源输出一组连续锯齿波, 其中共包含五个波峰, 波峰的上升斜率, 即 $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 由低到高依次增大, 由此可获得与图 3 类似但是连续的 $B-t$ 图线和 $E-t$ 图线。

使用专用软件中的图线选取工具, 依次手动选取 $B-t$ 图线的 5 个上升沿的某一部分, 系统即可计算得出选中部分的斜率, 即磁感应强度变化率($\frac{\Delta B}{\Delta t}$), 并同时获得与之对应的下方 $E-t$ 图线中的 E 值。研究 $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 与 E 的关系, 即可对公式进行验证。

以某次实验为例: 根据所获得的五组数据, 可在坐标系中得到对应的数据点。点击“图线拟合”, 即可绘出基于数据点的拟合图像(图 5)。

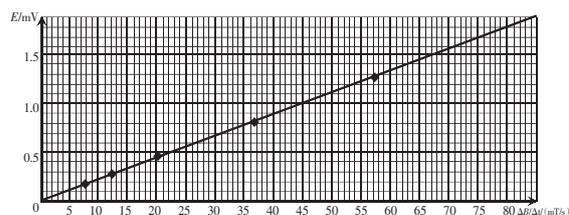


图 5 数据拟合图像

观察可见, 上述 5 个 E 、 $\frac{\Delta B}{\Delta t}$ 数据点均分布在拟合图线上, 且该图线经过原点。这表明 $E \propto \frac{\Delta B}{\Delta t}$ 。即面积 S 一定时, $E \propto \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ 。写成等式就是 $E = k \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$, 适当选择物理量的单位可令 $k=1$, 即 $E = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ 。如果线圈共有 n 匝, 则感生电动势公式为 $E = n \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ 。

经过多次验证, 所获数据均符合上述规律。这样就完成了感生电动势公式 $E = n \frac{\Delta \varphi}{\Delta t}$ 的定量验证。

(下转第 18 页)

拖车编成动车组来工作的,其中头、尾为动车,中间为拖车。当列车高速行驶时会使列车的“抓地力”减小不宜制动,解决的办法是制动时常用“机械制动”与“风阻制动”配合作用,所谓“风阻制动”就是当检测到车轮压力非正常下降时,通过升起风翼(减速板)调节其风阻(图5),用高速时的风阻来增大“抓地力”将列车进行初制动,当速度较小时才采用机械制动。求:

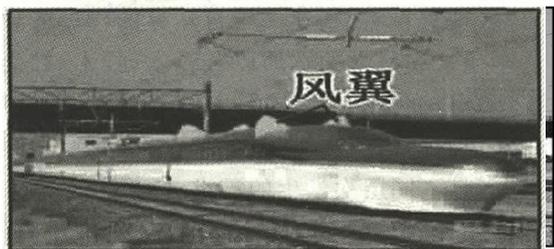


图5 风翼(减速板)

(1)沪昆高铁的最大时速 v 为多少?

(2)当动车组以加速度 1.5 m/s^2 加速行驶时,第3节车厢对第4节车厢的作用力为多大?

(3)沪昆高铁以第1问中的最大速度运动时,若已知横截面积为 1 m^2 的风翼上可产生 $1 \times 10^4 \text{ N}$ 的阻力,此阻力转化为车厢与地面阻力的效率为 75% 。沪昆高铁每节车厢顶安装有2片风

翼,每片风翼的横截面积为 1.5 m^2 ,求此情况下“风阻制动”的最大功率为多大?

答案:(1)324 km/h

(2) $1.125 \times 10^5 \text{ N}$

(3) $1.62 \times 10^7 \text{ W}$

这道题既让学生了解了我国高铁技术世界领先,又体现了中国科技、文化对人类发展和社会进步的贡献,从知识立意、能力立意向核心素养立意转变,命题更加关注实际问题的解决,也关注对非逻辑思维的重视,体现创新性,重视创新能力。问题设计也有梯度,能够满足不同层次学生的发展需求,成绩较差的学生一般能够做对第1问,中等生一般能够做出第2问,成绩好的学生一般能够全做对。

高中物理习题是考查学生核心素养的重要途径,特别是高考试题更是对中学物理教学具有指导意义。因此,高中物理习题创设要规避题海战术,让教学回归育人的功能,让学生关注过程分析,物理建模,联系实际,培养学生正确的科学思维、探究精神、科学态度与品质、运用数学知识处理物理问题等关键能力。

(栏目编辑 赵保钢)

(上接第12页)程是否与原题目一致等。这些诸多的因素若靠一个人在短时间内考虑周全,可能会感觉力不从心,但若能有同行一起交流切磋,就会尽量避免改编的试题出错。正所谓“交换一个苹果,各得一个苹果;交换一种思想,各得两种思想”,“团体的智商大于个体的智商之和。”

总之,试题的命制和改编是一种创造性的思维活动,这种思维活动能力的提升,要靠实践和

反思,且行且思,才能使自己的实践智慧和命题能力得到提高。

参考文献:

[1]陈琦,刘儒德.当代教育心理学[M].北京:北京师范大学出版社,2007.

[2]王安民.中学物理教学策略[M].重庆:重庆出版社,2009.

(栏目编辑 赵保钢)

(上接第15页)

4 结论

两个实验装置定型后都投入了教学应用,教师使用后普遍反映良好,认为这两个实验装置为物理教学提供了定量验证法拉第电磁感应定律的可靠手段。经系统查询,两个实验方案在国际范围内均具有创新性。

通过此项工作,可得出以下结论:

(1)正确分析和认识实验原理,并以此为基础搭建实验装置,是所有验证性实验成功的先决

条件;

(2)引入基于传感器、计算机的数据采集和分析系统,是本实验完成定量验证的关键;

(3)实现“实验装置运行+数据采集和分析”的一体化,是实验教学未来发展的趋势。

参考文献:

[1]张大昌.人教版高中物理[M].北京:人民教育出版社,2010.

[2]Zitzewitz, P.W.等.钱振华,等译.科学发现者 物理 原理与问题[M].杭州:浙江教育出版社,2008:685.

(栏目编辑 赵保钢)