

· 科学方法教育论坛 ·

# 对称性思维和逆向思维方法的应用

## ——法拉第电磁感应定律的建立与案例探讨

冯杰<sup>1</sup> 谢利民<sup>2</sup> 张栖宁<sup>1</sup> 姚佳倩<sup>1</sup> 苏秋霞<sup>1</sup> 王敬<sup>1</sup>

(1. 上海师范大学数理学院物理系, 上海 200234; 2. 上海师范大学教育学院, 上海 200234)

到19世纪初期,以牛顿力学为代表的物理学已经取得了长足的进步,而此时电学和磁学的研究还处于探索阶段,直到1820年奥斯特发现了电流的磁效应,证明了电与磁的同一性,才标志着电磁学的诞生。在以后的几年间,随着安培定律的发现,分子电流假说的提出,欧姆定律的发现等,电磁学的发展一日千里。但是对电与磁本质关系的研究并未有新突破,直到1831年法拉第发现电磁感应定律,掀开了电磁发展的新篇章。如果说安培的超距电动力学引起了电磁学领域的第1次巨大变革;那么法拉第的电磁理论则引起了电磁学领域的第2次重大变革,并最终由麦克斯韦用完美的数学形式统一了电磁理论。

奥斯特在1820年发现电流磁效应后,许多物理学家就认为这就是电与磁的关系的全部内容,没有人想过奥斯特的效应有没有逆效应,即磁的电流效应。只有少数的科学家对此进行研究,其中取得巨大成功的就是法拉第,那么,法拉第成功的奥秘是否具有独特性呢?

### 1 电磁学理论建立的思维基础——对称性思维和逆向思维方法

要探讨法拉第成功地建立电磁感应定律的深层次奥秘,就不得不分析法拉第当时是怎样想的,即他的思维特质和思维方法。

首先,法拉第深受对称性思维方法的影响。对称性思维方法的含义是如果自然界存在某一现象,那么这一现象的映象方面或对称方面也会存在着与这一现象对称的现象。对称性普遍存在于各种物理现象、过程和规律之中,它反映了物理世界的和谐与优美。物理学的对称主要包括:空间对称、时间对称、时间和空间同时对称、平面镜的成像、磁场的两极、电荷的正负、光的可逆性等表现物质的直观形象在空间的对称;相干光在干涉空间条纹亮度的对称性;抛体运动对称,弹簧振子的振动则同时表现出了时间和空间的对称;振子在平衡位置两侧任意相对称的位置上受到的合外力、具有的速度和加速度的大小相同,通过对称轨迹的时间、位移大小、合外力冲量的大小、合外力所做的功相同;波粒二象性;处于平衡状态的气体分子的热运动在三维空间各个自由度上发生运动的几率相等;随机实验次数趋近于无限时绝对误差的代数和为零等等。物质运动对时空表现出的对称性,已大大超出轴对称、中心对称等几何对称的概念,它是对运动时空中的某一点或某一刻表现出某种重复或特定的序。

其次,法拉第深受逆向思维方法的影响,具有大胆的

质疑精神。我们知道,自然界的对称性又表现出一种过程的可逆、互斥等等,反映在人们的逻辑方法中既是逆向思维又是求异思维,这是一种对某现象的映象方面司空见惯的似乎已成定论的事物或观点反过来思考的一种思维方式。敢于“反其道而思之”,让思维向对立面方向发展,从问题的相反面深入地进行探索,树立新思想,创立新形象。当大家都朝着一个固定的思维方向思考问题时,而你却独自朝相反的方向思索,这样的思维方式就叫逆向思维。人们习惯于沿着事物发展的正方向去思考问题并寻求解决办法。其实,对于某些问题,尤其是一些特殊问题,从结论往回推,倒过来思考,从求解回到已知条件,反过去想或许会使问题简单化。

法拉第从小就受到这些思维方法的熏陶。通过思考,他觉得电和磁本来就应是一对对称现象,奥斯特效应只说明电流与磁的相互关系的一个方面,安培理论也只不过解决了电流产生磁的问题,至于磁能否产生电呢?电与磁之间还有什么可能的关系?这些都挑起法拉第研究的激情。

再次,法拉第师从戴维,而戴维是接受康德的“以力论物”思想的最早的英国人,他是一切特设实体的反对者。而法拉第最早受戴维思想的熏陶,形成了跟戴维一样的风格,他把由直接观察或实验得到的认识称为知识,把关于各种流体的假说称为思辨,他对安培在条件不成熟时用一种实体简化成另一实体的做法持不赞同的态度。法拉第相信,越是简单的、基本的事实,就越要经受实验的检验,这种检验是不会受到任何数学分析牵制的。

法拉第从实验事实出发,运用对称性思维和逆向思维方法,同时对安培电动力学的大胆的质疑,否定了超距观点,提出了电场和磁场的概念。在1831年底,他终于成功了。

### 2 法拉第电磁感应定律建立的实验基础

在1821年到1831年间,法拉第对“磁产生电”的研究是分3个阶段的。

第1阶段:1821年,法拉第在收集电磁学发展资料的过程中,对电磁现象研究发生极大兴趣而转向电磁学方面的实验研究。他在重复奥斯特实验时,将小磁针放在载流导线周围的不同地方,发现小磁针的磁极受到电流作用后,有沿着绕导线的圆周转的倾向。于是他设计了一种有效的装置来实现这种旋转,称为电磁旋转器,这一现象就称为电磁旋转现象,并把这一发现写成论文发表了,引起了整个欧洲的注目,此后法拉第就把研究搁置起来了。

第 2 阶段:直至 1824 年著名的阿喇果圆盘实验发表了,该实验是将一个铜圆盘装在一个垂直轴上,让其可以自由旋转,再在铜盘上方自由悬吊一根磁针.阿喇果发现,当铜盘旋转时,磁针跟着一起旋转,但稍有滞后;反之,当磁针旋转时,铜盘亦然.当时各个学派或个人曾竞相对它做出解释,但谁都不能完美地解释它.这再次激发了法拉第的探索热情.刚开始他简单地认为用强磁铁靠近导线,导线中就会产生稳定的电流;或者 3 根导线里其中 1 根通以强大的电流,在靠近的导线中会产生稳定的电流.他做了大量实验,但因接线顺序问题,均以毫无结果而告终.但这些实验却为他以后发现电磁感应现象积累了一定经验基础.

第 3 阶段:在 1824—1830 年间,电磁学的新技术有了较快的发展,电磁铁就是在这一时期发展起来的.这项技术成就为法拉第的研究创造了有利条件.于是他重回电磁学领域.

在 1831 年,法拉第通过 3 个实验揭示出电磁感应现象,一是环形铁芯实验(“变压器”实验),揭示了感生电流的现象;二是螺线管实验,揭示了动生电流现象;三是改进的阿喇果圆盘实验,直观显示了导体切割磁感应线产生电流的现象.通过这些实验,法拉第基本明确了电磁感应必备的条件为(1) 磁场;(2) 磁场相对于导线的运动(在“伏打感应”中则是电流的接通或关闭).至此,这 3 个阶段的实验研究为法拉第总结出电磁感应定律打下了坚实的实验基础.

### 3 电磁学理论建立的理论基础

在奥斯特发现电流的磁效应之前,物理学家们大多数都信奉库仑的超距静电力学,认为电和磁是相互独立的两种不同的流体.之后虽证明了电与磁的同一性,但在如何统一解释电磁现象的问题上,许多物理学家都提出了自己的理论和见解,其中就以安培为代表的超距电动力学传播最广,影响最深.

库仑是将超距力学引进法国的第一人,而安培对库仑的见解深信不移.虽然后来证实了电与磁的同一性,但安培仍然努力将牛顿力学的全套方法应用于电磁学研究.

安培的超距电动力学体系是借助了力学原理,结合拉普拉斯的物理学简约纲领,将一切电磁现象作为单纯的电流相互作用的力学现象来处理.它的核心思想是磁就是电流、或者运动的电.该理论在英国传播时得到绝大部分物理学家的认同.发现电磁旋转现象后,法拉第就对安培关于磁就是电流的观点以及他把一切电磁现象都归结于电流与电流的直线作用的简约论略有怀疑.他认为,电动力不是基本的力,因为最终要通过空间的环形磁力才能作用于另一个电流或磁体.他指出,电和磁在物质上说是无法统一的.于是,在电磁学领域就出现了法拉第——安培之争.法拉第在对称性思维和逆向思维方法的指导下,通过实验研究及对安培超距电动力学的思考及批判性吸收,逐步坚定对“磁产生电”的研究,最终建立起电磁感应定律.

### 4 对称性思维和逆向思维方法的案例探讨

案例. 感应电流产生条件的实验探究.

#### 4.1 观察与思考

既然“电”能生“磁”.那么人们运用对称性思维方法,

自然想到利用“磁”生“电”.关于“磁”生“电”,最容易产生的设想是,把导线放入磁场中,用绕在磁铁两端的导线把电流表与导线连接起来,如图 1 所示,组成一个闭合电路,看能不能产生电流.法拉第开始就是这样研究的,结果发现电流表指针并没有偏转.更换较强的磁铁或者换用灵敏度更高的电流表,电流指针也没有偏转.

那么“磁”能否生“电”呢?让我们也来试一试.

在这个“磁”能否生“电”的实验中,没有产生电流,零结果说明仅有磁场还不能产生电流.利用磁场产生电流需要一定的条件.

#### 4.2 提出问题

(1) 大小和方向都不变的电流可以产生磁场,为什么利用大小和方向都不变的磁场却产生不了电流呢?

(2) 运用逆向性思维方法,在什么条件下磁场才能产生电流?

#### 4.3 猜想与假设

(1) 可能是磁场太弱,或许是导线的电阻太大,或许是电流表太不灵敏.

(2) “电”能生“磁”,只是电磁物质运动的一个方面,那么从另一方面思考,我们应该确信利用“磁”也一定能生“电”——对称性思维方法,问题可能在于“磁”生“电”的运动规律是否有特殊性呢?

(3) 在奥斯特的实验中,虽然电流是恒定的,但是恒定的电流实质上是导体中的电荷在运动,那么,我们的“磁”生“电”实验只是把导线绕在磁铁上——恒定磁场中,导线和磁场都处于静态,恒定的电流从何而来呢?

(4) 或许“磁”生的“电”流本来就不可能是恒定的….

(5) 我们让导线相对磁场运动,或让磁场有强弱变化,选定灵敏度高的电流表,并再一次检查电路的接触情况,重新实验.

#### 4.4 制定计划与设计实验

观察如图 2 所示的实验:当条形磁铁插入螺线管;或从螺线管拔出;或与螺线管保持相对静止不动.观察发生的现象.

(1) 当条形磁铁插入螺线管;或从螺线管拔出时,左边导线下面的小磁针会发生偏转;

(2) 当条形磁铁与螺线管相对静止时,左边导线下的小磁针静止不动.

实验现象 1: 磁铁插入或拔出 B 的过程中,线圈 B 中产生了电流.

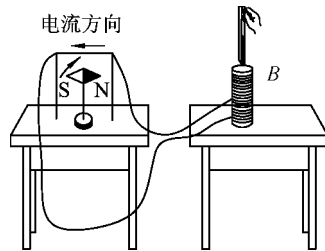
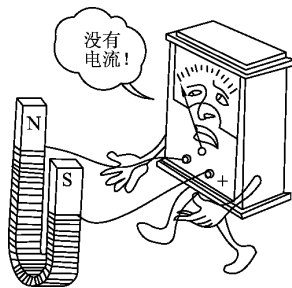


图 2

(3) 如图 3 所示,当用导线把螺线管和小量程电流表连接起来时,用匝数不同的线圈重新做上面的实验,观察当磁铁插入或拔出时,观察实验现象。

实验现象 2: 电流表的指针发生偏转的情况。

(4) 如图 4 所示,固定一匝线圈,用不同的磁铁重新做上面的实验,观察当磁铁插入或拔出时,电流表的指针发生偏转的情况。

实验现象 3: 线圈 B 的匝数增减或磁场强弱变化时,线圈 B 中产生了电流。

请学生们运用磁通量的概念,借助图 4 分析上述实验结果并讨论下列问题:

① 当磁铁插入或拔出线圈 B 的过程中,穿过线圈 B 中的磁通量发生了变化,在线圈 B 中产生了感应电流。

② 线圈 B 的匝数增减或磁场的强弱变化时,对穿过线圈 B 的磁通量有什么影响?

#### 4.5 进行实验与收集证据

(1) 如图 5 所示,导体棒 AB 用丝线悬起,两端用导线连在电流表上,组成闭合电路。观察当导体棒做切割磁感线的运动时,穿过闭合电路的磁通量的变化与感应电流的关系。

结论: 导体 AB 做切割磁感线的运动时,穿过导线与电流表组成的闭合电路的磁通量发生了变化,在电路中产生了感应电流。

(2) 如图 6 所示,螺线管 A 通过变阻器和开关连到电源上,螺线管 B 套在螺线管 A 中的外面,螺线管 B 的两端接到电流表上。

当开关闭合或断开的瞬间,以及开关闭合不动时;移动滑动变阻器的滑动触头,改变电路中的电阻时,观察螺线管 B 中的磁通量与感应电流的关系。

结论: 电磁铁 A 使得穿过线圈 B 中磁通量发生了变化,在线圈 B 中产生了感应电流。

#### 4.6 分析与论证

(1) 电磁感应现象。

通过以上实验可以看出,不论闭合回路的一部分导体做切割磁感线的运动,还是闭合电路中的磁场发生变化,穿过闭合电路的磁通量都发生变化,都会在闭合电路里产

生感应电流。这样,就可以总结出产生感应电流的条件。

对称性思维的肯定性结论: 只要穿过闭合电路的磁通量发生变化,闭合电路中就有电流产生。这种由于磁通量变化而产生电流的现象叫做电磁感应现象,产生的电流叫做感应电流。

(2) 学会判断直导线感应电流方向——右手定则。

导体在磁场中做切割磁感线运动时,感应电力的方向、导线运动的方向、磁场的方向三者之间有没有什么关系呢?

按如图 5 所示的闭合电路实验,并将实验结果填入表 1。

表 1

	导线切割磁感线方向 (磁场方向一定)	感应电流方向	磁场方向 (导线切割磁感线方向一定)	感应电流方向
1	水平向左		竖直向上	
2	水平向右		竖直向下	

导体在磁场中做切割磁感线运动时所产生的感应电流的方向,可以用右手定则来判别: 伸开右手,使拇指与四指在同一平面内并且跟四指垂直,让磁感线垂直穿过手心,使拇指指向导体运动方向,这时四指所指的方向就是感应电流的方向。

#### 4.7 评估

(1) 如果磁通量的变化是由于导体切割磁感线而引起的,请学生们猜想影响感应电流的方向的因素有哪些? 并通过如图 5 所示的实验验证你的结论。

(2) 用右手定则表示感应电流的方向、磁场方向及导体切割磁感线速度的方向三者之间关系的方法体现了物理学研究问题的什么特点。

#### 4.8 交流与合作

(1) 请你与实验小组成员在充分交流、讨论后写出简单的关于电磁感应的实验探究报告。

(2) 学生之间仔细分析,本节课中发生了电磁感应现象的演示实验中,都发生了哪些形式的能量转换?

(3) 小组成员分工,列举电磁感应现象在技术中的应用实例,并进行归类;思考日常生活和技术应用中还有哪些问题可以应用电磁感应现象进行分析和改进。

### 5 结论

在电磁学的发展历史上,奥斯特电流磁效应具有承前启后的哲学意义: 其一,电流磁效应——电可以产生磁,说明了自然界现象的联系具有普遍性;其二,电生磁,必然激发有心的思想家和科学家运用对称性思维和逆向思维探究电生磁的另一面——磁生电。

科学探究方法可以分为实验探究法(一般有 7 个要素构成)和理论探究法(理想化方法或逻辑方法或演绎方法),无论是哪一种方法都可能是研究者自觉或不自觉地部分涉及或完全运用了对称性思维和逆向思维的方法。我

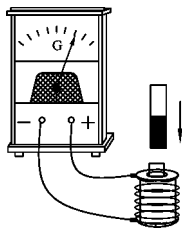


图 3

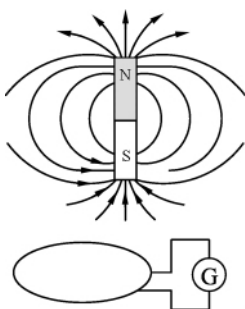


图 4

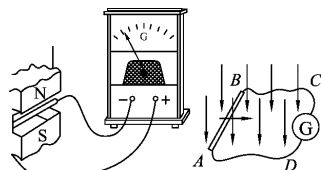


图 5

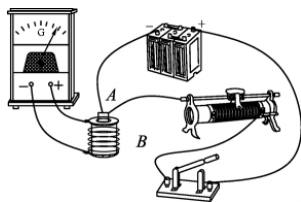


图 6

# 浅谈高中物理教材中的物理思想方法

陈林桥<sup>1</sup> 吉文忠<sup>2</sup>

(1. 江苏省扬中市教研室,江苏 扬中 212200; 2. 扬中市联合中学,江苏 扬中 212200)

高中物理教材中蕴含了丰富的物理思想和方法,这为我们进行物理思想和方法教育、教学提供了广阔的空间。为了更好地把握这些思想和方法,笔者以人民教育出版社的物理教材为蓝本进行了一些挖掘、梳理和研究,以供大家参考。

## 1 合成和分解思想

合成是由部分组成整体,而分解则是由整体分成部分。合成和分解是一种处理分析问题的重要手段,它们互为逆运算,一般是以等效性为前提,以解决问题为目的。

高中物理教材中的合成与分解:(1)矢量的合成与分解,如力、速度、电场强度等矢量的合成与分解,它们遵守平行四边形定则;(2)运动的合成与分解,如平抛运动可以看成水平方向上的匀速直线运动和竖直方向上的自由落体运动合成等;(3)光的合成与分解,如光的色散与合成;(4)波的合成与分解,如电磁波的发射与接收中的调制与解调;(5)原子核的合成与分解,如核裂变和聚变。

## 2 极限思想

极限思想是指用极限的概念去分析和解决问题的一种方法。极限思想揭示了变量与常量、无限与有限的对立统一关系,借助极限思想,人们可以从有限认识无限,从“不变”认识“变”,从直线形认识曲线形,从量变认识质变,从近似认识精确。

我们物理教材常常通过以下几种方法来帮助学生建构极限思想:(1)利用人们思维想象来建构极限思想,例如课本上通过平均速度来建立瞬时速度的概念,其间就运用了极限思想;(2)通过直观图像来建构极限思想,例如课本上借助  $v-t$  图像,运用极限思想导出匀变速直线运动的位移公式;(3)通过形象的图示变化来建构极限思想,例如必修 2 教材中,在探究向心加速度大小的表达式时,给出了甲、乙、丙、丁 4 幅质点从 A 运动到 B 的速度变化量示意图,通过这连续的变化展示,进而得到向心加速度大小的表达式;(4)通过一些数据的陈列来建构极限思想,例如教材 3-3 上通过列出了一些数据来帮助学生建立绝对零度概念;(5)通过实验观察来建构极限思想,例如教材 3-4 中通过让学生观察一组渐进的反射现象实验来帮助学生建立

全反射的概念。

## 3 控制变量思想

控制变量思想就是采用控制因素的方法,把多因素的问题变成多个单因素的问题,每次只改变其中的某一个因素,而控制其余几个因素不变,从而研究被改变的这个因素对事物的影响,最后再综合解决。例如必修 1 教材中“探究加速度与力、质量的关系”实验的基本思想就体现了控制变量思想。

## 4 类比法

类比法是指由一类事物所具有的某种属性,进而推测与其类似的事物也应具有这种属性的推理方法。

高中物理教材中有:(1)将未见与可见进行类比,例如教材中把头发屑悬浮在蓖麻油里,加上电场来模拟电场线的形状;(2)将未知与已知进行类比,例如教材中讲了电场之后,在引入磁场时,课本进行了这样的类比“正负电荷之间的相互作用是通过电场发生的,磁体与磁体、磁体与通电导体之间以及通电导体与通电导体之间的相互作用,是通过磁场发生的”;(3)将抽象与形象进行类比,例如将分子势能随分子间的距离的变化,与弹簧连接着的两个小球,弹簧的弹性势能的变化趋势进行类比;(4)将微观与宏观进行类比,例如“从微观的角度看,气体对容器的压强是大量气体分子对容器的碰撞引起的,这就好像密集的雨点打到伞上一样,雨点虽然是一滴一滴地打到伞上,大量密集的雨点的撞击,使伞受到持续的作用力”;(5)从时间的前后进行类比,例如教材中所述,德布罗意在博士学位论文中写道:“整个世纪以来,在光学上,与波动方面的研究相比,忽视了粒子方面的研究;而在实物粒子的研究上,是否发生了相反的错误呢?是不是我们把粒子方面的图像想太多,而忽视了波的现象?”于是,他提出假设:实物粒子也具有波动性。

## 5 整体性思想

整体是指由事物的各内在要素相互联系构成的有机统一体及其发展的全过程。所谓整体性思想,就是从整体出发,着眼全局,把握系统和过程的整体特征以及总体走向的思想方法。

们通过对法拉第科学思维方法的解析,可以悟出,科学研究中的科学思维方法与物理教学中科学方法培养没有本质的差别,都是一种探究未知、提高认知能力的过程。所以,我们运用对称思维就是运用物体在时空上表现出的对称性,启发我们直觉地、正确地感受一些物理问题。与此同时,我们运用逆向思维不仅可以去粗存精,去伪存真,而且

可以取得跨越学习障碍的学习效果。运用对称思维方法和逆向思维方法解决实际物理问题,往往可以避免繁冗的数学推导,抓住问题的物理本质,使分析问题的思路变得清晰,解决问题的步骤变得简捷,最终使我们的物理理论素养和实验实践能力得到有效提高。

(收稿日期:2012-12-01)