

关于涡旋电场和位移电流在教学中的探讨*

沈贤勇

(浙江树人大学基础学院 浙江 杭州 310011)

(收稿日期:2017-11-18)

摘要: 涡旋电场和位移电流是麦克斯韦提出的让电场和磁场最终统一为整体的重要假设,假设随后也被实验所证实.虽然现在已无法考证到底是什么灵感启发麦克斯韦在当时提出假设的,但是,提出该假设的推理过程必定能体现出物理学自身的美,本文探讨如何能够在教学中体现出这一推理过程.

关键词: 感生电动势 涡旋电场 位移电流 物理学中的美

1 引言

涡旋电场和位移电流是麦克斯韦的神来之笔,这两个假设在随后的实验中都得到证实,这两个假设告诉我们变化的磁场周围存在电场,同样反过来,变化的电场周围也存在磁场,也就是说,电场和磁场之间是可以相互转化的.正是基于这两个重要的假设,电场和磁场不再是对立的物理对象,而是被麦克斯韦统一为一个整体,也就是今天大家所熟知的电磁场以及电磁波,从而将整个电磁学的理论大厦完整地建立起来了.一个半世纪过去了,今天我们很难还原当时到底是什么灵感触发麦克斯韦想到这两个假设的场景,但是无疑得到假设的思考过程都是人类历史上智慧在闪烁光辉的时刻.一个能够促使我们很自然地提出此假设的推理过程必定也能折射出物理学中的智慧和美妙,同时也能够让学生接触到物理学中内在逻辑的奇妙之处,从而加深学生对物理学的兴趣和喜爱.所以本文就尝试给出一种提出涡旋电场和位移电流假设的推理方式.

2 动生电动势产生原因的解釋

动生电动势是法拉第发现的一种电磁感应现象.

如图1所示,在一个均匀磁场中,一段导线在做切割磁感线的运动,那么我们就可以观测到导体中存在着电流.并且法拉第还总结出了产生该电流的电动势与穿过闭合导线磁通量的变化率成正比.但

是,这个结论并没有告诉我们为什么当导线在做切割磁感线运动时就会有电流产生.

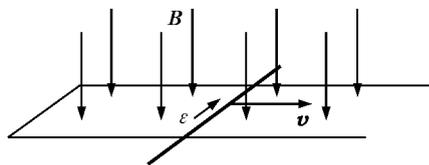


图1 动生电动势的电磁感应现象

仔细思考此现象的过程,我们发现对于站在实验室的观测者而言,导线是运动的,那么导线内的自由电子也是在运动的,不是静止的,而在磁场中运动的电荷会受到磁力的作用.所以,正是在导线运动导致自由电子运动而所受磁力作用下,这些自由电子才沿着导线发生运动,从而形成了电流.这个过程如图2所示.

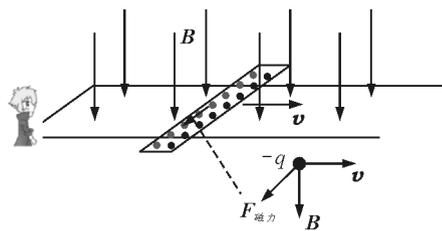


图2 在磁力的作用下,自由电子沿导线运动形成电流

这个解释过程之所以成立的前提条件是自由电子需要在磁场中运动,从而它会受到磁力的作用.可是,导线中的自由电子到底是运动还是静止是一个相对的结论.不同的观测者会得到不同的结论,比如对于站在导线上的观测者而言,导线就是静止的,那么导线中的自由电子当然就是静止的,如图3所示.

* 浙江树人大学引进人才项目的支持,项目编号:2017R016

作者简介:沈贤勇(1982-),男,博士,讲师,主要从事广义相对论与宇宙学方向的研究和大学物理的教学工作.

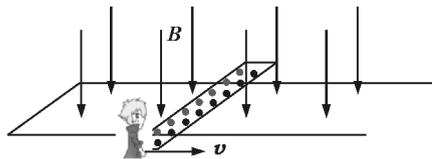


图3 对于导线上的观测者,导线中自由电子是静止的

而静止的电荷是不会受到磁力作用的,但是实际的观测结果却表明,对于无论站在实验室的观测者还是站在导线上的观测者而言,他们都可以观测到感应电流的存在.对于站在导线上的观测者而言,由于自由电子是静止的而没有受到磁力的作用,那么又是什么原因导致了导线中自由电子沿导线运动从而形成电流的呢?

对于站在导线上的观测者而言,导线中的自由电子当然也需要受到某种力的作用才会沿导线产生移动从而形成电流.而根据已有的知识,静止的电荷只会受到电场力的作用.所以,根据这个逻辑我们可以推理出一个非常重要的结论:对于站在导线上的观测者而言,他会观测到一个电场的存在,而正是该电场对自由电子产生的电场力使其沿导线移动从而形成电流,如图4所示.

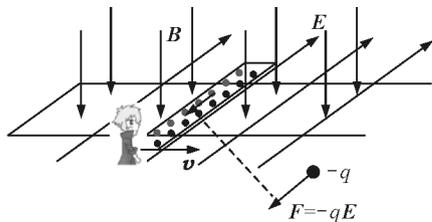


图4 对于导线上的观测者,他可以观测到一个电场的存在

这样,我们就得出一个非常重要的推论:如果存在一个均匀的磁场,那么对于站在实验室的观测者而言,他只能观测到这个均匀磁场;但是,对于另一个运动着的观测者而言,他除了可以观测到磁场的存在外,他还可以观测到一个电场的存在^[1],如图5所示.

这个推论给了我们一个极大的启发:不同运动状态的观测者所能观测到的磁场和电场是不一样的,并且这个推论与导线是否存在是无关的,也就是即使不存在导线,我们得到的结论是相同的.并且可以进一步推理得到:对于其他类型的非均匀磁场,也应该存在这个结论,即不同运动状态的观测者所能观测到的磁场和电场是不一样的,特别地,对于另一种电磁感应现象即感生电动势的产生原因也应该适用以上推论.

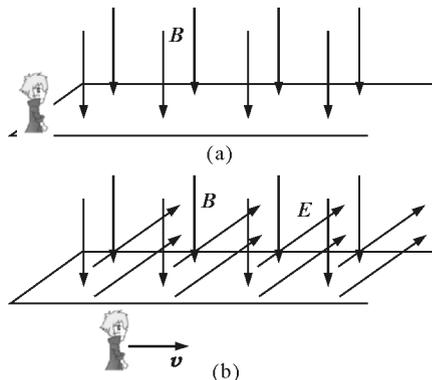


图5 (a) 静止观测者只能观测到磁场,(b) 而运动观测者除了观测到磁场外,还能观测到一个电场的存在.

3 涡旋电场的提出

感生电动势是法拉第发现的另一种电磁感应现象.如图6所示,在磁铁穿过线圈的过程中,线圈中会有电流产生.同样,法拉第也总结出了产生该电流的电动势与穿过闭合导线的磁通量的变化率成正比.但是,这个结论也没有告诉我们为什么当磁铁穿过线圈时会有电流产生.

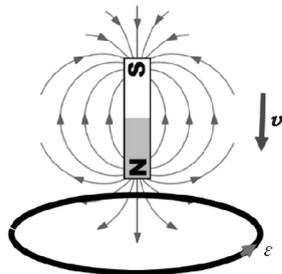


图6 产生感生电动势的电磁感应现象

如果把从动生电动势产生原因中得到的推论应用于感生电动势的情况,问题的复杂性马上就变得清晰了.为了能更好的说明这一点,可以将这两种情况做一个对比,如图7所示.

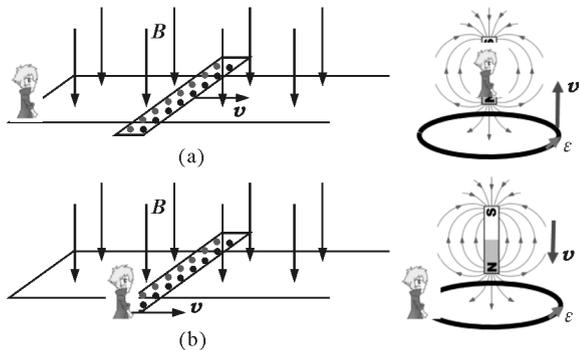


图7 (a) 导线都在运动;(b) 导线都是静止的

如图7(a)所示,对于对比情况,导线相对于观测者都是运动的,也就是说相对于磁场都是运动的,所以两者的感应电流都是由于导线中自由电子在磁场运动而受到的磁力作用产生的;而对于图7(b)的对比情况,导线相对于观测者都是静止的,那么,动生电动势产生原因中得到的推论也应该适用这里的感生电动势的情况.也就是说,感生电动势中站在导线上的观测者也应该像动生电动势中站在导线上的观测者一样,他也应该观测到一个电场的存在.再根据对称性,还可以推断这个电场的电场线还应该是环形闭合的,如图8所示.这些环形闭合的电场线所表示的电场就是麦克斯韦所假设的涡旋电场.不过这里与动生电动势的情况不同点为:感生电动势中站在导线上的观测者是在实验室中静止的,而磁场由于磁铁的运动却是变化的.

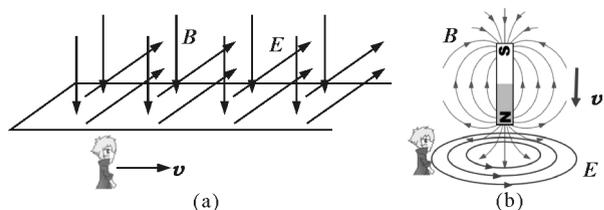


图8 右观测者也应观测到一个电场,该电场就是涡旋电场

所以,利用运动是相对的,不同运动状态的观测者之间的变换关系,我们可以合理而又自然的推理出:变化的磁场周围存在着电场,并且这些电场的电场线还可能是闭合的,也就是涡旋电场假设的提出.

有了涡旋电场的假设,利用电动势与电场之间的关系式和磁通量的定义,法拉第的电磁感应定律就可以改写为

$$\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \quad (1)$$

4 位移电流假设的提出

安培总结出了稳恒电流与其所产生的磁场之间的关系,即安培环路定律

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I$$

但是对于电流不是稳恒的情况,比如对于电容器充电的过程,麦克斯韦发现安培环路定律不再成立,为了修正此种情况下的安培环路定律,麦克斯韦提出了位移电流的假设^[2~5].

不过,除了从电容器充放电过程这个角度外,还

可以从另一个角度出发,即美学的角度出发,我们也能够很自然地推理出位移电流是需要存在的.为了说明这个美学角度,我们只需把真空处的高斯定律、磁场的高斯定律、电磁感应定律和安培环路定律一并写出来,它们是

$$\begin{aligned} \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} &= 0 & \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= - \int_S \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} &= 0 & \oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

从方程的数学形式上看,方程组等号的左边部分在形式上具有一种对称协调的美感,但是这种对称协调的美感在方程组等号的右边却遭到了破坏,产生了一种残缺感.如果我们坚信大自然底层的规律在形式上就应该是优美的,那么我们就可以大胆地提出假设来修补这里美感中遭到破坏的部分.具体来讲,为了恢复整个方程组对称协调的美感,方程组应该修补为如下形式

$$\begin{aligned} \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} &= 0 & \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} &= - \int_S \frac{d\mathbf{B}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} &= 0 & \oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} &= k \int_S \frac{d\mathbf{E}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \end{aligned} \quad (3)$$

其中系数 k 可以使用通过具体的实验来确定,它正好等于 $\frac{1}{c^2}$.这样,整个方程组在形式上就完全具有对称协调的美感.在有电流存在的空间处,补充后的安培环路定律就修改为

$$\oint_L \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \sum I + \frac{1}{c^2} \int_S \frac{d\mathbf{E}}{dt} \cdot d\mathbf{S} \quad (4)$$

而为了恢复方程组的对称协调美感而补充的那一部分正好就是麦克斯韦所提出的位移电流的假设.这个推理过程完全是从物理学应当也具有美的角度出发所得到的结论,而该补充部分后来也得到了实验的证实.所以,这是一个很好地诠释了物理学中也存在着美的例子.

5 小结

磁力作用是与电荷的运动状态相关的,但由于运动又是相对的,那么不同运动状态的观测者会观测到不同的磁力,而电磁感应现象产生的电流大小却不随观测者的运动状态的改变而改变.为了避免这种不一致,利用不同运动状态的观测者之间的变换关系,我们可以很自然的推理出:当观测者的运动

经验让一个简单题目成为教师的一道经典错题

——理想变压器的动态分析

白红艳

(深圳市宝安第一外国语学校 广东 深圳 518128)

(收稿日期:2017-09-18)

近5年全国高考物理选择题中,经常会见到理想变压器动态分析的题目,因此在不少城市的高考前的第一次模拟考或者第二次模拟考的选择题中都有它的身影!站在教学最前线的教师当然也对此种题目非常重视.正因为如此,可能才使笔者在很短的时间里,听到了不同教师对此种题目的相似解答和相同的结论.然而,正是教师们对理想变压器动态分析的一道典型模式的解答引起了笔者的质疑.笔者想把质疑写出来,与教学一线的教师们一起切磋和商讨.

下面便是笔者心存质疑的题目和一些教师的讲法.这原本是一道看似简单的选择题,可能刚好出题人设置答案时,回避了一些问题,致使一些教师没有找到这类理想变压器动态分析题目的本质.首先,看看一些经验丰富的教师,是如何给学生讲解此题的解题方法以及如何给出相同的结论的!然后,我们再分析一下,教师们采取此种讲法的好处以及笔者认为的不当之处,最后给大家呈现一下,很多人知道这个结论可以推导,但又没有去推导的结论究竟是什么样?

状态改变时,这个观测者不仅能够观测到磁场,还应该观测到一个电场的存在,并且根据对称性的分析,我们还能推理出这些电场的电场线可以是闭合的,这就是涡旋电场假设的提出.另外,利用大自然底层的规律在形式上就应该是优美的信念,通过修补方程组在形式上对称协调美感的破缺,我们在安培环路定律中引入了新的一项,而这一项正好就是麦克斯韦通过其他方式所提出的位移电流的假设.我们这里是从美学角度出发得到相同的结果,这本身就很好地诠释了物理学中也存在着美学.

参考文献

- 1 基特尔等.伯克利物理学教程电磁学卷.北京:机械工业出版社,2014.180~183
- 2 诸葛向彬.工程物理学.杭州:浙江大学出版社,2010.328~331
- 3 鲍世宁,黄敏,应和平.大学物理学教程.杭州:浙江大学出版社,2014.180~183
- 4 费因曼.费因曼物理学讲义第二卷.上海:上海科技出版社,2013.232~234
- 5 John David Jackson. Classical Electrodynamics,北京:高等教育出版社,2014.237~239

Discussion on Vortex Electric Field and Displacement Current in Teaching

Sheng Xianyong

(Zhejiang Shuren University Basic Couege, Hangzhou, Zhejiang 310011)

Abstract: Vortex electric field and displacement current were important concepts proposed by Maxwell, later, they were proved by experiments. Today, we lose the information about how Maxwell drawn his inspiration to make such great proposition. However, there were wisdom and beauty in the derivation of such two proposition. In this paper, we make a try to talking about a method of deriving the vortex electric field and displacement current proposition.

Key words: law of induction; vortex electric field; displacement current; beauty in physics