

罗兰与运动电荷磁效应

宋 德 生

(广西社会科学院哲学研究所)

运动电荷磁效应是美国霍普金斯大学第一任物理学教授罗兰 (H. A. Rowland) 在 1876 年于柏林发现的。这一效应的发现,与在它之前 56 年由奥斯特发现的电流磁效应,有着截然不同的历史背景和影响。电流磁效应的发现导致了安培超距电动力学的诞生,而运动电荷磁效应的发现却成为赫兹发现电磁波的实验的先导。在罗兰和赫兹之间起桥梁作用的是亥姆霍兹 (H. von Helmholtz)。从超距论与场论的分歧来看,这两种效应的历史作用的不同,是由于它们与不同的电流实体存在着对应的关系:电流的磁效应是指传导电流的磁效应;而运动电荷的磁效应,从麦克斯韦电磁场论的立场上说,就是位移电流磁效应的一种特殊形式。这是因为麦氏理论本质上是“无源场论”,在这个理论中没有孤立的电荷,所谓运动电荷产生的电流完全可以变换为位移电流。这一观点至今仍不失其新奇之处。本文的目的,就是通过对罗兰实验来重温这一观点,并阐明这一实验在电磁波发现史上的地位。

一、问题的由来

历史上的电动力学不同于我们现在已将场论包括在内的电动力学。上一世纪的电动力学主要指超距电动力学,它是在牛顿力学和超距势理论的基础上发展起来的。它侧重于处理孤立的客体(电荷、电流、磁体)之间的相互关系,它的空间是几何化的而不是物理的。与之对立的是麦克斯韦电磁场理论,它也是借助于力学原理,其借用面更为广泛,除牛顿力学外还包括流体力学、弹性力学和热力学,不过这些都是作

为工具而不是作为场论的实在观而出现于麦氏理论之中。它所处理的不是孤立的客体,而是作为一种物质系统的电磁场空间,故我们称之为“无源场论”^[1],以便和后来的洛伦兹的“有源场论”相区别。

麦克斯韦善于将各类“源”转化为场的形式。例如,在他看来,电荷既不是点,也不是面或体,它的量值只不过是“电通量”而已。如果说某点有 Q 电量,麦氏则说:这个点无关紧要,重要的是要认识到通过包围这个点的任何封闭面的“电通量”为 Q 。与之对应的单位面积电通量 ($D = Q/4\pi r^2$) 便是电位移,它满足于这个“弹性固体以太”空间的胡克定律^[2]:

$$E = kD. \quad (1)$$

试将(1)式与力学中胡克定律 ($F = kx$) 相比较,便能得知“电位移”一词的由来。力学实体位移对时间的微商等于速度,那末 $\frac{dD}{dt}$ 是什么? 试比较一下电感与电流强度之积 LI 和力学中的质量与速度之积 $m \frac{dx}{dt}$, 它们都具有动量的性质,且 L 和 m 都表示系统的惯性。这样,麦克斯韦把 $\frac{dD}{dt}$ 称为一种电流——“位移电流”的谜底就可以解开了。

位移电流的重要性,可从麦克斯韦改造安培环路定律 ($\nabla \times H = 4\pi j$) 看出。这个环路定律若不改造成场论的形式,就必然与电流连续性方程(即电荷守恒定律)相冲突。这是因为

$$\nabla \cdot \nabla \times H = 4\pi \nabla \cdot j \equiv 0, \quad (2)$$

而连续性方程则是

$$\nabla \cdot j + \frac{d\rho}{dt} = 0, \quad (3)$$

此处 $\mathbf{j}$ 为传导电流密度, ρ 为电荷密度。按照麦氏的观点, 电磁场中任一区域的电荷是守恒的, 且与这一区域的历史无关。(3) 式反映了这一思想, 而这一思想要求 $\nabla \cdot \mathbf{S} \equiv 0$, 而不要求 $\nabla \cdot \mathbf{j} \equiv 0$ 。这样, 全电流 $\mathbf{S}$ 必须是有旋场 (因为只有有旋场量的散度才恒等于零)。因此, 改造安培环路定律的出路就在于在环路公式中加入一项使电流构成有旋场的东西, 它正是位移电流。麦克斯韦于是导出了他的两个旋度方程中的一个^{[1],[3]}:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 4\pi \mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt}. \quad (4)$$

如果对 (4) 式取散度, 则有

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} &= 4\pi \left(\nabla \cdot \mathbf{j} + \frac{1}{4\pi} \frac{d}{dt} \nabla \cdot \mathbf{D} \right) \\ &\equiv 0, \end{aligned} \quad (5)$$

括号中的内容代表电荷守恒定律的各项, 由此还可得到 $\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$ 。

我们试图图 1 来解释位移电流的含义。按照超距电动力学的解释, 电流 i 流进金属球 A, 给球增加了电量, 电流到此就结束。而麦克斯韦则认为在任意包含球 A 的场空间, 电量没有增加, 因为由导线流进的电量变成电通量向区域外流失; 电场强度增大的过程, 也就是电位移增加的过程 (参考 (1) 式), 电位移的时间增量便是位移电流。因此, 区域 F 内的电荷守恒, 通过其封闭曲线的电通量总和为零。这样就保证了电流连续性不仅适用于闭合电路, 而且也适合于非闭合电路的情况。

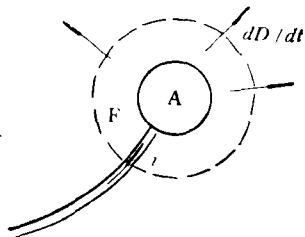


图 1

值得注意的是, 麦克斯韦的全电流只包括传导电流和位移电流, 似乎没有包括运动电荷形成的电流和介质在电磁场中运动形成的电

流。韦伯 (W. Weber) 在 1846 年创立了又一种超距电动力学, 他把传导电流当作两种不同号的电粒子的相反的位移运动 (当然这是错误的)。亥姆霍兹根据这个理论与能量守恒定律的矛盾, 从而否定了它^[4]。但对于电荷运动形成的电流的否定是很困难的。这种电流很直观, 正如“热对流”那样, 反映一种物质的输运过程, 比无需电荷物质输运的电传导和电辐射还要易于令人理解。正由于这种电流形成过程酷似于“热对流”, 当时人们常称之为“对流电流”。其实, 麦克斯韦的位移电流早已包括了这种电流成分。对此, 亥姆霍兹似乎有所觉察, 并用了将近 10 年的时间探索统一场论与超距论的可能性。正是罗兰的实验使他发现位移电流包括了除传导电流外的一切电流的形式, 并使他认识到“对流电流”本质上是位移电流的一种反映。他由此得到启发, 既然运动电荷存在磁效应, 那末就可以由磁效应来检验是否存在位移电流。这样就戏剧般地引导了赫兹去用实验检验位移电流, 并最终导致了电磁波的实验证明。

二、罗兰的两个实验

1. 罗兰的第一个实验

实验装置如下: 在水平方向装置一个厚 0.5cm、直径 21.1cm 的硬橡皮盘, 它可绕中心轴旋转。盘面镀有一环形金属膜, 环内径、外径分别为 8.9cm 和 21.1cm。在盘上、下 0.6cm 处各安一块固定的玻璃盘, 它们面向硬橡皮盘的一面, 镀有一层金属膜, 并接地, 目的在于屏蔽静电感应。实验必须防止产生传导电流, 为此他在硬橡皮盘的镀层上开了许多径向条槽, 以便切断电流的环形通道。在盘的正上方悬吊两根长 1.5cm 的磁针, 它们按一上一下的方式布置。实验时用电池给扇形镀层充电, 电荷被限制在扇形面内, 不能流动。他让硬橡皮盘以每秒 61 转的速度旋转, 结果磁针针尖指向转轴的方向,

1) 另一旋度方程就是法拉第电磁感应定律的微分场的表示: $\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{d\mathbf{H}}{dt}$ 。讨论从略。

或磁南极向下,或磁北极向下,因充电的正、负和盘旋转的方向而异。显然,这个实验证明运动电荷可以产生磁效应。

2. 罗兰第二个实验

实验装置如图 2 所示。这个实验使用的硬橡皮盘的两面镀层是连续的,没有径向条槽。在盘的边缘放置一对金属板,作施感器。实验时使它们同充一种电,便会在硬橡皮盘镀层上感应出另一种电。若硬圆盘不旋转,感应电荷会覆盖全盘;若让其旋转,等势面则会遭到破坏,施感器所对部分仍保持感应状态,而其他部分则会由于电传导而引起某种动态平衡。测量运动电荷磁效应的装置,仍是第一个实验所使用的磁针。

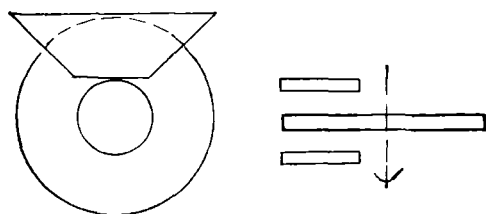


图 2

罗兰设计这个实验的根据,很可能是法拉第在 1831 年所做的阿喇戈 (Arago) 圆盘实验。法拉第使用的是一对磁极,金属盘在它们之间旋转时会在半径方向产生电流。这便是电磁感应现象的一种,其必要条件是金属切割磁力线。罗兰仅仅将法拉第实验置装的磁极改为金属板施感器。当然,金属不可能切割电力线,因为它们本身就是电力线的终端。但是,金属板(即镀膜硬橡皮盘)的运动是要扰动电场的,它总会产生出某种新的电场状态,并且能够或多或少地以电流的磁效应表现出来。罗兰正是根据这一对称性考虑进行这个实验的。遗憾的是,他未发现实验过程对磁针有所影响。

罗兰把他的第一个实验产生的电流称为“没有传导的[电]运动”,这是正确的;他把第二个实验所产生的电流称为“没有运动的[电]传导”^[9],也就不尽正确了。就他的第二个实验来说,虽然盘的转速远远低于电的传导速度,在实验中出现的传导电流与其他电流相比就微乎其

微了。正是因为他没有完全理解他的实验所产生的各种电流,他才认为实验是失败的。亥姆霍兹却从这个“失败”的实验中看到了只能用麦克斯韦电磁理论才能解释的新现象。亥姆霍兹对这个实验的解释,为实验证明位移电流和电磁波指明了一条捷径。

三、对罗兰实验的场论解释

好些科学史文献关于罗兰实验的观点颇有出入,但却在这样一点上的观点是相同的,即罗兰实验启迪了亥姆霍兹的灵感,使他找到了实验证明位移电流的方向。我们认为,如果没有赫兹实验证明位移电和电磁波的工作,如果没有亥姆霍兹对罗兰实验解释所起的承上启下的作用,罗兰关于运动电荷磁效应的发现,是不可能获得如此重要的历史地位的。

先让我们看看场论是怎样解释罗兰的第一个实验的。为了方便起见,我们将硬橡皮盘上扇形面内的电荷简化为点电荷,并将圆周运动视为直线运动。图 3 中的 $+q$ 表示这个电荷。

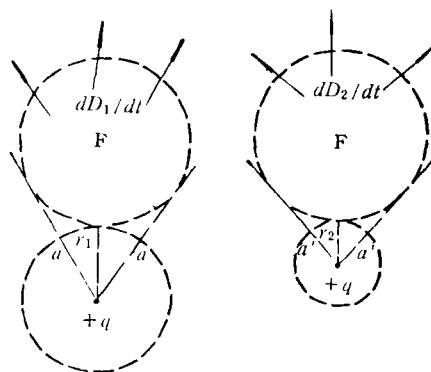


图 3

我们在它运动的前方画一区域 F 。当 $+q$ 处于图 3 左边图形的位置时,它产生的电位移 D_1 (应理解为电通量密度)经圆锥底面 aa 进入 F , 其值 $D_1 = |q|/4\pi r_1^2$ 。当电荷达到右边图形的位置时,进入 F 的 D_2 就大于 D_1 (因为 $r_2 < r_1$)。这时进入 F 的总电通量也要大些,这是显然的。在这两种情况中, F 区域内只有位移电流。根据麦克斯韦关于电荷守恒的场论描述和

他的连续性方程 $\nabla \cdot \mathbf{S} \equiv 0$ 的要求, 进入 F 的位移电流应当等于流出 F 的位移电流, 它们的方向都与正电荷运动的方向相同。自然, 随着正电荷逼近区域 F , 通过这个区域的位移电流会不断增加, 而当正电荷离开区域 F 时, 位移电流会越来越小。这样一来, 正电荷的物理解释便可代之以场空间 F 的解释; 它所形成的电流(即“对流电流”)便可用通过场空间 F 的位移电流来代替。按照麦克斯韦的看法, 孤立的电荷“消失了”, “对流电流”不存在了, 所存在的只是场空间的运动。换言之, 所谓运动电荷形成的电流只不过是位移电流的反映。如果我们把电磁场空间 F 的情况扩大到整个空间, 我们是不难理解麦克斯韦的这种观点的。所以, 罗兰第一个实验中磁针针尖指向硬橡皮盘螺旋轴的方向, 可以认为是位移电流所产生的一种磁效应。

亥姆霍兹正是通过这个实验的场论解释, 发现位移电流是可能存在的。他那时正致力于研究能否将麦克斯韦的电磁场理论和诺埃曼(F. E. Neumann)的超距势理论统一起来的问题。这两个理论的区别在于: (1) 麦克斯韦处理的电磁场, 而诺埃曼处理的是闭合电流的相互作用; (2) 从方法上看, 麦克斯韦擅长于微分运算, 而诺埃曼擅长于积分, 特别是环路积分。奇怪的是, 这两个理论在许多棘手的问题上却是殊途同归的。拿法拉第电磁感应定律来说, 他们两人对此都给出了一个公式。麦克斯韦给出的公式为¹⁾

$$\mathbf{E}_i = - \frac{d\mathbf{A}}{dt}, \quad (6)$$

诺埃曼给出的公式为

$$\mathcal{E}_i = - \oint \frac{d\mathbf{A}_{12}}{dt} \cdot d\mathbf{L}_2, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{A}$ 是矢势(麦克斯韦称之为“电磁动量”), $\mathbf{E}_i$ 是感生电场, $\mathcal{E}_i$ 为感生电动势, $\mathbf{A}_{12}$ 是电流环路 1 在闭合导线的环路 2 上产生的矢势。这两个公式的等价性反映在下式中:

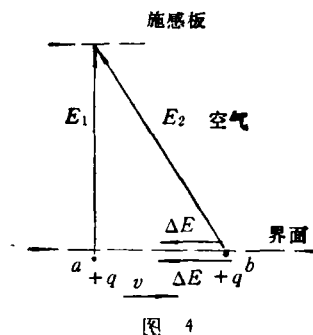
$$\mathcal{E}_i = \oint \mathbf{E}_i \cdot d\mathbf{L}_2. \quad (8)$$

上一世纪不论[感生]电场强度还是[感生]电动势统称为“电动力”(electromotive force, 现在

翻译成“电动势”), 其原因大概出自于此处。

在这里, 我们只是想借上述例子来说明亥姆霍兹为什么要花大力气去试图统一上述两个理论。其实, 亥姆霍兹已经看出诺埃曼超距势理论的缺点, 即它只能处理闭合环路的现象。倘若电路中出现了电容器, 只有麦克斯韦理论才能给与解释。由此看来, 要使两个理论完全等价并统一起来就不可能了。如果麦克斯韦理论是正确的, 那末诺埃曼理论只能作为它的一个特例。但是, 要证明麦克斯韦理论是否正确, 首先得证明他假设的位移电流的真伪。从何处着手证明? 如何证明? 这是摆在亥姆霍兹面前的问题。罗兰的实验, 以及对罗兰第一个实验的场论的理解, 均给亥姆霍兹很大的启迪, 使他感到位移电流是可能存在的, 而且是可借助磁效应来证明的。

现在让我们看看对罗兰第二个实验的解释。根据能量守恒与转化定律, 圆盘的机械运动是会将其部分机械能转化为电磁场能的, 但为何观察不到磁针的运动呢? 我们令施感金属板带负电, 它们所对应的镀膜圆盘的边缘感应出正电。假若圆盘顺时针旋转(俯视), 其上任一点的正电荷 $+q$ 由左向右运动, 在很短的时间内可视为直线运动。在开始运动的瞬间, 电力线由 a 点垂直指向施感板, 随着 a 点运动到 b 点, 电力线就斜着指向施感板(详见图 4)。这是受机械运动所产生的新的电场状态。我们知道, 电力线同磁力线一样, 都具有收缩的倾向, 这一倾向产生了使电力线要恢复原来状态的趋



1) 注意这个方程与 $\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{d\mathbf{H}}{dt}$ 是等价的, 它又类似于牛顿第二定律, 故 $\mathbf{A}$ 可称为“电磁动量”。

势。这一趋势体现为一种特殊的电场力(电场) ΔE , 它是由右指向左边的, 机械力维持着这个电场力, 而不致于使它瞬间变成传导电流。根据界面电场强度水平分量的连续性(麦克斯韦理论包含了这一点, 但他还不明白电位移水平分量是不连续的), 在空气中也应存在大小相等方向相同的电场 ΔE 。再根据电场强度与电位移的线性关系, 在空气中也产生了同方向的电位移。由于 ΔE 是不断加大的, 与它对应的电位移也不断加大, 因而形成了一个方向向左的位移电流。此外, 还有一个与正电荷 $+q$ 运动方向相同的位移电流, 方向向右, 正如罗兰第一个实验的情况那样。这两个位移电流相消, 故磁针不受影响。

罗兰第二个实验更加深了亥姆霍兹对位移电流的信念。在他看来, 既然运动电荷形成的电流都能用位移电流来加以说明, 那末其他非传导性的电流(如介质在电场中运动形成的“介质对流电流”)也是可以纳入麦克斯韦的位移电流的范围。这样一来, 位移电流至少应当包括三种形式: (1) 真空场的运动; (2) 介质在真空场中的运动; (3) 电荷的运动。罗兰发现的

运动电荷的磁效应, 虽然在本质上可以说是位移电流的磁效应, 但它们只证明了三种位移电流中的最直观的形式, 即第三种位移电流。显然, 以此来说明位移电流的真实存在还欠充分。亥姆霍兹于是给实验物理学家们提出了彻底证明位移电流的课题。这个课题是在 1879 年以柏林科学院悬奖的形式颁布的。该奖的 题目是: “用实验建立电磁力[场]和绝缘体介质极化的关系”, 其中包括真空场(以太)的极化。赫兹在 1887 年实验证明在介质中存在位移电流, 获得了科学奖。1888 年, 他为了证明真空中存在位移电流, 使用了倒果为因的方法, 先去证明电磁波, 结果导致电磁波的伟大发现^[6]。

笔者在写作本文过程中承蒙中国科学院物理研究所李国栋先生指导, 在此谨表谢意。

[1] 宋德生, 自然杂志, 9(1986), 55.
 [2] 宋德生, 物理, 11(1982), 378.
 [3] J. C. Maxwell, The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, J. Hermann, Paris, 1 (1927), 526—597.
 [4] 宋德生, 大学物理, No. 2 (1985), 31.
 [5] H. A. Rowland, Amer. Journ. Sci., 15-3 (1878), 30.
 [6] 宋德生, 自然杂志, 5(1982), 377.

(上接第 640 页) 表 1 典型配方 (BNNE) 的铁电、压电性能

性能参数		配方编号	BNNE	性能参数		配方编号	BNNE
耦合系数	K_p		0.165	机械品质因数	Q_m^p		426
	K_d		0.101		Q_m^t		25
	K_t		0.480	泊松比	σ		0.25
压电系数	$d_{31} \times 10^{-12} \text{C/N}$		~14.5	介质损耗	$\text{tg}\sigma(\%)$		1.9
	$d_{33} \times 10^{-12} \text{C/N}$		85	居里温度	$T_c(^{\circ}\text{C})$		282
	$g_{31} \times 10^{-3} \text{Vm/N}$		-5.6	相变温度	$(^{\circ}\text{C})$		206
	$g_{33} \times 10^{-3} \text{Vm/N}$		33	剩余极化强度	$P_r \mu\text{C/cm}^2$		43.5
弹性柔顺系数	$S_{11}^E \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$		8.0	矫顽场强	$E_c \text{ V/mm}$		3000
	$S_{11}^D \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{N}$		7.9	体积密度	$\rho \text{ g/cm}^3$		5.58
介电系数	ϵ_{33}^T		290	频率常数	$N_p \text{ m}\cdot\text{Hz}$		3060
	ϵ_{33}^D		2.17		$N_t \text{ m}\cdot\text{Hz}$		2660

[1] A. Fukumoto, Ferroelectrics, 40 (1982), 217.
 [2] 王天宝等, 硅酸盐学报, 14(1986), 14.
 [3] 王天宝等, 硅酸盐学报, 15(1987), 248.
 [4] 王天宝等, 无机材料学报, 2(1987), 223.
 (中国科学院上海硅酸盐研究所 王天宝、高敏)