

试论法拉第场论

——纪念法拉第诞辰200周年

宋德生

(广西社会科学院, 南宁 530022)

爱因斯坦在1931年说过：“自从牛顿奠定理论物理学的基础以来，物理学的公理基础——换句话说，就是我们关于实在的结构的概念——的最伟大的变革，是由法拉第和麦克斯韦在电磁现象方面的工作引起的”。这里所说的“公理基础”就是指19世纪机械论赖以存在的原子论和超距论。从1831年起，法拉第就开始致力于破除这两论，代之以场论，后被麦克斯韦发展成法拉第-麦克斯韦电磁场论。这一理论在1888年导致了电磁波的发现。毫无疑问，法拉第对19世纪机械论的公理基础的“最伟大的变革”，是最具有纪念意义的。

一、揭示超距电动力学的局限

在奥斯特(H.C. Oersted)于1820年仲夏宣布发现电流磁效应后，安培在不到半年的时间就将一个属于超距力学范畴的电动力学框架建立起来，并提出了后来以他的名字命名的电动力学基本公式，即安培公式：

$$F = (i i' ds ds' / r^2) (\sin \theta \sin \theta' \cos \omega + k \cos \theta \cos \theta')$$

安培提出这个公式的依据在于：(1) 他通过实验发现，电流不仅作用于磁体(即奥斯特效应)，而且也作用于另一电流。他根据电流作用于一个通电螺线管的事实直观而又天才地作出判断，磁体之所以受电流的作用，根本原因是磁体本身就包含有电的运动。因此他得出一个结论：磁就是电流。有了这一条假设，他便可把电磁现象化为电流的相互作用。(2) 同质体间相互作用的最简洁的数学形式要数牛顿万有引力公式。如果要将这个公式引入电磁现象，必

须解决三个问题：一是作用的实体，安培用电流元代替质点，仅是一种数学的需要；二是作用力的方向问题，即除吸引力外还有排斥力，由于电流元本身就是矢量，因此这一条件能自动满足；三是作用力是否与距离平方成反比，安培通过实验也给予解决了^[1]。

安培就这样将牛顿力学搬进了电磁学。这一定律正如静电学中库仑定律所经历的过程一样，既是一个源出于实验的定律，却最后又纳入了超距力学的框架：电磁作用既符合于距离平方的反比定律，又符合于作用与反作用的原理，同时又不占用时间而且在平直空间通过。

如果说磁体中存在电流，那么必然要有热效应，然而人们观察不到这种效应。为此，安培将磁体的宏观电流假设改造成磁体分子电流假设，这样既可超脱于实验的检验，又能保证超距电动力学的关系。原子论就这样进入了电磁学，因而电流元不再是数学假定，而成了物理学的假定。

只考虑作用元和以作用元为中心的“中心力”，是超距论加原子论结合成的机械论的突出特点。由于机械论能够用比较简洁的数学处理大量现象，对19世纪物理学家有着无限魅力，以致于使他们对一些新的现象作出过于匆忙的回答，使新现象的本质重新掩盖起来。最明显的例子是对阿喇戈(F. J. Arago)在1824年所做的圆盘实验的机械论解释。一个金属盘旋转使磁针扰动，本来就是一种电磁感应现象，而他们为使这种现象纳入超距电动力学范围，假定金属盘的旋转离心力使盘中两种电流体分离而形成电流，这种电流作用于磁针中的分子电流便扰动了磁针。

总之,当时已把电流的磁效应当作电磁现象的全部内容,至于是否存在奥斯特效应的逆效应,即运动磁的电流效应,人们还没考虑过。这里有一个电和磁的对称性问题,而这个问题必须从电磁作用的空间得到解决。

在寻找奥斯特效应的逆效应的激情支配下,法拉第在1831年发现了电磁感应定律。电磁感应现象是通过三个实验揭示出来,一是环形铁芯实验(即“变压器”实验),揭示了感生电流现象;二是螺线管实验,揭示了动生电流现象;三是改进的阿喇戈圆盘实验,直观显示了导体切割磁力线产生电流的现象。如果仅仅停留于这个阶段,就不能说发现了电磁感应定律,而只能说发现了电磁感应现象。对这三种现象的统一解释是至关重要的,法拉第在这里表现出向安培超距电动力学挑战的极大勇气。

法拉第对任何未经实验证明的实体都表示怀疑,无论是无质的还是有质的。安培的分子电流假设引起他对安培动力学的深刻反思。在他看来,物质的模型化只能导致人们忽视物质赖以存在的空间,而空间恰恰又是造成各类物质运动的最富活力的因素。因此,他不仅要排除原子论,而且还要铲除超距论。为此,他提出“电致紧张态”来解释他的发现。按照他的定义,“电致紧张态”是存在于空间的一种张力态,它的出现、消失或强弱的变化,均能使位于这个空间的导体产生电流。为了定量描述“电致紧张态”,他又引入了磁力线的概念。据此,磁的运动既可由磁体运动产生,还可通过磁力线的运动产生。前一运动产生动生电流,而后一运动产生感生电流。归根到底,导体要能产生电流,得相对于磁力线有所运动。这样,切割磁力线产生电磁感应现象就成了电磁感应定律的基本推论。由此可见,法拉第电磁感应定律的发现,不仅需要一种新的研究方法,而且也需要确立对物质世界的新观念,这种新方法和新观念都是围绕着空间是否具有物质属性这样一个问题而出现的。显然,这个定律的发现是对超距论电磁学的第一次认真挑战,同时又构成了法拉第场论发展的序幕。

二、法拉第的电学观

在法拉第出现之前,科学家解释物质的统一性通常使用一种“以物论物”的方法,即通过假设一种实体——无论是有质的还是无质的——来说明某一大类物质的统一性。为了解释宇宙的一般现象,最早提出了以太;为了解释热现象,假设了热质;为了解释燃烧现象,又假设了燃素;在电学和磁学中还有电流体和磁流体,后来安培又提出了分子电流。这样做的结果无外乎是为着统一解释自然现象而建立了人为现象,为了解决某种困难而增加了新的困难。法拉第对物质统一性的处理方法与此截然不同,他努力将从实验得来的知识与这类思辨的产物区别开来,独辟蹊径地发展起“以力论物”的方法。

1833年,他完成了一项重要的工作,那就是证明电的同一性。

由于在电的同一性的证明中接触了许多电学实验,法拉第的兴趣便转向了电化学领域,并于1834年发现了电解定律。使我们惊奇不已的是,现在必须具备原子、电子和化合价知识才能理解的法拉第电解定律,在它被发现时却没有直接利用原子论。法拉第把这个定律的第一部分(即法拉第电解第一定律)称为“电化作用量相等的原理”。这首先是一条实验定律,但对这个定律的解释,则包含着法拉第对物质和力的关系的哲学观点。“电化作用量”包括两个内容,一是指电量本身,二是指电解质被电解出的物质的质量。他指出,“被分解的物质的量不是与强度成比例,但与通过的电量成比例”,这里的“强度”是指电压。这里存在一个当量转化问题,即有多少克被分解的物质相当于一个单位的电量,这是一个质量和电量的当量转化问题。在法拉第时代,已有了化学当量,但是热功当量还没有提出。化学当量系从道耳顿1803年提出的化学重量比这一原理发展起来的,从概念上说,要比电化当量简单,因为化学当量是不同的元素物质组合的定比关系,毕竟都属于

物质,而电化当量已超出了单纯的物质范畴,要建立的是有质量的物质与无法进行质量量度的物-电的关系。由于法拉第当时站在哲学的高度认识到物质和电都是空间的强力的体现,它们是有确定的转化关系的,因此只有他才敢于测量这种关系,这样就导致了电解定律第二部分内容(即法拉第电解第二定律)的发现。

质量量度已经不成问题,而电量量度则必须先有电流强度的量度,恰恰电流强度的测量是电化学领域一大困难,因为当时是用磁针偏转角度来确定导体中的电流强度,这种方法用于电解质时其精确度就大可置疑了。为此,法拉第将他的哲学思考与实验卓越地结合起来。他设计了一个标准电解池,是用来电解纯水的,并将这个标准电解池与另一个电解池串联,后一电解池中装有待测的电解质或熔化的盐类。同一电流通过两个电解池,在标准电解池负极析出氢气,而在待测的电解池电极析出待测物质,这样就可以测量析出的待测物质相对于氢的重量比。显然,这种测量免去了对电流强度和时间的测量,测量的结果都是各种物质相对于氢的重量比。他发现所得结果与当时用化学方法测得的化学当量相一致,由此得到这样的结论:“电化当量与普通的化学当量一致,甚至相同。”^[2]这就是他发现的电解定律的第二部分的陈述。这样,法拉第电解定律可总体表示为 $M = KQ$, M 为某电极析出的物质质量, Q 为电量, K 为化学当量,即法拉第所说的“电化当量”。这一表述与现在的定律形式有所不同,现在的公式是

$$M = (1/F)(A/n)Q',$$

其中 F 是法拉第常数, A/n 为化学当量, Q' 是按另一种电量单位测量的电量。法拉第使用的电量单位是现在的单位的 F 倍;而法拉第常数是后人定的,他当时无意决定这个数值,因而他对自己使用的电量单位为多大是不知道的。电量单位的不同,公式当然也就不同。由此看来,现在的公式完全源出于法拉第的表述,二者没有根本区别。

当时考虑电和物质的联系,免不了要用以

太作为中介。而法拉第在 1834 年的工作表明以太假设完全没有必要,人们可用实验直接测定物质和电的关系,这就证明物质和电存在同一性。由于这种原因,英国物理学家惠维尔(W. Whewell)把法拉第电解定律称为“电和化学作用的同一性原理。”^[3]

1837 年,法拉第开始了摒弃电流体假设的工作。电流体的各种假说渊远流长,直到 19 世纪初仍占有很重要的位置,以致于在静电学中发展出“绝对电荷”的概念。静电学经库仑的实验研究后,牛顿的引力模式被用于了静电相互作用,再经泊松等人的发展,在静电感应理论中就接受了超距论^[4]。本来,牛顿力学在解释两个电荷相互作用时,只要不考虑电作用的传递机制,就可解决许多问题,条件是:两个电荷必须同时存在。然而,在处理感应现象时却遇到了麻烦:为什么一个电荷能使另一物体感应出电来?超距静电学被迫启用电流体假说,假设物体中含有不同号的两种电流体,它们等量存在于同一物体中,因而在一般情况下物体不显电性;但是,如果物体外某处有某种极性的电流体出现,它与物体中两种电流体产生静电相互作用而使物体电性显示出来。他们对此还有一条附加假设,即电流体是无质的,与有质物体不发生作用,即电流体不会吸引也不会排斥物质原子。因此,这种电流体便成了“绝对电荷”。超距论静电学并未因此完全摆脱困境,因为“绝对电荷”既然不与有质原子发生作用,那又如何解释“绝对电荷”受感应只附在金属表面而不被施感体上的电荷进一步吸引而溢出金属表面?按道理说,电的超距引力不仅会使感应电荷跑出受感金属体,而且会使它一直跑向施感体直至与施感电荷中和。为此,超距论又假设物体外面有一种特殊的“大气层”,阻止感应电荷溢出体外。这岂不是“绝对电荷”又与有质原子发生了作用吗?

法拉第从这种相互矛盾的假设看出超距论的缺陷,他决定从空间或介质的力学性质方面重建静电学。他在 1838 年发表的《论感应》^[5]一文中引入了电力线,对各种静电现象,特别对

绝缘与电导以及绝缘体与导体进行了统一解释。他第一次明确指出：“所有‘电荷’由感应维持；所有‘强度’现象包含感应原理。”^[6]就是说，电感应是一切静电现象的基础，这是对超距静电作用是静电现象的基础这一观点的批判。他所说的“强度”是静电感应强度，包含着场的概念。他认为，电力线是极性力线，只有在力线的两端才能将电性显示出来，当电力线传到绝缘体时，这种感应力线将继续在绝缘体中通过，绝缘体具有保持感应强度的能力；而电力线遇到金属时则被阻断，因为导体一旦获得感应就立即在其内部释放了感应强度，电力线不能通过导体内部，因而在导体表面显出了电性。总之，静电现象的基础在于电感应，而电感应的传递体现为电力线的运动。

电力线是电运动的形式，它应当具有物质性，介质中的电感应可根据分子的极化给予说明，但电作用通过真空又何以解释？真空有否物质性？法拉第根据康德和波斯柯维奇（J. Boscovich）关于空间的哲学，将电力概念引入真空，从而指出真空也具有物质性，具备力学特征^[7]。康德关于空间充满着力以及“我们只有通过空间力知道这个空间的物质”的思想成了法拉第场论的一块重要基石。法拉第由此形成了这样一个思想：物质与空间不可分割，空间是物质的继续，而物体则是空间的强力体现。他在1844年发表的《关于电导和物质本质的考虑》一文中说：“物质将是完全‘连续’的，在考虑一块物质时，我们不应当考虑原子与隔开它们的空间的差别”^[8]。

三、法拉第场论的最终形成

1845年，法拉第发现了磁致旋光现象（即法拉第效应），第一次指出在光、电、磁之间存在必然的联系。玻璃棒在磁场中获得旋光能力，而这种透明物质又具有很强的抗磁性，磁力何以能通过这种物质作用光呢？他认为这必定存在某种“新磁条件”。为寻找这种条件，他转而研究抗磁体，竟未想到，这项研究最终促成了法

拉第场论。

他那个时代所能提供的关于抗磁体的性质归纳为两点：一是抗磁体被磁场所排斥；二是抗磁体在磁场中可以感应出“磁性”和“反极性”，即与顺磁体感应极性正好相反的极性。可是，他的实验却提供了反例：铋晶体棒在均匀磁场中没有被推出，而是旋转一个角度后平稳地处在磁场中，此时晶轴与磁力线平行；如将它调转180°后仍能处于平衡。他由此认为不能简单用“排斥”二字概括抗磁体在磁场中的行为；铋棒之所以没被磁场推出，是因为其晶轴较能让磁力线通过；当它调转180°角后仍能处于磁场中，则说明抗磁体根本不存在感应极性。从1845年到1851年，他用了六年时间进行这项研究，导磁性原理由此诞生了。

法拉第研究抗磁体的工作表明，解释方法的不同可以导致完全不同的结论，解释是实验和观察必不可少的补充，没有解释的观察和实验就不能成为发现。正如第谷和开普勒同观日出，第谷由此支持“地心说”而开普勒提出“地动说”的情况一样，传统抗磁体研究所维护的是超距论而法拉第则由此确立起电磁场论。试看：一根抗磁体棒插入一个处于磁场中的螺线管，螺线管在此瞬间产生了电流。超距论者和法拉第都做了实验，都看到了同一现象。超距论者（如韦伯）认为，抗磁体棒在磁场中其分子电流重新分布而产生极性，它的运动就使螺线管产生了感生电流；而法拉第则认为抗磁体根本无感应极性可言，抗磁体不大容许磁力线通过，它的导磁能力远低于空气甚至于真空，当它进入螺线管时，就将管内空间的原有磁力线往外排，造成磁力线切割螺线管导线从而产生感生电流^[9]。显然，法拉第在这里推出了导磁性原理。这个原理是指，不同的物质有不同的磁导率，顺磁体能让空间磁力线更多地通过，且易向磁力线密的地方运动；而抗磁体则会排斥空间的磁力线。因此，磁场中两个顺磁体球会相互排斥，因为两球之间的磁力线密度低于它们的外侧空间；同理，磁场中两个抗磁体球也会相互排斥。

他在1851年发表的《论物体的磁和抗磁的

传导》和《磁的传导能力》等文章中用导磁性原理论述了抗磁体和顺磁体的区别和联系,并进一步表明他确信空间存在磁力。他说:“磁力线能够穿过纯空间;因此,空间具有它自己的磁关系,和一种我们今后也许会发现在自然现象中占有最重要位置的东西。”如果说他在20年前为了定量描述“电致紧张态”而将磁力线作为一种描述手段引入的话,那么现在他就不仅认为磁力线在解释电磁现象方面是一种绝对的必要,而且是一种实在,它代表着“纯空间”的一种基本力的属性。人们通常用铁屑和磁针来指示磁力线的密度和方向,当这些东西不存在了,磁力线似乎又消失了。他用铜导体在磁场中运动产生电流事实告诉我们,磁力线是独立于磁性物质的一种真正存在。他把人们对空间的认识向前推进了一大步,原来人们只知道由有质的物体产生力,即作用场是物质的“源”的产物,而现在他告诉人们情况正好相反,场是首要的,有质物体只不过是场的作用显示出来而已。他在1851年发表的另一篇论文——《论磁力线》——中指出:磁力线不仅存在,而且不论它们传播多远都不会消失、减损、破坏或变成潜在的形式;磁体的作用不是产生磁力线,而是收拢空间的磁力线;磁力线穿过磁体进入空间,再穿过磁体,周而复始地运动,在空间和磁体中的磁力线数目永远相等;磁极与磁极之间并不发生直接作用,而是通过磁力线相互作用。^[10]

1855年,法拉第在《论磁哲学的一些观点》一文中,将磁力线的物质性推广到其他力线,并给出了力线的四个基本性质:1.力线存在与物体无关;2.物质可以改变力线的分布;3.力线具有传递力的作用;4.力线在时间中运动。这就是法拉第场论形成的最后标志。^[11]

1857年,他在《论力的守恒》一文中提出了

重力线,认为重力线是一种非极性力线,它沿直线在空间和时间中传递质量引力。在此,他破除了以太的假说,指出以太同电流体、磁流体一样,都是人们为了回避“纯空间”本身的力学特征而作的荒唐假设。这一点对爱因斯坦有着积极影响,爱因斯坦后来在1940年说过这样一句话:“对于我们,法拉第的一些观念,可以说是同我们母亲的奶一道吮吸来的,它们的伟大和大胆是难以估量的。”这主要是指法拉第大胆破除以太等一系列的人为假设,破除以“中心力”为基础的超距论,并提出以电磁场论为中心的内容的场论思想。当然,法拉第这篇文章的题目现在看来有些不妥,因为力不守恒,守恒的是能量。读过法拉第这篇论文就会知道,他不是论能量守恒,而是指空间永恒存在着各种形式的力,永恒存在着各种力线。如果我们将他所说的“守恒”理解为“永恒”二字就不会产生误解了。

致谢:本文在撰写过程中,作者承蒙中国科学院物理研究所李国栋教授的关怀和指导,在此谨向他致以衷心的感谢。

- [1] 宋德生、李国栋著,电磁学发展史,广西人民出版社,(1987),165.
- [2] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*, Bernard Quaritch, London, Vol.1 (1839), Art. 836.
- [3] S.M. Guarnick, *ISIS*, 70 (1979),60.
- [4] 宋德生,物理,14-12(1985),759.
- [5] M. Faraday, *Phil. Trans.*, 129 (1838), 1-40, 83-123, 125-168.
- [6] 同[2], Art. 1178.
- [7] L.P. Williams, *Michael Faraday*, Chapman and Hall, London, (1965), 60-61.
- [8] 同[2], Vol. 2 (1844), 291.
- [9] 同[1],第251-252,255页.
- [10] 同[2], Vol. 3(1855), Arts. 3113, 3116.
- [11] 同[1],第259页.