

麦克斯韦电磁场理论思想体系的科学美

孙春峰 刘 舸

(孝感学院物理系, 湖北 432100)

人类在很早就已经发现了电现象和磁现象,并为揭开它们神秘的面纱而作出了不懈的努力。19世纪初,人们发现各种自然现象之间有其内在的关联性,另一方面,在法国古典哲学关于自然界统一思想的影响下,部分自然科学家开始寻求电与磁的联系,在科学与美学的融合中不断升华,深刻了人们对电、磁的认识,同时也在充实和完善着科学家们自己的物理美学理念。在这一漫长的认识过程中,科学家们逐渐建立了相当完备的电和磁的理论,为完成电磁的统一扫清了主要的障碍。这其中,尤以库仑定律、高斯定律、法拉第电磁感应定律和安培定律这四大定律影响巨大,为电磁学取得突破性的进展奠定了坚实的基础。直到19世纪下半叶,麦克斯韦集其大成,完美地实现了电、磁的统一。可以说麦克斯韦创造性的杰作,不仅是其自身天才的成就,也是前人物理思想的结晶。他从别人解决物理学与美学的冲突的成败中汲取了丰富的营养,完善和发展了他们的理论而凝聚成麦克斯韦方程组这一梦幻般的组合。其思想体系的科学美在他的方程组中得到了淋漓尽致的发挥。

库仑定律是库仑于18世纪通过实验总结出来的关于点电荷间相互作用的规律。这个公式与万有引力公式的形式相同。实际上,也正是在万有引力定律的启发下,库仑才从实验上证明电力和磁力都遵循距离平方反比关系,把电力、磁力统一于与引力相同的公式之中。由于没有明确地掌握电量、电势和电容之间的关系,也没有确定电量的单位,而磁荷的存在性问题也悬而未解,所以他实际上并没有严格地证明力与电荷或磁荷之积成正比。但是,由于它们的平方反比关系与万有引力的平方反比关系完全一样,出于对大自然简单、和谐之美的信仰,库仑认为力与电荷或磁荷之积成正比是“无须加以证明”的。虽然库仑深信电力、磁力与万有引力一样都是长程力,但他认为电与磁是完全不同的实体,电与磁之间没有什么联系。

库仑关于电磁之间没有什么联系的观点虽然得

到了安培和托马斯·杨的支持,但不能说服丹麦物理学家奥斯特。奥斯特崇尚哲学,而哲学关于“美是表现在有限中的无限性”,以及“美的要素是高于形式的普遍性”的思想对奥斯特更是有着无与伦比的魅力。也正是他在物理学研究中对哲学的偏爱,于1812年提出电与磁之间存在着联系的思想,并最终导致了他在1820年发现了通电导体附近磁针转动的现象,打破了一直延续两个世纪的电和磁绝然无关的观点,首次找到了电与磁的联系。

奥斯的惊人发现引起了法国数学家安培的极大兴趣。在奥斯特发现的基础上,安培以万有引力定律为模本,努力寻求一个精确的数学公式以表达电流与电流之间的相互作用。他受到牛顿微积分思想的启发,对电动力学现象的全部研究也奉行牛顿所遵循的路线,引进了电流元的概念,从电流元来推导电动力的一般规律,提出电能可以转化为磁能,磁起源于电,得到磁与电有本质联系的结论。

由于安培否认“绝对磁”的存在,把磁作用看成是电动力的作用。为此,他还提出了著名的分子电流假说。所以在安培的公式中从未出现过关于磁场的量。

安培的思想引起了法拉第的注意。法拉第曾经为安培公式的简洁而赞叹不已,但他对安培的分子电流假说产生怀疑,认为电和磁都是不能再变更的实体,它们在电磁相互作用中得到统一。法拉第深信大自然是对称而和谐的,所以,他认为电和磁也应该是一对和谐的对称现象。因此,如果安培一定要把磁作用看成是电的运动形式,这必然会破坏大自然本身具备的对称和谐之美。出于这一信念,法拉第对奥斯特实验以来,电能产生磁而磁不能产生电的这种不对称性感到苦恼。为了探索大自然在电与磁之间的对称性,就必须寻找磁产生电的机制,为此,他进行了艰苦卓绝的努力。1821年,他提出了“磁转化为电”的思想,并在以后的10年中做了大量的磁转变为电的实验研究,直到1831年夏天,终于取得了突破性的进展,找到了磁生电的机

制。他正确地指出感应电流与原电流的变化有关,而不是与原电流本身有关;仅有导线运动不能产生电流,必须在磁性区域中以一定的方向运动才产生电流。

为了解释电磁力的原因,法拉第屏弃了牛顿力学的超距作用,认为物质是完全连续的。为此,他引进了“力线”这一美妙的思想,给电磁场描绘了一幅形象的图像,“电场和磁场的许多性质,借助它就可以最简单而且富有暗示地表示出来”。从理论上把电磁学从牛顿力学的框架中解放出来,为以后麦克斯韦从数学上最终建立一个完整的电磁场理论奠定了坚实的基础。遗憾的是,法拉第虽然具有极美妙的物理思想和极高超的实验技巧,物理实验方面的成就也举世瞩目,且虔诚地追求着隐藏在物理世界深处的简单、对称与和谐,但他不太懂得一些高深的专门数学理论、而自创一套他个人用的形象讲法,用来解释他的实验结果。在他的巨著《电学的实验研究》中,几乎没有一个数学公式,而是详尽地描写了他所做的各个实验,并深刻地分析了它们的物理实质。这套讲法特别非数学化,因而,他无法使自己的定性理论上升为定量理论。也正是在这样的条件下,麦克斯韦开始了他的工作。

在那个时代,哲学家们都把大自然看成是一个和谐而统一的美的结合体。因此,追求和谐与统一是物理学不变的主题。即便是在现代物理学中,物理学家也常常把物理规律的统一、对应、互补三方面所反映出来的那种“神秘的和谐”视为美的典范,从这种神秘的和谐中感到一种强烈的惊异与满足。由于传统文化的耳濡目染,特别是古典美学的影响,使得麦克斯韦对物理美学有着独到的认识,从他那科学性的创举中就不难发现这一点。以统一为主要标志的和谐之美在物理学中往往包括物理内容和数学形式两方面的统一,这就是说,物理学家从美学角度坚信物理图景的统一,并认为物理世界的一切规律原则上可以在数学中找到它们的表现形式。而麦克斯韦恰恰就做到了这一点,圆满地实现了许多人的梦想。

麦克斯韦深受法拉第的影响,把法拉第的论文看成是电磁学的思想宝库,决心用严密的数学语言来描述法拉第所发现的现象,赋予它们优美的数学形式。为此,他利用流体的流线概念,说明如何画出法拉第的力线,“把一个空间画力线的清楚概念”展示出来,他把电力线比作不可压缩流体的流管,把

电场强度比作流速,并引入了一种新的矢量函数来描述电磁场。不仅揭示了法拉第原始想法中所包含的数学思想的精髓,而且产生了一个极其重要的新物理概念——场,可以说场是“力管”概念最精炼的数学形式。经过严密的数学推导,他导出了电流和磁力线的一些物理量之间定量关系的矢量微分方程,以及电流元间作用力和电磁感应定律的定量公式。

麦克斯韦对磁场变化产生感应电动势现象进行了深入的分析,敏锐地感觉到即使不存在导体回路,变化的磁场也会在其周围空间激发出一种电场,这种电场的力线是闭合的,称为“涡旋电场”,“涡旋电场”假设是麦克斯韦建立电磁场理论的重要一环。他分析了已有的电磁感应定律、库仑定律、高斯定律、安培定律,并把这4个实验定律表示为4个方程。后来又发现这4个方程并不自洽,为了解决数学上的不自洽性,也出于美学上的考虑,他发现,电磁感应定律与安培定律的不对称性,由变化的磁场能产生电场推断变化的电场也能产生磁场,如果在安培定律中引入新的一项——电位移通量的变化率,才能消除安培定律和电荷守恒定律之间的矛盾,不仅使这4个方程彼此相容,而且让电学与磁学的方程具有完美的对称形式。后来发现电位移通量的变化率实际上就是在电容器中通过的电流,即所谓“位移电流”,出于数学上的考虑引入的物理上有意义的一项,不断使麦克斯韦方程组可以描述已有的全部电磁场理论,而且还预言了新的现象。

从理论上引进“位移电流”概念,是麦克斯韦对电磁学的伟大创建。“涡旋电场”和“位移电流”的科学假设思想,使他得出了两个高度抽象的矢量微分方程,并导致麦克斯韦方程组的最终建立。

当麦克斯韦公布了他那篇著名的论文《电磁场的动力学理论》时,便宣告了电磁统一的时代到来了。他在论文引言中写道:“我提出的理论可以称为电磁场理论,因为这种理论关系到带电体或磁体周围的空间,它也可以称为一种动力学理论,因为它假定在这个空间存在着运动的物质,由此而产生了我们可观察到的电磁现象。”并指出“电磁场是包含和围绕着处于电磁状态的物体那部分空间”。麦克斯韦是一个数学家、理论物理学家,但他对物理实验却非常重视,所以理论和实践在他那里得到了高度的统一:他用理论来描述物理实验,解决物理问题,另一方面他提出的理论都有坚强的实践作为基础,

现代物理知识

同时他强调物理和数学的结合,尤其是数学思维和物理实践的结合,将他的物理思想、模型和图像最终表述为描述电磁场的基本方程组。为了把电磁场理论由介质推广到空间,他假设空间存在一种以太,它的动能体现磁的性质,它的势能体现电的性质,它的动量 A 表示电磁场的运动性质和相互作用的特性。麦克斯韦为了对电磁现象的各种讨论进行定量计算,归纳出了电磁场的一般方程组,列出了含有 20 个变量的 20 个分量方程(其中也包含了现在已不作为电磁场方程的公式,如库仑定律、欧姆定律、安培定律、毕奥—萨伐尔定律、位移电流、电荷连续性原理等),采取矢量形式可以写成 8 个方程,即:全电流方程,磁力方程,电磁场运动学方程,电动力方程,电位移方程,电阻方程,自由电荷方程和电荷连续性方程。

当赫兹仔细阅读了麦克斯韦的论文后,意识到当时的场论与源论之间并不存在无法填补的鸿沟。为了把德国电动力学源论与麦克斯韦场论统一在一个和谐的理论体系中,他将麦克斯韦方程简化为:

$$\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{H}}{dt} = -\nabla \times \mathbf{E}, \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0,$$

$$\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{E}}{dt} = \nabla \times \mathbf{H}, \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = 0.$$

这比起麦克斯韦原来的 8 个矢量方程来说,更体现了简单、对称的美学标准。但是,赫兹在这里只强调了电与磁在数学形式上的对称美,而在一定程度上放弃了法拉第、麦克斯韦物理思想中深刻的对称性。尤其是麦克斯韦电磁理论的核心内容位移电流的省略是一个不小的遗憾,这种省略带有一定任意性和人为因素。幸运的是,这一点由亥维赛圆满解决了。他继承和发展了麦克斯韦与赫兹的成就,同时又认识到为把麦克斯韦方程组中电和磁的深刻对称性简明地表示出来,就必须对麦克斯韦方程组再行简化。经亥维赛的工作,方程简化为:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \\ -\nabla \times \mathbf{E} &= \mathbf{J}_m + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_e + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \end{aligned}$$

与我们现在通用的麦克斯韦方程组相比,电场强度的旋度方程中多出了一个磁流项 \mathbf{J}_m ,它是亥维赛出于对称性考虑,类比磁场强度的旋度方程人为加进去的。至于 \mathbf{J}_m 是否真的存在,他自己也感到怀疑,后人再整理时取消了本来不存在的 \mathbf{J}_m 项。于是,经过众多科学家的不懈努力和坚持探索,终于完

成了人们梦寐以求的电磁统一。麦克斯韦和法拉第关于电磁场的理论在与美学的结合中得到了完善与发展,被表达得异常完美和明晰,为后人勾勒出了一幅使人赏心悦目的美的图景。它蕴涵了洛伦兹不变性这样重要的物理学对称原理。是简洁、对称、优美、和谐、统一、严密而精巧的理论体系典范。

简化后的 4 个方程,融合了数学形式上简单与对称,涵括了物理思想上的统一与和谐,完成了自然美与科学美的结合,正是这种结合,折射出物质世界的物理规律与自然世界的自然美之间千丝万缕的联系。这种物理学与科学美的联系将是我们探索更深层次的物理规律的桥梁和手段。

如果把 4 个一阶的偏微分方程,化为两个二阶的偏微分方程,在无介质自由空间,方程形式为:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= 0, \\ \nabla^2 \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} &= 0. \end{aligned}$$

类比数理方程中波动方程的对称性发现,电场和磁场都满足波动方程,也就是说电场和磁场都是一种波。麦克斯韦预言这种波就是电磁波。电场和磁场是电磁波的两个分量,这种波和其他的波一样,可以脱离源而辐射出去。电磁波在真空中以光速 c 传播,而 c 与电学量 ϵ_0 和磁学量 μ_0 相联系。据此,麦克斯韦进一步预言光是一种电磁波,并提出光的电磁理论。在麦克斯韦去世 9 年后的 1888 年,赫兹用快速振荡法证实了电磁波的存在,足见麦克斯韦电磁场理论的科学预见功能。因此,麦克斯韦在 19 世纪 60 年代实现了物理学的第一次大统一——电、磁、光的大统一! 一个无线电的新纪元也随之开创了。

麦克斯韦电磁场理论从美学的角度描述了电现象和磁现象的统一、关联和转化的规律,创造一个反映自然界的完美表达形式,它又从自身的美学体系中演绎出或预见到客观世界尚未被人观察到的美,并引导人们最终发现并证实这种现实美。

正如劳厄评价的那样:“麦克斯韦方程组……被给予了美学上真正完善的对称形式,鉴于它的丰富的物理内容,它看来对我们似乎是一种启示”——美学的方法、艺术性观点的科学研究思想。启迪着无数后来者致力于探索自然界的和谐,追求科学的统一。