

划时代的贡献

——麦克斯韦的电磁场理论

邵 瑞 程民治

(巢湖学院机械与电子工程学院 238000)

2015年距离阿拉伯学者海什木的5卷本光学著作诞生恰好1000年。为了纪念千年来人类在光学领域的重大发现，尤其是光技术在世界各国的能源、工农业生产和医疗卫生等领域中所占的举足轻重的地位，联合国大会决定把2015年确立为“光和光基技术国际年”（简称“国际光年”）。

在光学的千年发展史中，150年前英国杰出的理论物理学家麦克斯韦创立的电磁场理论无疑是一座难以逾越的高峰。没有电磁学就没有现代光学、电工学、电子学，就不可能有电气化和通信技术，也就不可能有现代文明。现就麦克斯韦光辉灿烂的人生与卓越贡献作一个简要的论述。

1. 短暂却异常亮丽的人生

麦克斯韦(1831~1879)是英国卓越的物理学家，出生于苏格兰首府爱丁堡。他的父亲是一位思想开放、思维敏锐、注重实际的机械设计师，对麦克斯韦影响很大，使他较早地受到科学的熏陶。麦克斯韦在15岁那年向皇家学会递交了一篇数学论文，并发表在《皇家学院学报》上。16岁时他考进了爱丁堡大学学习数学和物理，19岁时又转入剑桥大学，跟随著名数学家霍普金斯专攻数学。1860年至1868年间麦克斯韦任伦敦皇家学院和剑桥大学物理学教授，1871年受聘剑桥大学首任实验物理学教授，并负责筹建该校第一所物理学实验室——卡文迪许物理实验室。1874年该实验室竣工后，他又被任命为该实验室的第一任主任。1879年11月5日这位科学泰斗因病在剑桥逝世，年仅49岁。

2. 麦克斯韦电磁理论的研究

在先前以及同时代物理学家工作的基础上，麦克斯韦以其坚忍不拔的科学精神，丰富的物理与数学知识，以及高超的睿智才思，呕心沥血，刻苦攻关，终于构筑了一座集真、善、美于一体的电磁学理论大厦。

当麦克斯韦刚刚开始电磁学研究时，电磁学才走过了短短数十年的历程。1785年法国物理学家库仑公布了用扭秤实验得到电力的平方反比定律，即库仑定律，使电学进入了定量研究的阶段。1820年丹麦物理学家奥斯特发现了电流的磁效应，随后英国物理学家法拉第经过近十年的实验，在1831年发现了电磁感应现象，即磁产生电的效应。法拉第反对超距作用说法，坚信电磁的近距离作用，认为物质之间的电力和磁力都需要由媒介传递，由此提出了“场”的概念。为了进一步解释场，对于磁相互作用，法拉第使用了磁力线(1831年)；对于电相互作用，他使用了电力线(1837~1838年)，如此等等。法拉第力线为用场论的方法统一解释各种物理现象提供了一条行之有效的途径，包含有丰富的数学内容。然而出身贫寒，无法受到较多教育的法拉第，对此却无能为力。

如上所述，靠自学走上科学道路的法拉第，习惯以直观形象的方式来表达他所发现的电磁感应现象。但是对于一般的物理学家而言，他们因恪守牛顿的物理理论，而对法拉第的学说感到不可思议。例如有位天文学家曾公开宣称：“谁要在确定的超距作用和模糊不清的力线观念中有所迟疑，那就是对牛顿的亵渎！”

麦克斯韦在剑桥求学期间读到了法拉第的《电学实验研究》，深深地为法拉第的思想所吸引，但同时也看到了法拉第在定量表述上的缺陷。而麦克斯韦本人数学很好，获得过三一学院数学竞赛奖和斯密思数学奖。抱着给法拉第的理论“提供数学方法基础”的愿望，麦克斯韦下定决心将法拉第的天才思想以清晰准确的数学形式表示出来。

3. 麦克斯韦的三篇大作

1855年他发表了第一篇电磁学论文《论法拉第的力线》。受物理学家威廉·汤姆孙（后受封为开尔文勋爵）的启发，麦克斯韦把“力线”和不可压缩流体进行类比，塑造了电力线的数学模型。把电、磁学中的物理量从数学角度加以分类，提出“源”和“旋”的概念，同时还把流体中的通量和环流移植到电磁学中。虽然这篇论文从总体上可以说是对法拉第力线概念的“数学翻译”，但这却是麦克斯韦所迈开的至关重要的一步。后来麦克斯韦和法拉第在伦敦见面，法拉第鼓励年轻的麦克斯韦不仅仅要用数学来解释他的理论，还应该作出进一步的突破！麦克斯韦倍受鼓舞。

从1861~1862年，麦克斯韦在英国的《哲学杂志》上分四部分发表了他的第二篇电磁学论文《论物理力线》，比第一篇有了质的飞跃。麦克斯韦认识到类比方法固然可以抽象出来各种物理现象之间的共性，能迅速地推导出电磁场的一般规律，却忽略了物理现象自身的特性。换句话说，电磁现象有别于流体力学现象，就是电与磁也各自存在独特的性质。

麦克斯韦在这篇文章中假设了一个新的模型——“分子涡旋”。在这个模型的基础上，引入了“电位移”的概念，从更高的层次上创造性地提出了“位移电流”和“涡旋电场”的两大重要假设。

1865年，麦克斯韦发表了他的第三篇电磁学论文《电磁场的动力学理论》。这是一篇关于电磁场理论最重要的总结性论文。这篇论文的目的，就是用动力学的方法，全面概括电磁场的运动特征和建立电磁场的方程。在这篇论文中，麦克斯韦明确宣告他提出的理论可以称为“电磁场的理论”。

4. 麦克斯韦确立的电磁场理论

麦克斯韦为了把电磁场理论由介质推广到空间，假设在空间存在一种动力学以太，它有一定的密度，具有能量和动量：它的动能体现磁的性质，势能体现电的性质，它的动量是电磁最基本的量，表示电磁场的运动性质和传力的特征。麦克斯韦在这个基础上提出了一共包含20个变量的20个方程式，即著名的麦克斯韦方程组。奥利弗·赫维赛德和约西亚·吉布斯于1884年以矢量分析的形式重新构建了该方程组，其微分形式为

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \mathbf{j}_0 + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

这个方程组是麦克斯韦电磁理论的核心所在。

随后，麦克斯韦辞去了皇家学院的工作，回到家乡格伦莱庄园专心写书。在1873年出版了他的电磁学专著《电磁学通论》。在这本著作中，麦克斯韦系统地总结了19世纪中叶前后，库仑、安培、奥斯特、法拉第和他本人对电磁现象的研究成果，建立了完整的电磁理论。这部巨著有着划时代的历史意义，可与牛顿的《自然哲学的数学原理》（力学）、达尔文的《物种起源》（生物学）相提并论。从库仑、安培、奥斯特，经法拉第、汤姆孙最后到麦克斯韦，通过几代人的不懈努力，电磁理论的宏伟大厦，终于建立起来。

麦克斯韦方程组的对称美，很久以前就已被科学家们所领悟和体味，并且该方程组长期以来也一直被科学界奉为科学美的力作，德国物理学家劳厄称它是“美学上真正完美的对称形式”。今天，崇尚科学美已成为现代科学精神的一个极其重要的组成部分。那么麦克斯韦方程组所渗透出的科学美，是如何呈现在我们面前的呢？

5. 麦克斯韦探索科学美

从数学形式上看，麦克斯韦方程组具有几乎完美的对称形式。在真空中如果没有电荷也不存在电流，

麦克斯韦方程组微分形式可以写成

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

把公式中的 \mathbf{E} 和 $c\mathbf{B}$ 互换，得到，

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad c^2 \nabla \times \mathbf{B} = -\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

电场强度 \mathbf{E} 和磁感应强度 \mathbf{B} 的散度公式经过互换后保持不变，从数学上来说两者是完全对称的。而旋度公式互换后仅相差一个负号，具有“反对称性”，因此可以认为电场强度和磁感应强度具有空间对称性和时间对称性。

从物理内容上看，麦克斯韦方程组揭示了现实物理世界的对称美。在电流不连续的区域，麦克斯韦方程组引入了“位移电流”的概念，它和涡旋电场这两个物理概念是完全对称的。涡旋电场代表变化的磁场产生电场，位移电流的本质则是变化的电场产生磁场。两个假设使电场和磁场的地位完全对等；完善的对称性决定了变化的电场和磁场可以相互转化，致使电场和磁场二者相互交织、结合成统一的电磁场整体。这个理论在科学史上具有重要意义，即预言了电磁波的存在——交变的电场和磁场相互激发，以横波的形式在空间传播，这就是电磁波。

麦克斯韦对电磁波的波速作进一步的计算，发现电磁波的速度只与介质的电磁性质有关，在以太（即真空）中传播的速度，等于光在真空中传播的速度。这不是偶然的巧合。麦克斯韦认为“这一速度与光速如此接近，看来，我们有充足的理由断定，光本身是以波的形式在电磁场中按电磁规律传播的一种电磁扰动”。这就是麦克斯韦创立的光的电磁学说。

通过这个理论，麦克斯韦把电、磁完美的统一起来，并且把光也包括了进来。麦克斯韦逝世9年后的1888年，德国物理学家赫兹用实验验证了电磁波的存在，电磁场理论取得了决定性胜利。在近代科学史上，这是继牛顿统一物体相互作用和运动规律以后实现的第二次物理学大综合，深刻地影响了人们对物质世界

的认识。同时实现了从对称美到统一美，也是美学在物理上的重大成果。在《物理学的进化》一书中，爱因斯坦和英费尔德评论说：“这些方程的提出是牛顿时代以来物理学上一个最重要的事件，这不仅是因为它的内容丰富，而且还因为它构成了一种全新定律的典范。”

对麦克斯韦方程组对称美的深入研究实质上推动了近代物理的发展。方程组在伽利略变换中具有不对称性，是否说方程组的对称美不能经受物理变换的考验？回答是否定的。经过研究，发现了麦克斯韦方程组在洛仑兹变换下仍然保持对称性，而伽利略变换仅是洛仑兹变换在速度远小于光速时的极限。因此，麦克斯韦方程实际具有更高层次的对称性。

爱因斯坦仔细审视了当时物理学的发展过程，认为这是一个实验—方程式—对称性的过程。他决定把整个过程逆向进行，从对称性的角度出发进行研究。即先提出一个对称来，然后问什么方程式是否符合这个对称，再问这个方程式的结果会有什么实验？他做了七八年工作以后，得到了狭义相对论，这是对称美在现代物理的又一重大成果。杨振宁先生把这种思想称为“对称性支配相互作用”原理。

麦克斯韦方程组的对称性对近代物理的另一个启示是磁单极子。变化的电场激发磁场，变化的磁场也会激发电场；但是电荷能激发电场，却没有相应的磁荷激发磁场；有运动电荷激发磁场，却没有运动的磁荷激发电场。假如磁荷存在，电磁场就能实现完全对称。正是这种对称性的思想，使汤姆逊等人在20世纪初就萌发了磁荷（磁单极子）可能存在的猜想。虽然目前还没有实验能证实磁单极子的存在，但它一直是当代物理学中基础理论研究和实验的重要课题，被看做解决一系列涉及微观世界和宏观世界重大问题的突破口。

6. 一位超越时空的成果奉献者

麦克斯韦电磁理论的伟大无需多言，但他的电磁理论在他生前并未得到充分的重视。造成这种情况大致有两点原因，一是麦克斯韦本人过于谦逊和低调，没有充分地为自己的理论进行宣传 and 据理力争；二是麦克斯韦理论相对于它所处的时代而言过于超前了。在当时的自然观背景下，人们很难理解电磁场理论所

描绘的世界图景。

今天，麦克斯韦之所以被看作是与牛顿和爱因斯坦齐名的科学家，是因为电磁学以其不可思议的有效性和无穷的生命力，强有力地推动着全人类科学事业的蒸蒸日上，进而为现代人谋福利。例如：物质电磁性质的研究推动了材料科学的发展，建立在电磁场理论基础上的光学研究拓宽了光学研究领域，如此等等，不一而足。

而对于普通人来说，感受最直接、最深刻的无疑是对电磁波和电磁辐射的研究导致的信息传输技术的飞跃。传统的纸质媒体一般称为第一媒体，以电磁波为媒介的广播和电视媒体则分别称为第二媒体、第三媒体，相比于纸质媒体具有信息传播及时，传播范围广泛等优点，一直是家庭、个人的首选。自 20 世纪 60 年代开始，“光纤之父”高锟提出在电话网络中以光波代替电流，以玻璃纤维代替金属导线传递信息，

掀起了一场光纤通信的革命。光纤通信具有传输容量大，保密性好等优点，是现代通信的主要支柱之一，美、日、英、法等 20 多个国家已宣布不再建设电缆通信线路，致力于发展光纤通信。在此基础上更是衍生了光纤网络，被认为宽带网络中多种传输媒介中最理想的一种。正是依赖于光纤提供的网速，才成就了今日几乎无处不在、无所不能的互联网。

除了在电磁学等方面的卓越贡献，麦克斯韦设计并建立的卡文迪许实验室科研效率之惊人，成果之丰硕，举世无双，在鼎盛时期甚至获誉“全世界二分之一的物理学发现都来自卡文迪许实验室。”电子、质子、中子和 DNA 的发现就是其中的几个典型的案例。

正如量子论的创立者普朗克指出的：“麦克斯韦的光辉名字将永远镌刻在经典物理学家的门扉上，永放光芒。从出生地来说，他属于爱丁堡；从个性来说，他属于剑桥大学；从功绩来说，他属于全世界。”



科苑快讯

BEPCII 对撞亮度达到设计指标

2016 年 4 月 3 日至今，北京正负电子对撞机亮度屡创新高。在对撞机各硬件系统保持良好稳定的性能上，中科院高能所加速器中心调束与运行人员再接再厉、全体动员不分昼夜的调试对撞，八年磨一剑，终于在 4 月 5 日 22:29 实现对撞亮度 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ，成功达到了 BEPCII 对撞亮度设计指标，标志着对撞机的性能达到改造前的 100 倍，同时再次刷新了该能区对撞亮度的世界纪录。

4 月 12 日，中国科学院条件保障和财务局组织测试鉴定专家组对北京正负电子对撞机重大改造工程（BEPCII）对撞亮度进行了测试鉴定。专家组由北京大学、中科院院士陈佳洱担任组长，中国原子能科学研究院、中科院院士张焕乔担任副组长，专家组成员还有中国科技大学国家同步辐射实验室、中国工程院院士何多慧、北京大学、中科院院士赵光达等。

经过认真、深入的讨论，专家组认为：BEPCII 在 2009 年 7 月对撞亮度达到 $3.2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的指标并通过国家竣工验收后，迅速投入高能物理实验取数，在 1~2.3GeV 的束流能量范围长期稳定高效运行。经过六年半的努力，在优化能量 1.89GeV 下达到了 $1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的对撞亮度设计目标。

BEPCII 于 2004 年初开工，2008 年按计划建成，2009 年 7 月通过国家验收，在随后几年的运行中取得了“首次发现带电类粲偶素 $Z_c(3900)$ 及其伴随态”等重大物理成果，受到国际高能物理界的高度评价。BEPCII 的对撞亮度达到 BEPC 的 100 倍、美国康奈尔大学 CESRc 的 14 倍，居于粲能区对撞机的国际领先水平。BEPCII 亮度的提高，为取得物理成果创造了更好的条件。

（摘编自 2016 年 4 月 6 日“高能新闻”）