文章编号: 1000-5471(2008)06-0135-06

论麦克斯韦方程组的美[①]

刘 健 平

宜春学院 物理科学与工程技术学院, 江西 宜春 336000

摘要: 主要分析了麦克斯韦方程组所蕴涵的物理简单美、对称美、和谐美与统一美, 并从审美的角度加深对麦克斯韦方程组的理解.

关 键 词: 麦克斯韦方程组; 简单美; 对称美; 和谐美; 统一美

中图分类号: O441.4　　**文献标识码:** A

1865 年, 麦克斯韦在英国皇家学会上宣读了其举世瞩目的论文——《电磁场的动力学理论》, 在这篇论文中, 他提出了伟大的麦克斯韦方程组. 这个方程的伟大之处体现在三个方面, 首先, 它对电磁理论做出了正确地描述, 体现了科学的"真"; 其次, 利用它可以造福人类, 又有"善"的一面; 同时, 它被誉为"19 世纪最美的方程", 有人甚至称之为"像诗一样美的方程组", 可见它还是"美"的. 因此, 它是"真"、"善"、"美"的统一. 有关它的"真"与"善", 在众多电磁理论书籍中都有详论, 本文拟从"美"的角度来解读麦克斯韦方程组.

1 简单美

物理学崇尚简单, 以简单为美. 物理学家相信自然规律是简单的, 如牛顿所言: "自然界不作无用之事, 只要少做一点就成了, 多做了却是无用; 因为自然界喜欢简单化, 而不爱用什么多余的原因以夸耀自己"[1]. 海森伯则认为: "我相信自然规律的简单性具有一种客观的特征……"[2]. 由此可见简单美不仅是物理学一个重要的审美准则, 它还是许多伟大物理学家对自然规律的一种信念, 甚至是一种信仰.

本文谈论的物理简单美主要包含两个层面的含义: 物理逻辑基础的简单性和物理规律数学形式的简单性.

逻辑基础的简单性是由爱因斯坦提出来的, 他指出, 所谓逻辑基础的简单性, "并不是指学生在精通这种体系时产生的困难最小, 而是指这体系所包含的彼此独立的假设或公理最少"[2]. 同时, 他又对"彼此独立的假设或公理"做了如下解释, "应当使逻辑中独立的元素(基本概念和公理), 即不下定义的概念和推导不出的命题, 要尽可能的少"[2], 这是关于逻辑基础简单性的最经典的定义.

麦克斯韦方程组在历史上的建立过程非常复杂, 但它的逻辑基础却很简单. 它是由麦克斯韦在 3 个基本电磁实验定律(库仑定律、毕奥-萨伐尔定律、法拉弟电磁感应定律)的基础上, 引出涡旋电场与位移电流的 2 个假设, 并将这些定律与假设加以整合与推广而得到. 由库仑定律与毕奥-萨伐尔定律可以导出静态场的麦克斯韦方程组. 而动态场的麦克斯韦方程组是在此基础上作了两个重大改进. 第一个改进是从法拉弟电磁感应定律出发, 可以得出处于变化磁场中的导体会产生感应电场, 麦克斯韦进一步将它推广, 认为只要有变化的磁场就会产生感应电场, 并将它称为涡旋电场, 涡旋电场的产生与是否存在导体无关, 只不过有导体存在时, 在涡旋电场的作用下会产生涡旋电流. 引入涡旋电场的概念后就可以得到动态场电场

① 收稿日期: 2008-01-02
基金项目: 江西省教育科学"十一五"规划课题资助项目(06YB225).
作者简介: 刘健平(1972-), 男, 江西宜春人, 副教授, 主要从事理论物理的教学与研究工作.

的旋度方程. 因此，从逻辑上来看，涡旋电场仅是法拉弟电磁感应定律的一个引申与推广，它并不是一个独立的逻辑基础. 第二个改进是由麦克斯韦一个人完成的，他为了协调当时的磁场旋度方程与电荷守恒定律间的矛盾，天才地提出了位移电流的假设，认为位移电流也是产生磁场的源，于是就得到了动态场磁场的旋度方程. 因此，位移电流假设相当于一个定律，是与三大实验定律并列的一个定律[3]. 综上所述，从麦克斯韦方程组建立过程来看，库仑定律、毕奥－萨伐尔定律、法拉弟电磁感应定律、位移电流假设构成了麦克斯韦方程组简单的逻辑基础.

但是，当爱因斯坦建立了狭义相对论以后，人们发现在库仑定律的基础上，根据狭义相对论可以导出麦克斯韦方程，位移电流与涡旋电场仅是它的一个推论. 不仅如此，用其它方法也可以导出麦克斯韦方程，如根据能量守恒原理与近距作用原理，或者是根据拉氏函数的规范不变性与变分原理都可以导出麦克斯韦方程组[4,5]. 因此，我们自然要问，麦克斯韦方程组的逻辑基础到底是什么?

或许这种提问本身是有问题的. 爱因斯坦认为，物理学存在一个统一的基础. 这个基础是“由最少数的概念和基本关系所组成，从它那里，可用逻辑方法推导出各个分科的一切概念和一切关系”[2]. 这个统一基础必须通过物理学革命即不断地更替物理学的公理基础才能逐步逼近. 为此，爱因斯坦提出了科学进化的多层次的观点. 当建立了高一层次的理论体系之后，低一层次的基本概念和基本关系，是作为逻辑上导出的概念和导出的关系而保留下来的，就已认识的整个物理学而言，它们已失去了“基本”的性质，只有高一层次的体系的基本关系才具有“基本”的性质. 这种过程将继续下去，一直到得到了这样一个体系：它具有可想象的最大的统一和最少的逻辑基础[6]. 因此，根据爱因斯坦的理论，我们可以这样以为，麦克斯韦方程组的逻辑基础随着物理学的发展会不断更替与发展，它最终必然会包含在整个物理学的高度简单的逻辑基础之中.

麦克斯韦方程组的数学形式也具有简单性，而且从麦克斯韦方程组的发展历史来看，它是逐渐变得简单的. 麦克斯韦最初给出的是20个方程与20个变量，如(1)-(8)式所示.

$$\begin{cases} p' = p + \dfrac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}t} \\ q' = q + \dfrac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}t} \\ r' = r + \dfrac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases} \mu\alpha = \dfrac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}y} - \dfrac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}z} \\ \mu\beta = \dfrac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}z} - \dfrac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}x} \\ \mu\gamma = \dfrac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}x} - \dfrac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}y} \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}y} - \dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}z} = 4\pi p' \\ \dfrac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}z} - \dfrac{\mathrm{d}\gamma}{\mathrm{d}x} = 4\pi q' \\ \dfrac{\mathrm{d}\beta}{\mathrm{d}x} - \dfrac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}y} = 4\pi r' \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} P = \mu(\gamma\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} - \beta\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}) - \dfrac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}t} - \dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}x} \\ Q = \mu(\alpha\dfrac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t} - \gamma\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}) - \dfrac{\mathrm{d}G}{\mathrm{d}t} - \dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}y} \\ R = \mu(\beta\dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} - \alpha\dfrac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}) - \dfrac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}t} - \dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} P = kf \\ Q = kg \\ R = kh \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases}P=-\rho p\\ Q=-\rho q\\ R=-\rho r\end{cases} \tag{6}$$

$$e+\frac{\mathrm{d}f}{\mathrm{d}x}+\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}y}+\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}z}=0 \tag{7}$$

$$\frac{\mathrm{d}e}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}+\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}y}+\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}z}=0 \tag{8}$$

这就是最初的麦克斯韦方程组，麦克斯韦指出："在这些电磁场方程中，我们共设了 20 个变量，即电磁动量 F,G,H；磁强度 α,β,γ；电动力 P,Q,R；真空传导电流 p,q,r；电位移 f,g,h；总电流 p',q',r'；自由电量 e；电势 Ψ. 在这 20 个量中，找到了 20 个方程，即 3 个磁力方程((2) 式)；3 个电流方程((3) 式)；3 个电动力方程((4) 式)；3 个电弹性方程((5) 式)；3 个电阻方程((6) 式)；3 个总电流方程((1) 式)；1 个自由电量方程((7) 式)；1 个连续方程((8) 式)."[4] 应该说，最初的这组麦克斯韦方程从数学形式上来讲并不简单，后来经O. 亥维塞与赫兹的归纳整理后，形成了现代常用的麦克斯韦方程组((9)-(12) 式，(13)-(15) 式是它的辅助方程，也叫物质方程)，其形式就简单得多.

$$\nabla\cdot\boldsymbol{D}=\rho \tag{9}$$

$$\nabla\cdot\boldsymbol{B}=0 \tag{10}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{E}=-\frac{\partial\boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{11}$$

$$\nabla\times\boldsymbol{H}=\boldsymbol{J}+\frac{\partial\boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{D}=\varepsilon\boldsymbol{E} \tag{13}$$

$$\boldsymbol{B}=\mu\boldsymbol{H} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{J}=\sigma\boldsymbol{E} \tag{15}$$

再后来，随着爱因斯坦狭义相对论的建立，在引出电磁场张量的基础上，爱因斯坦将麦克斯韦方程组改写成具有协变的简单形式((16)-(17)式).

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\nu}=\mu_0 J_\mu \tag{16}$$

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x_\lambda}+\frac{\partial F_{\nu\lambda}}{\partial x_\mu}+\frac{\partial F_{\lambda\mu}}{\partial x_\nu}=0 \tag{17}$$

从整个麦克斯韦方程组的发展过程可以看出，一个物理方程，当其数学形式越来越简单时，每个方程所表示的物理内涵却越来越丰富，其内容也越来越深刻[7]. 概括性亦越高，同时抽象程度也越深.

2　对称美

对称美源于人们对自然界对称性的欣赏与追求，它是一个古老而又常新的概念，就其发展形态来说，它大致经历了直观唯象阶段、理性抽象阶段和数学变换阶段[8].

麦克斯韦方程组的建立过程以及未来的发展趋势都与追求物理理论思维的对称性与物理方程形式的对称性密不可分，这一过程既是唯象的，又是抽象的，它们是交替进行的.

1820 年，奥斯特发现电流会产生磁场，按照对称性思维，磁场也会产生电流，这一思想的提出其实是唯象的，也就是说物理学家只是觉得它应该是这样的，至于为什么是这样还不清楚. 这一推论最终由法拉弟通过实验得以证实. 根据法拉弟电磁感应定律，所谓磁场会产生电流，实际上是变化的磁场才会使导体产生电流，大量实验表明，静态磁场并不会使导体产生电流. 麦克斯韦认为，变化的磁场之所以会使导体产生电流，是因为变化的磁场产生了涡旋电场，这已经上升到理性抽象阶段. 同时，麦克斯韦进一步运用对称性思维，他认为变化的电场也会产生磁场，这便是位移电流的提出. 所以，对称性思想对麦克斯韦方程组的建立起到了指引方向的作用.

麦克斯韦方程组的表达形式也比较对称，人们经常将它看成物理方程数学形式对称的典范，如 MV 劳厄称之为"美学上真正完美的对称形式"[9]. 但需要指出的是，真空中的麦克斯韦方程组才具有完全对称的数学形式，而介质中的麦克斯韦方程组并不完全对称，造成这种现象的原因是由于电场中存在自由电荷，

而磁场中不存在自由磁荷(即不存在磁单极子)，倘若存在自由磁荷，那么由自由磁荷的定向移动形成自由磁流，这样一来，麦克斯韦方程就应改写成如((15)—(18)式)形式，此时麦克斯韦方程就变得高度对称. 正是在这种对称性思想的指引下，许多物理学家坚信麦克斯韦方程的最终形式应该是这样的，虽然现在没有找到磁单极子，但并不表示它不存在，况且根据狄拉克的理论，磁单极子应该是存在的，所以，物理学家对磁单极子的寻找一直没有停止过. 当然也有人提出不同看法，他们认为物理世界所谓的对称性是相对的，而不对称是绝对的，世界上任何对称的东西都存在自发破缺现象，所以没有找到磁单极子也是正常的.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{15}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = \rho_m \tag{16}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = \boldsymbol{J}_m - \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \tag{17}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{18}$$

现代物理学对对称性的讨论更为关注其最后一种形态，即数学变换的不变性. 数学变换的不变性是在群论理论上发展过来的，用通俗的话来讲，是指一组方程经过一个变换法则后，得到一组新的方程，如果这组新的方程与原来方程形式保持不变，那么这组方程相对这一变换来讲就是对称的. 例如，牛顿定律经过伽利略变换保持不变，所以牛顿定律相对伽利略变换来讲是对称的. 当麦克斯韦建立了麦克斯韦方程组以后，人们发现，麦克斯韦方程组在伽利略变换中具有不对称性，这说明人们应该找到新的变换法则，以使得麦克斯韦方程组经过它变换后保持不变，而且新的变换法则应该包含伽利略变换，这个新的变换法则就是洛仑兹变换. 当物体运动速度远远小于光速时，洛仑兹变换又回到了伽利略变换，伽利略变换仅是洛仑兹变换的一个速度远小于光速的极限. 因此，麦克斯韦方程具有更高层次的对称性. 在电磁理论与相对论的发展历史中，爱因斯坦是采用与上面相反的逻辑，他首先根据狭义相对论的两个基本假设，导出洛仑兹变换，然后由此导出麦克斯韦方程，即他摒弃了 18－19 世纪占主导地位的动力学方法，向不变性理论转化，将对称性放到了首位. 杨振宁先生在谈到这一转变时指出：“爱因斯坦不是从实验上已证实了的麦克斯韦方程组出发，去追问这些方程组的对称性是什么，而是把局面颠倒过来，从对称性出发去发问方程组应当怎样. 把原先的地位颠倒过来的这一崭新的程序，我曾称之为‘对称性支配相互作用’”[10].

3 和谐美

人们对和谐美的追求可追溯到毕达哥拉斯时代，毕达哥拉斯学派认为“美在和谐”，即和谐的事物是美的，而和谐最本质的含义是要合乎比例. 毕达哥达斯的这种对美的本质的诠释对整个自然科学的发展都产生深远影响，特别是物理学的发展更是将其视为判断物理理论是否正确的重要标准. 当然，现在物理学的和谐美与毕达哥拉斯时代和谐美相比，已有重大发展，它要求物理理论具有自洽性、独立性、完备性、正确性几个基本特性.

麦克斯韦方程组的自洽性是指各个方程间彼此协调一致、不相矛盾. 麦克斯韦方程的自洽性体现在两方面，一是麦克斯韦方程组内部间的自洽性，即它自身的不相矛盾. 例如，由方程(11)式两边取散度得

$$\nabla \cdot (\nabla \times \boldsymbol{E}) = -\frac{\partial(\nabla \cdot \boldsymbol{B})}{\partial t} = 0 \tag{19}$$

从(19)式可推出 $\nabla \cdot \boldsymbol{B}$ 是一个与时间无关的常数，这与(10)式的 $\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$ 不相矛盾. 可以证明，麦克斯韦方程组中的任意两个方程都是不相矛盾的. 二是麦克斯韦方程组与物理学中一些重要的基本原理不相矛盾. 例如它与能量守恒、电荷守恒、变分原理等重要物理理论不相矛盾. 如将(12)式两边取散度，并根据(9)式就可得电荷守恒定律. 当然，麦克斯韦位移电流的引出本来就是为了使方程组与电荷守恒定律不相矛盾而创立的.

麦克斯韦方程组的独立性是指它的每个方程都是彼此独立的，其中任何一个方程都不可能由其余 3 个方程推导出来. 如在前面谈到由(19)式可推出 $\nabla \cdot \boldsymbol{B}$ 是一个与时间无关的常数，但这并不能推出 $\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0$，也就是说，(10)、(12)两式仅仅不相矛盾，但并不等价，而是彼此独立的.

麦克斯韦方程组的完备性是指只要给定源分布(电荷与电流的分布)以及初始条件与边界条件，在理论上，麦克斯韦方程组就可以唯一地确定此后任何时刻电磁场的各个物理量. 对于静态场与稳恒场来说，不

存在初始条件问题，散度和旋度方程都是基本方程；而对于时变场来说，两个旋度方程是基本方程，两个散度方程可看成初始条件[3]．当把(9)(10)两式看作初始条件时，两个旋度方程只包含 6 个标量方程，而待求的标量是 15 个($\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{D}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{H}$, $\boldsymbol{J}$)．若假定介质是线性、各向同性的，物质常数 ε,μ,γ 与时间无关，则辅助方程(13)、(14)、(15)包含 9 个标量方程，总共加起来刚好有 15 个方程，能够解出待求的所有标量．所以麦克斯韦方程组是完备的．

麦克斯韦方程组的正确性是得到了大量的实验证实，其中最重要的是赫兹实验．麦克斯韦方程组刚刚建立时，由于麦克斯韦提出的两个假设当时还没有事实根据，所以遭到了以汤姆逊为代表的众多物理学家的反对．根据麦克斯韦方程组位移电流能够产生磁场，变化的磁场能够产生电场，并由此可以预言电磁波的存在，这是判断麦克斯韦方程组是否正确的关键之处[11]．而赫兹实验证实了这一点，从此麦克斯韦方程为大家所接受．此后的一百多年来，各个领域的无数实验证明，麦克斯韦方程组是宏观电磁现象的普遍规律．尽管在高速运动的条件下要考虑电磁场的变换关系，在微观领域里要考虑量子化效应，但其作为电磁场的普遍规律的形式依然成立．

4　统一美

追求物理学的统一，用最简洁的理论描述物理世界，是物理学家梦寐以求的目标．正如用爱因斯坦所说“从那些看来与直接可见的真理十分不同的各种复杂现象中认识到它们的统一性，那是一种壮丽的感觉”[12]．物理学发展的历史，就是一个不断由小的统一走向大的统一的历史．而麦克斯韦方程组的建立对于物理学理论的统一起到了重要作用．

首先，麦克斯韦方程组完成了电、磁、光的统一．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

$$\nabla^2 \boldsymbol{E} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial t} = 0 \tag{20}$$

$$\nabla^2 \boldsymbol{B} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{B}}{\partial t} = 0 \tag{21}$$

将这两个方程与数理方程中的波动方程作类比可以发现，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．根据麦克斯韦方程组可以导出，电磁波在真空中的传播速度刚好等于光在真空中的传播速度，据此，麦克斯韦进一步预言光也是一种电磁波，并提出光的电磁理论．后来赫兹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一次大统一，即电、磁、光的大统一．当然，从整个物理学的发展长河来看，这仅仅完成了物理理论的一个局部统一．

其次，麦克斯韦方程组引领了物理学追求统一的热潮．这股热潮的发起者是爱因斯坦．前文叙及，麦克斯韦方程组完成了电、磁、光的统一，但这种统一实质上仅仅是找到了电与磁的转换关系，还只能说是表层的，它们之间还必然还存在着深层次的内在统一性．这种内在统一性由爱因斯的狭义相对论得已实现．爱因斯坦在狭义相对论中，首先将电荷与电流密度统一成四维电流密度矢量，又将描述电场的标势与描述磁场的矢势统一成四维势矢量，在此基础上将电场与磁场统一成一个四维二阶电磁场张量 $F_{\mu\gamma}$ ，$F_{\mu\gamma}$ 有 16 个分量，写成矩阵形式

$$F_{\mu\gamma} = \begin{bmatrix} 0 & B_3 & -B_2 & -\frac{i}{c}E_1 \\ -B_3 & 0 & B_1 & -\frac{i}{c}E_2 \\ B_2 & -B_1 & 0 & -\frac{i}{c}E_3 \\ \frac{i}{c}E_1 & \frac{i}{c}E_2 & \frac{i}{c}E_3 & 0 \end{bmatrix} \tag{22}$$

在(22)式的矩阵中，$\boldsymbol{B}$ 是 $F_{\mu\gamma}$ 的空间分量，而 $\boldsymbol{E}$ 是 $F_{\mu\gamma}$ 的时间与空间的混合分量，$F_{\mu\gamma}$ 为四维协变量．把作为一个整体的电磁场分成电场和磁场只具有相对的意义，它充分反映了电磁场的统一性．至此，爱因斯

坦完成了电场与磁场的真正统一，也就是完成了电场力与磁场力的统一．接下来，他想将当时已知的电磁力与万有引力进行统一，即建立统一场论．虽然他用了三十年的时间仍没有成功，但他的这一思想却深深地影响了后来的物理学家，在爱因斯坦这种统一思想的指引下，经过许多物理学家的长期努力，终于取得了重大突破，20 世纪 60 年代，A 萨拉姆、S 温伯格、S L 格拉肖在“杨～米尔斯”规范场论的基础上完成了电磁相互作用与弱相互作用的统一(现在称之为电弱统一理论)．这个理论取得了巨大成功，使统一场论的研究再次活跃起来．70 年代初，强相互作用的理论研究也取得了重大进展，出现了量子色动力学，为大统一理论的研究提供了较坚实的基础．大统一理论的最终目标是要建立一个把电弱相互作用、引力相互作用、强相互作用都统一起来的新理论，虽然还未获得最后成功，但是人们寻找 4 种相互作用统一的研究仍在继续中，我们期待这一梦想的实现.

5　结束语

简单、对称、和谐、统一是物理学最重要的审美准则，麦克斯韦方程组是符合这些审美准则的典范．毫无疑问，麦克斯韦方程组是美的，当然，它的美是抽象的，我们只有懂得它所蕴含的物理意义，才能欣赏它的美．或者，也可以反过来说，如果我们能够欣赏麦克斯韦方程中的美，也就懂得了它所蕴含的物理意义.

参考文献：

[1]　塞耶 S H. 自然哲学著作选 [M]．上海：上海人民出版社，1974：3.

[2]　爱因斯坦 A. 爱因斯坦文集(第 1 卷) [M]．许良英，李宝恒，赵中立，等译. 北京：商务印书馆，1976：216，299，6，385.

[3]　俎栋林．电动力学 [M]．北京：清华大学出版社，2006：113，115.

[4]　陈秉乾，舒幼生，胡望雨. 电磁学专题研究 [M]．北京：高等教育出版社，2001：160－171，147.

[5]　刘成有．建立麦克斯韦方程组的其他途径 [J]．山西师范大学学报(自然科学版)，1999，13(3)：54－57.

[6]　黄政新．爱因斯坦对物理学统一基础和美的追求 [J]．南京大学学报，1997(1)：108－114.

[7]　邓纯江．论数学形式美的特征 [J]．四川师范大学学报(自然科学版)，1998，21(1)：97－98.

[8]　许　良. 对称、守恒与最小作用：历史分析及哲学思考 [J]．自然辩证法研究，1994，10(3)：48－51.

[9]　劳厄 M V. 物理学史 [M]．北京：商务印书馆，1978：52.

[10] 杨振宁．场与对称性．物理学史研究(二) [M]．上海：复旦大学出版社，1986：6－7.

[11] 罗琬华. 论“场”和“源”的统一——再论麦克斯韦方程组的意义 [J]．西南师范大学学报(自然科学版)，2001，26(1)：101－105.

[12] 爱因斯坦 A. 爱因斯坦文集(第 3 卷) [M]．许良英，赵中立，张宣三，译. 北京：商务印书馆，1979：347－348.

Discuss of Beauties of Maxwell Equations

LIU Jian-ping

College of Physics Science and Engineering Technology, Yichun University, Yichun Jiangxi 336000, China

Abstract: The simple, symmetrical, harmonious and unified beauties implicated in Maxwell equations are analyzed mainly in this paper, moreover the deeper apprehension of Maxwell equations are gotten from aesthetic aspect.

Key words: Maxwell equations; simple beauty; symmetrical beauty; harmonious beauty; unified beauty

责任编辑　潘春燕