

略谈麦克斯韦的电磁场理论

宋德生

(中国科学院自然科学史研究所)

1831年,麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879年)诞生于苏格兰一个农庄家庭,他的父亲是爱丁堡皇家学会的会员。麦克斯韦年幼时求知欲强,受过严格的家庭教育,有良好的思维习惯。他16岁入爱丁堡大学,19岁考入剑桥大学的三一学院。他在大学期间特别喜欢阅读法拉第的《电学实验研究》,深深地被法拉第的电磁场论的思想所吸引。1854年他在剑桥大学数学竞赛中第一个证明了斯托克斯公式,名列第二,与E. J. Routh分享史密斯奖^[1]。这个公式在他以后研究电磁场的过程中发挥了重要的作用。他在1855—1856年间发表的第一篇电磁学论——“论法拉第力线”(On Faraday's Lines of Force)^[2],标志着他对电磁学研究的开端。

一、电磁学史的简略回顾

奥斯特在1820年发现电流的磁效应,揭开了电磁学史的序幕。奥斯特的发现轰动了欧洲,具有理性传统的法国物理学家们随即用数学方法去解释、总结和继续发掘这个现象。安培在牛顿力学基础上把电磁力简化为电流元之间的吸引力或排斥力,提出分子电流的假说,创立了电动力学^[3]。安培把电流的横向磁力简化为电流元之间的电动力,把电磁学纳入牛顿力学的框架,这是拉普拉斯将一切自然力简化为粒子间的吸引力或排斥力的简约纲领的体现,曾影响了一代法国人的电磁学研究。英国伟大的实验物理学家法拉第在1821年发现了电磁旋转现象,这个现象使他开始怀疑安培的电动力的观点。他认为电流与磁体之间的横向指向

力是不能再简约的基本力,主张电与磁应当在空间或介质中的效应上得到统一,而不应当象安培那样追求电和磁在实体上的统一。他从根本上否定了安培的分子电流的假说。1822年阿拉哥(D. F. Arago),在格林威治山上测量地磁场强度时偶然发现金属可以阻尼磁针的振荡;他在1824年根据这种现象做了著名的阿拉哥圆盘实验:水平安装的铜盘旋转时能够带动悬吊在它上方的磁针旋转。这个实验引起了法拉第极大的兴趣。法拉第在1831年重复阿拉哥实验过程中认识到,在电流或磁体周围的空间存在一种张力态,这种张力态的建立或消失会使金属感应出一种电流——感生电流。法拉第把这种空间或介质中的张力态称为“电致紧张态”。他在这个基础上又提出了磁力线的概念,建立了电磁感应定律^[4],从而用电磁感应定律正确地解释了阿拉哥效应。1837年法拉第又建立了以介质中粒子的相邻作用为基础的静电感应理论^[5],向电学中的超距作用提出了挑战。法拉第在1845年的“磁光旋转”现象的研究和在1845—1846年间进行的抗磁体研究,结果产生了电磁场论的思想^[6](1851)。法拉第的电学实验研究扭转了欧洲大陆(特别是法国和德国)电学家的传统认识,使他们的注意力从电或磁的实体转向于介质或空间。特别重要的是,法拉第的电磁场论的思想为麦克斯韦准备了肥沃的思想园地。

在19世纪中期,随着法国理论物理学的衰落和德国理论物理学的兴起,安培的电动力学被德国人发展成为德国的电动力学体系。1845年诺埃曼(F. E. Neumann)从安培的电动力学公式出发成功地推导出电磁感应定律;他提

出了电流的一种位置函数——矢量势 \mathbf{A} ，并用矢量势对时间的微商的环路积分表示感生电动势，从而开辟了一条解释电磁感应现象的新途径。1846年，德国电动力学的另一位创始人韦伯在安培定律的基础上提出了所谓韦伯电作用定律¹⁾，将库仑的静电力、安培的电动力和法拉第的电磁感应力统一在同一个公式中^[7]。1847年亥姆霍兹 (H. Von Helmholtz) 创立了能量守恒与转化定律，在电磁学领域深刻地阐述了能量原理。

所有这些都为麦克斯韦的电磁学研究准备了良好的条件，为电磁场的数学理论提供了充分的实践例证和坚固的理论基础。一般认为，麦克斯韦的电磁场经典理论主要是通过他的三篇论文提出的，这三篇论文是：(I) “论法拉第力线” (1855—1856年)；(II) “论物理力线” (1861—1862年)；(III) “电磁场的一个动力学理论” (1865年)。

二、麦克斯韦论法拉第力线

1842年 W·汤姆孙 (W. Thomson) 建立了热、电、磁三种运动的共同的数学关系^[8]；1847年他又在不可压缩的流体的流线连续性基础上，论述了电磁现象和流体力学现象的共同性^[9]。汤姆孙这种富有成效的类比方法，被麦克斯韦发展成为研究法拉第力线的重要工具。麦克斯韦在论文 (I) 中说：“为了不通过一种物理理论而获得物理思想，我们应当熟悉现存的物理相似性。所谓物理相似性，我认为是在一种科学定律和另一些能够互相阐明的定律之间存在着局部相似。这样，所有的数学的科学就建立在物理定律和数的定律的关系的基础上，以致精密科学的目的就是要把自然问题化为通过数运算的量的决定。”^[10]

考虑一块各向同性的无限大的均匀介质，在介质中镶着一块流体源（或是有质流体源或是无质流体的热源）。根据不可压缩流体的性质，介质中任意一点的流体压力为

$$P(r) = \frac{kQ}{4\pi r^2},$$

式中 Q 表示单位时间内通过包围流体源的任意封闭曲面的总流量， r 表示由源到所求点的距离， k 是与介质性质有关的系数。

麦克斯韦通过类比，把这个力学公式搬进了静电场，用式中的 Q 表示总的电通量， $P(r)$ 表示电势 $V(r)$ 。根据电场强度的定义，有

$$\mathbf{E} = -\nabla V(r) = -\nabla P(r) = \frac{kQ}{4\pi r^3} \mathbf{r}.$$

如果令 $D = Q/4\pi r^2$ (D 在这里表示通过球面上单位面积的电通量)，就得到一个一般性公式：

$$\mathbf{E} = kD.$$

这是一个线性方程，它将电场中的力(电场强度 E) 和通量 D 通过系数 k (常数或张量) 联系在一起。麦克斯韦认为不仅电场有这种性质，磁场和恒稳电流场也有这种性质。他通过方程

$$\mathbf{E} = kD, \quad \mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B}, \quad \text{和} \quad \mathbf{E} = \rho \mathbf{j}$$

的比较，总结出矢量场的一个共同规律：同一场中的“力”可以用它的“通量”的线性关系表示出来。上述方程组中的电场强度 E 和磁场强度 H 是矢量场中的力，磁感应强度 B ，电流密度 j 以及 D (当时还没有命名为电位移) 则表示相应场中的通量。

麦克斯韦的高级物理类比和对矢量场的量分类的方法，体现了他的老师哈密顿的一个哲学观点，即知识不是事物的本身而是事物之间的关系^[11]。麦克斯韦后来把这种思想发挥得淋漓尽致，他说：“在电学中势对于电，在流体力学中压力对于流体和在热力学中温度对于热，有着共同的关系。电、流体和热全都趋向于由一个地方流到另一个地方，只有势、压力或温度在第一个地方高于第二个地方，这种情况就能发生”^[11]。

哈密顿的知识观显然是很片面的，因为他

1) 韦伯的电作用定律是

$$F = \frac{e_1 e_2}{r^2} \left[1 - \frac{1}{2c^2} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{r}{c^2} \frac{d^2 r}{dt^2} \right],$$

式中 e_1, e_2 表示电量， c 表示光速。

只强调事物的共性而忽视事物的个性。麦克斯韦正是由于受到这种哲学的影响,使他在1855—1856年把全部精力放在各种矢量场的共同性上,而忽视了电磁场的特殊性,因而他在论文(I)中还不可能提出电位移电流的概念,更无法从理论上预见电磁波的光学性质。

诺埃曼虽然在1845年提出了矢量势的概念,但由于他的理论是建筑在超距作用基础上的势理论,他不可能将他的矢量势 \mathbf{A} 和法拉第的“电致紧张态”联系在一起。麦克斯韦一眼就看出诺埃曼的矢量势就是“电致紧张态”,如果说有所区别的话,那就是诺埃曼的矢量势还缺乏空间性、物质性和运动性。因此,麦克斯韦决定用电磁场的动量来表示法拉第的“电致紧张态”,并从它推导电磁场的一般规律。他在论文(I)中明确指出,“电致紧张态”是电磁场的一种运动性质,它具有确定的量,物理学家应当“把它当作一个物理真理接受下来,从它出发推导出能够用实验检验的定律”。麦克斯韦根据电磁场动量的性质概括了电磁场的六条基本定律,这六条定律可以用我们熟悉的矢量式表示出来:

$$1. \phi = \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} (\mathbf{A} \text{ 为电磁场动量});$$

$$2. \mathbf{B} = \mu \mathbf{H};$$

$$3. \oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} = \Sigma I;$$

$$4. \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E};$$

5. $W = \oint \mathbf{j} \cdot \mathbf{A} dS$ (W 表示载流线圈在电磁场中的势能);

$$6. \mathbf{E} = \frac{d\mathbf{A}}{dt}.$$

前面四条定律表示了电磁场中的力和通量之间的关系,其中定律2和4表示强度量和通量之间的线性关系,定律1和3说明矢量场中的通量可以用强度量的环路积分表示。这样,麦克斯韦又为物理学提供了一个崭新的概念,即矢量场中的力的环路积分不再是力,而是一个通量。

三、麦克斯韦论物理力线及电位移电流

麦克斯韦在论文(I)发表后不久就认识到他过去对各种力线的类比只不过是物理共性的数学(确切说是几何)的抽象,这种方法虽然可以用动力学迅速地推导出电磁场的一般规律,但它却掩盖了电磁场的特殊性质。他基于如下两个事实重新考虑了电磁场的动力学模型。一、根据伯努利的流体力学,流线越密的地方压力越小流速越快;而根据法拉第的思想,磁力线有纵向收缩和横向扩张的趋势,因而磁力线越密的地方场强越大^[12]。二、从电解质运动的情况来看,电的运动是平移运动;而从偏振光在透明晶体中旋转的现象来看,磁的运动好象是介质中分子的旋转运动。因此,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。这样两个问题便构成了论文(II)——“论物理力线”^[13]的出发点。

麦克斯韦在论文(II)中假设介质的一种新模型——分子涡旋。他认为在磁场作用下的介质中,有规则地排列着许多分子涡旋,分子涡旋的旋转速度与磁场强度成正比,介质的质量密度与磁导率成正比,涡旋丝与磁力线相切。令涡旋的圆周速度为 \mathbf{H} ,通过涡旋的流量为 \mathbf{j} ,涡旋的运动方程则为

$$\mathbf{j} = \frac{1}{4\pi} \nabla \times \mathbf{H}.$$

麦克斯韦再一次把力学的结论推广到电磁学。他指出,如果上式中的 \mathbf{H} 表示磁场强度, \mathbf{j} 表示通过闭合磁力线的电流密度的话,那么,这个公式就是电磁场的运动学方程。

接着,他又用同样的方法推导电磁场的动力学方程。根据涡旋理论,涡旋的动能密度为 $C\mu H^2$, μ 为涡旋介质的质量密度, H 为涡旋的圆周速度。如果 μ 表示磁导率, H 表示磁场强度的话,这个式子便表示磁介质的动能密度。麦克斯韦由此推导出电磁场的动能密度为 $\frac{1}{8\pi} \mu H^2$ 。他最后根据从能量推导动力学方程的

一般方式得到电磁场的动力学方程:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{d\mathbf{H}}{dt},$$

\mathbf{E} 在这里表示感生电场强度。

电磁场的动力学方程表明磁扰动可以产生电场;而电磁场的运动学方程表明磁场中有电荷的运动或电流,这是传统观念所不能接受的,但它却正好是麦克斯韦的动力学介质假说的必然结果。这就提出了什么是介质中的电的问题。随着这个问题的解答,麦克斯韦的电位移和电位移电流的概念产生了。

麦克斯韦假设在两个相邻的分子涡旋中间夹着一排微小的粒子,这些粒子的力学作用正如机械中的惰性轮一样,它们的转动使得与它们相邻的两边的分子涡旋以相同的方向旋转,这就保证了相邻的磁力线的方向相同。麦克斯韦称这些粒子为介质中的电。他说:“按照我们的假说,磁介质被一种粒子层形成的壁分隔为许多胞,那些粒子起着电的作用。当电粒子在任何一方受到推力时,它们将通过作用于胞的弹性物质的正切力使每一个胞畸变,由于胞的弹性而产生一种相等而相反的作用力。当这种力撤消后,胞就恢复它们的形状,电将返回原来的位置”^[4]。

简单地说,外力作用于“电”粒子使之滑移,滑移产生一种正切力作用于磁介质的胞(分子涡旋)并使之畸变,这种畸变的大小便称为“电位移”。这里所说的力可以是电力,也可以是磁扰动产生的感应电力。根据麦克斯韦理论,电位移与电场力成正比,因为在介质的弹性范围内,位移量应当正比于外力。麦克斯韦把电位移表示为

$$D = \frac{1}{4\pi c_1^2} E,$$

式中 D 表示电位移, E 表示电场强度, C_1 是介质的一个常数。麦克斯韦后来证明 C_1 等于电磁波在介质中的速度。

“电位移”一词寓意着电磁学的力学化的深刻含义,它表明了麦克斯韦处理电磁场时用的是动力学方法。今日教科书上仍然沿用这个名字

称,只不过是历史的遗迹罢了。实际上,麦克斯韦后来在1865年的论文(III)中修改了电位移的定义,他在研究平行板电容器时就形成了这样的思想:电位移是通过垂直于电场方向的平面上单位面积的束缚电荷。显然,电位移的实际意义是电通量。

有了电位移必然会产生电位移电流,但是“电位移还不是电流,因为它达到一个确定的值时,它就会保持不变。然而它却是电流的开始,它的变化构成电流”。按照麦克斯韦的这种说法,电位移电流应当是电位移对时间的微商,即等于 $\frac{dD}{dt}$ 。

电位移电流是电磁波在介质或真空中传播的重要环节。因为磁扰动在场中产生电流,电流又产生新的磁场,电磁作用就是在磁和电的交替产生过程中传向远方,从而布满整个电磁场空间。如果介质中不存在这样的电流,电磁波则是不可思议的东西。在超距作用论者看来,更不可思议的东西是电位移电流。麦克斯韦在当时能够力排欧洲大陆电动力学学派的传统思想提出电位移电流设想,是非常大胆的。他本人不曾亲自获得电位移电流的直接证明,直至去世之前,他也没有看到别的物理学家能够用实验证明他的假说。要证明电位移电流的存在大致有两种方法:(1)显示介质中电位移电流的磁效应;(2)显示电磁波在空间随时间的传播。

1870年德国物理学家亥姆霍兹开始了统一麦克斯韦、韦伯和诺埃曼三个人的理论的工作。不久他就发现韦伯的电作用定律不符合能量原理,而韦伯坚持说他的理论在微观条件下是符合能量原理的。亥姆霍兹-韦伯之争严重地损害了韦伯的威信,客观上起到将麦克斯韦的电磁场理论引进欧洲大陆的作用。既然抛弃了韦伯的理论,剩下的问题就是统一麦克斯韦的场论和诺埃曼的势理论。亥姆霍兹发现,这两个理论只能在闭路振荡情况下统一,而在开路振荡情况下是不统一的。开路振荡问题自然与电位移电流有关,如果说麦克斯韦的电磁场

理论是正确的话,最重要的工作是要显示电位移电流的存在。1876年,美国霍普金斯大学第一任物理学教授罗兰德(H. Rowland)在柏林物理研究所显示了运动电荷的磁效应^[14]。这个实验引起了亥姆霍兹的联想:既然运动电荷能够产生磁效应,那么极化电流也应当可以产生磁效应。于是,亥姆霍兹在1879年(即麦克斯韦去世的一年)以“用实验建立电磁力和绝缘体介质极化的关系”为题颁布柏林科学院奖,以期解决电位移电流这个难题^[16]。1887年亥姆霍兹的学生赫兹用他自己设计的“感应平衡器”显示了介质中极化电流的磁效应,获得了柏林科学院奖。1888年他又通过对电磁波的驻波波长的测量,证明了电磁波的速度等于光速。这些都是对麦克斯韦电位移电流的直接证明。

四、电磁场方程组和电磁波的光学性质

1860—1865年麦克斯韦担任皇家学院教授的职务,时值法拉第从皇家研究所退休,住在维多利亚女皇赐给他的汉普顿宫内。麦克斯韦这时有机会拜访他崇拜已久的老师,因而法拉第的电磁场论的思想对他的影响也就愈加深刻起来。麦克斯韦在这种情况下完成了论文(III)——“电磁场的一个动力学理论”^[17]。这篇论文的目的,是要进一步使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。麦克斯韦在论文的引论部分说:“……我提出的理论可以称为电磁场理论,因为这种理论必须处理电或磁体周围空间的问题;它也可以称为动力学理论,因为它假设在那个空间存在着运动的物质,我们所观察的电磁现象就是在这种物质中产生的”^[18]。

麦克斯韦的场论揭示了电磁场的物质性和运动性,反映了麦克斯韦的唯物主义的电学观。他把电磁学理论称为动力学理论,准确地表明了他的理论是建立在动力学基础上的。

麦克斯韦为了把电磁场理论由介质推广到空间,他假设在空间存在一种动力学以太,它有一定的密度,它具有能量和动量;它的动能

$(\frac{1}{8\pi} \mu H^2)$ 体现磁的性质,它的势能 $(\frac{1}{2} E \cdot D)$ 体现电的性质;它的动量 A 是电磁场的最基本的量,它表示电磁场的运动的性质和传力的特征。麦克斯韦在这个基础上提出了电磁场八个基本方程¹⁾:

(A) 全电流方程: $\mathbf{j}' = \mathbf{j} + d\mathbf{D}/dt$;

(B) 磁力方程: $\mu\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$;

(C) 电磁场运动学方程:

$$\Delta \times \mathbf{H} = 4\pi \left(\mathbf{j} + \frac{d\mathbf{D}}{dt} \right)$$

(D) 电动力方程: $\mathbf{E} = \mu\mathbf{v} \times \mathbf{H} - d\mathbf{A}/dt - \nabla\phi$, 式中 \mathbf{v} 为导体在电磁场中运动的速度, ϕ 为电势;

(E) 电位移方程: $\mathbf{E} = -\nabla\phi$;

(F) 电阻方程: $\mathbf{E} = \rho\mathbf{j}$, 式中 ρ 为电阻率;

(G) 自由电荷方程: $\epsilon + \nabla \cdot \mathbf{D} = 0$, ϵ 为自由电荷密度;

(H) 连续性方程: $de/dt + \nabla \cdot \mathbf{j} = 0$ 。

值得注意的是,在这八个方程中没有电磁场的动力学方程 $\nabla \times \mathbf{E} = -\mu(d\mathbf{H}/dt)$, 不过我们可以从方程(D)中推导出来。方程组中的(C)和(E)及电磁场的动力学方程自动地保证了电磁波的横波性质,同时又保证了 $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ 。

麦克斯韦在论文(II)中已经假设电磁波是弹性介质的横波,并根据介质横波速度公式经验地推导出电磁波的速度为

$$v = c_1/\sqrt{\mu},$$

式中 μ 为磁导率, c_1 为介质的一个常数。在真空中 $\mu = 1$, 所以真空中的电磁波速等于 c_1 。 c_1 是怎样一个数值呢? 麦克斯韦从电磁场的势能推导出电荷作用力公式:

$$F = -c_1^2 \epsilon_1 \epsilon_2 / r^2.$$

显然,公式使用的是电磁学单位, c_1 就是柯尔劳施(R. Kohlrausch)和韦伯在1856年测得的电量的电磁学单位对静电学单位的比值,这个比值等于 $c_1 = 310,740,000$ 米/秒。单位的比值跟布喇德雷(J. Bradley)用光行差的方法

1) 麦克斯韦在论文(III)中实际列了二十个分量方程,如果采用矢量方程,则仅有八个。

测得的光速，菲索 (A. Fizeau) 用齿轮法测得的光速和傅科 (L. Foucault) 用旋转镜面法测得的光速非常接近，“这就表明光速和单位的比值是大小相同的量”。麦克斯韦由此得出结论：电磁波在真空中的速度等于光速。

在论文 (III) 中，麦克斯韦从他的方程组中直接推导出磁的波动方程：

$$k \nabla^2 \mathbf{B} = 4\pi\mu (d^2 \mathbf{B} / dt^2),$$

式中 \mathbf{B} 表示磁感应强度， $k = 4\pi c^2$ 。从方程可以看出磁扰动的传播速度为

$$v = \sqrt{k/4\pi\mu} = \frac{c_1}{\mu}.$$

这个结论与论文 (II) 得到的结论完全一致。不过应当指出，论文 (II) 的结果多少是经验性的结果，而论文 (III) 的结论则完全是麦克斯韦的电磁场动力学方程组的必然结果。

麦克斯韦通过对电容器的研究确定了真空常数 k_0 和介质常数 k 之间的关系：

$$\varepsilon = k_0/k,$$

ε 是介质的介电常数， $k_0 = 4\pi c^2$ 。将这个关系式代入上述速度公式，得

$$v = \sqrt{k_0/4\pi\varepsilon\mu} = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}.$$

这样就得到了电磁波速度的一般表达式。

根据光学理论，光在介质中的速度等于光在真空中的速度除以介质的折射率。如果电磁波在介质中的速度等于同一介质中的光速的话，则应有 $i^2 = \varepsilon\mu$ ， i 在这里代表介质的折射率。然而，我们立即会发现这个关系式不成立，因为介质的折射率与波长有关，而按照经典电磁学理论，介电常数和磁导率都是恒量。这就给光波的电磁学理论带来了严重的困难。麦克斯韦发现即使在长波范围，这种关系也只是对部分物质(如石蜡)才成立，而对于其它许多物质是不成立的。光的电磁学理论与观察的分歧，连同麦克斯韦关于金属的光吸收与电导率的比值的预言和观察的矛盾，可以说导致了固体物理学的诞生^[1]。尽管这些问题的彻底解决有待于量子理论，但是麦克斯韦已经预言关于物质结构的科学不可避免要产生出来。他说：

物理

“这些数字之差比用观察误差能够解释的差还要大，这表明在我们能够从它们的电学性质推导出它们的光学性质之前，我们的物体结构的理论应有一个较大的改进”^[19]。

由于长期含辛茹苦地工作，麦克斯韦被弄得疲惫不堪；也由于他想有一个专门的时间从事写作，他于 1866 年辞去了皇家学院的教授职务，回到自己的庄园。

他痛感以前许多优秀的电磁学论文都是刊登在各种卷帙浩繁的学报上，逐年累月，渐渐被人遗忘；而且这些论文太深，学生们不敢问津。于是，他决定用一种统一的方法，按照一种统一的思想来总结近百年的电学成就和他本人十多年来取得的成果。这种统一的方法就是动力学的思想，这种统一的思想就是法拉第的电磁场论的思想。他以奔放的热情在 1866—1870 年间完成了一部极为优秀的电磁学教科书——《电学和磁学专论 (A Treatise on Electricity and Magnetism) (1873)》。他在第一版序言中说道：“如果我能够同我所写的东西帮助学生理解法拉第的思想和表达方法的话，我将认为它达到了我的一个主要目的——把我读法拉第《研究》所感受的同样喜悦传授给他们”^[20]。

麦克斯韦的这个目的达到了，他的影响不仅限于英国，从 1870 年起，欧洲大陆的电学家们逐渐接受了他的理论。赫兹从传统的电动力学理论中解放出来倒向法拉第-麦克斯韦的电磁场理论一边，这就是最好的例子。赫兹在 1884 年将麦克斯韦的方程组简化为现在教科书上的四个方程。一年以后，英国的亥维赛 (O. Heaviside) 也推导出与赫兹的四个方程类似的方程组。因此，现在学生们所学的麦克斯韦方程组是经过赫兹和亥维赛简化的方程组。虽然简化的方程组比麦克斯韦原来的方程组来得简洁，对称性强，可以使学生们把握电磁场的主要特点，但是它们也掩盖了电磁场的许多性质。这个问题不拟在这里讨论。

本文承李国栋先生、赵凯华先生指正，谨表深切的谢意。

(下转第 351 页)