

# 伦琴对电磁理论的重要贡献\*

Peter Dawson 著

(*Department of Radiology, Hammersmith Hospital/ RPMS, Du Cane Road, London W120NN, UK*)

游胤涛 马世红<sup>†</sup> 编译

(复旦大学物理学系 上海 200433)

**摘要** 提到伦琴,人们往往想到的是他对 X 射线的发现,而对他在电磁理论方面的重要贡献则较少提及.文章详细叙述了伦琴为论证“位移电流”存在而做的实验,此实验曾被誉为是 19 世纪最重要的物理实验之一,在当时广受赞誉,但今天却被人们渐渐遗忘了.希望该文能够使人们对伦琴为构建 19 世纪物理学宏伟大厦而取得成就的重要性有更深入的认识.

**关键词** 伦琴,位移电流,麦克斯韦,电磁理论

## Röntgen's great contribution to electromagnetic theory

Peter Dawson

(*Department of Radiology, Hammersmith Hospital/ RPMS, Du Cane Road, London W120NN, UK*)

**Abstract** Röntgen's fame today rests solely on his discovery of X-rays and takes no account of his great contribution to electromagnetic theory. The experiment proving the existence of the “displacement current” done by Röntgen is described in his paper, which was recognized as the most important experiment of the 19th century. It was so famous at that time, yet today has been all but completely forgotten. Our aim is to give you a comprehensive understanding of Röntgen himself and the significance of his achievement for the construction of the edifice of 19th century physics.

**Keywords** Röntgen, displacement current, Maxwell, electromagnetic theory

## 1 引言

作为第一位诺贝尔物理学奖得主, X 射线的发现毋庸置疑地使伦琴成为那个时代实验物理学家的先驱. 1995 年,全世界为 X 射线发现 100 周年进行了庆祝活动,并肯定了它在随后的时间里为世界带来的贡献. 伦琴作为 X 射线的发现者也在诸多文献和报道中被提及. 为何许多人用类似的仪器,在无意中产生了 X 射线却唯独只有伦琴发现了它呢? 难道真是伦琴的幸运大于其才智吗? 这个问题引来了众多的分析. 当伦琴以他的学术成就被毫无疑问地誉为有能力的物理学家时,一些人却依然认为他

的成功靠的是运气而已. 然而,这种观点被伦琴的另一个工作有力地否定掉了. 在 1885—1888 年间,伦琴用不同的方法重复做的一个实验出色地证明了虽然微弱但却至关重要的一个物理现象——位移电流. 在这个现象发现之前,它已被麦克斯韦以其非凡的数学直觉所得到的麦克斯韦方程组而包含. 这个实验被洛伦兹誉为是伦琴最伟大的成就,而伦琴本

\* 原载于 Dawson P. Röntgen's other experiment. The British Journal of Radiology, 1997, 70: 809—816. 译文的题目及中英文摘要均为编者重新拟定的,而原文中的附录内容,则省略未译.——编者注

2006-11-12 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: shma@fudan.edu.cn

人对此也比较认同<sup>[1]</sup>. 它无疑是 19 世纪最重要的物理实验之一.

为了能更好地理解伦琴这一成就的重要性, 以及欣赏他的实验天赋和技术, 很有必要追溯到 19 世纪 60 年代麦克斯韦建立他的电磁理论的时候<sup>[2]</sup>.

## 2 麦克斯韦的电磁场方程组

麦克斯韦以数学形式描述了电磁场<sup>[2]</sup>, 他根据的是那个时代在电磁学领域的实验经验. 当然, 这些经验多数来自法拉第及其所代表的皇家研究中心的实验科学家们的贡献.

麦克斯韦的电磁场方程组之一是:

$$c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{J}}{\varepsilon_0}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{B}$  是磁场,  $\mathbf{J}$  为电流密度矢量,  $\varepsilon_0$  是真空介电常数,  $c$  是光速, 这里所描述的方程是以现代形式来表述的. 当然, 在麦克斯韦所用的原始表述形式中, 光速  $c$  并不出现在方程中. 简短地说, 方程描述了磁场和电场的关系. 它的解含有磁场的大小和方向.

麦克斯韦意识到这个方程中有些错误<sup>[2]</sup>. 当然, 首先根据奥斯特的结论——电流总是相应地产生一个磁场, 这个方程所描述的是相当符合物理上的观察结论的. 然而, 当麦克斯韦在这个方程中作了某一数学上的操作, 即对方程两端求散度, 得:

$$c^2 \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = \frac{1}{\varepsilon_0} \nabla \cdot \mathbf{J},$$

方程的左边等于 0, 则说明右边的  $\nabla \cdot \mathbf{J}$  必须也为 0. 这里散度不只是一个简单而抽象的数学操作, 而是有它清楚的物理含义, 指的是从一块区域内流出的纯净流量. 为了简化, 麦克斯韦巧妙的操作使得  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ , 进而暗指电流的不存在, 这个结论显然是错误的. 那么, 如何修正方程才可以“消除”上述的荒谬结论呢?

麦克斯韦也认识到在他的方程组中存在一个基本的对称性, 即人们可以用变化的磁场强度(电磁感应)来表示电场强度  $E$ , 即

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}. \quad (2)$$

(式中负号源于楞次定律), 但是, 没有描述变化的电场强度可以产生磁场强度的对应方程. 人们可以希望用以下的方程来表述:

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (3)$$

这样一个方程的缺少仅仅意味着物理观测上的不对

称. 事实上没有人观测到利用公认的(3)式所描述的物理现象.

麦克斯韦试图一次性地解决他的两个问题. 他总结后发现(1)式并不是完全“错误的”, 而只是不完整罢了. 通过引用(3)式的思想, 他大胆地给出了正确的方程形式:

$$c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\mathbf{J}}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

式中的附加项, 即变化电场的的时间导数项, 被他定义为“位移电流”. 这个术语所指的是在绝缘体(电介质)中, 电场导致的极化强度可以看作类似于导体中引起的相应电流. 现在, 我们再来演示一下麦克斯韦的最初的矢量(散度)操作:

$$c^2 \nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) = \frac{1}{\varepsilon_0} \nabla \cdot \mathbf{J} + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{E}).$$

由于麦克斯韦方程组中的另一个方程是:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

式中  $\rho$  是单位体积的电荷, 它遵循:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}.$$

这个形式表明, 流出一个区域的净电流不为 0, 而是等于区域内电荷的减少速率, 这完全是一个逻辑上的结论. 事实上这就是电荷守恒定律. 因此, 这个方程组现在不仅具有令人愉快的对称性及令人满意的内部自洽性和逻辑性, 而且它们也整合了电磁场中的电流和磁场. 然而, 所有这些都是基于一个从来都没有被观测到的物理现象的存在.

不仅如此, 麦克斯韦继续证明<sup>[2]</sup>, 经过对这些方程适当的修正, 他的 4 个方程能够被整合起来而构成一对描述电磁波传播的方程组, 其中电磁波的传播速度  $c$  是可测量的真空介电常数  $\varepsilon_0$  和磁导率  $\mu_0$  的函数:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2},$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2},$$

上式中假设波的速度为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}.$$

利用实验测量值取代  $\varepsilon_0$  和  $\mu_0$  值, 他计算出了假定的波的传播速度, 且发现它与光速十分接近. 他继续假定这种以光的速度传播的电磁波的存在, 并假定光本身就是一种电磁波. 这一电磁波理论<sup>[2]</sup>是 19 世纪物理学的最高成就, 导致了射频电磁波的产生及

其在后一世纪的无线电通信革命的实现。

### 3 实验的验证

麦克斯韦根据从原方程组中看到的不对称和明显的数学上的不完整性中得到了他的新方程组。然而在将近二十年的时间里,世界上一直没有实验证实麦克斯韦的关于电磁场假设。从某种意义上说,修正后的方程组在对称性、各个方程的协调性和预见性方面都显得太过于完美,以至于令人怀疑它的真实性。正如海森伯对爱因斯坦所说<sup>[3]</sup>：“如果自然界让我们得到的数学形式相当简单而优美……以至于没有人以前遇到过,我们禁不住想知道它们是否真的揭示了自然界的真实面,想知道它们所揭示的自然界的真正性质。”事实上,麦克斯韦在他方程中引入的对称性已经超出了他的所知。将近40年后,庞加莱和洛仑兹两人论证了这个方程组在洛仑兹变换下(一种数学上空间和时间的平权性)是协变的(对称的)<sup>[4]</sup>。在一个简明的数学变换下,这种对称性或者说不变性是非凡的。这种协变性事实上也预示着狭义相对论中的时间与空间的相关。然而,这需要爱因斯坦的天赋来最终把其中蕴含的东西挖掘出来。因此,无论是美学、数学还是哲学的讨论,一个论证“位移电流”存在的物理实验实在是必要的。

伦琴(Wilhelm Conrad Röntgen, 1845—1923)把他的精力投到这个问题上来是在1885年。在1885至1888年的3年期间,伦琴工作在Giessen大学,他做了一系列相当优秀的实验,以证实随时间变化的电场伴随着一个磁场,就好像随时间变化的磁场伴随着一个电场一样<sup>[5-7]</sup>。

伦琴在实验中所遇到的挑战难度来自于需要考虑在导电介质( $\sigma$ )中应用含时间的电场:

$$E = E_0 \sin \omega t \quad \omega = 2\pi f;$$

$$J = \sigma E_0 \sin \omega t, \quad \frac{\partial E}{\partial t} / \frac{J}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon \omega}{\sigma}.$$

在与真空(自由空间)不同的介质中, $\varepsilon_0$ 被一般的 $\varepsilon$ 所替代。将 $\sigma$ 值代入铜的数值,为了简单起见,可设 $\varepsilon = 1$ ,进而可以从(4)式获得“位移电流”与传导电流的相对数值的大小:

$$\frac{\partial E}{\partial t} / \frac{J}{\varepsilon} \sim \frac{\omega}{10^{19}}.$$

在电介质(绝缘体)中,导电性将会有明显的下降,其中 $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ,如设 $\varepsilon_r = 100$ ,以至于上述的比值将会大几个数量级,但实验所存在的挑战依然是存在

的。只有在很高的频率时,与导体电流相比,位移电流才不会小得难以被观察到。

### 4 伦琴的实验

就当时的科技水平而言,伦琴面临着巨大的挑战。他的实验装置是一个带电的电容器,其中间的夹层由一个装有各种材料和不同厚度的介质体转盘构成<sup>[5-7]</sup>。如图1(右)、图2和图3所示,它用来探测产生的磁场。现在,要观测到“位移电流”的简单方法就是通过电池使电容器带电。在充电的过程中,电流流入了其中一个平板而从另一个平板流出。“位移电流”就是那个流经两平板之间的东西,以便维持电流的连续性。如果两平板之间夹的是绝缘材料(电介质),那么流经它们的“电流”就可以被想象为一种“虚的电荷”流向电介质的另一端,其过程就是材料被极化了。在这种绝缘材料的内部,电场就不是 $E$ 而是 $D$ ,其中 $D = \varepsilon_0 E + P$ ,式中 $P$ 为介质材料的极化强度。于是 $E$ 在(4)式中被 $D$ 替代,附加项就

变为:  $\frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$ 。在充电过程的末尾,导线中几乎没有电流,而电场 $D$ 是稳定的并达到它的最大值,所以  $\frac{\partial D}{\partial t} = 0$ 。在充电过程期间,导线中有电流

(随时间变化)和“位移”电流:  $\frac{\partial D}{\partial t} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial t}$ 。

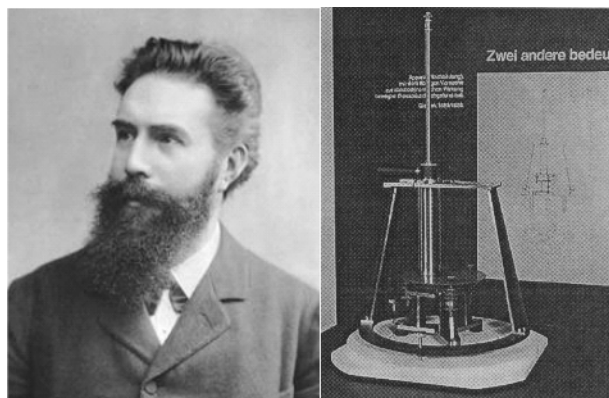


图1 伦琴(左图)发现“位移电流”的试验装置照片,现存德国伦琴博物馆

伦琴做了两种类型的实验。首先他转动一个充电电容器平板之间的介质(绝缘)盘,如图2所示,由此可观测到其产生了一个磁场,它被认为是在介质表面由于移动了虚拟电荷所致。有趣的是,英国人Rowland作过一个类似的实验,但他转动的却是电容器的平板<sup>[4]</sup>。他们两人的这些实验论证了移动的

电荷,不管是真实的还是虚的,与导线中的电流都是等价的,这在当时可决不是不言而喻的等价。在第二个实验中,伦琴把电容器平板沿它的直径两等分,并把相邻的两半分别加上相反的电势,如图3所示。这是一个看似简单然而却很高的做法,因为当介质盘被转动时,盘中任一点的极化强度矢量在穿过分隔线的时候,其极化强度矢量符号就被倒转过来,于是当导线中没有电流流过时,一个垂直方向的“位移电流” $\partial D/\partial t$ 就会在介质体中流过。伦琴探测到了伴随这个电流的微弱磁场,因此也就证明了“位移电流”的存在。

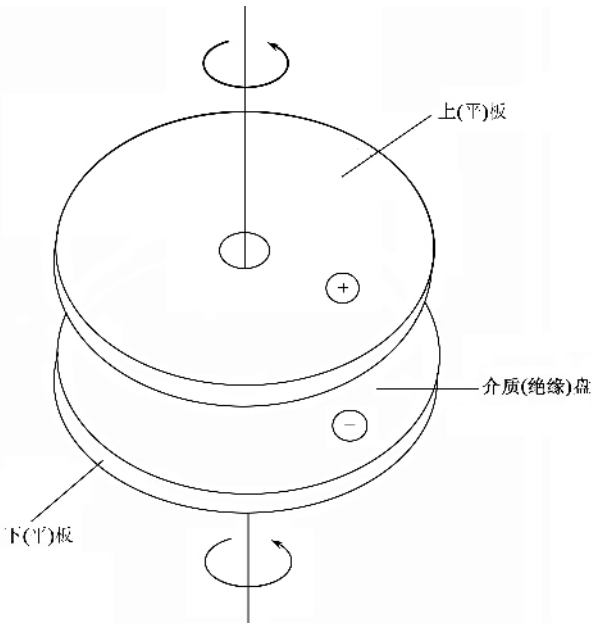


图2 沿其轴转动充电电容器平板之间的介质盘,由此可观测到其产生了一个磁场

为了消除大量干扰因素,伦琴煞费苦心地设计他的实验仪器,为此他付出了很多努力。在1890年柏林的普鲁士科学学术报告会上,伦琴的演说给人留下了深刻的印象<sup>[7]</sup>,他所描述的许多实验细节,毋庸置疑地证明了他是一个严谨、细心且高水准的实验物理学家。事实上,在三年多的时间里,连续地改变实验方案足以显示出他对进行这些实验有着十足的信心。

在实验中,他使用过直径和厚度范围分别为10—16cm以及0.2—0.5cm的玻璃和硬质橡胶平板。但是在最后的实验方案中,所用两块半圆的电容器平板的间隔却是0.8cm,上下平板盘的间隔则为0.74cm。一个由霍尔兹起电机充电的莱顿瓶被用于电容器平板充电,而一个验电器被自始至终地用来检测莱顿瓶中的剩余总电量或电位。

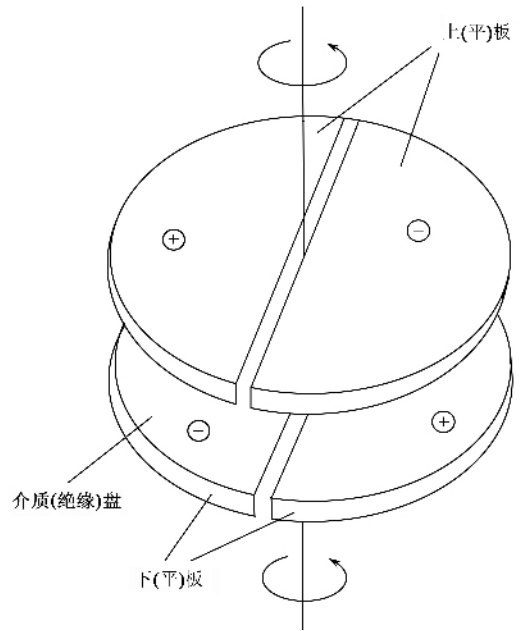


图3 沿电容器平板/盘的直径将它二等分,其间隔为几个毫米,并分别加上相反的电势

磁力计装置被安装在实验室角落里的一根50cm宽的砂石岩柱(墩)上。它是由一对大小分别为 $0.1 \times 4.56\text{cm}$ 和 $0.1 \times 4.74\text{cm}$ 的无定向指针构成,该指针被安置在一个与铝制的吊架固定在一起且相隔24.5cm的包金箔的玻璃毛细管上。整个装置被一根带有小镜子的细长铝线悬吊着。两根指针具有大小分别为 $22534\text{cm}^{1/2}\text{g}^{1/2}\text{s}^{-1}$ 和 $22913\text{cm}^{1/2}\text{g}^{1/2}\text{s}^{-1}$ 的磁力矩(cgs单位)。伦琴定义了这些力矩与长度的比率为1.0168和1.0193。从望远镜中可以观察到由平面镜反射且距离仪器229cm远的一把标尺的像。平板的最大转速为 $100\text{rev} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这是因为仪器在更高的转速下会产生振动。其转动是用安装在转轴上且用铅载重的木制 Savart 轮来驱动的。它被一个辅助的设备以规则的速率启动,用声学 and 频闪的方法来检测它的转速。

伦琴在他的论文中并未试图计算所探测的磁场强度,但是,从他的实验记录中,可以估计出所要寻找的实验效果真是太小了,即以 $100\text{rev} \cdot \text{s}^{-1}$ 转速转动的平板,在距平面镜229cm的标尺上所测到的位移变化不超过2—3mm。这说明角位移的量级为 $\frac{1}{2} \times 0.3/229\text{rad} (\approx 0.03^\circ)$ 。(  $\times \frac{1}{2}$  是因为反射光转过的角度是平面镜转角的两倍 )

## 5 伦琴实验的意义<sup>1)</sup>

如果天才就是那些拥有“无限的刻苦能力”的人,那么伦琴无疑就是一个天才.支持他在学术会议上做演讲的人,都是像亥姆霍兹这样的人物.与他的实验一样令人印象深刻的是,在他们那个时代,一个实验科学家对深奥的理论问题竟拥有如此清晰的理解,以致于能设计出如此精湛的实验.事实上,他的皇家科学院通讯院士的推荐者中就包括能斯特、冯·劳厄、普朗克、爱因斯坦等大牌物理学家,由此可以看出伦琴在物理学界中所占据的重要位置<sup>[11]</sup>.

如果说无线电学家没有认识到伦琴在解决这个问题时所取得的成就还情有可原,那么在物理学家当中,倘若还有人对他的这一伟大成就知之甚少,就太令人遗憾了.了解伦琴在这个领域所做的工作,将有助于人们更加清楚地认识到他是怎样一个富于创造且技术熟练的实验学家,也有助于人们更全面地评价他在物理学史上的地位.费曼曾说<sup>[8]</sup>：“纵观人类的历史……19世纪最重要的事件毫无疑问应该被认为是麦克斯韦电磁波理论的创立.与这一事件相比,同一时期发生的美国内战在人类历史上就显得无足轻重.”如果把伦琴对X射线的发现认为是将麦克斯韦电磁波理论在实验上拓展到高频段的电磁波谱,那么,他对麦克斯韦直觉的数学模型所潜在的物理现象的充满智慧的论证,也许就可以看作是对19世纪物理学最富有开创性的贡献.洛伦兹认为这个发现是如此的重要,以至于他建议将“位移电流”称作为“伦琴电流”以示纪念<sup>[1]</sup>.

今天,由于这个课题自身的困难和伦琴本人的谦虚等多种因素的综合(在伦琴70岁生日的颂词

中,索末菲说道<sup>[9]</sup>:仅仅少数人能够欣赏这个课题的本质),他的贡献仅被标注为人类历史长河中一个微不足道的脚步.然而他应该得到更多的赞誉,因为伦琴这一出色的实验,证明了麦克斯韦“位移电流”概念的合理性,为19世纪物理学大厦填上了最后一块砖.

译者致谢 感谢复旦大学物理学系王斌教授的有益讨论和帮助.

### 参 考 文 献

- [1] Rosenbusch G, Oudlerk M, Amman E. Radiology in Medical Diagnostics. Evolution of X-ray applications 1895—1995. Oxford: Blackwell Science, 1995. 15
- [2] Maxwell J C. Philosophical Trans. Royal. Soc., 1865, 155: 459
- [3] Davies P. Superforce. London: Penguin Books, 1995
- [4] Whittaker E T. A history of the Theories of Aether and Electricity. London: Longmans, Green and Co., 1910
- [5] Röntgen W C. Versuche über die elektromagnetische Wirkung der dielektrischen Polarisation. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Physik - Math KL 1885, 89—93
- [6] Röntgen W C. Ueber die durch Bewegung eines inhomogenen elektrischen Felde befindlichen Dielektrikums hervorgerufene elektrodynamische Kraft. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Physik - Math KL 1888, 7
- [7] Röntgen W C. Annalen der Physik u Chemie. Neue Folge 1890, 40, 93—108
- [8] Feynman R P. The Feynman Lectures on Physics. Vol. II. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co., 1997
- [9] Sommerfeld A. Zu Röntgens siebzigsten Geburtstag. Physik Zeitschrift, 1915, 16, 89

1) 此节标题是编译器加的,原文中无此标题