

电 磁 波

黄 宏 嘉 著

知 识 出 版 社

电 磁 波

黄 宏 嘉 著

知 识 出 版 社

电 磁 波

黄 宏 嘉 著

知 识 出 版 社 出 版

(北京安定门内外馆东街甲1号)

新华书店北京发行所发行

中国空间技术研究院印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 0.625 字数 14 千

1983 年 5 月第 1 版 1983 年 5 月第 1 次印刷

印数: 1—7,500

书号: 7214·21 定价: 0.13 元

出版说明

本书是《中国大百科全书·物理学》卷《电磁波》一条的释文。作者是研究微波理论的著名物理学家。本书深入浅出地论述了有关电磁波的历史背景、基本概念、经典电磁理论和现代物理学新观点的关系。

本书可供理工科大学低年级学生、基础课教师 and 自修大学电磁学的广大青年阅读。

知识出版社

目 录

一、历史背景.....	(1)
二、麦克斯韦的电磁理论.....	(4)
三、电磁波.....	(6)
四、赫兹的实验.....	(10)
五、电磁谱.....	(10)
六、电磁波的传播特性.....	(12)
七、电磁运动和相对论.....	(14)
八、电磁波和量子理论.....	(15)

电磁波 (Electromagnetic Wave) 是电磁场的一种运动形态; 这种运动以有限速度 (即光速) 在空间进行。由于交变场中电场与磁场互相依赖而同时存在, 所以电磁波也常称为电波。1864 年, 麦克斯韦首次从理论上预言电磁波的存在, 同时提出光的电磁波理论。1887 年, 赫兹首先用实验方法证实了电磁波的存在。

关于电磁波存在的预言, 是科学史上一项重大的理论成就。认识来源于实践。但在大量实践的基础上, 当理论发展到一定高度时, 它又走在实践前面, 反过来指导人们的再实践。麦克斯韦的电磁波学说正是起了这一作用的理论高度发展的产物。

一、历史背景

电和磁的基本定律: 关于电和磁的研究, 从悠久的古代 (最早是在希腊和中国) 就已开始。18 世纪末电池的发明为电磁学的研究提供了有效的实验手段, 迅速地推动了这门学科的发展。到 19 世纪下半叶, 电和磁的实验和理论研究已经积累了大量的, 然而又是不全面的成果, 迫切要求在更加普遍的观点下加以概括和总结。在当时, 电磁理论正处于飞跃和变革的前夕。

当时已发现的电和磁的基本定律有:

库仑定律（包括描述电荷间作用力的库仑定律和描述磁极间作用力的库仑定律）；

安培定律（描述电流的磁效应）；

法拉第的电磁感应定律（线圈中的感生电动势同线圈所交连的磁通量的变化率成正比）。

“超距作用”和“媒递作用”：在麦克斯韦的电磁波学说未建立前，对于电磁现象的解释，曾经有过两种截然不同的观点：

一种是“超距作用”观点，即认为电力和磁力是超越空间而直接发生在不相接触的物体之上。由于库仑定律和安培定律所给出的电力和磁力，同万有引力定律相似，都与距离的平方成反比，因此当时用“超距作用”的观点解释电力和磁力，是一种简单而直观的方法。“超距作用”学说也利用场的概念和方法，但仅仅把“场”看作是计算力的一种辅助手段。例如，将两电荷间存在电力的现象，设想为一个电荷在其周围空间产生电场，而存在于电场中的另一电荷则受到电场作用的力。

另一种是“媒递作用”观点。它认为带电体（或磁体）之间的力，不是超越距离而作用的，而是由带电体（或磁体）之间的媒质进行传递的。法拉第最早提出用电力线和磁力线来描述电磁现象的概念。在法拉第看来，力线不能简单地理解为一种形象化的图案，而是一种具体的、实际存在的物理状态；沿力线有张力作用，在垂直于力线的方向则有压力作用，而电荷（或磁极）间的力正是这样一种应力系统所产生的效应。

对于静止电荷（或磁极）之间以及稳恒电流之间的作用

力，超距作用和媒递作用可以等效地用来描述已知的电磁现象。随着电磁学的发展，这两种学说也都相应地有所改变或修正，以适应新的物理事实。超距学说后来也不得不承认电磁力是以有限速度传播的，并且引入“推迟”的概念来描述这种现象，即所谓“推迟超距作用”。然而，在解释电磁波传播时，超距学说，即使是“推迟”超距学说，也遇到了不可克服的理论困难。因为，尽管利用了“场”的概念和方法，并且承认了“推迟”，但“超距作用”学说最终还是把电磁现象归结为电荷、电流间作用的力，并不把场本身看成是物理上实际存在的东西；换句话说，超距作用的观点是认为，场不能离开电荷、电流而独立存在。实践否定了超距作用的观点。实践证明，已经激发并传播出去的电磁波，即使在它的激发源消失后，仍将继续存在并向前传播。就是说，电磁场可以脱离电荷和电流而独立存在，并在一般情况下以波的形式运动；它可以与电荷、电流相互作用，但它的存在并不以电荷、电流的存在为前提。电磁场本身是物质存在的一种形态。

媒递作用学说虽然接近于物理实际，但现代物理的发展也对原始的媒递作用学说作了重大的修正，即否定了“以太”（原来假设的一种传递电磁作用的媒质）的存在（参看后节“电磁运动和相对论”）。现代的电磁理论是一种不要求有媒质（即不以某种“媒质”的存在为前提）的“媒递作用”理论。为了避免逻辑上的含混，这种理论可以不称为媒递作用理论，而称为场的理论。

理论物理的发展趋势是使超距作用学说逐步让位给场的理论。然而，在麦克斯韦的时代，他看到的正是不同学说激

烈争论的历史背景。

二、麦克斯韦的电磁理论

场方程组：麦克斯韦继承和发展了前人在电磁理论方面的大量工作。他用数学语言表述了法拉第的物理思想，即媒递作用和场的思想。关于场的数学描述，最早是高斯定理（1813年），它表明了静电场中电力线和电荷分布之间的关系。此外，在麦克斯韦的时代，18世纪末以来关于引力场和位函数的数学理论，特别是拉普拉斯和泊松的理论，已经比较成熟。斯托克斯定理也已建立。这些都成为麦克斯韦描述电磁场的理想工具。

麦克斯韦将当时已发现的电磁场基本规律归纳为四个方程，在有理化米·千克·秒制中，其微分形式可以表示为

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2)$$

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4)$$

黑体字代表矢量。 $\mathbf{D}$ 为电位移、 $\mathbf{B}$ 为磁感应强度、 $\mathbf{E}$ 和 $\mathbf{H}$ 分别为电场和磁场强度。 $\mathbf{J}$ 为电流密度， ρ 为电荷密度。(1)式就是高斯定理，它可从库仑定律推导出来。(2)式描述了孤立磁极没有被发现过这一物理事实。方程(3)和(4)分别为用微分形式表示的法拉第定律和安培定律。上面的方程中，只要在方程(4)式右边引入位移电流项，就成为支配宏观电磁现象的完整的场方程组，即麦克斯韦方程组。

在不考虑各向异性的简单情况下，场方程组的三个辅助关系式可以表示为

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

式中 ϵ 、 μ 、 σ 分别为介电系数(或电容率)、磁导率和电导率。(5)式以电容测量为实验依据,(6)式以电感测量为实验依据。(7)式就是以场矢量表示的欧姆定律。

位移电流: 方程(1)到(4)是在不同的特殊情况下得到的;(1)和(2)式是静电场和静磁场的规律,(3)和(4)式分别是类稳场和恒定场的规律。将个别的、特殊的规律发展为普遍的规律,就需要对这些特殊规律进行分析,以便提取其中带有普遍性的内容,从而推广到更广泛的范围中去。这种推广过程必然包含有一些假设。

将方程(1)、(2)直接推广到电场、磁场随时间变化的普遍情形,虽然包含有假设,但在理论上并无矛盾,与以后的实验也不相冲突。因此,可以认为这种推广是合理的。

方程(3)是从法拉第定律导出的,但将它推广到普遍情形,也包含了一些假设。法拉第的实验是在类稳(即磁场变化不快)的条件下进行的。这里需要假设,在场随时间迅速变化的情形下,法拉第定律仍然成立。此外,麦克斯韦还引入了这样的假设:即使不存在导体回路,变化的磁场在其周围也会激发一种电场,它和静电场的共同点是对电荷有作用力,不同点是这种电场不是电荷所激发,而是由变化磁场所激发,并且描述这种场的电力线是闭合的,即所谓“旋涡电场”。以上一些假设的正确性已为后来的许多实验所证实。

至于方程(4),将它直接推广到变化场的情形,就遇到

了理论上的困难。根据矢量恒等式 $\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} \equiv 0$ ($\mathbf{A}$ 为任意矢量), 从方程(4)得到 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$; 然而, 根据电荷守恒定律, $\nabla \cdot \mathbf{J} = -\partial \rho / \partial t$, 而在非稳恒情况, $\partial \rho / \partial t$ 一般不为零。为了将方程(4)推广到普遍情形, 麦克斯韦引入了一个非常重要的概念, 即位移电流密度, 其定义为

$$\mathbf{J}_D = \partial \mathbf{D} / \partial t \quad (8)$$

将(8)式补充到(4)式右边, 就得到

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (4a)$$

这样, 原来(4)式与电荷守恒定律之间的矛盾就得到了解决。

将电位移矢量 $\mathbf{D}$ 对时间 t 的偏微分称为位移电流密度, 用 $\mathbf{J}_D$ 表示, 这只是一个定义问题; 然而, 将这个物理量引入到安培定律的微分形式(4)中, 就意味着位移电流和传导电流一样产生磁场, 这却是麦克斯韦前所未有的一个新的概念和假设。

引入位移电流的概念是麦克斯韦对电磁理论的一项重要发展。正是由于引入了这个概念, 才使麦克斯韦从理论上得出了电磁波存在的预言。位移电流概念的正确性已在以后实验中得到证明。

三、电 磁 波

麦克斯韦方程组包括两个散度关系和两个旋度关系。如果只考虑随时间变化的场, 那么在承认电荷守恒的前提下, 利用矢量恒等式 $\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} \equiv 0$, 就可从两个旋度关系导出两

个散度关系；因而，在上述前提下，可以认为基本的场方程只有两个，即两个旋度关系。

假定我们所考虑的区域是均匀的、各向同性的，而且是不导电的，并假定在这个区域中不包含场源，则两个旋度方程可以写为

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \partial \mathbf{H} / \partial t \quad (9)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \partial \mathbf{E} / \partial t \quad (10)$$

上面两个式子表明，变化的磁场产生电场，而变化的电场（即位移电流）又产生磁场，如此不断反复，便在空间形成电磁波。这里可以明显地看出，位移电流的概念是建立电磁波理论的前提。

为了将问题进一步简化，我们考虑平面波这一特例。图1表示按正弦函数变化的平面波。假定电场是在 x 方向 ($E_y = E_z = 0$)，并且在 xy 平面上场的强度为常量（即 $\partial E_x / \partial x = \partial E_x / \partial y = 0$ ），那么，根据旋度方程，在磁场的三个分量中就只有 H_y ($H_x = H_z = 0$)。于是，麦克斯韦方程组(9)和(10)简化为下列形式：

$$\frac{\partial H_y}{\partial z} = -\epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} \quad (11a)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} \quad (11b)$$

消去 H_y ，并以 V^2 代表 $\mu\epsilon$ ，就得到

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) E_x = 0 \quad (12)$$

如果消去 E_x ，对 H_y 也得到同样形式的方程。这正是物理学中

人们所熟知的波动方程。从这个结果，很自然地引出电磁现象是一种波动过程的预言。

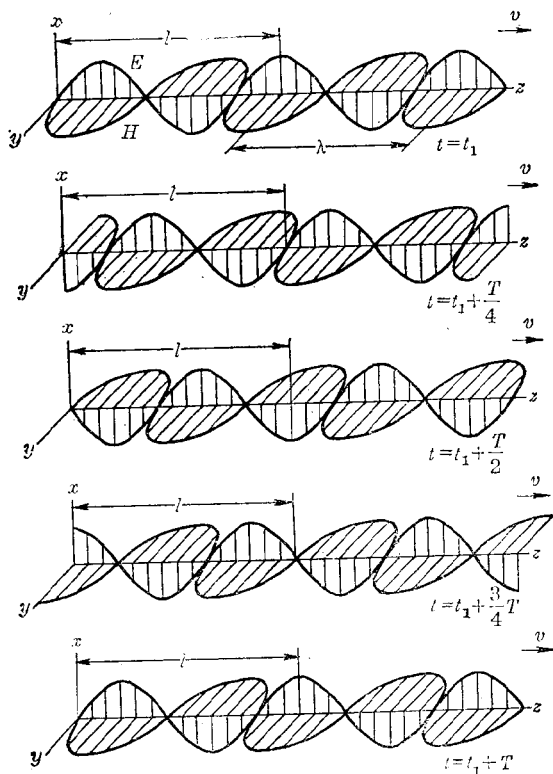


图1 按正弦函数变化的平面电磁波示意图

图中表示在不同时刻（相隔 $T/4$ ， T 为周期）正向平面电磁波的场分布。在某一固定时刻观察波在空间（ z 方向）的场分布，电场 E 和磁场 H 都是位置 z 的正弦函数；如在不同时刻观察波在某一固定点（ $z=l$ ）的场分布，则电场和磁场随时间的变化（即振荡）也是正弦函数。这样，在一段时间内观察整个空间中的场分布，电场和磁场就像是 z 方向运动的正弦波形。图中 λ 为波长。

光的电磁波学说：麦克斯韦在建立电磁波理论的时候，同时提出了光的电磁波学说。

波动方程(12)中的系数 $V = (\mu\epsilon)^{-\frac{1}{2}}$ 代表电磁波的速度。在自由空间，或近似地在空气中， $V_0 = (\mu_0\epsilon_0)^{-\frac{1}{2}}$ 。在麦克斯韦以前， $(\mu_0\epsilon_0)^{-\frac{1}{2}}$ 已经作为一个自然常数出现在电磁学的理论和测量问题中，它的值等于电磁系单位电荷与静电系单位电荷之比。当时很多电磁学家，包括麦克斯韦本人，都曾计算过这种数值：韦伯得 310,740,000 米/秒；麦克斯韦得 $288,000,000$ 米/秒；汤姆逊得 282,000,000 米/秒。另一方面，空气中的光速测量也已得到若干数据：斐索得 314,000,000 米/秒；傅科得 298,360,000 米/秒……。比较

$(\mu_0\epsilon_0)^{-\frac{1}{2}}$ 的数值和光速，两者在同一量级，其偏差是在当时的测量误差范围内，因而有理由认为电磁波的速度 $V_0 = (\mu_0\epsilon_0)^{-\frac{1}{2}}$ 恰好等于光速 c 。由于确定 $(\mu_0\epsilon_0)^{-\frac{1}{2}}$ 的方法和确定光速的方法是独立的、彼此无关的，因而两者的相等不能看成是偶然现象。麦克斯韦正是根据这一事实，提出了光是电磁波的假说。

根据光的电磁理论，除空气外，对于其它媒质，速度 $V = (\epsilon\mu)^{-\frac{1}{2}} = c(\epsilon_r\mu_r)^{-\frac{1}{2}}$ ； $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ ， $\mu_r = \mu/\mu_0$ 。在光学中， $n = c/V$ 称为折射率。如果不考虑铁磁材料， μ_r 都接近于 1，所以，从光的电磁理论得到

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (13)$$

这是麦克斯韦最早导出的一个重要公式，也是光的电磁理论的一个重要基础，它联系了媒质在电学方面的基本参数 ϵ_r 和媒质在光学方面的基本参数 n 。在麦克斯韦提出光的电磁理论时，他发现根据(13)式算出的 n 和光学方法测得的折射率

有不小的偏差,因此,他认为自己的理论还需作很大的改进,以便从媒质的电学特性导出其光学特性。不过,这个困难后来却很容易地得到了克服。这是由于 ϵ_r 在高频时的值并不等于它在静态或类稳态时的值,将 ϵ_r 随频率变化的效应考虑在内,那么联系电学特性和光学特性的基本公式(13)就仍然成立。

四、赫兹的实验

关于电磁波存在的理论预言,必须并且只能通过实践加以检验。电磁波的实验证实是由赫兹于1887年实现的。赫兹在他所著《电波》的序言中写道,对电磁波现象的了解,不可能单纯从理论的推理得到。他还写道,他的“实验目的是为了验证法拉第、麦克斯韦理论的基本假说,而实验所得到的结果,则是证实了这一理论的假说”。

赫兹用火花放电的原始方法成功地产生了电磁波。他的接收器是一个开路的导线回路,其一端是黄铜制的圆头,另一端是尖细的铜丝。当接收端出现微弱的电火花时,就可知道检测到从发射器射来的电磁波。赫兹还用放大尺寸的方法模拟各种光学设备,以便于将电磁波聚焦,确定其极化方向,使波发生反射和折射,进行干涉、衍射,形成驻波,测量其波长……等等。

赫兹的实验不仅证实了电磁波的存在,而且从实验方面显示了光和电磁波的同伦性。

五、电 磁 谱

不同频率(或波长)范围的电磁波具有不同的物理特

性。电磁波的整个频率（或波长）范围称为电磁谱（图2）。它包括以下一些频段（或波段），其大致的频率范围如下：工业电和无线电波（ $10^0 \sim 10^9$ 赫）；微波（ $10^9 \sim 3 \times 10^{11}$ 赫）；红外线（ $3 \times 10^{11} \sim 4 \times 10^{14}$ 赫）；可见光（ $3.84 \times 10^{14} \sim 7.69 \times 10^{14}$ 赫）；紫外线（ $8 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{17}$ 赫）；X射线（ $3 \times 10^{17} \sim 5 \times 10^{19}$ 赫）； γ 射线约 $10^{18} \sim 10^{22}$ 赫以上。

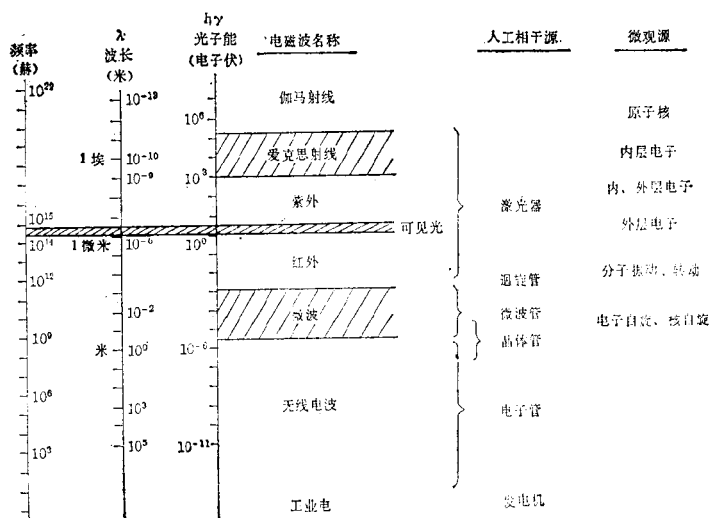


图2 电 磁 谱

就相对频宽来说，可见光是一个很窄的频段。日光通过棱镜，就形成一段从红色到紫色的可见光谱。微波和X射线都比可见光的相对频带宽。如果用对数坐标来表示电磁谱，并且用1厘米和1埃分别代表微波和X射线的波长量级，那么可见光（波长约短于1微米）就恰好落在微波和X射

线的正中。从微波到可见光和从可见光到 X 射线，波长或频率都大致差 4 个量级。

自然界中的电磁辐射覆盖从无线电波到 γ 射线的整个电磁谱。就非相干电磁辐射来说，从红外到 X 射线的各种人工光源都已齐备。用人工方法产生整个电磁谱的相干辐射，是物理学和电子学的主要发展趋势之一。由于本世纪六十年代激光器的发明以及七十年代相对论性电子学的技术突破（包括回旋管的发明），人工相干光源已经覆盖了从微波到紫外线的宽广的电磁谱。目前，开拓和占领电磁谱的研究正在推向相干 X 射线和 γ 射线。

六、电磁波的传播特性

传播常数、波阻抗和能流矢量：波动方程(12)中所包含的系数，即速度 V ，是波动现象的一个基本特征参数。如前所述，波动现象的另一个基本特征参数是频率 ν （单位 赫），即每秒内的振动次数；相应的时间周期，即每次振动所经过的时间， $T = 1/\nu$ 。从速度 V 和频率 ν 可以确定波长： $\lambda = V/\nu$ 。为了分析的方便，经常引用角频率的定义，即 $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$ 。与此相应，传播常数（即波数）定义为 $k = 2\pi/\lambda$ ，式中 λ 为波长。

这样，波动方程(12)的解，即波函数，可以写为 $f(\omega t \mp kz)$ ， f 代表任意函数， $(-)$ 和 $(+)$ 号分别表示沿 z 轴传播的正向波和反向波。从 $\lambda = V/\nu$ ， $V = (\epsilon\mu)^{-\frac{1}{2}}$ 得到下列关系式：

$$k = \frac{\omega}{V} = \omega\sqrt{\mu\epsilon} \quad (14)$$