

电磁场与电磁波



发现电磁波



探索人：王楠



电磁波简史



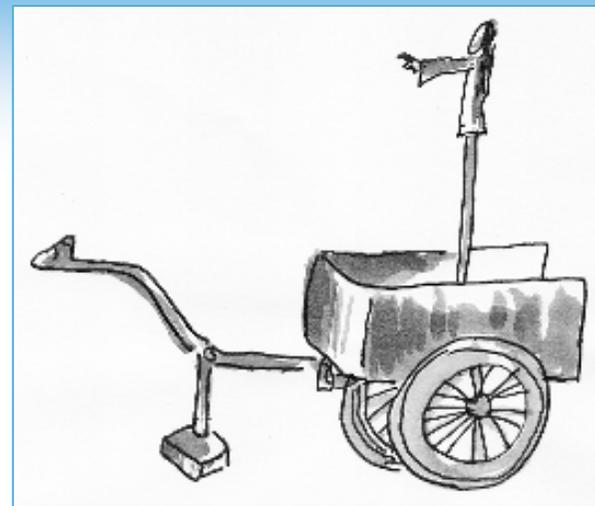
电磁波是一种客观存在的物质形态。但是，电磁波被人类认识并发现，至今不到**200**年。

刚刚过去的**20**世纪，人类学会了控制电子的能力，于是发明出半导体，直至芯片，由此电视、电话、计算机乃至无线技术，电磁场与电磁波的应用范围无限的扩展。

人类在地球生活并产生文化的数千年中，电与磁始终像两条平行线相互独立地与我们打着各种交道。作为根源，我们首先关心当时是如何发现电和磁的。



回顾起来，磁比电认识的历史要早得多。中国古代的指南车被誉为四大发明之一，显然，它与巨大的地球磁场密切相关。



在西方，关于磁的研究则首推英国医生威廉·吉尔伯特（**W.Gilbert, 1544-1623**），正是他的工作使整个磁学由经验逐步转变为科学，其代表作是**1600**年出版的《论磁、磁体和地球作为一个巨大磁体的新的自然哲学》，这本著作以详尽的实验来检验复杂的理论而著称。



作为另一条平行线——电，人类对于电的认识是从自然界开始的，由最初的摩擦起电、雷电闪鸣中，人们体会到电的巨大威力。



真正作为里程碑式的研究成果无疑应推本杰明·富兰克林（**Benjamin Franklin, 1706-1790**）他首次归纳出：

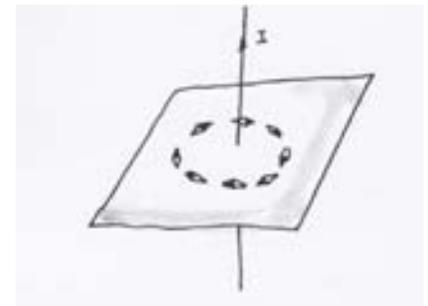
1、电荷可分为正电与负电；2、摩擦起电过程中，形成等量的异种电荷，且一方失去的电荷必定等于另一方得到的电荷；3、电荷守恒，也即电荷既不能创生，也不会消灭，而只能从一个带电体转移到另一个带电体，且总量保持不变。

富兰克林于**1752**年，冒险地用放风筝实验来证明天电（雷电）与地电（莱顿瓶）的统一性，并由此构造了避雷针的最初设想。正如吉尔伯特是磁学的先驱，富兰克林则是当之无愧的电学勇士。



1800年之后，由于各种因素的综合加快促成了电和磁的两个“独立”领域的相互交会。

首先是丹麦哥本哈根大学教授奥斯特于1820年7月宣布了一条消息：在电流线周围，小磁针发生了环形偏转。



由于牛顿的超距作用思想，使得Oersted本人特别谨慎小心，从1820年4月到7月期间反复做了60多次实验，其中包括用纸片隔在电流和小磁针之间，企图阻断它们之间存在的“神秘的力”，都未获成功。

终于在1820年7月21日发表了《关于磁针与电流“碰撞”的实验》的著名论文。



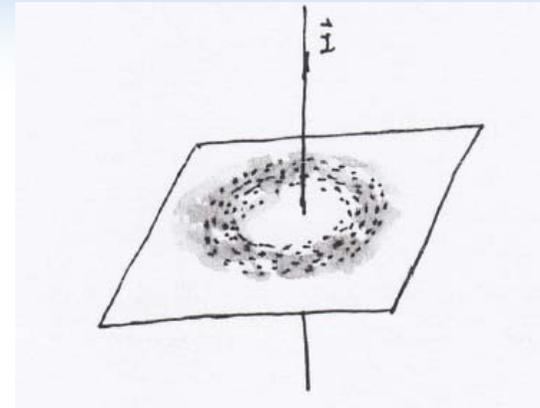
Oersted实验的最重要意义在于发现电可以产生磁，由此彻底结束了电与磁分裂的局面。

但是，由于受到**Newton**思想的束缚，**奥斯特**在场的概念面前停步了下来。他的历史功绩在于忠实地把这一重要发现记录了下来。

接下来，**法拉第**，出生于英国伦敦，是一位贫困铁匠的儿子，根本未受过正规教育：**12**岁卖报，**13**岁到书店学徒，装订书报**8**年，但是他刻苦努力，聪颖善思，及至自学成才，又由于当时化学大师**戴维**的提携，终于成为世界级物理学实验大师；



Faraday在电磁舞台上的第一次“亮相”是从改进了**Oersted**实验——也即采用铁粉取代磁针。



我们切莫小看这似乎毫不经意的“小改动”，它与**Faraday**关于电磁领域的深邃考虑密切相关，由于这一改进，20世纪最重要的物理概念之一——场突现出来了，而**Oersted**则与此擦肩而过。在**Faraday**的头脑中，电流所产生的是磁场，它在电流周围空间四处弥漫。接着，**Faraday**进一步提出了先进的力线概念。



Faraday毫不停步，他反复思索：“既然电能产生磁，那么为什么磁不能产生电呢？”他的思想是深刻而简单的，而所涉及的实验又是奇妙而直接的，也即希望由磁铁构成的回路中产生出电流。

从**1821-1831**年，即**Faraday**人生**30-40**岁最富创造力的**10**年期间，经历了无数的失败和教训。突然有一次他把磁铁向线圈猛然一扔，鬼使神差的竟然使电流表的指针发生偏转，从而发现了**磁的时间变化可以产生出电**。



后人，把 **Oersted**（后经安培总结）和 **Faraday** 的工作归结为如下两个方程

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

至此，电和磁终于实现了“第一次握手”——也即电可以产生磁，而磁又可以产生电（必须注意到在这个阶段，两者机理并不对称）。

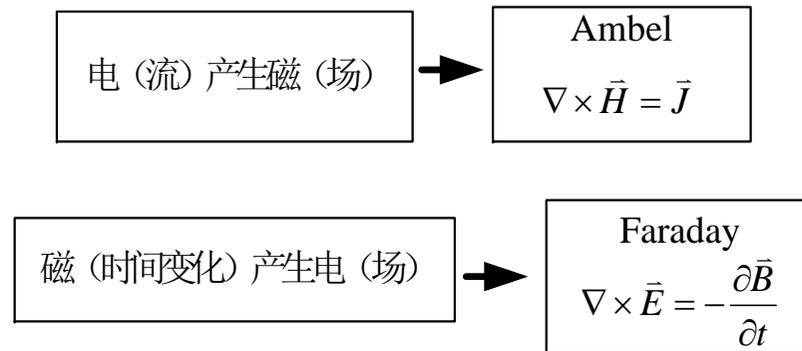


最后，不得不提的就是集大乘者，麦克斯韦（**James Clerk Maxwell, 1831-1879**），虽然他与**Faraday**同生于英国，但却有良好的家庭背景：机械设计师的父亲对他着力培养，使**Maxwell**10岁进中学，16岁进大学，19岁转入剑桥，23岁毕业后不久便当上教授。

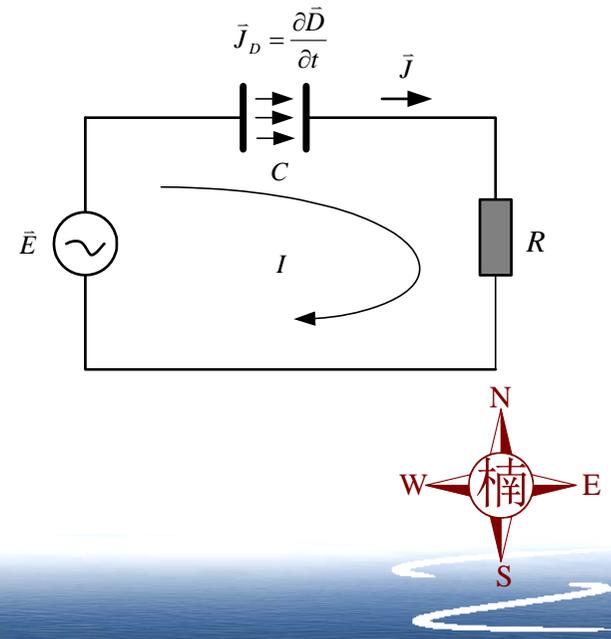
1860年，29岁的**Maxwell**带着初步成果《论**Faraday**的力线》，拜见了年近古稀的**Faraday**，后者对于**Maxwell**大加赞赏，**Faraday**说：“我不认为自己的学说一定是真理，但你是真正理解它的人。”并进一步鼓励**Maxwell**：“这是一篇出色的文章，但你不应该停留在用数学来解释我的观点，而应该突破它。”



Maxwell首先发现了Ambel和Faraday的转化完全不对称，也即Ambel是源（电流）产生场，而Faraday则是场的时间变化产生场。



很可能正是由于Maxwell细心而深刻的比较，使他发现电容C电路中的电流不连续性——具体地，外电路有电流而电容C中却没有电流



Maxwell由此提出崭新的位移电流设想，也即磁场的旋度除了对应传导电流密度外，还有 $\vec{J}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ 可称之为位移电流密度，唯有这样，才能保证电流连续性定理

这时导出的**Maxwell**方程真正构成了时间与空间的双向变化

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Maxwell所导出的电磁规律——**Maxwell**方程组不仅准确统一地表述了 **Oersted**，**Ampere**，**Faraday**和**Gauss**等提出的实验定律，而且有了全面的体系性升华和提高。



麦克斯韦方程组是电磁场的基本方程，它在电磁学中的地位等同于力学中的牛顿定律，是我们分析电磁问题的基本出发点。

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \end{array} \right.$$

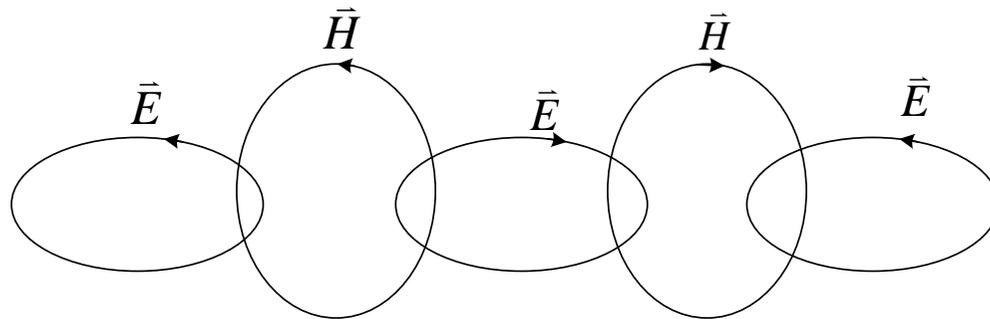
$$\left\{ \begin{array}{l} \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l}' = \iint_s \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} \\ \oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l}' = -\iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \\ \oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \\ \oiint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \iiint_v \rho dV \end{array} \right.$$

如果场矢量不随时间变化，则Maxwell方程自动退化为静态场方程。



➤ 提出位移电流之后所构成的**Maxwell**方程组清楚表明：电场可以转化为磁场，再由磁场可以转化为电场；此外可以由场的时间变化转化为场的空间变化，再由场的空间变化转化为场的时间变化

正是上述电场和磁场之间的相互转化；时间和空间之间的相互转化构成了产生电磁波的坚实基础，和在空间和时间上环环相扣。



➤ **Maxwell**正式预言了电磁波，并具体指出电磁波的速度即光速——也即很自然产生光与电磁波的统一学说。

设无源、无界空间填充无耗简单介质，电场强度和磁场强度满足无源区**Maxwell**方程

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0$$



$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0$$

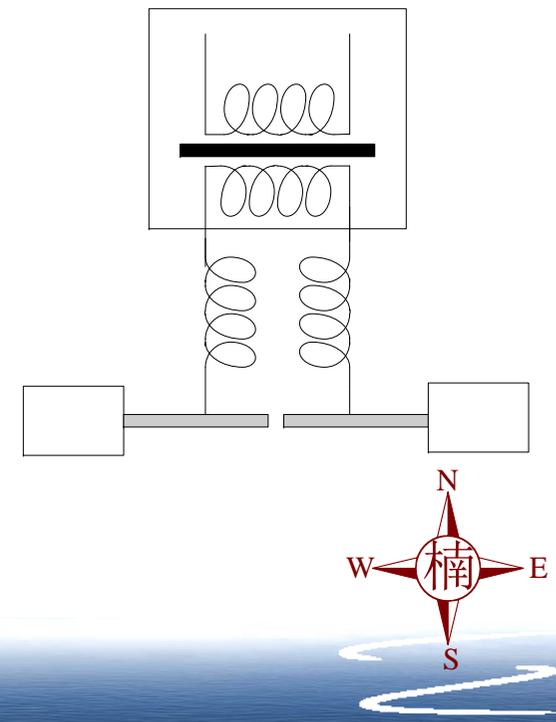
$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}$$



方程的解预言了一种以光速传播的物质形态，也就是我们后来发现的电磁波。

实践是检验真理的唯一标准。赫兹（**H. R. Hertz, 1857-1894**）在**1886-1888**做了一系列实验产生电磁波，并证明了电磁波与光完全类似，有反射、折射、绕射和偏振（极化）等重要特性。

从现代观点看来，**Hertz**电磁波实验仅仅是简单的**LC**振荡电路和极近距离的电火花通讯，这完全不足为奇。但是，当时却轰动了学术界：因为正是这一实验用事实证明证明了**Maxwell**的预言——电磁波。



➤ 电磁波及它的规律Maxwell方程组的发展还远没有结束。

Maxwell方程目前存在的不对称像一块心病让无数大科学家、大学者结合自己设立攻克的目标——千方百计地要“寻找”磁流与磁荷。

$$\left[\begin{array}{l} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \end{array} \right] \longleftrightarrow \left[\begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = -\vec{M} - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = \rho_M \end{array} \right]$$

2009年9月4日出版的Science杂志和10月15日的Nature杂志上，法国和德国的团队均报道了已从自旋冰的物质中观察到类似磁单极子的粒子和磁流。



电磁波三要素



我们写出Maxwell导出的一维波动方程作为出发点

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

若令 \hat{e} 是电场的方向，则可以给出由两组迭加构成的解形式为 $\vec{E} = \hat{e} \{A f_1(z - ct) + B f_2(z + ct)\}$

式中，表示向 $f_1(z - ct)$ 方向传播的波；而则表示向 $f_2(z + ct)$ 方向传播的波，波速均是光速。

取时谐信号，这是的电场可以写为

$$\vec{E} = \hat{e} E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi)$$

从上式可给出电磁波三要素：振幅，频率和相位



频率 $\omega = 2\pi f$

把频率作为电磁波的第一要素自然有其特殊的意义，如果令复数场的时间变化为 $e^{j\omega t}$ ，则 **Maxwell** 方程组即可转换成频域形式，前两个方程组分别写出为

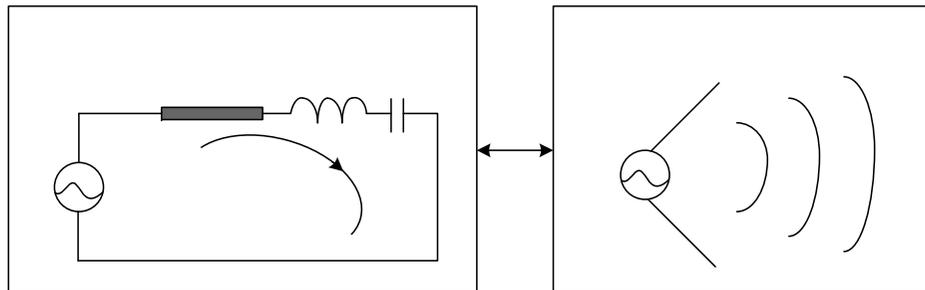
$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = j\omega\epsilon\vec{E} + \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu\vec{H} \end{cases}$$

可以看出：电磁转换的一个重要条件是频率。

只有确保有高的频率，才能实现电磁之间的有效转换，使波向空间“发展”。对于直流情况，由于电磁无法转换而只能各自独立。



频率低的时候，电磁形成的是路（*circuit*），而只有在很高的条件下，电磁才会“夺路而走”，形成自由的波（*wave*）。在一定意义上可以说波是开放的路，而路则是受约束的波。



随着微电子电路的迅速发展，电路板上的波动性越发显得明朗。波和路两者在更高层次的融合正以一个新的学术热点成为当前众多学者的兴趣所在。



路——受约束的波

振幅 E_0

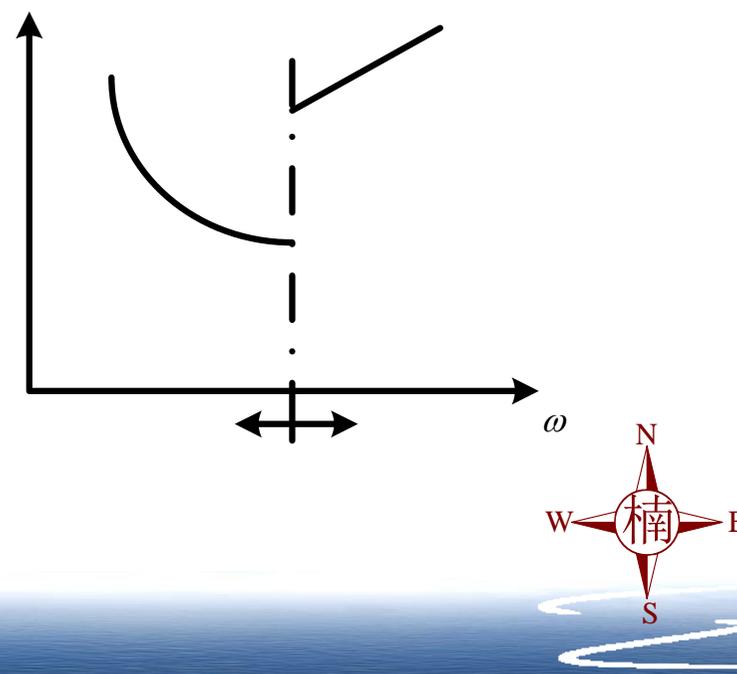
从最本质的观点考虑问题，要检测到电磁波必须有它的振幅存在。于是把振幅作为电磁波的第二要素顺理成章。

不同的用途对于波振幅会提出不同的要求：例如，在微波炉或微波能武器中，振幅和功率必然唱绝对的主角；而对于以信号为特征的微波通讯中，特别是微波接收情况，则振幅的要求还需增加一条，就是和实际环境的噪声作比较，也即所谓信噪比。



振幅和频率之间有一个现象很值得深入探索：在微波波段中，频率越高，越难产生高的功率。简单来说，**L**、**S**和**C**波段容易获取较大的功率，而**X**或**Ku**波段则很难给出高功率。但是，令人奇怪的是一旦越过微波进入光波波段，它们突然又可获得很大的功率，甚至激光武器。

这一现象究竟是技术上的某种难点，还是必然存在？换言之，振幅和频率之间的深层次关系还值得我们进一步努力探索。



相位 φ $\vec{E} = \hat{e}E_0 \cos(\omega t - kz + \varphi)$

对于宏观电磁场，相位因子的重要性尚显得不够突出。然而一旦真正进入物理领域，则凸显其发展。

杨振宁博士**2000**年在所作的著名报告《**20**世纪理论物理学发展的主旋律》中明确提出：**20**世纪物理发展有三个主旋律，也即量子化、对称性、相位因子。



非常感谢

See you next time!



下课

