

## 第三章 从静电现象到电磁波

“自从牛顿奠定理论物理学基础以来，物理学的公理基础 — 换句话说，就是我们关于实在结构的概念 — 最伟大的变革，是由法拉第和麦克斯韦在电磁学方面的工作所引起的。”

——爱因斯坦

伽利略和牛顿所取得如此伟大成就，是因为他们把科学思维和实验研究很好地结合在一起，为力学的发展开辟了一条正确的道路，并为近代科学革命奠定了基础。

电学、磁学构成了经典物理学的另一重要分支。

随着一个个电磁学研究成果的**取得和成功**，企图把全部物理学归纳为力学的**机械论**观点(称为**力学自然观**)宣告**彻底失败**。

本章将介绍下面一些科学家以及他们的重大发现，他们是：**库仑、奥斯特、安培、法拉第和麦克斯韦**等。

### § 3.1 静电和静磁现象的研究

#### 一、静磁和静电现象的早期研究

1. 中国古代的贡献：最早文字记载“雷”、“电”，发明指南针等。
2. 最早总结前人对电磁研究的大量经验，讨论电磁体性质的英国医生**吉尔伯特**，他本人断言：**电与磁是两种不同的现象**。
3. 相比静磁现象，静电研究困难得多。直到第一台摩擦起电机发明后，对静电研究才迅速开展起来。
4. 在库仑定律被发现前，科学家已发明了摩擦起电机，已区分了二种电荷，区分了导体和绝缘体，1746年富兰克林还指出了天上、地上电一样，并发明了避雷针等。

#### 二、库仑定律

类比万有引力，科学家猜测电荷间作用力与距离平方成反比。

罗比逊实验，发现： $f \propto \frac{1}{r^{2+\delta}}$ ，偏差 $\delta = 0.06$ 。

卡文迪许利用两个同心球的实验证明了上述规律，他得到 $\delta = 0.02$ ，可惜两人的工作都未发表。

库仑于1785年用电扭秤实验，通过与万有引力**类比**，确信并提出了库仑定律。

$$F_{12} = K \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_{12}^0, \quad K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, \quad \epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N}\cdot\text{m}^2)$$

计算表明，库仑力远大于万有引力。数量级相差： $10^{36}$ 。

#### 三、从库仑定律的建立看，类比方法的重要性

1. 库仑测得 $\delta = 0.04$ ，但他断定力与距离成平方反比，是成功运用类比方法(与万有引力类比)的结果。

## 2. 麦克斯韦对类比法的论述：

“为了不用物理理论而得到物理思想，我们必须熟悉物理类比的存在。所谓物理类比，我指的是一种科学定律与另一种科学定律之间的部分相似性。它使得这两种科学可以相互说明。”

3. 汤川秀树也是类比法的成功运用者，他通过将核力和电磁力类比，成功地提出了核力的介子理论。

他说：“**类比是一种创造性思维的形式**，……假定存在一个人所不能理解的某物，他偶尔注意到这一物和他所熟悉的另一物的相似性。他通过将两者比较就可以理解他在此刻之前尚不能理解的某物。如果他的理解是恰当的，而且还没有人达到这样的理解，那么可以说，他的思维确实是创造性得到。”

4. 必须指出：**有时简单的类比也会导致错误的结果**。如惠更斯类比声波，认为光波也是纵波就错了。可见类比结果是否正确还必须通过实验检验。

## § 3.2 电流的产生及其磁效应

### 一、从动物电研究到伏打电堆发明

伽伐尼发现“动物电”。

伏打怀疑神经电流的说法，从实验发现了金属的接触电势差，从而发明了伏打电堆。从此使电学从静电领域到电流（动电）领域，实现了一大飞跃。伏打电堆被称为“神奇的仪器”，还曾经表演给拿破仑看。

伏打的重大发明与他自小爱好科学，喜欢动手实验分不开。

### 二、奥斯特发现电流磁效应

#### 1. 奥斯的重大发现是基于什么？

(1) **自然哲学思想** — 受康哲学思想影响, 认为自然界各种基本力可以**相互转化**。

(2) 实验启发 — 已发现一些电可能会发生磁的迹象。坚信电磁间有联系，并开展电是否能产生磁的研究。

(3) 抓住机遇、重视意外发现。（有准备的头脑）

在一次演讲中，**奥斯特偶然**发现导线通电时，在它的下方的小磁针有一**微小晃动**。他抓住了这个现象，经过3个月的反复实验，首次发现了**电流磁效应**。

法国著名生物学家巴斯德在讲述奥斯的发现时，说过一句名言：

**“在观察领域的一切机遇只偏爱那些有准备的头脑。”**

“**机遇只偏爱那些有准备的头脑**”这句名言已在社会上被广泛使用。你能**举出例子**吗？

#### 2. 奥斯特实验的重大意义：

(1) 发现了电流磁效应。揭开了研究电与磁内在联系的序幕。

(2) 磁针受到了一个**旋转力**，**力学自然观**对此无法解释，这为法拉第提出“**场**”的概念打下了极为**重要的实验基础**。

### 三、安培对电流磁效应的深入研究

### 1. 两个重要实验:

安培从磁体与磁体、电流与磁体相互作用, 联想并发现了通电导线之间有相互作用。并进一步发现了通电螺线管与条形磁铁的等效性。

### 2. 重要意义:

① 安培实验进一步使力学自然观失效, 为法拉第提出“场”的概念打下了坚实实验基础。

② 由此安培还提出了著名的“磁性起源假说”: 物质磁性来自于内部有电流, 并可解释物体可被磁化的现象及磁体被分割后仍有N、S极性现象。

此假说, 直到19世纪知道了原子结构和物质结构的秘密, 才真正知道这是“分子电流”。

安培也通过理论研究, 提出了计算两载流回路之间的相互作用力的方法。对于作用在长为 $l$  两载流直导线上的力为:

$$f = -\frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

其中  $I_1$  和  $I_2$  是两导线中的电流,  $d$  为两平行导线间的距离, 在国际单位制中, 常量  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ 。

## § 3.3 电磁感应定律

### 一、电磁感应现象的发现

法拉第发现电磁感应是基于:

1. 法拉第的自然哲学思想: 他与奥斯特一样, 坚信自然力的“统一性”, 并追求这种统一性。

他在实验记录中有这样一段话: “长期以来, 我就持有一种观点, 几乎是一种信仰, 我相信其他许多爱好自然知识的人也会共同有的, 就是物质的力表现出来时具有某种形态, 都有一个共同的根源, 或者换句话说, 它们是相互直接联系的, 也是相互依赖的, 所以它们似乎是可以互相转化的。”

2. 加上奥斯特已发现了电能产生磁, 所以法拉第坚信: 磁一定能产生电。

3. 经过近10年的努力, 于1831年发现了电磁感应现象。

由图示4种方法, 可见关键点是: 产生感应电流的回路都是处在一个变化的磁场中, 一旦磁场变化停止, 感应电流就消失。这种现象称为电磁感应。

### 二、创造性的科学思维——磁感线与场概念的引入

#### 1. 发现磁感应线

法拉第于1831年底用铁粉实验展示并提出了“磁力线” (现称磁感应线) 概念。他认为磁感应线显示了在磁体周围空间是物理空间, 其中存在“磁场”。利用磁感应线在空间分布的疏密程度可以直观地描述磁场的强弱。“密”表示“强”, “稀”表示“弱”。

磁感应强度是**矢量**, 有大小和方向。

在磁感应线上某点的**切线方向**为该点磁感应强度方向。人们又**规定**: 磁场的方向是将小磁针放在该点时, 北极所指方向。

## 2. 法拉第“场”概念的提出

在1831年提出磁力线，经过14年于1845年才逐步形成和提出了“场”的概念。

法拉第“场”概念的依据:

- (1) 奥斯特和安培的一系列实验工作使力学自然观失效，需要新的思想来解释实验结果。
- (2) 法拉第本人在磁力线实验基础上又进行了一系列实验，说明在磁体周围是物理空间。
- (3) 法拉第不赞成电磁体之间相互作用是“超距作用”，而应是“近距离作用”，是通过“场”传递，这种传递需要一定的时间。

这是历史上第一次向英国科学界普遍认为的力的“超距作用”挑战。

## 3. “场”概念引入的重大意义

- (1) 力线和场的概念的提出，对电磁感应和其他一系列电磁实验可给以定量的物理描述。
- (2) “场”的提出，表明电力和磁力是一种近距离作用，即这种力是通过“场”进行传播的，不是“超距作用”。
- (3) 更重要的是：“场”的引入是物理学中极具想象力的创举，对物理学发展具有开创意义。在过去人们认为物理实在是质点，牛顿研究的是质点的力学运动规律。而在电磁学的研究中，物理实在是连续的“场”来代表。法拉第和麦克斯韦研究的是“场”的运动变化规律，这是一场伟大的变革。

“想象力比知识更重要，因为知识是有限的，而想象力概括着世界上的一切，推动着进步，并且是知识进化的源泉。”

—— 爱因斯坦

4. 电场线不同于磁感应线，电场线不闭合。类似地，可用电场线在空间的密集程度来描述电场强弱。

某点处的电场方向是沿电场线的切线方向，且规定为正电荷在该点的受力方向，所以电场线总是由正电荷指向负电荷。

## 三、带电粒子在电场和磁场中所受的力和场强的定义

### 1. 电荷所受的电场力： $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$

利用库仑定律，可得点电荷周围的P点出的电场强度：

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \mathbf{r}^0$$

### 2. 运动电荷在磁场中受的力： $\vec{\mathbf{F}} = q\vec{\mathbf{v}} \times \vec{\mathbf{B}}$

大小为：
$$F = |\vec{\mathbf{F}}| = |q|vB\sin\theta$$

式中  $B$  为磁感应强度，由上式可定义磁感应强度：
$$B = \frac{F}{|q|v\sin\theta}$$

在国际单位制中， $B$  的单位是特斯拉 (Tesla)，用符号 T 表示： $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m})$

### 3. 实际应用:

(1) 质谱仪：
$$r = \frac{mv}{|q|B}$$

### (2) 回旋加速器:

在原子核物理和高能物理实验中，用来加速带电粒子。

(3) 洛伦兹力

带电粒子在电磁场中受到的电磁力： $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ ，称为洛伦兹公式。

实际应用：

J. J. 汤姆孙发现电子的实验中，测量带电粒子的速度以及带电粒子的荷质比，就是利用了洛伦兹公式。

调节电场和磁场的大小，可使带电粒子不发生偏转，即洛伦兹力为零，因此：

$$|q|E = |q|vB$$

$$\vec{v} \perp \vec{B} \text{ 时, 有: } v = \frac{E}{B}$$

测出  $v$  后，再去掉电场，则带电粒子将在磁场作用下偏转，半径为  $r$ ，由此可得荷质比为：

$$\frac{|q|}{m} = \frac{e}{m} = \frac{v}{rB}$$

#### 四、磁通量

为了定量描述通过导线回路所围面积的磁场的变化，引入磁通量  $\Phi$ ：

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad \Phi = (B \cos \theta)A = BA \cos \theta$$

$\Phi$  的单位是韦伯 (Wb)。  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$

引入磁通量后，导线回路中感应电流的产生条件归结为：通过导线回路的磁通量必须发生变化。

#### 五、楞次定律

1. 什么楞次定律？

楞次定律是判断感应电流方向的法则：闭合回路中产生的感应电流方向，总是使由此感应电流所产生的磁场阻碍引起感应电流的磁通量的变化。

2. 楞次定律是能量守恒定律在电磁感应现象中的具体表现 —— 插入和抽出磁铁时所做的功转变为回路中的电能。

#### 六、法拉第电磁感应定律

1. 电磁感应定律

引入感应电动势比感应电流更能反映电磁感应现象的本质，当回路线圈的圈数为  $N$  时，电磁感应定律为：

$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

负号意味着  $\varepsilon$  总是与磁通量变化的符号相反，说明  $\varepsilon$  的方向总是阻止磁通量变化，是楞次定律要求。

2. 利用洛伦兹公式可导出电磁感应定律，即两者是自洽的。同时再通过对图3-3-5实验的具体计算，证明了回路中电能是由外力所做的功转化而来的。

3. 电磁感应现象应用举例：

(1) 麦克风

(2) 发电机原理

## § 3.4 麦克斯韦电磁场理论的建立与电磁波的发现

### 一、一场伟大的变革

“一个民族要想站在科学的高峰，就一刻也不能没有理论思维。”

—— 恩格斯

在1999年，英国广播公司（BBC）所评选出的1000年来**最伟大的10位思想家**中，麦克斯韦与马克思、爱因斯坦、牛顿等人一起榜上有名，他**排名第九**。后由英国杂志《物理世界》在100位著名物理学家中选出的**10位最伟大者**中，麦克斯韦紧跟爱因斯坦和牛顿，**排名第三**。

法拉第无疑是一位伟大的实验家，有丰富的想象力，但他一系列观点还缺乏严格的数学形式，在理论上不够严密。加上当时在学术界中，“超距作用”的传统观念还很深，所以当时学术界对法拉第学说表示出冷漠、甚至非议。

可是年轻的麦克斯韦却有与众不同的眼光，他体会到了“场”的引入的革命性意义。他被法拉第的成果所吸引。在1856年以后，他致力于用数学语言翻译和表述电磁场的运动规律。

“法拉第和麦克斯韦在电磁场方面的工作引起一场最伟大的革命”

—— 爱因斯坦

### 二、麦克斯韦方程组的建立

麦克斯韦通过对前人的发现和成果加以总结和升华以及结合**位移电流**概念的引入，**创造性地提出了变化电场可在周围激发磁场的假设**，把物理与数学紧密结合，**利用类比方法**建立了描写电磁场运动规律的麦克斯韦方程组。

从麦克斯韦方程可见麦克斯韦的电磁理论具有以下几个特点：

$$\begin{aligned}\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} &= \int_V \rho dV = q \\ \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} &= 0 \\ \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \\ \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} &= I_0 + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}\end{aligned}$$

从麦克斯韦方程可见麦克斯韦的电磁理论具有以下几个特点：

- (1) 首次综合和发展了前人工作，给出了一个描写“电磁场”运动的完美的统一方程。
- (2) 充分反映了电场与磁场以及时间空间的对称性。
- (3) 数学形式简单优美，充分体现了物理学的“美”以及数学的重要性 —— 不仅是一个表述工具，更重要的是科学家正是利用**数学方法**从庞杂的经验事实中找出**自然界普遍**的高于感性经验的**客观规律**来，这一点在伽利略的斜面实验中已早有体现。

### 三、预言电磁波，实现第三次大综合

#### 1. 预言电磁波

由麦克斯韦方程组出发，根据交变的电场（或磁场）可在周围产生交变磁场（或电场），这

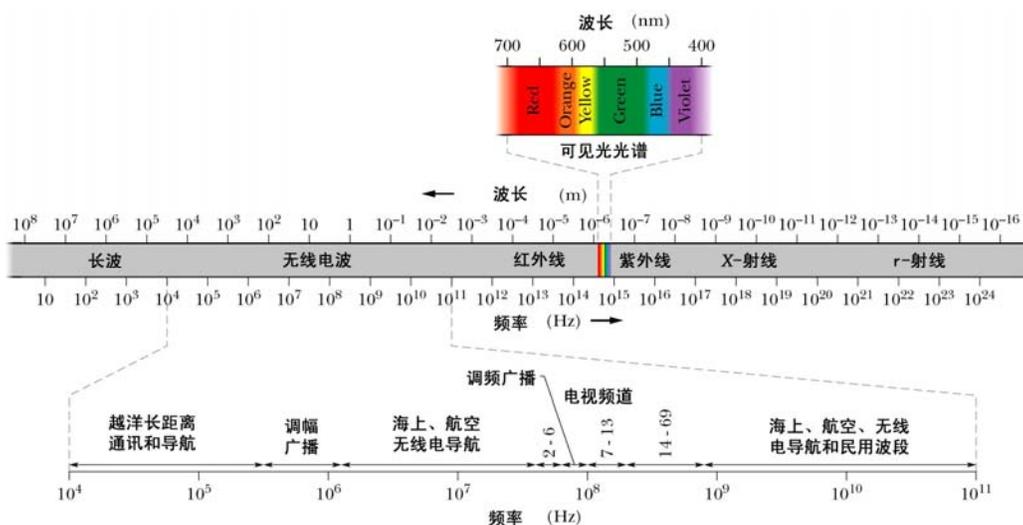
种交变电磁场(电磁振荡)可不断由振源向远处传播,就形成了电磁波。

麦克斯韦还推导出了电磁波在真空中的传播速度为:

$$v_{\text{真空}} = c \text{ (光速)} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8.854 \times 10^{-12} \text{ 库仑}^2 / (\text{牛顿} \cdot \text{米}^2) \times 4\pi \times 10^{-7} \text{ 牛顿/安培}}} \\ = 3.00 \times 10^8 \text{ 米/秒}$$

并由此推断光就是电磁波。

电磁波谱:



## 2. 电磁波谱的划分和产生:

### (1) 无线电波

一般由天线上的电磁振荡发射出去,它是电磁波谱中波长最长的一个波段。由于电磁波的辐射强度随频率的减小而急剧下降,因此波长为几百公里的低频电磁波通常不为人们注意。通常使用的包括长波、中波、短波、超短波和微波,波长范围长到10公里小到1mm。

### (2) 红外线

波长范围大约在0.6 mm~760 nm之间的电磁波称为红外线,它的波长比红光更长,人眼看不见。它能透过浓雾或较厚大气层而不易被吸收。红外线虽然看不见,但可以通过特制的透镜成像。根据这些性质可制成红外夜视仪,在夜间观察物体。

### (3) 可见光

可见光在整个电磁波谱中所占的波段最窄,其波长范围在760nm~400nm之间。这些电磁波能使人眼产生光的感觉,所以称为光波。可见光的不同频率决定了人眼感觉到的不同颜色,白光则是由各种颜色的可见光——红、橙、黄、绿、青、蓝、紫,按一定光强比例混合而成,称为复色光。

### (4) 紫外线

波长范围在400nm~5nm之间的电磁波称为紫外线 (ultraviolet),它比可见光的紫光波长更短,人眼也看不见。由于紫外线的能量与一般化学反应所涉及的能量大小相当,因此它有明显的化学效应和荧光效应,也有较强的杀菌本领。

无论是红外线、可见光或紫外线，它们都是由原子的外层电子受激发后产生的。

(5) X射线

伦琴在1859年发现了X射线。它的波长比紫外线更短，它是由原子中的内层电子受激发后产生的，其波长范围在0.04 ~ 5 nm之间。X射线具有很强的穿透能力，在医疗上用于透视和病理检查；在工业上用于检查金属材料内部的缺陷和分析晶体结构等。

(6)  $\gamma$  射线

这是一种比X射线波长更短的电磁波，它来自于宇宙射线或由处于激发态的原子核以及某些放射性核素在衰变过程中辐射射出来，其波长范围在 0.04nm 以下，以至更短。它的穿透力比X射线更强，对生物体的破坏力很大。除了用于金属探伤外，还可用于了解原子核的结构。

3. 赫兹实验

深刻、完美、新颖的麦克斯韦方程组于1864年提出，但开始并不被人们接受。直到1888年，赫兹用实验证明了电磁波的存在，并证明了电磁波不仅传播速度和光速一样，而且有类似光的特性（反射、折射、衍射、偏振等）。从此麦克斯韦方程组才被世人公认。

4. 第三次大综合

麦克斯韦不仅将电学与磁学完全统一起来，而且又将他们与光学统一起来，实现了物理学史上继牛顿力学建立和能量守恒提出以来的第三次大综合。

麦克斯韦的贡献不仅在于科学理论本身，而且为后人提供了丰富的科学思想和研究方法。值得指出的是，他是英国科学史上第一位创建和领导了在现代科学革命起先锋作用的卡文迪许实验室，并为该实验室立下了方针、政策和宗旨，指导实验室培养了无数科学人才，取得了大量杰出成果。