

走向统一的自然力

电力与磁力的统一（II）

厉光烈 张晓芳

2. 电磁感应

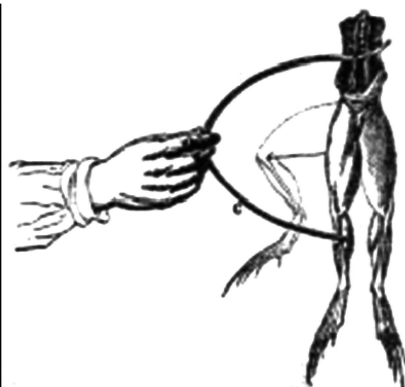
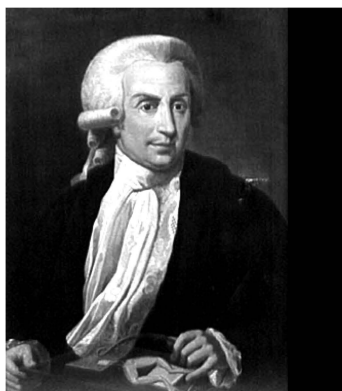
将电和磁联系起来认识，首先应该归功于奥斯特，是他在1820年发现了电流的磁效应；随后，安培发现了电流与电流之间存在相互作用，并提出安培定律来定量描述这一作用；最后，法拉第发现了电磁感应现象，进一步揭示了电与磁的内在联系。

奥斯特的“电动生磁”

早在远古时期，人类就通过雷闪观察到电荷在大气中移动所留下的痕迹，后来富兰克林通过著名的风筝实验引下了天上的“雷电”，将其称为“动电”，也就是我们现在所说的“电流”。但是，真正对电流开展实验研究的是意大利解剖学教授伽伐尼（L. Galvani, 1737 ~ 1798）。1780年，一次寻常的闪电使伽伐尼解剖室里桌子上与连接在一起的钳子和镊子相接触的一只蛙腿发生痉挛。一向严谨的伽伐尼没有忽视这个偶然现象，他花费了整整12年时间，对“肌肉运动中的电气作用”进行了反复研究，结果发现：如果将蛙腿的神经和肌肉与两种不同金属（例如铜丝和铁丝）相接触，它就会发生痉挛。实际上，蛙腿与两种不同金属所形

成的就是世界上第一个电流回路。伽伐尼还据此制成了“伽伐尼电池”。但是，伽伐尼对这种电流现象的认识并不清楚，他认为这是“动物电”的表现，金属只是起了放电回路的作用，而电起源于蛙腿。伽伐尼的好友、同为意大利人的伏特（A. Volta, 1745 ~ 1827）不同意他

的看法，认为电存在于金属中，而不是肌肉中。1783年，伏特在给朋友的信中说：“关于所谓动物电，您怎么看？我相信一切作用都是由于金属与某种潮湿的东西相接触才发生的”。1800年，他根据这一见解发明了著名的“伏打电池”。这是由一系列圆形锌片和银片交迭



伽伐尼及其蛙腿实验

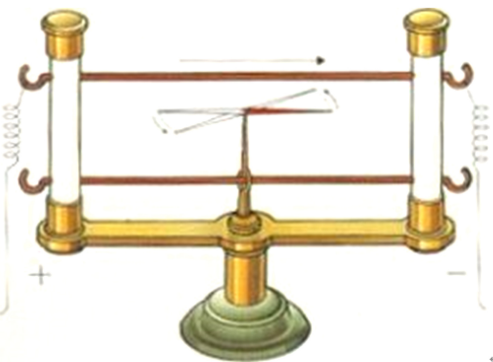


伏特及“伏打电堆”

而成的装置，在每一对锌片和银片之间，用在盐水或其他导电溶液中浸过的纸片隔开，所以又称“伏打电堆”。为了尊重伽伐尼的先驱工作，伏特当时将自己的发明称为“伽伐尼电池”。伏打电池的发明，为研究电流的各种效应（例如化学效应、热效应和磁效应）创造了条件。

丹麦物理学家和化学家奥斯特（H. C. Oersted, 1777 ~ 1851）崇尚康德提倡的“各种自然现象是相互关联”的学说。虽然库仑认为电与磁有本质上的差别，安培和毕奥等物理学家也都认为电与磁不会有任何联系，但是，富兰克林曾经发现莱顿瓶放电会使钢针磁化，这使奥斯特相信电、磁、光、热等现象之间应当存在内在联系。于是，他提出，既然电流流过导体能产生热效应、化学效应，为什么不能产生磁效应呢？为了解答这个问题，他用了13年时间寻找电流对磁针的作用，但因方法不对而未获结果。直到1820年4月，在一次实验中，他终于发现：处在通电直导线附近的小磁针确有偏转。曾经目睹这次实验的哈斯坦在1857年写给法拉第的信中详细描述了当时的情景：

“奥斯特将一根与伽伐尼电池（即伏打电堆）相连接的导线垂直地跨在一枚磁针上，没有发现磁针运动。然后，他再用更强的伽伐尼电池做同样的实验，磁针仍然没有运动，就在他准备结束实验时忽然又说道：‘让我们把导线同磁针平行放置再试试……’刹那间，他完全楞住了，因为他看到这时磁针几乎和磁子午线方向（即在地球磁场作用



奥斯特及其“电动生磁”实验

下磁针在自由静止时其轴线所指的方向）成直角地大幅度摆动着。接着他又说道：‘现在让电流方向反过来’，于是磁针就沿着相反方向偏转。”后来，奥斯特又发现磁铁也可使通电导线发生偏转，从而揭示了电现象与磁现象的内在联系。

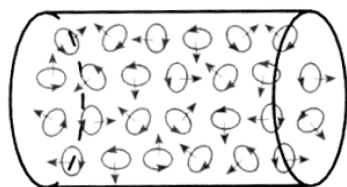
安培揭示磁力的规律

1820年9月11日，即奥斯特宣布他的发现后还不到两个月，法国天文学家和物理学家阿拉果（F. Arago, 1786 ~ 1853）就在法国科学院的报告会上演示了奥斯特的实验。阿拉果的报告在法国科学界引起了巨大的反响，当时尚未从

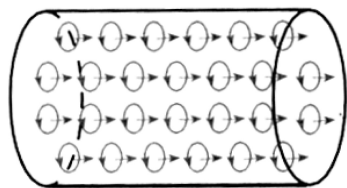
事物理工作的安培（A. M. Ampere, 1775 ~ 1836）在听讲后的第二天就重复了奥斯特的实验，并于阿拉果报告一周之后的9月18日、9月25日和10月9日在法国科学院会议上连续宣读了三篇重要论文。

在第一篇论文中，他提出了圆形电流产生磁的可能性，还通过实验发现，磁针偏转方向与直线电流的方向之间服从右手螺旋法则，后人称其为“安培右手定则”。

在第二篇论文中，他通过实验进一步指出，不仅电流与磁针有相互作用，而且电流与电流之间也存在相互作用。后来，安培还据此



无序分子电流无磁性



有序分子电流产生磁性

安培及其电流分子假说

提出了著名的分子电流假设：每个分子的圆形电流就像一枚小磁针。

在第三篇论文中，他介绍了不同形状的电流（如通电螺线管、圆电流等）之间的相互作用。

根据奥斯特的发现和自己的新发现，安培做出了一个重要的理论抽象：磁现象的本质是电流。磁体与磁体，磁体与电流，电流与电流之间的各种相互作用都应归结为电流与电流的作用。安培意识到，定量解释一切静磁现象的关键在于寻找两个电流元之间的作用力所遵循的规律。所谓“电流元”，就是长度为无穷小的一段电流，任何实际的电流都可以看作是一段又一段电流元的集合。然而，恒定电流总是以闭合回路形式出现的，并不存在孤立的恒定电流元，因此，安培无法通过直接的实验测量来寻找电流元之间的作用力的规律。经过精心的考虑，安培巧妙地设计了四个示零实验，即测量结果为“零”的特殊实验，并伴之以缜密的理论分析，终于发现了两电流元之间作用力所遵循的安培定律（又称安培环路定律）：同向电流相吸，异向电流相斥，其数学形式与库仑定律相似：

$$df = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 d\mathbf{l} \times (I_1 d\mathbf{l} \times \mathbf{r}_{12})}{r_{12}^3},$$

式中 \mathbf{r}_{12} 为从第一个电流元 $I_1 d\mathbf{l}$ 所在处指向第二个电流元 $I_2 d\mathbf{l}$ 所在处的矢径； μ_0 为“真空磁导率”，在国际单位制中，其值被规定为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 牛/安²。安培定律是静磁学的基础，它不仅可以用定量地解释恒定条件下的各种磁作用，而且可以用来研究物质的磁性，其

地位与静电学中的库仑定律相当。

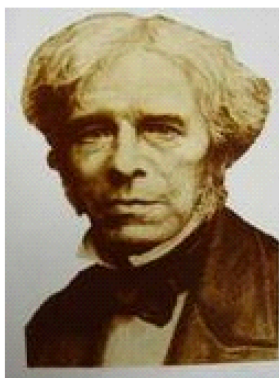
另外，安培还根据“磁现象的本质是电流”这一观念指出，细长磁棒就相当于载流直螺线管，并据此解释了磁棒一分为二时两极总是共存、不可分割的实验事实。

法拉第发现电磁感应

奥斯特实验向人们揭示了电流的磁效应，也就是“电动生磁”，那么，反过来磁能否生电呢？不少物理学家做了探索，均无功而返，只有英国物理学家法拉第（M. Faraday, 1791 ~ 1867）坚持不懈，终于在10年之后取得了成功。现在让我们从头谈起：

1821年，英国《哲学年鉴》主编邀请著名化学家戴维（H. Davy, 1778 ~ 1829）撰文介绍奥斯特发现电流磁效应以来电磁学方面的研究进展。戴维把这项工作交给了他的助手——当时正致力于化学研究的法拉第，从此法拉第的研究热情开始转移到电磁学方面。不久，他重复了奥斯特的实验，并将磁针放在通电长直导线周围不同的地方，发现小磁针会沿着环绕导线的圆周取向，后来人们将其称之为“法拉第力线”。随着研究的深入，

他逐步形成了一个想法：既然电会生磁，那么磁也应能生电。1822年，他在日记里写下了自己的这一想法：“磁能转化为电”。自1824年起，法拉第开始进行这方面的探索。他先将A、B两根导线平行地放置，在导线A中通以稳恒电流，而让导线B接上电流计。他期望导线A中的电流所产生的磁场会拖引导线B中的电荷运动，即产生电流。然而，尽管他尽可能增强电流并使用极灵敏的电流计，后来还采用强磁铁代替通电导线，但是，他仍未能见到电流计中的指针有任何变化。直到1831年8月，在经历了多次失败以后，他终于取得了成功。这次，他把长约62米的一根铜丝缠绕在一个粗圆木棒上，再把同样长的另一根铜丝嵌绕在同一个木棒上，中间用绝缘线隔开，并让其中一匝线圈通过开关与电池组相连，另一匝线圈则与一只电流计组成闭合回路，实验发现：当开关突然接通或断开时，电流计里的指针都会发生突然而极其微小的摆动，但当开关一直接通，电流不断通过时，电流计里的指针则没有任何反应。法拉第立刻意识到，这正是寻



法拉第及其电磁感应实验（图中线圈就是法拉第当年用过的）

觅已久的电流磁效应的逆效应，而过去种种失败的原因就在于，没有认识到这是一种在非恒定条件下出现的暂态效应。由此，法拉第紧接着成功地做了几十个类似的实验，都有感应电流出现。1831年11月，法拉第把产生感应电流的原因归纳为五类：变化着的电流，变化着的磁场，运动的恒定电流，运动的磁铁，在磁场中运动的导体，并把这类现象称为“电磁感应”。

电磁感应现象的特点是出现了“感应电流”，这表明存在着某种能够推动电荷运动的类似于“电源”的作用，为了定量描述这种“电源”做功的本领，法拉第引入“感应电动势”的概念，并认为这是解释电磁感应现象的关键。

电磁感应有两种现象：自感和互感，两者的差别仅在于：前者是，在一个线圈中，因电流变化而在该线圈自身引起感应电动势的现象；后者则是，当一个线圈中的电流发生变化时，在其邻近的另一个线圈中产生感应电动势的现象。



亨利

法拉第发现的是互感，自感则是由美国物理学家亨利（J. Henry, 1797 ~ 1878）在1832年发现的。说到亨利，就不能不提到他的遗憾。原来，就在法拉第有关电磁感应现象的论文发表三个月以后，他在无意中看到的一本杂志上看到一篇介绍法拉第发现的报道，这使他十分懊丧，因为早在一年以前他就发现了这个现象，只是为了积累更多的数据，没有及时发表。到了晚年，他对自己的这次延误更是追悔莫及。

谈到遗憾，就不能不提一下年轻的瑞士科学家科拉顿（J. D. Colladon, 1802 ~ 1892）。1825年，他在用实验探索如何产生感应电流时，也想到将条形磁铁在线圈中插进和抽出；但是，为了排除磁铁对“电流表”的影响，他把“电流表”和线圈分别放在两个房间里，实验过程中，他在两个房间之间跑来跑去，因此没有观察到将条形磁铁插进或抽出线圈那一刹那产生的电磁



楞次

感应现象。

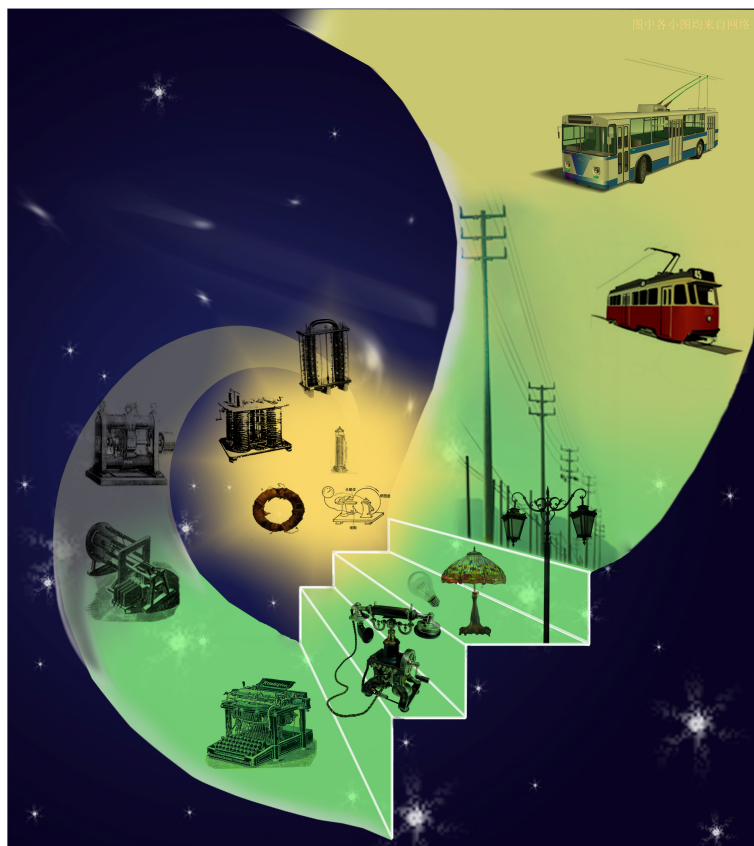
法拉第虽然发现了电磁感应现象，但是他对感应电流方向的叙述多少还有些含混。1833年，俄国物理学家楞次（H. F. E. Lenz, 1804 ~ 1865）在“论动电感应引起的电流方向”的论文中，对感应电流方向给出了明确的叙述：感应电流的方向总要使得它所产生的磁场阻碍引起感应电流产生的那个磁场的变化^①。这就是楞次定律，它揭示了电磁现象中的一种“惯性”



科拉顿的“跑进跑出”

现象，是能量守恒定律在电磁感应现象中的具体表现。1845年，德国数学家诺依曼（F. Neumann, 1798 ~ 1895）据此给出了电磁感应的定量规律——导体回路中的感应电动势与穿过回路的磁通量的变化率成正比： $\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$ ，式中磁通量 Φ 取决于磁场的大小、方向和回路面积。后来，这个公式被称为法拉第电磁感应定律。

电磁感应现象的发现和研 究，使电磁学摆脱了静止、恒定条件的束缚，向变化、运动的一般情形拓展；它所揭示的电现象和磁现象之间的相互联系和转化，不仅为电磁理论的建立奠定了基础，而且具有重大的应用价值。虽然科学研究的真正魅力在于它的非功利性，但是大多数具有社会责任感的科学家仍然会将自己的发现、发明与人类的利益和命运相联系。在发现电磁感应之后，法拉第曾举行过一次科普讲座，当时在场的英国财政大臣问道：“它到底有什么用途？”法拉第认真地回答说：“阁下，也许要不了多久，你就可以对它收税了。”



人类进入电气化时代

这段话，后来成为科学发现、发明与经济发展和社会进步之间关系的一段千古美谈。众所周知，伴随着运用电磁感应原理制造的发电机、电动机和变压器等的问世，人类迎来了电气化时代。

（厉光烈，中国科学院高能物理研究所 100049；张晓芳，江苏省宿迁中学 223800）

① 关于场，我们将在下一讲的“法拉第力线”中作更为详细的介绍。

科苑快讯

基因测序拯救香蕉

关于香蕉可能灭绝的说法似乎有些夸张。香蕉的基因测序工作最近已完成，科学家希望借此获得新的抗性基因，以使香蕉免受黄叶病和黑斑病这两种真菌疾病的威胁。世界上半以上的香蕉都属于一个称为“卡文迪什”的品种，没

有种子而且不能进行有性繁殖，这意味着它们在遗传基因上是相同的，都要遭受这些真菌的威胁。

卡文迪什香蕉有三条染色体，因此测序非常困难。研究者最终完成了 DH Pahang（右图）的测序工作，并将结果发表在了《自然》网站上。DH Pahang 是三种卡文迪什香蕉之一，对黄叶病有高抗性。其种子表明它是有性繁殖的，因此有望用于培育对黄叶病和黑斑病具有



高抗性的新品种。

（高凌云编译自 2012 年 7 月 11 日 www.sciencemag.org）