# 第4章 电磁波 第1节 电磁波的产生

向平静的水面抛一颗石子，水面会出现一圈圈凹凸相间的水波向外传播，这是机械振动形成的机械波。用什么方法可产生电磁波呢？本节我们将学习产生电磁波的原理和方法。

## 1．麦克斯韦的预言

1820 年，丹麦物理学家奥斯特发现了通电导线会使磁针偏转，揭示了电流的磁效应。1831 年，英国物理学家法拉第发现电磁感应现象，表明磁也会“生电”。电与磁究竟有怎样的联系？

19 世纪 60 年代，在总结法拉第等人电磁现象研究成果的基础上，英国物理学家麦克斯韦建立了完整的电磁场理论，精辟地揭示了电场与磁场之间的联系，预言了电磁波的存在，并提出了重要假设。

（1）变化的磁场周围会产生电场

由法拉第电磁感应定律可知，穿过电路的磁通量发生变化时，电路中会产生感应电动势。为了解释感应电动势的存在，麦克斯韦提出假设：在变化的磁场周围会激发出一种电场——涡旋电场（也称感生电场，图 4-1）。只要磁场发生变化，就有涡旋电场。如果磁场随时间均匀变化，则激发的涡旋电场是稳定的，即涡旋电场不随时间变化；如果磁场随时间不均匀变化，则激发的涡旋电场随时间变化。

*B*（增大）

*E*

图 4-1 变化的磁场产生涡旋电场示意图

（2）变化的电场周围会产生磁场

奥斯特通过实验发现，电流的周围存在磁场，当时人们认为电流周围的磁场是由电荷定向运动产生的。从场的观点出发，麦克斯韦提出：电荷的定向运动导致周围电场的变化，电流周围的磁场是由变化的电场产生的。因此，麦克斯韦得出了这样一个推论：即使没有电流存在，只要空间某处的电场发生变化，也会在其周围产生涡旋磁场。

如图 4-2 所示，电容器在充电过程中，随着电荷的增加，电容器两极板间的电场发生变化，就会在周围产生涡旋磁场。如果电场随时间均匀变化，则激发的磁场是稳定的；如果电场随时间不均匀变化，则激发的磁场随时间变化。

*E*（增大）

*i*

*B*

图 4-2 变化的电场产生涡旋磁场示意图

根据麦克斯韦的理论可得出：交变的电场周围产生频率相同的交变的磁场，交变的磁场周围产生频率相同的交变的电场。交变的电场和交变的磁场相互联系在一起，就会在空间形成一个统一的、不可分割的电磁场。这种在空间交替变化并传播出去的电磁场就形成了电磁波（electromagnetic wave）。自然界存在许多不同频率的电磁波，它们都以光速在空间传播，可见光只不过是人眼可看得见的、频率范围很小的电磁波。

### 科学书屋

**涡旋电场、位移电流与麦克斯韦方程组的意义**

涡旋电场与位移电流是麦克斯韦电磁场理论的两个核心概念。

涡旋电场是指变化的磁场在其周围空间激发出的电场。它不同于静电场，静电场的电场线起于正电荷，止于负电荷，涡旋电场的电场线是闭合曲线；静电场做功与路径无关，但涡旋电场做功与路径有关。

麦克斯韦认为，电流能激发磁场，电容器在两极间的电场发生变化时也能激发磁场，就好像两极间存在“电流”一样，他把这种电流称为位移电流。位移电流不是由电荷定向移动形成的电流，其本质是变化的电场，它可存在于真空、导体、电介质中，不会产生焦耳热，也不会产生化学效应。

麦克斯韦提出的涡旋电场和位移电流假说的核心思想是：变化的磁场可激发涡旋电场，变化的电场可激发涡旋磁场；电场和磁场不是彼此孤立的，它们相互联系、相互激发，组成一个统一的电磁场。麦克斯韦进一步将电场和磁场的所有规律综合起来，建立了完整的电磁场理论体系。这个电磁场理论体系的核心就是麦克斯韦方程组。从麦克斯韦方程组可预见电磁波的存在，确定电磁波的传播速度为光速，且光也是某种频率的电磁波。

牛顿的万有引力定律将力学体系完美统一起来，而麦克斯韦方程组则将电磁学完美统一起来。它所揭示出的电磁相互作用的完美统一，使物理学家相信物质的各种相互作用在更高层次上应该是统一的。

## 2．赫兹实验

麦克斯韦提出电磁波的预言后，许多物理学家都持怀疑态度，因为人们无法检验麦克斯韦的预言。

1888 年，德国物理学家赫兹注意到感应线圈高压电极间的空隙处有时会产生火花放电现象。他对这种放电现象进行了深入研究，第一次用实验证实了电磁波的存在。

赫兹实验的原理如图 4-3 所示。左边是电磁波发射器，其中 A、B 是两根金属杆，两端各带一个金属球，两球间有一很窄的间隙。感应线圈两端产生足够高的高压时，两金属球之间的空气被击穿，在两球间隙处产生火花放电。右边是接收器，即一个留有间隙的金属圆环，在间隙处环的两端也各带一个金属球。

发

射

接

收

感应线圈

振子

*A*

*B*

图 4-3 赫兹实验原理示意图

赫兹观察到，当与感应线圈两极相连的金属球间有火花跳过时，环的间隙处也有火花跳过。当火花在 A、B 间跳动时，在周围空间建立了一个迅速变化的电磁场，按照麦克斯韦的理论，这种变化的电磁场以电磁波的形式在空间传播。当电磁波经过接收器时，导致接收器产生感应电动势，使接收器两球间隙处产生电压；当电压足够高时，两球之间就会产生火花放电现象，从而证明了电磁波的存在。

赫兹的实验证明了麦克斯韦的预言，为麦克斯韦的电磁场理论奠定了坚实的实验基础。

麦克斯韦电磁场理论的建立和实验验证是 19 世纪物理学领域最重大的事件之一。它全面地总结了电磁学研究的成果，在此基础上建立了完整的电磁场理论体系，并且科学地预言了电磁波的存在，从理论上预见了电磁波在真空中的传播速度等于光速，由此揭示了光、电、磁现象的内在联系及统一性，完成了物理学的又一次大综合。

## 3．电磁振荡

电磁振荡能产生电磁波。什么是电磁振荡？下面我们先做一个关于电磁振荡的实验。

### 实验与探究

**电磁振荡**

按图 4-4 所示电路图连接电路，将开关拨到 1，给电容器充电。然后把开关拨到 2，注意观察灵敏电流计指针如何偏转。你能从中得到什么结论？

图 4-4 实验电路图

*L*

*E*

*C*

2

1

G

在上面的实验中我们看到，灵敏电流计的指针左右摆动，摆幅逐渐减小，最后指针停在零点位置。电流计指针的来回摆动，表明电路中产生了大小和方向都周期性变化的电流。这种大小和方向都周期性变化的电流称为振荡电流（oscillating current）；产生振荡电流的电路称为振荡电路（oscillating circuit）。由电感线圈 *L* 和电容器 *C* 所组成的电路就是一种基本的振荡电路，称为 *LC* 振荡电路。

在 *LC* 振荡电路中，已充电的电容器未放电时，电路中没有电流，电容器内电场最强。此时，电路的全部能量是电容器里存储的电场能［图 4-5（a）］。

*E*

*B*

（a）

（b）

（c）

（d）

（e）

*E*

*B*

*E*

图 4-5 振荡电路中能量转化示意图

闭合开关，电容器放电，其电荷量减少，由于线圈自感的阻碍作用，电流逐渐增大，磁场的磁感应强度与能量也逐渐增大。放电完毕时，电流最大，电场能全部转化为磁场能［图 4-5（b）］。

由于线圈的自感作用，线圈中的电流继续保持原来的方向并且逐渐减小，同时给电容器反向充电，电容器的电荷量逐渐增多，电场的强度与电场能逐渐增大，电流与磁场逐渐减弱。电流减为零时，磁场能全部转化为电场能［图 4-5（c）］。

此后，电容器又开始反向放电，两极板上电荷不断减少，电路中的电流逐渐增大，但电流方向与图 4-5（b）所示的电流方向相反。在此过程中，电场能逐渐转化为磁场能，放电完毕的瞬间，电场能又全部转化为磁场能［图 4-5（d）］。由于线圈的自感作用，电流继续流动，电容器又被充电，磁场能又转化为电场能［图 4-5（e）］。

上述过程周而复始地进行，就产生了方向和大小随时间做周期性变化的振荡电流，与振荡电流相联系的电场和磁场也周期性交替变化，电场能和磁场能相互转化。这种现象称为电磁振荡（electromagnetic oscillation）。

在实际的充、放电过程中，由于电感线圈和电路中存在电阻，电路中有能量损失，灵敏电流计指针摆动一会儿就停止。若不断地补充能量，就能在电路中持续产生大小和方向都随时间做周期性变化的电流，使电容器中的电场能和电感线圈中的磁场能不断地相互转化。

与描述交变电流一样，我们可用周期和频率来表示电磁振荡变化的快慢。完成一次周期性变化的时间称为电磁振荡的周期，一段时间内完成周期性变化的次数与这段时间之比称为电磁振荡的频率。如果没有能量损失，也没有外界影响，这时电磁振荡的周期和频率称为振荡电路的固有周期和固有频率，简称振荡电路的周期和频率。大量的实验表明，振荡电路的周期是由振荡电路中电感线圈的自感和电容器的电容决定的。电感线圈的自感越大，电容器的电容越大，振荡电路的周期就越长。*LC* 振荡电路的周期 *T* 与自感 *L*、电容 *C* 的关系是

*T* = 2π

振荡电路的频率 *f* 与 *L*、*C* 的关系是

*f* =

式中，周期（*T*）、自感（*L*）、电容（*C*）和频率（*f*）的单位分别为秒（s）、亨利（H）、法拉（F）和赫兹（Hz）。

只要改变 *LC* 电路中电感线圈的自感或者电容器的电容，就能改变振荡电路的周期和频率。

### 科学书屋

**谐振腔与石英晶体振荡器**

*LC* 振荡电路中，可减小电感线圈的自感或电容器的电容，以此增大振荡频率。但频率超过 1 GHz 时，由分立元件组成的 *LC* 电路就不再有效。高频振荡可由谐振腔产生，谐振腔是矩形的金属盒，它可替代线圈和电容器的共同作用（图 4-6）。盒子的大小决定了振荡的频率。微波信号源、微波炉等就是通过这种谐振腔来产生微波的。

*C*

*L*

图 4-6 谐振腔可替代线圈和电容器示意图

除 *LC* 振荡电路外，石英晶体振荡器（图 4-7）也能产生振荡电流。石英晶体有一种称为压电效应的特性：当在石英晶体的两侧加上电压时，它就会发生形变；反之，当晶体发生形变时，在相应的方向上也会产生电压。若在石英晶体的两侧施加交变电压，石英晶体就会产生机械振动，同时晶体的振动又会产生交变电压，从而形成振荡电流。石英晶体振荡器的振荡频率非常稳定，被广泛应用于计算机、手表、遥控器等设备中。

图 4-7 USB 闪存盘中的石英晶体振荡器

**封装后的石英晶体振荡器**

### 素养提升

能初步了解麦克斯韦电磁场理论的基本思想，了解电磁振荡的内涵，知道场的统一性与多样性。

能体会物理学对统一性的追求，能体会理论预言在科学发展中的作用，以及实验证据对新理论的支撑作用；能体会麦克斯韦电磁理论的基本思想，感受麦克斯韦电磁理论的美妙。

——物理观念，科学态度与责任

## 节练习

1．根据麦克斯韦的电磁场理论，变化的磁场周围会产生电场，均匀变化的磁场产生稳定的电场。根据法拉第电磁感应定律，说明为什么均匀变化的磁场产生的电场是稳定的。

**【参考解答】**根据法拉第电磁感应定律可知，变化的磁场产生的感应电动势只与磁通量的变化率有关，在均匀变化的磁场中磁通量的变化率是恒定的，产生的感应电动势也是恒定的，所以产生的电场是恒定的。

2．在某时刻的 *LC* 振荡电路中，电容器中的电场方向和线圈中的磁场方向如图所示。此时电容器在充电还是放电？电路中电流在增大还是减小？为什么？

*C*

*L*

**【参考解答】**在 *LC* 振荡电路中，当电容器充电时，电流在减小，电容器上的电荷量增大，磁场能转化为电场能。当电容器放电时，电流在增大，电容器上的电荷量减少，电场能转化为磁场能。通过图示电流方向可知，电容器在充电，振荡电流减少，电容器上的电荷量正在增大，两板间电压在增大，磁场能正在向电场能转换。

3．减小 *LC* 振荡电路的振荡周期，可行的办法有

A．固定电感 *L*，增大电容 *C* B．固定电感 *L*，减小电容 *C*

C．电感 *L* 和电容 *C* 都增大 D．电感 *L* 和电容 *C* 都减小

**【参考解答】**BD

4．一台收音机的 *LC* 调谐电路由电感线圈和可变电容器组成，可变电容器电容的变化范围是 30 ～ 300 pF，调谐电路能接收的电磁波的最小频率是 550 kHz，已知光速 *c* = 3×108 m/s，求它能接收的电磁波的最大频率和最小波长。

**【参考解答】***f*最大 = 1 739 kHz，*λ*最小 = 173 m

5．打开收音机的开关，转动选台旋钮，使收音机收不到电台的广播，然后开大音量。接着，按照如图所示的方式，在收音机附近将电池盒的两根引线反复碰触，你会听到收音机中发出“咔咔咔”的响声。为什么会产生这种现象？



**【参考解答】**电池盒的两根引线反复触碰时会产生变化的电流，变化的电流会向空中激发电磁波，收音机可以接收电磁波，所以收音机中会发出“咔咔咔”的响声。

6．请查询资料，结合牛顿万有引力定律和麦克斯韦电磁场理论，谈一谈你是怎样体会物理学发展过程中对统一性的追求的。写出你的体会，并与大家分享。

**【参考解答】**略。