

647099

1327

7724

振动与波

ZHENDONG YU BO



天津科学技术出版社

振 动 与 波

闵德芬 宁平治 编

天津科学技术出版社

振 动 与 波

闵德芬 宁平治 编

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津市蓟县印刷厂印刷

天津市新华书店发行

*

开本 787×1092毫米 1/32 印张 5 字数 102,000

一九八一年十月第一版

一九八一年十月第一次印刷

印数：1-10,000

统一书号：13212·39 定价：0.44元

前 言

在自然界，在科学技术领域中，存在着多种多样的物理本质不同的振动和波动现象。这些振动和波动现象分别属于力学、声学、电磁学、光学、量子物理学……的研究范围。这些本质上不同的物理现象，除了有其特殊性外，还在很大程度上存在着共同的规律性。

本书的首要任务是通过讨论振动与波，揭示客观世界的多样性和统一性，并着重说明振动与波在现代科学技术中的重要地位。

由于振动学是波动学的基础，故本书对振动部分（第一章）给以较多的原理性叙述。对波动部分（第二章）则重点讨论波的各种性质如何体现在各种本质不同的波中。最后两章选择了若干较有代表性的实例来说明振动与波在科学技术中的广泛应用以及在微观物理学中所起的重要作用。

本书既不是一本关于振动与波的物理学教科书，也不是一本关于振动与波的趣味物理学，而是一本教与学的辅助性读物。书中内容以定性叙述为主，侧重具体事例的说明，辅以较多插图。书中个别地方不得不用到一点简单的导数知识，但也简略作了入门性介绍。在目录中标有*号的内容理论性稍强，但初学者如果耐心读下去，还是会有收益的。

限于水平，书中错误和不妥之处在所难免，敬希广大读者批评指正。

闵德芬 宁平治

一九八〇年四月

目 录

一、振动	(1)
(一) 简谐振动	(1)
1. 简谐振动现象	(1)
2. 理想的弹簧振子	(5)
3. 理想的 $L-C$ 振荡电路	(7)
4. 一点简单的导数知识*	(10)
5. 电磁振荡方程*	(14)
6. 简谐振动的一般性质*	(16)
(二) 阻尼和周期性外力的影响	(20)
1. 摩擦力和电阻	(20)
2. 周期性外力和外加电信号	(23)
3. 共振	(25)
4. 一般讨论*	(27)
(三) 简谐振动的迭加	(31)
1. 位相的概念	(31)
2. 同方向同频率振动的合成	(33)
3. 同方向不同频率振动的迭加	(35)
4. 频谱	(37)
二、波	(44)
(一) 波的描述	(44)

1. 波速和波长·····	(44)
2. 波的物理描述·····	(47)
3. 波的几何描述·····	(50)
4. 简谐波的数学表示·····	(51)

(二) 波的一般性质····· (54)

1. 波的反射·····	(54)
2. 当波改变速度的时候·····	(59)
3. 波的干涉·····	(63)
4. 驻波·····	(64)
5. 波的衍射·····	(67)
6. 偏振(极化)·····	(70)
7. 多普勒效应·····	(73)
8. 相速、群速和色散* ·····	(75)

(三) 波的微分方程式* ····· (79)

1. 偏导数* ·····	(79)
2. 机械波的微分方程式* ·····	(80)
3. 电磁波的微分方程式* ·····	(83)

(四) 漫谈几个专题····· (85)

1. 声谱·····	(85)
2. 冲击波·····	(88)
3. 地震波·····	(90)
4. 电磁波谱·····	(93)

三、科学技术中的振动与波·····(101)

1. 振动机械·····	(101)
2. 电子示波器·····	(103)

3. 频谱分析仪	(106)
4. 声纳与雷达	(108)
5. 相位测距仪	(113)
6. 全息摄影	(116)
7. 电子显微镜	(118)
8. 微波技术	(122)
9. 通信和广播	(126)

四、微观世界的振动与波

1. 物质波*	(131)
2. 原子中的电子驻波*	(136)
3. 双原子分子的简谐振子模型*	(139)
4. 原子核对 γ 射线的共振吸收*	(141)
5. 低能共振核反应*	(144)
6. 高能散射中的绕射现象*	(146)

一、振 动

振动是我们日常工作、生活中所熟悉的现象。例如，微风吹动树枝和树叶产生的摇动，挑着东西行走时扁担的上下弯曲，钟摆或蒸气机活塞的往复运动，拉胡琴时弦的颤动，机器运转时机体的轻微跳动，发生地震时建筑物的短时间晃动，等等。这些现象都有一个共同特点，就是物体在一定位置附近来回运动，我们称之为机械振动。在力学中可以用“位移”这个物理量随时间的变化关系来描述这种运动状态。物体的位移在某一固定值附近随时间反复变化，就是机械振动。

除了机械振动以外，在其他物理过程中也存在着大量的振动现象。实际上，象气压、电流、电压、电磁场强度等物理量，只要是它们在某一固定值附近随时间反复变化，都可以广义地称为振动。关于不同物理本质的振动，特别是机械振动和电振动，由于它们的基本规律是一样的，我们将结合具体问题陆续在本章中统一地加以讨论。

(一) 简 谐 振 动

1. 简谐振动现象

简谐振动是最简单、最基本的振动形式，搞清了简谐振动的规律就比较容易了解各种复杂振动的规律。我们首先来观察两个简单的实验。

图1-1是漏沙摆。我们使漏斗静止时的位置（平衡位置）恰好对准纸板上的直线 $00'$ ，然后一面使漏斗做幅度不大的摆动，一面匀速地拉动纸板，使纸板沿着垂直于漏斗摆动平面的方向移动。于是漏斗漏出来的细砂就在纸板上描绘出漏斗尖端在各个时刻的位置，即其位移随时间变化的关系曲线，这是我们所熟悉的正弦曲线或余弦曲线，例如可表示成

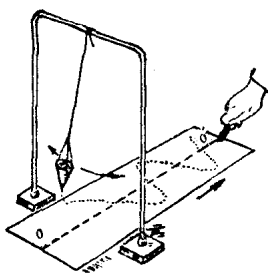


图1-1 漏沙摆

$$x = A \cos \omega t \quad (1-1)$$

上式中 x 代表位移， A 代表振幅， t 代表时间， ω 称为角频率。我们把 (1-1) 式所表示的曲线重绘于图 (1-2)。

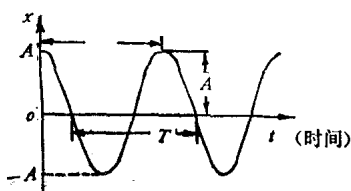


图1-2 简谐振动的余弦曲线

图 (1-2) 可以看出，振动物体离开平衡位置的最大位移就是振幅 A 。还可看出，振动物体的运动，每隔一定的时间 T 就重复一次，这段时间 T 叫做周期。

每秒钟内的振动周期数称为频率 ν 。显然，

$$\nu = \frac{1}{T}。角频率 \omega 是指 2\pi 秒内振动的周期数，即 \omega = 2\pi \nu。$$

一切按照 (1-1) 式的规律运动的现象都可称为简谐运动。

不难看出，同一简谐运动也可用正弦曲线表示：

$$x = A \sin \omega t$$

它和 (1-1) 式的差别仅是时间坐标起点不同，这里是：

当 $\omega t = 0$ 时, $x = 0$, 即位移为零;

当 $\omega t = \frac{\pi}{2}$ 时, $x = A$, 即此时位移为最大值, 等于振幅 A 。

我们再来看图(1-3), 它表示把照明用的交流电接到电子示波器的输入端。(关于电子示波器的基本原理将在第三章介绍), 这里只需要知道示波器可以把电压随时间变化的图形显示在它的荧光屏上。我们知道交流电压是忽大忽小忽正忽负有规律地随时间变化的, 从荧光屏上可以观察到这种变化规律恰是一条正弦曲线, 也就是说和图(1-1)中摆的运动规律是一样的, 只不过图(1-1)演示的是物体位移随时间变化的规律, 图(1-3)演示的是电压随时间变化的规律。类似的例子还可以举出许多, 图(1-4)绘出简谐振动的另一些例子。

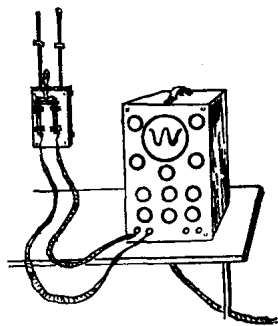


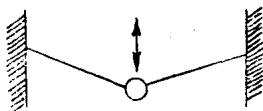
图 1-3 把示波器接到交流电源上



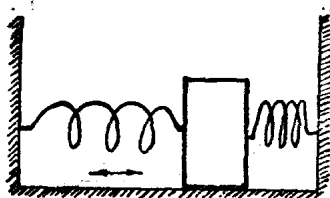
(1) 小球的来回摆动 (单摆)



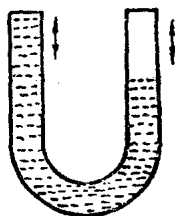
(2) 悬挂圆盘的来回扭动 (扭摆)



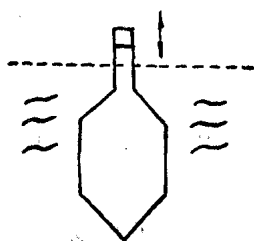
(3) 张紧的弦上小球的上下振动



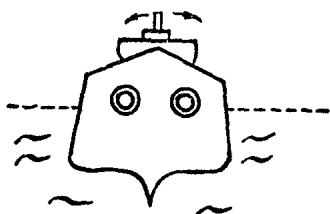
(4) 弹性力作用下, 物体的无摩擦运动



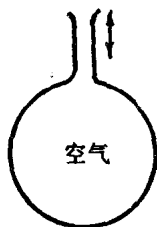
(5) 液体在U型管内的振动



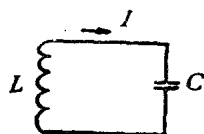
(6) 比重计在液体中的上下振动



(7) 船舶在静水中的微小侧振动



(8) 声共鸣器内空气的振动



(9) 电感 L 和电容 C 串联电路中的电振荡

图 1-4 简谐振动的例子

2. 理想的弹簧振子

为了深入讨论简谐振动，我们首先来分析一下弹簧振子的振动情形（图 1-5）。把一个很轻的弹簧左端固定，右端系一小球，并使之限制在光滑的水平面上运动。把小球稍微向右（或向左）推一下，小球就在弹性力的作用下左右振动，这种装置叫做弹簧振子。我们假定，

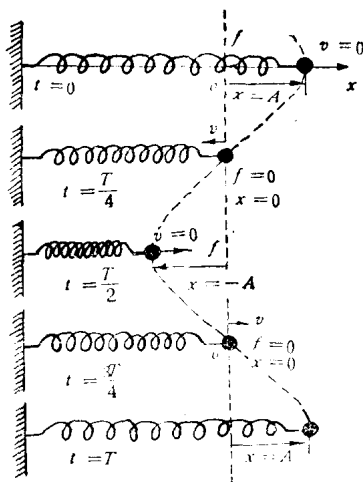


图 1-5 理想弹簧振子的振动

摩擦阻力可以忽略不计（无阻尼），而小球开始振动后就不再受任何外界的力（自由振动），这种简单情形称为理想的弹簧振子，因为实际情况摩擦阻力总是不可避免的。象这样为了突出问题的实质，暂时忽略一些次要因素，待弄清问题的实质后再考虑次要因素的影响，这种方法在科学研究工作中是常采用的。

在（图 1-5）中，开始时小球静止在 0 点（平衡位置）。当小球被推一下跑到平衡位置右侧，弹簧被拉长后，就有一个弹性力作用在小球上，这个力的方向指向平衡位置 0 点。当小球在 0 点左侧时，弹簧被压缩，同样有一个弹性力作用在小球上，力的方向仍指向 0 点。我们看到，弹性力 f 的方向总是与小球位移 x 的方向相反的。根据胡克定律，在弹性限度内，弹性力与弹簧的伸长（或压缩）距离成正比：

$$f = -Kx \quad (1-2)$$

上式中 K 是表示弹簧弹性强弱的倔强系数。设小球质量为 m （弹簧质量可忽略不计），它受弹性力 f 的作用产生加速度 a 。根据牛顿第二定律有：

$$f = ma. \quad (1-3)$$

上式说明，小球得到的加速度与弹性力成正比，并且方向相同。由（1-2）式和（1-3）式得：

$$a = -\frac{K}{m}x. \quad (1-4)$$

可见，小球的加速度 a 与其位移 x 成正比，但方向相反。（1-4）式称为理想弹簧振子的简谐振动方程。

当 $x = 0$ 时，即小球经过平衡位置 O 点时，因不受弹性力而没有加速度，但此时速度最大，小球的惯性使它继续沿原来方向运动。在整个振动过程中，弹性力 f 和小球的位移 x 、速度 v 、加速度 a 每时每刻都在变化，并且每隔一定时间（一个周期）就重复一次。

例如，在（图1-5）中，当小球从右端最大位移处经平衡位置 O 点运动到左端最大位移处的过程中，位移 x 的变化是：正最大（ A ） $\rightarrow 0 \rightarrow$ 负最大（ $-A$ ），相应的速度变化是： $0 \rightarrow$ 负最大 $\rightarrow 0$ ，而弹性力的变化则是负最大 $\rightarrow 0 \rightarrow$ 正最大。（注意：与 x 轴箭头指向相同的方向为正，相反的方向为负）。

如果从小球被拉到右端最大位移处开始松手时来算时间 t ，则松手时 $t = 0$ 。小球运动一个完整的来回所用的时间是周期 T ，于是自右端（ $x = A$ ）运动到 O 点所用的时间是

$t = \frac{T}{4}$, 再运动到左端 ($x = -A$) 共用的时间是 $t = \frac{T}{2}$,

再返回 0 点共用时间是 $\frac{3}{4}T$, 如 (图 1-5) 所示。

当小球在右端最大位移处, 由于弹性力最大, 因而弹性势能也最大。由于这时小球速度为零, 所以小球的动能也为零。当小球由此点向左边运动时, 势能逐渐减小, 动能逐渐增加。到了平衡位置, 由于弹性力消失, 故势能为零, 但此时速度最大, 故动能也最大。小球继续向左运动到最大位置时, 势能又增加到最大值, 而动能又减小到零。这是前半周期的情况。在后半个周期, 在小球自左向右运动的过程中, 动能和势能的变化也有类似的情况。

总之, 小球在振动过程中, 势能和动能在不断互相转化, 而总能量是守恒的。

3. 理想的 L - C 振荡电路

前面讨论的理想弹簧振子属于力学的研究范畴。在电磁学中类似的机构是理想的 L - C 振荡电路 (注: 本书中“振荡”与“振动”同义, 但在电磁学中多用“振荡”一词)。图 1-6 表示一个理想的 L - C 振荡电路, 它由电感线

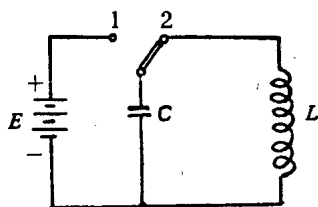


图 1-6 L - C 振荡电路

圈 L 和电容器 C 串联构成, 假设电路中电阻 $R = 0$ (理想情况)。图中开关接到位置 1 时可使电容器充电到电池电压 E , 它的上极片带正电荷, 下极片带负电荷。两极片间产生

了电场，储存了一定的电场能量。这类似于弹簧振子小球被拉到右端最大位移处而具有最大弹性势能的情况。

现在把开关接到位置 2，使电容器 C 与电感线圈 L 相连。这时电容器开始通过线圈放电，电路中开始有电流。这类似于把弹簧振子拉到右端后刚一松手，振子小球开始向左运动的情况，请对照（图 1-5）和（图 1-7）中时间 $t=0$ 的情形。

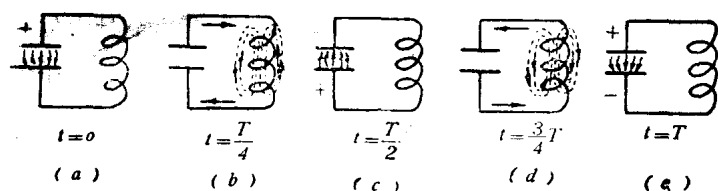


图 1-7 L - C 振荡回路的充放电过程

放电电流将在线圈中产生磁场，由于线圈的自感作用，电流不能一下子增大，只能由零逐渐增大，于是电容器极片上的电荷逐渐减少。电容器两端电压逐渐降低，电容器中储存的电场能也逐渐减少。但是，随着线圈中电流的增长，线圈中储存的磁场能逐渐增加，也就是说，电场能逐渐变成了磁场能。这个过程相当于振子小球由右端向平衡位置 0 点运动的过程。当电容器放电完毕，电压降至零，这时全部电场能转变成磁场能，线圈中的电流达到最大值。这类似于振子小球由右边恰好运动到平衡位置 0 点，请对照（图 1-5）和（图 1-7）

中 $t = \frac{T}{4}$ 的情形。

这时，虽然电容器上的电荷没有了，但是由于线圈的感应电动势，使电流不能一下子消失，这正如运动到0点的振子小球因具有最大速度而不能一下子停下来一样（惯性）。于是电流仍按原来方向继续流动。维持电流继续流动的能量是线圈储存的磁能，就象振子回到平衡位置时，由于有动能，仍可克服弹性力而继续向左运动一样。

当电流继续流动时，就使电容器下极片上的自由电子减少而带正电，上极片多了电子而带负电。在这样的反向充电过程中，线圈的磁能又逐渐变成电容器的电能，线圈中的电流逐渐减少，电容器上的反向电压逐渐增大。这类似于振子小球越过平衡位置后，动能减小、势能增大的情况。

当电流减小到零时，线圈磁场消失，磁能全部又转成电能，电容器上储存的电荷达到最大值，即电压达到最大值。这与振子小球运动到左面最大位移处动能全部转变为势能的情况类似。请对照（图1-5）和（图1-7）中 $t = \frac{T}{2}$ 的情形。这时的情形和振荡刚开始时（ $t = 0$ ）的情形相似，只不过 $t = \frac{T}{2}$ 时电容器两极片上电荷的符号与 $t = 0$ 时相反。

过了 $t = \frac{T}{2}$ 时刻以后，电容器开始反向放电，电流方向与前半周期相反。到 $t = \frac{3}{4}T$ 时，电容器放电完毕，电能又完全转变为磁能，但这时磁场方向与 $t = \frac{T}{4}$ 时的磁场方向相反。此后，到 $t = T$ 时磁能又完全转变为电能，电路中的状态和开