

影像物理

(供影像专业用)

李继兴 编

九江医学专科学校

影像物理

(供影像专业用)

李继兴 编

九江医学专科学校

前 言

随着物理学的发展和不断把其技术应用到医学成像领域,七十年代兴起了一门现代医学成像诊断新技术。八十年代出现了核磁共振成像的最新成就,使这门新技术发生了质的飞跃。

八十年代末,我国只有少数医学高等学校开设了现代影像专业。随着教改的深入,九十年代,开设影像专业医学高等学校如雨后春笋。

新专业——影像专业都把《影像物理》列为主要课程,但《影像物理》教材严重滞后。各校讲课都采用代用教材在其中东挖西找,至今也只有个别本科院校编写了《影像物理》为了适应教学,特别是为了广大的专科层次影像教学和广大医学工作者需要,我编写了《影像物理》一书。

本书内容共六章,振动和波、电路分析、超声成像、X光成像、核磁共振成像、核医学成像。编写内容以高中物理学基础知识为起点,力求适应从事医学影像诊断医务人员和技术人员的实际需要,尽量避免引用复杂的数学公式,只对基本原理作定量阐述,着重讲清楚现代医学成像的物理原理和临床应用。

编写由于无《影像物理》作参考,而且水平有限,一定有许多不当之处,希望读者给予指正。

编 者

1996年5月

目 录

第一章 振动和波	(1)
第一节 简谐振动	(1)
一 谐振动方程	(1)
二 描述谐振动的物理量	(4)
三 谐振动的能量	(6)
第二节 简谐波	(7)
一 波的产生和传播	(7)
二 简谐波的波动方程	(9)
三 波的能量	(12)
四 波的衰减	(13)
第三节 声波	(15)
一 声波的物理性质	(15)
二 声压、声强、声阻	(17)
三 声强级与响度级	(18)
第二章 电路分析	(23)
第一节 直流电	(23)
一 一段含源电路的欧姆定律	(23)
二 基尔霍夫定律	(26)
第二节 正弦交流电	(31)
一 正弦交流电的频率、位相、峰值	(31)

二	正弦交流电旋转矢量与复数表示法	(33)
三	交流电路中的电阻、电感、电容	(35)
四	R、L、C 串联电路	(41)
五	R、L、C 并联电路	(48)
六	交流电功率	(52)
第三节	三相交流电	(59)
一	三相交流电产生	(59)
二	三相电路的连接	(62)
三	感应电动机	(67)
第四节	电子示波器	(70)
第三章	超声波及其医学成像	(86)
第一节	超声波	(86)
一	超声波的性质	(86)
二	超声波的反射和折射	(87)
第二节	超声图像形成原理	(91)
一	A 型超声诊断仪	(91)
二	M 型超声诊断仪	(94)
三	B 型超声诊断仪	(98)
四	D 型超声诊断仪	(102)
五	超声诊断仪的分辨率	(114)
第四章	X 射线及其影像	(118)
第一节	X 射线的发生及其性质	(118)
一	X 射线的发生装置	(118)
二	X 射线的一般性质	(121)
三	X 射线的强度与硬率	(122)
第二节	X 射线谱	(123)

一	连续 X 射线谱	(124)
二	标识 X 射线谱	(127)
第三节	X 射线的衰减	(129)
一	X 射线与物质的相互作用	(129)
二	X 射线衰减规律	(130)
第四节	X 射线的医学影像	(132)
X 射线的治疗		(133)
X 射线诊断		(133)
第五章	核医学的物理基础及核素成像	(146)
第一节	放射性核素及核衰变方式	(146)
第二节	核衰变的规律	(152)
第三节	射线与物质的相互作用	(157)
第四节	辐射剂量	(160)
第五节	放射性核素在医学上的应用	(163)
一	探测器	(164)
二	核素显像装置	(167)
三	医学应用	(170)
四	放射性防护	(171)
第六节	放射性核素成像	(172)
一	单光子发射型计算机断层	(173)
二	正电子发射型计算机断层	(177)
三	SPECT 与 PET 的比较及其医学应用	(180)
第六章	核磁共振原理及成像	(184)
第一节	磁共振基本原理	(184)
一	原子核的自旋与磁矩	(184)
二	核磁共振	(192)

三 核磁共振的宏观描述.....	(195)
第二节 磁共振成像及临床诊断的物理依据.....	(205)
一 磁共振成像原理.....	(205)
二 MRI 临床诊断的物理依据	(213)
第三节 磁共振成像系统及主要优缺点.....	(217)
一 磁共振成像系统.....	(217)
二 MRI 的主要优缺点及其发展前景	(219)

第一章 振动和波

振动和波是十分普遍的运动形式,其基本知识是医学影像物理的基础。为此,本章着重介绍机械振动和机械波与影像有关的基本概念、性质与规律,进而介绍超声影像中常用的声学基础知识。

第一节 简谐振动

在忽略空气阻力的情况下,弹簧的振动、单摆的微小摆动都是谐振动。现以系在弹簧上的物体的振动为例,来说明谐振动的意义和规律。这个振动系统叫做弹簧振子。弹簧振子是在人们研究振动时提出的一个理想模型。当物体的质量比弹簧的质量大很多时,相对地说可把弹簧的质量视作为零,这样一个由质量可以忽略的弹簧和一个质量为 m 的物体组成的振动系统,便是弹簧振子。

一、谐振动方程

如图 1-1(a) 所示,一轻弹簧水平放置。一端固定,另一端与某物体连结,物体放在光滑的水平桌面上。弹簧自然长度所在位置 O 叫做平衡位置。将物体用手拉至 A 点〔如图 1-1(b) 所示〕然后轻轻松手,物体便在弹簧的弹性恢复力的

作用下向左作加速运动至平衡位置,如图 1-1(c) 所示。当物体运动到平衡位置时,虽然弹簧对物体的作用力为零,但这时物体已具有较大的速度,因惯性而继续向左运动至 A' 点,如图 1-1(d) 所示。在这一过程中,由于弹簧受压而对物体施以阻力并迫使它作减速运动,致使物体运动至 A' 点的速度降为零,但这时物体又受到弹簧指向右方的弹性恢复力的作用,使物体向右运动。当它越过平衡位置重新到达 A 点时,再度开始与上述相同的运动。若不考虑桌面和物体间的摩擦以及忽略空气的阻力,则物体受到弹簧弹性力的作用而围绕平衡位置的往复运动可不停地进行下去。

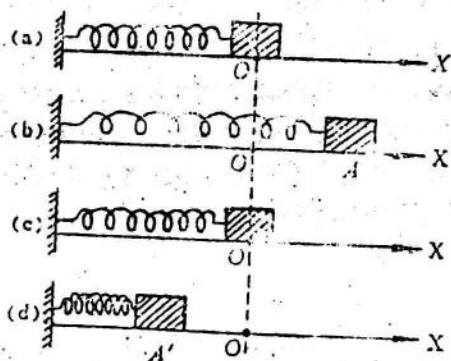


图 1-1 弹簧振子

根据胡克定律，在弹簧的弹性限度内，弹性力为 $F = -kx$ ，即物体在任意位置所受的弹性力 F 与物体相对于平衡位置的位移 x 成正比。式中 k 为弹簧的倔强系数。负号表示弹性力的方向始终与位移的方向相反。这种物体在弹性力或准弹性力(单摆摆动时所受的力)作用下的运动，称为谐振动。

描述谐振动规律的方程，可从物体受弹性力作用产生加速度的动力学角度，利用高等数学方法求得。也可以用参考圆的辅助方法从运动学的角度求得，这种方法既直观又不涉及高等数学，在分析谐振动及其合成时常会用到，现介绍如下。

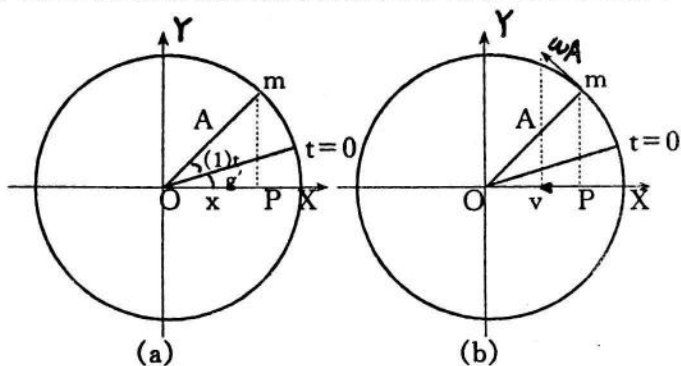


图 1-2 简谐振动与等速率圆周运动的关系

如图 1-2(a) 所示，有一质量为 m 的质点在半径为 A 的圆周上作等速率圆周运动，它在水平 X 上的投影点 P 将在 O 点(平衡位置)的左右来回作谐振动。在任一时刻，从 O 到 P 所作的矢量便是该时刻谐振动质点离开平衡位置的位移，用 x 表示位移矢量的量值，且规定矢量向右为正值，向左为负值。从图 1-2 上可以看到，投影点 P 的位移、速度和

加速度相应为质点 m 在作等速率圆周运动时的半径 A 、切线速度 ωA 和向心加速度 $\omega^2 A$ 在 X 轴上的投影(即在水平 X 轴上的分量)。它们分别为

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

$$v = -\omega A\sin(\omega t + \psi) = \omega A(\omega t + \psi + \frac{\pi}{2}) \quad (1-2)$$

$$a = -\omega^2 A\cos(\omega t + \psi) = -\omega^2 x \quad (1-3)$$

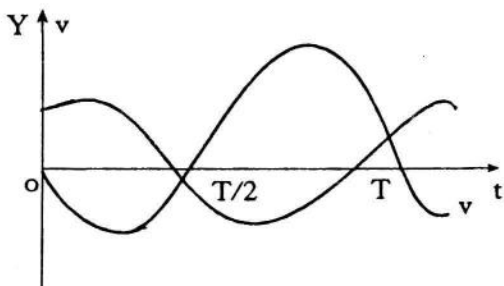


图 1-3 谐振动位移、速度曲线

这表明,作谐振动质点的振动速度也随时间按余弦或正弦规律变化。图 1-3 所示的是谐振动位移、速度曲线。

二、描述谐振动的物理量

下面讨论 $x = A\cos(\omega t + \psi)$ 中各量的物理意义。

1. 振幅、频率和周期

A 是振动质点离开平衡位置正的最大位移,称为谐振动

的振幅。

谐振动质点完成一次振动所需的时间称为谐振动的周期,用 T 表示。

谐振动质点在单位时间内所作振动的次数称为谐振动的频率,用 ν 表示。频率和周期的关系是

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (1-4)$$

频率的单位是 1/秒(s^{-1}),称为赫兹(Hz)。可以证明, $\omega = 2\pi\nu$, $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 。通常把 ω 称为谐振动的角频率, T 、 ν 和 ω 都是反映物体振动快慢的物理量。

根据牛顿第二定律,可以证明弹簧振子所受的力 F 为

$$F = -m\omega^2 x \quad (1-5)$$

式中 m 为物体的质量, ω 为角频率,由 $F = -kx$ 和(1-5)可得

$$k = m\omega^2 \quad \text{或} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-6)$$

由上式可得 $T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ 和 $\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$,这是弹簧振子的固有周期和固有频率。它表示振动系统在不受外界作用而阻尼又可忽略时的振动周期和频率,由振动系统本身的固有性质所决定。

2. 相位

$\omega t + \varphi$ 称为相位。相位的单位与角度单位相同。是一个随时间 t 变化的量,它确定谐振动质点在 t 时刻的运动状态。 φ 为时间 $t = 0$ 时,即开始振动时刻的相位,称为初相位。它确定谐振动质点在初始时刻的运动状态。在一个周期内,每一时刻

的相位不同,对应于每一时刻的运动状态也不同。当 $(\omega t + \varphi) = \frac{\pi}{3}$ 时, $x = \frac{1}{2}A, v = -\frac{\sqrt{3}}{2}A\omega$ 。表示 t 时刻图 1-1 中谐振子在平衡位置左边 $\frac{1}{2}A$ 处,以 $\frac{\sqrt{3}}{2}A\omega$ 的速度沿 x 轴负方向运动,当 $(\omega t + \varphi) = -\frac{\pi}{3}$ 时, $x = \frac{1}{2}A, v = \frac{\sqrt{3}}{2}A\omega$ 。表示图 1-1 中谐振子仍在平衡位置的左边 $\frac{1}{2}A$ 处,但以 $\frac{\sqrt{3}}{2}A\omega$ 的速度沿 x 轴正方向运动。由此可见,两种不同的相位表示了两种不同的运动状态。相位每增加 2π ,谐振动重复一次。

由图 1-3 可知,谐振动的位移、速度相位相差 $\frac{\pi}{2}$ 。速度相位超前 $\frac{\pi}{2}$,也可说位移相位落后 $\frac{\pi}{2}$ 。

三、谐振动的能量

以弹簧振子为例讨论谐振动的能量。如图 1-1 所示,当谐振子在平衡位置 O 时,它的速度最大,动能最大,势能为 0 。当位移达到最大值 A 时,速度为 0 ,动能为 0 ,势能最大。在振动过程中,动能、势能不断相互转化,其和恒定不变。

设弹簧谐振子在某一时刻的位移为 x ,速度为 v 。则势能和动能分别为

$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 \quad E_K = \frac{1}{2}mv^2$$

总能量
$$E = E_p + E_K = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

将式(1-1)和式(1-2)代入上式得

$$E = \frac{1}{2} kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi)$$

将 $k = \omega^2 m$ 代入上式可得

$$E = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \quad (1-7)$$

式(1-7)对任何谐振动都成立,即谐振动的总能量与其振幅的平方成正比,与其角频率的平方成正比。

第二节 简谐波

一、波的产生和传播

1. 波的产生和传播

振动的传播过程称为波,亦称为波动,如机械波和电磁波。激发波动的振动系统称为波源。机械振动在弹性媒质中的传播过程,称为机械波,如水波、声波等。机械波的产生,首先要有作机械振动的物体,即波源,其次要有能传播这种机械振动的弹性媒质。这里介绍的是机械波。

波分为横波和纵波。横波质点的振动方向与波的传播方向相垂直。横波只能在固体媒质中传播。纵波质点振动方向与波的传播方向相同。纵波可以在固体、液体、气体媒质中传播。例如,声波在空气中的传播就是纵波。必须指出,波动只是振动状态的传播,媒质中各质点只在各自的平衡位置附近振动,并不“随波逐流”。

波从波源发出,在媒质中向各个方向传播,引起媒质质点振动。振动相位相同的点所连成的几何面称为波面。波前是波传播时最前面的波面,它随时间向前移动。波面是平面的波称为平面波,波面是球面的波称为球面波。表示波传播方向的线称为波线。在各向同性的媒质中,波线总是与波面垂直的。球面波的波线是从波源向外的径向直线,如图 1-4 (a)所示。平面波的波线是垂直于波面的平行线,如图 1-4 (b)所示。

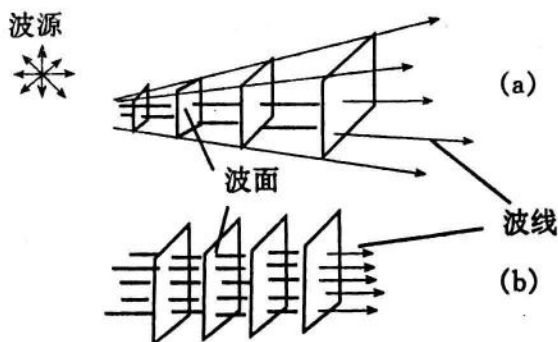


图 1-4 波面与波线

2. 波速 波长 波的周期

波的传播速度称为波速,用 c 表示。它是描述振动在媒质中传播快慢的物理量。波速主要决定于媒质的弹性和密度。

波在传播时,同一波线上两个相邻的相位差为 2π 的质点

之间的距离,即一个完整波的长度,称为波长,用 λ 表示。对于横波,两相邻波峰(或波谷)之间的距离就是波长。对于纵波,两相邻密部(或稀部)之间的距离就是波长。

波传播一个波长的距离所需的时间,或一个完整波通过波线上某点所需的时间,称为波的周期,用 T 表示。周期的倒数称为波的频率,用 ν 表示。波的频率是单位时间内通过波线上某点的完整波的数目。波的频率等于波源的振动频率。

根据上述定义,波速、波长、波的周期或频率之间的关系为

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda\nu \quad (1-8)$$

这是波动理论中的基本关系式,对于任何类型的波都成立。其中 c 决定于媒质的性质,因此同一频率的波,其波长随传播媒质不同而异。

二、简谐波的波动方程

谐振动在媒质中传播所形成的波面为平面的波称为平面简谐波,简称为简谐波。

现在用函数式定量地描述波线上任意质点在任意时刻的位移,这样的函数式就是波动方程。

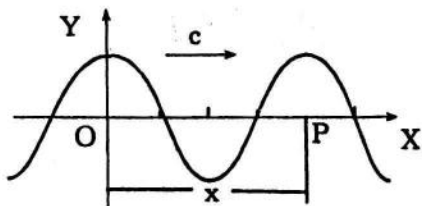


图 1-5 简谐波

如图 1-5 所示, 设有一列简谐波沿 X 轴的正方向无衰减地传播, 波速为 C 。O 是波线上任意一点, 在此作为坐标原点。波线上各质点的平衡位置用 x 表示, 质点振动的位移用 y 表示。设原点 O 处质点的振动方程为

$$y = A \cos \omega t$$

当振动沿 X 轴正方向以波速 c 传到任一点 P 时, P 点将以相同振幅和频率重复 O 点的振动, 不同的是它的相位要比 O 点落后一些, 因振动从 O 传到 P 需 $\frac{x}{c}$ 的时间。所以当 O 点振动了 t 秒时, P 点只振动了 $(t - \frac{x}{c})$ 秒。因此, P 点的振动方程为

$$y = A \cos \omega (t - \frac{x}{c})$$

$$\text{或} \quad y = A \cos 2\omega (\frac{t}{x} - \frac{x}{\lambda}) \quad (1-9)$$

式(1-9)所表示的是在波线上任一点(距原点为 x) 处的质点在任一时刻的位移, 称为平面简谐波在波动方向。

下面进一步说明波动方程的意义。在波动方程中含有 x