

2721
高等学校教材

医学超声原理与仪器

郑德连 编著

45.
DL
3



上海交通大学出版社

医学超声原理与仪器

郑德连 编 著

C0142219



上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书简要地阐述医学超声学原理、医用超声换能器及辐射超声场,系统、深入地分析B型超声诊断仪(B超)的工作原理、性能指标、构成型式、信号处理、图像存贮与处理、典型电路分析与设计,以及超声多普勒原理与仪器,简述超声治疗原理及仪器。

本书为电子工业部的工科电子类专业教材。可供大专院校生物医学工程与仪器类专业作为教材和参考书,也可供从事研究、生产、维修及使用医学超声仪器的人员阅读。

2028/15

医学超声原理与仪器

出 版: 上海交通大学出版社
(淮海中路1984弄19号)

发 行: 新华书店上海发行所

印 刷: 立信常熟印刷联营厂

开 本: 350×1168(毫米) 1/32

印 张: 9.25

字 数: 245,000

版 次: 1990年1月 第一版

印 次: 1990年2月 第一次

印 数: 1—2,800

科 目: 214—315

ISBN7-313-00521-0/TH·77

定 价: 2.15元

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会仪表与测量编审小组征稿,推荐出版,责任编委黄奕昌。

本教材由上海交通大学郑德连编写,黄奕昌主审。

医学超声诊断成像技术在过去十几年中有了长足的进展。超声图像诊断方法以其突出的优点(使用方便、无创伤、无剂量积累等),现已成为临床医学中不可缺少的一种非侵入性诊断方法,在医学影像诊断中确立了重要地位。生物医学超声学、换能器材料科学、电子学以及计算技术的发展,为医学超声仪器性能的提高创造了条件。改进换能器设计,提高工作频率,采用多段聚焦、数字扫描转换及图像处理等技术的结果,实时 B 型图像的质量有了明显的提高。从 70 年代起,为培养从事生物医学仪器的高级技术人才,国内一些大学相继建立生物医学工程与仪器专业。本教材就是为了满足医学超声仪器课程的教学需要而编写的。鉴于 B 型超声诊断仪(简称 B 超)是医学超声仪器中发展最快,最受注目的一种,因而也自然地成为本教材内容的重点。第一、二章简要地阐述医学超声学原理与医用超声换能器和辐射超声场。第三、四、五、六章以 B 超为主线,讨论超声诊断仪的工作原理、性能指标、构成型式、信号处理、图像的存贮与处理、典型电路的分析与设计等。第七章讨论超声多普勒的原理、信号解调与仪器。第八章简述超声治疗原理及仪器。可供大专院校生物医学工程与仪器类专业作为教材和参考书,参考学时数为 45 学时。已学过有关医学超声学原理与换能器方面先导课的,可从第三章开始,参考学时数为 36 学时。也可供从事研究、生产、维修以及使用医学超

声仪器的人员阅读。

本教材编写过程中，得到上海交通大学生物医学工程与仪器专业教研室同仁们的帮助与支持。姬树森副教授对本书内容的组织方面提出过宝贵的意见。王鸿樟教授审阅了初稿，并提出许多校正意见。洪国香同志为本书的插图和文稿做了大量的具体工作。在此对他们表示诚挚的感谢。由于编写者的水平有限，书中难免还存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

郑德连 1988年12月

目 录

第一章 医学超声学原理	1
第一节 振动系统.....	1
第二节 横波与纵波.....	12
第三节 波动方程.....	14
第四节 波参数.....	16
第五节 声波通过不同介质的界面.....	27
第六节 超声在生物组织中的衰减.....	33
第七节 辐射压力.....	36
第八节 多普勒效应.....	38
第九节 超声的生物效应.....	38
第二章 医用超声换能器及辐射超声场	40
第一节 压电换能器.....	40
第二节 速度变换器.....	59
第三节 换能器的超声场.....	61
第三章 医学超声仪器概论	69
第一节 概述.....	69
第二节 医学超声成像的基本原理.....	76
第三节 超声诊断仪的主要参数.....	79
第四节 超声诊断仪的显示型式.....	91
第五节 扫查方式.....	96
第六节 医学超声仪器的分类.....	103
第七节 医用超声的强度与安全剂量.....	103
第四章 超声信号的处理	111

第一节	概述	111
第二节	超声成像的基本数据	112
第三节	回波通道中的模拟信号处理	117
第四节	超声图像的存贮与处理	125
第五节	总体转移函数	127
第六节	图像的显示与记录	128
第七节	超声图像中的伪像	131
第五章	超声诊断仪	135
第一节	A型诊断仪	135
第二节	B型诊断仪	140
第三节	M型诊断仪	157
第四节	B超的种种设计	162
第六章	B超的电路原理与设计	178
第一节	线阵的发-收电路	178
第二节	时间增益补偿(TGC)技术及电路	188
第三节	对数放大器	199
第四节	数字扫描转换器	211
第七章	超声多普勒原理及仪器	226
第一节	多普勒信号的产生	226
第二节	连续波多普勒血流计	232
第三节	测距型血流计	235
第四节	多普勒频移的解调	242
第五节	多普勒频移信号的分析	257
第六节	多普勒成像技术	264
第七节	多普勒仪器的设计准则	270
第八节	多普勒探头与波束	274
第八章	超声治疗及仪器	277
第一节	超声治疗的机理	277

第二节 超声治疗仪.....	281
第三节 超声治疗仪的辐射换能器.....	282
主要参考文献.....	285

第一章 医学超声学原理

医学超声仪器在超声频范围内运用。可听声的频率范围为 20 Hz 至 20 kHz, 而医学超声的频率范围在 200 kHz 至 40 MHz 之间。超声诊断成像仪的频率多在 1 MHz 至 10 MHz 范围内, 这时相应的波长在 1.5 至 0.15 mm 之间。超声学是医学超声仪器的理论基础。超声波是介质中质点振动状态的传播过程。只有声源的振动, 才能发射出声波。也只有介质质点的振动, 超声才能传播开来。所以, 超声的发射、超声在介质中的传播和超声的接收, 整个过程都是机械振动的过程。振动是声学的基础。人体作为一种超声的传播介质, 有一些特殊的声学性质。医学超声学所研究的任务, 就是了解声波在生物体中的传播规律, 超声和生物体互相作用所产生的效应。本章讨论振动理论与波的传播特性, 超声波在生物体中的传播特性与效应。这些知识是研究医学超声仪器所必须具备的。

第一节 振动系统

一、无阻尼自由振动

(1) 运动方程 机械振动中最简单的形式, 是一个自由度振动系统。只需一个坐标就可确定一个振动系统的就称为一个自由度的振动系统, 如图 1-1 所示的弹簧振子。质量元件的质量为 m , 置于无摩擦的表面上; 弹簧的弹性系数为 K 。如果系统具有一初始位移 ξ_0 , 则必然有一个弹性力使系统产生振动。根据虎克定律, 弹性力 F_K

$$F_K = -K\xi, \quad (1-1)$$

即是说,在弹性限度内,弹性力 F_K 的变化与位移 ξ 的变化成正比;弹性力的方向与位移相反,有负号出现。弹性系数 K 的倒数称为顺性系数 C_m , 即 $C_m = 1/K$ 。若力的单位取牛顿即 N, 位移的单位取米即 m, 则 K 的单位为 N/m。而重力 $W = mg$ 与表面的反作用力 R 的方向相反。因此根据牛顿运动定律可以得到运动方程

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = -K\xi, \quad (1-2)$$

或

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + \omega_0^2 \xi = 0. \quad (1-2a)$$

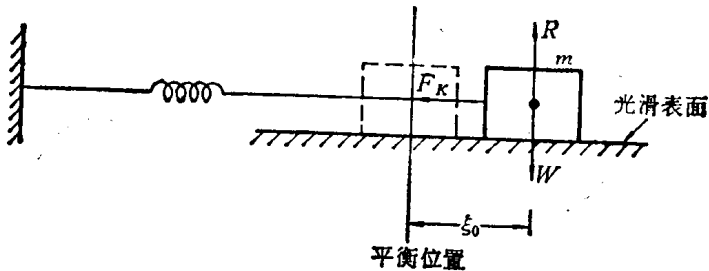


图 1-1 弹簧-质点振动系统

式中, $\omega_0 = 2\pi f_0$, 称为角频率, f_0 是振子的固有频率。显然有

$$\omega_0 = \sqrt{K/m} \quad (1-3)$$

或

$$f_0 = (1/2\pi) \sqrt{K/m}, \quad (1-3a)$$

即固有频率只取决于系统的弹性和惯性。质量的单位为 kg, f_0 的单位为 1/s 即 Hz。

(2) 振动位移、振速和振动加速度 式(1-2a)是一个齐次二阶常微分方程,其通解的形式为

$$\xi = A_1 \cos \omega_0 t + A_2 \sin \omega_0 t, \quad (1-4)$$

式中, A_1, A_2 是两个积分常数。此解还可写成复数形式

$$\xi = B_1 e^{i\omega_0 t} + B_2 e^{-i\omega_0 t}, \quad (1-4 a)$$

也可将式(1-4)稍加变换, 写为

$$\xi = A \cos(\omega_0 t - \varphi). \quad (1-4 b)$$

这里 A 是最大位移, 称为振幅; $(\omega_0 t - \varphi)$ 为相角, φ 为初相位。常数 A_1, A_2 取决于初始条件, 设 $t=0$ 时, 质量块 m 的位移为 ξ_0 , 它的振速 $d\xi/dt$ 即 v_0 , 代入式(1-4)可解得 $A_1 = \xi_0, A_2 = v_0/\omega_0$ 。这样, 微分方程的解可以用初始条件表示

$$\xi = \xi_0 \cos \omega_0 t + (v_0/\omega_0) \sin \omega_0 t. \quad (1-4 c)$$

此式表明, 振动是由两部分组成的, 右边第一项代表由初始位移引起的振动, 第二项由初始速度引起的振动。

比较式(1-4 b)与式(1-4 c), 得

$$A = \sqrt{\xi_0^2 + (v_0/\omega_0)^2},$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1}(v_0/\omega_0 \xi_0).$$

振动速度由式(1-4 b)导得

$$v = d\xi/dt = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t - \varphi) = A\omega_0 \cos(90^\circ + \omega_0 t - \varphi). \quad (1-5)$$

进一步求出振动加速度为

$$a = dv/dt = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t - \varphi) = A\omega_0^2 \cos(180^\circ + \omega_0 t - \varphi). \quad (1-6)$$

可见, 振动位移较之振速 v 落后 90° , 较加速度落后 180° 。在幅值上, 振动速度是振动位移的 ω_0 倍, 而加速度又是振速的 ω_0 倍。它们之间的这些关系如图 1-2 所示(图中取 φ 为零)。

(3) 振动的能量 振子的振动能量包括动能与位能两部分。当弹簧伸长或缩短到极限位置时, 质量块和弹簧出现暂时的静止状态, 这时振子的总能量全部转化为弹簧的位能。但是当质量块运动到其平衡位置时, 弹簧暂时无伸长或缩短, 瞬时运动速度达最大值, 振子

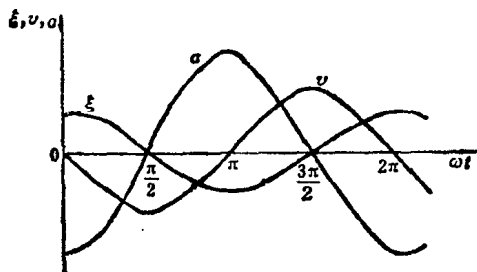


图 1-2 振动位移 ξ 、振动速度 v 和振动加速度 a 与时间的关系图

的总能量全部转化为动能。介于这两种状态之间的其他状态，振子均同时具有位能与动能。对于无阻尼的自由振动来说，振子的位能与动能的总和保持恒定值。

在质量块的作用下，弹簧受力。该力正比于位移，等于 $K\xi$ ；故贮存于弹簧中的位能 E_P 为

$$E_P = \int_{\xi}^0 -K\xi d\xi = \frac{1}{2}K\xi^2 = \frac{1}{2}KA^2 \cos^2(\omega_0 t - \varphi)。 \quad (1-7)$$

又因 $\omega_0 = \sqrt{K/m}$ ，即 $K = m\omega_0^2$ ，所以

$$E_P = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2 \cos^2(\omega_0 t - \varphi)。 \quad (1-7a)$$

而动能 E_K 为

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t - \varphi)。 \quad (1-8)$$

所以总能量 E 等于

$$E = E_P + E_K = \frac{1}{2}K\xi^2 + \frac{1}{2}mv^2。 \quad (1-9)$$

代入式(1-7a)与式(1-8)，又得

$$E = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2。 \quad (1-10)$$

在 MKS 单位制中，能量的单位取焦耳(J)。

(4) 弹簧质量的影响 在前面的讨论中,忽略了弹簧的质量,是一种近似的处理。现在讨论弹簧质量不能忽略时的影响。

设质量均匀分布的弹簧的长度为 l , 质量为 m_s , 那么单位长度的弹簧具有的质量为 m_s/l 。在离固定端点为 x 的距离上取一段长为 dx 的弹簧, 其质量为 $(m_s/l)dx$ 。此段弹簧的运动速度是 $(x/l)v$, v 为弹簧活动的一端上的运动速度。此元段上的动能为 $(1/2)(m_s/l) \cdot dx(x/l)^2v^2$ 。所以弹簧具有的总动能是

$$E_s = \frac{1}{2} \int_0^l \left(\frac{x}{l} v \right)^2 \left(\frac{m_s}{l} \right) dx = \frac{1}{6} m_s v^2. \quad (1-11)$$

因此, 如果振子中弹簧自身的质量不予忽略, 那么就必须在振子总能量里包含有弹簧的动能, 也即式(1-9)应该改为

$$E = \frac{1}{2} \left(m + \frac{1}{3} m_s \right) v^2 + \frac{1}{2} K \xi^2, \quad (1-11a)$$

这相当于在质量块上附加 $m_s/3$ 的质量。这时振子的固有频率应当是

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{K/(m + m_s/3)}. \quad (1-11b)$$

这就是说, 计及弹簧质量的振子固有频率低于忽略弹簧质量时的固有频率。

二、有阻尼自由振动

如果在图 1-1 系统中考虑到摩擦力的影响, 则能量就不断减少, 振动也必然逐渐减弱, 最后达到静止状态, 这样的振动就是衰减振动。当质点的运动速度不大时, 摩擦力与振速成正比, 其方向与振速相反, 即

$$f_R = -R_m \frac{d\xi}{dt}. \quad (1-12)$$

因此运动方程为

$$m \frac{d^2\xi}{dt^2} = -K\xi - R_m \frac{d\xi}{dt}, \quad (1-13)$$

或

$$\frac{d^2\xi}{dt^2} + 2\delta \frac{d\xi}{dt} + \omega_0^2 \xi = 0, \quad (1-14)$$

式中： $\delta = R_m/2m$ 称阻尼系数， $\omega_0 = \sqrt{K/m}$ 称固有频率。式(1-14)的解是

$$\xi = Ae^{-\delta t \pm \sqrt{(\delta^2 - \omega_0^2)t}}。 \quad (1-15)$$

式(1-15)描述了在阻尼情况下质点位移与时间的关系。依照 $(\delta^2 - \omega_0^2)$ 大于零、等于零或小于零的不同情况，有如图 1-3 所示：

(1) 当 $\delta^2 > \omega_0^2$ 时，是过阻尼状态，表示质点在一个冲击力作用下而离开它的平衡位置后，慢慢地回复到平衡位置而不振荡，如图 1-3 (a)。

(2) 当 $\delta^2 = \omega_0^2$ 时，是临界阻尼状态，表示质点在一个冲击力作用下而离开它的平衡位置后，以不出现振荡的最短时间内恢复到平衡位置，如图 1-3 (b)。

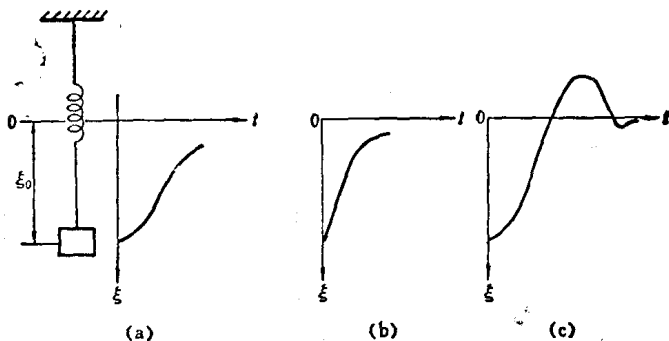


图 1-3 有阻尼的简谐运动

(a) 过阻尼；(b) 临界阻尼；(c) 振荡阻尼

(3) 当 $\delta^2 < \omega_0^2$ 时，是振荡阻尼状态，表示质点在一个冲击力作用

下离开平衡位置后,系统出现振荡,位移值在正负值之间交替变化,但越来越小如图1-3(c)。此时式(1-15)可以写为

$$\xi = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega' t + \varphi), \quad (1-16)$$

式中, $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ 。可以看出,运动仍有周期性,但振幅随着时间的增加而衰减,而且两者的振荡频率也不相同。

阻尼系数 δ 不仅影响阻力的数值,还影响振幅的衰减程度。

三、强迫振动

一个机械振动系统总是存在阻尼作用,因此振动逐渐减弱。为了维持它继续振动,要有外力供给能量。这种振动就称为强迫振动。当外力的形式为 $F = F_m e^{i\omega t}$ 时,同时考虑摩擦力 $f_m = R_m \frac{d\xi}{dt}$, 弹性力 $f = K\xi$, 则运动方程为

$$m \frac{d^2 \xi}{dt^2} = F_m e^{i\omega t} - R_m \frac{d\xi}{dt} - K \xi, \quad (1-17)$$

或

$$\frac{d^2 \xi}{dt^2} + 2\delta \frac{d\xi}{dt} + \omega_0^2 \xi = \frac{F_m}{m} e^{i\omega t}, \quad (1-18)$$

式中: $\delta = R_m / 2m$, $\omega_0 = \sqrt{K/m}$ (为无阻尼自由振动的角频率)。

解方程(1-18), 得到

$$\xi = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega' t - \varphi) + \frac{F_m}{\omega |Z_m|} \sin(\omega t - \varphi_1). \quad (1-19)$$

式中: $Z_m = R_m + j(m\omega - K/\omega)$ 称复数机械阻抗; $\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$, $\varphi_1 = \text{tg}^{-1}[(m\omega - K/\omega)/R_m]$ 。 A_0 与 φ 决定于振动的初始条件。

由式(1-19)可见,强迫振动由两种振动组成,第一项是自由振动时的位移,它取决于初始条件,其振幅随时间增长而减弱,因此称暂态成分。第二项是由于外力作用而产生的位移,它的幅值不随时间

变化，频率等于外加频率，因此称为稳态成分。在稳态建立以后，则位移 ξ 为

$$\xi = \frac{F_m}{\omega |Z_m|} \sin(\omega t - \varphi_1) \quad (1-20)$$

振速 v 有

$$v = \frac{d\xi}{dt} = (F_m/|Z_m|) \cos(\omega t - \varphi_1), \quad (1-21)$$

即是说振速的振幅与外力的振幅成正比，而相位落后的角度为 φ_1 。 v 又可改写为

$$\begin{aligned} v &= F_m e^{j(\omega t - \varphi_1)} / |Z_m| = F_m e^{j\omega t} / |Z_m| e^{j\varphi_1} = F/Z_m \\ &= F/[R_m + j(m\omega - K/\omega)]. \end{aligned} \quad (1-22)$$

用顺性系数 $C_m = (1/K)$ 代入上式，得

$$v = F/[R_m + j(m\omega - 1/\omega C_m)]. \quad (1-23)$$

式(1-23)与电学中的欧姆定律相类似，因此称为机械欧姆定律。

四、机电类比

由上可见，描写单个自由度系统的许多公式和电学中描写单振荡回路的公式很相似。这种情况并非偶然，而是反映了机械振动和电振荡两种运动的统一性。这种相似称为机电类比。应用机电类比的方法研究机械振动，大大方便了设计与计算。

表 1-1 列出了物理量的类比。可见，质量 m 类比于电感 L ，顺性系数 C_m 类比于电容 C ，力 F 类比于电压 V ，阻力系数 R_m 类比于电阻 R ，振速 v 类比于电流 i ，位移 ξ 类比于电量 Q 。

经进一步分析，得出类比规律为：

1. 当外力作用在质量元件上，如图 1-4(a)，则其运动方程类比于串联 LCR 振荡回路，可画出等效电路如图 1-4(b)。

2. 如果作用力作用在弹簧终端，如图 1-4(c)，则类比于并联电路，画出等效电路如图 1-4(d)。

表 1-1 机械系统与电路中物理量的类比

机 械 系 统	电 路
质量 m m 受的力 $F = m \, dv/dt$ m 的动能 $E_K = (1/2)mv^2$	电感 L L 上的电压 $V = Ldi/dt$ L 上的磁能 $E_L = (1/2)Li^2$
顺性系数 $C_m = 1/K$ 弹性力 $F = \xi/C_m$ 弹性元件的位能 $W_P = (1/2)\xi^2/C_m$	电容 C 电容上的电压 $V = Q/C$ 电容上的电能 $W = (1/2)Q^2/C$
阻力系数 R_m 阻力 $F = R_m v$ 摩擦耗损功率 $= (1/2)R_m v^2$	电阻 R 电阻压降 $V = Ri$ 电阻上耗损功率 $= (1/2)Ri^2$

研究机电类比的目的是要将机械系统画出和它等效的电路图来，以使用电学知识对机械系统特性进行研究。为了掌握画等效图的规律和方法，对不止一个质量元件或弹簧元件的情况说明如下。

如图 1-4(e)，力作用于质量元件上时，我们把和质量元件相联的整个部分看为一个系统 A，则质量元件和系统 A 产生的位移相等，故质量元件和系统 A 类比于串联电路，如图 1-4(f)。当力作用于弹簧元件时，我们把和弹簧元件相联的整个部分看为一个系统 B，则弹簧元件和系统 B 受力相等，故弹簧元件和系统 B 类比于并联电路，如图 1-4(h)。

根据上述规律，我们对图 1-5(a) 的振动系统画出等效电路图：

第一步：由于 F 作用于弹簧元件上， C_1 和 A 系统受力相等，则 C_1 和 A 系统并联，如图 1-5(b)；

第二步：进一步分析 A 系统中的等效支路，将 C_1 分离，必有外力 F 作用于 m_1 端，则 m_1 和 B 系统相串联，如图 1-5(c)。