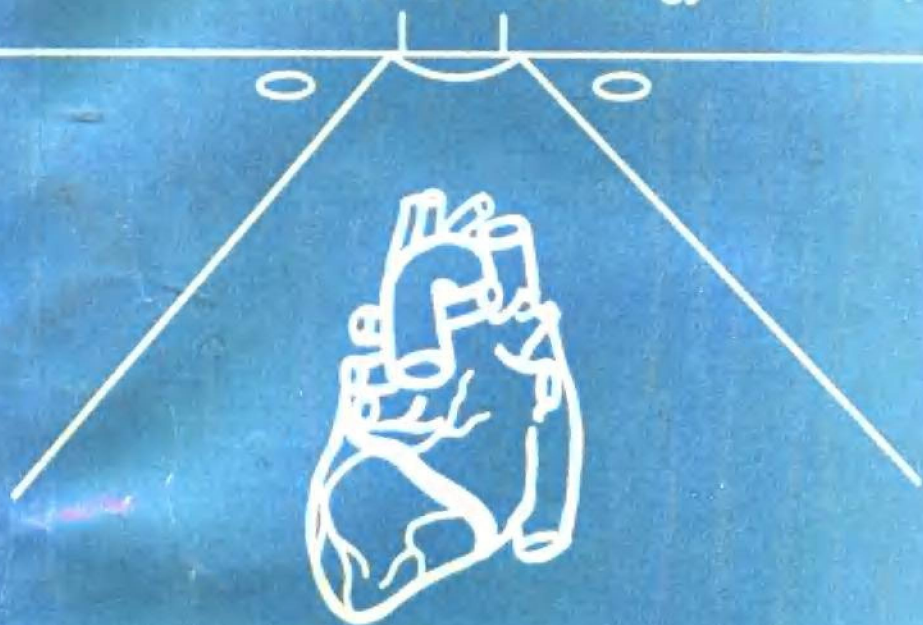


Biomedical Ultrasonics
— Principle and Technology



医学超声学

——原理与技术

万明习 卞正中 程敬之

西安交通大学出版社

医学超声学

—— 原理与技术

万明习 卞正中 程敬之

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了医学超声学的原理和工程技术。全书共分九章。除第一章绪论外,第二至第七章重点介绍了各类医学超声测量与成像技术的物理基础、数学原理、信号与信道特性、系统结构、关键技术和国内外新的进展。第八章简要地阐述了超声治疗、超声全息成像、超声显微镜与超声CT等方面的内容。第九章选编了典型医用超声设备若干使用和维修方法。书末附有部分习题。

本书为大专院校生物医学工程及仪器专业教材和参考书,也可供从事研究、生产、维护及使用医学超声设备的人员阅读。

(陕)新登字 007 号

医 学 超 声 学

—— 原理与技术

万明习 卞正中 程敬之

责任编辑 白居易

*

西安交通大学出版社出版

邮政编码 710049

西安工业学院印刷厂印装

陕西省新华书店经销

*

开本 850×1168 1/32 印张 13.125 字数: 330 千字

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数: 1 — 1000

ISBN7-5605-0494-9/R·6 定价: 9.80 元

前 言

超声诊断技术由于具有无痛、无损、无离子辐射和可重复检查等一系列优点，自 70 年代以来发展迅猛。当前医学超声成像已被列入四大医学成像技术之一，并已推广应用于各主要医学领域。医学超声学还是一门十分年轻、并处于蓬勃发展中的新的边缘学科。国内外科研人员对该学科所涉及的医学超声物理、换能器及材料科学、电子学、信息处理及计算技术、生物组织超声特性与生物效应等方面的课题进行了深入广泛的研究，并取得了许多重要的进展。以新的原理和方法为基础，新一代超声诊断设备正在孕育之中。

从 70 年代末起，国内一些大学相继建立了生物医学工程及仪器专业。本教材就是为满足医学超声学课程的教学需要而编写的。第一章简单介绍了医学超声学发展历史和医学超声设备的分类。第二章对医学超声物理的基本内容进行了概念性和结论性的阐述。第二章内容为医学超声换能器原理、材料、分类、结构、辐射声场与性能测试。在第四章中，系统地讨论了描述医学超声信号与信道的主要指标及其影响因素，介绍了典型超声发射和接收处理通道的工作原理。超声组织定征是当前医学超声领域内一个世界性热门课题，作为理工科专业技术人员，掌握这一领域所采用的实验方法是十分必要的。本书在第五章中比较系统地介绍了各主要超声参量测量的数学原理、方法与设备。鉴于 B 型超声诊断仪发展最快、使用最普遍，因而也成为本教材重点内容之一。在第六章中，对 B 型超声诊断仪中的扫描成像原理、波束处理技术、数字扫描变换与图像处理等关键技术进行了重点介绍，而对 A、M 型超声诊断仪只作了简单的原理与结构的阐述。超声多普勒血流测量与彩色血流成像是 80 年代以来取得重大突破的领域，是本书的另一个重点内容，第七章系统介绍了这

一领域内所采用的信号获取与处理方法、仪器工作原理与结构等内容。本书将超声治疗、超声全息成像、超声显微镜与超声CT等方面的内容一起放在第八章作了较为全面和恰当深度的阐述。书末附有习题。本书不仅仅是一本教材，也是医学超声专业技术人员的一本参考书。为部分满足医用超声设备维修人员的需要，第九章选编了典型医用超声设备若干使用与维修方法。医用超声设备故障种类与维修方法繁多，作者希望尽早见到有关使用与维修方面新的著作问世。

本教材可供生物医学工程及仪器专业作为一学期64—72学时的教材，各校各专业在选用本教材时，应根据具体情况进行调整。第五章的内容可放在本课程最后，不影响前面内容的完整性和连续性。

在编写本教材时，作者参阅了国内外有关的教材、著作、讲义和发表的有关文献，并注意反映我国在医学超声领域的研究成果。

本书主要由万明习同志编写和整理。出版前，已在我校近几届学生中作为生物医学工程及仪器专业必修课教材使用，并经反复修改。在程敬之教授指导下，作者所在的研究室近十多年来所从事的医学超声领域内的各项研究课题为本书的编写奠定了坚实的理论和技術基础。

担任本书主审的是南京大学冯若教授。责任编辑白居宪老师为本书的完善和出版提出了许多宝贵的意见，并付出了辛勤的劳动。

编者对上述为本教材作出贡献的同志表示深切的谢意。

由于编者水平所限，医学超声学涉及面广，发展很快，本书在内容选取和原理阐述等方面会有不少缺点和错误，恳切希望读者予以批评指正，使本教材的内容更加完善。

编 者

1992年6月

目 录

第一章 绪 论

- § 1.1 概述 (1)
- § 1.2 医学超声发展简史 (2)
- § 1.3 医学超声系统的分类 (5)

第二章 医学超声的物理基础

- § 2.1 超声波的一般概念 (9)
 - 一、机械振动与机械波 (9)
 - 二、超声波的类型 (13)
 - 三、超声波的传播速度 (16)
 - 四、超声波的叠加、干涉、绕射和惠更斯原理 (18)
 - 五、超声场的特征值 (20)
- § 2.2 波动方程及其解 (23)
- § 2.3 界面上波的反射和透射 (25)
 - 一、超声波垂直入射到平界面上的反射和透射 (25)
 - 二、超声波倾斜入射到平界面上的反射和透射 (27)
 - 三、平面超声波在曲界面上的反射和透射 (30)
 - 四、超声波多层透射与声耦合 (33)
- § 2.4 散射 (35)
- § 2.5 多普勒效应 (37)
- § 2.6 生物组织的超声特性 (39)
 - 一、生物组织 (39)
 - 二、超声衰减 (39)
 - 三、生物组织超声特性的参数值 (41)
- § 2.7 超声生物效应 (45)

一、超声生物效应的机理	(46)
二、诊断超声安全剂量阈值	(47)
三、超声生物效应研究分类(按生物体)	(48)

第三章 医用超声换能器

§ 3.1 压电效应与压电材料特性	(49)
一、压电效应	(49)
二、压电材料	(50)
三、压电方程	(54)
四、压电体参数	(56)
§ 3.2 压电振子	(61)
一、压电振子的振动模式	(61)
二、压电振子的等效电路	(66)
三、压电振子的谐振特性	(69)
§ 3.3 医用超声换能器种类、结构与特性	(72)
一、医用超声换能器分类	(72)
二、医用超声换能器的结构	(73)
三、超声换能器的特性	(78)
§ 3.4 超声换能器的声场特性	(81)
一、单阵元换能器的超声场	(82)
二、多阵元换能器的超声场	(90)
§ 3.5 超声换能器性能的测定	(100)
一、声场的测定	(100)
二、超声换能器频率特性的测定	(101)
三、超声功率的测量	(103)

第四章 超声信号、信道与指标

§ 4.1 概 述	(111)
§ 4.2 超声信号形式及其特性	(112)
一、信号特性的表达方法	(112)
二、超声信号分类	(113)

三、超声信号特性	(114)
§ 4.3 超声信号与系统的主要指标	(121)
一、动态范围	(121)
二、工作频率、频带宽度、信号基频与帧频	(123)
三、分辨力	(127)
四、发射功率、接收功率、灵敏度和信噪比	(134)
§ 4.4 超声发射通道	(136)
一、连续正弦波发射	(136)
二、单载频脉冲波发射	(136)
三、调制发射	(138)
§ 4.5 脉冲接收通道	(139)
一、射频放大器	(139)
二、扫描时间增益	(141)
三、对数放大器	(144)
四、检波、抑制与视频放大	(152)
§ 4.6 接收相关处理	(155)
§ 4.7 显示器	(157)
一、静电偏转示波管	(157)
二、磁偏转示波管	(161)
三、几种 CRT 的比较	(162)
四、彩色显像管	(163)
第五章 生物组织超声参量的测量	
§ 5.1 超声速度的测量	(165)
一、脉冲透射法	(166)
二、脉冲回波法	(167)
三、驻波法	(170)
四、共振法	(170)
五、生物组织声速在体测量	(171)
§ 5.2 声特征阻抗的测量	(174)

一、密度测量方法	(174)
二、垂直入射反射系数测量方法	(174)
§ 5.3 超声衰减的测量	(175)
一、超声波在组织中的衰减	(175)
二、透射法	(176)
三、瞬态热电偶法	(177)
四、回波法	(177)
§ 5.4 非线性声学参量 B/A 的测量	(186)
一、非线性声参量 B/A 的定义	(186)
二、热力学测量法	(188)
三、有限振幅声波法	(190)
四、泵波—相位法	(193)
§ 5.5 超声散射的测量	(195)

第六章 诊断超声成像

§ 6.1 概 述	(200)
§ 6.2 A 型超声诊断仪	(201)
§ 6.3 M 型超声诊断仪	(203)
§ 6.4 超声波束处理技术	(206)
一、凹面晶体	(206)
二、声学透镜	(207)
三、电子聚焦	(208)
四、可变孔径	(227)
五、动态变迹	(228)
§ 6.5 B 型扫描成像原理	(243)
一、手持扫描	(243)
二、机械线性扫描	(246)
三、机械扇形扫描	(249)
四、电子线性扫描	(252)
五、相控阵扇形扫描	(256)

六、凸面扇形扫描	(263)
七、动态频率扫描技术	(263)
§ 6.6 其它扫描成像方法	(267)
一、C 型扫描	(267)
二、F 型扫描	(269)
三、三维超声扫描成像	(270)
§ 6.7 数字扫描变换器与图像处理	(270)
一、带 DSC 的 B 超诊断设备的基本结构	(271)
二、DSC 的工作原理	(273)
三、B 型超声图像处理	(283)
§ 6.8 复合显示与屏幕测量	(291)
§ 6.9 B 型超声诊断仪器技术新进展	(293)
一、内窥超声方法	(293)
二、多通道模拟数字混合处理技术	(295)
三、全数字处理技术	(297)
四、并行处理技术	(298)
五、定量诊断技术的发展	(299)
六、三维显像	(299)
第七章 超声多普勒血流测量与成像	
§ 7.1 超声多普勒血流测量的原理	(300)
一、基本原理	(300)
二、血流方向信息的提取	(303)
三、血流速度提取及流速波形再处理	(308)
四、声束与流速矢量夹角的确定	(313)
§ 7.2 距离选通技术与流速分布测量	(315)
一、超声束交叉域多普勒法	(315)
二、脉冲超声多普勒技术	(316)
三、伪随机码超声多普勒技术	(319)
四、流速分布测量	(329)

§ 7.3 双工型医学超声设备	(333)
一、电子线扫 B 超与多普勒技术复合	(333)
二、机械扇扫 B 超与多普勒技术复合	(334)
三、相控阵 B 超与多普勒技术复合	(334)
§ 7.4 超声多普勒血流成像	(335)
一、连续波超声多普勒血流成像	(336)
二、脉冲超声多普勒血流成像	(336)
三、实时二维彩色超声多普勒血流成像	(338)
§ 7.5 其它	(346)
一、渡越时间式超声流速计	(346)
二、超声多普勒气泡检测	(347)
三、超声多普勒法在血压测量中的应用	(348)
四、经颅多普勒技术	(349)
第八章 其它医用超声技术	
§ 8.1 超声治疗	(351)
8.2 超声全息成像	(352)
一、全息成像的基本方程	(353)
二、超声全息成像系统	(356)
§ 8.3 超声显微镜	(359)
一、扫描声学显微镜 (SAM)	(360)
二、扫描激光声学显微镜 (SLAM)	(363)
8.4 超声 CT	(365)
一、CT 技术的基本原理	(366)
二、渡越时间超声 CT	(367)
三、衰减系数超声 CT	(368)
四、超声衍射 CT	(368)
第九章 超声诊断设备的使用和维修	
§ 9.1 A 型超声诊断仪的维修	(374)
一、A 超始脉冲各沿下冲故障的排除	(374)

二、CTS-5 型 A 型超声诊断仪基线抖动故障检修 ...	(375)
三、A 型回波图小杂波过多故障排除	(379)
四、A 型超声仪器显像管亮度下降的改进方法	(379)
§ 9.2 B 型超声诊断仪的使用与维修	(380)
一、强电磁场干扰下 B 超仪的使用	(380)
二、B 型超声诊断仪基本检修方法	(382)
三、线阵 B 超探头断线的维修	(387)
四、ATL / ADR 机械扇扫 B 超探头修理	(388)
五、日本 Aloka B 超仪故障维修举例	(389)
六、CX-Ⅱ型超声显像仪简易调校法	(391)
习题	(393)
主要参考文献	(405)

第一章 绪 论

§ 1.1 概 述

医学超声学是一门将声学中的超声学与医学应用结合起来形成的边缘学科,也是生物医学工程学的最重要的分支之一。振动与波的理论是它的理论基础。医学超声学又包括医学超声物理和医学超声工程两个方面。医学超声物理研究超声波在生物组织中的传播特性和规律。医学超声工程的内容则是应用生物组织中超声传播的规律,设计制造用于医学诊断和治疗的超声设备。二者间存在着理论与应用的相互依存关系,共同的目的是为解决生物医学中的问题提供方法和设备。

任何新学科的出现与发展都是与社会需要及当时的理论和技术基础分不开的。二次世界大战结束后,国际上出现了一个相对和平与稳定的局面,大批的科学家和军事技术人员汇集到非军事工业领域,使基础理论、生命科学、应用科学与边缘科学等得到了较快的发展。人们对健康的重视和对医疗卫生要求的提高,促进了生物医学工程学这一边缘学科的形成和发展。作为生物医学工程的一个重要组成部分,在 60 年代,医学超声学逐步形成一个相对独立的学科。目前,超声设备与生化分析、x 射线和核医学及核磁共振设备一起构成了医学设备的四大支柱。现代医学超声设备是通过不断发展的材料科学、电子技术、尤其是微处理机技术、信息处理、计算技术、制造工艺等领域的技术,将超声学理论应用于医学的结晶,即许多学科最新成就的结合。

超声在医学上的应用包括超声治疗、利用超声信号幅度、频

率、相位和时间等参量所携带的生物组织信息对人体进行测量、成像和诊断、并研究生物组织特性。超声医学应用几乎涉及到人体的每一个器官，以及每一个医学的分支领域。目前已形成了许多专门的方法，有的已独立形成为一门分支学科。

当超声能量作用于生物组织时，通过机械效应、温热效应和理化效应使这部分组织的温度升高，血液循环改善，代谢旺盛，组织软化，pH 值变化，化学反应过程加速，细胞活性增强。这些变化必然对这部分组织的机能状态产生影响，同时也通过体液传递及神经系统的反射活动，对远距离器官产生影响。超声治疗主要利用生物体吸收超声的特性，亦即利用超声波的生物学效能和机理，由此达到治疗的目的。

超声诊断主要根据超声波在生物组织中传播时，组织特性、尺寸的差异使声波所出现的透射、反射、散射、绕射及干涉等传播规律和波动现象也不同，从而使接收信号中幅度、频率、相位、时间等参量发生不同的改变。超声诊断正是通过对这些参量进行测量和成像，来识别这种差异、判别组织，诊断许多器质性和功能性疾病。

目前，医学超声技术正在发展和完善，应用领域不断扩展，其主要原因包括医学需要、超声波固有特性和工程技术的发展三个方面。

§ 1.2 医学超声发展简史

超声作为工程技术出现于 20 世纪。超声在生物医学上的初始应用建立在超声在军事工业中应用的技术基础上。1912 年英国客轮 Titan 号与冰山相撞沉没，第一次世界大战期间，德国使用潜艇击沉同盟国几千艘舰船，这使得许多科学家致力于研究能发现水下障碍和潜艇的探测器。在 1917 年，法国科学家保罗一郎之万发现了逆压电效应，首次使用了主要由石英晶体制成的超

声换能器，并发明了用超声探测水下目标的“水下定位法”。20世纪30年代，超声用于医学治疗和工业探伤，从而使超声治疗成为医学超声中最先发展的部门。

第二次世界大战前，超声技术发展比较缓慢。第二次世界大战爆发，一方面开创了军事中超声探测技术发展的新时期，另一方面，使医学超声研究趋于停顿。1942年 Dussik 和 Firestone 首先把工业超声探伤原理用于医学诊断，用连续超声波诊断颅脑疾病。1946年 Firestone 等研究应用反射波方法进行医学超声诊断，提出了A型超声诊断技术原理。从以上可见，从20世纪20—40年代，医学超声技术处于探索阶段。

1949年召开的第一次国际超声医学会议，促进了医学超声的发展。1958年，Hertz等首先用脉冲回声法诊断心脏疾病，开始出现“超声心脏图描记法”，现在称为“超声心动图描记法”，亦即“M型超声心动图”。同期，出现了两维B型显示原理和生物组织超声散射特性研究的报导。1955年 Jaffe 发现锆钛酸铅压电材料（PZT），这种人造压电材料性能良好，易于制造，极大地促进了工业和医学用超声技术的进一步发展。50年代末期，连续波和脉冲波 Doppler 技术以及超声显微镜问世。在50年代，用脉冲反射法探查疾病获得了很大成功，同时也为多普勒技术及B型二维成像奠定了基础。实际上已应用超声检查了人体每一个器官。

60年代期间，超声全息、B型实时成像、阵列式换能器、电子线性扫描和扇形扫描，电子聚焦法等被广泛研究。由于物理学、电子工程学、医学等的发展使超声成像技术已日趋成熟与完善，临床使用日益广泛。这一期间，多普勒技术被进一步研究，用频谱分析法研究血流问世。60年代末期，美、日均研制成压电高分子聚合物 PVF_2 （聚偏氟乙烯）换能器。

70年代是B型显像蓬勃发展的年代，超声成像设备不仅已挤身于主要医学成像领域，且与X射线系统并驾齐驱、相互补

充，成为使用最广泛的诊断工具。70年代后期，微型计算机在超声诊断仪器中得到使用，如探头的扫描、图像的数字扫描转换 DSC、图像的数字扫描处理 DSP、仪器操作的程序控制、各种功能的自动检测与显示等。DSC 和 DSP 的出现使医学超声仪器向高度技术性能迈进了一大步。同时出现了压电高分子薄膜换能器阵，它具有压电性能好、易成型、噪声小、声阻抗与人体声阻抗相接近等优点，它的应用将更有力地推进医学超声的发展。70年代，脉冲多普勒和连续波多普勒技术被不断发展和完善，随机噪声和伪随机码超声多普勒技术被研究。同时出现了血流成像原理的报导。

进入 80 年代后，医学超声成像设备向两极发展。一方面是价格低廉的便携式超声诊断仪进入实际使用，另一方面是向综合化、自动化、定量化和多功能等方向发展。同时亦在向超声 CT 方面进行探索。超声显微镜得到进一步的发展。生物组织的超声特性的研究被重视，并致力于从反射、散射特性方面提取更多的信息，力图用新的超声特征量来识别生物组织和成像。超声生物效应被广泛研究，并出现了诸如局部超声治疗等形式的超声治疗方法和系统。在超声多普勒技术方面，一个重大成就是发明了自相关流速及其分散程度提取方法，由此实现了二维血流实时彩色成像。此外，还探索了获取血流矢量及矢量成像的超声多普勒方法。

在探头方面，新的材料，新的换能器进一步发展与完善，如与控制技术结合的探头、直接探查体内的内窥超声探头等。在超声信号及图像处理方面，多通道模拟数字混合处理技术、全数字处理技术、并行处理技术、动态频率扫描技术被研究或实现。

进入 80 年代以来，医用超声设备的进步，在很大程度上要归功于微电子学、集成电路、微型计算机、信息处理、材料科学及其超声换能器的发展与完善。

§ 1.3 医学超声系统的分类

医学超声发展到今天已经包含有相当丰富的内容了。根据它的原理、任务和设备体系等，可将医学超声系统划分成很多类。从大的用途方面可分为诊断用和治疗用两大类。

一、按超声波形分类

(一) 连续波超声设备 如连续波超声治疗仪、单载频连续波超声多普勒血流仪、连续波伪随机码超声多普勒血流仪等。

(二) 脉冲波超声设备 脉冲波发射与接收处理方式在医学超声治疗和诊断设备中得到了最广泛的应用。目前，超声治疗仪、A、M和B型超声诊断仪、血流测量与成像等超声系统中，大多采用单载波脉冲超声信号。线性调频脉冲信号、随机噪声脉冲信号和伪随机编码脉冲及其伪随机编码调制脉冲信号等在医学超声领域也具有重要价值。

二、按利用的物理特性分类

(一) 回波式超声诊断仪 它从超声回波信号中提取所需的信息，并用于诊断。当目标尺寸远大于超声波长时，超声波在目标界面上发生反射；当目标尺寸比超声波长小或相当时，超声波要发生散射，由于可获得更细致的信息。

(二) 透射式超声诊断仪 它是应用得最早的超声诊断技术。与x射线透射相似，即从经过生物组织透射过来的超声波中获取所需的医学信息。超声透射图像是超声被组织吸收后留下的声影像。大多数超声全息系统和超声显微镜采用超声透射方法。

三、按医学超声设备的体系分类

(一) A型超声诊断仪 A型显示是一种最基本的显示方式，示波管上的横坐标表示超声波的传播时间，即探测深度；纵坐标则表示回波脉冲的幅度 Amplitude，故称A型。用A型诊断仪可测量人体内各器官的位置、尺寸、和组织的声学特性，并用于疾病诊断。