



生物医学工程与仪器丛书

医学超声成象机理

白 净 著

清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

医学超声成象机理

白 净 著

清 华 大 学 出 版 社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书从基本物理原理出发,阐述了超声波与生物组织相互作用的成象机理,着重论述了超声成象理论研究中的—些基本方法和思路,其中包括超声成象系统数学模型的建立方法、生物组织模型的选取以及许多医学超声诊断领域的前沿研究工作,如非线性参量成象法、背向散射积分的定义与算法、弹性回波图法、散射逆问题、超声 CT 以及超声全息成象法等。

本书可作为生物医学工程、医学超声学、生物电子学、医学信息学等专业的高年级本科生和研究生的教材,也可供在临床医学、医疗仪器、超声波诊断、生物医学工程等领域工作的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

医学超声成象机理/白净著. —北京:清华大学出版社,1998

ISBN 7-302-02884-2

I. 医… II. 白… III. ①超声成象 超声应用 医学②超声波诊断 IV. R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 03596 号

出版:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

因特网地址: www.tup.tsinghua.edu.cn

印刷:人民文学印刷厂

发行:新华书店总店北京科技发行所

开本: 850×1168 1/32 印张: 8.625 字数: 222 千字

版次: 1998 年 4 月第 1 版 1998 年 4 月第 1 次印刷

书号: ISBN 7-302-02884-2/Q·4

印数: 0001~1500

定价: 20.00 元

现代生物医学工程丛书

《现代生物医学工程丛书》编委会

主 编 杨福生

副主编 杨子彬

编 委 (按姓氏笔划)

白 净 刘元元 杨子彬

杨福生 容观澳

前 言

医学超声成像是当前医学界与 X 射线成象技术的普及率相当的诊断影象技术,它因对人体无损和具有较高的性能价格比而受到医学界的欢迎,其产品的产值和产量仍呈上升趋势,属于医疗仪器系列的重要分支。

在数十年的发展中,超声成象技术已日趋成熟,先进电子技术的应用已大大改善了超声成象的质量。然而,其图象的分辨率仍远远不及其他影象技术,这其中困扰人们的根本问题是超声成象的机理至今仍不十分清楚。因此,有学者认为,要实现医学超声成象技术的突破性进展,需要在搞清其成象机理上下功夫。

超声波作为一种机械波在人体组织中的传播过程是相当复杂的,是多个过程和多种机制复合作用的过程。因此,用于成象的超声回波中亦携带着丰富的关于人体组织结构、成分、状态等信息。而当前临床上所用的超声成象仪器却未能有效利用这些信息,原因之一是信息的组合方式尚不清楚。要搞清这种回波中信息的组合方式,首先要研究超声成象的机理。

目前医学超声界基础性研究可分为两个方向。其一是将获得的图象进行进一步的处理以使其信息更为突出、直观、精细,例如多维图象重建就属于此范畴。由于这方面工作是在已有成象技术和方法上的进一步推广,可称其为后处理技术。其二是寻求分离、抽取蕴含在回波中的组织信息的方法,其中包括各种信息的成因、在回波中的表现形式和提取方法。因为它是由回波反过来进行信息的提取后再去考虑新的参数成象方法,故可称为逆处理技术,例如本书中所介绍的多种组织定征方法即属于该范畴。正是由于后

一方向更多地涉及超声成象机理方面的内容,因此本书主要介绍这一方面的最新进展。

我国进行超声成象方面的研究和临床实践已有多年历史,已形成了一支相当规模的科技队伍,有关的图书也出版了一批,但特别阐述医学超声成象机理的书籍尚不多见。鉴于超声成象机理在其进一步发展中的重要作用,本书着重于这方面的有关原理和方法的介绍,特别是利用较多的篇幅介绍从机理的角度进行医学超声研究的基本思路 and 主要方法及其进展情况,可供有关的研究人员参考。

全书共分 11 章。前 5 章主要介绍超声成象的基本原理及超声波与生物组织相互作用的主要机理,后 6 章主要介绍有关的研究方法和成象技术,其中许多方法和技术都尚未成熟,仍在研究阶段。希望本书的介绍能起到抛砖引玉的作用,吸引一批有志于该领域研究的学者投入相关的研究中并取得突破性成果。

本书中亦包容了作者十几年在医学超声方面的研究思想和方法,借此机会与读者交流,不当之处亦恳请读者指正。

在本书的编写中得到了许多同志的勉励和帮助,特别是文中插图绘制和文字整理等繁杂的工作是由我的博士生李响协助完成的,在此向他表示衷心的感谢。

白 净

1996 年 8 月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 历史回顾	1
1.2 超声的医学应用	2
1.3 超声成象的特点	4
1.4 目前发展趋势	6
第 2 章 超声成象的理论基础	9
2.1 超声波在介质中传播的数学描述	9
2.2 常用声学参量的定义	13
2.3 生物组织的声学特性	15
2.4 声波的反射、透射和折射	18
2.5 声波的吸收和衰减	26
2.6 多普勒效应	27
第 3 章 超声波的产生和接收	36
3.1 基本概念	36
3.2 压电换能器的物理原理	37
3.3 换能器的等效电路模型	46
3.4 换能器的辐射声场	56
3.5 换能器的分类及其性能指标	61
3.6 探头定征	67
第 4 章 超声波在生物组织中的散射	71
4.1 散射的分类及研究方法	71
4.2 几种典型散射场的计算	76
4.3 超声波散射的理论模型	82
4.4 超声波散射的测量	85
第 5 章 超声波被生物组织吸收的物理机制	88

5.1	超声波吸收机理的分类	88
5.2	经典吸收的物理机制	89
5.3	弛豫吸收的描述	92
5.4	生物组织中声吸收的数学模型	95
第6章	生物组织模型	102
6.1	概述	102
6.2	分层介质模型	104
6.3	连续非均匀模型	108
6.4	分离粒子模型	115
6.5	分维模型	119
第7章	超声成象系统	126
7.1	系统模型	126
7.2	系统参量的确定	135
7.3	几种主要扫描方式	137
第8章	生物软组织定征方法	149
8.1	概述	149
8.2	超声回波的解卷处理	151
8.3	反射波与散射波的分离与提取	158
8.4	声阻抗率图的重建方法	164
8.5	背向散射积分方法	169
8.6	弹性系数回波图法	188
8.7	声速的测定原理和方法	201
8.8	衰减系数的测定方法	212
第9章	非线性现象	220
9.1	超声波的非线性传播	220
9.2	非线性参量的几种测量方法	222
9.3	非线性现象在超声医学中的应用	227
第10章	超声全息	232
10.1	全息理论和技术的产生	232
10.2	产生全息图的物理原理	235
10.3	波前再现成象原理	239

10.4	几种全息成象系统及其原理	244
第 11 章	超声 CT	249
11.1	基本思想	249
11.2	图象重建技术	251
11.3	无散射情况下的超声 CT 的数学模型	256
11.4	有散射时超声 CT 的几种方法	260
11.5	超声 CT 的数据采集系统	263

第 1 章 绪 论

1.1 历史回顾

所谓超声,是指频率超过了人耳的听觉范围的声波,即频率超过 20 kHz 的机械波。一般人耳的听觉范围在 20 Hz~20 kHz 频域内,高于此频率范围的称为超声,低于此频率范围的则称为次声。从历史上看,将超声波作为检测手段的开端是在第二次世界大战期间,用超声回波探测海下的潜水艇,并取得了成功。此后,超声波在工业的无损探伤,即用超声波来检测材料或产品的缺陷,以及在清洗、焊接等方面亦开始应用。直至 20 世纪 50 年代初,真正用于医学诊断的超声装置才问世。

最早将超声波用于医学诊断的是奥地利的 K. T. Dussik。他于 1942 年采用透射式一维示波法(后称为 A 型)探测颅脑,并于 1949 年报告了所获得的头部(包括脑室)的超声图象。尽管他所采用的透射式 A 型示波法并未达到实用的程度,但却引起了各国的许多研究者对超声诊断的浓厚兴趣。1950 年,美国的 J. J. Wild 等人采用脉冲反射式示波法获得了脑肿瘤标本的反射波,从而奠定了 A 型超声诊断的基础。与此同时,也有人探讨了用超声波对胆结石、乳腺肿瘤、肾肿瘤及子宫、胎儿和眼睛等的病症进行诊断的方法。我国在超声诊断方面的工作起步也较早,自 20 世纪 50 年代末起,我国就开始了应用超声波进行临床诊断的探索,60 年代就有近百人投入了超声诊断的研究工作,70 年代则发展为数百人,完成了大量的诊断工作,为超声诊断学的发展做出了贡献。

随着超声在临床诊断方面应用的展开,超声诊断装置亦在不

断地更新换代。继 A 型示波法诊断仪后,1952 年,美国的 D. H. Howry 等开始采用二维 B 型显象法,而后发展成为现今通用的扇扫式 B 型超声诊断仪。在发展过程中,探头的扫查驱动方式经历了最初的手动、机械自动扫查,直至现在的电子扫描方式。所用探头本身也由单一晶片探头发展为阵列式探头及电子相控阵扇扫探头。70 年代中,超声诊断装置引入了实时和灰阶两大技术,诊断效力大为提高,使这一诊断技术的应用达到了普及程度。目前,诊断用超声仪器又在三维显象、彩色显象、动态聚焦、动态光圈、动态变迹、传输区域增强、三维图象重构、全数字化数据采集和处理技术、体腔内探查技术、多种图象显示技术、多用途复合型诊断仪等方面取得了长足的进展,使诊断的效力和提供的信息量都大大提高,为临床诊断提供了得力手段。

1.2 超声的医学应用

超声波在医学方面,除用于诊断,还有两个方面的应用,即用于治疗和手术。

在诊断学方面,现有的医学超声技术可分为两大类:即基于回波扫描技术和基于多普勒原理的超声诊断技术。

(1) 基于回波扫描技术的超声诊断技术的基本原理是利用超声波在组织界面处产生的反射回波形成的图象或信号来鉴别和诊断疾病。这种技术主要用于解剖学范畴的检测和诊断,目的是了解器官的形态学和组织学方面的状况与变化。比如,检测体内异物和肿瘤,检查器官的形状及大小的变化等等。

回波扫描诊断技术一般按显示回波的方式分为如下五种类型:

① A 型:即将回波以波的形式显示出来。其纵坐标为回波幅值,用以表示回波的强弱;横坐标为回波接收的时间,该时间与产

生回波的组织界面相关。

② B 型:即将回波用光点形式显示出来,为辉度调制型。显示光点的辉度与回波强弱成正比。当探头以不同方式移动扫查时,可形成二维图象。

③ C 型:此为透射式扫查方式,可获得有关被测组织的声速和衰减等信息。

④ M 型:此法是在辉度调制型中加入一个慢扫查锯齿波,从而使回波光点从左至右自动扫描。显示的横坐标为慢扫描时间,纵坐标为声波传播时间(即对应于检测深度位置)。

⑤ F 型:此法为用多个切面图象构造成一个曲面的成象形式。

除了单一形式外,还有复合型诊断仪,即综合采用上述几种方式成象。目前,回波扫描技术已大量用于对肝、脾、胃、肾、胆、甲状腺、乳腺、眼球、子宫、卵巢、胸腔、肺、半月板、脑、心包等多种脏器的诊查之中。

(2) 基于多普勒原理的超声诊断技术的基本原理是利用运动物体反射声波时造成的频率偏移现象来获取人体的运动信息。这种技术主要用于了解体内器官的功能状况及血液动力学方面的生理病理状况,如用于测定血液流速、心脏运动状况及血管是否存在栓塞等。目前,超声多普勒技术主要用于心血管疾病的诊断中。

在诊断学方面,基于探查深度和分辨率两个方面的综合考虑,一般采用的频率为 $1\text{ MHz}\sim 15\text{ MHz}$ 。低频主要用于深部组织和器官的诊查,而高频则用于眼科等表浅部位的诊查。同时,为了避免产生生物效应,诊断用的超声波的功率一般在 $1\text{ mW/cm}^2\sim 10\text{ mW/cm}^2$ 。

超声治疗学起步相对早于诊断学,但其发展却不及诊断学。所谓超声治疗学,即施加超声波于人体病患部位而达到治疗效果的方法。应用超声波治疗疾病主要基于如下三种超声波与生物组织

相互作用的效应:

(1) 机械效应:在超声波的作用下,生物组织将受到压力的作用,并产生速度和加速度方面的变化。

(2) 温热效应:超声在生物组织中传播的过程中,部分声能将被生物组织吸收,因而会产生局部温度升高的效应。

(3) 理化效应:由于上述两种效应,常常会引发某些生物组织内部的物理化学变化,如物质交换的速率变化、空化、分子分解与合成的改变等等。

临床实践证明,这样一些超声波的作用对某些疾病可以起到治疗的作用,如用于治疗神经痛和治疗骨折等等。

超声在治疗方面的应用可分为两大类,即按照治疗仪所用的功率而分为一般剂量和大剂量治疗法。一般剂量是指所用超声波功率在 3 W/cm^2 以下,而大剂量则是指所用功率高于 3 W/cm^2 的治疗方法。一般剂量的超声治疗包括连续式或脉冲式超声疗法、超声-电疗法、超声药物透入疗法、超声雾化吸入疗法等。而大剂量超声治疗则包括超声波体外碎石法、超声加热治癌法以及超声在外科方面的应用,如超声手术刀等。

1.3 超声成象的特点

在现代医学四大影象技术中,X射线成象和超声成象是极为普遍应用的技术。因此,在这里,我们想通过与X射线成象技术的比较,来阐明超声成象的特点。

X射线影象技术发展较早,特别是20世纪70年代中期X-CT(X射线断层成象)的成功,使X射线影象技术获得了重大突破,使其诊断效果大为提高,应用更加广泛。尽管如此,X射线成象仍无法取代超声成象的位置和作用,其原因主要有三个:

(1) 超声波为非电离辐射,在诊断用功率范围内对人体无伤

害,可经常性地反复使用。

几十年来,一直有人从事超声波对生物组织的效应方面的研究,同时,临床上也大量使用超声诊断方法,但是,迄今为止,尚未发现诊断用剂量的超声波对人体的任何危害。因此,使用超声波进行检查不用任何防护,且可用于对胎儿进行检查。而在这方面,X射线则具有较大的危害性,在一定的时间内,不能重复使用,且不可对孕妇使用,对儿童也要尽量不用。所以,在无毒副作用这方面,超声成象较X射线成象有着显著的优势。

(2) 超声波对软组织的鉴别力较高,在对软组织疾患诊断时具有优势。

从用途来讲,超声成象和X射线成象是相辅相成的,这点可通过二者的成象原理来说明。X射线在生物组织中传播时,其穿透能力很强,可穿透人体任一部分组织,包括软组织和骨骼。因而,一般采用透射式成象方式,如图1-1所示,在人体受X射线照射的对侧放置接收底片,用以记录透射过来的X射线量。X射线透过的多少是由生物组织的电子密度决定的,不同的组织,其电子密度不同,因而反映在X射线成象底片上就是曝光强度不同。由于骨骼与软组织的电子密度有显著差别,但软组织各部分间无显著差别,因而X射线成象可很好地显示骨骼与软组织的界面,但不能很好地区别不同的软组织。

超声波在生物组织中的穿透力有限,特别是在空气和骨骼中,超声波衰减损失严重,因而难于穿透骨骼以及对其后面的组织成象,故目前临床所用超声波成象装置多为反射式的。如图1-2所示,用一个超声波发生器与一个探头相连,用于发射探测波并接收由组织内部产生的回波。当超声波在生物组织中传播,遇到组织界面时,将产生反射回波,因而反射回波中运载了组织界面的信息,可用来对软组织界面成象,故可补足X射线成象的局限性。

(3) 超声成象仪器使用方便、价格便宜。

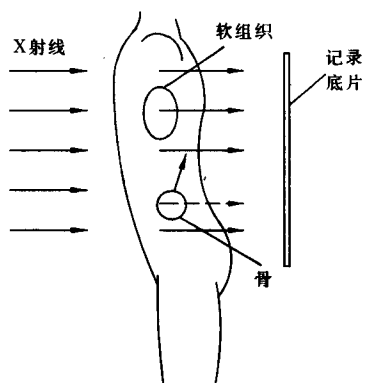


图 1-1 透射式 X 射线成像示意图

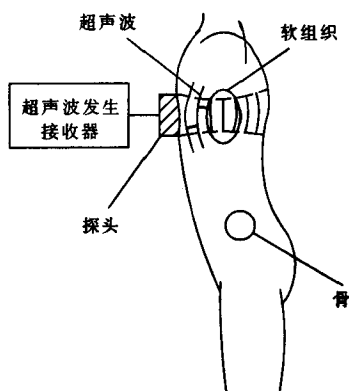


图 1-2 反射式超声成像

从使用上看,由于超声成像装置体积较小,探头可持于手中,适用于身体任意部位的扫描成像,还可根据使用需要更换探头,因此可以一机多用。同时,由于诊断用超声对人体无害,使用时不用任何屏蔽,因而较 X 射线成像方便且成本也较低。

由于上述这些特点,医学超声成像具有强大的生命力和发展前途,是其他成像技术所无法替代的现代诊断技术。

1.4 目前发展趋势

几十年来,许多研究者们都在超声成像上寻求新的突破口,主要围绕着两个目标:即如何提高成像分辨率以及寻求可定量表征特异性病变的成像特征量,而后者亦可视为实现前一目标的一个特殊手段之一。在长期的探索中,人们发现超声与生物组织的相互作用机理较为复杂,是由多种因素决定的。超声回波中至少主要运载着如下三个方面的信息:

- 大界面所造成的反射波;

- 小粒子所引起的散射波；
- 生物组织对声能量吸收所导致的回波幅值衰减。

在研究中人们发现,上述信息的变化分别表征着不同的生理病理变化。因而,超声回波中所携带信息的定量提取,自 20 世纪 80 年代以来成为医学超声研究的重要领域,并被称为超声组织定征。

要提取超声回波中所携带的生物组织的特征参量,首先就要研究超声波与生物组织相互作用的机理,然后才能找出各种因素在回波中的表现形式和作用,从而建立起特征提取的方法。本书正是在这种思想指导下,试图将这方面已有的方法与结果介绍给读者。

现在已为人们认识的与诊断有关的生物组织参量包括:声阻抗率、声速、介质密度、声衰减系数、散射系数、散射子尺度与密度分布、非线性参量、背向散射积分、弹性系数等等。这些参量的定量提取方法都是超声组织定征的前沿性课题。

随着全数字化的超声成象仪的出现,对回波中的特征参数进行定量估计的要求会更为迫切,而未来的超声诊断仪将可同时提供多个参量的图象供医生参考,使超声回波中所携带的信息得以充分利用。

除了通过定量的特征参量估计来提高超声对病症的分辨力之外,探头的设计以及图象的三维显示也都为提高超声成象分辨力做出了贡献,并仍在不断的发展之中。

参 考 文 献

- [1] 周永昌,郭万学. 超声医学. 北京:科学技术文献出版社,1991
- [2] Macovski A. Medical Imaging Systems. New Jersey:Printice- Hall Inc. ,

1983

[3] 杨国忠,刘玉清,邵会华,等. 医学成象技术. 北京:人民卫生出版社, 1987

[4] 王鸿章. 声学及医学超声应用. 上海:上海交通大学出版社,1991

[5] Rose J L, Goldberg B B. Basic Physics in Diagnostic Ultrasound. New York:John Wiley & Sons,1979

[6] Watson R W. IEE Medical Electronics-Medical Imaging Techniques. Peter Peregrinus Ltd, 1979

[7] 师宇东,张裕民,张忠丽. 医用诊断电子仪器与技术. 北京:电子工业出版社,1990

[8] Christensen D A. Ultrasonic Bioinstrumentation. New York:John Wiley & Sons,1988

[9] Erikson K R. Ultrasound in medicine — a review. IEEE Trans. SU, 1974,21(3):144~170