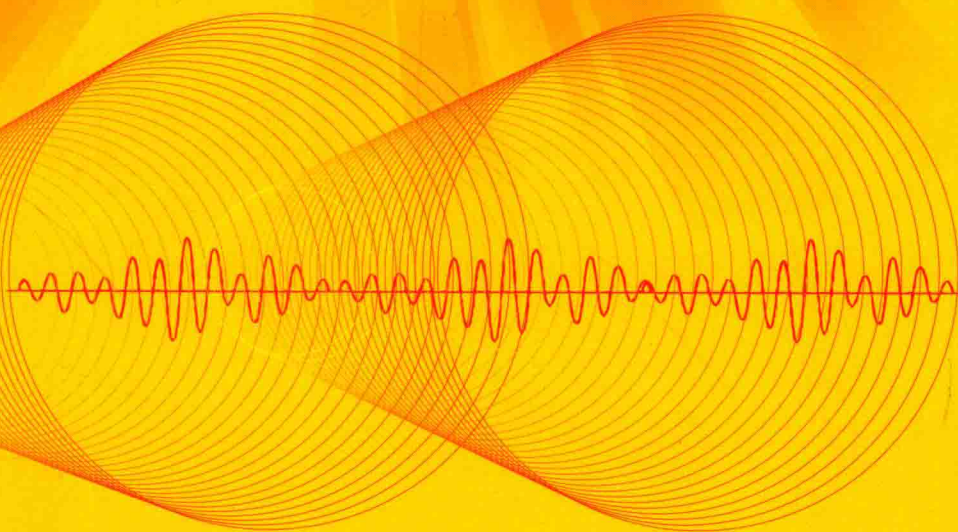




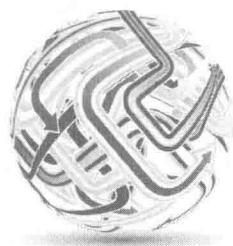
# 超声原理 及生物医学工程应用

## 生物医学超声学

牛金海 编著



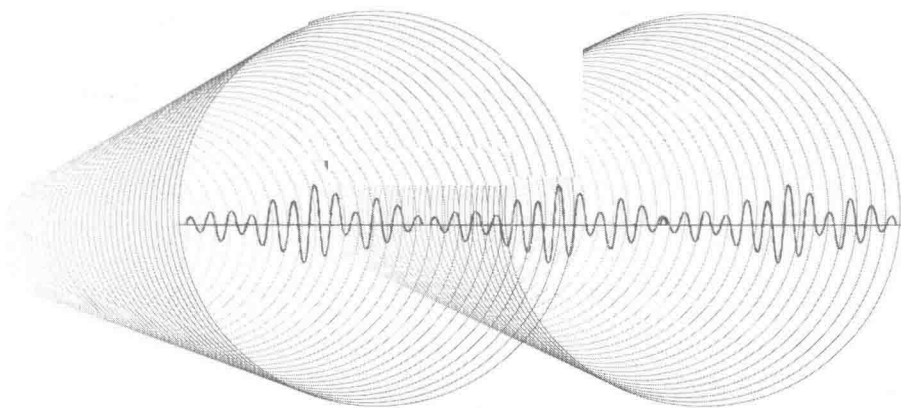
上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



# 超声原理 及生物医学工程应用

## 生物医学超声学

牛金海 编著



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书主要包括超声物理基础,压电效应及换能器技术,超声成像原理及诊断技术,高强度聚焦超声及其他超声治疗技术,医学超声实验,医学超声的最新进展等。每章配置了一定量的练习与思考题,以帮助读者巩固书中的内容并提高分析和解决问题的能力。为配合双语教学,本书保留了关键专业词汇的中英文对照。

本书的特点是在注重基本概念,基本原理,基本方法的同时,兼顾一定的工程技术实用性,如包含声场的数值模拟,超声图像的C语言程序处理,超声波发射电路原理,换能器的匹配技术等。本书适合医学超声以及相关领域的本科生作教材,也可供该领域的研究生、科研及工程技术工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

超声原理及生物医学工程应用:生物医学超声学 /  
牛金海编著. —上海:上海交通大学出版社, 2017  
ISBN 978-7-313-16087-4

I. ①超… II. ①牛… III. ①生物医学工程—超声学  
—高等学校—教材 IV. ①R318②R312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 262184 号

## 超声原理及生物医学工程应用:生物医学超声学

编 著:牛金海

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:郑益慧

印 制:上海盛通时代印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:459千字

版 次:2017年1月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-16087-4/R

定 价:49.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:18.5

插 页:4

印 次:2017年1月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-61453770

# 前 言

生物医学超声学是一门综合性课程,涉及数学、物理、材料、工程、计算机、微电子、医学和生物学等多门学科领域。经过近百年的发展,生物医学超声学发展已非常成熟,在临床取得广泛应用,同时新的研究方向与应用领域不断被开拓。医学超声学是生物医学工程学科的重要分支。超声在该学科领域的应用非常广泛,主要包括诊断、治疗、理疗、制药、美容等。

目前,关于生物医学超声的参考书很多;但是从教十年多来,一直很难找到一本非常适合本科生的教材。这也是编者下定决心编写本书的主要原因之一。本书的内容主要包括超声物理基础,压电效应与换能器技术,超声成像诊断原理,超声治疗技术,医学超声实验,医学超声的最新进展等。每章节都配置了一定量的练习与思考题,以帮助读者巩固书中的内容,并提高分析和解决问题的能力。为配合双语教学,本书保留了关键专业词汇的中英文对照。

本书的特点是在注重基本概念、基本原理、基本方法的同时,兼顾一定的工程技术实用性,如包含声场的数值模拟,超声图像的C语言程序处理,超声波发射电路原理,换能器的匹配技术等。本书适合医学超声以及相关领域的本科生作为教材,也可供该领域的研究生、科研及工程技术工作者参考。

由于编者水平有限以及时间紧迫,书中存在的问题甚至错误恳请指正,以便再版时更正。此外,本书编写过程中,参考了前辈、同行以及互联网上的大量资料,编者尽可能给出参考文献的出处,若有遗漏,敬请谅解。

2006—2016 十年期间选修《医学超声基础》和在我们课题组开展科研项目的本科生与研究生,参与了本课程建设,在此一并感谢同学们为本书做出的贡献。感谢上海交通大学生物医学工程学院的退休教师以及同事,在我编写此书时给我的支持与帮助,也感谢上海交通大学出版基金的资助以及上海交通大学出版社的大力支持。

本书在生物组织超声散射,数字 B 超硬件实现,医学超声最新进展等方面的内容仍有所欠缺,由于时间与篇幅等原因所限,我们期望再版时,能在这方面有所改进。

谨以此书献给我的导师王鸿樟先生,王老师是国内医学超声领域的前辈。让我们一起努力,为医学超声学科的发展尽自己的微薄之力。

# 目 录

<b>第 1 章 超声及医学应用</b>	<b>1</b>
1.1 医学超声(Medical Ultrasound)	1
1.2 医学超声发展简史	2
1.3 超声的应用	5
1.3.1 超声波在医学上的应用	5
1.3.2 超声波在其他领域的应用	8
<b>第 2 章 超声物理基础</b>	<b>11</b>
2.1 超声波的基本概念	11
2.1.1 机械振动与机械波(Mechanical Vibration and Mechanical Wave)	11
2.1.2 超声波的分类	13
2.1.3 超声波的传播速度	15
2.1.4 超声波的叠加、干涉、绕射	16
2.1.5 超声场的表征值	18
2.2 脉冲波声强及计算	25
2.2.1 脉冲波声强的定义	26
2.2.2 脉冲波声场声强的测量计算	27
2.3 波动方程及其解	28

2.4	声波的反射、折射和透射	32
2.4.1	超声波垂直入射到平界面上的反射与透射	32
2.4.2	超声波斜入射到平界面上的反射与透射	34
2.4.3	超声波在曲界面上的反射与折射	35
2.4.4	超声波多层介质透射	36
2.4.5	超声耦合剂	39
2.5	声波的散射和多普勒效应	40
2.5.1	超声波的散射	40
2.5.2	超声多普勒效应	46
2.6	生物组织的超声特性及超声生物效应	48
2.6.1	生物组织的超声特性	48
2.6.2	生物组织的超声特性参数值	49
2.6.3	超声的生物效应	51
2.7	声学参量及声场测量	55
2.7.1	声速的测量	55
2.7.2	声阻抗率的测量	57
2.7.3	声衰减系数的测量	58
2.7.4	声功率的测量	59
2.7.5	非线性声学参量 $B/A$ 的测量	61

### 第3章 压电效应与压电振子 65

3.1	压电效应	65
3.2	压电方程	66
3.3	压电材料	74
3.4	压电体的主要特性参数	77
3.5	压电振子以及振动模式	80

### 第4章 超声换能器 85

4.1	超声换能器概述	85
4.1.1	超声换能器的概念	85
4.1.2	超声换能器的分类	85
4.1.3	单振元换能器	86

4.1.4	常见的医用换能器	87
4.2	超声换能器的性能指标	89
4.3	超声换能器的声场分析	91
4.3.1	平面圆片换能器的声场	91
4.3.2	平面矩形换能器的声场	95
4.3.3	多元线阵换能器的声场	96
4.3.4	相控阵换能器超声场	101
4.4	声场聚焦技术及聚焦声场分布	103
4.5	相控阵超声换能器的原理	107
4.6	超声波发射与接收电路基础	111
4.7	超声换能器的匹配技术	114
4.8	自聚焦超声换能器声场数值模拟	119
4.8.1	基本原理	120
4.8.2	算法设计	121
4.8.3	程序设计	123
4.8.4	仿真结果	126

## **第5章 脉冲回波超声成像系统原理及应用** **131**

---

5.1	脉冲回波成像系统的基本原理	131
5.2	A型超声诊断仪的工作原理(模拟A超)	133
5.3	B型超声的基本原理	136
5.4	M型超声的原理及应用	137
5.5	C、F、P、D型超声诊断仪原理	138

## **第6章 数字B超声成像系统原理** **141**

---

6.1	B型超声成像的原理	141
6.2	B型超声成像诊断仪的关键技术指标与参数	142
6.3	B型超声成像诊断仪中的扫描技术	146
6.3.1	机械扇形扫描B超仪	146
6.3.2	高速电子线形扫描B超仪	147
6.3.3	电子相控阵扇形扫描B超仪	149
6.4	数字B超系统架构及数字扫描变换器	151



## 第7章 B超图像诊断及处理基础 158

7.1	人体组织的超声图像特征	158
7.2	B超图像的阅读方法	161
7.3	B超图像处理算法	166
7.4	超声图像伪差	170
7.5	BMP格式B超图像C语言编程处理实现	175
7.5.1	BMP文件读取	175
7.5.2	高斯平滑和拉普拉斯锐化原理	177
7.5.3	C语言程序及详细注释	179

## 第8章 超声多普勒成像原理及诊断技术 185

8.1	超声多普勒概述	185
8.2	超声多普勒血流测量原理	186
8.3	超声多普勒血流成像仪	188
8.3.1	连续波超声多普勒成像仪	189
8.3.2	脉冲波超声多普勒成像仪	190
8.3.3	彩色多普勒血流成像系统	190
8.4	多普勒频移信号的解调方法	197
8.4.1	非定向解调	198
8.4.2	定向解调	199
8.5	多普勒血流信息的时域自相关处理算法	202
8.5.1	血流方向信息的提取	202
8.5.2	血流速度大小的提取	203
8.5.3	时域自相关处理算法实现	203

## 第9章 其他超声成像设备 210

9.1	三维超声	210
9.2	超声CT	213
9.3	高频超声	217
9.4	超声显微镜	219
9.5	超声波全息术	224

<b>第 10 章 超声治疗及高强度聚焦超声</b>	<b>226</b>
10.1 超声治疗学概述	226
10.2 高强度聚焦超声	228
10.3 HIFU 治疗中的测温技术	232
10.3.1 概述	232
10.3.2 超声无损测温技术	233
10.3.3 基于 B 超图像的测温研究	236
10.3.4 MRI 无创测温在 HIFU 中的应用	240
<b>第 11 章 HIFU 的临床应用</b>	<b>243</b>
11.1 HIFU 的生物效应	243
11.2 HIFU 的医学应用	244
11.3 HIFU 应用于肿瘤的治疗	247
11.4 HIFU 临床治疗效果的评价	250
<b>第 12 章 超声碎石以及其他超声治疗技术</b>	<b>254</b>
12.1 超声碎石	254
12.1.1 超声碎石概述	254
12.1.2 超声碎石发展史	254
12.1.3 超声碎石原理	255
12.1.4 超声碎石机分类	255
12.2 其他超声治疗设备	259
12.2.1 超声雾化器	259
12.2.2 超声美容仪	260
<b>第 13 章 经颅超声刺激</b>	<b>261</b>
13.1 经颅超声刺激技术	261
13.2 经颅超声刺激系统	262
13.3 实验以及结果	264

<b>第 14 章 便携式超声成像设备的系统设计</b>	<b>268</b>
14.1 医学超声成像系统简介	268
14.2 便携式超声成像系统	269
14.2.1 便携式系统的设计需求	269
14.2.2 超声成像系统的架构	269
14.2.3 前端处理模块	269
14.2.4 中端处理	270
14.2.5 后端处理	271
14.2.6 系统控制器和 MMI	271
14.3 基于 DSP 的便携式超声解决方案	271
14.3.1 DSP 和 SOC 在便携式系统中的优势	271
14.3.2 系统方框图示例	272
14.3.3 实时操作系统(RTOS)	272
14.4 系统特性	273
 <b>第 15 章 医学超声的前沿技术</b>	 <b>275</b>
 <b>第 16 章 医学超声实验</b>	 <b>278</b>
16.1 超声实验与操作规范	278
16.2 实验 1 B 超成像的基本操作	278
16.3 实验 2 Gain & TGC 操作及 $\gamma$ 校正	280
16.4 实验 3 B 超图像伪影与气泡对成像的影响	282
16.5 实验 4 在 B/M 工作模式下, 模拟心脏二尖瓣跳动, 测量平均速度与心率	283
 <b>参考文献</b>	 <b>284</b>
 <b>附页彩图</b>	 <b>287</b>

# 第 1 章 超声及医学应用

## 1.1 医学超声(Medical Ultrasound)

声波(sound wave, acoustic wave)是声音的传播形式,是一种周期性的声压力的传播。声波是一种机械波,由物体(声源)振动产生,声波传播的空间称为声场。由于气体和液体不能承受剪切应力,在气体和液体介质中只能传播纵波,但在固体介质中可以混有横波。声波可以理解为介质偏离平衡态的小扰动的传播。这个传播过程只是能量的传递过程,而不发生质量的传递。如果扰动量比较小,则声波的传递满足经典的波动方程,是线性波。如扰动很大,则不满足线性的声波方程,会出现波的色散和产生激波,这时需要用非线性声学理论解释。

人耳可以听到的声波的频率一般为 20~20 000 Hz。频率小于 20 Hz(赫兹)的声波称为次声波。次声波不容易衰减,不易被水和空气吸收。次声波的波长往往很长,因此能绕开某些大型障碍物发生衍射。1883 年 8 月,南苏门答腊岛和爪哇岛之间的克拉卡托火山爆发,产生的次声波绕地球 3 圈,全长十多万千米,历时 108 小时。1961 年,苏联在北极圈内新地岛进行核试验激起的次声波绕地球转了 5 圈。某些频率的次声波由于与人体器官的振动频率相近甚至相同,容易与人体器官产生共振,对人体有很强的伤害性,危险时可致人死亡。如 4~8 Hz 的次声能在人的腹腔里产生共振,可使心脏出现强烈共振以及肺壁受损。地震、海啸、核爆等都可能产生次声波。

频率高于 20 kHz 的声波为超声波(ultrasound),其频率高于人耳听觉上限。人耳的听觉频率上限因人而异,一般认为健康成年人的听觉频率上限是 20 kHz。超声的应用非常广泛,典型的应用是用超声辐照介质,接收介质回波信号,从回波中获取其内部的信息。回波信号包含可以揭示介质内部结构的细节,此外超声也被动物(如蝙蝠)利用进行捕食。超声最为熟知的应用是超声成像,例如,用来产生子宫内胎儿的影像,如图 1-1 所示。



图 1-1 子宫内的胎儿超声影像

超声波的特点:

- (1) 相对于频率较低的声波及次声波,超声波的方向性强,能量更易于集中。
- (2) 携带能量高。在波幅相等的情况下,超声波携带的能量与频率的平方成正比。
- (3) 穿透力强。超声波能在各种不同媒质中传播,相对于电磁波,在水中传播距离远,

这也是水下探测和通信采用超声波的主要原因;通常情况下,电磁波在大气中的衰减仅为 $1.5\sim 3\text{ dB/Mm}$ (分贝/兆米),而在海水中的衰减是 $0.2\sim 10\text{ dB/m}$ 。如果是 $10\text{ kHz}$ 的甚低频电磁波在海水中传播,其衰减是 $3\text{ dB/m}$ ,即每传播 $1\text{ m}$ ,其功率衰减一半,幅度衰减到原来的 $0.7$ 。 $1\text{ MHz}$ 的超声波在水中的衰减系数约为 $0.2\text{ dB/m}$ 。

(4) 超声波具有反射、折射、衍射、散射等传播特性。作为波动形式,超声回波承载着被测物的信息,可用作探测及诊断;作为能量形式,当其强度超过一定值时,可与受体媒质相互作用,影响、改变或者破坏后者的状态、性质及结构,用于理疗、治疗、焊接、切割等。

医学超声学(medical ultrasound)是研究超声作用于生物体的规律并加以利用,达到诊断、治疗和保健等目的的一门学科。包括超声诊断学(diagnostic ultrasound)、超声治疗学(ultrasound therapy)和生物医学超声工程(biomedical ultrasound engineering)等,其理论基础是振动与波。不同频率超声波的应用如图 1-2 所示。

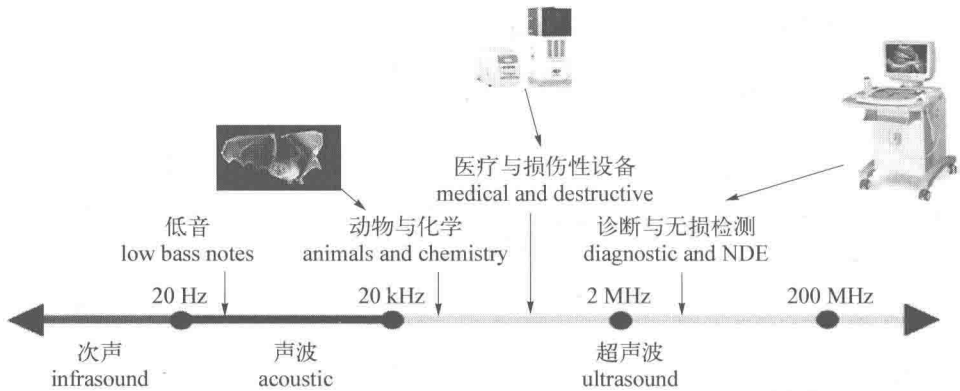


图 1-2 声波频率范围及相应用途

由图 1-2 可以看出,诊断超声常采用较高频率,以提高分辨率;而治疗超声,频率相对较低,以降低能量的衰减。

## 1.2 医学超声发展简史

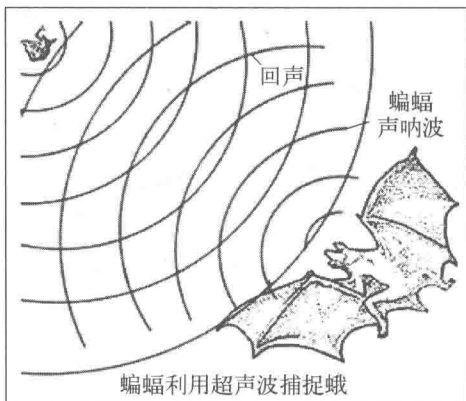


图 1-3 蝙蝠利用超声波捕食

超声是一门古老的学科,早在 1794 年,Lazzaro Spallanzani 证实蝙蝠夜间导航能力取决于频率高于人耳响应范围的声波(即超声波)的回音(见图 1-3);在 1876 年,Galton 通过其所发明的高尔顿哨子(Galton whistle)产生超声(见图 1-4)。

- 1877 年, Lord Rayleigh 出版“声学理论”(The Theory of Sound)首次以数学方程的形式描述声波,构建未来实用声学的基础。

- 1880 年, Pierre Curie 和 Jacques Curie 发现电压(electrical voltage)与晶体材料(crystalline material)所受压力有关,即在石英晶体上施加机

械压力会产生电压,这是制造现代超声换能器的突破。

- 1915年,Paul Langevin 发明水听器(hydrophone)监测冰山,是第一个换能器,一战中被用于监测潜艇,是超声史上重要的一步。

- 1930年,Dr. Karl Dussik 首次使用超声图像(ultrasound picture)诊断脑肿瘤,该过程被称为“hyperphonography”。这是超声成像(ultrasound imaging)的开始。

- 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。1945年,A. Firestone 制成 A 型脉冲超声检测仪(见图 1-5 和图 1-6)。

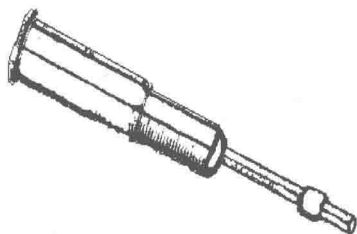


图 1-4 可产生超声的高尔顿哨子

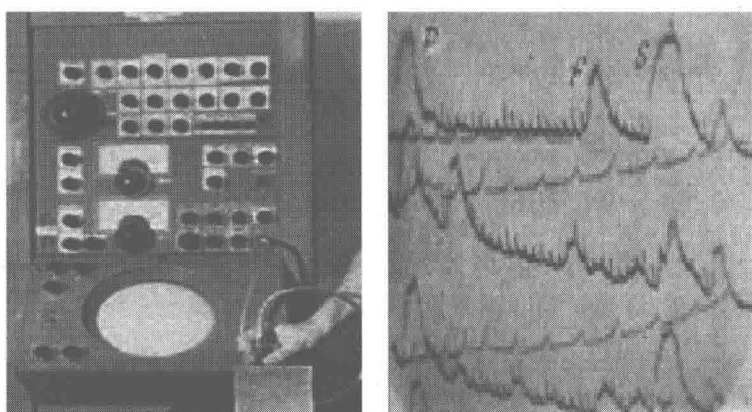


图 1-5 Firestone 制成 A 型脉冲超声检测仪

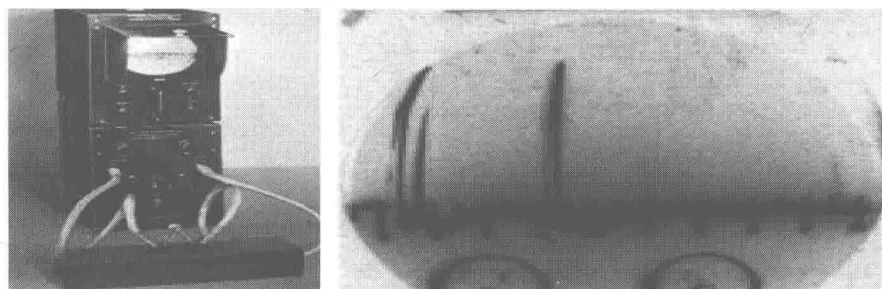


图 1-6 Donald 等发明的 A 型超声

- 1949年,第一次国际超声医学会议召开,促进了医学超声的发展。

- 1949年,John Wild 首次使用超声评估肠组织厚度,被后人称为“医学超声之父”。Dr. John Wild 和 John Reid 修订医疗成像设备标准,生产手持 B 型扫描仪从不同角度观测乳腺癌,生产出第一台乳房超声装置。

- 1950年,Ian Donald 发明并改进众多用于怀孕和婴儿发育方面的设备,其中有 B 型扫描仪(B-mode scanner),他被称为产科超声(obstetric ultrasound)之父。

- 1953年,Inge Edler 和 Carl Hellmuth Hertz 在其儿子身上使用医学超声;Kockums 首次成功测量心脏活动。

• 1955 年, Jafre 发现锆钛酸铅压电材料 lead zirconate titanate(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用超声技术的进一步发展。

• 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”。

• 1963 年, Richard Seldner 设计首台二维实时扫描仪(2D real-time scanner) Viduson (见图 1-7)。

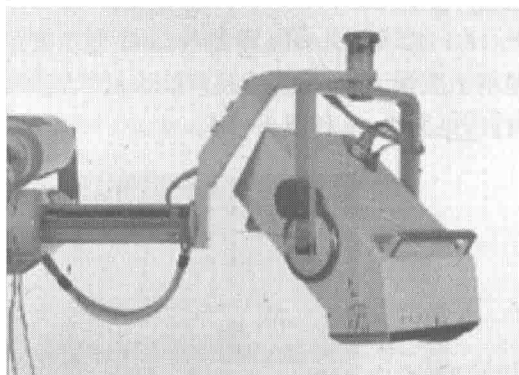
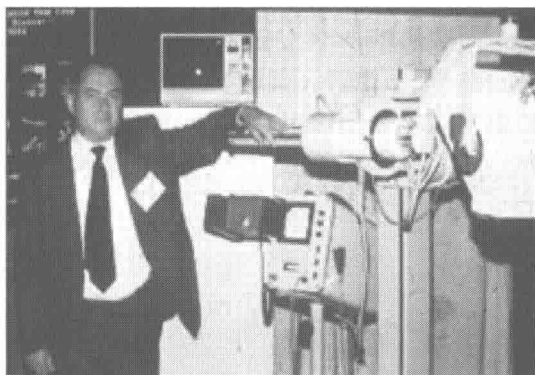


图 1-7 Richard Seldner 以及设计的首台二维实时扫描仪(Viduson)

• 1976 年, Tom Brown 开发世界首台三维超声扫描仪(见图 1-8)。

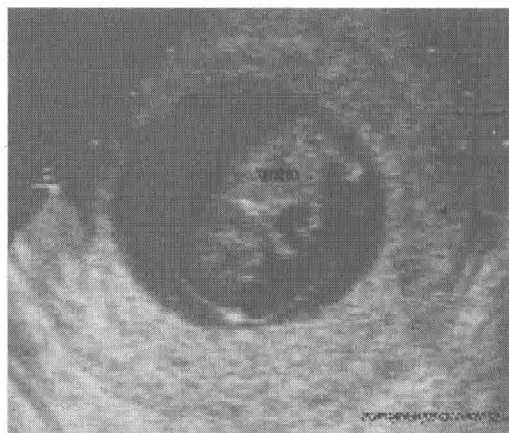
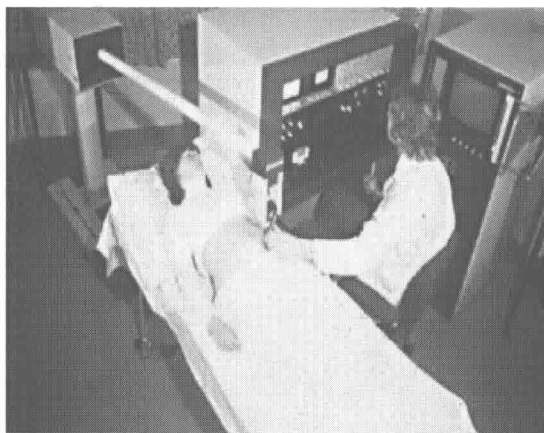


图 1-8 Tom Brown 开发世界首台三维超声扫描仪

• 20 世纪 70 年代中期, 静态扫描仪(static scanner)获得空前进步, 开发了线阵实时系统(linear array real-time system), 随后又进行了诸多技术改进。

• 20 世纪 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。

• 20 世纪 80 年代以后, 超声诊断仪日趋精密化、自动化、综合化、多功能化, 三维立体技术诞生, 彩色 Doppler 超声显像仪出现; 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, 当前已经与 X 射线、核医学、核磁共振并列为四大医学成像技术。

国内的医学超声发展起步相对较晚。1958年,上海市第六人民医院与上海第一、第二医科大学研究人员合作创立了上海超声医学应用研究小组,为超声诊断的开始;1959年7月,第一届全国超声会议在武汉召开;1960年,上海医科大学中山医院制作了最早的B型扫描仪;1961年7月,《超声诊断学》出版,是中国第一本有关超声的著作;1984年,中国超声医学研究会成立;1985年正式发表官方刊物为“中国超声医学杂志(Journal of Chinese Association of Ultrasound in Medicine and Engineering)”,协会更名为中国超声医学工程学会;1988年,王新房、周永昌、郭万学、徐智章及冯若获世界超声医学与生物学联合会所颁“医学超声历史先锋奖”。20世纪80年代末到90年代,上海交通大学生物医学工程的王鸿樟教授最早开始超声热疗方向的研究。

20世纪80年代初,超声体外机械波碎石术和超声外科,成为结石症治疗史上的重大突破,如今已在国际范围内推广应用。高强度聚焦超声无创外科,已使超声治疗在当代医疗技术中占据重要位置;21世纪高强度聚焦超声(high intensity focused ultrasound, HIFU)被誉为是21世纪治疗肿瘤的最新技术。

## 1.3 超声的应用

超声波广泛运用于诊断学、治疗学、工程学、生物学、军事等领域。① 工程学方面的应用:水下定位与通信、地下资源勘查、水下地貌探测、超声清洗、切割、探测鱼群等;② 生物学方面的应用:剪切大分子、生物工程及处理种子等;③ 诊断学方面的应用:A型、B型、M型、D型彩超等;④ 治疗学方面的应用:理疗、治癌、外科、体外碎石、牙科等;⑤ 军事方面的应用:水下声呐导航、侦察敌舰、清扫敌布水雷等。

### 1.3.1 超声波在医学上的应用

#### 1. 物理原理

超声波在声阻抗率不同的两层组织界面处会发生反射,回波信号中包含界面的位置、形状、软硬(相对于超声波)等信息,探头(换能器)接收回波信号,经过处理可以形成反映介质内部细节的超声图像(见图1-9)。

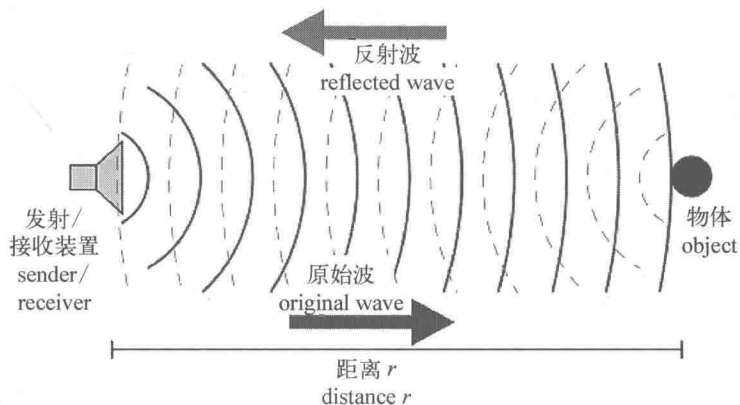


图1-9 超声回波定位



## 2. 三种基本扫描方式与诊断仪

### 1) A 型超声

探头以固定位置和方向对人体发射并接收超声波,声束不进行扫查。超声在人体内传播时,遇到声特性阻抗不同的界面,便产生反射,探头接收到反射回波,将其转换为电信号,经处理后送示波器显示。A 型超声诊断仪属于幅度调制显示型,是最早用于临床诊断的一种诊断仪,其原理如图 1-10 所示。

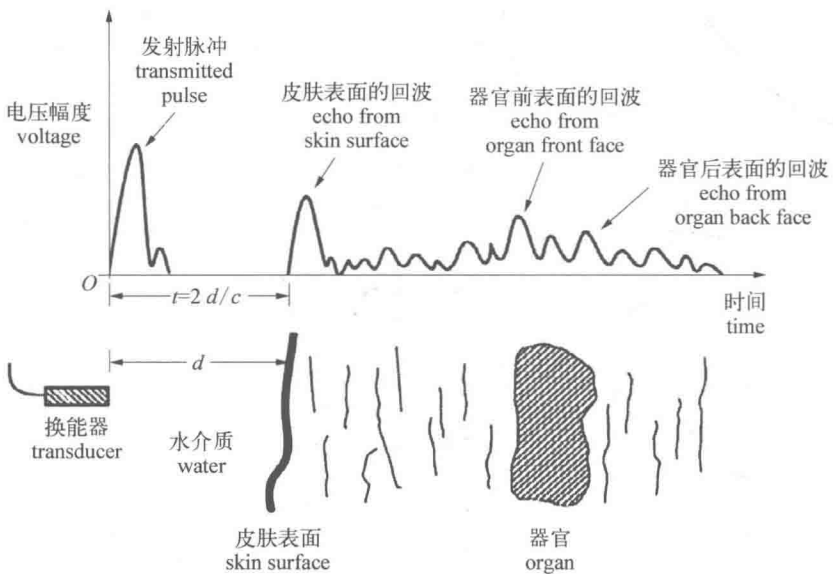
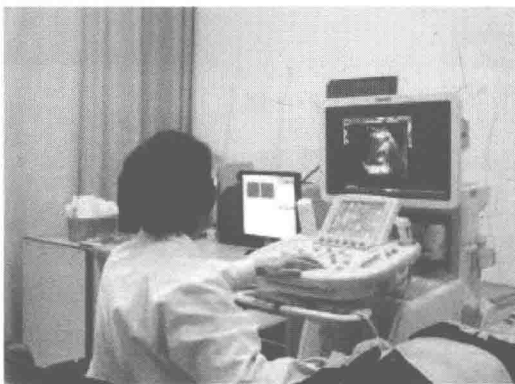


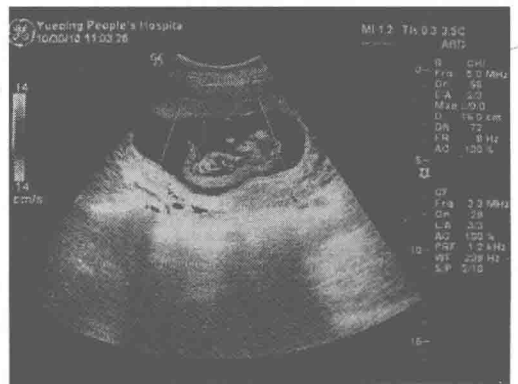
图 1-10 超声波医学应用的物理原理

### 2) B 型超声

B 型超声在 A 型的基础上,将 A 型超声的扫描线在一个平面上扫描扩展,并将幅度调制映射为辉度调制,形成一幅二维图像,即为 B 超成像的原理。B 型超声广泛应用于妇产科、心内科等。超声诊断技术主要用于体内液性、实质性组织的诊断,对于骨组织、充满气体的脏器(如肺)以及被它们遮挡的脏器不适合探及(见图 1-11)。



(a)



(b)

图 1-11 临床检查场景(a)以及 12 周的胎儿超声图像(b)