

超 声 医 学

冯 若

(南京大学信息物理学系,南京 210008)

超声波既是一种波动又是一种能量形式,利用这些性质发展了超声诊断和超声医疗,超声诊断和超声医疗以及超声在医学中的其他应用构成了内容极为新颖、丰富的超声医学。

现代医学的发展,关系到每一个社会成员的健康与幸福。现代医学的迅速发展是现代科学技术向医学广泛渗透的结果。例如,放射性科学、超声学、激光学及相应技术应用于医学,便导致相继出现的放射医学、超声医学及激光医学等。在超声医学中,B型超声显象仪、超声外科、彩色多普勒血流图及体外机械波碎石机等先进医疗技术的相继推出和卓有成效的应用,则充分显示了超声医学的蓬勃发展及广阔的发展远景。

一、超声医学的物理基础

超声波是指频率大于20kHz的声波。声波是一种波动,是机械振动能量的传播形式。它既是波动,就可作为信息载体。把超声波射入人体并从其回波中获取有关人体的病理信息,这就是超声诊断。既是能量,就可用以作用于人体病变部位,通过它对病变组织的影响,达到某种既定的医疗目的,这便是超声医疗。超声诊断与超声医疗构成了超声医学的主要内容。

以上只是原理上的叙述。事实上,超声医学之所以成为现实,还有二个重要条件。其一是超声波在人体中要能以直线传播,以使其便于控制;其二是超声波在人体中要能够传播足够的距离,并与其经过的人体组织间有适度的相互作用。理论研究与实践表明,选用大约频率为800kHz—10MHz的超声波能够同时满足上述二项条件。频率低于800kHz的超声波,声束很快发散,方向不易控制,能量难于集中;频率大于10MHz的超声波在人体内的传播衰减太大,可能的传播距离太小,无法应用。例如,一般理疗超声频率多选用800kHz,这既可

保证声波可在人体中传播到足够的深度,又可保证人体组织对声波能量的有效吸收,以获取理疗所必要的温升。又如,目前腹部B型超声显象仪使用的超声频率多为3.5MHz,这是因为3.5MHz的超声波仍可在人体内达到足够的深度,同时又增强了组织细微结构对超声波的散射作用,并可使图象质地细腻,具有较高的分辨率。

广义而言,超声医学使用的超声波频率大约从几十kHz到几GHz($1\text{GHz} = 10^9\text{Hz}$)。几十kHz的低频超声波可用于超声外科,它易于通过机械效应与空化效应切除病变组织,进行临床外科手术。而用于细胞病理学分析的超声显微镜可使用频率高达几GHz的高频超声波,使超声显微镜的分辨率可高出光学显微镜一个量级以上。

理论研究常常是技术的先导。大家知道,本世纪40,50年代分子声学得到了迅速发展。人们借助于分子声学的实验研究方法,把研究对象扩展到生物体系,从而对各个不同层次(分子、细胞、组织等)生物体系的声学性质进行广泛而系统的研究,这便为随之兴起的超声医学发展提供了必要的理论基础。反之,医学超声技术的发展又推动了基础研究的深化,这便导致了超声生物物理学这门边缘学科的形成。著名的生物物理学家编辑出版了超声生物物理学^[1]。《超声生物物理学》辞条也首次出现在1980年出版的美国《物理学大百科全书》之中^[2]。超声生物物理学的研究内容包括下列几个方面^[3]:

1 超声波在各个不同结构层次的生物体系的传播性质,其中涉及到多种声波传播参量,如

声速、声吸收、声衰减、声学非线性参量及超声背向散射等；

2. 超声波与生物体系相互作用的物理机制；

3. 超声作用引起生物体系的状态、功能及结构等的变化，即超声生物效应；

4. 生物医学超声剂量学。

这是一门与生命科学交叉的新兴的物理学分支。多年来，该领域的科研工作开展得异常活跃，在诸如生物物理学、医学物理学及生物医学超声等各种有关的国际学术会议上都有显著地位。

二、超声诊断技术日新月异^[4]

早在本世纪 40 年代，工业上用于探伤的超声脉冲回波技术首次被引入医学诊断，提出了 A 型 (amplitude mode) 诊断技术，从而掀开了超声诊断的历史篇章。

A 型超声诊断技术采用了如雷达或声纳的回波定位原理。当把一束超声波射入人体后，由于人体内不同组织器官或同一组织器官的不同结构或状态(正常的与病变的)下的声学特性阻抗不同，就会引起强度与数量不同的反射或散射回波。示波器屏幕上 Y 轴表示回波幅度，X 轴表示声波传入人体内的时间(或深度)。医生就是依据这疏密与大小不同的回波波形进行诊断的。

A 型超声诊断技术虽然在 50 年代就已有效地应用于颅脑、眼睛、心、肝、胰及胆等疾病的诊断。但是，这种波形诊断法既不直观也不形象，所以自 60 年代起，临床上应用的大部分 A 型超声诊断仪就开始逐渐被 B 型超声诊断仪所取代。

B 型 (brightness mode) 是指由超声脉冲回波调制的二维亮度(或灰度)显示。它反映的是人体某一断面上的信息。此时，屏幕上的 Y 轴代表声波传入体内的时间(或深度)，而其亮度则由对应空间点上的超声回波幅度调制；X 轴代表声束(或声线)对人体扫描的方向。这样，超声束对人体扫描，就等同于无损地把人体

切开一个断面，并用亮度调制的相应的二维图象把它再现在屏幕上。从物理上来看，一帧 B 超图象大体上可看成是人体内这个断面上声阻抗变化界面的分布。

自从 70 年代后期起，B 型超声诊断技术经历了频繁的重大技术改进。诸如对声线的电子扫描(对线阵式)及相控阵扫描(对扇扫式)，对回波的对数放大、灰阶(把回波亮度分成许多等级)显示等。但是，其中最具有意义的是数字扫描变换器 (DSC) 的应用，它把每束超声的回波信号通过 A/D 转换数字化，按纵列依次存入存储器，并在每帧图象的 128 线(该声线数受探测深度及帧频的限制)间充填到 512 线，然后用电视制式以横行读出(计 512 行)，与电视屏幕扫描线对应。这样，每帧图象将由 $512^2 = 262144$ 个像素(图象的最小结构单元)组成。通常取帧频为 30 Hz，则每秒钟内写入和读出的像素均为 $30 \times 512^2 = 7864320$ 个，这就充分保证了图象显示稳定，实时而细密。

DSC 技术引入 B 超的更重大意义还在于它使 B 超技术步入计算机化的时代！在 DSC 基础上发展起来的数字扫描处理器 (DSP) 及数字图象处理器 (DIP) 使 B 超诊断仪的功能大大改善与扩展，不仅为临床诊断带来极大方便，而且使诊断质量也大为提高。例如，应用计算机化的 B 超可进行图象冻结，图象局部放大，多幅图象存储、拼接和同时显示，以及为突出病灶特征便于提取诊断信息，对原图象的灰阶分布人为地进行多种方案的改造与调整(即图象处理)；还可以实现一定程度的量化诊断，例如可使用一对到四对光标测量并在屏幕上直接读取体内器官和病灶等探测目标的线径、周长、面积与体积；还可以在图象上由光标划出某一感兴趣的区域 (ROI)、线段 (LOI) 或点 (POI)，从超声回波中分析出该处各个像素的灰阶数及其所占百分比例，并以直方图形式显示出，其 Y 轴为具有某一灰阶的像素数量百分比(最大的取为 1)，X 轴为灰阶数(通常为 0-63 个，即 64 个灰阶)。

B 超诊断仪几乎可对人体所有脏器进行诊

断,如心、肝、胆、胰、肾及眼、乳房、妊娠子宫等。在妇产科, B超正获得日益广泛的应用^[5]。在 B超图象上,可在孕妇闭经 39 天后辨认出胎囊,妊娠 42 天后看到胎心跳动,90 天后就可以看到胎儿在母腹中吸吮小手指和小嘴巴一张一合呼吸的样子。B超已在确定妊娠日期、评价胎儿生长发育及检查胎儿先天性畸形等方面发挥着独特的作用。

B超图象显示的就是声束扫描的那个体断面。如果显示的图象是与声束相垂直的某一等深断面,则称为 C 型 (constant deep mode) 技术;倘若显示的断面虽与声束垂直但不是等深,而是自由选择的曲面,就称为 F 型 (free section mode) 技术。C 型与 F 型超声显象仪已开始用于乳房病变诊断,但还远未推广。

M 型 (motion mode) 超声诊断仪,通常称为超声心动图。它与 B 超诊断仪的区别在于显示屏上的 X 轴代表时间展开,因此它显示的是在超声传播方向上(一维)回波位置随时间变化的位移信息。M 型技术用于检查心脏时,可显示心内膜、外膜及心肌层的运动状况,它常与心音、心电等测量同步显示,以在多种参数相互比较中获得尽量多的诊断信息。

D 型 (Doppler mode) 超声诊断仪的工作原理则完全是另一套。如果说上述各型诊断仪都是从超声回波幅度来获取诊断信息的,那么 D 型诊断仪则是通过物理学中为人熟知的多普勒效应,从超声回波的多普勒频移中取得诊断信息的。因此 D 型诊断仪只适用于检查运动目标,如血流及胎心等。例如,一束频率为 f_0 的超声波作用到运动速度为 v 的目标上,从目标物上的反射(或散射)回波频率将变成 f ,则有

$$f_D = f_0 - f = f_0 \frac{2v}{c_s} \cos \theta,$$

f_D 即称为多普勒频移, c_s 为声速, θ 为声波传播方向与目标物运动方向的夹角。可见, f_D 的大小反映了目标物的运动速度, f_D 的正负符号则反映运动方向,朝向或远离声源。

超声多普勒诊断仪主要分连续与脉冲波二种。前者多用于胎心监护,后者主要用于血液

动力学分析及心血管系统疾病的临床检查。

近年来超声诊断技术发展的特点之一,是把不同类型的诊断相结合构成多功能超声诊断系统。双功能超声便是其中一例,它是在同一屏幕上同时显示三幅图像,即 B 超图象;多普勒频移随时间变化的图谱(图谱的亮度则代表引起该多普勒频移目标物的多少);及对应于某一时刻的频谱定量分析直方图,其 X 轴为频移量, Y 轴为某一频移对应的目标物百分比。这样,通过 B 超图象观测可把多普勒取样体积准确无误地置于病变位置,并获得实时状态下的血流动力学资料,从而可做出更全面而准确的诊断。彩色多普勒血流图则是 B 超与多普勒技术更加完美的结合。它用动目标显示技术和相位检测法,从超声回波中获取血流流速的空间分布信息,把流速的方向进行彩色编码与 B 超图象合成显示,并在彩色 B 超图象上以红、蓝二种颜色表示血流朝向与远离声源的二个方向,以颜色的深度代表流速的大小。由此,对心脏内的血流(分流、返流及环流等)状况便一目了然,对心房、心室间膜缺损、主动脉及肺动脉病变、二尖瓣关闭不全和狭窄等都可作出准确的诊断。

三、超声医疗发展引人瞩目^[6]

超声医疗的物理基础是足够强度的超声波在人体内传播时产生的热效应、机械效应及空化效应。热效应与机械效应会在人体病变部位产生升温或按摩作用,使血管舒张及细胞膜扩散功能增强,从而加速生化反应及新陈代谢过程,有一定的医疗效果。超声空化及强烈的机械效应可破坏生物组织,利用这一点可以进行超声外科手术。

超声理疗早在半个世纪前就已开始,它在治疗关节炎、滑囊炎、肌肉痉挛、软组织或韧带挫伤等方面都有较好医效。近年来超声理疗一个引人注目的进展是超声加热治癌^[7]。大量基础与临床研究都证明,癌细胞在 43°C 左右就难生存。热疗作为化疗、放疗的辅助形式已取得了公认的效果与发展。超声加热之所以特别重要,是因为它几乎是人体深部癌变组织加热的

唯一有效手段,加热深度可达 12cm 以上,远非微波或射频电磁波加热技术所能比拟。超声外科在国外,特别是在苏联,已取得了重大突破,它已成功地应用于骨、脑、眼外科,在摘除肿瘤、息肉以及动脉粥样硬化病变组织等方面都获得成功。在骨外科中,超声刀的切口类似微型锯齿,以 25—30 kHz 的频率振动,可使切割速度提高数十倍。在软组织手术中,超声刀切口为楔形,手术时比常规方法省力 3—5 倍,而功效却提高 8—10 倍,而且在手术中弹性较强的血管几乎不受损伤,因而被誉为无血、无感染手术。

近十年来,超声医疗另一个重大进展是体外机械波碎石术的出现及其迅速发展^[1]。80 年代初,联邦德国泌尿科专家 Chuassy 教授首先研制出体外冲击波碎石机,它把在水中由高压放电产生的冲击波能量用金属半椭球内表面反射聚焦,在焦点处压强可达到数百至上千个大气压,借助于 X 光机或 B 超监测把焦点对准人体内结石处,即可在不损伤周围软组织情况下把结石粉碎成 2mm 以下的微粒而排除体外。研究表明,冲击波中对碎石起主要作用的是频率为 1MHz 左右的超声波。此外,直接使用超声波的碎石机亦相继成功地应用于临床。一种是把微型超声探头在内窥镜配合下通过尿道引入肾盂内与结石接触,发射超声,破坏结石并设法吸除。另一种则是把许多小超声振元布设在金属半椭球内表面上,构成超声阵,由射频电脉冲同步激励这些阵元。各阵元发射的超声脉冲在焦点集中,以获取足够强的超声振动。

体外机械波碎石术使千万个结石患者免遭升刀之苦。它不仅具有较高的治愈率,而且安全性亦较常规手术大为提高。据 1989 年在南斯拉夫召开的第 13 届国际声学会议上一份报告^[9]指出,用传统外科手术方法摘除体内结石的术后死亡率为 2%,而近十年来西方国家接受体外冲击波碎石的患者已逾 50 万,术后死亡率仅为 0.01%,使安全性提高了 200 倍。

四、超声医学前景广阔

超声诊断技术的突出优点是它选用诊断参

量的灵活性及工程上实现的多样性。我们在前面例述的各种利用回波幅度的超声诊断仪,都是建立在超声回波基础上的,而回波的产生是由人体内存在的声阻抗界面引起的。这就是说,这些超声诊断仪的共同物理基础都是利用了声阻抗这个声学参量。然而,表征声波传播的参量很多,如声速、声衰减系数、声散射系数及声学非线性参量等。事实上,有些病变并不一定伴有声阻抗的明显变化,在这种情况下,从 B 超图象上就难以对其进行辨认。但是,这些病变却可能引起其它声参量的显著变化。例如,正常肝与轻度脂肪肝或硬化肝的 B 超图象差异不大,但是它们的超声衰减系数却变化了好多倍。如果选用衰减系数作为诊断参量,则其特异性会大大增强,从而易于诊断鉴别。使用多种参量从不同侧面与途径去探查病变信息,无疑是超声诊断技术所特有的、有待开发的潜在优势。

如今,利用声速及声衰减系数的二种透射型超声 CT 在国外已用于诊断;通过测量衰减系数进行诊断的超声诊断技术也已获得若干临床应用。此外,超声背向散射谱分析及声学非线性成象研究均已取得了一定的进展。

展望未来,超声医学的发展前景极为广阔,从事超声生物物理学、生物医学超声工程及临床超声医学的专家、医生和工程技术人员在这一富有生命力的交叉科学领域中,是可以大展宏图,大有作为的。

- [1] Ultrasonic Biophysics, edited by F. Dunn et al., Inc., (1976).
- [2] F. Dunn, Ultrasonic Biophysics, in "Encyclopedia of Physics", ed. R. G. Lerner et al., Addison-Wesley, New York, (1980).
- [3] 冯 若,物理,13-2(1984),65.
- [4] 冯 若、金树武,中国超声医学杂志,5-1(1989),32.
- [5] 冯 若、李化茂,自然杂志,13-10(1990),669.
- [6] 冯 若,自然杂志,10-5(1987),346.
- [7] 冯 若、吴至诚,生物医学超声,冯 若主编,南京大学出版社,(1987),133.
- [8] 宁新宝、冯 若,中国超声医学杂志,6-3(1990),185.
- [9] C. C. Church and L. A. Crum, in Proceedings of 13th ICA, Vol. 4, Yugoslavia, (1989), 205.