

由背向散射谱自相关分析进行超声组织定征*

毛伟年# 冯若

(南京大学声学研究所)

1990年10月25日收到

本文讨论了利用超声背向散射谱自相关分析估计相邻散射元特征间距的原理与方法。利用微机控制的自动三维机械扫描及宽带超声谱测试系统,对猪的新鲜离体肝、脾、肾等组织样品进行了实验研究及分析,得到它们的散射元平均特征间距分别为 $(1.12 \pm 0.28)\text{mm}$, $(1.18 \pm 0.29)\text{mm}$, 及 $(1.23 \pm 0.21)\text{mm}$, 进而结合各组织结构的显微分析结果做了对照讨论,并指出了超声背向散射谱自相关分析技术可能用于组织定征及临床诊断的潜在前景。

一、引言

近十多年来, B型超声图象诊断技术的发展极为迅速,其性能水平已趋近理论极限^[1]。在这种情况下,越来越多的医学超声基础研究专家开始致力于对超声诊断技术新领域的探索与开拓。超声组织定征(Ultrasonic tissue characterization)就是这种努力的重要组成部份。本文拟从超声背向散射谱的自相关分析对组织定征进行研究。

二、原理分析

动物软组织结构的不均匀性导致了入射声束散射回波的产生,这构成了一切超声回波诊断技术的物理基础。对于猪的若干离体软组织背向散射谱的研究表明,它们总是表现出有规则的起伏分布^[2],这反映了这些组织结构具有一定程度的有序性。在脉冲超声波入射情况下,从理论上求解非均匀波动方程,在远场处获得的背向散射声压频谱不仅与超声脉冲波形有关,而且还与组织的结构有关^[3]。当组织结构表现为具有声波波长 $\lambda = 2\pi/k$ 尺度的规则分布时(k 为波数),即可用半规则排列的点状散射阵来模拟它,而组织的病理变化可能会导致

这些相邻阵元的特征间距改变,因而研究这些特征间距与病理变化的相关性,就可开拓与建立对组织进行超声定征的新途径。

对于相邻阵元间距为 d 的散射阵,其相邻阵元散射回波的位相差为 $\varphi = 2dk$,当 $\varphi = 2n\pi$ (n 为整数),亦即 $n\lambda = 2d$ 时,产生相干峰。如有 N 个散射元,其总的散射能量应是单个散射元的 N 倍。当入射为脉冲声波时,其中包含有不同波长的能量,表现为谱分布。只要满足 $n\lambda = 2d$ 条件,对所有可能的 λ 与 d 值均发生相干峰,即在回波频谱中的所有 $f = nC/(2d)$ 频率点上均呈现峰值(c 为声速)。即相干峰以频率间隔为 $\Delta f = c/2d$ 周期出现。

在实验中为减小随机干扰引起回波频谱的起伏,提高信噪比,便于峰值检测,可采用自相关技术。周期函数的自相关仍为周期的偶函数,故超声回波频谱幅值 $P(f)$ 的自相关 $|P(f)| * |P(f)|$ 的峰值仍对应于原周期峰,且在最大峰外间隔 $\Delta f = \frac{c}{2d}$ 处呈现下一个峰。而随机噪声干扰经自相关处理将被削弱。

在进行实际测量时,可利用宽带回波测试系统,对组织的散射回波进行高速采样,对采集的离散回波信号进行FFT变换,获得离散的

* 国家自然科学基金资助的项目; # 现在深圳蛇口安科公司工作。

回波频谱 $|P(i)|$, ($i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$), 进而再计算其自相关函数^[4]

$$R(|P(i)|) = \frac{1}{N-i} \sum_j |P(j)||P(j+i)| \quad (1)$$

从测出的自相关谱峰间隔 Δf 及已知声速 c , 即可由下式估计出相邻散射元的特征间距

$$d = c/(2\Delta f) \quad (2)$$

由于实际组织的复杂性, 特征间距不是单一的, 因此更适于用平均特征间距来表征组织的结构特征, 为此需对被测样品做多点空间测量, 求出每一位置上的特征间距 d_i , 再进而求出平均特征间距 $\bar{d} = \sum_i^M \frac{d_i}{M}$, M 为测量的不同空间位置数, 可在一定程度上反映组织结构特征的定量信息。

据文献报道, 只有 Fellingham 等人^[5]曾对人肝和脾的散射元特征间距做过活体测量分析并得到了有意义的结果。本文拟在此基础上进一步对离体猪肝、脾及肾进行测量, 以深入探讨它在超声组织定征中的前景。

三、测量与分析系统

测量分析系统如图 1 所示^[5]。测试分析系统主要包括如下几部份: (1) δ 脉冲源, 可给出时宽 25ns, 幅度为 330V 的负尖电脉冲; (2) 宽带发射兼接收超声换能器, 中心频率为 5MHz, 3dB 相对带宽为 54%; (3) 高增益宽带接收放大器及门控电路; (4) 数字采样器及微机控制与分析系统; (5) 微机控制三维机械扫描系统及测试水槽。该系统在微机软件程序控制下, 可进行多功能自动快速测量与分析。

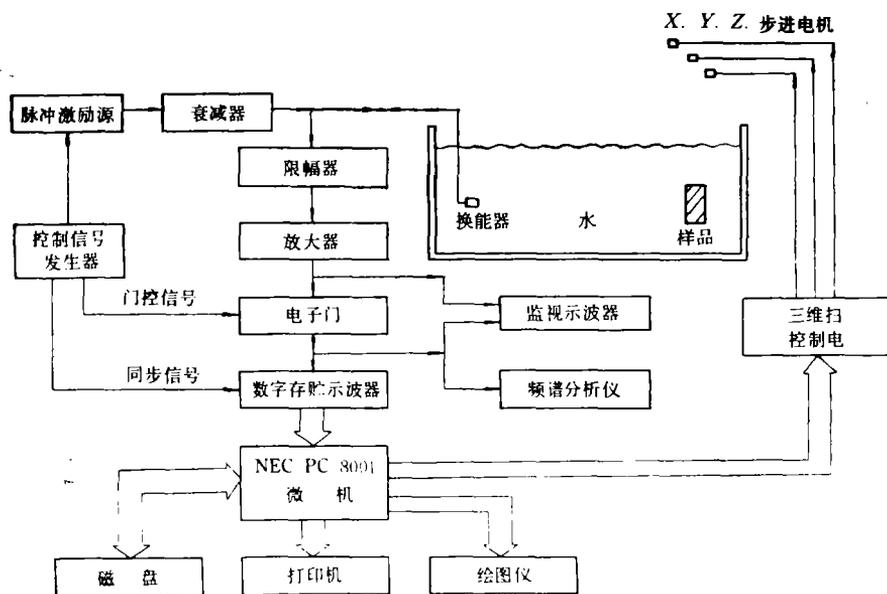


图 1 超声背向散射谱测试分析系统

δ 源发出的尖脉冲激励换能器发射出窄超声脉冲, 入射到组织样品, 再由同一换能器接收来自组织样品的散射回波, 回波信号经放大后输入到数字存储示波器, 通过门选后以 50MHz 采样频率进行高速采样, 采样后的离散信号输

入微机进行 FFT 及谱自相关分析, 并检测出峰的时间间隔 Δf 。一次采样完成后, 由微机控制输出逻辑脉冲驱动机械扫描系统, 移动换能器或组织样品, 再进行下一次测量。如此实现多次扫描测量。

四、测量结果与讨论

本文对猪的若干新鲜离体软组织，如肝、脾、肾等进行了实验测量研究。组织样品的获取与制备皆如前文所述^[6]。对各样品的全部测量均在离体后 4—5h 内完成。对每一样品进行自动扫描测量 20—40 次，每次均测出背向散射谱，并用其自相关分析估计出相邻散射元的特征间距，最后求得平均特征间距。

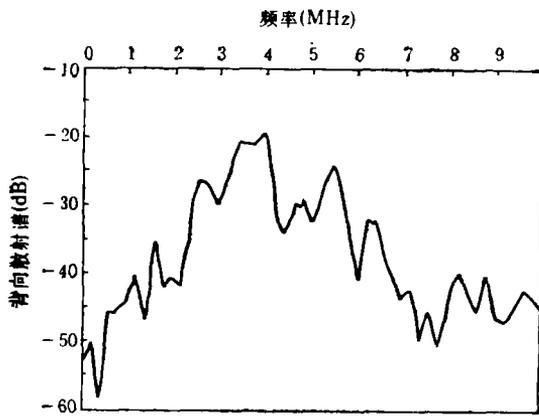


图 2 猪肝组织的超声背向散射频谱

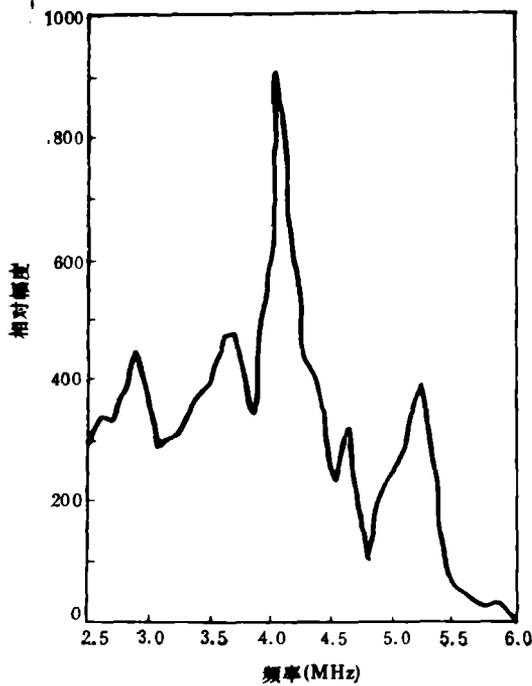


图 3 猪肝组织超声背向散射谱的自相关图谱

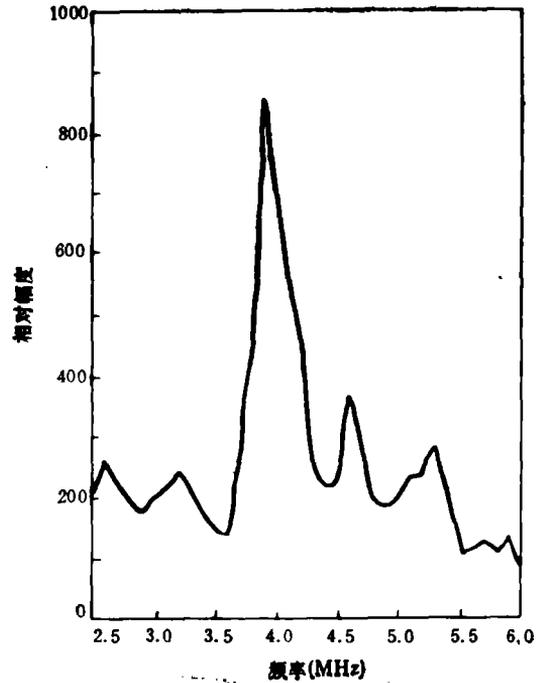


图 4 猪肾组织超声背向散射谱的自相关图谱

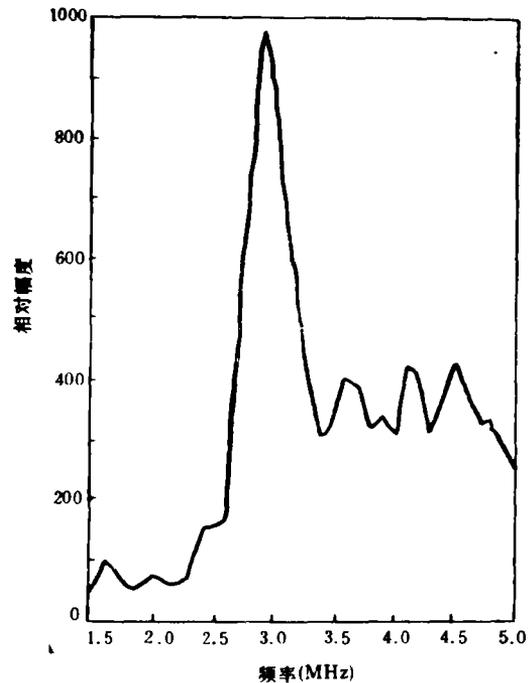


图 5 猪脾组织超声背向散射谱自相关图谱

1. 测量结果与分析

新鲜离体猪肝组织某一部位的背向散射频谱如图 2 所示。谱中表现出明显的峰值起伏，

而且表现出一定程度的周期性,这正是由于组织特征结构引起超声回波干涉效应的反映。

对猪肝样品某一部位的超声背向散射谱进行自相关分析,得到自相关图谱,如图3所示。可见,自相关谱具有较明显的峰值,且在谱中间出现最大峰,其两侧几乎等间距地呈现小峰值,颇类似于光栅的干涉效应。

对猪的肾皮质和脾组织的实验研究,也取得了类似结果,如图4和5所示。可见,组织超声背向散射谱的自相关图谱均存在主极大,其两侧的峰值几乎按相等频率间隔出现,表现出一定程度的周期性,该现象反映组织散射结构在某种程度上的规则性排列。

对3个猪肝组织样品,2个肾皮质样品和3个脾组织样品进行多次空间扫描测量获得的平均特征间距列入下表1。

表1 各组织样品散射元的平均特征间距

样 品	测量次数	平均特征间距 (mm)
猪肝(N=3)	60	1.12±0.28
猪肾(N=2)	50	1.23±0.21
猪脾(N=3)	100	1.18±0.29

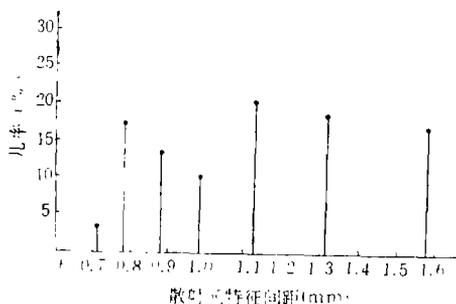


图6 猪肝散射元间距的分布

组织结构的复杂性决定了散射元的非均匀分布,即相邻散射元间距并不总是相同的,而只是表现为一定程度的规则性。由组织样品不同空间部位的散射回波谱估计出的散射元间距呈现一随机分布,如图6给出了对猪肝样品进行60次空间扫描的测量结果。可见,求出组织散

射元的平均特征间距是必要的。

影响估计精度的主要因素是统计平均次数和组织内大界面回波的影响,因此,为提高测量精度,需对样品进行大量统计测量,且在测量时,要避开大界面(如血管等)回波信号的干扰。

2. 散射结构分析

由测量结果知,肝组织内相邻散射元的平均间距为1.21mm,因此,在肝组织结构中,间距等效于此量级的某种组份结构应该是作出主要贡献的散射元。由组织结构的显微分析得知,肝组织是由呈六角棱柱形的肝小叶集合而成,相邻肝小叶之间的距离为1mm左右^[4],由此可以认为肝组织内主要散射元是肝小叶。其他有关超声背向散射的研究也表明,肝小叶可能是肝组织的主要散射元^[8]。文献[4]对活体人肝的测量表明,其平均特征间距为(1.07±0.16)mm,即略小于猪肝组织内散射元的平均间距,这与组织结构的显微分析结果是完全一致的^[4]。

测得的脾组织内散射元平均间距为1.18mm,在脾组织结构中可以找到与此相应的主要构成部份,即在脾组织内构成网状结构的脾小梁,它们是由结缔组织膜所构成。对于肾皮质内部散射元的平均间距测量值为1.23mm,肾皮质的散射结构更为复杂,且表现为各向异性。从其组织结构看,在肾皮质中分布着大量的平均尺度为150μm—200μm的肾小球,由肾小球和肾球囊组成肾小体,肾小体和集合小管是肾浅表部呈颗粒状皮质的主要组分。因此,由实验估计的散射元平均间距,可以认为肾皮质中的主要散射元可能是肾小球与肾球囊组成的肾小体。

五、结 语

根据某些生物组织内存在着有规分布的散射点阵假设,由超声背向散射谱估计相邻散射元的平均间距,在一定程度上揭示了组织的特征,有助于深化对组织的超声散射结构的认识。此外,由这种方法所估计的散射元平均间距,作

为组织结构的一个特征参量用于对组织定征,以鉴别病变组织,将很可能在超声临床诊断上具有潜在的前景。

作者衷心感谢冯纪成、宋受镒、陈兆华和张卫等同志对本工作的支持与帮助。

参 考 文 献

[1] 冯若,物理,20-1(1991),40-44.

- [2] 冯若等,中国生物医学工程学报,8-4(1989),205-211
[3] Chivers R. C., *Ultrasonnd in Med. and Biol.*, 3 (1977), 1-13.
[4] Fellingham L. L. and Sommer F. G., *IEEE Trans. on sonics and ultrasonics*, 31-4 (1984), 418-428.
[5] 毛伟年等,应用声学,8-4(1990),9-15.
[6] 冯若等,声学学报,10-5(1985),285-292.
[7] 朱洪文,组织学,高等教育出版社,1979年.
[8] Fei D. Y. and Shung K.K., *J. Acoust. Soc. Am.* 78-3 (1985), 871-876.

超声频谱分析中应用自适应学习网络技术进行缺陷自动鉴别的研究

郝晓峰 朱继洲 翟兴耀

(西安交通大学)

1990年7月7日收到

超声频谱分析是把频谱分析用于超声检验的技术。本文介绍了自行设计的超声频谱分析系统和研究开发的对频谱与缺陷作出相关分析的计算机程序。超声频谱分析系统中,研制了超声频谱探伤装置,以微机作为基本工具,利用步进采样技术对缺陷回波进行采样,通过软件进行快速傅里叶变换,获得频谱信号,然后,应用非线性自动增长的自适应学习网络技术,实现了对缺陷的自动鉴别。对有尖锐边缘与平滑边缘的两类人工缺陷所作的定性分析与横孔直径的定量分析都获得了较好的结果。

一、引 言

传统的超声探伤法是靠人工操作来确定缺陷的大小,因而难于精确确定缺陷的类型、位置和取向,并且在检验的重复性、可靠性方面也存在。当前,在超验检验的新技术方面,国内外正在探索与发展全息照相、自动成像、频谱分析、合成孔径等多种方法,以重现缺陷,提高检测可靠性,和实现检验过程的自动化。

超声频谱分析法是在50年代末提出的。60年代,Whaley和Cook建立了第一个超声频谱分析系统^[2]。70年代以来,很多学者侧重于超声场和缺陷相互作用机理的研究。在超声频谱分析的理论实验研究方面,国内外也做了不少工作^[1-4]。这些工作表明,超声频谱分析法

可以从对缺陷回波的频谱包络形状的分析中,得到多于常规超声检验的可用信息,有可能提高检测结果的客观性和可靠性。但是,在超声与缺陷相互作用的机理、缺陷回波谱信号的处理方法以及缺陷特征的自动鉴别等方面,仍有不少需解决的难题。

本文介绍我们自行设计的超声频谱分析系统和研制开发的对频谱与缺陷作出相关分析的计算机程序,在对人工缺陷所作的定性与定量自动分析上,获得了较好的结果,朝实际应用方面迈进了一步。

二、超声频谱分析系统

1. 超声频谱分析系统的组成

超声频谱分析系统是用来对缺陷反射信号