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., *Ultrasound 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、可靠性方面也存在问题。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与实验研究方面，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

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

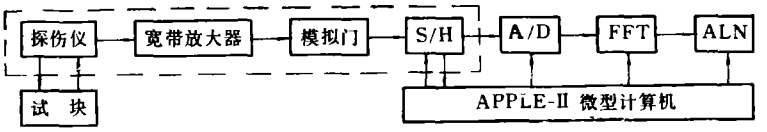

图 1 超声频谱分析系统框图

进行频谱分析，并对其特征做出判断的系统．它具有两方面功能：(1) 时域信号到频域信号的转换，(2) 缺陷特征的分析判断．

时域信号到频域信号的转换可以由模拟式的频谱仪来实现，也可以由数字化的快速傅里叶变换 FFT (软件、硬件)完成．我们曾使用过英国产某种频谱分析仪，但价格昂贵、体积大，不合实用；本实验采用 FFT 软件实现信号的变换．

缺陷特征的分析判断一般由逆散射理论中诸多技术来实现，我们采用自适应学习网络 (Adaptive Learning Network) 技术来完成这个工作．此外，本系统还有打印各种回波时域和频域波形图的功能，以便于分析．系统的框图示于图 1．其中虚线部分为自行设计与研制的超声频谱探伤装置，A/D 电路板是外购的 MS-1213 模入模出接口板．

2. 超声频谱探伤装置

在超声频谱探伤装置中，自制的电路有：

(1) 宽带放大器电路：由三极管组成共基极放大电路，完成缺陷回波信号的放大；

(2) 模拟门电路．用于选择缺陷回波．模拟门最大可以通过 ±5V 的模拟电压信号，它的频带宽达 30MHz—40MHz 门的位置与宽度在 50μs—2.6ms 内连续可调，对应的探测深度为 0.15mm—7.7m (钢纵波)，可以覆盖 CTS-23 型超声波探伤仪的标定探测深度 (5mm—5m 钢纵波)，因此能够选择探伤仪回波信号的任意部分．

(3) 采样保持电路：模数转换需要一定的转换时间，因此对快速变化的信号必须使用采样保持器，以使采样信号电压在整个变换期间保持不变．由于所分析的缺陷回波信号最宽仅 4μs—5μs，我们采用了步进采样技术．考虑到信号是重复性的，所以可以在两个周期中各采一个点，并依次将时间等间隔地向前推进，这样，经过若干个周期的采样，就可以得到一个等效的采样结果，其原理可以由图 2 来说明．

3. 频谱的获取及处理

在本实验中，我们对 10μs 内的缺陷回波

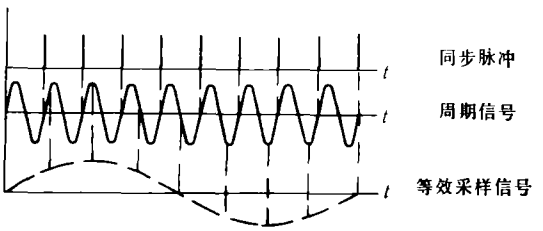

图 2 步进采样原理

信号等效采样 255 个点，因此等效采样频率为 25.5MHz，可以保证对 10MHz 的频带宽度，满足实验要求．

作为初步的分析研究，我们采用一个按时间抽取 256 点的快速傅里叶变换程序，并进行了加工和修改，使其变成了一个只对实序列进了变换的程序，从而提高了运算速度，完成时域信号到频域信号的转换．此外，为了保证频谱的质量，我们还做了简单的去除均值及加窗处理，以及时域、频域内的平滑滤波，以减小信号噪声及计算误差．

超声回波信号中除包含有缺陷的信息外，还包含有诸如传感器特性及耦合层特性等一系列响应特性，利用解卷积法处理 (Deconvolution) 可以从中提取出缺陷的信息，从而可以对缺陷的特征提供更为精确的估计．以图 3 所示的线性系统为例，回波信号可以写作：

$$e(t) = x(t) \times h(t) \times m(t) \times g(t) \times m(t) \times h(t) + n(t)$$

在频域中则可写成：

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

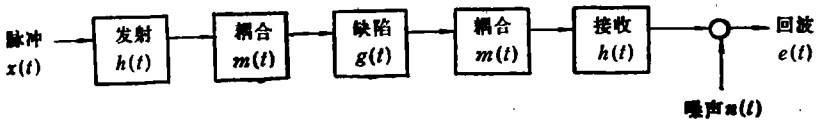

图 3 脉冲-回波方式下线性系统模型框图

$$E(f) = X(f) \times H(f) \times M(f) \times G(f) \times M(f) \times H(f) + N(f)$$

当信噪比足够大时，缺陷的频率响应可表示为：

$$G(f) = E(f)/[X(f) \times H(f) \times M(f) \times M(f) \times H(f)]$$

系统的响应项 $X(f)\times H(f)\times M(f)\times M(f)\times H(f)$ 可以确定，于是剩余的就是缺陷的响应项 $G(f)$。在实际应用中，常采用一个从平底面反射的参考信号，使与缺陷回波信号在频域中相除，来实现这一处理。

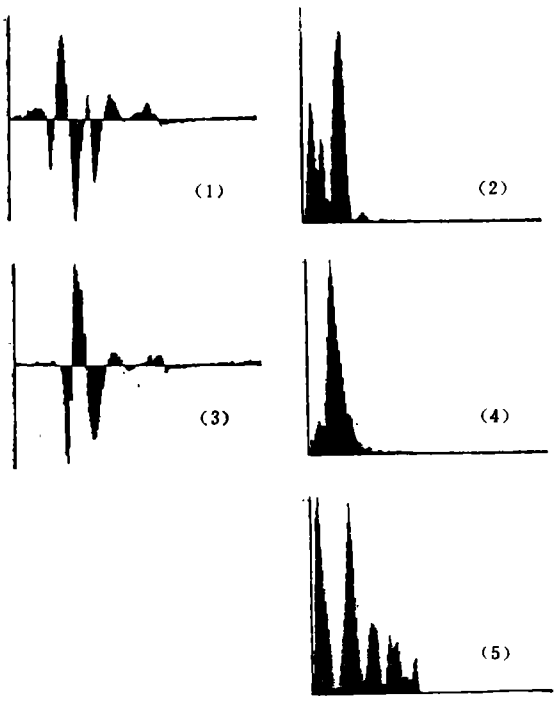

图 4 解卷积法处理前后的波形图
(1) 缺陷信号的时域波形 (2) 缺陷信号的频域波形
(3) 参考信号的时域波形 (4) 参考信号的频域波形
(5) 解卷积法处理后的缺陷频域波形

由超声频谱分析系统打印的缺陷信号和参考信号的时域、频域波形及经解卷积法处理后的缺陷频域波形见图 4 所示。

三、自适应学习网络（ALN）技术

1. ALN 原理

ALN 是一种自适应增长的非线性计算网络，它的指导思想是从测得的已知特性的缺陷波形数据入手，构造出一种经验式的预测模型。该模型考虑到了波形参数之间的线性、非线性相互作用，可对缺陷的特征作出精确的预测。

如图 5 所示，该网络是由许多基本单元组成的，每个单元完成一个二阶非线性的变换。网络具有自动识别参数重要度的功能，对缺陷特征识别贡献大的参数被保留下来，继续参与网络的训练；而对缺陷特征识别贡献不大的参数则被排除。

随着网络的增长，预测模型的阶数也不断地增长，从而使预测的精度也不断地提高。

2. 网络的训练

网络的训练就是由先验的知识来推断出预测模型的过程。首先必须对测得的原始数据进行参数比，选择尽可能与缺陷特征相关的量作为参数；然后将所得到的参数集合分为两个相同而又相互独立的子集，即训练集（Training Set）与检查集（Testing Set）。训练集用来训练网络，而检查集则不参予训练过程，只用来检查拟合误差，这样做可以避免因采用一个数据集训练网络所产生的过拟合现象。同时，通过检查拟合误差，可以实现对参数好坏的自动识别与取舍，从而有利于提高运算效率及拟合精度。

3. 应用 ALN 技术进行缺陷自动鉴别的软件

我们研制的应用 ALN 技术进行缺陷自动鉴别的软件包括：采样程序，参数化程序，训练程序和定性定量分析程序。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

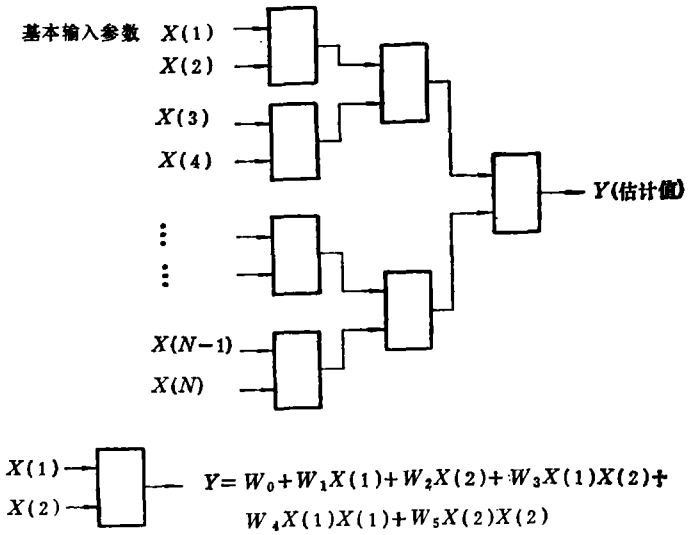

图 5 非线性 ALN 网络

S:采样程序. 采集缺陷回波及底波，分别进行 FFT 变换，然后在频域中完成解卷积处理.

C:参数化程序. 读出原始数据盘中的数据,选择了30个功率谱参数进行参数化.

T:训练程序. 用一个递推最小二乘优化程序求 ALN 模型的权系数.

D_1:缺陷自动定性分类程序.可用于对本实验中的各种缺陷进行平面型和体积型两类缺陷的自动判断.

D_2:缺陷自动定量预测程序一. 可对人工试样中直径在 2mm—12mm 间任一模拟缺陷进行自动检测.

D_3:缺陷自动定量预测程序二. 可对人工试样中直径在 0.5mm—2mm 间任一模拟缺陷进行自动检测.

四、缺陷的定性定量分析

1. 实验方法

我们采用 10N12 型直探头来发射与接收超声信号，利用脉冲回波方式来进行孤立人工缺陷的定性定量分析实验.

将探头置于试块上，左右移动以寻找缺陷回波，使回波时间最短，并平衡回波各部分幅度,以保证探头定位于缺陷的正上方;同时移动模拟门并调节门的宽度，选择出所要分析的波形. 在不移动探头的情况下，分别采集来自缺陷的回波以及底面的回波，并将其输入到计算机内进行一系列的处理,最终给出预测的结果. 整个过程除了探头的定位外，其余一切处理都是自动完成的.

实验所采用的人工试样为在圆钢上开出的 2mm—12mm 直径的横孔(深度为 20mm), 以及不同宽度和倾角的横槽(深度为 50mm).

实验时对每个缺陷沿槽或孔的走向各测20点，其中 10 点归于训练集，另 10 点归于检查集;最后又对每种缺陷以同样的方式各测 5 点，用以组成评价集，来评价网络训练的精度. 由于每测得一点后探头重新定位，因而测得各点之间是相互独立的.

定性分析要求按照缺陷是否有尖锐的边缘将其分为平面型(槽)与体积型(孔)两类; 定量分析则要求给出缺陷的具体尺寸，我们对圆孔的直径作了定量分析.

2. 实验结果

(1) 定性分析结果 表 1 示出训练出来的网络对训练集与检查集的 480 个点分类结果，表 2 系对评价集的 120 个点分类结果.

(2) 定量分析结果 表 3 是对圆孔直径的

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 训练集与检查集480个点定性分析结果

实验次数		判对次数	判错次数	判对率%
槽	280	260	20	92%
孔	200	187	13	93%

表 2 评价集 120 个点定性分析结果

实验次数		判对次数	判错次数	判对率%
槽	70	64	6	91%
孔	50	44	6	88%

表 3 圆孔直径的定量分析结果

编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
直径(mm)		2.0	3.0	4.0	5.0	6·0	7.0	8.0	10.0	11.0	12.0
平均估计量	训练集(10点)	3.5	3.2	4.2	5.2	5.9	6.7	7.4	9.4	10.9	11.3
	检查集(10点)	3.5	3.6	3.7	5.2	5.9	6.5	7.7	10.4	10.7	10.6
	评价集(5点)	4.5	3.8	3.7	9.8*	6.1	6.9	7.4	10.7	11.1	11.4

去除一个明显的差值 20.1 后平均估计值为 7.2.

定量分析结果.

五、结论与讨论

我们在自行设计研制的超声频谱分析系统上，应用自适应学习网络技术进行缺陷的自动鉴别，无论是在检测的可靠性，还是在缺陷定性、定量分析的精确度方面，都得到了较好的结果，从而提高了缺陷的检测效率，同时也为实现探伤的自动化、智能化奠定了基础.

实验结果表明:

(1) 利用超声频谱分析法对缺陷进行定性、定量分析是可行的. 我们成功地对两类人工缺陷进行了分类，特别是对回波频谱十分相似的平面反射体与圆孔的成功分类，表明该技术有明显的优点与发展潜力；对人工缺陷的定量分析也表明该技术有望取代常规的超声检测方法，走向实用.

(2) 微机的应用使得对复杂的缺陷频谱分析成为可能，从而可以推进超声频谱分析法向更深的层次发展. 实际探伤时，除了少数缺陷的频谱可能会呈现规律的形状外，大多数缺陷频谱都是杂乱无章的，因此只依靠人工进行分析几乎是不可能的. 计算的引入，就可利用各种先进的信号处理方法，对缺陷频谱进行深入细致的研究，从而可能成功地鉴别出缺陷的各种特征.

(3) 超声频谱分析法对探伤实现自动化，智能化有着重要的意义. 超声频谱分析法可以获得更多有关缺陷的信息，我们所设计的系统操作简便，便于实现探伤的自动化与智能化.

致谢，感谢国家核安全局为本课题提供了资助.

参考文献

[1] Otto R. Gericke, *J. of Metals*, 18-8 (1966), 932—937.
[2] Whaley H.L. and Cook, K. V. *Material Evaluation*, 28—3 (1970), 61—66.
[3] Whaley H.L. and Laszlo Adler, *Material Evaluation*, 29-8 (1971), 182—188.
[4] Laszlo Adler and Whaley, H.L. J. Acous. Soc. Am. 51(1972)/3
[5] Mucciardi, A. N. Tech. Rpt. AFML-TR-74-238
[6] R.L. Barron, "Proc. IEEE 1974 National Aerospace Electronics Conference" (NAECON 74), Dayton, Ohio, 1974, 513—515.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net