

声学译丛

超声在工业上的应用

7

上海市物理学会声学工作委员会主編
上海市科学技术編译館出版

目 录

超声检测

双频超声脉冲回波测试·····	O. R. Gericke ·····	(1)
超声检验管子焊缝·····	E. H. Uecker ·····	(9)
超声观察系统的设计标准·····	G. Kossoff 等 ·····	(12)
过渡时间式脉冲超声流量计·····	D. L. Franklin 等·····	(21)
超声电解液浓度计·····	B. A. Носов 等 ·····	(26)
用于吸泥船管道内的超声泥浆浓度计·····	B. A. Носов 等 ·····	(28)
用超声纯音选择电视波道·····	N. Frihart 等·····	(30)

超声加工及处理

高温超声热处理对工业纯铁组织的影响·····	Ю. Ф. Бажалаев ·····	(32)
超声振动作用下钢中残余奥氏体的分析·····	Г. Е. Айзензон 等 ·····	(34)
合金在不均匀超声场下的时效·····	П. А. Пархутик ·····	(35)
利用超声强化渗氮处理·····	Г. В. Земсков 等·····	(37)
在热交换装置中利用超声防止水垢的产生·····	М. В. Брук 等·····	(40)
超声干燥·····	R. S. Soloff ·····	(44)
流体动力式超声乳化机·····	И. И. Минин 等 ·····	(48)

其它

超声发生器频率的自动调整·····	Г. С. Кратыш ·····	(49)
自动调谐超声发生器·····	Г. М. Борун ·····	(53)
用压电陶瓷换能器工作的超声振荡器输出电路的计算·····	Г. С. Кратыш ·····	(58)
应用霍尔发生器来测量超声、高频、电腐蚀和焊接发生器的输出功率·····	В. Н. Щепетов·····	(63)
用倒置的固体锥作为声阻抗变换器·····	E. Sittig ·····	(67)

双頻超声脉冲回波測試

Otto R. Gericko

一、引言

总结超声检测的现有应用范围时,基本上可以说:每当材料损伤而造成试样弹性的不连续,而这些不连续情形又不能借肉眼看出或用射线图形测定时,首先总会提出用超声检验方法来确定它们。现在只略举几种这类情况如后:探查平行于试样表面的裂层或裂缝;对厚到 α 射线和 γ 射线无法透过的部位探伤。超声测试的另一方面是以更可靠的非破坏性检验去估定材料微观结构,而不在于探大伤。此外,对于仅有一个可接触表面的结构中的缺陷,也只能用超声来检验;例如,通过一个表面来测量壁厚,就属最后这一类。

虽然超声波不可否认是材料非破坏性检验的一种极有效的工具,但是对超声测试结果作判解时,可能比阅读一张射线图更加困难得多,这一事实常使人感到失望,尤其在有些情况下:按节约观点来看,已认为超声检验极可能替代另一些工作目的相同的非破坏性检验。

因为超声检验在所有非破坏性检验技术中可能是最年青的一种,可以想象到,通过目前正在进行的努力钻研,终究会作出新的方法而使超声测试数据更易判解。

过去几年中,曾经多次尝试要在超声脉冲回波的指示和缺陷的大小之间建立起定量的关系。但是,看来只有去研制超声测试仪,使它们超过目前市上出售的仪器的能力,才能在这方面取得重大的进展。

在这方面第一步是研制一种改进型的应用脉冲波形和脉冲频谱分析的超声脉冲回波测试仪,这是早先发表过的^[1]。这种仪器的基本原理是分别把回波的脉冲外形和频率分布去和发射信号作对比。这样,超声脉冲的“色彩”^①就可用作添加到总脉冲振幅和脉冲过渡时间方面的另一个变量。这个方法得到了有价值的结果,指出对于不同伤形的鉴别是可能的,即使这种特性也是通常单色脉冲回波技术中

所没有的。但是,这种技术所固有的困难,却是超声换能器在所需的宽频带内工作的不均匀。本文所述研究工作的出发点,是要提出一种新方法来解决换能器响应不均匀问题。

二、多频测试的基本概念

宽带脉冲回声测试系统用的理想的超声换能器,应该在所涉及的全部频率范围内具有线性响应。因为换能器也必须是超声振动的有效的发射器和接收器,所以通过阻尼方法来造成足够平坦的频率响应曲线是不切实用的。已经发现,利用钛酸钡这类近代压电材料时,可能达到的品质因素 Q 的最低实用值约等于2。

图1a中,虚线表示 $Q=2$ 的振荡器的频率响应曲线。因为在脉冲回波系统中只有一个换能器兼作发射和接收超声信号之用,所以接收到的回波两次受到换能器响应曲线的影响。合成的曲线称为回路响应曲线,如图1a实线所示。从这一曲线可以看到:灵敏度的损失是十分显著的,例如,当超声脉冲的载频是换能器共振频率的两倍时,发射和接收这

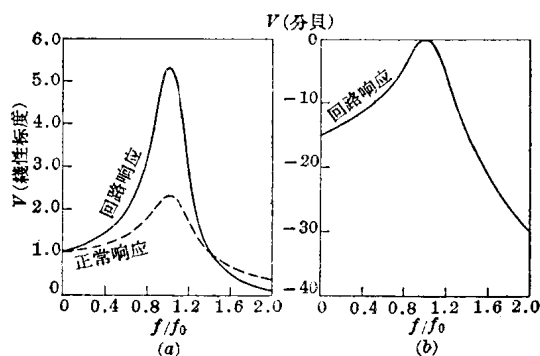


图 1

- (a) 虚线表示共振频率为 f_0 、 $Q=2$,在频率 f 时受迫振动的振子的响应曲线。实线表示频率 f 时兼作发射与接收的振子的回路响应曲线;
- (b) 用对数标度画出的同一振子在40分贝范围内的回路响应曲线

① 这里的“色彩”就是指频谱——译者注

超声脉冲的换能器的灵敏度损失高达 30 分貝。图 1a 中的回路响应曲线仅是理論的,并不能精确代表超声换能器的实际性能。表 1 中列出几种换能器(在 2.25 兆赫共振)三次谐波时回路灵敏度的实测降落值,这是将 2.25 兆赫和 6.75 兆赫时低耗材料(鋁)薄板底回波高度比較而得。在这种情况下,将回路响应曲线外推可以得到約 50 分貝的降落,这与鈦酸鋁换能器的实测值非常接近。表 1 中所列的其他换能器在三次谐波时具有較好的响应。不用有害的换能器阻尼方法而能在一定的頻率範圍內获得綫性换能器响应的方法有很多。一种方法是制造一种由共振頻率不同(亦即厚度不同)的多个换能器单元所組成的鑲嵌物或同心环探测探头。在这种情况下,可以在一定頻率範圍內得到相当均匀的响应,虽然响应曲线可能仍有某种程度的波动性,正与无线电和电视接收机中所用的多級中頻带滤波放大器相类似。不用晶体的鑲嵌物,也可用单晶体换能器,它的正面是平的,但反面是曲的,使换能器的厚度逐点連續地改变。

表 1 几种换能器在 2.25 和 6.75 兆赫时的回路响应

换能器 序号*	压电材料	直徑 (吋)	回路轉換損失 R^{**} (分貝)		$\frac{R_{2.25 \text{ 兆赫}}}{R_{6.75 \text{ 兆赫}}}$ (分貝)
			在 2.25 兆赫时	在 6.75 兆赫时	
1	鈦酸鋁	0.75	-21	-72	51
2	鋇酸鉛	1.00	-32	-68	36
3	鋇酸鉛	1.00	-32	-63	31
4	鋇酸鉛	0.50	-48	-56	8

* 换能器的共振頻率均为 2.25 兆赫

** $R = \frac{1 \text{ 吋厚鋁板底回波振幅}}{\text{加在换能器上的初始脉冲的振幅}}$ ①

在本文的研究工作中,却使用另一种方法来获得平坦的换能器响应,简单地說,这是一种使电子学的响应曲线均衡的方法。这方法的基本原理是:对于换能器的激发和回波放大,利用各种独立的測試通道,每一通道調諧在一个不同的頻率上。在每一通道中,無論是加于换能器的激发电压,或者是放大器的增益,甚或两者一起,不管换能器响应不同,都应加以調节而得到相同的回路灵敏度。如果在某一特定頻率下,换能器回路的效率比共振情况低 20 分貝,則在相应通道中的增益或激发信号就应比换能器共振时工作的通道要增大 20 分貝。

利用一个具有对数信号振幅响应特征的回波放大显示系統,就多少可达到电子换能器响应的均衡。例如图 1b 說明:回波信号經過一个 40 分貝动力範圍的对数放大器,而且最大值响应的信号被調节到产生滿刻度指示(0 分貝)时,换能器回路响应曲线是如何改变的。把图 1b 的曲线与代表綫性放大的图 1a 上的实綫相比,可以看到在非共振頻率处,相对放大器輸出振幅显著增大。例如,在对数放大的情况下, $2f_0$ (f_0 是共振頻率) 时的輸出信号只减小到共振时所得信号的 25%;而在綫性放大的情况下,却下跌到只剩 3%。在稍早发表的超声脉冲頻譜的研究^[1]中,就曾运用了这种均衡效应,其中应用了一个具有近似对数的頻率振幅响应的頻譜分析器。原則上应该可能在頻譜分析器上配备一个放大器,这放大器的增益可随頻率而自动变化,使一特定换能器响应曲线完全綫性化。多通道方法实质上是这一方向的第一步,而且后面将看到,这方法还有保持脉冲过渡時間的信息的优点。因此,可以用来研究一些随時間及頻率两者而变化的現象,例如材料中超声速度的頻散現象等。

可以想象,多通道測試系統可以做得具有与頻譜分析器相同的分辨能力,例如 50 千赫。但是,为了要覆盖 10 兆赫的頻率範圍,这种系統就要有 200 个独立通道,显示器也要有 200 个分离的迹綫,而这是一个十分困难的問題。

因为两个通道很易在一个双迹示波器上显示出来,因此值得来考察一下,对于用超声測試結果来判解缺陷大小方面,用两个不同頻率同时检测究竟是否有益。

三、双頻測試方法的初步评价

克勞脫克萊滿(Krautkramer)^[2]曾經对缺陷尺寸(包括平底孔型的不連續性)的超声測定进行了广泛的研究,他发展了一种把缺陷尺寸、距离与回波高度联系起来的所謂 AVG 图。图 2 中画出了 AVG 图(A 是缺陷距离 a 对近場长度 N 的比值, V 是回波信号电压, G 是缺陷直徑 d 对换能器直徑 D 的比值),为了考查双頻回波測試可能达到的效用,我們对这图进行了估算。在 AVG 图中,頻率是按照下述关系^[2]而包含在 A 中:

$$A = a/N = (4aL)/D^2$$

或因

$$L = c/f; A = (4ac)/(D^2f) \quad (1)$$

① 原文式中的分子、分母与此相反——譯者注

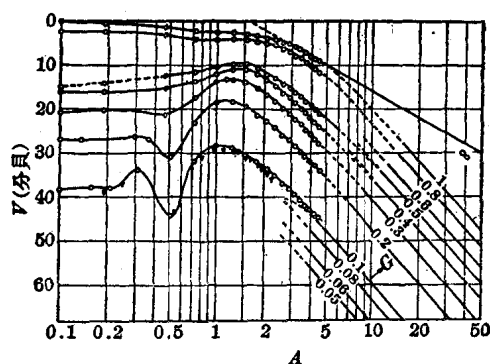


图2 克劳脱克莱满研制的 AVG 图: 依照超声回波振幅决定圆盘状缺陷(平底孔)的直径。
V(分贝)是相对回波振幅; A 是相对缺陷距离;
G 是相对缺陷直径

式中: a 是缺陷和换能器间的距离; $N = \frac{D^2}{4L}$, 是超声波长为 L 时直径为 D 的圆形活塞声源的近场长度;
 f 是超声频率; c 是超声速度。

如果缺陷距离 a 、超声速度 c 和换能器直径 D 都保持不变, 则 A 与超声测试频率 f 成反比。因此, 如换能器同时受到其共振频率(例如 2.25 兆赫)和三次谐波(6.75 兆赫)的激励, 则对于一个特定的缺陷距离就有两个不同值 $A_{2.25}$ 和 $A_{6.75}$ 。对于这两个 A 值, 可以从 AVG 图上查得两个相应的 V 值, 记为 $V_{2.25}$ 和 $V_{6.75}$ 。重要的问题在于比值 $R = V_{6.75}/V_{2.25}$ 和 $G = a/D$ 之间能否取得相关, 以便可判定尺寸不同的缺陷。为了研究这一问题, 对图 2 的 AVG 图作了估算, 把结果列成表 2。图 3 是以 $A_{6.75}$ 作为参量, 而把 R 作为 G 的函数而画出的曲线。这图说明, 在宽广的 G 值以及 $A_{6.75}$ 值时, R 的确与 G 有关。为了考查 $A_{6.75}$ 的那些值能把各 G 值区分得最好, 又以 G 为参量, 而把 R 作为 $A_{6.75}$ 的函数来画出了另

一个图, 如图 4 所示。图 4 指出, $A_{6.75} = 0.5$ 和 $A_{6.75} > 1$ 的值时, 应当可能依据 $R = V_{6.75}/V_{2.25}$ 的测定值来良好地区分大小不同的 G 。

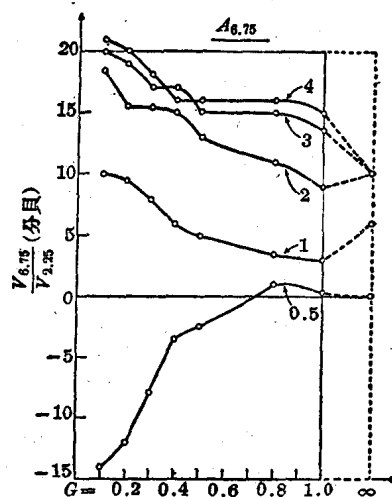


图3 测试频率为 6.75 和 2.25 兆赫时, 对相对缺陷距离 $A_{6.75}$ 的五个值所得的缺陷回波振幅比与相对缺陷直径 G 的关系

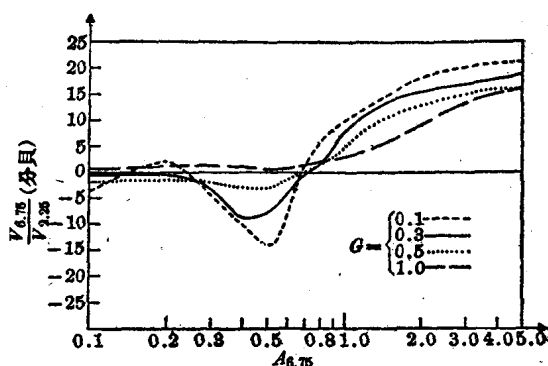


图4 测试频率为 6.75 和 2.25 兆赫时, 对相对缺陷直径 G 的四个值所得的缺陷回波振幅比与相对缺陷距离 A 的关系

表2 从图 2 的 AVG 图中导出的、在 6.75 和 2.25 兆赫时对不同的 G 值和 A 值所得的回波振幅比

G^*	在 6.75 兆赫时的 A^{**}														
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0
0.1	-4	+2	-5.5	-10	-14	-9	+1.5	+5.5	+8.5	+10	+15	+18	+20	+21	+21
0.2	-1	+1	-8	-10	-12	-6	0	+3	+7.5	+9.5	+15	+16	+19	+20	+19
0.3	-0.5	-0.5	-3	-9	-8	-4	0	+1	+5	+8	+14	+16	+17	+18	+19
0.4	0	-1	-3.5	-3.5	-3.5	-3	-1	+1.5	+4	+6	+12	+15	+17	+16	+17
0.5	-2	-1.5	-2	-3	-2.5	-1.5	0	+1	+3	+5	+11	+13	+15	+16	+16
0.8	0	+1	+2.5	+1	+1	+1	+1	+1	+2	+3.5	+8	+11	+15	+16	+17
1.0	+0.5	+1	+1.5	+1	+0.5	+1	+1.5	+2	+2.5	+3	+6	+9	+14	+15	+16

* $G = \frac{\text{平底孔直径}}{\text{换能器直径}}$

** $A = \frac{\text{换能器与平底孔间的距离}}{6.75 \text{ 兆赫时的近场长度}}$

从上述 AVG 图的分析可以作出結論：換能器直徑 D 保持不變時，雙頻脈沖回波測試會提供有效的方法來測定 G ，因而也可測定缺陷尺寸 d 。

四、雙頻測試設備

依據上述圖 2 AVG 圖估算的結果，雙頻脈沖回波測試系統選擇了 2.25 兆赫和 6.75 兆赫的頻率，相應地設計和製造了測試設備。圖 5 是設備的電路方塊圖；圖 6 是在方塊圖的不同點上（用 ①～⑧ 來表示）觀察到的信號的振幅與時間的關係。2.25 和 6.75 兆赫的脈沖交替地加到同一換能器上，而接收信號經放大後以交替的掃描顯示出來，在示波管上造成兩個分離的圖述。兩個圖述的垂直距離是可變的，而且例如為了精確地比較兩個頻率時的回波振幅或過渡時間，也可以將兩個圖述重迭起來。圖 7 是用雙頻測試儀從一塊鋼板上得到的多次底回波，

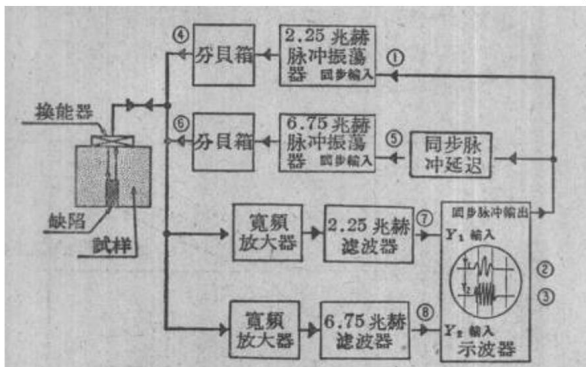


圖 5 同時在 2.25 和 6.75 兆赫時操作的双頻脈沖回波測試系統的電路方塊圖。“分貝箱”表示校准的衰减器。①～⑧可參照圖 6，它表示在這些點上觀察到的信號

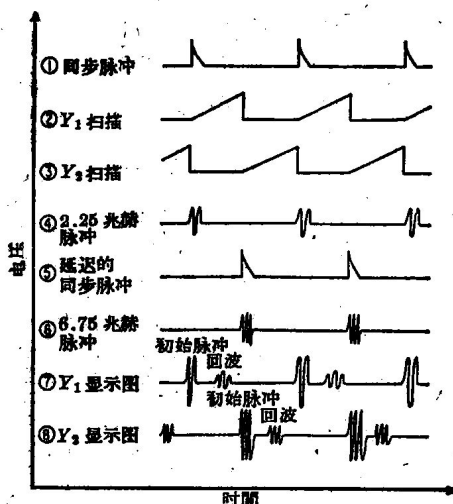


圖 6 圖 5 的電路方塊圖中不同點處信號的電壓與時間的關係

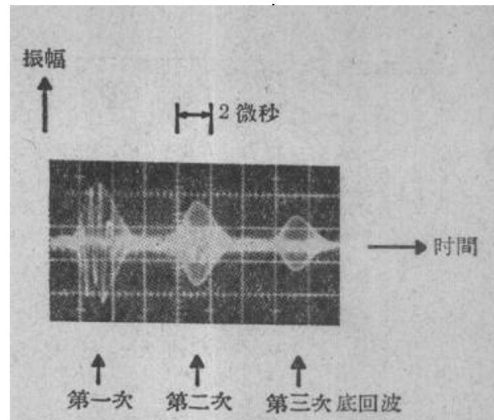


圖 7 使用一個直徑為 0.750 吋、共振頻率為 2.25 兆赫的鈦酸鋁換能器，同時在 2.25 和 6.75 兆赫時從 0.700 吋厚鋼板得到的多次底回波

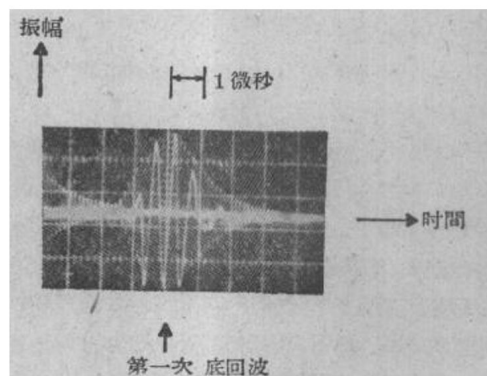


圖 8 圖 7 中第一底回波的擴展顯示圖

而圖 8 是第一底回波的擴展顯示圖。因為脈沖重復率的量級約為 10 千赫，故交替顯示的兩個圖述可以同時看到。

五、雙頻測試所得實驗數據與 AVG 圖數據的比較

1. 在 2.25 和 6.75 兆赫時對具有平底孔的鋁試樣的探究

雙頻脈沖回波檢驗方法首先應用於市上出售的超聲試塊方面，測試頻率用 2.25 和 6.75 兆赫。試塊是 7075-T6 鋁制 2 吋直徑圓柱，其端面平坦而且平行。它們含有許多直徑不同的與端面平行的平坦圓形不連續性（平底孔）。表 3 列出了从 AVG 圖所得的結果和在這些試樣上進行實驗所得的數據。表 3 的第一縱列指出了平底孔直徑即缺陷尺寸 d ，第二縱列是不連續性離測試表面的距離即缺陷距離 a 。把從一個無缺陷的直徑為 3 吋、長為 1 吋而端面平行的鋁圓柱上得到的底回波高度，用作兩頻率時設備靈敏度初步調整的參考信號，并標出在表 3 的

表3 在 6.75 和 2.25 兆赫时对不同铝试块得到的缺陷回波振幅

铝试块缺陷		G	A 在 6.75 兆赫时	按照 AVG 图 (分贝)			实 测 值 (分贝)		
尺寸(吋)	距离(吋)			在 6.75 兆赫时	在 2.25 兆赫时	比 值	在 6.75 兆赫时	在 2.25 兆赫时	比 值
∞	1.0	∞	0.60	0	-2	2	0*	-2*	2*
0.047	2.0	0.09	1.20	-30	-43	13	-28	-34	6
0.078	2.0	0.16	1.20	-23	-35	12	-28	-30	2
0.063	3.0	0.12	1.80	-31	-47	16	-21	-30	9
0.094	3.0	0.19	1.80	-23	-38	15	-20	-28	8
0.109	3.0	0.22	1.80	-21	-36	15	-20	-28	8
0.047	5.0	0.09	3.00	-40	-60	20	-23	-34	11
0.078	5.0	0.16	3.00	-33	-51	18	-23	-32	9

* 增益是对这些数值来调整的

第1横行上。把 6.75 兆赫时从 1 吋厚铝块上所得的底回波高度任意地选定为 0 分贝。按照 AVG 图表,在较低频率 2.25 兆赫时的底回波高度将稍低 2 分贝。表 3 的第 3 纵列是实验所用直径为 0.5 吋换能器的 G 值。第四纵列中的 A 值是由任意选定的 6.75 兆赫频率而得出的。表 3 中的其次 3 纵列是按照 AVG 图求出的在两种频率时的缺陷回波振幅及其比值 R,都是相对于 6.75 兆赫时从 1 吋厚铝块上所得底回波高度而来①。最后三列则是用图 5 所述的测试系统作实验而测定的类似数据。

为了便于进行估算,从表 3 的数据作出了图 9 所示的图形。它们表示在不同的 $A_{6.75}$ 值时 R 对 G 的关系曲线。从 AVG 图得到的数据用虚线表示,而相应的实验数据则用实线表示。

由图 9 曲线首先可以看出的是双频测试所得的 R 值往往比 AVG 图为低。只要假定双频测试所用的换能器,比用来得到 AVG 图所根据的数据的换能器具有更均匀的轴向声压特性,就可很好地说明上述结果。AVG 图的结果是用浸没技术而不是用接触技术得到的,这一事实可能已经引起了较大的轴向声压起伏(就是说,已经引起了一种很类似于理

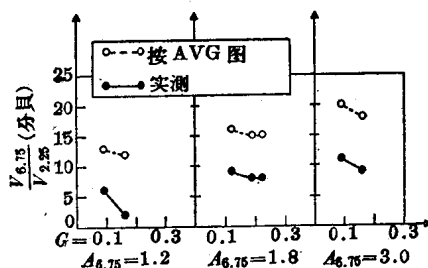


图9 在 6.75 和 2.25 兆赫时对不同 A 值和 G 值得缺陷回波振幅比,以及从图 2 的 AVG 图所得的相应数据

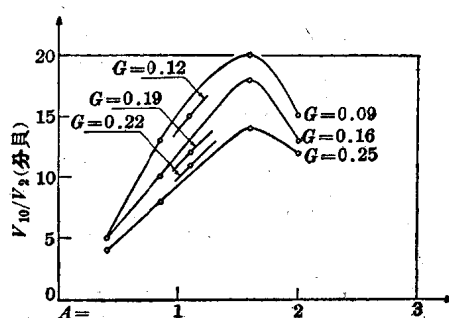


图10 用图 11 (即表 4)中的实测数据画成的类似于图 2 的 ARG 图

想活塞声源的轴向声压起伏的情况)。但是,从图 9 所得到的更重要的结果,却是当 G 增加时双频测试与 AVG 图所得的 R 值都有相同的下降趋势。把图 9 中三组曲线相比较,还可表明 R 随着 A 一起增加。

与单频测试相比,双频方法的优点是:只要使换能器在两个频率时的回路效率一达到均衡,就不必进行校准即可测定缺陷尺寸。但是这一方法可获成功的先决条件是:在两种频率时,对所有试样来说,所碰到的相对耦合条件都需保持不变。然而,建立可靠的耦合条件却始终是任何超声测试技术的一个基本要求。

为了易于估算双频测试所得的数据,可以作出一个与 AVG 图相似的图,但用 R 代替 V。图 10 所示就是这一种依据大量实测数据而得的图形,以下将加以讨论。

2. 在 2 和 10 兆赫时对具有平底孔的铝试样的探究

应用图 5 的双频测试系统,但使用 2 和 10 兆

① 本句原文意义与表 3 内容不尽相符,译文已经作了改写——译者注

表 4 在 10 和 2 兆赫时对不同铝试块得到的缺陷回波振幅

铝试块缺陷		G	A	按照 AVG 图 (分贝)			实 测 值 (分贝)		
尺寸(吋)	距离(吋)			在 10 兆赫时	在 2 兆赫时	比 值	在 10 兆赫时	在 2 兆赫时	比 值
∞	1.0	∞	0.40	0	-8	8	0*	-8*	8*
0.047	1.0	0.09	0.40	-40	-34	-6	-33	-38	5
0.078	1.0	0.16	0.40	-33	-27	-4	-19	-24	5
0.125	1.0	0.25	0.40	-24	-19	-5	-14	-18	4
0.047	2.0	0.09	0.80	-31	-44	13	-27	-40	13
0.078	2.0	0.16	0.80	-25	-37	12	-21	-31	10
0.125	2.0	0.25	0.80	-18	-28	10	-16	-24	8
0.063	3.0	0.12	1.20	-27	-50	23	-23	-38	15
0.094	3.0	0.19	1.20	-19	-40	21	-20	-32	12
0.109	3.0	0.22	1.20	-17	-37	20	-19	-30	11
0.047	4.0	0.09	1.60	-31	-57	26	-27	-47	20
0.078	4.0	0.16	1.60	-24	-49	25	-22	-40	18
0.125	4.0	0.25	1.60	-17	-41	24	-18	-32	14
0.047	5.0	0.09	2.00	-33	-60	27	-37	-52	15
0.078	5.0	0.16	2.00	-27	-53	26	-28	-41	13
0.125	5.0	0.25	2.00	-19	-45	26	-24	-36	12

* 增益是对这些数值来调整的

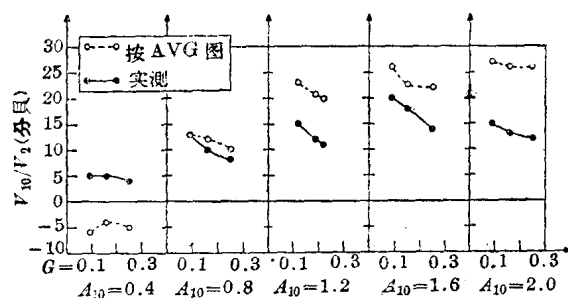


图 11 在 10 和 2 兆赫时对不同的 A 和 G 值得缺陷回波振幅比, 以及按图 2 的 AVG 图得到的相应数据

赫, 进行了一些补充实验。利用上节中所述类型的大量试块来获得更多的数据。表 4 是所得到的数据, 与表 3 的排列方式相同。图 11 是从表 4 的数据所作出的图形, 其中大多数都指明一种类似图 9 的趋势。而有趣的是, $R = \frac{V_{10}}{V_2}$ 的实测值, 在 $A=0.4$ 时大于 AVG 图的导出值, 而在 $A=0.8$ 时则与 AVG 图的导出值大致相等。这一事实再度指出, 双频测试所用的换能器的声束特性中的轴向声压分布较为均匀。

图 10 是用表 4 的实测数据画成的相似于 AVG 图的 ARG 图。从 ARG 图可以看出, 在 $A=1$ 至 1.8 的范围内, 可对缺陷尺寸作最佳的判断; 而 A 值小于和大于此范围时, 则 R 很难受到 G 的影响^①。因此,

对于表面附近缺陷尺寸的测定, 或对于在两频率中的较高一个时良好地延伸至换能器远场中的测量, 双频测试是不能适用的。

还应着重指出, 迄今为止仅考虑了与测试面平行的圆盘形缺陷(通常即指平底孔)。研究双频测试按照几何特征判断缺陷是否有效的工作目前正在进行, 并将在以后发表。对于不是平底孔的缺陷来说, 看来增加测试频率的数目(例如增至四个)可能对不同缺陷的形状提供更好的判断。

3. 固体材料中超声损失对频率的关系的测定

双频(或多频)脉冲回波测试方法的另一应用方面, 是快速测定固体材料中超声衰减对频率的关系, 因而可获得物质微观结构方面的知识。

在一篇较早的报告^[3]中, 曾经讨论了在这一方面运用脉冲外形和频谱分析所得的初步结果, 并指出了这一方法在非破坏检验方面可能的效用。虽然并不否认了测定结构特性的目的, 频率最好能有较大的连续的或至少是准连续的作用范围, 不过研究一下有用的双频测试结果也是有价值的。

测定试样中超声损失的通用方法都要采用多次底回波的衰减率测量。可惜这种方法会碰到许多困难。试样的上下两表面必须平坦, 其尺寸要比试样厚

① 意指 R 值就难以决定 G 值, 不宜用来判断缺陷尺寸——译者注

表5 几种金属的超声衰减数据

材 料	試 样 厚 度 (吋)	脉冲回行時間 (微秒)	回 波 高 度 (分貝)		15 兆赫时的相对衰减增量** (分貝)	
			在 15 兆赫时	在 5 兆赫时	分貝/吋	分貝/微秒
鋁	0.750	6.0	0*	0*	0*	0*
鋼	0.700	6.4	-18	-5	9.3	2.0
黃銅	0.500	6.6	-14	-2	12	1.8
銅	0.500	5.4	-52	-25	27	5.0

* 用鋁試样作为基准

** $\frac{5 \text{ 兆赫試样的底回波高度}}{5 \text{ 兆赫鋁的底回波高度}} \div \frac{15 \text{ 兆赫試样的底回波高度}}{15 \text{ 兆赫鋁的底回波高度}}$

度大得多,而且彼此要高度平行。此外,还应对近場声压起伏和探查超声束的发散所引起的損失以及对換能器耦合表面的反射率的减弱而引起的損失来校正这些測量值。用不同頻率測試时,也涉及到使用不同共振頻率的几个換能器而且必須相繼地耦合到試样上的問題,进行这种手續时往往发生耦合条件的不良变化。

反之,双頻(或多頻)方法却有下述优点:在确定衰减随頻率的变化时,它所利用的不是多次底回波,而只是初次从一个实际自由表面上反射的底回波的相对振幅。这样,只要把換能器加到几无損失的試样(例如 0.5 至 1 吋厚的鋁板)上,用电子仪器使換能器响应均衡,双頻測試立即能以可靠而快速的技术来測定超声損耗对頻率的关系。如果各試样中的超声波速度有显著的不同,則只要把試样的厚度选得与超声速度成反比,就可避免作几何衰减(声束发散)的修正。这一論点需要作进一步說明。按照图 2 的 AVG 图,如 G 和 A 都保持不变,則几何效应引起的損失也不变。为了使 G 保持不变,換能器直径应保持不变。而 A 也不变的要求可以用式(1)和下述物理量来作进一步分析。这些物理量是:令 S 为試样厚度, D 为換能器直径(与試样无关), L 为超声波波长, f 为超声頻率(与試样无关), c 为超声速度, N 为近場长度。

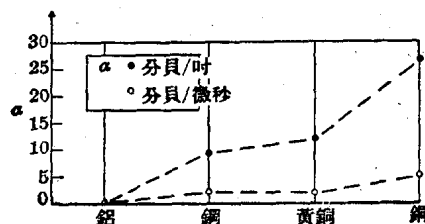
对于底面的回波,必須把 S 代替式(1)中的 a , 于是 $A = S/N = (4Sc)/(D^2f)$; 因为 D 和 f 是不变的測試参量,所以要使 A 不变就要求

$$Sc = \text{恒量} \quad \text{或} \quad S \propto 1/c \quad (2)$$

这正如上面所述。

已用双頻測試法实测了鋁、鋼、黃銅和銅等几种基本的工程材料在頻率由 5 兆赫增高到 15 兆赫时的超声衰减增量。表 5 列出了所得的衰减数据,而

图 12 則是这些数据的略示。所用試样較薄时,就把几何衰减略去不計。这里曾假定鋁試样在頻率增高时的衰减增量等于零。这个簡短的研究还有一个有价值的附带启发:鋼試样的衰减与黃銅試样相比較时,其損失增量是否較小还是略高,要看衰减单位用分貝/吋还是分貝/微秒而定。所以,在比較不同研究者所得的結果时,仔細地注意他們所引用的单位是非常重要的。

图 12 几种金属的衰减系数 α

4. 換能器耦合条件的探究

大家知道,超声頻率愈增高,換能器的耦合条件就变得愈苛刻;可是,双頻測試方法对这一問題却能首先提供較好的說明,因为耦合效率可用两个不同頻率来同时研究。因此,已进行了一些有关超声耦合的重要观察,这是应用双頻方法的結果。現在就来討論这些問題。

在較高的頻率时,耦合层厚度的重要性增高的情形在直接观察时是十分显著的。曾用有硬质保护表面而內部接地的陶瓷換能器进行工作,并且在用甘油作耦合剂的光滑(但未拋光)的平坦表面上測試,已經發現在 2.25 兆赫时,只要把換能器放到試样上就可建立良好的耦合条件。但是,在 6.75 兆赫时,只有在用很大的力把換能器紧压在試样上以后,才能得到可靠的回波指示。在把換能器压紧到試样表面上以后,要几分钟才能建立起較高頻率的回波。

实验观察还指出,在较高的频率时,由于耦合液体沾染外来粒子(例如测试时从试样上摩擦下来的材料),耦合条件更易受到有害的影响。

还做了进一步的实验观察,其结果颇为特出而且是很重要的。对图7作更细致的研究可知,多次回波系列中脉冲振幅在较低频率时要比在较高频率时衰减得更快。因为所用的测试试样很薄(0.7吋),故不能用几何衰减来说明所观察到的衰减随测试频率降低而增加的现象。另一方面,由晶粒边界处的散射所引起的衰减又肯定是随着频率而增加的。所以,对观察到的效应可能解释为:超声耦合条件随频率而变化。必须着重指出,图7所示的照片是把换能器压上试样后经足够长的时间后所摄取的,这就保证用两种频率时都得到了最佳的指示。

为了进一步研究测试频率对超声耦合的影响,把一钛酸钡换能器耦合到一块铝板上,于是在下列两种情况下得到了底回波:第一种是自由底面;第二种是在底面上耦合不接电源的第二个换能器。有源和无源的钛酸钡换能器的结构相同,都有氧化铝的保护面。耦合剂用甘油。表6列出了这次实验的结果以及按照下列两种材料(其中纵波速度各为 c_1 和 c_2 ,密度各为 k_1 和 k_2)界面处的反射率 M 的普遍公式^[4]算得的理论值:

$$M = (c_1 k_1 - c_2 k_2) / (c_1 k_1 + c_2 k_2) \quad (3)$$

铝到空气的界面可认为是实际上接近自由表面,其反射率为100%,即底回波振幅损失是0分贝。

表6 铝表面在与不同介质接触时的
超声反射率

与铝表面 接触的介质	按式(3)的计算值 (分贝)	实测值(分贝)	
		在2.25 兆赫时	在6.75 兆赫时
真空(自由表面)	0	未测定	未测定
空气	≈0	未测定	未测定
甘油	2.5	未测定	未测定
氧化铝	14	未测定	未测定
氧化铝通过甘油 耦合	不可应用	6.5	3.0

实测的反射损失明显地随测试频率而变化。对于铝到甘油的界面,在2.25兆赫时,实测的损失远大于理论值。但是,在较高的频率6.75兆赫下,对于铝到甘油的界面,反射率仅略低于计算值。所以,正当能量传入耦合剂时,添加的无源换能器对于反

射损失的影响在较高频率时是几乎可以忽略的。这一观察再度指出,如果应用接触测试方法,则用通常多次回波技术对超声衰减的定量测定就会碰到严重困难。在浸没法测试中就不会碰到上述困难。

5. 超声速度频散的测定

最后,讨论一种可能是最明显的双频脉冲回波测试的应用,即检验和测量纵波速度的频散;这一方面曾由福克斯(Fox)和梅利昂(Marion)用连续波方法进行过研究^[5]。到现在为止仅得到了定性结果,见图13所示。在图13中,2.25兆赫和6.75兆赫时产生的两个首次底回波是精确地对齐的,正如用无频散试样所得的图7一样。但是在图7中第二和第三底回波仍是对齐的,而在图13中,用作试样的铝块的频散特性使它们的相对位置显著移动。因为观察到的多次底回波在较低频率时分开得较远,可以断定纵波速度是随超声频率而增大的。利用延迟扫描来提供与图8所示相类似的放大图象,就易于检测超声速度的微小差别。因此,对结构特性作非破坏性测定时,如果被测材料的弹性模量依随超声频率而发生的变化较小,则这个方法会有相当大的把握。

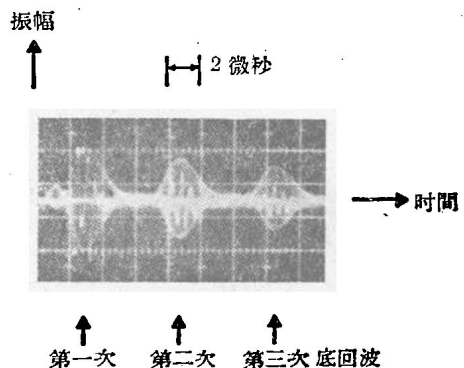


图13 在2.25兆赫和6.75兆赫下同时得到的
0.75吋厚铝板的多次底回波,显示出铝
中纵波速度的频散

六、结 论

本文讨论的实验结果说明双频脉冲测试有许多优点,超过了在同一时间内只用一个频率进行的通常超声反射测试法。市上出售的陶瓷换能器,用电子学方法使其回路响应曲线均衡以后,就可很好地适用于双频测试工作。用双频测试法测定平底孔尺寸时所得的结果是很有把握的,显然从两个频率时回波指示的比值易于确定这种缺陷的直径。

这种新技术的另一重要应用是测定固体材料中

超声檢驗管子焊縫

Ewald H. Uecker

本文系叙述 Smith 公司所属两制管工厂使用四频道脉冲回声檢驗系統檢驗外徑为 16~36 吋、长达 40 呎的油管焊縫；經驗表明，超声檢驗方法对檢測和标定电阻弧花压焊接的纵縫中的缺陷方面，具有迅速、正确和經濟的优点。

用四个 3/4 吋直徑的硫酸鋰晶体作为換能器，以产生超声振动，并用来接收通过焊縫縫隙而返回的振动波。晶体探头固定在一水槽內；水槽能自动地对准焊縫中心处，当工件傳送至檢驗工段时，再将其升起靠近工件进行檢驗。

每个晶体探头分別与各自的 Immersoscope 相联，并各探查指定的焊縫区域。由于超声束甚寬，所以檢驗的有效寬度也很大，因而实际上可使每个晶体探头探查到整个焊縫綫。因此，可以认为只需采用两个探头就已經足够，但是为了确保适当加寬探

查范围，实际上却要用四个探头，因为焊縫缺陷的方位是多变不定的。

要把晶体探头置于与鉛直綫相交成角度 α (见图 4)，且和焊縫中心的水平距离为 c 的位置，以便获得最高灵敏度。角 α 和距离 c 必須調整得适合于不同管子直徑和管壁厚度。

晶体探头固定在盛水的槽里，水槽装有滾筒，放于管子下部。将 Kodak Photoflo 溶液掺入水中，以改进管子迅速通过檢驗设备时的潤湿作用；为确保灵敏度稳定，对水温要进行恒温控制。

每一頻道的灵敏度（以标准管在移动时而言），可調至 80% 飽和值。标准缺陷是一条 60 度的 V 字槽。每根管子共有六条槽，V 字槽的两边长度相等，并相当于标称管壁厚度的 12%。标准管上的凹槽沿焊縫綫上的位置如下：

的超声衰减。因为只利用首次底回波，就可避免应用多次回波衰减測試技术时所碰到的某些困难。双頻測試还有一个优点，即可以比通常方法更加迅速地測定超声損失依随頻率而發生的变化。

应用双頻測試对超声耦合条件作实验研究时，已揭露出一个重要事实，即在有耦合液的接触測試中，換能器对試样表面的机械反作用是測試頻率的函数。

也已判明双頻測試方法理想地适用于可靠的快速測定材料中纵波速度频散方面。

七、今后工作

双頻技术所根据的电子換能器响应均衡技术很适合于同时应用数目較多的超声測試頻率方面。原则上說，利用数目較多的測試通道，而各个通道在不同的頻率工作，就可能覆盖一定頻率范围中的整个頻譜。所以，只要能研制出一个适宜的显示方法（例如在示波器上），定能易于获得一个完整的脉冲振幅-頻率-時間的关系式。

也計劃了一些附加工作来研究双頻測試中缺陷形状对回波振幅比的影响。进一步的企图是发展一种阴极射綫显示系統来同时显示四个或更多的頻率通道。

参考文献

- [1] O. R. Gericke, J. A. S. A., 35, 364~368 (1963).
- [2] J. Krautkramer, Brit. J. Appl. Phys. 10, 240~245. (1959).
- [3] O. R. Gericke, "Determination of Defect Geometry and Material Microstructure by Ultrasonic Pulse Analysis Testing", Proc. Natl. Symp. Nondestructive Testing Aircraft Missile Components, 3rd, San Antonio, Texas (1962).
- [4] T. F. Hueter & R. D. Bolt, Sonics (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1962) 3rd ed., pp. 38.
- [5] F. E. Fox & T. M. Marion, J. A. S. A., 25, 661~665 (1953).

(魏墨查譯自美国《J. Acoust. Soc. Am.》1964 年第 36 卷第 2 期第 313~322 頁，孙熙民校)

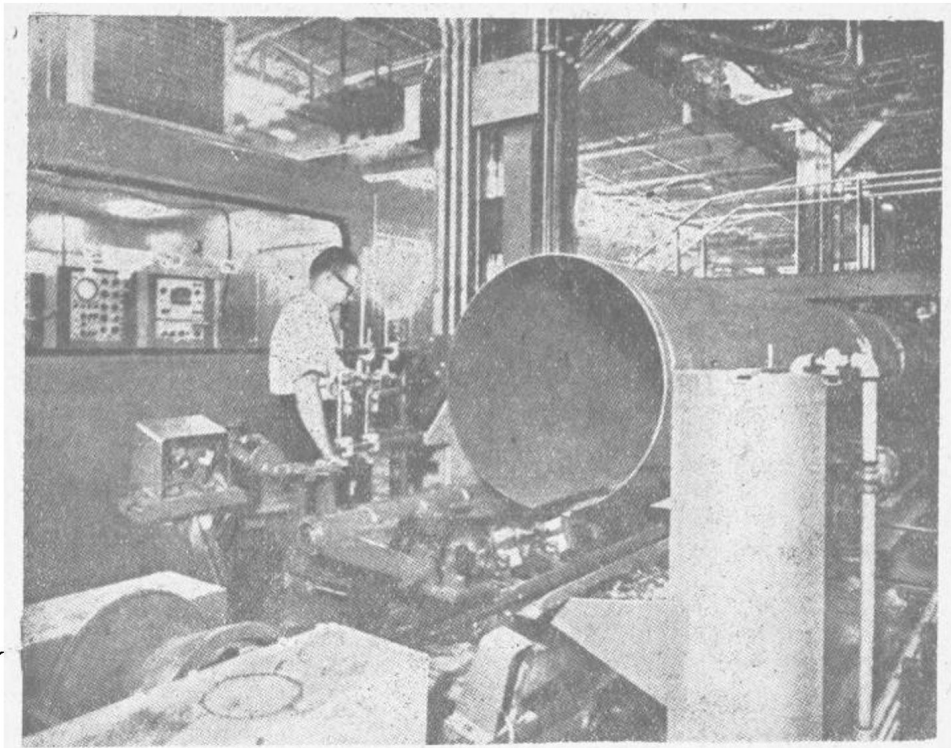


图1 用厚达 $\frac{5}{8}$ 吋的鋼板經电阻弧花压焊接而成的外徑 16~36 吋的油管的焊縫，正在以 60 呎/分的速度纵向通过超声设备受檢驗。电子仪器置于图中檢驗人員背后的密封室內，管子长度达 40 呎

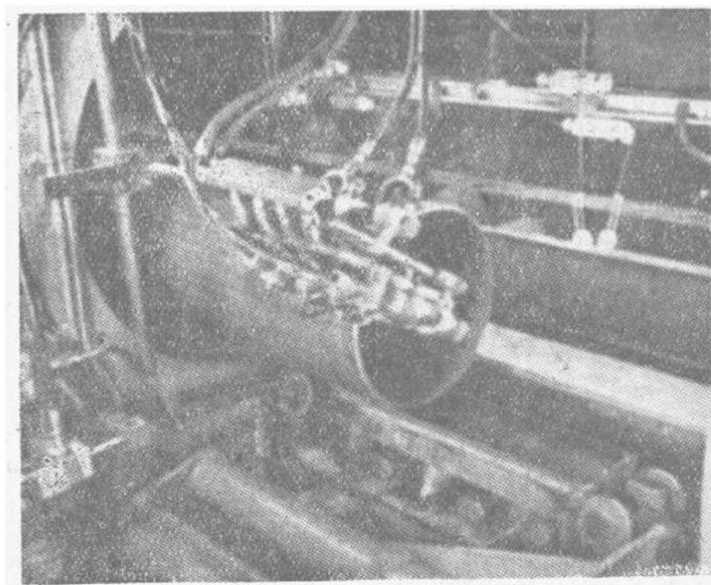


图2 水槽“拥有”四个硫酸鋰晶体探头，针对通过超声檢驗区段的管子。发现焊縫有缺陷时，电子綫路就接通，操纵四支油漆噴枪在管子上作出标記，以便修补。把噴嘴調节好，使能产生一个直徑为 $\frac{1}{2}$ 吋~ $1\frac{1}{2}$ 吋的油漆标記，以指示缺陷的位置

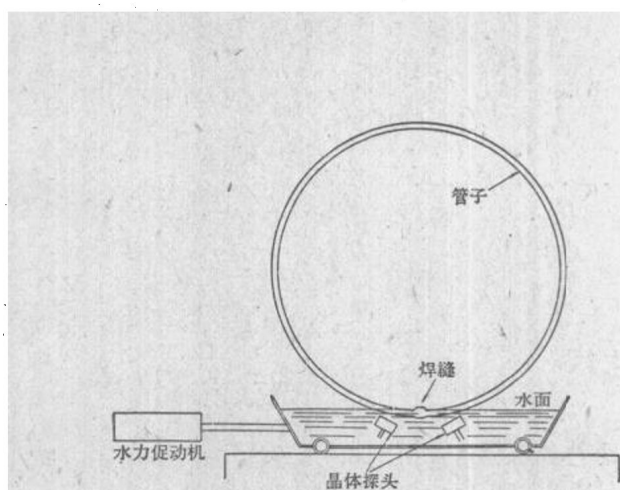


图3 超声系统的晶体探头是与 Curtiss Wright 公司的 Immersoscope 一起架在水槽内的,其位置和角度为最适于探查指定的直径与壁厚的管子焊缝。水力促动机是用跟着焊接头移动的双极敏感磁头来控制的。控制水温的恒定,可确保灵敏度稳定

距两端 1 吋处,内径上各有一条槽;
距两端 2 吋处,外径上各有一条槽;
距始端 30 吋处,内径上有一条槽;
距始端 48 吋处,外径上有一条槽。
如果检验时发现管子内部有缺陷,那么就有四

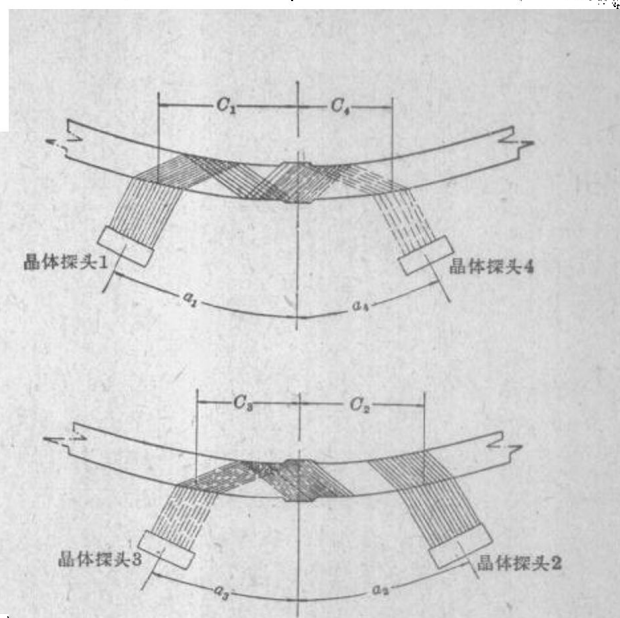


图4 每个晶体探头用来分别仔细检验预先确定的焊缝面积。每个探头所发送的超声束相当宽,因而实际上可使每个探头探查整个焊缝线。经验已经证明,需要用四个晶体探头。为使探查的结果有效,每个探头的位置必须调整得与指定的工件直径和壁厚相适合。

支自动油漆喷枪(每条超声束一支)把油漆标记喷涂在管子外壁。把各个自动喷头放置得能在各条超声束所规定的灵敏度范围内受到触发。把喷嘴调整好,使在发现缺陷时喷出一个直径为 $\frac{1}{2}$ 吋 $\sim 1\frac{1}{2}$ 吋的油漆标记。



图5 超声探查的灵敏度可由焊缝左区内表面下的小缺陷(黑线)来证明;该缺陷与金属表面倾斜成 60 度,是在工件通过检验设备时发现的(曾经探出过更小的缺陷)

管子自动输送机有一个双极敏感磁头,用以傳送管子通过超声检验区段。用这种方法傳送管子,能使管子的纵焊缝始终与水槽内的探头保持正确的角度。

管子在通过检验区段时,要将其稳住,以防止跳动和倾斜。探查焊缝时的傳送速度通常约为每分钟

60 呎。但入槽和出槽时的慢速度得按每段管子的长度作出自动的程序控制,以尽可能减小晶体探头所处水槽内的波紋,从而防止以假信号傳給自动油漆喷头。

(鄭墨德譯自《Metalworking Production》1964 年第 108 卷第 8 期第 80~82 頁,鄭墨明校)

超声观察系統的設計标准

G. Kossoff, D. E. Robinson, C. N. Liu, W. J. Garrett

用于描繪人体各种内部结构的超声观察系統，已在文献中作了叙述^[1-6]。虽然这些观察系統或回声显示器的詳細結構不一，但其原理則相同。图1給出了这种基本回声显示器的方框图。換能器对发射器及接收机作电学耦合，并与檢查器作机械耦合后經由超声声程达到病体。被观察的結構，由于它决定着工作頻率，亦被当作基本回声显示器的一部分。換能器的移动位置受到監視，它被偏轉系統用作对主显示器屏上軌迹的定位。在主显示器上回波由軌迹的輝光来表示，而所有回声显示器的主要設計标准为显示器的迹点尺寸，对高品质显示管來說，迹点尺寸为0.1厘米直徑。在本图中的A型显示器仅作輔助測量之用。

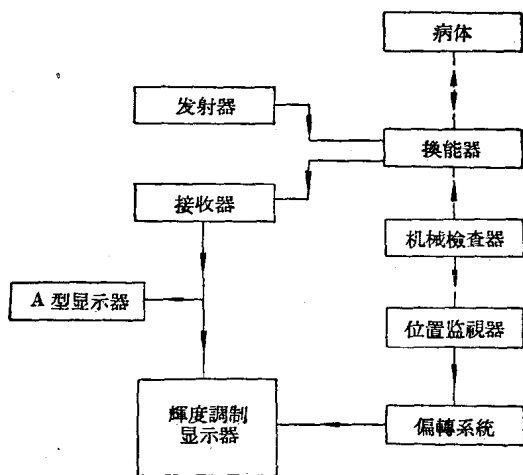


图1 基本回声显示器的方框图
(A型显示器仅用作輔助測量用)

工作頻率

工作頻率取决于受檢查結構的声学吸收系数，对大多数軟性組織來說，用回波測定得知，約为2分貝/厘米/兆赫，而其动态范围則可高达120分貝。最佳頻率亦和病体与設備的耦合方法有关，但通常是任意选定的。

換能器

一般在发射及接收中使用同一換能器，在設計中对下列三个方面的性能应予考虑：

1. 軸向分辨率；
2. 在扫描平面內的方位分辨率；
3. 在与扫描方向垂直的平面內的方位分辨率。

1. 軸向分辨率

需要的軸向分辨率决定于迹点的大小。应采用具有高耦合系数以及闊固有頻带宽度的換能器，因发射及接收采用同一換能器，在选择換能器材料时应同时考虑这两种用途。鉛鈦酸鉛材料，由于它具有最高的耦合系数、良好的发射和接收特性以及它的物理結構坚固，又由于它的大多数特性在0~50°C温度範圍內不随温度变化，因而很适用于这种用途。在这类运用中，由于采用寬頻帶，故頻率穩定度不是重要問題。获得所需頻率宽度的最簡便方法是：选用背衬材料，其阻抗应給出所要求的分辨率。这种垫衬材料必須能完全吸收入射声能而又不具有任何不均匀性，否則会出现假回声信号。但应用背衬材料后增加了換能器的介入損耗，并使換能器的体积增大。

例如，当对妊娠子宫进行观察时，它所要求的穿透深度为20厘米，要将全部子宫显示在直徑10厘米的屏幕上，就需要縮比2.5:1倍。这意味着直徑为0.1厘米的迹点等效于病体内的0.25厘米，由于脉冲在組織內通过1厘米需13.3微秒，它的回波必須在 $13.3 \times 0.25 = 3.3$ 微秒衰减掉，使它能限制在迹点面积以內。有一种調諧式PZT7A換能器是用Araldite做背衬(90%的澆制树脂D、10%的硬化剂951)，能給出約2微秒的衰减時間(图2)，它极适合于这种应用。它的介入損耗及換能器損耗^[7]見图3，在上述两种損耗中，由于水和玻璃界面的反射以及由于折射^[8]所产生的損耗，都已經考虑进去了。图4示这类換能器的内部結構，用作背衬的Araldite材料，事先在8吋半徑的臂上以400轉/分的速度进

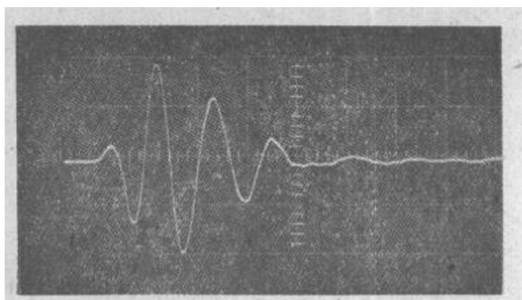


图2 以 Araldite 作背衬材料的 PZT7A 换能器,从玻璃目标上取得的回波(时间标度每小格是 0.5 微秒)

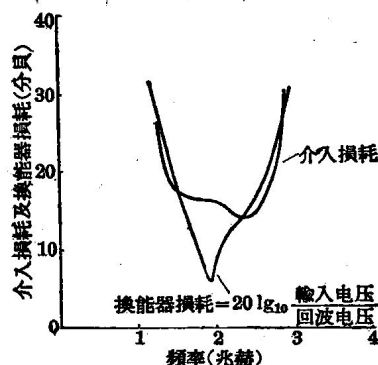


图3 用 Araldite 材料作背衬的 PZT7A 型换能器的插入损耗和换能器损耗

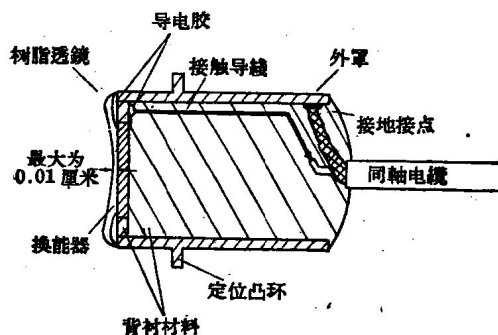


图4 用 Araldite 作背衬的换能器的内部结构

行 10 分钟离心处理,以消除气泡并清除杂质。所用的导电胶是一种热固性配制银胶 PSP-36。

但如果只要将子宫的一小部分显示在屏幕的全部直径上,可能要求例如 1:1 的复现比,此时背衬应采用阻抗较高的材料以给出所要求的分辨率。用细钨粉(2 微米)和 Araldite 材料(50% 浇制树脂 D、50% 的聚酰胺 75)在 8 吋半径臂上进行 2000 转/分的离心处理,可得到此阻抗。这类换能器具有较大的插入损耗,因而必需相应地提高发射器的功率。

2. 在扫描平面内的方位分辨率

一般通过水中延迟而进行扫描。为了避免在换

能器与病体之间多次反射而引起的误差,应根据穿透深度的要求将换能器放在远离病体的位置上。对于平面式换能器,当换能器的半径 a 为:

$$a = (\lambda P)^{1/2}$$

时,可得到最佳的分辨率,其中: $\lambda = v/f$ 为波长, v 为介质中的传播速度(在 36°C 的水中为 1.52×10^4 厘米/秒), f 为频率而 P 为要求在病体中穿透的距离。

聚焦换能器具有较好的方位分辨率,已被大多数研究者所采用。平面的及聚焦的换能器其标准化轴向声强如图 5 所示。这图的三个主要特征为:

- (1) 焦点不是出现在曲率半径上;
- (2) 在聚焦区域内,聚焦换能器的标准化轴向声强大于平面换能器的;
- (3) 在某个距离上,聚焦换能器的标准化轴向声强要降低至平面换能器的以下。

因为在平行于换能器表面的一个平面内,声束的能量是不变的,并可用一个其底部等于声束面积而高度代表最大声强的锥形体积来取得近似值,在这平面内量值 $I_a a_0^2$ 是不变的^[1],其中 I_a 为标准化轴向声强, a_0 为声束宽度。这里所指的声束宽度,是规定为声强等于轴向声强的 $\frac{1}{5}$ 的两点间的距离。聚焦换能器的曲率半径应如此选择,即在最大穿透距离处使它的标准化轴向声强等于平面换能器的声强。超过了要求的穿透距离,聚焦换能器的声束宽度就较窄,因而具有比平面换能器较好的方位分辨率。

聚焦换能器的最佳几何形状,可分两步求得:

- (1) 从平面换能器方程 $a = (\lambda P)^{1/2}$,求得其直径 $2a$;

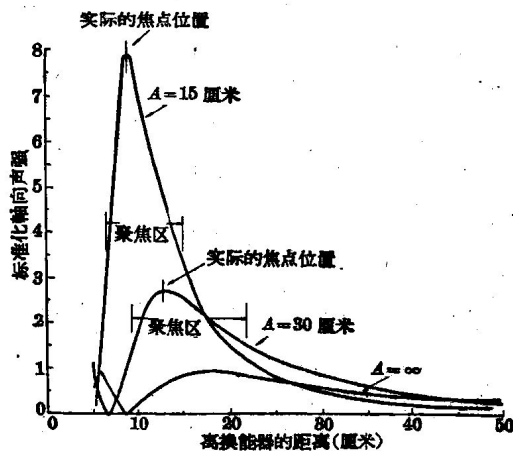


图5 平面及聚焦换能器的标准化轴向声强,换能器半径 $a=1.2$ 厘米,曲率半径 A 如图中所示

(2) 使曲率半径 A 等于要求的穿透距离 p (見附录 1)。

若将 a 及 A 值均增加 20%, 即可获得最佳分辨率, 但这种改进是很少的^[9]。表 1 指出, 对这类聚焦换能器, 只有在聚焦区域内其分辨率才能得到良好的改进。

表 1 在不同距离上, 平面的及聚焦的换能器的声束宽度

离换能器的距离 (厘米)	2 兆赫换能器用于 20 厘米穿透深度时的声束宽度		
	平面换能器 $A=\infty$	聚焦换能器 $A=20$ 厘米	最佳的换能器
	$a=1.2$ 厘米	$a=1.2$ 厘米	$a=1.4$ 厘米
15	1.7	0.8	0.8
20	1.4	1.0	1.0
25	1.5	1.3	1.2
30	1.7	1.6	1.5
40	1.9	1.9	1.8

如不用聚焦换能器而使用声透镜也可达到聚焦的要求。已证明可以运用关于圆透镜的标准光学公式^[10]:

$$A=r\left(\frac{n}{n-1}\right)$$

其中: $n=v_1/v_2$ 为透镜材料中的声速 v_1 与水中的声速 v_2 之比, 而 $v_1 > v_2$, r 为透镜的曲率半径。理想的透镜材料应具有与水相同的阻抗, 因而在换能器与透镜之间不产生反射而不造成衰减。可以采用 epoxide 树脂, 用合适的球形玻璃片可将其成形, 使其中心处的厚度不超过 0.01 厘米, 以减少在透镜中的衰减。这透镜亦作为部分的机械变换器, 使换能器和水负载的阻抗相匹配, 在换能器边缘上较厚的 Araldite 可抑低声束的边叶。使用透镜的主要缺点是在换能器与透镜之间所产生的小的多次反射。

为了提高方位分辨率, 应采用有积分显示器的复合扫描法^[1], 虽然这样会增加回声显示器的复杂性、价格以至它的调整程序。在理想上复合扫描法能给出圆满的分辨率, 但在事实上这是难以达到的, 仅能得到局部的改善。

3. 垂直于扫描平面的方位分辨率

为了取得三度空间的图象, 以某固定的垂直间隔反复进行扫描^[11]。这个垂直间隔的大小取决于回声显示器的应用和换能器的声束宽度。在进行检查时, 应对整个体积都扫描到, 此时垂直间隔不应超

过声束宽度。作为平常的观察, 可采用较大的间隔来减少扫描次数, 从而节约了诊断时间。为了减少在检查工作中的扫描次数, 可用平面换能器代替聚焦换能器, 但必然要降低回波图象的分辨率。

扫 描 器

扫描器使换能器进行机械地扫描和摆动来完成复合扫描, 这两种运动被监视并将其轨迹的起点和方向表现在主显示管上。

1. 机械要求

文献的调查^[12]指出, 在软性组织中的传播速度和水中的可能相差达 4%。折射定律 $\sin i / \sin r = v_1 / v_2$ 是与光学中所用的相似, 对于 30° 的入射角, 4% 的变化将使声线的折射方向偏离其原来方向 1.5° , 从而使目标的迹点模糊。对耦合水槽里的水作适当的配制, 可使其声速与皮肤匹配, 但内部的失配则无法加以补偿, 因此复合扫描不能任意采用。当不作复合扫描时, 对于扫描路程应这样选择, 即使换能器尽可能地接近垂直于受检的组织。直线式及圆周形机械运动易于被转换并显示于电的或磁的坐标, 而在对腹部、眼睛及四肢的观察中, 宜于采用圆周形主行程, 一般将换能器作 $\pm 30^\circ$ 的摆动来完成复合扫描。

对机械运动的精度要求决定于显示迹点的尺寸以及病体与显示图象之间的缩减比。例如, 当用缩减比为 2.5:1 以扫描妊娠子宫时, 对主圆周行程的精度要求是: 在真实圆周上, 其精度应不大于 0.05 厘米。这个误差仅使迹点的尺寸增加 33%。换能器通常装在一个长臂上, 以便浸于水中, 由于导轨扭转或轴承摇摆而产生的任何误差将被此臂扩大于扫描器上。这个误差 e 如图 6 中所示, 由于中心轴承及圆形导轨的扭转而产生的误差可由下式给出:

$$e = \frac{b}{d}$$

其中 b 为导轨扭转或轴承摇摆, d 为导轨宽度或支承长度, 而 l 为杆臂长度。这个误差不可超出圆的允许偏差。如导轨宽度为 10 厘米, 杆臂长 40 厘米而允许偏差为 0.05 厘米, 则导轨任何部分的最大允许扭转是 0.01 厘米。用准线标杆可消除这种误差。为了得到精确的监视, 换能器的运动必须很平滑, 在监视运动中所用的全部齿轮必须是弹性啮合的, 以避免齿隙游移的影响。

耦合槽内可用自来水。由于水中的声速与温度有关 (见图 7), 它的任何变化就等效于扫描圆形半

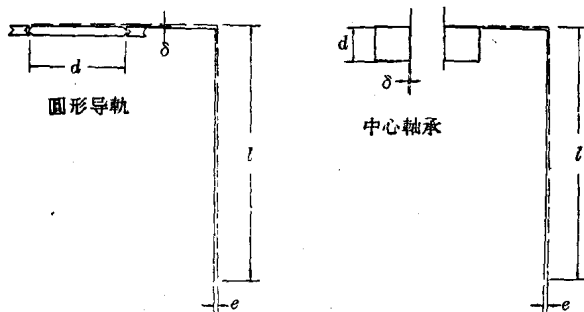


图6 由于机械骨架的无規誤差而引起的行程偏差。偏离圆形的誤差 e ，可从中心轴承的扭轉 δ 或圆形导轨的搖晃 δ 来計算

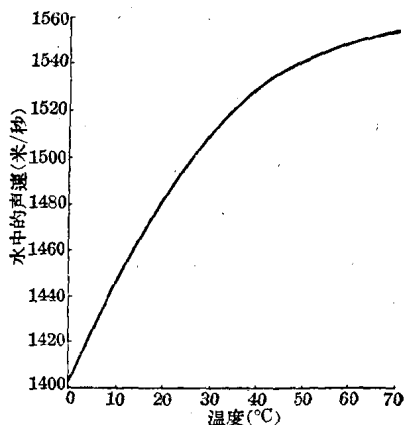


图7 水中的声速与温度的关系

徑的改变，故水温必須控制在 3°C 以內。換能器在水槽內的运动不应引起太大的扰动，否則将产生回波。

2. 病体位置

在檢查时病体必須靜止，有时还必须与延迟水槽束扎在一起，視所檢查的結構而异。呼吸会妨碍所要求的稳定性，应在病人可以坚持的呼吸時間內，加快檢查速度爭取完成一次扫描。将受檢查的結構与声束垂直，可縮短需要的穿透深度；允許用較佳的聚焦換能器，减少輻射的剂量，并使回波图象易于辨識。可将一只小型換能器放在病体上来測定相对于病体結構的扫描水准。

位置监视器

当使用复合扫描法时，在不同時間和从不同方向对目标进行扫描，所得到的回波必須精确地迭加，以便不破坏回波图象的分辨率。可通过直綫式或正弦-余弦式电位器、交流分析器、磁場綫圈的运动或实际的显示管的运动^[13]以監視机械运动。对这类

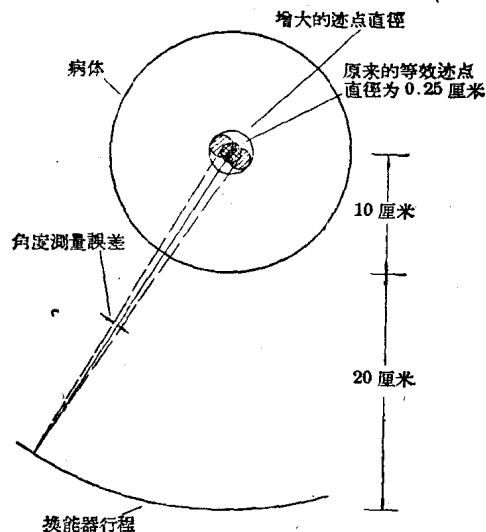


图8 由于角度測量中的电气誤差而使显示目标的尺寸增大

轉換器的精度要求很严格，如图8中就可以看到。这里，換能器是跨在圆形导轨上并指向位于中心的目标。当要求的穿透距离为20厘米时，換能器距皮肤表面为20厘米而距圓心为30厘米。按这种比例，0.1厘米直径的迹点等效于病体内的0.25厘米。如使用电角精度为 $0.125/30 = 0.4\%$ 的正弦-余弦电位器，則迹点的尺寸将加倍。薄膜电位器至少应采用符合度在0.2%以上的。这种电位器的微調裝置，在調整設備时是必需的。

偏轉系統

偏轉系統將監視換能器空間位置的变量轉換成軌迹，軌迹与換能器同步地移动；并完全由它的起点和方向所确定。虽然对監視器的精度要求极严，当采用傾斜波发生电路(ramp generating circuits)并作适当的校正后，仅需2.5%的綫性就可得到所要求的迹点分辨率(見附录2)。但是这些偏轉誤差在輸入主偏轉放大器之前，必需綫性地(0.1%)加在起点上，由于主放大器的輸入与显示管屏幕迹点之間具有单值关系，故主偏轉放大器只需5%的綫性。图9所示是用等距的耐綫綫組成目标的回波图象，它可很方便地用来校正并測定回声显示器的总分辨率。两张回波图象均特地作过度的描繪來說明迹点的重迭，而由于缺乏方位分辨率，目标被显示为条綫而不是一个点源。8兆赫的回声显示器采用了只有0.5%符合度的綫繞正弦-余弦式电位器，这是這張图象中誤差的主要来源。