

# 储罐底板缺陷的相控阵超声导波的图像重建

王维斌, 冯展军, 艾慕阳, 王琨

(中石油管道研究中心, 廊坊 065000)

**摘要:**探讨了利用相控阵方法控制纵波探头阵列提高超声导波激励能量的方法。针对实际中不同的可达检测范围,提出了可用的探头阵列布置方式。为提高超声信号的接收灵敏度,引入了数字聚焦方法,并给出了利用数字聚焦进行图像重建的基本公式。试验证明,利用该公式进行图像重建是可行的,能够对缺陷的位置和形貌等参数作出较为准确的反演。

**关键词:**超声导波;相控阵;储罐底板;图像重建

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)11-0847-03

## Image Reconstruction of Phased Ultrasonic Guided Wave Testing for Storage Tank Floor Defect

WANG Wei-Bin, FENG Zhan-Jun, AI Mu-Yang, WANG Kun

(Petrochina Pipeline R&D Center, Langfang 065000, China)

**Abstract:** The method of utilizing the control method of phased array was discussed. An arrayed longitudinal wave probe was controlled to enhance the excitation energy. Viable probe layouts were presented according to different size of inspection area. In order to improve the sensitivity of receiving signals, digital focusing method was adopted and the equation for image reconstruction was presented. The experiment showed that it was viable using this equation to locate the defect position and determine its size.

**Keywords:** Ultrasonic guided wave; Phased array; Storage tank floor; Image reconstruction

石油储罐容易发生腐蚀穿孔、裂纹扩展甚至局部破裂等较为严重的损伤。为保证石油储罐的安全正常运行,定期开展在役检测是一项重要的工作。储罐的检测主要是针对底板和侧壁的腐蚀及其他损伤,目前应用较多的为超声检测方法。由于底板和侧壁的二维尺度很大,具有典型的板状结构,因此应用超声导波对储罐损伤进行检测是较为合适的检测方法,也是当前的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。

使用超声导波对石油储罐的底板或侧壁进行检测的主要难点如下:检测导波需要覆盖板状结构中很长的距离范围,而且由于石油储罐的结构特点,导波在传播过程中会遇到多道搭接焊缝或者对接焊缝,这些焊缝不仅会混淆缺陷的识别,同时也大大增加了超声能量的衰减;由于石油储罐的工作条件,在对侧壁(底板)检测时,其界面一侧是油,一侧是空气

(固态地基),界面条件也会造成超声导波能量的散失。

由上述分析可知,应用超声导波进行石油储罐的检测时,导波的衰减和畸变较为严重。因此除了选择合适的导波模态之外,还应该提高导波的激励能量和系统的接收灵敏度;另外,有效的检测信号识别及处理方法也是必要的。

试验证明,在较大频厚积条件下,板状结构中侧壁激励的纵波是一种比较有效的检测方式<sup>[3]</sup>。笔者以此为基础,研究了采用相控阵方法<sup>[4]</sup>提高板中导波的激励能量,利用数字聚焦技术提高系统的接收灵敏度,以及对被检区域的图像重建等问题,以期能够解决石油储罐超声导波检测中存在的问题。

### 1 探头阵列的布置形式

由于石油储罐所需的检测范围较大,为提高导波激励的能量,可以选用多个超声探头构成探头阵列,按照相控阵的控制原理,以一定的时序激励各个

**作者简介:**王维斌(1972—),男,博士,高级工程师。从事油气管道运营和管理的安全保障研究工作。

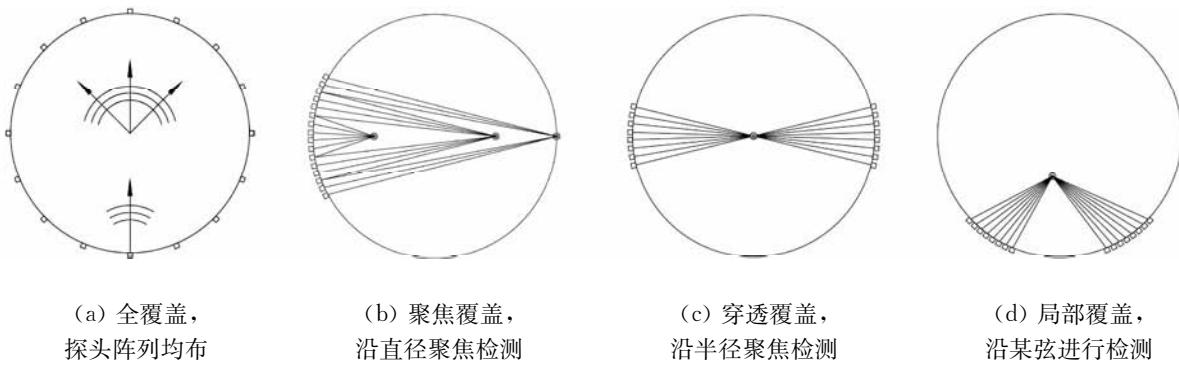


图 1 探头阵列的布置方式

探头,控制各探头的合成波阵面,满足聚焦或者偏转等需求。

如图 1 所示,根据不同的检测范围、被检材料的衰减情况以及缺陷特征等参数,将探头阵列进行分组,确定探头的布置方式,每组的探头数以及该组探头的功能(发射、接收、或者自发自收等)。在不损失检测灵敏度的前提下,实现对检测范围的有效覆盖,并兼顾检测效率。图 1(a)为单个探头即可覆盖检测范围的情况,此时将探头阵列均布,以提高检测效率。图 1(b)为通过单侧聚焦,探头阵列能覆盖检测范围的情况,此时将探头布置在一侧,通过分段聚焦进行检测。图 1(c)为单侧聚焦时仅能覆盖一半检测范围的情况,此时需要两组探头配合,一组发射一组接收,才能实现对全范围的检测。图 1(d)为当前激励条件只能覆盖局部的情况。如果需要实现对未覆盖区域的检测,需降低检测分辨率和灵敏度才能实现。

## 2 数字聚焦及图像重建

数字聚焦的原理可简单表述如下:如图 1(d)所示,将两组探头阵列按一定角度布置,两者均能对被检测区域形成有效的覆盖,每一个探头既可以作为发射器也可以作为接收器。两组探头阵列分别编号为 1,2,两者探头数相同为  $m$ ,并对其中的探头按照位置编号,依次为  $1, 2, \dots, m$ 。

根据目标探测区域的范围,超声探头的频率以及声波传播速度,可以估算从发射阵元到距此最远的目标点的传播时间  $t_1$ ,以及由该点产生的散射波到达距该点距离最远的接收探头所需要的时间  $t_2$ ,取两者的和再增加一定的延迟时间,作为各探头接收信号的采样时间,采样率根据要求的空间分辨率来定。

设  $k(k=1,2)$  组编号为  $i$  的探头发射,  $l(l=1,$

2) 组编号为  $j$  的探头接收到的超声波信号记为  $U_{ij}^k(t)$ 。如果考虑全部组合,则可以获得  $4 \times m \times m$  组数据。

所谓数字聚焦是指按照相位关系,根据目标聚焦点的不同,将采集完成的  $U_{ij}^k(t)$  按照不同的延时参数进行叠加,以取得对目标点的聚焦接收效果。该方法是文献[5]中提出的虚拟合成聚焦方法的一种推广,可以大大增加缺陷信号幅度,从而有效地提高检测灵敏度。

设探测区域内的某一目标聚焦点坐标为  $(x, y)$ ,则该点的与声压成正比的函数  $P(x, y)$  可以用下式表示:

$$P(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m U_{ij}^k T_i^k R_j^l F_{ij}^k \varphi_{ij}^k}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^m U_{i\max}^{k0}} \quad (1)$$

式中  $U_{ij}^k$  ——是对  $U_{ij}^k(t)$  离散采样后的信号;

$T_i^k$  —— $k$  组第  $i$  个发射探头几何特征和声场特性修正项;

$R_j^l$  —— $l$  组第  $j$  个接收探头几何特征和声场特性修正项;

$F_{ij}^k$  ——目标聚焦点的几何特征及声场特征修正项;

$U_{i\max}^{k0}$  —— $k$  组第  $i$  个探头发射信号的最大幅值;

$\varphi_{ij}^k$  —— $k$  组第  $i$  个探头发射,  $l$  组第  $j$  个探头接收的相位修正项。

具体应用的每一修正项,均要通过对检测声场的试验分析和研究,才能最终确定有效的修正函数。

按照式(1)即可获得检测区域内任意目标点的声压值,将各点的声压值按照对应坐标值分布成图像,即完成了基本的图像重建。

## 3 图像重建试验

为便于使用动态光弹设备分析声场,使用 K9

光学玻璃作为检测试件,尺寸为  $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ ,正中开有直径为  $30\text{ mm}$  的通孔。使用超声阵列探头,侧壁耦合,探头频率为  $6.5\text{ MHz}$ ,阵元宽度为  $2\text{ mm}$ ,阵元数为  $22$ 。如图 2 所示,图中画出了某阵元发射时声波的传播路径。试验中分别在四个侧面采集了发射/接收信号。

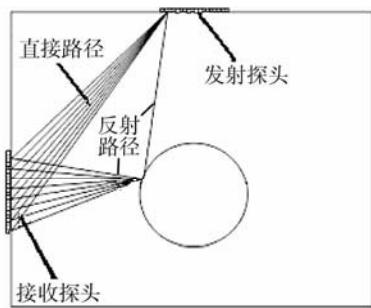


图 2 图像重建试验样品图

图 3 列出了四组从试验数据中选取的波形图,为发射探头阵列某阵元发射,接收探头阵列所有阵元接收的波形排列。可以看出,波形图的变化有一定的规律性,但由于直达波、边角散射和界面波型转换等干扰波形的存在,使得整个波形显得十分复杂,不能明显地分辨出圆孔的散射波。

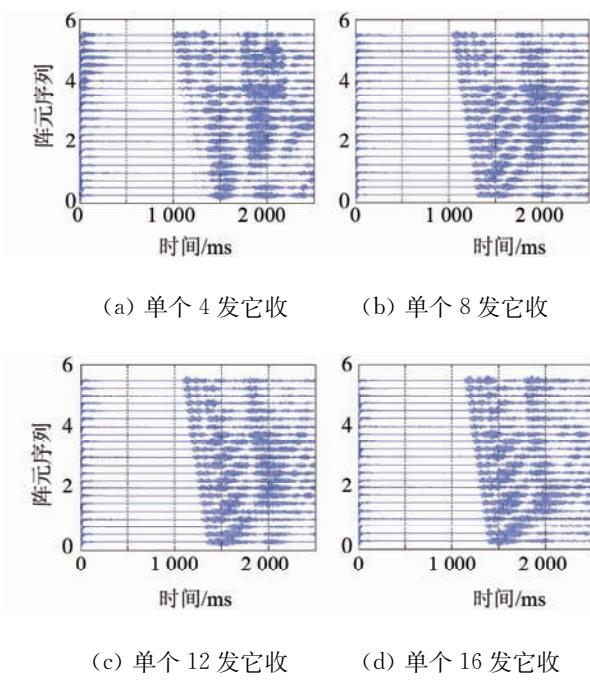


图 3 单个阵元发射,其它阵元接收到的时间序列示意图

图 4 为利用式(1)对整个样品进行图像重建的结果。其中中央圆孔的像比较清晰,但是也增加了很多不存在的伪像,这主要是由于直达波的影响,当然式(1)中各修正项的合理选择对成像的效果也有

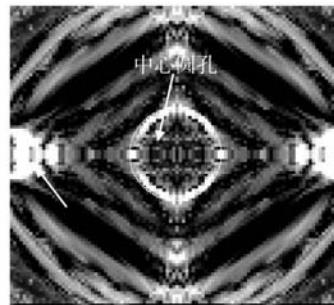


图 4 图像重建的结果

很大的影响。直达波的影响可以通过滤波手段去除,而各修正项的选择则需要比较系统的试验数据的支持。

#### 4 结论

超声导波检测是石油储罐在役检测的主要手段,由于石油储罐的结构特点和工作条件的限制,超声导波在储罐检测过程中的衰减尤为严重。探讨了利用相控阵方法控制纵波探头阵列提高超声导波激励能量的方法。针对实际中不同的可达检测范围,提出了可用的探头阵列布置方式。为提高超声信号的接收灵敏度,引入了数字聚焦方法,并给出了利用数字聚焦进行图像重建的基本公式。试验证明,利用该公式进行图像重建是可行的,能够对缺陷的位置和形貌等参数作出较为准确的反演。但是应用此方法进行声成像时,在信号滤波,公式的简化和实用化方面还需要进一步的工作。

#### 参考文献:

- [1] 肖贤军,刘丽川,刘子厚,等.超声导波技术检测储罐底板缺陷[J].无损检测,2008,30(1):6—8.
- [2] 徐彦廷,刘富君,王亚东,等.大型立式储罐综合检测技术[J].无损检测,2007,29(8):482—485.
- [3] Greve D W, Zheng P, Oppenheim I J. Excitation of longitudinal and Lamb waves in plates by edge-mounted transducers [C]. Proc IEEE Ultrasonics Conference. New York, 2007.
- [4] Zhu W, Rose R L. Lamb wave generation and reception with time delay periodic linear arrays: a BEM simulation and experimental study[J]. IEEE Trans Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1999 (46):654—664.
- [5] Yang Y, Chen Y, Fu De. A new method of phased-array ultrasonic used in NDT[J]. Sensor World, 2003 (5):5—8.