

# 不同激活孔径和聚焦深度对相控阵 超声横波检测灵敏度的影响

宋双官<sup>1</sup>, 于长乐<sup>2</sup>, 李 琪<sup>1</sup>, 廖兵兵<sup>1</sup>, 田 利<sup>1</sup>, 杨娟莉<sup>1</sup>

(1. 机械工业上海蓝亚石化设备检测所有限公司, 上海 201518;

2. 陕西恩埃姆检测技术有限公司, 西安 710075)

**摘 要:** 为探究相控阵超声检测过程中, 激发晶片数、激活孔径和聚焦深度对检测灵敏度的影响, 通过试验测定了 3 组激活孔径和不同聚焦深度下, 一系列不同深度横通孔在 55° 横波下的检测灵敏度。研究了固定孔径条件下不同聚焦深度对灵敏度的影响以及固定孔深条件下不同激活孔径和聚焦深度与灵敏度的关系。试验结果表明, 聚焦会提高焦点处的灵敏度, 且大多数情况下有效晶片面积越大灵敏度越高, 但越过焦点之后, 相比未聚焦状态, 灵敏度会下降得更快。因此在实际检测中, 对不同的检测区域, 应根据不同探头的声场能量分布选择合适的检测工艺, 以得到更优化的检测效果。

**关键词:** 相控阵超声; 横波; 孔径; 聚焦; 灵敏度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2022)04-0035-05

## Influence of different activation apertures and focus depths on the sensitivity of phased array ultrasonic shear wave detection

SONG Shuangguan<sup>1</sup>, YU Changle<sup>2</sup>, LI Qi<sup>1</sup>, LIAO Bingbing<sup>1</sup>, TIAN Li<sup>1</sup>, YANG Juanli<sup>1</sup>

(1. Machinery Industry Shanghai Lanya Petrochemical Equipment Inspection Institute Co., Ltd., Shanghai, 201581, China;

2. Shaanxi N. M Testing Technology Co., Ltd., Xi'an, 710075, China)

**Abstract:** In order to explore the influence of the number of excited wafers, the activation aperture and the depth of focus on the detection sensitivity in the phased array ultrasonic testing process, through experiments, the detection sensitivity for a series of different depths of transverse through holes by 55° shear waves was determined under three sets of activation apertures and different focus depths. The effects of different focus depths on sensitivity under fixed aperture conditions and the relationship between different activation apertures and focus depths and sensitivity under fixed aperture depths are studied. Experimental results show that focusing will increase the sensitivity at the focal point, and in most cases the larger the effective wafer area, the higher the sensitivity, but after passing the focal point, the sensitivity will decrease faster than in the unfocused state. Therefore, in actual detection, for different detection areas, a suitable detection process should be selected according to the sound field energy distribution of different probes to obtain a more optimized detection effect.

**Key words:** phased array ultrasonic; shear wave; aperture; focusing; sensitivity

相控阵超声系统通过调整阵列中不同晶片的激发时间延迟, 来控制声束的偏转和聚焦。其对偏转的控制是通过控制激发晶片组的位置或调节组内激

发晶片的延迟时间进行的, 通过控制偏转可实现线扫, 扇扫等不同的扫查方式; 对聚焦的控制主要是通过调整组内激发晶片的延迟时间来实现的。超声波的焦点并非一个点, 而是在一个区域内都拥有较高的能量, 这个区域被称为聚焦区。因为这个区域在声束扩散方向上较窄, 而在超声波传播方向上较长, 接近圆柱形, 所以聚焦区也被称为焦柱。焦柱结构

收稿日期: 2021-07-20

作者简介: 宋双官(1987—), 男, 本科, 工程师, 主要从事特种设备的检验检测工作

通信作者: 宋双官, 714374079@qq.com

如图 1 所示,图中  $Z_B$  为焦柱起点; $F_Z$  为聚焦区; $Z_E$  为焦柱终点; $D$  为晶片直径。有研究表明,焦距越接近场区长度,该区域声场能量越均匀,其聚焦效果越差。

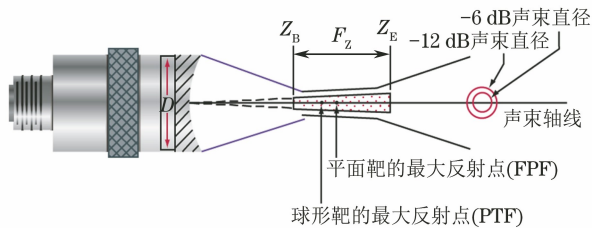


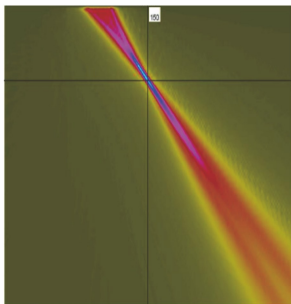
图 1 焦柱结构示意图

在实际工作中,先根据待检测之后工件的情况和可能产生的缺陷确定检测方法,再选择合适的探头并设置正确的焦点是制定检测工艺的重要环节。因此,选择的激活孔径和焦点位置是否能保证检测系统在所关注的区域内拥有足够的灵敏度,是重要的步骤。

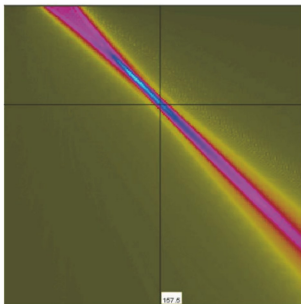
现在的相控阵超声设备都具有 TCG(时间校正增益)补偿功能,可将不同深度的灵敏度补偿一致,但是一方面补偿的总增益是有限的;另一方面在灵敏度较低的区域进行增益补偿,提高缺陷信号波幅的同时也会提高噪声信号波幅,并不能改善信噪比。因此为了优化检测工艺,提高缺陷检出率,还是应该对整个检测区域的灵敏度情况有所了解。因此笔者通过试验测定了不同激活孔径和聚焦深度下,不同深度横通孔在  $55^\circ$  横波下的检测灵敏度,探究这些因素对相控阵超声横波检测灵敏度的影响。

## 1 研究背景

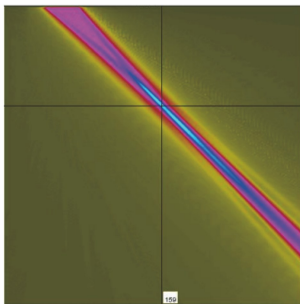
相控阵超声检测时聚焦深度及激活孔径对检测灵敏度影响的相关研究更多集中在纵波方面。不同偏转角度下的声场分布如图 2 所示,相控阵超声纵波检测不同偏转角度下声压与声程的关系如图 3 所示<sup>[1]</sup>。



(a) 聚焦深度50 mm



(b) 聚焦深度100 mm



(c) 聚焦深度200 mm

图 4 相控阵超声横波检测灵敏度仿真结果

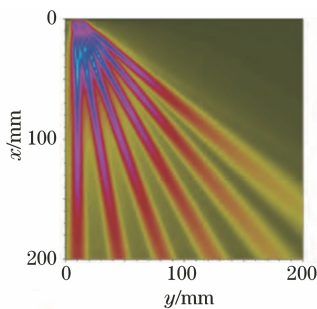


图 2 不同偏转角度下的声场分布

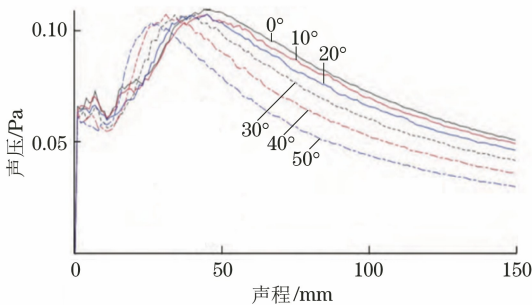


图 3 相控阵纵波检测中不同偏转角度下声压与声程的关系

也有学者研究了相控阵超声横波检测中声束聚焦对检测的影响。图 4 所示为 5L64-A12 探头在使用 SA12-N55S 楔块时, $45^\circ$  折射横波在不同深度聚焦时的灵敏度仿真结果<sup>[2]</sup>。但该研究主要集中在定位和测量缺陷尺寸方面,并未对不同孔径和聚焦深度下检测的绝对灵敏度进行比较,因此笔者在这个方面进行了尝试。

## 2 试验方案

### 2.1 试验设备

- (1) 主机:奥林巴斯 OmniScan X3 32128PR 型。
- (2) 使用了如下两个 A32 探头:① 型号为 5L64-A32,频率为 5 MHz,64 晶片,晶片中心距为 0.5 mm,次轴方向长度为 10 mm;② 型号为 5L32-A32,频率为 5 MHz,32 晶片,晶片中心距为 1 mm,次轴方向长度为 10 mm。
- (3) 楔块:SA32-N55S 楔块。

(4) 试块:CSK-IIA-3 试块,目标反射体为不同深度的  $\phi 2\text{ mm}\times 60\text{ mm}$  长横孔。

(5) 耦合剂:机油用于楔块与工件的耦合,凡士林用于探头和楔块的耦合。

2.2 试验过程

采用 8,16,32 mm 等 3 种激活孔径进行检测试验。

试验分为 3 组,第一组试验分别采用  $8\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  和  $16\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$  激活设置,激活孔径均为 8 mm;第二组试验分别采用  $16\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  和  $32\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$  激活设置,激活孔径均为 16 mm;第三组试验采用  $32\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  激活设置,激活孔径为 32 mm。

为了避免不同孔径尺寸的声束在楔块内传播的声程变化,所有组的激活孔径均以探头中心为中心对称分布,如  $8\text{ mm}\times 1\text{ mm}$  的激活孔径是激发 5L32-A32 探头的 13~20 号晶片, $16\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$  的激活孔径是激发 5L64-A32 探头的 25~40 号晶片。

通常的横波检测是有角度范围的扇形扫查,不同角度的聚焦效果、灵敏度等也有差异,不便于直接比较。试验使用的是自然折射角为  $55^\circ$  横波的楔块,因此测量的是无需电子偏转的  $55^\circ$  横波下的灵敏度。同时为了避免不同楔块磨损程度不同等因素带来的灵敏度差异,两个探头使用了同一个楔块。

第一组激活孔径尺寸较小,分别聚焦在 10,20,40 mm 深处,检测 1,20,40,60,90 mm 深的目标反射体。

后两组激活孔径尺寸较大,分别聚焦在 20,40,60,90,130,180 mm 深处,检测 10,20,40,60,90,130,180 mm 深处的目标反射体。

将每个目标反射体回波调整至满屏高度的 80%,记录增益并以此作为检测灵敏度。每个点测试 3 次,求其平均值作为该点的灵敏度。

3 试验结果及讨论

3.1 近场区计算

尽管笔者在设置聚焦深度时并未考虑近场区的问题,但近场区长度对分析实际测定的数据仍有很大意义,因此首先进行了近场长度及深度计算。在不使用电子偏转条件下,可使用常规超声横波斜探头对第二介质中的近场区长度进行计算<sup>[3]</sup>,如式(1)

$$N' = \frac{F_s}{\pi \lambda_{s2}} \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - L_1 \frac{\tan \alpha}{\tan \beta} \quad (1)$$

式中: $N'$  为钢中近场区长度; $F_s$  为波源面积; $\lambda_{s2}$  为

钢中折射波的波长; $\alpha$  为声束在楔块中的入射角; $\beta$  为声束在钢中的折射角; $L_1$  为楔块中波源到声束入射点的长度。

$L_1$  需要根据楔块参数进行计算,因为试验中所有激发方式均相对探头中心线对称,所以只需要计算探头中心处距声束入射点的距离  $L_1$ ,其计算公式为

$$L_1 = \frac{H_1 + A \sin \alpha / 2}{\cos \alpha} \quad (2)$$

式中: $H_1$  为楔块上第一晶片高度; $A$  为探头的总激活孔径。

通过上述计算得到  $N'$  后,用三角函数计算即可得到近场区深度

$$D_N = N' \cdot \cos \beta \quad (3)$$

经计算,3 组不同激活孔径下钢中近场区长度及深度如表 1 所示。

表 1 3 组不同激活孔径下钢中近场区

长度及深度 mm		
激活孔径	近场区长度	近场区深度
8	15.1	8.7
16	43.1	24.7
32	99.1	56.9

3.2 相同激活孔径下聚焦深度对灵敏度的影响

图 5 为第一组 8 mm 激活孔径下,检测灵敏度与聚焦深度的关系;图 6 为第二组 16 mm 激活孔径下,检测灵敏度与聚焦深度的关系;图 7 为第三组 32 mm 激活孔径下,检测灵敏度与聚焦深度的关系。图 5~7 中点的高度越高,代表该点达到 80% 高度时所需增益越大,检测灵敏度越低。

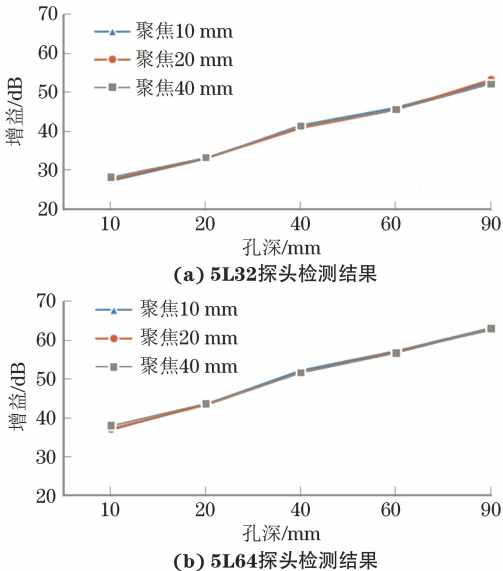


图 5 8 mm 激活孔径下检测灵敏度与聚焦深度的关系

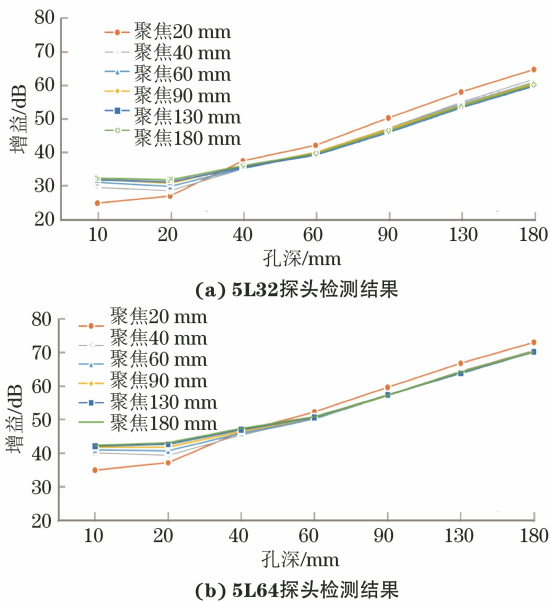


图6 16 mm 激活孔径下检测灵敏度与聚焦深度的关系

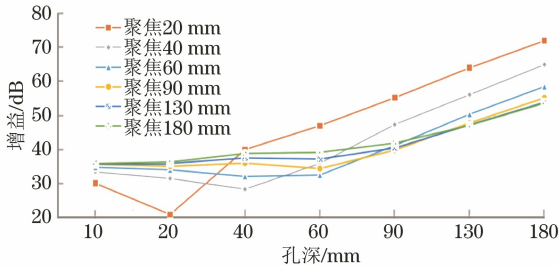


图7 32 mm 激活孔径下检测灵敏度与聚焦深度的关系

第一组试验中 5L32 探头在不同聚焦深度设置下的灵敏度曲线几乎完全重合, 5L64 探头也是如此, 同时两幅图中曲线形状几乎完全相同, 只是图 5 (b) 的数据比图 5 (a) 的数据整体高了大约 10 dB。曲线几乎重合是因为当激活孔径只有 8 mm 时, 理论上钢中 55° 的近场区深度只有 8.7 mm, 聚焦深度无论设置为 10, 20 mm 还是 40 mm, 声束均为非聚焦状态, 其声场实际上是相同的, 所以曲线形状相同。两组曲线高度有差异是由于在相同激活孔径下, 晶片数多的探头, 晶片间隙更多, 实际的晶片面积占比更小, 造成激发能量下降, 产生了灵敏度的差异。

第二组试验中, 图 6(a), (b) 两幅图的情况与第一组试验相似, 同聚焦深度的曲线在图 6(a) 中比图 6(b) 中低大约 10 dB, 即相同激活孔径下晶片数越多, 检测灵敏度越低。

由于该组既有近场区内聚焦也有近场区外聚焦, 故可以对比聚焦对灵敏度带来的影响。以图 6 (a) 为例, 当聚焦点在 20 mm 深处时, 孔深 10 mm 处的增益比 20 mm 处的更低, 意味着其灵敏度比

20 mm 处更高。造成这种现象的一种可能原因是近场区内声束能量较为均匀, 聚焦带来的灵敏度增加并不明显, 同时由于 10 mm 处声程近, 衰减小, 因而波幅反而高于焦点处的。除了聚焦 20 mm 外, 其他所有聚焦深度中均是 20 mm 孔深处灵敏度最高。其原因如表 1 所示, 激活孔径为 16 mm 时, 近场区终点深度为 24.7 mm, 意味着未聚焦的声束在深 24.7 mm 处声压达到最大值, 因此当聚焦设置在近场区之外时, 深度为 20 mm 的孔附近灵敏度最高。

另一个值得注意的现象是, 聚焦在 20 mm 的声束在远场区域的灵敏度明显低于其他声束, 而且曲线倾斜程度更大。也就是说, 当聚焦在近场区内时, 焦点附近可以获得更高的灵敏度, 但是在越过焦点之后, 声束的能量降低得也更快。

第三组只有激活孔径为 32 mm×1 mm 的一组数据, 可以看到, 由于激活孔径增大, 该组的聚焦效果更加明显, 当聚焦深度为 20 mm 时, 孔深 20 mm 处的检测灵敏度较同曲线其他孔深及不同聚焦深度的 20 mm 孔深处的检测灵敏度都有了 10 dB 以上的显著提升, 同时可以看出, 聚焦 40 mm 深处时, 孔深 40 mm 处的检测灵敏度也显著优于同曲线的其他孔及其他聚焦深度的 40 mm 孔深处的灵敏度。

该组近场区深度为 56.9 mm, 因而聚焦在 60 mm 以上的声束在 60 mm 以外区域曲线逐渐重合, 而聚焦在 20, 40, 60 mm 处的曲线在越过各自焦点后, 其灵敏度也快速下降。与图 6 的情况类似, 当聚焦在近场区以内时, 声束在越过焦点之后快速衰减, 焦距越小越过焦点后的灵敏度越差。

值得注意的是, 如图 7 所示, 当声束处于未聚焦状态时, 其灵敏度在整个深度范围内更均匀, 意味着在检测大厚度工件时, 将声束设置为未聚焦状态时可以在更大范围内得到较为均匀的灵敏度。

然而, 当聚焦深度为 90, 130, 180 mm 时, 按照理论计算结果, 其聚焦深度已远远超过近场区深度, 声束应该都是非聚焦状态, 这 3 条曲线应该是完全重合的, 但 3 条曲线在差异最大的地方 (60 mm 深度处), 增益相差了 4.7 dB, 已远远超过了检测数据的误差范围, 但该现象尚未找到有效的解释。

通过对这 3 组数据进行分析, 得出以下结论。

(1) 观察近场区内声场的能量变化, 发现同常规超声一样, 实测的相控阵声场并没有多个能量极大值, 而是只有一个极大值或没有极大值。出现极大值分为两种情况: 当聚焦在近场区内时, 能量极大



值位于焦点附近;当聚焦在近场区外时,能量极大值位于近场区附近。也可能由于焦距接近近场区,整个焦距范围内声束能量较为均匀,聚焦带来的焦点处能量增加并不明显,同时衰减的影响超过聚焦的影响,使整个声束能量呈现单调递减的状态,如图 7 聚焦 180 mm 曲线及图 6(a),(b)的聚焦 20 mm 曲线。

(2) 焦点设置在近场区内时可以有效聚焦,获得焦点附近的更高灵敏度,但是在越过焦点之后灵敏度下降速度快于非聚焦状态下的;焦点设置在近场区外时,声束为非聚焦状态,整个深度范围内灵敏

度与焦点设置的具体位置无关。

(3) 从灵敏度角度来看,聚焦可以提高焦点附近灵敏度,非聚焦声束的整个声场灵敏度较为均匀。

**3.3 特定检测深度时激活孔径及聚焦深度对灵敏度的影响**

实际工作中还有一种情况,在有明确的关注深度范围或已知缺陷的大概埋深时,为了得到较高检测灵敏度,需要选择合适的激活孔径和聚焦深度。针对这种情况,笔者绘制了特定深度时,激活孔径和聚焦深度与灵敏度的关系曲线,如图 8 所示。

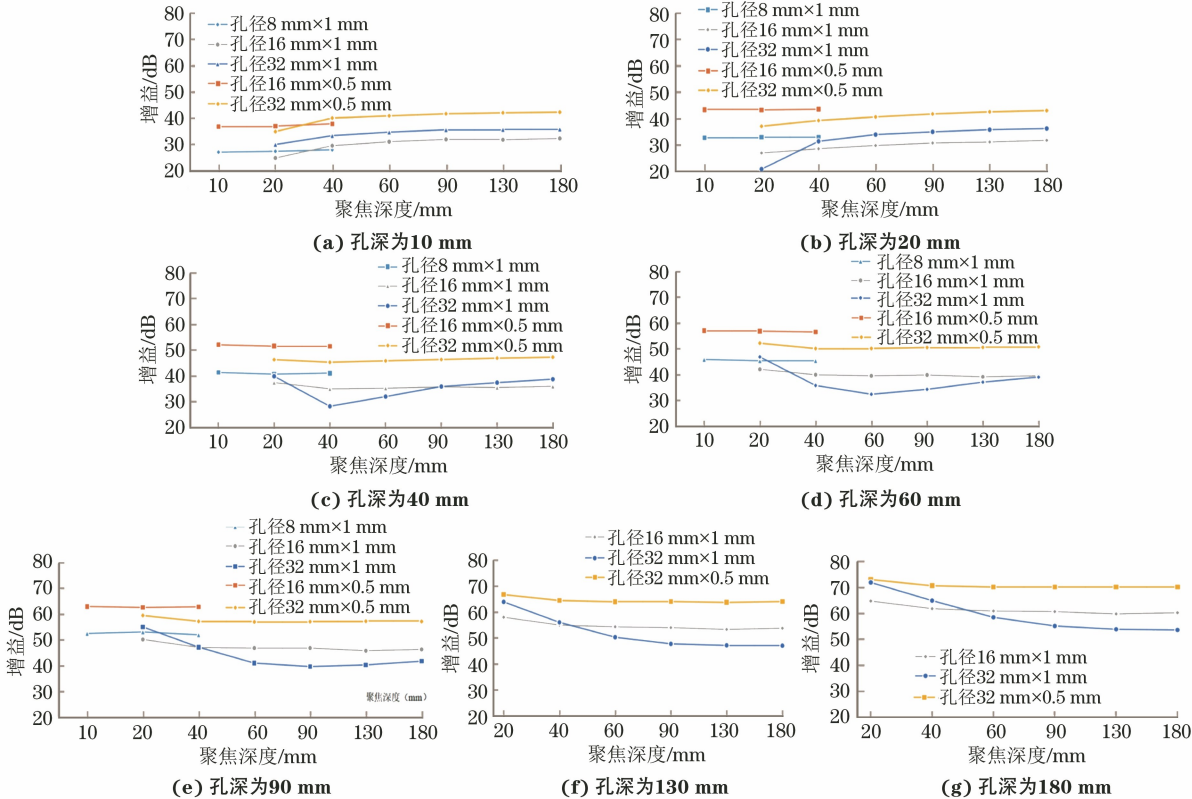


图 8 特定深度时,激活孔径和聚焦深度与灵敏度的关系

通过对这几组数据进行分析,可以得到以下结论。

(1) 在激活孔径尺寸相同的情况下,不同晶片数的探头声场变化趋势相同,而晶片数更少的探头由于晶片间隙更小,有效晶片面积占比更大,所以灵敏度更高。

(2) 在单个晶片尺寸相同的情况下,在声程较长的区域,更大的激活孔径聚焦效果更好,焦点处灵敏度更高,但是在声程较短的区域,该结论不一定成立。

实际工作中除了灵敏度之外,还应关注其信噪比。相控阵超声检测中的噪声主要来自 3 个方面:① 仪器电噪声;② 材料内部晶粒噪声;③ 由栅

瓣旁瓣引起的噪声。其中电噪声会随着增益的增大而增大,晶粒噪声与缺陷信号同步起落,栅瓣旁瓣引起的噪声较为复杂,其与单个晶片宽度与波长的比值有关,也与偏转角度和焦距有关。因此,在不考虑栅瓣旁瓣问题的情况下,可以认为较高的检测灵敏度降低了检测所需增益,对信噪比有一定优化作用。

4 结语

通过测定 3 组激活孔径和不同聚焦深度下,一系列不同深度横通孔在 55°横波下的检测灵敏度,

(下转第 66 页)

理构建坏点检测滤波器模型，完成图像的坏点视觉检测。试验结果表明，构建的坏点视觉检测方法，能够改善现有视觉检测方法存在的不足，为液晶屏设计提供了理论支持与实际应用依据。

参考文献：

[1] 欧习洋,曾幼松,冉晓红,等. IR46 智能电能表软件可靠性设计与测试研究[J]. 电测与仪表,2019,56(19): 147-152.

[2] 毕超,郝雪,李迪. 飞机蒙皮法线方向的视觉检测技术研究[J]. 传感技术学报,2020,33(9):1259-1265.

[3] 袁林光,李正琪,占春连,等. 强光环境下军用液晶显示屏检测技术研究[J]. 应用光学,2020,41(5):1047-1052.

[4] 刘仕彬,邹忠飞,钟德镇,等. 宽窄视角切换技术的制程改善应用于液晶显示屏的节能架构[J]. 液晶与显示,2019,34(10):952-958.

[5] 王孟涛,李岳阳,杜帅. 基于机器视觉的疵点检测方法的研究进展[J]. 现代纺织技术,2019,27(5):57-61.

[6] 刘望,邵慧丽,何勇军,等. 参数自适应的液晶屏幕缺陷检测框架[J]. 哈尔滨理工大学学报,2020,25(5): 75-82.

[7] 袁玉英,罗永刚,袁慧祥,等. 物联网智能电能表的设计[J]. 电力信息与通信技术,2019,17(4):72-76.

[8] 赵娜娜,陶溢,李芬,等. 高铁轮毂表面缺陷的视觉显著性超像素图像检测方法[J]. 科学技术与工程,2019,19(32):230-235.

[9] 刘又维,樊绍胜,唐立军,等. 基于关键点的输电线路防振锤滑移视觉检测[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(20):201502.

[10] 刘桂雄,何彬媛,吴俊芳,等. 面向视觉检测的深度学习图像分类网络及在零部件质量检测中应用[J]. 中国测试,2019,45(7):1-10.

[11] 许佳,蒋鹏. 视觉和物体显著性检测方法[J]. 山东大学学报(理学版),2019,54(3):28-37.

[12] 刘靖. 基于局部聚合描述符的视点不变视觉位置识别[J]. 计算机工程与设计,2020,41(11):3181-3187.

[13] 夏云汉,李鸣晓,范学仕. 柔性透明屏 LED 驱动芯片设计[J]. 电子与封装,2020,20(12):40-45.

(上接第 39 页)

得到以下结果，聚焦会提高焦点处的灵敏度，且大多数情况下有效晶片面积占比越大灵敏度越高，但越过焦点之后，相比未聚焦状态，灵敏度会下降得更快。因此在实际工作中，针对不同的检测区域，应根据不同探头的声场能量分布选择合适的检测工艺，以得到更优化的检测效果。

参考文献：

[1] 原可义,吴开磊,杨齐,等. 相控阵超声检测中的近场和远场选择[J]. 无损检测,2019,41(3):1-5.

[2] 刘飞. 超声相控阵焊缝缺陷检测中聚焦参数研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.

[3] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008.

欢迎网上投稿      欢迎订阅      欢迎刊登广告