

◇ 研究报告 ◇

带斜楔相控声束偏转聚焦延时特性研究*

姜学平¹ 王 鹏¹ 韩庆邦^{1†} 田国良²

(1 河海大学物联网工程学院 常州 213022)

(2 葫芦岛北检科技有限公司 葫芦岛 125000)

摘要 带斜楔的相控阵超声检测广泛应用于低碳钢薄壁工件焊缝的检测,研究带斜楔的相控阵超声偏转聚焦检测延时法则和对应的声场将使检测可靠性进一步提高。本文利用费马原理探究了相控阵超声探头辐射声波至楔块中,在楔块-工件平面界面发生模式转换入射到工件中的横波聚焦时各阵元延时的计算方法,数值求解指定焦点时各阵元的延时,并利用计算得到的延时进行声场仿真和实验测量,发现声波能很好的聚焦在目标点,仿真和实验结果吻合。

关键词 相控阵超声检测,延时法则,费马原理

中图分类号: O426.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2016)03-0219-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2016.03.006

Calculations of time delay-laws in phased array focusing ultrasound testing with inclined wedges

JIANG Xueping¹ WANG Peng¹ HAN Qingbang¹ TIAN Guoliang²

(1 College of IOT Engineering Hohai University, Changzhou 213022, China)

(2 Huludao North Testing Technology Limited Company, Huludao 125000, China)

Abstract Phased array ultrasonic testing with inclined wedges is widely used in low carbon steel thin-wall workpieces welds inspection. Investigation of delay laws for phased array ultrasonic focusing deflection testing can improve the evaluation reliability even more. In the ultrasonic testing, sound wave radiated from a phased array probe passes through the wedge-specimen plane interface and the mode conversion shear wave was focused in the specimen. Employing Fermat principle, calculations of each element delay time was deduced and a numerical solution for a focal point was got. Finally, simulation and experimental measurement of focusing acoustic field was carried out. The result shows that the beam can focus on the target point, and the simulation and experimental results agree well.

Key words Phased array ultrasonic testing, Time delay laws, Fermat principle

2015-09-10 收稿; 2016-01-22 定稿

*国家自然科学基金项目 (11274091, 11574072), 河海大学中央高校基金项目 (2015B04714, 2011B11014)

作者简介: 姜学平 (1983-), 男, 陕西渭南人, 博士, 讲师, 研究方向: 超声检测, 声场成像和测量。

† 通讯作者 E-mail: HQB0092@163.com

1 引言

伴随着材料、微加工、计算机和电子技术的迅猛发展,相控阵超声检测技术由于其声束灵活可控而越来越多地应用于工业无损检测中,国内外相关标准、设备、软件和检测方法不断丰富、完善或被认可、应用^[1-6],其中准确把握相控声束偏转聚焦时间延迟对检测方法研究和缺陷的定量定性越来越重要。工业无损检测中,通常将一维线性阵列换能器安装在一定角度的楔块上形成斜探头^[7-10],因此,需要研究声波经楔块-工件界面后在工件中聚焦时,各阵元的延时,同时伴随着全矩阵聚焦技术的推广和应用^[11-12],相控声束偏转聚焦时间延迟的研究更加必要。目前,时间延迟的研究多是计算同种介质中阵元到焦点的声程,得到对应的延时^[4,13]。孙芳等研究了斜探头相控阵超声检测时阵元延时的计算方法,但并未明确说明声波在楔块工件界面入射点位置的计算方法^[14]。周正干等采用费马原理推导了两层介质相控阵检测时延时的计算方法,但计算中需要遍取工件界面上的声束入射点^[15]。

本文基于费马原理和声波在界面折射遵循的斯涅尔定律,采用几何声线模型,计算了声波经过斜探头在工件中设定点聚焦时楔块-工件界面入射点位置,而后计算阵元辐射声波到达聚焦点的声时,得到阵元的延时。最后采用计算得到的延时进行聚焦声场仿真和实验测量,发现声波能很好聚焦在设定点,且理论实验结果吻合。

2 相控阵声束偏转聚焦的时间延迟理论分析

声学中的费马原理指出,声波在任意介质中从一点传播到另一点时,沿所需时间最短的路径传播^[16]。将各阵元近似为点声源(这里仅计算各阵元的延时,不考虑指向性),其位置位于该阵元中心处, p 为阵元间距,即相邻阵元中心间的距离。

如图1所示,以最下端(或者说最后端)的阵元中心为坐标原点 O ,平行于楔块-工件界面通过 O 点的直线为 x 轴,以垂直楔块-工件界面通过 O 点指向界面方向为 z 轴正向,建立直角坐标系,第一个阵元到楔块-工件界面的距离为 H ,声波聚焦于点 $P(x_p, z_p)$ 处。设探头的阵元个数为 N ,第 i 个阵元即阵元 i ($1 \leq i \leq N$)的位置坐标为 $I(x_i, z_i)$,该阵元辐射声波的入射点为 $A(x_a, z_a)$,楔块材料声速为 c_w ,倾斜

角为 α_0 , s_0 为从楔块斜面后边沿到第一阵元中心的距离,工件材料声速为 c_s 。

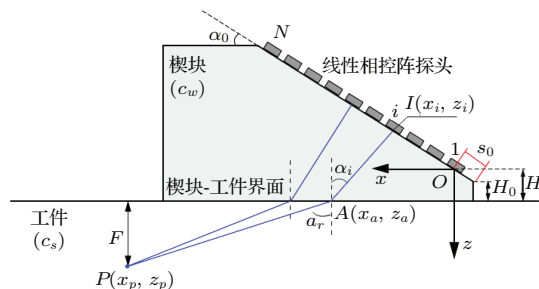


图1 相控阵声束偏转聚焦的时间延迟计算

Fig. 1 Scheme of phased array focusing deflection acoustic wave delay time calculation

如图1所示,楔块-工件平面接触的承压设备焊缝的检测中,阵元 i 的位置坐标 $I(x_i, z_i)$ 为

$$\begin{aligned} x_i &= (i-1)p \cos \alpha_0, \\ z_i &= (1-i)p \sin \alpha_0, \end{aligned} \quad (1)$$

阵元 i 发射声波到达聚焦点 P 处的声时为

$$T_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_a)^2 + (z_i - z_a)^2}}{c_w} + \frac{\sqrt{(x_p - x_a)^2 + (z_p - z_a)^2}}{c_s}, \quad (2)$$

式(2)中只有 x_a 未知,不考虑负折射时,求出 $x_i \leq x_a \leq x_p$,使 T_i 取最小,根据费马原理,此时, T_i 即为阵元 i 的辐射声波到达焦点的声时。重复以上步骤,计算不同 i 值对应的 T_i ,求出所有阵元声时 T_i 中的最大值 $T_{\max}$,则第 i 个阵元的延迟时间 ΔT_i 可以表示为

$$\Delta T_i = T_{\max} - T_i, \quad (3)$$

由此可求出聚焦到点 $P(x_p, y_p)$ 时各阵元的延迟时间 ΔT_i 。对于任意表面形状的工件,求出 x_i 与 z_i 的关系,带入式(2)和式(3)中同样可以计算阵元的延时^[16]。另外还可以根据检测结果自动调整各通道的发射和接收延时,实现声场在预定点的准确聚焦。这种方法称为自适应聚焦技术,可以应用在任何形状的工件、柔性探头、柔性楔块和各向异性材料的相控阵超声检测中^[17]。

楔块-工件平面接触的相控阵偏转聚焦超声检测更加普遍,需要计算其时间延迟。由斯涅尔定律有

$$\frac{\sin \theta_i}{c_w} = \frac{\sin \theta_r}{c_s}, \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned}\sin \theta_i &= \frac{|x_a - x_i|}{\sqrt{(x_a - x_i)^2 + (z_a - z_i)^2}}, \\ \sin \theta_r &= \frac{|x_p - x_a|}{\sqrt{(x_p - x_a)^2 + (z_p - z_a)^2}},\end{aligned}\quad (5)$$

z_a 即 O 点到检测面的距离 H , $(z_p - z_a)$ 为聚焦深度 F 。所以将式 (5) 代入式 (4) 后得

$$\begin{aligned}& \frac{|x_a - x_i|}{\sqrt{(x_a - x_i)^2 + (H - z_i)^2}} \\ &= \frac{c_w}{c_s} \frac{|x_p - x_a|}{\sqrt{(x_p - x_a)^2 + F^2}},\end{aligned}\quad (6)$$

设 $u = x_p - x_a$, $v = x_p - x_i$, 整理化简 (6) 得到

$$\begin{aligned}& \left(\frac{c_w^2}{c_s^2} - 1 \right) u^4 + \left[2v \left(\frac{c_w^2}{c_s^2} - 1 \right) \right] u^3 \\ &+ \left[\frac{c_w^2}{c_s^2} v^2 + \frac{c_w^2}{c_s^2} (H - z_i)^2 - v^2 - F^2 \right] u^2 \\ &- 2vF^2 u - F^2 v^2 = 0,\end{aligned}\quad (7)$$

从式 (7) 中解出 u , 即可计算出各阵元辐射声波的入射点位置, 将 $P(x_a, z_a)$ 带入式 (2) 可计算各阵元辐射声波传播到焦点 P 的声时, 进而可以计算出各阵元的延时。

由于声场只有在近场才能有效聚焦, 所以设定声束偏转 45° , 焦点深度为 10 mm, 采用表 1 中的参数进行计算。

表 1 计算所用相控阵探头和楔块、工件的参数

Table 1 Parameters of the phased array probe, wedge and work piece for use

探头		楔块		被检件	
名称	参数值	名称	参数值	名称	参数值
N	16	α_0	36.2°	c_{st}	3236 m/s
p	0.6 mm	H_0	5.36 mm	c_{sl}	5916 m/s
g	0.1 mm	c_w	2330 m/s	ρ_s	7800 kg/m ³
e	0.4 mm	Offset	$s_0 = 2.67$ mm		
w	10 mm	ρ_w	1180 kg/m ³		
焦点位置		在深度 10 mm 处偏转 45° 聚焦: $x_p = 19.76$, $F = 10$ mm, 焦点坐标为 $P(19.76, 16.93)$			

注: c 表示声速, 下标 w 表示楔块, s 表示待检工件, t 表示横波。 e 为晶片宽度, w 为晶片长度, g 为相邻晶片之间的间隙, ρ 为密度。

由表 1 数据计算 H :

$$H = H_0 + s_0 \sin \alpha_0, \quad (8)$$

所以 $H = 6.94$ mm。对于每个阵元, 方程 (7) 有四个解, 其中只有一个是符合要求的对应于入射点 A 的横坐标的解。如当 $i=6$ 时, 得到第 6 个阵元的辐射声波在检测面的入射位置的四个解为 $x_{a1} = -5.42$ mm、 $x_{a2} = (-2.08 + 1.45i)$ mm、 $x_{a3} = (-2.08 - 1.45i)$ mm、 $x_{a4} = 8.11$ mm、其中两个复根 x_{a2} 、 x_{a3} 为增根, 没有物理意义。另外还有一个根 $x_{a1} = -5.42$ mm 小于 $x_i = 2.42$ mm, 此为负折射对应的根, 只有 x_{a4} 为 A 点对应的横坐标, 将 $x_{a4} = 8.11$ mm 代入式 (2) 即可求出聚焦在 P 点时该探头中第 6 个阵元相对延时为 $0.327 \mu\text{s}$ (延时最小的阵元延时 0)。如此可以计算不同探头聚焦于不同点时各阵元的延时, 见表 2。

表 2 各阵元坐标、入射点横坐标、入射角、折射角和延时

Table 2 Coordinate, incident point abscissa, incident angle, refractive angle and delay time of elements

阵元 序号	x_i (mm)	z_i (mm)	x_a (mm)	入射角 ($^\circ$)	折射角 ($^\circ$)	延时 (μs)
1	0	0	5.13	36.5	55.6	0.357
2	0.484	-0.354	5.76	35.9	54.5	0.357
3	0.968	-0.709	6.37	35.2	53.2	0.354
4	1.45	-1.06	6.97	34.6	52.0	0.348
5	1.94	-1.42	7.54	33.9	50.7	0.339
6	2.42	-1.77	8.11	33.1	49.4	0.327
7	2.91	-2.13	8.65	32.4	48.0	0.311
8	3.39	-2.48	9.18	31.6	46.6	0.292
9	3.87	-2.83	9.68	30.7	45.2	0.269
10	4.36	-3.19	10.2	29.9	43.8	0.243
11	4.84	-3.54	10.7	29.0	42.3	0.213
12	5.33	-3.90	11.1	28.1	40.9	0.178
13	5.81	-4.25	11.6	27.2	39.4	0.140
14	6.29	-4.61	12.0	26.2	37.9	0.0977
15	6.78	-4.96	12.4	25.3	36.4	0.0510
16	7.26	-5.32	12.8	24.3	34.9	0

3 声场的仿真计算和实验测量

仿真计算辐射声场在待检测工件钢中聚焦, 探头和楔块的详细参数、工件参数和焦点位置见表 1, 由此计算各阵元的延时, 见表 2。

采用表 1 中的参数建立仿真模型, 将表 2 中的延时依次施加在相控阵探头各阵元上, 计算工件中的声场。计算中将声源表面离散成点声源, 计算区域离散成点阵, 相邻点间距离为 0.02 mm, 利用铅笔法半解析计算在设定延时下, 从探头各阵元发出的声波经过楔块、楔块-工件平面滑移接触面后进入待检测工件中, 在工件中各离散点的声压, 最后得到声场分布。忽略声波在传播过程中的衰减。由于在工件中声波的入射角大于第一临界角, 所以工件中只有模式转换横波, 仿真结果见图 2。由图 2 可见, 按照费马原理计算相控阵超声斜探头脉冲回波检测中探头各阵元延时, 并以该延时激励各阵元, 在工件中形成聚焦声场, 声束偏转 45°, 焦斑深度为 10 mm; 声场分布类似单探头聚焦换能器辐射声场, 有主瓣和旁瓣, 声能量主要集中在主瓣中, 旁瓣声能量较小; 其焦斑近似为椭圆形, 椭圆长轴沿声轴方向, 此处为声束偏转方向, 椭圆短轴垂直于声轴; 在椭圆形焦斑区域的一定范围内, 声压幅度差别不大, 所以在全矩阵聚焦相控超声检测中, 设置聚焦点密度达到一定程度将不能再提高成像分辨力; 远离焦斑后声波发散, 但仍有一定的方向性。该结果在物理上也是可以理解的。因为一维相控阵超声聚焦声场在原理上是通过声波干涉形成柱面波, 而线聚焦探头辐射声波也是形成柱面波, 在形成柱面波阵面以后, 波的传播特性就是一致的, 所以会出现一维相控阵聚焦声场分布类似于线聚焦超声探头辐射声场。

实验采用法国原子能委员会开发的设备 M2M 相控阵超声检测仪 (型号 Multi2000) 进行声场的激

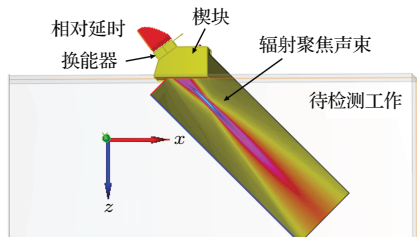


图 2 偏转 45° 聚焦深度 10 mm 声场仿真

Fig. 2 Phased array acoustic field simulation of 45° deflection and 10 mm depth focusing

发和回波接收。该设备允许用户自行输入各通道的延迟时间, 开放性好, 检测数据可以直接显示并存储在电脑中, 方便读出回波对应的反射体深度。相控阵超声探头和楔块由奥林巴斯公司提供, 其中探头型号为 5L16A10, 楔块型号为 SA10P-N55S, 检测试块为 B 型相控阵标准试块, 以图 3 中白色矩形框内斜排的横通孔为反射体, 横通孔直径 1.5 mm, 共 12 个, 从右向左编号分别为 1~12, 相关尺寸见图 4。以机油作耦合剂, 采用脉冲回波法, 前后反复平行于试块边缘移动探头找到最高波, 对应声轴上该深度处的相对声压。采用不同深度的孔进行实验测量, 得到各声轴上不同深度的相对声压, 见图 5 中的点, 其中曲线为仿真结果。由图 5 可见, 仿真和实验测量结果吻合, 声场在设定深度 10 mm 处声压最大, 而后声压随声程的增大逐渐减小。由仿真曲线还可以发现, 沿声轴方向, 声压先逐渐增大, 在焦点附近达到最大, 而后逐渐减小, 且在焦点附近, 声压分布较平稳。

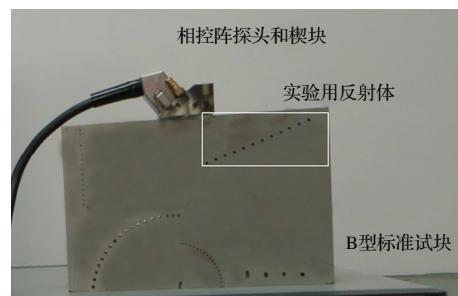


图 3 相控阵超声辐射聚焦偏转声场的测量装置

Fig. 3 Acoustic field experimental measurement instrument for phased array ultrasonic testing

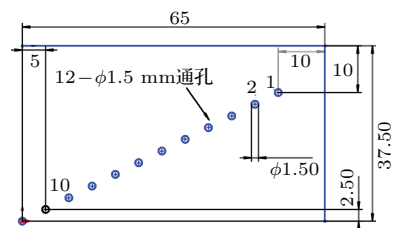


图 4 所用标准反射体位置和尺寸 (单位: mm)

Fig. 4 Position and size of standard reflections for use (unit: mm)

声场仿真和实际测量的误差主要来自于仿真和实验测量之间的输入信号和材料性质之间的差异。仿真采用连续波模型计算声场, 未考虑声能量在工件和楔块中的衰减, 给出的是指定位置处声压信号的相对值; 而实验依照 ASTM 2491 标准, 采用

脉冲回波法测量声轴上声压的分布, 得到结果为探头辐射声场经反射体反射后的回波的相对大小, 与反射体处声压分布有差异。

在仿真和实验过程中, 作了其它点如偏转角度 40° , 聚焦深度5 mm的聚焦研究分析, 与文中给出的结果类似, 只要在近场范围内, 声束都可以很好的聚焦在设定目标点; 仿真和测量基本吻合。

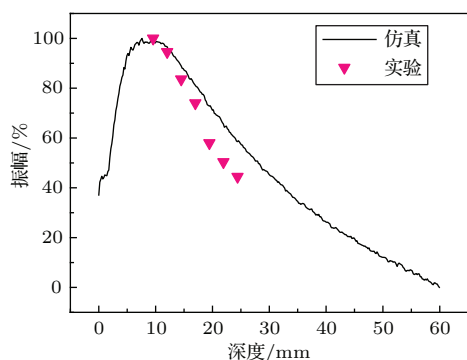


图5 45° 聚焦深度10 mm 声轴上声压分布

Fig. 5 Acoustic pressure distribution on acoustic axis for 45° deflection and 10 mm depth focusing

4 结论

本文针对相控阵超声聚焦脉冲横波检测中, 声束偏转聚焦时间延迟进行了理论和实验研究。采用费马原理推导了声波由阵元辐射到楔块中后经过楔块-工件平面接触界面后在工件中聚焦时各阵元的延时计算方法。设定聚焦点位置计算出各阵元延时, 将所计算得到的延时加载在各阵元上, 仿真计算和实验测量对应的声场, 发现声场可以很好地聚焦在指定位置。由于声场只能在近场有效聚焦, 所以, 当检测区域在近场范围内时, 楔块-工件界面为平面, 采用本文提出的延时法则的计算方法可以很好的计算相控阵超声斜入射聚焦脉冲横波检测中各阵元的延时。

参 考 文 献

- [1] 张迪, 吴先梅. 基于有限元的空耦超声相控阵 Lamb 波激发与检测[J]. 应用声学, 2015, 34(3): 201–206.
ZHANG Di, WU Xianmei. The numerical simulation of the excitation and detection of Lamb waves using air-coupled ultrasonic phased array with finite element method[J]. J. Appl. Acoust., 2015, 34(3): 201–206.
- [2] 彭小冲, 费跃农. 相控阵超声接收动态聚焦算法及其物理实现[J]. 应用声学, 2014, 33(5): 453–461.

- PENG Xiaochong, FEI Yuenong. Receiving dynamic depth focusing algorithm of phased array ultrasound imaging and its physical implementation scheme[J]. J. Appl. Acoust., 2014, 33(5): 453–461.
- [3] LONG R, RUSSELL J, CAWLEY P. Ultrasonic phased array inspection using full matrix capture[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(7): 380–385.
- [4] DRINKWATER B W, WILCOX P D. Ultrasonic arrays for non-destructive evaluation: A review[J]. NDT & E International, 2006, 39(7): 525–541.
- [5] HOSEINI M R, WANG X, ZUO M J. Modified relative arrival time technique for sizing inclined cracks[J]. Measurement, 2014, 50(50): 86–92.
- [6] 李锦, 林书玉. 平面相控阵的尺寸对声波聚焦效果的影响[J]. 应用声学, 2004, 23(3): 23–28.
LI Jin, LIN Shuyu. Influence of phased array element size on beam focusing behavior[J]. J. Appl. Acoust., 2004, 23(3): 23–28.
- [7] 李衍. 标准超声相控阵检测技术[J]. 无损探伤, 2011, 36(1): 43–49.
LI Yan. Standard ultrasonic phased array testing technique[J]. NDT, 2011, 36(1): 43–49.
- [8] 涂春磊, 邹建华, 强天鹏, 等. 对接焊缝相控阵超声检测可靠性的 CIVA 仿真与试验[J]. 无损检测, 2013, 35(11): 22–26.
TU Chunlei, ZOU Jianhua, QIANG Tianpeng, et al. Reliability analysis of phased array ultrasonic testing for butt weld by CIVA simulation and experiment[J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(11): 22–26.
- [9] 喻飞, 吴文焘, 李平. 楔块中脉冲声场及相控阵成像自检研究[J]. 应用声学, 2014, 33(6): 512–519.
YU Fei, WU Wentao, LI Ping. Ultrasonic field of pulse wave in wedge and self-checking for imaging by phased array[J]. J. Appl. Acoust., 2014, 33(6): 512–519.
- [10] 王常玺, 于朋, 刚铁, 等. 薄板焊缝检测的超声相控阵楔块设计[J]. 无损检测, 2014, 36(4): 72–78.
WANG Changxi, YU Peng, GANG Tie, et al. The design of ultrasonic phased array wedge for the inspection of thin metal plate[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(4): 72–78.
- [11] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D, et al. Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit–receive array data for non-destructive evaluation[J]. NDT & E International, 2005, 38(8): 701–711.
- [12] 周正干, 彭地, 李洋, 等. 相控阵超声检测技术中的全聚焦成像算法及其校准研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 89–95.
ZHOU Zhenggan, PENG Di, LI Yang, et al. Research on phased array ultrasonic total focusing method and its calibration[J]. J. Mech. Eng., 2013, 49(6): 89–95.
- [13] 谈洋. 超声相控阵裂纹定量检测有限差分法数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [14] 孙芳, 曾周末, 王晓媛, 等. 界面条件下线型超声相控阵声场特性研究[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 094301–1–094301–6.

- SUN Fang, ZENG Zhoumo, WANG Xiaoyuan, et al. Acoustic field characteristics of ultrasonic linear phased array for an interface condition[J]. Acta Phys. Sin., 2011, 60(9): 094301-1-094301-6.
- [15] XU N, ZHOU Z. Numerical simulation and experiment for inspection of corner-shaped components using ultrasonic phased array[J]. NDT & E International, 2014, 63(4): 28-34.
- [16] 徐娜, 周正干, 刘卫平, 等. L 型构件 R 区的超声相控阵检测方法研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(2): 419-425.
- XU Na, ZHOU Zhenggan, LIU Weiping, et al. Ultrasonic phased array in inspection method for the corner of L-shaped components[J]. J. Aeronaut., 2013, 34(2): 419-425.
- [17] SHIH J L, WU K T, JEN C K, et al. Applications of flexible ultrasonic transducer array for defect detection at 150°C[J]. Sensors, 2013, 13(1): 975-983.