

基于几种超声压电晶片阵列的金属板缺陷成像

袁 魁^{1,2}, 沈希忠²

(1. 上海海事大学 物流工程学院, 上海 201306;
2. 上海应用技术学院 电气与电子工程学院, 上海 201418)

摘要:结合椭圆定位方法, 分别采用了线型、十字型和时钟型超声压电晶片阵列对金属薄板中缺陷进行成像识别。根据 Lamb 波在薄板中的传播分析, 选取激励信号及其参数, 构建超声信号检测模型。依据椭圆轨迹原理进行成像, 判断薄板中有无缺陷存在。通过压电陶瓷晶片加载脉冲激励信号, 分别对三种情况进行数据处理并成像。结果证明十字型和时钟型阵列能有效地对缺陷成像, 并避免了成像过程中的虚像。

关键词:Lamb 波检测; 缺陷识别; 超声成像; 阵列技术; 虚像

中图分类号: TG115.28; TB553 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2013)03-0001-04

The Imaging of Plate Defect Based on Several Ultrasonic Piezoelectirc Arrays

YUAN Kui^{1,2}, SHEN Xi-Zhong¹

(1. College of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;
2. School of Electrical and Electronic Engingeering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: In the paper, ultrasonic linear array, cross array and clock-type array are used to image for defects of a thin plate with elliptical location method. According to Lamb wave propagation in the plate, the excitation signal and its parameters are selected and a model of ultrasonic signal detection is built up. Imaging is made based on the principle of elliptical trajectory and whether defects exist in the plate was determined. Excitation signal is generated by the piezoelectric ceramic wafer. Above-mentioned three kinds of arrays are used to acquire signals, which are then processed and imaged. The results show that it is effective to use cross array and clock-type array to do defect imaging and remove the effect of ghost generated in the process of imaging.

Keywords: Lamb detecting; Defect recognition; Ultrasonic imaging; Array technology; Ghost

随着现代工业的快速发展, 金属板结构已广泛应用于航空航天、船舶、轨道交通、汽车、家用电器等多个领域。金属板材在生产和使用的过程中, 由于外界环境的作用或过度疲劳使用等原因, 会使得结构表面或内部形成缺陷。而缺陷的存在会对设备的安全运行产生潜在的危害, 如不及时发现和处理可能会造成无法挽回的损失。

在薄板结构的缺陷检测中, Lamb 波因其自身特点被广泛应用于缺陷识别^[1-4], 特别是薄板结构的表面缺陷探伤。近年来, 在板结构的健康监测中,

结合传感器阵列的 Lamb 波检测方法成为了人们的研究热点。Bao^[5]采用压电相控阵列, 通过产生虚拟扫描光束和离线信号聚焦对铝板进行二维扫描。Malinowski 等人^[6]采用星形阵列通过数值模拟研究了缺陷识别方法。Wilcox^[7]研究了圆形阵列和圆环阵列对板结构的检测, 并分析了两种阵列的优缺点。彭海阔等人^[8]采用十字形传感器阵列基于相控阵原理对板结构缺陷识别方法进行了研究。这些研究促进了阵列技术在板结构健康监测中的发展。

笔者首先分析了线型阵列成像过程中可能出现的虚像现象, 虚像的存在会影响缺陷定位。根据线型阵列的这一不足, 采用了十字型阵列和时钟型阵列进行检测。对线型、十字型和时钟型阵列识别缺陷的情况进行仿真成像。结果证明, 十字型和时钟

收稿日期: 2012-02-27

基金项目: 铁道部科技研究开发计划资助项目(2011J011-E)

作者简介: 袁 魁(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超声检测成像。

型阵列能消除虚像干扰,有效地定位缺陷。

1 缺陷定位

在板结构中激发 Lamb 波,Lamb 波在传播过程中遇到缺陷或棱边等不连续处时都会发生反射或散射。在板上布置一些传感器接收信号,可以根据接收信号的时间来判断缺陷存在的位置。设薄板上存在一处缺陷,发射传感器与接收传感器间的直线距离为 d ,两传感器与损伤处的距离分别为 l_1 和 l_2 。当发射传感器发射信号后,接收传感器将先后接收到由发射传感器直接传播来的信号 $r_1(t)$ 和经缺陷处反射回来的回波信号 $r_2(t)$:

$$r_1(t) = \alpha s \left(t - \frac{d}{c} \right) \quad (1)$$

$$r_2(t) = \beta s \left(t - \frac{l_1 + l_2}{c} \right) \quad (2)$$

式中: α 为波的衰减系数; $s(t-d/c)$ 为传感器发射的信号; β 为波在损伤处的反射系数; c 为波的传播速度。

此外,接收传感器还会接收到由板结构棱边发射回来的信号等。在这些信号中,笔者最关心的是经损伤反射回来的回波信号,因此需要提取出回波信号并确定信号的延迟时间 τ 。

确定信号的延迟时间 τ 后,在波速 c 不变时,可得发射信号经损伤处反射路径的长度:

$$l_1 + l_2 = c\tau \quad (3)$$

对于某个缺陷相对传感器来说, τ 为一个固定值,因此可以认为缺陷在以这两个传感器为焦点,与两焦点的距离和为 $l_1 + l_2$ 的椭圆轨迹上。因此,采用在板结构上布置十字型阵列和时钟型阵列,结合椭圆定位方法进行超声成像,并对两种阵列的成像效果进行比较。

2 压电晶片阵列分布对成像的影响

2.1 线型阵列

将压电晶片沿直线排列,其中 T 作发射探头,R1 至 R4 作接收探头。将 T 与 R1 至 R4 两两配对作为椭圆焦点,根据椭圆方程组式(4),绘制椭圆曲线。

$$\frac{(x - c_i)^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} = 1 \quad (i = 1, \dots, 4) \quad (4)$$

式中: a, b, c 分别为椭圆曲线的长轴、短轴和焦距。

图 1 中 4 个椭圆曲线相交于 A,B 两点,在只存在一处缺陷的情况下,其中一点为缺陷位置,另一点则为虚假成像。对于平面上一点,若经过它的椭圆

曲线条数越多,则其成像效果越好。用穿过缺陷点椭圆曲线的条数来表示缺陷点处的成像亮度。如图 1 中穿过 A,B 点的椭圆曲线条数均为 4,则令 A,B 点处的亮度值分别为 $L_A = 4, L_B = 4$ 。可以得出,虚像处的成像亮度值等于缺陷处的成像亮度值,虚像给缺陷位置的判断带来了很大的影响,笔者无法得出正确的缺陷位置。因此,线型阵列只适合于已知区域的单边缺陷定位。

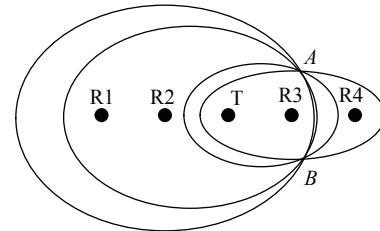


图 1 线型压电晶片阵列的成像椭圆轨迹图

2.2 平面阵列

对于平面阵列,考虑十字型和时钟型两种阵列。

2.2.1 十字型阵列

将压电晶片沿水平和垂直方向作十字型排列,如图 2 所示。其中压电片 T 作发射,其余 8 个压电片均作接收。根据椭圆方程组式(5),绘制椭圆曲线。

$$\begin{cases} \frac{(x - c_i)^2}{a_i^2} + \frac{y^2}{b_i^2} = 1 & (i = 1, \dots, 4) \\ \frac{(y - c_i)^2}{a_i^2} + \frac{x^2}{b_i^2} = 1 & (i = 5, \dots, 8) \end{cases} \quad (5)$$

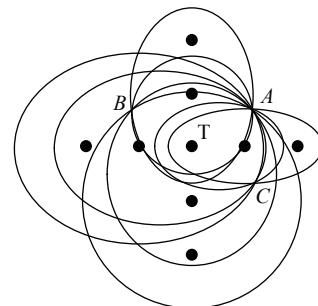


图 2 十字型压电晶片阵列的成像椭圆轨迹图

图 2 中有 8 条椭圆曲线,其中有 A,B,C 三点穿过的曲线条数为 2 条以上,其他点则均为 2 条,三点的成像亮度值分别为 $L_A = 8, L_B = 4, L_C = 4$,A 点的成像亮度最大,可以认为 A 点即为缺陷点。可以看出,采用十字型阵列可以突出缺陷点,淡化虚像点,从而减小了虚像点对缺陷点的干扰。

2.2.2 时钟型阵列

将压电晶片作时钟型排列,如图 3 所示。其中

压电片 T 作发射晶片,其他压电片均作接收晶片。根据椭圆方程式(6),绘制椭圆曲线。

$$\begin{cases} x = a_i \cos \theta_i + c_i \\ y = b_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (i = 1, \dots, 12) \quad (6)$$

式中: θ 为长轴与水平轴间的夹角。

图 3 中有 12 条椭圆曲线,其中只有 A 点穿过的曲线条数达到了 12 条,其他点则均为 2 条,A 点的成像亮度值最大,可认定为缺陷点。可以看出,采用时钟型阵列已经彻底消除了虚像的影响,能准确地定位缺陷点。

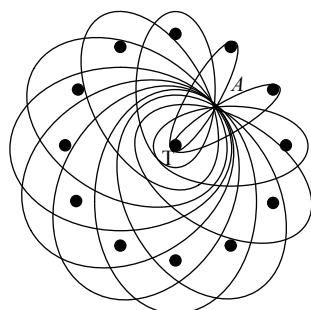


图 3 时钟型压电晶片阵列的成像椭圆轨迹图

3 仿真成像与分析

对薄板结构探伤中,采用压电陶瓷晶片激发 Lamb 波。采用窄带调制正弦信号作为激励信号,关系式如下表示^[9]:

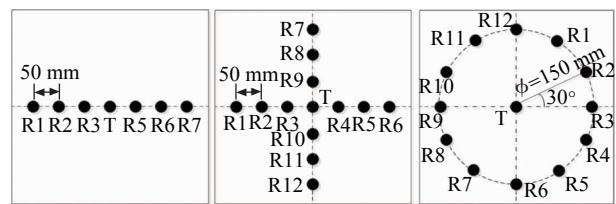
$$s(t) = A \left[H(t) - H\left(t - \frac{n}{f_c}\right) \right] \cdot \left(1 - \cos \frac{2\pi f_c t}{n} \right) \sin \frac{2\pi f_c t}{n} \quad (7)$$

式中: A 为调制信号的幅度, $A=5$; f_c 为信号的中心频率, $f_c=5$ MHz; n 为信号的周数; H 为 Heaviside 阶梯函数。

Lamb 波在板结构中的传播速度不仅与材料密度、弹性常数有关,同时还受板厚和 Lamb 波频率的

影响。不同频率的激励信号,其所激发出的 Lamb 波的传播模式各异,模式越多则信号分析处理的难度就越大。由于在同一频率下各模式的传播特性不相同,因此实际应用中可通过采用特定的激励方式来得到单一模式。入射角的改变在板中也会得到不同模式的 Lamb 波,采用垂直入射的方式,能使得 Lamb 波表现为单一的基础阶反对称模式(A_0 模式)^[10]。因此,采用压电陶瓷晶片垂直入射薄板。

分别采集板中无缺陷和有缺陷时的响应信号,求二者响应差即得缺陷回波信号。有信号峰值对应的时刻确定延迟时间,再根据椭圆方法进行定位成像。采用的研究对象为金属铝薄板,尺寸为 500 mm \times 500 mm \times 2.5 mm(长 \times 宽 \times 厚)。采用的线型、十字型和时钟型压电晶片阵列,如图 4。



(a) 线型 (b) 十字型 (c) 时钟型

图 4 几种超声压电阵列结构图

仿真中缺陷位置对应坐标为(350,400),三种阵列的成像情况如图 5 所示。采用线型阵列会出现一个缺陷虚像,对识别造成很大的干扰,不能判断出缺陷的位置。十字型阵列可以淡化虚像,突出缺陷位置。得到的缺陷点与实际情况相符,但图中仍有两个点亮度较大。采用时钟型阵列,椭圆阵列成像曲线均匀,彻底消除了虚像的影响。

选取 4 个不同点处的缺陷,采用时钟型阵列检测,分析检测结果误差,结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看出,检测结果的横、纵向偏差均在 10 mm 以内,能较准确地逼近实际位置。同时,

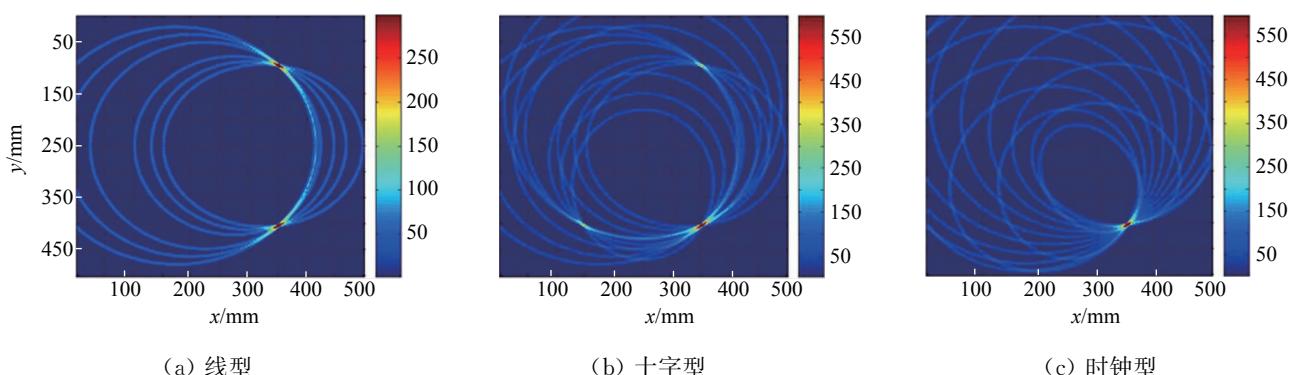


图 5 线型、十字型和时钟型压电晶片阵列成像比较

表 1 检测结果误差分析

实际位置	检测位置	横向偏差	纵向偏差	mm
(350,400)	(351,406)	1	6	
(300,280)	(305,283)	5	3	
(250,50)	(250,48)	0	2	
(100,250)	(95,253)	5	3	

通过增减压电晶片数量,可以减小误差,提高精度,但当增加到一定数量时,精度的提高将不再明显。

4 结论

将压电晶片传感器线型排列时,会产生虚像,对金属板缺陷位置的判断造成影响;而采用十字型阵列和时钟型阵列则能避免虚像影响,从图像中能够有效识别薄板中的缺陷,并且时钟型阵列的检测结果更为清晰。

参考文献:

- [1] NG C T, VEIDT M. A Lamb-wave-based technique for damage detection in composite laminates[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(7): 1–12.
- [2] BINGHAMA J, HINDERSA M, FRIEDMAN A. Lamb wave detection of limpet mines on ship hulls[J]. Ultrasonics, 2009, 49(8): 706–722.
- [3] FUKUDA M, IMANO K, YAMAGISHI H, et al. Detection of the second harmonics of Lamb waves in fatigued magnesium plates[J]. Acoustical Science and Technology, 2011, 32(6): 271–275.
- [4] JEONG H, LEE J S, BAE S M. Defect detection and localization in plates using a lamb wave time reversal technique[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(3): 427–434.
- [5] BAO J J. Lamb Wave Generation and Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors [D]. Columbia, US: University of South Carolina, 2003.
- [6] MALINOWSKI P, WANDOWSKI T, TRENDAFILOVA I, et al. A phased array-based method for damage detection and localization in thin plates [J]. Structural Health Monitoring, 2009, 8(1): 5–15.
- [7] WILCOX P D. Omni-directional guided wave transducer arrays for the rapid inspection of large areas of plate structures[J]. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on, 2003, 50(6): 699–709.
- [8] 彭海阔,孟光,李富才.一种基于压电晶片阵列的板结构损伤识别方法[J].振动与冲击,2009,28(9):56–59.
- [9] 袁慎芳.结构健康监控[M].北京:国防工业出版社,2007.
- [10] SU Z, YE L, LU Y. Guided lamb waves for identification of damage in composite structures: a review [J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 295: 753–780.

2013 年 ASNT Ⅲ 级培训班通知

经与美国无损检测学会(ASNT)商定,中国机械工程学会无损检测分会将于 2013 年 9 月 10—12 日在学会秘书处所在地,上海市辉河路 100 号 3 号楼 6 楼,举办 2013 年 ASNT Ⅲ 级考试班。

为了给学员一个学习消化的过程,中国机械工程学会无损检测分会决定于 2013 年 8 月 20 日—9 月 1 日在学会秘书处举办 ASNT Ⅲ 级培训班。时间安排如下:

- 8月19日 报到
- 8月20—22日 基础
- 8月23—25日 UT
- 8月26—28日 RT
- 8月29—30日 MT
- 8月31日—9月1日 PT

培训费用:每项方法 800 元/考卷,含资料费。学员的食宿费自理,可要求学会秘书处提供就近的食宿信息。

联系人:朱亚青,王莹赟;
地址:上海市辉河路 100 号 6 楼;
邮编:200437。
电话/传真:021-65550277, 55057699;
手机:朱亚青 13601691591,
王莹赟 13817155883;
E-mail: chsndt@sh163.net,
chsndt2008@163.com。

请学员随时关注网站上(www.chsndt.com)的课程时间变化,以最新信息为准。

(中国机械工程学会无损检测分会)