

圆柱体内缺陷重构的误差分析及校正方法^①

刘藺慧, 陈友兴, 王召巴

(中北大学 信息与通信工程学院, 太原 030051)

摘要: 本文针对圆柱体构件超声检测, 利用轮廓线法作出了缺陷定位图, 通过分析发现了轮廓线法重构圆柱体构件气孔缺陷误差产生是受定位偏角的影响, 并用 PZFlex 超声有限元软件仿真了缺陷回波信号, 验证了实验结论, 并分析了缺陷位置、大小和信号衰减对定位偏角的影响, 为进一步缺陷边界重构奠定了基础。

关键词: 缺陷重构; 圆柱体; 超声检测; PZFlex 仿真

Error Analysis and Correction Method of Defects Reconstruction in Cylindrical Object

LIU Lin-Hui, CHEN You-Xing, WANG Zhao-Ba

(College of Information & Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: This paper makes defect location maps for cylinder component ultrasonic testing by using Contour Method and finds that the generation of error of Contour Method for porosity defects reconstruction in cylindrical member is affected by the positioning angle. The experimental results are verified with flaw echo signal which is simulated by finite element software of PZFlex. The influence of the defect location, size and signal attenuation for the positioning angle is analyzed, which lays a foundation for further defect boundary reconstruction.

Key words: defect reconstruction; cylindrical object; ultrasonic testing; PZFlex simulation

圆柱体工件广泛应用于航天航空、国防军工等领域, 如飞机发动机, 子弹的弹体, 航天飞行器部件等. 这些圆柱体工件在生产加工过程中, 由于多种原因, 物体内部或表面会产生不同程度的缺陷, 这些缺陷常常会降低产品的使用效果. 因此, 对其内部进行缺陷检测是至关重要并且不可缺少的环节^[1,2]. 超声检测是一种常用的无损检测方法.

随着检测技术的发展, 定性检测已经不能满足要求, 定量检测成为了检测的重要环节, 对缺陷的重构方法的研究成为国内外缺陷检测技术的研究热点^[3,4]. born 近似和 Kirchhoff 近似法是一种线性化重构方法, 可以对方形孔、槽型、圆形孔的缺陷模型进行重构^[5-7], 从机理上看上述方法只适用于规则形状(如圆或方形)的缺陷, 近年来对该方法研究较少. k-wave 是一种比较新的仿真重构方法^[8], 但是该方法要求一个圆周方向都有回波信号, 如果信号少了就重构不出来; 国外近

几年关于柱状体重构方面检测报道相对较少, 主要集中在声场和传播特性分析^[9-11]; 虽然医学超声重构方法比较成熟, 但是医学设备成本较高, 且医学超声成像也存在不易进行缺陷边界确定的问题^[12,13]; 边界轮廓线法是一种有效的超声检测重构方法, 能够实现实际任意形状缺陷的重构, 本课题组顾雯琪运用此方法实现了镁合金构件的偏心孔缺陷三维重构^[14], 但是存在一定误差.

本文分析了轮廓线法重构产生的原因及其校正办法, 并通过实验数据进行了验证; 为了更加全面的分析不同缺陷情况和避免实验中不确定因素、噪声等的影响, 本文采用超声仿真软件 PZFlex 进行缺陷回波的仿真, 针对不同大小、不同位置的圆形缺陷进行了分析, 结果说明本文所揭示规律和校正方法的正确性. 本文的研究为下一步任意形状缺陷的研究奠定了基础.

^① 基金项目:国家自然科学基金(61201412)

收稿时间:2016-06-07;收到修改稿时间:2016-08-08 [doi: 10.15888/j.cnki.csa.005631]

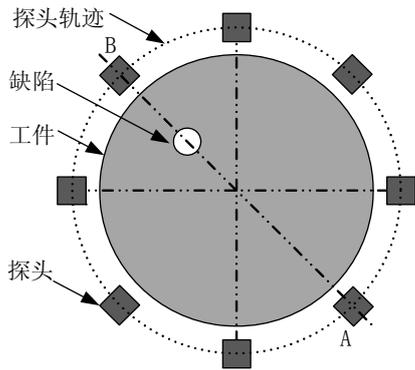
1 检测原理和方法

1.1 检测原理

采用本实验室自行研制的超声自动检测系统^[15]对圆柱体构件进行检测. 如图 1(a)所示, 对工件的扫描方式采用单截面扫描, 即柱状体工件绕轴以一定转速旋转, 工件旋转一周, 探头沿轴向移动一个步长. 图 1(b)是将工件作为参考物, 工件某截面的检测示意图. 每个位置都可以得到如图 2 所示典型回波信号.



(a)超声检测系统



(b)工件截面图

图 1 工件检测系统示意图

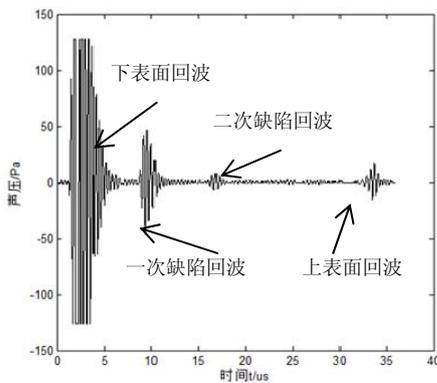


图 2 典型回波信号

利用工件旋转一周采集到的回波信号进行缺陷定

位. 构件内的缺陷点位置可用极坐标 (ρ, θ) 表示, 其中 ρ 表示缺陷点距离圆心的距离, θ 为缺陷点在极坐标的圆心角. 缺陷位置与圆心的距离:

$$\rho = R - l \tag{1}$$

其中 R 为构件截面的半径. l 由下式算出:

$$l = \frac{\Delta t}{2} c \tag{2}$$

其中 c 为声速, Δt 为缺陷回波和下表面回波的时间差. 电机控制构件匀速转动, 探头对一圈采集的总位置数是 N , 则:

$$\theta = \frac{n}{N} 2\pi \tag{3}$$

其中, n 是第 n 个检测位置.

定位结果如图 3 所示, 可以看到误差较大. 以工件旋转 30 度时为例, 探头发射超声是有一定发散角的, 图 3 中阴影所示, 定位点不一定在中心声线 OA 上也可能在其他声束范围内的其他声线如 OB 上. 所以上文所述的圆心角 θ 的计算方法会导致很大的误差.

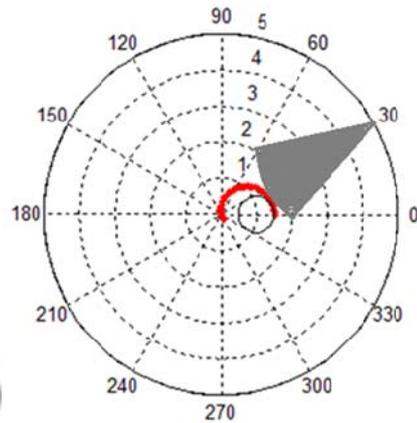


图 3 定位结果图

1.2 定位误差分析

下面以一个定位点来具体说明误差的产生. 如图 4 所示, 根据上述定位方法得到的缺陷点为中心声线 OC 上离 C 点距离为 l 的 A 点, 而声波是有扩散角的, 实际上该角度的探测点可能不在 OC 上. 以 C 点为圆心, 以 l 为半径画圆弧, 根据 1.1 节定位原理, 缺陷点必然在该圆弧上, 应该是圆弧与缺陷的交点 B .

利用实验采集的回波数据, 计算出对应的 l , 然后画出对应的圆弧. 如图 5 所示, 每个小图对应一个旋转角度, 图中列出了工件旋转 0 度到 5 度的情况, 可以看到圆弧都和气孔圆相切. 经实验, 工件旋转任意角

度, 均是上述情形. 那么切点就是圆弧与气孔圆的交点, 即定位点. 如果能确定各个切点的位置, 那么就可以重构出缺陷二维边界. 故需要研究不同大小和位置的气孔缺陷是否都是上述情形和切点的确定方法. 缺陷回波时间是很关键的, 如果错误或者误差较大势必会影响规律的研究, 噪声或者不确定因素会影响缺陷回波时间的准确确定, 影响规律的总结, 所以本文利用 PZFlex 仿真软件来仿真不同缺陷的回波信号, 进行研究.

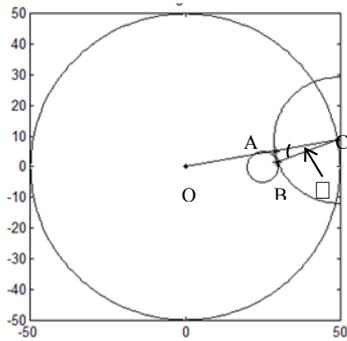


图 4 单个点定位结果图

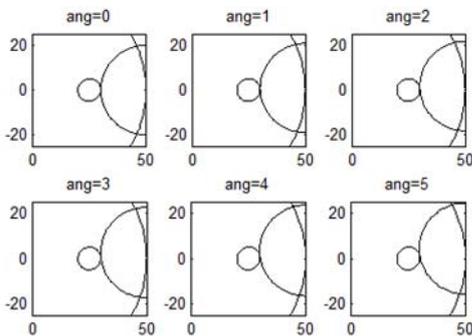


图 5 0 度-5 度定位结果图

2 基于PZFlex的超声仿真技术

2.1 PZFlex 仿真模型

PZFlex 是用于超声领域的有限元仿真软件. PZFlex 在超声领域拥有广泛的应用, 比如超声换能器设计、声/电阻抗匹配和各种参数优化, 以及超声波传播模拟、无损检测缺陷评估、测量结果量化与校准和成像模拟等. 本文选择铝质圆柱体构件, 在 PZFlex 中建立二维仿真模型, 如图 6 所示.

图中圆柱截面半径 50mm, 气孔半径 2mm, 孔, 气孔圆心距截面圆心 25mm, 材料属性如表 1 所示.

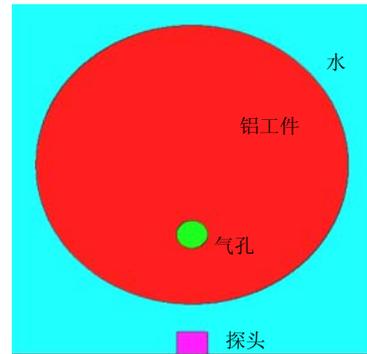


图 6 仿真模型图

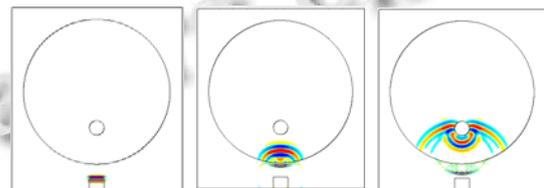
表 1 材料属性表

材料	水	铝	空气
密度/ $kg \cdot m^{-3}$	1000	2690	1.24
声速/ $m \cdot s^{-1}$	1496	6320	343

综合考虑计算精度和计算时间, 设置合适的网格大小和求解步长.

2.2 声波传播过程分析

图 7 为探头发射和接收超声波的过程, 图 7(a)探头发射出超声波, 当传播到水和工件下表面处时, 如图 7(b)所示, 可以看出透射声压大于反射声压, 说明少部分发生反射, 大部分传播到工件中, 说明水耦合效果良好. 当声波传到气孔位置处, 如图 7(c)所示, 声波发生反射, 传播到探头, 就会出现缺陷回波.



(a)探头发射超声波(b)下表面反射波(c)气孔反射波

图 7 声波传播过程图

2.3 仿真结果与实验结果对比

为了验证仿真的正确性, 建立与实验工件相同尺寸的仿真模型. 仿真回波如图 8 所示. 与图 2 实验回波图进行对比, 可以看到仿真回波和实验回波在时域特征上完全一样.

根据检测原理, 设定工件每转一度探头采集一次数据, 从探头正对缺陷开始检测, 共采集 360 组回波数据. 取每组回波的一次缺陷回波的幅值, 画出一组缺陷回波幅值随角度的变换曲线(回波数据进行了归

一化处理). 实验数据和仿真数据得到的曲线图如图 9 所示. 可以看到两条曲线变换趋势一样, 都是 0 度时幅值最大, 然后逐渐减小, 接近 180 度时幅值逐渐增大, 180 度时又达到一个峰值, 但是比 0 度幅值小. 仿真数据曲线变化比实验数据平缓, 主要是因为仿真探头发射声波的辐射范围比实验探头大, 探头偏离缺陷很远时仍能采集到缺陷回波, 而实验中采集不到. 重构利用的是幅值较大的信号, 这部分信号仿真数据和实验数据相差很小.

综上可以说明 PZFlex 仿真数据可以用来代替实验数据进行分析.

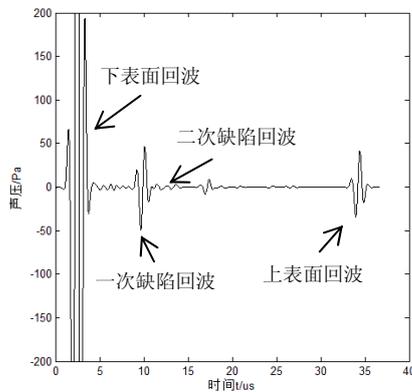


图 8 仿真信号回波图

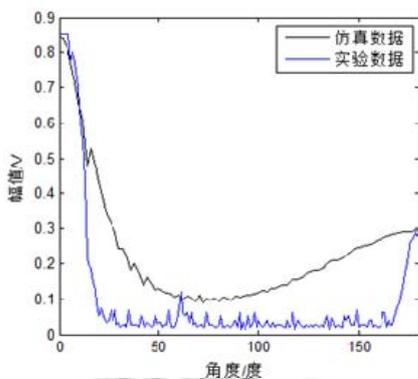


图 9 仿真幅值变化与实验幅值变化对比图

3 缺陷重构误差分析

3.1 缺陷重构误差产生原因分析

利用 PZFlex 软件, 仿真气孔位置不同(即改变气孔圆心距工件圆心的距离)和气孔大小不同的回波信号, 进行第 1.2 节所述实验, 圆弧和气孔都是相切的. 由此可以验证 1.2 所得的结论, 即圆弧和气孔圆的切点即为对应的定位点. 图 11 是利用切点绘出的缺陷边界, 可以看到重构效果良好. 下面研究切点的确定方法.

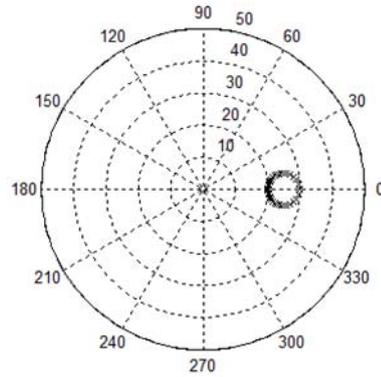


图 11 缺陷重构图

如图 2 中, B 为上述切点. 在定位过程中如果能够确定偏角, 即入射声线 OC 与定位声线 BC 的夹角(本文定义该角为定位偏角 α), 那么就可以确定定位点, 实现缺陷边界重构. 下面将研究 α 的影响因素.

3.2 定位偏角的影响因素

3.2.1 定位偏角与缺陷位置的关系

图 12 是分别距离工件圆心 5mm, 10 mm, 15mm, 20mm, 25mm 缺陷的定位偏角随转角的变化规律. 可以看到, 定位偏角与转角呈线性关系, 且缺陷离中心越远, 斜率越大, 定位偏角随转角变化越大.

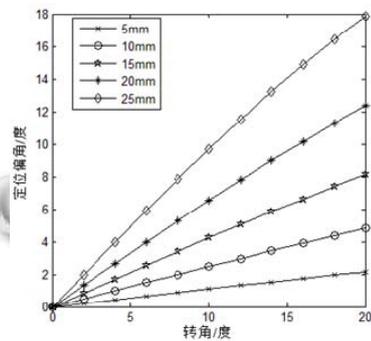


图 12 定位偏角与缺陷位置关系图

3.2.2 定位偏角与缺陷的大小关系

图 13 是距离工件圆心 25mm, 半径分别是 2mm 和 5mm 的缺陷的定位偏角随转角变换规律. 可以看到两条曲线是重合的. 说明缺陷大小对定位偏角没有影响.

3.2.3 定位偏角与信号衰减的关系

图 14 中三个大小相同的气孔圆均与弧线相切, 即到探头距离相等, 但是定位偏角不同, 那么对应的回波信号特征必然是不完全相同的. 下面分别仿真与探头距离相同, 定位偏角为 0 度到 20 度气孔缺陷的回波信号, 来研究定位偏角与回波信号特征的关系.

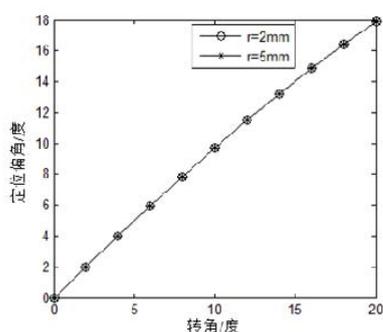


图13 定位偏角与缺陷大小关系图

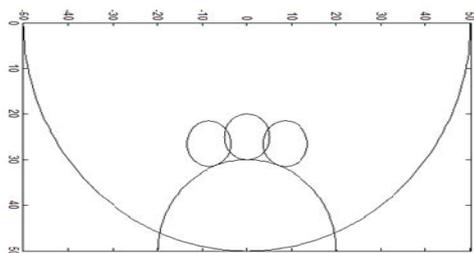


图14 同距离缺陷分布图

计算出每个回波信号中，一次缺陷回波相对始波的衰减，用 η 表示. 图15为定位偏角随衰减量的变换曲线，从左到右对应的 l 依次为 40mm, 35mm, 30mm, 25mm, 20mm. 可以看出，信号衰减越大，定位偏角越大，且 l 不同时，定位偏角随衰减量的变化趋势相同.

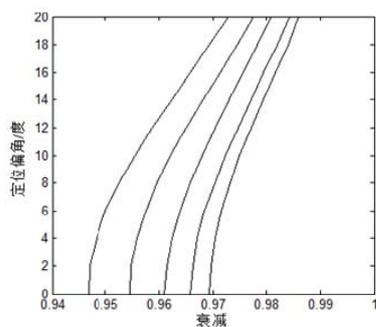


图15 定位偏角与衰减关系图

4 结语

本文通过对实验数据和仿真数据的分析，得出利用轮廓线法重构圆柱体构件缺陷误差产生的原因是定位偏角的计算不准确，如果能正确计算定位偏角，就能确定定位点，进而实现缺陷二维重构. 定位偏角是随转角的变化而变化的，变化关系与缺陷位置有关，与缺陷大小无关；定位偏角也随信号衰减量的变化而变化. 本文研究了定位偏角的影响因素，为圆形缺陷重构奠定了基础.

参考文献

- 1 陈友兴,吴其洲,赵建辉,王召巴,石兵华,刘洋帆.合金火箭弹弹体缺陷超声自动检测及信号处理.固体火箭技术,2013,36(5): 706-710.
- 2 李雄兵.曲面构件自动超声检测中若干关键问题的研究[硕士学位论文].杭州:浙江大学,2007.
- 3 郑钢丰.柱状杆结构中的逆散射理论与缺陷形状重构.合肥:中国科学技术大学出版社,2011.
- 4 孟凡凯.水下超声波检测声场数值模拟与实验分析[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- 5 冯文杰,邹振祝.二维时域 Born 近似.工程力学,1999,16(7): 17-20.
- 6 吴斌,郑钢丰,何存富.用 Kirchhoff 近似法对杆中球型缺陷的重构.应用基础与工程科学学报,2007,15(1):97-103.
- 7 吴斌,郑钢丰,何存富.用二维逆 born 近似法对杆中方形缺陷的重构.北京工业大学学报,2007,33(3):229-234.
- 8 Treeby BE, Cox BT. K-wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields. Journal of Biomedical Optics, 2010, 15(2): 021314(1-12).
- 9 Yoshihiro N, Takayuki S, Katsumi F, Masatoshi F. Study of image reconstruction by UT probe array using truncated singular value decomposition. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2014, 45(1): 21-26.
- 10 Brigante M. Numerical algorithm for defect reconstruction in elastic media with a circular ultrasonic scanning. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2013, 37(3): 551-557.
- 11 Guarneri GA, Pipa DR, Junior FN, de Arruda LV, Zibetti MV. A sparse reconstruction algorithm for ultrasonic images in nondestructive testing. Sensors, 2015, 15(4): 9324-9343.
- 12 Li DW, Li HS, Wan HL, Chen JH, Gong GZ, Wang HJ, Wang LM, Yin Y. Multiscale registration of medical images based on edge preserving scale space with application in image-guided radiation therapy. Physics in Medicine and Biology, 2012, 57(16): 51-87.
- 13 Wen QN, Wan SR, Liu ZL, Xu S, Wang HR, Yang B. Ultrasound contrast agents and ultrasound molecular imaging. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2014, 14(1): 190-209.
- 14 顾雯琪,王召巴,陈友兴.基于轮廓线法的镁合金构件内缺陷三维反演方法研究.科学技术与工程,2014,14(30): 206-208.
- 15 陈自立,陈友兴.圆锥形物体超声自动检测系统设计.计算机测量与控制,2013,21(11):2947-2949.