DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2022.06.006

铁道机车车辆

基于全聚焦技术的高速列车空心车轴疲劳裂纹量化检测研究

黄永聪[1]，赵梦林[2]，谭远浩[3]

（1.国能新朔铁路有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 010318；
2.北京主导时代科技有限公司，北京 100070；
3.西南交通大学 物理科学与技术学院，四川 成都 610031）

摘 要：空心车轴是高速列车重要的组成部分，目前主要使用常规超声技术从内孔面检测空心车轴外表面的横向疲劳裂纹，以保障高速列车运行安全。但使用常规超声技术无法实现疲劳裂纹的量化检测，从而无法评估空心车轴下次探伤周期，为列车安全留下隐患。文章研究了双层介质下超声最短传播路径的几何模型，结合Snell定律和Ferrari方法，计算出超声波束在双层介质交界面处的入射点位置，从而实现双层介质中的全聚焦方法成像。试验结果表明，该方法可以提供线性界面入射点坐标的精确解，并且可以准确地重建疲劳裂纹图像。通过增加路径计算和波形转换状态的二次反射来改进模型，可以实现空心车轴的真实裂缝量化成像。试验结果可以清楚地显示裂纹的形状和生长趋势，但裂纹尖端的漫反射现象仍会对裂纹的定量分析产生一定影响。

关键词：高速列车；空心车轴；疲劳裂纹；全聚焦技术；双层介质成像；Snell定律

中图分类号：U292.91^{+}4；U270.331^{+}.1　　**文献标识码：**A

文章编号：1000-128X(2022)06-0039-05

Study on quantitative detection of fatigue cracks for hollow axles on high-speed trains by the total focus method

HUANG Yongcong[1], ZHAO Menglin[2], TAN Yuanhao[3]

(1. CHN Energy Xinshuo Railway Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010318, China;
2. Beijing Leading Times Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China;
3. School of Physics Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Among the important components on high-speed trains, hollow axles are detected from the inner bore surface for transverse fatigue cracks on the outer surface by the conventional ultrasonic technique, as a measure to ensure the operation safety of high-speed trains. However fatigue cracks cannot be quantified by this conventional technique, making it impossible to identify the next detection cycle of the hollow axle, leaving a safety loophole for the trains. In this study, the shortest path of ultrasonic propagation through the double-layer media was geometrically modeled. Applying the Snell's law and Ferrari's method, the position was calculated for the incident point of the ultrasonic beam on the interface plane, to enable imaging in the double-layer media by the total focusing method (TFM). According to the study results, this method can generate the exact solution of the coordinates at the incident point on a linear interface and accurately reconstruct the fatigue crack images. The model improved with additional path calculation and secondary reflection of waveform conversion status, can achieve the real crack quantitative imaging of hollow axles. The results clearly presented the

收稿日期：2021-01-13
基金项目：中央高校基本科研业务费专项资助项目（61771409）
通信作者：赵梦林（1989—），男，硕士，工程师，主要研究方向为铁路无损检测；E-mail: 476592329@qq.com

shape and development tendency of cracks, but the diffuse reflection at the crack tip will cause a certain impact on the quantitative.

Keywords: high-speed train; hollow axle; fatigue crack; total focus method; double-layer media imaging; Snell's law

0 引言

空心车轴被高速列车广泛使用，但是受制造工艺、材料结构和其他因素的影响，轴中的疲劳缺陷可能在高速工况下恶化，甚至引发破裂轴事故，因此空心车轴的无损检测非常重要。近年，超声无损检测被广泛应用于世界铁路安全测试中。空心车轴的超声无损检测技术已经被开发出来，并在许多国家的常规超声检测系统中投入使用。由于传统的超声检测技术受到系统干扰、探测深度和信噪比（Signal Noise Ratio，SNR）的影响，其表现较差[1]。多家公司对现有成像设备进行了改进，德国铁路股份公司使用常规超声探头采集空心车轴的超声数据并结合合成孔径聚焦技术（Synthetic Aperture Focusing Technique, SAFT）进行成像。与传统的超声检测技术成像结果相比，SAFT 可以显著提高常规超声系统的 SNR。在传统超声波[2-3]的基础上，法国阿海珐集团（AREVA）通过添加相控阵探头，对空心车轴横向裂纹进行多角度聚焦扫描，提高了横向裂纹检测的信噪比[4]。但上述方法均不能实现裂纹缺陷的准确定位和量化成像，这会给空心车轴的缺陷检测带来干扰。

2005 年，相关学者使用全矩阵捕获（Full Matrix Capture, FMC）技术收集超声波扫描数据集（全矩阵数据），并使用 TFM 进行成像[5-6]。基于 FMC 的 TFM 算法使用完整的数据集，其中包含所有缺陷图像的信息，对小缺陷敏感，并且可以准确地量化和定位[7-8]，适用于空心车轴角裂纹检测的定量分析[9-10]。根据超声脉冲反射原理，当缺陷垂直于超声束时，反射能量最大，因此横波需以合适的角度入射才能实现空心车轴裂纹轮廓的定位和定量检测。文献[11-12]根据 Snell 定律计算出超声波在双层介质交界处的位置坐标，在 TFM 成像时考虑了楔块角度和深度影响，并研究了校正和补偿方法，实现了在不同区域图像质量的一致性。对于已知的弧面，有学者通过使用 Fermat 定理和迭代技术来成像[13]。对于常规物体的内部裂缝检测，文献[14]对 TFM 成像中横波和纵波的模式转换进行了定量研究。对于楔块和空心车轴构成的双层介质，TFM 需要分别获得超声波在楔块和空心车轴中的传播延迟，并根据 Snell 定律和 Fermat 定理获得基于双层介质的超声传播模型。试验结果表明，与传统的超声检测技术相比，双层介质中的 TFM 成像技术可以准确地求解线性界面入射点的位置坐标，并获得超声波在楔块和被测物体中的传播延迟，从而提高超声图像 SNR，准确量化裂纹缺陷。

1 原理和方法

1.1 超声波在双层介质中传播路径的几何模型

基于 Fermat 定理得到的最短传播路径可满足双层介质中的超声传播模型的需要，并且在双层界面处的超声折射需要符合 Snell 定律。因此，可以通过 Snell 定律来计算不同介质中的超声波传播角度，计算公式如下：

$$\frac{\sin\theta_{\mathrm{i}}}{v_1}=\frac{\sin\theta_{\mathrm{R}}}{v_2} \tag{1}$$

式中：θ_{i}为超声波入射角；θ_{R}为超声波折射角。

从第一层介质（楔形有机玻璃）入射到第二层介质（钢）的超声波束传播路径如图 1 所示。(x_0,z_0)表示声束发射位置坐标，$(x_{\mathrm{s}},z_{\mathrm{s}})$表示声束焦点位置坐标。

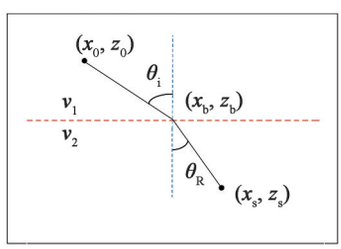


图 1 双层介质中的超声折射

Fig. 1 Ultrasonic refraction in double-layer media

设双层介质交界面处的超声坐标为$(x_{\mathrm{b}},z_{\mathrm{b}})$，令$\beta=\frac{v_1^2}{v_2^2}$，根据三角函数和 Snell 定律，可得

$$\frac{\beta\left(x_{\mathrm{b}}-x_0\right)^2}{\left(z_{\mathrm{b}}-z_0\right)^2+\left(x_{\mathrm{b}}-x_0\right)^2}=\frac{\left(x_{\mathrm{s}}-x_{\mathrm{b}}\right)^2}{\left(z_{\mathrm{s}}-z_{\mathrm{b}}\right)^2+\left(x_{\mathrm{s}}-x_{\mathrm{b}}\right)^2} \tag{2}$$

根据式(2)，使用法拉利方法[15]，可以获得入射点的水平纵坐标x_{b}的值。

1.2 全矩阵数据采集和全聚焦方法介绍

通过 FMC，可以获取探头中的所有“发射–接收阵元”的 A 扫描数据组合，从而为 TFM 成像提供最完整的数据信息。图 2 展示了基于相控阵超声的 FMC 原理，通过单个阵元依次发射，然后所有阵元都接收回波信

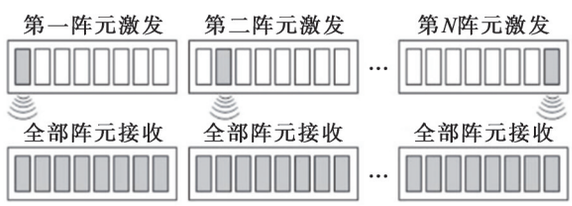


图 2 FMC 采集

Fig. 2 FMC acquisition

号，即可采集得到全矩阵数据。

TFM的基本原理可表示为

$$I\left(x_p,z_p\right)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}e\left(x_i,x_j,t\right) \tag{3}$$

式中：$I\left(x_p,z_p\right)$为点$\left(x_p,z_p\right)$处的幅值；$i=1,2,\cdots,N$，对应不同激发阵元；$j=1,2,\cdots,N$，对应不同接收阵元；$e\left(x_i,x_j,t\right)$为当激发阵元为i，接收阵元为j时，在t时刻的信号幅值。

全聚焦成像算法使用基于FMC方式采集的完备数据集，与其他基于延时叠加法则的聚焦算法相比，能够获得更好的成像质量。

1.3　楔块全聚焦方法与全聚焦方法的比较

对空心车轴进行超声无损检测，常规方法一般为使空心车轴以螺旋的方式运动，从孔的内表面和外表面发射超声波，使用0°的TR探头来检测内部体积缺陷（即三维缺陷，有长宽高3个尺寸，裂纹缺陷可视为二维缺陷，仅有长宽2个尺寸）横波探头检测横向裂缝。因此在使用TFM对空心车轴成像时，需考虑楔块的影响。利用基于楔块的全聚焦方法和无楔块的全聚焦方法检测同一组缺陷，并使用API（Amplitude Point Image）和SNR来对图像质量进行对比和分析。其中，API是衡量全焦成像质量的重要指标，被定义为点扩散函数的幅值大于最大幅值的−6 dB时的幅值面积，并用波长的平方进行归一化处理。API值越小，缺陷的分辨率越高。

WTFM和TFM的缺陷图像分别如图3和图4所示。图3和图4中的缺陷按深度从15 mm到30 mm分别命名为缺陷1、缺陷2、缺陷3、缺陷4、缺陷5、缺陷6（从上至下）。由图3和图4可知，采用2种算法都可以很好地对缺陷进行成像，但WTFM可以更有效地抑制缺陷信息处的尾部振荡；当未考虑楔块影响时（即图4），在缺陷图像的底部会产生伪像。6个缺陷的TFM和WTFM API对比见表1。

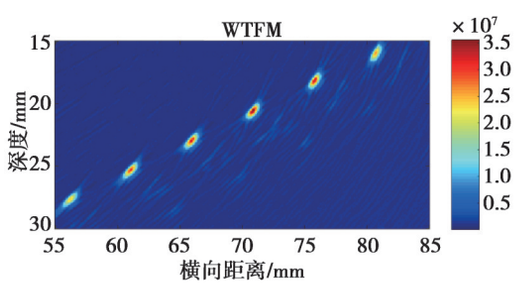


图3　带楔块的全聚焦成像

Fig. 3　TMC imaging with wedge

由表1可知，成像区域的API指数在一定范围内波动，在波束强、能量高、信噪比高、外部抗干扰强的情况下，用该范围内缺陷的API指数来判断算法的成像能力更为合理。WTFM对应的范围是缺陷2、缺陷3、缺陷4，平均API为0.475；TFM对应的范围是缺陷4、缺陷5、缺陷6，平均API为0.444。试验结果表明，WTFM能准确计算楔块与被测物体的交界处入射点的横坐标，而且API指数与TFM相差不大，但其抑制了尾部振荡信息，提高了缺陷成像的信噪比。

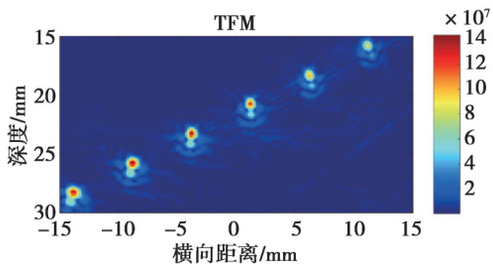


图4　全聚焦成像

Fig. 4　TMC imaging

表1　WTFM和TFM缺陷成像的API对比

Table 1　API comparison of WTFM and TFM defect imaging

缺陷	WTFM	TFM
缺陷1	0.316	0.086
缺陷2	0.554	0.194
缺陷3	0.482	0.295
缺陷4	0.388	0.403
缺陷5	0.280	0.453
缺陷6	0.144	0.475

2　空心车轴的超声检测

2.1　车轴表面横向裂纹的常规超声检测

在进行空心车轴探伤时，一般采用折射角为40°~70°的横波探头检测裂纹。当折射角为40°时，横波能量大，纵波能量小，接收信号SNR高，适用于检测车轴外径的横向裂纹（沟槽）。

使用传统常规超声探头检测空心车轴裂纹所得的B扫描缺陷图像如图5所示。空心车轴中裂纹的真实深度为2.5 mm，而B扫描界面显示的长度为12 mm，这表明常规超声技术无法反映裂纹的形状和长度。

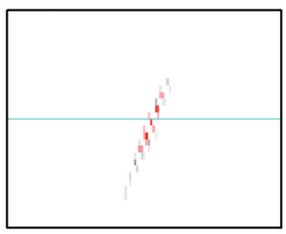


图5　角扫描反射缺陷的B扫描成像

Fig. 5　B-scan imaging of angular scan reflection defects

2.2　车轴表面横向裂纹的WTFM检测

空心车轴表面横向裂纹的WTFM检测涉及超声波的裂纹端角反射问题，并且在超声传播路径上还将产生二次反射现象。如果在飞行时间（即超声波传播时

间）原理上直接使用一次反射的超声传播路径，则延迟数据将被叠加，造成裂纹图像错位。因此，有必要改进WTFM，增加二次反射的路径计算方法，从而实现更加精确的横向裂纹成像。

双层介质中超声波传播路径如图6所示。

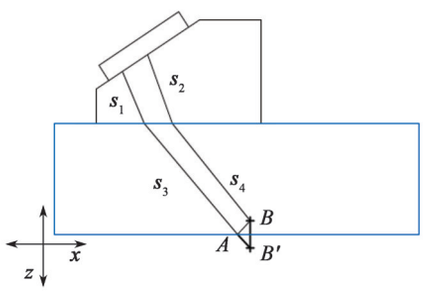


图6 WTFM横向裂纹检测传播路径

Fig. 6 WTFM transverse crack detection propagation path

楔块的WTFM成像表达式如下所示：

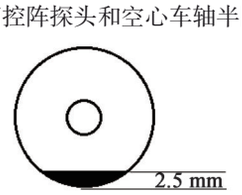
$$I\left(x_p,z_p\right)=\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N}e\left[\frac{s_1+s_2}{c_1}+\frac{s_3+s_4+AB'}{c_2},i,j\right] \tag{4}$$

式中：c_1和c_2分别为超声波在楔块和测试样品中的传播速度；e_{ij}为第i个阵元激发，第j个阵元接收的信号；s_1和s_2是超声波在楔块中的传播路径；s_3和s_4为超声波在测试样品中的传播路径；B'为B的镜面反射，可以得到$AB=AB'$。

在进行裂纹检测时，使用具有弯曲表面的SA12-N55S楔块，空心车轴外表面的横向裂纹缺陷深度为2.5 mm，空心车轴厚度为50 mm，如图7所示



(a) 楔块相控阵探头和空心车轴半圆测试块



(b) 车轴外表面的横向裂纹

图7 楔块的FMC数据采集

Fig. 7 FMC data acquisition with wedge

使用WTFM技术的裂纹成像的结果如图8所示。在图8中，缺陷图像与真实裂纹形状基本一致，但由于裂纹尖端存在漫反射现象，因此图像中会存在少量毛刺，使得裂纹图像较真实的裂纹更长。在成像时，WTFM采用优化后的第2种声束路径（图6中的AB'），以确保裂纹图像幅值的正确叠加，从而真实地显示出裂纹的形状。但是只有底面反射的裂纹反射信号才需要计算二次反射波的声程。当横向裂纹的位置未知时，改进的WTFM算法对整个成像区域都使用了二次反射波声路，这会导致裂纹图像幅值高，但SNR低。

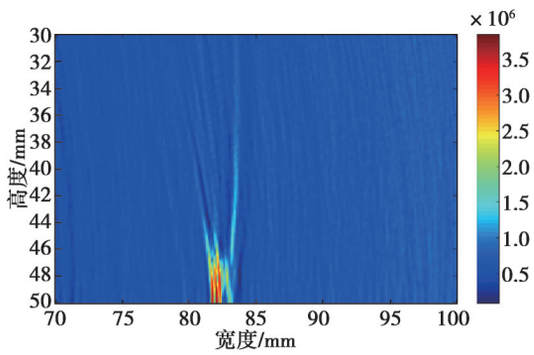


图8 WTFM横向裂纹成像

Fig. 8 WTFM transverse crack imaging

2.3 结果的优化

对成像结果的误差进行分析，可发现由于空心车轴轮廓上的横向裂纹检测过程中超声波存在端角反射和底面二次反射现象，这会导致波形转换的发生，从而使横波转换为纵波，采集得到的信号发生混叠，特别是在裂纹尖端，声波还会发生如图9所示的漫反射现象。

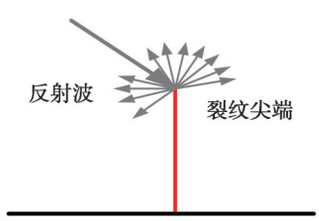


图9 裂纹尖端反射

Fig. 9 Reflection at crack tip

对于上述问题，可使用圆形滤波器对裂纹成像数据进行平滑处理，圆形滤波器表达式为

$$D(p)=\mathrm{mean}\left(\sum_{i=1,2,3,\cdots,M_1,j=1,2,3,\cdots,M_2}^{i^2+j^2\le r^2}p_{x_i,z_j}\right) \tag{5}$$

式中：p为圆心；r为半径，$M_1\times M_2$为成像区域的像素数量，M_1为宽度方向的像素数量，M_2为高度方向上的像素数量。

根据式(4)，对整个圆区的所有点数据进行叠加并做均值处理，最后得到的幅值作为点p的幅值，依次对成像区域内所有像素点进行类似处理。

图10是在图9基础之上应用圆形滤波器得到的结果。该图有效地消除漫反射和二次反射波引起的误差，去除了尖刺和伪裂纹信息。将优化后的WTFM图像与B扫描图做对比，结果如表2所示。

表2 WTFM与常规超声对横向裂纹成像的比较

Table 2 Comparison of transverse crack imaging between WTFM and conventional ultrasound technique

参数	真实缺陷	B扫描图	WTFM+圆形滤波图像
缺陷深度/mm	2.5	12.0	3.0
SNR值/dB		22.0	32.7

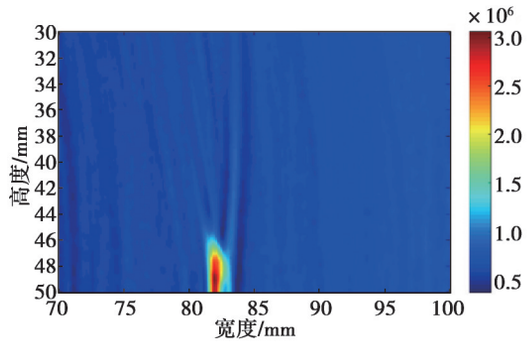


图 10　WTFM 横向裂纹过滤成像

Fig. 10　WTFM transverse crack filtered imaging

由表 2 可以看出，与传统的空心车轴裂纹检测技术相比，WTFM 能有效地反映裂纹形状，提取裂纹深度信息，定位和量化空心车轴缺陷；经过圆形滤波器处理后，WTFM 在减小裂纹深度误差的同时，可进一步提高成像 SNR。

3　结论

本文基于 Fermat 定理和 Snell 定律建立了双层介质中声束传播的理论几何模型，并确定了声束传播路径；对比了 TFM 和 WTFM 的成像效果，发现 TFM 和 WTFM 的 API 相差不大，但 WTFM 可抑制超声图像尾部振荡信息，并提高缺陷成像的 SNR，因此 WTFM 成像效果优于 TFM。使用相控阵探头结合 WTFM 算法对空心车轴横向裂纹进行检测和成像，再利用圆形滤波器对图像作平滑处理，最终实现了空心车轴横向裂纹的准确定位和定量检测。

参考文献：

[1] RICHTER C, FROEHLICH M, SCHOLZ H, et al. Development of components for an industry approved hollow-axle testing system[C]//BINDT. 18th World Conference on Non-Destructive Testing 2012 (WCNDT 2012). Durban, South Africa: BINDT, 2012: 2467-2473.

[2] ROHRSCHNEIDER A, HINTZE H, OELSCHLÄGEL T. Further development of the ultrasonic testing of hollow axles[C]//EFNDT. 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014). Prague, Czech Republic: EFNDT, 2014: 2783-2791.

[3] VÖLZ U, HEILMANN P, SPIEKER M. New approach for a more detailed visualisation of ultrasonic testing data of railway hollow axles[C]//NDT. 19th World Conference on Non-Destructive Testing 2016 (WCNDT 2016). Munich, Germany: NDT, 2016: 3358-3362.

[4] MARTY P. Latest development in the UT inspection of train wheels and axles[C]//BINDT. 18th World Conference on Non-Destructive Testing 2012 (WCNDT 2012). Durban, South Africa: BINDT, 2012: 2523-2533.

[5] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. 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.

[6] HOLMES C, DRINKWATER B W, WILCOX P D. Advanced post-processing for scanned ultrasonic arrays: application to defect detection and classification in non-destructive evaluation[J]. Ultrasonics, 2008, 48(6/7): 636-642.

[7] MOREAU L, HUNTER A J, DRINKWATER B W, et al. Efficient imaging techniques using an ultrasonic array[C]// SPIE. Proceedings Volume 7650, Health Monitoring of Structural and Biological Systems 2010. San Diego, California, United States: SPIE, 2010: 765037.

[8] SUTCLIFFE M, WESTON M, DUTTON B, et al. Real-time full matrix capture for ultrasonic non-destructive testing with acceleration of post-processing through graphic hardware[J]. NDT & E International, 2012, 51: 16-23.

[9] ZHANG Jie, DRINKWATER B W, WILCOX P D, et al. Defect detection using ultrasonic arrays: the multi-mode total focusing method[J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 123-133.

[10] 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.

[11] WESTON M, MUDGE P, DAVIS C, et al. Time efficient auto-focussing algorithms for ultrasonic inspection of dual-layered media using full matrix capture[J]. NDT & E International, 2012, 47: 43-50.

[12] WESTON M, NAGESWARAN C, SUTCLIFFE M, et al. Calibration of ultrasonic techniques using full matrix capture data for industrial inspection[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54 (11): 602-611.

[13] SUTCLIFFE M, WESTON M, CHARLTON P, et al. Full matrix capture with time-efficient auto-focusing of unknown geometry through dual-layered media[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2013, 55(6): 297-301.

[14] ZHANG Jie, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The use of ultrasonic arrays to characterize crack-like defects[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2010, 29(4): 222-232.

[15] MACDUFFEE C C. Theory of equations[M]. New York: Wiley, 1954.