

基于合成孔径技术的轮对探伤成像算法研究

李小娟¹, 杨昕², 王黎¹, 彭建平¹

(1. 西南交通大学 光电工程研究所, 四川 成都 610031; 2. 成都动车段建设指挥部, 四川 成都 610081)

摘要: 为了提高轮对超声探伤成像的信噪比(SNR)和缺陷的检出率, 针对轮对超声探伤的方法和特点, 提出了将轮对探伤结果 B 扫描图像与合成孔径聚焦技术(SAFT)相结合的图像处理技术。通过建立 SAFT 算法的数学模型, 设计了 SAFT 算法处理软件, 并以内部含有缺陷的 China Railway High-speed(CRH)型车轮轮对为检测对象, 进行了轮对探伤实验, 实现并优化了基于 SAFT 算法的轮对超声探伤图像重建, 验证了该技术的可行性和准确性。最后进行了 SNR 的定量数值计算和比较, 结果表明, 该技术能有效提高轮对超声探伤成像的 SNR 和分辨率, 可提供更准确详实的缺陷信息, 提高探伤系统检出率, 从而有效保障车轮的安全运行。

关键词: 轮对超声探伤; 合成孔径聚焦技术; 图像重建; 信噪比

中图分类号: U2 **文献标识码:** A

Ultrasonic Detection of Wheels Image Algorithm Based on Synthetic Aperture Focusing Technique

LI Xiaojuan¹, YANG Xin², WANG Li¹, PENG Jianping¹

(1. Photoelectric Engineering Institute, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. EMU Depot Construction Headquarters of Chengdu, Chengdu 610081, China)

Abstract: In order to enhance signal to noise ratio (SNR) and the ratio of flaw detection of ultrasonic detection of wheels, a new image processing technique which combined B scan image of ultrasonic detection of wheels with algorithm for synthetic aperture focusing technique was put forward according to the methods and characteristics of ultrasonic detection of wheels. The mathematical model was established and processing software of SAFT algorithm was designed. The detection experiments were carried out on CRH type wheels which contained internal defects. The ultrasonic detection of wheels image reconstruction was achieved and optimized based on SAFT algorithm. The feasibility and accuracy of the technique were verified. Finally, quantitative numerical calculation and comparison of the SNR were implemented which demonstrated that the technique could effectively improve SNR and resolution of ultrasonic detection of wheels. It also provided more accurate defects information and enhanced the ratio of flaw detection, ensuring operation security of wheels effectively.

Key words: ultrasonic detection of wheels; synthetic aperture focusing technique; image reconstruction; signal to noise ratio

0 引言

对铁路车轮的轮对缺陷的检测并准确判断其位置, 一直是铁道运输部门非常重视的问题, 也是铁路车辆高速和重载发展中必须解决的难题^[1]。近几十年来, 国外许多国家均已采用超声探伤法检查轮对质量, 在轮对探伤方面先后发展了一批超声探伤系统^[2]。目前国内各专业车轮制造厂的新制车轮超声波探伤均已采用国外先进设备^[3-4], 车辆和机务系统在手工探伤的基础上, 也配置了轮对探伤系统来确保行车安全。但是轮对探伤成像仍以传统的 A 扫、

B 扫为基础, 缺陷尺寸和当量与实际的轮对缺陷存在较大差距^[5], 尤其在线不落轮的状态下, 得到的图像分辨率较低^[6], 使轮对内部缺陷的判断准确率不高, 缺陷检出率、缺陷当量和尺寸的准确评估都有待进一步提高。

近年来, 很多研究机构均致力于提高轮对超声探伤成像分辨率的研究。改进措施主要包括以下 3 个方面:

1) 通过改进超声换能器的布局, 将换能器与轮对直接接触, 减小信号的衰减^[6]。

收稿日期: 2011-06-17

作者简介: 李小娟(1986-), 女, 甘肃省兰州市人, 硕士, 主要从事光电检测、轨道交通信息信号处理的研究。E-mail: lxj_52196@163.com。

2) 改进换能器,提高成像质量^[7]。

3) 通过增大采样点数,降低扫描速度,提高仪器的分辨率^[8]。上述措施主要是从物理角度进行改善,都有一定的局限性。

而合成孔径聚焦技术(SAFT)突破了经典理论的限制,具有以下优点:

1) 能增强缺陷信号,提高检测的灵敏度及分辨率^[9]。

2) 可用小尺度换能器及较低的工作频率,来获得高分辨率。

3) 在图像重建过程中,易应用各种图像处理技术,用于不同成像对象,以提高图像清晰度及信噪比(SNR)^[10]。

4) 有利于成像系统实现高分辨率和低成本,达到很高的性价比^[11]。

从国内外的研究和应用状况来看,对 SAFT 超声成像的研究已呈良好的发展势头^[12-14],但在轮对超声探伤中的应用还很少见。本文针对轮对超声探伤的方式和特点,提出了将轮对探伤结果 B 扫描图像与 SAFT 重建算法相结合的图像处理技术,建立了 SAFT 算法的数学模型,设计了 SAFT 算法处理软件,并以内部含有缺陷的 CRH 型车轮轮对为检测对象,开展轮对探伤实验,实现并优化了基于 SAFT 算法的轮对超声探伤图像重建,验证了该技术的可行性和准确性,并对结果进行了 SNR 定量计算和比较,数据结果表明该算法有效的改善了轮对超声探伤成像的 SNR 和分辨率。

1 SAFT 重建原理

图 1 为 SAFT 重建原理。由图可知,检测区域内有一个重建点 $F(i, j)$,探头按照“扫描—采样—扫描”的方式工作,移动间距为 Δx ,在每一点,超声探头发射一个超声脉冲,并接收来自物体内部各点的反射回波,将数据进行存储^[15]。

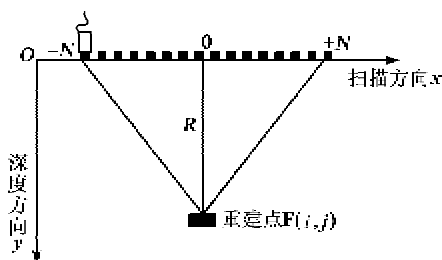


图 1 SAFT 重建原理

SAFT 图像重建依据主要有:

1) 声束的扩散性。重建点 $F(i, j)$ 附近很大范

围内的 A 扫描信号中都含有目标信息,设探头在 $-N$ 位置时,点目标 $F(i, j)$ 开始进入探头的照射区域,当探头移至位置 $+N$ 时, $F(i, j)$ 开始位于照射区域以外,所以, $-N \sim +N$ 的距离为合成孔径的长度^[15]。

2) 接收信号基本关于缺陷点对称。对于缺陷点,当声束垂直入射时,得到最大振幅回波,而在两侧,声程会逐渐增大,回波到达缺陷点的时间依次增加,回波减小^[16]。

SAFT 重建过程中,对于缺陷点:时移运算使得在 B 扫描中,接收到的各 A 扫描信号在相同时刻到达输出端,通过延时叠加处理后,缺陷信号的幅值会很强;对于非缺陷点:时移运算会导致参与运算的各 A 扫描信号的缺陷回波散乱分布,没有规律性,缺陷信号的幅值会很弱,甚至趋于 0^[17]。

2 车轮超声探伤 B 扫描成像

超声 B 扫描显示的是与声束的传播方向平行且与样品的测量表面垂直的样品剖面,可直观地显示出被探工件任一纵截面上缺陷的分布及缺陷的深度^[18]。在轮对超声探伤中,探头在车轮踏面依次进行扫查,若将探头的扫查轨迹作为横坐标,声波的传播距离作为纵坐标,则形成一个二维矩阵,矩阵中的各个元素表示对应扫描位置的回波强度,将矩阵元素表示为像素值,则可得到车轮超声探伤 B 扫描图像。

3 SAFT 数据计算和处理分析

对点 $F(i, j)$ 进行重建,据接收信号的空间点位置,引入适当的延时,使不同探头对同一个位置点的接收信号同时输出并叠加,而获得点 $F(i, j)$ 聚焦成像。

$$F(i, j) = \frac{1}{2N+1} \sum_{i=-N}^N f_i(t_i - \Delta t_i) \quad (1)$$

式中: $2N+1$ 为参与 SAFT 运算的波束总数; $f_i(t_i - \Delta t_i)$ 为经时移处理后第 i 个 A 扫描信号, Δt_i 为相应的时移量; $F(i, j)$ 为经 SAFT 处理后最终得到的信号,即为该点像素值大小。所以对点 $F(i, j)$ 进行重建,关键点主要是计算参与 SAFT 运算的波束总数 $2N+1$ 的值和参与叠加信号的延迟时间,也是软件设计的重点。

3.1 $2N+1$ 值的计算和量化取整

因为合成孔径线阵的半功率波束角

$$B=0.84\lambda/(2L)=0.42\lambda/L \quad (2)$$

所以最大合成孔径长度

$$L=0.42 \frac{\lambda}{D} R=0.42 \frac{c}{f \cdot D} R \quad (3)$$

探头移动次数计算值为

$$n=\frac{L}{\Delta x}=0.42 \frac{c}{f \cdot D \cdot \Delta x} R \quad (4)$$

式中： λ 为波长； $c=5\,940\text{ m/s}$ 为超声波在轮对材料钢中的传播速度； f 为探伤频率； D 为直探头直径； Δx 为探头移动间距； R 为缺陷深度信息。 R 可由点 $F(i, j)$ 的横坐标位置信息 i 来确定，即

$$R=d \cdot i \quad (5)$$

式中 d 为探头在深度方向的采样间隔，并对 n 值进行取整运算，设结果为 g ；然后，对 g 再进行取偶运算，是因为参与运算的波束数目 $2N+1$ 为奇数，则探头移动次数 $g=2N$ 为偶数，若得到的是奇数，化为相离最近的偶数。有4个判断条件：当 $g \geq 2$ ，且为偶数，则直接取 $2N=g$ ；当 $g \geq 2$ ，且为奇数，并且大于原来的小数，即 $g > n$ ，则取 $2N=g-1$ ；当 $g \geq 2$ ，且为奇数，并且小于原来的小数，即 $g < n$ ，则取 $2N=g+1$ ；当 $0 < g < 1.5$ ，不进行处理，直接像素点显示。

3.2 延迟时间的计算和量化取整

对于重建点 $F(i, j)$ ，在中垂线上的声程为 $S_0=2R$ 。设探头移动到第 n 个位置，接收到的点 $F(i, j)$ 的缺陷回波A扫信号为 $f_i(t_n)$ ，声程大小为

$$S_n=2\sqrt{R^2+(n \cdot \Delta x)^2} \quad (6)$$

所以探头移动次数为 n 时，接收到点 $F(i, j)$ 的延迟时间为

$$\Delta t_n=2 \frac{\sqrt{R^2+(n \cdot \Delta x)^2}-R}{c} \quad (7)$$

式中： R 为缺陷深度信息； n 为探头移动次数，在超声检测中，距离向信息中也包含了接收信号的时间先后信息，所以通过行信息 i 的值的量化延迟时间 Δt_n 。在深度方向的采样时间间隔 $t=d/c$ ，则行信息 i 变化量为 $\Delta t_n/t$ ，对其进行取整运算，延迟时间为 $\Delta t_n/t$ 的整数位和小数位四舍五入的值的和，则得到行信息 i 的值的量化量。

4 轮对探伤实验数据采集

4.1 轮对探伤系统

图2为实验轮对探伤系统，可检测车轮轮辋轮辐区域的周向裂纹、径向裂纹、轴向通孔和横通孔等

不同类型、不同区域、不同方向的缺陷。

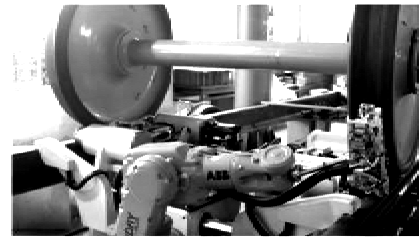


图2 实验轮对探伤系统

4.2 数据采集

以CRH型车轮为检测对象，实验数据采集，保持良好的耦合状态和夹具的稳定性，减小偶然因素。通过车轮旋转，超声直探头在踏面进行等间距扫查，实现轮辋轮辐检测，如图3所示。通过数据输入接口，输入被检轮对信息及操作信息、通过数据输出接口，输出检测数据报告，图4为超声数据采集系统。将回波数据A/D转化，以数据矩阵的形式以txt.文件存储。表1为数据采集实验参数。

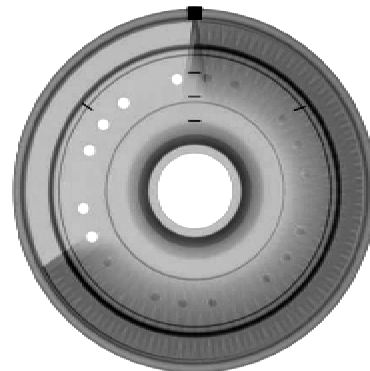


图3 CRH型轮对探伤数据采集示意图

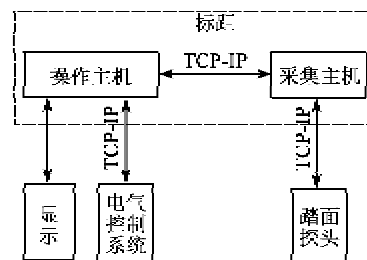


图4 超声数据采集系统

表1 实验参数

D/mm	f/MHz	c/mm	$\Delta x/\text{mm}$	d/mm
7.00	4	5 940	1.00	0.59

5 SAFT 图像重建和算法优化

5.1 SAFT 图像重建

实验采集了很多组轮对超声探伤实验数据，并分别对每组数据进行了B扫描图像显示和SAFT

算法处理,SAFT 算法处理后分辨率改善都较明显,如图 5(a)、(b)所示。由图可看到,经 SAFT 处理后,图像可更清晰的显示,缺陷特征很明显,但缺点是在软件算法处理过程中需对大量数据中的每一点分别进行重建,且是大量的开方运算,处理速度较慢,对 $3\ 000 \times 510$ 个数据进行处理时,运行时间为 96 s,且有可能会存在伪缺陷。

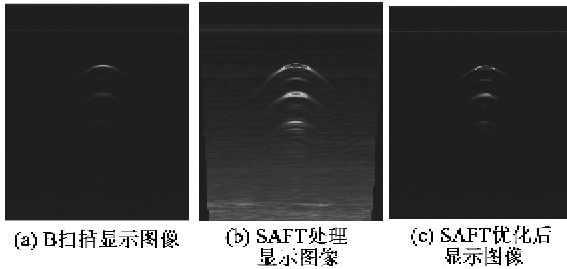


图 5 SAFT 优化前后图像显示结果

5.2 伪缺陷分析

图 6 为伪缺陷分析示意图。由图可知,将曲线 S_1 上所有点的回波幅值叠加点 F ,对缺陷点 F 进行重建,所以点 F 就加强了,这正是 SAFT 处理希望得到的结果。而对于点 P ,设它不是缺陷点,当重建时将曲线 S_2 上所有点的回波幅值叠加点 P ,实现对点 P 的重建,但缺陷点 F 恰好也位于曲线 S_2 上,点 F 的回波幅值(很大)也就叠加到了点 P 上,所以在进行图像重建时,点 P 也被认为是缺陷。同理,在通过点 F 的曲线上,有许多不是缺陷的重建点将点 F 的回波幅值叠加后,出现了很大的值,在进行图像重建时,这些点都被误认为是缺陷,从而影响了图像分辨率,需想办法进行消除。

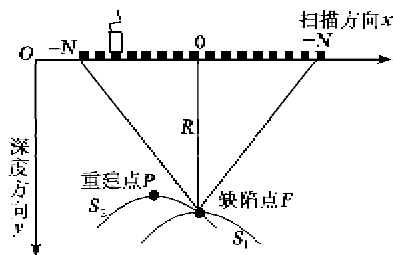


图 6 伪缺陷分析示意图

5.3 优化方案

SAFT 算法优化方案中主要考虑了两点:

- 1) 设定阈值法。如果是缺陷点,那么该点回波一定会有较大的振幅,若较小,则不是缺陷点。所以对处理数据先进行初步的判定,如果重建点信号小于该阈值,则这点不是缺陷点,不需要进行重建。
- 2) 消除伪缺陷。如果是缺陷点,当直探头的声束垂直入射到缺陷点时,会得到最大的缺陷振幅,即

有最大像素点值,叠加的信号则关于这个缺陷点对称相等,所以对重建点左右两侧信号的叠加和值进行大小判断,在处理中,通过二者的比值进行判断,若比值在一定的范围内,则为缺陷点,反之则为伪缺陷,不需要进行重建。

6 图像显示结果和定量计算

6.1 图像显示结果

图 5 为 SAFT 优化前后图像显示结果。由图可知,SAFT 算法优化后,软件运行速度较快,对 $3\ 000 \times 510$ 个数据处理时,运行时间为 2 s,缺陷特征更明显,很好地滤除伪缺陷,图像显示结果较好。

在 SAFT 优化算法中,随着阈值和重建点左侧信号叠加和值及右侧信号叠加和值的比值的变化,所得图像也随之变化,如图 7 所示,但对于成像质量的好坏还不能准确判断,所以下面通过 SNR 数值计算来进行定量的分析。

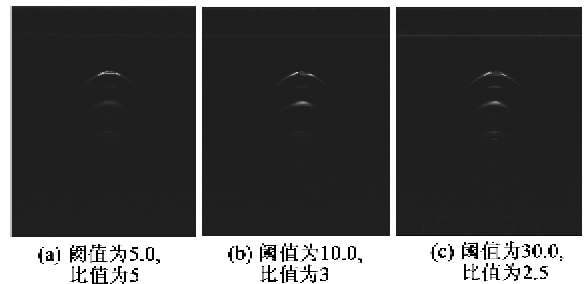


图 7 SAFT 优化中设定不同阈值和比值后所得的图像

6.2 SNR 定量计算

在超声检测中,SNR 是衡量成像质量很重要的指标,SNR 高,成像分辨率高,杂波少,对探伤有利,SNR 太低,则易引起漏检或误判,严重时甚至无法进行探伤。采用回波高度法对 SNR 进行定量计算,为了提高计算精确性,对噪声信号求平均值。表 2 为经过 SAFT 算法优化前后 SNR 数值计算结果,可以看出经过 SAFT 算法处理后,SNR 得到了一定程度的提高,在 SAFT 优化算法中,随着阈值和比值的改变,SNR 也随之改变,在阈值为 30.0,比值为 2.5,SNR 相对较大,图像成像较好。

表 2 SNR 数值计算结果

	信噪比/ dB	提高程度/ dB
原始 B 扫描图像	16.069 1	—
SAFT 算法	19.578 2	3.509 1
SAFT 阈值为 5.0, 比值为 5	20.001 5	3.932 4
算法 阈值为 10.0, 比值为 3	22.755 2	6.686 1
优化 阈值为 30.0, 比值为 2.5	25.095 8	9.026 7

7 结束语

本文针对轮对超声探伤的方式和特点,建立了轮对超声探伤结果 B 扫描图像的 SAFT 算法的数学模型,设计了 SAFT 算法软件,在轮对探伤系统中采集数据,得到了图像重建结果,实现了将 B 扫描图像与 SAFT 重建算法相结合的图像处理技术。并通过算法优化,使软件处理更快速,图像显示结果更准确,验证了该技术的可行性和准确性。最后对结果进行了 SNR 定量和比较,数据结果表明该算法有效的提高了轮对超声探伤成像的 SNR 和分辨率,可提供更准确详实的缺陷信息,提高探伤系统检出率,从而有效保障车轮的安全运行。

参考文献:

- [1] 董锡明. 德国高速列车 ICE1 重大脱轨事故的启示[J]. 中国铁路, 2000, 20(11): 18-20.
DONG Ximing. Enlightenment from the major derailment accident of the german high-speed train ICE1[J]. China Railway, 2000, 20(11): 18-20.
- [2] KAPPES W, ROCKSTROH B, BAHN W, et al. Application of new front-end electronics for non-destructive testing of railroad wheel set[C]//Berlin, Germany, EC-NDT, 2006: 108-110.
- [3] 彭东林, 熊强强, 刘小康, 等. 基于压电陶瓷动态信息的结构损伤检测技术[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2007(5): 11-14.
- [4] 黄永巍. 中国铁道系统无损检测技术与国外的交流与合作[J]. 无损检测, 2007, 29(11): 621-626.
HUANG Yongwei. Communication and cooperation on NDT technology between chinese and foreign railway department[J]. Nondestructive Testing, 2007, 29(11): 621-626.
- [5] 蔡永晶, 陈长健. 用超声波探伤法检查厂修轮对[J]. 机械, 2008, 35(10): 77-78.
CAI Yongjin, CHEN Changjian. The detection of the wheel-set by the method of ultrasonic[J]. Mechanical, 2008, 35(10): 77-78.
- [6] 李战慧, 吴运新, 隆志力. 超声波在换能器接触界面传播的特性研究[J]. 压电与声光, 2010, 32(2): 271-273.
LI Zhanhui, WU Yunxin, LONG Zhili. The study on transmission characteristics of ultrasonic transducer in interface[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2010, 32(2): 271-273.
- [7] WENNERSTROM E, STEPINSKI T. An iterative synthetic aperture imaging algorithm with correction of diffraction effects[C]//S. I.; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2006(53): 1008-1009.
- [8] NDOP J, KIM T J, GRILL W. Synthetic aperture imaging by scanning acoustic microscopy with vector contrast[J]. Ultrasonics, 2000, 38(12): 166-170.
- [9] MARTINEZ O, PARRILLA M, IZQUIERDO M A G. Application of digital signal processing techniques to synthetic aperture focusing technique images[J]. Ultrasonics, 1999, 32(76): 448-456.
- [10] KIM D, EOM H. Ultrasonic NDE discrimination with the gradient descent algorithm and SAFT image processing[J]. NDT&E International, 2009, 42(12): 250-259.
- [11] 毕永年. 合成接收孔径超声成像前端系统设计及实现[D]. 浙江: 浙江大学, 2003: 56-57.
- [12] MARTINEZ O, PARRILLA M. Application of digital signal processing techniques to synthetic aperture focusing technique images[J]. Sensors and Actuators, 1999, 12(76): 448-456.
- [13] SPIES Martin, JAGER W. Synthetic aperture focusing for defect reconstruction in anisotropic media[J]. Ultrasonics, 2003, 41(34): 125-131.
- [14] 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(13): 636-642.
- [15] JENSEN J A, NIKOLOV S I, GAMMELMARK K L. Synthetic aperture ultrasound imaging[J]. Ultrasonics, 2006, 44(26): 5-15.
- [16] FRAZIER C H, MEMBER S. Synthetic aperture techniques with a virtual source element[C]//S. I.; IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 10(45): 196-197.
- [17] 余建辉. 阵列探头在管材探伤中的应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 31-32.
- [18] 李衍. 超声相控阵技术 2: 扫描模式和图像显示[J]. 无损探伤, 2007, 31(6): 36-40.
LI Yan. Ultrasonic phased array technology 2: Scanning mode and image display[J]. Nondestructive Testing, 2007, 31(6): 36-40.