

基于多元接收线圈的管道局部缺陷检测方法研究

师奕兵^{1,2}, 罗清旺^{1,2}, 王志刚¹, 张伟^{1,2}, 马东^{1,2}

(1. 电子科技大学自动化工程学院, 四川成都 611731; 2. 电子科技大学信息地学研究中心, 四川成都 611731)

摘要: 在管道内部, 基于远场涡流技术的局部缺陷定量检测中, 当发射线圈处于管道缺陷位置时, 接收线圈检测的远场涡流信号中叠加了发射线圈处缺陷造成的伪峰信号, 影响了接收线圈处管道缺陷定量分析的正确性. 为了实现基于远场涡流检测中局部缺陷正确的定量分析, 本文在远场区域设置与发射线圈同轴的多接收线圈以及周向传感器阵列. 同轴接收线圈用来获取远场涡流检测信号中的伪峰信号, 周向传感器阵列用来检测局部缺陷. 该方法通过两个接收线圈获取具有差分特性的两个远场涡流检测信号, 然后利用维纳去卷积滤波器实现伪峰信号的获取, 同时滤除测试中的噪声; 最后, 在用于局部缺陷定量分析的涡流信号(由阵列传感器获取)中减去伪峰信号, 达到检测管道局部缺陷的目的. 该方法通过实验仪器得到验证, 在管道局部缺陷的定量检测中具有很好的实用性.

关键词: 远场涡流检测; 局部缺陷检测; 伪峰信号; 维纳去卷积滤波

中图分类号: P631.3+25 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2018)01-0197-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.027

Research on the Detection of Local Defects of Pipes Based on Dual Receivers

SHI Yi-bing^{1,2}, LUO Qing-wang^{1,2}, WANG Zhi-gang¹, ZHANG Wei^{1,2}, MA Dong^{1,2}

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China;

2. Information Geoscience Research Center, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: In the internal inspection of pipes based on Remote Field Eddy Current (RFEC), when transmitter passed by defects on pipe, signals tested by receivers is superimposed by the secondary peaks. Secondary peaks are caused by defects locate near transmitter, and lead to wrong assessment of qualification of defects. This paper applied dual receivers for removing secondary peaks. In proposed method, two receivers are set coaxially to transmitter in remote field to get two differential signals. With these two differential signals, Wiener deconvolution filter is employed to obtain secondary peaks and filter testing noise. Further, an array of sensors is set in remote field to test local defects. The secondary peaks can be subtracted from signals tested by sensors by using the dual-receiver. The feasibility of proposed method is validated by testing tool and experimental pipe.

Key words: RFEC testing; defects detect; secondary peaks; Wiener deconvolution filter

1 引言

在石油、天然气管道的检测中, 局部缺陷的定位以及定量分析一直是无损检测领域研究的重点^[1,2]. 因为远场涡流(RFEC, Remote Field Eddy Current)信号可以在铁磁性管道上两次穿透管壁传输^[2], 并且对管道内外壁缺陷具有相同的检测灵敏度; 因此其广泛应用于

石油、天然气管道缺陷检测中. 由于远场涡流信号两次穿透管道壁(发射线圈附近和接收线圈附近), 接收线圈检测的远场涡流信号中叠加了发射线圈附近管壁的信息. 当发射线圈附近管道出现缺陷, 而接收线圈附近管道无缺陷时, 检测信号中出现该缺陷的特征响应. 如果将该检测信号直接用于缺陷的评估, 则在检测处, 错误的缺陷定位、定量分析不可避免; 特别是发射、接收线

收稿日期: 2016-04-20; 修回日期: 2016-09-15; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家“十二五”科技重大专项(No. 2011ZX05020-006-005); 国家自然科学基金(No. 61201131); 中央高校基本科研业务费(No. ZYGX2012J092)

圈附近管道均出现缺陷时.发射线圈附近缺陷反应在检测信号中的特征响应称为伪峰信号;在基于远场涡流的管道内检测技术中,伪峰信号的移除必不可少.由于远场涡流信号及其微弱,其在实际检测中应用并不成熟;对于其研究主要是基于软件仿真^[3,4]以及检测仪器器的设计^[5,6].这些研究集中于缺陷的反演以及微弱信号的处理^[3-6],对于伪峰信号的分析却很少(伪峰信号亦出现在文献[6]中,但是集中于微弱信号处理方面).

由本文作者先前关于伪峰信号的研究^[7]可知,在远场涡流检测中可以采用多元接收线圈来实现移除伪峰信号的目的.另一方面,在远场区域设置周向传感器阵列可以实现管道局部缺陷的检测^[8].基于此,本文在远场区域同时设置多元接收线圈与周向传感器阵列,以实现局部缺陷的正确检测.将传感器检测的信号减去多元接收线圈获取的伪峰信号,就可以实现管道局部缺陷正确的定量、定位检测.并且由于远场涡流传输特性,该方法对于内外壁缺陷具有相同的检测灵敏度.

在上述检测方法中,本文作者采用维纳去卷积滤波器来获取伪峰信号以及滤除信号中的高斯噪声^[9].对于检测信号中的粗大误差,本文采用强局部加权的方法进行处理^[10].

2 基本原理

2.1 基于远场涡流的缺陷定量检测模型

在本文所述的基于远场涡流的管道缺陷定量检测中,一组周向传感器(共12个)用于局部缺陷的定量检测;与发射线圈同轴设置的两个接收线圈用于提取伪峰信号.管道局部缺陷定量检测模型如图1所示.

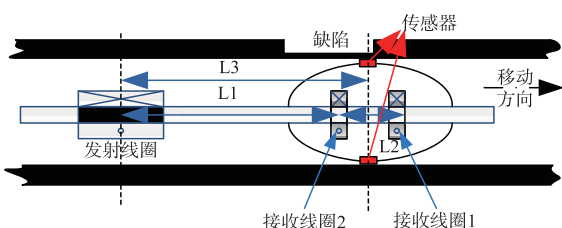


图1 基于远场涡流检测的局部缺陷定量检测模型

图1中,发射线圈激励0~100Hz的正弦低频信号, L_1 为2号接收线圈与发射线圈的距离, L_2 为1号接收线圈与2号接收线圈之间的距离, L_3 为周向传感器与发射线圈之间的距离; L_1 和 L_3 均属于2.5~3倍管道内直径范围, L_2 属于1~2倍管道内直径范围.1号接收线圈与2号接收线圈具有相同的尺寸、材质,且均与发射线圈同轴布局.接收线圈2的检测信号相较于接收线圈1的具有 Δt 的时移.假设仪器以测速 v 匀速移动,则,

$$\Delta t = L_2/v \quad (1)$$

因为在远场涡流检测中,检测线圈上信号的幅值衰减很大,具有较大的能级波动,而相位相对稳定^[3-6].所以,后文采用检测信号的相位进行相应的分析(由仪器电路获取).假设在时刻 t ,1号接收线圈检测的涡流信号相位为 $\theta_1(t)$,1号接收线圈位置处管道壁厚产生的相位变化为 $\Delta\theta_1(t)$,发射线圈位置处管道贡献的相位变化为 $\theta_c(t)$;在时刻 $t+\Delta t$,2号接收线圈移动到 t 时刻1号接收线圈位置,2号接收线圈检测的涡流信号相位为 $\theta_2(t+\Delta t)$,2号接收线圈位置处管道壁厚贡献的相位变化为 $\Delta\theta_2(t+\Delta t)$,发射线圈处管道壁厚贡献的相位为 $\theta_c(t+\Delta t)$,则

$$\begin{cases} \theta_1(t) = \Delta\theta_1(t) + \theta_c(t) \\ \theta_2(t+\Delta t) = \Delta\theta_2(t+\Delta t) + \theta_c(t+\Delta t) \end{cases} \quad (2)$$

又因为 $t+\Delta t$ 时刻,2号接收线圈覆盖 t 时刻1号接收线圈位置,即

$$\Delta\theta_1(t) = \Delta\theta_2(t+\Delta t) \quad (3)$$

将式(3)带入式(2)中,并将式(2)的两式相减可得

$$\theta_2(t+\Delta t) - \theta_1(t) = \theta_c(t+\Delta t) - \theta_c(t) \quad (4)$$

在 t 时刻,一个传感器检测的涡流信号相位为 $\theta_i(t)$,传感器位置处管道壁厚贡献的相位变化为 $\Delta\theta_i(t)$,则

$$\theta_i(t) = \Delta\theta_i(t) + \theta_c(t), \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

在基于远场涡流的管道缺陷定量检测中,主要通过传感器检测的涡流相位信号 $\theta_i(t)$ 进行分析.在 $\theta_i(t)$ 中, $\Delta\theta_i(t)$ 表示传感器检测位置的管道壁厚信息,而 $\theta_c(t)$ 表示发射线圈处管道壁厚的信息; $\Delta\theta_i(t)$ 和 $\theta_c(t)$ 同时混叠在 $\theta_i(t)$ 中,为了准确获取 $\Delta\theta_i(t)$,需在 $\theta_i(t)$ 中移除 $\theta_c(t)$. $\theta_c(t)$ 称为伪峰信号,其由发射线圈处于缺陷位置时产生,如图2所示.

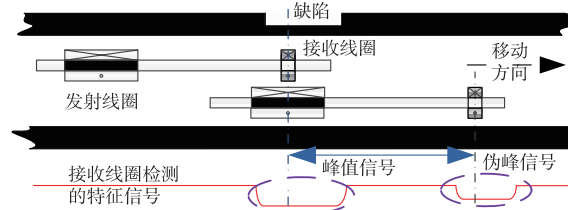


图2 远场涡流检测模型

为了移除式(5)中的伪峰信号,采用双接收线圈方法获取伪峰信号,结果如式(4)所示.对式(4)进行去卷积处理就可获取伪峰信号 $\theta_c(t)$.

2.2 维纳去卷积滤波器

维纳去卷积滤波器在去卷积的同时具有滤除平稳高斯噪声的优势^[9].本文采取维纳去卷积滤波器获取伪峰信号,同时滤除信号中的高斯噪声.

在式(4)中,令,

$$\theta_c(t+\Delta t) - \theta_c(t) = \theta_c(t) * (\delta(t+\Delta t) - \delta(t))$$

$$= \theta_e(t) * h(t) \quad (6)$$

$$\theta(t) = \theta_2(t + \Delta t) - \theta_1(t) \quad (7)$$

式(6)中, * 表示卷积运算, $\delta(t)$ 为单位冲击响应函数。

将式(6)、式(7)带入式(4), 并化简得,

$$\theta(t) = \theta_e(t) * h(t) \quad (8)$$

则基于式(8)的维纳去卷积滤波器如图 3 所示。

图 3 中, $\rho(t)$ 为噪声信号, 本文估计为平稳白噪声; $h(t)$ 为特征响应, 由式(6)可得; $\theta(t)$ 为实际仪器检测的两个接收线圈检测相位差值, 由式(7)可得。图 3 所示的维纳去卷积滤波器的目的是为了求出伪峰信号 $\theta_e(t)$ 的最佳估计 $\hat{\theta}_e(t)$, 则根据维纳去卷积滤波器的原理^[12,13]可得伪峰信号最佳估计的离散傅里叶变换为,

$$F(\hat{\theta}_e(t)) = \frac{\bar{F}(h(t)) \cdot F(\theta(t))}{|F(h(t))|^2 + \gamma} \quad (9)$$

$F(\cdot)$ 为离散傅里叶变换; $\bar{F}(\cdot)$ 为离散傅里叶变换的共轭; γ 为信噪比的倒数。

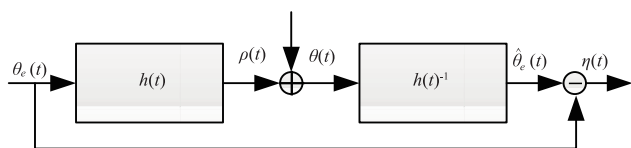


图3 维纳去卷积滤波器模型

则对式(9)进行离散傅里叶逆变换可得伪峰信号的最佳估计, 如式(10)所示。

$$\hat{\theta}_e(t) = \text{IFFT}(F(\hat{\theta}_e(t))) \quad (10)$$

$\text{IFFT}(\cdot)$ 为离散傅里叶反变换。

当测试管道无缺陷、各向同性时, 由式(6)可知,

$$\theta_e(t + \Delta t) - \theta_e(t) = 0 \quad (11)$$

则,

$$\hat{\theta}_e(t) = 0 \quad (12)$$

即传感器检测的涡流信号的相位为

$$\theta_i(t) = \Delta\theta_i(t) = 2\Delta\theta_0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$\Delta\theta_0$ 为涡流信号穿透一次正常管道壁厚产生的相位变化。

即维纳去卷积滤波器去除的是发射线圈处有缺陷时, 缺陷代表的伪峰信号; 当发射线圈处无缺陷时, 缺陷伪峰信号为 0 (式(11)所示), 则传感器检测信号中未去除任何信息。因此, 发射线圈处管道无缺陷时产生的相位变化仍包含 $\theta_i(t)$ 去伪峰后的信号中, 需去除, 如式(14)所示。

$$\Delta\theta_i(t) = \theta_i(t) - \hat{\theta}_e(t) - \Delta\theta_0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

通过式(14)就可实现基于远场涡流的管道缺陷定量评估。维纳去卷积滤波器对于平稳的高斯噪声可实现良好的滤除, 但是对于检测信号中的粗大误差却不能进行处理。而粗大误差在实际检测中又由于测试环境、测试仪器、人员的影响不可避免。为了去除检测信号中的粗大误差, 本文将采用强局部加权线性回归^[10]的方法进行处理。

3 实验准备

为了验证第 2 节所述方法的可行性, 现提供了符合图 1 所示检测方法的测试仪器。测试仪器上的各个线圈参数如表 1 所示。

表 1 仪器线圈参数

线圈名	线圈轴向长度(mm)	线圈内直径(mm)	线圈外直径(mm)	匝数	电阻(ohm)	铜线直径(mm)	支架材料
发射线圈	334	28.4	44.4	7550	61	0.58	非导磁
接收线圈 1	76.2	26.3	27.9	9275	7035	0.051	非导磁
接收线圈 2	76.2	26.3	27.9	9275	7035	0.051	非导磁
传感器上接收线圈	12.2	2.7	6	4500	516	0.051	铁芯(1J85)

为了在管道周向更好的实现管道局部缺陷的检测, 采用一组(共 12 个)周向式分布的传感器作为测试手段, 如图 4 所示。每个传感器可检测直径为 26mm 的范围。实验管道参数如表 2 所示。

表 2 实验管道参数

内直径 (mm)	外直径 (mm)	壁厚 (mm)	长度 (mm)	相对 磁导率	电导率 (MS/m)
157.1	177.8	10.36	9000	80	5.95

在实验管道壁上设计如图 5 所示的七段台阶环状缺陷。

管道正常处壁厚 10.36mm, 在各台阶处壁厚为: 台阶 1 处 9.36mm, 台阶 2 处 8.36mm, 台阶 3 处 7.36mm,

台阶 4 处 6.36mm, 台阶 5 处 5.36mm, 台阶 6 处 4.36mm, 台阶 7 处 3.36mm; 每一个台阶缺陷长 150mm, 总长为 1050mm。

接着台阶状缺陷, 在管道外壁沿周向设计五列如图 6 所示的在位置上相互交错的矩形槽。图 6 中的矩形缺陷均具有相同的深度(7mm)。从左到右, 第一列所有矩形槽具宽度均为 25mm, 第二列矩形槽宽度均为 20mm, 第三列矩形槽宽度均为 16mm, 第四列矩形槽宽度均为 8mm, 第五列矩形槽宽度均为 5mm; 每列缺陷由下到上的长度分别为: 50mm, 40mm, 30mm, 20mm, 10mm。

实验仪器以及其它实验管道如图 7 所示。由于设计的缺陷管道已埋入地下以便进行测试, 未能给出实物图。测试仪器以 320mm/min 匀速检测实验管道。

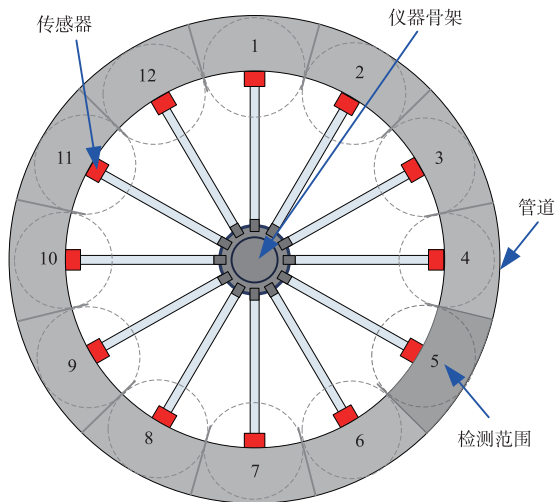


图4 12个传感器在管道内部的分布图

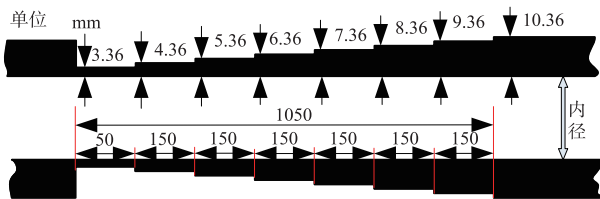


图5 台阶环状缺陷示意图

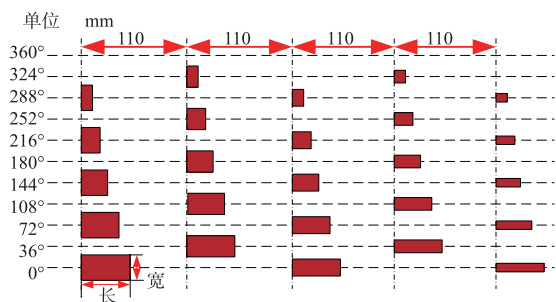


图6 外壁矩形槽缺陷

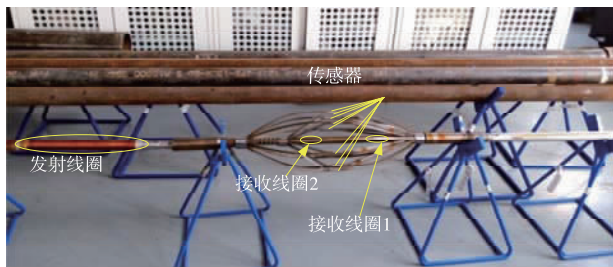


图7 测试仪器及管道实物图

4 理论验证及测试结果分析

测试仪器从图5所示的缺陷左端开始测试,测试完台阶状缺陷后,接着测试图6所示的外壁矩形缺陷,仪器在实验管道上进行2~3次测试以保证测试结

果的准确性. 仪器上接收线圈1检测的相位原始信号, 以及其通过强局部加权线性回归滤除粗大误差后的结果如图8所示.

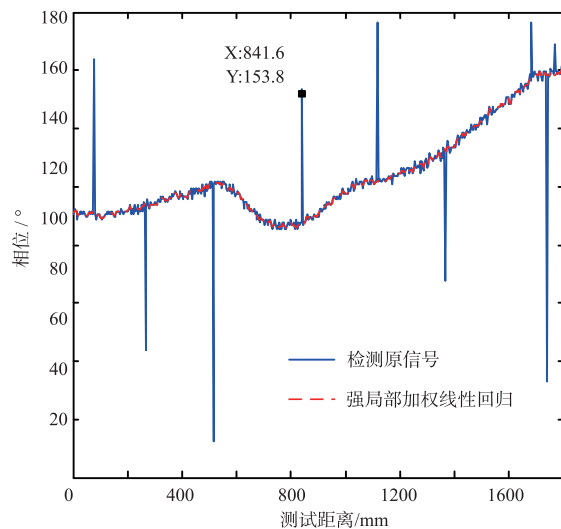


图8 接收线圈1检测的信号处理对比图

由图8可知,强局部加权线性回归可以很好的滤除测试数据中的粗大误差而不改变数据的整体趋势. 后文中亦会用其分别滤除12个传感器检测信号中的粗大误差.

用于缺陷定量的12传感器直接测试管道的结果如图9所示.

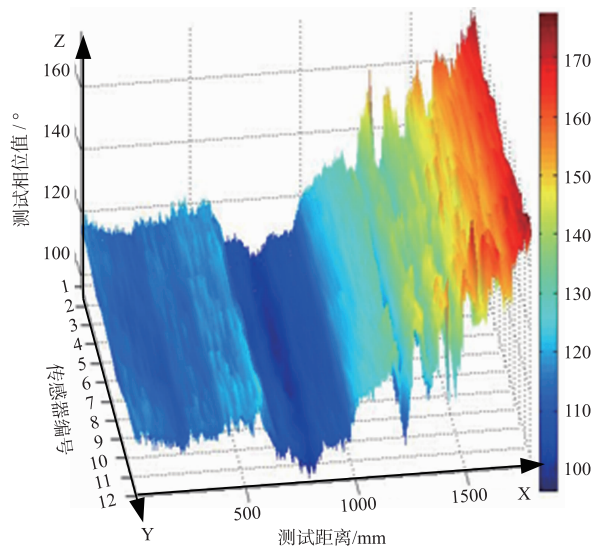


图9 传感器检测缺陷的相位信号图

图9中,在 $0 < X < 1050$ 的测试范围,对应图5所示的台阶状缺陷(从左到右, $150 \times 7 = 1050\text{mm}$);但是,传感器在 $0 < X < 1050$ 范围内的测试结果并不完全符合图5所示台阶状缺陷的变化趋势. 测试结果表明:在 $600 < X < 1050$ (对应图5中的台阶3~台阶1)范围内的管道壁厚最薄,缺陷最大;这并不符合图5所示的管

道真实情况.这是因为当传感器移动到 $600 < X < 1050$ 时,发射线圈处于 $0 < X < 450$ 位置,致使传感器接收的相位信号中叠加了发射线圈处缺陷的信息,从而检测出错误的缺陷信息.在 $1160 < X < 1710$ 的测试范围,对应图 6 所示的五列外壁槽缺陷(从左到右, $110 \times 5 = 550\text{mm}$),亦出现相同的检测错误.在图 9 的基础上应用第 2 节的方法去除伪峰以及去噪后的结果如图 10 所示.

比较图 10 和图 9 可知,经过去伪峰和去噪处理后,在 $0 < X < 1050$ 范围,相位检测信号呈现阶梯状变化的趋势,基本符合图 5 所示的实物缺陷.然后,在 $1160 < X < 1710$ 范围,明显出现对应于图 6 所述的五列外壁槽缺陷的特征信号.为了分析本文提出的管道定量检测方法的实用性,现将图 10 中(虚线圈所示)对应于 5 列外壁槽的范围提取出,并按式(15)将相位信号转化为缺陷的绝对尺寸,与图 6 所示的真实缺陷进行比较分析.

$$depth = \frac{(\Delta\theta_0 - \Delta\theta_i)}{\Delta\theta_0} \times 10.36 \quad (15)$$

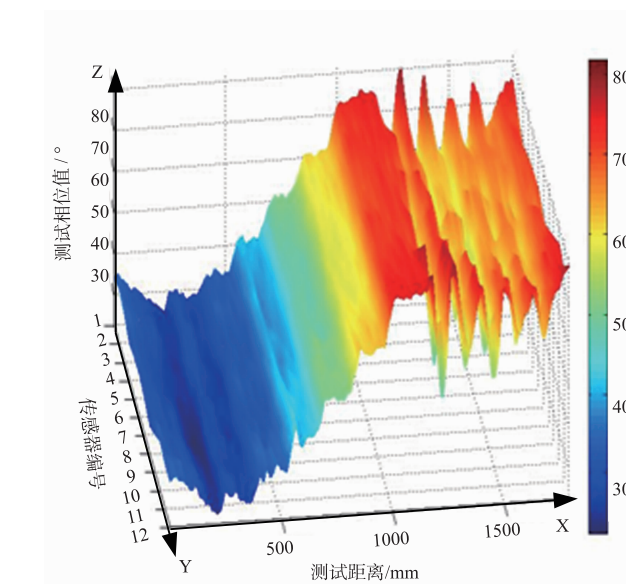
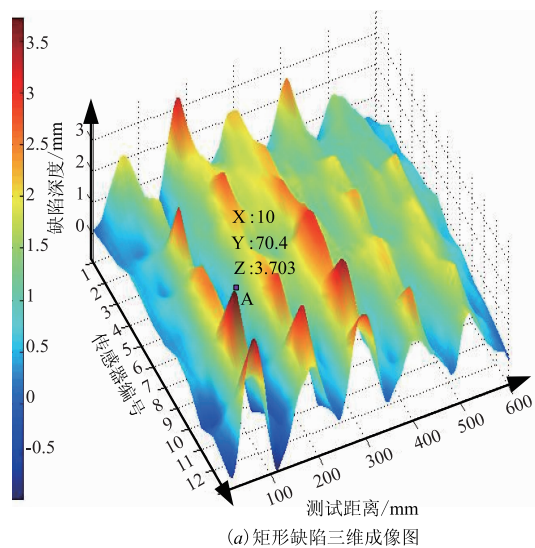


图10 处理后的传感器检测结果图

式(15)中 $i = 1, \dots, 12$; $\Delta\theta_i$ 为对应传感器处理后的相位测试值,由式(14)给出; $\Delta\theta_0$ 由式(13)给出,当实验管道为表 2 所示管道时, $\Delta\theta_0 = 75^\circ$. 转化后的结果如图 11 所示.

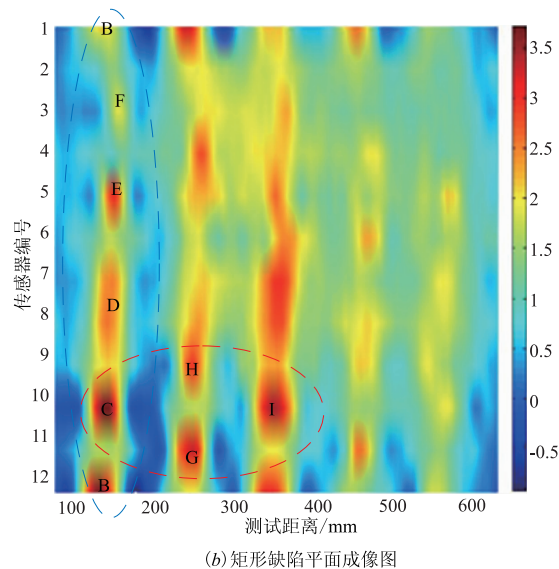


图11 五列外壁槽缺陷测试结果图

从图 11 中可看出缺陷共有 5 列,第一列缺陷共分为 5 个部分(如图 11(b)中的 B、C、D、E、F 所示,1 号传感器和 12 号传感器检测区域部分重合);在 8~12 号传感器的检测范围内,每列缺陷之间呈现交错式的分布(如图 11(b)中 C、G、H、I 所示).图 6 所示的缺陷深度均为 7mm,但图 11 所示的结果中,缺陷最大深度为 3.703mm(图 11(a)中的 A 点),明显小于缺陷的真实深度.下一步的研究重点将在于:根据可反演管道局部缺陷正确信息的相位特征信号,重构缺陷的正确尺寸

信息(长、宽、高).

5 总结

本文提供了基于远场涡流的管道局部缺陷定量检测方法,结合本文所述方法及测试仪器,可以实现面积 20mm^2 、深度 7mm 及更大体积缺陷的准确辨识,说明了该方法在管道局部缺陷定量检测中的实用性.该方法采用一组(共 12 个)处于远场涡流区域的传感器检测管道周向的局部缺陷,利用两个在远场区域与发射线

圈同轴设置的两个接收线圈(接收线圈 1、2)移除传感器检测信号中的伪峰信号,并采用强局部加权线性回归滤除测试信号中的粗大误差,最终达到管道局部缺陷准确成像的目的. 本文虽然可以实现管道局部缺陷的准确成像(包括局部缺陷的位置,大小信息),但是对于局部缺陷的准确定量仍然与管道缺陷真实情况存在一定的误差. 后续将在本文提供的管道局部缺陷准确信息的基础上,进一步研究缺陷的准确定量方法.

参考文献

- [1] Afzal M, Udup S. Advanced signal processing of magnetic flux leakage data obtained from seamless gas pipeline[J]. NDT&E International, 2002, 35: 449 - 457.
- [2] Yang B F, Li X C. Pulsed remote field technique used for nondestructive inspection of ferromagnetic tube [J]. NDT&E International, 2013, 53: 47 - 52.
- [3] Xu X J, Liu M, Zhang Z B, Jia Y L. A novel high sensitivity sensor for remote field eddy current non-destructive testing based on orthogonal magnetic field[J]. Sensors, 2014, 14(12): 24098 - 24115.
- [4] Rosell A, Persson G. Finite element modelling of closed cracks in eddy current testing[J]. International Journal of Fatigue, 2012, 41: 30 - 38.
- [5] Tao AH, Zhang W, Wang ZG, Luo QW. Design on forward modeling of RFEC inspection for cracks [J]. Information Science, Electronics and Electrical Engineering, 2014, 1: 579 - 584.
- [6] Thirunavukkarasu S, Rao B P C, Jayakumar T, Raj B. Techniques for processing remote field eddy current signals from bend regions of steam generator tubes of prototype fast breeder reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38: 817 - 824.
- [7] 罗清旺, 师奕兵, 王志刚, 张伟, 马东. 一种基于远场涡流的管道大面积缺陷定位检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2790 - 2797.
- [8] Luo Qing-wang, Shi Yi-bing, Wang Zhi-gang, Zhang Wei, Ma Dong. Location and inspection method for large area pipe defect based on RFEC testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2790 - 2797. (in Chinese)
- [9] 刘哲, 陈路, 杨静. 一种基于局部最优维纳滤波的图像重构算法 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(11): 2556 - 2562.
- [10] Liu Zhe, Chen Lu, Yang Jing. An image reconstruction algorithm using patch-based locally optimal wiener filtering [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2014, 36(11): 2556 - 2562. (in Chinese)
- [11] Ma J W, Chan J C W, Canters F. Robust locally weighted regression for super resolution enhancement of multi-angle remote sensing imagery [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(4): 1357 - 1371.

作者简介



师奕兵 男, 1964 年 9 月出生, 四川成都人. 教授、博士生导师. 于 1985 年、1988 年和 2002 年分别获得电子科技大学工学学士、工学硕士和工学博士学位. 主要研究方向为测试理论及电子测试仪器, 集成电路与电子系统综合测试.

E-mail: ybshi@uestc.edu.cn



罗清旺 男, 1990 年 2 月出生, 四川广元人. 2012 年 7 月毕业于电子科技大学自动化工程学院, 获工学学士学位; 现为电子科技大学博士研究生, 主要研究方向为电磁涡流无损检测理论、缺陷评估方法以及数据处理等.

E-mail: lqw_uestc@163.com