

多元检测线圈在石油拼接套管的 远场涡流检测中的应用

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

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

摘要: 在基于远场涡流的拼接套管检测中, 拼接套管各管道分析的复杂性会因为远场涡流两次穿透套管壁的特性而增加. 当发射线圈处于缺陷位置时, 作者已提出基于双接收线圈的伪峰移除方法. 当发射线圈处于正常管道位置时, 伪峰移除方法并不能移除检测信号中发射线圈处管道的信息, 所以本文提出弥补该不足点的方法. 该方法首先通过去伪峰方法将检测信号中发射线圈附近的管道情况统一转化为无缺陷的情况; 然后, 采用维纳去卷积滤波器获取拼接套管上缺陷(接箍可视为缺陷)的位置信息, 并根据缺陷位置反向定位拼接套管正常位置. 最后, 统一移除检测信号中发射线圈处管道的信息. 该方法通过仪器测试科索#1井得到验证, 有利于提高远场涡流在拼接套管检测分析中的实用性.

关键词: 拼接套管; 远场涡流; 双接收线圈; 伪峰信号; 维纳去卷积滤波器

中图分类号: P631.3+25

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)05-1139-07

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

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.018

The Applications of Dual Pick-up Coils in RFEC Testing of Casings in Oil Wells

LUO Qing-wang^{1,2}, SHI Yi-bing^{1,2}, WANG Zhi-gang², ZHANG Wei^{1,2}, LI Yan-jun^{1,2}

(1. Center for Information Geoscience, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China

2. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: In the Remote Field Eddy Current Testing (RFECT) of joint casings, the two penetrations of eddy current will enhance the complicity of analyzing joint casings. Based on our previous studies, the secondary peaks that caused by transmitter passing defects can be removed by employing two pick-up coils in remote field. However, when transmitter at normal pipe locations, there are not any secondary peaks, and nothing will be removed. The pipe information near transmitter is still contained in testing signals. In order to overcome this shortcoming, based on the pick-up coils, this paper deduced the method for removing Normal Pipe Value (NPV) caused by transmitter from testing signals. Firstly, the Wiener deconvolution filter is adopted to identify the signal that can be used to indicate defects. Secondly, based on the signal obtained by Wiener filter, the self-adapting acquisition of NPV is achieved. The correctness and feasibility of proposed method are validated by testing tool and Kesuo #1 well.

Key words: RFEC testing; joint casings; pick-up coils; secondary peaks; Wiener deconvolution filter

1 引言

井下石油套管通过接箍连接, 从而构成一个维持油井运行的生命线^[1~3]. 根据井况, 井深的不同, 采用的套管钢级也不同. 由于地下环境复杂多变, 石油套管

极易产生形变和受到腐蚀, 特别在套管接箍附近^[3]; 接箍的检测与防护是检测领域研究的重点^[4~6]. 在拼接套管的无损检测研究中, 超声检测方法易受到检测环境的影响^[5], 漏磁检测方法不易实现深层缺陷的检测^[6]. 因为远场涡流可以两次穿透管壁, 对套管内外壁

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-07-03; 责任编辑: 马兰英

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. ZYGX2016J104)

缺陷具有相同的检测灵敏度^[7~10],因此其对套管的检测具有广泛的应用前景.因为远场涡流两次穿透套管壁(发射线圈附近和接收线圈附近),接收线圈上的检测信号中包含了远场涡流两次穿透管壁的信息.在基于远场涡流的拼接套管检测分析中,只需要检测信号中接收线圈附近管道的信息,对于检测信号中发射线圈附近管道的信息需要移除.在移除过程中,可将发射线圈附近管道分为两种情况:(1)为发射线圈处于管道缺陷位置时;(2)为发射线圈处于正常管道位置时(未产生缺陷).

对于发射线圈处于管道缺陷位置时的信号移除情况,本文作者已经做了详细研究^[11~13].由于拼接套管是由多根单独套管拼接而成,而每一根独立的套管均有各自对应的正常管道值(如检测信号的相位测试值);在基于远场涡流的拼接套管检测中,如何获取每一个测试点各自对应的正常管道值以便移除检测信号中发射线圈处管道信息是一个新的难题.为了解决这个问题,本文在双接收线圈的基础上,推导出移除各测试点所对应正常管道值的方法.该方法在双接收线圈的基础上通过维纳去卷积滤波器^[14]将缺陷信号分离出来(接箍可视作缺陷);最后通过缺陷信号反向的辨识各测试点对应的正常管道值.

2 基本原理

2.1 基远场涡流的双接收线圈检测模型

在图1所示的基于远场涡流的双接收线圈检测模型中,两个接收线圈均置于远场区域且与发射线圈同轴放置;发射线圈激励正弦低频信号(0~100Hz),两个接收线圈同时接收来自发射线圈的远场信号.套管1和套管2通过接箍连接.

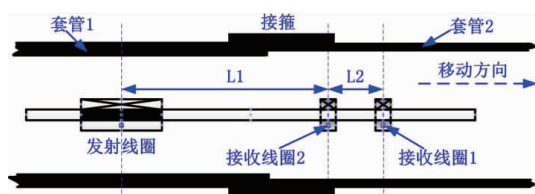


图1 拼接套管内部基于远场涡流的双接收线圈检测模型

图1中, L_1 为2号接收线圈与发射线圈的距离(2.5~3倍管道内直径); L_2 为两个接收线圈之间的距离(1~2倍管道内直径).两个接收线圈由相同的绞线圈绕制,具有相同的尺寸.因为接收线圈的检测信号两次穿透管壁(发射线圈附近和接收线圈附近),所以可以将检测信号分解为:

$$\theta(t) = \Delta\theta(t) + \theta_e(t) \quad (1)$$

式(1)中, t 为测试时间; $\theta(t)$ 为检测信号; $\Delta\theta(t)$ 为接收线圈附近管道信号,是用于拼接套管定量的有用信号;

$\theta_e(t)$ 为发射线圈附近管道信号,是需移除的信号.又因为发射线圈附近的管道可分为两种情况:正常和有缺陷;则 $\theta_e(t)$ 可进一步分解为:

$$\theta_e(t) = \theta_a(t) + \theta_n(t) \quad (2)$$

式(2)中, $\theta_a(t)$ 代表发射线圈附近管道距有缺陷,称为伪峰信号; $\theta_n(t)$ 代表发射线圈附近管道无缺陷.当发射线圈附近管道无缺陷时 $\theta_a(t) = 0$.将式(2)带入式(1),可得检测信号的进一步分解式:

$$\theta(t) = \Delta\theta(t) + \theta_a(t) + \theta_n(t) \quad (3)$$

通过本文作者的先前研究^[11~13]可知,式(3)中的伪峰信号可通过双检测线圈移除(详见文献[11]),则移除伪峰后的式(3)可表示为:

$$\theta'(t) = \Delta\theta(t) + \theta_n(t) \quad (4)$$

式(4)中, $\theta'(t)$ 为检测信号移除伪峰后的信号; $\theta_n(t)$ 为每个测试点所对应的正常管道值,根据单根套管而变化.当测试套管无缺陷时:

$$\Delta\theta(t) = \theta_n(t) \quad (5)$$

则将式(5)带入式(4),可得:

$$\theta'(t) = 2\theta_n(t) \quad (6)$$

式(6)中的数值2代表信号在发射线圈附近和接收线圈附近共计两次穿透管壁.

若 $\theta_n(t)$ 可自适应获取,则用于对拼接套管定量分析的有用信号可表示为:

$$\Delta\theta(t) = \theta'(t) - \theta_n(t) \quad (7)$$

2.2 缺陷信号的推导

在任一测试时刻,图1所示的双接收线圈上的检测信号根据式(4)可表示为:

$$\theta_1'(t) = \Delta\theta_1(t) + \theta_n(t) \quad (8a)$$

$$\theta_2'(t) = \Delta\theta_2(t) + \theta_n(t) \quad (8b)$$

式(8)中, $\theta_1'(t)$ 表示接收线圈1去伪峰后的检测信号; $\theta_2'(t)$ 表示接收线圈2去伪峰后的检测信号;因为这两个接收线圈同时接收来自一个发射线圈的信号,所以它们具有相同的正常管道值 $\theta_n(t)$.

将式(8a)减去式(8b)可得:

$$\theta_1'(t) - \theta_2'(t) = \Delta\theta_1(t) - \Delta\theta_2(t) \quad (9)$$

又由1号接收线圈和2号接收线圈的位置关系可知:

$$\Delta\theta_2(t) = \Delta\theta_1(t) * \delta(t - \Delta t) \quad (10)$$

其中,*为卷积操作; $\delta(t)$ 为单位冲激函数; Δt 可由式(11)给出:

$$\Delta t = L_2/v \quad (11)$$

v 为仪器的测试速度(匀速).

将式(10)带入式(9)并转化可得:

$$\theta'(t) = \Delta\theta_1(t) * (\delta(t) - \delta(t - \Delta t)) \quad (12)$$

其中, $\theta'(t)$ 由下式给出:

$$\theta'(t) = \theta_1'(t) - \theta_2'(t) \quad (13)$$

式(13)可由两个接收线圈获得.若可直接根据式(12)求解出 $\Delta\theta_1(t)$,则可直接实现检测处管道的定量分析.但是,由于式(12)中 $\delta(t) - \delta(t - \Delta t)$ 关系式的影响,根据式(12)求解出的 $\Delta\theta_1(t)$ 不一定是真实的 $\Delta\theta_1(t)$,为了说明该情况,将 $\Delta\theta_1(t)$ 做如式(14)所示的分解.

$$\Delta\theta_1(t) = \Delta(t) + N \quad (14)$$

N 可以是任意与时间无关的常数.

将式(14)带入式(12)可得:

$$\begin{aligned} \theta'(t) &= (\Delta(t) + N) * (\delta(t) - \delta(t - \Delta t)) \\ &= \Delta(t) * (\delta(t) - \delta(t - \Delta t)) \end{aligned} \quad (15)$$

由式(15)可知,根据式(10)求解出的实际信号为 $\Delta(t)$.当 $\Delta(t) + N = \Delta\theta_1(t)$ 时, $\Delta\theta_1(t)$ 才可真实求解出;但是由于 N 的任意性,根据式(10) - (15)求解出真实的 $\Delta\theta_1(t)$ 是不可行的.

由式(13)可知:

(1)当测试管道为正常管道时, $\theta'(t) = 0$;则由式(15)求得: $\Delta(t) = 0$.

(2)当两个接收线圈的检测信号不相等时(即任一接收线圈检测处出现缺陷,或两个接收线圈检测处出现不相等的缺陷), $\theta'(t) \neq 0$;则由式(15)求得: $\Delta(t) \neq 0$.

综合上述(1),(2)可知,由式(15)求得的 $\Delta(t)$ 可称为缺陷信号:

$$\Delta(t) \begin{cases} = 0, & \text{无缺陷} \\ \neq 0, & \text{有缺陷} \end{cases} \quad (16)$$

式(16)已可实现管道缺陷的检测;但是当缺陷损耗面积大于两个接收线圈的共同测试范围时,该缺陷处管道将被当做正常管道处理.在拼接套管的定量分析中,还需在各测试点的检测信号中移除其对应的管道正常值以便分析单根套管上缺陷的损耗程度.下节将给出基于式(15)的缺陷信号($\Delta(t)$)获取方法,以及管道正常值自适应获取方法.

2.3 管道正常值的获取方法

考虑到式(15)所示的卷积关系以及实际检测信号中的噪声,本文采用维纳去卷积滤波器^[14]来解析式(15).

在式(15)中,令:

$$h(t) = \delta(t) - \delta(t - \Delta t) \quad (17)$$

将式(17)带入式(15),并转化可得:

$$\Delta(t) = \theta'(t) * h(t)^{-1} \quad (18)$$

则基于式(18)的维纳去卷积滤波器由图2给出.

图2中, $\rho(t)$ 为噪声信号; $h(t)$ 为特征响应; $\theta'(t)$ 为两个接收线圈检测检测信号去伪峰后的差值.图2的目的是为了求出缺陷信号 $\Delta(t)$ 的最佳估计 $\hat{\Delta}(t)$,则根

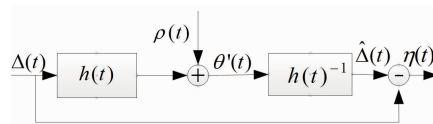


图2 维纳去卷积滤波器模型

据维纳去卷积滤波器的原理^[14]可得缺陷信号的最佳估计的离散傅里叶变换为:

$$F(\hat{\Delta}(t)) = \frac{\overline{F(h(t))} \cdot F(\theta'(t))}{|F(h(t))|^2 + \gamma} \quad (19)$$

式(19)中, $F(\cdot)$ 为离散傅里叶变换; $\overline{F(\cdot)}$ 为离散傅里叶变化的共轭; γ 为信噪比的倒数.

再对式(19)进行离散傅里叶逆变换可得缺陷信号的最佳估计为:

$$\hat{\Delta}(t) = \text{IFFT}(F(\hat{\Delta}(t))) \quad (20)$$

$\text{IFFT}(\cdot)$ 为离散傅里叶逆变换操作.

根据式(20)得出的管道正常值获取方法为:

(1)当 $\hat{\Delta}(t) = 0$ 时,由式(6)可知:

$$\theta_n(t) = \theta'(t)/2 \quad (21)$$

(2)当 $\hat{\Delta}(t) \neq 0$ 时,

①先向发射线圈方向($t > t_0$)进行管道正常值搜索,将距离测试点最近的管道正常值作为测试点的管道正常值:

$$\theta_n(t) = \theta'(t_0)/2 \quad (22)$$

并且, $\min \|t - t_0\|, \hat{\Delta}(t_0) = 0$.

②若 $t_0 = 0$,则向另外一个方向($t < t_0$)进行管道正常值搜索,将距离测试点最近的管道正常值最为测试点的管道正常值:

$$\theta_n(t) = \theta'(t_0)/2 \quad (23)$$

并且, $\min \|t - t_0\|, \hat{\Delta}(t_0) = 0$.

情况(1),(2)表明,所测试的单根套管必存在无缺陷的地方,即 $\hat{\Delta}(t_0) = 0$.结合(1),(2)就可获取测试套管上各测试点所对应的管道正常值;然后根据式(7)就可移除管道正常值.为了更好的将上述方法应用到拼接套管的分析中,使分析检测结果具有更强的鲁棒性;一般选择一个接近于0的实常数(ξ)作为情况(1),(2)的判别阈值.即情况(1)变为: $|\hat{\Delta}(t)| \leq \xi$;情况(2)变为: $|\hat{\Delta}(t)| > \xi$.本文进行了相应的物理实验验证上述方法的可行性.

3 物理实验

现提供了符合图1所示检测模式的测试仪器,如图3所示.该仪器由中海油田股份有限公司—电子科技大学电法测井联合实验室自主研发.测试仪器上的各个

线圈参数如表 1 所示.

表 1 测试仪器上各线圈参数

线圈名	长度 (mm)	内直径 (mm)	外直径 (mm)	匝数	电阻率 (ohm/m)	绞线直径 (mm)	相对磁导率
发射线圈	334	28.4	44.4	7550	$4.247e-8$	0.58	1
接收线圈 1	76.2	26.3	27.9	9275	$3.083e-7$	0.051	1
接收线圈 2	76.2	26.3	27.9	9275	$3.083e-7$	0.051	1

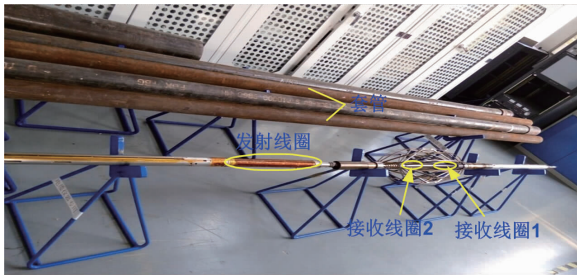


图3 测试仪器实物图

仪器上,发射线圈与 2 号接收线圈的中心间距 (L_1) 为 757mm,两个接收线圈的中心距 (L_2) 为 150mm. 被测拼接套管由中海油服燕郊基地的科索#1 井提供. 测试仪器在测试科索#1 井之前已在空气环境



图4 科索#1井测试现场图

中通电工作 20min 左右,以确保仪器正常工作. 仪器通过电缆竖直下放入科索#1 井,依靠重力进行移动(下放速度 0.06m/s). 仪器下井测试现场如图 4 所示.

4 理论验证及测试结果分析

科索#1 井套管总长度达到千米级,以及为了保密,本文仅选择部分测试结果进行验证与分析. 本文所选取的测试结果为仪器在科索#1 井下 1100 米左右(温度:150℃左右,压强:100Mpa 左右)的测试数据,并采用相位作为科索#1 井拼接套管分析的特征量,如图 5 所示.

从图 5 可知,在地下 1100 米附近,被测试的科索#1 井是由不同的套管拼接而成;不同套管之间通过接箍连接(如图 5 中虚线圈所示). 接收线圈(1 或 2)的相位信号表明:在套管连接处,测试信号具有两个峰值:实峰和伪峰(图 5 虚线圈). 而实际上,两根套管之间只通过一个接箍连接,只会出现一个峰值. 第一个峰值(实峰)可正确的反映接箍的位置与大小(接收线圈 1 的实峰(图 5 蓝色箭头)和接收线圈 2 的实峰(图 5 红色箭头));第二个峰值被称为伪峰^[11~13](图 5 黑色箭头). 伪峰会造成错误的接箍定位与定量分析,因为伪峰是由发射线圈通过接箍位置产生的检测信号,不能反映接收线圈处套管的信息. 移除伪峰后的信号与原信号的对比如图 6 所示(以接收线圈 1 为例). 由图 6 可知,伪峰被有效的移除,而对接箍检测有用的实峰则被很好的保留. 伪峰移除方法几乎不改变其它部分的相位测试值.

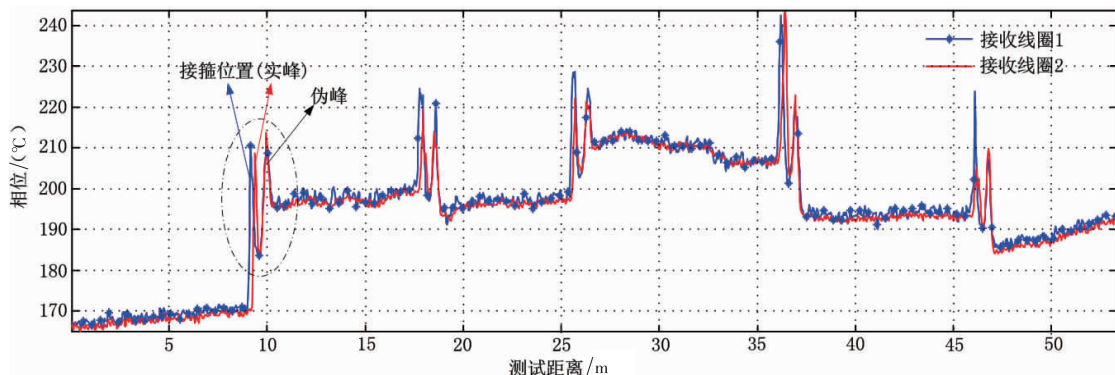


图5 接收线圈2和接收线圈1测试信号的相位值

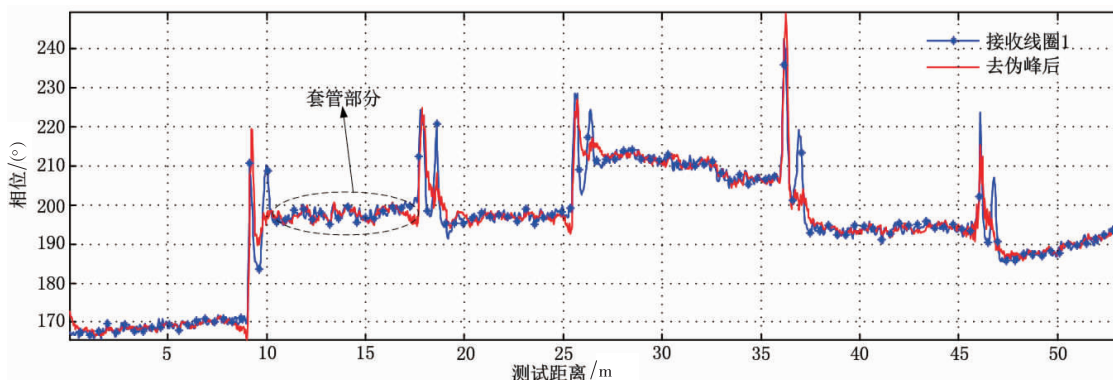


图6 接收线圈1的相位信号及其移除伪峰后的比较图

在通过远场测试的相位信号进行套管定量分析时,一般采用式(24)计算套管壁厚^[15,16].

$$h = \frac{\theta}{2\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (24)$$

式(24)中, h 为检测处套管壁厚; θ 为检测处移除伪峰后的相位测试信号; f 为激励信号频率; μ 为套管的磁导率; σ 为套管的电导率;2表明信号两次穿透管壁.

式(24)可直接用于信号在发射线圈附近和接收线圈附近套管产生的相位偏转相等的情况.而不能直接

用于接箍处(或缺陷处)壁厚的计算,因为此时在发射线圈和接收线圈附近套管产生的相位偏转不相等;在计算时,由于式(24)中因子2的影响,计算的壁厚(h)与实际套管壁厚有较大的偏差.本文提出的方法可消除因子2所带来的计算误差,并将式(24)变形为 $h = \theta / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ 来计算检测处的壁厚.

应用式(8)~式(20)提取的缺陷信号,如图7所示.

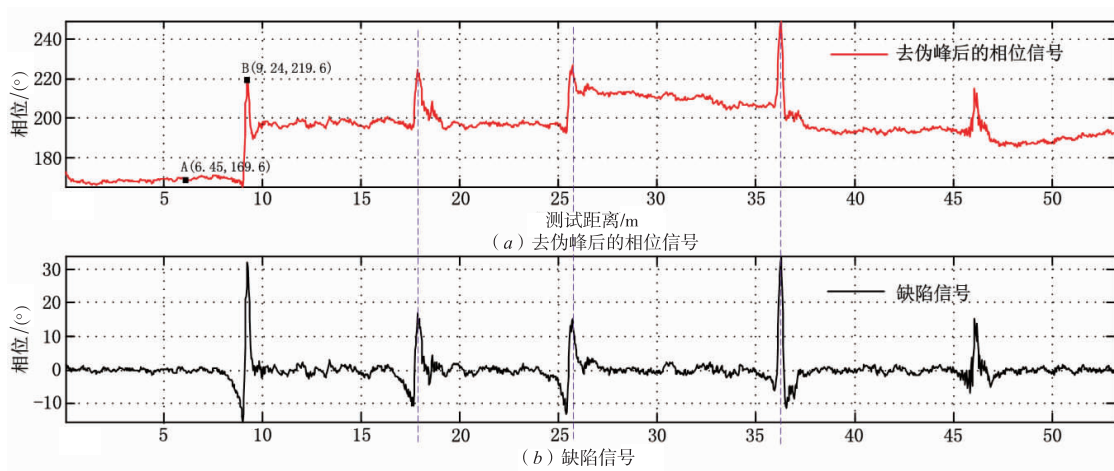


图7 去伪峰后的相位信号与缺陷信号对比图

图7(a)为图6中去伪峰后的信号(红线);图7(b)为获取的缺陷信号.由图7可知,缺陷信号可准确的指示出接箍的位置(图7中紫色虚线所示,接箍可视为壁厚变厚的异常位置);并将各其它部位的相位值均映射为0附近的数值,这为获取各套管的管道正常值提供了基础.

由式(21)~式(23)获取的管道正常值如图8(a)所示($\xi=5$).相位信号去伪峰后再移除对应管道正常值的结果如图8(b)所示.图8(b)在数值上等于图7(a)的信号减去图8(a)的信号.因为科索#1井的壁厚参数以及物理参数(磁导率、电导率)涉及保密,本文未

将图8(b)所示的相位信号通过 $h = \theta / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ 转化为管道的绝对壁厚以便分析比较.

为了便于阐述本文所述方法的意义,在图7(a)中标示出点A和点B,在图8(b)的对应位置标示出点C和点D以作分析.比较点A和点C的数值大小可知,C值为A值的一半;而点D的数值大于点B数值的1/2,这是因为接箍只出现在接收线圈位置处(未同时出现在发射线圈处).若图7(a)的信号直接采用式(24)计算接箍处壁厚,则由于因子2的影响,接箍处壁厚的计算失真不可避免.另外,点B与点A的数值之差为50°(接箍造成的信号变化量),其基本与点D与点C的数

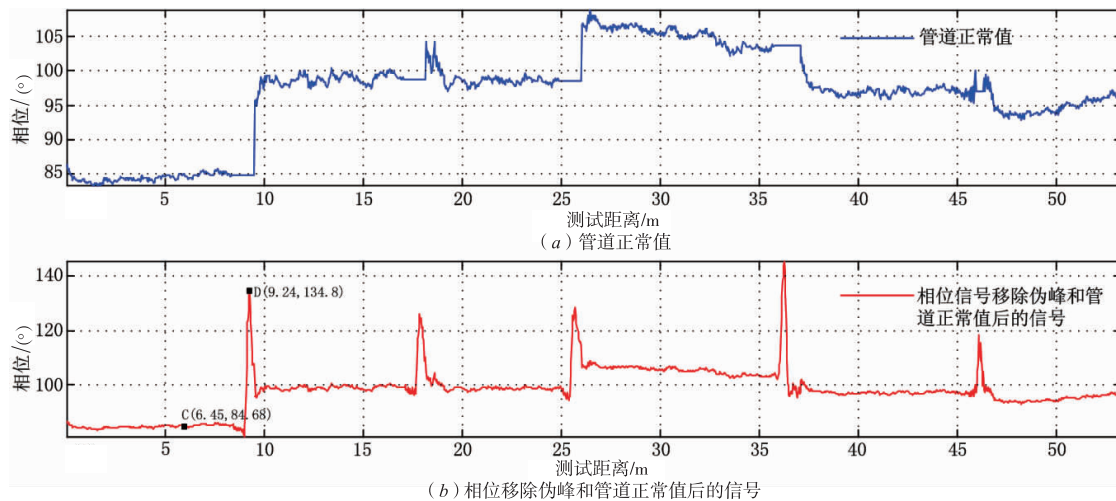


图8 管道正常值以及其移除结果对比图

值之差(50.12°)相等;这说明本文提供的方法并不会影响接箍(或缺陷)造成的信号变化量,这为图8(b)的信号采用式 $h = \theta / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ 进行拼接套管的正确定量分析提供了依据.

5 总结

本文提供了基于远场涡流的拼接套管信号处理方法,可有效提高管道接箍或缺陷定量分析的正确性. 本文所述方法是作者从先前关于移除套管远场涡流检测中伪峰的方法上引申出来的,其处理的信号是伪峰移除后的远场检测信号. 首先,通过两个接收线圈的检测信号之间的时移关系来迭代缺陷信号与检测信号的关系式(式(1)~式(15));其次,通过维纳去卷积滤波器提取出缺陷信号(式(20)),并根据式(21)~式(23)获取各测试点对应的管道正常值;最后,在移除伪峰后的远场信号中再次移除各点对应的管道正常值. 最后获取的结果信号通过式 $h = \theta / \sqrt{\pi f \mu \sigma}$ 可提高远场涡流检测中拼接套管的接箍或缺陷定量分析的正确性.

在本文提供的方法中,参数 γ 为信噪比的倒数;在实际检测中,由于信号会经过一系列滤波处理,所以 γ 一般设置在 $0.001 \sim 0.102$ 之间. 因为一般套管的相对磁导率大于80,电导率为 5.6 MS/m ,当激励信号频率为 20 Hz 时, 1 mm 套管壁厚致使检测信号相位产生至少 10.77° 的变化;所以参数 ξ 一般设置在 $0 \sim 10$ 之间,一方面提高本文方法的鲁棒性,一方面使方法对拼接套管壁厚分析的影响不超过 1 mm .

参考文献

[1] Zhang Z P, Li A. Research overview of casing damage in china's oil fields [A]. International Conference on Architectural Engineering and New Materials [C]. Guangzhou,

China, 2015. 409 - 415.

- [2] Zhou J J, Li N M, Qin L, Tang B. Protection of oil casing tube steel via surface treatment in China; a literature review [J]. Surface Review and Letters, 2013, 20(2): UNSP 13300025.
- [3] Ren C Q, Zhu M, Du L, Chen J B, Zeng D Z, Hu J Y, Shi T H. Two-metal corrosion of casing pipe joint in $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ environment [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2015, 10(5): 4029 - 4043.
- [4] Lian Z H, Zhang Q, Lin T J, Li K C, Liu Y H. Experimental study and prediction model of casing wear in oil and gas wells [J]. Journal of Pressure Vessel Technology-transactions of the ASME, 2016, 138(3): 031404.
- [5] Chapuis B, Jenson F, Calmon P, DiCrisci G, Hamilton J, Pomie L. Simulation supported POD curves for automated ultrasonic testing of pipeline girth welds [J]. Welding in the World, 2014, 58(4): 433 - 441.
- [6] Shi Y, Zhang Chao, Li R, Cai M L, Jia G W. Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection [J]. Sensors, 2015, 15(12): 31036 - 31055.
- [7] Teitsma A, Takach S, Maupin J, Fox J, Shuttleworth P, Seeger P. Small diameter remote field eddy current inspection for unpiggable pipelines [J]. Journal of Pressure Vessel Technology-transactions of the ASME, 2005, 127(3): 269 - 273.
- [8] Chen Y B, Zheng J, Luo W J. Remote field eddy current testing technology for ferromagnetic heat exchanger tubes [A]. ASME Pressure Vessels and Piping Conference [C]. Toronto, Canada, 2012. 237 - 239.
- [9] Tao A H, Zhang W, Wang Z G, Luo Q W. Design on forward modeling of RFEC inspection for cracks [A]. International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering [C]. Sapporo, Japan, 2014. 578 - 583.

- [10] Kim D, Udpa L, Udpa S. Remote field eddy current testing for detection of stress corrosion cracks in gas transmission pipelines [J]. *Materials Letters*, 2004, 58 (15): 2102 - 2104.
- [11] 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.
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)
- [12] Luo, Q W, Shi Y B, Wang Z G, Zhang W, Zhang Y. Approach for removing ghost-images in remote field eddy current testing of ferromagnetic pipes [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87 : 104707.
- [13] Luo, Q W, Shi Y B, Wang Z G, Zhang W, Ma D. Method for removing secondary peaks in remote field eddy current testing of pipes [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, 36 (1).
- [14] 束宇翔, 廖桂生, 杨志伟. 维纳滤波最优权修正导向矢量的 SAR-GMTI 动目标径向速度估计方法 [J]. *电子学报*, 2011, 39 (9): 1986 - 1991.
Shu Yu-xiang, Liao Gui-sheng, Yang Zhi-wei. Radial velocity estimation of moving targets based on modifying the steering vector with wiener optimal weights in SAR-GMTI radar system [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39 (9): 1986 - 1991. (in Chinese)
- [15] 王志刚, 罗清旺, 师奕兵, 陶爱华. 铁磁性管道内涡流线圈耦合分析与管道参数检测 [J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35 (12): 2843 - 2849.
Wang Zhi-gang, Luo Qing-wang, Shi Yi-bing, Tao Aihua. Analysis of eddy current coil coupling in ferromagnetic pipe and pipe's parameter detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35 (12): 2843 - 2851. (in Chinese)
- [16] Vasic D, Bilas V, Ambrus D. Validation of a coil impedance model for simultaneous measurement of electromagnetic properties and inner diameter of a conductive tube [J]. *IEEE Transaction on Instrument and Measurement*, 2006, 55, 337 - 341.

作者简介



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



师奕兵 (通信作者) 男, 1964 年 9 月出生, 四川成都人. 教授、博士生导师. 于 1985 年、1988 和 2002 年分别获得电子科技大学的工学学士、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