DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1904794

一种铁磁管道中远场涡流的伪峰移除方法*

孙 虎[1,2],师奕兵[1,2],张 伟[1,2],李焱骏[1,2]
(1. 电子科技大学自动化工程学院 成都 611731; 2. 电子科技大学 信息地学研究中心 成都 611731)

摘 要:在铁磁性管道的远场涡流检测中,由于涡流信号会从激发线圈和接收线圈处 2 次穿透管壁,所以同一缺陷必然影响 2 次远场涡流信号的传输,其在接收信号中分别体现为主峰和伪峰。主峰包含了管道缺陷的位置等信息,然而伪峰在管道的检测和评估中表现为对缺陷定位的干扰。为了排除伪峰对管道缺陷定位的干扰,给出了一种新的远场涡流伪峰移除方法,首先利用数学形态学滤波器滤除缺陷信号的基线偏移,然后提出以径向基函数拟合主峰、伪峰的数学模型,并使用 Nelder-Mead 单纯型法求解该模型的参数以得到伪峰信号。仿真实验和实际数据处理结果表明,该方法具有良好的伪峰移除效果,具有一定的适用性。

关键词: 远场涡流检测;伪峰移除;数学形态学滤波器;径向基函数;Nelder-Mead 单纯型法
中图分类号: TH701 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

A pseudo-peak removing method of remote field eddy current in ferromagnetic pipelines

Sun Hu[1,2], Shi Yibing[1,2], Zhang Wei[1,2], Li Yanjun[1,2]
(*1.School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China*;
2.Information Geoscience Research Center, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In remote field eddy current testing(RFECT) of ferromagnetic pipes, because the eddy current signal penetrates the pipe wall twice from the exciting winding and pick-up winding, the same defec twill affect the propagation of the remote field eddy current signal twice, which leads to the appearance of two peaks in the received signal, they are called real peak and pseudo-peak here. The real peak contains the useful information such as the position of the pipe defect, whereas the pseudo-peak acts as a disturbance to the defect positioning in the pipeline test and evaluation. In order to eliminate the disturbance of the pseudo-peak to defect positioning, this paper proposes a novel pseudo-peak removing method of remote field eddy current. Firstly, mathematical morphological filter(MMF) is utilized to eliminate the baseline bias of the defect signal, then a mathematical model based on radial basis function(RBF) is introduced to fit the real peak and pseudo-peak, and the Nelder-Mead simplex method(NMSM) is used to solve the model parameters and obtain the pseudo-peak signal. Simulation experiment and practical data processing results indicate that the proposed method possesses a decent pseudo-peak removing performance and certain applicability.

Keywords: remote field eddy current testing (RFECT); pseudo-peak removing; mathematical morphological filter (MMF); radial basis function (RBF); nelder-mead simplex method

0 引 言

伴随着上世纪航空航天以及核工业的高速发展,无损检测技术的相关研究也得到极大地推动。无损检测因其高效的检测速度、不损坏被测检工件的检测方式而被广泛地运用于铁磁性或非铁磁性金属的检测与健康评估[1]。由于具有对外部缺陷灵敏度高、降低提离干扰和非接触式检测等特点,电磁涡流技术被广泛地运用于铁磁性管道的检测和评估之中[2-5]。目前,运用远场涡流信

收稿日期:2019-03-01 Received Date:2019-03-01
*基金项目:国家自然科学基金(61201131)、中央高校基本科研业务费(ZYGX2016J104)项目资助

号对管道进行健康评估已经具有了大量的研究成果。基于有限元的研究方法[6],使得远场涡流信号在被检测工件中的分布变得更加直观,极大的提高了研究效率。文献[7-12]表明,不同结构的涡流检测装置在缺陷评估中具有出色的表现。三相旋转远场涡流[7]对压力管中周向和轴向缺陷的检测十分有效;铁镍合金构成的磁场导向器[8]实现了间接耦合信号的增强和直接耦合信号的衰减,提高了接收线圈对管道缺陷异常的灵敏度;倾斜线圈[9]的结构对周向和轴向管道缺陷都具有良好的识别率;在正交涡流激发信号的基础上,将接收线圈设置成 E 型和 U 型的周向分布[10],同样实现了缺陷的检测;在管道外部用贴片线圈[11]对管道缺陷进行检测的方式和基于磁阻传感器[12]作为信号接收器的研究对管道缺陷检测给出了新的思路;基于多层聚磁结构[13]的远场脉冲涡流集中了磁场能量,所以传感器具有更高的检测灵敏度。由于远场涡流信号的二次穿透特性,在接收信号中必然存在伪峰,伪峰对管道缺陷的定位和评估具有很强的干扰性,所以必须消除。尽管当前远场涡流的研究成果已经很多,但是伪峰移除的研究依旧很少。在此情况下,相关研究人员给出了一种基于维纳去卷积滤波器(wiener deconvolution filter,WDF)的方法[14-17]。该方法基于 2 个接收线圈,并将二者的接收信号进行差分处理,然后使用维纳去卷积滤波求得伪峰,最后使用原始信号减去伪峰信号以得到无伪峰的信号。该方法在远场涡流伪峰的移除上十分有效,不仅计算时间短,而且有效地移除了伪峰,但双接收线圈增加了检测仪器的长度与复杂性,且双接收线圈的信号在对应位置上存在的差异会引起新的误差。

本文针对上述问题,给出了一种新的伪峰移除方法。首先使用数学形态学滤波器[18-21]滤出信号的基线偏移,然后使用径向基函数(radial basis function, RBF)拟合主峰和伪峰,接着基于 Nelder-Mead 单纯型法[22-24](nelder-mead simplex method,NMSM)求解径向基函数的参数,并以此得到伪峰的拟合结果。最后从原始信号中减去伪峰以达到伪峰滤出的效果。仿真实验和实际数据处理结果表明,在只使用 1 个接受线圈的情况下,本文提出的方法有效地滤除了伪峰干扰,具有一定的适用性。

1　远场涡流检测模型

由于远场涡流信号对管道内外壁都具有很高的灵敏度,所以其对管道内外壁缺陷的检测十分有效。加上其快速和非接触的测量方式,使得其在石油天然气等易受腐蚀管道、套管的健康评估中得以广泛运用。基于远场涡流的铁磁性管道检测模型如图 1 所示。

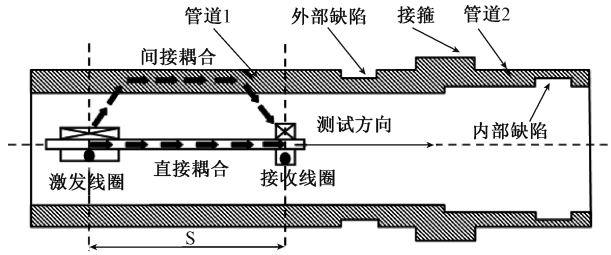


图 1　铁磁性管道远场涡流检测模型

Fig.1　RFECT model of ferromagnetic pipes

由图 1 可知,石油井下套管由金属管道和接箍组成,接箍主要用于连接 2 根相邻的管道,且由于相邻管道的厚度并不严格相等,所以在管道拼接处可能存在管道内径变化。在整个管道上主要有 3 种情况可以使得接受线圈信号产生异常信号,分别是外部缺陷、内部缺陷和接箍。外部缺陷和内部缺陷都使管道的厚度变薄,而接箍处管道厚度增加。

此处远场涡流检测装置由单个激发线圈和单个接收线圈组成。由图 1 可知,远场涡流信号在金属管道中的传播方式主要有 2 种:1)直接耦合方式,即沿着管道轴向方向传播;2)间接耦合方式,涡流信号在管壁中传播。由于缺陷等异常情况皆位于管壁,所以间接耦合包含了大量的缺陷信息,并且为了降低直接耦合信号对间接耦合信号的影响,激发、接收线圈间距 S 需设置合理。

实际上,远场涡流中通常使用接收信号相对于激发信号的相位变化[14-16] $\Delta\varphi$ 来描述管道的异常,接收信号的变化可由式(1)近似给出。

$$\Delta\varphi = (T + R)\sqrt{f\pi\mu\sigma} \tag{1}$$

式中:f 为激发信号频率;μ 和 σ 分别为管道的相对磁导率和电导率;T 和 R 分别为激发线圈和接收线圈处的管道壁厚。

由图 1 可知,当远场涡流检测装置向右移动时,接收线圈会首先位于外部缺陷,根据式(1)可知,此处必然出现相位的变化,即主峰出现。当装置继续移动,激发线圈随后会位于同一缺陷下,即使此时接收线圈处并无任何缺陷,由式(1)的结论可知,接收信号相位会再次发生变化,即伪峰出现。主峰信号包含了大量的缺陷信号,而伪峰信号在检测过程中容易造成错误的缺陷定位,所以伪峰的移除十分必要。由于实际套管由多节单独金属管道拼接而成,且管道拼接处存在内径变化,使得实际 $\Delta\varphi$ 存在基线偏移。为了方便后续伪峰的移除,这里首先基于数学形态学滤波器对 $\Delta\varphi$ 存在的基线偏移进行处理。

2　数学形态学滤波器

数学形态学滤波器由于其计算开销小,算法简单易实现等特点被广泛的运用于医学、电子显微的图像分析

之中,是一种基于集合、非线性信号叠加的算法[17]。在图像的特征处理中,数学形态学滤波具有十分出色的表现。

2.1 数学形态学基本运算

随着数学形态学的发展,其他领域的学者开始将其用于一维信号的处理,尤其是在一维心电信号[19-21]处理领域,数学形态学滤波器表现出了相当好的滤波效果。本文同样基于数学形态学滤波器移除接收线圈涡流相位信号的基线偏移,一维数学形态学的基本公式如下。

$$(f \oplus g)(j) = \max_{i \in L}(f(j-i) + g(i)) \tag{2}$$

$$(f \ominus g)(j) = \min_{i \in L}(f(j+i) - g(i)) \tag{3}$$

其中,$f(j)$ 是长度为 N 的原始数据,$j \in N$;$g(i)$ 是长度为 L 的结构元素,在此处 $g(i)$ 使用长度 $L = 30$ 的 RBF 表示;$(f \oplus g)(j)$ 为一维信号 $f(j)$ 的膨胀操作;$(f \ominus g)(j)$ 为一维信号 $f(j)$ 的腐蚀操作。当一维信号中存在间距较窄的 2 个峰时,合适的膨胀操作可以消除二者间的间隙,使二者连接在一起。而腐蚀操作可以一定程度上缩小幅值较大的峰,使其幅值变小。

根据式(2)和(3),还可以进一步推导得到形态开运算和形态闭运算如下。

$$(f \circ g)(j) = (f \ominus g) \oplus g(j) \tag{4}$$

$$(f * g)(j) = (f \oplus g) \ominus g(j) \tag{5}$$

形态开运算 $(f \circ g)(j)$ 和形态闭运算 $(f * g)(j)$ 都是由数学形态学的基本运算膨胀和腐蚀变化而来。其中形态开运算首先进行腐蚀运算降低一维信号的突出部分,然后再进行膨胀以消除腐蚀留下的狭窄间距。形态闭运算首先对一维信号进行膨胀以消除消除狭窄间距,然后对信号的幅值做等量的腐蚀。因此形态开运算通常用于消除信号的波峰,而形态闭运算通常用于移除信号的波谷,由此可以求得信号的波峰 PO 和波谷 VC 如下。

$$PO = f(j) - (f \circ g)(j) \tag{6}$$

$$VC = f(j) - (f * g)(j) \tag{7}$$

用在 COMSOL 中仿真得到的套管相位信号作为原始数据 $f(j)$,数学形态学的基本运算结果如图 2 所示。其中原始数据 $f(j)$ 是在 COMSOL 中由一个具有外部缺陷和接箍的金属管道仿真而来,由于外部缺陷导致管道厚度降低,而接箍导致管道厚度增加。根据式(1)可知,管道厚度降低的地方相位信号必然下降,厚度增加的地方相位信号必然增加,这与在 COMSOL 中得到的仿真数据变化规律一致。

由图 2 可知,每个缺陷都有对应的主峰(第 1 个波峰或波谷)和伪峰(第 2 个波峰或波谷)。腐蚀运算去掉了波峰,同时放大了波谷宽度;膨胀运算去掉了波谷,但放大了波峰宽度;形态开运算移除了波峰,保留了波谷;形态闭运算去掉了波谷,保留了波峰。

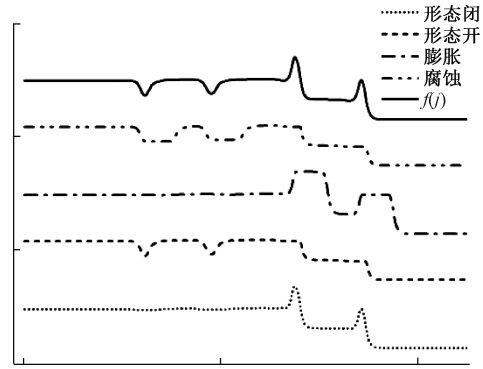


图 2 数学形态学运算结果

Fig.2 Mathematical morphological operationresult

2.2 数学形态学开闭运算

但是当使用式(6)求解波峰时,若在信号中存在 2 个间距小于波峰宽度的波谷时,那么这个间距就将会被保留下来。同理,当单独使用式(7)求解波谷时,若信号中存在 2 个间距小于波谷宽度的波峰,那么这个间距也会被保留下来。因此单独的使用式(6)和(7)在某些情况下并不能准确的求得真正的波峰和波谷,在这种情况下,式(8)和(9)给出了完美的解决方案,式(8)首先求得移除波峰和波谷后的基线 BL,然后利用式(9)可以得到移除的波峰和波谷 PV。

$$BL = (f \circ g) * g(j) \tag{8}$$

$$PV = f(j) - BL(j) \tag{9}$$

式(8)首先使用形态学开运算滤除了一维信号的波峰,即使信号中存在彼此间距小于波峰的波谷也不会影响,因为在形态开运算后又进行了形态闭运算,所以波峰和波谷都会被滤除。那么剩下的部分就是信号的基线 BL,再使用式(9)就可以得到信号的所有波峰和波谷 PV。

前面已经分析过单独的形态开运算或闭运算的缺点,为了克服这个缺点,本文使用式(8)对仿真数据进行运算。然后使用式(9)求得所有的波谷和波峰,并按照式(10)和(11)将波谷和波峰分开。

$$\begin{cases} Peaks(j) = PV(j), & PV(j) \geqslant 0 \\ Peaks(j) = 0, & PV(j) \leqslant 0 \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} Valleys(j) = PV(j), & PV(j) \leqslant 0 \\ Valleys(j) = 0, & PV(j) \geqslant 0 \end{cases} \tag{11}$$

式(8)和(9)的运算结果如图 3 所示。由图 3 可知,式(8)很好地滤除了信号中波谷和波峰,所以剩下的部分是信号的基线 BL。求得 BL 后,再使用式(9)就可以求出信号的波峰与波谷 PV。

通常情况下,在信号中还会存在一些不能由前期处理滤掉的噪声干扰。为了排除此类干扰,合适的阈值 M 被引入,如图 3 所示。当 PV 的绝对值小于 M 时,将会被

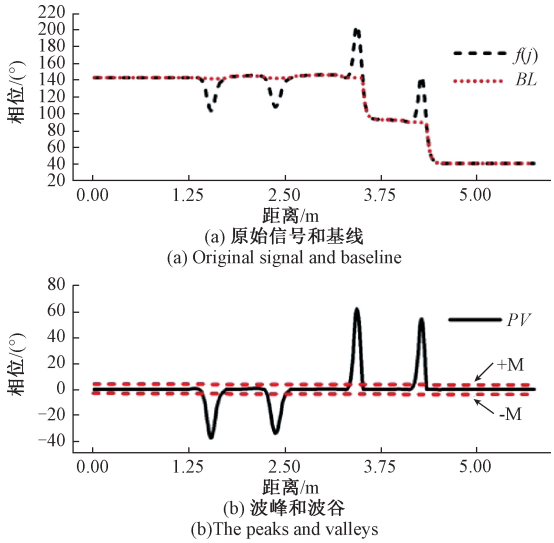


图 3　MMF 滤波结果

Fig.3　The filtering results of MMF

置 0,其他部分不变,该操作可以有效地移除前期未被滤波器滤掉的低幅干扰。

在滤掉低幅干扰以后得到滤波后波峰与波谷 *FPV*,用求导的方式可以从 *FPV* 中求取 *Peaks* 和 *Valleys* 的波峰点或波谷点并得到其位置。求得所有极值点位置 *EP* 后,就可以求得主峰和伪峰的平均距离 $L=(EP(k+1)-EP(k))/(n/2)$,其中 $k\in[1,n-1]$,n 为极值点数量。设一个主峰的位置为 x,则可以将 *Peaks* 和 *Valleys* 区间$(x-L,x+2L)$ 截取成对应于同一缺陷或异常的主峰伪峰。

由数学形态学开闭运算将原始信号的基线滤除,并将信号截取成对应同一缺陷或异常的数据段后,接下来就可以对伪峰进行消除。

3　基于 NMSM 的伪峰模型参数求解

由图 3 可知,对应于每个缺陷的主峰和伪峰是成对的,且伪峰总是位于主峰之后,因此本文采用 RBF 构成信号的主峰、伪峰拟合模型,并在此基础上,提出使用 NMSM 对拟合模型的参数进行求解。

3.1　基于 RBF 的主、伪峰拟合模型

为了将主峰和伪峰进行分离,本文将对应于同一缺陷的主峰和伪峰假设成独立的信号,并且该缺陷的响应是由主峰和伪峰和伪峰叠加构成。因此给出如式(12)的主峰伪峰拟合模型。

$$y(j,b)=\sum_{m=1}^{T}h_mR_m(j,\kappa_m,\lambda_m) \tag{12}$$

其中 $b=\{h_1,\kappa_1,\lambda_1,\cdots,h_T,\kappa_T,\lambda_T\}$ 是拟合模型的所有参数。T 是 RBF 的个数;$R_m(j,\kappa_m,\lambda_m)$ 表示第 m 个 RBF;κ_m 和 λ_m 分别决定 RBF 的出现波峰值位置和波的宽度;h_m 是第 m 个 RBF 的幅值放大倍数。RBF 的表达式如式(13)所示,图形如图 4 所示。

$$R_m(x,\kappa_m,\lambda_m)=\exp\left(-\left(\frac{x-\kappa_m}{\lambda_m}\right)^2\right) \tag{13}$$

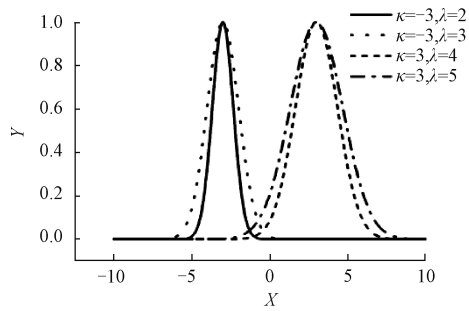


图 4　不同参数的 RBF

Fig.4　The RBFs with different parameters

由图 4 可知,RBF 的最大值为 1,参数 κ 和 λ 分别控制 RBF 的出现波峰的水平位置和波的宽度。

然后基于式(12),可以得出拟合信号和实际信号的偏差 $g(b)$ 如式(14)。

$$g(b)=\|Y(j)-y(j,b)\|^2/(3L) \tag{14}$$

其中 $Y(j)$ 为截取好的波峰或波谷,$y(j,b)$ 已经由式(12)给出,接下来只需找到一组参数 b^*,将 b^* 代入式(14)时使得 $g(b^*)$ 最小。

3.2　基于 NMSM 的模型参数求解

NMSM 是一种启发式的迭代算法,由于算法简单易实现、求解过程无需求导等优点而被大量运用于无约束非线性最优化问题[22-24]。

NMSM 每次迭代有 5 个重要的操作,分别是中心化、反射、扩展、伸缩和紧缩。设初始参数集合为 $B=\{b_0,b_1,\cdots,b_\theta\}$。其中 $b_t=\{b_{t1},b_{t1},\cdots,b_{tw}\}$,在本文中为 RBF 拟合模型的参数集。$w$ 表示参数的个数。$t\in[0,\theta]$,θ 为集合 B 的元素个数。将 B 中的元素代入式(14),则可得到式(14)的最优解、最差解以及第二差解 b_s、b_l 和 b_{sl}。接着就可以使用中心化、反射、扩展、伸缩和紧缩对 B 中元素进行优化。中心化的表达式如下。

$$b_c=\frac{1}{\theta-1}\sum_{i=0,i\neq l}^{\theta}b_i \tag{15}$$

在中心化后,对最差解进行反射以优化最差解,如下:

$$b_r=b_c+(b_c-b_l) \tag{16}$$

若 $g(b_r)<g(b_s)$,使用扩展在反射的基础上进一步延伸以得到更优解,其表达式如下:

$$b_e=b_c+2\cdot(b_r-b_c) \tag{17}$$

若 $g(b_{sl})\leqslant g(b_r)\leqslant g(b_l)$,那么对 b_r 进行外伸运算;若 $g(b_l)<g(b_r)$,则对 b_r 进行内缩运算。这 2 种运算

合称伸缩,分别如式(18)和(19)所示。

$$b_{out} = b_c + 0.5 \cdot (b_r - b_c) \tag{18}$$

$$b_{in} = b_c + 0.5 \cdot (b_l - b_c) \tag{19}$$

若 $g(b_r) < g(b_{\text{out}})$ 或者 $g(b_l) < g(b_{\text{in}})$,则进行式(20)的收缩操作。其中 $i \in [0,\theta]$ 且 $i \neq s$。

$$b_i = b_s + 0.5 \cdot (b_i - b_s) \tag{20}$$

整个算法的伪码如表 1 所示。

表 1 NMSM 伪码

Table 1 The pseudo code of NMSM

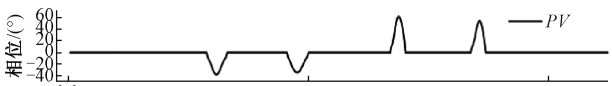
NMSM 伪码
1)初始化
2)中心化和反射,若 $g(b_s) \leqslant g(b_r) \leqslant g(b_{sl})$,$b_l = b_r$;跳至步骤 6)
3)若 $g(b_r) < g(b_s)$,扩展
若 $g(b_e) < g(b_r)$,$b_l = b_e$。否则 $b_l = b_r$;跳至步骤 6)
4)若 $g(b_{sl}) < g(b_r) < g(b_l)$ 或者 $g(b_l) \leqslant g(b_r)$,伸缩
若 $g(b_{\text{out}}) \leqslant g(b_r)$ 或 $g(b_{\text{in}}) \leqslant g(b_l)$
则 $b_r = b_{\text{out}}$ 或 $b_l = b_{\text{in}}$;跳至步骤 6)
5)若 $g(b_{\text{out}}) > g(b_r)$ 或 $g(b_{\text{in}}) > g(b_l)$,收缩;跳至 6
6)若满足停止误差或达到最大迭代次数,停止;否则跳至步骤 2)

本文设置 $T = 2$ 并使用第 1 个 RBF 和第 2 个 RBF 分别表示主峰和伪峰。然后使用本节提到的方法对第 2 节截取后的 *Peaks* 或 *Valleys* 进行拟合,接着将所有拟合的主峰和伪峰用式(21)表示,则有拟合结果如图 5 所示。

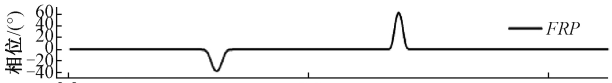
$$\begin{cases} FRP = \sum R_m(x,\kappa_m,\lambda_m), m = 2q - 1 \\ FFP = \sum R_m(x,\kappa_m,\lambda_m), m = 2q \end{cases} \tag{21}$$

式中:$q \in [1,n/2]$;*FRP* 和 *FFP* 分别为所有主峰和所有伪峰的叠加,然后可以得到移除伪峰后的主峰表达式如下:

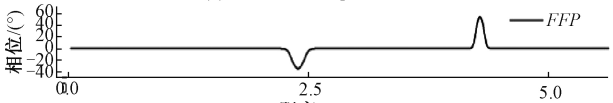
$$RP = PV - FFP \tag{22}$$



(a) 波峰和波谷
(a) The peaks and valleys



(b) 拟合的主峰
(b) The fitted real peaks



(c) 拟合的伪峰
(c) The fitted pseudo-peaks

(d) PV信号移除拟合的伪峰
(d)Removing the fitted pseudo-peaks from the PV signal

图 5 NMSM 拟合结果

Fig.5 The fitting results of NMSM

从图 5 的 *FFP* 和 *FRP* 曲线可以得知,使用基于 RBF 的拟合模型可以将主峰和伪峰分离。并且由 *RP* 的曲线可知,虽然伪峰的拟合具有一定误差,但其对缺陷定位的干扰已经基本消除。事实上,可由式(14)求得本次拟合误差为 0.084,说明本文给出方法拟合所得的 *FFP*、*FRP* 与涡流信号的伪峰和主峰具有极高的相似性和重合度。

4 实际数据实验与分析

为了进一步验证本文所提方法,在现场测量得到的部分数据中进行实验。实验的所用软件为 COMSOL 和 MATLAB,所用电脑内核为 i5-4690 CPU@3.50 GHz。

4.1 测试装置参数设置

现场测试的仪器结构基本上和图 1 一致,不过在信号接收部分使用了 2 个接收线圈[14-16](见图 6)。发射线圈和左侧接收线圈的轴心距 $S = 757$ mm,左侧接收线圈和右侧接收线圈的轴心距 $S_1 = 150$ mm。频率 20 Hz、幅值 160 V、相位为 0 的正弦信号作为激发线圈的激发信号。激发线圈和接收线圈的相对磁导率为 1,其余参数如表 2 所示。

图 6 仪器实物

Fig.6 The photo of the apparatus

表 2 仪器参数设置

Table 2 The apparatus parameter setting

线圈	内径/mm	外径/mm	匝数	长度/mm	线径/mm
激发线圈	28.4	44.4	7 550	334.0	0.580
接受线圈 1	26.3	27.9	9 275	76.2	0.051
接收线圈 2	26.3	27.9	9 275	76.2	0.051

仪器的现场测试在中海油科索#1 号井进行,整个油井长达数千米,部分测试数据如图 7 所示。由于基于本文的方法使用 1 个接收线圈进行伪峰消除,所以在具有 2 个接收线圈的仪器上同样适用。

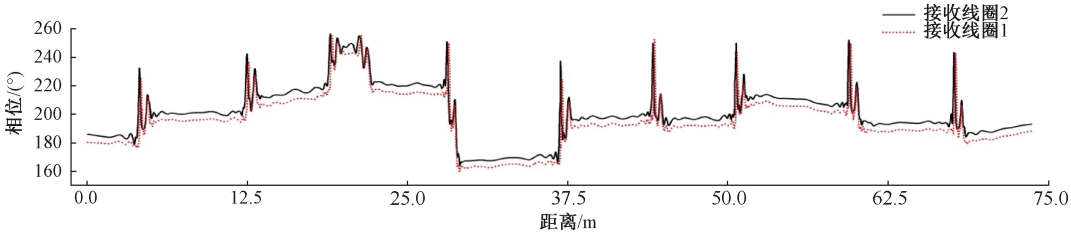


图 7　现场测试数据

Fig.7　The field test data

4.2　实际数据处理

首先按照本文方法的第一步,使用数学形态学滤波器对线圈(线圈 1 或线圈 2)的接收信号进行滤波,就可以得到信号的基线 *BL*,然后使用式(9)求得信号的所有波峰和波谷,接着使用阈值滤掉低幅干扰,最后使用 NMSM 求解基于 RBF 的拟合模型参数,并利用式(21)求得 *FRP* 和 *FFP* 并以此求取 *RP* 和滤出伪峰后的数据 *FS*,最终结果如图 8、9 所示。

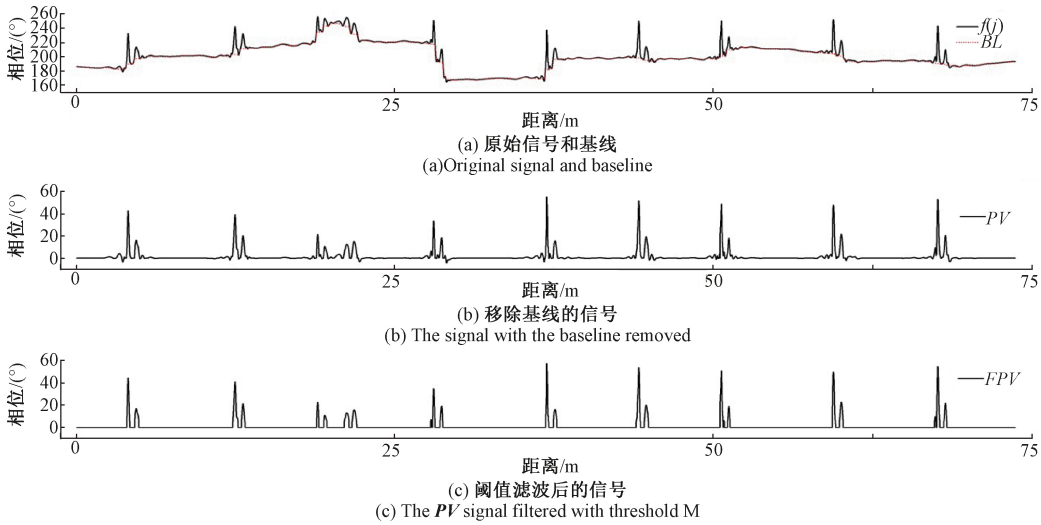


图 8　基于数学形态学滤波器的运算结果

Fig.8　The operation results based on mathematical morphological filter

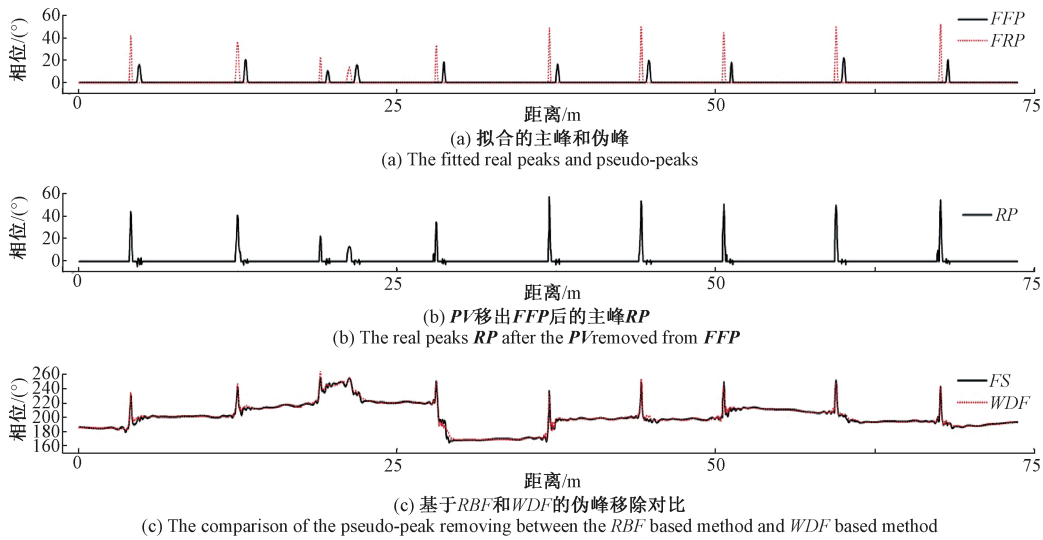


图 9　伪峰拟合与消除

Fig.9　The fitting and elimination of the pseudo-peak

从图 8 可知,基于数学形态学滤波器,信号 $f(j)$ 的基线 *BL* 被有效地提取,并且过设置阈值 $M=5$,*PV* 中的低幅干扰也得以消除。阈值的使用会使主峰和伪峰信号小于阈值 *M* 的部分失真,但从图 9 的 *RP* 和 *FFP* 信号可知,相比于伪峰滤出前,失真部分产生的误差和拟合误差对缺陷或异常处定位的影响已经可以忽略。事实上 *BL* 是实际管道无缺陷时的信号,可以基于式(1)用于反演管壁正常厚度。*PV* 信号表明,形态学滤波器可以有效地滤出基线偏移并给出更为直观的异常信号特征。由式(1)可知,此段信号中只存在接箍,不存在内外壁缺陷。从 *FPV* 中的主峰可推测出管道的接箍位置,伪峰处为干扰。

从图 9 可知,基于 NMSM 的方法实现了伪峰 *FFP* 和主峰 *RP* 的分离,并且由 *RP* 的曲线可知,*FFP* 和实际伪峰的拟合精度很高。事实上,相位信号拟合的平均误差为 0.297°,所以二者具有极好的重合度与相似性。从 *FS* 和 WDF 的结果对比中可知,基于本文的方法实现了文献[14-17]的伪峰滤除效果,且减少了接收线圈的数量。本文的方法对主峰的影响较小,主峰的幅值和消除伪峰前一致。而基于 *WDF* 的方法对主峰影响由 2 个接收线圈信号的差异决定,容易对主峰幅值产生影响,此处 WDF 所得主峰幅值与处理前幅值最大相差 8.3°。*RP* 中主峰的位置和实际信号中主峰的位置一致,所以可以使用 *RP* 对缺陷进行定位,并且使用 *RP* 进行缺陷的定位的方式更加直观。当管道的电导率和磁导率已通过其他方式测得时,可使用 *BL* 计算无明显缺陷的管道壁厚,使用 *RP* 计算异常位置处管道厚度的变化,或者使用 *FS* 计算管道的实际厚度。

5 结 论

在使用远场涡流对石油天然气输送管道的检测中,由于涡流信号具有二次穿透的特性,当接收线圈和激发线圈经过同一缺陷时会产生主峰和伪峰。其中主峰包含了缺陷的位置及厚度信息,而伪峰在则在缺陷的定位中表现为干扰。针对这一现象,相关研究人员给出了基于 *WDF*[14-17] 的方法滤出伪峰。该方法基于 2 个接收线圈实现了伪峰的滤出,但 2 个接收线圈增加了仪器的长度和复杂性,且在实际测量中,2 个接收线圈在对应位置上的真实信号可能差异极大,导致引起算法误差。对此,本文给出了一种基于一个接收线圈的方法来进行远场涡流信号的伪峰移除,首先基于数学形态学滤波器滤出了涡流信号的基线偏移,并使用阈值消除了低幅干扰;接着给出了基于 *RBF* 的数学模型对主峰和伪峰进行拟合,然后使用 NMSM 对模型的参数进行求解,并以此得到拟合的伪峰。仿真实验和实际数据处理表明,本文提出的方法对伪峰的拟合具有极高的重合度与相似性,在仅使用 1 个接收线圈的情况下有效地滤除了伪峰,为远场涡流检测信号的伪峰移除提供了一个新的思路。

参考文献

[1] JAVIERG M, JAIME G G, EMESTO V S. Non-destructive techniques based on eddy current testing[J]. Sensors, 2011, 11(3):2525-2565.

[2] RAPHAEL F, TERESA V C, JAIME V M. Defect detection and segmentation framework for remote field eddy current sensor data[J], Sensors, 2017, 17(10): 2276-2290.

[3] MIGUEL A M, LUIS R, NUNO P, et al. Novel eddy current probes for pipes: Application in austenitic round-in-square profiles of ITER [J]. NDT&E International, 2017(87):111-118.

[4] KIMH M, YOO H R, PARK G S. Analysis of a defect signal deformations induced by eddy current in RFECT system for pipeline inspection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 55(11):1-5.

[5] ZHANGW, SHI Y B, LI Y J, et al. A study of quantifying thickness of ferromagnetic pipes based on remote field eddy current testing[J]. Sensors, 2018, 18(9):2769-2779.

[6] ANTIPOV A G, MARKOV A A. 3D simulation and experiment on high speed rail MFL inspection [J]. NDT&E International, 2018(99):117-185

[7] GRIMBERG R, UDPA L, SAVIN A, et al. Remote field eddy current control using rotating magnetic field transducer: Application to pressure tubes examination [J]. Research in Nondestructive Evaluation, 2008, 19(4):202-218.

[8] KOBAYASHI N, UENO S, NAGAI S,et al. Remote field eddy current testing for steam generator inspection of fast reactor[J]. Nuclear Engineering & Design, 2011, 241(12):4643-4648.

[9] KIM Y J, LEE S S. Eddy current probes of inclined coils for increased detectability of circumferential cracks in tubing[J]. NDT&E International, 2012(49):77-82.

[10] XU X, LIU M, ZHANG Z, et al. 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.

[11] LIU Z H, HU Y A, FAN J W, et al. Longitudinal mode magnetostrictive patch transducer array employing a multi-splitting meander coil for pipe inspection[J]. NDT& E International, 2016(79):30-37.

[12] YE CH F, HUANG Y, LALITA U, et al. Novel rotating current probe with GMR array sensors for steam generate

tube inspection [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(12):4995-5002.

[13] YANG CH R, GAO B, MA Q P, et al. Multi-layer magnetic focusing sensor structure for pulsed remote field eddy current[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(7): 2490-2499.

[14] 罗清旺,师奕兵,王志刚,等. 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 Q W, SHI Y B, WANG ZH G, et al. A method for large defects inspection of pipes based on RFEC testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12):2790-2797.

[15] LUO Q W, SHI Y B, WANG ZH G, et al. Approach for removing ghost-images in remote field eddy current testing of ferromagnetic pipes [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(10):104707.

[16] LUO Q W, SHI Y B, WANG ZH G, et al. Method for Removing Secondary Peaks in Remote Field Eddy Current Testing of Pipes [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(1):1-11.

[17] LUO Q W, SHI Y B, WANG ZH G, et al. A study of applying pulsed remote field eddy current in ferromagnetic pipes testing [J]. Sensors, 2017, 17(5): 1038.

[18] MARAGOS P, SCHAFER R W. Morphological systems for multidimensional signal processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(4):690-710.

[19] TRAHANIAS P E. An approach to QRS complex detection using mathematical morphology [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1993, 40(2): 201-205.

[20] ZHANG F, BEA T W. VLSI Friendly ECG QRS complex detector for body sensor networks [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2010, 2(1):52-59.

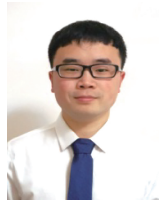
[21] ZHANG F, LIAN Y. QRS Detection based on morphological filter and energy envelope for applications in body sensor networks[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2011, 64(2):187-194.

[22] WANG P C, SHOUP T E. Parameter sensitivity study of the Nelder-Mead simplex method [J]. Advances in Engineering Software, 2011, 42(7):529-533.

[23] XIAO H F, DUAN J A. Multi-direction-based Nelder-Mead method [J]. Optimization, 2014, 63 (7): 1005-1026.

[24] FAJFAR I, PUHAN J, BURENM Á. Evolving a Nelder-Mead algorithm for optimization with genetic programming[J]. Evolutionary Computation, 2017, 25(3):351-373.

作者简介



孙虎,分别在 2014 年和 2018 年于西南石油大学分别获得学士学位、硕士学位,现为电子科技大学博士研究生,主要研究方向为电磁涡流检测与评估、信号处理。
E-mail:hsun_uestc@ 163.com

Sun Hu received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Southwest Petroleum University in 2014 and 2018, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include electromagnetic eddy current testing and evaluation, and signal processing.

师奕兵,博士,电子科技大学教授、博士生导师,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

Shi Yibing is a Ph. D., professor and Ph. D. supervisor in University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include test theory and electronic measurement instruments, comprehensive test of integrated circuits and electronic systems.

张伟(通信作者),分别在 2002 年、2005 年和 2010 年于电子科技大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,现为电子科技大学副教授,主要研究方向为电磁无损检测与评估、微弱信号检测与处理、智能信息处理等。
E-mail:weizhang@ uestc.edu.cn

Zhang Wei (Corresponding author) received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from University of Electronic Science and Technology of China in 2002, 2005 and 2010, respectively. Now, he is an associate professor in School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include selectromagnetic nonde structive testing and evaluation, weak signal detection and processing, and intelligent information processing.