

管道损伤磁梯度共振稀疏分解与 BMSR 辨识方法^{*}

王新华, 齐立夫, 陈迎春, 赵以振, 高宸宸

(北京工业大学机械工程与应用电子技术学院 北京, 100124)

摘要 为更好地提取埋地钢质管道地磁环境下由应力集中产生的磁力信号,克服现有磁力检测缺乏有效高灵敏度多元探头阵列和信号处理技术的问题,提出一种磁梯度张量共振稀疏分解结合偏置单稳随机共振(bias monostable stochastic resonance, 简称 BMSR)的辨识方法对管道损伤进行有效评估。首先,探头布置采用十字张量阵列形式;其次,针对管道缺陷和现场干扰信号特点,用不同品质因子对信号进行共振稀疏分解,剔除掉一部分干扰信号;最后,加入不同时段恢复的随机共振系统结合量子遗传算法进行参数寻优。将该辨识方法用于实际站场管道张量检测信号,比较传统低通滤波、不同随机共振系统结合共振稀疏分解的处理结果,验证了磁梯度张量共振稀疏分解加偏置单稳处理算法在提取管道损伤磁场和表征管道应力集中的有效性。

关键词 磁力检测;梯度张量;共振稀疏分解;随机共振
中图分类号: TH89

引 言

随着石油和天然气需求的日益增长,地下管线建设越来越密集,在方便人们生活的同时,也带来了一系列问题。管道在输送介质的过程中,由于所处的复杂环境,不可避免地存在材料失效、管体腐蚀、建造缺陷以及第三方破坏等威胁管道安全运行的问题。为减少管道破损带来的损失,对管道进行定期检测,评估管道安全运行状况势在必行。埋地钢质管道磁层析技术(magnetic tomography method, 简称 MTM)也称磁力检测,是俄罗斯开发的一种非开挖无损检测技术。当管道存在缺陷时会产生应力集中,并在地磁场作用下产生漏磁场,通过检测该漏磁场大小,进而评估管道的损伤程度。该方法在提取管道缺陷磁场时,极易受到非目标管道磁场的干扰,从而影响检测精度和准确性^[1-2]。磁场梯度张量测量系统与单一的总磁场和分量磁场相比能更好地反映管道的磁力信息,而且可以克服检测方向带来的影响^[3],但在实际检测时,直接计算地磁场磁梯度的大小将产生较大误差,从而影响管道损伤程度的准确判别。现有梯度信号分析多采用平滑、低通滤波,对磁梯度信号的特点分析不足^[4-5],而类似小波变换的方法对小波基和分解层数选择较为困难。因

此,如何实现强噪声干扰下管道地磁检测信号的可靠辨识和分析处理,获得准确的全张量磁梯度信号是一个非常关键的技术难题。

可调 Q 因子小波变换由 Selesnick 提出,后来在语音微弱信号检测、轴承故障特征提取方面获得应用^[6-7]。当分析信号同时含有高、低共振属性时,需要构造两种不同品质因子的小波基函数来分解信号,而传统小波方法只能选择单一品质因子的小波基,可调 Q 因子小波变换通过选择高低 Q 能克服该缺点。其利用基为 2 的快速傅里叶算法,计算过程更加高效,对冗余度和品质因子也更易量化,同时具有完美重构、完全离散等特点。共振稀疏分解选取高低品质因子表征不同振荡形态,对信号按照形态成分分析法进行非线性分离,建立高共振分量和低共振分量的最佳稀疏表示。随机共振更多的是将噪声的能量转换为待测信号的能量,使其在输出信号中凸显出来。随机共振被提出之后,双稳随机共振系统在检测低频信号上获得了良好应用效果。冷永刚等^[8]提出将二次采样用于双稳随机共振,克服了传统随机共振只能检测小参数信号的限制,有效实现了微弱大参数信号提取。单稳随机共振作为一种阱内随机共振,调节参数方面更加容易,在非周期随机信号检测中取得了许多有益结果。针对上述研究方法各自的优点和存在的不足,尝试利用共振稀疏分解方法

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0805005);北京工业大学日新人才培养计划资助项目
收稿日期:2018-03-23;修回日期:2018-05-23

分离出信号的低共振成分,再输入不同自适应随机共振系统模型对信号做进一步放大,以实现地磁检测信号和磁梯度张量信号的可靠辨识和有效提取。

1 磁梯度张量模型

磁场是矢量场,磁梯度是磁场在某一方向距离无限小时的变化量。磁梯度分为标量梯度、矢量梯度和全梯度张量。

假设空间某点磁场强度为 $\mathbf{H} = (H_x, H_y, H_z)$, $|\mathbf{H}| = \sqrt{H_x^2 + H_y^2 + H_z^2}$, r 为计算方向上的距离,则标量梯度为

$$g = d|\mathbf{H}|/dr \quad (1)$$

矢量梯度为

$$\begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \frac{d\mathbf{H}}{dr} = \begin{bmatrix} dH_x/dr \\ dH_y/dr \\ dH_z/dr \end{bmatrix} \quad (2)$$

全梯度张量为

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \partial H_x/\partial x & \partial H_x/\partial y & \partial H_x/\partial z \\ \partial H_y/\partial x & \partial H_y/\partial y & \partial H_y/\partial z \\ \partial H_z/\partial x & \partial H_z/\partial y & \partial H_z/\partial z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{xx} & g_{xy} & g_{xz} \\ g_{yx} & g_{yy} & g_{yz} \\ g_{zx} & g_{zy} & g_{zz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

由于在无源静磁场中,磁感应强度的散度和旋度为 0,故有

$$\begin{cases} g_{xy} = g_{yx} \\ g_{xz} = g_{zx} \\ g_{yz} = g_{zy} \\ g_{xx} + g_{yy} + g_{zz} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

因此,全梯度张量的 9 个分量只要知道其中 5 个分量,就能推出所有分量。图 1 所示为由 5 个三轴分量磁传感器组成的十字张量阵列检测探头模型,其中:1~5 为探头序列号;O 为探头阵列对称中心; d 为探头之间等基线距离,检测时取 25cm。 x, y 和 z 表示探头空间坐标轴,实际检测时 x 轴为管道轴向, y 轴为管道周向, z 轴为垂直管道向上方向。

选取 x, y 轴的张量分量来表征完全的梯度张量,则有

$$|\mathbf{G}| = \sqrt{(g_{xx}^2 + g_{yy}^2 + g_{zz}^2 + g_{xy}^2 + g_{yx}^2 + g_{yz}^2 + g_{zy}^2 + g_{xz}^2 + g_{zx}^2 + g_{xy}^2 + g_{yx}^2)} \times \sqrt{g_{xx}^2 + 2g_{yy}^2 + 2g_{zz}^2 + g_{xy}^2 + 2g_{zy}^2 + (g_{xx} + g_{yy})^2} \quad (5)$$

将 \mathbf{G} 中每个分量再求梯度组成全张量二次梯度 $|\mathbf{G}'|$,即

$$|\mathbf{G}'| = \sqrt{g_{xx}^{\prime 2} + 2g_{yy}^{\prime 2} + 2g_{zz}^{\prime 2} + g_{xy}^{\prime 2} + 2g_{zy}^{\prime 2} + (g_{xx}' + g_{yy}')^2} \quad (6)$$

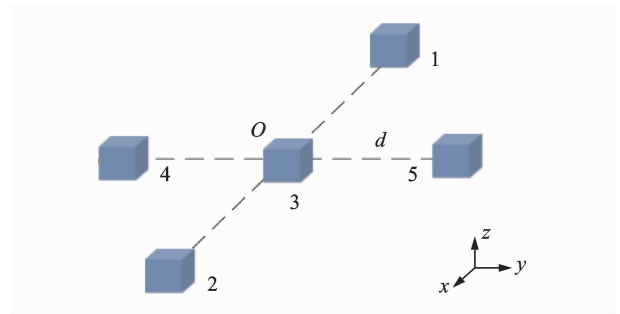


图 1 十字张量模型

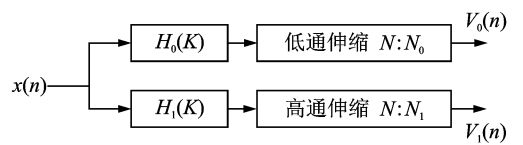
Fig. 1 Cross tensor model

相比与单一方向的磁场分量变化, $|\mathbf{G}'|$ 能反映更多的磁场信息,更好地表征磁力信号在缺陷处的突变,将 $|\mathbf{G}'|$ 值突变的地方判定为管道存在应力集中处。

2 共振稀疏分解

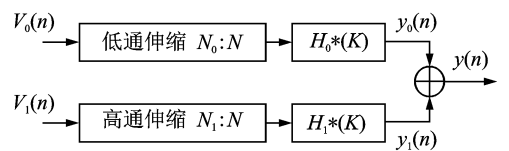
2.1 信号的共振属性

信号按照振荡程度的不同,可以分为高共振(高 Q)信号和低共振(低 Q)信号。可调 Q 因子小波变换采用的是一种类似小波变换的分解合成方法,如图 2 所示。分解过程将信号经离散傅里叶变换后的序列经低通滤波器和低通收缩得到 $V_0(n)$,经高通滤波器和高通收缩得到 $V_1(n)$,如图 2(a)所示。合成过程是反复将高低分解滤波器组用于其低通道上,得到不同层的分解信号,经逆变换得到重构信号,如图 2(b)所示。



(a) 分解过程

(a) Decomposition procedure



(b) 合成过程

(b) Synthesis procedure

图 2 可调 Q 因子小波变换

Fig. 2 Tunable Q -factor wavelet transform

可调 Q 因子小波变换主要参数为品质因子 Q 、

冗余度 r 和分解层数 J 。其中 Q 值决定了基函数的波形,代表其振荡形态。目前,高品质因子 Q 一般选择 $3\sim 8$,低品质因子 Q 一般为 1 。 Q 选定的情况下,冗余度 r 增加会使各级小波频率响应重叠度上升,即在同样的频率范围内,需要更大的分解层数 J 。从文献[6]可以看出,冗余度 r 取 3 就足够, r 一般取在 $3\sim 4$ 之间,后续分析中选取 $r=3$ 。在可调 Q 因子小波变换中,高低振成分都是不同层数 Q 小波基的线性和, J 越大,其小波基中心频率越小。因此, J 越大越能对信号进行有效稀疏表示,保证分解时有合适的中心频率,但 J 的增加会增加计算量。对于长度为 N 的信号,最大分解层数 J_{\max} 满足

$$J_{\max} = \left\lfloor \frac{\log(\beta N/8)}{\log(1/\alpha)} \right\rfloor \quad (7)$$

$$\beta = 2/(Q+1) \quad (8)$$

$$\alpha = 1 - (\beta/r) \quad (9)$$

其中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示小于括号中数值的最大整数; β 为高通尺度; α 为低通尺度。

在 Q 和 r 选定的情况下,如果想让分解层数较大时,可以使 J 稍小于 J_{\max} 。图 3 表示高 Q 为 5 , $r_1=3$, $J_1=19$ 以及低 Q 为 1 , $r_2=3$, $J_2=9$ 时不同 Q 因子下可调 Q 因子小波变换基函数。

管道处于地磁场中,应力集中处会引发磁力线异常,突变形状与低共振成分的基函数相似。实际检测时一些干扰成分是以高共振形式的信号引入,所以可以首先将信号中的高低共振进行区分,排除这一干扰。

2.2 形态成分分析稀疏分解

共振稀疏分解的形态成分分析假定信号 x 由分量信号 x_1 和 x_2 组成, s_1 和 s_2 为由高低 Q 因子组成的滤波器组,则有

$$x = x_1 + x_2 \quad (x, x_1, x_2 \in \mathbf{R}^N) \quad (10)$$

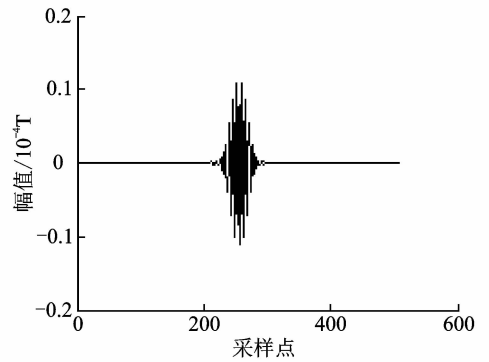
$$x = s_1 \omega_1 + s_2 \omega_2 \quad (11)$$

稀疏分解本质上转化为系数 $\{\omega_1, \omega_2\}$ 的优化求解,此时目标函数为

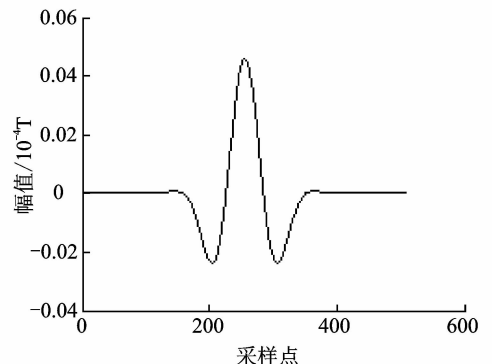
$$J(\omega_1, \omega_2) = \|x - s_1 \omega_1 - s_2 \omega_2\|_2^2 + \lambda_1 \|\omega_1\|_1 + \lambda_2 \|\omega_2\|_1 \quad (12)$$

其中: ω_1 和 ω_2 为库 s_1 和 s_2 下的变换系数; λ_1 和 λ_2 为用来分配高低共振成分的能量。

最小化目标函数采用分裂增广拉格朗日收缩算法(split augmented lagrangian shrinkage algorithm, 简称 SALSA)进行迭代运算,获得高低 Q 因子变换系数 ω_1^* 和 ω_2^* ,则有



(a) 高 Q 小波函数第 9 层
(a) Ninth layer of high Q wavelet function



(b) 低 Q 小波函数第 9 层
(b) Ninth layer of low Q wavelet function

图 3 变换基函数

Fig. 3 Transform basis function

$$\begin{cases} x_1 = s_1 \omega_1^* \\ x_2 = s_2 \omega_2^* \end{cases} \quad (13)$$

其中: x_1 为高共振成分; x_2 为低共振成分。

3 自适应优化随机共振

3.1 随机共振系统模型

随机共振可以把高频能量向低频部分转移,而磁力信号属于低频信号,但传统随机共振如双稳随机共振、单稳随机共振等更多的是倾向于微弱周期信号的放大,衡量指标更多看的是特征频率的幅值^[8-12],所以在观察频域指标时忽略了信号在时域上的变化。磁力信号表征缺陷时更多的体现在时域上,因此在用随机共振系统对磁力信号进行处理后,再用不同时域信号恢复模型对磁力信号进行处理。

首先,对于一个双稳随机共振表示为

$$U(x) = -ax^2/2 + bx^4/4 \quad (14)$$

$$\dot{x}(t) = -dU(x)/dx + s(t) + n(t) = ax - bx^3 + s(t) + n(t) \quad (15)$$

其中: x 为输出信号; $s(t)$ 为输入信号; $n(t)$ 为噪

声; $U(x)$ 为势函数。

在随机共振的经典理论——绝热近似理论中提出满足信号幅值、噪声强度和信号频率远远小于 1 是随机共振发生的前提条件,满足这个条件的是小参数信号;而实际检测时很多信号不满足这个前提条件,属于大参数信号。针对传统随机共振只适用于小参数信号,文献[8]提出二次采样共振,并成功实现了大参数信号检测。磁力信号不符合小参数条件,是一种大参数信号,因此后面的寻优算法中采用变步长随机共振来对频率进行重新归一化。这时, $s(t)$ 中的信号频率变的很小,可以认为是缓慢变换信号,所以 $\dot{x} \approx 0$, 可得

$$ax - bx^3 + s(t) + n(t) \approx 0 \quad (16)$$

当 $n(t) = 0$ 时,输出信号 $x(t)$ 在双稳系统势函数中的滑动轨迹由下式决定

$$-ax + bx^3 = s(t) \quad (17)$$

两边同时对 t 求导,可得

$$\dot{x}(t) = \dot{s}(t) / (-a + 3bx^2) \quad (18)$$

信号在经过双稳系统后,时域波形发生了失真,需引入一个恢复系统 $r(x)$, $r(x)$ 两边对 t 求导,可得

$$\dot{r}(x(t)) = \dot{x} \frac{dr(x)}{dx} = \frac{\dot{s}(t) dr(x)}{(-a + 3bx^2) dx} = \dot{s}(t) \quad (19)$$

因此,对于双稳系统取 $r(x)$ 为 $-ax + bx^3$ 。

单稳系统针对双稳系统只有一个势阱,不存在阱间跃迁,但与双稳系统一样存在随机共振现象,且在应用于语音、图像、脉冲信号检测时效果好^[13-16]。

同理,针对无偏置单稳系统表示为

$$U(x) = bx^4 / 4 \quad (20)$$

$$-bx^3 + s(t) + n(t) \approx 0 \quad (21)$$

$$\dot{x} = -bx^3 + s(t) + n(t) \quad (22)$$

引入恢复系统 $r(x)$, $r(x)$ 两边对 t 求导,可得

$$\dot{r}(x(t)) = \dot{x} \frac{dr(x)}{dx} = \frac{\dot{s}(t) dr(x)}{3bx^2 dx} = \dot{s}(t) \quad (23)$$

因此,对于无偏置单稳系统取 $r(x)$ 为 bx^3 。

无偏置单稳系统与双稳系统相比没有势垒,在定态解 $x=0$ 处为水平线,滑动速度较慢。加入偏置成分后,加快了信号在势函数中的滑行速度^[11]。偏置单稳系统势函数为

$$U(x) = bx^4 / 4 - cx \quad (24)$$

同理,对于偏置单稳系统取 $r(x)$ 为 $bx^3 - cx$ 。

对上述随机共振系统统一采用龙格-库塔算法进行求解,双稳系统所需参数为 a , b 和 h , 无偏单

稳系统所需参数为 b 和 h , 偏置单稳系统所需参数为 b , c 和 h 。

3.2 量子遗传算法

量子遗传算法将量子计算加入到遗传算法中,用量子比特编码的单个染色体实现多态叠加,种群的更新采用量子旋转门,运算效果相比于常规遗传算法更为优异^[17]。将随机共振的参数寻优过程与量子遗传算法相结合,采用信噪比(signal to noise ratio, 简称 SNR)作为参数寻优的目标函数,省去了人为选择参数的复杂性,且能得到更好的效果。设 $s(n)$ 为原始信号, $\hat{s}(n)$ 为随机共振后信号,则有

$$\text{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^N s^2(n)}{\sum_{n=1}^N [s(n) - \hat{s}(n)]^2} \right) \quad (25)$$

利用量子遗传算法对不同随机共振系统模型求解磁力信号的步骤如下。

1) 确定不同随机共振系统模型的参数范围。对于双稳系统和单稳系统中 a , b , c 的取值范围统一选 $[0.0001, 10]$; 对积分步长 h 的选取,由于磁力信号是一种大参数信号,要使用变步长随机共振,否则输出结果将会发散。设磁力信号频率为 f_0 , 采样率为 f_s , 二次采样信号频率为 f_r , 二次采样率为 f_{sr} , 则有

$$f_r / f_{sr} = f_0 / f_s \quad (26)$$

可以看出,当 f_0 和 f_s 固定时,要想 f_r 满足小参数随机共振的要求,只能降低 f_{sr} 。而 $f_{sr} = 1/h$, 所以可增大步长 h , 此处取 f_s 为 1kHz, h 的寻优范围为 $[0.001, 0.1]$ 。

2) 设定量子遗传算法的种群规模,在这里单个染色体由于量子计算引入了多态叠加,所以较小的种群规模就有很好的多样性。通过处理不同探头的分轴磁力信号,发现一味提高种群大小、遗传代数及变量二进制长度对寻优的提升效果有限,过大的参数设定还会成倍影响求解速度。在保证求解精度和效率的基础上,多次分析后将种群大小选为 40, 最大遗传代数设定为 50, 随机共振参数单个变量的二进制长度设为 20。

3) 对种群进行初始化,初始化时将染色体的基因全部设定为 $(1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$ 。对种群中的所有个体进行一次测量,测量时产生 $[0, 1]$ 之间的一个随机数,与量子比特的概率幅平方比较,根据比较的结果,取 0 或 1 来获得测量矩阵。将获得的测量矩阵进行适应度计算,并对最优个体的参数进行记录,作为下一次寻优的比较变量。

4) 判断当前最优个体是否达到判断终止条件,若达到,则跳出整个算法,输出最优个体的各个参数;否则,继续执行。

5) 重新对种群进行一次测量,计算测量输出矩阵的适应度。

6) 使用量子旋转门对种群进行更新,量子旋转门使每个个体的每一位二进制编码向最优个体的方向演化,并最终得到下一代种群。记录当前最优个体的参数和其对应适应度,将循环代数变量加1。

7) 返回步骤4重复执行。

3.3 管道损伤自适应随机共振识别

基于共振稀疏分解算法,提出基于共振稀疏分解的自适应随机共振磁梯度信号处理方法。首先对地磁检测信号进行高低共振成分分离,并用量子遗传算法对初步处理信号进行随机共振参数寻优,然后用求取的梯度张量再求梯度后合成一个总梯度,来确定应力集中部位。图4为梯度求解算法流程图。

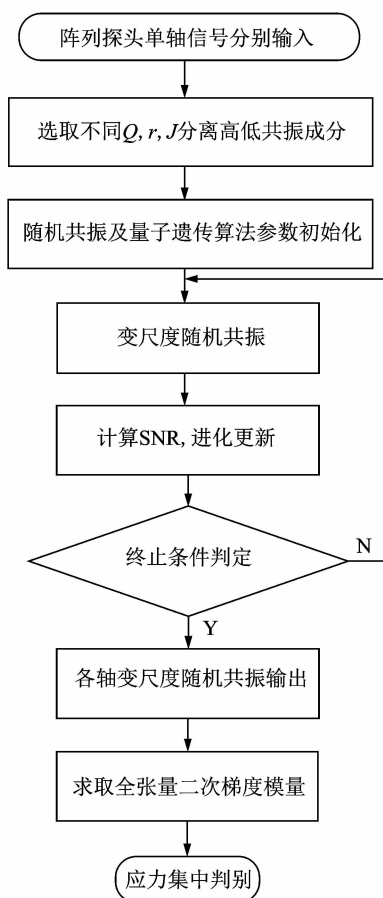


图4 自适应随机共振处理

Fig. 4 Adaptive stochastic resonance processing

具体步骤如下:

1) 根据形态成分分析方法,选取高低共振成分的品质因子 Q 、冗余度 r 和分解层数 J ,共振稀疏分解后得到高低共振成分;

2) 根据地磁检测信号属于大参数信号,使用变步长随机共振,确定寻优参数 a , b 和 h 的取值范围;

3) 选择种群规模大小、遗传代数以及随机共振单个参数的二进制位数,循环执行测量、求取适应度,记录最佳个体参数,直到循环终止条件,其中求取适应度时对各个单轴信号进行不同系统模型随机共振求解,然后再通过各自的恢复系统,以SNR值作为适应度值输出;

4) 按上述方法处理完的单轴信号各自相减得到5个张量分量,然后推出全张量梯度和全张量二次梯度的模量,模量极大值处即为磁力线异常点,可以认为该处管道存在应力集中。

4 现场检测

为检验研制开发的磁梯度张量检测系统的检测效果,对华北油田某站场内的消防管线进行磁力检测。管道的基本信息如下:管道直径为323mm,壁厚为5mm,埋深为1.5m,运行压力为1MPa,2006年投产。现场环境较为复杂,存在较多干扰信号。先用探管仪确定管道的走向,然后实验人员手持磁梯度张量阵列检测探头沿着此路径进行巡检,主要用到图5所示的十字型磁梯度张量检测系统。



图5 磁梯度张量检测系统

Fig. 5 Magnetic gradient tensor detection system

该检测系统主要由控制主机、5个TMR2309组成的十字探头阵列、AD转换电路、华测i70和GPS天线组成。巡检时探头阵列会自动感应管道上方的磁力信号,之后进行AD转换,最后送入主机进行计算显示,界面采用C#编程。其中华测i70作基站,P3-DT接收机作为移动端封装在控制主机中,与GPS天线一起实现实际检测时路径定位。

整个磁梯度张量系统有5个地磁检测探头,选择其中4个探头的三轴数据进行全张量二次梯度模量

的计算,探头 3 数据作为对照。图 6(a)为检测某段管线获得的探头 5-x 轴原始信号;图 6(b)为将原始信号进行 4 阶巴特沃斯低通滤波(低通频率为 50Hz);图 6(c)是首先取 $Q_1 = 3, r_1 = 3, L_1 = 30, Q_2 = 1, r_2 = 3, L_2 = 22$,对原始信号进行共振稀疏分解,将获得的低共振成分输入偏置单稳系统,然后再进行时域信号的恢复。 Q_1 值为 3,是从 3~8 中多次依据 SNR 指标对比分析得到的。地磁场大小在 $(0.5 \sim 0.6) \times 10^{-4} T$,可见图 6(a)中磁场原始信号干扰较大。

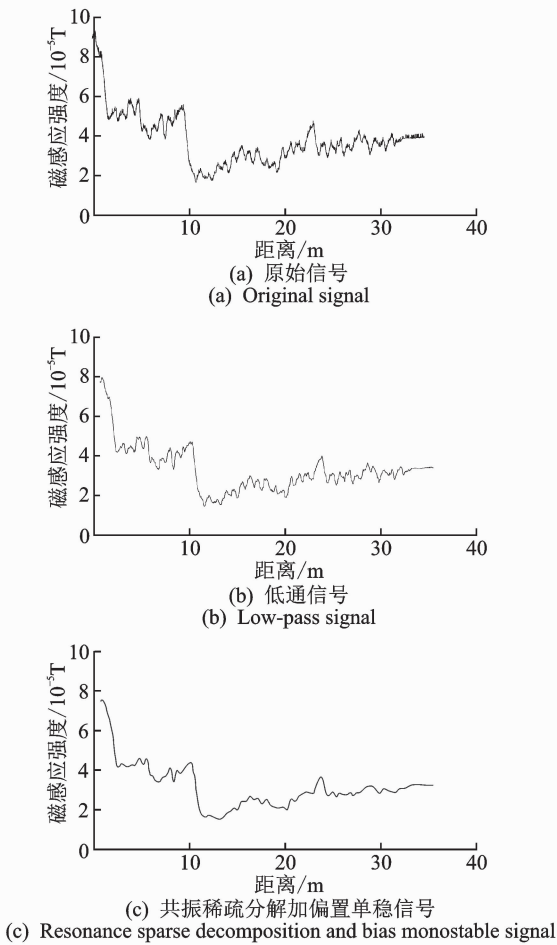


图 6 不同方法对比

Fig. 6 Comparison of different methods

图 7 为共振稀疏分解加偏置单稳系统在参数寻优时的进化曲线,参数设定如前所述,量子遗传算法参数寻优后参数为: $b = 7.8817, c = 9.9983, h = 0.089$,耗时 57s。表 1 为不同处理方法获得的 SNR。

由图 6 可以看出,低通滤波能滤掉一些高频噪声,但比较图 6 和表 1 可知,共振稀疏分解加偏置单稳系统在保留信号有用波形的情况下有更加优良的 SNR 指标。同时可以看出,共振稀疏分解和 3 种随

机共振模型比传统的低通滤波 SNR 指标好,偏置单稳系统在 3 种随机共振模型中最优,且实际处理时偏置单稳系统在结合共振稀疏分解也优于其他两种随机共振模型。从图 7 共振稀疏分解加偏置单稳进化曲线可以看出,在遗传代数为 25 时,算法已经较好地收敛,用共振稀疏分解加偏置单稳处理其他单轴信号,进而可以求出这段数据的全张量二次梯度模量。图 8 为原始数据和共振稀疏分解加偏置单稳

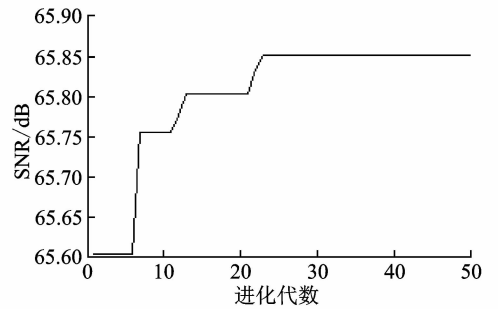
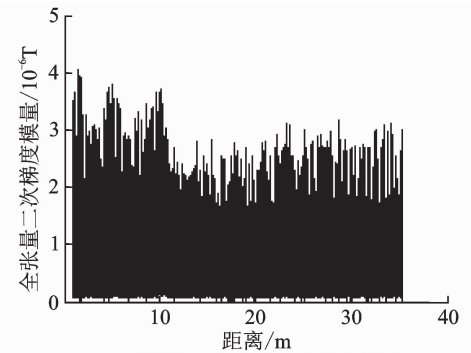
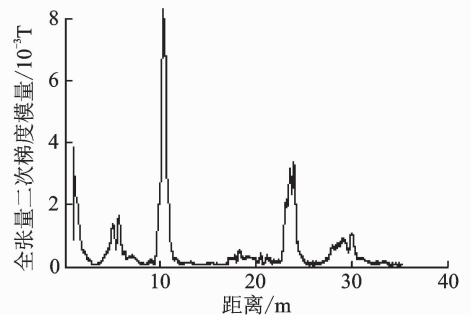


图 7 共振稀疏分解加偏置单稳进化曲线

Fig. 7 Resonance sparse decomposition and bias monostable evolution curve



(a) Full-tensor quadratic gradient modulus of original signal



(b) Full-tensor quadratic gradient modulus of Resonance sparse decomposition and bias monostable

图 8 全张量二次梯度模量对比

Fig. 8 Full-tensor quadratic gradient modulus comparison

的全张量二次梯度模量。

由图 8 可以看出,共振稀疏分解加偏置单稳的全张量二次梯度模量在 1,10,23m 处有最大的 3 个

异常极值点。埋地磁力检测技术采用管线分段数据处理方法,将整个管线划分成不同段进行处理。这里划分长度为35m,并以探头差值梯度绝对值的最大值和平均值的比值来判定某点在该分段应力集中的相对水平,此处用全张量二次梯度模量代替探头差值梯度进行计算。由于管道运行一段时间后会产生产应力集中,磁力检测是将应力集中较为严重的区域进行优先修复,而对应力集中稍低、不影响管道正常运行的点监视运行。1m处一般认为是端点效应,不予考虑。因为全张量二次梯度模量异常处为磁力线异常处,进而认为此处存在应力集中,开挖验证后发现10m处管道存在孔状缺陷,23m处存在局部腐蚀。比较其他处这两点的应力集中最大,并且只有这两点需要纳入维修计划,而从原始信号中看不出明显极值突变。

表1 不同处理方法信噪比

Tab. 1 SNR of different processing methods

处理方法	SNR/dB
低通滤波	44.124 7
共振稀疏分解	47.356 3
双稳系统	48.386 6
无偏单稳系统	50.296 1
偏置单稳系统	53.297 0
共振稀疏分解加偏置单稳	65.851 6

5 结 论

1) 在对磁力信号进行传统低通滤波分析方法的基础上,将共振稀疏分解和随机共振引入地磁检测信号分析,利用缺陷信号的低共振属性和随机共振将高频信号能量转移到低频上,获得了更好的处理效果,表明随机共振对信号的有益作用不仅仅体现在频域上,在加入时域恢复系统后,随机共振也能更好地提高信号时域指标。

2) 基于工程实际检测信号,采用共振稀疏分解和偏置单稳随机共振处理各轴信号,改变单一探头分析的传统模式,使用磁梯度张量阵列形式获取全张量二次梯度模量,进而能获得更加全面的磁场信息。共振稀疏分解加偏置单稳系统处理获得的全张量二次梯度模量能有效判定出管道应力集中的位置,验证了该方法的有效性。

参 考 文 献

[1] 朱凤艳,刘全利,张鹏,等. 在役管道非开挖外检测

技术评述[J]. 油气储运, 2015, 34(2):215-219.

Zhu Fengyan, Liu Quanli, Zhang Peng, et al. Review of the non-excavation external detection technology of in-service pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(2):215-219. (in Chinese)

[2] Wang Zhengdao, Gu Yu, Wang Yansheng. A review of three magnetic NDT technologies[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324(4): 382-388.

[3] 于振涛,吕俊伟,樊利恒,等. 基于磁梯度张量的目标定位改进方法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(7):1250-1254.

Yu Zhentao, Lü Junwei, Fan Liheng, et al. Improved method of magnetic localization based on magnetic gradient tensor[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(7):1250-1254. (in Chinese)

[4] Li Zhichao, Jarvis R, Nagy P B, et al. Experimental and simulation methods to study the magnetic tomography method (MTM) for pipe defect detection[J]. Ndt & E International, 2017, 92:59-66.

[5] Hu Bo, Yu Runqiao. Variations in surface residual compressive stress and magnetic induction intensity of 304 stainless steel[J]. Ndt & E International, 2016, 80:1-5.

[6] Selesnick I W. Wavelet transform with tunable Q-factor[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8):3560-3575.

[7] 余发军,周凤星. 基于可调Q因子小波变换和谱峭度的轴承早期故障诊断方法[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2015, 46(11):4122-4128.

Yu Fajun, Zhou Fengxing. Bearing early faults diagnosis based on tunable Q-factor wavelet transform and spectral kurtosis[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2015, 46(11): 4122-4128. (in Chinese)

[8] 冷永刚,王太勇. 二次采样用于随机共振从强噪声中提取弱信号的数值研究[J]. 物理学报, 2003, 52(10):2432-2437.

Leng Yonggang, Wang Taiyong. A numerical study of two sampling for the extraction of weak signals from strong noise by stochastic resonance[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(10):2432-2437. (in Chinese)

[9] Li Jimeng, Zhang Yugang, Xie Ping. A new adaptive cascaded stochastic resonance method for impact features extraction in gear fault diagnosis[J]. Measurement, 2016, 91:499-508.

[10] Wang Wei, Yan Zhi, Liu Xianbin. The escape problem and stochastic resonance in a bistable system driven by fractional Gaussian noise[J]. Physics Letters A,

2017, 381:2324-2336.

- [11] Kohar V, Murali K, Sinha S. Enhanced logical stochastic resonance under periodic forcing[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2014, 19(8):2866-2873.
- [12] 冯毅, 陆宝春, 张登峰. 基于多稳态随机共振的轴承微弱故障信号检测[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(6):1168-1174.
Feng Yi, Lu Baochun, Zhang Dengfeng. Bearing weak fault signal detection based on adaptive multi-stable stochastic resonance[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(6):1168-1174. (in Chinese)
- [13] 赵跃, 冷永刚. 单稳系统的随机共振研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(S):330-332.
Zhao Yue, Leng Yonggang. Stochastic resonance of monostable system [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(S):330-332. (in Chinese)
- [14] 万频, 詹宜巨, 李学聪, 等. 一种单稳随机共振系统信噪比增益的数值研究[J]. 物理学报, 2011, 60(4):5021-5027.
Wan Pin, Zhan Yiju, Li Xuecong, et al. A numerical study of SNR gain of monostable resonance system [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(4):5021-5027. (in Chinese)
- [15] 李继猛, 陈雪峰, 何正嘉. 采用粒子群算法的冲击信号自适应单稳态随机共振检测方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21):58-63.
Li Jimeng, Chen Xuefeng, He Zhengjia. Adaptive monostable stochastic resonance based on pso with application in impact signal detection[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(21):58-63. (in Chinese)

- [16] 冷永刚, 赵跃. 单稳系统的脉冲响应研究[J]. 物理学报, 2015, 64(21):50301-50310.
Leng Yonggang, Zhao Yue. Study on the impulse response of a monostable system[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(21):50301-50310. (in Chinese)
- [17] 赵知劲, 彭振, 郑仕链, 等. 基于量子遗传算法的认知无线电频谱分配[J]. 物理学报, 2009, 58(2):1358-1363.
Zhao Zhijin, Peng Zhen, Zheng Shilian, et al. Cognitive radio spectrum allocation based on quantum genetic algorithm[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(2):1358-1363. (in Chinese)



第一作者简介:王新华,男,1969年12月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为埋地油气管道智能检测诊治技术、管道检测智能传感器技术、管道物联网与智慧信息技术。曾发表《Effects of stray AC on delamination of epoxy coatings with defects in 3.5% NaCl solution》(《International Journal of Electrochemical Science》2017, Vol.12, No. 7)等论文。

E-mail:wxhemma2005@163.com

通信作者简介:陈迎春,男,1987年11月生,博士、讲师、硕士生导师。主要研究方向为管柱力学、油气管道腐蚀及管体损伤检测。

E-mail:ychen08089@163.com

论文撤回声明

王其昂、吴子燕、刘书奎等撰写的论文《多维性能极限状态随机性及相关性研究》发表于本刊2019年第2期,经作者本人反复论证,由于地震波选取的误差,导致最终计算结果出现较大错误。为避免对研究同行造成误导,故声明撤回此论文,并向相关数据库和网站声明撤回此文,请勿再以任何方式加以引用,由此对读者造成的不便深表歉意。

《振动、测试与诊断》编辑部
2019年12月

