

油气管道漏磁缺陷检测的若干技术问题研究

天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室

靳世久 李莺莺

中国石油天然气管道技术公司

李久春 肖兴江 李育忠

胜利油田钻井工艺研究院

魏茂安

摘 要 漏磁缺陷检测软件的相对滞后,制约了漏磁检测的效率及可靠性的进一步提高。本文运用先进的信号处理技术及图像处理技术,将 MFL 波形信号重建为缺陷图像并对其作伪彩色处理,从而提高了检测效率;通过实现缺陷图像的数据压缩,节约了存储空间;同时,对管道缺陷进行有限元仿真,深入研究了检测装置多种因素对漏磁的影响,这将有助于漏磁检测装置的优化设计;最后,把小波神经网络应用于研究漏磁信号与缺陷几何参数的非线性关系,用有限元仿真得到的缺陷漏磁信号来验证神经网络的可靠性,取得了较好的效果。

一、前 言

管道漏磁缺陷检测装置是在役管道缺陷检测的重要手段之一。目前,新型传感器、嵌入式系统及 FPGA 等的应用,大大改进了管道漏磁缺陷检测装置硬件系统的性能。但缺陷的评估主要依赖于检测人员根据经验直接对漏磁信号波形进行分析,工作量大、效率低,而且受主观因素的影响大。另外由于漏磁信号与缺陷几何参数之间并非线性关系,缺陷轮廓和深度的交叉影响、管道材质漏磁系数差别和流体压力对管道磁质结构的影响及周围环境的影响加大了缺陷分析的难度。

为此,在查阅国内外管道漏磁检测技术及漏磁数据处理技术,并吸收国际先进的无损检测缺陷评估科研成果的基础上,我们与管道局技术公司合作,对油气管道

漏磁缺陷检测若干技术问题进行了研究,取得了较大进展:基本实现了油气管道缺陷图像的重建及其伪彩色处理、缺陷图像的数据压缩。同时,通过对管道缺陷进行有限

元仿真，深入研究了检测装置多种因素对漏磁的影响，优化了漏磁检测装置的设计。最后，把小波神经网络应用于研究漏磁信号与缺陷几何参数的非线性关系，用有限元仿真得到的缺陷漏磁信号来验证神经网络的可靠性，取得了较好的效果。

二、管道缺陷图像重建^[1~3]

部分缺陷漏磁信号如图 1 所示。图像处理流程图如图 2 所示。针对管道漏磁检测装置实测的 $\Phi 457$ 管道数据资料，本文主要介绍其信号处理、图像重建、图像处理三个方面。

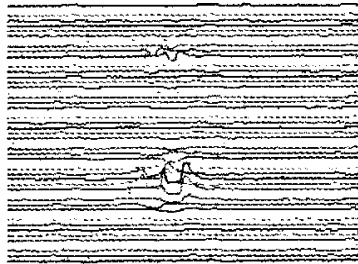


图 1 $\Phi 457$ 输油管道 MFL 波

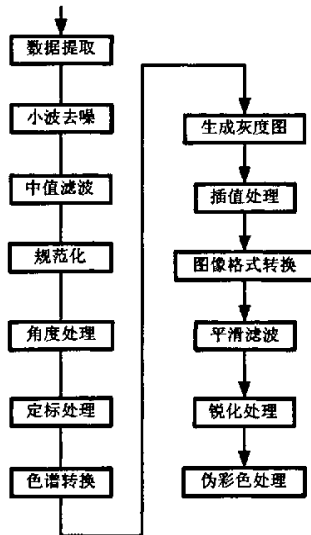


图 2 缺陷图像处理流程图

1、MFL 信号的小波噪声去除

油气管道漏磁缺陷检测装置在运行过程中，受电磁及环境干扰因素的影响，MFL 信号中夹杂不同程度噪声信号，影响了缺陷判别。去除 MFL 信号中的噪声，而保持 MFL 信号的完整性，有助于提高管道缺陷检测的可靠性。图 1 为 $\Phi 457$ 输油管道采集的部分原始 MFL 数据。可以看出，信号体现了管道缺陷的特征，但也包含了丰富的噪声。对其作

三级小波分析去噪处理、重构，有效去除了噪声信号，（见图 3）。

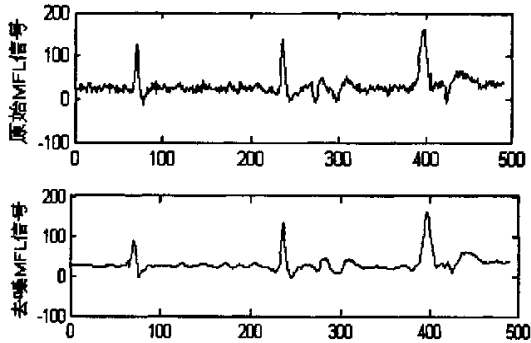


图 3 MFL 信号小波去噪

从图 3 中可以看出，用小波分析消噪可以很好的保存有用信号中的尖峰和突变部分。如果用傅里叶分析进行滤波，由于信号集中在低频部分，噪声分布在高频部分，故只能用低通滤波器进行滤波。但是，它无法将有用信号的高频部分和由噪声引起的高频干扰加以有效地区分，若低通滤波器太窄，则在滤波后，信号中仍存在大量的噪声，若低通滤波器太宽，则将以部分有用信号当作噪声而滤掉了。因此，使用小波分析对 MFL 信号消噪有着傅里叶分析不可比拟的优点。

2、图像重建

由于受缺陷检测传感器体积的限制及 MFL 信号采集速率、检测器存储容量等多方面因素的影响，轴向及周向的采样分辨率难以做得很高。单纯依靠这些信号重建管道的缺陷轮廓，图像分辨率很低，且由于轴向及周向的采样速率不一致，会导致据此重建的缺陷图像轴向及周向的比例不一致。

采用三次样条函数对 MFL 信号插值，效果非常理想，但由于实际油气管道 MFL 信号数据量巨大，运用三次样条的函数作插值，特别是作多项插值时，计算量也非常大。而采用自然三次样条函数，则可以大大减少计算量。

周向 MFL 信号使用了线性插值，有以下三方面的原因：

- (1) 线性插值速度快，且精度能满足实际需要；
 - (2) 管道是沿轴向磁化，MFL 信号主要体现了轴向的缺陷的变化，周向缺陷对轴向 MFL 传感器的影响很小；
 - (3) 易于与轴向三次样条插值配合，实现轴向与周向的分辨率一致；
- 缺陷分辨率要求不同，轴向的插值方式也不同：

(1) 管道缺陷大范围粗略检查，处理的数据量大，采用自然三次样条插值；

(2) 管道缺陷局部细节检查，要求精度较高，采用三次样条插值；

不同的管道 MFL 缺陷检测装置，周向缺陷检测和轴向缺陷检测分辨率不同。设周向 n_s 个传感器，轴向分辨率为 n_a ，若要求轴向插值为 m_a ，则周向插值为 m_c 。

$$m_c = \frac{2\pi R m_a}{n_s n_a}$$

3、图像滤波及锐化处理

在原始图像中，仍然存在一定的噪声干扰。噪声会使图像模糊，有时甚至淹没图像特征，给分析带来困难。通过图像平滑，可以降低图像噪声，改善图像质量。图像平滑实际上是低通滤波，滤除属于高频部分的噪声信号。显然，在减少随机噪声的同时，由于图像边缘部分也处在高频部分，平滑过程将会导致边缘模糊化。

选择掩模平滑即可完成滤波操作，又能保持区域边界的细节特征。取 5X5 的窗口，在窗口内以中心像素 $F(j, k)$ 为基准点，制作 4 个五边形，4 个六边形，1 各边长为 3 的正方形共九个掩模（见图 4）。

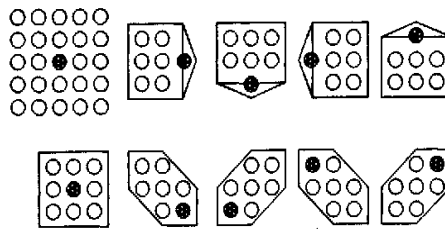


图 4 5X5 的窗口及 9 个掩模

计算各掩模的均值 a_i 及方差 k_i

$$a_i = [\sum_{l=1}^Q F_l(j+m, k+n)] / Q; \quad k_i = \sum_{l=1}^Q \{ [F_l(j+m, k+n)]^2 - a_i^2 \}$$

式中 $i=1, 2, \dots, 9$; Q 为各掩模对应的像素个数; m, n 为掩模内像素相对于中心像素 (j, k) 的位移量。在此基础上，按照 K_i 排序，取最小方差 $K_{i_{min}}$ 所对应的掩模的灰度级均值 a_i 作为 $F(j, k)$ 的平滑输出 $G(j, k)$ （含有尖锐边沿的区域，方差必定较平缓区域为大）。用此方法对每一像素（边缘两行可作零延拓或对称延拓）作掩模操作，即可完成全帧图像的平滑滤波。

经过上述过程处理 $\Phi 457$ 管道 MFL 信号，获得部分缺陷图像如图 5 所示。

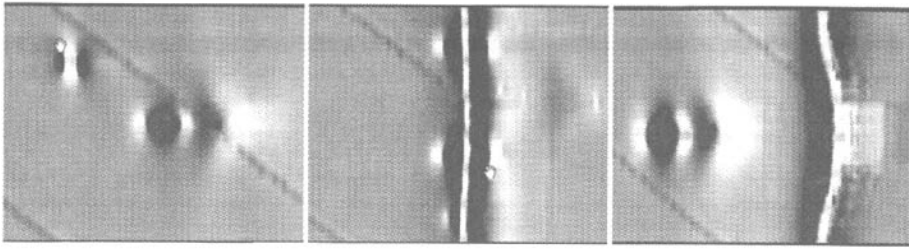


图 5 漏磁缺陷灰度图

三、缺陷图像伪彩色处理^[4,5]

油气管道缺陷重建图像在生成、获取、传输等过程中，受通道带宽和噪声等诸多因素的制约，图像往往对比度偏低、清晰度差。将灰度图像转换成伪彩色图像，不仅看起来自然、逼真，更重要的是，从中可获得更多的信息，便于区分不同类型的缺陷。

1、MFL 缺陷图像伪彩色编码要求

与普通灰度图像的伪彩色变换不同，MFL 缺陷图像根据 MFL 信号重建而成。管道缺陷检测器的分辨率不同，灰度的级别也不同。低分辨率检测器的灰度即一般是 8 位，高分辨率检测器 MFL 灰度图像可能是 10 位、12 位甚至更高。8 位灰度伪彩色编码方式与高于 8 位灰度的伪彩色编码方式不同。

检测人员对伪彩色图像的要求不同。一种要求是全范围灰度到伪彩色的一一对应编码；另一种要求是预定义不同缺陷深度级别（如划分为 10 个级别），根据不同的级别预定义相应的彩色，级别之间平滑过渡以突出重点缺陷区域。

根据上述要求，MFL 缺陷灰度的伪彩色编码采用两种方式：

- (1) 改进的等密度伪彩色编码：用于分级自定义彩色的伪彩色编码
- (2) 基于 RGB 三基色的非线性伪彩色：用于 8 位灰度级伪彩色编码

本文主要介绍改进的等密度伪彩色编码的原理及其缺陷灰度图像伪彩色转换。

2、改进的等密度伪彩色编码

该编码方式首先将缺陷的灰度分为 M 个等级（如 10 个），再将各等级分配相应的 RGB 色，等级之间利用插值平滑过渡，完成图像的伪彩色变换。处理过程如下：

设灰度图像 $f(x, y)$ 的灰度级别为 M

- (1) 选择颜色的位数（一般设为 24 位）；
- (2) 对应各灰度等级选择不同颜色；
- (3) 将选择的颜色分解出 RGB 分量 $C_i (R, G, B)$ ；

(4) 根据相邻等级的灰度范围, RGB 分量 C_i 、 C_{i+1} , 获取分段的灰度范围 $G(i)$ 与 RGB 的映射关系;

(5) 综合各个灰度等级, 获得非线性的灰度到 24 位彩色的映射关系;

合理选择等级颜色, 经过上述方法处理缺陷灰度图像, 获取的伪彩色图像, 彩色柔和, 缺陷特征突出, 效果比较理想。

缺陷图像伪彩色处理界面如图 6 所示, 部分处理结果如图 7 所示。

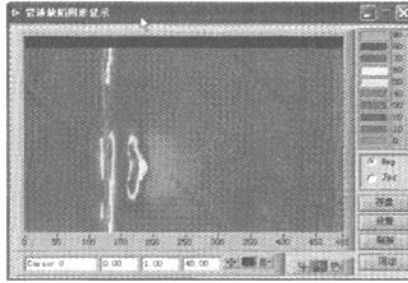


图 6 缺陷伪彩色处理软件界面

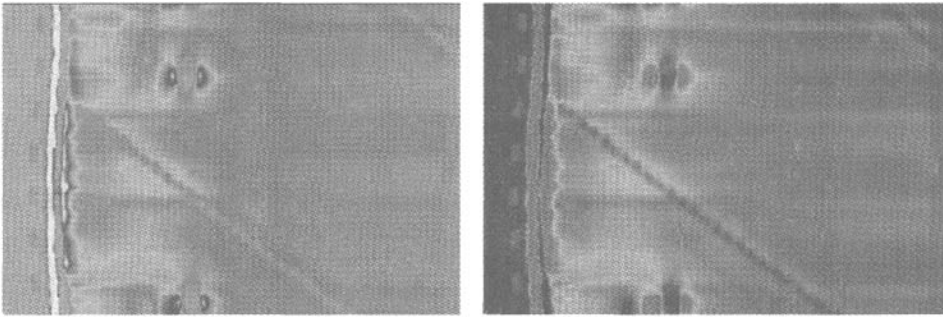


图 7 24 位彩色缺陷伪彩色图 (两幅图应用了不同色谱)

四、管道缺陷重建图像的小波压缩技术研究^[6~8]

由于小波变换具有多分辨率分析的优点, 易与人类视觉特性相结合, 用于图像压缩, 不仅压缩比高, 还可以避免其它压缩编码方法由于数据分块造成的“方块效应”和“蚊式噪声”。本文利用虚拟仪器编程软件, 选择 Marr 类小波作为图像压缩小波基函数, 通过交互式调整正交函数零极点完成小波函数的具体设计, 各级小波系数用更新的 JPEG 图像压缩表阈值量化, 而量化结果编码采用了算术编码方案。缺陷图像压缩速度快、压缩比高且失真较小 (见图 8)。

1、小波图像压缩的原理

分别在水平和垂直方向上对二维缺陷图像作离散小波变换, 将图像分成四个子带:

垂直和水平方向的低频子带 LL1，水平方向的低频和垂直方向的高频子带 LH1，水平方向的高频和垂直方向的低频子带 HL1，垂直和水平方向的高频子带 HH1。垂直和水平方向的低频子带信号称为低频概貌信号，其余三个子带信号称为高频细节信号。对低频子带 LL1 作进一步分解，可得到更低分辨率的 4 个子带 LL2, LH2, HL2, HH2。如此反复，可以对图像进行多级分解。

利用小波变换实现图像数据压缩的一般过程如图 9 所示。

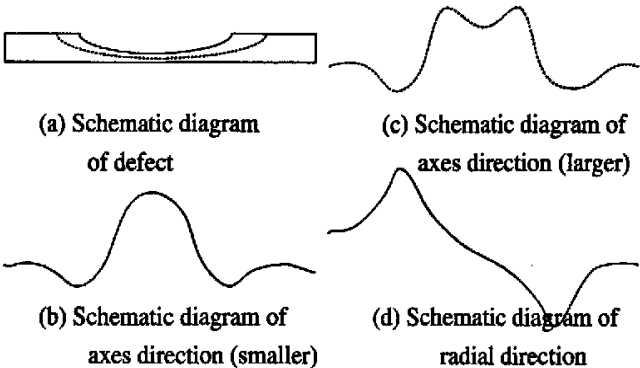


图 8 缺陷漏磁信号示意图

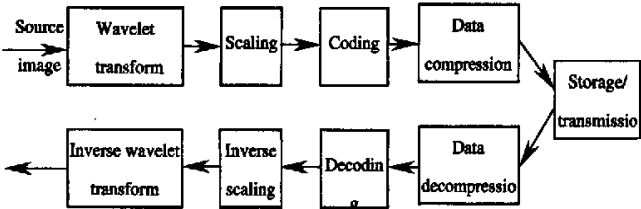


图 9 小波图像压缩过程示意图

2、小波图像压缩过程

小波函数设计界面如图 10 所示。图 11 下为双正交滤波器的极点和零点分布图，修改滤波器的阶数、零极点的数量及位置，得到不同性能的小波分解低通和高通滤波器，如图 11 上所示。

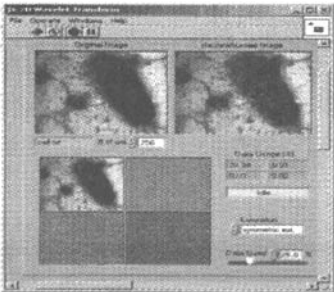


图 10 小波图像压缩

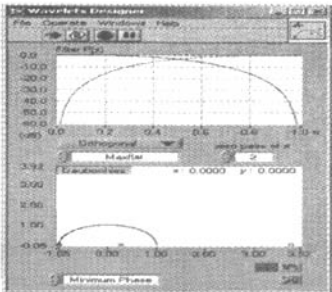


图 11 小波函数设计

在图像压缩过程中，量化对压缩的效率影响也最大。量化表中的值越大，则压缩倍数越大，但图像失真也越大。根据测试，人的眼睛对不同频率的敏感度不同，对低频较敏感，而对高频不敏感，因此，低频的失真应该尽量降低，高频部分则可以允许有较大的失真，这就要求在低频采用较小的量化标，而在高频采用大的量化标。

不同于一般的图像的 JPEG 量化处理，在缺陷漏磁图像小波系数量化的过程中，为了最大程度的降低量化影响，使用经验公式修改的 JPEG 标准量化表。

零树编码是目前应用最广的小波系数编码算法。在相同的压缩倍率下，使用该算法可以得到最好的复现图像质量，而且由于是嵌入式编码，能准确的控制压缩倍率。但零树编码实现方法复杂，运算时间长，故本文使用了自适应算术编码方案。

试验结果表明，采用双正交滤波器压缩缺陷图像效果比正交滤波器好。定义非零小波系数与总小波系数之比为保留数据比（用 *UsefulData* 表示）。图 12 是 *UsefulData*=24%，28%时的缺陷图像压缩效果。当 *UsefulData*>30%（相当于压缩比小于 30%），图像压缩引起的失真不会对缺陷分析产生影响。

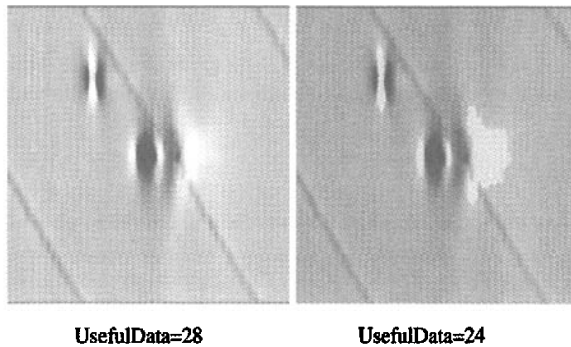


图 12 缺陷重构图(*UsefulData*=28%, 24%)

五、有限元分析必要性

对漏磁场理论的研究非常必要，如果不知道管壁缺陷产生的漏磁场的真实情况，就无法将测到的信号进行对比以进行缺陷的鉴别。管道内缺陷漏磁场的计算是一个十分复杂的过程，本文采用 ANSYS 进行管道缺陷的漏磁场的分析可以简化求解的过程，加快求解速度。

1、ANSYS 二维有限元分析

进行二维有限元分析是在假设存在的缺陷为环状缺陷的前提下进行的，由矢量图

(见图 13) 可见, 缺陷附近的漏磁场发生了畸变。通过二维分析揭示了管壁缺陷漏磁信号的一些规律。

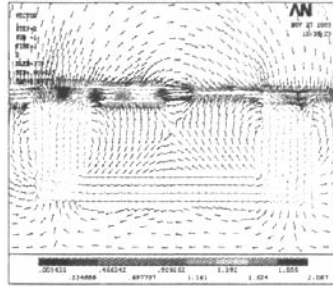


图 13 磁场矢量图

轴向漏磁信号有一正一负两个峰值; 径向漏磁信号始终保持正值, 随着缺陷形状的不同, 在相同的提离值下信号可能具有一个或两个峰值, 对于同一个缺陷, 随着提离值的增大双峰的特点越来越不明显, 直至只存在一个正峰值。永磁铁的磁场强度越大, 缺陷的深度越深, 漏磁信号的幅值也越大。缺陷的边缘越陡峭, 即它的表面角越大, 径向漏磁信号的峰值也越陡峭。图 14 分别为长 20 mm 深 30% 表面角为 30° 的管壁内缺陷和长 25 mm 深 30% 表面角为 60° 的管壁内缺陷距管内壁 1 mm 处的轴向、径向漏磁通密度曲线图。

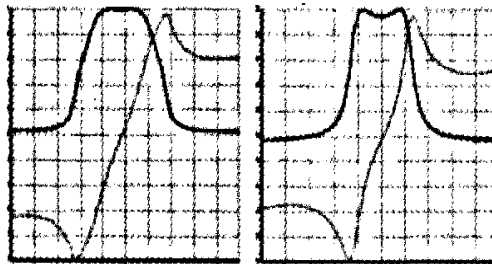


图 14 缺陷漏磁信号图

2、漏磁检测系统的有限元优化

有限元分析可以模拟仿真出各种形状缺陷的漏磁通情况, 经过分析可以揭示出各种因素对漏磁信号的影响, 对实际工程应用有重大的指导意义。

(1) 提离值对漏磁信号的影响

当缺陷的深度和宽度也变化时, 缺陷漏磁信号幅值的变化趋势如图 15 所示: (a) 为长度 10 mm 不变, 不同深度下管内缺陷的 B_{xpp} 与提离值变化关系图; (b) 为 50% 深度不变, 长度由 10 mm 变化至 70 mm 的管内缺陷的 B_{xpp} 与提离值变化关系图。从图 15 中可

可以看出,对于不同长度和深度的缺陷,当传感器的提高值逐渐变大时, B_{pp} 的变化趋势均为逐渐减小,并最终趋近一个极限值;而且深度对提高值影响的程度较大,长度对提高值影响的程度较小。

对于图 15(a)中 20%缺陷的变化曲线,提高值为 2.5 mm 时信号的幅值为 0.0106 T。为了获得较大幅值的测量信号,传感器的提高值应该越小越好。但是传感探头的封装厚度大约为 1 mm,且管道内壁附着的蜡质使得传感探头也不能完全紧贴管道内壁。综合各种因素,传感器的提高值应该保持在 1.5~2 mm 之间,这个设计参数既能保证检测器测到较浅的缺陷,又符合实际情况。

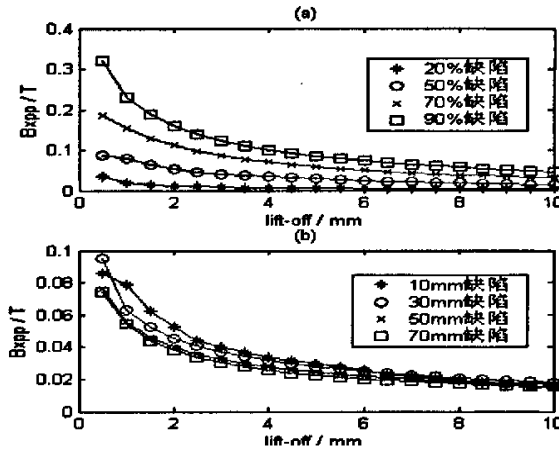


图 15 缺陷漏磁信号幅值的变化趋势

(2) 管壁磁化状况的研究

管壁磁化的程度直接影响着漏磁信号的强度。从磁力线图可以看出:耦合进管壁的磁力线有一部分形成闭合回路,另外一部分损失了,形成闭合回路的磁力线也有一部分沿途泄露到空气中,在两个磁铁的中心磁场强度达到了最低值。

通常认为形成闭合磁路的磁力线部分所占的比例(磁通利用率)越大,管壁的磁化强度也越大。通过有限的分析发现磁通利用率随着磁铁的间距与磁铁长度的比值的增大而增大,但是磁铁间距增加后,沿途损失的也越多。所以,只强调磁通利用率是没有意义的,应该根据管壁的材料特性来设计合理的磁化装置尺寸。图 16 为磁铁的间距与磁铁长度的比值连续变化时, B_{MIDDLE} 的值。对于常见的 X52 钢管,当 AIRON/AMAG 为 5 时管壁已经达到了中度饱和状态,且磁铁的间距过小还会影响传感器的放置,这个比值比较合适。

(3) 磁化装置尺寸的优化设计

磁铁的重量是整个漏磁检测器重量的很大的一部分，选择合理的磁铁尺寸，以尽可能小的体积提供合适的磁化强度也是需要研究的重要方向。有限元分析方法较物理实验的方法有很多优越性，建模阶段几乎可以设计任意形状的磁铁。

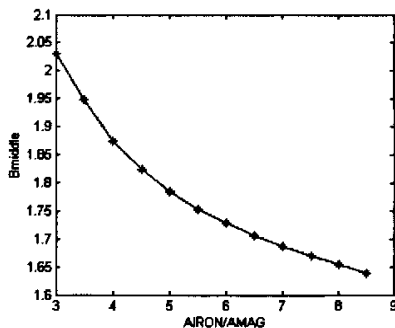


图 16 磁铁的间距与磁铁长度比值对 B_{MIDDLE} 的影响

选用 1.128T 的永磁铁作为励磁源，它将 X60 管壁磁化到中度饱和状态。设定其它部件的尺寸均保持不变，磁铁的间距与磁铁的长度的比值为 5，图 17 左图所示为径向厚度 15 mm 和 25 mm 的磁铁其长度与管壁磁化状态的关系，表明当磁铁的长度在 30 mm 到 40 mm 之间时，管壁的磁化强度达到最大值。右图是长度为 30 mm 的磁铁其厚度与管壁磁化状态的关系图，厚度小于 10 mm 管壁的磁化强度变化明显，当厚度大于 10 mm 时磁化状态趋于平稳。分析表明，永磁铁的轴向长度选在 30 mm 至 40 mm 之间，厚度保持在为 10~20 mm 之间即可保证其最优的磁化状态，继续增大磁铁的厚度对磁化强度的增大趋势并不明显。一般使磁铁的长径比在 2~2.5 之间。

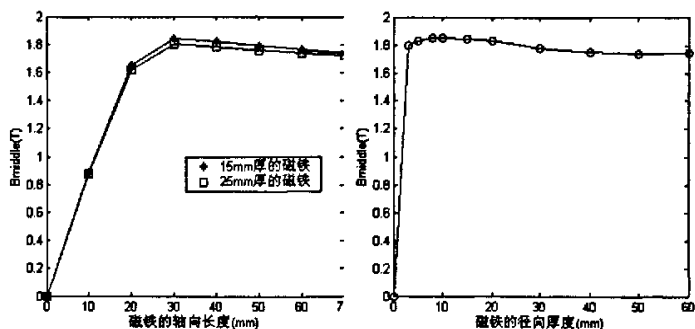


图 17 磁铁其长度与管壁磁化状态的关系

六、采用人工神经网络进行缺陷的特征提取

漏磁检测的最终目的就是能够准确地从漏磁信号揭示出缺陷的几何特征。缺陷的几何特征可以通过径向长度、周向宽度、深度和缺陷的表面角度等几何量来表示，这些因素交织在一起，又很难用简单的解析表达式揭示出每种因素的影响程度，这就为由漏磁信号揭示出缺陷的尺寸特征带来了困难。

考虑到漏磁信号与缺陷轮廓的非线性关系，我们选用能够进行非线性函数映射的人工神经网络来进行研究探索。径向基函数神经网络是一种常用的建立非线性函数关系的前向型神经网络。然而，在此应用中径向基神经网络并不一定是最优的，因为如果想要提高可靠性需要采用大的训练样本，而这在实际应用时是不可行；而且径向基神经网络无法在训练的过程中对网络输出的精度进行足够的控制。所以采用一种特殊的径向基神经网络：小波基神经网络来建立管道 MFL 信号与缺陷轮廓的网络映射，小波基神经网络的隐层节点是利用小波变换多分辨率函数逼近的概念建立起来的，而且隐层节点的数目由分辨率的层数决定。

1、小波基神经网络结构设计

小波基神经网络的隐层节点正是利用小波变换多分辨率函数逼近的概念建立起来的。由小波多分辨的概念可知，函数在 L 级分辨率下分解为：

$$f(x) = \sum_{k=1}^{N_L} a_{L,k} \varphi_{L,k}(\|x - c_{L,k}\|) + \sum_{j=1}^{L-1} \sum_{k=1}^{N_j} d_{j,k} \psi_{j,k}(\|x - c_{j,k}\|)$$

式中 L ——分辨率的层数；

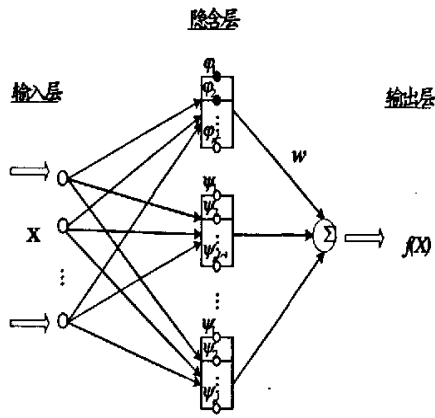
N_j ——第 j 层分辨率下基函数的数量；

$c_{j,k}$ k ——在第 j 层分辨率下，平移 k 后的基函数的中心。

则 WBF 网络的结构如图 18 所示，确定了各分辨率下的尺度函数和小波作用函数及各个隐层节点的权重，也就确定了整个网络。

2、小波基神经网络的学习算法

小波基神经网络可以采用与径向基神经网络相似的训练方法，训练的过程可以分为两个阶段：第一个阶段，根据所有的输入样本决定隐层各个节点基函数的中心和宽度；第二个阶段，在决定好隐层的参数后，求出权矩阵 W ，使得 $\|F - BW\|^2 = \min$ 。根据矩阵理论中的最小二乘问题数值解法的定理，对于 $B \in R^{r \times p}$ ($r > p$)， $F \in R^{r \times 1}$ ，满足 $\|F - BW\|^2 = \min$ 的唯一最小范数解为 $W = B^+ \cdot F$ 。其中 B^+ 为由 B 唯一确定的广义逆， $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ 。



○ 节点: 尺度函数节点 ● 节点: 小波函数节点

图 18 WBF 网络的结构

小波基函数神经网络具有小波的多分辨率分析的特点，在训练 WBF 网络时采用逐层的训练方法，先从最粗分辨率的训练开始，逐步增加分辨率的层数。训练的流程如图 19 所示。

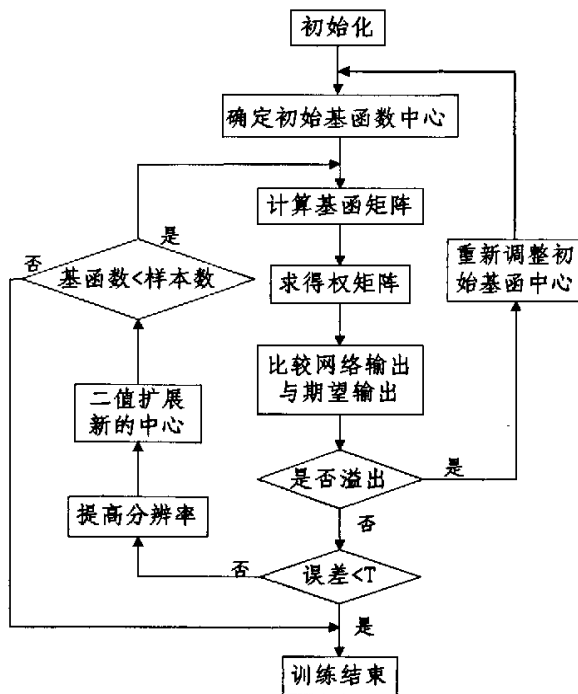


图 19 WBF 训练的流程图

3、网络训练结果

采用有限元分析的方法仿真了 56 组在相同的条件下，不同几何特征的管道缺陷所

产生的漏磁信号，样本归一化为 125 维。网络训练四层分辨率后结束，最终隐层基函数点数为 37 个，整个 WBF 网络的结构为 125—37—125。

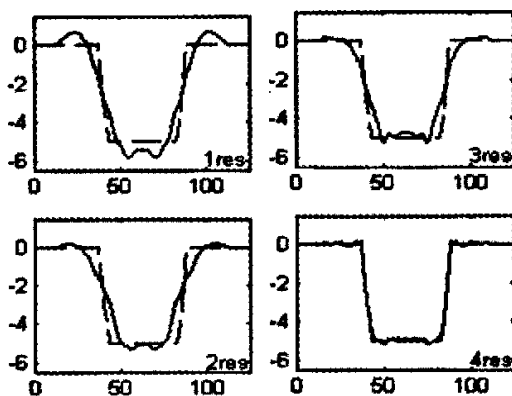


图 20 Res=1~4 理想输出与实际输出比较

训练样本经过 WBF 网络训练后，在四层分辨率下理想输出与实际输出的结果比较表明经过多分辨率分析的小波网络可以基本上反映出缺陷的轮廓。

4、WBF 网络描述缺陷轮廓的效果验证

为了验证这个 WBF 网络通过缺陷漏磁信号描述缺陷的截面轮廓图的能力，采用与样本集出自同一种情况下的缺陷信息作为测试集。图 21 为 L10D10A30 缺陷经过网络后的输出，这两个缺陷均不包含在训练样本里。

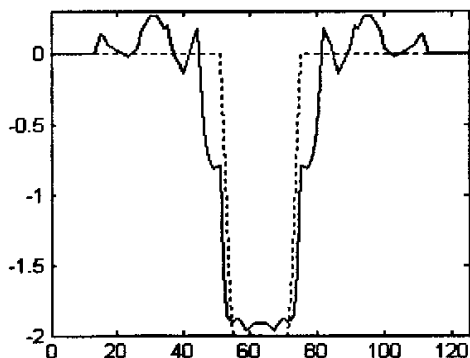


图 21 L10D10A30 缺陷网络输出

经验证，网络的输出基本上能够反映出缺陷的轮廓，样本集越大，网络的逼近效果越好，可见，经过大量样本训练的 WBF 网络可以建立起缺陷漏磁信号与缺陷轮廓的对应关系，从而为正确地估计管道缺陷的形状找到了一种可行的方法。

参 考 文 献

- 1, Wayne Niblas. An Introduction to Digital Image Processing. Engleood Cliffs:Prentice Hall International, 1986, 31~34.
- 2, Rafael C Gonzalez, Paul Wintza Digital Image Processing. Maschusetts: Addison-Wesley Publishing company, 1977.
- 3, Maoyong Cao, Nongliang Sun, Daoyin Yu, Computer pseudocolor equidensity coding of gran image based on tri-primary colors of RGB and pixel' s self-transformations Proc of SPIE, 2001, 4551:94~98.
- 4, Ward, K. D. Compound representation of high resolution sea clutter, Electronics Letters, 17, 16 (Aug. 6, 1981):561~563.
- 5, Donoho D.L. De-noising by soft-thresholding. IEEE Trans. On Information Techloghy. 1995, 41:613~627.
- 6, 田逢春: 小波变换实现图像数据压缩的边界问题及线性相位有限长脉冲响应滤波器的逼近。[博士学位论文] 1996。
- 7, Rioul Olivier. Regular Wavelets: a discrete-time approach. IEEE Trans. On Singal Processing, 1993, 41(12).
- 8, 阮秋琦: 数字图像处理学, 电子工业出版社(北京), 2001, 195~204.

油气管道漏磁缺陷检测的若干技术问题研究

作者: 靳世久, 李莺莺, 李久春, 肖兴江, 李育忠, 魏茂安

作者单位: 靳世久, 李莺莺(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室), 李久春, 肖兴江, 李育忠(中国石油天然气管道技术公司), 魏茂安(胜利油田钻井工艺研究院)

本文读者也读过(10条)

1. 纪凤珠, 王长龙, 陈正阁, 刘兵, JI Feng-zhu, WANG Chang-long, CHEN Zheng-ge, LIU Bing 基于径向基函数神经网络的漏磁信号反演[期刊论文]-军械工程学院学报2006, 18(6)
2. 陈礼娟 油气管道高速漏磁检测可视化系统[学位论文]2003
3. 蒋奇, JIANG Qi 基于小波神经网络的管道腐蚀缺陷定量识别研究[期刊论文]-钢铁2005, 40(10)
4. 杨理践, 陈晓春, 魏兢, YANG Li-jian, CHEN Xiao-chun, WEI Jing 油气管道漏磁检测的信号处理技术[期刊论文]-沈阳工业大学学报1999, 21(6)
5. 彭利军 浅析压力钢管无损检测工艺规程[期刊论文]-山西建筑2009, 35(36)
6. 金虹 漏磁检测技术在我国管道腐蚀检测上的应用和发展[会议论文]-2002
7. 刘峰, 陶涛 供水管道的无损检测技术[期刊论文]-城市公用事业2008, 22(4)
8. 宋丽茹, 唐振杰, 于克杰, SONG Li-ru, TANG Zhen-jie, YU Ke-jie 漏损管道无损检测的仿真分析[期刊论文]-计算机仿真2005, 22(2)
9. 李再国, 张友明, Li Zaiguo, Zhang Youming 漏磁检测定量分析中的信号处理技术[期刊论文]-石油仪器2010, 24(3)
10. 窦建庆, 谭多鸿, 姜学峰, Dou Jianqing, Tan Duohong, Jiang Xuefeng 油管漏磁现场无损检测装置的研制与应用[期刊论文]-石油机械2000, 28(11)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6310059.aspx