

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108443

漏磁信号增强算法研究^{*}

杨理践,赵东升,耿浩,黄平

(沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:对漏磁信号进行增强处理以提高其信噪比是实现漏磁数据智能分析的重要前提。漏磁信号中同时包含低频和高频噪声,直接进行处理往往会产生较高的错误率。从无限长矩形凹槽的磁偶极子模型中发现,漏磁场的切向分量和法向分量的原函数和一阶导数具有较强的交叉相关性。于是,利用这种交叉相关性,提出将漏磁场磁感应强度切向分量和法向分量融合的漏磁信号增强算法,对检测目标位置的信号进行增强,同时对其余位置的噪声进行抑制,从而提高漏磁信号的信噪比。利用牵拉实验数据和在役管道漏磁内检测数据对算法进行了初步验证和推广。最后,从在役管道漏磁内检测数据中收集了若干样本,并提出适合于漏磁信号的信号质量评估方法,对所提增强算法进行量化评估。实验结果显示,几乎所有样本的信号质量均得到了提高,大多数样本得到了不小于 10 dB 的提高。

关键词:漏磁信号;增强算法;磁偶极子模型;交叉相关性

中图分类号: TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on the MFL signal enhancement algorithm

Yang Lijian, Zhao Dongsheng, Geng Hao, Huang Ping

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: To improve the signal noise ratio (SNR), it is important to enhance the intelligent analysis of MFL signal. If MFL data are processed directly, it usually has low precision due to the low and high frequency noise contained in MFL signal. It is discovered from the magnetic dipole model of infinite rectangular groove that there is a cross correlation between the original function and first derivative of the normal component and tangential component leakage magnetic field. Therefore, a MFL signal enhancement algorithm is proposed based on the cross correlation, which can enhance the signal near detect targets and suppress noise. Hence, the SNR of MFL signal is improved. The algorithm is validated and generalized by pipeline pull-through test data and in-service pipeline inspection data, respectively. Finally, some samples are collected from in-service pipeline inspection data and a signal quality estimation method is proposed which is suitable for evaluating the quality of the MFL signal. The enhancement algorithm is quantitatively evaluated by the samples and the estimation method. Experimental results show that almost all the samples are improved and most of the samples are improved by 10 dB at least.

Keywords: MFL signal; enhancement algorithm; magnetic dipole model; cross correlation

0 引 言

漏磁检测方法由于其对检测环境要求较低、操作简单,且灵敏度高,被广泛用于长输油管道的内检测中。而且,在众多管道在役检测技术中,漏磁检测是应用最为广泛的^[1-2]。然而,漏磁信号中往往含有大量的噪声信号,

尤其是频率较低的准直流噪声信号,其动态范围甚至可与有用漏磁信号幅度相当,严重影响了后续漏磁数据智能分析的效果。因此,探索提高漏磁信号质量的增强算法具有重要意义。

近年来,国内外学者针对漏磁信号分析和处理方法进行了广泛研究,从不同角度提出了各种方法,主要分为基于漏磁数据的目标检测和缺陷轮廓重建。这些

方法大多只对原始漏磁数据进行简单的预处理或进行空间变换等处理,便进入后续核心算法,而关于提高漏磁信号质量的信号增强算法鲜有研究。此外,现有的信号增强算法主要针对声音信号、地震信号、图像信号等^[3-5],不宜直接将其应用于漏磁信号。文献[6]首先对原始漏磁数据进行了预处理、剔除异常值和滤波,并进行多色彩空间变换,最后基于小波多尺度变换和数据融合等方法实现了漏磁异常边缘检测;文献[7]直接利用原始漏磁数据和改进的卷积神经网络对焊缝法兰组件进行识别;文献[8]首先将漏磁信号的三维正交矢量融合并映射到一个新的空间,再利用改进的条件生成对抗网络从缺失了部分信息的漏磁数据生成完整的数据,最后利用卷积神经网络识别管道缺陷并对其深度进行表征;文献[9]基于微波电路和天线设计等优化问题上提出了空间映射的方法,通过研究精确的有限元模型与粗糙但高速的磁偶极子模型间的映射关系,构建适当的替代模型,并设计基于正则化方法的迭代策略,给出了缺陷重构的算法;文献[10]首先对漏磁数据进行预处理,包括基线校正、异常值判别、数据插补和滤波4个步骤,然后利用图像平滑与图像锐化的方式实现缺陷数据的图片增强,再进行伪彩色化,最后利用自监督模型实现管道缺陷检测;文献[11]在缺陷识别算法之前,对漏磁数据进行了二次基线校正和滤波;文献[12]利用文献[13]所提出的伪彩色成像方法将漏磁数据转换成漏磁彩色图像,再对有害缺陷和无害缺陷进行识别;文献[14]对漏磁数据中的5类失效数据进行了检测与剔除,并提出一种将KNN与SVR相结合的漏磁缺失数据插补方法,对缺失数据进行插补;文献[15]利用卷积神经网络的多输入多输出互相关操作,完成漏磁缺陷信号3个分量(轴向、周向、径向)的数据融合。文献[16]针对漏磁信号的噪声特性,提出一种基于数学形态学滤波的漏磁信号预处理方法,即利用改进的中值滤波法剔除信号中的奇异点,采用多项式拟合法消除信号趋势项,使用形态滤波法对漏磁信号进行消噪处理。文献[17]采取分布式多传感器数据融合分析技术,分别对漏磁检测器的主传感器、ID/OD传感器、轴向里程传感器、周向钟点传感器的信号进行各自特征量的数据分析,最后采取支持向量机融合分析技术实现对多传感器检测数据的融合分析。

本文受无限长矩形凹槽磁偶极子模型^[18]的启发,发现漏磁场的切向分量和法向分量的原函数与一阶导数存在交叉相关性。基于这种交叉相关性提出了一种漏磁信号的增强算法。本文的创新点在于所提方法是基于漏磁场的物理特性,而非基于有限数据集观察或训练而得出的。因此,本文所提方法具有天然的普适性。

1 理论分析

1.1 漏磁场产生机理

管道漏磁内检测器中的测量单元及漏磁场的产生机理如图1所示。当管壁无缺陷时,磁感线将沿着励磁铁、轭铁及管壁构成的闭合磁路行走,不会向外部泄漏;而当遇到缺陷或介质磁导率发生变化时(例如焊缝、阀门等管道目标),磁感线将会向管壁外泄漏,形成漏磁场。对某点漏磁场矢量做正交分解,可得到与励磁方向平行且同向的切向分量 H_t 、与被测目标平面垂直的法向分量 H_n 、以及与被测目标平面平行且垂直于励磁方向的周向分量 H_c 。其中, H_t 和 H_n 对缺陷灵敏度较高,漏磁信号幅值较大; H_c 的灵敏度较低,漏磁信号不明显。

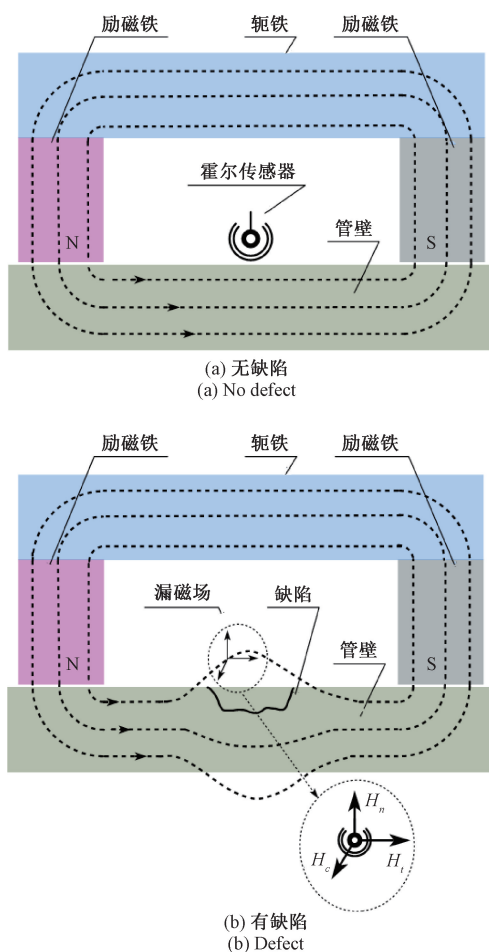


图1 测量单元及漏磁场产生机理

Fig. 1 Measurement unit and the mechanism of MFL

1.2 增强算法原理

文献[18]基于磁偶极子模型对无限长矩形凹槽形成的漏磁场进行了建模。矩形凹槽长度方向与励磁方向

垂直,如图 2 所示。式(1)和(2)为漏磁场的解析表达式。式中, σ_{ms} 为矩形凹槽两壁的磁荷面密度; μ 为被测材料的相对磁导率; H_0 为励磁强度; μ_0 为真空磁导率; b 为矩形凹槽宽度的半; h 为矩形凹槽的深度; y 为提高值,即霍尔传感器与被测铁磁性材料表面的垂直距离; x 为励磁方向的位移。以矩形凹槽上边缘的中点为原点建立了图中的笛卡尔坐标系。

假设矩形凹槽深度为 1 mm, 传感器提高值 y 为 1 mm, 励磁强度 H_0 为 $180 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 被测铁磁性材料相对磁导率 μ 为 2 000, 传感器位移 $x \in [-20 \text{ mm}, 20 \text{ mm}]$ 。分别得到矩形凹槽较窄(b 取 1 mm) 时的和较宽(b 取 10 mm) 时的 H_t 及 H_n 波形, 如图 3 所示。

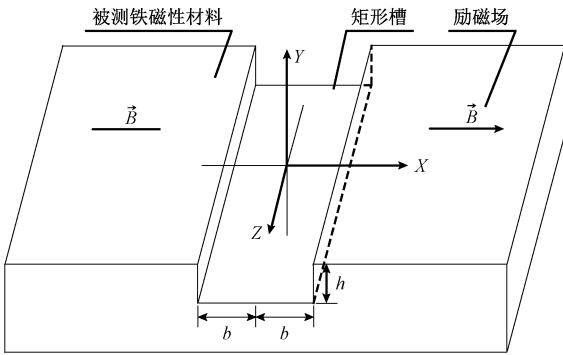


图 2 矩形凹槽磁偶极子模型

Fig. 2 Rectangular groove under the magnetic dipole model

$$\begin{cases} \lambda_1 = \tan^{-1} \left(\frac{h(x+b)}{(x+b)^2 + y(y+h)} \right) \\ \lambda_2 = \tan^{-1} \left(\frac{h(x-b)}{(x-b)^2 + y(y+h)} \right) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \sigma_{ms} = 5.3 \left(\frac{h/b + 1}{h/(b\mu) + 1} \right) \cdot H_0 \\ H_t = \frac{\sigma_{ms}}{2\pi\mu_0} (\lambda_1 - \lambda_2) \\ \lambda_3 = \frac{(x-b)^2 + y^2}{(x+b)^2 + y^2} \\ \lambda_4 = \frac{(x+b)^2 + (y+h)^2}{(x-b)^2 + (y+h)^2} \\ H_n = \frac{\sigma_{ms}}{4\pi\mu_0} \ln(\lambda_3 \lambda_4) \end{cases} \quad (2)$$

由图 3 可知, 矩形凹槽较窄($b=1 \text{ mm}$) 时的和较宽($b=10 \text{ mm}$) 时的, 其波形形状不同, 需分别进行讨论。分别对切向分量 H_t 和 H_n 求关于 x 的一阶偏导数, 得到 H'_t 和 H'_n , 如式(3) 和(4)。比较 H'_t 与 H_n 的波形, 如图 4 所示。图 4 展示了窄凹槽和宽凹槽两种情况下的对比图。同时, 比较 $-H'_n$ 与 H_t 的波形, 如图 5 所示。图 5 展示了窄凹槽和宽凹槽两种情况下的对比图。从图 4 和 5 不难发

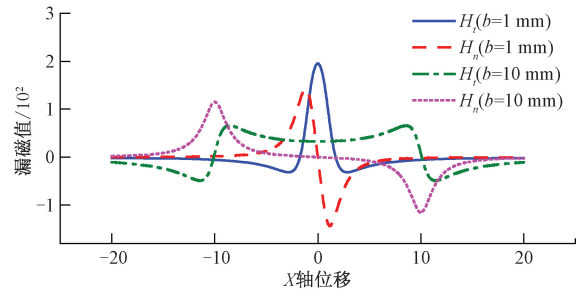


图 3 切向分量和法向分量

Fig. 3 Tangential and normal component

现, 无论是窄凹槽, 还是宽凹槽, 其切向分量的一阶导数与法向分量, 以及法向分量的一阶导数与切向分量, 均表现出了较强的相关性。此外, 在远离凹槽的位置, 原函数变化较为平缓, 经过求导之后的信号, 其值较小或接近于 0; 而在凹槽边缘附近, 原函数变化较为剧烈, 一阶导数也较为明显。不仅如此, 信号经过求导后, 其低频成分会得到有效的抑制, 这对抑制实际管道漏磁检测信号中频率接近直流的低频准直流信号, 效果明显。

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{y+h}{(-x+b)^2 + (y+h)^2} \\ \omega_2 = \frac{y+h}{(x+b)^2 + (y+h)^2} \\ \omega_3 = \frac{y}{(-x+b)^2 + y^2} \\ \omega_4 = \frac{y}{(x+b)^2 + y^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} H'_t = \frac{\partial H_t}{\partial x} = \omega_1 - \omega_2 - \omega_3 + \omega_4 \\ \rho_1 = \frac{2(-x+b)}{(-x+b)^2 + (y+h)^2} \\ \rho_2 = \frac{2(x+b)}{(x+b)^2 + (y+h)^2} \\ \rho_3 = \frac{2(x-b)}{(x-b)^2 + y^2} \\ \rho_4 = \frac{2(x+b)}{(x+b)^2 + y^2} \\ H'_n = \frac{\partial H_n}{\partial x} = \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 - \rho_4 \end{cases} \quad (4)$$

综上所述, 利用切向和法向两个漏磁场分量的这种原函数和一阶导数的交叉相关性, 以及导数计算的特性, 设计了漏磁信号增强算法, 如式(5) 所示。

$$H_{en}(x, *) = H_a(x, *) \times \left| \frac{\partial H_b(x, *)}{\partial x} \right| \quad (5)$$

式(5) 的含义是, 在切向分量和法向分量中, 选择其中之一作为 H_b , 并对其求关于 x 的一阶偏导, 再求绝对

值,然后以此作为增强系数与另外一个分量 H_a 逐点相乘,实现对 H_a 的增强。式中 * 号表示除 x 以外的其它所有变量。对一阶偏导求绝对值的主要目的是尽量保持被增强信号的正负极性。

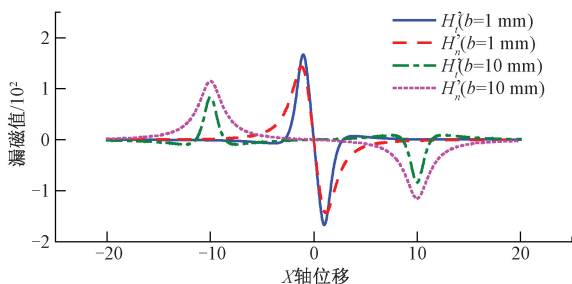


图4 切向分量一阶导数与法向分量

Fig. 4 First derivative of tangential component and normal component

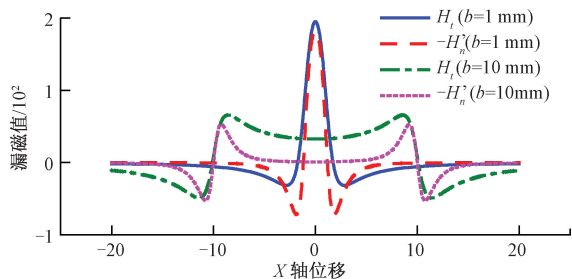


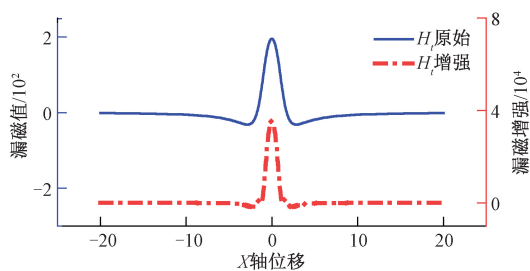
图5 切向分量与法向分量一阶导数

Fig. 5 Tangential component and first derivative of normal component

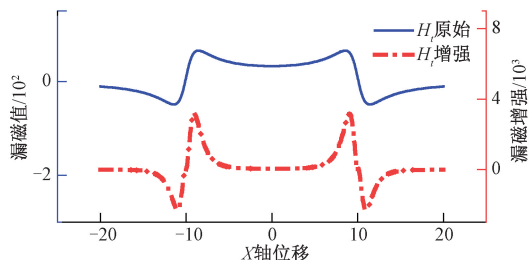
图6和7分别展示了窄凹槽、宽凹槽切向分量和法向分量的增强结果。可以看出,经过处理后的漏磁信号得到了显著增强,且信号能量更加集中。同时,在远离凹槽边缘位置的信号值得到了明显的抑制。总体上,信号经过增强处理后,信噪比有明显提升。然而,增强信号的波形都出现轻微失真,未能完全保持与原始信号的一致性。但可以预见,这种轻微的失真对于后续目标检测工作几乎没有影响,而相比之下,信噪比的显著提升所带来的益处则更加明显。

2 算法验证与推广

前文所述漏磁信号增强算法利用了漏磁场切向分量和法向分量的原始信号与一阶导数的交叉相关性,而这一相关性是从无限长且垂直于励磁方向的矩形凹槽的磁偶极子模型中发现的,对于实际管道中的腐蚀缺陷、环焊缝、螺旋焊缝等常见管道目标往往不能满足这一苛刻条件。但是,由于漏磁场产生的根本原因是被测目标材料磁导率发生了突变,使得磁感线的方向发生了偏转,进而



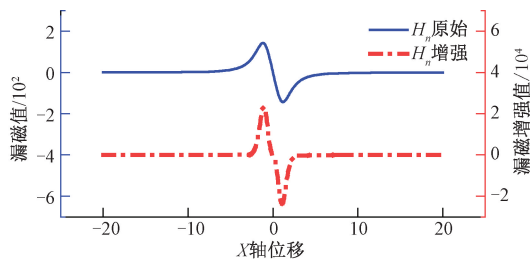
(a) 窄凹槽($b=1$ mm)
(a) Narrow groove($b=1$ mm)



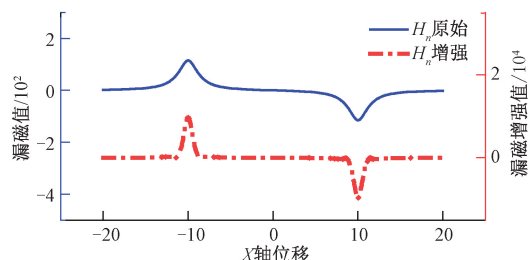
(b) 宽凹槽($b=10$ mm)
(b) Wide groove($b=10$ mm)

图6 切向分量增强

Fig. 6 Enhancement of tangential component



(a) 窄凹槽($b=1$ mm)
(a) Narrow groove($b=1$ mm)



(b) 宽凹槽($b=10$ mm)
(b) Wide groove($b=10$ mm)

图7 法向分量增强

Fig. 7 Enhancement of normal component

在突变点附近发生了泄漏磁场。因此推测,对于任意方向、任意形状以及磁导率突变点两侧是哪两种材料,其所产生的漏磁场应该也具有相似的特性,尤其这种交叉相关性,不同之处,是所产生的漏磁场强度和方向。下面基于管道漏磁牵引拉试验数据和在役管道漏磁检测数据对腐蚀缺陷、环焊缝和螺旋焊缝这3个在管道中最为常见的目标进行讨论,初步验证和推广所提增强算法。

2.1 有限长人工矩形凹槽漏磁信号增强

在空管道上人为蚀刻不同尺寸的矩形凹槽,即矩形缺陷,并牵拉漏磁内检测器,即可获得人工矩形凹槽的漏磁信号。与第1节中讨论的矩形凹槽不同,人工矩形凹槽是有限长的。本文从中选择轴向和周向尺寸分别为6.2 mm×6.2 mm、20.6 mm×21.2 mm、2.6 mm×23.6 mm、21.6 mm×2.0 mm 的矩形凹槽分别观察算法的有效性。

由图8~11可知,4种不同尺寸矩形凹槽的漏磁信号均得到了明显地增强,同时,远离矩形凹槽的噪声也得到了明显的抑制。

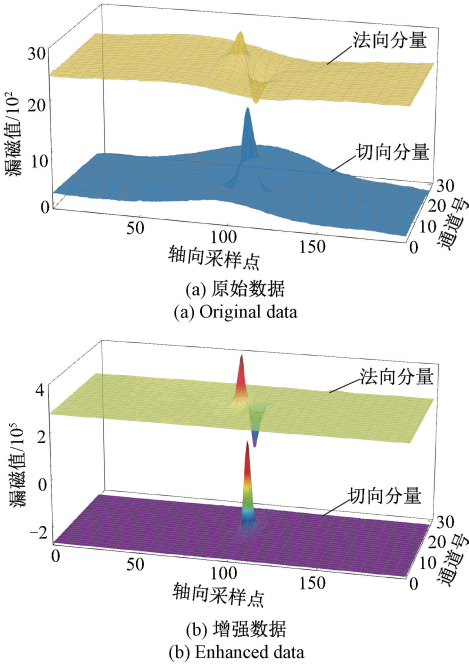


图8 6.2 mm×6.2 mm 矩形缺陷增强
Fig. 8 6.2 mm×6.2 mm rectangular defect enhancement

2.2 在役管道腐蚀缺陷漏磁信号增强

为进一步验证算法的适用性,从在役管道漏磁内检测数据中收集腐蚀缺陷,并利用所提算法进行增强处理,效果如图12~14所示。在役管道腐蚀缺陷的形状一般为不规则形状,其尺寸实际为最大外接矩形的长和宽。并且,在役管道腐蚀缺陷的尺寸是有限的,所选尺寸为6 mm×12 mm、17 mm×20 mm、29 mm×28 mm。与2.1节对人工矩形凹槽的牵拉试验数据不同,在役管道腐蚀缺陷的漏磁信号夹杂着较强的扰动信号,信噪比较低。但从图12~14可知,经过增强处理后,腐蚀缺陷位置的漏磁信号得到了显著增强,漏磁信号整体上的信噪比得到了显著提升。

2.3 在役管道焊缝漏磁信号增强

焊缝是管道的常见目标,也是管道维护工作中重要的参照物,因此,也是漏磁数据分析的对象之一。于是,

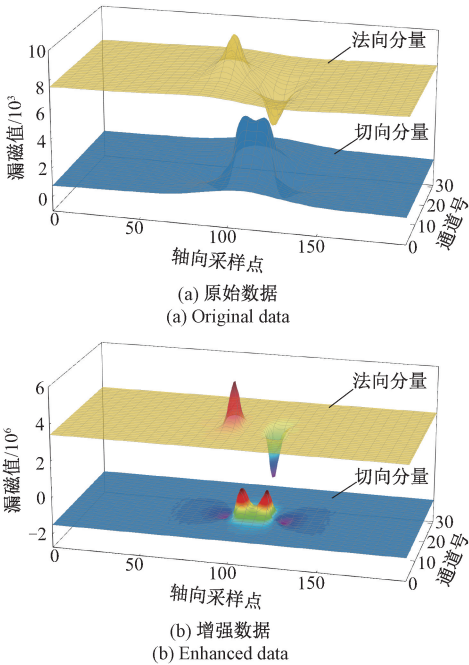


图9 20.6 mm×21.2 mm 矩形缺陷增强
Fig. 9 20.6 mm×21.2 mm rectangular defect enhancement

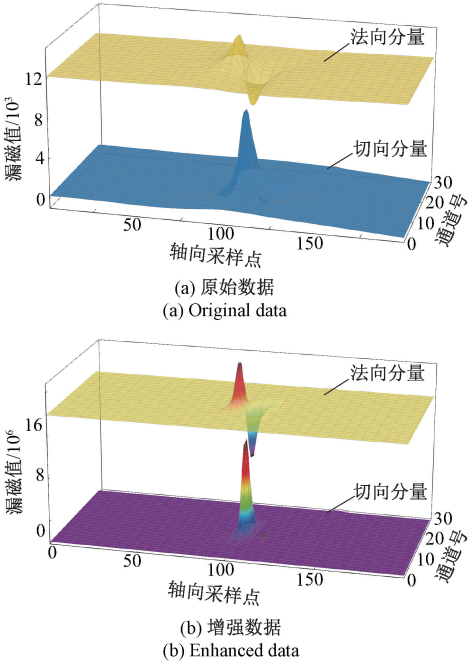


图10 2.6 mm×23.6 mm 矩形缺陷增强
Fig. 10 2.6 mm×23.6 mm rectangular defect enhancement

从在役管道漏磁内检测数据中选取了环焊缝及螺旋焊缝附近的数据,并利用所提算法进行增强处理,效果如图15~17所示。所截取的数据中仍然包含扰动信号,但经过增强处理后,只有焊缝位置的漏磁信号得到了显著增强,漏磁信号整体上的信噪比也得到了显著提升。由

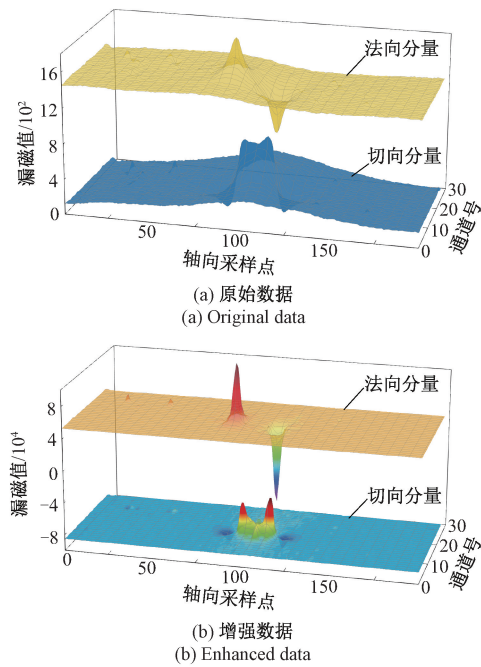


图 11 21.6 mm×2.0 mm 矩形缺陷增强
Fig. 11 21.6 mm×2.0 mm rectangular defect enhancement

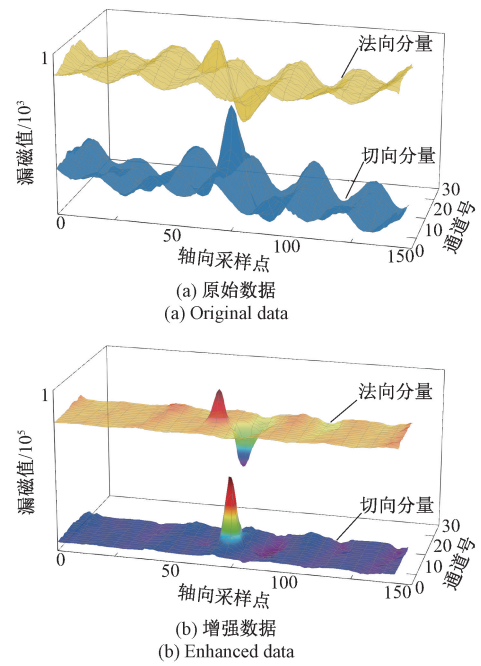


图 12 6 mm×12 mm 腐蚀缺陷增强
Fig. 12 6 mm×12 mm corrosion defect enhancement

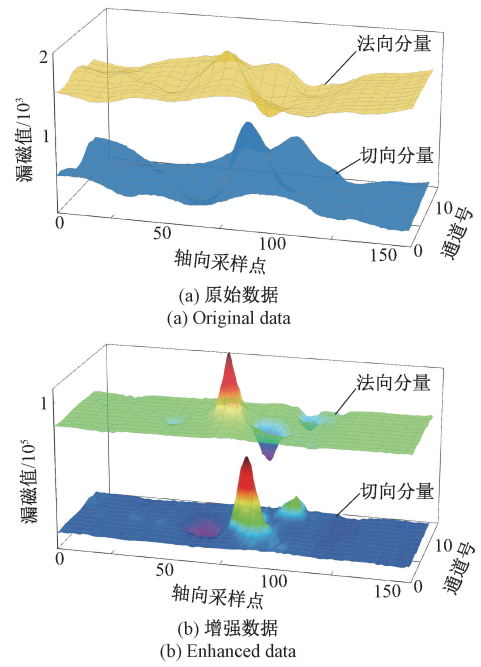


图 13 17 mm×20 mm 腐蚀缺陷增强
Fig. 13 17 mm×20 mm corrosion defect enhancement

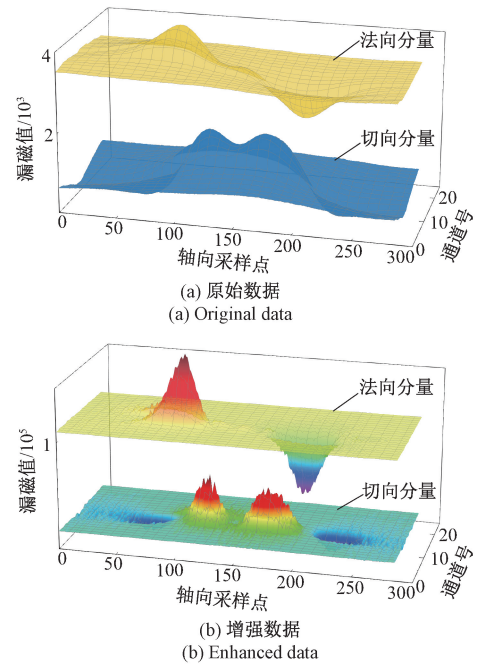


图 14 29 mm×28 mm 腐蚀缺陷增强
Fig. 14 29 mm×28 mm corrosion defect enhancement

图 12~17 可知,无论是在役管道中的不规则腐蚀缺陷,还是环焊缝及螺旋焊缝,所提漏磁信号增强算法也均表现出了良好的效果。

综合 2.1~2.3 节的分析,漏磁场切向分量与法向分

量的导数与原函数交叉相关性以及所提增强算法适用于有限长规则形状缺陷(有限长人工矩形凹槽)、不规则形状缺陷(有限尺寸腐蚀缺陷)、焊缝等常见管道目标,即所提增强算法具有较好的普适性。

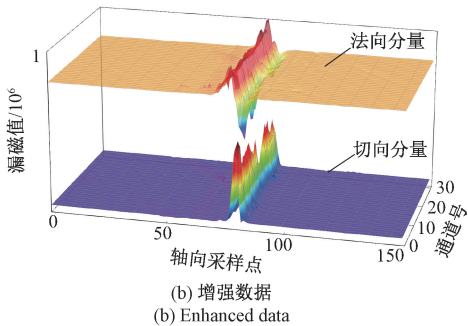
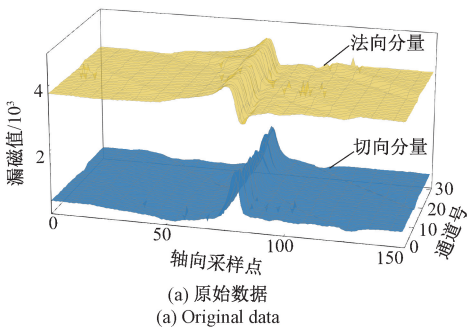


图 15 环焊缝增强
Fig. 15 Girth weld enhancement

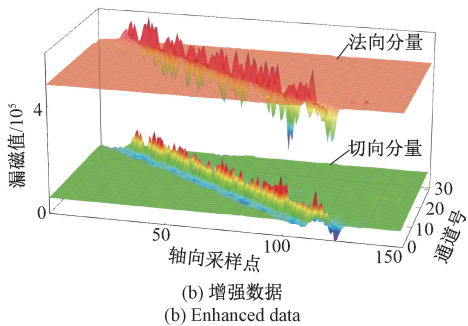
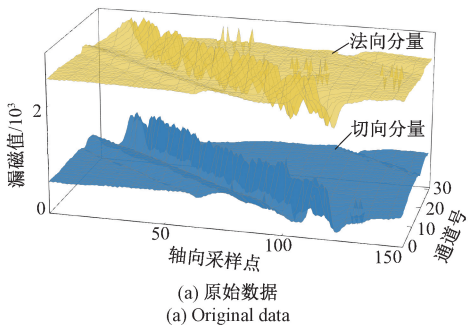


图 16 螺旋焊缝增强(顺时针方向)
Fig. 16 Spiral weld enhancement (clockwise)

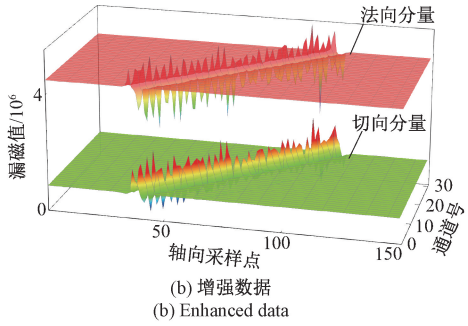
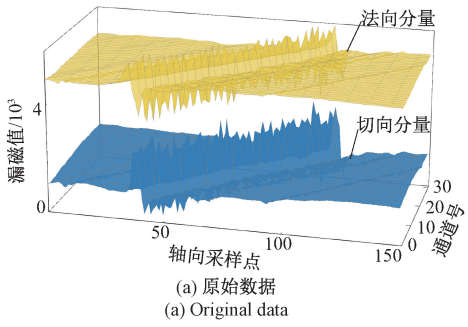


图 17 螺旋焊缝增强(逆时针方向)
Fig. 17 Spiral weld enhancement (anti-clockwise)

图 18 和 19 为实际管道漏磁检测数据中的某一通道漏磁信号,轴向截取了 5 000 个采样点。纯直流信号如图中短划线所示,是漏磁信号整体的偏移,不同通道其值通常不同,并且差异较大;准直流信号频率较低,但幅度较大,如图中长划线所示;高频噪声幅值较小,图中展示了局部放大后的高频噪声信号。

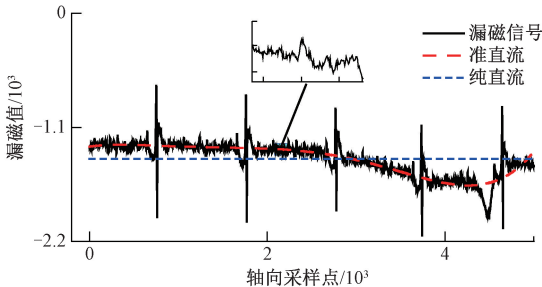


图 18 法向分量
Fig. 18 Normal component

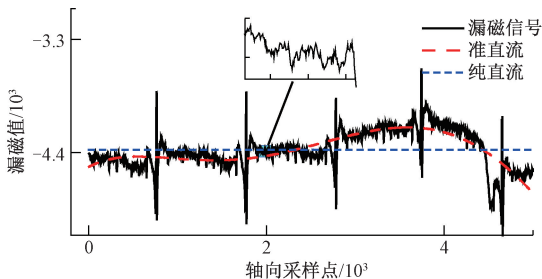


图 19 切向分量
Fig. 19 Tangential component

3 算法设计

实际管道漏磁检测信号中,除了目标位置附近的有用漏磁信号,还包括纯直流信号、准直流信号、高频噪声。

纯直流信号不影响观察漏磁信号的动态特征,而由于高频噪声的存在,使得其导数值也存在噪声,经过所提增强算法的乘积运算,较大的直流量会使得导数中的噪声被放大,影响输出结果的质量。因此,对实际漏磁信号做增强处理,需首先去除纯直流成分。准直流成分变化缓慢,高频噪声幅值较小,二者对导数值的影响均较小,增强算法均可对其进行抑制。此外,为了均衡不同通道之间的增益系数,当增益系数大于设定阈值 ε 时,该通道的增益系数整体做等比例衰减,使得衰减后的最大值不大于 ε 。

基于前文理论分析并结合实际的管道漏磁数据特征,设计了如下漏磁数据增强算法流程。

算法 1

Input: 漏磁数据第 i 通道第 j 轴向采样点的法向分量和轴向分量 $H_n[i,j]$ 和 $H_t[i,j]$,通道数 N ,轴向采样点数 M ,增益阈值 ε 。

- 1) **for** $i=1 \rightarrow N$ **do**
- 2) $H_n[i,:] = H_n[i,:] - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_n[i,j]$
- 3) $H_t[i,:] = H_t[i,:] - \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_t[i,j]$
- 4) $A_{H_t}[i,:] = |\text{Grandient}\{H_t[i,:]\}|$
- 5) $A_{H_n}[i,:] = |\text{Grandient}\{H_n[i,:]\}|$
- 6) **if** $\max\{A_{H_t}[i,:]\} > \varepsilon$ **then**
- 7) $A_{H_t}[i,:] = \frac{A_{H_t}[i,:]}{\max\{A_{H_t}[i,:]\}} \times \varepsilon$
- 8) **if** $\max\{A_{H_n}[i,:]\} > \varepsilon$ **then**
- 9) $A_{H_n}[i,:] = \frac{A_{H_n}[i,:]}{\max\{A_{H_n}[i,:]\}} \times \varepsilon$
- 10) **for** $j=1 \rightarrow M$ **do**
- 11) $H_{n_en}[i,j] = H_n[i,j] \times A_{H_t}[i,j]$
- 12) $H_{t_en}[i,j] = H_t[i,j] \times A_{H_n}[i,j]$
- 13) **until** 所有采样点处理完成
- 14) **end for**
- 13) **until** 所有通道处理完成
- 14) **end for**
- 15) **return** 增强结果 H_{n_en}, H_{t_en}

4 实验结果与分析

4.1 漏磁信号质量评估方法

通常情况下,利用信噪比对信号的质量进行评估,计算信噪比的前提是需要已知或可以测量信号和噪声的幅值或功率。然而,从实际检测数据中,无法分离出漏磁信号和噪声,因此,需要寻找适合于漏磁信号的评估方法。

漏磁信号的幅值随着被测位置铁磁性材料物理结构或特性的变化而变化。例如,当管道漏磁内检测器遇到缺陷、焊缝、阀门、三通等目标时,才会发生显著的漏磁现象。所以,有用漏磁信号往往集中于被检测目标中心附近的一个较小范围内,且在这个范围内,有用漏磁信号占主要成分,其它区域则是对管道漏磁检测数据分析工作不利的噪声信号。于是提出如式(6)所示的漏磁信号质量的量化评价方法。

$$Q = 20 \lg \frac{R_{pp}\{U(P, \delta)\}}{R_{pp}\{C_w[U(P, \delta)]\}} \text{ (dB)} \quad (6)$$

式中: W 表示所截取的全部漏磁采样点,即全集; P 表示被检测目标的中心点; $U(P, \delta)$ 表示以 P 为中心, δ 为半径的邻域内的所有样本点集合,即有用漏磁信号; $C_w[\cdot]$ 表示补集运算,即 $C_w[U(P, \delta)]$ 表示噪声; $R_{pp}\{\cdot\}$ 表示求峰峰值运算,即样本点集合的最大值与最小值之差。 Q 反映了有用漏磁信号与噪声幅度的比值,可近似表征漏磁信号的质量。

为了评估漏磁信号增强算法的性能,首先分别计算输出信号的质量 Q_o 和输入信号的质量 Q_i ,再利用二者之差来刻画漏磁信号的改善程度,即增强算法的性能,如式(7)所示。

$$Q_A = Q_o - Q_i \text{ (dB)} \quad (7)$$

4.2 漏磁信号增强实验

管道漏磁内检测器一般为轴向励磁,全方位管道漏磁内检测器还会包含周向励磁的检测单元,如图20所示。由于周向励磁检测器的结构特征,其远离励磁单元位置的漏磁场较弱,甚至遇到焊缝时,漏磁信号也相对较弱,对其焊缝位置的漏磁信号进行增强处理具有现实意义。于是,从周向励磁的检测数据中截取若干焊缝漏磁数据作为测试样本,同时,从轴向励磁的检测数据中截取了若干腐蚀缺陷漏磁数据作为测试样本,共同构成了测试样本集,具体样本分布如表1所示。

利用第3节的算法对所有样本进行增强处理,并利用式(6)和(7)对漏磁信号的改善情况进行分析,结果如表2和3所示。由表中可知,对于常见管道目标,几乎全部漏磁信号样本的质量均得到了改善,不少于90%的焊缝样本和不少于80%的腐蚀缺陷样本的改善程度不低

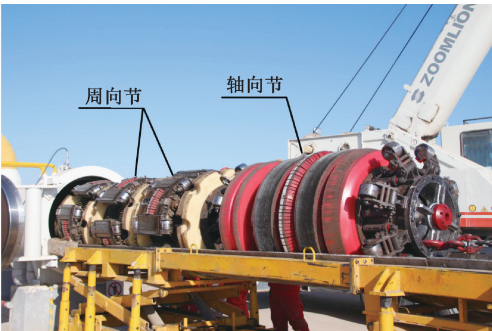


图 20 管道漏磁内检测器

Fig. 20 The MFL internal detector of pipeline

表 1 漏磁信号样本集

Table 1 MFL signal sample set

类别	励磁方向	数量
腐蚀缺陷	轴向	2 120
环焊缝	周向	2 676
螺旋焊缝 ¹	周向	2 650
螺旋焊缝 ²	周向	2 369
合计		9 815

注 1: 顺时针方向的螺旋焊缝; 注 2: 逆时针方向的螺旋焊缝。

表 2 切向分量漏磁信号的改善情况

Table 2 Improvement of MFL signal (tangential component)

类别	%		
	$Q_A > 0$ dB	$Q_A > 6$ dB	$Q_A > 10$ dB
腐蚀缺陷	98.82	80.33	54.34
环焊缝	99.50	97.65	93.04
螺旋焊缝 ¹	98.23	91.43	79.66
螺旋焊缝 ²	99.87	96.50	81.68

表 3 法向分量漏磁信号的改善情况

Table 3 Improvement of MFL signal (normal component)

类别	%		
	$Q_A > 0$ dB	$Q_A > 6$ dB	$Q_A > 10$ dB
腐蚀缺陷	99.01	83.68	59.01
环焊缝	99.25	96.90	91.03
螺旋焊缝 ¹	99.74	96.60	90.00
螺旋焊缝 ²	99.62	96.03	89.62

于 6 dB, 大多数样本的改善程度不低于 10 dB。可认为, 所提算法具有较好的适用性和实用性。

4.3 对比分析

漏磁信号预处理阶段较为常用的提高信噪比的方法是高斯滤波。高斯滤波属于低通滤波器, 可以抑制高频噪声, 但同时也会抑制漏磁信号。可以预测, 基于 4.1 节的评

估方法, 经过高斯滤波后信噪比不会有明显改善, 只能使信号较为平滑。实际上, 漏磁信号中的准直流成分动态幅度较大, 是影响信噪比的主要因素。因此, 本文使用强度较高的高斯滤波器, 得到准直流成分, 再从原始信号中减掉准直流成分, 最终得到有所改善的漏磁信号。所用高斯滤波器方差为 9、截断范围为 $[-36, 36]$, 如式 (8) 所示。

$$H_G = H_m - H_m \cdot G[9, 36] \tag{8}$$

将基于交叉相关性的增强算法和基于高斯滤波方法去除准直流成分后的效果如图 21 和 22 所示。

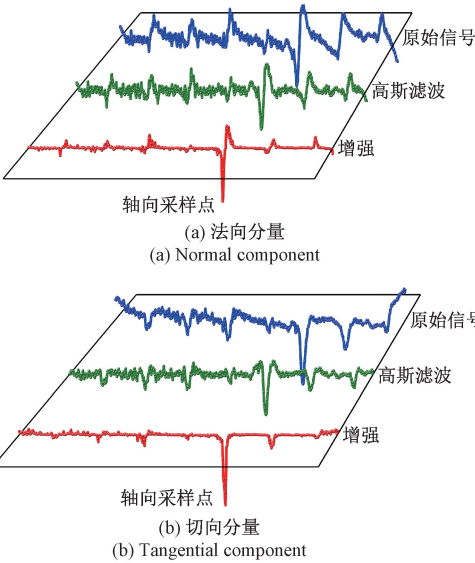


图 21 缺陷漏磁信号增强与高斯滤波效果对比

Fig. 21 The comparison of enhancement algorithm and gaussian filtering effect on defect MFL signal

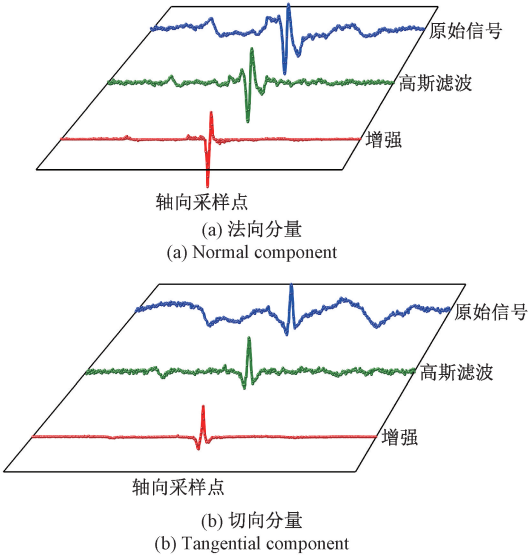


图 22 焊缝漏磁信号增强与高斯滤波效果对比

Fig. 22 The comparison of enhancement algorithm and gaussian filtering effect on weld MFL signal

由图 21 和 22 中可知,对于包含了有用漏磁信号和噪声的样本,高斯滤波方法也能够提升信号的质量,但所提增强算法的效果更好,有用漏磁信号更加突出。

5 结 论

本文从无限长矩形凹槽的磁偶极子模型中发现了漏磁场切向分量与法向分量原函数与一阶导数的交叉相关性,并基于此相关性提出了漏磁信号增强算法。以牵拉实验数据和在役管道漏磁检测数据为基础,对算法进行了初步验证和推广。最后,基于在役管道漏磁检测数据建立了样本集,并提出适用于漏磁信号的信号质量评估方法,对增强算法的效果进行量化评估。实验结果表明,所提增强算法对腐蚀缺陷、焊缝等常见管道目标的漏磁信号具有较好的适用性,并且比基于高斯滤波的方法效果更佳,但对腐蚀缺陷漏磁信号的表现欠佳,其主要原因是腐蚀缺陷漏磁信号本身信噪比较差,导致其一阶导数不光滑,进而使得增强结果信噪比较差。后续工作重点研究改进求导方法或增加必要的降噪预处理。本文的工作为后续基于漏磁数据的管道目标识别与定位任务奠定了基础。

参考文献

- [1] PENG X, ANYAOHA U, LIU Z, et al. Analysis of magnetic-flux leakage (MFL) data for pipeline corrosion assessment[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2020, 56(6):1-15.
- [2] PENG X, SIGGERS K, LIU Z. Multi-MFL measurement assessment using gaussian mixture model [C]. 2019 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC), 2019: 529-534.
- [3] 王伟江, 彭业萍, 曹广忠, 等. 面向机柜表面缺陷检测的不均匀光照和低亮度图像增强方法[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(8):131-139.
WANG W J, PENG Y P, CAO G ZH, et al. Non-uniform and low illumination image enhancement for cabinet surface defect detection[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(8):131-139.
- [4] 戴忠华, 周穗华, 孙玉绘, 等. 舰船地震波信号的滑动功率谱实时检测算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(1):74-80.
DAI ZH H, ZHOU S H, SUN Y H, et al. Real-time detection algorithm of sliding power spectrum of ship seismic wave signal [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(1):74-80.
- [5] 米建伟, 方晓莉, 仇原鹰. 非平稳背景噪声下声音信号增强技术[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(1):17-22.
MI J W, FANG X L, QIU Y Y. Enhancement technology for the audio signal with nonstationary background noise[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(1):17-22.
- [6] 曹辉, 杨理践, 刘俊甫, 等. 基于数据融合的小波变换漏磁异常边缘检测[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(12):71-79.
CAO H, YANG L J, LIU J F, et al. Magnetic flux leakage anomaly edge detection based on data fusion and wavelet transformation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(12):71-79.
- [7] 杨理践, 曹辉. 基于深度学习的管道焊缝法兰组件识别方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(2):193-202.
YANG L J, CAO H. Deep learning based weld and flange identification in pipeline[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(2):193-202.
- [8] FU M R, LIU J H, ZHANG H G, et al. Multisensor fusion for magnetic flux leakage defect characterization under information incompleteness [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(5):4382-4392.
- [9] 吴振宁, 汪力行, 刘金海. 基于空间映射的匀速采样漏磁检测复杂缺陷重构方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(7):164-172.
WU ZH N, WANG L X, LIU J H. Space mapping based reconstruction of complex defects of MFL inspection under constant sampling speed [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(7):164-172.
- [10] 刘金海, 赵贺, 神祥凯, 等. 基于漏磁内检测的自监督缺陷检测方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9):180-187.
LIU J H, ZHAO H, SHEN X K, et al. Self-supervised defect detection method based on magnetic flux leakage internal detection [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9):180-187.
- [11] 刘金海, 付明芮, 唐建华. 基于漏磁内检测的缺陷识别方法[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(11):2572-2581.
LIU J H, FU M R, TANG J H. MFL inner detection based defect recognition method[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(11):2572-2581.
- [12] FENG J, LI F M, LU S X, et al. Injurious or noninjurious defect identification from MFL images in pipeline inspection using convolutional neural

- network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(7):1883-1892.
- [13] PENG L S, WANG S, LIU H, et al. Improved gray-color transform method for MFL images[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2015, 55(5):592-596.
- [14] 唐建华, 姜琳, 李志鹏, 等. 管道漏磁内检测失效数据处理方法[J]. 油气储运, 2020, 39(10):1122-1128.
- TANG J H, JIANG L, LI ZH P, et al. Processing method for failure data in pipeline MFL inline inspection[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(10):1122-1128.
- [15] 王宏安, 陈国明. 基于深度学习的漏磁检测缺陷识别方法[J]. 石油机械, 2020, 48(5):127-132.
- WANG H AN, CHEN G M. Magnetic flux leakage defect detection based on deep learning[J]. China Petroleum Machinery, 2020, 48(5):127-132.
- [16] 邱忠超, 洪利, 蔡建美, 等. 基于数学形态学滤波的漏磁信号预处理方法研究[J]. 中国测试, 2020, 46(3):1-5.
- QIU ZH CH, HONG L, CAI J X, et al. Research on magnetic flux leakage signal preprocessing method based on mathematical morphology filtering [J]. China Measurement and Test, 2020, 46(3):1-5.
- [17] 邵卫林, 陈金忠, 马义来, 等. 基于多传感器数据融合技术的漏磁内检测数据分析[J]. 传感技术学报, 2019, 32(10):1541-1548.
- SHAO W L, CHEN J ZH, MA Y L, et al. Analysis of magnetic flux leakage in-line inspection data based on multi-sensor data fusion technology[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2019, 32(10):1541-1548.
- [18] 吴德会, 刘志天, 王晓红, 等. 表面缺陷的方向性对漏磁场分布的影响[J]. 物理学报, 2017, 66(4):266-276.
- WU D H, LIU ZH T, WANG X H, et al. Mechanism analysis of influence of surface-breaking orientation on magnetic leakage field distribution[J]. Acta Phys. Sin., 2017, 66(4):266-276.

作者简介



杨理践, 1981 年于沈阳工业大学获得学士学位, 1984 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、无损检测技术。

E-mail: yanglijian888@163.com

Yang Lijian received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1981, and received his M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. He is currently a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include in-detection technology of long distance oil and gas pipeline and related theory, nondestructive testing technology.



赵东升(通信作者), 2009 年于广西大学获得学士学位, 2011 年于东北大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学在读博士研究生, 主要研究方向为管道检测数据智能分析与处理。

E-mail: 1332906250@qq.com

Zhao Dongsheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Guangxi University in 2009, and received his M. Sc. degree from Northeastern University in 2011. He is currently a Ph. D. candidate at Shenyang University of Technology. His main research interests include intelligent analysis and processing of pipeline inspection data.