

文章编号: 1000-8241(2022)01-0034-08

新一代超高清亚毫米级管道内检测技术的研发与应用

董绍华^{1,2} 田中山³ 赖少川³ 王同德¹ 宋执武¹ 彭东华¹ 刘冠一¹ 魏昊天¹

1. 中国石油大学(北京)管道技术与安全研究中心; 2. 油气资源与探测国家重点实验室; 3. 国家管网集团华南分公司

摘要: 针对油气管道中普遍存在的环焊缝缺陷、类裂纹缺陷以及针孔小缺陷检测能力和识别率较低的难题,通过理论分析、建模仿真、设备研制、现场应用等环节,自主研发了新一代超高清管道漏磁内检测器。该检测器实现了探头通道间距 0.6 mm、轴向采样间距 1 mm,满足海量数据存储和采集要求,信号数据采集量增加 15 倍,并将漏磁检测、变形检测及定位检测集成到同一台检测器上,可一次性检测出各类缺陷,同时对齐腐蚀、变形以及环焊缝缺陷。开发了基于深度学习的智能化识别分析软件,建立了 BP 神经网络深度学习模型,实现了缺陷的一体化识别,提高了小孔腐蚀的可检测能力,可有效识别面积小于 $1t \times 1t$ (t 为管道壁厚)的缺陷。该技术初步解决了当前三轴高清漏磁内检测器无法精确描述和量化小孔腐蚀缺陷、环焊缝缺陷的突出问题,对于打破国外技术垄断和提升中国管道完整性技术水平具有重大意义。(图 13,参 22)

关键词: 油气管道; 内检测; 超高清; 海量存储; 环焊缝; 小孔腐蚀; 智能化识别

中图分类号: TE832

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.01.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and application of a new generation of ultra-high-definition inline detection technology with sub-millimeter precision

DONG Shaohua^{1,2}, TIAN Zhongshan³, LAI Shaochuan³, WANG Tongde¹, SONG Zhiwu¹,
PENG Donghua¹, LIU Guanyi¹, WEI Haotian¹

1. Pipeline Technology and Safety Research Center, China University of Petroleum (Beijing);

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting; 3. PipeChina South China Company

Abstract: In view of the low detectability and identification rate of the girth weld, crack-like and pinhole defects that generally exist in the oil and gas pipelines, a new generation of ultra-high-definition pipeline magnetic flux leakage (MFL) inline detector was independently developed through theoretical analysis, modeling and simulation, equipment research and development, field application and other links. As for the detector, the probe channel spacing is up to 0.6 mm and the axial sampling spacing is 1 mm, which meet the requirements for storage and collection of massive data. In addition, the acquisition capacity of signal data is increased by 15 times. The MFL detection, deformation detection and positioning detection are integrated into the same detector, so that all kinds of defects can be detected at one time. Meanwhile, the corrosion, deformation and girth weld defects can be aligned. Moreover, the intelligent identification and analysis software based on deep learning was developed and a BP neural network based deep learning model was established, realizing the integrated identification of defects and improving the detectability of pinhole corrosion. Hence, the defects with an area less than $1t \times 1t$ (where t is the wall thickness of the pipeline) can be identified effectively. In this way, the prominent problem that the pinhole corrosion and girth weld defects cannot be accurately described and quantified with the current three-axis high-definition magnetic flux leakage internal detector is solved preliminarily, which is of great significance for breaking the foreign monopolies and improving the technical level of pipeline integrity in China. (13 Figures, 22 References)

Key words: oil and gas pipelines, inline inspection, ultra-high-definition, mass storage, girth weld, pinhole corrosion, intelligent identification

管道内检测器是一种集成了检测、信息采集、处理、存储等技术的装置。1965年,美国 Tuboscope 公司开发出了第1代管道漏磁内检测器,聚焦于金属损失检测。1980年以来,美国西南研究院、加拿大 BJ、德国 NDT、美国 GE(PII)、德国 ROSEN 等机构相继开展了油气管道内检测技术与系列化设备研制,并成功应用于管道工程项目。2000年以来,中国科研机构在国家重点研发项目、重大科学仪器研制项目的支撑下,逐步开展了油气管道内检测技术的研究及设备的研制,设备在功能、精度等方面与国外的差距进一步缩小,已完成第1代漏磁内检测器、第2代高精度漏磁内检测器、第3代三轴高清漏磁内检测器、第4代三轴高清复合漏磁内检测器的研制^[1-10],其中第4代三轴高清复合漏磁内检测技术将腐蚀、变形、压力、速度等数据一体化采集,并在同一平台上进行分析。漏磁检测从励磁方式上可分为轴向励磁和环向励磁,轴向励磁技术对环向缺陷敏感,环向励磁对轴向缺陷敏感,中国学者历经10余年攻关,成功开发出轴向励磁、环向励磁、几何变形、惯性导航(Inertial Measurement Unit, IMU)等管道内检测技术,实现了对管体腐蚀、变形、机械损伤、路由位置的检测^[11-15]。沈阳工业大学与国家管网集团西部管道公司已联合研发出机械组合式轴向励磁+环向励磁技术,目前处于试验阶段,但在信号对齐、裂纹或环焊缝类裂纹缺陷检测方面仍存在问题^[16]。此外,超声波检测技术也是管道内检测常用方法,通过耦合剂实现传感器与管壁之间超声信号的发射和接收,检测器可在液体管道中运行,不适合在天然气管道中运行^[17-18]。磁巴克豪森噪声信号在管道应力集中处波动明显,若将磁巴克豪森技术集成到管道内检测器上,可实现长距离管道应力内检测,工程应用前景广阔^[19-20]。

目前,中国内检测技术在原理应用、精度等方面与国外仍存在一定差距,具体体现在:①中国管道内检测技术研究起步时间短,检测器重要部件、关键结构尚需加大研究力度,芯片、传感器以及高精度陀螺亟需实现自主创新;②管道内检测技术励磁方式单一,与轴向成 45° 以下的缺陷无法有效识别与检测,环向励磁技术尚处于工程试验阶段,螺旋励磁尚未开展研究工作;③与国外管道检测技术工业化差距大,国外在环向励磁、螺旋励磁、超声波裂纹检测、电磁超声检测(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT)方面基本实现常规化,中国50%以上的管道内检测市场被

ROSEN、GE(PII)等国外检测企业占据。针对中国管道环焊缝缺陷、类裂纹缺陷以及针孔小缺陷检测能力不足和识别率不高的难题,研发了新一代超高清亚毫米级管道漏磁内检测器。通过磁路仿真设计、探头开发、海量数据采集和存储,建立了基于深度学习的BP神经网络模型,提高了超高清检测技术的缺陷量化和识别能力,对推动中国管道内检测技术发展工业化意义重大^[21-22]。

1 关键技术

1.1 磁路有限元数值仿真

以管径323 mm的管道为例,分别计算壁厚为6.4 mm、8.0 mm、9.5 mm、10.3 mm、12.7 mm时管道外壁的漏磁场强度。基于磁场分析的有限元仿真方法,建立超高清管道漏磁检测系统的有限元仿真模型(图1),计算出管壁外部脱离值为2 mm时的磁场强度,为管道漏磁检测系统的开发提供参考。图1a为Maxwell磁路仿真的二维几何模型,图中不同的颜色代表不同的材料,其中铁芯为1J22合金,永磁铁采用N48钕铁

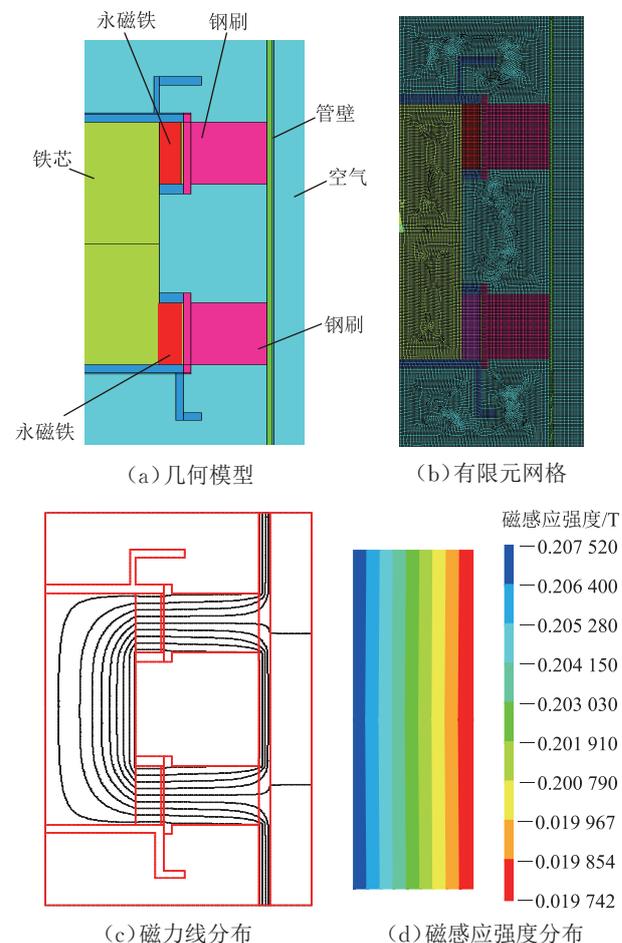


图1 超高清管道漏磁检测系统的二维磁路有限元仿真模型图

硼,钢刷为65Mn,外部包裹的为空气。图1b为有限元计算网格,由于结构的对称性,选择二维八节点轴对称单元 PLANE233,包裹空气的外表面使用了无限单元 INFIN110,共采用了39 577个单元、119 556个节点。

针对不同壁厚管体的磁化能力进行有限元仿真分析,得到了管道外表面2 mm处沿管道轴向的磁感应强度(图2)。在不考虑管道缺陷的情况下,轴对称模型的磁感应强度较小,约在 200×10^{-4} T以下。根据模拟结果得到磁感应强度 L_B 与管道壁厚 t 之间的关系式:

$$L_B = 256.93 - 4.24t - 0.69t^2 \quad (1)$$

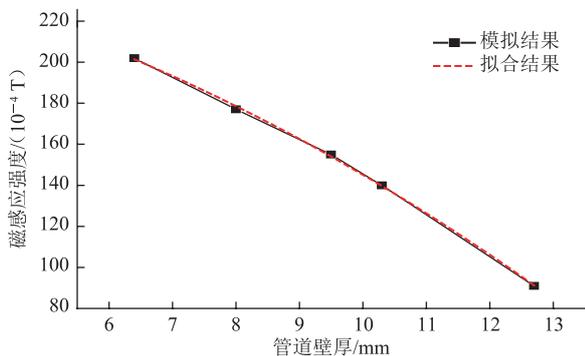


图2 管道外表面2 mm处磁感应强度与管道壁厚的关系曲线

1.2 亚毫米级间距探头的研制

成功研制出T字形亚毫米级间距霍尔探头,实现单个探头各通道间距达0.6 mm(图3)。将相邻的两个T字形探头正反交错设置,使得探头在检测器中心轴的径向上形成内外两排的排布方式,相较于现有技术的单排设计,此设计方式布置的探头个数明显增多,排布更加紧凑,相邻两个探头的间隙达到最小,有助于检测出管道内部针孔型小缺陷,大幅度提高检测精度。同时,相邻的两个探头沿检测器中心轴的径向保留一定距离,保证检测器在管道内运行时探头具有一定的活动空间,减少因管道壁的挤压对探测机构造成的损坏。探头支撑部位设置多个弹性部件,每个探测单元通过一个连接机构与检测器的中心轴连接。弹簧可提

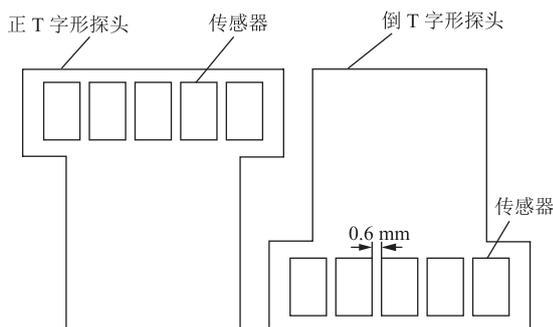


图3 正、反T字形数字霍尔探头布置示意图

供一定的缓冲力度,提高了连接机构的柔性和,使检测器过焊道时更加平稳,降低了探测机构受撞击时的力度,延长了检测器的使用寿命。

1.3 数据分析软件开发与数据集构建

1.3.1 数据采集

数据采集系统的硬件主要包含A/D采样芯片、现场可编程逻辑门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、双口RAM处理器缓存、ARM控制器、NAND Flash存储器,其特点在于方便实现对数字霍尔磁信号、里程信号、温度信号等的采集和控制。对于不同类型的检测信号,其数据采集方式不同:非磁检测信号(如压力、温度等)的数据量小,经信号调理后,直接送入ARM处理器模数转换端口进行采集;漏磁检测信号数据量大,主要由FPGA控制A/D转换芯片实现多路采集(图4)。

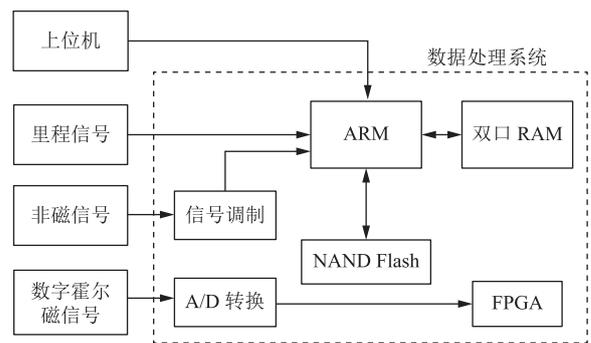


图4 超高清管道漏磁检测系统传感器数据采集系统结构示意图

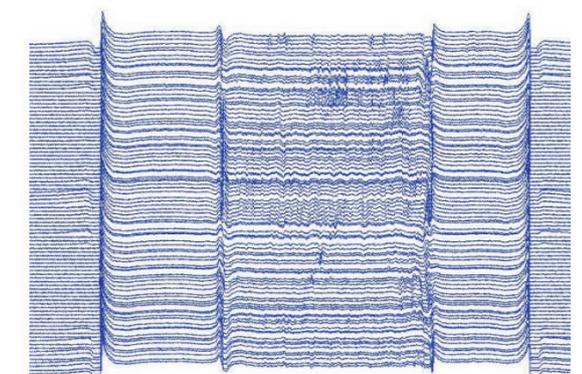
1.3.2 数据分析软件开发

对于超高清亚毫米级检测技术,海量数据的读取和分析是关键,故开发了一套数据分析软件,可实现漏磁数据、变形数据以及IMU数据的统一整合与分析。该软件以曲线、灰度、彩色等表现形式呈现出直观的管道图像;功能上可实现管道缺陷、焊缝缺陷的识别和量化,并将缺陷评为I~III级;可进行检测数据的对比分析,生成检测数据的三维地理坐标,识别和量化管道中的凹陷、椭圆化、褶皱等;对管道壁厚的变化进行识别,标记管道的三通、阀门、法兰、弯头、焊缝等特征。

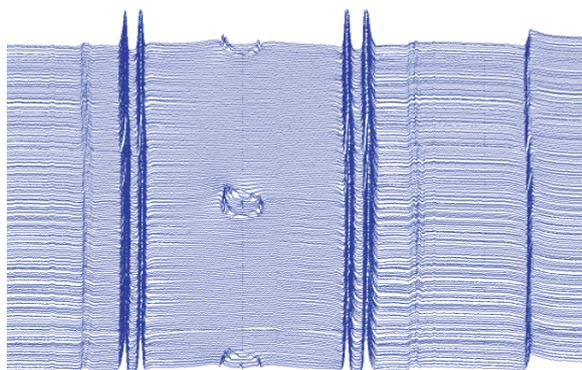
该数据分析软件基于缺陷特征参数建立统一量化基准,可自动实现缺陷长度、宽度、深度的量化;同时,具备灵活的统计、报表及输出功能,生成三维管道缺陷点分布图,辅助完成缺陷特征自动化、智能化识别;此外,还能实现缺陷等效尺寸计算和临界破坏压力值分析,实现对缺陷点安全性的评估。

1.3.3 检测数据对比

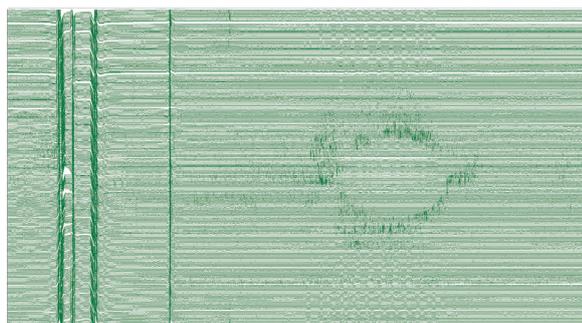
与第3代高清数据信号、第4代三轴高清数据信号相比,新一代超高清内检测数据信号在数据密集程度、缺陷像素质量等方面获得大幅提高。以口径为323 mm的管道内检测器为例,第3代内检测器采用单轴传感器,漏磁通道80个,内外部缺陷识别(Inside or Outside, IDOD)通道30个;第4代内检测器采用三轴模拟霍尔传感器,漏磁通道360个, IDOD通道30个,轴向采样间距2 mm;新一代超高清内检测器采用三轴亚毫米数字霍尔传感器,漏磁通道768个, IDOD通道768个,轴向采样间距1 mm,总通道数1 536个,数据显示的密集度大幅增加(图5)。



(a) 第3代高清内检测数据



(b) 第4代三轴高清复合检测数据



(c) 新一代超高清亚毫米级三轴一体化内检测数据

图5 3代高清内检测器漏磁检测数据对比图

1.3.4 管件高清数据库建立

为了更好地识别管道附属设施,建立了管件基础数据库,表征信号特征,实现了管件特征的自动识别与分析,提高了管件智能化识别判断的准确性(图6)。

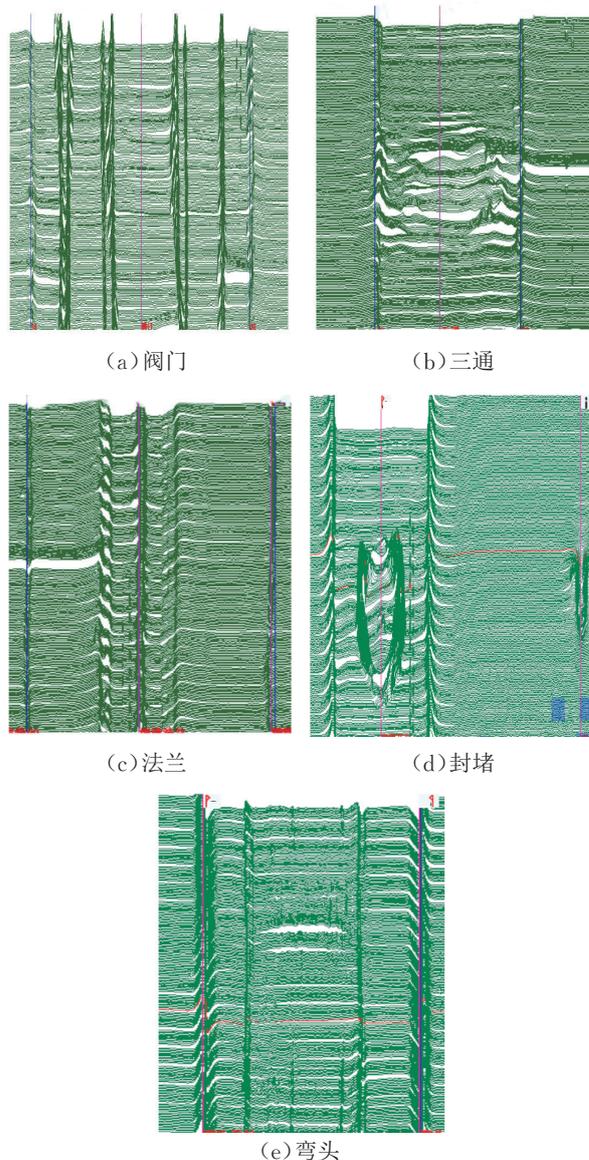


图6 超高清管道漏磁检测系统中管件及附属设施特征基本数据库图例

1.3.5 缺陷数据库建立

基于SQL Server 建立关系型数据库,定期存储海量管道内检测缺陷图像,采用B/S的架构模式,建立.NET 框架和C# 语言为开发工具的交互界面,界面通过.NET 框架实现与数据库之间的交互,数据库可设定缺陷类型选项,基于聚类算法实现显示标签特征的缺陷数据集(图7)。

1.4 缺陷智能化识别

采用BP神经网络深度学习模型对管道缺陷当量

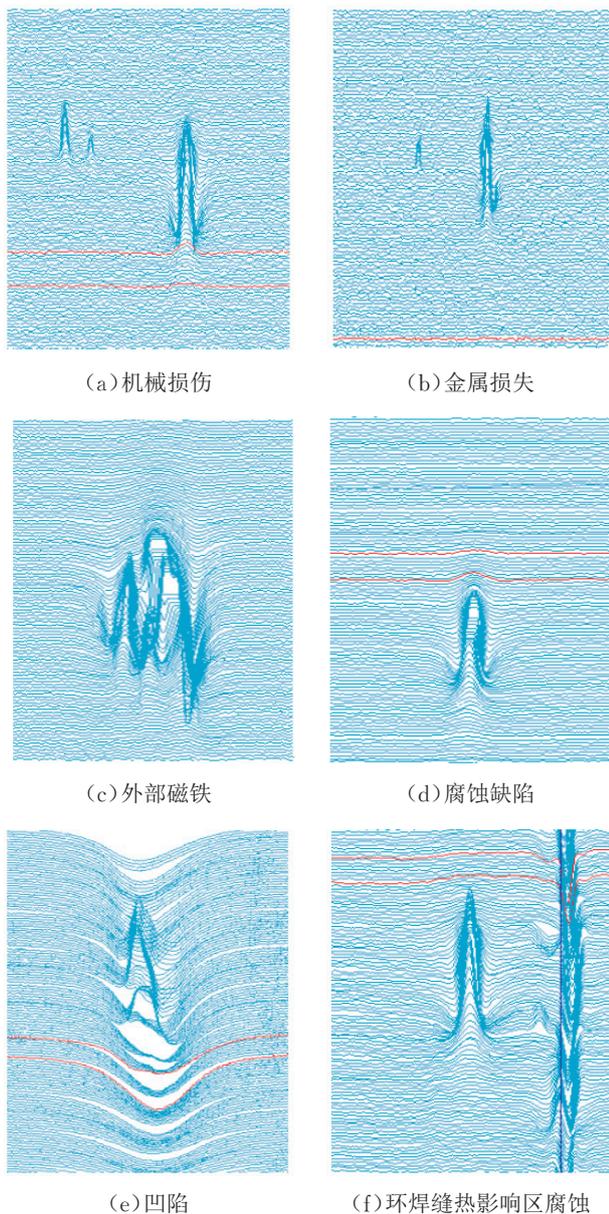


图7 超高清管道漏磁检测系统中缺陷信号数据库图例

尺寸进行量化分析,选择有效的特征量作为BP网络输入层。以缺陷深度的量化为例,其漏磁信号特征量采用轴向分量的峰面积 S_1 与峰值 P_1 、径向分量的峰面积 S_2 与峰值 P_2 共4个特征量作为BP神经网络的输入层,建立一个缺陷深度回归预测BP神经网络,其主要包括:4个输入单元的输入层、8个单元的隐含层、1个输出单元(包含缺陷深度)的输出层。其中,优化器选择Adam,网络的学习速率为0.01,损失函数L_{loss}为0.008。由损失函数(图8)可知,随着迭代次数的增加,训练集和测试集的损失函数逐渐减至期望值0.008,当损失函数小于0.008时,迭代结束,通过迭代获得最优权重参数。

对比训练集、测试集的真实值与预测值(图9)可

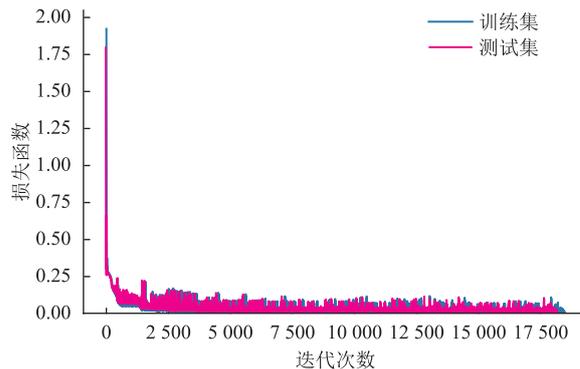
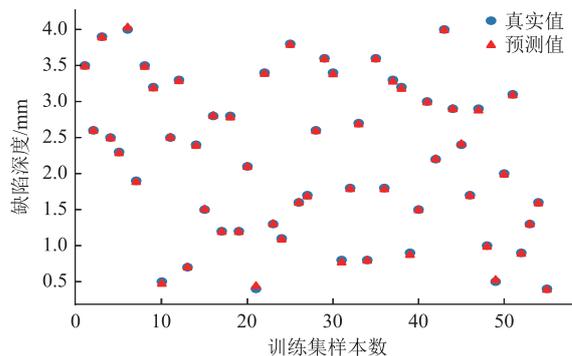
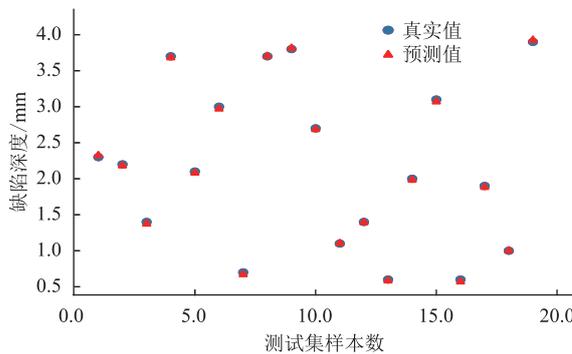


图8 超高清管道漏磁检测系统缺陷深度量化损失函数曲线



(a) 训练集真实值与预测值对比



(b) 测试集真实值与预测值对比

图9 超高清管道漏磁检测系统中缺陷深度量化训练集、测试集的真实值与预测值对比图

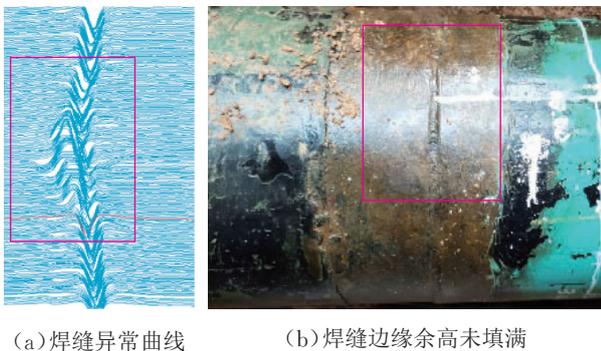
知:训练集与测试集的决定系数均为0.999,可以较好地预测缺陷深度;图中真实值和预测值大部分重合度较高,预测值与真实值十分接近,证明此预测模型具有相当高的可靠性。

2 应用案例

2020年2月,新一代超高清亚毫米级管道内检测器在中石化某输油管道进行了应用。该管道全长105.5 km,常规壁厚6.4 mm,管道直径323 mm,设计压力9.5 MPa。该检测器拥有双通道,三轴主、副探头共1 536个检测通道,探头通道数量是第4代检

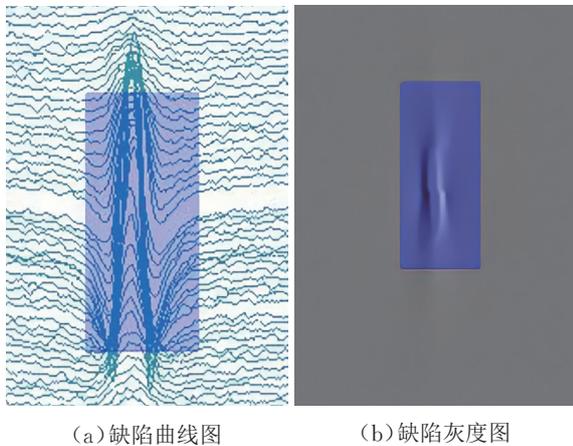
测器的5~6倍;探头间距为0.6 mm、轴向采样间距为1 mm,较一般传统检测技术的探头间距(3~6.9 mm)、轴向采样间距(2 mm)的数据总量提高近15倍,可精准描述管道焊缝缺陷,对于针眼小孔腐蚀的检测具有重要意义。

通过检测和开挖验证,可清晰地判断出环焊缝缺陷的异常等级和焊缝缺陷类别。开挖验证缺陷为焊缝边缘余高未填满(图10),同时可以检测出针孔缺陷(小于 $1t \times 1t$,如果 $t < 6$ mm,则按照6 mm计算),以及其他特征(如凹陷等),缺陷检测与识别精度大幅提高(图11、图12)。



(a) 焊缝异常曲线 (b) 焊缝边缘余高未填满

图10 超高清亚毫米级管道内检测器检测的焊缝异常信号及其实物图



(a) 缺陷曲线图 (b) 缺陷灰度图



(c) 缺陷实物图

图11 超高清亚毫米级管道内检测器检测的针孔深度腐蚀缺陷信号及其实物图

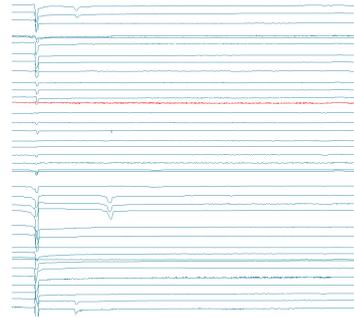


图12 超高清亚毫米级管道内检测器检测的凹陷(缺陷深度为 $5.54\%t$)信号图

GB/T 27699—2011《钢质管道内检测技术规范》中规定,金属损失的类型可以按照其长度和宽度分为均匀金属损失、坑状金属损失、针孔、环向凹沟、环向凹槽、轴向凹沟及轴向凹槽。通过开挖验证对比分析,检测器的性能指标与开挖验证检测技术指标吻合,此次检测可信度达到90%,优于80%的预定指标;可检测率达到95%以上,优于90%的预定指标;缺陷识别率达到98%以上,优于90%的检测指标(图13,不同类型的金属损失缺陷用不同颜色的边界线进行区分,其中ILI代表内检测结果,NDE代表现场无损检测结果)。

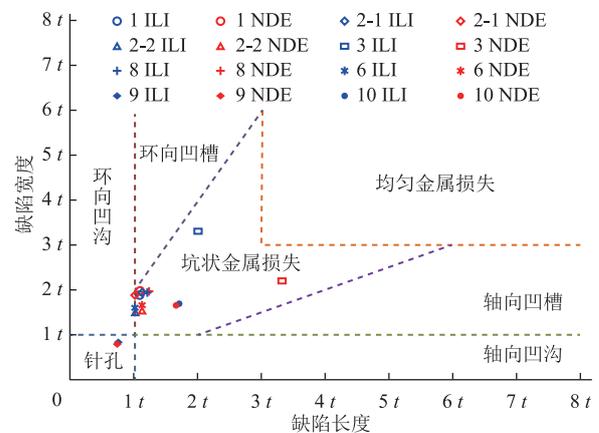


图13 超高清亚毫米级管道内检测器缺陷检测结果与开挖结果对比图

3 结论与建议

(1)新一代超高清漏磁亚毫米级管道内检测器解决了超高清漏磁亚毫米级探头间距过大的难题,将探头通道数量增加了5~6倍、采集数据量增加15倍,实现了亚毫米级通道间距的海量数据采集,基本做到缺陷的精细化描述,解决了油气管道针眼小面积深度腐蚀检测的难题。

(2)形成了管道超高清漏磁检测、变形检测、位置

检测三位一体的复合检测技术,并在同一时间轴上进行对齐和分析,定位更加准确,可以准确描述几何变形、金属损失的复合缺陷。

(3)突破了管道厚壁管磁化的检测难题,初步实现了管道小缺陷、环焊缝缺陷的精准检测;提出了基于海量数据的综合分析技术,大大增强了焊缝的可识别性;通过与开挖数据对比分析,大幅提高了焊缝未焊透、未熔合、开口裂纹等缺陷的识别精准度,基本实现了焊缝的量化评价。

(4)开发了基于深度学习的智能化内检测数据分析软件,建立了基于深度学习的BP神经网络模型,实现了缺陷一体化、智能化识别,提高了小孔腐蚀的可检测能力,可有效识别面积小于 $1t \times 1t$ 的缺陷,初步解决了当前三轴高清漏磁内检测器针对小孔腐蚀缺陷、环焊缝缺陷无法实现精确描述和量化的突出问题。

(5)在今后的研究中,应当不断丰富超高清数据库的缺陷种类,提升软件智能化分析识别能力,在环焊缝量化评价上进一步提高精度。加大管道内检测新技术的研发,针对现有漏磁场不能检测的小渗漏、小孔泄漏等问题,采用声磁融合理论进一步开展新型内检测技术的研究。

参考文献:

- [1] 李开泰,黄艾香,黄庆怀.有限元方法及其应用[M].西安:西安交通大学出版社,1992:85-106.
LI K T, HUANG A X, HUANG Q H. Finite element method and its application[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1992: 85-106.
- [2] 宋后定,陈培林.永磁材料及其应用[M].北京:机械工业出版社,1984:29-37.
SONG H D, CHEN P L. Permanent magnetic material and application[M]. Beijing: China Machine Press, 1984: 29-37.
- [3] ACHILLES D. Fourier transform in signal processing[M]. Beijing: Science Press, 1989: 102-129.
- [4] 杨理践,王玉梅,冯海英.智能化管道漏磁检测装置的研究[J].无损检测,2002,24(3):100-102.
YANG L J, WANG Y M, FENG H Y. Research on intelligent pipeline magnetic flux leakage tester[J]. Nondestructive Testing, 2002, 24(3): 100-102.
- [5] 张永江,陈崇祺,赫广令,王同德.高清晰度漏磁检测器的研制及应用[J].机电产品开发与创新,2008,21(4):84-86.
ZHANG Y J, CHEN C Q, HE G L, WANG T D. Research of high resolution pipeline inspection tools[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2008, 21(4): 84-86.
- [6] 武万辉,郭勇,王同德,杨寒.管道漏磁检测技术及应用[J].管道技术与设备,2009(2):33-34,57.
WU W H, GUO Y, WANG T D, YANG H. Magnetic flux leakage on-line inspection technique and its application to pipelines[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2009(2): 33-34, 57.
- [7] 王富祥,冯庆善,张海亮,宋汉成,陈健.基于三轴漏磁内检测技术的管道特征识别[J].无损检测,2011,33(1):79-84.
WANG F X, FENG Q S, ZHANG H L, SONG H C, CHEN J. Identification of pipeline features via tri-axial magnetic flux leakage technology for in-line inspection[J]. Nondestructive Testing, 2011, 33(1): 79-84.
- [8] 张志文,史瑞龙,吴良寅,王同德,汪华军.油气管道投产前验收检测技术现场的应用[J].机电产品开发与创新,2017,30(1):75-77.
ZHANG Z W, SHI R L, WU L Y, WANG T D, WANG H J. The field application of acceptance detection technology to oil and gas pipelines before operating[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2017, 30(1): 75-77.
- [9] 赵云利,折明,强毅.饱和磁化后管壁缺陷处管材磁导率的有限元模拟[J].油气储运,2021,40(5):539-544.
ZHAO Y L, SHE M, QIANG Y. Finite element simulation of pipe permeability at the wall defect after saturation magnetization[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(5): 539-544.
- [10] 胡家铨,焦晓亮,郑莉,刚蓓,刘思娇.一种改进的支持向量回归三轴管道漏磁缺陷量化方法[J].无损检测,2021,43(3):62-68.
HU J C, JIAO X L, ZHENG L, GANG B, LIU S J. An improved support vector regression method for quantifying magnetic leakage defects in three-axis pipeline[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(3): 62-68.
- [11] 李春雨,马义来,张莉莉,何仁洋.基于脉冲涡流的管道内检测系统设计[J].无损检测,2018,40(7):65-68.
LI C Y, MA Y L, ZHANG L L, HE R Y. Design of pipeline internal inspection system based on pulse eddy current[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(7): 65-68.
- [12] 于超,张永江,李彦春,臧延旭,王金星,林传波,等.管道横向励磁漏磁内检测器研制[J].油气储运,2020,39(9):1037-1041.

- YU C, ZHANG Y J, LI Y C, ZANG Y X, WANG J X, LIN C B, et al. Development of transverse excitation MFL inline detector[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(9): 1037-1041.
- [13] 杨辉,王富祥,玄文博,雷铮强,考青鹏. 油气管道周向励磁漏磁检测技术优势与发展前景[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(3): 1-4.
- YANG H, WANG F X, XUAN W B, LEI Z Q, KAO Q P. Advantages and development prospects of circumferential excitation flux leakage detection technology for oil and gas pipelines[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2020, 39(3): 1-4.
- [14] 冯搏,伍剑波,邱公喆,康宜华. 高速漏磁检测方法的发展[J]. 无损检测, 2021, 43(2): 57-63.
- FENG B, WU J B, QIU G Z, KANG Y H. Development of high-speed magnetic flux leakage testing method[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(2): 57-63.
- [15] 贾海东,冯健. 油气管道周向励磁检测技术的研究[J]. 无损探伤, 2017, 41(4): 14-16, 19.
- JIA H D, FENG J. Research on circumferential excitation detection technology of oil and gas pipeline[J]. Nondestructive Inspection, 2017, 41(4): 14-16, 19.
- [16] 杨理践,梁成壮,高松巍,刘斌. 管道漏磁内检测裂纹缺陷仿真与实验研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(6): 59-63.
- YANG L J, LIANG C Z, GAO S W, LIU B. Simulation and experimental research on the crack defect of pipeline magnetic flux leakage inspection[J]. Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology, 2020, 40(6): 59-63.
- [17] 臧延旭,金莹,陈崇祺,邸强华,赵宣. 基于磁致伸缩效应的管道裂纹检测器机械结构的设计[J]. 油气储运, 2015, 34(7): 775-778.
- ZANG Y X, JIN Y, CHEN C Q, DI Q H, ZHAO X. Design of mechanical structure of crack detector for pipeline based on the magnetostrictive effect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(7): 775-778.
- [18] 黄松岭,叶朝峰,王珅,赵伟,董甲瑞. 天然气管道裂纹电磁超声检测器研制[J]. 无损检测, 2009, 31(10): 827-829.
- HUANG S L, YE C F, WANG S, ZHAO W, DONG J R. Development of oil and gas pipeline crack detector based on EMAT[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(10): 827-829.
- [19] 陈金忠,段礼祥,马义来,何仁洋,靳阳,王俊杰. 基于巴克豪森效应的管道应力内检测数值计算[J]. 石油机械, 2018, 46(8): 113-117.
- CHEN J Z, DUAN L X, MA Y L, HE R Y, JIN Y, WANG J J. Numerical calculation of in-line stress measurement of pipeline based on Barkhausen effect[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(8): 113-117.
- [20] 陈金忠,马义来,靳阳. 基于巴克豪森效应的管道应力内检测辅助装置[J]. 油气储运, 2020, 39(10): 1192-1196.
- CHEN J Z, MA Y L, JIN Y. An auxiliary device for internal pipeline stress detection based on Barkhausen effect[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(10): 1192-1196.
- [21] 赵海旭,樊建春. 皮碗式海洋管道内检测器通过性分析[J]. 石油机械, 2021, 49(3): 78-83.
- ZHAO H X, FAN J C. Analysis on the passage capacity of cup type marine pipeline internal detector[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(3): 78-83.
- [22] 吴志平,玄文博,戴联双,李妍,常景龙,王富祥. 管道内检测技术与管理的发展现状及提升策略[J]. 油气储运, 2020, 39(11): 1219-1227.
- WU Z P, XUAN W B, DAI L S, LI Y, CHANG J L, WANG F X. Development status and improvement strategy of in-line inspection technology and management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(11): 1219-1227.
- (收稿日期:2021-04-07; 修回日期:2021-10-26; 编辑:王雪莉)
-
- 基金项目:** 中国石油天然气集团有限公司-中国石油大学(北京)战略合作科技专项“‘一带一路’海外长输管道完整性关键技术研究与应用”, ZLZX2020-05; 中国工程院重大咨询项目“油气长输管道国家治理体系战略问题研究”课题3“油气长输管道安全与应急科技支撑体系研究”, 2019-ZD-37; 油气资源与探测国家重点实验室自由探索课题“基于巴克豪森效应的管道应力检测技术研究”, PRP/indep-3-1812。
- 作者简介:** 董绍华,男,1972年生,教授,博士生导师,2001年毕业于中国石油大学(北京)油气储运工程专业,现主要从事管道完整性管理、管道信息化及大数据决策分析等领域的研究工作。地址:北京市昌平区府学路18号,102249。电话:010-89733657。Email: shdong@cup.edu.cn