

附件 1

基于声磁融合的的油气管道智能 内检测机器人

董绍华^{1,2,3} 徐鲁帅^{1,2} 李凤^{2,3} 马云栋^{2,3} 魏昊天^{2,3} 王路明^{2,3} 刘冠一^{2,3}

(1. 中国石油大学(北京)人工智能学院, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京)管道技术与安全研究中心, 北京 102249

3. 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京, 102249)

摘 要: 管道复杂缺陷检测精确度低, 管道焊缝缺陷检测量化弱, 管道小泄漏和渗漏检测识别率差等问题, 目前常规单一轴向励磁原理开发的漏磁内检测器, 不能满足空间任意场、任意方位的复杂缺陷及小泄漏、渗漏缺陷同时检测, 以及对更高检测精确度和准确率的检测需求。本项目提出了声磁融合的开发原理、可变向励磁结构配置、海量数据采集与处理、人工智能数据融合与缺陷识别分析、样机制造与可靠性测试五大内容, 研发出一套基于声磁融合的可变励磁管道内检测器, 在仪器的研制理论方面, 提出光纤磁致伸缩、次声传感与漏磁场等多物理场融合理论, 建立声磁融合的多参数融合算法模型, 形成复杂缺陷信号人工智能识别深度学习方法; 在仪器的研制结构方面, 采取可变向励磁结构配置, 实现磁场内检励磁方向任意转换, 组合布置光纤磁致伸缩、次声传感器, 实现内检测过程中泄漏、渗漏信号的同时提取, 解决管道复杂焊缝缺陷和管道小泄漏或渗漏一次性检测难度大、漏检率高的技术难题。

关键词: 声磁融合理论; 可变向励磁; 磁致伸缩; 深度学习

中图分类号: TP2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

油气输送管道是国家能源输送的“命脉”, 油气管道具有易燃易爆的特点, 油品泄漏对环境、水体等造成污染, 一旦发生事故给国家财产、人民生命带来了巨大威胁。据统计, 我国长输油气管道总里程达13.6万公里, 其中, 原油管道总里程超过2.8万公里; 成品油管道、天然气管道总长分别超过2.2万公里、8.6万公里; 集输管道约30万公里以上, 公用管道约25万公里, 老旧管道占比达到40%以上, 主要分布在西南油气田、东北管网以及东部原油管网。

管道输送的安全已成为社会公共安全问题, 国内油气管网近10年共发生泄漏事故370余起, 其中重特大事故4起, 共造成75人死亡, 直接经济损失超过100亿, 重大环境污染10次, 对生命财产、生态环境和能源供给造成重大危害。2013年11月22日发生了青岛输油管道泄漏爆炸事故, 如图1所示, 由于长期缺乏有效的管道完整性保障措施和方法, 多个因素交织到一起, 未发现管道薄弱环节, 最终造成62人死亡, 伤136人; 2014年8月发生在台湾高雄的气爆事故, 同样也是由于对管道风险认识不足, 泄漏穿孔导致丙烯气体体积聚, 在密闭空间发生爆炸, 引起32人死亡, 事故教训深刻, 后果极为惨痛; 除此之外, 发生了2017年7月2日和2018年6月10日, 在中缅管道贵州段直径1016mm, X80管线钢爆炸起火, 连续2次在相距500米位置, 管道环焊缝开裂爆炸起火, 致8人死亡, 数十人受伤, 如图2所示。我国杭州湾海底原油管道由于海浪冲击、悬跨热屈曲、大型船只抛锚等操作引起管道屈曲或损伤, 一旦发生泄漏则污染海域, 如图3所示。我国重要生命线工程-西气东输二线西段在乌鲁木齐

-连木沁段在生产过程中出现了多处失效损伤，2015年7月发现西二线876km+277.8m处螺旋焊缝类裂纹缺陷，类裂纹深度达到14mm，张开宽度达到0.5mm，如图4所示，情况极为复杂，一旦爆炸起火，将造成巨大的经济损失和社会影响。



图1 青岛11.22 管道特大事故



图2 中缅管道贵州段X80管道失效断裂



图3 海底管道屈曲变形

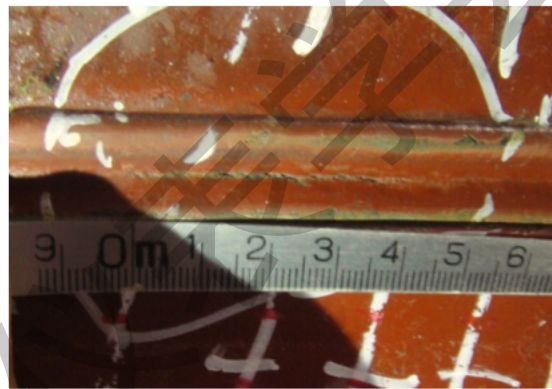


图 4 X80管道沿着螺旋焊缝内部裂纹

我国油气管道实施强制性检验，主要应用管道漏磁内检测技术，管道漏磁内检测技术一直被工业界视为缺陷检测和量化的重要工具，通过对检测数据进行深度量化分析和安全性评估，可给出管道剩余强度和剩余寿命，为制定维修方案提供必要依据，也为下一次检测分析数据的对比积累基础数据，使管道的盲目被动维修转化为预知性主动维修，对风险大的缺陷及时进行修复，进一步实现管道本质安全。管道漏磁检测技术具有高灵敏度、高可靠性、操作简便、不污染环境以及可对缺陷量化等优点。我国中石油、中石化、中海油以及中国石油大学等管道研究院所，在国家科技支撑项目、重大科学仪器研制项目的支撑下，开展了油气管道内检测技术研究及设备研制，设备的精度、功能等方面与国外的差距进一步缩小，图5为中国石油大学（北京）自主研发的G5超高清管道漏磁内检测器。

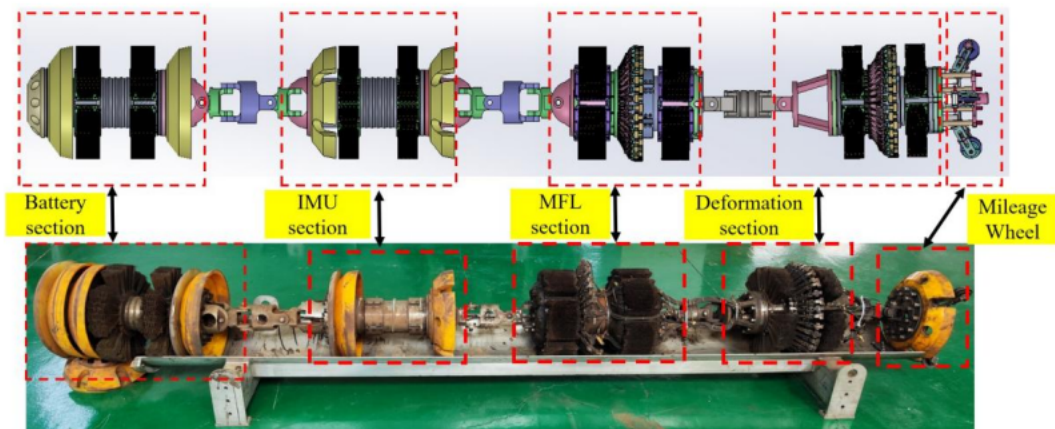


图 5 中国石油大学（北京）研发的超高清管道漏磁内检测器

国内外漏磁检测器主要针对金属损失缺陷的检测，但由于我国老旧管道大量存在、螺旋焊缝问题风险大，新建管道环焊缝问题比较突出，检测技术已不能适应发展的需求，目前的国内外漏磁检测技术存在如下问题：

- 1) 老旧复杂螺旋焊缝存在的缺陷检测精度不高。
- 2) 检测器探头处于不均匀的环向磁场内，其缺陷量化模型难以建立，量化不准。
- 3) 管道小泄漏或渗漏检测，当前漏磁检测、超声检测不能有效检测，针眼型、裂纹型的渗漏或泄漏很难检测和量化，需要采用非磁传感技术。

1.2 应用价值

该项目的科学问题属于“需求牵引、突破瓶颈”问题。随着我国油气资源大规模开发，油气管网已成为我国能源输送的“生命线”，已发生多起重特大事故，对人民生命财产、生态环境造成重大危害。究其原因，主要是由于管体复杂缺陷检测精确度低，焊缝缺陷检测定量化弱，小泄漏和渗漏检测识别率差等引起，漏检率较高。近年来，管道内检测技术一直被美国GE(PII)，德国ROSEN等世界知名内检测企业所掌控，我国针对高精度、复杂缺陷的管道内检测技术开展研究较少，核心技术仍未掌握，与国外差距较大。

检测器的科学原理、励磁结构是制约我国内检测技术发展的重要瓶颈问题，一是目前常规单一轴向励磁原理开发的漏磁内检测技术，不能满足空间任意场、任意方位的复杂缺陷及小泄漏、渗漏缺陷检测需求；二是励磁结构上制约，单一的轴向励磁或环向励磁结构不能解决管道环焊缝、螺旋焊缝复杂缺陷问题。基于此，构建声场和漏磁场原理方法的交互融合，轴向和螺旋励磁的可变向配置，声磁信号分析处理方法的特征重构，进一步提高复杂缺陷的检出率和小泄漏或渗漏的准确率。

本项目属首次开发基于声场和漏磁场融合的内检测器，一是从科学原理上，创新提出光纤磁致伸缩、次声特性与漏磁等多物理场融合理论，获得声磁场融合规律、拓扑特征、参数关联性，建立任意空间的磁耦极子模型，声场扩散模型，以及声磁场人工智能融合处理算法模型，构建人工智能神经网络深度学习网络，训练内检测图像数据集，对漏磁信号和光纤信号组合判断泄漏点；二是从仪器结构设计上，创新提出有限空间实现励磁结构方向的自动变换，解决漏磁场可变向难题；光纤磁致伸缩、次声传感器组合配置，解决声磁信号一次性检测难题；声磁信号多通道优化布局、电子包存储架构多目标逻辑构建，解决声磁多通道数据一体化采集难题。最终开发出适用于管道螺旋焊缝、环焊缝、轴向沟槽等缺陷，以及小泄漏和渗漏一体化检测仪器，提高复杂缺陷检测的精准度，具备可变向励磁、人工智能的缺陷量化与识别特征。

2 创新点与优势

一、突破了超高清漏磁亚毫米级探头间距难题，将探头通道数量增加了近5-6倍，采集数据量增加15倍，实现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，解决了油品管道针眼小面积深度腐蚀的难题。

二、形成了管道泄漏声场、超高清漏磁、变形检测、位置检测的复合检测技术，并在同一时间轴上进行对齐和分析，定位更加准确，可以准确定位检测几何变形、金属损失的复合缺陷及针孔级缺陷。

三、开发了海量数据处理与存储平台，通过大数据融合技术对数据中的结构化数据、非结构数据等进行清洗、相关、降维和组合，实现多来源数据条件下的协同分析和快速更新，采用多层神经网络或深度学习习的智能化方法，实现了缺陷的一体化智能化识别。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

3.1.1 声磁融合的管道内检测器结构

声磁融合的管道检测器系统（图6）包括检测器机械载体和电气系统部分，机械载体由整体框架和密封舱组成，支撑系统将保证检测器载体在管道中运行时的对中与稳定性，同时支撑系统还保证检测器的动态性能。探头机构支撑系统保证传感器在管道中运行时能够紧密贴合管壁，同时保证传感器阵列位于管道的一个横截面上。密封驱动装置通过输气管道的压差为检测器在管道内的运行提供动力。安装在机械载体上的磁路装置磁化被检测管壁。密封舱内搭载电子数据采集与记录系统，安装在检测器上的里程计为检测器运行提供精确的里程信息。

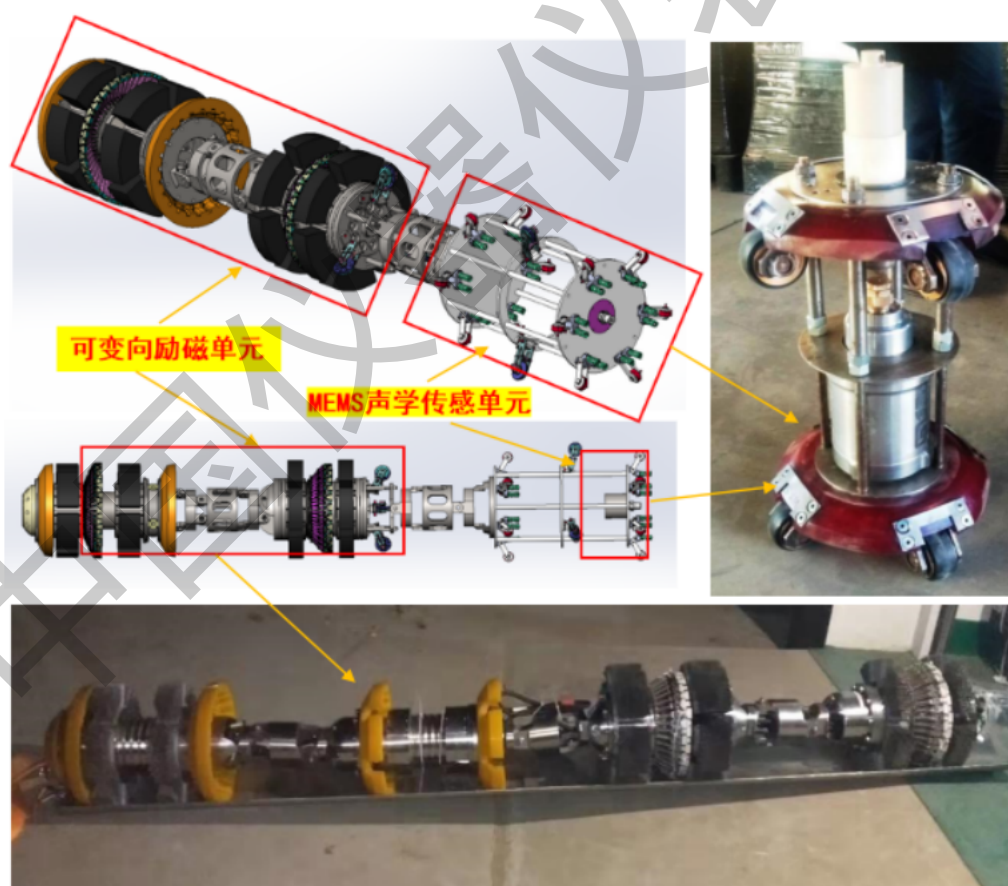


图6 声磁融合的的油气管道智能内检测机器人

电气系统包括超高清三轴数字霍尔传感器、光纤磁致伸缩、声波传感器、信号管理单元、电源管理系统、辅助传感器系统、管道走向测绘单元和数据采集存储系统。在里程信号的触发下，安装在探头环上的传感器拾取管壁缺陷的漏磁信号，并将信号传输给信号调理与管理单元，经处理后传送给数据采集存储单元。同时信号采集存储单元采集辅助传感器系统的数

据后，与传感器数据整合打包进行存储。管道走向测绘单元具有独立的数据采集与存储结构，完成检测后数据通过记录的标记与漏磁传感器数据对齐。通过检测器运行过程中数据存储、运行结束后本地存储以及云平台数据自动上传存储的海量数据信号存储与云平台，实现G级流量存储。

3.1.2 海量数据采集与存储云平台方案

海量数据采集与存储云平台建设方案主要包括四个部分：数据格式与需求、多维数据的采集、数据转换与存储、数据处理与分析四大块，技术路线如图7所示。

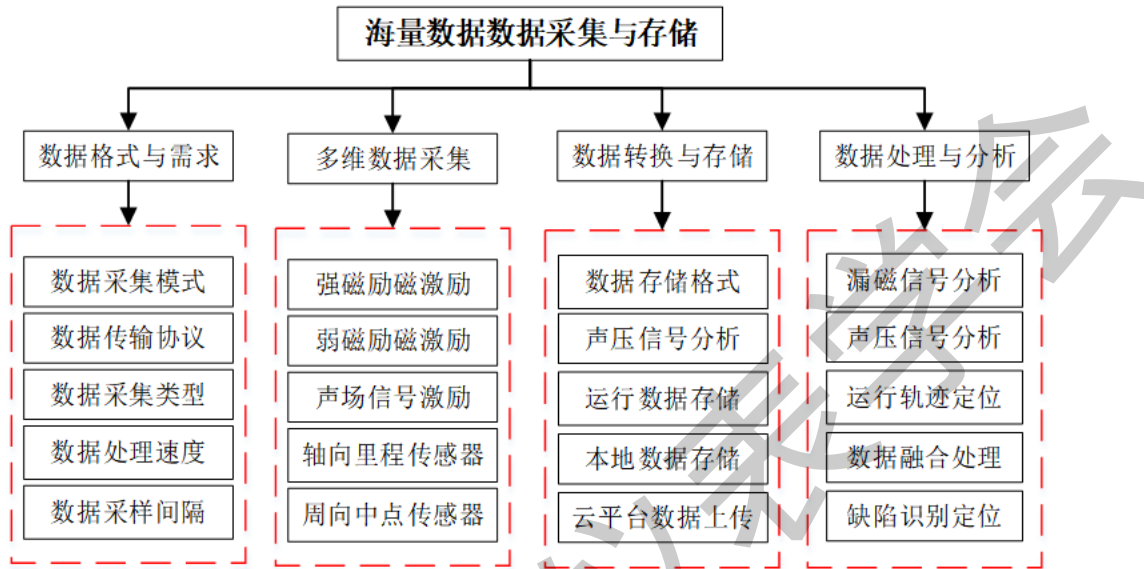


图7 海量数据采集与存储云平台方案技术路线图

海量数据采集与存储云平台的基础条件是**确定采集存储格式和需求**，根据管道的结构特点进行数据采集系统设计，考虑超高清晰度检测需求，以及光纤磁致伸缩、次声传感器信号采集、传输等，建立以特征对齐、时间对齐的采集模式，解决数据存储约束和采集信息系统的处理速度限制等问题，确定采集数据的类型和各类型数据的采样间隔，原始数据存储格式，以及原始数据预处理方法等。

海量数据采集与存储云平台的核心部分是解决**声磁信号的融合统一与声磁信号融合处理与采集**。声磁两类信号采集模式的融合统一，以及光纤磁致伸缩、次声传感器用于管道内检测小泄漏或渗漏检测的可靠性和精度，然后考虑可变向励磁在检测装置中的结构设计，即磁铁节和探头可按照轴向漏磁励磁布置，也可按照螺旋激励方式布置，关注是否存在干涉和噪声干扰影响。

声磁信号融合处理与采集，光纤磁致伸缩、次声传感器的传感原理、结构尺寸、应用环境等影响管道泄漏检测、渗漏检测的精度，需要改进光纤磁致伸缩、次声传感器探头膜片结构设计、适应油气介质压力高的问题，另外可变向励磁结构，在磁铁节局限性的空间中布设，机械结构和励磁磁场强度、螺旋励磁所具备的磁化场应具有较强的磁感应强度，由于存在分量比原有轴向励磁场设计强度要高。螺旋焊缝声场与磁场融合处理示意图如图8所示。

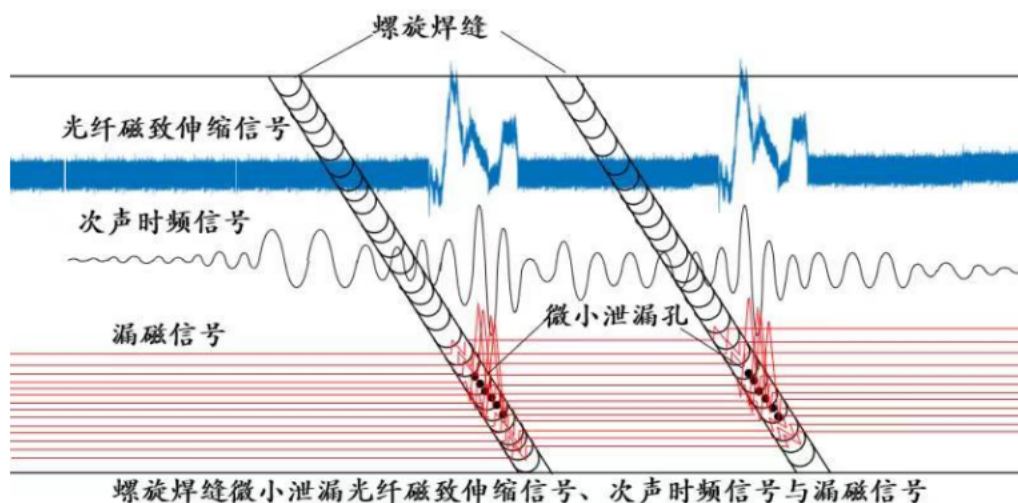


图8 螺旋焊缝声场与磁场融合处理示意图

海量数据采集与存储云平台的关键技术是构建海量数据信号存储与云平台，本项目将构建三重存储模式，一是检测器运行过程中数据存储，二是运行结束后本地存储，三是云平台数据自动上传存储，建立多目标存储的逻辑架构关系，搭建一套基于云模式的多源数据自适应反馈数据存储系统，实现G级流量存储，云平台与本地存储改变原来下载存储时间长、效率低（100km数据大约需要30个小时）的方式，通过使用5G+MEC技术，检测器内置 5G 通信模块，提高检测仪器与地面基站的通信速率，实现异地多台仪器数据的海量传输，构建检测数据的云平台。

3.1.3 人工智能数据融合与缺陷识别分析

上节提出海量数据采集与存储云平台可得到多维声磁缺陷数据库，通过大数据融合技术，如聚类K-means分析、支持向量机和主成分分析，对数据中的结构化数据、非结构数据等进行清洗、相关、降维和组合，实现多来源数据条件下的协同分析和快速更新。在此基础上，采用多层神经网络或深度学习方法，通过训练和校准，开展基于人工智能数据融合与缺陷识别分析，建立管道系统缺陷特征因素与这些管道数据之间的内在逻辑关系，进而确定管道系统的具体的病害位置和病害程度。技术原理图如图9所示。

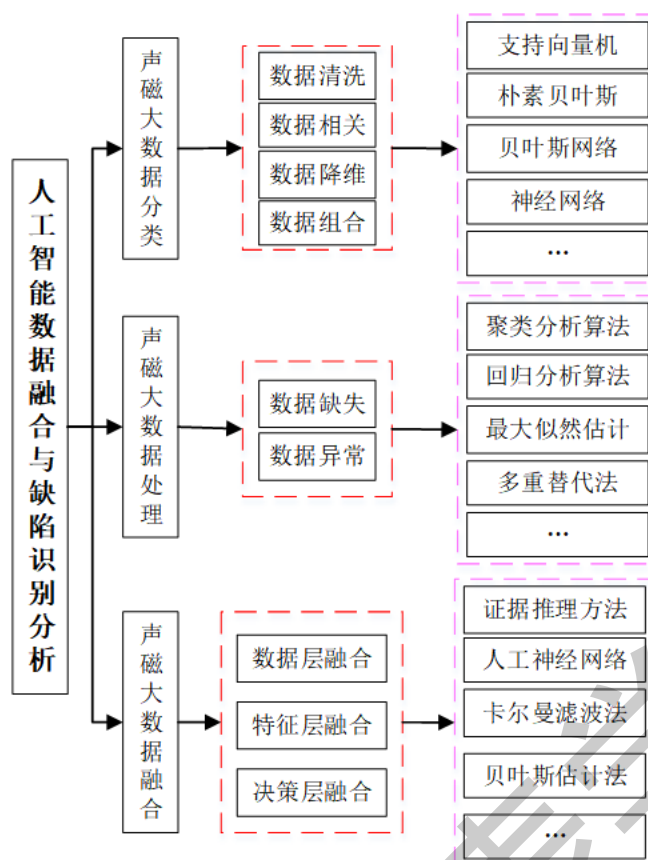


图9 人工智能数据融合与缺陷识别分析技术路线图

在实现多源异构大数据融合处理过程中，对数据的分类是非常重要的，分类方法选择是一项重要的研究任务。所谓分类，是一种有监督学习方法，以待分析的目标问题为背景，采用样本数据建立一个关于类别属性划分的分类方法，利用该模型对同类问题汇总类别，标记未知的样本进行学习和判断的过程。分类需要两个过程：第一步，根据训练数据，建立分类函数或分类器。这是训练阶段，也叫学习阶段，是通过对数据分类或者从样本训练集中“学习”完成。训练集是由数据库元组以及相关关联的类标号共同构成。第二步，使用分类方法对数据进行分类。在使用分类方法之前，需要评估该分类器的预测准确率，在测试集上完成。该测试集是由检验元组和相关关联的类标号组成。目前，经典的分类方法主要有支持向量机分类、神经网络分类、朴素贝叶斯分类、贝叶斯网络分类、决策树分类、多层感知器神经网络分类等。管道异常工况识别采用的智能算法主要包括支持向量机和神经网络两种人工智能算法。在实际管道运行工况中，管道的正常样本较多，泄漏样本较少，而支持向量机(Support vector machine, SVM)算法具有小样本的学习优势，具有较好的泛化能力，许多学者利用SVM进行管道泄漏工况识别和泄漏点定位。支持向量机数据融合模型如图10所示。

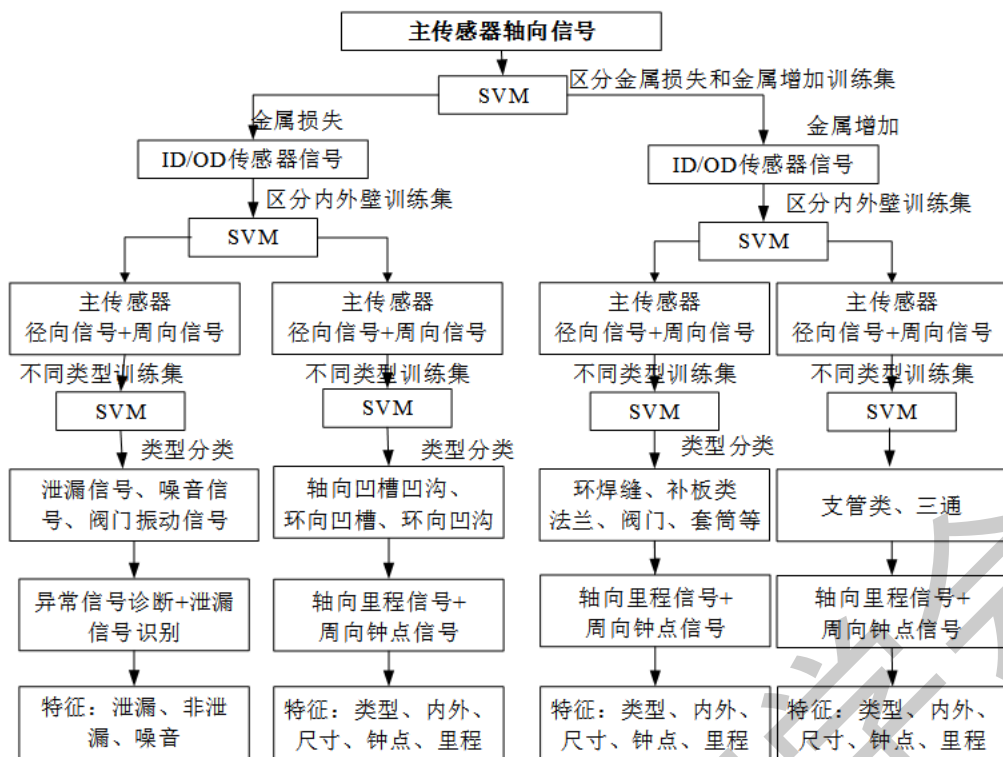


图10 支持向量机数据融合模型

数据融合又称作信息融合或多传感器数据融合，其定义可概括为：充分利用不同时间与空间的多传感器数据资源，采用计算机技术对按时间序列获得的多传感器观测数据，在一定准则下进行分析、综合、支配和使用，获得对被测对象的一致性解释与描述，进而实现相应的决策和估计，使系统获得比它的各组成部分更充分的信息。多传感器数据融合技术的基本原理就像人脑综合处理信息一样，充分利用多个传感器资源，通过对多传感器及其观测信息的合理支配和使用，把多传感器在空间或时间上冗余或互补信息依据某种准则来进行组合，以获得被测对象的一致性解释或描述。利用多个传感器所获取的关于对象和环境全面、完整的信息，主要体现在融合算法上。多传感器数据融合的常用方法基本上可概括为随机和人工智能两大类，随机类方法有加权平均法、卡尔曼滤波法、多贝叶斯估计法、Dempster-Shafer (D-S) 证据推理、产生式规则等；而人工智能类则有模糊逻辑理论、神经网络、粗集理论、专家系统等。可以预见，神经网络和人工智能等新概念、新技术在多传感器数据融合中将起到越来越重要的作用。基于声磁多传感器融合技术原理如图11所示。

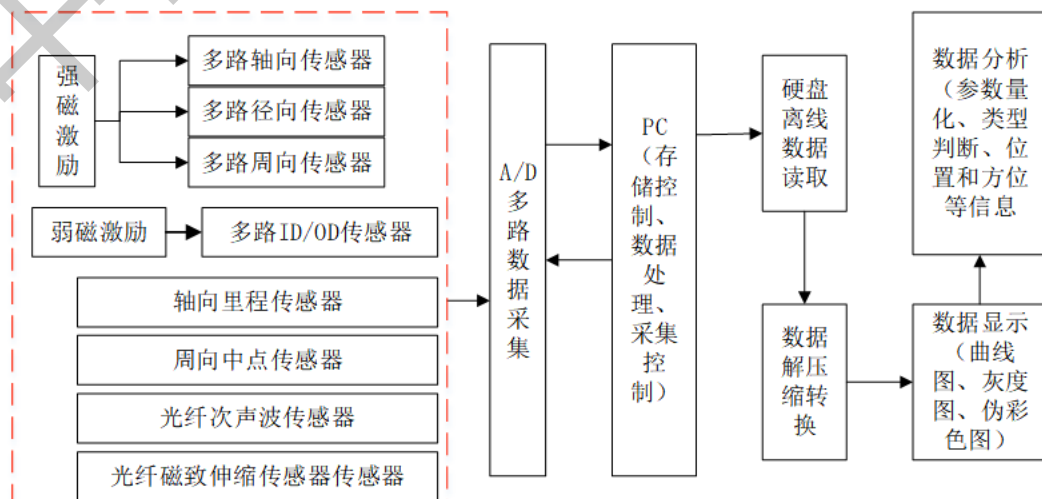


图11 多传感器数据融合技术

基于人工神经网络(Artificial neural network, ANN)的管道缺陷识别与定位方法是根据采集管道的正常工况信号与管道泄漏工况信号的关系建立映射,以不同工况下信号的特征作为神经网络模型的输入,通过神经网络模型的输出来判断管道运行的状态。将神经网络、自适应系统模拟和辨识应用到管道检测系统中,将进一步提高检测准确度;采用融合传感器定位的分层模糊控制方法,解决滑动驾驶问题,避免多变量模糊控制系统的“维数灾”问题。本项目通过建立人工智能神经网络深度学习网络,以及管道内检测缺陷数据集,开展管道漏磁内检测图像数据集的训练识别,采取漏磁场与声场融合的人工智能深度学习方法,对漏磁信号和光纤信号组合判断泄漏点;需要建立任意方位管道复杂缺陷的磁偶极子模型,建立螺旋励磁信号缺陷识别与分析模型、建立光纤磁致伸缩、次声传感器声音信号分析模型,建立泄漏量、泄漏大小以及泄漏声场扩散、噪声滤波之间关联性。主要包括:

1) **超高清亚毫米级检测数据集的构建**,主要风险在于将传统传感器探头间距3.0mm-6.9mm、轴向采样间距2mm,升级为传感器探头通道间距 $\leq 1\text{mm}$ 、轴向采样间距1mm,数据采样速度4.5GB/min,数据量存储增加15倍,并考虑次声信号的存储、模式识别与滤波、噪声干扰降噪等多种模型的构建,人工智能深度神经网络的构建过程中,典型缺陷的样本集的数量是关键点。

2) **缺陷量化智能识别模型建立**,开发管道各类缺陷的智能识别量化模型,基于多传感器数据融合的采集系统,依靠传感器获取各种信息,每一个传感器构成一个信息源,而每一种传感器都有其各自的功能、使用范围和精确度,再者单一类别的传感器受结构、时间、空间和精度的限制,故检测信息存在局限性,不能全方位获得检测信息。具体采用深度卷积神经网络、基于统计方法或神经网络法的模式匹配算法、或者基于支持向量机或神经网络法的模式分类法,建立管道任意方位励磁互感应抗扰性缺陷量化识别模式建立与方法。

3) **管道智能识别内检测数据分析系统**,基于上述模型和算法,开发管道智能识别量化数据分析系统,要求具备漏磁信号分析、检测数据融合、缺陷判别、缺陷及运行轨迹精确定位、缺陷自动识别、管道完整性评估报告自动输出等功能,软件系统的功能行测试。

3.2 设计方法

基于声磁融合的的油气管道智能内检测机器人结构设计,包括内检测器结构可靠性设计,可变向励磁结构设计,超高清亚毫米级数字霍尔探头设计、变形检测系统设计、IMU系统设计,基于磁路结构仿真配置永磁体、传感器的范围,周向、螺旋间距等。

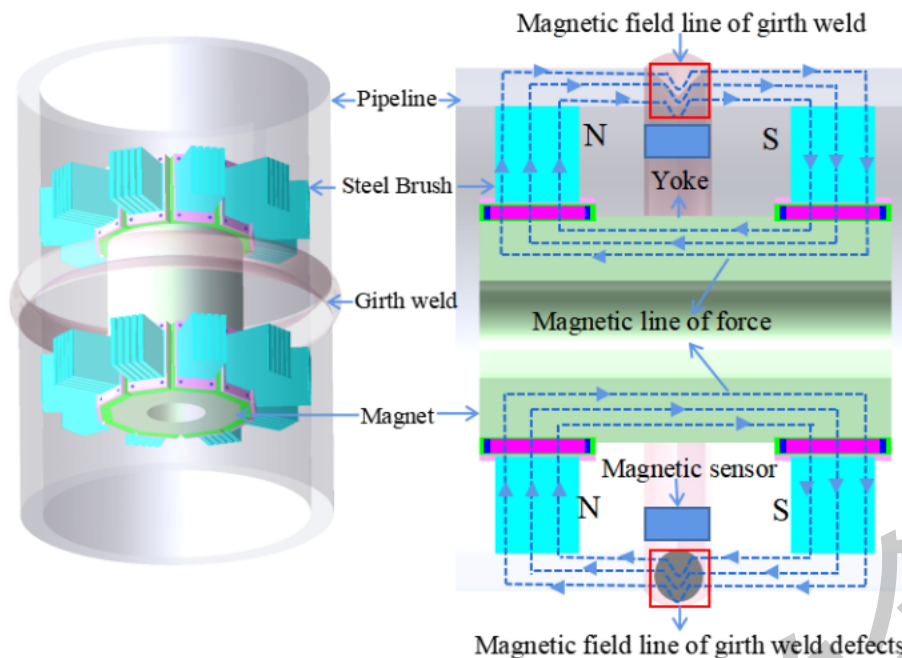


图12 内检测机器人原理图

数据采集系统采用24位A/D芯片，将传感器输出的霍尔数字信号，通过SPI通信方式发送给FPGA，FPGA具有丰富的I/O接口，可与多路A/D芯片相连，实现对多路数字信号的并行接收，主控ARM和FPGA以双口RAM作为缓冲，完成数字信号即数据的交换，两者可同时对RAM存储单元空间进行读写操作。

从多传感器漏磁内检测器系统构成引出多传感器构成，采取分布式的多传感器数据融合分析技术和大数据融合技术，对多维数据中的结构化数据、非结构数据等进行清洗、相关、降维和组合，实现多来源数据条件下的协同分析和快速更新，并开展基于人工智能数据融合与缺陷识别分析，建立管道系统缺陷特征因素与这些管道数据之间的内在逻辑关系，实现管道缺陷的智能识别。

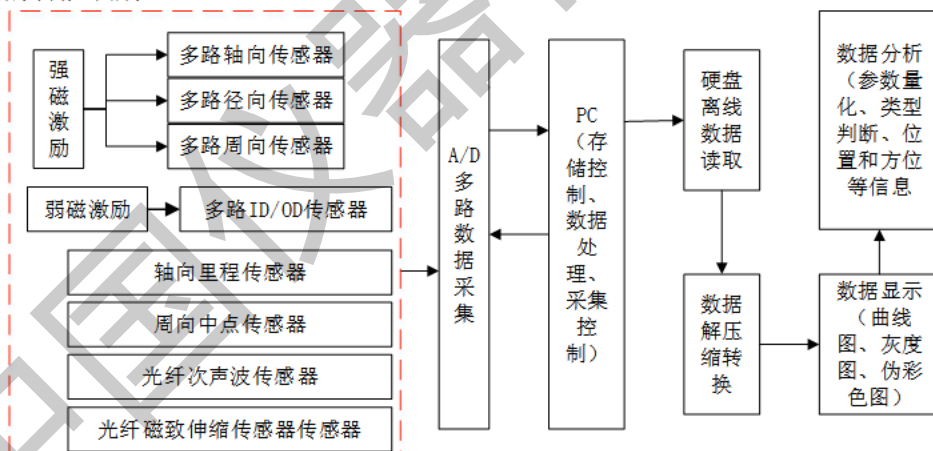


图13多传感器数据融合技术

3.4 实验验证过程



图14 探头制作



图15 探头制作



图16 传感器系统集成联调

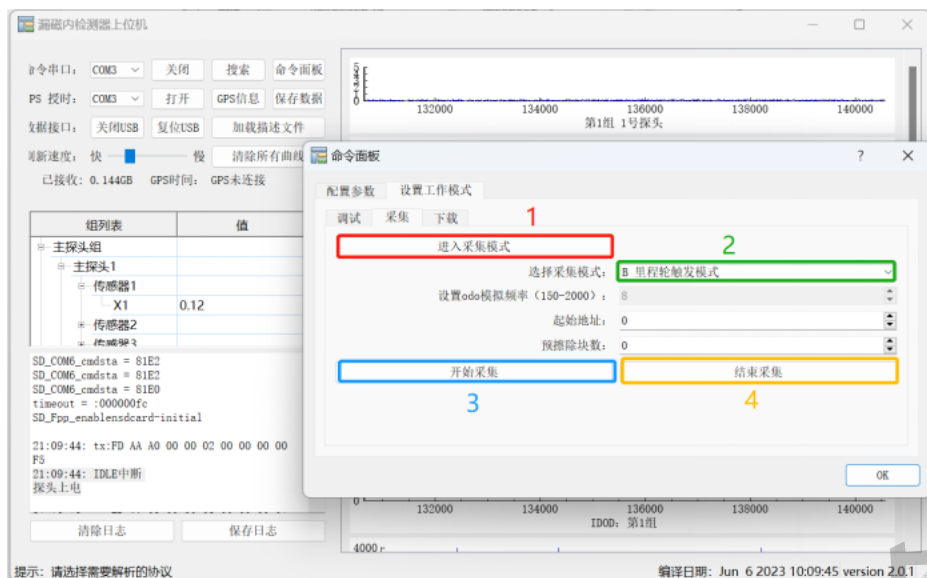


图17 内检测机器人上位机

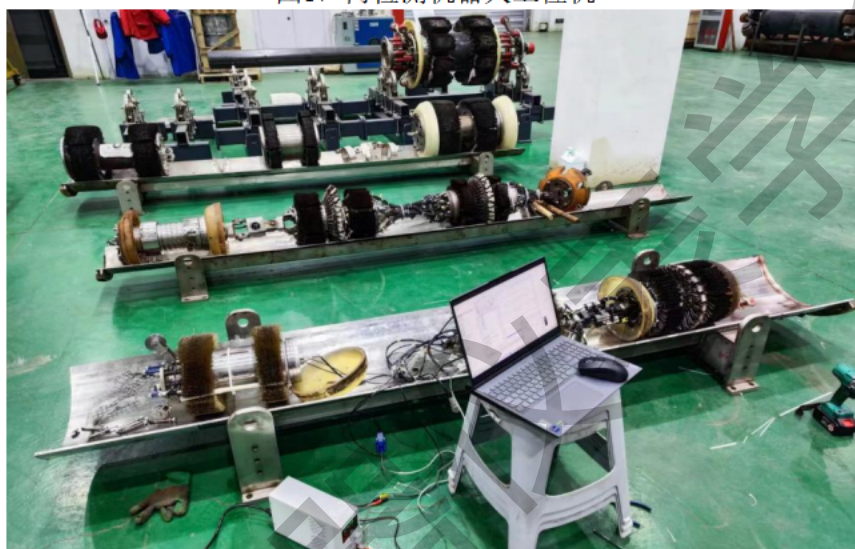


图18 内检测机器人调试



图19 内检测机器人数据牵拉采集实验



图20 内检测机器人水推数据采集实验

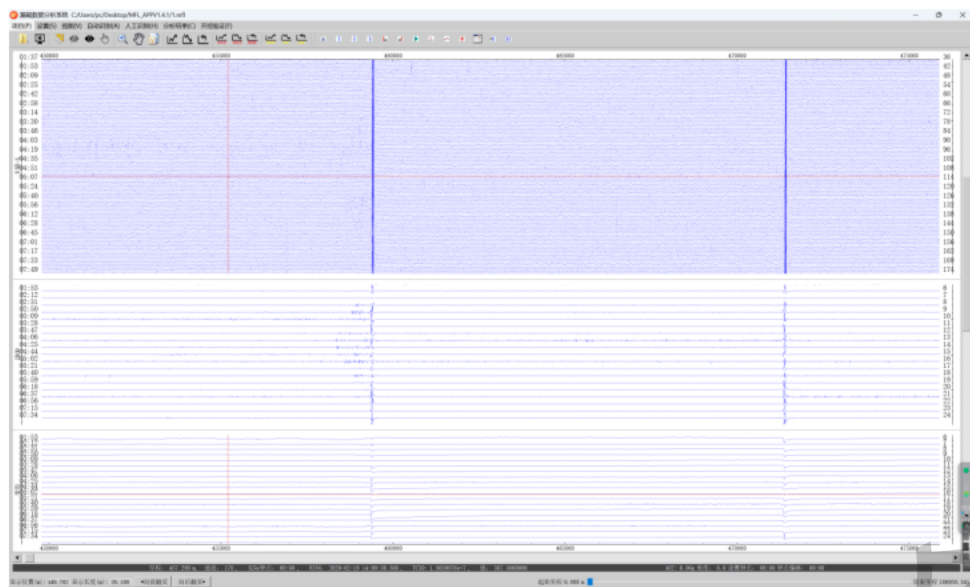


图20 内检测机器人数据智能化分析

第一作者信息：董绍华，男，教授，管道完整性管理技术，邮箱：shdong@cup.edu.cn。

通讯作者信息：董绍华，男，教授，管道完整性管理技术，邮箱：shdong@cup.edu.cn