

设计与计算

油气管道轻量化内检测复合探头设计及动态测试

赵 番^{1,2} 王继锋^{1,2} 魏 星³

1. 上海市特种设备监督检验技术研究院有限公司, 上海 200062; 2. 上海压力管道智能检测工程技术研究中心, 上海 200062; 3. 上海天然气管网有限公司, 上海 201204

摘要:在管道内检测过程中, 探头的性能直接影响检测器的整体质量和检测效果, 而传统的漏磁检测器采用多节设计, 体积庞大、结构笨重, 难以适用于低压、低流量管道内检测。本文设计了一款将涡流与漏磁技术相结合的复合探头, 通过优化 2 种涡流传感器结构和位置设计, 解决了单一涡流传感器对特定取向缺陷敏感度不足的问题, 实现了对管道内外壁缺陷的全方位区分和识别。其中, 采用三轴集成霍尔传感器, 可避免传统方案中通过 3 个单轴传感器按照不同朝向布置获取三维漏磁信号的设计。本文设计的复合探头结构紧凑、测量精度高, 可实现检测器单节式、轻量化的设计。

关键词:油气管道; 漏磁检测; 涡流; 探头; 轻量化; 缺陷

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16759/j.cnki.issn.1007-7251.2026.02.006

Design and Dynamic Testing of a Lightweight Composite Probe for In-line Inspection of Oil and Gas Pipelines

ZHAO Fan^{1,2} WANG Jifeng^{1,2} WEI Xing³

1. Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical Research Co., Ltd., Shanghai 200062, China;

2. Shanghai Pressure Pipeline Intelligent Inspection R & D Center, Shanghai 200062, China;

3. Shanghai Natural Gas Pipeline Network Co., Ltd., Shanghai 201204, China

Abstract: The performance of inspection probes directly governs the overall mass and detection efficacy of in-line inspection (ILI) tools. Conventional magnetic flux leakage (MFL) detectors adopt multi-section configurations with bulky structures, rendering them unsuitable for low-pressure, low-flow pipeline applications. This study presents a lightweight composite probe integrating eddy current testing (ECT) and MFL technologies. Through optimized structural and positional design of dual eddy current sensors, the inherent insensitivity of single-sensor configurations to defects of specific orientations is mitigated, enabling omnidirectional discrimination and identification of inner and outer wall defects. The incorporation of a tri-axial integrated Hall sensor eliminates the need for conventional arrangements employing three discrete single-axis sensors oriented in different directions. The proposed composite probe features compact architecture and high measurement precision, facilitating single-section, lightweight ILI tool design.

基金项目: 上海市特种设备监督检验技术研究院有限公司科研资助项目 (2025-01Y)

作者简介: 赵番, 男, 1981 年生, 硕士研究生, 高级工程师。

Key words: oil and gas pipelines; magnetic flux leakage detection; eddy current; probe; lightweight; defect

0 引言

在“双碳”目标背景下,油气在能源结构中仍将发挥重要作用,保障油气管道安全运行是推动碳减排的重要环节。目前,我国长输油气管道总长度约20万km^[1],一旦油气管道发生泄漏、火灾或爆炸等事故,将对生命、财产安全和生态环境造成严重危害。管道内检测技术是保障油气管道安全的有效技术。2015年前后,以漏磁技术为代表的管道内检测技术已基本实现国产化,逐步打破国外垄断。

目前,常规的漏磁内检测器普遍采用多节级联结构^[2]。该类型检测器通常由2节构成:前1节为磁饱和节,用于定量检测管道内、外壁缺陷;后1节为弱磁节,对管壁施加较低强度的磁场,在该磁场条件下,外壁缺陷信号的衰减速度显著快于内壁缺陷,从而实现缺陷内、外壁位置的判别。

多节式漏磁内检测器因体积较大,仅适用于管径大、流量高的长输管道,覆盖长度为十多万千米。对于低压、低流量的管道,其运行压力较低,介质流量较小,且管道布局复杂,部分区域弯头密集。传统的漏磁内检测器在管道中走走停停,管道内介质压力无法提供足够的驱动力,造成检测器运行缓慢,能耗提高,且易发生卡堵,这已成为管道内检测领域的技术难题。

1 复合探头设计

针对上述问题,本文提出了一种结合涡流与漏磁检测原理的复合探头设计方案。该探头采用涡流效应区分管道缺陷的内、外壁位置,并采用三轴集成霍尔传感器获取三维漏磁信号,避免了传统方案中通过3个单轴霍尔传感器按不同方向布置带来的体积庞大问题。该集成化设计有效避免了传统多节布局的方式,使检测器实现轻量化的单节结构,设备质量降低30%以上,提高了检测器在管道弯头处的通过能力和环境适应性。

1.1 设计原理

复合探头原理见图1。H1~H5为三轴集成霍尔传感器,L1~L4为涡流传感器线圈。该探头包含2类传感器:一类是三轴集成霍尔传感器阵列(H1~H5),用于检测管道缺陷引起的漏磁场;另一

类是涡流传感器,分为2组,L1和L4为一组,L2和L3为另一组,用于判别缺陷位于管道内壁或外壁。当管道存在缺陷时,形成的漏磁场会导致磁感应强度发生变化。霍尔传感器通过测量X、Y、Z这3个方向的磁感应强度变化来定量评估缺陷尺寸^[3]。

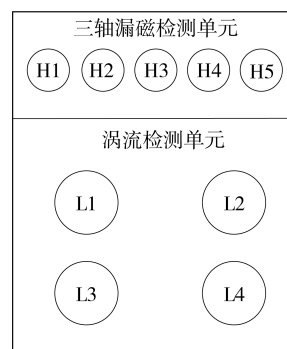


图1 复合探头原理

涡流传感器工作时,向线圈通入正弦交变电流,使其在空间产生激励磁场。处于该磁场中的金属管道表面会感应生成与激励电流方向相反的涡流,该涡流产生的磁场与激励磁场方向相反,称为涡流场^[4]。在涡流检测中,涡流能够渗入管道内部,但其密度随渗透深度增加呈指数衰减。通常将涡流密度衰减至管道表面涡流密度值的1/e(即0.368)时对应的深度定义为趋肤深度^[5],其计算式如下:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中: δ ——趋肤深度,mm;

f ——正弦波频率,Hz;

μ ——磁导率,H/m;

σ ——电导率,S/m。

当涡流线圈采用铜线绕制时,铜的电导率 σ 为 58×10^6 S/m,磁导率可近似取其真空磁导率,即 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m,在正弦波激励频率 f 为200 kHz的条件下,计算得到其趋肤深度 δ 为0.148 mm。

由上述计算结果可知,由于趋肤深度较小,涡流场能够有效表征管道内壁缺陷;而对于管道外壁缺陷,涡流场显著衰减,难以实现有效检测。因此,通过分析涡流场信号即可实现对缺陷位于管道内壁或外壁的判别。

1.2 电路设计

复合探头的电路结构如图2所示, 主要包括激励信号产生电路、参考信号产生电路、涡流传感

器、运算放大电路、相敏检波电路、模拟数字转换器(ADC)采样电路、三轴集成霍尔传感器和嵌入式微处理器。各电路模块的功能如下:

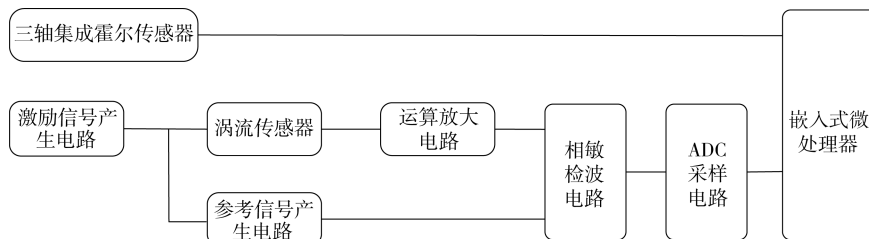


图2 复合探头电路结构

(1) 激励信号产生电路包括正弦波信号发生器、高通滤波电路和电压跟随电路。正弦波信号发生器采用直接数字频率合成芯片(DDS), 可产生频率为200 kHz的正弦波信号; 高通滤波器用于滤除低频噪声和工频干扰; 电压跟随电路则用于提高信号的驱动能力。

(2) 参考信号产生电路采用反比例放大电路, 将激励信号产生电路输出的正弦波信号进行反相处理, 为后续相敏检波电路提供检波信号。

(3) 涡流传感单元包括2个涡流传感器, 每个传感器由一组对角布置的涡流线圈构成。线圈采用直径为0.1 mm的漆包线绕制成50匝圆柱形结构。每组线圈和2个桥臂电阻构成一组电桥电路, 即对角线圈L1、L4与2个桥臂电阻R1、R2构成一组电桥, 对角线圈L2、L3与2个桥臂电阻R3、R4构成另一组电桥^[6]。线圈的布局如图3所示。

线圈L1和L4方向上的缺陷可能漏检。因此, 设置2组电桥可实现管道周向的全方位缺陷检测。

(4) 运算放大电路包括仪表放大器和高通滤波电路。仪表放大器用于对2个桥臂输出的差分信号进行放大, 同时对共模输入信号仅作跟随处理, 以提高信号的共模抑制比; 高通滤波电路则用于隔离直流分量和工频干扰, 并将有效的交流信号进行放大。

(5) 相敏检波电路包括乘法器、低通滤波器和同相放大电路^[7]。其中, 乘法器对运算放大电路的输出信号和参考信号产生电路的输出信号进行乘法运算, 得到和频与差频信号。低通滤波器用于滤除和频信号, 保留差频信号成分, 从而得到能被直流检出的信号。同相放大电路则用于放大相敏检波的输出信号, 得到有效区分内、外壁特征信号。

(6) ADC采样电路用于将相敏检波的输出电压信号进行模拟/数字转换。考虑到信号转换速率的要求, 选用16位分辨率的SAR型ADC。

(7) 5个三轴集成霍尔传感器(H1~H5)构成复合探头, 其沿管道周向呈平行阵列式排列。该传感器具有16位磁场分辨率, 可以检测高达120 mT的磁场强度, 并具有体积小、功耗低等优点。

(8) 嵌入式微处理器选用ARM Cortex M3系列的STM32F103C8T6微控制器, 用于采集三轴霍尔传感器和涡流传感器的数据。

1.3 数据传输协议设计

本文采用RS485总线和分布式数据采集系统, 将复合探头中的霍尔传感器数据和涡流传感器数据发送至主控电子包模块进行存储。所设计的探头数据传输协议见表1。

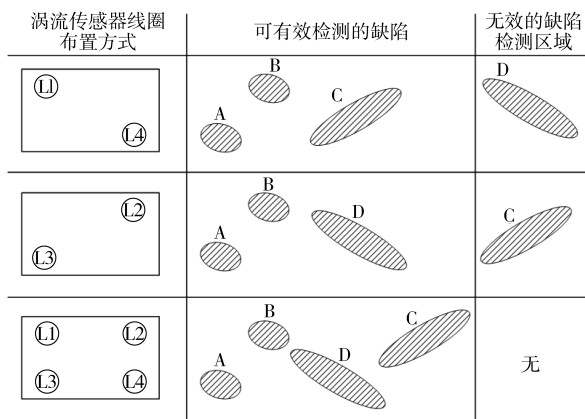


图3 涡流线圈布局

图3中, L1、L2、L3、L4为涡流传感器线圈。若仅设置线圈L1和线圈L4, 则沿线圈L2和L3方向上的缺陷可能无法检测; 若仅设置线圈L2和L3,

表1 复合探头传输协议

名称	符号	字节数/个
起始字节	2301	2
探头编号	0X01	1
霍尔传感器1的 x 、 y 、 z 轴主磁通数据	X1	6
霍尔传感器2的 x 、 y 、 z 轴主磁通数据	X2	6
霍尔传感器3的 x 、 y 、 z 轴主磁通数据	X3	6
霍尔传感器4的 x 、 y 、 z 轴主磁通数据	X4	6
霍尔传感器5的 x 、 y 、 z 轴主磁通数据	X5	6
涡流传感器1的内外壁缺陷信息	ADC1	2
涡流传感器2的内外壁缺陷信息	ADC2	2
结束字节	0D0A	2

每帧数据包包含5个三维集成霍尔传感器和2个涡流传感器信息,共39个字节。起始标志包含2个字节,探头编号包含1个字节,每个三轴集成霍尔传感器数据包包含 x 、 y 、 z 轴数据各2字节,每个涡流传感器数据包包含2个字节,结束标志包含2个字节。

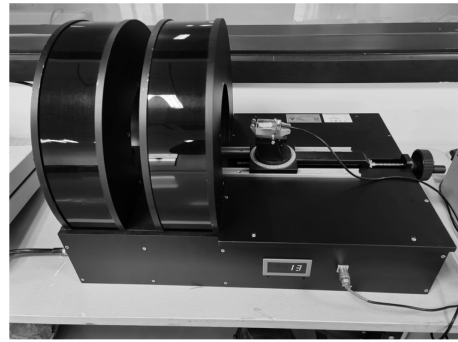
2 复合探头校准

复合探头的校准主要针对霍尔传感器展开,包括零点校准和增益校准2部分,用于提高探头的线性度和测量精度。

(1) 零点校准。零点校准用于消除霍尔传感器在零磁场条件下输出的偏置电压。校准时,将探头放置于磁屏蔽桶内,通过霍尔传感器测量得到其偏置电压,用于补偿因制造工艺差异和环境温度变化等因素引起的偏差。

(2) 增益校准。增益校准用于修正霍尔传感器的线性度,确保其对磁场强度的线性响应。因此,本文研发了一套匀强磁场校准平台,如图4所示。

该校准平台主要包括亥姆霍兹线圈和旋转机构。其中,亥姆霍兹线圈由一对共轴、平行、密绕且匝数为 N 的线圈组成。线圈骨架采用航空铝无磁材料,通过自然冷却。线圈直径为240 mm,磁场方向设置为水平方向,通过 ± 8 A电流时,中心区域最高磁感应强度不低于 ± 500 Gs,且在 $\phi 30$ mm范围内磁场均匀度优于0.1%。旋转机构由探头盒、支撑板、轴承、机架和转轴组成。轴承固定在支撑



(a) 校准平台



(b) 旋转机构

图4 匀强磁场校准平台

板上,可实现 360° 旋转,用于完成 x 轴和 y 轴校准。探头盒通过转轴固定在支架上,支持水平和垂直方向旋转,用于实现 z 轴校准。

校准时,对探头施加多个已知强度的磁场,并记录霍尔传感器相应的输出电压。通过线性拟合法调整霍尔传感器的增益参数,所得的增益拟合系数见表2。

表2 增益拟合系数

方向	$x/(uT \cdot LSB^{-1})$	$y/(uT \cdot LSB^{-1})$	$z/(uT \cdot LSB^{-1})$
增益拟合系数	3.22	0.80	2.93

3 复合探头动态测试

为了评估复合探头的综合检测性能,本文设计并搭建了一套动态漏磁检测试验平台。该平台主要包括操作台、行车、直线导轨、升降机构、内检测器、机架和管道^[8],如图5所示。

(1) 操作台。操作台基于触摸屏和可编程逻辑控制器(PLC),实现对行车和升降机构运动的集中控制。触摸屏界面设置自动和手动控制按钮,用于控制行车的进退和升降机构的升降;输入框可用



(a) 平台整体结构 (b) 探头安装位置

图 5 动态漏磁试验平台

于设置行车的行进速度；指示灯可实时显示试验平台上各传感器的工作状态。触摸屏操作界面如图 6 所示。

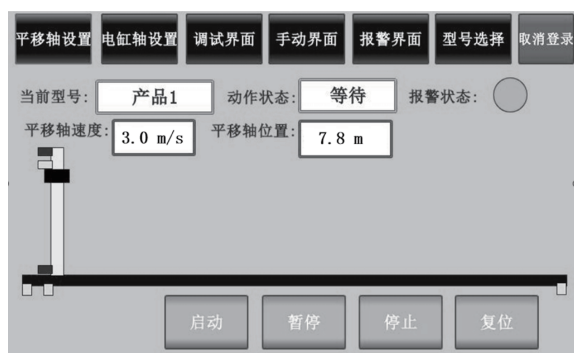


图 6 触摸屏操作界面

(2) 行车。行车装有交流伺服电机，通过齿轮驱动行车沿直线导轨滑动。同时，行车配备速度传感器，用于精确检测其行进速度。行车下方安装有内检测器，通过探头对管道进行缺陷检测。当检测至管道终点时，行车自动反向行驶返回起点，完成单次检测。

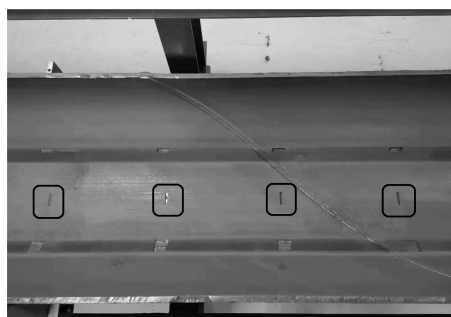
(3) 升降机构。升降机构通过机械连接带动内检测器上升和下降，内检测器下方安装有复合探头。在行车前进过程中，升降机构下降，使内检测器的探头和钢刷与管道内壁紧密接触，从而实现对接壁的饱和磁化；在行车后退过程中，升降机构上升，使钢刷和探头与管道内壁分离，避免损坏钢刷和探头。

(4) 内检测器。内检测器包括基体、磁铁、钢刷和探头。基体前后两端各安装有 1 块极性相反的磁铁，通过钢刷使管道达到饱和磁化状态，形成闭合磁路。探头位于 2 个钢刷中间位置，用于区分

内、外壁缺陷并进行检测。

(5) 机架。机架用于支撑并调节待测管道的水平位置。机架左右两端分别安装有缓冲器和限位传感器，从而保障行车安全。

(6) 管道。采用半管结构，管道直径为 508 mm，壁厚为 12.7 mm，材质为 X52 钢^[9]。在管道的内、外壁 6 点钟方向根据 NB/T 47013.12—2015《承压设备无损检测 第 12 部分：漏磁检测》加工了 2 组标准金属损失缺陷，如图 7 所示。



(a) 内壁缺陷



(b) 外壁缺陷

图 7 缺陷布局

其中，第 1 组的缺陷 1~缺陷 4 为内壁矩形轴向沟槽金属损失，缺陷 5~缺陷 8 为外壁矩形轴向沟槽金属损失；第 2 组的缺陷 9~缺陷 12 为内壁圆形坑状金属损失，缺陷 13~缺陷 16 为外壁圆形坑状金属损失。各组缺陷的具体尺寸见表 3 和表 4。

表 3 第 1 组缺陷尺寸

缺陷编号	长度/mm	宽度/mm	深度/mm
缺陷 1,5	36.0	6.0	1.2
缺陷 2,6	36.0	6.0	3.0
缺陷 3,7	36.0	6.0	4.8
缺陷 4,8	36.0	6.0	6.0

表4 第2组缺陷尺寸

缺陷编号	直径/mm	深度/mm
缺陷9、13	12.0	1.2
缺陷10、14	12.0	2.4
缺陷11、15	12.0	4.2
缺陷12、16	12.0	6.0

复合探头的动态测试曲线如图8所示。图8中上方较粗的曲线为2组涡流传感器数据,用于区分缺陷位于管道内壁或外壁;下方2条较细的曲线为霍尔传感器数据,用于管道缺陷的三维尺寸量化。图8曲线表明,涡流传感器仅对内壁缺陷敏感,对外壁缺陷无响应。霍尔传感器在内壁缺陷和外壁缺陷处均产生峰值信号和谷值信号。因此,结合霍尔传感器和涡流传感器的信息,可准确区分缺陷位于管道内壁还是外壁。同时,利用三轴霍尔传感器数据并结合缺陷量化识别算法,可对缺陷进行量化。

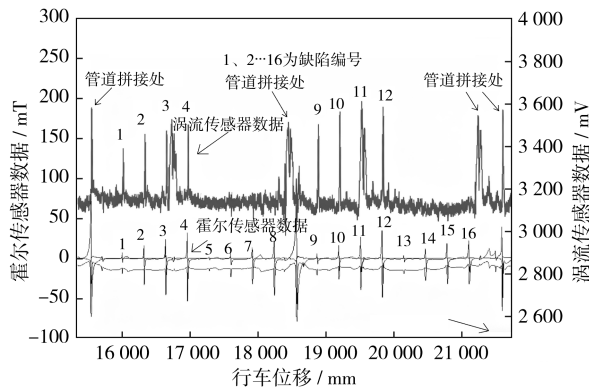


图8 复合探头动态测试曲线

4 结语

本文针对传统漏磁检测器结构笨重,难以满足低压、低流量管道检测要求的问题,将涡流检测与漏磁检测相结合,设计了一款复合探头。阐述了该复合探头的检测原理,并详细设计了探头电路的各

功能模块。为了提高复合探头的线性度和测量精度,开发了一款匀强磁场校准平台,用于三轴霍尔传感器的增益校准。此外,还搭建了动态漏磁试验平台,通过在管道上预制内、外壁缺陷,模拟实际检测工况,基于测试数据分析,验证了所设计复合探头的综合性能。

该复合探头克服了传统检测器多节式结构、易卡堵的不足,实现一体化单节式结构,缩短了检测器的长度,减轻了检测器的质量。

参考文献

- [1] 曾力波. 中国输油管道泄漏监测研究进展[J]. 油气储运, 2025, 44(7): 840.
- [2] 郭晓婷, 杨亮, 宋云鹏, 等. 油气管道三轴高清漏磁内检测机器人设计验证[J]. 仪表技术与传感器, 2020(12): 53-57.
- [3] PHAM H Q, NGUYEN T K, PHAM Q N, et al. Highly sensitive planar hall magneto resistive sensor for magnetic flux leakage pipeline inspection[J]. Measurement, 2021 (182):109782.
- [4] GHOLIZADEH S. A review of non - destructive testing methods of composite materials[J]. Procedia Structural Integrity, 2016(1): 50-57.
- [5] MOOK G, HESSE O, UCHANIN V. Deep penetrating eddy currents and probes[J]. Materialpruefung: Werkstoffe und Bauteile, Forschung Pruefung Anwendung, 2007, 49 (5): 258-264.
- [6] 赵番, 汤晓英, 王继锋, 等. 金属管道内外壁缺陷的脉冲涡流检测系统[J]. 无损检测, 2020, 42(6): 58-62.
- [7] 喻尚, 周凤星, 张智恒. 基于相敏检波的地下电缆故障精确定位系统[J]. 仪表技术与传感器, 2019(12): 56-60, 68.
- [8] 上海市特种设备监督检验技术研究院. 一种用于评价管道漏磁检测性能的实验装置: CN201721074396.X [P]. 2018-04-06.
- [9] 赵番. 油气管道漏磁内检测三维有限元动态仿真分析与验证[J]. 压力容器, 2024, 41(9): 77-86.

(收稿日期: 2025-11-21)