

# D1016 mm天然气管道环焊缝相控阵超声内检测 机器人系统研制与应用

蒋毅<sup>1</sup> 任涛<sup>2</sup> 吴志锋<sup>1</sup> 马剑林<sup>1</sup> 陈亦凡<sup>2</sup> 轩恒<sup>1</sup>

1. 国家管网集团西南管道公司; 2. 成都理工大学

**摘要:** 针对埋地天然气管道焊缝传统检测存在开挖量大、精度低、适应性差和可靠性不足等问题,开发了基于相控阵超声技术的D1016 mm管道自适应超声内检测机器人系统。基于相控阵超声检测原理,设计高精度自对齐模块化检测装置,并采用多重浮动结构确保探头与管壁紧密耦合,同时通过焊缝定位模块实现精确识别与定位;针对工况适用性问题,设计轮式管道机器人,采用自调节轮式结构,提升在复杂工况下的适应能力;针对控制与通信问题,设计无线控制系统,机器人采用以太网与控制器局域网(controller area network, CAN)总线的高效协作,实现模块化设计与分布式控制。专用环道测试与缺陷检测结果表明:该机器人可在管道内部稳定作业,常见缺陷检出率达100%,检测效率显著优于传统检测方法,为管道安全运行提供了高效、可靠的技术支持,具有重要的工程应用价值。

**关键词:** 天然气管道; 超声内检测; 焊缝; 缺陷; 机器人

中图分类号: TE832 文献标志码: A

文章编号: 2097-5260(2025)01-0050-08

## Development and application of D1016 mm phased array ultrasonic internal inspection robot system for natural gas pipeline circumferential welds

JIANG Yi<sup>1</sup> REN Tao<sup>2</sup> WU Zhifeng<sup>1</sup> MA Jianlin<sup>1</sup> CHEN Yifan<sup>2</sup> XUAN Heng<sup>1</sup>

1. Southwest Pipeline Co., Ltd. of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd.;

2. Chengdu University of Technology

**Abstract:** The traditional inspection methods for buried pipelines require extensive excavation and exhibit limitations in terms of precision, adaptability, and reliability. To address this issue, an adaptive ultrasonic internal inspection robotic system for D1016 mm pipelines based on phased array ultrasonic technology was developed in this study. Based on the principles of phased array ultrasonic inspection, a high-precision self-aligning modular detection device was designed, incorporating a multi-floating structure to ensure tight coupling between the probe and the pipe wall, simultaneously employing a weld seam positioning module to enable precise identification and localization. To improve adaptability under various working conditions, a wheeled pipeline robot with a self-adjusting wheel structure was designed to enhance operational performance in complex environments. In response to control and communication challenges, a wireless control system was established using the robot Ethernet and controller area network (CAN) bus for efficient coordination, enabling modular design and distributed control. Results from dedicated loop tests and defect detection experiments show that the robot can achieve stable operation within the pipeline, with

收稿日期: 2025-01-10

基金项目: 国家管网集团西南管道公司科技项目“Φ1016天然气管道环焊缝内检测机器人系统”(201908)。

作者简介: 蒋毅, 男, 1982年生, 高级工程师, 2010年博士毕业于西南石油大学油气储运工程专业, 现从事长输油气管道完整性技术研究和管理。地址: 四川省成都市金牛区迎宾大道6号, 邮编610037。电话: 13548126000、028-62721642。E-mail: jiangyi@pipechina.com.cn

通信作者: 任涛, 男, 1988年生, 教授, 2017年博士毕业于西南石油大学机械工程专业, 现主要从事机器人技术与石油天然气装备专业方向的研究工作。地址: 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 邮编610059。电话: 1500828834。E-mail: rtone@foxmail.com

a defect detection rate of 100%. The inspection efficiency significantly surpasses that of traditional methods, providing an efficient and reliable solution to substantial engineering application value and ensuring comprehensive technical and equipment support for the safe operation of pipelines.

**Keywords:** natural gas pipelines; ultrasonic internal testing; weld line; defects; robot

2025年我国油气管网规模将达24万km,全国天然气主干管网将全部连通<sup>[1]</sup>,覆盖我国大部分地区。目前,我国天然气主干管网以D1016 mm及以上大口径高压高钢级管道为主。尽管现代管道焊接技术较20世纪70年代已有显著提升,但施工过程中存在的预热保温不当、强力组对等问题仍将导致焊接缺陷,影响管道安全运行<sup>[2]</sup>。因此,管道检测与维护技术对保障管道的完整性和预防故障至关重要<sup>[3]</sup>。

环焊缝是长输管道的“节点”,数量众多,任何一个焊缝失效都可能导致管道系统的整体中断,造成严重后果<sup>[4]</sup>。此外,环焊缝的不规则形貌对检测精度影响较大;环焊缝所处位置特殊,导致检测窗口短,增加了检测的难度<sup>[5]</sup>。漏磁、电磁超声、涡流等管道常规在线内检测由于间接原理、精度等限制,无法识别或解析出环焊缝上微小缺陷<sup>[6-12]</sup>。超声内检测技术基于直接检测原理,探测精度较高,对管道缺陷较为敏感,可检测环焊缝中各种类型的缺陷,尤其可识别细小裂纹,包括应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹等<sup>[13-18]</sup>。因此,超声内检测技术在管道焊缝缺陷检测中具有显著优势。

内检测机器人在天然气管道检测的应用中,主要面临检测准确性、工况适用性及系统可靠性三大核心挑战问题。首先,针对检测准确性问题,基于相控阵超声检测原理,优化超声检测装置的多重浮动结构及焊缝定位模块,并匹配视觉跟踪系统,确保探头与管壁的紧密耦合及焊缝的精准定位;其次,针对工况适用性问题,设计并验证机器人的轮式结构及驱动系统,提升其在复杂工况下的适应能力;最后,针对系统可靠性问题,进行超声检测控制系统的模块化设计,确保数据传输与操作的可靠性。通过上述研究,本研究开发了一款高精度、高适应性、高可靠性的天然气管道内检测机器人,为实际工程应用提供技术支持。

## 1 相控阵超声技术

超声相控阵探头具有较多的换能器阵元,且

阵元之间按照一定形状和尺寸排列(图1)。其核心优势包括波束扫描、偏转和聚焦能力,为确定缺陷的形状、大小及方向提供超越传统单探头或多探头系统的能力。根据 Huygens 原理和 Helmholtz 声压积分定理,线性阵列换能器各阵元等间隔延迟一段时间依次被激励,使合成的波阵面与线阵形成一定的角度,并形成声束相控偏转效果。线性阵列换能器左端阵元先激励,延迟一段时间后,邻近的一个阵元开始发射,越靠近右侧的阵元发射越晚。由此,使各阵元的波阵面指向一个曲率中心,各阵元的波阵面同时到达这个曲率中心,即相控焦点。超声相控阵通过控制阵元发射时间,可以采用声束合成的方式探测到较大的角度范围。因此,相控阵超声能有效地识别焊缝内的各类缺陷。

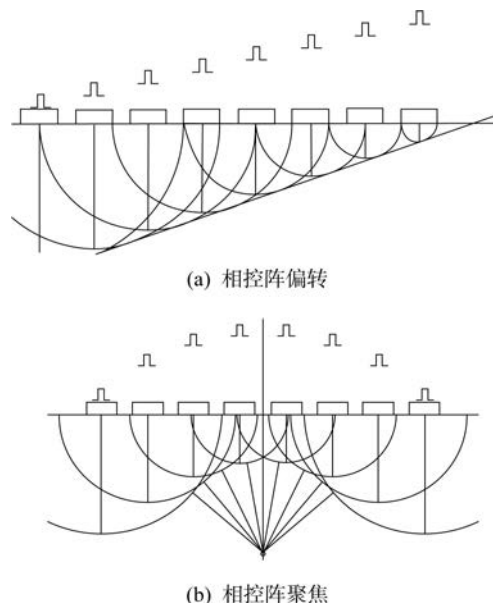


图1 线性阵列超声相控阵探头

Fig.1 Linear array ultrasonic phased array probe

## 2 检测装置与系统研究

针对天然气管道内环境特点及长距离检测需求,研制了具有主动管径适应能力的轮式管道机器人。管道机器人由检测体与运载体两部分组成。检

测传感器等部件以模块形式安装于检测体。同时,管道机器人还集成了焊缝定位、周向扫描、自适应控制、远程数传、实时反馈及安全保护等功能,满足了管道检测要求。

## 2.1 超声检测装置设计

超声检测装置主要包括超声检测功能箱体、检测浮动模块以及焊缝定位模块。它是管道内检测机器人的核心部分,其设计将直接影响检测精度与系统可靠性。

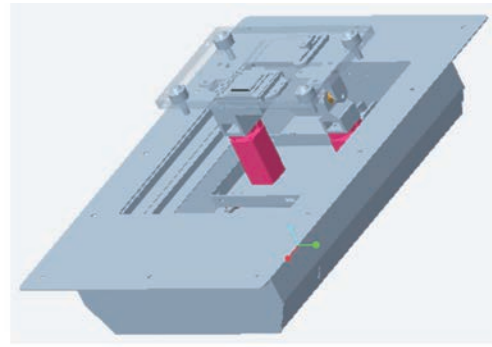
### 2.1.1 超声检测箱体

超声检测箱体用于安装超声检测装置,包括超声移动平台、伸缩气缸、相控阵探头和编码器等(图2)。箱体内部配置移动平台,可调节探头沿管道轴向的位置,确保探头与焊缝中心对准。气缸负责控制探头的伸缩,确保探头在非检测状态下处于安全位置。箱体内电气设备区域与检测设备区独立分隔,以防止耦合液进入电气区域,以提设备安全性。

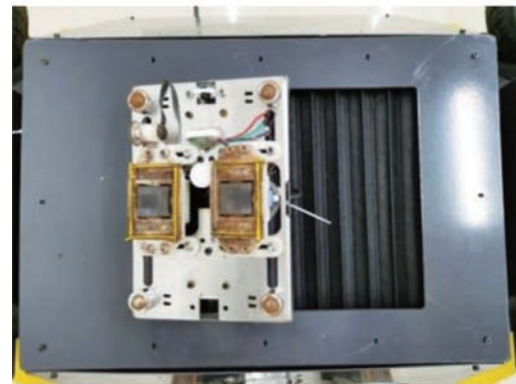
### 2.1.2 检测浮动模块

(1) 探头径向浮动结构。如图3(a)所示,为缓解气缸顶出探头时的浮动阻力,降低探头损坏和楔块摩擦的风险,设计了软弹簧浮动结构。该结构通过软弹簧顶住探头背部,使其获得径向浮动能力。

(2) 周向与轴向浮动结构。如图3(b)所示,实际的管道并非理想圆弧面,加工误差导致超声相控阵探头中心线与管道曲率中心线无法完全重合,影响耦合效果。为此,设计了可沿管道周向浮



(a) 模型

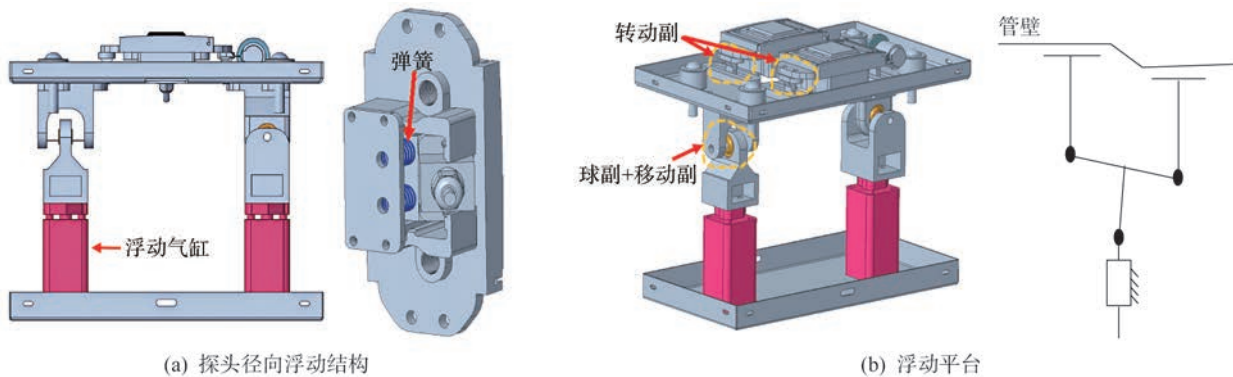


(b) 实物

图2 超声检测箱体

Fig.2 Ultrasonic inspection enclosure diagram

动的平台。平台两端通过不同结构与气缸连接,通过调节两侧气缸压缩量实现周向浮动,从而改善探头与管壁的耦合效果。此外,管道对接环焊缝两侧常存在错边现象,导致超声检测时耦合不良,影响检测质量。为此,平台进一步设计了沿管道轴向浮动结构,平台与气缸连接处及超声相控阵探头均可轴向摆动,两处铰链结构与管壁形成欠驱动平行四边形机构。该结构在焊缝两侧高度不一致时,仍能确保探头与焊缝良好耦合,显著提升检测质量。



(a) 探头径向浮动结构

(b) 浮动平台

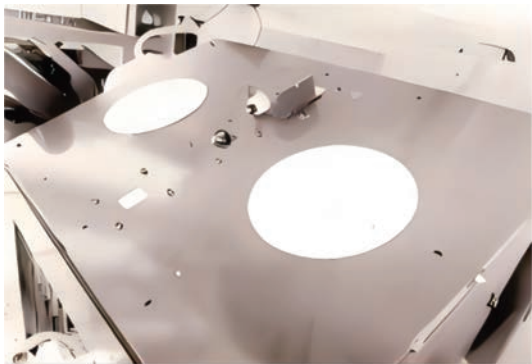
图3 检测浮动模块

Fig.3 Floating detection module

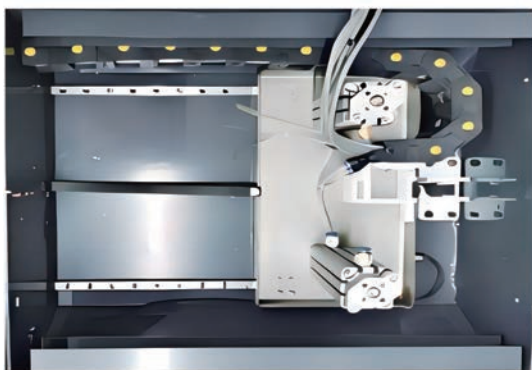
### 2.1.3 焊缝定位模块

在对焊缝进行超声检测前,需要对焊缝进行精确定位,确保超声探头与焊缝中心保持预设距离。焊缝精确定位分为两个步骤:首先,识别并计算焊缝中心相对于超声内检测装置坐标系的偏移距离;其次,将超声探头移动至指定焊缝位置。

根据功能需求,焊缝定位结构分为传感器平台和移动平台两部分(图4)。焊缝定位采用线形结构、激光结合图像处理技术,利用结构光在管道内表面的特殊投影,确保检测定位准确。摄像头置于平面中心,两侧配备LED补光灯(白色圆形区域),以保障图像采集质量。通过摄像头垂直照射管道内表面,一字线激光以特定角度入射,使焊缝位于摄像头视场范围内。移动平台作为超声检测平台的核心组件,用于调整焊缝相对位置。



(a) 传感器平台



(b) 移动平台

图4 焊缝定位模块

Fig.4 Weld positioning module

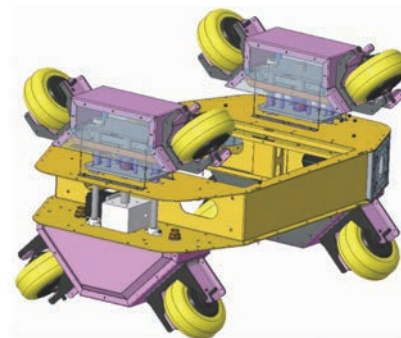
## 2.2 轮式管道机器人研究

管道检测机器人在管内的运动姿态(包括直行、转弯与俯仰)是其稳定运行的基础。为避免轮

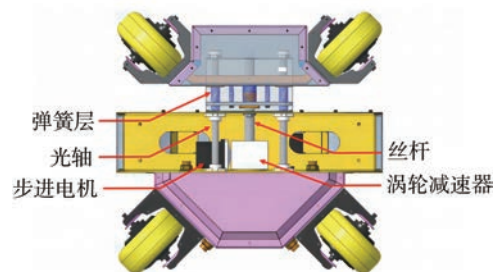
子与管道内壁接触时因侧向力导致的脱胎,左右两侧前后轮的中心面设计为相交于管道轴线,从而有效消除横向力,确保机器人在复杂工况下的运动稳定性。

机器人采用可调节轮式结构(图5),能够适应 $0.95D\sim 1.05D$ 的管径变化( $D$ 为管径),并可在长达数公里以上的管道中实现连续作业。在水平直管作业时,顶部轮组收缩形成车型轮式管道机器人,提升了灵活性与通过性,使其能够顺利通过最小 $1.5D$ 的弯道;在爬坡时,轮组伸出转换为支撑轮式管道机器人,增强了驱动力与稳定性,最大爬坡能力可达 $30^\circ$ 。在一般工况下,采用下部四轮的四驱模式,优化能耗并延长行进距离;在爬陡坡或过障碍等恶劣工况下,启用全轮八驱模式,实现牵引力与动力的最大化。

管径调节机构采用丝杆导轨与弹簧复合设计,通过电机实现驱动轮对管径变化的自适应调节,确保驱动轮始终与管壁紧密贴合,进一步提升了机器人运行的稳定性和检测精度。



(a) 轮式结构



(b) 管径调节机构

图5 检测机器人整体结构三维图

Fig.5 3D model of the detection robot's overall structure

此外,考虑到长距离焊缝表面清洗水和超声耦合液的携带总量,单独设计了链式加挂舱节。

### 2.3 检测机器人控制系统研究

机器人控制系统以工控电脑作为核心单元,兼具图像处理 and 系统控制功能,并通过无线数据传输实时监测系统数据和状态(图6)。

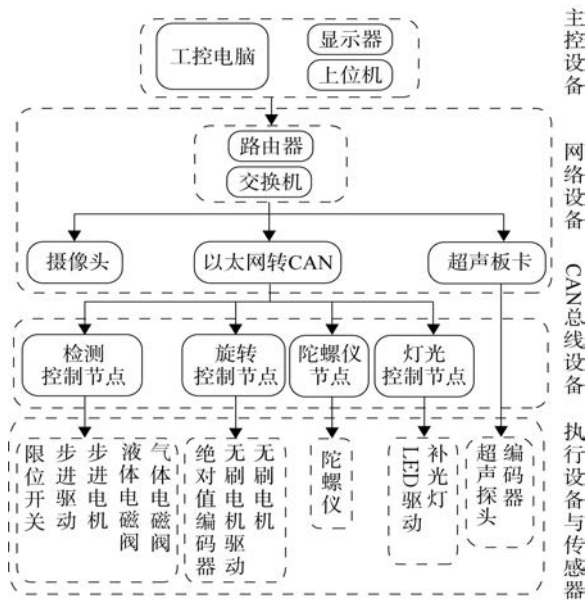


图6 超声内检测控制系统框

Fig.6 Block diagram of ultrasonic internal inspection control system

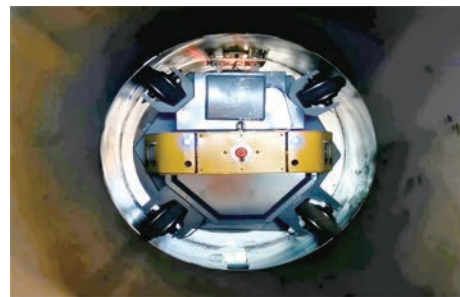
超声板卡通过同轴屏蔽线缆连接超声探头,传输激励和回波信号,并通过以太网与核心控制单元通信,实现超声数据与位置信息同步,以确保检测精度。检测控制节点通过电磁阀控制气缸伸缩和耦合液开关,结合视觉跟踪模块实现检测装置的精准定位,确保系统运行的稳定性。旋转控制单元采集绝对值编码器数据,并通过脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)信号控制无刷电机,实现旋转机构的精确同步。灯光控制单元独立调节补光灯的亮度,为封闭环境下的摄像头提供适宜光源,确保图像采集的可靠性。整体系统通过以太网与CAN总线的高效协作,实现高效控制,具有较强的可靠性、扩展性和适应性,能够满足复杂管道环境的检测需求。

### 3 测试及应用

D1016 mm天然气管道环焊缝相控阵超声内检测机器人系统在综合测试平台开展了专用环道测试与缺陷检出率测试,并进行应用效果总结。

### 3.1 综合测试平台试验研究

机器人进入含有标准缺陷的样管后,自动移动至焊缝区域以开展超声检测(图7)。测试过程中,超声内检测装置自动完成焊缝定位,驱动超声探头移动至焊缝位置并执行自动扫描。超声波通过探头发射进入管壁后沿传播方向传播,当首次到达管壁内表面时产生反射回波,即一次回波,形成一次回波界面。在此阶段,声束可检测一次回波覆盖范围内的缺陷,若检测到异常信号,则判断为缺陷信号。未被探头接收的声束继续传播,再次到达管壁表面时形成二次回波界面。一次回波界面之前的信号,以及一次与二次回波界面之间的信号通常被认为是缺陷信号,而一次和二次界面处的信号则主要反映焊缝表面的结构特征。



(a) 机器人管内检测



(b) 机器人超声数据实时反演



(c) 管道机器人实地测试

图7 管道机器人环道检测

Fig.7 Experimental setup for ultrasonic inspection of pipeline robot

在环道测试中,超声内检测装置对焊缝进行检测并记录相关数据(图8)。结果显示,两侧探头采集的数据完整,无因耦合不良而引起的数据丢失。这表明,本文设计的超声内检测装置在管道内能够实现稳定的耦合效果,并成功采集高质量的超声数据,验证了装置在超声数据采集方面的可靠性。

通过在标准缺陷管道上开展检出率测试,验证超声内检测装置的检测精度和可靠性(图9)。在检测过程中,超声内检测系统能够实时保存检测到的焊缝数据;并开展离线分析,筛选可能存在缺陷的信号,对疑似缺陷进行判定;随后对该缺陷进行测量,定性分析其长度、高度等尺寸参数。

通过对检测结果与实际管道缺陷参数进行对比,评估检测的准确性和系统性能(表1,图10)。

结果表明:实际检出缺陷数量为26处,与标准缺陷数量完全一致,缺陷检出率达100%;长度方向测量平均误差率4.1%,误差较小;高度方向测量平均误差率50.0%,配乘设定误差补偿系数0.65,平均误差率12.8%,误差较小。与传统检测方法相比,本系统在缺陷检出率和尺寸测量精度方面均表现出显著优势,验证了其高精度检测能力。

### 3.2 应用效果总结

本文研发的管道检测机器人系统通过优化管内轮式机器人结构、超声检测装置与控制系统设计,实现了高精度、高适应性及高可靠性的管道检测功能。具体检测机器人参数见表2。

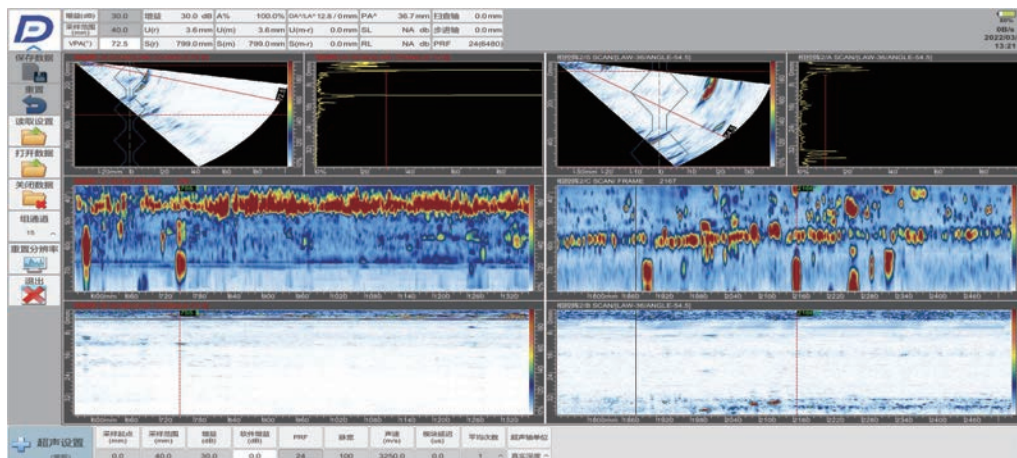


图8 环道应用数据图

Fig.8 Experimental data diagram of ultrasonic internal inspection

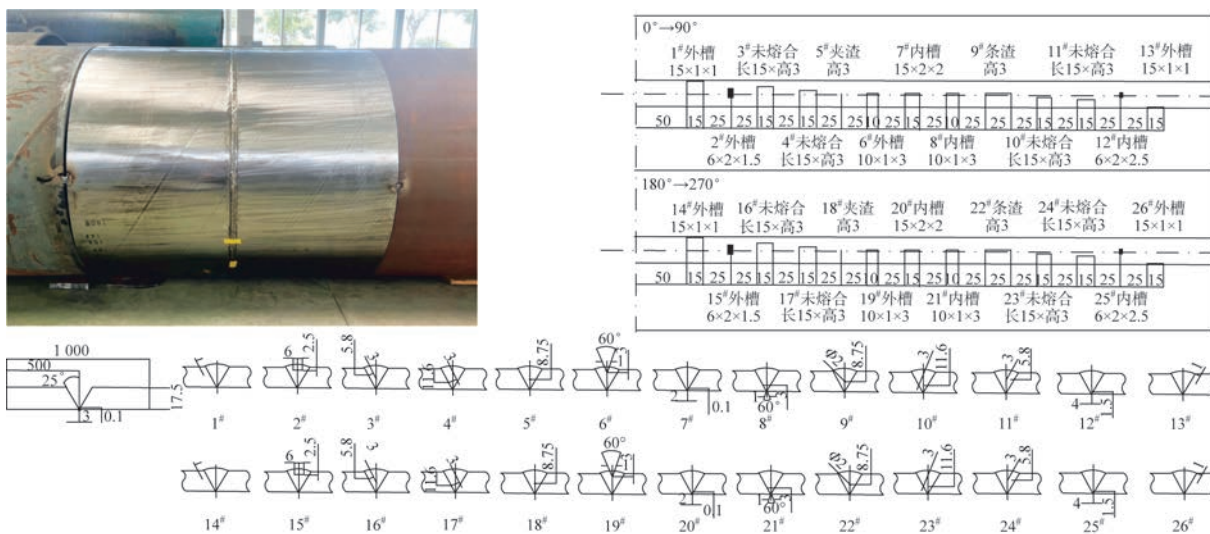


图9 标准缺陷样管及缺陷分布情况

Fig.9 Standard defective sample tubes and distribution of defects

表1 标准实验样管检测出缺陷与标准数据对比

Tab.1 Comparison between detected defects of standard test sample tube and standard data

缺陷编号	实际长度/mm	检出长度/mm	长度误差/mm	实际高度/mm	检出高度/mm	高度误差/mm
1#	15.0	15.2	0.2	1.0	1.8	0.8
2#	6.0	5.1	0.9	1.5	1.9	0.4
3#	15.0	14.7	0.3	5.0	5.0	0.0
4#	15.0	14.7	0.3	3.0	4.6	1.6
5#	25.0	24.1	0.9	3.0	4.8	1.8
6#	10.0	12.0	2.0	3.0	4.1	1.1
7#	15.0	14.7	0.3	2.0	2.8	0.8
8#	10.0	11.5	1.5	3.0	4.2	1.2
9#	3.0	3.0	0.0	3.0	4.8	1.8
10#	15.0	14.3	0.7	3.0	4.6	1.6
11#	15.0	14.9	0.1	3.0	4.4	1.4
12#	6.0	6.2	0.2	2.5	3.7	1.2
13#	15.0	14.8	0.2	1.0	1.4	0.4
14#	15.0	15.1	0.1	1.0	1.9	0.9
15#	4.0	3.0	1.0	1.5	2.3	0.8
16#	15.0	15.3	0.3	3.0	5.1	2.1
17#	15.0	15.0	0.0	3.0	4.9	1.9
18#	25.0	26.0	1.0	3.0	4.7	1.7
19#	10.0	9.6	0.4	3.0	5.0	2.0
20#	15.0	14.8	0.2	2.0	2.6	0.6
21#	10.0	11.0	1.0	3.0	4.2	1.2
22#	3.0	3.0	0.0	3.0	4.9	1.9
23#	15.0	16.0	1.0	3.0	4.8	1.8
24#	15.0	14.7	0.3	3.0	5.0	2.0
25#	6.0	6.0	0.0	2.5	3.9	1.4
26#	15.0	14.5	0.5	1.0	1.6	0.6
平均值	12.62	12.66	0.52	2.54	3.81	1.27

#### 4 结论

针对天然气管道环焊缝缺陷检测问题,通过理论分析、设计优化,开发了D1016 mm天然气管道环焊缝相控阵超声内检测机器人系统,经综合测试平台验证,该系统具有如下特征:

(1) 检测精度和效率显著提升。基于相控阵超声技术,研制了高精度超声检测装置与视觉跟踪单元。实验结果表明,缺陷检出率达到100%,长度方向平均误差率为4.1%,单焊缝检测时间

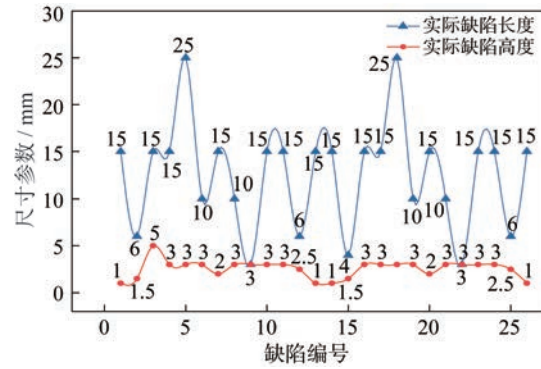


图10 超声内检测系统检测误差分析

Fig.10 Error analysis of ultrasonic internal inspection system

表2 机器人参数表

Tab.2 Equipment parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
主体结构	单/双	供电方式	电池
行进平均速度/(km·h <sup>-1</sup> )	10	续航时间/h	6
自重/kg	350	控制方式	自主/无线
可载重/kg	500	单焊缝检测时间/min	5
驱动结构	可调节轮式结构	超声判读规则	到一次/二次回波

为5 min,整体性能显著优于传统检测方法。

(2) 管道适应性强。针对作业管道适用性问题,开发了高适应性轮式管道机器人,实现了直管与爬坡作业模式的自主切换。该机器人作业距离大于2 km,最大爬坡能力30°,适应管径范围为0.95D~1.05D。此外,机器人自重为350 kg,可载重500 kg,续航时间6 h,可满足长距离管道的连续检测需求。

D1016 mm天然气管道环焊缝相控阵超声内检测机器人系统的开发,为长距离管道内环焊缝检测提供了高效、可靠的解决方案,具有重要的工程应用价值。

#### 参考文献

[1] 国家发展改革委,国家能源局. 中长期油气管网规划[R]. 北京:国家发展改革委,国家能源局,2017.  
 [2] 李秋扬,赵明华,张斌,等. 2020年全球油气管道建设现状及发展趋势[J]. 油气储运,2021,40(12):1330-1337,1348. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.12.002.

- [3] 陆阳,郭瑞杰,张晴晴,等. 油气管道不等壁厚内锥孔环焊缝的相控阵超声检测[J]. 无损检测,2024,46(5):6-10. DOI: 10.11973/wsjc202405002.
- [4] 萧成珺,贾航,蒲飞航. 长输天然气管道环焊缝安全状况等级评定及修复[J]. 建材技术与应用,2022(5):45-48. DOI: 10.13923/j.cnki.cn14-1291/tu.2022.05.012.
- [5] 孙培翔,戴国文,李学达,等. 长输油气管道环焊缝工程临界评估技术的应用现状及探讨[J]. 电焊机,2023,53(5):30-37. DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.05.04.
- [6] 耿丽媛,董绍华,钱伟超,等. 基于DCNN的管道漏磁内检测环焊缝缺陷智能分类法[J]. 油气储运,2023,42(5):532-541. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.05.006.
- [7] 杨永,冉文荣,李林涛,等. 漏磁检测剩余磁场对油气管道直流杂散电流腐蚀行为的影响[J]. 压力容器,2023,40(1):75-81,88. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4837.2023.01.010.
- [8] LIU B, HE L Y, ZHANG H, et al. The axial crack testing model for long distance oil-gas pipeline based on magnetic flux leakage internal inspection method [J]. Measurement, 2017, 103: 275-282.
- [9] 叶至灵,韩赞东. 燃气管道腐蚀缺陷电磁超声检测方法[J]. 仪表技术与传感器,2020(8):100-103.
- [10] 卢润坤,王博,王皓,等. 基于电磁超声的工业管道自驱式壁厚连续扫查内检测系统[J]. 仪表技术与传感器,2024(7):94-99,104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2024.07.017.
- [11] 玄文博,王婷,戴联双,等. 油气管道类裂纹缺陷涡流内检测的可行性[J]. 油气储运,2021,40(12):1384-1389,1440. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.12.009.
- [12] SOPHIAN A, TIAN G, FAN M. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: a review [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30: 500-514.
- [13] 李睿. 油气管道内检测技术与数据分析方法发展现状及展望[J]. 油气储运,2024,43(3):241-256. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.03.001.
- [14] 贾潇,赵隆. 相控阵超声与射线检测对石油化工管道缺陷检测的对比分析[J]. 中国石油和化工标准与质量,2022,42(15):174-175,178. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4076.2022.15.061.
- [15] 吴勇,齐迎春,许衍,等. 管道环焊缝的相控阵超声检测[J]. 无损检测,2023,45(12):57-62. DOI: 10.11973/wsjc202312011.
- [16] 关向国. 在役管道环焊缝的相控阵超声检测思考探究[J]. 中国金属通报,2021(9):140-141. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1667.2021.17.068.
- [17] 朱序东. 锻造奥氏体不锈钢管道焊缝的单侧超声检测[J]. 无损检测,2021,43(2):11-15. DOI: 10.11973/wsjc202102003.
- [18] 李守彬,夏中杰,孔晨光,等. 相控阵超声检测技术在核电厂不等厚对接环焊缝检测中的应用[J]. 压力容器,2020,37(10):64-69. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4837.2020.10.010.

(编辑:高继江)

(上接第29页)

- [20] LOWRY E, KRISHNAMOORTHY G. Two-phase pressure loss correlation for co-current flow in corrugated plate static mixers and structured packing [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, 195: 601-612. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.05.051.
- [21] LIU Q, LIU Y, LI S, et al. Analysis of the static mixer effect on natural gas mixing process in a pipeline [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2022, 85: 102146. DOI: https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102146.
- [22] ZHUANG Z, YAN J, SUN C, et al. The numerical simulation of a new double swirl static mixer for gas reactants mixing [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2020, 28(9):2438-2446. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.05.008.
- [23] 高岳,朱红钧,唐堂,等. 天然气管道掺氢输送研究现状与分析[J]. 低碳化学与化工,2024,49(3):118-128. DOI: 10.12434/j.issn.2097-2547.20230260.
- [24] 刘永振,陈天昊,赵序海,等. 基于SMX静态混合器的天然气掺氢流动影响研究[J]. 石油化工设备,2024,53(2):1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7466.2024.02.001.
- [25] ZHENG J, XU W, JIANG, et al. Performance analysis of coaxial shear static mixer for hydrogen blending into natural gas [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 78: 1275-1287. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.06.389.
- [26] YANG D, SUN Y, TIAN L, et al. Investigation of the mixing characteristics of hydrogen and natural gas in different static mixers [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 72: 166-178. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.330.
- [27] FERNANDES L A, MARCON L R C, ROUBOA A. Simulation of flow conditions for natural gas and hydrogen blends in the distribution natural gas network [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 59: 199-213. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.014.
- [28] OUYANG X, HE Q, CHAI C, et al. A numerical study on hydrogen blending in natural gas pipeline by a T-Pipe [J]. Journal of Pipeline Science and Engineering, 2024, 4(4): 100186. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100186.
- [29] BRAILLARD O, HOWARD R, ANGELE K, et al. Thermal mixing in a T-junction: novel CFD-grade measurements of the fluctuating temperature in the solid wall [J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 330: 377-390. DOI: https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.02.020.

(编辑:白鹤)