

文章编号: 1000-8241(2021)04-0446-05

# 油气变径管道内检测器磁铁探头的设计与实现

曾辉<sup>1,2</sup> 强毅<sup>2</sup> 王自林<sup>1</sup> 刘争<sup>1</sup> 白港生<sup>1</sup> 高子凌<sup>1</sup>

1. 中油管道检测技术有限责任公司; 2. 机械科学研究总院

**摘要:** 常规的管道漏磁检测器无法满足长输变径管道的检测需求, 故研制了一种可变径检测器的磁铁探头机械结构。新设计的磁铁探头机械结构采用浮动分块形式, 通过在 40~48 in (1 in=2.54 cm) 可变径检测器一前一后交错布置探头, 实现了整体磁路结构优化。通过磁化能力测试、机械性能测试及整机牵拉测试一系列试验表明: 该机械结构具有足够的磁化强度, 在变径管道中探头紧贴管内壁而不发生干涉, 能够实现探头的全覆盖, 并适应变径管道的通过能力要求。合理的浮动磁铁探头机械结构是油气变径管道腐蚀检测成功的前提, 研究成果可为推动中国变径管道漏磁检测系列化技术的发展提供参考。(图 7, 表 1, 参 20)

**关键词:** 变径管道; 浮动磁铁; 浮动探头; 管道检测; 全覆盖; 通过能力

中图分类号: TE973

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Design and implementation of magnet probe for inline detector of oil and gas multi-diameter pipeline

ZENG Hui<sup>1,2</sup>, QIANG Yi<sup>2</sup>, WANG Zilin<sup>1</sup>, LIU Zheng<sup>1</sup>, BAI Gangsheng<sup>1</sup>, GAO Ziling<sup>1</sup>

1. China Petroleum Pipeline Inspection Technologies Co. Ltd.;

2. China Academy of Machinery Science and Technology Group Co. Ltd.

**Abstract:** For the conventional magnetic flux leakage detector could not meet the requirements for inspection of long-distance oil and gas multi-diameter pipelines, a mechanical structure of magnet probe of multi-diameter detector was developed. The new structure is in the form of floating blocks, and the overall magnetic circuit structure is optimized by arranging probes in a staggered way in the 40~48 in (1 in = 2.54 cm) multi-diameter detector. As shown in the results of the magnetizing test, the mechanical test and the overall traction test, the mechanical structure has sufficient magnetization, and the probe is tightly close to the inner wall of the multi-diameter pipeline without any interference, capable of realizing the full coverage of the probe and adapting to the requirements of through capability of the multi-diameter pipeline. Generally, the reasonable mechanical structure of the floating magnet probe is the precondition for the successful corrosion inspection of oil and gas multi-diameter pipelines, and the research results will provide reference for promoting the development of the magnetic flux leakage inspection series technologies for the multi-diameter pipelines in China. (7 Figures, 1 Table, 20 References)

**Key words:** multi-diameter pipeline, floating magnet, floating probe, pipeline inspection, full coverage, through capacity

利用智能高清漏磁腐蚀检测器对管道进行内检测作业已得到广泛认可。目前, 管道漏磁内检测技术通常是在漏磁检测器中布置整圈的探头结构来实现管道的缺陷检测<sup>[1-4]</sup>, 磁铁钢刷均是固定的, 不会根据管道口径的变化而自动缩放。但西气东输、陕京管道、中亚管道、辽河油田等的部分管道由于管道修复、经济性等原因被设计成了变径管道, 导致常规的管道清管

器和检测器没有足够的变径能力对其进行检测。如果开展分段清管、检测作业, 需要改造站场, 添加收发球筒等管道工艺, 作业成本成倍增加。对于变径管道, 若采用常规检测器进行检测, 探头结构会出现探头重叠, 无法满足通过能力要求。尽管国外检测公司研制的变径磁铁探头装置适用于不同变径管道的检测器<sup>[5-17]</sup>, 但对于可变径检测设备变径磁铁探头结构的关键技术

鲜有报道。中国在等径管道内检测装备研发中取得了相应成果<sup>[18-20]</sup>,但在变径管道检测设备方面的研究还较少,达不到工业应用要求。

为满足变径油气管道内检测作业的要求,磁铁探头结构的设计显得尤为重要。为此,采用浮动分块一前一后的磁铁探头设计形式,能够自动调节磁铁钢刷和探头的位置与姿态,可保证在通过不同口径时磁铁钢刷、探头与管壁紧密结合,避免缺陷漏检;同时,能适应在变径管道检测时的通过能力要求,避免由大口径到小口径管道检测时探头的重叠问题。

## 1 设计要求

(1)设计适用于可变径管道特殊结构的新型磁铁钢刷探头机构,使磁铁、铁芯、探头在满足空间结构布置的情况下,同时满足在通过变径管道大跨度过程中对不同管径、不同壁厚管道的磁化饱和能力。

(2)当可变径检测器通过变径管道时,由于管道直径差值较大,磁铁探头机构的伸缩能力要强,设计的探头既要能够解决通过变径管道时的重叠问题,又要保证探头通过不同口径管道时均与管壁紧密贴合,还需保证适应变径管道的全圆周覆盖。

(3)设计的磁铁钢刷探头整体机构能够适应变径管道不同口径时的变形要求,保证其通过能力。

(4)对设计加工组装好的可变径磁铁钢刷探头机构在实验室进行性能测试,然后将该机构组装于可变径管道检测器上在牵拉试验场进行牵拉试验,验证磁铁探头机构在变径管道下的磁化能力和通过能力。

## 2 机械结构设计

### 2.1 变径检测器整机结构

可变径检测设备由驱动节和磁铁探头节两部分组成(图1),将速度控制系统、变径驱动皮碗搭载于驱动节骨架上,将浮动磁铁探头机构搭载在磁铁探头节骨

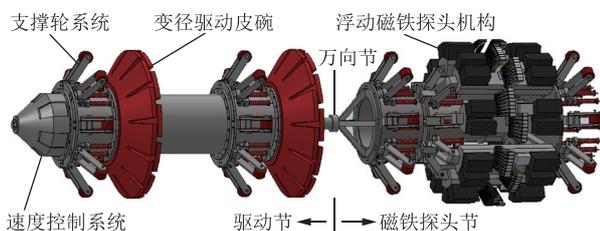
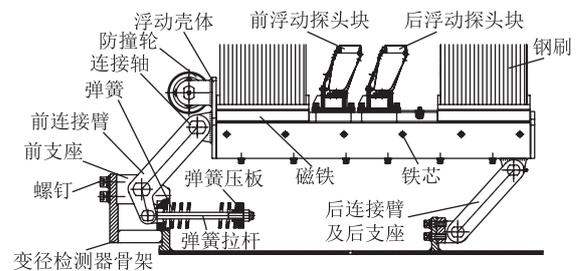


图1 变径检测器整机结构模型图

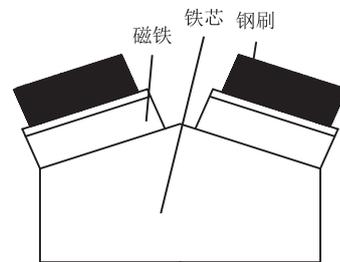
架上,两节设备通过万向节连接。每个骨架搭载相同数量的可压缩支撑轮系统,利用管道输送介质在变径密封皮碗前后产生的压差驱动可变径检测器运行,利用浮动磁铁探头机构完成对管道的磁化饱和和缺陷识别检测,设备各个部件有较强的伸缩能力,能够满足管道口径变化缩放通过的要求。

### 2.2 浮动磁铁钢刷探头块结构

变径检测器的浮动磁铁探头机构由周向分布的若干个浮动磁铁钢刷探头块组成。单块磁铁探头(图2)主要组成部件包括:前支座、前连接臂、弹簧、连接轴、弹簧拉杆、弹簧压板组成的前弹簧连杆机构,后连接臂及后支座组成的后连杆支撑机构,浮动壳体与铁芯组成的浮动磁铁座,“Y”形铁芯磁铁钢刷、前浮动探头块、后浮动探头块等。



(a) 整体结构



(b) “Y”形铁芯磁铁钢刷

图2 浮动磁铁钢刷探头块及零部件结构示意图

磁铁探头机构前端、后端分别通过前弹簧连杆机构、后连杆支撑机构固定在变径检测器的骨架上,浮动磁铁座铁芯上前后端各安装磁铁,磁铁上安装钢刷,铁芯磁铁钢刷呈“Y”形,能够更好地适应管壁圆周变化,浮动探头块安装在铁芯的钢刷之间,在管道轴向方向呈一前一后阶梯形布置。浮动探头安装数量由变径管道的最大内径决定,相邻探头结构上前后阶梯布置距离由变径管道的最小内径决定。40~48 in(1 in=2.54 cm)变径检测器周向上共均匀布置8个浮动磁铁钢刷探头块结构,每个结构上16个探头呈一前一后阶梯形布置,保证磁铁钢刷探头结构在40~48 in变径管道最大管径时圆周达到100%的信号覆盖率。

浮动磁铁钢刷探头机构的工作过程:变径检测设备上安装多个浮动磁铁钢刷探头块,每块都能够根据管道口径的变化上下浮动自适应贴合管道内壁,保证磁路饱和。在大口径管道中,根据探头检测灵敏度、被测管径及管径变化范围确定变径检测器上布置的磁铁钢刷探头块结构及数量,保证圆周 100% 的信号覆盖率;当可变径检测器由大口径管道进入到小口径管道时,通过前弹簧连杆机构和后连杆支撑机构动作,整个浮动磁铁钢刷探头结构沿径向压缩,实现大口径到小口径的径向变形;当进入小口径管道时,由于磁铁块压缩,相邻两排的探头径向也被压缩,但由于探头是一前一后阶梯形布置,部分探头在管道轴向方向发生重叠,但却能够有效避免检测器进入小口径管道中时探头在管道轴向上互相干涉挤压的问题,实现口径不断变化,但探头始终 100% 覆盖管道内壁,同时在弹簧片的作用下,浮动探头可以不同的姿态与管壁良好接触。反之,当可变径检测器由小口径管道进入到大口径管道时,浮动磁铁钢刷探头结构通过前弹簧连杆机构和后连杆支撑机构整体回弹复位,使得钢刷、探头始终与管壁紧密接触,满足缺陷信号完整性的检测要求。

### 3 性能测试

#### 3.1 磁铁探头节的磁化能力

将设计的磁铁探头结构装入可变径检测器,在 40~48 in 的变径管道内使用高斯计进行磁化能力测试,测试不同钢管壁厚的磁化强度。当钢管中的磁化强度达到近饱和(图 3)时,检测器的检测灵敏度和精度即可满足要求。在充分考虑安装空间,且通过能力合适的前提下,测得磁铁钢刷的最大磁化壁厚达到 33 mm,在此最大磁化壁厚时钢管外表面的磁场强度为 8 080 A/m,管外壁磁感应强度为 1.848 T,能够保证变径检测器在变径管道检测的磁化饱和问题,满足检测灵敏度和精度要求。

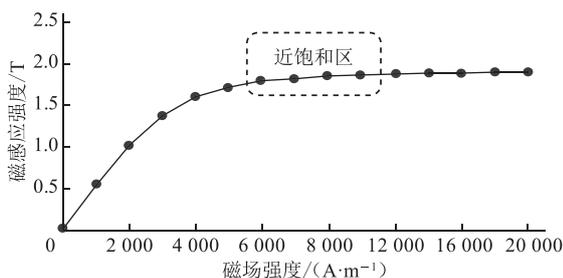


图 3 磁铁探头节磁化能力曲线

#### 3.2 磁铁探头节的机械性能

为验证该磁铁探头节的机械性能,在旋转动态试验台上对磁铁钢刷探头块进行性能测试,通过设置 1~5 m/s 不同的运行速度,验证其在不同速度下探头与管壁的接触状态、机械强度。通过试验验证,磁铁钢刷探头机构在通过焊缝、预设置的小变形时与管壁始终接触良好,通过累计大于 300 km 的运行距离测试,各零部件均能够满足强度要求。

#### 3.3 可变径检测器牵拉试验

通过整机组装,在 40~48 in 变径管道内进行牵拉测试,牵拉管道全长 120.8 m, 共由 11 节管段组成。其中,首尾两端为 48 in 管道,中间放置 40 in 管道,用大小头连接。40 in 管道壁厚分别为 14.6 mm、17.5 mm、20 mm; 48 in 管道壁厚分别为 16 mm、18.4 mm、22.5 mm、27.5 mm。各种壁厚管道上都预制了人工金属损失点。

磁铁探头机构的最大径向压缩量为 181.5 mm,能够满足大跨度的管道口径变化。根据磁铁探头机构分别进入 40~48 in 管道内的贴合情况可见,在压缩范围内,探头始终与管壁贴合良好。当通过变化口径管道时,在各个浮动磁铁钢刷探头块弹簧连杆机构的作用下,钢刷、探头与管壁始终紧密接触。其结果表明,牵拉试验数据质量良好,能有效拾取大、小口径管道上预制缺陷的信号(图 4~图 6)。

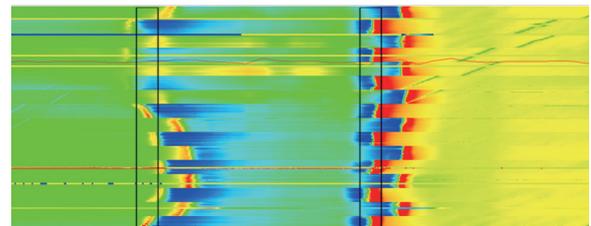
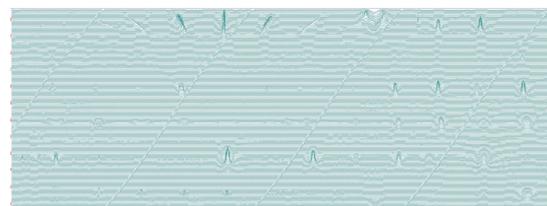
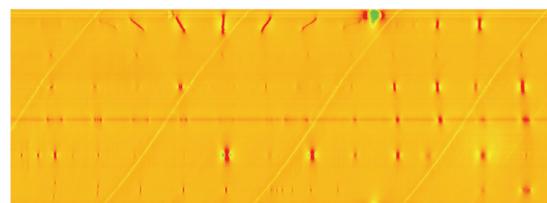


图 4 变径检测器经过变径大小头时的信号彩图

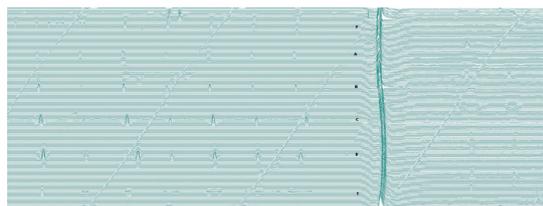


(a) 48 in 管道缺陷识别曲线

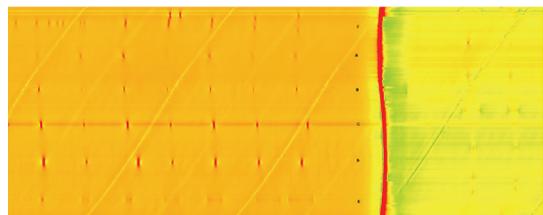


(b) 48 in 管道缺陷识别彩图

图 5 40~80 in 变径检测器通过 48 in 管道时的缺陷识别信号图



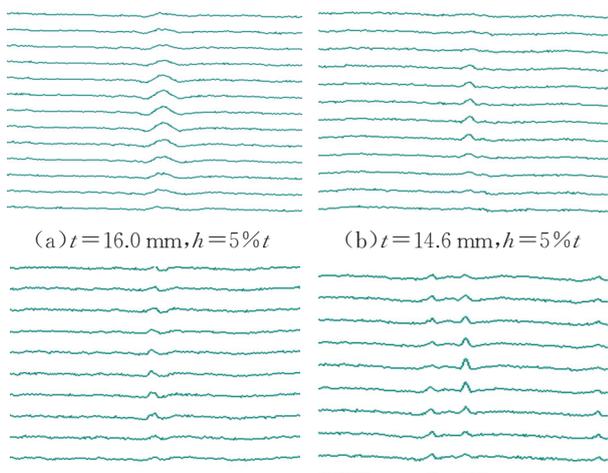
(a) 40 in 管道缺陷识别曲线图



(b) 40 in 管道缺陷识别彩图

图 6 40~48 in 变径检测器通过 40 in 管道时的缺陷识别信号图

在牵拉试验中,对于上述变径管道上不同壁厚缺陷深度  $h \geq 5\%t$  ( $t$  为管材壁厚) 的预制缺陷,探头均能清晰拾取信号(图 7a、图 7b)。在壁厚 16 mm 的管道上,对于面积很小的缺陷,如 5 mm×5 mm 和 8 mm×8 mm 的缺陷也有明显反应,说明检测器对于小面积缺陷有很好的识别效果(图 7c、图 7d)。



(c) 缺陷 5 mm×5 mm,  $h=30\%t$  (d) 缺陷 8 mm×8 mm,  $h=30\%t$

图 7 变径检测器检测的不同壁厚典型缺陷识别信号结果图

检测概率为检测器实际探测到缺陷个数与预期探测缺陷个数之比。在牵拉试验中,管道上预制缺陷检测概率超过了 90%。统计不同形状预制缺陷并量化缺陷精度,得到 40~48 in 变径检测器磁铁探头结构的检测阈值、长度精度、宽度精度、深度精度(表 1)。

依据 GB/T 27699—2011《钢制管道内检测技术规范》,通过牵拉试验验证,40~48 in 可变径检测器的磁铁钢刷探头结构能满足相关技术指标和精度指标的要求。

表 1 变径检测器在牵拉试验中检测不同形状缺陷的精度统计结果

缺陷类型	检测阈值 (90%检测概率)	检测精度(80%可信度)		
		长度	宽度	深度
普通金属损失 (4A×4A)	5% $t$	±10 mm	±10 mm	±10% $t$
点蚀 (2A×2A)	8% $t$	±10 mm	±10 mm	±10% $t$
轴向沟槽 (4A×2A)	15% $t$	±15 mm	±12 mm	±15% $t$
环向沟槽 (2A×4A)	10% $t$	±12 mm	±15 mm	±10% $t$

注:  $A$  是与壁厚相关的几何参数,当壁厚  $t < 10$  mm 时,  $A = 10$  mm; 当  $t \geq 10$  mm 时,  $A = t$ 。

### 4 结束语

国外已经多次将含有变径磁铁探头的可变径检测设备应用于油气变径管道的现场检测中,中国的可变径检测设备仍处在结构设计、试验调试、经验积累阶段。针对变径管道检测的特殊情况,设计了浮动磁铁钢刷探头块结构,在适应苛刻空间结构布置的情况下,各零部件的机械强度、磁铁钢刷的磁化强度、整机结构的通过能力及缺陷识别能力经试验验证均满足现场应用要求。40~48 in 变径检测设备磁铁探头结构的试验表明了该结构的可靠性,为下一步工业现场应用奠定了坚实的基础,对于打破国外长期可变径检测技术的垄断地位,为中国自主研发不同口径系列的可变径检测装备并实现系列化工业现场应用有重要的技术指导和推动作用。

### 参考文献:

[1] 胡铁华,郭静波. 油气管道内检测新技术与装备的开发及应用[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 118-124.  
 HU T H, GUO J B. Development and application of new technologies and equipments for in-line pipeline inspection[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 118-124.

[2] 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.

[3] 洪险峰,姜晓红,付桂英,郑景娜,肖英杰. 一种新型投产前管道

- 智能测径检测器[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 61-64.
- HONG X F, JIANG X H, FU G Y, ZHENG J N, XIAO Y J. A new smart calibre detector for pre-commissioning pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2014, 33(1): 61-64.
- [4] 白港生, 徐志, 吴楠勋. 三轴高清晰度漏磁腐蚀检测器的研制[J]. 石油机械, 2014, 42(10): 103-106.
- BAI G S, XU Z, WU N X. Development of triaxial high definition magnetic flux leakage corrosion detector[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(10): 103-106.
- [5] QUARINI G, AINSLIE E, HERBERT M, DEANS T, ASH D, RHYS D, et al. Investigation and development of an innovative pigging technique for the water-supply industry[J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 2010, 224(2): 79-89.
- [6] Rosen. Multi-diameter in-line inspection[EB/OL]. [2018-04-23]. [http://221.179.130.209:83/1Q2W3E4R5T6Y7U8I9O0P1Z2X3C4V5B/www.roseninspection.net/NR/rdonlyres/2332E96B-1632-4AD7-A57F-A034D627F5D1/2823/MultiDiameter\\_SF\\_E\\_print\\_201112.pdf](http://221.179.130.209:83/1Q2W3E4R5T6Y7U8I9O0P1Z2X3C4V5B/www.roseninspection.net/NR/rdonlyres/2332E96B-1632-4AD7-A57F-A034D627F5D1/2823/MultiDiameter_SF_E_print_201112.pdf).
- [7] MIRSHAMSI M, RAFEEYAN M. Dynamic analysis of pig through two and three dimensional gas pipeline[J]. Journal of Applied Fluid Mechanics, 2015, 8(1): 43-54.
- [8] WHITNEY C, QUICK E, BLOUNT M, BAIN A. Multi-diameter inline tool inspects the previously unpiggable[J]. Pipeline & Gas Journal, 2010, 237(8): 46-50.
- [9] BOTROS K K, GOLSHAN H. Field validation of a dynamic model for an MFL ILI tool in gas pipelines[C]. Calgary: 2010 8th International Pipeline Conference, 2010: 325-336.
- [10] THOMAS B, HUBERT L. Successful corrosion inspection of two multi-diameter pipelines with purpose-built tools[J]. Pipeline & Gas Journal, 2007, 234(8): 36-38.
- [11] SOLGHAR A A, DAVOUDIAN M. Analysis of transient PIG motion in natural gas pipeline[J]. Mechanics & Industry, 2013, 13(5): 293-300.
- [12] KSRL D. Multi-diameter pigging-factors affecting the design and selection of pigging tools for multi-diameter pipelines[EB/OL]. [2018-04-23]. <http://www.ppsa-online.com/papers/08-Aberdeen/2008-02-PE.pdf>.
- [13] MIRSHAMSI M, RAFEEYAN M. Dynamic analysis and simulation of long pig in gas pipeline[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 23: 294-303.
- [14] CHOQUETTE J J, CORNU S, EISEIFY M, KARÉ R. Understanding pipeline strain conditions-case studies between ILI axial and ILI bending measurement technique[C]. Calgary: 2018 12th International Pipeline Conference, 2018: IPC2018-78577.
- [15] LAYOUNI M, HAMDI M S, TAHAR S. Detection and sizing of metal-loss defects in oil and gas pipelines using pattern adapted wavelets and machine learning[J]. Applied soft Computing, 2017, 52(3): 247-261.
- [16] USAREK Z, WARNKE K. Inspection of gas pipelines using magnetic flux leakage technology[J]. Advances in Materials Science, 2017, 17(3): 37-45.
- [17] NARANG R, CHANDRASEKARAN K, GUPTA A. Experimental investigation and simulation of magnetic flux leakage from metal loss defects[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2017, 17(3): 595-601.
- [18] 徐小云, 颜国正, 丁国清, 颜德田. 管道机器人适应不同管径的三种调节机构的比较[J]. 光学精密工程, 2004, 12(1): 60-65.
- XU X Y, YAN G Z, DING G Q, YAN D T. Comparative study of three regulating mechanisms for pipeline robot to suit different pipe diameters[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(1): 60-65.
- [19] 武燕, 王才东, 王新杰, 牛志军. 可变径管道机器人系统的设计与研究[J]. 矿山机械, 2013, 41(4): 124-127.
- WU Y, WANG C D, WANG X J, NIU Z J. Design and research on variable-diametered pipeline robots[J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(4): 124-127.
- [20] 张士华. 可变径海底石油管道内部检测系统的研制[J]. 中国海洋平台, 2005, 20(1): 35-38.
- ZHANG S H. The inner detecting system of seabed oil pipe which varies in diameter[J]. China Offshore Platform, 2005, 20(1): 35-38.
- (收稿日期: 2018-04-24; 修回日期: 2021-02-26; 编辑: 王雪莉)

---

**作者简介:** 曾辉, 男, 1986年生, 工程师, 2018年博士毕业于机械科学研究总院机械设计及理论专业, 现主要从事油气管道检测装备的研究工作。地址: 河北省廊坊市广阳区爱民东道166号, 065000。电话: 18632669957。Email: nyzenghui@126.com