

Doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.09.007

流体驱动智能管道内检测机器人关键技术及应用

李志宏, 张青斌, 于磊

(安徽省特种设备检测院, 合肥 230051)

摘要: 使用以管道自身流体驱动并搭载漏磁检测设备的管道内部机器人进行长距离输送管道的检测是一种重要且有效的手段。介绍了管道漏磁内检测的原理、缺陷漏磁场的算法及关乎缺陷检出效果等在内的内检测机器人驱动力, 通过适应性、速度控制和漏磁检测模块设计, 并将上述项目研究成果运用到实际工业实践。结果表明: 本项目开发的内检测机器人其检测适应能力更强, 能进一步提高缺陷的检出灵敏度和分辨力, 可在行业内推广应用。

关键词: 漏磁检测; 机器人; 缺陷; 应用

中图分类号: TB4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1744(2022)09-0046-06

Key Technology and Application of Fluid Driven Intelligent Pipeline Inspection Robot

LI Zhihong, ZHANG Qingbin, YU Lei

(Anhui Special Equipment Inspection Institute, Hefei 230051, China)

Abstract: It is an important and effective means to use a pipeline internal robot driven by the pipeline's own fluid and equipped with magnetic flux leakage detection equipment to carry out long-distance transmission pipeline detection. The principle of pipeline magnetic flux leakage internal detection, algorithm of defect magnetic flux leakage and driving force of internal detection robot were introduced. Through adaptability, speed control and magnetic flux leakage detection module design related to defect detection effect, the results of the above project were applied to practical industrial practice. The results show that the internal detection robot developed in this project has stronger detection adaptability and can further improve the detection sensitivity and resolution of defects, which can be popularized and applied in the industry.

Key words: magnetic flux leakage detection; robot; defects; application

管道长距离运输是随着石油工业的发展而产生的一种油气资源的高效运输方式。随着我国经济社会对油气资源需求的不断增长, 长输管道在我国战略和经济地位愈发重要。目前我国已建成原油管道 3.1 万千米, 成品油管道 2.9 万千米, 天然气管道

8.2 万千米, 油气管道总长度超过 14 万千米, 近年来长距离输送管道的建设还在迅猛发展, 以高钢级、大口径、高压力、大流量为主^[1-2]。由于管道输送的石油和天然气等介质具有易燃易爆等特性, 一旦泄漏可能会引起非常严重的后果, 对公共安全和自然

收稿日期: 2022-05-13

基金项目: 安徽省科技重大专项项目(202103a05020010)

Fund: Supported by Major Science and Technology Special Project of Anhui Province(202103a05020010)

作者简介: 李志宏(1966—), 女, 硕士, 正高级工程师, 承压类特种设备高级检验师, 主要从事承压类特种设备检验、材料、焊接等方面的检验检测及研究工作。

引用格式: 李志宏, 张青斌, 于磊. 流体驱动智能管道内检测机器人关键技术及应用[J]. 有色金属工程, 2022, 12(9): 46-51.

LI Zhihong, ZHANG Qingbin, YU Lei. Key technology and application of fluid driven intelligent pipeline inspection robot[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(9): 46-51.

环境造成极大的威胁,同时造成巨额经济损失。由于历史原因,国内油气管道在设计、管材和施工方面相比西方发达国家较为落后,事故发生率要高于国外。加之管道服役条件恶劣,经常产生各种缺陷和腐蚀现象,由施工或其它人为因素造成管道机械损伤、由腐蚀造成管道蚀坑等缺陷,随着管道服役时间的增加,管道安全状况会逐步恶化,形成巨大的公共安全隐患。使用管道内检测机器人对油气管道进行定期检测是排除管道安全隐患有效的方法之一。欧美国家最早研究管道检测机器人,如美国研发的ROVER系列结构紧凑型机器人,应用模块化设计理念,能够适应直径为100~1500 mm的管道;德国IPEK系列机器人,适应管道口径为150~1500 mm,具有驱动力充足等优点;国内对于管道检测机器人的研究起步较晚,上海交通大学研究了一种煤气管道检测机器人,主要适用直径为500 mm,但该机器人存在过弯能力较差问题;北京交通大学研究了一种小口径聚乙烯燃气管道检测机器人,主要集中在低压力领域;武汉大学研究了一种针对直径为250~350 mm的石油天然气管道检测机器人,具有良好的过弯能力,但存在难以长距离驱动情况。综上,管道检测机器人的相关产品主要被欧美发达国家所垄断,管道检测机器人设备的核心技术处于被严密防护的状态,是我国长输管道内检测领域的技术短板,存在可能被“卡脖子”的风险。同时,使用国外管道检测机器人检测作为我国能源大动脉的长输油气管道,会完全暴露重要管道的位置走向和管道的安全运行状况。基于对管道油气运输的公共安全、国家安全、科技安全和管道检测服务成本等多方面的考量,研发我国具有自主知识产权和达到国际先进水平的管道检测机器人愈发重要,应大力发展管道检测机器人研究^[3-4]。

管道内检测作为管道完整性管理中的关键一环,是目前排除长输油气管道安全隐患的有效办法,是国内外管道企业常用的缺陷检测方法^[5-7]。管道检测机器人是一种管道内检测设备,可以搭载漏磁检测等无损检测设备及一系列配套装备行走于管道内部,实时检测并记录金属管体、三通及阀门上的缺陷,能够对缺陷进行识别、定位及量化,为管道事故预防、维护修理提供科学依据^[8-9]。管道检测机器人融合了多种智能技术,是一套复杂精密的系统。

本文主要针对长输油气管道内检测领域中存在的问题,研究管道内检测机器人关键结构、运动特性、速度控制等,以期研发出适用于我国长距离输送油气管道缺陷检测、提高缺陷检测灵敏度的高性能机器人。

1 管道漏磁内检测原理

管道漏磁内检测是以漏磁为原理在管道内部进行的检测。管道漏磁内检测原理见图1。图1中用永久磁铁作为磁化单元对铁磁性管道进行磁化,若管道材料均质、连续,此时磁力线应均匀分布于材料内部,形成的磁通将平行于材料表面、不存在泄露。若管道材料非均质、不连续、存在缺陷,会导致磁路中的磁通产生畸变,磁力线将发生弯曲变化,部分磁力线在材料内部,部分磁力线会绕过缺陷而泄露到材料表面,然后通过空气再次进入材料,形成所谓漏磁场,应用布局在磁极中间的磁场传感器检测泄漏磁场信号,从而获得相应缺陷的检测数据实现检测。

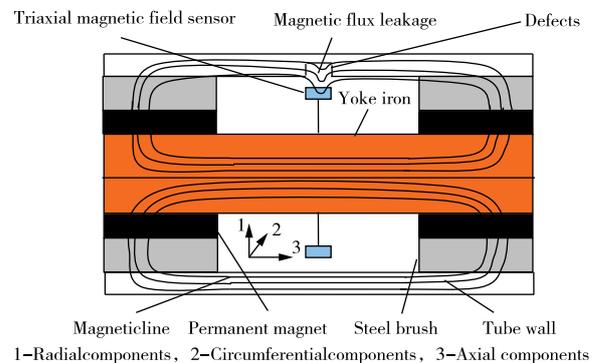


图1 管道漏磁内检测原理

Fig. 1 Principle of magnetic flux leakage internal detection of pipeline

2 管道内检测机器人研究内容

2.1 缺陷漏磁场计算

漏磁场计算方法通常有两种:解析法、有限元法。

1) 解析法

解析法是应用解析方程式对所建立的数学模型进行求解。在解析求解的过程中添加精确的初始及边界条件是求得准确解析解的重要环节。关于漏磁场简单的解析方程,可用磁偶极子模型表示,见图2。

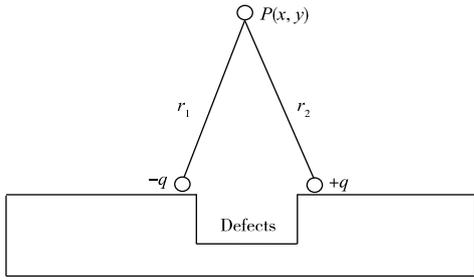


图2 磁偶极子模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of magnetic dipole model

两个异性磁偶极子分别位于缺陷的两端,磁荷密度分别为 $-q$ 和 $+q$,则空间某一点 $P(x, y)$ 处磁感应强度为:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 = \frac{-q}{4\pi\mu_0 r_1^3} \vec{r}_1 + \frac{+q}{4\pi\mu_0 r_2^3} \vec{r}_2 \quad (1)$$

式中, μ_0 为真空磁导率。

磁偶极子模型较好地解决了漏磁场的空间分布问题。其中心思想是对实际磁场中不同类型的模型进行等效建模。该模型是对复杂磁问题进行简化后得出的,对于非线性、具有复杂形状以及特殊边界的缺陷漏磁场,该模型则难以适用。

2) 有限元法

随着计算机的发展,有限元法得到了应用,它能求解一些数学解析法求解不了的复杂模型问题,而且呈现的结果形象逼真。目前有限元法已广泛用于力学、光学、磁学、声学、流体输送等专业,已成为研究人员进行科学研究、工程分析的重要手段与工具。

根据以麦克斯韦方程组表征的磁场理论核心,在相对磁导率为 μ 的介质中,密度为 $\vec{\mathbf{J}}$ 的电流产生磁感应强度为 \mathbf{B} 的磁场表达为:

$$\nabla \times \vec{\mathbf{H}} = \vec{\mathbf{J}} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{\mathbf{B}} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu \vec{\mathbf{H}} \quad (4)$$

分析物理场参数变化时需要设立相应边界条件,在该磁场中法线与切线方向的磁感应强度及磁场强度认为均连续,即:

$$\mathbf{B}_{1n} = \mathbf{B}_{2n}, \mathbf{H}_{1t} = \mathbf{H}_{2t} \quad (5)$$

引入矢量磁位 \mathbf{A} ,使得:

$$\nabla \times \vec{\mathbf{A}} = \vec{\mathbf{B}} \quad (6)$$

由式(2)、(3)得方程:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{\mathbf{A}} \right) = \vec{\mathbf{J}} \quad (7)$$

在管道实际检测中,建立磁场的2D轴对称模

型,其矢量磁位满足库仑规范且只有唯一分量。

根据矢量恒等式

$$\nabla \times \nabla \times \vec{\mathbf{A}} = \nabla(\nabla \cdot \vec{\mathbf{A}}) - \nabla^2 \vec{\mathbf{A}} \quad (8)$$

则方程(7)可以写成:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{\mathbf{A}} = -\vec{\mathbf{J}} \quad (9)$$

采用圆柱坐标系 (r, θ, z) ,对于轴对称情况方程(7)可为:

$$\frac{1}{\mu} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \vec{\mathbf{A}}) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial z} \right) \right\} = -\vec{\mathbf{J}} \quad (10)$$

式中,矢量磁位 $\vec{\mathbf{A}}$ 、激励电流密度 $\vec{\mathbf{J}}$ 均为标量。

由式(6)可求得磁感应强度 $\vec{\mathbf{B}}$:

$$\mathbf{B}_r = -\frac{\partial \vec{\mathbf{A}}}{\partial z} \quad (11)$$

$$\mathbf{B}_z = \frac{1}{r} \frac{\partial (r \vec{\mathbf{A}})}{\partial r} \quad (12)$$

式中, \mathbf{B}_r 是 $\vec{\mathbf{B}}$ 的径向分量, \mathbf{B}_z 是 $\vec{\mathbf{B}}$ 的轴向分量。

通过式(11)、式(12)可对模型进行相应稳态分析。

有限元法可以清晰地呈现缺陷处漏磁场,这对于漏磁检测传感器提离值、缺陷深度估算有指导作用,有限元法还能求解磁势方程,识别检测装置的运动速度对测试信号的影响程度等。

2.2 管道机器人流体驱动力系统研究

管道机器人在管道内的平稳运行是完成检测的重要前提条件,由于不停车检测,管道内部介质的压缩比特性增加了设备平稳运行的难度。本项目研究了管道机器人在上坡、下坡、弯头转弯和跨越障碍时的驱动力影响因素和运动状况,建立各种不同运动状况下管道机器人的运动方程、驱动力压差计算方法和内摩擦阻力方程,优化管道机器人的驱动结构材料、尺寸和参数。确定机器人管内运动时受力与运动参数之间的关系,通过分析运动方程研究管道机器人在线检测的运动状态。建立管道机器人弹性体驱动皮碗的动力学模型,分析驱动皮碗底部刚度变化对机器人运行速度的影响。分析计算管道机器人驱动皮碗过盈量和管道内壁挤压及其重力变形产生的压紧力,通过计算获取管道机器人流体驱动力和管道内摩擦阻力。

2.3 管道机器人蛇形模块化结构及可变径支撑轮设计

由于早期管道建设的管径不统一、管道主线和支线切换、地质运动及人为破坏等客观因素,长输油

气管道的管径变化较为常见,因此管道机器人必须具备良好的弯道通过能力、管径变化适应能力及行进速度控制能力。本项目研究开发新型多节串联管道机器人蛇形模块化结构,以及一种同时具有主动及被动调节的智能调节方法的可变径支撑轮结构,当管径变化较小时可由被动调节单元自行调节适应,当管径变化较大时,由电机启动实现大范围调整,实现管道机器人对管道变化的快速响应和自动调整,使得其具备智能化的管径适应和通过能力。根据管道直径、弯曲率及弯道角度等参数设计优化管道机器人最大通过长度,合理设计管道机器人模块之间的连接结构,既能保证其弯道通过性能,又能搭载足够多功能模块。

2.4 管道机器人调速机构及智能速度控制模块设计

考虑到采样精度、数据存储时效和行进速度等因素,管道机器人搭载的漏磁传感器采样频率在设定后的工作过程中一般固定不变,速度过快导致缺陷漏检,而速度过慢导致数据冗余和效率低下,因此只有管道机器人保持匀速前进才能保证传感器有效的检测每一段管壁。本项目对管道机器人的调速机构及速度控制模块进行研究,实现其匀速前进的目标。开发出一套控制算法,通过智能调节管道机器人前后的流体压力差,改变其驱动力大小,智能化控制管道机器人在不同情况下的减速和加速,确保管道机器人行进速度在一定范围内。当管道机器人正常运动时,节流孔适当打开;当管道机器人速度突增时,通过电机驱动动盘使得节流孔开大,降低管道机器人两端的压力差实现降速;当管道机器人速度减小时,通过速度控制算法驱动电机动盘反向转动,关闭节流孔,增大两端流体压差,提高机器人运动速度。

2.5 管道机器人漏磁检测模块设计

为了提高管道缺陷识别率和检测精度,同时考虑降低速度变化对检测精度的影响。本项目研究管道机器人运行速度对于漏磁检测的影响,确定长输油气管道漏磁检测装置的最佳运行速度范围;研究磁化器和传感器提高值分别与漏磁信号的关系,为智能管道机器人检测系统研究确定合理的提高值,提高检测精度。项目设计使用浮动磁环使得管道机器人具有良好的弯管通过性和管径变化适应能力;采用永磁铁、衬铁和钢刷,将管道壁面饱和磁化并产

生磁通;磁敏探头用于检测漏磁通,其核心采用霍尔元件,前级放大电路由不导磁钢组成,高导磁耐磨材料覆盖霍尔元件以防止管壁对元件的损伤;数据采集单元由模数转换元件、现场可编程门阵列、固态硬盘组成,完成对漏磁检测数据的采样和存储等功能;同时采用周向和轴向磁化方式,达到对周向和轴向分布缺陷检测的高灵敏度要求。

3 工业应用

管道内检测机器人可对管道变形、裂纹、内外腐蚀、损伤、焊缝缺陷、管道结构特征(如焊缝布置、三通、斜接)等进行检测,依托本项目研发的检测机器人,对长输天然气管道工程进行了实际运用,经开挖验证后发现检测效率高、缺陷检测精度高、定位准确。

3.1 环焊缝缺陷

某天然气管道内检测后发现存在的环焊缝未焊透,未焊透长度超过 200 mm,见图 3。该处焊缝缺陷位于 1 m 短管上游焊缝,该短管与上游钢管之间存在一定角度斜接,说明在施工时存在强力组对焊接现象。后经过及时开挖修复,消除了此处安全隐患。



图3 管道环焊缝未焊透缺陷

Fig. 3 Incomplete penetration defect of pipeline girth weld

3.2 管体挖补

某天然气管道内检测后发现存在管体挖补。开挖后发现挖补尺寸为 300 mm×300 mm,挖补四周焊缝均存在不同程度的未焊透现象。挖补处宏观及内检测信号见图 4。

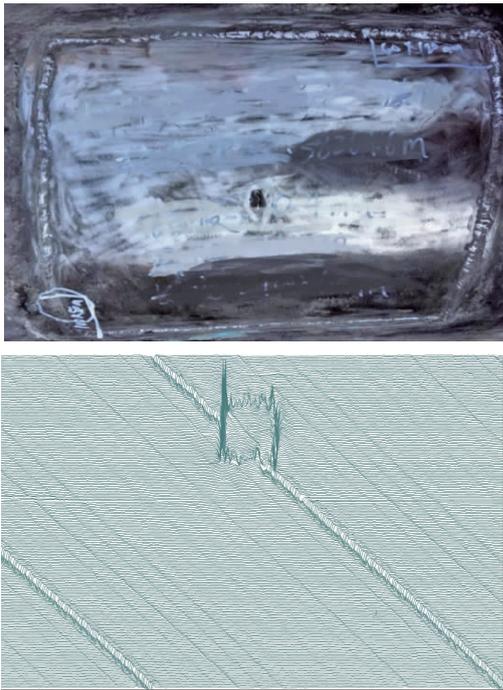


图4 管体挖补

Fig. 4 Pipe body patching

3.3 弯头修补

某天然气管道内检测后发现弯头存在修补,弯头修补处及内检测信号见图5。



图5 弯头修补

Fig. 5 Elbow repair

3.4 第三方施工破坏

某天然气管道内检测后发现第三方施工造成的防腐层及管体金属损失。金属损失深度最深达到32%管壁厚度,金属损失面积为 $15\text{ mm}\times 70\text{ mm}$,见图6。



图6 防腐层及管体金属损失

Fig. 6 Loss of anticorrosive coating and pipe metal

3.5 管体裂纹

某天然气管道内检测后发现存在管体龟状近表面裂纹。裂纹面积为 $25\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,见图7。



图7 管体龟状裂纹

Fig. 7 Turtle crack of pipe body

4 结论与展望

1)本项目开发的内检测机器人其检测适应能力更强,能进一步提高缺陷的检出灵敏度和分辨力。经开挖验证后发现缺陷信号特征与实际缺陷状态高度吻合,可在行业内推广应用。

2)对于内检测机器人自身结构以及与管道本体的交互研究,确定内检测机器人最佳运行速度应始终作为研究方向;在内检测数据后处理环节,方便、可靠地识别缺陷信号与实际缺陷之间的对应关系,可作为下一步研究方向。

参考文献:

- [1] 郑洪龙,黄维和. 油气管道及储运设施安全保障技术发展现状及展望[J]. 油气储运,2017,32(1):1-6.
ZHENG Honglong, HUANG Weihe. Development status and prospect of safety assurance technology for oil and gas pipelines and storage and transportation facilities[J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2017,32(1):1-6.
- [2] 付大为,马强,郭騫,等. $\Phi 1016$ 油气管道三维漏磁/动磁内检测设备工业示范应用[J]. 机电产品开发与创新,2021,34(1):80-83.
FU Dawei, MA Qiang, GUO Xian, et al. $\Phi 1016$ oil and gas pipeline of 3D magnetic flux leakage/dynamic magnetic internal detection equipment industrial demonstration application [J]. Electromechanical product development and innovation, 2021, 34(1): 80-83.
- [3] ZHANG H L, SHA S Y, WILLIS C, et al. Feasibility study of pinhole inspection via magnetic flux leakage and hydrostaic testing in oil & gas pipelines[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021,1043(2):22-53.
- [4] 程航,喻九阳,戴耀南,等. 油气管道检测机器人技术现状及展望[J]. 武汉工程大学学报,2021,43(3):324-333.
CHENG Hang, YU Jiuyang, DAI Yaonan, et al. Current situation and prospect of oil and gas pipeline inspection robot technology[J]. Journal of Wuhan University of Engineering, 2021,43(3):324-333.
- [5] 杨理践,耿浩,高松巍. 长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.
YANG Lijian, GENG Hao, GAO Songwei. Magnetic flux leakage internal detection technology for long-distance oil and gas pipeline [J]. Journal of instrumentation, 2016,37(8):1736-1746.
- [6] 诸海博,徐晓甲,宋华东,等. 管道内检测技术及系统发展综述[J]. 管道技术与设备,2018(3):25-28.
ZHU Haibo, XU Xiaojia, SONG Huadong, et al. Overview of pipeline internal inspection technology and system development [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2018(3):25-28.
- [7] 卢泓方,吴晓南,ISELEY T,等. 国外天然气管道检测技术现状及启示[J]. 天然气工业,2018,38(2):103-111.
LU Hongfang, WU Xiaonan, ISELEY T, et al. Current situation and enlightenment of foreign natural gas pipeline detection technology [J]. Natural Gas Industry, 2018,38(2):103-111.
- [8] 陈胜森,刘卫华,王联伟. 集团型企业管道完整性管理体系建设[J]. 油气储运,2019,38(1):32-36.
CHEN Shengsen, LIU Weihua, WANG Lianwei. Construction of pipeline integrity management system in group enterprises [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2019,38(1):32-36.
- [9] 阙永彬. 长输油气管道内检测数据的质量控制[J]. 化工管理,2015,36(15):159-160.
QUE Yongbin. Quality control of inspection data in long-distance oil and gas pipeline [J]. Chemical Management, 2015,36(15):159-160.

(编辑 金开生)