

Analysis of the Motion of the Pipeline Detection Robot in the Vertical Gas Transmission Pipeline

Jian Du¹ Chenhao Liu² Jiali Deng³

1. Shandong Province Natural Gas Pipeline Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250000, China

2. Sinopec Yantai Longkou LNG Co., Ltd., Yantai, Shandong, 264000, China

3. Shandong Shihua Natural Gas Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266100, China

Abstract

With the continuous progress of modern science and technology, the pipeline detection robot has gradually entered the industrial field. For long pipeline, the conventional monitoring is not only time-consuming and laborious, but also poor effect, which will also bring great safety risks. The advent of the pipeline detection robot has opened up a brand-new way for the study of this problem. This new mechanical device can move freely in the shaft, and use high definition cameras and sensors installed on the pipeline to collect and transmit the image data in the pipeline, providing necessary information support for pipeline maintenance and management work. The application of these methods can not only effectively improve the accuracy and efficiency of inspection, but also greatly reduce the intensity and safety of manual inspection work, which is a major innovation of pipeline inspection. Based on this, this paper analyzes the movement of the robot in the vertical gas pipeline and puts forward several measures for reference.

Keywords

pipeline detection; detection robot; vertical gas transmission; gas transmission pipeline

管道检测机器人在垂直输气管道的运动分析

杜建¹ 刘晨昊² 邓佳丽³

1. 山东省天然气管道有限责任公司, 中国·山东, 济南, 250000

2. 中石化烟台龙口液化天然气有限公司, 中国·山东 烟台 264000

3. 山东实华天然气有限公司, 中国·山东 青岛 266100

摘要

随着现代科学技术的不断进步, 管道检测机器人已经逐渐走入了工业领域。对于长输管道, 采用常规方法进行监测不但费时费力, 而且效果差, 还会带来很大的安全隐患。而管道探测机器人的问世为该问题的研究开辟了一条崭新的途径。这种新型的机械装置可以在竖井中自由移动, 利用安装在管道上的高清晰度摄像机、感应器等设备, 将管道内的影像资料进行采集与传送, 为管道维修与管理工作提供必要的信息支撑。这些方法的应用, 不但可以有效提升检验的精度与效率, 而且大大减少了手工检验工作的强度与安全性, 是管道检验的一项重大创新。基于此, 论文分析了管道检测机器人在垂直输气管道的运动, 提出了几点措施, 以供参考。

关键词

管道检测; 检测机器人; 垂直输气; 输气管道

1 引言

管道检测机器人是一种新型的自动化设备。在长输管道中, 作业人员面临着更为复杂、更为严苛的工作条件。比如, 管道的高度、压力、温度等都会对其操作造成一定影响。但也正因为如此, 才促使管道探测机器人取得持续的突破与革新。当前, 管道检测机器人技术具有更为高级的导航与操

控能力, 使其可以在竖直管道上维持稳定而精确的轨道。此外, 管道检测机器人技术还配备有更多类型的传感器及探测装置, 可实现管道内多个参量的在线监控与分析, 为管道维修与管理工作提供更为完整、深度的资讯支撑^[1]。

2 输气管道机器人研究现状及市场调研

目前, 根据能量供应的不同, 管道机器人可划分为无缆型和拖曳型两类。根据其机构的构造及移动模式, 可分为轮式、履带式、轮腿式、螺旋式、流体式、蠕动式以及仿生型等。

【作者简介】杜建(1984-), 男, 中国山东滕州人, 硕士, 经济师, 从事长输天然气管道运营、管道完整性管理研究。

2.1 轮式

轮式管道机器人采用车轮来完成行走，电动机带动车轮通过管道完成移动。在管道中，每一个车轮可以单独驱动，并通过转速差异来完成各个动作，从而适应不同的直线行驶、转弯情况。其特点是灵活性高，动作速度调整容易，便于装载和检测设备。

2.2 履带式

与其他类型的管道机器人相比，履带式管道机器人的构造比较复杂。该传动装置具有大的工作表面、摩擦系数和良好的传动性能。其越障性能好，操作柔性差，转弯能力弱，控制困难，适用于大口径管道。

2.3 轮腿式

轮腿式机器人构造更加复杂，是一种以 360° 角均匀布置在空间中的多支承机器人，通过若干轮腿的交换支撑控制机器人本体前进的爬行者。其支承结构特殊，拉力大，机动灵活，但跨越障碍能力差，一般只适合大直径管道。

2.4 螺旋式

螺旋式驱动机器人的结构和轮腿式机器人类似，其前端与末端构成螺旋传动装置，机器人在管内壁间作持续螺旋运动，使其沿管道轴线方向作直线运动。其行走轨迹近似于螺旋形，转弯性能更好，但通常螺旋管机器人为了满足工作条件，都会安装导轮，从而降低其稳定性能。由于传动轮与机体之间呈一定的夹角分布，因此，这类机器人的牵引能力很小^[2]。

3 机器人运动特性分析

由于管道巡检机器人的作业场所是在城镇中铺设的管道，作业条件是管道的垂直方向和横向转向，因此，针对作业条件下管道巡检机器人通行问题，需重点研究管道的几何约束与越障性能。管道机器人在弯曲过程中需要综合考虑几何参数，将管道机器人简化为圆柱，那么长度为 l ，宽度为 d ，管子半径为 D ，弯曲半径为 R 。根据极限条件，有两种情形可以发生，比如，机器人的长度太长，或者机器人的宽度太宽。

考虑到用于输气管道的DN100管径最小为95mm，以及管道机器人穿越管道时的数学约束条件，得出了在各种回转半径下，其体宽与最大体长的对应关系。管道机器人的主体长度为130mm，主体直径70mm，能够达到对弯管尺寸的约束。数值分析显示，论文所提出之机器人可顺利穿越DN100管道，其半径为95mm左右。管道因其焊接技术尚不完善和管道之间的界面连接而形成的障碍，若机器人不具备足够的跨越障碍能力，将极大地制约其在管道中的工作，因此，在管道中进行跨越障碍的研究是非常必要的。在此基础上，需将所有障碍看作是均匀的、对称的，假定各车轮在遭遇不同障碍时的工作状况是一致的，那么仅针对单个车轮进行研究，并绘制其在遭遇障碍时的受理解析曲线。在垂直管道中，由于重力的影响，机器人的运动状态将受到明显的

挑战。机器人的自重将明显影响设备的运行速度，尤其是在向下运行时，机器人可能会超速运行，从而影响检测数据的质量。为了解决这个问题，可以利用动量守恒定律建立机器人前后端气体的压差增量与机器人运行速度增量间的关系式，并据此分析机器人在垂直管道内的运动特性^[3]。

4 管道检测机器人在垂直输气管道的运动系统设计

4.1 控制系统功能分析

输气管道机器人的控制系统主要对驱动电机及变径电机进行控制，并为之配套通信装置，使其能够及时地将管道中的工况信息传递给用户。系统控制系统设计原理如图1所示。

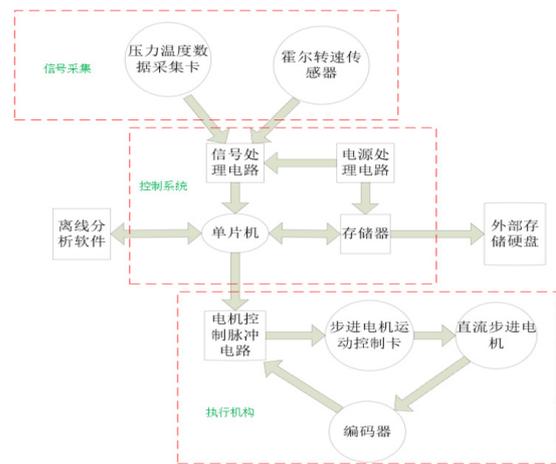


图1 控制系统设计原理框图

传动与控制：用于控制传动电动机。输气管机器人在工作过程中，其移动方式是由四台驱动电机驱动的，而对驱动电机的控制就是对驱动轮的控制。4个驱动电机，每两个为一组，两个电机转速一致，转动方向反向，为了确保电动机的移动不会互相干扰，因此，在进行控制时，必须使这两个电机的控制彼此分开。

直径调节：用于变径电动机的调节。输气管道机器人在运行过程中，根据直径大小，采用变径电机带动变径电机移动，从而实现管道机器人与直径相匹配的要求，这就要求对其进行变径电动机的控制。同传动电动机的控制一样，也要对电动机的转动和转速进行控制。感应反馈：各种类型的感应装置。在输气管道机器人的运作过程中，除了要检查管道的内部状况，还要检查管道本身的工作状况，因此，在机体上要设置多个传感器。为了实现对变径的精密调节，在车轮上加装压力传感器，使变径电动机在压力上升到某一数值后停机，这时就有必要对其进行实时压力回馈。

通信系统的控制：实现对无线通信各个部分的控制。通信系统的功能是向接收方发送命令和消息，因此有必要对命令的发送和接收进行控制^[4]。

4.2 速度控制系统设计

内部探测器的控制系统为“大脑”，引导着内部探测器行动，当内部探测器在管道中工作时，将各个传感器收集到的信息储存起来，然后进行运算和响应，在算出已经被处理过的速率信号之后，就可以引导旁通阀门进行操作。开启或关闭阀门以加快流量，最后调整内部探测器的运转速率。此外，本设计还应具有防卡堵、低电量报警和电路板损坏报警等多种功能，以确保安全。将该系统的操作功能与其特有的功能相融合，内部探测器转速控制系统由 CPU 模块、数据存储模块、电源模块、电机抱闸模块、温度监控模块、通信模块等组成。管道监控系统的速度调节包括信号采集系统、控制系统和执行器三个方面。数据获取包括速度获取和温压测量两部分，通过霍尔传感器对里程轮的转数进行测量，里程轮旋转一圈后，就会生成一定数目的脉冲，然后将这些脉冲的数目输入到微处理器中，经过运算就能获得实时车速。微处理器首先将这些信息存入内存芯片中；接着，微处理器通过算出的目前的转速，来判定该转速是不是在期望范围内；最后，再向执行机构发出命令，使电机旋转到特定角度，打开或关闭转阀，从而使探测器的前后压差发生变化。通过持续探测与旋转，使内部探测器的转速持续调节，直至达到动力学均衡状态。

4.3 通信模块

通信组件的作用是实现系统与外部的通信，包含通信界面，在探测器检测完毕之后，通过 USB 接口将 PC 机与控制系统连接起来，读取、显示和存储在装置中的数据，还可以通过 PC 机调节和设定系统的参数。该设备所用的 CH340 芯片是 USB 总线变换器，可以完成 USB 到 USB、USB 到 LrDA 的转换。CH340 可作为通用调制解调器的通讯接口，用于对本机的非同步串行进行扩充，也可将一般的串行装置与 USB 连接；对于红外模式，CH340 采用红外收发机构成 USB 红外适配卡，可以在 50bps 到 2Mbps 的范围内进行红外通信，并且可以同时提供 5V 供电和 3.3V 供电。

4.4 CPU 模块

CPU 作为“中枢大脑”，其工作效率将决定着整套计算机的实时性与准确性，其核心部件包括外部设备及 ARM 单片机。由于内部探测器的工作环境非常苛刻，内部探测器内部存在着大量的压力和高速流动的液体，再加上焊缝、缺陷、流量波动等因素的作用，内部探测器的转速会发生剧烈波动，且一次测试工作可以长达数十个小时，因此这对 CPU 模块来说是极大挑战，而 CPU 模块的性能很大程

度上取决于 ARM 微处理器，因此必须选用稳定、耐久的 ARM 微处理器。该芯片以 STM32F103C8T6 为核心，采用 48 通道 LQFP 芯片，实现了内存与 RISC 技术的有机融合。STM32F103C8T6 内置先进的通信接口、PWM 定时器、12 位 ADC。其核心是 Cortex-M3、CPU 速率 72MHz、1MB 的快闪记忆体，包含电动机控制外设、CAN 与 USB 高速连接。且具有强大的功能和较低的功率消耗，在十多个小时的工作中消耗电力较少；具有很好的抗干扰性，内部探测器的振动和速度变化情况下也能正常工作。此微处理器特别适合电动机驱动器及应用控制。

4.5 驱动及变径模块

脉宽调制 (PWM) 是一种对模拟信号进行数字化编码的技术。其工作原理是：通过对逆变电路进行切换，使其产生不同幅度、不同宽度的脉冲，代替所需波形或正弦波。天然气管道机器人的传动方式为采用传动电机带动主动轮，因此选择 H 型传动线路。通过芯片的脉宽调制波形来实现对电动机的驱动。该方法能有效、简便地实现对电动机的回转及其速度的控制，并能将电动机置于各种速度状态。采用 NMOS 器件构成的单纯 H 型电路有很大的安全风险，即同侧桥臂无法同步导通。对于同侧桥臂，因为 NMOS 器件的电阻只有几毫欧到几十毫欧，因此在同一侧桥臂上进行同步开合，会造成很大的短路，甚至会烧坏整个电路，因此可以采用两块 IR2104S 半桥芯片来防止这个问题。

5 结语

综上所述，管道检测机器人在垂直输气管道中的运动，既是科学技术进步的集中表现，又是人类的智慧与创造。这种新型管道监测系统，不但可以很好地克服常规监测方法存在的许多问题，而且对管道的维修与管理也产生了巨大影响。这两种方法的应用，既能有效地改善测试精度与速度，又能减少人力测试的强度与安全性。论文的研究成果将为管道维修与管理开辟一条崭新途径，促进中国油气产业的不断发展。坚信在今后的日子里，管道检测机器人将在更多领域发挥更大的作用，为人类创造更加美好的未来。

参考文献

- [1] 郑杰,尚祖跃,窦益华,等.模块化同步自主变径输气管道机器人的研究设计[J].石油机械,2023,51(11):154-162.
- [2] 孙晓锋.输气管道机器人设计及其控制系统研究[D].西安:西安石油大学,2023.
- [3] 臧延旭,赵宣,杨博霖,等.管道检测机器人在垂直输气管道的运动分析[J].机床与液压,2022,50(5):28-32.