

基于电磁超声的天然气管道机器人 测控系统设计

曹建树¹, 张义¹, 李扬², 李魁龙², 徐宝东¹

(1. 北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102617; 2. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249)

摘要: 分析了国内天然气管道现状及检测维护情况, 针对目前天然气管道裂纹缺陷检测问题, 采用电磁超声检测方法, 并结合虚拟仪器技术, 设计了天然气管道机器人测控系统; 系统以 PXI 模块化仪器平台为核心, 结合数据采集模块和运动控制模块构建了硬件平台, 以 LabVIEW 编程语言为基础开发了人机交互软件平台; 该系统能够控制机器人在管道内的运动, 并可在管道内壁激励和接收超声导波; 整个系统可靠性高、扩展性强、人机交互界面友好, 满足了机器人管内电磁超声检测作业时的运动控制、数据采集及处理要求。

关键词: 天然气管道; 机器人; 电磁超声; 虚拟仪器; 测控系统

Design of Measurement and Control System for Natural Gas Pipeline Inspection Robot Based on EMAT

Cao Jianshu¹, Zhang Yi¹, Li Yang², Li Kuilong², Xu Baodong¹

(1. College of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

2. College of Machinery and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: The current situation of detection and repair of domestic natural gas pipeline are introduced. As the crack detection still poses a problem, a measurement and control system based on virtual instrument and EMAT is designed. PXI modular instrument platform is taken as the core of the system and a hardware platform, combined with data acquisition module and motion control module is built. A human-machine interaction software platform is designed based on LabVIEW. Robots can be controlled to move through the pipe, to produce and receive ultrasonic guided waves by the system. With the system's reliability, expansibility, and user-friendly human machine interaction, the demands of motion control, data collection and processing can be met when the robot is conducting EMAT detecting through the pipe.

Keywords: natural gas pipeline; robot; EMAT; virtual instrument; measurement and control system

0 引言

天然气作为高效清洁化石能源, 成为中国优化能源结构、加强环境保护、实现可持续发展的重要选择, 其需求因而呈现爆炸式增长。管道作为天然气大规模输送的唯一选择, 其建设也因此高速发展^[1]。随着在役天然气管道总里程不断激增, 其安全运行问题受到越来越广泛的关注。为有效评估天然气管道寿命, 抑制管道事故发生, 保障其安全高效运行, 必须对管道腐蚀程度进行定期检测^[2]。

利用检测器对管道内部损伤进行检测, 检测所得数据准确, 观察直观, 对了解管道腐蚀状况、评估管道寿命以及制定抑制腐蚀计划等具有重要意义^[3-4]。管道机器人是一种可在管道内部自主移动并进行检测作业的特种机器人, 相对于被动式管道内检测器 (PIG), 其运动速度和运动方向易于控制, 是一种较为理想的管道自动化检测设备^[5]。国内外均对管道检测机器人展开了相关研究。韩国成均馆大学 Choi H R 等针对城市天然气管道研制了 MRINSPECT 系列检测机器人, 其中 MRINSPECT III 能对管道缺陷进行超声波检测^[6]。美国卡内基梅隆大学 Schempf H 等研发了 Explorer 系列城市天然气管道检测机器人, 其中 Explorer II 可搭载远场涡流或漏磁检测

器进行管道缺陷检测^[7]。

管体腐蚀、机械损伤和壁厚减薄可通过超声、远场涡流或漏磁等方法实现有效检测, 但应力裂纹、疲劳裂纹等裂纹缺陷的检测, 仍然存在问题。而电磁超声对于裂纹缺陷具有良好检测效果^[8-10]。本文针对目前天然气管道裂纹缺陷检测问题, 采用电磁超声检测方法, 并结合虚拟仪器技术, 设计了天然气管道机器人测控系统, 并对系统进行了实验测试。

1 机器人系统结构

管道机器人系统组成如图 1 所示, 机器人采用支撑轮式结构, 其周向对称分布三组可支撑于管道内壁的支撑轮机构。机器人管内运行遇到管径变化或工况突变时, 其中心轴线与管道中心轴线可始终保持一致, 因此机器人运动稳定性好; 且通过支撑机构可产生较大封闭力, 机器人牵引能力强。机器人整体采用模块化设计, 按功能分为四部分: 驱动模块、支撑模块、电磁超声检测模块和控制模块。



图 1 管道机器人系统组成示意图模块

收稿日期: 2014-05-15; 修回日期: 2014-07-02。

作者简介: 曹建树(1971-), 男, 内蒙古丰镇人, 副教授, 主要从事天然气管道检测等方向的研究。

其中驱动模块采用单电机全驱动，伺服电机扭矩通过机械传动机构传递给驱动轮，进而驱动机器人前进；支撑轮机构运用步进电机驱动滚珠丝杠旋转，带动连杆机构运动，从而实现自身张开或回缩^[11]，适应不同管径；支撑模块主要起支撑作用；电磁超声检测模块可张开或收缩，张开时电磁超声检测模块处于工作状态，超声探头贴紧管壁，检测管道内壁缺陷，收缩时则电磁超声检测模块不工作；控制模块用以控制机器人运动和检测作业。

2 管道机器人测控系统硬件设计

2.1 总体设计构架与实现思路

管道机器人于管道内部封闭环境进行作业，工况恶劣；且涉及运动控制、数据采集、处理与显示，功能复杂，其测控系统的集成性、数据实时处理能力和可靠性是系统开发中的重点和难点。本文采用虚拟仪器技术对测控系统进行开发，将计算机强大的计算处理能力和模块化仪器硬件的测量、控制能力结合，提高了系统集成性和可靠性，并通过软件实现了对数据的实时分析处理、显示以及存储。管道机器人测控系统构架如图 2 所示。

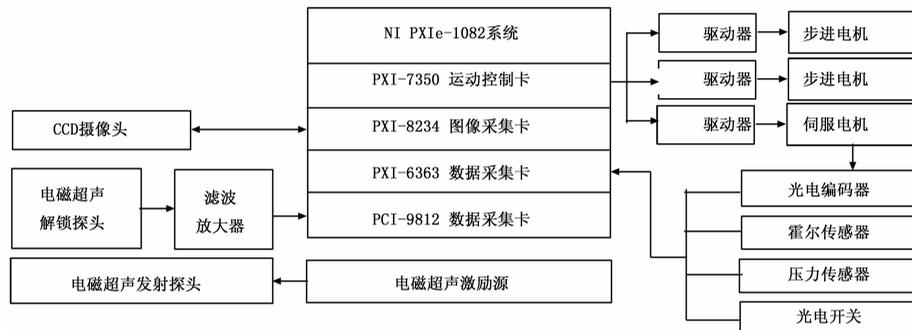


图 2 管道检测机器人测控系统构架

以 NI PXIe-1082 模块化仪器平台为核心，搭配 PXI-7350 运动控制卡，控制伺服电机和步进电机的运转，分别实现机器人的驱动控制和支撑轮机构的张开（回缩）；搭配 PXI-1411 图像采集卡，用于 CCD 摄像头图像采集，对管道内部进行图像监测；搭配 PXI-6363 数据采集卡，用于光电编码器、压力传感器、霍尔传感器和光电接近开关信息采集，以监测机器人运行状态；搭配 PCI-9812 高速数据采集卡，用于电磁超声接收探头数据采集。各模块通过 PXI 总线与 PXIe-1082 系统控制器实现信息互换。

2.2 电磁超声检测模块设计

电磁超声（EMAT）检测利用电磁耦合方法激励和接收超声波，与传统超声检测技术相比，具有精度高、无需耦合剂、非接触等优点^[8]。利用电磁超声换能器在管壁中产生的横波、纵波、表面波和 Lamb 波等进行表面裂纹缺陷检测，是目前天然气管道在线无损检测技术研究的重点^[2,10]。

本文电磁超声检测模块工作原理如图 3 所示。

电磁超声激励源产生的高频大功率激励信号传输至发射探头线圈，基于磁致伸缩效应，激励信号转换为 Lamb 波。Lamb 波在管壁中传播，遇到裂纹缺陷和管道端部时发生反射。反射的 Lamb 波传播至接收探头线圈时，线圈将 Lamb 波转换为电信号，由 PCI-9182 高速数据采集卡对滤波放大后的电信号进行采集，然后传输至 PXIe-1082 进行数据处理和

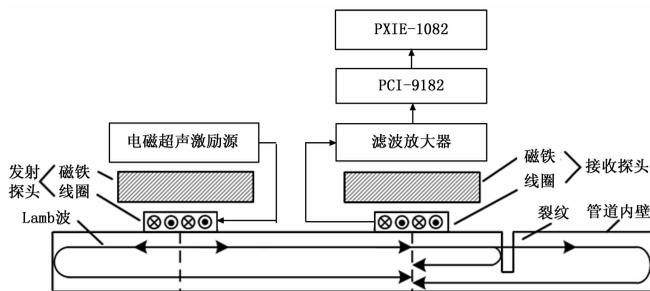


图 3 电磁超声检测模块工作原理

分析。

2.3 支撑轮机构支撑压力控制设计

天然气管道机器人在管道内部运行时，其牵引力与支撑轮机构支撑压力正相关（一定范围内）。但随着运行距离增加，管道内壁粗糙度和管径均不断变化，势必导致驱动轮支撑压力随之变化。为避免机器人牵引力产生波动，提高机器人运行稳定性，需对支撑轮机构支撑压力进行控制。采用压力传感器测量支撑轮支撑压力，然后根据实际测量值与预设值的偏差，控制步进电机转速和转向，以使支撑轮机构支撑压力稳定在设定值。

PID 控制由于结构简单、稳定性好、工作可靠、调整方便而在工业控制中广泛应用，因此本文采用 PID 控制。由于支撑轮机构执行原件为步进电机，需要的不是控制量的绝对值，而是控制量的增量，所以应采用增量式 PID 控制^[12]，控制原理如图 4 所示。

增量式 PID 控制算法为：

$$\Delta u(k) = (k_p + k_i + k_d)e(k) - (k_p + 2k_d)$$



图 4 压力控制原理图

$$e(k-1) + k_d e(k-2) \tag{1}$$

式中， k_p 为比例系数， k_i 为积分系数， k_d 为微分系数， $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 分别为第 kT 、 $(k-1)T$ 和 $(k-2)T$ 时刻预设值与反馈值之间的偏差， T 为采样周期。

压力控制过程中，每隔时间 T 对支撑轮压力采样一次，采集到的数据与设定值进行比较得出偏差 $e(k)$ ，根据控制效果调整、确定 k_p 、 k_i 和 k_d 之后，只需前后 3 次采样值的偏差，即可由式（1）求出控制增量 $\Delta u(k)$ 。控制算法流程图如图 5 所示。

3 测控系统软件设计

图形化编程语言 LabVIEW 可便捷实现与硬件模块的连接，且具备后续数据处理与分析能力^[13]。因此采用 LabVIEW 编程语言进行系统软件开发。根据机器人系统工作原理可知，机器人系统软件须实现运行控制、缺陷检测等多种功能。为简化编程过程、方便程序调试，系统软件采用模块化编程，将各

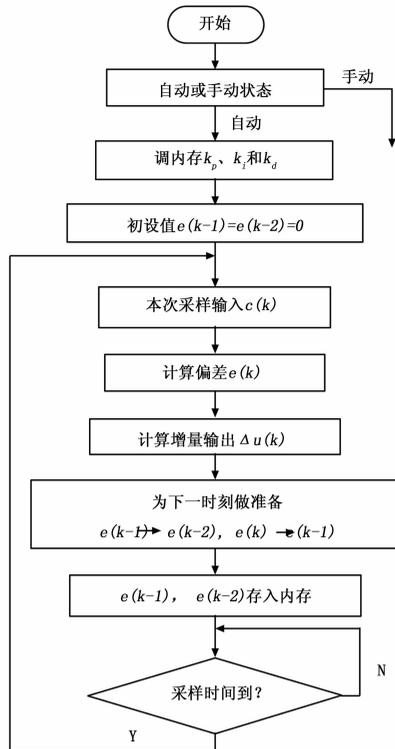


图 5 控制算法流程图

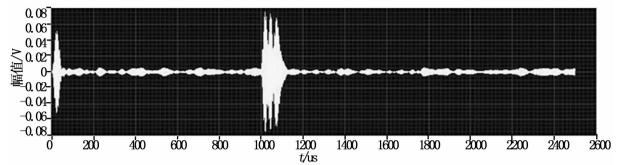
功能的实现程序编制成独立模块, 根据需要进行单独的调试和运行。系统软件主要包括 Motion Control. vi、Pressure Control. vi、Video Monitor. vi 和 EMAT. vi 四个功能子 VI。

Motion Control. vi 主要通过用于 LabVIEW 的 Motion Assistant 模块进行程序设计, 以完成机器人的移动速度控制, 实时显示运行速度和运行里程; Pressure Control. vi 核心部分是 PID 控制, 采用 PID and Fuzzy Logic Toolkit 工具包进行开发, 实现支撑轮支撑压力自动控制; Video Monitor. vi 通过视觉开发工具包 Vision Development Module 创建图像采集参数配置、图像采集并保存等程序, 完成对管道内部的实时图像监控; EMAT. vi 程序主要包括三部分: 初始化部分、采集参数配置部分和数据采集部分, 初始化部分优先执行完成程序初始化工作, 采集参数配置部分主要通过 While 循环 (循环 I) 响应操作人员对采集参数的设置操作, 数据采集部分通过 While 循环 (循环 II) 在循环 I 控制下完成数据的连续采集工作, 三部分协同工作以完成电磁超声检测数据的采集。

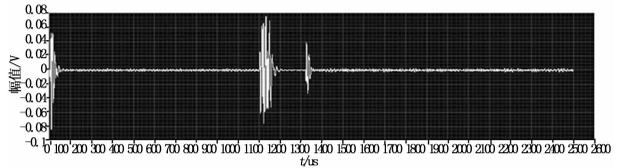
4 系统测试

为验证测控系统控制性能和电磁超声检测能力, 在实验室条件下对该系统进行实验测试。采用对照实验方法, 将实验分为实验组和对照组, 实验组为内壁有裂纹缺陷的钢管, 对照组为内壁无裂纹缺陷的钢管, 除此之外, 两组钢管材料、直径、壁厚、长度均相同, 分别对两组钢管进行电磁超声检测。机器人在对照组钢管管内进行检测作业时, 人机交互界面如图 6 所示; 两组钢管电磁超声检测结果如图 6 所示。

机器人在管道内运行时, 测控系统正常工作, 可采集到清晰图像和电磁超声检测信号。由图 6 中两组钢管电磁超声检测结果的对比可明显观察到缺陷回波的存在, 由此可知电磁超声检测模块可检测到管道内壁裂纹缺陷的存在。



(a) 对照组钢管电磁超声检测结果



(b) 实验组钢管电磁超声检测结果

图 6 电磁超声检测结果

5 结论

采用虚拟仪器技术, 设计了基于电磁超声的管道机器人测控系统, 开发了基于 LabVIEW 的人机交互系统, 满足了机器人管内电磁超声检测作业时的运动控制、数据采集及处理要求, 实现了电磁超声检测技术与管内移动机器人技术的结合, 为进一步研发基于电磁超声的天然气管道机器人系统奠定了良好基础。

参考文献:

- [1] 黄维和. 大型天然气管网系统可靠性 [J]. 石油学报, 2013, 34 (2): 401-404.
- [2] 曹建树, 李 杨, 林 立, 等. 天然气管道在线无损检测技术 [J]. 无损检测, 2013 (5): 20-25.
- [3] 陈德胜, 王遂平, 龙媛媛, 等. 输气管线内腐蚀检测评估技术 [J]. 油气田地面工程, 2011, 30 (8): 6-8.
- [4] 李 宁. 天然气管道内腐蚀的原理及直接评价 [J]. 腐蚀与防护, 2013 (4): 362-366.
- [5] 周 晓, 张晓华, 邓宗全, 等. 管内作业机器人的发展与展望 [J]. 机器人, 1998, 20 (6): 471-478.
- [6] Choi H R, Ryew S M. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines [J]. Mechatronics, 2002, 12 (5): 713-736.
- [7] Schempf H, Mutschler E, Gavaert A, et al. Visual and nondestructive evaluation inspection of live gas mains using the Explorer™ family of pipe robots [J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27 (3): 217-249.
- [8] 张广纯, 范 弘, 贾慧明. 几种钢管探伤方法可靠性分析 [J]. 钢铁, 2002, 37 (9): 56-60.
- [9] Hirao M, Ogi H. An SH-wave EMAT technique for gas pipeline inspection [J]. NDT & E International, 1999, 32 (3): 127-132.
- [10] 黄松岭, 叶朝峰, 王 坤, 等. 天然气管道裂纹电磁超声检测器研制 [J]. 无损检测, 2009, 31 (10): 827-829.
- [11] 曹建树, 李 杨, 李魁龙. 支撑轮式管道机器人牵引装置 [P]. 中国专利: CN202937957U, 2013-05-15.
- [12] PID 控制器参数整定与实现 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [13] 陈 鹏, 蔡强富, 刘美全, 等. 基于 LabVIEW 的电磁超声数据采集与处理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (3): 816-818.