

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.04.017

基于机器人的附塔管线多功能检测系统

王群¹, 陈兴阳^{2,3}, 叶宇峰^{2,3}, 宋俊俊²

1. 中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司, 浙江 宁波 315207;
2. 浙江省特种设备科学研究院, 浙江 杭州 310020;
3. 浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310020)

摘要:针对附塔管线作业存在危险系数高、检修成本高以及检修难度大等问题,课题组提出了一种基于机器人的附塔管线多功能检测系统。设计了基于机器人的管道爬行器,并介绍了爬行机器人的主要功能和原理;检测系统采用高清视频系统和图像处理算法,实现对管道内部宏观全景图像实时二维拼接查看,同时通过串联脉冲涡流检测和电磁超声测厚模块,实现管道截面损失和管道壁厚的自动测量;设计了一体化信号采集和处理系统,实现多功能检测系统的一体化自动化作业。试验测试结果表明该系统不仅测量精度可靠,也满足工程应用的自动作业等要求。该管线多功能检测系统的应用可有效解决附塔管线检测成本高、检测难度大等问题。

关键词:爬行机器人;附塔管线;管道腐蚀;串联脉冲涡流检测;电磁超声测厚

中图分类号:TH6;TH39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2021)04-0089-05

Multi-Function Inspection System Based on Robot for Attached Tower Pipelines

WANG Qun¹, CHEN Xingyang^{2,3}, YE Yufeng^{2,3}, SONG Junjun²

1. Zhenhai Refining and Chemical Company of SINOPEC, Ningbo, Zhejiang 315207, China;
2. Zhejiang Academy of Special Equipment Science, Hangzhou 310020, China;
3. Key Laboratory of Special Equipment Safety Testing Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Aiming at the problems of the high operating risk factor, high maintenance cost, and difficult maintenance of the pipeline attached to the tower, a robot-based multifunctional detection system for the pipeline attached to the tower was proposed. A robot-based pipeline crawler was designed and the main functions and functional principles of the crawling robot were introduced; the high-definition video system and image processing algorithm were adopted in the detection system to realize real-time two-dimensional splicing and viewing of the macro panoramic image inside the pipeline, and at the same time, the automatic measurement of pipe wall thickness and section loss was realized through the series pulse eddy current testing and electromagnetic ultrasonic thickness measurement modules. An integrated signal acquisition and processing system was designed to realize the integrated automatic operation of the multifunctional detection system. The test results show that the system not only has reliable measurement accuracy, but also meets the requirements of automatic operation in engineering applications. The robot-based multifunctional pipeline detection system can effectively solve the problems of high cost and difficult detection of the pipeline attached to the tower.

Keywords: crawling robot; attached tower pipeline; pipeline corrosion; series pulse eddy current testing; electromagnetic ultrasonic thickness measurement

在石油和化工领域,会大量使用金属管道和压力容器来输送和存储具有高温、高压以及腐蚀性的气体

或液体介质。磨损和流体加速腐蚀,会使管道和压力容器等构件的壁厚腐蚀减薄,导致构件的承压性能下

收稿日期:2021-02-23;修回日期:2021-05-25

第一作者简介:王群(1970),男,浙江诸暨人,学士,高级工程师,现任中国石化镇海炼化副总工程师,主要研究方向为化工设备管理。E-mail:wangqun_zhlh@sinopec.com

降,容易造成介质泄漏、爆炸等事故,严重威胁生产和人身安全。需要定期对这些金属构件的壁厚腐蚀情况实施无损检测和评估,确保设备的安全运行。附塔管线具有作业危险系数高、检修成本高及检修难度大等特点,所以必须采取合适的技术手段对管道运行情况进行检测,而常规检测方法具有针对性不强、抽检覆盖率低等问题^[1-4],因此,有必要引入新的检测方法,从而保证检测工作的全面性和高效性。

目前能够对金属管道实施无损检测的方法主要有超声法、漏磁法和射线法。实际应用中,管道或容器外通常覆着一定厚度的保温或防腐层,最外层可能还有铁皮或铝皮包裹,这给常规的管道或容器检测带来了困难。超声法要求探头和被检管壁之间耦合良好,检测时必须将阻断超声波传播的包覆层剥离,不仅检测效率低、而且成本高^[5]。漏磁法一般用于管道或容器内检测,检测铁磁管道或容器表面或近表面的缺陷,对壁厚检测灵敏度不高^[6]。射线法虽检测结果直观,但对射线的安全防护措施要求高,检测成本高,多用于管道或容器联接处的焊缝检测^[7]。

课题组针对管道内检测的现状,依据最新理论研究成果,基于重新设计的灵巧爬行机器人,充分考虑了现场操作环境和使用条件,搭载了脉冲涡流和电磁超声测厚模块,集成了高清晰视频、多通道脉冲涡流测腐蚀、电磁超声测厚、智能运动定位、图像展开和拼接、视频缺陷测量编辑等功能,实现在不搭脚手架的情况下对附塔管线的检测。该检测系统具有抗干扰性强、精度高、重复性好和有效性好的特点,具有“功能一体化、操作简便化、作业程控化”的特点,一次检测中可同时使用 3 种技术手段进行检测,检测结果相互补充、相互印证,使得附塔管道内检测的精准度、置信度以及检测效率大大提高。

1 系统设计

1.1 总体方案设计

检测系统分为爬行机器人主体、高清视频图像采集系统、脉冲涡流检测系统、电磁超声检测系统及电脑处理系统,整体设计采用模块化设计,检测系统总体设计模型如图 1 所示。

爬行机器人本体由驱动电机、转向机构、变径机构和扶正机构等组成运动系统。其中转向结构主要适应管线的弯头结构;变径结构主要匹配不同管径(一定范围内)管道及适应管道内焊缝余高带来的管径变化;扶正机构主要是通过控制爬行器使整个系统始终保持沿管道中心行进。爬行机器人最前端装载高清视

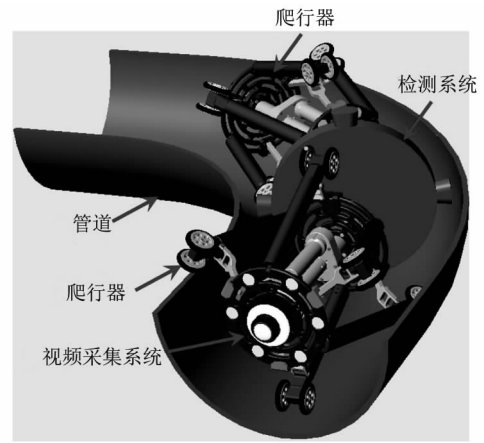


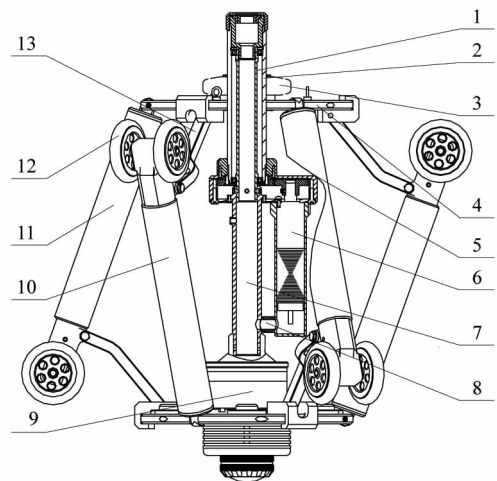
图 1 检测系统总体设计模型

Figure 1 Overall design model of detection system

频图像采集系统,中间搭载脉冲涡流检测系统和电磁超声系统,所有信号采集后通过中间信号线传输到电脑。为了工程使用方便,将供电线、信号线和控制线等包覆电磁屏蔽层后形成一条电缆,并分别接入电脑。为了操作和检测方便,爬行机器人控制软件、高清视频图像采集系统、脉冲涡流检测系统和电磁超声系统数据采集和处理软件均集成到一个软件中。

1.2 爬行器和高清晰视频图像采集系统

高清视频图像采集系统由爬行器和图像采集模块组成,如图 2 所示为结构示意图。



1—固定管轴;2—螺杆轴;3—手柄螺母;4—铰链盘;5—传动壳体;6—电机;7—中心外前轴;8—电机管穿线块;9—内窥镜头组;10—下动力支腿管;11—上动力支腿管;12—驱动轮;13—支腿。

图 2 高清视频图像采集系统和爬行器结构示意图

Figure 2 Schematic diagram of structure of high-definition video image acquisition system and crawler

爬行器在管道内前进并实施检测是依靠爬行器的

支腿组件挤压管壁产生较大的摩擦力来实现的。为了适应检测时管径的变化,课题组通过控制电机来调节支腿组件的伸展或收缩。支腿组件包括上动力支腿管及其下端的驱动轮和下动力支腿管及其下端的驱动轮。上动力支腿管与下动力支腿管与铰链盘可伸缩连接,并通过控制各驱动轮的运动实现爬行器的行进及对中操作,防止视频采集时由于爬行器不对中导致图像过渡畸变问题。总而言之,爬行器的转向、变径和扶正动作均通过驱动轮和支腿管的伸缩控制。

针对管道的检测现状,充分考虑了现场操作环境和使用条件等实际需求,高清视频图像采集软件系统集成了高速高清视频、智能运动定位、缺陷测量编辑、图像展开和拼接、远程图传诊断等功能。系统动态视频像素达500~1200万、周向倾角精度 $\pm 1^\circ$ 、距离定位精度 $\pm 3\%$ 、缺陷尺寸测量精度 $\pm 5\%$ 。为提高工作效率,高清成像并行同步处理可在3 m/min的行进中同时实现高清视频成像、录像、展开和远程数传等功能。系统采用特殊光学处理的高速全景单像机,配合多角度可调光源,保证在行进中全周向一次性快速清晰成像,提高了检测效率并彻底杜绝了多镜头或旋转式镜头的漏检和视角盲区。

另外,图像处理端可实时对全景视图展开并拼接为2D剖开图,由于管道内全景视角采集的图像为扇形图,不利于观察和发现缺陷,因此图像处理采用插值算法对图像像素进行插值,使得采集的图像展开为长方形,如图3所示为管道内高清视频图像采集示意图。

1.3 脉冲涡流和电磁超声检测系统

针对附塔管线管道内检测问题,脉冲涡流检测系统设计成4~6只探头环形分布,当爬行机器人在管道内行进时,脉冲涡流检测系统测量速度为0.5~15.0次/s(随被测壁厚降低而增加),适用管道最大检测壁厚为3~100 mm,管道直径 ≥ 50 mm,重复检测精度为2%,分辨率/腐蚀缺陷检测灵敏度为5%(体积比)。脉冲涡流检测系统采集的数据可展开2D平面图,方便对有怀疑的部位进行定位和测量,并可协同管道高清视频展开图对比研究。

与脉冲涡流检测系统检测类似,电磁超声检测系统设计成4~6只探头环形分布,可对厚度1.5~200.0 mm的钢管进行测厚,该厚度范围测量精度可达0.04 mm;厚度100~200 mm时精度可达0.1 mm,其激发频率为3.0~3.9 MHz。同样的,电磁超声检测系统采集的数据可展开2D平面图,方便与其它检测数据进行对比分析及验证。

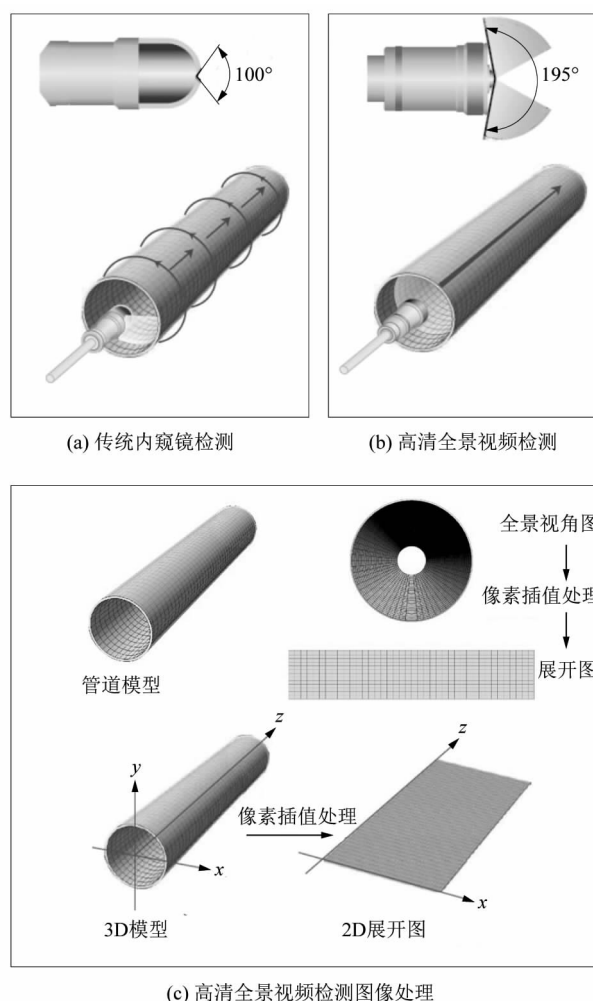


图3 管道内视频采集检测对比与检测图像处理示意
Figure 3 In-pipe video collection and detection comparison and image processing schematic diagram

通过串联方式将高清图像采集系统、脉冲涡流检测系统、电磁超声检测系统和爬行器依据检测要求进行连接,由此组成了整个管线多功能检测系统。该系统示意图如图4所示。系统可控制爬行器进入管道内部或退出,同时开启高清图像采集系统、脉冲涡流检测系统和电磁超声检测系统进行检测,多个系统集成到一个信号控制和软件内进行处理。

2 样机测试与结果

2.1 样机测试

为了验证该附塔管线多功能检测系统的适应性和检测能力,试验采用一段公称直径为DN250 mm,壁厚为10 mm的样管进行测试。样管内已预粘贴一张带尺寸的模拟缺陷纸,在不同位置预制了多处已知尺寸的减薄区域和圆形孔。将载有高清视频检测系统、脉冲涡流检测系统和电磁超声测厚的爬行机器人放入样

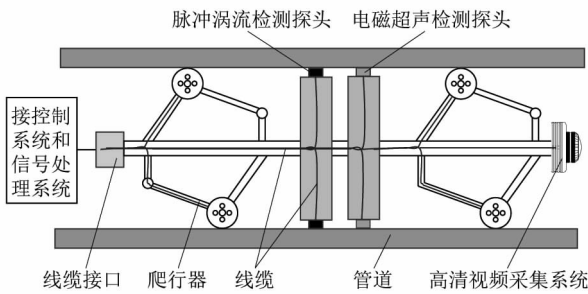


图 4 管线多功能检测系统示意图
Figure 4 Schematic diagram of pipeline multifunctional inspection system

管内,通过电脑端控制爬行机器人的驱动程序,调节其直径以适应管道的内径,并调节机器与管道进行对中;同时打开各检测系统查看各检测系统信号。如图 5 所示为爬行机器人进入管道内进行检测的实物图。



图 5 爬行机器人检测实物图
Figure 5 Picture of crawling robot detection

2.2 高清视频检测

机器人进入样管后实时查看视频图像,由视频图像可以看到管道内的实时全景图像和管道平面展开图形,如图 6 所示。测试中,发现样管内模拟缺陷清晰可辨,管道展开图无畸变,通过对比测试得到高清视频检测的距离定位精度约为 $\pm 3\%$,缺陷尺寸测量精度约为 $\pm 5\%$ 。当爬行机器人走完检测管道后,可获得管道展开图,并可拼接成管道 2D 展开图像,如图 7 所示。由测试结果可以看出,该管道的内部全景图、展开图和管道 2D 展开图清晰,测量精度满足要求,可以用来发现管道内部的宏观缺陷。

2.3 脉冲涡流检测

操作爬行机器人对管道进行测试并启动脉冲涡流检测^[8-10],在样管不同位置预设了多处已知尺寸的减薄区域,通过脉冲涡流模块对样管实施检测,并将对应管道检测结果数据图进行展开,形成 C 扫描图像,机

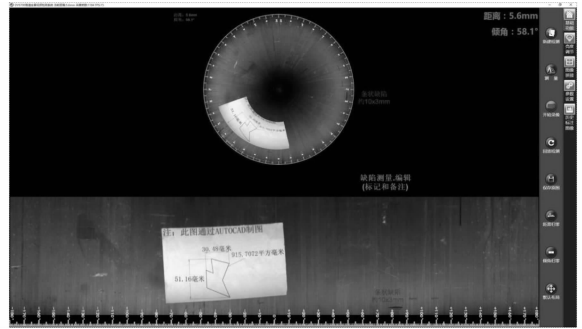


图 6 管道全景图和展开图
Figure 6 Pipeline panorama and expansion dwg

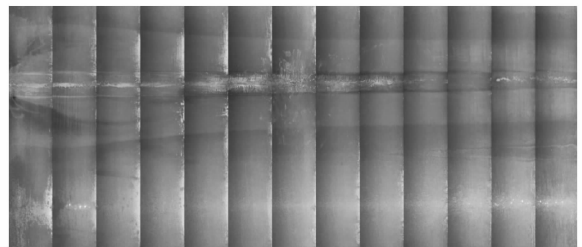


图 7 管道拼接图
Figure 7 Pipeline splicing diagram

器人脉冲涡流检测结果如表 1 所示。通过检测结果可知,轴向相对位置 20,100 和 110 mm 处存在壁厚减薄,减薄量约为校准壁厚的 20%,19% 和 15% (校准壁厚为 10 mm),该结果与实际相符,通过重复测试得出其腐蚀缺陷检测灵敏度约为 5%,可以看出该检测结果满足现场检测要求。

2.4 电磁超声检测

在样管不同位置预设了多处已知尺寸的圆形缺陷,通过电磁超声模块对样管实施检测,并将对应管道检测结果数据图进行展开,形成 C 扫描图像,机器人电磁超声检测结果如表 2 所示。通过检测结果可知,轴向相对位置 50 mm(4) 和 50 mm(10) 处存在壁厚减薄,厚度约为 8.0 mm 和 6.1 mm,该结果与实际相符,通过重复测试得出厚度精度约为 0.05 mm,可以看出该检测结果满足现场检测要求。

3 结语

针对附塔管线存在作业危险系数高、检修成本高及检修难度大等问题,课题组设计了一种基于机器人的附塔管线多功能检测系统。系统包括爬行机器人、高清视频检测系统、脉冲涡流检测系统、电磁超声检测系统和集成的控制系统。通过对检测系统的试验,结果表明该检测系统具有满足工程应用的变径、对中等功能,能够实现管道内部图像高清视频采集,其缺陷

表1 管道脉冲涡流检测相对壁厚值

Table 1 Pulse eddy current test results of relative wall thickness

轴向相 对距离/ mm	管道相对壁厚/%												
	周向相对位置												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	99.6	99.6	99.6	99.7	99.6	99.6	99.6	99.6	100.5	99.6	99.7	99.7	99.7
10	88.0	90.2	94.4	96.4	96.6	96.0	95.4	92.5	92.2	90.5	89.0	87.0	87.2
20	81.3	81.3	81.2	81.2	81.1	81.0	81.0	80.8	80.9	80.9	80.9	81.0	81.4
30	100.0	99.2	100.0	99.2	100.0	100.0	99.2	99.2	100.0	99.3	99.9	100.0	99.3
80	100.0	100.1	99.3	99.4	100.1	100.0	99.3	100.0	100.1	99.2	100.1	99.2	100.1
90	100.1	99.3	99.2	100.1	100.1	100.0	99.3	100.1	99.2	100.0	100.1	100.0	100.0
100	81.4	81.4	81.4	81.5	81.3	81.4	81.4	81.4	81.3	81.4	81.4	81.3	81.4
110	86.0	86.1	86.1	86.0	86.1	86.0	86.1	86.0	85.9	86.0	86.1	86.0	86.1
120	99.4	99.4	99.5	99.4	99.4	99.5	99.4	99.3	99.3	99.4	99.4	99.4	99.4

表2 电磁超声检测结果

Table 2 Test results of electromagnetic ultrasonic

轴向相 对距离/ mm	管道壁厚/mm												
	周向相对位置												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
30	10.46	10.97	10.16	10.19	10.77	10.12	10.09	10.43	10.36	10.79	10.55	10.96	10.54
40	10.90	10.59	10.37	8.43	10.63	10.48	10.72	10.08	10.31	6.62	10.07	10.39	10.69
50	10.38	10.14	8.51	8.02	8.33	10.41	10.50	10.43	6.62	6.12	6.53	10.00	10.01
60	10.66	10.06	10.80	8.55	10.30	10.92	10.67	10.93	10.89	6.40	10.44	10.30	10.83
70	10.96	10.22	10.13	10.91	10.49	10.50	10.82	10.33	10.06	10.50	10.95	10.94	10.94

尺寸测量精度约为±5% ;系统搭载的脉冲涡流检测和电磁超声测厚能够检测出管道内部腐蚀减薄情况,其中脉冲涡流检测腐蚀缺陷检测灵敏度约为5%,电磁超声检测厚度精度约为0.05 mm。该系统能够实现附塔管线多种检测方式一体化作业,并通过机器人改善作业条件,提高检测自动化水平。综上所述,该基于机器人的管线多功能检测系统适宜应用于附塔管线的检验检测。

参考文献:

[1] 马君鹏,杨贤彪,陈大兵,等. 钢制管塔腐蚀的超声导波检测[J]. 无损检测,2014,36(8): 50.
 [2] 刘会彬,叶宇峰,王锋淮,等. 超声导波在附塔管线中的应用[J]. 管道技术与设备,2019(3):1-4.
 [3] 孟涛,何仁洋,肖勇,等. 超声导波技术在压力管道腐蚀检测的应

用研究[J]. 管道技术与设备,2010(6):42-44.
 [4] 王中旺,李华,汪帮富,等. 聚焦超声振动球壳的声压数值仿真及测量研究[J]. 机电工程,2019,36(9):949-953.
 [5] 刘志刚,于帅,周炜,等. 压力管道超声导波检测技术研究[J]. 中国设备工程,2018(15):91-92.
 [6] 王庆国,潘华锦,张灵振,等. 漏磁法无损检测中铁磁材料内部磁场分布的研究[J]. 无损检测,2001(1):7.
 [7] 王一宁,余薇,杨钢,等. 含介质压力管道 X 射线检测技术研究[J]. 石油化工设备,2012,41(6):21.
 [8] 田明明,解社娟,肖盼,等. 基于脉冲涡流/电磁超声复合检测方法的复杂缺陷检测[J]. 无损检测,2016,38(12):13.
 [9] 陈鹏,韩德来,蔡强富,等. 电磁超声检测技术的研究进展[J]. 国外电子测量技术,2012(11):19.
 [10] 田明明,解社娟,韩捷,等. 基于小波分析的脉冲涡流/电磁超声复合无损检测方法[J]. 中国机械工程,2019,30(16):1925.