DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.05.042

一种大型货轮管道系统探测机器人的研制

蒋梦龙,孙雯,金志鹏,温慧滢,王义斌,陈姣
(河海大学 机电工程学院,江苏 常州 213000)

摘　要:大型货轮上的管道内壁由于常年受到腐蚀,需要对其进行定期检查。但现有的检查技术无法适应复杂的管道结构。根据货轮管道检查的实际需要,设计能够适应货轮管道环境的机器人结构,通过力学分析建立了一种管道机器人的三维模型,根据三维模型加工制作了实物样机。样机试验结果表明,该机器人能够在水平、竖直、弯曲、变径管道中对内壁有效地进行探测检查。

关键词:大型货轮;管道系统;探测机器人;内壁检查
中图分类号:TP242　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-5276(2020)05-0157-04

Manufacture of Pipeline System Detecting Robot for Large Cargo Ship

JIANG Menglong, SUN Wen, JIN Zhipeng, WEN Huiying, WANG Yibin, CHEN Jiao
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213000, China)

Abstract: The inner wall of pipeline on large cargo ship has to be inspected periodically because of corrosion all year round. It is hard to inspect the complex pipeline by now inspection method. According to the reguirements of inspecting the cargo pipeline inner wall, this paper designs a robot which can be suitable for the pipeline environment inspection. The three-dimensional model is established according to the mechanical analysis, then, the model machine is manufactured. The experimental results show that the robot can be used to effectively inspect the inner wall of horizontal, vertical, winding and reduced pipeline.

Keywords: large cargo ship; pipeline system ; detecting robot ; inner wall inspection

0　引言

目前,我国船舶行业飞速发展,管路系统在船舶的燃油输送和排水排气方面发挥着不可替代的作用。这些管道在长期使用的过程中常常会受管内输送物质和管外环境的双重影响,从而发生腐蚀、漏孔、老化等一系列的问题[1]。管道问题一旦出现没有及时修护将会发生难以预料的后果。因此,设计一种适用于船舶行业的管道探测机器人能够提高检查效率、扫除安全隐患。

20世纪50年代管道机器人技术逐渐兴起,美国、德国、日本等工业发达的国家已经开始对管道机器人进行研究。到20世纪80年代后期,计算机技术、先进传感器技术、智能控制技术等基础技术蓬勃发展,这些技术为管道机器人的进一步研究奠定了基础。然而目前还没有适用于船舶行业中高度复杂的管道系统的机器人。

根据运动方式的不同,可以将管道机器人分为6类:1)压差式管道机器人;2)轮式管道机器人[2];3)履带式管道机器人[3];4)足腿式管道机器人[4-5];5)蠕动式管道机器人[6-7];6)螺旋推进式管道机器人[8-9]。6种管道机器人的优缺点如表1所示。

通过分析发现,现有机器人可以在特定的场合满足工作需求,但是难以适应例如货轮管道这种复杂多变的环境。本文将结合货轮管道的实际情况,设计、分析并制作出一种用于货轮管道的探测机器人,帮助船舶行业工人提高管道内壁检测效率、保证检测准确性。

表1　各种管道机器人优缺点

机器人种类	优点	缺点
压差式	速度较快	条件苛刻
轮式[10]	效率较高	越障能力差
履带式[11]	越障能力强	多变管道
足腿式	行动灵活	控制困难
蠕动式	运动平稳	速度极低
螺旋式[12]	小径管适用	推动力小

1　管道探测机器人的结构设计

1.1　设计目标

由于大型货轮管道系统错综复杂,管道结构与形状多变,所设计的机器人必须能够转弯、变径、通过竖直管道。通过在合作企业建造的大型货轮上实地考察以及与船舶行业内相关技术人员的交流,分析得出表2所示机器人的一系列性能指标。

基金项目:2018年度国家级大学生创新训练项目(201910294104z)

第一作者简介:蒋梦龙(1999—),男,江苏宜兴人,本科,研究方向为机器人设计与控制。

表 2　管道机器人设计指标要求

序号	项目	指标要求
1	适用管径/mm	300~600
2	变径范围/mm	管径差<150
3	过弯半径/mm	曲率半径≥300
4	竖直管道	附壁式结构
5	供电方式	电缆供电
6	水平管内速度/(m/s)	0.2~0.5
7	竖直管内速度/(m/s)	0.1~0.3
8	机器人质量/kg	8

1.2　机构设计与选择

根据上述性能指标,机器人主要分为以下各部分:变径机构、弯道适应装置、驱动轮、机架、摄像头云台。机器人整体结构如图 1 所示。

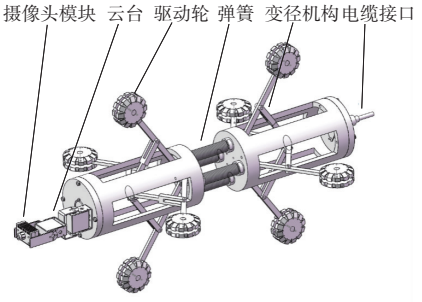

图 1　机器人整体结构

1)变径机构设计与分析

通过实地调查与测算,船舶行业中制造的大型货轮大部分物料传输管道采用 300 mm~600 mm 管道,因此变径机构需要能够使机器人适用于管径处于该范围内的所有管道。本设计采用摇杆滑块这一连杆机构,摇杆末端安装驱动机器人的驱动轮,滑块配合在丝杆上,通过电机转动丝杆使滑块运动,最终使摇杆摆动,改变径向展开幅度,其结构如图 2 所示。

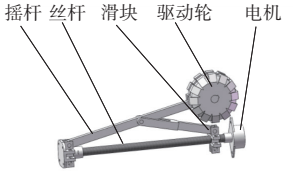

图 2　变径机构

根据以上的局部机器人模型进行测算,进行静力学分析,已知整体机器人质量 $M=8$ kg,一组变径机构所在的部分本体质量 $m=4$ kg。驱动轮外侧包裹橡胶套,货轮管道材质一般为碳钢或不锈钢,查阅相关资料,橡胶驱动轮与钢铁材料之间的摩擦系数 $\mu=0.5$。在竖直管道中时,必须全部依靠驱动轮与管道内壁的摩擦力来平衡机器人本体,避免下滑或摔落。因此,着重分析机器人在竖直管道中的受力状况。

假设机器人在大型货轮竖直管道内运动,将管道视为理想中空圆柱体,并且机器人仅仅凭借驱动轮与管道内壁的摩擦力维持姿态,拖拽的电缆上不受力,管道内径 $D=300$ mm~600 mm,驱动轮半径 $r=30$ mm,连杆机构中丝杆直径 $d=10$ mm,导程 $p=1.5$ mm,丝杆轴心至滑块与丝杆铰接处的径向距离 $s=12$ mm,摇杆长度 $L_1=200$ mm,近丝杆段长度 $l=100$ mm,推动杆长度 $L_2=100$ mm。下面对管道机器人在竖直管道中以速度 $v=0.3$ m/s 匀速运动时进行受力分析,如图 3-图 4 所示。

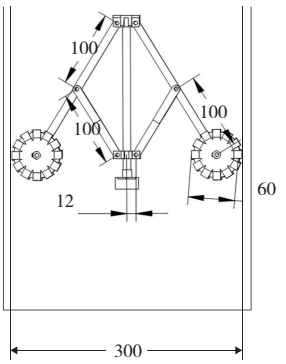

图 3　尺寸图

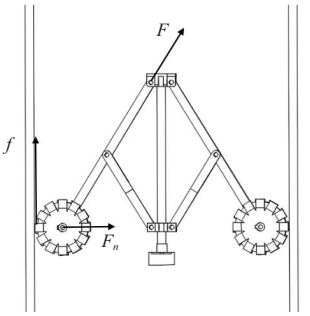

图 4　受力图

在竖直管道中,为了维持姿态,管道机器人的每一个驱动轮上所受摩擦力为:

$$f=\frac{1}{4}mg=10\ \text{N} \tag{1}$$

在竖直管道中,摩擦力来自于驱动轮与管壁的压力,其压力为:

$$F_n=\frac{f}{\mu}=20\ \text{N} \tag{2}$$

在竖直管道中,摇杆与丝杆夹角 α 为:

$$\alpha=\arcsin\frac{\frac{D}{2}-r-s}{L_1}\approx 32.684^\circ \tag{3}$$

在竖直的管道中,推动杆与丝杆夹角 β 为:

$$\beta=\arcsin\frac{l\times\sin\alpha}{L_2}\approx 32.684^\circ \tag{4}$$

在竖直管道中,机器人做匀速运动时,作用在推动杆上的压力为:

$$F=\frac{F_n\times\sin\left(\frac{\pi}{2}-\alpha\right)}{\sin(\alpha+\beta)}\approx 18.518\ \text{N} \tag{5}$$

此时滑块作用在丝杆上的轴向压力为:

$$F_x = F\times\cos\beta \approx 15.586\ \text{N} \quad (6)$$

此时滑块作用在丝杆上的径向压力为:

$$F_y = F\times\sin\beta \approx 10.000\ \text{N} \quad (7)$$

为了提供足够的轴向推力,丝杆需要提供的转矩为:

$$T=\frac{F_x\times p}{2\pi}\approx 3.721\ \text{Nm} \quad (8)$$

考虑到梯形螺纹丝杆传动损耗较大,输出效率约为40%,所以实际转矩为:

$$T_0=\frac{T}{40\%}=9.302\ \text{Nm} \quad (9)$$

2)摄像头云台设计

为了辅助摄像头采集机器人前方各方位的图像,设计如图5所示的舵机云台来调整摄像头的角度。舵机1后端合金架固定在机器人本体上,舵机2后端合金架使用螺钉固定在舵机1的舵盘上,摄像头模块通过滑槽卡装在舵机2的舵盘上。

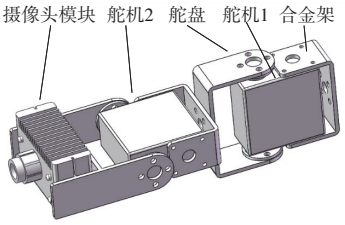

图5　摄像头云台

3)多段机器人连接方式

为了保证机器人能够维持姿态的稳定,并且灵活地在管道中运动,所研制的机器人采用二段结构。机器人分为前后两段,在其中一段由于打滑等情况失去平衡时,另外一段能够保持机器人本体的稳定。此外,二段结构能够很好地克服轴向扭转力矩,在变径管道、弯曲管道处,机器人的前后两端相互配合,保证顺利通过。

所研制的机器人两段之间采用大刚度弹簧连接,既能够在直线管道中维持机器人两段轴心在同一直线上,又能使机器人在弯曲管道中具有一定的柔性。

2　管道探测机器人运动方式说明

2.1　在平直管道中

在水平直线管道中运动时,无需将机器人的所有驱动轮均支撑在管道内壁,变径机构适当收缩,使机器人的径向尺寸略小于管道内径,此时机器人类似一辆四轮小车在管道内运动。如图6所示。

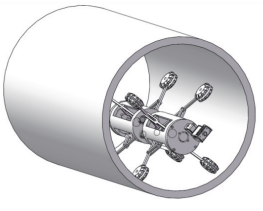

图6　机器人在平直管道中工作

该形态下机器人可以具有较快的运动速度,可提高在长直管道中的检查效率。同时此形态下的机器人具有一定的爬坡能力,当斜坡角度低于一定值时,机器人无需切换工作形态,就能顺利通过。以下对此时机器人的爬坡能力进行分析。机器人总体质量为8 kg,驱动轮与管道内壁摩擦系数为0.5,斜坡倾角为θ,已知机器人不会从斜坡上滑下的条件为:$\tan\theta\leqslant\mu$,即:$\theta\leqslant 26.56°$,因此上述机器人形态适用于平直管道以及坡度不超过26.56°的倾斜管道。

2.2　在竖直管道中

在竖直管道中,机器人前后两段的变径机构均径向展开,使8个驱动轮均支撑于管道内壁,通过压力产生的摩擦力来保证机器人的姿态稳定,驱动轮同速转动,机器人可以上下运动。具体力学分析已在上文中阐明。

2.3　通过弯曲管道

由于所研制的管道机器人采用了二段结构且中间用弹簧连接,可以适应弯道情况。当机器人处于弯道中时,每个驱动轮的转速各不相同,以下对于弯道中的机器人做几何分析。由于机器人结构前后两段除了摄像头云台外完全相同,取一段分析。

设弯道轴线曲率半径为D,圆管弯道半径为d,驱动轮直径r = 30 mm,机器人的4个驱动轮完全支撑在管道内壁且不考虑打滑,其中有2个相对的驱动轮所在平面与管道曲率半径所在的平面重合。

内侧轮的运动轨迹曲率半径为:

$$\rho_1 = D-d+\frac{r}{2} \quad (10)$$

外侧轮的运动轨迹曲率半径为:

$$\rho_2 = D-\frac{r}{2} \quad (11)$$

中间的2个驱动轮运动轨迹半径为:

$$\rho_3 = D \quad (12)$$

因此,内侧轮转速v_1、外侧轮转速v_2、中间轮转速v_3比值为:

$$v_1 : v_2 : v_3 = (2D-2d+r) : (2D-r) : 2D \quad (13)$$

2.4　通过变径管道

经调查,大型货轮上存在较多变径管道,所研制的机器人通过前后两段配合可以适应这种情况。

当机器人由大径进入小径管道时,如图7所示,前段变径机构的丝杆正转,使前段机构径向收缩直至略小于小径,后段驱动轮转动,驱动机器人向前运动,在前段主体进入小径管道后,前段变径机构使轮子支撑于管道内壁。相似的,后段机构径向收缩至小于前方管道的直径,在后段主体进入小径管道后,再使后方的驱动轮支撑于管道内壁。由小径进入大径管道时执行上述过程的反向过程即可。

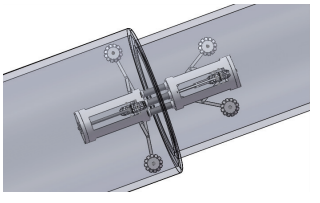

图7　由大径进入小径

3　控制界面与样机制作

3.1　用户交互控制界面的设计

为了使操作人员能够更为直观、便捷地控制机器人的运动,并仔细观察管道内壁情况,针对该机器人研究设计出一个 GUI(graphical user interface)界面,如图 8 所示。

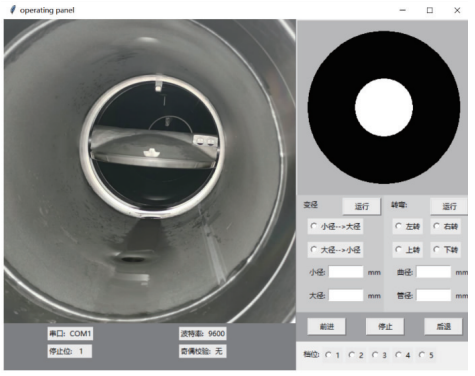

图 8　交互界面

该 GUI 界面主要分为 3 个部分:返回图像显示框、串口信息显示栏、机器人运动控制区。返回图像显示框用于实时显示摄像头返回的图像。串口信息显示栏用于反馈串口信息。右上方的黑白圆用于控制摄像头云台的指向。在机器人运动控制区域,操作人员可以控制机器人实现前进、后退、停止、转弯、变径等操作。

3.2　样机效果及反馈

在建立三维模型和理论分析的基础上,进行了实物样机的制作并且对实物与理论的差距进行了数据的收集分析,图 9 为实物样机照片。

实物样机能够较好地在管道中维持稳定的姿态,并且进行图像采集。在试验中,机器人性能满足各项预设指标,能够适应各种管道环境,但是缺少必要的传感器,使得操作较为复杂,有待改进。

4　结语

本论文研制出可以适应复杂多变环境的大型货轮管道系统探测机器人。为船舶行业检查管道内部情况、排除安全隐患提供了一种简单高效的解决方案。本文对于各种管道环境下机器人的工作方式逐一进行了分析,并成功制作出实物样机。根据实验情况,样机能够较好地实现在管内进行运动探测,为后续进一步研究管道机器人奠定了基础。

图 9　实物样机照片

参考文献:

[1] 姜莹,任光,贾宝柱. 船舶故障诊断的新发展[J]. 航海技术,2004(1):41.

[2] SENDOH M, ISHIYAMA K, ARAI K I.Fabrication of magnetic actuator for use in a capsule endoscope[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2003,39(5):32-34.

[3] 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(6):72.

[4] MIYAGAWA Toyomi, IWATSUKI Nobuyuki. Moving characteristics in bent pipes of in-pipe mobile robot with wheel drive mechanism using planetary gear drive[J]. Journal of the Japan Society for Precision Engineering,2008,74(12):1346-1350.

[5] 米智楠,龚振邦,钱晋武,等. 一种无损检测用的新型微机器人[J]. 无损检测,2000,22(11):489-490.

[6] 沈功田,景为科,左延田. 埋地管道无损检测技术[J]. 无损检测,2006, 28(3):137-141,150.

[7] 张云伟,颜国正,丁国清,等. 煤气管道机器人管径适应调整机构分析[J]. 上海交通大学学报,2005,39(6): 950-954,959.

[8] 刘跃冲. 基于模糊神经网络的船舶管道泄漏检测方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.

[9] 张永顺. 国外微型管内机器人的发展[J]. 机器人,2000(6):75-82.

[10] 费振佳. 履带式管道机器人设计及仿真研究[D]. 青岛:青岛大学,2016.

[11] 吴洪冲. 三轮腿式管道机器人结构设计及运动学分析[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2007.

[12] 郭瑜. 微小型螺旋推进管道机器人设计与分析[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.

收稿日期:2020-06-15