

双轮履带式管道机器人防侧倾机构研究

刘增辉^{a,b},马正阔^{a,b},彭磊^{a,b}

(河海大学 a. 机电工程学院; b. 疏浚技术教育部工程研究中心,江苏 常州 213022)

摘 要:针对双轮履带式管道机器人在管道中运动不稳定、容易侧倾的问题,设计一种履带式管道机器人防侧倾机构。基于 SolidWorks 软件,建立履带式管道机器人三维模型,进行防侧倾装置及传动系统设计。研究防侧倾装置不同管径适应性,并对管道机器人进行了受力分析。研究表明:该防侧倾机构结构简单、适应性能、损伤便捷、性能可靠,能够实现双轮履带式管道机器人的平稳作业,具有良好的工程应用价值。

关键词:管道机器人;防侧倾;水平仪;Zigbee 无线模块;伺服电机

中图分类号:TH242.3;TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)05-0142-04

Research on Anti-roll Mechanism of Double-wheel Crawler Pipeline Robot

LIU Zenghui^{a,b}, MA Zhengkuo^{a,b}, PENG Lei^{a,b}

(a. Department of Mechanical and Electrical Engineering, b. Engineering

Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Because unstable movement and easy rolling, exist in the double-wheel crawler pipeline robot, its anti-roll mechanism is designed. SolidWorks software is used to establish its 3D model and the anti-roll mechanism and the driving system are designed. The adaptability of the anti-roll mechanism in the different pipe diameters is researched on and the bearing force of this pipeling robot is analyzed. The research result shows that this anti-roll mechanism is characteristic of simple structure and reliable performance, it can be used to make the double-wheel crawler pipeline robot smoothly operate and it is of good value in engineering.

Keywords: pipeline robot; anti-roll; levelmeter; Zigbee wireless module; servo motor

0 引言

随着我国城市现代化建设的步伐越来越快,城市的规模不断扩大,城市用水量不断地增多,排水量也越来越大,下水管道管理、养护、维修及疏通等工作也越来越多。下水管道内的环境往往是狭小、复杂、危险的,传统的人工作业通常伴随着工人中毒、刮伤和管道破裂的风险。随着管道机器人的不断发展,机器人逐渐取代了人工在管道内进行养护、维修和疏通的工作^[1]。

管道机器人的种类繁多,但其中最常见的是履带式管道机器人,分为三轮式和双轮式两种。三轮履带式管道机器人虽然保证了其工作的稳定性,但由于自身质量较大,且灵活性较差,所以无法通过弯管、三通等特殊管道。相比之下双轮履带式管道机器人的灵活性更好,但在大管径管道行进过程中容易偏离管道中心,导致工作效率较低,且存在管道内倾覆的风险^[2]。

本文针对双轮履带式管道机器人在管道中运动不稳定、容易侧倾的问题,设计了一种主动防侧倾装置,可以尽早地纠正机器人在管道内工作的姿态,实现双轮履带式管道机器人的平稳作业。

1 履带式管道机器人结构设计

1.1 履带式管道机器人三维模型建立

基于目前主流的双轮履带式机器人的外形设计,利用 SolidWorks 三维建模软件对双轮履带式管道机器人外形进行建模,模型如图 1 所示。模型主要包括机器人的主体装置、行走装置和防侧倾装置 3 个部分。主体装置包括行走装置、为防侧倾装置提供能量的动力源和装有控制电路的电子舱;行走装置包括支撑、安装机器人主体装置的负重轮和支撑架,其可以通过控制两边履带的转速、转向做到小半径转向甚至原地转向。防侧倾装置是为了保证

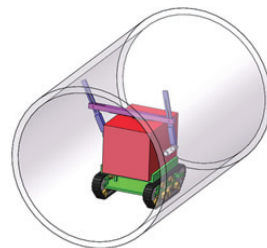


图 1 双轮履带式管道机器人
三维模型

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51909075);国家重点研发计划项目(2018YFC0407404);江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20190166)

第一作者简介:刘增辉(1988—),男,江苏徐州人,讲师,硕士生导师,博士,研究方向为机械设计、疏浚技术与装备等。

管道机器人在复杂管道环境下工作的稳定性,安装在管道机器人主体装置的上方。本文所设计的管道机器人主要技术参数如表 1 所示。

表 1 管道机器人主要技术参数

技术参数	数值
工作管径/mm	900~1 200
最大工作距离/m	30
尺寸/(mm×mm×mm)	550×600×700
质量/kg	15
最大管内速度/(m/s)	0.1

1.2 防侧倾装置以及传动系统设计

管道机器人在管道内工作时,一方面管道底部淤积物的高低不平会导致履带倾斜;另一方面移动过程中电缆放线时所产生的附加扭转力矩也会破坏履带配置平衡,进而造成履带逐渐偏离正常行进轨迹,呈现出图 2 所示的侧倾状态。侧倾严重时,工作效率低,工作可靠性差,且存在倾覆造成机器损坏的风险。为了避免此类情况发生,需要在机器人产生较小偏离角时启动防侧倾装置,通过防倾杆与管壁接触的反作用力将机器人推回到管道中心来保证其工作的稳定性^[3]。

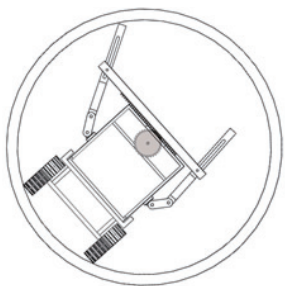


图 2 双轮履带式管道机器人侧倾状态示意图

防侧倾装置安装在履带式管道机器人的上方,其结构如图 3 所示,主要由驱动电机、齿轮、齿条、水平导轨、防倾杆及可调支座等组成。可调支座通过双头销轴将防倾杆固定在机器人主体装置两侧。驱动电机与齿轮相连,齿轮与齿条啮合,从而带动水平导轨水平运动。防倾杆上部有滑槽,通过销轴与水平导轨固定,因此当水平导轨运动时,会带动防倾杆内外收放,以适应不同管径的工作环境。

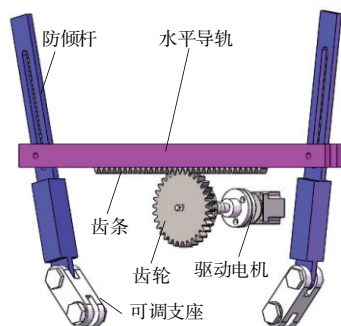


图 3 防侧倾装置结构图

1.3 防侧倾装置不同管径适应性

城市管道多数采用 PE 管,这类管材常被用于市政工程管道的建设,主要用于生活饮用水供给管道、污水处理管道等。因为其耐高压、耐磨、耐高温、防酸耐腐蚀、质量轻、方便安装与移动等特点,所以是管道建设的较好选择^[4]。

PE 材料按照国际统一的标准可以划分为 5 个等级: PE32 级、PE40 级、PE63 级、PE80 级和 PE100 级,其中 PE100 级有着更好的抗压能力、更薄的管壁和更长的使用寿命,所以 PE100 级的使用范围更广。PE100 级别管道的尺寸规格标准如表 2 所示^[5-6],表中规格系列 SDR 数值表示公称外径与公称壁厚的比值,其表示不同压力,对应不同壁厚。

表 2 PE100 级别管道的尺寸规格

公称 外径/ mm	公称壁厚/mm			
	SDR26	SDR21	SDR17	SDR13.6
	0.6 MPa	0.8 MPa	1.0 MPa	1.25 MPa
800	30.6	38.1	47.4	58.9
900	34.4	42.9	53.3	66.2
1 000	39.2	47.7	59.3	73.6
1 200	45.9	57.2	70.6	—
1 400	53.9	66.7	82.4	—

如图 4 所示,为了增大管道机器人的适应范围,通过调节零部件可调支座的安装角度,即可在一定范围内不同直径的管道实现,而不需要额外改变防倾杆、水平导轨等其他零部件的尺寸,操作便捷,适应性强。

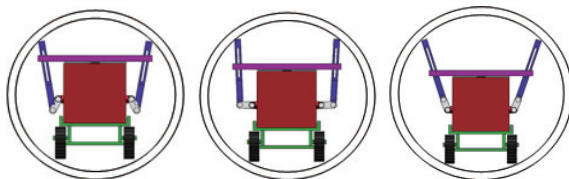


图 4 适应不同直径管道示意图

1.4 履带式管道机器人受力分析

履带式管道机器人受力分析如图 5 所示。在履带式管道机器人侧倾初期(图 5(a)),双侧履带均受力,取其截面进行受力分析。履带受力点分别定义为点 A 和 B,管道中心为点 O,机器人质心为点 M,机器人垂直中心线 MK 与重力的夹角定义为侧倾角 θ ,质心 M 与中心点 O 的水平距离定义为 l_1 ,管道半径定义为 R。履带受力点 A、B 承受管壁支撑力 N_A 、 N_B 及管壁摩擦力 f_A 、 f_B ,质心 M 承受重力 G。对管道中心点 O 求力矩,可得:

$$T_O = f_A \cdot R + f_B \cdot R + G \cdot l_1 \quad (1)$$

经过分析可知,O 点所受力矩 T_O 为逆时针方向,表明履带式管道机器人侧倾初期,在外力不加侧倾的情况下,依靠自身重力可逐步调整至管道中心,实现自动纠偏。

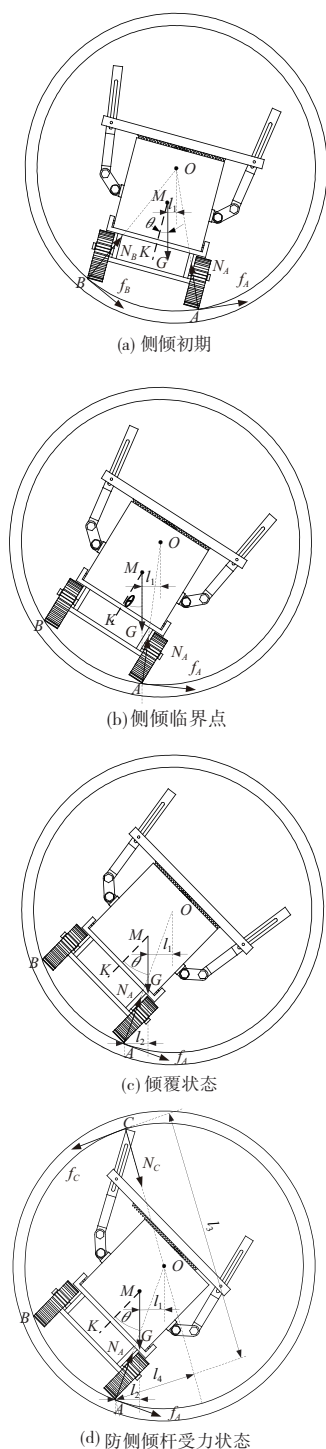


图5 履带式管道机器人受力分析图

但如果管道机器人继续倾斜,当 $\angle KMA = \angle \theta$ (重力方向与 MA 共线),管道机器人达到侧倾临界点(图5(b)),此时履带上点 B 处于不受力状态,只有点 A 承受支撑力和摩擦力。对点 A 求力矩,可得点 A 处的力矩为0,表明下一阶段如果侧倾角继续增大,将打破临界平衡,履带机器人进入倾覆状态(图5(c))。此时,对履带 A 点求力矩,可得:

$$T_A = G \cdot l_2 \quad (2)$$

经过分析可知, A 点所受力矩 T_A 为顺时针方向,表明履

带式管道机器人将沿着履带边顺时针倾覆。针对图5(c)所示倾覆状态,如果及时调整防侧倾杆位姿,可阻止甚至预防机器人侧倾情况的发生。防侧倾杆受力状态如图5(d)所示,对履带 A 点和中心点 O 分别求力矩,可得:

$$\begin{cases} T_A = f_C \cdot l_3 - N_C \cdot l_4 - G \cdot l_2 \\ T_O = f_A \cdot R + f_C \cdot R + G \cdot l_1 \end{cases} \quad (3)$$

首先,点 C 处摩擦力 f_C 克服倾覆力矩,使得机器人不再沿点 A 倾覆。然后在摩擦力 f_A 、 f_C 和重力 G 的共同作用下,使得管道机器人逆时针旋转,逐渐完成复位。通过以上分析可知,临界侧倾角即为 $\angle KMA$,因此通过降低机器人质心位置或增大机器人两履带间距均可增大临界侧倾角,一定程度上可降低管道机器人倾覆概率。但降低机器人质心通常会导致履带行走部底盘过低,降低履带机器人的越障能力;增大履带间距会导致履带行走部拐弯半径增大,增加其拐弯难度。因此,在管道机器人结构尺寸不变的情况下,增加防侧倾装置,可实现管道机器人的平衡作业。

2 防侧倾装置智能控制

智能控制是一种拥有智能信息处理、智能信息反馈和智能控制决策的控制方式,是控制理论发展的高级阶段,主要用来解决那些使用传统人工处理难以解决的复杂系统控制问题,以提高机械自动化的水平。其中智能控制中信息的获取主要是通过传感器技术将物理信号转变为电信号传输到处理器中进行处理。

2.1 传感器

在机器人行业内传感器的应用已更加广泛,为了实现防侧倾装置的智能控制,管道机器人的控制系统中需要添加不同的传感器,来监测管道内部环境和机器人自身的运动姿态,其中最重要的是水平仪和应变传感器。

1) 水平仪

传统的气泡水平仪并不能输出电信号,所以在此机器人中采用图6所示电感式水平仪,当机器人出现倾斜时,水平仪跟着机器人一起倾斜,水平仪内部摆锤磁芯与感应线圈绕组发生相对位置变化,进而导致感应线圈电压变化,从而输出相应的电信号,经过信号传输处理,转化成倾斜角度信号^[7-8]。

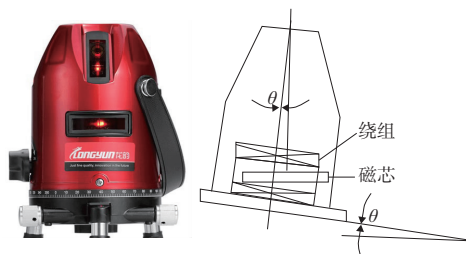


图6 电感式水平仪

2) 电阻应变式传感器

由于履带的不断滚动,难以测量机器人两侧的压力差,所以采用两侧支撑架的应变差代替压力差。所使用的电阻应变式传感器如图7所示,金属电阻应变丝随着受力物体产生应变,导致其电阻阻值变化,从而输出电流电信号。

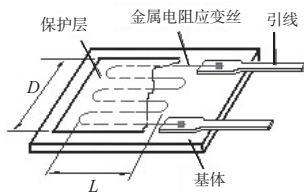


图7 电阻应变式传感器

2.2 控制系统

以往管内机器人常采用手动控制或固定模式控制,这种控制方法对于简单已知的管道环境内机器人的控制尚且有效,但当面对未知的管道环境时,由于管道内部情况复杂多样,且管道内部的空间有限,导致机器人无法对管道内部的环境和自身的运动姿态进行全面的实时检测,并且机器人在管道内的运动具有不确定性,难以用固定模式进行精确的控制,而手动控制也非常考验操作人员的反应速度与经验,从而难以完成设定的工作。因此管道机器人的智能控制不仅可以提高其工作效率,同时也大大提高了其工作的稳定性和准确性。

管道机器人的姿态与其自身尺寸、工作弯管半径和

管内工作情况等方面有关;管道机器人的姿态调整与机器人的本体质量、质心位置以及机器人与管壁的摩擦系数等方面有关。为了使机器人在环境复杂的管道内平稳行进,管道机器人自动调整姿态的能力显得尤其重要。

为使机器人在不同的倾斜角度下具有一定的回正能力,需要不断地检测机器人的运动姿态,并根据不同的运动环境模式,由控制计算机发出图3所示水平导轨平动的指令,进而伸出防侧倾杆抵住管壁,自动进行机器人的姿态调整。

管道机器人防侧倾系统控制流程如图8所示。将水平仪安装于机器人防侧倾装置水平面上,用于测量机器人侧倾角;同时将电阻应变式传感器安装在机器人支撑架的两侧,通过支撑架两侧的变形量判断履带轮的受力大小。传感器获取的机器人定位、位姿及受力信息,通过 Zigbee 无线收发模块^[9]传输至管道机器人控制台。通过与设定值比较判断,如果机器人的侧倾角过大或是两侧履带应变差值过大,控制台判断机器人已偏离管道中心,控制台将给防侧倾装置中伺服电机发送启动信号,输出合适转速与转矩,推动水平导轨平动,进而将防侧倾杆伸出,逐渐将倾斜的履带机器人回正。当机器人回正,控制台通过伺服电机反转,驱动防侧倾杆收回复位,然后关闭伺服电机,机器人正常继续前进,直到步进到设定移动距离,机器人停止前进^[10]。

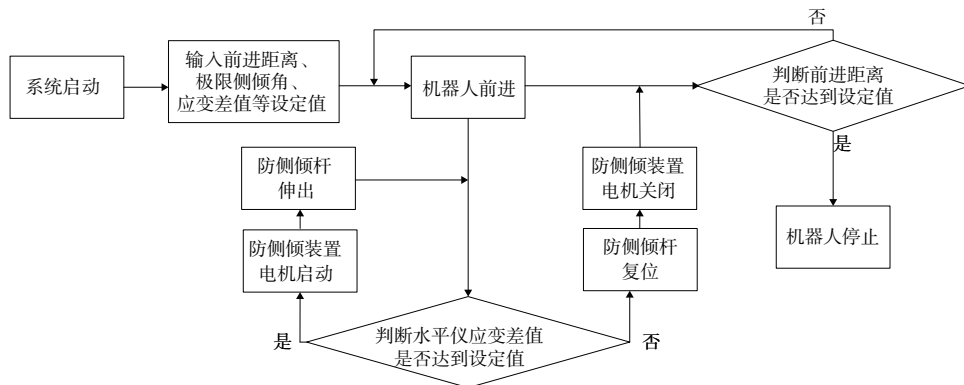


图8 管道机器人防侧倾系统控制流程图

3 结语

本文结合国内外管道机器人的发展现状和趋势,针对传统履带式管道机器人存在的倾覆问题,设计了一款能够主动防倾的双轮履带式管道机器人,尤其是对其防侧倾装置做了一定的优化改善。通过调节零部件可调支座的安装角度,即可实现一定范围内不同直径管道的灵活适应,结构简单,操作便捷,适应性强。该机器人利用水平仪和电阻应变式传感器,实现了对其位姿及受力信息的实时监测,并通过 Zigbee 无线收发模块和伺服电机控制,实现了机器人的自动纠偏和侧倾预防,进而保证双轮履带式管道机器人的平稳作业,具有良好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 刘嘉诚,陈涛,朱郎涛,等.城市地下管道机器人[J].湖北农机化,2017(5):58-59.
- [2] 李爱民,于浒,李云鹏,等.管道清淤机器人的设计[J].轻工科技,2019,35(3):64-65.

- [3] 杨忠炯,江艳蕊,周立强.双摆臂履带式移动机器人侧倾稳定性分析[J].制造业自动化,2019,41(2):128-131.
- [4] 孙伟.对B型结构壁缠绕式PE管用于水下管道的实践[J].智能城市,2018,4(23):94-95.
- [5] 林金梅,黄国家.管道用PE100级树脂的性能分析及发展趋势[J].现代化工,2020,40(2):36-40.
- [6] 张静行.PE80、PE100管材料国内外发展趋势[J].中国石油和化工经济分析,2007(2):36-38.
- [7] 王存堂,阳恩会,张建国,等.全方位电子水平仪的结构及测量原理分析[J].仪器仪表学报,2006,27(2):183-185.
- [8] MENG W G, XU S G, LIU M, et al. Fracture analysis of the threaded joint of the level gauge in a reabsorption tower[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 96:44-59.
- [9] 赵超. ZigBee 无线数据传输模块的设计组网及在管道自动化中的应用[J].科学与信息化,2017,31:115.
- [10] MOGHADDAM M M, ARBASTAFTI M, HADI A. In-pipe inspection crawler adaptable to the pipe interior diameter[J]. International Journal of Robotics & Automation, 2011, 26(2):135-145.

收稿日期:2020-07-17