

管道机器人推进装置的支撑腿压力 稳定性控制方法

罗继曼,刘士恒,马思源,肖雅心

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 提出一种基于模糊PID的压力控制方法,以提高管道机器人推进装置工作稳定性,增强机器人的协调性和可控性。方法 通过分析推进装置的工作原理及控制需求,设计支撑腿压力稳定控制方案,并在Simulink平台进行压力稳定控制的建模与仿真;对该控制系统进行硬件配置及软件设计,并进行支撑腿压力稳定控制实验。结果 在引入模糊控制方法后,系统调节时间缩短了14.2%,并且抗干扰能力明显提升;实验结果表明:在引入模糊控制方法后,压力波动幅度减少了81.6%,系统稳态性能明显提高。结论 基于模糊PID算法的压力控制策略提高了支撑腿压力的稳定性,笔者所设计的压力稳定控制系统可满足控制要求。

关键词 管道机器人;推进装置;支撑腿;压力控制;模糊PID

中图分类号 TP241

文献标志码 A

Pressure Stability Control of Supporting Legs of Pipeline Robot Propulsion Device

LUO Jiman, LIU Shiheng, MA Siyuan, XIAO Yaxin

(School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to improve the working stability of the propulsion device of pipeline robot and enhance the coordination and controllability of the robot, a pressure control strategy based on fuzzy PID was proposed. By analyzing the operating principle and control requirements of the propulsion device, the pressure stability control scheme of the support leg was designed, and the modeling and simulation of the pressure stability control were carried out on the Simulink platform; and the hardware configuration and software design of the control system were carried out, and then the pressure stability control experiment of the support leg was completed. The simulation results show that after introducing the fuzzy control method, the adjustment time of the system was shortened by 14.2%, and the anti-interference ability was significantly improved; The experimental results show that after introducing the fuzzy control method, the pressure fluctuation amplitude was reduced by

收稿日期:2021-09-12

基金项目:国家自然科学基金项目(62003226);辽宁省自然科学基金项目(2019-KF-01-03)

作者简介:罗继曼(1966—),女,教授,博士,主要从事机器人设计和工程机械等方面研究。

81.6%, and the steady-state performance of the system was significantly improved. The pressure control strategy based on Fuzzy PID algorithm improves the stability of support leg pressure. The pressure stability control system designed by the author can meet the control requirements.

Key words: pipeline robot; propulsion device; support leg; pressure control; fuzzy PID

管道机器人在排水管道清淤工作中优势越来越明显^[1-3]。目前国内外很多研究者致力于管道机器人的研发:曹建树^[4]研制了一款可变径管道机器人,利用直流电机驱动变径机构撑紧在管道内壁,并通过在传动链上安装压力传感器检测压力,形成了压力的半闭环控制;牛海川等^[5]研制了一款垂直管道机器人,通过控制电机带动凸轮旋转使两侧弧形板撑紧在管道内壁,并使用压力传感器实时检测压力,然而对于压力的稳定控制研究较少;丹麦的皮塔尔·杜德维奇团队研制了一款管道检测机器人^[6],该机器人的行走轮由柔性机构支撑,在柔性结构中安装有压力传感器安装,可以间接检测轮子与管道内壁的压力数据。上述研究均未对机器人与管道内壁的压力进行稳定控制研究,虽然可以使机器人可适应管径的变化,但是支撑腿压力的波动还是会影响机器人工作时的稳定性。

基于此,笔者将课题组研制的管道机器人作为实验平台,针对其支撑腿的压力稳定控制问题进行研究;通过在支撑腿上安装压力传感器,建立支撑腿压力的闭环反馈控制系统,并在控制方法上引入模糊 PID 控制算法,使支撑腿的压力稳定在目标值附近。研究表明:笔者所提方法实现了压力的闭环控制,解决了压力难以稳定的问题,是一种有效的压力控制方法;在进行压力控制时,模糊 PID 控制方法适应能力强,系统稳态性能好,响应速度更快,控制效果明显优于传统 PID。

1 机器人结构及控制需求分析

1.1 机器人机械结构

笔者所在课题组设计的管道清淤机器人

是一种可在排水管道内部进行清淤疏通作业的机械装置,能自主完成前进、后退、清淤等操作。该机器人由清淤装置、轮式行走装置和推进装置三部分构成,如图 1 所示。在工作时,清淤装置负责完成清淤工作,轮式行走装置提供前进动力。当轮式行走装置出现打滑现象时,开启推进装置,推进装置的支撑腿压紧管道内壁,然后通过推力挡板的伸缩运动推动机器人前进。

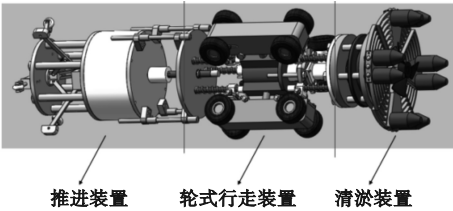


图 1 管道清淤机器人

Fig. 1 The pipeline robot for desilting

推进装置由撑紧机构和丝杠推进机构组成,如图 2 所示。丝杠推进机构的伸缩运动由丝杠电机 M4 带动丝杠螺母副完成,使推力挡板推动机器人向前运动。撑紧机构的撑紧和缩进动作由电动推杆电机 M5 控制,使支撑腿与管道内壁间产生压力,保证推进装置在推进过程中不打滑。

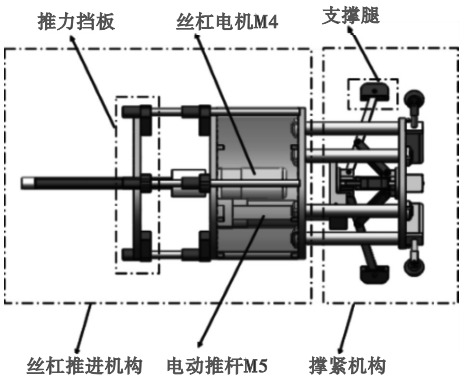


图 2 推进装置

Fig. 2 The propulsion device

1.2 工作原理

当机器人前端负载过大,轮式行走装置提供的驱动力不足时,推进装置启动。推进

装置工作流程分为电动推杆带动支撑腿撑起、推力挡板前进、电动推杆缩回以及推进装置前进等 4 个步骤(见图 3)。

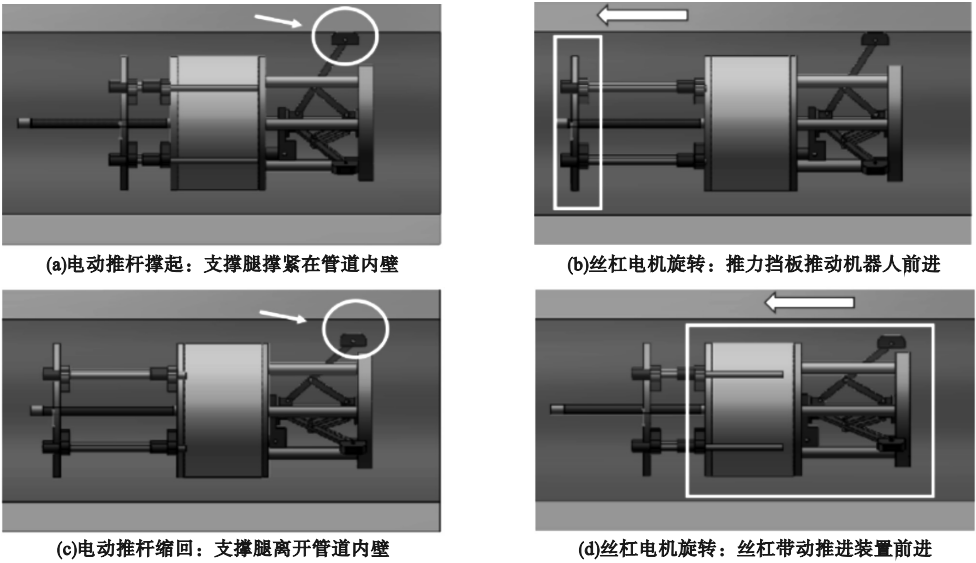


图 3 推进装置工作流程

1.3 控制需求分析

在推进装置工作时,需要使支撑腿撑紧在管道内壁,为推力挡板的推进动作提供夹紧力。但在清淤工作中,机器人与前方障碍物发生碰撞或者清淤装置旋转均会导致支撑腿与管道内壁的压力波动,这就会导致推力挡板的推进动作不稳定。由此可见,支撑腿与管道内壁的压力能否得到稳定控制决定着推进装置能否稳定工作。

为确保推进装置能够稳定工作,对如何实现支撑腿与管道内壁压力的稳定控制进行了研究,并针对压力稳定控制搭建其控制系统。

2 控制系统方案设计

在控制方式上,为提高控制精度,在支撑腿端部安装压力传感器,构成基于压力反馈的闭环控制。在支撑腿与管道内壁接触后,利用压力传感器的检测与变送功能,实时检测支撑腿与管道内壁压力并将压力检测值发送至核心控制器^[7]。核心控制器收到压力

检测值后与压力设定值相比较,并通过模糊 PID 算法实时改变电动推杆电机的两端电压的大小和方向,使电动推杆输出不同大小的推力,从而保证支撑腿与管道内壁的压力稳定在压力设定值附近。

2.1 控制模型与力学模型的建立

为了对支撑腿压力控制系统进行稳定性分析,首先需要建立被控对象输入、输出之间精确的数学关系,即描述系统动态物理规律的数学模型。

支撑腿与管道内壁之间的压力是通过压力传感器检测的,其中压力闭环传递函数可以简化为图 4 所示的流程图。针对方框图的每一模块进行建模,为后续的控制与仿真分析打好基础。

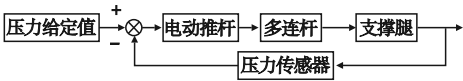


图 4 压力控制流程图

Fig. 4 The flow chart of pressure control

2.1.1 电动推杆控制模型

控制支撑腿的压力需要从控制电动推杆

的推力开始,而控制电动推杆的推力是从控制电动推杆电机两端电压开始的。对于电动推杆电机,其不同于普通直流电机,它是通过输入电压量 $U(t)$ 逐步转变为电流量 $I(t)$ 、转矩量 $T(t)$,最后转为输出推力量 $F_B(t)$ [8]。通过 Laplace 变换后,获得电动推杆的传递函数,如图 5 所示。

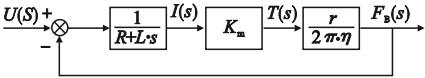


图 5 电动推杆传递函数

Fig. 5 The transfer function of electric push rod

由图 5 可知,电动推杆的输入电压 $U(s)$ 与电流 $I(s)$ 之间的参数关系:

$$\frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{R + Ls} \tag{1}$$

电动推杆的电流 $I(s)$ 与转矩 $T(s)$ 之间参数的关系:

$$\frac{T(s)}{I(s)} = K_m \tag{2}$$

电动推杆的转矩 $T(s)$ 与输出推力 $F_B(s)$ 之间的参数关系:

$$\frac{F_B(s)}{T(s)} = \frac{r}{2\pi\eta} \tag{3}$$

结合式(2)、式(3)、式(4),电动推杆电压 $U(s)$ 与输出推力 $F_B(s)$ 的关系:

$$\frac{F_B(s)}{U(s)} = \frac{I(s)}{U(s)} \cdot \frac{T(s)}{I(s)} \cdot \frac{F_B(s)}{T(s)} \tag{4}$$

即

$$\frac{F_B(s)}{U(s)} = \frac{K_m \cdot r}{2(R + Ls) \cdot \pi\eta} \tag{5}$$

式中: K_m 为转矩系数; R 为电枢电阻; L 为电感; r 为电动推杆导程; η 为电动推杆传动效率。

2.1.2 多连杆与支撑腿的力学模型

撑紧机构是由电动推杆和多连杆机构组成。电动推杆与前固定端连接,带动多连杆结构做出撑开和收缩动作。

多连杆机构的三维模型如图 6 所示。

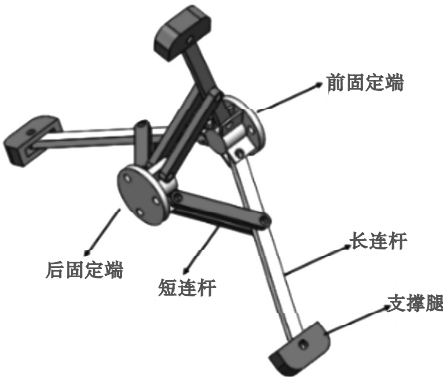


图 6 电动推杆多连杆机构

Fig. 6 The multi-link mechanism of electric push rod

连杆机构由 3 组相同的单支腿并联组成,取多连杆机构中单支链进行受力分析,力学模型如图 7 所示。图中, L_{AB} 为长连杆; F 为支撑腿压力; F_B 为电动推杆推力; θ 为长连杆与电动推杆的夹角。

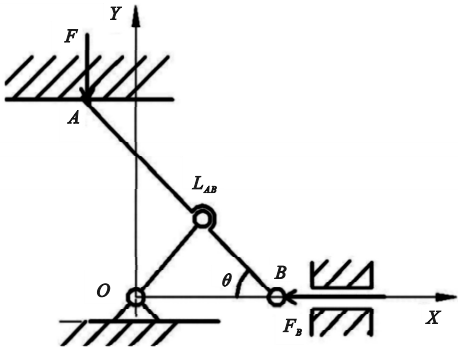


图 7 多连杆机构受力分析

Fig. 7 The force analysis of multi-link mechanism

由图可知,管道内壁单个支撑腿压力 F 与电动推杆总输出推力 F_B 之间关系:

$$F = F_B \cdot \frac{\tan\theta}{3} \tag{6}$$

综上所述,结合式(5)、式(6)可知单个支撑腿压力 $F(s)$ 与电动推杆的输入电压 $U(s)$ 之间关系的函数表达式:

$$\frac{F(s)}{U(s)} = \frac{K_m \cdot r \cdot \tan\theta}{(R + Ls) \cdot 6\pi\eta} \tag{7}$$

2.2 模糊 PID 控制的实现

由于支撑腿压力控制系统具有非线性、控制环境复杂的特点,当控制环境发生变化时,传统 PID 控制参数不能实时调整,这就

造成了传统 PID 对支撑腿压力稳定控制的局限性^[9-10]。

基于上述情况,该控制系统在传统 PID 控制基础上引入了模糊控制算法,来在线调整 PID 控制器的控制参数,以提高控制效果^[11-14]。

模糊 PID 控制原理就是在传统 PID 控制器前段引入模糊控制算法,如图 8 所示。

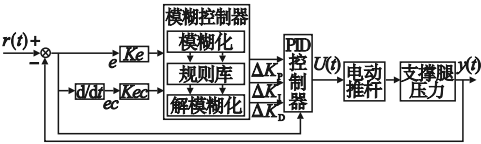


图 8 模糊 PID 压力控制框图

Fig. 8 The pressure control block diagram based on fuzzy PID

在压力稳定控制系统中,以支撑腿压力反馈值与设定值之间的偏差 e 及偏差率 ec 作为模糊 PID 控制器的输入量,然后将模糊 PID 控制器的输出量作为电动推杆的电压控

制量 $u(t)$,电动推杆电机将电压量转化为推力,再经多连杆机构转换为支撑腿压力,最后经过不断反馈和调整,即可使支撑腿压力保持在目标压力值附近。

3 基于 Simulink 的控制仿真

为了验证该控制系统的控制效果,在 MatLab/Simulink 平台,分别以传统 PID 控制方法和模糊 PID 控制方法进行了建模仿真,并通过对比其响应速度、稳态误差以及受到扰动后的回调速度等数据,定量分析模糊控制方法对支撑腿压力稳定性的影响。

3.1 仿真模型的搭建

根据系统的数学模型以及确定的模糊控制策略,在 Simulink 模块中建立该控制系统的仿真模型,如图 9 所示。仿真模型分为传统 PID 控制模型和模糊 PID 控制模型两部分,对两者输出量进行对比分析。

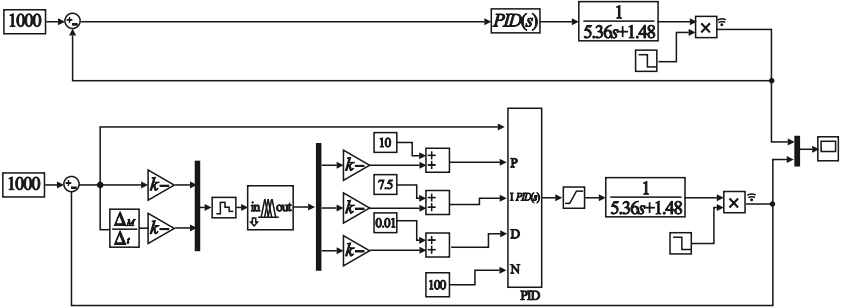


图 9 压力控制仿真模型

Fig. 9 The simulation model of pressure control

3.2 仿真过程及结果分析

支撑腿压力控制仿真具体步骤如下:首先设定仿真时间为 20 s,压力期望值为 1 000 N^[15],然后利用 Simulink 中 PID 控制模块中 Tuner 工具,设置初始控制参数 K_p 、 K_i 、 K_d ,最后在第 10 s 时为系统引入 -200 N 的扰动,以测试控制系统的抗干扰能力。

该压力控制系统阶跃响应曲线如图 10 所示。仿真结果如表 1 所示。

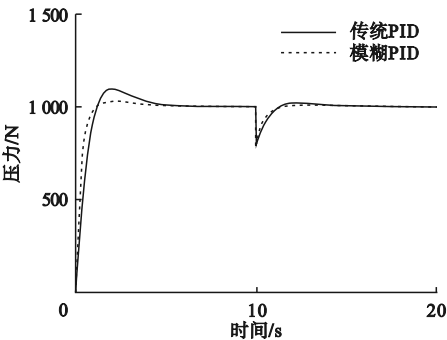


图 10 控制系统仿真曲线

Fig. 10 The simulation results of control system

表 1 控制系统仿真结果

Table 1 The comparison of simulation results

控制方法	调节时间/s	最大超调量/%	受扰动后 回调时间/s
传统 PID	7.35	9	6.71
模糊 PID	6.31	3	1.53

分析图 10、表 1 可知:在整个仿真过程中,模糊 PID 控制方法相较于传统 PID 调节时间缩短了 14.1%,最大超调量减少了 6%;在增加系统负载扰动后,模糊 PID 算法相较于传统 PID 算法,系统回调时间缩短了 77.2%。

由此可以得出,模糊 PID 控制方法比传统 PID 控制方法控制效果更好,系统的动态特性和稳态特性都满足要求。

4 支撑腿压力稳定控制实验

4.1 硬件配置

该控制系统的下位机选用嵌入式 STM32 系列微控制器,其芯片是基于 Cortex-M4 内核的 32 位 CPU,同时该控制器有多种通信及多个定时器,可产生多路 PWM 脉冲信号。

关于支撑腿处的压力检测,选择型号为 RP-S40-ST 的薄膜压力传感器。该传感器面积小,方便固定在支撑腿端部。而且该压力传感器压力灵敏度高,稳定性好。

电机驱动器选择 L298N 电机驱动模块,它能作为核心控制器和电机之间的连接纽带,根据核心控制器输出的 PWM 信号控制电机的电压大小。

4.2 软件设计

控制系统的软件部分是实现压力稳定控制功能的核心^[16],该控制系统软件开发平台使用 MDK 软件,与 STM32 有着较好的兼容性;同时该软件含有丰富的中间库资源,提高开发效率。

软件设计主要包含两个步骤,分别为压力检测和压力稳定控制。压力稳定控制程序

框图如图 11 所示。

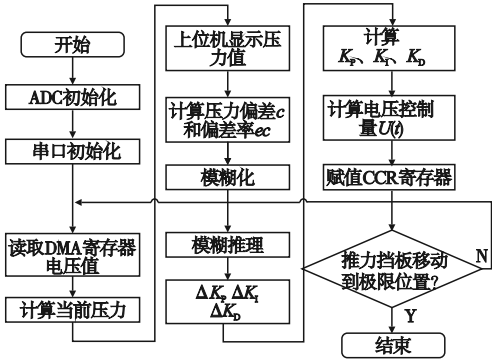


图 11 压力控制程序框图

Fig. 11 The flow chart of pressure control

压力检测:首先初始化模数转换器 ADC 并使能,并以 10 ms 为时间间隔采集 DMA 寄存器数值,然后根据采样值与电压、压力之间的比例关系,计算出当前的压力值,最后在上位机以 10ms 的时间间隔打印支撑腿压力值。

压力稳定控制:首先计算压力偏差 e 和偏差率 ec ,经过模糊推理的运算后即可得到增量值 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D ,然后将其分别与初始控制参数 K_{P0} 、 K_{I0} 、 K_{D0} 相加,即可得到三个控制参数 K_P 、 K_I 、 K_D 。最后计算出 PID 控制量,进行循环调节。

4.3 实验过程及结果分析

4.3.1 实验步骤

(1)将机器人本体放置在自制的管道中(见图 12),将压力传感器固定在支撑腿端部,连接上位机、控制单元以及各电控线路;

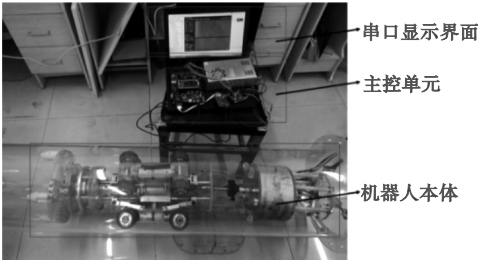


图 12 管道机器人实验平台

Fig. 12 The experimental platform of pipeline robot

(2)在 MDK 软件中进行控制程序设计与编译,并使用 DAP 仿真器将完整的程序下

载到核心控制器;

(3)实验开始前,打开上位机串口界面,如图 13 所示。实验开始后,上位机的串口界面就会以 10 ms 的时间间隔打印支撑腿压力值。



图 13 上位机串口显示界面

到 Origin 软件中绘制支撑腿压力与时间的关系曲线,如图 14 所示。

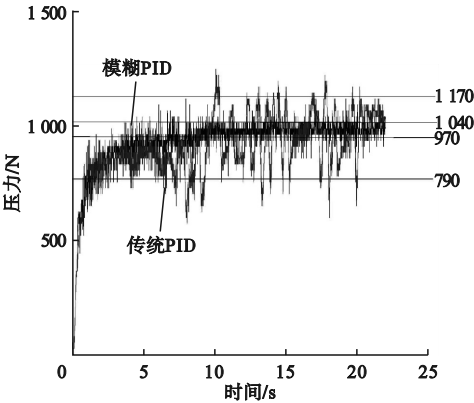


图 14 支撑腿与管道内壁的压力检测值

Fig. 14 The measured pressures between supporting leg and pipe inner wall

为了验证模糊 PID 算法的压力稳定控制效果,针对同一目标压力值,分别采用传统 PID 和模糊 PID 两种算法进行实验。实验结束后收集上位机显示的数据,并将数据导入

为了定量分析支撑腿压力的波动情况,通过实验获得以下压力数据及统计值,见表 2,由此比较不同控制方法对于压力稳定产生的控制效果。

表 2 实验压力及统计结果

Table 2 The statistical results of measured pressures

控制方法	调节时间/s	压力/N	压力超调量/%	压力平均值/N	压力标准差/N
传统 PID	9.7	[790,1170]	11.70	990.6	118
模糊 PID	6.9	[970,1040]	4	1 000.5	34

4.3.2 实验结果分析

(1)在使用不同控制算法对压力进行稳定控制时,这两组压力平均值与压力期望值(1 000 N)的相对差分别为 0.94%、0.05%,同时支撑腿压力值均在 10 s 内调节到压力目标值(1 000 N)附近,证明了该控制方案的可行性。

(2)在进行压力稳定控制时,模糊 PID 相较于传统 PID 系统压力波动幅度降低了 81.6%,压力标准差缩小了 71.2%,说明模糊 PID 算法相较于传统 PID 算法能获得波动更小的压力值,其控制效果更好。

(3)由于实验影响因素较多,而仿真是在理想条件下进行的,导致实验中压力控制效果比仿真中的控制效果稍差。例如,对比表 1 和表 2 可知,使用传统 PID 控制算法时,

实验中的压力调节时间比仿真中的延长了 2.35 s,压力超调量增大了 2.7%。对比表 2 中传统 PID 与模糊 PID 的实验数据可知,后者比前者压力调节时间缩短了 2.8 s,压力超调量降低了 7.7%。由此说明,实验与仿真结果都有相同的规律,使用模糊 PID 比传统 PID 控制效果好,说明模糊 PID 控制算法更加适用于该控制系统。

5 结 论

(1)针对机器人在管道内进行清淤作业时,推进装置工作不稳定的现象,笔者提出了推进装置支撑腿与管道内壁的压力稳定控制方法;该方法以电动推杆为控制对象,通过使用模糊 PID 控制算法调节电动推杆的电压,间接调整了支撑腿与管道内壁的压力,实现

了压力的闭环控制,解决了压力难以稳定的问题,达到了预期设计目标,是一种有效的压力控制方法。

(2)与传统PID控制方法相比,在进行压力控制时,模糊PID控制方法适应能力强,系统稳态性能好,响应速度更快,控制效果明显优于传统PID控制方法。

参考文献

- [1] YAN H W, WANG L, LI P C, et al. Research on passing ability and climbing performance of pipeline plugging robots in curved pipelines [J]. IEEE access, 2020, 8: 173666 – 173680.
- [2] ZHANG G Q, YANG Z M, ZHEN J J. Design and realization of a pipeline and slot multi-function robot [J]. Applied mechanics and materials, 2013, 440: 216 – 221.
- [3] 骆煜, 黄大为. 地下管网清淤机器人开发前景浅析[J]. 建设机械技术与管理, 2020, 33(增刊1): 11 – 13.
(LUO Yu, HUANG Dawei. The brief analysis of development prospect of underground pipe line desilting robot [J]. Construction machinery technology & management, 2020, 33(S1): 11 – 13.)
- [4] 曹建树, 张义, 黄子茂, 等. 基于LabWindows/CVI的排水管道机器人测控系统设计[J]. 测控技术, 2014, 33(8): 80 – 83.
(CAO Jianshu, ZHANG Yi, HUANG Zimao, et al. Design of measurement and control system of sewer pipe robot based on LabWindows/CVI [J]. Measurement & control technology, 2014, 33(8): 80 – 83.)
- [5] 牛海川, 王兆强, 朱范翔, 等. 基于STM32的管道机器人控制系统设计[J]. 现代制造技术与装备, 2019(5): 26 – 27.
(NIU Haichuan, WANG Zhaoqiang, ZHU Fanxiang, et al. Design of pipeline robot control system based on STM32 [J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2019(5): 26 – 27.)
- [6] QU Y, DURDEVIC P, YANG Z. Smart-spider: autonomous self-driven in-line robot for versatile pipeline inspection [J]. IFAC-papers online, 2018, 51(8): 251 – 256.
- [7] 刘彩霞, 龚德利. 螺旋轮式小型管道机器人及其驱动控制系统研究[J]. 制造业自动化, 2014(15): 45 – 48.
(LIU Caixia, GONG Deli. Research on screw wheel small pipeline robot control system [J]. Modern manufacturing technology and equipment, 2014(15): 45 – 48.)
- [8] 高嵩, 王磊, 陈超波, 等. 一种改进粒子群优化的分数阶PID参数整定[J]. 控制工程, 2017, 24(10): 2010 – 2015.
(GAO Song, WANG Lei, CHEN Chaobo, et al. An improved particle swarm optimization algorithm for fractional order PID parameter tuning [J]. Control engineering of China, 2017, 24(10): 2010 – 2015.)
- [9] 张潮, 郭京波, 张海东, 等. 基于模糊PID的盾构土仓压力控制研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(3): 82 – 88.
(ZHANG Chao, GUO Jingbo, ZHANG Haidong, et al. Research of earth pressure balance control on the fuzzy PID [J]. Journal of Shijiazhuang railway institute (natural science), 2019, 32(3): 82 – 88.)
- [10] ZHENG H, LI Z Q, XIA Y X, et al. Tuning of fuzzy PID controller for smith predictor [J]. Journal of central south university of technology, 2010, 17(3): 566 – 571.
- [11] CHIA K S. Ziegler-nichols based proportional-integral-derivative controller for a line tracking robot [J]. Indonesian journal of electrical engineering and computer science, 2018, 9(1): 221 – 226.
- [12] 荆建立, 王艳春, 朱永庆. 无刷直流电机模糊参数自适应PID控制[J]. 控制工程, 2018, 25(5): 915 – 919.
(JING Jianli, WANG Yanchun, ZHU Yongqing. Fuzzy parameter adaptive PID control of brushless DC motors [J]. Control engineering of China, 2018, 25(5): 915 – 919.)
- [13] 李树江, 王志超, 王向东. 基于ARM9的变风量空调末端控制器设计与实现[J]. 控制工程, 2017, 24(8): 1595 – 1602.
(LI Shujiang, WANG Zhichao, WANG Xiangdong. Design and implementation of variable air volume air-conditioning terminal controller based on ARM9 [J]. Control engineering of China, 2017, 24(8): 1595 – 1602.)
- [14] 张屹. 基于干道绿波效应协同策略的信号配时模糊控制[J]. 计算机科学, 2014, 41(6A): 80 – 82.
(ZHANG Yi. Signal timing fuzzy control based on road green wave effect collaborative strategy [J]. Computer science, 2014, 41(6A): 80 – 82.)
- [15] 罗继曼, 都闯, 郭松涛, 等. 管道机器人轮-爪式行走装置运动学和力学特性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 344 – 351.
(LUO Jiman, DU Chuang, GUO Songtao, et al. Analysis of kinematics and mechanical properties of wheel-claw walking device of pipeline robot [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2): 344 – 351.)
- [16] 张伟, 杨朝全, 李慧, 等. 伺服控制数控攻丝机的设计[J]. 现代制造工程, 2015(4): 44 – 46.
(ZHANG Wei, YANG Chaoquan, LI Hui, et al. Design of CNC tapping machine based on servo control [J]. Modern manufacturing engineering, 2015(4): 44 – 46.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)