

密集管道群自动化清洗机器人设计及仿真分析

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2023.06.007

赵易达¹ 姚利华¹
黄鹏鹏¹ 王慧钰¹
周东辉² 杨 景¹

1. 浙江理工大学
机械工程学院
浙江 杭州 310018
2. 浙江工业职业技术学院
交通学院
浙江 绍兴 312000

摘 要: 换热器作为工业领域的重要设备,其内部密集管道群的内壁污垢清洗是一个难点。为提升密集管道群清洗的效率,设计了用高压水枪快速自动化清洗机器人。首先,针对换热器的结构特点,设计管端定位装置,用于高压水枪喷头在管道群端口的定位。其次,设计位置反馈装置以提高机器人末端位置控制精度,并研究其标定算法。最后,对管道清洗机器人运动学进行建模,通过仿真验证模型的正确性,并结合 Adams 软件对机器人进行自动清洗过程的模拟。所设计的管道清洗机器人能够将高压水枪精准定位,完成清洗任务,为密集管道群的自动化清洗方案提供重要参考。

关键词: 密集管道群;清洗机器人;运动学模型;位置反馈;拉线传感器

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2023)06-0056-06

引文格式: 赵易达,姚利华,黄鹏鹏,等.密集管道群自动化清洗机器人设计及仿真分析[J].包装学报,2023,15(6):56-61.

1 研究背景

换热器作为石化、炼油及动力传输等领域的常用设备,其内部由许多细长的管道组成。随着介质的长时间输送,管道内壁不可避免地会发生结垢^[1]。管道内壁污垢的存在会影响设备的传热效率、增大介质阻力,进而增大设备能耗,因此,定期对管道内部进行清理具有重要意义。在细小工业管道群的清洗方面,管道清洗机器人能对管内清洗机器人或清洗头进行精确定位与移动,将管内机器人准确送至需清洗的管道入口处,在驱动力的作用下,管内机器人或清洗头完成管道内部的清洗作业。目前,管道清洗机器人在

换热器管束中的定位不够精准,致使它在细小工业管道群中的应用受到限制。

管道清洗技术主要有手工清洗、机械清洗、化学清洗等传统技术,也有高压水射流清洗等新技术^[2]。高压水射流清洗技术正逐渐取代传统的清洗技术^[3]。高压水射流装置在管端的自动精准定位是实现管道群自动化清洗的关键。国内外有诸多与管道自动化清洗相关的研究。孟宪宇等^[4-5]对变化的管道内径和大弯道的管道清洗机构进行了研究,并设计了能够适应以上工况的清洗机构。钟文胜等^[6]以油烟管道为研究对象,设计了用于自动化清洗的机械结构,并搭建了相应的控制系统。此管道清洗机器人能完

收稿日期:2023-07-11

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LQ21F020026);浙江理工基本科研业务费项目(22242296-Y);绍兴市科技计划基金资助项目(2022A14034)

作者简介:赵易达(1999-),男,浙江嘉兴人,浙江理工大学硕士生,主要研究方向为机器人技术,
E-mail: 986241555@qq.com

通信作者:杨 景(1989-),男,河南南阳人,浙江理工大学讲师,博士,主要研究方向为机器人技术,
E-mail: yangjing@zstu.edu.cn

成油烟管道的自动化清洗。刘莹等^[7]设计了一款专门用于中央空调通风管道清洗的机器人。该机器人还可以用于一定范围内的变截面管道清洁。孙康岭等^[8]设计了一种风管清洗机器人自适应调节机构, 并建立相应的数学模型, 进行仿真分析。蔡长亮^[9]建立了履带式管道清洗机器人三维模型, 并进行了仿真分析。仿真结果证明了该机器人清洗功能的可行性。

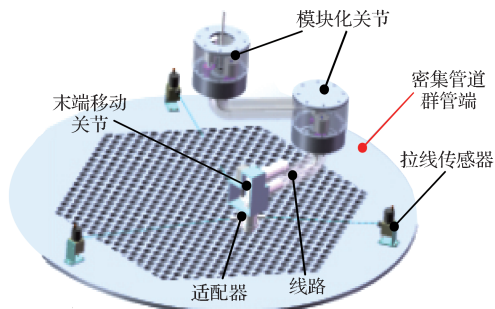
本文对密集细长管道内壁污垢的自动化清洗问题进行研究, 设计一种自动化清洗污垢机器人。清洗污垢采用高压水枪。管道清洗机器人包括管端定位装置和位置反馈装置两部分。构建管端定位装置的运动学模型, 运用 MATLAB 仿真软件对位置反馈装置的测量方法进行了多工况条件下的分析。

2 管道清洗机器人的结构设计

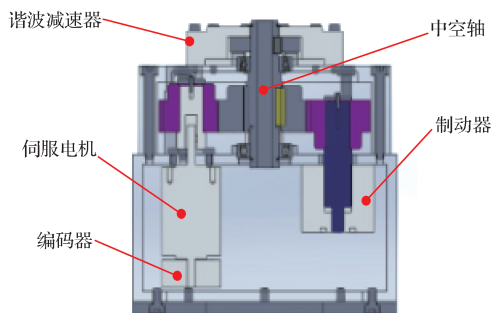
根据换热器密集管道群管端的工况, 管端定位装置应能定位管端所有细长管道的中心位置, 高压水枪喷头通过喷射高压水流进行管道内壁清洗。当清洗完一根细长管之后, 定位机器人动作将高压水枪喷头定位到下一个中心孔位, 继续清洗, 直至完成所有密集细长管道清洗。

本文所设计的管端清洗机器人整体结构如图 1a 所示。管道清洗装置为三自由度平面机构, 包括大臂旋转自由度、小臂旋转自由度和末端移动自由度。两个旋转自由度实现机器人末端在管端面平面的位移, 末端移动自由度实现高压水枪喷头与管端的近距离接触。

大臂和小臂关节采用模块化关节设计, 如图 1b 所示。模块化关节中, 伺服电机与制动器分别通过齿轮传动实现谐波减速器的输出和制动, 并且电机和制动器分布在中空轴的对称位置上。



a) 整体结构



b) 模块化关节

图 1 管道清洗机器人

Fig. 1 Pipeline cleaning robot structure

3 位置反馈装置分析

3.1 位置测量方法

位置反馈装置由三组均匀分布的拉线传感器组成, 可以实现直径 800 mm 之内的所有管道定位, 如图 2 所示。拉线传感器选择上海煦赫电子科技有限公司生产的 W50-E 型, 量程为 1000 mm, 线性精度为 $\pm 0.01\%FS$, 速度为 4.0 m/s, 内置拉线为 0.5 mm 进口涂塑钢丝绳。三组拉线传感器均匀分布在圆盘的圆周上。拉线传感器即可实现平面坐标标定, 测量的初始位置为圆盘的中心位置。三组坐标标定值的均值为最终的坐标标定值。每一组拉线传感器通过过轮及过线座保证拉线始终在机器人末端所在平面内。

钢丝绳穿过过线座时, 过线座的一端具有一定的圆弧 (直径 2 mm), 但对测量精度的影响很小, 在测量过程中绕绳轮的圆弧段长度保持不变, 因此, 坐标标定时只需要用常值补偿来抵消测量误差。在测量过程中过线座的圆弧段长度为动态变化, 因此, 结合圆弧度和圆弧直径对该段进行修正, 进而消除测量误差影响。在测量过程中, 拉线传感器的钢丝绳需始终保持直线。

位置反馈装置在实时测量机械臂末端位置时, 若检测到机械臂末端位置偏离管道中心孔位置超过 1 mm, 则将误差反馈给控制系统, 形成闭环控制, 再通过误差补偿修正机械臂末端位置。

位置反馈装置测量所选定基平面为各路传感器中经过过线座之后的出线点 (A 、 B 、 C) 所处平面, 如图 3 所示。图中, 管道的基础坐标系为 $X_0O_0Y_0$, D 为机械臂末端点, A 、 B 、 C 到 O_0 点的距离分别为定值 l_1 、 l_2 、 l_3 , 且 $l_1=l_2=l_3$ 。

机械臂末端点 D 位于 $\triangle ABC$ 所在平面内, D 点

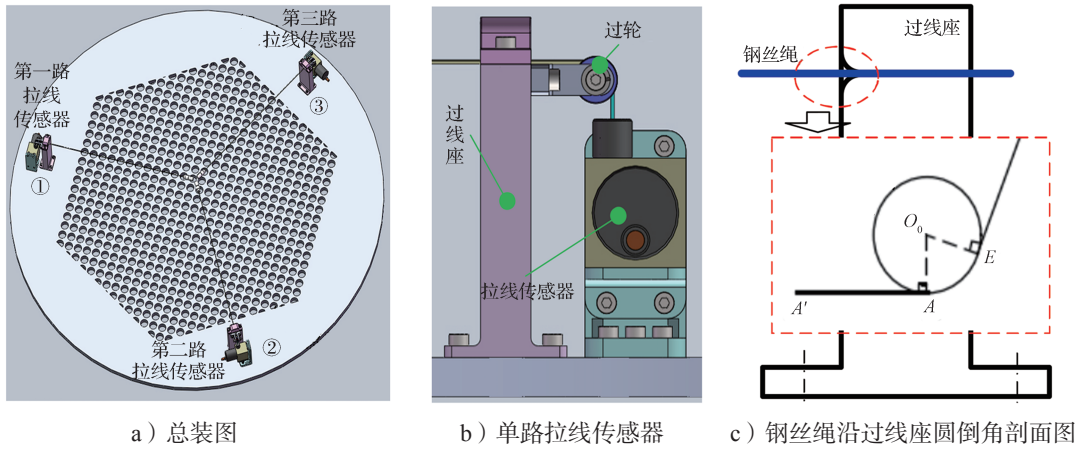


图2 拉线传感器标定装置

Fig. 2 Calibration device for draw-wire sensor

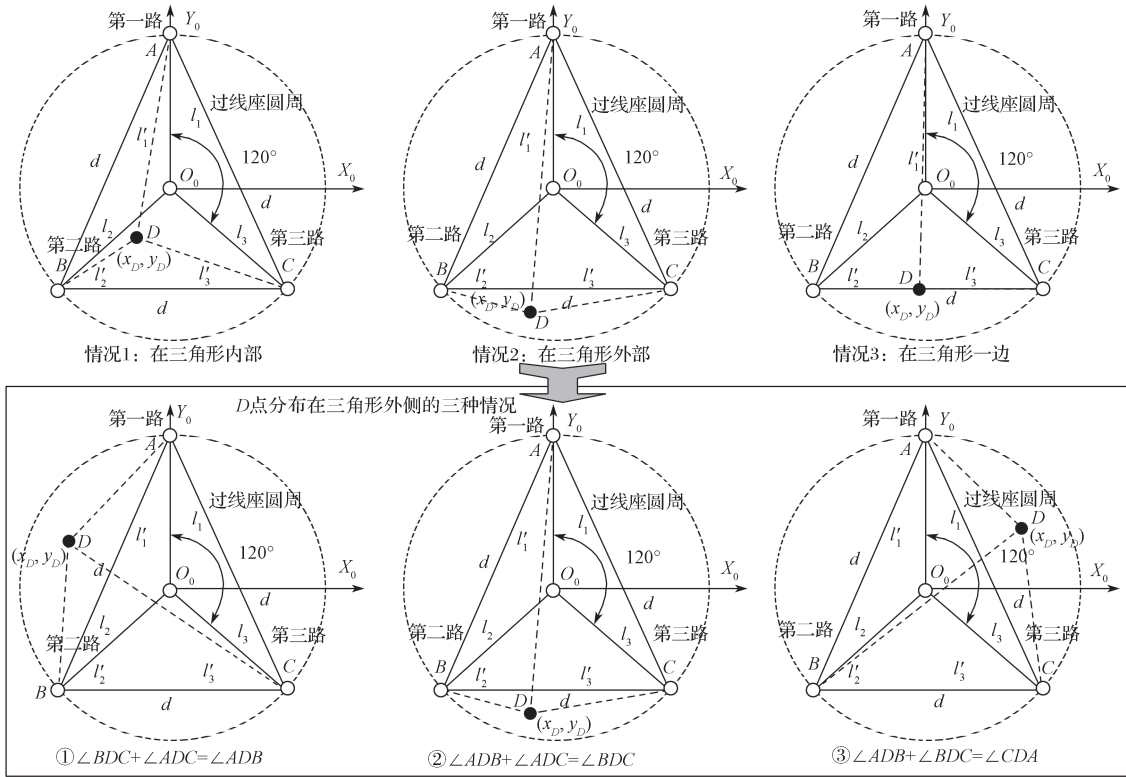


图3 不同测量情况示意图

Fig. 3 Schematic diagram of different measurement conditions

与 $\triangle ABC$ 的位置关系有3种情况,即 D 点位于三角形的内部、外部、边上。

1) 情况1: D 点位于三角形内部。当 D 点在三角形内部时,角度满足关系式(1)。

$$\angle ADB + \angle ADC + \angle CDB = 2\pi. \quad (1)$$

2) 情况2: D 点位于三角形外部。当 D 点在三角形外部时,角度满足关系式(2)。

$$\begin{cases} \angle ADB + \angle ADC + \angle BDC \neq 2\pi, \\ \angle ADB + \angle ADC = \angle BDC \text{ 或} \\ \angle BDC + \angle ADC = \angle ADB \text{ 或} \\ \angle ADB + \angle BDC = \angle ADC. \end{cases} \quad (2)$$

3) 情况3: D 点位于三角形的边上。当 D 点在三角形的某条边上时, D 点到 A 、 B 、 C 点的距离 l'_1 、 l'_2 、 l'_3 满足关系式(3)。

$$l'_1 + l'_2 = d \text{ 或 } l'_3 + l'_2 = d \text{ 或 } l'_1 + l'_3 = d. \quad (3)$$

先判断机械臂末端点与三角形的位置关系, 再求解机械臂末端点位置。不同情况下机械臂末端点的位置求解如下。

1) 末端点位于三角形内部

以第一路拉线传感器为例, D 点的坐标计算如式 (4) 所示。同理可得另外两路拉线传感器测量的 D 点坐标。将三路数据的平均值作为最终的机械臂末端点坐标。

$$\begin{cases} x_D = -l'_1 \cdot \sin(\pi/6 - \angle BAD), \\ y_D = l_1 - l'_1 \cdot \cos(\pi/6 - \angle BAD). \end{cases} \quad (4)$$

2) 末端点在三角形的外部

以 D 点在 AB 外侧时的第一路拉线传感器为例, 求解 $\triangle ABD$ 的三个角度, D 点的坐标计算如式 (5) 所示。同理可以求得另外两路拉线传感器数据下的末端坐标。将三路数据的平均值作为最终的末端坐标。

$$\begin{cases} x_D = -l'_1 \cdot \sin(\pi/6 + \angle BAD), \\ y_D = l_1 - l'_1 \cdot \cos(\pi/6 + \angle BAD). \end{cases} \quad (5)$$

3) 末端点在三角形的某一边上

以 D 点在 AB 时的第一路拉线传感器为例, D 点的坐标计算如式 (6) 所示。同理可以求得另外两路拉线传感器数据下的末端坐标。将三路数据的平均值作为最终的末端坐标。

$$\begin{cases} x_D = -l'_1 \cdot \sin(\pi/6), \\ y_D = l_1 - l'_1 \cdot \cos(\pi/6). \end{cases} \quad (6)$$

3.2 拉线传感器力位特性分析

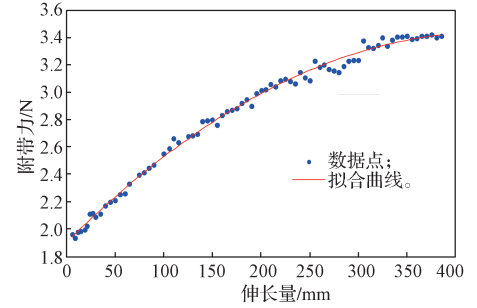
在实际应用中, 拉线传感器的拉线会对机器人产生拉力。利用拉力传感器对拉线传感器力位特性进行分析。首先, 采集拉线传感器的零位拉力值, 并取平均值, 得到零位拉力均值 F_0 。然后, 对附带力和伸长量采集实验进行处理, 得到实验数据 F_i 和伸长量 L_i , 先去除零位拉力 F_0 对 F_i 的影响, 再分析去除零位拉力后的附带力 ($F_i - F_0$) 与 L_i 之间的关系。考虑到三路传感器的型号相同, 任选一路作为测量的对象, 结果如图 4 所示。

利用测量得到的拉线传感器位移和力的数值, 采用二次多项式对结果进行拟合, 得到力位模型,

$$F_i - F_0 = (-8.12 \times 10^{-6}) \cdot L_i^2 + 0.007\,063 \cdot L_i + 1.902. \quad (7)$$



a) 测量实验图



b) 实验数据拟合结果

图 4 拉线传感器实验图

Fig. 4 Experimental diagram of draw-wire sensor

4 管道清洗机器人运动学模型及仿真

4.1 运动学模型正解及验证

在运动学正解的推导过程中, 已将各运动关节的初始位置转角包含在转角 θ_i 中, 所以在图 5 的坐标系中当前初始位置为运动学的初始零位。管道清洗机器人运动学坐标系如图 5 所示, 运动学参数如表 1 所示。

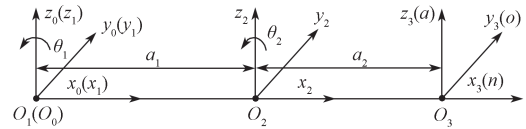


图 5 管道清洗机器人运动学坐标系

Fig. 5 Kinematic coordinate system of pipeline cleaning robot

表 1 管道清洗机器人运动学参数

Table 1 Kinematics parameters of pipeline cleaning robot

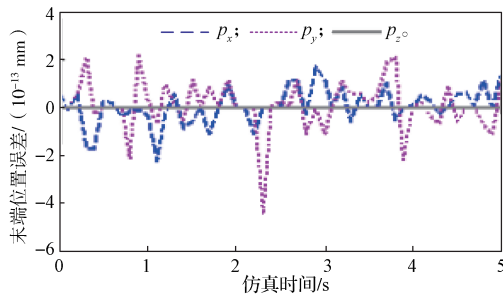
关节 i	l_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1 (500 mm)	0	0	θ_1
2	a_2 (500 mm)	0	0	θ_2

利用式 (8) 即可得到相邻关节的运动学转换矩阵, 则管端定位装置的运动学模型如式 (9) 所示。

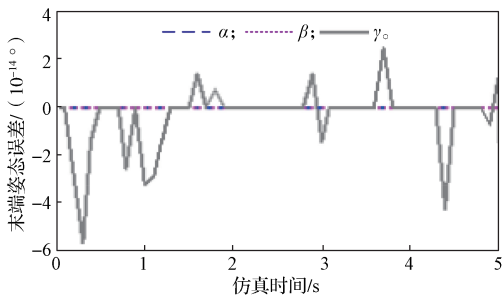
$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i \cdot c\alpha_i & s\theta_i \cdot s\alpha_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\theta_i \cdot c\alpha_i & -c\theta_i \cdot s\alpha_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$T = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2. \quad (9)$$

用 MATLAB 中的 Simulink 模块与 SimMechanics 模块搭建管道清洗机器人的运动学正解模型与机构仿真模型。将机构各关节变量值分别输入机构运动学正解模型与机构仿真模型, 得到各自末端位姿 (位置坐标 (P_x, P_y, P_z) 和姿态角度 (α, β, γ)), 如图 6 所示。



a) 机器人末端位置误差



b) 机器人末端姿态误差

图 6 管道清洗机器人的运动学正解仿真验证结果

Fig. 6 Simulation results of forward kinematics solution of pipeline cleaning robot

从图 6 可知, 机构运动学正解模型的末端位姿与机构仿真模型的输出值基本保持一致, 位置输出值最大的误差数量级为 10^{-13} , 姿态输出值的误差数量级为 10^{-14} 。可见机构运动学正解模型是正确的。

4.2 运动学模型逆解及验证

为求出机器人末端位置矢量相对于第一主动关节坐标系 $x_2y_2z_2$ 的逆解, 将末端工具坐标系相对于自身基座坐标系的齐次位姿转换矩阵定义为 T' , 该矩阵中的元素均为已知量。

$$T' = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

由于两连机构的运动学逆解存在两组, 故通过限

定关节 2 的转角范围得到管道清洗机器人的运动学逆解, 即

$$\begin{cases} q_1 = a \tan 2(p_y - a_2 \cdot n_y, p_x - a_2 \cdot n_x), \\ q_2 = a \cos \left(\frac{p_x^2 + p_y^2 - a_1^2 - a_2^2}{2a_1 \cdot a_2} \right). \end{cases} \quad (11)$$

通过 MATLAB 中 Simulink 搭建运动学逆解的验证程序, 如图 7 所示。将机器人各关节变量输入到机构仿真模型, 测得机器人末端位姿, 再将其代入运动学逆解模型, 进一步求得逆解模型下的机器人各关节变量值, 最后通过对比关节转角误差分析运动学逆解模型的正确性。

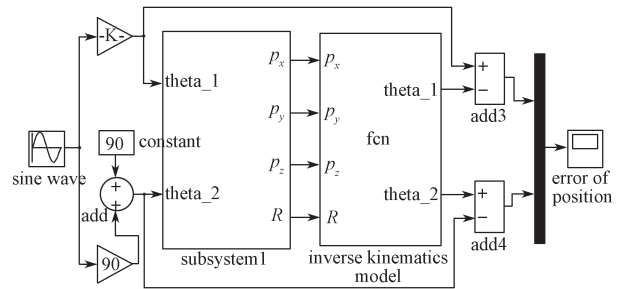


图 7 管道清洗机器人运动学逆解仿真验证程序

Fig. 7 Simulation and verification program of inverse kinematics of pipeline cleaning robot

仿真结果如图 8 所示, 运动学模型逆解所得机构关节变量 (两个关节转角) 与给定输入下的关节变量间的误差数量级为 10^{-12} 。仿真结果证明所求取的运动学逆解模型是正确的。

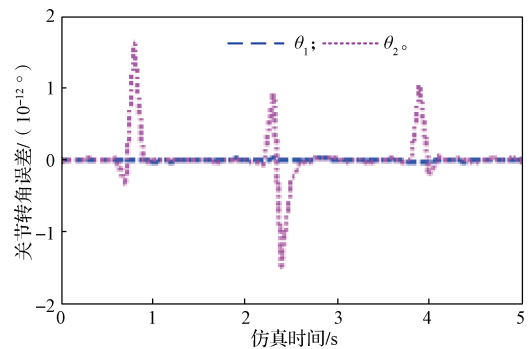


图 8 管道清洗机器人运动学逆解仿真验证结果

Fig. 8 Simulation results of inverse kinematics of pipeline cleaning robot

4.3 运动仿真

将管道清洗机器人三维模型以 parasolid.x_t 格式导入到 Adams 动力学仿真软件中, 将三维模型中关

节的质量、质心位置、惯量等物理属性值赋给虚拟样机模型, 给关节添加对应的约束和驱动。管道清洗机器人的清洗定位过程仿真如图 9 所示。仿真结果表明管道清洗机器人的清洗定位精准。

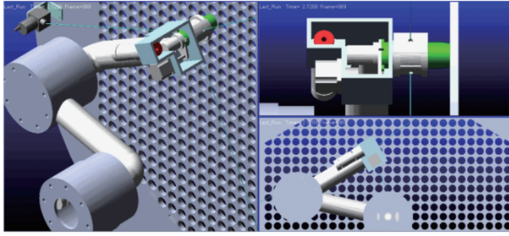


图 9 管道清洗机器人运动过程仿真

Fig. 9 Simulation of the movement process of pipeline cleaning robot

5 结论

针对换热器, 本文设计了一种密集管道群自动化清洗机器人。1) 设计了基于拉线传感器的末端位置反馈装置, 并对其标定方法进行了多工况条件下的分析。2) 设计了用于管道清洗的模块化关节结构, 并建立其运动学的正逆解模型, 结合 MATLAB 对模型进行仿真验证。3) 借助于 Adams 仿真软件, 对清洗过程进行模拟。结果表明所设计的机器人能够将末端高压水枪在管端进行精准定位, 完成清洗动作。

参考文献:

- [1] 宋加会, 刘昌林, 许胜涛, 等. 高压水射流清洗技术及其在管道除垢中的应用[J]. 化工设备与管道, 2014, 51(5): 79-82.
SONG Jiahui, LIU Changlin, XU Shengtao, et al. Cleaning Technique with High Pressure Water Jet and Its Application in Removing Scale in Piping[J]. Process Equipment & Piping, 2014, 51(5): 79-82.
- [2] 殷小明, 陈艺, 宋友立, 等. 换热器内结垢特性研究进展[J]. 化工装备技术, 2021, 42(6): 1-6.
YIN Xiaoming, CHEN Yi, SONG Youli, et al. Research Progress of Fouling Characteristics in Heat Exchangers[J]. Chemical Equipment Technology, 2021, 42(6): 1-6.
- [3] 吴同锋, 蔡晓君, 刘湘晨, 等. 常用换热器清洗技术及选用[J]. 化工机械, 2016, 43(3): 268-271, 356.
WU Tongfeng, CAI Xiaojun, LIU Xiangchen, et al. Cleaning Technologies and Their Selection for Commonly-Used Heat Exchangers[J]. Chemical Engineering & Machinery, 2016, 43(3): 268-271, 356.
- [4] 孟宪宇, 董华伦, 俞凯雄. 复杂环境下旋转式变向管道清洗机器人及转向技术研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(5): 15-18, 68.
MENG Xianyu, DONG Hualun, YU Kaixiong. Research on Rotating Directional Pipe Cleaning Robot and Steering Technology in Complex Environment[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(5): 15-18, 68.
- [5] 孟宪宇, 董华伦, 俞凯雄. 自适应管道清洗机器人及其转向技术设计[J]. 工业技术创新, 2017, 4(6): 41-43, 47.
MENG Xianyu, DONG Hualun, YU Kaixiong. Design on the Self-Adaptive Pipe Cleaning Robot and Its Steering Technology[J]. Industrial Technology Innovation, 2017, 4(6): 41-43, 47.
- [6] 钟文胜, 陶学恒, 卢金石. 油烟管道清洗机器人关键技术研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2013(4): 122-124, 128.
ZHONG Wensheng, TAO Xueheng, LU Jinshi. Study of Key Technology for Pipeline Cleaning Robot[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2013(4): 122-124, 128.
- [7] 刘莹, 申超, 邵泉钢, 等. 中央空调管道式通风系统清洁机器人[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(3): 435-439, 443.
LIU Ying, SHEN Chao, SHAO Quangang, et al. A Cleaning Robot for the Pipe Ventilation System of a Central Air-Conditioner[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(3): 435-439, 443.
- [8] 孙康岭, 徐遵义, 杨兆伟. 中央空调风管清洗机器人自适应调节机构的研究[J]. 机械传动, 2010, 34(8): 45-48.
SUN Kangling, XU Zunyi, YANG Zhaowei. Research on Adaptive Adjust Mechanism of Pipeline Robot for Central Air-Conditioning[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2010, 34(8): 45-48.
- [9] 蔡长亮. 基于 Pro/E 与 RecurDyn 的履带式管道清洗机器人的联合仿真[J]. 制造业自动化, 2014, 36(21): 53-56.
CAI Changliang. Simulation of the Tracked Duct Cleaning Robot Based on Pro/E and RecurDyn[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(21): 53-56.

(责任编辑: 邓彬)

(下转第 72 页)