

管道机器人轮-爪式行走装置 运动学和力学特性分析

罗继曼,都 闯,郭松涛,戴璐璐

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究一种排水管道清淤机器人的轮-爪式行走装置,以增强管道清淤机器人在管道内行进能力,提高负载能力和自适应管径能力.方法 建立运动学模型,通过 ADAMS 运动学仿真,对轮爪式夹紧机构进行运动学研究;通过 ADAMS 动力学仿真分析,得到了爪式夹紧机构最大夹紧力;通过 ANSYS workbench 静力学仿真,分析卡爪夹紧机构强度、刚度等力学特性.结果 运动学研究分析得到夹紧机构工作空间变化为 421.1~500 mm,卡爪支腿的速度变化为 0~23.35 mm/s、加速度变化为 0~36.76 mm/s².通过动力学分析,得到机构工作夹紧力为 1 000 N.通过有限元分析得到机构产生的总变形变化为 0~0.001 25 m,等效应变变化为 $1.142\ 3 \times 10^{-8}$ ~0.001 45,等效应力变化为 2 010.1~ 2.95×10^{-8} Pa.结论 卡爪夹紧机构的工作范围满足要求;机构速度和加速度曲线平滑,运行稳定,无震颤现象;机构最大夹紧力能保证推进的需要;机构满足结构刚度、强度要求.

关键词 管道机器人;行走装置;运动学;动力学;力学特性

中图分类号 TH122

文献标志码 A

Analysis of Kinematics and Mechanical Properties of Wheel-claw Walking Device of Pipeline Robot

LUO Jiman, DU Chuang, GUO Songtao, DAI Lulu

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

Abstract: A wheel-claw type walking device of the sewer dredging robot is studied to enhance the traveling ability of the robot in the pipeline, and to improve its load capacity and self-adapting pipe diameter capability. The kinematics model was established, and the kinematics of the claw clamping mechanism was studied by ADAMS kinematics simulation. The maximum clamping force of the claw clamping mechanism was obtained by ADAMS dynamics simulation analysis. The ANSYS workbench static simulation was used to analyze Mechanical properties such as strength

收稿日期:2018-05-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51575365);辽宁省自然科学基金项目(201602620);辽宁省教育厅科学研究一般项目(LJZ2016018)

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

and stiffness of the jaw clamping mechanism. The kinematics analysis shows that the working range of the clamping mechanism is changed to 421.1 ~ 500 mm. The range of the speed of the claws is 0 ~ 23.35 mm/s. The range of acceleration is 0 ~ 36.76. Through the dynamic analysis, the maximum clamping of the mechanism is obtained. The force is 1 000 N. Through the finite element analysis, the total deformation range of the mechanism is 0 ~ 0.001 25 m and the equivalent strain range is $1.142\ 3 \times 10^{-8}$ ~ 0.001 45. The equivalent stress range is 2010.1 ~ 2.95×10^{-8} Pa. The working range of the claw clamping mechanism meets the requirements; the speed and acceleration curves of the mechanism are smooth, stable and non-chattering; the maximum clamping force of the mechanism can ensure the need of propulsion; and the mechanism meets the requirements of structural stiffness and strength.

Key words: pipeline robot; walking device; kinematics; kinetics; mechanical properties

随着现代化进程的不断展开,大量的管道被安装应用于城市和工厂的各个角落.其中,排水管道的应用更是给人们的生活带来极大的便利.然而随着地下排水管道系统的发展,排水管道存在的一些问题也逐渐被发现.特别是管道内部淤积不通,引起排水不畅这一问题尤其严重.目前,排水管道清淤问题迫切需要解决,因此排水管道清淤机器人应运而生.排水管道清淤机器人由行走装置和清淤工作装置组成.其中,行走装置是机器人清淤工作装置的重要载体,因此管道机器人行走装置的设计是研究重点.李成群等^[1]设计了一种牵引式排水管道清淤机器人,使用简单可靠的机械结构驱动机器人在管道内部自由行走,通过使用钢丝绳牵引装置为清淤机器人清淤作业过程提供足够动力.陈伶等^[2]研究了一种六轮腿支撑式管内螺旋行走装置.徐洪等^[3]为提高管道机器人的自适应能力,设计了一种运用自锁原理的新型蠕动式管道机器人,该设计通过伸缩式伞架机构实现蠕动式行进,具有良好的自适应能力.以上研究中,针对管道机器人行走装置设计大致分为两类:轮式行走装置和步进式行走装置.两种设计各有优缺点,轮式行走装置具有良好的运动特性,但其提供的牵引力较小,但管道自适应能力差.步进式行走装置可以提供较大的牵引力,具有良好的管道自适应能力,但其运动性能差,工作效率低^[4-12].

针对轮式行走装置和步进式行走装置优缺点,笔者提出一种由轮式和卡爪式步进装置并用的复合式行走装置.针对步进装置中的卡爪夹紧机构分别从运动学角度研究其运动特性和工作范围;从动力学角度研究其与管道产生的碰撞力,分析卡爪所受冲击和系统稳定性;从静力学角度分析有负载时最大夹紧力大小以及其刚度、强度特性,为管道清淤机器人的实践研究提供借鉴.

1 结构组成与工作原理

1.1 结构组成

作为管道机器人工作装置的载体,行走装置设计的核心问题是其运动平稳性和负载能力.笔者设计的管道机器人行走装置采用轮式和爪式步进机构复合的新型行走方式.结构组成如图1所示.该行走装置分轮式行走部分和步进式行走两部分.轮式行走部分由三个呈圆周均布安装在机架2上的驱动单元构成,每个驱动单元由通过直流电机提供驱动力的驱动小车1组成.与常见的轮式行走装置相比,该轮式行走装置不但可以有效地保证行走装置中心轴线与管道中心轴线的一致性,也可以适应不同管径变化.步进式行走部分由爪式夹紧机构4和步进单元3构成.与常见的夹紧机构相比,设计中的爪式夹紧机构具有机构简单、提供夹紧力大、自锁性能好等优点.

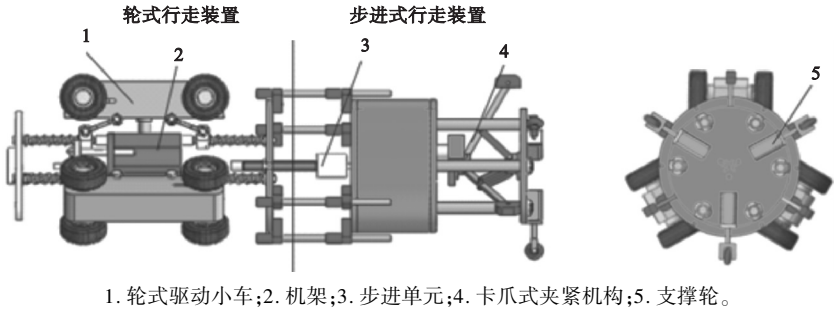


图1 新型管道机器人的行走装置

Fig.1 A new walking device for pipeline robot

1.2 工作原理

该行走装置工作时,轮式装置启动,带动清淤装置进行清淤工作.当前端负载过大时,通过安装的力传感器反馈启动卡爪式步进行走装置,卡爪张开,夹紧管壁;滚珠丝杠推动行走装置前进;随后,卡爪收缩,滚珠丝杠带动卡爪机构向前收回,完成一个步长前进.

2 运动学模型的建立与仿真分析

通过对卡爪夹紧机构建立运动学模型以及基于ADAMS的运动学仿真分析,可以得到卡爪夹紧机构张开和收缩时的运动特性和工作范围,为后面的动力学仿真提供基础^[13-20].

2.1 卡爪夹紧机构运动学模型

卡爪夹紧机构是由电动推杆和多连杆机构组成.通过类似伞型机构的多连杆结构的撑开和收缩,实现伸缩腿交替夹紧管壁,配合步进单元运动,以达到实现步进行走的目的.三维模型如图2所示.根据电动推杆和伸缩腿的运动关系,建立夹紧机构的运动学模型.

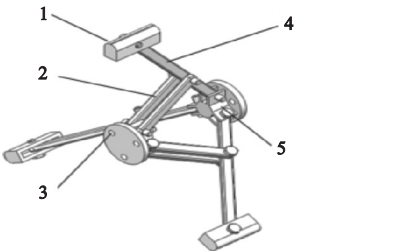


图2 卡爪夹紧机构三维模型图

Fig.2 Three-dimensional model of claw clamping mechanism

由于多连杆机构布局是对称的,故其运动是独立的.因此将卡爪夹紧机构简化为3条相同结构的支链(见图3).图中 b 为电动推杆初始位置; h 为电动推杆的行程; l 为长连杆的长度; s 为长连杆A端点径向位移; v 为电动推杆伸缩速度; D 为管道直径.当电动推杆沿 x 轴运动时,连杆机构带动伸缩腿A沿 y 轴运动,整个机构完成张开和收缩运动.由于3个支链运动规律完全相同,故只需对其中一个支链建立运动学模型.

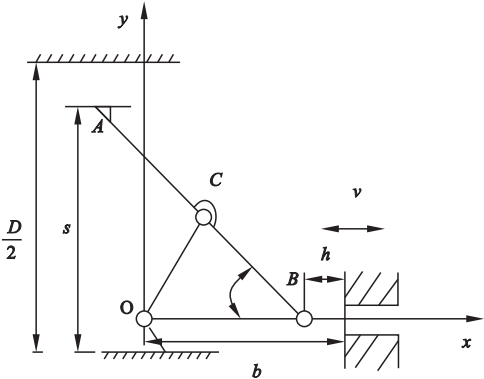


图3 卡爪夹紧机构中一条支链的运动简图

Fig.3 Motion diagram of a branch in the clamping mechanism

设机构的输入与输出关系由一组独立运动方程组描述;

$$F(U,V,L).$$

式中: $L=[l_1,l_2,\cdots,l_n]^T$ 为机构的广义结构矢量参数; $V=[v_1,v_2,\cdots,v_n]^T$ 为机构的广义输入运动; $U=[u_1,u_2,\cdots,u_n]^T$ 为机构的广义输出运动; $F=[f_1,f_2,\cdots,f_n]^T$ 为 n 个独立运动方程.

对式(1)连续求微分两次,即可求得输出运动的速度和加速度一般矩阵表达式:

$$U = \left(\frac{\partial F}{\partial U} \right)^{-1} \frac{\partial F}{\partial V} V, \tag{2}$$

$$U = \left(\frac{\partial F}{\partial U} \right)^{-1} \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial U} \right) U + \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right) V + \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right) V \right]. \tag{3}$$

根据伸缩夹紧机构可得约束方程:

$$f = (b - h)^2 + s^2 - l^2 = 0. \tag{4}$$

其中机构结构矢量参数, $L = [l, b]$, $V = [h]$, $U = [s]$, $F = [f]$.

因为原动件(电动推杆)位移 h 、速度 v 和加速度 a 为已知量,所以可以求得 A 点任意位置下位移、速度、加速度以及长连杆转角 α .

由于工作空间限制,约束条件为

$$\begin{cases} 0 < \alpha < 90^\circ, \\ h_{\min} < h < h_{\max}, \\ s_{\min} < s < s_{\max} = \frac{D}{2}. \end{cases} \tag{5}$$

式中: h_{\min} 、 h_{\max} 为电动推杆最大和最小行程; s_{\max} 、 s_{\min} 为 A 点最大、最小位移; α 为长连杆转角.

通过式(2)、式(3)对 $F = [f]$ 求微分,可以获得 A 点速度 v 和加速度 a :

$$v = s = \frac{b - h}{s} h. \tag{6}$$

$$a = s = -\frac{1}{s} [s^2 + h^2 + (h - a)h]. \tag{7}$$

由此获得卡爪工作范围为 $[2s, D]$; 卡爪最大工作范围为 $[2s_{\min}, D]$.

2.2 卡爪夹紧机构运动学仿真分析

笔者采用 ADAMS 软件进行仿真分析. 已知电动推杆以匀速驱动卡爪张开. 通过仿真求解卡爪张开过程中卡爪末端接触头的位移、速度、加速度曲线. 最后对得到的运动曲线进行分析,得出卡爪夹紧机构的运动特性. 具体步骤如下.

(1) 导入 ADAMS 的几何模型

将几何模型导入 ADAMS,添加材料属

性参数. 在文中将所有部件均设为合金钢,密度为 $7.8 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$,弹性模量为 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}$,泊松比为 0.29.

(2) 施加运动约束

如图 2 所示,添加运动副约束如下:①长连杆 4 与短连杆 2 之间铰接为转动副;②短连杆 2 与前固定端 5 之间铰接为转动副;③长连杆 4 与后固定端 3 之间铰接为转动副;④前固定端 5 与后固定端 3 之间为移动副;⑤前固定端 5 与大地之间为固定副.

(3) 施加驱动

在 ADAMS 模型中驱动件选择电动推杆,驱动函数采用 STEP 函数,驱动函数: STEP(time, 0, 0, 1, -10) + STEP(time, 4, -10, 5, 0)

(4) 进行仿真分析

选择仿真模块,设置仿真时间 5 s,仿真步数 200,分析类型运动学,开始仿真.

(5) 仿真结果

从后处理模块中调出卡爪接触头 A 的位移、速度、加速度曲线,如图 4、图 5、图 6 所示.

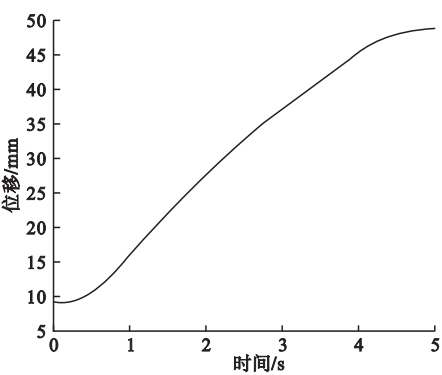


图 4 卡爪接触头位移曲线

Fig. 4 Displacement curve of claw contact head

(6) 结果分析

由图 4 位移曲线可知,接触头在 0~1 s,位移不变,机构处于启动状态,1~4 s 开始运动,沿 y 轴位移变化 9.25~48.7 mm,4~5 s 位移不变,机构停止运动. 卡爪支腿可变径距离为 $48.7004 - 9.2485 = 39.4519 \text{ mm}$. 夹

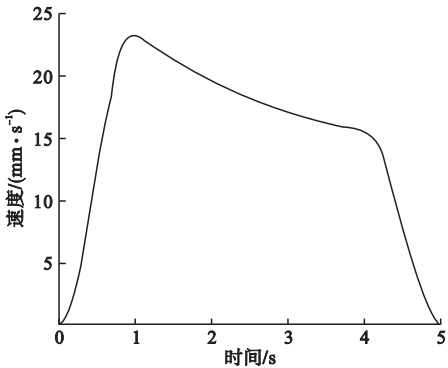


图5 卡爪接触头速度曲线

Fig. 5 Velocity curve of claw contact head

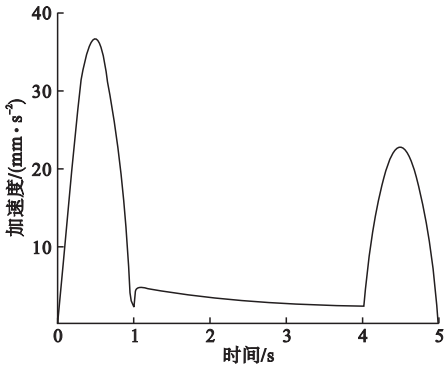


图6 卡爪接触头加速度曲线

Fig. 6 Acceleration curve of claw contact head

紧机构最大工作空间为固定值即管道直径 $D_{\max} = 500\text{ mm}$, 夹紧机构最小工作空间为 $D_{\min} = 500 - 2 \times 39.451\ 9 = 421.096\ 2 \approx 421.1\text{ mm}$, 故夹紧机构工作空间变化为 $421.1 \sim 500\text{ mm}$. 而实际设计管径变化为 $450 \sim 500\text{ mm}$, 所以夹紧机构设计满足管径自适应要求.

由图5速度曲线可知,卡爪支腿的速度变化为 $0 \sim 23.35\text{ mm/s}$. 接触头在 $0 \sim 1\text{ s}$ 速度持续变大,机构处于启动状态, $1 \sim 4\text{ s}$ 开始运动,曲线总体变化较为平滑, $4 \sim 5\text{ s}$ 速度减慢到零,机构停止运动. 当夹紧机构张开即空载时,较快的运动速度可以减短机构空载时间. 当卡爪靠近管道内壁到夹紧过程中降低速度,可减小速度冲击,提高机构稳定性.

由图6加速度曲线可知,卡爪支腿加速度变化为 $0 \sim 36.76\text{ mm/s}^2$. 接触头在 $0 \sim 1\text{ s}$ 加速度突然变大,机构处于启动状态; $1 \sim 4\text{ s}$ 开

始运动,曲线趋势较为平滑,变化较为缓慢,机构运行顺畅,无震颤现象,整体稳定性较好; $4 \sim 5\text{ s}$ 加速度减慢到零,机构停止运动.

3 基于 ADAMS 机构夹紧力分析

由于卡爪夹紧机构是利用增大正压力(即夹紧力),从而增大管道内壁与夹紧机构接触头之间的摩擦力,进而为整机提供前进时的反作用力. 因此整机的负载能力与夹紧力的大小息息相关. 因为夹紧机构采用电动推杆提供机构工作时的推力,且电动推杆只能提供恒定的推力,所以需要研究卡爪夹紧机构在电动推杆推力的作用下所能提供的最大夹紧力.

在以下工况条件下进行仿真计算:夹紧机构处于撑紧管道内壁状态,电动推杆驱动力 $F = 1\ 500\text{ N}$.

(1) 驱动力及接触添加

在前固定端上施加 $F = 1\ 500\text{ N}$ 的驱动力,作用点为前固定端的重心. 在管道内壁与接触头之间添加接触,参数设置采用默认值.

(2) 进行仿真分析

选择仿真模块,设置仿真时间 5 s ,仿真步数 500 ,分析类型动力学,开始仿真.

(3) 仿真结果

在后处理模块中调出管道内壁与接触头之间接触力即夹紧力曲线(见图7).

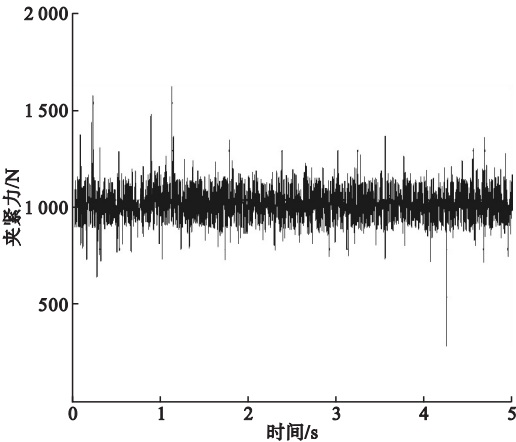


图7 夹紧机构夹紧力曲线

Fig. 7 Clamping force curve of clamping mechanism

(4)结果分析

从图7可以看出,管道内壁与接触头之间接触力平均值为999.9845 N,取近似值1 000 N.因为管道内壁与接触头之间弹性接触,所以整条接触力曲线在平均值1 000 N上下浮动.故可以使用接触力平均值1 000 N表示机构夹紧力大小.

4 卡爪夹紧机构力学特性分析

通过使用 ANSYS Workbench 有限元分析软件,对其最大负载工况状态进行静力学仿真分析,获得各杆件应力、应变、变形的分布状态云图.通过得到的仿真结果,分析机构刚度、强度、弹性变形以及受力危险点等力学特性,进而验证卡爪夹紧机构是否满足预期设计要求.

(1)模型简化与导入

在进行软件分析之前,根据机构的结构和受力特点进行模型简化.简化过程中,去除不必要的杆件和支撑机构.通过模型简化,可以在保证原机构力学特性不变的情况下,减少软件的计算工作量,提升软件工作效率.将简化后的模型导入 ANSYS Workbench Static Structural 模块,该模块为静态结构分析模块,可以求解静力学问题.模型如图8所示.



图8 导入 ANSYS Workbench 模型

Fig. 8 Importing ANSYS Workbench model

(2)添加材料属性

该构件材料为合金钢,材料属性见表1.

表1 材料属性

Table 1 Material property

弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
2.07×10 ⁵	0.29	7 801

(3)网格划分

采用自由网格划分方法,如图9所示.

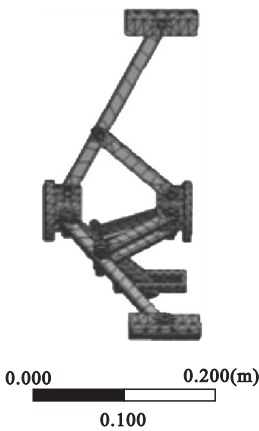


图9 网格划分

Fig. 9 Meshing

(4)施加固定约束和力载荷

将后固定端施加固定约束,3个接触头施加3个1 000 N的夹紧力,前固定端施加1 500 N的电动推杆推力.施加固定约束和力载荷如图10所示.



图10 固定约束和力载荷

Fig. 10 Fixed constraints and force loads

(5) 仿真结果

进行加载运算得到机构总变形、等效应变、等效应力云图如图 11、图 12、图 13 所示。

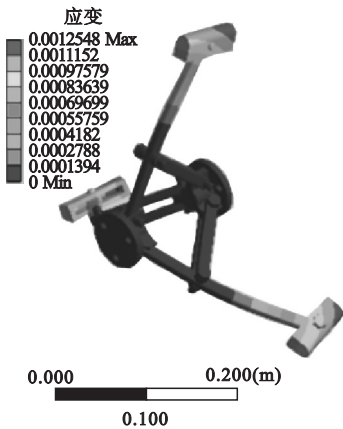


图 11 总变形云图

Fig. 11 Total deformation plot

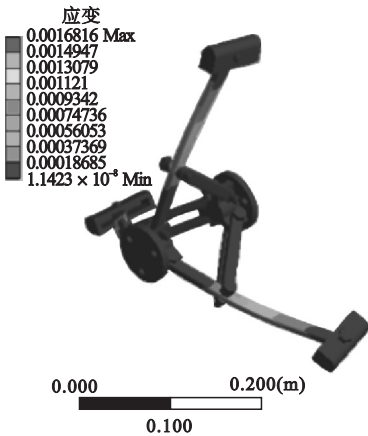


图 12 等效应变云图

Fig. 12 Equivalent strain contour plot

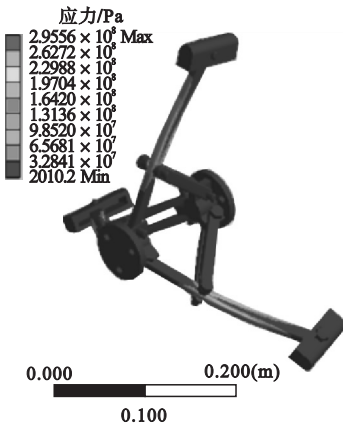


图 13 等效应力云图

Fig. 13 Equivalent stress contour plot

(6) 结果分析

通过机构总变形云图分布情况得知,在夹紧机构卡爪支腿撑紧管壁时,机构产生的总变形变化为 0 ~ 0.001 25 m,机构的最大变形出现在接触头处。从图上看,在正常工作状态下,机构的变形对机构的整体刚度几乎没有影响,机构符合设计要求。

通过机构应变云图分布情况得知,在夹紧机构卡爪支腿撑紧管壁时,机构产生的等效应变变化为 $1.1423 \times 10^{-8} \sim 0.00145$,机构的最大应变出现在机构各个部件之间相连的铰接孔处。为保证两部件之间相对转动,在安装过程中不可避免的采用间隙配合,所以有一部分挠度是由间隙形成的。因此在加工装配中,需要加强对装配的精度,可以有效弥补由间隙造成的附加挠度。

通过等效应力云图分布情况得知,在夹紧机构卡爪支腿撑紧管壁时,机构受到的等效应力变化为 $2010.1 \sim 2.95 \times 10^{-8}$ Pa,小于许用应力 350 MPa,应力较大处为各个部件的铰接孔处支撑截面。

5 结 论

(1)通过对 ADAMS 运动学仿真结果的分析,得出夹紧机构工作空间变化为 421.1 ~ 500 mm,卡爪夹紧机构的工作范围大于实际所需的变径范围,满足工作要求;卡爪支腿的速度变化为 0 ~ 23.35 mm/s,加速度变化为 0 ~ 36.76 mm/s²。研究表明,机构速度和加速度曲线平滑,运行稳定,无震颤现象。

(2)通过对 ADAMS 动力学仿真结果的分析,机构和静力学建模分析,机构夹紧力为,能保证推进的需要。

(3)通过 ANSYS 静力学仿真分析,机构产生的总变形变化为 0 ~ 0.001 25 m,等效应变变化为 $1.1423 \times 10^{-8} \sim 0.00145$,等效应力变化为 $2010.1 \sim 2.95 \times 10^{-8}$ Pa。研究表明,机构应力、应变、变形能满足结构刚度、强

度的要求.

参考文献

- [1] 李成群,马利平,路春光,等.牵引式排水管道清淤机器人的研究[J]. 制造业自动化,2014(21):57-60.
(LI Chengqun, MA Liping, LU Chunguang, et al. Research on tractive sewer dredging robot [J]. Manufacturing automation, 2014(21): 57-60.)
- [2] 陈伶,闫宏伟,范倩倩,等.六轮支撑式管道机器人弯管通过性仿真分析[J]. 河北农机,2016(2):34-35.
(CHEN Ling, YAN Hongwei, FAN Qianqian, et al. The simulation analysis of pipe bending trafficability of six-wheel support pipeline robot [J]. Hebei agricultural machinery, 2016(2): 34-35.)
- [3] 徐洪,林潘忠,王扬渝.新型蠕动式管道机器人设计[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2015,36(5):561-565.
(XU Hong, LIN Panzhong, WANG Yangyu. Design of a novel peristaltic pipeline robot[J]. Journal of Jiangsu university (natural science edition), 2015,36(5):561-565.)
- [4] 魏衍侠.基于ADAMS的手抛式机器人碰撞动力学分析[J]. 机械工程与自动化,2011(2):82-85.
(WEI Yanxia. Collision dynamics analysis of hand-thrown robot based on ADAMS [J]. Mechanical engineering and automation, 2011(2):82-85.)
- [5] 沈体强.城市排水管道清淤机器人研究综述[J]. 山东工业技术,2016(20):289-289.
(SHEN Tiqiang. A review of dredging robots for urban drainage pipelines [J]. Shandong industry & technology, 2016(20):289-289.)
- [6] 焦圣喜,阚一凡,赵远新.基于SolidWorks的管道除垢机器人设计与实现[J]. 机床与液压,2014(3):65-67.
(JIAO Shengxi, KAN Yifan, ZHAO Yuanxin. Design and implementation of pipe descaling robot based on solidworks[J]. Machine tools & hydraulics, 2014(3):65-67.)
- [7] 杜云,隋博,孟凡华,等.自动避障三轮管道机器人设计[J]. 河北科技大学学报,2014,35(5):447-453.
(DU Yun, SUI Bo, MENG Fanhua, et al. Design of three-wheel robots for automatic obstacle avoidance [J]. Journal of Hebei university of science and technology, 2014,35(5):447-453.)
- [8] 武燕,王才东,王新杰,等.可变径管道机器人系统的设计与研究[J]. 矿山机械,2013,41(4):124-127.
(WU Yan, WANG Caidong, WANG Xinjie, et al. Design and research of variable diameter pipeline robot system[J]. Mining machinery, 2013,41(4):124-127.)
- [9] 王明盛.基于ADAMS的管道机器人机构设计与仿真分析[D]. 绵阳:西南科技大学,2010.
(WANG Mingsheng. Design and Simulation Analysis of pipeline robot mechanism based on ADAMS[D]. Mianyang:Southwest University of Science and Technology,2010.)
- [10] LEE S, KIM B. Design parametric study based fabrication and evaluation of in-pipe moving mechanism using shape memory alloy actuators [J]. Journal of mechanical science and technology, 2010,22(1):96-102.
- [11] GRANOSIK G, BORENSTEIN J, HANSEN M. Serpentine robots for industrial inspection and surveillance [J]. Industrial robotics: programming, simulation and applications, 2016:633-662.
- [12] 张向伟.蛇形管道机器人系统研究[D]. 西安:长安大学,2017.
(ZHANG Xiangwei. Study on serpentine pipeline robot system [D]. Xi'an: Chang'an University,2017.)
- [13] 李鹏,马书根,李斌,等.具有轴向和周向探查功能的螺旋驱动管内机器人[J]. 机械工程学报,2010,46(21):19-28.
(LI Peng, MA Shugen, LI Bin, et al. Spiral-driven in-tube robot with axial and circumferential exploration functions [J]. Journal of mechanical engineering, 2010,46(21):19-28.)
- [14] 简小刚,王叶锋,杨鹏春.基于蚯蚓蠕动机理的仿生机器人研究进展[J]. 中国工程机械学报,2012(3):359-363.
(JIAN Xiaogang, WANG Yefeng, YANG Pengchun. Research progress of bionic robot based on creep mechanism of sputum [J]. China construction machinery, 2012(3):359-363.)
- [15] QIU F S. Vertical tail topology optimization design based on the variable density method with constraint factor [J]. Applied mechanics and materials, 2013(300/301):280-284.
- [16] SCHOLL K U, KEPPLIN V, BERNIS K, et al. Controlling a multi. joint robot for autonomous sewer inspection [C]. Proceedings of 2000 IEEE international conference on robotics and automation, 2000,2:24-28.
- [17] PETRILLO A M. The ins and outs of drain & sewer cleaning [J]. Reeves journal: plumbing, heating, cooling, 2004,84(8):40-46.
- [18] ZHANG Y W, YAN G Z. In-pipe inspection robot with active pipe. diameter adaptability and automatic tractive force adjusting [J]. Mechanism and machine theory, 2007,42(12):1618-1631.
- [19] KAWAGUCHI Y, YOSHIDA I, IWAO K, et al. Sensors and crabbing for an in-pipe magnetic-wheeled robot [J]. JRSJ, 1997,15:1164-1171.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)