

# 新型管道机器人运动学和力学特性分析

罗继曼,张东跃,魏泽明,刘思远

(沈阳建筑大学机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究新型步进式管道机器人运动学和力学性能,揭示管道机器人的运动规律,验证其运动状态和工作特性.方法 采用理论建模和基于 ADAMS 软件仿真分析的方法,获得管道机器人相关机构的运动规律曲线以及机器人在管道内步进运动时活塞驱动力变化规律曲线.结果 机器人能够适应管道直径范围为 750 ~ 1 021.5 mm,步距为 103 mm,速度和加速度曲线平滑,运行稳定,无震颤现象;当承受负载 4 000 N 时,伸缩夹紧机构驱动力变化范围为 1 407.6 ~ 18 113.7 N,步进单元驱动力范围为 1 978.46 ~ 7 645.38 N,驱动力曲线平滑,无力冲击,可驱动性能良好.结论 该新型管道机器人的运动性能满足功能要求,具有适应管径范围大、速度快、运动平稳和驱动性能好等优点.

**关键词** 步进式;管道机器人;运动学;动力学;仿真分析

中图分类号 TU94+9;TH112

文献标志码 A

## Analysis on Kinematics and Mechanics Characteristics of a New Type of Pipeline Robot

LUO Jiman, ZHANG Dongyue, WEI Zeming, LIU Siyuan

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

**Abstract:** The kinematics analysis and mechanical property of the robot is carried out in this paper, in order to obtain the motion law of the newly developed pipeline robot, verify its motion state and work characteristics. Theoretical modeling and simulation analysis based on ADAMS software are used to get the motion law curve of the pipeline robot and obtain the change rule curve of the piston driving force when the robot moves in the pipeline. Results shows that the robot can adapt to the pipeline diameter range of 750 ~ 1 057.5 mm, and the step distance is 103 mm with smooth-speed and acceleration curve, stable operation with no tremor phenomenon; When the load force is 4 000 N, from the driving force change curve, the driving force change range of the telescopic clamping mechanism is 1 407.6 ~ 18 113.7 N. The driving force range of the stepping element 1 978.46 ~ 7 645.38 N, driving force curve smoothing and inability to shock with good drive performance. The kinematics performance and mechanical property of the new type of pipeline robot is verified and meet the functional requirements. It is indicated that the new pipeline robot has the advantages of adapting to the large diameter range, stable movement, and high-driving performance.

收稿日期:2016-09-20

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)

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.

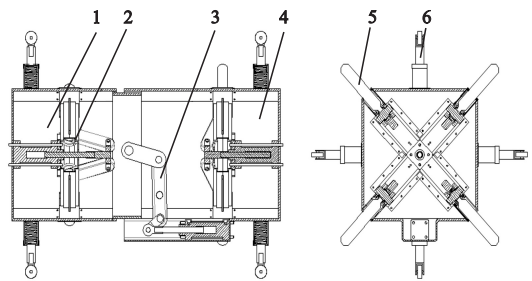
**Key words:**stepping type;pipe robot;kinematics;dynamics;simulation analysis

管道机器人可用于管道检测、喷涂和疏通等,因其工作条件的特殊性,近年来国内外研究人员对此作了大量的研究.在常规研究中,大多都是用于检测特定管径类的管道机器人<sup>[1-6]</sup>.王振中等<sup>[7]</sup>提出了一种轮式驱动的差动式管道机器人,主要针对过弯时驱动轮与管壁之间的相对滑动和机体对管径尺寸的适应性进行了研究;陈伶<sup>[8]</sup>研究了一种六轮腿支撑式管内螺旋行走机构的运动学和性能,这一管道机器人行走机构主要应用于物流管道的检测和维护中;刘清友等<sup>[9]</sup>针对主动螺旋式和被动螺旋式两种管道机器人的运动学和力学进行了对比分析,完成了主动螺旋式管道机器人的设计,并进行了运动学和力学性能研究.以上文献研究的管道机器人大多为轮式驱动,运动学研究了机器人管径适应性的原理和适应范围,但对管径的适应范围为特性的小直径管道,机器人管径适应范围也较小.对于管道机器人力学性能,大多研究轮式管道机器人驱动轮和管壁之间的摩擦力,以及驱动机体所需驱动力等问题.目前很少有对大管径、管径适应性好的管道机器人在较大负载情况下的力学性能研究,因此,笔者针对大管径管道,设计了一种新型步进式的、对管径适应性较大、承载能力高的管道机器人行走机构,从运动学角度研究机器人运动特性和工作范围,分析其特定工况下的力学性能,为相关工程中大直径管道清淤机器人的实践研究提供借鉴.

1 新型管道机器人的结构组成

新型管道机器人采用两个模块交替移动的方式实现机器人整体的前进或后退运动.行走机构作为机器人工作装置的载体<sup>[9-11]</sup>,即要保证机器人沿着管道平稳移动,又要使机器人有足够的负载能力,因此运动平稳性和负载能力强是设计要考虑的核心问题.根

据机器人步进行走原理,研发出新型管道机器人的行走装置,其结构原理如图1所示.



1. 模块 I; 2. 伸缩加紧机构; 3. 步进单元; 4. 模块 II; 5. 伸缩杆; 6. 支撑腿。

图1 机器人行走装置结构方案

Fig. 1 Structural scheme of robot walking device

伸缩夹紧机构采用对称布局的多连杆机构,在两个模块中,实现伸缩杆的交替夹紧和放松;步进单元实现两模块沿着管道中心线方向平动;支撑腿上安装滚轮,起支撑作用.

2 建立运动学模型

2.1 伸缩夹紧机构的运动学模型

伸缩夹紧机构是由位于中轴的油缸活塞( $O_1Z$ )所驱动,沿轴心线方向带动对称布局的多连杆机构,实现 $B_iC_i$ 杆与轴线相垂直的运动;两模块的伸缩杆交替夹紧管壁,配合步进单元运动,实现两模块之间平动,其运动简图如图2、图3所示.根据活塞杆和伸缩杆的运动关系,建立夹紧机构的运动学模型.

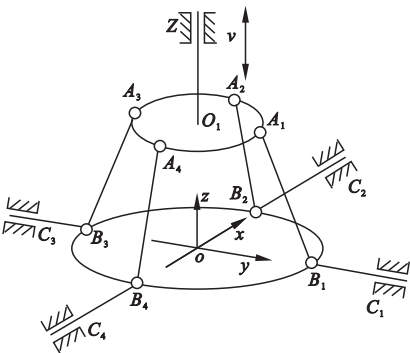


图2 夹紧机构的运动简图

Fig. 2 Clamping mechanism motion diagram

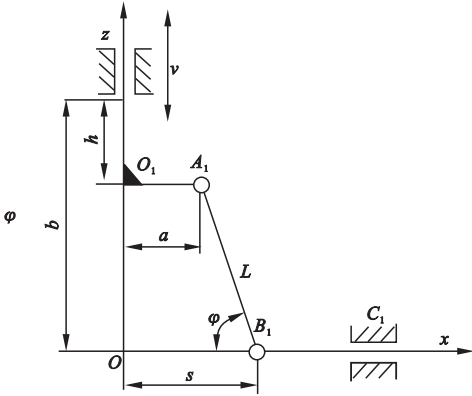


图3 夹紧机构中一条支链的运动简图

Fig. 3 Motion diagram of branched chain

图中,  $b$  为活塞初始高度;  $a$  为连杆安装位置与活塞杆中心距离;  $L$  为连杆长;  $h$  为活塞杆位移;  $s$  为伸缩杆位移;  $v$  为伸缩腿速度。

由于对称布局的多连杆机构的运动是独立的, 可以化简为四条结构相同的支链(见图3)。当活塞杆沿  $z$  轴运动时, 连杆机构带动伸缩腿  $B_iC_i$  沿  $x$  轴或  $y$  轴移动, 完成伸出和缩进运动, 实现夹紧或放松功能。四组连杆机构对称布局、运动同步, 因此对其中一个分支建立运动学模型。

设机构的输入与输出关系由一组独立运动方程组描述:

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{L}) = 0. \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{L} = [l_1, l_2, \dots, l_n]^T$  为机构的广义结构矢量参数;  $\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_n]^T$  为机构的广义输入运动;  $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_n]^T$  为机构广义输出运动;  $\mathbf{F} = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$  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的一般矩阵表达式。

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

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

因此, 根据伸缩夹紧机构可得约束方程:

$$f = (b - h)^2 + (s - a)^2 - l^2 = 0$$

其中, 机器人的结构矢量参数  $\mathbf{L} = [l, a, b]^T$ ,  $\mathbf{V} = [h]$ ,  $\mathbf{U} = [s]$ ,  $\mathbf{F} = [f]$ 。

原动件(活塞杆)的位移  $h$ 、速度和加速度为已知量, 由此即可求得任意位置下, 伸缩腿位移  $s$  和连杆转角  $\theta$ 。

由于工作空间的限制, 其约束条件为

$$\begin{cases} 0 < \theta < 90^\circ, \\ h_{\min} < h < h_{\max}, \\ s_{\min} < s < s_{\max}. \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $h_{\max}$ ,  $h_{\min}$  为活塞杆最大和最小行程;  $s_{\min}$ ,  $s_{\max}$  分别为伸缩腿  $B_iC_i$  的最小和最大位移;  $\theta$  为连杆转角。通过式(2)、式(3)对  $\mathbf{F} = [f]$  求微分, 可以获得伸缩腿  $B_iC_i$  速度  $\dot{s}$  和加速度  $\ddot{s}$  表达式:

$$\dot{s} = \frac{b - h}{s - a} \dot{h}, \quad (5)$$

$$\ddot{s} = \frac{1}{a - s} [\dot{s}^2 + \dot{h}^2 + (h - b) \ddot{h}]. \quad (6)$$

## 2.2 步进单元运动学模型

步进单元的功能是实现两个模块之间相对平动, 在夹紧机构的配合下完成机器人的步进运动。步进单元机构采用反向曲柄滑块机构, 油缸活塞杆  $BC$  为驱动件, 滑块  $C_1$  为输出运动, 建立运动学模型如图4所示。

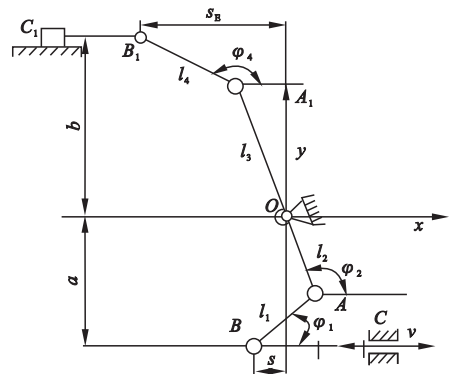


图4 步进单元运动学模型

Fig. 4 Kinematic model of a stepping element

图中,  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$  分别为杆  $BA$ 、 $AO$ 、 $OA_1$ 、 $A_1B_1$  的长度参数;  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $\varphi_4$  分别为杆  $BA$ 、 $AO$  和  $A_1B_1$  的转角;  $a$  为活塞杆  $BC$  到铰点  $O$

的垂直距离;  $b$  为滑块  $C_1$  到铰点  $O$  的垂直距离;  $s$  为杆  $BC$  的位移;  $s_E$  为滑块  $B_1C_1$  位移.

步进单元机构由两组串联式曲柄滑块机构组成, 其中, 曲柄滑块机构  $O_1ABC$  是由原动件(杆  $BC$ ) 平移运动转化为杆  $AO_1$  的摆动; 曲柄滑块机构  $O_1A_1B_1C_1$  是由摆杆  $O_1A_1$  的旋转运动带动滑块  $B_1C_1$  移动. 因此, 为简化模型, 先建立机构  $O_1ABC$  中驱动活塞杆  $BC$  与连杆  $AO_1$  的运动学模型. 由于连杆  $AO_1$  与杆  $A_1O_1$  固接为一体, 并同速运动, 两者具有相同的角速度和角加速度, 由此建立机构  $O_1A_1B_1C_1$  的运动模型.

根据几何条件建立曲柄滑块机构  $O_1ABC$  的位移方程, 其坐标轴上的投影方程为

$$\begin{cases} l_1\cos\varphi_1-l_2\cos\varphi_2=s, \\ l_1\sin\varphi_1+l_2\sin\varphi_2=a. \end{cases} \tag{7}$$

其中, 当原动件(活塞杆  $BC$ ) 位移  $s$  给定时, 即可求解出转角  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ ; 对时间求一次和二次导数, 并写成矩阵形式, 获得速度和加速度关系:

$$\begin{bmatrix} -l_1\sin\varphi_1 & l_2\sin\varphi_2 \\ l_1\cos\varphi_1 & l_2\cos\varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = v \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} -l_2\sin\varphi_1 & l_2\sin\varphi_2 \\ l_1\cos\varphi_1 & l_2\cos\varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -l_1\omega_1\cos\varphi_1 & l_2\omega_2\cos\varphi_2 \\ -l_1\omega_1\sin\varphi_1 & -l_2\omega_2\sin\varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} - a \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}. \tag{9}$$

其中,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  分别为杆  $AB$  和杆  $AO_1$  角速度;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为杆  $AB$  和杆  $AO_1$  角加速度; 活塞杆  $BC$  的速度  $v$  和加速度  $a$  为自变量, 由此可求得杆  $O_1A$  的角速度  $\omega_2$  和角加速度  $\alpha_2$ .

以杆  $O_1A_1$  的运动参数为已知量, 建立曲柄滑块机构  $O_1A_1B_1C_1$  的运动学模型, 其投影方程为

$$\begin{cases} l_4\cos\varphi_4+s_E=l_3\cos\varphi_2, \\ l_4\sin\varphi_4+b=l_3\sin\varphi_2. \end{cases} \tag{10}$$

由式(8)已求解出  $\varphi_2$ , 由此可以求解滑块位移  $s_E$ .

分别对时间求一次和二次导数, 并写成矩阵形式, 得速度和加速度关系:

$$\begin{bmatrix} -l_4\sin\varphi_4 & 1 \\ l_4\cos\varphi_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_4 \\ v_{SE} \end{bmatrix} = \omega_2 \begin{bmatrix} -l_3\sin\varphi_2 \\ l_3\cos\varphi_2 \end{bmatrix}. \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} -l_4\sin\varphi_4 & 1 \\ l_4\cos\varphi_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_4 \\ a_{SE} \end{bmatrix} = \omega_4 \begin{bmatrix} l_4\cos\varphi_4 \\ l_4\sin\varphi_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_4 \\ v_{SE} \end{bmatrix} + \alpha_2 \begin{bmatrix} -l_3\sin\varphi_2 \\ l_3\cos\varphi_2 \end{bmatrix} - \omega_2^2 \begin{bmatrix} l_3\cos\varphi_2 \\ l_3\sin\varphi_2 \end{bmatrix}. \tag{12}$$

式中:  $\varphi_2$ 、 $\omega_2$ 、 $\alpha_2$  为自变量, 由此可求得模块  $C_1$  的速度  $v_{SE}$  和加速度  $a_{SE}$ .

3 运动学仿真分析

3.1 伸缩夹紧机构运动学仿真分析

机构运动学仿真可更为直观地表现出机构运动学性能, 对仿真结果进行分析, 从而对产品结构和参数进行合理选择. 学者们<sup>[12-16]</sup>应用 ADAMS 和 SolidWorks 联合建模仿真, 在管道机器人方面进行了大量研究. 因此, 笔者应用 ADAMS 和 SolidWorks 联合建模仿真的方法, 对伸缩夹紧机构进行运动学研究.

根据管道机器人结构参数和设计初始值见表 1, 在 ADAMS 模型中将活塞设置为驱动件添加驱动 (Motion) 见表 2, 设置 STEP 驱动函数(见表 3) 进行仿真. 在以上的仿真条件下, 获得伸缩腿在驱动 (Motion1) 下的运动特性曲线, 如图 5 所示.

表 1 伸缩机构构件和管径尺寸

Table 1 Telescopic mechanism component and pipe diameter size mm			
活塞行程	最小管径	最大管径	连杆长
100	800	1 000	200

表 2 驱动活塞 Motion 设置

Table 2 Motion settings of drive piston			
运动副类型	驱动方式	函数类型	控制目标
平移副	函数	STEP	速度

表3 伸缩夹紧机构 STEP 驱动函数

Table 3 STEP drive function of telescopic clamping mechanism

时间/s	速度/(mm·s <sup>-1</sup> )
0~4	0~24
4~8	0~-24
8~12	0~0
12~16	0~-24
16~20	0~24

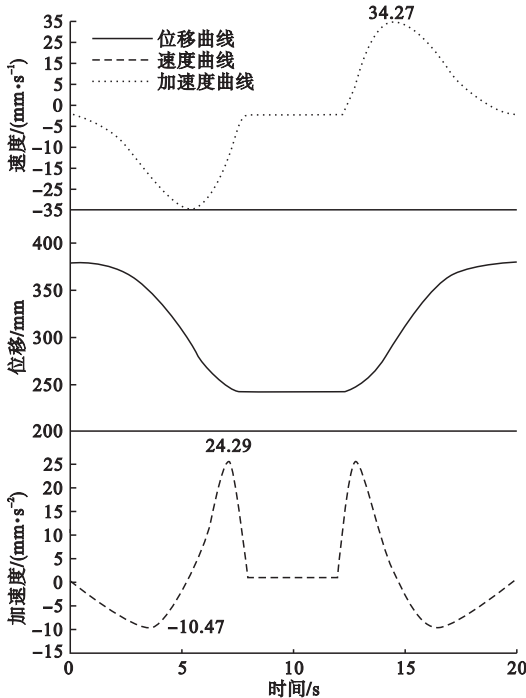


图5 伸缩腿运动曲线

Fig. 5 Telescopic leg movement curves

由图5可知,伸缩腿位移变化范围为233.78~369.53 mm.管道机器人机体直径为750 mm,因此管道机器人所能适应的最小管径 $D_{\min}=750$  mm,根据下式可求得机器人所能适应的最大管道直径:

$$D_{\max}=750+2\times(369.53-233.78)=1\,021.5\text{ mm}.\tag{13}$$

因此,伸缩夹紧机构的运动工作空间为750~1 021.5 mm,而实际的管径变化范围为800~1 000 mm,由于机器人的伸缩腿工作空间大于实际的管径范围,根据区间包含关系,机器人所能适应的管径范围大于实际

的管径范围,说明机器人伸缩腿对管径大小的适用性更好.

由图5的速度曲线可知,伸缩腿的速度变化范围为-34.47~34.27 mm/s,曲线平滑,伸缩腿伸出过程中空载速度较快,当接近管壁到夹紧过程中速度放慢,可减小速度冲击,提高效率;由加速度曲线分析可知,其变化范围为-10.47~24.29 mm/s<sup>2</sup>,且曲线平滑,变化缓慢,表明机伸缩夹紧机构运行顺畅,不会产生较大的惯性力,无震颤现象.速度曲线中速度值为零的时间段表示伸缩机构在这段时间内正处于夹紧(或放松)状态,此时间段内由步进单元完成一个步进运动.

3.2 步进单元运动学仿真分析

通过联合仿真将获得步进单元在活塞杆的驱动下,模块运动的位移、速度和加速度特性曲线;初始设计要求步距为100 mm.

将步进单元机构模型导入ADAMS,设置驱动活塞杆驱动设置与伸缩夹紧机构的一致(见表2),各构件参数和位置如表4所示,确定其运动参数和STEP驱动函数(见表5)后仿真,仿真结果如图6所示.

表4 步进单元各杆件尺寸

Table 4 Dimensions of each member of the step unit

mm						
$a$	$x_1$	$b$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$
140	148.5	337.5	75	100	150	150

表5 步进单元 STEP 驱动函数表

Table 5 STEP drive function of step unit

时间/s	速度/(mm·s <sup>-1</sup> )
0~4	0~23
4~8	0~-23
8~12	0~-23
12~16	0~23

图6为步进单元运动在以上仿真条件下获得的运动曲线,由位移曲线可知滑块平移范围为395.96~499.68 mm,由此可根据下式求得步进单元的步距 $S$ .



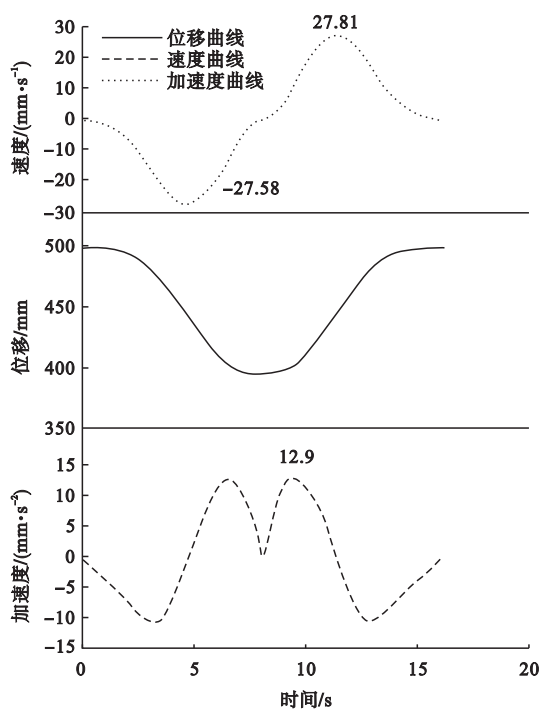


图6 步进单元运动曲线

Fig. 6 Step motion curves

$$S = 499.68 - 395.96 = 103.72 \text{ mm. (14)}$$

由此可见步距 103.72 mm 大于初始设计要求的 100 mm,满足步进单元的步距设计要求。

由速度曲线可知,步进单元滑块的速度范围为  $-27.58 \sim 27.81 \text{ mm/s}$ ,速度曲线平滑,步进单元的单步步速为  $12.7 \text{ mm/s}$ 。由加速度曲线可知,其加速度范围为  $-10.53 \sim 12.90 \text{ mm/s}^2$ ,加速度变化幅度小,曲线平滑。通过仿真动画可见,步进单元在运行时没有速度冲击和震颤现象。

4 力学模型分析

4.1 伸缩夹紧机构静力学模型

伸缩夹紧机构结构整体比较复杂,但结构对称<sup>[17-18]</sup>。当伸缩夹紧机构处于夹紧状态时,四条支链受力相同,因此可简化为对其中的一条支链进行受力分析,在夹紧机构处于工作状态,建立其夹紧力与驱动力之间的数学模型。夹紧机构单支链受力分析简图如图 7 所示。

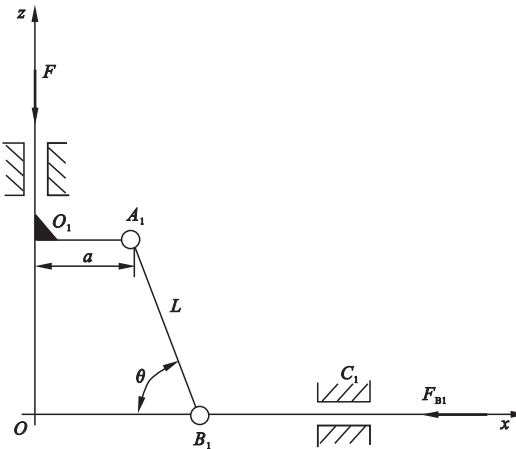


图7 夹紧机构单支链受力分析简图

Fig. 7 Force diagram of single branched chain

图中,  $L$  为连杆  $A_1B_1$  长度;  $\theta$  为连杆  $A_1B_1$  的转角;  $a$  为伸缩腿安装构件  $A_1O_1$  的长度;  $F$  为伸缩腿所受夹紧力;  $F_{B1}$  为活塞驱动力。

因所受夹紧力和重力相差为数量级的差距,做受力分析假设:1) 机构间的摩擦力忽略不计;2) 重力、惯性力忽略不计;3) 连杆为刚体无弹性变形。

由图 7 可知,杆  $O_1A_1$  和驱动活塞属于同一刚体,连杆  $A_1B_1$  为单支链中唯一的二力杆,伸缩腿的阻抗力为  $F_{B1}$ ,活塞驱动力为  $F$ 。整个系统约束为理想约束,根据虚位移原理:

$$\sum (F_{ix}\delta x_i + F_{iy}\delta y_i + F_{iz}\delta z_i) = 0. \quad (15)$$

简化得:

$$-F_{B1}\delta x_{B1} - F_{O1}\delta z_{O1} = 0. \quad (16)$$

$O_1, B_1$  的坐标为

$$x_{B1} = a + l\cos\theta, z_{O1} = l\sin\theta.$$

实施变分运算得到:

$$\delta x_{B1} = -l\sin\theta\delta\theta, \delta z_{O1} = l\cos\theta\delta\theta.$$

将  $\delta x_{B1}, \delta z_{O1}$  代入式(16),解得:

$$F_{O1} = F_{B1}\tan\theta. \quad (17)$$

式(17)为伸缩夹紧机构单一支链的活塞驱动力  $F_{O1}$  与夹紧力  $F_{B1}$  之间的关系。

4.2 步进单元静力学模型

步进单元由活塞杆  $BC$  驱动,通过反曲柄滑块机构,将运动和力传递到滑块  $C_1$ ,建立步进单元的受力模型,如图 8 所示。

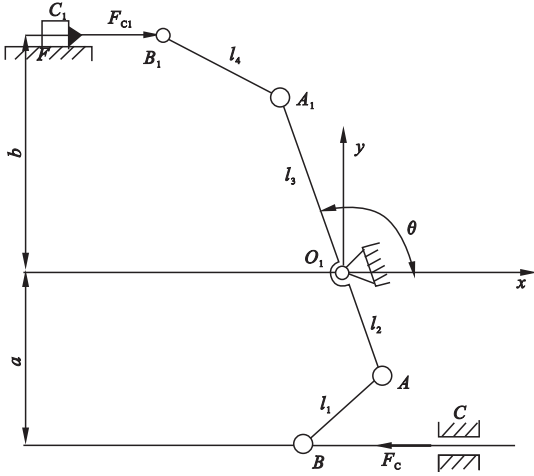


图8 步进单元力学模型

Fig. 8 Stepping element mechanical model

图8中,  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 、 $l_4$  分别为杆  $BA$ 、 $AO$ 、 $OA_1$ 、 $A_1B_1$  的长度参数;  $\theta$  为杆  $O_1A_1$  转角;  $a$  为杆  $BC$  离  $Y$  轴的距离;  $b$  为滑块与  $Y$  轴之间的距离;  $F_{c1}$  为滑块负载阻力;  $F_c$  为步进单元活塞驱动力。  $C_1$  为运动滑块,  $A_1O_1A$  为可绕  $O_1$  点旋转的杠杆,  $BC$  为驱动活塞杆。系统约束为理想约束, 因此对于该机构采用虚位移原理。建立图示坐标系:

$$\sum (F_{ix}\delta x_i + F_{iy}\delta y_i + F_{iz}\delta z_i) = 0. \quad (18)$$

根据力学模型简化得:

$$F_c\delta x_c + F_{c1}\delta x_{c1} = 0. \quad (19)$$

$C$ 、 $C_1$  点分别与  $B$  和  $B_1$  点之间的距离为常数  $\chi$ 、 $\chi_1$ 。则由几何关系可得  $C$ 、 $C_1$  的横坐标:

$$x_c = \sqrt{l_1^2 - (a - l_2 \sin\theta)^2} \pm l_2 \cos\theta + \chi$$

$$x_{c1} = \sqrt{l_4^2 - (b - l_3 \sin\theta)^2} + l_3 \cos\theta + \chi_1.$$

当  $\theta > \arccos \frac{a_2 + l_2^2 - l_1^2}{2al_2}$  时, 取“+”; 当

$\theta \leq \arccos \frac{a_2 + l_2^2 - l_1^2}{2al_2}$  时, 取“-”; 对坐标实施

变分运算, 有

$$\delta x_c = \frac{l_2(a - l_2 \sin\theta) \cos\theta \delta\theta}{\sqrt{l_1^2 - (a - l_2 \sin\theta)^2}} \mp l_2 \sin\theta \delta\theta.$$

$$\delta x_{c1} = \frac{-l_3(b - l_3 \sin\theta) \cos\theta \delta\theta}{\sqrt{l_4^2 - (b - l_3 \sin\theta)^2}} + l_3 \sin\theta \delta\theta.$$

将  $\delta x_c$ 、 $\delta x_{c1}$  代入式(19), 得步进单元活

塞驱动力  $F_c$  和负载阻力  $F_{c1}$  之间的关系:

$$F_c = \frac{F_{c1} \left( \frac{-(b - l_3 \cos\theta) \sin\theta}{\sqrt{l_4^2 - (b - l_3 \cos\theta)^2}} + \cos\theta \right) l_3}{\left( \frac{(a - l_2 \cos\theta) \sin\theta}{\sqrt{l_1^2 - (a - l_2 \cos\theta)^2}} \mp \cos\theta \right) l_2}. \quad (20)$$

## 5 力学特性仿真分析

### 5.1 伸缩夹紧机构驱动力仿真分析

研究在该管径条件下, 伸缩夹紧机构完成一个工作循环时, 驱动力随时间的变化。从而为机器人驱动系统的设计提供理论依据<sup>[19-20]</sup>。

#### 5.1.1 变管径下驱动力研究

分析伸缩夹紧机构在负载阻力一定和管径变化条件下, 活塞驱动力随管径的变化。在以下工况条件下进行仿真计算: 负载阻力  $F = 4\,000\text{ N}$ , 伸缩腿末端为橡胶类材料, 管道为钢筋混凝土, 根据橡胶与钢筋混凝土之间的摩擦性质, 取伸缩腿与管壁之间的摩擦系数  $\mu = 0.4$ , 则由式(21)求得单个支链所需的夹紧力:

$$N = \frac{F}{4\mu} = \frac{4\,000}{0.4 \times 4} = 2\,500. \quad (21)$$

将模型以 X\_T 格式导入 ADAMS, 如图9所示, 其仿真条件设置如表6所示。

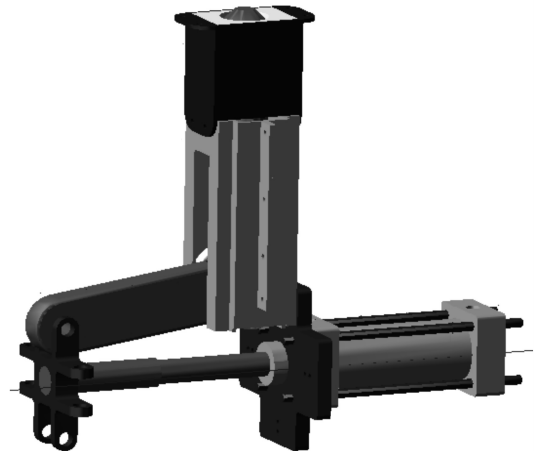


图9 ADAMS 伸缩夹紧机构模型

Fig. 9 ADAMS telescopic clamping mechanism model

表6 伸缩夹紧机构仿真设置

Table 6 Simulation setting of telescopic clamping mechanism

驱动类型	仿真时间/s	仿真步数/步	仿真速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	夹紧力/N
移动副	9.6	100	10	2 500

在 2 500 N 夹紧力作用下,活塞驱动力随伸缩腿位移的变化曲线如图 10 所示.

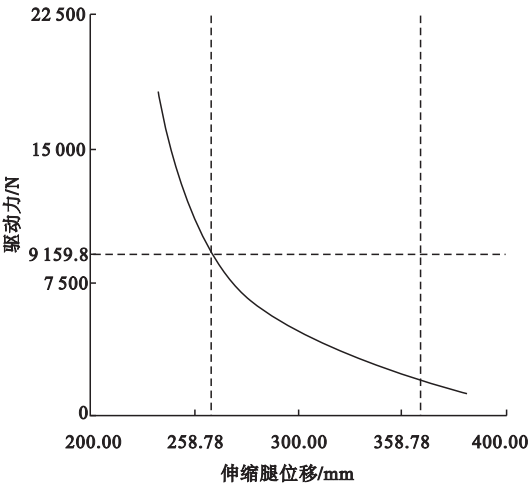


图 10 活塞驱动力曲线

Fig. 10 Piston driving force curve

由图 10 可知,负载阻力一定的情况下,随着伸缩腿伸出,活塞驱动力逐渐减小,即随着管径的增加,所需驱动力逐渐减小.综合式(13)计算可知,伸缩夹紧机构所能适应的管径范围为 750~1 021.5 mm.当管径为 750 mm 时,所需最大驱动力为 18 113.7 N,当管径为 1 021.5 mm 时所需最小驱动力为 1 407.6 N.

管道机器人工作管径范围为 800~1 000 mm,图中虚线横坐标 258.78~358.78 所对应的管径范围即为机器人的工作管径尺寸.横坐标为 258.78,对应管径为 800 mm,所需驱动力最大为 9 159.8 N,由此可研究管径为 800 mm 时活塞驱动力随时间的变化.

5.1.2 定管径下驱动力仿真分析

因管径为 800 mm 时机构所需驱动力最大,从而分析在该管径下活塞驱动力和夹紧力随时间的变化规律.其仿真步骤和函数设置如 5.1.1 小节.其仿真 STEP 函数数据如表 7 所示.

表7 STEP 函数数据表

Table 7 Function data table

时间/s	位移/mm	时间/s	位移/mm
0~2	0~-5	18~20	0~-5
2~10	0~-0.186	20~28	0~-0.186
10~14	0~0	28~32	0~0
14~16	0~5.186	32~34	0~5.186
16~18	0~0	34~36	0~0

表 7 为伸缩夹紧机构夹紧力仿真的 STEP 函数时间和位移表,仿真得到夹紧力和驱动力随时间的变化规律,伸缩夹紧机构夹紧力和活塞驱动力随时间的变化曲线如图 11 所示.

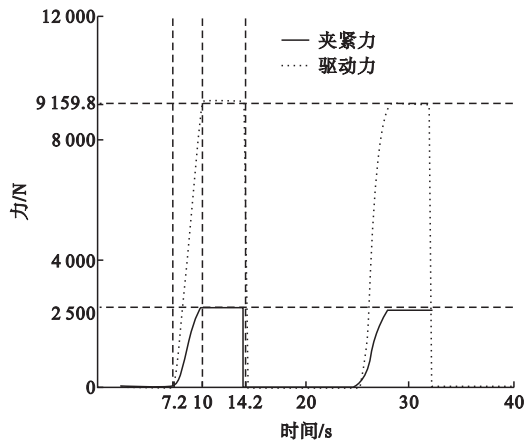


图 11 伸缩夹紧机构力学仿真

Fig. 11 Mechanical simulation of telescopic clamping mechanism

由图 11 可知,在一个工作循环内,7.2 s 时伸缩腿开始接触到管道内壁,夹紧力和驱动力逐渐增大,到 10 s 时伸缩夹紧机构夹紧力达到 2 500 N,机构完全夹紧,此时活塞驱动力为 9 159.8 N;夹紧状态保持到 14.2 s 时,伸缩腿缩回,机构放松,夹紧力和活塞驱动力都减小为零.结合 5.1.1 节的结论,在工作管径变化范围内,当负载阻力为 4 000 N 时,伸缩夹紧机构所需驱动力最大为 9 159.8



N,验证了5.1.1节的仿真结果,由此可为动力设计提供理论依据。

5.2 步进单元驱动力仿真分析

研究机器人在负载阻力为4 000 N时,活塞驱动力随步距变化的曲线,STEP驱动函数与运动学仿真函数一致如表5所示。仿真条件:仿真时间16 s;仿真步数300步;函数STEP函数;负载阻力为4 000 N。

图12为液压缸驱动力随模块位移的变化曲线。结果表明在负载阻力下,液压缸的活塞驱动力随着模块之间的距离的增大而减小。当负载恒定为4 000 N,模块之间的距离从397 mm到500 mm,即步距从0 mm增加到103 mm时,活塞杆驱动力范围为1 978.46~7 645.38 N。以此为理论依据,可选择相应的液压缸驱动步进单元。

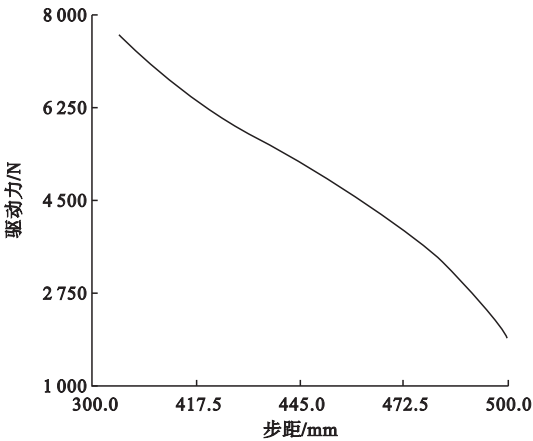


图12 步进单元驱动力曲线  
Fig.12 Step driving force curve

6 结 论

- (1)以管径要求800 mm,步距100 mm为例进行设计,该新型管道机器人行走装置的夹紧机构实际工作范围和最大步距均大于设计要求,满足功能要求。
- (2)运动学研究结果表明,夹紧机构和步进单元速度和加速度曲线平滑,机构运行平稳,无震颤现象。
- (3)以负载阻力为4 000 N为例进行力学性能仿真分析,获得夹紧机构和步进单元

的驱动力选用范围,并获得以下规律:夹紧力一定情况下,夹紧驱动力随着管道直径的增大而减小;步进单元液压缸的活塞驱动力随着模块之间的距离的增大而减小。

(4)该管道机器人行走机构具有管径适应范围较大、速度快、运行平稳,由加速度产生的惯性力较小,驱动性能良好,无力冲击等优点,为进一步设计打下理论基础,对工程中大直径管道清淤机器人的研究具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 曹建树,林立. 油气管道机器人技术研发进展[J]. 油气储运,2013(1):1-7.  
(CAO Jianshu, LIN Li. Research and development of oil and gas pipeline robot technology [J]. Oil & gas storage and transportation,2013 (1):1-7. )

[2] 柏蔚,李怀正,陈卫兵,等. 机器人在排水管道中研究和应用[J]. 环境科学与管理,2012,37(9):45-50.  
(BO Wei, LI Huaizheng, CHEN Weibing, et al. Research and application of robots in sewer pipes [J]. Environmental science and management,2012,37(9):45-50. )

[3] TRUONG-THINH N, NGOC-PHUONG N, PHUOC-THO T. A study of pipe-cleaning and inspection robot[C]//International Conference on Robotics and Biomimetics. [S. l.]: IEEE, 2011:2593-2598.

[4] MAZZINI F, KETTLER D, GUERRERO J, et al. Tactile robotic mapping of unknown surface, with application to oil wells[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement,2011,60(2):420-429.

[5] FUKUSHIMA H, SATOMURA S, KAWAI T, et al. Modeling and control of a snake-like robot using the screw-drive mechanism[J]. IEEE transactions on robotics, 2012, 28(3):541-554.

[6] KAKOGAWA A, MA S G. Stiffness design of springs for a screw drive in-pipe robot to pass through curved pipes and vertical straight pipes [J]. Advanced robotics,2012,26(3/4):253-276.

[7] 王振中,王挺,刘君,等. 差动式自适应管道机器人的设计与运动学研究[J]. 机电工程, 2016,33(4):395-400.

- (WANG Zhenzhong, WANG Ting, LIU Jun. Research on design and kinematics of differential adaptive pipeline robot [J]. Mechanical and electrical engineering, 2016, 33(4): 395 – 400. )
- [8] 陈伶. 六轮支撑腿式弯管机器人运动轨迹研究[J]. 科技创新与生产力, 2016(2): 60 – 63. (CHEN Ling. Research on the motion trajectory of the six wheel supporting leg bent pipe robot[J]. Science and technology innovation and productivity, 2016(2): 60 – 63. )
- [9] 刘清友, 李雨佳, 任涛, 等. 主动螺旋驱动式机器人[J]. 机器人, 2014, 36(6): 711 – 718. (LIU Qingyou, LI Yujia, REN Tao, et al. An active helical drive in-piperobot [J]. Robot, 2014, 36(6): 711 – 718. )
- [10] NESAIA K P, KARTHIKEYAN M B. Design and development of vision based blockage clearance robot for sewer pipes[J]. International journal of robotics and automation, 2012, 1(1): 64 – 68.
- [11] 殷奇会, 孔凡让. 三轴差速式管道机器人越障能力分析[J]. 机电工程, 2012, 30(12): 1371 – 1375. (YIN Qihui, KONG Fanrang. Crossing ability analysis of triaxial differential pipeline robot [J]. Mechanical & electrical engineering magazine, 2012, 30(12): 1371 – 1375. )
- [12] KAKOGAWA A, NISHIMURA T, MA S. Development of a screw drive in-pipe robot for passing through bent and branch pipes[C]// International Symposium on Robotics. [S. l.]: IEEE, 2013: 1 – 6.
- [13] 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 on the system of variable diameter pipeline robot [J]. Mining machinery, 2013, 41(4): 124 – 127. )
- [14] 焦闻喜, 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, 42(3): 65 – 67. (JIAO Wenxi, KAN Yifan, ZHAO Yuanxin. Design and implementation of pipeline cleaning robot based on SolidWorks [J]. Machine tools and hydraulic, 2014, 42(3): 65 – 67. )
- [15] 刘彩霞, 龚德利. 螺旋式小型管道机器人控制系统的设计[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2014, 14(1): 37 – 40. (LIU Caixia, GONG Deli. Design of control system for screw wheel small in-pipe robot [J]. Journal of Shanghai institute of technology (natural science), 2014, 14(1): 37 – 40. )
- [16] 梁亮, 胡冠昱, 朱宗铭, 等. 内外螺旋管道机器人的动力学建模和数值仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(11): 2546 – 2551. (LIANG Liang, HU Guanyi, ZHU Zongming, et al. Dynamics modeling and numerical simulation of inner and outer spiral in-pipe robots [J]. Journal of system simulation 2013, 25(11): 2546 – 2551. )
- [17] 李杨, 曹建树, 廖建泉, 等. 支撑轮式管道行走机构牵引机构结构设计[J]. 北京石油化工学院学报, 2013, 21(1): 29 – 32. (LI Yang, CAO Jianshu, MIAO Jianquan, et al. A structural design of tractive module for wall-press pipelinerobots [J]. Journal of Beijing institute of petro-chemical technology, 2013, 21(1): 29 – 32. )
- [18] 唐鹏, 石成江, 刘占民, 等. 基于 ADAMS 的管道检测机器人动力学分析及仿真[J]. 机械设计与制造, 2012(7): 150 – 152. (TANG Peng, SHI Chengjiang, LIU Zhanmin, et al. Dynamics analysis and simulation of pipeline detection robot based on ADAMS [J]. Machinery design & manufacture, 2012(7): 150 – 152. )
- [19] 孙丹, 韩继光, 王殿君, 等. 四轮管道行走机构的通过性能研究[J]. 徐州师范大学学报(自然科学版), 2011, 29(4): 71 – 74. (SUN Dan, HAN Jiguang, WANG Dianjun, et al. Study on the performance of the four round pipeline walking mechanism [J]. Journal of Xuzhou normal university (natural science), 2011, 29(4): 71 – 74. )
- [20] 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行走机构[J]. 机械工程学报, 2010, 46(21): 19 – 28. (LI Peng, MA Shugen, LI Bin, et al. Screw drive pipe inner running mechanism with axial and circumferential exploration function [J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(21): 19 – 28. )