

DOI: 10.7652/xjtuxb201808014

轮式管道机器人过弯动态特性分析

闫宏伟, 汪洋, 马建强, 袁飞, 彭方现, 李亚杰

(中北大学机械工程学院, 030051, 太原)

摘要: 为了详细地了解管道机器人过弯时的动态特性,设计了一种全驱动轮式管道机器人。基于坐标转换法,分析了机器人过弯时质心与管道中线的相对距离 Δx 发生变化对机器人运动特性的影响;基于力学虚功原理,分析了机器人过弯时 Δx 发生变化对机器人受力情况的影响。通过 Adams 软件对机器人过弯过程中的运动状态和受力情况进行了仿真,经分析发现管道机器人在过弯过程中, Δx 先快速增大后低速减小,在运动特性方面,随着 Δx 增大,外驱动轮运动速度随之增大,内驱动轮运动速度则有所减小。当内驱动轮速度达到最低时,外驱动轮与内驱动轮的速度之比会发生小幅度波动;在受力情况方面,随着 Δx 增大,内、外驱动轮与管壁的接触力随之增加,此仿真模型中,在入弯阶段外驱动轮和内驱动轮与管壁接触力大小之比为 1.4,出弯阶段此接触力之比约降为 0.9。从平稳性角度来看,与入弯和出弯两个阶段相比,过渡阶段在运动和受力上均相对不稳定,故当机器人过弯时,将 Δx 的变化纳入运动分析方程有利于获得其更加精确的动态特性。

关键词: 管道机器人;相对距离;Adams 软件;动态特性

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)08-0087-08

Analysis for Dynamic Characteristics of Wheeled Pipe Robot in Elbow

YAN Hongwei, WANG Yang, MA Jianqiang, YUAN Fei, PENG Fangxian, LI Yajie

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: A fully driven wheeled pipe robot is designed to understand the dynamic characteristics of pipe robots over a curve in detail. Influences of the changing distance Δx between the center of mass and the center line of the pipeline on the motion characteristics of the robot are analyzed based on the coordinate transformation method, and the effects of the relative distance on the force on the robot are analyzed based on the principle of mechanical virtual work. The motion state and contact force of the robot are simulated through the ADAMS software. It is found from the analysis that the relative distance increases rapidly at first and then reduces at a lower speed during the cornering process. The motion state has the following characteristic that the speed of the outer drive wheel increases and the speed of the inner drive wheel reduces as Δx increases. When the speed of the inner drive wheel reaches its minimum value, the ratio of the speed of the outer drive wheel to the inner drive wheel has small fluctuation. The contact force between both inner or outer drive wheels and the pipe wall increases as Δx increases. Simulation also shows that the ratio of the contact force between the outer drive wheel and the pipe wall to the contact force between the inner drive wheel and the pipe wall is 1.4 during entering elbow stage, while

收稿日期: 2017-12-16。 作者简介: 闫宏伟(1969—),男,副教授。 基金项目: 山西省重点研发计划(一般项目)社会发展资助项目(201603D321117);山西省自然科学基金资助项目(2013011026-2)。

网络出版时间: 2018-06-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180622.1721.006.html>

this contact force ratio reduces to about 0.9 during exiting elbow stage. It is found from the standpoint of stability that the transitional period is relatively unstable in both the motion and the stress compared to the two stages of entering and exiting. Therefore, when the cornering process of a pipe robot is analyzed, considering Δx variation in the motion analysis equation will be beneficial to obtain its more accurate dynamic characteristics.

Keywords: pipe robot; relative distance; Adams software; dynamic characteristics

管道机器人作为一种在特定环境中工作的智能装备,近年来一直是国内外学者的研究热点之一^[1-4],由于轮式驱动具有动力传递效率高、运动平稳性高等优点成为管道机器人的主要驱动方式。哈尔滨工业大学许冯平等分别从直轮驱动管道机器人的过弯特性、差速调节机构、管径自适应能力、过弯位姿等方面对管道机器人过弯时的运动特性进行了详细分析^[5-10]。Lee 和 Kwon 等提出通过控制驱动轮角度可以驱动机器人顺利通过弯管和 T 型管道^[11-12]。Jeon 和 Rollinson 等采用柔性连接方式,提出一种具有自适应能力的管道机器人,并研究了其在不同类型管道内的移动性能^[13-14]。Kakogawa 等提出了适用于驱动管道机器人的螺杆传动机构,并找到了机器人在移动过程中的最佳弹簧刚度,使此机器人具备了通过较小曲率半径弯管的能力^[15-16]。多数学者已经注意到管道机器人过弯过程中机器人质心运动轨迹与管道中线并不重合,但其相对距离对机器人过弯时的动态特性影响尚未见报道^[17-19]。为了更加精确地了解机器人过弯时动态特性的变化,设计了一种轮式管道机器人,并将此相对距离的变化纳入运动分析方程,从运动分析和受力分析两个角度研究了机器人质心到管径中心线的相对距离的变化对其过弯时运动特性的影响。

1 轮式管道机器人设计

为了提高管道机器人各构件的互换性,便于维修和降低制造成本,本文机器人采用模块化设计^[20]。

图 1 所示为管道机器人的驱动模块,由驱动部分、齿轮传动部分、连杆机构和弹簧等组成,此驱动模块传动原理如图 2 所示。为了提高装置运行的稳定性,在驱动模块前端装有固定接头,用来和另一个驱动模块固接以限制管道机器人工作时的自由度,如图 3 所示。为了提高装置的柔性,在驱动模块后端装有活动接头,用来串联相关执行机构(如封堵器、机械手等)。驱动模块设计为全驱动形式,一方面可以提高其负载能力,另一方面使此管道机器人具备了过 T 型管的能力。弹簧和连杆机构配合使

用使机器人在管道中具备径向自适应能力。驱动部分包括电源和减速电机,所输出转矩先后通过锥齿轮和直齿轮组最终传递到驱动轮上^[21-22]。

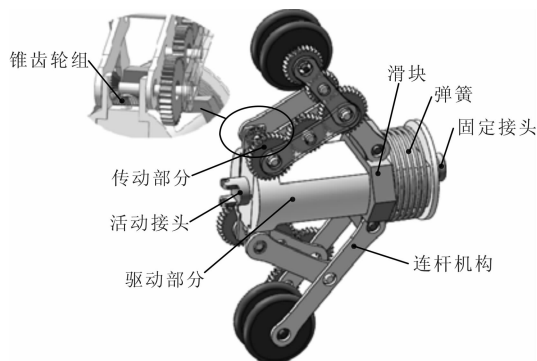


图 1 驱动模块示意图

驱动模块主要由两套相互独立且结构相同的齿轮传动机构组成,传动机构原理如图 2 所示,主要由 1 对用于变向的锥齿轮和 5 个用于传递扭矩的直齿轮串联组成。其中直齿轮系均置于连杆同一侧,且固定于连杆上,并能够随着连杆的运动而改变相对空间位置,以保证电机所产生的扭矩稳定地传递到机器人的轮子上。

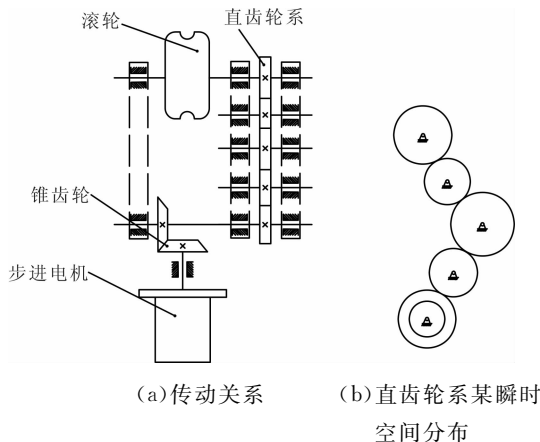


图 2 机构传动原理图

轮式管道机器人在结构上由两个驱动模块经固定接头串联组成,在传动上由 4 套相互独立的传动系统组成,驱动电机所输出的扭矩通过串联的齿轮系可直接传递到机器人轮子上,且 4 套独立的传动

链不仅能使机器人获得更大的驱动力,还可以允许操作者根据不同工况选择相应的驱动模式。例如:机器人爬升时,采用 4 个电机同时驱动以保证获得足够大的驱动力;机器人水平行走时,用两个靠近管道下部的轮子作为驱动轮,上部两个轮子作为从动轮,从而提高驱动效率。管道机器人整体模型如图 3 所示,并以此为研究对象,研究其过弯时的动态特性。

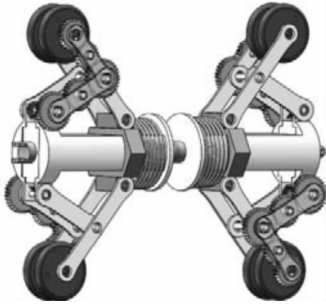


图 3 管道机器人示意图

2 过弯运动分析

机器人在过弯道过程中,由于管道同一横截面内各点相对于弯道圆心的曲率半径不同,为保证其不发生打滑,要求机器人外侧的驱动轮转速大于内侧驱动轮转速,以保证其顺利过弯。此时,由管道机器人自身的结构特点和机器人与管道内壁的接触条件可知,在过弯过程中,机器人质心 G 的运动轨迹 W_G 与管道中线 W_D 不重合,且 W_D 与 W_G 的相对距离 Δx 也不是一个定值,具体变化规律为先增大后减小,如图 4 所示。

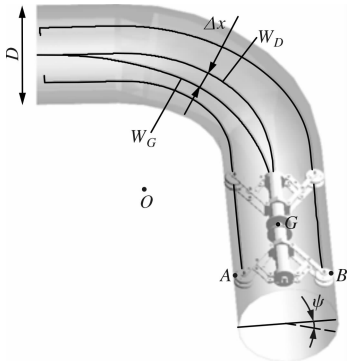


图 4 管道机器人过弯时各点运动轨迹图

由于 Δx 的不断变化,管道机器人在过弯过程中的位姿将随之不断调整。由高等数学知,此过程中通过两内壁接触点且垂直于管道机器人的平面与管道的交线为一类似椭圆(非椭圆),此类似椭圆具体大小可由弯管曲率半径 r_c 、弯管内径 D 和机器人

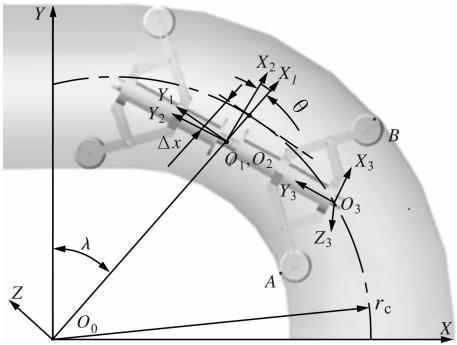
长度 $2L$ 等参数确定^[8]。此过程中,管道机器人的运动为其绕弯管圆心转动和绕自身质心摆动的运动合成。设 ψ 为管道机器人入弯姿态角, λ 为过弯过程中管道机器人的旋转角, θ 为摆动角。

设管道机器人前轮与管道内壁的接触点分别为 $A、B$,常用于分析接触点 $A、B$ 的运动关系的分析方法为^[13,17]

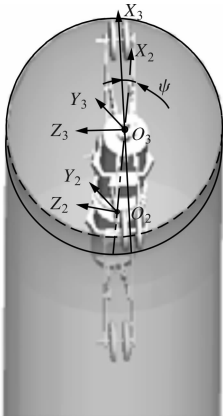
$$\begin{aligned} &|V_A|/|V_B|=|r_A|/|r_B|= \\ &|r_c+0.5D\cos\psi|/|r_c+0.5D\cos(\psi+180^\circ)| \end{aligned} \tag{1}$$

式中: $V_A、V_B$ 为接触点 $A、B$ 的运动速度; $r_A、r_B$ 为过弯过程中接触点 $A、B$ 到弯管圆心的距离。

由于机器人在过弯过程中发生摆动,产生摆动角 θ ,使 $\omega_A \neq \omega_B$,故式(1)不成立。现用坐标转换法对接触点 $A、B$ 的运动关系进行分析^[23]。设 $\{O_0\}$ 为全局定坐标系,其坐标原点为弯管圆心,坐标轴方向如图 5 所示。 $\{O_1\}$ 为固定在机器人质心的动坐标系,由定坐标系 $\{O_0\}$ 绕 Z 轴旋转 $(90^\circ-\lambda)$,并沿坐标系 $\{O_1\}$ 的 X 轴方向平移 $(r_c-\Delta x)$ 获得。动坐标系 $\{O_2\}$ 由坐标系 $\{O_1\}$ 绕其 Z 轴旋转 θ ,再绕旋转后的



(a)主视图



(b)截面示意图

图 5 管道机器人某瞬时过弯示意图

坐标系的 Y 轴旋转 ψ 获得, $\{O_2\}$ 的坐标原点与坐标系 $\{O_1\}$ 原点重合。动坐标系 $\{O_3\}$ 由坐标系 $\{O_2\}$ 沿其 Y 轴平移 L 获得。

根据上述坐标系旋转关系建立由动坐标系 $\{O_1\}$ 到定坐标系 $\{O_0\}$ 的齐次变换矩阵

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \sin\lambda & -\cos\lambda & 0 & (r_c - \Delta x)\sin\lambda \\ \cos\lambda & \sin\lambda & 0 & (r_c - \Delta x)\cos\lambda \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于坐标系 $\{O_2\}$ 是绕动坐标系连续旋转获得, 现用 Z - Y - X 欧拉角表示法来进行分析(令绕 X 轴旋转 0°)^[24], 由动坐标系 $\{O_2\}$ 到动坐标系 $\{O_1\}$ 的旋转关系为

$${}^1_2\mathbf{R}_{ZYX} = \mathbf{R}_Z(\theta)\mathbf{R}_Y(\psi)\mathbf{R}_X(0^\circ) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由动坐标系 $\{O_2\}$ 到动坐标系 $\{O_1\}$ 的齐次变换矩阵 ${}^1_2\mathbf{T}$ 可写为

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^1_2\mathbf{R}_{ZYX} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\sin\theta & \cos\theta\sin\psi & 0 \\ \sin\theta\cos\psi & \cos\theta & \sin\theta\sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

易推得由动坐标系 $\{O_3\}$ 到动坐标系 $\{O_1\}$ 的齐次变换矩阵为

$${}^1_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\sin\theta & \cos\theta\sin\psi & 0 \\ \sin\theta\cos\psi & \cos\theta & \sin\theta\sin\psi & L \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于机器人在径向有自适应能力, 在运动分析中, 根据其构件设计尺寸 e_{O_3B} (动坐标系 $\{O_3\}$ 原点指向接触点 B 的向量) 在坐标系 $\{O_3\}$ 中可近似表示为

$${}^3\mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} \frac{D\cos\psi}{2\cos\theta} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

则接触点 B 在定坐标系 $\{O_0\}$ 中的坐标为

$$[{}^0\mathbf{P}_B \quad 1]^T = {}^0_1\mathbf{T} \cdot {}^1_3\mathbf{T} \cdot [{}^3\mathbf{P}_B \quad 1]^T \quad (7)$$

联立式(2)(5)~(7)可得接触点 B 在定坐标系 $\{O_0\}$ 中的坐标为

$${}^0\mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} \frac{D}{2}(\sin\lambda\cos^2\psi - \cos\lambda\tan\theta\cos^2\psi) - \cos\lambda L + (r_c - \Delta x)\sin\lambda \\ \frac{D}{2}(\cos\lambda\cos^2\psi + \sin\lambda\tan\theta\cos^2\psi) + \sin\lambda L + (r_c - \Delta x)\cos\lambda \\ -\frac{D\sin\psi\cos\psi}{2\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式(8)中, Δx 是时间 t 的函数。 ψ 和长度 $2L$ 分别为机器人进管道时的姿态角和机器人躯干长度分量, 非时间 t 的函数。将式(8)两边对时间 t 求一阶导, 得其在坐标系 $\{O_0\}$ 中的速度分量为

$${}^0\mathbf{P}'_B = \begin{bmatrix} \frac{D}{2}\left((\cos\lambda + \sin\lambda\tan\theta)\cos^2\psi\lambda' - \frac{\cos\lambda\cos^2\psi\theta'}{\cos^2\theta}\right) + (r_c - \Delta x)\cos\lambda\lambda' + (L\lambda' - \Delta x')\sin\lambda \\ \frac{D}{2}\left((\cos\lambda\tan\theta - \sin\lambda)\cos^2\psi\lambda' + \frac{\sin\lambda\cos^2\psi\theta'}{\cos^2\theta}\right) + (\Delta x - r_c)\sin\lambda\lambda' + (L\lambda' - \Delta x')\cos\lambda \\ -\frac{D\sin\psi\cos\psi\tan\theta\theta'}{2\cos\theta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(8)(9)可以看出, 相对距离 Δx 的变化对管道机器人在过弯时的位移和速度均有影响, 因此为保证研究的严谨性和准确性, 在讨论机器人过弯运动特性时不宜忽略 Δx 。同理, 不难推得此观点同样适用于螺旋推进式管道机器人。

同理, 可以求出接触点 A 在坐标系 $\{O_0\}$ 中的速度分量, 在此不加赘述。

3 力学分析

为进一步了解相对距离 Δx 对机器人过弯时动态特性的影响, 对管道机器人进行力学特性分析, 其在动坐标系 $\{O_3\}$ 中的受力状态如图 6 所示。

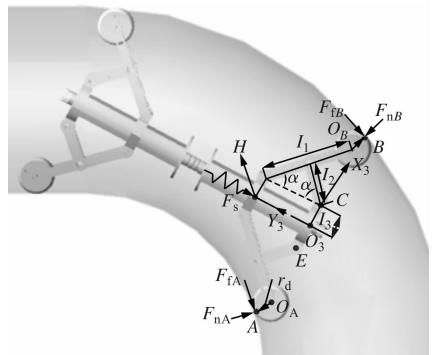


图6 管道机器人在动坐标系 $\{O_3\}$ 中的受力状况分析

由于铰链 C 、 E 固定于机体上,在坐标系 $\{O_3\}$ 中不产生相对移动,故利用力学虚功原理分析时可将其视为相对固定点^[21]。由于驱动轮半径 $r_d \ll D/2$, 此处近似将向量 $\mathbf{e}_{O_B}$ (外驱动轮轴心 O_B 指向接触点 B 的向量)视为与 X_3 轴同向;将向量 $\mathbf{e}_{O_A}$ (内驱动轮轴心 O_A 指向接触点 A 的向量)视为与 X_3 轴反向,其中点 O_A 、 O_B 分别为对应驱动轮的轴心,则接触点 A 在动坐标系 $\{O_3\}$ 中的坐标为

$${}^3\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} -(l_3 + l_1 \sin\alpha + r_d) \\ \frac{l_2 \sin(\pi - 2\alpha)}{\sin\alpha} - l_1 \cos\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: l_1 、 l_2 分别为短杆、长杆的长度; l_3 为动坐标系 $\{O_3\}$ 坐标原点到铰链 C 的距离; α 为连杆与管道机器人驱动部分壳体的夹角。

在受力分析中,考虑驱动轮在 $\{O_3\}$ 坐标系 Y 轴方向的微小变化,接触点 B 在动坐标系 $\{O_3\}$ 中的坐标为

$${}^3\mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} l_3 + l_1 \sin\alpha + r_d \\ \frac{l_2 \sin(\pi - 2\alpha)}{\sin\alpha} - l_1 \cos\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

滑块 H 在动坐标系 $\{O_3\}$ 中的坐标为

$${}^3\mathbf{P}_H = [0 \quad l_1 \cos\alpha \quad 0]^T \quad (12)$$

对式(10)(11)和(12)两边分别取微分,得滑块 H 与接触点 A 、 B 在坐标系 $\{O_3\}$ 中的虚位移为

$$\delta^3\mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} l_1 \cos\alpha \delta\alpha \\ l_1 \sin\alpha \delta\alpha - \frac{2l_2 \sin\alpha \cos(\pi - 2\alpha) + l_2 \cos\alpha s(\pi - 2\alpha)}{\sin^2\alpha} \delta\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\delta^3\mathbf{P}_B = \begin{bmatrix} -l_1 \cos\alpha \delta\alpha \\ l_1 \sin\alpha \delta\alpha - \frac{2l_2 \sin\alpha \cos(\pi - 2\alpha) + l_2 \cos\alpha s(\pi - 2\alpha)}{\sin^2\alpha} \delta\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: $\delta^3\mathbf{P}_A$ 、 $\delta^3\mathbf{P}_B$ 和 $\delta^3\mathbf{P}_H$ 分别为 A 、 B 和 H 在 $\{O_3\}$ 中的虚位移

$$\delta^3\mathbf{P}_H = [0 \quad -l_1 \sin\alpha \delta\alpha \quad 0]^T \quad (15)$$

根据前文关于坐标转换的分析,得滑块与接触点 A 、 B 在全局坐标系 $\{O_0\}$ 中的虚位移为

$$[\delta^0\mathbf{P}_i \quad 1]^T = {}^0\mathbf{T} \cdot {}^1_3\mathbf{T} \cdot [\delta^3\mathbf{P}_i \quad 1]^T \quad (16)$$

式中: $\delta^0\mathbf{P}_i$ 为 i 在定坐标系 $\{O_0\}$ 中的虚位移, i 分别指代滑块 H 和接触点 A 、 B 。

根据力学虚功原理得

$$F_{A_j} \cdot \delta^0\mathbf{P}_A + F_{B_j} \cdot \delta^0\mathbf{P}_B + F_s \cdot \delta^0\mathbf{P}_H = 0 \quad (17)$$

式中: F_{A_j} 是接触点 A 处切向力 F_{tA} 与法向力 F_{nA} 的合力; F_{B_j} 是接触点 B 处切向力 F_{tB} 与法向力 F_{nB} 的合力; F_s 是弹簧预紧力。

将式(13)~(15)和式(16)代入式(17),即可得过弯时驱动轮与管壁接触点 A 、 B 的接触力 F_{A_j} 、 F_{B_j} 。从 ${}^0\mathbf{T}(\lambda, \Delta x)$ 、 ${}^1_3\mathbf{T}(\theta, \phi)$ 的函数关系不难推得接触力的大小不仅与 λ 、 θ 、 ϕ 有关,还与 Δx 有关。

通过前文对管道机器人的动态特性分析,发现当机器人过弯时,其机体质心与管道中线的相对距离 Δx 存在且不可避免。将 Δx 作为自变量纳入运动和受力分析方程,有助于获得管道机器人更加精确的过弯动态特性。由于管道机器人在过弯时机体偏离管道中线靠近管道下方,所以在设计制造管道机器人时,可提供如下建议:①如果机器人质心置于机体正中,应确保机器人轮子的径向截面半径大于机器人质心处的径向截面半径;②如果机器人质心置于机体正中之上,虽会破坏机器人的对称性,但在一定程度上可以提高机器人的管道通过能力。

4 动力学仿真

现利用 Adams 动力学仿真软件定量分析相对距离 Δx 对机器人过弯时的动态特性影响。为便于分析,设接触点 B 处为外驱动轮,设接触点 A 处为内驱动轮,机器人材料采用铸造合金钢,其弹性模量 $E=1.9 \times 10^5$ MPa,密度 $\rho=7\,300$ kg·m⁻³,其余相关仿真参数见表 1。

表 1 几何参数及动力学系数

参数	数值
管道直径/mm	250
管道曲率半径/mm	360
机器人长度/mm	350
机器人质量/kg	16
姿态角/(°)	0
电机转速/rad·s ⁻¹	500
电机转速允许波动范围	±100%
动摩擦系数	0.3
弹簧预紧力/N	200

4.1 运动特性

由前文分析知,由于管道机器人过弯时存在着

绕自身摆动,机器人质心的运动轨迹与管道中心线的相对距离 Δx 是动态变化的,其运动轨迹如图 3 所示,变化过程如图 7 所示。

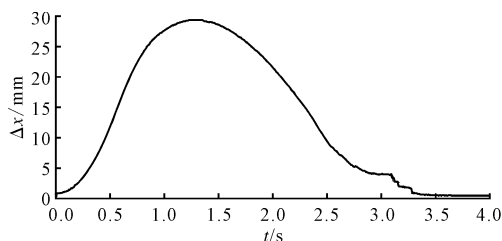


图 7 Δx 随时间的变化

通过分析发现,机器人在入弯时相对距离 Δx 先增大至 30 mm 后逐渐减小,其增大速度略大于出弯道时的减小速度,即在运动惯性的作用下,机器人以较大的初速度入弯,在过弯过程中由于驱动轮与内管壁接触力的变化,其质心在过弯时的位置相对于管道中线有所降低。

V_A 、 V_B 随时间的变化如图 8 所示。通过分析发现: V_A 、 V_B 的变化趋势相反, V_B 先增大后减小, V_A 先减小后增大,且外驱动轮将提前达到稳态(伴随轻微速度波动)。即在过弯过程中机器人绕靠近内轮处沿过弯旋转方向发生摆动,使外轮运动速度增加,内轮运动速度减小,以保证平稳过弯。

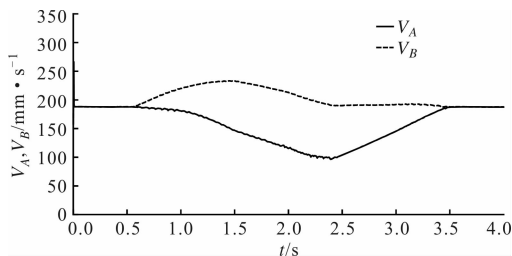


图 8 V_A 、 V_B 随时间的变化

同时,发现 V_B 与相对距离 Δx 的变化趋势大体相同。当相对距离 Δx 最大时, V_B 达到最大。

在机器人过弯过程中, V_B 与 V_A 之比随时间的变化如图 9 所示。在过弯过程中, V_B 与 V_A 之比先增大后减小,当 $t \in 2 \sim 2.5$ s 时, V_A 逐渐达到最小,

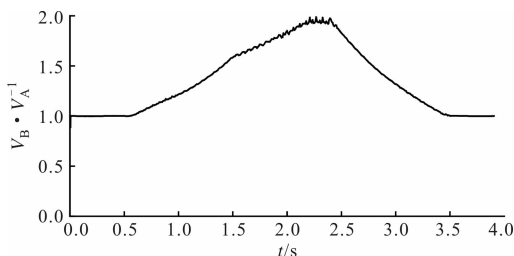


图 9 V_B 与 V_A 之比随时间的变化

此时其速度比发生小幅度波动,波动幅值约为 0.1。

4.2 力学特性

由于机器人过弯时其质心位置相对于管道中线的距离不断改变,导致机器人与管道内壁的接触条件也发生变化,因此在此过程中, F_{A_j} 和 F_{B_j} 也随之变化,如图 10 所示。

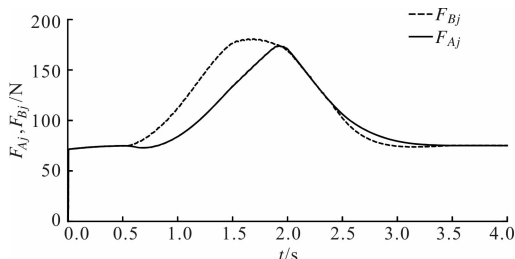


图 10 F_{A_j} 、 F_{B_j} 随时间的变化

在过弯过程中, F_{A_j} 、 F_{B_j} 均先增大后减小至稳态。分析发现,相对距离 Δx 的最大值、 F_{B_j} 的最大值和 F_{A_j} 的最大值出现时间均具有一定滞后性,此研究模型的滞后时间约为 0.5 s。过弯过程中由于机器人自身摆动的存在,在入弯阶段 F_{B_j} 大于 F_{A_j} ;在出弯阶段, F_{A_j} 略大于 F_{B_j} 。

机器人过弯过程中 F_{B_j} 与 F_{A_j} 之比如图 11 所示。分析发现,在入弯阶段, F_{B_j} 与 F_{A_j} 之比变化较为剧烈,随着相对距离 Δx 增大,其接触力之比逐渐增大至 1.4。在出弯阶段接触力变化较为平缓,接触力之比略大于 0.9。入弯过程和出弯过程之间还存在着过渡区,在此阶段 F_{B_j} 与 F_{A_j} 之比为 1 并伴随着小幅度波动,此过程与速度比的波动区相对应,说明与入弯和出弯两个阶段相比,过渡阶段在运动和受力上均相对不稳定。

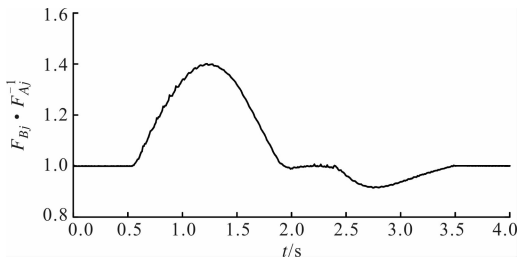


图 11 F_{B_j} 与 F_{A_j} 之比随时间的变化

4.3 研究展望

轮式管道机器人具备通过 T 型管道的能力,过 T 型管时,机器人一侧的驱动轮会经历“悬空”状态,如图 12 所示,此“悬空”状态会对机器人的运动特性产生重大影响。因此,机器人驱动轮“悬空”状态对其运动特性和功能关系的影响将是未来的研究重点。

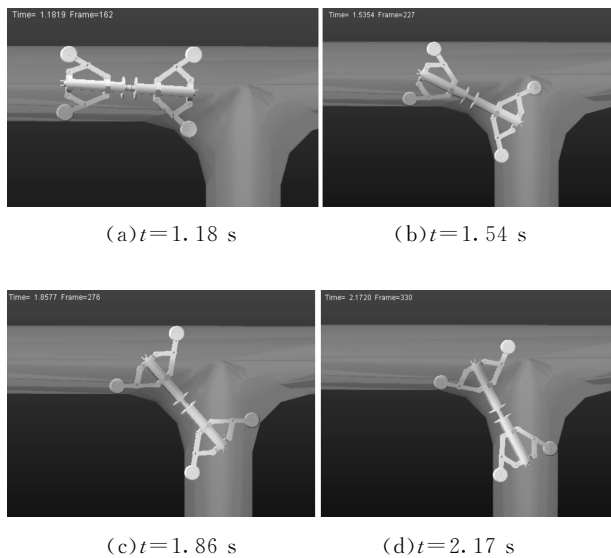


图 12 机器人过 T 型管道示意图

5 结 论

本文研究了管道机器人过弯过程中,机器人质心与管道中线相对距离发生变化对机器人运动特性和力学特性的影响,得出以下结论:

(1)从模块化角度出发,设计了一款轮式管道机器人,提高了各构件间的互换性。将机器人质心到管径中线的相对距离变化纳入运动分析方程,使推导出的运动特性方程更加精确。

(2)管道机器人过弯过程中,由于自身发生摆动,其质心位置相对于管道中线的相对距离先快速增大后略低速减小。

(3)相对距离的变化对管道机器人的运动速度有影响,随着相对距离增大,接触点 B 的运动速度随之增大,接触点 A 的运动速度有所减小。当 V_A 达到最小时, V_B 与 V_A 之比会发生小幅度波动。

(4)相对距离的变化对驱动轮与管壁的接触力大小有影响,随着相对距离增大,内外驱动轮与管壁的接触力随之增加。机器人在入弯和出弯过程中,驱动轮受力情况有较大差异。此模型中,在入弯阶段外驱动轮和内驱动轮与管壁接触力之比为 1.4,出弯阶段此接触力之比约降为 0.9。

(5)从平稳性角度来看,与入弯和出弯两个阶段相比,过渡阶段在运动和受力上均相对不稳定。

参考文献:

[1] 梁亮,郭振华,朱宗铭,等. 一种四螺旋管道机器人的转向分析[J]. 机械设计, 2015, 32(7): 16-19.
LIANG Liang, GUO Zhenhua, ZHU Zongming, et al.

Steering analysis of a four-spiral in-pipe robot [J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(7): 16-19.

- [2] KOLESNIKOV Y L, PTITRYNA A S, BARANOVA O V, et al. Mathematical model for pipeline control applying in-line robotic device [J]. Indian Journal of Science & Technology, 2016, 9(11): 1-11.
- [3] REN X X, HU W T, LV H X, et al. Research and design of a robot for pipeline inspection and cleaning [J]. Journal of Electric Power, 2016, 31(2): 142-147.
- [4] CAI Z, LIN C, HUO D, et al. Design and analysis of cleaning mechanism for an intermittent screw-driven pipeline robot [J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2017, 31(2): 911-921.
- [5] 许冯平, 邓宗全. 管道机器人在弯道处通过性的研究 [J]. 机器人, 2004, 26(2): 155-160.
XU Fengping, DENG Zongquan. Research on traveling-capability of pipeline robot in elbow [J]. Robot, 2004, 26(2): 155-160.
- [6] 李庆凯, 唐德威, 姜生元, 等. 管道机器人弯管运动转体原因分析 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(10): 19-23.
LI Qingkai, TANG Dewei, JIANG Shengyuan, et al. Body-twist of pipeline robot in elbow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(10): 19-23.
- [7] 唐德威, 李庆凯, 姜生元, 等. 三轴差速式管道机器人过弯管时的差速特性及拖动力分析 [J]. 机器人, 2010, 32(1): 91-96.
TANG Dewei, LI Qingkai, JIANG Shengyuan, et al. Differential property and traction force of tri-axial differential pipeline robot in elbow [J]. Robot, 2010, 32(1): 91-96.
- [8] 唐德威, 梁涛, 姜生元, 等. 机械自适应管道机器人的机构原理与仿真分析 [J]. 机器人, 2008, 30(1): 29-33.
TANG Dewei, LIANG Tao, JIANG Shengyuan, et al. Mechanism and simulation analysis of mechanical self-adaptive pipe-robot [J]. Robot, 2008, 30(1): 29-33.
- [9] 唐德威, 李庆凯, 姜生元, 等. 具有差动运动功能的管道机器人设计与分析 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 1-8.
TANG Dewei, LI Qingkai, JIANG Shengyuan, et al. Design and analysis of a pipeline robot with the function of differential movement [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 1-8.
- [10] LI Qingkai, TANG Dewei, JIANG Shengyuan, et al. Research and simulation on the driving property of a

- tri-axial differential pipeline robot [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(6): 753-758.
- [11] LEE D, PARK J, HYUN D, et al. Novel mechanisms and simple locomotion strategies for an in-pipe robot that can inspect various pipe types [J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 56(1): 52-68.
- [12] KWON Y S, YI B J. Design and motion planning of a two-module collaborative indoor pipeline inspection robot [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2012, 28(3): 681-696.
- [13] JEON W, KIM I, PARK J, et al. Design and control method for a high-mobility in-pipe robot with flexible links [J]. Industrial Robot, 2013, 40(3): 261-274.
- [14] ROLLINSON D, CHOSSET H. Pipe network locomotion with a snake robot [J]. Journal of Field Robotics, 2016, 33(3): 322-336.
- [15] KAKOGAWA A, MA S. 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.
- [16] KAKOGAWA A, MA S. Design of a multilink-articulated wheeled pipeline inspection robot using only passive elastic joints [J]. Advanced Robotics, 2017, 32(1): 1-14.
- [17] 王辰忠, 王挺, 刘君, 等. 差动式自适应管道机器人的设计与运动分析研究 [J]. 机电工程, 2016, 33(4): 395-400.
- WANG Chenzhong, WANG Ting, LIU Jun, et al. Design and motion analysis of differential-drive adaptive in-pipe robot [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(4): 395-400.
- [18] ZHU X, WANG W, ZHANG S, et al. Experimental research on the frictional resistance of fluid-driven pipeline robot with small size in gas pipeline [J]. Tribology Letters, 2017, 65(2): 49.
- [19] QIAO J, SHANG J. Application of axiomatic design method in in-pipe robot design [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2013, 29(4): 49-57.
- [20] 蔡业彬. 模块化设计方法及其在机械设计中的应用 [J]. 机械设计与制造, 2005(8): 154-156.
- CAI Yebin. The method of modularization design and its application in machine design [J]. Machinery Design and Manufacture, 2005(8): 154-156.
- [21] 张学文, 邓宗全, 贾亚洲, 等. 管道机器人三轴差动式驱动单元的设计研究 [J]. 机器人, 2008, 30(1): 22-28.
- ZHANG Xuewen, DENG Zongquan, JIA Yazhou, et al. Design and research of a tri-axial differential drive unit for in-pipe robot [J]. Robot, 2008, 30(1): 22-28.
- [22] 姜生元, 邓宗全, 李瑰贤. 三轴差速器及其在管道机器人驱动系统中的应用研究 [J]. 中国机械工程, 2002, 13(10): 877-879.
- JIANG Shengyuan, DENG Zongquan, LI Guixian. Study on the tri-axial differential and its application in the driving system of wheel-type in-pipe robot [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(10): 877-879.
- [23] CRAIG J J. 机器人学导论 [M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 26-39.
- [24] 刘延柱, 潘振宽, 戈新生. 多体系统动力学 [M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 44-46.

[本刊相关文献链接]

- 朱圣晨, 李敏, 徐光华, 等. 多段连续结构的外骨骼手指功能康复机器人. 2018, 52(6): 17-22. [doi:10.7652/xjtuxb201806003]
- 王冰, 方跃法. 一种运动分岔并联机构的结构约束与运动模式分析. 2018, 52(6): 62-68. [doi:10.7652/xjtuxb201806010]
- 钟德星, 杨元, 刘瑞玲, 等. 基于单目视觉的装配机器人研究及应用. 2018, 52(5): 81-87. [doi:10.7652/xjtuxb201805012]
- 张铁, 林康宇, 邹焱飏, 等. 用于机器人末端残余振动控制的控制误差优化输入整形器. 2018, 52(4): 90-97. [doi:10.7652/xjtuxb201804013]
- 董肖莉, 李卫军, 宁欣, 等. 应用三角形坐标系的风格化肖像生成算法. 2018, 52(4): 139-144. [doi:10.7652/xjtuxb201804020]
- 杨航, 刘凌, 倪骏康, 等. 双关节刚性机器人自适应 BP 神经网络算法. 2018, 52(1): 129-135. [doi:10.7652/xjtuxb201801019]
- 程传奇, 郝向阳, 李建胜, 等. 融合改进 A* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划. 2017, 51(1): 137-143. [doi:10.7652/xjtuxb201711019]
- 李兵, 杜俊伟, 陈磊, 等. 工业机器人 RV 减速器传动误差分析. 2017, 51(10): 1-6. [doi:10.7652/xjtuxb201710001]
- 尹贵, 张小栋, 陈江城, 等. 下肢康复机器人按需辅助自适应控制方法. 2017, 51(10): 39-46. [doi:10.7652/xjtuxb201710007]
- 栾玉亮, 荣伟彬, 吴方勇, 等. 3-PPSR 柔性并联机器人力控制研究. 2017, 51(4): 85-90. [doi:10.7652/xjtuxb201704013]

(编辑 武红江)