

差动式自适应管道机器人的驱动特性研究

王辰忠^{1,2} 王挺^{1,2} 刘君³ 张朝龙³ 胡绍刚³

(1 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

(2 沈阳理工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159)

(3 辽宁省电力有限公司鞍山供电公司, 辽宁 鞍山 114001)

摘要 为解决管道机器人过弯时驱动轮与管壁间的相对滑动问题以及机体对管径尺寸的适应问题, 设计了采用一个电机进行驱动并具备差动能力和自适应变径能力的管道机器人。分析了机体差动机构的传动特性, 理论推导了管道机器人变径机构工作状态时的受力方程, 得到了机器人运行时驱动轮与管壁之间的力学关系式。构建了机体管内运动模型, 并分析了机体在不同位姿条件下, 模型中各轮的运动参数变化情况。建立机器人在组合管中运动的虚拟样机模型, 通过仿真实验对机体的差动特性进行了验证, 结果表明机器人可以无干涉过弯, 并展现出了良好的驱动性能。

关键词 差动机构 管道机器人 变径机构 运动位姿

Research of the Driving Characteristic of Differential - drive Adaptive Pipe Robot

Wang Chenzhong^{1,2} Wang Ting^{1,2} Liu Jun³ Zhang Zhaolong³ Hu Shaogang³

(1 State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation of Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

(2 School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

(3 Anshan Power Supply Company, Liaoning Electric Power Corporation, Anshan 114001, China)

Abstract Aiming at solving the problems of relative sliding between the robot driving wheel and the tube wall and the adaptation of the robot body to the pipe diameter, the pipe robot with the characters of autonomous differential motion and adaptive variable diameter is designed by adopting the single motor to drive. The transmission characteristics of the differential mechanism are analyzed, the force equation of working state for the variable diameter mechanism of pipe robot is theoretically deduced, and the mechanical relation between the driving wheels and pipe wall in robot operation is obtained. The movement model of robot in pipe is built, and the relationship between each variable in the model under the condition of different pose is analyzed. The virtual prototype model of robot operating in combined pipe is built through the simulation analysis. The robot characters of autonomous differential motion is validated. The results indicate that the pipeline robot can through bends without interference, and show a good driving characteristics.

Key words Differential mechanism Pipe robot Variable diameter mechanism Movement position

0 引言

圆柱管道在生产生活中被广泛应用, 适应圆柱管道的机器人运动方式有轮式、蠕动式、履带式 and 行走式^[1-2]等多种类型, 其中轮式最为常见。近年来, 国内外学者先后研制出各种针对圆柱管道的机器人, 如中国科学院沈阳自动化研究所和东京工业大学分别设计了旋转驱动管道机器人, 此类机器人采用轮部螺旋运行方式带动机体在管内行进^[3-5]。韩国成均馆大学设计了 MRINSPECT 型轮式管道机器

人^[6-8], 其利用每个驱动轮对应一个驱动电机的方式使机体得以在管内运动, 这种设计结构简单, 但控制系统复杂, 当机器人过弯时需借助 3D 方位传感器或是提前测得管道弯曲参数, 否则, 无法准确进行电机调速。哈尔滨工业大学和吉林大学分别研制了三轴差动管道机器人, 两者均具有一定变径能力与差动能力, 但由于采用轴向外延式变径, 使得机体长径比偏大, 无法适应较大曲率的弯管。其中前者采用 3 驱动轮同步变径的结构设计, 由于机器人在弯管中运行时 3 驱动轮所需的变径量存在差异,

因此机体过弯时的局部干涉问题并未完全消除^[9-12]；后者采用 6 轮同步变径前后轮联动设计，由于机器人过弯初始阶段前后轮转速并不同步，且机器人运动过程各轮所需的变径量并不相同，因此其也存在机器人管内运行的干涉问题^[13-14]。本文中我们设计了一种采用单电机进行驱动并具有自主差动特性和自适应变径特性的管道机器人。对机体的机构组成及内部传动机理进行了分析，推导了自适应变径机构工作状态的受力方程，并通过构建机器人在管内的运动位姿模型来分析弯管曲率半径与驱动轮角速度之间的关系。通过仿真对设计进行了检验。

1 机器人的结构

图 1 为采用模块化设计方法构建的机器人整体结构，机体由驱动电机、内部传动系统、外部变径机构和机壳组成。各变径机构均采用可径向伸缩的结构形式，其中驱动轮变径机构采用径向外延、轴向内缩式设计，使机器人在满足径向自适应变径的条件下可以保有较短的轴向长度，表 1 为机体结构参数。

机器人将驱动轮作为后轮为其管内运行提供推力；由于机器人前支撑轮本身并未被加载驱动力，而是由后驱动轮推动运行，为使前轮更有利于适应管道内部的各种状况，机器人前支撑轮的直径略大于后驱动轮。机器人驱动轮变径机构中的 3 个驱动轮和辅助支撑轮变径机构的 3 个辅助支撑轮分别位于机体前后两侧并均匀分布且交叉支撑于管壁之上；各驱动轮和辅助支撑轮均配有单独的弹簧变径系统，弹簧产生的作用力，为机体提供足够的支撑；变径过程中各轮的变径机构彼此配合且互相不影响。

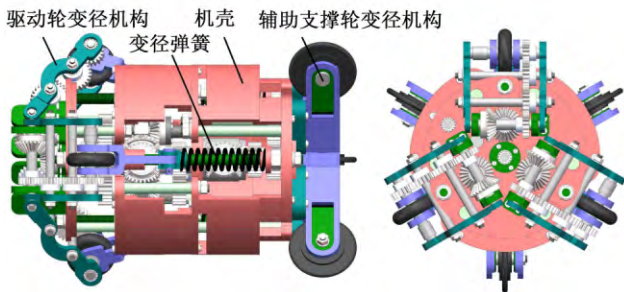


图 1 差动式自适应管道机器人

表 1 机器人的结构参数

最大外径 D_{max}/mm	最小外径 D_{min}/mm	轴向长度 L/mm	驱动轮半径 r_w/mm	辅助支撑轮 半径 r_f/mm
211	189	241	18	22.5

机体内部的传动系统如图 2 所示，其中差动机构由 4 个差速器(I、II、III、IV) 和多个直齿轮按

照一定关系组合而成。驱动电机为机器人提供动力，动力经差动机构进行重新分配后经输出轴(H_1, H_2, H_3) 输出。

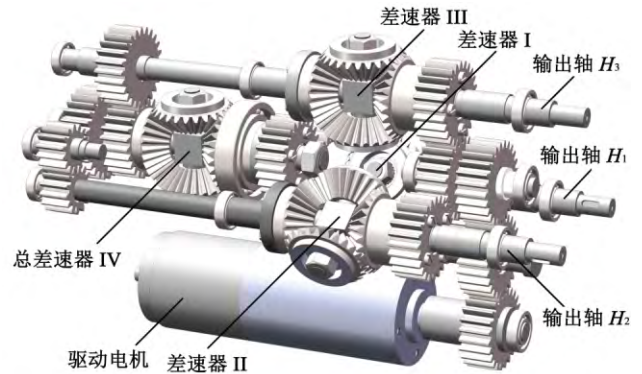


图 2 机体内部传动结构

2 机器人的差动机构

2.1 差动机构的传动原理

图 3 中主输入齿轮 Z_0 分别将动力同步传递给差速器 I、II、III 右侧齿轮 $Z_1、Z_6、Z_{11}$ ，差速器 III 的左侧齿轮 Z_{10} 经由与齿轮 Z_{22} 相啮合实现转向的改变，并同时通过齿轮 Z_{21} 与 Z_{22} 的啮合将动力间接传递到总差速器 IV；差速器 I、II 则通过各自左侧齿轮 $Z_5、Z_{15}$ 直接与总差速器 IV 相连，至此总差速器分别通过齿轮机构与差速器 I、II、III 建立传动关系。若通过主输入齿轮 Z_0 输入运动 ω_0 ，经差动机构对动力重新分配后，由输出轴 $H_1、H_2、H_3$ 输出。则差速器 I、II、III、IV 各自内部存在传动关系，为

$$\begin{cases} \text{I: } -\frac{\omega_0 Z_0}{Z_1} + \omega_4 = 2\omega_{H1} \\ \text{II: } -\frac{\omega_0 Z_0}{Z_6} + \omega_9 = 2\omega_{H2} \\ \text{III: } -\frac{\omega_0 Z_0}{Z_{11}} + \omega_{14} = 2\omega_{H3} \\ \text{IV: } \frac{\omega_4 Z_5}{Z_{16}} + \frac{\omega_{14} Z_{15}}{Z_{20}} = -2 \frac{\omega_9 Z_{10}}{Z_{21}} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $\omega_{H1}、\omega_{H2}、\omega_{H3}$ 分别为输出轴 $H_1、H_2、H_3$ 对应的角速度。

轮系中的传动比为

$$\begin{cases} i_{5-16} = i_{15-20} = 1 \\ i_{10-21} = \frac{1}{2} \\ i_{0-1} = i_{0-6} = i_{0-11} = i_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中， i_0 为主输入齿轮 Z_0 与各差速器输入齿轮 $Z_1、Z_6、Z_{11}$ 间传动比。

结合式(1)、式(2)可知机器人在管内行进时，其主输入齿轮角速度与三输出轴的角速度满足关

系式

$$\omega_{H1} + \omega_{H2} + \omega_{H3} = -\frac{3}{2i_0}\omega_0 \quad (3)$$

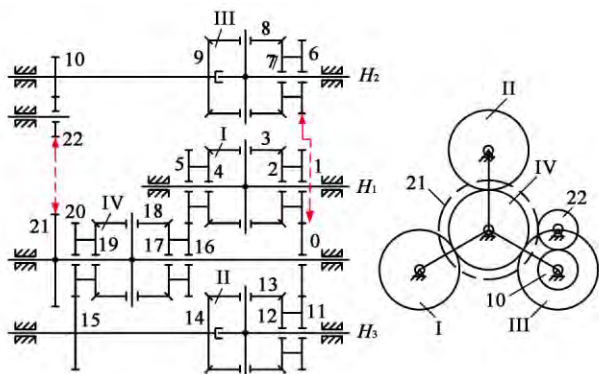


图3 差动系统传动原理图

2.2 差动机构的作用力分析

设定直齿轮 Z_{10} 和 Z_{22} 的分度圆半径为 r_{sg} ，各个差速器中锥齿轮分度圆半径为 r_{bg} ，主输入齿轮 Z_0 分度圆半径为 R_0 ，差动机构中剩余直齿轮齿数相等，其分度圆半径取为 R_{sg} 。若齿轮 Z_0 受到电机传动轮的啮合作用力是 F_q ，则 Z_0 与齿轮 Z_1 、 Z_6 、 Z_{11} 之间有

$$F_{0-1}R_{sg} + F_{0-6}R_{sg} + F_{0-11}R_{sg} = F_qR_0 \quad (4)$$

式中， F_{i-j} 为齿轮 i 沿分度圆切线对齿轮 j 的作用力。

差动系统达到平稳工作状态时，差速器内部的齿轮间作用力大小也保持稳定。此时差速器 I 的状态方程为

$$\begin{cases} F_{1-3}r_{bg} - F_{1-0}R_{sg} = 0 \\ F_{3-1}r_{bg} - F_{3-5}r_{bg} = 0 \\ F_{3-1}r_{bg} - F_{5-3}r_{bg} - F_{3-H1}r_{bg} = 0 \\ F_{5-3}r_{bg} - F_{5-16}R_{sg} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

差速器 I、II 状态方程与式(5)类似，对总差速器 IV 有

$$\begin{cases} F_{18-16}r_{bg} - F_{18-19}r_{bg} = 0 \\ F_{18-16}r_{bg} + F_{18-19}r_{bg} - F_{18-21}r_{bg} = 0 \\ F_{22-10}r_{sg} - F_{22-21}r_{bg} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由式(4)、式(6)以及差速器 I、II、III 的状态方程可得

$$\begin{cases} F_{3-5} = F_{13-15} = F_{8-10} = \frac{F_qR_0}{3r_{bg}} \\ F_{H1-3} = F_{H3-13} = F_{H2-8} = \frac{2F_qR_0}{3r_{bg}} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知输出轴 H_1 、 H_2 、 H_3 的输出转矩为

$$M_{H1} = M_{H2} = M_{H3} = \frac{2F_qR_0}{3} \quad (8)$$

式中， M_{H1} 、 M_{H2} 、 M_{H3} 分别为 H_1 、 H_2 、 H_3 的输出转矩。

由式(3)和式(8)可知无论差速器是否处于工作状态，各输出轴输出的转矩大小恒定，而输出的转速值会根据管道的具体状况而产生相应变化，差速器 I、II、III 以及总差速器 IV 会根据外部反馈产生转动，对机体输出轴进行调速。

3 驱动轮自适应变径机构的分析

由于机器人的各个驱动轮变径机构结构相同且相互独立，因此取单个变径机构进行分析。若机体在管道内部平稳运行，即变径机构受力达到平衡状态，则可对其进行静态分析(不考虑重力作用)。如图4所示，轨迹线 1、2 位于弯管内壁，驱动轮沿轨迹线 1、2 运行时管壁对轮的法向支反力和由摩擦产生的轮缘切向力分别为 F_{EN} 、 F_{CN} 和 $F_{E\tau}$ 、 $F_{C\tau}$ 、 r_w 为驱动轮半径， D 点为滑套受力点， F_{DS} 、 F_{DT} 分别为弹簧和滑竿对该点的作用力。

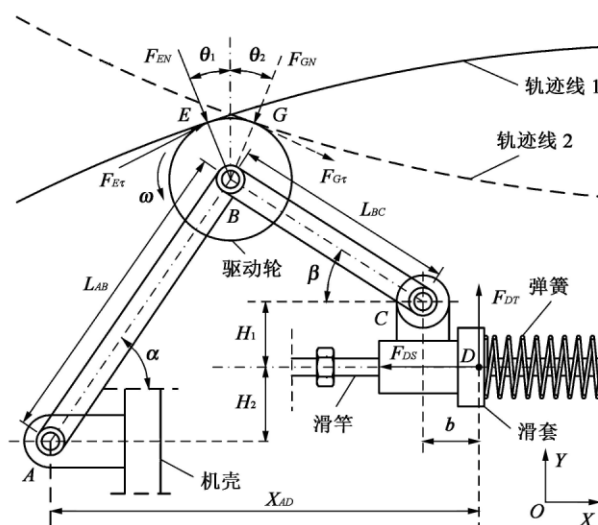


图4 驱动轮变径机构简化图

对驱动轮运行于轨迹线 1 的状态进行分析，根据

$$M_A = M_A(F_{EN}) + M_A(F_{E\tau}) + M_A(F_{DS}) + M_A(F_{DT}) \quad (9)$$

可以得到

$$-F_{ENx}(L_{AB}\sin\alpha + r_w\cos\theta_1) - F_{ENy}(L_{AB}\cos\alpha - r_w\sin\theta_1) - F_{E\tau x}(L_{AB}\sin\alpha + r_w\cos\theta_1) + F_{E\tau y}(L_{AB}\cos\alpha - r_w\sin\theta_1) + F_{DS}H_2 + F_{DT}X_{AD} = 0 \quad (10)$$

$$\text{其中, } \begin{cases} F_{ENx} = F_{EN}\sin\theta_1 \\ F_{ENy} = F_{EN}\cos\theta_1 \\ F_{E\tau x} = F_{E\tau}\cos\theta_1 \\ F_{E\tau y} = F_{E\tau}\sin\theta_1 \end{cases}, \text{ 若 } F_{E\tau} \text{ 满足 } F_{E\tau} \leq F_{EN}K_{\mu 0},$$

则

$$F_{E\tau} = F_{EN}\mu_0 \quad (11)$$

式中, $K_{\mu 0}$ 为管壁附着系数, μ_0 为轮与管壁间的摩擦因数。

由式(10)、式(11)可得

$$F_{EN} = \frac{F_{DS}H_2 + F_{DT}X_{AD}}{L_{AB}\cos(\alpha - \theta_1) + \mu_0 L_{AB}\sin(\alpha - \theta_1) + \mu_0 r_w} \quad (12)$$

对于驱动轮沿轨迹线 2 运动时, 同理可以求得

$$F_{GN} = \frac{F_{DS}H_2 + F_{DT}X_{AD}}{L_{AB}\cos(\alpha + \theta_2) + \mu_0 L_{AB}\sin(\alpha + \theta_2) + \mu_0 r_w} \quad (13)$$

其中,
$$\begin{cases} H_2 = L_{AB}\sin\alpha - L_{BC}\sin\beta - H_1 \\ X_{AD} = L_{AB}\cos\alpha + L_{BC}\cos\beta + b, K, \Delta X, F_0 \text{ 分} \\ F_{DS} = F_0 + K\Delta X \end{cases}$$

别是弹性系数、压缩量及预紧力。

4 机器人弯管内姿态与运动分析

如图 5 所示, 坐标系 $Oxyz$ 的 xy 面位于水平面内, K_1 、 K_2 平行于 z 轴, $\lambda \left(\frac{\pi}{4} \leq \lambda \leq \frac{3\pi}{4} \right)$ 为过 z 轴的弯管径向截面与 x 轴的夹角, P_0 是管内壁上一点, O_{M_i} 是过 P_0 的管道径向截面圆的圆心, 设定 $O_{M_i}P_0$ 与 K_2 夹角为 ψ ($0 \leq \psi < 2\pi$), 则弯管内壁曲面的参数化表示为

$$W_{rear} = \begin{bmatrix} -\frac{L_0}{2} & -\frac{L_0}{2} & -\frac{L_0}{2} \\ y_0 - l_r \cos\varphi & y_0 - l_r \cos\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) & y_0 - l_r \cos\left(\varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \\ z_0 - l_r \sin\varphi & z_0 - l_r \sin\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) & z_0 - l_r \sin\left(\varphi + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (15)$$

轮心 O_4, O_5, O_6 的坐标为

$$W_{front} = \begin{bmatrix} \frac{L_0}{2} & \frac{L_0}{2} & \frac{L_0}{2} \\ y_0 - l_r \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) & y_0 - l_r \cos\left(\varphi + \frac{5\pi}{6}\right) & y_0 + l_r \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \\ z_0 - l_r \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{6}\right) & z_0 - l_r \sin\left(\varphi + \frac{5\pi}{6}\right) & z_0 + l_r \sin\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据式(14)可知各轮与管壁间作用点 P_i ($i = 1 \sim 6$) 的坐标为

$$P_i = \{ (R + 0.5D\sin\varphi_i) \cos\lambda_i, (R + 0.5D\sin\varphi_i) \sin\lambda_i, 0.5D\cos\varphi_i \} \quad (17)$$

作用点 P_i 与其对应的轮心 O_i 之间连线即为轮的半径, 即

$$|\mathbf{r}_{O_i P_i}| = r_0 \quad (18)$$

而作用点 P_i 应在各轮中心 O_i 的轴向切面内, 即

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{O_i P_i} \cdot \mathbf{n}_{r_i} = 0 & i = 1 \ 2 \ 3 \\ \mathbf{r}_{O_i P_i} \cdot \mathbf{n}_{f_i} = 0 & i = 4 \ 5 \ 6 \end{cases} \quad (19)$$

$$\mathbf{r}(\lambda, \psi) = \begin{bmatrix} (R + 0.5D\sin\psi) \cos\lambda \\ (R + 0.5D\sin\psi) \sin\lambda \\ 0.5D\cos\psi \end{bmatrix} \quad (14)$$

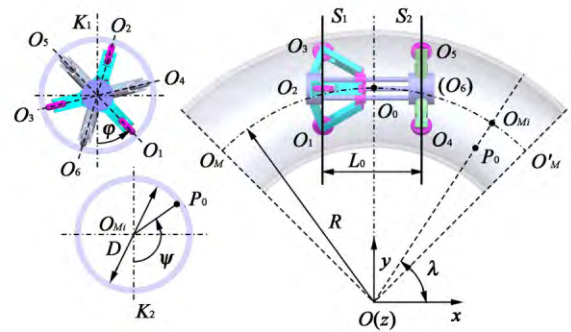


图 5 机体管内运行状态简化图

为便于研究设定机器人各轮大小相等, 其半径均为 r_0 , 且前后轮轮心所在平面满足 $S_1 \parallel S_2 \parallel yoz$; 机体中心 O_0 的坐标为 $(0, y_0, z_0)$, 各轮轮心和其与管壁间作用点分别是 O_i 和 P_i , 其中 $i = 1, 2, 3$ 为驱动轮, $i = 4, 5, 6$ 为辅助支撑轮, 各轮径向伸展量为 l_r , S_1 与 S_2 的垂直距离为 L_0 , 定义 O_0O_1 在 yz 面的投影与 K_1 的夹角为机器人的运动位姿角 φ ($0 \leq \varphi \leq 120$), 此时轮心 O_1, O_2, O_3 的坐标为

其中 \mathbf{n}_{r_i} 和 \mathbf{n}_{f_i} 分别为机器人后侧轮和前侧轮的轴向切面法向量

$$\begin{cases} \mathbf{n}_{r_i} = \left[0, -\sin\left(\varphi + \frac{2\pi i}{3}\right), \cos\left(\varphi + \frac{2\pi i}{3}\right) \right]^T & i = 1 \ 2 \ 3 \\ \mathbf{n}_{f_i} = \left[0, \sin\left(\varphi + \frac{4i+1}{6}\pi\right), -\cos\left(\varphi + \frac{4i+1}{6}\pi\right) \right]^T & i = 4 \ 5 \ 6 \end{cases} \quad (20)$$

机器人各轮运行于弯管管壁, 形成了不同的轨迹, 根据管道的结构特性, 轨迹的几何尺寸即为其

在 xy 平面投影的圆弧参数, 此时各轮沿轨迹运行的速比方程为

$$v_i : v_{i+1} = R_i : R_{i+1} = \sqrt{P_{x_i}^2 + P_{y_i}^2} : \sqrt{P_{x_{i+1}}^2 + P_{y_{i+1}}^2} \quad (21)$$

式中, R_i 是轮 i 运行轨迹投影于 xy 平面的圆弧半径; P_{x_i} 、 P_{y_i} 为管壁上作用点 P_i 沿 x 、 y 方向上的投影。

实际上, 机体在弯管内运行时处于管壁外侧 ($R_i > R$) 的轮, 其运行轨迹圆弧的曲率半径值较大, 与之对应的变径机构也更舒展; 反之处于管壁内侧 ($R_i \leq R$) 的轮, 其运行轨迹圆弧的曲率半径值较小, 与之对应的变径机构就更紧凑, 即 S_1 与 S_2 在弯管内运行时并不平行。为避免求解复杂的非线性方程, 可假定前后轮的轮心均位于过 z 轴的弯管径向截面内, 则可得到各轮运行的速比方程, 对驱动轮 O_1 , O_2 , O_3 , 有

$$v_i : v_{i+1} = R_i : R_{i+1} = \left[R - \left(\frac{D}{2} - r_w \right) \sin \left(\varphi + \frac{2(i-1)}{3} \pi \right) \right] : \left[R - \left(\frac{D}{2} - r_w \right) \sin \left(\varphi + \frac{2i}{3} \pi \right) \right] \quad (22)$$

式中, r_w 为驱动轮半径。

对辅助支撑轮 O_4 , O_5 , O_6 , 有

$$v_i : v_{i+1} = R_i : R_{i+1} = \left[R - \left(\frac{D}{2} - r_f \right) \sin \left(\varphi + \frac{2i-1}{3} \pi \right) \right] : \left[R - \left(\frac{D}{2} - r_f \right) \sin \left(\varphi + \frac{2i+1}{3} \pi \right) \right] \quad (23)$$

式中, r_f 为辅助支撑轮半径。

图6为机体在 $R = 2D = 400$ mm 的弯管内运动时, 各轮轮心理论速度随位姿角变化的特性曲线。

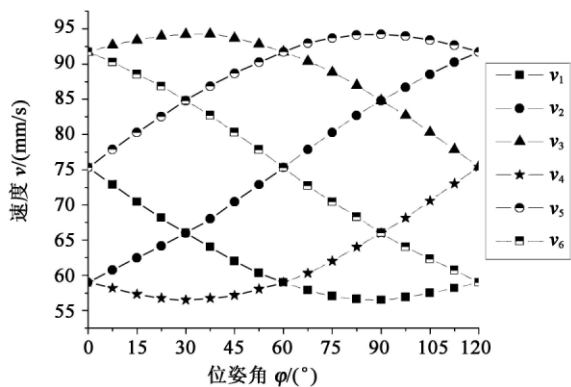


图6 各轮运动特性曲线

5 仿真实验

5.1 差动特性仿真

机体运行于图7所示的组合管内, 管内径 $D = 200$ mm, 机器人的输入转速 $n_e = 80$ r/min, 初始传动比 $i_0 = 1$ 。仿真分析机器人在不同位姿角度下通过管道的运动状况, 得到各驱动轮在不同姿态角下运行的角

速度变化曲线, 由于输出轴通过等传动比齿轮系传递动力至驱动轮, 因此各驱动轮转速分别与对应的差动机构输出轴转速相等。

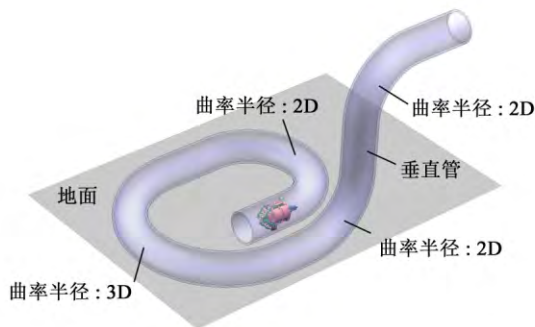
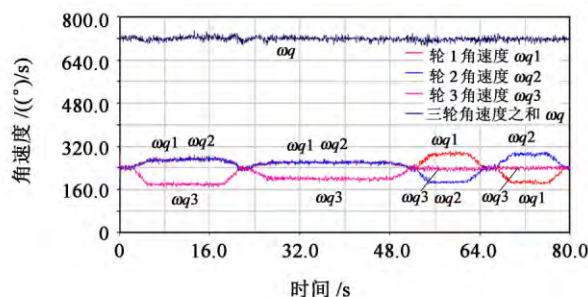
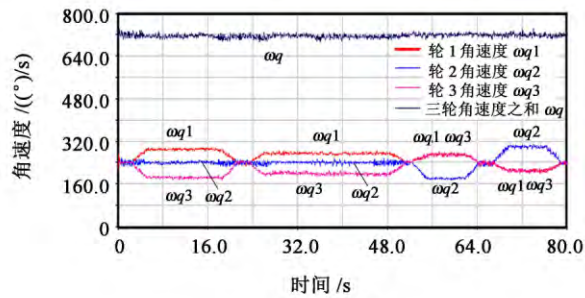


图7 机体在组合管内运动状态图

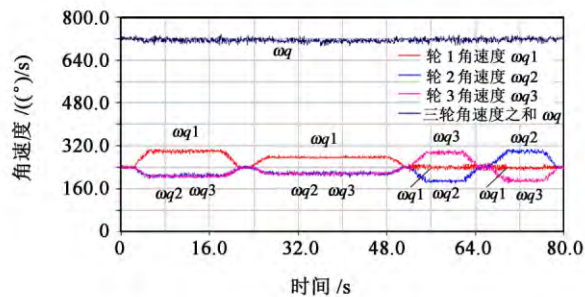
根据机器人的结构特性及其在水平弯管中运行时的位姿, 当 $\varphi = 60^\circ$ 时, 即为机器人正常工作时的运行状态, 而当 $\varphi = 30^\circ$ 和 $\varphi = 90^\circ$ 时, 分别为机器人驱动轮过弯时通过曲率半径极限值的两种状态, 因此取机器人位姿角分别为 30° 、 60° 、 90° 进行组合管通过性分析, 仿真结果如图8所示。



(a) 位姿角 30°



(b) 位姿角 60°



(c) 位姿角 90°

图8 驱动轮角速度变化曲线

即当驱动轮处于直管阶段时各轮角速度变化曲线稳定于相同数值,当驱动轮处于弯管阶段时各轮瞬时角速度根据外部环境产生相应变化并最终趋于稳定,且在不同位姿角、不同曲率弯管中运行时,各轮得到的角速度变化曲线呈现不同形态。但各驱动轮的速比关系满足式(22),角速度之和保持稳定且满足式(3)。由此可知,机器人内部差动机构与外部驱动轮间存在实时的反馈调节,两者相互作用保证了机体通过弯道时各驱动轮转速的合理性。

5.2 自适应性仿真

使机器人运行于如图 9 所示变径管道,管道总长 1 700 mm,外径为 250 mm; $L_1 = L_5 = 250$ mm, L_1, L_5 段的内径 $D_1 = D_5 = 211$ mm; $L_2 = L_3 = L_4 = 400$ mm, L_3 段的内径 $D_3 = 189$ mm, L_2, L_4 段为管径均匀变化的管道,各段相接处平滑过渡。

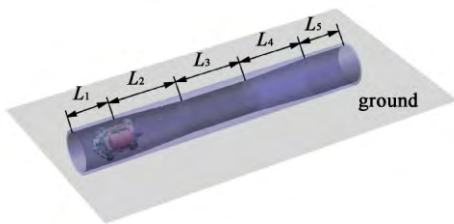


图 9 机器人变径管内运行图

机体在管道内以 $\varphi = 60^\circ$ 的位姿角运行,竖直方向上驱动轮 2 的轮心高度变化情况如图 10 所示。

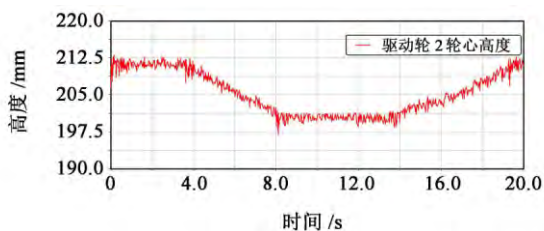


图 10 驱动轮 2 轮心高度变化曲线

根据机器人驱动轮变径机构的整体结构布置,结合图 10 可知机器人通过内径变化管道时,能够根据管径尺寸实现自适应变径。且机器人轮心径向波动幅度较小,说明机体管内运行状态平稳。

6 结论

(1) 设计出了一种采用一个电机驱动的管道机器人,其具有差动特性和自适应变径特性,当机体在管内运行时,差动机构与变径机构相配合,自主调节各轮转速以适应管内环境。

(2) 对机器人驱动轮的自适应变径机构进行了力学分析,得到了变径机构各部件之间的力学关系,进而求得机体平稳运行状态下驱动轮与管壁间的力学关系。

(3) 对机器人管内运动特性进行了理论分析,

研究了各轮管内运行状态,得到了位于不同位姿条件下各轮的速度特性曲线。

(4) 通过仿真实验对机器人运动特性进行了验证,结果表明机体在管中运行时具备良好的差动特性和自适应特性。

参 考 文 献

- [1] 程乾,蒋刚. 电液驱动六足机器人三维空间力学分析[J]. 机械传动, 2015, 39(1): 43-47.
- [2] 周立伟,蔡芸. 仿生四足机器人的仿真研究[J]. 机械传动, 2013, 37(9): 30-33.
- [3] 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.
- [4] LI P, MA S, LI B, et al. Self-rescue mechanism for screw drive in-pipe robots[C]// Proceeding of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. New York: IEEE, c2010: 2843-2849.
- [5] HIROSE S, OHNO H, MITSUI T, et al. Design of in-pipe inspection vehicles for $\varphi 25, \varphi 50, \varphi 150$ pipes [C]// Proceeding of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, c1999: 2309-2314.
- [6] ROH S G, CHOI H R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 1-17.
- [7] ROH S G, KIM D W, LEE J S, et al. In-pipe robot based on selective drive mechanism[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2009, 7(1): 105-112.
- [8] LEE D H, MOON H, CHOI H R. Autonomous navigation of in-pipe working robot in unknown pipeline environment[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, c2011: 1559-1564.
- [9] LI Q, TANG D, DENG Z, et al. Velocity analysis of tri-axial differential pipeline robot when getting across elbow [C]// Proceeding of the 2010 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). New York: IEEE, c2010: 1416-1420.
- [10] 李庆凯,唐德威,姜生元,等. 键合图理论在三轴差动机构效率分析中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(11): 44-48.
- [11] 李庆凯,唐德威,姜生元,等. 三轴差动式管道机器人的驱动特性及仿真研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(6): 753-758.
- [12] 李庆凯,唐德威,姜生元,等. 平行四杆联动式管道机器人弯管过渡阶段的速度控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(2): 483-488.
- [13] 张学文,邓宗全,贾亚洲,等. 三轴差动式管道机器人驱动单元弯管通过性研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(23): 2777-2781.
- [14] 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(1): 22-28.

收稿日期: 2016-05-02 收修改稿日期: 2016-06-27

基金项目: 机器人学国家重点实验室(中国科学院沈阳自动化研究所) 自主研究课题(Y4A120A101) 一种可变形移动机器人机理研究

作者简介: 王辰忠(1988—),男,山东省即墨市人,硕士研究生。
通信作者: 王挺(1978—),男,博士,副研究员。