

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.003

# 差动式自适应管道机器人的设计与运动分析研究\*

王辰忠<sup>1</sup>, 王 挺<sup>1,2\*</sup>, 刘 君<sup>3</sup>, 张朝龙<sup>3</sup>, 胡绍刚<sup>3</sup>

(1. 沈阳理工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2. 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;

3. 辽宁省电力有限公司 鞍山供电公司, 辽宁 鞍山 114001)

**摘要:**针对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。分析了机体差动机构的传动特性,从理论上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。构建了机器人在管内的运动位姿模型,并研究了机器人在不同位姿条件下的模型中各个变量之间的对应关系。分别建立了管道机器人在弯管和变径管中运行的虚拟样机模型,最后通过仿真实验对管道机器人的自主差动特性和自适应变径特性进行了验证。研究结果表明,管道机器人可以无干涉地通过弯管,在变径管中运行时也能有效地实现自主变径,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;仿真分析

中图分类号:TP242.3; TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)04-0395-06

## Design and motion analysis of differential-drive adaptive in-pipe robot

WANG Chen-zhong<sup>1</sup>, WANG Ting<sup>1,2</sup>, LIU Jun<sup>3</sup>, ZHANG Zhao-long<sup>3</sup>, HU Shao-gang<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Anshan Power Supply Company, Liaoning

Electric Power Corporation, Anshan 114000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of relative sliding between the robot's driving wheel and the tube wall and the adaptation of the robot's body to the pipe diameter, the pipe robot with the characters of autonomous differential motion and adaptive variable diameter was designed by adopting the single motor to drive. The transmission characteristics of the differential mechanism were analyzed, the force equation of working state for the variable diameter mechanism of pipe robot was theoretically deduced, and the mechanical relation between the driving wheels and pipe wall in robot's operation was obtained. The movement pose model of robot in pipe was built, and the relationship between each variable in the model under the condition of different pose was studied. The virtual sample models of robot operating in the bend pipe and variable diameter pipe were built respectively. Through the simulation analysis, robot's characters of autonomous differential motion and adaptive variable diameter were validated. The results indicate that the pipeline robot can pass through bends without interference, in reducing tube can also effectively realize the independent variable diameter, and show a good driving characteristics.

**Key words:** differential mechanism; pipe robot; variable diameter mechanism; simulation analysis

收稿日期:2015-11-13

基金项目:机器人学国家重点实验室自主研究课题(Y4A120A101)

作者简介:王辰忠(1988-),男,山东即墨人,主要从事特种机器人技术方面的研究. E-mail: wangcz1106@163.com

通信联系人:王挺,男,博士,副研究员. E-mail: wangting@sia.cn

## 0 引 言

圆柱形管道在管道运输中应用最为普遍,适应圆柱形管道的机器人运动方式多以轮式、履带式 and 旋转驱动式这 3 种类型为主,其中又以轮式最为常见。近年来,国内外专家学者先后研制出各种类型针对圆柱形管道的机器人,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,此类机器人驱动轮采用螺旋运行方式驱动机体在管道中行进<sup>[1-4]</sup>。韩国成均馆大学设计了 MRINSPECT 型轮式管道机器人<sup>[5-7]</sup>,其利用电机与驱动轮对应提供动力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,且当机器人通过弯管时必须借助 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式管道机器人,两者均采用轴向外延式变径,这样不利于限制机器人结构长度,使其得以适应较大曲率弯管。其中哈尔滨工业大学设计的管道机器人 3 个驱动轮经由变径杆连接于同一预紧变径机构,采用三驱动轮同步变径的结构设计,由于机器人在弯管运行过程中三驱动轮所需的变径量大小并不完全相同,机器人通过弯管时驱动轮与管壁间的局部干涉问题并未完全消除<sup>[8-10]</sup>;吉林大学研制的管道机器人采用六轮同步变径、前、后轮联动(前、后轮的转速同步)设计,由于机器人进入弯管的初始阶段前、后轮转速并不同步,且机器人运动过程中 6 个轮子所需的变径量也不总是相同,也没有完全消除机器人在弯管运行中存在的干涉<sup>[11-12]</sup>。其他科研机构也对三轴差动机器人的部分特性进行了研究<sup>[13]</sup>。

本研究设计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分析,推导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,最终通过仿真分析对设计进行验证。

## 1 机器人的结构与机构原理

### 1.1 机器人的结构

差动式自适应管道机器人的机体由驱动电机、差速运动机构、驱动轮变径机构、辅助支撑轮变径机构和机身 5 个部分组成。其中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传输到驱动轮变

径机构,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有较小的轴向长度。差速运动机构所分配的动力通过驱动轮变径机构的齿轮系统传递到各驱动轮,机器人将驱动轮作为后轮为其在管道内部运行提供推动力;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而不互相影响。外部管道、变径系统和差动机构三者之间相互作用,让机器人能根据不同的管道环境对各轮进行自主调控,最终无干涉地在管内运行。

差动式自适应管道机器人如图 1 所示。

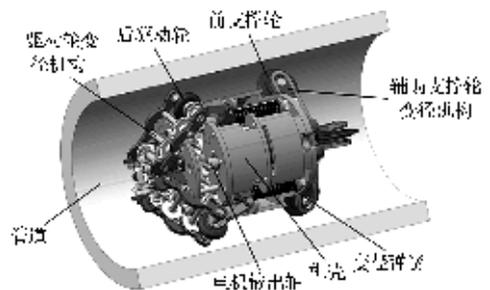


图 1 差动式自适应管道机器人

### 1.2 差动机构的传动原理

差动机构由 4 个差速器和多个直齿轮按照一定关系组合而成。电机提供的动力经由主输入齿轮  $Z_0$  同步传递给差速器 I、II、III 的右侧输入齿轮  $Z_1$ 、 $Z_6$ 、 $Z_{11}$ ; 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  $\omega_0$ , 经差动机构对动力重新分配后,由 3 路输出轴  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$  输出。

则差速器 I、II、III 各自内部存在传动关系:

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

式中: $\omega_{H1}, \omega_{H2}, \omega_{H3}$ —输出轴  $H_1, H_2, H_3$  对应的角速度。

总差速器 IV 内部传动方程:

$$\frac{\omega_4 Z_5}{Z_{16}} + \frac{\omega_{14} Z_{15}}{Z_{20}} = -2 \frac{\omega_9 Z_{10}}{Z_{21}} \quad (2)$$

轮系中的传动比为:

$$\begin{cases} i_{5-16} = i_{15-20} = 1 \\ i_{10-21} = \frac{1}{2} \\ i_{0-1} = i_{0-6} = i_{0-11} = i_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i_0$ —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 ~ 3)可知机器人在管内正常行进时,其主输入齿轮角速度与三输出轴的角速度总是满足关系式:

$$\omega_{H1} + \omega_{H2} + \omega_{H3} = -\frac{3}{2i_0}\omega_0 \quad (4)$$

差动机构传动原理如图2所示。

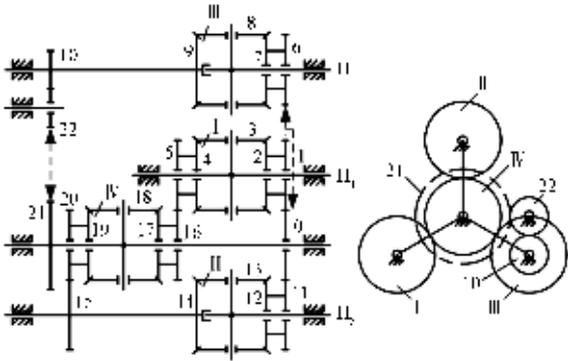


图2 差动机构传动原理图

## 2 机器人弯管内姿态与运动分析

机器人在管道中运行时由于管内环境的复杂性及机体运转时的衍生扭矩作用,有时不可避免地会发生轻微的轴向转动,这时各个驱动轮的速比关系也将发生相应变化。轮1、2、3为机器人的3个驱动轮,轮1'、2'、3'为机器人的3个辅助支撑轮,每一侧的3个轮子均呈径向放射状配置,其间隔角为 $120^\circ$ ,且两侧轮子交错分布于管壁,其前、后侧相邻轮子间的交叉间隔角度为 $60^\circ$ 。由于前侧辅助支撑轮和后侧驱动轮配置状况类似,笔者以后侧驱动轮为研究对象进行分析,定义驱动轮1的支撑杆中线与过管心的竖线  $K-K$  之间的夹角  $\Psi (0^\circ \leq \Psi \leq 120^\circ)$  为机器人的运动位姿角。机器人管内运动位姿简化图如图3所示。

机器人在弯管中运行时,其各驱动轮在通过弯道时所经过的轨迹长度有所不同。由于机体通过弯管

时,处于管外侧的驱动轮其所通过的圆弧轨迹的半径值较大,与之对应的变径机构更舒展;反之处于管内侧的驱动轮其通过的圆弧轨迹的半径值较小,与之对应的变径机构更紧凑;即可假定3个驱动轮轮心所构成的平面在运动过程中与  $M-M'$  垂直相交。

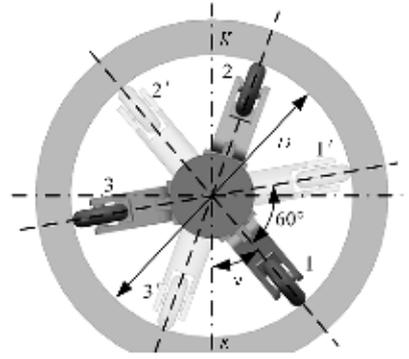


图3 机器人管内运动位姿简化图

机器人过弯时的运动状态简化图如图4所示。

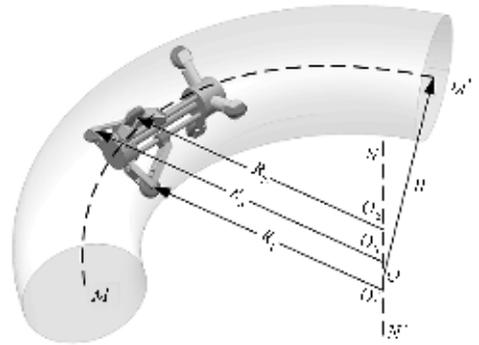


图4 机器人弯管内运行状态简化图

$R$ —管道自身弯曲的曲率半径; $R_1, R_2, R_3$ —各驱动轮轮心与  $N-N'$  的垂直距离; $D$ —管道内径

各驱动轮轮心与  $N-N'$  的垂直距离为:

$$\begin{cases} R_1 = R - (D/2 - r_w) \sin \Psi \\ R_2 = R - (D/2 - r_w) \sin \left( \Psi + \frac{2\pi}{3} \right) \\ R_3 = R - (D/2 - r_w) \sin \left( \Psi + \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $r_w$ —驱动轮动力半径。

由驱动轮相对于管道内壁作纯滚动,即:

$$k\omega_{H1} = \omega_{q1} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

式中: $\omega_{q1}$ —驱动轮角速度; $k$ —驱动轮与输出轴之间的齿轮传动比。

在运动过程中存在如下关系:

$$\omega_{q1} : \omega_{q2} : \omega_{q3} = \omega_{H1} : \omega_{H2} : \omega_{H3} = R_1 : R_2 : R_3 \quad (7)$$

联立式(4 ~ 7)可得,驱动轮与主输入齿轮间的速比方程为:

$$\begin{Bmatrix} \omega_{q1} \\ \omega_{q2} \\ \omega_{q3} \end{Bmatrix} = -\frac{k}{2i_0} \begin{Bmatrix} \frac{R_1}{R} \\ \frac{R_2}{R} \\ \frac{R_3}{R} \end{Bmatrix} \omega_0 \quad (8)$$

### 3 机器人驱动轮自适应变径机构的分析

#### 3.1 单个变径机构的力学研究

弹簧提供的弹力经由滑套和支撑杆 BC 传递到驱动轮处,在支撑杆 AB、BC 的共同作用下,使驱动轮和管壁之间有足够的作用力,由于弹簧被施加了一定大小的预紧力,滑竿上装配有阻挡螺母,用以限制滑套在滑竿上的活动范围。由于机器人的各驱动轮变径机构结构相同且相互独立,笔者取单个变径机构进行分析。若机体在管道内部平稳运行,即此时变径机构受力达到平衡状态,可对其进行静态分析。

不考虑重力作用,驱动轮变径机构简化图如图 5 所示。

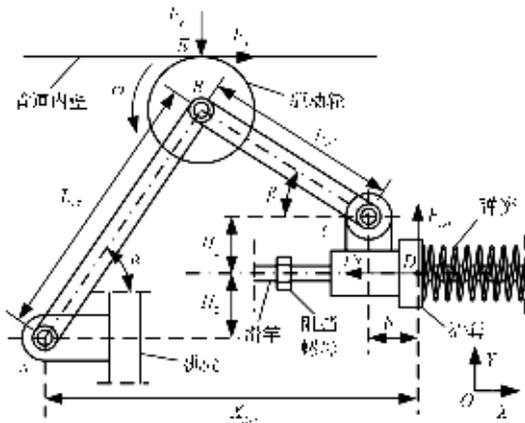


图 5 驱动轮变径机构简化图

$F_N$ —管壁对驱动轮的支反力; $F_S$ —弹簧作用在滑套的力; $F_T$ —由摩擦产生的推动力

滑套在滑竿上可前后滑动,为便于分析,取 D 点为滑套受力点,则变径机构存在力学关系:

$$-F_N L_{AB} \cos\alpha - F_T L_{AB} \sin\alpha + F_S H_2 + F_{DY} X_{AD} = 0 \quad (9)$$

对于滑套有:

$$F_{DY} = \frac{F_S H_1}{b} \quad (10)$$

若轴向推力  $F_T$  满足

$$F_T \leq F_N \varphi \quad (11)$$

则:

$$F_T = F_N \mu \quad (12)$$

由式(9 ~ 12) 可得管壁法向支反力为:

$$F_N = \frac{bH_2 + H_1 X_{AD}}{bL_{AB}(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)} F_S \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} H_2 = L_{AB} \sin\alpha - L_{BC} \sin\beta - H_1 \\ X_{AD} = L_{AB} \cos\alpha + L_{BC} \cos\beta + b \\ F_S = F_0 + K\Delta X \end{cases} \quad (14)$$

式中: $\varphi$ —管壁附着系数; $\mu$ —轮与管壁间的摩擦因数; $K, \Delta X, F_0$ —刚度系数、压缩量及预紧力。

#### 3.2 变径机构产生的推动力分析

机器人正常工作状态即为位姿角  $\Psi = 60^\circ$  时,为保证机器人在管道内部平稳运行,管道需平衡由机器人变径弹簧作用而对管道内壁产生的压力,以及机器人所受的重力作用。对于机器人的各驱动轮,驱动轮 2 对管道内壁正压力方向与重力方向相反,对其进行分析时只考虑变径机构对管壁的正压力即可;驱动轮 1、3 除受到由变径弹簧作用而产生的力外,还需平衡机器人自身重力。

若机器人自重为  $G$ ,驱动轮和辅助支撑轮轮心之间的垂直距离为  $L$ ,机器人重心位置与驱动轮轮心垂直距离为  $X_M$ ,则作用在三驱动轮所在平面的重力分量为  $G X_M / L$ 。

机器人在位姿角  $\Psi = 60^\circ$  运行状态下三驱动轮产生的推动力为:

$$F_Z = \left( 3 \frac{bH_2 + H_1 X_{AD}}{bL_{AB}(\cos\alpha + \mu\sin\alpha)} F_S + \frac{G X_M}{L} \right) \mu \quad (15)$$

### 4 管道机器人仿真实验

#### 4.1 自适应性仿真

本研究将机器人置于组合管中进行仿真分析,该管由 3 段组成,长度比例为 1: 1: 1,管长为 1 500 mm,左、右两侧为两段内径大小不同的直管,中间作为过渡段为内径均匀变化的变径管。为减轻机器人轮子在通过两段管径接合面处由于管径突变对仿真结果产生的影响,中间段变径管与两侧直管相接处采用曲面平滑过渡。机器人在变径管内运动模型如图 6 所示。

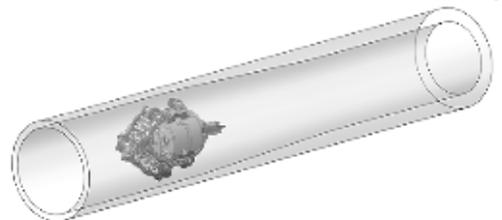


图 6 机器人在变径管内运动模型图

机器人轴向长度为 241.5 mm,驱动轮变径机构径向尺寸变化范围为 181.5 mm ~ 217.3 mm,辅助支撑轮变径机构径向尺寸变化范围为 186.5 mm ~ 213.4 mm,即结构上机器人变径的径向尺寸应在 186.5 mm ~ 213.4 mm 区间内。

笔者根据机器人的结构尺寸对仿真环境进行设置,取  $D_{MAX} = 214$  mm,  $D_{MIN} = 186$  mm,  $\Delta d = 1$  mm ( $D_{MAX}$ —左侧管初始内径尺寸;  $D_{MIN}$ —右侧管初始内径尺寸;  $\Delta d$ —管径变化量),有:

$$\begin{cases} D_Z = D_{MAX} - N_Z \Delta d \\ D_Y = D_{MIN} + N_Y \Delta d \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $D_Z, D_Y$ —左、右两侧管内径大小;  $N_Z, N_Y$ —左、右两侧管径变化次数。

本研究通过调节左、右两侧直管的内径大小进行多组仿真,使机器人能分别以组合管的左右侧为起始位置,平稳运行到达管的另一侧;最终确定机器人在管内能够实现有效运行的径向变径范围为 189 mm ~ 211 mm,此时单个驱动轮轮心径向变化情况如图 7 所示。

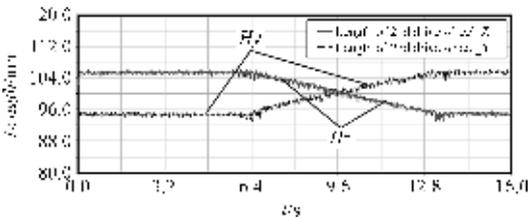


图7 驱动轮2的轮心高度变化曲线

$HZ, HY$ —当  $\Psi = 60^\circ$  时,机器人分别以变径管左侧和右侧为起点运行至另一侧时驱动轮2的轮心高度变化曲线

由于各变径机构结构上对称,由图7可以推知其他驱动轮轮心的径向变化情况。

### 4.2 弯管通过性仿真

管道内径  $D = 200$  mm,两段弯管曲率半径分别为  $R = 2D$  和  $R = 3D$ ,直管长度  $L = 400$  mm。机器人驱动电机转速  $n_e = 80$  r/min,初始传动比  $i_0 = 1$ ,驱动轮与输出轴间齿轮传动比  $k = 1$ 。本研究通过仿真分析机器人在不同位姿角度下通过弯管的运动状况,得到各驱动轮在不同位姿角度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,各驱动轮转速分别与对应的机器人差动机构输出轴转速相等,机器人在管内运动模型图如图8所示。

根据机器人的结构特性及其在管道中运行时的位姿,当  $\Psi = 60^\circ$  时,即为机器人正常工作时的运行状态,而当  $\Psi = 30^\circ$  时,为机器人驱动轮3通过弯管内壁最小

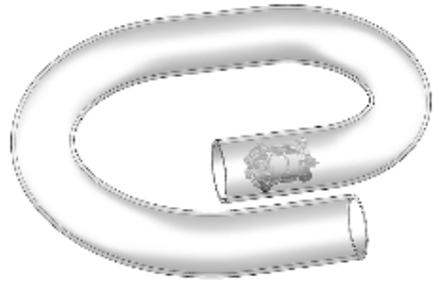


图8 机器人在管内运动模型图

曲率半径时的运动状态,此时轮3运行距离最短;  $\Psi = 90^\circ$  时,为机器人驱动轮1通过弯管内壁最大曲率半径时的运动状态,轮1在整个过程中运行距离最长。本研究取机器人位姿角分别为  $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  的情况进行弯管通过性分析,仿真结果如图9所示。

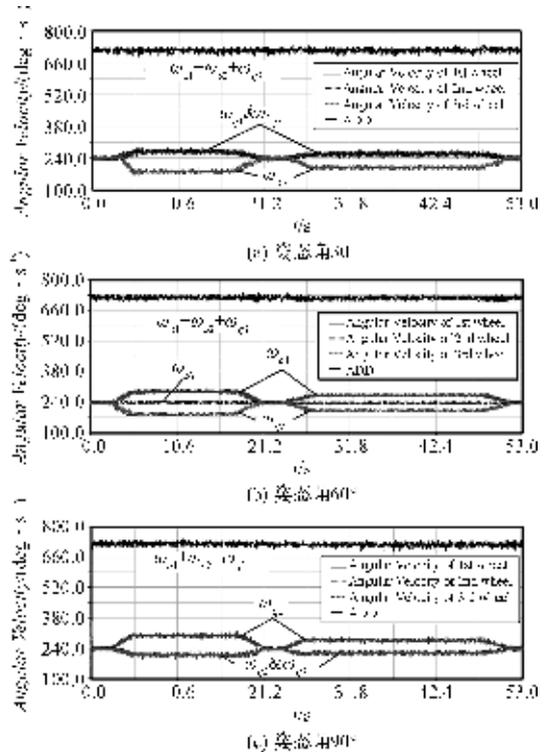


图9 3种位姿角下各驱动轮转动角速度变化曲线

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、不同管道环境中运行时,各轮得到的角速度变化曲线呈现不同形态。各驱动轮的角速度之和保持稳定。

## 5 结束语

(1) 本研究设计出一种采用单个电机驱动的管道机器人,其具有差动特性和自适应特性,当机器人在弯管中行进,可以经由差动机构自主调节各轮转速实现

无滑动过弯;当机器人在内径有变化或管道内表面凹凸不平的管道中运行时,机器人可利用各轮相互独立的变径机构,自适应管道内部环境的改变,而不互相影响。

(2)本研究通过对机器人的弯管通过性进行理论分析,得出了各轮各驱动轮转速与主输入齿轮转速的速比关系

(3)本研究对机器人驱动轮的自适应变径机构进行力学分析,得到变径机构各部件之间的力学关系,进而求得机器人正常工作时驱动轮对管道内壁之间的正压力表达式,以及机器人 3 个驱动轮工作时对机器人产生的推力。

(4)本研究通过仿真实验对机器人的差动特性和管径自适应特性进行了验证,仿真结果表明机器人可以经由其变径机构自适应并通过管径具有一定尺寸变化的管道;且其在弯管中运行时展现了良好的差动特性。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 李 鹏,马书根,李 斌,等. 具有自适应能力管道机器人的设计与运动分析[J]. 机械工程学报,2009,45(1):154-161.
- [3] 唐东林,任 杰,赵 江,等. 管道缺陷超声波内检测机器人运动特性研究[J]. 机械,2015,42(1):58-61.

- [4] HIROSE S, OHNO H, MITSUI T, et al. Design of in-pipe inspection vehicles for  $\varphi 25$ ,  $\varphi 50$ ,  $\varphi 150$  pipes[J]. IEEE, 1999(3):2309-2314.
- [5] ROH S G, CHOI H R. Differential-drive in-pipe robot for moving inside urban gas pipelines [J]. **Robotics IEEE Transactions on**,2005,21(1):1-17.
- [6] 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.
- [7] LEE D H, MOON H, CHOI H R. Autonomous Navigation of In-pipe Working Robot in Unknown Pipeline Environment [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation 2011. New York: IEEE,2011:1559-1564.
- [8] 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,2011,4(13):1-8.
- [9] 唐德威,李庆凯,姜生元,等. 基于键合图理论的三轴差速机构的差动特性[J]. 机械工程学报,2011,4(23):14-19.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

[编辑:李 辉]

#### 本文引用格式:

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 Chen-zhong, 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.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>