

DOI: 10.3901/JME.2008.09.128

三轴差动式管道机器人机械自适应驱动技术*

唐德威¹ 李庆凯¹ 梁涛¹ 姜生元² 邓宗全¹

(1. 哈尔滨工业大学机电工程学院 哈尔滨 150001;
2. 北华大学机械工程学院 吉林 132021)

摘要: 为解决管道内轮式移动机器人通过弯管时的运动干涉问题,减小因滑动摩擦而引起的磨损,提高该类机器人的使用寿命,提出一种具有管道自适应能力的轮式管道机器人驱动技术——三轴差动驱动技术。通过对三轴差动式管道机器人过弯管时内部传动系统的运动关系和力矩传递关系的理论分析及内部功率流向的深入研究,建立三轴差速轮系的力矩传递关系的数学模型,推导传递效率的理论计算公式,并证明该驱动技术驱动效率高,功率体积比大。

关键词: 管道机器人 三轴差动技术 力矩传递方程 功率流 传递效率

中图分类号: TH132.4

Mechanical Self-adaptive Drive Technology of Triaxial Differential Pipe-robot

TANG Dewei¹ LI Qingkai¹ LIANG Tao¹ JIANG Shengyuan² DENG Zongquan¹

(1. School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001;
2. Mechanical Engineering College, Beihua University, Jilin 132021)

Abstract: In order to solve the problem of locomotion interference for the roller pipe-robot when getting across a bend pipe, reduce the abrasion because of sliding friction and improve the service life of this kind of robots, a drive technology of roller pipe-robot with self-adaptive ability which is named triaxial differential drive technology is presented. After theoretical analysis on motion relation and torque transmission relation between parts of pipe-robot's internal transmission system and in-depth research on internal power flow direction, mathematical models of torque transmission relation are established, the theoretical formula of transmission efficiency is deduced, and the high drive efficiency and big power to volume ratio of this drive technology are proved.

Key words: Pipe-robot Triaxial differential technology Equations of torque transmission Power flow Transmission efficiency

0 前言

管内机器人是特种机器人的重要分支之一,它是在现代石化、城市建设等管道施工技术的推动下产生的^[1]。从管道机器人出现至今,研究人员对高效驱动单元的研究就一直没有间断过,陆续研制出了轮式、履带式、仿生蠕动式以及惯性冲击式等驱

动方式。由于履带式管道机器人的结构尺寸大、占用空间大,且在管道中行走时容易出现侧倾等问题^[2-3],因而这种驱动方式不太适合于在中小型管道中工作。而对于具有仿生蠕动式^[4]、惯性冲击式等驱动方式的管道机器人来说,因存在行进速度慢,且不易于进行位置精确控制等问题,在实际管道工程中也很难进行真正应用。而轮式驱动的管道机器人具有结构紧凑、体积小、重量轻、工作过程中行进速度快、驱动效率高及在管道行进过程中可实现自定心等突出优点^[5-8],在工程中这种驱动方式被广泛应用,尤其是对于大中型油气输送管线作业机器人来说,为了提高管道机器人的驱动效率及工作中

* 国家高技术研究发展计划(863计划, 2006AA04Z236)、高等学校学科创新引智计划(B07018)、教育部科学技术研究重点课题(204040)和吉林省杰出青年科学研究基金(20040107)资助项目。20070803收到初稿, 20080331收到修改稿

机器人本体的运动灵活性，多数驱动单元是采用轮式驱动方式。在以往的管道机器人轮式驱动方式中，主要有两种运动输入与输出形式，一种是单电动机输入运动，通过减速装置直接带动驱动轮输出运动^[5-6]，这种驱动形式在直管中的使用效果很好，但当管道机器人通过弯管时，由于各轮走过的实际弧长不同，使得某些驱动轮成为事实上的制动轮而产生滑动摩擦，这样不但降低了有效拖动力，而且由于驱动轮间产生的寄生功率循环，加剧了载体内部的功率消耗和驱动部件的快速磨损。为解决这一问题，人们又提出采用多个电动机进行运动输入，分别驱动不同的驱动轮进行运动输出方式^[7-10]，这种方式优点是结构简单、设计方便，缺点是实时性和柔顺性还不够理想，并且由于多个电动机占据了大部分管内的有限空间，使其仅适用于大型管道。实际上，解决这一问题最简便的办法就是驱动单元中采用单电动机进行运动输入，通过具有多轴协调差速功能的装置进行多运动输出，哈尔滨工业大学于2001年提出了管道机器人的驱动方案^[11-12]——三轴差动驱动。这种驱动方式与以往的驱动方式相比，虽然结构相对复杂，但可有效利用管道内有限的空间，且可实现各输出轴运动随管道形状变化的自适应特性。三轴差动驱动理论的研究还处于初级阶段，很多关键问题有待解决，如力矩传递关系、功率流向和传递效率等，所以，本文在已有的基础上对三轴差动驱动理论进行了进一步的探讨和研究。

1 三轴差动的基本原理

1.1 三轴差速轮系结构及工作原理

三轴差速轮系是一个3自由度机构，由空间分布的4个圆锥齿轮差速器按一定关系组成，其结构原理简图^[11]如图1所示。左侧3个称为主差速器，右侧1个称为分动器；齿轮A₀、A₁、A₂、A₃之间的传动称为初级传动。整个轮系由主输入轴输入主运动n₀，经过所有直齿轮和锥齿轮的运动传递，由轴1、轴2和轴3输出运动n₁₁、n₂₂、n₃₃。该机构具有由1个输入运动获得3路差速输出运动的功能，输入输出的运动关系满足式(1)，且当输入转速一定时，3个输出轴的转速比决定于外部环境的几何约束关系

$$n_{11} + n_{22} + n_{33} = -\frac{3}{2i_0} n_0 \quad (1)$$

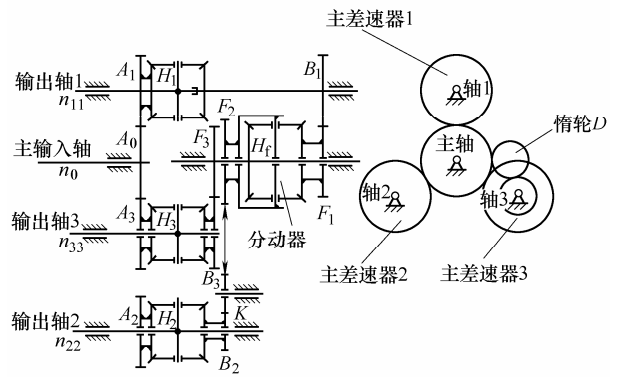


图1 三轴差速机构原理简图

式中，i₀为初级传动比，由初级传动单元结构尺寸决定。

式(1)表示了1个总输入和3路差速输出运动间的数值关系，从形式上看，各输出轴的输出转速n₁₁、n₂₂、n₃₃和总输入转速n₀的相对关系是平等的，也就是说差速器的速度反馈权值(比例因子)等同。在运动关系方程中，各转动速度的相互关系只与初级传动比i₀有关，同时说明只要差速器在结构上满足对称性要求，则差速器的总输入与各分输出间的数值关系便由初级传动比决定。

1.2 机器人通过弯管时三轴差速轮系输入输出轴间的速比关系

机器人在管内作业过程中，经常会遇见弯管或不规则管等情况，3个驱动轮在相同时间内所走过的实际距离将不再时时相等。另外，即使是在直管中作业，如果驱动轮的当量驱动半径存在较大误差，3个驱动轮的转动角速度也不应该相等。管道机器人过弯管时的状态^[12]如图2所示。三轴差动驱动系统中的三轴差速器在遇到这些情况时，将根据管道几何约束条件，自动、实时地起到分配驱动速度的作用。

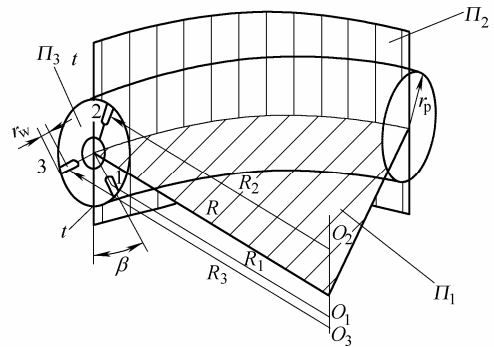


图2 机器人过弯管时的状态

机器人过弯管时各驱动轮速比关系还与管道机器人在管道中姿态有关，由于一般该类机器人在

结构上是完全对称的, 3 个驱动轮沿圆周方向是均匀分布的, 所以可以定义在管道下半部分最靠近竖直线 $t-t$ 的驱动轮伸展臂方向与竖直线 $t-t$ 之间的夹角为机器人作业姿态角, 用 β 表示, 竖直线 $t-t$ 为机器人作业姿态角的一条参考起始标线, 该标线的具体位置及作业姿态角如图 3 所示。

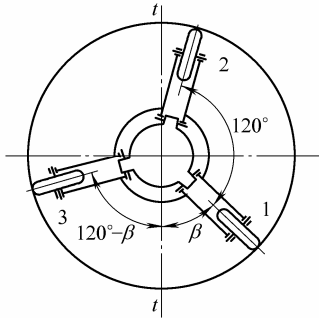


图 3 管道机器人作业姿态图示

三轴差速轮系是一个 3 自由度机构, 在空间运动时, 三输出轴输出运动不确定, 但当应用于管道机器人中时, 各输出轴的运动受到管道环境的限制, 会产生一定的速比关系, 速比关系式如下

$$\begin{pmatrix} n_{11} \\ n_{22} \\ n_{33} \end{pmatrix} = -\frac{1}{2i_0} \begin{pmatrix} R_1/R \\ R_2/R \\ R_3/R \end{pmatrix} n_0 \quad (2)$$

式中 R ——弯管的弯曲曲率半径

R_i ——驱动轮运动的当量半径, $i=1, 2, 3$

$$R_1 = R - r_{pw} \sin \beta$$

$$R_2 = R - r_{pw} \sin(\beta + 120^\circ)$$

$$R_3 = R - r_{pw} \sin(\beta + 240^\circ)$$

$$r_{pw} = r_p - r_w$$

r_p ——标准弯管内径

r_w ——驱动轮的动力半径

式(2)表示了管道机器人在通过弯管时三轴差速轮系输入轴与输出轴之间的速度关系。

2 力矩传递方程的研究

三轴差速轮系的力矩传递方程表征了该机构输入输出力矩及内部相关参数的基本关系, 是三轴差动理论研究的基础。它的研究对三轴差速轮系的应用和推广有着深远的意义。

当三轴差动式管道机器人行走在弯管中时, 内部三轴差动系统工作在差动状态; 在整个系统运动平衡时, 初级传动中根据功率平衡条件和力偶矩平衡条件有

$$M_{A0}i_0\eta_0 + M'_{A1} + M'_{A2} + M'_{A3} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} M'_{A1} = -M_{A1} \\ M'_{A2} = -M_{A2} \\ M'_{A3} = -M_{A3} \end{cases} \quad (4)$$

式中 M_{A0} ——主驱动轴输入转矩

M'_{Ai} ——3 个主差速器对主驱动轴的阻力转矩, $i=1, 2, 3$

M_{Ai} ——3 个主差速器主输入轴上的内力偶矩, $i=1, 2, 3$

η_0 ——初级传递效率

当系统匀速运行时, 根据力偶系平衡条件^[6], 对四个圆锥齿轮差速器有式(5)成立

$$\begin{cases} M_{A1} + M_{B1} + M_{H1} = 0 \\ M_{A2} + M_{B2} + M_{H2} = 0 \\ M_{A3} + M_{B3} + M_{H3} = 0 \\ M_{B1} - 2M_{B2} + M_{B3} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中 M_{Bi} ——3 个主差速器中输出轴上的内力偶矩, $i=1, 2, 3$

M_{Hi} ——3 个主差速器中行星架上的内力偶矩, $i=1, 2, 3$

M_{Bi} 为分动器的外力偶矩, 需要注意的是 2 号主差速器与分动器之间的传动比为 2, 而且在这里有一个惰轮起换向作用。

在 4 个圆锥齿轮差速器的转化机构中, 根据啮合效率平衡条件^[13]有

$$\begin{cases} M_{A1}i_{A1B}^{H1}\eta_{H1} + M_{B1} = 0 \\ M_{A2}i_{A2B}^{H2}\eta_{H2} + M_{B2} = 0 \\ M_{A3}i_{A3B}^{H3}\eta_{H3} + M_{B3} = 0 \\ M_{B1}i_{FF}^{F2}\eta_{F2} + M_{B3} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 i_{A1B}^{Hj} ——3 个主差速器转化机构的传动比,

$j=1, 2, 3$

i_{FF}^{F2} ——分动器转化机构的传动比

η_{Hi} ——3 个主差速器转化机构的效率, $i=1, 2, 3$

η_{F2} ——分动器转化机构的效率

联立式(5)、(6)并化简有

$$\begin{cases} \frac{M_{A1}}{-1} = \frac{M_{B1}}{i_{A1B}^{H1}\eta_{H1}} = \frac{M_{H1}}{1 - i_{A1B}^{H1}\eta_{H1}} \\ \frac{M_{A2}}{-1} = \frac{M_{B2}}{i_{A2B}^{H2}\eta_{H2}} = \frac{M_{H2}}{1 - i_{A2B}^{H2}\eta_{H2}} \\ \frac{M_{A3}}{-1} = \frac{M_{B3}}{i_{A3B}^{H3}\eta_{H3}} = \frac{M_{H3}}{1 - i_{A3B}^{H3}\eta_{H3}} \\ \frac{M_{B1}}{-1} = \frac{M_{B3}}{i_{FF}^{F2}\eta_{F2}} = -\frac{2M_{B2}}{1 - i_{FF}^{F2}\eta_{F2}} \end{cases} \quad (7)$$

由于这4个差速器是圆锥齿轮差速器，所以有 $i_{A1B}^{H1} = i_{A2B}^{H2} = i_{A3B}^{H3} = i_{FF}^{F2} = -1$ 。根据设计要求，可以认为这4个差速器的机构尺寸和装配精度是相同的，所以取 $\eta_{H1} = \eta_{H2} = \eta_{H3} = \eta_{F2} = \eta_H$ 。将其代入式(7)有

$$\begin{cases} \frac{M_{A1}}{-1} = \frac{M_{B1}}{-\eta_H} = \frac{M_{H1}}{1+\eta_H} \\ \frac{M_{A2}}{-1} = \frac{M_{B2}}{-\eta_H} = \frac{M_{H2}}{1+\eta_H} \\ \frac{M_{A3}}{-1} = \frac{M_{B3}}{-\eta_H} = \frac{M_{H3}}{1+\eta_H} \\ \frac{M_{B1}}{-1} = \frac{M_{B3}}{-\eta_H} = \frac{-2M_{B2}}{1+\eta_H} \end{cases} \quad (8)$$

联立式(3)、(4)、(8)有

$$\begin{cases} M_{H1} = -\frac{2}{3}i_0\eta_0M_{A0} \\ M_{H2} = -\frac{\eta_0}{3}i_0(1+\eta_H)M_{A0} \\ M_{H3} = -\frac{2}{3}i_0\eta_0\eta_HM_{A0} \end{cases} \quad (9)$$

整理得力矩传递方程

$$\begin{pmatrix} M_{H1} \\ M_{H2} \\ M_{H3} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{2}{3}i_0\eta_0 \\ \frac{1}{3}i_0\eta_0(1+\eta_H) \\ \frac{2}{3}i_0\eta_0\eta_H \end{pmatrix} M_{A0} \quad (10)$$

式(10)说明三轴差速轮系的输出力矩与初级传动比、输入扭矩和各级传递效率有关，与输出轴转速无关，可证明三轴差速轮系具有差速不差力的特点。通过式(10)还可以看出，各输出轴的输出扭矩近似相等，数值约为输入轴扭矩的 $2i_0/3$ ，由此证明了该轮系在结构上满足对称性要求。

3 三轴差速轮系功率流分析

为了清楚地表示出轮系内部功率流和所受内力，须画出离散图。图4中，三角形表示圆锥齿轮差速单元^[14]，构件依序标在图形顶点上，单元之间固定在一起的构件用细实线连接。图4中的箭头表示功率流向。因轮 A_0 为输入件，3个主差速器的行星架为输出件，故可先画出它们的箭头，表示出轮系整体的功率流向。

(1) 确定构件的角速度。图4中构件 A_1 、 A_2 、 A_3 为第一级传动的从动件，不难判断它们的角速度与主动件角速度相反，由于 $\omega_{A0} > 0$ ，所以有

$\omega_{A1} < 0$ ， $\omega_{A2} < 0$ ， $\omega_{A3} < 0$ 。根据式(2)、(8)确定出 $\omega_{H1} < 0$ ， $\omega_{H2} < 0$ ， $\omega_{H3} < 0$ ， $\omega_{B2} > 0$ ， $\omega_{B3} < 0$ 。当 $-60^\circ \leq \beta < 0$ 时， $\omega_{B1} < 0$ ； $0 \leq \beta \leq 60^\circ$ 时 $\omega_{B1} > 0$ 。将它们标注在图4上。

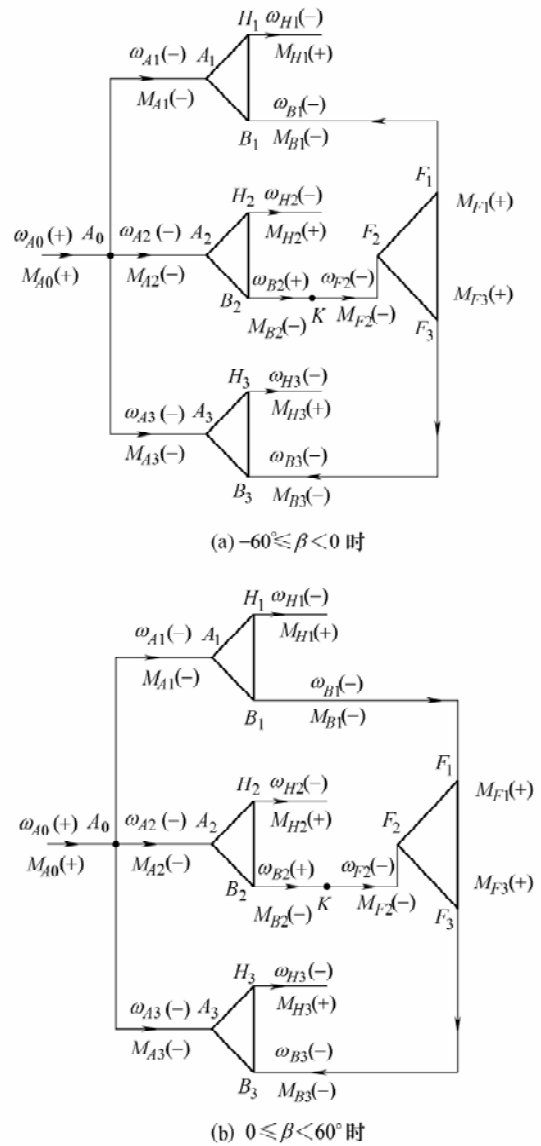


图4 三轴差速轮系功率流向图

(2) 确定构件的力矩。构件 A_1 、 A_2 、 A_3 为第一级传动的从动件，很容易判断它们所受力偶方向与主动件的相反，取 $M_{A0} > 0$ ，所以 $M_{A1} < 0$ ， $M_{A2} < 0$ ， $M_{A3} < 0$ 。根据式(8)可知 $M_{H1} > 0$ ， $M_{H2} > 0$ ， $M_{H3} > 0$ ， $M_{B1} < 0$ ， $M_{B2} < 0$ ， $M_{B3} < 0$ ， $M_{F1} > 0$ ， $M_{F2} < 0$ ， $M_{F3} > 0$ 。将它们标注在图4上。

(3) 绘制差动轮系内部功率流向图。按功率 $P = M\omega$ ，正功率为轮系单元的输入功率，箭头尖端应指向轮系；负功率为轮系单元的输出功率，箭头尖端应背向轮系。根据已确定出的扭矩和转速可分别确定出各处的功率正负，将它们标注在图4上。

(4) 从功率流向分析三轴差速轮系的效率和自

锁。观察图 4 所绘的功率流向, 可知该机构属于功率汇流型^[15], 不存在循环功率流, 理论上该机构的功率利用率较高, 且不存在自锁。

4 三轴差速轮系传递效率分析

传递效率是评价机械传动系统好坏的重要性指标。在此之前, 关于三轴差速轮系的传递效率等问题的分析和研究几乎没有, 严重影响该机构在实际工程中的应用和推广。本节通过对三轴差速轮系深入的理论分析和研究, 推导出这种机构机械效率的理论计算公式。

采用三轴差速原理设计的管道机器人行走时, 由于驱动轮实际行走距离不等, 机器人内部装有的三轴差速轮系根据外部环境的变化, 自动调节驱动轮的转速, 实现差速功能。此时各驱动轮的转速与弯管弯曲曲率、弯管内径等外部环境有关。虽然三轴差速轮系结构和传递关系复杂, 但输出转速和力矩可由外部环境推得, 可以采用传统的效率计算公式来计算

$$\eta_{cs} = \frac{P_o}{P_i}$$

式中 P_i ——总输入功率

$$P_i = \frac{2\pi}{60} M_{A0} n_0$$

P_o ——总输出功率

$$P_o = \frac{2\pi}{60} (M_{H1} n_{11} + M_{H2} n_{22} + M_{H3} n_{33})$$

将三轴差速轮系的输出速度和输出力矩代入 P_o 的表达式, 有

$$P_o = \frac{2\pi}{60} \left[\frac{2\eta_0}{3} M_{A0} \frac{R_1}{2R} n_0 + \frac{\eta_0(1+\eta_H)}{3} M_{A0} \frac{R_2}{2R} n_0 + \frac{2\eta_0\eta_H}{3} M_{A0} \frac{R_3}{2R} n_0 \right] = \frac{2\pi}{60} \left[3R\eta_0(1+\eta_H) - \sqrt{3}\sin(\beta+30^\circ)r_{pw}\eta_0(1-\eta_H) \right] \frac{M_{A0}n_0}{6R} \quad (11)$$

所以三轴差速器工作在弯管时的传递效率为

$$\eta_{cs} = \frac{\frac{2\pi}{60} \left[3R\eta_0(1+\eta_H) - \sqrt{3}\sin(\beta+30^\circ)r_{pw}\eta_0(1-\eta_H) \right] \frac{M_{A0}n_0}{6R}}{\frac{2\pi}{60} M_{A0}n_0} = \frac{\eta_0(1+\eta_H)}{2} - \frac{\sqrt{3}\sin(\beta+30^\circ)r_{pw}\eta_0(1-\eta_H)}{6R} \quad (12)$$

式(12)说明, 三轴差速轮系的传递效率主要与

初级传动效率、圆锥齿轮差速轮系转化机构的效率及机器人在管道中的作业姿态有关。

5 结论

(1) 通过对三轴差速轮系的结构特点和各构件受力情况的深入分析, 建立了力矩传递关系的数学模型, 并得出三轴差速轮系输出力矩具有对称性及三轴差速轮系具有差速不差力特点的结论。

(2) 通过对轮系内部功率流向的分析和研究, 绘出了该机构的功率流向图, 同时得出该机构为功率汇流型机构的结论, 为三轴差速轮系传递效率的分析和研究奠定了基础。

(3) 采用传统的机械效率的求解方法, 推导了三轴差速轮系的传递效率公式, 为三轴差速轮系的研究和应用提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] 周晓, 张晓华, 邓宗全. 管内作业机器人的发展与展望[J]. 机器人, 1998, 20(6): 471-478.
ZHOU Xiao, ZHANG Xiaohua, DENG Zongquan. The development and prospects of robot working in pipeline[J]. Robot, 1998, 20(6) : 471-478.
- [2] 龚进峰, 彭商贤. 履带式可变结构管道机器人及其双控制系统的研究[J]. 高技术通讯, 2001 (12) 70-72.
GONG Jinfeng, PENG Shangxian. Study on a vaistructrued crawler pipe robot and its dual-control system[J]. High Technology Letters, 2001 (12): 70-72.
- [3] 彭商贤, 刘斌, 龚进峰, 等. 履带式管道机器人及侧倾问题的研究[J]. 机器人, 2000, 22(4): 247-250.
PENG Shangxian, LIU Bin, GONG Jinfeng, et al. A study of internal pipeline tracked robot and its side lurch[J]. Robot, 2000, 22(4): 247-250.
- [4] 刘晓洪, 郑毅, 高隽恺, 等. 新型蠕动式气动微型管道机器人[J]. 液压气动与密封, 2007(1): 16-18.
LIU Xiaohong, ZHENG Yi, GAO Junkai, et al. A new type of squirmy pneumatic micro-pipeline robot[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2007(1): 16-18.
- [5] 陆麒, 章亚男, 沈林勇, 等. 适应管径变化的管道机器人[J]. 机械设计, 2007, 24(1): 16-19.
LU Qi, ZHANG Yanan, SHEN Linyong, et al. Piping robots that suit the variation of pipe diameter[J]. Journal of Machine Design, 2007, 24(1): 16-19.
- [6] DENG Zongquan, XU Fengping, ZHANG Xiaohua, et al. Key techniques of the x-ray inspection real-time imaging

- pipeline robot[J]. High Technology Letters, 2004, 10(2): 54-56.
- [7] 邓宗全, 陈军, 姜生元, 等. 六独立轮驱动式管内机器人的研制[J]. 高技术通讯, 2004(9): 54-58.
DENG Zongquan, CHEN Jun, JIANG Shengyuan, et al. Development of in-pipe robot driven by six independent wheels[J]. High Technology Letters, 2004(9): 54-58.
- [8] 邓宗全, 陈军, 姜生元, 等. 六独立轮驱动管内检测牵引机器人[J]. 机械工程学报, 2005, 41(9): 67-72.
DENG Zongquan, CHEN Jun, JIANG Shengyuan, et al. Traction robot driven by six independent wheels for inspection inside pipeline[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(9): 67-72.
- [9] KAWAGUCHI Y, YOSHIAD I, KURUMATANI H, et al. Internal pipe inspection robot [C]// Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Part 1 (of 3), May 21-27, 1995, University of Nagoya, Nagoya, Japan. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 857-862.
- [10] KUNTZE H B, HAFFNER H. Experiences with the development of a robot for smart multisensoric pipe inspection [C]// Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Part 2 (of 4), May 16-20, 1998, University of Leuven, Belgium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 1 773-1 778.
- [11] 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.
- [12] 姜生元. 管内 X 射线探伤机器人技术及理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
JIANG Shengyuan. Research on in-pipe X-ray inspection robot technology and theory[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2001.
- [13] 华大年. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994.
HUA Danian. Theory of machines and mechanisms[M]. Beijing: Higher Education Press, 1994.
- [14] 杨实如, 段钦华. 周转轮系的内力矩、功率流与自锁[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(2): 189-191.
YANG Shiru, DUAN Qinhua. Study on inner torque, power-flow and self-locking of epicyclic gear trains[J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(2): 189-191.
- [15] 王述彦. 行星轮系效率和自锁分析[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(1): 60-63.
WANG Shuyan. Efficiency of the planet wheel system and analysis of self-locking[J]. Mechanical Science and Technology, 2001, 20(1): 60-63.
-
- 作者简介: 唐德威, 男, 1966 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为特种机器人技术。
E-mail: dwtang@hit.edu.cn