

管道机器人适应不同管径的三种调节机构的比较

徐小云, 颜国正, 丁国清, 颜德田

(上海交通大学 信息检测技术及仪器系 820 研究所, 上海 200030)

摘要: 为了使管道机器人能够适应管径为 400 ~ 650 mm 的管道, 介绍了 3 种适应不同管径的常用调节机构。分析了每种调节机构的力学特性, 给出了计算结果, 比较研究了各种调节机构的优缺点。针对工程需要, 选用了滚珠丝杠螺母副调节机构, 滚珠丝杠上的筒式压力传感器保证驱动轮和管道内壁间的压力始终处于稳定的范围, 使管道机器人具有充裕并且稳定的牵引力, 牵引力的实验表明该调节机构具有 1404 N 的牵引力输出。该调节机构能很好地适应管径为 400 ~ 650 mm 的管道。

关键词: 管道机器人; 滚珠丝杠螺母副; 管道检测; 调节机构

中图分类号: TP242. 2 **文献标识码:** A

Comparative study of three regulating mechanisms for pipeline robot to suit different pipe diameters

XU Xiao-yun, YAN Guo-zheng, DING Guo-qing, YAN De-tian

(820 Research Institute, Department of Information Detecting Technology and Instrument, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to enable a pipeline robot to suit pipelines with diameters in the range of 400 ~ 650 mm, three commonly used regulating mechanisms are proposed by analyzing the mechanical properties of each type of regulating mechanism and comparing the advantages and disadvantages of these regulating mechanisms. A ball screw pair regulating mechanism has been chosen to satisfy the actual engineering needs of this subject under investigation. The cylindrical pressure sensor on the ball screw can keep the pressure between the driving wheel and the pipe inner wall always stable so that the pipeline robot has adequate and stable traction force. Experimental results show that this regulating mechanism has a traction force output of 1404 N, and it can be used to suit pipelines with pipe diameters in the range of 400 ~ 650 mm very well.

Key words: in-pipe robot; ball screw pair; pipe inspection; regulating mechanism

1 引言

工业管道系统已广泛应用于冶金、石油、化工

及城市水暖供应等领域。工业管道的工作环境非常恶劣, 容易发生腐蚀、疲劳破坏或使管道内部潜在的缺陷发展成破损而引起泄漏事故等, 因此管道的监测、诊断、清理和维护就成为保障管道系统

收稿日期: 2003-07-14; 修订日期: 2003-11-10.

基金项目: 国家“863”计划资助项目 (No. 2002AA442110); 云南省省院省校合作基金 (No. 2001KABAA00A025)

安全、畅通和高效运营的关键, 管道的在役和在线探查也就成了管道无损检测技术应用、发展的重要方向之一。然而管道所处的环境往往受人力或人手不及所限, 检修难度很大, 故通常对重要和不允许泄漏的管道采用定期或提前报废的办法, 从而造成了巨大人力和物力损失。目前关于地下管道的质检, 常采用工程量十分巨大的“开挖”抽检方法, 不但劳动强度大、效益低, 而且由于随机抽样法经常出现漏检, 因而准确率低、效果并不理想, 并且往往会妨碍道路交通。因此开发适应在管道这一特殊环境下工作的特种管道机器人, 使人脱离危险作业的生产第一线, 减轻人的劳动强度, 提高生产效率, 减少不必要的损失是机器人发展的一个必然方向。

我国油气管道大多是在 60~70 年代建设的, 迄今仅在役时间近 30 年、处于中老年期和事故多发性阶段的长输管线已逾 1.7 万 km, 正面临着管道进入中老年期, 处于事故多发阶段, 油气管道的检测和评价的需求已日趋迫切。

日本东京工业大学航空机械系 Shigeo Hirose 和 Hidetaka Ohno^[1-2]等人于 1993 年开始研究管道检测机器人, 先后研制成功适用于 50 mm 管道的 TheS⁻、TheS⁻ 型管道机器人和适用于 150 mm 管道的 TheS⁻ 型管道机器人。日本 Osaka 煤气公司的 Y. Kawaguchi^[3-6]等人于 1995 年研制成功的管道检测机器人系统的行走装置则采用内外轮结构, 由电动机驱动的内轮为磁性轮, 系统携带彩色摄像头, 并通过棱镜改变成像方向。该机器人采用光纤进行通信, 可以检测管径为 200 mm 的铁管, 一次作业的检测距离不大于 500 m。日本横滨国立大学电子与计算机工程系 Chi Zhu^[7]等人于 2000 年研制成功用于检测污水排放管道的机器人, 该机器人适用于管径为 200 mm 的管道。哈尔滨工业大学的邓宗全^[8-9]教授等人采用两个电机分别驱动均布在机架上的与管道内壁之间用弹簧力封闭的两组驱动轮, 利用弹簧产生封闭力使机器人能适应一定管径范围内的管道。但是, 当管径变化范围比较大的时候, 弹簧产生的封闭力变化较大, 失去常封闭力的特性, 管道机器人的移动机构的牵引力将不再稳定, 机器人的工作可靠性将受到很大的影响。

上述研究的管道机器人通常只适用于单一的管道直径, 而且一次作业的检测距离都比较短, 通常不超过 500 m。为了克服现有管道机器人一次作业

的检测距离短和只能适用于单一管径的不足, 本文详细介绍了 3 种适应不同管径的常用调节机构, 比较研究了各种调节机构的优缺点, 针对本课题的工程实际需要, 选用了滚珠丝杠螺母副调节机构, 该调节机构使机器人具有充裕并且稳定的牵引力, 并且管径变化范围比较大, 能适应管径为 400~650 mm 的管道。

2 适应不同管径的 3 种调节机构

2.1 蜗轮蜗杆调节方式

图 1 所示是蜗轮蜗杆调节方式示意图, 其工作原理是电机驱动与之相连接的蜗杆, 蜗杆驱动蜗轮转动。由于连杆 AB 的一端和蜗轮刚性固定铰接在一起, 另一端和车轮轴铰接, 从而蜗轮的转动带动车轮撑开或者紧缩以达到适应不同的管径的目的。下面分析蜗轮蜗杆调节方式的力学特性, 以蜗轮的中心点 A 为坐标系的原点, 建立如图所示的坐标系 XOY, L 为连杆 AB 的长度, α 是连杆 AB 与水平方向之间的夹角, N 为管道内壁作用在车轮上的压力, $T_{\text{蜗杆}}$ 是作用在蜗杆轴上的有效扭矩, $T_{\text{电机}}$ 是电机轴的输出扭矩, 蜗杆蜗轮之间的传动比记为 i_1 , 传动效率记为 η , 电机和蜗杆之间的传动比记为 i_2 。

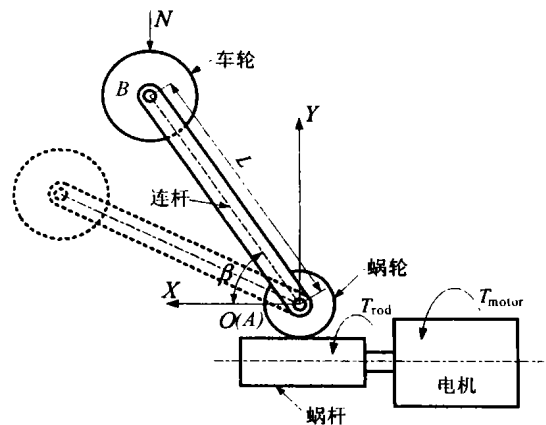


图 1 蜗轮蜗杆调节方式

Fig. 1 Worm gear regulating mode

在坐标系 XOY 中, 车轮质心 B 的 Y 坐标值 y 可以表示为: $y = L \sin \alpha$

对上式两边分别取微分可得: $dy = L \cos \alpha d\alpha$

又因为连杆和蜗轮刚性固定铰接在一起, 因此有:

$$= \theta_{\text{turbine}}, \quad (1)$$

式中 θ_{turbine} 是蜗轮的转角。

蜗杆蜗轮之间的传动比记为 i_1 , 即: $\frac{\theta_{\text{rod}}}{\theta_{\text{turbine}}} = i_1$, 等式两边取微分可得:

$$\theta_{\text{rod}} = i_1 \theta_{\text{turbine}}, \quad (2)$$

由虚功原理可得: $T_{\text{rod}} \theta_{\text{rod}} + 3N y = 0$

将式 (1) 和 (2) 代入上式有:

$$T_{\text{rod}} = \frac{-3NL}{i_1} \cos \beta$$

因为

$$T_{\text{motor}} = \frac{T_{\text{rod}}}{i_2}, \text{ 则 } T_{\text{motor}} = \frac{-3NL}{i_1 i_2} \cos \beta, \quad (3)$$

式 (3) 是蜗轮蜗杆调节方式的力学特性。

在本设计中, $L = 215.3 \text{ mm}$, 输出牵引力 F 按 125 kg 计算, 驱动轮和管道内壁之间的摩擦系数 μ 取 0.5 , 则管道内壁作用在车轮上的压力 $3N = \frac{F}{\mu} = \frac{125}{0.5} = 250 \text{ kg} = 2450 \text{ N}$ 。随着机器人轮腿机构的撑开程度的变化而变化, 当机器人行走在 400 mm 的管道中时, $\beta = 24.71^\circ$; 当机器人行走在 650 mm 的管道中时, $\beta = 86.97^\circ$, 蜗杆蜗轮之间的传动效率取 $\eta = 0.5$ 。

调节机构用的蜗轮蜗杆采用与驱动端相同的尺寸规格, 电机采用步进电机, 则 $i_1 i_2 = 30$, 当管道直径为 400 mm 时, $T_{\text{motor}} = 31945.7 \text{ N mm}$, 当管道直径为 650 mm 时, $T_{\text{motor}} = 1858.8 \text{ N mm}$ 。

可见采用蜗轮蜗杆调节方式时, 电机轴所受的扭矩非常大, 达到了将近 32 N m , 远远超出了目前步进电机所能提供的额定扭矩, 可见这种调节方法在本设计中根本不可行。

2.2 升降机调节方式

图 2 所示为升降机调节方式示意图, 其工作原理是在连杆 CD 的 C 端作用一定大小和方向的力, 使升降机机构升起或者回落, 从而使固定在 E 点的车轮也跟着升起或者回落以达到适应不同的管径的目的。下面分析升降机调节方式的力学特性, 以连杆 AB 的支点 A 为坐标系的原点, 建立如图所示的坐标系 XOY , 所有的连杆单元的长度均为 L , 即 $AG = CG = GD = GB = BE = DE = L$, β 是连杆 AB 与水平方向之间的夹角, N 为管道内壁作用在车轮上的压力, F 是作用在支点 C 上的推力, 改变作用在支点 C 上的推力的方向, 可以使升降机收缩或张开, 从

而实现机器人适应不同管径的目的。

在坐标系 XOY 中, 车轮质心 E 的 Y 坐标值 y 可以表示为: $y = 3L \sin \beta$

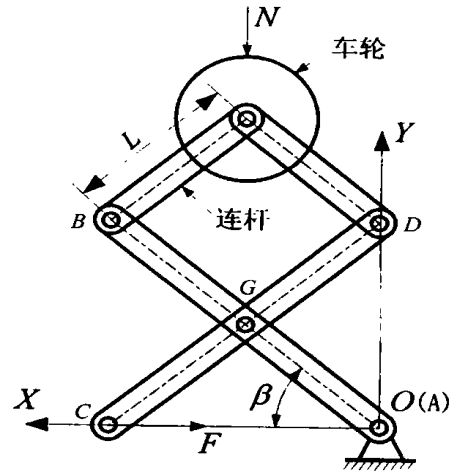


图 2 升降机调节方式

Fig. 2 Elevator regulating mode

对上式两边分别取微分可得:

$$y = 3L \cos \beta, \quad (4)$$

支点 C 在坐标系 XOY 中的 X 坐标值 x 为: $x_C = 2L \cos \beta$

对上式两边分别取微分可得:

$$x_C = -2L \sin \beta, \quad (5)$$

由虚功原理可得: $F x_C + 3N y = 0$

将式 (4) 和 (5) 代入上式可得:

$$F = \frac{9N}{2 \tan \beta}, \quad (6)$$

式 (6) 是升降机调节方式的力学特性。

在本设计中, 机器人的车轮直径是 110 mm , 驱动端的蜗轮蜗杆的中心距是 60 mm , 当管径在 $400 \sim 650 \text{ mm}$ 范围内变化时, 升降机的 O 点和 E 点间的垂直高度只能在 $90 \sim 215 \text{ mm}$ 变化。随着机器人轮腿机构的撑开程度的变化而变化, 当机器人行走在 400 mm 的管道中时, $3L \sin \beta_1 = 90$, 则 $L > 30 \text{ mm}$; 当机器人行走在 650 mm 的管道中时, $3L \sin \beta_2 = 215$, 则 $L > 71.7 \text{ mm}$; 因此假设取连杆单元的长度 $L = 75 \text{ mm}$, 则 $\beta_1 = 23.58^\circ$, $\beta_2 = 72.85^\circ$, 输出牵引力 F 按 125 kg 计算, 驱动轮和管道内壁之间的摩擦系数 μ 取 0.5 , 则管道内壁作用在车轮上的压力 $3N = \frac{F}{\mu} = 250 \text{ kg} = 2450 \text{ N}$ 。

管道直径为 400 mm 时, 推力 $F = 841.9.8$ N, 管道直径为 650 mm 时, 推力 $F = 113.4.1$ N。

采用升降机调节方式时, 最大的优点是在轴线方向和径向上结构都比较紧凑, 使机器人的空间尺寸大大缩小; 其缺点是当管道的直径为 400 mm 时, 所需的推力比较大, 达到了 841.9.8 N, 对电机的要求比较高; 而且在坐标系 XOY 中, 升降机的 O 点和 E 点间的垂直高度只能在 90~215 mm 变化, 要在空间尺寸这么小的范围内布置具有一定强度和刚度的升降机结构在工程实际中非常困难, 因此本设计中没有采用这种调节方式。

2.3 滚珠丝杠螺母副调节方式

图 3 所示是滚珠丝杠螺母副调节方式示意图, 其工作原理是压紧力调节电机驱动滚珠丝杠转动, 丝杠螺母和压紧力传感器以及轴套用螺栓固定在一起, 连杆 AB 的一端和车轮轴铰接在一起, 另一端铰接在固定支点 A , 推杆 CD 与连杆 AB 铰接在 D 点, 另一端铰接在轴套上 C 点, 轴套在圆周方向相对固定, 因此滚珠丝杠的转动将带动丝杠螺母沿轴线方向在滚珠丝杠上来回滑动, 从而带动推杆运动, 进而推动连杆 AB 绕支点 A 转动, 使车轮撑开或者紧缩以达到适应不同的管径的目的。压力传感器间接检测驱动车轮和管道

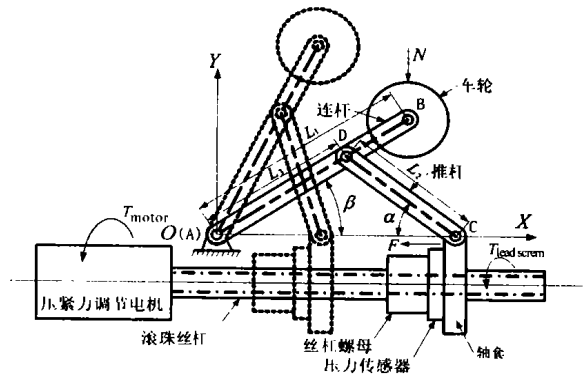


图 3 滚珠丝杠螺母副调节方式

Fig. 3 Screw pair regulating mode

内壁之间的压力, 保证管道机器人以稳定的压紧力撑紧在管道内壁上, 使机器人具有充足且稳定的牵引力, 图 4 是压紧力控制框图。下面分析滚珠丝杠螺母副调节方式的力学特性, 如图所示。以固定支点 A 为坐标系的原点, 建立如图所示的坐标系 XOY , L_1 为连杆 AB 的长度, L_2 是推杆 CD 的长度, L_3 是支点 D 到固定支点 A 之间的距离, α 是推杆 CD 与水平方向之间的夹角, β 是连杆 AB 与水平方向之间的夹角, N 为管道内壁作用在车轮上的压力, F 是滚珠丝杠螺母作用在推杆上的轴向推力, T_{rod} 是作用在滚珠丝杠轴上的有效扭矩, T_{motor} 是电机轴上的输出扭矩。

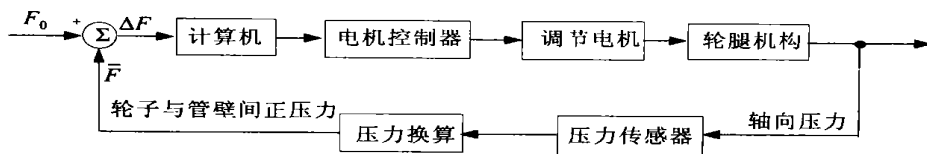


图 4 压紧力控制结构框图

Fig. 4 Control structural block diagram of pressure

在坐标系 XOY 中, 由几何关系可得:

$$\begin{cases} y_B = L_1 \sin \beta \\ L_2 \sin \alpha = L_3 \sin \beta \\ x_C = L_2 \cos \alpha + L_3 \cos \beta \end{cases}$$

对上式两边分别取微分可得:

$$\begin{cases} y_B = L_1 \cos \beta \\ L_2 \cos \alpha = L_3 \cos \beta \\ x_C = -L_2 \sin \alpha - L_3 \sin \beta \end{cases}$$

化简上式得:

$$x_C = -\frac{L_3}{L_1} (\tan \alpha + \tan \beta) y_B, \quad (7)$$

由虚功原理得: $F x_C + 3N y_B = 0$

将式 (7) 代入上式并化简得:

$$F = \frac{3L_1}{L_3 (\tan \alpha + \tan \beta)} N, \quad (8)$$

所采用的滚珠丝杠螺母副的导程记为 P_h , 为滚珠丝杠和丝杠螺母之间的相对转角, 则丝杠螺母的位移为: $S = \frac{P_h}{2}$

对上式等号两边分别取微分得： $s = \frac{P_h}{2}$

考虑滚珠丝杠螺母副，由虚位移原理可得：

$$F_s + T_{lead\ screw} = 0, \tag{9}$$

式中： η 为滚珠丝杠螺母副的传动效率。

合并整理式 (8)、(9) 得： $T_{lead\ screw} = \frac{P_h}{2} F$

$$= \frac{3L_1 P_h}{2 L_3 (\tan \alpha + \tan \beta)} N$$

即：

$$T_{lead\ screw} = \frac{3L_1 P_h}{2 L_3 (\tan \alpha + \tan \beta)} N, \tag{10}$$

式 (10) 是滚珠丝杠螺母副调节方式的力学特性。

在本设计中，连杆 AB 的长度 $L_1 = 215.3$ mm，支点 D 到固定支点 A 之间的距离 $L_3 = 155$ mm，随着机器人轮腿机构撑开程度的变化而变化，当机器人行走在 400 mm 的管道中时， $\alpha = 23.89^\circ$ 、 $\beta = 24.71^\circ$ ；当机器人行走在 650 mm 的管道中时， $\alpha = 75.33^\circ$ 、 $\beta = 86.97^\circ$ ，输出牵引力 F 按 125 kg 计算，驱动轮和管道内壁之间的摩擦系数 μ 取 0.5，则管道内壁作用在车轮上的压力 $3N = \frac{F}{\mu} = \frac{125}{0.5} = 250 \text{ kg} = 2450 \text{ N}$ ，滚珠丝杠螺母副的导程 $P_h = 5$ mm，滚珠丝杠螺母副的传动效率 $\eta = 0.95$ 。

当管道直径为 400 mm 时，滚珠丝杠上的扭矩 $T_{lead\ screw} = 3156.6 \text{ N}\cdot\text{mm} = 3.16 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，当管道直径为 650 mm 时，滚珠丝杠上的扭矩 $T_{lead\ screw} = 125.5 \text{ N}\cdot\text{mm} = 0.13 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

可见采用滚珠丝杠螺母副调节方式时，当管径在 400~650 mm 范围内变化时，滚珠丝杠上所需的最大扭矩仅为 3.16 N·m，目前一般的步进电机都能提供，而且这种方式在空间布置上比较简单，滚珠丝杠直接安装在步进电机的输出轴上，其缺点是这种调节方式使机器人在轴线方向上的结构不是那么紧凑。为了适应 400~650 mm 的管径范围，滚珠丝杠长度要 400 mm 左右，而且由于滚珠丝杠一端固定另一端相对固定，相当于一根悬臂梁刚度不是特别好。综合考虑以上各种调节方式的优缺点和工程实际情况，本设计中采用滚珠丝杠螺母副的调节方式，步进电机选用日本多摩川的 Ts3684N3E8，其额定输出扭矩达到 5 N·m，满足本设计所需的 3.16 N·m。图 5 为本课题采用滚珠丝杠螺母副调节方式所设计的管道

机器人实物照片，它由照明和 CCD 摄像头、管道机器人爬行机构、电机驱动器、开关电源、光纤信号收发器和特殊光纤以及嵌入式控制计算机等组成，可以很好地适应管径范围是 400~650 mm 的各种管道。

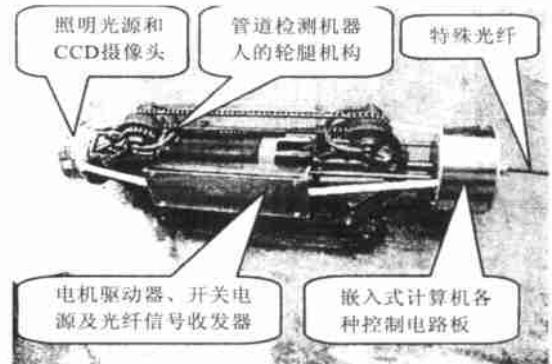


图 5 管道检测机器人外形实物照片

Fig. 5 Picture of pipe inspection robot

3 牵引力实验

为了验证理论分析的正确性和了解该机构的牵引力情况，样机制作完成后，进行了管道检测机器人爬行机构的牵引力实验。管道机器人爬行机构的牵引力实验是在上海市计量测试技术研究院的监督下，采用计量局的标准量仪—三等测力计标准装置（[1988]沪计标社证字第 209 号）为测量设备，在管径为 500 mm、管壁厚度为 10 mm 的无缝钢管中进行的。钢管内无任何障碍物，检测时的环境条件为：温度：20℃；相对湿度：50%。实验方案为：在管道检测机器人爬行机构的尾部连接一标准化测力传感器，力传感器的另一端固定在横在管道口的钢棍上，力传感器通过电缆线和数字测量仪连接，所测得的力可以直接在数字测量仪的屏幕中直观地显示出来。在管道检测机器人系统的控制界面上输入前进指令，发现管道检测机器人的爬行机构在管道中走过一定的距离后，3 个驱动轮同时开始在管道内壁上打滑，驱动步进电机开始出现丢步现象，此时数字化测量仪屏幕上所显示的数值即为管道检测机器人爬行机构的最大牵引力值。图 6 所示是管道检测机器人移动机构牵引力的实验现场照片，牵引力实验共进行了 5 次，所测得的实验数据结果如

表1所示。

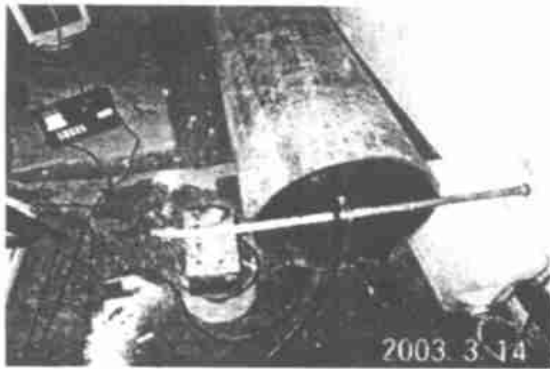


图6 管道检测机器人牵引力实验

Fig. 6 Experiment of pipe inspection robot's traction force

表1 牵引力实验结果

Tab. 1 Experimental result of traction force

实验次数	1	2	3	4	5
实验结果	1420	1390	1450	1350	1410

(单位: N)

取各次实验结果的平均值为该管道检测机器人的牵引力,由实验结果可知管道检测机器人具有较好的稳定牵引力。

4 结 论

本文介绍了蜗轮蜗杆、升降机和滚珠丝杠螺母副3种适应不同管径的常用调节机构,详细地分析了每种调节机构的力学特性,并根据工程实际要求给出了计算结果,比较研究了各种调节机构的优缺点。针对本课题的工程实际需要,选用了滚珠丝杠螺母副调节机构,设计了能适应400~650mm管径范围的管道机器人。滚珠丝杠上的筒式压力传感器能保证管道机器人的驱动轮和管道内壁间的正压力始终处于稳定的范围,使管道机器人具有充裕并且稳定的牵引力输出,实验表明该机构具有1404N的牵引力输出。采用滚珠丝杠螺母副调节机构能很好地适应管径为400~650mm的管道。

参考文献:

- [1] HIROSE S, OHNO H. Development of 25 mm-diameter gas-pipe inspection mobile mechanism [C]. *Proc of 15th Annual Conference of Robotics Society of Japan*, 1997: 257-258.
- [2] HIROSE S, OHNO H, MITSUI T, et al. Design of in-pipe inspection vehicles for, 25, 50, 150 pipes [J]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, 5: 2309-2314.
- [3] KAWAGUCHI Y, YOSHIDA I, KURUMATANI H, et al. Internal pipe inspection robot [J]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, 1: 857-862.
- [4] KAWAGUCHI Y, YOSHIDA I, KURUMATANI H, et al. Development of an in-pipe inspection robot for iron pipes [J]. *Journal of Robotics Society of Japan*, 1996, 14 (1): 137-143.
- [5] TSUBOUCHI T, TAKAKI S, KAWAGUCHI Y, et al. A straight pipe observation from the inside by laser spot array and a TV camera. Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ [C]. *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000, 1: 82-87.
- [6] KAWAGUCHI Y, YOSHIDA I, IWAOKAWA K, et al. Sensors and crabbing for an in-pipe magnetic-wheeled robot [C]. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics '97*. 1997.
- [7] ZHU Ch, SARATA SH. In-pipe mobile manipulator for inspection and sampling tasks [M]. Elsevier Science Ltd. 2000.
- [8] 邓宗全, 王杰, 刘福利, 等. 直进轮式全驱动管内行走机构的研究 [J]. *机器人*, 1995, 17 (2): 121-122.
DENG ZH Q, WANG J, LIU FL, et al. Study on a new type of mobile robot mechanism moving in pipe [J]. *Robot*, 1995, 17 (2): 121-122. (in Chinese)
- [9] 张永顺, 邓宗全, 毕德学, 等. 一种可越过管内凹形障碍的双驱动多轮移动载体的研究 [J]. *机器人*, 1998, 20 (5): 352-355.
ZHANG Y SH, DENG ZH Q, BID X, et al. A mobile carrier with two motors driving multi-full traction wheels suitable to go across concave barrier inside pipeline [J]. *Robot*, 1998, 20 (5): 352-355. (in Chinese)

作者简介: 徐小云 (1974-), 男, 浙江人, 上海交通大学电子信息学院在读博士生, 主要研究方向为微型机器人, 特种机器人等;

颜国正 (1961-), 男, 湖南人, 上海交通大学电子信息学院博士生导师, 电子信息学院信息检测技术及仪器系主任, 主要研究方向为微型机器人, 特种机器人, 人工智能等领域;

丁国清 (1966-), 男, 湖南人, 电子信息学院信息检测技术及仪器系系副主任, 主要研究方向为微型机器人, 特种机器人, 人工智能等领域。