

# 螺旋轮驱动的细小管内移动机器人研究\*

钱晋武 章亚男 孙麟治 苏建良 秦新捷  
(上海大学精密机械工程系 上海嘉定 201800)

**摘 要** 螺旋轮驱动的管内机器人是一种适合小口径管内移动作业的微小机器人形式。它由动力内置式螺旋运动机构和 CCD 摄像头/监视装置组成。本文分析了这种移动机构的运动和力学性能。通过对原理样机的试验测试,得到移动性能的实验数据,为开发适应  $\varnothing 20\text{mm}$  管径的螺旋运动机构提供设计依据。

**关键词** 微小机器人 螺旋轮 移动机构 管道检查

中图分类号 TP242.3 文献标识码 A

## 1 引 言

细小管道内缺陷或积垢的机器人化自动检查和探测技术在国际上尚处于研究开发阶段,由于这项技术有广阔的应用背景受到许多研究机构的重视。如美国视频检查技术公司开发的车轮驱动的管道移动探测器,已能在直径为 2 英寸的水平管道内实现移动探测<sup>[1]</sup>。日本通产省 1991 年启动的微机械十年计划中后五年重点开发的四个综合应用系统中,即有一项为  $\varnothing 20\text{mm}$  管内检查用微小机器人系统<sup>[2]</sup>。日本东京工业大学、东芝公司、OMRON 公司和日本煤气公司近年来均报道过研制管径在  $\varnothing 20\sim 50\text{mm}$  间的细小管内机器人移动机构或传感器技术的消息<sup>[3~6]</sup>。我国也必将细小工业管道自动移动和探测技术列入国家高技术研究发展计划。

管内移动机构作为自动探测机器人的重要组成部分,是检测装置的载体。对细小管道内机器人移动机构的基本要求为:(1)较大的承载能力(对于直立管道内的移动机构尤为如此);(2)较高和均匀的移动速度;(3)适应一定曲率的弯曲管道;(4)适应由于管道弯曲或管内积垢腐蚀而引起的管径变化。由于空间窄小,传统的机器人移动技术(车轮、履带、步行机构)很难直接应用到细小管道内,因此需要研究新的机构形式。

\* 863 计划资助项目(编号:863 512-04 26 97)

收稿日期:1999-02-01

修稿日期:1999-05-04

与已有的管内蠕动机构、压电驱动机构、电磁驱动机构相比,螺旋轮驱动移动机构比较容易达到上述的四项基本要求,是一种较有前途的实用机构形式。

作者研制的细小管内移动机器人由动力内置式螺旋轮移动机构、CCD 摄像头和监视器等组成,如图 1 所示。其中摄像头输出信号为 PAL 全电视信号,感光区面积为  $3.99 \times 3.99 \text{mm}^2$ ,像素尺寸为  $10.8 \times 10.8 \mu\text{m}^2$ ,分辨率为  $369 \times 287$ 。

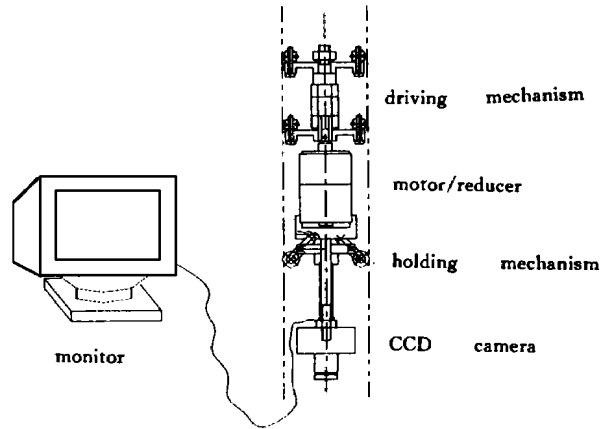


Fig. 1 Robot system in small pipe based on screw motion wheel

螺旋轮移动机构的主要部分为:

减速电机、驱动机构和保持机构。驱动轮均匀分布于轮架上与轮架铰接,并与管壁呈一定的倾斜角  $\theta$ 。当电机通电时,电机轴带动轮架转动,使驱动轮沿管壁作螺旋运动。保持机构的轮子压紧在管壁上,防止电机外壳反向转动。因此,随着电机的转动,驱动机构作螺旋运动,保持机构沿管道中心轴线移动。改变施加于电机的电流极性,可改变机器人的移动方向,从而使机器人在管内进退自如。

本文对基于螺旋轮驱动的机器人移动机构进行了力学性能和运动性能研究,并对研制的原理样机进行了实验测试。以便为进一步开发面向实用目的的细小管内移动机器人机构提供设计分析模型和类比研究数据。

## 2 驱动力矩、承载能力及移动速度的理论计算

### 2.1 驱动力矩和承载能力

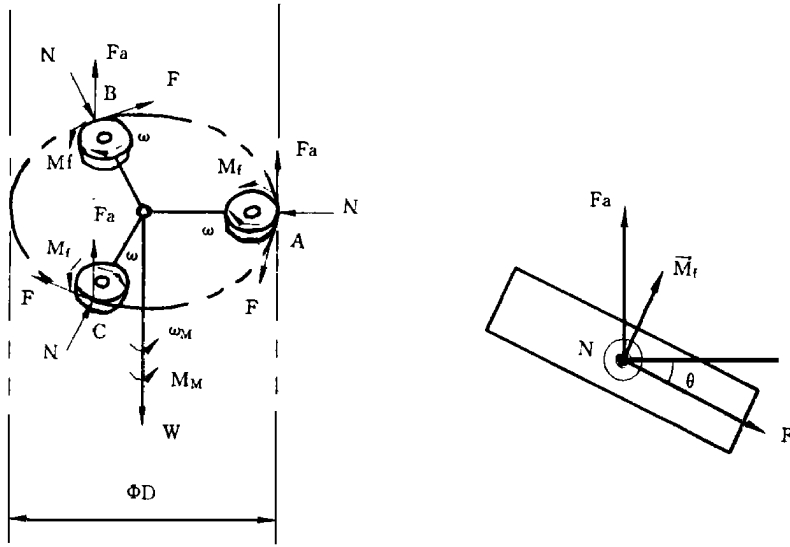
取垂直管道内机器人移动机构的驱动部分为隔离体,其受力状况如图 2(a) 所示。图 2(b) 为管壁展开后 A 轮的受力状况图。

图中:  $F$  为轮子沿管壁螺旋方向的摩擦力;  $W$  为移动机器人的总重(含载重);  $F_a$  为由于  $W$  引起机构沿管子轴向滑动趋势的摩擦力,在最大承载能力时,  $F_a \rightarrow F_{amax} = f \cdot N$ , 其中  $f$  为轮子与管壁的滑动摩擦系数;  $N$  为管壁对轮子的支反力;  $M_f$  为车轮滚动摩擦阻力矩;  $M_M$  为电机输出力矩;  $\theta$  为轮子的倾斜角;  $\omega_M$  为电机的角速度;  $\omega$  为轮子的角速度。

在移动机构的三个轮子的受力状况一致时,由图 2 得

$$\begin{aligned} W_{\max} &= 3F_{amax} - 3F \sin \theta \\ &= 3f \cdot N - 3F \sin \theta \end{aligned} \quad (1)$$

考虑到轮轴与轮子之间存在着摩擦,因此取 A 轮为隔离体,其受力状况如图 3 所示。其中  $F_x$ 、 $F_y$ 、 $F_z$  为来自轮轴的支反力,  $M_d$  是来自轮轴的摩擦力矩。



(a) Forces acted on mechanism

(b) Side view of wheel A

Fig. 2 Force analysis of moving mechanism

由静力平衡方程  $\sum M_{Az} = 0$ ,  $\sum Y = 0$ , 可以解

得:

$$F = \frac{N}{d}(2f_1 + f_2 d_2) \quad (2)$$

式中,  $f_1$  —— 车轮与管壁的滚动摩擦系数;

$f_2$  —— 车轮与轮轴的滑动摩擦系数;

$d_2$  —— 轮轴直径;

$d$  —— 轮子直径。

把(2)代入(1)得移动机构的最大载荷为

$$W_{\max} = 3N \left[ f - \frac{(2f_1 + f_2 d_2)}{d} \sin \theta \right] \quad (3)$$

同样可以从图 2 得:

$$M_M = 3 \cos \theta \left[ \frac{N}{d}(2f_1 + f_2 d_2) \cdot \frac{D}{2} - f_1 \cdot N \right] \quad (4)$$

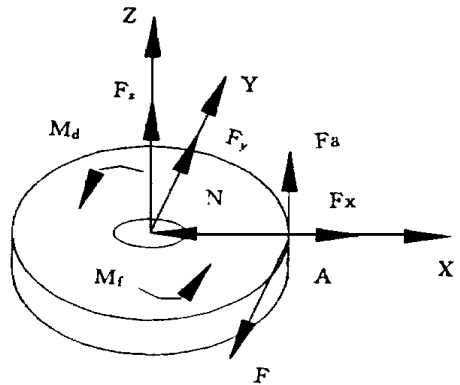


Fig. 3 Forces acted on a wheel

## 2.2 移动速度

理想情况下,机器人在管内的运动可看成是一个理想的螺旋运动,在管径  $D$  一定的情况下,其移动速度取决于电机的转速  $n$ 、驱动轮的直径  $d$  和驱动轮的螺旋角  $\theta$ ,即:

$$v = \pi n (D - d) \tan \theta \quad (5)$$

## 2.3 计算实例

已知  $D = 38(\text{mm})$ ,  $d_2 = 2(\text{mm})$ ,  $n = 9(\text{r/min})$ ,  $\theta = 8^\circ$ ,  $f_1 = 2(\text{mm})$ ,  $f_2 = 0.15$ ,  $f = 0.5$ ,  $d = 7.4(\text{mm})$ , 实测  $N = 3.77(\text{N})$ , 代入计算得:

$$W_{\max} = 3.96(\text{N}), M_{\text{电}} = 0.101(\text{Nm}), U = 232(\text{mm}/\text{min})。$$

### 3 实验及分析

我们对细小管内机器人移动机构原理模型分别测试了在玻璃试管中不同载重下的移动速度等参数。

部分实验结果和分析如下:

(1) 机器人自重为 142g, 最大载荷为 210g, 其自重载重比达到 1:1.48;

(2) 机器人水平方向空载移动速度分别为 240mm/min(前进)和 205mm/min(后退)。水平运动时的前进速度大于后退速度的原因在于前进时保持机构的压紧轮上受到的壁面摩擦力使压紧力减少, 后退时则相反。

(3) 机器人垂直方向空载移动速度分别为 160mm/min(前进)和 278mm/min(后退)。这是因为机器人自重使驱动轮沿管道纵轴线方向在管道壁上滑移的缘故。

(4) 机器人在垂直管道中的移动速度载重的关系如图 4 所示。向上运动(前进)时, 速度与载重呈反比, 向下运动(后退)速度与载重呈正比。原因同样是驱动轮与管道壁面的沿管道纵轴线方向的滑移。

(5) 少量的管道圆度变化(5%管径)及管径的变化(3%管径)对移动速度影响不大。上述实验装置的移动速度提高和适应管径的缩小可以通过减速电机尺寸和性能的选择来解决。

### 4 结 论

经过适当设计的基于螺旋运动的细小管道机器人机构具有较大的承载能力, 可以在较高的速度下实现连续移动, 由于这种机构的驱动部分和保持部分可以融入一定的弹性装置, 使机构的管径适应性增加, 因此是一种有前途的实用机构形式。

通过设置多组驱动轮可以增加驱动力。通过调节保持机构中的弹簧压紧螺母可以调节保持力矩。为防止机构移动迟滞或保持机构反转的情况发生, 机构设计或调试中应保证驱动力矩和保持力矩相匹配。

螺旋轮驱动移动机构靠摩擦驱动, 在受载情况下有打滑现象, 实际移动速度与理论移动速度有差别, 随重量的增加有明显的下降。进一步设计更小管径的移动机构时应注意这一问题。

以本文研究的  $\varnothing 38\text{mm}$  管内移动检查机器人为先导, 适应  $\varnothing 20\text{mm}$  管内的动力内置式螺旋

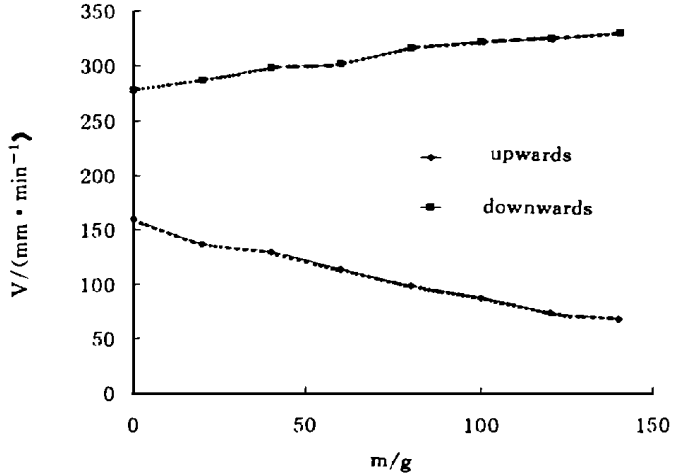


Fig. 4 Payload velocity chart

轮驱动的移动检查机器人正在研究开发中。

### 参 考 文 献

- 1 <http://delta.brtime.com/scripts/vit/proddetail.asp?itemnum=6>
- 2 Yanagisawa K. R&D issues and status of national Micro machine Project. Proc of China Japan Joint Workshop on Micromachine/MEMS, Beijing, China, Sept 29-30, 1997. 3841
- 3 Iwashina S, Hayashi I, et al. Development of Irr pipe Operation Micro Robots. Proc 5th Int Symp on Micro Machine and Human Sciences, 1994. 4145
- 4 Suzumori K, Koga A, et al. Integrated flexible microactuator systems. Robotica, 1996, 14( s ): 493498
- 5 Hamasaki Y, et al. A multilayer eddy current micro sensor for nondestructive inspection of small diameter. 精密工学会誌, 1996, 62( 3 ): 359362
- 6 Goto H, et al. Development of a Scanning Type Miniature Two dimensional Image Sensor. 精密工学会誌, 1997, 63( 2 ): 218222

## On Micro Robot in Small Pipes Based on Screw Motion Wheels

QIAN Jir Wu, ZHANG Ya Nan, SUN Lir Zhi, SU Jiar Liang, QIN Xir Jie

(Dept. of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 201800)

### Abstract

Irr pipe micro robot based on screw motion wheels is suitable for moving and inspection inside small diameter pipes. The robot development is composed of an screws motion irr pipe moving mechanism with the driving motor inside and a CCD camera. In the paper, the motion and force analyses are made for this kind of moving mechanism. After experiments on the prototype, moving characteristics are obtained, which will provide a sound reference in the development of irr pipe robot suitable for smaller diameter pipes.

**Key words:** Micro robot, Screw motion wheel, Moving mechanism, Pipe inspection

钱晋武 男, 1962年生, 博士, 上海大学教授, 主要从事机器人学与机器人技术研究。