

文章编号: 1001-2486(2007)06-0098-04

## 微小管道机器人机构设计及动力学分析\*

解旭辉, 王宏刚, 徐从启

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:**设计了一种蠕动式微小管道机器人,采用三组直流电机与螺旋传动装置,通过控制三组电机顺序协调动作,实现了机器人的蠕动前进。研究了机器人在垂直管道中驱动负载的情况,以及爪子适应管径变化的力学调节特征。利用 ADAMS 动力学分析软件,对机构做了运动学和动力学仿真,通过仿真得到了牵引力和移动速度与结构参数之间的关系。仿真表明,机器人可以适应  $\phi 15 \sim 20\text{mm}$  的管道,驱动力达到 28N,移动速度为 6mm/s。

**关键词:**微小机器人;管道检测;蠕动式;虚拟样机

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** A

## Mechanism Design and Dynamic Analysis on Micro-pipe Robot

XIE Xu-hui, WANG Hong-gang, XU Cong-qi

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A creeping micro-pipe robot is designed, which comprises three DC motors and screw-driven units. The three motors are coordinated to realize the creeping motion. Firstly, the load is analyzed for the case that the robot creeps in a vertical pipe. Meanwhile, the mechanical adjustment characteristic for the claws to adapt to the varying pipe size is also discussed. Then with the help of ADAMS software, kinematical and dynamical simulations are presented, which shows the relationship between the driving force, the moving velocity and structural parameters of the robot. Simulations also demonstrate that the robot is applicable to pipes with diameter ranging from 15 to 20mm. The driving force reaches up to 28N and the moving velocity 6mm/s.

**Key words:** micro robot; pipeline inspection; creeping; virtual prototype

工业上 20mm 以下的细小管道很多,也很难检修,通常在化工、核工业等恶劣环境下更是难以检修,迫切需要能够进入管道内部进行检测和维修的微小机器人代替人进行工作。因此,微小管道机器人在细小管道检测方面具有良好的应用前景。国外在微细管道机器人研究方面起步较早,成果较多。如日本 DENSO 公司研制了无线双压电晶片执行器微机器人<sup>[1-2]</sup>;德国西门子公司研制出仿蜘蛛的爬管微机器人<sup>[3]</sup>;法国 Industrielle 自动化实验室(LAI)研制了一种电气体驱动的蠕动式微型管内机器人<sup>[4]</sup>等。国内研究成果有上海大学的层叠压电执行器管道机器人<sup>[5]</sup>,上海交通大学的仿蚯蚓多关节蠕动微机器人<sup>[6]</sup>,广东工业大学研制了一种电磁力驱动的蠕动式微机器人<sup>[7]</sup>等等。

目前微特电机的发展使电机的应用更加广泛,采用电机驱动有易于控制、输出力矩大等优点。微型直流电机具有小惯量,小尺寸的特点。采用蠕动式结构有行走可靠,对管径变化适应能力强等优点。因此本文采用微型直流电机驱动与蠕动式结构结合起来的方式,设计了一种微小管道机器人。

### 1 微型管道机器人运动原理及结构设计

机器人本体由三个单元组成:前后部分为支撑管壁的爪结构单元,中间为伸缩单元,各单元之间用微型万向联轴器连接起来,各段分别由不同的微型直流电机驱动。如图 1 所示。

#### 1.1 运动原理

电机 2 正反转实现伸缩,电机 1、3 分别控制前后爪的松开和张紧,三个电机协调动作,就可以实现整体的蠕动前进或后退。具体分为 6 步:(1)电机 3 反转,后爪抓紧管壁;机器人主体呈收缩状态;前爪

\* 收稿日期:2007-05-23

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:解旭辉(1967—),男,副教授,博士。

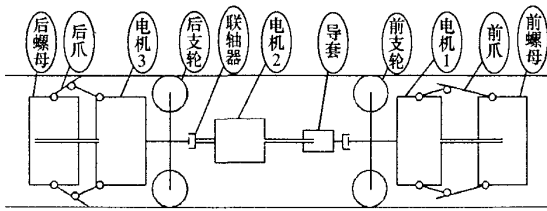


图1 微型蠕动管道机器人的结构

Fig.1 Structure of the creeping micro-pipe robot

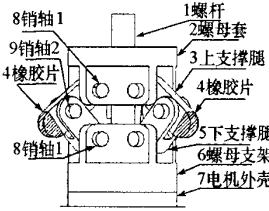


图2 支撑爪

Fig.2 Claws

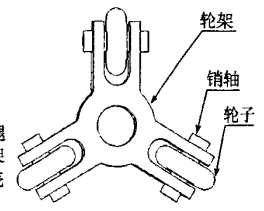


图3 保持机构

Fig.3 Holding mechanism

收缩,松开对管壁的支撑;(2)电机2正转,机器人主体伸长,带动前部向前运动;(3)后爪保持,电机1反转,前爪张开,抓紧管壁;(4)前爪保持,电机3正转,后爪收缩,松开管壁;(5)电机2反转,机器人主体收缩,带动后部向前运动;(6)当主体收缩到最短时,后爪再次抓紧管壁。至此,机器人完成一个周期的运动,向前移动一个步距 $l$ 。继续重复以上动作,机器人就能持续向前运动。反向运动时,按照相反的动作顺序即可实现。

## 1.2 机械结构设计

设计的最大零件处外形尺寸不大于 $\phi 12\text{mm}$ ,单节长度小于 $65\text{mm}$ ,总长度 $190\text{mm}$ ,总质量约 $150\text{g}$ 。

### 1.2.1 爪部设计

为实现平衡,采用三组爪结构,在圆周方向呈 $120^\circ$ 对称分布。爪部机构采用螺杆螺母传动,其中上支撑腿3铰接在螺母套2上,下支撑腿5铰接在螺母支架6上,螺母支架6与电机外壳7固定,当电机旋转时,通过螺纹传动,螺母套2沿螺杆1上下滑动,带动上支撑腿3抓紧或松开管壁。如图2所示。上支撑腿3端部胶粘橡胶片4,使接触处的静摩擦系数达到 $0.8$ ,动摩擦系数达到 $0.5$ ,提高了摩擦性能,使支撑更加可靠。

### 1.2.2 保持机构部分

保持机构主要起导向作用,三个轮子呈 $120^\circ$ 对称分布于轮架上。其中轮架与电机外壳固联,使轮与管道内壁压力保持在 $1\text{N}$ 以下。结构如图3所示。

## 2 静力学分析与计算

受自重及负载重量的影响,在竖直向上管道中机器人所受阻力最大,故以竖直向上管道为例进行分析。机构各个运动状态时的受力分析如图4。

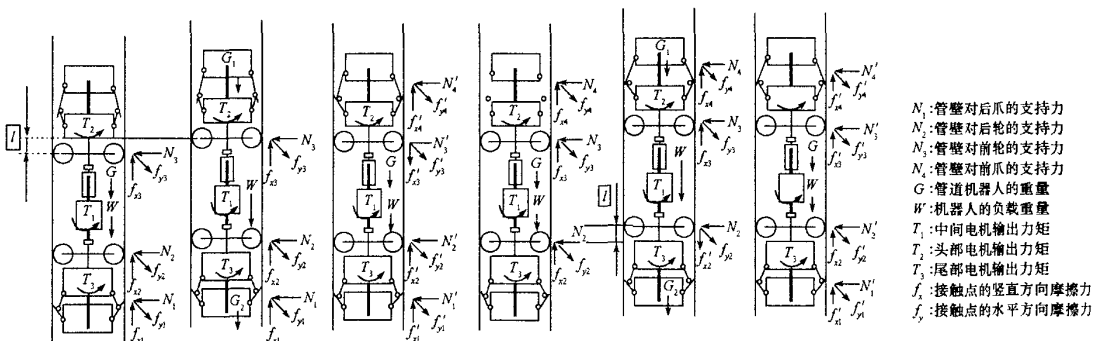


图4 机器人运动状态及受力分析图

Fig.4 Locomotion state and force analysis of the robot

### 2.1 机构整体受力分析

假设:(1)支撑腿与管壁不打滑;(2)三组支撑腿受力均等;(3)运动过程中负载重量恒定。其中, $f_h$ 为滑动摩擦系数,其余各变量的意义见图4说明。静止状态:第(1)、(3)步时,静力平衡如式(1)和(2):

$$3f_h(N_1 + N_2 + N_3) = G + W \quad (1)$$

$$3f_h(N'_1 + N'_2 + N'_3 + N'_4) = G + W \quad (2)$$

其中, $N'_1 = N'_4$ ;  $N_2 = N_3 = 0$ ;  $N'_2 = N'_3 = 0$ ; 各个参数取设计值,由式(1)有 $N_1 = 7.51\text{N}$ ;由式(2)有 $N'_1 = N'_4 = 3.76\text{N}$ 。中间驱动单元动作时,输出的轴向力 $F_1$ 与电机的转矩 $T_1$ 之间存在下面关系:

$$T_1 = PF_1/2\pi\eta \quad (3)$$

第(5)步时,电机2反转,所产生的推力要克服后轮的摩擦力 $f_{x2}$ 和下半部分重力 $G_2$ 以及驱动负载重量 $W$ ,假设上升过程是匀速运动,则有力平衡方程:

$$F_1 - 3f_{x2} - G_2 - W = 0 \quad (4)$$

前支撑腿要提供足够的摩擦力以防止机器人打滑:

$$3f_h(N_3 + N_4) > G_1 + F_1 \quad (5)$$

各参数取设计值,由式(4)有: $F_1 = 11.27\text{N}$ 。由式(3)可得需要的电机转矩 $T_1 = 3.2\text{N}\cdot\text{mm}$ 。由于尺寸限制,以及考虑到要有较高的转速和较大的力矩,驱动电机要可靠稳定,我们选择了Maxon公司的微小高精度快速响应伺服电机EC6,电机直径 $\phi 6\text{mm}$ ,加上减速器总长 $33.5\text{mm}$ ,转速 $n = 600\text{r/min}$ ,力矩 $T_m = 10\text{N}\cdot\text{mm}$ ,力矩满足要求。

## 2.2 爪部力学分析

为分析方便,只画出了一组支撑腿结构,如图5所示,以固定支点 $A$ 为坐标原点建立坐标系 $xoy$ 。其中各个变量的意义已在图上做了说明。由几何关系有:

$$\begin{cases} y_D = L_2 \sin \alpha \\ L_1 \sin \beta = L_3 \sin \alpha \\ x_C = L_1 \cos \beta + L_3 \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

上式两边取微分并化简:

$$\delta x_C = -(L_3/L_2)(\tan \alpha + \tan \beta) \delta y_D \quad (7)$$

由虚功原理有:

$$F \delta x_C + 3N \delta y_D = 0 \quad (8)$$

整理式(7)、(8)有:

$$F = 3L_2/[L_3(\tan \alpha + \tan \beta)]N \quad (9)$$

$$T_1 = PF/2\pi\eta = 3L_2 PN/[2\pi\eta L_3(\tan \alpha + \tan \beta)] \quad (10)$$

式(10)即为爪部调节的力学特征。各参数取设计值,在管道为 $\phi 18\text{mm}$ 时,计算得到支腿处的压力 $N_1 = 7.51\text{N}$ ,需要的电机转矩 $T_1 = 2.39\text{N}\cdot\text{mm}$ 。

机器人头、尾部选用的电机电矩为 $5.88\text{N}\cdot\text{mm} > 2.39\text{N}\cdot\text{mm}$ ,满足设计要求。由式(10)反算出电机可以提供的最大压力 $N_{\max} = 18.5\text{N}$ 。选用的电机转速不小于 $500\text{r/min}$ 。

## 2.3 牵引力及运动速度分析

由式(4)得到机器人的牵引力为

$$F = F_1 - 3f_{x2} - G_2 \quad (11)$$

经计算,牵引力 $F = 32.33\text{N}$ 。提高电机输出力矩 $T_1$ 及螺纹传动效率 $\eta$ ,减小导程 $P$ ,可提高牵引力。

速度分析:整个机构的运动是间歇式、周期性的,现在分析一个运动周期的情况:

$$v = l/T \quad (12)$$

其中, $l$ 为一个周期的运动步距; $T$ 为一个周期的运动时间。

按照初始设计,步距为 $10\text{mm}$ ,一个周期运动时间为 $3.3\text{s}$ ,故机器人的移动速度为 $3\text{mm/s}$ 。

从当前的设计分析得知,目前驱动力 $F$ 裕度比较大,而移动速度比较低,只有 $3\text{mm/s}$ ,因此需要优化,以提高移动速度。从机构分析来看,提高运动速度可以采用如下方法:(1)电机调速控制,增大电机转速,增大步距 $l$ ;(2)增大螺距,或者加工多头螺纹从而增大螺纹导程,增大步距 $l$ ;(3)改进控制顺序,节省辅助工作时间,减小周期 $T$ 。由于改变结构参数同时又会对机器人的牵引力造成影响,故借助ADAMS动力学分析软件进行机器人的运动学与动力学仿真分析,来确定最佳参数。

## 3 基于ADAMS的机器人运动学和动力学仿真

### 3.1 运动学仿真

在保持运动完整的前提下,我们简化了零部件。建立的模型如图6所示。在添加各种约束和驱动之后,进行仿真,可以看出机器人可以顺利通过内径 $\phi 20\text{mm}$ 、曲率半径 $80\text{mm}$ 和内径 $\phi 15\text{mm}$ 、曲率半径 $100\text{mm}$ 的倒U型管道,如图7所示。结论:该机器人可以通过内径 $\phi 15 \sim 20\text{mm}$ ,曲率半径不小于 $80\text{mm}$ 的倒U型管道。

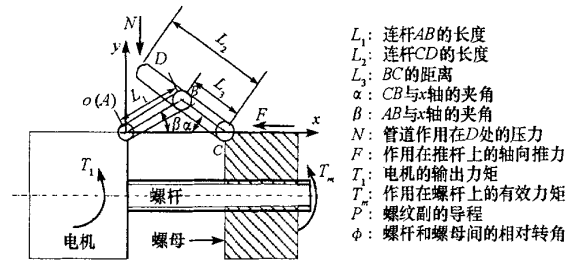


图5 爪部受力分析图

Fig.5 Force analysis on the claw

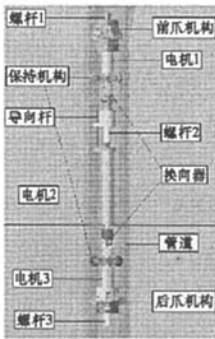


图6 ADAMS 仿真模型

Fig.6 Virtual prototype of the robot

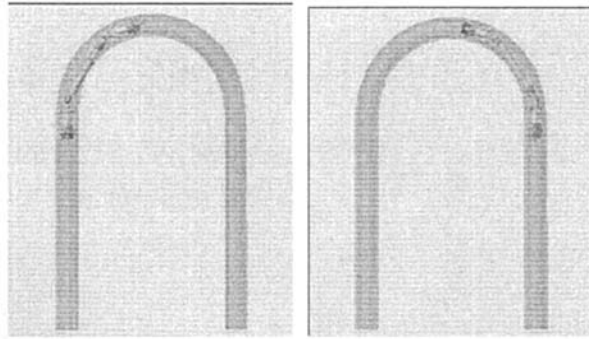


图7 过弯仿真

Fig.7 State of passing elbow pipe

### 3.2 动力学仿真

理论分析表明,在前后支腿支持力足够的情况下,机器人的驱动力与中间螺纹的导程、传动效率、电机转矩等参数有关。仿真以中间螺杆导程  $P$  为设计变量,变化范围为  $0.5 \sim 1\text{mm}$ ,得到如图 8、9 的牵引力  $F$  和移动速度  $v$  与导程  $P$  之间的变化曲线。可见,要同时提高驱动力  $F$  和移动速度  $v$  是相互矛盾的,因此实际中,首先在保证足够大的驱动力情况下,尽量提高移动速度。适当增大导程,可以提高移动速度,但实际中,导程过大会使加工困难,因此综合各种因素,选择导程  $P = 1\text{mm}$ ,由图 8、9 知,保持了较大的牵引力  $F = 28\text{N}$ ,速度  $v = 6\text{mm/s}$ 。

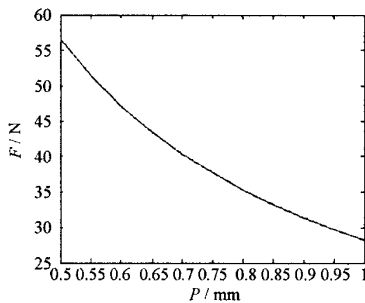
图8 牵引力  $F$  随导程  $P$  变化曲线

Fig.8 Curve of traction force and screw parameter

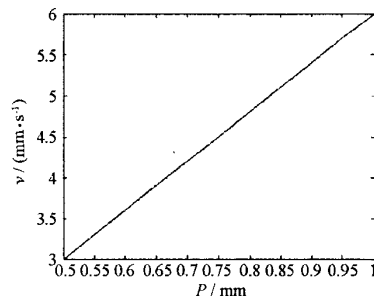
图9 移动速度  $v$  随导程  $P$  变化曲线

Fig.9 Curve of velocity and screw parameter

## 4 总结

本文研究了适用于  $\phi 15 \sim 20\text{mm}$  管道的微小蠕动式机器人,从理论上分析了支腿的受力情况和适应管径变化的力学特征,并计算了机器人的驱动能力和移动速度,利用 ADAMS 软件建立了机器人的虚拟样机,进行运动学和动力学仿真,得到了牵引力和移动速度随机器人结构参数的变化曲线,仿真表明该机器人有较大的牵引力和适宜的移动速度。

## 参考文献:

- [1] Nobuaki K, Takayuki S, Takanari S. In-pipe Wireless Micro-robot[C]//SPIE Conf. on Microrobotics and Microassembly, 1999:166-171.
- [2] Kazuhiro T, Takanari S, Takayuki S, et al. Control Circuit in an In-pipe Wireless Micro Inspection Robot [C]//Intl. Symposium on Micromechatronics and Human Science, 2000:59-64.
- [3] Werner N. A Spider-like Robot that Climbs Vertically in Ducts or Pipes[C]//IEEE/RSJ/GI Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 1994: 1178-1185.
- [4] Anthierens C, Ciftci A, Betemps M. Design of an Electro Pneumatic Micro Robot for in Pipe Inspection[C]//IEEE Intl. Symposium on Industrial Electronics, 1999: 968-978.
- [5] Sun L Z, Zhang Y N, Sun P, et al. Study on Robots with PZT Actuator for Small Pipe[C]//Intl. Symposium on Micro-mechatronics and Human Science, 2001: 149-154.
- [6] 左建勇, 颜因正. 基于蚯蚓原理的多关节蠕动机器人[J]. 机器人, 2004, 26(4): 320-324.
- [7] 程良伦, 杨宜民. 一种新型管道内微机器人的研究[J]. 机器人, 1999, 21(4): 249-255.



