

文章编号: 1001- 2486(2010) 01- 0152- 07

新型微小管道机器人驱动特性分析*

徐从启, 解旭辉, 戴一帆

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 研制了一种具有“大驱动、快速、长距离运动”综合性能的新型微小管道机器人。机器人采用电机驱动蠕动式爬行方案, 主要包括自调节支撑机构、柔性保持机构、软轴驱动机构、卸载机构等, 适用于直径为 15~ 20mm 的微细管道。在介绍了工作原理及机构组成的基础上, 对各机构的力学特性进行了分析。虚拟仿真和样机试验表明, 机器人能顺利通过曲率半径不小于 80mm 的弯管, 移动速度为 8~ 10mm/s, 具有 0~ 90° 爬坡能力, 可双向移动, 其负载能力不小于 10N, 载重自重比可达 6.67:1。

关键词: 微小管道机器人; 自调节机构; 力学特性; 虚拟样机

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Analysis on Driving Characteristics of a Novel Micro In-pipe Robot

XU Cong-qi, XIE Xu-hui, DAI Yi-fan

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

Abstract: A novel micro in-pipe robot, which possesses the advantages of big driving force, fast and long-distance moving ability, is developed. The robot creeps bidirectionally and is driven by motors. It consists of self-regulating mechanism, flexible holding mechanism, flexible shaft driving mechanism and unloading mechanism, which can adapt itself to micro pipelines with diameters ranging from 15 to 20mm. Based on the robot's operating principle and mechanism structure, dynamic characteristics of each mechanism are analyzed. The virtual simulation and prototype experiment results demonstrate that the robot can pass the elbows whose radius of curvature is not less than 80mm, move bidirectionally with a speed of 8-10mm/s, climb the oblique pipes angled 0-90°, and carry a load of at least 10N while the ratio of load to deadload is up to 6.67:1.

Key words: micro in-pipe robot; self-regulating mechanism; dynamic characteristics; virtual prototype

现代工农业生产及日常生活中使用着众多内径为 15~ 20mm 的微细管道, 比如各种动力装置的传热管道。由于结构复杂、内部空间狭小、所处环境有毒有害于人体, 检修和维护十分困难, 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以代替人来工作。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。

国外在微小管道机器人研究方面起步较早, 成果较多。如日本 DENSO 公司研制了一种叠层压电执行器微型管道机器人^[1], 但其驱动力较小、发热大、功耗高, 甚至可能导致狭小空间内因温度过高无法作业; 日本东芝公司研制出适应 1 英寸管道的检测机器人^[2], 由于轮径太小, 越障能力有限, 且结构复杂, 不易进一步小型化; 韩国航空航天大学研制出一种仿蚯蚓蠕动式气驱动微管道机器人^[3], 其最大速度可达 50mm/s, 但带载能力较差, 单次爬行约为 3m, 且只能单向移动。上海大学研制的双压电薄膜微机器人^[4], 速度可达 18mm/s, 但最大负载能力只有 50g; 国防科大研制的蠕动式微小管道机器人^[5-6], 尽管驱动力较大, 但适应管径能力和弯管通过性较差。

本文针对文献[5-6]中原始方案的不足, 提出了改进方案, 并对改进后的机构进行了力学特性分析, 虚拟仿真和样机试验表明, 改进后的方案实现了管道机器人的“微小化、大驱动、快速、长距离运动”的需求。

* 收稿日期: 2009- 07- 08

基金项目: 国家部委资助项目(51318020310)

作者简介: 徐从启(1981-), 男, 博士生。

1 新型微小管道机器人运动原理

图 1(a) 所示为文献[5]所提出的机器人原始方案, 经过虚拟仿真和样机试验发现该方案存在三个不足: (1) 支撑机构完全是刚性结构, 当管径有一定变化时, 可能达不到撑紧管壁的要求; (2) 保持机构在管径变化时不能起到有效的保持作用, 当管径小于保持机构尺寸时, 它就会被“卡住”, 使整个机器人“瘫痪”; (3) 驱动部分尺寸过长, 在过弯时明显与管道发生“干涉”, 致使机器人被“卡死”。

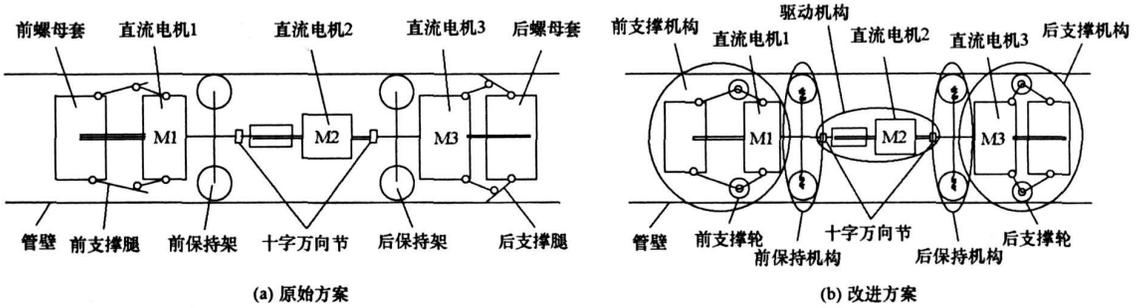


图 1 微小管道机器人系统结构原理图

Fig. 1 System structure principle of the micro in-pipe robot

针对上述不足, 提出了如图 1(b) 所示的改进方案。改进后的机器人主要包括自调节支撑机构、柔性保持机构、软轴驱动机构以及卸载机构等。

2 新型微小管道机器人结构设计

2.1 自调节支撑机构

为解决原始方案中的刚性支撑问题, 设计了如图 2 所示的自调节支撑机构。这种调节是一种硬调节和软调节共同作用的混合调节^[7]。硬调节是主动调节, 由计算机通过程序控制电机正反转时间, 实现大范围的调整; 软调节是被动调节, 由图 2 中的压簧 1 和压簧 2 完成, 实现小范围的调整。硬调节和软调节的协调作用, 使该支撑机构具有更好的径向调节能力, 从而使机器人具有更强的管径适应能力。由于增加了软调节单元, 当管道径向发生微小变化时, 在主动径向调节来不及响应时, 连杆系统可以带动滑块压缩弹簧, 以抵消管径的变化。另外, 增加了支撑轮设计, 这样就避免了原始方案的支撑腿与管壁的直接接触, 不仅增大了与管壁间的摩擦力, 提高了牵引能力, 同时由于支撑轮的塑性变形增大了接触面积, 解决了原始方案点接触的问题, 可以更好地适应复杂的管道环境。支撑轮与销轴间采用胶粘方式固定, 因此工作时, 支撑轮并不产生转动, 它与管壁间产生滑动摩擦而非滚动摩擦。另外, 在滑块上装有微型压力传感器, 可以直接测量在撑紧过程中滑块所受的合力, 通过换算就可以间接得到支撑轮与管壁间的正压力, 这不仅保证了支撑机构以恒定压力撑紧在管壁上, 同时也对电机起过载保护的作用。

2.2 柔性保持机构

为满足管道机器人“形封闭、力封闭”的设计要求, 设计了如图 3 所示的柔性保持机构。其中保持轮轴线始终与管壁母线保持垂直, 工作时, 保持轮沿管壁滚动。当机器人在不同直径的管道内运动时, 压簧的伸长和缩短带动滑块上下滑动, 并通过连杆机构的作用, 保持轮将始终贴紧管壁, 达到“适应不同管径”的目的。这样机器人在管内运动时, 其中心线基本与管道的中心线保持一致, 保证各单元与管壁的夹角在稳定运动的范围内。

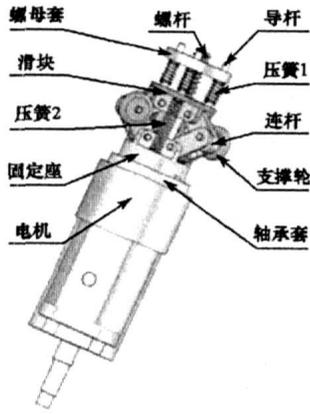


图2 自调节支撑机构

Fig. 2 Self-regulating supporting mechanism

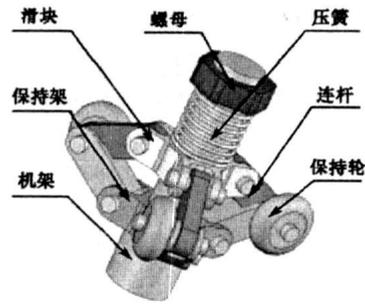


图3 柔性保持机构

Fig. 3 Flexible holding mechanism

2.3 软轴驱动机构

为保证微小管道机器人顺利通过曲率半径不小于 80mm 的弯管, 设计了如图 4 所示的驱动机构。采用了软轴驱动方案, 高速旋转的电机通过软轴传递转矩, 软轴长度为 15mm 左右, 其转矩传递效率可达 95% 以上。软轴的一端通过联轴器与电机输出轴相连, 另一端采用胶粘方式与丝杠连接。

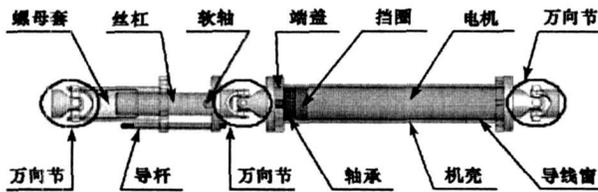


图4 驱动机构

Fig. 4 Driving mechanism

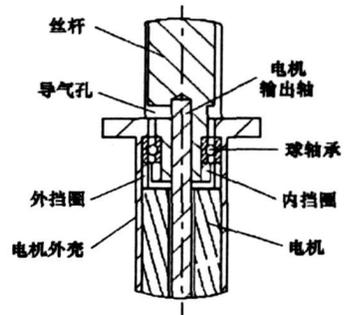


图5 卸载机构

Fig. 5 Unloading mechanism

2.4 卸载机构

由于电机的减速器输出轴不能承受过高的轴向力及径向力, 为此设计了一套卸载保护装置, 如图 5 所示。当输出轴承受轴向载荷时, 力的传递路径如下:

承受压力时: 丝杠—轴承—外挡圈—电机—电机外壳;

承受拉力时: 丝杠—内挡圈—轴承—电机外壳。

3 支撑机构的力学特性分析

考虑支撑机构的周向对称性, 建立支撑机构在张紧过程中的分析模型如图 6 所示, 可得如下几何关系:

$$\begin{cases} R_1 = h + r + l_1 \sin \alpha \\ l_1 \sin \alpha = l_2 \sin \beta \\ x = l_1 \cos \alpha + l_2 \cos \beta \\ \frac{z}{\sin(60^\circ - \Psi)} = \frac{R}{\sin 120^\circ} \\ R_1 \sin 60^\circ = R \sin \Psi \\ a = R \Psi \end{cases} \quad (1)$$

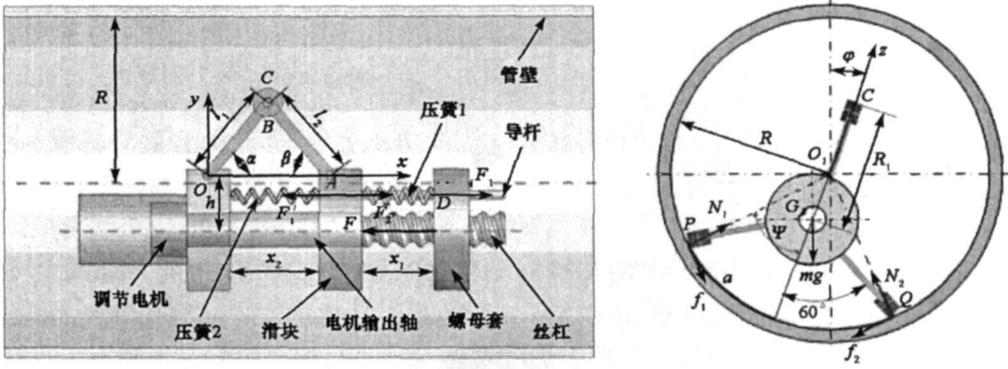


图6 支撑机构受力分析

Fig. 6 Force analysis of the supporting mechanism

其中, x, z 分别为图6中 A, G 两点沿 x, z 方向的坐标; R, R_1, r 分别为管道、支撑机构和支撑轮半径; l_1, l_2 分别对应连杆 OB 和 AB 的长度, h 为滑块上铰链 A 处距离支撑机构中心线的高度; α, β 分别表示连杆 OB, AB 与水平方向的夹角; Ψ 表示支撑轮 P 与管道中心 O_1 连线与 z 轴的夹角, a 是 Ψ 对应的弧长。对上式两边取微分, 整理后得

$$\begin{cases} da = \frac{R \sin 60^\circ}{\sqrt{R^2 - R_1^2 \sin^2 60^\circ}} dR_1 \\ dx = -(R_1 - h - r) \left(\frac{1}{\sqrt{l_1^2 - (R_1 - h - r)^2}} + \frac{1}{\sqrt{l_2^2 - (R_1 - h - r)^2}} \right) dR_1 \\ dx_D = \left(1 + \frac{k_2}{k_1} \right) dx \\ dz = - \left(\frac{R_1 \sin^2 60^\circ}{\sqrt{R^2 - R_1^2 \sin^2 60^\circ}} - \cos 60^\circ \right) dR_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_1, k_2 分别为压簧 1、2 的刚度系数。

由力学平衡和虚位移原理有

$$\begin{cases} \sum N_C \cos \Psi = mg \cos \varphi + \sum f \sin \Psi \\ \sum N_C = N_1 + N_2 \\ \sum f = f_1 + f_2 = \mu \sum N_C \\ (F - 3F_1) dx_D + 3(F_1 - F_2) dx + \sum f da + mg \cos \varphi dz = 0 \end{cases} \quad (3)$$

联立式(2), (3)可得

$$F = \frac{mgk_1 \cos \varphi}{\lambda_2 (k_1 + k_2)} (\lambda_1 \lambda_4 - \lambda_3) + \frac{3F_1 k_2}{k_1 + k_2} + \frac{3F_2 k_1}{k_1 + k_2} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{R \sin 60^\circ}{\sqrt{R^2 - R_1^2 \sin^2 60^\circ}} \\ \lambda_2 = (R_1 - h - r) \left(\frac{1}{\sqrt{l_1^2 - (R_1 - h - r)^2}} + \frac{1}{\sqrt{l_2^2 - (R_1 - h - r)^2}} \right) \\ \lambda_3 = \frac{R_1 \sin^2 60^\circ}{\sqrt{R^2 - R_1^2 \sin^2 60^\circ}} - \cos 60^\circ \\ \lambda_4 = \frac{\mu R}{\sqrt{R^2 - R_1^2 \sin^2 60^\circ} - \mu R_1 \sin 60^\circ} \end{cases} \quad (5)$$

此时需要电机输出的转矩为

$$T = \frac{p}{2\pi\eta} F \quad (6)$$

式(3)~(6)中, μ 为支撑轮与管壁间的横向摩擦系数; T 为调节电机输出转矩, p 为丝杠的螺纹导程, η 为丝杠螺母副的传动效率; φ 表示支撑机构姿态角; F_1 、 F_2 分别表示压簧 1 和压簧 2 的弹力; F 表示调节电机旋转时, 丝杠对螺母套的推力; N_1 、 N_2 分别表示作用在两支支撑轮 P 、 Q 上的正压力, f_1 、 f_2 对应为摩擦力。

为了观察推力 F 和电机输出转矩 T 随 R 和 R_1 的变化关系, 在 $\varphi = 0$ 时, 根据实际设计尺寸对三种管道直径(15mm、18mm、20mm) 进行分析, 结果如图 7 所示。从图中可以看出, 管径越大, 所需推力和电机输出转矩越小, 当管径为 15mm 时, 最大推力为 14.85N, 所需电机输出转矩为 2.364N·mm, 因此, 选用额定转矩为 5.88N·mm 的直流减速电机可以满足要求。

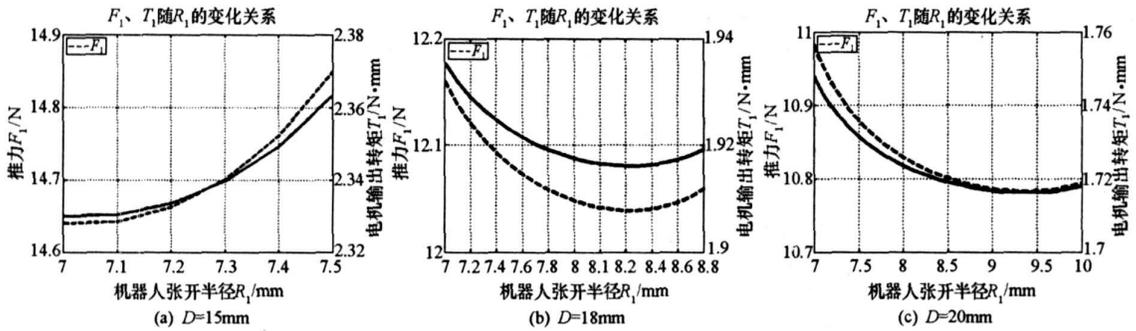


图 7 不同管径下推力 F 和转矩 T 随机器人半径的变化曲线

Fig. 7 Curves of thrust force F and torque T vs. robot radius in different pipe diameter

4 封闭力分析

如图 8 所示, 对保持轮、连杆、滑块、压簧等有:

$$R = h' + S_1 \sin \beta + r', \quad S_1 \sin \beta = S_2 \sin \alpha',$$

$$x = S_1 \cos \beta + S_2 \cos \alpha', \quad y = R - h' \quad (7)$$

$$\frac{1}{3} F' dx + N'_1 dy = 0 \quad (8)$$

式中: S_1 、 S_2 分别为连杆 $A'B'$ 和 OB' 的长度; α' 、 β 分别为连杆 OB' 、 $A'B'$ 与水平方向的夹角; x 、 y 分别为铰链 A' 和接触点 C' 的横纵坐标; r' 为保持轮半径; N'_1 为支撑轮处的封闭力; F' 为压簧弹力。

联立式(7)、(8)可得上支撑轮处的封闭力为

$$N'_1 = \frac{(R - h' - r')}{3} \left[\frac{1}{\sqrt{S_1^2 - (R - h' - r')^2}} + \frac{1}{\sqrt{S_2^2 - (R - h' - r')^2}} \right] F' \quad (9)$$

5 牵引力分析

设驱动电机 M_2 输出转矩为 T_2 , 产生的推力为 F_2 , 保持轮与管壁间的滚动摩擦系数为 f_r , 则微小管道机器人在水平直管内爬行时的牵引力 F_q 可以表示为

$$F_q = F_2 - \frac{f_r}{r} \sum_{i=1}^3 N'_i = \frac{2\pi\eta_0}{p_2} T_2 - \frac{f_r}{r} \sum_{i=1}^3 N'_i \quad (10)$$

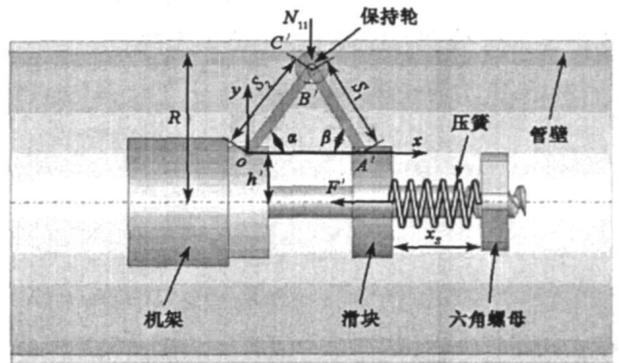


图 8 保持机构受力分析

Fig. 8 Force analysis of the holding mechanism

其中, p_2 为驱动部分丝杠的螺纹导程, η_b 为驱动部分丝杠螺母副的传动效率。

根据实际设计尺寸代入式(10)可求得, 当 $R = 9\text{mm}$ 时, 牵引力 $F_q = 12.76\text{N}$, 同时可验证牵引力是管径的单调递减函数。

6 仿真及试验

为了验证理论分析的正确性及结构改进的合理性, 利用 ADAMS 对改进后的机器人进行虚拟样机仿真, 如图 9 所示。图 9(a) 中左侧为虚拟样机仿真模型, 中间为仿真后得到的前后螺母套质心沿竖直方向的位置变化曲线, 右侧为放大曲线; 图 9(b) 为牵引力测试曲线, 曲线 1、2、3 分别表示机器人在竖直直管向上爬行和在水平直管、竖直直管向下爬行时的牵引力仿真曲线。仿真管道条件如下: 内径为 15mm , 曲率半径为 80mm 的倒“U”型管道。从图中可以看出, 改进后机器人前后螺母套质心沿竖直方向的位置变化曲线较为平滑, 不存在尖峰和凹陷, 这说明机器人能平稳地通过图 9 所示的倒“U”型管道; 机器人速度大大提高(约 9mm/s), 电机功耗也明显降低; 机器人在水平直管内的牵引力可达 14.5N 。

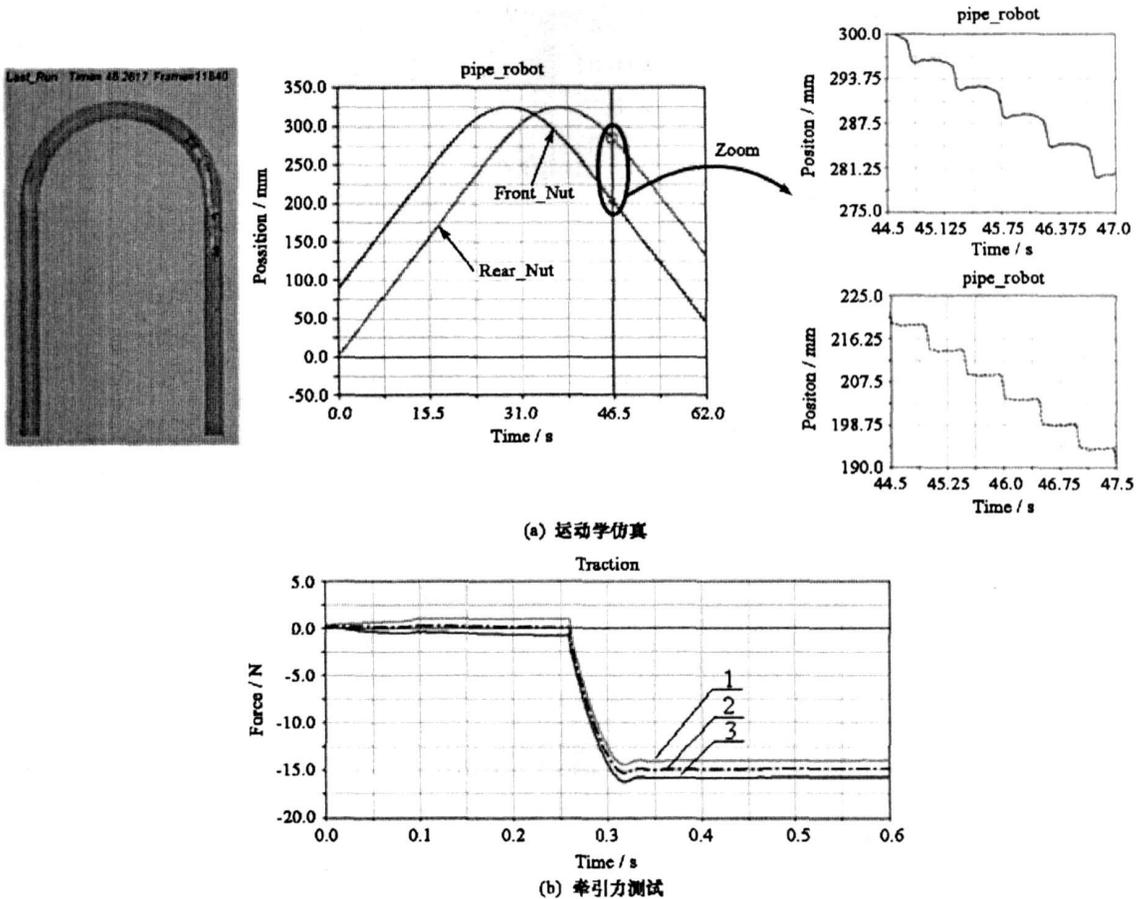


图 9 改进后的微小管道机器人虚拟样机仿真

Fig. 9 Virtual simulation of the improved micro in-pipe robot

为测量机器人牵引力, 设计了如图 10(a) 所示的试验方案, 管道置于水平面内, 从机器人尾部引出一根牵引线提升沙斗。系统通电后, 机器人在管道内平稳爬行, 缓慢增加沙斗内沙子, 直至机器人打滑为止。在天平上称出沙斗的重量, 该重量就是机器人的最大牵引力。该测量值是在忽略线缆重量时测得的, 因此机器人实际的牵引力要大于该测量值。测试结果如图 10(b) 所示, 取均值得机器人的牵引力约为 11.2N , 载重自重比约为 $6.67:1$ 。试验结果略小于仿真结果和理论计算结果, 主要原因是理论仿真时忽略了线缆的拖动阻力和保持轮与管壁间的滚动阻力对机器人的影响。

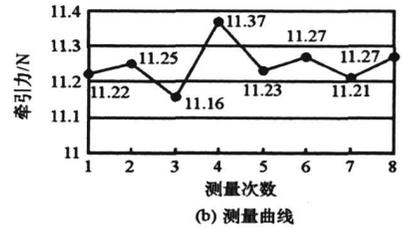
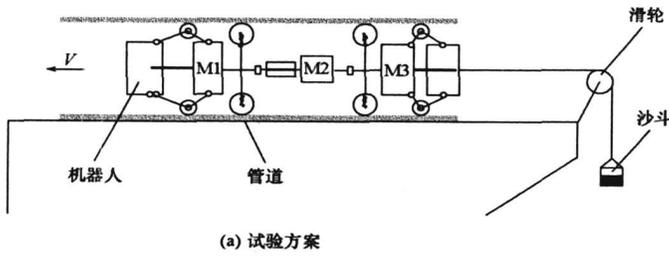
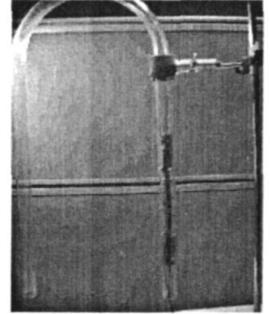
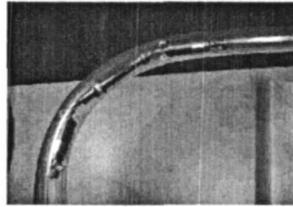


图 10 牵引力测量

Fig. 10 Testing for traction force

另外,对机器人样机进行了爬行试验,如图 11 所示。试验用透明管道尺寸分内径 15mm 和 20mm 两种规格,弯管处曲率半径为 80mm,直管段长 300mm。如图 11(a) 所示,试验表明机器人能顺利通过内径不小于 15mm,曲率半径不小于 80mm 的管道,达到设计要求。图 11(b) 为机器人在竖直接管内爬行的试验照片,试验表明机器人具有 0~ 90° 的爬坡能力,竖直向上爬行时速度约为 8mm/s,向下爬行时速度约为 10mm/s,且可双向移动。



(a) 机器人过弯

(b) 机器人在竖直接管内爬行

7 结论

针对原始方案的不足,本文提出了一种新型微小管道机器人改进方案。经虚拟仿真和样机试验验证,改进后的机器人能平稳运行于直径为 15~ 20mm 的管道,可通过曲率半径不小于 80mm 的弯管,移动速度为 8~ 10mm/s,具有 0~ 90° 爬坡能力,可双向移动,单次行走距离不小于 10m,其负载能力约为 11.2N,载重自重比可达 6.67: 1,达到了管道机器人的“微小化、大驱动、快速、长距离运动”的设计要求。

参考文献:

- [1] Idogaki T, Kanayama H, Ohya N, et al. Characteristics of Piezoelectric Locomotive Mechanism for an In-pipe Micro Inspection Machine[C]//The 6th Int. Symposium on Micro Machine & Human Science, 1995: 193- 198.
- [2] Hayashi I, Iwatsuki N, Iwashina S. The Running Characteristics of a Screw-principle Micro Robot in a Small Bent Pipe[C]//The 6th Int. Symposium on Micro Machine & Human Science, 1995: 225- 228.
- [3] Lim J W, Park H, An J, et al. One Pneumatic Line Based Inchworm-like Micro Robot for Half-inch Pipe Inspection[J]. Mechatronics, 2008, 18: 315- 322.
- [4] 罗怡. 双压电薄膜微小管道机器人的研究[D]. 上海: 上海大学, 2002.
- [5] 解旭辉, 王宏刚, 徐从启. 微小管道机器人机构设计及动力学分析[J]. 国防科技大学学报. 2007, 29(6): 98- 101.
- [6] 解旭辉, 李圣怡, 徐从启, 等. 蠕动式微小管道机器人[P]. 中国, ZL200710035846. 9, 2009.
- [7] 张云伟. 煤气管道检测机器人系统及其运动控制技术[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.

图 11 部分试验照片

Fig. 11 Photos of some experiments