

文章编号 1004-924X(2002)01-0056-05

驱动电压幅值对双压电薄膜管道 微机器人运动的影响

罗 怡, 李朝东, 龚振邦, 孙麟治, 汪勤恂, 孙 萍
(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 研究了一种细小管道内移动微机器人, 它可以搭载摄像机进入 $\varnothing 20\text{mm}$ 的管道内部进行检测作业。微机器人驱动器采用 PZT 双压电薄膜驱动器。介绍了微机器人的结构及运动机理。着重介绍了驱动电压幅值对此类微机器人运动的影响, 通过建模、仿真以及有限元分析, 得到随着驱动电压幅值的增加, 驱动器振幅增加, 微机器人速度增加的结论, 并通过实验验证了此结论, 此结论对提高此类微机器人的工作效率有重要意义。

关键词: 管道微机器人; 压电驱动器; 仿真; 速度; 驱动电压

中图分类号: TP242.3 文献标识码: A

1 引言

现代化的工业设备中, 有许多管径为 $\varnothing 10\sim 20\text{mm}$ 的细小管道。人工检测耗时费力。微机器人可以携带检测或维修装置进入管道进行作业, 这对于避免事故的发生, 提高经济效益有着重要意义。

近年来, 细小管道微机器人的研究已经成为热点。大量文献报道了此类微机器人, 主要可分为以下几类: 螺旋驱动式、电磁式、气动式、SMA 式和压电式。

螺旋驱动的微机器人, 其运动主要依靠倾斜安装的两个摩擦轮在外力的作用下沿管壁产生螺旋运动。它的运动速度可以达到 $34\sim 52\text{mm/s}$, 牵引力为 12N 。但是此种微机器人机构过长, 不利于在曲率半径大的弯曲管道内运动^[1]。电磁驱动的微机器人的本体尺寸为 $\varnothing 15\text{mm} \times 20\text{mm}$, 它在水平或竖直管道内可以 $6\sim 8\text{mm/s}$ 的速度运动。这种驱动方式的微机器人的优点在于驱动力较大, 但运动速度较缓慢^[2]。SMA 的微机器人一个显著优点是具有很高的功重比 (power to

weigh), 并且可以通过机械加工获得任意形状, 但是运动控制较为困难, 由于是在管道这类狭小空间内运动, 加热容易, 冷却困难, 会造成响应时间较长^[3]。

压电驱动器有很高的能量转换效率和响应速度。利用惯性冲击原理运动的层叠型 PZT 微机器人可以在 8mm 的管道内以 6mm/s 的速度运动^[4]。但是它发热严重, 不利于狭小空间内的运动。另一种微机器人利用 PZT 材料制成针形驱动器, 可以在 $\varnothing 25.4\text{mm}$ 的管道内运动^[5]。

本文研究了一种双压电薄膜微机器人, 在不对称周期电压作用下, 它利用惯性冲击原理产生运动, 可以携带 CCD 摄像机进入 $\varnothing 20\text{mm}$ 工业管道内实施检测作业。本文主要讨论了驱动电压幅值对其运动性能的影响。

2 双压电薄膜微机器人的结构与运动机理

双压电薄膜微机器人如图 1 所示。它由双压电薄膜驱动器和两对铜制弹性支撑腿两部分组成。双压电薄膜驱动器包括惯性质量、两片并联

的双压电薄膜和芯杆。微机器人本体尺寸为 $\varphi 16\text{mm} \times 9\text{mm}$, 重 9.5g。在 $\varphi 20\text{mm}$ 管道内的最大运动速度为 18mm/s。

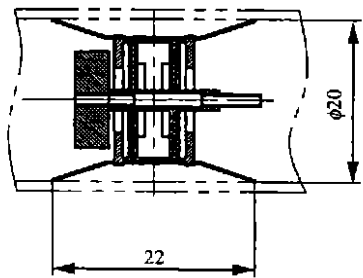
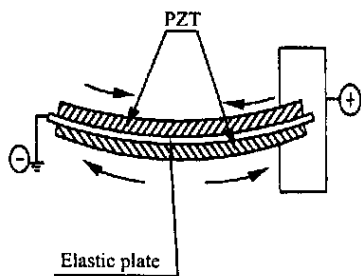


图 1 PZT 双压电薄膜细小管道机器人的结构

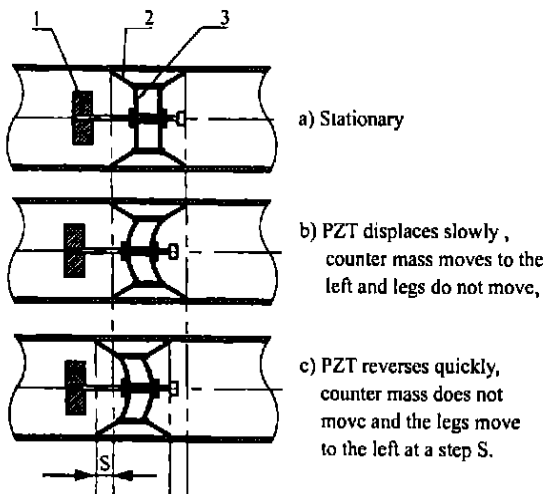
Fig. 1 Structure of the bimorph PZT micro in-pipe robot.

图 2(a) 描述了双压电薄膜的变形。它由弹性材料铜基材和压电材料 PZT 组成。施加适当的驱



(a) PZT 双压电薄膜驱动器的弯曲类型

(a) Bending type of the bimorph PZT actuator.



1-counter mass, 2-legs, 3-PZT element

(b) 微机器人的惯性冲击运动原理

(b) Impact moving principle of the micro robot.

图 2 PZT 双压电薄膜机器人的运动机理

Fig. 2 Moving principle of the bimorph PZT robot.

动电压, 由于压电逆效应, 上层压电材料 - PZT 收缩, 而下层的 PZT 膨胀, 这就使得双压电薄膜产生弯曲。弯曲效应会放大压电材料的变形量。

惯性冲击微机器人依靠惯性质量的变加速运动产生的惯性力和支撑腿与管壁之间的摩擦力的共同作用产生运动。其驱动波形是不对称的周期电压。定性描述微机器人的运动机理, 如图 2(b) 所示。初始状态, 微机器人静止于管内。在施加缓慢变化的驱动电压时, 双压电薄膜缓慢变形, 芯杆带动惯性质量向左运动产生惯性力, 由于此时支撑腿与管壁之间的最大静摩擦力大于惯性力, 所以微机器人与管道没有相对运动。在电压快速回复阶段, 双压电薄膜快速变形, 芯杆带动惯性质量向右运动产生惯性力, 此时支撑腿与管壁之间的最大静摩擦力小于惯性力, 微机器人与管道产生相对运动, 向左滑动 S 距离。以一定的频率重复此过程, 微机器人在管内产生稳定运动。施加的电压反向变化, 微机器人实现反向运动。

3 驱动电压幅值对微机器人速度的影响

周期性不对称电压的作用使得双压电薄膜通过逆压电效应产生变形, 利用惯性冲击原理, 微机器人产生运动。

由参考文献 [6] 知, 双压电薄膜的变形量与施加的电压幅值成正比。

$$\Delta x \propto d_{31} V \left(\frac{l}{t} \right)^2, \quad (1)$$

式中: Δx : 双压电薄膜的变形量

V : 外加电压幅值

d_{31} : 压电常数

l : 压电薄膜长

t : 压电薄膜厚度

因此, 驱动电压幅值必定对双压电薄膜微机器人的运动产生重大影响。

3.1 驱动电压幅值对双压电薄膜微机器人速度的影响

双压电薄膜驱动器包括惯性质量、两片并联的双压电薄膜和芯杆。惯性质量的尺寸为 $\varphi 12\text{mm} \times 4\text{mm}$, 芯杆的尺寸为 $\varphi 1.5\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。双压电薄膜的铜基材尺寸为 $\varphi 15\text{mm} \times 0.12\text{mm}$, PZT 薄膜的尺寸为 $\varphi 1.3\text{mm} \times 0.18\text{mm}$ 。极化方

向相同的 PZT 薄膜利用环氧树脂同心烧结在铜基材两侧。

双压电薄膜微机器人驱动器的有限元模型如图 3 所示。由于 PZT 是机电耦合材料,选择四面体八节点的 SOLID 5 单元划分网格,其有限元方



图 3 驱动器的有限元模型

Fig. 3 FE model for actuators.

程为:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}\} \\ \{\ddot{v}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [c] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}\} \\ \{\dot{v}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^Z] \\ [K^Z]^T & -[K^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{L\} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

其中: $[M]$: 质量矩阵

$[c]$: 阻尼矩阵

$[K]$: 刚度矩阵

$[K^Z]$: 机电耦合矩阵, 由压电常数矩阵经变换得到

$[K^d]$: 介电传导率, 由介电常数矩阵经变换得到

$\{u\}$: 位移矢量

$\{v\}$: 节点电势矢量

$\{F\}$: 结构载荷矢量, 包括节点力, 表面力, 体积力

$\{L\}$: 施加的节点电载荷

对其进行有限元分析, 得到图 4 所示结果。

可以看出, 驱动器的振幅和驱动电压幅值成正比。

双压电薄膜微机器人可以简化为图 5 所示的振动模型, 考虑到惯性质量的运动与机器人本体的运动相互独立, 双压电薄膜是介于两者之间的

激振源, 忽略阻尼的作用, 将芯杆看作弹性件 K , (双压电薄膜的挠曲刚度也串联在其中), 将惯性质量块缩聚为集中质量 m_1 。将其它质量都缩聚为 m_2 , 并代表机器人本体的运动。

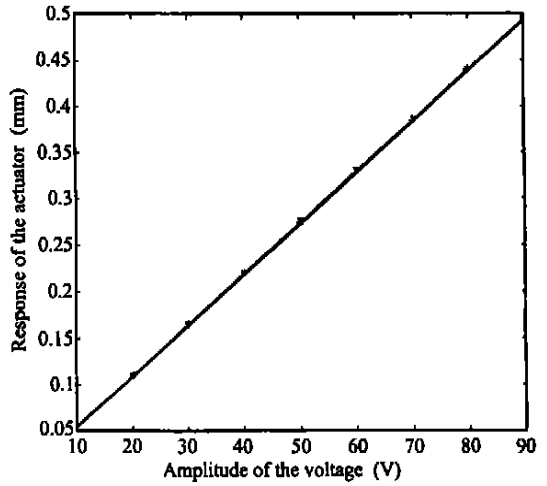


图 4 有限元分析结果

Fig. 4 FE results.

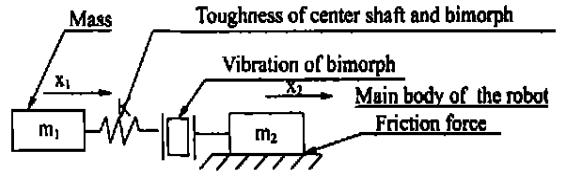


图 5 微机器人的振动模型

Fig. 5 Vibration model of the micro robot.

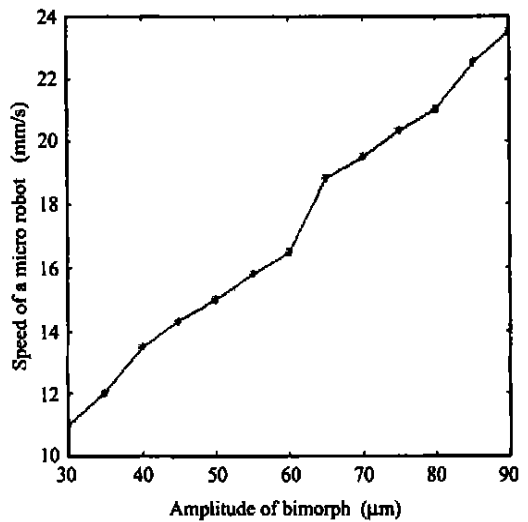


图 6 双压电薄膜振幅对微机器人速度的影响

Fig. 6 Influence of bimorph amplitude on the speed of a micro robot.

建立微机器人的振动方程进行动力学仿真, 振动方程为式 (3), 利用它仿真出的薄膜振幅和微机器人速度的关系如图 6 所示。

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c[\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}(t)] + \\ K[x_1 - x_2 - x(t)] = 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 - c[\dot{x}_1 - \dot{x}_2 - \dot{x}(t)] - \\ K[x_1 - x_2 - x(t)] = F(t), \quad (3) \end{aligned}$$

其中:

m_1, m_2 : 分别为微机器人的惯性质量和本体质量(微机器人总质量除去惯性质量部分);

x_1, x_2 : 分别为微机器人的惯性质量和本体质量的位移;

c : 阻尼;

K : 微机器人等效刚度;

$x(t)$: 薄膜随时间的振动规律, 是相对于微机器人本体的位移;

$F(t)$: 摩擦力。视微机器人的运动状况而定, 未运动时是随时间变化的静摩擦力, 超过最大静摩擦力后是动摩擦力。

由图 6 知随着双压电薄膜振幅的增加, 微机器人的速度增加。结合有限元分析的结果知, 随着驱动电压幅值的增加, 微机器人速度增加。

3.2 实验

微机器人驱动器的振幅与驱动电压成正比, 因此后者必定对微机器人速度有较大影响。为了便于观察, 微机器人在玻璃管内运动。信号发生器产生 20% 占空比的矩形脉冲电压, 玻璃管标有刻度, 利用秒表对微机器人测速, 得到如图 7 所示结果。

由图 7 知, 随着驱动电压幅值增加, 微机器人速度有显著增加。

实验结果验证了 3.1 分析的结果。

参考文献:

- [1] Toshiaki Y. Screw principle micro robot passing steps in a small pipe[A]. *Proceedings of the 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*[C]. Japan: 1999. 149- 152.
- [2] Sun L, Sun P, Qin X J. Study on micro robot in small pipe[A]. *International Conference on Control* 98[C]. 1998. 1212 - 1217.
- [3] Anthierens C. Design of an electro pneumatic micro robot for in- pipe inspection[A]. *ICRA M' 99*[C]. 1999. 125- 130.
- [4] Takaharu Idogaki. Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in- pipe micro inspection machine[A]. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*[C]. Japan, 1995. 193- 198.
- [5] Toshiyuki Matsuoka. Improvement of micro mobile machine with piezoelectric driving force actuator[A]. *Proceedings of*

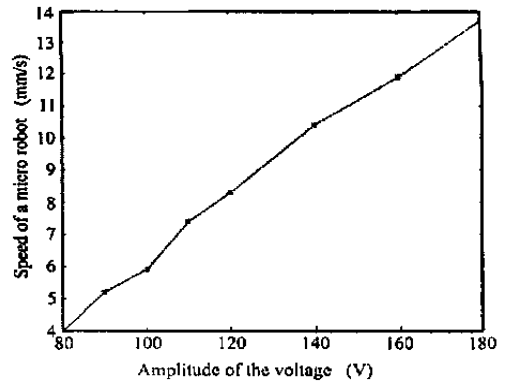


图 7 驱动电压幅值对微机器人速度的影响

Fig. 7 Influence of amplitude of driving voltage on the speed of a micro robot.

4 结 论

本文介绍了一种新型管内移动微机器人- 双压电薄膜微机器人。着重研究了驱动电压幅值对双压电薄膜微机器人运动的影响。利用有限元分析的方法, 得到如图 4 所示结果, 从图上可以看出, 随着驱动电压幅值的增加, 微机器人驱动器的振幅线性增加。对微机器人进行动力学仿真, 得到如图 6 所示结果, 随着驱动电压幅值的增加, 微机器人的速度基本呈线性增加。对微机器人进行测速实验, 得到如图 7 所示结果, 证明了上述结论。因此可以通过提高驱动电压幅值提高微机器人速度。

由参考文献[7]知, 微机器人的功耗与微机器人的驱动电压幅值的平方成正比, 随着驱动电压幅值的增加, 微机器人的功耗迅速增加; 另一方面, 压电材料有其额定工作电压, 过高会导致其被击穿。因此微机器人工作电压幅值不能过高。综合考虑后, 目前本微机器人实验的工作电压幅值选择为 70~100V, 可以很好地满足检测效率和安全工作的要求。

the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science[C]. Japan, 1995. 211– 217.

[6] 叶至碧. 压电陶瓷驱动器[J]. 电子元件与材料, 1989, 18(4): 1_6.

[7] 罗怡. 双压电薄膜微机器人的功耗及速度的影响因素[J]. 机电一体化, 2000, 6(4): 35_39.

Effect of the voltage amplitude on moving performance of PZT in_pipe bimorph micro robot

LUO Yi, LI Chao_dong, GONG Zhen_bang, SUN Lin_zhi, WANG Qin_que, SUN Ping

(*School of Mechatronics and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

Abstract: A micro robot carrying a CCD camera for inspecting the inner wall of a small pipe has been developed. Its actuator is composed of a PZT bimorph driver and two pairs of brass elastic supporting legs. The structure and the moving principle of the robot are studied, and the influence of the voltage is analyzed in particular. According to the simulation and FE analysis, it is concluded that with the increase of the voltage, the amplitude of the actuator will increase as well as the speed of the robot. Experiments have been carried out to prove the conclusion, which is important in improving the inspection efficiency of the micro robot.

Key words: in_pipe micro robots; piezoelectric actuators; simulation; speed; driving voltage

作者简介: 罗怡(1973-), 女, 安徽合肥人, 博士, 讲师, 研究方向: 微机器人及微机械。