



# 压电双层膜驱动管内移动微小型机器人的研究

刘品宽, 温志杰, 孙立宁

上海交通大学机械与动力工程学院, 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240;

哈尔滨工业大学机器人研究所, 哈尔滨 150001

E-mail: [pkliu@sjtu.edu.cn](mailto:pkliu@sjtu.edu.cn)

2008-09-10 收稿, 2009-03-13 接受

国家自然科学基金(批准号: 50675132)、国家高科技研究发展计划(编号: 2006AA4Z334)和上海科技委员会(编号: 07PJ14051, 071111008)资助项目

**摘要** 提出了一种新型管内移动微小型机器人, 采用压电双层膜驱动器和惯性冲击式原理(IDM), 实现在直径为  $\phi 16\sim 18$  mm 的直管内的稳定运动. 对惯性冲击原理进行了理论分析和动态仿真, 通过实验, 验证了微小型机器人的运动原理和运动能力. 实验结果表明, 在峰值为 50 V 和频率为 1100 Hz 的锯齿波电压驱动下, 该微小型机器人的直线运动速率可以达到 3.5 mm/s. 理论分析与实验结果验证了惯性冲击原理在本设计中的可行性和有效性, 并为管内移动微小型机器人的优化设计提供了理论依据.

**关键词**

压电双层膜

管内移动微小型机器人

惯性冲击原理

工业界和临床实验医学领域存在大量的细小管道, 如冷凝管、血管以及人体肠道等管状结构<sup>[1~3]</sup>, 此类管状结构大都具有复杂的外部几何形状, 内表面容易损伤, 因此对此类管道进行探测和维护等操作比较困难<sup>[4,5]</sup>. 另外, 此类管状结构长度较长, 内径相对微小(毫米级甚至更小), 这更增加了对其进行探测和维护的难度. 因此, 采用新的原理和方法对复杂微小管道的探测和维护日益成为众多学者关注的焦点.

有许多研究将传感器置于管道内部来监测管道的内部环境. 美国的Gianchandani教授等人研制出了一种置于静脉血管内的微机电(MEMS)传感器<sup>[6]</sup>, 用于监测血液循环, 当血栓形成时, 传感器能检测到相应部位的血压有明显升高, 并将检测到的血压信号通过无线传输的方式传送到医疗中心. 此外, 在煤气管道等内部, 也可以通过放置传感器、微型摄像头等方法对该管道内部进行探测. 然而, 以上方法只将传感器固定在管道内某个特定的位置, 并不能全面地监测管道的整个内部环境. 因此, 目前迫切需要开发能携带检测与作业工具的新型管内移动微小型机器

人, 使其能在管道内部进行稳定、精确、高效的运动, 同时携带作业工具与检测仪器, 实现对管道内部的全面探测.

意大利的Quirini等研制了一种用于检测人体肠道的微小型机器人<sup>[1]</sup>. 该机器人采用微型无刷电机作为驱动器来实现精密直线运动. 整个运动系统置于一个胶囊内, 其包括机器人本体、4个弹性腿以及摄像头. 实验和测试表明, 该机器人可以在肠道复杂的流体环境中稳定运动, 运动速度值可达 10~40 mm/min. Hayashi等设计了一种基于螺旋理论的管内移动机器人<sup>[3]</sup>, 其包括机器人本体和两个橡胶轮. 两个橡胶轮的中心线与机器人本体的轴线相交成一定的偏角, 当机器人本体在电机的驱动下, 两个橡胶轮开始做旋转运动, 由于橡胶轮与机器人本体之间存在侧偏角, 使得机器人在管内以螺旋轨迹的形式前进与后退. 利用形状记忆合金(SMA)作为驱动器, 或采用尺蠖运动原理实现管内机器人的运动也有类似报道<sup>[7]</sup>. 以上原理能够达到稳定的运动效果, 但机器人的结构过于复杂, 运动效率和精度也需要进一步提高.

**引用格式:** 刘品宽, 温志杰, 孙立宁. 压电双层膜驱动管内移动微小型机器人的研究. 科学通报, 2009, 54: 2257~2263

Liu P K, Wen Z J, Sun L N. An in-pipe micro robot actuated by piezoelectric bimorphs. Chinese Sci Bull, 2009, 54: 2134—2142, doi: 10.1007/s11434-009-0257-5

本文提出了一种压电双层膜结构驱动的管内移动机器人。压电晶体作为一种智能材料广泛应用于工业界,如用于制作压电传感器和压电驱动器。压电晶体在外电场作用下产生变形(逆压电效应);相反,压电晶体在机械力作用下,晶体表面将产生极化电荷(正压电效应)。有大量研究报道有关压电效应的静态、动态性能和相关理论分析等方面的研究<sup>[8~10]</sup>。由于压电驱动器具有高频响和高精度等优点,本设计采用基于压电双层膜结构的压电驱动器作为管内机器人的驱动主体。

本文所设计的管内微小型机器人主要包括两个完全相同的压电双层膜和一个惯性质量块,通过中心轴串联组成机器人本体。当驱动电压作用于压电双层膜时,双层膜将产生弯曲变形,利用惯性冲击力将其弯曲变形转化为机器人的直线运动。本文在理论分析的基础上,采用数值计算方法对系统的动态性能进行仿真,并通过实验对机器人的运动能力进行测试。

## 1 原型系统和运动机理

### 1.1 原型系统设计

管内移动微小型机器人的基本结构如图 1 所示。

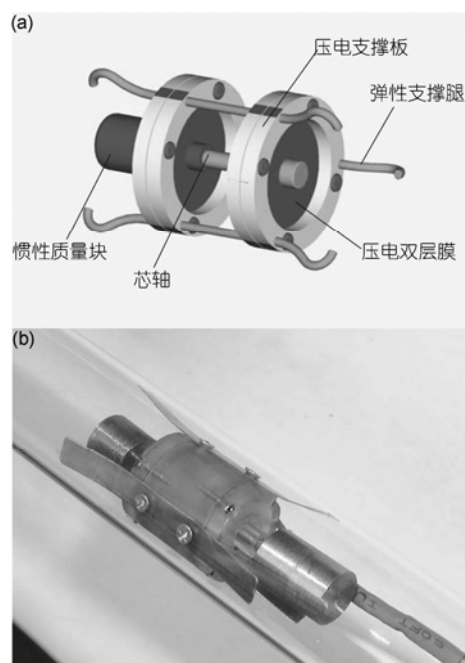


图 1 管内移动微小型机器人

(a) 机器人基本结构示意图; (b) 原型系统实物照片

该机器人包括:两套压电双层膜,一个惯性质量块,一个中心轴和三个铜质弹性支撑腿。支撑腿呈  $120^\circ$  均匀分布,并固定在机器人本体周围。驱动器通过细导线与外部的驱动电源连接。

图 2 所示为一个压电双层膜的基本结构和工作原理示意图。压电双层膜是由两层性质完全相同,极化方向也相同的圆形压电薄膜和一个铜质的圆形薄板粘合而成。驱动电压同时施加于双层膜的上、下电极,中间层接地。上下两压电膜极化方向一致而电压的施加方向相反,当其中一层沿直径方向伸张,另一层沿直径方向收缩,从而产生双层膜整体的弯曲变形。由于双层膜边界固定,最大的位移量产生于双层膜的中心。压电双层膜采用 PZT-4A 材料,其结构尺寸等参数如表 1 所示。静态分析和实验测试结果表明,当压电双层膜圆周边缘处于简支约束条件下时,30 V 驱动电压可产生  $19.7 \mu\text{m}$  的位移。

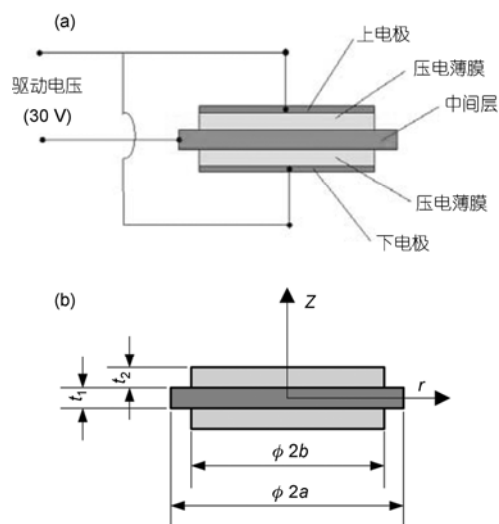


图 2 压电双层膜结构与组成

(a) 结构及工作原理示意图; (b) 尺寸标示和坐标系。  $t_1, t_2, a, b$  为压电膜金属层、压电膜的厚度,金属层的半径以及压电膜的半径

### 1.2 惯性冲击原理(IDM)

智能材料驱动器,如压电陶瓷驱动器,形状记忆合金<sup>[7]</sup>等具有较高的位移分辨率,但其运动范围有限。针对智能材料驱动器的小运动行程的问题,出现许多驱动方法,如惯性冲击式原理和尺蠖运动原理<sup>[11]</sup>等。形状记忆合金作为驱动器,系统的响应速度较低,对温度也较敏感;利用尺蠖运动原理来实现大行程连续运动时,其实现机构复杂,制造成本较高<sup>[12]</sup>,不仅增大研制的难度,也限制其在工业界的广泛应用。

采用惯性冲击原理,驱动器能实现较大的运动范围,且机构简单,易于实现.本研究采用惯性冲击原理作为驱动方法<sup>[13-16]</sup>,其工作原理和模型简化示意如图3所示.

在图3中,惯性冲击系统由三部分组成:运动主体、压电驱动器和惯性质量块.驱动电压通常为锯齿波.惯性冲击原理的工作过程包括三个基本步骤:(1)初始状态.施加一定的预压力于运动主体上,运动主体处于原始状态,驱动电压为0,压电陶瓷驱动器没有位移输出;(2)驱动器缓慢伸展状态.驱动电压逐步上升( $a \rightarrow b$ ),压电驱动器逐渐伸长,产生一个惯性力 $F_I$ ,此时 $F_f > F_I$ ,运动主体保持静止,当电压上升至最高时(点 $b$ ),驱动器的输出位移最大;(3)驱动器快速收缩状态.驱动电压快速减小到0( $b \rightarrow c$ )产生一个惯性收缩力 $F_I$ ,此时 $F_I \gg F_f$ ,运动主体向前移动.重复步骤(1)至(3),整个运动主体向前连续运动.同时,通过改变驱动电压幅值、频率或者锯齿波的形态可以控制其单位步长、运动速度以及运动方向.在本设计中,压电双层膜是作为驱动器,提供惯性力 $F_I$ ,摩擦力 $F_f$ 则产生于弹性腿和管内壁的接触部位.摩擦力在惯性冲击过程的实现中起着十分重要的作用.在1.3节中将对其进行介绍与讨论.

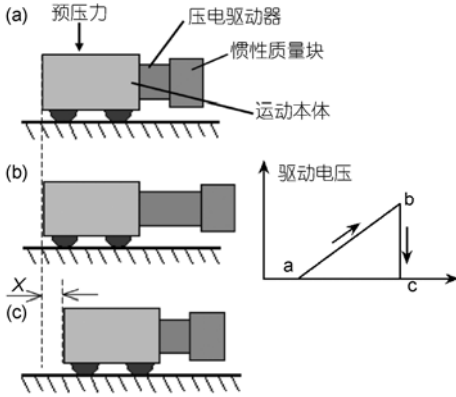


图3 惯性冲击原理

(a) 初始状态,驱动器处于原始位置.驱动电压在 $a$ 点;(b) 驱动器缓慢伸展状态.驱动电压逐渐上升至 $b$ 点;(c) 驱动器快速收缩状态.驱动电压快速下降至 $c$ 点,产生惯性冲击作用.左图为运动主体和驱动器的运动状态,右图为驱动电压曲线

### 1.3 摩擦力模型

摩擦涉及静摩擦、黏滞摩擦、摩擦记忆和迟滞等复杂的物理现象<sup>[17,18]</sup>.本研究拟采用静摩擦模型<sup>[19]</sup>来表达机器人支撑腿和管壁之间产生黏滑运动

(stick-slip)时的摩擦系数.为满足数值计算,将其摩擦系数表示为随机器人本体的运动速率 $|\dot{x}_t|$ 变化的连续函数形式<sup>[19]</sup>:

$$\mu(|\dot{x}_t|) = \mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp(-d_c |\dot{x}_t|), \quad (1)$$

其中 $\mu$ 是黏滑运动摩擦系数, $\mu_s$ 是静摩擦系数, $\mu_k$ 是动摩擦系数, $\dot{x}_t$ 是机器人本体的运动速率, $d_c$ 是衰减系数,其值可以通过如下表达式获得.

$$d_c = -\frac{1}{\dot{x}_{t1}} \cdot \ln\left(\frac{\mu_1 - \mu_k}{\mu_s - \mu_k}\right), \quad (2)$$

其中 $\mu_1$ 是在 $\mu_s$ 与 $\mu_k$ 之间的一个与速率 $\dot{x}_{t1}$ (参考速率)相对应的摩擦系数,由实验测试确定.黏滑运动的摩擦系数曲线如图4所示.从图中可以看出,当摩擦系数 $\mu$ 达到静摩擦系数的最大值时,机器人本体的滑动速率接近零,此时其处于“黏滞”状态;而当滑动速率增大时,摩擦系数 $\mu$ 达到趋向动摩擦系数 $\mu_k$ ,此时机器人本体处于“滑动”状态.摩擦力大小最终可表示为:

$$F_f = [\mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp(-d_c |\dot{x}_t|)] F_p \operatorname{sgn}(\dot{x}_t), \quad (3)$$

其中 $F_p$ 为作用于机器人本体上的预压力, $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.

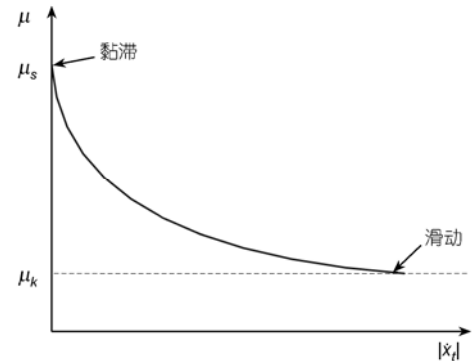


图4 黏滑运动摩擦系数曲线

## 2 动态分析和仿真

### 2.1 理论分析

采用质量-弹簧-阻尼系统作为机器人的等效物理模型,如图5所示.

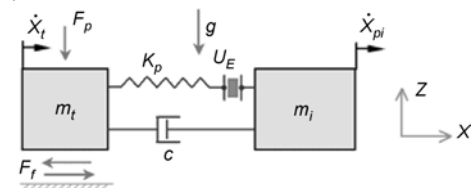


图5 惯性冲击原理分析模型

在图 5 中, 机器人系统沿  $x$  方向运动. 其中  $m_t$  是运动主体的质量,  $m_i$  为惯性质量块的质量,  $\dot{x}_t$ ,  $\dot{x}_{pi}$  分别表示运动主体和惯性质量块的运动速率,  $C$  为压电膜的阻尼系数,  $K_p$  为等效刚度,  $F_p$  和  $F_f$  分别表示预压力和摩擦力,  $U_E$  为压电双层膜驱动器的电势能,  $g$  为重力加速度.

根据图 5 所提出的等效模型, 采用拉格朗日方法推导机器人系统的动力学方程:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k \quad (k=1, 2, \dots, n), \quad (4)$$

其中  $L$  为拉格朗日函数,  $Q_k$  为广义非有势力(如阻力、摩擦力),  $q_k$  为广义位移,  $\dot{q}_k$  为广义速度. 拉格朗日函数  $L$  可以表达成:

$$L = T - U + U_E, \quad (5)$$

其中  $T$  是系统的总动能,  $U$  是总势能,  $U_E$  为电势能,  $T$ ,  $U$  和  $U_E$  分别为

$$T = \frac{1}{2} m_t \dot{x}_t^2 + \frac{1}{2} m_i \dot{x}_{pi}^2, \quad (6)$$

$$U = \frac{1}{2} K_p (x_{pi} - x_t)^2, \quad (7)$$

$$U_E = y_{11} x_e^2 - y_{12} x_e w, \quad (8)$$

其中  $w$  是双层压电膜的沿轴线方向的变形, 满足  $w = (x_{pi} - x_t)$ ,  $x_e$  为压电双层膜的驱动电压,  $y_{11}$ ,  $y_{12}$  是与压电材料相关的系数, 由材料参数决定.

将方程(6)~(8)代入(5)式中, 拉格朗日函数可写成如下形式:

$$L = \frac{1}{2} m_t \dot{x}_t^2 + \frac{1}{2} m_i \dot{x}_{pi}^2 - \frac{1}{2} K_p (x_{pi} - x_t)^2 + y_{11} x_e^2 - y_{12} x_e (x_{pi} - x_t), \quad (9)$$

将方程(9)代入(4)式中, 得到机器人系统的运动微分方程:

$$\begin{cases} m_t \ddot{x}_t - K_p (x_{pi} - x_t) - y_{12} x_e = F_f + C(\dot{x}_{pi} - \dot{x}_t) \\ m_i \ddot{x}_{pi} + K_p (x_{pi} - x_t) + y_{12} x_e = -C(\dot{x}_{pi} - \dot{x}_t) \end{cases} \quad (10)$$

将方程(3)代入(10)式中, 并将运动方程表示成状态空间方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases}, \quad (11)$$

其中  $\mathbf{X} = \{x_t, \dot{x}_t, x_{pi}, \dot{x}_{pi}\}^T$ ,  $\mathbf{u} = \{\mu(\dot{x}_t), x_e\}^T$ ,  $\mathbf{C}$  是单位矩阵,  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$  分别为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{K_p}{m_t} & -\frac{C}{m_t} & \frac{K_p}{m_t} & \frac{C}{m_t} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_p}{m_i} & \frac{C}{m_i} & -\frac{K_p}{m_i} & -\frac{C}{m_i} \end{bmatrix}_{4 \times 4}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{F_p}{m_t} & \frac{y_{12}}{m_t} \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{y_{12}}{m_i} \end{bmatrix}_{4 \times 2}, \quad (12)$$

$\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  矩阵相应的部分参数列于表 1.

表 1 管内机器人物理参数表

| 参数                                                   | 数值      |
|------------------------------------------------------|---------|
| $a/\text{mm}$                                        | 6       |
| $b/\text{mm}$                                        | 5       |
| $t_1/\text{mm}$                                      | 0.152   |
| $t_2/\text{mm}$                                      | 0.18    |
| $m_i/\text{kg}$                                      | 0.00314 |
| $m_t/\text{kg}$                                      | 0.00252 |
| $C/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$                    | 0.3     |
| $d_c/\text{s} \cdot \text{s}^{-1}$                   | 10      |
| $\mu_s$                                              | 0.4     |
| $\mu_k$                                              | 0.2     |
| $F_p/\text{N}$                                       | 0.3     |
| $K_p/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$                   | 120000  |
| $y_{12}/\text{s} \cdot \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ | 0.02    |

## 2.2 仿真

采用 Matlab 软件中的动态系统仿真工具 (Simulink), 建立机器人动力学系统的仿真模型, 如图 6 所示. 驱动电压的幅值和频率分别选定为 30 V 和 3333 Hz. 通过仿真进一步定性考察惯性冲击原理的工作过程. 因此, 仿真采用的电压幅值和频率是初步指定的值, 机器人实际工作的最佳幅值和频率在后续实验过程中通过实验测试与分析获得. 基于龙格-库塔(Runge-Kutta)数值算法对其运动方程(11)进行求解, 求解初始条件:  $x_t = 0, \dot{x}_t = 0$ ;  $x_{pi} = 0, \dot{x}_{pi} = 0$ , 迭代精度为  $1 \times 10^{-6}$ , 仿真时间为 0~1 ms. 计算结果如图 7 所示.

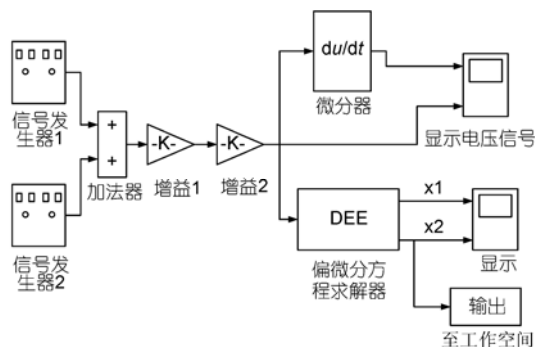


图 6 机器人模型仿真分析原理框图

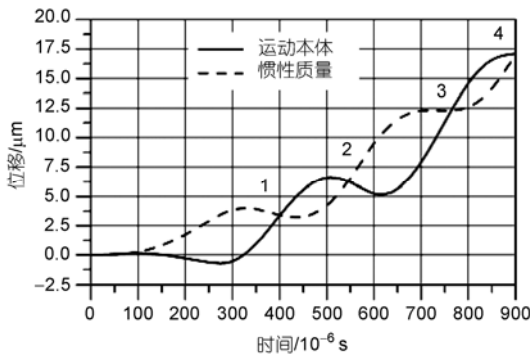


图7 运动主体和惯性质量块的位移曲线

在运动过程中,点 1,2,3,4 处双层压电膜的输出位移为 0,此时运动主体和惯性质量块具有相同位移。

仿真结果得到了惯性冲击过程中运动主体和惯性质量块的位移。在初始阶段,当压电双层膜产生弯曲变形时,惯性质量块向前运动而运动主体保持静止甚至向后运动;当电压由峰值迅速回落时,惯性质量块随压电驱动器的收缩而向后运动,而运动主体快速向前运动。在点 1,惯性质量块和运动主体达到同样的位移,表示压电驱动器的变形量恢复为 0。但由于弹性腿的弹性以及系统整体的惯性,运动主体保持向前运动而惯性质量块继续向后运动,如点 1-2 过程所示。在点 2,两者再次达到同样的位移,表示惯性冲击过程一个周期的结束。点 2~4 的过程与初始位置到点 2 的过程相似。

通过 Matlab 求解,定性考察惯性冲击的运动过程,得到了机器人速度曲线。由于摩擦系数、驱动电压以及弹性腿的刚度等参数的选取并不十分精确,

因此数值仿真存在一定误差。

采用有限元分析方法,考虑机器人本体和支撑腿的弹性变形,建立机器人的有限元模型。采用有限元瞬态分析方法,分析管内机器人在一个周期中的运动过程,分析结果如图 8 所示。分析结果也验证惯性冲击式原理的有效性。

### 3 实验

在理论分析和有限元分析基础上,研制了管内移动微小型机器人如图 1(b)所示。驱动电压由信号发生器产生,其幅值为 0~50 V,频率为 0~3500 Hz。同时,搭建了实验测试平台,其结构示意图如图 9。图 10 所示为实验平台照片。通过实验测试,进一步分析机器人的运动能力(运动速率、驱动力和驱动电压的幅值、频率之间的关系)。

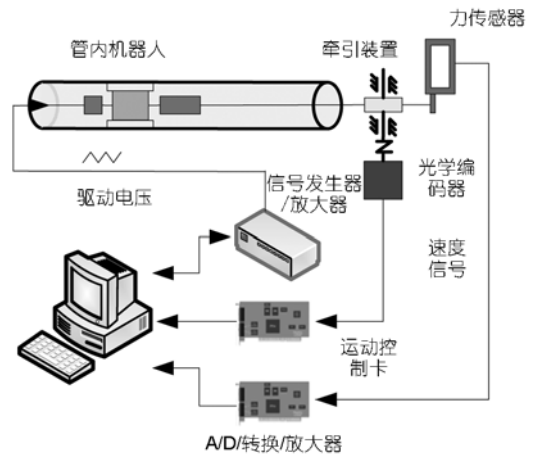


图9 实验平台组成示意图

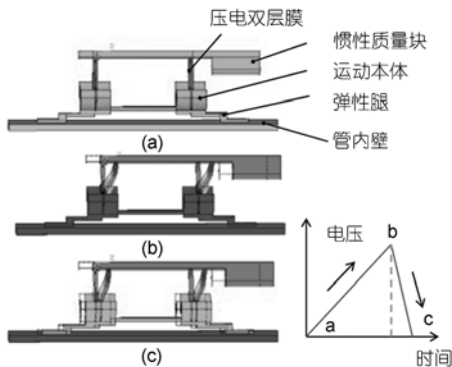


图8 惯性冲击原理一个周期内的运动仿真效果

(a) 初始状态,驱动电压在 a 点,机器人保持原位;(b) 驱动电压达到 b 点,压电双层膜变形达到最大;(c) 驱动电压迅速下降至 b 点,压电双层膜将快速收缩,运动主体向前运动。左图为运动本体和驱动器的运动状态,右图为驱动电压曲线

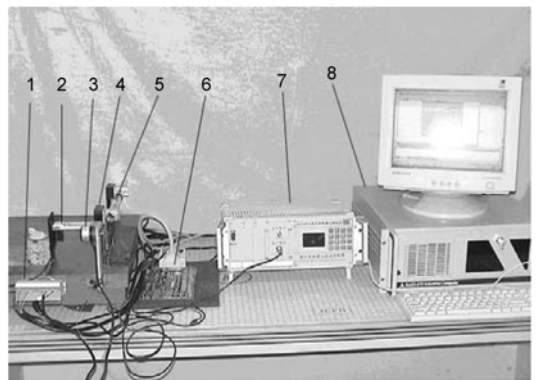


图10 实验测试平台

(1) 工业计算机(含 A/D 采集卡);(2) 机器人控制器(含信号发生器、放大器);(3) 运动控制卡;(4) 管内机器人;(5) 牵引装置;(6) 光学编码器;(7) 力传感器;(8) 力传感器的放大器

管内机器人(4)放置于一个直径为 14 mm 的玻璃管内. 控制器(2)由信号发生器和放大器组成. 信号发生器产生的驱动电压经放大作用于压电双层膜上, 驱动机器人系统运动. 牵引装置(5)包含一条尼龙绳和一个动滑轮, 用来连接机器人和力传感器(7), 并将直线位移转化为角位移. 通过光学编码器(6)来测量其角位移, 从而获得机器人的直线运动速率. 力传感器(7)用于测量牵引力, 其测量信号通过放大器(8)后放大到 0~10 V 范围内. 运动控制卡采用香港固高公司产品(型号 GT-400-SV), 用于采集光学编码器的信号, 并将其输送到计算机(1)进行数据处理. 计算机(1)与管内机器人控制器(2)之间通过 RS232 接口进行通讯. 同时, 一个 12 位的 A/D 数据采集卡和运动控制卡内嵌于工业计算机中.

为了确保机器人的工作效率, 需要确定驱动电压的最佳工作幅值和频率. 首先, 测试机器人的运动速率和牵引力在不同的电压频率下的变化, 实验结果如图 11 所示. 根据前面的理论分析和仿真分析, 机器人的运动速率并非恒定值, 这里所指的速率是指机器人在一个工作周期内的平均速率.

将驱动电压的幅值定为 50 V, 改变工作频率, 可

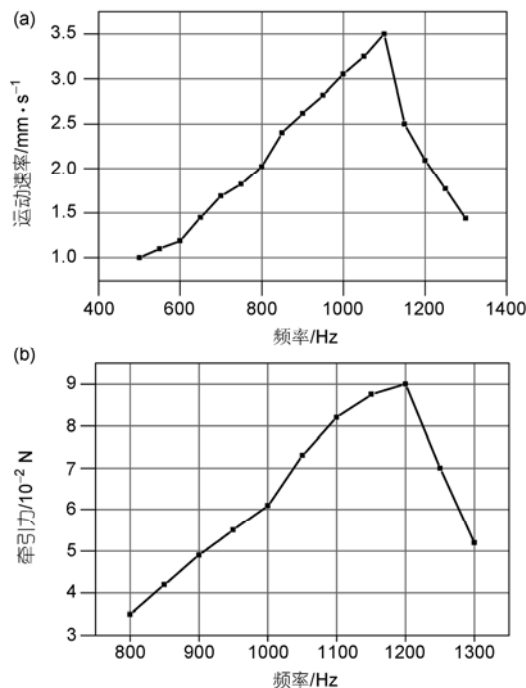


图 11 运动速率和牵引力随频率变化曲线

(a) 机器人运动速率随驱动频率变化的关系曲线; (b) 机器人牵引力随驱动频率变化的关系曲线

以得到图 11(a)所示的实验结果. 在 500 ~1100 Hz 的频率范围内, 机器人的运动速度的大小随驱动频率增加而逐步升高. 在驱动频率大于 1100 Hz 之后, 当频率继续上升时, 运动速率快速下降. 图 11(b)也显示了相似的结果. 牵引力在工作频率为 1200 Hz 时达到峰值 0.09 N. 根据实验结果, 我们可以确定最佳工作频率在 1100~1200 Hz 之间. 但当频率大于 1100 Hz 时, 运动速率随频率升高衰减很快. 因此, 在综合考虑牵引力和运动速率的基础上, 我们可以确定机器人驱动的最佳工作频率在 1100 Hz 左右.

接下来研究运动速率和牵引力在不同的电压幅值下的变化趋势. 设定驱动电压工作频率为 1100 Hz, 通过改变电压幅值, 得到一组实验数据, 如图 12 所示. 从图可以看出管内机器人的运动速率和牵引力均随电压幅值的增加而线性递增, 运动速率和牵引力的关系曲线如图 13 所示. 在工作频率为 1100 Hz 时, 机器人的运动速率和牵引力也呈线性关系. 如果需要更高的运动速率需要更大的牵引力. 在 1100 Hz 的工作频率下, 当牵引力为 0.082 N 时, 机器人达到最大的运动速率 3.5 mm/s.

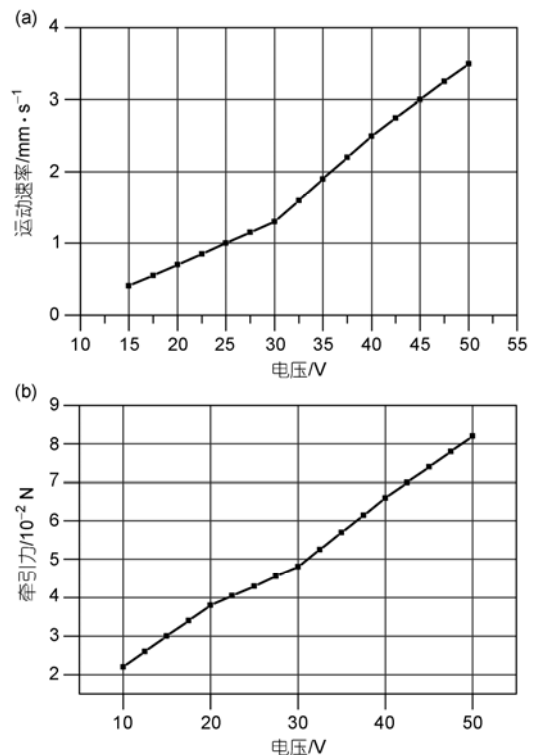


图 12 运动速率和牵引力随驱动电压变化曲线

(a) 机器人运动速率随驱动电压变化的关系曲线; (b) 机器人牵引力随驱动电压变化的关系曲线

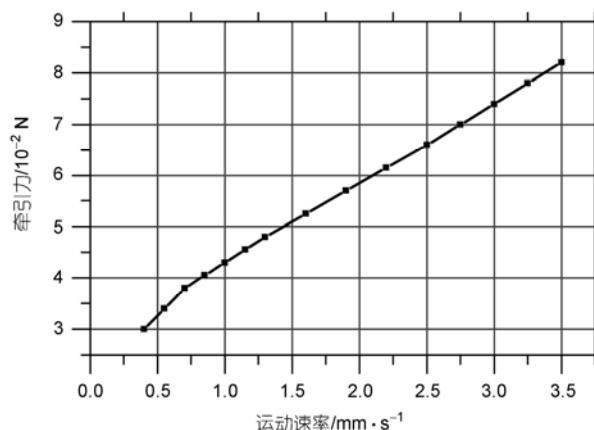


图 13 机器人牵引力和运动速率之间的关系曲线

## 4 结论

设计了由压电双层膜驱动的小型管内移动机器人。采用压电双层膜驱动器和惯性冲击原理, 实现机器人在直径为 16~18 mm 的管状结构内稳定的直线运动。在原型系统设计的基础上, 对惯性冲击过程进行理论分析和仿真。通过理论分析与实验验证了惯性冲击原理的有效性。实验结果表明在 50 V 和 1100 Hz 的驱动电压下, 机器人在管内移动速率可以达到 3.5 mm/s(最大)。在未来的研究中, 我们将进一步提高机器人的小型化和推重比; 研究在更复杂的工作环境(非直线管状结构、液体环境、内置电源)下保持并提高机器人的运动性能。

## 参考文献

- Quirini M, Menciassi A, Scapellato S, et al. Design and fabrication of a motor legged capsule for the active exploration of the gastro-intestinal tract. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2008, 13: 169—179[doi]
- Yukawa T, Suzuki M, Satoh Y, et al. Design of magnetic wheels in pipe inspection robot. In: *Proceedings of 2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 2006 Oct 8-11, TaiPei. 2006, 235—240
- Hayashi I, Iwatsuki N, Morikawa K, et al. An in-pipe operation microrobot driven based on the principle of screw-Development of a prototype for running in long and bent pipes. In: *Proceedings of 1997 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 1997 Oct 5-8, Nagoya. 1997, 125—129
- Choi C, Jung S. Pipe inspection robot with an automatic tracking system using a machine vision. In: *Proceedings of 2006 SICE-ICASE International Joint Conference*, 2006 Oct 18-21, Busan. 2006, 5647—5652
- Xia Q X, Xie S W, Huo Y L, et al. Numerical simulation and experimental research on the multi-pass neck-spinning of non-axisymmetric offset tube. *J Mater Process Technol*, 2008, 206: 500—508[doi]
- Takahata K, Gianchandani Y B, Wise K D. Micromachined antenna stents and cuffs for monitoring intraluminal pressure and flow. *IEEE ASME J Microelectromech Syst*, 2006, 15: 1289—1298[doi]
- Anthierens C, Libersa C, Touaibia M, et al. Micro robots dedicated to small diameter canalization exploration. In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2000 Oct 31- Nov 5, Takamatsu. 2000, 480—485
- Lee P C Y, Yu J D. Governing equations for a piezoelectric plate with graded properties across the thickness. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectrics Freq Contr*, 1998, 45: 236—250[doi]
- Yang Z T, Guo S H, Yang J S. Transmitting electric energy through a closed elastic wall by acoustic waves and piezoelectric transducers. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectrics Freq Contr*, 2008, 55: 1380—1386[doi]
- Kant T, Shiyekar S M. Cylindrical bending of piezoelectric laminates with a higher order shear and normal deformation theory. *Comput Struct*, 2008, 86: 1594—1603[doi]
- Lim J, Park H, Moon S, et al. Pneumatic robot based on inchworm motion for small diameter pipe inspection. In: *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2007 Dec 15-18, Sanya. 2007, 330—335
- Pozzi M, King T. Piezoelectric actuators in micropositioning. *Eng Sci Educ J*, 2001, 10: 31—36[doi]
- Ota T, Mitsutake Y, Hasegawa Y, et al. Dynamic analysis of electromagnetic impact drive mechanism using eddy current. *IEEE Trans Magn*, 2007, 43: 1421—1424[doi]
- Aburatani H. A piezoelectric gripper combined with a smooth impact drive mechanism. In: *2007 the 16th IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics*, 2007 May 27-30, Nara-City. 2007, 773—776
- Mendes J, Nishimura M, Tomizawa K, et al. Printed board positioning system using impact drive mechanism. In: *Proceedings of the 35Th SICE Annual Conference*, 1996 Jul 24-26, Tottori. 1996, 1123—1128
- Jiang N, Liu J B, Tao T, et al. Fatigue evaluation of piezo impact drive mechanism. In: *Proceedings of 2007 International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science*, 2007 Nov 11-14, Nagoya. 2007, 255—259
- Kawagoe K, Furutani K. Influence of friction force on seal mechanism with one degree of freedom. In: *Proceedings of 2003 International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 2003 Oct 19-22. Nagoya. 2003, 317—322
- Owen W S, Croft E A. The reduction of stick-slip friction in hydraulic actuators. *IEEE/ASME Trans Mechatron*, 2003, 8: 362—371[doi]
- Liu Y T, Jiang C C. Pneumatic actuating device with nanopositioning ability utilizing PZT impact force coupled with differential pressure. *Precis. Eng-J Int Soc Precis Eng Nanotechnol*, 2007, 31: 293—303