

文章编号 1004-924X(2003)01-0011-06

微型机器人用于检查管道内的缺陷

孙麟治, 陆林海, 秦新捷, 龚振邦
(上海大学 精密机械研究所, 上海 200072)

摘要:管径 10~20 mm 的细小管道在工业中应用十分广泛,因此迫切需要研究一种管道检测机器人进入管道内部,对其缺陷进行检测或维修。为此目的,近年来发展了不同类型的微型机器人,例如:气囊蠕动型、螺旋摩擦型、电磁力型、SMA 型、冲击型机器人,并且取得了一些可喜进展。本文报道一种采用双压电薄膜 PZT 驱动器的细小管道实验微机器人,它可以携带 CCD 摄像机进入 20 mm 的垂直、水平或弯曲管道,检查管壁上的小孔或裂纹。论述了此种微机器人的实验系统、结构、运动机理和性能。

关键词:驱动器;机器人;压电材料;管道

中图分类号:TP242 **文献标识码:**A

1 引言

管径 10~20 mm 的管道,在工业上应用十分广泛,因此迫切需要研究一种管道检测机器人,进入管道内部,对其缺陷进行检测或维修。这对防止事故发生,减少经济损失有着重要意义。

这类微机器人经常包括二大部分:微型驱动器和微型探测器。

近年来,文献报道了几种微机器人驱动器:气囊蠕动型,螺旋摩擦驱动型,电磁力型,SMA 型和压电冲击型,有些研究工作已经取得了一定成果。

气囊蠕动式微机器人的尺寸为 25 × 85 mm,运动速度为 2.2 mm/s。这种微机器人的运动速度非常缓慢,它由气动装置驱动^[1]。螺旋驱动的微机器人,依靠两个倾斜安装的摩擦轮与管壁的摩擦推动力产生运动,在直管和弯管内的运动速度为 34~52 mm/s,但是这种结构的微机器人本体尺寸过长^[2]。依靠电磁力驱动的微机器人,已在我们研究所内研制成功^[3-4]。

鉴于压电 PZT 驱动器具有能量转换率高,响应迅速等优点,近年来不少研究人员对其进行了大量研究。采用层叠型 PZT 驱动器、利用惯性冲击

原理运动的微机器人,长 20 mm,直径 5.5 mm,在 10 mm 的管道内的运动速度为 6 mm/s^[5]。

文献报道,多层双压电薄膜型 PZT 驱动的微机器人^[6],具有更快的运动速度、更大的牵引力和较小的功耗。

此外,还有人在研究 SMA 驱动器的微机器人,但其速度较慢。

关于微型探测器,主要有二种:一种是涡流探测器,另一种是光学摄像机。涡流探测器主要用于探测管壁外表面的缺陷和壁上的穿孔。这种探测器由涡流线卷和分析仪组成。涡流线卷很容易制造,但是分析仪很贵,难于广泛应用。

此外,微型光学 CCD 摄像机已在工业中广泛应用,成本较低,并能实时显示管壁缺陷优点。

本文报道一种采用双压电薄膜 PZT 驱动器的细小管道实验微机器人,它可以携带 CCD 摄像机,进入 20 mm 的垂直、水平或弯曲管道,检查管壁上的小孔或裂纹。文内论述了微机器人的实验系统,微机器人的结构、运动机理和性能。

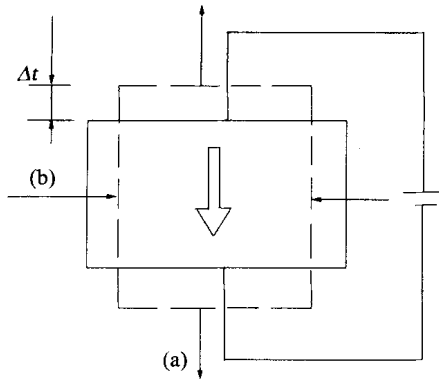
2 双压电薄膜 PZT 微机器人

双压电薄膜 PZT 微机器人的主要工作原理,

收稿日期:2002-10-17;修订日期:2002-12-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 69889501)

在于利用压电材料极化后的逆压电效应,如图 1 所示。



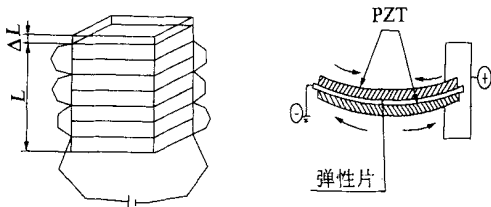
(a) 纵向伸长 (b) 横向收缩

(a) Longitudinal elongation (b) Transverse reduction

图 1 压电陶瓷极化效应

Fig. 1 Polarized effect of piezoelectric ceramics

在压电陶瓷上施加电压时,沿着极化方向,压电陶瓷伸长(纵效应),垂直极化方向,压电陶瓷收缩(横效应),因此,工业上有两种 PZT 驱动器,一种是基于纵效应的层叠型 PZT 驱动器,另一种是基于横效应的双(单)压电薄膜 PZT 驱动器,如图 2(a, b) 所示。



(a) 层叠型 PZT 驱动器 (b) 双压电薄膜 PZT 驱动器
(a) Stacked PZT actuator (b) Bimorph PZT actuator

图 2 两种 PZT 驱动器

Fig. 2 Two kinds of PZT actuators

层叠型 PZT 驱动器产生的位移为:

$$l = \frac{1}{32} \cdot d_{33} \cdot U_a \cdot (l/t)^2, \quad (1)$$

式中: l —Total displacement

U_a —Applied voltage

d_{33} —Piezo constant

l —Total length

t —Thickness of each piece.

双压电薄膜 PZT 驱动器产生的位移为:

$$x = \frac{1}{32} \cdot d_{31} \cdot U_a \cdot (l/t)^2, \quad (2)$$

式中: x —Displacement

U_a —Applied voltage

d_{31} —Piezo constant

l —Length

t —Thickness of piece.

层叠型 PZT 驱动器有较快的响应,产生的驱动力较大,但是位移很小,例如,5 × 5 × 9 层叠型 PZT 在 100 V 电压下的变形量只有 6 μm。弯曲型 NLB33 × 10 × 1 PZT 产生的变形量为 150 μm,因此,为了获得较大位移量,应当用弯曲型的双压电薄膜 PZT 驱动器,此时,当交变电压施加到双压电薄膜 PZT 驱动器的两面和中间的弹性片上时,驱动器就往复弯曲。

由此构成的双压电薄膜 PZT 管道机器人的结构如图 3 所示。这种机器人主要包含一个惯性质量块、装有双压电薄膜 PZT 驱动器的机器人本体、以及两组青铜支撑腿。

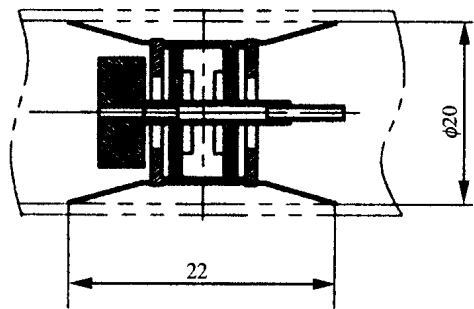


图 3 双压电薄膜 PZT 微型管道机器人

Fig. 3 Bimorph PZT actuator for micro in-pipe robot

这是一个双层(或多层)结构的微机器人。对于双层结构的微机器人来说,也就是有两片双压电薄膜 PZT,并联安装在主体内。每个弹性片的两侧面上,同心地粘贴两片 PZT 元件,在其中心孔内插有芯杆,惯性质量固定在这个芯杆上。两个外隔圈和两个内隔圈分别固定于弹性片的内外边。两组弹性腿沿着主体外缘分布,它们的作用是支撑微机器人,并与管道内壁产生摩擦力。

双压电薄膜微机器人的运动机理如图 4 所示。初始状态,微机器人因为支撑腿与管壁的摩擦力静止在管道内部(图 4(a))。当锯齿波电压缓慢增加时,双压电薄膜 PZT 缓慢变形,芯杆带

动惯性质量向左运动。由于惯性力小于支撑腿与管壁之间的最大静摩擦力,支撑腿不运动。当电压快速降低,双压电薄膜 PZT 快速反向变形,支撑腿向前滑移距离 s 。当高频锯齿波电压连续作用于微机器人,由于弹性材料的变形,芯杆相对与外壳产生轴向振动,微机器人在管内产生向前运动,当电压快速增加,缓慢降低,微机器人产生向后的运动。

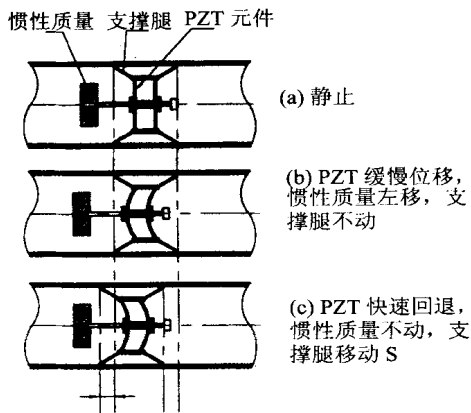


图 4 双压电薄膜 PZT 机器人的运动机理
Fig. 4 Moving principle of bimorph PZT robot

3 微型 CCD 摄像机

微型 CCD 摄像机如图 5 所示。原型 CCD 摄像机是工业市场产品,经过改制,并且在其外端面上增装了 LED 发光二极管,改制后摄像机的直径为 19 mm,长度为 18 mm,重量为 5 g。

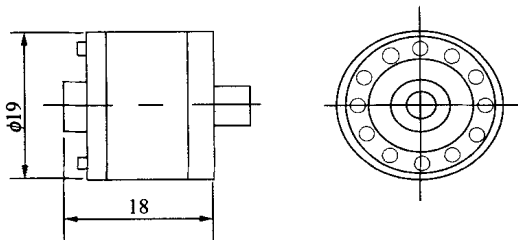


图 5 微型 CCD 摄像机和 LED 发光二极管
Fig. 5 Micro CCD camera with LED light ring

4 控制器

最初,我们以锯齿波和脉冲波两种波形,在相同的电压和相同的负载下,驱动同一个机器人样

机,进行了试验,结果表明,据此获得最大移动速度时的频率,是不同的,并且速度也不相等,如表 1 所示。施加脉冲波时,机器人样机有较快的移动速度。

表 1 波形对最大移动速度的影响

波形	最大速度 (mm/s)	频率 (Hz)
脉冲	4.8	990
锯齿	3.9	840

基于以上分析,研制一台专用控制器,可以提供锯齿波和脉冲波两种波形。控制器由波形发生器、比较器和功率放大器组成。其输出频率可用可变电阻 R_1 调节,调节范围为 500 ~ 2 000 Hz。

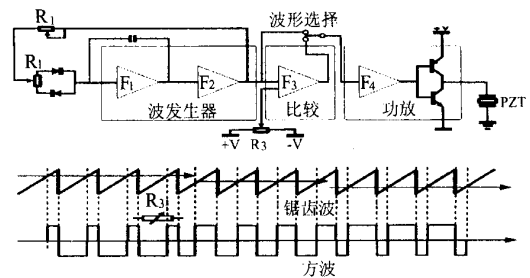


图 6 控制原理
Fig. 6 Control Principle

控制器的基本原理如图 6,当调节电位计 R_2 时,积分电容的充电和放电时间产生变化,因此锯齿波的上升和下降斜坡和方向将变化。在其经过比较器后,锯齿波转变成方波。

调节电位计 R_3 改变 F_3 上的参考电压电平,因而改变方波的占空比。波形改变时,施加到 PZT 上的电压波的上升和下降斜坡也就改变,因此,就能控制移动速度和方向,亦即是:频率改变,移动速度改变;相位改变,移动方向就改变。

5 微型机器人的运动性能

对二层结构的双压电薄膜 PZT 微机器人进行了运动性能研究,机器人本体连同青铜支撑腿在一起的尺寸为 16 × 9 mm,总长度为 22 mm,总质量 9.5 g。

控制器以脉冲波驱动机器人,进入直径为 20 mm 的玻璃管。实验表明,它能在垂直管道内爬行,平均速度为往上 17.6 mm/s,往下为 21.5 mm/s。

微机器人的运动取决于产生振动的电压,施加电压的幅值会很大程度影响其振动振幅。施加不同幅值的电压驱动微机器人,得到如图 7 所示的运动速度与电压的关系曲线。

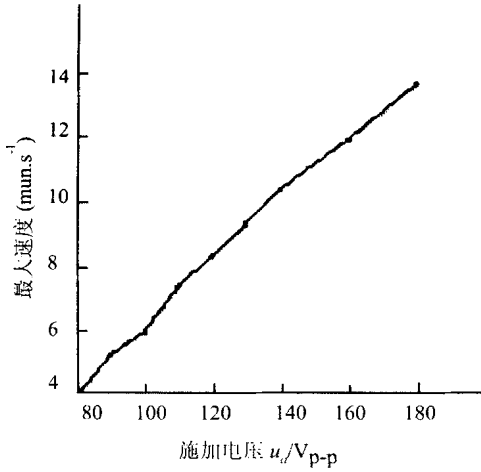


图 7 运动速度与驱动电压关系^[7]

Fig. 7 Moving speed versus voltage^[7]

显然,运动速度和驱动电压幅值 U_a 成正比增加。在 V_{p-p} 为 160 V 时,微机器人的速度可达 13.7 mm/s。当然,这么高的驱动电压是不适合实际应用的。

为此分析了机器人的功率消耗,由于压电材料的电学性能表现为电容,所以微机器人的双压电薄膜 PZT 压电材料的阻抗,主要表现为容抗。容抗的计算公式为:

$$X_c = \frac{1}{C} = \frac{1}{2 f C}$$

f ——电压频率;

C ——驱动器的电容。

微机器人的功率消耗为:

$$P = \frac{U_a^2}{X_c} = 2 U_a^2 f C$$

U_a ——周期电压的均方根值。

由此可见,微机器人的功耗 P 与 U_a^2 成正比,为了降低功耗,首先必须降低施加于 PZT 上的电压值,但是电压的大小,主要取决于材料的性能、压电薄膜的厚度以及制造工艺,对此有待今后进一步探讨。

图 8 示出了双压电薄膜 PZT 驱动器,在不同频率的驱动电压下的响应。利用 DWS 精密振幅测量仪器,测得双压电薄膜 PZT 的响应,开始时

缓慢增加,在 1 100 Hz 时达到共振点,然后快速下降,频率为 1 300 Hz 时达到静止。由于运动速度与振动幅度相关,可以认为,机器人在一定频率下有其最大运动速度,该频率与共振点相对应^[8]。

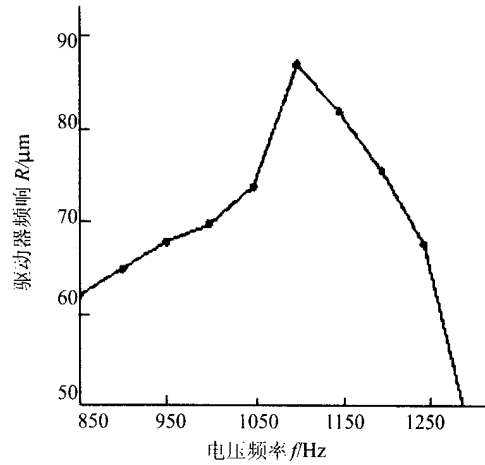


图 8 运动速度与频率关系

Fig. 8 Moving speed versus frequency

基此实验,研制了三层结构的双压电薄膜 PZT 机器人,用以搭载专用的 CCD 摄像机。该新型机器人的外形尺寸保持不变,只是在其本体内,将二层 PZT 替换成了三层 PZT。这个三层结构的双压电薄膜 PZT 机器人,搭载着摄像机后的运动性能如表 2 所示。

表 2 双压电薄膜 PZT 机器人的运动性能

Table. 2 Moving performance of bimorph robots

No.	3L-1	3L-2	平均
电压 (V_{p-p})	139	139	
频率 (Hz)	1266	1130	
占空比 (%)	36	23	
波形	脉冲		
平均垂直速度			
向上 (mm/s)	14.8	11.7	13.2
向下 (mm/s)	19.6	10.9	15.2

实验显示,该机器人能在 20 mm 垂直管道内爬行,平均速度为往上 13.2 mm/s,往下为 15.2 mm/s,也能在半径 R 为 410 mm 的弯曲管道内往返爬行。

6 微型机器人检查管道内的缺陷

检查管道内缺陷的微型机器人实验系统,如图 9。该系统包括下列硬件:

- ⑧ 双压电薄膜 PZT 机器人——直径: 16 mm, 本体长度: 9 mm, 总长度: 22 mm, 质量: 10 g;
- ⑧ 微型 CCD 摄像头——直径: 19 mm, 长度: 18 mm, 视角: 69°, 分辨率: 350 TVL, 视场范围: 3.6 mm, 质量: 5 g;
- ⑧ 光源——12 个 LED 二极管;
- ⑧ 监视器——工业监视器用于显示缺陷;
- ⑧ 控制器和电源;
- ⑧ 计算机。

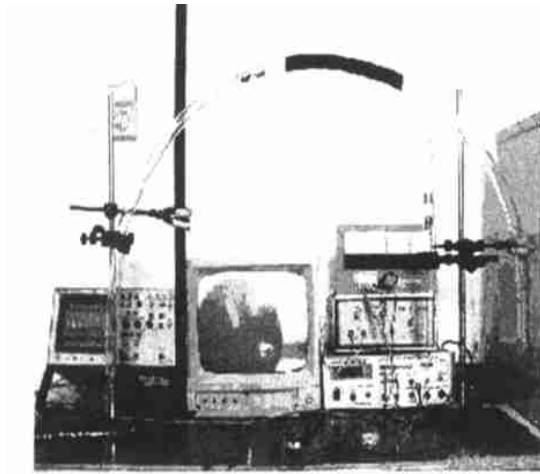


图 9 光学探测管壁缺陷的微型机器人实验系统

Fig. 9 Robot system for photo visual inspection

从图 10 中可见,试管上的小孔和焊缝可以明显显示。微型 CCD 摄像头安装在机器人的前端,两者之间用螺旋弹簧连结,摄像机和 LED 光源由

8 V 直流电源供电。当机器人沿着管壁移动时,LED 光源将管壁表面照明,由于其较大的视角,像机将探测到的缺陷信息通过信号导线,传输到显示屏。

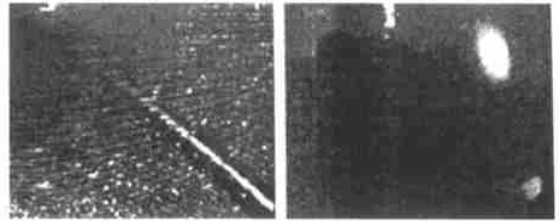


图 10 管壁上的缺陷图形(焊缝和小孔)

Fig. 10 Crack pattern (welding seam and holes) on wall

7 结 语

(1) 研究的管内移动的双压电薄膜 PZT 微机器人实验系统,可以携带 CCD 摄像机,进入 20 mm 的管道,可在水平和竖直管道内运动,也可以在弯曲管道内往返运动。

(2) 当机器人沿着管壁移动时,LED 光源将管壁表面照明,由于 CCD 摄像头有较大的视角,从而能将探测到的缺陷信息,通过信号导线,传输到显示屏,显示管道内壁的小孔或裂纹。

(3) 研制的专用控制器,可以提供锯齿波和脉冲波两种波形。控制器由波形发生器、比较器和功率放大器组成,输出频率的调节范围为 500 Hz 至 2 000 Hz。

(4) 机器人运动速度和与驱动电压幅值 U_a 成正比增加,其功耗 P 与 U_a^2 成正比增加。如何降低功耗有待今后进一步探讨。

参考文献:

- [1] TAKAHASHI M, HAYASHI I. The development of an in-pipe micro robot applying the motion of an earthworm[A]. *Proceedings of MHS '94* [C]. Nagoya, Japan, 1994. 35-40.
- [2] HAYASHI I. The running characteristics of a screw principle micro robot in a small bent pipe[A]. *Proceedings of MHS '95* [C]. Nagoya, Japan, 1995. 225-228.
- [3] SUN L ZH, SUN P, QIN XJ. Study on micro robot in small pipe[A]. *Proceedings of Inter. Conference on Control '98* [C]. Swansea, U K, 1998. 1212-1217.
- [4] SUN L, SUN P, LIAN L. Improvement of characteristics of in-pipe micro robot[A]. *Proceedings of MHS '99* [C]. Nagoya, Japan, 1999. 153-156.
- [5] IDOGAKI T. Characteristics of piezoelectric locomotive mechanism for an in-pipe micro inspection machine [A].

- Proceedings of MHS '95* [C]. Nagoya, Japan, 1995. 193-198.
- [6] KAWAKITA S. Multi-layered piezoelectric bimorph actuator[A]. *Proceedings of MHS '97* [C]. Nagoya, Japan, 1997. 73-78.
- [7] SUN L, ZHANG Y, SUN P. Study on robot with PZT actuator for small pipe[A]. *Proceedings of MHS '2001* [C]. Nagoya, Japan, 2001. 149-154.
- [8] SUN L, SUN P, LUO Y, *et al*. Micro in-pipe robot with PZT actuator[A]. *Proceedings of 4th Inter. Climbing and Walking Robots* [C]. Karlsruhe, Germany, 2001. 539-546.

Micro in-pipe robot for detection of cracks in pipe wall

SUN Lin-zhi, LU Lin-hai, QIN Xin-jie, GONG Zhen-bang

(*Institute of Precision Machinery, Shanghai University, Shanghai 200072, China*)

Abstract : Small pipes of 10 ~ 20 mm in diameter are widely used in different industries, and it is therefore necessary to develop robots which can climb inside pipes to detect cracks in walls. Several micro robots, such as of screw friction drive type, electro-magnetic force type, SMA type and PZT impact type have been developed for this purpose in recent years, and advanced achievements have been made. An experimental micro in-pipe robot with PZT type actuator, which can carry a small CCD camera and climb into a 20 mm vertical, horizontal or curved pipe to detect fine holes or cracks in inner walls. The moving principle of the micro robot, structural design and performance test were described in detail.

Key words : robot; detecting; crack; pipe

作者简介:孙麟治(1928 -) ,男,江苏常熟市人,讲座教授,现主要从事精密机械和微机械研究。

征订启事

欢迎订阅《中国光学与应用光学文摘》

《中国光学与应用光学文摘》是经国家科委批准,由中科院文献情报中心、中科院光学情报网和中科院长春光学精密机械与物理研究所联合主办的国家级检索刊物,该刊主要收录我国科研人员在国内期刊和有关会议上发表的科技论文和会议论文,年收录量 5 000 篇左右。《中国光学与应用光学文摘》以文摘形式报道国内光学、光电子学领域的理论研究动态、最新科研成果和相关创新技术,是国内该领域惟一的检索刊物,是了解光电子行业相关科技信息的最新窗口,以报道时差短、检索途径多、信息量充实为特色。

《中国光学与应用光学文摘》为双月刊,大 16 开本,110 页,国内公开发行人。邮发代号:12 - 140,定价:15 元/期。为满足不同订户的要求,编辑部亦随时办理破年、破季订阅。

单 位: 中科院长春光学精密机械与物理研究所《中国光学与应用光学文摘》编辑部

联系人: 杨妹清

地 址: 长春市人民大街 140 号

邮 编: 130022

电 话: (0431) 5261590

账 户: 中科院长春光学精密机械与物理研究所

http://www.ciomp.ac.cn

账 号: 01471908091001

E-mail: yanh@ciomp.ac.cn

银 行: 中行吉林省分行营业部