

双压电薄膜微机器人驱动器的稳态响应

罗 怡, 龚振邦, 孙麟治, 汪勤恣

(上海大学机电及自动化学院, 上海 200072)

摘要: 描述了一种适用于 $\varnothing 20\text{mm}$ 管径的管道检测微机器人的驱动器, 它由双压电薄膜、芯杆和配重质量构成。采用有限元分析的方法研究了双压电薄膜在不同边界条件下, 驱动器在一阶固有频率处的稳态响应, 得出双压电薄膜的压制角度为 9° 和 63° 时, 驱动器的稳态响应较大。该结论可成为此类微机器人优化设计的理论依据。

关键词: 双压电薄膜; 微机器人; 驱动器; 稳态响应

中图分类号: TP242.3 文献标识码: A

1 引言

核电站, 化工厂中存在着大量的细小管线, 为了安全有效快速地定期检测这些设备, 我们研制了适用于 $\varnothing 20\text{mm}$ 管径的微小移动机器人。它利用双压电薄膜的弯曲振动效应, 通过惯性冲击原理使微机器人产生运动。

微机器人通过振动产生运动, 希望其驱动器在共振时的响应尽可能大, 从而获得较大的运动速度。本文研究了双压电薄膜在不同边界条件时, 微机器人驱动器在一阶固有频率时的稳态响应, 从而为提高微机器人速度, 降低功耗提供理论依据。

2 微机器人的结构及其运动机理

微机器人的压电驱动器主要有三种形式, 层叠型, 双压电薄膜型和单压电薄膜型。层叠型可以产生较大的驱动力, 但是它只能产生较小的变形, 这就使得它的驱动电压的频率和幅值都必须较高^[1]。双压电薄膜驱动器的变形原理如图1所示, 当施加适当的驱动电压, 由于压电逆效应, 上层压电材料水平方向收缩, 竖直方向膨胀, 而下层的压电材料水平方向膨胀, 竖直方向收缩, 这就使得双压电薄膜产生弯曲。而这种弯曲效应会放大变形量。单压电薄膜的驱动原理类似于双压电薄膜, 只是在施加适当的驱动电压时, 仅有上层的压电材

料水平方向收缩, 竖直方向膨胀弹性层保持不变, 这依旧会使得压电薄膜产生弯曲, 但驱动力会小于双压电薄膜。故我们选择 PZT 材料的双压电薄膜作为微机器人的驱动器。

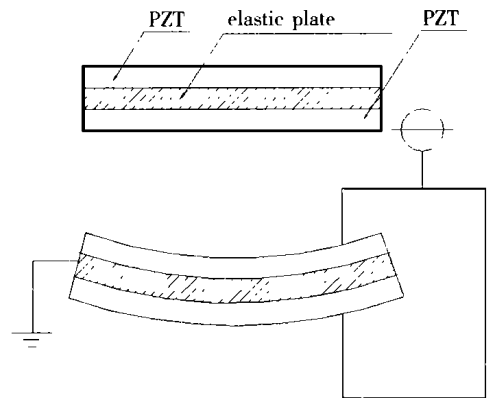


Fig. 1 Deformation behavior of PZT bimorph actuator (cross section)

微机器人的运动机理如图2所示, 在双压电薄膜上施加的驱动电压缓慢增大时, 微机器人如图2(2)形式变化, 支撑腿与壁面之间的静摩擦力大于惯性力, 此时机器人支撑腿不动, 压电片变形带动芯杆和配重发生一定位移, 机器人重心向上移动, 当施加的驱动电压快速减小时, 微机器人如图2(3)形式变化, 腿与壁面的静摩擦力小于惯性力, 支撑腿移动, 微机器人完成一步, 以一定频率重复此过程, 微机器人可以在管道内壁以一定速度运动。

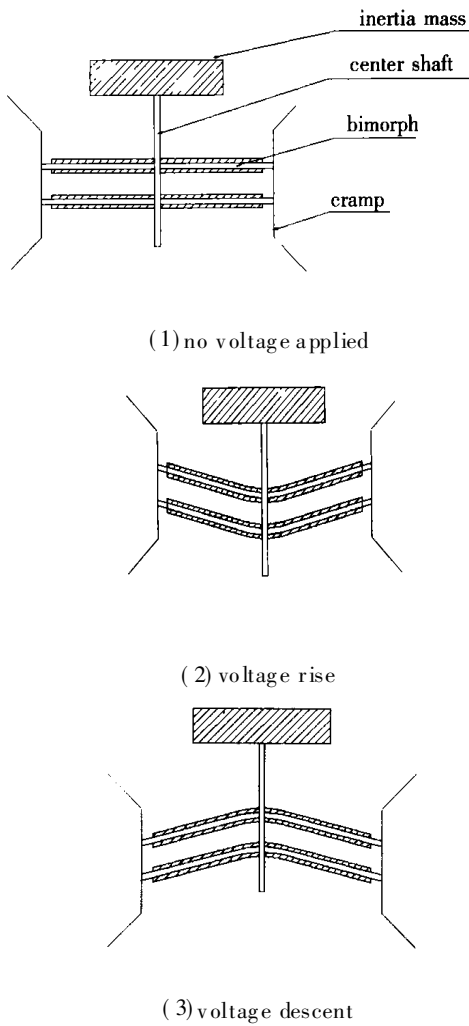


Fig. 2 Driving principle of microrobot

3 微机器人驱动器的稳态响应求解

3.1 驱动器阻尼受迫振动稳态响应公式推导

PZT 是机电耦合材料, 所以应用有限元的离散技术和变分原理的思想来研究其响应。可推导出如下的机电耦合方程^[6]:

$$\begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\{u\}} \\ \ddot{\{v\}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [c] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\{u\}} \\ \dot{\{v\}} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K] & [K^z] \\ [K^z]^T & -[K^d] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{v\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{L\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

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

由(1)式可得

$$[K^z]^T \{u\} - [K^d] \{v\} = \{L\}$$

所以

$$\{v\} = [K^d]^{-1} [K^z]^T \{u\} - [K^d]^{-1} \{L\}$$

代入 $[M] \{\ddot{u}\} + [c] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} + [K^z] \{v\} = \{F\}$, 得:

$$[M] \{\ddot{u}\} + [c] \{\dot{u}\} + [K^*] \{u\} = \{F^*\} \quad (2)$$

其中 $[K^*] = [K] + [K^z][K^d]^{-1}[K^z]^T$

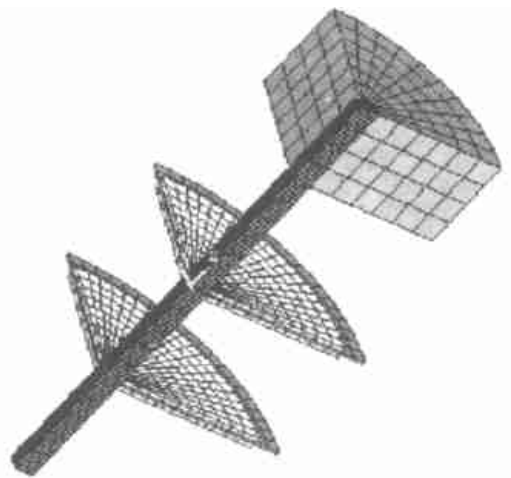
$$\{F^*\} = \{F\} + [K^z][K^d]^{-1}\{L\}$$

采用 ANSYS 软件中的 ICCG (Incomplete Cholesky Conjugate Gradient) 求解器求解(2)式, 得到微机器人驱动器的稳态响应。

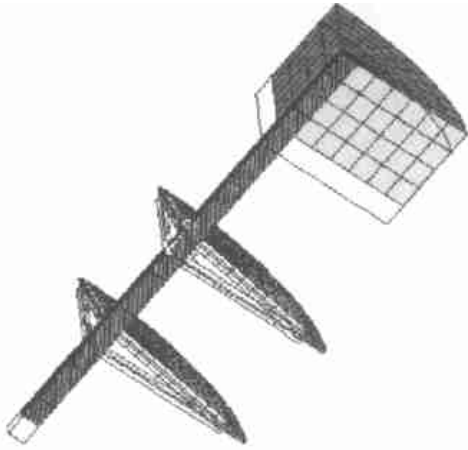
3.2 微机器人驱动器计算模型的构成及振型

由于双压电薄膜的数量会影响微机器人的驱动力, 考虑一定负载要求, 我们采用两片双压电薄膜制作微机器人的驱动器。

微机器人驱动器由两片双压电薄膜, 芯杆和配重构成, 其边界条件对称, 为了提高计算速度, 只做其 $\frac{1}{4}$ 的模型。有限元模型中的 PZT 是强机电耦合材料, 故选择四面体八节点的 SOLID 5 单元划分网格, 得到如图 3(a) 所示的有限元模型。



(a) the FE model



(b) the model shape

Fig. 3 The FE model and the model shapes at first mode natural frequency

双压电薄膜的压制角度如图 4 所示。

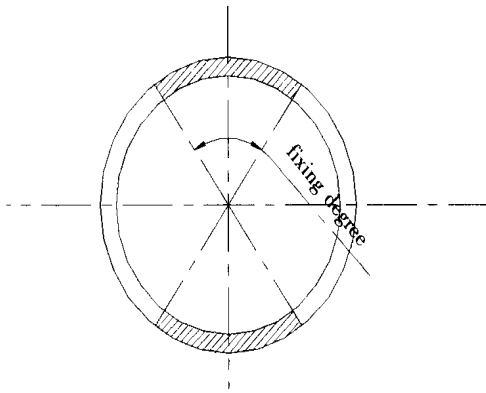


Fig. 4 Fixing manner of the bimorph

Table 1 The relationship between fixing angle and the first mode nature frequency

Fixing degree(°)	The first mode nature frequency(Hz)	The fixing angle(°)	The first mode nature frequency(Hz)
0	993.7	72	1489.2
9	1067.8	81	1548.3
18	1120.0	90	1599.7
27	1171.2	108	1677.1
36	1227.7	126	1724.4
45	1357.0	144	1750.7
54	1424.5	162	1765.1
63	1424.5	180	1770

为了计算微机器人驱动器在固有频率时的稳态响应,必须首先进行获得其固有频率和振型,因

此首先对微机器人进行模态分析,得到不同压制角度下的固有频率和振型。以 180 压制角度为例,其前三阶固有频率,分别为 1770Hz, 19014Hz, 19598Hz。由于一阶和二阶、三阶固有频率相差很大且二阶、三阶固有频率过高不符合驱动器的工作需要,因此我们选择一阶固有频率作为驱动器的工作频率。其振型如图 3(b) 所示。表 1 示出了不同压制角度时微机器人驱动器的一阶固有频率值。

3.3 计算结果

图 5 示出了在不同压制角度下,微机器人驱动器在电压为 10V,频率为其一阶固有频率的正弦电压驱动下的稳态响应。

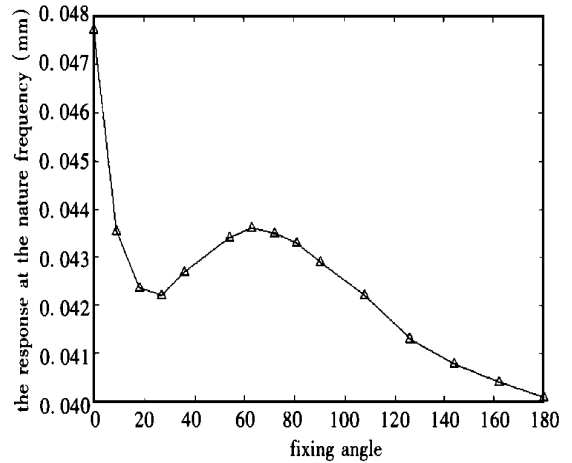


Fig. 5 Fixing angle vs. the response at the first mode nature frequency

4 结 论

由图 5 知,双压电薄膜的压制角度不仅对微机器人驱动器的固有频率有很大影响,而且还会对其稳态响应产生重大影响。在压制角度为 0°,9°和 63°时,响应较大。(实际应用中,0°实现较为困难)。故合理的驱动器结构为双压电薄膜压制 9°和 63°。

此结论可为该类微机器人的优化设计提供理论依据。

致谢

感谢清华大学智能技术与系统国家重点实验室在 ANSYS 应用上提供的巨大帮助。

参考文献:

- [1] KAWAKITA Shinichiro, et al. Multi-layered piezoelectric bimorph actuator[C]. Proc. MHS'97, 73- 77.
- [2] 谢贻权,何福保. 弹性和塑性力学中的有限单元法[M]. 北京:机械工业出版社,1983.
- [3] 弗伦奇 A P 著. 徐绪笃译. 振动与波[M]. 北京:人民教育出版社,1982.
- [4] 张世基. 振动学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1990.
- [5] 孙慷,张福学. 压电学[M]. 北京:国防工业出版社,1984.

Harmonic analysis of PZT bimorph actuator for microrobot

LUO Yi, GONG Zhen-bang, SUN Lin-zhi, WANG Qin-que

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

Abstract: The PZT bimorph actuator for microrobot, which is suited for inspecting the pipe of $\varnothing 20$ mm diameter were studied. The actuator is made of PZT bimorph, center shaft and mass. With different boundary conditions of bimorph, the response at the first mode natural frequency of actuator were analyzed. FEM(finite element method) were used. The conclusion can be reached that when the fixing degree is 9° or 63° the response is larger than those of others. All these are the theoretical basis of optimization of this kind of microrobot.

Key words: bimorph; microrobot; actuator; harmonic analysis

作者简介: 罗怡(1973-),女,安徽合肥人,1994年毕业于大连理工大学化机系,获学士学位,1997年毕业于上海大学精密机械系,获硕士学位,1997年攻读机械学博士学位。主要研究方向:机器人和微机械。