

文章编号 1004-924X(2005)02-0165-06

非接触压电微马达的仿真与实验研究

杨 斌,刘景全,陈 迪,周广华,蔡炳初

(上海交通大学 微纳米科学技术研究院 薄膜与微细技术教育部重点实验室,上海 200030)

摘要:提出了一种基于四区和八区 2 种激振方式的新型非接触压电微马达,并进行了振动模态的有限元数值模拟。利用 ANSYS 有限元软件对定子进行模态分析,并用激光测振仪对四区和八区 2 种激振方式下的定子进行位移扫频和振型测试,得出:最优驱动频率分别为 34.4 kHz 和 46.3 kHz,相应的模态分别为 B_{21} 和 B_{22} ,二者结果吻合较好。对微马达的输出性能进行了实验研究,结果表明:三叶片和六叶片转子在八区最优模态激振下转子的转速约是四区的 2 倍。说明了增加定子的分区数不仅改变了定子的最优驱动频率而且能够明显提高转子的转速。而且当 A-B 间相位差从 90° 调谐到 270° 时,行波的传播方向发生了改变,从而实现了转子的换向。实验还表明,转子的正反转的转速基本一致。

关键词:振动模态;非接触;压电微马达;有限元模拟

中图分类号:TM282 文献标识码:A

Simulation and experimental study of non-contact piezoelectric micromotor

YANG Bin, LIU Jing-quan, CHEN Di, ZHOU Guang-hua, CAI Bing-chu

(Key Laboratory for Thin Film and Micro Fabrication of Ministry of Education, Institute of Micro/Nanometer Science and Technology, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A new non-contact piezoelectric micromotor was presented, based on four-sector and eight-sector excited by electric signals. The mode analysis of the stator was carried out to compute the natural frequency and the corresponding vibration mode by finite element method. The frequency sweep and the vibration mode test were done with a laser Doppler vibrometer. It is shown that the optimum driving frequencies of the stators divided into four-sector and eight-sector are 34.4 kHz and 46.3 kHz, and the corresponding vibration mode were B_{21} mode and B_{22} , respectively. It is found that the finite element simulation results were in good agreement with experiment. The output characteristics of micromotor were tested. The conclusion is that the revolution speed of the optimum driving frequency of eight-sector is about double than four-sector for three blades and six blades rotors. These demonstrate

that the increase of the sector number of stator can not only change the optimum driving frequency, but also increase the revolution speed of rotors obviously. When the difference between A and B phase is changed between 90° and 270° , the direction of the traveling wave along circumferential direction is shifted, so the rotation direction of rotor is also changed. the experiment shows that the non-contact piezoelectric micromotor offers identical performance to different rotation directions.

Key words: vibration mode; non-contact; piezoelectric micromotor; finite element simulation

1 引言

非接触压电微马达由于定子与转子或滑块不直接接触,它们之间充满流体,因而克服了接触型压电微马达由于接触而带来的寿命短、转速低的缺点。定转子间的所采用的流体通常包括空气、水、氯化钠等溶液、电流变液体等^[1-8]。在指定要求高转速的环境中,通常用空气作为流体,因为它比其他流体很难达到饱和状态^[9]。非接触压电微马达的转子用垫片支撑或依赖声辐射压力来悬浮。而且对于高转速的旋转式非接触压电微马达能够用在高密度磁盘驱动系统、IC 冷却系统中;对于线性非接触压电马达,它能够传输硅片、IC 晶片等^[10]。为了预测压电微马达的性能,有限元模型被广泛应用到压电微马达的研究中。采用有限元方法计算马达的固有频率报道较多^[11-13]。N. Guo 等人利用有限元法研究了压电圆盘的动力学特性^[14]。

本文研制将马达定子分成了四区和八区的 2 种激振方式下以气体为媒质的非接触压电微马达。马达的定子利用有限元 ANSYS 软件进行模态分析和计算,得到不同模式下的固有频率。对定子进行了实验验证,结果两者吻合很好。并且比较了两种共振模式下非接触微马达的转速。

2 微马达的结构

非接触压电微马达的定子结构如图 1 所示,它是由压电陶瓷 PZT-4 和镍合金通

过环氧树脂粘结而成,它们的直径和厚度如图 1 所示。

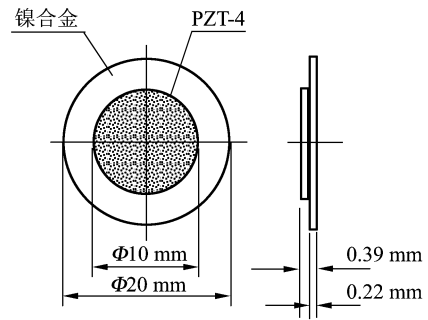


图 1 马达的定子结构

Fig. 1 Configuration of the stator

微马达的 SU-8 转子采用微细加工工艺制成,结构如图 2 所示,其半径 $R = 6 \text{ mm}$,厚度为 $170 \mu\text{m}$,两种结构的质量分别为 17 mg 和 19.4 mg 。

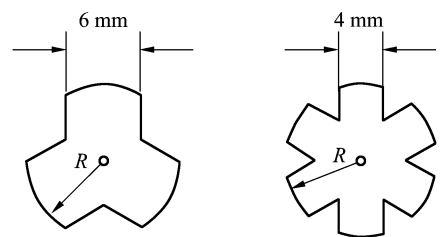


图 2 马达的转子结构

Fig. 2 Configuration of the rotor

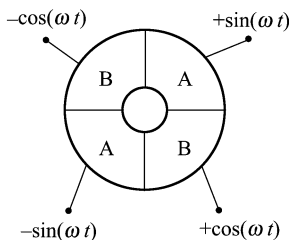
3 马达定子的振动模态仿真

3.1 共振模态

压电晶体的机械特性与它的形状及振动模态有关。把交变电压加到压电晶体上便可通过逆压电效应在压电晶体内激发出

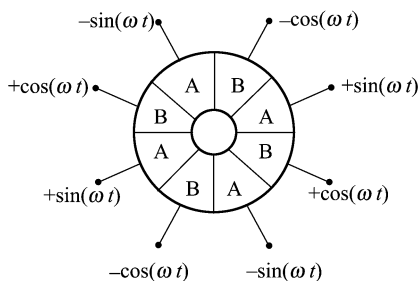
强迫振动。当外电场的频率与压电晶体的固有频率一致时,压电晶体便进入了机械共振状态^[15]。振动模式通常用 B_{mn} 表示,其中 m 代表节圆数, n 代表节径数。压电马达的振动模态是通过外电场来激发的,因而不同的分区电极会激发出不同的最优振动模态,从而影响了马达的输出性能。

本文对马达定子进行了 2 种不同的分区,分别是四区和八区的激振方式,如图 3 所示。在 A 区和 B 区陶瓷上分别施加正弦和余弦信号,相邻的 2 个 A 区或 2 个 B 区信号相位差为 180° ,A 区和 B 区的相位差为 90° 。通过分区电极所产生的 2 个弯曲的驻波由于在空间和时间上相位差为 90° ,因此经过合成后形成了旋转的行波。



(a) 四区激振方式

(a) Excited vibration mode of four-section



(b) 八区激振方式

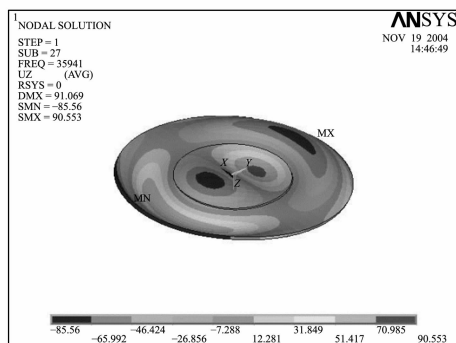
(b) Excited vibration mode of eight-section

图 3 行波的激励方式

Fig. 3 Excited method of traveling wave

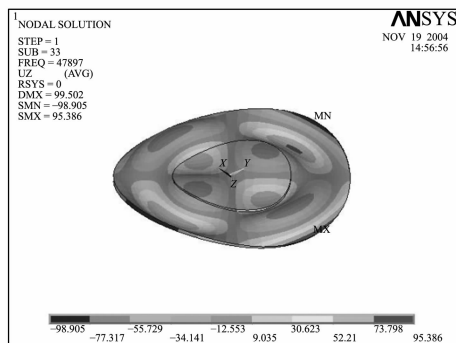
3.2 模态仿真

利用 ANSYS 有限元软件,对上述的微马达定子建立了有限元模型。采用压电分析的 Solid5 单元,它是一个六面体八节点的耦合场单元,利用 Block Lanczos 法进行了模态求解。输入的材料参数如表 1 所示。计算中忽略了粘结层和阻尼的影响。图 4 给出了定子的 B_{21} 和 B_{22} 的振型图,所对应的频率分别为 35.9 kHz 和 47.9 kHz。



(a) B_{21} 模态的振型

(a) Vibration mode of B_{21}



(b) B_{22} 模态的振型

(b) Vibration mode of B_{22}

图 4 定子振型图

Fig. 4 Vibration mode of the stator

表 1 定子的材料属性

Tab. 1 Material properties of the stator

参数	PZT-4	Ni-alloy
密度 (10^3 kg/m^3)	7.5	8.5
杨氏模量 (10^{10} N/m^2)		10.7
泊松比		0.37

其 e 型压电方程中的压电材料的刚度矩阵 $[c]$ 、压电矩阵 $[e]$ 和介电矩阵 $[\epsilon]$ 分别为:

$$[c] = \begin{bmatrix} 13.9 & 7.7 & 7.4 & 0 & 0 & 0 \\ 7.7 & 13.9 & 7.4 & 0 & 0 & 0 \\ 7.4 & 7.4 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3.1 \end{bmatrix} \times 10^{10} \text{ (N/m}^2\text{)}$$

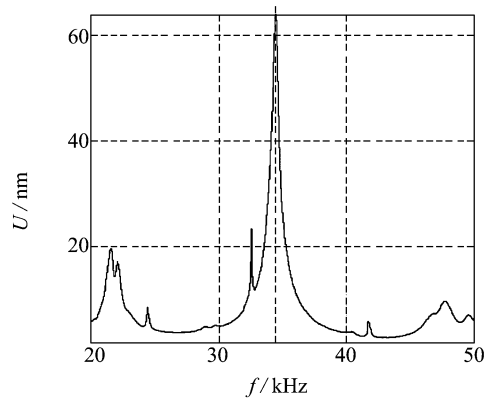
$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -5.2 \\ 0 & 0 & -5.2 \\ 0 & 0 & 15.1 \\ 0 & 12.7 & 0 \\ 12.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ (C/m}^2\text{)}$$

$$[\epsilon] = \begin{bmatrix} 6.5 & 0 & 0 \\ 0 & 6.5 & 0 \\ 0 & 0 & 5.6 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ (F/m)}$$

4 实验测试

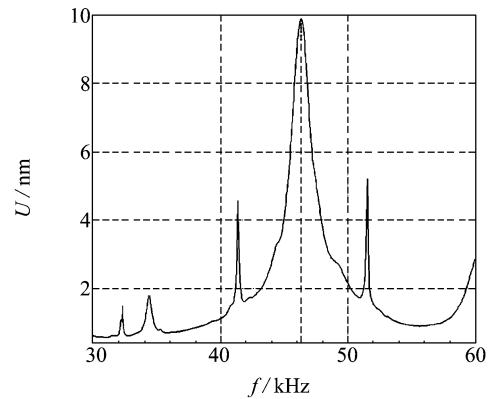
采用德国 Polytec 公司的 OFV3001S 激光测振仪对上述 2 种激励方式的马达定子进行了位移扫频测试,扫频结果如图 5 所示。从图中可以清楚看到 2 种方式下都有一个最大峰值,它们对应了 2 个最优共振模态,相应的共振频率分别为:34.4 kHz 和 46.3 kHz。而且通过用激光测振仪测得的定子表面振幅分布图可以分析出它们的振动模态分别为 B_{21} 和 B_{22} 。这和有限元计算的值非常接近,从而证实了有限元模拟的准确性和可靠性,为马达定子的设计提供了理论依据。

图 6 为非接触压电微马达定子在不同激励方式下的转速与频率的关系曲线。加载电压恒定为 20 V。从图中可以看出, B_{22} 模态下的转速约是 B_{21} 的 2 倍,这是因为 B_{22} 模态的周向波数是 B_{21} 的 2 倍,根据波的叠加理论可知^[16],振幅也随之加大。



(a)四区的扫频曲线

(a)Frequency sweep curve of four-section



(b)八区的扫频曲线

(b)Frequency sweep curve of eight-section

图 5 马达定子的扫频曲线

Fig. 5 Frequency sweep curve of the stator

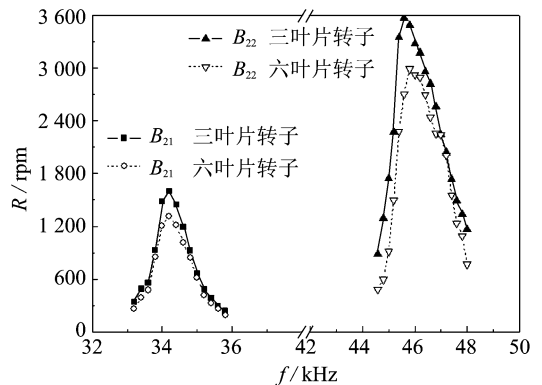


图 6 转速与频率的关系

Fig. 6 Relationship between the revolution speed and driving frequency

当驱动频率与定子的固有频率一致时定子产生了共振,振幅达最大,声辐射压力最大,相应的转速达最大。

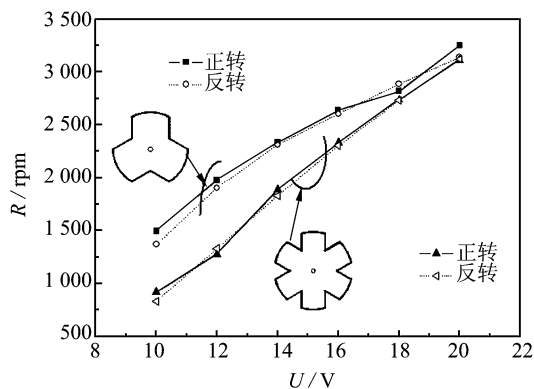


图 7 转速与电压的关系

Fig. 7 Relationship between the revolution speed and applied voltage

除了上述调频调速外,还可通过调压来实现非接触压电微马达的调速。实验中仅采用了 B_{22} 振动模式下的激振方式,驱动

频率为马达定子的共振频率。由图 7 的实验可得,马达的转速与输入电压几近呈线性关系。当改变 A-B 相位差为 270° ,可以改变行波的传播方向,从而改变了转子的转动方向。从图中看到,转子正反转的转速基本一致。

5 结 论

压电微马达的振动模式是由外电场来激发的,本文采用四区和八区的 2 种电极进行激振,产生了 2 种不同最优振动模式分别是 B_{21} 和 B_{22} 。采用有限元法对其振动模式进行计算和分析。并且进行了实验验证,仿真和实测结果一致。从而验证了有限元模型的准确性。并且比较 2 种激振方式下马达的转速特性,得到 B_{22} 模式下转子的转速约是 B_{21} 的 2 倍。而且非接触压电微马达能够通过改变相位差来实现转子的换向。

参考文献:

- [1] YAMAYOSHI Y, HIROSE S. Ultrasonic motor not using mechanical friction force[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics in Materials*, 1992,3(3):179-182.
- [2] HIROSE S, YAMAYOSHI Y, ONO H. A small non-contact ultrasonic motor[C]. *Ultrasonics Symposium*, 1993:453-456.
- [3] HU J H, NAKAMURA K, UEHA S. An analysis of a noncontact ultrasonic motor with an ultrasonically levitated rotor[J]. *Ultrasonics*, 1997,35(6):459-467.
- [4] YAMAZAKI T. Trial construction of a non-contact ultrasonic motor with an ultrasonically levitated rotor[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1996,35(5): 3286-3288.
- [5] HU J, YAMAZAKI T, NAKAMURA K, et al. Analyses of an ultrasonic motor driving fluid directly[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995,34:2702-2706.
- [6] 夏长亮,胡俊辉,史婷娜,等. 基于液体为媒质的非接触型超声波电机理论与实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2001,21(8):64-67.
XIA CH L, HU J H, SHI T N, et al. Study on theory and experiment of non-contact type ultrasonic motor with fluid medium[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(8):64-67. (in Chinese)
- [7] NAKAMURA K, MARUYAMA M, UEHA S. A New ultrasonic motor using electro-rheological fluid and torsional vibration[J]. *Ultrasonics*, 1996,34: 261-264.
- [8] 刘景全,吴博达,杨志刚,等. 一种新型的圆筒非接触超声马达[J]. *声学学报*, 2001,26(2):113-116.

- LIU J Q, WU B D, YANG ZH G, *et al.* A new type of circular cylindrical non-contact ultrasonic motor[J]. *Acta Acoustica*, 2001, 26(2):113-116. (in Chinese)
- [9] HU J H. *A study on noncontact high speed ultrasonic motor*[D]. Ph. D. Dissertation, Tokyo Institute of Technology, 1997.
- [10] HU J H, LAI H, CHAN W, *et al.* A standing wave-type noncontact linear ultrasonic motor[J]. *IEEE Transactions on UFFC*, 2001, 48(3): 699-708.
- [11] 刘景全, 杨志刚, 吴博达, 等. 圆环驻波超声波马达振子的有限元分析与振型测试[J]. *光学精密工程*, 1998, 6(3):56-61.
LIU J Q, YANG ZH G, WU B D, *et al.* Finite-element analyses of a ring type ultrasonic motor and measurement of vibration mode[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1998, 6(3):56-61. (in Chinese)
- [12] LAMBERTI N, IULA A, PAPPALARDO M. A piezoelectric motor using flexural vibration of a thin piezoelectric membrane[J]. *IEEE Transactions on UFFC*, 1998, 45(1): 23-29.
- [13] 马建旭, 吴清文, 卢铿, 等. 纵弯式压电微电机自然频率的有限元计算[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(6):81-85.
MA J X, WU Q W, LU E, *et al.* Finite element analysis on natural frequency of longitudinal-bending piezoelectric micromotor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(6):81-85. (in Chinese)
- [14] GUO N, CAWLEY P. The finite element analysis of the vibration characteristics of piezoelectric discs[J]. *J. Sound. Vibration.*, 1992, 159(1):115-137.
- [15] 陈永校, 郭吉丰. *超声波电动机*[M]. 杭州:浙江大学出版社, 1994.
CHEN Y X, GUO J F. *Ultrasonic motor*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994. (in Chinese)
- [16] UEHA S, TOMIKAWA Y, KUROSAWA M, *et al.* *Ultrasonic motors theory an applications* [M]. Clarendon Press, 1993.

作者简介:杨斌(1977—),男,安徽池州人,博士研究生,研究方向为微驱动器与微执行器的设计与实验研究。