

压电微马达有限元分析及实验研究

崔天宏

(清华大学精仪系,北京100084)

吴清文 王立鼎 吕琼莹

(中国科学院长春光学精密机械研究所,长春130022)

摘要 压电微马达是微型机械领域中的一个崭新课题,本文从动力学角度对压电微马达进行有限元分析,得出固有频率和定子表面切应力场等重要结论,并通过模型样机实验研究验证有限元分析结论的正确性,从而为压电微马达的优化设计奠定了基础。

关键词: 微型机械;压电微马达;有限元分析

1 前 言

随着八十年代末期微型机械的崛起,以压电微马达为代表的微驱动器的研究已经受到国际上学术界和产业界的高度重视,目前美国、日本等发达国家的重点科研机构都投入相当大的人力、财力从事这一项目的深入研究。压电马达的原始设计思想出自苏联,产品开发和应用是日本人做得最好。美国人在静电微马达的研究中遇到阻力后,偶受压电马达思想的启发,A. M. Flynn 等人于1990年用美国先进的 IC 工艺与材料技术率先做出了压电微马达。压电微马达有许多优良的性能,在微机械中是一个十分新颖和具有巨大潜力的待开发的微驱动器,它有可能成为微电子机械系统中最有希望的驱动器之一。

压电微马达是微型机械中最有发展前途的单元技术之一,但是关于其波传动深层次的理论和实验研究却刚刚起步,还处于探索阶段。压电微马达是一个较复杂的力学问题,它的固有频率和定子表面应力场的精确解难以计算,所以适合于用有限元法计算。压电微马达的有限元计算结果,对指导微马达驱动电源以及微马达本体的设计具有重要的指导意义。压电微马达有限元分析结论通过模型样机实验得以验证,从而开辟了压电微马达有限分析这一有效研究途径,为压电微马达的优化设计奠定坚实的基础。

2 压电微马达的有限元分析

压电微马达的广义瑞利波的传动问题实际上是一个固体波动力学与接触力学相结合的问题。这里用世界上公认的有限元分析软件 ANSYS 在 APOLLO 工作站上对压电微马达的样机

模型进行了工程分析,主要计算了压电微马达的固有频率及定子表面的应力场分布。压电微马达的固有频率计算值可以直接用于指导压电微马达本体及驱动电源设计;定子表面的应力场分布可以用于分析压电微马达的驱动力矩及功率。

2.1 有限元力学模型

2.1.1 有限元网格的划分

根据压电微马达样机的特点及工况条件建立相应的有限元力学模型。模型是按实际设计结构形式,通过必要的力学简化处理,采用有限元分析程序 ANSYS 提供的相应单元类型划分而成。由于宽高比不是很大,所以均采用体单元。

本模型中,节点总数为 1310 个,单元总数为 1296 个。

考虑到压电微马达是中心对称的结构特点,我们最关心的是轴向的一阶振型,故选取轴向自由度为主自由度。

模型中各构件的材料是根据压电微马达的本身要求选定的。所用材料见表 1。

表 1 材料属性

物理量	密度	弹性模量	泊松比
材 料	(kg/mm^3)	(kg/mm^2)	
铜	0.8E-05	11000	0.35
压电陶瓷	0.75E-05	58500	0.31

2.1.2 边界条件

压电微马达定子的下表面可作全约束处理,约束为: $u_x=0, u_y=0, u_z=0, ROT_x=0, ROT_y=0, ROT_z=0$ (u_x, u_y, u_z 为平移量, ROT_x, ROT_y, ROT_z 为旋转量)。

2.1.3 载荷形式

根据压电微马达的工作条件,可看作总压力的 F_N 的均布载荷作用在定子的上表面,以及 μF_N 的摩擦载荷作用在定子的上表面。取 F_N 为 $2.0 \times 10^{-3} \text{kgf}$, $\mu F_N = 1.0 \times 10^{-3} \text{kgf}$ 。

2.2 有限元的计算结果分析

根据有限元方法用 ANSYS 软件在 APOLLO 工作站上进行工程计算,可得轴向的固有频率为: $f_1=513779.127\text{Hz}$; $f_2=855639.042\text{Hz}$; $f_3=872117.166\text{Hz}$ 。由此可见压电微马达的固有频率较高,根据一阶固有频率可设计驱动电源的激振频率。

取压电微马达定子表面沿径向的两组节点,计算其表面的切应力。节点由内向外逐渐增大排列,见表 2。

表 2 定子表面节点切应力值

	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
第一组	2.8861502	4.6905413	6.8907122	5.3175081	3.7566061
第二组	2.6800385	4.7381197	6.6477541	4.7450035	3.3361848

由表 2 可见,压电微马达的定子环面中部的切应力较大,由此向内向外切应力逐渐减小。这

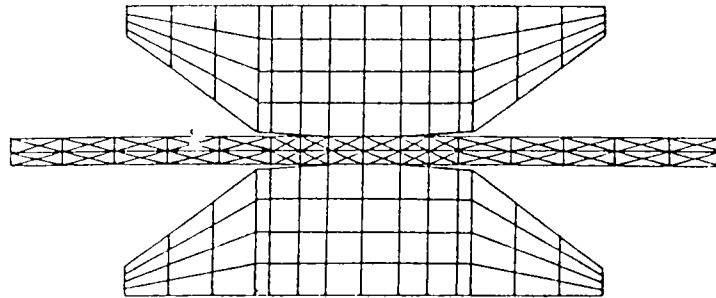


图 1 压电微马达有限元模型

说明压电微马达定子环面中部的驱动力将是最大的,向内环及外环驱动力逐渐减小。

3 压电微马达的实验研究

根据压电微马达的有限元分析结果,设计该微马达实验模型的本体结构如图2所示。其中,1为转子,2、3、4、5、6构成定子,3、5为换能器。考虑到压电微马达实验模型的强度和性能的稳定性,压电换能器采用PZT-5,其余材料为金属Cu。压电微马达实验模型各元器件装配好坏直接影响马达的性能,本模型的联接采用内应力固接的方式完成。

用简单传输法或 π 型网络传输法可测得压电微马达的谐振频率。简单传输法的测量线路原理如图3所示。对于各仪器的要求是:①信号发生器的频率范围较宽,输出电平稳定。要求有一定输出功率,保证压电振子或压电材料所需要的传输电流;②示波器要求有较高的输入阻抗,性能稳定,灵敏度高,其工作频率范围应宽于所测信号频率;③频率计应具有高输入阻抗,且远大于信号发生器的输出阻抗,以免影响其输出电平,而且其测量精确度应高于所要求的测量误差;④为保证输入电压保持不变,应使 $R_T < R_1$ (其中, R_1 为压电微电机的等效电阻)。

测量原理及方法如下:改变信

号发生器的频率 f ,压电振子(即压电微马达本体)的阻抗随之发生变化,因而回路中过的电流也要发生变化。由于 R_T 是与马达本体串联的,因此, R_T 两端的电压 V_R 也随其电流变化而变化。由于PZT-5的 Q_m 较大,这时可近似取电压 V_R 最大值时的阻抗频率为谐振频率 f_r 。根据实验测试结果: $f_r \approx 500\text{kHz}$ 。这与前述压电微马达有限元分析结果基本上取得一致。根据有限元分析结果及实验测试结论,专门设计了压电微马达的驱动电源。为了保证换能器的高效工作和微马达控制,采用了高频振荡电路的电频率可调自动跟踪技术。

对于研制的 $\varphi 10\text{mm}$ 的压电微马达实验模型,用HT-446型数字式手持转速表及SZGB-5光电转速传感器进行转速测试,微马达的转速可在 $0 \sim 400\text{r/s}$ 范围内连续调节。用悬臂梁法进行压电微马达的动力学测试,其最大输出扭矩达 $28\mu\text{Nm}$,功率达 $1172.3\mu\text{W}$ 。

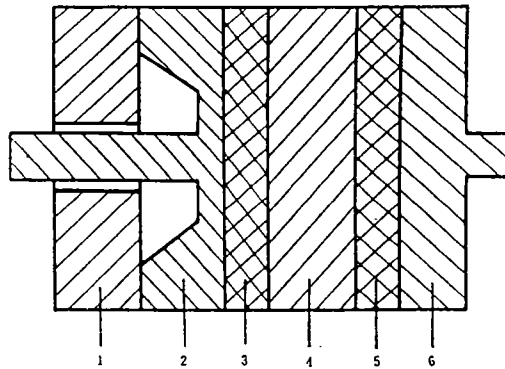


图2 压电微马达实验模型的结构

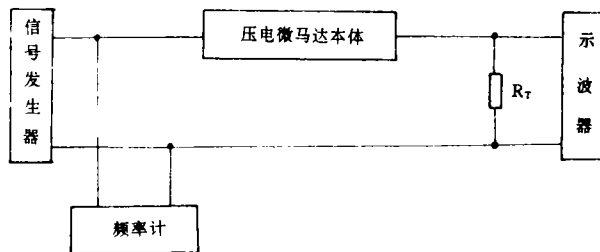


图3 简单传输法测量电路图

4 结 论

(1)在压电微马达的力学模型及边界条件的基础上,用世界上公认的 ANSYS 有限元分析软件在 APOLLO 工作站上进行压电微马达的有限元分析,得出了压电微马达实验模型的共振频率以及定子表面应力场的分析结果。一方面开辟了一条压电微马达 CAE 的有效途径,另一方面可以根据有限元分析结果指导压电微马达的研制。

(2)通过简单传输法对压电微马达本体的谐振频率进行了测试,实验测试结果与有限元分析结果基本上吻合,验证压电微马达有限元理论分析结果的可靠性。此分析结果可以用于指导压电微马达驱动电源的设计及其本体结构的改进。

(3)根据理论及实验分析结论,已经研制成功 $\phi 10\text{mm}$ 压电微马达实验样机模型。这种新型微驱动器的研究必将进一步推动微型机械的发展。

参 考 文 献

- [1] 崔天宏等,超声波微电机传动机理的研究. 机械工程学报,1995,31(2):71~76
- [2] 崔天宏等,微机械中超声微电机的研究. 仪器仪表学报,1995,16(1):275~278
- [3] T. Maeno, et al., The Contact Mechanism of an Ultrasonic Motor. IEEE The International Symposium on Applications of Ferroelectrics, U. S. A., 1990:535~538
- [4] K. Nakamura, et al., Design of a Hybrid Transducer Type Ultrasonic Motor. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, U. S. A. 1993,40(4):395~401
- [5] S. Ueha, et al., Ultrasonic Motors. IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, U. S. A., 1988:519~522
- [6] A. M. Flynn, et al., Piezoelectric Micromotors for Microrobots. Journal of Microelectromechanical Systems, 1992, 1(1):44~50
- [7] 任庆华,空间相机主反射镜的力学计算. 光学精密工程,1994,2(2):35~41
- [8] 卢锴,改善光电跟踪测量系统机械谐振频率方法探讨. 光学精密工程,1994,2(2):47~52

Fem and Experiment of Piezoelectric Micromotors

Cui Tianhong*, Wu Qingwen, Wang Liding and Lu Qiongying

(* Dept. of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

The piezoelectric micromotor is a new project in the field of Micro Electro Mechanical Systems. In this paper, FEM of the piezoelectric micromotor has been conducted in dynamics in order to get some important results such as resonance frequencies, shearing force on the stator surface, etc.. The experiment of the piezoelectric micromotor has also been carried out so that the FEM results of the piezoelectric micromotor has been proved. This has laid a solid foundation for the piezoelectric micromotor optimum design.

Key words: MEMS, Piezoelectric micromotor, FEM