

压电微马达运动学模拟的研究*

崔天宏* 王立鼎 吕琼莹

(* 清华大学精仪系, 北京100084)

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春130022)

摘要 本文在压电微马达运动学基本原理的基础上, 运用C语言编制了压电微马达运动学分析程序, 进行了压电微马达运动学模拟仿真的研究, 得出一些重要的结论, 并进一步得到压电微马达样机实验的验证。

关键词: 微型机械; 压电微马达; 运动学; 模拟

1 引言

随着微电子学的发展, 本世纪八、九十年代大规模集成电路技术取得惊人的发展, 由此带来的信息革命冲击着社会的各个角落。一些富于思索的科学家受微电子技术的启发, 设想把机械系统也做成象集成电路一样的微小集成机械系统, 进而把驱动器、传感器、执行器、控制器以及微处理器等都集成于一个极小的几何空间内, 并能象集成电路一样大批量廉价生产。如果这一设想得以实现, 则势必带来空前的产业革命。美国、日本、德国等发达国家的决策者们支持了少数科学家这一近乎离奇的设想, 于是展开了微型机械这个新兴交叉学科领域的研究。

压电微马达是微型机械的动力源, 是典型的机电一体化装置, 它涉及的技术横跨众多学科, 如压电学、固体波动力学、接触力学、电子学、控制论、摩擦学、机械振动理论等等。因此, 压电微马达的研究有赖于将多学科的知识密切融合。从机械传动角度, 压电微马达包含着波传动和机械传动两大要素, 但它不是传动装置, 而是微驱动装置。由此可见, 压电微马达本身就是一个涉及众多交叉学科微电子机械系统, 其理论和实验工作都是很复杂的。本文在压电微马达运动学基本原理的基础上, 运用C语言编制了其运动学分析程序, 进行了压电微马达运动学模拟仿真的研究, 得出一些重要的结论, 并通过已经研制的压电微马达样机模型实验得以验证。本文的研究工作不但指明了压电微马达的研究方向, 而且对其进一步研制工作提供了有力的理论指导。

2 压电微马达的运动学模型

压电微马达致动的基本原理是: 以广义瑞利波振动的定子表面的质点都在做着一致的椭

* 国家自然科学基金资助项目

收稿日期: 1995年11月2日

圆运动,则与处于广义瑞利波振动状态的定子表面接触的转子被波峰托起。要注意波峰处质点的振动方向是一致的,但转子运动方向与波前进的方向相反。这样,被波托起的转子必将在质点摩擦力的作用下,向着与广义瑞利波前进相反的方向转动。

根据压电微马达的广义瑞利波和粗糙度类波理论^[1,2],由图1压电微马达机理简图,可以推导出压电微马达速度仿真模型为:

$$v = -K_x \frac{\omega_{GR} I_m H T}{r^2 \lambda_1} \cos(R_{GR} x - \omega_{GR} t) - 2.22 \frac{\omega_0 R_a T}{\lambda_2} \cos(R_c x - 0.5 \omega_0 t) \quad (1)$$

则当广义瑞利波与粗糙度类波同步时,最大转速为

$$n_{\max} = \frac{T \omega_{GR}}{2\pi r \lambda_1} (K_x \frac{I_m H}{r^2} + 2.22 R_a) \quad (2)$$

当广义瑞利波与粗糙度类波异步时,可得最大转速为

$$n_{\max} = \text{Max} \left(K_x \frac{\omega_{GR} T I_m H}{2\pi r^3 \lambda_1}; \frac{0.354 R_a \omega_0 T}{2\pi r \lambda_2} \right) \quad (3)$$

式中, K_x ——转速修正系数;

ω_{GR} ——广义瑞利波的角速度;

T ——定义弹性体的厚度;

I_m ——外加交流电峰值;

H ——压电陶瓷的厚度;

r ——压电陶瓷圆片的半径;

λ_1 ——广义瑞利波的波长, $\lambda_1 = C_{GR}/f_{GR}$;

λ_2 ——粗糙度的波距;

R_a ——粗糙度的算术平均值;

ω_0 ——转子的角速度。

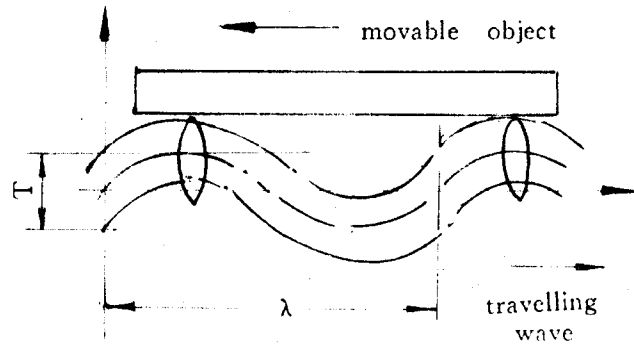


图1 压电微马达机理简图

Fig. 1 The theory of piezoelectric micromotors

3 压电微马达的运动学模拟

根据上述压电微马达的运动学仿真模型,用C语言编写了相应的运动学模拟程序,在PC486计算机上进行了压电微马达的运动学模拟仿真,取得了良好的效果。转速随参数变化的模拟仿真程序框图如图2所示。

取式(1)、(2)、(3)中各个参数为: $T = 5 \times 10^{-3} \text{m}$, $f_{GR} = 5 \times 10^5 \text{Hz}$, $r = 5 \times 10^{-3} \text{m}$, $\lambda_1 = 8.8 \times$

10^{-3}m , $H=2\times 10^{-3}\text{m}$, $K_z=4.5\times 10^{-8}$. 分别按同步时 $R_a=0.32\mu\text{m}$; 同步时 $R_a=1.25\mu\text{m}$; 异步时 $\lambda_2<0.354R_a$ (取 $R_a=3.39\lambda_2$); 异步时 $\lambda_2>0.354R_a$ 等四种情况, 利用图2编制的计算机模拟程序, 模拟转速 n 随电流 I_m 的变化情况, 其模拟仿真的结果如图3所示。

由图3可以得出这样的结论:
 (1) 转速 n 与电流 I_m 基本上成线性关系;
 (2) 同步时, R_a 若较小, 则转速的大小主要由广义瑞利波决定; R_a 若较大, 则转速的大小同时取决于广义瑞利波及粗糙度类波;
 (3) 异步时, 当 $\lambda_2 r > 0.354R_a T$, 转速由广义瑞利波决定; 当 $\lambda_2 r < 0.354R_a T$, 转速主要由粗糙度类波决定。

取式(1)、(2)、(3)中各个参数为: $T=5\times 10^{-3}\text{m}$, $r=5\times 10^{-3}\text{m}$, $H=2\times 10^{-3}\text{m}$, $K_z=4.5\times 10^{-8}$. 分别按同步时 $R_a=0.32\mu\text{m}$, $I_m=1\text{A}$; 同步时 $R_a=0.32\mu\text{m}$, $I_m=2\text{A}$; 异步时 $I_m=2\text{A}$, $\lambda_2<0.354R_a$ (取 $R_a=3.39\lambda_2$); 异步时 $I_m=2\text{A}$, $\lambda_2>0.354R_a$ 等四种情况, 利用图2编制的计算机模拟程序, 模拟转速 n 随广义瑞利波频率 f_{GR} 变化情况, 模拟仿真的结果如图4所示。

由图4可以得出这样的结论:
 (1) 转速 n 与广义瑞利波的频率 f_{GR} 的平方成正比;
 (2) 同步时, I_m 和 R_a 同时决定转速 n 的大小。当 I_m 相对较大时, 转速主要由广义瑞利波决定; 当 R_a 相对较大时, 转速主要由粗糙度类波决定;
 (3) 异步时, 当 $\lambda_2 > 0.354R_a T$, 转速主要由广义瑞利波决定; 当 $\lambda_2 r < 0.354R_a T$, 转速主要由粗糙度类波决定。

取式(1)、(2)、(3)中各个参数为: $f_{GR}=5\times 10^5\text{Hz}$, $\lambda_1=8.8\times 10^{-3}\text{m}$, $K_z=4.5\times 10^{-8}$, $H=0.4r$, $T=r$. 分别按同步时 $R_a=0.32\mu\text{m}$, $I_m=1\text{A}$; 同步时 $R_a=0.32\mu\text{m}$, $I_m=2\text{A}$; 异步时 $I_m=2\text{A}$, $\lambda_2<0.354R_a$ ($R_a=3.39\lambda_2$); 异步时 $I_m=2\text{A}$, $\lambda_2>0.354R_a$ 等四种情况, 利用图2编制的计算机模拟程序, 模拟转速 n 随半径 r 的变化情况, 模拟仿真的结果如图5所示。

由图5可以得出这样的结论:
 (1) 在相同条件下, 转速 n 随半径 r 的增大而减小;
 (2) 同步时, I_m 和 R_a 同时决定转速度 n 的大小。当 I_m 相对较大时, 转速主要由广义瑞利波决定; 当 R_a 相对较大时, 转速主要由粗糙度类波决定。

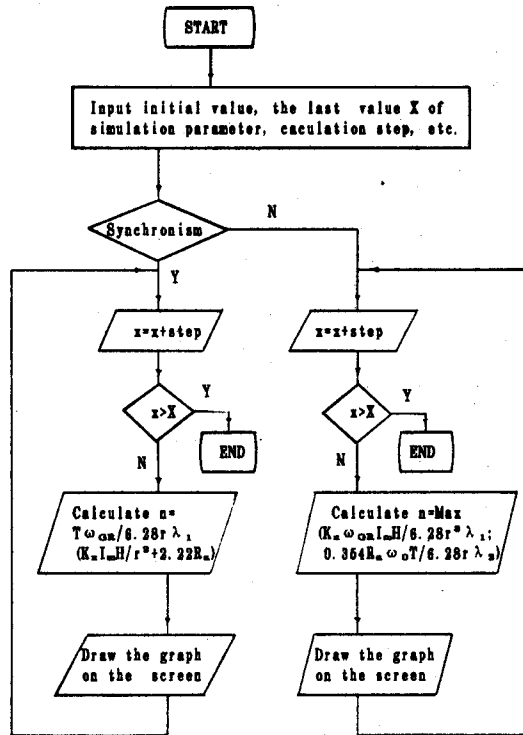


图2 压电微马达的运动学模拟程序框图

Fig. 2 Kinetic simulation of piezoelectric micromotors

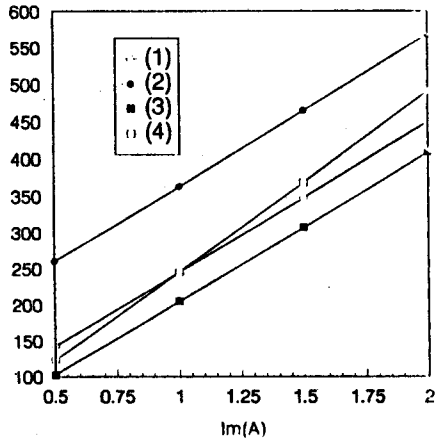


图3 压电微马达 n 随 I_m 变化的模拟曲线
 (1)同步, $R_s=0.32\mu\text{m}$ (2)同步, $R_s=1.25\mu\text{m}$
 (3)异步, $R_s=0.32\mu\text{m}, \lambda_2 > 0.354R_s$
 (4)异步, $R_s=0.32\mu\text{m}, \lambda_2 < 0.354R_s$
 (取 $R_s=3.39\lambda_2$)

Fig. 3 $n-I_m$ simulation curves of piezoelectric micromotors

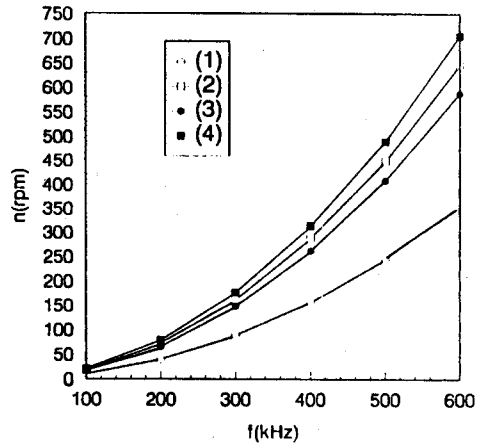


图4 压电微马达 n 随 f_{GR} 变化的模拟曲线
 (1)同步, $R_s=0.32\mu\text{m}, I_m=1\text{A}$
 (2)同步, $R_s=0.32\mu\text{m}, I_m=2\text{A}$
 (3)异步, $I_m=2\text{A}, \lambda_2 > 0.354R_s$
 (4)异步, $I_m=2\text{A}, \lambda_2 < 0.354R_s$
 (取 $R_s=3.39\lambda_2$)

Fig. 4 $n-f_{GR}$ simulation curves piezoelectric micromotors

4 压电微马达的样机实验

根据压电微马达的广义瑞利波致动机理, 我们设计如图6所示的压电微马达的实验模型样机, 基本体直径为 $\varnothing 10\text{mm}$ 。其中, 1为转子,

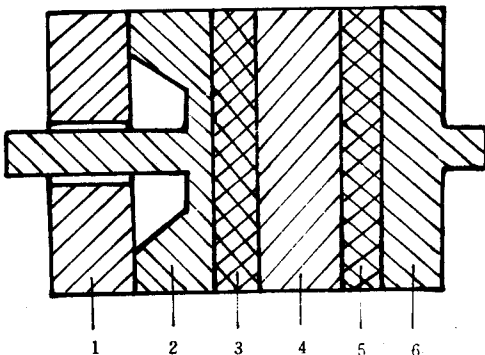


图6 压电微马达实验模型结构简图
 Fig. 6 The structure of Piezoelectric micromotor model

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样机的强度和性能的稳定性, 压电换能器采用 PZT-5, 其余材料采用金属

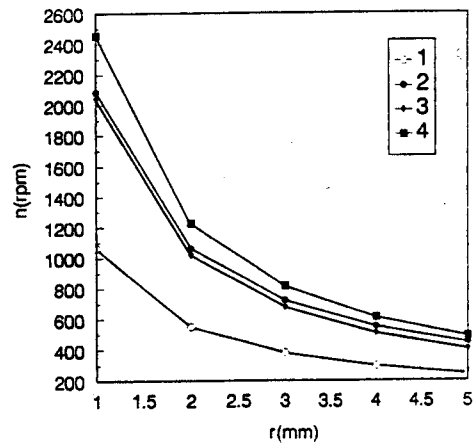


图5 压电微马达 n 随 r 变化的模拟曲线
 (1)同步, $R_s=0.32\mu\text{m}, I_m=1\text{A}$
 (2)同步, $R_s=0.32\mu\text{m}, I_m=2\text{A}$
 (3)异步, $I_m=2\text{A}, \lambda_2 > 0.354R_s$
 (4)异步, $I_m=2\text{A}, \lambda_2 < 0.354R_s$
 (取 $R_s=3.39\lambda_2$)

Fig. 5 $n-r$ simulation curves of piezoelectric micromotors

C₀。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。压电微马达的驱动电路是针对该微马达实验模型的具体结构而专门设计的,为了保证换能器的高效工作和马达控制,采用了高频振荡电路的电频率可调自动跟踪技术。

对图6所示的压电微马达样机进行了运动学模型实验,转速测量使用 HIT-446型数字式手持转速表和 SZGB-5型光电转速仪,两种仪器测试结果基本一致。在改变参数的情况下,测量各种情况下的马达转速,结果表明压电微马达模型实验与上述模拟仿真的结论取得良好的一致,从而验证了压电微马达运动学基本原理及其模拟仿真方法的正确性。

5 结 论

压电微马达在微型机械是一种十分新颖、独具特色并具有巨大潜力的驱动器,它具有许多优良性能,如:高换能/储能密度、低驱动电压、不需悬浮措施、可直接轴向耦合、转子材料不限、低速大力矩、结构简单易于微型化等等。压电微马达的优良特性为其发展必将带来美好的应用前景,目前它已成为各国研究的热点技术之一。本文根据压电微马达的广义瑞利波及粗糙度类波理论给出其运动学数学模型,运用 C 语言编制了压电微马达运动学模拟程序,进行了运动学仿真,得出转速 n 与电流 I_m 成线性关系、转速 n 与广义瑞利波的频率平方 f_{cr}^2 成正比、转速 n 随压电微马达的半径 r 的增大而减小等一系列重要结论。并通过直径 $\varnothing 10\text{mm}$ 的压电微马达样机模型实验,验证了其运动学基本原理及其模拟仿真结论的正确性,从而为压电微马达的优化设计甚至于实用化研究奠定了坚实的基础。

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] 崔天宏,微电子机械系统中的压电微马达的研究. 中国科学院博士学位论文,1995
- [4] R. M. Moroney, et al., Ultrasonic Micromotors: Physics and Application, IEEE MEMS Workshop, 1991,109-113
- [5] M. Kurosawa, et al., Simulation and Experimental Study on Elastic Fine Ultrasonic Motor, Ultrasonic Symposium. 1992:893-892
- [6] K. Nishibori, et al., Velocity Control of Ultrasonic Motors for Robot Arms by Pulse Width Modulation, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers,1991,57(541):2804-2810
- [7] O. Yu. Zharii, Model of Ultrasonic Motor with Frictional Transformation of Motion-Type in Slip Condition, Akusti cheskii Zurnal(Russia), 1993, 39(3):479-488
- [8] O. Y. Zhstii, Modeling of a Mode Conversion Ultrasonic Motor in the Regime of Slip, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 1993, 40(4):411-416
- [9] R. L. Letty, et al., Analysis of an Ultrasonic Piezoelectric Motor Using Numerical Modeling, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 1993,4(3):428-431
- [10] K. R. Udayakumar, et al., Ferroelectric Thin Film Ultrasonic Micromotors, IEEE MEMS Workshop, 1991:109-113

Simulation of Piezoelectric Micromotor in Kinematics

Cui Tianhong*, Wang Liding and Lu Qionying

(*Tsinghua University, Beijing 100084*)

Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

Based on the fundamental mechanism of piezoelectric micromotor in kinematics, a software to analyze the piezoelectric micromotor has been worked out. According to the Simulation of piezoelectric micromotor, some important conclusions have been reached. Finally the conclusions have been tested and verified by the experiment of piezoelectric micromotor model.

Key words: MEMS, Piezoelectric micromotor, Kinematics, Simulation

崔天宏 1969年6月出生,清华大学博士后。1991年7月毕业于南京航空航天大学机械工程系,同年免试推荐为中国科学院长春光机所硕士研究生,1992年9月免试推荐直接攻读博士学位,1995年7月获中国科学院工学博士学位。研究领域为微米/纳米科学与技术。参加国家重点、重大项目多项,其中已完成三项。1994年获中国科学院院长奖学金,1995年获中国科学院大恒奖学金。近三年在国内外发表学术论文二十余篇,其中国内核心期刊、国外刊物九篇。