

# 压电微马达的动力学仿真及实验研究\*

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** 本文在压电微马达动力学基本原理的基础上, 运用C语言编写了其动力学仿真程序, 进行了压电微马达的动力学模拟。其次, 本文提出了压电微马达的动力学测量原理, 对压电微马达样机进行了动力学模型实验, 从而验证了压电微马达动力学原理及其仿真结论的正确性。

**关键词:** 微型机械; 压电微马达; 动力学; 仿真; 模型实验

## 1 引言

微型机械是八十年代后期崛起的新兴热点技术, 它是一个独立的微小智能系统, 主要由微驱动器、微传感器、微执行器和微能源等要素组成。这些要素技术的实现必须有相应的基础理论和工艺技术的支持。从这个意义上说, 微型机械是一个多学科、高技术交叉的边缘学科。可以说, 微型机械及其相关学科的研究目前已得到科技发达国家的普遍重视, 并已成为当今高科技研究的重点之一。以微马达为中心的微驱动器的研究一直是微型机械研究的核心内容, 并在一定程度上是一个国家微型机械发展水平的重要标志。1988年, 洛伯(T. A. Lober)和豪(R. T. Howe)制作了静电微马达的原始结构, 同年华裔留美学生冯龙生等人做出了首台可动的静电微马达, 轰动了世界。目前, 人们已经设计、制作了多种形式的微马达。按照工作原理, 可以把微马达分为以下五类: 静电微马达、压电微马达、电磁微马达、谐振微马达和生物微马达。其中, 压电微马达在微型机械中是一个十分新颖和具有巨大潜力的待开发课题, 它有可能成为微型机械中最有希望的动力元件之一。

1990年, 美国麻省理工学院人工智能实验室、林肯实验室和宾西法尼亚大学材料实验室的A. M. Flynn等人首次研制成功压电薄膜微马达。可见, 关于压电微马达机理更深层次的理论和实验研究却刚刚起步, 还处于探索和待完善阶段。本文在压电微马达广义赫兹动力学基本原理的基础上, 进行了压电微马达的动力学模拟, 并用模型实验方法验证了其基本原理及模拟仿真结论的正确性, 从而为压电微马达的理论、实验及实用化研究奠定了坚实的基础。

\* 国家自然科学基金重点资助项目

收稿日期: 1995年11月6日

## 2 压电微马达的动力学仿真模型

压电微马达的广义赫兹接触指压电微马达的转子与定子表面的广义瑞利波、粗糙度类波或前二者的合成行波的弹性接触。根据这一基本原理,可以得到压电微马达的动力学仿真模型为:

$$M = \mu\varphi(r)F_N + ER \quad (0 < \delta < \max\delta) \quad (1)$$

其中,

$$\varphi(r) = \frac{2}{3}(r_1 + r_2 - \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}) \quad (2)$$

$$\delta = \frac{2F_N}{(r_2 - r_1)n} \cdot \frac{1 - \sigma^2}{E} (\ln \frac{2R}{a} + 0.407) \quad (3)$$

$$\max\delta = \begin{cases} \max(\epsilon_0, \epsilon_0') = \max[k_x \frac{I_n HT}{r^2 \lambda_1}, \sqrt{2} \pi R_a \frac{I}{\lambda_2}] & \text{异步时} \\ \max(\epsilon_0 + \epsilon_0') & \text{同步时} \end{cases} \quad (4)$$

$$\min \ln(R/a) = \begin{cases} \ln \frac{\min[k_x \frac{I_n HT}{r^2 \lambda_1} k_{GR}^2, \sqrt{2} \pi R_a \frac{T}{\lambda_2} k_c^2]}{1/2(\lambda_1 + \lambda_2)} & \text{异步时} \\ \ln \frac{\min(\epsilon_0 + \epsilon_0') k_{GR}^2}{1/2(\lambda_1 + \lambda_2)} & \text{同步时} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} ER = & \iint_{\Sigma} r \left\{ -\frac{4F_N}{\pi^2 a'} \int_{-a}^{-a'} [1 - \frac{\epsilon^2}{R^2}]^{1/2} \frac{Z^2(x + \epsilon)}{[(x + \epsilon)^2 + Z^2]^2} d\epsilon \right. \\ & - \frac{2t}{\pi} \int_{-a}^{-a'} \frac{Z(x + Z)^2}{[(x + \epsilon)^2 + Z^2]^2} d\epsilon - \frac{4F_Z}{\pi^2 a'} \int_{a'}^a [1 - \frac{\epsilon^2}{R^2}]^{1/2} \frac{Z^2(x - \epsilon)}{[(x - \epsilon)^2 + Z^2]^2} d\epsilon \\ & \left. - \frac{2t}{\pi} \int_{a'}^a \frac{Z(x - \epsilon)^2}{[(x - \epsilon)^2 + Z^2]^2} d\epsilon \right\} dx dr \quad (6) \end{aligned}$$

式中,  $k_{GR}$ ——广义瑞利波的波数,  $k_{GR} = \frac{\omega_{GR}}{C_{GR}} = \frac{2\pi}{\lambda_1}$ ;

$k_c$ ——粗糙度类波的波数,  $k_c = \frac{\omega_c}{C_c} = \frac{2\pi}{\lambda_2}$ ;

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

$\lambda_2$ ——粗糙度类波的波长;

$M$ ——压电微马达的转矩;

$\mu$ ——转子与定子间的摩擦系数;

$F_N$ ——定子表面所受的正压力;

$r_1, r_2$ ——压电微马达定子的内外半径;

$R$ ——波峰处的曲率半径;

$a$ ——接触带宽的一半;

$a'$ ——转子与曲率圆接触带宽的一半;

$n$ ——定子表面广义瑞利波或粗糙度类波的个数;

$\delta$ ——接触变形量。

### 3 压电微马达的动力学仿真分析

根据上述压电微马达的动力学仿真模型,利用 C 语言编写了相应的动力学仿真程序,在 PC486 机上进行了压电微马达的动力学模拟仿真,取得了良好的效果。图 1 为转矩  $M$  随参数变化的仿真程序框图。

利用式(1)到式(6),分别按  $r_1=0, r_2=1\text{ mm}; r_1=0, r_2=5\text{ mm}; r_1=2.5\text{ mm}, r_2=5\text{ mm}; r_1=4\text{ mm}, r_2=5\text{ mm}$  等四种情况,利用图 1 编制计算机仿真程序,模拟转矩  $M$  随压力  $F_N$  的变化情况,模拟仿真的结果如图 2 所示。

由图 2 可以得到这样的结论:(1)转矩  $M$  与正压力  $F_N$  在一定范围内近似成线性关系;(2)外径相同的,内径较大的压电微马达的输出转矩较大;内径相同时,外径较大的压电微马达的输出转矩较大。

利用式(1)到式(6),取  $F_N=50\text{ mN}$ ,分别按  $r_1=0; r_1=2\text{ mm}; r_1=4\text{ mm}$  等三种情况,利用图 1 编制计算机仿真程序,模拟转矩  $M$  随压电微马达外径  $r_2$  的变化关系,模拟仿真的结果如图 3 所示。

由图 3 可以得到这样的结论:(1)当  $r_1=0$  时,转矩  $M$  与外径  $r_2$  成正比例关系;(2)当  $r_1 \neq 0$  时,转矩  $M$  随外径  $r_2$  的增加而增大,但并非正比例关系。

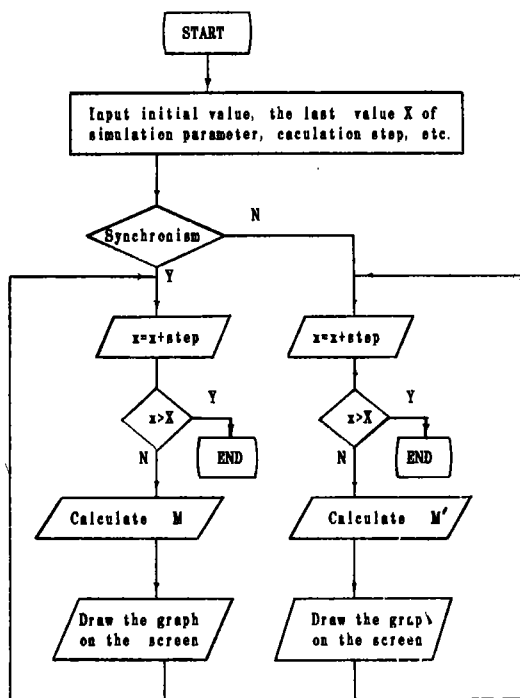
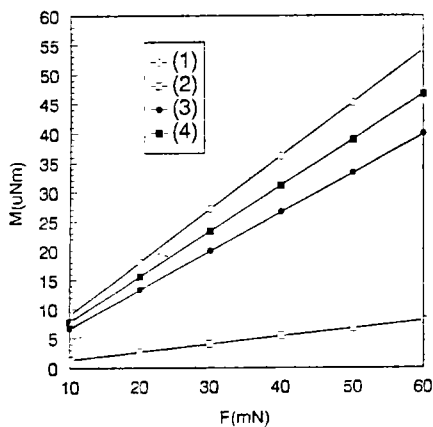


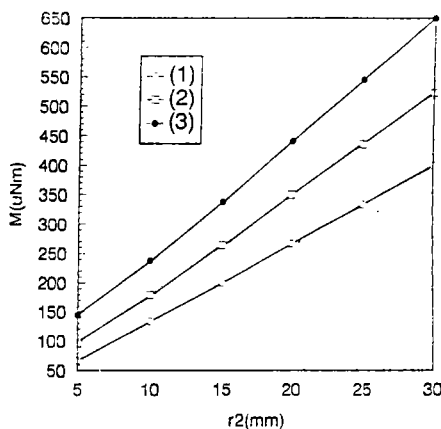
图 1 压电微马达的动力学仿真程序框图  
Fig. 1 Dynamics simulation framework of piezoelectric micromotor



(1)  $r_1=4\text{ mm}, r_2=5\text{ mm}$  (2)  $r_1=0, r_2=1\text{ mm}$   
(3)  $r_1=0, r_2=5\text{ mm}$  (4)  $r_1=2.5\text{ mm}, r_2=5\text{ mm}$

图 2 压电微马达  $M$  随  $F_N$  变化的模拟曲线

Fig. 2  $M-F_N$  curve of piezoelectric Micromotor



(1)  $r_1=0$  (2)  $r_1=2\text{ mm}$  (3)  $r_1=4\text{ mm}$

图 3 压电微马达  $M$  随  $r_2$  变化的模拟曲线

Fig. 3  $M-r_2$  curve of piezoelectric micromotor

## 4 压电微马达的动力学模型实验

### 4.1 压电微马达的转矩测量原理

到目前为止尚无微马达转矩测量方法的文献报道,本文给出一种微转矩测量的基本方法,称为悬臂法,即在已研制的直径  $\varphi 10\text{ mm}$  压电微马达转子外侧压上一悬臂梁,由于正压力  $N$  作用在转子外侧,将产生切向摩擦力  $f$ ,则压电微马达的输出力矩  $M$  为

$$M = \mu \cdot N \cdot r \quad (7)$$

式中,  $\mu$ ——悬臂梁与转子间的摩擦系数;

$r$ ——转子半径。

$N$  和  $\mu$  可用如下方法确定:

(1) 正压力  $N$  的确定可采用两种方法

① 根据力学基本原理可知  $h = NL^3/3EI$ , 则

$$N = \frac{3EIh}{L^3} \quad (8)$$

式中,  $E$ ——悬臂梁的杨氏弹性模量;

$h$ ——悬臂梁的挠度;

$I$ ——悬臂梁的惯性矩,它的大小为  $I = \frac{1}{64}\pi d^4$  ( $d$  为悬臂梁的直径)

式(8)中,  $E, I, L$  为常量,根据测得的挠度  $h$  可以确定正压力  $N$ 。

② 标定方法

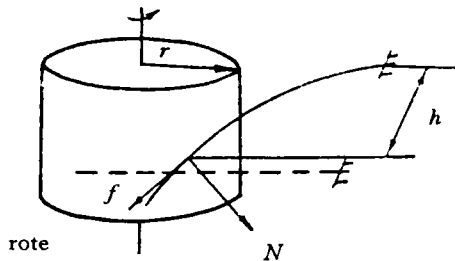


图4 转矩测量原理

Fig. 4 Mechanism of torque

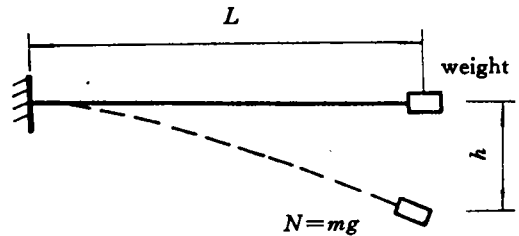


图5 正压力  $N$  的标定

Fig. 5 Scale the pressure  $N$

如图5所示,在悬臂梁自由端放上一质量为  $m$  的砝码,该砝码距固定端距离为  $L$ ,悬臂梁水平放置,测出其加砝码后的挠度为  $h$ 。用上述方法,通过改变砝码质量,可以得出一系列的力  $N = mg$  所对应的挠度  $h$ ,即标定出了在悬臂梁  $L$  处的作用力与挠度的对应关系。实验表明,在所实验的砝码重要范围内,挠度  $h$  基本上与作用力  $N$  成线性关系。有了该对应关系,就可用差值的方法算出各种挠度下的正压力  $N$ 。

### 4.2 压电微马达的动力学模型实验

(1) 输出转矩与电压关系试验

本实验考查各种驱动电压下的输出转矩,最后得出输出转矩与驱动电压之间的关系曲线,如图6所示。

由图 6 可以得出这样的结论:压电微马达的输出转矩与驱动电压之间成线性关系,这与理论分析结果基本一致。

### (2) 输出转矩与正压力关系试验

对压电微马达实验模型,设定其驱动电压为 20V,在转子的轴向加载,调节转子与定子之间正压力的大小,观察输出转矩随正压力的变化关系,最后得到压电微马达输出转矩与正压力的关系曲线,如图 7 所示。

由图 7 可以得出这样的结论:正压力在一定范围内,压电微马达的输出转矩与正压力成正比例关系;正压力超过一定范围后,输出转矩随正压力的进一步增大而减小;当正压力达到一定值后,输出转矩将为零。峰值点处的输出转矩理论值与实验值的最大误差为 28.0%,理论与实验基本上吻合。

## 5 结 论

(1) 本文给出了压电微马达广义赫兹接触的基本概念,及由此得出的压电微马达的仿真数学模型,这不仅可以定性、定量地分析压电微马达的动力学问题,而且在一定意义上讲可以推动接触力学的进展。

(2) 根据压电微马达的广义赫兹接触理论得出的动力学模型,运用 C 语言编制了压电微马达的动力学仿真程序,进行了动力学仿真。得出输出转矩  $M$  与压力  $F_N$  在一定范围内近似成线性关系、当  $r_1=0$  时输出转矩  $M$  与定子外径  $r_2$  成正比例关系、当  $r_1 \neq 0$  时输出转矩  $M$  随定子外径  $r_2$  的增大而增大,但非正比例关系等重要结论。这些结论对压电微马达的优化设计及实用化研究具有重要的意义。

(3) 进行了压电微马达的动力学模型实验,得出输出转矩与电压关系、输出转矩与正压力关系等实验,成功地验证了压电微马达的动力学理论的正确性。

压电微马达在微型机械领域具广阔的应用前景,本文的理论和实验研究工作为压电微马达的进一步实用化研究奠定了坚实的基础。

### 参 考 文 献

- [1] Cui Tianhong, et al., Theoretical Analysis and Design of Ultrasonic Micromotors, IEEE 5th International Symposium on Micro Machine and Human Science, Japan, October 2-4, 1994; 115-118
- [2] 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
- [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] T. Maeno, et al., Finite-element Analysis of the Rotor/ Stator Contact in a Ring-Type Ultrasonic Motor, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, U. S. A., 1992; 868-874
- [5] M. Ishida, et al., Piezoelectric Motor Utilizing the Principle of Strain Ware Gearing, Transactions of

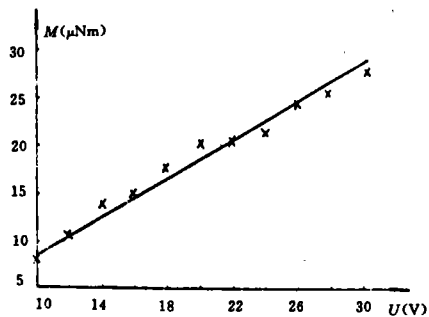


图 6 压电微马达输出转矩与驱动电压的关系曲线

Fig. 6 M-u Curve of Piezoelectric Micromotor

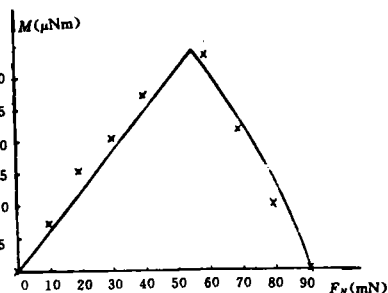


图 7 压电微马达输出转矩与正压力的关系曲线

Fig. 7 M-F<sub>N</sub> Curve of Piezoelectric Micromotor

- the Institute of Electrical Engineers of Japan, 1992, 112(8):747-754
- [6] V. R. Dhuler, et al., Micromotor Operation in a Liquid Environment, IEEE Solid-Sensor and Actuator Workshop, U. S. A., 1992:10-13
- [7] T. Uchiki, et al., Ultrasonic Motor Utilizing Elastic Fin Rotor, IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, U. S. A., 1991:929-932
- [8] O. Yu. Zharii, Modeling of a Mode Conversion Ultrasonic Motor in the Regime of Slip, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, U. S. A., 1993, 40(4):411-417
- [9] H. Hirata, et al., Characteristics Estimation of a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, U. S. A., 1993, 40(4): 395-401
- [10] 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
- [11] Y. Yamayashi, et al., Ultrasonic Motor not Using Mechanical Friction Force, Yamagata University, 1992:125-131
- [12] K. R. Udayakumar, et al., Ferroelectric Thin Film Ultrasonic Micromotors, IEEE MEMS Workshop, Japan, 1991:109-113

## Simulation and Experiment of Piezoelectric Micromotors in Dynamics

Cui Tianhong\*, Wang Liding and Lu Qiongying

(\* Dept of Precision Instrument, 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 micromotors in dynamics, a software to analyze piezoelectric micromotors in dynamics has been worked out, and simulation of piezoelectric micromotors in dynamics has been carried out. Then measurement mechanism of piezoelectric micromotors in dynamics has been advanced, the experiment of piezoelectric micromotors in dynamics has been done, and the conclusions of mechanism and simulation of piezoelectric micromotors in dynamics have been tested and verified.

**Key words:** MEMS, Piezoelectric micromotor, dynamics, Simulation, Model experiment

**崔天宏** 男,1969年6月生,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。