

# 压电微电机优化理论的计算机仿真<sup>\*</sup>

马建旭<sup>1</sup> 刘 翔<sup>2</sup> 李成发<sup>3</sup> 王立鼎<sup>4</sup>

(上海交通大学机械系 上海 200030)

(邮电部长春电话设备厂 长春 130064)

(吉林工业大学机械工程系 长春 130025)

(中国科学院长春光学精密机械研究所 长春 130022)

**摘要** 利用计算机仿真技术,成功地编制出一套计算机软件,深入探讨了压电微电机优化理论,探明了压电微电机压电体材料属性、定子基衬底和弹性体的比刚度、定子各部分结构尺寸对能量输出效率的影响规律,并建议性地给出了压电微电机各部分的优选材料、结构尺寸等。实验表明,该分析方法的应用确有助于提高压电微电机的能量输出。

**关键词** 压电微电机 微机器人 优化理论 计算机仿真

## 1 引 言

近年来计算机技术的迅猛发展,为科学研究提供了强有力的工具。压电微电机作为可应用于微机器人中的一种典型的驱动器,涉及到压电学、机械振动学、分析力学、电子学、波动学等多种理论,因而其一些理论分析和实验研究是极其复杂的。计算机技术的日益完善,为对压电微电机进行系统的研究提供了一定的可能性,利用计算机可以模拟分析出压电微电机在某一研究方向中,各种已知条件变化时,所引起的其他条件变化情况,最后优选出最佳结果。

本文在已建立的纵弯式压电微电机运动学和动力学数学模型、等效优化理论公式<sup>[1]</sup>等基础上,运用C语言编制了压电微电机模拟分析程序,输入各种条件,对其进行仿真研究,较为全面地模拟研究了压电微电机换能过程中,其结构尺寸、材料属性等众多因素对其机械能量转

\* 国家科委 863、攀登计划资助项目

收稿日期: 1997-07-31

换率的影响, 为微电机等效优化理论提供了强有力的补充。以上工作对压电微电机的优化设计、研制工作提供了参考理论依据。

## 2 压电微电机计算机模拟仿真过程

模拟仿真就是通过系统模型的实验去研究一个已经存在的或正在设计中的系统。系统模拟仿真技术实质上就是建立模拟仿真模型和进行模拟实验的技术。系统模拟仿真是一种能代表所研究系统的模型, 结合实际的或模拟的条件进行研究、分析和实验的方法。它作为一种研究方法和实验技术直接应用于系统研究。它是一种利用相似与类比的关系来间接研究事物的方法。

压电微电机的计算机模拟仿真就是建立压电微电机系统的数学模型, 并将数学模型放到计算机上进行实验。因此, 对压电微电机进行一次完整的计算机模拟仿真, 需要经过以下几步:

- (1) 压电微电机系统定义: 根据仿真的目的确定压电微电机系统的边界及约束条件;
- (2) 建立模型: 把压电微电机系统抽象成数学公式或模型;
- (3) 模型变换: 把数学模型转变成计算机能接受的形式(称为程序);
- (4) 设计仿真实验: 包括要输入哪些信号, 改变哪些参数, 记录哪些变量等;
- (5) 模型装载: 将已建立的压电微电机模型输入给计算机;
- (6) 仿真实验: 对压电微电机模型进行各种规定的实验;
- (7) 仿真报告: 对仿真的数据进行分析、整理。

根据仿真技术, 可以将以上压电微电机计算机模拟仿真过程分成三个主要阶段: (如图 1)

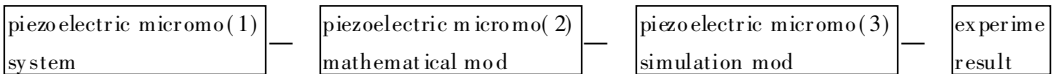


Fig. 1 The proceeding of piezoelectric micromotor's computer simulation

- (1) 压电微电机建模阶段;
- (2) 压电微电机模型变换阶段;
- (3) 压电微电机模型实验阶段;

## 3 压电微电机优化理论的计算机模拟仿真分析

### 3.1 压电微电机优化理论计算机模拟仿真的数学模型

在对纵弯式压电微电机的理论分析, 已建立了压电微电机运动学和动力学数学模型, 抽象出等效优化理论公式<sup>[1-3]</sup>,

$$\eta_{ea} = \eta_0 \cdot \frac{R_L/R_1}{1 + \frac{R_L}{R_1}} \cdot \frac{\frac{K_{eff}^2}{1 - K_{eff}^2 \tan^2 \delta} \frac{Q_m}{1 - K_{eff}^2 \tan^2 \delta}}{\frac{R_L}{R_1} + \frac{K_{eff}^2}{1 - K_{eff}^2 \tan^2 \delta} \frac{Q_m}{1 - K_{eff}^2 \tan^2 \delta}} \quad (1)$$

式中,

$\eta_{ea}$ ——压电微电机系统机械效率;

$\eta_0$ ——压电微电机转子输出效率;

$K_{eff}^2$ ——压电微电机有效机械耦合系数;

$Q_m$ ——压电微电机定子机械品质系数;

$R_L$ ——压电微电机机械负载;

$R_1$ ——压电微电机定子等效阻抗;

$\text{tg}\delta$ ——压电振子介电损耗角正切值。

压电微电机转子输出效率  $\eta_0$  可表示为,

$$\eta_0 = (M\Omega T) / \int_0^T F(t) V_f(t) dt \quad (2)$$

式中,

$T$ ——转子加速和减速运动的一个周期;

$\Omega$ ——转子运动稳定阶段的平均转速;

$M$ ——转子输出转矩;

$F(t)$ ——定子顶端驱动力;

$V_f(t)$ ——定子顶端振动速度。

并将压电微电机定子综合参量  $Y$  引入压电微电机等效优化理论公式中

$$Y = \frac{K_{eff}^2}{1 - K_{eff}^2} \cdot \frac{Q_m}{\text{tg}\delta} \quad (3)$$

那么,式(1)~(3)即为压电微电机优化理论计算机模拟仿真的数学模型。因此下面主要从压电微电机计算机模拟仿真过程中第二个主要阶段进行分析研究。

根据已建立的压电微电机的等效优化理论模型,用 Turbo C 语言编写了相应的仿真程序,在 PC 机上进行了压电微电机等效优化理论的模拟仿真,建立了压电微电机材料属性与压电微电机定子综合参量  $Y$  和电机输出机械效率  $\eta_a$  的关系。

### 3.2 压电微电机材料属性对压电微电机机械能量输出率的影响

(1) 压电体种类压电微电机系统输出效率  $\eta_{ea}$  的影响。

取压电微电机各个参数量如下:压电微电机基衬底和弹性体材料均为黄铜,相应弹性模量为  $E_a = E_b = 100\text{GPa}/\text{m}^2$ ,密度为  $\rho_a = \rho_b = 8.43 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ ,驱动电压  $V = 20\text{V}$ ,预压力  $F_0 = 100\text{mN}$ 。定子与转子之间摩擦系数  $\mu = 0.25$ ,其它结构系数为  $l_a = 7.5\text{mm}$ ,  $l_0 = 4\text{mm}$ ,  $r = 5\text{mm}$ 。在此状态下考查不同种类的压电体 P8、P5 对压电微电机定子综合参量  $Y$  和电机系统机械输出效率的关系。压电体 P8、P5 厚度方向的弹性模量、密度均为  $E_0 = 156\text{GPa}/\text{m}^2$ ,  $\rho_0 = 7.6 \times 10^3\text{kg}/\text{m}^3$ ,而 P8 的主要参量为:  $K_{33} = 0.65$ ,  $d_{33} = 233 \times 10^{-12}\text{C}/\text{N}$ ,  $\text{tg}\delta = 0.002$ ,  $\beta_{33} =$

0.202 × 10<sup>9</sup> m/F, P5 的主要参量为  $K_{33} = 0.72$ ,  $d_{33} = 450 \times 10^{-12}$  C/N,  $\text{tg} \delta = 0.02$ ,  $\beta_{33} = 0.049 \times 10^9$  m/F。利用编制的计算机程序, 模拟出 P8、P5 对压电微电机定子综合参量  $Y$  和机械输出效率变化情况, 其仿真结果如图 2 示。

由图 2 可知:

(1) 利用压电体 P8 的压电微电机定子综合参量  $Y$  值在一定范围 ( $l_b = 2.5 \sim 6$  mm) 均高于利用压电体 P5 的压电机定子综合参量值  $Y$ 。(2) 采用压电体 P8 的压电微电机系统机械输出效率高于 P5 型压电微电机系统机械输出效率。

(2) 压电微电机中其他材料选择对其系统输出能量的影响压电微电机定子基衬底和弹性体材料变化将影响其整个系统能量的输出。选取压电微电机参量如下: 压电体厚度方向的弹性模量  $E_0 = 156 \text{ GPa/m}^2$ , 密度为  $\rho_0 = 7.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 其他参数为  $\text{tg} \delta = 0.02$ ,  $\beta_{33} = 0.202 \times 10^9$  m/F,  $V = 20 \text{ V}$ ,  $F_0 = 100 \text{ mN}$ ,  $l_a = 7.5 \text{ mm}$ 。在此状态下, 考查铜、钢、铝等材料对电机整个系统能量输出的影响。并取铜、钢、铝的弹性模量分别为  $100 \text{ GPa/m}^2$ ,  $200 \text{ GPa/m}^2$ ,  $70 \text{ GPa/m}^2$ , 密度为  $8.43 \text{ kg/m}^3$ ,  $7.85 \text{ kg/m}^3$ ,  $2.7 \text{ kg/m}^3$ 。利用编制的计算机程序, 模拟出不同材料与电机系统机械输出效率的关系。其仿真结果如图 3 所示。

由图 3 可得出这样的结论, 当材料由铝变化到钢、铜的时候, 其系统能量输出率将逐渐升高; 进而可引申为, 随着材料比刚度  $E/\rho$  的提高, 电机系统能量机械输出率将逐渐降低。

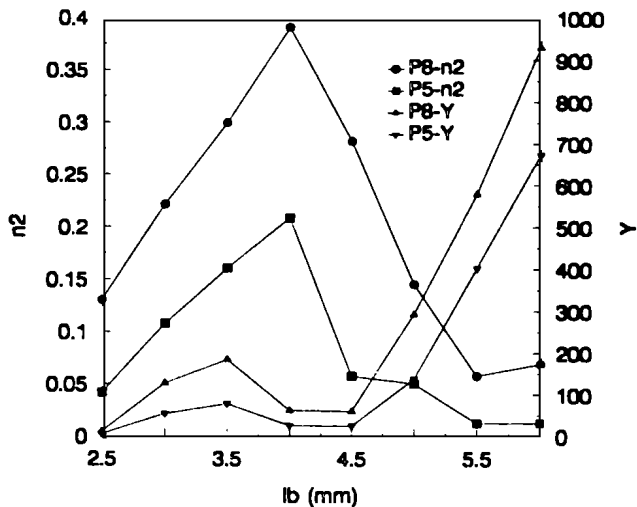


Fig. 2 Comparison among piezoelectric micromotor's output efficiency with different PZT types; the output efficiency  $n_2$  of piezoelectric micromotor and the total parameter  $Y$  of the stator as a function of the elastomer's length

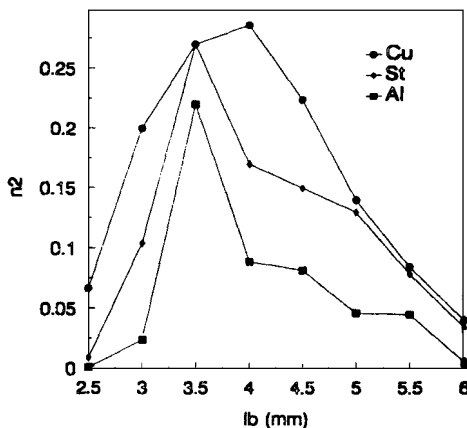


Fig. 3 Comparison among piezoelectric micromotor's output efficiency with different metal materials types in piezoelectric micromotor

### 3.3 结构尺寸变化与压电微电机机械能量输出率的关系

压电微电机各部分结构尺寸变化,亦将影响到其整个系统的能量输出。探讨压电微电机各部分结构尺寸与其机械能输出率之间的关系,也是计算辅助分析的一个重要内容。下面将逐一分析其各部分的影响规律。

#### (1) 压电微电机定子基衬底的影响

设定压电微电机其他部分结构参数和外部输入条件为,  $l_b = 6\text{mm}$ ,  $l_0 = 4\text{mm}$ ,  $r = 5\text{mm}$ , 材料为黄铜, 输入电压为  $V = 20\text{V}$ , 预压力为  $F_0 = 100\text{mN}$ , 利用设计的计算程序, 模拟出在不同压电微电机定子基衬底长度下的机械输出率  $\eta_{ea}$  的变化值。

由图 4 可知, 由于  $Y$  与  $R_L/R_1$  值的综合作用, 最终使得压电微电机系统机械能量输出率  $\eta_{ea}$  在一定的范围内, 随着其基衬底  $l_a$  的增加而呈减小的趋势。

#### (2) 压电体厚度的影响

设定压电微电机其他部分结构参数和外部输入条件为:  $l_a = 11\text{mm}$ ,  $l_b = 6\text{mm}$ ,  $r = 5\text{mm}$ , 材料为黄铜, 输入电压为  $V = 20\text{V}$ , 预压力为  $F_0 = 100\text{mN}$ , 利用已设计的 C 语言计算程序, 模拟出不同压电体厚度与机械输出能比率  $\eta_{ea}$  的关系。

在电机其他结构尺寸一定的时候, 在一定的压电体厚度时, 电机系统机械能量输出率(如图 5)在  $Y$  和  $R_L/R_1$  的共同作用下, 在某一压电体厚度下(6mm) 出现极大值。

#### (3) 弹性体厚度的影响

设定定子中除压电体外的材料为黄铜, 压电微电机部分结构尺寸参数和外部输入条件为  $l_a = 7.5\text{mm}$ ,  $l_0 = 4\text{mm}$ ,  $r = 5\text{mm}$ , 输入电压为  $V = 20\text{V}$ , 预压力为  $F_0 = 100\text{mN}$ , 利用 C 语言计算程序, 模拟出不同弹性体厚度与机械输出能量比率  $\eta_{ea}$  的关系。

在  $R_L/R_1$  和  $Y$  的共同作用, 电机系统机械能输出率将在弹性体厚度为 3.5~4.5mm 时呈现极大值(图 2)。

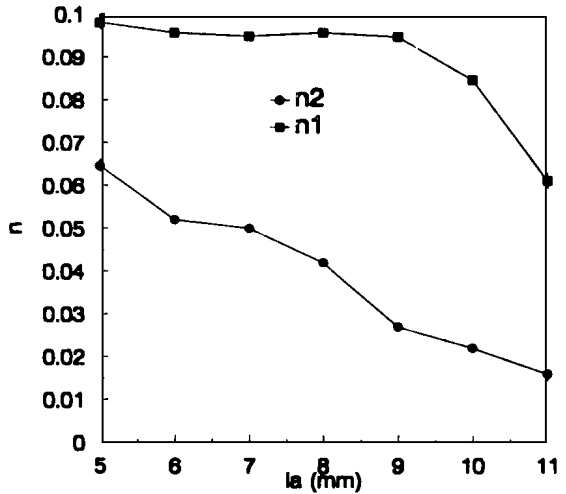


Fig. 4 The output efficiency  $n_2$  of piezoelectric micromotor and the output efficiency  $n_1$  of the stator as a function of the matrix's length

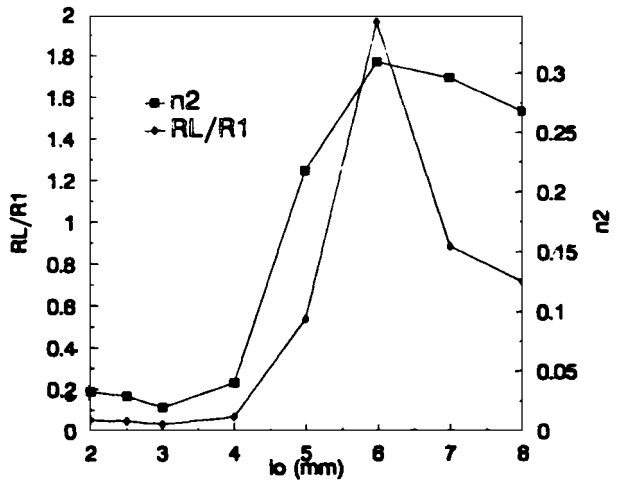


Fig. 5 The output efficiency of piezoelectric micromotor and the rate of resistors as a function of the PZT's length

## 4 实验结果

本文的实验是在设计研制的  $r = 5\text{mm}$  的纵弯式压电微电机样机上完成的。电机的初始设计尺寸为定子基衬底长度为  $11\text{mm}$ 、定子上弹性体长度为  $6\text{mm}$ 、压电体的厚度为  $2\text{mm}$ ，驱动电压峰峰值为  $50\text{V}$ ，在预压力  $40\text{mN}$  下，实际测得其输出典型值为：转子转速为  $180\text{rpm}$  时，输出力矩为  $2.26\text{gfcm}$ ，其最大输出效率为  $1.23\%$ 。而利用压电微电机等效优化理论，结合计算机仿真分析，优选其结构尺寸为：定子基衬底长度为  $8\text{mm}$ 、压电体的厚度为  $4\text{mm}$ 、定子上弹性体长度仍为  $6\text{mm}$ ，驱动电压峰峰值  $50\text{V}$ ，在预压力  $75\text{mN}$  下，实际测得其典型值为：转子转速为  $300\text{rpm}$  时，输出力矩为  $6.38\text{gfcm}$ ，其最大输出效率为  $5.9\%$ 。

由以上分析表明，利用压电微电机优化理论的计算机仿真方法，优化了压电微电机结构尺寸，的确达到了提高压电微电机机械能量的目的。

## 5 结 束 语

根据建立的纵弯式压电微电的运动学和动力学数学模型，以及等效优化理论公式，编制了 C 语言程序，对上述理论进行了计算机模拟仿真和实验，结论如下：

(1) 压电微电机材料属性将影响压电微电机能量转化率：其中利用压电体 P8 的微电机的能量转化率将高于利用压电体 P5 的微电机；能量转化率还将随着定子基衬底和弹性体材料的比刚度  $\frac{E}{\rho}$  的增大而减小，因而在选择压电微电机其他部分材料时，黄铜优于钢和铝；

(2) 压电微电机的结构尺寸将影响压电微电机能量转化率，在一定范围内增加压电体厚度  $l_0$  将有助于增大能量转化率，而适当的定子基衬底长度  $l_a$  和弹性体长度  $l_b$  将可获得较大能量转化率；

(3) 相应的实验表明，该方法确有助于提高压电微电机的能量输出。

### 参 考 文 献

- 1 Ma Jianxu, Wang Liding et al. Calculation of the transduction efficiency of USMM. IEEE International conference on electronic components and materials and international conference on sensors and actuators, Xi'an, October 5- 8, 1995: 163~166
- 2 马建旭. 微机械中纵弯式压电微电机特性的研究. 中国科学院长春光学精密机械研究所博士学位论文, 1996
- 3 马建旭, 王立鼎等. 压电微电机能量转换和优化设计. 机械传动, 1996, 20(2): 232~233

## Computer Simulation of the Piezoelectric Micromotor's Optimization Principle

MA Jian-Xu

(*Department of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030*)

LIU Xiang

(*Changchun Telephone Equipment Factory,  
Ministry of Posts and Telecommunications, Changchun 130064*)

LI Cheng-Fa

(*Department of Mechanical Engineering, Jilin University of Technology, Changchun 130025*)

WANG LI-Ding

(*Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

### Abstract

By computer simulation, computer software was developed successfully so that the optimization principle of the piezoelectric micromotor was analyzed in depth. This work showed that the piezoelectric element's material characteristics, the stiffness of the matrix and elastomer in the stator, the structure size of all parts of the stator will influence the efficiency of piezoelectric micromotors. The optimal material and structure of piezoelectric micromotors are presented in this paper, and the experiments show that the principle is useful in improving the energy output of piezoelectric micromotors.

**Key words:** Piezoelectric micromotor, MEMS, Optimization principle, Computer simulation

马建旭 男, 1970年7月生, 上海交通大学机械工程站博士后。1991年7月毕业于吉林工业大学机械工程系, 获学士学位。1994年3月毕业于吉林工业大学研究生部, 获硕士学位。1997年7月毕业于中国科学院长春光学精密机械研究所, 获工学博士学位。曾从事汽车齿轮高效加工方法的研究, 现主要从事微电子机械系统、微机器人方向的研究, 正主持一项863课题。已在国内外著名会议及期刊发表论文十余篇。1995年获中国科学院院长奖学金优秀奖, 1996年获宝钢教育基金优秀学生奖。