

重力-弹力耦合驱动压电微电机研究*

邵培革¹ 王立鼎²

(1 大连理工大学机械系 大连 116024)

(2 中国科学院长春光机所 长春 130022)

摘要 分析了重力-弹力耦合驱动压电微电机的机理并给出了其运动学模型。制作了转子直径为 0.433mm 的压电微电机并实验验证了运动学模型。

关键词 压电微电机 重力-弹力耦合 运动学

中图分类号 TM384 **文献标识码** A

1 前言

自八十年代末美国加州伯克利大学等单位研制成功转子直径为 60 μ m 的静微电机,微电子机械系统(MEMS)研究引起了人们的普遍关注。近十年来, MEMS 得到迅速发展,其部分成果已经实现了产业化。微电机作为 MEMS 主要动力源,在微小机器人的关节驱动、微小光盘、磁盘驱动以及微小航天仪器中有广泛应用前景,其研究是 MEMS 研究热点之一。微电机的研究已在静电微电机、电磁微电机和压电微电机三个方向,取得了一定进展。其中,静电微电机采用的是静电力驱动的。静电力属表面作用力,随尺寸减小其作用相对增强,但是,电机中的摩擦力和粘滞力也较强,因而,静电电机力矩较小,难以应用。电磁微电机采用传统电磁驱动方式,利用精密机械加工或 IC 工艺,实现小型化,已在毫米级微电机研制中取得较大进展。但由于“尺寸效应”影响,进一步微型化面临困难。

压电电机原始设计思想出自苏联,日本在产品开发和应用方面做得较好,现在已有在照相机调焦距方面的应用。美国 Flynn 等人^[1],最先利用其先进的 IC 工艺和材料技术,研制出转子直径为 1.5mm 压电微电机模型,但由于压电微电机的驱动机理较复杂,其实验结果与原设想有一定差距。随后,日本、中国等国也在压电微电机方面进行了大量研究工作,长春光机所在 93 年研制出 \varnothing 3mm \times 5mm 压电微电机。并提出了广义瑞利波驱动机理等理论模型^[2]。

* 自然科学基金、博士后基金、辽宁省博士启动基金资助项目

收稿日期: 1999-01-25

修稿日期: 1999-02-05

压电微电机,采用摩擦力驱动,为克服随电机尺寸减小,摩擦阻力增大这一“尺寸效应”创造了有利条件。有可能成为 MEMS 最有前途的驱动器。目前,压电微电机研制一般仿照大中型压电电机结构,利用精密机械或 IC 工艺实现小型化,但由于一般大中型压电电机结构较复杂,小型化困难较大。

目前, MEMS 较成功的成果,往往是结构相对简单的器件,如压力传感器和加速度传感器。因此,本文研究一种结构简单的压电电机的微型化。

2 弹力和重力耦合驱动压电微电机机理

2.1 弹簧片压电电机

1973年,美国 IBM 公司的 H. U. Baith 提出了一种压电电机,即弹簧片压电电机的雏形^[3],如图 1. a 所示,它由一个转子和两个振子组成,当振子 1 工作时,转子沿顺时针转动,当振子 2 工作时,转子沿逆时针转动。图 1. b 表示了其工作原理。在压电振子上加上交流电压,它便会产生纵向(轴向)的机械振动。振子前端振动片以一定频率振动冲击转子柱面。振动片与相对的转子柱面成一定角度,使振动片前端产生横向振动(图中朝上下方向振动)。横向与纵向振动合成椭圆运动,驱动转子定向转动。

弹簧片压电微电机驱动力矩 M_D 和阻力矩 M_R 分别为:

$$M_D = f_D R \quad (1)$$

$$M_R = f_R r \quad (2)$$

f_D 为摩擦驱动力。通过改变摩擦材料可以提高摩擦系数而提高 f_D 。 f_R 为轴承摩擦阻力,可以利用滚动轴承和润滑使其降低。 R 和 r 分别为转子和转子轴承的半径,由于尺寸较大的电机中,可以使 $R \gg r$,因而可以实现 $M_D \gg M_R$,实现电机较大力矩输出。

这种振子的振幅为几微米,频率为几十千赫,故振动片尖端的振动速度可达几十厘米每秒,转子速度可达数百转每分,能量转换率可达 60% 以上的换能效率。这种电机结构简单,微型化有一定有利条件。

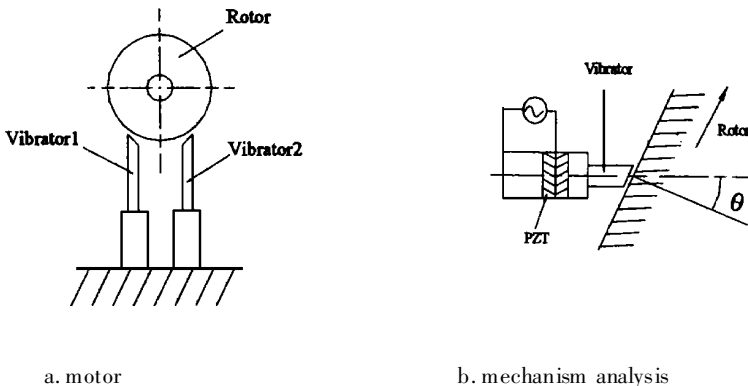


Fig. 1 Schematic diagram of PZT vibrator motor

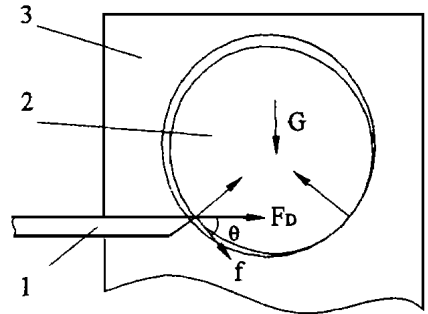
2.2 弹簧片压电电机微型化

将弹簧片电机微型化, 存在如下问题: ①转子直径减小时, 轴承直径减小存在一定限度, 难以实现较大的动力臂和较小的组力臂; ②转子直径变小后, 粘滞力相对增强, 使阻力矩相对增大。如图 2 所示, 其驱动和阻力矩分别为:

$$M_D = \mu_1 F_D r \sin \theta \quad (3)$$

$$M_R = F_N \mu_2 r + F_{VR} \quad (4)$$

式中, r 为转子半径。③压电振子实现较高频率振动, 振幅一般较小, 而转子质量较低, 惯性稳定性较低; 而且较细的转子, 刚度较小, 驱动力难以有效提高, 因此, 简单地将弹簧片压电电机小型化, 不仅难以实现有效力矩输出, 而且有可能难以实现转子的自身旋转。



1. vibrator 2. rotor 3. base

Fig. 2 PZT vibration micromotor

3 弹性力-重力耦合驱动的压电微电机

要使转子输出一定力矩。必须减小转子的摩擦阻力、粘滞力, 为此, 我们改变转子轴的支撑方式, 如图 3 所示。用 V 型架支撑转子。这将改变转子的力学行为。

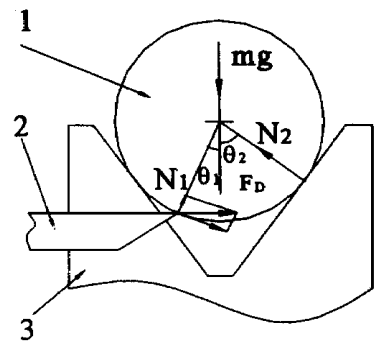
在驱动臂以振幅 A 中振动时, 转子将在弹性力 N_2 、 N_1 作用瞬时获得上升速度 V_0 , 而在摩擦力 f 作用下, 获得转矩。上升一段距离后下落, 在落到原来位置时, 驱动臂再次撞击。由于转子大部分时间在空间, 因而, 阻力矩作用时间缩短, 从而使驱动力矩相对增加, 实现力矩输出。以下对该种电机驱动过程进一步分析。

3.1 驱动臂振动频率

当驱动臂频率与转子上下振动频率一致时, 电机可以获得最大转动力矩。设驱动臂振幅为 A , 振动频率为 f (周期为 T), 转子接触点角度坐标为 θ_1 (见图 3), 并且设驱动臂在往复运动的高速正向运行期间与转子接触, 设接触时间为 $T/4$, 则接触点横向位移为 A , 纵向位移为 $A \tan \theta_1$, 设接触结束时, 转子获得上升速度 V_0 , 则转子的质心做抛物运动, 如图 4 所示, 在 a 点速度为 V_0 , 在 b 点上升速度降低为 0, 在 c 点获速度 V_c , 并再次与驱动臂端相遇, 再次做上抛运动。

$$ac = A \tan \theta_1 \quad (5)$$

$$t_{ac} = \frac{T}{4} \quad (6)$$



1. rotor 2. driving beam 3. base

Fig. 3 Elastic and gravitational force driving micromotor

设转子与驱动端相遇时受到向上分力平均值为 $F_{\perp} = k_1 mg$, 式中 k_1 为常数, m 为转子质量, g 为重力加速度, 则可以求得

$$T = \sqrt{\frac{32A \operatorname{tg}\theta_1}{k_1 g}} \quad (7)$$

由动量定理:

$$F_{\perp} \frac{T}{4} = m(V_c - V_0) = mg \frac{3}{4} T \quad (8)$$

则:

$$F_{\perp} = 3mg$$

$$k_1 = 3$$

$$T = 3.3 \sqrt{A \operatorname{tg}\theta_1 g^{-1}} \quad (9)$$

$$f = 0.3 \sqrt{A^{-1} g \operatorname{tg}\theta_1} \quad (10)$$

$$V_0 = 1.2 \sqrt{A g \operatorname{tg}\theta_1} \quad (11)$$

3.2 运动学分析

在驱动臂端与转子分离时刻、转子轴心相对于臂端的速度为

$$V = \sqrt{(2\pi f A)^2 + v_0^2} \quad (12)$$

V 与水平方向成 θ_3 角:

$$\theta_3 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{V_0}{2\pi f A} \quad (13)$$

沿转子切向速度为

$$V_{tan} = V \cos(\theta_3 - \theta_1) \quad (14)$$

如果臂端与转子无相对滑动, 则转子转速 n 为:

$$n = \frac{V_{tan}}{\pi d} \quad (15)$$

式中, d 为转子直径。设滑动系数为 k , 则

$$n = \frac{k_2 V_{tan}}{\pi d} \quad (16)$$

3.3 动力学分析

保证转子无水平运动, 则 $\sum F_x = 0$, 即

$$F_D \sin^2 \theta_1 = N_2 \sin \theta_2 \quad (17)$$

故:

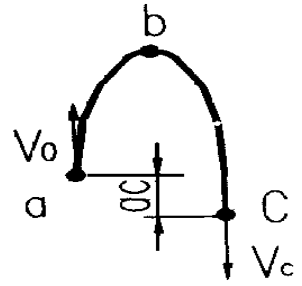


Fig. 4 Schematic diagram of rotor parabolic motion of elastic and gravitational force driving motor

$$N_2 = \frac{F_D \sin^2 \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (18)$$

平均合力矩为:

$$M = \frac{\Delta T r}{T} [\min(\mu_1 F_D \sin \theta_1, F_D \cos \theta_1) - \mu_2 F_D \sin(\theta_1 N \mu_2)] \\ \frac{1}{4} [\min(\mu_1 F_D \sin \theta_1, F_D \cos \theta_1) - \mu_2 F_D \sin \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_2] \quad (19)$$

因为:

$$F_{\perp} = F_D \sin \theta_1 \cos \theta_1 + N_2 \cos \theta_2 - mg \\ = 3mg \quad (20)$$

将(18)代入(20)得

$$F_D = \frac{4mg}{\sin \theta_1 \cos \theta_1 + \sin^2 \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_2} \quad (21)$$

设 $\theta_2 = 60^\circ$, $\mu_1 = 0.3$, $\mu_2 = 0.1$, 可求得在 $\theta_1 = 73^\circ$ 时 M 获最大值:

$$M_{max} = 0.29 mgr \quad (22)$$

3.4 实验验证

用 NEC 生产的 $5\text{mm} \times 5\text{mm} \times 9\text{mm}$ 压电陶瓷块为驱动元件, 以 $\varnothing 0.433\text{mm} \times 20\text{mm}$ 碳钢圆柱为转子, 用 60° 的黄铜 V 型架作支承, 制作了重力-弹力耦合驱动压电微电机并用光电测速仪测量了其转速。当 $A = 10\mu\text{m}$ 时, 由公式(10)、(15) (其中取 $k_2 = 0.6$)、(22) 可得 f 、 n 、 M , 如表 1 所示。试验结果也列入表 1, 可以看出, 分析结果与实验值吻合较好。

Table 1 comparison between theoretical and experimental value of the motor characteristics

	f (Hz)	M (μNm)	n (rpm)
Theoretical value	165	14.4	630
Experimental value	150	-	550

采用同样的转子和驱动元件, 而转子支承采用孔径为 $\varnothing 0.46\text{mm}$ 的黄铜滑动轴承, 制作弹簧片压电微电机, 转子无转动现象。

4 结 论

(1) 分析了重力-弹力和耦合驱动压电微电机的机理, 建立了其运动学和动力学模型。

(2) 研制了转子直径为 0.433mm 的弹力和重力耦合驱动压电微电机, 验证了运动学模型的正确性。

参 考 文 献

- 1 Flynn Anita M, et al. Piezoelectric Micro motors for Micro robots. Ultrasonic Symposium, USA, 1990, 1163-1172
- 2 崔天宏, 王立鼎等. 超声微电机传动机理的研究. 机械工程学报, 1995, 31(2): 7176
- 3 Barth H V. Ultrasonic Driven Motor. IBM Technical Disclosure Bulletin, 1973, 16(7): 712

Micro Piezoelectric Motor Driven by Coupling of Elastic and Gravitational Force

SHAO Pei Ge, WANG Li Ding

(*Department of Mechanical Engineering,*

Dalian University of Science and Technology, Dalian 116024)

Abstract

Mechanism of a micro piezoelectric motor driven by coupling of elastic and gravitational force was analyzed. The kinematics and dynamics models were represented. A experimental motor model was developed and the theoretical models were verified.

Key Words: PZT micromotor, Coupling of elastic and gravitational force, Dynamics

邵培革 男, 1964年生人, 1996年于哈尔滨工业大学获博士学位, 现为大连理工大学机械系博士后, 发表学术论文十余篇。