金属方柱压电片复合微型超声电机的研制

路 凯[1], 周铁英[1], 鹿存跃[1], 刘 涛[1], 蔡海荣[2], 易晓星[2]

(1. 清华大学物理系, 北京 100084; 2. 中国科学院声学研究所, 北京 100080)

摘要: 研制了一款金属方柱压电片复合微型超声电机。相对于圆柱型电机,这种形式的电机的电场极化更充分,以及信号线的焊接更易实现。定子帽的材料用钢或铜。文中计算了整个电机定子换能器的模态和谐响应,理论上分析了不同方向转动惯量一致,可以形成椭圆运动的原理。实验测试了电机的共振频率、转速、转矩等。结果表明这款电机的自由共振频率约 100kHz,无载转速可达到 6000r/min 以上,最大转矩可达 60μNm 以上,理论和实验基本一致。该电机具有很好的实用化前景。

关键词: 金属方柱;超声电机;压电片;弯曲旋转

中图分类号: TN912 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-3630(2006)-03-262-04

A novel ultrasonic motor with quadrate bar

LU Kai[1], ZHOU Tie-ying[1], LU Cun-yue[1], LIU Tao[1], CAI Hai-rong[2], YI Xiao-xing[2]

(1. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A novel miniature ultrasonic motor is described. The stator consists of a quadrate metal bar and 4 piezoelectric plates. The metal bar uses brass with a dimension of $1.6\times1.6\times6.6mm^3$. The piezoelectric plates are made of PZT-4 and bonded to the sides of metal bar, all sized $1.6\times6\times0.3mm^3$ and polarized in the direction of thickness. Compared with traditional cylindrical ultrasonic motors, the quadrate cross-section motor makes polarization more sufficient, and signal wires easier to be welded. Modal and harmonic analysis of the stator is performed using FEM. The paper also shows the principle that inertial moments are equal in different directions of quadrate bar, so the motion trace of surface particle can be ellipse. Output characteristics of the USM is measured and compared with the FEM. The resonance frequency, maximum torque, and unloaded revolution are more than 100 kHz, 60 mNm and 6000 rpm, respectively, basically in agreement with the theory. The miniature ultrasonic motor has potential applications.

Key words: quadrate bar; ultrasonic motor; piezoelectric plate; bend mode

1 引 言

超声电机具有低速大转矩、动态响应快、无电磁干扰、惯性小、控制特性好、定位精度高、重量轻、结构简单等突出特点,因而在工业控制、精密仪器仪表、航空航天、汽车专用电器、智能机器人以及医学仪器等领域中有着广泛的应用前景。

弯曲旋转式超声电机也称摇头式超声电机,它利用定子的弯曲振动产生的摩擦力来驱动转子,传递能量。它与其它超声电机相比突出的特点是体积小,能耗低,易于制作。

弯曲旋转式的超声电机主要有压电片式、压电管式、压电柱式电机。而压电管式和压电柱式的弯曲旋转超声电机更易于小型化,且力矩密度大,转速高。在

收稿日期: 2005-11-29; 修回日期: 2006-00-00
基金项目: 自然科学基金项目(50235010)
作者简介: 路凯(1979-),男,河南人,硕士生,研究方向:超声电机。

微机械、医学、国防等很多领域都可以应用[1-6]。在此项研究的前期工作中,曾把一个直径 1mm的压电柱电机应用到 OCT 的内窥镜中去[7,8]。

压电管式和压电柱式超声电机外表面都是圆弧曲面,本文提出一种新型的金属方柱压电片复合的结构,相对于圆柱和圆管结构的电机,金属方柱易于加工,矩形薄压电片极化充分且易于大量生产,同时易于焊接导线。

2　原　理

2.1　结　构

图 1 为金属方柱压电片复合超声电机的原理示意图。图 1(a)为横截面为正方形的金属方柱压电片复合微电机的实物照片,图 1(b)是定子断面结构图,用 0 标出的部分为金属方柱,材料使用黄铜,图 1(b)中用 1,2,3,4 标出的部分为四片矩形压电片,分别粘接在金属方柱的四个侧面,压电片的材料为 PZT-4,厚度方向极化。相对于圆柱型电机,这种形式的电机的电极化更充分,信号线的焊接更易实现。

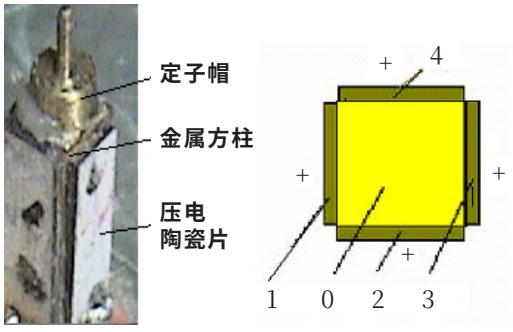


图 1　(a)金属方柱定子照片(b)金属方柱压电片复合的定子断面结构

Fig.1　(a) the photo of stator (b) the cross section of stator

将厚度极化的 4 片矩形压电片粘结在方柱体的 4 个侧面。压电片极化方向相同,外表面皆为正,四个压电片依次施加相位差为 90°的激励信号 $\sin\omega t$、$\cos\omega t$、$-\sin\omega t$、$-\cos\omega t$,就会在相互垂直的两个方向分别激发出弯曲运动,这两个弯曲振动耦合形成了一个简并的弯曲旋转模态,这相当于一个波长的行波。

2.2　定子振动稳定性分析

下面再来分析金属方柱压电片复合超声电机定子的振动稳定性。

首先建立坐标系,对金属方柱的惯性矩进行分析。如图 2(a)所示,设金属方柱的纵向中心轴为 z 轴,在一个方形横截面内的两个对称轴分别取为 x、y 轴。再如图 2(b)中所示,将 x、y 逆时针旋转 α角度得到新坐标系 x_1-y_1,则新坐标系与旧坐标系的关系为

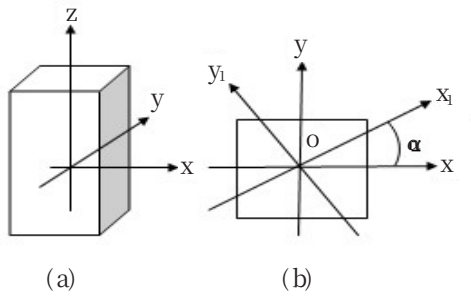


图 2　旧、新坐标系

Fig.2　The coordinate system

$$\begin{cases} x_1 = x\cos\alpha + y\sin\alpha \\ y_1 = y\cos\alpha - x\sin\alpha \end{cases} \tag{1}$$

矩形截面的杆的惯性矩[9]

$$I_x = \int_A y^2 dA, \quad I_y = \int_A x^2 dA, \tag{2}$$

其中 dA 为面积元

惯量积
$$I_{xy} = \int_A xy dA, \tag{3}$$

新轴的惯性矩为

$$I_{x_1} = \int_A y_1^2 dA = \frac{I_x + I_y}{2} + \frac{I_x - I_y}{2}\cos 2\alpha - I_{xy}\sin 2\alpha \tag{4}$$

$$I_{y_1} = \frac{I_x + I_y}{2} - \frac{I_x - I_y}{2}\cos 2\alpha + I_{xy}\sin 2\alpha \tag{5}$$

对正方形截面的方柱来说,

$$I_x = I_y = \frac{h^4}{12}, \quad I_{xy} = 0 \tag{6}$$

所以
$$I_{x_1} = I_{y_1} = \frac{h^4}{12} = I_x = I_y \tag{7}$$

由此证明金属方柱以过圆心的任意方向的 x 或 y 轴弯曲时,其惯性矩是相同的。弯矩 M 在方柱引起绕 y 轴的曲率 $1/\rho_x$[9]为:

$$\frac{1}{\rho_x} = -\frac{M}{EI_y} \tag{8}$$

这里 E 为材料的杨氏模量,EI_y 是方柱的抗弯刚度,对旋转 α角度的 x_1-y_1 坐标系,有

$$\frac{1}{\rho_{x_1}} = -\frac{M}{EI_{y_1}} \tag{9}$$

因为 $I_{x_1} = I_{y_1} = \frac{h^4}{12} = I_x = I_y$,所以同样的弯矩下,方柱

不同方向的弯曲曲率都是一致的。到此可以证明方柱弯曲旋转超声电机的弯曲振动在各个方向是等价的,由此可见运动是平衡和稳定的。

2.3 定子表面质点运动轨迹

用与圆柱相同的推导过程可以得到定子表面质点运动轨迹,如果在相对的两组电极分别加上电压

$V_a=\pm V\sin(\omega t)$, $V_b=\pm V\cos(\omega t)$

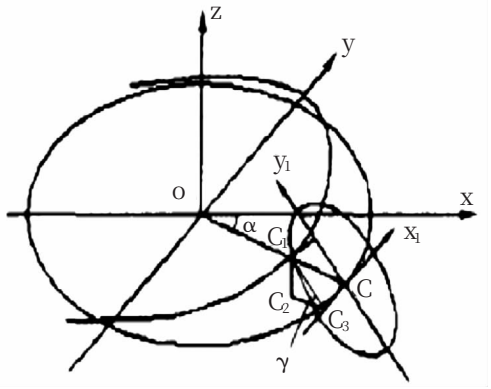


图3 表面质点的椭圆轨迹

Fig.3 The Track of A Surface Particle's Motion

可以推得定子表面的质点运动轨迹是一个椭圆方程[10,11]

$$\frac{x_1^2}{w^2}+\frac{y_1^2}{(R\sin\beta)^2+w^2}=1 \qquad (10)$$

而且方柱结构电机与圆柱结构电机相类同,其表面质点的运动轨迹椭圆都与水平平面成 γ 角度。

通过对定子的几何分析可以得到:

$$\tan\gamma=\frac{2\lambda R\sin(\frac{\lambda}{2})\sinh(\frac{\lambda}{2})}{l[\sin(\frac{\lambda}{2})\cosh(\frac{\lambda}{2})-\sinh(\frac{\lambda}{2})\cos(\frac{\lambda}{2})]}=A\frac{R}{l} \qquad (11)$$

λ 为边界条件和振动顺序决定的一个常数,

其中 $A=\dfrac{2\lambda\sin(\frac{\lambda}{2})\sinh(\frac{\lambda}{2})}{[\sin(\frac{\lambda}{2})\cosh(\frac{\lambda}{2})-\sinh(\frac{\lambda}{2})\cos(\frac{\lambda}{2})]}$,是一个依赖于一阶振动模态特征值的常量。

对两端自由的压电管来说,$\lambda=4.73$,因此 $A=4.647$;而对于一端固定一段自由的一阶弯曲振动,$A=1.3765$。

R 是圆柱半径,L 是柱的长度。因此只要有了压电柱的具体尺寸,就可以很容易的求出定子端面质点振动轨迹的锥形角了。

对于方柱结构还将进一步推导其锥形角的表达式。

2.4 带孔的金属方柱超声电机

现在再来考虑一下中心为圆孔的金属方柱的运动情况。

因为中心与方柱的对称中心相重合的圆孔的惯性矩也是各向同性的,所以从上面的步骤可以很容易地得到,在这种结构电机的横截面上,以过圆心的任意方向的 x 或 y 轴弯曲时,其惯性矩和惯量积是相同的,其弯曲振动在各个方向是等价的,由此可见运动是平衡和稳定的。对于具有圆孔的方柱定子表面质点的运动轨迹和锥形角我们也将给出进一步的推导。

3 金属方柱超声电机的设计制作

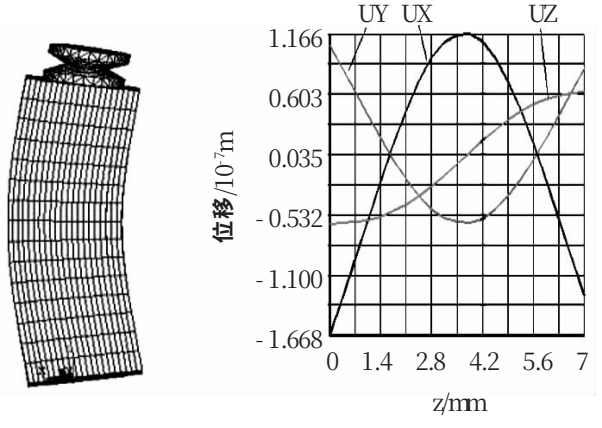
金属方柱材料使用黄铜,其尺寸为 1.6mm×1.6mm×6.6mm,在四个侧面粘接有四片矩形压电片,每片尺寸为 1.6mm×6.6mm。压电片材料为 PZT-4,厚度方向极化。

定子帽的材料是钢或铜。直径 1mm,高 0.4mm(见图 4)用环氧粘结到方柱端部。为了测试其特性,转子用一带孔的铜盘,直径 8mm,厚 2mm。

4 有限元计算

针对上述设计的金属方柱压电片复合微电机的具体结构,文中采用有限元计算进行了分析。

通过计算,可以从图 4(a)得到该电机两端自由的一阶弯曲旋转模态的共振频率在 114kHz。



(a) (b)

图4 (a)有限元计算的振动模态分析

(b)有限元计算计算的谐响应位移分布

Fig.4 Finite Elements Analysis (a) modal analysis

(b) displacement distribution of harmonics analysis

5　金属方柱超声电机的实验

使用 YOKOGAWA 公司的 WT1600 型功率计，测量得到金属方柱超声电机参数如表 1 所示

表 1　金属方柱电机测量数据

Table 1　The measurement results of USM

信号频率/kHz	电压/V	转速/rpm
100	93.6	6400
95	90.8	3800
90	88.7	2100
85	87.07	1200

该数据是在保持有效信号电压相同的条件下测得的，由于频率改变，电机的阻抗变化，致使功率放大器输出电压变化。

测得该电机在 70Vp-p 驱动电压下的堵转力矩为 60μNm。

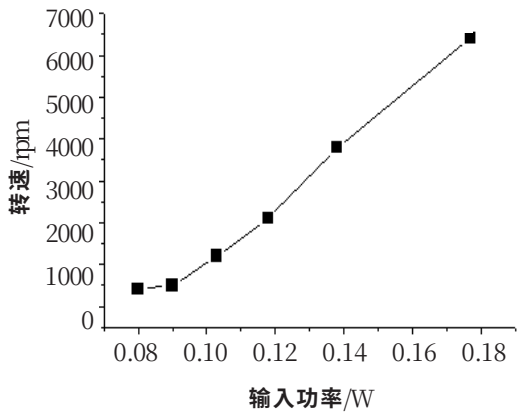


图 5　电机转速与输入功率的关系

Fig.5　The relation of rotating speed vs input power

测量了电机转速与输入功率的关系，得到的结果如图 5 所示。

6　金属方柱超声电机的应用

应用带孔的金属方柱结构超声微电机初步研制了一种超声胃窥镜。

图 6 是用带孔金属方柱超声电机驱动的超声胃窥镜探头的实物照片。超声探头在旋转的时候使用一个从圆孔中穿过的轴来保持转子的转动稳定。

为了提高电机的驱动效率，并减小因径向滑移带来的能量损失，就要使定子与转子的接触面与定子运动的振动轨迹相垂直，设计了一个圆孔形的定子，在金属定子帽上加工了锥形角。

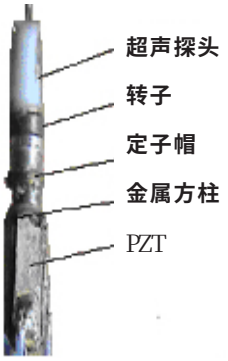


图 6　超声胃窥镜的实物照片

Fig.6　The photo of an ultrasonic gastroscope

7　总　结

本文研制了一款金属方柱压电片复合微型超声电机，分析了驱动原理，并证明了这种电机的运动稳定性。它和圆柱式摇头电机具有相同的运动机理，并相对圆柱电机具有制作简单，易于极化和平面焊接的优点。作者已经用这种结构初步研制了一种超声胃窥镜。

参　考　文　献

[1] Ueha S, Tomikawa Y, Korosawa M, Nakamura K. Ultrasonic Motors: Theory and Application[M]. Oxford: Clarendon Press, 1993. 183-184.

[2] Morita T, Kurosawa M, Higuchi T. A cylinder micro-ultrasonic motor[J]. ultrasonics, 2000, 38(1): 33-36.

[3] Cagatay S, Koc B, Uchino K. A 1.6-mm, metal tube ultrasonic Motor[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2003, 50(7): 782-786.

[4] Dong Shuxiang. Piezoelectric ultrasonic micromotor with 1.5 mm diameter[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2003, 50(4): 361-367.

[5] 周铁英，张凯，王欢，等. 1mm压电柱式超声微电机的研制[J]. 声学学报(中文版)2004, 29(3): 258-261. ZHOU Tieying, ZHANG Kai, WANG Huan, et al. Study on piezoelectric cylinder micro ultrasonic motor with 1mm diameter[J]. ACTA ACUSTICA (in Chinese) 2004, 29(3): 258-261.

[6] 周铁英，张凯，姜开利. 基于压电柱的弯曲振动超声波微电机[P]. 中国专利申请号. CN01109049.9, 2001-01-09.
ZHOU Tieying, ZHANG Kai, JIANG kaili, Bending vibration piezoelectric cylindrical-type micro ultrasonic motor, Chinese Patent, Application No. CN01109049.9 (in Chinese), 2001-01-09.

[7] 周铁英. 用于内窥镜驱动器的超声电机[J]. 国际医疗器械, 2004, 10(1): 10-13.
ZHOU Tieying, LIU Xinguo, CHEN Yu, et al. ultrasound electromotor as the endoscopes driving system[J]. International Medical Devices (in Chinese), 2004, 10(1): 10-13.

[8] ZHOU Tieying, ZHANG Kai, CHEN Yu, et al. A cylindrical rod ultrasonic motor with 1 mm diameter and its application in endoscopic OCT[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(8): 826-830 .

[9] Robert D Cook, Warren C Young, Advanced Mechanics of Materials, Upper Saddle River[M]. N. J. : Prentice Hall, 1999. 5-7.

[10] 赵向东，刘长青，赵淳生. 圆柱体弯曲行波被压电超声电机运动机理的研究[J]. 应用力学学报, 2000, 17(3): 120-123.
ZHAO Xiangdong, LIU Changqing, ZHAO Chunsheng, The movement mechanism research of cylinder bending travelling wave piezoelectric ultrasonic motor[J]. Journal of Applied Mechanics (in Chinese), 2000, 17(3): 120-123.

[11] 羊全钢，张凯，周铁英，等. 弯曲旋转超声电机接触界面锥形角的分析与实验[J]. 声学学报, 2002, 9(5): 413-419.
YANG Quangang, ZHANG Kai, ZHOU Tieying, et al. Analysis and experiment on the taper angle of contact surface of cylindrical USM[J]. ACTA ACUSTICA (in Chinese), 2002, 9(5): 413-419.

简 讯

香港声学学会成为《声学技术》的协办单位

为了能够及时地报道香港声学学会的科研成果和科研动态，使《声学技术》期刊更进一步地展示包括香港在内的我国声学界的科技成果，促进声学科技的发展，2006 年 1 月 10 日，《声学技术》编辑部与香港声学学会经过协商，同意香港声学学会作为《声学技术》刊物的协办单位，并协助参与刊物有关的征稿、审稿、征订和宣传等工作。香港声学学会推荐两名成员（香港声学学会前会长张乃聪先生和香港声学学会会长麦卓明先生）作为《声学技术》的编委会成员，并参与每年一次的编委会会议。香港声学学会向《声学技术》提供一定数量的论文稿源，论文内容可包括环境声学、建筑声学及其他声学技术领域的文章和科研动态报道等。作为《声学技术》协办单位的香港声学学会每年承担《声学技术》的一部分办刊经费。

《声学技术》编辑部 丁玉薇