

1 mm 圆柱式超声电机的研制及在 OCT 内窥镜中的应用

周铁英 张 凯 陈 宇 王 欢 吴继刚 姜开利 薛 平

(清华大学物理系和原子分子纳米教育部重点实验室, 北京 100084. E-mail: zhouty@tsinghua.edu.cn)

摘要 介绍了一种用压电柱作为定子的微型超声电机. 这种超声微电机的直径 1 mm, 长 5 mm, 重量 36 mg. 一端固定的电机其共振频率是 32 kHz, 两端自由的是 83 kHz. 在压电柱的表面均匀分割出四个电极, 电极的间隔经过了优化设计. 采用弯曲振动模式, 该电机转速 1800 r/min, 堵转力矩达到 $4 \mu\text{N} \cdot \text{m}$, 能承受 350 V_{pp} 的驱动电压. 该电机已用于 OCT 内窥镜样机中, 驱动一个光学棱镜进行环向扫描, 得到了塑料管和葱管内部的层析成像图, 并且得到微米数量级的分辨率.

关键词 超声电机 圆柱 弯曲振动 OCT 内窥镜 环向扫描

超声电机是利用压电材料制成的驱动器, 它由定子、转子以及预压力机构等部件构成, 把交变电压加在压电陶瓷上可以在定子表面产生超声振动, 定子与转子之间的摩擦力驱动转子运动^[1].

与电磁电机相比, 超声电机的主要特点: (1)大力矩低转速, 不需减速机构; (2)能量密度大, 可达电磁电机的 3~10 倍; (3)响应速度快, 仅 ms 量级; (4)定位精度高; (5)无电磁干扰; (6)因为靠摩擦驱动, 具有自锁功能.

普通超声电机已经成功的用于相机自动调焦, 设备精密定位, 汽车、航天、机器人和医疗设备中. 近几年, 随着微机械、微电子的快速发展, 对微型电机的需求越来越多. 由于超声电机的结构多样、灵活, 在微型电机市场中更有发展前景. 制作小直径的超声电机, 弯曲振动模式超声波电机是常用的一种, 它是利用定子的弯曲振动产生的摩擦力来驱动转子. 弯曲振动模式超声波电机根据激励弯曲振动的方式和压电晶体的形状可分为压电片式、压电管式和压电柱式.

2000 年报道的 Morita 等研制的圆管式超声电机, 其外径 1.4 mm, 最大转速 295 r/min, 堵转矩 $0.67 \mu\text{N} \cdot \text{m}$ ^[2]. 随后董蜀湘等人 and Cagatay 等人分别研制了直径 1.5 mm 和 1.6 mm 弯曲模态超声电机, 共振频率分别为 67 kHz 和 130 kHz, 堵转力矩分别为 $45 \mu\text{N} \cdot \text{m}$ 和 $500 \mu\text{N} \cdot \text{m}$, 最大转速分别 2000 r/min 和 45 rad/s 的微型超声电机^[3,4]. 这些结果为超声微电机

的广泛应用带来了希望. 但由于管式压电超声电机的压电晶体元件或金属元件要有一定尺寸的内径, 所以要进一步小型化比较困难.

本文介绍在 2001 年研制出的一种圆柱式超声微电机^[5], 其特点是以压电柱作为定子. 它不需要考虑内径, 可以做的非常细, 这样的结构非常适合用于制作微型电机. 本文研制的微电机样机的直径 1 mm, 长 5 mm, 边界一端固定的电机其共振频率是 32 kHz, 两端自由的是 83 kHz, 转速可达 1800 r/min, 堵转力矩 $4 \mu\text{N} \cdot \text{m}$ ^[6]. 通过进一步完善结构, 有望用于微机械电子领域和医学内窥镜系统.

2003 年 10 月, 该电机应用于 OCT(光学相干层析成像)内窥镜样机中, 驱动一个光学棱镜对样品进行环向扫描, 得到了塑料管和葱管内部的层析成像图, 并且得到微米数量级的分辨率¹⁾.

1 压电柱的极化

虽然有很多种弯曲振动模态的超声电机, 但是它们的定子的运动方式都是相同的. 定子弯曲运动时, 定、转子之间有切点接触, 其接触点在定子的外圆周边上移动, 而定、转子接触点间的摩擦力驱动转子沿着行波的反方向转动^[7,8].

为了得到弯曲振动模态, 在压电陶瓷圆柱侧面均匀镀上四份银电极, 然后再按图 1(a)方式加高压直流电(2000 V/mm)极化. 相对的两个电极通入高压直

1) 吴继刚. 光学 OCT 内窥镜的研究. 清华大学硕士学位论文, 2004, 6

电流, 另两个相对的电极接地, 箭头所示方向为极化方向. 极化后, 该陶瓷柱就具有特殊方向的压电效应, 如图 1(a)所示. 工作时在四份电极上分别加 $\sin \omega t$, $\cos \omega t$, $-\sin \omega t$, $-\cos \omega t$ 四路交流电信号, 就可激励该压电柱产生所需的弯曲摇头振动. 通过交换任意两相交流电的相位就可以改变电机的旋转方向^[1].

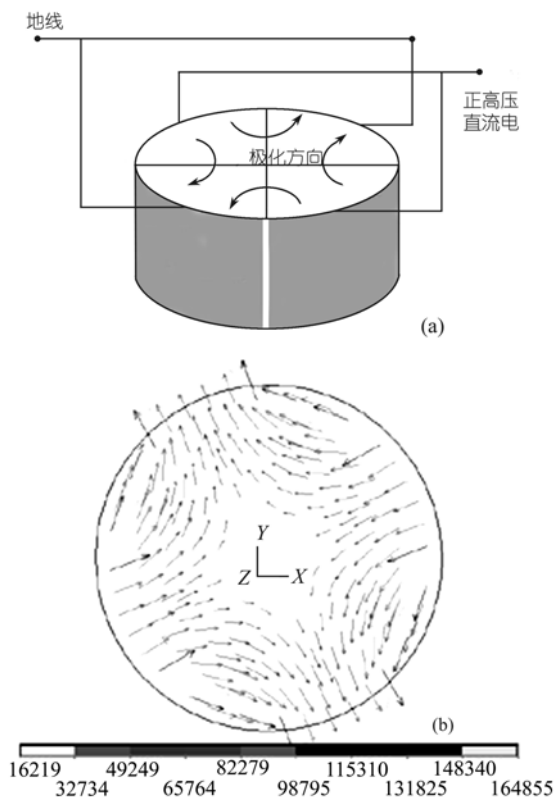


图1 压电柱的极化
(a) 极化示意图, (b) 电场计算图

为了得到较好的极化效果, 用有限元方法计算了压电柱极化电场. 结果表明, 当电极间隔与电极表面宽度接近时, 极化电场分布呈均匀状态. 计算时令每个银电极的范围为 50° , 电极间隔为 40° , 结果如图 1(b)所示, 部分电力线垂直于电极面, 部分平行于间隔表面, 线的疏密沿圆柱周边比较均匀, 极化比较充分.

该电机定子在使用时可以粘结在厚玻璃板上, 相当于一端固定, 一端自由的弯曲振动模式, 也可安放在细的塑料管中, 此时相当于两端自由. 用有限元法对定子共振频率进行了计算, 长度与直径之比为 5:1, 因此, 定子长度为 5 mm. 用有限元计算的一端固定的定子的一阶弯曲振动模式如图 2(a)所示, 对应的共振频率为 32.5 kHz. 对于两端自由的定子的

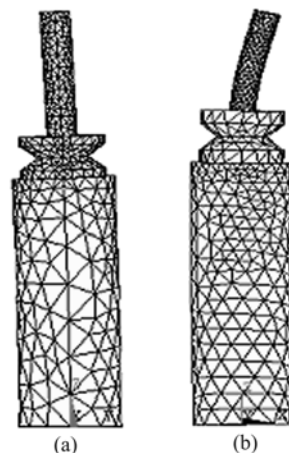


图2 有限元方法计算的振动模式
(a) 一端固定的定子的一阶模式, (b) 两端自由的定子的一阶模式

共振频率为 82 kHz, 如图 2(b)所示.

2 结构设计和性能测试

设计和制作了两种压电柱式超声微电机样机, 电机结构如图 3(a)所示. 图 3(b)中超声微电机用环氧树脂粘接在厚玻璃板上. 图 3(c)是两端自由的电机定子.

定子由压电陶瓷柱、轴和定子帽组成, 电机的轴和定子帽是做成一体, 该电机的轴与定子是同一金属件, 转子安放在轴上, 定转子之间的预压力是用弹簧提供, 力矩由转子直接输出. 该结构的主要特点是简单, 易于加工和装配.

测试了该超声电机的特性, 定子(压电柱+定子金属帽)重约 32.5 mg, 用激光测振仪测量定子的共振频率是 32 kHz 或 83 kHz, 分别对应于两种边界条件. 对两端自由的测量结果如图 4 所示, 与理论计算一致. 加上转子(重约 3.5 mg)后, 为了测试转速, 把转子上压了一个金属齿轮, 该齿轮和转子一起转动, 齿轮的转速用光纤测速仪测量, 齿轮转速随驱动电压的变化曲线如图 5 所示, 当转速过高时, 由于声悬浮的作用, 转子与齿轮间产生相对分离和滑动, 并由此会产生图 5(a)中的转速饱和现象. 用 $100 V_{pp}$ 电压驱动, 在 0.05 g 预压力条件下, 金属轮转速达 1800 r/min. 当预压力是 0.1 g 时, 电机转速—电压呈线性关系, 如图 5(b)所示. 驱动金属轮转动的最低电压为 $10 V_{pp}$.

用测量微力的电阻应变仪测量了电机的力矩. 测量原理如图 6 所示. 图中的金属圆盘压在转子上, 与转子同速旋转. 金属圆盘重 0.6 g, 直径为 8 mm,

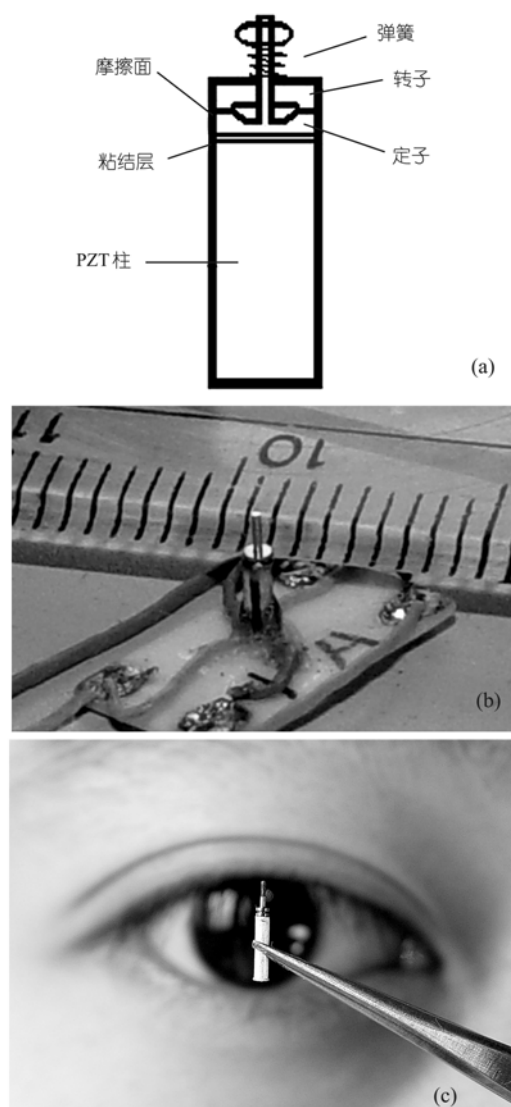


图 3 压电柱式超声微电机

(a) 结构简图, (b) 电机粘结在板上, (c) 电机定子两端自由

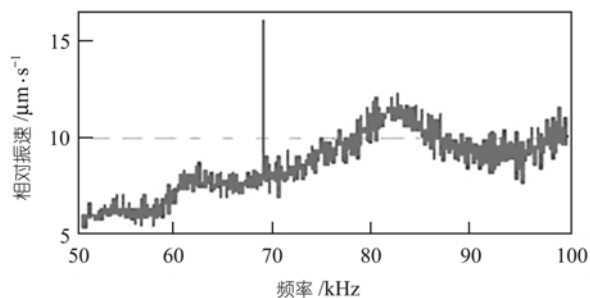


图 4 共振曲线

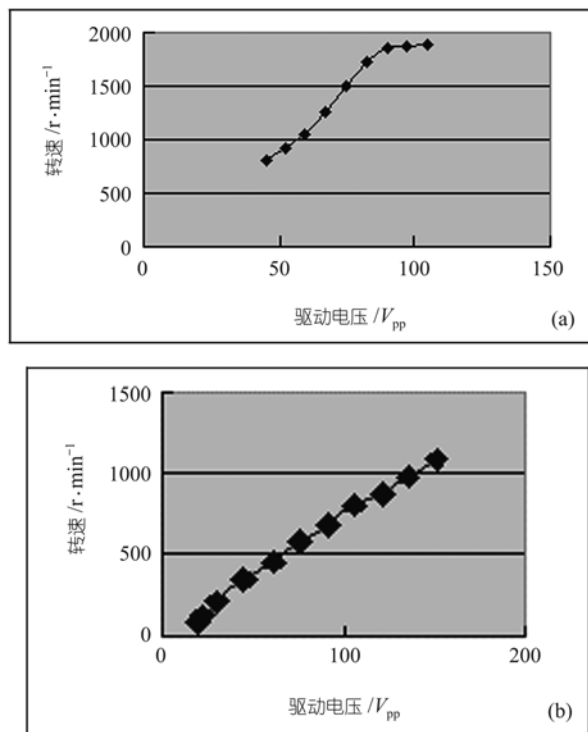


图 5 转速随驱动电压的变化规律

(a) 预压力 0.05 g, (b) 预压力 0.1 g

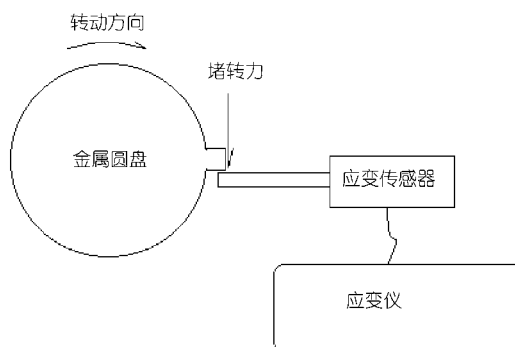


图 6 微力和微力矩测量原理

其边缘粘上一片微挡板, 当应变仪与挡板接触时, 可测出堵转力. 该应变仪最小分辨率是 0.01 g. 驱动频率为 33.5 kHz, 预压力为 0.6 克时, 测量结果如表 1 所示.

表 1 测量结果^{a)}

频率 $f=33.5$ kHz			
驱动电压 V_{pp}/V	75	150	350
堵转力矩/ $\mu N \cdot m$	1.2	2	4

a) 该电机的效率是 3%~5%

3 在 OCT 内窥镜系统中的应用

2003年10月,该电机用于一个OCT内窥镜系统中,驱动一个光学棱镜,进行OCT环向扫描¹⁾.OCT内窥镜的结构如图7所示.

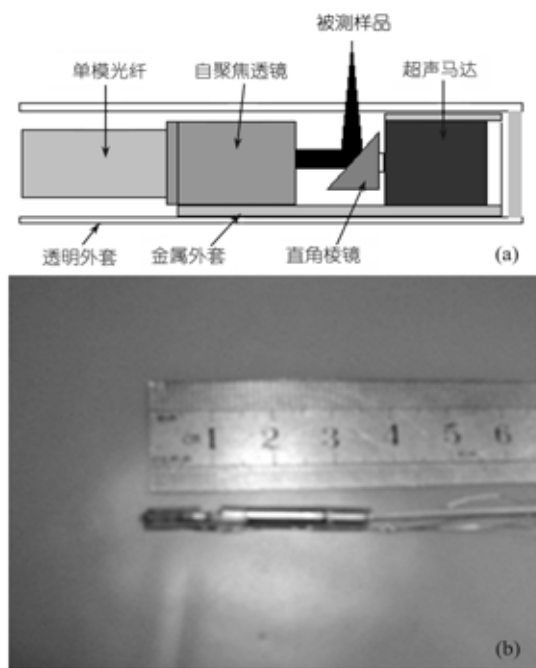


图7 OCT系统结构图

(a) 原理图, (b) 实物照片

红外光通过光纤被自聚焦透镜聚焦,并被一个直角棱镜反射到被检测的样品上.从样品散射回来的光用共焦模式采集,也就是说反射光沿着入射光的路径返回.直角棱镜由该1 mm直径的超声电机驱动,转速约为6 r/s.通过这个设计可以得到被检测样品的环向光学层析扫描图像.实验得到了一个塑料管壁和一个葱壁内部的层析扫描成像图,分别如图8(a)和(b)所示.图像的分辨率为100微米数量级.

4 结论

本文利用压电陶瓷圆柱研制成直径1 mm的弯曲模态超声微电机,证明所用极化方法和驱动原理正确,初步测试了转速、转矩随着驱动电压的变化规律,它的承受电压的能力和储存电能的容量大于相同外径的压电管式弯曲模态超声微电机.该超声微电机被用于一个OCT内窥镜样机中,驱动一个光学棱镜,进行扫描.它在生物、医疗^[9]、微机械、国防科技等方面有着广阔的应用前景,例如可以作为微型机器

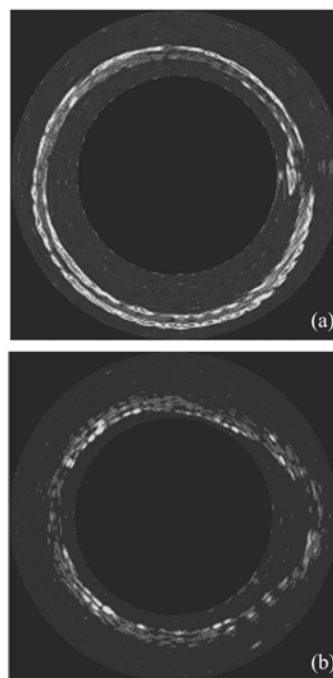


图8 OCT光学层析扫描成像图

(a) 塑料管壁扫描图像, (b) 葱壁扫描图像

人、血管内窥镜、微型特用飞行器的核心驱动机构等,这将把超声电机的应用推向一个新的阶段.我们的研究工作还在继续深入,进一步提高电机的性能,并准备制作直径小于1 mm的弯曲模态超声微电机.

致谢 本工作为国家自然科学基金重点项目(批准号:50235010)、国家“973”计划(批准号:001CB510307)、北京科技基金(批准号:3012007)和深圳科学基金资助项目.

参 考 文 献

- 1 Ueha S, Tomikawa Y. Ultrasonic Motors: Theory and Application. Oxford: Clarendon Press, 1993.5~7
- 2 Morita T, Kurosawa M, Higuchi T. A Cylinder Micro-ultrasonic Motor, Ultrasonics, 2000, 38(1): 33~36 [DOI]
- 3 Dong Shuxiang, Lim Siak P, Lee Rwork H, et al. Piezoelectric ultrasonic micromotor with 1.5 mm diameter. UFFC, 2003, 50(4): 4
- 4 Cagatay S, Koc B, Uchino K. A 1.6-mm, metal tube ultrasonic motor. UFFC, 2003, 50(7): 782~786
- 5 周铁英, 张凯. 基于压电柱的弯曲振动超声波微电机及电极组合激励方法. 中国专利申请号: 01109049.9
- 6 周铁英, 等. 1 mm直径的压电柱超声电机研制, 声学学报, 2004, 29(3): 258~261
- 7 赵向东, 刘长青, 赵淳生. 圆柱体弯曲行波压电超声电机运动机理的研究. 应用力学学报, 2000, 17(3): 120~123
- 8 羊全钢, 张凯. 弯曲旋转超声电机接触界面锥形角的分析与实验. 声学学报, 2002, 27(5): 413~419
- 9 周铁英, 等. 用于内窥镜驱动器的超声电机. 国际医疗器械, 2004, 10(1): 10~13

1) 见713页脚注