

1 mm 压电陶瓷管式微型超声马达研究*

张辉 董蜀湘 张淑仪 王天华 张仲宁 范理

南京大学声学研究所 近代声学实验室, 南京 210093

摘要 利用微型 PZT 压电陶瓷管研制微型超声马达. 微型压电陶瓷管外径 1 mm, 内径 0.6 mm, 管长 5 mm. 微型马达工作在压电陶瓷管的第一阶弯曲振动模式下, 其谐振频率约为 58.5 kHz. 在一定的驱动电压范围内, 马达的转速与电压成线性关系, 当驱动电压峰峰值为 90 V 时, 转速达 3500 r/min. 启动力矩为 7.8 μ Nm. 利用压电陶瓷管研制的微型马达与相似尺寸的其他类型的微型超声马达相比, 具有更大的力矩和更高的转速.

关键词 超声马达 压电陶瓷 有效机电耦合系数 有限元方法

超声马达具有许多传统马达无法比拟的优点: 结构简单, 易于小型化, 不受电磁辐射干扰等, 已成为微型驱动器的研究热点^[1]. 近年来, 毫米量级的压电陶瓷管式或柱式微型超声马达已相继研制成功^[2-6]. Morita 等^[3]利用在钛管外覆盖一层 PZT 膜作为定子, 研制了一种微型超声马达, 其定子直径为 1.4 mm, 长度为 5 mm. 这种微型超声马达利用弯曲振动模式工作, 谐振频率 227 KHz, 驱动电压峰峰值为 20 V 时, 转速达 680 r/min, 由转子的瞬时响应计算出的最大力矩 0.67 μ Nm. 由于这种微型超声马达的定子由 PZT 压电薄膜构成, 当驱动电压峰峰值大于 30 V 时, PZT 薄膜就会击穿. Dong 等^[5]利用直径为 1.5 mm 压电陶瓷管研制成功了一种微型超声马达, 样机 1 在驱动电压峰峰值为 66 V 时, 马达的转速达到 1800 r/min, 最大力矩 20 μ Nm; 样机 2, 其转子进行了氮化处理, 当驱动电压峰峰值为 80 V 时最大力矩 45 μ Nm, 但最大转速则下降为 400 r/min. 其后, 张凯等^[6]利用直径为 1 mm 压电陶瓷圆柱作定子, 定子的一端摇摆来驱动转子, 研制成功圆柱式微型超声马达, 当驱动电压峰峰值为 75 V 时, 其最高转速接近 1500 r/min, 最大堵转力矩达到 1.2 μ Nm, 这种结构的马达一般

力矩较小.

在上述工作的基础上, 本文提出利用直径 1 mm 的 PZT 压电陶瓷管研制微型超声马达, 采用优化设计、改进工艺等措施, 使马达具有更高的转速和驱动力矩. 首先, 利用有限元方法分析了定子在第一阶弯曲振动模式下的谐振频率特性, 优化定子的尺寸和结构. 然后, 通过实验测定微型马达的运转特性. 结果显示, 这种微型马达具有大驱动力矩、高转动速度.

1 微型超声马达的结构和驱动

利用直径为 1 mm 的 PZT 陶瓷管研制微型超声马达, 首先陶瓷管需经极化处理. 极化后压电陶瓷管两端加金属帽形成复合结构作为定子, 以改善定子和转子的摩擦接触, 有利于提高马达的转速和输出更大的力矩, 也使加工和装配容易. 转子固定在穿过陶瓷管的细轴上, 调节压在弹簧上的螺栓以改变定子和转子之间的预紧力. 整个马达的结构如图 1 所示.

为驱动马达旋转, 压电陶瓷管外壁的电极沿圆周分成四等分, 内壁接地, 按照图 2 所示接入四路彼此相位差 90° 的驱动电压信号. PZT 压电陶瓷管

2005-05-13 收稿, 2005-07-14 收修改稿

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10374051)

E-mail: paslab@nju.edu.cn

将在垂直于轴线的方向做弯曲复合振动，使陶瓷管端部产生摇头旋转，通过定子和转子之间的接触摩

擦力驱动转子旋转。当交换相位差为180°的两个电极的电压，马达将反向旋转。

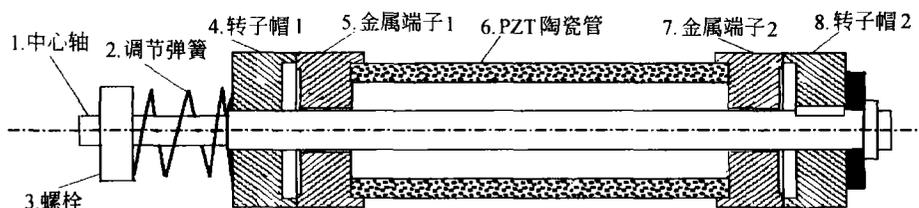


图1 马达结构图

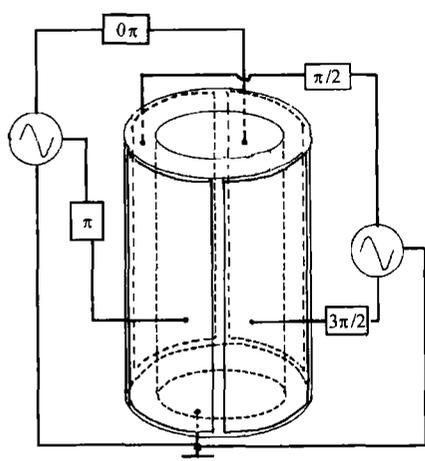


图2 陶瓷管驱动接线图

2 微型超声马达有限元分析

2.1 理论

在马达的结构基本确定后，压电陶瓷管的长度对马达的工作频率、有效机电耦合系数和输出力矩有很大影响，因此需要进行理论分析，以得到最佳的设计。由线性压电弹性动力学问题的 Hamilton 原理和压电弹性体的压电方程^[7]：

$$\begin{bmatrix} T \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & -e^T \\ e & \epsilon^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ E \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 T 为应力， D 为节点位移， c^E 为恒电场下的弹性常数， e 为压电常数， e^T 为压电常数的转置， ϵ^S 为恒应变下的介电常数， S 为应变， E 为电场强度。

根据有限元方法将连续求解问题变换为离散问题解决的思路，把连续压电体利用网格分为许多小的单元，考虑作用在节点上的外力 F ，可得到压电体稳态简谐振动的离散结构的运动方程：

$$\begin{cases} \mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} = \mathbf{P}\mathbf{V} + \mathbf{F} \\ \mathbf{P}^T \mathbf{u} + C_0 \mathbf{V} = \mathbf{Q} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 ω 为角频率， \mathbf{K} 为刚度矩阵， \mathbf{M} 为质量矩阵， \mathbf{P} 为机电耦合矩阵， \mathbf{V} 为节点电压， \mathbf{u} 为节点位移， C_0 为压电体钳制电容， \mathbf{Q} 为电极面的自由电荷。

满足机电边界条件：

(1) 当电端短路，并且外作用力 $\mathbf{F}=0$ 时，特征方程为

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0, \quad (3)$$

此特征方程对应的是谐振频率和相应的振动模式。

(2) 当电端开路，外作用力 $\mathbf{F}=0$ ，并且电极自由电荷 $\mathbf{Q}=0$ 时，特征方程为

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{P}\mathbf{P}^T/C_0| = 0, \quad (4)$$

由此特征方程即可求出反谐振频率和相应的振动模式。

对于运转在第一阶弯曲振动模式的情况下的带有金属帽的定子，根据 2.1 中的压电弹性方程，利用有限元软件 ANSYS 可分析其谐振频率 f_r ，和反谐振频率 f_a 。由此可计算该模式的有效机电耦合系数 k_{eff}^2 ，

$$k_{\text{eff}}^2 = [1 - (f_r/f_a)^2]^{1/2}. \quad (5)$$

2.2 有限元方法分析结果

为了验证有限元方法计算的正确性，根据压电陶瓷管的参数(见表 1)，以及内径 0.6 mm 和外径 1.0 mm，表 2 给出没有两端金属帽情形下，压电陶瓷管在不同长度的谐振频率、反谐振频率和机电耦

合系数的有限元方法计算结果，同时，给出实验测定的数据。可以看出，有限元方法计算和实验测定的结果基本相符。由此表明，利用有限元方法能有效的分析随陶瓷管长度变化，其第一阶弯曲振动谐振频率和有效机电耦合系数的变化情况。

表1 压电陶瓷管参数

机械品质因子	Q_m	80
耦合因子	K_{31}	0.33
压电电荷系数	$-d_{31}/(10^{-12}C \cdot N^{-1})$	185
顺度常数	$S_{33}^E/(10^{-12}m \cdot N^{-1})$	20.7
密度	$\rho/(mg \cdot mm^{-3})$	7.8
相对介电常数/1 kHz	ϵ_{33}/ϵ_0	1850

表2 压电陶瓷管 B₁ 模式谐振频率和有效机电耦合系数模拟和测定结果

管长/mm	有限元方法计算结果			实验测试结果		
	f_r/kHz	f_a/kHz	k_{eff}^2	f_r/kHz	f_a/kHz	k_{eff}^2
2	422.51	425.65	0.121	423.21	426.39	0.122
3	230.08	237.74	0.252	236.87	244.62	0.249
4	143.11	147.23	0.234	145.90	149.93	0.231
5	96.96	99.45	0.222	98.12	100.55	0.218

考虑金属帽对压电陶瓷管的影响，利用有限元方法分析两端加金属帽的陶瓷管的第一阶弯曲振动谐振频率和有效机电耦合系数随管长的变化。压电陶瓷管的参数如上所述，金属帽的参量为：密度 8.9 mg/mm^3 ，poisson 比 0.3，弹性模量 $9 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，内径 0.3 mm，外径 1.2 mm，长度 0.6 mm。图 3 和 4 分别显示有限元方法分析压电陶瓷管长度对第一阶弯曲振动谐振频率 f_r 和有效机电耦合系数 k_{eff}^2 的影响。从图中可以看出，压电陶瓷管长度的变化对谐振频率和有效机电耦合系数有显著影响。图 3 显示，压电陶瓷管长度增加时，谐振频率降低，陶瓷管长度大于 4 mm 时，谐振频率降到 100 kHz 以下。谐振频率下降，马达定子振动幅度将增大^[5]，这有利于提高马达的输出力矩。从图 4 看出，随管长增大， k_{eff}^2 逐渐增大，管长比较小时， k_{eff}^2 随管长缓慢增大；管长比较大时，则 k_{eff}^2 随管长急剧增大。所以，为使有效机电耦合系数较高，应取较大的压电陶瓷管长度。综合考虑，马达定子在第一阶弯曲振动模式下，要求有较低的 f_r 和较大 k_{eff}^2 ；此外，为了控制马达的总体长度也要求管长不能过长，所以管长取 5 mm 较为合适。以 5 mm 管长进行有限元方法模

拟计算，马达定子的谐振频率为 63 kHz，有效机电耦合系数达到 0.153。

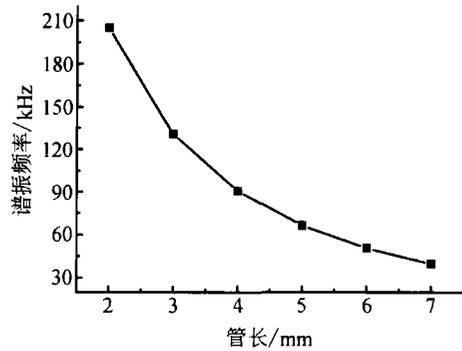


图3 定子管长对有效机电耦合系数的影响

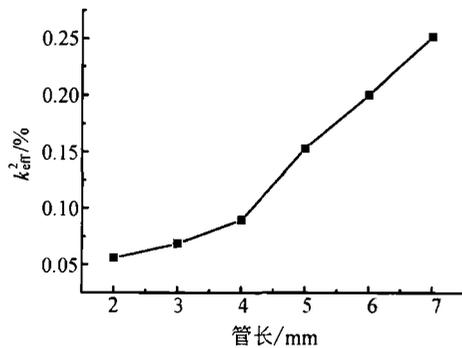


图4 定子管长对谐振频率的影响

3 微型压电管式超声马达的性能

利用 PZT 压电陶瓷管外径 1 mm、内径 0.6 mm、长度 5 mm 制作的小型微型超声马达，包括调节弹簧和转子在内，马达的总长度约为 8 mm。微型超声马达样机如图 5 所示。其性能指标如下：

(1) 利用阻抗分析仪，对 PZT 压电陶瓷管两端有金属帽的情况下，进行阻抗/频率曲线测量，其第一阶弯曲谐振频率约为 61 kHz；而装配转子和弹簧后，测量的阻抗曲线如图 6 所示，测定第一阶弯曲振动模式谐振频率约为 58.5 kHz，表明马达装配后，定子的谐振频率降低。

(2) 利用激光测振仪测定微型马达的转速随驱动电压和驱动频率的变化关系。图 7 给出了驱动频率 60 kHz 时转速随驱动电压之间的关系。从图 7 中可看出，转速随驱动电压增高呈线性增加。驱动电压峰峰值为 110 V，转速可达 3300 r/min。通过改变

驱动电压, 马达的转速从每分钟几百到几千转线性可调. 图 8 所示的是驱动电压峰峰值 90 V 时转速随驱动频率的关系. 从图 8 可看出, 在第一阶弯曲振动谐振频率 58.5 kHz 附近转速达 3500 r/min, 驱动频率高于或者低于谐振频率时, 转速会降低.

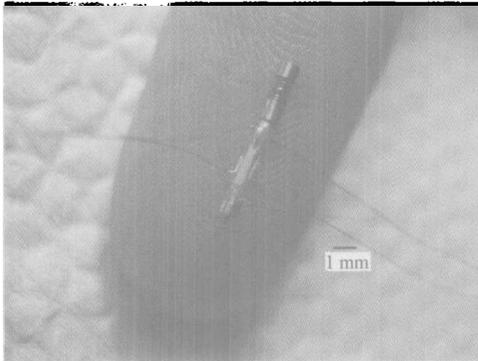


图 5 微型超声马达

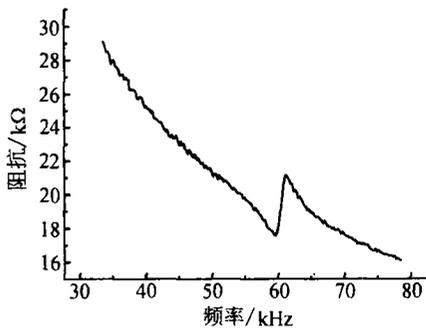


图 6 超声马达的阻抗曲线

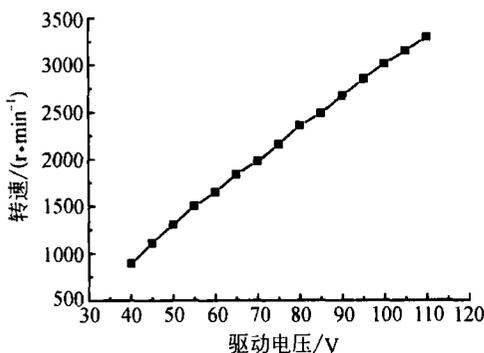


图 7 驱动电压与转速之间的关系

(3) 利用“重力法”测定了微型超声马达的力矩. 实验测定, 输入驱动信号频率为 58.5 kHz, 驱动电压峰峰值为 110 V 的条件下, 测得的启动力矩

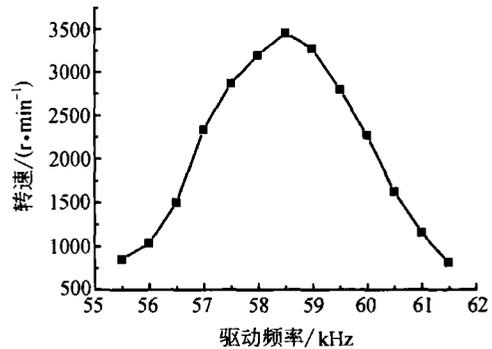


图 8 驱动频率与转速之间的关系

为 $7.8 \mu\text{Nm}$. 说明直径 1 mm 压电陶瓷管式微型超声马达具有较大的力矩输出, 能满足微小空间内工作的要求.

4 结论

利用直径 1 mm 的压电陶瓷管, 经过优化设计和精细制作, 一种微小型管式超声马达已研制成功. 其中, 利用陶瓷管两端的金属帽改善马达输出性能, 提高了马达的转速和输出力矩. 经过实验测量, 马达转速超过 3000 r/min, 启动力矩达 $7.8 \mu\text{Nm}$. 与类似的微型超声马达相比较, 压电陶瓷管式微型超声马达具有更高的转速和力矩.

压电陶瓷管式微型超声马达具有细长的结构, 特别适用于在狭小管道, 如微型机器人、微型飞行器、微型医疗机械等微小空间内作为驱动源, 具有广阔的应用前景.

参 考 文 献

- 1 Sashida T. An Introduction to Ultrasonic Motors. Oxford: Clarendon Press, 1993, 1—225
- 2 Muralt P, Kohli M, Maeder T. Fabrication and characterization of PZT thin-film vibrators for micromotors. *Sens Actuators*, 1995, 48(2): 157—165
- 3 Morita T, Kurosawa M, Higuchi T. A cylindrical micro ultrasonic motor utilizing PZT thin film. *Sens Actuators*, 2000, 83(3): 225—230
- 4 Koe B, Bouchilloux P, Uchino K. Piezoelectric micromotor using a metal-ceramic composite structure. *IEEE Trans Ultrason, Ferroelect, Freq Contr*, 2000, 47(4): 836—843
- 5 Dong S X, Lim S P, Lee K H, et al. Piezoelectric ultrasonic micromotor with 1.5 mm diameter. *IEEE Trans Ultrason, Ferroelect, Freq Contr*, 2003, 50(4): 361—366

- 6 张凯,周铁英,王欢,等. 1 mm 压电柱式超声微电机的研制. 声学学报, 2004, 29(3): 258—261
- 7 肖孙圣,张金铎,栾桂冬. PVDF 水听器加速度响应特性的有限元分析. 声学学报, 1997, 22(4): 338—344

(上接第 1425 页)

- (8) 超高速空泡航行体流动特性和机理
- (9) 超高温气体流动
- (10) 超常颗粒多相流动力学模型
- (11) 与人类疾病成因及诊治相关的生物力学研究
- (12) 计算力学的新理论与新方法
- (13) 实验力学新方法与新技术

3 天文学处:

天文学科领域以“十一五”提出的优先资助领域作为重点项目指南。申请者可依据公布的拟资助领域中提出的重要科学问题,自行选择项目名称、研究内容、研究方案和研究经费。每年重点项目指南公布的优先领域可能会有所变化,这主要取决于已支持的和在研的重点项目领域分布情况。2006 年度天文学科重点项目指南公布 3 个领域,拟资助 3—5 个重点项目,平均资助强度 200 万元。

- (1) 星系宇宙学
- (2) 恒星的形成、演化和爆发
- (3) 天体测量和天体力学

4 物理科学一处:

物理科学一处以“十一五”提出的 17 个优先资助领域作为重点项目指南。每年将公布其中的一部分,这主要取决于学科的发展、已资助项目的布局和年度可用经费等。2006 年度拟资助 8—11 个重点项目,平均资助强度 200 万元。申请者可在公布的拟资助领域内(或方向上)提出项目名称和具体研究内容直接申请。

- (1) 受限量子体系的量子输运现象、自旋量子现象、超精细光谱与相干光学性质
- (2) 新功能材料物理
- (3) 关联电子系统中的新奇现象
- (4) 软物质体系物性
- (5) 物质结构和性质的计算与模拟
- (6) 冷原子分子物理及应用
- (7) 原子分子体系的复杂相互作用
- (8) 噪声的产生、传播与控制
- (9) 高精物理测量技术原理和关键设备

5 物理科学二处:

2006 年度拟资助 8—10 个重点项目,平均资助强度 190 万元。以下公布的是拟资助的重点项目及研究内容。

- (1) 基于复杂网络的复杂系统动力学及统计行为的研究
- (2) TeV 能区物理
- (3) HIRFL-CSR 上强子物理研究谱仪模拟系统的建立
- (4) 夸克物质产生的硬探针信号和集体效应研究
- (5) 基于汤姆逊散射的超短脉冲硬 X 射线光源关键物理及技术问题研究
- (6) 用于毒品/爆炸物探测的新方法学研究
- (7) 强流加速器中空间电荷效应的理论与实验研究
- (8) 同步辐射时间分辨技术及其应用研究
- (9) 低气压多频等离子体与材料表面相互作用
- (10) 快 Z 箍缩等离子体物理特性研究