

弛豫铁电单晶超声电机的仿真与试验研究

史翔,魏晓勇,李振荣,徐卓,崔玉

(西安交通大学 电子陶瓷与器件教育部重点实验室 国际电介质研究中心,陕西 西安 710049)

摘要:弛豫铁电单晶以其良好的压电性能和低温适应性成为超声电机性能提升理想的替代材料。由于单晶物理性能的各向异性,在单晶超声电机设计过程中必须考虑振幅均匀性和振型干扰问题。该文通过对两种具有振幅均匀性的单晶切向进行压电、介电、弹性性能的计算和有限元分析,分析了单晶超声电机定子的工作频率、振幅和振幅均匀性;设计制作了单晶超声电机样机,并对其进行了测试。结果表明,∅20 mm单晶超声电机堵转扭矩达到0.057 N·m,优于同直径的压电陶瓷超声电机。

关键词:弛豫铁电单晶;超声电机;切型;振幅

中图分类号:O732+.1;TN602 **文献标识码:**A

Simulation and Experimental Study on Application of Relaxor Ferroelectric Single Crystals to Ultrasonic Motor

SHI Xiang, WEI Xiaoyong, LI Zhenrong, XU Zhuo, CUI Yu

(Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of Electronic Ceramics and Devices, Ministry of Education, International Center for Dielectric Research, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The relaxor ferroelectric single crystals have become an ideal substitute materials for improving the performance of ultrasonic motor as their excellent piezoelectric performance and cryogenic property. But the amplitude uniformity of stator and the interference of vibrations have to be considered in the process of single crystal ultrasonic motor design due to the anisotropy of single crystals. The operating frequency, amplitude and amplitude uniformity of stator are analyzed through the calculation and the finite element analysis of the piezoelectric, dielectric and elastic performance of two cutting orientations with amplitude uniformity. A prototype of single crystal ultrasonic motor is designed and fabricated. The results show that the proposed single crystal ultrasonic motor with ∅20 mm has a locked-rotor torque of 0.057 N·m, which is better than that of the piezoelectric ceramic ultrasonic motor with the same diameter.

Key words: relaxor ferroelectric single crystal; ultrasonic motor; cutting orientation; amplitude

0 前言

超声电机具有控制精度高、能量密度大、无电磁干扰、结构简单、断电自锁和静音等显著优点^[1-5],是精密控制、深空深海探测和民用领域理想的驱动设备。由于目前超声电机中普遍使用的锆钛酸铅(PZT)系压电陶瓷在压电性能方面尚有不足,其压电应变系数 d_{31} 约为 -270 pC/N,机电耦合系数 k_{31} 约为 0.4 ^[6],制约了超声电机的性能提升。另外,因压电陶瓷在低温下的压电性能急剧下降,导致压电

陶瓷超声电机在低温下的应用受到限制。因此,使用具有优良压电性能,特别是低温压电性能的材料替换现有压电陶瓷成为超声电机发展和应用的必由之路^[7]。

以铌镁酸铅-钛酸铅(PMNT)为代表的新型弛豫铁电单晶具有优良的压电性能,其 d_{31} 和 k_{31} 分别达到 -1335 pC/N和 87% ^[8],在低温下仍能保持良好的压电性能,是超声电机激振材料的理想替代材料。李世阳等^[9]利用铌钽酸铅-铌镁酸铅-钛酸铅单晶绕 z 轴旋转 45° 切割的正方压电单晶片制作了面

收稿日期:2017-04-18

基金项目:国家“九七三”计划基金资助项目(2015CB6546020);产业技术研究与开发基金资助项目(2013DFR50470);高等学校学科创新引智计划基金资助项目(B14040)

作者简介:史翔(1976-),男,青海西宁人,博士生,主要从事先进功能材料与器件的研究。E-mail: shixiang2222@163.com。

切变振型的超声电机,获得了优良的输出性能;利用PMNT单晶制作的直线超声电机工作于液氮温度时,其性能仅有极小的降低^[10-11],说明弛豫铁电单晶在超声电机领域的应用具有极大的优势。但是,因压电单晶物理性能的各向异性,单晶的切割方向直接影响到超声电机的性能;另一方面,由于压电单晶的对称性低于压电陶瓷,故而可能会在一些特殊的方向存在机电耦合。相比于压电陶瓷超声电机,单晶超声电机的工作状态更复杂,更可能引起振型干扰。因此,弛豫铁电单晶在超声电机,尤其是复杂振动模态的超声电机中的应用需要解决单晶切割方向和振型干扰的问题。

本文以PMNT单晶应用于环状行波型旋转超声电机为例,讨论了压电单晶环的切割方向,获得了优化的单晶切向;利用有限元分析方法对可能引起振型干扰的振动模态进行了分析;制作了单晶超声电机样机并进行了输出性能测试。

1 单晶环优化切向的确定

环状行波型旋转超声电机定子的工作状态如图1所示,粘贴于金属定子下表面的压电环在交变电压的激励下产生横向伸缩振动,而由于压电材料与金属材料不同的弹性性能,使得定子上产生弯曲的波峰和波谷。在两路时间和空间均相差 $\pi/2$ 的正弦信号激励下,定子上产生行波并通过摩擦驱动转子转动。



图1 超声电机定子工作状态

由超声电机定子工作原理可以看出,如果压电环各处的横向压电系数 d_{31} 不同,将会影响定子振幅的一致性,从而影响超声电机的输出性能。因此,对于环状行波型超声电机而言,需要寻找能够保证定子振幅一致性的切向。文献[12]提出了基于定子振幅一致性的切向判据,并计算得到对于3种不同工程化畴组态的PMNT67/33单晶适用于环状行波型超声电机切向:对于沿 $[001]_c$ 方向极化的单晶,其优化切面的法线方向为 $[001]$ (后称1号材料),该切型下 $d_{31} = -1\ 335\ \text{pC/N}$ 、 $k_{31} = 0.87$;对于沿 $[011]_c$ 方

向极化的单晶,其优化切面的法线方向为 $[025]_c$,该切型下 $d_{31} = 199\ \text{pC/N}$ 、 $k_{31} = 0.55$;沿 $[111]_c$ 方向极化单晶的优化切面的法线方向为 $[33\bar{2}]_c$ (后称2号材料),此切型的 $d_{31} = 1\ 201\ \text{pC/N}$ 、 $k_{31} = 0.92$ 。可以看出,除了沿 $[011]_c$ 方向极化PMNT67/33单晶的优化切面,1、2号材料压电性能均优于PZT系压电陶瓷,可作为单晶超声电机的激振材料。

2 单晶超声电机定子有限元分析

2.1 定子几何模型的建立

利用有限元分析软件ANSYS14.5对超声电机定子进行建模,其几何模型如图2所示。定子环外径 $\varnothing 20\ \text{mm}$ 、内径 $\varnothing 14.5\ \text{mm}$ 、支撑板厚度 $0.8\ \text{mm}$ 、位移放大齿共计75个、齿高 $2.5\ \text{mm}$;压电单晶环外径和内径与定子环相同,厚度为 $0.5\ \text{mm}$ 。

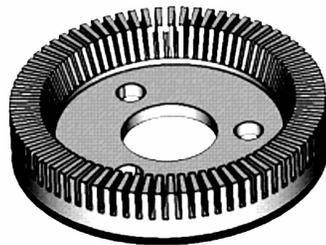


图2 单晶超声电机定子几何模型

2.2 单晶环主要物理性能参数的确定

由于单晶物理性能参数随着切割样品所在的坐标系而变化,因此需要通过坐标旋转操作计算获得每一种切型下单晶环的物理性能参数的具体形式。按照ANSYS软件的习惯要求,本文计算得到压电应力系数矩阵 e 、弹性劲度系数矩阵 c 、介电系数矩阵 ϵ 的具体形式。旋转操作计算方法^[13]为

$$\begin{cases} s^E = N \cdot s^E \cdot M^{-1} \\ d' = B \cdot d \cdot M^{-1} \\ \epsilon^T = B \cdot \epsilon^T \cdot B^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: B 为张量操作矩阵; M 、 N 分别为应力型和应变型矩阵的操作矩阵; s 为压电单晶的压电应变系数矩阵。

压电系数之间的转换方法为

$$e = d \times c \quad (2)$$

弹性系数之间的转换方法为

$$c = s^{-1} \quad (3)$$

由式(1)~(3)可求得1号、2号材料的主要物理性能如表1、2所示。

表1 1号材料物理性能参数

$c/(10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	$e/(\text{C} \cdot \text{m}^{-2})$	ϵ
$\begin{bmatrix} 11.5 & 10.3 & 10.2 & & & \\ 10.3 & 11.5 & 10.2 & & & \\ 10.2 & 10.2 & 10.4 & & & \\ & & & 6.6 & & \\ & & & & 6.9 & \\ & & & & & 6.9 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} & & & & 10.1 & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ -5.2 & -5.2 & 18.6 & & & \\ & & & & & \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 600 & & & \\ & 1 & 600 & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & 8 & 200 \end{bmatrix}$

表2 2号材料的主要物理性能

$c/(10^{10} \text{ N} \cdot \text{m}^{-2})$	$e/(\text{C} \cdot \text{m}^{-2})$	ϵ
$\begin{bmatrix} 20.1 & 6.6 & 12.2 & & -3.7 & \\ 6.6 & 19.5 & 13.7 & & 2.6 & \\ 12.2 & 13.7 & 13.4 & & 0.6 & \\ & & & 0.15 & & -0.3 \\ -3.7 & 2.6 & 0.6 & & 5.1 & \\ & & & -0.3 & & 9.1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} & & & -6.80 & 0 & 3.28 & \\ & & & & 4.01 & 0 & \\ & & & & -6.02 & 0 & \\ 2.05 & -10.0 & 2.83 & & & & \\ -2.18 & -1.46 & 6.52 & & & & \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 233 & & & & \\ & 290.7 & -46.4 & & \\ & -46.4 & 270.3 & & \end{bmatrix}$

另外,建立有限元分析模型需要的参数还包括:定子金属材料(磷青铜)的密度为 $8\ 800 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量和泊松比为 $1.13 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 和 0.3 ;压电单晶的密度为 $8\ 090 \text{ kg/m}^3$ 。

至此,根据单晶电机定子的几何模型和物理参数可建立有限元分析模型。

2.3 定子的有限元分析

模态分析是对结构动力学进行分析的手段,可以获取结构的固有频率、振动类型和阻尼比等信息。超声电机定子的模态分析过程认为定子是自主振动,忽略载荷作用,在分析模型中忽略预压力和结构阻尼的影响。模态分析的数学模型为

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \Phi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & K_z \\ K_z^t & K_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \Phi \end{Bmatrix} = 0 \quad (4)$$

式中: m 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; K_d 为介电系数矩阵; K_z 为压电系数矩阵; u 、 Φ 分别为节点位移和节点电压。

谐响应是分析结构在承受一个或者多个相同频率的正弦(简谐)载荷的作用下,确定系统稳态响应的一种技术。通过谐响应分析可以获取结构的振幅等信息。谐响应分析的数学模型为

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K & K_z \\ K_z^t & K_d \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{\max} e^{j\Psi_u} \\ \Phi_{\max} e^{j\Psi_\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Q_{\max} e^{j\Psi_\Phi} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: Ψ_u 为节点位移矢量相位角; Ψ_Φ 为节点电位移矢量的相位角; j 为虚数单位; ω 为电载荷的角频率。

由于本文的超声电机定子尺寸较小,若将定子工作模态设定在较高阶的面外弯曲振动,则会导致定子没有足够的挠度;同时,激励高阶振动的信号频率也会较高,导致介电损耗的增加,因此,本文选定五阶面外弯曲振动作为定子的工作模态。在 $20 \sim 100 \text{ kHz}$ 内进行模态分析和谐响应分析提取 30 阶振型及其振幅。模态分析结果与谐响应分析结果如图 3 所示。

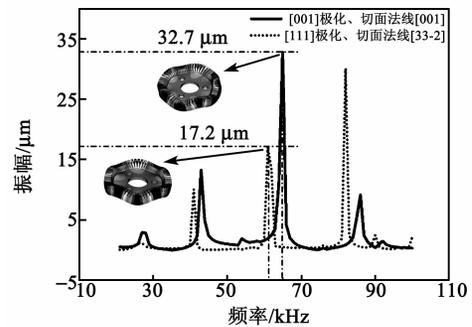


图3 单晶定子有限元分析结果

由图3可看出,在 $20 \sim 100 \text{ kHz}$ 频段内,使用两种不同切型 PMNT 单晶的定子均存在五阶面外弯曲振动模态。1号材料具有较高的谐振频率和较大的振幅,这是由于1号材料具有更优秀的压电性能。由于2号材料的 $d_{34} = -892 \text{ pC/N}$,将会在单晶环各分区上激发面切变振动,这是单晶区别于压电陶瓷的特点。根据模态分析结果可知其谐振频率为 97.0 kHz ,远离工作频率,不会造成干扰。

由于单晶环面上各物理性能参数也是各向异性的,因此,图3中的振幅仅能代表定子模型某一点的

振幅,无法说明定子整体振幅的优劣和振幅的均匀性。本文沿定子模型周向在每一个齿的外沿选取节点,共提取 75 个振幅,分别计算了工作频率下的平均振幅和振幅标准差,用以说明定子整体振幅和振幅均匀性,如表 3 所示。

表 3 不同激振材料振子有限元分析结果

材料编号	极化方向	切面法线方向	工作模式频率 f/kHz	平均振幅 $A_{av}/\mu\text{m}$	振幅标准差 σ
1	[001]	[001]	65.2	20.0	0.282
2	[111]	[33 2]	62.0	16.5	0.254

由表 3 可看出,采用 1、2 号压电单晶的超声电机定子均具有较高的平均振幅和较小的振幅标准差,均适用于单晶超声电机定子。但由于 2 号材料无法实现圆环上相邻极化分区的反向极化工艺,需要采用四路驱动信号进行驱动^[14],在经济性上有所欠缺;而采用 1 号材料单晶环由于极化方向和切割方向一致,可借鉴压电陶瓷超声电机的极化、驱动工艺,因此,本文最终选用 1 号材料作为超声电机的激振材料制作超声电机并进行测试。

3 单晶超声电机的制作与测试

根据上述有限元分析结果对超声电机进行设计、加工、组装与测试,首先使用 Agilent E4980A 自动平衡电桥对超声电机两路驱动下的阻抗频率特性进行测试,结果如图 4 所示。由图可看出,该单晶超声电机具有良好的两相一致性。五阶面外弯曲谐振频率为 61.6 kHz,非常接近有限元分析结果,说明有限元分析的有效性。

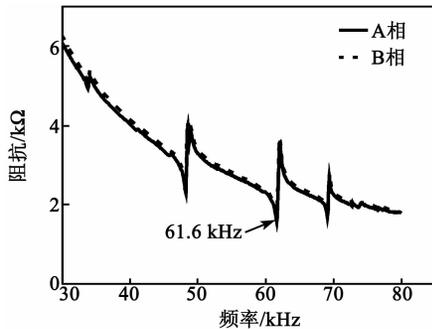


图 4 单晶超声电机阻抗频率特性测试

利用 RIGOL-DG1022U 双通道任意信号发生器产生适用于 A、B 两相的正弦信号,两路信号的相位差可调;两路信号分别经由两台 PINTECH HA-805 高速功率放大器产生驱动功率信号。使用 RIGOL DS1102E 示波器通过功率放大器的监视接口对驱动信号进行监测。对其转速与扭矩进行了测试。超声电机测试系统如图 5 所示。

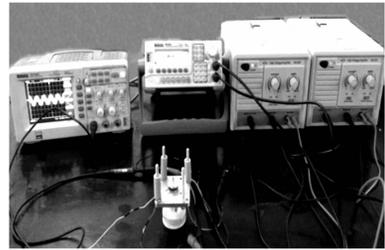


图 5 超声电机测试系统

在 100 N 预压力情况下对单晶超声电机的转速与扭矩的关系进行测量,其结果如图 6 所示。由图可看出,随着电机负载的增加,电机的转速下降,最大转速为 279 r/min,其堵转扭矩约为 0.057 N·m。

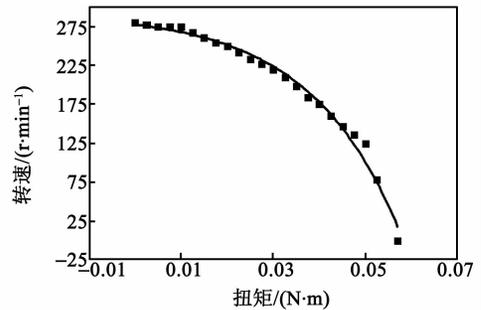


图 6 单晶超声电机转速-扭矩关系

将单晶超声电机与与目前已有的直径相同或接近的陶瓷超声电机进行了对比,比较对象为某公司 $\varnothing 20$ mm 超声电机和某高校实验室设计制作的 $\varnothing 30$ mm 超声电机。两种超声电机的关键参数与输出性能如表 4 所示。

表 4 单晶超声电机与陶瓷超声电机对比

激振材料	定(转)子直径/mm	工作电压/ V_{rms}	最大转速/ $(r \cdot \text{min}^{-1})$	堵转扭矩/ $(\text{N} \cdot \text{m})$
陶瓷	20	90	360	0.018
陶瓷	30	100	250	0.1
单晶	20	170	279	0.057

由表 4 可知,本文制作的单晶超声电机转速和扭矩介于 $\varnothing 20$ mm 和 $\varnothing 30$ mm 陶瓷超声电机之间,而扭矩优于同样直径的陶瓷超声电机,其原因可能有两方面:

- 1) 本文采用的激振材料为弛豫铁电单晶,具有优于压电陶瓷的压电性能。
- 2) 本文的单晶超声电机驱动电压较高,导致定子与转子之间的接触正应力增加,从而使摩擦力增大。

4 结束语

弛豫铁电单晶应用于超声电机需要解决振幅一致性、振型干扰等问题。本文选用两种具有较优振

幅一致性的压电单晶切向,计算物理性能参数,建立有限元分析模型并进行仿真,结果表明两种单晶定子模型均具有良好的振幅值和振幅一致性。选用沿[001]方向极化PMNT67/33单晶的[001]切向单晶环制作超声电机,结果表明仿真结果真实可信;单晶超声电机的堵转扭矩优于同直径的陶瓷超声电机。

参考文献:

- [1] 苏松飞,姚志远,王长茹,等.一种弯曲模态直线超声电机的研究[J].压电与声光,2012,34(3):400-403.
SU Songfei, YAO Zhiyuan, WANG Changru, et al. Research on linear ultrasonic motor based on bending modal[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2012, 34(3):400-403.
- [2] 刘婵娟,纪跃波.一种新型旋转超声电机驱动控制试验系统[J].压电与声光,2014,36(2):285-288.
LIU Chanjuan, JI Yuebo. Driving control test system for a new type of rotary ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2014, 36(2):285-288.
- [3] LU X, HU J, YANG L, et al. A novel dual stator-ring rotary ultrasonic motor[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2013, 189(2):504-511.
- [4] ZHOU X, CHEN W, LIU J. A novel multi-mode differential ultrasonic motor based on variable mode excitation[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2015, 230:117-125.
- [5] 黄帅军,刘振,付前卫,等.基于双定子直线超声电机的移动平台设计[J].压电与声光,2017,39(2):194-197.
HUANG Shuaijun, LIU Zhen, FU Qianwei, et al. Design of amobile platform based on linear ultrasonic motor with double stators[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(2):194-197.
- [6] 黄新友,高春华.三方/四方相共存铋锑锆钛酸铅压电陶瓷极化的研究[J].硅酸盐学报,2001,29(5):422-426.
- [7] YAMAGUCHI D, KANDA T, SUZUMORI K, et al. An ultrasonic motor for use at ultralow temperature using lead magnesium niobate-lead titanate single crystal[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012, 51(7):1514-1522.
- [8] BABU G A, SUBRAMANIYAN R, BHAUMIK I, et al. Growth and characterization of undoped and Mn doped lead-free piezoelectric NBT-KBT single crystals[J]. Materials Research Bulletin, 2014, 53:136-140.
- [9] LI Shiyang, JIANG Wenhua, ZHENG Limei, et al. A face-shear mode single crystal ultrasonic motor[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(18):183512-183512-4.
- [10] DONG S, YAN L, VIEHLAND D, et al. A piezoelectric single crystal traveling wave step motor for low-temperature application[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(15):153504-153504-3.
- [11] DONG S, YAN L, WANG N, et al. A small, linear, piezoelectric ultrasonic cryomotor[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(5):4-6.
- [12] SHI Xiang, HUANG Wenbin, LI Fei, et al. Analysis on the anisotropic electromechanical properties of lead magnoniobatetitanate single crystal for ring type ultrasonic motors[J]. Aip Advances, 2016, 6(11):1783-39.
- [13] 陈纲,廖理几,郝伟.晶体物理学基础[M].北京:科学出版社,2007.
- [14] 赵淳生.超声电机技术与应用[M].北京:科学出版社,2007.

(上接第335页)

参考文献:

- [1] KARL S, BURHANETTIN K. Piezoelectric motors, an overview[J]. Actuators, 2016, 5(1):6.
- [2] LIU Yilin, XU Qingsong. Mechanical design, analysis and testing of a large-range compliant microgripper[J]. Mechanical Sciences, 2016, 7:119-126.
- [3] 马立,谢伟,刘波,等.柔性铰链微定位平台的设计[J].光学精密工程,2014,22(2):338-345.
MA Li, XIE Wei, LIU Bo, et al. Design of micro-positioning stage with flexure hinge[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(2):338-345.
- [4] ZHU Xiaobo, XU Xiao, WEN Zhijie, et al. A novel flexure-based vertical nan positioning stage with large travel range[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86:105112.
- [5] 苏钊.双足压电作动器的研究及其在二维平台中的应用[D].南京:南京航空航天大学,2016.
- [6] LARRY L H. Compliant mechanisms[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [7] 卢倩,黄卫清,王寅,等.深切口椭圆柔性铰链优化设计[J].光学精密工程,2015,23(1):206-215.
LU Qian, HUANG Weiqing, WANG Yin, et al. Optimization design of deep-notch elliptical flexure hinges[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1):206-215.
- [8] 韩瑞锋.遗传算法原理与应用实例[M].北京:兵器工业出版社,2010.