

弛豫铁电单晶超声电机的动态响应模拟与分析

曹磊,杜慧玲,史翔,任广林,马武祥

(西安科技大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710054)

摘要:相对于传统压电陶瓷,新型压电单晶材料铌镁酸铅-钛酸铅(PMNT)具有更优良的介电和压电性能。该文将PMNT单晶作为超声电机的驱动材料,引入二维弹性接触、预应力等因素建立数学模型。经Matlab软件对 $\varnothing 20$ mm超声电机进行模拟,其最大空载转速为383 r/min,输入电压频率为50.3 kHz。经过与实测结果对比,该模型能够较准确地模拟电机稳态运行时的性能参数。

关键词:行波超声波电机;机电耦合;模拟;铌镁酸铅-钛酸铅(PMNT)单晶

中图分类号:TM304;TM306

文献标识码:A

Modeling and Analysis of the Dynamic Response of Ultrasonic Motor Fabricated by Relaxor-based Ferroelectric Single Crystals

CAO Lei, DU Huiling, SHI Xiang, REN Guanglin, MA Wuxiang

(College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Comparing with the conventional piezoelectric ceramic, the novel piezoelectric single crystals of PMNT possess more excellent dielectric and piezoelectric properties. In this paper, the PMNT single crystal is used as the driving material of the ultrasonic motor, and the mathematical model is established by introducing the elements of a two-dimensional elastic contact and pre-stress and others. The simulation of a ultrasonic motor with the diameter of 20 mm is carried out by the Matlab software. The result shows that the motor has a maximum no-load velocity of 383 r/min and input voltage frequency of 50.3 kHz. Compared with the experimental results, the model can describe the performance parameters of the motor accurately during steady state operation.

Key words: traveling wave type ultrasonic motor; electromechanical-coupling; simulation; PMNT single crystal

0 引言

超声波电机(USM)是20世纪80年代发展起来的一种新型微特电机。USM具有低速大转矩、直接驱动、运行无噪声、无电磁干扰及断电自锁等特性,其在照相机镜头对焦、钟表、机器人、精密定位系统等方面具有广泛的应用前景^[1-2]。相对于传统PZT基驱动材料,近几十年发展起来的铌镁酸铅-钛酸铅(PMNT)单晶材料具有更高的压电性能,其压电常数(d_{33})、机电耦合系数(k_{33})从600 pC/N和70%左右分别提高到2 000 pC/N和90%以上,且压电陶瓷在-200℃时的压电性能仍优于在30℃时的压电性能,能满足在低温或者真空环境下的工作要求^[3-5]。因此,新型的PMNT单晶在超声电机邻域具有广阔的应用前景。

行波超声波电机的主要结构包括:PMNT压电环、定子、摩擦材料、转子以及中轴。其体积小,能量密度大^[6]。行波超声波电机的工作原理:

1) 利用压电材料的逆压电效应,将输入在电机上的电能通过压电材料转化为定子的振动能。

2) 通过定子和转子的摩擦耦合,将定子的振动能通过摩擦材料转化为转子的旋转能量。在实际接触建模过程中,有定、转子结构,摩擦材料的特性,压电陶瓷的性能,电机预压力,装配误差等影响因素,如果把每个因素都计算进去不现实,也无必要^[7]。

本课题组的超声电机直径为 $\varnothing 20$ mm,驱动方式为环型,驱动材料为压电PMNT单晶材料。在本文中,我们将定、转子接触简化为一个二维弹性接触问题来解决,建立模型;通过电机的结构参数计算了

收稿日期:2016-07-30

基金项目:陕西省重点科技创新团队基金资助项目(2014KCT-04);陕西省国际科技合作重点基金资助项目(2012KW-10)

作者简介:曹磊(1991-),男,陕西宝鸡人,硕士生,主要从事先进无机材料研究。通信作者:杜慧玲(1972-),女,陕西西安人,教授,博士。

E-mail: hldu@xust.edu.cn.

驱动材料为 PMNT 单晶的超声电机的转矩、转速特性;继而通过对实际电机进行一系列测试,并与模拟结果进行对比分析,确定了电机的工作参数,为此超声电机的实际应用提供理论指导。

1 MATLAB 模型仿真^[8]

我们根据环形超声波电机的工作原理以及定、转子之间的接触,得出了仿真模型方程。本文使用 MathWorks 公司的 Matlab/Simulink 模块建立了仿真模型。

1.1 TWUSM 的主要模型方程

由环形超声波电机的工作原理以及定、转子之间的接触,根据波动方程、压电方程和二维弹性接触模型推导出了环形行波超声电机的主要仿真模型方程。

行波超声电机的输出转矩主要与定、转子间摩擦系数,摩擦材料的等效刚度,定子表面行波振幅及定、转子接触区域有关:

$$\frac{F}{2\mu k_r \epsilon \xi_0} = \frac{1}{k} (2 \sin kx_1 - \sin kx_0) + \cos kx_0 (x_0 - 2x_1) \quad (1)$$

式中: μ 为定、转子间的摩擦系数; k_r 为摩擦材料的等效刚度; ξ_0 为定子表面行波振幅; k 为行波系数; F 为一个波峰产生的摩擦力。

相应的总转矩为

$$T = nrF \quad (2)$$

式中: T 为力矩; n 为周向行波波数; r 为转子等效半径。

运用动力学原理,转子的角速度 (ω_{rotor}) 主要与转动惯量 (J_r)、总转矩及负载转矩有关:

$$\omega_{\text{rotor}} = \frac{T - T_{\text{load}}}{J_r} \quad (3)$$

式中 T_{load} 为负载转矩。

x_1 是定子表面质点横向速度与转子速度相等的位置,有

$$kx_1 = \arccos\left(\frac{\omega_{\text{rotor}} r}{kh_0 \xi_0 \omega}\right) \quad (4)$$

式中: h_0 为定子等效厚度的一半; ω 为输入电压频率。

转子的轴向压力主要与摩擦材料的等效刚度、定子表面行波振幅以及波数有关:

$$F_z = 2nk_r \xi_0 \left(\frac{1}{k} \sin kx_0 - x_0 \cos kx_0 \right) \quad (5)$$

式中 F_z 为定子给转子的轴向压力。

$\ddot{w}_R$ 是对时间的积分,有

$$\ddot{w}_R = \frac{F_z - F_N - D_z \dot{w}_R}{m_{\text{rotor}}} \quad (6)$$

式中: F_N 为轴向预应力; D_z 为轴向阻尼系数; m_{rotor} 为转子质量。

x_0 是定转子边界接触区域的边界点,有

$$kx_0 = \arccos\left(\frac{w_R - h_0}{\xi_0}\right) \quad (7)$$

式中 w_R 为定子底部和定子中性层的间距。

1.2 MTLAB/SIMULINK 建模及仿真参数

根据超声波电机的模型方程,再添加 Simulink 中一些辅助的计算模块,可得到电机的仿真模型。

结合本课题组 $\varnothing 20$ mm 环形行波超声电机,通过实际测量得出转子质量为 2.58 g,波数为 5, $h_0 = 1.95$ mm,转子等效半径为 8.75 mm,输入电压频率设置为 50.4 kHz。

1.3 模型仿真

利用 Matlab/Simulink 模块在给定不同的转矩和预压力的情况下,可以计算得到所需的曲线关系。

1.3.1 电机空载转速-预应力关系分析

图 1 为电机空载转速和预应力曲线关系图。由图可看出,在其他条件相同的情况下,当预应力为 0 时,电机的空载转速为 383.2 r/min。随着预应力的增加,空载转速逐渐减小并最终趋近于 0,这与实际情况相符。随着预应力的增大,定子和摩擦材料之间的摩擦力增大导致电机的转速减小,当预应力足够大时,电机将会停止转动。在实线与虚线的交点处,预应力为 380 N,空载转速为 340 r/min,堵转转矩为 0.51 N·m,可以提供一个负载的参考值。

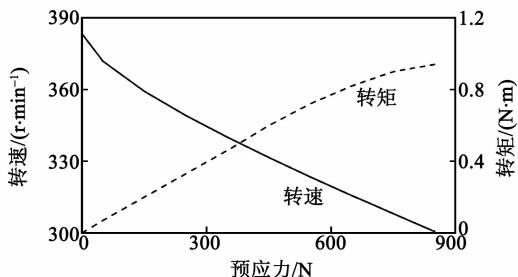


图 1 电机空载转速-堵转转矩与预应力的关系

1.3.2 电机堵转转矩-预应力关系分析

由图 1 可看出,随着预应力的增大,电机的堵转转矩会逐渐增大,并逐渐趋近于一个恒定的值。在实际情况,预应力的增大会使电机的共振模态发生变化,电机定子的振幅也会随之减小。由于这些在仿真模型中未体现出来,所以,实际电机所能施加

的预应力要远小于 850 N。

1.3.3 不同预应力作用下的转矩-转速关系分析

图 2 为电机在不同预应力作用下的转矩-转速关系。由图可看出,随着预应力的逐渐增大,电机的负载特性趋于平坦、稳定,这与超声电机的原理相符。当预应力增大时,摩擦材料与定子的接触面增大,转矩也相应提高;当预应力在 350~550 N 时,电机具有相对较大的转矩,性能也较稳定。再对比图 1 的分析,理论上最佳的预应力为 450 N。

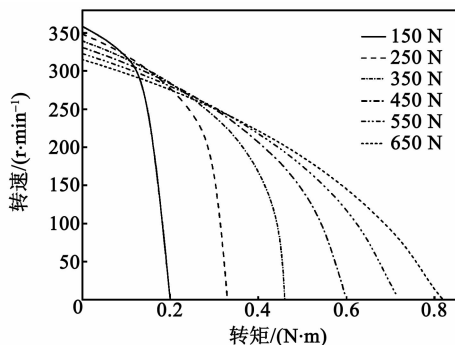


图 2 电机在不同预应力作用下的转矩-转速关系

1.3.4 不同预应力作用下的转矩-输出功率关系分析

电机输出功率为

$$P = M \times \omega_{\text{rotor}} \quad (8)$$

式中: P 为输出功率; M 为转矩。

图 3 为电机输出功率与转矩的关系。由图可看出,在同一预应力下,输出功率先随着转矩的增大而增大,达到极值后随着转矩的增大而减小;随着预应力的增大,电机的输出功率峰值逐渐增大,其对应的转矩也逐渐增大。理论上,当预应力为 450 N 时,转矩为 0.45 N·m,其输出功率最大;其堵转转矩为 0.6 N·m。

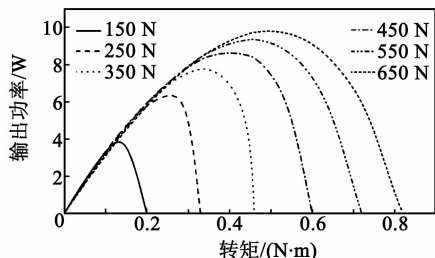


图 3 电机输出功率与转矩的关系

2 超声电机运行性能测试与结果对比

本实验中使用的是沿着 [001] 的垂直方向切割的 PMNT 单晶^[9],极化后的单晶不同扇形分区压电常数(d_{33})的测量值基本处于 $(1\ 020 \pm 30)$ pC/N。

在测试前,需先使用环氧胶将 PMNT 压电单晶

环、引线 and 定子粘好,粘结好的定子和转子如图 4 所示。将定子粘结好后,使用万用表检查其导线是否导通,并检查其合格性。

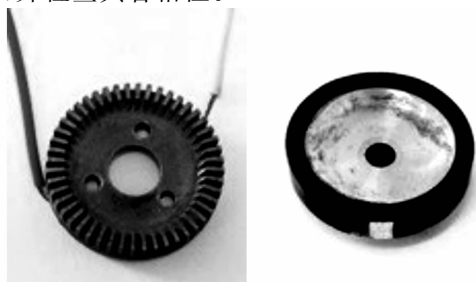


图 4 粘结好的电机定子和转子

2.1 定子的频谱测试

本次测试频率范围为 4.5~5.5 kHz,步长为 100 Hz。图 5 为定子阻抗-频谱测试。由图可看出,谐振峰尖锐明显,说明了定子制作良好。超声电机在工作时会发热,整个电机的定子会有明显的温升。而对于压电材料,温升会使其性能发生变化,其谐振频率会相应升高,反映在图中就是阻抗曲线和阻抗角曲线会在坐标中向右平移。如果一开始就将驱动频率设定在谐振点附近,那当电机定子的共振模态随温升变化时,驱动频率有可能会低于谐振点;又因为在谐振点和反谐振点附近,阻抗变化都非常大,这不利于驱动电路的阻抗匹配。因此,为使超声电机具有稳定的工作性能,在驱动电机时,总是将激励电压的频率设定在偏高于反谐振点的频率段内^[10]。根据上述规则,本文选取 51.1 kHz 作为输入电压频率。

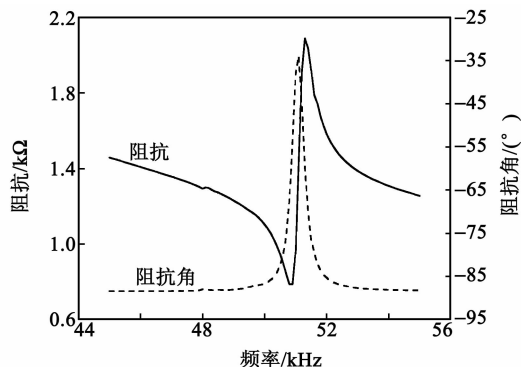


图 5 定子阻抗-频谱测试

2.2 输入电压频率与空载转速的关系分析

先将电机接入驱动电路,然后接通电路,调整相关参数。我们使用台湾 Lutron/路昌公司生产的 DT-2234B 型手持式测速仪测量电机转速。

图 6 为电机输入电压频率与转速的曲线。由图

可看出,当输入电压频率在 50.4 kHz 以下时,电机的空载转速随着输入电压频率的增大而增大;当输入电压频率在 50.4 kHz 以上时,电机的空载转速随着输入电压频率的增大而减小。因此,当输入电压频率为 50.4 kHz 时,电机的空载转速最大。这与第 2.1 节中频谱测试的结果相符,误差在 1 kHz 以内。

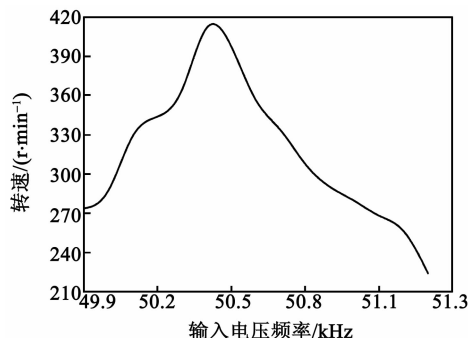


图6 电机输入电压频率与转速的曲线

2.3 定子 A、B 区的相位差对转速的影响分析

图 7 为电机 A、B 相位差与转速的曲线。由图可见,电机的空载转速随着两区之间相位差的增大而增大,且在 90° 时其空载转速最大(为 427.8 r/min),这与定子的驱动原理一致。当 A、B 相之间的驱动电压相位差为 $\pi/2$ 时,定子的弯曲振动形成了行波;当其中一相反向时,行波的行进方向将会反向,即转子会沿着反方向旋转。

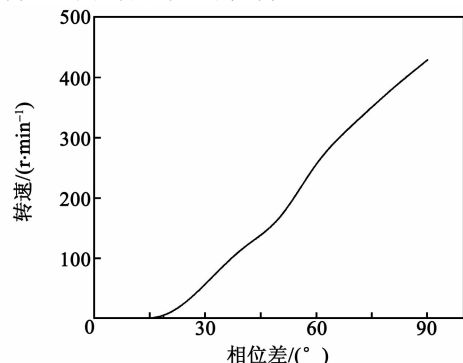


图7 电机 A、B 相位差与转速的曲线

3 结论

本文中使用了新型的 PMNT 单晶作为超声电机的驱动材料,把环形行波型超声波电机的定、转子接触简化为一个二维弹性接触模型。考虑定子振型、激励电压、电机预应力等因素,通过模型方程、Simulink 建模、参数设置、仿真以及实际测试得出了一系列数据。得出的结论如下:

1) 通过仿真模拟,对于本课题组的 $\varnothing 20$ mm 环

形行波超声电机,建立的模型能够较准确地反映电机的稳态运行状况,由分析得出当预应力为 450 N 时,电机的性能较好;同时,在负载为 0.45 N 时电机的输出功率最大,且最大堵转转矩为 0.6 N·m。

2) 对于本课题组的 $\varnothing 20$ mm 环形行波超声电机,为其性能表现较好,驱动电压频率应设置为 50.4 kHz,驱动电源二相之间的相位差应设置为 90° 。

3) 电机空载转速的测试值略大于模拟值,而产生这些误差的原因是在建模时忽略了定、转子结构,摩擦材料的特性,压电陶瓷的性能等。

参考文献:

- [1] 胡敏强. 超声波电机原理与设计[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [2] HONG J K, PARK C H, LEE J S, et al. The trial fabrication and characteristics of linear ultrasonic motor for application to X-Y table[C]//Caesars Tahoe, NV, USA: IEEE Ultrasonics Symposium, IEEE, 1999:683-686.
- [3] 李晓兵,赵祥永,罗豪甦,等. 弛豫铁电单晶的生长、性能及应用研究[J]. 人工晶体学报, 2012(S1):36-46. LI Xiaobing, ZHAO Xiangyong, LUO Haosu, et al. Growth, properties and applications of relaxor-based ferroelectric single crystals[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2012(S1):36-46.
- [4] ZHANG Shujun, LI Fei, JIANG Xiaoning, et al. Advantages and challenges of relaxor-PbTiO₃, ferroelectric crystals for electroacoustic transducers - A review[J]. Progress in Materials Science, 2015, 68:1-66.
- [5] 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.
- [6] HAGEDORN P, WALLASCHEK J. Travelling wave ultrasonic motors, Part I: Working principle and mathematical modelling of the stator[J]. Journal of Sound & Vibration, 1992, 155(1):31-46.
- [7] 施一峰. 超声波电机仿真及其测试系统[D]. 南京:东南大学, 2005.
- [8] 姚俊. Simulink 建模与仿真[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2002.
- [9] 任广林. 行波型 PMNT 压电单晶超声电机设计制作及性能分析[D]. 西安:西安科技大学, 2016.
- [10] 徐志科. 行波型超声波电机的模型仿真与试验研究[D]. 南京:东南大学, 2005.