

超声电机的预压力特性分析与优化

郑杰基, 陈宁, 焦西凯, 刘军, 范大鹏

引用本文:

郑杰基, 陈宁, 焦西凯, 等. 超声电机的预压力特性分析与优化[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 782–789.

ZHENG Jie–ji, CHEN Ning, JIAO Xi–kai, et al. Characteristics analysis and optimization of preload force in ultrasonic motors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 782–789.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0782>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超声电机多参量高精度测控系统的研制

Development of high–precision multivariable measurement and control system of ultrasonic motor
光学精密工程. 2020, 28(4): 759–770 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0759>

旋转行波超声电机性能提升技术进展

Progress on performance promotion technologies of rotary traveling wave ultrasonic motors
光学精密工程. 2020, 28(5): 1109–1115 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.1109>

V型直线超声电机梁式夹持的结构设计

Structure design of beam type clamp for V–shape ultrasonic motor
光学精密工程. 2015, 23(5): 1358–1364 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1358>

超声电机宽温域低损耗压电与摩擦功能材料

Wide–temperature–range and low–loss piezoelectric and friction functional materials of ultrasonic motor
光学精密工程. 2020, 28(4): 771–781 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0771>

超声电机速度与位置的高精度控制

High–precision control algorithm for velocity and position of ultrasonic motor
光学精密工程. 2020, 28(4): 790–799 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0790>

文章编号 1004-924X(2020)04-0782-08

超声电机的预压力特性分析与优化

郑杰基¹, 陈 宁¹, 焦西凯¹, 刘 军², 范大鹏^{1*}

(1. 国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073;

2. 南京航空航天大学 航空学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 预压力是保证超声电机定转子摩擦驱动的关键因素, 开展预压力特性分析及优化方法研究对于提升电机性能及使用寿命具有重要意义。本文通过仿真分析了预压力对接触角及驱动区占比的影响, 实验测试了预压力变化时的速度波动规律, 并绘制了在不同预压力和转矩下的速度与效率曲面; 借助编码器与薄膜温度传感器获取了不同预压力条件下电机工作 200 s 的速度与定子界面温度的变化过程。综合上述分析结果, 提出了一种面对不同应用场合的预压力优化准则, 确定了预压力的理想工作区间。实验结果表明, 伴随着预压力的增长, 接触区与驱动区同步扩展, 同时驱动区占比逐步减小, 在一定程度上能减小速度波动, 电机最大效率点逐渐向大转矩方向移动, 且机械效率在某个预压力下存在最高值, 而界面温升则呈现先增大、后减小再增大的趋势。根据所提出的优化准则确定出 TRUM60A 型超声电机预压力较为理想的工作区间为 260~320 N, 在该预压力范围内, 超声电机既能较好地满足低速稳定、温升小的要求, 又能使制动力矩和机械效率达到理想范围。

关键词: 超声电机; 预压力; 特性分析; 优化准则

中图分类号: TN384; TM301.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0782

Characteristics analysis and optimization of preload force in ultrasonic motors

ZHENG Jie-ji¹, CHEN Ning¹, JIAO Xi-kai¹, LIU Jun², FAN Da-peng^{1*}

(1. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Aeronautical Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

* Corresponding author, E-mail: fdp@nudt.edu.cn

Abstract: Preload force is a key factor for ensuring the frictional drive of the stator and rotor of an ultrasonic motor. In this paper, the influence of the preload force on the proportion of the contact antenna and driving area is first analyzed through simulation. The velocity fluctuation law of different preload forces is tested experimentally. The velocity and efficiency surfaces under different preload and torque are measured and plotted. With the help of the encoder and film temperature sensor, the changing process of the speed and stator interface temperature of the motor under different preload

收稿日期: 2020-03-04; 修订日期: 2020-03-15.

基金项目: 国家 973 基础研究发展规划资助课题 (No. 2015CB057503)

force was obtained. Based on the above analytical results, a preload force optimization criterion for different applications is proposed, and the ideal working range of the preload force is determined. With the growth of preload force, the contact area is synchronized with the drive area, while the speed of the driving area decreases and the speed fluctuation of the motor is somewhat reduced, the maximum efficiency of the motor occurs at a larger torque. Moreover, the highest rate of mechanical efficiency is at a certain preload force, temperature rise of the interface increases, and surface temperature rise fluctuates. According to the analysis results, the proposed optimization criterion determined that the ideal working preload force range for the TRUM60A ultrasonic motor is 260-320 N. The preload force in this range enables the ultrasonic motor to meet the requirements of low speed stability and small temperature rise, and achieve the ideal range of braking torque and mechanical efficiency.

Key words: ultrasonic motor; preload force; characteristic analysis; optimization criterion

1 引言

超声电机依靠定转子的摩擦作用传递驱动力,预压力作为保证电机内部摩擦驱动的关键因素,对电机工作性能及使用寿命有着至关重要的影响,因此,预压力特性的分析和优化在超声电机设计分析过程中成为一个不可忽视的科学问题。

在预压力对频率特性的影响研究方面,PIR-ROTTA等^[1]采用分布数值模型和有限元模型对预压力函数的一阶共振频率进行了研究。他发现一阶共振频率对预压力不敏感,然而其结果并没有被进一步的实验结果所证实。在此基础上,OH等^[2]对不同预压力下的共振频率和反共振频率进行了测试,证明了谐振频率和反谐振频率均与预紧力呈正相关。然而,LI等^[3]发现这两个频率并不随着预压力的增加而单调增加,但他的数据是从阻抗分析仪收集的,该分析仪只提供小振幅电压(0~10 V)。

在预压力对表面接触特性的影响研究方面,接触状态是预压力对摩擦力和输出扭矩的重要贡献。CHEN等^[4-5]通过考虑径向滑动因子的半解析模型建立了接触模型,仿真结果表明,当预压力增大时,接触区和驱动区同时变宽,径向滑动加剧。他在接触模型中考虑了接触层的变形和标准刚度,证明了接触区域变宽,各接触点的压力随着预压力的增大而增大,但分析时缺乏对负载条件下接触状态的研究。

在预压力对机械特性的影响研究方面,机械特性综合了频率特性和接触特性的结果,因为前者决定了输入功率,后者会影响输出功率和输出

力矩。BULLO和曾劲松等学者^[6-13]从仿真和实验角度分析了预压力对电机性能的影响,但他们的研究大都不够全面,仅分析了预压力对电机的影响,并未根据分析结果提出一种预压力优化的准则,确定出超声电机预压力的理想工作区间,因此未能将分析结果转化为电机性能的提升。

此外,超声电机在运行过程中存在的温升和速度波动均受到预压力不同程度的影响。前人虽提出了一些温度补偿控制策略^[14-15]和速度平稳性控制策略^[16]以获得更好的速度控制性能,然而,多数学者忽视了预压力在温度变化和速度波动中的作用。

综上所述,超声电机预压力特性的分析和参数优化方法对于超声电机的设计、制造、装配以及控制效果等都具有重要意义。本文通过仿真和实验测试的方法,对预压力和电机接触特性、速度稳定性、机械特性以及温升特性的映射关系进行了较全面的研究,并依据分析结果提出了一种预压力优化准则,确定了超声电机理想的预压力工作区间,使电机各项性能均达到较理想的状态。

2 预压力调控及监测装置

性能优良的预压力调控装置是分析超声电机预压力与性能之间映射关系的基础。前人的预压力施加装置多通过螺旋进给方式且依靠手动对预压力进行调整,具有调节困难、精度不高的缺点。本文采用伺服电动缸作为预压力施加装置,当控制电动缸的伺服电机工作在力矩模式时,其出力可基本保持恒定,利用这一特性可以实时在线地改变预压力,且导向精度高、施加力均匀。电机

在运动过程中轴向压力的测量需要高精度的压力传感器。根据预压力 0~600 N 的需求, 遴选了上海会通的直线型电动缸和广州斯密特的 VC20 石英型压力传感器, 其中 VC20 还配套 ST100 压力数显表, 能够实时观测压力, 而压力变化曲线在测控处理器上进行观测。

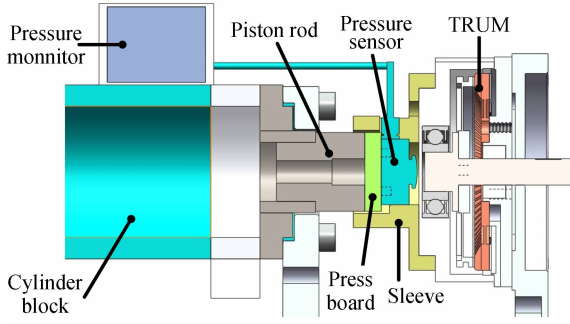


图 1 预压力施加及监测装置

Fig. 1 Device for adjusting preload force

3 预压力对电机性能的影响

3.1 预压力对接触特性的影响

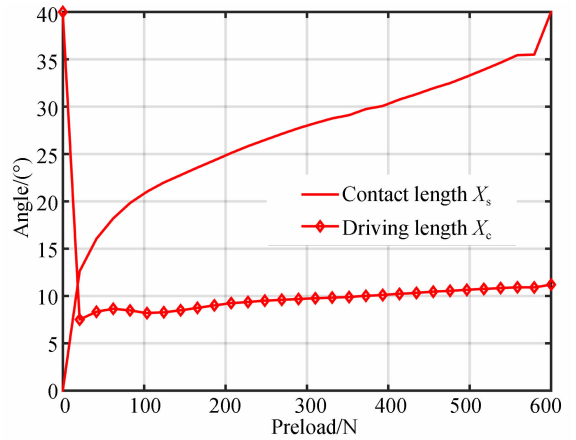
从直观上看, 预压力变化最直接的影响就是定转子间接触界面。TRUM60A 型超声电机运行时在定子圆周上具有 9 个行波, 每个行波所占角度为 40° , 其中接触角 X_c 和驱动角 X_s 可表示为:

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{20}{\pi} \arccos\left(\frac{h - z(t)}{R_{sc}\xi}\right), \\ X_s &= \frac{20}{\pi} \arccos\left(\frac{\Omega_r R_o^2}{\lambda h R_{sc}\xi f_s}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

其中: ξ 表示模态振幅, h 表示压电层合板中性层厚度, λ 表示行波的波长, f_s 代表驱动频率, Ω_r 为转子的角速度, R_{sc} 为横向位移振型函数在定子环等效半径 R_o 处的取值。

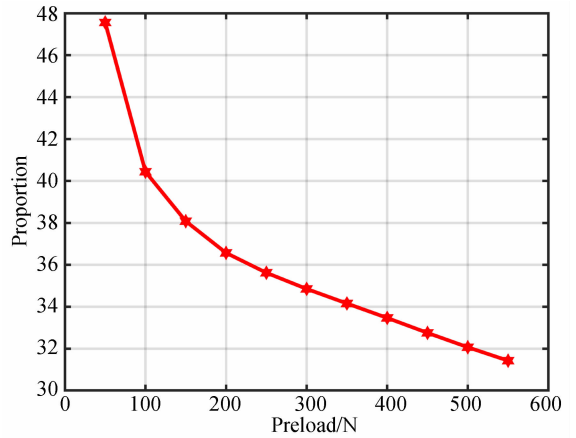
控制预压力在 0~600 N 内, 通过仿真观察其接触区域的变化, 图 2(a) 为空载条件下改变预压力时的接触角度与驱动角度的变化情况。可以发现, 随着预压力的增加, 接触区逐渐由 0° 开始增大, 起初上升趋势较快, 在中段即 100~580 N 以约 $0.033^\circ/\text{N}$ 的斜率增大, 预压力升至 580 N 后上升斜率陡增, 并迅速到达 40° , 此时定转子处于全接触状态。而驱动角度在从 0 N 时的

40° 跳变后便一直以稳定的斜率上升, 斜率始终远小于 $0.033^\circ/\text{N}$ 。进一步比较驱动角度与接触角度的比例关系(图 2(b)), 可知随着预压力的增大, 驱动区在整个接触区内所占的比重逐渐减小, 接触过程的径向及切向摩擦损耗都随之增加。



(a) 接触角度与驱动角度

(a) Contact angle and driving angle



(b) 驱动区占比

(b) Proportion of driving area

图 2 一个行波内不同预压力的接触情况

Fig. 2 Contact under different preload forces within a single traveling wave

3.2 预压力对速度波动的影响

超声电机工作时, 定子齿与摩擦层的接触状态存在周期性变化, 且并非均匀分布。由于加工、制造及装配误差, 定转子难以实现绝对的严格对中, 转轴相对定子中心存在偏心倾斜状态。此外, 由于定子齿表面粗糙度和摩擦界面磨损的发生,

电机运转时的速度波动不可避免,因此有必要探究预压力对于速度波动的作用,以便选取能有效抑制转速波动的预压力范围。

设置驱动频率为 43 kHz,在 500 s 时间内,以 25 N 为间隔逐渐改变预压力,观察电机速度波动情况,得到图 3 所示的速度响应曲线(彩图见期刊电子版)。图中红色曲线与蓝色曲线分别对应的电压幅值为 200 V 与 240 V。由图可知,随着预压力的增加,电机转速先增大后减小,转折点处的预压力约为 275 N。从该预压力开始,电机的等速点及接触点变化加剧,摩擦层逐渐嵌入齿隙使得损耗开始增大,速度响应则随之下降。对速度波动采用标准差进行评估,择取每一段预压力持续过程的速度曲线进行标准差换算,结果表明,伴随着预压力的增大,速度平稳性逐渐提高,说明预压力对速度波动起一定的抑制作用。

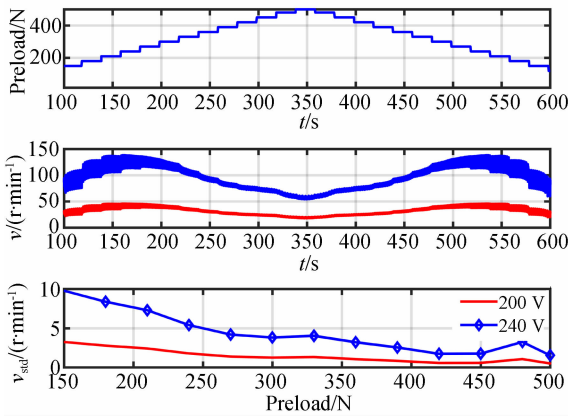


图 3 不同预压力条件的速度稳定性

Fig. 3 Velocity stability under different preload forces

在获得速度曲线的同时,通过压力传感器得到了同样处于波动状态的轴向压力,为了探究速度波动与动态压力的内在关系,借助公式(2)反解得到动态压力 F_z 为自变量、接触角度 X_c 为因变量的多项式(3),该表达式重新建立了动态压力与接触区域的映射关系。

$$F_z = n \int_{R_0-\epsilon/2}^{R_0+\epsilon/2} \int_{-x_0}^{x_0} p(x) dx dy =$$

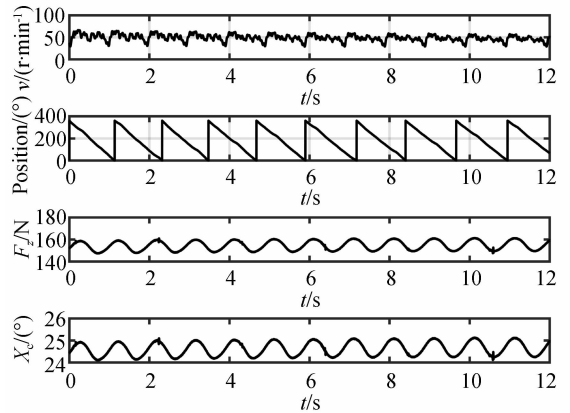
$$2nkrR_s c \epsilon \xi \left[\frac{1}{k} \sin(kx_0) - x_0 \cos(kx_0) \right], \quad (2)$$

$$X_c = 2.7 \times 10^{-16} F_z^7 - 6 \times 10^{-13} F_z^6 +$$

$$5.4 \times 10^{-10} F_z^5 - 2.5 \times 10^{-7} F_z^4 +$$

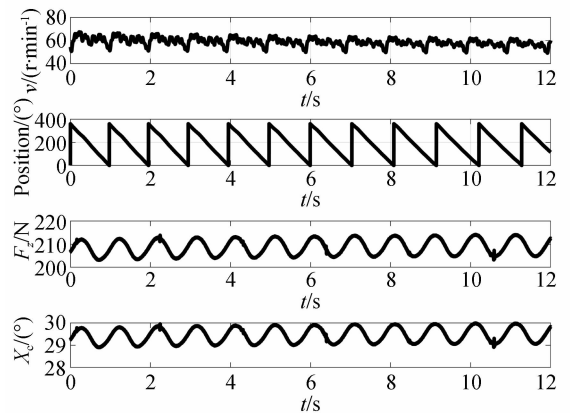
$$6.4 \times 10^{-5} F_z^3 - 0.0088 F_z^2 + 0.65 F_z + 0.72. \quad (3)$$

图 4 是预压力为 150 N 和 200 N 时的实时速度、角位置、动态压力和解算出的接触角度。可以观察到动态压力、接触角度和速度波动均以 360° 为周期,这说明波动主要来自于转子轴的非对中误差,且波动周期随着速度下降而持续增加。



(a) 局预压力为 150 N 时的实时速度、角位置、动态压力和接触角度

(a) Real-time velocity, angular position, dynamic pressure and contact angle with preload force of 150 N



(b) 预压力为 200 N 时的实时速度、角位置、动态压力和接触角度

(b) Real-time velocity, angular position, dynamic pressure and contact angle with preload force of 200 N

图 4 动态压力波动的时域分析

Fig. 4 Time domain analysis of dynamic preload force fluctuation

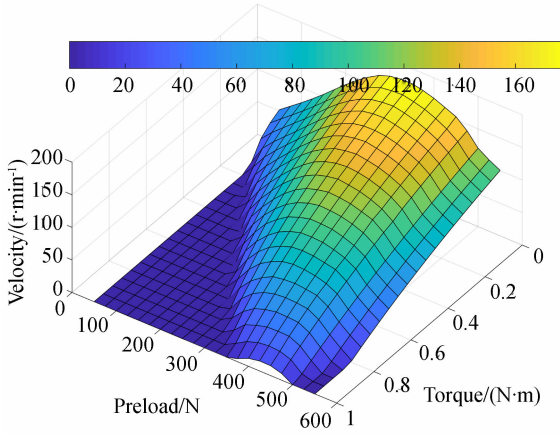
当预压力为 150 N 时,接触区的波动角度范围为 1.01° ,在整个接触区 24.15° 中占比 4.18%;而预紧力为 200 N,接触角度和波动角度分别为 28.94° 和 0.9° ,占比变为 3.11%,由此表明,预压

力增加对定转子的约束程度加大,有助于减少速度波动。

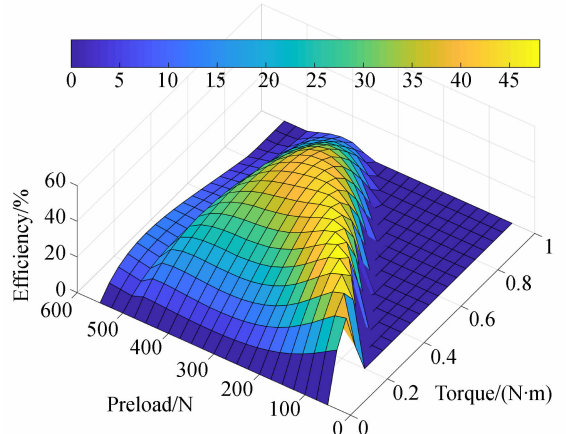
3.3 预压力对机械特性的影响

从电机带载能力与效率上看,接触状态的影响最终都会体现到机械特性上。图 5(a)和图 5(b)分别是预压力介于 50~550 N 时的预压力-转矩-速度曲面与预压力-转矩-效率曲面。从预压

力-转矩-速度曲面可发现,在任意负载条件下,转速随预压力的增大呈现出先增大后减小的趋势,且最大速度点从空载时的 275 N 逐渐过渡到带载 1 N·m 条件下的 400 N。从预压力-转矩-效率曲面可以看出,随着预压力增大,最大效率点逐渐向大转矩方向移动,同时机械效率最大值也呈现出先增大后减小的趋势。



(a) 预压力 - 转矩 - 速度曲面
(a) Curves of preload force, torque and speed



(b) 预压力 - 转矩 - 效率曲面
(b) Curves of preload force, torque and efficiency

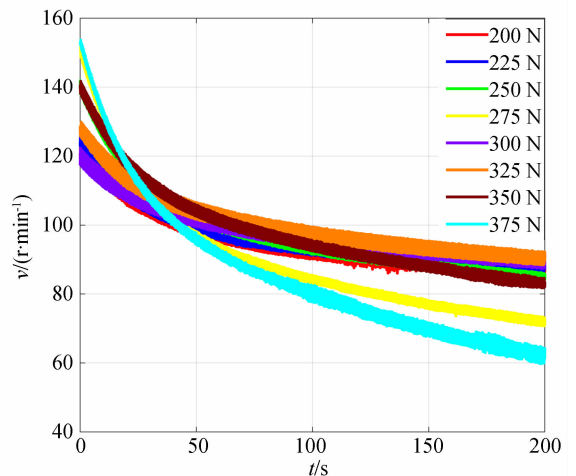
图 5 不同预压力条件的转矩-转速-效率特性

Fig. 5 Torque-speed and efficiency characteristics under different preload force conditions

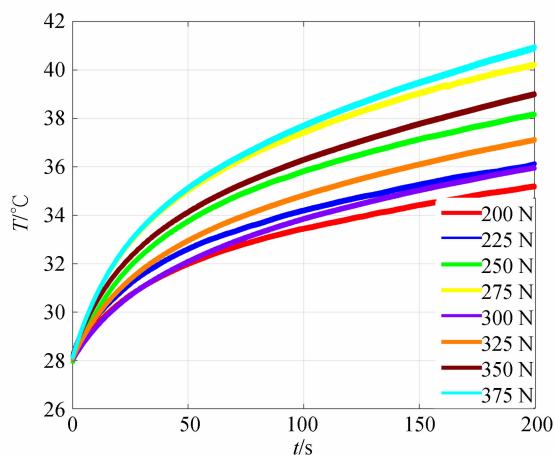
3.4 预压力对功耗及温升的影响

摩擦损耗是电机能量损耗和温升的主要因素,预压力的变化引起的接触状态改变,导致摩擦损耗随之变化。为了保证单因子调控原则,实验测试的启动温度均为 28 °C,且开关电机在相同的操作时间内完成。将预压力从 200 N,每隔 25 N 增加到 400 N,研究预压力对速度与界面温度的影响,电机启动后的转速和界面温度变化见图 6(a)和图 6(b)。电机启动后,速度逐渐下降温度逐渐上升,一段时间后两者均趋于平稳,这表明热量积累是逐渐实现的。图 6(c)为不同预压力时电机运行 200 s 后的速度下降量和界面温度上升量。由图可知,预压力为 375 N 时温度上升量达到最高值,稳态速度却最小,在该预压力下电机速度下降过快,电机发热严重,温度急剧上升,不适于电机的精确控制,原因在于预压力过大引起接触宽度激增,摩擦产热大幅增加;而在预压力为 300 N 时,速度下降与温度上升均达到极小值,这说明电机预压力

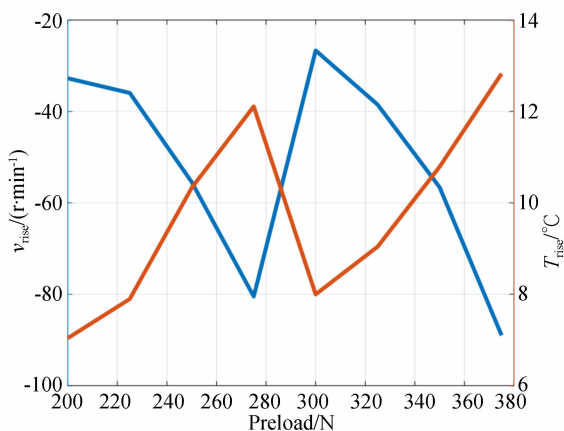
控制在该值附近时,速度稳定性好且发热温升最小。其原因因此预压力下定子齿面与摩擦层之间的接触状态达到最优,使定子与转子之间的周向与径向摩擦损耗最小。很明显,过快的温升不利于最终的速度位置控制。



(a) 速度变化曲线
(a) Velocity change curve



(b) 温度变化曲线
(b) Temperature change curve



(c) 不同预压力下的速度变化量与温升量
(c) Velocity change and temperature rise at different preload forces

图6 不同预压力条件下的特性变化

Fig. 6 Characteristic changes under different preload forces

4 预压力优化准则

由上述测试及分析结果可知,预压力对超声电机的影响覆盖了超声电机的主要性能,可得到以下结论:

(1)无论在何种负载条件下,速度随预压力的增大都是先增加后减小;

(2)空载条件下的速度波动随着预压力的增大持续减小,速度稳定性与轴向的压力波动和接触状态变化密切相关;

(3)不同预压力电机的堵转力矩和最大效率均存在一个峰值点,堵转力矩的峰值点为 320 N,

而最大效率的峰值点为 260 N;

(4)电机的温升主要来源于摩擦损耗,受预压力影响较大,温升量在预压力为 300 N 时存在一个极小值。

选取测试的典型结果,汇总到同一坐标系中,如图 7 所示(彩图见期刊电子版),可以较全面观察不同性能随预压力的演变规律,并根据上述 4 个结论提炼出以下 4 条预压力优化准则:

(1)由堵转力矩曲线可知,预压力为 320 N 时电机出力最大,若电机运用于高出力场合,则预压力约为 320 N;

(2)由效率曲线可知,预压力为 260 N 时电机效率最高,若要求电机高的工作效率,则预压力应取在 260 N 附近;

(3)由速度标准差曲线可知,速度波动与预压力负相关,若要求电机小的速度波动,预压力应尽可能大;

(4)由温升曲线可知,温升量在预压力为 300 N 时达到最小值。为了延长超声电机的使用寿命和保证电机稳定工作,预压力取为 300 N 左右时,阻碍区和驱动区能够达到平衡。

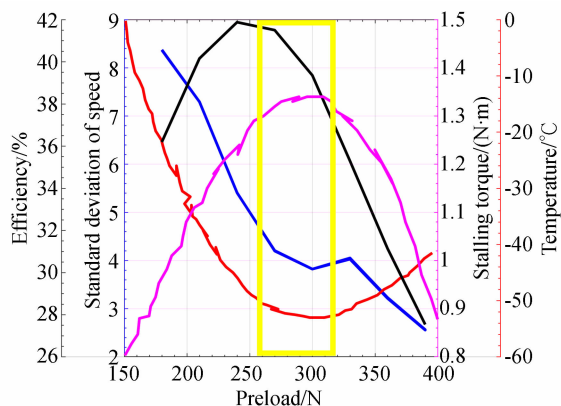


图7 预压力最优工作区间

Fig. 7 Optimal working range of preload force

为了提高超声电机的综合性能,使电机在拥有较大的出力、较高的工作效率的基础上兼顾较小的速度波动和温升,因此以最大效率曲线峰值对应的预压力为左边界,以堵转力矩曲线最大值对应的预压力为右边界,确定了 TRUM60A 型超声电机的理想预压力区间为 260~320 N,如图 7 所示的黄色矩形区域。该区域既能满足低速稳定、温升小的要求,又能使制动力矩和机械效率达

到理想范围,是该电机应用时较理想的工作区间。

5 结 论

本文通过仿真分析了预压力对超声电机接触角和驱动区占比的影响规律,通过实验测试的方法探索了在不同预压力下速度波动与压力波动的关系,对电机在不同的预压力和转矩时的速度与效率进行了分析,最后测试了电机在运行 200 s 后的温度变化情况,并根据测试分析结果提出了一种预压力最优工作区间的评定准则。若要求电

机出力较大,则预压力应取约 320 N;若要求电机的输出效率高,则预压力应取在 260 N 附近;若要求电机的速度波动小,预压力应尽可能大;若要求温升较小,则预压力为 300 N 左右。利用该准则,确定了 TRUM60A 型超声电机的预压力较为理想的工作区间为 260~320 N,在该预压力范围内电机的各项性能均能达到较理想的状态。

对于超声电机的设计制造而言,本文提出的预压力优化准则可快速确定电机的理想预压力区间,有助于超声电机制造装配工艺优化、机械特性改进以及高精度控制算法等工作的开展。

参考文献:

- [1] PIRROTTA S, SINATRA R, MESCHINI A. Evaluation of the effect of preload force on resonance frequencies for a traveling wave ultrasonic motor [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2006, 53(4): 746-753.
- [2] OH J H, YUK H S, LIM J N, *et al.*. An analysis of the resonance characteristics of a traveling wave type ultrasonic motor by applying a normal force and input voltage [J]. *Ferroelectrics*, 2009, 378(1): 135-143.
- [3] LI J B, LIU S, QU J J, *et al.*. A contact model of traveling-wave ultrasonic motors considering preload and load torque effects [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2017, 56(2): 151-164.
- [4] CHEN CH, ZHAO CH SH. A novel semi-analytical model of the stator of TRUM based on dynamic substructure method [C]. *USE2005. Tokyo, Japan, November 17-25, 2005: 17-25.*
- [5] CHEN CH, ZHAO CH SH. Dynamics of piezoelectric ultrasonic motor based on substructural theoretic method [J]. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. IEEE*, 2006: 344-339.
- [6] BULLO M, PERRIARD Y. Influences to the mechanical performances of the travelling wave ultrasonic motor by varying the prestressing force between stator and rotor [C]. *IEEE Symposium on Ultrasonics*, 2003, 5-8 Oct. 2003, Honolulu, HI, USA, 2003: 593-596.
- [7] 曾劲松, 罗文华, 李金新. 预压力对超声电机输出性能的影响 [C]. 2010 全国压电和声波理论及器件技术研讨会, 中国福建厦门, 2010.
- [8] ZENG J S, LUO W H, LI J X. Effects of preload force on ultrasonic motor output performance [C]. *Proceedings of the 2010 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves and Device Applications*, xiamen, fujian, China, 2010. (in Chinese).
- [9] 王光庆. 预压力对超声波电动机性能影响的实验研究 [J]. *微特电机*, 2008, 36(6): 4-6, 12.
- [10] WANG G Q. Effects of the preload on the characteristics of ultrasonic motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2008, 36(6): 4-6, 12. (in Chinese)
- [11] 赵向东, 赵淳生. 预压力对超声电机输出特性影响的实验研究 [J]. *力学与实践*, 2002, 24(4): 46-48.
- [12] ZHAO X D, ZHAO CH SH. Effects of preload on the output characteristics of ultrasonic motors [J]. *Mechanics and Engineering*, 2002, 24(4): 46-48. (in Chinese)
- [13] 张彦虎, 曲建俊, 郭文峰, 等. 预压力对超声电机输出性能影响的模拟分析 [C]. 第五届全国振动利用工程学术会议暨第四次全国超声电机技术研讨会, 南京, 2012.
- [14] ZHANG Y H, QU J J, GUO W F, *et al.*. Simulation analysis of the influence of preload force on ultrasonic motor output performance [C]. *The Fifth National Conference on Vibration Utilization Engineering and the Fourth National Symposium on Ultrasonic Motor Technology*, Nanjing, 2012. (in Chinese)
- [15] 韩庆庆, 黄卫清. 一种超声波电动机预压力的试验方法 [C]. 第十届中国小电机技术研讨会, 中国上海, 2005: 202-204.
- [16] HAN Q Q, HUANG W Q. A test method for

- preload force of ultrasonic motor [C]. *The 10th China Symposium on Small Motor Technology*, Shanghai, China, 2005: 202-204. (in Chinese).
- [12] 王贞艳, 贾高欣. 压电陶瓷作动器非对称迟滞建模与内模控制[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2484-2492.
WANG ZH Y, JIA G X. Asymmetric hysteresis modeling and internal model control of piezoceramic actuators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2484-2492. (in Chinese)
- [13] 张泉, 尹达一, 张茜丹. 压电执行器动态迟滞建模与LQG最优控制器设计[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(11): 2744-2753.
ZHANG Q, YIN D Y, ZHANG X D. Dynamic hysteresis modeling and LQG optimal controller design of piezoelectric actuators[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(11): 2744-2753. (in Chinese)
- [14] TAVALLAEI M A, ATASHZAR S F, DRANGOVA M. Robust motion control of ultrasonic motors under temperature disturbance [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(4): 2360-2368.
- [15] YANO Y, IIDA K, SAKABE T, *et al.*. Approach to speed control using temperature characteristics of ultrasonic motor [C]. *The 2004 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 2004. MWSCAS '04., 25-28 July 2004, Hiroshima, Japan, 2004: iii-155.
- [16] 张帆. 行波型超声电机稳定性及其控制策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
ZHANG F. *Stability of the Traveling Wave Type Ultrasonic Motor and Control Strategy* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)

作者简介:



郑杰基(1993—),男,福建龙岩人,博士研究生,2016年于中南大学获得学士学位,2018年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事超声电机设计与测控方法的研究。E-mail: 1024451173@qq.com

通讯作者:



范大鹏(1964—),男,河南周口人,教授,博士生导师,1991年于华中科技大学获得博士学位,主要从事数控技术、嵌入式系统以及精密光电跟踪平台的测控技术研究。E-mail: fdp@nudt.edu.cn