

伺服阀旋转直驱超声电机机理与特性

刘广军¹, 刘可臻¹, 陆亮^{1,2}, 徐寅鹏¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310007)

摘要: 针对某旋转直驱式伺服阀对驱动电机小长径比紧凑型结构形式的设计要求, 从伺服阀功率级 200 Hz 动态响应需求出发, 设计了一款环形行波型超声电机。分析了超声电机的基本工作原理并建立了超声电机定子转子摩擦传动模型, 搭建了超声电机特性测试实验台并进行了转矩-转速测试, 实验结果与仿真结果一致, 验证了电机设计的合理性。在此基础上, 进行了超声电机驱动频率和驱动电压的影响特性分析, 结果表明超声电机在 49.8 kHz 的驱动频率下具有最大的工作效率, 驱动电压大于 110 V 时可以满足伺服阀转速与转矩工作要求, 并且在 49.8 Hz 的驱动频率和 110 V 驱动电压条件下可以接近最大的工作效率。

关键词: 直驱伺服阀; 动态响应; 超声电机; 建模设计; 实验测试

中图分类号: TH137.5; TM359.9

文献标志码: A

Principle Design and Characteristic Analysis of Ultrasonic Motor for Direct Drive Servo Valve

LIU Guangjun¹, LIU Kezhen¹, LU Liang^{1,2}, XU Yinpeng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Hangzhou 310007, China)

Abstract: To meet the design requirements of a rotary direct-drive servo valve for a small length-to-diameter ratio compact structure of the drive motor, an annular traveling wave type ultrasonic motor was designed starting from the demand of 200 Hz dynamic response of the servo valve power level. The basic working principle of the ultrasonic motor is analyzed and the stator-rotor friction transmission model of the ultrasonic motor is established. An ultrasonic motor characteristic test bench was built and the torque-speed test was conducted, based on which, the analysis of the influence characteristics of

ultrasonic motor drive frequency and drive voltage was performed. The results show that the ultrasonic motor has the maximum working efficiency at a drive frequency of 49.8 kHz, the servo valve speed and torque working demand can be satisfied when the drive voltage is greater than 110 V, and the maximum working efficiency can be approached under a drive frequency of 49.8 Hz and 110 V drive voltage condition.

Keywords: direct-drive servo valve; dynamic response; ultrasonic motor; modeling design; experimental test

伺服阀是火箭推力矢量控制、飞机器作动系统及航空发动机燃油调节器等高端装备中的关键液压元件, 通常需满足高功率密度、高动态和高可靠的指标要求^[1]。目前, 以射流管伺服阀和喷嘴挡板式伺服阀为代表的带前置级机械反馈式电液伺服阀占据主要市场, 但先导式两级伺服阀始终面临加工难度大、泄漏大、抗污能力差、易温漂等技术难题^[2]。20 世纪 70 年代因为电磁驱动技术的显著进步, 欧美一些发达国家开始研制可以满足商用性能的直接驱动式电液伺服阀, 使用了一套电-机械转换装置来直接驱动功率级阀芯的运动, 省去了先导级复杂的机械机构, 在较大程度上解决了两级伺服阀的固有问题, 已成功应用于航空航天等军事领域^[3-4]。直接驱动式电液伺服阀的驱动级经历从电磁铁驱动到电磁电机驱动的发展历程, MOOG 公司的经典产品 D633 系列直接驱动伺服阀采用直线力马达作为驱动元件, 直线力马达由电磁铁和线圈组成, 结构简单, 直线力马达和功率级主阀采用同轴布置的形式, 该阀的控制精度和响应频率均不低于传统的电液伺服阀^[5]。由于电磁铁的响应频率不高, 限制了直驱

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2005102); 国家自然科学基金(52075387); 上海市自然科学基金(22ZR1464400); 流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金(GZKF-201907)。

第一作者: 刘广军, 教授, 工学博士, 主要研究方向为施工装备液压技术及其动力单元技术。E-mail: gjliu@126.com

通信作者: 陆亮, 副教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为电液伺服与智能控制。

E-mail: luliang829@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

式伺服阀性能的进一步提高,具有更高响应性能的电磁电机开始被作为驱动级使用在直驱式伺服阀上。如PARKER公司利用音圈电机载流线受力大小与电流大小成正比特性,将音圈电机作为直驱式伺服阀的驱动级,功率级阀芯和载流线连接在一起随载流线做直线运动,并在载流线上安装位移传感器将主阀芯的位移反馈至信号输入端对整阀进行闭环控制,PARKER公司推出的音圈电机直驱式伺服阀线性度好,可靠性高,响应频率可达250 Hz^[6]。又如国外WOODWARD公司的旋转直接驱动式液压伺服阀采用有限转角力矩电机作为驱动级,有限转角力矩电机是一种直流无刷力矩电机,可以在有限的转角范围内实现较为恒定的力矩输出,并采用小球副式的电—机械转换结构将转角转化为功率级阀芯的直线位移,因为电机和主阀体垂直布置,有效减小了主阀轴向的长度,使得整阀更加紧凑。

尽管电磁电机简化了伺服阀驱动级的机械结构,给加工带来便利,但电磁电机长径比较大,不能很好地解决航空航天领域液压系统对伺服阀小型化尤其是紧凑化的使用要求^[7]。而超声电机或超声波马达在结构上具有轴向长度短、体积小和构造简单的特点,且由于其独特的能量传递机理,还具有响应速度快、不易受外界磁场干扰等优势^[8],逐渐成为精密设备驱动元件的更好替代品。日本佳能集团^[9-10]将超声电机运用于驱动镜头的聚焦动作。丰田集团超声电机用于汽车上某些需要电机驱动的设备,将超声电机替换掉传统电机后,原设备的尺寸及重量都有所降低,提高了车内空间,增强了用户体验。美国NASA^[11]将超声电机应用于火星探测器的支撑腿驱动上,与传统电机相比,在扭矩同等情况下,减少了30%以上的重量。将超声电机应用于液压驱动的研究也逐步体现,日本Teruyuki^[12]使用超声电机取代了球阀上的传统电机,利用超声电机力矩密度高的特性,在电机占用体积减小的情况下还提高了电机输出力矩。Nie等^[13]利用超声电机的高力矩密度以及高定位精度的特性,尝试使其直接驱动射流管式伺服阀,在降低阀中电机结构占用体积的同时,阀的工作参数和定位精度还得到了提高。

由此可见,超声电机用于精密的液压伺服驱动具有广阔的应用前景,但用于取代伺服阀旋转直驱电磁电机的深入研究尚不多见。本文以某款已研制开发的电磁电机旋转直驱伺服阀为基础,基于伺服阀频率响应分析,给出超声电机转速转矩设计要求。在此基础上进行超声电机的结构原理设计,通过建

模仿真与实验验证,分析所研制超声电机的性能特性,并给出满足频率指标的电机驱动频率与驱动电压工作范围。

1 伺服阀功率级负载特性

某电机直驱式伺服阀工作原理如图1所示,该阀主要是由电子控制器、驱动电机、偏心驱动器机构、功率级滑阀以及旋转角度传感器构成的。当输入不为零时,通过控制器计算并驱使电机运转,电动机通过偏心球副与伺服阀连接,使电机的回转运动变换为阀芯的直线运动,并由此改变阀口的节流面积,以达到流量控制的目的。该阀通过电子反馈形式实现伺服控制,通过角位移传感器将驱动电机的回转角度反馈至控制阀,由此形成电机位置闭环^[14-15]。

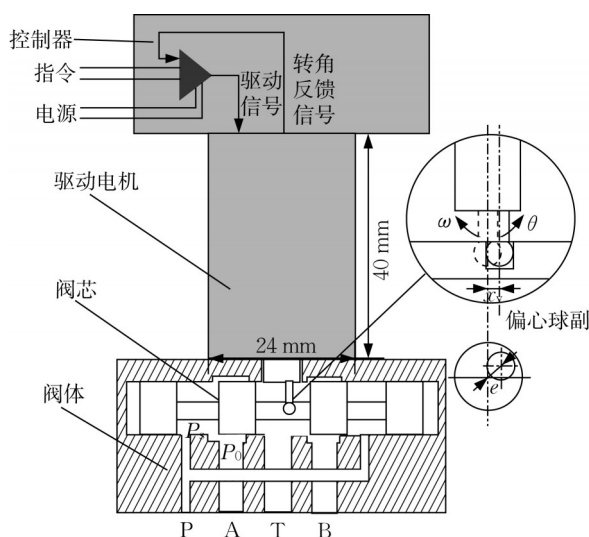


图1 电机直接驱动式伺服阀整阀结构原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of structure principle of motor direct drive servo valve

为了明确所要设计的超声电机的转速和转矩需求,需要对伺服阀功率级负载特性进行分析。伺服阀动态测试中,取阀芯位移量为最大阀芯开度的1/4,阀芯动态响应频率为200 Hz,考虑-3 dB幅值衰减,则阀芯有效开口位移应为实际开口的0.707倍,此时滑阀位移 x_v 应为

$$x_v = \frac{1}{4} \times 0.707 \times x_{v_{\max}} = \frac{1}{4} \times 0.707 \times 0.587 = 0.01(\text{mm}) \quad (1)$$

式中: $x_{v_{\max}}$ 为阀芯最大开度。此时对应电机转角 θ 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_v}{e}\right) = \arctan\left(\frac{0.01}{4}\right) = 0.143^\circ \quad (2)$$

式中: e 为偏心距。

为保证阀芯动态响应,电机驱动力矩应能够克服稳态液动力、阀芯摩擦力、电机转动惯量及阀芯重量带来的惯性力、黏性阻尼等,其中电机黏性阻尼带来的负载力矩一般很小,可忽略不计。电机对阀芯作用力分为轴向力和径向力,其中,轴向力为阀芯提供驱动力,径向力给阀芯带来摩擦力。

阀芯最小动态响应频率 f 为 200 Hz 时,电机转角 0.593° ,电机最小轴角速度 ω 为

$$\omega = \frac{\theta}{180} \pi \cdot 2\pi f = \frac{0.143}{180} \pi \cdot 2\pi \cdot 200 = 3.11(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}) = 29.7(\text{r}\cdot\text{min}^{-1}) \quad (3)$$

电机旋转角度为 0.593° 时,电机提供的动态力矩与峰值力矩基本保持不变。设滑阀副摩擦系数为 0.1,电机径向摩擦负载力矩 M_f 为

$$M_f = b_v M_c \sin(\theta) \quad (4)$$

式中: b_v 为滑阀副摩擦系数; M_c 为电机输出力矩。

当电机转角 0.593° 时,阀芯实际有效开口位移为 0.01mm,阀芯实际开口为阀芯所受稳态液动力矩 M_s 为

$$M_s = 2C_d W x_v (p_s - p_0) \cos(\gamma) e = 0.208(\text{N}\cdot\text{m}) \quad (5)$$

式中: C_d 为流量系数,取 0.51; W 为阀口面积梯度,取 0.517mm; p_s 为供油压力,取 28MPa; p_0 为回油压力,取 0.5MPa, γ 为射流角,取 69° 。

阀芯动态响应幅频 200Hz 时,电机转角 0.593° ,此时,电机轴角加速度 a_s 为

$$a_s = \frac{\theta}{180} \pi \cdot (2\pi f)^2 = 16\,343 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2} \quad (6)$$

转动惯量带来阻力矩 M_j 为

$$M_j = J a_s \quad (7)$$

式中: J 为电机转子沿旋转轴的转动惯量。

电机带动阀芯的线加速度为

$$a_1 = a_s e = 65.4(\text{m}\cdot\text{s}^{-2}) \quad (8)$$

阀芯质量 m_v 约为 0.002 5kg,则阀芯质量带来阻力矩 M_r 为

$$M_r = m_v a e \quad (9)$$

因此,电机提供驱动力矩与电机所受阻矩之间的关系为

$$M_c > M_f + M_s + M_j + M_r \quad (10)$$

可解得伺服阀功率级驱动转矩 $M_c \geq 0.044 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

2 超声电机工作原理与实验测试平台

2.1 电机工作原理

所研制的超声电机为环形行波型超声电机,其通过定子振动而形成行波,并以此推动旋转行波超声马达的转子运动旋转^[16]。在定子底部粘贴有两相对称的压电陶瓷片,压电陶瓷通电后,可以在定子上产生 2 个时空上都相距 90° 的相同频率、等幅值的驻波,这 2 个驻波经过线性叠加产生行波,此时定子顶部的运动呈现出了椭圆的运动轨迹,而定子和转子之间的相互摩擦导致了定子面上的椭圆运动,引起了定子作旋转运动。所以,超声电动机的工作过程主要包括以下 2 个部分^[17]:压电陶瓷推动定子的振动,并且与定子质点之间经过相互摩擦推动定子作旋转运动,工作原理如图 2 所示。

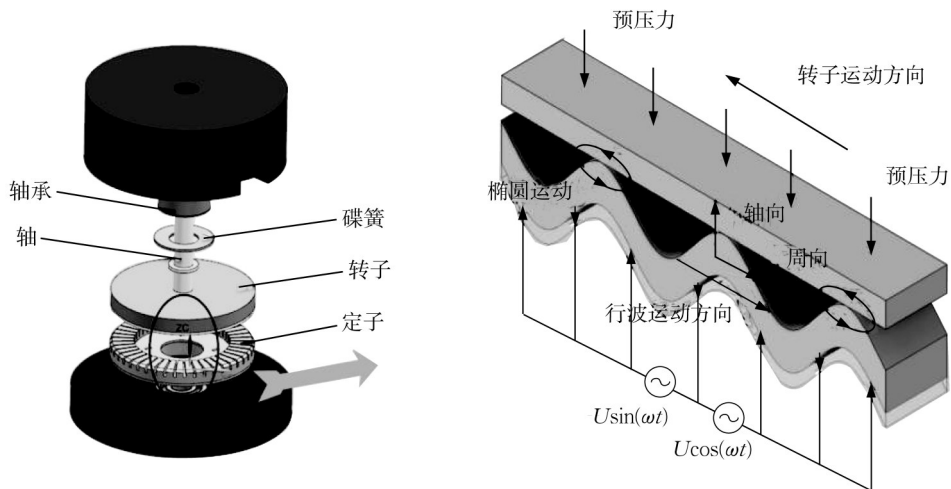


图 2 旋转行波超声电机工作原理

Fig. 2 Working principle of rotary traveling wave ultrasonic motor

2.2 实验测试平台

为了对超声电机性能测试需求进行分析,搭建了一个功能完整的超声电机实验平台,能够进行超声电机机械特性以及瞬态特性测试。超声电机样机的电源信号频率在40~60 kHz左右,输入电压要求在100 V以上,所以需要信号放大器对激励信号进行放大匹配。设计的超声电机实验平台由驱动部分、采样部分以及负载这3个部分组成。其中,驱动

部分包括信号发生器、信号放大器;采样部分包括转速转矩传感器、采集卡、测功机;负载部分包括磁滞制动器及其驱动器。同时,为了方便人机交互,编写上位机程序将实验平台的3个部分并联起来,通过上位机能直接明了地实时获取激励信号数据以及电机输出数据,以提高实验效率。图3为实验平台原理图,图4为实验平台实物图。

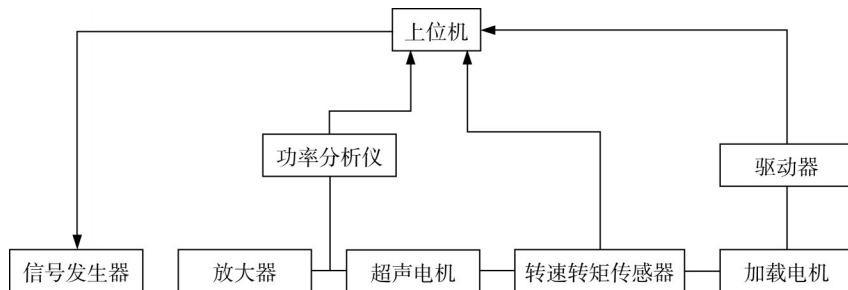


图3 超声电机实验平台原理

Fig. 3 Schematic diagram of ultrasonic motor experimental platform



图4 超声电机实验平台实物

Fig. 4 Photo of ultrasonic motor experimental platform

3 数学建模与仿真验证

超声电机的建模涉及到诸多的影响因素,但在实际的分析与计算中,如果每一个影响因素都考虑会使分析和计算复杂度大幅增加,因此,本文通过电机定子与转子的结构参数来建立超声电机的数学模型,并进一步计算电机工作特性。通过简化电机的定子、转子的接触模型,将摩擦接触视作弹性接触的二维问题,建立数学模型并进行仿真,得到的仿真结果与超声电机样机的实验结果作对比研究。

3.1 定转子摩擦传动模型

通过电机结构数据建立数学模型表示超声电机来进一步计算电机的工作特性参数。为便于电机传动机构接触模型的建立,先对定子与转子做以下假设^[18]:① 定子以理想波形进行振动;② 定子径向方

向的振幅相等;③ 忽略径向形变,摩擦层仅发生轴向形变;④ 将定子模型等效为复合梁,考虑驱动齿对结构的影响;⑤ 忽略定子、转子间预压力。

在数学建模过程中,坐标系选择是模型建立的关键,合理的坐标系能简化运算,提高推导效率,还能使最终建立的模型更加简洁直观。超声电机定子表面质子的运动轨迹是中心对称且其速度在径向上的分量为匀速状态。所以,在进行定、转子摩擦分析时,将参考坐标系定位随行波旋转的坐标系,以定子表面的某一质点作为坐标系参考的原点,如图5所示,这样分析过程更为简单直观,滤除了时间变量的干扰。由建立的新的坐标系可得定子表面质点产生的行波幅度 $w(x)$ 及其速率 v_t 。

$$w(x) = \cos(kx) \quad (11)$$

$$v_t = -kh\xi\omega\cos(kx) = \hat{v}\cos(kx) \quad (12)$$

式中: k 为弹性波振荡的波数; x 为坐标系中横轴上的坐标; h 为定子表面到定子中性层的距离; ξ 为横向振动的振幅。

在新坐标系下, $-x_0$ 到 x_0 表示定、转子间摩擦传动的长度,其中点坐标为0。在坐标点 $-x_1$ 和 x_1 上,定子、转子的速度在径向上相等。因此,坐标点 $-x_0$ 、 $-x_1$ 、 x_0 和 x_1 可以将定子与转子的摩擦传动区域分割成1个驱动区域、2个制动区域这3个部分:在 $-x_1 < x < x_1$ 上,定子大于转子的径向速度,为驱动力;在 $-x_0 < x < -x_1$ 和 $-x_1 < x < x_0$ 上,定子小于转

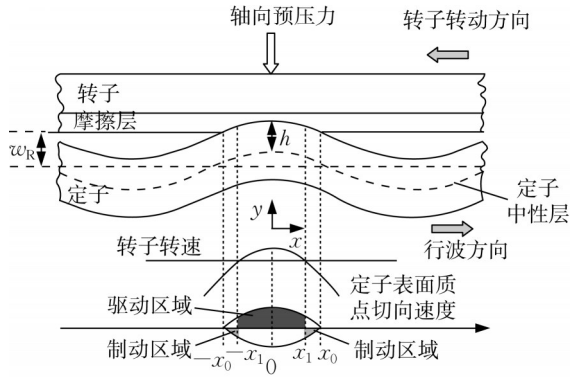


图 5 旋转坐标系下的定子接触模型

Fig. 5 Stator contact model in rotating coordinate system

子的径向速度,摩擦力为制动力。由分析可知

$$x_0 = \frac{1}{k} a \cos\left(\frac{\omega_R - h}{\xi}\right) \quad (13)$$

$$kh\xi\omega\cos(kx_1) = \omega_{rotor}R \quad (14)$$

式中: a 为截面宽度; ω_R 为定子中性层的厚度; ω_{rotor} 为转子角速度; R 为转子的半径。在 $-x_0 \leq x \leq x_0$ 上,摩擦层的纵向变形位移 Δx 为

$$\Delta x = \xi(\cos kx - \cos kx_0) \quad (15)$$

摩擦层单位长度纵向压力为

$$f(x) = k_c \Delta x = k_c \xi(\cos kx - \cos kx_0) \quad (16)$$

式中: k_c 为等效刚度。

由弹性力学原理可知,由(16)所求得的摩擦层单位长度正压力可求得滑动摩擦力为 μf ,然后在摩擦区域内积分此力,可求得一个波峰的摩擦力 F ,为

$$\begin{aligned} F &= \int_{-x_0}^{x_0} \text{sgn}(Vt(x) - V_{rotor}) \mu f(x) dx = \\ &= 2\mu \left[\int_0^{x_1} f(x) dx - \int_{x_1}^{x_0} f(x) dx \right] = \\ &= 2\mu k_c \xi \left[2 \left(\frac{1}{k} \sin kx_1 - x_1 \cos kx_0 \right) - \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{1}{k} \sin kx_0 - x_0 \cos kx_0 \right) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

式中: μ 为摩擦系数; $\text{sgn}()$ 为符号函数。

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (18)$$

由式(17)所求得一个波峰产生摩擦力为 F ,根

据定子振型分析,总共 n 个波的力为 nF ,则总的摩擦转矩 T 为

$$T = nRF \quad (19)$$

如图6所示为转子受力简图,分析可知转子受到轴向预压力作用和切向摩擦力以及力矩,得到转子受力关系为

$$J\dot{\omega}_{rotor} = T - T_{load} \quad (20)$$

$$m_{rotor} \dot{\omega}_{rotor} = F_z - F_N - d_z \dot{\omega}_{rotor} \quad (21)$$

式中: J 为转子转动惯量; T_{load} 为负载转矩; m_{rotor} 为转子质量; F_z 为转子所受轴向压力; F_N 为电机预压力; d_z 为轴向阻尼系数。

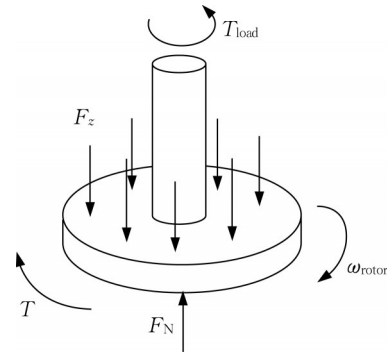


图 6 转子受力分析

Fig. 6 Analysis of rotor force

定子表面与转子的接触区域中,每一个质子都跟随行波进行椭圆轨迹的运动。因此,需要对力在整个定子行波区域内进行积分,以求得转子的纵向受力情况为

$$\begin{aligned} F_z &= n \int_{-x_0}^{x_0} f(x) dx = \\ &= 2nk_c \xi \left(\frac{1}{k} \sin kx_0 - x_0 \cos kx_0 \right) \end{aligned} \quad (22)$$

3.2 Simulink 建模仿真计算

根据 3.1 节的数学推导建立超声电机的定转子摩擦传动模型 Simulink 仿真模型如图 7 所示,将仿真时间定为 0.005 s,仿真步长为 10^{-6} s。仿真中输入的尺寸数据均为本文设计制造的 30 mm 超声电机实际尺寸,如表 1 所示。由理论分析可知,当负载及电机尺寸确定时,通过该仿真模型可得出其输出特性参数。

表 1 超声电机各零部件尺寸

Tab. 1 Size of parts and components of ultrasonic motor

| 定子内径/mm | 定子外径/mm | 振动模式 | 定子厚度/mm | 齿宽/mm | 齿高/mm | 齿数/个 | 槽宽/mm | 内支撑板厚度/mm | 压电陶瓷厚度/mm |
|---------|---------|------|---------|-------|-------|------|-------|-----------|-----------|
| 20 | 30 | B09 | 5 | 3 | 2 | 45 | 0.5 | 0.8 | 0.5 |

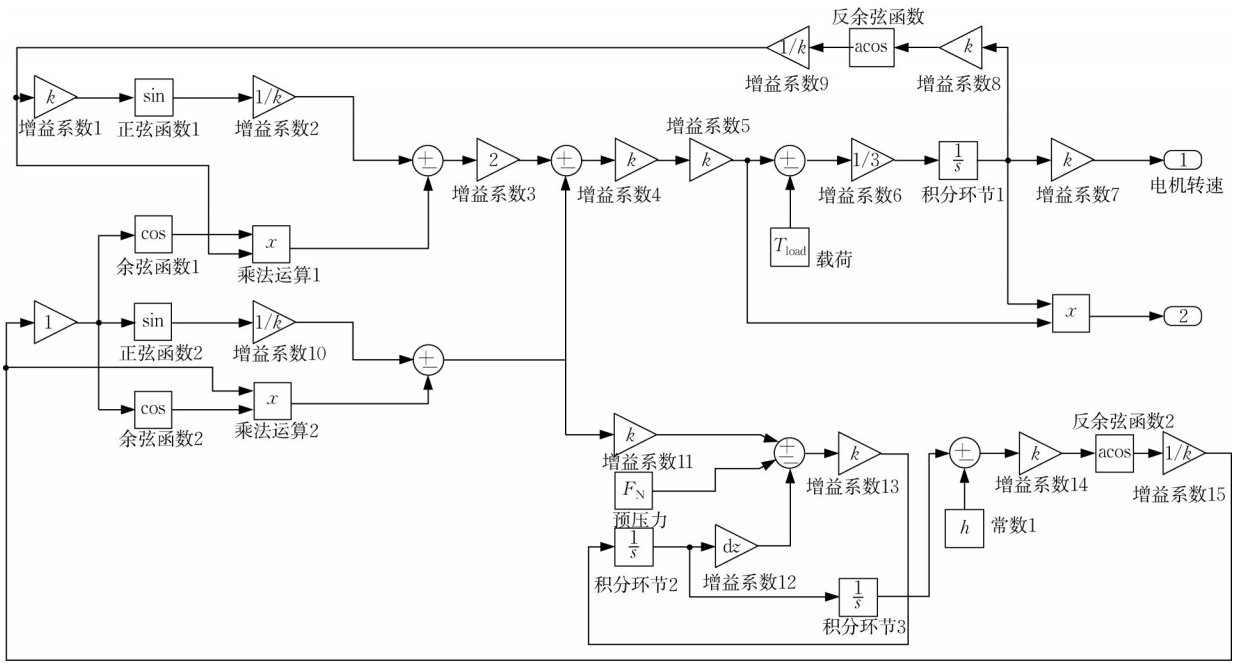


图 7 超声电机仿真模型

Fig. 7 Simulation model of ultrasonic motor

3.3 仿真模型准确性验证

设定超声电机的驱动电压为 110 V, 频率为 49.8 kHz, 相位差为 90°, 负载加载范围为 0~0.16 N·m, 保持其他参数与表 1 相同, 通过 Matlab 软件的可视化仿真工具 Simulink 进行仿真运算与实验测试, 结果如图 8 所示。可以看出建立的超声电机模型仿真数据与实验数据较为吻合, 说明通过定子、转子接触模型的解析计算与仿真对超声电机的性能进行预测的结果具有较高的准确性, 验证了超声电机设计的合理性。

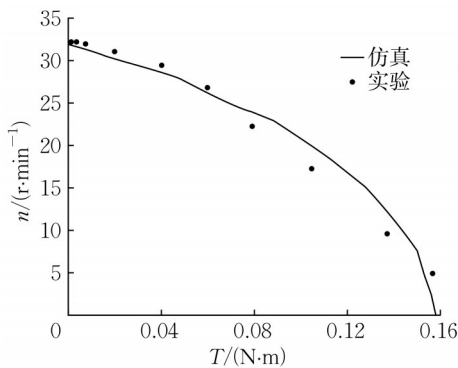


图 8 转矩—转速特性曲线仿真与实验对比

Fig. 8 Simulation and experimental comparison of torque-speed characteristic curve

图 9 为超声电机工作效率的仿真曲线。由图可见, 随着电机输出转矩的增大, 电机的输出效率呈现

先增大后减小的变化趋势, 其中当转矩处于 0.04~0.11 N·m 范围时电机的输出效率大于 50%, 接近于电机的最大输出效率。

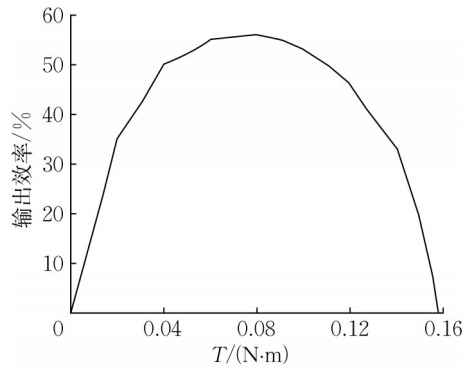


图 9 转矩—输出效率仿真曲线

Fig. 9 Simulation curve of torque-output efficiency

4 驱动参数对电机转动特性的影响分析

超声电机工作时的 2 个能量的转换过程都存在着一定的能量损耗, 限制了超声电机的输出性能, 另外早期的超声电机受到驱动技术的限制, 高频驱动电源造价昂贵, 难以获得^[19], 后来随着双频驱动技术、定子中性面下移等驱动技术和结构设计上的进步^[20-21], 超声电机的驱动频率已最高可达 100 kHz, 转速亦可在长时间的工作条件下保持稳定^[22], 已可用于连续驱动的场所。为了研究将超声电机用作旋

转直驱流量伺服阀驱动电机的可行性,分析驱动参数对电机转动特性的影响,并给出响应的参数建议。

4.1 驱动频率对超声电机特性的影响

改变电机驱动频率实质上就是改变定子的振幅,从而更改超声电机的速度。当定子处于谐振频率下,其振幅也处于最高值,从而其输出的速率也将到达最大。由此,可根据实验结果得出驱动频率—速率的曲线图,进而获得该超声电机样机的谐振频率。图 10 所示为测试所得驱动频率 49.8 kHz 下且负载为零时,电机的输出转速曲线。从图中可以看出,在当前驱动频率下转速波动约为 6.5%,对于超声电机来说转速波动较为稳定^[23],符合设计预期。

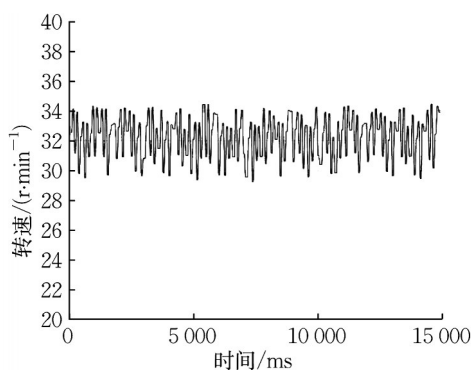


图 10 驱动频率 49.8kHz 下超声电机的转速曲线

Fig. 10 Speed curve of ultrasonic motor at a drive frequency of 49.8kHz

重复改变驱动频率,记录不同频率下电机的平均转速,频率由 40.4 kHz 逐步调整至 50.6 kHz,得到电机特性随驱动频率的变化关系曲线实验结果如图 11 所示。

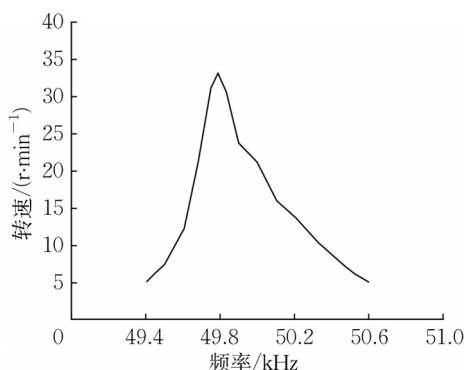


图 11 驱动频率—转速实验曲线

Fig. 11 Experimental curve of driving frequency—rotating speed

由图可见,随着驱动电源的频率增加,设计的电机样机的输出转速先增后减,其中经过一个峰值,此速度峰值的频率即谐振频率。当频率靠近谐振频率附近时,定子振动幅度就会有很大提高,进而使超声波电机输出速率提高;当偏离此频率时,定子振动幅度也会迅速下降,进而使得电机输出速率下降。因此应将驱动电源的驱动频率维持在谐振频率 49.8 kHz 使电机获得最大转速。

4.2 驱动电压对超声电机特性的影响

压电陶瓷会随输入电源电压的改变而发生形变,进而影响与之相粘贴的定子的行波振幅,从而直接影响到输出特性。利用调频调速所得的谐振频率,可以在该频段内对电机进行调幅调速实验。此实验中,驱动频率为 49.8 kHz,相位差为 90°,驱动电压变化范围为 85~150 V,如图 12 所示为超声电机转速与电压的实验曲线。

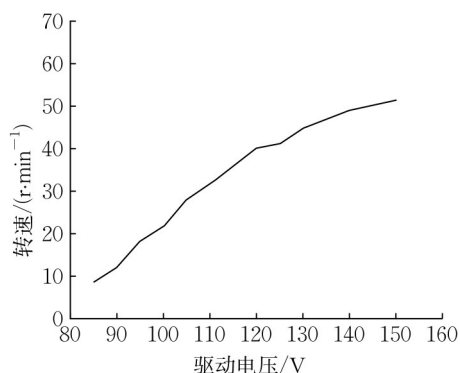


图 12 驱动电压—转速实验曲线

Fig. 12 Experimental curve of driving voltage—rotating speed

从图 12 可知,由于信号电压的增大,定子振荡幅度提高,输出的速率相应加大,其转速与电源电压的大小之比呈近似线性关系,当电流增加到一定数值时,振荡幅度逐渐趋向饱和,转速增加减缓。根据第 1 节对电机负载需求的分析可知,电机的转速需要满足大于等于 29.7 r/min,所以在实际使用中需要保证驱动电源的驱动电压大于 110 V。

改变电源两相激励的相位差,进行一组调相调速实验,驱动频率为谐振频率,电压为 110 V,图 13 所示为实验所获得的相位差与转速关系曲线。由图 13 可知,电机在电源两相激励相位差值为 0° 时停止工作;当相位差上升时,运动速率增大,其值为 90° 时,电机转速达到最大值;当其为负值或超过 180° 时,电机开始反向转动。同时,速度变化的过程较为平滑稳定,在工程实际中可以通过调相来调整超声

电机的转速及转向。

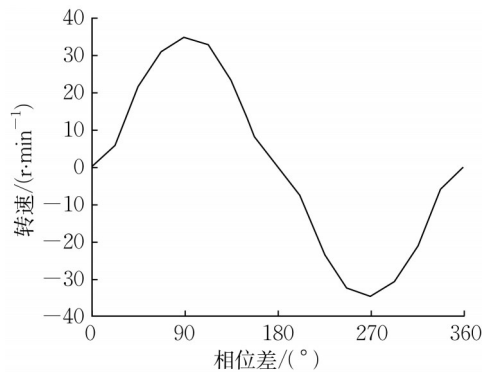


图13 相位差—转速实验曲线

Fig. 13 Experimental curve of phase difference-rotating speed

5 结论

针对电机旋转直驱式伺服阀小体积紧凑型驱动级应用需求,开展了超声电机作为驱动电机的原理设计、样机研制及特性分析。首先对伺服阀进行功率级的建模分析,以阀的频率响应大于200 Hz为主要设计指标,明确了对超声电机转速与转矩的设计要求。在环形行波型超声电机结构原理设计与测试平台搭建基础上,建立了超声电机定转子摩擦传动数学模型与仿真模型,开展了转速转矩的理论计算与实验验证,并分析了驱动频率与电压对电机输出特性的影响规律。研究结果表明:

(1)通过简化电机的定子、转子接触模型,将摩擦接触视作弹性接触的二维问题,建立数学模型并进行仿真,得到的仿真结果与实验结果较为吻合,不仅验证了仿真建模的合理性,也说明了电机理论设计的可行性。

(2)随着驱动频率的增大,超声电机的转速呈现先增大后减小的趋势,在49.8 kHz驱动频率下,超声电机可以获得最大转速输出。随着驱动电压的增大,超声电机的转速先呈现近似线性的增长趋势,而后转速增加逐渐减缓,当驱动电压大于110 V时可以满足伺服阀对驱动电机的转速要求。

(3)所研制的超声电机长径值分别为21.8 mm和42 mm,相比已使用的电磁电机长径值40 mm与24 mm,在满足当前转速转矩使用要求的前提下,具有较为明显的长径比尺度优势。在当前49.8 kHz频率与110 V电压驱动条件下,转速转矩分别为 $30 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $0.048 \text{ N}\cdot\text{m}$,接近最大的工作效率。

本文研究处于旋转直驱伺服阀用超声电机的初

期开发阶段,为伺服阀驱动级的替代应用提供新的思路,后续将会继续进行伺服阀用超声电机的优化改进工作。

作者贡献声明:

刘广军:选题研究,提供研究思路和技术指导。

刘可臻:样机制作,实验测试,技术指导。

陆亮:方案论证,提供研究思路和技术指导。

徐寅鹏:数据处理,论文撰写。

参考文献:

- [1] RYBARCZYK D. Investigations of electronic controller for electrohydraulic valve with DC and stepper motor [C]// Advances in Manufacturing II. Poznan: Justyna Trojanowska, 2019: 215-222.
- [2] PAUL A S, FRANCIS M, PAUL J A. Efficient control of a piezoelectric linear actuator embedded into a servo-valve for aeronautic applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(4): 1971.
- [3] CHEN L, LICHUAN L I. Development of the linear motor and its key technologies for reciprocating compressors [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 52.
- [4] OSDER S. Practical view of redundancy management application and theory [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1999, 22(1): 12.
- [5] KEN I, WATANABEICHIRO N, YOSHIMICHI A. Direct drive type servo valve: U.S. Patent 4428559A[P]. 1984-01-31.
- [6] SHUAI W, JIAO Z, LIANG Y, et al. A new rotary voice coil motor suitable for short angular strokes-design, modeling and optimization [C]//ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Wollongong: IEEE, 2013: 792-797.
- [7] XU B, SHEN J, LIU S, SU Q, ZHANG J. Research and development of electro-hydraulic control valves oriented to industry 4.0: a review [C]//Chinese Journal of Mechanical Engineering. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2020: 1-20.
- [8] LIU X, ZHAO G, QIU J. Improving the performance of ultrasonic motors in low-pressure, variable-temperature environments [J]. Tribology International, 2021, 160 (1): 10700.
- [9] 赵淳生,李朝东. 日本超声电机的产业化、应用和发展[J]. 振动、测试与诊断, 1999, 19(1): 3.
ZHAO Chunsheng, LI Chaodong. Industrialization, applications and development of ultrasonic motors in Japan [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1999, 19(1): 3.
- [10] TOMOAKI M, SHUNSUKE I. SHIRO A, et al. High-speed visual feedback control of miniature rotating mirror system using a micro ultrasonic motor [J]. IEEE Access, 2020, 8(8):

- 38546.
- [11] JEAN-JACQUES C, AMIT K. Electric actuation for flight and engine control: evolution and current trend [C]// 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007: 1391-1396.
- [12] IZUNO Y, IZUMI T, NAKAOKA M. Ultrasonic motor-actuated valve direct driving and positioning motion control system using improved fuzzy reasoning controller[C]//Industry Applications Society Meeting. Denver: IEEE, 1994: 368-375.
- [13] NIE L, YAO X, LI Q. Modeling and simulation of ultrasonic motor driving jet-pipe servo valve system [C]//International Conference on System Simulation & Scientific Computing. Beijing: IEEE, 2008: 688-692.
- [14] 陆亮,夏飞燕,阎耀保,等.小球式旋转直驱压力伺服阀动态特性分析优化[J].航空学报,2018,39(10):266.
LU Liang, XIA Feiyan, YIN Yaobao, *et al.* Dynamic analysis and optimization of ball-type rotary direct drive pressure servo valve [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(10): 266.
- [15] 原佳阳,阎耀保,陆亮,等.旋转直接驱动电液压力伺服阀稳定性分析[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(2):235.
YUAN Jiayang, YIN Yaobao, LU Liang, *et al.* Stability analysis of rotary direct-drive electro-hydraulic pressure servo valve [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(2): 235.
- [16] 尹育聪,姚志远,赵淳生.行波型旋转超声电机两种组合方式的实验研究[J].中国机械工程,2011,22(1):84.
YIN Yucong, YAO Zhiyuan, ZHAO Chunsheng. Experimental study on two combinations of traveling-wave rotary ultrasonic motor [J]. *China Mechanical Engineering*, 2011, 22(1): 84.
- [17] 黄鹞.基于超声电机驱动的气动控制阀的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- HUANG Yao. Research on the pneumatic control valve driven by ultrasonic motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [18] LIANG W, MA J, NG C, *et al.* Optimal and intelligent motion control scheme for an ultrasonic-motor-driven x-y stage [J]. *Mechatronics*, 2019, 59(4): 127.
- [19] 金雯,王卿,周杨,等.航空航天新型电机发展及应用分析[J].导航与控制,2016,15(5):25.
JIN Wen, WANG Qing, ZHOU Yang, *et al.* The development and application of the new aerospace motor [J]. *Navigation and Control*, 2016, 15(5): 25.
- [20] ROMLAY F R M, YUSOFF W A W, PIAH K A M. Increasing the efficiency of traveling wave ultrasonic motor by modifying the stator geometry [J]. *Ultrasonics*, 2016, 64(9): 177.
- [21] 杨明,庞亚飞,李存岑,等.超声电机双频驱动技术研究进展[C]//第十九届中国小电机技术研讨会论文集.上海:中国电工技术学会,2014:34-39.
YANG Ming, PANG Yafei, LI Cuncen, *et al.* Research progress of dual-frequency driving technology for ultrasonic motor [C]//Proceedings of the 19th China Small Electrical Machinery Technology Symposium. Shanghai: China Electrotechnical Society, 2014: 34-39.
- [22] 周凤,王彦利,田秀,等.一种行波型超声电机驱动器的研制[J].导航与控制,2013,12(1):59.
ZHOU Feng, WANG Yanli, TIAN Xiu, *et al.* A driver for traveling wave of ultrasonic motor [J]. *Navigation and Control*, 2013, 12(1): 59.
- [23] 安国庆,安孟宇,杨少锐,等.基于相关性相位提取的超声电机频率控制技术[J].河北科技大学学报,2019,40(2):159.
AN Guoqing, AN Mengyu, YANG Shaorui, *et al.* Frequency control technology for ultrasonic motor based on correlation phase extraction method [J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2019, 40(2): 159.