

超声电机速度与位置的高精度控制

陈宁, 郑杰基, 范世珣, 李华峰, 范大鹏

引用本文:

陈宁, 郑杰基, 范世, 等. 超声电机速度与位置的高精度控制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 790–799.

CHEN Ning, ZHENG Jie-ji, FAN Shi-xun, et al. High-precision control algorithm for velocity and position of ultrasonic motor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 790–799.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0790>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于分段弧形永磁同步电机的4 m望远镜控制系统

Control system of 4 meters telescope based on segmented permanent magnet arc synchronous motor
光学精密工程. 2020, 28(3): 591–600 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202803.0591>

机载光电载荷视轴指向控制技术综述

A survey of line of sight control technology for airborne photoelectric payload
光学精密工程. 2018, 26(7): 1642–1652 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182607.1642>

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>

超声电机的预压力特性分析与优化

Characteristics analysis and optimization of preload force in ultrasonic motors
光学精密工程. 2020, 28(4): 782–789 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0782>

空间高精度扫描伺服系统的驱动控制

Driving and controlling of high accuracy scanning servo-system in space
光学精密工程. 2016, 24(5): 1104–1111 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162405.1104>

文章编号 1004-924X(2020)04-0790-10

超声电机速度与位置的高精度控制

陈 宁¹, 郑杰基¹, 范世珣¹, 李华峰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: 由于超声电机压电材料、摩擦材料、接触界面的非线性, 速度平稳性和位置控制精度不高, 这在一定程度上制约了它在高端精密装备中的应用。本文介绍了一种实现超声电机速度、位置高精度控制的方法。从连续运动与步进运动两个维度分析了超声电机的速度调控机理, 阐明了速度波动的误差来源, 建立了以幅值、频率为输入量, 融合稳态环节与动态环节的速度模型。为了准确预测步进位移量, 建立并辨识了启动-关断两段式二阶速度模型; 接着采用双环复合控制算法实现了高平稳性速度控制, 并通过驱动参数优化实现了电机的高分辨率位置控制。最后, 运用分段逼近策略实现了高精度定位。实验结果表明, 在速度控制方面, 采用双环复合方法控制的速度平稳性为 0.44%, 相比单速度环的控制效果提升了一倍; 在位置控制方面, 超声电机的开环位置分辨率达到了 $0.375 \mu\text{rad}$, 定位精度达到了 $1.7 \mu\text{rad}$ 。本文提出的控制方法综合了不同参数及不同环路的调控特点, 有效提高了超声电机的速度与位置控制精度, 为超声电机在精密装备中的拓展应用奠定了基础。

关键词: 超声电机; 速度平稳性; 微步进特性; 定位精度

中图分类号: TM356 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0790

High-precision control algorithm for velocity and position of ultrasonic motor

CHEN Ning¹, ZHENG Jie-ji¹, FAN Shi-xun¹, LI Hua-feng², 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: In order to improve speed/position control accuracy and overcome nonlinearity accompanied by a multivariable coupling effect, the targeted speed and position control of the ultrasonic motor was proposed in this paper. Firstly, the control mechanism of the ultrasonic motor was demonstrated from the perspectives of continuous macroscopic motion and microscopic stepwise motion. Then, the sources of velocity fluctuation errors were clarified, and a multiparameter speed control model was established; the amplitude and frequency were integrated into the model by combining steady and dy-

收稿日期: 2020-03-03; 修订日期: 2020-03-12.

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

dynamic links. In order to predict stepwise displacements, a two-stage second-order speed model was also constructed from the microscopic dimension. Then, the double-loop compound control algorithm was used to realize high-stability speed control, while high-resolution position control could be achieved through driving parameter optimization. Finally, a piecewise approximation strategy was adopted to combine the continuous and stepwise motion for high-precision positioning. The experimental results show that speed stability under dual-loop compound control is 0.44%, which is two times better than that of single-loop control. In terms of position control, the open-loop position resolution of the ultrasonic motor reached $0.375 \mu\text{rad}$, and a positioning accuracy of $1.7 \mu\text{rad}$ is achieved. The proposed control strategy integrates the control characteristics of different parameters and loops, which effectively improves the speed and position control accuracy of the ultrasonic motor. This work lays the foundation for extended applications in advanced precision equipment.

Key words: ultrasonic motor; speed stability; micro stepwise characteristics; positioning accuracy

1 引言

近年来,随着超声电机在空间机器人、生物医学微操作设备等领域的应用,其速度与位置控制精度的要求也越来越高^[1-2]。而超声电机将压电陶瓷的微观高频振动转化为输出转子的宏观旋转运动的过程中,非线性、多变量、强耦合的特性引起了系统模型的不确定性^[3],使电机呈现出复杂的动力学行为,难以获得精确的模型。同时,由于 μs 级调控、 μm 级振动的特点,能否充分利用微观特性使电机更精细地判断与调整运动状态,成为最终速度位置控制性能优劣的根本性问题。

在速度控制层面,重点是如何实现电机的速度平稳性控制,人们主要采用速度闭环控制^[4-5]和频率跟踪控制^[6]两种方式。传统的速度闭环控制既从结构上缺乏位置环的辅助作用,也忽略了超声电机 μs 级快速定位的优势。而在频率跟踪控制上则涌现出以孤极电压^[7]、阻抗角^[8-10]为反馈量的多种控制方式,但由于频率跟踪截取的多为定转子摩擦传力前的陶瓷机电信号,难以实现较好的控制效果。近年来,随着控制理论的发展,学者提出了诸如模糊控制^[11]、神经网络控制^[12]、混沌控制^[13]等超声电机速度控制策略。虽然取得了一定成果,但是多数因模型集获取困难及训练复杂等原因难以在工程上广泛应用^[14-15]。从位置控制来看,主要难点在于高分辨率定位,这需要精确的开环或闭环步进运动,特别是开环步进模式下的高分辨率运动,对于紧凑空间的精密定位应用是很有意义的。若想把握开环步进运动的规

律,需要尽可能地细化其中的启动关断过程,尤其是当周期数较小时($N \leq 10$),关断过程的动态特性对步进位移量的影响不能忽略^[16]。因此,为了实现高分辨率的步进运动,有必要分析少周期数条件下关断过程的规律,并提出行之有效的位置增量预测方法。

综合上述分析,速度平稳性控制与位置分辨率控制构成了超声电机控制性能提升的两个核心问题。二者均要建立在对电机参数调控机理以及微观状态演变的建模分析上。因此,本文从连续运动与步进运动两种模型机理进行研究,目的在于充分利用电机的自身特性,运用工程上快速易行的方法实现控制目标。在速度平稳性控制上,提出并辨识了多输入多输出速度模型,设计了双环复合的速度控制策略;在位置分辨率控制上,开展了电机步进运动特性尤其是关断过程速度规律的研究,提出步进量预测模型,并通过优化驱动参数实现电机的高分辨率步进运动。

2 连续运动与步进运动机理分析

超声电机在两相正弦波的共同激励下工作,通过驱动参数和波形关断时间的控制可以实现连续运动与步进运动,分别对两种模型及其影响因素进行分析。

2.1 连续运动机理

2.1.1 多参数调速模型

超声电机的运动及控制的实质在于改变行波的振幅、速度以及质点的椭圆轨迹,其相应的控制量有两相驱动电压幅值(u)、频率(f)和相位差

(α)。由行波的运动方程可知,波峰处的切向速度可以表示为:

$$v_{\max} = -\xi h \omega n \frac{\sin(\omega t)}{\sqrt{\sin^2(\omega t) + \sin^2(\omega t + \alpha)}}, \quad (1)$$

式中: ξ 为定子振幅, h 为定子厚度的一半, $\omega = 2\pi f$ 为驱动的角频率, n 为行波振动的波节数。可以看出,一定频率和相位差的峰值速度与定子振幅 ξ 呈线性关系,而定子振幅 ξ 与电压幅值 u 成正比,因此速度值 v_s 与激励幅值 u 满足线性关系。同时根据文献^[14-15],在一定幅值和相位差条件下定子速度峰值与频率呈指数关系。考虑到相位差不为 $\pm 90^\circ$ 时,定子的两相驻波波形的不正交,在带来波形畸变的同时也将使速度变化规律更加复杂,因此在控制时只考虑相位差 α 为 $\pm 90^\circ$ 时的速度模型,从而将转子速度的稳态值等效为定子的切向速度峰值。进一步整合超声电机转子转速的动态传递函数 $H(s)$,得到的转子速度表达式为:

$$v_r = (au + b)e^{(cf+d)} H(s), \quad (2)$$

式中 a, b, c, d 为待定系数,将通过后面的辨识获得。

2.1.2 速度平稳性及表征

超声电机的速度时刻处在变化当中,主要成因是电机轴线在加工和装配过程中存在角度偏差,使得摩擦界面接触不平衡,周向压力分布不均^[17]。定性来看,超声电机在工作状态下,接触压力大的一侧接触范围较大,阻止区较大,定子振幅较小,导致速度偏小;而接触压力小的一侧接触范围窄,驱动区相对较大,定子振幅较大,速度较高^[18]。由于速度分布在周向的不一致,超声电机转动一圈,速度将会产生持续的周期性波动,从而加重定转子相对速度差异带来的滑移,在增加摩擦损耗降低效率的同时还会影响电机服役寿命。为了减少这类误差,不仅需要改进定转子结构、提高制造精度,还需要研究波动误差抑制或补偿方法。

为了表征连续运转时的速度波动特性,将某一指令 v_r 下的速度平稳性表征为:

$$\sigma_v = \max\left(\frac{|v_r - \bar{v}_r|}{\bar{v}_r}\right), \quad (3)$$

式中 v_r 为电机实时测得的速度。显然速度平稳性控制的最终目标就是尽可能降低控制残差的占比。

2.2 步进运动机理

步进运动是指超声电机在间歇性的电压激励

下产生的反复启停运动过程,其速度规律不再是连续运动状态下速度均化的结果,而是包含了启动、运行、关断等响应全过程。假设当驱动信号周期数发生变化时,启动后的转速曲线是沿着同一轨迹逐渐延伸的。如图 1 所示,将启停过程转速曲线以关断点 A_i 为界分为启动与关断两个阶段,并定义 B_i 为关断后电机运动的自锁点。

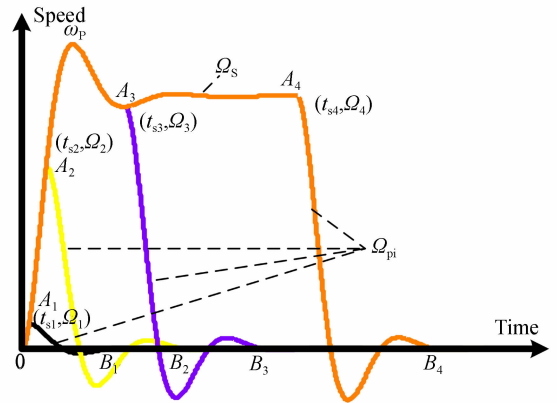


图 1 不同周期数的速度曲线

Fig. 1 Speed curves under different period numbers

显然,在不同的周期数条件下,启动阶段与关断阶段的速度函数可以分别表示为:

$$G_s(s) = \frac{K_s}{s^2 + 2\xi_s \omega_{ns} s + \omega_{ns}^2}, \quad (4)$$

$$G_p(s) = \frac{K_p}{s^2 + 2\xi_p \omega_{np} s + \omega_{np}^2}. \quad (5)$$

式中: ξ_s 与 ξ_p 代表启动阶段与关断阶段的阻尼系数, ω_s 与 ω_{pi} 则表征各自传递函数的谐振频率, K_s 与 K_p 为各自的增益系数。

此时可以采用面积包络法计算位移增量,通过计算速度曲线与坐标轴的面积得到步进量 S_i ,如式(6)所示:

$$S_i = \int_0^{N/f_s} \Omega_s(t) dt + \int_{N/f_s}^{t_p} \Omega_{pi}(t) dt, \quad (6)$$

式中: N 为激励波形的周期数, f_s 为激励电压的频率, t_p 为最终的关断时间。

3 高精度测试装置

为了辨识超声电机的速度模型,也为了能在控制中实现更高的速度位置分辨精度,本文在多参数综合测控系统中的编码器进行替换。所选用的编码器为美国 MicroE Systems 公司的分立式

增量编码器,主要由光栅盘、读数头及细分电路构成,如图 2 所示。其中,光栅刻线数为 16384 (2^{14}),即物理细分为 14 位,而细分电路模块对读数头输出的脉冲信号进行 1 024 (2^{10})的细分处理,即电气细分为 10 位。两者综合后编码器的整体分辨位数为 24 位,检测分辨率为 $0.375 \mu\text{rad}$,能够满足超声电机高精度控制的反馈与评估需求。所采用的电机为新研的 PMR60-PI1 电机,集成了新型压电陶瓷与摩擦功能材料,具有较好的工作稳定性。

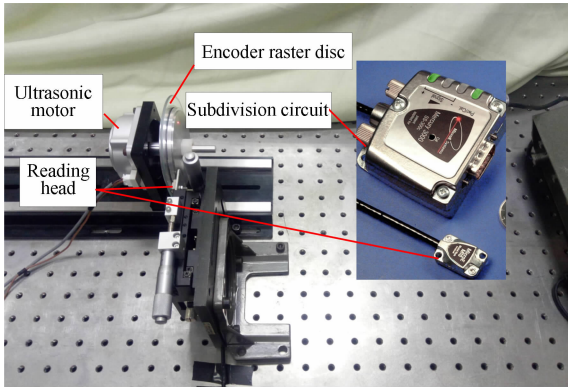


图 2 高精度编码器组成

Fig. 2 Composition of high-precision encoder

4 模型辨识及控制实验

为了实现电机的高精度速度与位置控制,对模型中的待定参数进行辨识和分析,进而提出有针对性的高平稳性速度控制策略与高分辨率位置控制策略。

4.1 高平稳性速度控制

4.1.1 连续运动多参数模型辨识

在多参数模型辨识环节,设定电压幅值为 $[200 \text{ V}, 260 \text{ V}]$,频率测试区间为 $[42 \text{ kHz}, 44 \text{ kHz}]$,在相应的幅值与频率作用下,求取电机运行 10 s 后的平均速度,得到的稳态速度点如图 3 所示。

按照线性关系与指数关系相乘的表达式,利用 Levenbert-Maquetyy 规则下的非线性最小二乘算法对数据进行拟合,得到的综合模型为:

$$v_r(u, f) = (9.39u + 10.29) e^{(58.16 - 1.411f)}. \quad (7)$$

在辨识分析系统动态部分时,以幅值为输入,速度为输出,扫频区间为 $0.1 \sim 200 \text{ Hz}$,得到如图

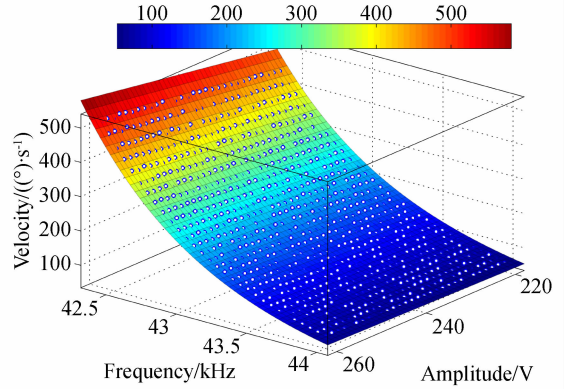


图 3 幅值-频率-速度关系的三维曲面

Fig. 3 Three-dimensional speed curves under different amplitudes and frequencies

4 所示的幅频与相频曲线。可以看出,不同驱动参数归一化后的扫频曲线吻合度比较好,可以统一用一种传递函数进行表征。

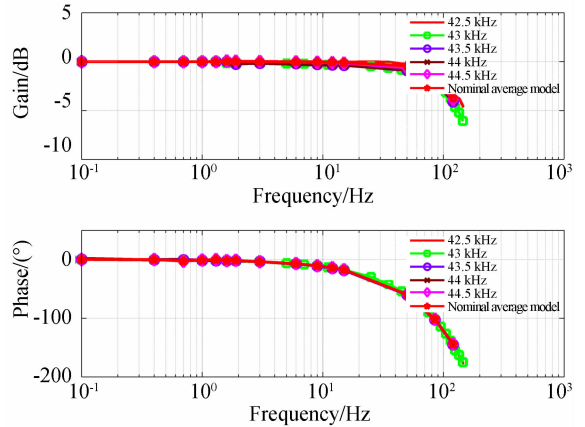


图 4 不同驱动参数的幅值扫频曲线

Fig. 4 Amplitude sweeping curves under different driving parameters

运用最小二乘算法对图 4 中归一化后的扫频模型进行辨识,参数速度模型的动态部分可以表示为:

$$H(s) = \frac{4.4584 \times 10^8}{s^3 + 1439.3s^2 + 1.2549 \times 10^6 s + 4.4584 \times 10^8}. \quad (8)$$

结合上述稳态部分与动态部分,在 Simulink 上建立起如图 5 所示的超声电机多参数调速模型。

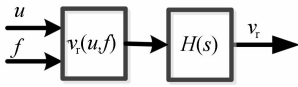


图 5 多参数调速模型

Fig. 5 Multi-parameter speed model

4.1.2 双环复合速度控制策略

4.1.2.1 仿真分析

超声电机为典型的伺服器件,当电机处于稳速控制状态下,位置曲线围绕着一斜线演变,且该斜线的斜率与给定的速度指令相近。因此可以采用图 6 所示的控制方案。其中, \bar{v}_r 代表期望的转子速度, δ_1 为纯速度环控制后的速度残差, δ_2 为“位置环+速度环”双环控制后的速度残差, v_r 与 θ_r 分别为输出的速度与位置, $C_p(s)$ 和 $C_v(s)$ 分别为位置环和速度环的控制器,此时位置外环的输入指令便变为了斜率为 \bar{v}_r 的斜坡信号。图 6 中,虚线框表示的是速度闭环控制的结构框图。

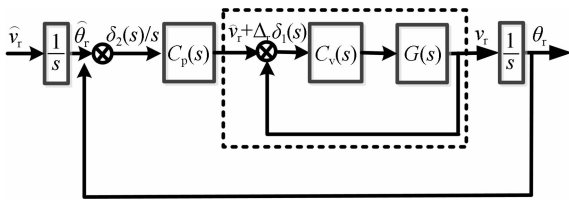


图 6 速度平稳性控制框图

Fig. 6 Control diagram of speed stability

从控制框图上看,单一速度环控制时速度误差的表达式为:

$$\delta_1(s) = \frac{v_r}{1 + C_v(s)G(s)}. \tag{9}$$

而采用“位置环+速度环”双环控制所获得的速度误差表达式为:

$$\delta_2(s) = \frac{[s + C_v(s)G(s)s]v_r}{s + C_v(s)G(s)s + C_v(s)G(s)C_p(s)}. \tag{10}$$

因而两个误差的比值为:

$$\left| \frac{\delta_2(s)}{\delta_1(s)} \right| = \left| \frac{s + C_v(s)G(s)s + C_v(s)G(s)[s + C_v(s)G(s)s]}{s + C_v(s)G(s)s + C_v(s)G(s)C_p(s)} \right|. \tag{11}$$

如果在实施时,通过调节能控制:

$$\left| \frac{s + C_v(s)G(s)s}{C_p(s)} \right| < 1. \tag{12}$$

当速度指令为 $72 (^{\circ})/s$ 时,设计速度环 PI 控制器的参数 $K_p=2, K_i=150$,位置环 PI 控制器的参数为 $K_p=70, K_i=1$ 。通过仿真获得式(11)误差传递函数的波特图,如图 7 所示。结果证实了当电机的速度波动处于 10 Hz 的频带内,所提出的双环控制器都能有效补偿波动影响,在仿真条件下能够获得优于单环控制的效果。

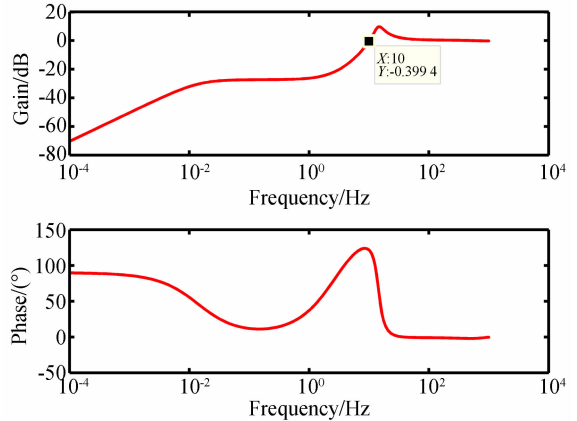


图 7 误差比值扫频曲线

Fig. 7 Sweeping curves with error ratio of different period numbers

从图 7 可以看出,双环控制能够获得比单环控制更小的稳态误差。这是由于双环控制既能够得到更高的幅值及相位裕度,也可以充分发挥超声电机快速定位的优势,使得速度环控制后的残差在位置环内进一步得到消除,从而提升整体的速度控制精度。

4.1.2.2 实验结果

与仿真相似,当速度指令为 $72 (^{\circ})/s$ 时,通过调节,设计速度环 PI 控制器的参数 $K_p=2, K_i=150$,位置环 PI 控制器的参数 $K_p=70, K_i=1$ 。通过实验,将单速度环控制与双环复合控制的速度控制效果进行比较(图 8),可以发现双环复合控制的控制误差(0.44%)约为单速度环控制误差(0.89%)的一半,说明双环复合的方法能够进一步补偿速度环的残差。

将双环复合的控制策略应用到 40, 50, 60, 70 ($^{\circ})/s$ 的恒速控制中,结果如图 9 所示。由图可知,每组控制后上升时间约为 22 ms,速度稳定度均低于 0.44%。

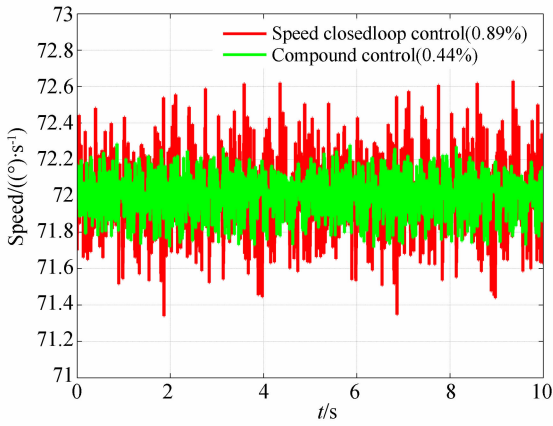
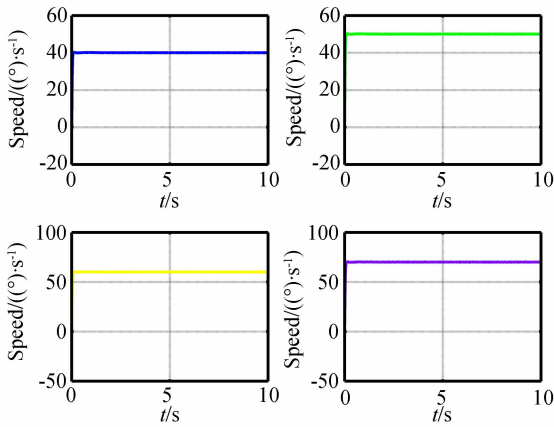


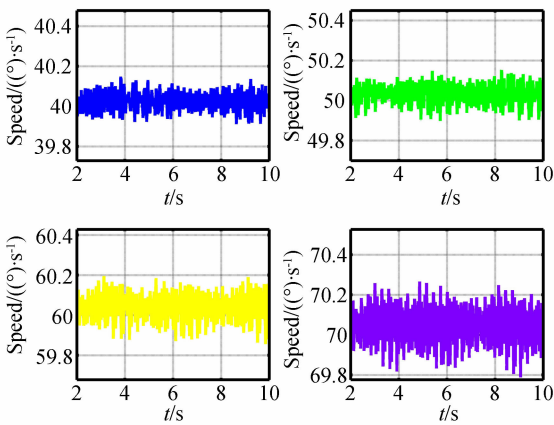
图 8 速度平稳性控制对比

Fig. 8 Block diagram of performance evaluation



(a) 控制效果 (0~10 s)

(a) Control results(0~10 s)



(b) 控制效果 (2~10 s)

(b) Control results(2~10 s)

图 9 速度平稳性控制效果

Fig. 9 Control results of speed stability

4.2 步进运动位置控制

通过驱动电源对超声电机实施控制,即由驱

动电源的通、断,使电机产生间歇性的起、停动作而实现步进运动^[18]。为了获得不同参数条件下的步进运动规律,测试了不同周期数的转速响应曲线,进而提出步进量的预测与控制模型。

4.2.1 步进量模型辨识

为了得到步进量预测的稳定区间,测试了不同周期数的转速曲线,如图 10 所示。可以看出,周期数较少的启动曲线与周期数较多的启动曲线部分重叠,表明了相同激励参数条件下的电机启动过程呈现较好的可重复性,而从关断后过零部分的速度响应看,不同周期数的关断曲线也表现出了相似的振荡特征。

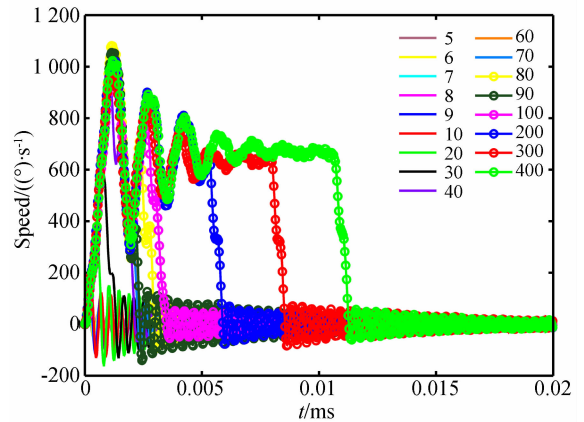


图 10 不同周期数的启停速度响应曲线

Fig. 10 Startup-stopping speed response under different period numbers

结合图 1 与式(4),对速度响应曲线进行分段二阶函数的辨识。首先是启动段,通过辨识可以得到的启动阶段的传递函数 G_s 为:

$$G_s(s) = \frac{57\ 274\ 554}{s^2 + 1307.45s + 353916222}. \quad (13)$$

其次是关断段速度传递函数的辨识,图 11 为辨识得到的关断段的增益、阻尼系数、固有频率以及每一个周期数下的关断点速度。

辨识结果表明,周期数小于 10 时模型参数的变化趋势相对稳定,这是由于周期数在 $[1, 10]$ 之内时,速度仍处于上升的初始阶段,未到达阶跃响应的上升节点,即稳态速度的 0.707,没有突破弹性波动的极限,因此断电后的回复过程相对比较接近,综合曲线后确定关断过程阻尼系数在 0.012,自然频率为 4 200 rad/s。对辨识后的参数与关断点速度之间的关系进一步进行探索,如

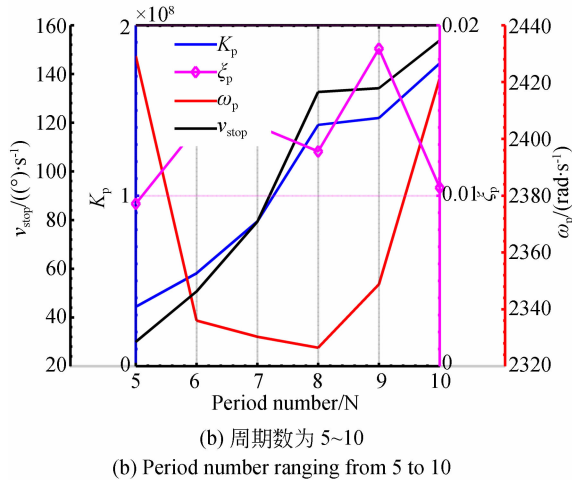
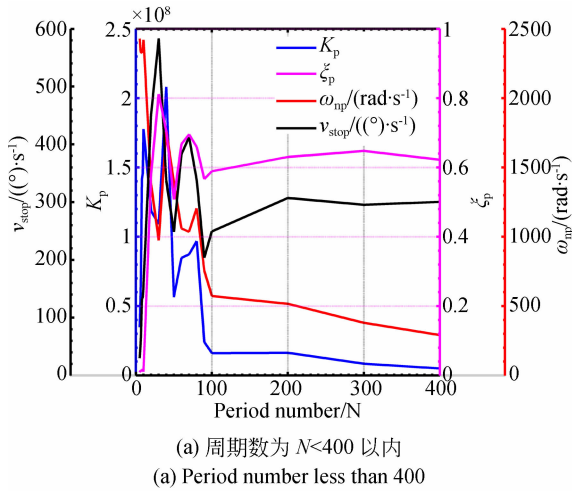


图 11 辨识得到的关断阶段的模型参数

Fig. 11 Identified parameters of stopping process

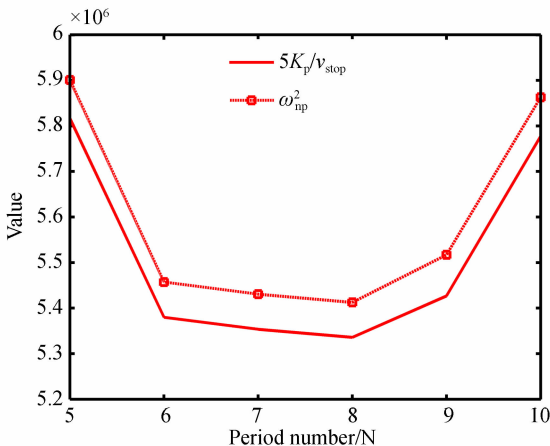


图 12 $5K_p/v_{stop}$ 与 ω_{np}^2 之间的数值关系

Fig. 12 Relationship between $5K_p/v_{stop}$ and ω_{np}^2

图 12 所示,模型增益与关断点转速成正比,且比例系数为 0.197。根据上述分析,建立了如式(14)所示的关断速度的传递函数,该表达式将关断过程的传递函数与关断点的速度相互关联,从而实现了启动段与关断段的衔接。

$$G_p = v_{stop} \frac{K_p/v_{stop}}{s^2 + 2\xi_p \omega_{np} s + \omega_{np}^2} = \frac{0.197 \omega_{np}^2 v_{stop}}{s^2 + 2\xi_p \omega_{np} s + \omega_{np}^2} \quad (14)$$

联合关断点前后的辨识结果,通过式(5)进一步获得不同周期数的步进位移增量,和实验结果对比(图 13)发现,辨识结果吻合度在 85% 以上,并且具有较好的一致性,说明所提出的两阶段二阶模型能够有效地预测超声电机周期数在 10 以内的步进运动规律。

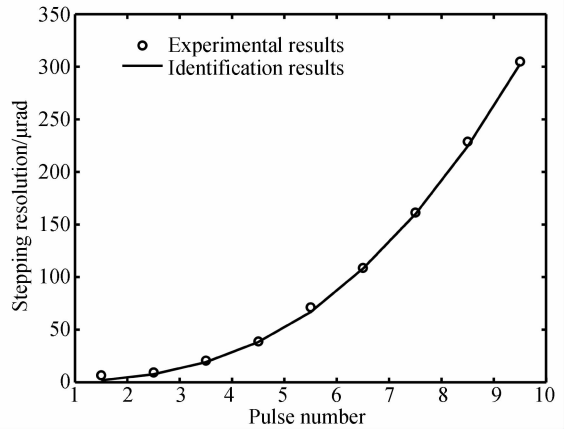


图 13 不同周期数的拟合结果

Fig. 13 Fitting results under different period numbers

4.2.2 高分辨率步进运动

依据步进量预测模型,控制激励电压幅值和频率分别为 200 V 和 43 kHz,在周期数区间[1, 10]内寻找运行稳定且定位可靠的参数使电机实现开环状态下的微步进运动。图 14 为周期数为 2.1 的步进曲线,由图可知,通过周期数的控制实现了 3.3 μrad 的步进量。从位移响应上看,不同时间片的运动在启动阶段的瞬时响应上存在一定的差异,有些阶段的超调量大,有些阶段的超调量小,但是在稳定阶段的表现则比较接近。

通过不同周期数步进状态的分析与整合,对超声电机所能达到的极限步进分辨率进行测试。设置驱动幅值为 178 V,驱动频率为

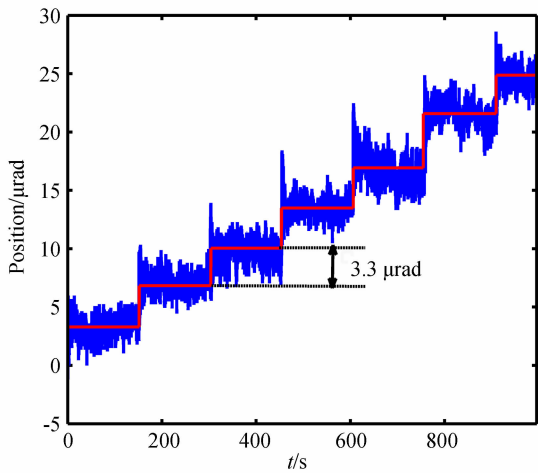


图 14 施加周期数调控后的步进结果

Fig. 14 Stepwise curves under adjustment of period number

44.6 kHz,周期数为 4.7,可以得到如图 15 所示的步进运动结果。由图可知,超声电机的步进运动可以达到现有编码器的极限分辨率,即 0.375 μrad。

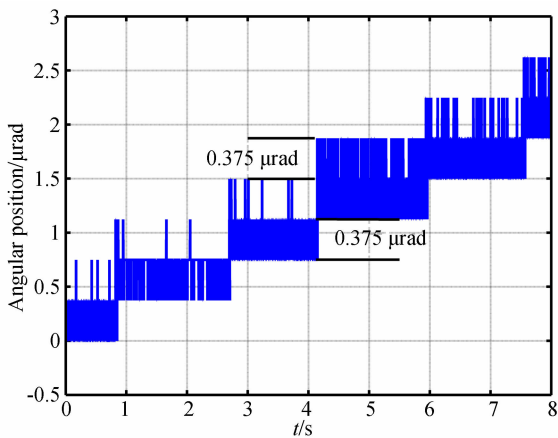


图 15 开环步进位移曲线

Fig. 15 Open-loop stepwise position curve

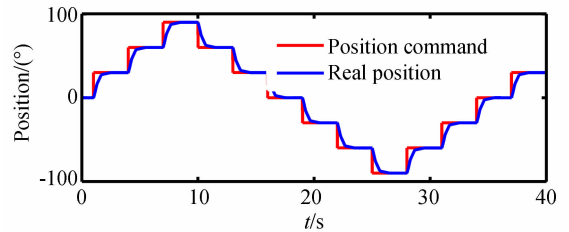
4.2.3 角度定位控制

在传统的位置闭环控制中,当实际位置超过期望值需要解决速度换向时的突变问题,在增加控制系统复杂性的同时也会影响最终的位置精度。为解决这一问题,设计了一种分段逼近的控制方法。为了实现全局范围内的稳定运动,在以幅值为变化量,保持频率为 44 kHz 的基础上,具体的分段控制方法如下:当实际位置与指令位置

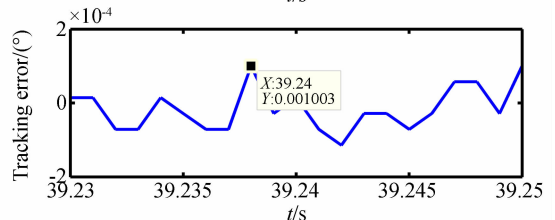
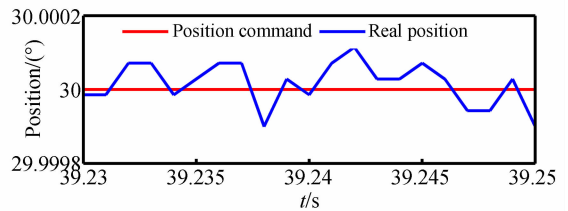
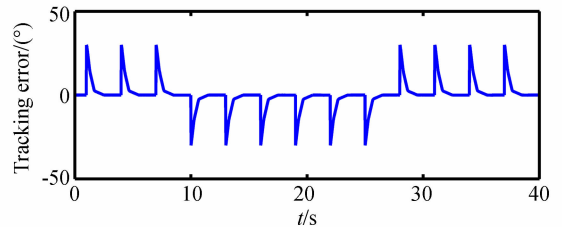
之差大于 10°时,速度指令为 50 (°)/s;当差值大于 5°小于 10°时,速度指令为 20 (°)/s;当差值大于 0.1°小于 5°时,速度指令为 10 (°)/s;差值达到 0.1°时,断开其中速度环,同时切换到步进运动模式,整个定位调整时间不超过 1 s。

$$\hat{v}_r = \begin{cases} 50 & (\hat{\theta}_r - \theta_r) > 10 \\ 20 & 5 < (\hat{\theta}_r - \theta_r) < 10 \\ 10 & 0.1 < (\hat{\theta}_r - \theta_r) < 5 \\ 0 & (\hat{\theta}_r - \theta_r) < 0.1 \end{cases}, \quad (15)$$

式中 \hat{v}_r 为期望的速度。当位置指令 $\bar{\theta}_r$ 以 30°的增量逐步变化时,测得的位置指令与实际位置的对应关系如图 16(a)所示,可以看出无论正反



(a) 全局控制效果
(a) Global control performance



(b) 局部控制效果
(b) Partial control performance

图 16 电机定位控制效果

Fig. 16 Positioning control performances

运动,每一个设定的角度值都能很好地追踪上。通过图 16(b)对最后的稳态精度进行评估,得到的控制误差为 $0.000\ 100\ 3^\circ$,应用式(15)给出的控制策略,超声电机实现了 $1.7\ \mu\text{rad}$ 的定位精度。

5 结 论

针对超声电机不同的控制模式,本文提出了针对性的控制策略,在稳速控制上建立并辨识了

多参数调速模型,采用“速度环+位置环”的双环控制策略使速度稳定性达到 0.44% ;在步进运动控制上,通过驱动参数调控与周期数控制实现了 $0.375\ \mu\text{rad}$ 的位置分辨率;在角度定位控制上,通过逐步逼近方法达到了 $1.7\ \mu\text{rad}$ 的定位精度。

本文充分发挥超声电机响应快,可定脉冲控制的优点,提出了有针对性的速度稳定性与位置分辨率控制策略,不仅能够保证控制精度,也能有效简化控制结构,对于推进压电驱动功能部件在高端装备的应用具有积极意义。

参考文献:

- [1] 徐斯强,朱晓博,刘品宽.粘滑式压电驱动平台的复合控制[J].光学精密工程,2019,27(12):2571-2580.
XU S Q, ZHU X B, LIU P K. Composite control of piezo-actuated stick-slip devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(12): 2571-2580. (in Chinese)
- [2] 范伟,傅雨晨,于欣妍.压电陶瓷驱动器的迟滞非线性规律[J].光学精密工程,2019,27(8):1793-1799.
FAN W, FU Y C, YU X Y. Hysteresis nonlinear law of piezoelectric ceramic actuator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1793-1799. (in Chinese)
- [3] 史维佳.行波型超声电机调速特性复合补偿方法研究与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
SHI W J. *Research and Implementation of Compound Compensation for Regulating Characteristics of Traveling Wave Ultrasonic Motors* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [4] SHI J Z, YU L, HUANG J T, et al.. Novel intelligent PID control of traveling wave ultrasonic motor [J]. *Isa Transactions*, 2014, 53(5): 1670-1679.
- [5] 史敬灼,刘玉.超声电机简单专家PID速度控制[J].中国电机工程学报,2013,33(36):120-125,17.
SHI J ZH, LIU Y. Simple expert PID speed control of ultrasonic motors[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(36): 120-125, 17. (in Chinese)
- [6] 安孟宇.行波型超声波电机频率跟踪技术的研究[D].石家庄:河北科技大学,2019.
ANG M Y. *A Research on Frequency Tracking Technology of Traveling Wave Type Ultrasonic Motor* [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 祖家奎,赵淳生.行波型超声电机频率自动跟踪控制技术评述[J].微电机(伺服技术),2004,37(6):47-50,46.
ZU J K, ZHAO CH SH. A review for frequency tracking control techniques of traveling wave ultrasonic motors [J]. *Micromotors Servo Technique*, 2004, 37(6): 47-50, 46. (in Chinese)
- [8] 陈胜,雷向红.超声电机的阻抗角特性及其控制技术[J].机电信息,2013,1(15):94-95,97.
CHEN SH, LEI X H. Research on the impedance angle characteristic and control technology of ultrasonic motor [J]. *Mechanical and electronic information*, 2013, 1(15):94-95,97. (in Chinese)
- [9] 甘云华,金龙,胡敏强,等.基于锁相环的超声波电机频率跟踪控制技术[J].哈尔滨理工大学学报,2009,14(2):66-70.
GAN Y H, JIN L, HU M Q, et al.. Frequency tracking technology of ultrasonic motor based on phase-locked loop[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2009, 14(2): 66-70. (in Chinese)
- [10] 陈志华,赵淳生.一种简单实用的超声电机频率跟踪控制技术[J].压电与声光,2003,25(2):149-151.
CHEN ZH H, ZHAO CH SH. The control of resonant tracking of ultrasonic motor[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2003, 25(2): 149-151. (in Chinese)
- [11] 张萌,史敬灼.行波超声波电动机单输入Takagi-Sugeno模糊转速控制[J].微特电机,2017,45(1):55-57.
ZHANG M, SHI J ZH. Single-input Takagi-sugeno fuzzy speed controller of traveling wave ultrasonic motor[J]. *Small & Special Electrical Ma-*

- chines, 2017, 45(1): 55-57. (in Chinese)
- [12] LENG X F, WU S S, DU Y L, *et al.*. Fuzzy sliding mode control for pan-tilt-zoom system driven by ultrasonic motor[J]. *Conference on automation science and engineering*, 2015: 868-873.
- [13] SHI J Z, ZHAO F J, SHEN X X, *et al.*. Chaotic operation and chaos control of travelling wave ultrasonic motor [J]. *Ultrasonics*, 2013, 53 (6): 1112-1123.
- [14] ZHANG J T, ZHANG T M, XIE Z Y, *et al.*. Multivariable nonlinear model of ultrasonic motor based on Hammerstein model and uniform design [C]. *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, 7-9 July 2010, Jinan, China, 2010: 5794-5799.
- [15] GARCÍA-ROCHÍN R, KÜHNE M, SANTIES-TEBAN-COS R, *et al.*. Second-order model for rotary traveling wave ultrasonic motors[C]. *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, 3-5 Nov. 2015, Seoul, South Korea, 2015: 991-996.
- [16] WU X, HUA L, QIANG Y J, *et al.*. Studies on stepping characteristics of traveling-wave ultrasonic motor[C]. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronics and Optoelectronics*, 29-31 July 2011, Dalian, Dalian, 2011: V1-79-V1-84.
- [17] 王金鹏, 全家楣, 赵淳生. 行波型旋转超声电机速度稳定性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(30): 109-116.
- WANG J P, JIN J M, ZHAO CH SH. Velocity stability research of traveling wave type rotary ultrasonic motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(30): 109-116. (in Chinese)
- [18] 胡敏强, 金龙, 顾菊平. 超声波电机原理与设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- HU M Q, JIN L, GU J P. *Ultrasonic Motor Principles and Design* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)

作者简介:



陈宁(1990—),男,福建莆田人,博士研究生,2013年和2015年于国防科技大学分别获得学士和硕士学位,主要从事压电驱动功能部件的动力学建模与控制研究。E-mail: chenning007xm@126.com.cn

通讯作者:



范大鹏(1963—),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测控技术的研究。E-mail: fdp@nudt.edu.cn

(本栏目编辑:曹金)