

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514510

考虑定子变形误差的超声微电机步进控制方法*

马忠睿¹, 赵欣¹, 龚旭辉¹, 何江波², 周吴¹

(1. 电子科技大学机械与电气工程学院 成都 611731; 2. 西华大学机械工程学院 成都 610039)

摘要: 超声微电机(USM)在需要到点即停和可控微小位移的使用场景中,通常通过步进方式实现高精度定位。然而在实际步进过程中,定子表面变形会使得电容式角度传感器出现检测误差,从而限制其定位精度。针对这一问题,聚焦所研究的具有专用结构特征的USM,提出了一种考虑定子初始变形误差的步进控制方法。首先,基于传感器结构和平板电容原理,分析启停阶段角度检测误差的形成机理,明确了启停阶段行波的激发与衰减引起定转子间距变化是误差的主要来源,据此提出预激励补偿与制动参数标定相结合的误差补偿方案。其次,针对该类USM建立了电压频率、幅值与相位与转速之间的输入-输出映射关系,并选取电压幅值作为调控参数。在闭环步进策略中,结合电容式角度传感器的实际输出特性,规划了一种无换向、平滑过渡的步进方式,选取电容波形的波峰/波谷作为角度检测基准点,引入带跟踪微分器的非线性比例积分微分(PID)控制器实现单向正转轨迹规划,并通过自适应电压幅值调控实现角度位置的精准跟踪。最后,搭建包含高精度光电准直仪的实验平台。实验结果表明,预激励补偿可使电容波动幅度降低约82%;在30次12°步进实验中,控制误差均 $<0.2^\circ$,相比开环控制精度提升约33%,且未出现误差累积。

关键词: MEMS; 超声微电机; 闭环步进控制; 电容式角度传感器; PID 控制器

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on stepping control method of ultrasonic micromotors considering stator deformation errors

Ma Zhongrui¹, Zhao Xin¹, Gong Xuhui¹, He Jiangbo², Zhou Wu¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: In application scenarios that require stop-on-target behavior and controllable micro-displacements, ultrasonic micromotors (USM) typically achieve high-precision positioning through stepping operation. However, during actual stepping, deformation of the stator surface introduces detection errors in the capacitive angular sensor, thereby limiting the positioning accuracy. To address this issue, this paper focuses on an ultrasonic micromotor with specialized structural features and proposes a stepping control method that explicitly accounts for the initial stator deformation error. First, based on the sensor structure and the principle of a parallel-plate capacitor, the formation mechanism of angular detection errors during the start-stop phases is analyzed. The variation of the rotor-stator gap induced by the excitation and attenuation of the traveling wave in these phases is identified as the main source of error. Accordingly, an error-compensation scheme combining pre-excitation compensation and braking-parameter calibration is proposed. Second, for this type of ultrasonic micromotor, an input-output mapping is established between the excitation voltage frequency, amplitude and phase and the rotational speed, and the voltage amplitude is selected as the control variable. In the closed-loop stepping strategy, taking into account the actual output characteristics of the capacitive angular sensor, a commutation-free, smoothly transitioned stepping scheme is designed. The peaks and troughs of the capacitive waveform are selected as reference points for angle detection, and a nonlinear proportional integral derivative (PID) controller with a tracking differentiator is introduced to realize unidirectional forward trajectory planning, while adaptive adjustment of the voltage amplitude is employed to achieve precise tracking of the angular position. Finally, an

收稿日期: 2025-09-17 Received Date: 2025-09-17

* 基金项目: 四川省科技成果转化示范项目(2024ZHCG0050)资助

experimental platform incorporating a high-precision photoelectric autocollimator is constructed. Experimental results show that the pre-excitation compensation reduces the amplitude of capacitance fluctuations by approximately 82%; in 30 trials of 12° stepping experiments, the control error remains below 0.2° , representing an improvement of about 33% compared with open-loop control, and no error accumulation is observed.

Keywords: MEMS; ultrasonic micromotor; step control; capacitive sensor; PID controller

0 引言

超声微电机 (ultrasonic micromotor, USM) 是一种基于微机电系统 (micro electro mechanical system, MEMS) 技术和压电晶体材料的新型驱动装置。其工作原理是通过压电材料的逆压电效应,在定子表面激发行波振动,促使接触面的质点产生椭圆运动轨迹,进而通过摩擦力驱动转子旋转^[1]。超声电机具有功率密度高、噪音小、响应速度快以及高扭矩等特点^[1-4],使其在成像设备系统中获得广泛应用^[5-7]。尤其对“到点即停、可控微小量位移”有刚性需求的场景^[8-11]中,超声电机通常作为驱动器以步进方式实现高精度定位,此类任务的性能瓶颈并非最高转速,而在单步位移的可重复性与启停一致性。因此,高精度的步进能力是上层应用能否达标的关键前提。

然而,实现高精度步进的基础是可靠的角度实时反馈。电容检测技术已经广泛应用于各种微传感器和微驱动器中^[12-14]。目前在针对超声电机的实时角度监测方法中,采用电容式角度传感器^[15]可实现监测的角精度优于 0.1° ^[16],奠定了高精度步进的基础。尽管如此,该检测方案在实际步进中仍存在系统性偏差:特别是在步进的启停阶段,在行波的形成与衰减过程中会导致电容式角度传感器对角度的检测失准,限制了角度反馈的精度,阻碍了其高精度定位应用场景的发展。

针对传统超声电机的步进控制,大致上可以分为两类:1) 针对某一输入参数的单一的控制策略方法;2) 针对研究对象采用组合控制策略的方法。在方法1)中,国内外已提出基于传统比例积分微分控制 (proportional integral derivative, PID)^[17-18]、模糊控制^[19-20]、自适应控制^[21-22]、智能控制^[23-24]等多种闭环位置控制方法。在方法2)中,研究者们摒弃了单一位置控制的方案,转而面向具体的被控对象设计合理的组合控制策略使运动点逼近目标位置。李松珂^[25]采用组合控制的策略使运动点逼近目标位置。将控制过程分为连续运动与步进运动两个过程,利用实验得到了电机驱动参数对步距角的变化规律,提出了基于瞬态响应的超声电机步进控制算法。纪科辉等^[26]从电机瞬态特性着手,剖析了电机机械特性和瞬态特性之间内在的联系,提出了利用此步进特性的步进定位控制策略。然而,这些方法多假设被控对象结构通用、检测链路理

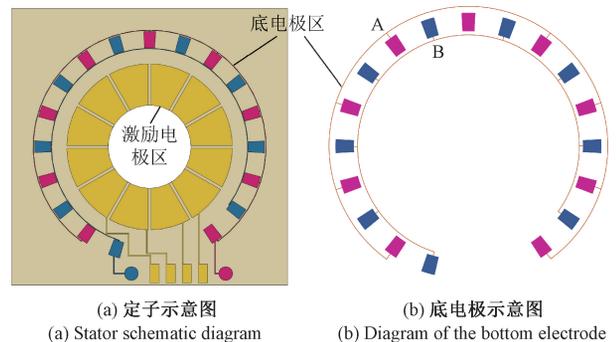
想。本文所研究的行波超声微电机具有专用结构特征,其定转子的检测电极与行波生成方式也与传统的超声电机有所区别^[27]。为此,本文从器件实际出发,不再依赖通用模型与固定参数整定,而是围绕微电机的输入-输出关系与电容式角度传感器输出特性开展面向对象的控制设计。

因此,本文针对行波超声微电机在启停阶段角度检测易受定子变形影响而导致误差的问题,提出了一种预激励与标定特定参数方法补偿该误差。结合传感器输出曲线特性与电机输入-输出映射关系规划了无换向、平滑过渡的步进策略,并引入具备自适应电压幅值调节功能的非线性 PID 闭环控制器。利用高精度光学准直仪搭建实验平台,验证了该补偿方法的有效性以及控制策略的准确性。本文首次实现了该类特殊结构的超声电机闭环步进控制,为特殊结构超声电机的高精度定位提供了可参考的依据。

1 电机角度检测原理及误差分析

1.1 电容式角度传感器

微电机的角度检测基于平板电容的基本原理。在转子与定子的接触面的一侧,周期性地布置一定尺寸的感应电极。微电机定子示意图如图1(a)所示,包括激励电极区与电容式角度传感器的底电极区,其中激励电极区主要用来激发行波驱动转子转动。底电极则分为A、B两组,如图1(b)所示。图1(c)为转子示意图,包括宝石环摩擦区与电容式角度传感器的顶电极区,如图1(d)所示。宝石环摩擦区与激励电极区接触负责提供摩擦力。底电极与顶电极共同构成平板电容。该电容式角度传感器的制造工艺及其功能参照文献[15-16]。



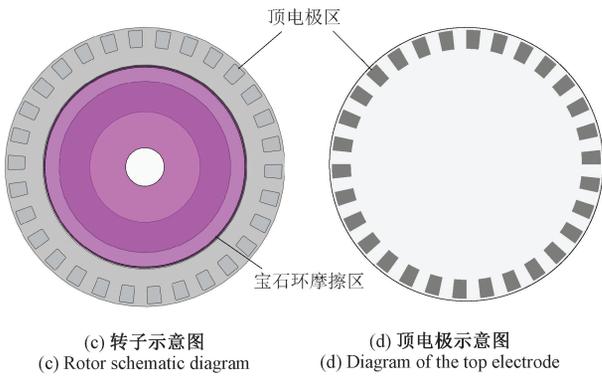


图 1 敏感电极示意图

Fig. 1 Sensitive electrode diagram

转子旋转过程中敏感电极重叠面积变化如图 2(a) 所示。当转子位于 θ_0 时, A 组底电极与顶电极重叠面积最大, B 组则完全错开。电容信号经检测电路输出得到 A 组电容信号最大 C_{max} 而 B 组信号为 0。转子顺时针旋转至 θ_1 , A 组重叠面积逐渐减小, B 组逐渐增大, 二者变化曲线相同但存在相位差。当转子旋转至 θ_3 时, B 组输出信号最大 C_{max} 而 A 组信号为 0。最后转子旋转至 θ_4 位置时, 两组电容信号输出情况与 θ_0 相同。 θ_0 至 θ_4 构成一个完整的电容-角度变化周期。进一步将这两组电容信号差分处理可进一步放大输出信号幅值, 同时消除一定的噪声, 如图 2(b) 所示。

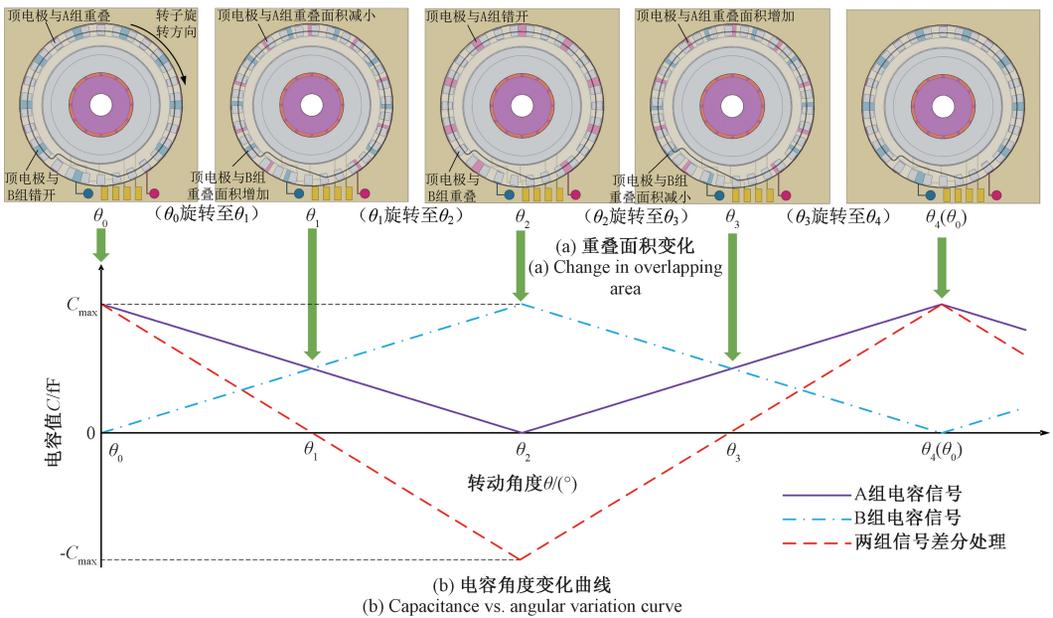


图 2 电容式角度传感器
Fig. 2 Capacitive angular sensor

基于平板电容理论, 可以推导出转子的旋转角度。假设单个敏感电极波形变化周期为 φ 。根据该结构, 推导出电容与转动角度的关系如式(1)、(2)所示。

$$C(t) = \varepsilon_0 S(t) / d(t) \tag{1}$$

$$S(t) = \frac{\pi(R_1^2 - R_2^2) |\varphi - \theta(t)|}{360} \tag{2}$$

式中: $S(t)$ 为极板间的正对重叠面积; ε_0 为真空介电常数; $d(t)$ 为两极板间垂直距离, 其中 R_1 为敏感电极重合外圆半径, R_2 为敏感电极重合内圆半径; $\theta(t)$ 为定转子敏感电极对间对应重叠转角。

进一步地, 通过检测电路将模拟信号 $C(t)$ 转换成电压数字信号 $U_{out}(t)$, 用于后续微电机旋转角度解算, 即:

$$U_{out}(t) = k_1 + k_2 C(t) \tag{3}$$

式中: k_1 为检测电路输出可能存在的偏置; k_2 为检测电路转换放大的比例系数。

1.2 角度检测误差及补偿方案

实验表明, 在这类微电机中采用的电容式角度传感器的检测误差主要源于启停阶段: 除转子旋转引起的电极重叠面积变化外, 行波在激发与衰减过程中同样会改变转子与定子间距, 进而影响电容值。这一差异降低了角度解算的精度, 使控制器输入与实际转角存在偏差, 从而限制了控制精度。

针对角度检测反馈系统存在的误差, 主要从两个方面进行补偿, 即:

1) 采取特殊的行波激励方式

如图 3 所示为微电机在单次步进过程中的激励与反馈信号。在启动阶段, t_1 时刻产生驱动信号, 转子被行波顶起; 至 t_2 时刻, 转子开始转动; 至 t_3 时刻, 行波稳定。

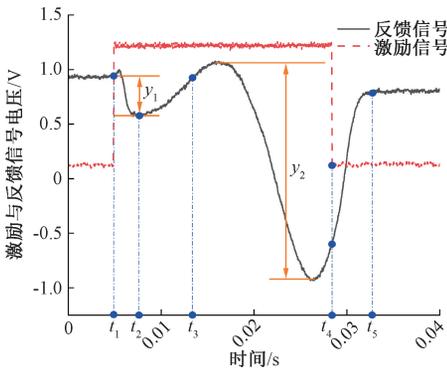


图3 单次步进激励与反馈信号

Fig. 3 Excitation and feedback signals for single-step

更详细的过程如图4所示,在 $t_1 \sim t_2$ 中,电容信号受到间距 λ_1 的影响大于重叠面积 ε_1 ,输出的电压 y_1 主要反应的是转子被顶起引起的电容变化;在 $t_2 \sim t_3$ 中,行波激励趋近稳定,电容信号受到间距 λ_2 的影响小于重叠面积 ε_2 ,输出的电压转变为转子旋转引起的电容变化。

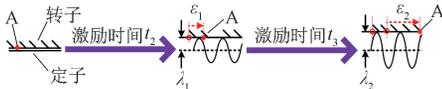


图4 启动阶段

Fig. 4 Start-up stage

因此提出了一种预激励方法。根据行波原理,两个振幅和频率相同但相位不同的正弦驻波可叠加成行波。在微电机开始旋转之前,预先激发驻波以稳定转子与定子距离,从而减少间隙变化引起的转角偏差。

2) 标定特定参数值

如图3所示,在 t_4 时刻停止激励,行波开始衰减,转子开始下落。受转子惯性与行波衰减时间影响,在 t_5 时刻,微电机才完全停止。

和启动阶段不同,在此阶段无法通过驻-行波转换来分离转子转动和下落过程,其原因在于,取消两路电压后,驻波提供的点摩擦力较小,会导致转子制动时的惯性角过大,远超过目标步进角度。

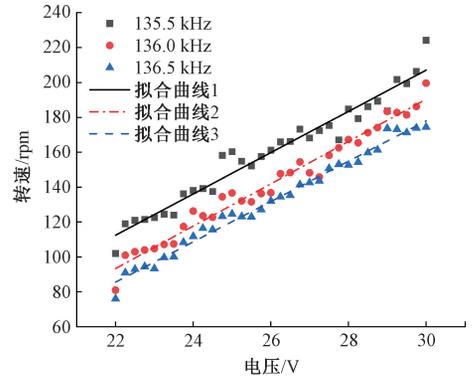
因此提出标定特定参数值方法。实验多次不同电压幅值下的步进进行信号标定,主要用于马达预留制动惯性角度的计算。

2 微电机控制策略

2.1 微电机的输入输出映射关系

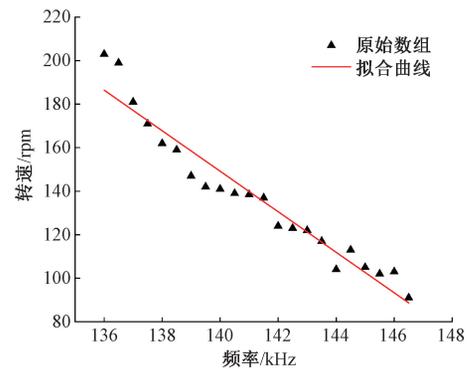
根据行波工作原理,微电机的驱动参数包括激励频率、幅值、相位差和激励持续时间。调控这些参数可实现转速及转角控制。然而,在微观尺度下精确建立

振动与摩擦模型较为困难,因此需通过实验确定输入-输出映射关系以实现精准步进控制。微电机的实际谐振频率可利用阻抗分析仪频率扫描获得,激励电压幅值范围则由实测确定。如图5所示,通过调节谐振频率、激励幅值和相位差这三个参数可建立输入-输出间的定量映射关系。



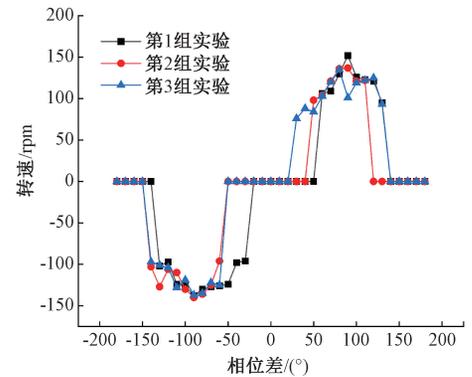
(a) 电压幅值与转速的关系

(a) The relationship between voltage amplitude and speed



(b) 电压频率与转速的关系

(b) The relationship between voltage frequency and speed



(c) 相位差与转速的关系

(c) The relationship between phase difference and rotational speed

图5 激励参数与转速的关系

Fig. 5 Relationship between excitation parameters and rotational speed

综上,激励电压幅值与转速呈较好的线性关系,信号之间的相位差更适合改变微电机旋转方向。

2.2 微电机步进控制策略

基于上述对电容式角度传感器的曲线特性与误差补偿,并针对微电机的输入输出特性,本文规划了一种无换向、平滑过渡的步进策略,构建了调节激励电压幅值的非线性 PID 控制器。

由图 2(b)所示,差分后的电容-角度曲线特性理论为三角波。然而在微电机实际运行中,由于敏感电极尺寸较小且各电极间间距较短,电容边缘效应^[28]显著,主要影响输出波形的峰值、谷值,传感器实际输出曲线如图 3 所示。因此,微电机的旋转角度可以通过电容式角度传感器输出曲线的反三角函数计算得到。

虽然理论三角波与实际正弦波的曲线斜率存在偏差,但对步进过程的电容变化绝对值影响有限。实验进一步发现,当上下极板重叠面积最大时,即波形处于峰值或谷值时,检测精度最佳。因此,本文选取波峰或波谷作为角度检测的基准参考点,如图 6 所示。

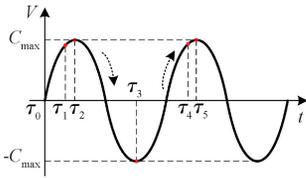


图 6 微电机工作阶段示意图

Fig. 6 Diagram of the micromotor operating stage

基于文献[15]提出的大转矩高速微电机原位电容检测方法基础上,根据执行器的实际需求优化了敏感电极配置。定子阵列设置 18 个敏感电极,各电极对应 6°角区段,相邻电极间隔 12°;转子阵列配置 30 个敏感电极,各电极对应 6°角区段,相邻电极间隔 6°。微电机实际定子电极结构布局如图 7 所示。

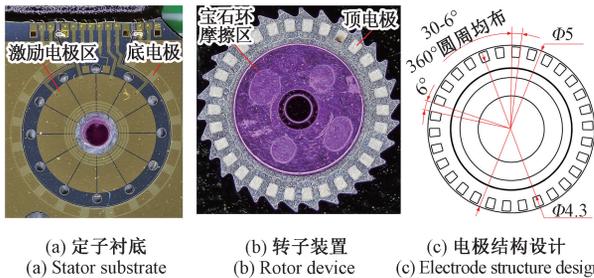


图 7 定转子电极结构布局

Fig. 7 Electrode structure layout of stator and rotor

基于 12°步进目标设计,电容反馈信号波形特征可明确识别为包含一个完整波峰与波谷,且转动开始与终止的电容角度检测输出电压值相等。

但是在微电机实际工作中,转子因滑动特性及初始

位置差异,难以严格在理想时刻 τ_2 启动。其实际启动时刻常偏离 τ_2 点(提前或滞后),导致与理想工况间产生角度偏差。为此引入补偿角度 θ_1 表征实际启动时刻 τ_1 与理论时刻 τ_2 的角位移差,同时定义 $\tau_2 \sim \tau_4$ 区间的解算角 θ_2 及激励关断后 $\tau_4 \sim \tau_5$ 区间的滑移角 θ_3 如图 6 所示。基于电容检测原理,可得总转动角度公式为:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \quad (4)$$

在 $\tau_2 \sim \tau_4$ 采用 PID 控制方法使得微电机平稳到达 τ_4 点位,继而通过预标定转速-制动距离关系驱动微电机精确抵达目标位置。

为了避免微电机正反转切换,系统引入跟踪微分器规划平滑过渡过程,确保位置单向正转模式。控制系统结构如图 8 所示,其中 v 为输入目标信号, v_1 为输出过渡信号, v_2 为输出过渡信号的微分。

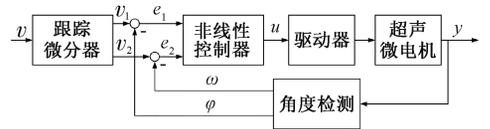


图 8 非线性控制系统结构

Fig. 8 Nonlinear control system structure

跟踪微分器可同步输出经平滑处理的目标轨迹信号及其微分信号。其误差函数可定义为: $e = v_1(t) - y$ 。当输入为阶跃信号 v 时,通过离散化处理可生成无超调、渐进趋近目标轨迹的过渡过程,从而实现系统对设定值的快速平稳跟踪。

该微分器采用二阶系统描述为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u \end{cases} \quad (5)$$

离散形式的非线性微跟踪器表示为:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hu = v_2(k) + hf_z(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h_0) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_z(v_1 - v, v_2, r, h_0) = \begin{cases} -r \frac{a}{d}, & |a| \leq d \\ -r \cdot \text{sign}(a), & |a| > d \end{cases} \quad (7)$$

$$a = \begin{cases} v_2 + \frac{z}{h_0}, & |z| \leq d_0 \\ v_2 + \frac{a_0 - d}{2} \text{sign}(z), & |z| > d_0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} d = rh_0 \\ d_0 = h_0d \\ z = v_1 - v + h_0v_2 \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|z|} \end{cases} \quad (9)$$

式中: h 为采样周期; h_0 为滤波因子; r 为跟踪快慢的参数, r 越大, 跟踪速度越快, 其具体取值需根据微电机实际转速上下限来确定; f_z 为选用的快速最优控制综合函数, 该控制函数的主要思想是将目标位移 ($v_1 - v$) 与当前减速过程的预期位移做比较来调节控制量。

针对微电机驱动模型难以精确建模的问题, 采用普适性 PID 控制算法结合适应性参数调整策略。所设计的非线性 PID 控制器采用非线性 PD 复合结构, 其表达式如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} u = \beta_1 fal(e_1, \alpha_1, \varepsilon) + \beta_2 fal(e_2, \alpha_2, \varepsilon) \\ fal(e, \alpha, \varepsilon) = \begin{cases} \frac{e}{\varepsilon^{1-\alpha}}, & |e| \leq \varepsilon \\ |e|^\alpha \text{sgn}(e), & |e| > \varepsilon \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $0 < \alpha_1 < 1 < \alpha_2$; $\beta_1 = k_p$; $\beta_2 = k_d$; e_1 为输出过渡信号与实际偏转角度数值 φ 之差; e_2 为输出过渡信号的微分与实际角速度 ω (通过对转动角度进行微分处理得到) 之差; fal 函数为原点附近具有线性段的幂次函数; ε 为线性段的区间长度。该控制器的设计主要考虑到定位和控速两个方面, 可使微电机转速追随微分器输出的微分信号, 在达成定位步进的情况下对制动时的转速起到一定限制作用。

控制器输出 u 对驱动电压值 A 进行调控, 从而控制微电机的转动角度, 其对应关系如式 (11) 所示。

$$\begin{cases} A = A_0 + f_a(u), & A < A_1 \\ A_1, & A \geq A_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: A_0 微电机此次步进的最低启动电压。在每次启动时可从小到对 A_0 值进行试探, 直至电容检测结果明显变化, 确定当前启动位置微电机的启动电压幅值。函数 f_a 则需要在实际运作来探求驱动电压变化对转动角度的影响, 从而进行适配性设计。在实际测试中, 电压幅值和转速在启动电压到 30 V 保护上限电压区间呈明显正相关关系, 故函数 f_a 如式 (12) 所示。

$$\begin{cases} f_a(u) = |A_0 - A_1| \lg\left(\frac{u+1}{k}\right), & u > 0 \\ f_a(u) = 0, & u \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

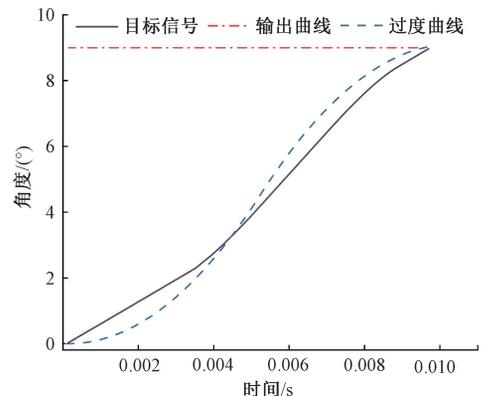
式中: A_1 为电压幅值上限, 一般为 30 V; 同时为确保制动惯性角仅可能小, k 的取值由 u 的变化区间决定, 基本保持 $u+1 < 10k$, 将 A 值维持在幅值区间内。进行对数函数形式可对微电机转速进行一定的限制。

3 实验验证

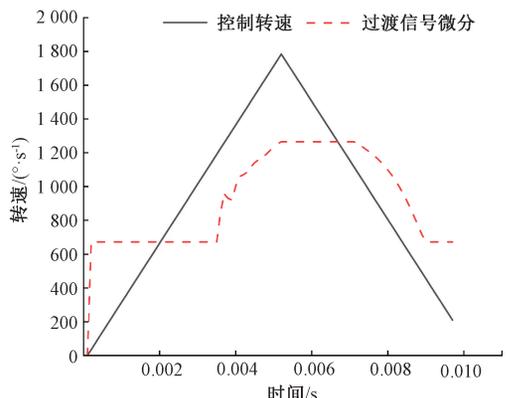
根据已经验证的电压幅值与转速的实验结果, 可拟合超声微电机的电压幅值-转速的关系为:

$$\omega = 12.35A - 159.69 \quad (13)$$

为验证控制有效性, 在 MATLAB 软件中进行离散系统仿真, 设置 v 为 9、 h 为 0.000 1、 h_0 为 0.000 01、 r 为 350 000、 ε 为 0.000 2、 α_1 为 1.2、 α_2 为 0.45、 k_p 为 180、 k_d 为 4、 A_0 为 15、 k 为 10, 结果如图 9 所示。



(a) 角度跟踪结果
(a) Angle tracking result



(b) 速度跟踪结果
(b) Speed tracking result

图 9 仿真验证

Fig. 9 Simulation verification

图 9(a) 显示输出信号平稳趋近目标角度。图 9(b) 表明微电机转速变化连续可控, 未出现突变现象, 且临近目标角度时自动降速。尽管驱动电压幅值受限导致转速跟踪存在偏差, 但控制目标仍能有效实现。该控制器兼具响应速度与稳定性优势, 末端通过最小化残余转速确保制动阶段初始条件一致, 从而提高控制重复性。

基于图 10 所示的实验平台, 验证超声微电机闭环控制方法的有效性。首先对电容检测角度误差进行补偿, 结果如图 11 所示。图 11(a) 展示常规激励方式下采集的角度反馈与激励信号, 可见微电机启动时因定子间距变化导致的电容波动显著; 图 11(b) 采用预激激励策略后, 启动阶段电容波动幅度较常规方式降低约 82% (输出电压波动由 0.198 V 降至 0.036 V)。

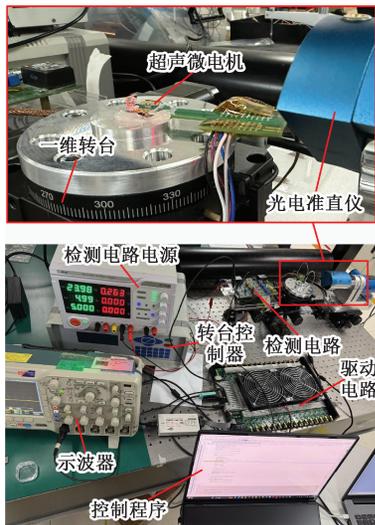


图 10 实验环境

Fig. 10 Experimental environment

所示,30 次步进测试中实现 12° 步进角误差均 $< 0.2^\circ$, 较 Wang 等^[15] 开环步进 0.3° 的精度提升约 33%。并且通过有效利用反馈信号峰值特征,系统成功避免了步进过程中的误差累积效应。

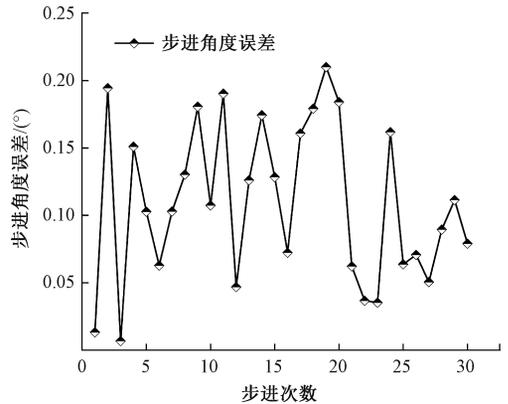


图 12 超声电机 12° 步进误差。

Fig. 12 USM 12° stepping error

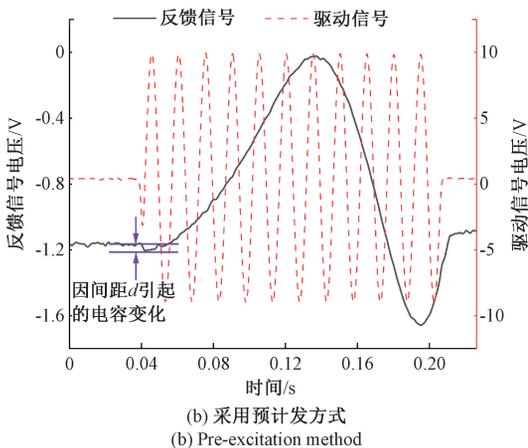
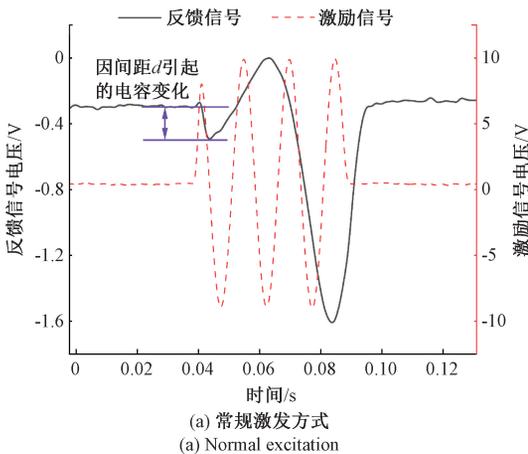


图 11 电容检测角度误差补偿

Fig. 11 Capacitance detection angle error compensation

在超声微电机闭环步进精度实验中,采用高精度光电准直仪(分辨率为 $0.1''$)进行角度误差检测。如图 12

4 结 论

针对超声微电机在步进过程中因定子变形导致的角度检测误差,本研究系统性分析了微电机角度检测原理及其误差来源,并提出了启动预激励补偿与制动参数标定相结合的方法,减小了启停阶段的检测偏差。实验结果表明,该方法能够将电容波动幅度降低约 82%,显著提升角度反馈的稳定性。

在控制策略方面,通过分析电容式角度传感器输出曲线特征,结合微电机的输入输出特性,本研究对该结构的超声电机规划了一种无换向、平滑过渡的步进策略,并构建了调节激励电压幅值的非线性 PID 控制器。系统实现了高精度定位。实际测试结果显示,在 30 次 12° 步进实验中,角度误差始终 $< 0.2^\circ$,较已有的开环步进精度提升约 33%,且有效避免了误差累积。

综上,本研究首次在该类结构的超声微电机中实现了基于电容反馈的闭环步进控制。所提的方法不仅验证了角度检测补偿方法与控制策略的有效性,也为特殊结构超声微电机的高精度定位提供了可行方案,对微创医疗、精密操作等应用场景具有重要参考价值。

参考文献

[1] QIN F, DAI G, SUN X Y, et al. A novel PZT-based traveling-wave micromotor with high performance and unconstrained coaxial rotation[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2018, 27(4): 635-642.

[2] ZHOU W, HE J B, RAN L Q, et al. A piezoelectric micro ultrasonic motor with high Q and good mode match[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(4):

- 1773-1781.
- [3] 王瑞锋, 王亮, 贾博韬, 等. 单相驻波驱动的旋转型超声电机结构设计与试验研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 227-236.
- WANG R F, WANG L, JIA B T, et al. Structural design and experimental studies of rotating ultrasonic motor driven by single-phase standing wave [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 227-236.
- [4] 陈建毅, 林星陵, 吴庆勇, 等. 面内驱动旋转超声电机的研究进展[J]. 微电机, 2024, 57(6): 69-74.
- CEHN J Y, LIN X L, WU Q Y, et al. Research progress of the rotating ultrasonic motors based on in-plane mode[J]. Micromotors, 2024, 57(6): 69-74.
- [5] NAZ S, XU T B. A comprehensive review of piezoelectric ultrasonic motors: Classifications, characterization, fabrication, applications, and future challenges[J]. Micromachines, 2024, 15(9): 1170.
- [6] MASUDA N, IZUHARA S, MASHIMO Y. Miniature camera module with a hollow linear ultrasonic motor-based focus feature [J]. In: Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 354: 114248.
- [7] MASHIMO T, IZUHARA S, ARAI S, et al. High-speed visual feedback control of miniature rotating mirror system using a micro ultrasonic motor[J]. IEEE Access, 2019, 8: 38546-38553.
- [8] LI J W, SUN ZH J, YAN H, et al. Design of a magnetically anchored laparoscope using miniature ultrasonic motors[J]. Micromachines, 2022, 13(6): 855.
- [9] 陈加林, 郭明森, 邢晓红. 基于超声电机的食道胶囊内窥镜光扫描机构[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(4): 744-750, 872.
- CEHN J L, GUO M S, XING X H. Design of light scanning mechanism for esophageal capsule endoscope utilizing ultrasonic motors[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(4): 744-750, 872.
- [10] 潘松, 梁永锦, 陈雷, 等. 超声电机驱动的激光跟踪平台误差建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 93-104.
- PAN S, LIANG Y J, CHEN L, et al. Error modeling and analysis of a laser tracking platform driven by ultrasonic motor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(1): 93-104.
- [11] 吴必成, 姚志远, 张亚飞. 基于超声电机的细胞微操作台设计与实验研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(1): 19-22.
- WU B CH, YAO ZH Y, ZHANG Y F. Design and experimental study of the micro operation platform for cells based on the ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2017, 39(1): 19-22.
- [12] ZUO W, GUO Q T, JI X C, et al. Structural optimization of capacitive MEMS microwave power sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(19): 11380-11386.
- [13] 高忠华, 胡帅, 汪强, 等. 单相激励电容式时栅角位移传感器研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(1): 130-137.
- GAO ZH H, HU SH, WANG Q, et al. Study on capacitive type time-grating angular position sensor with single-phase excitation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(1): 130-137.
- [14] NGUYEN S D, PAPROTNY I, WRIGHT P K, et al. MEMS capacitive flow sensor for natural gas pipelines[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 231: 28-34.
- [15] WANG Y CH, YANG T Y, LI X SH, et al. Precise stepping control of a piezoelectric traveling wave micromotor through embedded in-situ detection[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2020, 30(10): 105007-105016.
- [16] YANG T Y, LI X SH, SUN X Y, et al. An embedded capacitive sensor for in-situ angular detection of micromotor[J]. Microelectronics Journal, 2021, 114: 105088.
- [17] MAKAREM S, BÜLENT D, KOC B. Data-driven tuning of PID controlled piezoelectric ultrasonic motor[J]. Actuators, 2021, 10(7): 148.
- [18] YAN G F. Design of back-stepping reaching law controller for ultrasonic motor using friction drive [J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2024, 45(2): 161-168.
- [19] KEBBAB F Z, BELKHIAT D E C, JABRI D, et al. Frequency speed control of rotary travelling wave ultrasonic motor using fuzzy controller[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research 2018, 8(4): 3276-3281.
- [20] 李华峰, 赵淳生, 辜承林. 使用模糊控制的超声波电机精密位置控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2004(5): 22-24.
- LI H F, ZHAO CH SH, GU CH L. Precise position control of ultrasonic motor by fuzzy control[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2004(5): 22-24.
- [21] MU SH L, TANAKA K. Position control of ultrasonic motor using PID-IMC combined with neural network based on probability[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013, 41(1): 59-71.

- [22] SHI J ZH, HUANG W W. Model reference adaptive iterative learning speed control for ultrasonic motor[J]. IEEE Access, 2020, 8:181815-181824.
- [23] LIN C M, LI H Y. Intelligent control using the wavelet fuzzy CMAC backstepping control system for two-axis linear piezoelectric ceramic motor drive systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014, 22(4): 791-802.
- [24] MUSTAFA A, SASAMURA T, MORITA T. Deep reinforcement learning for sensorless speed control of rotary ultrasonic motors[C]. Proceedings of JSPE Semestrial Meeting, 2022: 690-691.
- [25] 李松珂. 基于瞬态响应的超声电机高精度位置控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
LI S K. Research on the high-precision position control of ultrasonic motor based on transient response[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2017.
- [26] 纪科辉, 郭吉丰, 刘晓. 超声波电机的步进特性和步进定位控制[J]. 中国电机工程学报, 2004(1): 71-75.
JI K H, GUO J F, LIU X. Stepping characteristic of ultrasonic motor and its stepping-positioning control[J]. Proceedings of the CSEE, 2004(1): 71-75.
- [27] HE J B, CHEN Y, CAO B L, et al. Traveling wave distortion of MEMS ultrasonic motor induced by anisotropic elasticity[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 189: 110083.
- [28] 熊葵容, 倪德儒. 电容传感器的边缘效应[J]. 传感器世界, 1998(3): 16-19.
XIONG K R, NI D R. Edge effects of capacitive sensors[J]. Sensor World, 1998(3): 16-19.

作者简介



马忠睿, 2017 年于重庆理工大学获得学士学位, 2022 年于广西大学获得硕士学位, 现为电子科技大学博士研究生。主要研究方向为 MEMS 超声电机智能控制及其工程应用、信号处理。

E-mail: cqjgmzr@163.com

Ma Zhongrui received his B.Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2017, and his M.Sc. degree from Guangxi University in 2022. He is currently a Ph.D. candidate at the University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include intelligent control and engineering applications of MEMS ultrasonic motors, and signal processing.



赵欣, 2023 年于重庆理工大学获得学士学位, 现为电子科技大学硕士研究生。主要研究方向为微传感器与执行器控制、闭环控制算法优化及系统集成。

E-mail: zhaoxin0107@std. uestc.edu.cn

Zhao Xin received her B.Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2023. She is currently a master's candidate at University of Electronic Science and Technology of China. Her main research interests include the control of micro-sensors and actuators, the optimization of closed-loop control algorithms, and the development of system integration.



龚旭辉, 2021 年于电子科技大学获得学士学位, 2024 年于电子科技大学获得硕士学位, 现为中国工程物理研究院助理工程师。主要研究方向为微传感器与执行器控制。

E-mail: 3452054833@qq.com

Gong Xuhui received his B.Sc. and M.Sc. degrees both from University of Electronic Science and Technology of China in 2021 and 2024, respectively. He is currently an assistant engineer at the China Academy of Engineering Physics. His main research interests include microsensor and actuator control.



何江波, 2009 年于西南交通大学获得学士学位, 2011 年于西南交通大学获得硕士学位, 2016 年于西南交通大学获得博士学位, 现为西华大学教授。主要研究方向为 MEMS 传感器及执行器、微系统封装、结构力学。

E-mail: hejiangbo@foxmail.com

He Jiangbo received his B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees all from Southwest Jiaotong University in 2009, 2011 and 2016, respectively. He is currently a professor at the Xihua University. His main research interests include MEMS sensors and actuators, microsystem packaging, and structure mechanics.



周吴(通信作者), 2005 年于西南交通大学获得学士学位, 2010 年于西南交通大学获得博士学位, 现为电子科技大学教授、博士生导师。主要研究方向为微系统设计、微传感器与执行器、微系统封装等。

E-mail: zhouwu916@uestc.edu.cn

Zhou Wu (Corresponding author) received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Southwest Jiaotong University in 2005 and 2010, respectively. He is currently a professor and Ph.D. supervisor at the University of Electronic Science and Technology of China. His main research interests include micro system design, micro sensor and actuator and micro system packaging.