

## 超声电机多参量高精度测控系统的研制

陈宁, 郑杰基, 焦西凯, 范世珣, 陈虎城, 范大鹏

引用本文:

陈宁, 郑杰基, 焦西凯, 等. 超声电机多参量高精度测控系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 759–770.

CHEN Ning, ZHENG Jie-ji, JIAO Xi-kai, et al. Development of high-precision multivariable measurement and control system of ultrasonic motor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 759–770.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0759>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 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>

### 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>

### 基于参数辨识的内置式永磁同步电机最大转矩电流比电流预测控制

Maximum torque per ampere current predictive control of interior permanent magnet synchronous motors based on parameter identification

*光学精密工程*. 2020, 28(5): 1083–1093 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202805.1083>

### 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>

### 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>

文章编号 1004-924X(2020)04-0759-12

# 超声电机多参量高精度测控系统的研制

陈 宁<sup>1</sup>, 郑杰基<sup>1</sup>, 焦西凯<sup>1</sup>, 范世珣<sup>1</sup>, 陈虎城<sup>2</sup>, 范大鹏<sup>1\*</sup>

(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:** 为了克服传统超声电机测控系统参数调控不灵活、特性测试分析不全面、控制算法效率低等问题, 本文介绍了一种能对超声电机主要机电参数进行测量和控制的实验系统。依据超声电机参数特点与输入输出特性提出了测控系统总体方案。针对变预压力特性与温度特性难以快速获取的问题, 设计了以电动缸为出力源的预压力施加装置和以薄膜热电阻为敏感源的界面温度采集装置; 针对高频激励信号难以灵活产生和实时采集的困难, 设计了多参数可调的驱动与采集电路; 针对电机特性测控低效、过程不够规范的问题, 形成了标准化测控流程, 尤其是提出了能够精细化分析瞬态特性的同步采集和控制流程。测试结果表明, 本系统覆盖了超声电机主要的 8 项控制参数与 13 项状态参数, 能够实现控制参数的在线精确调控与状态参数的快速测量, 测试效率较传统的超声电机测控系统提高了 30%, 为超声电机的动力学建模、特性评估及运动控制算法研究提供了较为完善的测控手段。

**关键词:** 超声电机; 测控系统; 多参量; 标准化流程

**中图分类号:** TM93 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0759

## Development of high-precision multivariable measurement and control system of ultrasonic motor

CHEN Ning<sup>1</sup>, ZHENG Jie-ji<sup>1</sup>, JIAO Xi-kai<sup>1</sup>, FAN Shi-xun<sup>1</sup>, CHEN Hu-cheng<sup>2</sup>, FAN Da-peng<sup>1\*</sup>

(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 solve the restriction caused by inflexible parameter control and low analysis efficiency in the motor's test system, this paper builds a multi-parameter measurement and control system. This paper introduces a system that can measure and test the main mechanical-electrical parameters of ultrasonic motors. Firstly, an overall scheme is designed according to the parameters and the input-output characteristics. Then in order to obtain the characteristics of variable preloads and temperature rapidly, an electric cylinder is employed as the source of pre-pressure and a temperature acquisition unit based on thin-film thermal resistance is designed; In view of the difficulties in flexible

收稿日期: 2020-03-04; 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)

generation and real-time acquisition of high-frequency signals, a driving circuit which can satisfy the adjustment and measurement in multi-parameters is designed. An overall flowchart is formed for solving low efficiency and incompleteness occurring in the traditional test process. The flowchart especially includes synchronous acquisition processes that can measure transient characteristics of the step-wise movement. Experimental results show that the system covers the main 8 control parameters and 13 state parameters of the ultrasonic motor, and the test apparatus can achieve online accurate adjustments of control parameters and rapid measurement of state parameters. The efficiency in this system is 30% higher than the one in other traditional test system. This paper focuses on solving the problems of multi-parameter measurement and control and provides several effective strategies for dynamic modeling, characteristic evaluation and servo control of the ultrasonic motor.

**Key words:** ultrasonic motor; measurement system; multivariable; standardized flowchart

## 1 引言

电磁<sup>[1]</sup>、压电<sup>[2]</sup>等精密驱动功能部件是实现航空航天、智能制造等高端装备中载荷精确运动/定位的重要基础件。以压电陶瓷为换能装置,以定子摩擦界面为传力介质的超声电机一直是压电功能部件家族的明星成员。近年来,因其低速大扭矩、响应制动快、可断电自锁、无磁化等特点,超声电机在空间探测器、智能制导炮弹<sup>[3-4]</sup>、精密运动平台<sup>[5-6]</sup>、核磁共振装置<sup>[7-8]</sup>等领域实现了应用,体现了良好的应用潜力。

超声电机作为一个利用逆压电效应和摩擦界面实现驱动的基础部件,其驱动性能取决于正余弦两相激励信号幅值、频率、相位差等参数的共同作用;同时由于高频交流激励与宏观运动相耦合的工作特点,输出转矩、转速与激励信号之间呈现显著的非线性特性,而且内外部的传感信号呈现高低频混叠、动态变化、规律复杂等特点<sup>[9]</sup>。以上因素造成了超声电机控制参数与过程参数多且复杂的总体特点。以典型的行波旋转型超声电机为例,需要调整的 8 项控制参数包括 2 项工况参数(预压力、负载转矩),4 项驱动参数(幅值等)以及 2 项伺服控制参数(速度、位置控制指令),而需要进行测量或解算的 13 项过程参数有 4 项机械参数(角速度等),5 项电学参数(输入电压电流等)和 4 项能量参数(温度、效率等)。同时为了定量化评估超声电机性能,还需要通过参数间的高效组合快速形成有效的特性分析曲线,如幅值-速度、频率-阻抗,转矩-速度等。从前人研究来看,超声电机测控系统的主要难点集中在以下几个方

面:(1)驱动参数可控的高频信号生成;(2)工况参数重点是预压力的精准在线调整;(3)电学参数的高精度采样;(4)能量参数中界面温度的实时准确测量;(5)通过参数快速组合形成高效的标准化分析流程。

在驱动参数可控的高频信号生成上,多数测试系统通过“信号发生器+功放箱”组合或商用驱动器驱动超声电机<sup>[11-13]</sup>,此方法不仅无法实现幅值、频率、相位差 3 个参数的在线快速调节,也难以有效控制激励信号的周期数,因此无法对电机的启停瞬态特性进行细化研究。在预压力参数的调节上,较多采用螺栓旋进加力的装置<sup>[14]</sup>,不仅难以进行预压力的数字化调整,而且需要对电机外壳结构进行改造<sup>[15]</sup>,降低了测试系统的普适性。在电学参数的高精度采集上,利用电阻分压或霍尔传感器<sup>[14]</sup>测电流、电压互感器测电压的方式值得借鉴,在陶瓷阻抗上<sup>[15]</sup>,文献<sup>[15]</sup>采用阻抗分析仪作为测量仪器,由于产生的激励电压较小(1~10 V),因此难以获得电机实际工作时的阻抗变化。而在温度参数的获取上看,产热最大的摩擦界面的温度状态始终未能进行有效的测量,多数测温系统检测的是电机机壳的温度<sup>[16]</sup>。除此之外,由于 PXI 采集卡等主控器件性能及功能上的缺陷,传统的超声电机测试装置没有形成整体化规范化的性能评估与数据分析流程。综上,由于超声电机自身参数多、信号类型复杂的特点,国内外目前的测控系统不仅难以实现对超声电机控制参数的在线快速精确调控与过程参数的高精度测量,还缺少体系化的性能评估与测试分析流程。

为了提供超声电机性能测控分析所需的整体

化解决方案,本文建立了一套多参量快速综合测控实验系统,在分项技术上突破了传统测控系统难以解决的高频信号可控生成、预压力精准调控等问题,从总体上实现了对超声电机8项控制参数的在线快速调整和13项过程参数的高精度采集解算,形成了超声电机特性分析的整体化流程,为超声电机的性能评估与控制方法研究提供了较全面的测试手段。

## 2 测控系统总体方案

### 2.1 工作机理

行波旋转型超声电机的驱动原理如图1所示。两相同幅同频的正弦信号激励粘接在定子底面的压电陶瓷产生形变,定子也随之产生相应的高频振动,振动状态可以通过不参与激励的孤极陶瓷获得。在预压力的作用下,定子和转子之间因摩擦作用使得定子的微幅波动转换为转子的宏观转动,从而带动负载。当电机运行时,由于多重能量损耗的存在,尤其是摩擦损耗的产生,电机内外都存在一定的温升,其中摩擦界面附近的温升量最大<sup>[17]</sup>。不难看出,超声电机是典型的多输入多输出机电耦合系统,且系统内也耦合了很多非线性因素。

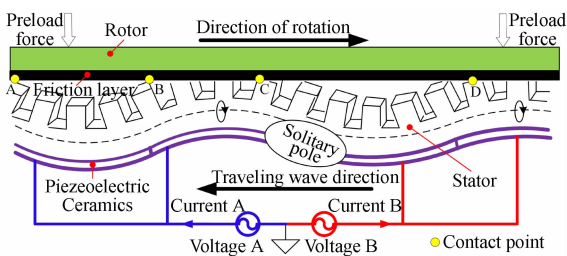


图1 行波旋转型超声电机的工作机理

Fig.1 Mechanism of traveling wave ultrasonic motor

### 2.2 测控系统需求

根据超声电机的工作机理及参数特点,梳理出测控系统的功能需求为:

(1)多参数驱动功能:实现幅值、频率、相位差、周期数的在线调整且输出波形质量较好;

(2)工况设定功能:灵活设置超声电机的工况参数,主要是实现预压力和负载力矩的精细设定和测量;

(3)参量检测及解算功能:对角速度、角位置、

输入电压、输入电流、界面温度、轴向压力、输出转矩等电机主要参量可实现采集、测量及解算,并具备较好的高低频信号同步监测能力,除此之外,电机定子两相压电陶瓷的阻抗和输入功率可通过电压和电流的实时采集和计算获取;

(4)伺服控制功能:便于集成控制算法,可实现电机的速度及位置控制功能。

本文主要以南京航空航天大学研制的TRUM60型行波超声电机为实验对象,通过更换电机连接工作接口,也可用于其它类型的超声电机实验。对系统控制参数、状态参数的类型、测量范围等技术指标如表1所示。

表1 超声电机测试系统的指标

Tab.1 Index of test system for ultrasonic motor

	项目	指标
控制参数	激励幅值/V	100~300
	激励频率/kHz	40~47
	相位差/(°)	-180~+180
	预压力/N	0~500
	加载力矩/(N·m)	0~1
状态参数	角度分辨率/ $\mu$ rad	优于1
	轴向压力/N	0~500
	输出转矩/(N·m)	0~1
	输入电流幅值/A	0~1
	输入电压幅值/V	0~300
	孤极电压幅值/V	0~100
	界面温度/°C	-30~70

### 2.3 测控系统总体设计

依据测控系统需求与性能指标,制定了多参量测控系统的总体方案,如图2所示。该方案同轴布置预压力加载装置、压力传感器、超声电机、转矩传感器、角度编码器、惯量模拟装置及力矩加载装置。于此同时将温度采集装置嵌入超声电机体内,用于敏感超声电机运行时的定子界面温度。

超声电机系统的输入输出中,高频信号和低频信号同时存在。通过整合测控任务,设计了测控处理器和高速测控模块两个单元。从图2可以看出,测控处理器是整个测试系统的主控单元,一

方面负责所有控制指令的输出,包括三参数调整指令,预压力指令与负载指令;另一方面接收系统采集或解算后的低频信号,包括角位置、动态压力、界面温度、输出转矩、阻抗及功率。而高频测控模块的作用一是通过直接数字合成方法生成超声电机工作所需的两相正余弦控制信号,二是对电机实际端电压和相电流进行高频数据采集。

集。由于高频测控模块生成输入或输出信号的幅值较小( $0\sim 10\text{ V}$ ),不能直接驱动超声电机,因此还研制了驱动放大电路,该电路既能对高频测控模块生成的正余弦控制信号进行放大,驱动电机运转,还能对电机工作的实际端电压和相电流信号进行隔离和调理,以便于高频测控模块对这些信号的采集。

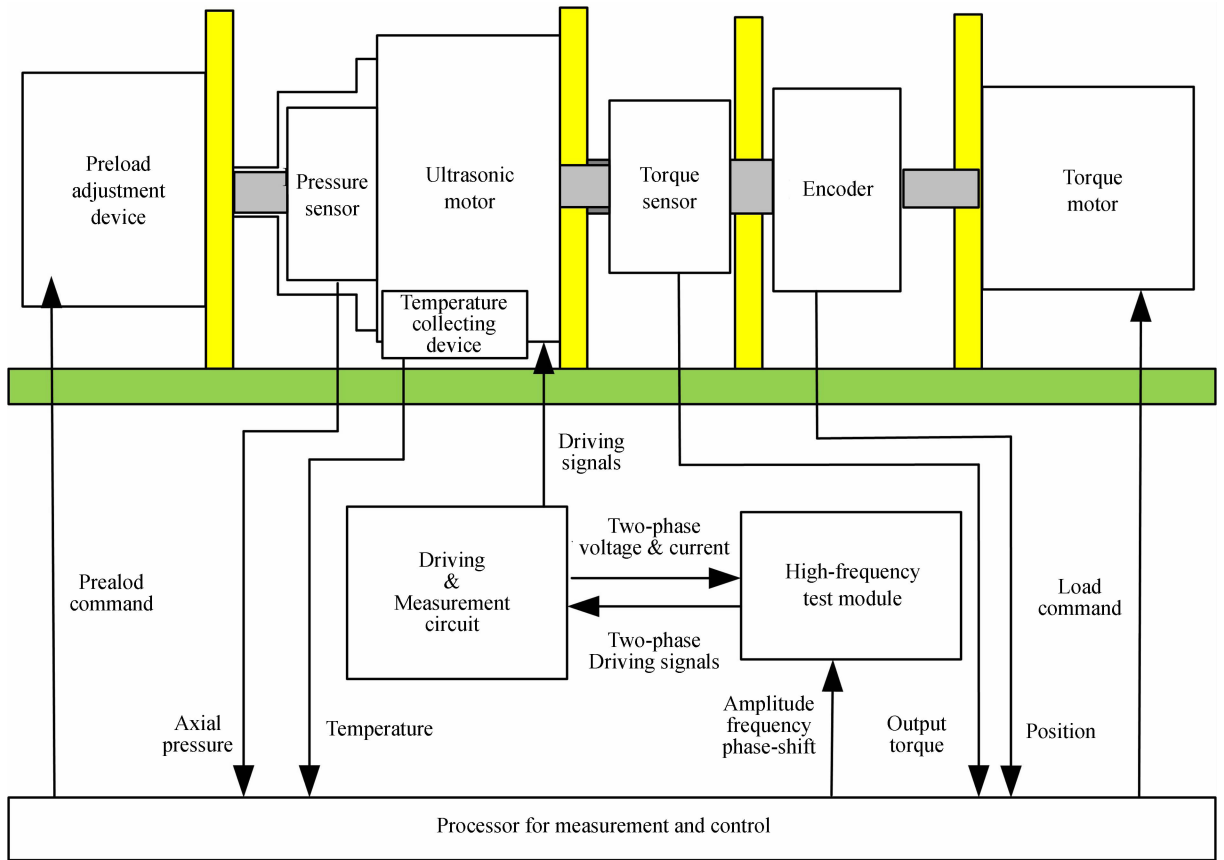


图 2 超声电机测控系统总体设计方案

Fig. 2 Overall scheme of measurement and control system for ultrasonic motor

## 2.4 主要器件选型

为便于系统的实现,选择德国 dSPACE 公司的 DS1103 控制箱作为图 2 中的测控处理器,其最高伺服周期为  $50\ \mu\text{s}$ ;高频测控模块采用美国 NI 公司的 FPGA 板卡 RIO-7854R,其板卡对模拟信号的最高采样频率为  $750\ \text{kHz}$ ,模拟信号的最高输出频率达  $1\ \text{MHz}$ 。这两种设备都支持图形化编程,亦可快速实现硬件在回路仿真,便于直接开展测量信号生成方法和闭环控制算法的研究。

编码器选择了日本多摩川公司的

TS5700N8501 型 23 位绝对式编码器,支持  $2.5\ \text{MHz}$  波特率的 RS485 通信,数据帧发送的时间间隔为  $37\ \mu\text{s}$ ,可以满足角度测量和速度解算精度的要求。

## 3 测控系统关键技术

预压力施加及监测、界面温度敏感与处理、高频驱动控制信号生成与采集等问题,是传统超声电机测试装置中未得到很好解决的关键问题。

### 3.1 预压力施加及监测

预压力是保证电机内部摩擦驱动的关键因素,也是超声电机的一项重要工作参数,对电机工作性能及使用寿命有着至关重要的影响<sup>[17]</sup>。本文采用伺服电动缸作为预压力施加装置,压力传感器用于轴向压力检测,电动缸端部通过过渡板作用在压力传感器基座上,推力致使压力传感器的敏感体抵住电机端盖,从而将力传递给定子。为了保证导向性,将活塞头过渡板压力传感器限制在套筒中。工作时,控制电动缸工作在力矩模式,其输出力基本保持恒定,利用这一特性可实时在线地改变预压力。上述设计导向精度高、施加力均匀,实现了预压力的精准施加,同时压力传感器的存在可以量化地监测电机运动中轴向压力的变化。经过拟合标定,电动缸的指令  $I$  与出力  $F$  满足  $F=162.81I-4.64$ 。

### 3.2 界面温度敏感及采集

超声电机的工作过程始终伴有热量损耗,导致内部温度增加,尤其是定转子摩擦界面附近温升较快<sup>[18]</sup>。为有效监测界面温度变化且不影响定子振动模态,最终选择在定子齿隙附近布置 MCBM 薄膜温度传感器。该传感器的有效敏感区域尺寸为  $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,检测温度为  $-50\sim 250\text{ }^\circ\text{C}$ ,并且具有较好的动态性能。图3为所用的薄膜温度传感器以及它在超声电机中的安装位置。该薄膜传感器的电阻随着温度的升高而减小,在驱动采集电路上的惠斯通电桥调理放大后,通过温箱标定得到的电压  $U$  与温度  $T$  之间建立起非线性函数关系满足  $T=0.026U^3+0.12U^2+4.9U+17$ 。

将零部件同轴连接,并通过安装架固定在基座上,设计出图4所示的超声电机机械试验台。

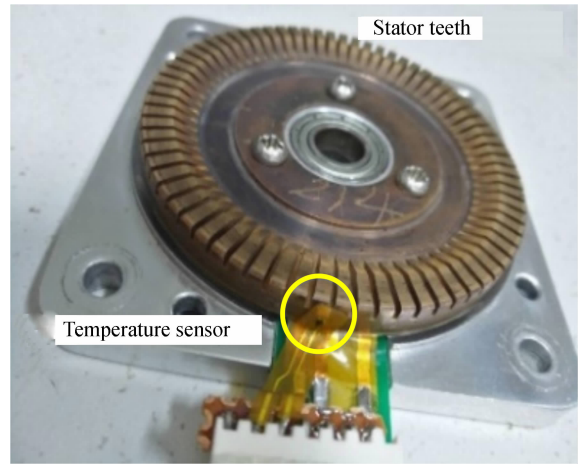


图3 薄膜温度传感器测量敏感界面温度

Fig. 3 Interface temperature detected by thin-film temperature sensor

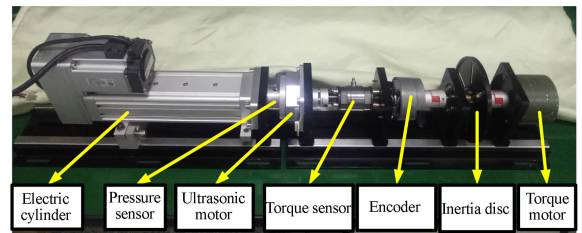


图4 超声电机测试用机械装置

Fig. 4 Mechanical apparatus for ultrasonic motor test

### 3.3 高频信号生成及采集

为了全面实现高频信号生成中参数设定、波形生成及采集解算等任务,设计了图5所示的电

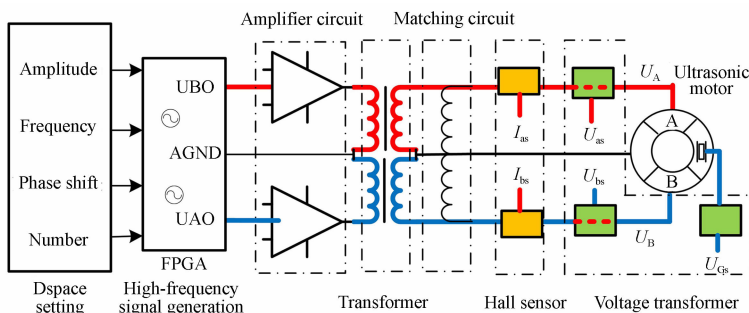
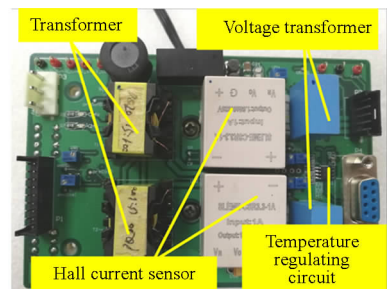


图5 高频信号生成与采集电路

Fig. 5 Driving and acquisition circuits of high-frequency signals



路方案。其中,功放电路、变压器、匹配电路、霍尔传感器、电压互感器以及温度调理电路构成驱动采集电路。系统方案的重点在于高速信号产生与高频信号采集。在高速信号产生部分,在 dSPACE 上配置幅值、频率、相位差、周期数等参数,经 CAN 传输后在 FPGA 板卡中生成相应的两相正弦波  $U_{A0}$  与  $U_{B0}$ ,最后经功放电路放大、变压器升压以及并联电感匹配生成超声电机激励信号  $U_A$  与  $U_B$ 。在高频信号检测部分,两相输入电压与孤极电压通过电压互感器进行检测,采用南京中霍公司的 PT107 电压互感器,其带宽为 80 kHz,测试得到的信号为  $U_{as}$ ,  $U_{bs}$  与  $U_{gs}$ ;两相输入电流则通过串联在回路中的霍尔传感模块实现检测,采用南京中霍公司的 SLEME-CSR3.3-1A 霍尔电流传感器,其带宽为 100 kHz,测试得到的信号为  $I_{as}$  与  $I_{bs}$ ,上述高频信号都通过 FPGA 板卡进行采集解算,采样频率设为 500 kHz。

在高频信号解算部分,采集到的电压、电流可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= U_{Am} \sin(2\pi ft), \\ \dot{U}_B &= U_{Bm} \sin(2\pi ft + \theta), \\ \dot{I}_A &= I_{Am} \sin(2\pi ft - \varphi_{ia}), \\ \dot{I}_B &= I_{Bm} \sin(2\pi ft + \theta - \varphi_{ib}), \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $U_{Am}$ ,  $U_{Bm}$  为两相电压信号幅值,  $I_{Am}$ ,  $I_{Bm}$  为两相电流信号幅值,  $f$  为激励频率,  $\theta$  为两相电压的相位差,  $\varphi_{ia}$  与  $\varphi_{ib}$  为 A 相与 B 相的阻抗角。在得到电压信号的幅值后,通过式(2)的计算并滤去式(2)后半部分的二次谐波得到 A 相陶瓷的输入功率。

$$\begin{aligned} 2P_A &= 2U_A I_A = \\ &U_{Am} I_{Am} \cos(\varphi_{ia}) - U_{Am} I_{Am} \cos(2\pi ft - \varphi_{ia}) \\ &= \hat{P}_A - U_{Am} I_{Am} \cos(2\pi ft - \varphi_{ia}). \end{aligned} \quad (2)$$

然后由输入功率可以得到的阻抗  $Z_A$ ,  $Z_B$ , 阻抗角  $\varphi_{ia}$ ,  $\varphi_{ib}$  的表达式为:

$$\begin{aligned} Z_A &= U_{Am} / I_{Am}, \\ Z_B &= U_{Bm} / I_{Bm}, \\ \varphi_{ia} &= \arccos(\hat{P}_A / U_{Am} I_{Am}), \\ \varphi_{ib} &= \arccos(\hat{P}_B / U_{Bm} I_{Bm}). \end{aligned} \quad (3)$$

上述解算工作在 FPGA 板卡中实现。根据

上述方案,对系统进行相关设计,设计后的超声电机测控系统性能参数如表 2 所示。

表 2 超声电机测试系统的性能参数

Tab. 2 Specifications of ultrasonic motor measurement system

项 目		性能参数
驱动信号	FPGA+驱动电路	幅值 0~300 V
		频率 40~47 kHz
		相位差 $-180^\circ \sim 180^\circ$
		输出电压周期 1 $\mu$ s
预压力设置	电动缸	0~500 N
角度检测	编码器	分辨率 0.75 $\mu$ rad
		发数周期 37 $\mu$ s
电压检测	电压互感器+采集电路	采样频率 500 kHz
		幅值 0~300 V
		精度 1 V
电流检测	霍尔传感器+采集电路	采样频率 500 kHz
		幅值 0~1 A
温度检测	薄膜热电阻+采集电路	精度 3 mA
轴向压力检测	压力传感器	-30~70 $^\circ$ C
		0~500 N

## 4 测控软件设计

针对传统实验装置电机特性测控内容不完备且测控效率较低的问题,设计了一套覆盖超声电机主要特性的标准化测控流程,进而依托 dSPACE 和 FPGA 平台形成交互性友好的人机界面,以全面提升系统测试与分析的效率。

### 4.1 软件功能定义及流程

按照 2.2 节,超声电机测控软件需要完成 8 项控制参数的灵活设置及调控和 13 项状态参数的高速采集与解算。从超声电机建模与控制研究的需求出发,待测曲线重点需要包括预压力-速度特性、启停换向特性、脉冲步进特性、驱动参数-速度特性、机械特性、阻抗特性与温升特性等 7 项主要内容。同时,测控软件应该具有快速存取数据并形成报告的能力。

图 6 所示为超声电机典型特性测试流程。执行该流程图时,针对特定的测试内容运行已编好的程序模块。在每一步的实现过程中,系统能够准确设置参数区间,灵活改变电机驱动参数与工

况参数,从而完成对超声电机的主要特性的测试及指标评估工作,并绘制相应的标准化特性曲线,由此可快速获知超声电机的各项特性指标,最终形成可供评估的完整报告。

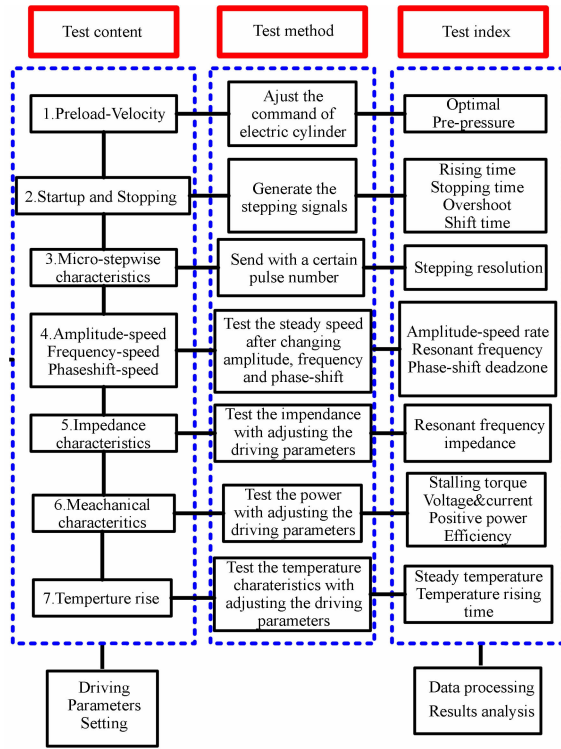


图 6 超声电机典型特性测试分析流程

Fig. 6 Testing and analyzing flowchart of typical characteristics for ultrasonic motor

在图 6 的步进运动特性测试环节中,能否实现全过程的精细测量是检验系统测试能力和水平的关键指标,也是本文测试系统有别于传统测试装置的主要特点。其核心问题在于系统对宏观、微观状态的同步获取和处理能力,即超声电机在步进运动的过程中速度、位置、温度、电压、电流与孤极信号能否有效地测量并在时间轴上精准对齐。为了实现高精度同步测试,在硬件设计的基础上,利用 dSPACE 数据采集特点与 FPGA 的高频特性,设计了图 7 所示的超声电机脉冲步进过程瞬态特性的测试流程。

步进运动瞬态特性的测试步骤如下:

- (1)在 dSPACE 上初始化驱动参数,并通过 CAN 通信传输给 FPGA 板卡;
- (2)dSPACE 在  $T_0$  时刻通过数字 IO 发出脉冲步进启动指令,FPGA 检测 IO 指令上升沿,生

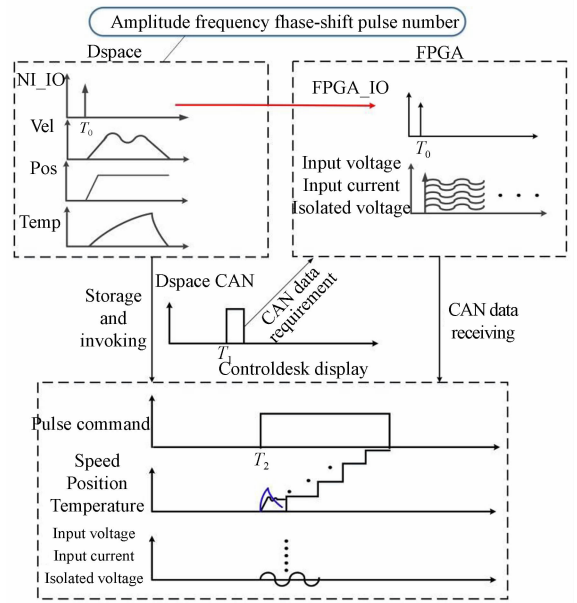


图 7 步进运动的瞬态特性测试过程

Fig. 7 Process of testing transient characteristics of stepping motion

成指定周期数的正弦信号,同时开始采集电机电学量,存储在 RAM 中;

(3)待电机完全停止后,dSPACE 于  $T_1$  时刻通过 CAN 向 FPGA 发送数据请求指令。FPGA 接收指令后,取出 RAM 中的数据并通过 CAN 发送给 dSPACE,Controldesk 界面在  $T_2$  时刻显示出电压、电流、孤极信号以及电机角度、速度与温度等信号。

### 4.2 测控界面设计

测试效率的快速提升既有赖于测试流程的标准化,也需要通过软件设计形成人机交互较好的测控界面,其功能包括:

- (1)开环条件下,对驱动参数、工况参数和控制指令参数进行设置;
- (2)闭环条件下,灵活配置速度环、位置环参数,实现硬件在回路控制器的仿真;
- (3)快速切换工作模式,实现高效自动测试;
- (4)任何条件下实时显示状态参数,并根据测试模式形成相应的特性曲线。

为实现上述功能,根据超声电机工作过程信号高低频共存的特点,在测控处理器(dSPACE)上利用 Controldesk 软件设计低频信号的测控界面,而在高频测控模块(FPGA)上则通过 Lab-view 软件设计相关高频信号的测控界面。

图 8 为 Controldesk 测控界面, 设置了指令参数、驱动参数、工况参数与速度位置环控制参数等输入控件。同时, 按照测控流程图分列了 7

个模式, 且在内部集成了相应的测试与数据采集程序, 所需的曲线在界面上方的窗格中集中显示。

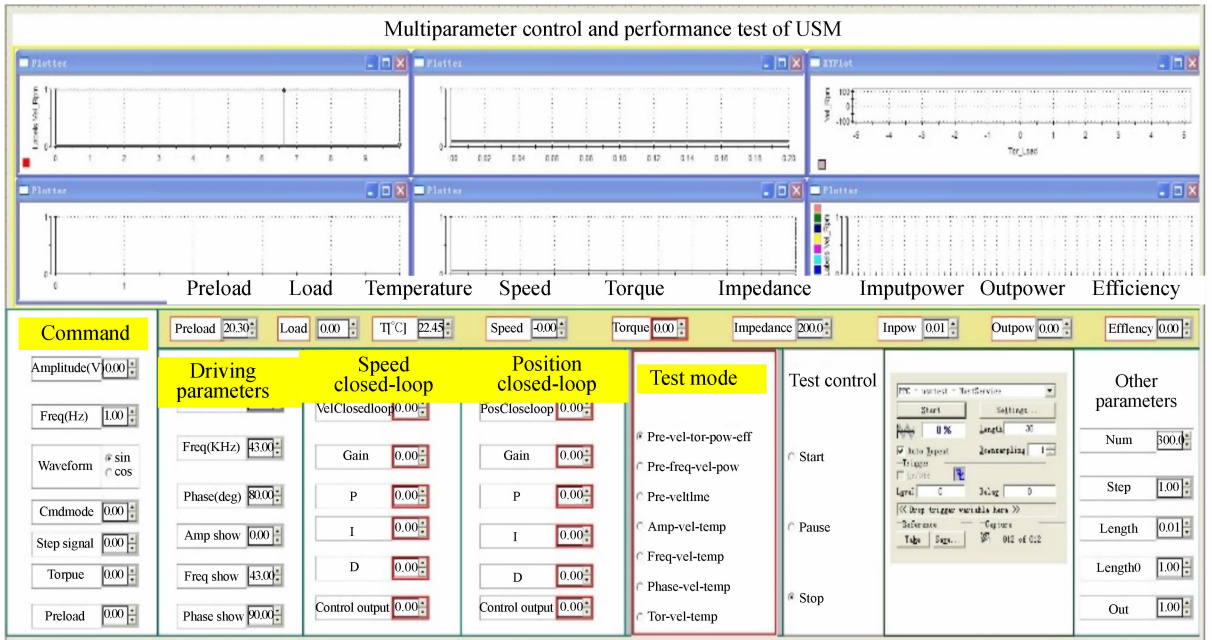


图 8 Controldesk 控制界面

Fig. 8 Control interface of Controldesk

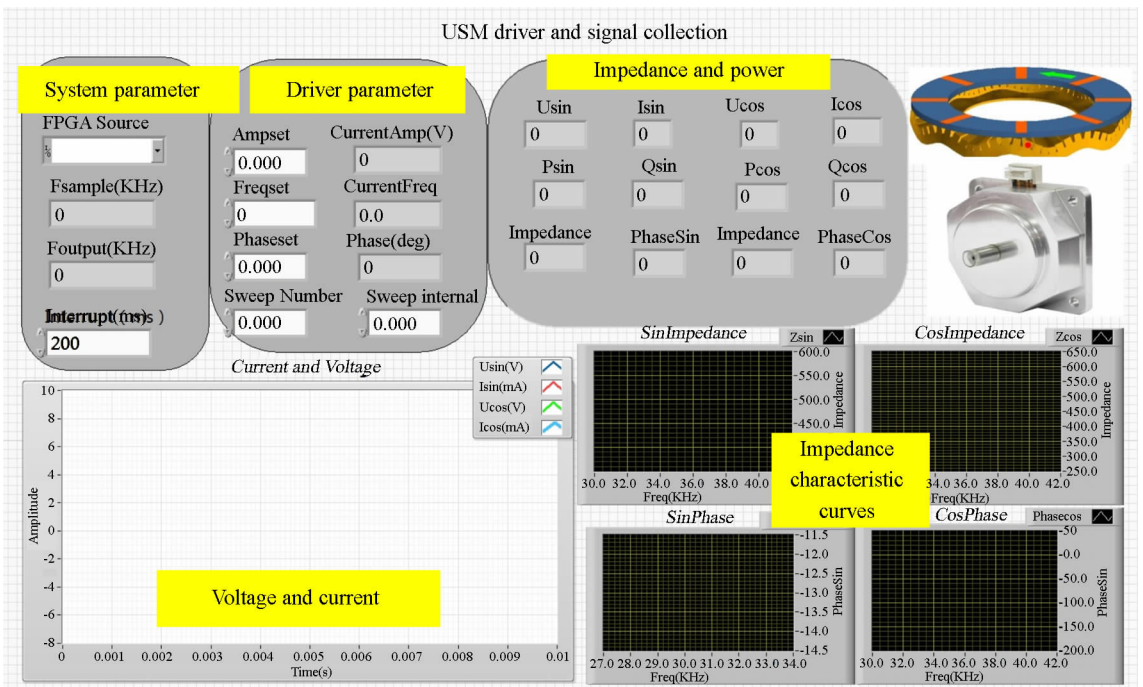


图 9 Labview 测控界面

Fig. 9 Control interface of Labview

而 Labview 界面主要配置高频信号处理所需的系统参数,用于产生两相高频正弦信号,并对电机的电流、电压与孤极信号进行高速采集和实时显示,同时将陶瓷输入端阻抗及有功功率信息进行呈现。

### 5 典型测试结果

在整合关键测控装置和软件系统后,按照机

械层、硬件层和软件层 3 个方面将整个测控系统的信号生成、传递、流通及显示过程如图 10 所示(彩图见期刊电子版)。图中蓝色细线代表低频信号,绿色粗线表示高频信号。可以看出,所构建的测控系统较好地覆盖了超声电机性能分析所需的主要参数,测控界面也实现了主要参数的设置、变化及曲线显示,展现出了高效的测试分析及控制能力。

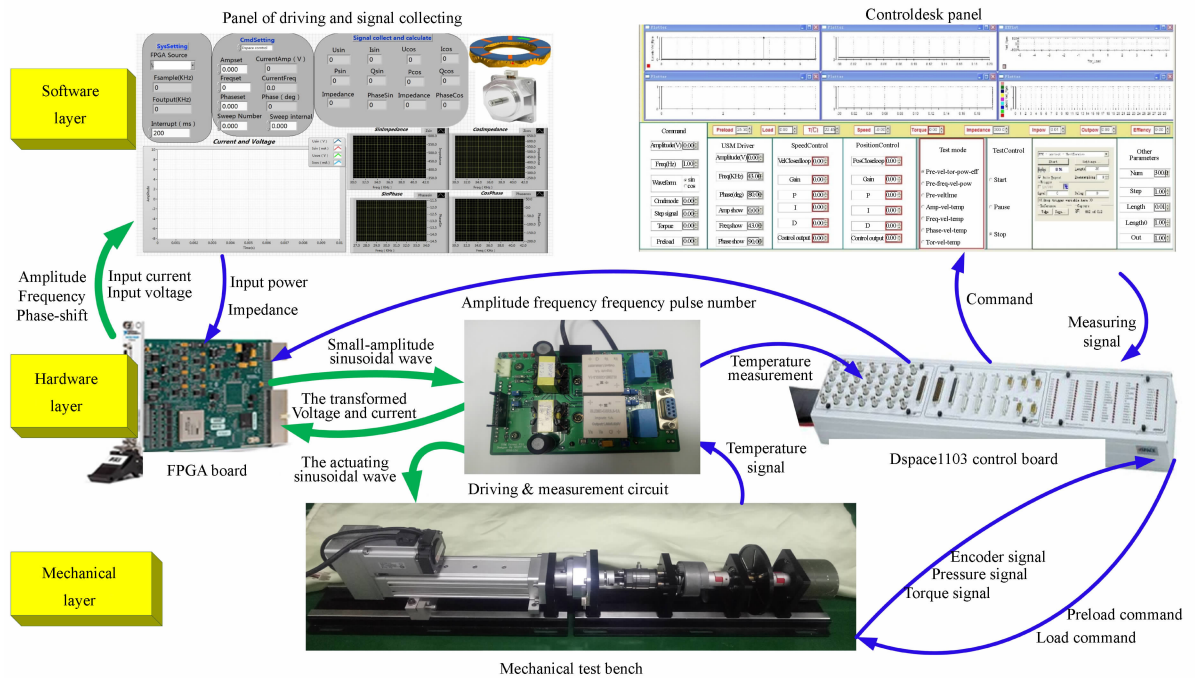
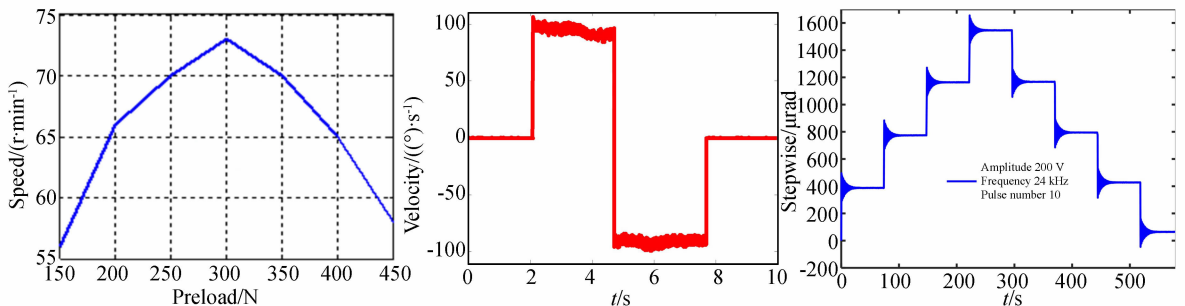


图 10 超声电机实验装置及其信号连接图

Fig. 10 Test system and signal flowchart of ultrasonic motor

为了全面验证测试装置与测控方法的有效性,选取 TRUM60 旋转型行波超声电机,依据图 6 的特性分析流程对各项内容进行了测试,所获

得的典型结果如图 11 所示。经过对比,本系统的测试效率相比商用驱动器搭建的传统测试装置提高了 30%,且测试的准确性明显提高。



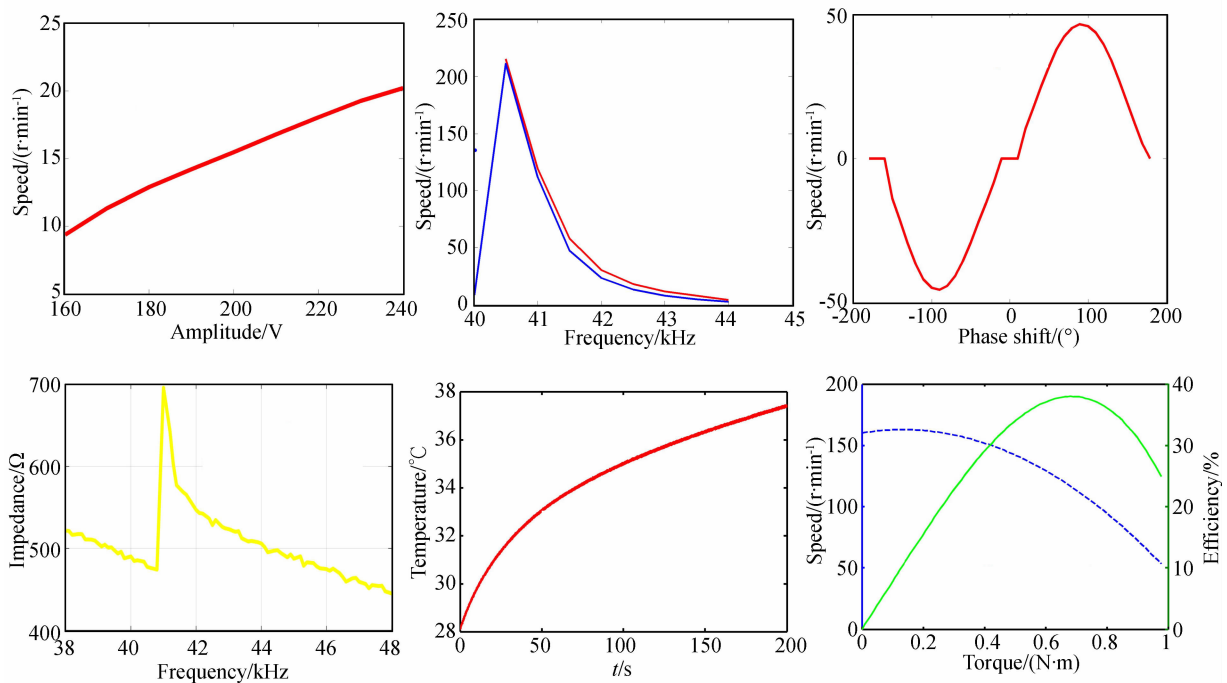


图 11 超声电机的典型特性曲线

Fig. 11 Curves of typical characteristics of ultrasonic motor

测试结果表明,该测控系统可较全面实现对包括预压力在内的 8 项控制参数的在线精确控制能够对电压电流等 13 项状态参数的实时高速检测,也能对电机脉冲步进运动过程的瞬态特性进行精确刻画,显著提高了超声电机的测试和性能评估效率。

## 6 结 论

超声电机的精细化建模分析与精密控制研究有赖于高精度高效率的实验手段。针对传统测控

装置难以解决的问题,本文设计了一套超声电机多参量高精度测控系统,并提出了超声电机的性能测试流程与步进运动同步采集流程。测试结果表明,该测控系统可全面实现对预压力等 8 项控制参数的在线精确调控和对电压电流等 13 项状态参数的高速检测,可对电机启停过程的瞬态特性进行精确刻画,实现了电机的多参数高精度调控,拥有较好的控制集成能力,为超声电机非线性动力学特性研究、整机模型辨识以及高精度速度与位置控制等提供了完整的测试和验证平台。

## 参考文献:

- [1] 肖奇军, 罗忠辉. 电磁悬浮静电驱动旋转微镜控制系统设计[J]. 光学精密工程, 2019, 27(9): 1935-1942.  
XIAO Q J, LUO ZH H. Control system for an electromagnetic suspension and electrostatically drive rotating micro mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(9): 1935-1942. (in Chinese)
- [2] 马天兵, 周青, 杜菲, 等. 基于机器视觉和改进 PID 的压电柔性机械臂振动控制[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1): 141-150.

- MA T B, ZHOU Q, DU F, *et al.*. Piezoelectric flexible manipulator vibration control based on machine vision and improved PID[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(1): 141-150. (in Chinese)
- [3] CHEN H P, CHEN C, WANG J S, *et al.*. Performance analysis and experimental study of traveling wave type rotary ultrasonic motor in high-rotation environment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(11): 115004.
- [4] 马广野. 高旋环境下超声电机性能演变分析及试验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.  
MA G Y. *Experimental Researches and Perform-*

- ance Analysis of Ultrasonic Motor under High-Speed Rotating Conditions [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [5] 郑伟, 彭晋民, 朱志宏. 应用于精密数控机床的超声电机[J]. 世界制造技术与装备市场, 2014(5): 91-94.  
ZHENG W, PENG J M, ZHU ZH H. Ultrasonic motor for precision NC machine tools [J]. *World Manufacturing Engineering & Market*, 2014(5): 91-94. (in Chinese)
- [6] 王帅, 苏刚. 基于超声波电机的三维微动平台的设计[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(11): 1-3.  
WANG SH, SU G. Design of three dimensional micro-displacement worktable based on the ultrasonic motor [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2012(11): 1-3. (in Chinese)
- [7] FLUECKIGER M, BULLO M, CHAPUIS D, *et al.*. fMRI compatible haptic interface actuated with traveling wave ultrasonic motor[C]. *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference*, 2005., 2-6 Oct. 2005, Kowloon, Hong Kong, China, 2005: 2075-2082.
- [8] CHAPUIS D, GASSERT R, BURDET E, *et al.*. Hybrid ultrasonic motor and electrorheological clutch system for MR-compatible haptic rendering [C]. *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 9-15 Oct. 2006, Beijing, China, 2006: 1553-1557.
- [9] ZENG J S, LUO W H, ZHAO C S. Nonlinear vibration of travelling wave ultrasonic motor stator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16 (12): 2384-2390.
- [10] 黄文文, 宋璐, 史敬灼. 基于差分进化算法的超声波电机 Hammerstein 非线性建模[J]. 微电机, 2019, 52(5): 6-10.  
HUANG W W, SONG L, SHI J ZH. Nonlinear Hammerstein model of ultrasonic motor based on differential evolution algorithm[J]. *Micromotors*, 2019, 52(5): 6-10. (in Chinese)
- [11] 郑伟, 黄伟彬, 周景亮, 等. 基于可编程逻辑控制器的超声电机测试系统设计[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 123-126, 130.  
ZHENG W, HUANG W B, ZHOU J L, *et al.*. Design of ultrasonic motor testing system based on programmable logic controller [J]. *Electric Ma-*  
*chines & Control Application*, 2018, 45(1): 123-126, 130. (in Chinese)
- [12] 周景亮, 陈超, 王均山, 等. 旋转型行波超声电机瞬态响应能力的试验研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(10): 1369-1373, 1380.  
ZHOU J L, CHEN CH, WANG J SH, *et al.*. Experimental study of transient response capability on traveling wave rotary ultrasonic motor[J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(10): 1369-1373, 1380. (in Chinese)
- [13] 潘松, 王海宁, 孙志峻, 等. 超声电机驱动和疲劳寿命集成测控系统[J]. 振动·测试与诊断, 2012, 32(6): 956-960, 1036.  
PAN S, WANG H N, SUN ZH J, *et al.*. Integrated control system for ultrasonic motor drive and fatigue life testing[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012, 32(6): 956-960, 1036. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 李锦棒. 基于数据驱动的行波超声电机剩余性能寿命预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
LI J B. *Prediction Research of Remaining Useful Performance Life of Travelling Wave Ultrasonic Motors Based on Data Driven Method* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 李晓牛, 周盛强, 姚志远. 超声电机温升特性测试系统设计[J]. 机械与电子, 2012, 30(10): 49-51.  
LI X N, ZHOU SH Q, YAO ZH Y. Design of USM temperature characteristic measuring system [J]. *Machinery & Electronics*, 2012, 30(10): 49-51. (in Chinese)
- [17] 郭咏, 朱华, 刘军, 等. 旋转行波超声电机最优预压力的研究[J]. 压电与声光, 2019, 41(4): 524-528.  
GUO Y, ZHU H, LIU J, *et al.*. Study on optimal pre-pressure of rotating traveling wave ultrasonic motor [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2019, 41(4): 524-528. (in Chinese)
- [18] LU X L, HU J H, ZHAO C S. Analyses of the temperature field of traveling-wave rotary ultrasonic motors[J]. *IEEE Transactions on Ultrason-*

*ics Ferroelectrics and Frequency Control*, 2011,

58(12): 2708-2719.

作者简介:



陈 宁(1990—),男,福建莆田人,博士研究生,2013年、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(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测控技术的研究。E-mail: fdp@nudt.edu.cn