

超声电机驱动的轻量化扫描机构高精度控制

薛久明,王世明,李永国

(上海海洋大学 工程学院,上海 201306)

摘要:为实现卫星高分载荷扫描驱动机构的轻量化,以超声电机为驱动部件,设计了一款扫描驱动机构,质量仅为传统的步进电机加谐波减速器驱动方案的15%。构建了扫描驱动机构驱动控制器,配合21位绝对式光电编码器作为位置反馈传感器,对扫描驱动机构高精度控制方法进行了研究。针对超声电机在精密控制中的非线性及时变性,在对比总结比例、积分、微分(PID)控制、模糊控制、神经网络PID控制算法的基础上,设计了一种基于专家规则的PID控制器,并结合超声电机实时温度作为前馈控制在线调节控制器控制参数,最后进行了指向控制和速度稳定度实验研究。实验结果表明:令扫描驱动机构指向 20° 时,稳态指向精度优于 $2''$,在 3.3 r/min 情况下扫描驱动机构速度稳定度优于 $\pm 1\%$,能够满足卫星载荷对扫描驱动机构高精高稳的控制需求。

关键词:超声电机;扫描驱动机构;驱动控制器;指向精度;速度稳定度

中图分类号:TM359.9

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.018

High Precision Control Method of Lightweight Spatial Scanning Drive Mechanism Based on Ultrasonic Motor

XUE Jiuming, WANG Shiming, LI Yongguo

(College of Engineering, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to realize the lightweight of the spatial scanning drive mechanism in the high-resolution satellite payload, a scanning drive mechanism is designed with the ultrasonic motor as the driving component. The weight is only 15% of the conventional drive scheme combining the step motor with the harmonic reducer. A drive control system of the scanning drive mechanism is built. The equipment is used to test the high precision pointing control method of the scanning drive mechanism with the help of the 21-bit absolute photoelectric encoder as the position feedback sensor. By comparing the efficiency of PID control, fuzzy control and neural network PID control algorithm, the ultrasonic motor temperature detection is taken as the forward feedback control on-line regulation control parameter considering the nonlinearity and time-variation of ultrasonic motor and hence a novel expert rule PID controller is proposed. The experimental results show that when the scanning drive mechanism is pointing at 20° , the steady-state pointing accuracy is better than $2''$, and the speed stability of the scanning drive mechanism is better than $\pm 1\%$ at 3.3 r/min , which meet the requirement of satellite payload for high precision and high stability control of the scanning drive system mechanism.

Key words: ultrasonic motor; scanning drive mechanism; drive control system; pointing accuracy; speed stability

0 引言

随着国民经济、军事等领域应用需求的发展,以微波载荷为代表的航天器载荷对卫星上扫描驱动机构的质量、指向精度和速度稳定度等性能指标提出了更高的要求。国内外学者对高精度、快响应扫描驱动机构及其伺服技术作了一定的研究。文献[1]以直流无刷电机作为驱动,以感应同步器为位置反

馈元件研制了一款扫描驱动装置,扫描角度为 $\pm 10^\circ$,指向精度优于 $10''$,质量为 23 kg 。文献[2]以直流无刷电机加三相步进电机作为驱动,配合21位的旋转变压器为ADEOS-II卫星载荷研制了一款扫描驱动装置,扫描角度为 $\pm 10^\circ$,扫描速度稳定度达到 $\pm 0.015\text{ (}^\circ\text{)/s}$,扫描线性度为 $\pm 0.003^\circ$,指向精度达到 $\pm 0.08^\circ$,质量为 42.5 kg 。文献[3]为SPOT-5

收稿日期:2017-09-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51505294);上海市2014年优秀技术带头人计划资助项目(14XD1424300)

作者简介:薛久明(1993-),女,江苏南通人,硕士生,主要从事精密机构驱动与控制方面的研究。王世明(1964-),男,山西忻州人,教授,博士生导师,主要从事海洋工程装备设计制造及智能控制的研究。

卫星载荷研制了一款扫描驱动机构,其以步进电机驱动,配合 21 位光电编码器采集角位移信息进行闭环控制,整个机构质量为 25 kg^[1-3]。但是,传统的步进电机加谐波减速器的驱动方案不仅在质量上难以满足指标要求,而且由于谐波减速器的齿轮间存在间隙及其在啮合时会产生瞬时冲击,对扫描驱动机构运行速度形成扰动,致使其指向精度与速度稳定度均无法适应新一代高分卫星载荷用扫描驱动机构的发展需求。

超声电机是 20 世纪 80 年代末发展起来的一种新型驱动器,通过给压电材料施加两相相位相差 90°的正弦波,利用压电材料的逆压电效应,使定子产生微米级超声振动,再通过定子和转子之间的摩擦作用,转换成转子的宏观运动。超声电机具有低转速、可直接驱动,响应快,位置分辨率高,质量小,不受电磁场干扰及断电自锁等特点,近年来已逐步成为精密驱动领域的理想驱动器^[4]。

采用超声电机作为驱动器,利用超声电机可直接驱动及断电自锁的特性,可以省去减速、传动、自锁装置,简化了扫描驱动机构的设计,能使整个扫描机构更加简单紧凑,实现轻量化;同时超声电机具有转速低、位置分辨率高、不受电磁场干扰等特点,是轻量化、低转速、高精度的扫描驱动机构的理想驱动器。但由于超声电机是材料学、力学、电子、控制等多个学科交叉的产物,且其基于摩擦驱动原理,故超声电机存在强烈的非线性特性^[5-6],目前仍缺乏有效手段来建立超声电机控制模型。此外,超声电机利用压电材料的逆压电效应来激励定子的振动,由于压电材料的性能会随着外界温度变化而变化,故超声电机在运行过程中会表现出时变性特性。因此需研究一种在线计算量小且具有较高控制性能的控制策略来克服超声电机的非线性及时变性特性^[7-8]。

本文基于超声电机设计了一种轻量化的扫描驱动机构,简要地介绍了其各个主要部件选型依据及其主要参数;其次,为了测试所设计的扫描驱动机构指向控制精度指标,构建了扫描驱动机构驱动控制系统;最后开展了扫描驱动机构指向控制实验研究。在对比总结现有的超声电机控制方法的基础上对超声电机高精度控制方法进行了深入研究,将超声电机温度检测作为前馈控制来在线调节控制参数,设计了一种基于专家规则的比例、积分、微分(PID)控制器,获得了良好的控制效果。

1 基于超声电机的扫描驱动机构

本文设计的基于超声电机的扫描驱动机构及驱动控制系统实物图如图 1 所示。

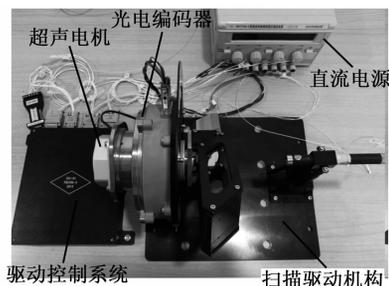


图 1 扫描驱动机构及驱动控制系统的实物图

1.1 扫描驱动机构设计

扫描驱动机构的内部结构如图 2 所示,主要由超声电机、闭环控制测角单元、温度传感器、轴系及壳体等零部件组成。图中超声电机不经过减速器直接驱动,减小了传动误差;闭环控制测角单元安装在扫描驱动机构的前端盖上;温度传感器用于测量超声电机、测角单元的表面温度;电机轴采用 D 型键设计,并通过紧定螺钉安装轴套,轴系装配采用轴孔配合方式,可通过对轴套适度修配以保证电机轴线与主轴的同轴度,且能够保证电机轴向具有一定的自由度。

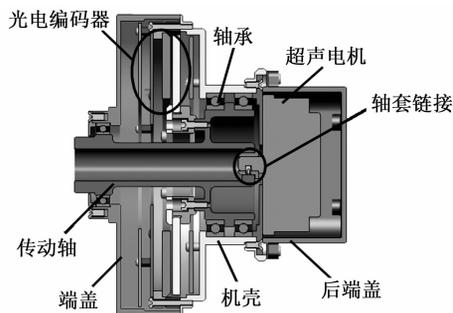


图 2 扫描驱动机构内部结构示意图

负载的转动惯量为 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,轴系转动惯量小于 $0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,轴系摩擦阻力矩为 $0.05 \sim 0.20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。综合考虑机构静力矩裕度和动力矩裕度,选取 TRUM-60 型旋转行波超声电机作为驱动器。该电机额定力矩为 $0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$,自锁力矩大于 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$,启动响应时间小于 3 ms ,停止响应时间小于 1 ms ,质量小于 0.25 kg 。为实现角秒级定位,采用长春光机所定制的 21 位绝对式光电编码器作为闭环控制用测量单元,波特率 $115\,200 \text{ bit/s}$,通讯接口为 RS422,质量为 0.75 kg 。温度传感器选用高精度 MF501 热敏电阻。此外,为减小轴向高度,选用

固体润滑深沟球轴承。整个扫描驱动机构的质量为 2.35 kg,是步进加谐波减速器方案质量的 15%。

1.2 驱动控制系统

为了测试扫描驱动机构的指向精度及速度稳定性,设计了扫描驱动机构驱动控制系统^[9-11],其系统框图如图 3 所示。

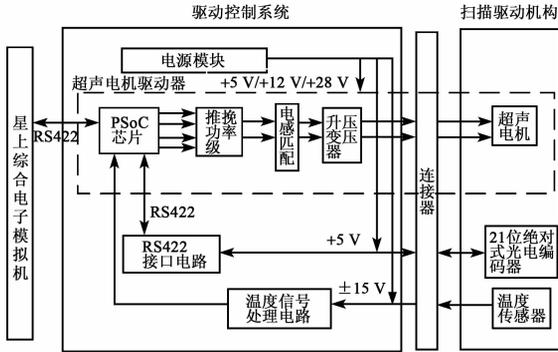


图 3 驱动控制系统框图

驱动控制系统主要包括电源模块、超声电机驱动器、RS422 接口电路及温度信号处理模块等。超声电机的驱动电路由信号发生电路、推挽功率放大电路、匹配电路及升压变压器组成。信号发生电路以 Cypress 公司生产的 CY8C5868AXI-LP035 芯片为核心,通过芯片的脉宽调制(PWM)模块产生两相相差 90°、相内相位差 180°的四路方波信号。星上综合电子模拟机通过串口 RS422 向 PSoc 发出控制命令,PSoc 芯片产生的四路方波信号通过推挽功率放大电路、电感匹配电路及升压变压器进行放大、升压和匹配,产生两相相差 90°的高频正弦激励信号,实现对超声电机的驱动控制。同时,长光所 21 位绝对式光电编码器反馈超声电机转角角度信号、经串口 RS422 上传到 PSoc,实现对超声电机闭环控制。为防止超声电机长时间工作后,其谐振频率随环境温度变化发生漂移,需要监测电机工作时的温度。超声电机的温度由温度传感器进行检测,检测输出的信号经温度信号处理电路反馈到 PSoc 控制器,控制器通过通信接口将数据传给模拟机。

2 超声电机控制算法

2.1 比例、积分、微分(PID)控制

PID 控制算法是一种应用较广泛的工程控制方法,其具有原理简单,易实现和适用面广等特点,并能提供较宽的稳定裕度和较高的稳定性,其原理如下:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) =$$

$$K_P[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (1)$$

式中: $u(k)$ 、 $u(k-1)$ 分别为 k 、 $k-1$ 时刻的控制量; $\Delta u(k)$ 为 k 时刻的控制增量; K_P 、 K_I 、 K_D 为 PID 算法 3 个参数; $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 分别为 k 、 $k-1$ 、 $k-2$ 时刻的误差。因此,式(1)又被称为增量式 PID 算法。

2.2 模糊控制

超声电机位置伺服模糊控制原理如图 4 所示,其核心是以直线超声电机位置误差及电机速度作为输入的二维模糊逻辑控制器(FLC),FLC 输出即为电机运行控制量。FLC 主要可分为参量模糊化、模糊推理、解模糊化 3 步骤。

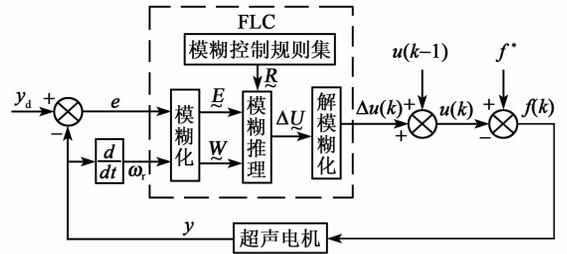


图 4 超声电机模糊逻辑控制系统

2.3 神经网络 PID 控制

对于 K_P 、 K_I 、 K_D 参数可调的变增益 PID 控制可写为

$$u(k) = \vartheta(u(k-1), K_P, K_I, K_D, e(k), e(k-1), e(k-2)) \quad (2)$$

式中: $\vartheta(\cdot)$ 是与 $u(k-1)$ 、 K_P 、 K_I 、 K_D 、 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 有关的非线性函数。神经网络 PID 控制就是采用 BP 网络对 $\vartheta(\cdot)$ 进行逼近。

图 5 是超声电机的神经网络 PID 控制器原理,其主要包含 PID 控制器和 BP 神经网络两部分。其中,PID 控制器输出直接控制超声电机运行,BP 神经网络会依据系统当前的运行状态在线调整 PID 控制参数以使系统达到期望的性能。

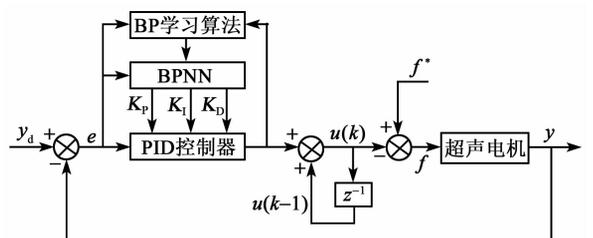


图 5 超声电机的神经网络 PID 控制系统

2.4 试验研究及分析

利用上述的控制方法,通过驱动控制系统对扫描驱动机构进行指向精度测试实验,稳态误差结果如图6~8所示。

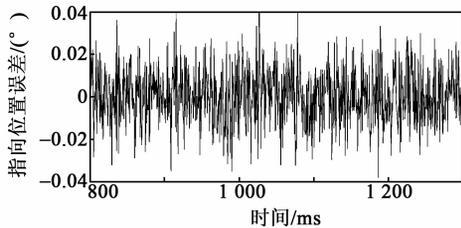


图6 PID控制实验结果

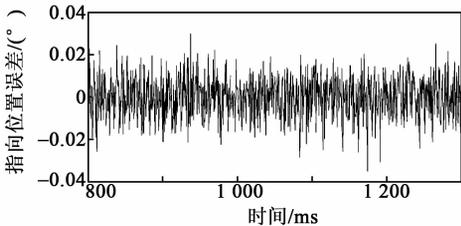


图7 模糊控制实验结果

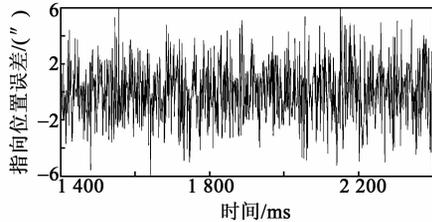


图8 神经网络PID控制实验结果

由图6~8可知,PID控制方法有明显的超调,且在指向目标位置附近反复振荡,稳态精度为 0.04° ;模糊控制相比PID控制稳态精度略有减小,但响应时间并未提高;神经网络PID大幅减小了超调量,稳态精度为 $6''$,系统动态响应特性有了大幅提升,但神经网络PID算法复杂,在线计算量大,增加了系统响应时间,因此,需要对超声电机控制方法作深入研究,以克服其强烈非线性及时变性。

3 扫描驱动机构高精度控制方法及实验

3.1 基于专家规则的PID控制

针对超声电机在控制中的非线性,在固定参数PID控制器的基础上,设计了一种基于专家规则的PID速度控制器,控制器规则如下:

规则1:若 $e(k)\Delta e(k) < 0$,则按照下式计算超声电机控制量:

$$u(k) = u(k-1) + K_P[1 - a(1 - |\Delta e(k)|/b)] \times [e(k) - e(k-1)] + K_I[1 + a(1 - |\Delta e(k)|/b)]e(k) \quad (3)$$

式中: a 为增量系数,用来调节 K_P, K_I 的变化量; b 为期望的转速误差变化量

规则2:若 $e(k)\Delta e(k) > 0$ 或 $e(k) \neq 0$ 且 $\Delta e(k) = 0$ 时,则按照下式计算控制量:

$$u(k) = u(k-1) + \{K_P[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k)\}(1 + |\Delta e(k)|/b) \quad (4)$$

考虑到超声电机在运行过程中的时变性特性,固定的一组控制参数无法总是获得最佳控制效果,因此,提出将超声电机温度检测作为前馈控制在在线调节控制参数来克服超声电机时变性,具体如下:

If $T = T_0$; then $S = (K_{P0}, K_{I0}, K_{D0}, a_0, b_0)^T$

If $T = T_1$; then $S = (K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}, a_1, b_1)^T$

...

If $T = T_{39}$; then $S = (K_{P39}, K_{I39}, K_{D39}, a_{39}, b_{39})^T$

式中: S 为所设计的控制器的控制参数; T 为超声电机实时温度; T_0, T_1, T_{39} 为预设的温度点。考虑到试验环境及超声电机运行过程中温升,此处将温度范围预设为 $15 \sim 55^\circ\text{C}$ ^[12-14],每 1°C 预设置一组专家控制器的控制参数,共设置40组控制参数。

3.2 实验结果及讨论

为验证所设计的专家控制器控制效果,对扫描驱动机构进行指向精度测试实验。指向角度设为 20° ,控制周期设为 2ms ,指向控制位置误差结果如图9所示。

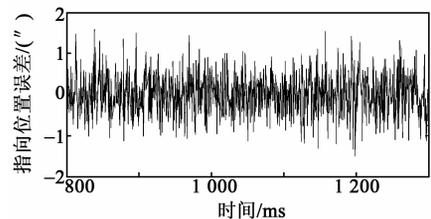


图9 稳态指向精度测试结果

由图9可知,扫描驱动机构指向控制系统稳态位置误差小于 $2''$,基于专家规则的PID控制器充分利用了超声电机的高位置分辨率特性,实现了高精度的位置指向控制。基于专家规则的PID控制器与神经网络PID控制结果量级一致,但其计算量大幅减小,缩短了扫描机构指向的响应时间,这对实现扫描机构精准指向、快速稳定具有重要的意义。

由于超声电机是摩擦驱动,在长时间工作时超声电机温度会逐步升高,并最终达到热平衡状态。超声电机温度升高后,其共振频率将发生漂移,进而影响其控制特性。为进一步验证所设计的控制器性能,在扫描驱动机构典型工作转速 3.3r/min 长时

间运行的情况下,对扫描驱动机构的速度稳定度进行了测试,实验场地为上海卫星工程研究所空间热一体化技术实验室,环境温度 $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。扫描驱动机构运行约 70 min 后超声电机温度上升至约 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$,整个运行过程中扫描机构速度稳定度实验结果如图 10 所示。

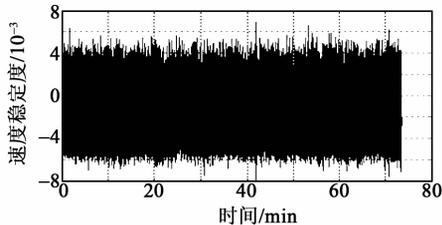


图 10 速度稳定度测试结果

由图 10 可知,虽然超声电机在长时间运行后温度由 $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升至 $49\text{ }^{\circ}\text{C}$,其控制特性已发生变化,但由于所设计的基于专家规则的控制器具有多组控制参数,能够克服超声电机控制模型的时变特性,扫描驱动机构的转速稳定度优于 $\pm 1\%$ 。

4 结束语

轻量化、高指向精度、高速度稳定度的扫描驱动机构是未来航天高精驱动技术领域的重点发展方向,在航天器领域中有广泛的应用前景。本文基于超声电机设计了一台扫描驱动机构,质量仅为传统步进电机加谐波减速器方案质量的 15%。为测试扫描驱动机构的性能指标,构建了扫描驱动机构驱动控制系统。配合长光所 21 位绝对式光电编码器作为位置反馈对扫描驱动机构高精度指向控制进行了研究。针对超声电机在精密控制中的非线性及时变性特性,在对比总结 PID 控制、模糊控制、神经网络 PID 控制的基础上,结合超声电机温度检测作为前馈控制在线调节控制参数,设计了一种基于专家规则 PID 控制器。指向控制实验结果表明:令扫描驱动机构指向 20° 时,稳态指向精度优于 $2''$,在 3.3 r/min 的情况下扫描驱动机构速度稳定度优于 $\pm 1\%$ 。

参考文献:

- [1] ROBICHAUD J, AKERSTROM A, FREY S, et al. Reaction bonded silicon carbide gimbaled pointing mirror[C]//S. l.: SPIE, 2007.
- [2] MOOG Schaeffer Magnetics Division. Spacecraft mechanisms product catalog [C]//S. l.: MOOG Schaeffer Magnetics Division, 2005:74-75.
- [3] HERMIER J P. SPOT'S pointing mechanisms experience feedback [C]//Toulouse: 8th Europe Space Mechanisms and Tribology Symposium, 1999.
- [4] 赵淳生. 超声电机技术与应用[J]. 压电与声光, 2009, 31(1):148-148.
ZHAO Chunsheng. Theory and applications of ultrasonic motors [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(1):148-148.
- [5] 曾劲松, 姚志远, 赵淳生. 超声电机中的非线性现象研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(10):1047-1051.
ZENG Jinsong, YAO Zhiyuan, ZHAO Chunsheng. Research on non-linear phenomena in ultrasonic motor [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(10):1047-1051.
- [6] 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.
- [7] 张斌, 李洪文, 郭立红, 等. 变结构 PID 在大型望远镜速度控制中的应用[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7):1613-1619.
ZHANG Bin, LI Hongwen, GUO Lihong, et al. Application of variable structure PID in velocity control for large telescope[J]. Opt Precision Eng, 2010, 18(7):1613-1619.
- [8] GIRAUD F, SEMAIL B, ARAGONES J, et al. Precise position control of a travelling wave ultrasonic motor[C]//Hong Kong: Proceeding of the 40th IAS Annual Meeting, 2015:1548-1554.
- [9] 刘汉清, 王寅, 黄卫清. 双驱动足压电平台驱动电源设计[J]. 压电与声光, 2016, 38(2):262-266.
LIU Hanqing, WANG Yin, HUANG Weiqing. Design of the power supply of piezoelectric platform with two drive foot [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2016, 38(2):262-266.
- [10] 孙继友. 一种高稳定度扫描驱动控制系统的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [11] 李华峰, 冒俊, 赵淳生. 基于 PSoC 的超声电机快速反应装置驱动控制器[J]. 压电与声光, 2009, 31(2):218-220.
LI Huafeng, MAO Jun, ZHAO Chunsheng. A PSoC-based controller for a quick response unit composed of ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2009, 31(2):218-220.
- [12] 田咪, 何志平, 陈凯, 等. 基于超声电机的轻型指向机构及其指向误差分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7):2200-2205.
TIAN Mi, HE Zhiping, CHEN Kai, et al. Lightweight pointing mechanism and its pointing error analysis based on ultrasonic motor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(7):2200-2205.
- [13] ZHENG W, ZHAO C S. Test of mechanical characteristics of ultrasonic motor under high temperature condition[J]. Opt Precision Eng, 2008, 16(12):2313-2319.
- [14] LI S, OU W, YANG M, et al. Temperature evaluation of traveling-wave ultrasonic motor considering interaction between temperature rise and motor parameters[J]. Ultrasonics, 2015, 57:159.