

# 基于相关性相位提取的超声电机频率控制技术

安国庆,安孟宇,杨少锐,刘庆瑞,李 争

(河北科技大学电气工程学院,河北石家庄 050018)

**摘 要:**为了解决温度和负载的变化容易引起超声电机转速波动,以及基于转速反馈的闭环控制因转速传感器安装体积和成本在某些特种场合应用受限的问题,提出一种基于相位差信息反馈的频率闭环控制方法:首先,根据电机各类相位差对温度和负载变化的敏感程度,优化选择了相位差反馈量的类型;其次,针对系统机械噪声以及驱动器谐波对相位差计算结果的影响,利用改进的相关性相位提取方法准确提取驱动电压和孤极电压的基频相位差信息;最后,分别就超声电机运行过程中温度和负载变化的情况,给出了相应的频率闭环控制方案。实验结果表明,所提出的方法能有效降低温度以及负载变化导致的转速波动,可提升电机所在系统的转速稳定性。由于其只需采样两路电压信号,故易于工程实现。

**关键词:**电机学;超声电机;相位差;闭环控制;相关性分析

**中图分类号:**TM359.9      **文献标志码:**A

## Frequency control technology for ultrasonic motor based on correlation phase extraction method

AN Guoqing, AN Mengyu, YANG Shaorui, LIU Qingrui, LI Zheng

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

**Abstract:** In order to solve the problems that the speed of ultrasonic motor is usually affected by the changes of temperature and load, and that due to installation volume and cost of the speed sensor, the closed-loop control based on speed feedback is often limited in some special applications, a frequency closed-loop control method based on phase difference feedback is introduced. Firstly, the type of phase difference feedback quantity is optimally selected according to the sensitivity of different motor phase differences to the temperature and load change; secondly, aiming to the interference of mechanical and harmonic noises on phase difference calculating result, the correlation phase extraction method is proposed to improve the accuracy of phase difference between driving voltage and monitor electrode voltage; lastly, the corresponding frequency closed-loop control scheme is given according to the changes of temperature and load change, respectively. Experiment results indicate that this method can reduce the speed fluctuations caused by the changes of temperature and load, and improve the speed stability of motor system. Because only two voltage signals are needed to be recorded, this method is easy for implementation.

收稿日期:2018-11-25;修回日期:2019-03-12;责任编辑:李 穆

基金项目:国家自然科学基金(51877070);中国博士后科学基金(2017M623404);河北省自然科学基金(E2017208086);河北省高等学校科学技术研究青年基金(QN2017329)

第一作者简介:安国庆(1982—),男,河北石家庄人,副教授,博士,主要从事电机故障诊断方面的研究。

通信作者:刘庆瑞副教授。E-mail:lqr\_2013@163.com

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):159-166.

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): 159-166.

**Keywords:** electric machinery; ultrasonic motor; phase difference; closed-loop control; correlation analysis

超声电机具备低速高转矩、快速响应、无电磁噪声、断电自锁等优良特性<sup>[1-2]</sup>,在医疗设备、光学仪器、机器人驱动,航空航天以及新型军事装备等领域应用广泛<sup>[3-6]</sup>。当电机温度发生变化时,其谐振频率将会发生偏移<sup>[7]</sup>。当驱动频率不能很好地跟踪谐振频率变化时,会导致其转速下降,效率降低<sup>[8]</sup>。此外,超声电机的机械特性相对偏软,当转轴上的负载变化时,其转速会产生较大波动,大大降低了电机所在系统的可靠性<sup>[9]</sup>。基于转速监测的闭环反馈控制可以较好地补偿转速的变化,但转速传感器一方面增加了超声电机所在系统的体积,另一方面使高精度的编码器增加了系统成本<sup>[10]</sup>。近年来,基于非转速反馈的超声电机频率闭环控制技术成为了许多学者研究的热点,其中基于孤极电压反馈法和基于驱动电压驱动电流锁相法逐渐成为了频率跟踪控制的主流<sup>[11-13]</sup>。文献[14]提出了基于孤极反馈的跟踪方法,推导出了行波型超声电机定子上孤极传感器反馈电压与其转速之间的关系,并利用这一关系控制了电机的转速。文献[15]提出了基于驱动电压反馈的频率跟踪技术,使驱动电压恒定让电机运行趋于稳定,但是单纯以孤极电压或驱动电压作为反馈信号很难同时满足效率、转矩等指标要求。文献[16]提出基于驱动电压和驱动电流相位差反馈的方法实现频率跟踪控制,设计了超声电机相位差负反馈闭环控制器,改善了温度等外界因素变化对电机运行转速波动的影响,但由于超声电机的信号频率较高,电流信号相对于电压信号不易测取而导致反馈误差容易偏大。文献[17]提及驱动电压和孤极电压相位差与定子阻抗特性的变化具有一致性,且被监测信号同为电压信号,测取方法简单易于工程实现,具有较大的研究空间。

本文针对超声电机多应用于特种场合的实际情况,为避开编码器给超声电机控制系统带来的安装体积和成本问题,拟选用相位差信息作为反馈量进行频率闭环控制。根据电机温度及负载变化时电机不同相位差信息的变化规律,优化选择反馈量,并提出一种能够准确提取基频相位差信息的方法,以实时调节驱动频率,补偿电机温度及负载变化对电机转速带来的不良影响。

注:孤极电压为陶瓷晶体利用压电效应产生的电压信号。

## 1 相位差反馈量的优化选择

### 1.1 温度变化时相位差反馈量的对比

超声电机定子的等效电路如图 1 所示<sup>[18-19]</sup>。

$C_d$  为电机夹持电容,  $C_m$  为动态电容,其值与定子的刚度成反比;  $R_m$  为动态电阻,代表机械阻尼;  $L_m$  为动态电感,与机械质量成正比。

等效电路中,  $R_m-L_m-C_m$  串联支路电流为

$$i_m = \frac{U}{R_m + j\omega L_m - j\left(\frac{1}{\omega C_m}\right)} = \frac{U}{|Z_m|} < \phi, \quad (1)$$

$$\tan \phi = -\frac{\omega L_m - 1/(\omega C_m)}{R_m}, \quad (2)$$

式中  $\omega$  为电机驱动信号角频率。

电机温度的变化会导致动态电容值  $C_m$  发生变化。由式(2)分析可知,定子阻抗的相频特性曲线将会出现平移现象,如图 2 所示<sup>[20]</sup>。

图 2 中  $T_0$  和  $T_1$  分别表示不同时刻的温度;  $Q_0, Q_1$  和  $Q_2$  分别表示不同温度以及不同状态下对应的频率相位值。电机温度为  $T_0$  时,电机在初始驱动频率  $f_0$  下所对应的相位为  $Q_0$ ,当电机温度上升为  $T_1$  后,如果仍以初始频率驱动,则电机的相位就会下降为  $Q_1$ ,这时电机的运行状态就会发生改变,共振频率发生偏移。

电机共振频率的偏移会进而导致电机转速-频率特性随之发生变化,如图 3 所示。

图 3 中  $P_0$  和  $P_1$  分别表示电机温度上升前和上升后所对应的频率转速值。当温度升高后,转速-频率

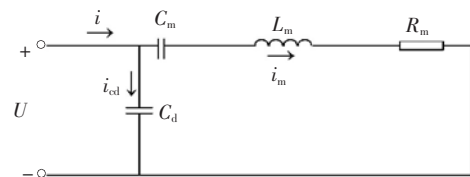


图 1 超声电机定子的等效电路

Fig.1 Equivalent rircuit of the ultrasonic motor stator

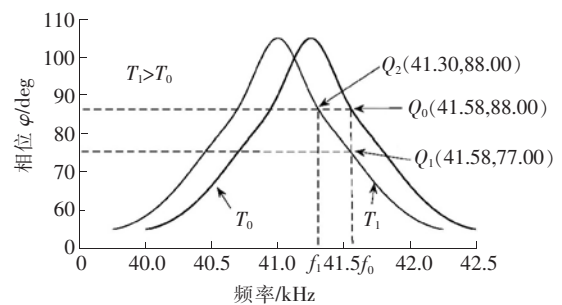


图 2 定子阻抗的相频特性曲线

Fig.2 Phase-frequency characteristic of stator impedance

曲线向左偏移,若仍以  $f_0$  对电机驱动,其转速将出现  $\Delta n$  的速降。

为探究电机相位差随温度的变化规律,将型号为 TWUSM-60 的超声电机放置在恒温箱内,在电机工作允许温度范围内 ( $-15 \sim 45 \text{ }^\circ\text{C}$ ),观察驱动电压和驱动电流相位差以及驱动电压和孤极电压相位差随温度的变化情况,如图 4 所示。

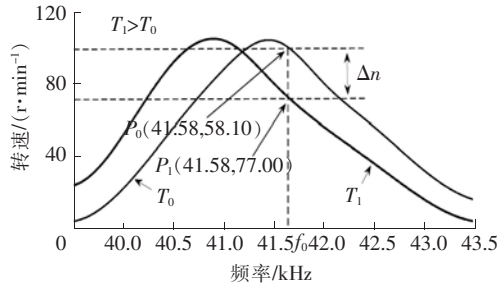


图 3 转速-频率特性与温升的变化关系

Fig.3 Relation between rotating speed and frequency characteristics at different temperatures

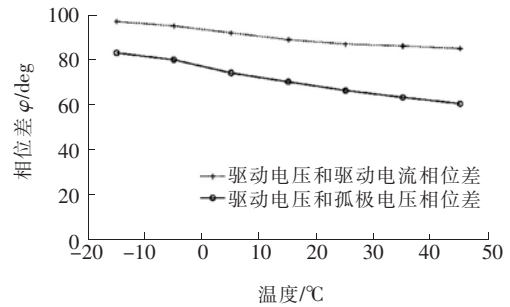


图 4 相位差随温度变化关系

Fig.4 Relation between phase difference and temperature

由图 4 可知,两类相位差随温度升高均呈下降趋势,但仔细对比不难发现,驱动电压和孤极电压的相位差对温度的变化更为敏感,因此可将该相位差作为反馈量实现闭环控制,以补偿电机温度变化对转速带来的不良影响。

### 1.2 负载变化时相位差反馈量的对比

型号为 TWUSM-60 的行波型超声电机测得的机械特性如图 5 所示。

超声电机厂家一般推荐按最大转矩为 1.5 倍实际负载转矩的原则进行电机选型。由图 5 可知,电机在实际负载 ( $2/3 T_{\max}$ ) 处的转速变化率为 38%。可见超声电机的机械特性较软,且呈非线性变化,转速易受负载波动的影响,使得超声电机所在系统的可靠性大大降低。

为探究电机相位信息随负载的变化规律,开环状态下,在最大转矩范围内改变负载,观察驱动电压和驱动电流的相位差以及驱动电压和孤极电压的相位差随负载变化趋势,如图 6 所示。

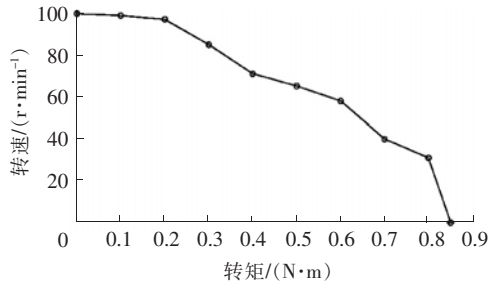


图 5 超声电机的机械特性

Fig.5 Mechanical characteristics of ultrasonic motor

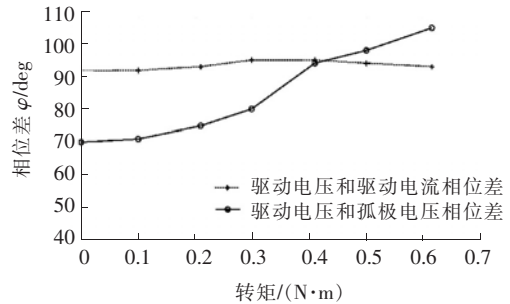


图 6 相位差随转矩变化关系

Fig.6 Relation between phase difference and torque

由图 6 可知,随着负载的增加,驱动电压和驱动电流相位差变化范围不大,而驱动电压和孤极电压相位差对负载变化相对敏感。因此可将该相位差作为反馈量用于频率的闭环控制,以补偿电机负载变化对转速带来的不良影响。

基于以上分析,在非转速反馈的控制场合,驱动电压和孤极电压的相位差对温度和负载的变化都相对敏感,因此可将其作为反馈量实现频率的闭环控制。

## 2 相关性相位提取法

在基于相位差反馈的频率闭环控制中,准确提取两信号基频相位差是信号检测的关键。但一方面超声电机的孤极电压为陶瓷晶体利用压电效应产生的电压信号,常夹杂有电机所在机械系统的背景振动噪声;另

一方面电机驱动器由于变频需求含有大量开关器件,产生较多的谐波噪声。采用传统的“过零法”提取相位差信息误差较大。针对以上问题,利用改进的相关性相位提取法,以获取驱动电压和孤极电压的基频相位差信息,具体方法如下。

假设现有2个同频信号,将同频的2个周期信号进行互相关处理,既保留了同频信息,又保留了相位信息,而非同频的周期信号则是不相关的<sup>[21]</sup>。由于孤极电压与驱动电压同频,可根据驱动电压设定值(基频)构造一个参考信号,分别与实测的驱动电压信号以及孤极电压信号进行互相关处理,就可以保留二者的基频相位信息,计算两者相位差。

现以驱动器一相驱动电压信号为例,将该信号记为 $u(t)$ ,其中基频分量的相位为 $\theta$ ,幅值为 $U_m$ ,角频率为 $\omega$ , $n(t)$ 为其他谐波成分和噪声的合成分量:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta) + n(t) \quad (3)$$

现构造2个与驱动信号同频的参考信号,并令其幅值同为 $U_{ref}$ :

$$z_1(t) = U_{ref} \sin(\omega t), \quad (4)$$

$$z_2(t) = U_{ref} \cos(\omega t), \quad (5)$$

若将 $u(t)$ 分别与2个参考信号 $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 进行互相关运算,由于 $n(t)$ 与2个参考信号 $z_1(t)$ , $z_2(t)$ 不相关,进行求解可以得到:

$$\theta = \arctg(R_{sz_2}/R_{sz_1}), \quad (6)$$

式中: $R_{sz_1}$ , $R_{sz_2}$ 为 $u(t)$ 与参考信号 $z_1(t)$ , $z_2(t)$ 的相关函数的估计值。

设在周期 $T$ 内的采样点个数为 $N$ ,则 $u(t)$ 采样的离散时间序列为 $u(t_k)$ 。2个参考信号 $z_1(t)$ , $z_2(t)$ 的离散时间序列分别表示为 $z_1(t_k)$ 和 $z_2(t_k)$ ,其中 $t_k=0,1,2,\dots,N-1$ 。则:

$$R_{sz_1} = \frac{1}{N} \sum_{t_k=0}^{N-1} u(t_k) z_1(t_k), \quad (7)$$

$$R_{sz_2} = \frac{1}{N} \sum_{t_k=0}^{N-1} u(t_k) z_2(t_k). \quad (8)$$

将通过离散时间序列 $u(t_k)$ , $z_1(t_k)$ 和 $z_2(t_k)$ 计算出来的 $R_{sz_1}$ , $R_{sz_2}$ 代入式(6)中即可求得驱动电压相位。

用相同的方法对实测孤极电压信号与2个参考信号进行互相关运算,通过式(6)得到孤极电压的基频相位,取差值得到驱动电压与孤极电压的基频相位差,便可将其作为反馈量用于驱动频率的闭环控制。

由以上分析可知,利用改进的相关分析的方法提取相位信息的过程中,由于驱动电压信号和孤极电压信号的谐波和噪声成分与构建的参考信号不相关,因此最终得到的两者相位差可以消除驱动电源谐波和孤极电压中振动噪声的不良影响。

### 3 控制系统构建及实验方案

#### 3.1 控制系统构建

图7为频率闭环控制的系统框图。首先,取电机相电压信号,采集电机的孤极信号,将二信号经调理电路接至数据采集卡;然后,上位机通过美国NI公司Labview虚拟仪器开发平台的编程,利用改进的相关性相位提取算法实时处理驱动电压与孤极电压的时域信号,计算二者基频相位差作为系统反馈信号;最后,将反馈与设定的相位差偏差值送至PID控制进行计算,得到驱动器的控制输出频率对电机进行驱动,从而实现电机的闭环控制。

#### 3.2 电机温度变化时的实验方案

步骤1:记录在某初始温度下驱动电压和孤

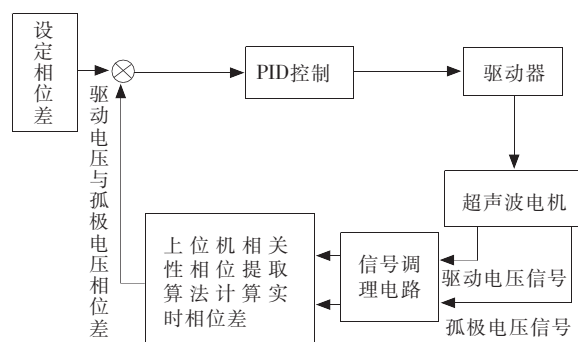


图7 频率闭环控制的系统框图

Fig.7 Frequency closed loop control system diagram

极电压的相位差信息,并将其作为相位差设定值;

步骤 2:实时采集驱动电压和孤极电压信号,利用相关性相位提取法实时计算两者相位差;

步骤 3:将相位差计算值和设定值比较,计算偏差值。此时对频率自动调节进行闭环控制,当相位差计算值大于设定值时,提升驱动频率,减小相位差;当相位差计算值小于设定值时,降低驱动频率,增大相位差,直至偏差量小于设定阈值为止。

### 3.3 电机负载变化时的实验方案

步骤 1:将负载分为四级:空载、轻载、中载和重载。其中空载记为  $T_0$ ,取轻载  $T_{\text{light}} = \frac{1}{4} T_{\text{max}}$ ;中载  $T_{\text{middle}} = \frac{1}{2} T_{\text{max}}$ ;重载  $T_{\text{heavy}} = \frac{3}{4} T_{\text{max}}$ 。

步骤 2:调节驱动频率,令轻载、中载、重载时的转速与空载时的转速相同,并分别记录对应驱动电压和孤极电压的相位差分别记为  $\varphi_0, \varphi_{\text{light}}, \varphi_{\text{middle}}$  以及  $\varphi_{\text{heavy}}$ 。

步骤 3:横坐标为转矩,纵坐标为驱动电压和孤极电压的相位差,将空载( $\varphi_0, T_0$ )、轻载( $\varphi_{\text{light}}, T_{\text{light}}$ )、中载( $\varphi_{\text{middle}}, T_{\text{middle}}$ )、重载( $\varphi_{\text{heavy}}, T_{\text{heavy}}$ )4 个坐标点作为原始数据,进行指数拟合。

注:在此基础上,可视情况增加原始数据的组数,以提高拟合精度。

步骤 4:将当前实际负载值代入到拟合表达式,将该点对应的拟合值作为相位差控制目标,通过调节驱动频率进行闭环控制。

## 4 实验结果及分析

选用型号为 TWUSM-60 的行波型超声电机作为被控对象,选用配套的驱动器进行变频控制;将磁粉制动器作为其负载,利用张力控制器进行负载调节;转矩转速传感器型号为 CYT-303,可实时监测电机的转矩与转速。采用自制的信号调理电路,信号采集卡型号为 Handyscope HS4,电机驱动电压峰峰值为 315 V,所构建的超声电机实验平台如图 8 所示。

利用型号为 GDJS-408C 高低温交变试验箱模拟温度变化,如图 9 所示。



图 8 超声电机实验平台

Fig.8 Ultrasonic motor experiment platform



图 9 高低温交变试验箱

Fig.9 High-low temperature cydes test

### 4.1 温度变化时闭环反馈控制结果

#### 4.1.1 环境温度变化时闭环反馈控制结果

测得电机在  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,驱动频率为 41 200 Hz,驱动电压和孤极电压初始相位差为  $83.4^{\circ}$ ,本实验将此作为相位差初始设定值。利用高低温交变试验箱模拟环境温度的变化,在电机允许范围内对温度进行连续调节,在此过程中进行闭环控制。开环与闭环时转速的变化情况如图 10 所示。

由图 10 可知,当温度由  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  变化至  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,开环控制情况下,电机的转速由 100 r/min 下降至 62 r/min;闭环控制情况下,电机的转速由 100 r/min 下降至 95 r/min,转速速降由 38% 降至 5%。由此可见,基于驱动电压和孤极电压相位差反馈的闭环控制方法,有效地降低了温度对电机的影响。

#### 4.1.2 电机温升变化时闭环反馈控制结果

实际上,超声电机在运行过程中由于各种损耗的存在会产生发热的情况。实验在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的室温环境下令

电机空载运行。利用红外测温的方法监测电机连续运行时,电机定子表面温度随时间的变化情况,如图 11 所示。

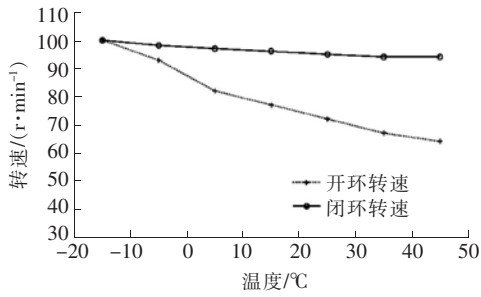


图 10 不同温度下开环与闭环的转速变化曲线

Fig.10 Rotational speed curves of open-loop and closed-loop at different temperatures

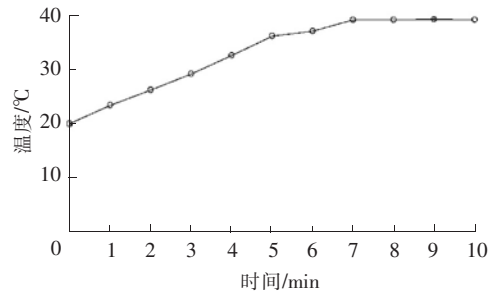


图 11 定子表面温度随时间变化曲线

Fig.11 Curve of the temperature of the stator surface with time

将室温 20 °C 下电机起动前的相位差作为初始设定值。在电机表面温度稳定的过程中进行闭环控制。相关控制参数如表 1 所示。

表 1 温度变化时的控制参数

Tab.1 Control parameters when temperature changes

温度/°C	20.00	23.50	26.50	29.00	33.00	36.20	37.40	39.10
相位差 $\varphi$ /deg	69.80	68.43	67.25	66.27	64.70	63.45	62.98	62.32
频率/kHz	41.51	41.41	41.32	41.25	41.13	41.04	41.00	40.93

开环与闭环时转速的变化情况如图 12 所示。

由以上实验结果可知,电机的表面温度由 25 °C 变化到 39.1 °C。开环控制情况下,电机的转速由 75 r/min 下降至 65 r/min;闭环控制情况下,电机的转速由 75 r/min 下降至 72 r/min,转速速降由 13.3% 降至 4%。由此可见,基于驱动电压和孤极电压相位差反馈的闭环控制方法,有效地降低了电机自身温升对转速的影响。

4.2 负载变化时闭环反馈控制结果

经测试,电机的最大转矩为 0.85 N·m。调节负载分别至空载、轻载、中载以及重载 4 个等级,分别通过改变驱动器频率,将转速调至空载转速  $n_0$ 。实验过程中在 4 个负载等级之间增加了 3 组数据以提高拟合精度。相应原始数据如表 2 所示。

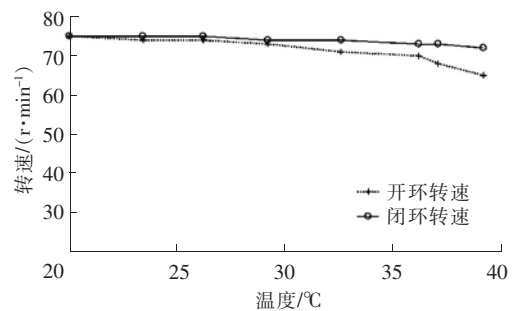


图 12 定子不同温度下开环与闭环的转速变化曲线

Fig.12 Rotational speed curves of open-loop and closed-loop at different temperatures of stator

表 2 拟合的原始数据

Tab.2 Raw data for fitting

负载等级	空载	轻载	中载	重载
负载/(N·m)	0	0.11	0.21	0.31
相位差 $\varphi$ /deg	70.1	74.1	79.8	86.2

选用指数拟合方式将 7 个坐标点进行处理,得到的拟合方程式为  $\varphi(T) = 68.48 \times e^{0.748 \cdot 2T}$ 。

为验证拟合函数的合理性,对负载进行细化调节,记录不同负载下将转速调回  $n_0$  的相位差数据。实测结果与拟合结果的对比如图 13 所示。

由图 13 可知,拟合结果和实测数据基本吻合,指数拟合方法合理可行。

令负载以 0.1 N·m 间隔在 0~0.6 N·m 范围内取观测点,将不同观测点在拟合多项式中计算出来的

相位差作为设定值,进行闭环控制调节。相关控制参数如表 3 所示。

表 3 负载变化时的控制参数

Tab.3 Control parameters when load changes

负载/(N·m)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
相位差 $\varphi$ /deg	70.0	72.5	79.6	84.90	93.50	101.00	108.00
频率/kHz	41.51	41.45	41.35	41.21	40.95	40.60	40.20

得到开环与闭环控制下超声电机的机械特性,如图 14 所示。

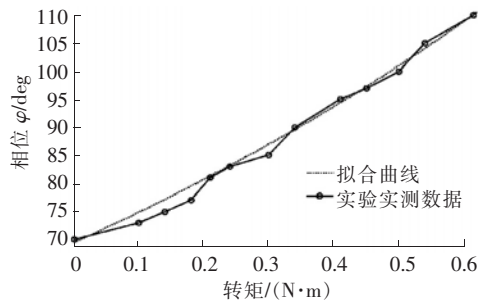


图 13 拟合曲线与实测数据曲线对比

Fig.13 Contrast diagram of fitting and measured data

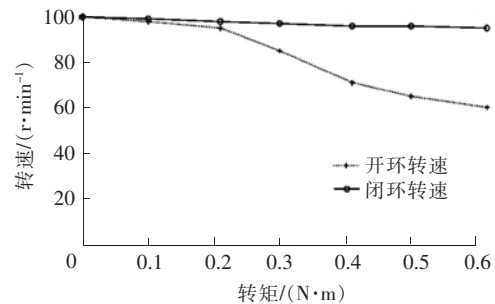


图 14 开环与闭环机械特性曲线对比

Fig.14 Mechanical characteristic contrast diagram of open-loop and closed-loop

由图 14 可知,电机加载到  $0.6 \text{ N} \cdot \text{m}$  时,开环情况下,转速由空载时的  $100 \text{ r/min}$  降至  $60 \text{ r/min}$ ,转速变化率为  $40\%$ ;闭环情况下,转速由空载时的  $100 \text{ r/min}$  降至  $95 \text{ r/min}$ ,转速变化率为  $5\%$ ;因此,基于驱动电压与孤极电压相位差反馈的闭环控制,能够降低由于负载变化而引起的转速波动,提高了电机对负载变化的抗扰能力。

## 5 结 语

1)驱动电压与孤极电压的相位差相较于驱动电压和驱动电流相位差对温度变化以及负载变化更为敏感,可将前者作为反馈量用于超声波电机的频率闭环控制。

2)改进的相关性相位提取法可有效滤除机械噪声和驱动器谐波对相位差计算结果的影响,提高相位差提取和闭环控制准确度。

3)基于驱动电压和孤极电压相位差反馈的频率闭环控制方案可降低环境温度以及负载变化对电机转速输出的影响,提高电机所在系统的稳定性。

4)本文对超声波电机频率控制技术的研究仍然存在许多不足之处。相关性相位算法在改进以及创新方面还有很大的提升空间,超声波电机在实际应用中会运行在各种复杂环境中,对电机闭环控制的要求会更多,难度也会大大增加。今后将在这些方面继续做深入的研究。

## 参考文献/References:

- [1] 牛子杰,孙志峻,陈超,等.基于响应面模型与自适应遗传算法的中空型行波超声电机柔性转子结构优化[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5378-5385.  
NIU Zijie, SUN Zhijun, CHEN Chao, et al. Optimization of the rotor structure of a hollow traveling wave ultrasonic motor based on response surface methodology and self-adaptive genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5378-5385
- [2] 张军,时运来,梁大志,等.直线超声电机驱动精密二维定位平台系统[J].中国电机工程学报,2014,34(18):2960-2966.  
ZHANG Jun, SHI Yunlai, LIANG Dazhi, et al. A 2-D precision positioning table system driven by linear ultrasonic motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(18): 2960-2966.
- [3] 夏长亮,徐绍辉,史婷娜,等.基于遗传算法的超声波电机模糊自适应速度控制[J].中国电机工程学报,2003,23(3):99-103.

- XIA Changliang, XU Shaohui, SHI Tingna, et al. Fuzzy adaptive speed control for ultrasonic motor based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003,23(3):99-103.
- [4] STEPANENKO D A, MINCHENYA V T. Development and study of novel non-contact ultrasonic motor based on principle of structural asymmetry[J]. Ultrasonics, 2012,52(7):866-872.
- [5] 李争,郭鹏,高世豪. 环形超声波电机的特性分析与实验研究[J]. 微电机, 2018,51(5):17-21.  
LI Zheng, GUO Peng, GAO Shihao. Characteristic analysis and experimental study of ring ultrasonic motor[J]. Micro motors, 2018, 51(5): 17-21.
- [6] 张龙. 基于 DSP 的行波型超声波电机驱动控制系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
ZHANG Long. Research on Drive Control System of Traveling Wave Ultrasonic Motor Based on DSP[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004.
- [7] 王光庆,郭吉丰. 超声波电机频率-温度特性研究[J]. 电机与控制学报, 2008,12(6):675-679.  
WANG Guangqing, GUO Jifeng. Research on the frequency-temperature characteristics of the ultrasonic motor[J]. Electric Machines and Control, 2008,12(6): 675-679.
- [8] 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.
- [9] 陈胜,雷向红. 超声电机的阻抗角特性及其控制技术研究[J]. 机电信息, 2013,15:94-95.  
CHEN Sheng, LEI Xianghong. Research on impedance angle characteristics of ultrasonic motor and its control technology[J]. Journal of Mechanical And Electrical Information, 2013, 15:94-95.
- [10] 李华峰,丁庆军,陈超. 超声电机启动可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013,33(9):138-145.  
LI Huafeng, DING Qingjun, CHEN Chao. Research on startup reliability of ultrasonic motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 138-145.
- [11] 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 Zhihua, ZHAO Chunsheng. The control of resonant tracking of ultrasonic motor[J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2003,25(2): 149-151.
- [12] IZUNO Y, HOJO M, NAKAOKA M. Software-based adjusting P-I gain controller for speed-tracking servo system using traveling-wave type ultrasonic motor[C]// IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.[S.l.]: Denver,1994.
- [13] 赵淳生,朱华. 超声电机技术的发展和应[J]. 机械制造与自动化, 2008,37(3):1-9.  
ZHAO Chunsheng, ZHU Hua. Development and application of ultrasonic motors technologies[J]. Machine Building & Automation, 2008,37(3): 1-9.
- [14] 陈志华,赵淳生,黄卫清. 行波型超声电机速度控制技术的研究[J]. 压电与声光, 2005,27(4):427-430.  
CHEN Zhihua, ZHAO Chunsheng, HUANG Weiqing. Research on the speed control techniques of a traveling-wave-type ultrasonic motor[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2005,27(4): 427-430.
- [15] 王文浩,郭吉丰,胡锡幸,等. 驱动电压跟踪的超声波电机频率自适应技术[J]. 中国电机工程学报, 2010,30(27):36-41.  
WANG Wenhao, GUO Jifeng, HU Xixing, et al. A adaptive frequency tracking control strategy for ultrasonic motor using the driving voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(27): 36-41.
- [16] 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 Yunhua, JIN Long, HU Minqiang, 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.
- [17] 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, 2004,37(6):47-50.  
ZU Jiakui, ZHAO Chunsheng. A review for frequency tracking control techniques of traveling wave ultrasonic motors[J]. Micro Motors, 2004,37(6): 47-50.
- [18] SHI Jingzhuo, LV Lin, ZHANG Yu. Dynamic takagi-sugeno model for the control of ultrasonic motor[J]. Journal of Control Science and Engineering, 2011:1-9.
- [19] 顾菊平,秦申蓓,石斌,等. 超声波电机测试技术的研究[J]. 电工技术学报, 2003,18(1):21-26.  
GU Juping, QIN Shenbei, SHI Bin, et al. Research on testing techniques of ultrasonic motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003,18(1): 21-26.
- [20] 甘云华,金龙,王心坚,等. 超声波电机自激振荡驱动电路的变频控制特性[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(9):93-97.  
GAN Yunhua, JIN Long, WANG Xinjian, et al. Characteristic of variable frequency control of self-oscillating driving circuit for ultrasonic motor[J]. proceedings of the CSEE, 2008, 28(9): 93-97.
- [21] AN Guoqing, LI Hongru. Stator and rotor faults diagnosis of squirrel cage motor based on fundamental component extraction method[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2017: Article ID 1576381.