

超声电机启动瞬态的电参量测试*

韩 威, 季宏丽, 聂 瑞, 陈虎城, 裘进浩

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京, 210016)

摘要 针对当前超声电机电参量的测试方法无法表征其启动瞬态电参量变化规律的问题,提出一种用于超声电机启动瞬态电参量测试的方法。基于加窗的短时傅里叶变换,对超声电机的驱动电压和驱动电流信号进行时频分析处理,得到超声电机启动瞬态下电流电压信号对应的频谱。利用单峰谱线插值法对信号的频谱进行插值修正,得到信号精确的幅值、频率和相位信息,并进一步计算得到阻抗、阻抗角等电参量信息。通过对仿真信号进行处理分析,验证该方法在启动瞬时电参量计算方面的准确性。搭建超声电机瞬态测试平台并对 PMR-60/E 型超声电机进行测试。结果表明,该方法能够揭示超声电机启动瞬态电参量在电机启动过程中的变化规律,可用于评估超声电机的响应特性,同时为超声电机等效电路模型的建立及驱动电路的设计提供重要信息。

关键词 超声电机;电参量;测试系统;时频分析

中图分类号 TM359.9;TH132.2

引 言

超声电机因其具有精度高、质量轻、响应快、构型灵活、结构刚度大、断电自锁及电磁兼容性好等优点^[1-2],成为航空航天^[3]、医学设备^[4]、机器人^[5]及精确制导武器^[6]等领域中精密驱动机构的主要功能部件。近年来,高端装备对超声电机提出了更为苛刻的作动需求,因此建立准确的超声电机模型,充分了解其响应特性,是促使超声电机的输出性能、定位精度、运行稳定性和服役可靠性向纵深发展的必要前提。

超声电机的模型主要包括解析模型、有限元模型和等效电路模型。由于超声电机复杂的压电耦合特性和定转子间摩擦的非线性,使其解析模型和有限元模型都存在建模困难、求解复杂及使用不便等问题^[7-8]。相比之下,等效电路建模将超声电机的机械量等效为电学量,通过电学理论实现对超声电机特性的分析,是一种简洁有效的分析方法^[9-11]。但是,超声电机等效电路模型电参量的确定具有后验性,需要相应测试实验的支持。

目前,国内外学者在超声电机的电参量测试方面取得了一些研究成果。魏守水等^[12]提出了一种基于导纳圆的超声电机定子电参数测量方法,证明了通过导纳频率特性求取电机电学特性参数的方法具

有可行性,并对定子的频率特性和电机效率之间的关系进行了分析。Li 等^[13]基于拉格朗日方程建立了一种非线性等效电路模型,描述了电流谐波的非线性特征,并提出了一种非线性调谐的驱动电路,抑制了超声电机的电流谐波。牛子杰等^[14]提出了超声电机及驱动器组成的并联等效电路整体模型,通过电学仿真得到机电系统的阻抗特性,并通过傅里叶分解法对电机驱动电压和驱动电流信号进行处理,得到超声电机实际工作中的阻抗特性。陈宁等^[15]提出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,该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。上述研究基于不同理论分别给出了超声电机电参量的测试方法,然而这些方法仅适用于电机在稳定运行状态下的电参量测试。瞬态测试实验表明,超声电机启动瞬态的过程中相关电参量有剧变的特点,这表明超声电机的工程应用中需要考虑启动过程中电参量变化对超声电机响应特性的影响。尤其是在精密定位等需要超声电机频繁启动的领域,测试电机启动瞬态的电参量,揭示各项电参量在启动过程中的变化规律,有助于分析超声电机的响应特性,对超声电机驱动电路的设计,完善超声电机等效电路模型具有重要

* 基础加强计划技术领域基金资助项目(2019-JCJQ-JJ-337);机械结构力学及控制国家重点实验室开放课题资助项目(MCMS-I-0519G02);江苏高校优势学科建设工程资助项目

收稿日期:2020-06-25;修回日期:2020-11-28

意义。

首先,笔者基于短时傅里叶变换的时频分析理论,提出一种超声电机启动瞬态的电参量测试方法;其次,通过对仿真信号进行处理分析,验证该方法在启动瞬时电参量计算方面的准确性;最后,通过搭建超声电机瞬态测试系统,采集超声电机启动过程中的驱动信号,并对其进行时频分析,得到相关电参量随着超声电机启动过程的变化曲线,验证该方法在启动瞬时电参量测试上的有效性。

1 超声电机瞬态测试系统

1.1 系统组成

超声电机瞬态测试系统如图1所示。该系统由光电编码器、功率放大器、波形发生卡、高速数据采集卡、电流探头、分压电路、PXI机箱和显示器等设备组成。在测试的过程中,波形发生卡输出2路幅值、频率和相位差可调的正弦信号,经由功率放大器后输出超声电机的驱动信号。与此同时,PXI机箱控制数据采集卡采集经分压电路处理后电压信号、电流信号和光电编码器的信号,经过数据处理后将测试结果显示在屏幕上。

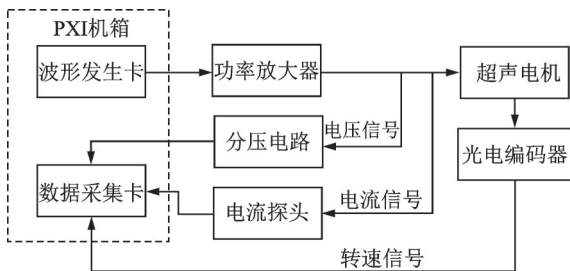


图1 超声电机瞬态测试系统
Fig.1 Transient testing system of ultrasonic motor

1.2 程序设计

在超声电机的瞬态测试过程中,由于超声电机启动过程的时间在毫秒级,因此需要保证原始测试数据的丰富性和实时性。

本测试系统中的数据采集卡使用的是NI公司的PXI-5105的多通道同步数据采集卡,具有12位模拟输入分辨率,最大采样速度可达60 MS/s,其高采样率的特性可确保在短时间内采集足够多的数据,很大程度上减小信号采集的失真。另一方面,通过LabVIEW软件设置将NI-PXIe5423信号发生卡和NI-PXI5105数据采集卡共享PXI机箱内部时钟源,从而实现板卡间的同步触发以保证数据采集的

实时性。此外,数据处理方面采用了Matlab Script脚本技术,将数据处理部分模块化,利用Matlab可以实现数据快速处理,简化测试流程,提升测试效率。整个测试流程如图2所示。

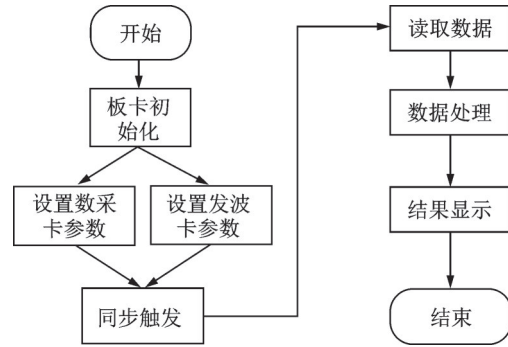


图2 超声电机电参量测试流程
Fig.2 Testing process of electrical parameters of ultrasonic motor

2 超声电机启动瞬态的电参量测试方法

超声电机的电参量包括驱动电压、电流、阻抗、阻抗角、等效电阻、等效电抗和有效功率等,分析启动瞬态电参量随时间的变化规律,首先需要对驱动信号进行实时处理。

2.1 超声电机驱动信号的时频处理

在超声电机启动过程中,驱动信号波形随时间的变化较为复杂,因此需要通过时频分析技术对驱动信号进行处理。经验模态分解(empirical mode decomposition, 简称EMD)、小波分析和短时傅里叶变换(short-time Fourier transform, 简称STFT)是常见的时频分析技术,其中EMD在处理信号时计算量较大且会引入边缘效应,导致信号的端部分析误差较大;小波分析的抗干扰能力较差,且同样受边缘效应的影响。因此,笔者选择适用于分析缓慢时变信号的短时傅里叶变换法对超声电机的驱动信号进行处理。在STFT分析中,先将信号分为不同的段,再对各段信号进行傅里叶变换来分析其特征参数,其中每一段信号称为“一帧”信号。由于超声电机驱动电压电流信号是短时平稳的,则每一帧信号的短时频谱就是各个平稳信号频谱的近似。STFT定义为

$$X_n(e^{j\omega}) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m)\omega(m+n)e^{-j\omega m} \quad (1)$$

其中: $x(m)$ 为信号序列; $\omega(m+n)$ 为实数窗序列。

n 取不同值时,窗 $w(m+n)$ 将延时间轴滑动,对不同帧信号进行频谱分析。

2.2 超声电机驱动信号的频谱分析

采集的超声电机驱动信号如图 3 所示。由图 3 (c)可以看出,电压电流信号并非标准正弦信号,除了基频分量和噪声信号外,其中还包含了其他频率分量^[13]使得正弦信号产生畸变。

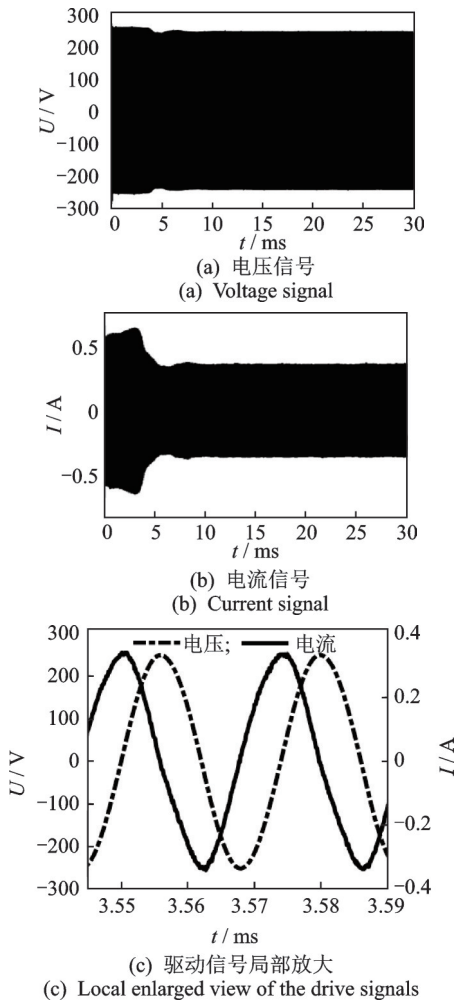


图 3 超声电机驱动信号
Fig.3 The drive signal of ultrasonic motor

对超声电机的驱动信号作频谱分析,如图 4 所示。由图可见,信号中除了直流和基频分量外,还存在以 2 次和 3 次谐波为主的高次谐波分量。

在信号的频谱分析过程中可能遇到混叠、栅栏和泄漏现象。实验中采样率为 10 MS/s,超声电机工作频带为 30~50 kHz,采样率远大于超声电机驱动信号频率,满足奈奎斯特采样定理,故不会出现混叠现象,因此只需要考虑泄漏和栅栏现象带来的影响。

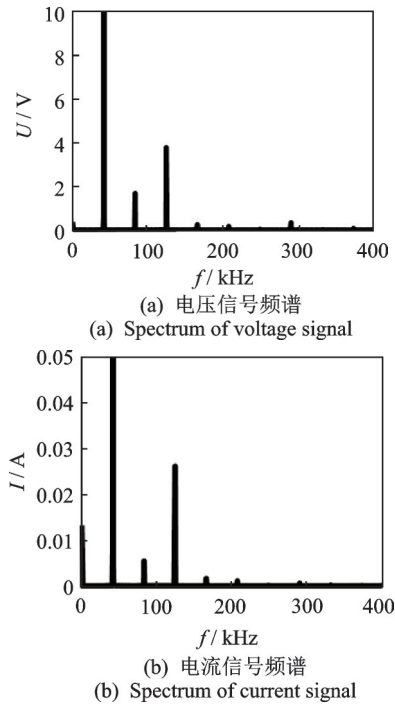


图 4 超声电机驱动信号频谱
Fig.4 Spectrum of ultrasonic motor driving signal

2.2.1 基于信号加窗方法抑制频谱泄漏

由于每帧信号为有限长度,相当于给信号加上了矩形窗,将信号截断,而且实际中很难对信号整周期截取,因此出现不可避免的频谱泄漏的现象,这将会对信号各频率分量的提取和计算带来很大的误差。为减小泄漏带来的影响,应当使用性能好的窗函数。理论上要求窗函数的主瓣带宽小、频率分辨率高;同时还要使得窗函数旁瓣衰减大、旁瓣衰减速度快,这样信号在频谱分析时各频率分量之间的泄漏影响才会小。但这两个条件是相互矛盾的,不能同时满足。考虑到电参量计算的准确性,有必要牺牲频率分辨率而选旁瓣衰减大、旁瓣峰值衰减快的窗函数。笔者选用 RV(Ⅲ)窗函数,其参数与矩形窗对比如表 1 所示。

表 1 矩形窗和 RV(Ⅲ)窗性能对比

Tab.1 Performance comparison between rectangular and RV(Ⅲ) window

窗函数名称	第 1 旁瓣衰减/dB	主瓣带宽	旁瓣峰值衰减/(dB·oct ⁻¹)
矩形窗	-13.0	4π/N	-6
RV(Ⅲ)窗	-73.9	12π/N	-30

从表 1 中可见,RV(Ⅲ)窗函数旁瓣衰减速率是矩形窗的 5 倍,第 1 旁瓣衰减远大于矩形窗,所以 RV(Ⅲ)窗对频谱泄漏的抑制要优于矩形窗。但是

其主瓣带宽为矩形窗的3倍,频率分辨率不足,需要较大的窗长才能弥补。如果窗长过大,相应地导致时间分辨率下降,失去瞬态测试的意义,所以需要折中选择窗函数的长度。窗长的选择计算公式为

$$N \geq \frac{f_s}{\Delta f} (K + M) \quad (2)$$

其中: f_s 为采样率; Δf 为频率分辨率; K 为选用窗函数与矩形窗的主瓣带宽之比; M 为选用窗函数的旁瓣位置; N 为窗函数长度。

2.2.2 基于单峰谱线插值法改善栅栏现象

在信号频谱中,信号频率 $f_0 = k_0 \Delta f$, k_0 一般不是整数,由于栅栏现象该频率的谱线不会出现在所得频谱中。因此,笔者使用单峰谱线插值的方法,对所求频率分量进行插值修正,原理如下。

设 f_s 为采样频率,则采样间隔为 $T_s = 1/f_s$,对单一频率信号 $x(t)$ 进行采样得

$$x(n) = A \cos(2\pi f_0 n T_s + \varphi_0) \quad (3)$$

利用窗函数 $w(n)$ 截断信号,可得加窗信号的离散傅里叶变换正频谱为

$$X(k\Delta f) = \frac{A}{2} e^{j\varphi_0} W[2\pi T_s(k\Delta f - f_0)] \quad (4)$$

其中: $W(\cdot)$ 为窗函数的傅里叶变换。

在信号频谱中设某频率点左右两侧的谱线序号为 k_1 和 k_2 ,它们对应的幅值为 $y_1 = |X(k_1 \Delta f)|$, $y_2 = |X(k_2 \Delta f)|$ 。设 $\alpha = k_0 - k_1$,则 α 取值范围为 $[0, 1]$,两谱线的幅值比为

$$\beta = \frac{y_2}{y_1} = \frac{\left| W\left[\frac{2\pi(k_2 - k_0)}{N}\right] \right|}{\left| W\left[\frac{2\pi(k_1 - k_0)}{N}\right] \right|} = \frac{\left| W\left[\frac{2\pi(1 - \alpha)}{N}\right] \right|}{\left| W\left[\frac{2\pi(-\alpha)}{N}\right] \right|} \quad (5)$$

对于给定的窗函数,通过式(5)可以得到 β 的值以及 α 和 β 的关系,以此可以计算出频率修正量 α ,因此信号的频率 f 、相角 φ_0 和幅值 A 的修正值可以由式(6)~(8)计算得到

$$f = (k_1 + \alpha) \Delta f \quad (6)$$

$$\varphi_0 = \arg[X(k_1 \Delta f)] + \arg\left[W\left(\frac{2\pi(-\alpha)}{N}\right)\right] \quad (7)$$

$$A = \frac{2y_1}{\left| W\left[\frac{2\pi(-\alpha)}{N}\right] \right|} \quad (8)$$

其中: $\arg(\cdot)$ 表示求复数的相角。

综上,利用加窗短时傅里叶变换的时频分析方

法以及单峰谱线插值的频谱分析方法,理论上能够提取包含多频率分量信号的各频率分量的幅值、频率和初始相位,这为超声电机电参量的计算提供了基础信息。

2.3 电参量计算

对于包含高次谐波的非正弦周期信号,需要对其进行分解。由于超声电机的驱动电路分为A,B两相且对称,这里仅以A相电路进行说明。对于非正弦周期电压电流信号,可以表示为

$$\begin{cases} u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k \cos(2\pi k f t + \varphi_{uk}) \\ i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} I_k \cos(2\pi k f t + \varphi_{ik}) \end{cases} \quad (9)$$

其中: U_0, I_0 分别为电压和电流的直流分量; U_k, I_k 分别为电压和电流的交流分量有效值; f 为驱动信号频率; $\varphi_{uk}, \varphi_{ik}$ 分别为电压和电流交流分量的初始相位。

根据上述的时频分析方法,可以得到较为精确的信号各频率分量的信号幅值、相位和频率信息。利用这些信息,可以对超声电机的电参量进行相关的计算。

利用式(9)及三角关系,超声电机的平均功率(有效功率)为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos(\varphi_{uk} - \varphi_{ik}) \quad (10)$$

超声电机输入功率(视在功率)等于驱动电压与电流有效值的乘积

$$S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2} \quad (11)$$

其中: U 和 I 为电压和电流的有效值。

阻抗角(功率因数角)可表示为

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{P}{S} \quad (12)$$

阻抗角为负值表示超声电机驱动电压在时间上滞后于电流,系统呈容性;阻抗角为正值表示超声电机驱动电压在时间上超前于电流,系统呈感性。

超声电机的阻抗值、等效电阻值和等效电抗值为

$$|Z| = \frac{U}{I} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} / \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} I_k^2} \quad (13)$$

$$\begin{cases} R = |Z| \cos \varphi \\ X = |Z| \sin \varphi \end{cases} \quad (14)$$

3 电参量测试方法可靠性分析

为了验证笔者提出测试方法在提取信号幅值、频率和相位差方面的可靠性与准确性,设置了1组包含基频、2次谐波和3次谐波的连续变化的仿真电压和电流信号并对其进行分析。仿真信号的公式为

$$\begin{cases} u(t) = Y(t) \sum_{k=1}^3 A_{uk} \cos(2\pi k f_0 t + \varphi_{uk}) \\ i(t) = Y(t) \sum_{k=1}^3 A_{ik} \cos(2\pi k f_0 t + \varphi_{ik}) \\ Y(t) = (1 + 0.1 \cos(2\pi f t)) e^{-\frac{t}{5}} \end{cases} \quad (15)$$

其中: $f=10\text{ Hz}$; f_0 为信号的基频; A_u, A_i 分别为信号的电压、电流的幅值; φ_u, φ_i 分别为信号的电压、电流的初始相位。

所设置的电压电流仿真信号的采样率为10 MS/s,时长为0.1 s,信号各频率成分如表2和表3所示。

对仿真信号进行时频分析后所得各频率分量

表2 仿真电压信号成分

Tab.2 Components of simulated voltage signal

k	A_u/V	$\varphi_u/(\text{°})$	f_u/kHz
1	250.00	0.00	42.00
2	2.50	10.00	84.00
3	5.00	20.00	126.00

表3 仿真电流信号成分

Tab.3 Components of simulated current signal

k	A_i/A	$\varphi_i/(\text{°})$	f_i/kHz
1	0.50	70.00	42.00
2	0.01	80.00	84.00
3	0.02	90.00	126.00

信号的幅值、频率和信号相位差的最大绝对误差如表4所示。

表4 仿真信号各频率成分的幅值、频率和相位差的绝对误差

Tab.4 Error of amplitude, frequency and phase difference of each frequency component of simulation signal

k	$\Delta A_{u\text{max}}/\text{V}$	$\Delta A_{i\text{max}}/\text{A}$	$\Delta f_u/\text{kHz}$	$\Delta f_i/\text{kHz}$	$\Delta \varphi_{\text{max}}/(\text{°})$
1	9.8×10^{-2}	2.2×10^{-4}	2.1×10^{-3}	1.6×10^{-3}	2.7×10^{-3}
2	4.1×10^{-3}	1.3×10^{-5}	1.9×10^{-2}	1.0×10^{-2}	2.0×10^{-1}
3	2.2×10^{-3}	8.7×10^{-6}	6.3×10^{-3}	4.6×10^{-3}	4.7×10^{-2}

由表4可见,所得信号幅值的绝对误差小于0.1 V,电压电流信号相位差的绝对误差小于0.2°,基频的绝对误差小于3 Hz,上述参数的绝对误差均小于0.5%。因此,本研究方法的计算精度可以满足电参量的计算要求。

4 实验结果及分析

利用搭建的超声电机瞬态测试系统对PMR-60/E型超声电机进行测试,测试平台如图5所示。实验

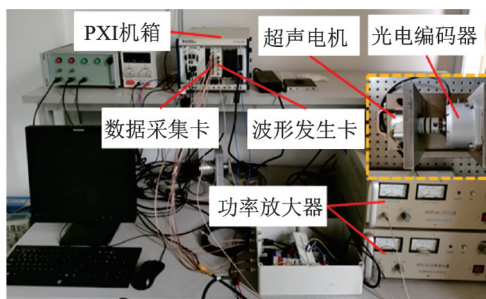


图5 瞬态测试平台

Fig.5 Transient test platform

中使用的驱动频率为41.8 kHz,驱动电压为500 V_{pp},驱动信号相位差为90°。

由于超声电机的驱动电路分为相互对称的A、B两相,因此瞬态电参量测试结果仅以A相的测试结果展示,测试结果如图6所示。

图6(a)为超声电机阻抗值和阻抗角,图6(b)为等效电阻和等效电抗,图6(c)为超声电机的转速、有效功率和孤极反馈电压,通过测试可以全面显示出超声电机瞬态下状态参数的变化过程。从测试结果中可以清楚地看出,超声电机从启动到稳定运行的过程中存在两个变化过程,在时间上划分为 $(0, t_0)$ 和 (t_0, t_1) 两个阶段,称之为超瞬态阶段和次瞬态阶段^[16]。

在超瞬态阶段,电机处于加速状态,电机的孤极反馈电压幅值不断增大,电机定子的振幅也随之增大,压电振子的正压电效应也随之增强,产生的电流反馈给驱动电流导致通过电机的电流减小而使得电机的电参量变化剧烈。阻抗随时间增加从450 Ω逐渐增加到780 Ω,最大值约为最小值的1.7倍;等效电抗与阻抗的绝对值的变化规律一致,等效电阻的

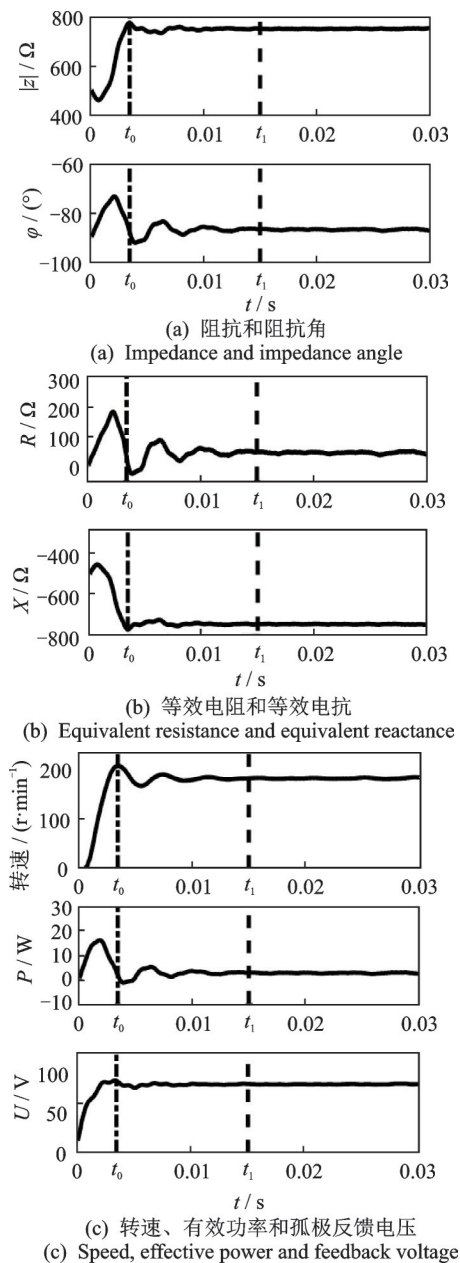


图6 超声电机电参量测试结果

Fig.6 Test results of electrical parameters of ultrasonic motor

变化规律与阻抗角一致;阻抗角先减小后增大导致电机有效功率先增大后减小,阻抗角的最大值与最小值之间的差值约有 17° 。

在次瞬态阶段,由于电机定转子之间储存了一定的弹性势能,此时弹性势能与机械能之间的相互转化使得电机的压电振子的振动状态发生改变,在阻尼的作用下孤极反馈电压处于衰减振荡状态,电机转速也在衰减振荡;相应的电机阻抗、阻抗角等相关电参量均处于衰减振荡的状态,阻抗最大衰减量达到 $50\ \Omega$,阻抗角最大变化量达到 10° 左右。在时间 t_1 之后各项参数趋于稳定,超声电机基本处于稳定

运行状态。

5 结论

1) 提出了一种用于超声电机启动瞬态下的电参量测试方法,该方法可以较为全面地测试超声电机启动瞬态下的阻抗、阻抗角等相关电参量的变化曲线,且具有良好的测试精度,可用于分析超声电机启动瞬态的响应特性。

2) 搭建了超声电机瞬态测试系统并对PMR-60/E型超声电机进行了测试,结果表明:在电机启动的超瞬态和次瞬态两个阶段中电参量变化剧烈,阻抗值的相对变化最大约为70%,阻抗角相对变化最大约为17%。

参 考 文 献

- [1] ZHAO C S. Ultrasonic motors: technologies and applications[M]. Beijing: Science Press and Springer, 2011:1-9.
 - [2] YANG L, REN W H, MA C C, et al. Mechanical simulation and contact analysis of the hybrid longitudinal-torsional ultrasonic motor[J]. Ultrasonics, 2020, 100:105982.
 - [3] ZHOU Y N, CHANG J J, LIAO X X, et al. Ring-shaped traveling wave ultrasonic motor for high-output power density with suspension stator[J]. Ultrasonics, 2020, 102:106040.
 - [4] ZHANG Z, XU J L, YANG L L, et al. Design and comparison of PMN-PT single crystals and PZT ceramics based medical phased array ultrasonic transducer[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2018, 283: 273-281.
 - [5] ZHANG Y H, FU Y H, HUA X J, et al. Wear debris of friction materials for linear standing-wave ultrasonic motors: theory and experiments[J]. Wear, 2020(448/449): 203216.
 - [6] ZENG W J, PAN S, CHEN L, et al. Research on ultra-low speed driving method of traveling wave ultrasonic motor for CMG[J]. Ultrasonics, 2020, 103: 106088.
 - [7] MOJALLALI H, AMINI R, IZADI-ZAMANABADI R, et al. Systematic experimental based modeling of a rotary piezoelectric ultrasonic motor[J]. ISA Transactions, 2007, 46(1): 31-40.
 - [8] 周先立,罗萍,黄龙,等.行波型超声波电机等效电路建模[J].压电与声光,2019,41(2):199-202.
- ZHOU Xianli, LUO Ping, HUANG Long, et al.

- Equivalent circuit modeling of traveling wave ultrasonic motor[J]. Piezoelectric and Acousto-optic, 2019, 41 (2): 199-202. (in Chinese)
- [9] YU T H, JHANG Y J. Equivalent circuit analysis of a single-phase rotary wedge-wave ultrasonic motor[C]// International Conference on Fuzzy Systems & Knowledge Discovery. [S.l.]:IEEE, 2016.
- [10] ZHAO Y Y, CAI M, TANG Y X, et al. Nonlinear modeling of electrical equivalent circuit of rotary traveling wave ultrasonic motor[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014(490/491):1068-1072.
- [11] 袁义坤,赵增辉,王育平,等. 超声波电动机定子等效电路模型及驱动电路的阻抗匹配[J]. 微特电机, 2012, 40(2):62-64.
YUAN Yikun, ZHAO Zenghui, WANG Yuping, et al. Equivalent circuit model of ultrasonic motor stator and impedance matching of driving circuit[J]. Small & Special Electrical Machines, 2012, 40 (2): 62-64. (in Chinese)
- [12] 魏守水,孙合明,赵淳生. 超声马达定子的等效电路参数测量与仿真[J]. 振动、测试与诊断, 2000(2): 110-114.
WEI Shoushui, SUN Heming, ZHAO Chunsheng. Measurement and simulation of equivalent circuit parameters of ultrasonic motor stator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2000(2): 110-114. (in Chinese)
- [13] LI X N, YAO Z Y, MI Y, et al. Modeling, analysis and suppression of current harmonics of Langevin-type ultrasonic motors under high voltage[J]. Precision Engineering, 2020, 64:177-187.
- [14] 牛子杰,闫锋欣,孙志峻,等. 基于并联谐振匹配的超声电机阻抗特性[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 73-79.
NIU Zijie, YAN Fengxin, SUN Zhijun, et al. Impedance characteristics of ultrasonic motor based on parallel resonance matching[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38 (1):73-79. (in Chinese)
- [15] 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 Jieji, JIAO Xikai, et al. Development of multi parameter high-precision measurement and control system for ultrasonic motor[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28 (4):759-770. (in Chinese)
- [16] 胡敏强,王心坚,金龙,等. 行波超声波电机瞬态特性的测试及分析[J]. 中国电机工程学报, 2006(23): 120-125.
HU Minqiang, WANG Xinjian, JIN Long, et al. Measurement and analysis of transient characteristics of traveling wave ultrasonic motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006 (23):120-125. (in Chinese)



第一作者简介:韩威,男,1996年6月生,硕士生。主要研究方向为超声电机性能测试及控制。

E-mail:1124054412@qq.com

通信作者简介:季宏丽,女,1983年2月生,教授、博士生导师。主要研究方向为智能材料与结构的减振降噪。

E-mail:jihongli@nuaa.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332

邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn