

基于并联谐振匹配的超声电机阻抗特性^{*}

牛子杰¹, 闫锋欣¹, 孙志峻², 朱 华², 衣雪梅¹

(1. 西北农林科技大学机械与工程学院 咸阳, 712100)

(2. 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 针对目前对超声电机及其驱动系统的阻抗特性测试均局限于单定子和低电压的现状, 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。通过傅里叶分解的方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。通过仿真分析和实验可知: 机电系统随着驱动频率的降低, 阻抗呈单调增大的趋势, 同时电机负载扭矩(小于额定扭矩)越大, 系统阻抗越小; 机电系统谐振匹配频率越小, 系统阻抗越小, 同时谐振匹配点越靠近电机共振频率, 系统阻抗模随着驱动频率的减小, 增大得越快。最后, 通过机电系统阻抗特性提出超声电机实际工作的理想频率和驱动器的谐振匹配频率均应略大于电机共振频率的频率点。

关键词 阻抗特性; 超声电机; 谐振匹配; 驱动频率; 共振频率

中图分类号 TH39; TM359.4; TP273

引 言

超声电机是 20 世纪末期发展起来的一种特殊类型电机。行波超声电机是超声电机最实用的一种类型^[1-3]。该种电机采用超声频段的交流信号激发黏结在定子上的两相压电陶瓷环, 使其分别产生频率相同、相位相差为 90° 的两相弯曲共振模态, 通过模态叠加产生单一旋转模态——行波, 最后通过定子与转子之间的摩擦作用输出力矩和转速^[4]。驱动电压、驱动频率、电路谐振匹配点和阻抗特性等均对电机机械特性和效率有影响。其中, 谐振电路的阻抗特性是最能反映一个谐振电路是否匹配合理的关键^[5], 只有分析清楚超声电机及其驱动系统的阻抗特性才能选取电机合理的驱动频率点。国内外学者对超声电机及其驱动系统进行了深入研究。文献[6]利用等效电路的方法对驱动电源进行了研究。文献[7]研究了电源的驱动频率对电机速度的影响。文献[8-9]提出每个行波型超声电机的压电陶瓷片均可以测得一个阻抗特性曲线, 分析了超声电机定子的共振与反共振特性。李华峰等^[10]理论上认为电机工作在陶瓷片阻抗最大的频率点时, 电路的电

流最小。文献[11-12]研究了超声电机自激振荡驱动器, 成功使用该技术将超声电机驱动器小型化。颜佳佳等^[13]利用半桥电路作为驱动器拓扑结构, 成功解决电路偏磁问题, 消除了开关管的电压尖峰。梁大志等^[14]提出通过准确控制超声电机 PWM 驱动信号的关断时间来保证驱动信号的准确性, 从而保证超声电机的角秒级分辨率。目前, 对超声电机及其驱动电路系统阻抗特性的测试仍停留在单定子和低电压这两种测试方法。这种实验电学条件与电机正常工作时的电学条件相差较大, 不足以说明问题。因此, 电机在正常工作状态下的驱动系统阻抗特性是研究电机驱动系统的重要问题。

考虑到串联匹配的驱动器电机两端的电压随着驱动频率的变化衰减的比较厉害, 实用性不强, 笔者以在文献[15]中提出的一种行波型中空超声电机和文献[16]中提出的并联驱动电路为对象进行展开。目前, 亟待解决的问题是超声电机及其并联驱动系统在工作过程中的阻抗模型不清楚, 同时不同的驱动频率、负载扭矩和谐振匹配频率点对机电系统的阻抗特性影响不清楚, 无法对电机及驱动器的实际应用进行指导。笔者首先通过对超声电机及驱动器在正常工作情况下的电特性进行分析, 建立机电系

^{*} 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2452017134); 国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)资助项目(2015CB057501); 中国博士后科学基金资助项目(2017M613217); 博士科研启动费资助项目(2452016158)

收稿日期: 2016-08-31; 修回日期: 2016-10-16

统的等效电路模型;然后,通过仿真分析得到机电系统随着驱动频率的降低,阻抗呈单调增大趋势;最后,通过实验验证了电机负载扭矩(小于额定扭矩)越大,系统阻抗越小的特性。机电系统谐振匹配频率越小,系统阻抗越小,谐振匹配点越靠近电机共振频率,系统阻抗模随着驱动频率的减小增大的越快。

1 超声电机和并联谐振驱动器结构

1.1 超声电机的结构形式描述

笔者研究涉及的超声电机是卫星调整姿态的控制力矩陀螺(control moment gyroscope, 简称CMG)的核心器件。该CMG的结构如图1所示。可以看出,超声电机的作用是在合适的时间,以合适的速度转动,改变陀螺仪的指向,从而通过陀螺仪改变卫星的姿态。图2为CMG上使用的超声电机的基本结构。

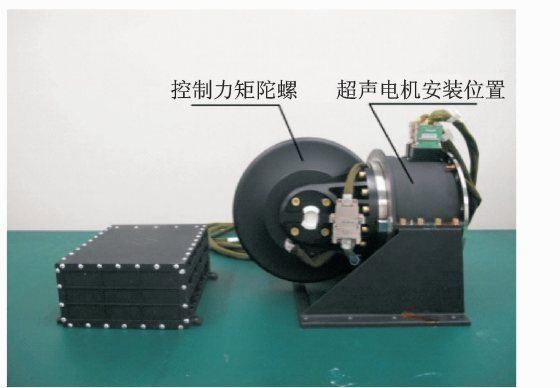


图1 控制力矩陀螺

Fig. 1 Control moment gyroscope

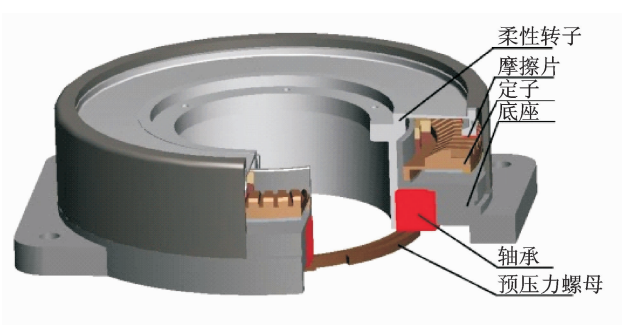


图2 电机结构

Fig. 2 Structure of motor

1.2 并联谐振驱动器拓扑结构

笔者的研究是基于并联电容匹配的驱动器展开的。驱动器采用型号为 PSOC5LP-32-BITARM-

BASE PSOC 的主芯片。驱动器原理框图如图3所示。电机驱动需要两相相位差为 90° 的高压正弦功率信号。每相需要两组驱动信号,一组用于驱动恒流供电脉宽调制(pulse-width modulation, 简称PWM)组件,另一组用于驱动推挽换向PWM驱动组件,每组信号都是一对反相信号。

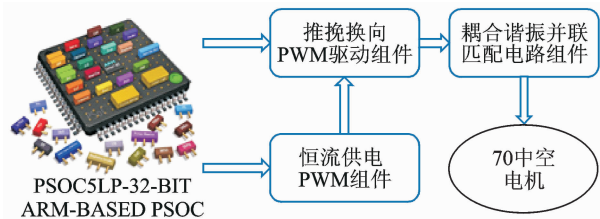


图3 驱动器原理图

Fig. 3 Drive schematic

超声电机及其驱动器组成的机电一体化系统的拓扑结构主要包含了电机等效电路部分和驱动电源部分。整体的电路拓扑结构如图4所示。

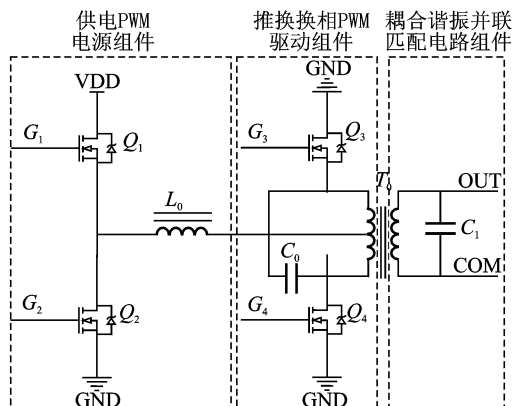


图4 机电一体化系统拓扑结构

Fig. 4 Mechanical and electrical integration system

2 并联电容驱动电路等效模型

2.1 超声电机等效电路模型

由于超声电机的等效电路对耦合谐振匹配网络的影响比较大,因此在研究耦合谐振匹配网络之前应该先确定电机的等效电路模型。超声电机在静止状态下可以测得A,B两相的静态电容值,但在正常工作状态下的电学特性并不完全清楚。常见的电机等效电路如图5所示。为了便于研究,笔者将电机的等效电路进一步简化,如图6所示。其中: L_m , R_m , C_m 分别为超声电机等效电路支路的动态电感、动态电阻和动态电容; C_{d0} 和 R_{d0} 分别为压电陶瓷片支路的自由电容和损耗电阻。

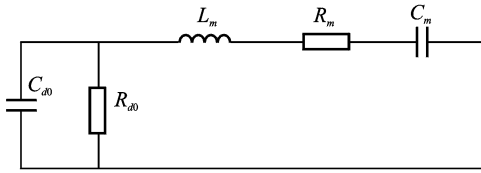


图 5 电机等效电路

Fig. 5 Motor equivalent circuit

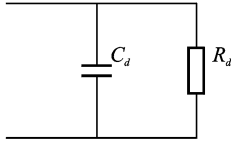


图 6 简化等效电路

Fig. 6 Simplified equivalent circuit

根据图 5,6 得到简化的等效关系式为

$$\begin{cases} C_d = C_{d0} - \frac{L'_m}{R_m^2 + (\omega L'_m)^2} \\ R_d = R_{d0} - \frac{R_{d0}^2 R_m}{R_{d0} R_m + R_m^2 + (\omega L'_m)^2} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $L'_m = L_m - \frac{1}{\omega^2 C_m}$ 。

以压电陶瓷片实验测试数据及文献[17-19]的数据处理方法为参考,笔者设置 TRUM-70H 型中空超声电机的等效电路模型参数,如表 1 所示。在确定了电机的等效电路模型之后,笔者将结合驱动器研究电机的匹配网络。

表 1 TRUM-70H 型超声电机等效模型参数

Tab. 1 Equivalent model parameters of TRUM-70H type ultrasonic motor

参数	数值
压电陶瓷 A/B 相自由电容 C_{d0} /nF	11
压电陶瓷 A/B 相损耗电阻 R_{d0} /k Ω	6
L_m /mH	325
A/B 相动态支路等效参数 R_m / Ω	338
C_m /pF	72.5

2.2 并联电容谐振匹配网络

由于超声电机自身是容性负载,因此并联电容的谐振匹配电路考虑到变压器副边电感 L_0 的谐振匹配网络。如图 7 所示,结合超声电机等效电路,得到并联电容的谐振匹配网络。

并联电容匹配电路的总阻抗为

$$Z_{\text{parallel}} = \frac{R_d}{1 + R_d^2 \left[\omega(C_d + C_s) - \frac{1}{\omega L_0} \right]^2} +$$

$$j \frac{R_d^2 \left[\frac{1}{\omega L_0} - \omega(C_d + C_s) \right]}{1 + R_d^2 \left[\omega(C_d + C_s) - \frac{1}{\omega L_0} \right]^2} \quad (2)$$

由于谐振匹配电路的无功功率为零,此时需要阻抗的虚部为零,因此可得

$$C_s = \frac{1}{L_0 \omega_d^2} - C_d \quad (3)$$

其中: ω_d 为电机驱动器实际匹配的谐振点。

一般假设电机自身的谐振频率点为 $\omega_{n,r}$,电机驱动器的匹配频率点 ω_d 与电机自身谐振频率点 $\omega_{n,r}$ 满足式(4)时,电机的驱动器处于正常工作状态。

$$\omega_d > \omega_{n,r} (\omega_d = 2\pi f_d, \omega_{n,r} = 2\pi f_{n,r}) \quad (4)$$

其中: $f_{n,r}$ 为电机固有谐振频率值; f_d 为电机驱动器实际匹配的频率值。

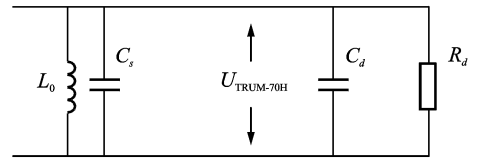


图 7 并联谐振匹配网络

Fig. 7 Parallel resonant matching network

3 并联谐振电路阻抗特性仿真

TRUM-70H 型中空超声电机的并联匹配驱动器的变压器副边电感、匹配电容以及固有谐振频率值和电机驱动器实际匹配的频率值如表 2 所示。

表 2 TRUM-70H 型超声电机相关频率值

Tab. 2 Frequency value of TRUM-70H type ultrasonic motor

参数	数值
$f_{n,r}$ /Hz	39 000
L_0 /mH	0.576
f_d /Hz	39 515
C_s /nF	5

由式(2)得到并联电容匹配电路阻抗的模为

$$|Z_{\text{parallel}}| = \frac{R_d}{\left[1 + R_d^2 \left[\omega(C_d + C_s) - \frac{1}{\omega L_0} \right]^2 \right]^2} \times \sqrt{\left[1 + R_d^2 \left[\omega(C_d + C_s) - \frac{1}{\omega L_0} \right]^2 \right]^2 + R_d^2 \left[\omega(C_d + C_s) - \frac{1}{\omega L_0} \right]^2} \quad (5)$$

结合表 1、表 2 以及式(5),得到电路的总阻抗与驱动频率之间的关系如图 8 所示。

由式(2)得到并联电容匹配电路阻抗的实部为

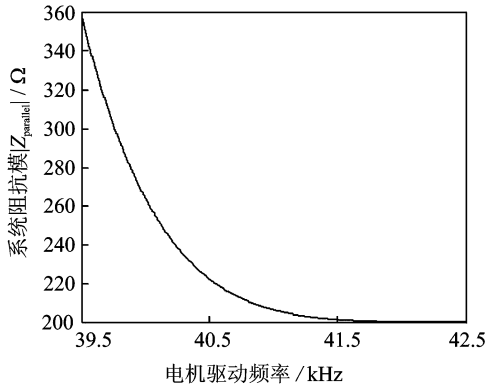


图8 总阻抗-驱动频率

Fig. 8 The total circuit impedance-driving frequency

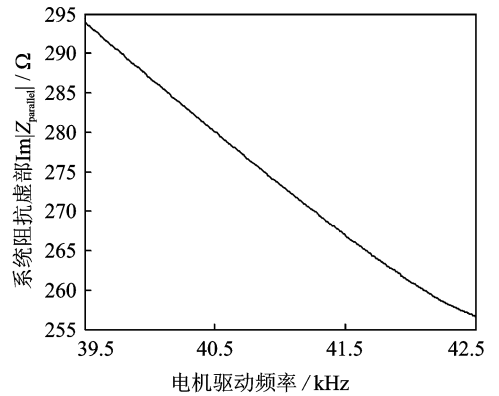


图10 阻抗虚部-驱动频率

Fig. 10 Impedance imaginary part-driving frequency

$$\operatorname{Re} |Z_{\text{parallel}}| = \frac{R_d}{1 + R_d^2 [\omega(C_d + C_s) - \frac{1}{\omega L_0}]^2} \quad (6)$$

结合表1和表2以及式(6),得到电路的阻抗实部与驱动频率之间的关系如图9所示。

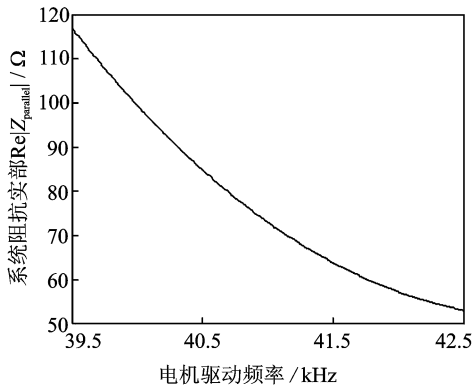


图9 阻抗实部-驱动频率

Fig. 9 Impedance real part - driving frequency

由式(2)得到并联电容匹配电路阻抗的虚部为

$$\operatorname{Im} |Z_{\text{parallel}}| = \frac{R_d^2 [\frac{1}{\omega L_0} - \omega(C_d + C_s)]}{1 + R_d^2 [\omega(C_d + C_s) - \frac{1}{\omega L_0}]^2} \quad (7)$$

结合表1和表2以及式(7),得到电路的阻抗虚部与驱动频率之间的关系如图10所示。

可见,系统阻抗模会随着电机驱动频率的减小呈单调递增趋势,越靠近电机的共振频率点,阻抗模的增加幅度越快。

4 阻抗特性影响因素实验

4.1 机电系统测试实验方案

本实验主要针对机电系统正常工作中的3个节

点进行数据测试,测试的数据主要包括系统输入的电压和电流,驱动器输入到电机的电压和电流以及电机输出的扭矩和转速。测试数据及测试节点的示意图如图11所示。

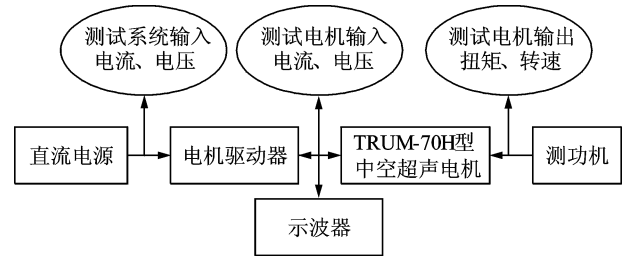


图11 测试数据及测试节点示意图

Fig. 11 Schematic diagram of test data and test node

实验设备如图12所示。实验装置中直流电源用于提供能量及测量输入电压和电流;测功机用于提供负载扭矩和测量电机输出扭矩和转速;示波器用于测量电机输入电压,电流及孤极电压;电流探头用于辅助示波器测量电机输入电流。

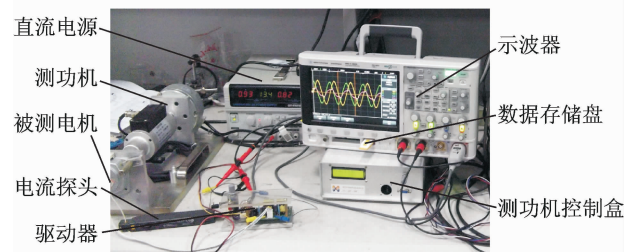


图12 实验平台

Fig. 12 Experimental platform

4.2 实验数据处理

4.2.1 基于傅里叶变换的电机电压、电流信号处理
由于实验中超声电机的输入电压和输入电流信

号均为高频信号,同时由于谐振匹配网络匹配结果不可能使得电路完全呈阻性,因此电压信号和电流信号也并非标准的正弦信号。超声电机 A,B 两项陶瓷片分别施加激振电压,一个施加 \sin 相交变电压信号的同时,另一个必须施加 \cos 相交变电压信号。笔者主要将 TRUM-70H 型超声电机 A,B 两项的电压和电流信号分别进行傅里叶变换,用到的傅里叶级数为

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (8)$$

其中: $x(t)$ 为电压或者电流实时信号; a_0 为直流分量; a_n 和 b_n 为 n 次谐波的系数; ω_0 为基频。

参数 a_0, a_n 和 b_n 分别为

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) dt \quad (9a)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (9b)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (9c)$$

利用辅角公式将式(8)中的 \cos 谐波和 \sin 谐波进行合并,得到

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_0 t + \varphi_n) \quad (10)$$

其中: a_0 为信号均值,是直流分量; A_n 为 N 次谐波的幅值; $n\omega_0$ 为 n 次谐波的频率; φ_n 为 N 次谐波的相角。

参数 A_n 和 φ_n 分别为

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (11a)$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{-b_n}{a_n} \quad (11b)$$

其中: $n=1,2,3,\dots$ 。

笔者在数据分析过程中,基于电路谐振频率 ω_d 的傅里叶变换,得到了电压和电流信号的直流分量、一次谐波分量(基频为 ω_d)、二次谐波分量和三次谐波分量。其中,一次谐波分量为电机有效驱动电压和电流,其余部分均为杂波信号。分别针对每种信号求得相关功率

$$\begin{cases} P_0 = U_0 I_0 \\ P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi_{U1} - \varphi_{I1}) \\ P_2 = U_2 I_2 \cos(\varphi_{U2} - \varphi_{I2}) \\ P_3 = U_3 I_3 \cos(\varphi_{U3} - \varphi_{I3}) \end{cases} \quad (12)$$

其中: $P_0, P_1, P_2, P_3, I_0, I_1, I_2, I_3$ 和 U_0, U_1, U_2, U_3 分别为直流分量、一次谐波、二次谐波和三次谐波的功率、电流和电压有效值; φ_U 为电压相位角; φ_I 为电流相位角。

在获得各谐波分量的功率之后,得到电机输入功率如式(13)所示。由于超声电机驱动信号为两路,因此输入功率要乘以 2

$$P_{\text{Din}} = 2(P_0 + P_1 + P_2 + P_3) \quad (13)$$

4.2.2 电路系统阻抗的获取

依据式(12)将示波器测试得到的电机输入电压、电流的瞬时数据进行处理,得到电机输入电压和电流的有效值分别为

$$I_A = I_B = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2} \quad (14)$$

$$U_A = U_B = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + U_3^2} \quad (15)$$

式(12)中,一次谐波分量是以匹配电路共振频率 ω_d 为基频的谐波分量, P_1 为电路的有功功率。在获得电机输入功率之后,得到电路的功率因数为

$$\cos(\varphi_d) = \frac{2P_1}{P_{\text{Din}}} \quad (16)$$

阻抗特性是电机与驱动器组成机电系统的一个重要参数量。笔者在获得电路的电压有效值、电流有效值和电路功率因数之后,对电路的阻抗实部、阻抗虚部和阻抗的模进行了计算,分别如式(17)~(19)所示。

$$\text{Re} |Z_{\omega_d}| = \frac{U_A}{I_A} \cos(\varphi_d) \quad (17)$$

$$\text{Im} |Z_{\omega_d}| = \frac{U_A}{I_A} \sin(\varphi_d) \quad (18)$$

$$|Z_{\omega_d}| = \frac{U_A}{I_A} \quad (19)$$

4.3 不同因素对机电系统阻抗的影响实验分析

4.3.1 电机输出扭矩、电机驱动频率与系统阻抗模的关系

本实验测试中电机驱动电压峰-峰值设置为 350 V;驱动器谐振匹配点设置为 39 515 Hz,电机的输出扭矩定在 0.1,0.3 和 0.5 N·m 的状态。得到电机输出扭矩、电机驱动频率与系统阻抗模之间的关系如图 13 所示。

4.3.2 谐振匹配点、电机驱动频率与系统阻抗模之间的关系

本实验测试中电机驱动电压峰-峰值设置为 350 V;驱动器谐振匹配点分别设置为 36 531, 39 515 和 44 232 Hz,电机的输出扭矩定在 0.3 N·m 的状态。得到电机谐振匹配点、电机驱动频率与系统阻抗模之间的关系如图 14 所示。

对比仿真结果图(8~10)和实验结果图(13,14)可以看出,机电系统阻抗特性随着驱动频率的变化趋势是一致的。由图 13,14 得到:a. 机电系统随着

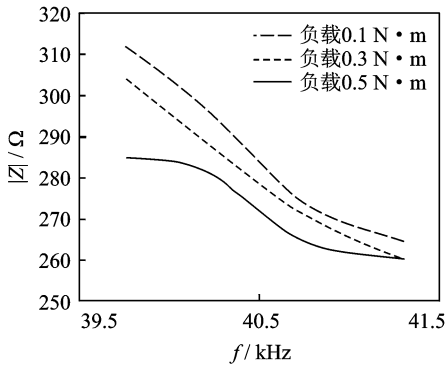


图 13 驱动频率-负载扭矩-阻抗模

Fig. 13 Drive frequency-load torque-impedance mode

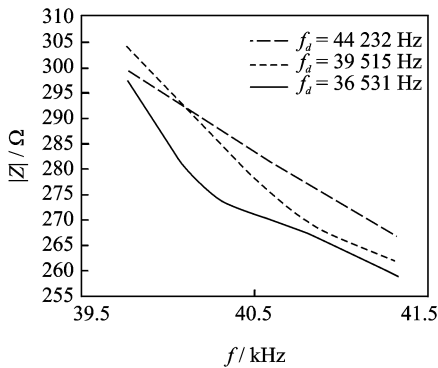


图 14 驱动频率-谐振匹配点-阻抗模

Fig. 14 Drive frequency-resonance matching point-impedance mode

驱动频率的降低阻抗呈单调增大趋势,同时电机负载扭矩(小于额定扭矩)越大,系统阻抗越小。b. 机电系统谐振匹配频率越小,系统阻抗越小,同时谐振匹配点越靠近电机共振频率,系统阻抗模随着驱动频率的减小增大的越快。

4.4 超声电机最佳驱动频率点分析

为了在实际工作中尽量减小电机的驱动电流,同时又能保证电机输出性能,这里着重对电路的谐振匹配点和电机最佳工作驱动频率点进行分析。由于谐振电路阻抗越大,电路的电流越小,由此推断超声电机的谐振匹配点应该略高于电机的机械共振频率点,同时电机的驱动频率应该在系统谐振频率点为最佳。文献[1,8]均提出行波型超声电机应该工作在反谐振点附近,理由是电机使用的压电陶瓷片的阻抗特性如图 15 所示。但图 15 所示的超声电机用的压电陶瓷导纳特性测试是在很低的电压(一般为 5 V)下测试的结果,而行波型超声电机实际工作的电压峰-峰值为 300 V 以上。电机在正常工作状

态下是否还存在反谐振点还不能确定。即使存在反谐振点,在电机正常工作中也无法及时准确地找到电机的反谐振点。

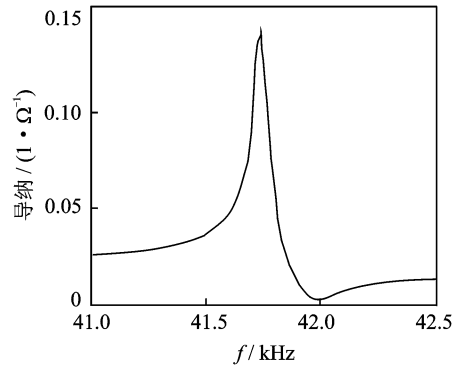


图 15 压电陶瓷的导纳特性

Fig. 15 Admittance characteristics of piezoelectric ceramics

5 结束语

超声电机在正常工作的频带内阻抗是单调的,越靠近共振点,系统阻抗越大。在略大于电机共振频率点的 100~250 Hz 的驱动频率点,可以认为是反谐振频率点,此时电机的工作电流相对较小。可见,超声电机实际工作的理想频率为略大于电机机械共振频率的频率点,超声电机驱动器的谐振匹配频率点也在略大于电机机械共振点的频率点。

参 考 文 献

- [1] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京:科学出版社, 2007:1-19.
- [2] Nakazono M, Kanda T, Yamaguchi D, et al. A study on temperature dependence of an ultrasonic motor for cryogenic environment[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(7):115-122.
- [3] Ri C S, Kim M J, Kim C S, et al. Study on the vibration displacement distribution of a circular ultrasonic motor stator[J]. Ultrasonics, 2015(59):59-63.
- [4] Shi Jingzhuo, Liu Yu. Simple expert PID speed control of ultrasonic motors [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36):120-125.
- [5] Li Huafeng, Ding Qingjun, Chen Chao. Research on startup reliability of ultrasonic motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9):138-145.
- [6] Radi B, Hami A E. The study of the dynamic contact in ultrasonic motor[J]. Applied Mathematical Modeling, 2010, 34(12):3767-3777.
- [7] Lionel P, Nicolad R, Roland B, et al. Frequency be-

- haviour and speed control of piezomotors[J]. *Sensors and Actuators*, 2000,80:45-52.
- [8] 赵淳生,祖家奎.行波型超声电机定子的共振与反共振特性的研究[J].*声学学报*,2005,33(1):1-8.
Zhao Chunsheng, Zu Jiakui. Resonance and anti-resonance characteristics of the stator of traveling wave ultrasonic motor[J]. *Journal of Acoustics*, 2005,33(1):1-8. (in Chinese)
- [9] 祖家奎,赵淳生.超声电机定子的驱动方式及其振动响应特性[J].*压电与声光*,2006,28(1):92-95.
Zu Jiakui, Zhao Chunsheng. Driving mode and vibration response characteristics of ultrasonic motor stator [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2006,28(1):92-95. (in Chinese)
- [10] 李华峰,赵淳生.基于LC谐振的超声电机驱动器的研究[J].*中国电机工程学报*,2008,25(23):144-148.
Li Huaifeng, Zhao Chunsheng. Research on ultrasonic motor driver based on LC resonance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008,25(23):144-148. (in Chinese)
- [11] 袁小红.直线型驻波超声电机及其自振荡驱动电路的研究[D].南京:南京航空航天大学,2001.
- [12] 徐东梁.超声电机自振荡驱动器的研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.
- [13] 颜佳佳,阮新波,李华峰,等.超声电机的软开关驱动电路[J].*中国电机工程学报*,2009,29(3):109-114.
Yan Jiajia, Ruan Xinbo, Li Huaifeng, et al. Soft switch driving circuit of ultrasonic motor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009,29(3):109-114. (in Chinese)
- [14] 梁大志,时运来,朱华,等.超声电机驱动及控制技术的新进展[J].*振动、测试与诊断*,2012,32(6):990-993.
Liang Dazhi, Shi Yunlai, Zhu Hua, et al. New development of ultrasonic motor drive and control technology[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2012,32(6):990-993. (in Chinese)
- [15] 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*,2014,19(35):62-64.
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*, 2014,19(35):62-64. (in Chinese)
- [16] 梁大志,张军,赵淳生,等.一种超声电机双PWM功率驱动拓扑结构:中国,201210451717.9[P].2012-11-13.
- [17] 徐志科.行波型超声波电机的模型仿真与试验研究[D].南京:东南大学,2005.
- [18] Nakazono M, Kanda T, Yamaguchi D, et al. A study on temperature dependence of an ultrasonic motor for cryogenic environment[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015,54(7):7-15.
- [19] Philippe B, Kenji U. Combined finite element analysis-genetic algorithm method for the design of ultrasonic motor[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003,14(10):657-667.



第一作者简介:牛子杰,男,1985年10月生,博士。主要研究方向为行波超声电机及其驱动控制系统。曾发表《傅里叶变换的行波型中空超声电机的系统效率》《《振动、测试与诊断》2015年第35卷第6期》等论文。

E-mail: 328920539@qq.com

通信作者简介:孙志峻,男,1970年2月生,教授、博士生导师。主要研究方向为超声电机及其应用和机电一体化技术。

E-mail: meezjsun@nuaa.edu.cn

