

超声电机定子的动力学特性仿真

王育平 赵增辉 陈波 袁义坤

(山东科技大学理学院, 青岛 266510)

摘要 将行波超声电机的两相振动简化为两自由度系统,建立了基于模态假定的动力学方程.基于机电类比建立定子系统的传递函数及导纳表达式,通过有限元计算及实验测量确定模型参数,在此基础上建立了定子动力学模型的仿真模型.结果表明该模型可用于进行定子的参数化设计及性能的预测.

关键词 超声电机,模态假定,动力学模型,仿真模型

引言

超声电机是近十年来才发展起来的一种全新概念的新型驱动装置.它利用压电材料的逆压电效应,把电能转换为弹性体的超声振动,并通过摩擦传动的方式转换成运动体的回转或直线运动.这种新型的电机一般工作于 20 kHz 以上的频率,故称超声电机.

由于超声电机的研究起步较晚,目前开发出的原型机普遍存在如下问题:性能不稳、效率低、负载特性难以预测、尚难以实现精确控制及无法按照性能要求进行设计等等,离工业产品的标准尚有很大差距.因此如何在设计阶段就可以预测超声电机的输出特性,评价其性能的优劣,研究超声电机的材质、形状、尺寸变化时以及不同的工作状况等等因素对其性能的影响程度,对初步设计进行修改,实现参数化设计从而既高效又经济地设计出性能优异的电机产品,最终实现超声电机的优化设计显得尤为重要.本文正是基于以上目的,在利用文献[1]的动力学模型的基础上,对超声电机定子的输出特性进行仿真分析.

1 基于模态假定的超声电机动力学模型及其等效电路模型

超声电机工作在预先选定的某一特定模态,对于圆板型旋转行波超声电机来讲,实质上是两个在时间和空间上相差 90 度的正交驻波模态的叠加,故此定子中性层面的工作振型(实质上也是两个正

交振型按某种特定方式的叠加)可假定为已知,这是采用基于模态假定进行超声电机建模的一大优势.一般可设为

$$\varphi_{smesh}(r, \theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ F(r)\cos(q\theta) & F(r)\sin(q\theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 q 为所用模态阶次.如此假定既符合超声电机的实际振动型态,又将 r, θ 两个变量分离开来,便于计算处理.同时,模态坐标也就只有两个,即 $n = 2$

$$\omega(t) = \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

为此,可以用模态质量、模态刚度和模态力等模态参数在模态域内将带齿定子环这样一个复杂的连续质量系统的振动方程化简为单自由度系统(具体推导见文献[1])

$$M_s \ddot{\omega} + C_s \dot{\omega} + K_s \omega = \Theta v + F_{xt} + F_{xt} \quad (3)$$

其中 $M_s = M_{s \setminus p} + M_p$ 为定子的模态质量; $K_s = K_{s \setminus p} + K_p$ 为定子的模态刚度; C_s 为定子结构的模态阻尼; Θ 称为力系数,单位为 N/v 或 C/m,它表示当给压电陶瓷施加一定的电压时,相当于给振子施加了 ΘV 的激振力. F_{xt} 和 F_{xt} 分别为定/转子接触界面的法向和切向模态力.

由于旋转行波超声电机为两相驱动的驻波模态的叠加,为考察两相之间的相互耦合影响,我们将每相振动模态简化为一单自由度系统,为此将式(3)改写为

$$\begin{aligned}
 M_s \ddot{w}_1 + C_{s1} \dot{w}_1 + K_{s1} w_1 &= \Theta_1 v + \\
 &F_{scn1} + F_{sc1} \\
 M_s \ddot{w}_2 + C_{s2} \dot{w}_2 + K_{s2} w_2 &= \Theta_2 v + \\
 &F_{scn2} + F_{sc2}
 \end{aligned} \tag{4}$$

这样,通过模态质量、模态刚度、力系数等的计算,将压电陶瓷诱发应变的激振效果等效成两自由度弹簧—质量系统在外力作用下的强迫振动,不仅求解简单,更便于进行动态特性分析。

超声电机的工作模态对应于等效电路的谐振状态,以一相为例,该机械振动方程的等效电路如图1。

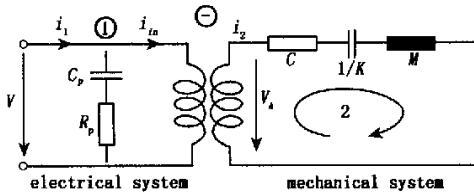


图1 A相振动模式的等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit for vibration mode of phase A

其中 R_p 为夹持等效电阻,表示介电损失,即电场强度 E 和电位移 D 之间因滞后产生热的现象,这种损失在低频范围可以忽略,但高频不能忽略.对超声波电动机所用频率可忽略.今后的等效电路可不计 R_p 的影响; C_p 为压电振子在高频下的夹持等效电容。

流入机械系统的电流

$$i_{in} = i_1 - V \cdot C_p s \tag{5}$$

机械系统中存在如下关系

$$V_A = i_2 (M_s s + C_s + \frac{K_s}{s}) \tag{6}$$

由力系数的定义可知

$$V_A = \Theta V, i_2 = \frac{1}{\Theta} i_{in} \tag{7}$$

联立式(5)~式(7)可以得到输入导纳的表达式

$$\begin{aligned}
 Y(s) &= \frac{i_1(s)}{V} = \\
 &\frac{M_s C_p s^3 + C_s C_p s^2 + (\Theta^2 + K_s C_p) s}{M_s s^2 + C_s s + K_s} \text{ (不计 } R_p \text{)} \tag{8}
 \end{aligned}$$

2 压电振子的仿真模型及参数的确定

2.1 传递函数及仿真模型

定子中的行波是基于同频等幅,时间和相位分

别相差 90 度的两相驻波的叠加,而同频等幅两个相互正交的驻波存在的条件是定子结构的对称性(如对称的圆形薄板),也即实现模态兼并,否则会出现振型失调现象.此外,为了保证压电陶瓷片能够有效地激发出所需的振型,旋转型压电行波超声马达的压电陶瓷片每一区域的形状和大小须根据行波的振型图进行设计.但是在实际制作当中,很难保证定子结构和压电陶瓷的准确设计,两相驻波不可能是完全相互独立的,两相之间存在耦合效应是相互影响的^[2].假设两相之间的相互影响系数分别为 μ_1 和 μ_2 (如 μ_1 表示 A 相对 B 相的影响).理想情况下,两相驻波是相互独立的,相互之间不存在耦合效应。

为方便在 MATLAB/SIMULINK 软件环境中对压电振子的动力学模型进行仿真,在此采用其传递函数模型.超声电机定子的动力学系统是一多变量系统,其不仅受到驱动电压的作用,而且还受到定转子之间的模态力作用,我们以该驱动电压和模态力作为输入变量,以模态位移和模态速度作为输出变量来建立传递函数模型,其模型示意图(图2),为了研究输入量与输出量的相互关系(考虑两相之间的相互影响),需建立以下传递函数,每相内 V_1 与 $W_1 G_{V_1 W_1}(s)$, V_2 与 $W_2 G_{V_2 W_2}(s)$, F_{sc1} 与 $W_1 G_{F_{sc1} W_1}(s)$, F_{sc2} 与 $W_2 G_{F_{sc2} W_2}(s)$, 两相之间相互影响 V_1 与 $W_2 G_{V_1 W_2}(s)$, V_2 与 $W_1 G_{V_2 W_1}(s)$.将式(4)简化得到

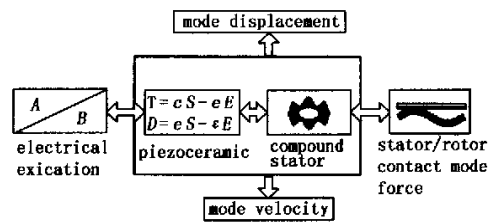


图2 定子系统的输入输出示意图

Fig.2 The sketch map for the in-out of stator system

$$\begin{aligned}
 M_s \ddot{w}_1 + C_{s1} \dot{w}_1 + K_{s1} w_1 &= F_{V_1} + F_{sc1} \\
 M_s \ddot{w}_2 + C_{s2} \dot{w}_2 + K_{s2} w_2 &= F_{V_2} + F_{sc2}
 \end{aligned} \tag{9}$$

其中 $F_{V_{1,2}} = \Theta_{1,2} v$, 为等效激振 $F_{sc} = F_{sc1,2} + F_{sc1,2}$ 为定转子接触界面的模态力.将两相之间的影响系数考虑在内,则

$$F_{V_1} = \Theta_1 [(1 - \mu_1) V_1 + \mu_2 V_2]$$

$$F_{V_2} = \Theta_2[(1 - \mu_2)V_1 + \mu_1 V_2] \quad (10)$$

将上式代入式(9)得到

$$\begin{aligned} M_s \ddot{w}_1 + C_{s1} \dot{w}_1 + K_{s1} w_1 &= \Theta_1[(1 - \mu_1)V_1 + \mu_2 V_2] + F_{x1} \\ M_s \ddot{w}_2 + C_{s2} \dot{w}_2 + K_{s2} w_2 &= \Theta_2[(1 - \mu_2)V_2 + \mu_1 V_1] + F_{x2} \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)两边分别进行 Laplace 变换整理后得到

$$\begin{aligned} w_{1(s)} &= \frac{\Theta_1(1 - \mu_1)}{M_s s^2 + C_{s1}s + K_{s1}} V_1(s) + \\ &\frac{\Theta_1 \mu_2}{M_s s^2 + C_{s1}s + K_{s1}} V_2(s) + \\ &\frac{1}{M_s s^2 + C_{s1}s + K_{s1}} F_{s1}(s) \\ w_{2(s)} &= \frac{\Theta_2(1 - \mu_2)}{M_s s^2 + C_{s2}s + K_{s2}} V_2(s) + \\ &\frac{\Theta_2 \mu_1}{M_s s^2 + C_{s2}s + K_{s2}} V_1(s) + \\ &\frac{1}{M_s s^2 + C_{s2}s + K_{s2}} F_{s2}(s) \end{aligned} \quad (12)$$

引入传递函数,整理得到

$$\begin{aligned} w_{1(s)} &= G_{V_1 w_1}(s) V_1(s) + G_{V_2 w_1}(s) V_2(s) + \\ &G_{F_{s1} w_1}(s) F_{s1}(s) \\ w_{2(s)} &= G_{V_2 w_2}(s) V_2(s) + G_{V_1 w_2}(s) V_1(s) + \\ &G_{F_{s2} w_2}(s) F_{s2}(s) \end{aligned} \quad (13)$$

在此我们对自由定子的动力学特性进行仿真,这样上式可以简化为

$$\begin{aligned} w_{1(s)} &= G_{V_1 w_1}(s) V_1(s) + G_{V_2 w_1}(s) V_2(s) \\ w_{2(s)} &= G_{V_2 w_2}(s) V_2(s) + G_{V_1 w_2}(s) V_1(s) \end{aligned} \quad (14)$$

2.2 模型参数的确定^[3]

仿真模型的精度很大部分取决于仿真参数的准确确定,对于动力学模型中的模态参数的确定我们将采用有限元计算和实验测量相结合.通过模态假定定子每相的动力学方程可以简化为模态域内的单自由度系统.

短路状态下求得共振频率

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_s}{M_s}} \quad (15)$$

开路状态下($q = 0$)求得反共振频率

$$f_{ant} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_s + \frac{\Theta^2}{C_p}}{M_s}} \quad (16)$$

共振频率和反共振频率可以通过实验获得的导纳曲线直接获得.

(1) 模态质量的、模态刚度和力系数的确定

利用软件平台(如 ansys)有限元模态分析来确定定子在一定工作模式下的模态质量.假设时间域内定子的质量矩阵为 M ,则模态域内对应的模态质量为 $M_s = \phi^T M \phi$, ϕ 为工作模态的振型函数矩阵.在模态坐标下,各阶模态及各阶主振动之间不会发生能量传递,各阶模态是相互独立线性无关的,每一阶主振动可以看成是一个具有某阶主质量和主刚度,并按同价固有频率及相应的主振型作振动的单自由度系统,只要计算出最大动能,进行振型归一化处理,就可以提取出模态质量;模态刚度可以由模态质量和式(15)直接获得

$$K_s = M_s (2\pi f_{res})^2 \quad (17)$$

联立式(15)和式(16)得到力系数

$$\Theta = \sqrt{M_s C_p ((2\pi f_{ant})^2 - (2\pi f_{res})^2)} \quad (18)$$

(2) 影响因子

影响因子一般比较小,取决于定子本身的结构对称性以及压电陶瓷的粘贴精度.为了较准确的反映这两方面的因素,采用有限元分析的静力学分析,先对 A 相施加电压,考察其在两相中引起的位移,然后在 B 相施加电压,考察其在两相中引起的位移.以 W_{11}, W_{21} 分别表示在 A 相施加电压 V_1 在 A, B 相中引起的位移,同理,在 B 相施加电压在两相中引起的位移为 W_{12}, W_{22} .由于是静力学分析,式(11)简为

$$\begin{aligned} K_{s1} W_{11} &= \Theta_1(1 - \mu_1) V_1 \\ K_{s2} W_{21} &= \Theta_2 \mu_1 V_1 \\ K_{s1} W_{12} &= \Theta_1 \mu_2 V_2 \\ K_{s2} W_{22} &= \Theta_2(1 - \mu_2) V_2 \end{aligned} \quad (19)$$

对两相施加相同大小的电压,整理式(19)可以得到

$$\begin{aligned} \mu_1 &= \frac{\frac{W_{21}}{W_{22}} - \frac{W_{12}}{W_{11}} \frac{W_{21}}{W_{22}}}{1 - \frac{W_{12}}{W_{11}} \frac{W_{21}}{W_{22}}} \\ \mu_2 &= \frac{\frac{W_{12}}{W_{11}} - \frac{W_{21}}{W_{22}} \frac{W_{12}}{W_{11}}}{1 - \frac{W_{21}}{W_{22}} \frac{W_{12}}{W_{11}}} \end{aligned} \quad (20)$$

(3) 夹持电容、阻尼系数确定

夹持电容可以通过电流表或低频交流电桥测

量直接得到,在有限元分析中,我们假定定子内的阻尼为结构阻尼,并且两相中的阻尼相同,通过对定子激振在后处理中绘制输入导纳曲线,然后入实验获得的导纳曲线相比较,通过不断调整阻尼的大小,使两曲线在共振和反共振频率处相吻合来确定阻尼系数.

经过以上分析计算得到施加电压为 100 V 时定子模型参数如下

表 1 传递函数模型参数

Table 1 The parameters of transfer-function modeling

	M_i (Kg)	K_i (M/m)	C_{i1} (Nsm ⁻¹)	μ	C_p (nf)	θ (C/m)
Phase A	0.0138	9.32e8	6	0.02	6.04	0.242
Phase B	0.0138	9.48e8	6	0.02	6.20	0.258

3 仿真分析^[4]

根据所建立的传递函数以及定子导纳表达式,建立如下的仿真模型,代入以上参数即可确定传递函数模型及导纳表达式利用 MATLAB 程序对 $\Phi 60$ 型超声电机的定子进行了基于压电陶瓷激振的动力学仿真(此时不计摩擦界面对定子的作用).

在 A, B 两相压电陶瓷上分别施加幅值为 $V_{0-P} = 100$ v 的余弦、正弦交变电压,激振频率为 $f = 42.5$ kHz.

$$\begin{cases} v_A(t) = V \cos \omega t \\ v_B(t) = V \sin \omega t \end{cases} \quad (21)$$

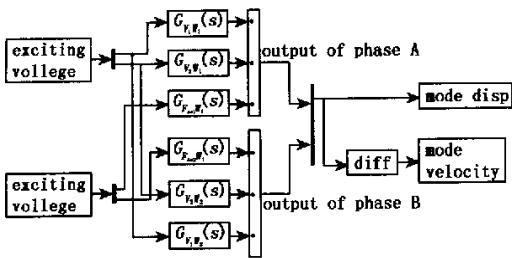


图 3 定子动力学系统仿真模型框图

Fig.3 Scheme for the simulation model of dynamic system of stator

(1) 模态位移

红色部分代表两相之间的耦合影响,其值的大小取决于加工制造因素以及设计阶段材质参数的准确性,但在电机的实际制造中很难保证两相的完全对称,应尽量把误差降到最低.

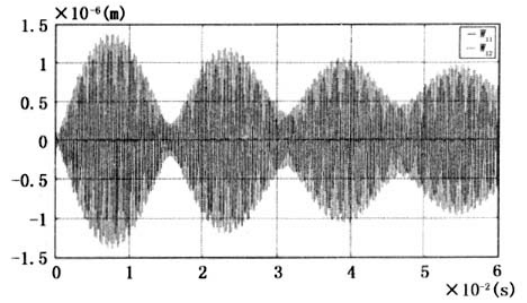


图 4 A 相定子模态位移仿真曲线

Fig.4 The simulation curve of modal displacement of phase A

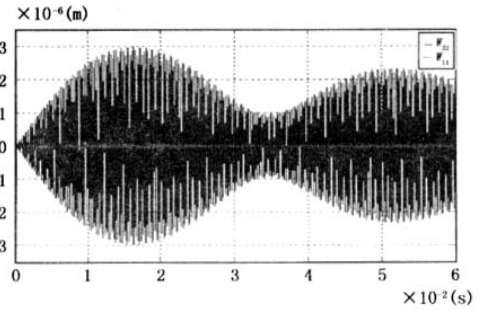


图 5 B 相定子模态位移仿真曲线

Fig.5 The simulation curve of modal displacement of phase B

(2) 导纳比较

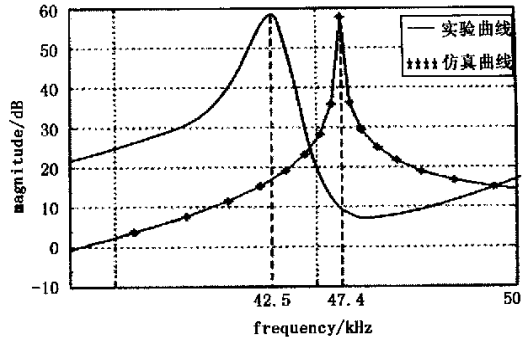


图 6 实验导纳曲线和仿真导纳曲线比较

Fig.6 The comparison between the admittance curves of simulation and experiment

图中为仿真导纳曲线(星花线)与实验得到的导纳曲线(实线)比较.仿真的精度不仅取决于模型参数的精确度,还取决于压电陶瓷的工作特性,导纳表示的是压电陶瓷的电学特性,由于压电材料本身的非线性因素会导致大功率下压电振子的导纳测量与通常的小功率条件下测得的结果有所不同,实验过程中还伴随有压电陶瓷的发热等现象.

4 结论

目前超声电机的开发研究主要还是依靠实验和专家经验,没有一套系统完整的理论参考^[6],要开发出性能稳定的电机,在设计之初进行性能预测是至关重要的.由于超声电机利用的是A,B两相驻波按一定条件叠加而成的行波,本文所建立仿真模型可以通过分别对A,B两相进行单独激励,并考虑实际制作中存在的误差,对激发的振型进行预测,另外,还可以用来研究超声电机的材质、形状、尺寸变化等等因素对其性能的影响程度,对初步设计进行修改.但由于计算所用材质参数的不精确以及加工制造等因素的影响,实际制造出来的超声电机的模态参数难免与计算结果存在一定的误差.对于行波型超声电机来讲在共振点附近的可运转频段较窄;因而在超声电机制造完成以后,必须通过实验的方法来最终精确确定其共振频率及可运转频段,从而能在此基础上进一步确定超声电机的工作频率(实质上是处在可运转频段范围内的某一工作频段),以便据此设计驱动电路,确定驱动频率.特别是利用调频法来对超声电机进行控制时,该频段的确定更是尤为重要.

参 考 文 献

1 赵向东,赵增辉,赵淳生.旋转型行波超声电机的动力学

模型研究.2004年全国振动工程及应用学术会议,南京航空航天大学出版,2004,(8)(Zhao Xiangdong, Zhao Zenghui, Zhao Chunsheng. Research on the dynamic model of ring type traveling-wave ultrasonic motor. National Academy Conference on Vibration Engineering and Its Application. Published by Nanjing Univ. of Aeronautics and Astronautics, 2004(8)(in Chinese))

- 2 朱美玲,金龙,赵淳生.行波超声马达传动机理的研究(一).振动、测试与诊断,1992,16(4):7~14(Zhu Meiling, Jin Long, Zhao Chunsheng. Research on Transmission Mechanism of Piezoelectric Traveling Wave Ultrasonic Motors Part I. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 1992, 16(4): 7~14(in Chinese))
- 3 易日.使用ansys6.1进行结构力学分析.北京大学出版社,2002(Yi Ri. Analysis of structural mechanics with ansys 6.0. Peking university publishing company, 2002(in Chinese))
- 4 姚俊,马松辉. Simulink建模与仿真.西安电子科技大学出版社,2002(Yao Jun, Ma Songhui. Modelling building and simulation with simulink. Xi Dian university publishing company, 2002(in Chinese))
- 5 胡敏强.超声电动机的研究及其应用.微特电机,2000,(5):8~10(Hu Minqiang, Research and Application of Ultrasonic Motor. *Small & Special Electrical Machines*, 2000,(5):8~10(in Chinese))

SIMULATION ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE STATOR OF ULTRASONIC MOTOR

Wang Yuping Zhao Zenghui Chen Bo Yuan Yikun

(College of Science of Shan Dong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract The two-phases vibrations of the stator of traveling-wave type ultrasonic motor were simplified into a system of two degrees of freedom, and a dynamic equation was established sequently based on the mode assumption. The expressions for the transfer function and admittance were deduced based on the equivalent circuit, and as a result the parameters were decided through FEM calculation and experimental measurement. Based on this, a simulating model was set up for the dynamic model. The results showed that the method can be used for the parametric design and performance prediction for the stator of ultrasonic motor.

Key words ultrasonic motor, mode assumption, dynamic model, simulating model