

文章编号 1004-924X(2009)12-3009-07

超声电机定子振动分析的模态选择

周盛强,赵淳生

(南京航空航天大学 精密驱动研究所,江苏 南京 210016)

摘要:结构的主动控制通常是通过对结构的少数几个主要模态的控制来实现的。常用的假设模态法可以建立系统的低阶近似运动方程,但很难找到适用于整个系统的假设模态;有限元法的求解精度较高,但得到的动力学方程数目较大,影响系统后续计算分析的效率。本文在超声电机定子振动模态有限元分析的基础上,引入模态选择方法,对结构模态截断,仅保留特定的模态来实现模型降阶。以旋转型行波超声电机定子为例,用 APDL 实现了从有限元分析结果中自动识别工作模态,提取特定的模态参数和相应等效电路模型的电学参数,仿真计算了定子的机械和电学响应。激光多普勒测振试验得到的定子工作模态频率与假设模态法计算值的相对误差为 9.1%,与有限元法计算值的相对误差为 0.3%;动力响应的试验值与模态选择法计算值的相对误差为 3%。实验结果表明,本文采取的模态参数提取方法是有效的,相比假设模态法能更精确地反映实际自由定子的运动状况。

关键词:超声电机;定子;振动分析;假设模态法;有限元法;模态截断法

中图分类号:TM35;TB559 **文献标识码:**A

Modal truncation to vibration analysis of stator in ultrasonic motor

ZHOU Sheng-qiang, ZHAO Chun-sheng

(Precision Driving Laboratory, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The active controls of structures are always realized by controlling a few major modes. The assumed modal method can be used to establish a low-order motion equation to reduce modes, but it is difficult to find a suitable assumed mode for the entire system. Moreover, although the solution precision of the finite element method is higher, the greater number of freedom degrees can affect the subsequent computation efficiency. Based on the finite element analysis on the vibration mode of the stator in an ultrasonic motor, this paper presents a modal truncation method to reduce the dimension of the finite element model and to reserve the special modes. By taking a stator in the travelling rotary ultrasonic motor TRUM as an example, the ANSYS Parametric Design Language (APDL) is used to recognize the working mode automatically, to extract the electrical parameters of equivalent circuit model and to calculate the mechanical and electrical responses simulatively. The dynamic properties of the structure are simulated and tested with a laser Doppler vibrometer. Comparing with experiment results of the working mode frequency, the relative error is 9.1% to the assumed modal method, and 0.3% to the finite element method. For the stable response, the relative error between the observa-

收稿日期:2009-01-08;修订日期:2009-03-06.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50735002; No. 10604032)

tion and the calculation of the modal truncation method is 3%. It is shown that the acquisition method of modal parameters is effective and the modal parameters reflect the actual motion state of the free stator more precisely than that of the assumed modal method.

Key words: ultrasonic motor; stator; vibration analysis; assumed modal method; finite element method; modal truncation method

1 引言

在结构动态分析中,动力学模型建立的正确与否直接关系到分析结果是否可靠,而连续系统的精确解仅限于简单的构件形状和边界条件。对于实际工程问题,大多只能利用近似方法求解,各种近似方法的共同点是用有限自由度系统近似地代替连续系统。连续系统的离散化方法主要有集中质量法、假设模态法和有限元法,其中有限元法汲取了集中质量法和假设模态法的优点,将复杂的结构分割为有限个单元,用节点位移(广义坐标)和插值函数(单元的假设模态)来表示整个结构的模态^[1]。

结构的主动控制,通常是通过对结构的少数几个主要模态的控制来实现的。所以,常采用假设模态法,由哈密顿变分原理来建立系统的低阶近似运动方程。在旋转行波型超声电机(TRUM)定子的动力学分析中,常将定子假设为圆环形压电层合板,并由此构造假设模态,将哈密顿变分原理推广到连续介质,经积分运算得到用定子模态质量、模态刚度、和模态广义力表示的运动方程^[2-4]。工程实践中,为了增大驱动效果,定子通常开有齿槽,由此增加了内圈的支撑板,使得结构形式比较复杂^[5-6]。假设模态法原则上适用于复杂结构,但找到的适用于整个系统的假设模态常忽略内了支撑板和齿结构,并不能完整描述定子的特征结构。

当前有很多学者采用有限元法对定子进行振动分析^[7-9]。定子有限元模态分析主要是利用有限元分析软件对定子的模态在感兴趣的频带范围内进行全面计算,得到定子的各阶固有频率和固有振型,以验证所设计的定子是否含有所期望的振型以及该振型是否在所期望的频段范围内。同时,利用有限元分析软件的谐响应分析功能,计算定子在不同频率的外部激励电压下的响应(振动

振幅)。有限元法的求解精度较高,但求解结果是由物理坐标描述的关于单元节点列阵的一系列数据,需要进一步从特征值求解结果中识别出所需的模态参数^[5-6],而且有限元法得到的动力学方程数目较大,会影响系统后续计算分析的效率,所得到的模型难以与控制系统设计相结合^[10]。

针对假设模态法难以找到适用于整个系统的假设模态,而有限元法得到的动力学方程数目较大等问题,本文在超声电机定子振动模态有限元分析的基础上,采用模态选择方法^[10]对结构模态进行截断,仅保留特定模态来实现模型降阶。以旋转型行波超声电机的定子为例,用 ADPL 编程实现了从 ANSYS 分析结果中自动识别工作模态、提取特定模态参数,得到了相应的等效电路参数,同时进行了定子的机械和电学响应分析。

2 模态截断和定子的运动方程

系统经有限元法离散后存在与自由度 n 相等的多个固有频率,每个固有频率对应于系统的一个特征向量。模态分析法以系统的各阶特征向量所组成的模态矩阵为变换矩阵,对选取的物理坐标进行线性变换,将互相耦合的 n 阶运动方程转化为 n 个互相独立的模态方程。如果在模态截断时仅选取特定的模态,即用少数 m 个特征向量组成缩减模态矩阵,对有限元法建立的定子运动方程进行线性变换,可以建立起保持原系统主要特性的低阶(m 个, $m < n$) 运动方程。模态截断阶数一般根据各阶模态在系统响应中贡献量的大小来选取^[10]。

旋转型行波超声电机的定子是旋转对称结构,存在两个同频正交弯曲模态,它们是相似的,仅在空间相位上相差 $\pi/2$ 。超声电机定子的主要功能是在超声频域的特定模态下产生某一共振,理想情况下定子仅由这两个工作模态激发,其他模态的贡献可以忽略^[4-5]。在模态截断时也仅保

留这两个工作模态,减缩后的运动方程与假设模态法得到的运动方程^[2-4]形式上一致,可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}\mathbf{p} &= \mathbf{\Theta}\mathbf{V} + \mathbf{F} \\ \mathbf{\Theta}^T \mathbf{p} + \mathbf{C}_d \mathbf{V} &= \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,模态质量矩阵 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_i & 0 \\ 0 & m_i \end{bmatrix}$,模态阻尼矩

阵 $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_i & 0 \\ 0 & c_i \end{bmatrix}$,模态刚度矩阵 $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_i & 0 \\ 0 & k_i \end{bmatrix}$,力

系数矩阵 $\mathbf{\Theta} = \begin{bmatrix} \theta_i & 0 \\ 0 & \theta_i \end{bmatrix}$,夹持电容矩阵 $\mathbf{C}_d =$

$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_d & 0 \\ 0 & \mathbf{C}_d \end{bmatrix}$,模态位移列阵 $\mathbf{p} = [p_{iA}, p_{iB}]^T$,电极上

施加的电压列阵 $\mathbf{V} = [V_A, V_B]$, \mathbf{F} 为定子所受的模态力列阵, \mathbf{Q} 为电极上的电荷列阵。

假设模态法已知的模态函数和有限元特征值求解所得的特定的特征向量是对应的,因此,用模态分析和模态截断得到的运动方程与假设模态所得的方程是类似的。

以模态质量为例,假设模态法表示为

$$m_i = \int_V \rho \phi_{iA}^T \phi_{iA} dU = \int_V \rho \phi_{iB}^T \phi_{iB} dU,$$

其中 ϕ_{iA} 、 ϕ_{iB} 为同频正交弯曲模态的连续函数, ρ 为材料的密度;有限元法表示为 $m_i = \{\phi_{iA}\}^T \mathbf{M}^e \{\phi_{iA}\} = \{\phi_{iB}\}^T \mathbf{M}^e \{\phi_{iB}\}$,模态表示为节点位移矩阵 $\{\phi_{iA}\}$ 、 $\{\phi_{iB}\}$ 的离散形式,总质量矩阵 \mathbf{M}^e 由单元质量矩阵 $\mathbf{M}^e = \int_V \rho \mathbf{N} \mathbf{N}^T dU$ 组集得到, \mathbf{N} 为插值函数矩阵。

3 模态参数的自动提取

利用 ANSYS 的模态分析可以直接得到超声电机定子的固有频率和固有振型,但要获得其他模态参数,如模态刚度、模态质量、模态阻尼、力系数等,则需要进行二次开发。如果从有限元分析结果中获取其生成的总刚度矩阵、总质量矩阵、机电耦合矩阵、介电矩阵,选取特定的特征向量组成减缩的模态矩阵,再由矩阵运算得到式(1)中的模态参数,这种方式较为复杂。

本文从能量分析的角度,在用 ANSYS 软件进行静态电学分析、模态分析的基础上,由 APDL

编程实现了工作模态识别和模态参数的自动提取。

夹持电容 C_d 反映压电陶瓷的静态介电特性,从能量上来看,电荷做的功转化为压电陶瓷中存储的电,即 $QV/2 = C_d V^2/2$ 。因此,通过给电极上施加单位电压,进行静态电学分析,从后处理 post1 获得相应电极上的电量 Q ,在数值上 $C_d = |Q|$ 。

对电极做短路处理,指定频率范围,振型按最大位移正规化,进行模态分析,得到各阶共振(谐振)模态。模态分析的结果包含一系列模态和对应着一系列单元节点数据组成的矩阵。旋转型行波超声电机定子一般采用 B_{0j} (0 节圆、 j 节径)振动模态,根据 B_{0j} 模态的特点,编制程序,可以从中找到所需的工作模态。本文采用先识别节径,即查询轴向是否有 j 个振幅峰;然后识别节圆,即查询沿某个轴向位移最大节点所在径向剖面上的所有节点位移是否均位于同侧,从最低阶到最高阶逐个判断是否是所需模态。也可采用判别理论计算模态和试验模态的相似程度的模态置信准则^[5]进行模态识别,从而找到 B_{0j} 工作模态对应的共振频率 ω_i 。

结构发生第 i 阶模态振动时的最大动能为 $m_i \omega_i^2/2$,最大势能为 $k_i/2$,利用单元表方式获取结构的动能或势能,进而得到模态刚度 k_i 和模态质量 m_i 。对于比例阻尼的情况,模态阻尼 $c_i = 2\xi \omega_i m_i$, ξ 为阻尼比。

对电极做开路处理,指定频率范围在共振频率 ω_i 附近,进行反共振模态分析。反共振模态与共振模态的振型相似,可以采用类似共振模态的识别方法,也可以从电学分析的角度进行识别。反共振的特点是流过定子的电流最小,如果两相均施加开路边界条件时,不能获取电极上的电量,这里采用一相开路而另一相短路的方式。逐阶比较电极上的电量,得到反共振频率 ω_{if} 。由式(1)及电极开路边界 $Q=0$,反共振频率可表示为 $\omega_{if} = \sqrt{(k_i + \theta_i^2/C_d)/m_i}$ 。由此间接得到力系数 θ_i 。

计算定子所受的模态力 $\mathbf{F} = [\{\phi_{iA}\}^T \{f\}, \{\phi_{iB}\}^T \{f\}]^T$ 时,仅需提取定子接触处节点的振型数据和节点载荷列阵。

4 定子的机械响应和电学响应

超声电机是利用压电陶瓷的逆压电效应激发出定子的共振响应来工作的。这里仅考虑自由定子的响应,即定子压电陶瓷所加外部电压激励下的强迫振动问题,此时模态力 $F=0$ 。

当 A、B 两相压电陶瓷分别施加频率为 ω 的 \sin 相和 \cos 相交变电压,即 $V=[V_A, V_B]^T=[V_{\max} \cos \omega t, V_{\max} \sin \omega t]^T$,主坐标下两相的稳态响应为 $p=[p_{iA}, p_{iB}]^T=[A_s \cos(\omega t + \psi), A_s \sin(\omega t + \psi)]^T$, ψ 为由阻尼而产生的相位差, A_s 为模态振幅

$$A_s(\omega) = \left| \frac{\theta_i V_{\max}}{-\omega^2 m_i + j\omega c_i + k_i} \right|. \quad (2)$$

在定子受激励开始振动的初始阶段,其自由振动伴随着强迫振动同时产生。结构的响应是暂态响应和稳态响应的叠加,通常采用数值积分方法进行瞬态分析。这里采用状态空间法,式(1)对应的状态空间方程为:

$$\begin{Bmatrix} \dot{p} \\ \dot{p} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p \\ \dot{p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} \\ M^{-1} \end{bmatrix} \Theta V. \quad (3)$$

物理坐标中定子各节点的位移为 $\{u\} = [\{\phi_{iA}\}, \{\phi_{iB}\}] [p_{iA}, p_{iB}]^T$,进而由单元形函数插值得到定子位移场。由 A、B 两相同频、等幅、空间及时间上相差 $\pi/2$ 的二个驻波叠加为一个行波,此时定子表面质点会产生椭圆轨迹运动。

将式(1)中的 $\theta_i p_{iA}$ 或 $\theta_i p_{iB}$ 类比于机械支路的电量 Q_{m0} ,可以转化为:

$$\frac{m_i}{\theta_i^2} \ddot{Q}_{m0} + \frac{c_i}{\theta_i^2} \dot{Q}_{m0} + \frac{k_i}{\theta_i^2} Q_{m0} = V. \quad (4)$$

$$Q_{m0} + C_d V = Q$$

将模态质量、模态阻尼和模态刚度分别对应于机械支路的电学参数,即等效电感 $L_0 = m_i / \theta_i^2$ 、等效电阻 $R_0 = c_i / \theta_i^2$ 、等效电容 $C_0 = \theta_i^2 / k_i$ 。定子的等效电路模型^[4]如图 1 所示:

机电耦合参数 $k = \sqrt{C_0 / (C_0 + C_d)}$,反映了压电陶瓷中的电场能与机械能之间的相互转换关系。

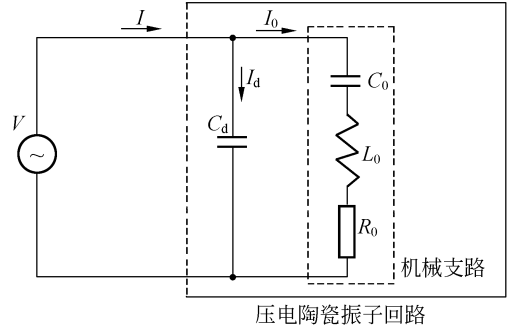


图 1 定子的等效电路模型

Fig. 1 Equivalent circuit model of stator

$$\text{机械支路的导纳为 } Y_{m0} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_0} + j\omega L_0 + R_0};$$

整个压电陶瓷谐振回路的导纳为 $Y_{md} = j\omega C_d + Y_{m0}$ 。

5 定子分析示例

以某电机 60 mm 直径的定子为例,定子设计的工作模态为 B_{09} 。利用参考文献[8-9]的方法建立有限元模型,用八节点六面体单元进行剖分,如图 2 所示。该模型共有 4320 个节点,2376 个单元。

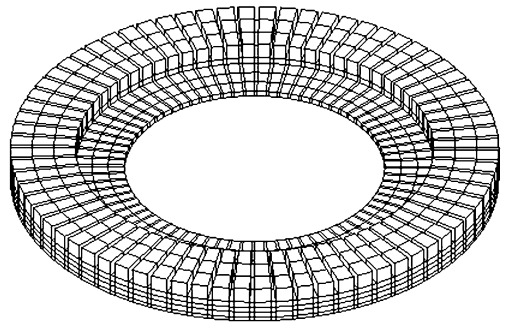


图 2 TRUM 电机定子的有限元模型

Fig. 2 Finite element model of stator in TRUM

弹性体部分的单元类型为 solid45,材质为磷青铜;压电体部分的单元类型为 solid5,材质为 PZT-8。力学边界为支撑板内圈固支。

先进行静态电学分析。给 A 相正极化区加单位正电压,给 A 相负极化区加单位负电压,压电陶瓷电极上的电流密度矢量分布如图 3 所示。按照第 3 节中介绍的方法得到夹持电容为 5.4491 nF。

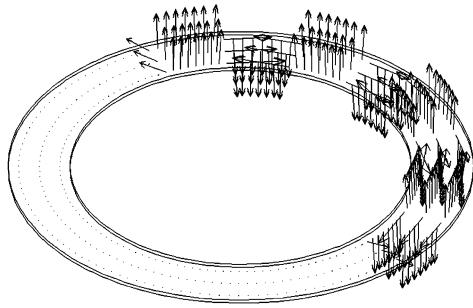


图 3 压电陶瓷电极上的电流密度矢量分布
Fig. 3 Current density vector plot of PZT

然后在电学短路条件下进行共振模态分析,计算了频率在 20~60 kHz 内的各阶振动模态,逐阶判断振型后找到 B_{09} 模态,如图 4 所示。

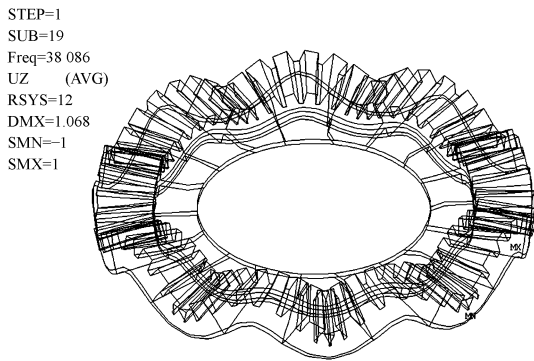


图 4 B_{09} 振动模态
Fig. 4 B_{09} vibration mode

然后进行电学开路条件下的反共振模态分析,计算频率在 B_{09} 模态频率附近的各阶振动模态,逐阶比较电极上的电量后找到反共振模态。振型按最大位移正规化时的模态参数和电学参数,列于表 1。作为比较,表中同时列出由假设模态法^[4]得到的数据。

表 1 定子的 B_{09} 模态和电学参数

Tab. 1 Modal & electric parameters of B_{09} mode

	本文方法	假设模态法
$\omega_i/2\pi$ (kHz)	38.086	41.69
m_i (kg)	0.014 836	0.013 3
k_i (N/m)	8.496 0e8	9.12e8
$\omega_{if}/2\pi$ (kHz)	38.320	41.91
C_d (nF)	5.449 1	6.01
θ_i (C/m)	0.238 96	0.242
C_0 (pF)	67.208	64.21
L_0 (mH)	259.83	226.95
k	0.110 38	0.102 803

利用 PSV 激光多普勒测振仪器进行定子的响应特性实验^[6],扫频及定频测试结果如图 5 所示。定子 38.2 kHz 时,被激发出 9 节径的弯曲振动模态,其顶端质点沿轴向位移和速度幅值分别为 3 μm 和 0.8 m/s。

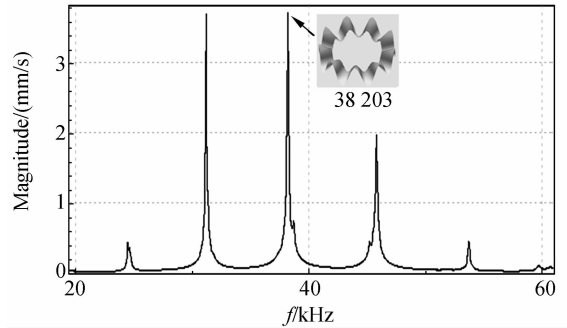


图 5 扫频及定频测试结果
Fig. 5 Frequency responses from laser vibrometer

由半功率带宽近似估计阻尼比^[5]时,按 $\xi=0.2\%$ 计算模态阻尼 $c_i=14.201$ kg/s,相应的等效电阻 $R_0=248.71 \Omega$ 。

由模态参数,用 MATLAB 求解状态空间模型(3),仿真施加频率为 38.23 kHz(与 B_{09} 共振频率之比为 1.004),200 V 峰峰值两相激励电压时超声电机定子的启动特性如图 6,启动过程大约需十几个毫秒,定子顶面最大半径处质点轴向振幅值趋稳于 3.103 μm 。由式(2)算得的稳态振幅为 3.137 μm 。

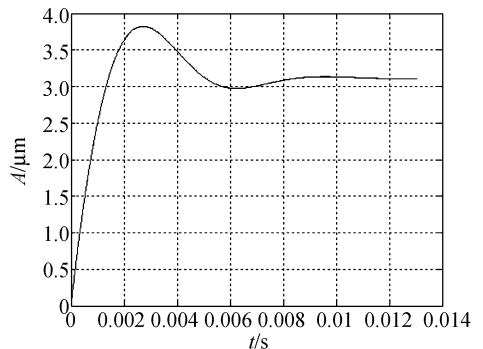


图 6 定子启动的瞬态过程仿真
Fig. 6 Simulation of transient response for stator

试验得到的定子工作模态频率与假设模态法的计算值相对误差为 9.1%,与有限元法的误差为 0.3%;动力响应的试验值与模态选择法计算值的相对误差为 3%。综合比较可以看出,假设模态法忽略了内支撑板和齿,而这部分结构对

定子的特性矩阵(即刚度和质量矩阵)有一定影响。本文采取的模态参数提取方法是有效的,相比假设模态法的模态参数能更精确地反映实际自由定子的运动状况。同时引入模态选择方法所得到的减缩的低阶运动方程保持了原系统的主要特性。

由 4 节的导纳计算公式,计算频率为 37.5~39 kHz 时定子的导纳特性曲线如图 7。

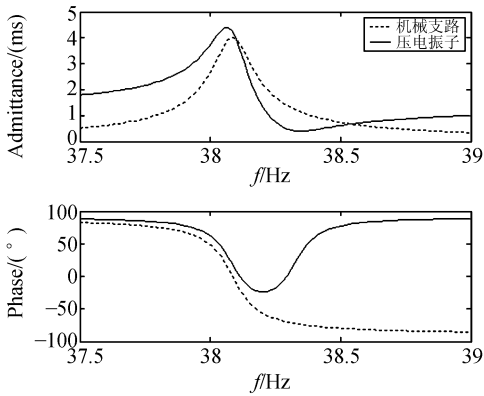


图 7 导纳特性曲线

Fig. 7 Admittance characteristic curve

参考文献:

- [1] 刘延柱, 陈文良, 陈立群. 振动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
LIU Y ZH, CHEN W L, CHEN L Q. *Vibration Mechanics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998. (in Chinese)
- [2] NESBITT W H, ANDREW J M. Modeling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor [J]. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.*, 1995, 42(2): 210-224.
- [3] NORDDIN E G. *Hybrid Modeling of a Traveling Wave Piezoelectric Motor* [D]. Denmark: Aalborg University, 2000.
- [4] 赵向东. 旋转型行波超声电机动力学模型及性能仿真的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2000.
ZHAO X D. *Study on the Dynamic Modeling and Simulation of the Traveling Wave Type Ultrasonic Motor* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2000. (in Chinese)
- [5] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出

6 结 论

利用有限元软件,通过 APDL 编程实现了工作模态识别和模态参数的自动提取,建立了保持原系统主要特性的低阶运动方程。这种方法避免了假设模态法难于找到适用于整个系统的假设模态的问题,无需进行繁琐的积分计算和矩阵运算,但在特征值计算上要耗费一定机时。

试验得到的定子工作模态频率与假设模态法的计算值相对误差为 9.1%,与有限元法的误差为 0.3%;动力响应的试验值与模态选择法计算值的相对误差为 3%。模态选择方法的引入,减缩了有限元法所得的定子运动方程阶数,比假设模态法的计算精度更高。通过模态质量、模态刚度、力系数等计算,将压电陶瓷诱发应变的激振效果等效成单自由度弹簧-质量系统在外力作用下的强迫振动,便于进行动态特性分析,有利于将有限元法融入整机的动力学模型,以实现整个电机的高精度、快捷性能分析和优化设计。

版社, 2007.

- ZHAO CH SH. *Ultrasonic Motors Technologies and Applications* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [6] 陈超, 赵淳生. 基于半解析法的旋转型行波超声电机定子的动态特性分析[J]. *中国机械工程*, 2005, 16(21): 1940-1944.
CHEN CH, ZHAO CH SH. Modeling of stator of a traveling wave rotary ultrasonic motor based on semi-analytical method [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(21): 1940-1944. (in Chinese)
- [7] 夏长亮, 郑尧, 史婷娜, 等. 行波接触型超声波电机定子振动有限元分析[J]. *中国电机工程学报*, 2001, 21(2): 25-28.
XIA CH L, ZHENG Y, SHI T N, *et al.*. FEM analysis on stator vibration of traveling wave type contact ultrasonic motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2001, 21(2): 25-28. (in Chinese)
- [8] 莫岳平, 胡敏强, 徐志科, 等. 超声波电机振动模态有限元分析[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(11): 92-96.
MO Y P, HU M Q, XU ZH K, *et al.*. The finite

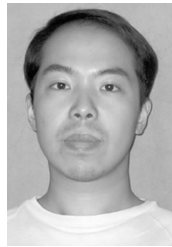
element analysis on the vibration mode of ultrasonic motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22 (11):92-96. (in Chinese)

- [9] 赵增辉,王育平,赵向东. 超声波电动机压电振子机电耦合振动分析[J]. 微特电机,2005,(9):5-6.
ZHAO Z H, WANG Y P, ZHAO X D. The analyses of the electro-mechanical coupling vibration of the piezoelectric resonator of ultrasonic motor[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2005, (9):5-

6. (in Chinese)

- [10] 任会礼,王学林,胡子进,等. 模态选择方法及其在复杂结构振动分析中的应用[J]. 中国机械工程, 2008,19(8):889-892.
REN H L, WANG X L, HU Y J, *et al.*. Modal truncation method and its application in vibration analysis of complex structures[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(8):889-892. (in Chinese)

作者简介:



周盛强(1975—),男,江西安福人,博士后,2007年于北京航空航天大学获工学博士学位,主要从事动力学建模仿真及优化设计的研究。E-mail: zhousq@nuaa.edu.cn



赵淳生(1938—),男,湖南衡山人,教授,院士,1984年于法国巴黎高等机械学院获工程力学博士学位,主要从事超声电机技术及其应用的研究。E-mail: cszhao@nuaa.edu.cn

●下期预告

溶胶-凝胶薄膜修饰的 MPOF 氟离子传感探头

杨兴华^{1,2},苑立波¹,王丽莉²

(1. 哈尔滨工程大学 理学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国科学院 西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

针对微结构聚合物光纤修饰桑色素-铝配合物掺杂的凝胶薄膜,制备了一种氟化物光纤传感探头。这种探头的结构基于微结构聚合物光纤实现,其内部具有贯穿的微孔道结构,这种微孔结构可以作为敏感材料的载体以及微传感池。敏感层的修饰通过溶胶-凝胶过程实现,将掺有桑色素-铝的溶胶直接吸入光纤内部,可以在光纤微孔阵列中形成凝胶敏感膜。微结构光纤内部可以容纳微量液体,传感过程在微孔道内进行。传感原理基于荧光淬灭远离实现,氟离子对凝胶膜中桑色素-铝具有强烈的荧光淬灭作用,因此传感探头对于不同浓度的氟离子溶液表现不同的荧光强度。在 pH 值为 4.6 的条件下,探头对于氟离子具有良好的响应,其传感范围为 5~50 mmol/L。