

# 行波型旋转超声电机定子振动特性仿真

伍旺贤, 纪跃波, 王 涛

(集美大学机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了了解定子直径为 60 mm 的行波型旋转超声电机定子的振动特性, 采用有限元分析的方法, 在有限元软件 ANSYS10.0 中对其进行模态、谐响应、瞬态仿真分析. 得到了其模态频率及振型; 振幅及阻抗随频率的变化关系; 定子齿端质点的椭圆运动轨迹的形成过程, 及其输入电流随时间的变化规律.

**[关键词]** 超声电机; 定子; 有限元法; 振动特性; 仿真分析

**[中图分类号]** TM 359.9

**[文献标志码]** A

## Analysis of the Vibration Characteristic of a Stator on a Traveling Wave Type Ultrasonic Motor

WU Wang-xian, JI Yue-bo, WANG Tao

(School of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Analysis of a stator's vibration characteristics of a traveling wave type ultrasonic motor was carried out in this paper. The research was conducted on the stator having a diameter about 60mm by employing finite element method on the stator's modal analyses, harmonic analyses and transient analyses via finite element software ANSYS10.0. It shows that the result from analysis is beneficial to the determination of the stator's vibration modal and resonance frequency, the relations between vibration amplitude, impedance and frequency, the ellipse trajectory formation process of a particle which belongs to the stator's tooth tip and the relation between input current of stator and time. Conclusions were drawn that the method of finite element analysis is applicable to the motor design, production and experimental study.

**Key words:** ultrasonic motor (USM); stator; finite element method; vibration characteristics; simulation analyses

## 0 引言

行波型旋转超声电机是一种新原理的电机, 该种电机利用压电陶瓷的逆压电效应产生两相在时间和空间都相差  $90^\circ$  的等幅值驻波, 这两相驻波在定子弹性体内合成行波且在定子表面质点形成椭圆运动<sup>[1]</sup>. 超声电机具有低速大转矩、响应速度快、不受电磁干扰等特点, 被广泛应用于航空航天、机器人、生物工程等领域<sup>[2-3]</sup>.

在电机进行设计和制造之前对其进行仿真分析, 可为电机的设计、制造提供依据和指导<sup>[1]</sup>. 针对旋转型超声电机定子的模态和谐响应仿真分析已有相关文献进行报道<sup>[4-8]</sup>. 但这些文献都对超声电机的定

**[收稿日期]** 2015-04-24 **[修回日期]** 2015-06-26

**[基金项目]** 福建省自然科学基金资助项目 (2013J01200)

**[作者简介]** 伍旺贤 (1990—), 男, 硕士生, 从事先进机电产品、工艺与装备研究. 通信作者: 纪跃波 (1969—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事超声电动机及动态测试技术研究, E-mail: ybj@jmu.edu.cn,

子进行了一些简化, 未根据定子的实际模型进行仿真分析. 而这些被忽略的因数对定子的振动有较大的贡献, 在对定子进行分析时应该给予考虑<sup>[9]</sup>. 本文根据定子直径为 60 mm 的行波型旋转超声电机定子的实际模型, 用有限元软件 ANSYS10.0 对电机的定子进行了仿真分析, 得到了其系列的振动特性.

1 有限元分析

超声电机定子振动满足的有限元方程<sup>[10-11]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{U}} \\ \dot{\boldsymbol{\Phi}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{\Theta} \\ \boldsymbol{\Theta}^T & \boldsymbol{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F} \\ \boldsymbol{Q} \end{bmatrix}.$$

(1)

式中:  $\boldsymbol{M}$  为单元质量矩阵;  $\boldsymbol{C}$  为单元阻尼矩阵;  $\boldsymbol{K}$  为单元刚度矩阵;  $\boldsymbol{\Theta}$  为单元介电系数矩阵;  $\boldsymbol{E}$  为单元压电系数矩阵;  $\boldsymbol{F}$ 、 $\boldsymbol{Q}$ 、 $\boldsymbol{U}$  和  $\boldsymbol{\Phi}$  分别是单元节点力矢量、电荷矢量、节点位移矢量及节点电势矢量.

在定子模态分析中不考虑定子的载荷及阻尼的影响且认为定子是自由振动的, 即上式中  $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{0}$ 、 $\boldsymbol{C} = \boldsymbol{0}$ 、 $\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{0}$ , 则由式 (1) 可得到定子的模态分析方程为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{\Theta} \\ \boldsymbol{\Theta}^T & \boldsymbol{E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{0}].$$

(2)

假设定子振动符合正弦振动的规律, 则式 (2) 可写成

$$\left( -\omega^2 \begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{\Theta} \\ \boldsymbol{\Theta}^T & \boldsymbol{E} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = [\boldsymbol{0}].$$

(3)

式 (3) 特征根  $\omega_i$  为结构振动的圆周频率, 则对应的固有频率  $f_i = \omega_i/2\pi$ , 相应的特征向量  $\begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix}_i$  即为所对应的振型.

若式 (1) 中的  $\boldsymbol{F} = \{F_0 e^{j\delta} \cdot e^{j\omega t}\}$  是时间的简谐函数, 则对应的分析类型为谐响应分析<sup>[12]</sup>, 式 (1) 可化为

$$\left( \omega^2 \begin{bmatrix} \boldsymbol{M} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K} & \boldsymbol{\Theta} \\ \boldsymbol{\Theta}^T & \boldsymbol{E} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \boldsymbol{U} \\ \boldsymbol{\Phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{F} \\ \boldsymbol{Q} \end{bmatrix}.$$

(4)

若式 (1) 中的  $\boldsymbol{F}$  为时间的函数, 即  $[\boldsymbol{F}] = [\boldsymbol{F}(t)]$ , 则对应的分析类型即为瞬态分析.

2 仿真分析

2.1 定子 ANSYS 中前处理

本文先在 PRO/E5.0 中建立了定子的三维实体几何模型, 并通过 ANSYS/PROFEA 接口将定子模型导入 ANSYS10.0 中<sup>[13]</sup>, 导入后的定子模型如图 1 所示. 定子的材料及有限元分析单元的选取如表 1 所示.

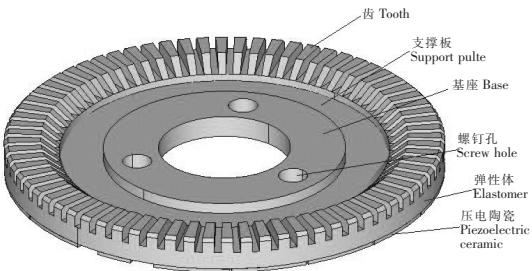


图 1 电机定子结构

Fig.1 The stator structure of motor

表 1 定子材料主要参数及有限元单元

Tab.1 Main parameters of the stator and the finite unit

项目 Items	材料 Material	弹性模量 Elasticitu modulus / $(\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	密度 Density / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 Poissons ratio	有限元单元 Finite elementuait
弹性体 Elastomer	磷青铜 Phosphor btanze	$1.01 \times 10^{11}$	8624	0.373	Solid95
压电陶瓷 Piezoelectris ceramic	PZT-4	各向异性 Anisotropic	7500	0.330	Solid98

在对定子模型划分网格之前需将表 1 中材料参数及定义的有限元单元输入到 ANSYS 中, 同时还要输入压电陶瓷恒电压下的弹性系数矩阵  $C_p^E$ 、压电应力矩阵  $e$  及恒定应力下的介电系数矩阵  $\epsilon^T$ . 由于定子相邻的压电陶瓷的极化方向相反, 而在 ANSYS 中默认的极化方向为同一个方向, 可以通过在 ANSYS 中建立一个新的坐标系, 该坐标系与系统坐标系相反. 在给压电陶瓷赋予材料属性时, 正向极化方向的在系统坐标系下赋予, 反向极化方向的在另一个坐标系下赋予. 在赋完定子材料属性后, 需要将压电陶瓷和定子弹性体进行黏贴, 之后再对定子进行划分网格, 可以采用智能划分网格的方式.

2.2 定子的模态分析

对定子进行模态分析可以得到定子不同的振型及各振型所对应的固有频率, 模态分析是定子谐响应分析和瞬态分析的基础.

在 ANSYS10.0 中对定子进行模态分析时, 根据本文分析的定子的结构尺寸, 设置分析的频率范围为 20 ~ 50 kHz, 提取的模态数为 50, 并扩展模态数为 50, 扩展的目的是得到分析结果的特征向量并将结果写入文件中, 为后续的其他分析奠定基础. 根据定子的实际安装条件, 对三个螺钉孔进行全约束. 直径为 60 mm 的旋转型行波超声电机选取定子的工作模态阶数为  $B_{09}$ <sup>[1]</sup>, 图 2 为定子经过模态分析后所提取得到的  $B_{09}$  振型, 其固有频率为 37.090 kHz. 图 3 为去除定子基座后定子的  $B_{09}$  振型, 其固有频率为 37.042 kHz. 由此可见定子基座对定子的振动会产生影响, 定子基座的存在加大了定子的共振频率.

2.3 定子的谐响应分析

对电机定子进行谐响应分析的目的是在定子受到一个已知频率简谐载荷（正弦电压）的激励下, 得到定子结构不同频率下的振动响应. 定子的压电陶瓷片分为  $A$ 、 $B$  两相极化区, 且每个极化区相邻的陶瓷的极化方向相反, 两相极化区之间有  $\lambda/4$  和  $3\lambda/4$  的区域不施加电压载荷<sup>[1]</sup>. 由于在谐响应分析时只能分析定子驻波振动时的响应情况<sup>[14]</sup>, 因此只在压电陶瓷的  $A$ 、 $B$  两相极化区中的一相极化区施加电压载荷, 另一相压电陶瓷的极化区不施加电压载荷. 本文选择只在  $A$  相极化区施加电压, 当  $\theta$  ( $\theta$  为压电陶瓷所处的角度) 位于  $A$  相正极化区时, 施加正的正弦电压即  $\Phi_\theta = +U_0 \sin 2\pi ft$ , 式中  $\Phi_\theta$  为节点电压,  $U_0$  为电压幅值,  $f$  为电压的频率; 当  $\theta$  位于  $A$  相负的极化区时, 施加负的正弦电压即  $\Phi_\theta = -U_0 \sin 2\pi ft$ ; 在压电陶瓷的背面（和金属弹性体粘贴的面）施加电势为 0 的电压载荷表示接地即  $\Phi_\theta = 0$ .

仿真分析时将所有的正极化区的压电陶瓷耦合到一个主节点上（CP），并在主节点施加100 V 电压；将所有负极化区的压电陶瓷耦合到另一个主节点上，在主节点施加 -100 V 电压. 由模态分析可知定子  $B_{09}$  模态对应的频率值为 37.090 kHz, 则谐响应分析选择的频率范围为 36 ~ 39 kHz, 并且设置 0.2% 的结构阻尼. 图 4 为经过仿真分析得到的定子齿顶上某一质点  $Z$  方向上的幅频特性曲线. 由图 4 可以看出, 在幅值为 100 V 的正弦电压载荷的激励下, 定子的谐振频率为 37.650 kHz 时对应的该质点的振幅值为 6.0  $\mu\text{m}$  左右. 谐响应分析定子  $B_{09}$  振型的谐振频

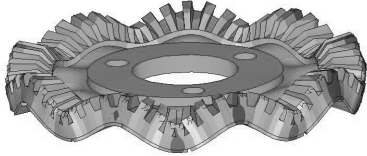


图 2 定子有基座  $B_{09}$  振型  
Fig.2 The  $B_{09}$  mode of the stator with base

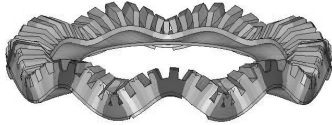


图 3 定子无基座  $B_{09}$  振型  
Fig.3 The  $B_{09}$  mode of the stator without base

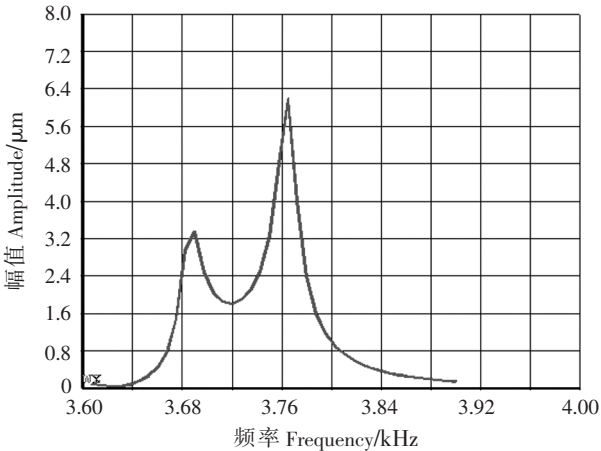


图 4 定子的幅值-频率特性  
Fig.4 The amplitude-frequency characteristic of the stator

率与模态分析  $B_{09}$  共振频率不一致, 相差 1.5% 左右, 这表明压电耦合效应对定子振动频率会有影响.

为了计算定子的输入阻抗, 先提取耦合的主节点的电荷值  $Q$  (AMP), 则阻抗为

$$Z = U/I = U_0/j\omega Q = U_0/j2\pi fQ. \tag{5}$$

式中:  $Z$  为阻抗;  $j$  为虚数单位;  $I$  为电极的电流;  $U_0$  为输入电压的幅值;  $f$  为谐振频率. 可在 ANSYS10.0 的时间历程后处理器 (POST26) 提供的数学运算工具计算式 (5), 计算得到的定子的输入阻抗-频率结果如图 5 所示. 由图 5 可以看出, 在谐振点和反谐振点附近定子的输入阻抗变化很大, 阻抗从谐振点到反谐振点幅值变化最大处就是定子  $B_{09}$  工作模态, 且在  $B_{09}$  处输入阻抗最小, 其值约为  $400\ \Omega$ .

2.4 定子的瞬态分析

为了解电机定子在受到激励电压后启动时的振动过程, 需要对定子进行瞬态分析. 由谐响应分析可知在受到幅值为 100 V, 频率为 37.650 kHz 的正弦载荷电压的激励时, 定子的  $B_{09}$  可以激发出来. 因此在瞬态分析时选择幅值为 100 V, 频率为 37.650 kHz 的正弦电压和余弦电压作为激励电压.

在 ANSYS10.0 中通过函数加载的方式施加电压载荷, 首先要通过 ANSYS 提供的函数编辑器来编辑函数, 所需编辑的函数如下式所示:  $V_1 = 100 \sin(2\pi \times 37650 \times t)$ ;  $V_2 = -100 \sin(2\pi \times 37650 \times t)$ ;  $V_3 = 100\cos(2\pi \times 37650 \times t)$ ;  $V_4 = -100\cos(2\pi \times 37650 \times t)$ .

在 A 相极化区施加  $V_1, V_2$ , 在 B 相极化区施加  $V_3, V_4$ . 施加的方式与谐响应分析施加的方式相同, 并按照定子实际的安装情况对定子进行约束. 在求解控制器中设置的求解结束的时间为 18 个周期即  $4.7 \times 10^{-4}\text{s}$ , 设置子步数为 360 且输出每个子步. 并修改瞬态积分参数 (TINTP, 0.25, 0.5, 0.5), 设置完后即可以求解. 图 6 是经过仿真分析得到的定子齿的顶端一质点上 X 和 Z 方向的位移响应的合成图. 由该轨迹图可以

证明定子齿端质点的运动轨迹为椭圆, 可以看出定子齿端某一质点由开始启动到稳定时椭圆轨迹的变化过程, 定子在此电压载荷的激励下, 稳定时的振幅约为  $1.2\ \mu\text{m}$ . 图 7 是定子某齿端径向一直线上外圈和内圈质点 Z 方向的位移响应. 由图 7 可以看出, 定子受到电压载荷激励后齿端外圈质点的振幅要大于齿端内圈质点的振幅, 且定子由启动到稳定时的响应时间约为 4 ms. 在瞬态分析的时间历程后处理中可以提取压电陶瓷片耦合主节点反作用力结果数据 AMP——电荷  $Q$ , 由 ANSYS 后处理提供的数学运算工具可计算得到定子输入电流  $I$  的响应, 即:

$$I = d \sum_i q_i / dt. \tag{6}$$

式中  $\sum_i q_i$  为定子上电极上的电荷总和, 由于受到的是正弦载荷和余弦电压载荷的激励, 则可以认为电极上的电荷也符合正弦规律和余弦规律, 式 (6) 可表示为

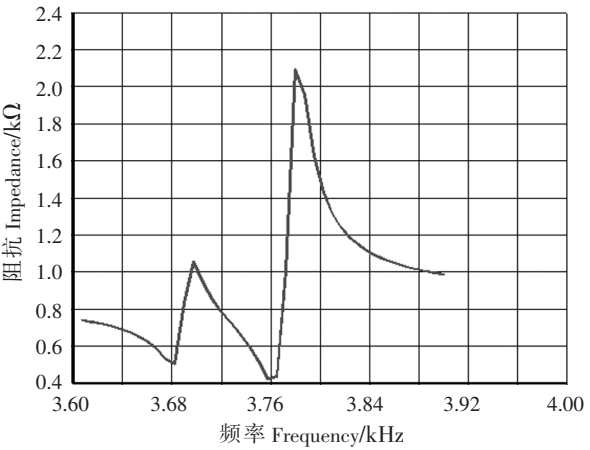


图 5 定子阻抗-频率曲线

Fig.5 The impedance-frequency curve of stator

因此在瞬态分析时选择幅值为 100 V, 频率为 37.650 kHz 的正弦电压和余弦电压作为激励电压.

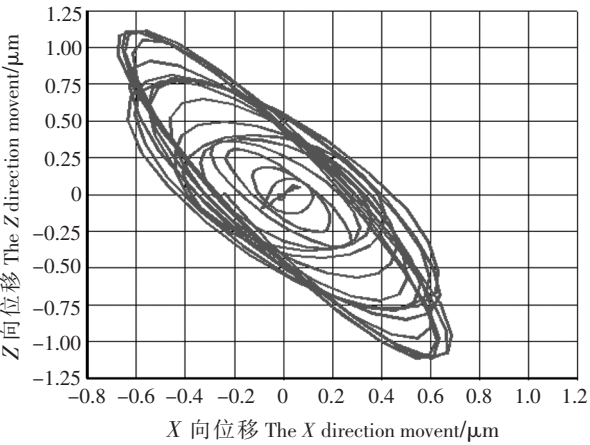


图 6 定子齿端一质点的运动轨迹图

Fig.6 The moving trajectory of a particle in the stator

$$I = j\omega \sum_i q_i \quad (7)$$

通过在 ANSYS 时间历程后处理器中提供的数学运算工具计算得到的结果图如图 8 所示, 由图 8 可以得到定子在此电压载荷的激励下稳定时的输入电流的有效值约为 0.085 A.

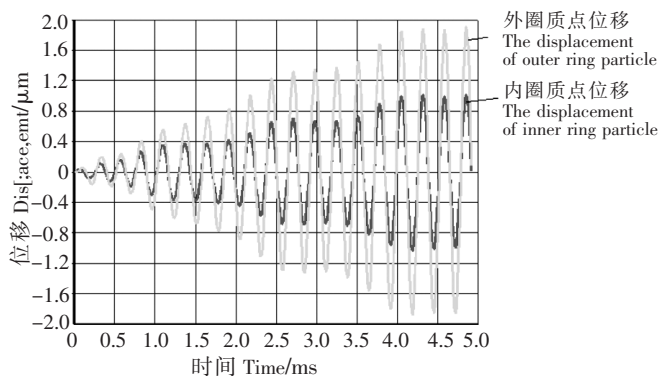


图 7 定子-齿端外圈和内圈质点 Z 向位移

Fig.7 The displacement of Z direction between outer ring and inner ring particles of stator's tooth

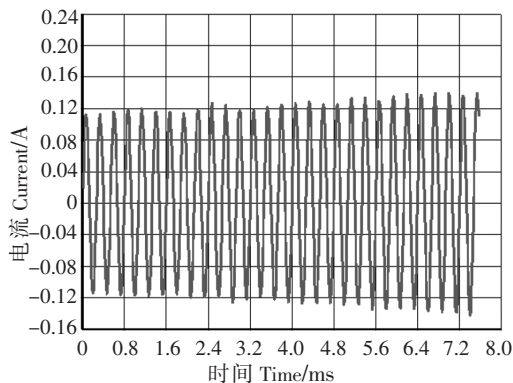


图 8 定子输入电流随时间变化关系

Fig.8 The relation between input current and time of the stator

### 3 结束语

本文针对定子直径为 60 mm 的行波型旋转超声电机的定子的实际模型进行了有限元模态分析, 谐响应分析及瞬态分析, 得到了其振动模态、谐振频率、输入阻抗的频率特性、振动的幅频特性以及输入电流随时间的变化规律, 椭圆运动轨迹的形成过程, 定子齿端内外圈质点的运动规律. 仿真分析结果表明定子基座的存在会影响定子的共振频率. 仿真结果可为以后电机的设计、制造提供理论依据, 也可以为其他类型的超声电机的仿真分析提供借鉴.

### [ 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.
- [2] 赵玉灿, 程寓. 行波旋转型超声波电机的实验研究 [J]. 电机产品开发与创新, 2003(2): 41-42.
- [3] 罗辞勇, 卢斌. 超声波电机发展现状及应用 [J]. 微特电机, 2011(11): 70-74.
- [4] 何平, 朱海峰. 超声波电机定子的有限元模态分析 [J]. 电机电器技术, 2001, 5: 13-15.
- [5] 章顺勤. 超声波电机定子的有限元分析及其结构优化设计 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2008.
- [6] 李君余. 行波型旋转超声波电机的建模及仿真 [D]. 泉州: 华侨大学, 2005.
- [7] 张洪民. 超声波电机定子的压电耦合运动分析 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2010.
- [8] 侯飞. 压电定子与压电转子振型嵌合式旋转型行波超声电机 [D]. 厦门: 集美大学, 2013.
- [9] 陈超, 赵淳生. 旋转型行波超声电机定子的子结构模型研究 [J]. 振动工程学报, 2005, 18(2): 238-242.
- [10] ALLIK H J, HUGHES. Finite element for piezoelectric vibration [J]. International Journal Numerical Methods of Engineering, 1970, 2: 151-157.
- [11] 莫岳平, 胡敏强. 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.
- [12] 莫喜平. ANSYS 软件在模拟分析声学换能器中的应用 [J]. 声学技术, 2007, 26(6): 1279-1290.
- [13] 陈乾伟, 鞠全勇, 黄卫清, 等. ANSYS 和 PRO/E 在超声电动机有限元建模中的应用 [J]. 微特电机, 2014, 42(11): 32-36.
- [14] 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.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)