

# 多自由度超声电机优化设计及其在 $x-y$ 平台的应用\*

朱 华, 吴文才, 刘卫东, 潘 松

(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** 为了探索和快速实现多自由度超声电机的设计及应用,提出一种锥型结构的多自由度超声电机。该电机定子采用单足驱动方式,利用四分区的叠层压电陶瓷作为激励元件,分析其产生两维直线运动的驱动机理。利用有限元软件 ANSYS 对电机建立参数化模型,并导入到多学科优化软件 Optimus 中进行全局优化求解。优化结果表明,电机多个设计目标都得以实现,最后制作实验样机并成功应用在  $x-y$  平台上。

**关键词** 超声电机; 多自由度; 优化设计; Optimus;  $x-y$  平台

**中图分类号** TM356; TH122

## 引 言

多自由度超声电机作为超声电机的一个分支,是在单自由度超声电机的基础上发展起来的一种新型电机。自 20 世纪 90 年代开始成为新型超声电机的研究热点,已有各种形式的电机结构被不断研发出来,如国内学者提出的圆柱-球体多自由度超声电机<sup>[1]</sup>、四定子多自由度超声电机<sup>[2]</sup>、方尖塔型二自由度超声电机<sup>[3]</sup>。日本学者提出的多自由度球面超声电机模组<sup>[4]</sup>,立陶宛学者提出的 4 个纵振振子组成的二自由度超声电机定子<sup>[5]</sup>,而后又发展出更紧凑的单定子型结构<sup>[6]</sup>。

目前,单自由度超声电机在一维旋转及直线运动领域的应用相对较成熟。随着科技的发展,精密装置对驱动的要求越来越高,若每个自由度的运动都由一台单自由度电机来完成,这必然造成机构复杂、体积庞大、动态性能差等不利因素。因而,研制出性能良好、功能齐全的单电机来完成多个自由度的驱动输出显得尤为迫切。

在直线平台领域,常见的两自由度  $x-y$  平台多为采用两台电机分别驱动负载沿  $x$  向导轨和  $y$  向导轨运动<sup>[7]</sup>,或是两台电机分别驱动平行滑块作水平运动,再通过连杆带动中间头作平面轨迹运动<sup>[8]</sup>。由于两台电机分别驱动,难以做到实时联动定位,尤其是传动机构的限制,难以向微型化方面发展。

针对上述存在的不足,笔者在研究锥形多自由度超声电机定子结构的基础上,将其结构参数作了系统的仿真及参数优化<sup>[9]</sup>,加工出实验样机,采用有别于传统的电机定子固定的夹持方式<sup>[10]</sup>,让平板(动子)固定不动,而电机定子支撑板与两维导轨连接在一起,实现电机定子在  $x-y$  平台上的自由运动。

本研究方法相比于传统超声电机驱动方式,行程得到有效拓展,活动更加灵活自如,克服了传动机构的死角限制,方便驱动控制实现实时联动定位,简化驱动电路设计,以更小的体积实现传统平台的二维驱动功能。

## 1 电机工作原理

### 1.1 结构模型及驱动原理

图 1 为多自由度超声电机定子结构简图。定子由锥型头、支撑板、叠层压电陶瓷、下配重及预紧螺栓组成。其中:叠层压电陶瓷采用四分区结构沿  $z$  轴厚度方向极化,电机定子的工作模式为空间上两个正交的二阶弯振模态及一阶纵振模态,当同时激励出电机定子在  $x-z$  平面的弯振模态  $B_{2\_x}$  与沿  $z$  轴的纵振模态  $L_{1\_z}$ ,可驱动压在其上的平板动子沿  $x$  轴方向作直线运动,如图 2 所示。同理,当同时激励出电机定子在  $y-z$  平面的二阶弯振模态  $B_{2\_y}$  与沿  $z$  轴的纵振模态  $L_{1\_z}$ ,可驱动压在其上的平板动子沿  $y$  轴方向作直线运动。

\* 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研资助项目(NS2010034);南京航空航天大学科研基地创新创优基金资助项目(NJ20120002);航空科学基金资助项目(20100112005);江苏高校优势学科建设工程资助项目  
收稿日期:2014-02-28;修回日期:2014-03-24

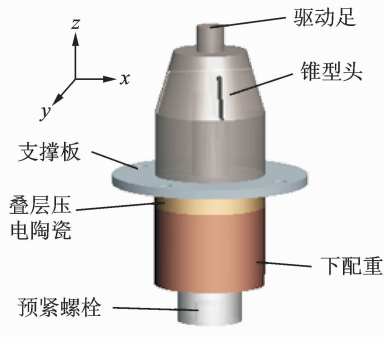


图 1 电机结构简图

Fig. 1 The structure of motor diagram

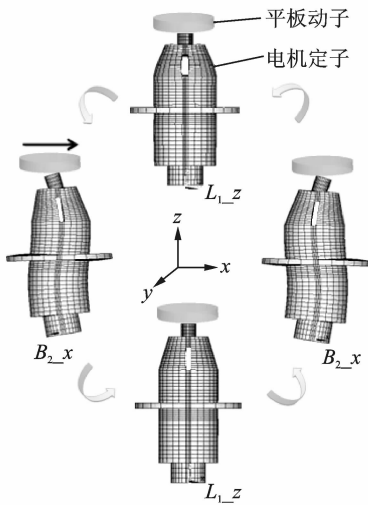


图 2 定子在  $x-z$  平面的工作模式

Fig. 2 The working mode of stator in  $x-z$  plane

### 1.2 陶瓷片结构及对激励信号的要求

叠层压电陶瓷整体尺寸外径 $\times$ 内径 $\times$ 厚度为  $12\text{ mm}\times 5.5\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ , 实物如图 3(a)所示, 电气特性如图 3(b)所示。4 个正极分区分别接正弦激励信号, 负极端接信号的地极。

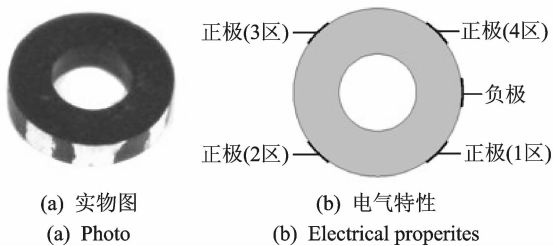


图 3 叠层压电陶瓷及其电气特性

Fig. 3 Laminated piezoelectric ceramics and its electrical properties

假设叠层压电陶瓷片各电极分区分别以  $A, B, C, D$  作标记。当对  $A, B$  及  $C, D$  分别加  $\sin\omega t, \sin\omega t, \cos\omega t, \cos\omega t$  正弦信号激励时, 可激发出驱动

足沿  $x-z$  平面逆时针方向椭圆运动轨迹, 进而驱动电机定子沿  $x$  轴负方向运动, 如图 4(a)所示。切换  $A, B$  及  $C, D$  所加正弦信号相位差, 可驱动电机定子沿  $x$  轴正方向运动, 如图 4(b)所示。当对  $A, D$  及  $B, C$  分别加  $\sin\omega t, \sin\omega t, \cos\omega t, \cos\omega t$  正弦信号激励时, 可激发出驱动足沿  $y-z$  平面逆时针方向椭圆运动轨迹, 进而驱动电机定子沿  $y$  轴负方向运动, 如图 4(c)所示。切换  $A, D$  及  $B, C$  所加正弦信号相位差, 可驱动电机定子沿  $y$  轴正方向运动, 如图 4(d)所示。

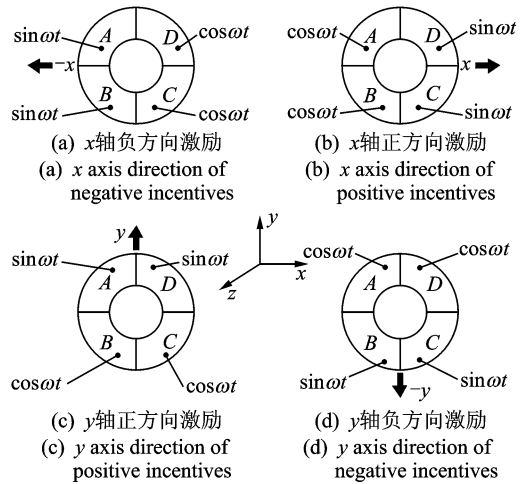


图 4 叠层压电陶瓷的不同激励方式

Fig. 4 Stacked piezoelectric ceramics with different incentives

## 2 多自由超声电机有限元模型

在 ANSYS13.0 软件中建立起多自由度超声电机的  $1/4$  映射网格模型, 如图 5 所示。利用 APDL 语言对定子各个尺寸作全参数化设计, 如图 6 所示。考虑到定子的散热、耐磨性、支撑刚度、加工难易性及选择合适驱动频率段的要求, 锥型头及下配重材料选择磷青铜, 支撑板材料选择 45 号钢, 预紧螺栓选择  $M_4$  内六角, 材料为 304 不锈钢, 叠层陶瓷片材料为 PZT-8。在 ANSYS 仿真模型中, 锥型头、下配重、支撑板及预紧螺栓选用 Solid45 单元; 叠层陶瓷片选择 Solid5 压电单元。

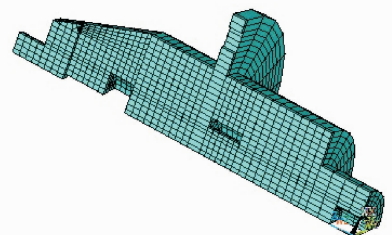


图 5 定子  $1/4$  映射网格模型

Fig. 5 The  $1/4$  mapped mesh modal of stator

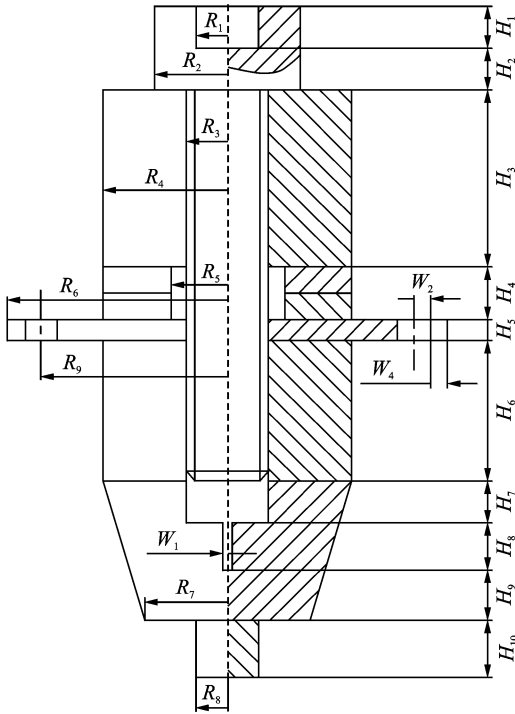


图 6 定子参数化模型

Fig. 6 The parameterized model of stator

由于陶瓷片的尺寸制约着定子整体的结构尺寸,因而定子全参数化设计是以陶瓷片的尺寸为基准,进而构建定子整个结构尺寸参数。由前面对陶瓷片的说明可知,陶瓷片外径  $R_4 = 6$ 、内径  $R_5 = 2.75$  及厚度  $H_4 = 2.5$  固定不变;  $M_4$  内六角螺栓尺寸  $R_1 = 1.5, R_2 = 3.5, R_3 = 2, H_1 = 2, H_2 = 2$  固定不变,而螺栓长度为  $H_3, H_4, H_5, H_6$  之和。考虑到映射分网的方便,锥面  $W_1$  为方槽;尺寸  $R_8 = 1.5$  固定不变;支撑板安装孔径  $W_2 = 0.8$  也不变。实际参数优化尺寸总共 11 个,分别为  $H_3, H_5, H_6, H_{10}, R_9, W_1, H_7, H_8, H_9, R_7, W_4$ 。

### 3 Optimus 集成优化

Optimus 是 Noesis Solution 公司开发的过程集成和多学科协同优化设计软件,能集成 ANSYS 仿真工具,实现仿真流程自动化。Optimus 允许用户以图形化的方式建立 workflow,并在 workflow 中定义输入文件、输出文件、输入参数、输出参数、所需调用的分析工具及各控件在流程中的逻辑关系。

Optimus 软件平台中,集成了多种全局优化算法,如 Self-Adaptive Evolution(可进化自适应遗传算法)、Differential Evolution(差分进化算法)、simulated annealing(模拟退火算法)等<sup>[11]</sup>。全局优化

算法能够同时考察设计空间中的参数变量,相比局部优化算法更易达到全局最优解。因此,多自由度超声电机优化设计选择的是 Optimus 的全局优化算法。

#### 3.1 参数变量及变化范围的定义

考虑到电机合适的工作频率范围、机加工及装配的可行性、ANSYS 映射分网的完整性,拟定图 6 中各设计变量的初值及连续变化范围如表 1 所示。

表 1 优化变量初始尺寸及上下限  
Fig. 1 The initial size of optimization variables and its limits mm

参数	初值	下限	上限
$H_3$	6	2	12
$H_5$	1	0.5	2
$H_6$	5	2	12
$H_7$	2	0.5	5
$H_8$	3	1	5
$H_9$	2	1	5
$H_{10}$	2	1	4
$R_7$	3.5	3.5	5.5
$R_9$	8.5	7.8	9.5
$W_1$	0.3	0.1	1.4
$W_4$	0.95	0.4	1.2

#### 3.2 目标函数定义及优化方法选择

由于多自由度超声电机二阶弯振模态在  $x$ - $z$  平面与  $y$ - $z$  平面的空间对称性,可以简化为  $x$ - $z$  平面的参数优化为主,兼顾  $y$ - $z$  平面优化输出。提取出  $x$ - $z$  平面二阶弯振  $B_{2\_x}$  的振型曲线及沿  $z$  轴一阶纵振  $L_{1\_z}$  振型曲线,如图 7 所示。作为电机优化迭代过程中模态识别的参考振型,并利用模态置信准则 MAC 法<sup>[12]</sup>,在 Optimus 自动寻优中准确的识别出  $L_{1\_z}$  及  $B_{2\_x}$  振型。具体的参数优化过程下面 8 个子目标函数分别加以说明。

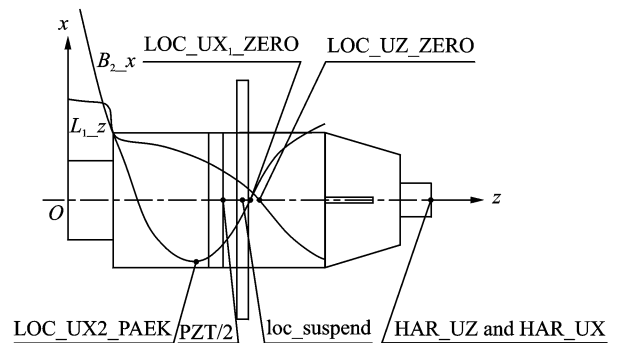


图 7 电机关键位置及振型

Fig. 7 The modal shape with key position

1) 电机的二阶弯振模态  $B_{2\_x}, B_{2\_y}$  的工作频率与一阶纵振模态  $L_{1\_z}$  的工作频率应尽可能接近,令 FRE\_MAX, FRE\_MIN 分别为  $B_{2\_x}, B_{2\_y}, L_{1\_z}$  中的最大值与最小值,其子目标函数为

$$f_1 = \min | \text{FRE\_MAX} - \text{FRE\_MIN} | \quad (1)$$

2) 电机较小工作模态频率 FRE\_MIN 应远离前一干扰模态频率 FRE\_FRONT,其子目标函数为

$$f_2 = \max | \text{FRE\_MIN} - \text{FRE\_FRONT} | \quad (2)$$

3) 电机较大工作模态频率 FRE\_MAX 应远离后一干扰模态频率 FRE\_REAR,其子目标函数为

$$f_3 = \max | \text{FRE\_REAR} - \text{FRE\_MAX} | \quad (3)$$

4) 电机支撑板的中心位置 loc\_suspend 应与二阶弯振中间节点 LOC\_UX<sub>1</sub>\_ZERO 及一阶纵振节点 LOC\_UZ\_ZERO 尽量接近,以减少电机工作时支撑处的能量损失,提高效率。其子目标函数为

$$f_4 = \min | 2\text{suspend} - \text{LOC\_UX}_1\text{-ZERO} - \text{LOC\_UZ\_ZERO} | \quad (4)$$

5) 电机的陶瓷片加载正弦电压信号作谐响应时,驱动足沿  $x$  轴方向的振幅 HAR\_UX 及沿  $z$  轴方向的振幅 HAR\_UZ 都应尽可能大,其子目标函数为

$$f_5 = \max | \text{HAR\_UZ} + \text{HAR\_UX} | \quad (5)$$

6) 在子目标(5)中要求驱动足沿两个方向振幅尽都可能大的同时,两者振幅比例应趋于相等,即各自所占分量都趋于 0.5,其子目标函数为

$$f_6 = \max \left| \frac{\min(\text{HAR\_UX}, \text{HAR\_UZ})}{|\text{HAR\_UX} + \text{HAR\_UZ}|} \right| \quad (6)$$

7) 陶瓷片的中心 PZT/2 应与一阶纵振的节点 LOC\_UZ\_ZERO 尽量靠近,以有效激发纵向振动模态,其子目标函数为

$$f_7 = \min | \text{LOC\_UZ\_ZERO} - \text{PZT}/2 | \quad (7)$$

8) 陶瓷片的中心 PZT/2 应与二阶弯振的波峰 LOC\_UX<sub>2</sub>\_PEAK 尽量靠近,以有效激发二阶弯振模态,其子目标函数为

$$f_8 = \min | \text{LOC\_UX}_2\text{-PEAK} - \text{PZT}/2 | \quad (8)$$

上述 8 个函数为多目标优化的子函数,最终优化的目的是要使驱动足在  $x$  轴方向及  $z$  轴方向的振幅达到最大。

采用主要目标法<sup>[13]</sup>,即抓住主要目标,兼顾其他要求。笔者选择  $f_5$  作为主要目标函数,其他 7 个子目标函数分别给予一定的取值范围,使其转化为新的约束条件,如式(9)所示。通过实践发现,该方法可操作性强,易于导入 Optimus 软件中自动寻优,有效找出全局最优解。

$$F = \max_{D^m} f_5$$

$$\text{s. t. } D^m = \{f_{\min} \leq f_i \leq f_{\max}\}$$

$$(i = 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8) \quad (9)$$

### 3.3 优化流程图

利用 ANSYS 编写的 APDL 语言建立输入文件 76\_new\_15\_UTF.txt 及输出文件 OPT\_OUT0611.TXT。在 Optimus 工作流中,输入参数存放在 InputArray1 数组控件中,并建立相关监测量如陶瓷片的中心位置 PZT/2、支撑板的中心位置 loc\_suspend 等。Optimus 通过相应优化算法来不停地调用输入文件,并在输出文件中导出所需监测量与 8 个子目标函数优化结果,整个优化流程图 8 所示。

### 3.4 优化方法及结果讨论

在 Optimus 中选择全局优化算法 Self-Adaptive Evolution 进行迭代计算。在遗传算法中,输入设计参数数量  $N=11$ ,种群大小为  $N$  的 4~5 倍,笔者将种群大小设置为 50,设置最大迭代数量为 30,则优化的计算总次数为 1 500 次。

在寻求主要目标函数  $f_5$  最大同时应兼顾其余 7 个子目标约束函数  $f_1, f_2, f_3, f_4, f_6, f_7, f_8$ ,折中选择第 1 207 次计算数据作为本次优化的寻优结果,其尺寸参数优化结果与圆整值如表 2 所示。对电机在优化前与优化后 8 个子目标函数的提取结果作对比,如表 3 所示。其中,优化前提取结果是指在表 1 的输入尺寸下,在 Optimus 作一次单点运算(Nominal)所提取结果。

表 2 输入参数优化结果及圆整值

Tab. 2 The input data derived from Optimization and rounding number

参数	$H_3$	$H_5$	$H_6$	$H_{10}$	$R_9$	$W_1$	$H_7$	$H_8$	$H_9$	$R_7$	$W_4$	mm
优化值	8.55	1.02	6.8	2.75	9.04	0.5	2.24	2.47	1.98	3.98	0.84	
圆整值	8.55	1.0	6.8	2.75	9.0	0.5	2.24	2.47	1.98	4.0	0.84	

表 3 各子目标函数优化前后结果对比

Tab. 3 Each sub-objective results were present before or after optimization

目标函数	$f_1/$ Hz	$f_2/$ Hz	$f_3/$ Hz	$f_4/$ mm	$f_5/$ $\mu\text{m}$	$f_6$	$f_7/$ mm	$f_8/$ mm
优化前	3 283.3	11 008.6	4 981.7	0.290	0.750	0.460	4 2.561	2.147
优化后	1 562.7	8 568.7	12 106.6	0.002 86	7.4	0.499 6	2.184	2.522

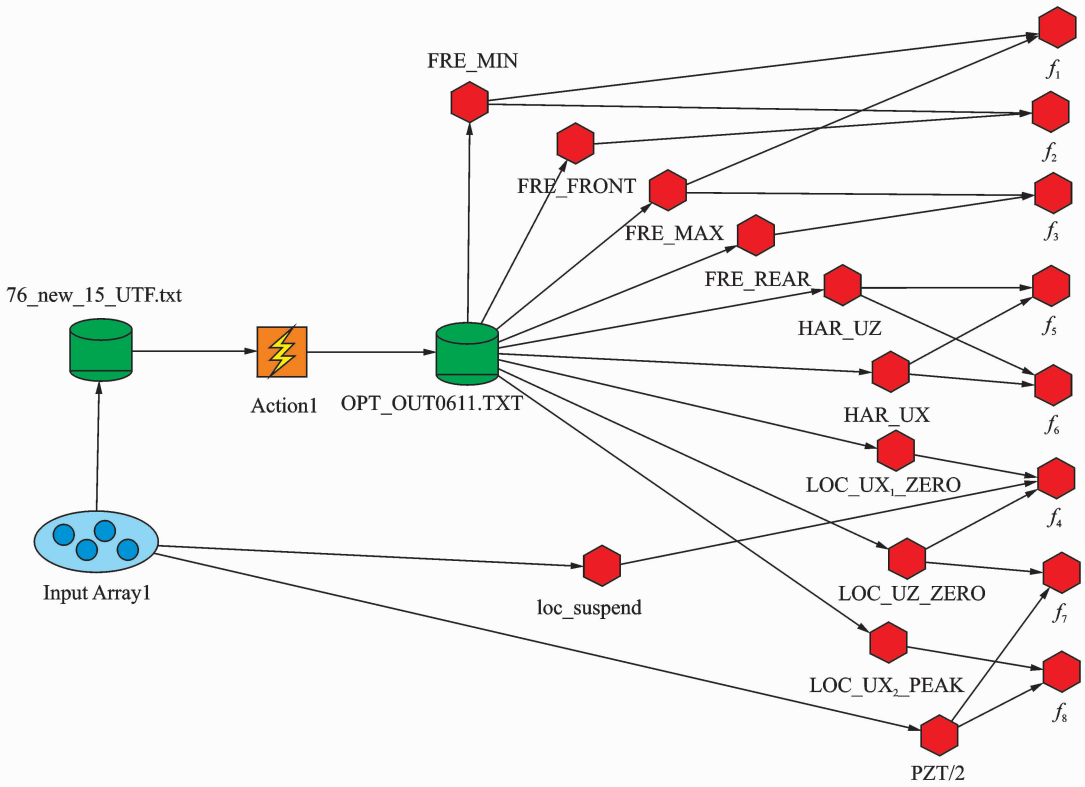


图 8 Optimus 中整体流程图  
Fig. 8 The flow char in Optimus

从表 3 的优化前与优化后的数据结果对比可知,电机驱动足沿  $x$  轴方向与  $z$  轴方向的振幅之和  $f_5$  明显增大了数量级,且沿  $x$  轴方向与沿  $z$  轴方向所占分量值  $f_6$  接近 0.5,达到了主要设计目标。电机支撑板的中心位置与二阶弯振中间节点及一阶纵振节点位置的重合度指标  $f_4$  比优化前降低了两个数量级,几乎趋近于 0,有利于电机应用于  $x$ - $y$  平台减少能量耗散及降低对平台的干扰。同时工作频率与前后干扰频率差  $f_2, f_3$  最小达到 8 kHz 以上,有效防止电机加正弦信号激励及变频调速时把不期望的干扰模态激发出来,不利于电机的夹持,严重时会产生较大的噪声干扰。在保证实际应用需求的前提下,子目标函数  $f_1, f_7, f_8$  变化不大,可以作为次要目标考虑。总体而言,优化后电机各项性能得到显著提高,验证了模型的正确性及算法的可靠性。

机定子进行扫频测振实验,测得电机横向频响曲线及纵向频响曲线,如图 10,11 所示。与仿真计算结果进行对比,如表 4 所示。可以看出,仿真计算频率与实际加工样机测振频率比较接近,在二阶弯振处存在最大误差,达到 400 Hz 左右,这与电机加工装配和仿真计算两方面都存在误差有关。

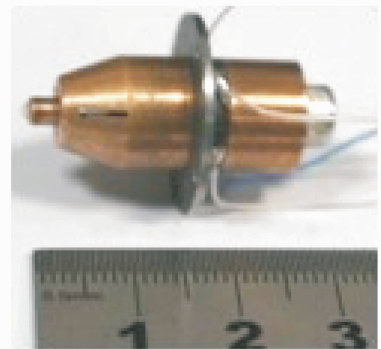


图 9 电机实物图

Fig. 9 The photos of motor

## 4 样机制作和 $x$ - $y$ 平台应用

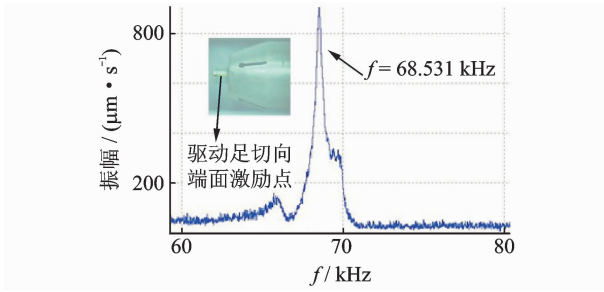
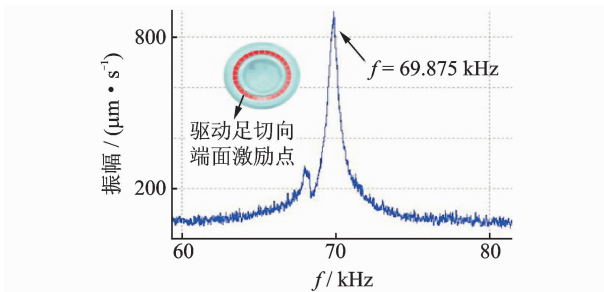
### 4.1 实验样机制作及实验

加工制作的电机实物如图 9 所示。利用德国 Polytec 公司的 PVS-300F 多谱勒激光测振仪对电

表 4 电机扫频测试与仿真对比

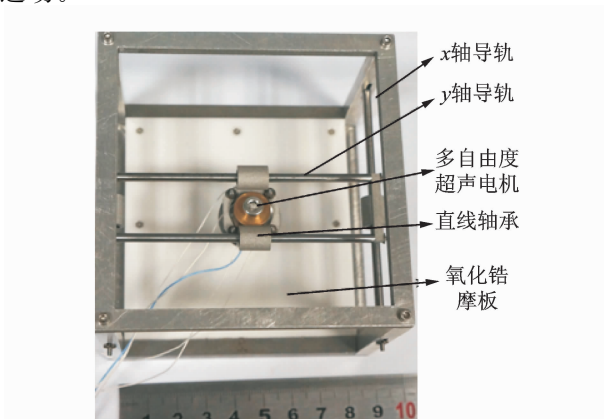
Tab. 4 The frequency in sweep experiment and simulation

方法	$x$ 向二阶弯振频率/kHz	$z$ 向一阶纵振频率/kHz
仿真	67.973	69.541
实验	68.531	69.875

图10  $x$  向二阶弯振响应曲线Fig. 10 The curve of second lateral vibration in  $x$  axis图11  $z$  向一阶纵振响应曲线Fig. 11 The curve of first longitudinal vibration in  $z$  axis

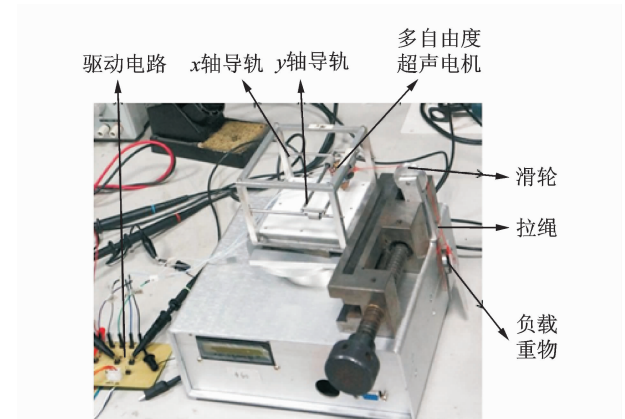
## 4.2 $x$ - $y$ 平台及性能测试

将制作的实验样机装配到  $x$ - $y$  工作平台上,如图 12 所示。传统多自由度超声电机的工作模式是定子固定不动,而动子如直线导轨、旋转球等往复移动或转动。本工作台中电机工作方式与之相反,把多自由度超声电机定子通过支撑板装配在两自由度导轨上,而下面的氧化铝磨板固定不动,当对定子陶瓷片各分区分别施加正余弦信号激励时,驱动足产生椭圆轨迹,依靠氧化铝平板对定子的反作用力驱动其实现沿  $x$  轴方向或  $y$  轴方向作两自由度直线运动。

图12  $x$ - $y$  工作平台Fig. 12 The photos of  $x$ - $y$  platform

## 4.3 电机在 $x$ - $y$ 平台上性能测试

图 13 为平台上电机沿  $x$  轴向及  $y$  轴向运动性能测试方案。其中,电机空载线速度  $v$  是以测试电机来回跑 10 趟所需时间换算得出。加负载时,由于线速度较慢及同向负载影响,以电机带负载走一趟所需时间换算出线速度。平台中电机  $x$  轴向行程  $S_1=58$  mm, $y$  轴向行程  $S_2=60.5$  mm。当驱动电路给予电机合适的激励频率  $f$  (65~70 kHz)、激励电压(峰峰值 35~50 V),测出电机速度  $v$  及负载物重  $G$  如表 5 所示。表 5 中负载  $G$  为 0 N 对应空载线速度  $v$  最大值,随着负载  $G$  逐渐增大,线速度  $v$  趋于 0。

图13  $x$ - $y$  平台电机性能测试方案Fig. 13 The experiment of mechanical characteristics on  $x$ - $y$  platform表5  $x$ - $y$  平台电机测试结果

方向	$f/\text{kHz}$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$G/\text{N}$
$x$ 轴	68.84	0.105	0
$x$ 轴	68.84	0.034	0.161
$x$ 轴	68.84	0.008	0.308
$y$ 轴	68.30	0.125	0
$y$ 轴	68.30	0.060	0.215
$y$ 轴	68.30	0.023	0.253

## 5 结束语

针对多自由度超声电机的结构优化问题,从驱动机制和参数优化模型方面作了系统阐述。在 Optimus 中应用遗传算法对如何提高电机驱动足振幅、减少电机工作时能量耗散、降低对支撑系统干扰及减小激励频率干扰进行了研究,得到的优化结果验证了算法的可靠性。加工出的实验样机创新性地



将多自由度超声电机成功应用于两自由度的  $x$ - $y$  工作平台上,为多自由度超声电机向实际应用方面迈出了一步,并为下一阶段的  $x$ - $y$  平台行走轨迹控制打下基础。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Chunsheng, Li Zhirong, Huang Weiqing. Optimal design on stator of cylinder-sphere 3-DOF ultrasonic motor using structural dynamics method[C]// Ultrasonics Symposium, 2004 IEEE. Nanjing: IEEE, 2004, 3: 2259-2262.
- [2] 傅平, 郭吉丰, 沈润杰, 等. 二自由度行波型超声波电机的驱动和运动姿态控制[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 25-30.  
Fu Ping, Guo Jifeng, Shen Runjie, et al. Driving circuit and position control system of two degree-of-freedom spherical traveling-wave type ultrasonic motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 25-30. (in Chinese)
- [3] 金家楣, 张建辉, 赵淳生. 新型方尖塔形定子二自由度超声电机的结构设计、驱动机理与性能研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 63-67.  
Jin Jiamei, Zhang Jianhui, Zhao Chunsheng. Research on construction, principle, and performances of a novel two-degrees of freedom ultrasonic motor with an obelisk stator [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(12): 63-67. (in Chinese)
- [4] Mashimo T, Awaga K, Toyama S. Development of a spherical ultrasonic motor with an attitude sensing system using optical fibers[C]// Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on. Roma, Italy: IEEE, 2007: 4466-4471.
- [5] Vasiljev P, Borodinas S, Yoon S J, et al. The actuator for micro moving of a body in a plane[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 91(1): 237-242.
- [6] Vasiljev P, Borodinas S, Mazeika D, et al. Investigation of the multipurpose piezoelectric actuator[C]// Proceedings of the Second International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators. Paderborn: Heinz Nixdorf Institute, 2006: 339-408.
- [7] 张健滔, 朱华, 赵淳生. 杆式超声电机在精密平台上的应用[J]. 中国机械工程, 2011, 15(22): 1842-1846.  
Zhang Jiantao, Zhu Hua, Zhao Chunsheng. Precision positioning stage using rod shape rotary ultrasonic motors[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 15(22): 1842-1846. (in Chinese)
- [8] Sun Shuwen, Wu Na, Zheng Gang, et al. Research and implementation on control technology of plane two-DOF dual-truck parallel mechanism[C]// Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on. Beijing: IEEE, 2011: 1682-1687.
- [9] 时运来, 赵淳生. 蝶形直线超声电机优化设计[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(6): 883-891.  
Shi Yunlai, Zhao Chunsheng. Application of response surface methodology for optimization of butterfly-shaped linear ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(6): 883-891. (in Chinese)
- [10] 姚志远, 赵妹淳, 江超, 等. 扇形直线超声电机的结构设计[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(1): 40-43.  
Yao Zhiyuan, Zhao Meichun, Jiang Chao, et al. Structural design on linear ultrasonic motor with fan-shaped stator[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1): 40-43. (in Chinese)
- [11] 王雪梅, 王义和. 模拟退火算法与遗传算法的结合[J]. 计算机学报, 1997, 20(4): 381-384.  
Wang Xuemei, Wang Yihe. The combination of simulated annealing and genetic algorithms[J]. Journal of Chinese Computers, 1997, 20(4): 381-384. (in Chinese)
- [12] Allemang R J, Brown D L. A correlation coefficient for modal vector analysis[C]// Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference. Orlando: [s. n.], 1982: 110-116.
- [13] 王国强, 赵凯军, 崔国华. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 160-180.



**第一作者简介:**朱华,男,1978年8月生,副研究员。主要研究方向为压电精密驱动元件与系统(包含超声电机)的样机开发、机理分析与优化设计、驱动与控制、压电作动器件产业标准化与质量控制体系等研究与生产工作。曾发表《一种微型柱体超声电机的研究》(《中国电机工程学报》2006年第26卷第12期)等论文。

E-mail: hzhu103@nuaa.edu.cn

