

文章编号:1006-1355(2022)04-0038-08

盆架型压电平面电机响应面法动力学特性优化

王哲逸, 李 冀, 李晨捷, 龙玉繁, 贺红林

(南昌航空大学 航空制造工程学院, 南昌 330063)

摘要:为解决压电电机定子在设计过程中存在的定子结构尺寸难以拟定、驱动足激励变形难以最大化以及进行多目标设计时难以求得全局最优解等问题,以盆架型压电电机定子为研究对象,在以有限元法构造定子参数化模型的基础上,利用模态置信准则(modal Assurance Criterion, MAC)进行定子工作模态的筛选与捕获,采用中心复合设计法(Central Composite Design, CCD)生成采样计算点,结合克里金法(Kriging Method)搭建相关特征结构尺寸参数的响应面优化模型,并运用多目标遗传优化算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II)在基于响应面模型所得的设计空间内进行最优解的全局搜索。通过定子谐波响应分析得到弯-纵振频差相对于“试凑法”所得结果下降30%,且无明显干扰模态,由此验证了优化模型的正确性。瞬态分析结果表明定子驱动足的 x 方向位移为 $6.4\text{ }\mu\text{m}$, y 方向位移为 $5.48\text{ }\mu\text{m}$, z 方向位移为 $6.16\text{ }\mu\text{m}$,各相位位移均有明显增长。说明根据优化设计得到的定子驱动足位移更大,三相工作模态更接近,电机运行更加平稳。

关键词: 振动与波; 压电平面电机; 响应面模型; 多目标遗传优化算法; 结构动力学优化

中图分类号: TM3

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2022.04.007

Optimization of a Basin-shaped Piezoelectric Planar Motor Using Stator Response Surface Methodology

WANG Zheyi, LI Ji, LI Chenjie, LONG Yufan, HE Honglin

(School of Aeronautical Manufacturing, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The problems in the design process of the stator of the ultrasonic motor, such as the difficulty in drawing up the stator structure size, the difficulty in maximizing the deformation of the driving foot and the difficulty in obtaining the global optimal solution in the multi-objective design are studied. With a basin type ultrasonic motor stator as the research object, the stator structure parametric model is established by means of finite element method. The modal assurance criterion (MAC) is used to select and capture the working mode of the stator. The central composite design (CCD) method is used to generate the sampling calculation points. Combined with the feature of Kriging method, the related structure size parameters of the response surface optimization model are set up. The non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) are used to global searching of the optimal solution within the design space of the response surface model. The results of stator harmonic response analysis show that the bending-longitudinal frequency difference decreases by 30 % compared with the results obtained by "trial and error" method, and there is no obvious interference mode, which verifies the correctness of the optimization model. The results of transient analysis show that the displacement of the stator driving foot in the x direction is $6.4\text{ }\mu\text{m}$, in y direction is $5.48\text{ }\mu\text{m}$, and in z direction is $6.16\text{ }\mu\text{m}$. And the displacement of each phase is increased obviously. It shows that the stator driving foot displacement obtained by the optimized design is larger, the three-phase working modes are closer, and the motor operates more smoothly.

Key words: vibration and wave; piezoelectric planar motor; response surface model; NSGA-II; structural dynamical optimization

收稿日期:2021-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52165008);江西省自然科学基金重点资助项目(2020ACB202003);南昌航空大学研究生创新专项基金资助项目(YC2020-029)

作者简介:王哲逸(1997-),男,硕士研究生,主要从事精密压电驱动研究。

通信作者:贺红林(1967-),男,博士,教授,主要从事压电驱动、结构动力学,机电一体化系统设计技术研究。

压电电机是一种直接驱动的新型微特电机。与传统直流电磁电机不同,压电电机利用压电材料的逆压电效应进行驱动。通过在压电材料表面施加电激励信号使其产生微观振动,进而激励定子体产生微观共振,再将其转化为动子的宏观运动^[1-4]。平面压电电机在工作时有响应快、定位精度高、运动平稳、无输入自锁等一系列优点,因此平面压电电机广泛运用于生物医疗、芯片制造等有高精度定位需求

行业^[5-6]。Polit等^[7]提出了1种具有纳米级分辨率的压电驱动平台,该驱动平台 x 、 y 向驱动行程可达15 μm ,行进间位移分辨率可达1 μm ; Zhang等设计出一种新型精密二维定位平台^[8],平台将两向驱动耦合形成50 mm×50 mm的驱动行程,定位精度小于0.28 μm ;贺红林课题组提出“田字型”、“双十字形”和“口齿式”电机结构^[9-11]。总结前人研究成果,本文提出了1种以定子纵、弯两种振动模态作为驱动模态的盆架型平面压电电机。电机利用压电材料的 d_{31} 效应激励定子固有模态,通过定动子间的摩擦耦合,将定子的微观振动传递至动子^[12]。

压电电机定子设计要求特殊,在设计过程中常出现为满足某一个性能参数要求而导致另一个性能参数产生剧烈变化的情况,极大地增大了电机设计难度^[13]。以往为满足此类电机定子设计要求,常采用“手动试凑”的方法^[14-15]。此类设计方法使得定子设计过程繁琐,结果也不理想。针对上述问题,时运来^[16]提出了1种基于响应面法的优化设计方法,运用响应面法获得优化参数与优化目标的显式关系式,结合优化算法对其进行参数寻优,因其依靠经验进行优化参数选取从而降低了优化精度。杨模尖等^[17]利用有限元分析获得了V型定子的关键结构参数对两相模态频率一致性的影响,通过试选的方式找到较合理的结构参数尺寸,因函数关系构建问题,该方法操作相对复杂^[18]。Deibel等^[19]采用了遗传算法和单纯形法相结合的算法来优化换能器参数; Hong等^[20]等运用Kriging Meta模型,辅助以进化算法,对结构参数进行寻优。

本文提出了1种基于ANSYS有限元软件和MATLAB分析软件,结合响应面法和多目标遗传优化算法(NSGA-II)的优化设计方法,以盆架型压电电机定子为研究对象对其性能进行验证。

1 电机定子设计

1.1 定子的结构拓扑

在满足电机直线驱动的基础上,定子设计还需大致满足3个条件^[21]:

(1) 存在合适的模态频率,使定子工作模态处于合适的超声频域。模态频率低则易产生噪声,模态频率高则电机能量损耗增加。

(2) 压电陶瓷片尽量配置在定子最大应变处,以保证获得最大的驱动足振幅。

(3) 应尽量降低驱动杆的弯曲刚度,进而使驱动杆上的驱动足获得更大振幅。综合上述条件,设计出如图1所示的盆架型平面压电电机定子。定子由4根方形杆与十字结构体相连构成,在十字结构

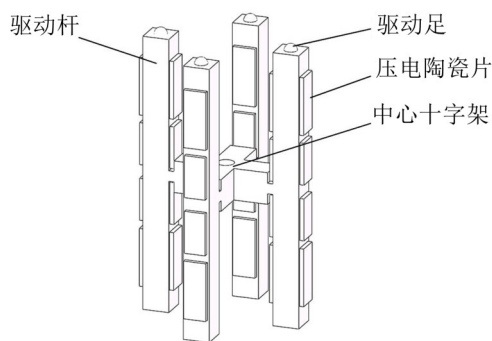


图1 盆架形压电电机定子模型

体中心处设置通孔用于固定和装配。为减小驱动的弯曲刚度,在驱动杆与十字结构体连接处作挖槽处理并在驱动杆中心开孔。在4根方形杆顶部设有球形驱动足用于传递运动。将压电陶瓷片对称贴于每根方形杆两侧,其中置于两端驱动足处的16片压电陶瓷片用于激励定子产生1阶面内弯曲振动模态,置于十字结构体的16片压电陶瓷片用于激励定子产生2阶反对称纵向伸缩振动模态。

1.2 定子驱动机理

本文采用压电陶瓷的LE模式并基于 d_{31} 效应激励定子1阶对称弯振模态和2阶反对称纵振模态,通过二者运动耦合驱动动子滑块。电机盆架型定子一个运动周期 T 内驱动足运动过程如图2所示。

在 $0 \sim T/4$ 时段,1、2号方杆的1阶纵振使它们由初始杆长伸长成最大长度,使1、2号方杆顶部的驱动足与动子滑块相接触,而1、2号方杆的弯曲模态振动使两杆由最大左弯状态恢复成直杆状态,使得1、2号方杆顶部的驱动足分别由 A_1 、 B_1 运行至 A_2 、 B_2 并推动动子滑块沿 x 方向移动一个步距 λ ;同时,3、4号方杆的2阶纵振使它们由初始长度收缩至最小杆长,使3、4号方杆顶部的驱动足与动子滑块脱离接触,3、4号方杆的1阶弯曲模态振动则使3、4号方杆由最大前弯状恢复成直杆状,使3、4号方杆顶部的驱动足由 F_1 、 G_1 行进到 F_2 、 G_2 。

在 $T/4 \sim T/2$ 时段,1、2号方杆的2阶纵振使它们由最大杆长恢复至初始杆长,两杆顶部的驱动足仍保持与动子滑块接触,而1、2号方杆的1阶弯曲模态振动使两杆由直杆状弯成最大右弯状,从而使1、2号方杆顶部的驱动足分别由 A_2 、 B_2 运行至 A_3 、 B_3 并推动动子滑块沿 x 方向移动一个步距 λ ;同时,3、4号方杆的2阶纵振使它们由初始最小杆长恢复到初始杆长,使3、4号方杆顶部的驱动足仍不与动子滑块接触,而3、4号方杆的1阶弯曲模态振动则使3、4号方杆由直杆状弯曲成最大后弯状,从而使3、4号方杆顶部的驱动足由 F_2 、 G_2 行进到 F_3 、 G_3 。

在 $T/2 \sim 3T/4$ 时段,2阶纵振使1、2号方杆由初

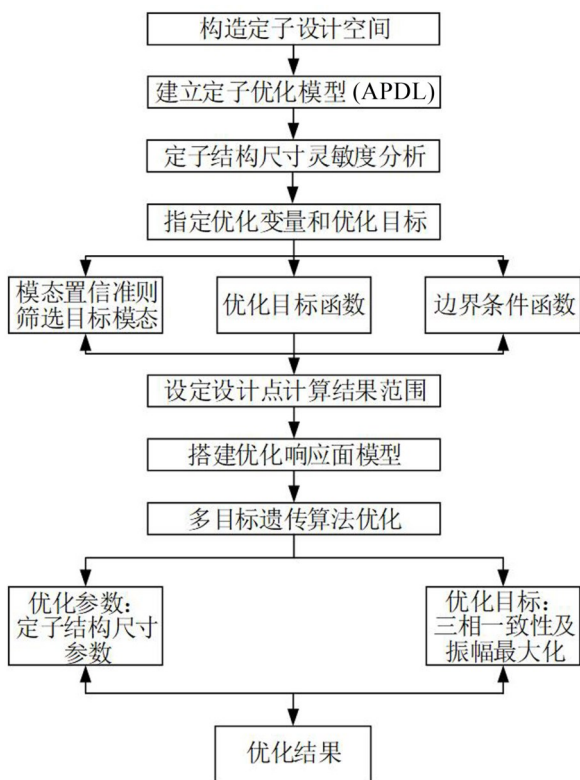


图3 定子结构优化流程图

$$(\text{MAC})_i = \frac{(\Phi_{ui}^T \Phi_{\text{ref}})^2}{(\Phi_{ui}^T \Phi_{ui})(\Phi_{\text{ref}}^T \Phi_{\text{ref}})} \quad (1)$$

式中:

$\Phi_{ui} = [ux(Node_{i,1}), ux(Node_{i,2}) \cdots ux(Node_{i,j})]^T$, $ux(Node_{i,j})$ 指所得模型的第 j 个节点在第 i 阶模态下的 x 向振幅值 ($i=1, 2, 3, \dots, j=1, 2, 3, \dots, n$), y 向的振幅值和 z 向的振幅值同理; Φ_{ref} 为参考模态振型, MAC 值越大说明该模态与目标模态相似程度越高。

2.2 结构尺寸灵敏度分析

根据初始运动机理和振动学特性要求所设计的电机定子结构已经具备了某种稳定的振动特性,但未经优化的定子结构无法充分体现自身的振动特性。因此,还需在原有结构基础上对定子结构尺寸进行寻优。盆架型电机的定子结构图如图4所示。

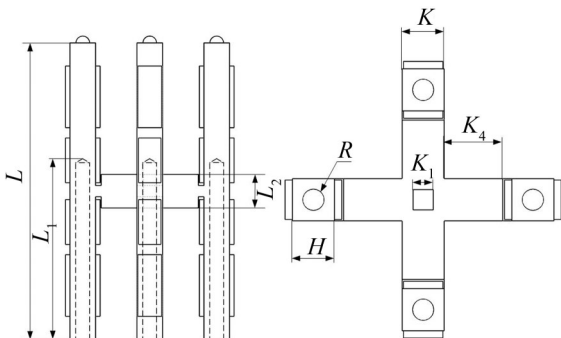


图4 定子结构图

由图4可知,定子结构尺寸众多,逐个分析各尺寸会降低优化效率,故有必要运用全局差分法筛选出对定子工作性能影响较大的尺寸进行分析。设定定子设计变量为 $d_i (i=1, 2, \dots, n)$, 得定子有限元模型特征方程:

$$K\varphi - \omega_i^2 M\varphi = 0 \quad (2)$$

式中: $\varphi = \varphi_i(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为定子第 i 阶模态的振型; $\omega_i = \omega_i(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为第 i 阶模态的振动频率; $K = K(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为定子刚度阵; $M = M(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为质量矩阵。当 d_i 产生了微变量 Δd , 必然有:

$$\begin{cases} K(\Delta d_1)\varphi(\Delta d_1) - \omega_i^2 M(\Delta d_1)\varphi(\Delta d_1) = 0 \\ K(\Delta d_2)\varphi(\Delta d_2) - \omega_i^2 M(\Delta d_2)\varphi(\Delta d_2) = 0 \\ \vdots \\ K(\Delta d_n)\varphi(\Delta d_n) - \omega_i^2 M(\Delta d_n)\varphi(\Delta d_n) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

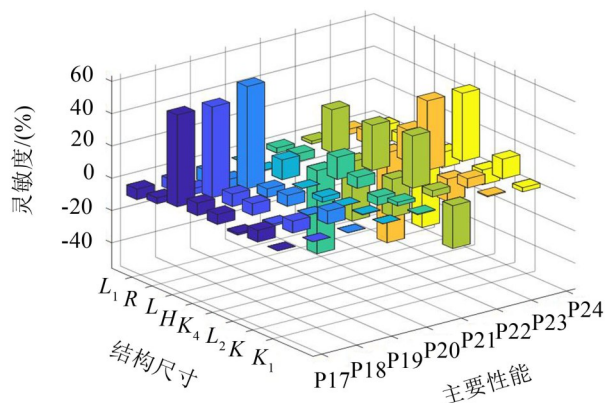
解得各尺寸的频率灵敏度为:

$$\begin{aligned} S_{d1} &= \partial \omega_i / \partial d_1 = (\omega_i(\Delta d_1) - \omega_i) / \Delta d \\ S_{d2} &= \partial \omega_i / \partial d_2 = (\omega_i(\Delta d_2) - \omega_i) / \Delta d \\ &\vdots \\ S_{dn} &= \partial \omega_i / \partial d_n = (\omega_i(\Delta d_n) - \omega_i) / \Delta d \end{aligned} \quad (4)$$

即:

$$S_{di} = \frac{\partial \omega_i}{\partial d_i} \quad (5)$$

根据式(5)求得优化目标函数针对定子尺寸的灵敏度,如图5所示。 L_1, R, K 对频率一致性影响较小, L, H, L_2 对面内弯振影响大, L, H, K_4, L_2 对反对称纵振影响大, L, H 对频率一致性影响较大。



P17—1阶左弯振频率

P18—1阶右弯振频率

P19—2阶反对称纵振频率

P20—相邻2阶弯振模态频差

P21—相邻2阶弯振模态频差

P22—1阶左弯振振幅

P23—2阶反对称纵振振幅

P24—1阶右弯振振幅

图5 定子部分特征尺寸敏感度图

2.3 建立定子优化模型

从尺寸灵敏度分析可知,盆架形定子众多的尺寸中 K_1, K_4, H, L, L_2 等对目标工作模态的影响较大,故选定这些尺寸为优化变量,构建以工作模态频率

一致性及振幅最大化为优化目标,并以模态置信度等为约束的定子结构动力学优化数学模型,即:

$$\begin{cases} x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T \triangleq [K_1, K_4, H, L, L_2]^T \\ f_{\max}(x) = \max(f_{11}(x), f_{12}(x), f_2(x)) \\ f_{\min}(x) = \min(f_{11}(x), f_{12}(x), f_2(x)) \\ \min \Delta f = f_{\max}(x) - f_{\min}(x) \\ F = \frac{1}{|\zeta_s|} \\ \text{MAC}_j \in [0.9, 1] \quad j = 1, 2, 3 \\ -x_i < x_{i\min} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \\ x_{i\max} < c \\ f_{\max} < 50 \text{ kHz} \\ -f_{\min} < -30 \text{ kHz} \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_{11} 为1阶左弯振模态频率, f_{12} 为1阶右弯振模态频率, f_2 为2阶反对称纵振模态频率; ζ_s 为定子振幅, $x_{i\min}$, $x_{i\max}$ 为结构尺寸 x_i 的下限和上限。

3 响应面模型的构建

响应面技术具有很强的操作性,将它与有限元分析结合起来可以对复杂结构进行优化分析^[23]。在通过 ANSYS 内部循环得到一系列可行解之后,建立响应面模型进行数据分析,求得全局最优解。响应面的基本思路为:首先,选择近似隐式响应函数的多项式形式,然后再通过一系列设计点来确定近似函数中的各个待定系数。故在确定拟合函数时,需选取合理的设计点和迭代方法,以确保近似响应函数能收敛于真实的隐式响应函数^[24]。

在单一变量情况下,响应面函数形式如式(7)所示:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (7)$$

其中: y 为拟合函数输出量, β_0 为系数, β_i 为各变量系数, x_i 为输入变量, ε 为观测误差。分析发现,当变量为单个变量且最大项数为一次时拟合结果太粗略,将两个变量的乘积合并,得到:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^m \beta_{ii} x_i x_j + \sum_{i < j}^m \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (8)$$

将式(8)改写成:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

再将其改写成矩阵形式:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (10)$$

式中:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

可得最小方差为:

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad (11)$$

不难发现,当式(11)中最小方差趋于最小时,拟合曲面与实际隐函数趋于一致。当 L 对 β 的偏导数为零时,最小方差取极小值。

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta} \right|_{\hat{\beta}} = -2X'y + 2X'X\hat{\beta} = 0 \quad (12)$$

可得:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (13)$$

即可推导出所拟合的响应面为:

$$\hat{y} = X\hat{\beta} \quad (14)$$

利用 ANSYS 动力学计算求得的数据,运用中心复合设计法 CCD 生成采样计算点,基于克里金法结合式(10)至式(14)建立定子结构参数 L 、 K_4 关于目标函数的响应面模型,拟合精度为 98.12%,如图 6 所示。

F 为目标函数,响应面展开式为:

$$\begin{aligned} F = & 2.117 \times 10^5 - 4160 \times L - 8.914 \times 10^4 \times K_4 + \\ & 31.37 \times L^2 + 336 \times L \times K_4 + 1.569 \times 10^4 \times K_4^2 + \\ & 4.88 \times 10^{-7} \times L^3 + 2.13 \times 10^{-5} \times L^2 \times K_4 + \\ & 4.662 \times 10^{-4} \times L \times K_4^2 + 4.864 \times 10^{-3} \times K_4^3 \end{aligned} \quad (15)$$

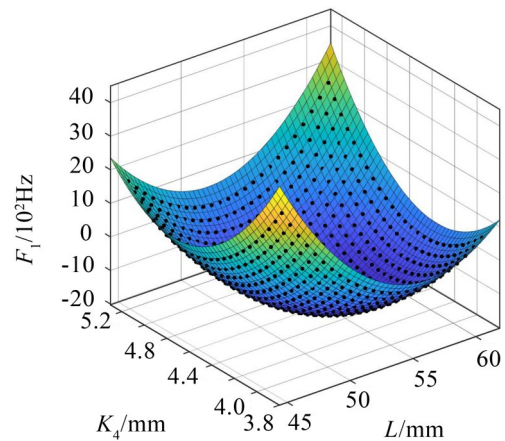


图6 定子响应面模型

4 定子的NSGA-II优化

本文中定子采用多目标遗传优化算法(NSGA-II)进行优化,该方法是1种非支配快速多目标优化算法,而且是基于 Pareto 最优解的多目标优化算法^[25-26]。NSGA-II算法中新引入了精英策略,成为一种快速非支配的排序算法,这一改进扩大了采样空间,使得非支配排序计算复杂度大幅降低。

文中将驱动足 x 、 y 、 z 向振幅最大化和模态频率一致性作为算法的目标函数,以3阶工作模态频率差值总和 ≤ 300 Hz为约束,构造如表1所示的搜索空间。自初代种群起,对所有个体进行拥挤度排序,将每次迭代生成的子代种群与其父代种群重新组合,通过共同竞争来产生下一代种群。这样有利于保存父代中现存的优良个体,使之在进化过程中不被丢弃,提高了算法结果的准确度。同时引入拥挤度计算和拥挤度比较算子。将拥挤度作为种群中个体之间的比较准则,在迭代过程中对种群中所有个体以拥挤度为标准进行分层存放。这样能迅速提高种群精英度水平,使得准Pareto域中的种群个体能均匀扩展到整个Pareto域,避免算法过快进入局部最优而停止优化,保证了种群多样性。本文优化算法的实现流程如图7所示,优化中的相关参数设置情况如表1所示。

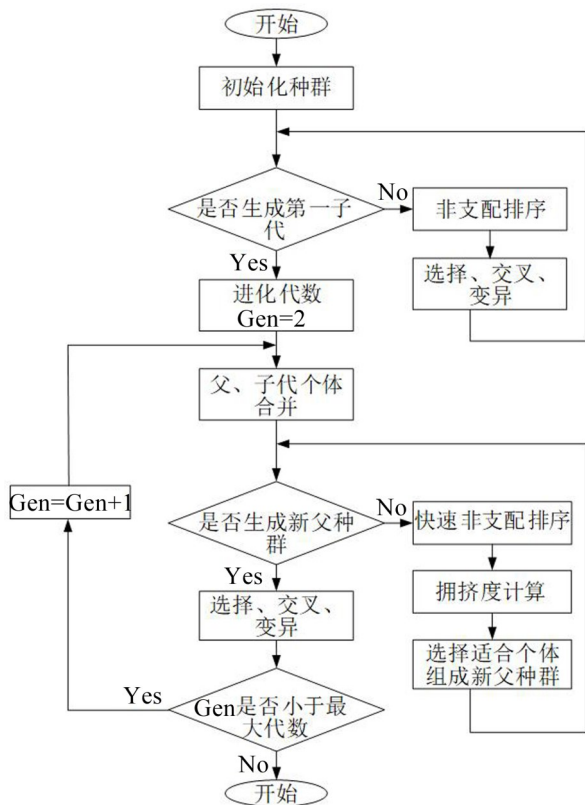


图7 定子多目标优化流程图

表1 优化变量取值范围

优化参数	数值
K_1/mm	1.9~2.5
K_2/mm	7.7~9.6
H/mm	4.1~5.1
L/mm	47.8~58.5
L_2/mm	5.4~6.6

在基于多目标遗传优化算法的优化过程中,拥

挤度的判定是确保种群多样性的决定性因素。拥挤度计算步骤为:

(1) 不在两端的点拥挤度主要与其相邻两个点有关,遂将每个点的拥挤度 i_d 设为0;

(2) 根据优化目标对种群进行非支配排序,使边界上的两个点拥挤度达到无限大,即 $o_d=l_d=\infty$;

(3) 对种群中其余个体进行拥挤度计算,并对同层个体进行排列分层^[20-21]。式(16)为拥挤度计算公式。

$$i_d = \sum_{j=1}^m (|f_j^{i+1} - f_j^{i-1}|) \quad (16)$$

式中: i_d 为对应点的拥挤度, f_j^{i+1} 和 f_j^{i-1} 为目标函数 j 对应的 $i+1$ 点和 $i-1$ 点的函数值。

5 优化过程与结果

5.1 迭代优化过程

为保证样本点数量和优化可信度,运用中心复合设计法CCD进行计算,得到161组设计点,在算法中生成8 000个初始化种群个体并进行优化运算。迭代终止条件设为收敛稳定性趋于0%或种群中精英数达到70%,对优化模型中的各优化目标进行约束并取极值,迭代步数设为100步,算法参数设置如表2所示,算法迭代过程如图8所示。

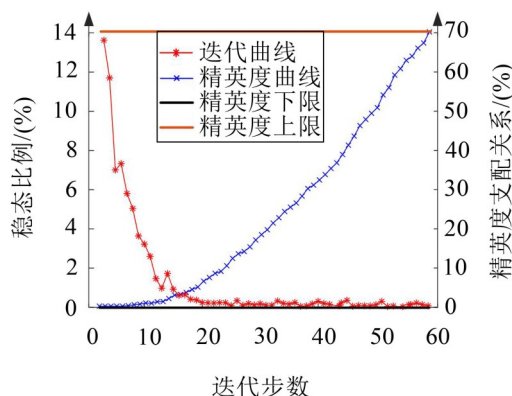


图8 目标函数迭代过程

表2 NSGA-II算法参数设置

参数名称	值
最大迭代步数	100
初始种群个体	8 000
生成子代种群个体	1 600
目标精英数占比	70 %
迭代终止条件	收敛稳态为0 %或精英数达到70 %

5.2 优化结果

如图8所示,算法在迭代到第58步时达到迭代终止条件,优化结束并输出结果。根据输出结果重

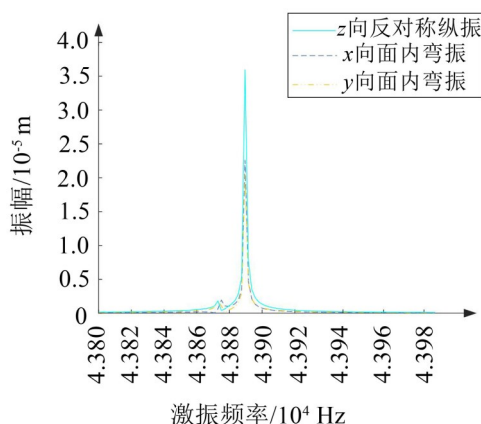
建定子模型并进行模态计算,所得结果满足 $MAC \geq 0.9$ 和模态频率一致性等设计要求。随后建立优化后的定子机电耦合动力学分析模型,利用ANSYS对定子的频响特性进行求解,观测步长设为0.5 Hz。结果表明,相比于之前“手动试凑”所得结果^[27],优化后的定子结构模态频率一致性明显提高且无明显干扰模态,特别是 x 、 z 向振幅几乎相等,这说明该电机能较好地保证 x 、 z 向输出特性的平衡,谐响应对比分析如图9所示。定子尺寸优化结果如表3所示。

同样基于ANSYS对优化后的定子进行定频激励动力学分析。对陶瓷片施加频率为44 350 Hz、幅值为250 V、相位差为 $\pi/2$ 的激励电信号。定子振幅

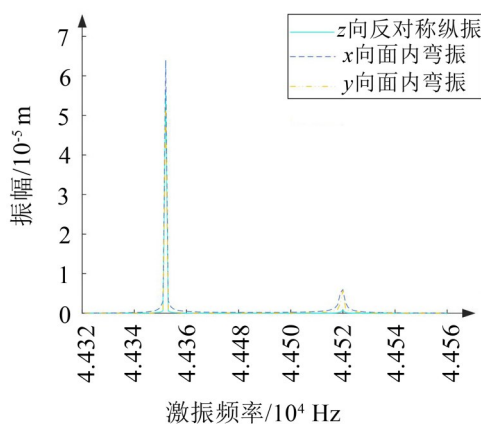
达微米级且达到稳态时驱动足沿 x 、 y 、 z 的振动幅值分别为6.3 μm 、5.48 μm 、6.16 μm 。从图10(b)中可以看出,驱动足在 xOz 平面内的运动轨迹扁平,收敛速度快,表明优化后的定子具有更优的驱动性能。

表3 定子优化结果

优化参数	初始值	优化结果
K_1/mm	2.2	2.32
K_4/mm	8.66	9.06
H/mm	4.56	4.62
L/mm	53.136	55.38
L_2/mm	6	6.24
目标参数	起始值	终止值



(a) “手动试凑”法谐响应图



(b) 多目标优化法谐响应图

图9 谐响应对比图

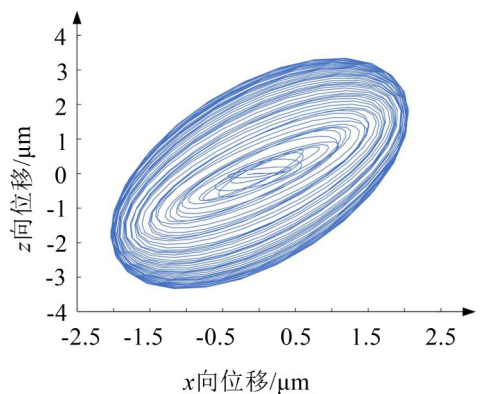
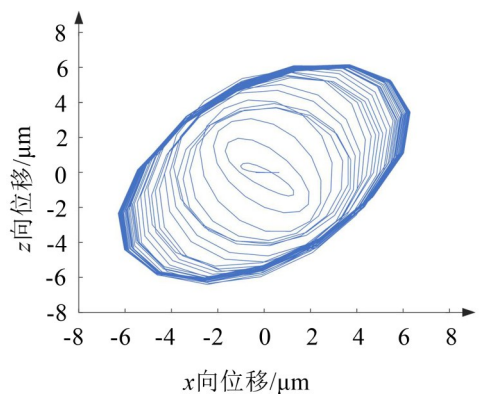
(a) “手动试凑”法 xOz 平面驱动足运动轨迹(b) 多目标优化法 xOz 平面驱动足运动轨迹

图10 瞬态分析对比图

相邻弯振频率差/Hz	193.6	40.5
相邻弯纵振频率差/Hz	143.6	114.2
瞬态分析下 x 向稳态振幅/ μm	2.0	6.4
瞬态分析下 y 向稳态振幅/ μm	1.5	5.5
瞬态分析下 z 向稳态振幅/ μm	3.3	6.1

6 结语

提出一种基于ANSYS和MATLAB,结合有限

元响应面法和多目标遗传算法解决压电电机定子动力学结构优化问题的方法。以盆架型平面电机定子为研究对象,解决了多结构尺寸、多优化目标定子优化困难的问题。研究表明:

(1) 优化后的电机定子拥有更优的模态频率一致性。三相工作模态间工作频率间隔从优化前的193.6 Hz、143.6 Hz降低至40.5 Hz、114.2 Hz。

(2) 优化后的电机定子拥有更大的激励振幅。

工作模态 x 、 y 、 z 向有效振幅从优化前的 $2.0\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $3.3\ \mu\text{m}$ 增加至 $6.4\ \mu\text{m}$ 、 $5.5\ \mu\text{m}$ 、 $6.1\ \mu\text{m}$ 。

本文提出的优化方法可为今后的压电电机动力学优化提供思路,但本文仅涉及定子的静力学优化,只在理论和仿真阶段对本方法所得结果进行验证,后续的研究中将进一步复现设计理论。

参考文献:

- [1] 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+1031.
- [2] 符宝鼎,李治辰,王宏祥. 弯扭复合模态超声电机振子的优化设计[J]. 压电与声光, 2021, 43(1): 110-113.
- [3] 郭语,陆庆,孙志峻,等. 行波型球形超声电机定子的优化设计[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 77-82.
- [4] 牛子杰,孙志峻,崔永杰. 基于响应面的三自由度超声电机定子设计优化[J]. 振动、测试与诊断, 2019, 39(5): 1089-1097+1138.
- [5] 张健,王笑竹,何劼,等. H形直线超声电机振子的结构分析及模态优化[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(25): 183-190.
- [6] 冯书剑. 面内弯纵模态耦合直线超声电机的有限元仿真及结构优化[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [7] POLIT S, DONG J. Development of a high-bandwidth xy nanopositioning stage for high-rate micro-nanomanufacturing[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(4): 724-733.
- [8] ZHANG J T, ZHU H, ZHOU S Q, et al. Optimal design of a rod shape ultrasonic motor using sequential quadratic programming and finite element method[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2015, 59(2): 11-17.
- [9] 贺红林,江涛,付磊,等. 双十字压电振子同型弯振模态驱动的平面超声电机[J]. 工程设计学报, 2019, 26(5): 594-602.
- [10] 余九,贺红林. 口齿式定子驱动的平面超声电机特性分析[J]. 压电与声光, 2019, 41(2): 269-274.
- [11] 贺红林,邓传涛,龙玉繁,等. 双H叉合式定子谐振驱动的压电平面电机研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 97-103.
- [12] 董兆鹏. 双谐振环形行波超声电机设计及优化[D]. 上海:交通大学, 2018.
- [13] 杨模尖,姚志远,李响,等. V型贴片式直线超声电机的结构优化设计[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 213-218+270.
- [14] 张海军,刘卫东,吴文才,等. 基于OPTIMUS的盘状摇头型超声电机定子参数优化设计[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(8): 1248-1253.
- [15] 孙士平,胡政. 双足反向型直线超声电机的优化设计及性能仿真[J]. 中国机械工程, 2015, 26(13): 783-1788.
- [16] 时运来. 新型直线超声电机的研究及其在运动平台中的应用[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [17] 杨模尖,姚志远,李响,等. V型贴片式直线超声电机的结构优化设计[J]. 振动与冲击, 2017, 36(7): 213-218.
- [18] 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, 34(30): 5378-5385.
- [19] DEIBEL KARL-ROBERT, WEGENER KONRAD. Methodology for shape optimization of ultrasonic amplifier using genetic algorithm and simplex method[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2013, 32(4): 523-528.
- [20] HONG SEUNG KI, RO JONG SUK, JUNG HYUNKYO. Optimal design of a novel permanent magnetic actuator using evolutionary strategy algorithm and Kriging Meta-model[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2013(8): 742-746.
- [21] 王中营,焦群英,陈宇. 圆柱弯曲型超声电机定子的结构优化[J]. 压电与声光, 2009, 31(5): 742-744+748.
- [22] LI Z, WANG Z, GUO P, et al. A ball-type multi-DOF ultrasonic motor with three embedded traveling wave stators [J]. Sensors and Actuators A Physical, 2020, 313: 112161.
- [23] GENG R, LIANG C, YAO Z, et al. Mechanical modeling and analysis of V-shaped LUM mechanical drift[C]//Journal of Physics Conference Series, 2020, 1654(1): 012083.
- [24] 牛子杰. 行波型中空超声电机关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
- [25] CHEN N, FAN D. A teeth-discretized electromechanical model of a traveling-wave ultrasonic motor[J]. Mechanical Sciences, 2020, 11(2): 257-266.
- [26] 荆鹏飞. 行波型旋转超声电机三维动力学建模及性能优化[D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [27] 王哲逸,贺红林,方志敏,等. 盆架形压电振子同型模态驱动平面电机研究[J]. 压电与声光, 2020, 42(6): 831-836.