

# 蝶形直线超声电机优化设计\*

时运来, 赵淳生

(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** 为了有效和快速地实现直线型超声电机的设计,提出了一种基于响应面法的直线超声电机优化设计方法并应用于蝶形直线型超声电机。响应面法是一种试验设计与数理统计相结合的优化方法。首先,利用有限元法建立定子的参数化模型并选定设计变量;其次,利用试验设计方法在变量空间里选取样本点,对各个样本点所对应的结构利用 APDL 建立有限元模型并进行模态分析和谐波响应分析,得到对应各样本点的响应值,利用这些样本点和响应值建立定子响应面近似模型;最后,利用单纯形法找到最佳的设计方案。优化结果显示,蝶形直线超声电机的多方面设计要求都得以实现。

**关键词** 超声电机; 直线; 优化设计; 响应面法

**中图分类号** TM35; TH7

## 引言

对于超声电机而言,定子完成了电能到机械能的转换,其动态特性对于整个电机的性能至关重要。超声电机的优化问题必须有一个动力学模型作为基础。目前,超声电机振子的动力学模型的建模方法主要有解析法<sup>[1-3]</sup>、等效电路法<sup>[4-5]</sup>、半解析-数值法<sup>[6-7]</sup>以及数值法(有限元法)<sup>[8]</sup>等。解析法理论性强,但所能解决的问题一般是比较规整的、理想的,往往与实际情况有所不同。实际问题经过简化,必然会产生误差;因此,解析法一般只作为理论上的定性分析。等效电路法能较好地反映复合定子机电能量转换的非线性特性,具有简单方便的特点。利用该法可弥补解析法中压电体线性本构方程的不足,但其主要还是侧重于压电陶瓷的电学特性的分析。同时,等效电路中主要等效元件(机械支路部分)的确定依赖于实验测定,无法实现参数分析和优化设计。电路参数的确定为后验性,仅适用于原理性分析,尚不能用于计算。半解析-数值法既利用了解析法的思路,便于理论分析,又部分地使用数值法对分析过程中的某些参数进行计算,保证了计算精度,适合解决比较规整的问题。在这4种建模方法中,基于有限元方法的数值法对结构的适用性比较强,求解精度较高,是一种工程上常用的方法;因此,笔者采用有限元法建立定

子的结构动力学模型。对驻波型直线超声电机定子而言,因其结构形状和工作原理的多样性,其分析模型有很大的差异,且在分析建模时,要考虑多种因素及这些因素对电机性能的影响,这就给定子的优化设计带来了一定的难度。目前很多定子优化设计工作中,主要采用参数研究方法,其特点是仅仅变化所研究结构的单一参数来确定其对定子的影响。这种方法在探索定子的设计空间方面存在局限性。源于统计分析的响应面法(response surface methodology,简称RSM)<sup>[9-10]</sup>,可以综合考虑多种因素,给出有效的实验方案,拓宽了设计空间。响应面法在优化思想上和 ANSYS 软件优化设计模块的优化设计方法(零阶方法)的思路是一致的,但RSM方法更加开放,设计者可以根据自己的需求进行实验设计(design of experiment,简称DOE)和响应面拟合方法的选择。同时,RSM计算量相比 ANSYS 优化模块大大降低,可以扩大设计域,使设计者更加方便地根据应用需求进行设计。笔者以一种蝶形直线超声电机为例,提出了一种基于RSM的直线超声电机优化设计方法。

## 1 电机定子操作原理及优化策略

蝶形直线超声电机的基本结构如图1所示。该电机定子左右对称,8片沿厚度方向极化的压电陶

\* 国家自然科学基金资助项目(编号:51275235,50975135);NSFC-广东联合基金重点资助项目(编号:U0934004)  
收稿日期:2012-11-06;修改稿收到日期:2012-11-15

瓷片通过螺栓夹持在前端盖和后端盖之间。固定件布置在压电陶瓷片中间,用于把整个定子固定在滑座上。两片压电陶瓷元件为一组,按相反的极化方向固定在一起,并以青铜箔作为电极夹在每一组压电陶瓷间作为电极。为提高耐磨性,在前端盖驱动点处粘贴有摩擦球,定子表面粘贴着摩擦条。通过施加在固定件上的预压力使得定子驱动足和定子紧紧接触在一起。

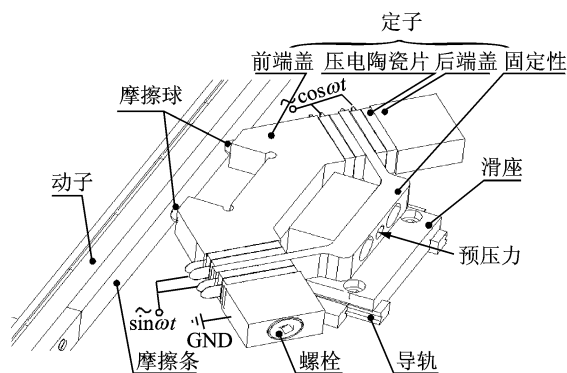


图1 蝶形直线超声电机结构图

该型电机定子所利用的模式为对称模式和反对称模式,如图2所示。左右两个压电振子(称左翅和右翅)同时做同相的伸缩运动,在定子两驱动端(称为驱动足)形成与水平方向有一定夹角的对称振动,称之为对称模式 $E_s$ ,如图2(a)所示;左右两腿同时做反相的伸缩运动,在定子两驱动足上形成与垂直方向有一定夹角的反对称振动,称之为反对称模式 $E_a$ ,如图2(b)所示。压电陶瓷片布置在左、右翅纵向振动的节面附近。在 $E_s$ 中,由于定子的对称振动,固定件上的振幅很小。在 $E_a$ 中,由于定子反对称振动,固定件的局部二阶弯曲模式被激励出来,其3个节点位于1,2,3处。为减少定子的夹持和预压力对定子工作模式的影响,把固定件的1,3节点作为定子的夹持点。当定子左右两边的PZT元件上同时施加两相特定的交变电压信号时,由于PZT元件的逆压电效应,可激发定子工作所需的模式,在两个驱动足端面质点上形成椭圆运动轨迹。在一定预压力作用下,两个驱动足交替驱动动子产生直线运动。切换交变电压的相位,可改变定子驱动足椭圆运动的方向,从而改变动子运动的方向。

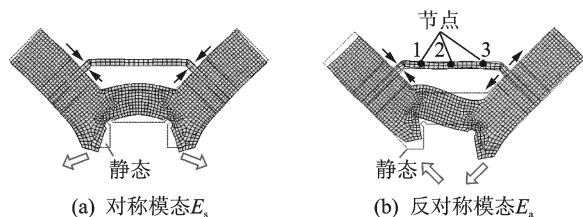


图2 定子的工作模式

由蝶形直线超声电机定子的工作原理可知,该电机定子利用两个异形模式作为工作模式,其优化的第一要务就是要尽量减小两个异形模式的频率差,使得在同一驱动频率的驱动下这两个工作模式都被有效地激发出来。但同时,超声电机要能正常工作,在定子的动力学特性上不仅要求定子的两相工作模式频率差足够小,还要求定子驱动足端面的位移振幅足够大,而用于定子支撑的支撑板的位移振幅足够小。显然,这些要求都是电机定子设计需要满足的目标。笔者借助试验设计方法和响应面近似模型技术来实现蝶形直线超声电机定子的优化设计,其基本思想是选取合适的定子结构参数作为设计变量,利用试验设计方法在变量空间里选取样本点,并对各个样本点所对应的结构利用APDL(ANSYS parametric design language)建立有限元模型并进行模态分析和谐响应分析,得到对应各样本点的响应(包括两相工作模式频率差、驱动足振幅和夹持点振幅等),利用这些样本点和响应值建立定子响应面近似模型,再以优化算法进行寻优,其流程如图3所示。

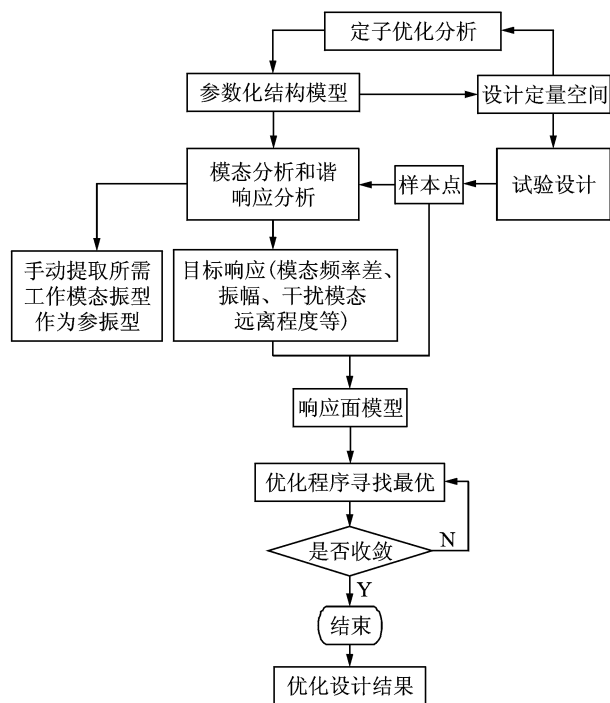


图3 定子优化设计流程图

## 2 电机定子数值建模

图4为蝶形电机定子的简化结构及其相应的结构参数,共14个,其初值见表1。为了在驱动足上获得较大的振幅,定子整体采用了不同的弹性体材料。定子后端盖部分采用了密度相对较大的磷青铜材料,密度为 $8\ 500\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为 $92\text{ GPa}$ ,泊松比

为0.33;前端盖采用了密度相对较小的硬铝材料,密度为3 000 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为70 GPa,泊松比为0.3;固定件采用不锈钢材料,密度为7 900 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为198 GPa,泊松比为0.24。压电陶瓷材料采用PZT-8,密度为7 500 kg/m<sup>3</sup>,其压电应变矩阵 $e^E$ 、刚度矩阵 $c^E$ 和介电常数矩阵 $\epsilon^S$ 分别为

$$e^E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 10.5 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{C} \cdot \text{m}^{-3})$$

$$c^E = \begin{bmatrix} 13.2 & 7.1 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.1 & 13.2 & 7.3 & 0 & 0 & 0 \\ 7.3 & 7.3 & 11.5 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 3.0 & 0 & 0 \\ & & & & 2.6 & 0 \\ & & & & & 2.6 \end{bmatrix} \times 10^{10} \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$$

$$\epsilon^S = \begin{bmatrix} 7.12 \times 10^{-9} & & & & & \\ & 7.12 \times 10^{-9} & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & 5.84 \times 10^{-9} \end{bmatrix} \quad (\text{F} \cdot \text{m}^{-1})$$

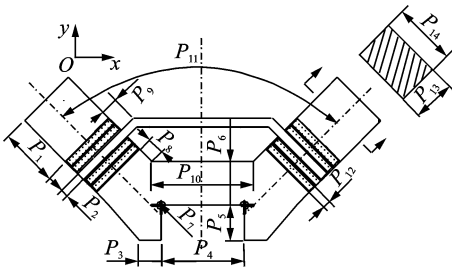


图4 蝶形电机定子结构及其参数

根据表1所示的结构初值,建立了定子的有限元模型,如图5所示。定子上金属弹性体结构部分采用三维八节点六面体solid45单元,压电陶瓷部分则采用三维八节点六面体压电耦合体solid5单元,将定子结构离散成11 248个体单元,共14 202个节点,边界为自由边界。

表1 定子主要设计参数 mm

参数	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7$	$P_8$	$P_9$	$P_{10}$	$P_{11}$	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$
初始值	11.5	2	5	18	7.5	10	0.8	3	3	23	90°	2	8	14

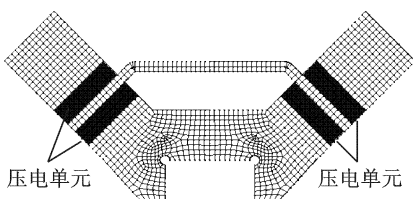


图5 蝶形电机定子有限元模型

为了便于优化过程中的模态辨识,选取如图6所示黑框内的节点的在 $xOy$ 面内的位移构成定子的对称振动模态参考振型和反对称振动模态的参考振型。

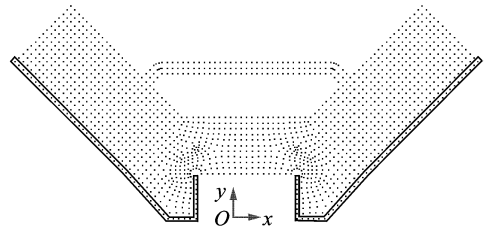


图6 提取振型时所选定的节点

### 3 优化设计

#### 3.1 优化目标

由定子优化设计思路可知,为了获得较高的电机输出性能和机电转换效率,定子的优化设计应满足以下几个方面的设计需求。

1) 两相工作模态频率差足够小。对于利用两个异形模态作为工作模态,其优化的第一要务就是要尽量减小两个异形模态的频率差,使得在同一驱动频率的驱动下这两个工作模态都被有效地激发出来。由此,这一设计要求的数学模型可以表示为

$$R_1(x) = |f_a - f_s| \Rightarrow \min \quad (1)$$

其中: $f_s$ 为对称模态频率; $f_a$ 为反对称模态频率。

2) 干扰模态。干扰模态的存在会在定子驱动足上引起不需要的振动位移,从而导致电机的输出性能下降。为了避免模态干扰问题,要求电机的工作模态与临近模态的频率差尽可能大。因为电机定子利用两个模态作为工作模态,故选择两个工作模态中与其相邻的干扰模态中频率差较小的作为优化的目标之一,可以表示为

$$R_2(x) = \begin{cases} |f_a - f_{\text{distb1}}| \Rightarrow \max \\ (|f_a - f_{\text{distb1}}| < |f_s - f_{\text{distb2}}|) \\ |f_s - f_{\text{distb2}}| \Rightarrow \max \\ (|f_s - f_{\text{distb2}}| \leq |f_a - f_{\text{distb1}}|) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $f_{\text{distb1}}, f_{\text{distb2}}$ 为干扰模态频率。

3) 定子驱动足端面振幅。定子驱动足端面振幅对电机的驱动力和运动速度起着非常关键的作用,其输出力随着定子驱动足端面法向振幅的增大而增大,输出速度随着驱动足端面切向振幅的增大而增大。因为定子主要是利用 $xOy$ 平面内的振动,其在 $z$ 向上的振动是不需要的,此方向的振动将会大大降

低电机的运行效率,并对电机摩擦接触界面带来一定的损伤。笔者把定子驱动足端面的振幅也作为一个优化目标,可以表示为

$$\begin{cases} R_3(x) = U_y \Rightarrow \max \\ R_4(x) = U_x \Rightarrow \max \\ R_5(x) = U_z \Rightarrow \min \end{cases} \quad (3)$$

4) 压电陶瓷的安放位置及定子夹持位置。对于采用压电复合结构的超声电机而言,整个定子的机电转化效率与压电陶瓷的安放位置有着很大的关系。将压电陶瓷安放在定子应变最大处可以获得较大的力系数,从而提高电机的机电转换效率。对于笔者研究的蝶形电机定子,利用两组螺纹压紧方式的压电陶瓷来激发定子的的工作模式,在定子左右两翅的应变最大处安装压电陶瓷。同时此处也是定子左右两翅沿电场方向振动的节面所在处,故把定子固定件也安放在这里。此处的振动位移作为一个优化目标,可以表示为

$$R_6(x) = U_y^{\text{Node}} \Rightarrow \min \quad (4)$$

由此可知,蝶形电机定子的优化设计属于多目标优化设计,在此采用“统一目标函数”法。在对总的目标函数进行极小化的过程中,为了使各个分目标函数能均匀一致地趋向各自的最优值,采用“转化设计指标法”。首先,将各项设计指标都转化为统一的无量纲值,并且将量级限定于 $[0,1]$ 区域内,使目标规格化;然后,再根据各个子目标的重要性分别给予加权因子,各个分目标函数的线性组合就构成了“统一目标函数”。由前述可知,定子共有6个优化子目标,采用加权目标函数法转化为单目标优化问题,以各个目标函数加权之和作为最后的目标函数

$$F_{\text{obj}} = \min \sum_{i=1}^6 c_i F_i \quad (5)$$

其中: $F_1 = |R_1(x)|$ ;  $F_2 = |1/R_2(x)|$ ;  $F_3 = |1/R_3(x)|$ ;

$F_4 = |1/R_4(x)|$ ;  $F_5 = |R_5(x)|$ ;  $F_6 = |R_6(x)|$ ;  $c_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ )为各子目标的加权系数; $F_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ )为各子目标函数。

$F_1$ 是以定子两相工作模式频率差值为优化子目标函数; $F_2$ 是选择两个工作模式中与其相邻的干扰模式中频率差较小值的倒数作为优化的子目标函数; $F_3, F_4$ 分别是以定子驱动足端面节点幅值 $U_y$ 和 $U_x$ 的倒数作为考核驱动足端面节点位移振幅大小的优化子目标函数; $F_5$ 是以定子驱动足端面节点幅值 $U_z$ 作为考察定子驱动效率的优化子目标函数; $F_6$ 是以定子压电陶瓷的安放位置及定子夹持位置的幅值 $U_y^{\text{Node}}$ 作为考核定子夹持位置位移振幅大小及定子振动有效激发的优化子目标函数。显然,这6个子目标函数越小越好,在优化设计中,则是求解它们的极小值。在优化开始前, $F_1 \sim F_6$ 的值均进行 $[0,1]$ 规格化处理。

### 3.2 优化目标响应面函数的确立

选择 $P_1, P_4, P_5, P_8$ 这4个参数作为设计变量,则实验设计变量为

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [P_1 \ P_4 \ P_5 \ P_8]^T \quad (6)$$

采用拉丁超立方实验设计,进行四因素设计,初始值为 $[11.5, 18, 7.5, 3]$ ,各个设计变量的取值范围为

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{x}} &= [10.5, 17, 6.5, 2.5] \\ \bar{\mathbf{x}} &= [12.5, 19, 8.5, 3.5] \end{aligned} \quad (7)$$

通过多学科优化设计软件isight进行拉丁超立方实验设计,共得到30组实验样本点。通过有限元分析得到这30组实验样本点所对应的响应值,如表2所示。根据式(5)对定子响应值进行处理,规格化后的全部数据如表3所示。

表2 拉丁超立方实验设计方案样本点及其响应值

样本号	$x_1/\text{mm}$ ( $P_1$ )	$x_2/\text{mm}$ ( $P_4$ )	$x_3/\text{mm}$ ( $P_5$ )	$x_4/\text{mm}$ ( $P_8$ )	$R_1(x)/$ Hz	$R_2(x)/$ Hz	$R_3(x)/$ $\mu\text{m}$	$R_4(x)/$ $\mu\text{m}$	$R_5(x)/$ $\mu\text{m}$	$R_6(x)/$ $\mu\text{m}$
1	10.500	18.586	7.121	2.776	555.30	878.80	1.217 0	2.620 0	0.063 62	0.526 10
2	10.569	18.034	6.569	2.845	2 652.00	857.80	0.280 5	0.616 3	0.014 78	0.111 70
3	10.638	17.138	6.914	2.948	2 910.00	1 076.00	0.267 4	0.643 5	0.014 55	0.101 10
4	10.707	18.517	8.155	3.052	1 687.00	1 752.00	0.492 5	1.039 0	0.016 79	0.183 00
5	10.776	17.621	7.672	3.328	897.80	1 345.00	0.805 8	1.988 0	0.041 09	0.325 30
6	10.845	17.276	7.190	2.983	2 270.00	1 143.00	0.343 3	0.831 9	0.017 72	0.128 40
7	10.914	18.103	7.603	2.810	241.40	1 043.00	1.923 0	4.513 0	0.099 29	0.815 20
8	10.983	17.552	7.328	2.569	1 481.00	795.20	0.509 0	1.223 0	0.025 98	0.198 60
9	11.052	18.241	7.741	2.914	88.08	1 012.00	2.545 0	5.649 0	0.094 27	0.887 10
10	11.121	17.690	7.466	3.155	1 402.00	1 242.00	0.544 6	1.304 0	0.027 36	0.202 60
11	11.190	17.483	7.810	2.603	518.20	638.30	1.221 0	3.075 0	0.064 43	0.516 90
12	11.259	19.000	7.948	3.190	1 236.00	70.67	0.657 1	1.367 0	0.021 66	0.222 10

续表2

样本号	$x_1/\text{mm}$ ( $P_1$ )	$x_2/\text{mm}$ ( $P_4$ )	$x_3/\text{mm}$ ( $P_5$ )	$x_4/\text{mm}$ ( $P_8$ )	$R_1(x)/$ Hz	$R_2(x)/$ Hz	$R_3(x)/$ $\mu\text{m}$	$R_4(x)/$ $\mu\text{m}$	$R_5(x)/$ $\mu\text{m}$	$R_6(x)/$ $\mu\text{m}$
13	11.328	17.414	6.638	2.534	3 290.00	666.80	0.236 0	0.525 1	0.012 25	0.077 51
14	11.397	17.828	7.052	3.259	2 446.00	1 278.00	0.322 5	0.732 5	0.015 20	0.108 20
15	11.466	18.862	8.017	3.431	878.10	543.50	0.930 5	1.961 0	0.029 00	0.288 80
16	11.534	18.724	6.500	3.224	2 689.00	975.90	0.285 4	0.542 2	0.012 21	0.095 17
17	11.603	17.897	6.983	3.362	2 695.00	1 186.00	0.295 3	0.658 6	0.013 69	0.094 32
18	11.672	18.310	6.776	2.741	2 349.00	783.00	0.327 2	0.680 4	0.014 94	0.107 50
19	11.741	17.207	8.362	2.879	20.09	381.60	2.806 0	6.503 0	0.108 80	0.887 10
20	11.810	18.379	7.534	3.293	999.20	1 166.00	0.751 7	1.706 0	0.034 33	0.253 50
21	11.879	18.655	8.086	2.707	1 019.00	1 851.00	0.810 6	1.714 0	0.026 24	0.239 30
22	11.948	18.172	8.293	3.500	374.50	751.30	1.328 0	4.294 0	0.059 34	0.508 30
23	12.017	17.759	8.500	2.672	851.80	67.38	1.037 0	2.237 0	0.033 19	0.264 60
24	12.086	17.966	7.397	3.397	1 957.00	1 058.00	0.407 0	0.933 9	0.018 41	0.122 70
25	12.155	18.931	6.845	3.121	1 992.00	971.10	0.389 9	0.752 8	0.016 38	0.119 80
26	12.224	17.069	8.431	3.466	586.40	633.80	1.086 0	2.862 0	0.049 21	0.377 50
27	12.293	17.345	7.259	3.017	2 739.00	331.50	0.298 6	0.690 2	0.013 45	0.082 73
28	12.362	17.000	7.879	2.638	1 529.00	2 417.00	0.514 9	1.254 0	0.023 85	0.156 60
29	12.431	18.448	6.707	2.500	2 513.00	1 102.00	0.307 5	0.597 2	0.012 96	0.086 76
30	12.500	18.793	8.224	3.086	795.90	2 095.00	1.055 0	2.246 0	0.032 06	0.263 50

表3 拉丁超立方设计方案及其子目标函数规格化数据

样本号	$x_1^0$	$x_2^0$	$x_3^0$	$x_4^0$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
1	-1.000	0.586	-0.379	-0.448	0.163 680	0.050 195	0.119 900	0.130 180	0.532 250	0.554 100
2	-0.931	0.034	-0.931	-0.310	0.804 890	0.052 125	0.826 790	0.839 020	0.026 607	0.042 231
3	-0.862	-0.862	-0.586	-0.104	0.883 790	0.035 740	0.871 790	0.799 840	0.024 226	0.029 138
4	-0.793	0.517	0.655	0.104	0.509 770	0.010 885	0.431 360	0.461 940	0.047 417	0.130 300
5	-0.724	-0.379	0.172	0.656	0.268 420	0.022 856	0.227 940	0.199 500	0.299 000	0.306 070
6	-0.655	-0.724	-0.310	-0.034	0.688 060	0.031 964	0.658 740	0.598 810	0.057 045	0.062 859
7	-0.586	0.103	0.103	-0.380	0.067 681	0.037 778	0.042 166	0.038 733	0.901 540	0.911 190
8	-0.517	-0.448	-0.172	-0.862	0.446 770	0.058 486	0.414 400	0.379 230	0.142 560	0.149 570
9	-0.448	0.241	0.241	-0.172	0.020 793	0.039 813	0.009 417	0.013 279	0.849 570	1.000 000
10	-0.379	-0.310	-0.034	0.310	0.422 610	0.027 130	0.381 310	0.350 220	0.156 850	0.154 510
11	-0.310	-0.517	0.310	-0.794	0.152 330	0.079 912	0.119 200	0.097 924	0.540 640	0.542 730
12	-0.241	1.000	0.448	0.380	0.371 850	0.952 110	0.300 310	0.330 030	0.097 836	0.178 600
13	-0.172	-0.586	-0.862	-0.932	1.000 000	0.075 271	1.000 000	1.000 000	0.000 414	0.000 000
14	-0.103	-0.172	-0.448	0.518	0.741 890	0.025 558	0.707 150	0.691 990	0.030 956	0.037 908
15	-0.034	0.862	0.517	0.862	0.262 400	0.098 852	0.185 090	0.203 450	0.173 830	0.260 980
16	0.034	0.724	-1.000	0.448	0.816 200	0.042 347	0.811 010	0.965 690	0.000 000	0.021 814
17	0.103	-0.103	-0.517	0.724	0.818 040	0.029 765	0.780 750	0.779 490	0.015 322	0.020 764
18	0.172	0.310	-0.724	-0.518	0.712 220	0.059 844	0.695 680	0.751 700	0.028 264	0.037 043
19	0.241	-0.793	0.862	-0.242	0.000 000	0.152 960	0.000 000	0.000 000	1.000 000	1.000 000
20	0.310	0.379	0.034	0.586	0.299 430	0.030 767	0.250 960	0.246 990	0.229 010	0.217 380
21	0.379	0.655	0.586	-0.586	0.305 490	0.008 769	0.226 050	0.245 430	0.145 250	0.199 840
22	0.448	0.172	0.793	1.000	0.108 390	0.063 579	0.102 200	0.045 188	0.487 940	0.532 110
23	0.517	-0.241	1.000	-0.656	0.254 350	1.000 000	0.156 650	0.167 510	0.217 210	0.231 090
24	0.586	-0.034	-0.103	0.794	0.592 340	0.036 836	0.541 270	0.523 820	0.064 189	0.055 818
25	0.655	0.931	-0.655	0.242	0.603 050	0.042 698	0.569 040	0.670 960	0.043 172	0.052 236
26	0.724	-0.931	0.931	0.932	0.173 190	0.080 683	0.145 440	0.111 750	0.383 060	0.370 550
27	0.793	-0.655	-0.241	0.034	0.831 490	0.180 410	0.771 100	0.739 780	0.012 838	0.006 448
28	0.862	-1.000	0.379	-0.724	0.461 450	0.000 000	0.408 600	0.367 680	0.120 510	0.097 691
29	0.931	0.448	-0.793	-1.000	0.762 380	0.034 220	0.746 130	0.868 660	0.007 765	0.011 426
30	1.000	0.793	0.724	0.172	0.237 260	0.004 408	0.152 410	0.166 490	0.205 510	0.229 730

为获得较高的响应面质量,近似模型选用三阶多项式响应面模型,由上面的实验设计的各样本点和与其对应的响应值规格化后的数据,得到如下的近似模型。

1) 子目标函数  $F_1$  的近似函数为

$$\begin{aligned} \tilde{F}_1(x) = & a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + \\ & a_5x_1^2 + a_6x_2^2 + a_7x_3^2 + a_8x_4^2 + \\ & a_9x_1x_2 + a_{10}x_1x_3 + a_{11}x_1x_4 + a_{12}x_2x_3 + \\ & a_{13}x_2x_4 + a_{14}x_3x_4 + a_{15}x_1^3 + a_{16}x_2^3 + \\ & a_{17}x_3^3 + a_{18}x_4^3 + a_{19}x_1^2x_2 + a_{20}x_2^2x_3 + \\ & a_{21}x_3^2x_4 + a_{22}x_4^2x_1 + a_{23}x_4^2x_2 + \\ & a_{24}x_4^2x_3 + a_{25}x_3^2x_1 + a_{26}x_3^2x_2 + \\ & a_{27}x_2^2x_1 + a_{28}x_1x_2x_3 \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $a_0 \sim a_{28}$  的值分别见下表。

$a$	数值	$a$	数值	$a$	数值
$a_0$	0.309 72	$a_{10}$	-0.172 46	$a_{20}$	0.514 68
$a_1$	0.369 05	$a_{11}$	0.194 06	$a_{21}$	-0.318 94
$a_2$	-0.510 53	$a_{12}$	0.642 84	$a_{22}$	-0.032 20
$a_3$	-0.549 83	$a_{13}$	-0.028 59	$a_{23}$	-0.068 14
$a_4$	0.323 87	$a_{14}$	-0.085 41	$a_{24}$	-0.129 69
$a_5$	-0.030 91	$a_{15}$	-0.626 63	$a_{25}$	0.391 78
$a_6$	0.002 03	$a_{16}$	0.029 39	$a_{26}$	0.936 17
$a_7$	0.359 94	$a_{17}$	-0.017 95	$a_{27}$	0.104 15
$a_8$	-0.097 41	$a_{18}$	-0.325 46	$a_{28}$	-0.555 35
$a_9$	-0.124 94	$a_{19}$	0.074 54		

2) 子目标函数  $F_2$  的近似函数为

$$\begin{aligned} \tilde{F}_2(x) = & b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \\ & b_5x_1^2 + b_6x_2^2 + b_7x_3^2 + b_8x_4^2 + \\ & b_9x_1x_2 + b_{10}x_1x_3 + b_{11}x_1x_4 + b_{12}x_2x_3 + \\ & b_{13}x_2x_4 + b_{14}x_3x_4 + b_{15}x_1^3 + b_{16}x_2^3 + \\ & b_{17}x_3^3 + b_{18}x_4^3 + b_{19}x_1^2x_2 + b_{20}x_2^2x_3 + \\ & b_{21}x_3^2x_4 + b_{22}x_4^2x_1 + b_{23}x_4^2x_2 + \\ & b_{24}x_4^2x_3 + b_{25}x_3^2x_1 + b_{26}x_3^2x_2 + \\ & b_{27}x_2^2x_1 + b_{28}x_1x_2x_3 \end{aligned} \quad (9)$$

其中:  $b_0 \sim b_{28}$  的值分别见下表。

$b$	数值	$b$	数值	$b$	数值
$b_0$	0.074 61	$b_{10}$	-0.317 50	$b_{20}$	0.264 33
$b_1$	-0.073 74	$b_{11}$	-0.096 13	$b_{21}$	0.226 41
$b_2$	0.202 10	$b_{12}$	-0.149 00	$b_{22}$	1.102 76
$b_3$	-0.407 87	$b_{13}$	0.500 36	$b_{23}$	-0.635 60
$b_4$	0.027 46	$b_{14}$	0.025 81	$b_{24}$	-0.012 81
$b_5$	0.289 50	$b_{15}$	-0.389 56	$b_{25}$	0.295 76
$b_6$	-0.224 73	$b_{16}$	1.130 80	$b_{26}$	-0.729 48
$b_7$	0.369 31	$b_{17}$	0.751 97	$b_{27}$	-0.221 71
$b_8$	-0.417 11	$b_{18}$	-0.419 22	$b_{28}$	1.227 28
$b_9$	0.070 73	$b_{19}$	-1.291 43		

3) 子目标函数  $F_3$  的近似函数为

$$\begin{aligned} \tilde{F}_3(x) = & c_0 + c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3 + c_4x_4 + \\ & c_5x_1^2 + c_6x_2^2 + c_7x_3^2 + c_8x_4^2 + \\ & c_9x_1x_2 + c_{10}x_1x_3 + c_{11}x_1x_4 + c_{12}x_2x_3 + \\ & c_{13}x_2x_4 + c_{14}x_3x_4 + c_{15}x_1^3 + c_{16}x_2^3 + \\ & c_{17}x_3^3 + c_{18}x_4^3 + c_{19}x_1^2x_2 + c_{20}x_2^2x_3 + \\ & c_{21}x_3^2x_4 + c_{22}x_4^2x_1 + c_{23}x_4^2x_2 + \\ & c_{24}x_4^2x_3 + c_{25}x_3^2x_1 + c_{26}x_3^2x_2 + \\ & c_{27}x_2^2x_1 + c_{28}x_1x_2x_3 \end{aligned} \quad (10)$$

其中:  $c_0 \sim c_{28}$  的值分别见下表。

$c$	数值	$c$	数值	$c$	数值
$c_0$	0.280 22	$c_{10}$	-0.151 37	$c_{20}$	0.361 30
$c_1$	0.288 60	$c_{11}$	0.122 58	$c_{21}$	-0.195 50
$c_2$	-0.428 42	$c_{12}$	0.510 59	$c_{22}$	0.048 61
$c_3$	-0.572 35	$c_{13}$	-0.045 07	$c_{23}$	-0.105 88
$c_4$	0.235 38	$c_{14}$	-0.037 43	$c_{24}$	0.014 46
$c_5$	-0.063 71	$c_{15}$	-0.434 66	$c_{25}$	0.080 42
$c_6$	0.041 73	$c_{16}$	0.038 91	$c_{26}$	0.791 12
$c_7$	0.374 92	$c_{17}$	0.154 12	$c_{27}$	0.087 45
$c_8$	-0.065 23	$c_{18}$	-0.227 18	$c_{28}$	-0.379 85
$c_9$	-0.073 72	$c_{19}$	0.010 92		

4) 子目标函数  $F_4$  的近似函数为

$$\begin{aligned} \tilde{F}_4(x) = & d_0 + d_1x_1 + d_2x_2 + d_3x_3 + d_4x_4 + \\ & d_5x_1^2 + d_6x_2^2 + d_7x_3^2 + d_8x_4^2 + \\ & d_9x_1x_2 + d_{10}x_1x_3 + d_{11}x_1x_4 + d_{12}x_2x_3 + \\ & d_{13}x_2x_4 + d_{14}x_3x_4 + d_{15}x_1^3 + d_{16}x_2^3 + \\ & d_{17}x_3^3 + d_{18}x_4^3 + d_{19}x_1^2x_2 + d_{20}x_2^2x_3 + \\ & d_{21}x_3^2x_4 + d_{22}x_4^2x_1 + d_{23}x_4^2x_2 + \\ & d_{24}x_4^2x_3 + d_{25}x_3^2x_1 + d_{26}x_3^2x_2 + \\ & d_{27}x_2^2x_1 + d_{28}x_1x_2x_3 \end{aligned} \quad (11)$$

其中:  $d_0 \sim d_{28}$  的值分别见下表。

$d$	数值	$d$	数值	$d$	数值
$d_0$	0.255 20	$d_{10}$	-0.182 83	$d_{20}$	0.387 30
$d_1$	0.278 95	$d_{11}$	0.152 76	$d_{21}$	-0.249 79
$d_2$	-0.386 31	$d_{12}$	0.485 83	$d_{22}$	-0.010 19
$d_3$	-0.553 83	$d_{13}$	-0.062 57	$d_{23}$	-0.071 24
$d_4$	0.254 58	$d_{14}$	-0.065 70	$d_{24}$	0.017 25
$d_5$	-0.054 52	$d_{15}$	-0.405 98	$d_{25}$	0.146 37
$d_6$	0.048 14	$d_{16}$	0.012 16	$d_{26}$	0.822 53
$d_7$	0.438 63	$d_{17}$	0.069 60	$d_{27}$	0.077 50
$d_8$	-0.060 09	$d_{18}$	-0.242 45	$d_{28}$	-0.438 82
$d_9$	-0.092 72	$d_{19}$	0.020 86		

5) 子目标函数  $F_5$  的近似函数为

$$\tilde{F}_5(x) = e_0 + e_1x_1 + e_2x_2 + e_3x_3 + e_4x_4 +$$

$$\begin{aligned}
 & e_5x_1^2 + e_6x_2^2 + e_7x_3^2 + e_8x_4^2 + \\
 & e_9x_1x_2 + e_{10}x_1x_3 + e_{11}x_1x_4 + e_{12}x_2x_3 + \\
 & e_{13}x_2x_4 + e_{14}x_3x_4 + e_{15}x_1^3 + e_{16}x_2^3 + \\
 & e_{17}x_3^3 + e_{18}x_4^3 + e_{19}x_2^2x_3 + e_{20}x_3^2x_4 + \\
 & e_{21}x_4^2x_1 + e_{22}x_4^2x_2 + e_{23}x_4^2x_3 + \\
 & e_{24}x_3^2x_1 + e_{25}x_3^2x_2 + e_{26}x_2^2x_1 + \\
 & e_{27}x_1x_2x_3 + e_{28}x_1x_2x_4
 \end{aligned} \tag{12}$$

其中: $e_0 \sim e_{28}$ 的值分别见下表。

$e$	数值	$e$	数值	$e$	数值
$e_0$	0.395 37	$e_{10}$	-0.098 94	$e_{20}$	0.925 05
$e_1$	-0.427 24	$e_{11}$	-0.004 00	$e_{21}$	-0.104 50
$e_2$	0.354 77	$e_{12}$	-0.506 62	$e_{22}$	0.546 42
$e_3$	0.747 12	$e_{13}$	-0.119 29	$e_{23}$	-0.260 65
$e_4$	-0.715 86	$e_{14}$	-0.115 44	$e_{24}$	-0.198 95
$e_5$	0.206 39	$e_{15}$	1.043 37	$e_{25}$	-2.052 79
$e_6$	-0.240 45	$e_{16}$	0.244 75	$e_{26}$	-0.387 87
$e_7$	-0.035 18	$e_{17}$	-0.751 79	$e_{27}$	0.314 69
$e_8$	0.014 25	$e_{18}$	0.610 59	$e_{28}$	0.635 03
$e_9$	0.105 13	$e_{19}$	-0.484 38		

6) 子目标函数 $F_6$ 的近似函数为

$$\begin{aligned}
 \tilde{F}_6(x) = & f_0 + f_1x_1 + f_2x_2 + f_3x_3 + f_4x_4 + \\
 & f_5x_1^2 + f_6x_2^2 + f_7x_3^2 + f_8x_4^2 + \\
 & f_9x_1x_2 + f_{10}x_1x_3 + f_{11}x_1x_4 + f_{12}x_2x_3 + \\
 & f_{13}x_2x_4 + f_{14}x_3x_4 + f_{15}x_1^3 + f_{16}x_2^3 + \\
 & f_{17}x_3^3 + f_{18}x_4^3 + f_{19}x_2^2x_3 + f_{20}x_3^2x_4 + \\
 & f_{21}x_4^2x_1 + f_{22}x_4^2x_2 + f_{23}x_4^2x_3 + \\
 & f_{24}x_3^2x_1 + f_{25}x_3^2x_2 + f_{26}x_2^2x_1 + \\
 & f_{27}x_1x_2x_3 + f_{28}x_1x_2x_4
 \end{aligned} \tag{13}$$

其中: $f_0 \sim f_{28}$ 的值分别见下表。

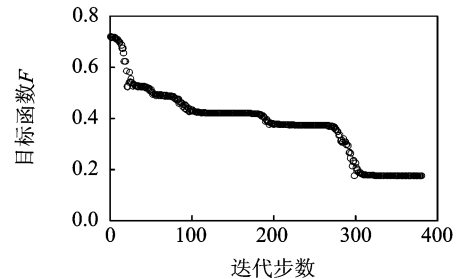
$f$	数值	$f$	数值	$f$	数值
$f_0$	0.338 08	$f_{10}$	-0.018 01	$f_{20}$	-1.531 87
$f_1$	-1.330 50	$f_{11}$	-0.482 84	$f_{21}$	0.945 50
$f_2$	1.121 04	$f_{12}$	-1.131 03	$f_{22}$	0.362 45
$f_3$	0.396 43	$f_{13}$	-0.109 26	$f_{23}$	0.067 26
$f_4$	-1.007 74	$f_{14}$	0.003 00	$f_{24}$	-0.820 44
$f_5$	0.017 18	$f_{15}$	2.223 51	$f_{25}$	-1.976 45
$f_6$	0.326 11	$f_{16}$	-0.080 66	$f_{26}$	-2.326 14
$f_7$	-0.053 21	$f_{17}$	0.897 36	$f_{27}$	-0.214 28
$f_8$	0.315 68	$f_{18}$	1.274 85	$f_{28}$	1.675 06
$f_9$	0.226 69	$f_{19}$	-0.426 00		

### 3.3 优化设计

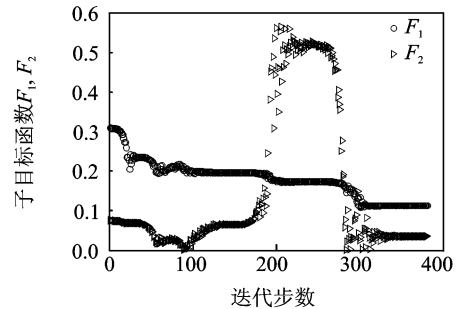
由前面的数据可知,定子的各个优化子目标均采用“转化设计指标法”,将各项设计指标都转化为统一的无量纲值,并且将量级限定于 $[0,1]$ 区域内。根据各个子目标的重要性和设计目的性分别给予加

权因子,利用单纯形法进行优化设计,以定子规格化后的初值 $[0,0,0,0]$ 进行优化计算,优化收敛误差取为0.001,其优化结果见表4,其中\*为最佳。

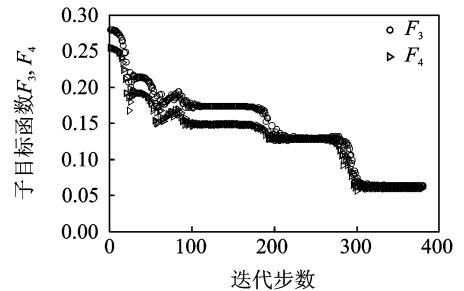
综合对比表4中的优化结果可知,在第4组的加权系数组合下优化得到的各个子目标函数值相对较小,定子的优化设计效果最佳。该组加权系数组合下优化目标函数随迭代步数的变化曲线如图7所示,其总体目标函数共经过381次迭代后求解收敛。由图7(b~d)对比可以看出,随着子目标函数 $F_1$ (两相工作模态频率差)的减小,子目标函数 $F_3, F_4$ 也相应减小(对应于定子驱动足振幅随着两相工作模态频率差的减小而增大);然而,子目标函数 $F_5, F_6$ 却相



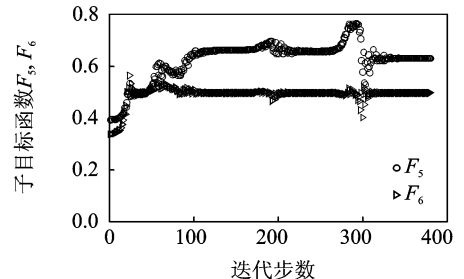
(a) 总体目标函数



(b) 子目标函数 $F_1, F_2$



(c) 子目标函数 $F_3, F_4$



(d) 子目标函数 $F_5, F_6$

图7 目标函数随迭代步数的变化曲线

表4 不同加权系数组合下的定子优化设计结果

组数	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	$F_6$
1	0.5	0.20	0.05	0.05	0.10	0.1	$2.8264 \times 10^{-5}$	$4.5033 \times 10^{-6}$	0.008 300 0	0.009 100 0	0.839 20	1.086 0
2	0.6	0.15	0.05	0.05	0.05	0.1	$7.7235 \times 10^{-8}$	0.003 294 7	0.010 963 0	0.012 175 0	0.804 75	1.061 7
3	0.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	$1.9329 \times 10^{-8}$	0.018 298 0	0.001 511 2	0.004 524 0	0.860 35	1.091 3
* 4	0.8	0.05	0.02	0.02	0.01	0.1	$2.3276 \times 10^{-5}$	0.018 393 0	0.001 350 0	0.004 452 3	0.860 74	1.091 1

组数	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$F$	$P_1$	$P_4$	$P_5$	$P_8$
1	0.5	0.20	0.05	0.05	0.10	0.1	0.193 406	-0.202 8	0.339 1	0.194 0	-0.232 5
2	0.6	0.15	0.05	0.05	0.05	0.1	0.148 058	-0.021 4	0.450 0	0.224 5	-0.300 2
3	0.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.153 368	-0.354 6	0.304 1	0.186 5	-0.199 3
* 4	0.8	0.05	0.02	0.02	0.01	0.1	0.118 762	-0.356 8	0.304 3	0.187 1	-0.199 1

应地增大。这主要是因为随着两相工作模态频率差的减小,定子振幅增大,同时,子目标函数 $F_6$ 所取的定子夹持位置在提取时没有完全取到节线上,故其值必然会随着子函数 $F_1$ 的减小而增大,即子目标函数 $F_1$ 和 $F_5, F_6$ 之间是互相矛盾的,其优化过程根据权重寻求一个协调点。

对表4所示的优化结果利用ANSYS有限元软件进行了验证,其对比如表5所示。第4组优化的ANSYS计算结果为:两相工作模态频率差达12.21 Hz,干扰模态远离程度为1 073 Hz,驱动足 $y$ 向振幅为 $2.56 \mu\text{m}$ ,驱动足 $x$ 向振幅为 $5.76 \mu\text{m}$ ,驱动足 $z$ 向振幅为 $0.109 \mu\text{m}$ ,定子夹持位置振幅为 $0.945 2 \mu\text{m}$ 。计算结果表明,除干扰模态远离程度与优化结果相比的差距较大之外,其余的差距相对较

小,基本满足需求。干扰模态远离程度产生较大误差的原因可能是因为其样本点的值跳跃性较大。

总体而言,利用统一目标函数法,根据前次优化计算结果的优劣,适当调整权系数,可以实现多个子目标的优化设计。

由表5可以知道,参数 $P_1, P_4, P_5, P_8$ 的值精确到了 $0.000 1 \text{ mm}$ ,这给加工带来了很大的难度。为此,把第4组所得到的参数值进行圆整到 $0.01 \text{ mm}$ 后,利用有限元软件ANSYS重新计算,并与电机定子的初始结构值进行比较,其结果如表6所示。可以看出,参数 $P_1, P_4, P_5, P_8$ 的值在优化结果的基础上圆整后所得到的计算结果与初始参数所得到的计算结果相比,得到了很大的改善,其两相工作模态频率差仅为 $5.698 \text{ Hz}$ 。

表5 不同加权系数组合下的定子优化设计反规格化结果与ANSYS计算结果验证

组数	结果	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$F_1/\text{Hz}$	$\frac{1}{F_2}/\text{Hz}$	$\frac{1}{F_3}/\mu\text{m}$	$\frac{1}{F_4}/\mu\text{m}$	$F_5/\mu\text{m}$
1	优化结果	0.5	0.20	0.05	0.05	0.10	0.1	20.182	2 416.60	2.573 2	5.890 2	0.093 300
	ANSYS 计算验证	-	-	-	-	-	-	44.140	1 001.21	2.530 0	5.705 0	0.107 800
2	优化结果	0.6	0.15	0.05	0.05	0.05	0.1	20.090	2 167.90	2.506 7	5.711 4	0.089 940
	ANSYS 计算验证	-	-	-	-	-	-	39.060	847.30	2.615 0	5.774 0	0.100 500
3	优化结果	0.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	20.090	1 475.50	2.760 6	6.184 5	0.095 311
	ANSYS 计算验证	-	-	-	-	-	-	15.380	1 072.00	2.556 0	5.756 0	0.109 300
* 4	优化结果	0.8	0.05	0.02	0.02	0.01	0.1	20.166	1 472.50	2.765 3	6.189 3	0.095 349
	ANSYS 计算验证	-	-	-	-	-	-	12.210	1 073.00	2.560 0	5.760 0	0.109 000

组数	结果	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$	$F_6/\mu\text{m}$	$P_1/\text{mm}$	$P_4/\text{mm}$	$P_5/\text{mm}$	$P_8/\text{mm}$
1	优化结果	0.5	0.20	0.05	0.05	0.10	0.1	0.956 70	11.297 2	18.339 1	7.694 0	2.883 7
	ANSYS 计算验证	-	-	-	-	-	-	0.929 90	-	-	-	-
2	优化结果	0.6	0.15	0.05	0.05	0.05	0.1	0.937 05	11.478 6	18.450 0	7.724 5	2.849 9
	ANSYS 计算验证	-	-	-	-	-	-	0.877 60	-	-	-	-
3	优化结果	0.7	0.05	0.05	0.05	0.05	0.1	0.961 05	11.145 4	18.304 1	7.686 5	2.900 3
	ANSYS 计算验证	-	-	-	-	-	-	0.945 70	-	-	-	-
* 4	优化结果	0.8	0.05	0.02	0.02	0.01	0.1	0.960 86	11.143 2	18.304 3	7.687 1	2.900 5
	ANSYS 计算验证	-	-	-	-	-	-	0.945 20	-	-	-	-



表6 定子优化设计参数圆整后计算结果与初值结构  
计算结果比较

项目	初始结构/mm				优化结构/mm			
	$P_1$	$P_4$	$P_5$	$P_8$	$P_1$	$P_4$	$P_5$	$P_8$
	11.5	18	7.5	3	11.14	18.3	7.69	2.9
$F_1$ /Hz	1 135				5.698			
$\frac{1}{F_2}$ /Hz	999.8				1 072			
$\frac{1}{F_3}$ /μm	0.663 3				2.567			
$\frac{1}{F_4}$ /μm	1.547				5.779			
$F_5$ /μm	0.324 5				0.107 1			
$F_6$ /μm	0.237 1				0.944 2			
$E_s$ 模态频率/Hz	53 045.453 9				52 465.795 5			
$E_a$ 模态频率/Hz	51 910.415 8				52 460.097 1			
谐波响应频率/Hz	52 477.934 9				52 462.946 5			
干扰模态 1/Hz	50 910.566 6				51 388.446 4			
干扰模态 2/Hz	54 892.402 8				54 820.640 6			

## 4 结束语

笔者提出了一种基于响应面法的直线超声电机定子优化设计方法,并应用于蝶形直线超声电机定子的优化设计。通过选取合适的定子结构参数作为设计变量,利用试验设计方法在变量空间里选取样本点,并对各个样本点所对应的结构利用参数化设计语言 APDL 编程,建立有限元模型并进行模态分析和谐波响应分析,得到对应各样本点的响应(包括两相工作模态的频率差、驱动足振幅和夹持点振幅等),利用这些样本点和响应值建立定子响应面近似模型,再以优化算法进行寻优。优化结果表明,优化后的电机满足了多方面的设计要求:两相工作模态频率差较小( $<10$  Hz);定子驱动足时振幅较大( $>2$  μm);工作模态远离干扰模态( $>1$  kHz);定子支撑点振幅较小( $<1$  μm)。与基于 ANSYS 软件的优化模块相比,该方法更具开放性,使得电机的设计域更广,且可以根据不同的应用需求提出设计目标,更加便利和快捷,大大缩短了电机的设计周期。

## 参 考 文 献

[1] Hagedorn P, Wallaschek J. Traveling wave ultrasonic motors, part I: working principle and mathematical modelling of the stator[J]. Journal of Sound and Vibration, 1992, 155(1):31-46.

[2] Wallaschek J, Hagedorn P, Konrad W. Traveling wave ultrasonic motors part II: a numerical method for the flexural vibrations of the stator[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 168:115-122.

[3] 赵向东,赵淳生. 行波超声电机带齿定子固有频率解析[J]. 振动、测试与诊断, 1998,18(4):243-247. Zhao Xiangdong, Zhao Chunsheng. Calculation of natural frequencies of the stator with teeth of a traveling wave type ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1998, 18(4): 243-247. (in Chinese)

[4] Hirata H, Ueha S. Design of a traveling wave type ultrasonic motor [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1995, 42(2): 225-231.

[5] Hirata H, Ueha S. Characteristics estimation of a traveling wave type ultrasonic motor [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1993,40(4):402-406.

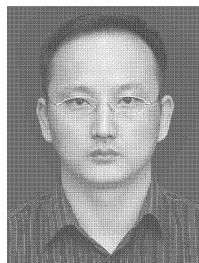
[6] Nesbitt W H, Andrew J M. Modeling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor[J]. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelec, and Frequency Control, 1995, 42(2):210-224.

[7] Moal P L, Minotti P. A 2-D analytical approach of the stator/rotor contact problem including rotor bending effect for the high torque piezomotor design[J]. European Journal of Mechanics A-Solids, 1997, 16(6): 1067-1103.

[8] 朱华. 行波型杆式超声电机的关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.

[9] Box G E P, Hunter J S. Multifactor experimental design for exploring response surface [J]. Annals of Mathematical Statistics, 1957,28:195-241.

[10] Hill W J, Hunter W G. A review of response surface methodology: a literature survey[J]. Technometrics, 1966, 8(4):571-590.



第一作者简介:时运来,男,1976年10月生,博士、讲师。主要研究方向为直线超声电机。曾发表《Linear ultrasonic motor with wheel-shaped stator》(《Sensors and Actuators A: Physical》2010, Vol. 161)等论文。  
E-mail:shiyunlai950438@nuaa.edu.cn