

基于多目标优化的低速大力矩超声电机设计

刘军¹,牛瑞坤²,张益铭¹,朱华³

(1.南京电子技术研究所,江苏南京210039;2.金陵科技学院,江苏南京211169;

3.南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏南京210016)

摘要:低速、大力矩是超声电机的重要特性之一,电机外径尺寸对该特性有正相关影响。为增强超声电机的低速大力矩特性而不增大电机外径,提出了基于电机定子特征参数的多目标优化方法。该方法以自研的 TRUM-70HA 样机为研究对象,以定子齿面法向振幅与切向速度的数值比(简称幅速比)为低速大力矩特性表征参数,利用 ANSYS 优化设计平台 AWE 对其定子进行参数化建模,实现了对定子特征参数的多目标优化。制作了优化后的第二代样机 TRUM-70HB,并搭建了电机机械特性测试平台。测试结果显示,优化后的 70HB 最大转速从 65 r/min 降低到 50 r/min,降幅为 23.1%;最大堵转力矩从 1.2 N·m 增大到 2.4 N·m,增幅为 100%。该研究成果有助于节省电机的应用空间。

关键词:超声电机;低速大力矩特性;多目标优化;机械特性曲线

中图分类号:TM359.9

文献标识码:A

Design of Low-Speed and High-Torque Ultrasonic Motor Based on Multi-Objective Optimization

LIU Jun¹, NIU Ruikun², ZHANG Yiming¹, ZHU Hua³

(1. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China;

2. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 3. State Key Laboratory of Mechanics and

Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Low-speed and high-torque are crucial characteristics of an ultrasonic motor, and they are positively correlated with the outer diameter of the motor. A multi-objective optimization method based on stator feature parameters is proposed to improve the low-speed and high-torque characteristics without increasing the outer diameter of the motor. For demonstration, this study considers a TRUM-70HA prototype motor as the research object. The ratio between the normal amplitude and tangential velocity of the stator teeth is used as the characterization for low-speed and high-torque characteristics. The parametric stator modeling of the 70HA is conducted using the ANSYS Workbench Environment. The multi-objective adaptive optimization of stator feature parameters is conducted. A second generation optimized prototype motor named TRUM-70HB is considered, and its mechanical performance is evaluated. The experimental results show that the maximum speed of the 70HB decreases from 65 r/min to 50 r/min, a decrease of 23.1%, and the maximum stall torque rises from 1.2 N·m to 2.4 N·m, an increase of 100%. The findings help save space in the manufacture of ultrasonic motors.

Key words: ultrasonic motor; low-speed and high-torque characteristics; multi-objective optimization; mechanical character curve

0 引言

行波型超声电机是一种非电磁电机,它是利用压电陶瓷材料的逆压电效应,在高频激励(20 kHz以上)下使其联结的弹性体产生如行波般的微幅振

动,并利用摩擦材料将振动传递给接触转子从而实现宏观旋转运动的一种特殊电机。行波型超声电机具有体积小、质量轻、低速大力矩直驱、响应快、精度高、断电自锁、无电磁干扰等优点,因而成为各

收稿日期:2024-07-06

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB057500)

作者简介:刘军(1990-),男,江苏省邳州市人,工程师。

小型空间精密驱动领域特别是航空航天应用领域的新选择和研究热点^[1]。

低速大力矩特性是超声电机重要的应用特性,受电机结构、尺寸影响较大。在相同的外型尺寸或重量下,目标转速恒定时,电机输出力矩越大,意味着功率密度越大,潜在工程价值越高^[2]。为此,东南大学、清华大学、北京航天控制仪器研究所等单位相继研制出低速大力矩行波型超声电机,直径在 $\varnothing 90\sim\varnothing 100$ mm左右,最高转速在 $20\sim 100$ r/min不等,堵转力矩在 $2\sim 4$ N·m不等^[3-5]。由此可见,增大电机直径和整体尺寸,是直接降低电机最高转速、增大堵转力矩的有效办法。然而,这种办法使得电机体积和质量增大,结构不够紧凑,工程应用可能受限。

本文以自研的工程样机 TRUM-70HA(下文简称 70HA)为研究对象,尝试在不改变外型尺寸的情况下提高电机的低速大力矩特性^[6-7]。利用有限元仿真提取出影响电机低速大力矩特性的定子工作模态和结构尺寸等特征参数,采取多目标优化算法,对上述特征参数进行迭代重塑,根据优化模型研制出第二代样机 TRUM-70HB(下文简称 70HB)。经过实验验证,70HB 的低速大力矩特性显著提升,对其他类型的低速大力矩超声电机的设计制造具有借鉴意义。

1 低速大力矩特性实现方法

超声电机定子振幅大小是衡量电机整体性能优劣的重要指标。振幅越大,表示由一定电能转化成的机械能越大^[8]。电机的输出转速和力矩与振幅正相关,这与电机调速结果一致。在实际应用中,电机主要通过调频和调压来调速,这两种方法本质上均是通过改变振幅来改变电机速度。当电机结构不变时,若电压一定,在设计频带内由高到低调频,电机转速由小到大。驱动频率越接近模态频率点处,电机振幅越大,转速也就越大,在最大转速点测得的电机堵转力矩最大。若频率一定,采用调压调速,则驱动电压越大,定子振幅越大,电机转速和堵转力矩也越大,反之亦然。

行波电机定子质点椭圆运动的法向和切向运动分量是相互耦合的,即定子驱动质点的切向位移是由法向弯曲振动诱发的^[9-10]。所以增大(减小)法向运动分量(代表振幅,可表征极限堵转力

矩)时必然会增大(减小)切向运动分量(代表质点切向速度,可表征极限转速)。从椭圆运动机理上看,调节外部激励时,振幅的增大或减小实际上可认为是椭圆运动轨迹的同比例放大或缩小,如图 1(a)所示。

当改变电机外径大小时,定子椭圆轨迹的长轴(法向分量)是不受影响的,短轴(切向分量)与外径成反比,其影响电机低速、大力矩特性的本质是改变了椭圆轨迹的形状。当不改变定子外径大小时,要想改变椭圆轨迹形状以提高低速、大力矩特性,应尽可能增大振幅,同时设法减小切向速度,即增大椭圆的长轴和短轴之比。虽然振幅与椭圆运动切向分量即转速正相关,但并不是唯一的参数变量。定子特征结构参数不仅直接影响椭圆运动,而且从内部影响振幅大小。也就是说,振幅只是影响电机转速和输出力矩的中间因变量,外部激励和定子特征参数是自变量。而根据以上分析,调整外部激励只能放大或缩小行波电机的椭圆运动,无法改变椭圆形状。若想改变定子椭圆运动的长、短轴比例,则必须改变行波电机定子的特征参数,从内部改变定子固有的振动特性,使得定子椭圆运动变得“高”和“瘦”,如图 1(b)所示。

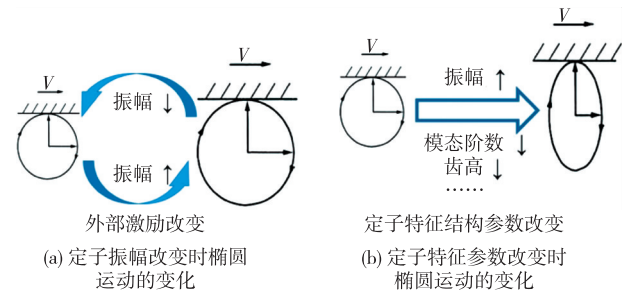


图 1 外部激励和特征参数对定子椭圆运动的影响

2 有限元模型及谐响应仿真

为了定量研究定子的特征参数对椭圆运动的影响,需要建立有限元模型,通过对压电陶瓷环施加外部激励来仿真出定子工作振动时的稳态谐响应^[11]。

2.1 模型建立

70HA 的定子结构如图 2 所示。定子由金属弹性体和压电陶瓷环组成,呈圆环形结构。压电陶瓷环通过环氧胶粘结在金属弹性体下端,其上端面为齿形结构。由于中空结构,定子内圈的支撑腹板设计得又薄又短,在起到径向隔振作用的同时被定

子锁紧螺母压紧固定在基座上。为了尽量保证电机定子振动的对称性,一般将定子齿的数目设计成工作模态阶数的倍数,并且在粘贴压电陶瓷环时将陶瓷片的分区界线对准齿槽的位置。

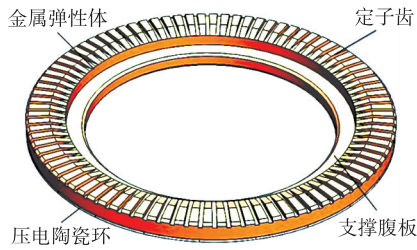


图2 TRUM-70HA 定子组件结构模型

70HA 超声电机结构截面如图3所示。图中 H 为定子弹性体厚度, H_1 为定子齿高, $h = \frac{H+H_1}{2}$ 为

定子齿面到中性面的距离, $H_2 = H - H_1$ 为定子基体厚度, r_d 为定子支撑腹板内圈半径, Z 为定子齿数, l 为定子齿槽宽。

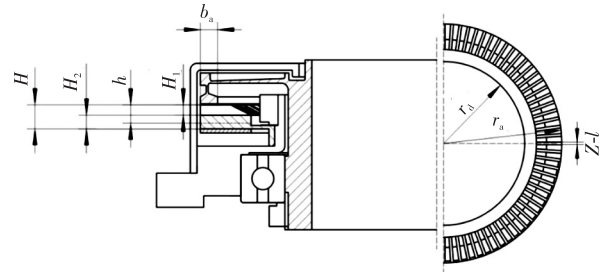


图3 行波型中空超声电机结构截面图

定子弹性体材料为锡磷青铜 QSn6.5, 压电陶瓷片为 PZT-8, 具体材料属性配置如表1所示。

表1 TRUM-70HA 样机定子组件材料属性配置

材料及属性	磷青铜 QSn6.5	压电陶瓷 PZT-8
材料密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	8 800	7 500
杨氏模量/GPa	110	$\begin{bmatrix} 120.6 & 53.5 & 51.5 & 0 & 0 & 0 \\ 53.5 & 120.6 & 51.5 & 0 & 0 & 0 \\ 51.5 & 51.5 & 104.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 31.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 31.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 34.6 \end{bmatrix}$
泊松比	0.3	各向异性
压电系数/($\text{C} \cdot \text{m}^{-2}$)	—	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10.3 & 0 \\ 10.3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
介电系数/($\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$)	—	$\begin{bmatrix} 6.04 & 0 & 0 \\ 0 & 6.04 & 0 \\ 0 & 0 & 6.04 \end{bmatrix} \times 10^{-9}$

2.2 谐响应仿真

压电陶瓷环与定子弹性体接触的面上电势设置为0; A相正向极化区输入电势设置为 $100V_{pp}$, 反向极化区输入电势设置为 $-100V_{pp}$; B相正向极化区输入电势设置为 $100iV_{pp}$, 反向极化区输入电势设置为 $-100iV_{pp}$ 。谐波电压信号的激励频率设置为 $35 \sim 65 \text{ kHz}$, 并在该频段内取100个等分点进行谐响应计算。结构阻尼比设置为 0.8% ^[12], 即可通

过谐响应分析计算得到定子行波运动的振型图及稳态响应, 如图4所示。图中的位移-频率曲线有3处峰值比较明显, 频率从低到高依次为 43.4 kHz 、 51.2 kHz 、 59 kHz , 分别对应定子振动的 B_{010} 、 B_{011} 、 B_{012} 模态。其中 B_{011} 模态处定子振幅最大, 为 $1.41 \mu\text{m}$, 这是因为样机 TRUM-70HA 的压电陶瓷环是按照 B_{011} 模态振型进行分区极化的, 与另两个模态相比, B_{011} 模态更容易被激发, 压电陶瓷的振动

效果对该模态的贡献最大。

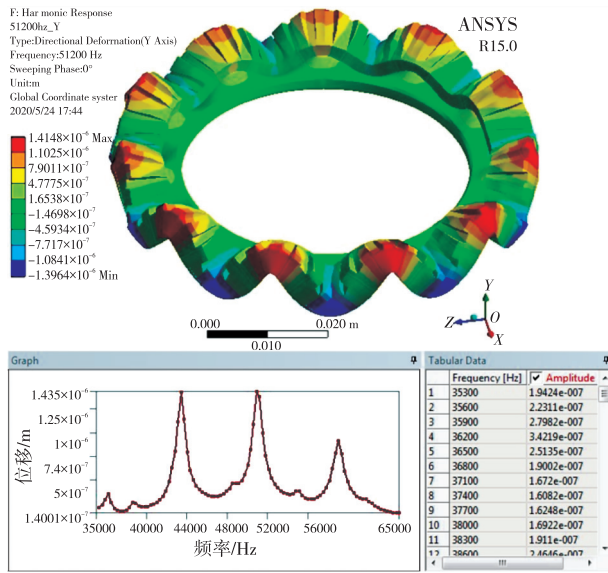


图 4 70HA 的定子有限元谐响应分析

由第 1 节论述可知,定子法向振幅能够表征电机堵转力矩的大小,而定子表面切向振动速度是电机的极限转速。为了衡量行波型中空超声电机的低速、大力矩特性,本文假设在同样的模态频率下,定义定子法向振幅 W_z 和切向速度 V_c 数值大小的比值为 β_{w-v} ,并称之为定子幅速比。 β_{w-v} 越大,则表示低速、大力矩特性越显著。将 70HA 的定子法向位移响应曲线和切向速度响应曲线绘制在同一图中,可以得到该定子结构下不同模态的幅速比,如图 5 所示。图中 B_{010} 模态的定子法向振幅为 $1.4 \mu\text{m}$,切向速度为 0.1989 m/s ,幅速比为 7.04 ; B_{011} 模态的定子法向振幅为 $1.41 \mu\text{m}$,切向速度为 0.2439 m/s ,幅速比为 5.78 ; B_{012} 模态的定子法向振幅为 $0.904 \mu\text{m}$,切向速度为 0.1940 m/s ,幅速比为 4.66 。因此,将幅速比作为优化指标,在尽可能增大法向振幅的同时减小切向速度(速度不能过小,否则会像驻波振动一样使电机无法工作),提高电机的低速大力矩特性。

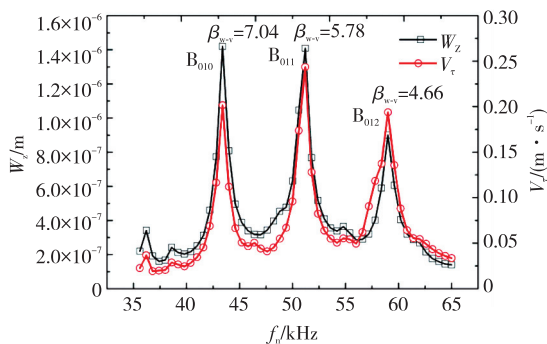


图 5 70HA 定子振动特性频率响应仿真曲线

3 多目标优化设计

利用优化设计平台 AWE(ANSYS Workbench Environment, CAE 前后处理环境)与 CAD 三维建模软件实时联通,将电机定子 CAD 模型中待优化的参数变量传递到 AWE 后,求解参数变量改变后的谐响应分析;然后利用 AWE 中提供的优化设计模块,设定约束条件和优化目标函数;最后根据谐响应分析结果解算得到目标函数的响应面模型,并选择自适应多目标优化算法(AMO)对输入变量进行迭代计算,直到求得目标函数最优解,并返回优化后的定子参数变量。整个优化过程如图 6 所示。

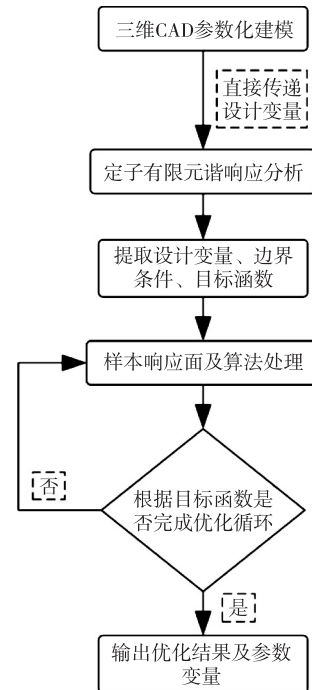


图 6 自适应多目标优化流程图

3.1 定子优化空间确定

考虑到实际的尺寸需要及材料的机械性能,定子的初始尺寸与设计空间如表 2 所示。其中需要优化的设计变量有 4 个,包括 2 个固定参数和 2 个条件参数。 σ_s 表示定子弹性体材料 QSn6.5 锡磷青铜的屈服极限; f_{nl} 表示定子工作模态频率下限。固定参数和条件参数均可看作定子优化设计的边界条件。

表 2 TRUM-70HA 定子初始结构及优化空间

定子参数	初始值	设计空间	参数类型
H_2/mm	2.5	[1,5]	变量
H_1/mm	1	[0.5,2.5]	变量

续表

定子参数	初始值	设计空间	参数类型
l/mm	0.8	[0.3, 1.5]	变量
定子工作模式阶数 n	11	{7, 9, 11}	变量
r_a/mm	35	{35}	固定
r_d/mm	24	{24}	固定
σ_s/MPa	265	{265}	条件
$f_{\text{nl.}}/\text{kHz}$	20	{20}	条件

3.2 工作模式识别

定子随着激励频率的变化会表现出多种振动模式,但只有一种模式是电机工作所需要的。因此,在定子设计变量改变后的每次谐响应分析计算,提取的目标参数结果必须属于预设的工作模式。为了在众多模式中识别出与压电陶瓷分区极化对应的工作模式,本文采用了模式置信准则(MAC方法)。该方法通常在模式试验中被用来描述结构计算模式与试验模式之间的差异程度。本文用MAC识别法对所需的定子工作模式进行识别,其表达式为

$$(MAC)_i = \frac{(\phi_{ai}^T \phi_{b1})^2}{(\phi_{ai}^T \phi_{ai})(\phi_{b1}^T \phi_{b1})} \quad (i=1, 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$

其中: ϕ_{ai} 表示待识别的定子模式振型; ϕ_{b1} 表示定子的某个工作模式参考振型。MAC值越大(即越接近1),说明 ϕ_{ai} 与 ϕ_{b1} 之间的差异越小。因此,通过比较MAC值的大小就可在众多模式中准确识别出定子优化后的工作模式。为了便于计算,本文选取定子齿面外侧圆周上单元节点的振型作为参考振型,然后通过MAC方法完成模式识别。

3.3 目标函数和边界条件

为了提高样机的低速、大力矩特性,须设定具有数学表现形式的目标函数来描述该特性。根据上文的分析,TRUM-70HA的低速、大力矩特性优化可以用以下3个目标和2个约束条件来实现。

1) 在预设压电陶瓷分区极化方式和定子的的工作模式阶数保持一致后,得到的优化结果必须是该工作模式所提供的。因此优化的首要目标是要进行模式识别,该目标函数可以用MAC值表示为

$$\min. O_1 = |(MAC)_i - 1| \quad (2)$$

2) 根据前文分析,为了提高电机的堵转力矩,

必须增大定子齿面的法向振幅,故定子在设计工作模式下的振幅越大越好。该设计要求可以用目标函数表示为

$$\min. O_2 = \frac{1}{W_z} \quad (3)$$

3) 根据前文分析,定子振幅增大可使电机堵转力矩增大,但同时也会促使极限转速提升。然而电机的极限转速等同于定子齿面质点的切向振动速度,它不单由振幅决定,而是多变量耦合的结果。因此,本文通过谐响应分析直接获得了定子齿面的切向速度,为了体现电机的低速特性,速度值越小越好。该设计要求可以用目标函数表示为

$$\min. O_3 = |V_\tau| \quad (4)$$

4) 定子振动过程中,弹性体内应力 σ_v 应该小于材料的屈服极限 σ_s 。该设计要求可看作求解目标函数的边界条件,其表达式为

$$\max(\sigma_v) < \sigma_s \quad (5)$$

5) 由前文仿真分析可知,定子低速、大力矩特性的提升往往伴随着定子工作模式频率的下降。超声电机的驱动频率 f_n 一般在20 kHz以上,因此定子结构优化后的工作模式频率不得低于该频率下限值 $f_{\text{nl.}}$,该设计要求可以用边界条件表示为

$$f_{\text{nl.}} \leq f_n \quad (6)$$

以上3个优化目标函数均采用最小化处理,即优化后的每个目标函数值越小,表明优化效果越好。其中,式(3)中 W_z 的单位为 μm ,式(4)中 V_τ 的单位为 m/s 。根据实际经验,行波型超声电机定子齿面振幅通常为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$,切向速度通常为 $0.1 \sim 1 \text{ m/s}$ 。利用归一化思想,可将 O_1 、 O_2 和 O_3 无量纲取值范围设定为 $[0, 1, 1]$,则子目标函数的标量值具有统一的数量级。综上所述,同时考虑各项子目标的重要性优先级,对3个目标函数做相应的加权后,可得TRUM-70HA定子优化设计的总目标函数:

$$\begin{cases} \min. O(p_i) = \sum_{i=1}^3 \beta_i O_i \\ p_i \in [p_i^{lb}, p_i^{ub}], i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (7)$$

式中: β_i 为加权系数,取值依次为1、0.9、0.5; p_i 为设计变量参数; p_i^{lb} 和 p_i^{ub} 表示设计变量的变化范围,具体数值见表2对应的参数变量。因此,整个定子的优化设计模型可以表述为一个带边界约束的极小值问题。

3.4 定子优化过程及结果

对定子参数变量进行均匀分布式采样,可得到若干设计空间样本。为了直观获取样本输入变量对目标函数的影响,本文利用 AWE 的响应面计算模块,建立了样本拟合的响应面模型。图 7(a)、(b)分别为定子齿槽宽 l 和定子齿高 H_1 相对于振幅 W_z 、切向速度 V_r 优化目标的响应面模型。由图可看出,当齿槽宽减小时,定子振幅和切向速度均会略微减小;当基体厚度相同时,定子齿高增加会使振幅和切向速度显著增大。此外,当基体厚度减小时,振幅会显著增大而工作频率会显著下降,切向速度略微减小。

在得到全部设计变量对各个子目标函数的响应面模型后,软件采用 AMO 算法对总目标函数进行迭代计算,设置迭代次数为 30 次,如图 8 所示。由图可看出,总目标函数在边界条件约束下趋于收敛,初始总目标函数值为 1.040,在第 22 次迭代计算时总目标函数值逐渐稳定于 0.446。

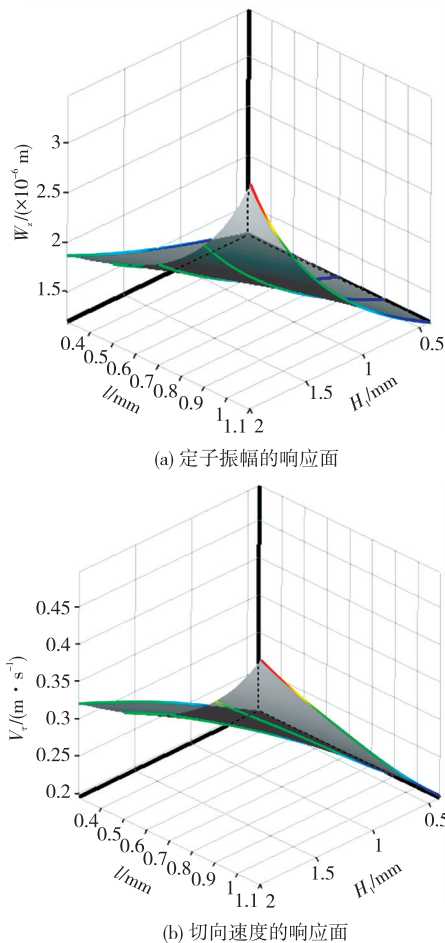


图 7 部分参数变量对目标函数的响应面

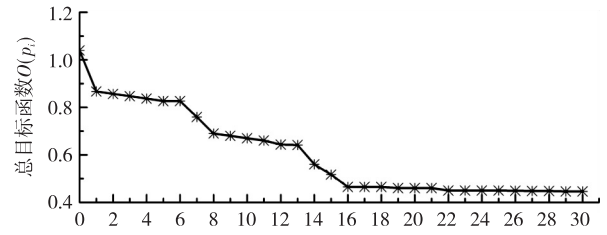


图 8 优化总目标迭代过程

优化结束后 AWE 平台返回了新的设计变量,定子设计变量初始值和优化值的对比如表 3 所示。由表可看出,各子目标函数和总目标函数均有不同程度的优化,其中振幅的优化较为明显。

表 3 TRUM-70HA 定子设计变量初始值与优化值比较

设计变量及目标函数	初始值	优化值
H_2/mm	2.5	1.5
H_1/mm	1	0.8
l/mm	0.8	0.3
n	11	9
O_1	0.280	0.101
O_2	0.709	0.272
O_3	0.244	0.200
O_{p_i}	1.040	0.446

3.5 优化结果仿真

优化后的样机为 70HB,其定子工作模态为 B_{09} 模态。仿真得到的工作模态频率为 23.6 kHz,齿面最大法向振幅为 $3.68 \mu\text{m}$,切向速度为 0.199 9 m/s,幅速比达到 18.41,比 70HA 的幅速比提高了两倍多。仿真结果如图 9 所示。

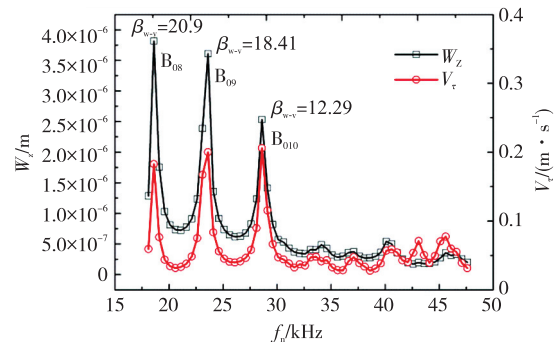


图 9 70HB 定子振动特性频率响应仿真曲线

4 实验验证

根据仿真及优化结果,为了排除样机个体差异

性的影响,加工制作了70HA、70HB样机各两个,构成两个对照组。样机分别编号为70HA-1、70HA-2、70HB-1和70HB-2,如图10所示。

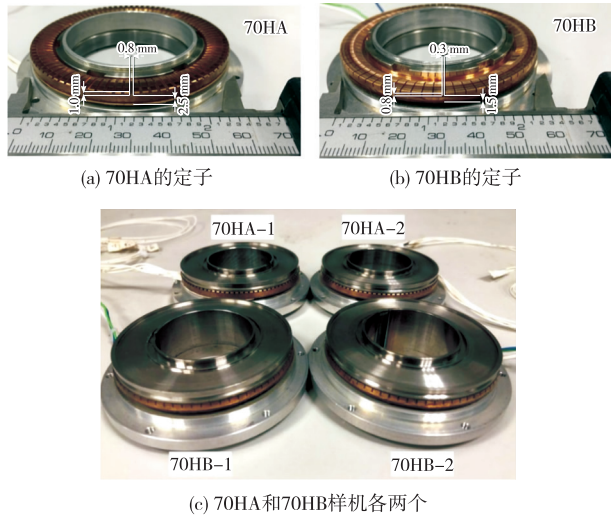


图10 70HA和70HB样机定子及整机实物对比

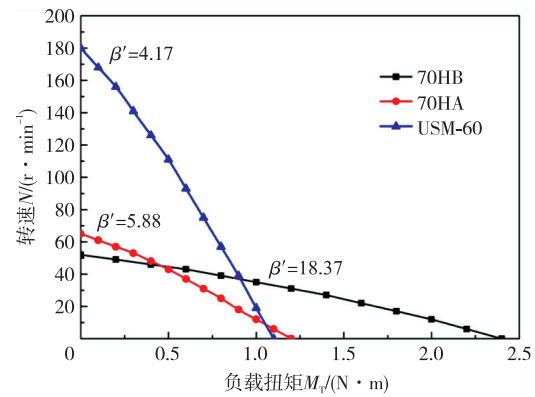
为了验证样机真实的输出机械特性,搭建了行波型中空电机测试系统,主要由直流电源、上位机、下位机驱动控制器、转速和力矩传感器、负载装置等部分组成。

实验测试结果如图11所示,与目前业内典型的行波超声电机USM-60(日本新生工业公司研制)相比,USM-60的实测幅速比最小,为4.17;70HA的实测幅速比为5.88;70HB的实测幅速比最大,为18.37。这表明三者的机械特性曲线由“软”变“硬”。与70HA相比,70HB的最大转速从65 r/min降低到50 r/min,最大堵转力矩从1.2 N·m增加到2.4 N·m;70HA的工作频率在50.5~53.5 kHz之间,在最大堵转力矩的50%处,其输出效率最大,约为10%;70HB的工作频率在25~28 kHz之间,在最大堵转力矩的55%处,其输出效率最大,约为27%。整体而言,优化后的70HB最大转速下降了23.1%,最大堵转力矩增加了100%,最大输出效率提高了170%,低速大力矩特性优化效果显著。

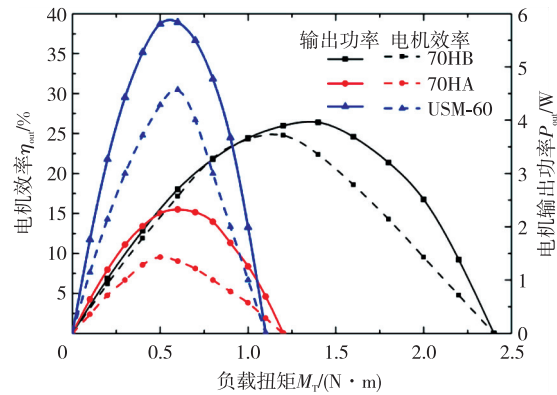
由实验结果可得如下结论:

1) 适当减小定子基体厚度和齿槽宽,提高定子齿高在厚度方向上的比例,有利于降低定子模态频率,增大振幅和电机宏观力矩。

2) 采用较低频和较低阶的工作模态,能有效降低电机空载转速。



(a) 转速-负载扭矩对比



(b) 功率效率-负载扭矩对比

图11 70HA/HB与经典电机USM-60的机械特性曲线

5 结束语

行波型超声电机的外形尺寸对其机械输出特性有着直接而显著的影响。为了提高电机低速大力矩特性,通常会增大定子直径和重量,然而这不利于特殊空间下的工程应用。

本文分析了超声电机定子微观椭圆运动对其宏观输出特性的影响,提出了在定子直径不变的情况下改变其椭圆运动轨迹形状的低速大力矩特性优化方法。通过确立定子特征参数和优化目标函数,利用有限元多目标优化平台对样机模型进行了迭代设计。仿真和实验结果表明,优化后样机的低速大力矩特性显著提高,验证了上述优化思路及方法的可行性,为在航空航天等对部件体积、重量有较高要求的领域应用提供了设计参考价值。

参考文献:

- [1] 梁柱林,徐张凡,鲁明,等. 超声电机驱动的CMG框架系统滑模控制[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(6): 1170-1176.
LIANG Zhulin, XU Zhangfan, LU Ming, et al. Sliding mode control for control moment gyroscope gimbal

- system driven by ultrasonic motor[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2022, 42(6): 1170-1176.
- [2] 张武, 史玉娣, 李刚强, 等. 基于空天环境应用的超声电机转子圆盘设计[J]. *微电机*, 2022, 55(11):102-106. ZHANG Wu, SHI Yudi, LI Gangqiang, et al. Design of rotor disk of ultrasonic motor for the aerospace environment application [J]. *Micromotors*, 2022, 55(11):102-106.
- [3] 莫岳平, 胡敏强, 金龙, 等. 大扭矩均压行波超声波电机研究[J]. *电工技术学报*, 2002, 17(6):7-11. MO Yueping, HU Mingqiang, JIN Long, et al. Study of large torque pressure-equalizing traveling wave type ultrasonic motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2002, 17(6):7-11.
- [4] CHEN Yu, LIU Qingli, ZHOU Tieying. A traveling wave ultrasonic motor of high torque[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44:e581-e584.
- [5] 田秀, 王彦利, 郎跃东, 等. 一种中空环形行波型超声电机的研制[J]. *振动、测试与诊断*, 2013, 33(S2): 190-193. TIAN Xiu, WANG Yanli, LANG Yuedong, et al. Development of a hollow ring-type of travelling wave ultrasonic motor[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2013, 33(S2):190-193.
- [6] DONG Zhaopeng, XU Liang. Performance analysis and experimental research of a dual-vibrator traveling wave ultrasonic motor[J]. *Micromachines*, 2023, 14(8):1610.
- [7] YANG Lin, HU Xiaobin, YANG Mojian, et al. A novel traveling wave rotary ultrasonic motor with piezoelectric backup function[J]. *Journal of intelligent material systems and structures*, 2023, 34(20):2414-2427.
- [8] 董迎晖. 基于有效椭圆运动及结构力系数行波型超声电机研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2015.
- [9] 陶征, 刘本学. 行波型超声电机与纵扭型超声电机的比较[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2009, 30(3):60-64. TAO Zheng, LIU Benxue. Comparison of the traveling-wave ultrasonic motor with the ultrasonic motor using longitudinal and torsional vibration model[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2009, 30(3):60-64.
- [10] 安大伟, 张建辉, 薛昊东, 等. 旋转行波超声电机性能提升技术进展[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(5): 1109-1115. AN Dawei, ZHANG Jianhui, XUE Haodong, et al. Progress on performance promotion technologies of rotary traveling wave ultrasonic motors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(5):1109-1115.
- [11] 牛子杰, 孙志峻, 崔永杰, 等. 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. NIU Zijie, SUN Zhijun, CUI Yongjie, et al. Design optimization of three degrees of freedom ultrasonic motor stator based on response surface model[J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2019, 39(5): 1089-1097.
- [12] 刘军, 朱华, 牛子杰, 等. 基于半功率带宽法的行波超声电机谐波响应分析[J]. *压电与声光*, 2019, 41(3): 344-348. LIU Jun, ZHU Hua, NIU Zijie, et al. Analysis of the harmonic response of traveling-wave ultrasonic motor based on half-power bandwidth method[J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2019, 41(3): 344-348.