

一种双驱动模式行波型旋转超声电机*

杨 淋¹, 尧凯希¹, 杨模尖², 赵荣城²

(1. 南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室 南京, 210016)

(2. 南京航达超控科技有限公司 南京, 211100)

摘要 为提高行波型旋转超声电机在工作寿命内的可靠性, 满足航空航天等无法进行后期维护的特殊领域对超声电机的需求, 设计出一种具有压电陶瓷组件冗余设计的双驱动模式的行波型旋转超声电机(traveling wave rotary ultrasonic motor, 简称 TRUM), 并通过在转子上粘贴 1 组备用陶瓷片实现结构备份功能。首先, 建立经典 TRUM 的故障树, 基于提高电机整体可靠性的思想提出对压电陶瓷组件进行冗余设计的结构方案; 其次, 通过模态分析和谐响应分析确定满足初步振动特性要求的转子结构; 最后, 建立超声电机整机非线性动力学模型, 并通过样机实验对该双驱动模式电机进行可行性验证, 测得样机在常规驱动和备用驱动模式下的最大空转转速和堵转扭矩分别为 50 r/min 和 1.3 N·m、45 r/min 和 1.1 N·m。实验结果表明, 备用模式下的电机输出可以满足大多数应用场景下对电机的输出要求。

关键词 行波型旋转超声电机; 可靠性; 冗余设计; 有限元法

中图分类号 TH111; TH113; TH122

引 言

在超声电机的发展初期, 研究人员开始利用声波来驱动机械装置。随着材料科学和电子技术的进步, 超声电机得到了更大的发展。新的材料和设计方法进一步提高了超声电机的效率和精度, 微型化和集成化的技术也使得超声电机应用于更多的领域。TRUM 作为超声电机产品的典型分支之一, 已经被应用于各种高精尖领域, 如靶向给药、微型机器人、光学聚焦系统、精密定位及航天航空设备等^[1-4]。尤其在航天领域, 超声电机因其具有结构紧凑、低速、大转矩及断电自锁等优点, 展现出巨大的应用潜力^[5-7]。随着航天应用场景的拓展, 如何提高超声电机在设计寿命时长内的工作可靠性, 成为重要的研究内容。

压电陶瓷和摩擦材料是影响超声电机寿命的主要因素^[8]。由于超声电机新颖的工作原理, 这 2 种组件相对于其他机器组件更易受损, 因此超声电机的故障主要可分为 2 种: ①压电陶瓷片开裂; ②摩擦材料磨损。目前, 针对超声电机的可靠性研究, 大多数通过寻求耐磨性良好的摩擦材料和表面处理方法以及探索压电材料及其制备工艺来提高该组件的可靠性, 从而提高电机在运行过程中的可靠性^[9-10]。Zeng

等^[11]通过在定子表面进行织构, 提高了聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, 简称 PTFE)基材料的耐磨性和超声电机的性能, 使 PTFE 基材料与定子的摩擦磨损率降低了 52.5%, 电机的平均转速提高了 20.6%。Wang 等^[12]为了探究优化铁电陶瓷断裂性能的参数, 通过使用不同方法测定压电陶瓷特性, 实验表明, 优化铁电材料的弹性模量和铁弹翻转行为有望提升其断裂韧性。然而, 这些可靠性研究主要针对如何提高超声电机的工作时长而非提高其在预计工作时长内的可靠性。

针对超声电机中易发生故障的压电陶瓷组件, 笔者从结构角度出发, 对该组件进行冗余设计, 旨在设计一种具有主模式和备份模式的双驱动模式行波型旋转超声电机, 以便在主模式发生故障时能够切换到备份模式, 继续驱动电机工作。首先, 在转子上粘贴 1 组备用陶瓷片来实现冗余设计, 在尽可能保持电机加工、装配工艺难度不变的情况下, 设计出与典型 TRUM 结构尽可能接近的双驱动模式电机; 其次, 确定电机结构和具体尺寸参数后, 通过有限元软件 ADINA 对样机进行三维动力学仿真分析, 预测电机输出性能; 最后, 通过制作样机并搭建实验平台进行双驱动模式电机的原理验证与性能测试, 证明

* 国家自然科学基金资助项目(52375058)

收稿日期: 2024-01-23; 修回日期: 2024-02-22

双驱动模式电机的可行性。

1 双驱动模式电机结构和工作原理

1.1 TRUM 的可靠性分析

超声电机结构主要包括定子组件、转子组件、外壳以及驱动电路,造成其失效的原因可能出现在任意组件上。根据实际情况,超声电机中任何一个组件的故障(压电陶瓷、驱动电路等)都会使整机系统发生故障,因此超声电机为可靠性串联系统。将超声电机简化为驱动器、电路连接、压电陶瓷、定子、转子及摩擦副 6 个子系统,简化的行波型旋转超声电机可靠性框图如图 1 所示。其中: R_d 为驱动器的可靠性; R_c 为导电膜线路的可靠性; R_p 为压电陶瓷片的可靠性; R_s 为定子的可靠性; R_r 为转子的可靠性; R_f 为摩擦副的可靠性。



图 1 简化的行波型旋转超声电机可靠性框图

Fig.1 Simplified block diagram of TURM reliability

假设电机与部件只存在 2 种状态,即故障状态和正常状态,各部件的故障间相互独立,可得出超声电机的可靠度为

$$R_D = \prod_{i=1}^6 R_i(t) \quad (1)$$

根据超声电机的可靠性模型可知,若想提高超声电机的可靠性,就要提高各单元的可靠性,而提高易疲劳、断裂的机械零件可靠性的有效方法之一是对该零件进行冗余设计。

对压电组件进行冗余设计后的行波型旋转超声电机可靠性框图如图 2 所示。此时,压电组件变成并联系统,如果并联系统失效,则需 2 个子系统同时失效。因此,这时的压电组件可靠度为

$$R_{cp} = 1 - (1 - R_c R_p)(1 - R_c R_p) \quad (2)$$

该情况下,超声电机的可靠度为

$$R_D = \prod_{i=1}^6 R_i(t)(2 - R_c R_p) \quad (3)$$

可见,这种备份设计可以有效增加超声电机的可靠性。

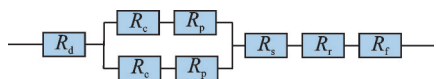


图 2 对压电组件进行冗余设计后的行波型旋转超声电机可靠性框图

Fig.2 Block diagram of TURM reliability after redundant design of piezoelectric components

1.2 电机结构与运行机理

笔者基于成品 CSX-60 行波型旋转超声电机,提出一种具有压电陶瓷片冗余设计的双驱动模式 TRUM。通过对电机中的转子进行一定的改变并将陶瓷片粘贴到转子上,使转子同时具备输出部件和驱动部件功能。

双驱动模式电机结构爆炸视图如图 3 所示。该电机主要由外壳、滑环、预压力施加装置、转子组件、定子组件、输出轴及定子座组成。其中:定子用螺钉紧固在定子座上,中间套设输出轴;转子通过中心的方形孔洞与输出轴方形孔配合;蝶形弹簧和螺母套设在轴中间位置,组成预压力装置;滑环套设在输出轴最上方,通过下方螺钉与轴紧固,并通过上方螺钉与电机外壳连接,进行定位;外壳上开设窗口方便电机施加预压力。

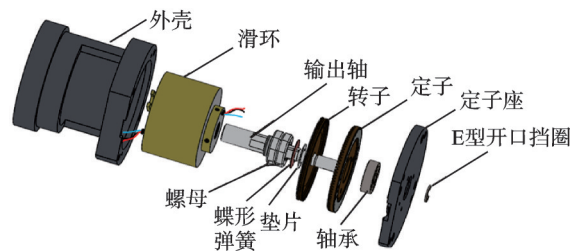


图 3 双驱动模式电机结构爆炸视图

Fig.3 Exploded view of dual-mode drive motor structure

为了最大程度地保证备份模式工作状态和常规工作状态下电机工作状态的一致性,转子和定子采用同种振动模态作为工作模态,因此备用陶瓷片和主陶瓷片极化方向、分区方式和驱动方式相同。压电陶瓷环的分区极化示意图如图 4 所示。

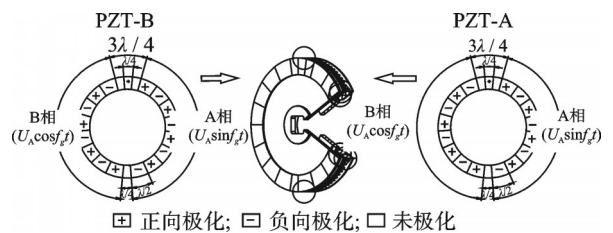


图 4 压电陶瓷环的分区极化示意图

Fig.4 Schematic diagram of domain polarization of PZT rings

通过对 2 组压电陶瓷片采用独立控制的驱动方式,可以实现定子压电陶瓷片损坏后备份模式的切换。具体过程为:当驱动定子上的压电陶瓷组时,电机处于正常工作模式下,备份压电陶瓷组处于待机模式,不参与驱动;当检测到主压电陶瓷组出现故障影响电机正常运转时,启动备份模式,此时停止驱动

定子的压电陶瓷组,转而驱动转子的压电陶瓷组,使转子同时具备振子功能,继续驱动电机工作。

转子尺寸结构参数如图 5 所示。其中: r_1 、 r_2 和 h_5 分别为压电陶瓷环外径、内径和厚度,数值分别为 28、22.5 和 0.5 mm; r_6 为内径,考虑到摩擦材料和定子要有足够的接触面积,所以其保持不变,为 26.35 mm。

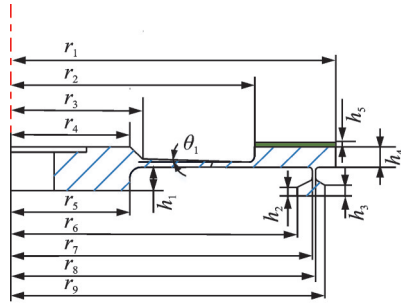


图 5 转子尺寸结构参数

Fig.5 Structural parameters of the rotor

设计时,该电机的备份驱动模式需要激励转子进行振动,因此转子也需要满足一定的振动特性。为了使转子的结构尺寸达到较好的效果,笔者采用灵敏度分析筛选出对工作模式固有频率以及驱动足振幅较为敏感的结构参数。为了更直观地显示,对灵敏度进行归一化处理。结构参数的相对灵敏度见表 1。工作模式固有频率和质点振幅对结构参数的相对灵敏度分别如图 6、7 所示。结果表明: r_3 、 r_4 对转子工作模式频率和振幅影响较小,考虑到后续电机的结构与预压力装置的配合, r_3 和 r_4 都取值 11 mm; r_7 、 r_8 、 r_9 、 h_2 和 h_3 为转子工字形部分的结构参数,其能够变化的范围较小,改变这些参数对模式频率和振幅影响不大,因此这些参数也保持不变。

采用有限元软件 ANSYS/Workbench18.0 对筛选出来的尺寸参数 r_5 、 h_1 、 h_4 和 θ_1 进行模式分析以及谐响应分析,获得转子结构的最终尺寸参数见表 2。

在自由边界条件下,对转子的最终结构进行模式分析。转子工作模式如图 8 所示。两相模式频率分别为 35 955 和 35 965 Hz。工作模式的前、后相干

表 2 转子结构的最终尺寸参数

Tab.2 Final dimension parameters of rotor

参数	r/mm									h/mm					$\theta_1/(^\circ)$
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_7	r_8	r_9	h_1	h_2	h_3	h_4	h_5		
数值	29	22.5	11	11	19	26.35	27.85	29	1	0.8	1	0.5	1.5	0	

2 电机整机非线性动力学分析

2.1 电机的有限元模型

本研究利用有限元建模软件 ADINA 对该双驱

表 1 结构参数的相对灵敏度

Tab.1 Relative sensitivity of structural parameters

参数	工作频率相对灵敏度	振幅相对灵敏度
r_3	0.102	0
r_4	0.078	0.012
r_5	0.077	0.004
r_7	0.010	1.000
r_8	0.386	0.003
r_9	-0.395	0.545
h_1	0.880	0.098
h_2	1.000	0.329
h_3	0	0.140
h_4	-0.212	0.073
θ_1	0.880	0.238

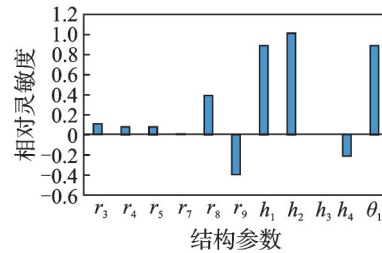


图 6 工作模式固有频率对结构参数的相对灵敏度

Fig.6 Relative sensitivity of operating mode intrinsic frequency to structural parameters

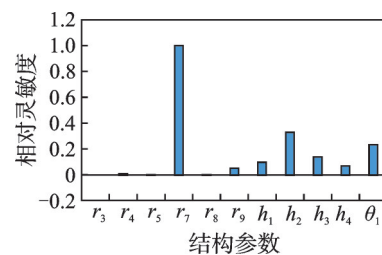


图 7 工作模式质点振幅对结构参数的相对灵敏度

Fig.7 Relative sensitivity of mass amplitude to structural parameters in operating modes

扰模式频率分别为 34 980 和 38 063 Hz,最接近的干扰模式频率与工作模式频率的频率差约为 1 kHz,满足实际工作要求。

动模式电机进行三维动力学仿真分析。考虑到电机实际运行情况,为降低计算成本,忽略一些对电机输出特性无直接影响的结构,仅保留电机的核心部件,如转子、定子、压电陶瓷片及摩擦材料,同时简化这

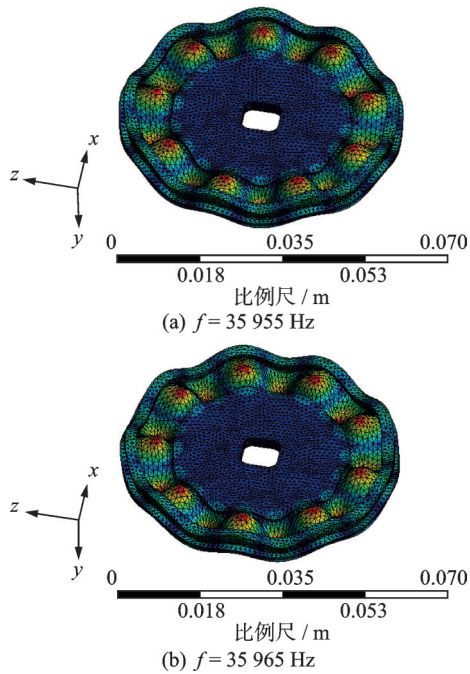


图 8 转子工作模态

Fig.8 The working modal of rotor

些材料中不影响结果的螺纹孔、倒角等结构。整机的网格模型全部由一阶六面体网格单元组成,其中转子、摩擦材料、压电陶瓷环和定子的单元网格数分别为 24 640、1 760、9 216 和 81 000。该模型中,摩擦材料为聚四氟乙烯,定子和转子的材料均为磷青铜,压电陶瓷材料为 PZT-8H。常用材料参数见表 3。压电陶瓷材料参数见表 4。

表 3 常用材料参数

Tab.3 Constants of the common materials

材料	密度/(kg·m ⁻³)	泊松比	弹性模量/(N·m ⁻²)
磷青铜	8 780	0.33	1.15 × 10 ¹¹
聚四氟乙烯	2 100	0.30	1.20 × 10 ⁹

ADINA 软件中使用瑞利阻尼生成模型的阻尼矩阵,其为质量矩阵和刚度矩阵的纯线性组合,即

$$C = \alpha M + \beta K \quad (4)$$

该矩阵可以被来自无阻尼特征频率问题的特征模态对角化,从而在不同模态之间实现完全的动态解耦。式(4)中 α 和 β 的计算公式为

$$\begin{cases} \alpha \\ \beta \end{cases} = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \begin{Bmatrix} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

其中: ξ 为振型确定的振型阻尼比; $[\omega_1, \omega_2]$ 为频率范围,应涵盖备份超声电机的谐振频率和工作频率。

本模型中有 3 组粘接设置,分别是:2 组压电陶瓷片与定、转子粘接;摩擦材料与转子齿面粘接。按

表 4 压电陶瓷材料参数

Tab.4 Electro-mechanical properties of the piezo-electric material

参数	取值
密度/(kg·m ⁻³)	7 500
泊松比	$\nu_{12} = 0.35$ $\nu_{13} = \nu_{23} = 0.38$
弹性模量/(N·m ⁻²)	$E_1 = E_2 = 6.1 \times 10^{10}$ $E_3 = 5.32 \times 10^{10}$
剪切模量/(N·m ⁻²)	$G_{12} = 2.26 \times 10^{10}$ $G_{13} = G_{23} = 2.11 \times 10^{10}$
压电耦合常数/(C·m ⁻¹)	$e_{13} = e_{23} = -7.029$ $e_{33} = 15.118$ $e_{51} = e_{62} = 12.332$
介电常数/(C·(Vm) ⁻¹)	$\epsilon_{11} = \epsilon_{22} = 1.53 \times 10^{-8}$ $\epsilon_{33} = 1.5 \times 10^{-8}$

照软件内置要求,将网格更少、更简单的压电陶瓷片的粘接面设为从属面,定子和转子的粘接面设为主面;将摩擦材料表面设为从属面,转子端面设为主面。本模型中还存在 1 组接触组,即定子齿面和摩擦材料接触面。同样按照软件要求,将面积更小、更软的摩擦材料表面设为从属面,将面积更大、质地更硬的定子驱动表面设为目标面^[13]。

按照电机实际运行情况,对电机进行如下边界条件约束:将定子下表面的自由度进行全约束,模拟定子通过螺钉固定在底座上;同时,只保留转子内圈上表面沿 z 轴方向上的位移和绕 z 轴的转动自由度,模拟转轴对电机转子的约束。此外,在转子内圈上表面施加力 F 来模拟实际运转状态下预压力的施加。基于超声电机驱动原理,对 2 组压电陶瓷片施加电信号。双驱动模式电机三维有限元网格模型如图 9 所示。仿真计算中通用的参数取值见表 5。

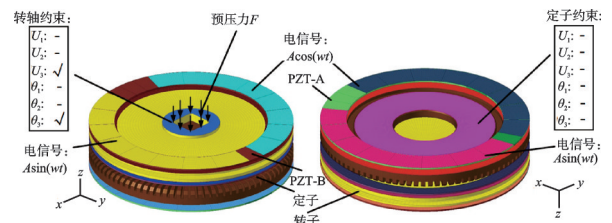


图 9 双驱动模式电机三维有限元网格模型

Fig.9 3D finite element model of a dual-mode drive TRUM

2.2 有限元结果与分析

当电机在预压力为 160 N、负载为 0、激励电压峰值为 500 V 情况下,考虑不同驱动频率对电机的影响进行仿真。不同驱动频率下的速度响应如

表 5 仿真计算中通用的参数取值

Tab.5 Common parameter values in simulation calculation

参数	数值
库伦摩擦系数 μ_s	0.3
穿透因子 ϵ_p	1×10^{-12}
阻尼比 ξ	0.008
瑞利阻尼系数 α	1 854.39
瑞利阻尼系数 β	3.44×10^{-8}

图 10 所示。由图可知,电机从启动到稳定的过程中,2种模式在不同激励频率下的速度响应趋势基本一致,但同等情况下备用驱动模式的速度曲线波动相较于常规驱动模式的速度曲线波动更大,且稳定数值更小,说明备用驱动模式下电机性能与常规模式下的性能存在一定差距。这是因为转子上的备用陶瓷片外径要比定子上的陶瓷片小,因此输出的功率更小,相同情况下电机的输出转速也更小。

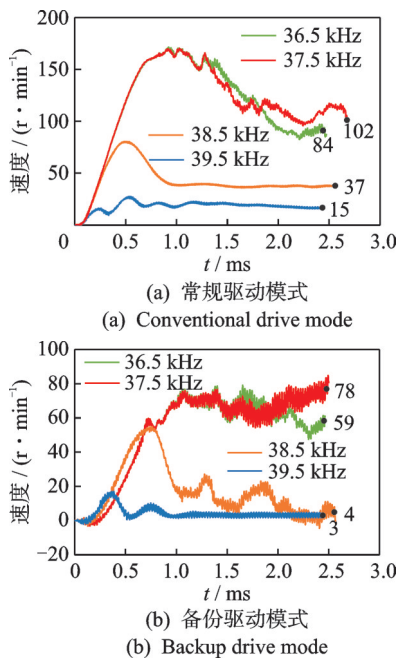


图 10 不同驱动频率下的速度响应
Fig.10 Velocity response at different drive frequencies

当电机的工作频率为 37.5 kHz、负载为 0、激励电压峰值为 500 V 情况下,考虑不同预压力对电机的影响进行仿真。不同预压力下电机的速度响应如图 11 所示。由图可知,备用驱动模式下,由转子驱动的电机的对预压力的改变更为敏感。

采用驱动频率为 37.5 kHz、电压峰值为 500 V、预压力为 160 N 的驱动电信号,对电机在不同工作模式下的负载特性进行仿真计算。不同负载下的速度响应如图 12 所示。可以看出,电机无论在哪种驱

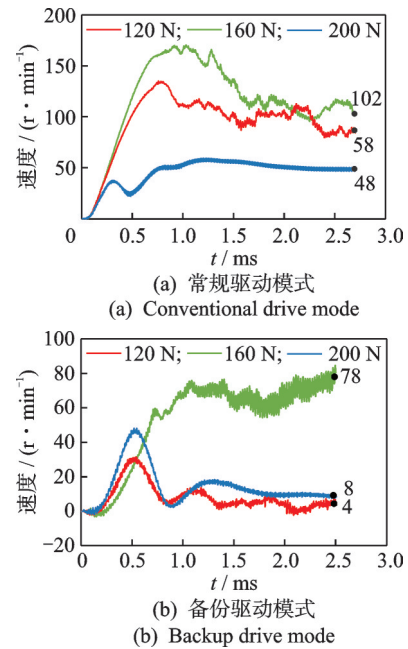


图 11 不同预压力下电机的速度响应
Fig.11 Velocity response under different preloads

动模式下,开始加载时速度响应曲线都会出现巨大波动,但很快又变得稳定。通过对比电机在不同驱动模式下的仿真结果,发现常规驱动模式明显优于备份驱动模式。

为了对电机进行模式切换的仿真,设置驱动峰

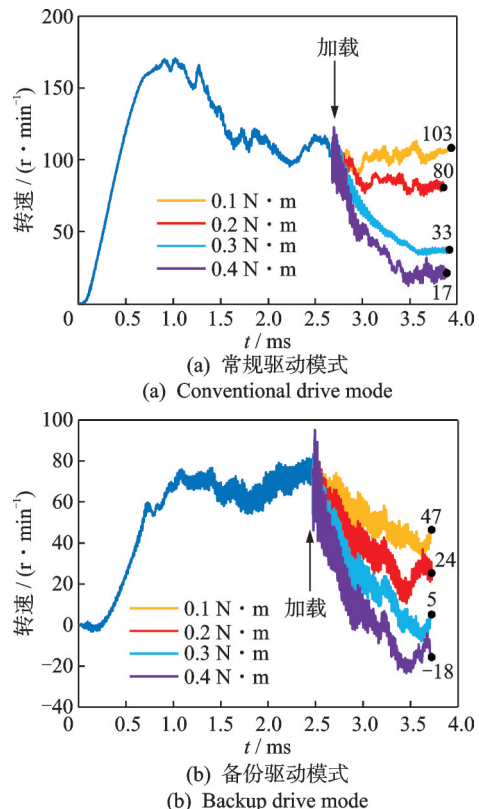


图 12 不同负载下的速度响应
Fig.12 Velocity response at different drive loads

值电压为 500 V、驱动频率为 37.5 kHz、预压力为 160 N,模拟电机在无负载情况下常规模式切换到备用模式下的速度响应。此外,本研究还对电机在定、转子同时驱动下的速度响应曲线进行了仿真。各模式切换的空载速度仿真结果如图 13 所示。可以看出:当电机转速在常规驱动模式下达到稳定后再切换其他模式时,会经历一段毫秒级的波动才能重新回到稳定状态;当电机切换到定、转子上陶瓷片一起驱动的加强模式时,电机稳定转速比常规驱动模式下的转速大;当电机切换到由转子单独驱动的备份驱动模式时,电机的稳定转速比常规驱动模式下的转速小。

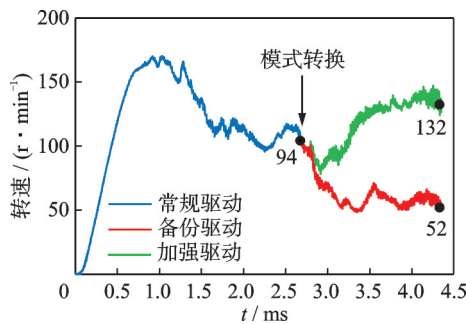


图 13 各模式切换的空载速度仿真结果

Fig.13 No-load speed during mode switching: simulation results

3 样机实验

为了进一步验证备份电机的可行性和仿真的准确性,根据 2.2 小节中确定的参数尺寸,加工并装配实验样机,主要部件有外壳、滑环、输出轴、转子组件、定子组件和定子座。样机整机及组件见图 14。

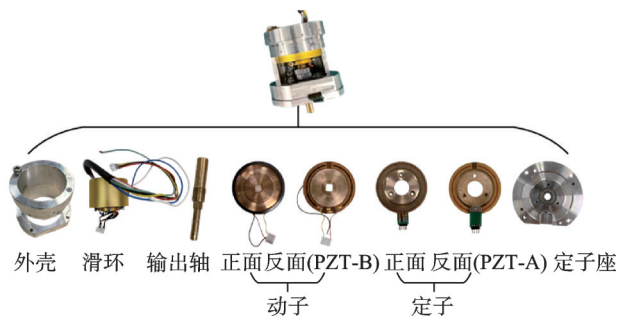


图 14 样机整机及组件

Fig.14 The prototype and component diagrams

利用多普勒测振仪对转子齿面的法向振动进行扫频实验,振动测试实验结果如图 15 所示。施加峰值为 80 V 的正弦电信号时,获得样机转子的频响特性曲线见图 15(a)。图中转子的 B_{00} 工作模式所对应的共振频率显示为峰值,分别为 37.094 kHz 和 37.110 kHz,

频率相差 16 Hz,转子组件表现出良好的两相一致性。对转子进行定频实验,施加电压峰值为 80 V、频率为 37.110 kHz 的正弦电信号时,得到转子的振型见图 15(b),此时转子齿面最大振幅为 2 μm 。

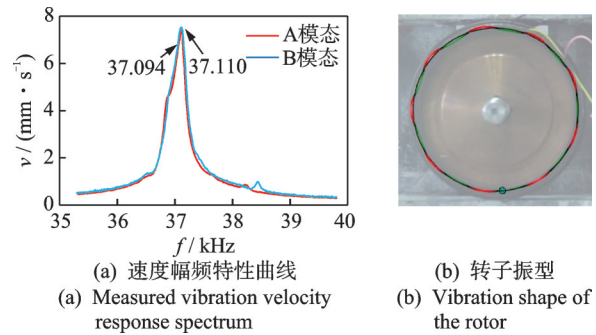


图 15 振动测试实验结果

Fig.15 Vibration scanning results of the rotor

为了对样机进行整机性能测试,搭建了如图 16 所示的电机性能测试平台。该测试平台包括信号发生器、功率放大器、扭矩传感器、数据采集器、磁滞制动器以及相应的导线连接装置。首先,由信号发生器产生相位差为 90° 的两相正弦信号;其次,功率放大器分别对两相正弦信号进行升压处理驱动电机转动,此时双驱动模式样机通过联轴器与扭矩传感器联接在一起;然后,数据采集器通过采集相应数据实时获得电机转速,同时通过控制后方磁滞制动器对电机转轴进行精确加载,并实时获取电机转矩;最后,由数据采集器实时显示并记录实验测得的数据。

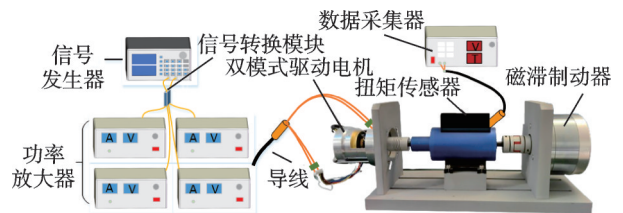


图 16 电机性能测试平台

Fig.16 The experimental platform

经多次实验,测得在驱动电压为 500 V、驱动频率为 40 kHz 时双驱动模式样机的力矩-速度特性曲线,如图 17 所示。常规驱动和备用驱动模式下,电机空载转速分别为 50、45 r/min,堵转扭矩分别为 1.3、1.1 N·m。实验结果表明,转子在备份驱动模式下的性能曲线可以满足电机的输出要求,验证了双驱动模式电机的可行性。电机在备份驱动模式下的输出性能整体小于常规驱动模式,与仿真结果预测一致。样机实验测试结果与有限元仿真分析结果存在一定误差,这可能与仿真过程中忽略了滑环有关。因为滑环对装配的同轴度存在一定的要求,而在实验过程中螺钉锁紧程度不一致会引起滑环的偏

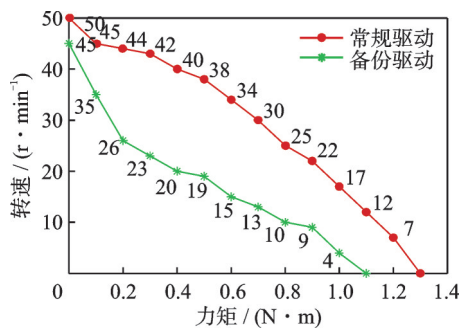


图17 样机的力矩-速度特性曲线

Fig.17 Torque-speed characteristic curve of the prototype

心转动,在一定程度上增加了电机负载。

4 结 论

1) 提出了一种对压电陶瓷组件进行冗余设计的双驱动模式行波型旋转超声电机,给出了具体的备份设计方案,分析了电机的工作原理,确定了转子的具体结构尺寸参数。

2) 建立该电机的三维动力学有限元模型,通过该模型对电机在不同驱动模式下的速度响应特性曲线进行了仿真,制作样机并进行实验分析。

3) 实验结果表明,粘贴备用压电陶瓷组件的转子已经具备初步的振动特性,可以驱动电机正常运行,所建立的有限元模型可以用来预测电机的性能。

4) 实验过程中,分别在定子和转子单独驱动模式下同时驱动2组陶瓷片。当频率一致时,电机转速不一致,用同一频率进行驱动或调整到同一转速进行驱动时,电机都出现异响、减速、停转等现象。分析原因如下:定子和转子的工作模态固有频率相差较大,用驱动频率一致的电信号进行驱动,定子和转子上的行波波速相差较大,其相互作用阻碍了电机运转;当定子和转子上行波波速一致时,相差较大的驱动频率之间互相作用,2个振子各自的工作模态因为其他高频振动的存在而被影响,这说明转子结构还需进一步进行优化。

参 考 文 献

- [1] SHEN F H, PENG H M, ZHU P C, et al. Piezoelectric actuation combined with ultrasound for enhancing drug delivery in gastric mucosa phantom[J]. Smart Materials and Structures, 2024, 33(1): 015027.
- [2] DU P F, CHEN W S, DENG J, et al. A critical review of piezoelectric ultrasonic transducers for ultrasonic-assisted precision machining[J]. Ultrasonics, 2023, 135: 107145.
- [3] LI J, DENG J, ZHANG S J, et al. Developments and challenges of miniature piezoelectric robots: a review

[J]. Advanced Science, 2023, 10(36): 2305128.

- [4] NISHIZAWA U, TOYAMA S, OOHASHI T. Spherical ultrasonic motor for space[M]//BERAN J, BILEK M, ZABKA P. Advances in Mechanism Design II. Cham: Springer, 2016: 81-86.
- [5] JÜRÉNAS V, KAZOKAITIS G, VAŠKAS D. Ultrasonic motor with spherical rotor for nanosatellite orientation[C]//2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM). Bialystok, Poland: MSM, 2020: 1-5.
- [6] 赵淳生. 面向21世纪的超声电机技术[J]. 中国工程科学, 2002, 4(2): 86-91.
ZHAO Chunsheng. Ultrasonic motor techniques for 21st century[J]. Engineering Science, 2002, 4(2): 86-91.(in Chinese)
- [7] 杨淋, 赵淳生. 军民两用高性能超声电机的研发和产业化[J]. 军民两用技术与产品, 2018(9): 40-43.
YANG Lin, ZHAO Chunsheng. Research and industrialization of high performance ultrasonic motors for military and civilian use[J]. Dual Use Technologies & Products, 2018(9): 40-43.(in Chinese)
- [8] 赵淳生. 超声电机技术与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 23-75.
- [9] 曹鑫鑫, 赵盖, 李兴明, 等. 超声电机聚酰亚胺摩擦材料的设计与研究[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(4): 791-796.
CAO Xinxin, ZHAO Gai, LI Xingming, et al. Study and design of polyimide composites for ultrasonic motor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(4): 791-796.(in Chinese)
- [10] AN G Q, LI R, SONG K Y, et al. Degradation state identification for ceramic in ultrasonic motor based on morphological boundary span analysis[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2019, 19(3): 761-770.
- [11] ZENG S S, LI J B, ZHOU N N, et al. Improving the wear resistance of PTFE-based friction material used in ultrasonic motors by laser surface texturing[J]. Tribology International, 2020, 141: 105910.
- [12] WANG X Y, WANG W G, LI Y W, et al. Correlation between constitutive behavior and fracture performance of PZT ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2023, 38(7): 839.
- [13] 马野, 袁志丹, 曹金凤. ADINA有限元经典实例分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 89-90.



第一作者简介:杨淋,男,1981年9月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为超声电机及其系统的研发和产业化推广。

E-mail: yanglin@nuaa.edu.cn