

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.05.021

基于粒子群优化的磁悬浮鼓风机转子模型修正方法研究

刘飞¹,徐园平²,周扬²,周瑾²

(1. 山东省章丘鼓风机股份有限公司,山东 章丘 250299; 2. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:磁悬浮鼓风机系统中通过主动磁悬浮轴承和闭环反馈控制实现转子的稳定悬浮,精确的转子模型对于控制器的设计至关重要。针对磁悬浮转子部件的过盈配合导致理论和试验动力学特征之间存在的误差,采用以弯曲模态频率误差和模态振动匹配度为目标函数的模型修正方法,通过粒子群算法迭代优化转子过盈配合处的等效弹性模量和等效密度,从而保证建模误差最小化。通过模态测试验证,结果表明:修正后的模型在进行模态预测时的计算误差得到改善,前 3 阶模态频率相对误差均小于 5%,前 3 阶振型匹配度均大于 0.9。

关键词:磁悬浮鼓风机;主动磁悬浮轴承;柔性转子建模;模型修正;粒子群优化

中图分类号:TH133.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)05-0111-05

Research on Model Updating Method of Rotor in Magnetic Levitation Blower Based on Particle Swarm Optimization

LIU Fei¹,XU Yuanping²,ZHOU Yang²,ZHOU Jin²

(1. Shandong Zhangqiu Blower Co., Ltd., Zhangqiu 250299, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:As the rotor is stably levitated by active magnetic bearings and closed-loop feedback control in the magnetic levitation blower systems, the accurate rotor model is essential in the design of controller. Regarding the discrepancy between the theoretical and experimental dynamic characteristic due to the shrink-fit assembly of rotor, the model updating method with the objective function of the discrepancies between theoretical and experimental bending mode frequencies and modal assurance criterion is employed. In order to minimize the modeling error, the equivalent Young's modulus and density of shrink-fitted lamination are iteratively optimized based on the particle swarm optimization. The simulation analysis results validated by modal test show that the modified model in modal prediction is improved, with the relative error of the first three bending modes less than 5% and the modal assurance criterions more than 0.9.

Keywords: magnetic levitation blower; active magnetic bearing; flexible rotor modelling; model updating; particle swarm optimization

0 引言

主动磁悬浮轴承(AMB)因其无摩擦、无需润滑、主动可控等优点,被广泛应用于旋转机械中。磁悬浮鼓风机是一种将主动磁悬浮轴承技术融入传统风机的高效且节能的新型风机技术,在国内外均得到广泛应用^[1-2]。

对于磁悬浮鼓风机系统,转子的动力学特性起到关键的作用。转子模型通常通过有限元法(FEM)获得。对于梁单元结构,传递矩阵和有限元公式在理论上是等效的,但有限元公式通常在数值上更稳定^[3]。磁悬浮鼓风机系统中所采用的转子,通常由多个过盈配合的部件组装而成,因此

转子有限元模型计算出的弯曲模态频率和振型等转子动力学特性与实验结果之间存在误差。考虑过盈配合的磁悬浮转子表现出不均匀的材料特性,被认为是建模误差的来源^[4-5]。

转子动力学建模是结构设计的重要考虑因素,与实验结果相比,几乎总会导致一定程度的误差^[6]。这种误差产生的原因主要是未知的结构特征和简化建模^[7-9]。有限元模型修正技术用于调整模型的不确定参数,以误差最小为目标迭代优化出与实验数据更兼容、更接近物体动态特性的模型^[10],其中包括直接模型修正方法和迭代模型修正方法^[11],但这种方法修正得到的系统动力学方程可能没有物理意义。相比之下,迭代模型修

基金项目:国家自然科学基金项目(52475060、52275537)

第一作者简介:刘飞(1982—),男,安徽宿州人,高级工程师,硕士,研究方向为磁悬浮鼓风机/真空泵、离心鼓风机/真空泵,liufei@blower.cn。

正方法灵活地选择修正变量,并提供有物理意义的修正结果。迭代方法需要一个目标或误差函数来表示仿真和试验动力学特征之间的差异。通常采用优化算法迭代修正变量,从而最小化误差函数。

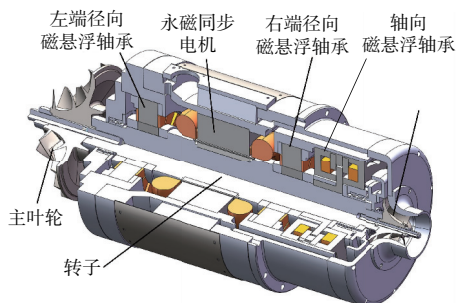
尽管模型修正方法已被广泛应用于其他工程领域,但将模型修正应用于磁悬浮转子的文献很少。LI 等^[12]将转子模型的前 5 个模态频率误差设置为误差函数,并更新了 8 个不确定刚度因子,但只考虑了模态频率,没有考虑数学振型,因此振型信息不可用于控制器设计。考虑转子过盈配合,ZHANG 等^[13]和 ZHOU 等^[14-16]将磁悬浮转子的热套部分等效成一种新材料,分别通过模态试验数据或者等效材料计算公式修正这种新材料的弹性模量和密度。高天宇^[17]在 ANSYS 平台建立三维转子有限元模型,基于模态试验,通过优化圆柱配合界面法向接触刚度因子,确定适合该过盈量下的最优值。

本文将磁悬浮鼓风机转子热套部分考虑为新材料,基于试验和仿真模态频率误差和振型匹配度构建误差目标函数,通过粒子群优化方法对材料的弹性模量和密度进行修正,得到准确转子有限元模型。

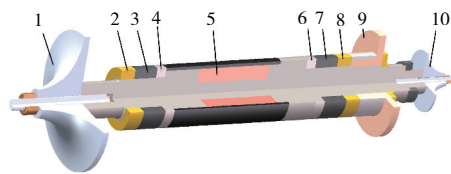
1 磁悬浮鼓风机

本文所采用的磁悬浮鼓风机系统如图 1(a)所示,整个系统包括转子、径向磁悬浮轴承、电涡流位移传感器、功率放大器、控制器、永磁同步电机等部分。转子由两个径向磁悬浮轴承和一个轴向磁悬浮轴承支承,永磁同步电机直接驱动转子旋转,额定转速为 24 000 r/min。

如图 1(b)所示,磁悬浮鼓风机系统中所采用的转子由数个组件构成,其中叠层硅钢片、隔磁环、传感器检测环、推力盘、电机护套等组件热套于转子芯轴上。主叶轮和散热叶轮通过螺栓连接装配在转子芯轴上。



(a) 磁悬浮鼓风机整机



1,10—叶轮螺栓连接;2,8—传感器检测环热套;3,7—叠层硅钢片热套;4,6—隔磁环热套;5—电机护套热套;9—轴向推力盘热套。

(b) 磁悬浮鼓风机转子

图 1 磁悬浮鼓风机示意图

2 转子有限元建模及模型修正

2.1 转子有限元模型

转子在建模过程中,每个梁单元存在 2 个节点和 8 个自由度,柔性转子的运动方程可以表示为

$$\mathbf{M}_R \ddot{\mathbf{q}} + (\mathbf{C}_R + \omega \mathbf{G}_R) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_R \mathbf{q} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}_R$ 、 $\mathbf{C}_R$ 、 $\mathbf{G}_R$ 和 $\mathbf{K}_R$ 分别为转子的质量矩阵、结构阻尼矩阵、陀螺矩阵和结构刚度矩阵; ω 为转子旋转角频率; $\mathbf{q}$ 为转子节点的广义坐标向量,其中 $\mathbf{q}_i = [x_i \ y_i \ \alpha_i \ \beta_i]$, $x_i(y_i)$ 、 $\alpha_i(\beta_i)$ 分别为第 i 个节点的 $x(y)$ 方向的横向位移及绕 $x(y)$ 轴的转动自由度。

如图 1(b)所示,本文所用的转子需要在芯轴上热套一些组件以配合磁悬浮轴承工作,包括磁悬浮轴承转子硅钢片叠片、位移传感器检测环、隔磁环等。对于磁悬浮轴承转子硅钢片叠片、电机护套、推力盘这种轴向长度比较长的组件,由于会为芯轴提供刚度,将其视作刚性圆盘处理是不合适的。可以将这些组件与其对应位置的芯轴一起等效为一种新材料,保持等效材料的外径不变,定义等效材料的弹性模量和密度的计算公式为

$$\begin{cases} E_{eq} = (r_1^2/r_2^2)E_1 + (1-r_1^2/r_2^2)E_2 \\ \rho_{eq} = (r_1^2/r_2^2)\rho_1 + (1-r_1^2/r_2^2)\rho_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: r_1 、 r_2 分别为芯轴和硅钢片组件外径; E_1 、 E_2 分别为芯轴和硅钢片组件的弹性模量; ρ_1 、 ρ_2 分别为芯轴和硅钢片组件的密度。

2.2 转子试验模态分析

由于转子组件与芯轴的热套过盈配合导致转子动力学特性变化却很难用有限元方法准确地描述,在建模过程中存在误差。采用基于试验模态数据的转子模型修正方法,针对 2.1 节转子建模中的材料等效弹性模量、材料等效密度进行修正。

模态试验是结构分析中常用的试验手段,可以弥补有限元建模分析中对连接方式及边界条件

等进行简化处理引起的计算偏差。因此,试验模态分析是了解结构动力学特性的最主要、最简单的方法,也是验证仿真模型准确性的一个检验标准^[18-19]。

在本文转子的模态试验中,采用多点激励单点响应的方法测量转子结构件的模态频率、振型以及频率响应。激励方式为力锤激励,采用加速度信号采集振动响应。模态试验的布置如图2(a)所示,转子被放置在两个充气轮胎上从而模拟转子自由-自由状态。如图2(b)所示,沿转子轴线划分17个测试节点,采用多通道信号分析仪(OROS-36,采样频率为51.2 kHz)采集力锤激励信号和转子加速度响应信号,并用N-Modal软件处理得到转子自由状态下的模态频率、模态振型。

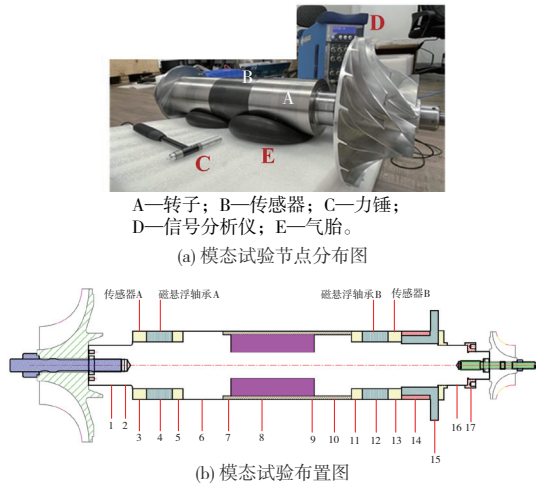


图2 转子模态试验

转子无叶轮装配时,试验前3阶弯曲模态频率及与之对应的仿真频率和相对误差,如表1所示。

表1 光轴试验与仿真前3阶弯曲模态频率及相对误差

阶次	试验值/Hz	仿真值/Hz	相对误差/%
1	973.15	961.82	1.16
2	2 132.67	2 013.11	5.61
3	3 461.01	3 188.71	7.87

从表1中可以看到,仿真计算转子弯曲模态频率数值与试验数据并不吻合,且相对误差随模态阶数的增加而增大,第2阶、第3阶弯曲模态频率的相对误差超过5%,上述误差主要是由于转子组件与芯轴间的热套过盈配合导致转子芯轴抗弯刚度产生了变化而产生的。为提高转子模型精

度,2.3节将基于试验模态的结果,对2.1节中转子模型热套配合轴段等效弹性模量和等效密度进行修正。

2.3 模型修正

本文将模态频率和转子振型共同作为模型修正的目标。在模型修正之前需要选取合理的模型变量参数用于模型修正,针对本文的转子模型,选取转子上热套的叠层硅钢片部分等效弹性模量和等效密度作为修正变量参数,变量的具体信息如表2所示。

表2 修正变量信息

修正变量名称	修正变量信息
e_1	叠层硅钢片热套部分等效弹性模量
e_2	叠层硅钢片热套部分等效密度
e_3	电机护套热套部分等效弹性模量
e_4	电机护套热套部分等效密度
e_5	推力盘热套部分等效弹性模量
e_6	推力盘热套部分等效密度

选定合理的模型变量参数后,需要设定修正误差函数。通过迭代优化修正变量,不断缩小仿真计算值与试验数据的误差,进而提高有限元模型精度。在设定误差函数前,首先引入振型相关系数(MAC)概念^[20-22]。振型相关系数被广泛应用于评价仿真模态振型与试验模态振型的匹配程度,定义为

$$M_{AC,ij} = \frac{|\varphi_{Ai}^T \cdot \varphi_{Xj}|^2}{(\varphi_{Ai}^T \cdot \varphi_{Aj})(\varphi_{Xi}^T \cdot \varphi_{Xj})} \quad (3)$$

式中: φ_{Ai} 为第*i*阶仿真模态振型; φ_{Xj} 为与之匹配的第*j*阶试验模态振型; $M_{AC,ij}$ 为第*i*阶仿真模态振型与第*j*阶试验模态振型的相关系数。MAC值体现了试验和仿真模态振型之间的相似程度,数值范围在0~1之间,数值越高,表明仿真与试验振型线性相关性越大。本文选用的修正误差函数如下所示。

$$e_{rr}(\varepsilon_{\omega i}, \varepsilon_{Mi}) = \sum_{i=1}^3 k_{\omega i} \varepsilon_{\omega i} + \sum_{i=1}^3 k_{Mi} \varepsilon_{Mi} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{\omega i} = |\omega(e)_{Ai} - \omega_{Xi}| / \omega_{Xi} \\ \varepsilon_{Mi} = \frac{1}{M_{AC}(e)_{ii}} - 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\omega(e)_{Ai}$ 为有限元模型计算得到的第*i*阶次的模态频率; ω_{Xi} 为通过模态试验获得的第*i*阶次的模态频率; $M_{AC}(e)_{ii}$ 为有限元模型计算获得的第

i 阶次的模态振型与模态试验获得的第 i 阶次模态振型之间的匹配系数; $\varepsilon_{\omega i}$ 和 $\varepsilon_{M i}$ 为模态频率误差与模态振型匹配误差; $k_{\omega i}$ 为模态频率误差的权重系数; $k_{M i}$ 为模态振型误差的权重系数。

降低误差函数值的本质是一个优化问题,本文选取粒子群优化对误差函数值进行优化。粒子群优化算法是一种进化计算,通过随机解迭代找到最优全局解^[23-24]。在粒子群算法中,每个潜在的优化问题解都被视为一个粒子。每个粒子都有一个位置和一个速度。位置将根据前一个最佳粒子和全局最佳粒子的经验进行更新。

经过迭代寻优,表 3 为修正后转子的前 3 阶模态频率,修正后转子的模态频率与试验值之间的误差有了较大的降低,前 3 阶弯曲模态理论和试验相对误差不超过 1%。修正结果表明,修正后的有限元模型在考虑的频率范围内与试验数据具有较高的吻合度。

表 3 修正光轴试验与仿真前 3 阶弯曲模态频率及相对误差

阶次	试验值/Hz	仿真值/Hz	相对误差/%
1	973.15	973.00	0.02
2	2 132.67	2 116.39	0.76
3	3 461.01	3 460.99	0.00

修正后转子的前 3 阶模态振型 MAC 值分别为 0.997、0.985、0.979,MAC 值在修正后趋近于 1,表明修正后的仿真与试验模态振型依然保持着较高的匹配度。数值仿真和模态试验得到的模态振型对比如图 3 所示,可以看到振型的匹配度较高,验证了转子模型的准确性。

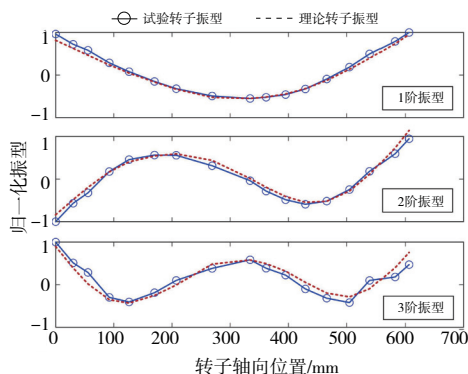


图 3 自由-自由状态下转子弯曲模态振型数值仿真与模态试验结果对比

3 修正后模型验证

为验证修正后模型的有效性,在光轴转子建

模的基础上,考虑主叶轮和散热叶轮的建模,并对数值仿真和模态试验结果(包括模态频率对比、振型对比以及频响对比)。

表 4 为考虑叶轮建模的转子前 3 阶模态频率,前 3 阶弯曲模态理论和试验相对误差不超过 5%。

表 4 叶轮转子试验与仿真前 3 阶弯曲模态频率及相对误差

阶次	试验值/Hz	仿真值/Hz	相对误差/%
1	701.45	705.91	0.64
2	1 304.62	1 345.27	3.12
3	2 078.06	2 139.53	2.96

考虑叶轮建模的转子前 3 阶模态振型 MAC 值在修正后趋近于 1,表明考虑叶轮建模的转子仿真与试验模态振型依然保持着较高的匹配度。仿真和模态试验得到的模态振型对比如图 4 所示,振型的匹配度较高,验证了鼓风机转子模型的准确性。

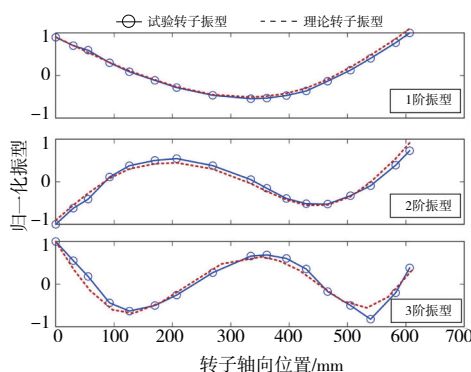


图 4 自由-自由状态下叶轮转子弯曲模态振型数值仿真与模态试验结果对比

综上,模态频率对比和振型对比均表明,修正后的转子有限元模型能够准确预测鼓风机转子的动力学特性。

4 结语

为了获得精确的转子数学模型,通常采用模型修正技术来优化转子有限元模型。针对磁悬浮转子热套过盈配合导致理论有限元计算值与模态试验之间的误差,本文采用同时考虑弯曲模态频率和振型的模型修正方法,修正变量选择了转子上的硅钢片、电机护套和轴向推力盘的热套部分等效弹性模量和等效密度,并采用粒子群算法优化了有限元转子模型。对叶轮转子模型试验和仿真的模态频率、模态振型、频率响应均进行对比。

结果表明,与实验数据相比,修正后的理论模型较为准确,前3阶模态频率相对误差均小于5%,前3阶振型匹配度均大于0.9,表明本文提出的模型修正方法对于磁悬浮转子精确有限元建模是有效的。

参考文献:

- [1] 阴宏宇,刘路,王跃方,等. 主动磁悬浮轴承在压缩机及鼓风机应用的技术进展[J]. 风机技术,2019,61(2):88-94.
- [2] 张志华,沙宏磊,俞天野,等. 进气状态对磁悬浮高速离心式鼓风机性能影响的研究[J]. 风机技术,2018,60(增刊1):19-23.
- [3] 李朝峰,孙伟,汪博,等. 机械结构有限元法基础理论及工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2020.
- [4] 韩晓明. 磁悬浮叶轮机械自激振动分析及其抑制研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2022.
- [5] 金超武,辛宇,周扬,等. 高温磁悬浮轴承-转子系统建模与动力学分析[J]. 西南交通大学学报,2024,59(4):746-754,822.
- [6] 吴华春,杨一鸣,宋春生,等. 高功率密度磁悬浮高速电机转子动力学建模与分析[J]. 中国工程机械学报,2024,22(1):89-93,100.
- [7] JALALI H, RAFIEIAN F, KHODAPARAST H H. Dynamic modeling and experimental verification on the rotor-armature structure of a steam turbine-generator unit[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 107: 802-814.
- [8] 展铭,郭勤涛,岳林,等. 使用应变模态和遗传算法的有限元模型修正方法[J]. 振动·测试与诊断,2018,38(5):974-978,1081-1082.
- [9] 展铭,郭勤涛,岳林,等. 基于多响应频响函数的加筋壁板结构模型修正[J]. 中南大学学报(自然科学版),2020,51(5):1228-1233.
- [10] 陈学前,沈展鹏,刘信恩. 考虑模型偏差的结构动力学模型修正[J]. 振动·测试与诊断,2018,38(2):273-277,417.
- [11] XU H C, QIN D T, LIU C Z, et al. An improved dynamic model updating method for multistage gearbox based on surrogate model and sensitivity analysis[J]. IEEE Access, 2021, 9: 18527-18537.
- [12] LI G X, LIN Z L, ALLAIRE P E, et al. Modeling of a high speed rotor test rig with active magnetic bearings[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2006, 128(3): 269-281.
- [13] ZHANG Y, ZHOU J, ZHANG Y B, et al. Modelling and vibration response of a magnetically suspended flexible rotor considering base motion [J]. Applied Mathematical Modelling, 2023, 118: 518-540.
- [14] ZHOU Y, XU Y P, ZHOU J, et al. Numerical and experimental investigations on the dynamic behavior of a rotor-AMBs system considering shrink-fit assembly[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 224: 111980.
- [15] ZHOU Y, ZHOU J, WANG Y Y, et al. Investigations on the modal vibration caused by bolted joint interface contact in the rotor-AMBs systems: modelling and experimentation[J]. Applied Mathematical Modelling, 2024, 134: 249-267.
- [16] ZENG K, ZHOU Y, XU Y P, et al. Modal vibration suppression for magnetically levitated rotor considering significant gyroscopic effects and interface contact[J]. Actuators, 2025, 14(2): 76.
- [17] 高天宇. 磁悬浮高速永磁发电机设计及综合优化技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [18] 于磊. 航空发动机转子系统动力学特性计算软件开发[D]. 南京:南京航空航天大学,2022.
- [19] 展铭. 螺栓连接结构动力学多响应模型修正与确认方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
- [20] ZHAN M, GUO Q T, YUE L, et al. Modeling and stochastic model updating of bolt-jointed structure[J]. Shock and Vibration, 2018(1): 8354249.
- [21] ZHAN M, GUO Q T, YUE L, et al. Finite element model updating of jointed structure based on modal and strain frequency response function [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(10): 4583-4593.
- [22] MIKOTA G. A model correlation criterion for rotors[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 441: 106-110.
- [23] DAI G B, JI G Y. Impacts of the weight coefficient and modal assurance criterion of large structures on observation station selection and optimization [J]. Journal of Vibroengineering, 2018, 20(1): 503-518.
- [24] 周策,白斌,叶楠. 自适应粒子群优化支持向量回归的工程系统可靠性预测[J]. 机械工程学报,2023,59(14):328-338.

收稿日期:2025-04-23