DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2026.04.018

磁性联轴器静态拉力及动态跟随性试验研究

彭森泉，李朋宾，张晓康，叶本远，刘廷武，吕红玉
（中国航发四川燃气涡轮研究院，四川 绵阳 621000）

摘　要：磁性联轴器作为一种利用永磁场实现非接触扭矩传动的装置，具有广泛应用前景，掌握其拉力变化及动态跟随特性至关重要。为此，文章针对一款磁性联轴器，搭建了静态拉力试验平台以及空载与负载动态跟随性测试试验平台，系统研究了不同安装间隙下的拉力变化规律以及不同转速下的空载与负载跟随特性。试验结果表明：当安装间隙由1.00 mm增大至6.25 mm时，磁性联轴器产生的拉力近似线性下降；间隙增大至25 mm时，水平与垂直安装下的拉力分别降至155 N和135 N，两种安装方式下的磁拉力随间隙变化规律高度一致。空载状态下，从动转子与主动转子间存在稳定的转差率，转速跟随性良好，且滑差波动较小；在不同转速稳定后，随着负载扭矩增大，从动转子能迅速调整至新的平衡转差率，动态响应快，滑差波动范围小，表现出良好的转矩自适应能力。研究结果为磁性联轴器的工程应用提供了试验依据。

关键词：磁性联轴器；静态拉力；转差率；转矩

中图分类号：TH133.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-128X(2026)04-0164-06

0　引言

磁性联轴器通过永磁体磁场与感应磁场的相互作用，实现主动转子与从动转子之间的非接触扭矩传递。与传统机械联轴器相比，它具备隔振、免润滑、过载保护等突出优点[1]，特别适用于对密封性要求苛刻的场合，如化工泵、真空设备和航空航天等领域。

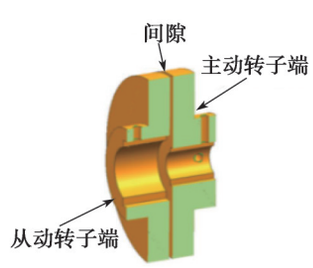
近年来，国内外学者对磁性联轴器的性能开展了大量研究[2-4]。在热特性与启动特性方面，文献[5]发现磁性联轴器工作时温升不超过25 K，额定负载下启动偏转角不超过2.6°。在结构参数影响方面，文献[6]通过数值模拟发现转矩随导体盘厚度增大先增后减；文献[7]研究了同轴磁力传动联轴器的结构特点，并基于最大静磁力矩公式分析了影响静磁力矩的关键因素。在新型结构与优化设计方面，文献[8]基于某四代核反应堆系统换料设备进行了非标磁性联轴器设计开发，发现电机启动时磁性联轴器存在滞后失速现象；文献[9]将三段式Halbach阵列应用于同轴磁性联轴器，基于模拟退火算法进行了优化设计，使永磁体的转矩密度提升53.9%，总体积减少18.4%；文献[10]将Halbach永磁阵列用于主从动盘，证明该阵列不仅无需导磁轭铁，而且在同等条件下能提高最大传输转矩；文献[11]通过对磁性联轴器多目标优化设计降低了生产成本及能耗。在工程应用方面，文献[12]将磁性联轴器用于水泥厂高转速风机，实现了隔振效果并降低了维修成本。在理论分析与建模方面，文献[13]采用解析与有限元相结合的方法精确量化了气隙磁场分布特性，为研究静态转矩和涡流损耗提供了重要基础；文献[14]系统比较了相同结构尺寸下笼型转子和实心转子两种异步磁力联轴器的传动性能，结果表明在相同几何条件下，笼型转子的转矩密度是实心转子的2.3~2.4倍。此外，随着新型磁性联轴器的不断出现，其扭矩性能持续提升，应用领域日益广泛[15-18]。

基金项目：国家稳定支持专项（GJCZ2-0103-04）
通信作者：彭森泉，男，硕士，主要从事航空发动机机械系统方面的研究；E-mail: 1805572574@qq.com
引用格式：彭森泉, 李朋宾, 张晓康, 等. 磁性联轴器静态拉力及动态跟随性试验研究[J]. 机车电传动, 2026(4): 164-169.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.04.018.
Citation：PENG Senquan, LI Pengbin, ZHANG Xiaokang, et al. Experimental study on static pull-force and dynamic following performance of a magnetic coupling[J]. Electric drive for locomotives,2026(4): 164-169.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2026.04.018.

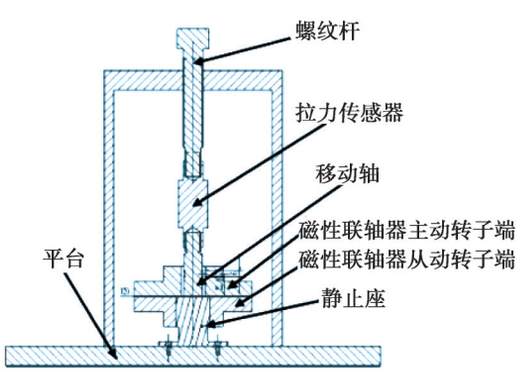
尽管上述研究取得了重要进展，但现有工作主要集中于静态转矩、结构优化和稳态性能分析，对磁性联轴器的动态传动特性关注不足。特别是空载运行特性，作为表征基础性能的关键指标，从动转子在空载下仅克服自身转动惯量及轴承摩擦，其转速响应直接反映了磁场耦合的刚度特性和能量传递效率，但目前缺乏系统的试验研究。此外，不同安装间隙下静态拉力的变化规律，以及不同转速条件下空载与负载的动态跟随特性，尚待深入探究。为此，本文针对一款磁性联轴器，开展静态拉力、空载和负载下的动态传动特性试验，一方面探究静态拉力随安装间隙的变化规律，另一方面揭示不同转速下空载及负载时的动态跟随特性。本项研究有助于深入理解磁性联轴器的空载转速特性，对于优化磁路设计、预测启动行为、评估系统能耗具有重要的理论意义和工程价值。

1　试验设计

磁性联轴器的三维模型如图 1(a)所示。为探究静态拉力随安装间隙的变化规律，设计了如图 1(b)所示的试验装置，该装置可实现水平和垂直方向的拉力测量。装置中，静止座通过螺钉固定于底座平台，拉力传感器安装于移动轴与螺纹杆之间。螺纹杆的外螺纹规格为M20×1.0，每旋转一周可驱动磁性联轴器产生 1 mm 的轴向位移，最大调节位移量为 20 mm。测量时，将测得的拉力值减去磁性联轴器及移动轴的自重，即可得到不同安装间隙下的实际拉力值。



(a) 磁性联轴器三维模型



(b) 拉力测量结构设计图

图 1　磁性联轴器三维模型和拉力测量结构设计图

Fig. 1　3D model of the magnetic coupling and structural design for pull-force measurement

研究团队设计并搭建图 2 所示的试验装置，用于测量磁性联轴器在空载与负载工况下的动态跟随特性。该装置中，工艺轴承采用角接触球轴承（FAG-HCB71906-C-T-P4S-U/L）和滚子轴承（NU1006），其中角接触球轴承安装于靠近磁性联轴器从动转子一侧，两轴承均采用脂润滑，磁性联轴器的安装间隙固定为 2 mm。试验时，由电机驱动电机主轴旋转，并通过磁性联轴器带动测功机主轴旋转，试验于环境温度下进行。

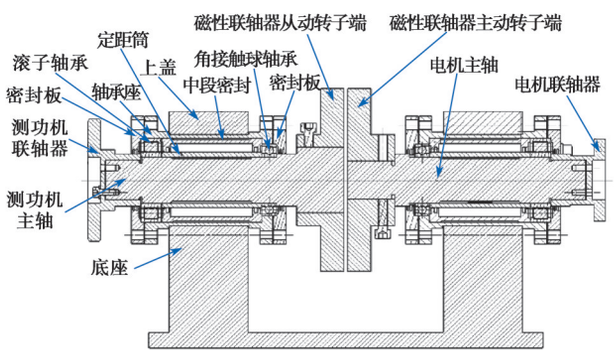


图 2　转速测量结构设计图

Fig. 2　Structural design for rotational-speed measurement

在空载动态跟随性试验中，转速分别设定为 6 000 r/min、6 500 r/min 、7 000 r/min、7 500 r/min、8 000 r/min、8 500 r/min 和 9 000 r/min。每档转速稳定后至少保持 250 s，记录主动转子和从动转子的转速数据。在负载动态跟随性试验中，转速分别设定为 6 000 r/min、6 500 r/min 、7 000 r/min、7 500 r/min、8 500 r/min 和 9 000 r/min，每档转速稳定后，由测功机对从动转子施加负载，扭矩从 0 逐步增大至 4 N·m。在此过程中，通过对比从动转子与主动转子的转速以判断传扭能力，并记录扭矩值、主动转子转速和从动转子转速。

2　试验结果及分析

2.1　静态拉力测试

磁性联轴器在不同安装间隙下的磁拉力测试结果如图 3 所示。结果表明，水平与垂直两种安装方式下的磁拉力随间隙变化的规律基本一致：当安装间隙由

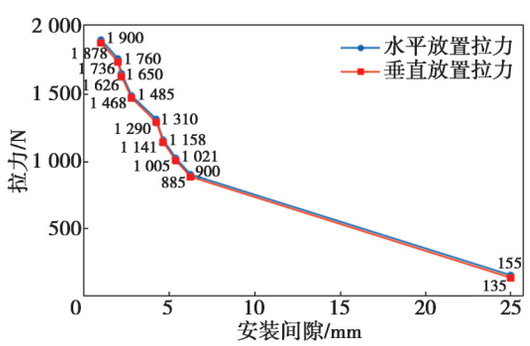


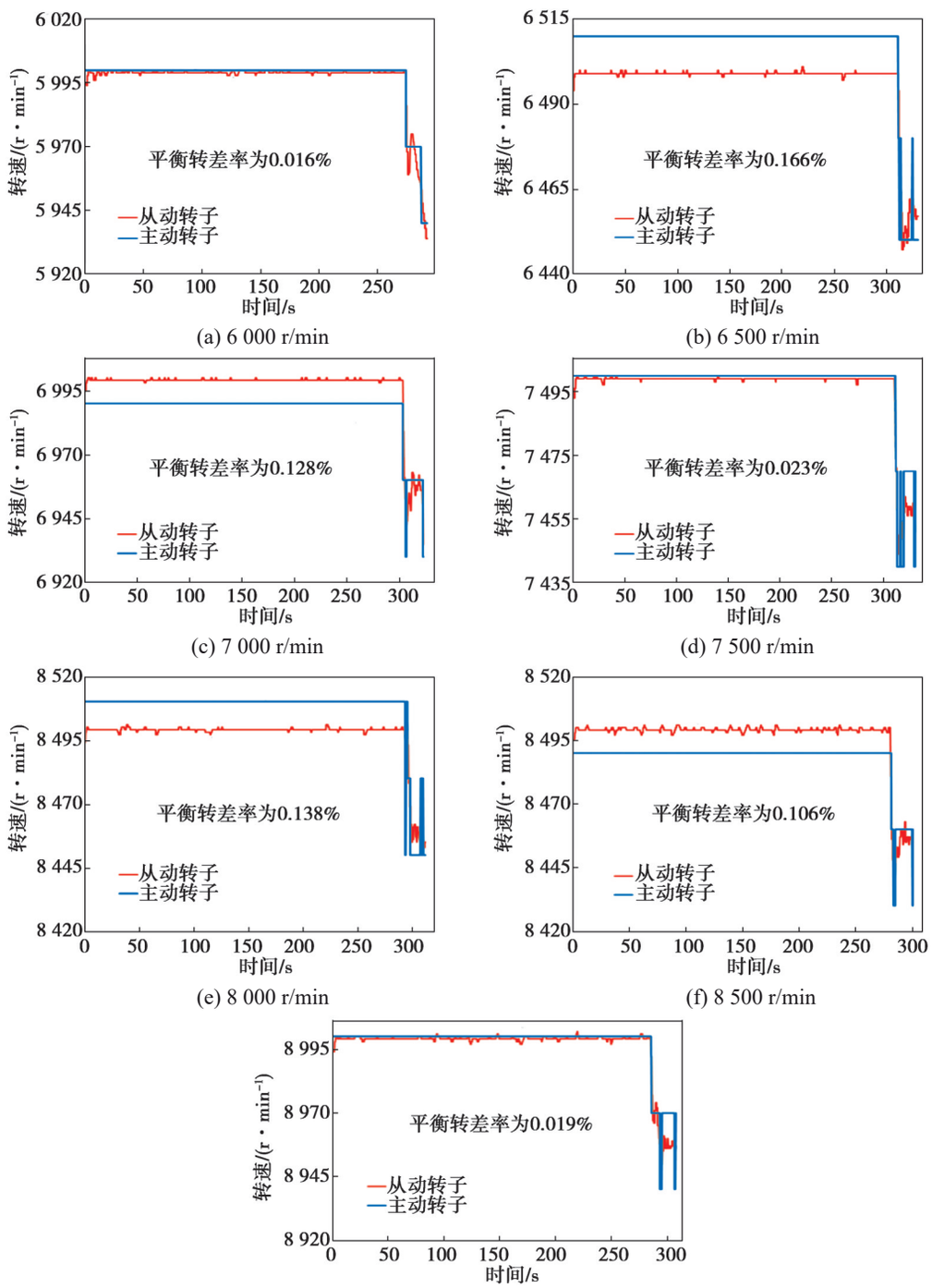
图 3　不同安装间隙下的静态拉力测试结果

Fig. 3　Test results of static pull-force for different mounting clearances

1.00 mm 增大至 6.25 mm 时，磁拉力呈近似线性下降，其中水平安装拉力从 1 900 N 降至 900 N，垂直安装拉力从 1 878 N 降至 885 N；当间隙进一步增大至 25 mm 时，水平与垂直安装下的拉力分别降至 155 N 和 135 N。由此可知，为使该联轴器提供不低于 1 000 N 的拉力，需将其安装间隙控制在 5 mm 以内。

2.2 空载动态跟随性试验

在空载条件下，磁性联轴器的主动转子和从动转子在不同转速下达到稳态后的测试结果如图 4 所示。由图 4 可知，各转速稳定后，从动转子与主动转子之间均存在稳定的转差率，且转速跟随性良好，其中 6 000 r/min 工况下的平衡转差率最小（0.016%），6 500 r/min 时最大（0.166%）。这是由于磁性联轴器依赖主、从动转子间的磁场耦合传递转矩，即使空载，从动转子自身的机械摩擦（轴承、密封件等）及风阻损耗仍需较小的驱动转矩才能维持稳态旋转，该微小转矩需通过一定的转差角（即转差率）产生。当转差率为零时，无法传递任何转矩；当存在转差时，从动转子导体中感应出涡流，涡流与磁场相互作用产生转矩。此外，当主动转子减速时，从动转子能立即响应跟随，进一步表明该磁性联轴器在空载条件下具有良好的转子跟随性。



(a) 6 000 r/min　(b) 6 500 r/min

(c) 7 000 r/min　(d) 7 500 r/min

(e) 8 000 r/min　(f) 8 500 r/min

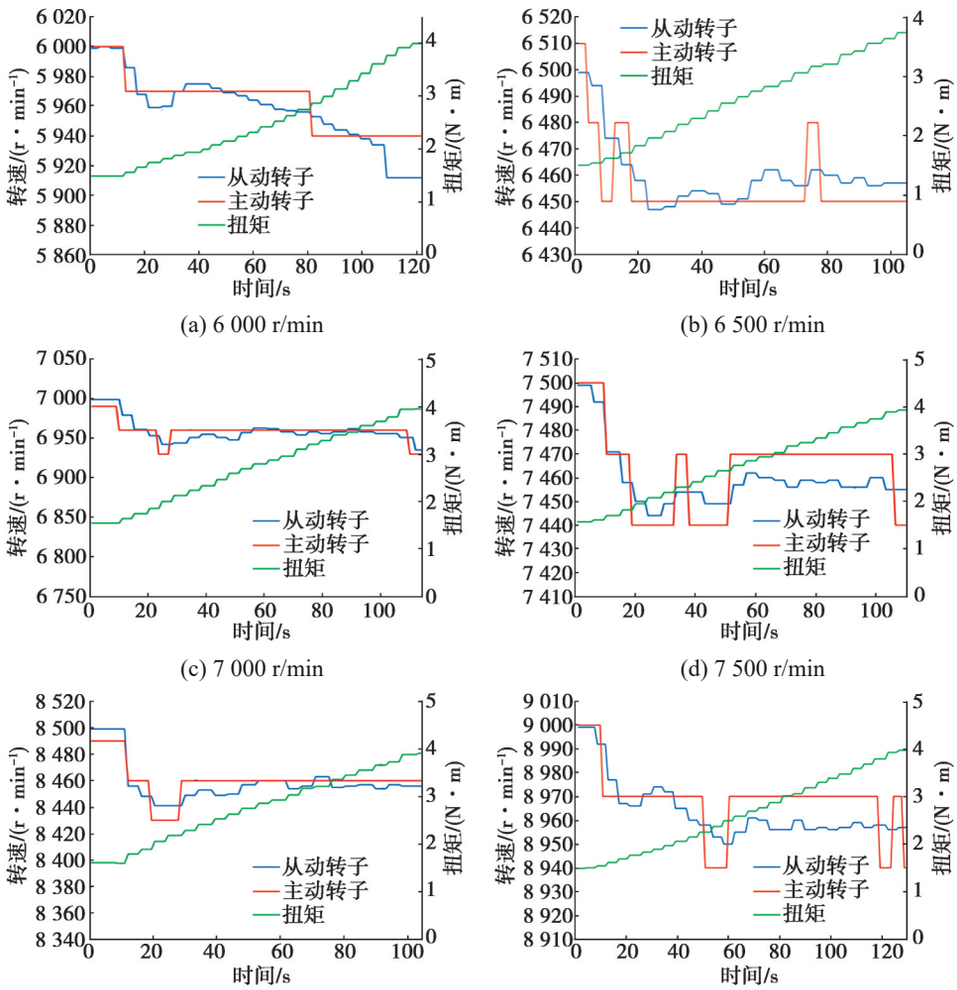
(g) 9 000 r/min

图 4　空载动态跟随性试验结果

Fig. 4　Test results of no-load dynamic following performance

2.3　负载动态跟随性试验

在不同转速下，待磁性联轴器的主、从动转子达到稳态后，将测功机扭矩逐步增大至4 N·m，由此测得6种不同稳定转速下的负载动态跟随性结果如图5所示。



(a) 6 000 r/min　(b) 6 500 r/min

(c) 7 000 r/min　(d) 7 500 r/min

(e) 8 500 r/min　(f) 9 000 r/min

图5　负载动态跟随性试验结果

Fig. 5　Test results of on-load dynamic following performance

当负载扭矩（即测功机扭矩）增大至4 N·m时，磁性联轴器的主、从动转子转速均出现小幅下降，但两者变化趋势一致，表明其在负载下具有良好的动态跟随性。具体而言，在扭矩开始增大的瞬间，转速出现突降，尤其在6 500 r/min和7 500 r/min时较为明显：主动转子分别下降0.90%和0.80%，从动转子分别下降0.49%和0.72%。

在整个加载过程中，各转速下的转速降幅详见表1。由表1可知，转速降幅总体随转速升高呈减小趋势，且主、从动转子响应同步。这是因为随着负载扭矩增大，驱动电机转速下降，导致系统转差率增大；该变化促使转子感应电流增强，进而提升电磁扭矩直至与负载扭矩达到新的平衡，电机遂稳定运行于较低转速（较高转差率）下。在此过程中，从动转子能快速响应主动转子的转速变化，迅速抵达新的平衡点，其动态响应迅速且滑差波动小。这表明该磁性联轴器具备优异的转矩自适应能力，再次验证了其良好的负载动态跟随性能。

表1　扭矩增大至4 N·m过程中的主动转子和从动转子转速降幅情况

Table 1　Speed reduction of the driving and driven rotors during the torque ramp-up to 4 N·m

转速/(r·min⁻¹)	主动转子降幅	从动转子降幅	试验温度环境
6 000	1.0%	1.5%	室温
6 500	0.9%	0.7%	
7 000	1.8%	1.6%	
7 500	0.8%	0.7%	
8 500	0.7%	0.6%	
9 000	0.7%	0.5%	

3　结论

为系统研究某型磁性联轴器的传动特性，本文分别搭建了静态与动态试验平台，重点考察其静态安装

性能，以及空载与负载条件下的动态行为。主要结论如下：

①磁性联轴器在静止状态下，其内部磁场产生的轴向拉力随安装间隙的增大呈单调减小趋势。值得注意的是，无论是采用水平安装方式还是采用垂直安装方式，拉力随间隙的变化趋势高度一致，说明磁场拉力的衰减规律不受安装姿态影响，具有良好的一致性与可预测性。

②当安装间隙固定为2 mm时，联轴器所产生的磁力较强。在空载稳态运行条件下，从动转子与主动转子之间存在一个稳定且数值较小的转差率，表明从动转子能够紧密跟随主动转子的运动。同时，转差率的波动幅度小，说明在该间隙下系统运行平稳，滑差控制良好。

③在不同转速的稳态工况下，逐步增加负载扭矩时，从动转子能够迅速响应，自动调整至新的平衡转差率，以适应外界负载的变化。该调整过程动态响应迅速，且在新的稳态下，滑差的波动范围始终维持在较小水平，表明该磁性联轴器具备优异的转矩自适应能力，能够在宽转速和变负载范围内保持稳定、高效的传动性能。

参考文献：

[1] Wang J X, Yao G, Tao Y Z. Nonlinear dynamics and vibration reduction properties of a quasi-zero stiffness magnetic isolator under translational and rotational coupling excitation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 232: 112758.

[2] Brun M, Cortés F, Elejabarrieta M J. Electromagnetic and structural dynamic coupling in a two-degree-of-freedom system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2026, 623: 119550.

[3] Lei M X, Lu Y T, Luo Z T, et al. A novel magnetic-thermal coupling model considering air thermophysical properties for temperature rise and performance analysis of hub motor [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2025, 210: 109586.

[4] Sun X H, Chen S E, Zhao T F. Enhancing coupling coefficient and efficiency in wireless power transfer: a comparison of ferrite block and magnetic composite particle material [J]. High-speed Railway, 2026, 4(2): 76-88.

[5] 郑富磊, 靳峰雷, 杨孔雳, 等. 磁性联轴器试验设计与验证[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(2): 43-45.
Zheng Fulei, Jin Fenglei, Yang Kongli, et al. Experimental design and research of magnetic coupling[J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(2): 43-45.

[6] 王强, 何浩, 廖芸, 等. 磁性联轴器转矩特性分析和研究[J]. 河南科技, 2022, 41(14): 38-42.
Wang Qiang, He Hao, Liao Yun, et al. Analysis and research on torque characteristics of magnetic coupling[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2022, 41(14): 38-42.

[7] 余法松. 同轴型磁性联轴器最大静磁力矩影响因素分析[J]. 中国设备工程, 2021(12): 69-71.
Yu Fasong. Analysis of influencing factors on maximum static magnetic torque of coaxial magnetic coupling[J]. China Plant Engineering, 2021(12): 69-71.

[8] 杨平汉. 核电设备用磁性联轴器设计开发及其工程应用[J]. 中国机械, 2024(6): 34-38.
Yang Pinghan. Design and development of magnetic coupling for nuclear power equipment and its engineering application[J]. Machine China, 2024(6): 34-38.

[9] 秦清海, 汲柏良. 基于三段式Halbach阵列的同轴磁性联轴器优化设计[J]. 微特电机, 2022, 50(4): 25-30.
Qin Qinghai, Ji Boliang. Optimization design of coaxial magnetic coupling based on three-stage Halbach array[J]. Small & Special Electrical Machines, 2022, 50(4): 25-30.

[10] 祁长璞, 赵建兴, 郑延延. 一种用于水下推进器的Halbach阵列磁性联轴器设计[J]. 微电机, 2017, 50(8): 80-83.
Qi Changpu, Zhao Jianxing, Zheng Yanyan. Design of Halbach array magnetic coupling for underwater propeller[J]. Micromotors, 2017, 50(8): 80-83.

[11] 张勇, 何朝辉, 郭嘉. 基于ANSYS Workbench的磁力泵磁性联轴器的多目标优化设计[J]. 机电工程, 2017, 34(5): 487-490.
Zhang Yong, He Chaohui, Guo Jia. Muti-object optimization of magnetic coupling of magnetic driving pump based on ANSYS Workbench[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(5): 487-490.

[12] 张文功, 朱先均, 郑亚娜. 磁性联轴器在水泥厂高转速风机上的应用[J]. 水泥, 2020(4): 42-45.
Zhang Wengong, Zhu Xianjun, Zheng Yana. Application of magnetic coupling in high speed fan of cement plant[J]. Cement, 2020(4): 42-45.

[13] Li L B, Chen T, Li W X. Analysis of the air gap magnetic field in cylindrical magnetic couplings based on mathematical and finite element approach[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 27067.

[14] Yang J Y, Ye X F. Comparative analysis of transmission performance of radial asynchronous magnetic couplings with different structures[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2025, 20(5): 3417-3429.

[15] Yue K, Wang L M, Chen S, et al. Simulation and experimental study of a high-compact circular Halbach-array magnetic coupling for enhanced torsional vibration isolation in rotating machinery[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2025, 237: 113088.

[16] 钱兴良, 曹志亮, 黄鹏, 等. 开关磁阻起动发电机静扭矩特性仿真与试验验证[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2022, 35(6): 57-60.
Qian Xingliang, Cao Zhiliang, Huang Peng, et al. Static torque characteristic simulation and testing for switched reluctance motor/generator[J]. Gas Turbine Experiment and

Research, 2022, 35(6): 57-60.

[17] 孙震, 祝天一, 陈少俊, 等. 端面密封装置泄漏分析与结构改进设计[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2023, 36(2): 45-50.
Sun Zhen, Zhu Tianyi, Chen Shaojun, et al. Leak analysis and structural improvement design of end face seal device [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2023, 36(2): 45-50.

[18] 向永君. 磁性联轴器的特点及其选型[J]. 中国设备工程, 2019(6): 49-50.
Xiang Yongjun. Characteristics and selection of magnetic coupling[J]. China Plant Engineering, 2019(6): 49-50.

Experimental study on static pull-force and dynamic following performance of a magnetic coupling

PENG Senquan, LI Pengbin, ZHANG Xiaokang, YE Benyuan, LIU Tingwu, LYU Hongyu

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang, Sichuan 621000, China)

Abstract: Magnetic couplings utilize permanent magnetic fields for non-contact torque transmission and have broad application prospects; therefore, understanding their pull-force variation and dynamic following performance is essential. To this end, experimental platforms were established for static pull-force tests and dynamic following performance tests under both no-load and on-load conditions for a specific magnetic coupling. The study systematically investigated pull-force variation with mounting clearance and evaluated no-load and on-load following performance across a range of rotational speeds. Experimental results showed that, as the mounting clearance increased from 1.00 mm to 6.25 mm, the pull force generated by the magnetic coupling decreased in an approximately linear manner; when the clearance increased to 25 mm, the pull force decreased to 155 N and 135 N for horizontal and vertical installation, respectively, with very similar clearance-dependent trends for both installation orientations. Under no-load conditions, a stable slip ratio remained between the driven rotor and the driving rotor, demonstrating good speed-following performance with only minor slip fluctuations. After stabilization at different rotational speeds, increasing the load torque caused the driven rotor to adjust quickly to reach a new equilibrium slip ratio, indicating excellent torque adaptability with rapid dynamic response and slip fluctuations controlled within small ranges. These research findings provide an experimental basis to support engineering applications of magnetic couplings.

Keywords: magnetic coupling; static pull-force; slip ratio; torque

收稿日期：2026-02-25
责任编辑：文　韬