

核电厂反应堆主泵推力轴承启动阻力矩测试方法

张健鑫, 谷继品, 陈树明, 王明政, 刘小军

Test Method on Starting Drag Torque of the Thrust Bearing of the Reactor Main Pump in Nuclear Power Plant

Zhang Jianxin, Gu Jipin, Chen Shuming, Wang Mingzheng, and Liu Xiaojun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.02.0232>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华龙一号某机组主泵推力轴承优化改进分析

Analysis of Reactor Coolant Pump Thrust Bearing Modification of an HPR1000 Unit

核动力工程. 2021, 42(5): 218–221

核主泵推力轴承断冷却水工况磨损机理研究

Study on Wear Mechanism of Thrust Bearing of Nuclear Main Pump in Cooling Water Loss Condition

核动力工程. 2021, 42(4): 214–221

核电厂主泵轴振异常分析

Analysis for Abnormal Shaft Vibration of Main Coolant Pump in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(1): 167–171

百万千瓦级核电站轴封型主泵整机集成试验验证优化方案研究

Reserch of Optimal Integrated Verification Test Program for Shaft Seal Reactor Coolant Pump of 1000 MW Nuclear Power Plant

核动力工程. 2020, 41(1): 113–116

核电厂主泵倒流工况转子动态特性分析与研究

Analysis and Research on Rotor Dynamic Characteristics of Nuclear Power Plant Reactor Coolant Pump under Reverse Flow Condition

核动力工程. 2018, 39(3): 134–137

核电厂用变频泵振动故障分析及治理

Analysis and Countermeasures of Vibration for Variable Frequency Pump in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2019, 40(1): 105–109



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)02-0232-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.02.0232

核电厂反应堆主泵推力轴承启动 阻力矩测试方法

张健鑫¹, 谷继品¹, 陈树明¹, 王明政¹, 刘小军²

1. 中国原子能科学研究院, 北京, 102413; 2. 湖南崇德工业科技有限公司, 湖南湘潭, 411102

摘要: 为了获得核电厂反应堆主泵推力轴承在寿期内的极限启动阻力矩, 确保执行事故余热排出功能的辅助电机可以在极端工况启动主泵, 提出了推力轴承启动阻力矩(指启动瞬间的阻力矩)的测试方法并设计了试验装置, 采用正交试验法对影响推力轴承启动阻力矩的 3 个影响因素(粗糙度、比压、润滑油温)进行研究, 采用单因素法测试不同停机时间(指静止加载时间)对推力轴承启动阻力矩的影响, 研究表明 3 个影响因素在规定的控制范围内变化时, 启动阻力矩变化较小, 而停机时间对推力轴承启动阻力矩影响较大。基于试验确定的极限启动阻力矩开展辅助电机设计, 通过了推力轴承样机与主泵样机的反复启停试验验证。本研究可为辅助电机启动阻力矩的设计提供准确可靠的输入。

关键词: 核电厂; 主泵; 推力轴承; 正交试验; 阻力矩

中图分类号: TL353 **文献标志码:** A

Test Method on Starting Drag Torque of the Thrust Bearing of the Reactor Main Pump in Nuclear Power Plant

Zhang Jianxin¹, Gu Jipin¹, Chen Shuming¹, Wang Mingzheng¹, Liu Xiaojun²

1. China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413, China;
2. Hunan SUND Industrial and Technological Co., Ltd., Xiangtan, Hunan, 411102, China

Abstract: In order to obtain the ultimate starting drag torque of the thrust bearing of the reactor main pump in nuclear power plant during its lifetime, and ensure that the auxiliary motor performing the accident residual heat removal function can start the main pump under extreme conditions, a test method of the starting drag torque (which refers to the drag torque at the moment of starting) of the thrust bearing was proposed and a test device was designed. The orthogonal test method was used to study the three influencing factors (roughness, specific pressure and lubricating oil temperature) that affect the starting drag torque of the thrust bearing. The single factor method was used to test the influence of different downtime (which refers to the static loading time) on the starting drag torque of the thrust bearing. The results show that the starting drag torque changes little when the three factors change within the specified control range, but the downtime has a great impact on the starting drag torque of the thrust bearing. The design of the auxiliary motor was carried out based on the ultimate starting drag torque determined by the test, and has been verified by repeated start-stop tests of the thrust bearing prototype and the main pump prototype. The research in this paper can provide accurate and reliable input for the design of the starting drag torque of the auxiliary motor.

Key words: Nuclear power plant, Main pump, Thrust bearing, Orthogonal test, Drag torque

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-02-25

作者简介: 张健鑫(1989—), 男, 工程师, 现从事核电厂反应堆关键设备设计工作, E-mail: zzxwth@163.com

0 引言

主泵是核电厂反应堆的核心设备，反应堆运行时主泵为冷却剂提供驱动压头，确保一回路冷却剂的循环以冷却堆芯；反应堆停堆时主泵持续运转维持冷却剂的熔融状态。主泵电机分为主电机与辅助电机，为双绕组结构，辅助电机执行事故余热导出的重要安全功能，因此需要辅助电机在最极端的工况条件下具备启动零转速主泵的能力。主泵推力轴承为油润滑轴承，为转子提供轴向支撑。通常核电主泵中设有顶油装置，能够在主泵启停阶段加压润滑油，以减轻推力轴承的动压效应压力负荷^[1]。为了防止高压顶油装置降低主泵的可靠性，辅助电机没有配备高压顶油装置，而是采用应急柴油机电源，且尺寸、重量受到严格限制，导致其启动能力有限，这就要求主泵的启动阻力矩尽可能地小，并且在开展辅助电机设计时，主泵启动阻力矩的设计输入必须足够准确，从而既保证辅助电机的启动能力相对启动阻力矩具备足够的安全系数，但又不会因为过高的安全系数造成辅助电机设计难度过大。

影响辅助电机启动主泵的主要阻力矩来自主泵推力轴承的推力瓦与推力头摩擦副产生的阻力矩，为了给辅助电机的设计提供较为准确的输入，重点是要获得较为准确的推力轴承启动阻力矩。常用的推力轴承启动阻力矩测试方法是通过模拟推力瓦的比压，在实验室测量出推力瓦材料（巴氏合金）的静摩擦系数，进而计算出推力轴承的启动阻力矩。然而，由于主泵推力轴承采用偏支轴承，而实验室通常采用面对面摩擦^[2-3]，这就造成实验室测量计算得到的启动阻力矩与真实情况往往存在较大的偏离。

考虑到辅助电机执行的重要安全功能以及对设计输入准确度的高要求，需要对反应堆主泵推力轴承启动阻力矩的测试方法进行研究，并通过研究各影响因素对启动阻力矩的影响趋势，确定影响启动阻力矩大小的各因素工程控制范围。

1 启动阻力矩测试方法

推力轴承摩擦力矩的测试方法主要包括扭轴法、平衡力法、能量转化法，根据推力轴承的尺寸范围检测精度选择不同的测试方法^[4-5]。扭轴法

具有体积较小、检测精度较高等优点，不仅可以测量静态阻力矩，也可以测量动态阻力矩，并可通过测量系统与计算机实现自动测量、数据图形自动处理等功能^[6-7]。因此本文选择扭轴法测量推力轴承的摩擦力矩。常用的扭轴法通常使用电机带动旋转轴，采用标准扭矩仪测量扭矩，但该仪器难以准确测得推力轴承的启动阻力矩，主要有2个原因：①因电机从静止到启动的瞬间十分短暂，扭轴法采用的标准扭矩仪因采样频率有限无法采集到启动瞬间的最大扭矩值；②因采用电机启动，扭矩仪测得的扭矩值包含了电机对主轴的惯性力矩，而辅助电机采用变频启动，该惯性矩在实际工况中不需要克服。

为了解决这2个问题，专门定制了高采样精度的扭矩仪，并与示波器联通，从而可以给出启动瞬间扭矩的变化曲线，将启动瞬间测得的最大扭矩作为需要克服的启动阻力矩。对于如何剔除启动瞬间电机对主轴的惯性力矩，可以考虑2种方式：①采用变频启动，通过变频器控制电机启动加速度，将启动瞬间电机对主轴的惯性力矩降到最低；②采取人工盘车，也能有效地降低惯性力矩。考虑到试验成本问题，本文采用人工盘车的方式来剔除启动瞬间电机对主轴的惯性力矩。

2 测试试验台

影响推力轴承启动阻力矩的主要因素为摩擦副材料特性、表面粗糙度、表面膜及摩擦副之间的润滑状况、接触面比压、停机时间、摩擦环境温度^[8-13]。如表1所示，测试试验台将逐一对这些影响因素进行模拟。

表1 测试试验台模拟因素

Tab. 1 Factors Simulated by the Test Bench

影响因素	模拟方式
摩擦副材料特性	采用和真实情况完全相同的推力瓦
表面粗糙度	模拟真实粗糙度
表面膜及摩擦副之间的润滑状况	采用相同牌号润滑油
接触面比压	模拟真实比压
停机时间	模拟真实停机时间
摩擦环境温度	模拟真实润滑油温

试验装置主要组成零部件有：油箱（机架）、推力头、推力瓦组件、主轴、圆柱滚子轴承和润

滑油、液压油缸、扭矩传感器等。主要组成零部件结构如图 1 所示，试验台架如图 2 所示。

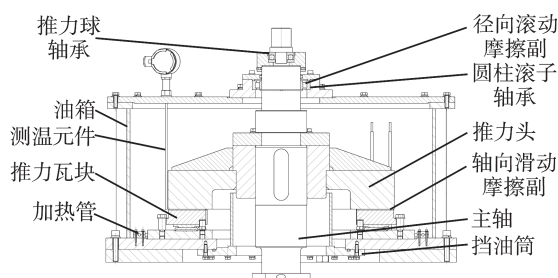


图 1 试验装置主要组成零部件结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of the Main Components of the Test Device

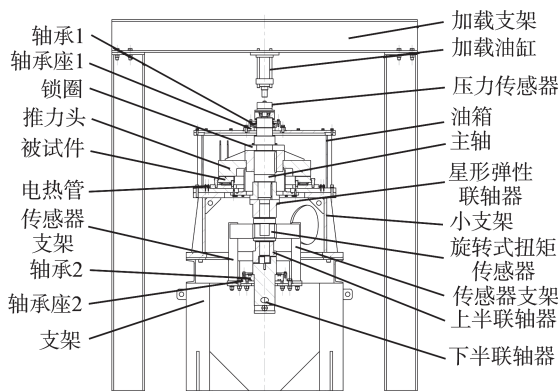


图 2 试验台架示意图

Fig. 2 Schematic Diagram of Test Bench

试验装置通过液压油缸油压变化从主轴顶端对主轴施加向下的不同轴向载荷，通过扭矩传感器与示波器实时采集记录启动瞬间的扭矩值变化。主轴安装的径向支撑由处于加载器内部的径向圆柱滚子轴承和试验装置顶端的径向圆柱滚子轴承共同承担，轴向支撑由推力头、推力瓦组件承担。2 个径向轴承的摩擦系数为圆柱滚子轴承旋转摩擦副摩擦系数，分别为 0.0008~0.0012、0.001~0.0015，相对于推力头与推力瓦之间摩擦副摩擦系数（一般为 0.1~0.3）小很多，因此，在试验中 2 处的摩擦阻力可忽略不计。

3 不同影响因素对推力轴承启动阻力矩的影响

在主泵寿期内，有 4 个影响因素会随着主泵的运行、地震的发生、轴向载荷设计值与真实值的偏差、操作员的反应时间而发生变化，偏离设计值，分别为推力瓦粗糙度、比压、润滑油温、

停机时间。其中推力轴承的推力瓦粗糙度设计值为 0.8，极限值在 0.4~1.6；比压设计值为 1.37 MPa，极限值在 1.10~1.71 MPa；润滑油温设计值为 50℃，极限值在 35℃~65℃；停机时间在 0~2 h。在主泵寿期内，当需要辅助电机启动主泵执行事故余热导出功能时，辅助电机的启动能力应能克服主泵任何可能出现的启动阻力矩。为了确定主泵寿期内推力轴承启动阻力矩的最大值，需要研究 4 个影响因素对启动阻力矩的影响。

根据压水堆推力轴承设计经验，停机时间越长，推力头与推力瓦之间的分子吸附力越强，启动所需克服的阻力矩越大，通常需要高压顶油装置。此外，停机时间由核电厂操作员的反应时间决定，不确定性较高，需要给出启动阻力矩随停机时间的变化曲线。因此本文首先对表面粗糙度、比压、润滑油温的上限值、设计值、下限值 3 个水平启动阻力矩进行研究，如果 3 个影响因素水平变化对启动阻力矩影响较大，则进一步细化 3 个因素水平，直到找出启动阻力矩最大时对应的 3 个因素值；如果 3 个影响因素水平变化对启动阻力矩影响较小，则无需继续细化，选择启动阻力矩最大时对应的 3 个因素值进一步开展停机时间对启动阻力矩影响的研究，最终确定推力轴承启动阻力矩的最大值。

3.1 粗糙度、比压、润滑油温对启动阻力矩的影响

正交试验法是研究处理多因素试验的一种科学方法，其在实际经验与理论认识的基础上，利用一种排列整齐的规格化表——正交表来安排试验。由于正交表具有“均衡分散、整齐可比”的特点，能在考察的范围内选出代表性强的少数试验条件，做到均衡抽样。均衡抽样能够通过少数的试验次数找到最好的生产和科研条件，即最优的方案^[4]。本文通过正交试验对推力轴承启动阻力矩的影响因素进行研究。

将正交试验停机时间固定为 5 min，作为第 4 个影响因素，采用 $L_9(3^4)$ 正交表开展试验，分析表面粗糙度、比压、润滑油温度对启动阻力矩的影响。将启动阻力矩折算为扭矩系数，计算公式为：扭矩系数=启动阻力矩/（载荷×推力瓦偏

支半径)。每组试验条件开展5次试验,取平均值进行研究,正交试验结果如表2所示。

表2 正交试验结果

Tab. 2 Results of the Orthogonal Test

序号	粗糙度(Ra)/ μm	润滑油温度/ $^{\circ}\text{C}$	比压/MPa	停机时间/min	平均扭矩系数
1	0.4	35	1.10	5	0.245
2	0.4	50	1.37		0.250
3	0.4	65	1.71		0.245
4	0.8	65	1.10		0.240
5	0.8	35	1.37		0.224
6	0.8	50	1.71		0.247
7	1.6	50	1.10		0.257
8	1.6	65	1.37		0.247
9	1.6	35	1.71		0.248

对正交试验结果进行极差分析,确定3个影响因素对推力轴承启动阻力矩的影响^[15-16]。分析结果如下:粗糙度、比压、润滑油温度在控制范围内变化时,启动阻力矩变化较小,无需进一步细化3个因素水平;最优组合(启动阻力矩最大的组合)为推力瓦 Ra 取 $1.6\ \mu\text{m}$ 、润滑油温度 50°C 、比压 $1.1\ \text{MPa}$;3个因素对启动阻力矩影响大小排列顺序为:粗糙度>润滑油温>比压。

3.2 停机时间对扭矩系数的影响

选取上述启动阻力矩最大的组合进行不同停机时间的试验,每个试验测试5次,得到不同停机时间下的扭矩系数,如图3所示。

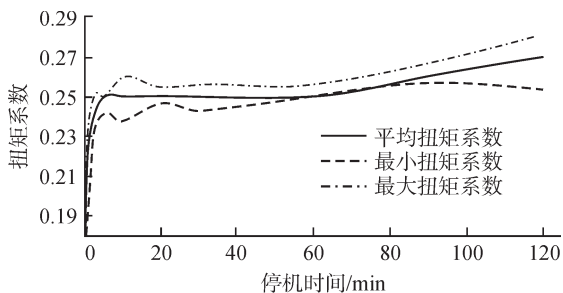


图3 扭矩系数与停机时间关系曲线

Fig. 3 Relationship Curve between Torque Coefficient and Downtime

从图3可以看出,停机时间对推力轴承启动扭矩系数的影响较大,随着停机时间的延长,平均扭矩系数逐步增大,在0~60 min内平均扭矩系数基本稳定在0.25以内,最大值为0.26,超

过60 min后平均扭矩系数随停机时间显著增大。为了进一步确保反应堆运行安全性,将允许的停机时间确定为60 min,即将需要辅助电机启动的事故工况下操作员的反应时间规定为60 min。

在试验测得的60 min内极限扭矩系数0.26的基础上乘以1.1倍的安全系数,最终选择扭矩系数0.29作为推力轴承启动阻力矩的计算输入,该值可以有效包络推力轴承在寿命内可能出现的粗糙度、润滑油温度、比压、停机时间。

在主泵推力轴承1:1样机制造完成后,开展了2000次推力轴承启停可靠性试验,测得的启动扭矩系数均不超过该设计值。同时开展了各种停机时间的辅助电机启动主泵试验,均能保证辅助电机正常启动主泵。因此,本文研究的推力轴承启动阻力矩测试方法为辅助电机启动阻力矩的设计提供了准确可靠的输入。

4 结论

本文研究了推力轴承启动阻力矩的测试方法,搭建了试验台并实现了启动阻力矩的测量。粗糙度、润滑油温度、比压对推力轴承启动阻力矩影响较小,影响大小排列顺序为:粗糙度>润滑油温度>比压。停机时间对启动阻力矩影响较大。本研究方法可为辅助电机的设计提供准确可靠的输入。

参考文献:

- [1] 邓啸,王岩,邓礼平,等.核电主泵失电惰转时推力轴承动态特性分析[J].核动力工程,2017,38(S2):50-54.
- [2] 甄洪声,刘辉.用斜面法精确测量静摩擦系数[J].现代制造技术与装备,2009(3):73-74.
- [3] 梁锋,于川江,段渝秦.静摩擦系数的测定[J].表面技术,1991(1):44-47.
- [4] COUSSEAU T, GRAA B, CAMPOS A, et al. Friction torque in grease lubricated thrust ball bearings[J]. Tribology International, 2011, 44(5): 523-531.
- [5] 谢黎明,马家起,靳岚,等.成对角接触球轴承动刚度分析[J].轴承,2019(12):11-15.
- [6] 邱明,陈龙,李迎春.轴承摩擦学原理及应用[M].北京:国防工业出版社,2012:162-163.
- [7] 赵静.微型轴承摩擦力矩的测试研究[D].上海:上海交通大学出版社,2006:11-22.
- [8] 盛选禹,雒建斌,温涛铸,等.石墨-金属摩擦副的静摩擦系数[J].润滑与密封,1999(3):11-13.

- [9] OBATA F, KONISHI D, YAMAMOTO K, et al. Effects of surface roughness on friction coefficient of plate bricks (part1): sliding characteristics at room temperature[J]. *Journal of Japanese Society of Tribologists*, 2002, 47(5): 377-383.
- [10] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012: 241-243.
- [11] ZHU B, WANG C G, CAI X. Research of influence factors on friction coefficient of carbon fiber reinforced composite[J]. *Materials Science & Engineering*, 2002, 20(3): 361-363.
- [12] 贾利晓, 张永振, 牛永平, 等. 环境因素对步进摩擦系数的影响[J]. *摩擦学学报*, 2011(2): 114-117.
- [13] ZENG C, TAO Z, PAN W, et al. Research of the influence factors of the friction coefficient between PTFE and stainless steel plate of FPE[J]. *Earthquake Resistant Engineering & Retrofitting*, 2009, 7(3): 167-173.
- [14] 于慧春, 殷勇, 李欣, 等. 正交试验设计中正交表的特点及正交的意义浅析[J]. *农产品加工*, 2020(5): 91-97.
- [15] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010(9): 52-55.
- [16] 王玄静. 正交试验设计的应用及分析[J]. *兰州文理学院学报(自然科学版)*, 2016, 30(1): 17-22.

(责任编辑: 邱彦)