

启停对推力轴承可靠性与阻力矩的影响测试

张健鑫, 张东辉, 谷继品, 郭晓娴, 陈树明, 刘小军

Testing of Influence of Start-Stop on the Reliability and Drag Torque of the Thrust Bearing

Zhang Jianxin, Zhang Donghui, Gu Jipin, Guo Xiaoxian, Chen Shuming, and Liu Xiaojun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.03.0173>

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

基于FPGA的反应堆保护系统可靠性建模与分析

Reliability Modeling and Analysis of Reactor Protection System Based on FPGA

核动力工程. 2021, 42(5): 173–177

考虑应力松弛和辐照影响的堆内构件压紧弹簧疲劳可靠性评估方法

Fatigue Reliability Evaluation Method for Hold Down Spring of Reactor Vessel Internals Considering Stress Relaxation and Irradiation

核动力工程. 2021, 42(6): 141–147

基于PSA技术的核电厂数字化仪控系统可靠性设计及应用

Reliability Design and Application of NPP Digital I&C System Based on PSA

核动力工程. 2019, 40(2): 99–104

动静叶栅间隙对钠冷快堆二回路泵压力脉动特性的影响

Effect of Clearance of Rotor–Stator Cascade on Pressure Fluctuation in Secondary Circuit Coolant Pump for Sodium–Cooled Fast Reactor

核动力工程. 2020, 41(1): 127–133



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)03-0173-06; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.03.0173

启停对推力轴承可靠性与阻力矩的影响测试

张健鑫¹, 张东辉¹, 谷继品¹, 郭晓娴¹, 陈树明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: 为了测试反复启停对钠冷快堆(SFR)一回路主泵推力轴承可靠性和阻力矩的影响, 采用适用于小样本的分散系数法设计了可靠性统计方案, 制造了3套巴氏合金推力瓦和1台上部组合轴承样机, 设计并搭建了试验台, 测试了启动阻力矩随停机加载时间的变化情况, 模拟推力轴承的真实情况并开展了反复启停试验。试验研究表明, 启动阻力矩均会随着停机加载时间的延长而不断增大; 反复启停对推力瓦的磨损寿命影响较小, 置信度0.9时, 推力轴承启停125次不发生失效的可靠度超过0.99996; 反复启停会影响推力轴承的阻力矩, 随着启动次数的增多, 推力轴承的阻力矩呈缓慢上升趋势, 证明开展主泵电机启动能力设计时, 必须要考虑启停次数的影响。本文研究可为主泵电机启动能力设计提供参考。

关键词: 钠冷快堆(SFR); 主泵; 推力轴承; 可靠性; 阻力矩

中图分类号: TL353 **文献标志码:** A

Testing of Influence of Start-Stop on the Reliability and Drag Torque of the Thrust Bearing

Zhang Jianxin¹, Zhang Donghui¹, Gu Jipin¹, Guo Xiaoxian¹,
Chen Shuming¹, 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 test the effect of repeated start-stop on the reliability and drag torque of the thrust bearing of the primary circuit main pump in sodium cooled fast reactor (SFR), a reliability statistical scheme was designed by using the dispersion coefficient method suitable for small samples, three sets of Babbitt thrust pads and one upper combination bearing prototype were manufactured, a test bench was designed and built, the change of starting drag torque with shutdown loading time was tested, repeated start-stop tests were carried out by simulating the real situation of the thrust bearing. The results show that the starting drag torque increases with the increase of shutdown loading time. The repeated start-stop has little effect on the wear life of the thrust pads, and the reliability of the thrust bearing start-stop for 125 times without failure exceeds 0.99996 when the confidence level is 0.9. The repeated start-stop has effect on the drag torque of the thrust bearing, and the drag torque of the thrust bearing shows a slow upward trend with the increase of starting times. It is proved that the effect of the start-stop times must be factored in the design of starting capacity of main pump motor. This study can provide a reference for the design of starting capacity of main pump motor.

Key words: Sodium cooled fast reactor, Main pump, Thrust bearing, Reliability, Drag torque

0 引言

一回路主泵是钠冷快堆(SFR)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; 反应堆停堆时, 主泵持

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-07

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

续运转来维持冷却剂的熔融状态。主泵是反应堆内唯一连续运转的旋转设备，是反应堆的心脏，有着极高的可靠性和安全性要求。一回路主泵的关键部件之一是油润滑的上部组合轴承^[1]，包括1个推力轴承和1个径向轴承，推力轴承的作用是承担泵运行过程中转子产生的全部轴向载荷，径向轴承的作用是承担主泵转子上部的径向载荷。推力轴承和径向轴承同时起到对转子部件的支撑作用，确保转子部件平稳运转。

根据推力轴承的故障模式影响分析（FMEA）、故障树分析（FTA）、相似产品运行业绩可知，推力轴承的主要失效机理为推力瓦的磨损。依据经典的斯特里贝克（Stribeck）曲线^[2-4]，在推力瓦结构、推力负荷、润滑剂粘度确定的前提下，随着转速的提高、液膜厚度的增加，液体动压推力轴承的润滑状态会从边界润滑转变为混合润滑，当液膜厚度增加到足够大时转变为流体润滑。根据推力轴承的性能计算及试验验证，推力轴承正常运行时处于流体润滑状态，摩擦副的表面被连续流体润滑膜完全分隔开，可认为不会发生机械磨损。而在启停阶段，推力轴承处于边界润滑和混合润滑状态，推力头与推力瓦存在直接接触，因此判定推力瓦的机械磨损只发生在推力轴承的启动和停机阶段。

推力瓦的瓦面材料为巴氏合金，反复启停会造成巴氏合金的不断磨损，进而可能导致推力轴承烧瓦，影响主泵的安全运转，因此需要测试反复启停对推力瓦磨损寿命的影响。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^[5-6]。SFR主泵推力轴承没有设置高压顶油装置，反复启停可能会改变瓦面状态，进而影响推力轴承的启动阻力矩，因此需要测试反复启停对推力轴承启动阻力矩的影响，以确认在经历反复启停后，主泵电机的启动能力是否满足要求。

1 可靠性统计方案

推力轴承反复启停试验周期长、成本昂贵，在有限的时间和经费约束下，只能充分利用已有的先验信息，采用小样本方法进行评估。大量文献及统计数据表明，与机械部件疲劳、磨损、腐蚀等耗损型失效相关的寿命分布大多可用对数正

态分布或威布尔分布来表征。针对寿命分布服从对数正态分布或威布尔分布的机械部件，基于分散系数法开展寿命试验方面的研究已较为成熟，具有明确理论依据与计算方法，且已具备较多的工程应用经验^[7-9]。

推力轴承启停阶段的累积磨损量通常认为服从对数正态分布^[10]。由于试验样本较少，为保证足够的设计裕量，取全部样本中的最短寿命进行寿命评估，采用基于子样最差寿命的分散系数设计试验方案，计算公式为^[11-12]：

$$S_F = (N_{0.13}/N_{99.87}) \left[\phi^{-1} \left(1 - \sqrt[1-\gamma]{1-\gamma} + \phi^{-1}(\kappa) \right) \right]^6 = \frac{N}{N_{R,\gamma}} \quad (1)$$

式中， S_F 为分散系数， $N_{0.13}/N_{99.87}$ 为受试产品的寿命散度，即可靠度为0.13%与可靠度为99.87%的可靠寿命之比； $\phi^{-1}(x)$ 为标准正态分布下侧分位数； n 为试验样品数； γ 为置信度要求； R 为可靠度要求； $N_{R,\gamma}$ 为给定置信度、可靠度下的寿命要求； N 为每个样品所需试验时间。

对数正态分布的寿命散度受产品寿命分布的标准差影响，寿命散度越大，所需的试验时间越长。由于推力瓦磨损有较高的安全风险，对推力轴承任务可靠性的影响也最大，需要严格考核推力轴承推力瓦的磨损寿命，因此选取文献[13]中寿命散度的最大值10作为试验方案的寿命散度。

试验样品数越少，每个样品所需的试验时间越长，在开展可靠性验证试验时，试验样品数量不少于2台/套^[14]。为了研究推力瓦磨损寿命的分散性，试验选择3个样品开展测试，制造了与产品推力轴承相同材料、相同工艺、相同尺寸的3套巴氏合金推力瓦，以及1台与产品完全相同的上部组合轴承样机。在开展启停试验前，上部组合轴承样机已经通过全性能试验验证，各项指标满足设计要求。

根据主泵设计工况及可靠性分配，推力轴承运行5a的启停次数不超过125次，不发生失效的可靠度要求为0.99996，置信度要求为0.9。将以上参数带入式(1)，得到推力瓦启停寿命的分散系数为4.65。分散系数为试验时间（启停次数）与寿命要求（125次）的比值，为了验证反复启停对推力瓦磨损寿命的影响，每个样品需要启停582次，如果3个样品均不发生失效，则证明推力瓦的启停寿命满足给定的可靠性指标要求。

2 失效判据

满足以下任何一条判据，均认为推力轴承失效：

(1) 启停试验过程中，推力轴承启动阻力矩过大，造成电机无法启动主泵，即停机加载 30 min，扭矩系数 (μ) 大于 0.3。

μ 的计算公式为：

$$\mu = M / (FL) \quad (2)$$

式中， M 为启动阻力矩； F 为推力轴承载荷； L 为推力瓦偏支半径。

依据如下：根据压水堆推力轴承设计经验，停机加载时间越长，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。根据 SFR 运行工况，主泵推力轴承停机加载时间通常不超过 30 min，为了研究停机加载时间对启动阻力矩的影响，分别测试了停机加载时间 5、10、20、30 min 时的启动阻力矩，其变化曲线如图 1 所示。由图 1 可看出，启动阻力矩随停机加载时间的延长呈现出不断增大的趋势，因此，为了确保电机可以启动主泵，将启动阻力矩过大的失效判据对应的停机加载时间确定为 30 min。

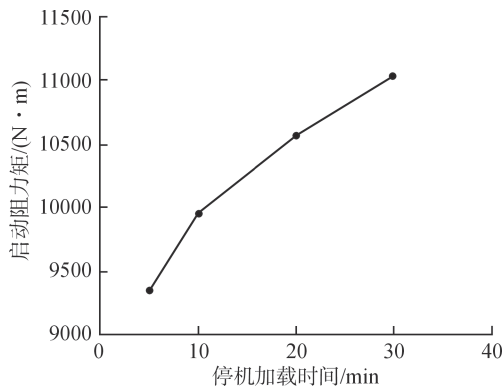


图 1 启动阻力矩与停机加载时间关系曲线

Fig. 1 Relationship Curve between Starting Drag Torque and Shutdown Loading Time

(2) 启停试验过程中，轴瓦温度变化值超过 10℃。

(3) 启停试验结束后进行拆解检查，瓦面出现过量磨损、烧瓦或明显的材料迁移现象。

(4) 拆解检查后，将经过反复启停的推力瓦回装到推力轴承开展性能验证，推力瓦温度不满足设计要求（推力轴承的主要性能指标包括温度、

振动、油膜刚度，其中油膜刚度通过计算得到，振动需要在整泵试验时测试才有意义，因此启停试验后的性能验证只验证瓦温指标）。

3 试验

3.1 试验剖面

大量研究表明^[15-17]，影响推力轴承磨损和启动阻力矩的因素有很多，试验剖面应尽可能模拟推力轴承的真实情况，以确保试验结果的可信性。

3.1.1 环境剖面 工作环境与试验环境的对比情况见表 1，试验润滑油温选取了工作环境的最高油温，其他试验环境条件与真实工作环境几乎相同。

表 1 工作环境与试验环境对比

Tab. 1 Comparison of Working Environment and Test Environment

参数	工作环境	试验环境
环境温度/℃	0~45	
相对湿度（25℃时）/%	≤80	
润滑油牌号	ISO VG46	
油温/℃	40~53±2	53±2
润滑油过滤精度/μm	20	
油位高度/mm	380	380±10

3.1.2 转速、载荷剖面 通过模拟主泵的启动与惰转曲线，确定了推力轴承启动和停机的转速曲线，启动和停机曲线如图 2 所示。

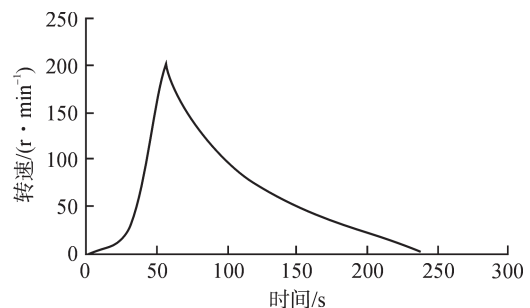


图 2 启动和停机曲线

Fig. 2 Curve of Start and Stop

由于每套推力瓦的启停高达 582 次，考虑到试验设备连续工作需要检修等问题，将启停试验分为 6 个周期，每个周期包括 97 次启停。试验将推力瓦的比压设定为 1.37 MPa，以模拟推力轴承在实际工作中的最大比压。

3.2 试验台架

为了满足环境剖面、转速、载荷剖面以及监测需求,设计并搭建了试验台架,试验台架主要由以下6个系统构成,其结构简图如图3所示。

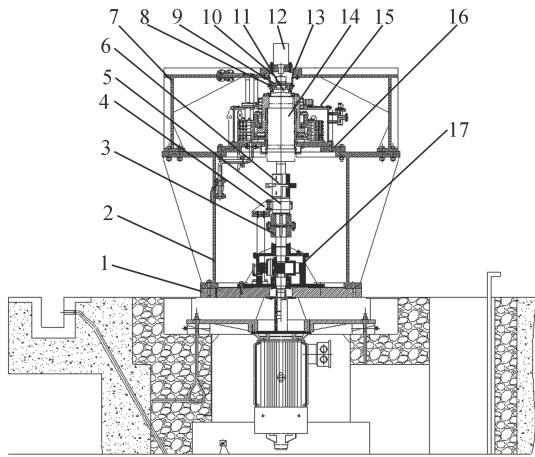


图3 试验台架
Fig. 3 Test Bench

1—底板; 2—轴承支架; 3—联轴器; 4—支架; 5—扭矩传感器; 6—联轴器; 7—加载支架; 8—推力调心滚子轴承; 9—托架; 10—称重传感器; 11—推力轴; 12—液压缸; 13—托架固定板; 14—模拟轴; 15—上部组合轴承; 16—转接支撑板; 17—减速器

3.2.1 驱动系统 通过变频器驱动1台315 kW的4级电机,电机位于台架的最下方,与地井地面平台连接。由于驱动电机启动力矩偏小,在电机上方配置减速箱(减速比为6.261)以增加启动力矩。电机与减速箱之间通过花键联轴器连接,用以传递扭矩。减速箱的上端轴与被试件模拟轴连接,中间配有专门定制的高采样精度扭矩传感器,实时采集转速和扭矩参数,并可捕捉启动阶段的最大扭矩,即推力轴承的启动阻力矩。通过可编程逻辑控制器(PLC)控制变频器,调节启动和停机过程中的电机转速,以模拟主泵启动和惰转曲线。

3.2.2 加载系统 加载系统位于整个台架的顶端,通过加载支架将液压油缸产生的轴向推力传递给模拟轴,模拟轴再通过推力头将载荷传递到推力瓦。加载油缸与模拟轴之间配置了1个高性能的滚动轴承,用以传递轴向载荷并对转子进行径向约束。加载油缸和加载轴承之间配置称重传感器,用以测试推力瓦的轴向载荷。

3.2.3 测控系统 台架上的电机(包括驱动电机、油泵电机、冷却水泵电机)都由同一套集成

式系统控制,该系统可以同时采集试验过程中的所有相关数据,对数据进行分类后显示在监测面板上,该系统还可根据监测的数据对试验台的运行状态进行评估,建立逻辑保护,针对载荷过大、油温过高、瓦温过高以及油位过低的情况进行报警或者自动停机,以保证试验系统的安全可靠。

3.2.4 加热系统 为了保证试验过程中油温稳定在 $53\pm 2^{\circ}\text{C}$,在上部组合轴承油箱中设置加热器和控制器,控制器可根据油温控制加热速度,以保证油箱中的油温满足试验要求。

3.2.5 冷却系统 上部组合轴承的循环冷却水来自外置冷却水箱,冷却回路中设计加热器与电动阀,可为上部组合轴承提供所需温度和流量的冷却水。

3.2.6 过滤系统 油站中设置过滤装置,过滤精度为 $20\ \mu\text{m}$,试验过程中定期检测油品,以保证清洁度满足试验要求。

4 试验结果

4.1 推力瓦磨损情况

试验前对瓦面状况进行检测,确认瓦面无划痕和磨损痕迹。试验中实时监测、记录轴瓦温度、润滑油温度、壳体振动、扭矩、载荷等参数。根据推力轴承设计经验,在试验过程中如果推力瓦温度变化超过 10°C ,或者扭矩值、振动值出现明显异常,则可判定推力轴承发生故障。3套瓦启停582次均未出现上述现象,说明推力轴承在连续启停过程中运转正常。

582次启停试验结束后,对推力轴承进行拆解检查,3套瓦的表面形貌非常相似,瓦面均无明显磨损痕迹,也无明显材料迁移现象。瓦面划痕为磨合期动静磨合导致,属于推力轴承的正常运转现象,而且必要的磨合会让推力轴承工作在更加理想的状态。

完成拆解检查后,分别将3套瓦回装到上部组合轴承,开展上部组合轴承的性能验证试验,上部组合轴承各项指标均满足设计要求,3套瓦试验过程中温度变化都没有超过 10°C ,而且3套瓦的温度差异性较小,相对偏差不超过5%,相对于反复启停前的性能验证试验,各项指标均无明显变化,表2给出了其中一套瓦反复启停试验前后性能试验的对比情况。

表2 反复启停前后性能试验对比

Tab. 2 Comparison of Performance Test before and after Repeated Start-stop

参数	启停试验前	启停试验后
转速/(r·min ⁻¹)	742	
比压/MPa	1.37	
冷却水温/℃	40.3	40.7
冷却水流量/(L·min ⁻¹)	138.8	140.1
油位/mm	380	385
轴瓦温度/℃	55.6	56.9
推力瓦温度/℃	54.5	56.3

试验结果表明, 经历寿期内 5 a 的启停次数, 推力轴承不发生磨损失效的可靠度为 0.99996, 置信度为 0.9。说明在给定启停次数的要求下, 主泵的反复启停对推力轴承的磨损寿命影响较小。

4.2 启动阻力矩变化情况

高采样精度扭矩传感器实时采集记录扭矩信息, 可将捕捉到的每次启动最大扭矩值作为推力轴承的启动阻力矩, 每套瓦分别收集到 582 个启动阻力矩值。

取每个启停周期 (97 次启停) 中的最大扭矩系数绘制曲线, 得到最大扭矩系数随启停周期的变化曲线, 如图 4 所示, 每个周期 3 套瓦的平均扭矩系数变化曲线如图 5 所示。可以发现, 随着启停次数的增多, 最大扭矩系数和平均扭矩系数呈现缓慢增大的趋势, 平均扭矩系数变化曲线线性较好, 最大扭矩系数变化曲线线性较差, 这是因为启动阻力矩并不是单调增大的, 而是局部反复波动, 但是总体上呈缓慢上升趋势, 最大扭矩

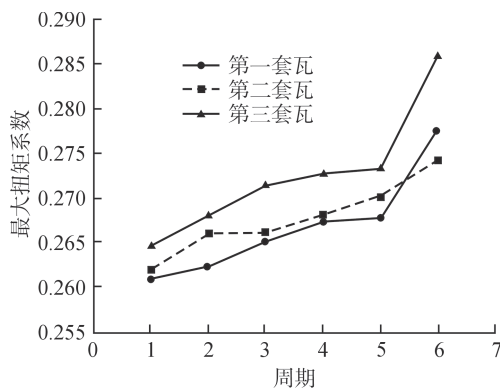


图4 最大扭矩系数变化曲线

Fig. 4 Variation Curve of Maximal Torque Coefficient

矩系数是随机出现的, 因此平均扭矩系数线性较好, 最大扭矩系数线性较差。同时可看出, 3套瓦的扭矩系数分散性较好, 相对偏差不超过 5%。瓦面表面形貌并没有发生肉眼可见的明显变化, 但是扭矩系数呈缓慢增加趋势, 说明瓦面发生了不断增加的微量磨损与材料迁移。以上研究表明在开展电机启动能力设计时, 必须要充分考虑启停次数对启动阻力矩的影响, 避免启动能力不足造成主泵无法启动, 为此可以考虑增加 10% 的安全系数。

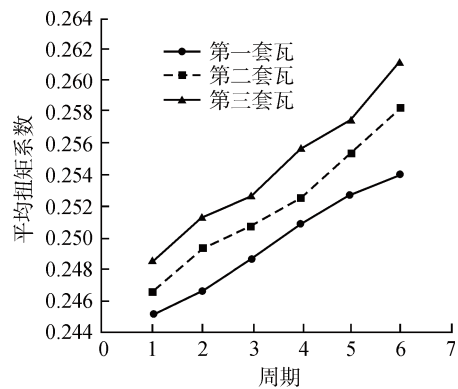


图5 平均扭矩系数变化曲线

Fig. 5 Variation Curve of Average Torque Coefficient

5 结论

本文通过试验法研究了反复启停对推力轴承磨损可靠性和启动阻力矩的影响, 研究结果表明:

(1) 在给定的启停次数要求下, SFR 回路主泵的反复启停对推力轴承的磨损可靠性影响较小。

(2) 随着启停次数的增多、停机加载时间的延长, 推力轴承阻力矩呈现缓慢增大的趋势。

(3) 在开展主泵电机设计与验证时, 需要充分考虑启停次数、停机加载时间对推力轴承启动阻力矩的影响, 避免启动能力不足造成主泵无法启动。

参考文献:

- [1] 赵雪岑, 刘立志, 邓啸, 等. 屏蔽泵水润滑推力轴承寿命评估方法研究[J]. 核动力工程, 2019, 40(S2): 104-107.
- [2] FARAON I C, SCHIPPER D J. Stribeck curve for starved line contacts[J]. *Journal of Tribology*, 2007, 129(1): 181-187.
- [3] LU X B, KHONSARI M M, GELINCK E R M. The

- Stribeck curve: experimental results and theoretical prediction[J]. *Journal of Tribology*, 2006, 128(4): 789-794.
- [4] 方群玲, 孙虎儿, 刘维雄. 不同载荷下滑块轴承润滑状态的Stribeck曲线研究[J]. *机械传动*, 2016, 40(1): 124-126.
- [5] 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.
- [6] 蔡龙, 王伟光. 核主泵无顶油惰转推力轴承磨损研究[J]. *水泵技术*, 2019(1): 10-13.
- [7] 卢小艳. 航空发动机零构件概率寿命试验评估方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 2-3.
- [8] 李超, 王金诺, 羊海涛. 高可靠性产品的等效试验技术及可靠性评估[J]. *机械科学与技术*, 2004, 23(7): 876-878+882.
- [9] 高潮, 何宇廷, 侯波, 等. 飞机结构疲劳寿命分散系数研究[J]. *机械强度*, 2016, 38(5): 1076-1081.
- [10] 张祖明. 推力滑动轴承的加速磨损试验和可靠性研究[J]. *应用科学学报*, 1996, 14(2): 191-198.
- [11] 贺小帆, 刘文斑. 服从不同分布的疲劳寿命分散系数分析[J]. *北京航空航天大学学报*, 2002, 28(1): 47-49.
- [12] 卢小艳, 陆山. 基于对数正态分布第k试验寿命的分散系数法[J]. *航空动力学报*, 2006, 21(4): 738-740.
- [13] 陆山, 杨剑秋. 基于小子样最差和最好试验结果的寿命分散系数法[J]. *机械科学与技术*, 2006, 25(1): 99-101.
- [14] 中国人民解放军总装备部. 可靠性鉴定和验收试验: GJB 899A—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [15] 胡晓峰. 大型立式水泵推力轴承磨损润滑分析与对策[J]. *中国电力*, 2004, 37(11): 53-56.
- [16] WANG X H, ZHANG S W, FAN Q Y. Adhesive wear model based on the fractal geometry theory[J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1999, 23(6): 50-52.
- [17] KAUZLARICH J J, WILLIAMS J A. Archard wear and component geometry[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2001, 215(4): 387-403.

(责任编辑: 邱彦)