

液体火箭发动机涡轮泵用轴承寿命试验研究

毛 凯, 苗旭升, 陈 晖, 牛小轶
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 基于液体火箭发动机涡轮泵轴承工作要求的特殊性, 介绍了一种考核液体火箭发动机涡轮泵用轴承寿命的试验方法, 设计了轴承试验方案, 并研制了专门的试验系统。以某型号发动机氧泵用轴承为研究对象, 对其进行了常温水介质和低温液氮介质运转试验。试验系统运转良好, 并且通过该方法试验后的同批次轴承参加发动机热试车工作正常。

关键词: 涡轮泵; 轴承寿命; 试验

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 05-0024-04

Experimental research on bearing life of turbopump in liquid rocket engine

MAO Kai, MIAO Xusheng, CHEN Hui, NIU Xiaozhe
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: An experiment method to assess the bearing life of turbopump in liquid rocket engine is introduced according to particularity of turbopump bearing working condition of liquid rocket engine. Meanwhile, the experiment projects and special experiment system were designed. The experiment, in which normal temperature water and liquid nitrogen were taken as the running medium, was performed for a bearing used in the oxygen pump in a certain engine. The results show that the experiment system works well. The other bearings produced in the same batch as the bearing used in the experiment behaved perfectly in a rocket engine hot test.

Keywords: turbopump; bearing life; experiment

0 引言

轴承属于精密的旋转机械基础件和易损件。统计表明, 旋转机械大约 30% 的机械故障是因轴承失效导致^[1]。涡轮泵是液体火箭发动机的“心脏”, 轴承是保证涡轮泵正常工作的关键部件之一, 影

响发动机的工作可靠性^[2]。

轴承寿命获取最直接的方法为理论计算。其发展历程依次经过 Weibull 分布^[3]、载荷容量理论^[4]、L-P 理论^[5-7]、修正发展理论^[6-7]、新寿命理论^[5]、ISO 281:1990/Amd.1:2000^[3]理论等几个阶段。轴承的寿命与结构、材料、运转工况、冷却

收稿日期: 2016-01-05; 修回日期: 2016-02-03

基金项目: 航天支撑技术项目(617010411)

作者简介: 毛凯 (1987—), 男, 硕士研究生, 研究领域为液体火箭发动机涡轮泵设计

液和润滑剂特性以及安装方式等因素均有关系, 根据目前国内外的研究水平, 理论计算仅能考虑部分因素对轴承寿命的影响^[1], 很难获取较为准确的数据。因此, 对于可靠性要求极高的火箭发动机, 通过试验方法得到较为精准的轴承寿命显得尤为重要。

液体火箭发动机涡轮泵轴承不同于普通机械用轴承, 通常用推进剂冷却和润滑, 相比常规润滑油, 推进剂粘度非常低, 约 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 量级, 润滑效果有限。轴承转速高, 一般不低于 10 000 r/min, 高达 60 000 r/min。轴承承受轴向、径向载荷约几百至上千公斤, DN 值高达 100 万至 200 万。发动机起动极快, 轴承转速和载荷在极短的时间 (通常数秒) 内由零增加至工作值, 承受较大冲击。

我国轴承试验早期一直沿用前苏联的 ZS 型轴承试验机以及从美国引进的 F&M5 试验机, 试验精度低, 加载系统不稳定, 转速和功率均很低^[2]。90 年代, 国内研制了新一代轴承疲劳寿命强化试验机 B10-60R 及其改进的 ABLT 系列^[3], 功率小, 对于内径 120 轴承, 转速只有 3000 r/min。因此, 对于比较特殊的火箭发动机涡轮泵用轴承, 需研制专门的试验系统进行试验。

1 轴承试验方案设计

液体火箭发动机常温推进剂主要有偏二甲肼、四氧化二氮、煤油等, 低温推进剂主要有液态氧、液态氢等。直接采用推进剂介质进行轴承运转试验的成本或者试验风险较大, 如偏二甲肼和四氧化二氮均属于剧毒介质, 不仅成本很高, 对试验安全性要求苛刻, 液态氢和液态氧属于低温易爆炸介质, 对试验系统清洁性要求很高, 无成熟操作经验的情况下试验风险极大。因此, 火箭发动机轴承性能和寿命考核通常采用模拟介质运转试验。考虑到水介质的安全性、容易获取及成本低的优点, 常温推进剂介质通常采用水模拟运转。低温推进剂介质通常采用温度为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的液氮, 液氮安全稳定, 并能提供与发动机工作介质相近的低温环境。

水介质运转主要对轴承承载能力, 转速以及

轴承冷却量进行考核, 初步摸索轴承寿命情况。对于低温推进剂用轴承, 需采用液氮考核低温介质对轴承工作性能的影响, 更为真实的模拟轴承工作环境。另外, 低温推进剂发动机具有单台产品不下台多次工作的特性, 轴承除了满足单台长时间工作要求外, 必须达到多次重复起停要求。因此, 轴承模拟介质运转试验方案主要包括多次重复起停试验和长时间寿命运转试验。

2 轴承试验系统设计

2.1 试验系统

根据制定的试验方案, 本文针对低温发动机用轴承, 设计了轴承常温及低温模拟介质运转试验系统。图 1 和图 2 分别给出了常温和低温试验系统装置图, 其主要由驱动系统、轴承试验器、供介系统、测试及采集系统组成。常温试验的驱动系统采用变频电机和增速箱结构。低温试验采用涡轮驱动。

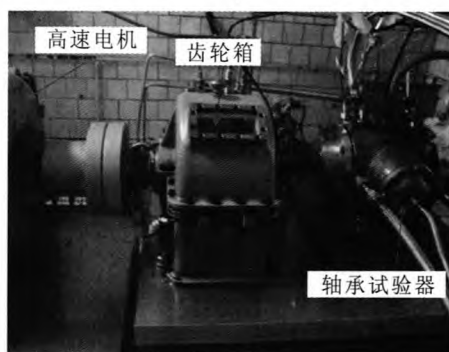


图 1 轴承常温试验系统

Fig. 1 Normal temperature experiment system for bearing



图 2 轴承低温试验系统

Fig. 2 Cryogenic experiment system for bearing

常温试验要求系统设计简单, 载荷加载速度快、精度高、转速控制精准、轴承冷却水流量调整迅速且精度高。低温试验系统由于试验器端轴密封液氮泄漏, 对电机工作影响较大。因此, 密封是一项较为关键的技术。本文设计的试验系统通过采用增压系数高的液封轮和低温密封圈结构, 实现了低温液氮的泄露防护。液氮泄漏环境不适用于电机安全可靠工作, 因此低温试验需设计专用的涡轮驱动。

涡轮驱动装置是低温试验系统设计中的另外一项关键技术, 主要由涡轮转子及其附件组成, 采用喷嘴形式的部分进气方式, 驱动涡轮的工质为燃气或者常温空气。涡轮支撑轴承采用单独的水冷却及润滑系统。图 3 给出了驱动涡轮结构示意图。

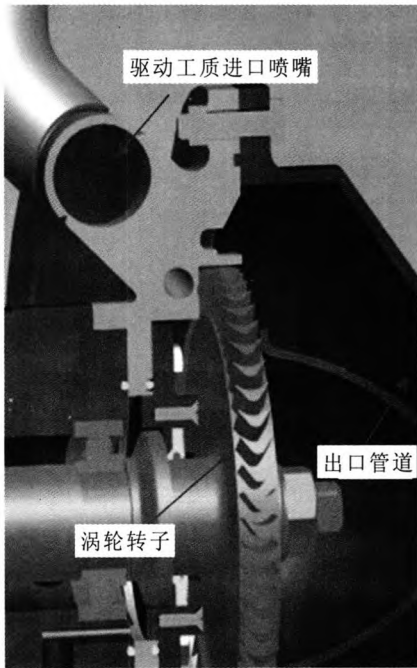


图 3 驱动涡轮结构示意图
Fig. 3 Diagram of turbine configuration

试验器主要结构包括轴承、轴、试验器壳体、轴向力加载装置、径向力加载装配。根据施力要求, 在试验器中同时装配三套轴承, 其中前端和后端为工艺轴承, 中间为被试轴承。轴承载荷是通过气体活塞作动筒施力, 作动筒内采用胶圈密封, 需在运动的状态下保持高压气体密封性能。轴向力通过传动杆加载至轴端, 从而传递至

被试轴承, 径向力直接加载至前端工艺轴承外环, 通过杠杆作用, 按比例分配至被试轴承和后端工艺轴承, 轴向力和径向力均可通过气体压力调节。轴承试验器构如图 4 所示。由于轴承尺寸不同, 不同型号轴承需设计专门的试验器。

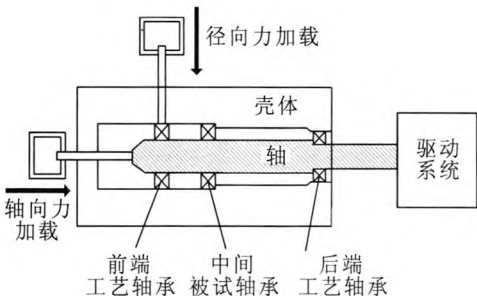


图 4 轴承试验器示意图
Fig. 4 Configuration of bearing experiment facility

2.2 测试参数

轴承测试参数包括: 转速、功率、冷却流量、轴承壁温、介质温度、介质压力、轴承载荷。

3 某型号发动机氧泵轴承试验情况

以某型号液体火箭发动机涡轮氧泵为对象(其结构示意图如图 5 所示), 采用双轴承支撑方式, 一个推力轴承和一个径向轴承配对使用。

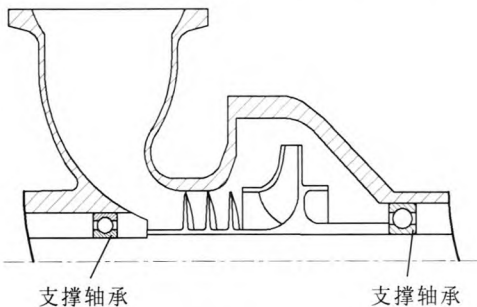


图 5 某型号发动机涡轮氧泵示意图
Fig. 5 Diagram of oxygen pump for a certain engine

采用上述设计的试验方法对其推力轴承进行了模拟运转试验。根据发动机的工作要求, 对该轴承进行了常温水介质重复起停试验和低温液氮长时间运转试验。试验过程中轴承转速、载荷、冷却流量均在实际工况下加有一定安全裕度。其

中常温试验共进行了 22 次重复起停，每次运转约 200 s，低温液氮试验共运转三次，每次运转约 1 800 s。图 6 和图 7 分别给出了常温和低温试验过程中轴承转速变化情况。从图中可以看出常温试验运转平稳，转速控制精度高，而低温试验由于涡轮驱动，转速波动较大。

试验完成后对试验器进行分解，试后轴承结构完整、转动灵活，滚道跑和带正常，轴承滚珠光亮无异常。

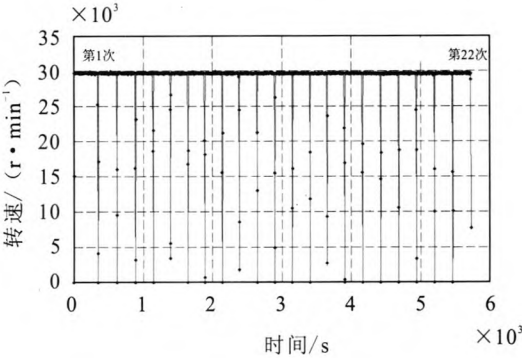


图 6 常温水介质重复起停试验转速

Fig. 6 Rotation speed of repeated startup and shutoff experiment in water environment

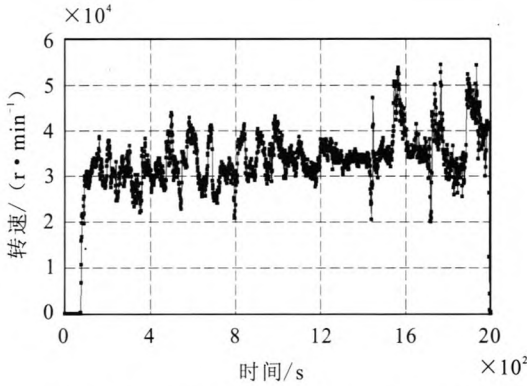


图 7 低温液氮介质长时间运转试验转速

Fig. 7 Rotation speed of long time experiment in liquid nitrogen environment

轴承通过常温和低温模拟介质运转试验后，

其同批次轴承进行了发动机整机热试车考核，包括发动机低工况起动、额定工况和高工况工作、以及单台多次重复点火试验。涡轮泵均正常工作，试车后产品分解表面轴承状态良好。目前发动机试车中未出现轴承性能不足或疲劳导致的试车失败等问题。

4 结论

1) 针对轴承寿命理论计算的不足，本文对模拟介质运转试验核轴承寿命的试验方法进行了研究。

2) 以某型发动机氧泵轴承为例，进行了常温水介质重复起停试验研究和低温液氮介质长时间运转试验研究，同批次轴承通过发动机整机热试车考核。说明该试验装置和试验方法基本能获得轴承的真实寿命。

参考文献：

[1] 朱亮亮, 林素敏, 吉晓民. 滚动轴承寿命计算方法的发展与分析[J]. 哈尔滨轴承, 2014 (3): 3-6.

[2] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 1994.

[3] 李兴林. 滚道轴承疲劳寿命试验新进展[J]. 结构与强度, 2013(2): 448-450.

[4] 李兴林, 李俊卿, 张仰平, 等. 滚动轴承快速寿命试验现状及发展[J]. 轴承, 2006 (12): 44-47.

[5] 郭婧. 滚动轴承疲劳寿命综述[J]. 甘肃科技, 2006 (4): 133-134.

[6] 杨洁. 新的滚动轴承寿命理论计算方法[J]. 西部探矿工程, 2004 (11): 147-148.

[7] 杨洁, 张晓东. 滚动轴承寿命计算方法的分析与应用[J]. 石油机械, 2004 (5): 27-29.

[8] 李兴林. 滚动轴承疲劳寿命及可靠性强化试验技术现状及发展[J]. 现代零部件, 2007 (2): 66-71.

(编辑：王建喜)