

角接触球轴承在高速大载荷工况下 滑油中断耐受能力分析

刘 鲁¹, 赵 聪¹, 冯小川², 王黎钦³

(1. 中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所

航空发动机动力传输重点实验室, 沈阳 110015;

2. 中国航空发动机集团有限公司 哈尔滨轴承有限公司, 哈尔滨 150025;

3. 哈尔滨工业大学 航空航天轴承技术及装备工信部重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 通过研究角接触球轴承断油故障的故障复现现象,发现断油耐受能力不足的初期故障模式为滚动体与内圈之间发生三点接触。使用三点接触分析法对轴承断油耐受能力进行计算,结合相似轴承的计算分析,结果表明:垫片角越大,轴承抗断油能力越差,垫片角为 25°的情况下轴承抗断油能力较差。通过断油后轴承的瞬态温度场分析,结合三点接触分析法,确定原设计状态的轴承断油耐受时间为 25 s,不具备耐受断油 30 s 的能力。根据分析的结论,将该轴承的垫片角减小到 19°,落实改进措施后的轴承通过了试验器验证和发动机试车验证。

关 键 词: 角接触球轴承; 大载荷; 滑油中断; 三点接触; 轴承游隙

中图分类号: V233.4⁺5

文献标志码: A

Analysis of oil-off tolerance of angular contact ball bearing under condition of high speed and heavy load

LIU Lu¹, ZHAO Cong¹, FENG Xiaochuan², WANG Liqin³

(1. Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero-engine,

Shenyang Engine Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China;

2. Harbin Bearing Company Limited,

Aero Engine Corporation of China, Harbin 150025, China;

3. Ministry of Industry and Information Technology Key Laboratory of Aerospace Bearing Technology and Equipment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: According to the study of the oil-off fault recurrence phenomenon of the angular contact ball bearing, the initial failure mode was three-point contact between balls and inner rings. The three-point contact analysis method was used to calculate the bearing's oil-off tolerance; in combination with the calculation and analysis results of similar bearings, it was found that the larger the shim angle, the worse the bearing's oil-off capacity. The bearing had poor resistance of oil-off when the shim angle was 25°. Through analysis of the transient temperature distri-

收稿日期: 2020-12-08

作者简介: 刘鲁(1978—),男,高级工程师,硕士,主要从事航空发动机主轴承应用技术研究。

引用格式: 刘鲁,赵聪,冯小川,等. 角接触球轴承在高速大载荷工况下滑油中断耐受能力分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(11): 2430-2436. LIU Lu, ZHAO Cong, FENG Xiaochuan, et al. Analysis of oil-off tolerance of angular contact ball bearing under condition of high speed and heavy load[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(11): 2430-2436.

bution of the bearing after the oil-off, combined with the three-point contact analysis method, it was determined that the bearing oil-off withstand time of the original design state was 25 s, without the ability to withstand the oil-off for 30 s. According to the conclusion of the analysis, the shim angle of the bearing was reduced to 19° , and the improved bearing passed the oil-off verifications of test rig and engine test verification.

Key words: angular contact ball bearing; heavy load; oil-off; three-point contact; bearing clearance

航空发动机主轴轴承是支撑发动机转子系统正常运转的关键零部件^[1]。角接触球轴承作为航空发动机推力轴承,是一种应用非常广泛、成熟的轴承类型,其润滑方式一般为油润滑^[2]。它主要承受发动机转子的轴向载荷,也承担一部分径向载荷。为了增加钢球数量,提高轴承的承载能力,通常使用双半内圈角接触球轴承。随着发动机技术的发展,主轴轴承的工作条件越来越苛刻^[3],甚至在某些状态下需要完成高状态无油运转,此时主承载面润滑状态迅速恶化,其性能和可靠性受到严峻考验^[4],对发动机主轴轴承的抗滑油中断(后文简称断油)能力有相当高的要求^[5],如果轴承在设计时未能给予充分考虑,断油过程中滚动轴承的工作游隙将迅速减小^[6],轴承温度迅速升高,内部接触面严重磨损,严重时会造成轴承卡死^[7],导致发动机发生严重故障。为了验证轴承在断油工况下的工作能力,GJB241A-2010《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》、美国的JSSG-2007B《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机联合使用规范指南》等标准中都对发动机滑油中断的工作能力和试验验证提出了明确的要求^[8],型号规范上通常要求发动机在最大状态下进行 30 s 断油试车。美国 F117 等发动机也对其 No.3 支点轴承在起飞状态进行了断油试验研究^[9]。

因此,航空发动机主轴承的在高速大载荷工况下断油耐受能力分析,是航空发动机主轴承寿命与可靠性研究的重要内容之一^[10]。

由于断油过程短,需要进行轴承的瞬态温度场分析,国外 Stein 等^[11]建立了类似于 Burton 和 Steph 模型的非常复杂的轴承内部热传递网络,考虑了瞬态热变化的影响。Parker 等^[12-13]在 Shaberth 模型的基础上,采用热阻网络法建立了角接触球轴承温度场分布计算模型。目前国内已经在常规计算中对轴承供油喷嘴的压力、最佳供油、表面应力等进行较准确的分析评估^[14],针对航空发动机主轴承断油性能,许多学者进行了较为

广泛的研究^[15],但航空发动机主轴轴承在高速大载荷工况下的断油耐受能力分析方面工作较少,主要是进行通过性试验。

某型发动机按照型号规范要求,在发动机起飞状态开展断油试车,断油 30 s 后恢复滑油供给,在滑油压力恢复过程中发动机发生喘振,发动机下台进行分解检查,主推力角接触球轴承严重损坏,所有滚珠呈黑色,有严重变形,内圈滚道严重磨损并有高温变色。

因此,本文以 Cr4Mo4Ni4V 材料的某型发动机主推力角接触球轴承为研究对象,通过游隙变化的计算、温度场仿真分析^[16-17]等手段,分析和研究影响轴承断油耐受能力的因素,将其结果用于指导工程实际应用。

1 断油损坏轴承的损伤痕迹及理化分析

外圈滚道局部宏观图像见图 1。外圈滚道表面呈黑色,可见黑色黏着物;沿周向方向存在间隔大体相等的高温变色现象;在滚道表面及边缘均存在较严重的摩擦痕迹。



图 1 故障轴承外圈滚道

Fig.1 Out ring raceway of the failure bearing

在扫描电镜下观察,外圈滚道表面被黏着物覆盖,以钢球材料 Cr4Mo4V 为主,如图 2 所示。

外圈横向截面试样腐蚀后宏观图像见图 3,在滚道表面附近区域可见明显的过热区(淬火层),外圈挡边及其附近区域可见少量渗碳层,表

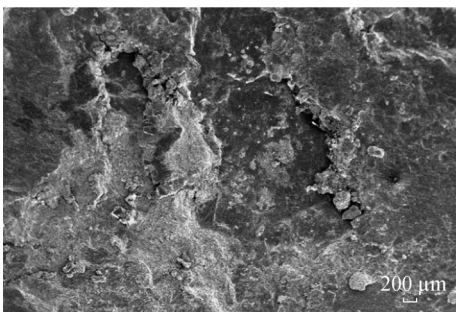


图2 外圈滚道微观图(50×)
Fig.2 Micrographic of the out ring raceway (50×)



图3 外圈截面宏观图像
Fig.3 Graphic of the out ring section

明由于外圈滚道表面过热,导致部分滚道表面发生二次淬火。

故障轴承承载内圈已经严重磨损,端面存在明显的高温变色现象,滚道表面呈黑色,有黏着物,且存在明显的滑蹭痕迹,在滚道表面附近区域可见明显的过热区,见图4。

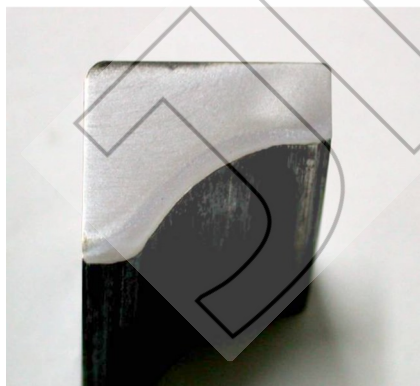


图4 内圈截面
Fig.4 Cross section of inner ring

2 断油试验未通过故障原因

由于发动机上的故障轴承损坏严重,已经无法进行深入的故障原因分析,因此开展了试验器上的故障复现试验,故障复现轴承的形貌见图5~图7。根据断油试验后损坏的轴承形貌发现,

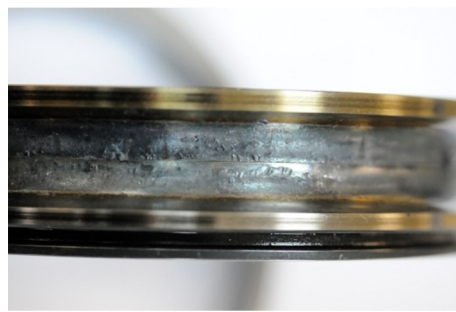


图5 断油试验故障轴承内圈
Fig.5 Failure bearing inner ring of oil-off test

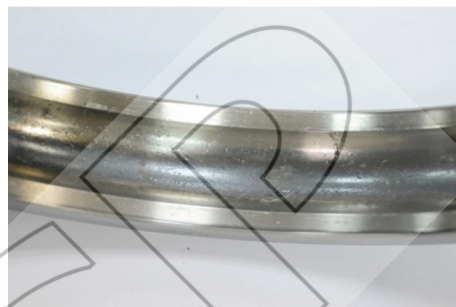


图6 断油试验故障轴承外圈
Fig.6 Failure bearing out ring of oil-off test



图7 断油试验故障轴承钢球
Fig.7 Failure bearing balls of oil-off test

在断油的过程中轴承初期故障模式为三点接触。

因为三点角接触球轴承承载能力大,所以在航空发动机的主轴轴承领域得到广泛使用,但该轴承在工作时要有足够大的径向游隙(P_d)来保证两点接触,见图8所示。

如果径向游隙减小到一定程度,将导致钢球与内圈发生三点接触,见图9。此时钢球运动失稳,与滚道间会产生很大的滑动摩擦,导致轴承急剧升温,径向游隙进一步减小,轴承卡死损坏。

在断油的工况下,钢球和内圈会迅速受热膨胀,而外圈受到轴承座的限制,膨胀速度较慢,导致轴承的工作温度梯度变大,轴承径向游隙会相应减小,很快会发生三点接触,导致轴承急剧升温,径向游隙进一步减小,轴承卡死损坏。

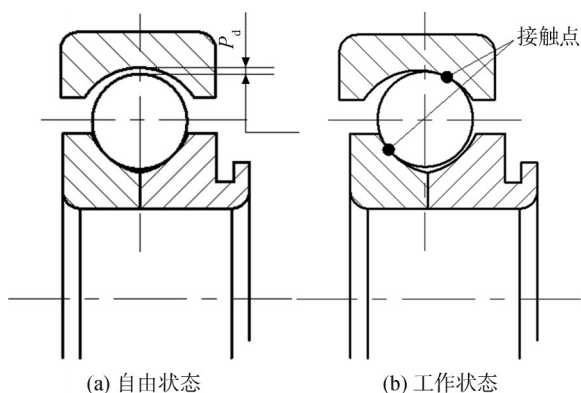


图 8 正常工作下两点接触

Fig.8 Two-point contact of normal work

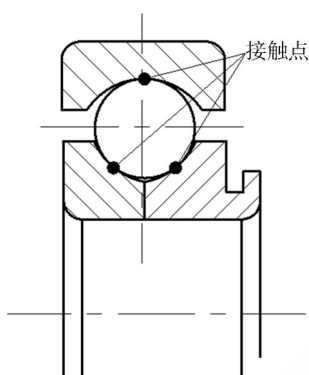


图 9 非正常工况下三点接触

Fig.9 Three-point contact of abnormal work

2.1 避免三点接触的极限径向游隙

三点接触现象的产生跟轴承的径向游隙有直接的关联,为了分析轴承游隙相关参数对轴承断油耐受能力的影响,根据轴承设计方法对最大垫片角 $\beta_{i,\max}$ 和避免三点接触的极限径向游隙 P'_d 进行计算^[18-19]。

$$\beta_{i,\max} = \arcsin [X_{i,\max} / (R_{i,\min} - D_{a,\max} / 2)] \quad (1)$$

$$P'_d = (2R_{o,\max} - D_{a,\min})(1 - \cos \beta_{i,\max}) \quad (2)$$

$$P'_d = 0.09 \text{ mm}$$

即轴承径向游隙大于 0.09 mm 时可以避免三点接触,考虑工况波动及工作安全,该型号轴承实际要求 $0.18 \text{ mm} \leq P_d \leq 0.21 \text{ mm}$,在正常工作状态下不会发生三点接触。

为了便于分析,将实际游隙与避免三点接触的极限游隙之间的差值 $(P_d - P'_d)$ 定义为主轴承抗断油径向游隙裕度 ΔP_d 。该故障轴承的设计状态抗断油径向游隙裕度 ΔP_d 为 0.09~0.12 mm。

2.2 不同轴承的对比分析

在本次断油未通过故障之前,使用了相似型号的轴承进行了发动机 30 s 断油,通过了断油试

验。在发生故障后在试验器上进行了两种不同型号轴承的断油试验,结果与故障轴承相同型号的轴承未能通过 30 s 断油试验,而相似型号的轴承则通过了 30 s 断油试验。

根据文中第 2.1 节计算方法将故障轴承与通过 30 s 断油的相似型号轴承进行对比计算,对比结果见表 1。

表 1 轴承参数对比

Table 1 Bearings parameter checklist

参数	故障轴承	相似轴承
垫片角/(°)	25	19
设计径向游隙/mm	0.18~0.21	0.18~0.21
避免三点接触最小径向游隙/mm	0.09	0.04
抗断油径向游隙裕度/mm	0.09~0.12	0.14~0.17
试验器 30 s 断油试验结果	未通过	通过
发动机 30 s 断油试验结果	未通过	通过

由式(2)可知,随着最大垫片角 $\beta_{i,\max}$ 的增大,主轴轴承抗断油径向游隙裕度逐渐减小。因此垫片厚度偏大是造成故障轴承抗断油能力较差的主要因素。

在不考虑材料线膨胀系数、轴和轴承座与轴承的过盈配合的情况下,从结构方面的计算结果显示,故障轴承垫片厚度偏大,导致故障轴承抗断油的热敏感性更高,更容易产生三点接触。当断油工作时,轴承的游隙会急剧减小,裕度不足会发生三点接触,三点接触后钢球与套圈滚道接触区出现了滑动磨损,温度急升,导致轴承卡滞破坏。

3 断油轴承温度场计算分析

3.1 有限元计算模型的建立

根据发动机轴承腔的结构,结合 ANSYS 建立计算模型。

针对轴承腔内外工作条件的特点,对某型发动机的轴承腔内部的滑油边界进行了划分。

根据简化的轴承腔结构模型,应用赫兹计算结果对轴承进行轴对称建模,划分网格,建立有限元模型^[20]。将相关的材料特性赋给模型,以及按照边界条件的划分,对有限元模型的边界进行定义和分组,建立温度场简化模型(图 10)。以实测外圈温度为 140 °C 为初始条件,确定轴承及相关部分零件传热系数为 3 000 W/(m²·°C),轴承运转产生的热量平均分配在内、外圈上。

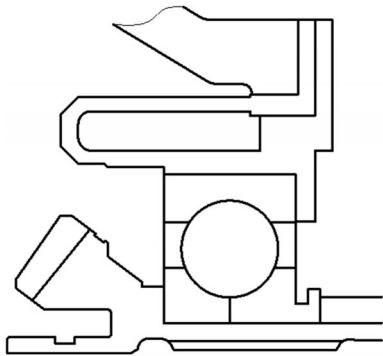


图 10 温度场简化模型

Fig.10 Simplified model of the temperature field

轴承发热功率 H 可用下式进行计算:

$$H = 1.047 \times 10^{-4} n \cdot M \quad (3)$$

其中 n 为轴承内圈转速; M 为轴承总摩擦力矩。

3.2 稳态热分析

在 ANSYS 中将轴承腔稳态边界条件进行加载并计算,得到稳态热分析计算结果,其温度分布如图 11 所示。可以看出,未断油情况下,外圈温度为 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$,内圈温度为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$,内外圈平均温度差约为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

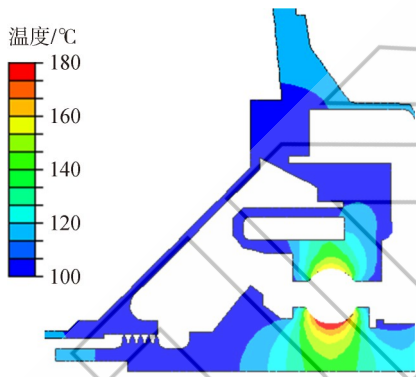


图 11 稳态温度分布

Fig.11 Steady temperature distribution

3.3 瞬态热分析

在 ANSYS 中进行稳态热分析计算后,将瞬态边界条件加载到模型上,并进行瞬态热分析计算,得到断油后 30 s 时的轴承腔温度分布云图如图 12 所示。可以看出,外圈温度为 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$,内圈温度为 $240\text{ }^{\circ}\text{C}$,断油 30 s 后内外圈平均温度差约为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.4 故障机理分析

经实际测量,主推力角接触球轴承在最大工况条件、正常供油情况下,外圈温度为 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$,以此温度为初始条件,计算本次故障轴承在不同的内外圈温差下的径向工作游隙变化情况(初始游

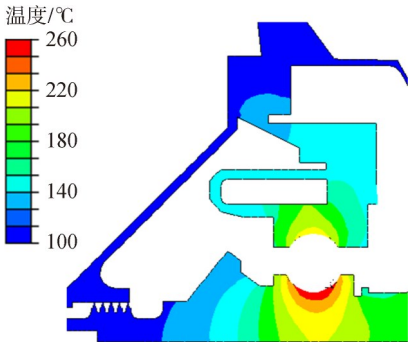


图 12 断油 30 s 后的温度分布

Fig.12 Temperature distribution of 30 s after oil-off

隙取 0.2 mm),计算结果见表 2。

根据计算结果绘制了轴承内外圈温差和抗断油径向游隙裕度随断油时间变化图,见图 13。

表 2 径向游隙计算结果

Table 2 Calculation results of radial clearance

断油时间/s	内外圈温度差/ $^{\circ}\text{C}$	径向工作游隙/mm	抗断油径向游隙裕度/mm
0	20	0.158	0.068
5	22	0.153	0.063
10	25	0.142	0.052
15	30	0.134	0.044
20	40	0.112	0.022
25	50	0.11	0
30	60	0.07	-0.02

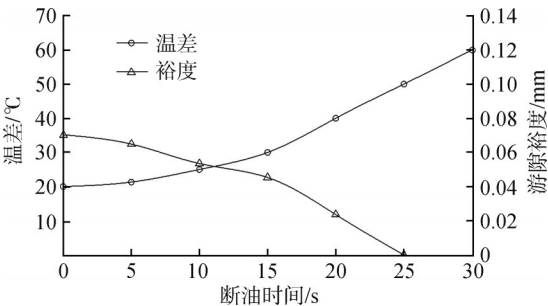


图 13 温差和游隙裕度随断油时间的变化

Fig.13 Temperature difference, clearance margin versus oil-off time

在发动机正常的最大轴向负荷下,高压止推球轴承的内外圈温度梯度不超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,在正常工作条件下,轴承抗断油径向游隙裕度为 0.068 mm ,轴承有足够的游隙,不会发生三点接触。

由温度仿真可知断油 25 s 后,内外圈平均温度差约为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而计算结果表明,在断油工作条

件下如果轴承工作的温度梯度超过 50°C , 轴承工作径向游隙将等于避免三点接触的极限径向游隙 0.09 mm , 抗断油径向游隙裕度为 0 mm , 发生三点接触, 在此情况下, 轴承的钢球运动极不稳定, 产生大量的热量, 造成轴承故障。由此可见, 故障轴承的实际滑油中断耐受时间约为 25 s 。

4 轴承的改进和验证情况

根据分析结果制定了轴承的改进方案, 将该轴承的垫片角设计值从 25° 减小到 19° 。

完成改进后, 选取了 3 套成品轴承分别进行了 3 次 30 s 地面试验器试验, 完成试验后轴承完好, 顺利通过试验。断油自 0 s 开始至 30 s 恢复供油, 试验过程中轴承的温度变化情况见图 14。

完成试验器断油试验后, 开展了发动机整机断油 30 s 试车, 试验后轴承完好, 顺利通过试验。

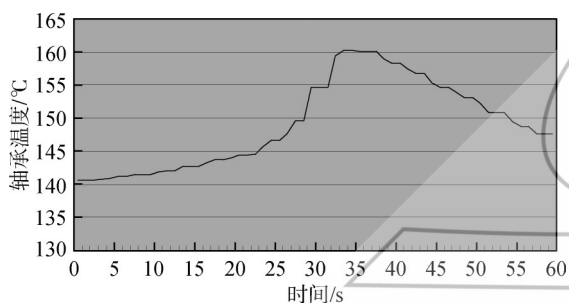


图 14 断油过程外圈温度随时间的变化

Fig.14 Out ring temperatures versus time during oil-off

5 结 论

1) 三点角接触球轴承断油耐受能力不足的初期故障模式为钢球与两个内圈之间发生三点接触。

2) 垫片角过大是造成故障轴承抗断油能力较差的主要因素, 减小垫片角有利于轴承抗断油能力的提高。

3) 三点角接触球轴承的断油耐受时间可以用三点接触分析法结合温度场仿真进行分析。

参考文献:

- [1] 林国昌, 徐从儒, 林基恕. 某发动机主推力球轴承断油试验分析[J]. 航空发动机, 1997(2):32-34.
- [2] 王宇石, 李颖. 某航空发动机主轴轴承断油试验对比研究[J]. 哈尔滨轴承, 2017, 38(2):16-18.
WANG Yushi, LI Ying. Comparative study on oil break test of aircraft engine spindle bearing[J]. Journal of Harbin Bearing, 2017, 38(2):16-18. (in Chinese)
- [3] 林国昌, 张振波, 陈聪慧. 某发动机主轴承故障分析[J]. 航空发动机, 2002, 28(1):43-46.
LIN Guochang, ZHANG Zhenbo, CHEN Conghui. The fault analysis of main thrust bearing in a typical engine[J]. Aeroengine, 2002, 28(1):43-46. (in Chinese)
- [4] 袁玉同, 李红涛, 李鸿亮. 氮化硅陶瓷滚子轴承的抗断油能力试验[J]. 轴承, 2016(10):33-35.
YUAN Yutong, LI Hongtao, LI Hongliang. Anti oil-interruption ability test for silicon nitride ceramic roller bearings[J]. Bearing, 2016(10):33-35. (in Chinese)
- [5] 张金焕, 孙岩, 乔鸿春. 轴承断油性能试验及破坏机理分析[J]. 轴承, 2000(3):37-39.
ZHANG Jinhuan, SUN Yan, QIAO Hongchun. Bearing oil interruption performance test and damage mechanism analysis[J]. Bearing, 2000(3):37-39. (in Chinese)
- [6] 苏华, 刘志全. 失去润滑的高速滚动轴承工作游隙的分析[J]. 航空动力学报, 2000, 15(2):179-182.
SU Hua, LIU Zhiqun. Analysis of work clearance for high-speed rolling bearing in the condition of loss-of-lubrication[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2):179-182. (in Chinese)
- [7] 葛泉江, 尹龙承, 张美宏, 等. 航空轴承断油试验失效件微观损伤分析[J]. 轴承, 2018(6):40-42.
GE Quanjiang, YIN Longcheng, ZHANG Meihong, et al. Analysis on microscopic damage of failure parts of aircraft bearings after oil interruption test[J]. Bearing, 2018(6):40-42. (in Chinese)
- [8] 雷友峰, 王海, 宣建光. 大涵道比涡扇发动机滑油流量中断工作要求与试验方法分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(6):19-23.
LEI Youfeng, WANG Hai, XUAN Jianguang. Analysis of working requirements and test methods for high bypass ratio turbofan engine during oil flow interruption[J]. Aeroengine, 2013, 39(6):19-23. (in Chinese)
- [9] MINER J R, DELL J, GALBATO A T, et al. F117-PW-100 hybrid ball bearing ceramic technology insertion[R]. Houston, US: International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, 1995.
- [10] 王红霞, 张金焕, 孙岩. 航空发动机主轴承断油性能试验[J]. 轴承, 1999(1):21-23.
- [11] STEIN J L, TU J F, DANAL K, et al. A state-space model for monitoring thermally-induced preload in anti-friction spindle bearings of high speed machine tools[R]. New York: ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Control of Manufacturing Processes, 1991.
- [12] PARKER R J, H. RSIGNER. Lubrication of high speed, large bore tapered roller bearings[J]. Journal of Tribology, 1978, 100(1):31-38.
- [13] PARKER R J. Comparison of predicted and experimental thermal performance of angular contact ball bearings[R]. NASA Technical Paper 2275, 1984.
- [14] 陈聪慧, 葛泉江, 李季, 等. 航空发动机机械系统技术研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(5):86-90.

- CHEN Conghui, GE Qianjiang, LI Ji, et al. Study on aeroengine mechanical system technology[J]. Aeroengine, 2015, 41(5):86-90. (in Chinese)
- [15] 叶本远, 刘廷武, 李锟, 等. 某发动机主轴承断油试验与温升趋势分析[J]. 轴承, 2017(10):30-35.
- YE Benyuan, LIU Tingwu, LI Kun, et al. Analysis on oil-interruption test and temperature rise trend of an engine main shaft bearing[J]. Bearing, 2017(10):30-35. (in Chinese)
- [16] 王黎钦, 陈观慈, 古乐, 等. 高速圆柱滚子轴承工作温度研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1):179-183.
- WANG Liqin, CHEN Guanci, GU Le, et al. Study on operating temperature of high-speed cylindrical roller bearings[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1):179-183. (in Chinese)
- [17] 陈观慈, 王黎钦, 古乐, 等. 高速球轴承的生热分析[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1):163-168.
- CHEN Guanci, WANG Liqin, GU Le, et al. Heating analysis of the high speed ball bearing[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1):163-168. (in Chinese)
- [18] HARRIS T A, KOTZALAS M N. 滚动轴承分析[M]. 罗继伟, 马伟, 杨咸启, 等, 译, 北京:机械工业出版社, 2009.
- [19] 《航空发动机设计手册》总编委会, 航空发动机设计手册:第12册 传动及润滑系统[M]. 北京:航空工业出版社, 2001.
- [20] 苏壮, 李国权. 航空发动机滑油系统断油时主推力球轴承的瞬态热分析[J]. 航空发动机, 2009, 35(2):24-29.
- SU Zhuang, LI Guoquan. Transient thermal analysis of main thrust ball bearing during fuel cut off for aeroengine oil system[J]. Aeroengine, 2009, 35(2):24-29. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)