

涡扇发动机主轴承试验器考核试验方法

刘文龙^{1,2}, 杨宇^{1,2}, 张大鹏³, 刘新宇³, 孔德龙^{1,2}

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 2. 中国航发航空发动机动力传输重点实验室: 沈阳 110015;

3. 中国航发哈尔滨轴承有限公司: 哈尔滨 150500)

摘要: 针对涡扇发动机主轴承试验器考核试验, 从验证轴承的自身质量和轴承与发动机工况适应性的角度出发, 以 GJB 7268-2011 为指导, 提出了一种基于发动机常规工况和极限工况的轴承试验器考核方法。该方法在传统试验基础上, 对常规试验项目的试验程序进行了细化, 增设了短时多频次滑油中断试验、超温试验、超转试验、陀螺力矩试验及不对中试验等项目, 提供了各试验程序的编制要点和示例, 并在涡扇发动机主轴承研制过程中对该方法进行了应用, 结果表明: 试验轴承通过了全部试验项目考核, 且成功装配发动机通过了持久试车验证。该试验方法可以基本覆盖该型涡扇发动机的使用工况边界, 达到了在发动机整机装配前考核主轴承工况适应性的目的, 对涡扇发动机主轴承试验器考核的发展具有重要的工程指导意义。

关键词: 涡扇发动机; 主轴承; 试验器试验; 极限工况

中图分类号: V233.4+5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.06.017

Rig Test Method for Turbofan Engine Main Bearing Assessment

LIU Wen-long^{1,2}, YANG Yu^{1,2}, ZHANG Da-peng³, LIU Xin-yu³, KONG De-long^{1,2}

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, 2. AECC Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aeroengine:

Shenyang 110015, China; 3. AECC Harbin Bearing Co., Ltd., Harbin 150500, China)

Abstract: A bearing rig test method considering both conventional and extreme operational conditions was proposed for rig test assessment of turbofan engine main bearings, from the perspective of verifying the bearing quality and their adaptability to engine operational conditions and guided by GJB 7268-2011. Based on traditional tests, the conventional test program was refined by adding more test items such as short-duration multiple oil interruption tests, over-temperature test, over-speed test, gyroscopic moment test, and misalignment test. The key points and examples of each test program were provided. The method was implemented in developing a turbofan engine main bearing, and the results show that the bearings under test passed all items of the verification test, and the engine assembled with the bearings passed the endurance test. The method can basically cover the operational conditions boundary of the turbofan engine, achieving the purpose of assessing the operational condition adaptability of the main bearing before the whole engine assembly, It has important engineering guidance significance for the development of rig test method for main bearing assessment of turbofan engines.

Key words: turbofan engine; main bearing; rig test; extreme operational condition

0 引言

涡扇发动机主轴承具有工作温度高、转速高、可靠性要求高、载荷大等特点, 近 30 年来, 在设计、加工、检验、试验等方面均取得了较大进步^[1-3]。主轴承试验器考核试验作为轴承产品从研制到应用之间的重要过渡环节, 考核的全面性和充分性将直接影响轴承在发动机上的可靠使用, 对其进行深入研

究意义重大^[4-5]。

国外的轴承研发单位在轴承试验研究方面起步较早、投入大。以德国 FAG 公司为例, 其产品级寿命试验累计试验时间达 150 万 h 以上, 积累的大量试验数据支撑其建立了完整的试验考核评价准则和数据库, 能够支持其在后续研制过程中不再进行重复性的等寿考核试验, 仅对边界工况和特殊条件开展适应性考核就可以保证轴承的性能和寿命, 大大缩短研发周

收稿日期: 2021-12-12 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 刘文龙(1988), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 刘文龙, 杨宇, 张大鹏, 等. 涡扇发动机主轴承试验器考核试验方法[J]. 航空发动机, 2023, 49(6): 109-114. LIU Wenlong, YANG Yu, ZHANG Dapeng, et al. Rig test method for turbofan engine main bearing assessment[J]. Aeroengine, 2023, 49(6): 109-114.

期^[6]。Brecher等^[7]针对主轴圆锥滚子轴承研发了专用的设计试验联合设备,轴承设计过程中即可以通过试验数据不断优化设计参数;Mishra等^[8]在涡扇发动机主轴轴间轴承失效分析过程中,通过试验确定了轴间轴承内外圈变形不协调是导致轴承剥落的主要原因。中国目前在涡扇发动机主轴轴承试验器试验阶段一般根据GJB 7268^[9]要求开展性能试验、耐久性试验和滑油中断试验,考核通过后即允许装配整机验证,进而对轴承定寿和状态鉴定,因此在此方面一般也是以上述试验项目为基础开展专项研究。林基恕等^[10]在涡扇发动机主轴轴承寿命确定方法研究中指出,在轴承耐久性试验中要模拟发动机使用飞行包线的主要工作状态和条件,并且建议开展额定寿命的验证试验;张振强等^[11]提出了轴承开展性能试验时在考虑轻载、重载的基础上应考虑模拟发动机超转;林国昌等^[12]通过开展滑油中断试验,给出了发动机滑油中断试车前轴承滑油中断试验的数据分析方法,阐释了滑油中断试验过程中监控参数的变化规律;安浩俊^[13]参考国外涡扇发动机主轴轴承研制过程建立了航空轴承试验评价体系,其中第3级试验为全尺寸轴承工况适应性极限试验,包括环境试验、寿命试验和极限工况试验。以上研究侧重于涡扇发动机主轴轴承试验中单项试验的设置、试验过程和结果的分析,但并没有针对轴承试验器试验项目进行系统的规划并且给出相应方法或指南。

本文提出了一种基于涡扇发动机常规工况和极限工况的主轴承试验器综合考核试验方法。

1 试验项目

主轴轴承试验器考核试验作为主轴应用于发动机前的最后验证,试验项目首先应能够支撑对轴承自身质量(包含参数设计和可靠性等)的验证,同时也应尽可能全面的验证轴承对发动机实际工况的适应性。因此,本文提出的涡扇发动机主轴轴承试验器考核试验项目规划的主要出发点一是来自轴承自身质量验证需要,二是发动机具体的使用工况,试验项目的设置主要依据GJB 7268,并在此基础上结合涡扇发动机主轴轴承工作特点进行细化,具体考核试验项目如图1所示。

耐久性试验主要是考核轴承在发动机常规使用工况下是否符合使用寿命要求,为GJB 7268规定的常规试验项目,一般采用发动机典型工况以考核轴承

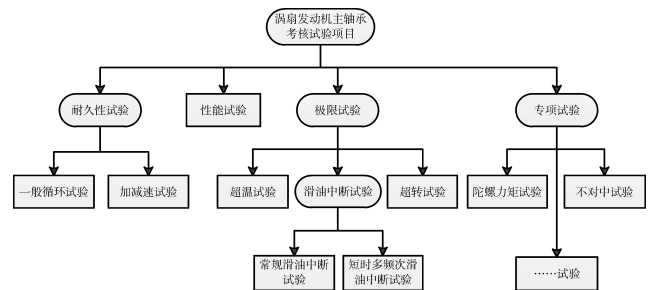


图1 涡扇发动机主轴轴承考核试验项目

的使用寿命;考虑到涡扇发动机在实际使用的整个寿命期中存在非常多的加减速过程,因此为考核加减速对轴承的影响,本试验方法设置了专项的加减速试验或可以在耐久性试验中设置专门的加减速考核程序。

根据GJB 7268要求,性能试验主要模拟高速轻载或高速重载等条件验证轴承结构和设计参数合理性,一般时数较短。

滑油中断试验一般按照GJB 7268要求对发动机型号规范规定的滑油中断要求进行验证,一般是对极限断油工况进行考核;考虑到发动机(尤其是军用涡扇发动机)在实际使用时经常会因飞机机动出现持续时间较短但频次很高的滑油中断^[14],因此在考核试验项目中增加设置短时多频次滑油中断试验。

超温试验为增加设置试验项目,主要是针对涡扇发动机在极端条件下出现的燃油温度大幅升高导致滑油温度异常升高的情况,验证轴承在该条件下的使用性能。

超转试验为增加试验项目,主要是针对发动机在极端条件下会出现发动机转子“超速”甚至突破发动机转子限制转速的情况^[15],验证轴承 DN 值(D 为轴承内径,mm; N 为轴承转速,r/min)大幅上升情况下的使用性能。

陀螺力矩试验为增加试验项目,陀螺力矩是涡扇发动机(尤其是军用涡扇发动机)在做大幅度机动时的一种状态,该状态可能导致轴承的径向载荷大幅增加,引起的非正常比例的轴承轴向/径向载荷可能会导致轴承运转不稳定,因此设置针对性试验项目开展考核。

不对中试验为增加试验项目,主要是考虑到试验器条件下轴和轴承座的同轴度较好,但发动机实际使用过程中由于转静子间隙以及热不均匀性等问题,会导致轴和轴承座的轴线出现一定夹角(不对中),严重影响轴承滚动体与滚道的接触状态,因此设置针对性

试验项目开展考核。

此外,部分类型发动机还会因飞机使用特点而在工作中出现较长时间贫油、不可避免的载荷换向、弹射产生的冲击等极端情况,均可结合实际情况制定相应的考核试验项目。

2 试验程序

试验项目规划了轴承试验器试验的考核范围,而每项试验的程序则关系到试验项目是否能够有效的起到考核作用。本文结合发动机主轴承试验器考核试验,对各试验项目给出了程序的编制要点、方法和示例。

2.1 耐久性试验

耐久性试验的转速和载荷应覆盖发动机的典型工作状态,程序主要依据发动机典型任务剖面制定,如“慢车一起飞—巡航—中间/最大—降落”等,各状态的时间比例依据发动机使用要求确定,此部分属于一般循环试验;此外,由于发动机在使用中经常出现快速加减速,在一般循环试验的基础上可安排多次的快速加减速程序,如“慢车—最大”的快速推拉。

发动机主轴承耐久性试验程序(单个循环)如图 2 所示,每个循环 5 h,根据 GJB 7268 要求,试验时数应为寿命要求的 1.5 倍,故需设计相应循环数的试验,试验时各状态的载荷设定需考虑发动机实际使用过程中轴承所受的机动过载载荷、气动载荷及附加载荷等^[6]。

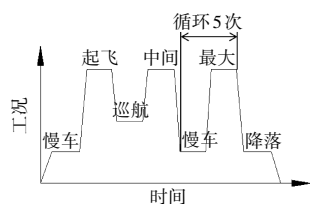


图 2 耐久性试验程序 (单个循环)

开展加减速试验时,加减速的时间、次数等一般根据发动机整机使用要求确定,如开展发动机主轴承加减速试验时,要求工况变化幅度最大的“慢车—最大”循环次数不少于 1 次/h,工况的变化时间不超过 5 s。

根据主轴承高转速、高负荷、工况变化快的特点,主轴承试验器的动力系统一般采用电主轴直接驱动,保证在额定负载条件下能够拥有良好的高转速运行能力和平稳性,并且具备 ≥ 1000 r/s 的转速平稳变化能力,控制精度不低于 $\pm 1\%$;加载系统可以采用电液混合伺服加载,液压加载提供足够的加载压力和稳定

性,电加载保证了足够的控制精度,具备 ≥ 10000 N/s 的载荷平稳变化能力,控制精度不低于 $\pm 1\%$ 。

2.2 性能试验

性能试验需要在较短时间内验证轴承结构和设计参数的合理性。根据 GJB 7268 要求,轴承在通过性能试验后即可装配发动机开展短期的科研试车,因此试验转速和载荷需覆盖发动机常用工作范围,另外还需设置高速轻载和重载程序。

发动机主轴承性能试验程序(单个循环)如图 3 所示,发动机常用相对转速区间在 70%~103%。

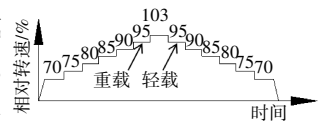


图 3 主轴承性能试验程序 (单个循环)

2.3 滑油中断试验

滑油中断试验分为常规滑油中断试验和短时多频次滑油中断试验。

常规滑油中断试验需模拟整机滑油中断试车工况,滑油中断的状态和时间一般依据发动机型号规范的要求制定。发动机主轴承常规滑油中断试验程序如图 4 所示,发动机型号规范要求为发动机可以在中间状态滑油中断情况下工作 30^{+2} s。

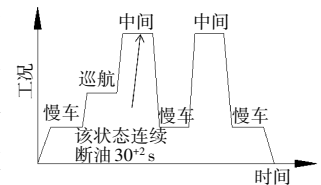


图 4 主轴承常规滑油中断试验程序

短时多频次滑油中断试验是为了模拟发动机实际使用情况,其程序可以设定在耐久性试验程序的某个状态进行短时滑油中断,并随耐久性试验完成足够的循环数以模拟足够的滑油中断频次,进而保证轴承使用寿命期内可以满足多次短时断油要求。

发动机主轴承短时多频次滑油中断试验程序如图 5 所示。要求随耐久性试验开展,完成 90 个循环,每循环选取 1 个状态进行滑油中断,断油时间为每次 T^{+2} s。

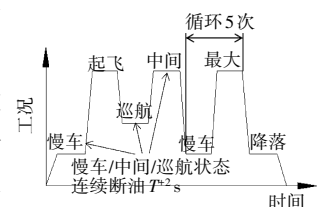


图 5 短时多频次滑油中断试验程序

开展轴承试验器滑油中断试验时,一般可以通过控制润滑系统(如图 6 所示)供油管路上的压力溢流阀关闭试验器的供油,滑油通过溢流路流回油箱,此时回油泵会正常工作,试验腔内正常回油以达到模拟滑油中断的效果。

2.4 超温试验

超温试验是结合发动机实际使用需求增加的试验项目,主要是考虑发动机实际使用时由于燃油温度短期超限导致对滑油冷却能力下降,滑油温度在短时间内突然超出常规使用温度。滑油温度的上升会影响对轴承的润滑、冷却能力,需对此极限情况进行考核。

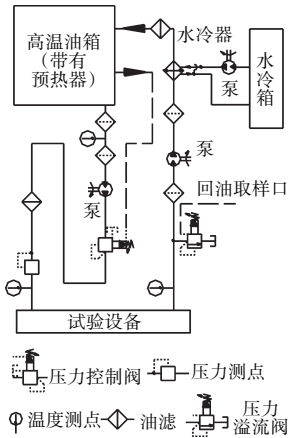


图6 试验器润滑系统

由于滑油温度变化存在一定的滞后性,滑油超温可能在发动机任意典型状态出现,因此其试验可以随发动机耐久性试验开展,通过评估发动机可能发生滑油超温的时长,在耐久性试验的若干个循环中开展超温试验。

以发动机主轴承超温试验程序为例,其程序与耐久性试验相同(图2),要求试验时滑油供油温度根据发动机使用极限设定。

开展轴承试验器试验时,一般通过在油箱中采用导热油热交换的方式加热滑油,并通过水冷器散热平衡以达到控制试验供油温度的目的(图6);当开展超温试验时,可以通过提前适度增加加热交换功率或在供油管路上设置2级加热设备的方式提高供油温度。

由于发动机工作时,轴承处于热腔之中,试验器环境下则处于冷腔之中,目前一般很难在试验器条件下对轴承套圈温度进行精确的控制和模拟,但可以通过在试验器壳体中增设硅橡胶加热片等方法适度提高轴承及环境温度,尽可能接近发动机整机状态下轴承温度水平。

2.5 超转试验

根据相关标准规定,发动机转子需具备必要的结构完整性储备,要求转子能够适应转速达到最高允许稳态转速的115%并持续工作5 min。转子超转带来轴承DN值的增大可能会引起轴承出现短时失效,需对此极限情况进行考核。

发动机转子超转时,其轴承载荷可以考虑按照最大状态设定。以发动机主轴承超转试验为例,其超转试验程序设定如图7所示。要求开展2个循环,超转

时间共计10 min。

2.6 陀螺力矩试验

由于陀螺力矩状态一般伴有较大的角速度,作用在主轴承上的径向载荷可能会大幅增加,因此需对此极限工况开展考核。陀螺力矩状态的转速由发动机功率状态确定,载荷则依据陀螺力矩状态下发动机的过载情况确定。

以发动机主轴承陀螺力矩试验程序(如图8所示)为例,其程序为在耐久性试验程序基础上增加了1处陀螺力矩工况,其转速为慢车转速,轴向载荷为空中慢车载荷2940 N,径向载荷依据规定的过载情况计算为23010 N,陀螺力矩状态时间为15 s,需至少完成2个循环。

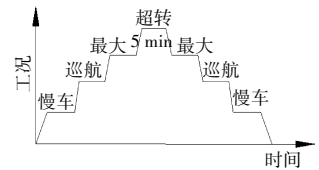


图7 超转试验程序

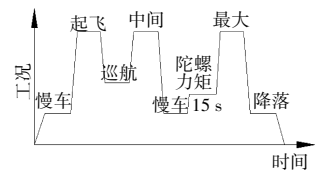


图8 陀螺力矩试验程序

2.7 不对中试验

不对中试验是结合发动机实际使用需求增加的试验项目,主要是考虑发动机实际使用时盘轴的热变形不均匀以及制造公差等因素导致的主轴承安装座与轴出现偏斜,因此需在试验器上模拟验证轴承是否具备适应该不对中条件的能力。

不对中的程度受影响因素较多,一般可以考虑按照最严苛的计算结果,在发动机各典型状态下进行一定时数的试验,分解轴承检查判断是否存在偏载接触导致的初始损伤。

开展不对中试验时需要主动设计轴承安装轴和轴承座孔轴线之间的偏斜,一般可以通过直接补加工轴承安装衬套、定制带有一定锥度的轴承套圈或在轴承安装时增加刚性垫片以形成偏心套等方式设计偏斜。

开展发动机主轴承不对中试验(方案如图9所示)时,采用刚性垫片的方式设计了轴承内、外圈配合面轴线之间的夹角。

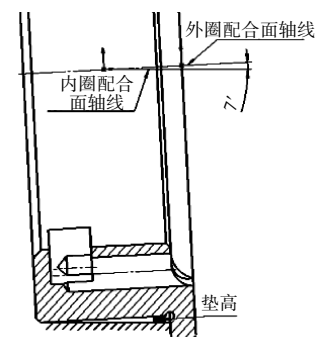


图9 不对中试验方案

3 试验验证

结合发动机主轴承研制工作,按照本文提出的试验器考核试验项目以及规划的试验程序,开展了主轴承试验器考核试验,基本可

以覆盖发动机实际使用过程中主轴承的边界工况,试验项目见表1。

表1 发动机主轴承试验器试验项目

序号	试验项目	试验时数/h	备注
1	性能试验	50	
2	耐久性试验	750	
3	超温试验	4	随耐久性试验开展
4	超转试验	1	
5	陀螺力矩试验	1	
6	滑油中断试验	1	短时多频次滑油中断试验随耐久性试验开展
7	不对中试验	50	随耐久性试验开展

在开展主轴承试验器试验时,一般需对轴承静止套圈温度、回油温度、振动等进行监测,当出现监测项目异常变化时(如超过经验限制值、出现异常突变等),需要暂停试验排除故障。本次试验过程中,在上述常规监测项目基础上,在回油管路上增设了滑油颗粒在线监测装置辅助监测滑油污染颗粒,能够更直观地监测试验轴承及相关机件的损伤情况。通过温度、振动、滑油颗粒等在线监测项目,配合管路磁塞、油滤、滑油光谱、滑油磨粒等定期检查项目,可以更有效地监控整个试验过程。

按表1所述试验项目,每型轴承至少2套完成了全部试验,试验过程中各项监控参数正常。试验轴承分解后,需对轴承外观、尺寸等检查,检查项目一般包含零件表面损伤情况(如压划伤、蹭伤、麻点、腐蚀等)、转动灵活性、重要尺寸及精度指标(如游隙、滚道体组差、滚道圆度等),检测标准一般需综合考虑新品轴承要求和相关试验标准(如GJB 8530^[17]等)制定。

试验后对轴承进行了分解检查,轴承转动灵活,整体外观良好,尺寸精度未见异常,未发现异常磨损、变形、剥落等情况,符合试验后轴承检查要求,通过了试验器试验考核。

通过试验器试验考核后,5型主轴承在后续研制过程中成功装配发动机通过了持久试车验证,证明了其使用可靠性。

4 结束语

本文提出的基于涡扇发动机常规工况和极限工况的主轴承试验器综合考核试验方法,细化了传统试验项目程序要求,增设了多项极限工况试验和专项试

验,并且提供了具体的试验程序编制要点、方法和示例。在涡扇发动机主轴承研制工作中对该方法进行了应用,轴承通过了全部试验项目考核并成功通过发动机持久试车验证,试验项目和程序基本可以覆盖发动机使用边界,达到了在装配发动机前尽可能通过试验器试验考核轴承对发动机整机工况适应性的目的,对涡扇发动机主轴承试验器考核的发展具有重要的工程指导意义。

参考文献:

- [1] 刘长福,邓明.航空发动机结构分析[M].西安:西北工业大学出版社,2006:286-293.
LIU Changfu, DENG Ming. Analysis of aeroengine structure [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006:286-293. (in Chinese)
- [2] Wang L, Snidle R W, Gu L. Rolling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research [J]. Wear, 2000, 246:159-173.
- [3] 林基恕,张振波.21世纪航空发动机动力传输系统的展望[J].航空动力学报,2001,16(2):108-114.
LIN Jishu, ZHANG Zhenbo. Prospects of aeroengine power transmission system in the 21st century [J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2):108-114. (in Chinese)
- [4] 马芳,刘璐.航空轴承技术现状与发展[J].航空发动机,2018,44(1):85-90.
MA Fang, LIU Lu. Present situation and development of aviation bearing technology [J]. Aeroengine, 2018, 44(1):85-90. (in Chinese)
- [5] 李宏新,李国权.航空发动机动力传输系统的技术发展思考[J].航空发动机,2013,29(2):1-5,30.
LI Hongxin, LI Guoquan. Technology development thought on aeroengine power transmission system [J]. Aeroengine, 2013, 29(2):1-5, 30. (in Chinese)
- [6] 闫众.基于试验器的中介球轴承可靠性试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
YAN Zhong. The reliability test research of intermediate ball bearing based on tester [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] Brecher C, Fey M, Bartelt A, et al. Design and test rig experiments of a high speed tapered roller bearing for main spindle applications [J]. Procedia CIRP, 2016, 46:533-536.
- [8] Mishra R K, Muduli S K, Srinivasan K, et al. Failure analysis of an intershaft bearing of an aero gas turbine engine [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2015, 15(2):205-210.
- [9] 中国人民解放军空军.航空发动机轴承试验定寿程序和要求:GJB 7268-2011[S].北京:总装备部军标出版发行部,2011:2-3.
Air Force of the Chinese People's Liberation Army. Program and request for test and operation life of aeroengine bearings: GJB 7268-

- 2011[S]. Beijing: Military Standard Publication and Distribution Section of General Armament Department, 2011:2-3. (in Chinese)
- [10] 林基恕,战明学. 航空发动机主轴轴承寿命确定方法的研究[J]. 航空发动机, 2002(1): 40-46.
LIN Jishu, ZHAN Mingxue. An investigation of method for determination of operating life on aeroengine main bearing[J]. Aeroengine, 2002(1): 40-46. (in Chinese)
- [11] 张振强,杨兵华,赵洋,等. 某型航空发动机主轴轴承试验故障分析及改进[J]. 轴承, 2017(11):52-55.
ZHANG Zhenqiang, YANG Binghua, ZHAO Yang, et al. Fault analysis and improvement on test for spindle bearings in an Aeroengine[J]. Bearing, 2017(11):52-55.(in Chinese)
- [12] 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):32-34,41.
LIN Guochang, XU Congru, LIN Jishu. Study on oil interruption test of main thrust ball bearing[J]. Aeroengine, 1997(2):32-34,41. (in Chinese)
- [13] 安浩俊. 基于轴承试验器的航空发动机主轴轴承试验评价技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
AN Haojun. A study on aerospace engine bearing of test evaluation technology based on test rig[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 空军装备研究院. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范: GJB 241A-2010[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2010:17-18.
Research Institute of Air Force Equipment. General specification for engine, aircraft, turbojet and turboprop: GJB 241A-2010[S]. Beijing: Military Standard Publication and Distribution Section of General Armament Department, 2010:17-18. (in Chinese)
- [16] 刘文龙,王科,王丹丹,等. 航空发动机高压轴止推轴承载荷分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(5):1-5.
LIU Wenlong, WANG Ke, WANG Dandan, et al. Load analysis of thrust bearing of aeroengine high-pressure shaft[J]. Aeroengine, 2020, 46(5):1-5. (in Chinese)
- [17] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. 航空发动机主轴轴承耐久性试验方法:GJB 8530-2015[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2011:2-3.
The Ministry of Electronic Information of the General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. Endurance test method for bearing of aeroengine shaft:GJB 8530-2015[S]. Beijing: Military Standard Publication and Distribution Section of General Armament Department, 2011:2-3. (in Chinese)

(编辑:程海)