

某航空发动机滑油位异常下降故障分析

屈衍静¹, 曹丽娜², 栾旭¹, 宋冠麟¹, 史妍妍¹, 杨杰¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 山东工业职业学院 山东淄博, 256414)

摘要:针对某航空发动机在试飞过程中连续出现多起滑油箱油位异常下降情况,对滑油系统进行排查分析,确认为由滑油泵皮碗裂纹引起的。经对皮碗故障件进行复查、断口分析、设计复查等工作,确定了皮碗裂纹产生的原因。结果表明:滑油泵级间壳体上通油孔与增压泵出口相连,使得皮碗密封压力过大,为导致皮碗裂纹故障发生的主要原因;泵轴与皮碗装配过盈量大促进了皮碗裂纹故障萌生和扩展。通过对滑油泵结构参数优化设计,降低皮碗承载油压和摩擦力,提高皮碗密封性能和寿命,从而有效避免此类故障再次发生。

关键词: 滑油位; 滑油泵; 皮碗; 裂纹; 故障; 航空发动机

中图分类号: V233.4+4

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.01.006

Failure Analysis of Oil Level Abnormally Declined for an Aeroengine

QU Yan-jing¹, CAO Li-na², LUAN Xu¹, SONG Guan-lin¹, SHI Yan-yan¹, YANG Jie¹

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China; 2. Shandong Vocational College of Industry, Zibo Shandong 256414, China)

Abstract: Aiming at the problem of oil level of tank anomaly declined occurred several times in the flighttest for aeroengine, the reason was identified that the crack of oil pump seal cup caused oil level decline through the analysis of lubrication system. According to the faulty component review, fracture analysis and design review, the cause of failure was identified finally. The result shows that the oil-through hole in the oil pump's inter stage shell is connected with pressure pump's outlet. It resulted that seal cup's sealing pressure was too large, which was the main reason of the occurrence of seal cup crack fault. The large interference between seal cup and pump's axial is the auxiliary reason. The hydraulic pressure and friction of the cup seal is reduced through the optimization design of structure parameters of oil pump, and the sealing performance and life is improved, accordingly, the analogous failure can be avoided.

Key words: oil level; oil pump; seal cup; crack; fault; aeroengine

0 引言

润滑系统是航空发动机的关键系统之一,保证航空发动机承力和传动部件的正常润滑和冷却,对发动机的工作可靠性起着决定性的作用^[1]。近年来,国内开始对润滑系统研究进行重视并建立专门的科研基地,但润滑系统的发展仍然落后于发动机大部件的改进。随着高性能航空发动机的应用和发展,军方对发动机的可靠性和耐久性更加关注,对润滑系统也提出易损性低、质量轻和可靠性高的新要求^[2-3]。因此,为降低和减少发动机在外场使用和研制中的经费损失,润滑系

统需不断提高设计水平和排除故障来提高其可靠性^[3]。

本文针对某型航空发动机在外场飞行使用时连续出现多起滑油位异常下降情况,进行故障排查分析,确定了故障位置及原因,并制定相应改进措施以提高发动机安全性和可靠性,为促进发动机快速成熟提供技术支撑。

1 故障现象描述

在 2015 年下半年,某型发动机在外场交付使用阶段连续发生多起滑油箱油位异常下降故障,故障现

收稿日期:2017-03-24

基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:屈衍静(1989),男,硕士,工程师,从事航空发动机润滑系统设计工作;E-mail: quyanjing6@163.com。

引用格式: 屈衍静, 曹丽娜, 栾旭, 等. 某航空发动机滑油位异常下降故障分析[J]. 航空发动机, 2018, 44(1): 27-31. QU Yanjing, CAO Lina, LUAN Xu, et al. Failure analysis of oil level abnormally declined for an aeroengine [J]. Aeroengine, 2018, 44(1): 27-31.

象具体描述如下：

某发动机在完成地面开车后检查滑油箱油位为 14 L,停放数日后,机场机务检查发现滑油箱滑油量不足,使用油标尺检测不到油位,然后补加滑油至 14.5 L 后地面开车,发现有滑油从高空活门处喷出,停车后检查滑油箱油位为 15 L,飞附机匣约有 5 L 滑油。发动机停放 3 天后检查滑油箱液位下降至 13 L,继续停放 10 天后,滑油箱油位下降至不可测量。

对发现的滑油箱油位异常下降相关现象特点,可以总结归纳：

- (1)发动机在静态停放时,滑油箱液位下降明显,油标尺无法检测到油位；
- (2)飞附机匣内部大量积油；
- (3)发动机外部管路、附件表面检查无明显漏油痕迹。

2 故障问题分析

2.1 故障定位

某型发动机润滑系统供、回油流路原理如图 1 所示。从图中可见,增压泵从滑油箱吸油,供给发动机各滑油腔,回油泵将发动机各滑油腔的滑油抽回滑油箱,起动机则由滑油箱直接供油。

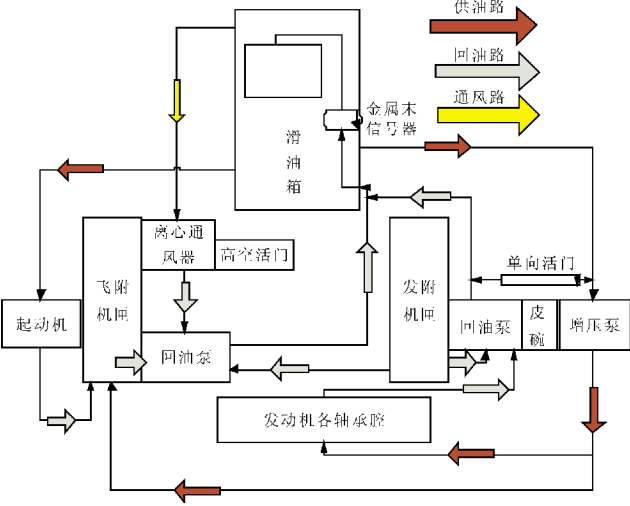


图 1 润滑系统原理

根据故障现象特点结合润滑系统工作原理进行初步分析可知,滑油箱油位下降问题与润滑系统内部漏油有关,与外部管路、附件无关,以停车后滑油箱油位异常下降为顶事件,分析顶事件发生的全部可能性底事件,建立故障树如图 2 所示。

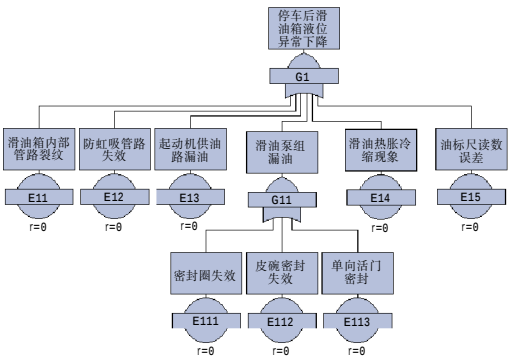


图 2 滑油箱油位异常下降故障树

针对该故障树列出了 8 个可能发生故障原因的底事件,并逐一排查确认,其排查措施和结果见表 1。

表 1 故障原因排查

底事件编号	故障原因	排查内容	排查措施及结果	是否主要原因
E11	滑油箱内部回油管路裂纹漏油	回油路是否漏油	分解滑油箱处总回油管,加注滑油至 14 L,回油路无滑油流出。	否
E12	防虹吸节流嘴堵塞	孔口是否贯通	分解后目视检查,完好。	否
E13	起动机供油路漏油	油箱液位是否下降	更换滑油泵后,滑油箱液位未下降,说明该处油路完好。	否
E14	滑油热胀冷缩现象	计算温差变化量	静态存放温度变化小,不影响液位变化	否
E15	油标尺读数误差	是否读数误差大	油标尺最小刻度为 0.25 L,误差不大于 0.25 L,非读数误差	否
E111	密封胶圈失效	胶圈是否有卡伤	分解后目视检查,完好	否
E112	皮碗密封失效	皮碗是否变形断裂	分解检查,发现皮碗密封有贯穿性裂纹	是
E113	单向活门密封失效	密封试验	打压检查,无漏油	否

通过对上述部位排查分析,最终确定滑油泵皮碗密封失效(底事件 E112),为导致滑油箱油位异常下降的原因,其他底事件均可排除。将滑油泵组分解检查,皮碗裂纹故障件如图 3 所示。从图中可见,约在 3/5 圆周处的皮碗密封唇口沿金属骨架内圈从皮碗主体断开。

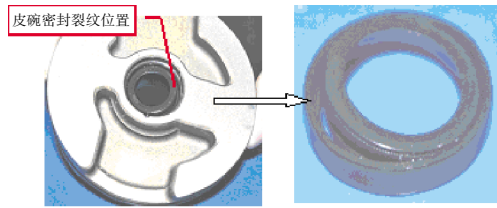


图 3 皮碗裂纹故障件

2.2 滑油箱油位下降故障机理

某型发动机滑油箱的位置高于滑油泵,当滑油泵内增压泵与回油泵之间的皮碗出现裂纹时,在位势差的作用下,滑油从油箱通过皮碗裂纹处流至回油泵,然后经发动机的附件机匣(发附机匣)的回油管流至飞机的附件机匣(飞附机匣)腔内。飞附机匣与发附机匣的回油泵由回油管路相连,且相对于发附机匣处于较低位置,发附机匣中的滑油可经飞附回油泵组流至飞附机匣腔内,最终导致飞附机匣内大量积油。若机务在试车前未发现滑油位异常下降,对滑油箱补加滑油的情况下,发动机启动后飞附机匣内积油被抽回至滑油箱,油箱油位过满导致大量滑油从通风管路流向飞附机匣的油气分离器,飞附机匣的回油泵来不及抽回油气分离器中过多的滑油,部分滑油随空气从高空活门处喷出。此种故障模式下的滑油流路如图 4 所示。

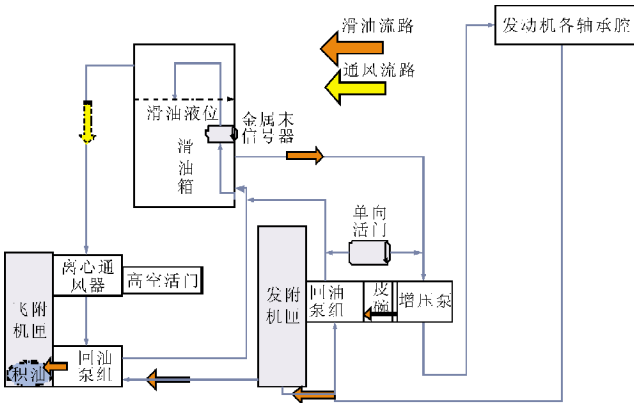


图 4 滑油泵皮碗故障漏油流路

3 皮碗裂纹故障分析

3.1 皮碗裂纹故障树分析

为进一步确认皮碗裂纹的故障原因,综合设计、加工、装配、使用等多方面因素,列出滑油泵组皮碗裂纹故障树^[4-6],如图 5 所示。

根据故障现象及故障树,通过故障件断口分析、设计复查、装配工艺复查等工作,以确定故障原因。

3.2 故障件断口分析

多次故障的皮碗断口位置相同,均为沿金属骨架

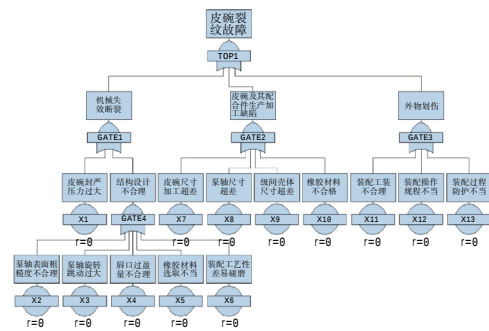


图 5 皮碗裂纹分析故障树

边缘断开,断口处剖面如图 6 所示,从图中可见,裂纹沿金属骨架内边缘并贯穿皮碗底部橡胶,在唇口边缘无明显磨损痕迹。

将裂纹区域放大如图 7 所示,从图中可见,断口起源于图中箭头所示的皮碗弹簧槽内壁,并整体大致沿箭头方向扩展,整个断口形貌大致分为 2 部分,靠近弹簧槽处为断口区域 1,该区域裂纹呈粗大的棱状分布,扩展方向与皮碗轴向方向平行,裂纹起源于该处;远离弹簧槽处为断口区域 2,表面粗糙,有一定的斜纹,是裂纹的快速扩展阶段^[7-8]。

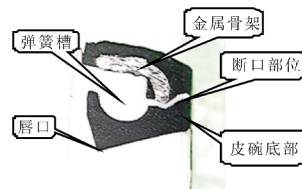


图 6 故障皮碗断口剖面



图 7 断口放大

通过以上断口分析认为,在滑油泵组工作过程中,皮碗内侧唇口部位受力发生变形,在轴向油压反复作用下,橡胶与钢骨架外边缘接触部位萌生裂纹并逐渐扩展断裂。据此判断,底事件 X1 皮碗封严压力过大是导致故障可能原因之一。

3.3 橡胶材质分析

从故障件切取皮碗橡胶进行材质分析,符合 FX-4 材料标准要求^[9-10],且胶料产品验收合格,无让步使用情况,由此可排除底事件 X10:橡胶材料不合格的因素。

3.4 故障件尺寸测量

对皮碗裂纹故障件进行实物尺寸测量,故障件皮碗除内径变形无法测量外,其余尺寸均合格。基本可排除底事件 X7:皮碗尺寸加工超差。

对滑油泵组与皮碗存在配合关系的泵轴和级间

壳体主要尺寸进行测量,其结果均合格,由此可排除底事件 X3、X8、X9 的故障因素。泵轴轴端有倒角,泵轴表面经磨削后光滑无毛刺,且皮碗安装座端面有倒角^[4],因此皮碗与泵轴和级间壳体正常装配时不会发生碰磨划伤现象,由此可排除底事件 X6。

结合断口分析结果,皮碗唇口边缘无明显磨损痕迹,因此泵轴表面粗糙度低不是导致皮碗裂纹的原因,由此可排除底事件 X2 因素。

3.5 设计复查

3.5.1 皮碗设计复查

皮碗安装在滑油泵组内增压泵与回油泵之间的级间壳体内,其作用是将增压泵与回油泵隔离,防止在发动机停车后滑油通过泵轴与壳体间隙流至其他部位^[2]。在发动机工作时,该皮碗的工作环境温度约为 190℃、泵轴转速为 3960 r/min、唇口线速度 3.3 m/s,结构尺寸按照 GB/T 9877《液压传动旋转轴唇形密封圈设计规范》设计如图 8 所示。

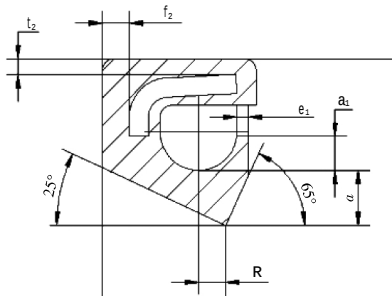


图 8 皮碗剖面

皮碗橡胶材料选用氟橡胶 FX-4,其质量符合 GJB251A-2001 标准,主要特点:耐油、耐热、耐腐蚀,工作温度为 -25~250℃,该材料能够满足发动机使用要求。由此可排除底事件 X5 橡胶材料选取不合理。

3.5.2 泵轴与皮碗装配过盈量

滑油泵皮碗装配过盈量要求如图 9 所示,按照 GB/T 9877 要求, $\phi 16$ 泵轴与皮碗过盈量为 0.7~1.0 mm,但滑油泵图纸中对泵轴与皮碗装配过盈量未作要求,而实测装配过盈量为 1.3~1.5 mm,该过盈量偏大。由此可判断底事件 X4 是导致裂纹的可能因素之一。

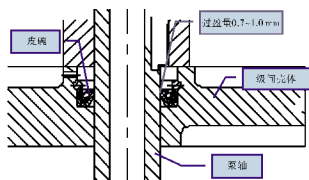


图 9 滑油泵皮碗装配过盈量要求

3.5.3 级间壳体通油孔设计

皮碗安装在滑油泵级间壳体上,在级间壳体的增压泵出油区一端设计有 $\phi 1$ 通油孔,该孔可将滑油引入皮碗密封腔,对皮碗起润滑作用,如图 10 所示。

将通油孔连通增压泵出口后直接影响了皮碗的承

载压力,该压力与滑油供油压力相当,约为 0.6 MPa。较大的油压可将皮碗腰部推向轴面,并导致胶圈变形甚至出现密封失效问题。由此分析底事件 X1: 封严压力过大为导致皮碗裂纹的主要因素。

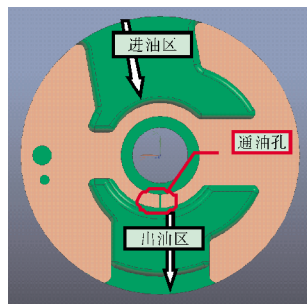


图 10 级间壳体通油孔位置

3.6 皮碗装配工艺复查

某型发动机滑油泵皮碗装配工艺规程完善,并明确采用压装工具,装配过程严格按照工艺规程执行,可排除底事件 X11、X12。装配车间操作台零件、工具摆放整齐、卫生条件良好,泵轴、级间壳体以及工装无污物^[13],装配过程防护合理,可排除底事件 X13。

4 故障机理分析

针对与故障相关的 2 个底事件,对皮碗裂纹故障原因具体分析如下。

(1) 皮碗封严压力过大。由于通油孔与滑油增压泵出口相连,导致滑油泵工作过程中皮碗承受的压力过大,油压将皮碗腰部推向轴面并产生严重变形,同时使皮碗与泵轴的接触宽度和摩擦力增大,在弹簧槽内侧骨架边缘应力集中并逐步产生微裂纹^[14-15],最终形成贯穿性裂纹,进而发生停车后漏油故障。因此,通油孔设计位置不合理导致皮碗承受油压过大是引起该故障发生的主要原因。

(2) 唇口过盈量不合理。皮碗唇口与泵轴之间的实际过盈量为 1.3~1.5 mm,相比 GB/T 9877 标准推荐值偏大。较大的过盈量会使皮碗安装抱轴力增大,摩擦力也会增大^[16],从而促进了裂纹的产生和扩展。

5 改进措施及验证

针对故障原因及复查问题,制定排故措施如下:

(1) 泄压孔更改位置如图 11 所示,从图中可见,通过更改级间壳体通油孔位置,将该孔设计在增压泵进油区,从而降低皮碗承载压力。

(2) 增加皮碗安装过盈量要求“装配弹簧后,皮碗与轴的过盈量为 0.7~1.0 mm”。

(3) 为进一步提高滑

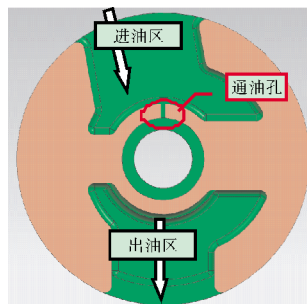


图 11 泄压孔更改位置

油泵可靠性,将泵轴与皮碗配合处表面粗糙度 R_a 由 1.6 提高至 0.6。

将改进后滑油泵换装至多台发动机上,经过大量的厂内台架试车验证以及外场试飞验证,均未再出现此类故障问题,证明这些改进措施正确有效。

6 结束语

详细分析了某型航空发动机滑油位异常下降的故障机理和皮碗裂纹的故障原因,并制定改进措施,为避免此类故障再次发生,给出滑油泵皮碗密封设计经验及建议如下:

(1)在设计航空滑油泵时,可通过结构优化设计来降低皮碗的承载油压,有利于延长密封结构件的寿命;

(2)要注意合理选取皮碗唇口与泵轴过盈量。过盈量大会增大箍紧力和摩擦力,加速皮碗唇口的磨损以及腰部的疲劳裂纹的产生;过盈量偏小则会因径向压力小而降低密封性;

(3)注重提高泵轴表面加工质量,轴的表面粗糙度过大会加速皮碗唇口磨损,适当的粗糙度能够改善密封性能和提高使用寿命;

(4)影响皮碗使用寿命的因素很多,要从设计、生产、装配等多因素考虑,才能提高其密封性能和延长使用寿命,因此将设计经验及考虑因素纳入航空滑油泵设计规范是避免类似故障再次发生的有效方法。

参考文献:

- [1] 张效伟. 涡扇发动机润滑系统性能计算与分析[D]. 西安:西北工业大学, 2006.
ZHANG Xiaowei. Performance calculation and analysis of aero-engine lubrication system [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [2] 刘启国,唐伟,朱瑾,等. MIL-STD-3024《推进系统完整性大纲》标准解析[J]. 航空标准化与质量, 2014, 49(4): 49-52.
LIU Qiguo, TANG Wei, ZHU Jin, et al. MIL-STD-3024 propulsion system integrity program standard analysis [J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2014, 49(4): 49-52. (in Chinese)
- [3] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M]. 北京:航空工业出版社, 2005: 95-116.
LIN Jishu. Mechanic system design of aero-engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005: 95-116. (in Chinese)
- [4] 魏龙,张红光. 密封技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2009: 74-76.
WEI Long, ZHANG Hongguang. Sealing technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 74-76. (in Chinese)
- [5] Salant R F, Shen D W. Hydrodynamic effects of shaft surface finish on lip seal operation[J]. Tribology Transactions, 2002, 45(3): 404-410.
- [6] 王文瑞,顾亮,王国丽,等. 叶片减振器静密封结构设计与性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(11): 979-982.
WANG Wenrui, GU Liang, WANG Guoli, et al. Design and performance analysis of the static seal structure of a vane damp[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2008, 28 (11): 979-982. (in Chinese)
- [7] 刘小明, 亓军洲. 航空橡胶件失效分析及预防研究[J]. 航空维修与工程, 2010(1): 42-44.
LIU Xiaoming, QI Junzhou. Failure analysis and prevention research of aircraft rubber parts[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2010(1): 42-44. (in Chinese)
- [8] 冯保东,黄艳松,马俊文,等. 发动机封严胶圈裂纹分析与预防失效分析与预防[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(3): 165-170.
FENG Baodong, HUANG Yansong, MA Junwen, et al. Analysis and prevention of cracks of sealing rubber band in an engine. [J]. Failure Analysis and Prevention, 2009, 4(3): 165-170. (in Chinese)
- [9] 秦大同,谢里阳. 现代机械设计手册: 润滑与密封设计[M]. 北京:化学工业出版社, 2013: 448-476.
QIN Datong, XIE Liyang. Modern mechanical design manual: lubrication and seal design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 448-476. (in Chinese)
- [10] 中国国家标准化管理委员会. GB/T9877-2008 液压传动 - 旋转轴唇形密封圈设计规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2008: 2-6.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T9877-2008 Hydraulic fluid power-guide specifications for designing rotary shaft lip type seals[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008: 2-6. (in Chinese)
- [11] 孙邦俊. 油封旋转密封对轴表面状态提出的要求[J]. 河北工学院学报, 1994, 23 (3): 89-95.
SUN Bangjun. The requirements proposed by the kinetic rotating oil seal for axial surface state condition [J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 1994, 23 (3): 89-95. (in Chinese)
- [12] Salant R F. Theory of lubrication of elastomeric rotary shaft seals[J]. Journal of Engineering Tribology, 1999, 213(3): 189-201.
- [13] 程红勤. 旋转轴唇形密封圈安装设计 [J]. 合肥工业大学学报, 2009, 199(3): 199-201.
CHENG Hongqin. Installation design of the axis of revolution lip oil seal support [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2009, 199 (3): 199-201. (in Chinese)
- [14] 陈敏,姜小敏,赵祖欣,等. 唇形橡胶密封圈非线性接触有限元分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(11): 76-79.
CHEN Min, JIANG Xiaomin, ZHAO Zuxin, et al. The non-linear contact finite element analysis of the mouth shaped rubber sealing ring[J]. Lubrication Engineering, 2009, 34(11): 76-79. (in Chinese)
- [15] 李建国,丁玉梅,杨卫民,等. 油封动密封机制的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(1): 96-99.
LI Jianguo, DING Yumei, YANG Weimin, et al. Finite element analysis of the dynamic sealing mechanism of oil seal [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(1): 96-99. (in Chinese)
- [16] 高福年,李思婉. 骨架油封自润滑性的提高及其机制的探讨[J]. 特种橡胶制品, 1995, 16(3): 23-26.
GAO Funian, LI Siwan. The improvement of the self-lubricate performance of the framework oil seal and the discussion of its mechanism [J]. Special Purpose Rubber Products, 1995, 16 (3): 23-26. (in Chinese)

(编辑:张宝玲)