

航空发动机轴承失效分析

Failure Analysis on Bearing of Aeroengine

中国人民解放军 5713 工厂 陈礼顺 张莹松 赵 翌 杨武奎



陈礼顺

工学博士,高级工程师,主要从事航空产品技术研究与实践工作,多次参与航空产品新机开发工作。近年来先后承担和主要参与科技创新、技术攻关 16 项,其中 1 项获得军队科技进步三等奖。在省部级学术刊物上发表 48 篇论文,多篇论文获得湖北省自然科学优秀学术论文奖。

航空发动机轴承是关键零部件,主要用来支撑转动轴,引导旋转运动,承受传递给支架的载荷,已经广泛应用在国防军工及民用工业等领域,其加工精度是航空发动机可靠性工作的重要保证,直接影响航空发动机的整体质量。发动机和飞机的起

针对某型发动机深沟球轴承保持架脱落故障现象,对失效轴承进行检查分析,建立了轴承保持架脱落故障树,详细分析了故障产生的原因,结果表明:发动机发出异常声音是由空气起动机传动轴后轴承损坏引起的。铆钉冷冲压端钉头裂纹、轴承保持架兜孔边的周向错位量大、铆钉与铆钉孔的偏心量大、两半保持架铆钉处的贴合缝隙大是造成轴承保持架分离脱落的可能原因,根据故障原因提出了工艺改进方法,对其他类型轴承失效分析具有一定的启示作用。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.120

动、燃油、滑油、液压等系统的主要传动齿轮都是依靠轴承进行支撑运转,在整个飞行过程中,轴承都必须可靠地工作,以保证发动机和飞机所有转子及附件的转速、转向和所需功率符合设计要求^[1-2],轴承工业发展水平推动着国防事业的快速发展。

随着航空发动机技术的进一步发展,新一代飞机发动机在预研时更加关注如何减少飞机迎风面积,提高发动机推力,改善热效率,减轻发动机重量,降低油耗及维修成本,延长在翼时间,对航空发动机附件传动功率及转速提出了更高要求,要求在附件传动装置轴承上的负荷越来越大,轴承的工作转速越来越高,轴承外形尺寸越来越小,因而发生故障的概率也越来越高。深沟球轴承具

有摩擦系数小,在动力传递过程中机械功率消耗小,回转精度和极限转速高,耐磨性好,抗断油能力强等特点,且具有使用寿命长、维修保养简单等优点,在工作中既可单独承受径向载荷,也可同时承受径向和轴向载荷。因此,在航空发动机附件传动装置中得到广泛应用^[3-4]。但近年来厂内和外场出现多起深沟球轴承保持架脱落故障问题,值得进行深入研究。

故障现象及分解检查

某型飞机着陆滑至停机位自然减速至停车状态,在转子停转过程中,机组人员听到发动机有“咚咚”的异常响声,持续时间约 15s;对滑油采样分析,光谱检查发现滑油中铜元素浓度值为 3.2×10^{-6} ,铁元素浓度

值为 4.4×10^{-6} ，与前次滑油光谱分析检查结果进行对比，发现铜元素浓度值和铁元素浓度值增长速度过快，说明滑油系统中某一机件磨损过快。

为查找故障源，分下传动装置收油池，在分流机匣传动腔体底部发现 3 块损坏的青铜保持架，其中最大的 1 块有 4.5 球兜孔。收油池滤网上发现 3 个断裂铆钉；进一步分解发现，空气起动机传动轴后轴承保持架大部分已损坏脱落，内外圈及钢球完整，保持架剩余段含有 3 球兜孔、2 个铆钉，如图 1 所示；1 块保持架粘附在空气起动机传动轴齿轮的轮齿之间；继续分解检查，发现滑油泵处有许多小片状金属屑，其他零部件未见异常。经认真分析、讨论，确认发动机发出“咚咚”异常声音是由空气起动机传动轴后轴承损坏引起的，对该轴承的失效分析是本次研究的重点。



图1 失效轴承的外观形貌

空气起动机传动轴后轴承的结构及工作转速

1 空气起动机传动轴后轴承的结构特点

空气起动机传动轴后轴承为精密级深沟球轴承，也叫向心球轴承，由套圈、钢球、保持架组合而成，轴承外廓尺寸为 $(35 \times 62 \times 9)$ mm。轴承套圈和钢球均采用真空熔炼并经镇静去气处理的 ZGCr15 材料制造而

成，这种材料综合性能好，淬火与回火后不但具有高而均匀的厚度，还具有好的耐磨性和高的疲劳抗性，热加工变形性能和切削加工性能良好^[5]。外圈滚道直径 $D_e=54$ mm，内圈滚道直径 $D_i=43$ mm。轴承平均直径（又称节圆直径） $D_m=48.56$ mm，内圈外挡边直径 $\phi 44.4$ mm，钢球直径为 5.556 mm，共 15 粒，保持架采用两半铝铁锰青铜用铆钉铆接而成，保持架外圆尺寸 $D=\phi 52$ mm，内圆直径 $d=\phi 45.5$ mm，保持架厚度为 7.3 mm，铆钉孔直径 ϕ 铆孔 = $\phi 1.1$ mm，保持架的宽度 $H=(D-d)/2=3.25$ mm。在过梁铆钉孔处的单边宽度为 H 孔梁 = $(H-\phi \text{ 铆孔})/2=1.08$ mm；铆钉材料为 ML15-GB5955，由铆钉钢丝经切断后冲制铆钉头而成，铆钉尺寸为 $\phi 1.0 \times 9$ mm，每套轴承 15 件。

2 轴承及保持架在最大状态的工作转速

该发动机最大状态高压转子转速为 17810 r/min，空气起动机传动轴的传动比为 0.711，因此空气起动机传动轴后轴承在最大状态转速为 12663 r/min^[6]。

根据别捷尔曼著的《滚动轴承手册》一书中计算极限转速的简易公式：

$$N_g = 900000 / (d + D)$$

用以上公式可算出普通级 G7000107 轴承的极限转速 $N_g=9278$ r/min，由于空气起动机传动轴后轴承需承受 98 N 的重负荷，工作温度 80~120 °C，轴承精度等级为 D 级，承受的载荷和精度等级远远高于普通级轴承，因此空气起动机传动轴后轴承工作转速与普通级轴承极限转速有一定差异。

保持架转速 n_m 为：

$$n_m = N_i (1 - D_b \cos \alpha / D_m) / 2$$

式中： N_i 为轴承内圈转速， $N_i=12663$ r/min； D_b 为滚动物直径， $D_b=5.556$ mm； D_m 为轴承节圆直径， $D_m=48.56$ mm； α 为接触角， $\alpha=0\sim 15^\circ$

求得保持架转速：

$$n_m = 5672 \text{r} \sim 5697 \text{r/min}$$

失效轴承的检查与分析

1 失效轴承的宏观检查

检查失效轴承内外套圈钢球跑道，无异常磨损现象；检查 15 个钢球，外观正常，无异常磨损；检查脱落的保持架，保持架兜孔磨损严重，在保持架兜孔剖面处形成金属堆积，可以判断在轴承运转过程中保持架受到滚子不正常作用力破坏；收集了 8 段长短不一的保持架断块，最长 56 mm，最短 2~3 mm，说明轴承带伤运转了很长一段时间，导致断裂的保持架被碾压成很多断块和碎屑，1 块保持架粘附在空气起动机传动轴齿轮齿之间，根据空气起动机传动轴齿轮装配位置，轴承在后，齿轮在前，当保持架脱落后，其残骸将自然落入正在旋转的齿牙之间；铆钉断裂均位于冷冲压端的钉头根部。

2 失效轴承几何尺寸测量

测量保持架剩余段相关尺寸。测量保持架铆钉与铆钉孔的偏心量：铆钉孔位 1 的偏心量为 0，铆钉孔位 2 的偏心量为 0.029 mm；测量铆钉 1 长度为 8.510 mm，铆钉 2 长度为 8.480 mm；测量兜孔轴向单边厚度，最厚为 0.729 mm；测量两半保持架铆钉处的贴合度，最大缝隙宽度为 0.040 mm；测量两半保持架兜孔边的周向错位量最大为 0.125 mm，该位置错位量明显大于同一批次其他 6 套轴承（最大为 0.073 mm）；测量空气起动机安装座内径、空气起动机棘轮轴外径，失效球轴承内外径尺寸，计算配合间隙，均符合设计图样要求。测量结果表明：失效轴承保持架铆钉与铆钉孔的偏心量过大，两半保持架铆钉处的贴合缝隙大，两半保持架兜孔边的周向错位量大。

3 断口分析

保持架断裂位置均在兜孔轴向最小梁宽处，对保持架断口进行电镜

扫描,宏观结构可见明显疲劳弧线及疲劳台阶,最后断裂部位可见韧窝特征;微观结构可见与裂纹扩展方向垂直的疲劳辉纹,涟波花样及韧窝花样,均为疲劳裂纹特征。保持架铆钉均断裂于冷冲压端的钉头根部,微观结构也存在明显的疲劳辉纹、解理台阶及韧窝花样的疲劳裂纹特征^[7-9];剩余段保持架上的2个铆钉在冷冲压端的钉头R根部均有微裂纹。

保持架脱落机理分析

根据对失效轴承的宏观检查、尺寸测量、断口分析、失效轴承的结构特点及工作转速、查阅相关的技术文件、图纸资料,结合前期的排查经验,建立轴承保持架脱落的故障树,如图2所示,进行故障定位,明确保持架加工缺陷、铆钉脱落、材料强度不够、润滑不良、安装游隙调整不当是保持架脱落的主要故障原因。

1 保持架加工缺陷

轴承具有高精密性,其尺寸公差和旋转精度是以 μm 来设计和制造的,对于钢球,形状偏差也是以

0.01 μm 或更小的单位。保持架是轴承的一个重要零件,其作用是把滚动体均匀相互隔开,以免互相碰撞和摩擦,并使每个滚动体均匀轮流承受相等的载荷。因此,保持架加工精度要求很高,如果在制造过程中保持架加工精度达不到要求,就可能造成轴承在运转过程中保持架发生变形,一旦变形过大,滚动体承受的载荷就会失去均匀性,从而反过来使保持架发生疲劳断裂。通过对失效轴承保持架进行测量,保持架铆钉与铆钉孔的偏心量为 0.029mm,两半保持架铆钉处的贴合缝隙为 0.040mm,两半保持架兜孔边的周向错位量为 0.125mm,这3项指标均远远超过了加工精度要求,保持架的几何尺寸变化改变了保持架和钢球的配合间隙,使钢球丧失了原来的回转精度,在极限转速下,钢球和保持架的惯性力均可导致运转情况恶化,钢球在保持架中转动异常,使保持架承受异常作用力,保持架在兜孔轴向最小梁宽处产生疲劳断裂。

2 铆钉脱落

引起铆钉脱落的原因有4个:一是铆钉在冷冲压过程中钉头根部产生疲劳裂纹;二是铆钉铆接过程中存在铆钉拆钉再铆现象,该过程导致铆钉孔两端局部产生微小变形,再次装钉铆接会产生微小间隙,该微小间隙在轴承正常工作过程中,由于振动应力作用使铆钉钉头与铆钉孔之间发生微振磨损,产生疲劳裂纹,导致铆钉头脱落;三是轴承运转过程中铆钉头因磨损发生微裂纹,在循环载荷作用下产生疲劳裂纹;四是未采用专用工装进行安装和拆卸,造成分解和装配过程中铆钉受到伤害导致疲劳裂纹。

如果保持架上某一个铆钉头出现微裂纹,那么在轴承的运转过程中就会以微裂纹为起点开始萌生疲劳裂纹,导致铆钉头断裂,铆钉脱落会使相邻的两个钢球运动空间相对增大,钢球和保持架的撞击力增大,在接触区将对保持架造成很大的应力和塑性变形,在保持架薄弱环节,即兜孔轴向最小梁宽处引发疲劳裂纹;一个铆钉脱落后,此时轴承还能继续

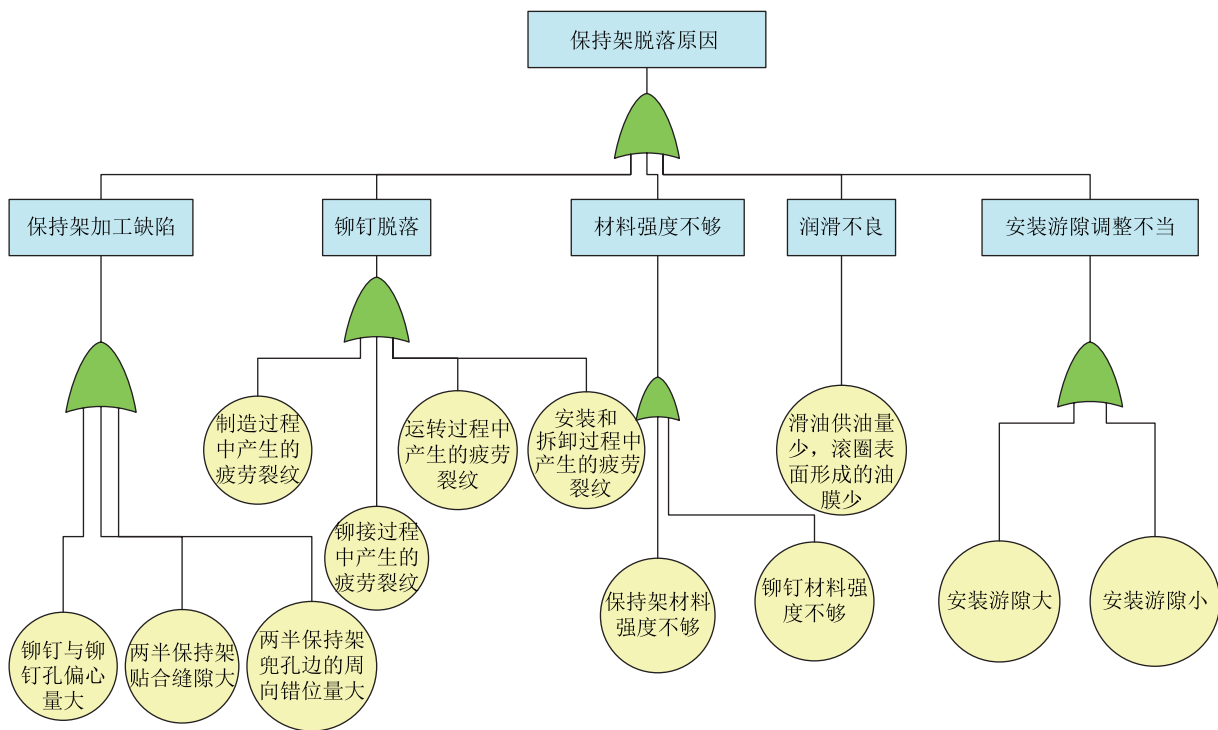


图2 轴承保持架脱落故障树

运转,但属于非正常运转。在钢球异常撞击力的作用下,相邻的铆钉受力增大,磨损加剧,在冷冲压端根部产生微裂纹,随着微裂纹逐步扩展,萌生疲劳裂纹直至断裂导致相邻铆钉脱落。铆钉脱落的数量越多,钢球在保持架中运动的空间越大,承受不均匀载荷越大,不均匀的载荷又使保持架承受的应力和变形相应增大,最后不能将钢球束缚在兜孔里,使钢球相互之间发生碰撞、摩擦,同时未脱落的铆钉受力也越来越大,在冷冲压端容易产生裂纹,脱落的速度也變得更快,铆钉的脱落又使钢球异常作用力增大,承受的载荷越来越不均匀,保持架变形相应增大,疲劳裂纹扩展的速度越来越快,形成恶性循环,最终导致保持架发生疲劳断裂、脱落^[10]。

脱落铆钉均在冷冲压端头断裂,检查现场工装,分解和装配空气起动机传动轴后轴承均有合适的专用工装,不会损坏到保持架及铆钉,可排除因不正确安装和拆卸方法导致铆钉裂纹。

3 材料强度不够

保持架材料为铝铁锰青铜,铆钉材料为 ML15 钢丝。根据《中国航空材料手册》介绍,铝铁锰青铜具有较高的强度、硬度、耐磨性和耐腐蚀性能,优良的切削性能,高温下塑性较好,适合制造中小型轴承保持架,但抗拉强度和屈服强度较低;ML15 铆钉钢丝的塑性、韧性及冷冲压性能均良好,但强度较低。

当轴承转速达到 12663r/min,轴承保持架转速已经达到 5672~5697r/min,对于 ML15 铆钉和铝铁锰青铜保持架来说,工作条件极其苛刻,且轴承的最高转速已接近轴承极限转速,铆钉和保持架材料的强度都较低,在高转速下铆钉和保持架极易断裂。

4 润滑不良

发动机润滑油系统采用 4109 合成润滑油对轴承和齿轮进行飞溅润滑,在

滚动面上形成油膜,避免滚道与滚动体表面直接接触,减少轴承内各零件之间的摩擦和磨损,并为摩擦热进行导热和散热,延长轴承的使用寿命。如果轴承润滑不良,将使套圈滚道与滚动体表面之间缺少有效油膜保护,在重载、高速、高温等环境下轴承滚道表面很快就会因摩擦增大和磨损加重,轴承温度上升很高致使润滑油不能带走足够的热量而使轴承处于高温运转导致保持架疲劳断裂^[11]。检查失效轴承内、外套圈钢球跑道,无异常磨损现象,检查 15 个钢球,外观正常,无异常磨损,说明轴承润滑良好。

5 安装游隙调整不当

在轴承安装和拆卸过程中,要使用专用工装,采用科学正确的安装和拆卸方法,如不按照技术文件要求采用冷装、热装、注油液压装等方法,使得安装后的径向游隙变大或变小,均会导致保持架在运转过程中由于热疲劳产生裂纹。

在安装过程中,如果轴承和轴承安装座、轴承和轴过盈量大,安装后轴承的径向游隙变小。轴承运转过程中,滚珠和套圈会出现多点接触,摩擦力骤然加大,轴承部分工作表面温度迅速升高,滚珠和滚道产生超大应力,滚珠对保持架产生不均匀超拥挤压力,使得保持架膨胀变形,进一步消除轴承游隙,导致轴承卡死、抱轴、产生热裂纹并在保持架薄弱处发生断裂;如果轴承和轴承安装座、轴承和轴配合过松,安装后轴承游隙过大、轴承旋转时,保持架与滚动体之间的冲击碰撞力增大,使保持架发生变形、萌生裂纹,同时使滚子和套圈间产生公转滑动,滑动摩擦产生高温,使保持架产生热裂纹,热裂纹不断延伸将使保持架在使用中断裂。

检查断裂保持架,未发现高温变色现象;检查轴承安装方法,有专用工装并采用在滑油中加温的方法进行装配;检查轴承和轴承安装座、轴

承和轴的配合间隙均符合要求,说明轴承安装方法是科学合理的,产生该故障与轴承安装无关。

工艺改进

为提高轴承工作可靠性,保证飞行安全,应对轴承制造、加工工艺方法、控制尺寸精度等方面进行改进,以提高轴承的制造质量。

(1)从检查情况看,铆钉均在冷冲压钉头根部产生疲劳裂纹,热冲压端钉头根部均未产生裂纹,冷冲压工艺容易在钉头根部产生应力集中,形成疲劳裂纹源,因此应将铆钉钉头一端采用冷冲压加工方法,另一端采用热冲压加工方法改为两端均进行热冲压加工方法;

(2)进一步减小铆钉和铆钉孔配合间隙,保证铆钉和铆钉孔的同心度;

(3)为避免双半保持架产生错位,保持架加工时选用数控钻加工兜孔,提高兜孔的加工精度;选用进口硬质合金钻头,减小钻孔时的切削力;

(4)在双半保持架的端面增加装配位置,区分基准面与非基准面,防止保持架兜孔错位,保证两半保持架的贴合度;

(5)增加对新品轴承的检查手段,用显微镜检查铆钉头外观质量;

(6)采用科学正确安装和拆卸方法,使轴承正确安装于轴上或轴承座圈内,保证装配过盈量,避免因操作不当损伤轴承或使轴承安装游隙发生变化。

结束语

轴承在使用过程中,两种或多种失效机理可能同时起作用,且相互影响,即在轴承寿命的某一时期,一种起作用的失效机理可能会导致其他失效机理,如铆钉裂纹可能是保持架变形的原因,也可能保持架加工装

(下转第 128 页)

弯曲和滚压工艺试验验证,管材的弯曲半径可实现与不锈钢管材的弯曲半径一致,管接头尺寸<不锈钢管接头尺寸,解决了钛合金管路因塑性较低而不易弯曲,进而导致管路成形后空间占用偏大;

(2)在温度方面,钛合金管路通过

了高低温、脉冲和防火试验,分别验证了钛合金管路的耐温度冲击、耐各种温况下压力冲击和防火能力;

(3)在压力方面,钛合金管路通过了气密、耐压、重复装配、爆破、连接强度、弯曲疲劳、高低温和脉冲试验,验证了在各种复杂工况下管路承受工作

压力和极限压力的能力;

(4)在振动方面,钛合金管路进行了振动疲劳试验,得出在管路的全寿命周期内(循环数为 10^7 量级),疲劳极限不低于180MPa,与不锈钢管路相当。

按照该机构设计的零组件目前已在航空发动机上使用,各项性能表现良好。

以上钛合金管路研究成果不仅可以应用到航空发动机领域,也能推广应用于飞机、导弹、航天和船舶等装备的管路系统设计和制造,全面提高我国整体装备水平。

结论

钛合金导管的重量优势能够减轻发动机外部管路组件重量,从而降低发动机整机重量,提高发动机推重比。从先进航空国家的研制方向上看,随着航空发动机推重比的不断提高,扩大选用钛合金导管的使用范围已成为必然趋势。本文从设计角度进行研究,可为钛合金管路在国内航空发动机领域的应用提供技术支持和参考。

参考文献

[1] 张荣霞,郭敏骁,邱明星. 钛合金导管内径滚压连接数值模拟与试验研究. 航空制造技术,2011(16): 90-92. (责编 古系)

12册-传动及润滑系统). 北京:航空工业出版社,2002.

[5] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册(第4卷)-钛合金 铜合金. 北京:中国标准出版社,2002.

[6] 王云普. 涡扇十一型发动机构造. 湖南:空军第二航空学院,1998.

[7] 张栋,钟培道,陶春虎,等. 失效分析. 北京:国防工业出版社,2013.

[8] 张栋. 机械失效的痕迹分析. 北京:国防工业出版社,1996.

[9] 胡世炎. 机械失效分析手册. 成都:四川科学技术出版社,1989.

[10] 吴富民. 结构疲劳强度. 西安:西北工业大学出版社,1985.

[11] 林国昌,张振波,陈聪慧. 某发动机主轴承故障分析. 航空发动机,2002(1):43-46.

(责编 古系)

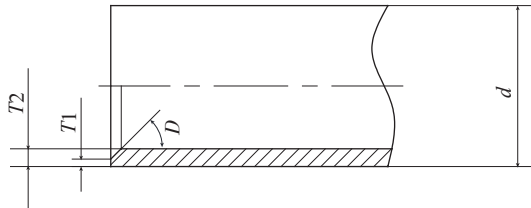


图10 钛合金导管特征尺寸示意图

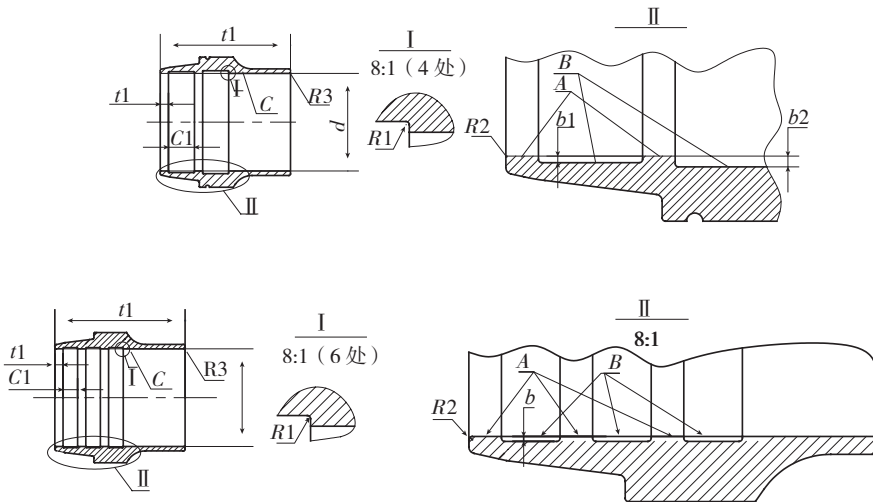


图11 钛合金管接头特征尺寸示意图

(上接第123页)

配精度不高导致铆钉断裂。

本文根据轴承保持架脱落故障树,结合轴承结构特点,进行了有针对性的分析,给出了故障原因:

(1)发动机发出“咚咚”的异常声音,是由于空气起动机传动轴后轴承损坏引起的。

(2)铆钉冷冲压端钉头裂纹断裂是造成轴承保持架分离脱落的可能原因之一。

(3)轴承保持架兜孔边的周向错位量相对较大、保持架铆钉与铆钉孔的偏心量大、两半保持架铆钉处的贴合缝隙大也是轴承保持架分离脱

落的可能原因之一。

(4)为保证轴承安全使用,建议用滑油光谱检查间隔时间由25h缩短为20h,每次飞行结束后,对磁性螺堵进行金属屑检查,滑油泵滑油滤检查间隔时间由100h改为50h。

参考文献

[1] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计. 北京:航空工业出版社,2005.

[2] 陶春虎,钟培道,王仁智,等. 航空发动机转动部件的失效与预防. 北京:国防工业出版社,2008.

[3] 刘长福. 航空发动机构造. 北京:国防工业出版社,1989.

[4] 林基恕. 航空发动机设计手册(第