

某型航空发动机减速器轴承失效故障分析与排除

张 海 孟 伟

(总参陆航部驻株洲地区军事代表室, 长沙 410200)



摘要: 针对某型航空发动机减速器输入级结合面漏油的故障, 采用建立故障树的故障模式影响分析方法, 准确定位, 从五个方面分析了故障产生的机理, 逐一排除, 确定了减速器轴承失效的性质和原因, 回油部位堵塞造成轴承循环冷却不畅是造成本次故障的主要原因。最后, 针对性地制定了相应的改进措施和建议, 严格控制涂胶工艺。

关键词: 航空发动机; 减速器; 轴承磨损; 齿轮

Fault Analysis and Elimination of a Bearing Invalidation in the Air Motor Reducer

Zhang Hai Meng Wei

(Military Representative Office of Headquarter of Army Air Corps in Zhuzhou, Changsha 410200)

Abstract: The oil leakage fault is discovered when the oil level lower than normal standard air motor reducer junction surface. In the paper, the failure modes and effects analysis of fault tree is constituted. Mechanism of fault emerging is analysed from five aspects with accurate fault location. The characters and reasons are confirmed in the bearing's invalidation in the reducer through the exclusive method. The main reason is that the position of return oil is blocked. In addition, improvement actions and proposals are given out pertinently. The technology of gluing must be controlled strictly.

Key words: air motor; reducer; bearing abrasion; gear

1 引言

某型航空发动机是 90 年代初我国引进国外直升机制造专利, 并逐步实现了国产化的涡轮轴发动机, 它在设计思想、原理结构和维修规范上都与国外发动机基本一致。近两年, 该发动机减速器在总装厂和各部队先后发生了 X 次结合面漏油现象, 严重影响了直升机的交付与部队飞行训练^[1]。

2 故障现象

某台整机试验时数 60h 后, 现场反映减速器每天需要补加滑油 5~10ml, 检查后发现传动与发动机结合处有油渗出。分解后发现主动锥齿轮轴上圆锥滚子

轴承烧毁, 油封损坏, 现场分解后的故障零件见图 1 和图 2。



图 1 故障齿轮和轴承



图 2 故障挡盘和油封

初步判断, 输入端的轴承失效是本次故障产生的原因, 因此, 对轴承进行了详细故障分解。对失效的圆锥轴承检查, 发现轴承内圈断裂, 内径表面沿内径圆周方向上有较深的滑动痕迹; 滚子在内圈滚道中歪

斜；保持架梁倾斜，且小端处的梁多处断裂。进一步详细分解此轴承，轴承外圈外径呈棕色或黑色，无明显磨损痕迹，滚道呈金属色，无剥落，运行轨迹局部附着有圆周方向分布的碾皮及受碾压产生的塑性变形痕迹。

失效轴承内圈：烧损严重，滚子已焊合镶嵌到滚道表面，将滚子与内圈分离后，未见内圈滚道表面有剥落及高温变色现象，滚道局部有黑色堆积物，形貌见图 3；两端挡边内侧受啃严重。内圈两端面及内径有明显打滑痕迹且温升变色明显，呈蓝黑色或棕黄色，两端面和内径呈槽状，形貌见图 4。内圈有两处沿轴向贯穿断裂，断口为脆性断口，由于断口烧损严重，无法确定其断裂源位置。

失效轴承滚子：轴承呈锁死状态，滚子在内圈滚道偏向同一侧倾斜，滚子已焊合到滚道表面，表面有附着物，呈黑色，局部裸露处呈金属色；滚子磨损严重，导致宏观尺寸变小，局部有撞击印痕；两端端面有明显因啃擦产生的塑性变形。

失效轴承保持架：有多处过梁沿根部断裂且沿同一方向扭曲，少数过梁已经断裂，过梁外径有明显磨损痕迹，呈金属色，形貌见图 5。



图 3 内圈滚道形貌



图 4 内圈内径打滑痕迹



图 5 外圈滚道形貌

3 故障定位

3.1 建立故障树^[2]

故障轴承为发动机减速器输入级锥齿轮副主动齿轮的支撑件。该传动是由一对减速的螺旋锥齿轮（26/31）改变方向，经一对直齿轮（34/45）增速后将动力传给功率轴，实现为变速机构提供动力的功能。该轴承位于主动锥齿轮轴系，起对主动锥齿轮支撑作用。其载荷工况与锥齿轮载荷工况成线性关系。该轴承与锥齿轮支撑处的锥轴承成对使用，其在润滑上共用进油油路，在回油上，两个轴承有各自独立的回油通道。通过对设计结构图（图 6）受力情况分析，对故障产品进行分解、检验、试验及故障分析工作，形成了故障树，见图 7。

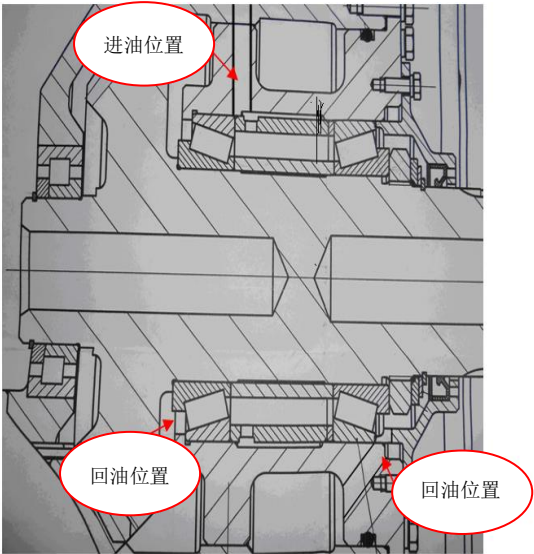


图 6 减速器部分设计结构图

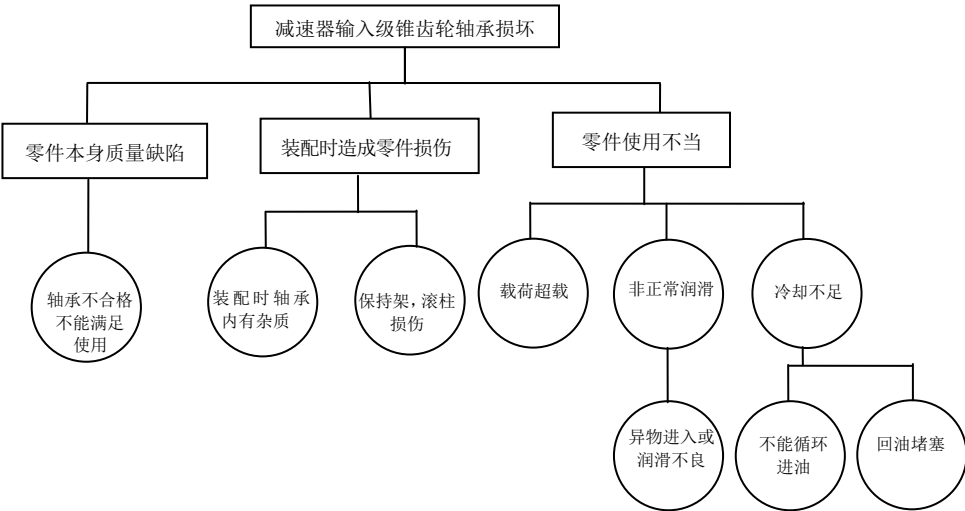


图 7 减速器轴承失效故障树

3.2 故障部位轴承计算分析

3.2.1 寿命计算

a. 计算依据

ISO281—2007《滚动轴承——额定动载荷和额定寿命》^[3]。

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^\epsilon \tag{1}$$

式中： L_h ——额定寿命，h； C ——基本额定动负荷，N； P ——当量动负荷，N； ϵ ——寿命指数，滚子轴承 $\epsilon=10/3$ ； n ——转速，r/min。

b. 计算边界条件

故障轴承的基本参数见表 1。故障轴承的载荷参数见表 2。

表 1 故障轴承的基本参数

代 号	基本尺寸/mm	额定动负荷/N	额定转速/r min ⁻¹	
			滑脂	机油
32022X	110×170×38	233000	1800	2600

表 2 故障轴承的载荷参数

计算工作点	转速/r min ⁻¹	当量动载荷/N
最大扭矩点	1500	6930
最大功率点	2200	6010

c. 计算结果

最大扭矩点 $L_h = \frac{10^6}{60n} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^\epsilon = 1363012\text{h}$;

最大功率点 $L_h = \frac{10^6}{60n} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^\epsilon = 1494046\text{h}$ 。

从计算结果看，最大扭矩点和最大功率点的计算

寿命都远大于轴承的工作时间，从而满足设计要求。

3.2.2 热平衡分析

故障部位轴承采用强制循环润滑、冷却，在工作过程中，轴承通过循环冷却润滑油和内外圈向轴及支撑件传导辐射散热。在该发动机试制过程中，不管是极限试验，还是高、低温环境试验，高原环境试验，发动机均通过了寿命考核验证，并未发现类似故障。因此，可以判定该处轴承的润滑和冷却设计能满足使用要求。

3.3 故障原因分析

3.3.1 轴承本身质量

故障部位的轴承自型号正样设计开始，其技术状态从未发生过变更，采购渠道也未发生变更。在发动机寿命考核验证中，均未发生此类故障。因此，可排除由于轴承本身零件质量问题造成本次故障的原因。

3.3.2 轴承装配质量

装配过程中异物的带入或者滚柱、保持架的损伤均可能导致轴承在使用过程中产生上述现象的故障。

前传动总成装配对零件清洗和装配环境有严格的要求，故障轴承随发动机完成了台架性能试验，并到故障发生是已飞行 60h，因此，可排除在轴承装配时异物带入造成故障的可能性。

故障部位轴承的装配工艺中，明确必须采用专用的装配工装，因此，在工艺路线和具体实施时造成故障部位轴承滚柱、保持架损伤的可能性很小。

由上所述，由于轴承装配造成本此故障的原因可以排除。

3.3.3 轴承工作载荷

轴承工作载荷可分为工况载荷和非正常附加载

荷。

a. 轴承工况载荷分析

故障部位轴承,在工况载荷设计计算中,其计算寿命远大于工况时的寿命要求。发动机样机完成了寿命可靠性考核试验和各类极限工况试验,在试验中均未发生此类故障。发生故障的主动锥齿轮齿面接触印痕无边缘接触、无重接触痕迹,由此可判定该轴系在工作过程中工况载荷正常,未承受额外的附加载荷。因此,可排除由于工况载荷造成的轴承故障。

b. 非正常附加载荷分析

轴承在工作过程中,如果出现游隙控制不合适、轴承支撑位置不同轴会造成轴承承受非正常的附加载荷,从而导致轴承产生故障。

故障部位轴承游隙控制,从正样状态开始,该轴承轴系的轴向游隙一直控制在 0.06mm。故障轴承原始装配记录中,轴系的轴向游隙为 0.05mm,与正样状态一致。复查与故障轴承支撑、定位等相关零件的质量文件,未见相关的超差质量记录,符合图样设计要求。因此,可排除由于零件超差、游隙控制不当等因素造成的轴承故障。

综上所述,可排除轴承工况载荷造成本次轴承故障。

3.3.4 轴承润滑

润滑条件是保证轴承正常工作的必备条件,如果工作中出现通过润滑有异物进入轴承或润滑缺乏的现象,均会产生轴承损坏故障。

a. 异物进入轴承

故障部位轴承的润滑油取自压力油箱,润滑油为系统内部经过过滤后的液压油,从压力油箱到故障轴承处为封闭管路,不可能在轴承工作过程有异物进入。由图 6 可知,故障轴承与靠近锥齿轮位置的锥轴承采用统一油路作为循环进油口,而故障仅发生在外端轴承,靠近锥齿轮的轴承未见明显损伤。因此,可排除在工作过程中由于异物进入导致本次轴承故障。

b. 润滑不良

在分解过程中,对进油的润滑油路进行了仔细的检查,检查结果为:润滑油路通畅且无异物。因此,润滑不良不是造成本次轴承故障的原因。

综上所述,可排除由于润滑问题造成本次故障的原因。

3.3.5 轴承冷却

轴承冷却是保证轴承长期正常工作的必备条件之一,如果轴承散热不良,将会造成轴承在工作过程

中轴承温升不断升高,最后导致轴承运行过热失效。

故障部位轴承的冷却是采用循环强制冷却的方式。在故障分解过程中,对故障部位轴承润滑冷却油路进行了仔细的排查,发现进油油路正常,而回油油路有脱落的平面密封胶胶块形成的沉淀物,造成了回油口堵塞现象,如图 8 所示。由此分析可知,回油部位堵塞造成故障部位轴承循环冷却不畅,是导致轴承失效故障的原因之一。



图 8 挡盘回油口的沉淀物

4 故障机理分析

本次故障,共造成了支撑盘、螺母挡片等共 12 种零件不同程度的损伤。从失效后的主动锥齿轮轴和支撑盘可以看出,其温度失效后颜色变化为由靠近输入端轴承开始向两边不断变浅。由此可以判断,此次故障源为靠近输入端的轴承,其它零件为由此造成的次生损坏。

故障轴承分解后其故障现象为:内圈断裂,内径表面沿内径圆周方向上有较深的滑动痕迹。轴承在运行时,轴承圈达到的温度通常要高于与其相配部件的温度,这样会导致内圈与轴径的配合变松,而外圈的膨胀则可能导致其不能在轴承座中有预期的轴向移动。如果轴承工作过程中润滑液不能正常循环,导致轴承不能及时冷却,轴承工作时温度会不断升高,当温度升高到一定程度时,就会导致故障轴承的内圈与轴径失去配合。由于轴承内圈与轴径之间失去配合,使得内圈与轴颈之间发生相对运动,即产生了轴承内圈的旋转爬行现象。旋转爬行的存在,致使整个装置的运转类似与一个摩擦传动装置,进一步导致该处温度的升高。正是旋转爬行现象的产生,致使轴承内套圈的内壁和轴的表面产生严重以刻痕为特征的擦伤现象(图4、图5),甚至出现短小的径向擦伤,由于径向的擦伤,导致径向定位的螺母、轴套等损伤。这

一结果类似于局部咬合^[4]。而不连续的局部加热所引起热应力,必然会导致内圈开裂(图3),内圈断裂面具有像锯切一样的形貌,裂纹起始于内圈端面,受到严重划伤的区域并由此发展,因为内圈中的应力集中导致最终开裂。因此,该轴承的强制循环冷却失效,是导致本此故障的原因。

回查故障轴承循环冷却油路,发现在该轴承的回油口部位有脱落的平面胶块沉积物,见图8。该沉积物聚集在回油口附近,造成了回油不畅,导致该轴承冷却不够而发生故障。在故障分解后的挡盘上,尚有已被润滑油浸泡软化,但尚未脱落的胶块,也可证明以上分析内容,见图9。



图9 挡盘尚未完全脱落的胶块

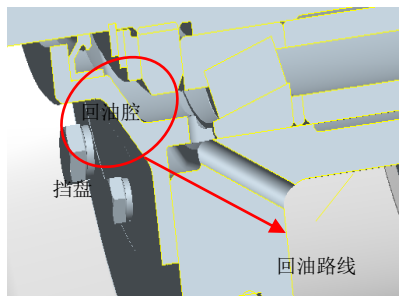


图10 故障部位轴承回油结构

故障部位轴承循环冷却回油结构如图10所示。润滑油经过轴承,通过挡盘及支撑座上的回油孔回到箱体,完成循环冷却。挡盘与支撑座之间通过在两者配合的平面处涂平面密封胶(牌号:乐泰587)实现回油密封。在装配挡盘过程中,涂过多的平面密封胶,会造成把多余密封胶挤压到环形回油槽中,当胶凝固后形成胶块。在使用过程中,在回油槽中润滑油的浸泡下,胶块会不断软化,飞行过程中该处会随发动机产生一定振动,在两者作用下,最终导致胶块脱落。脱落后的胶块不断沉积,达到一定量后就会堵塞回油孔,造成回油不畅,最终导致故障发生。

当脱落的胶块开始堵塞回油孔时,由于回油不

畅,会导致该轴承回油腔的回油不断聚集,在供油压力和轴承旋转产生油压作用下,在回油腔会产生一定油压,从而导致主动锥齿轮轴和挡盘之间的旋转油封漏油。随着故障旋转爬行的不断发展,轴承温度不断升高,逐渐烧伤与之相邻零件,但是由于润滑正常,所以该轴系在动力作用下还能继续旋转。由于油封的损坏,势必造成润滑油外漏,这与现场反映的故障现象——每天须补充滑油5~10ml相符。

5 结束语

经过以上的故障定位与机理分析,可以得出发动机减速器轴承失效的原因是:装配时,平面密封胶涂胶过多后凝结成块,在运行中受润滑油浸泡和振动影响,脱落后堵塞回油口所致。因此,故障发生的时机与减速器的飞行时间没有直接联系,与减速器使用的工况条件也无直接联系,而是与涂胶量和胶块脱落的时间有直接关系。由于胶块脱落时间在使用过程中具有一定的随机性,因此,故障发生的时机也有一定的随机性。

因此,挡盘安装时涂胶过多,在支撑座的容油环槽中凝结成块,在工作过程中受润滑油的浸泡和运行振动的影响致胶块脱落,堵塞轴承回油孔是造成本次故障产生的主要原因。

涂胶工艺属于特种工艺,结合面的清洁程度、涂胶量、涂胶均匀性、挡盘的拧紧力矩都与涂胶的质量有关。因此,必须固化涂胶的工艺参数和工艺流程,从涂胶到挡盘最终装配时间不得超过6min,保证在0~35℃的环境中,固化24h以上。经过多次验证性试验,拆开挡盘检查后均未发现胶体有块状物出现。按照新的涂胶工艺装配的发动机减速器,使用正常,再未发生类似故障,进而说明上述故障定位是准确的,改进的涂胶工艺是可行的。

参考文献

- 1 张海,周志兵.航空发动机齿轮材料及加工精度分析研究.航天制造技术,2007,1:38~40
- 2 陆廷孝,郑鹏洲.可靠性分析与设计.北京:国防工业出版社,1995
- 3 陈光等.航空燃气涡轮发动机结构设计.北京:北京航空学报出版社,1988
- 4 苏云洪,韩铁侠,黄合成.航空发动机轴承失效模式分析.试验技术与试验机,2007,1

