

# 基于FTA的轴承失效分析与改善

黄 段

上海人本集团轴承技术研发有限公司 上海 201410

**摘要:** 本文主要探讨了基于故障树分析 (FTA) 方法对轴承保持架失效进行分析与改善。首先介绍了轴承保持架的作用及重要性,接着阐述了故障树分析方法。通过对保持架失效案例的深入研究,构建了保持架失效的故障树,分析了导致保持架失效的各种潜在因素。针对这些因素进行逐一排查,并针对故障原因提出了相应的改善措施并验证了改善效果,为相关领域的工程实践提供参考。

**关键词:** 故障树;深沟球轴承;失效分析

引言: 轴承作为机械设备中重要的基础零部件,广泛应用于各个领域。而保持架作为轴承的重要组成部分,其作用是分隔滚动体,引导滚动体并使其在正确的轨道上运动,同时还能防止滚动体之间的直接接触,减少摩擦和磨损。保持架的性能和可靠性直接影响着轴承的工作性能和使用寿命。传统汽车的驱动电机转速相对较低,而新能源汽车,特别是电动汽车,其驱动电机的转速可高达16,000转/分钟,甚至在某些极端情况下,可以达到30,000转/分钟。这样的高速运转对轴承的耐久性、承载力和摩擦阻力提出了前所未有的挑战。高速深沟球轴承不仅要承受巨大的离心力,还要在极高的旋转速度下保持稳定,同时减少能量损耗,以确保电机运行效率,延长电池续航里程,以及优化车内空间布局。一旦保持架发生失效,不仅会导致轴承损坏,还可能引发整个设备的故障,造成严重的经济损失和安全隐患。因此,对保持架失效进行深入分析并采取有效的改善措施具有重要的现实意义。

所谓故障树分析方法 (FTA) 是一种图形演绎方法。它以系统的故障作为分析对象,用图形表示出其发生原因之间的逻辑关系。故障树分析法是产品可靠性和安全性分析的重要工具之一,它以一个不希望的产品故障事件即顶事件作为分析的目标,通过自上而下严格的按层次的故障因果逻辑分析,逐层找出故障事件的必要而充分的直接原因,最终找出导致顶事件发生的所有原因和组合,在各个领域的排查中起到了非常重要的作用<sup>[1]</sup>。

## 1 故障现象

某减速机在进行高速耐久测试中,试验运转至80%左右,出现异常噪音和振动,停机检查后发现输入轴后端深沟球轴承的保持架从套圈里脱出。对失效轴承进行拆解调查,套圈滚道无异常磨损,钢球表面有划痕和碰撞痕迹。对该轴承的内径、外径、宽度、沟道等尺寸和精度进行复

查,相关参数均符合轴承的图纸设计。轴承整体的运转状态正常,接下来对轴承保持架脱出进行分析。

## 2 故障排查

### 2.1 故障树建立

建造故障树的具体步骤如下:首先,明确顶事件即轴承失效。然后,从顶事件出发,逐步分析可能导致其发生的直接原因,这些原因包括轴承自身因素和外部因素,其中自身因素又可以分为设计问题和制造问题,外部因素包括使用工况异常和安装问题。对于每个直接原因,再进一步分析其下一层的原因,直到分析到底事件为止。在分析过程中,要合理运用逻辑门符号来表示事件之间的关系。例如,如果某个原因只有在多个条件同时满足时才会导致顶事件发生,那么就可以使用与门连接这些条件;如果只要有一个条件满足就会导致顶事件发生,就可以使用或门连接这些条件。

本失效案例中以轴承保持架脱出为顶事件,建立故障树,如图1。

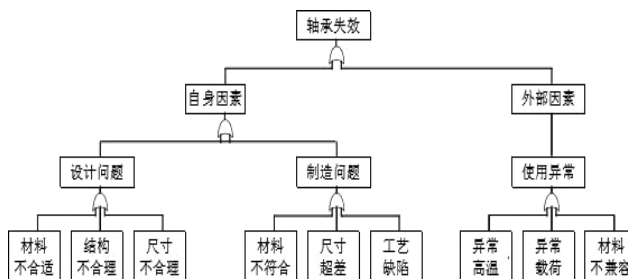


图1 轴承保持架脱出的故障树

### 2.2 故障原因排查

#### 1) 设计问题

##### ①材料选择不合适

工程塑料保持架具有轻质量和自润滑性等特点。在新能源汽车高速深沟球轴承中,轻质量的保持架能够减少轴承的整体重量,降低整车能耗。同时,自润滑性能

能够减少保持架与滚动体之间的摩擦，降低摩擦损耗，提高轴承的效率。此外，这种材料的保持架通常采用非对称的冠状设计，能够在高速运转时有效引导滚动体，保证轴承的稳定性。

失效轴承的保持架采用PA46+30%GF，是常用的保持架材料，使用温度-40~160℃，具有优良的耐磨性、耐热性、自润滑性，机械强度较高，力学性能好，抗冲击性能良好<sup>[2]</sup>；保持架材料选型符合JBT 7048-2011滚动轴承工程塑料保持架技术条件的标准；该材料的保持架量产应用实际较多，PA46+30%GF材料选型可满足使用环境要求。

②结构设计不合理

保持架的形状过于复杂或存在薄弱，导致应力集中会降低保持架的强度；加强筋或支撑结构设计不足，也会影响保持架的强度，导致保持架的变形量大。通过动力学软件模拟计算最高转速工况下，钢球与保持架间的碰撞力为202N，如图2。此工况下保持架的最大变形量为0.09mm，发生在球兜处，如图3。

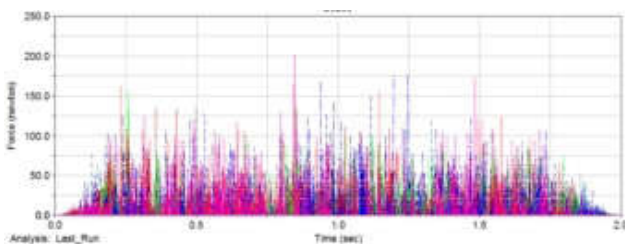


图2 保持架与钢球的碰撞力

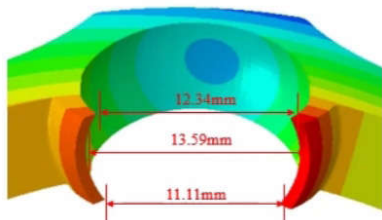


图3 保持架的变形量

③尺寸设计不合理

尺寸设计不合理，如底部厚度不足、宽度不够等，无法承受工作中的载荷，导致保持架断裂或变形。保持架球兜的锁口尺寸是影响保持架脱出的关键尺寸，保持架球兜的锁口尺寸越小，保持架从轴承内脱出的难度越大，相反，保持架球兜的锁口尺寸越大，保持架越容易从轴承内脱出。

为了检验设计的合理性，按保持架锁口尺寸的上限挑选样件，实测保持架的脱出力，如表1。虽然室温下保持架的脱出力大于钢球与保持架的碰撞力202N，然而实际工况中，保持架在离心力的作用下会发生变形，球兜的锁口尺寸会张大，保持架的脱出力会减小。

表1 保持架的脱出力

保持架的脱出力 (N)					
失效件	新品1	新品2	新品3	新品4	新品5
225	244	270	250	246	237

2) 制造问题

①材料不符合

如果材料使用错误或者材料本身有缺陷，会影响保持架的性能。查阅保持架的原材料检测报告，并通过红外光谱仪对材料进行测试，并与标准图谱进行对比分析，测得返回品保持架材料为PA46+30%GF，符合设计要求。

②尺寸超差

尺寸超差可能导致与其他部件的配合出现问题。例如，保持架的兜孔直径过小，可能与滚动体配合过紧，导致钢球运转不顺畅，轴承卡滞；如果保持架的兜孔直径过大，可能与滚动体配合过松，导致钢球在保持架里的窜动量大，轴承的噪音增大。

对同批次的新品保持架的内径、外径、中心径、底部厚度、高度、兜孔直径、锁口尺寸等进行复查，均满足设计要求。

③含水率不足

尼龙材料具有一定的吸水性，吸水后会导致尺寸变化和性能下降。因此，保持架生产过程中通过加湿工艺控制保持架含水率，以保证保持架的尺寸稳定性。为确认保持架含水率是否合格，用含水率检测仪器对同批次的保持架进行检测，测得同批次保持架的含水率均满足标准要求。

3) 工况异常

①异常高温

轴承在工作过程中会产生热量，保持架能够在一定的温度范围内保持其性能稳定，但如果超过了使用温度，尼龙材料在高温下分子结构会发生变化，分子间的作用力减弱，导致保持架的整体强度下降。如果尼龙保持架在高温下长时间暴露，随后又快速冷却，可能会发生不均匀的收缩变形，这种变形会使保持架的形状和尺寸发生改变。

经客户排查试验过程中的监测数据，试验过程中的油温最高为95℃，没有异常。

②异常载荷

轴承在开发阶段做过常温下15,000rpm的高速性能试验，而借用到本项目中的最高转速为18000rpm。在高速运转时，保持架会受到离心力的作用而发生变形。离心力会使保持架产生沿径向的扩张变形，且转速越高，离心力越大，扩张变形也越大。由于冠状保持架几何形

状在轴向不对称,其梁位置的材料是圆周闭环连续的,向外扩张变形较小;而加强筋和卡爪位置的材料沿圆周方向不连续,类似悬臂梁结构,向外扩张变形程度相对较大,离梁的轴向位置越远,扩张变形越大,甚至会使保持架产生向外翻转的扭转变形,严重时会使保持架发生干涉。通过外观观察失效件的保持架的各个表面,如内径、外径、两端面均与其他零件(内圈、外圈和钢球)无摩擦痕迹,表明轴承与其他零件无干涉。

### ③材料不兼容

不兼容的润滑油可能会对尼龙保持架产生化学侵蚀作用。润滑油中的某些成分可能与尼龙发生反应,导致保持架表面出现腐蚀、软化、溶胀等现象。这会使保持架的强度降低,可能使尼龙保持架发生尺寸变化,从而影响轴承的正常运转。

通过保持架材料和润滑油的兼容性测试,PA46材料可与润滑油共存保持良好的性能。

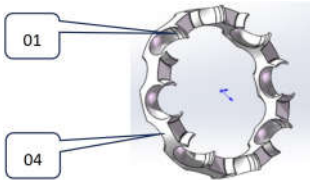
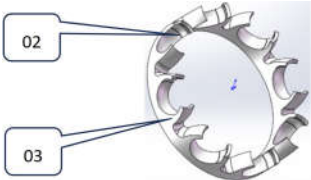
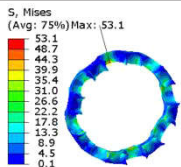
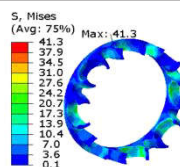
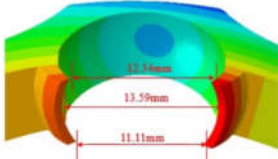
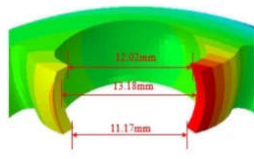
### 3 故障定位与机理分析

根据对故障原因的排查和分析,轴承制造问题和工况异常均已排除,保持架的强度不足为引起轴承失效的原因。其失效机理分析如下:高速耐久工况下,轴承转速高导致钢球离心力大,保持架在钢球离心力的作用下变形,球兜尺寸胀大,锁球能力下降,保持架的脱出力减小。

### 4 改善措施及验证

为了提高保持架的强度和刚度,主要从以下4个方向进行优化。1)减小保持架球兜直径和锁口尺寸,增大保持架的脱出力;2)降低保持架梁的加强筋高度,使保持架受力均匀;3)取消保持架底部减重槽并增加其厚度,提高保持架的强度,减小变形量。

表2 保持架优化措施及验证结果。

项目	优化前	优化后
保持架结构		
01 锁口尺寸	13.50±0.15	13.14±0.15
02 加强筋	加强筋高度高	降低加强筋高度
03 底部厚度	兜孔底部厚度小	增加兜孔底部厚度
04 减重槽	轻量化设计	高强度设计
保持架应力		
保持架变形量		
保持架脱出力	244/260/250/246/237	286/280/276/281/269

保持架结构优化后,轴承的保持架应力由53.1Mpa降低到41.3Mpa,下降了22.2%,保持架变形量由0.09mm下降到0.04mm;保持架的脱出力(5套平均值)由247N增加到278N,提升了12.5%。

### 5 结论

本文针对减速机输入轴前端深沟球轴承失效问题,建立了故障树,通过逐条排查分析,确定了失效原因为保持架强度不足。针对目前保持强度不足的问题,提出

了改善措施,通过验证表明改进措施的有效性。

### 参考文献

- [1]方波;林亲学.基于FTA法的某发动机轴承失效分析.工艺设计改造及检测检修
- [2]S.NAGAI;A.YAMANOT; T.ONIZUKA; K.YANAI. Development of a plastic cage for high-temperature and high-speed bearings. Technical report