

基于实际案例的 V2500 发动机金属屑排故分析

王学慧

北京飞机维修工程有限公司 100621

摘要: 金属屑是 V2500 发动机滑油系统故障的重要预警信号, 若未及时排查可能导致机械部件严重磨损、滑油系统失效甚至空中停车, 直接影响飞行安全。本文以某航司 V2500 发动机反复出现金属屑超标的实际案例为载体, 梳理了发动机的故障背景、历史维修背景及排故分析过程, 为后续 V2500 发动机金属屑相关故障的精准定位与高效解决提供了实用案例参考。

关键词: 金属屑, PTO 轴中心轴承

1 引言

V2500 系列发动机作为窄体客机的主流动力装置, 其外齿轮箱上共装有 7 个磁堵探测器, 分别监控内齿轮箱、四号轴承和五号轴承区域以及外齿轮箱各分区的系统工作状态, 以保障发动机整体的安全运行。当磁堵探测器检测到大量金属屑时, 这意味着滑油系统轴承区域机械部件出现摩擦损耗, 若不能及时定位故障源, 可能导致机械部件严重磨损甚至断裂, 进而滑油系统失效引发空中停车等严重安全事件^[1]。

2 故障背景

某航司一台 V2500 发动机 2024 年在短短两个月内反复因外齿轮箱发现金属屑问题进厂维修。2024 年 5 月, 此台发动机在航线检查过程中发现 1 号磁堵(外齿轮箱主磁堵)和 5 号磁堵(角齿轮箱磁堵)均存在大量金属屑(所有磁堵位置见图 1), 参照技术文件对金属屑分析后发现其成分为 M50 轴承钢。发动机制造商 (IAE) 评估建议下发更换外齿轮箱, 航司考虑到 AOG 风险决定倒串外齿轮箱单元体以保证此台发动机尽快投入航线使用, 并要求 MRO 仅对此台拆下的外齿轮箱单元体进行排故修理。5 月底, MRO 按照航司要求倒串外齿轮箱单元体后将此台发动机顺利放行交付航司。2024 年 7 月, 此台发动机航线检查中再次在 5 号磁堵上发现了大量金属屑, IAE 建议再次下发对内齿轮箱和外齿轮箱一并进厂排故维修。

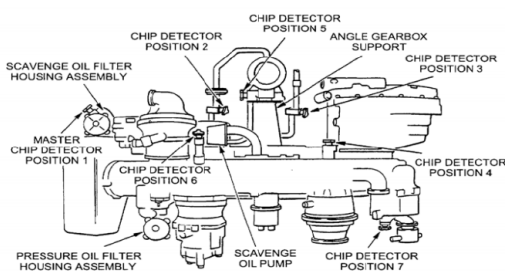


图1 V2500外齿轮箱磁堵位置图

3 发动机历史维修信息回顾

3.1 第一次进厂维修

此台发动机于 2023 年 4 月因更换时寿件下发运往 MRO 进行修理 (MISC)。对内齿轮箱单元体所有零部件完全分解, 重点对 1 号、2 号、3 号轴承及 PTO 轴中心轴承执行详细检查, 发现 PTO 轴中心轴承内环、外环及轴承座均损伤超限, 全部报废更换新件装机; 对外齿轮箱单元体所有零部件完全分解, 重点对所有轴承执行详细检查, 发现角齿轮箱驱动轴承、液力泵驱动轴承、燃油泵驱动轴承及起动机驱动轴承均损伤超限, 全部报废更换新件装机。发动机其他零部件均执行相应检查后恢复可用后装机使用。基于此, 发动机按照手册标准执行出厂试车工作, 所有试车数据均满足手册要求, 试车后所有磁堵未发现金属屑。发动机完成第一次维修工作并顺利出厂。

3.2 第二次进厂维修

2024 年 5 月, 此台发动机航线检查过程中发现两个位置的磁堵 (1 号和 5 号) 均发现大量金属屑, 其成分与轴承钢高度匹配。经 IAE 评估后建议紧急更换外齿轮箱单元体以解决航司 AOG 的困难。MRO 将修后满足手册要求可用的外齿轮箱单元体倒串给此台发动机后, 按照手册标准执行了出厂试车工作, 所有试车数据均满足手册要求, 试车后所有磁堵未发现金属屑。发动机完成第二次维修工作并顺利出厂。

此台发动机的外齿轮箱单元体在修理厂进行完全分解并执行相关检查, 发现 8 个轴承存在凹坑、划痕等超限损伤, 其中 5 个轴承为第一次进厂维修时更换的新件。

4 排故分析过程

第二次进厂维修后仅两个月, 5 号磁堵再次检测到大量金属屑且成分依旧为 M50 轴承钢。IAE 认为, 除了外齿轮箱中的角齿轮箱损伤会导致 5 号磁堵出现金属屑外, PTO 轴中心轴承 (如图 2-3) 损伤产生的金属屑也会被 5 号磁堵收集。因此, IAE 建议本次进

厂重点检查 PT0 轴中心轴承区域的状态。

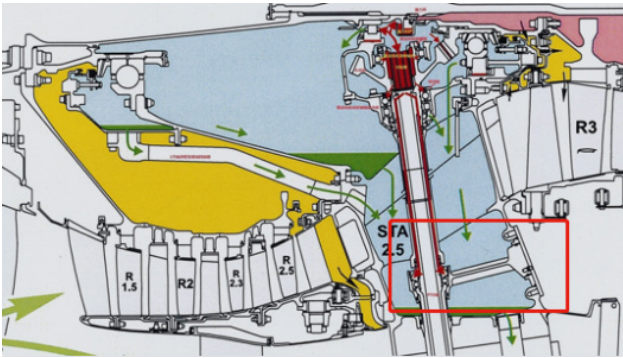


图2 V2500 PT0轴区域位置

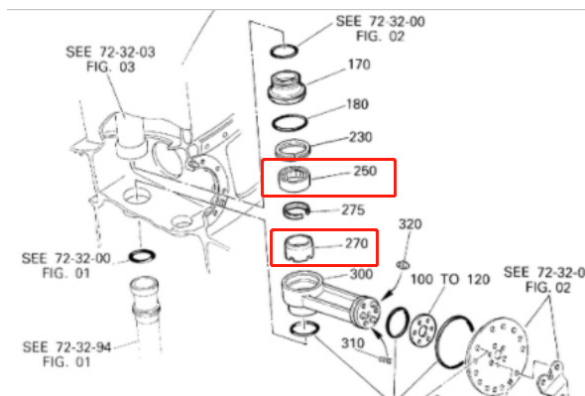


图3 V2500 PT0轴区域零件图

依照 IAE 评估建议，对 PT0 轴中心轴承组件进行完全分解并详细检查后发现，中心轴承外环（图 3 中 250 项）的滚柱严重磨损并脱离轴承本体，内环（图 3 中 270 项）发现严重的划痕损伤。与此同时，对外齿轮箱进行完全分解并执行详细检查后，未发现任何超出手册标准的损伤。



图4 V2500 PT0轴中心轴承损伤细节

更换 PT0 轴中心轴承组件后，依照手册标准，对发动机恢复装配，装配过程中无异常。随后按照手册标准执行试车工作，所有试车数据均满足手册要求，且试车后所有磁堵均未发现金属屑。经 IAE 技术团队评估后，认为发动机排故结束，可以放行出厂。

5 故障原因分析

此台发动机反复出现的金属屑故障，核心根源在于 PT0 轴中心轴承的失效。PT0 轴中心轴承作为传递动力的关键部件，需长期承受持续负载与高速旋转冲击，容易导致中心轴承出现磨损最终失效的情况。PT0 轴中心轴承组件在首次进厂维修过程中已更换新件，首次维修出厂试车后所有磁堵均未发现金属屑；在发动机二次进厂维修中，PT0 轴中心轴承组件并未暴露，出厂试车后仍未发现任何金属屑。因此，PT0 轴中心轴承组件自换新装机后持续运转了 1615 个飞行循环，随着发动机运行时间的拉长，可能存在的微小装配偏差或零件材料性能的缺陷就会在长期高速运转中不断被放大，导致轴承外环滚柱与内环接触面受力不均，局部应力集中引发渐进式磨损。同时，脱落的微小杂质在轴承滚道内持续研磨，进一步加剧了滚柱表面的损伤，最终造成滚柱脱离本体，内环出现严重划痕的失效状态^[2]。

由于该轴承失效产生的金属屑成分与 M50 轴承钢完全一致，且 5 号磁堵的监控范围恰好覆盖 PT0 轴中心轴承区域，这些金属屑被持续收集，导致航线检查中反复出现金属屑超标的现象。由于航空公司 AOG 等特殊情况，导致此前进厂排故未聚焦于 PT0 轴中心轴承区域，使得这一核心故障点始终未被发现，最终导致故障反复出现。

6 结论

此台发动机因持续发现大量金属屑导致反复进厂排故，通过系统拆解检查与关联分析，精准定位 PT0 轴中心轴承失效为故障核心，成功解决了 V2500 发动机金属屑反复超标的问题。故障本质是 PT0 轴中心轴承异常磨损产生的 M50 轴承钢金属屑被 5 号磁堵收集，更换 PT0 轴中心轴承组件后，试车数据全部满足手册要求且磁堵未再发现金属屑，排除因装配不当导致中心轴承组件磨损的问题，初步判断为中心轴承组件材料存在缺陷，导致中心轴承组件在持续高速运转的状态下受力不均提前失效。

参考文献

[1] 何彦良, 王铁铮. 航空发动机金属屑未故障分析及思考 [J]. 科学中国人, 2015, (24): 10.

[2] 张昱, 冯硕, 齐宇博, 等. 航空发动机主轴承的主要失效形式 [J]. 机械管理开发, 2024, 39(10): 268-270.