

LEAP-1A 起动机故障调查

崔志豪, 余思颖, 卢昱朋

南航股份有限公司技术分公司沈阳基地, 辽宁 沈阳 110000

DOI:10.61369/ETQM.2026030012

摘 要 : 本文针对 LEAP-1A 发动机起动机频发的间歇性故障, 开展系统性调查与根本原因分析。通过结合航线报告、孔探数据、部件拆解检查及历史维护记录, 研究发现故障主要表现为滑油渗漏, 叶片断裂和磁堵存在大量金属屑三大类; 回顾事件发动机滑油量变化情况, 不同发动机的表征不一致。基于调查结论, 本文提出了针对性的优化维护方案, 包括改进孔探标准、起动机磁堵碎屑检查标准以及更新早期预警逻辑, 为提升 LEAP-1A 起动机的运行可靠性与维护效率提供了有效参考。

关 键 词 : 起动机; 故障诊断; 维修标准

Fault Investigation of LEAP-1A Starter

Cui Zhihao, Yu Siying, Lu Yupeng

China Southern Airlines Shenyang Maintenance Base, Shenyang, Liaoning 110000

Abstract : systematic investigation and root cause analysis targeting the frequent intermittent failures of the LEAP-1A engine starter has been conducted. By integrating airline reports, borescope inspection data, component teardown examinations, and historical maintenance records, the study identifies that the faults primarily manifest in three categories: oil leakage, blade fractures, and the presence of significant metal debris in the magnetic chip detectors. A review of the oil consumption trends across affected engines revealed inconsistent patterns among different units. Based on the findings, optimized maintenance solutions have been proposed, including enhanced borescope inspection criteria, revised standards for inspecting debris in the starter's magnetic chip detectors, and updates to early warning logic. These measures provide an effective reference for improving the operational reliability and maintenance efficiency of the LEAP-1A startert.

Keywords : stater; fault diagnosis; maintenance criterion

引言

起动机是发动机从静止状态进入稳定慢车状态的唯一动力来源。在飞机起飞前, 它必须可靠地将核心转子加速至点火转速, 确保发动机成功启动。一旦在空中因极端情况 (如遭遇严重颠簸) 导致发动机熄火, 起动机是执行空中重新启动的核心装置。其瞬间失效将直接导致单发运行, 严重威胁飞行安全; 若双发起动机均故障, 后果将是灾难性的。因此, 起动机的可靠性是确保飞机在任何阶段都具备动力恢复能力的最后保障。

一、LEAP-1A 发动机起动系统介绍

起动机是航空发动机的重要附件, 在工作过程中, 传递扭矩并驱动发动机由静止加速达到慢车状态^[1], 具有高起动功率、高可靠性、高寿命高涡轮前温度、数字控制等发展趋势。许多学者针对起动机的故障提出了许多新方法, 程鲁等人经试验验证有效控制了起动机出口结冰故障^[2]。谢平等通过功率谱^[3]的方法可提高起动机转子的故障诊断准确性。在民航维修业, 主要关注如何提高

高起动机送修可靠性, 减少不必要的送修。方法有据部件可靠性和维护成本数据来制定适用于本机队的起动机软时限和维护检查间隔。

起动系统由以下子部件组成 (图1): 空气涡轮起动机 (起动机)、起动机空气活门 (SAV)、起动机空气管路 (SAD)。起动系统还可用于维护需要的次慢车转速驱动。起动机和活门系统的主要功能是将发动机核心机旋转到可自维持转速所需的驱动力矩。发动机起动系统位于发动机上大约8点钟位置 (从后向前看)。

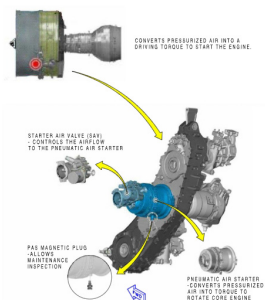


图1 LEAP-1A 发动机起动系统组成

起动机有一个扭力轴，带有花键齿轮，连接到附件齿轮箱 (AGB)。起动机转子的旋转使 AGB 齿轮转动，径向驱动轴接收到使核心机转动的力矩（图2）。当发动机旋转达到足够的速度时，燃油和点火系统按照给定的顺序进行以获得起火。起动机空气供应由起动机上游的 SAV 控制，操作起动机中轴向涡轮机。起动机的主要功能是为发动机核心机转动而提供力矩给 AGB。涡轮机提供的力矩通过行星减速齿轮组和超越离合器传递到花键输出轴，该输出轴与 AGB 接合。内部循环共用滑油供应系统使用来自 AGB 的补充滑油润滑起动机轴承，齿轮，离合器和花键。滑油填充口仅在初次安装到 AGB 期间使用一次，由于共用滑油供应系统，不需要任何润滑勤务任务。当发动机起动序列完成时，超越离合器将涡轮和行星齿轮组从输出轴断开。碎屑检测器堵塞的功能是获取用于检查的磁性颗粒以显示起动机的内部损坏。

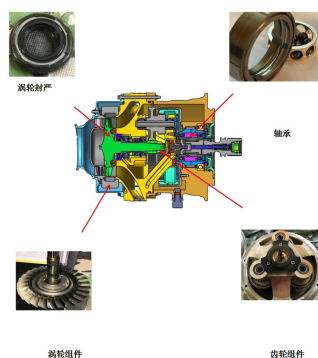


图2 起动机内部结构图和主要部件

二、典型故障原因和分析

（一）起动机磁堵检查

在针对某台发动机进行例行 A 检孔探检查起动机涡轮叶片，发现叶片根部一圈有滑油痕迹。按工程要求进一步检查，发现磁堵有大量金属屑，经评估，需立即更换起动机。针对起动机磁堵有大量金属屑这一情况，事后查阅修理报告发现修理厂家更换了轴承组件和涡轮封严，说明起动机内部轴承有一定程度的磨损，旋转件磨损造成动不平衡导致涡轮封严处有滑油渗漏。对比事件前后发动机滑耗情况，该更换起动机的发动机滑耗在起动机更换前后相差不大。进一步分析碎屑可能产生的原因，轴承磨损或预加载路径在行星齿轮轮毂处的台阶部分中断，从而造成轴承预加载力缺失，致使滚珠轴承在轨道内过度移动，如图3所示。

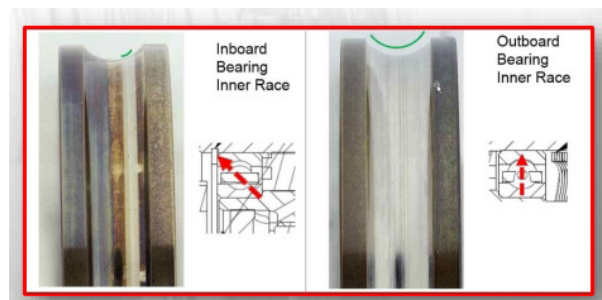


图3 厂内检查故障件发现错误的轴承预紧力

（二）起动机涡轮叶片损伤

针对某台发动机例行 A 检孔探检查起动机涡轮叶片，发现一片叶片发生断裂，需立即更换起动机。检查涡轮叶片，没有其他撞击和损伤的痕迹。针对制造工艺与叶片应力设计问题进行进一步分析。根据厂家资料，2018年10月份之前生产的部分起动机的涡轮叶片，在机械加工涡轮叶片过程中，切削工具磨损造成部分叶片厚度不一致，且叶片根部留有加工痕迹。当起动机高速转动时，叶片共振产生应力集中，形成高周疲劳导致叶片材料缺失。厂家于2018年10月对 LEAP-1A 起动机实施了改进的制造工艺，以减少变化，改善表面光洁度并消除工具痕迹。

（三）起动机漏油事件

某航班性能监控到空中双发滑油量差值较大且左发滑油量逐步下降。落地后检查发现左发包皮下有滑油痕迹，起动机格栅处有滑油泄漏。落地后译码分析故障航班滑油量情况，发现左发滑油量在起动慢车后成逐渐下降趋势，起动机在发动机起动阶段出现故障，滑油开始渗漏，由于发动机和起动机共用同一滑油系统，引起大发滑油量下降。更换起动机运行后滑油量恢复正常。后续工程师在调查中，通过查看起动机修理报告，发现失效主要部件为轴承，涡轮封严和涡轮盘，最主要失效部件为涡轮封严，涡轮封严失效造成滑油的大量泄漏。

涡轮封严是一种具有定向流体动力特性实现转子与碳质界面之间的流体动力式分离密封装置，O型密封圈在与未嵌入槽位相对应的位置出现了损坏（部分切掉）导致滑油泄漏。这很可能是由于轴向载荷下碳边缘的干涉导致。厂家针对此现象发布了 SB，引进了新的安装工具，减少了封严密封不严的问题。

（四）起动机典型故障总结

起动机失效集中表现为滑油泄漏，起动机涡轮叶片断裂和磁堵大量金属屑三大类；回顾事件发动机滑油量变化情况，不同发动机的表征不一致，有滑油量降低明显的，也有滑油量几乎无变化的。且多起事件发生时的滑耗水平平均处于可接受范围内，滑耗升高的速率较缓，只有在起动机滑油渗漏严重的情况下才能通过性能监控到；起动机失效多发现在航后或定检主动检查中，在备件不充足时易造成飞机停场或者延误。

三、起动机故障处理方法及有效措施

（一）更新孔探标准

翻阅大量孔探报告多数起动机干油迹发生在一定循环数之

后,综合手册内容和 OEM 答复,分析得出干油迹形成的原因可能来自起动机进气油雾的长期堆积。某航司针对滑油泄露标注问题咨询过厂家,厂家给的答复是:如果起动机无目视可见流动的滑油渗漏,无需拆下起动机,干油迹的来源可能使制造和测试过程中出现的渗漏情况。结合历史起动机因漏油故障而送修的历史数据来看,其中 NFF 件(非必要拆换件)占比接近半数,且这些 NFF 件中大多数的孔探报告记录为起动机有干油迹现象。由此初步判断孔探起动机发现有干的滑油印记不需要更换起动机。

因起动机涡轮叶片损伤而送修的记录中,大多仅在记录中表征为叶片小凹坑、划痕和微小的材料损失,且这样表征的起动机在送修后均被定义为 NFF 件。厂家于 2018 年 10 月对 LEAP-1A 起动机实施了改进的制造工艺,以减少变化,改善表面光洁度并消除工具痕迹。但涡轮叶片材料部分损失有时仍会发生,最有可能的原因是 FOD。初步结论为对于叶尖处的细小裂纹或凹坑及叶面的小凹坑不影响涡轮的正常旋转,可以持续监控,适当缩短孔探间隔。

(二) 更新起动机活门故障判断标准

起动机活门故障导致的起动机更换送修中的 NFF 件占比较高,且经调查发现,NFF 件在空中起动机活门最大压力为 6.25PSI,压力保持 2600s,其中超 6PSI 的时长只有 17s。另外某飞机左发起动活门空中关不严,触发预警,落地后维护人员预防性更换起动机,后续调查查询起动机修理报告为 NFF 件。修理报告显示进厂主要做 3 方面检测:滑油渗漏检查、组件旋转检查、磁堵检查。结合进场修理检测,决定实施“孔探+磁堵+干冷转 2 次+孔探+磁堵”五步验证法,孔探检查起动机无滑油渗漏且磁堵检查正常无碎屑,可初步判定起动机无损伤,完成两次干冷转检查循环,再次执行孔探检查起动机有无滑油渗漏和磁堵检查有无碎屑,如果检查正常则起动机可以继续使用。初步结论为结合 QAR 译码、起动机活门空中位置和起动机活门压力,打开压力在 6PSI 以下或者 6PSI 以上但持续时间 17 秒以内的起动机,起动机活门发生故障经过五步验证法的起动机如果检查正常可以继续使用。

(三) 更新起动机磁堵碎屑标准

因磁堵有碎屑而更换起动机,后送修发现为 NFF 件有一定占比,且非 NFF 件的修理报告中均更换轴承组件,说明轴承磨损普遍存在,是金属屑的主要来源。但在某次航后定检中,工作人员检查左发起动机磁堵有大量金属屑细屑,按 TSM 清洁磁堵,排放滑油后重新勤务起动机,冷转两次,检查磁堵无异常,已放行。后续正常运行 12 天航材到件更换。结合 AMM 手册要求和碎屑原因分析,少量聚积的细丝和相对扁平的金属碎片,表示正常的磨损,是不需要立即拆下起动机的,即使是较大的碎屑,也可通过一系列可靠的检查标准来判断起动机状态。由此可得出少量金属屑按手册标准执行检查正常可以放行,大量金属屑更换的起

机要求进厂必须分解检查更换轴承组件。

四、结束语

本文围绕 LEAP-1A 发动机起动机的典型间歇性故障展开系统性调查与分析。通过整合故障现象记录、孔探检查数据、部件分解报告及历史维护信息,研究明确了故障主要表现为滑油渗漏,叶片断裂和磁堵大量金属屑。进一步分析发现,正确进行起动机孔探检查,明确起动机滑油渗漏原因、以及磁堵碎屑成分的正确分析是有效判断起动机相关故障,做出正确排故决策的根本方法,具体的措施如下:

- 1.明确孔探起动机发现有干的滑油印记不需要更换起动机——减少不必要的更换;
- 2.如果有因为滑油渗漏原因(和湿油迹)拆下送修的起动机,颁发 PDN 要求进厂必须分解更换涡轮封严(件号 63508352-1),并完成相关渗漏测试——增加修理可靠性;
- 3.明确不是起动机磁堵检查有碎屑就立即更换起动机,少量聚积的细丝和相对扁平的金属碎片,表示正常的磨损,这是一个可以接受的状态。后续需连续三天检查起动机磁堵检查正常后恢复正常间隔——减少不必要的更换;
- 4.因磁堵有大量金属屑更换的起动机颁发 PDN 要求进厂必须分解检查更换相应轴承组件——增加修理可靠性;
- 5.针对起动机涡轮叶片表面有细小凹坑,叶尖处有细小裂纹,凹坑等不影响起动机涡轮正常运转的损伤可以继续监控使用,缩短检查起动机涡轮叶片间隔——减少不必要的更换;
- 6.针对因起动机活门空中打开故障需预防性更换的起动机,实施“孔探+磁堵+干冷转 2 次+孔探+磁堵”五步验证法,并结合 QAR 译码起动机活门空中位置和起动机活门压力,若打开压力在 6PSI 以下或者 6PSI 以上但持续时间 17 秒以内的起动机,且检查正常可以继续使用——减少不必要的更换;
- 7.向 OEM 和 CFM 询问起动机涡轮叶片损伤表征为小凹坑叶尖小裂纹的放行参考标准,结合厂家的丰富经验做好与起动机故障相关的放行决策。

基于上述结论,本文从多个层面提出针对性改进方案:优化与起动机相关的孔探标准、明确起动机磁堵检查标准、优化起动机活门故障后检查流程减少一系列起动机的非必要送修。所提措施不仅有助于降低同类故障的发生率,也为未来民用航空发动机起动机可靠性设计与视情维护提供了实践依据。后续将考虑建立与起动机活门故障有关的预见性维修监控模型,更进一步将针对起动机起动机活门相关故障进行实时的监控预测,以有效减少、提前预防起动机相关故障,形成起动机活门故障模型处理方案。

参考文献

- [1]刘正华.民用飞机空气涡轮起动机剩余寿命预测研究[D].中国民航大学,2020.
- [2]程鲁,闫卫青,张帅,等.某型航空发动机空气涡轮起动机启动故障研究[J].内燃机与配件,2024,(09):70-73.
- [3]谢平,陈矛,祝刚.基于功率谱熵距的航空发动机转子振动故障诊断方法研究[J].电子测量技术,2018,41(21):99-102.