

航空发动机 VSV 作动筒典型故障模式与根本原因研究

程来星 骆萌繁

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要: 航空发动机VSV作动筒作为核心控制部件,其故障直接影响发动机性能与安全。本文系统分析其结构组成与工作原理,归纳机械结构、密封系统、控制与传感、动力传输等典型故障模式,从设计、制造装配、运行环境、维护保养等层面剖析根本原因,提出设计优化、制造装配质量控制、运行维护改进等策略,为提升VSV作动筒可靠性提供理论支撑。

关键词: VSV作动筒;故障模式;根本原因;设计优化;维护保养

引言: 航空发动机VSV系统通过调节高压压气机静子叶片角度,优化气流匹配,防止喘振,是保障发动机高效稳定运行的关键装置。VSV作动筒作为执行机构,其性能直接决定VSV系统调节精度与响应速度。然而,受复杂工况、高频动作及多因素耦合影响,作动筒易出现卡滞、泄漏、控制紊乱等故障,严重威胁发动机安全。深入研究其故障模式与根本原因,对提升航空发动机可靠性具有重要意义。

1 VSV作动筒结构组成与工作原理

1.1 核心结构组成

VSV作动筒作为精密的机械控制装置,其核心结构由三大模块构成。机械结构模块包含缸体、活塞、活塞杆及密封组件。缸体作为承载主体,提供稳定的工作空间;活塞在缸体内做往复运动,通过与活塞杆的连接实现力的传递;密封组件则确保缸体内压力的稳定,防止介质泄漏,保障作动筒正常工作^[1]。控制结构模块由传感器、电磁换向阀及反馈机构组成。传感器负责实时监测作动筒的运动状态,如位置、速度等,并将这些信息转化为电信号;电磁换向阀根据接收到的控制信号,切换液压或气动回路的流向,从而控制作动筒的运动方向;反馈机构则将作动筒的实际运动状态反馈给控制系统,形成闭环控制,提高控制精度。动力传输结构模块涵盖液压或气动回路的关键部件,如液压泵、气动马达、管路及接头等。这些部件共同构成动力传输网络,将液压或气动能量转化为机械能,驱动活塞及活塞杆运动。

1.2 工作原理与运行特性

VSV作动筒的工作原理基于动力驱动机制与控制逻辑的协同作用。在动力驱动方面,伺服燃油提供的液压力通过回路传输至作动筒,推动活塞及活塞杆运动,实现力的传递与转换。控制逻辑方面,控制系统接收外部指令信号,经过处理后发送给电磁换向阀,控制切换燃

油回路流向,进而改变作动筒的运动方向。传感器实时监测作动筒状态,反馈机构将信息传回控制系统,形成动态调整机制。运行过程中,VSV作动筒需承受多种受力与环境影响。受力方面,包括伺服燃油压力、活塞及活塞杆的惯性力、摩擦力等;环境方面,则涉及温度、湿度、振动等因素。这些因素共同影响作动筒的运行稳定性与寿命。

1.3 故障分析的关键维度

对VSV作动筒进行故障分析,需要从结构完整性、功能有效性以及运行稳定性三个层面展开考察。结构完整性方面,重点关注缸体、活塞、活塞杆等主要构件是否存在裂纹、变形或异常磨损。功能有效性方面,需要验证传感器、电磁换向阀等控制单元能否准确接收指令并正确执行动作。运行稳定性方面,则需评估作动筒在持续工作条件下性能输出的平稳程度,分析是否存在输出波动、响应迟滞或卡涩现象。这三个维度相互关联,共同构成了全面诊断作动筒健康状况的分析框架,有助于系统识别潜在故障并定位问题根源。

2 VSV作动筒典型故障模式分类

2.1 机械结构类故障

机械结构是VSV作动筒稳定运行的核心载体,相关故障直接影响整体动作精度与可靠性。缸体与活塞常出现多种异常状况,长期高频往复运动易导致接触面磨损加剧,密封间隙增大引发性能衰减;运动阻力突变时易发生卡滞,表现为动作卡顿甚至停滞;极端压力或温度环境下可能出现变形,破坏原有配合精度^[2]。活塞杆作为力传递关键部件,受侧向力或冲击载荷时易发生弯曲,导致运动轨迹偏移;超出材料耐受极限会出现断裂,造成动力传输中断;螺纹连接部位长期振动易出现损伤,影响与外部部件的连接稳定性。连接部件故障同样不可忽视,螺栓、销钉等紧固件在振动环境下易出现松动,随

运行时间延长可能发展为脱落；配合面磨损或加工误差累积会导致配合失效，破坏作动筒整体结构完整性。

2.2 密封系统类故障

密封系统是保障作动筒压力稳定的重要环节，故障易引发介质泄漏与压力损失。密封件在长期使用中受温度、介质侵蚀等因素影响，会逐渐出现老化现象，弹性下降导致密封性能衰退；往复摩擦或尖锐杂质刮擦会造成破损，直接失去密封作用；安装偏差或压力冲击则可能导致变形，无法与密封面紧密贴合。密封界面问题多与密封件状态及安装质量相关，密封件失效后极易出现泄漏，初期表现为微量渗油，随故障发展泄漏量逐渐增大；密封性能下降直接导致压力保持能力不足，系统需频繁补压才能维持正常工作，增加能耗与运行成本。

2.3 控制与传感类故障

控制与传感系统主导作动筒的动作逻辑，故障易引发控制紊乱与状态误判。传感器在复杂工况下易出现信号失真，输出数据与实际状态偏差增大；线路接触不良或元件损坏会导致无反馈，控制系统无法获取作动筒实时状态；电磁干扰或参数漂移则可能引发误报，误导操作人员做出错误判断。控制元件中电磁换向阀故障较为常见，阀芯磨损或油污堵塞会导致卡滞，无法及时切换油路；线圈老化或电压不稳则会造动作延迟，影响作动筒响应速度。反馈机构失效会直接破坏控制闭环，位置反馈不准确导致动作精度下降，无法达到预定行程；响应滞后则使作动筒动作与控制指令不同步，影响整个系统的协调运行。

2.4 动力传输类故障

动力传输系统为作动筒提供能量支撑，故障会导致动力供应不足或传输失效。液压或气动回路易出现压力异常，调压阀故障会造成压力过高引发安全隐患，管路堵塞或泄漏则导致压力过低；过滤器堵塞或泵体磨损会造成流量不足，作动筒动作速度明显下降，甚至无法完成全行程动作。动力转换部件承担能量传递与转换功能，部件磨损或配合间隙增大会导致能量传递效率下降，输入能量无法有效转化为机械功；轴承损坏或密封失效会造成部件彻底失效，动力传输中断，作动筒完全无法运行。这类故障不仅影响作动筒自身性能，还可能对关联系统造成连锁影响，需及时排查处理。

3 VSV作动筒故障模式的根本原因分析

3.1 设计层面原因

设计环节是VSV作动筒性能的源头保障，诸多设计问题会为后续故障埋下隐患。结构设计缺陷是常见问题之一，若受力设计不合理，某些部位会承受过大应力，长期

运行后易出现疲劳损伤；刚度或强度不足，则在面对复杂工况时，难以维持稳定形态，引发变形甚至断裂。材料选型不当同样影响重大，若耐温性能不匹配，高温环境下材料性能下降，导致部件失效；耐压、耐磨性不足，在高压或频繁摩擦工况下，部件会快速磨损，影响使用寿命^[3]。密封设计问题也不容忽视，密封形式若与介质、压力条件不适应，会出现泄漏现象，破坏作动筒正常工作环境。控制逻辑设计缺陷则会干扰作动筒精准运行，信号交互冲突可能引发误动作，响应机制不完善则导致作动筒无法及时、准确执行指令。

3.2 制造与装配层面原因

制造与装配过程的质量把控，直接关系到VSV作动筒的最终性能。机械加工误差会破坏部件精度，尺寸精度不足可能导致装配困难，甚至无法正常安装；表面粗糙度不达标，会加剧部件间摩擦，降低使用寿命。热处理工艺问题同样关键，若处理不当，材料性能无法达到设计要求，如硬度、韧性不足，影响部件抗磨损、抗冲击能力。装配质量缺陷更是常见故障诱因，装配间隙不当会改变部件受力状态，引发卡滞或运动不畅；紧固力矩不符可能导致连接松动，影响整体稳定性；清洁度不足则会使杂质进入作动筒内部，加速部件磨损。这些制造与装配环节的细微偏差，往往成为故障的初始诱因，并在长期运行中被不断放大，最终导致功能丧失。

3.3 运行与环境层面原因

运行环境对VSV作动筒性能影响显著。工况应力影响是重要因素，频繁启停会使部件承受交变应力，加速疲劳损伤；载荷波动、冲击载荷则可能超出部件承受极限，引发变形或断裂。环境温度骤变容易造成部件热胀冷缩不均，产生额外应力，这种应力累积会逐步破坏部件原有结构稳定性。环境侵蚀同样不容小觑，高温氧化会改变材料表面性能，降低耐腐蚀性；腐蚀介质会直接侵蚀部件，破坏结构完整性；粉尘颗粒污染会进入作动筒内部，磨损密封件，导致泄漏。润滑失效也是常见问题，润滑不足会使部件间摩擦增大，产生过多热量，加速磨损；燃油变质会失去润滑效果，甚至对部件造成腐蚀；润滑通道堵塞则会使燃油无法到达关键部位，引发局部过热和磨损。

3.4 维护与保养层面原因

维护与保养是保障VSV作动筒长期稳定运行的关键环节。维护操作不当会直接损伤部件，拆装过程中若操作粗暴，可能划伤部件表面，破坏密封结构；维护流程不规范则可能遗漏关键步骤，无法及时发现潜在问题。保养周期不合理会导致关键部件得不到及时检查更换，如密

封件老化后未及时更换,会引发泄漏;燃油未定期更换,会失去润滑效果。维护介质问题同样严重,液压油或燃油污染会携带杂质进入作动筒内部,加速部件磨损;型号不符则可能无法满足部件润滑需求,影响性能^[4]。日常维护中操作手法的细微偏差都可能累积成部件损伤,保养时机的延误或提前都会打乱部件正常损耗节奏,介质选择的疏忽更会从内部侵蚀作动筒运行基础,这些细节疏忽共同构成影响设备稳定性的重要因素。

4 故障预防与改进方向

4.1 设计优化策略

设计环节是预防VSV作动筒故障的首道防线,通过针对性优化可显著提升产品可靠性。针对结构与材料,需重点增强抗疲劳与抗磨损能力。例如,对关键受力部位进行结构拓扑优化,合理分布应力,避免局部应力集中;选用高强度、高韧性且耐疲劳的新型材料,或对现有材料进行表面强化处理,如喷丸强化、渗碳淬火等,提升表面硬度与耐磨性。密封系统升级同样关键。高性能密封件是基础,可选用耐高温、耐高压、耐腐蚀的复合材料密封件,提升密封性能与使用寿命。优化密封结构也不容忽视,根据工况需求设计双密封、迷宫密封等复合密封形式,增强密封效果,降低泄漏风险。控制系统完善则聚焦于提升信号可靠性与响应速度。采用冗余设计,增加备用信号通道,确保单一通道故障时系统仍能正常运行;优化信号传输线路,减少信号干扰与衰减;升级控制算法,提升系统响应灵敏度,缩短动作延迟时间,确保作动筒能快速、准确执行指令。

4.2 制造与装配质量控制

制造与装配质量直接影响VSV作动筒性能稳定性。强化加工工艺管控是首要任务,对关键尺寸采用高精度加工设备与工艺,如数控加工、精密磨削等,确保尺寸精度符合设计要求;严格控制表面粗糙度,通过抛光、研磨等工艺提升表面质量,减少摩擦磨损。规范装配流程同样重要。明确装配间隙标准,通过工艺文件与检测工具确保装配间隙在合理范围内,避免间隙过大引发卡滞或间隙过小导致磨损加剧;规定紧固力矩要求,使用扭矩扳手等工具确保螺栓、螺母等紧固件达到设计力矩,防

止松动;制定严格清洁标准,装配前对部件进行彻底清洗,去除油污、杂质等,确保装配环境清洁度,防止污染进入作动筒内部。加工环节需引入全流程尺寸检测,每道工序完成后即时核验参数偏差,装配阶段要落实人员操作资质审核,只有熟练掌握操作要点的人员才能参与核心工序,从源头规避人为失误带来的质量隐患。

4.3 运行与维护改进

运行与维护是保障VSV作动筒长期稳定运行的关键环节。优化运行工况可减少故障发生概率,通过调整设备运行参数,避免频繁启停与载荷剧烈波动,降低部件承受的交变应力;对冲击载荷进行缓冲处理,如增加缓冲装置或优化设备布局,减少冲击对作动筒的影响。完善维护体系需制定针对性保养周期与检查项目^[5]。根据作动筒实际运行情况与工况特点,合理确定保养周期,对关键部件如密封件、活塞杆等进行定期检查与更换;制定详细检查项目清单,涵盖外观检查、性能测试、泄漏检测等多个方面,确保及时发现潜在问题。加强污染控制则聚焦于提升液压油或燃油清洁度管理。选用高质量液压油或燃油,从源头上减少杂质含量;定期对油液进行过滤与更换,保持油液清洁;对油液储存与输送系统进行密封处理,防止外界污染进入,确保作动筒在清洁的油液环境中运行。

参考文献

- [1]钱荣荣,阳丽娜,缙林峰.航空发动机VSV作动系统多物理场耦合建模与故障影响分析[J].机械工程与技术,2022,11(3):257-270.
- [2]李润文.CFM56-5B发动机VSV系统故障分析[J].航空维修与工程,2022(5):95-98.
- [3]李三保.V2500发动机BSBV机构的主要故障及其监控方法[J].航空维修与工程,2025(3):104-106.
- [4]陈肖楠,王奕首,卿新林.基于混合驱动的航空发动机气路故障诊断技术综述[J].系统工程与电子技术,2025,47(6):1880-1892.
- [5]李全坤,武琛舒,黄宇灵,等.航空发动机附件管路卡箍松动故障诊断方法[J].振动工程学报,2025,38(6):1183-1189.