

负压技术在航空液压系统维护的应用研究

杜杨雄 崔超 尚冲

陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723213

【摘要】：航空业高速发展背景下，飞机维护的效率提升与环保合规要求愈发严苛。传统航空液压系统维护中，管路及附件拆卸环节易发生液压油泄漏，引发环境污染、资源浪费与作业安全隐患，成为行业绿色发展的制约因素。本文针对该痛点，提出基于负压技术的航空液压系统主动防泄漏维护方法，通过在液压通气系统加装专用负压装置，从原理上抑制油液外泄。文章系统阐述了负压技术的应用原理、防泄漏装置的整体设计与核心部件选型，制定了标准化的实施流程，结合实机模拟实验验证了技术效果，并从经济、环境、安全维度开展效益分析。研究结果表明，该技术可实现95%以上的油液泄漏量削减，大幅缩短维护工时、降低作业成本，且装置适配性强、操作简便，为航空维修领域的节能减排与技术升级提供了可行路径，对推动航空维修行业绿色化、高效化发展具有重要的工程参考价值与实践推广意义。

【关键词】：航空液压系统；负压技术；维护工艺；油液防泄漏；绿色维修；节能减排

DOI:10.12417/3083-5526.26.01.008

1 引言

飞机液压系统作为飞机飞行控制、起落架收放、刹车制动等核心功能的动力执行系统，其密封性与运行稳定性直接决定飞机的飞行安全和整机性能。以液压油为工作介质，通过密闭管路的压力传递实现动力输出，因此在飞机定检、故障维修、部件更换等维护作业中，管路、液压泵、作动筒等附件的拆卸与重装是高频操作环节。

传统液压系统维护作业中，由于系统内部残存一定量的液压油，且受重力、管路残余压力影响，拆卸接头或管路时极易发生液压油泄漏。航空液压油为专用精密油品，具有抗磨、抗氧化、高低温稳定性强等特性，其单价高、制备工艺复杂，泄漏不仅造成直接的资源浪费，还会增加油液补充与废弃物处理成本；同时，泄漏的油液会污染机坪地面、飞机蒙皮及周边设备，若处理不及时，还可能引发维修人员滑倒、油液遇明火燃烧等安全事故，且航空维修场地的油液污染治理需符合严格的环保标准，进一步提升了维护作业的环境成本与合规压力。此外，传统防泄漏措施多采用被动收集方式，如在拆卸点下方放置接油盘、铺设吸油毡等，该方法仅能对泄漏油液进行简单收集，无法从根本上阻止泄漏发生，还会增加后续清理工序，延长维护周期，降低飞机周转效率。

近年来，航空业在“双碳”目标指引下，对绿色维修的要求不断提升，节能减排、降本增效已成为航空维修技术发展的核心方向。负压技术通过构建局部低压环境，利用压力差实现流体的定向控制，可从源头抑制泄漏，目前已广泛应用于医疗、化工、石油管道维护等领域，在流体系统密封作业中展现出显著的主动防泄漏优势。但在航空液压系统维护领域，负压技术的应用仍处于起步探索阶段，现有研究多集中于液压系统本身的性能优化，针对维护工艺的负压防泄漏技术研究较少，且缺乏标准化的装置设计与实施流程。本文结合航空液压系统的结构特点与维护作业要求，设计一套适配航空液压系统的专用负

压防泄漏装置，系统研究负压技术在航空液压系统维护中的应用原理与实施方法，通过实机模拟实验验证技术效果，并开展全维度效益分析，旨在为航空液压系统维护提供一种高效、环保、安全的新型工艺，推动航空维修技术的创新与升级。

2 负压技术应用原理与防泄漏装置设计

2.1 负压技术防泄漏核心原理

航空液压系统的传统维护中，油箱通气系统直接与大气相通，系统内部压力与大气压保持平衡，此时管路内的液压油在重力作用下具备向管路开口端流动的势能，拆卸时即形成泄漏。负压技术防泄漏的核心原理基于流体力学的压力差效应，即流体始终从高压区向低压区定向流动，通过外部设备在液压系统内部构建稳定的负压环境，使系统内部压力低于外界大气压，从而抵消液压油因重力和残余压力产生的外流趋势，实现拆卸过程的油液密封。根据静压力公式 $P = \rho gh$ ，可计算出液压油在管路中产生的静压力。若要有效抑制油液外泄，系统内部负压值需抵消该静压力的大部分势能，同时需避免负压过高导致油箱结构变形、密封件损坏等二次问题。

负压装置通过与飞机液压通气系统对接，将油箱内的部分空气抽出，使油箱内形成稳定的低压状态，此时整个液压系统的管路内部均处于微负压环境，拆卸管路开口端时，外界大气压会对开口端形成“封堵”作用，阻止内部油液流出，同时轻微的负压还能将管路内残存的少量油液吸回油箱，进一步减少泄漏量。

2.2 负压防泄漏装置整体设计

针对航空液压系统的结构特点、维护作业场景，设计的负压防泄漏装置采用模块化结构，由负压发生单元、控制监测单元、油液分离单元、连接适配单元四部分组成，整体设计遵循小型化、轻量化、便携化原则，适配机场外场维护作业需求。

装置的核心工作逻辑为：通过连接适配单元与飞机液压通

气系统的测试口对接，控制监测单元启动负压发生单元，将油箱内的空气抽出，油液分离单元对抽出气体中夹带的油液微粒进行收集分离，防止油液进入负压发生单元造成设备损坏，控制监测单元通过压力传感器实时采集油箱内的压力数据，与设定的负压阈值进行对比，动态调节负压发生单元的工作功率，使油箱内压力始终稳定所需的目标范围，作业完成后，通过控制单元切换通气模式，使油箱恢复常压，再拆除装置。

2.3 核心部件选型与设计

负压发生单元是装置的动力核心，负责为液压系统提供稳定的负压，选用无油旋片式真空泵作为负压抽气泵。真空泵配备变频调速模块，可根据压力反馈实时调节抽气速率，避免频繁启停，提升设备使用寿命。控制监测单元为装置的“中枢系统”，由换向阀、安全阀、高精度压力传感器等组成，实现负压的精准控制、实时监测与安全保证。油液分离单元主要由透明集油瓶和油气分离滤芯组成，安装于真空泵进气前端的气路中，其作用是对抽出气体中夹带的液压油微粒进行收集和分离，防止油液进入真空泵内部造成泵体磨损或密封失效。连接适配单元的核心是实现装置与飞机液压通气系统的安全、密封、快速对接，针对不同机型液压通气系统的单向阀测试口规格差异，设计标准化快速接头+专用适配器的组合方式。

2.4 实验验证与效果分析

为验证负压技术在航空液压系统维护中的防泄漏效果与作业效率，选取某型机的液压系统作为实验对象，在机场外场进行模拟拆卸实验，泄漏油液量从 350mL 降至 12mL，削减率达 96.6%，远高于 95% 的预期目标，少量泄漏为管路开口端封堵前的微量残油，可通过吸油毡快速清理，几乎无实际污染；作业总工时从 25 分钟缩短至 18 分钟，效率提升 28%，主要原因是负压技术从根本上减少了油液泄漏，省去了传统工艺中大量的油液清理、地面清洁工序；拆卸过程中无油液泄漏至地面与设备，彻底解决了传统工艺的污染问题。

大幅减少油液污染：负压技术工艺实现 95% 以上的油液泄漏削减，每年可减少数百升的航空液压油泄漏，避免油液污染机坪地面、土壤及水体，降低了机场环境治理的压力；航空液压油属于危险废弃物，其泄漏与处理会产生一定的碳排放，负压技术通过减少油液消耗与废弃物排放，降低了航空维修过程的碳足迹，符合航空业“双碳”目标要求；装置采用无油旋片式真空泵，作业过程中无其他污染物产生，实现资源的循环利用，提升了航空维修资源的利用效率。

提升作业安全性：彻底杜绝了因油液泄漏导致的维修人员滑倒、油液燃烧等安全事故，降低了航空维修的安全风险，保障了维护人员的人身安全与机场设备的运行安全；负压技术工艺缩短了 28% 的维护工时，减少了飞机的离场时间，提升了飞机的日利用率，为航空企业带来间接的经济效益；泄漏的油液

会对飞机蒙皮、地面设备造成腐蚀，负压技术工艺避免了油液腐蚀，延长了飞机部件与机场设备的使用寿命，减少了设备维修与更换成本。

3 负压维护技术的应用要点与注意事项

为确保负压技术在航空液压系统维护中的应用效果、作业安全与设备可靠性，结合实验与工程实践，总结出以下核心应用要点与注意事项，为实际推广应用提供指导：

3.1 负压值的精准控制

负压值是决定防泄漏效果的核心参数，需严格控制，严禁超压运行。负压值过低，无法形成足够的压力差，防泄漏效果不佳；负压值过高，易导致液压油箱的薄壁结构发生弹性变形，甚至造成油箱密封件、液压系统内部的单向阀、密封圈等部件损坏，引发液压系统的二次故障。每次作业完成后，及时清理装置表面的油污，排空集油瓶内的积液，检查快速接头、连接管路的密封性与磨损情况；

3.2 特殊场景的应用调整

在高温、高湿度、高海拔等特殊外场环境下，需对负压装置进行适当的参数调整。例如，在高海拔地区，外界大气压较低，需适当降低负压设定值，避免实际负压过高；在高温环境下，需加强真空泵的散热，防止泵体过热导致工作效率下降。同时，在雨雪天气作业时，需对装置进行防雨防护，避免雨水进入装置内部造成电路故障。

4 负压维护技术的应用前景与改进方向

4.1 应用前景

本文提出的航空液压系统负压维护技术，凭借其防泄漏效果显著、操作简便、成本低廉、适配性强等优势，具有广阔的应用前景，该技术的核心原理可延伸应用于航空燃油系统、滑油系统，液冷系统等其他流体系统的维护，为航空各类流体系统的防泄漏维护提供技术参考，推动航空维修整体工艺的升级。

此外，随着航空业对绿色维修的要求不断提升，相关政策与标准也将不断完善，负压维护技术作为一种高效的节能减排技术，将得到更多的政策支持与市场认可，未来有望成为航空液压系统维护的标准工艺。

4.2 技术改进方向

装置的小型化与集成化：目前的装置虽已实现模块化，但仍可进一步优化结构，实现各模块的高度集成，缩小装置体积、减轻重量，提升外场作业的便携性；

智能化与数字化升级：引入物联网与大数据技术，在装置中加装无线通信模块，实现装置工作数据（如压力、工时、泄漏量）与航空维修管理系统的实时传输，同时开发手机 APP 端的远程控制与监测功能，实现无人值守的负压控制，进一步

提升作业效率；

自适应负压调节：开发基于机型、维护部位、环境参数的自适应负压调节算法，使装置能根据实际作业场景自动设定最优负压值，无需人工干预，提升装置的智能化水平与应用便捷性；

多功能集成：在现有装置的基础上，集成油液检测功能，如在气路中加装油液品质传感器，在抽气过程中对液压油的含水量、杂质含量等指标进行检测，实现“防泄漏+油液检测”的一体化作业，为液压系统的状态监测提供数据支撑；

拓展适配范围：进一步研发适配更多机型（包括通用航空小型飞机）的专用适配器，同时设计适配液压系统不同部位（如作动筒、液压阀组）的专用连接装置，提升装置的适配范围与应用场景。

5 结论

本文针对传统航空液压系统维护中油液泄漏的行业痛点，提出了基于负压痛点，提出了基于负压技术的主动防泄漏维护方法，通过系统研究技术原理、设计专用负压防泄漏装置、制

定标准化实施流程，并结合实机模拟实验验证了技术效果，得出以下主要结论：负压技术通过在液压油箱内构建可控负压环境，利用流体压力差效应，可从根本上抑制油液泄漏，实验验证该技术的油液泄漏削减率达95%以上，防泄漏效果显著；设计的负压防泄漏装置采用模块化结构，由负压发生、控制监测、油液分离、连接适配四部分组成，具备负压精准控制、实时监测等功能，且小型化、便携化，适配航空外场维护作业需求，装置的安全性与可靠性经实验验证符合航空维修要求；负压维护技术在经济、环境、安全维度均具有显著的综合效益，可实现航空维修的成本节约、污染减排与安全提升，符合航空业“双碳”目标与绿色维修的发展要求。

负压技术在航空液压系统维护中的应用，为解决油液泄漏问题提供了一种全新的思路与方法，突破了传统被动防泄漏的技术局限，推动了航空维修技术的创新与升级。后续研究将进一步优化装置结构与控制算法，开展更多机型的实机应用验证，推动该技术的标准化与普及化，为航空维修行业的绿色化、高效化发展提供更有力的技术支撑。

参考文献：

[1] 王建军, 李志强. 航空液压系统维护与故障诊断技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2018.
 [2] 张华, 刘伟. 负压技术在流体密封中的应用研究进展[J]. 液压与气动, 2020, 44(5): 12-18.
 [3] 陈晓峰, 赵磊. 绿色维修理论及其在航空工程中的应用[J]. 航空维修与工程, 2021, 36(3): 25-30.
 [4] 周明, 孙建国. 航空液压油泄漏对环境的影响及防治措施[J]. 环境工程, 2019, 37(2): 45-49.
 [5] 黄伟, 杨静. 负压控制算法在复杂环境下的自适应优化[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(4): 67-73.