发动机引气污染及滑油渗漏污染分析与改进

胡兴龙[1,2],李国权[1,2],侯宏建[1,2],苏　壮[1,2],谷智赢[1,2]
(1.中国航发沈阳发动机研究所,2.中国航空发动机集团航空发动机动力传输重点实验室:沈阳 110015)

摘要:为了探寻航空发动机引气系统空气污染的原因并制定相应的解决方案,以典型的双转子涡扇发动机的引气系统流路为研究对象,详细分析了发动机因工作环境污染、流道清洗液残留及密封装置滑油渗漏造成发动机引气污染的可能性,并针对每种模式给出了应对措施。结果表明:渗漏的滑油粘附在发动机流道内,对引气造成持久污染,即滑油渗漏是发动机引气污染的主要原因。通过协调滑油供回油系统以保证在任何工况下回供比满足设计要求、优化轴承腔回油结构以保证轴承腔内滑油不积聚、优化封严腔漏油结构以保证渗漏的滑油不进入流道以及避免封严压差反向以实现密封装置工作正常。提出的解决方案能够有效地提高发动机引气系统的空气质量,为发动机引气污染问题提供解决思路。

关键词:引气系统;滑油渗漏;污染;轴承腔;航空发动机
中图分类号:V233.4　　**文献标识码:**A　　doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.06.018

Analysis of Aeroengine Bleed Air Pollution Causes and Mitigation of Lubricating Oil Leakage

HU Xing-long[1,2], LI Guo-quan[1,2], HOU Hong-jian[1,2], SU Zhuang[1,2], GU Zhi-ying[1,2]
(1.AECC Shenyang Engine Research Institute,
2.AECC Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero Engine Corporation of China: Shenyang 110015, China)

Abstract: To investigate the causes of air pollution in aeroengine bleed air systems and develop corresponding solutions, the flow path of a typical twin-spool turbofan engine bleed air system was chosen as the research object. Detailed analyses were conducted on potential pollution sources, including working environment pollution, flow passage cleaning fluid residues, and lubricating oil leakage from sealing devices. Countermeasures were proposed for respective modes. The results show that oil leakage is the primary cause for bleed air system pollution, as leaked oil adhering to the flow path causes persistent bleed air pollution. Effective solutions include coordinating the oil supply and return system to ensure the return-to-supply ratio meets the design requirements under all operating conditions, optimizing the oil return structures of bearing chambers to prevent oil accumulation, improving the oil scavenge structures of sealing cavities to prevent lubricating oil from entering the flow path, and avoiding reverse sealing pressure differentials to ensure proper sealing device operation. The proposed solutions can effectively improve the air quality of engine bleed air systems, offering practical approaches to resolving engine bleed air pollution issues.

Key words: bleed air system; oil leakage; pollution; bearing chamber; aeroengine

0　引言

发动机引气系统的功能是从风扇或压气机引出空气,经过一系列处理(如除水、加压、降温等)流向座舱供飞机使用[1],从发动机引出的空气不仅要满足温度和压力的要求,同时其中的污染物浓度应在规定值以内。但从发动机实际使用情况可见,虽然引气中污染物浓度能满足标准,但飞行员偶尔反映引气中存在异味,该异味的成分比较复杂且容易影响驾驶感受[2-4]。针对引气中可能存在的污染,国内外均有明确要求,如:欧洲的《发动机审定规范》(CS-E)中要求了发动机引气中不能含有有毒物质;中国的《航空发动机适航规定》CCAR-33 中要求客舱用发动机引气中有毒物质浓度不能使机组人员或乘客失去能力;《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》要求座舱引气不能使人员工作能力受影响。

收稿日期:2024-01-24　　**基金项目:**国防工业重点研究项目资助
作者简介:胡兴龙(1988),男,硕士,工程师。

引用格式:*胡兴龙,李国权,侯宏建,等.发动机引气污染及滑油渗漏污染分析与改进[J].航空发动机,2025,51(6):138-144.HU Xinglong, LI Guoquan, HOU Hongjian, et al.Analysis of aeroengine bleed air pollution causes and mitigation of lubricating oil leakage[J].Aeroengine, 2025, 51(6): 138-144.*

陈希远等[5-6]采用 AMESim-FLUENT 耦合计算模型,分析了飞机座舱中污染物的进入、扩散以及排除的全过程,得到了一种能够能够精确模拟座舱污染物扩散的分析方法;杨建忠等[7]研究了飞机座舱的送风方式对污染物传播的影响分析,表明混合送风会增大舱内污染物的传播范围,提高舱内乘客受到感染的概率;吕大超[8]利用统计分析方法得出乘客对座舱异味、刺激等更为敏感,且长时飞行反应更为强烈;胡毅等[9]归纳总结了国内外相关机构对军用飞机引气污染的相关要求,同时概述了发动机引气污染物的成分、来源及对飞行员或乘客的危害评估;李艳娜等[10]阐述了飞机座舱供气从发动机至座舱的全流程,分析了飞机环控系统可能造成的座舱引气污染的几种方式,提出了飞机座舱供气品质的控制途径,提出的引气检测方法可以用于批产发动机引气成分的抽样检查;Zhao 等[11]、Sagnik 等[12]研究了飞机座舱不同送风形式对流场的影响以及对座舱污染物的排除效果;Li 等[13]、Yan 等[14]研究了飞机座舱多种通风形式对乘客周围污染物浓度的影响,同时获得了考虑人体温度辐射的座舱温度场和流场仿真结果。上述研究均以座舱污染物的传播和分布为研究对象,并没有对座舱污染物的来源及如何避免座舱引气中含有污染物质进行深入分析。

本文综合分析了发动机引气污染的来源,重点分析了因滑油渗漏导致引气污染的模式,提出了 4 种避免滑油渗漏至发动机引气系统的改进思路。对改善飞行员的驾驶感受、保障飞行安全具有重要的意义。

1　异味的来源及解决措施

发动机引气系统的空气一般从风扇或者压气机的某一级引出提供给飞机环控系统。因此可以从引气来源及发动机的使用维护过程将引气污染来源分为:风扇进气口吸入受污染的气体、发动机流道清洗时残留的清洗液进入流道、滑油泄漏后滑油蒸汽进入流道 3 种模式。

1.1　发动机吸入污染物

当飞机飞行的空域大气环境中存在有污染的物质(比如导弹的尾气、火山灰等)时,不可避免地将污染物吸入发动机,随引气系统进入飞机座舱。但考虑到该大气环境不属于飞机或者发动机长时工作的环境状态,引气系统的空气污染可随大气环境的改善而改善,因此发动机和飞机不需要特殊的处置措施。

1.2　流道清洗液残留

发动机在使用过程中不可避免会吸入粉尘、昆虫等物质,以及从封严装置泄漏的少量滑油附着在风扇及压气机转静子叶片等部位,形成沉积物[15-16],从而影响发动机的性能,因此需要定期对发动机进行清洗,去除沉积物。《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》中规定如果在发动机维护中使用清洗液,则应考虑给出对引气污染的影响。目前,国内外用于发动机清洗的溶剂分为水基型和溶剂型清洗剂[17]。溶剂型清洗剂的主要成分是苏打重铬酸钾,属于有毒化学品。为避免溶剂型清洗剂对发动机引气造成污染,应优先采用水基型清洗剂,这种清洗剂对人体没有危害,可广泛使用。此外,发动机清洗后,结合发动机性能检查试车就能够将流道中残留的清洗液吹除干净,既不会对引气造成污染也不会损害飞行员身体。

1.3　滑油泄漏造成引气污染

发动机各轴承腔内部是轴承、供油喷嘴、密封装置、回油结构、通风结构等综合体,其内部工作情况极为复杂。当密封装置损坏或者发动机处于某些特殊工作状态时,很有可能发生滑油渗漏至主流道并随引气系统进入到座舱造成污染。有相关研究人员对受热的滑油开展了气味对比试验,当滑油加热至 210 ℃时出现了油烟味,温度越高油烟味越浓,该油烟味与发动机引气污染的特征一致。

综上所述,在众多的污染源中,因滑油泄漏及滑油分解产物导致引气污染的可能性比较大,并具有诱发因素多、产生来源广和排查困难的特点。虽然目前国内使用的 4050 滑油、4010 滑油等产生的蒸汽对人的身体无害,但是长期吸入会影响驾驶或飞行感受。因此,解决发动机滑油渗漏是解决引气污染问题的重要工作之一。

1.3.1　滑油渗漏模式

双转子涡扇发动机的结构如图 1 所示,各轴承腔均由壳体及密封装置(如石墨圆周密封、篦齿密封)形成封闭腔室。前轴承腔滑油(或油气)渗漏时,大部分滑油在离心力的作用下进入发动机外涵道,仅有少部分滑油进入内涵道进入发动机引气系统。中轴承腔的滑油(或油气)发生了渗漏时,滑油进入流道内或黏附在叶片表面,也能够进入发动机引气系统。而后轴承腔内的滑油从密封装置泄漏后,会随气流向后通过

发动机尾喷管排出，不会向前进入到发动机引气系统。因此，需要重点分析前轴承腔、中轴承腔的滑油渗漏模式。

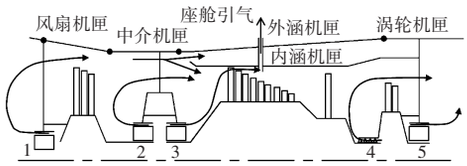
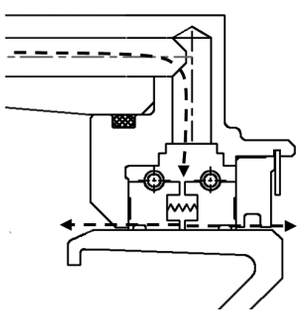
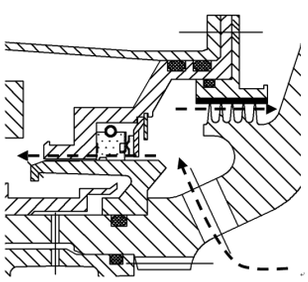


图1 双转子发动机结构

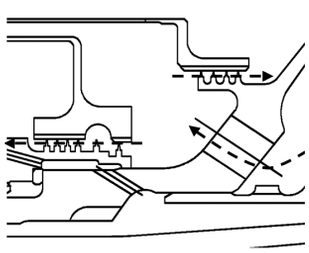
发动机前轴承腔的密封装置大多采用石墨圆周密封或者石墨圆周密封加篦齿密封，也有部分发动机仅采用篦齿密封，几种常见的密封形式如图2所示。中轴承腔的密封形式主要为石墨圆周密封，虽然篦齿密封和石墨圆周密封的结构有差异，但是产生滑油渗漏的模式是一致的。当发动机引气系统存在污染时，除了应检查发动机密封装置的结构是否完好外，还应充分考虑发动机供回油系统协调、轴承腔的有效容积是否利于回油以及是否设计了密封装置外的漏油回油结构等因素。



(a) 双联石墨密封



(b) 单联石墨+篦齿密封



(c) 双篦齿密封

图2 几种常用的主轴密封形式

1.3.2 避免滑油渗漏的设计方案

1.3.2.1 供回油系统协调

发动机轴承腔应采用干油池设计，这种设计思路不仅能降低滑油渗漏也能有效避免因轴承搅拌导致的滑油超温。为此，要求滑油泵的回油能力足够大，一般来说轴承腔回油能力应比供油能力大3～4倍以上[18]。但即使轴承腔的回供油比比较大的发动机也会出现引气系统污染的问题，其原因就是发动机在例如起动过程或者风车状态等低转速时，滑油泵的回油能力在油气条件下往往很弱[19-20]，其回供油比可能达不到设计点的状态。为此，如果发动机在各种状态下均有足够的回油能力，则有利于避免滑油渗漏。

滑油供油系统可分为有调压差活门和无调压差活门的2类，2种供油方式的流量特性曲线如图3所示。有调压差活门的滑油系统原理如图4所示，调压差活门通过感受供油路压力和某一轴承腔压力调节活门内溢流路的开度保证发动机各喷嘴前后的压差能够稳定在设计范围内。

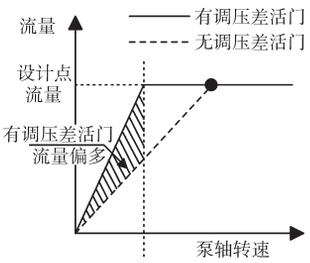


图3 滑油泵组流量特性对比

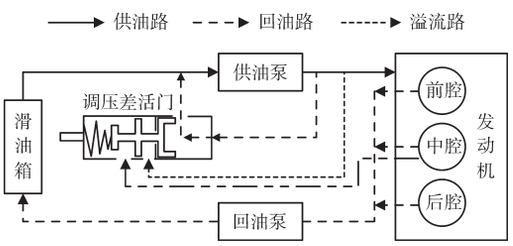


图4 带调压差活门的滑油系统原理

发动机在地面工作时，供油泵的流量应大于系统循环量，多出的流量通过调压活门返回至供油泵的进口或总回油出口[21]；发动机在高空工作时，由于滑油泵组的高空特性导致其工作效率降低，调压差活门通过调整溢流量的大小保证了发动机在高空也具有足够的滑油供油量。但这种供油方式在低转速下供油偏多(图3阴影区域)，且此时轴承腔封严压差尚未建立、回油滞后于供油，当腔内的积油超过密封装置的封严面时就会造成滑油渗漏。无调压差活门的滑油系统原理如图5所示，相比于有调压差活门滑油系统无控

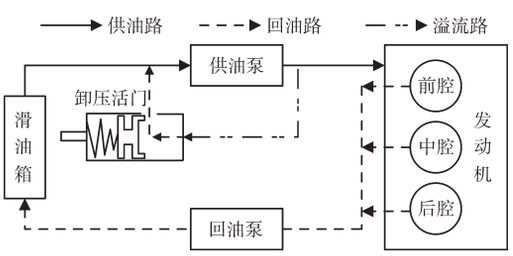


图5 无调压差活门的滑油系统原理

制活门作动的引气路和油路。供油泵的流量基本上与发动机转速成正比，因此也称为全流量供油系统，一般供油泵的流量比系统循环量大15%即可。当滑油压力超过规定值时滑油泵组卸压活门打开，多余的滑油通过卸压活门流回至低压腔(如供油泵进口或某级回油出口)，相比之下更易实现供、回油系统的

协调。

当供回油系统不协调时,为避免滑油从密封装置处泄漏往往需要较大的封严压差;供回油系统协调时则较小的封严压差就能保证滑油不渗漏。供回油系统的协调不是滑油泵单独部件能够解决的问题,必须在特定的结构和工况下具体设计。当发动机有狭小的轴承腔时,为防止腔内积油除提高回油泵效率外也可在供油路上设置断流活门在低转速下停止供油。比如F139发动机和РД-33发动机均在供油路上设置断流(单向)活门,其作用是当发动机处于起动、停车等低转速状态时阻止对前支点的供油,这样就解决了起动、停车等低转速状态时轴承腔内积油过多的问题,而在大状态下,断流(单向)活门打开,正常向前支点供油。谷智赢等[22]设计了一种发动机在低转速下避免后轴承腔滑油渗漏的活门。其工作原理为发动机转速低时活门不开启,只有少量滑油通过节流嘴喷射到轴承上,保证轴承的润滑。当发动机转速继续增加,单向活门开启,实现轴承腔的正常供油。

1.3.2.2　优化轴承腔回油结构

轴承腔内低温、清洁的滑油对轴承冷却润滑之后需要以最短的时间和最短的路径从回油口返回至滑油箱内部。为了保证滑油能够迅速达到回油口,在轴承腔设计时应当考虑轴承腔的油腔容积、回油口的位置、回油路流通面积等问题。

轴承腔的容积需要与轴承腔供油量、回油泵的效率进行匹配。一般来说,轴承腔容积过小容易使滑油在密封装置处积聚,造成滑油渗漏进入发动机流道污染引气。轴承腔设计时也要兼顾发动机其它结构的设计,当发动机空间结构无法满足轴承腔容积的设计要求时,也可通过设计外置临时储油箱的方法增大轴承腔容积。比如РД-33发动机在轴承腔回油管路上,设计1个漏油箱以增大轴承腔的容积,使停车后回油路内靠重力流下的滑油进入到漏油箱从而避免积聚得滑油超过密封装置的密封面而渗漏至发动机流道内。

轴承腔回油口是轴承腔内积聚的滑油返回滑油箱的入口,其布置的位置对回油的效率起着关键性的作用,任国哲[23]依据回油口的位置,将回油结构分为常规结构、斜坡结构及侧开结构。回油口的位置不一定要设计在轴承腔的最低点,但是考虑到发动机低转速时及地面状态工作,一般设置在轴承腔的底部。随着仿真技术的提升,可以通过轴承腔3维仿真分析,综合考虑回油泵的抽吸力、滑油的重力、轴承转动给滑油的离心力获得轴承腔内滑油积聚的准确部位,从而获得最佳的回油口位置。

为了减小轴承腔回油泵组的回油阻力,提高泵的效率,轴承腔回油路上的流通面积应尽可能大,尽量避免回油流路出现过多的弯折或者节流单元。

1.3.2.3　优化封严腔漏油结构

发动机在某些情况下,比如大状态下拉时因容腔效应导致的短时封严反向或者高空低马赫封严裕度不足时,轴承腔内的滑油会渗漏至封严腔,如果这些滑油不能及时排出而进入流道,很可能会导致发动机引气污染。为解决这个问题,一般在封严腔设计漏油回油孔或漏油收集结构(腔),使泄漏的滑油返回至轴承腔内部或者排出发动机外,从而避免泄漏的滑油进入主流道。

典型的封严腔漏油回油结构如图6所示,密封装置的封严腔与轴承腔通过一处细小的孔道进行连通。当在某些特殊工况下,轴承腔内的滑油从石墨环与跑道的密封面渗出后,短时积聚在封严腔内,积聚的滑油在封严引气压力、重力或旋转离心力的共同作用下,通过封严腔底部的漏油回油孔返回至轴承腔内部。对于CFM56-7B发动机则是通过该漏油回油孔排出至发动机外部[24]。

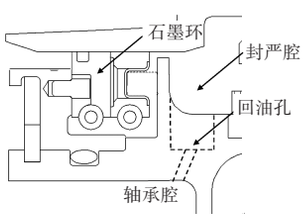


图6　典型封严腔的漏油回油结构

增加密封装置的漏油回油孔可以说是解决轴承腔内滑油渗漏造成引气污染最简单易行也比较有效的一种方式。漏油回油孔的孔径一般不超过Φ=1.5 mm,其位置开在封严腔最低点即可。过大的孔径会导致轴承腔封严引气泄漏致轴承腔,反而不利于轴承腔封严。因此,密封装置外采用漏油回油孔的结构必须计算引气泄漏对轴承腔腔压及腔温的影响,综合判断之后确定封严腔漏油回油孔的孔径。

1.3.2.4　保证封严压差不反向

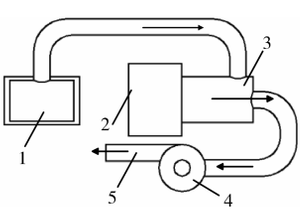
当发动机在起动/停车过程、风车状态、高空低马赫等特殊状态时,引气压力往往比较低,从而导致密封装置前后的压差不足导致滑油渗漏。这些工作状态因持续时间较短滑油渗漏的情况往往并不严重,甚至可能不影响滑油系统的滑油消耗,但是微量泄漏的

滑油对引气系统的污染是不能忽略的。

为了保证轴承腔密封装置在工作时有足够的封严压差，可以采用增加封严引气的压力或降低轴承腔腔内压力这2种方式。

AL-31F发动机及РД-33发动机引气方案为发动机低状态采用高压引气封严，发动机高状态时采用低压引气进行封严，高低压引气的转换通过增压转换活门的作动实现。这种引气方案优点是简便、易行、效果明显；缺点是增压转换活门必须足够可靠，一旦活门转换失效过高或者过低的引气压力均会导致滑油泄漏增多，也会缩短密封装置的寿命。

降低轴承腔腔内压力的方法对发动机过渡态及低状态的封严效果的改善具有明显的作用，但需要额外增加抽吸轴承腔腔内气体的系列附件及控制逻辑。比如JT150D发动机将轴承腔回油与轴承腔通风结合起来，可以取消轴承腔通风管，通过增大轴承腔回油泵的能力将滑油和气体一起抽走，这种方法对于轴承腔采用接触式封严装置时效果明显，属于无通风的设计。此外，为了解决燃机动力涡轮滑油渗漏问题，采用了在通风系统末端增加抽气泵的方式保证发动机在低状态及过渡态时轴承腔内形成负压以保证密封装置能够建立起足够的封严压差，使密封增压空气流动不反向，其构成如图7所示。



1—轴承腔；2—附件齿轮箱；3—油气分离装置；4—空气泵；5—发动机排气口。

图7 燃机动力涡轮通风方案

从图中可见，轴承腔通过通风管与附件传动机匣的油气分离装置连接，将轴承腔内的油气混合物进行油气分离，分离之后的气体通过管路被抽气泵排出至发动机外。该抽气泵在控制逻辑上，能够跟踪轴承腔密封装置的封严压差情况，当封严压差处于告警下限时抽气泵起动，降低轴承腔内压力，以保证轴承腔密封装置能够建立起足够的封严压差。

2 试验验证

发动机引气污染（异味）与引气成分暂无明确的对应关系，也没有较为成熟的测量方法，目前只能依靠人体感官察觉，属于典型的“疑难杂症”[25]。为了判断发动机引气是否污染，可以通过发动机停车后采孔探检查流道油迹变化和发动机引气嗅觉检查2种方法进行判断。由于孔探检查属于成熟的常规性检查，本文对孔探方法不再赘述。

引气嗅觉检查即通过判断发动机引气的味道直观地判断引气的优劣，其测试方法气路如图8所示，无论何种异味来源均可以用该方法进行检查。具体方法为将发动机引气接口与图示管路相连接，将引气不经过任何处理直接引出至封闭空间，该空间应保证无油漆、燃油、煤油等带有异味气体或液体。引气管通径不可过小且无堵塞，长度越短越好，一般不超过20 m为宜，其间安装一处手动调节阀快速控制引气的压力和流量。

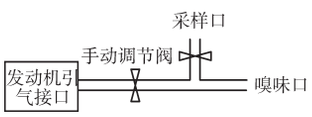


图8 发动机引气嗅味测试方法

为了能够使嗅味试验结果在不同批次发动机或者不同型号发动机之间具有可对比性，需要固化试车程序。例如发动机在开展嗅味试验时采用如图9所示的试车程序，在开展嗅味试车程序时，要求前一次试车发动机最大状态在暖机转速及以上，且发动机为正常停车。这样能够避免因前次试车发动机状态异常可能导致滑油渗漏对嗅味试验造成影响。程序中，首次中间状态之前的过程为流道污染物吹除过程，试验时可仅记录实际结果，若发动机第2次达到中间状态，发动机引气的污染情况仍不合格，则该发动机可能存在引气污染问题。

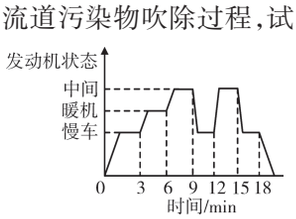


图9 发动机引气嗅味试验试车程序

发动机引气嗅味试验的判断标准还属于摸索阶段，不同试车次及不同嗅味试验员的感受会略有差别。龚帅[26]将不同物质产生的座舱异味进行了特征描述，具有一定的参考意义。开展发动机嗅味试验时，为了对引气气味量化对比，将引气气味分为了5个等级，即无异味、轻微、较淡、较重、严重，结合发动机实际使用认为引气气味轻微或者短时为较淡级别是能够被接受的，较重或严重则异味发动机可能存在异常，需要按照本文提出的排查方法和解决思路进一步开展工作。

3 结论

（1）滑油泄漏进入引气系统是造成发动机引气系

统污染的主要来源。

(2)无论是接触式密封还是非接触式密封,在某些特殊工况下均可能造成滑油的少量渗漏,虽然不影响发动机的滑油消耗,但是对发动机引气的空气质量是不可以忽略的。

(3)在发动机较低工况下工作时,比如起动、停车及风车状态,滑油回油泵通常不能建立稳定的回油,解决措施是在不影响系统安全的前提下减小滑油的供油量,以实现供回油系统协调。

(4)轴承腔容积、回油路径、回油口的位置应进行优化设计,保证滑油在密封装置处不积聚,能以最短的时间和路径返回滑油箱。

(5)在密封装置的封严腔增加漏油回油孔是避免滑油渗漏至流道的最简单易行的方式。

(6)当发动机引气压力尚未建立或高空左边界某些工况引气压力较低时,将轴承腔抽成负压是一种有效避免滑油渗漏的方法。

(7)发动机引气成分与异味暂无对应关系,亟需一种能够定量分析发动机引气系统空气质量的手段。

参考文献:

[1] 林贵平,袁修干,张成宽.飞机环控系统引气分析系统动态性能分析[J].北京航空航天大学学报,1997(5):30-34.
LIN Guiping, YUAN Xiugan, ZHANG Chengkuan. Transient performences of air bleeding part of enviromental control system [J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1977(5): 30-34.(in Chinese)

[2] 马进恩.某型发动机因泄漏引起座舱异味故障的研究[J].现代工业经济和信息化,2015(14):45-47.
MA Jinen.A certain type of engine carbin odor caused by leakage fault [J].Modern Industrial Economy and Informationization, 2015(14):45-47.(in Chinese)

[3] 李春,廖建军.某型辅助动力装置尾喷管冒烟及引气异味问题分析[J].产业科技创新,2020,2(3):41-42.
LI Chun, LIAO Jianjun. Analysis of smoke and peculiar smell of exhaust gas form tail nozzle of a certain auxiliary power unit[J].Industrial Technology Innovation, 2020,2(3):41-42.(in Chinese)

[4] 宋刚. A320 系列飞机 APU 滑油泄漏造成客舱异味研究[J].工业技术,2014(35):83-86.
SONG Gang.Study on cabin odor caused by apu oil leakage of A320 series aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014(35):83-86.(in Chinese)

[5] 陈希远,于天鹏,欧阳建亮,等.考虑再循环风的飞机座舱引气污染仿真研究[J].科学技术与工程,2017,17(19):295-300.
CHEN Xiyuan, YU Tianpeng, OU YANG Jianliang, et al. A study of bleed air contaminant in aircraft based on recirculation air[J]. Science Technology and Engineering,2017,17(19):295-300.(in Chinese)

[6] 杨建忠,于天鹏,陈希远,等.飞机环控系统引气污染耦合仿真研究[J].科学技术与工程,2016,16(32):269-273.
YANG Jianzhong, YU Tianpeng, CHEN Xiyuan, et al.A coupled simulation for bleed air contaminant in aircraft environmental control system [J].Science Technology and Engineering, 2016, 16(32): 269-273.(in Chinese)

[7] 杨建忠,裴春波,陈希远.送风方式对飞机座舱内污染物传播影响研究[J].应用力学学报,2021,38(1):241-248.
YANG Jianzhong, PEI Chunbo, CHEN Xiyuan.Study on the influence of air supply mode on contamin ant transport in aircraft cabin[J].Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(1): 241-248.(in Chinese)

[8] 吕大超.飞机座舱可挥发性有机物的健康效应及舒适度评估[D].天津:天津大学,2019.
LYU Dachao. Assessment of health and comfort effects of volatile organic compounds in commercial airliner cabins[D]. Tianjin: Tianjin University,2019.(in Chinese)

[9] 胡毅,吕宝,李毓峰.JSSG-2007军用飞机引气污染要求浅析[J].航空标准化与质量,2016(3):48-51.
HU Yi, LYU Bao, LI Yufeng. JSSG-2007 analysis of air pollution requirements of military aircraft[J].Aeronautic Standardization & Quality,2016(3):48-51.(in Chinese)

[10] 李艳娜,张翠峰,朱永峰.飞机座舱供气品质分析[J].航空科学技术,2014,25(9):44-47.
LI Yanna, ZHANG Cuifeng, ZHU Yongfeng. Analysis of air supply quality of aircraft cabin[J].Aeronautical Science & Technology,2014,25(9):44-47.(in Chinese)

[11] Zhao Y J, Dai B R, Yu Q, et al.Numerical simulation study on air quality in aircraft cabins[J].Journal of Environmental Sciences, 2017, 56: 52-61.

[12] Sagnik M , Chen Q. Influence of cabin conditions on placement and response of contaminant detection sensors in a commercial aircraft[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2008 10(1):71-81.

[13] Li M, Zhao B, Tu J, et al.Study on the carbon dioxide lockup phenomenon in aircraft cabin by computational fluid dynamics[J].Building Simulation, 2015, 8(4):431-441.

[14] Yan Y, Li X, Tu J.Effects of passenger thermal plume on the transport and distribution characteristics of airborne particles in an airliner cabin section[J].2015:1-11.

[15] 王坚,黄选民,幸泽宽,等.航空发动机压气机叶片表面清洗技术研究[J].中国表面工程, 2010,23(4):78-81,86.
WANG Jian, HUANG Xuanmin, XING Zekuan, et al.The research on cleaning technique for aero-engine compressor blade[J].China Surface Engineering, 2010,23(4):78-81,86.(in Chinese)

[16] 刘运华.特殊环境飞行后发动机清洗技术的改进[J].民航飞行与安全,1998(4):9-10.

LIU Yunhua.Improvement of engine cleaning technology after flight in special environment[J].Journal of Civil Aviation Flight University of China,1998(4):9-10.(in Chinese)

[17] 李本威,王秀霞,胡国才.涡喷发动机清洗技术[J].航空发动机,2000(1):12-16.
LI Benwei,WANG Xiuxia,HU Guocai.Research on cleaning technology of turbojet engine[J]. Aeroengine,2000(1):12-16. (in Chinese)

[18] 林基恕.高性能涡轮发动机润滑系统设计[J].燃气涡轮试验与研究,2003(1):7-9,17.
LIN Jishu.Design of high performance turbo-engine lubrication systems[J].Gas Turbine Experiment and Research,2003(1):7-9,17. (in Chinese)

[19] 李国权.航空发动机滑油泵高空性分析[J].航空发动机,2008(1):46-47,34.
LI Guoquan.Analysis of altitude performance of aeroengine oil pump [J]. Aeroengine, 2008(1):46-47,34. (in Chinese)

[20] 武晓龙,姜甲玉.某发动机滑油消耗量大故障影响因素分析[J].机械工程师,2015(1):100-103.
WU Xiaolong, JIANG Jiayu. Factors analysis of lubrication consumrtion overrun malfunction on an aero-engine[J].Mechanical Engineer,2015(1):100-103. (in Chinese)

[21] 赵宏达,毛福荣,谷俊.润滑系统调压差活门技术研究与应用[J].航空发动机,2017,43(6):44-48.
ZHAO Hongda, MAO Furong, GU Jun.Research and application on pressure differential valve of lubrication system[J].Aeroengine.2017,43(6):44-48.(in Chinese)

[22] 谷智赢,李国权.一种解决低转速下漏油的流量管理阀[J].航空动力学报,2014,29(9):2136-2141.
GU Zhiying,LI Guoquan.An oil flow management valve for solving oil leakage at low rotating speed[J].Journal of Aerospace Power, 2014,29(9):2136-2141. (in Chinese)

[23] 任国哲.基于油气两相流的航空发动机轴承腔流动换热研究及回油结构改进设计[D].西安:西北工业大学,2016.
REN Guozhe. Study on flow and heat transfer and optimization of scavenge structure in bearing chamber based on oil/air two-phase flow[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University,2016.(in Chinese)

[24] 夏存江.CFM56-7B发动机滑油渗漏分析[J].燃气涡轮试验与研究,2008(1):54-57,50.
XIA Cunjiang.Analysis for CFM56-7B engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008(1):54-57,50.(in Chinese)

[25] 吴有元.某型发动机滑油消耗量异常故障的封严因素分析和外场应对措施[J].航空维修与工程,2017(8):37-39.
WU Youyuan.Sealing factor analysis and countermeasures on abnormal oil consumption of engine[J]. Aviation Maintenance &Engineering, 2017(8):37-39.(in Chinese)

[26] 龚帅.孔探技术在排除客舱异味故障中的应用[J].中国设备工程,2017(17):28-30.
GONG Shuai.Application of pore-probing technique in troubleshooting cabin odor[J].China Plant Engineering, 2017(17):28-30.(in Chinese)

(编辑:程 海)