

# 地面模拟高度导致辅助动力装置停车及限制

马扬\* 李彦双 顾程 薛伟伟

(上海飞机设计研究院,上海 201210)

**摘要:** 在进行大气数据计算系统的功能测试任务时,某型飞机在地面模拟空中高度并使用辅助动力装置(APU)供电的过程中,APU 出现了熄火停车的现象。通过对 APU 的系统构造、控制系统原理、供油过程以及燃烧室的燃烧机理进行深入分析,确定了 APU 熄火的原因:尽管 APU 实际位于地面高度,但它错误地接收到了代表空中高度的信号。这导致 APU 在燃油调节控制过程中减少了燃油供给,以适应错误认为的“高空稀薄”空气。由于此时 APU 对燃油的实际需求量超过了供给量,APU 因供油不足而转速下降,并触发了欠速保护机制,最终导致熄火停车。同时,分析了该现象可能对 APU 和飞机造成的影响。基于这些影响,建议在未来使用 APU 时,应从飞机端引入环境参数,并关注 APU 的使用限制。这样做可以防止在模拟高度与地面实际高度不一致的情况下,APU 再次出现熄火停车的现象,从而降低对飞机设备造成损坏的风险,并有助于提高 APU 的使用寿命。

**关键词:** 民用飞机;辅助动力装置;停车

中图分类号: V23

文献标识码: A

OSID:



## 0 引言

作为飞机的第二动力<sup>[1]</sup>,APU 在飞机使用过程中至关重要。识别 APU 可能存在的故障,提前处理,避免超限使用 APU,可以提高 APU 的使用寿命,降低对飞机其它设备的影响。

本文从航线案例出发,从原理上分析 APU 故障的原因及其对飞机的影响,从而给出航线使用建议。

## 1 案例描述

在某型飞机执行大气数据计算系统功能测试时,使用 APU 供电。APU 根据飞机的压力高度、马赫数、静温等信号自动调节供油量,当地面模拟压力高度达到 16 000 ft 左右时,APU 转速下降,熄火停车。

## 2 原理介绍

### 2.1 APU 系统构成

通常 APU 系统布置在飞机尾锥区域,由进气系

统、本体发动机、排气系统、安装系统、控制/电气系统、通风冷却系统和排液系统组成,如图 1 所示。

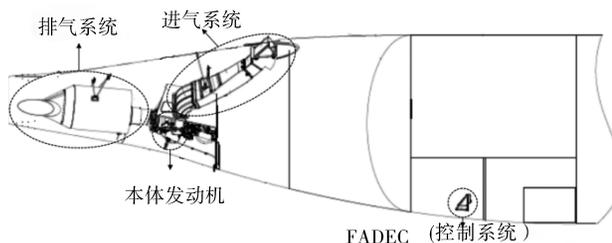


图 1 APU 系统构成

APU 本体发动机是一台小型燃气涡轮发动机,具有重量轻、体积小等特点,其功能是为环控系统 and 主发起动的空气涡轮起动机提供压缩空气,同时驱动一台发电机,其工作必要的系统通常包含燃油、滑油、空气、控制、指示、进气和排气系统<sup>[2]</sup>。

APU 工作时,全权限数字电子控制器(full au-

\* 通信作者. E-mail: mayang@comac.cc

引用格式: 马扬,李彦双,顾程,等.地面模拟高度导致辅助动力装置停车及限制[J].民用飞机设计与研究,2024(3):31-35.

MA Y, LI Y S, GU C, et al. Ground simulation altitude causing APU shutdown and limitations[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2024(3):31-35(in Chinese).

thority digital engine control, 简称 FADEC) 控制风门打开, 外界空气经过进气系统进入本体发动机集气腔, 经集气腔整流进入压气机, 后经压气机压缩、燃烧室燃烧、涡轮膨胀做功, 将热能转化为机械能。

### 2.2 APU 控制系统简介

APU 的控制系统通常包含 FADEC、其它控制部件和安装在 APU 上的传感器。这一系统主要负责协调 APU 与飞机相关系统之间的交互与控制。

APU 的控制主要依赖于 FADEC。FADEC 是一个基于微处理的计算机系统, 负责监控和控制 APU 在所有状态下的操作, 并在发动机指示和机组告警系统 (EICAS) 上显示相关信息。其主要功能有:

- 1) 通过风门控制器控制 APU 进气风门, 控制 APU 的起动电机和燃油模块, 控制 APU 点火和 APU 引气阀, 控制 APU 起动、正常关车和自动停车过程, 根据供油规律调节供油;
- 2) 监控 APU 运行参数和状态, 包含 APU 转速、排气温度 (EGT)、滑油压力和温度;
- 3) 故障探测和隔离, 实时监测 APU 部件工作状态, 探测到故障时进行初步的故障隔离。

### 2.3 APU 系统供油过程

APU 的控制通常采用恒物理转速控制的方式, 其中控制系统以燃油量为控制量, 以发动机转速为被控制量来实现对辅助动力装置的控制<sup>[3]</sup>。

APU 的燃油控制规律包括起动燃油控制规律和稳态运转燃油控制规律, 由 FADEC 自动实现。APU 采用来自飞机传输或自身传感器测得的压力高度、马赫数、静温等信号自动调节供油量。

APU 稳态运转燃油控制通常采用转速闭环策略<sup>[4]</sup>, 其目的是为了保障 APU 在空载或带载状态下恒速运转, 避免出现超温、超转、喘振、熄火等不利特性, 以满足飞机对 APU 的要求。在 APU 完成起动过程后, FADEC 根据自身采集或飞机传输的压力高度、马赫数、静温等信号和 APU 本身负载情况计算供油量, 然后控制燃油模块自动调节供给到燃烧室的燃油, 保证 APU 燃烧室的持续燃烧。

APU 起动控制规律是为满足 APU 在起动过程的燃油供给需求, 同时保证在起动过程中不熄火、不超温的情况下把 APU 加速到 100% 转速状态。通常起动时采用定油气比进行供油<sup>[3]</sup>。

为提高 APU 起动可靠性, 减少 APU 起动过程的时间, 以及适应稳态运转时, 不同状态下不同的燃油流量需求 (高空和起动初始阶段燃油需求量较低), APU 通常采用主辅双油路设计, 主辅油路的控制通过燃油分配阀实现。燃油分配阀通常为机械弹簧阀或电磁阀, 均存在压力打开阀值。

APU 起动初始阶段, FADEC 控制燃油模块开始为燃烧室供油, 初始阶段为主燃油管路供油。当供油压力上升到燃油分配阀打开压力时, 燃油分配阀打开, 主辅燃油管路一同为燃烧室供油, 燃油管路示意图见图 2。

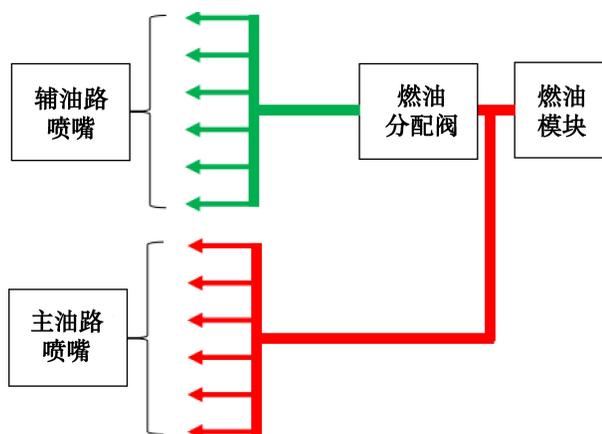


图 2 APU 喷嘴布置图

APU 起动过程如图 3 所示, 通常包含以下几个步骤:

- 1) 无刷起动发电机 (BSG) 带转 APU, APU 转速上升, 此时不供油;
- 2) APU 转速达到特定值时, APU 开始供油, 点火激励器开始点火;
- 3) APU 点火成功, 直到 APU 转速进一步增加, 起动机脱开, 此时燃油供给规律与 APU 进气温度、压力相关;
- 4) 从起动机脱开到 APU 转速达到 100%。APU 转速到达目标转速后, 可加载 (RTL) 灯亮, 表示 APU 起动完成, 并可以为飞机提供电源和引气, 供油规律与 APU 进气温度、压力相关。

通常 APU 停车过程阶段如下:

- 1) APU 引气活门关闭;
- 2) 冷运转开始, BSG 断开;
- 3) APU 进气风门关闭;
- 4) APU FADEC 断电;

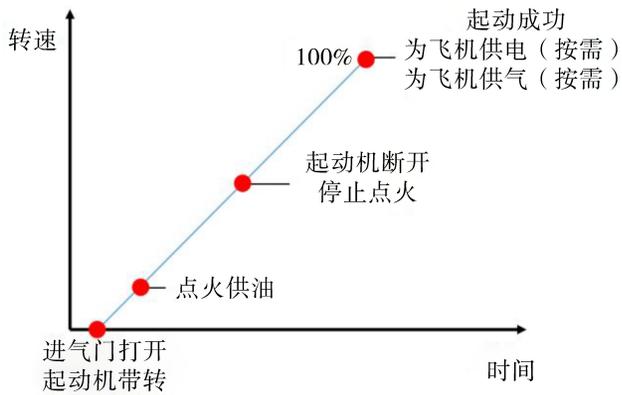


图3 APU 启动过程

5) APU 供油切断阀关闭。

APU 非指令自动熄火停车时,通常无冷转过程。

## 2.4 常见 APU 停车原因

APU 常见故障包括启动失败和自动停车<sup>[4]</sup>。通常 APU 故障出现在启动阶段,正常启动后由于故障导致自动停车情况比较少见。

启动过程中点火系统、燃油模块、燃油喷嘴、传感器、引气活门等部件的失效会造成 APU 启动失败<sup>[5]</sup>。涡轮叶片移位、损伤等硬件问题也会造成 APU 启动失败<sup>[6]</sup>。

APU 正常启动后自动停车通常是由于滑油系统问题,或触发超速保护导致,为了安全被动停车<sup>[7]</sup>。当遇到空气进气口或空气管道堵塞、滑油散热器堵塞等故障情况时,APU 会由于滑油温度高或者滑油压力低导致自动停车<sup>[8]</sup>。

另外一种常见的情况是 APU 燃油系统供油发生问题,造成熄火。APU 燃烧室存在两种熄火现象:一是油气比小到一定程度时发生熄火,此时燃油贫瘠,空气较多,为贫油熄火。另一种是当油气比大到某个程度时发生熄火,此时燃油丰

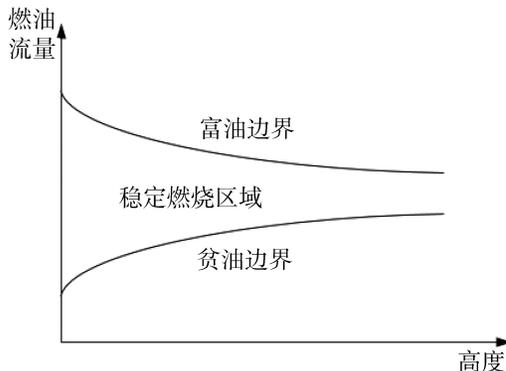


图4 典型的贫富油燃烧边界

富但空气较少,为富油熄火。贫油熄火和富油熄火界限越宽,说明 APU 的燃烧稳定性越好。由航空发动机燃烧室的使用特性可知,随着飞行高度的升高,稳定燃烧范围逐渐减小<sup>[9-10]</sup>。典型的贫富油燃烧边界如图 4 所示。当 APU 供油量处于贫油和富油边界之间区域时,APU 能够稳定燃烧。

## 3 APU 自动停车案例原因分析

APU 是一台小型恒转速的燃气涡轮发动机,其转速由 APU FADEC 自动控制。该型 APU FADEC 根据 APU 运行时飞机传输的压力高度、马赫数、静温等工况,自动控制 APU 燃油模块以调节供油量。

随着海拔上升,进气压力和温度的降低使得空气流量下降,供油规律会调节供油量下降,保证合理的油气比。

APU 启动的可靠性与启动阶段燃烧室供油点火密切相关。燃烧室供油点火特性主要受电嘴的放电频率和能量、燃油喷嘴喷油的角度和流量、燃油雾化效果、油气比、燃烧室进口处的空气压力、温度和速度等因素影响,该案例中 APU 启动无异常现象。

APU 稳定运转的可靠性主要与 APU 稳态阶段的油气比及负载相关。APU 熄火停车时,接收模拟信号与 APU 本身所处的实际环境不一致。APU 实际处于地面高度,但接收到的高度信号为空中高度,即接收到了“假的”高度信号。此时,APU FADEC 在燃油调节控制过程中会降低燃油供给以匹配“高空”的“稀薄”空气,但实际上地面空气密度较大,对燃油的实际需求量要高于此时供给的燃油量,相同状态下,APU 耗油量随高度增加而下降。APU FADEC 针对这种油气比偏低的状态,控制系统会自动纠偏,再提高供油量,以维持 100% 转速。但这种纠偏有一定的调节范围,一旦超过了纠偏的范围,APU 因供油不足,转速下降,触发 FADEC 欠速保护,会导致 APU 熄火停车。

根据该 APU 性能计算结果(详见图 5),飞机模拟高度为 16 000 ft 的 APU 耗油量,相比于飞机处于 0 ft 高度时,下降约 0.36 kg/min,相较于要求下降 23%,此时供油量远小于实际需要的耗油量,从而导致 APU 熄火停车。

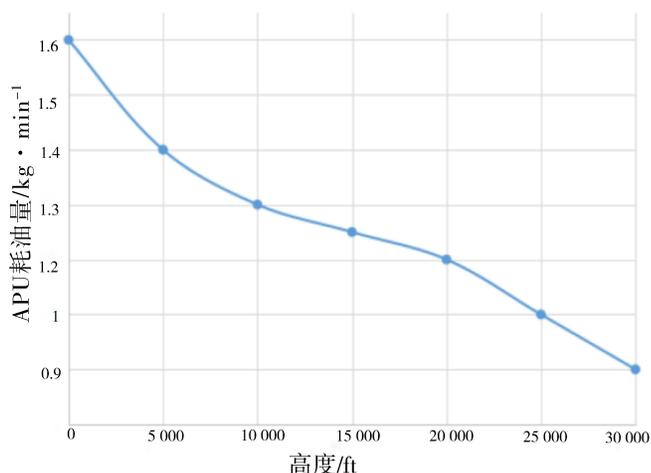


图5 APU 燃油消耗量和高度关系曲线

## 4 影响分析

### 4.1 APU 使用寿命

正常停车时,APU 会经过特定时间的冷运转,高温部件得以冷却。而此案例中的 APU 自动停车为非正常停车,跳过了 APU 正常停车时的冷转循环,高温部件无法得到正常冷却,影响 APU 的使用寿命。并且由于冷却时机匣冷却较快,盘冷却较慢,有可能会造成卡滞。

### 4.2 飞机部件

APU 熄火停车,飞机用电设备瞬间断电,可能会对飞机其它系统上的用电设备造成损坏。

### 4.3 安全性

地面模拟高度导致 APU 非指令停车,安全性影响为 IV 类,安全性影响可接受。

## 5 结论

由于部分 APU 采用飞机传输的压力高度、马赫数、静温等环境信息的设计特点,为了避免 APU 熄火停车可能导致的飞机设备损坏和 APU 寿命降低,模拟高度测试时不建议使用 APU 供电和供气。

目前,部分新型号 APU 自带压力、温度等传感器用以调节燃油流量,可有效避免此类问题的发生。

### 参考文献:

- [1] 陈静. 航空辅助动力装置 FADEC 系统燃油控制规律研究[D]. 上海:上海交通大学,2017.
- [2] 邓正钧. B-737/300 型飞机 APU 介绍及常见故障分析[J]. 科技经济市场,2012(6):5-6.
- [3] 李彦慧. 辅助动力装置燃油控制浅析[J]. 应用能源技术,2011(5):16-19.
- [4] 周智勇. APU 常见故障类型及维护[J]. 中国科技信息,2019(24):30,32,14.
- [5] 王国志. 浅谈 A319/320/321 飞机 APU 自动关车故障排除[J]. 科技视界,2014(25):81-82,101.
- [6] 周宇翔. 空客 APU 故障分析及解决建议[J]. 科技创新与应用,2017(5):64.
- [7] 王守乐,刘松,王明,等. 关于直升机 APU 常见故障类型的故障分析[J]. 电子制作,2023,31(4):99-102.
- [8] 次多. 由一起典型 APU 自动关车的故障分析[J]. 西藏科技,2017(3):72-74.
- [9] 刘兴建,何立明,杨涛,等. 等离子体助燃对航空煤油贫油燃烧的影响研究[J]. 推进技术,2016,37(9):1727-1734.
- [10] SUN W T, UDDI M, OMBRELLO T, et al. Effects of non-equilibrium plasma discharge on counterflow diffusion flame extinction [J]. Proceedings of the Combustion Institute,2011,33(2):3211-3218.

### 作者简介

马扬 男,硕士,工程师。主要研究方向:辅助动力装置本体性能和需求。E-mail: mayang@comac. cc

李彦双 男,硕士,研究员。主要研究方向:辅助动力装置控制。E-mail: liyanshuang@comac. cc

顾程 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:辅助动力装置本体性能。E-mail: gucheng@comac. cc

薛伟伟 男,硕士,工程师。主要研究方向:辅助动力装置本体性能。E-mail: xuweiwei@comac. cc

## Ground simulation altitude causing APU shutdown and limitations

MA Yang\* LI Yanshuang GU Cheng XUE Weiwei

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** This paper describes the phenomenon of a certain type of aircraft stalling and shutdown when powered by an APU during ground simulation of air altitude during the functional testing task of the atmospheric data calculation system; introduces the phenomenon of this problem and conducts root cause analysis from the APU system structure, control system principle, fuel supply process and combustion mechanism of combustion chamber. The reason for the stalling and shutdown of the APU is determined; the APU was actually at ground altitude, but received an altitude in the air. During the fuel adjustment control process, the APU reduced the fuel supply to match the “thin” air at high altitude. At this time, the actual demand for fuel is higher than the supply. Due to insufficient fuel supply, the APU’s speed decreased and triggered underspeed protection, resulting in the APU stalling and shutdown. At the same time, it analyzes the possible impact of this phenomenon on the APU and the aircraft. Based on the analysis results, the usage restrictions that need to be paid attention to in the future are formulated to avoid the phenomenon of APU stalling and shutdown due to the inconsistency between simulated altitude and actual ground altitude, reduce the possibility of damage to aircraft equipment, and improve the service life of APU.

**Keywords:** civil aircraft; APU; shutdown

---

\* Corresponding author. E-mail: mayang@comac.cc