

# 航空发动机空中起动失败故障分析与排除

杜鑫, 张立伟, 滕德和  
(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

**摘要:** 针对某型发动机空中起动失败故障, 阐述了发动机空中起动的时序与原理, 通过对空中起动失败故障的现象分析, 进行初步故障排查, 建立空中起动失败故障树, 根据故障树对可能导致发动机空中起动失败的因素进行逐一分析、检查及试验验证, 确定主燃油泵调节器起动回油活门故障导致空中起动供油异常是发动机空中起动失败的原因。更换主燃油泵调节器后进行试飞验证。结果表明: 发动机空中起动正常, 空中起动参数正常, 发动机空中起动能力满足该型产品的指标要求, 发动机可以在规定时间内完成空中的再次起动, 达到目标转速, 发动机检飞通过。本次排故的思路与经验, 可为后续某型产品的相关故障排除提供指导性帮助。

**关键词:** 空中起动; 故障树; 主燃油泵调节器; 起动回油活门; 起动供油; 航空发动机

**中图分类号:** V232.4

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2023.02.016

## Analysis and Elimination of Engine Air Start Failure

DU Xin, ZHANG Li-wei, TENG De-he

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** Aiming at the air start failure of an aeroengine, the timing and principle of the engine air start are described. Through analyzing the phenomenon of the engine air start failure, preliminary troubleshooting was carried out, and a fault tree for the engine air start failure was established. Based on the fault tree, the factors that may cause the engine air start failure were analyzed, inspected and tested one by one. It was found that the failure of the starting fuel spill valve of the main fuel pump regulator, which led to abnormal fuel supply during air start, was the reason for the air start failure. After replacing the main fuel pump regulator, verification was conducted in a flight test during which the engine's air start and starting relative parameters became normal, and the engine's air start ability met the specification of the product. The engine could complete the air restart within the specified time, reach the target rotational speed, and pass the engine flight inspection. The insight and experiences gained can serve as guidance for future troubleshooting of the product.

**Key words:** air start; fault tree; main fuel pump regulator; starting fuel spill valve; starting fuel supply; aeroengine

## 0 引言

起动系统工作由起动机、传动装置、主燃烧室点火系统、补氧系统、燃油调节系统等协作完成。起动系统是否正常工作, 对发动机能否进入到稳定工作状态和充分发挥作战效能等至关重要<sup>[1-3]</sup>。而空中起动作为起动中的重要一项, 空中起动成功与否更是直接影响飞行安全<sup>[4]</sup>。空中起动科目检飞是检验航空发动机稳定性和安全性的重要科目, 是飞机交付用户前的必检项目, 是保证飞行安全的必需条件<sup>[5]</sup>。一款发

动机产品, 只有通过飞行试验验证, 表明了在不同高度、不同外部环境的条件下, 发动机具备控制空中起动的能力, 能为飞行员的飞行提供有效的安全保障, 因此世界各国的航空发动机工程师都在不遗余力的提高航空发动机的空中起动的能力与可靠性。发动机空中起动受多因素影响, 同时涉及飞机、发动机 2 大系统。发动机的转速、控制计划、供油、飞行的高度与速度等均影响其空中起动性能<sup>[6-8]</sup>。

在发动机实际应用中, 虽然空中停车后起动失败故障发生率较低, 但因其危害严重性的关系, 国内外

收稿日期: 2020-05-15 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 杜鑫(1988), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 杜鑫, 张立伟, 滕德和. 航空发动机空中起动失败故障分析与排除[J]. 航空发动机, 2023, 49(2): 132-135. DU Xin, ZHANG Liwei, TENG Dehe. Analysis and elimination of engine air start failure[J]. Aeroengine, 2023, 49(2): 132-135.

对空中起动的试验均有明确的试验规定和检测手段<sup>[9-11]</sup>。国内外同时在发动机空中起动方面的理论研究不断深入,国外Lexzek通过故障树分析建立发动机起动的模型,应用模拟与可靠度计算进行分析,国外Zachos通过数学建模等方式研究涡扇发动机的空中风车起动特性,国内通过建立功率平衡等约束条件下,分析发动机的空中风车特性<sup>[12-13]</sup>。国内外的空中起动试验为了增加安全性,多数在双发平台开展,成熟后转为单发试验,航空工业的孔祥兴等专家,针对民用的涡扇发动机,将控制算法应用于其起动设计,并且开展发动机的起动仿真研究。南航的李胜泉等针对发动机起动中容易出现的起动问题,提出了流量调节等方法,并且取得了一定成果<sup>[14]</sup>。与国外相比,中国航空发动机生产等方面相对落后,很多细小原因均会导致故障的发生,而针对该故障的公开资料有限<sup>[15]</sup>。

本文针对某型发动机某次空中起动失败故障,基于发动机空中起动的时序与原理,通过建立可能导致发动机空中起动失败的因素故障树,分析定位故障原因,制定排故方案并进行试验、试飞验证。

## 1 某型发动机空中起动失败现象

某次检飞中,飞行过程中做空中起动科目时,空中起动失败,飞机由高空进行俯冲后,再次进行风车起动,起动成功,飞机正常返航。飞行结束后判读飞参,在进行空中起动检查时飞行员的操作如图1所示。

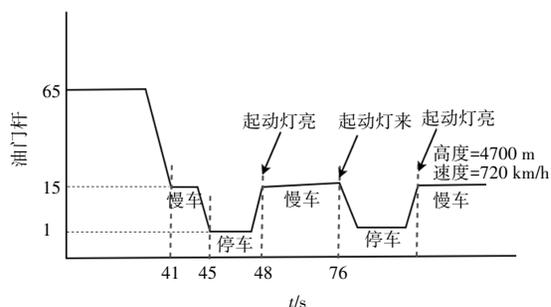


图1 空中起动操作

从图中可见,发动机由慢车拉至停车短暂停留后,再次推至慢车,此时发动机执行空中起动程序,起动灯亮20 s,因起动未成功,发动机自动执行惯性起动8 s,仍未成功后起动灯灭,此次空中起动失败。从飞参判读得出,飞机的飞行高度和速度均在空中起动包线之内,操作正常,空中起动过程中发动机的转速、排气温度等参数持续下降,需进一步分析失败原因。

## 2 某型发动机空中起动时序与原理

空中发动机拉停后,发动机转速迅速下降,此时风扇、压气机以及涡轮均效率非常低<sup>[16-17]</sup>,空中起动就是在该状态下进行主燃烧室点火供油,建立起发动机的正常工作状态。

空中起动的具体逻辑为:有起落架收起信号时,空中将发动机油门杆拉至慢车后,把发动机油门杆收到停车位置,然后再放到慢车位置,发动机执行起动程序,起动灯亮20 s,如果起动不成功,转速仍小于规定值,起动信号灯再亮8 s,空中起动时序如图2所示。

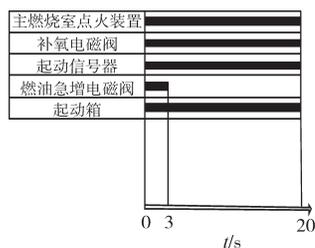


图2 空中起动时序

主燃油泵调节器的功能是按发动机不同工作状态要求,规律调节供给燃烧室燃油。发动机空中起动时,主燃油泵调节器按以下规律调节供给燃烧室燃油

$$P_1 = P_0 + K_1 (K_2 P_{31} - P_H) \quad (1)$$

式中: $P_1$ 为主燃油总管燃油压力; $P_0$ 为燃油压力; $P_{31}$ 为高压压气机后空气压力; $P_H$ 为发动机舱的压力; $K_1$ 为恒定系数; $K_2$ 为减压系数。

该发动机采用机械液压系统控制,起动供油量开始时由带高空修正和感受 $P_{31}$ 、 $P_H$ 的自动起动器(如图3所示)调节。在发动机空中起动时,为修正供往主燃烧室的燃油量,按照 $P_H$ 调节供油量,随着飞行高度的增加,真空膜盒膨胀,带动自动起动器内部拉杆转动,拉伸弹簧打开放油孔,放油量增加,供给主燃烧室的燃油量减少<sup>[18-19]</sup>,实现空中起动供油调节。

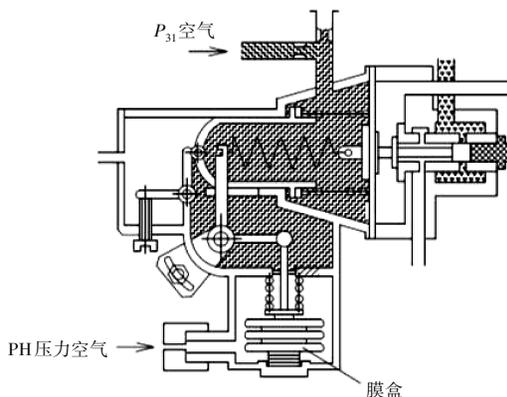


图3 自动起动器

### 3 空中起动失败原因分析

基于以上空中起动的时序与工作原理,分析得出全部影响发动机空中起动的因素,建立故障树,如图4所示。

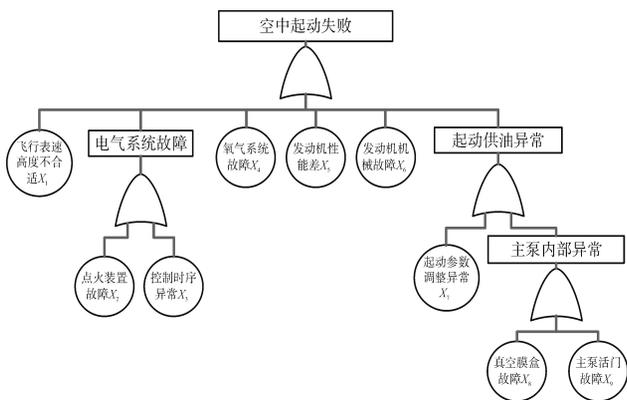


图4 空中起动失败故障树

根据故障树建立底事件排查方法,见表1。

表1 底事件排查方法

序号	底事件	排除方法
$X_1$	飞行表速高度不合适	检查飞参
$X_2$	点火装置故障	地面检查
$X_3$	控制时序异常	地面试车检查
$X_4$	氧气系统故障	地面检查
$X_5$	发动机性能差	检查飞参及地面试车
$X_6$	发动机机械故障	地面检查
$X_7$	起动参数调整异常	履历本检查及地面试车
$X_8$	真空膜盒故障	地面检查
$X_9$	主泵活门故障	返厂分解检查

根据9个底事件对发动机进行地面检查以及试车试验。

检查飞机进行空中起动的时机,首次执行空中起动以及起动失败后的第2次起动的飞机速度和高度,根据发动机设计要求,均在发动机空中起动包线之内,飞行表速、高度符合技术要求。

检查点火装置,点火装置结构无异常。进行地面点火试验,能听见打火的“啪啪”声音,确认点火装置工作无异常,能够正常点火。

检查发动机控制时序,进行两次地面起动试验,起动供油、起动点火等均按照技术说明书的起动时序进行,无异常。

检查发动机氧气系统,补氧工作正常。

检查发动机主机性能,通过对过往多架次飞参数据判读以及地面起动性能检查,发动机起动性能良好,起动时间合格,主机性能正常。

飞行结束后例行检查发动机的进气道、发动机转子等,均无破裂或者转子卡滞现象,检查发动机管路以及电缆均无损坏现象,故机械结构无异常。

检查真空膜盒,真空膜盒工作无异常。

检查主燃油泵调节器各活门外观无损伤,工作异常与否需进一步试车检查。

因现场环境限制,可测油压数量远少于试验台,地面试验仅进行地面起动测量起动油压和模拟高空环境测量起动油压是否正常2项试验。

#### (1) 地面起动测量起动油压

第1次地面起动试验,发动机起动成功,发动机起动按规定时序点火,起动时间符合技术要求,但测量起动油压偏高,超出起动油压标准,该型发动机根据早期厂内试验结果,起动油压偏高,发动机空中起动成功率降低,故需对起动油压进行调整。

第2次地面起动试验,调整可改变起动油压的调整钉后试验,试验结果得出起动油压相比第一次试验无变化,说明主燃油泵调节器的起动回油活门工作异常,在起动过程中调整回油量会出现异常,尤其空中起动过程中,真空膜盒通过感受压力变化,调整回油量,如若起动回油活门工作存在异常,空中起动会更加困难,故需要对其进行检查或者更换。

现场根据实际排故需要,进行了该发动机的主燃油泵调节器的更换,更换后待试飞验证。

#### (2) 模拟高空环境测量起动油压

更换主燃油泵调节器后,模拟发动机在高空飞行下的起动环境,利用地面设备对发动机进行抽真空假起动,在不同抽真空效果下,检查发动机的起动油压是否正常。进行多次假起动测量,测量数据见表2。

表2 模拟高空环境数据

序号	模拟高度/m	起动油压/MPa	序号	模拟高度/m	起动油压/MPa
1	7700	0.23	4	9200	0.23
2	7700	0.23	5	9200	0.22
3	7700	0.23	6	0	0.24

通过模拟高空试验,可发现更换主燃油泵调节器后,发动机在各高空环境下,起动油压稳定,符合要求。

### 4 试飞验证

该飞机进行第2次检飞,检验空中起动科目,风

车起动一次性成功,空中起动参数正常,故障排除,确认事件9主燃油泵调节器起动回油活门故障是导致故障发生的原因。

## 5 结论

(1)针对单一故障可采用建立故障树的方法进行排查,识别全部可能导致故障的因素,逐一排查后定位导致故障的因素,快速排除故障。

(2)对返厂的主燃油泵调节器分解检查发现,在其起动回油活门处存在非金属纤维物污染,导致起动回油活门在工作中不灵活,造成空中起动供油量异常,导致发动机空中起动失败。

为减少该类型故障再次发生,建议承制厂在后续主燃油泵调节器生产及装配过程中优化零件清洗工艺。

### 参考文献:

- [1] 卫传凯,于鑫. 某型航空发动机起动系统的分析与研究[J]. 科技资讯, 2013(30): 113-114.  
WEI Chuankai, YU Xin. Analysis and research on a certain aero engine starting system[J]. Science & Technology Information, 2013 (30): 113-114. (in Chinese)
- [2] 刘旭东,苗禾状,高扬,等. 涡扇发动机惯性起动试飞方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2013, 26(3): 47-49.  
LIU Xudong, MIAO Hezhuang, GAO Yang, et al. Methods on inertial automatic start flight test of turbofan engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2013, 26(3): 47-49. (in Chinese)
- [3] 吴虎,冯维林. 某型涡扇发动机起动过程数值模拟[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 2068-2070.  
WU Hu, FENG Weilin. Numerical simulation of the startup process of augmented turbofan engines[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 2068-2070. (in Chinese)
- [4] Casey W, Malloy D, Arnold S, et al. A method to compare turbine engine airstart times[R]. ASME 2007-GT-27036.
- [5] 刘彦楠,常诚,石丹. 航空发动机空中起动供油分析[J]. 价值工程, 2014(1): 44-46.  
LIU Yannan, CHANG Cheng, SHI Dan. The fuel supply characteristics analysis of aircraft engine airstart[J]. Value Engineering, 2014 (1): 44-46. (in Chinese)
- [6] 张媛,马燕荣,郭斌. 某型发动机风车特性试验研究[J]. 现代机械, 2015(3): 73-76.  
ZHANG Yuan, MA Yanrong, GUO Bin. Flight test study of a type of engine's windmill performance[J]. Modern Machinery, 2015 (3): 73-76. (in Chinese)
- [7] 赵安家,孟哲理,高洪权,等. 飞行包线对飞行安全影响研究[J]. 飞机设计, 2017, 37(1): 11-16.  
ZHAO Anjia, MENG Zheli, GAO Hongquan, et al. The research on the flight envelope of aircraft effect on safety of flight [J]. Aircraft Design, 2017, 37(1): 11-16. (in Chinese)
- [8] Chappell M, McLaughlin P. An approach to modeling continuous turbine engine operation from startup to shutdown[R]. AIAA-91-2373.
- [9] 张华,叶巍,李红军. 美国航空发动机通用规范演变分析[J]. 航空标准化与质量, 2015(4): 53-56.  
ZHANG Hua, YE Wei, LI Hongjun. Evolution analysis of American aeroengine general specification[J]. Aeronautics Standardization & Quality, 2015(4): 53-56. (in Chinese)
- [10] 张媛,郭斌. 某型发动机空中启动试验方法研究[J]. 工程与试验, 2013(4): 46-48.  
ZHANG Yuan, GUO Bin. Research on test method for airstart of an aeroengine[J]. Engineering & Test, 2013(4): 46-48. (in Chinese)
- [11] 唐智勇. 涡扇发动机起动故障诊断及定位技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.  
TANG Zhiyong. Research on the technology of turbofan engine starting fault diagnosis and fault location[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [12] Chybowski L. The impact of marine engine component failures upon an explosion in the starting air manifold[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022(10): 1850.
- [13] Zachos P K. Modelling and analysis of turbofan engines under wind-milling conditions[J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 29(4): 882-890.
- [14] 孔祥兴,王曦,张绍基. 民用涡扇发动机起动过程改进的分段组合控制计划研究与试验[J]. 航空动力学报, 2014, 29(12): 2924-2929.  
KONG Xiangxing, WANG Xi, ZHANG Shaoji. Research and test of piecewise combined control plan for improving the starting process of civil turbofan engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29 (12): 2924-2929. (in Chinese)
- [15] 张琦. 涡扇发动机起动故障诊断方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.  
ZHANG Qi. Research on fault diagnosis method of turbofan engine startup[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [16] 周文祥,黄金泉. 涡扇发动机高空起动模型研究[J]. 航空动力学报, 2007, 22(8): 1385-1387.  
ZHOU Wenxiang, HUANG Jinquan. Research on the startup model of turbofan engine at high altitude[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1385-1387. (in Chinese)
- [17] 刘磊. 航空发动机地面与高空起动特点分析[J]. 价值工程, 2011(15): 34-35.  
LIU Lei. Starting characteristics of aeroengine at ground and in high altitude[J]. Value Engineering, 2011 (15): 34-35. (in Chinese)
- [18] 王兆铭,王福德,左伟,等. 某型航空发动机空中起动供油规律的研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1164-1166.  
WANG Zhaoming, WANG Fude, ZUO Wei, et al. Research on fuel supply control law of airstart for an aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1164-1166. (in Chinese)
- [19] 樊丁,张亦程,戚学锋. 某型航空发动机起动调节器建模及起动特性研究[J]. 航空发动机, 2005, 31(1): 31-33.  
FAN Ding, ZHANG Yicheng, QI Xuefeng. Modeling of an aeroengine jump-start regulator and study of the startup characteristics[J]. Aeroengine, 2005, 31(1): 31-33. (in Chinese)

(编辑:程海)