

某涡扇发动机空中停车率分析与优化

杨 阳,刘慧娟,翟 月,吴晓丹
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为了分析某型军用涡扇发动机空中停车的原因,通过自批量装备部队以来发生的空中停车故障,根据历年空中停车率总结了停车原因的变化趋势,归纳了空中停车率统计结果,分析了影响空中停车率的空中停车事件以及故障件与故障原因,提出了提高成附件可靠性水平、优化控制规律和加强监控措施等预防措施。结果表明:影响发动机空中停车率的主要因素是控制系统和传动润滑系统成附件故障与整机喘振裕度低。

关键词: 空中停车率;预防措施;成附件;喘振裕度;航空发动机

中图分类号: V328.5

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.02.017

Analysis and Optimization of In-flight Shutdown Rate of a Certain Turbofan Engine

YANG Yang, LIU Hui-juan, ZHAI Yue, WU Xiao-dan

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

Abstract: In order to analyze the reasons for in-flight shutdown of a military turbofan engine, the trend of the shutdown reasons was summarized according to the in-flight shutdown rate in the past years since the batch equipment troops. The statistical results of in-flight shutdown rate were summarized and the in-flight shutdown events affecting the in-flight shutdown rate as well as the fault parts and the cause of the failure were analyzed. The preventive measures such as improving the reliability level, optimizing the control rules and strengthening the monitoring measures were put forward. The results show that the main factors affecting the in-flight shutdown rate of the engine are the failure of the control system and the lubrication system and the low surge margin of the engine.

Key words: in-flight shutdown rate; preventive measures; accessory; surge margin; aeroengine

0 引言

航空发动机是飞机的“心脏”,发动机在空中停车,轻则给飞行员应急处置带来一定难度,危及飞行安全,重则因飞机失去动力而导致事故^[1]。对单发飞机而言,空中停车会造成灾难性后果,甚至导致飞机迅速失控和坠毁;对双发飞机,单发动机空中停车是1起事故征候,增加了发生坠机事故的风险。由于空中停车危害大,空中停车率也是发动机可靠性定量评价的重要指标之一^[2]。因此,必须认真研究产生空中停车故障的原因,采取有力措施,尽量减少和避免空中停车的发生。

综合 GJB 2103A《航空燃气涡轮动力装置术语和符号》中的定义来看,空中停车指飞机发动机在起飞之

后与落地之前,由于机械故障、电子系统故障、设计缺陷等原因导致的发动机空中停止工作^[3]。本文只要是在空中因发动机故障引起的停车都算是1次空中停车事件,因为空停属于较少发生的事件,只要是出于“非主观意愿”发生的空停,皆计入本文的研究“样本”。

国内外关于发动机空中停车的研究主要是针对具体空停的故障机理与排故方法以及针对性的措施。黄郁华^[4]研究了涡喷发动机由于设计、工艺、材料等引起的空停现象及措施;徐立新^[5]以民用航空发动机为分析对象,在研究可靠性理论的基础上,制订出降低发动机空中停车率的具体可靠性措施;蔡运金^[6]对 WP7 系列发动机空中停车故障进行分析,着重论述了压气机的重大改进对空停率的影响;范振伟等^[7]

收稿日期:2019-03-12 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:杨阳(1989),男,本科,工程师,主要从事六性设计与适航验证工作;E-mail:1024373164@qq.com。

引用格式:杨阳,刘慧娟,翟月,等.某涡扇发动机空中停车率分析与优化[J].航空发动机,2020,46(2):93-96. YANG Yang, LIU Huijuan, ZHAI Yue, et al. Analysis and optimization of in-flight shutdown rate of a certain turbofan engine [J]. Aeroengine, 2020, 46(2): 93-96.

针对在科研试飞和批生产“升限”科目试飞中先后出现的空中停车现象进行分析,并制定了改进措施。

综合各学者的研究成果,从统计的角度进行空中停车率分析的较少。本文在国内某型发动机外场使用的空停故障基础上加以统计分析,分析影响空中停车的主要因素,并根据分析结果对优化降低空停率、减少空停发生的风险提供可以加以改进的措施方向^[8]。

1 空中停车事件统计

1.1 计算方法

空中停车率的计算公式为

$$R_{\text{IFSD}} = \frac{n}{T} \times 1000 \quad (1)$$

式中: T 为发动机总飞行时间; n 为 T 期间由于发动机原因引起的发动机空中停车的总次数。

1.2 统计结果

所有的统计数据来源于该型发动机生产总质量师系统,包括发动机飞行时间、故障日期、发动机号、使用单位、故障现象、故障件、生产单位、故障处理情况、故障原因、解决措施等。根据式(1),该发动机随部队外场服务年限的变化趋势如图1所示。



图1 某发动机 R_{IFSD} 随外场服务年限变化趋势

从图中可见,近年来该型发动机空中停车率总体上呈现逐年降低的趋势,而且经过计算分析,在2016年就已经达到了该发动机规定的空中停车率指标,满足设计要求。从整体趋势上看,该发动机的空中停车率指标趋向于稳定,发动机趋向成熟。

2 引发空中停车的原因分析

该型发动机空中停车的原因可归纳为3个类别,如图2所示。

(1)控制系统成附件导致的空中停车(如滑油压差传感器、主泵、发动机电缆、燃滑油温度传感器、燃油增压泵、应急放油附件);

(2)传动润滑系统成附件导致的空中停车(如发

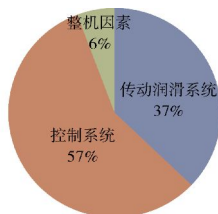


图2 空中停车故障类别分布

(3)整机因素(喘振裕度低)。

导致空停故障的致因故障件发生次数分布如图3所示。

大多数人会将发动机空中停车与主机损伤等联系在一起^[9]。从经验

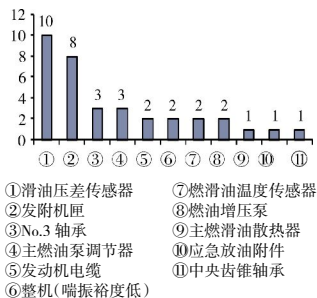


图3 对空中停车致因的统计

来看,发动机核心机的缺陷的确是发动机空停的致因之一,但就该型发动机统计数据表明,发动机成附件才是造成该型发动机空中停车的最主要原因^[10]。从图中可见,该发动机空停因控制系统、传动润滑系统故障占94%。引起空停较多的故障件为滑油压差传感器和发附机匣。

2.1 控制系统

在整个飞行包线内通过驾驶舱中的操纵杆(改变供油量)完成发动机的起动、停车和推力调节。控制系统发生故障将导致发动机的燃油供应以及发动机控制异常,易导致发动机空中停车^[11]。

控制系统中导致空停的成附件有多种,其中滑油压差传感器最多,影响最深也最受关注。滑油压差传感器用于测量滑油管路中的滑油泵供油压力和轴承腔压力的压差,将其转化成电信号,送至综合电子调节器。当符合报警条件时,综合电子调节器发送“减小转速”信号到飞机座舱告警系统。当发动机空中报“减小转速”,将油门杆收至慢车位置时信号不消失,为保证飞机安全则将发动机拉停,造成空中停车。针对该故障件,军、厂、所多次联合排故,对多发故障进行分析及定位,开展大量的分析排查工作,制定了解决措施及验证方法。经综合环境试验验证,改进措施有效。其他燃油与控制系统成附件引起空中停车的主要原因是成附件故障/失效导致控制系统起不到控制作用,或者因故无法测量参数导致。比如主泵主要是因故障或工作异常导致发动机参数摆动。发动机电缆因为属于接插件,插针与插孔瞬时“虚接”,会造成误报信号或者线路短路,导致电阻异常,空中报“减小转速”信号。燃滑油温度传感器主要故障原因是感温元件接线片处铂丝因疲劳强度降低而断裂,造成综合电子调节器输出“减小转速”告警信号,将油门杆拉至慢车位置,信号不消失,飞行员空中拉停发动机,发生空停。

2.2 传动润滑系统

发动机的高压比、高涡轮进口温度、高主轴转速及严格的空限制,要求传动润滑系统在高温、高速、重负荷、轻质量、激烈的状态变化、紧凑的空限制、长寿命和高可靠性下发挥其功能。润滑系统要保证在整个飞行包线内对发动机轴承、齿轮和某些摩擦副进行有效的润滑和冷却,以确保发动机工作的安全和寿命要求。发动机高、低压转子的转速通常高达 5000 ~ 12000 r/min,在如此高速转动下的部件(如轴承),如没有很好的润滑和散热措施,会在较短的时间内因过高的温度和严重的磨损而损坏和失效。滑油系统的封严若严重受损将导致滑油的大量流失,若金属异物较多堵塞油滤将严重影响滑油的正常传输,导致滑油压力不足。

引发空停较多的发附机匣的功能是将旋转运动从中心锥齿轮传给发动机附件各系统,并用来固定附件。由于内部齿轮零部件较多,极易磨损。当滑油中金属屑超标时,飞机报“减小转速”信号,飞行员将油门杆拉至慢车时,“减小转速”信号不消失,此时飞行员会将发动机拉停。发附机匣引起的空停主要有 2 种故障模式:离心通风器故障和轴承保持架断裂。离心通风器故障原因有多种,如高周疲劳引起的起始于花键齿根的裂纹;在工作转速范围内存在共振频率;离心通风器与齿轮轴采用单侧止口定位、配合定位面过短;轴向压紧力不足,不能保证在全工况条件下有效固定离心通风器。轴承保持架断裂、发生轴承故障时,在机匣内产生大量金属屑,导致发动机因滑油中有金属屑报降转信号,金属屑堵塞回油滤网,附件机匣回油不畅、内部温度升高,导致密封失效,滑油大量泄漏、压力降低,为确保安全拉停发动机。

2.3 喘振裕度低

发动机的压气机应具有足够的喘振裕度,避免压气机发生喘振,引起发动机空中停车。因喘振裕度低导致空停发生 2 起,均为在实施高空科目机动过程中。在该过程中进气道动态畸变较大,致使发动机在飞机进入包线边界时发生喘振。导致整机喘振裕度低的因素有 2 个方面,一方面是进气道与发动机匹配性差,导致进气畸变大;另一方面是该发动机在研制过程中对控制规律进行适应性更改,但在实际使用过程中,部分控制规律与发动机实际需求不匹配,导致极端边界下发动机剩余裕度不足。针对故障原因,制定

了飞发匹配优化、高压压气机多级可调角度控制措施,可以提高发动机喘振裕度;通过优化改进节流嘴,加大切油深度,调整试车消喘系统检查时的转速范围,改善发动机消喘系统的消喘能力,在一定程度上减少了因喘振裕度低而导致的空停。

3 预防措施

虽然该型发动机的空中停车率指标已经满足了设计要求,但是发动机的空中停车与飞行员和飞机的安全息息相关,必须采取措施降低其发生的概率。通过分析空中停车原因可知,空中停车主要与成附件和控制规律边界有关。因此应综合考虑,提出切实可行的预防措施。

3.1 提高成附件可靠性水平

预防发动机空停,仅根据经验将工作重心放在发动机核心机上是不够的,从统计结果看,成附件是影响该型发动机空停率的最重要因素。应当重点关注可能影响发动机空停的成附件故障^[12]。目前内场对成附件的考核试验项目较少、试验量值偏低,导致对成附件的验证不够充分,不能充分暴露成附件问题,导致外场使用中故障频发。在研制过程中虽然针对存在的技术质量问题以及系统与发动机的匹配性问题,开展了多轮技术攻关和试验验证,但对于一些关键技术,特别是深层次的系统问题仍理解不深、技术尚未完全吃透和掌握。因此,通过试验加严成附件考核,采取措施提高成附件的可靠性,是有效预防发动机空停和确保发动机运行安全的必要举措。

3.2 控制规律优化

目前,对发动机控制规律的认知依然是在摸索中发展,还没有达到最优,同时由于该发动机批量装备部队后,随着生产任务的增多,成附件承制单位对产品的生产过程控制相对粗放,导致产品一致性和质量稳定性不高,造成出厂产品分散度较大,导致成附件未完全实现给定的控制规律,控制结果与设计的要求不符,使得部分控制裕度被“吃掉”,容易导致在极端边界条件下发生空停。因此,承制单位要加强生产管控,提高质量稳定性,设计单位要不断对控制规律优化,探索最优的控制规律,减少空停的发生^[13]。

3.3 加强监控措施

有些导致空停的故障在发生之前通过加强监控是可以被提前发现的,比如滑油消耗量过大、滑油内有金属屑等。因此,通过金属磁塞观察、滑油光谱分

析、金属屑能谱分析、振动值监控、放射性探伤、孔探仪检查、飞参分析等综合监控手段^[4],做到提前发现故障,适时采取措施,防患于未然,避免发生空停故障或机毁人亡的巨大损失。

4 结束语

某型军用涡扇发动机的空中停车率指标虽已满足型号规范的要求,但应采取措施不断改进、不断降低空中停车发生的风险^[5]。在对该发动机投入部队使用以来发生的空停故障数据统计发现,影响空停的主要因素是成附件和控制规律边界。通过采取提高成附件可靠性水平、优化控制规律、加强监控措施等,可以降低空停发生的次数。预防发动机空中停车故障的发生,应联合军方、设计和承制等单位,共同致力于减少各职责范围内导致空中停车的因素,形成合力。实行综合治理,发动机可靠性和安全性会进一步提高,能更好地承担守卫国门的重任。

参考文献:

- [1] 孔瑞莲. 航空发动机可靠性工程[M]. 北京:航空工业出版社,1995:81-82.
KONG Ruilian. Aeroengine reliability engineering[M]. Beijing:Aviation Industry Press,1995:81-82. (in Chinese)
- [2] 蔡娜,贾广生,徐风磊. 航空发动机可靠性参数体系选择和指标确定的初步探讨[J]. 科技信息,2007(18):95-96.
CAI Na, JIA Guangsheng, XU Fenglei. Discussion on the selection of reliability parameter system and targets for military aeroengines [J]. Science & Technology Information, 2007(18):95-96. (in Chinese).
- [3] 中国人民解放军总装备部. GJB 241A-2010 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范 [S]. 北京:总装备部军标出版发行部.2010:29-30.
PLA General Armament Department.GJB 241A-2010. General specifications for aero turbine jet and turbofan engine [S]. Beijing: Military Standard Publication and Distribution Section of General Armament Department.2010:29-30.(in Chinese)
- [4] 黄郁华. 发动机空中停车的故障分析与预防措施[J]. 民航经济与技
术,1996(5):35-37.
HUANG Yuhua. Trouble analysis and prevention of in-flight shutdown [J]. Civil Aviation Economy and Technology,1996 (5):35-37. (in Chinese)
- [5] 徐立新. 降低民用航空发动机空中停车率的可靠性研究 [D]. 大连:大连理工大学,2005.
XU Lixin. Reliability research of reducing the IFSD rate of civil aviation engine [D]. Dalian:Dalian University of Technology,2005.(in Chinese)
- [6] 蔡运金. 降低 WP7 系列发动机空中停车率的途径 [J]. 燃气涡轮试验与研究,1994(4):8-12.
CAI Yunjin. Ways to reduce the IFSD rate of WP7 series engines[J]. Gas Turbine Test and Research,1994(4):8-12.(in Chinese)
- [7] 范振伟,刘永辉. 某型飞机空中停车原因分析[J]. 沈阳航空工业学院学报,2009,26(2):12-15.
FAN Zhenwei, LIU Yonghui. Cause analysis of a certain type aircraft in-flight shutdown [J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering,2009,26(2):12-15.(in Chinese)
- [8] 白广忱,王延荣. 航空发动机空中停车率的优化[J]. 北京航空航天大学学报,2000,26(4):393-395.
BAI Guangchen, WANG Yanrong. Optimization of aeroengine IFSD rate [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000,26(4):393-395.(in Chinese)
- [9] 杨善发. 某型发动机空中停车故障研究及改进 [J]. 航空发动机,1999(3):1-7.
YANG Shanfa. Research and improvement of a certain type engine in-flight shutdown failure[J]. Aeroengine,1999(3):1-7.(in Chinese)
- [10] 周珣. 关键附件管控在发动机空中停车防治中的应用 [J]. 航空维修与工程,2018(3):34-36.
ZHOU Xun. Application of critical component management and control for preventing engine from IFSD [J]. Aviation Maintenance & Engineering,2018(3):34-36. (in Chinese)
- [11] 肖文富,申晓霞,田琳. 某型涡扇发动机空中停车过程参数变化的试验研究[J]. 工程与试验,2014,54(2):35-38.
XIAO Wenfu, SHEN Xiaoxia, TIAN Lin. Experimental study on parameter changes of a turbofan engine during inflight shutdown processes[J]. Engineering & Test,2014,54(2):35-38.(in Chinese)
- [12] 孙超,王瑛,崔利杰,等. 基于 Bow-tie 模型的发动机空中停车事故分析与预防[J]. 火力与指挥控制,2017,42(1):27-31.
SUN Chao, WANG Ying, CUI Lijie, et al. Research on analysis and prevention of in-flight shutdown based on Bow-tie [J]. Fire Control & Command Control,2017,42(1):27-31.(in Chinese)
- [13] 杨善发. 某型发动机空中停车故障研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,1999,12(4):8-12.
YANG Shanfa. Research of a certain type engine in-flight shutdown failure [J]. Gas Turbine Test and Research,1999,12 (4):8-12. (in Chinese)
- [14] 张利勇,杨宝继,石峰. 加强监控管理预防空中停车[J]. 民航经济与技术,1996(174):41-43.
ZHANG Liyong, YANG Baoji, SHI Feng. Strengthening management of prevent in-flight shut-down [J]. Civil Aviation Economy and Technology, 1996(174):41-43.(in Chinese)
- [15] 王通北,陈美英. 谈航空发动机工作可靠性的几个问题[J]. 航空发动机,2005,31(1):1-5.
WANG Tongbei, CHEN Meiyong. Talking about several problems in reliability of aeroengine[J]. Aeroengine,2005,31(1):1-5. (in Chinese)

(编辑:刘 亮)