

航空发动机喘振故障外场诊断与分析

金 帅,张振兴,李家瑞,杨 光
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为了完善航空发动喘振故障研究和加速发动机技术快速成熟,通过分析喘振原因及其影响因素,建立故障树,将喘振影响因素分为调节机构、进气扰动、主机性能及主机结构 4 个模块。以故障树及 4 个模块为依据,并综合考虑零部件发生故障概率和维护工作难易程度,提出一种喘振故障外场诊断方法,制定排故流程以及与 4 个模块相对应的排故子流程,将排故流程模块化。诊断方法已应用于外场用户的使用维护中,通过该方法,可将喘振故障快速定位于 4 个模块中的 1 个,进而根据该模块及其排故子流程进行故障排查及处理。结果表明:该方法有效可行,能够大幅提高喘振故障的排查效率,并大量节约了航空发动机在外场中的使用维护成本。

关键词:喘振;故障树;外场;故障诊断;航空发动机

中图分类号:V263.6

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.009

Field Diagnosis and Analysis of Aeroengine Surge Fault

JIN Shuai, ZHANG Zhen-Xing, LI Jia-Rui, YANG Guang

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

Abstract: In order to improve the research of aeroengine surge fault and accelerate the rapid maturity of engine technology, a fault tree was established by analyzing the causes of surge and its influencing factors. The influencing factors of surge were divided into four modules, which consisted of adjustment mechanism module, air turbulence module, engine performance module, engine structure module. Based on the fault tree and four modules and considering the failure probability of parts and the difficulty of maintenance, a field diagnosis method of surge fault was proposed. The troubleshooting program and the troubleshooting subprogram corresponding to the four modules were formulated to modularize the troubleshooting program. The diagnosis method had been applied to the use and maintenance of field users. Through this method, the surge fault could be quickly located in one of the four modules and then the fault could be checked and handled according to the module and its troubleshooting subprogram. The results show that the method is effective and feasible, which can greatly improve the efficiency of surge troubleshooting and greatly save the cost of aeroengine maintenance in the field.

Key words: surge; fault tree; field; fault diagnosis; aeroengine

0 引言

军用发动机的稳定工作,是支撑空军力量的有力保障。发动机喘振会严重影响其工作稳定性,甚至导致发动机损毁^[1-3]。用户执行任务时有及时性等要求,因此,对发动机喘振故障的及时排查和预防备受用户关注。

对喘振故障的研究方向多侧重于单起喘振故障的分析排故,李阳等^[4]针对 1 起航空发动机喘振故障原因进行了分析,故障定位为加速油异常,并制定排

故方案;苗禾状等^[5]针对某涡扇发动机空中起喘振悬挂进行了分析,喘振原因定位为油气不匹配,并针对故障原因制定排故措施;赵安家等^[6]针对大表速飞行时加力喘振导致空停故障进行了研究,分析认为是飞机包线外飞行导致喘振;符小刚等^[7]针对 1 起涡扇发动机飞行中的高空喘振故障进行了分析,确认 a_2 偏关是导致喘振的主要原因,并制定了相应的排故方案。研究侧重于单起喘振故障的现象和机理,排故措施是针对导致喘振主要原因而制定的针对性较强的

收稿日期:2019-03-28 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:金帅(1987),男,硕士,工程师,主要从事航空发动机外场技术保障工作;E-mail:tjukinge@163.com。

引用格式:金帅,张振兴,李家瑞,等.航空发动机喘振故障外场诊断与分析[J].航空发动机,2021,47(增刊1):53-56. JIN Shuai, ZHANG ZhenXing, LI JiaRui, et al. Field diagnosis and analysis of aeroengine surge fault[J]. Aeroengine, 2021, 47(S1):53-56.

故障解决方法,具有很大的借鉴意义,但普及性有限。此外,关于喘振机理的研究已引起了关注,张森^[8]开展了关于航空发动机喘振形成原因以及喘振对飞机危害方面的研究,张萍等、符小刚等^[10]介绍了喘振发生和蔓延的现象,并分析了喘振的原因以及发生喘振的条件;马燕荣等^[11]研究了某型涡扇发动机扰流板进气总压畸变对发动机喘振的影响;王磊等^[12]、申世才等^[13]基于联合仿真模型,分析了喷口控制系统动态特性与加力喘振之间的关系;屈霖云等^[14]分析了某型发动机喘振特征分析并试验验证了消喘系统。根据喘振故障发生机理与外场喘振故障紧密联系,系统地分析排查的相关文献较少。

本文针对多起喘振故障,根据喘振故障现象,分析引起喘振的原因及其影响因素,建立故障树。从外场使用维护的角度出发,将喘振的影响因素分为4个模块,并综合考虑零部件发生故障概率和维护工作难易程度,制定了排查流程。排查流程应用于外场的使用维护中,并解决了数起喘振故障。

1 喘振故障现象

喘振主要表现为正激波在进气道进口内、外迅速往返移动,气流的总压呈低频、大幅度的脉动,空气质量流量也呈忽大忽小的波动。

当发动机发生加力喘振时,通常表现出以下现象:

(1)发动机工作不连续,轴向有喘息声,压气机出口压力和流量大幅波动,甚至有气流倒流,冲向上游进气道,严重时会引起进气道喘振和发动机流道损伤,发动机振动值急剧增大甚至超标,工作声音变得低沉;

(2)发动机排气温度急剧升高甚至超温,烧坏涡轮叶片等结构部件;

(3)发动机工作性能急剧降低,进气空气流量骤减骤增,转速和增压比突降,压气机效率、涡轮效率、发动机推力减小;

(4)严重时,尾喷口会喷火并伴有放炮声,常导致发动机构件产生强烈的机械振动和燃烧室等热端构件超温,造成发动机构件在短时间内被破坏,甚至使燃烧室与加力燃烧室熄火停车,危及飞机与飞行员的安全。

2 喘振影响因素

引起发动机喘振的原因主要分为3类^[8-10]:

(1)发动机主机稳定性不足,包括加力燃烧室个别区段周期性熄火、燃油系统压力波动、燃烧室扩压器中周期性的旋涡分离等可能造成的低频振荡燃烧^[11-13];

(2)流道中的气动失稳,包括超声速进气道喘振(即深度亚临界状态下正激波可能会在进气道进口内、外迅速往返移动而形成进气道内气流振荡),气流在压气机叶片处的严重分离等;

(3)机械原因造成的发动机流道各几何可调机构工作异常。

高、低压压气机和高、低压涡轮的转、静子叶片是对发动机主机性能的主要影响因素。进气扰动带来的进气畸变会减小发动机的喘振裕度,增加发动机喘振的可能性。飞机进气道斜板控制异常、进气道损伤、飞行姿态、武器发射、以及进发不匹配等因素均有可能引起进气畸变的加剧。高、低压压气机可调静子叶片角度 α_2 、 α_1 、喷口等几何尺寸以及加力油、加速油的调节异常直接影响发动机的主机状态以及进气扰动,是导致发动机喘振的常见诱因。此外,高、低压压气机和高、低压涡轮的转静子间隙,以及发动机结构性损伤等因素也可能导致发动机喘振。

3 故障排查

本文从外场使用维护的角度出发,将喘振的影响因素分为调节机构、进气扰动、主机性能、主机结构4个模块。以此建立故障树,如图1所示。对4个模块分别建立故障树分支,如图2~5所示。

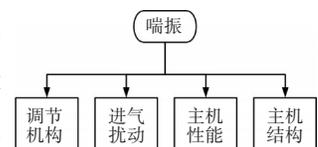


图1 故障树

由于受到发动机生产装配差异性和兼顾发动机起动性能的制约,在发动机外场使用维护过程中,调节机构模块易发生异常,该异常可通过发动机飞参分析来判断,维护调整工作简单便捷,在外场可操作性较强^[14-15]。

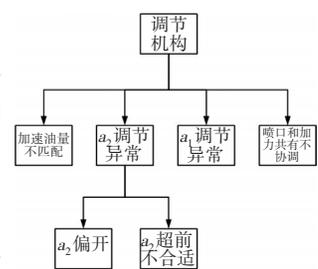


图2 调节机构故障树

当加速油过多时,使压气机产生热节流作用,从而使其工作点升高至喘振边界外,造成压气机进喘。发动机 α_1 、 α_2 调节异常使得压气机喘振边界下移,从

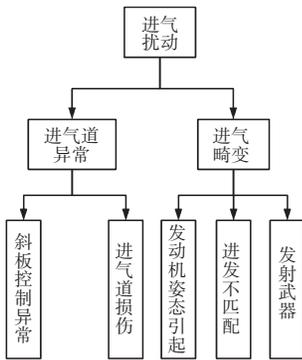


图3 进气扰动故障树

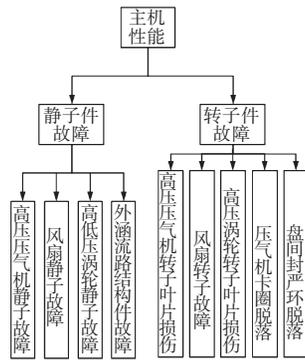


图4 主机性能故障树

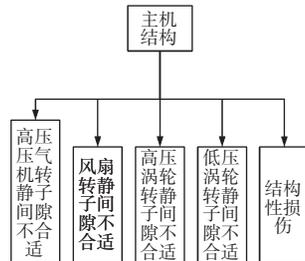


图5 主机结构故障树

而使发动机喘振裕度有所减小。喷口与加力油不协调,会造成加力燃烧室和外涵气流压力的大幅度波动,对主机稳定工作不利。

通过对喘振机理的深入研究和大量试验分析数据的积累,发现航空发动机受进气扰动影响明显。在进行发动机结构和性能设计时,对发动机留有足够的喘振裕度,但飞发匹配后,受到飞机方面影响,发动机喘振裕度骤减。当发动机发生进气畸变时,喘振裕度进一步减小,易将发动机逼向喘振边界,致使其喘振。在外场,只能通过孔探针检查主机性能模块是否异常,主机结构模块需将发动机返厂分解检查,这2个模块导致发动机喘振的概率较低。由于进气扰动、主机性能、主机结构3个模块均不具有外场维护性,在此不做详细描述。

综上所述,综合考虑外场使用维护工作的难易程度以及各零部件发生故障的概率,仅针对调节机构模块制作详细排故程序,喘振和调节结构排故程序如图6、7所示。

4 验证及应用

目前,上述故障分析方法和喘振排故程序已得到应用,并解决了数起喘振故障。列举了几起典型喘振故障案例。

4.1 案例1

用户在暖机后由慢车状态上推油门杆过程中,左

发发生喘振。分析其飞参数据,在同等油门速率下,左发 n_2 转速上升率明显大于右发的,说明左发加速油量明显偏大。根据排故程序判断左发加速油调整过量。减少加速油量后,经多次飞行验证,左发未再发生喘振,故障得以排除。

4.2 案例2

用户在空中由中间状态下拉油门杆过程中,右发发生喘振。分析其飞参数据,喘振发生时是下拉油门杆时,发动机由 a_2 超前调节状态恢复至正常 a_2 调节状态的过渡态。 a_2 超前恢复瞬间使得压气机喘振边界下移,发动机加油使得压气机工作点向喘振边界靠近,2种因素共同作用使得发动机裕度有所减小。根据排故程序判断该发加速油量以及 a_2 超前不合适。进行相应调整后,经多次飞行验证,右发未再喘振,故障得以排除。

4.3 案例3

用户在进入起飞加力过程中,左发发生喘振。分析其飞参数据,加速油、 a_1 、 a_2 均正常,左发喷口明显小于右发的。根据排故程序判断喷口控制异常,排查喷口异常原因,故障定位为 P_6 引气管接头漏气。拧紧 P_6 引气管接头,经多次飞行验证,右发未再喘振,故障得以排除。

5 结束语

本文分析了喘振故障发生的原因,将喘振的影响因素分为调节机构、进气扰动、主机性能、主机结构4个模块,以此为基础建立了故障树。从外场使用维护的角度出发,综合考虑零部件发生故障概率和维护工作难易程度,针对4个模块,分别制定相应的排故流程。将排故流程模块化,屏蔽了引发喘振故障的其他影响因素,大幅提升了排故工作的针对性,帮助用户有效地快速定位故障位置,及时排除故障,已应用于外场的使用维护中,并排除了数起喘振故障。本文提出的喘振故障分析排故方法,不仅大量节约了航空发动机在外场使用中的使用维护成本,而且为用户顺利

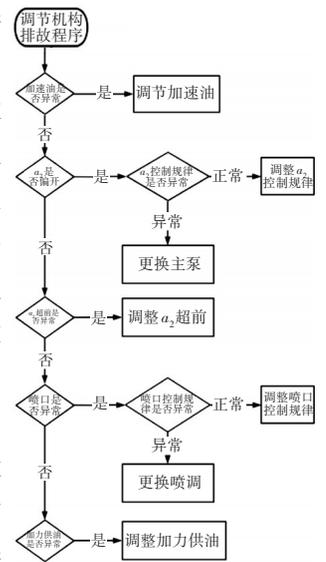


图7 调节机构排故程序

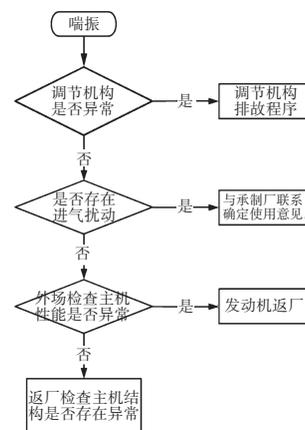


图6 喘振排故程序

完成任务提供了有力支撑,为进一步促进发动机技术快速成熟,提高用户战斗力奠定了基础。

参考文献:

- [1] 黄伟,黄向华. 航空发动机喘振主动控制技术的发展[J]. 航空科学基金,2013(1):68-73.
HUANG Wei, HUANG Xianghua. Development of aero-engine surge active control[J]. Aeronautical Science Fund,2013(1):68-73. (in Chinese)
- [2] 罗泽明,郑丽,张玉宪. 航空发动机喘振的研究与发展[J]. 机械设计与制造工程,2015,44(6):1-4.
LUO Zeming, ZHENG Li, ZHANG Yuxian. Research and development of the aircraft engine surge[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering,2015,44(6):1-4. (in Chinese)
- [3] 李志平,王孟琦. 进气畸变下航空发动机失速/喘振适航审定方法[J]. 航空学报,2015,36(9):2947-2957.
LI Zhiping, WANG Mengqi. Airworthiness certification method for aeroengine on stall and surge with inlet distortion[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015,36(9):2947-2957. (in Chinese)
- [4] 李阳,杨福刚. 一起航空发动机喘振故障原因分析[J]. 航空维修与工程,2014(3):93-94.
LI Yang, YANG Fugang. The causation analysis of aero-engine surge fault[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014(3):93-94. (in Chinese)
- [5] 苗禾状,严文洁,王朝蓬,等. 某涡扇发动机空中启动喘振悬挂分析[J]. 工程与试验,2015,55(1):43-46.
MIAO Hezhuang, YAN Wenjie, WANG Zhaopeng, et al. Analysis on surge and suspension in air-start of a turbofan engine[J]. Engineering & Test,2015,55(1):43-46. (in Chinese)
- [6] 赵安家,孟哲理,高洪权. 大表速飞行时加力喘振导致空停故障的研究[J]. 沈阳航空航天大学学报,2016,33(5):18-23.
ZHAO Anjia, MENG Zheli, GAO Hongquan. Research on stop fault of aero-engine in a flight with high speed caused by afterburner surge[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016, 33(5):18-23. (in Chinese)
- [7] 符小刚,许艳芝,汪涛. 涡扇发动机飞行中的喘振故障分析[J]. 燃气涡轮试验与研究,2015,28(4):15-18.
FU Xiaogang, XU Yanzhi, WANG Tao. Analysis of surge fault of a turbofan engine in flight[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2015, 28(4):15-18. (in Chinese)
- [8] 张森. 航空发动机喘振问题分析[J]. 企业导报,2013(9):274.
ZHANG Sen. Analysis of surge fault of the aeraengine[J]. Guide to Business,2013(9):274. (in Chinese)
- [9] 张萍. 航空燃气涡轮发动机喘振浅析[J]. 科技创新导报,2015(14):66-67.
ZHANG Ping. Analysis of surge fault of the gas turbine engine[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015(14):66-67. (in Chinese)
- [10] 符小刚,许艳芝. 采用排除法分析航空发动机喘振故障[J]. 工程与试验,2015,55(4):31-34.
FU Xiaogang, XU Yanzhi. Analysis of surge fault of an aero-engine with exclusive method[J]. Engineering & Test, 2015, 55(4):31-34. (in Chinese)
- [11] 马燕荣,马明明,王小峰,等. 某型涡扇发动机扰流板进气总压畸变研究[J]. 航空动力学报,2009,24(5):1028-1034.
MA Yanrong, MA Mingming, WANG Xiaofeng, et al. Investigation of disturbed board total pressure distortion on a certain turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(5):1028-1034. (in Chinese)
- [12] 王磊,王靖宇,于华锋,等. 发动机加力喘振故障原因仿真分析[J]. 航空计算技术,2017,47(2):72-75.
WANG Lei, WANG Jingyu, YU Huafeng, et al. Simulation and analysis of cause for augmented engine surge[J]. Aeronautical Computing Technique, 2017,47(2):72-75. (in Chinese)
- [13] 申世才,郝晓乐,贾一哲. 高空超声速涡扇发动机喘振特征及扩稳措施的飞行试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2016,29(3):7-48.
SHEN Shicai, HAO Xiaole, JIA Yizhe. Flight of surge characteristic and measures to enlarge the engine surge margin on a high-altitude supersonic turbofan engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2016, 29(3):7-48. (in Chinese)
- [14] 屈霖云,马明明,王小峰,等. 某型发动机喘振特征分析及消喘系统验证试验[J]. 航空动力学报,2010,25(6):1291-1296.
QU Jiyun, MA Mingming, WANG Xiaofeng, et al. Investigation of surge characteristics and surge eliminating system verification based on a certain engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6):1291-1296. (in Chinese)
- [15] 丁蓬勃,王仲生. 航空发动机喘振故障机理及监控方法研究[J]. 科学技术与工程,2010,10(15):3805-3809.
DING Pengbo, WANG Zhongsheng. The research on the surge Mechanism and monitoring method of aero-engine[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(15):3805-3809. (in Chinese)

(编辑:刘 亮)