

航空发动机高压转子转速摆动故障分析与排除

李小彪¹, 马庆岩², 张立伟¹, 谷雪花¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 中国人民解放军31434部队, 沈阳 110000)

摘要:针对某型发动机高压转子转速摆动故障,详细分析了油门杆稳定时地面和空中多次出现高压转子转速无规则摆动、其他参数随动的故障现象,阐述了高压转子转速受综合电子调节器、燃油系统、转速调节系统等控制的控制原理,剖析故障机理,制定了故障树。结合故障树,列举了进口温度感受附件、综合电子调节器、燃油系统、转速调节系统等4种故障。采用故障树分析法找出故障原因,分析薄弱环节。经对4种故障原因逐条分析,排除了进口温度感受附件、综合电子调节器、燃油系统等因素,确定转速调节系统中加速控制器未完全退出工作是转速摆动的原因。针对波动量较大的发动机,调整加速性至合理范围,进行地面试车和飞行等外场排故验证。结果表明:发动机工作参数正常,高压转子转速摆动现象消失,发动机推力稳定。故障得以排除。

关键词:高压转子;转速摆动;转速调节系统;加速控制器;航空发动机

中图分类号: V232.4

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.05.010

Analysis and Elimination on Speed Swing of an Aeroengine High Pressure Rotor

LI Xiao-biao¹, MA Qing-yan², ZHANG Li-wei¹, GU Xue-hua¹

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. Chinese People's Liberation Army Unit 31434, Shenyang 110000, China)

Abstract: On speed swing of an aeroengine high pressure rotor, the fault phenomenon was analyzed in detail. The control principle of high pressure rotor speed was expounded, the fault mechanism was analyzed, and the fault tree was formulated. Combined with the fault tree, four kinds of causes such as inlet temperature sensing unit fault, integrated electronic regulator fault, fuel system fault, and speed regulation system fault were enumerated. After a series of analysis of four kinds of fault causes, it was determined that the acceleration controller did not completely quit work and had the function to control the rotor speed, which was the reason for the speed swing. Aiming at the speed swing aeroengine, the acceleration was adjusted to a reasonable range, and the measures were verified in the ground testing and flight testing. The results show that the engine operating parameters are normal, the speed swing phenomenon disappears, the engine thrust is stable, and the fault is eliminated.

Key words: high pressure rotor speed swing; speed oscillating; speed regulating system; accelerated controller; aeroengine

0 引言

在航空发动机正常使用过程中,由油门杆来控制高压转子转速的变化。当油门杆不动时,发动机高压转子转速应处于稳定位置。在使用过程中,如果出现油门杆不动而高压转子转速摆动情况,会发生其他参数随动的故障现象。这种故障极易造成发动机推力波动、进气流量扰动、整机稳定性降低等问题,对飞行安全产生不利影响^[1-2]。

黄玉军^[3]分析了发动机中与供油系统有关的性能工作参数摆动故障的原因,即转速限制机构切油点

提前、转速放大器有故障或调整不当,这些因素直接影响发动机的工作性能,并介绍了排除故障的方法;张立新等^[4]针对燃油压力、燃油耗量、扭矩等参数摆动故障,列举了粗细油滤脏和限温、转速校正系统、调速器、燃油调节器等故障发生的原因,并进行了故障排除;孔祥兴等^[5]针对某型民用涡扇发动机,通过改进算法,在涡扇发动机起动过程采用n-dot闭环控制算法,设计了涡扇发动机起动过程开环与闭环分段组合的控制计划,在起动初始阶段采用基于油气比的开环控制,之后进入闭环控制和慢车稳态控制模式,消除了起动初始阶段的参数摆动,具有良好的稳定性和

收稿日期:2019-07-18 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:李小彪(1987),男,硕士,高级工程师,从事航空发动机技术支持工作;E-mail: xiaobiaoli1987@163.com。

引用格式: 李小彪, 马庆岩, 张立伟, 等. 航空发动机高压转子转速摆动故障分析与排除[J]. 航空发动机, 2021, 47(5): 62-65. LI Xiaobiao, MA Qing-yan, ZHANG Liwei, et al. Analysis and elimination on speed swing of an aeroengine high pressure rotor[J]. Aeroengine, 2021, 47(5): 62-65.

重复性;王磊等^[6-8]参考国内外相关研究结果,提出了一种网络参数与保成本容错控制器协同设计方法,建立 MET-TOD 调度协议作用下状态变量和控制变量的传输特性,仿真结果显示,低压转子转速超调量降低了 80%,参数摆动减小了 66.7%,实现了控制器动态性能最优;殷孝勇^[9]对涡桨五型发动机转速摆动故障进行了分析,并分析了转速调节系统、转速校正系统、限温系统及交联装置、燃油系统等故障发生的原因,从地面试车、分解装配、拆检清洗、线路检查等方面提出了转速摆动故障的预防措施。国外 Ait 等^[10]、Crusius 等^[11]、Tarbouriech 等^[12]通过设计 PI 控制器,基本消除工作环境和发动机性能变化对起动控制性能的影响,保证发动机参数稳定;Walsh 等^[13]提出了 MEF-TOD 协议,可应用于数据传输调度,在减小参数摆动值方面有一定的借鉴意义。

为保证发动机转速稳定,获得良好的性能,本文基于高压转子转速控制原理,列举导致高压转子转速摆动的因素,分析定位原因,并进行了排故和外场验证。

1 高压转子转速摆动故障现象

在发动机使用过程中,在油门杆未动、进气温度没有变化的稳定状态下,在地面和空中多次出现高压转子转速无规则摆动,其它参数随动的故障现象,如图 1 所示。

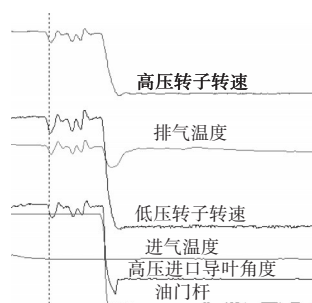


图 1 高压转子转速摆动故障现象

判读飞参,高压转子转速、低压转子转速、排气温度、高压进口导叶角度摆动幅值较大,超过规定值;操作者在座舱中明显感到推力变化。

2 高压转子转速控制原理

转速调节器自动保持高压转子的给定速度并按进气温度修正,靠改变主燃烧室的供油量来实现^[14]。计量开关的位置决定燃油供油量,取决于主燃油泵调节器的离心调节器和综合电子调节器^[15-16]。高压转子转速控制原理如图 2 所示。

在离心调节器的摆锤活门上,受配重的离心力和弹簧的共同作用。当摆锤活门偏离均衡位置时,通过

改变放油孔口的面积来改变摆锤内腔中的燃油压力,从而改变供油量,直到转速恢复平衡为止。

用主燃油泵调节器油门杆调节高压转子转速,发动机进口温度感受附件的指令通过型面凸轮修正转速。当燃油温度变化时,利用温度补偿器保证转速调节器稳定工作。发动机综合电子调节器根据

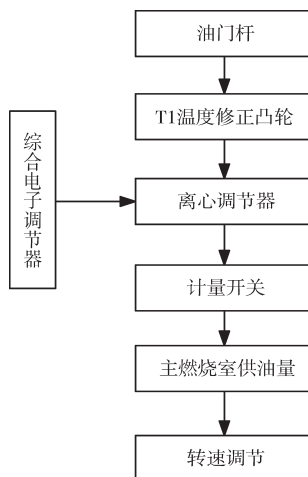


图 2 高压转子转速控制原理

占空比 S_1 ,参与控制主燃烧室供油量。

3 高压转子转速摆动故障原因分析

基于该型发动机的控制计划和控制原理,高压转子相对转速应按与油门、进气温度相关的调节计划来控制主燃油流量,以保证发动机的推力按规律变化。

(1)在进口温度感受附件方面,当进口温度感受附件故障时, T_1 测量有误,导致高压转子给定转速不能按进气温度修正,引起转速摆动。

(2)在综合电子调节器方面, S_1 指令控制主燃油供油量时,若指令异常,导致供油量变化,进而使转速发生波动。综合电子调节器消喘指令可导致主燃烧室短时切油,进而使转速发生波动。综合电子调节器大车重调指令可导致重调特性改变发动机当前状态,进而使转速发生波动。

(3)在燃油系统方面,主泵进口油压波动量值较大,且低于允许最小进口燃油压力时,可能出现主燃油泵调节器工作异常情况,导致转速波动。在主泵进口油温异常波动时,主泵内部温度补偿片来不及修正计量燃油流量,进而使转速发生波动。

(4)在转速调节系统方面,计量装置工作异常时,定压差发生波动,计量燃油流量发生变化,进而使转速发生波动;摆锤活门工作异常时,导致高压转子相对转速按油门、进气温度特性调节的灵敏性降低,进而使转速发生波动;加速控制器无法退出工作时,与转速调节器共同耦合控制,使得系统工作不稳定。

综上所述,高压转子转速摆动故障与进口温度感受附件、综合电子调节器、燃油系统、转速调节系统等有关。故障树如图 3 所示,共有 9 个底事件。

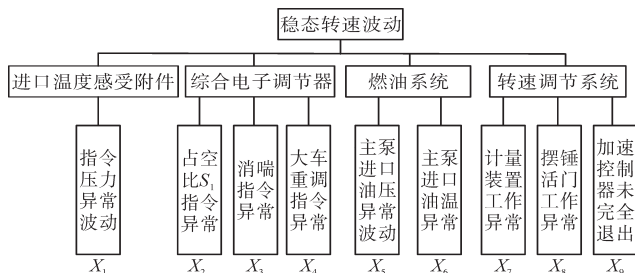


图3 稳态时高压转子转速波动故障树

对图中故障因素分析可知：

(1)在试车过程中测量主、副温包指令压力及稳定放油压力,压力值稳定,符合技术要求。 X_1 因素可以排除。

(2)在试车过程中进行综合电子调节器断电检查,转速波动现象依然存在。 X_2 、 X_3 、 X_4 因素可以排除。

(3)主泵为齿轮泵,容积泵的进口压力即使波动,对泵后压力影响甚微。 X_5 因素可以排除。

(4)在飞参中无燃油超温告警,且油温变化也不至于引起燃油计量发生突变;温度信号惯性较大,不太可能发生突变。 X_6 因素可以排除。

(5)在试车时增设计量装置前后压力传感器 P_{22} 、 P_{21} ,转速波动时其压差值保持恒定,未见波动;计量活门随动活塞随动活塞面积较大,对压差响应很灵敏,其结构为皮碗结构,未见滞涩情况。 X_7 因素可排除。

(6)查阅履历资料,故障发动机的主泵出厂时摆锤活门灵活性检查结果为 $\pm 0.1\%$,远远小于此次波动量,压力测试结果表明摆锤内腔压力正常,单摆活门运动灵活。 X_8 因素可排除。

判读故障发动机的加速性,加速性慢,超出正常范围。当加速性过慢,导致稳态时加速控制器无法退出工作,与转速调节器共同耦合控制,使得系统工作不稳定。

在发动机稳定工作状态下,自动加速活门关闭计量开关随动活塞放油,用转速调节器保持稳定工作状态。当调整加速钉过多导致加速性变慢时,加速活门在弹簧作用下向右移动过多,不能完全关闭,计量活门偏开,随动活塞控制内腔一直放油,达不到稳态系统建立时所需的油压,加速控制系统会一直工作。在转速调节器共同耦合控制下,主燃油泵离心调节器的摆锤活门,受离心式转速传感器配重的离心力和弹簧的共同作用,无法建立稳定工作时的平衡状态,导致高压转子转速波动,并引起低压转子转速、排气温度、

高压进口导叶角度等其他发动机参数的随动。

综上所述,加速控制器未完全退出工作是转速摆动的初步原因。

4 排故验证

针对波动量较大的发动机,判读飞参发现加速时间较长,通过调整加速钉,将加速性调至规定范围内,进行试车和飞行验证发现,高压转子转速稳定,转速波动现象消失,如图4所示。空中推力平稳,操作者未感受到推力脉动。

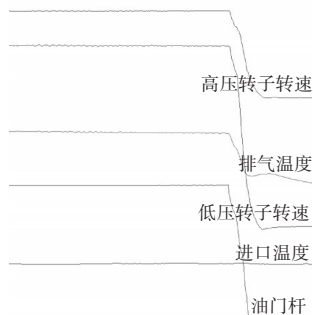


图4 排故后发动机稳态参数

5 结束语

高压转子转速稳定工作,对维持发动机的推力、保证发动机的整机稳定性和喘振裕度具有重要作用。本文针对高压转子转速摆动故障现象,基于高压转子转速控制原理,通过列举故障树的方法分析故障原因,并逐一排除,确定故障原因为加速性偏慢,导致稳态时加速控制器无法退出工作,与转速调节器共同耦合控制,使得系统工作不稳定。经外场试车和飞行验证,发动机工作参数正常,未见参数摆动现象,发动机推力稳定。

参考文献:

- [1] 高双林,查柏林.航空发动机及其部件工作原理[M].北京:北京航空航天大学出版社,2018:1-5.
GAO Shuanglin, ZHA Bailin. Aviation engine and components principle[M]. Beijing: Beihang University Press, 2018:1-5. (in Chinese)
- [2] 廉筱纯,吴虎.航空发动机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2013:8-13.
LIAN Xiaochun, WU Hu. Aviation engine principle[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013:8-13. (in Chinese)
- [3] 黄玉军.发动机工作参数摆动的故障分析[C]//湖北省航空学会成立二十周年学术交流文集.襄阳:湖北省科学技术协会,2004:51-53.
HUANG Yujun. Analysis of aero-engine parameter swaying [C]//Proceedings of Hubei Aviation Society 20 anniversary. Xiangyang: Hubei Association for Science and Technology, 2004:51-53. (in Chinese)
- [4] 张立新,刘将辉,唐先文.某型飞机发动机平衡转速状态参数摆动的故障分析[J].科技信息,2013(4):495.
ZHANG Lixin, LIU Jianghui, Tang Xianwen. Analysis of aero-engine

- parameter swaying on speed balance state[J]. Science & Technology Information, 2013(4):495. (in Chinese)
- [5] 孔祥兴, 王曦, 张绍基, 等. 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, et al. Research and experiment on improved sectional combination control scheme for civil turbofan engine's startup process [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(12):2924-2929. (in Chinese)
- [6] 王磊, 谢寿生, 苗卓, 等. 具有网络调度的航空发动机分布式控制系统协同容错控制[J]. 推进技术, 2018, 39(5):1164-1170.
- WANG Lei, XIE Shousheng, MIAO Zhuo, et al. Collaborative fault tolerant control for aero-engine distributed control system with network scheduling [J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(5): 1164-1170. (in Chinese)
- [7] YUAN Ge, LIU Zhenan, CHEN Qigong, et al. Stability of networked control systems with communication constraints[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008, 38(3):266-271.
- [8] 李睿超, 郭迎清, 李岩, 等. 基于数据集中器的超燃冲压发动机分布式控制系统通信方案设计[J]. 推进技术, 2016, 37(9):1766-1773.
- LI Ruichao, GUO Yingqing, LI Yan, et al. Communication scheme design of distributed control system for scramjet engine based on data concentrators[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(9): 1766-1773. (in Chinese)
- [9] 殷孝勇. 涡桨五型发动机转速摆动的故障分析与预防[J]. 科技信息, 2014(11):69.
- YIN Xiaoyong. Analysis of parameter swaying on WJ-5 aero-engine [J]. Science & Technology Information, 2014(11):69. (in Chinese)
- [10] Ait R M, El F S, Benzaouia A, et al. Basic problems in stability and design of switched systems[J]. IEEE Control System Magazine, 1999, 19(5):59-70.
- [11] Crusius C A R, Trofino. Sufficient LM I. conditions for output feedback control problems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(5):1053-1057.
- [12] Tarbouriech S, Turner M. Anti-windup design: an overview of some recent advances and open problems[J]. Control Theory and Applications, 2009(3):1-19.
- [13] Walsh G C, Ye H, Bushnell L G. Stability analysis of network control systems [J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 2002, 10(3):438-446.
- [14] 孟洋, 赵军. 基于控制器切换的涡扇发动机转速调节及安全保护[J]. 计算技术与自动化, 2017, 36(2):23-28.
- MENG Yang, ZHAO Jun. Speed control and safety protection of turbofan engine based on controller switching [J]. Computing Technology and Automation, 2017, 36(2):23-28. (in Chinese)
- [15] 李述清, 张胜修, 胡卫红. 航空涡扇发动机全包线平衡流形建模[J]. 航空动力学报, 2011, 26(3):537-542.
- LI Shuqing, ZHANG Shengxiu, HU Weihong. Whole flight envelop corrected equilibrium manifold modeling for a turbofan engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(3):537-542. (in Chinese)
- [16] 李杨. 某型发动机高空小表速转速摆动问题分析[J]. 航空发动机, 2020, 46(1):61-64.
- LI Yang. Analysis of the Rotor Speed Swing of the High-altitude Small Airspeed of an Engine Research on the Swing of Small Airspeed of an Engine[J]. Aeroengine, 2020, 46(1):61-64. (in Chinese)

(编辑:程海)