

航空发动机故障诊断及测试流程分析

郝春生¹, 秦月²

(1. 中国人民解放军驻红林机械有限公司军事代表室, 贵阳 550009; 2. 中航工业贵州航空发动机研究所, 贵阳 550081)

摘要: 阐述了某型航空发动机工程研制中应用的发动机故障诊断及测试流程。根据发动机型号的使用特点和发动机故障诊断方法对 FMECA 分析结果进行故障分类, 指出了各类故障在现有的测试技术下是否能进行故障诊断, 并对能诊断的故障类型进行了详细的故障诊断及测试流程分析, 经验证, 发动机故障诊断及测试性流程可满足航空发动机型号的测试性需求。

关键词: 航空发动机; 故障诊断; 测试流程; FMECA; 测试方法

中图分类号: V263.6

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2014.03.015

Fault Diagnosis Methods and Testing Procedure of Aeroengine

HAO Chun-sheng¹, QIN Yue²

(1. The office of representatives from the Chinese People's Liberation Army in AVIC Hong Lin Machinery Company Limited, Guiyang 550009, China; 2. AVIC Guizhou Aeroengine Research Institute, Guiyang 550081, China)

Abstract: The fault diagnosis method and testing procedure of aeroengine were presented according to the engineering research. The fault classification of FMECA analysis results was conducted by the engine characteristic and fault diagnosis methods. Whether all kinds of faults were suited to carry out by the testability technology, and fault diagnosis and testability procedure were analyzed in detail. The fault diagnosis methods and testability procedure were validated to meet the model testability.

Key words: aeroengine; fault diagnosis; testing procedure; FMECA; testing method

0 引言

进行航空发动机故障诊断^[1]可以迅速而准确地确定故障部位及严重程度, 有利于确保飞行安全以及减少维修人力和成本, 缩短飞行器的停飞时间, 提高其利用率, 同时也为实现发动机视情维修奠定基础。发动机的故障诊断与测试性^[2]要求密切相关。随着发动机可靠性、维修性要求的逐步提高, 各种型号都提出了故障诊断和测试性需求。对此, 近年来开展了很多关于发动机故障诊断方法的研究, 但航空发动机测试性研究起步较晚, 缺乏实际有效的发动机故障诊断及测试方法^[3]分析研究。建立 1 种有效实用的发动机故障诊断及测试方法, 不仅能有效地对发动机的故障进行查找和定位, 还可开发监控发动机性能和功能参数的发动机测试性系统, 从而提高航空发动机可靠性和寿命, 降低发动机使用成本。

本文针对航空发动机在研制中的故障诊断及测试流程进行研究分析, 提出故障诊断及测试流程的分析方法^[3]。

1 故障诊断及测试流程的设计分析过程

发动机故障诊断及测试流程设计分析过程如图 1 所示。

2 故障诊断及测试流程设计方法分析

2.1 发动机故障诊断设计方法

根据发动机的故障分类, 结合发动机监视和故障诊断需求^[4]。可把发动机故障诊断方法分为机内检测、自动检测、人工检测 3 种方式, 如图 2 所示。

2.2 各类发动机故障的诊断方法与测试流程

在大体明确发动机测试流程和故障诊断方法^[5]后进行发动机故障诊断和测试流程分析。在发动机的方

收稿日期: 2013-01-15

作者简介: 郝春生 (1979), 男, 工程师, 从事航空发动机系统工程研究和质量管理工作; E-mail: 41055023@qq.com。

引用格式: 郝春生, 秦月. 航空发动机故障诊断及测试流程分析[J]. 航空发动机, 2014, 40(3): 71-74. HAO Chunsheng, QIN Yue. Fault diagnosis methods and testing procedure of aeroengine[J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 71-74.

案及工程研制阶段,根据可靠性设计工作中的FMECA设计分析结果,结合发动机的使用特点和现有测试方法^[7-8],将发动机故障分为以下3类,其故障诊断方法与测试流程如下。

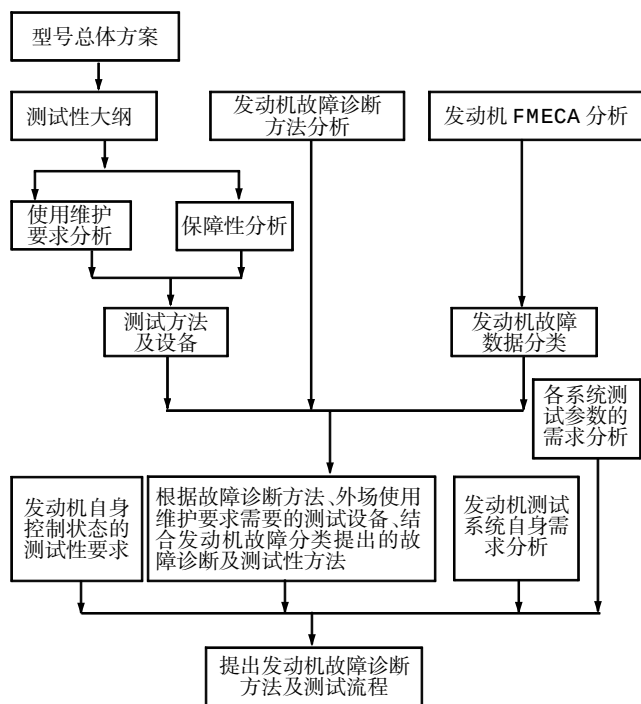


图1 发动机故障诊断及测试流程设计分析过程

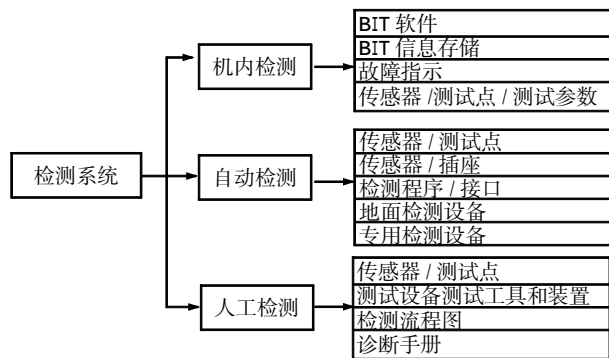


图2 发动机故障诊断方法

2.2.1 第1类故障测试流程分析

第1类故障为功能失效及性能衰退故障,即故障发动机系统或设备丧失规定的功能以及发动机实际性能的衰退超过规定值。故障模式有发动机转速摆动、喘振、超温等。该类故障可通过发动机机载自动检测系统中的自动检测和机内检测,进行实时监控和采集或计算。通过测量发动机的总温、总压、静压、转子转速和燃油流量等来分析发动机及部件的性能水平及性能衰退程度,并可将气动热力参数反映的故障隔离到气路

部件或单元体及有关的子系统。利用发动机的振动数据、滑油参数以及对滑油中所含屑末的检测和分析结果等来监视发动机结构系统部件的健康状况^[9]。发动机测试方法和测试点^[10]及传感器的需求见表1。

表1 第1类故障的发动机测试方法和测试点及传感器的需求

故障模式	产生影响	测试方法	测试点及传感器
发动机转速摆动	使发动机推力变化,发生窜动,造成飞行员紧张。	对发动机转速进行实时监控,以保证在发动机转速摆动时采取应急措施。	装转速传感器,采集高、低压转子转速。
发动机喘振	导致发动机空中停车,轻则威胁飞机飞行安全,重则造成飞机等事故。	对发动机燃烧室扩压段中空气速度头数值和正负号转换成的电信号进行实时监控,以保证在发动机喘振时采取应急措施。	装喘振传感器。
发动机超温	造成涡轮叶片和涡轮盘报废,损害发动机结构。	对发动机低压涡轮后的燃气温度 T_5 进行实时监控,以保证在发动机超温时采取应急措施。	在发动机混合器机匣装双点热电偶。

2.2.2 第2类故障测试流程分析

不能通过发动机机载自动检测设备或地面自动检测设备进行检测的故障。故障模式有风扇部件转子叶片裂纹、风扇部件转子叶片叶身掉块或断裂、高压压气机转子叶片裂纹等。该类故障与发动机结构部件损伤相关,无法通过自动检测设备^[11]进行监控和定位,但可以通过人工检测来完成,主要依赖发动机在外场的使用维护和现有测试方法和设备。在外场利用地面专用设备来探查发动机零件、部件的结构和机械损伤。因此,需使用孔探仪检查、电涡流检测、超声波检查和磁力探伤检查等,同时根据发动机的结构和气流通道特点,设置检查窗口。

2.2.3 第3类故障的测试流程分析

在外场级条件下,既无法通过机载自动监测设备检测,也无法通过地面专用设备检测的故障。故障模式有中央传动主动锥齿齿面疲劳点蚀、传动轴花键磨损等。该类故障与发动机结构部件损伤相关,在外场难以通过现有检测技术进行检测,必须返厂(厂内必须有分解设备、探伤设备和装配设备)分解发动机检查。

2.3 基于控制计划和工作状态诊断的测试流程需求分析

通过以上发动机故障分析,结合对发动机的工作状态和控制计划进行分析见表2,由此才能建立较全面的发动机故障诊断及测试流程^[12]。

2.4 基于发动机测量参数和测量点的测试流程需求分析

通过对发动机的故障分类,结合发动机监控及故

障诊断的需求,测试系统对各级测试对象所需的测试点和测试参数的测试流程^[2]不同。

表 2 发动机工作状态和控制计划分析

序号	发动机工作状态控制	测试方法	测试点及传感器
1	慢车状态控制	慢车转速控制计划只与发动机进口温度有关,并受最小供油量和喉管喉部最大面积限制,测试系统需要采集发动机进口温度、燃油压力、喉管喉部最大面积提供给控制器	为采集发动机进口温度,需安装温度传感器;为采集主燃油总管燃油压力,需安装压力传感器;为监控喉管临界截面值,需安装喉管临界截面调节片位置传感器
2	巡航状态控制	巡航状态转速由发动机操纵杆位置和进口温度确定。测试系统需要采集二者数据提供给控制器	为判别发动机操纵杆位置需要安装发动机操纵杆拉杆;为采集发动机进口温度,需在飞机进气道装温度传感器

(1)对于重要参数,要求多设测试点,当某个测试点出现问题时,还有其他测试点可进行备份测量。如高、低压转子转速都是飞行员实时判别飞机状态的重要参数,如果只设置 1 个测试点,一旦出现问题,飞行员就不能判断发动机的状态。

(2)对于特殊参数,如涡轮后温度的测量,因为温度场分布不均匀,为了保证参数的准确性,要在温度场内设置多件热电偶来采集温度,取其平均值,以确保参数的准确度。

2.5 发动机测试系统自身需求分析

2.5.1 发动机测试系统设计要求^[13]

(1)将发动机系统和设备中的所有故障都定位到可更换单元 LRU 上。

(2)测试点的可达性好,以便快速测试,包括用于连接测试设备的内部和外部测试点、检测插座和人工观测等。

(3)制定分析各项试验结果以及分析使用和维修活动的计划,以确定数字式电子控制器机内测试(BIT)^[14]软硬件、自动测试设备(ATE)软硬件、发动机自动测试手段、人工测试方法以及针对故障检测判别后所实行的维修、维护文件是否满足数字式电子控制器和发动机整机的故障检测率、故障隔离率和虚警率的要求。

(4)控制器的 CPU、定时器、RAM、Flash Memory 和电源系统等硬件应具有自检测功能。

(5)数字式电子控制器的控制软件应具有自检测功能。

(6)高速电磁阀 BIT 应具有自检测功能。

(7)能够准确及时地采集模拟量、频率量及开关量输入信号,并进行相应的滤波、消抖等处理。

(8)对传感器、执行机构及其回路工作状态应具有实时检测功能。

(9)对开关量输入、输出通道应具有故障检测功能。

(10)应具有与外界通讯的功能,能够与 GME、FMCS 等进行数据交换。

(11)对发动机、涡轮起动机和数控系统工作状态应具有诊断及监控的功能。

(12)通过通讯,完成发动机信息、控制参数和标定参数的调整以及历史数据的读取。

(13)通过通讯,能对控制系统功能进行地面检测。

(14)根据故障危害程度进行故障隔离和系统重构,并按一定的告警级别划分,进行告警级别设计,并具备一定的故障恢复能力。

2.5.2 测试系统自身可靠性需求

发动机测试系统一定要安全可靠,不能因为该系统发生问题影响发动机的可靠性,造成飞机的误报警,影响飞行安全。

(1)设置测试单元后,必须考虑测试单元的可靠性对整体可靠性的影响,对于监控重要故障的测试单元以及监控多种故障均涉及到的检测单元应进行余度设计。

(2)发动机测试性系统应采用检测单元故障自检设计。

(3)发动机测试性系统对于可能出错的测试点应有防错设计。

(4)为了防止测试单元误报警造成测试性虚警率指标升高,应对测试点监控报警范围的设计提出要求。

3 验证方法

3.1 测试流程的有效性评估^[15]

根据发动机故障诊断及测试流程分析,对发动机进行测试性设计。根据测试性设计资料和数据,预计发动机的故障检测率、故障隔离率、故障检测时间、隔离时间以及估计测试费用等。以这些参数的估计值来评价和度量测试性设计工作,如果达不到型号规范和测试性大纲的要求,则需要改进设计。

3.2 故障诊断及测试流程的有效性试验验证

在发动机(或电子控制器)研制出来后,可以通过注入一定数量故障的方法来验证测试性水平。注入故障后运行规定的故障检测与隔离程序,根据试验结果数据估计有关测试性参数值,是否能满足发动机(或

电子控制器)的使用要求,即进行测试性验证。

4 总结

(1)在发动机型号研制过程^[10]中,可以按照发动机故障诊断及测试性流程进行发动机故障诊断方案分析。

(2)对具体型号的 FMECA 分析结果进行故障分类,对能进行故障诊断和测试性设计的故障按照本文的方法进行具体分析,为发动机故障诊断需求分析提供输入。

(3)在进行发动机型号测试性设计时,必须考虑发动机测试系统自身的需求和可靠性需求。

发动机故障诊断及测试流程的分析方法,已在某型发动机的测试性设计中得到应用,证明其分析方法、分析流程、设计结果满足发动机故障诊断及测试性要求。

参考文献:

- [1] 田仲. 系统测试性设计分析与验证[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003:58-114.
TIAN Zhong. The analyzing and confirmation of systematic testability design [M]. Beijing: Beihang University, 2003: 58-114. (in Chinese)
- [2] 航空发动机设计手册总编委会. 航空发动机设计手册:可靠性与维修性[M]. 北京:航空工业出版社,1999:315-361.
Aeroengine Design Manual Compiling Committee. The design manual of aeroengine reliability and maintainability [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1999: 315-361. (in Chinese)
- [3] 石君友. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 28-51.
SHI Junyou. Testability design analysis and verification [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 28-51. (in Chinese)
- [4] 郑波,朱新宇. 航空发动机故障诊断技术研究[J]. 航空发动机, 2010, 36(2): 22-25.
ZHENG Bo, ZHU Xinyu. Investigation of fault diagnosis technology for aeroengine [J]. Aeroengine, 2010, 36(2): 22-25. (in Chinese)
- [5] 陈大光. 燃气涡轮发动机的状态监控与故障诊断[J]. 航空学报, 1989, 10(6): 22-25.
CHEN Daguang. Gas turbing engine condition monitoring and fault diagnostics [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1989, 10(6): 22-25. (in Chinese)
- [6] 陈曦,廖名夫,王俨凯. 航空发动机故障融合诊断研究[J]. 航空发动机, 2010, 39(4): 78-84.
CHEN Xi, LIAO Mingfu, WANG Yankai. Investigation of aeroengine fault fusion diagnosis[J]. Aeroengine, 2010, 39(4): 78-84. (in Chinese)
- [7] 范文正,谢静,徐耀荣. 故障因子诊断方法在航空发动机上的应用研究[J]. 航空发动机, 2010, 39(2): 52-56.
FAN Wenzheng, XIE Jing, XU Yaorong. Study of diagnosis method on aeroengine based on fault factor [J]. Aeroengine, 2010, 39(2): 52-56. (in Chinese)
- [8] 孙涛,侯志强,张赟. 基于小波包分析和案例推理的转子系统故障诊断方法[J]. 航空发动机, 2010, 36(1): 27-30.
SUN Tao, HOU Zhiqiang, ZHANG Yun. Rotor system fault diagnosis based on wavelet packet analysis and CBR [J]. Aeroengine, 2010, 36(1): 27-30. (in Chinese)
- [9] Sheppard J, Simpson W. Applying testability analysis for integrated diagnostics [J]. IEEE D & T of Computer, 1992, 9(3): 65-78.
- [10] Deb S, Pattipati K R, et al. Multi-signal flow graphs: a novel approach for system testability analysis and faule diagnosis [J]. IEEE Aerospace and Electronics Magazine, 1995, 10(5): 14-20.
- [11] Pattipati K R, Deb S, Dontamsetty M, et al. Start: system testability analysis and research tool [J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 1991, 6(1): 13-20.
- [12] 田仲. XKG/C01-2009. 型号测试性设计准则制定指南 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010: 115-170.
TIAN Zhong. XKG/C01-2009. Guide to the testability design and analysis [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 115-170. (in Chinese)
- [13] 田仲. XKG/C02-2009. 型号测试性设计准则制定指南 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010: 171-198.
TIAN Zhong. XKG/C02-2009. Guide to the establishment of testability design criteria [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 171-198. (in Chinese)
- [14] 石君友. XKG/C03-2009. 型号 BIT 设计指南 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010: 199-236.
SHI Junyou. XKG/C03-2009. Guide to the BIT design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 199-236. (in Chinese)
- [15] 田仲. XKG/C04-2009. 型号测试性要求验证试验与评价应用指南 [M]. 北京:国防工业出版社, 2010: 237-266.
TIAN Zhong. XKG/C04-2009. Guide to the demonstration of testability [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 237-266. (in Chinese)
- [16] 刘廷毅. 航空发动机研制全寿命管理研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(1): 1-6.
LIU Tingyi. The research of aeroengine researching and manufacture full life management [J]. Aeroengine, 2012, 38(1): 1-6. (in Chinese)