

航空发动机健康管理系统的功能架构优化方法

王净巍¹, 吴新¹, 蔡景², 张瑞¹, 杨旭¹, 陈晓哲¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 南京航空航天大学 民航学院, 南京 21006)

摘要: 航空发动机健康管理系统是目前先进发动机提升自身安全性、可靠性以及经济可承受性的核心系统之一, 而架构设计是该系统的关键技术, 高效合理的系统架构能够充分发挥系统的功能与作用。针对航空发动机健康管理系统架构设计需求, 为了提升系统架构的高效性、合理性, 实现系统功能的最优分配, 开展航空发动机健康管理系统功能架构优化方法研究。比较和分析了国外发动机和飞机健康管理系统功能架构, 总结了健康管理系统共同特征, 并结合健康管理系统用户需求分析, 提炼形成通用的发动机健康管理系统功能架构; 基于该架构采用逻辑决断图和层次分析法(AHP), 提出了一种针对部件和故障的功能分配方法。结果表明: 所提出的分配方法可实现状态监测、故障诊断、故障预测、寿命管理及趋势分析功能向机载和地面系统的定性定量分配; 在军民航空发动机健康管理系统设计, 可应用通用健康管理系统架构实现发动机健康管理系统核心功能及用户需求的全面覆盖, 并根据发动机结构及特点采用功能分配方法实现机载、地面系统功能的优化配置。

关键词: 发动机健康管理系统; 架构设计; 逻辑决断图; 层次分析法; 功能分配

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.05.006

Optimization Method of Aeroengine Health Management System Functional Architecture

WANG Jing-wei¹, WU Xin¹, CAI Jing², ZHANG Rui¹, YANG Xu¹, CHEN Xiao-zhe¹

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

2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 21006, China)

Abstract: Aeroengine health management system is one of the core systems for advanced engines to improve their safety, reliability, and affordability. The design for its architecture is the key technology of aeroengine health management systems. An efficient and reasonable system architecture can give full play to the functions of the system. According to the design requirements of the aeroengine health management system architecture, aiming at improving the efficiency and rationality of the system architecture and achieving the optimal distribution of system functions, the optimization method of the aeroengine health management system functional architecture was studied. In this paper, functional architectures of foreign aeroengine and aircraft health management systems were compared and analyzed, and their common characteristics were summarized. Combined with user requirements analyses of the health management system, a general functional architecture of engine health management systems was formed; Based on this architecture, a function allocation method for components and faults was proposed by using logical decision diagrams and analytic hierarchy process (AHP). The results show that the proposed allocation method can realize the qualitative and quantitative allocation of state monitoring, fault diagnosis, fault prediction, life management and trend analysis functions to airborne and ground systems. In the design of military and civil aeroengine health management systems, the general health management system architecture can be applied to realize the comprehensive coverage of the core functions and user requirements of the engine health management system, and the function allocation method can be used to realize the optimal configuration of airborne and ground system functions according to the engine structure and characteristics.

Key words: engine health management system; architecture design; logical decision diagram; analytic hierarchy process; function allocation

0 引言

在航空发动机不断发展的过程中, 系统的非线性

和结构复杂性愈发明显, 对发动机的安全性和可靠性提出了更高的要求^[1]。维修性也逐渐成为发动机的核心竞争力, 以民航市场为例, 2018 年全球机队维护、

收稿日期: 2023-04-11 基金项目: 国家级研究项目资助

作者简介: 王净巍(1991), 女, 硕士, 工程师。

引用格式: 王净巍, 吴新, 蔡景, 等. 航空发动机健康管理系统的功能架构优化方法[J]. 航空发动机, 2024, 50(5): 47-55. WANG Jingwei, WU Xin, CAI Jing, et al. Optimization method of aeroengine health management system functional architecture[J]. Aeroengine, 2024, 50(5): 47-55.

维修和大修的投入达690亿美元,其中发动机维护投入占比达42%^[2]。随着发动机信息化程度的日益提升,传统计划性的维修理念和模式难以实现故障的快速定位与修复,维修效率和效益较低^[3]。因此,以视情维修为核心的发动机健康管理技术受到航空领域高度重视,发动机健康管理系统已经成为先进航空发动机的标志性系统之一。面对发动机健康管理系统多场景、多用户、多需求、多模式的特点,如何通过技术手段建立高效的系统架构,实现机载和地面功能的优化分配,对于发动机健康管理系统的研究具有重要意义。

国外航空发动机健康管理(Engine Health Management, EHM)的技术发展经历了从状态监视、故障诊断到预测及健康管理的逐步发展和完善过程,在长期的工程研制积累过程中,已形成较为完备的体系^[4]。2004年美国国防部颁布的JSSG-2007A《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范指南》提出了发动机健康监视系统(Engine Health Monitoring System, EHMS)的概念;2007年E-32修订出版了ARP 1587B《航空燃气涡轮发动机健康管理系统指南》,对健康管理系统的整体架构进行了描述,并对系统功能、效益等给出了指导,提供了有参考价值的实例^[5]。中国航空发动机健康管理技术起步相对较晚,尚未形成完整的体系,但中国学者也开展了一些研究工作。李军等^[6]提出了健康管理系统的典型功能及关键技术,总结了健康管理系统的的发展趋势;尉询楷等^[7]研究了国外典型健康管理系统架构并提出了机载与地面系统功能分割建议。但目前的研究工作主要集中在对健康管理系统通用或典型功能的研讨,在实际开展系统设计过程中,为实现不同的发动机结构、用户需求或具体故障模式下系统架构的最优设计,有必要对发动机机载与地面系统的功能分配方法开展进一步研究。

本文建立了一种通用的发动机健康管理系统功能架构,并采用逻辑决断图和层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)得出了一种针对部件和故障的功能分配方法。

1 健康管理系统功能架构

1.1 OSA-CBM架构

状态检修系统开放体系架构(Open System Architecture for CBM, OSA-CBM),是波音、罗克韦尔

等公司联合制定的1套促进状态检修系统信息流动的标准结构和框架^[8]。根据OSA-CBM架构,发动机健康管理系统的核心模块可分为7层:数据采集层、数据操作层、状态检测层、健康评估层、预测评估层、建议生成层和表达层次^[9-10]。OSA-CBM架构层次如图1所示。

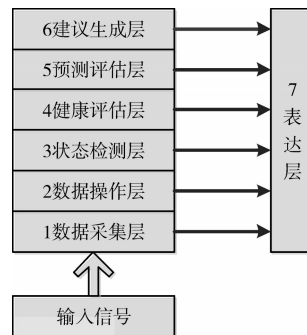


图1 OSA-CBM架构层次

在7个层次中,数据采集层、数据操作层、状态检测层通常位于机载部分,是发动机健康管理及任务载荷管理的核心组成,其功能的实现较为简单,主要依赖于机载的传感器、处理器及分布式互联网络等;其余4个层次的功能实现较为复杂,对处理性能要求较高,一般设置在发动机健康管理系统的地面部分。

1.2 典型飞机和发动机健康管理系统架构

在OSA-CBM架构基础上,波音、GE等公司均提出了各自的健康管理架构体系,服务应用于多型飞机及发动机。波音的飞机健康管理系统是通过中央维护系统并利用e-Enanbled环境的网络化平台以及空地维护网络共同构成,具备机队监控、故障分析、报告发布等功能,实现了空中与地面的一体化管理,大幅提升运营效率^[11]。GE公司的EHM系统为全球多家用户提供了远程诊断服务,该系统架构如图2所示。

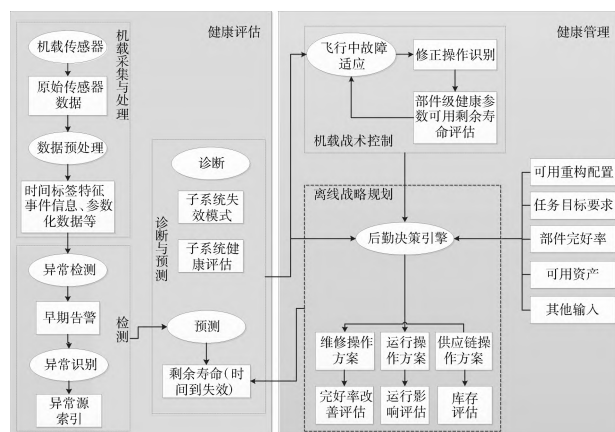


图2 GE公司提出的EHM系统架构

信息流程由机载传感器采集发动机状态信息,经滤波、特征提取等方式进行预处理后,得到事件信息、时间标签等特征数据,特征数据经异常检测后进行早期故障告警,再经过诊断与预测模块确定故障部位并评估故障部件运行至失效的剩余时间,通过上述3个

层级的功能实现健康评估,后勤决策引擎则利用机载诊断和预测结果,进行离线战术规划,确定最佳的维修、运行以及供应链的方案和操作^[10-11]。

Honeywell 公司提出的综合健康管理(Integrated System Health Management, ISHM)架构,通过机载监视器采集获取相关参数,并通过离线和机载的检测、诊断等方法确定系统中的失效问题。F119、F135 等军机均配备健康管理系统,由机载和地面系统实现监测、诊断与寿命管理等功能。

以上多种典型的发动机或飞机健康管理系统具有不同的关注点,在架构的描述和结构上不同,典型健康管理系统架构对比见表 1。从表中可见,对其主要组成和功能进行分析提取,可发现以下共同点:

- (1)由机载、空地通讯和地面处理 3 部分组成;
- (2)核心功能包括状态监测、寿命管理、故障诊断、故障预测、趋势分析、数据采集及预处理。

表 1 典型健康管理系统架构对比

公司或机 型	机载部分	空地通讯 部分	地面部分
GE	异常检测、早期告警、异常识别、	数据通讯	离线战略规划(维修
	诊断、健康评估、		操作方案、运行操作方
波音	异常诊断推理	数据通讯	案、供应链操作方案)、
	机、告警		战略战术控制(故障适
霍尼韦尔	数据测量、状态	数据通讯	应、修正操作识别)
	及事件检测、异常		
F119	实时流 STORM	数据通讯	诊断推理机、预测推
	模型,实现气路性		理机
F135	能监测、振动监	数据通讯	基于模型的推理机、
	测、滑油监测和寿		规则的推理机等、数据
	命管理	数据通讯	挖掘、任务资源管理
	发动机状态实	数据通讯	机载数据进行 2 次
	时监测、故障诊断		分析,完成关键部件的
	和寿命统计分析	数据通讯	寿命管理

2 用户需求分析

EHM 系统的核心是视情维修,其目的是为用户、使用方提供全面的后勤保障维修解决方案,因此在进行 EHM 系统设计的过程中,需要明确各方对健康管理系统的要求,进而明确系统的设计目标。

EHM 的用户一般包括 3 个部门:运行部门、监管部门和工程部门^[4],如图 3 所示。

工程部门主要指发动机及 EHM 系统的工程设计人员,侧重于系统的维护、研发和制造;监管部门主要关注建立 EHM 系统的使用规则,这二者对 EHM 系统的需求捕获影响较小。而运行部门是 EHM 系统的主要使用方,包含了后勤保障、飞行、维修、机群管理、训练等。训练目的是辅助飞行员提升对飞机的操纵能力,其需求可体现在飞行用户需求中;机群管理则是综合了飞行、维修、保障等信息后得到的综合信息。因此,后勤保障用户、飞行用户、维修用户的需求是 EHM 功能架构设计的主要驱动源,对上述 3 类用户的关注点以及对 EHM 系统用户的要求进行分析总结见表 2。

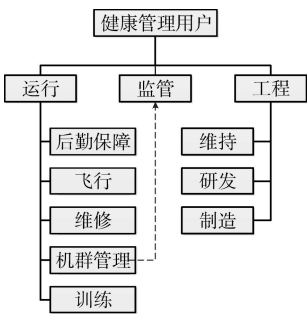


图 3 EHM 系统用户分类

表 2 EHM 系统用户需求

用户	用户关注点	对 EHM 的要求
飞行用户	飞行安全	危险识别及预警
		预测危险发生后可持续飞行时间
	工作负荷	避免警报冲突
		降低虚警率
维修用户	计划维修工作	座舱信息过滤
		对典型故障的预测
	非计划维修工作	发动机关键件剩余寿命的预测
		监测和诊断覆盖发动机常见故障
后勤保障用户	后勤保障率	可以检测出发动机常见故障
		可以隔离出发动机常见故障
	后勤保障投资成本	可预测典型故障
		关键件的寿命预测
	修理恢复时间	关键件的寿命预测
		判断故障严重程度
		故障诊断定位

飞行用户最关心的是飞行安全和工作负荷,需要机载 EHM 系统能够对发动机状态进行实时分析和评估,能够对重要危险进行识别和预警,对关键故障的警示及虚警率有更高要求;维修用户更关心的是维修难易程度和维修任务工作量。因此需要 EHM 系统能够尽可能多方而准确地对故障进行诊断、隔离和预测;后勤保障用户的关注点在于保障资源的供需以及保障方案的制定,因此要求 EHM 系统能够对典型故

障及关键件的寿命进行预测和管理,为决策保障提供充分支持和依据。

3 通用 EHM 系统功能架构

目前针对 OSA-CBM 架构和波音、GE 等公司典型健康管理架构体系相对不完善的问题,为明确各功能模块之间的关联性以及进一步细化模块功能,提出了一种通用细化的 EHM 系统功能架构,并完成了基于该架构的系统功能规划。该架构包含机载系统、空地通信系统、地面系统3部分,如图4所示。

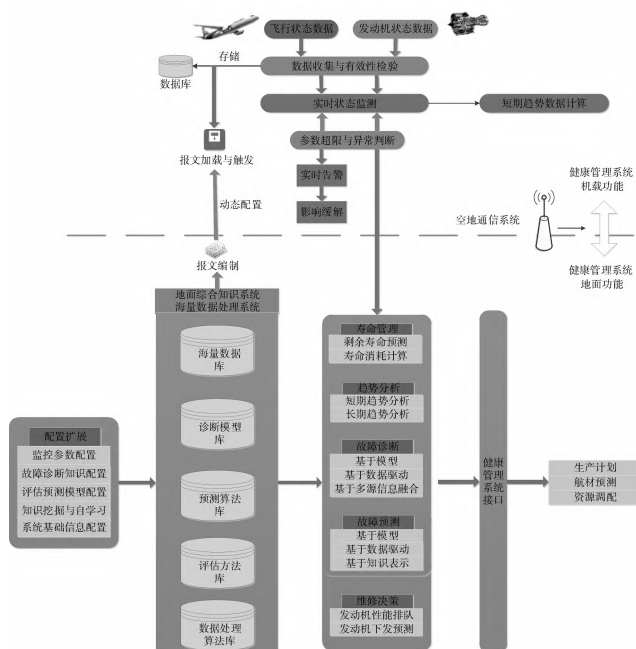


图4 EHM系统通用功能架构

3.1 机载系统功能

3.1.1 数据采集及预处理功能

该功能是机载健康管理系统的核心功能,机载系统通过大量健康管理系统专用传感器采集发动机的各项参数,然后将各类参数进行数据的预处理,存储至机载系统中对应的存储器中,在航空器降落之后通过存储器把发动机各项参数传输至地面健康管理系统进行故障的诊断与预测、趋势分析以及寿命预测等。

3.1.2 实时状态监测功能

状态监测具有机载系统的核心功能,由发动机控制系统和机载健康管理系统共同完成。控制系统实现关键参数的状态监测,其结果向飞行员提示告警,应通过必要的冗余保证其高可靠性;健康管理系统能实现发动机性能、振动或滑油液位等参数实时监视,并负责数据的存储、传输和失效处置。

3.1.3 报文加载功能

报文加载功能是与用户需求结合最紧密的部分,一般根据用户需求进行定制,例如对发动机性能参数监测的需求、对趋势特征提取的需求等。机载系统产生的报文一般包括监控报文和健康管理报告。

3.1.3.1 监控报文

监控报文是地面系统进行进一步诊断的基础,主要包含对发动机正常运行时主要参数的特征提取以及当出现异常时对事件的记录结果。

(1)正常运行报文。正常报文主要对每架次飞行过程中关键状态的特征数据进行提取,一般包含起动过程、起飞状态、爬升状态、巡航状态。提取后特征数据与架次信息、飞机信息、时间、大气环境数据等共同组成机载系统正常运行报文。提取的特征数据根据需求及状态的差异,可包含温度、压力、振动等参数。

(2)事件报文。事件报文为触发式,即只有在飞行过程中出现某个事件时,则产生对应事件报文。事件报文可包含参数超限报文、故障报文、派遣报文、振动报文等。

3.1.3.2 健康管理报告

健康管理报告监控整个飞机运行过程中的健康状况,典型的发动机健康管理报告包括:

(1)全航段数据报告。该报告存储了飞行过程中全部的数据,是地面系统分析最重要的数据来源。

(2)故障历史数据报告。该报告主要记录故障发生时的相关参数,为故障排除与定位提供依据,同时可根据产生故障的类型建立故障数据库,为后续同类故障的诊断提供支撑。

3.1.4 机载实时告警功能

机载系统的实时告警功能通过监视发动机主要性能、振动、滑油系统等参数,向驾驶人员提示发动机的异常,实现驾驶人员与机载设备之间的信息交互。

3.1.5 短期趋势数据计算功能

通过短时趋势分析算法来实时判断参数异常增量特征,对发动机飞行的时间、飞行中出现的故障进行统计,为机载状态监测和故障诊断提供数据分析结果。

3.1.6 影响缓解功能

影响缓解功能通常由健康管理与控制系统共同完成。该功能将机载系统监测到的故障信息显示在飞机驾驶舱内,部分特定故障将提示给机组人员,供

驾驶人员操作使用;大部分故障将提示给地面维护人员,用于地面排故。同时大部分故障也会对应到派遣级别,以确定系统的派遣能力^[12]。

3.2 空地通信系统功能

空地通信系统实现机载系统与地面系统的数据交互,目前实现空地通信系统功能主要通过3种方式:地空数据链、航后硬拷贝、航后无线传输。

(1)地空数据链主要通过机载飞机通讯寻址和报告系统(Aircraft Communication Addressing and Reporting System, ACARS),将地面分析所需的飞行信息发送到地面总站,再经过地面通信网络发送至相应用户,同时也可以接收地面发送的数据显示给机组人员^[13]。该方式数据传输及分析的实时性强,但数据量小,若出现数据波动,地面系统进行分析时难以准确地判断该波动是发动机故障还是数据干扰,影响诊断结论的准确性。

(2)航后硬拷贝是通过数字式飞行数据记录装置(Flight Data Recorder, FDR)、快速存取记录装置(Quick Access Recorder, QAR)等记录飞行过程中产生的飞行数据,并在飞行结束后进行下载。相较于飞机通讯寻址和报告系统(Aircraft Communication Addressing and Reporting System, ACARS),航后硬拷贝的方式实时性较差,数据下载时间长,但数据记录完整,每次飞行都可以取大量的数据进行发动机健康监控^[14]。

(3)航后无线传输可利用无线QAR技术,实现飞机落地后QAR数据的快速下载,弥补了实时性不足的问题。

3.3 地面系统功能

3.3.1 状态监测功能

发动机健康管理地面系统的状态监测功能同机载实时状态监控功能一致,可分为气路性能监测、滑油系统监测和机械振动监测。

3.3.2 寿命管理功能

地面寿命管理功能的实施对象一般为发动机关键件和重要件,通过雨流计数法等寿命计算方法,计算发动机关重件剩余寿命,预计维修时间,给出维修建议。

3.3.3 故障诊断与预测功能

EHM系统智能故障诊断算法依赖于人工智能技术,常用的智能诊断方法包括:基于神经网络的故障

诊断、基于支持向量机的故障诊断、多传感器信息融合故障诊断及模糊逻辑推理。

故障预测的方法主要包括基于模型、基于知识表示以及基于数据驱动等预测方法。

3.3.4 趋势分析功能

地面系统的趋势分析通常以趋势图的形式显示,其数据来源可以由机载系统在特定状态下提取特征数据,也可以由地面系统读取机载系统记录的完整飞行剖面数据并进行特征提取与分析。在发动机正常工作情况下由性能衰退引起的趋势图变化一般呈缓慢变化;由于发动机工作异常或传感器故障引起的趋势图变化一般为突变,地面系统可通过趋势变化的连续性对发动机工作情况进行判断。

3.3.5 维修决策支持功能

维修决策支持功能主要分为2部分:发动机性能排队和发动机下发预测。通过提供每台发动机的性能状态,帮助地面维护人员从全局角度对发动机进行调度,并通过发动机下发预测功能,辅助维修决策部门确定维修时间,减少非计划性停飞,提高利用率。

3.3.6 模型库优化与配置功能

为报文编制、故障诊断、预测、统计等方法提供结果优化和验证的模型,并针对发动机的使用特点,对模型中的关键参数进行配置。数据库和知识库是故障诊断的重要组成部分,是故障诊断预测算法的基础。

4 功能分配与优化方法

在明确总体功能架构的基础上,针对目前国内外在系统功能架构规划中缺少将具体需求分配至机载系统和地面系统的问题,提出了一种易操作的功能分配与优化方法,以实现完整的EHM系统功能架构设计。从发动机组成部件和故障模式2个层面,对上述功能规划中机载、地面功能进行细化,再通过逻辑决断图法和AHP层次分析法逐一确定各项功能中哪些部件和故障模式由机载系统承担、哪些由地面功能承担,以此来进行具体的机载及地面功能分配。

4.1 功能分配流程

基于机载系统和地面系统的特点,健康管理系统功能分配流程如图5所示。从故障和部件2个层面,采用AHP层次分析法和逻辑决断图法实现状态监测、故障诊断、故障预测、寿命管理与趋势分析的功能分配。

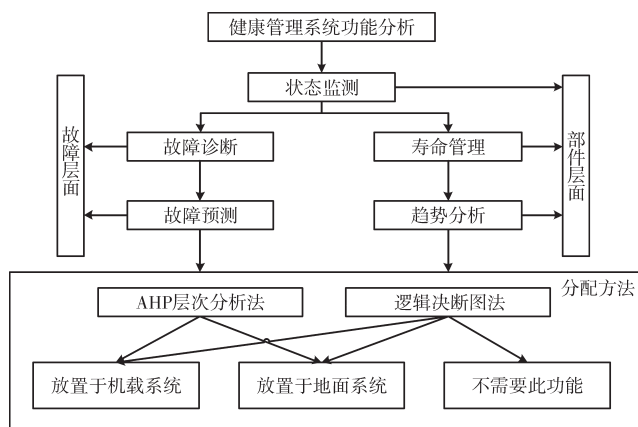


图5 EHM系统功能分配流程

4.2 逻辑决断图法

逻辑决策图法将功能实现中的影响因素输入到逻辑决策图中进行分析决策,通过不断的“是”、“否”回答完成决策过程,确定最佳的功能分配方案^[15]。该方法清晰易懂,可应用于状态监测、故障诊断、故障预测、寿命管理及趋势分析的功能分配。

4.2.1 状态监测功能分配

部件的状态监测功能分配逻辑决断方法如图6所示。

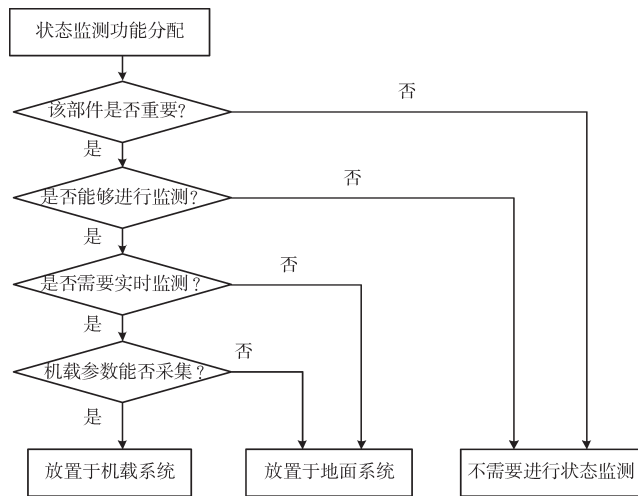


图6 状态监测功能分配逻辑决断方法

逻辑判断过程为:

(1)部件重要性判断:指该部件所发生的故障是否会造成严重的后果;故障的发生是否会对发动机的利用率和安全性造成影响;故障的发生是否会造成经济上的影响;故障的发生是否会影响飞机执行任务。

(2)部件可监测性判断:该部件的性能是否能够通过发动机参数来体现。

(3)监测实时性判断:部件所发生的故障是否具有潜伏期,即分析部件从潜在故障到功能故障的间隔

时间,若从潜在故障点到功能故障点的时间较长,表示该故障潜伏期较长,实时性要求较低,则可将状态监测功能分配至地面系统;若从潜在故障点到功能故障点的时间较短,表示该故障潜伏期较短,实时性要求较高,则可将状态监测功能分配至机载系统。

(4)机载参数可采集性判断:部件性能参数是否有对应的传感器安装在发动机上。

4.2.2 寿命管理功能分配

部件的寿命管理功能分配逻辑决断方法如图7所示。逻辑判断过程包含限寿件判断、部件受影响性判断、寿命可折算性判断。

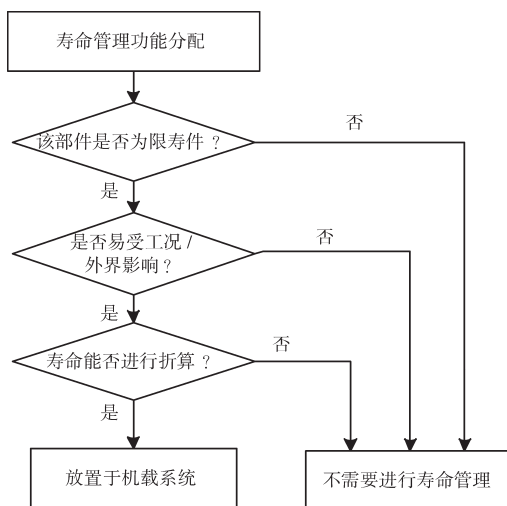


图7 寿命管理功能分配逻辑决断方法

4.2.3 故障预测功能分配

部件故障模式的故障预测功能分配逻辑决断方法如图8所示。

逻辑判断过程为:

(1)故障重要性判断:该故障的发生是否会造成严重的后果,是否会对发动机的利用率和安全性造成影响;故障的发生是否会造成经济上的影响,是否会影响飞机执行任务。

(2)特征可识别性判断:判断该故障的特征是否能够识别。

(3)参数可采集性判断:该故障对应的故障参数是否能够采集。

(4)参数趋势判断:该故障对应的参数及其组合是否有规律,是否有一定的变化趋势。

(5)预测算法支持性判断:是否有合适的故障预测算法。

(6)故障潜伏期判断:对潜在故障到功能故障的

间隔时间进行分析,若从潜在故障点到功能故障点的时间较长,表示该故障潜伏期较长,则可将故障预测功能分配至地面系统;若从潜在故障点到功能故障点的时间较短,表示该故障潜伏期较短,则可将故障预测功能分配至机载系统。

(7)算法精度判断。

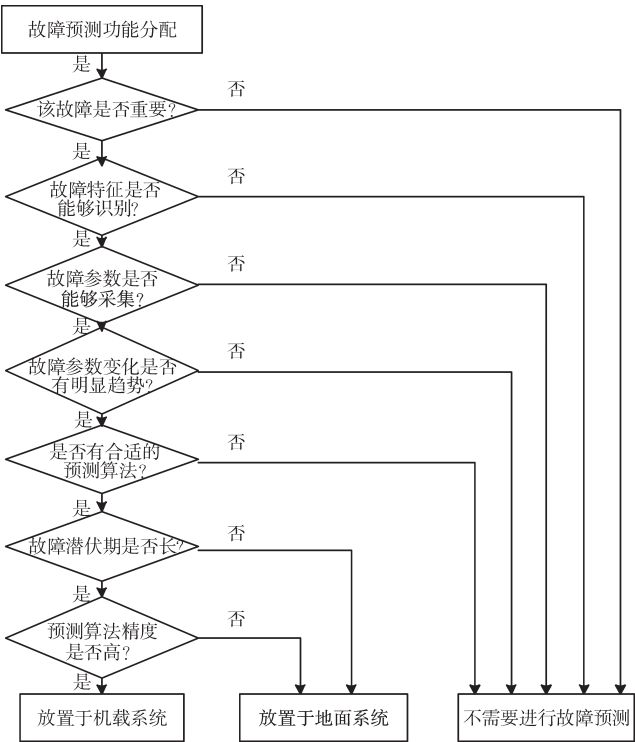


图8 故障预测功能分配逻辑决断方法

4.2.4 趋势分析功能分配

部件的趋势分析功能分配逻辑决断方法如图 9 所示。逻辑判断过程包含部件性能趋势重要性判断、参数趋势判断、参数可采集性判断。

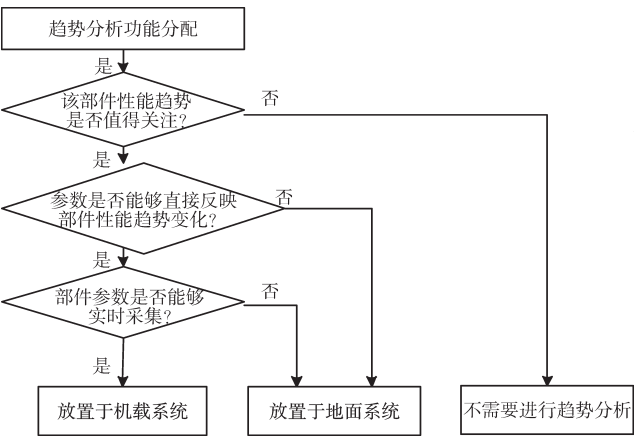


图9 趋势分析功能分配逻辑决断方法

4.3 AHP 层次分析法

AHP是由 THOMAS 等提出的一种层次权重分析

方法,能定量描述同一层次元素之间比较的重要性程度,通过数学方法计算每一层次元素相对重要性的权重,是定性分析与定量分析相结合的分析方法^[16]。该方法可实现功能分配的定量分析,可应用于故障诊断与故障预测功能分配。

以发动机典型振动故障(转子不对中)的诊断功能分配为例,采用 AHP 层次分析方法进行功能分配过程如下:

(1)建立多层次结构模型。根据决策目标和需要考的因素及决策对象之间的相互关系,将其划分为最高层、中层和最低层,并绘制多层次结构模型,如图 10 所示。

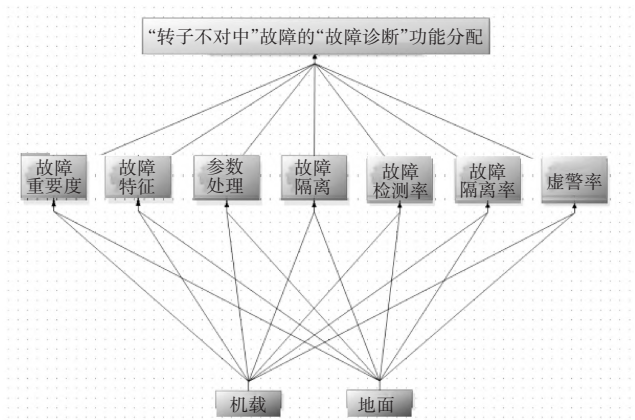


图 10 多层次结构模型

最高层:决策的目的,即“转子不对中”故障的诊断功能分配;

中间层:为了达到总目标的准则和要素,即为故障诊断功能的主要评价指标;

最低层:备选方案,即机载系统和地面系统。

(2)确定中间层要素。故障诊断功能典型评价指标见表 3。

(3)建立判断矩阵。1~9 标度法含义见表 4。采用 1~9 标度法进行评价指标之间重要度比较,建立判断矩阵 A。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1i} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2i} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & \cdots & 1 & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{ni} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 为 A_i 要素与 A_j 要素之间比较的相对重要性。

对表 3 中故障诊断评价指标进行相对重要度分

析,结果见表5。

表 3 故障诊断功能评价指标

评价指标	说明
故障重要度	根据发生故障所造成后果的严重程度;故障的发生是否会对发动机的利用率和安全性造成影响;是否会造成经济上的影响以及是否会影响飞机执行任务来确定评价尺度。
故障特征	根据该故障的特征是否明显,能否识别该故障的特征来确定评价尺度。
参数采集	根据该故障对应参数是否能够实时采集并进行处理来确定评价尺度。
故障隔离	根据故障能否被隔离到具体的 LRU 来确定评价尺度。
故障检测率	根据故障检测率的高低来确定评价尺度。
故障隔离率	根据故障隔离率的高低来确定评价尺度。
虚警率	根据虚警率的高低来确定评价尺度。

表 4 1~9 标度法含义

相对重要性权重	含义
1	同等重要
3	稍微重要
5	相当重要
7	明显重要
9	绝对重要
2 4 6 8	上述两相邻判断的折中值

表 5 相对重要度分析结果

A	评价尺度									B
	9	7	5	3	1	3	5	7	9	
故障重要度	√									故障特征
故障重要度		√								参数采集
故障重要度							√			故障隔离
故障重要度					√					故障检测率
故障重要度			√							故障隔离率
故障重要度						√				虚警率
故障特征					√					参数采集
故障特征								√		故障隔离
故障特征							√			故障检测率
故障特征						√				故障隔离率
故障特征								√		虚警率
参数采集									√	故障隔离
参数采集							√			故障检测率
参数采集						√				故障隔离率
参数采集								√		虚警率
故障隔离			√							故障检测率
故障隔离	√									故障隔离率
故障隔离				√						虚警率
故障检测率			√							故障隔离率
故障检测率								√		虚警率
故障隔离率									√	虚警率

(4)一致性检验及权重计算。利用“yaahp”层次分析法软件对判断矩阵A进行一致性检验。

$$C_r = \frac{C_l}{R_l} = \frac{\frac{\lambda - n}{n - 1}}{\frac{n - 1}{R_l}} = 0.0927 \tag{2}$$

式中:λ为矩阵A的最大特征值;n为矩阵A的阶数;C_l为一致性指标;R_l为随机一致性指标;C_r为一致性比率。当C_r值小于0.1时,一致性检验通过。

经计算,机载权重为0.1307,地面权重为0.8693,因此可将“转子不对中”故障的诊断功能分配至地面系统。

5 总结

(1)提炼先进发动机及飞机健康管理系统组成及功能特点,在OSA-CBM标准架构要求的基础上,结合健康管理系统用户需求,为明确各功能模块之间的关联性以及细化模块功能,提出了一种通用细化的EHM系统功能架构,实现对数据采集与处理、状态监测、故障诊断、趋势分析、寿命管理等核心功能的全面覆盖。

(2)针对目前国内外在系统功能架构规划中缺少将具体需求分配至机载系统和地面系统的问题,提出了一种易操作的功能分配与优化方法,实现了基于具体部件和故障的功能分配。

(3)建立状态监测、故障诊断、趋势分析和寿命管理的功能分配逻辑决断图,并采用AHP层次分析法,计算得到“转子不对中”故障的预测功能分配至地面系统权重为0.8693,远大于机载系统权重,实现了基于发动机振动故障实例的定量功能分配。

所提出的方法可推广应用于军、民用航空发动机健康管理系统设计过程,为机载和地面系统功能设计提供支撑。

参考文献:

[1] 李少尘,陈敏,胡金涛,等. 航空燃气涡轮发动机气路故障诊断进展综述[J]. 航空发动机,2022,48(2):33-49.

LI Shaochen, CHEN Min, HU Jintao, et al. A review of research progress on aircraft gas turbine engines gas path fault diagnosis [J]. Aeroengine,2022,48(2):33-49.(in Chinese)

[2] 尉询楷,冯悦,刘芳,等. 军用航空发动机PHM发展策略及关键技术[J]. 航空动力学报,2011,26(9):2107-2115.

WEI Xunkai, FENG Yue, LIU Fang, et al. Development strategy and key prognostics health management technologies for military aero-engine in China[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9):2107-

- 2115.(in Chinese)
- [3] 尉询楷, 杨立, 刘芳, 等. 航空发动机预测与健康[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 29-30.
- WEI Xunkai, YANG Li, LIU Fang, et al. Aeroengine peognostics and health management[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 29-30.(in Chinese)
- [4] 尉询楷, 刘芳, 陈良峰, 等. 航空发动机健康管理用户的诊断预测指标体系[J]. 航空发动机, 2012, 38(5): 27-34.
- WEI Xunkai, LIU Fang, CHEN Liangfeng, et al. Diagnostic and grognostics metrics of aeroengine health management users[J]. Aeroengine, 2012, 38(5): 27-34.(in Chinese)
- [5] 杨天策, 张瑞, 蔡景. 航空发动机机载健康管理系统设计方法[J]. 航空发动机, 2023, 49(6): 6-13.
- YANG Tiance, ZHANG Rui, CAI Jing. Design method of aero-engine airborne health management system[J]. Aeroengine, 2023, 49(6): 6-13.(in Chinese)
- [6] 李军, 杨旭. 航空发动机健康管理系统功能架构[J]. 航空动力, 2019, 6(1): 71-74.
- LI Jun, YANG Xu. Aeroengine health management system functional architecture[J]. Aerospace Power, 2019, 6(1): 71-74.(in Chinese)
- [7] 尉询楷, 冯悦, 刘芳, 等. 航空发动机健康管理系统架构研究[C]//探索 创新 交流-第五届中国航空学会青年科技论坛文集. 南昌: 中国航空学会, 2018: 188-200.
- WEI Xunkai, FENG Yue, LIU Fang, et al. Aeroengine prognostic and health management architecture [C]//Exploration, Innovation and Exchange-the 5th China Aviation Science and Technology Forum. Nanchang: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2018: 188-200.(in Chinese)
- [8] 吴登勇, 张廷银, 仇宏迪, 等. PHM在机柜式系统中的应用研究[J]. 信息技术与信息化, 2017, 1(5): 117-121.
- WU Dengyong, ZHANG Tingyin, QIU Hongdi, et al. Research on application of PHM in cabinet system[J]. Information Technology and Informatization, 2017, 1(5): 117-121.(in Chinese)
- [9] Wheeler K R, Kurtoglu T, Poll S D. A survey of health management user objectives in aerospace system related to diagnostics and prognostic metrics[J]. International Journal of Prognostics and Health Management, 2010, 1(3): 1-9.
- [10] 曲昌琦, 毛利民, 周岩, 等. 面向复杂装备PHM数据体系架构的研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(4): 1-9.
- QU Changqi, MAO Limin, ZHOU Yan, et al. A research on PHM data system architecture for complex equipment [J]. Computer Measurement and Control, 2021, 29(4): 1-9.(in Chinese)
- [11] Atlas L, Bloor G, Brotherton T, et al. An evolvable trireasoner IVHM system[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Washington: IEEE Computer Society, 2001: 3023-3037.
- [12] 冯冰. 民机发动机机载健康管理功能简述[J]. 科学技术创新, 2018, 1(23): 68-69.
- FENG Bing. Introduction of airborne health management function of civil aircraft engine[J]. Scientific and Technological Innovation, 2018, 1(23): 68-69.(in Chinese)
- [13] 钟青, 张其善. 基于多线程的VHF地空数据链网关设计与实现[J]. 航空学报, 2000, 21(6): 558-560.
- ZHONG Qing, ZHANG Qishan. Multithread-based design and implementation of VHF air/ground data link gateway system for caac [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2000, 21(6): 558-560.(in Chinese)
- [14] 王维, 陈啸. 浅析QAR数据分析对民航机务维修的作用和影响[J]. 科技创新导报, 2015, 12(36): 30-32.
- WANG Wei, CHEN Xiao. The role of QAR data in locomotive maintenance[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(36): 30-32.(in Chinese)
- [15] 杨波, 陈雅, 王旻晖. 舰船装备海上维修方式决策方法探讨[J]. 火炮发射与控制学报, 2014, 35(1): 83-87.
- YANG Bo, CHEN Ya, WANG Minhui. Discussion about maintenance mode decision method for warship weapon equipments[J]. Journal of Gun Launch and Control, 2014, 35(1): 83-87.(in Chinese)
- [16] 湛文武, 夏云云, 雷宏. 基于灰色关联度和AHP层次分析法评价定风速下的土遗址劣化效应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(3): 311-317.
- ZHAN Wenwu, XIA Yunyun, LEI Hong. Evaluation of the degradation effects of earthen sites at constant wind speed based on gray correlation degree and analytic hierarchy process[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2021, 57(3): 311-317.(in Chinese)

(编辑: 贺红井)