

文章编号:1000-8055(2009)11-2589-06

航空发动机预测健康管理系统的 设计的关键技术

姜彩虹^{1,2}, 孙志岩², 王 曦¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 介绍了航空发动机预测健康管理(EPHM)系统的定义、设计目标及其功能;结合 EJ200, F119 等国外第 4 代战斗机发动机健康管理系统的技术特点,设计了航空发动机预测健康管理系统与飞机、发动机的交联方案;完成了航空发动机在线机载 EPHM 系统及离线 EPHM 系统的基本结构设计;提出了航空发动机机载预测健康管理系统的技术指标;总结归纳了航空发动机预测健康管理系统的核心技术。

关 键 词: 发动机; 预测; 健康管理; 故障诊断

中图分类号: V233.7

文献标识码: A

Critical technologies for aero-engine prognostics and health management systems development

J IANG Cai-hong^{1,2}, SUN Zhi-yan², WANG Xi¹

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: The definition, design objective and functions of engine prognostics and health management (EPHM) system were introduced in this paper. Along with the technical characteristics of EPHM systems of the fourth generation fighter engines, such as EJ200 and F119, the association scheme of a new EPHM system with its airplane and engine was discussed. The basic configurations of both on-line and off-line EPHM subsystems were further discussed. The technical specification of typical EPHM systems in modern advanced fighters was then presented. Critical technologies for aero engine prognostics and health management systems development were summarized.

Key words: engine; prognostics; health management; fault diagnosis

为了满足先进战斗机在超声速巡航、过失速机动、隐身性能、短距起飞垂直着陆、低寿命期费用和高可靠性等几方面的要求^[1],国外先进的航空发动机如 EJ200, M88, F119, F135, F136 等第 4 代战斗机发动机及先进的商用和航天飞机发动机都采用了发动机健康管理(engine health man-

agement, 简称 EHM) 技术,实现了发动机较高的性能、较低的耗油量、更高的可靠性、更好的维护性和保障性^[2-4].空军方面积极参与军用发动机健康管理系统的研究与发展,并制定了相应的视情维护计划以延长发动机在翼时间和降低维护成本^[5].我国军用航空发动机的健康管理水平与国

收稿日期:2008-11-10; 修订日期:2008-12-17

作者简介:姜彩虹(1965-),女,山西潞城人,研究员,博士生,主要从事航空发动机控制系统设计技术研究。

际先进水平有较大的差距,重要的发动机参数主要依靠座舱仪表显示,由飞行员目视监视.如何利用数字电子计算机技术自动监视发动机的健康状况、预测诊断发动机故障、延长发动机使用寿命、保证发动机安全工作和降低维护成本成为研制新一代航空发动机的重要研究内容之一.

1 发动机预测健康管理系统

发动机预测健康管理(engine prognostics and health management,简称 EPHM)系统是具有状态监控、故障诊断和预测及寿命管理功能的系统^[6].预测健康管理系统的设计目标是能够对发动机状态进行实时监控,自动定位已发生故障的部件并预测潜在的故障,自动提交诊断和预测报告给飞机综合管理系统,给出维修建议,实现视情维修^[7].EPHM 系统的应用可以减少发动机定检及维修次数,减少维修工作量、备件数量及停机时间,优化维修计划,从而降低维修费用,最终提高发动机可靠性、维修性和安全性^[8].预测健康管理是一项建立在机械工程、测试技术、信号处理、计算机应用技术和人工智能等众多理论基础上的综合性科学技术.

1.1 状态监控

状态监控用于确定发动机整机、分系统及各零部件的工作状况,包括气路监控、滑油监控、振动监控和发动机限制参数监控,当参数超限时进行告警和处置.

1.2 故障诊断和预测

故障诊断和预测是通过对发动机气路监控参数的分析,评估发动机性能,诊断发动机是否出现故障.当发动机性能衰减时,对发动机机载实时模型进行自适应修正,对控制规律进行调整;当发动机性能异常时,通过对发动机主机机械损伤、发动机振动、润滑、传动和燃油控制等系统的机械状况分析^[9],并与性能状况参数综合分析,探测和定位故障位置,进行自动应急处置;对性能状况和机械状况参数进行趋势分析,实现故障预测,给出维修建议.

1.3 寿命管理

寿命管理是统计、计算和跟踪发动机整机和关键零部件的工作时间寿命、低循环、日历寿命并计算寿命消耗,给出有限寿命零部件的剩余寿命,提出检查或更换建议^[10].

2 EPHM 系统的基本结构

发动机预测健康管理系统包含两个子系统,

机载的在线 EPHM 系统和地面的离线 EPHM 系统.机载 EPHM 系统收集数据,完成自检和飞行中的健康管理,例如检测、评估、预报和建议等功能.飞行中的数据和报告被转入地面离线系统完成进一步分析和决策^[11].

2.1 机载 EPHM 系统基本结构

机载 EPHM 系统有独立的 EPHM 计算机,主要包括数据管理、健康分析、故障诊断和寿命分析等 4 个主要功能模块,结构框图见图 1.数据管理模块的功能是融合数据信息,即对从飞机综合管理系统获得的飞行参数、从监控传感器获得的发动机监控参数、从数控系统电子控制器获得的控制传感器测量的参数和发动机模型计算的数据进行融合、提取特征值^[12].健康分析模块接收数据管理模块的数据信息和特征值,融合后进行发动机长期变化趋势分析^[13].故障诊断模块接收数据管理模块和健康分析模块的数据和信息,进行基于模型的发动机及重要部件的症状检测和性能、机械故障诊断;接收数控系统对自身故障诊断(包括电子控制器硬件电路自检、软件自检、传感器、执行机构的故障状态检测等)的结果;并对数控系统故障诊断结果和发动机故障诊断结果进行综合分析,完成故障定位和排序,产生故障诊断报告,发出给飞机综合管理系统.同时,寿命分析模块接收数据管理模块和健康分析模块的数据和信息,利用寿命模型进行消耗寿命和剩余寿命估算,与趋势分析数据综合后,产生预测报告,发出给飞机综合管理系统^[14].

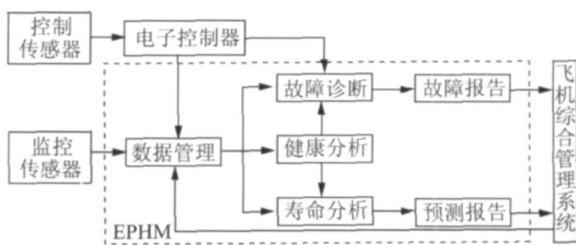


图 1 机载预测健康管理系统结构框图

Fig. 1 On-board EPHM system architecture block diagram

2.2 离线 EPHM 系统基本结构

离线 EPHM 系统的功能是接收机载 EPHM 系统记录的发动机运转状况数据和故障诊断报告、故障预测报告等信息,进一步分析发动机健康状况并给出诊断报告和维修决策.离线预测健康管理系统与机载预测健康管理系统的技术不同,离线 EPHM 系统是基于发动机非线性模型和

专家知识的故障诊断技术,其故障树更详尽,分析诊断方法更复杂^[15]。

离线 EPHM 系统包括数据回放模块、故障预测诊断和寿命管理模块、维修辅助专家系统模块。数据回放模块可以重现问题发生期间发动机的工作状态,为保障工程师和维修人员深入研究发动机发生的问题提供支持。预测诊断和寿命管理模块通过离线的数据处理和信息融合实现部件使用寿命分析和发动机部件健康状况趋势分析,并对在线 EPHM 系统的健康管理结论进行综合、判别和决策,实现基于发动机状态的维修。维修辅助专家系统模块用于帮助维修人员发现发动机难于诊断的复杂故障并给出维修建议。

3 EPHM 系统与飞机、发动机的交联

航空发动机预测健康管理系统与发动机数控系统、飞机综合管理系统和地面的离线预测健康管理系统是相互交联的。

3.1 国外预测健康管理系统的交联情况

国外第 4 代航空发动机基本都有独立的数字电子装置完成健康管理功能,如 EJ200 发动机的监控装置和 F119 发动机的综合发动机诊断装置^[2]。

每台 EJ200 发动机配装 1 台数字电子控制器(DECU),一架飞机配 1 台监控装置(engine monitoring unit,简称 EMU),与左、右发的数字电子控制器借助 1 条 MIL-BUS 1553 总线进行数据通

讯。DECU 给 EMU 提供大量的数据和信息,包括发动机控制信号、发动机监控信号、DECU 的 BIT 数据、发动机事故数据和 DECU 配置数据等。EMU 给 DECU 也提供了发动机振动警告、发动机性能重新恢复额定值数据和维护人员点火要求等数据信息。数字电子控制器也完成部分监控功能,数字电子控制器软件的 65 %是监控软件,用于故障的判定、定位和容错控制。EMU 和 DECU 一起完成左、右两台发动机的健康管理。EJ200 发动机监控系统与发动机控制系统的信号交联如图 2 所示^[16]。EMU 与飞机系统、地面设备和发动机控制系统的信号交联如图 3 所示^[17]。

每台 F119 发动机配有 2 台用于发动机控制的全功能数字电子控制器和 1 台综合发动机诊断装置(comprehensive engine diagnostic unit,简称 CEDU)^[18]。这些装置与飞行器的通讯是由 MIL-STD-1553 总线完成的。诊断装置和发动机控制器联合完成发动机的故障诊断和健康管理功能。发动机控制器配置了机载自适应发动机模型,采用卡尔曼滤波器估算发动机参数,实现故障容错。诊断装置完成故障记录、故障数据存储、部件寿命消耗情况计算和健康趋势分析等功能。

3.2 新型航空发动机 EPHM 系统交联设计方案

机载在线 EPHM 系统与飞机、发动机和离线 EPHM 计算机等都有交联,交联设计方案参见图 4。

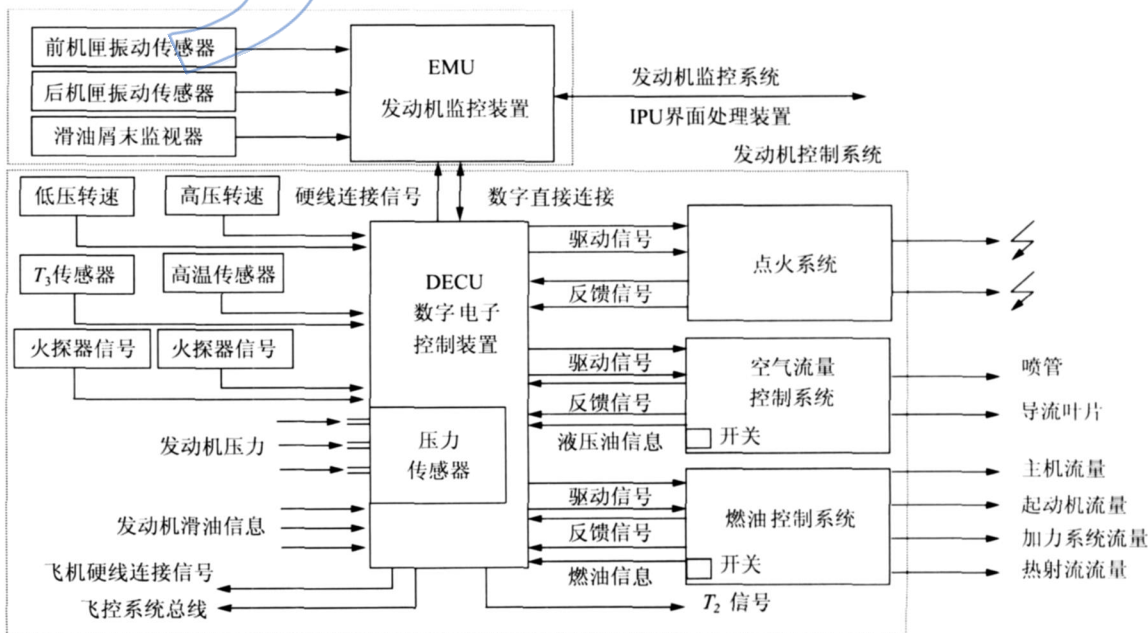


图 2 EJ200 发动机监控系统的信号交联

Fig. 2 Signal association of EJ200 monitoring system

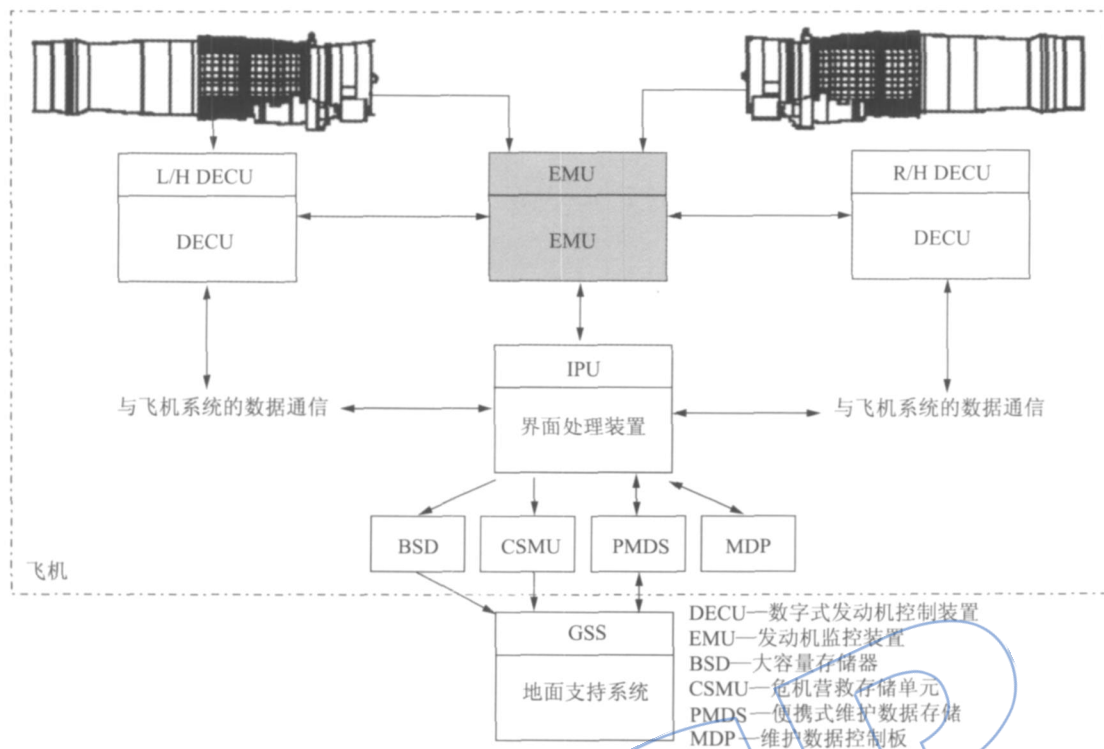


图 3 EJ200 发动机监控系统数据互联

Fig. 3 Date flow of the EJ200 engine monitoring system

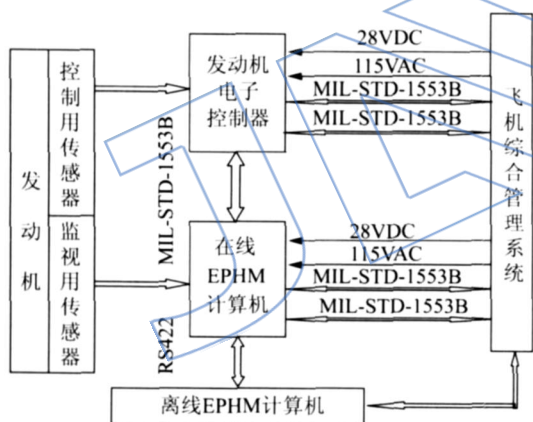


图 4 EPHM 系统关联方案

Fig. 4 EPHM system association scheme

3.2.1 机载 EPHM 系统与飞机的交联

机载 EPHM 系统与飞机的硬件交联主要有电源和总线,软件交联主要是数据传输。机载 EPHM 系统由飞机提供电源,主电源为 28 V 直流电源,备份电源为 115 V 交流电源。机载 EPHM 计算机有两个 MIL-STD-1553B 总线接口,与飞机综合管理系统进行数据传输。接收飞机综合管理系统的数有油门杆角度、飞行高度、飞行 Ma 数,以及攻角与侧滑角等飞机的其它参数;发送给飞机综合管理系统的数有三类,一类为飞机进行健康管理所需的发动机工作状态参数,另一类

为发动机健康管理系统诊断的结果,即发动机故障预测报告和发动机故障诊断报告(含维修建议),还有一类是发动机健康管理系统委托飞机海量存储器保存的发动机数据。

3.2.2 机载 EPHM 系统与发动机的交联

EPHM 系统与发动机的交联包括与发动机主机的交联和与发动机控制器的交联,主要指传感器交联和数据交联。控制用传感器的信号连接到发动机电子控制器,监视用传感器的信号连接到在线 EPHM 计算机。EPHM 计算机与发动机控制器通过 MIL-STD-1553B 数据总线进行数据传输,从发动机电子控制器获得发动机工作状态参数和控制系统故障诊断信息等数据;从监视用传感器获得发动机监视参数。

3.2.3 机载 EPHM 系统与离线 EPHM 系统的交联

机载 EPHM 系统与离线 EPHM 系统的交联是指机载 EPHM 计算机与离线 EPHM 计算机通过通讯接口进行数据传输。在发动机停车状态下,离线 EPHM 计算机接收机载 EPHM 计算机在发动机运转过程中存储的发动机工作状态参数、发生的事件、故障分析过程中提取的特征值、发动机故障预测报告和发动机故障诊断报告及寿命消耗

量与剩余寿命等信息数据,以便进行离线健康管理。

4 机载预测健康管理系统技术指标

发动机故障按照其危害程度分为一般性故障、致命性故障和灾难性故障三类。健康管理系统要对这三类故障进行故障诊断和预测。衡量机载预测健康管理系统的技术指标通常有故障检测率、故障定位率和虚警率。

故障检测(fault detection)率 F_d 是健康管理系统能检测出的一般性故障/致命性故障/灾难性故障占有可识别故障的百分比。故障定位率即故障隔离(fault isolation)率 F_i 是健康管理系统能把发生的一般性故障/致命性故障/灾难性故障隔离定位到单元体的百分比。灾难性故障的检测目标是 100%。NASA 第二代可重复使用的运载火箭系统级的健康管理规范规定为 96% 的可识别飞行致命故障必须被检测(即 $F_d > 0.96$),并且 89% 必须被隔离(即 $F_i > 0.89$)^[3]。国外第 4 代战斗机发动机都采用了内建自测试(BIT)技术。BIT 是指在电子设备内部集成了对其自身故障进行自动检测并能向外报告故障状态的技术。F119 发动机的数字发动机控制器和综合发动机诊断装置要求 BIT 的内部故障隔离率大于 95%^[2]。航空发动机通常要求发动机整机故障检测率 98%,故障定位率 90%。

传感器故障、线路故障、电子计算机故障,或由于设计不完善产生的处理软件误差等都能引起误报警,虚警(false alarm)率 F_a 也是衡量机载预测健康管理系统的一项重要技术指标。误报警容易引起经济上的浪费和人们精神放松带来的危害,所以虚警率必须精确到一定的高度。NASA 第二代可重复使用的运载火箭规定 $F_a < 0.11$ 。为了提高生存概率,最新估值建议 $F_a < 0.002$ ^[3]。航空发动机通常要求发动机虚警率不大于 0.01。

5 结 论

我国航空发动机的预测健康管理水平与国外有较大的差距,需要突破的关键技术很多,归纳起来有三个方面。第一,测试参数检测方法及机载传感器的设计与应用,如滑油油品传感器、滑油油位传感器、发动机进口工质及出口工质传感器^[19]、叶尖间隙传感器、振动传感器和新型光纤传感器等在航空发动机上的应用^[20]。第二,数据管理及信息融合技术,包括发动机故障模式及故障库的

建立、部件寿命跟踪及剩余寿命评估技术和维修记录等^[24]。第三,状态特征仿真和智能诊断分析技术,包括机载发动机自适应实时模型的建模技术;基于发动机自适应实时模型产生虚拟传感器,来增加传感器可靠性的解析冗余设计技术;故障判断、预测准则及相应处理对策等技术^[22]。

参考文献:

- [1] 林左鸣. 战斗机发动机的研制现状和发展趋势[J]. 航空发动机, 2006, 32(1): 1-8.
LIN Zuoming. The current development and future trends of fighter engines[J]. Aeroengine, 2006, 32(1): 1-8. (in Chinese)
- [2] 梁春华. 第 4 代战斗机发动机控制系统和其技术特点[J]. 航空发动机, 2007, (增刊): 76-81.
LIANG Chunhua. The fourth generation fighter engines control system and its technology characteristics [J]. Aeroengine, 2007, (suppl.): 76-81. (in Chinese)
- [3] Brown E N, Chidambaram B, Aaseng G B. Applying health management technology to the NASA exploration system of systems[R]. AIAA 2005-6624.
- [4] Schweikhard K A, Richards W L, Theisen J. Flight demonstration of X-33 vehicle health management system components on the F/A-18 systems research aircraft [R]. NASA/TM-2001-209037.
- [5] Holtz C, Smith G, Friend R. Modernizing systems through data integration: a vision for EHM in the United States Air Force[R]. AIAA 2004-4049.
- [6] Roemer M. Testing of a real-time health monitoring and diagnostic system for gas turbine engines[R]. AIAA 98-3603, 1998.
- [7] Green A J. The development of engine health monitoring for gas turbine engine health and life management [R]. AIAA 98-3544, 1998.
- [8] Creitzer F L, Kangas L J, Terrones K M. Gas turbine engine health monitoring and prognostics[R]. Las Vegas, Nevada, USA: The International Society of Logistics (SOLE) 1999 Symposium, 1999.
- [9] Orsagh R F, Sheldon J, Klenke C J. Prognostics/ diagnostics for gas turbine engine bearings [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2003. Georgia, U. S. A.: [s. n.], 2003.
- [10] Suarez E L, Duffy M J, Gamache R N, et al. Jet engine life prediction systems integrated with prognostics health management [C]// 2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2004: 3596-3602.
- [11] Jaw L C. Recent advancements in aircraft engine health management (EHM) technologies and recommendations for the next step [R]. ASME, GT2005-68625, 2005.
- [12] Kacprzynski G J, Deshmukh S. Poseidon: the US navy's comprehensive health management software for LM2500 MGTs—Part 1 [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2003. Georgia, U. S. A.: [s. n.], 2003.

- [13] Volponi A J , Brotherton T , Luppold R. Development of an information fusion system for engine diagnostics and health management[R]. AIAA 2004-6461 ,2004.
- [14] Jaw L , Wang Y T , Friend R. ICEMS: intelligent condition-based engine/ equipment system[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo 2001. New Orleans , Louisiana , U. S. A :[s. n.] , 2001.
- [15] Tumer I Y , Bajwa A. A survey of aircraft engine health monitoring systems[R]. AIAA 98-2528 , 1998.
- [16] Hoerl F , Richter K. Monitoring the EJ200 engine[C]// Proceedings of the 18th Symposium. Stuttgart :[s. n.] ,1995.
- [17] Barragan J M. Engine vibration monitoring and diagnosis based on on-board captured data[R]. Manchester , U. K. : NATO/ RTA AVT Symposium , 2001.
- [18] Budrow S. System analysis and integration of diagnostics and health management for the F119-PW-100[R]. AIAA 98-3545 , 1998.
- [19] Smiths Aerospace. Intelligent tools for prognostics health management and its application to avionics[M]. [S. l.] : Smiths Aerospace Proprietary Information , CALCE , 2004.
- [20] Simon D L , Garg S , Semega KJ. Sensor needs for control and health management of intelligent aircraft engines[R]. NASA/ TM-2004-213202 , 2004.
- [21] Litt J , Simon D L , Meyer C. NASA aviation safety program aircraft engine health management data mining tools roadmap[R]. NASA/ TM-2000-210030 , 2000.
- [22] Dr. Scheuren W. Safety and military aircraft joint strike fighter prognostics and health management[R]. AIAA 98-3710 , 1998.