DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2009.19.009

航空智能发动机的研究进展

Review of Intelligent Aeroengine

中国燃气涡轮研究院　黄春峰　刘志友

黄春峰

高级工程师。1982 年毕业于南昌航空大学，北京航空航天大学硕士研究生。现从事航空发动机情报和翻译工作，研究方向为国外发动机预研、试验与制造技术跟踪研究。在核心期刊发表论文 80 多篇，编撰出版《航空发动机技术创新与发展》系列情报研究文集，《世界航空发动机预研技术计划的进展》、《国外航空发动机新技术》、《航空涡轮发动机静态和瞬态压力、温度测量探针技术》、《现代航空发动机测试技术的发展》等 4 部发动机技术情报研究文集。

智能发动机是一种 21 世纪正在发展之中的先进新概念航空发动机技术，是美国 IHPTET 计划及其后继 VAATE 计划的最核心内容，将是对综合信息、推进系统和综合飞行 / 推进控制技术的挑战。状态监视和故障诊断技术是智能发动机的关键技术之一。未来的 6 代机主要注重人工智能，特别是智能发动机技术的应用。

航空发动机的技术发展水平是一个国家科技、军事实力和综合国力的重要标志。美国在世界航空发动机技术方面处于领先地位。从 1988 年开始实施的综合高性能涡轮发动机技术（IHPTET）计划是迄今为止世界上范围最广、创新度最高、规模最大、影响力最强、投资最多的发动机技术预研计划。尽管 IHPTET 计划第 3 阶段目标还未达到，研制工作仍在继续，但是美国国防部、NASA 和国防预研局已制定出了一个延续到 2017 年的推进技术长期发展计划，就是从 2006 年开始实施 IHPTET 计划的后继计划——VAATE 计划，即通用、可承担起的先进涡轮发动机计划。

VAATE 计划的宗旨是在提高发动机性能的同时，强调降低生产和维修成本，主要目的是开发、验证经济可承受的多用途核心机技术，再从核心机研制出更高性能、更高耐用性和更低费用的民用和军用发动机。VAATE 计划的发展重点是经济可承受性，总目标是到 2017 年开发出革命性和创新性的技术，使先进军用发动机的经济可承受性提高到 F119 发动机的 10 倍，推重比提高 20% ～ 30%，耗油率降低 25% ～ 30%，研制、生产和维修成本降低 50%。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

VAATE计划设有重点领域组、共用技术组和技术应用小组。在重点领域组中设有通用核心机、智能发动机和耐久性3个小组。智能发动机小组负责将开发、验证和转化先进空气动力学、先进材料和革新结构与提供传感器、主动控制器、飞机与发动机一体化、进口与喷口一体化、实时诊断和人工智能技术结合在一起，研制并综合那些提供耐久性长、适应性强以及耐损伤的发动机状态和寿命管理特征的技术，实现对发动机的健康管理，提高发动机的性能、可靠性和寿命。这正是VAATE计划的核心内容。

美国NASA在2006年制定的《民用航空技术10年规划》中，特别将“维修间隔期能够自我诊断和重新构型的智能发动机和机械动力系统”、“经济可承受的新型传感器”等确定为未来10年美国在民用航空领域具有挑战性的研究与技术(R&T)发展项目。

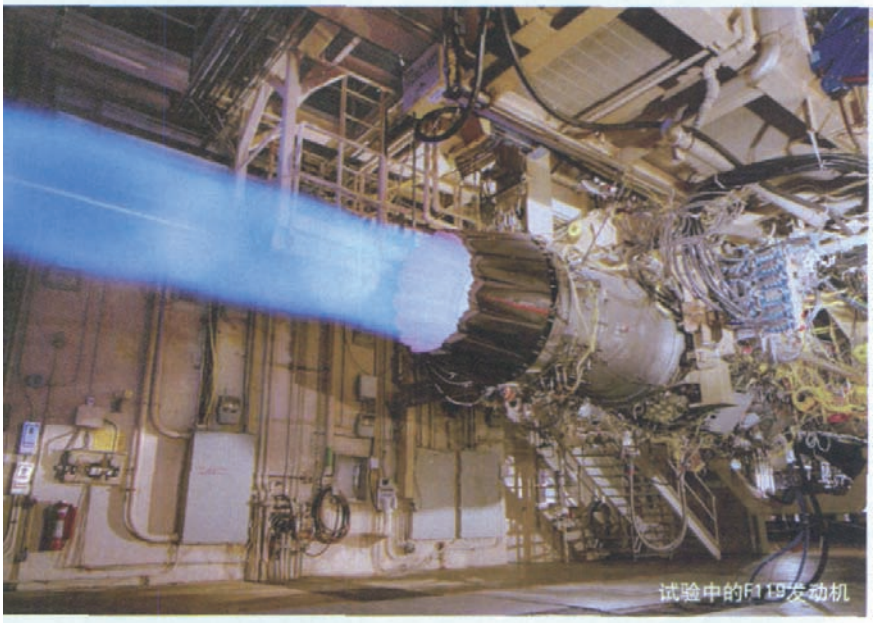
美国国际战略和评估中心智囊专家理查德·费舍尔载文指出：面对中俄5代机竞争的压力，美军必须采购足够数量的5代机，甚至研发6代机，以保持空中优势。未来的6代机主要注重人工智能，特别注重智能发动机技术的应用。科幻电影《绝密飞行》中艾迪就是一架由人工智能控制的战斗机。

航空智能发动机就是此背景下发展起来的。

智能发动机的概念与特点

目前的发动机是设定的、不灵活的，不能对变化的环境条件作出响应，导致在设计、使用和维修概念方面留有很大的裕度，使其性能受到不利影响并使保障成本增加。因此，未来的军民用发动机将发展成为智能发动机。所谓智能，就是不仅能感受，而且能思维，既可按预定程序操作也可根据思维去操作。此过程用一个词来描述就是“学习”，通过提高“学习”能力，研制出超级智能发动机。

智能发动机是一种先进的新概念航空发动机技术，关键部分是发动机智能管理系统。该系统具有控制发动机性能和诊断发动机“健康”状况的能力，这2种能力是息息相关的。智能发动机通过发动机和各个部件的自适应控制，可以延长发动机寿命。同时，智能发动机依靠传感器数据、专家模型和二者的融合，可全面了解环境和发动机的状态；广泛采用信息融合技术(每台发动机就是1个网站)，发动机的状态监视和管理(EHM)能够实现自动化、自我诊断和自我预测，对发动机的性能和状态进行主动的自我管理，根据环境平衡任务要求，提供最佳的信息以作出决策，并采取物理动作执行这些决策；智能发动机一般不需要维修，除非自检或检测系统发出维修信号并准确指出需要采取的维修措施。


试验中的F119发动机

智能发动机的关键技术

1 发动机智能控制技术

(1)发动机智能控制的任务与内容。发动机是飞机的“心脏”，是推动飞机快速发展的源动力。要使飞机“心脏”健康地工作，要靠“动脉、经脉和神经”系统的优秀控制实现。现代航空发动机控制系统已是一个多变量、时变、非线性以及多功能的复杂系统，要求控制的参数越来越多(目前已达6～10个，未来将增加到20个)，新一代变循环发动机、智能发动机以及飞行/推进系统一体化控制都要求有更多的控制变量，控制器必须具有更强的计算能力、逻辑功能和控制精度。传统的机械液压控制器要实现这些要求显然过于复杂，采用数字式电子控制在重量、成本和可靠性方面都有显著优势。因此，发达国家都特别重视发动机数字电子控制技术的发展，不惜花费巨资(占发动机研制费15%～30%)来研究，满足飞机最佳的战术技术或经济性能要求。

航空发动机控制系统技术发展目标是成为能提高数据处理量和防电磁干扰的光纤控制系统，它集在线性能优化、飞行和发动机集成控制、先进传感器和作动器等功能于一身。

发动机智能控制任务有：稳态控制、过度态控制和极限控制。航空发动机控制的内容包括：主燃烧室和加力燃烧室燃油流量控制；风扇和压

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气机导叶和整流叶片角度控制；尾喷管面积及收／扩喷口面积比控制；压气机级间放气活门控制；压气机和涡轮叶尖间隙主动控制；矢量推力喷管控制；内、外涵变涵道控制；反推力控制；发动机冷却控制；失速／喘振保护控制；加／减速控制；超温、超速、超压保护控制；火焰探测器控制等。

航空发动机数字电子控制系统的主要部件是数字电子控制器，由信号处理及转换电路、以微处理器为核心的数字电子计算机、输出信号转换及放大电路和电源等模块组成。微处理器通过运行程序完成信号采集、控制运算和控制信号输出的功能；通过各种执行机构，实现对发动机的控制、监视和保护。为了确保控制器可靠工作，必须解决冷却、抗振动冲击和抗电磁干扰等问题。目前电子控制器一般都采取余度设计，使电子控制器的可靠性指标达到较高的水平。

M88-III发动机

（2）航空发动机智能控制关键技术。航空发动机智能控制相关技术和主要技术难点包括：

• 精确的机载发动机实时模型建模技术；

• 高性能电子控制器设计技术；

• 二次集成和专用芯片设计技术；

• 控制器抗恶劣环境技术（冷却、电磁兼容性）；

• 先进的应用软件设计技术（实现软件的非相似余度）；

• 先进控制模态设计（多变量控制算法，各种自适应控制算法）；

• 传感器余度设计及先进的解析余度技术；

• 高速、大流量、高压力、轻重量的燃油泵及计量装置设计；

• 状态监视，软、硬件故障诊断及处理技术。

（3）航空发动机数字电子控制技术。美国目前正在实施一项未来先进控制技术研究（FACTS）计划，其目的是进一步实现动力控制系统的小型化、综合化、高性能和高可靠性。具体表现为：

• 小型化：通过采用先进轻质材料和先进系统（分布式、光纤、电驱动泵）结构，大幅度减轻控制系统的重量和体积，最终目标是使系统重量减少50%。

• 综合化：采用超高速集成电路及并行技术，提高系统的处理能力，实现动力控制，状态监视综合，进而实现飞行／推进综合控制。

• 高性能：通过研究先进的进气道、发动机、矢量喷管的控制模态和逻辑，采用先进的控制理论和综合控制提高动力装置的性能。其目标是使燃油消耗率减少5%，推力增大10%。

• 高可靠性：采用分布式系统降低控制系统的复杂性，改善维修性和可靠性；把控制器安装在远离发动机的地方；采用砷化镓和碳化硅器件制造电子控制器，采用复合材料制造油泵和计量部件，提高系统的耐高温、耐振动和抗电磁干扰能力。目标是使耐温能力达220℃。

美国研制的F119发动机采用的最先进的第3代全权数字电子控制系统（FADEC）是在一项综合、可靠和容错控制计划下发展起来的，系统可控参数达12～13个，具有双－双余度和容错能力，可以进行模块重构。由于可靠性提高，已不设液压机械备份，系统能对发动机及矢量喷管实行故障诊断和处理，具有视情维护（OCM）和后勤保障的综合诊断，并能根据飞机推进系统一体化来确定发动机的最佳工作参数。

早在20世纪80年代，美国NASA组织GE和P&W公司等通过详细评估鉴定出最值得发展的先进控制概念有：智能控制概念（IEC）、性能寻优控制（PSC）、稳定性寻优控制（SSC）、主动失速／喘振控制（ASC）、主动叶尖间距控制（ATC）、主动压气机畸变控制（SSC）、主动噪声抑制（ANS）、二次冷却气流控制（SCAC）、主动燃烧室出口径向温度分布系数控制（BPF）、主动燃油喷嘴分级（AFN）和加力燃烧室油气比优化（F/A OPT）等。其中最重要的先进控制概念是：IEC、PSC、SSC和ASC。研究结果表明，IEC大大优越于其他的控制方式，按照GE公司的计算方法，它的收益高于第2名PSC 50%。电子数字控制技术的发展方向是综合控制、分布式控制、多变量控制和智能控制，采用先进控制模态和先进的光纤控制技术、容错技术、复合材料和耐高温的电子设备。在美国FACTS计划中审查了6项新技术的应用潜力，即光纤传感器、砷化镓和高速集成电路（VHSIC）、高温电子装置、利用VHSIC技术的并行处理、高温电子驱动和作动器以及复合材料。这些技术被认为是应用于未来飞机涡轮发动机的控制和附件系统的备选技术。

2 航空发动机智能状态监视和故障诊断技术

航空发动机状态监视和故障诊断系统是智能发动机的重要关键技术之一，对监视发动机的工作状态、变化趋势和寿命消耗以及剩余寿命，保证发动机安全和可靠的运行有重要作用，它是发动机可靠性设计和管理的重要组成部分。发动机状态监视和故障诊断系统由传感器、数据采

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

集、数据处理与分析数据存储以及检索和告警等装置组成，其技术的实质就是进行状态识别或状态分类，根本任务是根据运行信息来识别设备的状态。主要有以下几种技术方法：

（1）基于数学模型的状态监控与故障诊断方法。基于直接测量系统输入输出及信号处理的方法。该诊断方法是直接测量被诊断对象有关的输出量，如果输出超出正常变化范围，则可以认为对象已经或将要发生故障。常用的方法有谱分析法、概率密度法和相关分析法等；基于状态估计的方法。被诊断过程的状态直接反映系统的运行状态，通过估计出系统的状态并结合适当模型则可进行故障诊断。状态估计的方法通常是状态观测器法及滤波器法。基于过程参数估计的方法。该方法是根据参数变化的统计特性来检测故障的发生，而后进行故障分离、估计和分类。由于可以建立故障与过程参数的精确联系，因此，这种方法比基于状态估计的方法更有利于故障的分离。

基于数学模型的故障诊断方法，其优点是能深入系统本质的动态性质和实现实时诊断，缺点是当系统模型未知、不确定或具有非线性时，这种方法不易实现。

（2）基于人工智能的状态监控与故障诊断方法。基于专家系统的方法。该方法是状态监控与故障诊断领域中研究最多、应用最广的一类智能化监控与诊断技术。它主要经历了2个发展阶段：基于浅知识（领域专家的经验知识）的状态监控与故障诊断系统和基于深知识（诊断对象的模型知识）的状态监控与故障诊断系统。基于案例的诊断方法。基于案例的推理方法能通过修订相似问题的成功结果来求解新问题。它能通过获取新知识作为案例来进行学习，不需要详细地诊断对象模型。基于案例的诊断方法的原理是：对于所诊断的对象，根据其特征从案例库中检索出与该对象的诊断问题最相似匹配的案例，然后对该案例的诊断结果进行修订作为该对象的诊断结果。

（3）基于信息融合思想的状态监控与故障诊断方法。信息融合是信息科学领域内的一项高技术，也就是将多种类型的信息融合在一起，并从中提取更多有价值信息的方法。由于监控系统中传感器数量和种类的增多，尤其是集散监控诊断系统的出现，信息融合技术也开始应用于设备诊断领域。

机械故障诊断问题中的信息融合技术包括2个方面，一是多个传感器信息的融合，以全面考察整个机组的运行情况，提高对故障特征的认识深度；二是多种诊断方法的融合，即对每一个诊断方法（专家）所提供的结论进行综合以取得更为合理、更为科学的诊断结果。

多传感器信息融合主要是根据智能发动机正常工作与异常工作时各种特征参数的变化，通过选择不同的特征信息，然后对这些信息进行数据、特征和决策融合，利用小波分析、频谱分析和功率谱分析等现代信号处理方法提取被测数据特征，采用贝叶斯（Bayaes）准则、Neyman－Pearson方法、证据理论（D-S推理）方法、神经网络、一致性理论、模糊融合技术理论进行分析、判断和决策，最终实现对发动机故障的定位和诊断。

航空发动机智能状态监视和故障诊断技术的发展方向

现代航空发动机的状态监视和故障诊断的手段有：性能状态监视、机械状态监视以及寿命管理和无损探测。F119、F135、EJ200等新研制的第4代战斗机发动机已装备了完整的状态监视和故障诊断系统，这种系统的发展是一个不断改进和完善的过程。现在，国外仍在继续研究新的状态监视和故障诊断系统，满足未来智能发动机的需要。

1 机载实时诊断系统

今后的趋势是开发机械和性能的故障诊断与寿命管理结合在一起并与控制系统综合的机载实时诊断系统，需要突破的关键技术有：提高测量数据的有效性与监视和诊断的实时性；提高性能监视和机械监视的综合性与发动机监视系统与发动机控制系统的综合性；实施寿命监视与滑油实时监视。发展这样的系统要解决的关键技术有：提高测量数据的有效性；提高监视和诊断的实时性；提高综合性；实施寿命监视；实施滑油实时监视。

2 自动测试设备（ATE）

这是实现智能发动机的自动故障诊断的工具和手段，是测试技术的集中反映。基于机器智能的自适应诊断测试信息处理技术在新一代军用领域ATE中获得了日益广泛的应用，其中较有代表性的智能技术主要有故障树、诊断专家系统、基于模型和行为以及结构特征的诊断推理技术、人工神经网络、遗传算法和模糊逻辑等。

3 交互式电子技术手册

被称之为现代武器装备维修技术又一场革命的交互式电子技术手

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

册(IETM)将专家系统、多媒体信息处理、数据库管理和电子出版等多种技术结合在一起,将预防性维护能力和诊断性维修能力结合在一起,以电磁介质将大量的操作说明、维修过程指导、技术图纸和元器件代换以及备件储备等信息精练组织,存储在智能化的“数字”技术手册内,并嵌入ATE或武器装备之中,从而建立了一个无纸张的、人机和谐的交互式维修测试与系统维护环境。其最大的好处在于大大减少了资料载体的重量和体积,有效地提高了武器装备的操作使用效能和维护测试效率,降低了图纸资料管理维护的成本费用,扩展了技术资料的通用范围。

4 远程故障诊断系统

利用网络技术实现远程故障诊断,使各航空公司之间和航空公司与科研机构之间可以实现技术手段和技术人员的共享。Internet技术和发动机诊断技术的发展为智能发动机实现远程故障诊断提供了良好的发展机遇。发动机诊断技术的发展趋势是从传统的单机现场诊断方式向分布的远程方式发展,而远程方式也逐渐从第1代的专用网络和专线连接向第2代的基于因特网的方式发展。采用远程诊断带来的好处是信息集中、资源共享、效益提高,而基于因特网的远程故障诊断更具有良好的性能价格比、开放性好和有利于技术发展的特点。

远程诊断系统的建立需要解决以下技术关键:

(1)建立跨地域远程故障诊断的体系结构。基于现有的国际互联网络,充分利用各参与单位已经建设起来的局域网络,构造一个跨地域的远程协作网络,并设计开发相应的网络软件,以完成发动机运行状态监控与可靠性管理任务。

(2)在网络环境下基于Web数据库的远程故障诊断技术专家系统。为了利用网络进行发动机故障远程协同诊断,必须使传统诊断技术的核心部分,即信号采集、信号处理与分析和故障诊断专家系统能够在网络环境中运行。

(3)创造计算机协同诊断工作技术(CSCW)环境。CSCW是指地域分散的一个群体,在计算机网络技术的支持下,共同协作完成一项研究任务。利用CSCW技术,制定协同工作协议和各级专家的协同诊断技术界面,可以使分布在不同地理区域的有关专家,通过网络共同召开协同诊断会议。

(4)中心站点及企业站点相关开放平台的保障技术。开放式平台要求资源开放、自由访问,但也必须保障系统数据的安全性和系统的运行可靠性。既要加强安全措施以防止网络用户越权访问甚至匿名访问系统数据,又要着眼于系统的易用性和可靠性,使合法用户能够迅速、便捷地获得所需服务。

(5)共享信息的标准化与规范化技术。本系统着重于各方面的资源共享,数据传送就成为重中之重。为保障数据传送的实时性和可靠性,方便合作方共享信息,需要建立信息分级处理机制,并制定一套系统各方共同遵守的标准化规范。

5 智能发动机状态监视与故障诊断系统的实际应用

这是为满足军用发动机研究和发展的状态监视与管理系统。在美国IHPTET计划和后继的VAATE计划中,智能发动机是核心内容。智能发动机的特点是发动机可以全面了解流路和机械状态,通过发动机状态监视和健康管理(EHM),能够进行自动故障诊断和维修预报,从而提高发动机的可用性和经济承受性。

(1) JSF发动机的EHM系统。JSF发动机采用了发动机状态监控管理系统(EHM)。

发动机状态监视的基本任务是测量和监视发动机控制参数。这些参数一般是独立的,供机务人员作参考,有时可用来确定发动机寿命和状态。技术人员和机械师将他们的经验用于监视,选择确定状态、诊断故障和提示需采取的维修动作等重要的参数。发动机状态管理要研究的是采集所有的经验,建立包含这些丰富知识的专家模型,将这些聪明才智提供给所有的用户,不管他们的背景和经验如何。

EHM可进一步扩展到“先导机队管理”。在美国空军,有不同的机构各自管理和维修发动机机队,它们

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

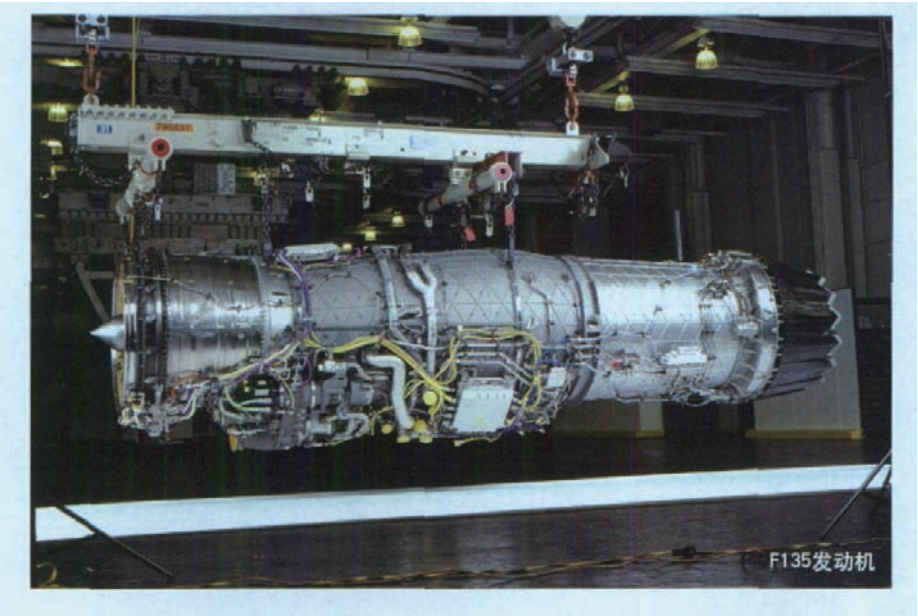
有各自的规章制度、日程安排和经费预算。这些机构之间的沟通是复杂的，而且是多变的。许多使用部门都能感觉到这种互不通气的“条条”式组织结构的存在。如果能通过一个横向通信网络将这些“条条”沟通，就能使使用部门以最低的成本使用发动机。对此，通信和数据的传递和处理速度是十分重要的。未来的通信网络必须将保障机构统一起来，为部队司令部提供手段，使其能够选择恰当的方法完成任务。这种全面的保障方法不是新的技术，但能够不断得到改进，为保障系统中的每一个人提供灵活性，改善透明性，从而降低成本。

EHM首先用传感器提供各种发动机参数的数据。这些数据一般在座舱仪表上显示，并用于发动机控制。发动机的监视功能在传感器级别上综合，其输出再与部件、发动机和机队的维修历史相结合，为使用和维修人员提供关于发动机状态的最佳信息。信息综合对先进发动机状态管理是关键。采用信息综合技术后，每台发动机就是一个网站。发动机一旦发生问题，就能够及时发现，实时用余度技术做出正确的决策，并通过网络通知有关的使用和维修部门。

（2）罗·罗公司的R^3思想。在2002年，英国罗·罗公司在发动机上装备了第一台高技术黑匣子，它能详细分析发动机的性能。新的发动机监视系统——包括激光、雷达、声学传感器和粒子探测器，是如此的完善，以致它们将首次把发动机系统放在完全科学的基础上。此系统和未来的EHM系统能够提供自动后勤保障，自动提供备件，召唤合格的维修人员。这种思想是为了以正当的理由在恰当的时间获得正确的保障和维修（get the right support or maintenance at the right time for the right reason—R^3）。R^3后勤保障方法可以包括呼叫工具、提供电子维修手册／细节、进行电子设备履历卡记录等。

（3）F119的DHM系统。美国的F119-PW-100的诊断与状态综合管理（Diagnostics and Health Management，DHM）是迄今最先进的航空发动机智能状态监视和故障诊断系统。F119燃气涡轮发动机是F－22飞机的推力系统，F119的控制系统电子装置是由2个全权限发动机数字控制器（FADECs）和一个综合的发动机诊断装置（CEDU）组成的。

装置之间的通信用同步的双裕度控制来完成。在FADECs之间，链接是二元的。用MIL-STD-1553系列母线来传输与飞行器的通信。在F－22飞行器管理系统（VMS）母线上，每个FADEC有2个主动的、可遥控的通信终端。CEDU通过F－22上与飞行器通信系统（IVCS）母线综合在一起的主动／备用遥控终端通信。



如今，F-22已经实现了武器系统的一体化，将F119的支持系统性能整合到了F-22的综合维护信息系统（IMIS）内，要求适用于不拆卸发动机即可更换的那些部件，称之为线路上可更换的单元（LRU），最终实现100%的发动机的状态监控、数据采集和给飞机提供显示和数据、故障诊断、故障隔离和维护的自动与智能化，从而满足安全性、可靠性、可维护性和可支持性的发动机系统要求，所有这些要求均由DHM性能的正确应用来支持。

结束语

智能发动机是一种21世纪正在发展之中的先进新概念航空发动机技术，是美国IHPTET计划及其后继VAATE计划的最核心内容，将是对综合信息、推进系统和综合飞行／推进控制技术的挑战。状态监视和故障诊断技术是智能发动机的关键技术之一。未来的6代机主要注重人工智能，特别是智能发动机技术的应用。

欧美航空发动机技术先进国家设计研发的第4代战斗机发动机已经成功应用智能状态监视和故障诊断的理念和技术，实现发动机状态监视、“健康管理”（EHM）、自动故障诊断和维修预报，最终在提高发动机性能的同时，改善发动机的可靠性、耐久性、环保性、适用性和经济承受性，使新一代航空发动机更富创新性，更具竞争力。

（责编　玉龙）

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net