

军用飞机供配电系统故障预测与健康健康管理关键技术



艾凤明¹, 梁兴壮¹, 董润², 李伟林²

1. 航空工业沈阳飞机设计研究所, 辽宁 沈阳 110035

2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072

摘要:随着飞机多电化和全电化的快速发展,军用飞机供配电系统结构日益复杂、维护难度加大,采用故障预测和健康管理技术对于提高军用飞机供配电系统可靠性、降低维护难度、提高维护效率、实现视情维修具有重要意义。结合军用飞机供配电系统的特点,本文从故障预测与健康健康管理(PHM)系统构型设计、数据采集需求、机载使用需求三个方面对军用供配电系统故障诊断与健康健康管理技术进行了需求分析,梳理了当前军用飞机PHM架构发展现状,并针对军用飞机供配电系统特征总结了PHM系统架构特征。针对特征参量提取、信号检测与预处理、故障预测方法、预测效果评估方法等,对PHM重点关键难点技术进行了分析。并就当前军用飞机供配电系统PHM技术发展所遇到的问题,对未来研究方向提出建议。

关键词: 供配电系统; 军用飞机; 故障预测和健康健康管理; PHM

中图分类号: V240.2

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.02.012

随着航空技术的快速发展,军用飞机的供配电系统由最初低压直流系统的形式被后续恒频交流系统、变频交流系统和高压直流系统所取代。军用飞机的供配电系统的跨越式发展和改进使得飞机的供配电效率、电源质量、供配电容量等方面有了长足的进步,但是随着供配电系统设备数量的增多,供配电系统结构变得越来越复杂。由于军用飞机任务场景多样、使用环境恶劣,对于故障的容忍度较差,军用飞机这一任务特点与先进供配电系统逐渐提高的复杂度产生了矛盾。同时,传统的定期检查修理和事后修理的策略已经不能满足先进军用飞机高可靠性、高准确率、高效率 and 低成本的维护要求。因此,如何将这一复杂系统的可靠性保持较高的水平成为当今军用飞机供配电系统设计、研究、使用和维护过程中不可忽略的一项重要课题。

20世纪70年代,研究人员在装备维护过程中逐步提出了状态监测、故障诊断、故障预测与健康健康管理(PHM)等概念^[1-2]。故障预测和健康健康管理技术是状态监控和故障诊断技术的发展和衍生,故障预测技术的目的是对出现一定

征兆的未发故障进行预判和预测,将未发故障扼杀于摇篮之中,使设备使用状态不再进一步恶劣,造成更加严重的影响。健康管理技术主要是对整个系统中不同层次的子系统、部件或元件的使用状态进行监控和管理,及时为设备维护人员提供维护数据,以便维护人员针对不同设备的不同健康状态进行视情维护,提高维护效率、降低维护成本。

本文将主要针对军用飞机供配电系统的故障预测和健康健康管理技术进行供配电系统PHM技术需求分析、梳理研究现状、进行架构设计、阐述关键难点技术,并对军用飞机供配电系统PHM技术中的一些热点问题提出研究建议。

1 军用飞机供配电系统PHM技术需求

由于技术需求定义角度众多,本节内容不力求覆盖军用飞机供配电系统PHM所有技术需求和设计要点,旨在结合军用飞机供配电系统PHM系统构型、飞机供配电系统及设备故障特征、机载环境和航空条件等要点重点分析军用飞机供配电系统PHM技术需求及设计要点。

收稿日期: 2022-09-05; 退修日期: 2022-12-11; 录用日期: 2023-01-15

基金项目: 航空科学基金(20164053029); 陕西省杰出青年科学基金(2022JC-27)

引用格式: Ai Fengming, Liang Xingzhuang, Dong Run, et al. Key Technologies of prognostic and health management of military aircraft power supply and distribution system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(02): 86-95. 艾凤明, 梁兴壮, 董润, 等. 军用飞机供配电系统故障预测与健康健康管理关键技术[J]. 航空科学技术, 2023, 34(02): 86-95.

本节将分别针对军用飞机供配电系统PHM构型设计、数据采集需求、机载使用需求三个方面对军用飞机供配电系统PHM技术需求进行阐述。

1.1 军用飞机供配电系统的PHM系统构型设计需求

军用飞机供配电系统在结构形式上可以分为集中式供配电和分布式供配电两种,集中式供配电系统是将发电机、二次电源变换器、用电负载等发电、用电设备通过配电设备、配电线路连接到集中配电中心设备上,进行统一集中供配电和配电。图1是集中式供配电系统示意图。

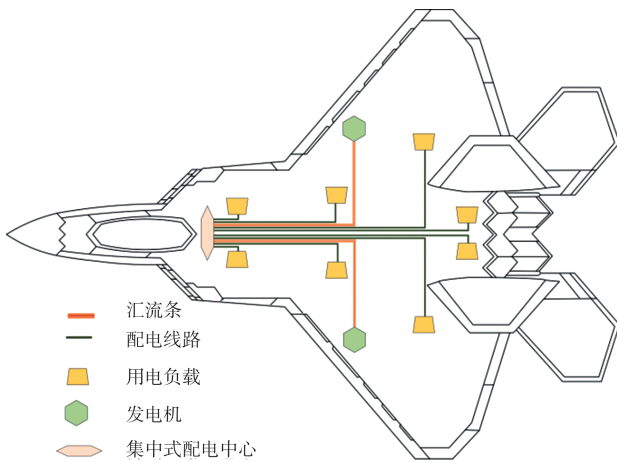


图1 集中式供配电系统

Fig.1 Centralized power supply and distribution system

分布式供配电系统则是将供配电设备与用电设备分散布置,通过分布配电设备就近进行供配电和配电,分布式供配电系统能够缩短供配电线缆的长度,分散控制、分散供电的特点能够提高供配电的可靠性。分布式特征可以存在于不同体制的供配电系统之中,交流供配电系统和直流供配电系统均可设计成为分布式供配电系统。

相较于集中式供配电系统,分布式供配电系统具有较大优势,将是未来新型军用飞机供配电的主流发展方向。图2是分布式供配电系统示意图。

中式PHM系统必须保证信号传感器与管理中心的数据传输通畅,以便管理中心及时判断机载供配电系统设备的健康水平和预测可能发生的故障。数据传输可以使用有线传输和无线传输。

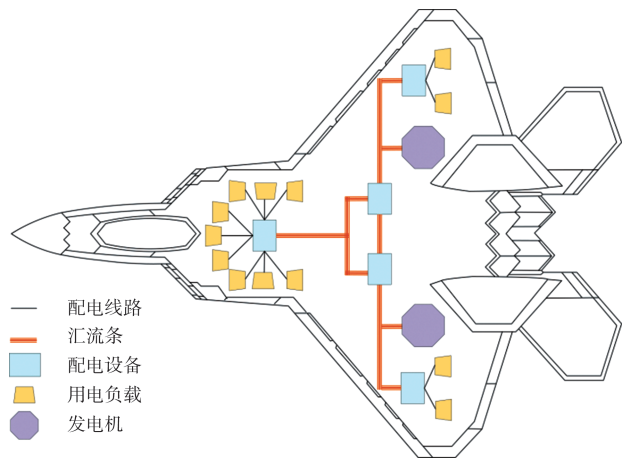


图2 分布式供配电系统

Fig.2 Distributed power supply and distribution system

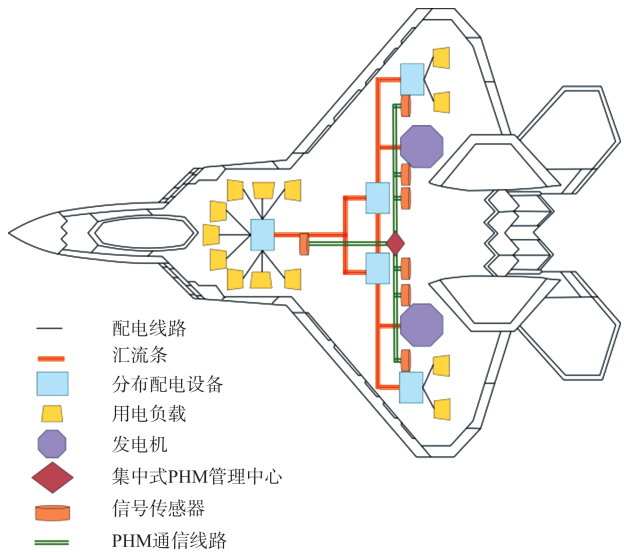


图3 集中式PHM系统

Fig.3 Centralized prognostics and health management system

不同类型的供配电系统之间的设备连接形式差别很大,拓扑结构之间存在很大差异。所以针对不同类型的供配电系统需要设计不同组织形式的故障预测和健康管理系统。同样,故障预测和健康管理系统可以分为集中式PHM系统和分布式PHM系统两种。图3是集中式PHM系统的结构示意图。

集中式PHM系统具有一个PHM管理中心和多个信号传感器,管理中心接收分布在不同位置的传感器的不同种类的信号,经过分析处理得到各设备的健康状态信息。集

与集中式PHM系统相对应的是分布式PHM系统,图4是分布式PHM系统结构示意图。分布式PHM系统在飞机供配电系统不同部位分别设置和安放能够独立工作的PHM智能终端,分布式PHM智能终端具有信号采集、处理、通信、状态评估、故障预测和健康管理等功能,能够针对单个设备独立完成故障预测和健康管理功能,并可以通过有线或无线传输,将设备健康状态和故障情况传递其

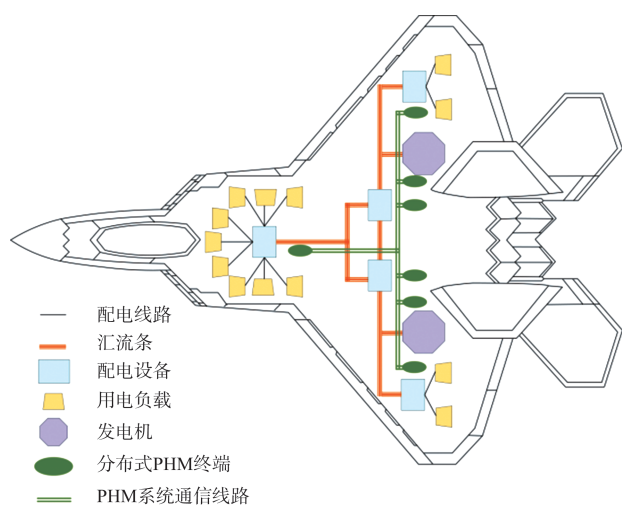


图4 分布式PHM系统

Fig.4 Distributed prognostics and health management system

他PHM智能终端。分布式PHM系统并不依赖某一个中心设备工作,单个或少数几个设备的运行异常并不会导致整个系统瘫痪,这一特点使得整体PHM系统的可靠性提高。

1.2 供配电系统PHM系统数据采集需求

军用飞机供配电系统主要包含主电源、辅助电源、应急电源、专用电源、二次电源、配电路径和配电设备等^[3]。供配电系统中设备类型众多,工作原理不尽相同,供配电系统耦合了电气、机械、液压、热学、声学等多个物理特征,是典型的多物理域耦合的复杂系统。

由于供配电系统涉及多个物理域,设备故障和系统健康状态能够通过多种特征量进行表征。供配电系统PHM系统数据采集需求分析和设计需要充分考虑多物理耦合特征,为不同设备的数据采集准确地选取传感器类型。通过相关试验研究并结合历史经验,军用飞机供配电系统的数据采集种类主要涉及电、热量、振动、声纹、电磁信号等。

另外,供配电系统设备数量众多,全面掌握供配电系统设备健康水平和运行状态需要使用大量传感器。如何通过合理地布置传感器并将不同传感器采集到的数据进行融合,也需要在数据采集需求论证阶段进行充分考虑。

1.3 供配电系统PHM技术机载使用需求

飞机供配电系统的工作条件和地面工业设备的工作条件相差很大,主要表现在三个方面:气候不同、机械因素不同、化学和核因素不同^[3]。相比民用飞机,军用飞机任务工况更加恶劣,相应的工作条件更为严苛。飞行过程中会产生强烈的振动、噪声、不良散热、大温差、强电磁干扰等不利

因素。若在设计、开发供配电PHM系统时没有充分考虑这些不利因素,轻则可能干扰相关传感器的信号采集,造成信号采集不准确,重则可能影响PHM系统的正常工作。

军用飞机机舱空间和载荷十分宝贵,这一状况对于小型军用飞机来讲尤为突出。在设计供配电PHM系统时应当充分考虑这一问题,需要进行传感器布置位置优化和无损化安装、系统小型化和轻量化研究,力求对原有供配电系统和整机产生最小的负担。

不仅军用飞机上空间和载荷十分宝贵,同时机载计算机算力也是十分宝贵的。在军用飞机供配电系统PHM技术研制过程中要充分考虑机载算力的有限,过于复杂和需要消耗大量算力的算法无法满足机载使用实际情况。

综上,在军用飞机供配电系统PHM技术的研发中要充分考虑相关航空工作条件的影响、空间、载荷和算力的制约,充分考虑PHM技术的机载使用需求。

2 军用飞机供配电系统PHM架构

2.1 国外军用飞机PHM架构研究现状

随着系统和设备复杂性的增加以及信息技术的发展,PHM相关技术的发展主要经历了外部测试、机内测试(BIT)、智能BIT、综合诊断和PHM共5个阶段^[4]。故障预测和健康相关技术的理念最早可以追溯到20世纪50—60年代,PHM技术的最早应用是70年代美国在其军用舰载攻击机A-7E上安装了发动机监控系统(EMS)^[4]。以发动机监控系统为代表的早期应用属于BIT技术,大多是监控某些重要参数,此类管理策略是基于阈值的方法。后来,美军为直升机研制并装备了直升机健康管理系统(HUMS),主要装配在AH-64“阿帕奇”、UH-60“黑鹰”、CH-47“支奴干”等直升机上。在技术水平上,早期HUMS系统介于智能BIT和综合诊断阶段之间,已经能够通过监测直升机的振动频率和滑油温度等信息,使用诊断算法从而推测直升机的使用状态。20世纪90年代技术发展到PHM阶段,美国国家航空航天局(NASA)和美国空军相继研发了综合健康管理系统分别用于航天器和联合攻击战斗机JSF。

未来PHM技术的发展路径可以归结为三个技术层次^[4-9]。层次1:部件失效模型、传感与数据采集、状态感知与推理、智能材料;层次2:子系统故障预测和管理、容错控制、体系架构设计与验证;层次3:PHM系统的设计集成与验证^[10]。从技术层级来看,PHM技术的发展态势将从失效机制、数据分析、传感器检测等基础技术研究到子系统级的数据监测、故障诊断与预测和失效缓解技术研究,再到系统级PHM系统设

计,最后实现对整机的故障预测和健康管理^[11-13]。从应用领域来看,PHM技术的发展从最初的航空航天军事领域逐渐下沉渗透到了轨道交通、电动汽车、电力装备、电子电器等民用领域。从技术成熟度来看,目前针对PHM技术的研究已经达到了智能BIT水平,大部分已经达到智能诊断的技术水平,少数能够达到较为成熟的PHM技术水平。

美国海军委托波音公司针对飞机综合健康管理进行研究。以F/A-18、C-17和波音737为主要研究对象,该项目重点研究涉及军、民用飞机,旨在开发一种可互操作的多平台飞机健康管理数据处理与分析方法^[12]。该项目设计的数据库方案、数据接口方法和算法对新型飞机、衍生飞机和现有飞机都具有较好的适用性。

目前根据现有消息,美军所研发和使用的军用飞机故障预测和健康管理系统主要完成了飞机的增强故障诊断、状态监测和部分剩余寿命估计功能,预测能力还有待提高。现阶段军用飞机上技术成熟度最高的联合攻击战斗机(JSF)上的故障预测和健康管理系统还处于成熟阶段,机载PHM系统没有加入预测功能,另外还有一些问题如故障虚报问题尚未得到完美解决;目前少部分预测算法只存在于地面PHM系统之中。

2.2 军用飞机供配电系统PHM架构设计

军用飞机供配电系统PHM架构需要充分考虑供配电系统特征、PHM技术需求和飞机机载条件等因素进行设计。

经过上文分析可知,未来新型军用飞机将向多电化和全

电化方向发展,供配电系统也将向分布式结构发展。多电化特征和分布式架构使军用飞机供配电系统的设备数量、种类更多,分布更分散,PHM系统需要布置更多的监测点位才能获取到翔实、准确的数据,从而对整个供配电系统的整体健康状态和不同设备的个体健康状态进行更加准确的判断。但现阶段到未来很长一段时间内,机载计算机的运算能力并不能保障更多的状态监测和数据采集、更强大的数据处理需求。换言之,需要将状态监测、数据采集、故障预测方法等PHM技术需求结合实际飞机机载条件进行考虑。

针对新型军用飞机供配电系统特征、PHM技术检测需求,以及机载环境和条件限制等PHM系统设计需求和条件因素,军用飞机供配电系统PHM架构解决方案包含了多源异构传感器阵列、多源数据融合和机载地面联合PHM架构等。图5展示了军用飞机供配电系统PHM架构设计需求与解决方案。

多源异构传感器阵列研究主要包含了多源传感器选择、阵列布置方案、降噪等内容。多源异构传感器阵列技术有针对性地满足了供配电系统检测数据种类多、分布分散、检测精度要求高的技术需求。

多源数据融合技术旨在解决供配电系统检测数据类型多样、数据量庞大的问题,通过先期特征提取和降维,筛选出与故障和健康状态关联度较大的特征参数,之后利用数据融合算法将不同特征参数进行融合处理,通过对融合结果进行评价从而实现对故障的预测和健康水平的管理。

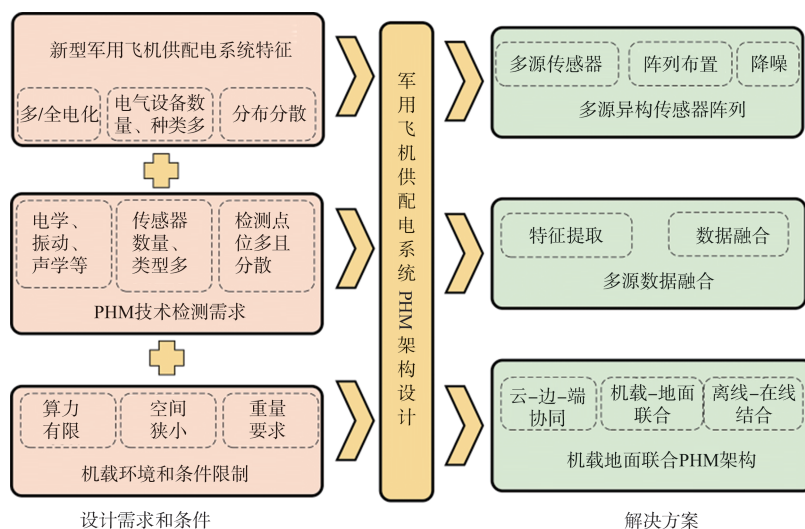


图5 军用飞机供配电系统PHM架构设计需求与解决方案

Fig.5 PHM architecture design requirements and solutions for military aircraft power supply and distribution system

军用飞机供配电系统PHM架构设计中应用云—边—端协同、机载—地面联合和离线—在线结合的技术能够较好地解决机载条件限制与PHM技术需求之间的矛盾。图6

是PHM系统云—边—端协同、机载—地面联合特征结构示意图。

离线—在线结合技术通过对供配电系统中的不同子系

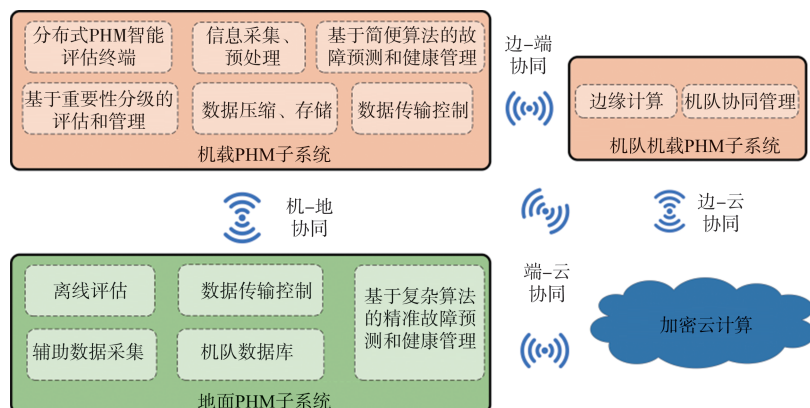


图6 PHM系统云—边—端协同、机载—地面联合特征

Fig.6 The cloud-edge-collaboration and airborne-ground combination features of the PHM system

统、设备进行重要程度评定,将重要程度较高、一旦发生故障容易危及飞行安全的子系统和设备进行在线状态监测、故障预测和健康水平评估;对于重要程度较低、发生故障不危害飞行安全和任务完成的子系统和设备进行离线状态监测、故障预测和健康水平管理。

在军用飞机供配电系统PHM架构中引入机载—地面联合技术可以有效解决机载算力不足、复杂PHM算法无法在机载环境下进行应用的问题。机载—地面联合技术同时具备机载PHM子系统和地面PHM子系统,其中机载PHM子系统主要包含分布式PHM智能评估终端、PHM评估总控计算机等设备,能够在机载条件下完成信息采集、预处理、数据压缩和存储、数据传输控制,能够运行简单的故障预测和健康管理算法,进行基于重要性分级的评估和管理。地面PHM子系统由于不再受体积、重量、功率等限制,可以大大增强运算算力,能够运行复杂的故障预测和健康管理算法,如基于深度学习和人工智能的PHM算法。地面PHM子系统主要通过下载机载数据,对供配电子系统进行离线评估,另外可以通过表贴等方法为供配电系统设备外接传感器进行辅助数据采集,收集同一机队不同架次的运行数据建立整个机队的数据库。

云—边—端协同特征是指将加密云计算、边缘计算和智能供配电计算进行协同融合,通过协同算法对运算评估任务进行智能化分配,通过边—端协同、边—云协同、端—云协同等技术,充分挖掘云、边、端的算力潜力,实现高运算速度、大规模算力、低运算延迟的有机统一。

3 关键难点技术

3.1 特征参数提取

提取故障特征参量是飞机供配电系统故障预测和健康健康管理的重要环节,为学习样本的建立提供数据基础,同时也是故障预测和健康管理的一个非常关键的问题,目的是尽可能地减少模式识别过程中的工作量;研究故障特征的提取方法,同时也是为了解决故障诊断过程中模式识别中存在的一些问题,如精度、计算时间等问题。

特征参数提取可以利用BP神经网络、主成分分析法、频谱分析法、小波分析提取法、经验模态分解等方法进行特征参数的提取^[14-17]。图7是几种常用的故障特征提取技术。

3.1.1 BP神经网络

建立军用飞机供配电系统故障诊断神经网络模型时,需要从故障模型中提取一定的信息,对这些信息进行进一

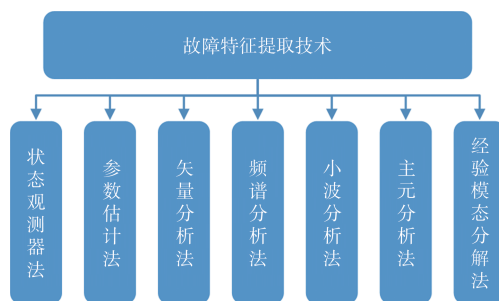


图7 故障特征提取技术

Fig.7 Fault feature extraction technology

步分析处理后,选取合适的量作为故障特征值。

基于BP神经网络的供配电系统故障诊断和预测主要包括两个部分:BP神经网络学习过程、故障诊断和预测过程^[17]。这两个部分都包括数据处理和提取特征值两个过程。BP神经网络学习过程是对供配电系统故障的历史数据进行处理和分析,提取可以识别各种故障模式的故障特征值,并按照BP神经网络的标准流程来训练模型,这一过程是离线状态下在上位机中完成的;故障诊断过程是实时采集供配电系统实时运行的数据,并对这些数据进行处理,将故障特征数据输入训练好的模型中,从而完成未知故障模式的在线判断。

3.1.2 主成分分析法

在完成故障特征提取研究之前,对于故障特征参数的把握和认识是笼统和感性的,对某种参数变量与故障和健康状况是否具有密切的关联度并没有清晰、明确的认识。因此,在最初的试验测试过程中,需要选取数量较多的参数进行测试,继而建立PHM试验原始数据库。在试验测试期间人为地选取大量参数变量这样的试验设计有利于为研究和应用提供丰富的信息,但同时这些原始数据中包含了大量的冗余信息。一般情况下,这些参数之间存在一定的相关性,若不加处理地对所有参数进行分析计算,势必造成数据分析和问题研究的复杂化。如果对不同参量采取独立分析的方法,就不能完全利用数据中的信息,造成特征的丢失和遗漏。因此,需要使用一种数据处理方法,既能消除原始数据之间的关联性,又能够减少有效信息的损失,从而实现数据的较低成本的有效把握。主成分分析方法是使用最广泛的数据降维算法。其基本原理是将原始的数组重新组合,通过正交变换的方式将 n 维的特征映射到 m 维上,得到全新的 n 维特征($n < m$),通过这样的过程将原始数据中的主成分提取出来,新的 n 维特征之间呈现互补关系^[18-20]。

传统PCA方法仅需衡量参考样本集协方差矩阵的大小即可,得到的所有主成分变量之间相互独立,这样可能降低特征的解释性和造成一定程度的样本信息缺失。针对以上问题,可以结合信息论互信息原理、基于均值加权的数据中心化、熵权法等方法对传统PCA方法进行改进,以提高PCA方法的效果。

3.1.3 小波变换

经典的小波分析理论是在傅立叶分析理论的基础上发展而来的,但小波分析对于非线性问题的处理要优于傅里叶分析。对于需要时域信息的信号,傅里叶分析则不能从原始信号的傅里叶变换中得到原始信号在某一时间点附近

的性态,也就是说不具备局部化的能力。小波变换使用的是可以根据需要调整时间与频率分辨率的窗函数(小波函数),因此在时频两域同时具有良好的局部化性质。其在各种时频分析场合应用得比较广^[21]。

小波变换是一种新兴的数学分析工具,最先使用这种分析方法的是在独立的不同领域中,这其中包括纯数学领域、物理学领域,还有工程学领域。随着小波理论不断发展,目前小波分析理论广泛运用于信号分析与处理、图像处理与分析、语音识别与合成、分子力学、齿轮变速控制、金属表面探伤、自动目标锁定、地震勘探、量子化学、分子动力学等领域,小波分析的发展对数学和工程应用都产生了比较深远的影响。

3.2 数据采集和状态监测

由于军用飞机机载环境恶劣,高低温、复杂电磁环境、大噪声、强振动等环境因素对供配电系统和设备数据采集和状态监测产生强烈的干扰和影响。因此,在军用飞机供配电系统PHM技术中的状态监测和数据采集技术研究中需要充分考虑军用飞机机载实际环境条件的影响。为了降低和消除环境因素给数据采集和状态监测带来的干扰,可以从屏蔽和降噪两个方面进行处理:(1)加装干扰屏蔽装置。这种方法主要适用于易于物理隔绝的干扰信号的屏蔽,如高低温、电磁干扰等。通过在干扰信号源头加装干扰屏蔽装置或在扰动传递路径上设置屏蔽层等手段,可以对极端温度和电磁干扰等不利环境因素进行屏蔽和隔绝,以实现供配电系统和设备进行准确的数据采集和稳定的状态监测。(2)设置降噪传感器对环境扰动进行降噪处理。此类型方法是在供配电系统不同位置按照一定规则分别设置若干采集传感器和降噪传感器,所有传感器构成一个传感器阵列。一般情况下,采集传感器更为接近受测设备,对受测设备的信号进行采集,但由于受外界环境因素的干扰,采集传感器也会不可避免地收集到一定比例的干扰信号。与此同时,设置在外围的降噪传感器对干扰信号进行实时采集,采集传感器与降噪传感器的数据由阵列中央信号处理器进行处理,将环境噪声从原始信号中消除,最终得到降噪处理的有效数据。

另外,未来军用飞机供配电系统的一大特征是分布式架构,多源分布式供配电架构要求传感器也应具备分布式布局,若干分布式传感器构成一个或若干个传感器阵列分散在整个飞机供配电系统之中,实现分布式传感器稳定、高效、可靠的信息交互也是一个亟待解决的问题。由于机载环境复杂,需要同时满足信息的可靠采集、稳定传输和抗干

扰等要求,在传感器类型选用和信息传输方式方面的选择要求较高。

3.3 故障预测方法

在完成特征提取、数据采集之后,通过故障预测方法对故障特征信号进行分析处理,从而实现故障的预测和健康状态的评价。目前常用的故障预测方法有基于损伤标尺的方法、基于状态信息的方法、基于数据融合的方法和基于灰色预测理论的方法。

3.3.1 基于损伤标尺的故障预测方法

损伤标尺是针对一种或多种故障机理,以被监控电子设备相同的工艺过程制造出来的,预期寿命比被监控对象短的产品^[4]。学术界也称为Canary、预警装置、Precursor等。使用该种方法的前提条件是对研究对象的故障机理具备了清晰明确且准确的认识,通过检测设备的实时运行状态和特征参数,利用故障机理模型对数据进行累积处理,从而得到损伤标尺故障预测结果,之后参考故障标尺的预测结果对受测设备进行故障预测和健康状态评估。因此,基于损伤标尺的故障预测方法可以被归类为基于故障机理模型的故障预测方法。使用基于损伤标尺的故障预测方法的前提是对设备和系统的故障机理具有十分清晰且准确的认识,但在实际的研究中,达到这样的要求是十分困难的,因此该方法实施难度大,当前应用范围较小。

3.3.2 基于状态信息的故障预测方法

供配电设备一般由若干功能电路和单元等组成,这些电路和单元的输出状态信息部分能够反映电子设备的健康状况^[21]。利用这种特性,对能够表征故障和健康水平的状态信息进行监测,通过监测状态信息的变化趋势或是否达到故障阈值,从而对供配电设备进行故障预测,但由于供配电设备故障普遍具有突发性的特点,大部分供配电设备的功能及性能等状态信息还不能有效反映电子设备的退化,即使部分状态信息(如半导体功率管的阈值电流等)可以较明显反映故障的演化过程,这些参数也往往需要一定的测试条件,直接在线获取这类状态信息比较困难,这也直接导致目前基于状态信息的故障预测方法在PHM的工程实际中难以大范围实施。

3.3.3 基于数据融合的故障预测方法

供配电系统的复杂性、故障的随机性和突变性使得利用某一种数据对供配电系统故障进行准确预测存在较大的困难^[20]。数据融合方法作为一种将多种数据经过一定方法的分析、处理和综合从而实现综合决策的方法,能够综合考虑复杂系统中的多种数据,数据利用率和决策结果准确性

大大提高^[23]。近年来,研究人员将基于数据融合的方法运用到了PHM领域。例如,有学者将基于模型的方法和基于数据的方法进行融合开展剩余寿命预测研究,运用丰富的历史数据修正物理模型中权重因子,弥合了数据驱动的预测和基于模型的预测之间的差距^[24]。所提出的框架成功应用于锂离子电池剩余使用寿命预测,并且与经典粒子滤波器方法相比实现了明显更好的准确性。另外,也有研究人员利用电路输出响应数据估计回归模型参数。其方法将元件性能退化的不确定性加入考虑范畴,引入随机因子以概率分布的形式对模拟电路故障进行了预测,研究对预测结果进行了置信度计算。但是数据融合的方法需要大量能有效表征电子设备退化状态的特征参数数据,这方面仍是困扰电子设备PHM技术的难点,因此,该方法目前在预测电子设备故障时准确性仍然较低,且具有一定的随机性。

3.3.4 基于灰色预测理论的故障预测方法

灰色预测理论的主要观点是结构不完全明确、系统因素之间的关系不完全确定的系统称为灰色系统^[25-26]。灰色系统以“部分信息已知、部分信息未知”的“小样本”“贫信息”不确定系统为研究对象,采取补充信息、转化灰色性质为白色性质的方法提取有价值的信息,实现对系统运行行为的正确认识。灰色预测模型以“小数据”不确定性系统为研究对象,这是其与回归分析模型、自回归移动平均模型及BP神经网络模型等大样本预测模型的一个重要区别。

灰色预测模型对数据量没有严格的要求和限制,同时具有建模过程简单等优点。目前利用灰色预测理论对建筑、农业、机械工程等领域进行预测已经取得了较好的效果。在“小样本”的现实条件下,很适合采用对数据量具备较低要求的灰色预测模型和灰色预测理论。针对军用飞机供配电系统进行故障预测研究,不需形成巨大试验数据样本,利用此方法可以大大缩短数据测试周期、提高研究速度。

3.4 预测性能评估方法

上一小节介绍了几种故障预测方法,由于不同故障预测方法原理不同,故障预测方法的预测性能存在差异。为了筛选出预测性能最优的故障预测方法,需要通过各种评估指标,对多种故障预测方法的预测性能和预测效果进行评估。

针对军用飞机供配电系统故障预测方法进行有效性、准确性等性能评价是衡量预测算法的重要研究环节。目前,在PHM研究领域对预测方法的评价体系主要包括可靠性、准确性、安全性、测试性和维修性,评价指标主要包括虚警率、漏报率、故障检测延迟时间、Kappa系数和故障预测距离等。

4 未来研究方向

(1) 建立故障预测和健康管理的标准

目前针对军用飞机供配电系统的研究主要集中在故障特征识别和提取、故障预测算法上,在行业内并没有建立和形成一套公认的故障预测和健康管理的标准,使得不同研究者提出的方法和理论没有统一标准进行评判与评价。当务之急应当是建立一套统一的、标准化的技术评价标准,并公开一组完整的供配电系统历史数据用于对不同预测方法和理论进行评价。这不仅能够方便研究者对其所研究方法和理论进行自我完善和提升,也方便行业内进行技术评判和交流。

(2) 基于无历史数据的故障预测和健康管理的

现阶段针对飞机供配电系统设备的真实历史数据分散在不同研究机构中,由于数据保密性、数据价值难以衡量等,非内部研究人员获取真实历史数据的难度较大,真实历史数据存在的信息壁垒进一步加大了PHM技术发展的难度。针对这一问题,研究基于无历史数据或弱基于历史数据的故障预测与健康管理的成为另一方向的研究路径。基于无历史数据或弱基于历史数据可以在设备使用前期,设备健康状态较为良好的阶段积累数据,结合自身采集的数据和虚拟模型对供配电系统进行故障预测和健康管理,能够极大弱化对于真实历史数据的依赖性。

(3) 考虑军用飞机机载条件的故障预测和健康管理的

由于军用飞机机载环境与地面环境存在巨大差异,恶劣的机载环境、强烈的环境扰动和机载设备的特殊要求使得军用飞机PHM研究具有其特殊性。若将地面设备PHM技术不加修改地机载化使用,轻则造成预测效果变差、评估结果失实,重则可能因为误报和漏报而对军用飞机飞行安全造成重大影响。因此,对军用飞机供配电系统机载环境和特殊条件进行有针对性的研究有利于提高军用飞机供配电系统PHM技术的准确性、可靠性和稳定性。

5 结论

本文针对军用飞机供配电系统特征,从故障预测与健康管理系统构型设计、数据采集需求、机载使用需求三个方面对军用飞机供配电系统故障诊断与健康管理的进行需求分析;对军用飞机供配电系统PHM架构进行设计;梳理了特征参量提取、故障预测方法等核心技术;最后对未来发展研究方向提出了研究建议。

AST

参考文献

- [1] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理的核心技术[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1459-1472.
Wang Shaoping. Prognostics and health management key technology of aircraft airborne system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1459-1472. (in Chinese)
- [2] 曾声奎, Michael G P, 吴际. 故障预测与健康管理的(PHM)技术的现状与发展[J]. 航空学报, 2005(5): 626-632.
Zeng Shengkui, Michael G P, Wu Ji. Status and perspectives of prognostics and health management technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005(5): 626-632. (in Chinese)
- [3] 秦海鸿, 严仰光. 多电飞机的电气系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
Qin Haihong, Yan Yangguang. Power system for more electric aircraft[M]. Beijing: Beihang University Press, 2015. (in Chinese)
- [4] 王海峰. 战斗机故障预测与健康管理的思考[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 3-11.
Wang Haifeng. Research on application of prognostics and health management technology for fighter aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 3-11. (in Chinese)
- [5] 景博, 黄崧琳, 王生龙, 等. 军用飞机 PHM 系统一体化设计架构分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 64-73.
Jing Bo, Huang Songlin, Wang Shenglong, et al. Analysis on integrated design of military aircraft prognostic and health management (PHM) system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 64-73. (in Chinese)
- [6] 曲昌琦, 周锐, 杜宝, 等. 航空装备故障预测与健康管理的数据库体系研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(12): 61-67.
Qu Changqi, Zhou Rui, Du Bao, et al. Research on PHM data system architecture for aviation equipment[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(12): 61-67. (in Chinese)
- [7] 汤孝, 高朝晖, 郝展, 等. 航空发电机健康特征参数与老化模式分析[J]. 航空科学技术, 2021, 32(6): 27-35.
Tang Xiao, Gao Zhaohui, Xi Zhan, et al. Analysis on health characteristic parameters and aging mode of aerospace generator[J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(6): 27-35. (in Chinese)
- [8] 周扬, 曾照洋, 周岩, 等. 航空装备智能保障系统研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(12): 68-73.

- Zhou Yang, Zeng Zhaoyang, Zhou Yan, et al. Research on intelligent support system of aviation equipment[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020,31(12):68-73. (in Chinese)
- [9] 吕琛,马剑,王自力. PHM技术国内外发展情况综述[J]. *计算机测量与控制*, 2016,24(9):1-4.
- Lyu Chen, Ma Jian, Wang Zili. A state of the art review on PHM technology [J]. *Computer Measurement & Control*, 2016, 24(9):1-4. (in Chinese)
- [10] 彭宇,刘大同,彭喜元.故障预测与健康管理工作综述[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010,24(1):1-9.
- Peng Yu, Liu Datong, Peng Xiyuan. A review: Prognostics and health management[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010,24(1):1-9. (in Chinese)
- [11] 吕克洪,程先哲,李华康,等. 电子设备故障预测与健康管理工作发展新动态[J]. *航空学报*, 2019,40(11):18-29.
- Lyu Kehong, Cheng Xianzhe, Li Huakang, et al. New developments of prognostic and health management technology for electronic equipment[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019,40(11): 18-29. (in Chinese)
- [12] 王莉,戴泽华,杨善水,等. 电气化飞机电力系统智能化设计研究综述[J]. *航空学报*, 2019,40(2):5-19.
- Wang Li, Dai Zehua, Yang Shanshui, et al. Review of intelligent design of electrified aircraft power system[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(2): 5-19. (in Chinese)
- [13] 邱立军,吴明辉. PHM技术框架及其关键技术综述[J]. *国外电子测量技术*, 2018,37(2):10-15.
- Qiu Lijun, Wu Minghui. Review on the framework and key technology of PHM[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2018, 37(2):10-15. (in Chinese)
- [14] 林燕. 航空航天领域故障预测与健康管理工作研究综述[J]. *中国航天*, 2019(5):21-26.
- Lin Yan. Review on prognostics and health management technologies in the aerospace field[J]. *Aerospace China*, 2019 (5):21-26. (in Chinese)
- [15] 张宝珍,王萍. 飞机PHM技术发展近况及在F-35应用中遇到的问题及挑战[J]. *航空科学技术*, 2020,31(7):18-26.
- Zhang Baozhen, Wang Ping. Recent development of aircraft PHM technology and problems and challenges encountered in the application on F-35[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(7):18-26. (in Chinese)
- [16] Su Yan, Liang Xuerui, Wang Jinjun, et al. A maintenance and troubleshooting method based on integrated information and system principles[J]. *IEEE Access*, 2019,7: 70513-70524.
- [17] Jia Zhen, Liu Zhenbao, Gan Yanfen, et al. A deep forest based fault diagnosis scheme for electronics-rich analog circuit systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 68(10):10087-10096.
- [18] 任磊,韦微,龚春英,等. 电力电子电路功率器件故障特征参数提取技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2015,35(12):3089-3101.
- Ren Lei, Wei Zheng, Gong Chunying, et al. Fault feature extraction techniques for power devices in power electronic converters: A review[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35 (12):3089-3101. (in Chinese)
- [19] 年夫顺. 关于故障预测与健康管理工作技术的几点认识[J]. *仪器仪表学报*, 2018,39(8):1-14.
- Nian Fushun. Viewpoints about the prognostic and health management[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(8):1-14. (in Chinese)
- [20] Fateme D, David F, Chris B, et al. Predicting damage and life expectancy of subsea power cables in offshore renewable energy applications[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 54658-54669.
- [21] Wu Zhenyu, Lin Wenfang, Fu Binghao, et al. A local adaptive minority selection and oversampling method for class-imbalanced fault diagnostics in industrial systems[J]. *IEEE Transactions on Reliability*, 2019, 69(4): 1195-1206.
- [22] 王洁,周鑫,李元祥. 飞机供电系统健康管理技术研究[J]. *航空科学技术*, 2019,30(11):57-61.
- Wang Jie, Zhou Xin, Li Yuanxiang. Research of the health management for the aircraft power supply system[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2019, 30(11): 57-61. (in Chinese)
- [23] Zhao Minghang, Zhong Shishen, Fu Xuyun, et al. Deep residual shrinkage networks for fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 16(7): 4681-4690.
- [24] Du Wenliao, Kang Myeongsu, Pecht Michael. Fault diagnosis using adaptive multifractal detrended fluctuation analysis[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 15: 2272-2282.

- [25] Liu Xiangxiang, Li Lingling, Das Diganta, et al. Online degradation state assessment methodology for multi-mode failures of insulated gate bipolar transistor[J]. IEEE Access, 2020,8: 69471 -69481.
- [26] Chen Shuwen, Ge Hongjuan, Li Jing, et al. Progressive improved convolutional neural network for avionics fault diagnosis[J]. IEEE Access, 2019, 7: 177362-177375.

Key Technologies of Prognostic and Health Management of Military Aircraft Power Supply and Distribution System

Ai Fengming¹, Liang Xingzhuang¹, Dong Run², Li Weilin²

1. AVIC Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China

2. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract: With the rapid development of more-electric and all-electric aircraft, the structure of military aircraft power supply and distribution systems is more complex and difficult to maintain. The adoption of prognostics and health management (PHM) technology is of great significance to improve the reliability of military aircraft power supply and distribution systems, reduce maintenance difficulties, improve maintenance efficiency and achieve situational maintenance. Combining the characteristics of military aircraft power supply and distribution systems, this paper analyzes the requirements of PHM technology for military power supply and distribution systems from three aspects: PHM configuration design, data collection requirements and airborne requirements. It compares the current development status of military aircraft PHM architecture and summarizes the PHM system architecture features aiming at the characteristics of military aircraft power supply and distribution systems. The key technologies of PHM are analyzed in terms of feature parameter extraction, signal detection and pre-processing, fault prediction methods and prediction effect evaluation methods. This paper suggests future research directions for the problems encountered in the development of PHM technology for military aircraft power supply and distribution systems.

Key Words: power supply and distribution system; military aircraft; prognostics and health management; PHM

Received: 2022-09-05; **Revised:** 2022-12-11; **Accepted:** 2023-01-15

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20164053029); Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Shaanxi province, China(2022JC-27)