

引用格式: 宋丽茹, 裴梓渲, 刘东. 有人机/无人机协同作战机群 PHM 顶层架构 [J]. 电光与控制, 2021, 28(9): 54-58. SONG L R, PEI Z X, LIU D. On top-level architecture of PHM for manned/unmanned aerial vehicle cooperative fleet [J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(9): 54-58.

有人机/无人机协同作战机群 PHM 顶层架构

宋丽茹¹, 裴梓渲², 刘东²

(1. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100000; 2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110000)

摘要: 故障预测与健康管理 (PHM) 技术作为新一代飞机设计与使用中的关键技术和重要组成部分, 受到国内外专家学者的广泛关注。针对未来航空装备无人化、协同化的特点, 利用系统工程的方法对有人机/无人机协同作战机群 PHM 系统进行场景分析, 通过系统用例图与活动图建模对系统需求进行分析综合, 提出了一种面向机群的 PHM 系统顶层架构, 包括功能架构设计、逻辑体系架构设计、数据传输服务, 并针对系统设计中涉及的关键技术进行论述。研究成果对于协同作战场景下机群 PHM 系统设计具有一定的指导意义。

关键词: 有人机/无人机; 协同作战; 故障预测与健康管理; 系统工程; 需求分析; 体系结构

中图分类号: V267 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-637X.2021.09.012

On Top-Level Architecture of PHM for Manned/ Unmanned Aerial Vehicle Cooperative Fleet

SONG Liru¹, PEI Zixuan², LIU Dong²

(1. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100000, China;

2. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110000, China)

Abstract: As the one of the key technologies and an important part in the design and operation of the new generation aircraft, Prognostics and Health Management (PHM) technology has been widely concerned by numerous experts and scholars at home and abroad. In view of the unmanned and collaborative features of the future aviation equipment, an analysis is made to the operation scene of the PHM system for manned and unmanned aerial vehicle cooperative fleet by using the system engineering method. The system requirements are studied by modeling the system case diagram and system activity diagram. Then, the top-level architecture of PHM for manned and unmanned aerial vehicle cooperative fleet is proposed, which contains functional architecture design, logic architecture design and data transmission service. Some key technologies involved in the system design are also discussed. The research has certain significance for the design of the PHM system for manned and unmanned aerial vehicle cooperative fleet.

Key words: manned/unmanned aerial vehicle; cooperative operation; Prognostics and Health Management (PHM); system engineering; requirement analysis; architecture

0 引言

近年来, 随着无人机战略地位的不断提升, 其攻击与杀伤能力迅速增强, 但单机能力有限, 随着战争环境的日益复杂与任务的多样化, 多机协同、有人机/无人机协同的使用需求逐步显现。另外, 随着高新技术的飞速发展及体系化作战指导思想的不断深入, 给作战

任务、作战编成及作战样式带来了深刻变化^[1], 有人机/无人机协同作战技术愈发成为各军事大国的研究重点。未来军事战争中涌现出的无人化、多平台协同作战的新型作战概念与模式^[2], 对维修保障提出了更高要求, 传统的采用后勤部队大量集结的保障方式在协同作战下将难以实现^[3]。故障预测与健康管理 (PHM) 作为实现飞机基于状态的维修和自主保障的关键技术^[4], 将在协同作战场景下发挥更大作用。但目前针对单机的系统故障诊断、健康评估、任务和维修决策等功能的需求、定位和使用场景与未来协同作战从根本上并未同源, 存在局限性和不相适应的情况。本文结合装备系统工程

收稿日期: 2021-07-19

修回日期: 2021-08-20

基金项目: 装备预研共用技术 (50902060101)

作者简介: 宋丽茹 (1975—), 女, 河南洛阳人, 博士, 副研究员。

通讯作者: 裴梓渲 (1995—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 助工。

研制流程,提出一种新的有人机/无人机协同作战场景下的机群 PHM 顶层架构,对运行场景、需求、功能、数据传输等进行研究。

1 有人机/无人机协同作战下机群 PHM 系统运行场景设计

自 20 世纪 90 年代 PHM 技术被首次提出以来,形成了完整的技术方法体系、技术标准体系与技术继承机制^[5]。其中,尤以战斗机领域的应用研究最为广泛,更成为新一代战机的典型技术特征之一^[6]。现有针对 PHM 系统的研究及验证场景大都面向单机,而未来空战中多机种协同作战的特点日益凸显,基本作战单元将由单机变为机群,传统的单机 PHM 系统在运行中将存在以下问题:1) 需求的变化要求针对协同作战的任务和保障特点,对 PHM 系统的功能、性能进行全面梳理,对系统能力要求进行确认和验证;2) 基本作战单元的改将带来针对机群特有的故障模式及异常状态,如通信网络可靠性、机群软件错误、数据片段缺失等带来的群体性、蔓延性故障模式,单机 PHM 系统难以针对机群进行有效的状态监测以及故障推理预测;3) 在任务与资源的限制下,多机型配置将会产生权衡优化问题,单机 PHM 系统无法从顶层角度给出优化结果;4) 验证对象的不同造成现有针对单机 PHM 的试验方法和能力部分不适用,需要针对有人机/无人机协同的数据特点、传输特点和处理计算特点进行试验验证方法研究。

传统的单机 PHM 系统因应用层面受限将会影响机群整体的可靠性、安全性和保障性,进而影响任务成功率及维修决策。需以准确感知机群健康态势、战场态势、维修保障态势为目标,建立有人机/无人机协同作战机群 PHM 系统运行场景。

以机群为研究对象,通过分析协同作战机群系统架构组成与 PHM 系统的各项活动,完成机群 PHM 系统活动,用例分析如图 1 所示。

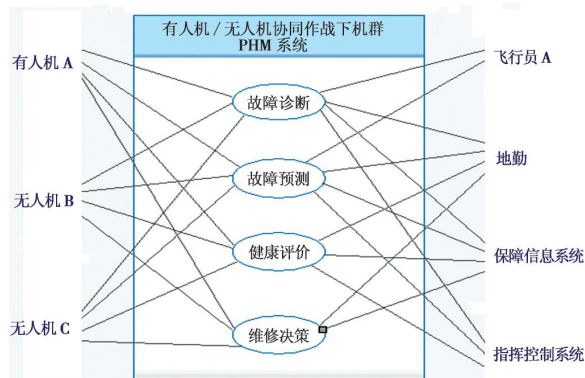


图1 有人机/无人机协同作战下机群 PHM 系统用例图

Fig. 1 The case diagram of the PHM system for manned/unmanned aerial vehicle cooperative fleet

根据用例活动结合作战想定与应用场景分析,支撑有人机/无人机协同作战机群 PHM 系统需求分析。

有人机/无人机协同执行作战任务,基于无人机侦察、突击、防空、应急/战术加油保障等使命任务,结合飞行员对战场环境信息的判断与处理,以及在复杂条件下对机群的指挥与协调等活动,分析典型作战场景,制定协同作战模式下机群的主要作战想定为突击模式、防空模式与进攻模式。

典型机群 PHM 系统运行示例。以防空模式为例:由 1 架有人机与 2 架多用途无人机组成一个基本作战单元,多用途无人机依据机群 PHM 系统的任务规划更换光电载荷设备,2 架无人机先起飞,进行对地侦察,1 架有人机后起飞,接收无人机侦察结果,评估地面威胁程度,抵达任务区后开展空中带弹巡逻,受到留空时间限制,有人机带弹巡逻一定时间后返航,并执行再次出动准备任务。无人机与后续出动的有人机组组成新的作战单元,并由有人机机群 PHM 系统主控部分接收无人机健康信息,自动决策是否具备继续执行该任务的条件下。无人机待机结束后,与有人机同时返航。结合具体作战场景任务需求,开展机群 PHM 系统应用场景分析与规划,采用系统工程建模方法,构建协同作战机群 PHM 系统的活动场景模型,同时充分考虑作战模式对机群 PHM 系统的需求。给出机群 PHM 系统中健康评价与任务决策活动示意图,见图 2。

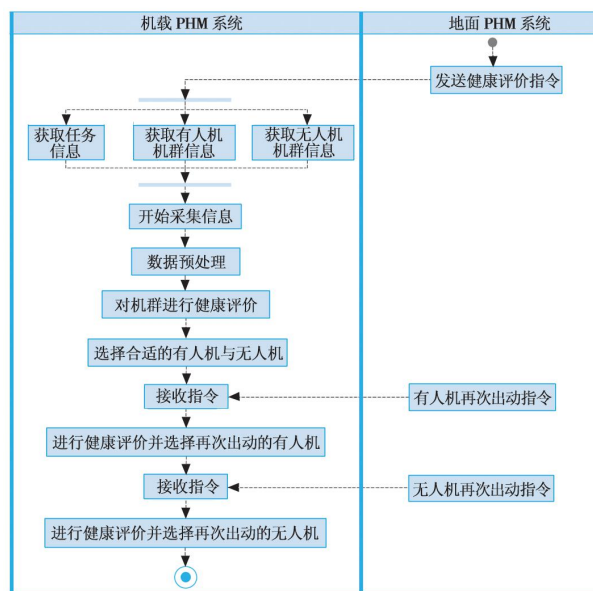


图2 有人机/无人机协同作战下机群 PHM 系统活动示意图

Fig. 2 The diagram of activity of the PHM system for manned/unmanned aerial vehicle cooperative fleet

2 有人机/无人机协同作战下机群 PHM 系统需求研究

在传统单机 PHM 系统需求分析的基础上,根据有

人机/无人机组组成、特点及功能特性,梳理单一机型 PHM 系统需求,进行提炼分类和组合优化,并在此基础上充分考虑机群在执行作战任务时机间的相互协同,捕获机群 PHM 系统的需求增量,以有人机/无人机协同作战下机群 PHM 系统活动图为基础,利用体系化、智能化的方法,对需求进行综合与分解分析,归纳总结,形成协同作战下典型机群 PHM 系统需求,其系统需求研究流程如图 3 所示。

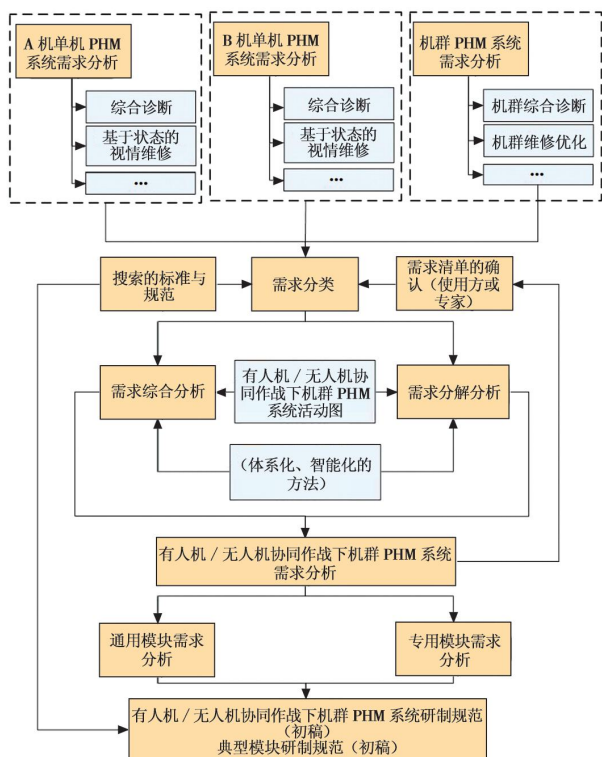


图 3 典型机群 PHM 系统需求研究流程图

Fig. 3 Flow chart of research on requirements of typical PHM system of the fleet

3 有人机/无人机协同作战下机群 PHM 的顶层架构

本文在单机 PHM 系统的基础上,通过对有人机/无人机协同作战下机群 PHM 系统的运行场景及需求分析,搭建机群 PHM 系统的顶层架构,主要涉及功能体系架构设计、逻辑体系架构设计与数据传输服务。

3.1 功能体系架构

机群 PHM 系统功能体系架构采用分布式体系架构(图 4),主要完成机群数据分布式采集与传输、数据处理与融合、机群智能行为监控、风险评估、智能诊断、健康评价、短期预测、维修决策等功能,主要由以下 4 层组成。

1) 感知层。利用机群分布式智能传感器采集外部环境信息、系统状态信息和行为信息,作为机群 PHM 系

统的数据基础,并且还具有数据转换、智能处理、异常检测、片段提取和压缩以及传输等功能,是机群 PHM 系统基础信息获取的源头。

2) 意识层。获取来自本机和他机传感器以及其他数据处理模块的信号和数据,并依据智能诊断、风险评估、健康评价和故障短期预测等功能要求的数据格式及数据内容对来自不同飞机的数据进行处理与融合,对需要确认的结果进行数据片段的调用。同预定的单机/机群正常状态的判据等进行比较,对机群的智能行为进行监控,并基于在线/离线不断迭代的风险评估模型和智能故障诊断模型,输出机群外部危险等级和内部故障情况。

3) 决策层。利用前述感知和意识到的各层级信息,基于预测、评价和维修决策模型,建立硬件、功能与任务的关联关系,输出机群、单机及其关键系统的状态或部件的健康状态,聚焦作战单元任务能力评估和实时维修决策。

4) 动作层。利用机群及空地通信网络,快速执行决策,支持协同作战,结合维修保障资源限制对维修决策进行优化设计并给出建议措施,从而实现机群的视情维修。接口层面包括有人机的人-机接口和机群间飞机的机-机接口,确保由决策到动作的实时性和准确性。

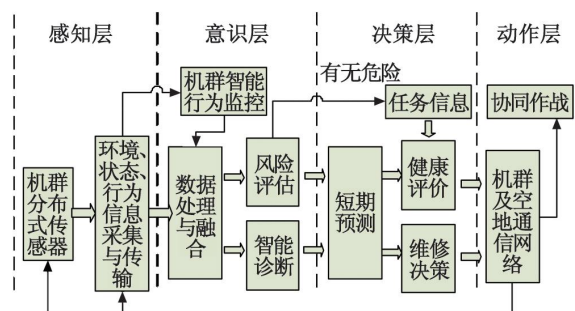


图 4 机群 PHM 系统功能体系架构

Fig. 4 The functional architecture of PHM system of the fleet

3.2 逻辑体系架构

机群 PHM 系统由机载 PHM 系统与地面 PHM 系统组成,其中,机载 PHM 系统采用分层融合的集散式体系架构,将整个系统分为 4 个层次,即成员级 PHM 管理器、区域级 PHM 管理器、飞机级 PHM 管理器和机群 PHM 管理器。地面 PHM 系统作为实时和事后处理两种方式并存的系统,负责对机群机载 PHM 系统得到的数据、信息与结论进行整合、处理、优化、评估、决策与仿真^[7],并作为机载 PHM 系统的补充,处理机载系统难以处理的复杂度较高的大规模计算问题。两者之间通过空地实时数据链和无线网络进行数据传输,协调配合实现机群 PHM 系统的主要功能。以一个基本

作战单元(包含1架有人机与2架无人机)为例给出机群 PHM 系统的逻辑结构,如图5所示。

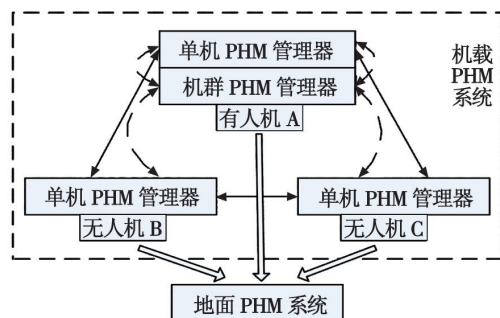


图5 机群 PHM 系统逻辑结构

Fig. 5 The logic architecture of PHM system of the fleet

机载 PHM 系统将机群 PHM 管理器置于有人机中,其整体架构采用集散式布局,机群 PHM 管理器与单机 PHM 管理器形成集散式体系架构,每架飞机利用单机 PHM 系统对自身健康状态进行评估与管理,并将结果发送给机群 PHM 管理器,由机群 PHM 管理器针对每个单机 PHM 管理器的结果进行综合、优化与评估,从顶层角度对机群整体的健康状态进行评估与管理,辅助飞行员在战场环境下获取全面的信息,直观地做出判断,在复杂条件下指挥协调无人机完成作战任务。地面 PHM 系统则依据机载 PHM 系统各组成部分提供的相关数据信息与结论,完成对机群作战计划、维修决策、备件供应等需求的及时快速响应。

针对飞机级 PHM 管理器、区域级 PHM 管理器、成员级 PHM 管理器则采用分层融合式的逻辑结构,如图6所示。

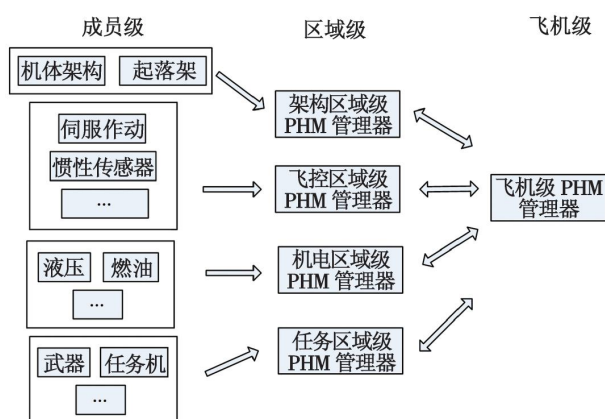


图6 单机 PHM 系统逻辑结构

Fig. 6 The logic architecture of the single aircraft PHM system

成员级由飞机的各成员系统组成,根据需求分析对成员系统的传感器布局、BIT (Built In Test) 设计提出要求,在可接受的设计改动和经济效益下最大程度地满足 PHM 系统的设计需求。区域级管理器收集对应区域成员系统的数据信息,飞机级管理器收集所有区域级管理器处理后的结果并承担机载 PHM 部分顶

层功能。

3.3 数据传输服务

机群 PHM 系统的运行需要大量的数据作为输入,因此,对机群内各飞机间的数据传输和机载 PHM 系统与地面 PHM 系统间的数据传输提出了更高的要求,希望通过空地实时数据链路实时传输机群内各飞机不断产生的关键参数信息、故障诊断、状态监测、故障预测等结果数据,并期望在飞机落地后通过地面无线网络传输飞行过程中的大量数据^[8]。

从数据传输的角度来看,机群 PHM 系统的体系架构包含横向数据流、纵向数据流以及反馈数据流3种数据流^[9]。

横向数据流指在特定层级的 PHM 管理器中对该层级以下层级传输的数据进行融合处理,并分析得到本层级故障诊断、状态监测、故障预测等结果的数据处理与传输过程。

纵向数据流指从飞机各设备和部件获取 BIT 信息、传感器信息等,经过成员级 PHM 管理器进行推理分析并将结果逐级上传,最终得到机群的故障诊断、状态监测、故障预测等信息。该数据流涉及从成员级 PHM 管理器到区域级 PHM 管理器再到飞机级 PHM 管理器最终到机群 PHM 管理器的数据传输过程。

反馈数据流则包括控制信息流和知识信息流,用以支撑系统成为受控并且能不断学习的闭环系统^[9]。

4 有人机/无人机协同作战下机群 PHM 的主要关键技术

PHM 系统的实现需要计算机网络技术、信息技术、测试技术、人工智能技术等多学科交叉配合。协同作战下机群的 PHM 系统由于数据规模巨大、故障模式繁多以及多机间如何进行协同优化等问题,为系统的实现带来了极大挑战,涉及多种工具、模型及算法研究,现对主要关键技术简要列举如下。

4.1 基于混合增强智能的故障诊断技术

混合增强智能技术是将人的作用或人的认知模型引入智能系统,有效实现系统的自演进。在机群 PHM 系统架构中,由于有人机/无人机多机种带来的故障模式多、认知不清等问题,加之一些机群特有的顶层故障模式的引入,将对故障诊断技术带来很大挑战。基于混合增强智能的故障诊断技术通过引入人在环路的混合增强智能,保证机载故障诊断结果的合理性,并促进推断推理模型的不成熟化,增加可信性,实现故障诊断功能的不成熟化,有效适应飞机平台技术状态变更、资源动态调整等内外部变化。在此基础上,针对机群中不同机型,采用基于混合增强智能技术搭建有人机/无人机

多机种一体化的故障诊断框架和空地一体化故障诊断架构,满足未来有人机/无人机协同作战下的故障诊断技术需求。

4.2 空地一体的 PHM 通信网络设计

机群 PHM 系统的建立需要机载 PHM 系统内各飞机间关键数据信息与结果的实时传输,以及机载 PHM 系统与地面 PHM 系统的有效结合,因此,首先制定机载 PHM 系统各飞机间以及机载 PHM 系统与地面 PHM 系统间数据信息的规范化要求,形成统一的信息编码与传输格式,分析机群 PHM 系统数据传输需求,确定数据传输时机与内容,最终确定数据融合与压缩机制,并结合空地数据链能力确定各数据视情回传或指令回传的传输方式,从而建立空地一体的通信网络框架^[10],在保证信息实时传输的基础上使机载 PHM 系统与地面 PHM 系统紧密结合,有效提升机群的可靠性与安全性,同时有效保证 PHM 系统的准确性与时效性。

4.3 机群协同维修决策建模与优化

由于维修保障资源的限制,基于协同优化技术的机群协同维修策略优化从视情维修的角度出发,充分考虑机群中各飞机维修计划间的相关性,并以维修保障资源为约束,以维修成本、维修资源利用率、机群保有率等一系列关心的指标为优化目标,建立优化模型,并借助协同优化算法将模型分解为子问题从而求解得到最优的维修策略,有效解决传统基于单机的维修规划忽略机群间的相关性而带来的维修资源利用率偏低、维护成本过高、机群保有率过低影响任务执行的问题^[11]。

5 结论

本文从有人机/无人机协同作战下机群 PHM 系统运行场景分析出发,以机群(基本作战单元)为研究对象,构建机群 PHM 系统用例图与活动图,结合需求研究

准确捕获机群 PHM 系统需求;分析提出了机群 PHM 系统顶层架构,并对机群 PHM 系统设计中的关键技术进行了梳理研究。

参考文献

- [1] 王兵,王栋梁. 浅析空海一体作战及海防部队作战能力建设的思考 [J]. 国防科技,2012,33(2):62-65.
- [2] 黄长强,翁兴伟,王勇,等. 多无人机协同作战技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [3] 张修社,石静,范文新. 协同作战系统工程导论 [M]. 北京:国防工业出版社,2019.
- [4] 苗学问,杨云,雷迅,等. 军用飞机预测与健康管理系统性能度量体系研究 [J]. 测控技术,2011,30(12):106-110.
- [5] 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.
- [6] 王海峰. 战斗机故障预测与健康管理技术应用的思考 [J]. 航空科学技术,2020,31(7):3-11.
- [7] 张宝珍. 21 世纪的保障方案——JSF 飞机的自主式后勤 [J]. 航空维修与工程,2003(1). doi:10.3969/j.issn.1672-0989.2003.01.009.
- [8] 谢娜,雷江妮. 民机故障预测与健康管理系统顶层架构设计技术研究 [J]. 计算机测量与控制,2020,28(2):19-22,38.
- [9] 张亮,张凤鸣,李俊涛,等. 机载预测与健康管理系统(PHM)的体系结构 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2008,9(2):6-9.
- [10] 许卫强,陈国顺,牛刚. 指控网络 PHM 系统及其关键技术研究 [J]. 电光与控制,2017,24(4):46-50,66.
- [11] 罗斌. 基于结构疲劳寿命预测的机队维修决策方法研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.



请扫描二维码关注我刊