

文章编号: 1674-8190(2022)03-064-10

# 军用飞机 PHM 系统一体化设计架构分析

景博<sup>1</sup>, 黄崧琳<sup>1</sup>, 王生龙<sup>1</sup>, 崔展博<sup>1</sup>, 盛增津<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038)

(2. 空军研究院 战略预警所, 北京 100089)

**摘 要:** 军用飞机故障预测与健康管理系统(PHM)系统设计与工程应用存在设计标准缺失、复杂度高、准确率低等问题。通过对 PHM 系统数据、结构、功能维度的设计需求分析, 提出三维多相迭代设计准则; 基于三维多相设计准则对 PHM 系统设计流程进行梳理; 提出基于软硬件协同加速的健康管理实时化、基于知识图谱的知识逻辑可视化、基于 MBSE 的 PHM 系统模型化的三化一体设计架构, 并通过多领域模型联合仿真进行验证。结果表明: 该设计架构实现了 5.63 倍的加速计算效果与 82.7% 的计算功耗缩减, 提升了 PHM 系统知识与设计需求管理的可追溯性。

**关键词:** PHM 系统; 三维多相设计准则; 三化一体设计架构; 软硬件协同; 知识图谱; 基于模型的系统工程

**中图分类号:** V240.2; V271.4

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.03.08

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Analysis on Integrated Design of Military Aircraft Prognostic and Health Management (PHM) System

JING Bo<sup>1</sup>, HUANG Songlin<sup>1</sup>, WANG Shenglong<sup>1</sup>, CUI Zhanbo<sup>1</sup>, SHENG Zengjin<sup>2</sup>

(1. School of Aviation Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

(2. Strategic Early Warning Institute, Air Force Research Institute, Beijing 100089, China)

**Abstract:** The design and engineering application of prognostic and health management (PHM) system for military aircraft has the problems of design standards deficiency, high complexity and low accuracy. The three-dimensional multiphase iterative design criterion is proposed by design requirements analysis of data, structure and function dimensions of PHM system. A three-in-one design architecture is proposed, which is combined with real-time health management based on embedded system, knowledge logic visualization based on knowledge graph, and PHM system modeling based on model-based system engineering (MBSE). The results show that the design architecture achieves 5.63 times of acceleration and 82.7% reduction of power consumption, and improves the traceability of PHM system knowledge and design requirement management.

**Key words:** PHM system; three-dimensional multiphase design criterion; three-in-one design architecture; software and hardware collaboration; knowledge graph; MBSE

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-05-11

基金项目: XXX“十四五”装备预研共用技术项目(50902060401); XXX 基础研究项目群项目(514010504-304)

陕西省自然科学基金(2022JQ-586)

通信作者: 景博, jingbo\_sensor@163.com

引用格式: 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)

## 0 引言

随着通信技术、材料科学、人工智能、工业自动化等技术的创新发展与深度融合,军用飞机装备复杂度呈指数型上升<sup>[1]</sup>。系统功能结构交联紧密,故障耦合模式复杂多样,确保系统安全稳定运行的飞机健康管理系统设计已逐渐成为涉及产品设计、生产工艺、使用环境、维修决策的系统性问题,传统的基于时间的计划维修已无法满足复杂装备的健康管理需求。随着故障预测与健康管理系统(Prognostic and Health Management,简称PHM)技术的发展,面向高效率、低成本的诊断和预测为基于状态的视情维修提供了技术手段。

PHM技术在F-35飞机的维护保障中带来了巨大的经济效益,故障不可复现率降低82%,维修人力减少20%~40%,后勤规模减少50%,出动架次率提高25%,飞机的使用与保障费用比过去减少50%,使用寿命达8 000 fh,极大地降低了维修成本,提高了保障性与安全性<sup>[2]</sup>。美国在AH-64“阿帕奇”等武装直升机安装了健康与使用监控系统(HUMS),其任务完好率提高了10%<sup>[3]</sup>。然而,国外军用飞机PHM系统仍存在虚警率高、数据质量差的问题<sup>[4]</sup>。目前国内PHM技术工程化应用水平同国外有较大差距,仍存在诸多实际问题,需进一步研究完善。张洪亮<sup>[5]</sup>构建了特种飞机PHM系统层次化体系架构,并针对PHM系统应用场景设计了可视化软件;宋丽茹等<sup>[6]</sup>提出有人机/无人机协同的PHM系统架构,并以系统工程的视角建立了系统用例图与活动图模型。国内军用飞机PHM系统工程化技术成熟度低,尤其缺少系统设计标准以及设计与验证的有效手段。知识工程混沌化、结构设计模糊化、工程实现碎片化等问题严重制约了军用飞机PHM技术的发展<sup>[7-8]</sup>。典型的飞机系统具有由数千个传感器产生的大量数据<sup>[9]</sup>,然而由于缺乏合理的系统规划设计,数据的管理与应用效率较低,极大地限制了健康管理的效果。同时,片面地追求设备级PHM的准确性忽视了系统级相关因素的影响,导致系统设计相互独立,从而产生了故障诊断虚警率较高的现象。

针对以上问题,本文从数据、结构、功能维度出发,基于军用飞机系统特点,提出PHM系统三维多相迭代设计准则;在此基础上提出包括基于软硬件协同加速的健康管理实时化、基于知识图

谱的知识逻辑可视化、基于MBSE的PHM系统模型化的三化一体设计架构,并通过多领域模型联合仿真进行验证。

## 1 三维多相迭代设计准则

PHM技术以数据科学为基础,通过面向飞机层次结构的设计实现飞机PHM系统的健康管理相关功能。在三维多相PHM系统设计准则中,数据、功能与结构三个维度生成设计准则空间,每个维度由逻辑关系清晰的多个相构成,空间中每个坐标代表了设计过程需要满足的系统需求与遵循的设计准则,如图1所示。

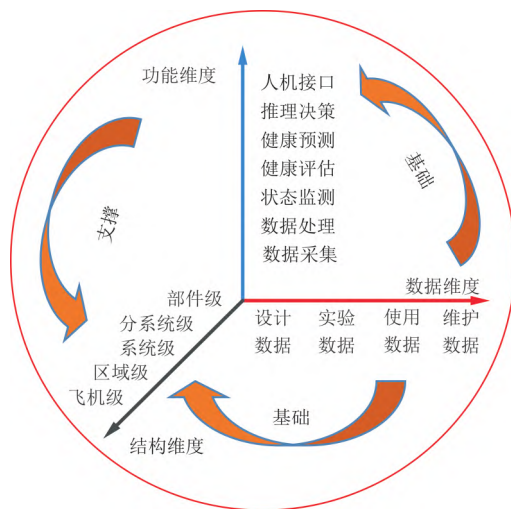


图1 三维多相设计准则

Fig. 1 Three dimensional polyphase design criteria

### 1.1 数据维度

数据维度包含设计数据、实验数据、使用数据、维护数据四种类型的数据(如图2所示),是PHM系统功能维度与结构维度的数字化表达与量化结果。数据维度为PHM系统设计提供设计需求与数据基础,同时为系统验证评估提供数据支撑<sup>[10]</sup>。

(1) 设计数据是PHM系统设计的起点。设计数据是PHM系统设计阶段收集和产生的数据集,具体包括历史设计方案、功能性需求、非功能性需求、功能逻辑、系统架构、仿真模型、产品型号等。设计数据存储载体多样,存储格式各异,但以清晰的耦合关系覆盖装备全寿命周期,具有耦合性、多源异构的特点。

(2) 实验数据是PHM模型建立的基础。实验

数据包括飞机设备仿真模型、半实物模型、智能算法模型、各类实验监测数据。通过实验模拟飞机理想运行环境及非理想运行环境,采集相应状态下的实验数据并进行集中标准化存储,为实现 PHM 算法建模与验证评估,以低成本迭代优化 PHM 系统设计创造条件,实验数据具有可控性、标准化的特点。

(3) 使用数据是 PHM 系统运行的输入。使用数据包括飞参数据、实时空地数据链,详细记录了飞机在运行过程中飞机装备及 PHM 系统输出的

数据<sup>[11]</sup>。反映了飞机装备及 PHM 系统实际服役环境下的工作运行状态,为 PHM 系统设计优化提供直接的数据来源。由于机载设备故障率较低,运行环境复杂,因此使用数据具有非平衡、强噪声的特点。

(4) 维护数据是 PHM 系统优化的保证。维护数据是在飞机维护过程中获取的状态数据的集合,包括故障数据、维修测试数据等。维护数据采集在地面进行,环境条件单一,因此维护数据具有理想化、多维海量的特点。

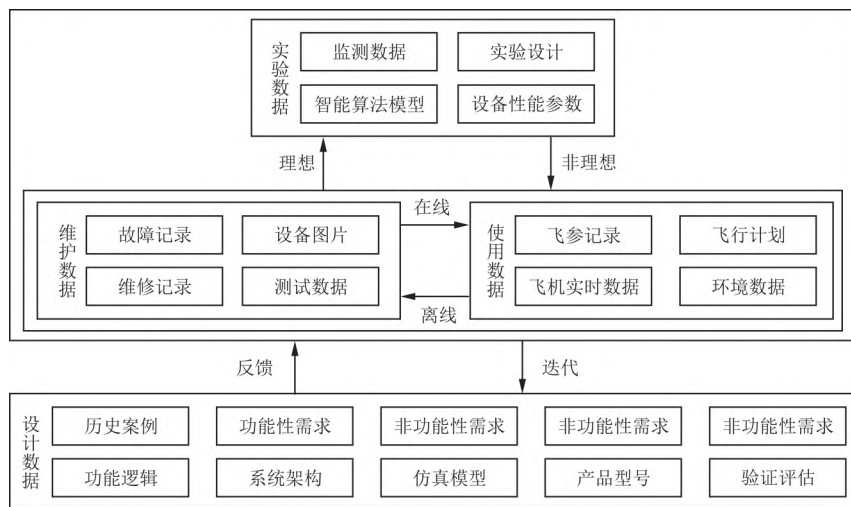


图 2 数据维度内容与关系

Fig. 2 Data dimension content and relationships

PHM 数据维度囊括了以上四个领域,结合不同数据域的特点,PHM 系统设计在数据维度应满足如下准则:

(1) 模型化或结构化的数据管理是实现 PHM 系统的验证与迭代的基础,因此,PHM 知识工程的顶层设计应以设计数据为根节点,保证系统需求的可追溯性。

(2) 实验与设计应同步进行,将复杂系统分解为小型分系统,通过分布式实验向集中式实验过渡的方式,实现实验数据向设计数据的实时反馈迭代,提高设计迭代的效率。

(3) PHM 系统设计应通过优化数据链路与设计数据保证数据流的流畅性。

(4) 数据存储与计算系统应支持海量离线数据的可靠存储与高速并行计算。

## 1.2 结构维度

结构维度由组件级、分系统级、系统级、平台

级构成,在对 PHM 系统数据与功能维度特点的分析后,提出 PHM 系统多级设计方案(如图 3 所示),统一数据流在层级间的传输方向,为系统功能进行结构维度上的分工。

(1) 平台级 PHM 系统对数据进行管理,通过空地接口及人机接口设计为飞机健康状态监测提供软硬件接口,实现飞机整体健康状态的综合评估并给出维修决策。

(2) 系统级 PHM 系统设计从飞机系统的视角对 PHM 系统结构、功能进行设计。通过决策逻辑、故障反馈、容错控制的设计,主要实现信息整合与维修决策推理。

(3) 分系统级 PHM 系统设计以分布式的视角通过数据总线排布对飞机分系统进行合理划分与数据整合,主要实现健康评估与故障预测的功能。

(4) 组件级 PHM 系统的构建包括计算资源选择、测量参数选择、传感器布置等设计内容,主要实现数据预处理的功能。

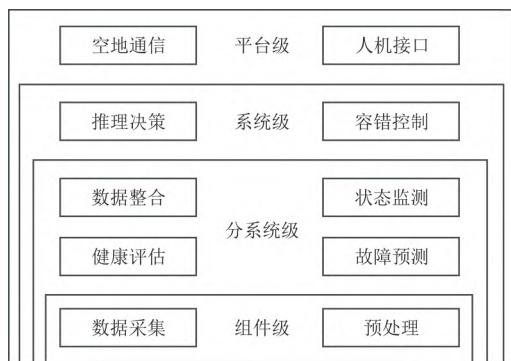


图3 结构维度内容与关系

Fig. 3 Structural dimension content and relationships

通过分析总结PHM系统结构维度的分类与特点,PHM系统在结构维度设计中应遵循以下准则:

(1) 在平台级的数据传输功能实现中,空地数据通信应满足安全性、高速性的要求,根据信道资源合理分配通信信道。

(2) 加强系统级健康管理算法验证评估,提高维修决策的可靠性。

(3) 针对飞机重要部件健康管理加强可靠性试验,选择具有较强计算能力的计算资源对分系统及其包含组件的健康状态进行实时检测,形成故障信息。

(4) 分布式布置传感器,通过边缘计算同步进行数据采集与预处理,提升数据利用率及信噪比。

### 1.3 功能维度

PHM系统功能维度设计参考OSA-CBM标准,包含数据采集、数据处理、状态监测、健康评估、故障预测、推理决策、接口七个部分的功能,如图4所示。功能维度为结构维度提供方法支撑,系统功能的通用性和工程化应用是制约PHM技术发展的核心问题。

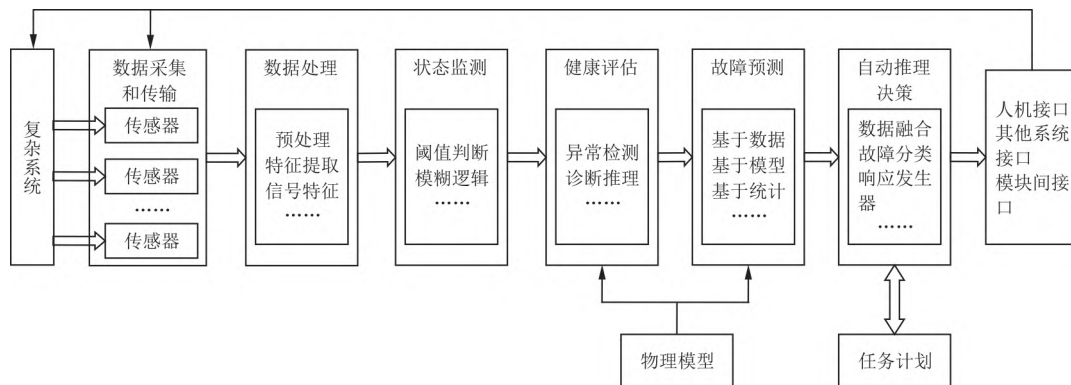


图4 功能维度内容与关系

Fig. 4 Functional dimensions content and relationships

(1) 数据采集使用传感器采集飞行过程中机载部件承载的内部应力、环境应力、运行参数、环境噪声等物理量,并通过“物理量—信号—数据”的转换实现飞机状态的感知、传输与存储。

(2) 数据处理基于信号处理算法对传感器采集的数据进行预处理,实现信号的降噪、降维、特征提取。

(3) 状态监测接收来自传感器与数据处理模块的数据,基于专家知识库通过固定的失效阈值判断装备故障状态,以实现基本的BIT功能。

(4) 健康评估基于飞机实时数据,利用智能算法模型对故障状态进行推理,得到离散的故障类型判断并确定故障发生概率。

(5) 故障预测在健康评估的基础上进行寿命

预测,综合利用上述模块数据,基于输出向量空间连续的智能算法模型进行故障预测。

(6) 推理决策融合前级所有信息推理得到飞机系统级故障状态,并对飞机健康状态进行综合评估,给出维修决策建议,是实现视情维修的关键模块。

(7) 接口主要分为人机接口与机机接口,人机接口将PHM系统最终结果信息以可视化的形式进行展示,机机接口实现系统内与系统间数据的传输。

通过分析总结PHM系统功能维度的组成与特点<sup>[12]</sup>,PHM系统在功能维度设计中应遵循以下准则:

(1) 数据采集功能的设计应以测试性设计为



基础,在确保故障诊断率、故障隔离率的前提下压缩数据量。同时,数据采集速率与数据处理的降维功能应满足空地数据链的带宽限制。

(2) 针对重要易损部件应开展充分的可靠性实验,根据实际服役条件合理调整实验条件,通过边界实验、加速寿命试验实现全寿命周期数据的采集与建模。

(3) 算法模型的可靠性须满足 PHM 系统工程化的要求,使用在线训练、离线训练相结合的方法,加强算法模型的验证评估。

(4) 人机接口应具有针对性,面向 PHM 系统功能采用模块化设计提高软件的灵活性,从而降低软件学习使用成本。

## 2 PHM 系统设计开发流程

基于 PHM 系统功能、结构、数据三个维度设计准则要求,结合系统工程 V&V 模型,提出 PHM 系统设计开发流程,如图 5 所示。该流程遵循系统工程流程,每阶段以功能维度为主线,包括自上而下的系统设计与自下而上的系统实现。

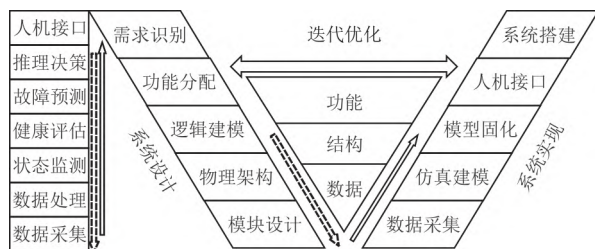


图 5 PHM 系统设计开发流程

Fig. 5 PHM system design and development process

在系统设计阶段,按照“功能—结构—数据”的基本流程进行分析。

(1) 从功能性需求识别出发,明确 PHM 系统具体任务(Mission)与运行能力(Operation capability)。

(2) 根据飞机系统结构确定系统需求基线,并对系统功能进行分配。

(3) 从数据角度出发,根据信息流串联功能维度与结构维度,抽象出系统功能逻辑。

(4) 基于功能逻辑设计系统物理架构并进行模块细节设计。

在系统实现阶段,按照与设计阶段逆向的顺序,依照“数据—结构—功能”的基本流程进行 PHM 系统的工程实现。

(1) 从数据维度出发,基于数据采集方案的设计开展设备可靠性试验与仿真实验,获取理想数据,通过试验数据的分析、挖掘,建立设备健康管理诊断与预测模型。

(2) 根据机上空间资源,对各级 PHM 系统计算资源进行选型、分配与模型固化。

(3) 根据具体应用场景,通过软件设计开发专业、友好的人机界面,最终实现 PHM 系统的正常运行与人机交互。

## 3 PHM 系统三化一体设计架构

在三维多相设计准则的基础上,提出集成实时化、可视化、模型化的一体化 PHM 设计架构要求。

### 3.1 基于软硬件协同加速的实时化设计架构

军用飞机故障的瞬发性和严重性要求机载 PHM 系统具有较好的实时性,对飞机状态变化敏感,能够对故障现象与故障症候做出及时反应与决策<sup>[12]</sup>,其设计思路如图 6 所示。

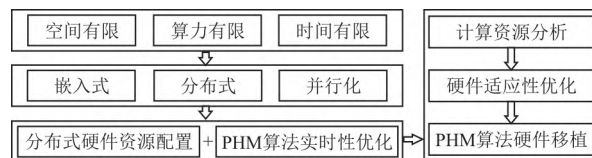


图 6 软硬件协同的实时化设计

Fig. 6 Real-time design of hardware and software collaboration

#### (1) 分布式硬件资源配置

随着半导体制造技术的发展,包括 ASIC、DSP、FPGA 在内的嵌入式计算芯片成为飞机各系统的关键部件。在半导体制造技术的飞速发展下,现场可编程逻辑门阵列(FPGA)与数字信号处理器(DSP)的应用场景更加广泛。尤其在飞机 PHM 系统设计中,由于数据模型的动态性与迭代性,可灵活重构的 FPGA 能够以较低的成本实现 PHM 系统的维护保障,其小型化、低功耗的特点为 PHM 系统提供了分布式并行边缘计算的能力,是 PHM 系统设计的重要部件<sup>[13-14]</sup>。

#### (2) PHM 算法实时性优化

军用飞机实际服役条件下由传感器采集的数据多为具有非平衡、强噪声、不完备等特点的非理

想数据,为降低因噪声干扰带来的虚警率,提高实时故障预测的准确率,保证维修决策的有效性,需要对 PHM 算法进行实时性优化,强调实现滤波去噪、缺失值补全、信号降维等功能。

(3) 软硬件协同加速

PHM 系统实时化设计应统筹计算硬件资源与 PHM 算法资源,综合考虑运行效果与效能,使算法精度与运行效率之间达到平衡。基于该设计思想搭建 PHM 桌面超算平台,平台具体配置如表 1 所

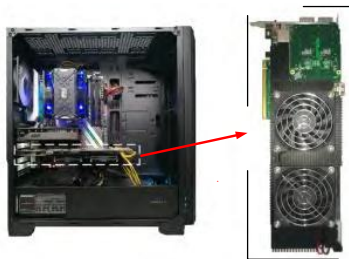
示,平台组成如图 7 所示。以 SVM 算法为例,PHM 超算平台计算 171 个数据点的 SVM 故障诊断过程训练时间平均为 180.02 ms,诊断时间平均为 4.40 ms,总时间平均为 184.42 ms;CPU 平台上 Matlab 训练时间耗时平均约为 1 025.47 ms,诊断时间平均为 12.81 ms,总时间平均为 1 038.28 ms,相较 CPU 获得的加速比平均约为 5.63。计算过程中 PC 平台平均功耗为 24.571 W,超算平台平均功耗为 4.262 W,相比 PC 平台缩减了 83.7%。

表 1 PHM 桌面超算平台配置  
Table 1 PHM Desktop supercomputing platform configuration

属性	处理器	内存	硬盘	操作系统	软件环境	软件语言	数据库
计算机	Intel Core i7-7800x	DDR4 32 GB	SSD 240 GB+ HDD 4 TB	Win10,64 位	Spyder VS Code	Python、C++	MySQL
FPGA	Xilinx Virtex-7 系列 XC7VX485T 芯片	DDR3 1 536 MB	—	Win10,64 位	Vivado、Modelsim Vivado HLS	Verilog、C	—
DSP	TI C66x 系列 TMS320C6678	DDR3 3 072 MB	—	Win10,64 位	Code Composer Studio	C	—



(a) 软件界面



(b) 硬件板卡

图 7 PHM 桌面超算平台  
Fig. 7 PHM Desktop supercomputing platform

通过算法分解、模型裁剪等操作,在 FPGA 中将面向在线非理想数据的算法进行硬件化移植,达到算法加速的效果,并在此基础上实现数据流与 PHM 算法的验证评估。

3.2 基于知识图谱的数据可视化设计架构

PHM 系统从飞机健康状态出发,经过数据处

理、故障推理、维修决策等环节,产生了大量多层次异构数据,其中在设计阶段、实现阶段产生的数据具有可追溯性与差异性。军用飞机 PHM 系统主要完成飞行数据实时监测分析与离线数据训练挖掘,给出故障维修建议,为工程师的维修决策提供参考,实现飞机结构与功能的修复,是一种人在环的反馈控制。但是在军用飞机全寿命周期数据管理中没有充分利用各类数据,为提升复杂多源异构数据的利用效率,需要对数据进行结构化管理<sup>[15]</sup>。因此,需要使用数据可视化方法进行高效的数据管理与使用方法融合,如图 8 所示。

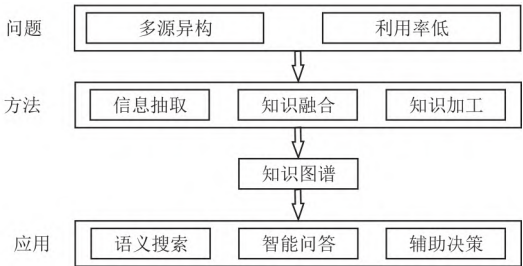


图 8 基于知识图谱的 PHM 数据可视化  
Fig. 8 PHM data visualization based on knowledge graph

经信息抽取、知识融合、知识加工等数据操作将非结构化数据转换为结构化图数据,知识图谱以图数据库的形式不仅存储了数据数值信息,同时将数据文件之间的逻辑关系以“实体—关系—对象”三元组载体的形式存储<sup>[16]</sup>。具体可应用于

故障手册语义搜索、设计数据智能问答、维修工作辅助决策等场景下<sup>[17]</sup>。知识图谱图数据库支持网络同步管理,便于保持系统设计过程中各部门数据的一致性。因此,知识图谱的应用能够提升设计过程中知识搜索的效率,加强数据的管理能力。

在此设计方法的指导下建立的知识图谱将故障逻辑与维修策略以有向图的形式进行可视化显示,如图9所示,为军用飞机维修决策与健康管带来丰富的参考信息。

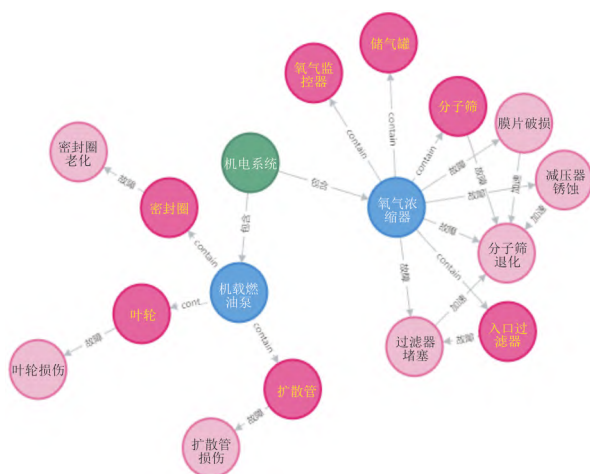


图9 机载设备PHM知识图谱

Fig. 9 PHM knowledge graph of airborne equipment

### 3.3 基于MBSE的系统模型化设计架构

PHM系统涉及数据处理、网络通信、人机交互、多系统耦合等多学科技术,具有复杂性、综合性、信息化的特点,因此PHM系统设计是一个复杂的系统工程问题。由于健康管理信息维度爆炸式增长、层级交联复杂度提升、功能流程耦合性加强,PHM系统设计与工程化实现面临碎片化的问题。

基于模型的系统工程(Model-based System Engineering, 简称MBSE)采用灵活、统一的模型元素代替了传统系统工程模糊、局限的文本式描述,使得系统具有更强的通用性、可靠性与可追溯性<sup>[18]</sup>。使用MBSE方法指导PHM系统的设计能够有效发挥其模型化设计的优势,将包括数据、功能、结构等设计信息进行整合,克服PHM系统设计过程中存在的对象多样、环境复杂、耦合泛在的问题,联合多领域模型、多学科技术,加速PHM系统设计进程。该设计架构面向PHM系统设计开发流程进行优化,通过模型的手段建立设计阶段与实现阶段的联系,如图10所示,具体包括以下内容:

(1) 通过设计过程对系统模型进行定义,在对机务工作人员、飞行员、工程师等利益攸关者进行需求收集后将需求整合转化为成熟的系统需求,在系统需求的指导下对系统逻辑、系统架构进行模型表示,得到功能完备、结构合理的系统模型。

(2) 对机载设备物理模型以及健康管理算法模型进行建模,通过两者内部联合仿真及半实物仿真进行模型迭代优化,提高模型精确度。

(3) 将包含物理模型、算法模型、系统模型在内的多领域模型相关联进行模型级系统测试与验证<sup>[19]</sup>。系统的分层集成实现DVT(Design, Verification, Test)过程并行化,在系统测试验证过程中对设计过程及时提出新的需求,实现系统设计与迭代的同步推进。

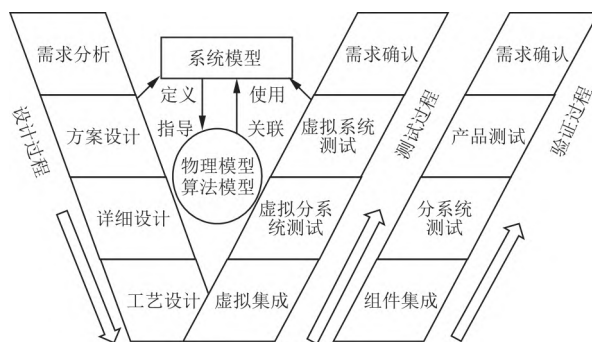


图10 基于MBSE的军用飞机PHM系统设计

Fig. 10 MBSE based PHM system design for military aircraft

在此设计方法指导下通过运行分析、系统分析、逻辑架构建立、物理架构建立等流程基于MBSE建立PHM开发平台业务模型,如图11所示。

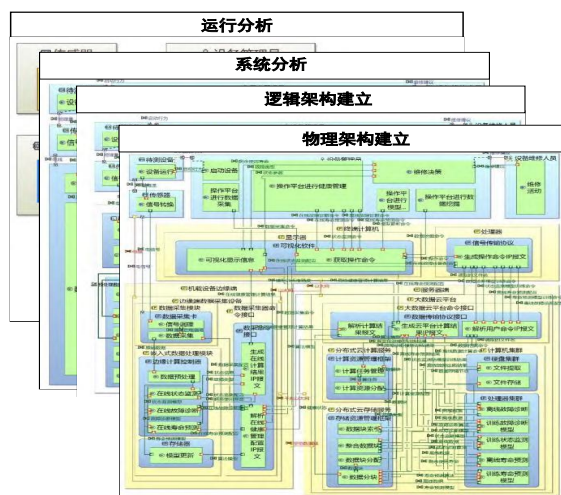


图11 PHM开发平台MBSE模型

Fig. 11 PHM development platform MBSE model



以机载燃油泵与氧气浓缩器为例,通过PHM领域多模型联合仿真,如图12所示,将包括机载设备、数据采集设备、智能算法、人机接口等在内的PHM系统组成部分以模型联系起来。

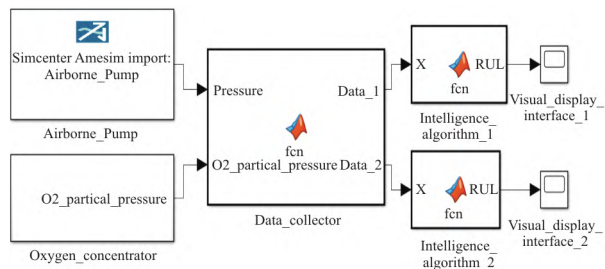
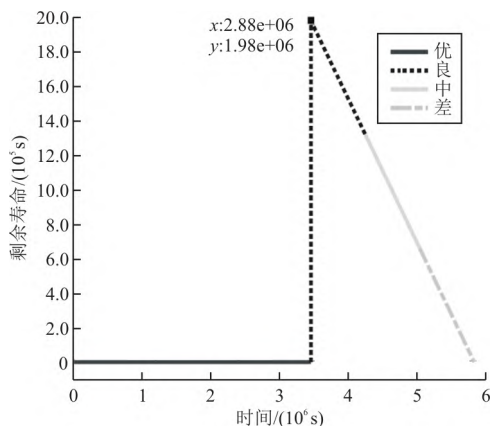


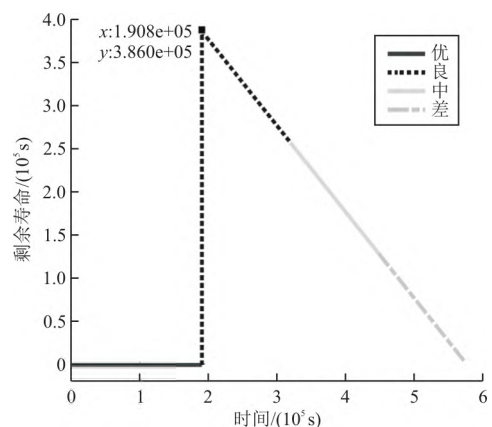
图12 PHM系统多领域模型联合仿真

Fig. 12 Multi-domain model co-simulation of PHM system

人机接口模块的仿真结果如图13所示,通过机载设备实时寿命预测对健康水平进行评估,基于健康状态评级可实现面向视情维修的辅助决策。



(a) 机载燃油泵寿命预测



(b) 氧气浓缩器寿命预测

图13 机载设备PHM系统联合仿真可视化结果

Fig. 13 Visualization results of airborne PHM system co-simulation

### 3.4 军用飞机PHM系统一体化设计特点

在PHM系统一体化设计过程中,模型化设计贯穿始终,规范了PHM系统设计流程;以建立实时化的PHM系统为工程化目标,强调了PHM系统运行效率;呈现方式具有面向应用层的可视化特征,旨在高效、充分利用知识信息,如图14所示。

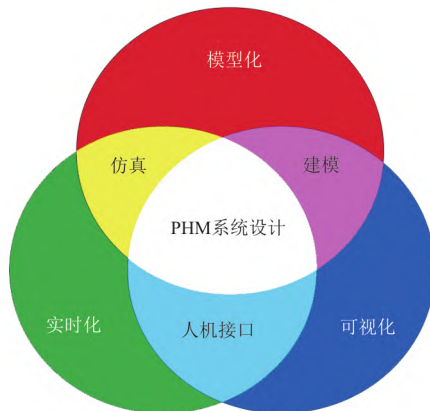


图14 PHM系统一体化设计架构

Fig. 14 PHM system integration design architecture

其一体性特点主要体现在以下3个方面。

#### (1) 理想与非理想条件的一体化

从军用PHM系统需求论证阶段开始,如何克服实际服役条件非理想的环境因素与条件制约影响始终是设计的关键问题。因此,在实验、仿真等理想环境条件下的系统设计流程须以实际服役条件为验证,通过边界实验探索系统安全使用包线,将设备状态以可视化的形式展现,结合设计与实验测试结果,对设计进行进一步迭代优化,使其满足实际服役条件下的非理想工况。

#### (2) 模型测试验证一体化

在军用飞机复杂系统设计过程中,涉及多领域模型的建立与验证,以及仿真环境。在进行PHM系统一体化模型设计时,基于通用的功能模拟接口(FMI)建立不同仿真环境间的数据交换通路,实现包括业务模型、算法模型、电路模型、计算卡模型、软件模型等多领域模型建模与可视化的仿真环境一体化,通过模型联合仿真逐步进行PHM系统模拟、半实物与实物仿真,实现PHM系统的功能验证与迭代优化,形成PHM系统设计的闭环。



### (3) 系统工程设计一体化

基于模型的系统工程将文本式的设计数据基于建模语言(如 SysML、DSML、KARMA<sup>[20]</sup>)以逻辑清晰的图元形式展现,并通过建模工具(如 IBM Rational Rhapsody、Capella、MagicDraw)提供简洁的图形化编程手段。尤其在实时化嵌入式系统设计上,国内外在复杂系统设计中积累了较为丰富的实践经验,形成了较为成熟的设计方法,如 Harmony 方法论<sup>[1]</sup>串联了嵌入式设计过程中互相制约但设计割裂的系统工程阶段与软件工程阶段,为 PHM 系统实时化设计提供了可视化、经济性的方法。

## 4 结 论

(1) 三维多相设计准则创新性地融合数据、结构、功能维度的设计特点,有利于促进军用飞机 PHM 系统设计标准化。

(2) 在技术验证过程中,基于软硬件协同加速的实时化 PHM 系统设计架构为 PHM 系统带来了 5.63 倍的加速效果以及 82.7% 的能耗缩减。

(3) 基于知识图谱的数据可视化 PHM 系统设计架构以结构化、关系型的数据库对知识数据进行管理,极大地提高了数据搜索与维修决策的效率。

(4) 基于 MBSE 的 PHM 系统模型化设计架构以模型为线索串联了系统设计、测试与验证环节,缩短了系统迭代周期,降低了系统设计成本。

### 参 考 文 献

- [1] DARPA. Strategic technologies [EB/OL]. (2019-03-01) [2022-03-07]. <https://www.fbo.gov/index?s=opportunity&mode=form&id=43a486f560215b96e5d291fdadd06e56&tab=core&cvview=1>.
- [2] Dr NEAL N, EDWARD R B. PHM on the F-35 fighter [C]// 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management. Denver: IEEE, 2011: 1-10.
- [3] KEVIN H. The role of HUMS [EB/OL]. (2017-10-05) [2022-03-07]. <https://www.aviationpros.com/airports/airport-technology/article/12365423/the-role-of-hums>.
- [4] 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)
- [5] 张洪亮. 特种飞机综合化任务系统 PHM 设计与实现[J]. 电讯技术, 2021, 61(3): 291-297.  
ZHANG Hongliang. Design and implementation of PHM for integrated mission system of special aircrafts [J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(3): 291-297. (in Chinese)
- [6] 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 Liru, PEI Zixuan, LIU Dong. On top-level architecture of PHM for manned/unmanned aerial vehicle cooperative fleet [J]. Electronics Optics & Control, 2021, 28(9): 54-58. (in Chinese)
- [7] GREGORY W V, BRAIN A V, MONEER H. A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2019, 30(1): 79-95.
- [8] 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.  
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)
- [9] 景博, 焦晓璇, 黄以锋. 面向飞机 PHM 的大数据分析与人工智能应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(1): 46-54.  
JING Bo, JIAO Xiaoxuan, HUANG Yifeng. Massive data mining and artificial intelligence application for aircraft PHM [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(1): 46-54. (in Chinese)
- [10] 景博, 徐光跃, 黄以锋, 等. 军用飞机 PHM 技术进展分析及问题研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 161-169.  
JING Bo, XU Guangyue, HUANG Yifeng, et al. Recent advances analysis and new problems research on PHM technology of military aircraft [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31(2): 161-169. (in Chinese)
- [11] 李稷, 胡挺. 基于成本的民用飞机可靠性与安全性一体化设计[J]. 航空工程进展, 2021, 12(3): 121-129.  
LI Ji, HU Ting. Integrated design of civil aircraft reliability and safety based on cost [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(3): 121-129. (in Chinese)
- [12] CHEN Z Y, CUI X H, MA N, et al. On-board multi-lane parallel MLVDS bus design for in-orbit embedded satellite test device [J]. Journal of Engineering-Joe, 2019 (23): 8959-8965.
- [13] ZHANG B, ZENG T. Advanced prognostics and health management technology [J]. Measurement & Control Technology, 2003, 22(11): 4-6. [14] YUE J, ZHU Y, CAI Z, et al. Energy efficient buffer cache replacement for data servers [C]// 2011 IEEE Sixth International Conference on Networking, Architecture, and Storage. [S. l.]: IEEE, 2011: 329-338.

- [15] 郭宁生, 蒙涛. 航空领域重大关键技术项目发现影响因素研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(1): 160-167.  
GUO Ningsheng, MENG Tao. Research on influencing factors of major key technology project discovery in aviation field [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(1): 160-167. (in Chinese)
- [16] DONG X W, THANOU D, RABBAT M, et al. Learning graphs from data [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(3): 44-63.
- [17] ZHANG X, JING W, NI J. Knowledge graph and rule constraint based equipment fault reason diagnosis method involves constructing equipment fault knowledge graph data model, and defining fault reason smart selection technology based on rule matching and reasoning: CN113312411-A [P]. 2012-09-13.
- [18] RAMOS A L, FERREIRA J V, BARCELO J. Model-based systems engineering: an emerging approach for modern systems [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C-Applications and Reviews, 2012, 42(1): 101-111.
- [19] VIPAVETZ K, SHULL D T A, INFELD D S, et al. Interface management for a NASA flight project using model-based systems engineering (MBSE) [C] // 2016 INCOSE International Symposium. [S.l.: s.n.], 2016: 1-15.
- [20] EDITH P. SysML distilled: a brief guide to the systems modeling language [J]. Insight, 2015, 17(2): 63.

#### 作者简介:

景 博(1965—),女,博士,教授。主要研究方向:智能检测与健康管理、测试性设计、传感器网络、信息融合等。

黄崧琳(1998—),男,硕士研究生。主要研究方向:智能检测与健康管理、嵌入式设计等。

王生龙(1995—),男,博士研究生。主要研究方向:智能检测与健康管理、系统建模与仿真等。

崔展博(1991—),男,博士研究生。主要研究方向:基于模型的系统工程、自动化测试与仿真、飞控系统自动检测等。

盛增津(1989—),男,博士,工程师。主要研究方向:故障预测、健康管理等。

(编辑:丛艳娟)

## 第二届飞行器服役(作战)完整性学术会议 第一轮会议通知

飞行器的服役(作战)完整性是飞行器在服役(作战)使用过程中保持完好及功能不退化的属性,其主要是由飞行器的耐久性、保障性、安全性、装备能力、生存性、修复性、电磁兼容性、体系兼容性等决定的,是飞行器更具有综合性的通用质量特性。本届会议聚焦飞行器气动、结构、各系统服役(作战)完整性的设计、制造、试验、维持及增长等主题开展学术研讨,内容重点涉及面向服役运营(作战使用)需求的飞行器综合论证、优化设计、先进制造、失效预测、损伤分析、试验测试、仿真分析、健康监控、维修保障等方面。

本着“聚焦国家重大需求、共谋自主创新发展”的宗旨,本届会议由中国航空学会结构与强度分会、中国仪器仪表学会设备结构健康监测与预警分会主办,空军工程大学航空工程学院、西安交通大学航天航空学院承办,唐长红院士担任大会主席,何宇廷教授担任执行主席,旨在搭建用户—高校—工业部门交流沟通的平台,促进领域内的协同自主创新发展。

本届会议拟于2022年10月28日至30日在西安召开,不收取会议费,各参会代表交通、食宿费用自理。投稿邮箱AOIS2022@163.com,论文格式参见《航空工程进展》的要求,投稿论文自行完成保密审查,优秀稿件推荐至《航空工程进展》刊发专栏/专刊。

会议组委会:

主 席:西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室、先进飞行器服役环境与控制国家重点实验室李跃明教授,金峰教授。

副主席:空军工程大学飞行器作战完整性中心张登成教授,景博教授。

委 员:西安交通大学陈刚,王娴,杨雄伟,柴怡君;

空军工程大学飞行器作战完整性中心张腾,李哲,冯宇,陈涛。

会议联系人:田甜,18009295536,fyzzwzx@163.com;

李哲,17791651321,lizhe08402@163.com

杨雄伟,15929565947,op.yangxw@xjtu.edu.cn。