

# 基于知识图谱的航空发动机 PHM 仿真验证平台设计

范满意<sup>1</sup>, 罗凯<sup>2,3</sup>, 马英杰<sup>2,3</sup>, 韩崇鹏<sup>4</sup>

(1. 中国航空发动机研究院 基础与应用研究中心, 北京 101304;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

3. 北京市高速交通工具智能诊断与健康重点实验室, 北京 100041;

4. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

**摘要:** 针对航空发动机 PHM 系统功能、性能验证要求高、验证内容多、验证业务复杂等实际问题, 分析了国外先进航空发动机 PHM 系统开发验证情况及经验, 提出了一种基于知识图谱技术的 PHM 仿真验证平台设计方法; 该方法利用了知识图谱在具有的半结构化、高效性、直观性等特点, 实现了发动机 PHM 验证涉及到的故障模式、故障特征、算法模型及专家知识等大量信息知识的有效组织与管理; 在此基础上, 进一步面向发动机 PHM 验证数据量大、计算需求高等需求, 采用大数据、数据挖掘、机器学习、云服务等技术, 搭建了基于知识图谱的航空发动机 PHM 仿真验证平台, 实现了数据挖掘与信息提取、专家知识获取、多层次融合诊断智能导向型推理等应用; 最后, 以某型发动机为对象, 介绍了发动机 PHM 仿真验证情况; 经实际验证结果分析, 该文提出的 PHM 仿真验证平台能够有效解决航空发动机 PHM 系统可验证的历史故障样本少、验证功能单一等问题。

**关键词:** 知识图谱; PHM 建模; 仿真验证; 云服务; 智能导向型推理

## Design of Aircraft Engine PHM Simulation and Verification Platform Based on Knowledge Graph

FAN Manyi<sup>1</sup>, LUO Kai<sup>2,3</sup>, MA Yingjie<sup>2,3</sup>, HAN Chongpeng<sup>4</sup>

(1. Basic & Applied Research Center, Aero Engine Academy of China, Beijing 101304, China;

2. Beijing Aerospace Measure & Control Corp. Ltd, Beijing 100041, China;

3. Beijing Key Laboratory of High-speed Transport Intelligent Diagnostic and Health Management, Beijing 100041, China

4. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** In response to practical issues such as high requirements for functional and performance verification of the aviation engine PHM system, multiple verification contents, and complex verification business, this paper analyzes the development and verification situation and experience of advanced aviation engine PHM systems abroad, and proposes a design method for a PHM simulation verification platform based on knowledge graph technology. This method utilizes the semi structured, efficient, and intuitive characteristics of knowledge graph to effectively organize and manage a large amount of information knowledge related to engine PHM validation, including fault modes, fault features, algorithm models, and expert knowledge. On this basis, further targeting the demand for large amounts of data and high computational requirements in engine PHM verification, a knowledge graph based aviation engine PHM simulation verification platform has been established using technologies such as big data, data mining, machine learning, and cloud services. Applications such as data mining and information extraction, expert knowledge acquisition, and multi-level fusion diagnosis intelligent guided reasoning have been implemented. Finally, taking a certain type of engine as the object, the PHM simulation verification of the engine was introduced. After analyzing the actual verification results, the PHM simulation verification platform proposed in this article can effectively solve the problems of limited historical fault samples and single verification function that can be verified in the aviation engine PHM system.

**Keywords:** knowledge graph; PHM modeling; simulation and validation; cloud services; intelligent guided reasoning

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-05-14。

基金项目: 国家科技重大专项(2019-I-0019-0018, 2019-I-001-001)。

作者简介: 范满意(1991-), 男, 河南周口人, 在读博士生, 工程师, 主要从发动机健康管理与控制技术方向的研究。

引用格式: 范满意, 罗凯, 马英杰, 等. 基于知识图谱的航空发动机 PHM 仿真验证平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 305-313.

## 0 引言

PHM 技术的持续推广、应用,提升了装备保障能力及水平,包括大数据、机器学习、数字孪生等多项智能化技术,已成功应用至 PHM 地面系统,有效地提升了装备海量测试数据分析处理效率及智能化水平<sup>[1-4]</sup>。以航空发动机领域为例,美国 GE、罗罗等公司已经在其军民用发动机型号产品中建立了智能化故障预测与健康管理系统<sup>[5-6]</sup>,帮助其售后服务及维修保障人员识别潜在故障,有效地提高了产品维护效率,减少了停机时间和成本,并确保了航空安全。另外,借助 PHM 技术应用,还提供一系列定制化服务,以满足客户的特定需求,例如定制化的健康管理方案和远程技术服务支持等。目前,PHM 系统已经配套至航空、航天、车船、大型设施等多领域复杂装备的运维保障体系中,有效地提升了装备安全性、经济性,但也暴露出了一些问题,包括故障诊断预测精度不足、系统业务及功能不完善等。经事后分析得出,PHM 技术缺乏有效验证能力和工具是其中主要原因之一<sup>[7-8]</sup>。随着我国新型航空发动机的集成度、复杂度及智能化程度急剧增加,使其对 PHM 系统成熟度要求更高,对高效、智能的 PHM 技术验证需求尤为迫切。同时,考虑到新型产品配套时间短,故障数据积累少,可验证的故障不足,发动机 PHM 验证需要借助仿真等手段,以补充验证数据。

目前,国外典型 PHM 开发验证工具有 VSE、Sure-Sense 等产品<sup>[9]</sup>,提供了包括 PHM 工程搭建、数据融合、诊断预测推理、系统状态评估等功能,有效地支撑了包括美国空军 F-16、F/A-22 飞机涡轮发动机监控、诊断、预测等 PHM 验证,缩短了发动机产品研发周期并消除通常由错误数据引起的昂贵调查。除 PHM 验证功能外,国外 PHM 开发验证工具产品核心优势在于 PHM 知识模型库,其通过体系化的知识组织管理,有效地支撑复杂装备 PHM 多业务、多过程验证。近年随着技术发展,知识图谱已经成为信息领域智能化知识管理技术手段。知识图谱应用数学、图形学、信息可视化等技术,可有效实现复杂知识内容的语义搜索、智能问答、内容推荐和辅助决策,已广泛应用至医学、教育、电力、航天等多领域<sup>[10-11]</sup>。

在 PHM 开发验证技术需求分析基础上,针对新型航空发动机 PHM 验证实际需求,包括基于大数据挖掘、深度机器学习诊断预测验证等<sup>[12]</sup>,提出了一种基于知识图谱的 PHM 仿真验证方法,研制了一套智能化发动机健康管理系统验证平台。该平台在利用大数据、深度机器学习、知识图谱等技术基础上,提供发动机 PHM 算法建模、知识开发、仿真验证及原理样机验证等功能,可满足发动机基于海量数据处理、多元异构关联分析、智能导向型推理的诊断预测验证等需求。

## 1 基于知识图谱的 PHM 仿真验证平台设计需求分析

与传统 PHM 单机软件相比,基于分布式云服务的

PHM 仿真验证平台具有以下优势:1) 借助 Hadoop、SpringCloud、Docker 容器技术搭建验证平台架构,可有效满足发动机 PHM 验证所需处理的海量验证数据处理需求,提高仿真计算、诊断推理等验证效率;2) 可有效为知识图谱、深度机器学习等智能化新技术在 PHM 验证提供支撑;3) 将 PHM 验证服务化,可有效验证多发动机、多业务并行 PHM 能力,真实复现现场 PHM 系统环境。其中:

1) 大数据验证服务,采用 HDFS 分布式文件系统存储源码二进制文件、视频、音频、图像等较大的数据文件,可充分发挥 HDFS 对于大文件存储的优势,进而提高发动机飞参运行记录等多源海量验证数据处理效率。针对 QAR、ECU、CEDU 等历史飞行记录,按照故障代码、发生时间等,实现故障记录验证数据海量高效查询,并快速完成误码剔除、滤波平滑等预处理。

2) 智能计算验证服务,通过集成知识图谱技术框架,实现发动机故障机理、故障特征、故障数据、诊断预测模型等结构化知识和故障预案、故障案例、手册文件等非结构化知识组织管理。同时,利用深度机器学习引擎,利用规则推理、回归聚类等方法,可进一步实现 PHM 知识挖掘、诊断预测验证模型学习训练等功能验证。

3) 分布式验证服务,依据 OSA-CBM+ 架构<sup>[13]</sup>,提供分布式健康管理原理样机并行验证服务,面向多发动机型号、机载/地面 PHM、诊断预测等多环境、多业务验证需求,提供数据采集、状态监视、故障诊断、寿命预测等验证功能,从而实现与实际机队发动机 PHM 保障条件相一致的集成验证。

## 2 PHM 仿真验证平台设计

### 2.1 总体架构设计

采用私有云服务搭建 B/S 平台架构,提供发动机试验数据、飞参数据以及维修信息等验证数据采集服务,经数据进行清洗、集成、融合存储到数据库。业务层,通过调用建模开发、推理引擎、业务服务等,实现发动机 PHM 验证建模、仿真验证、原理验证等应用。总体架构如图 1 所示。

1) 环境层:包括 PHM 系统运行所需的必要通信网络、信息服务、系统安全产品等基础设施和操作系统、数据库系统、文字处理工具等系统环境;

2) 数据层:主要为发动机 PHM 验证数据对象,包括设计数据、试验数据、仿真数据、航空数据、飞机维护管理系统数据<sup>[14]</sup>、维修数据、诊断预测算法等;

3) 支撑层:包括用于仿真验证平台所需的基础数据服务,包括数据库服务、文件服务、报表服务、资源服务、可视化组件、权限控制等基础服务组件;

4) 业务层:包括诊断预测算法模型等验证对象开发集成工具、诊断预测业务应用的故障树遍历、规则推理、案例检索、知识图谱融合推理等业务服务;

5) 应用层:包括仿真验证、功能原理验证、外场保障功能验证、现场维修保障功能验证以及验证过程可视化交

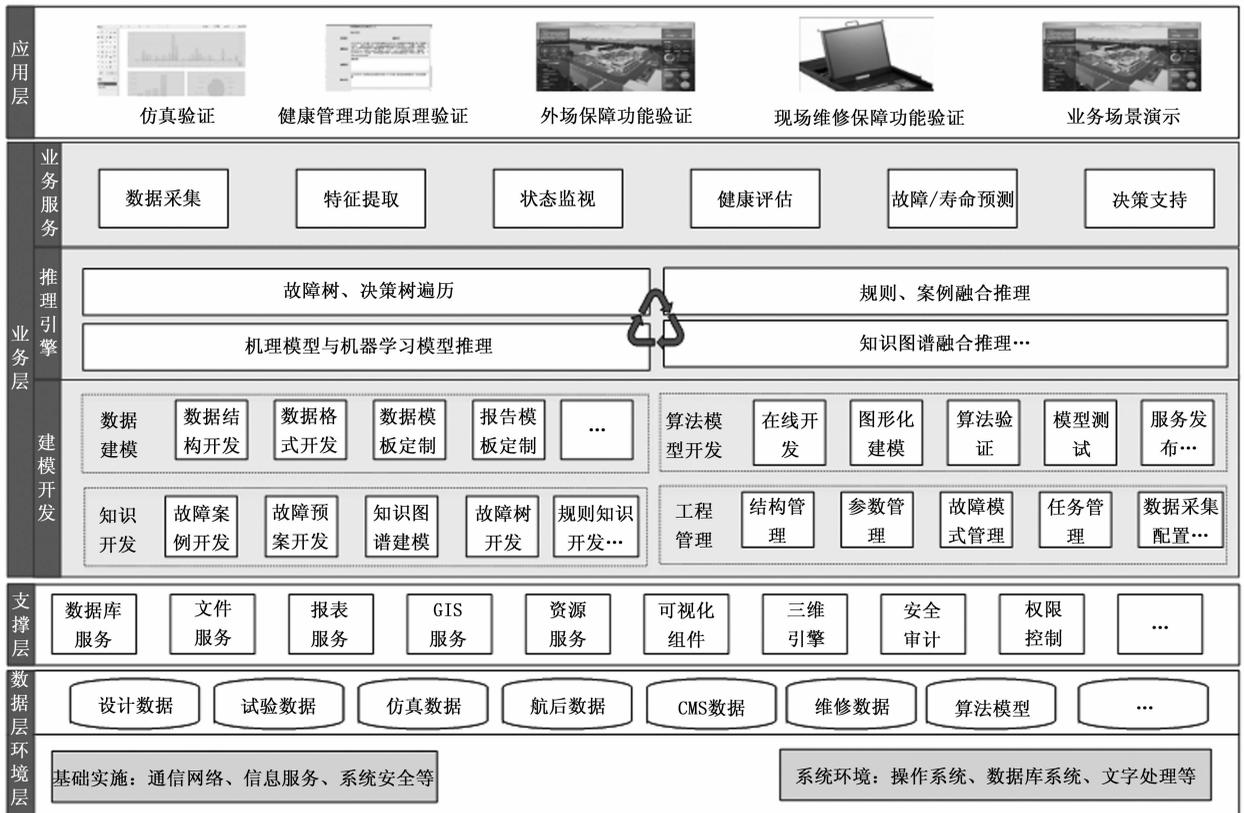


图 1 基于知识图谱的 PHM 仿真验证平台设计总体设计

互等应用软件及工具。

### 2.2 平台 workflow

平台工作流程主要包括“验证开发”、“验证数据接入”、“验证计算评估”等典型过程，平台工作流程如图 2 所示。

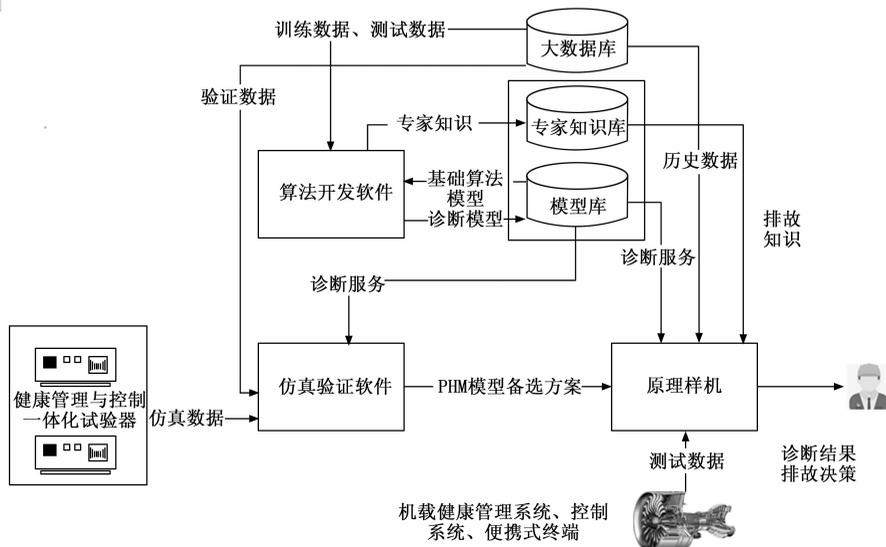


图 2 基于知识图谱的 PHM 仿真验证平台工作流程图

1) 验证开发: 包括发动机 PHM 工程模型建模、诊断预测算法开发建模、专家知识开发;

2) 验证数据接入: 包括发动机一体化半实物仿真试验设备数据、机载健康管理系统离线数据、飞机 QAR 航后数据等实时数据接入和离线数据接入;

3) 验证控制: 包括开发 PHM 验证用例、创建 PHM 验证试验、启动控制 PHM 验证以及 PHM 验证算法模型加载推理计算;

4) 验证监视: 包括 PHM 验证场景交互、PHM 验证过程数据监视、报警故障诊断监视、故障预测与寿命预测监视;

5) 验证评价: 包括内场试验 PHM 功能原理验证、外场运维保障 PHM 功能原理验证、故障诊断与预测算法准确率、精度验证。

### 2.3 平台功能设计

#### 2.3.1 验证数据服务

针对发动机海量 PHM 验证数据特征: 一是数据来源具有多源性; 二是数据种类和形态具有复杂性, 即异构性; 三是数据具有时空性, 采用 Hadoop、

Spark、Storm 等主流大数据组件,实现多型号、多编号发动机验证数据统一采集、处理,包括数据贯标、数据清洗、数据特征提取和数据存储管理等。在此基础上,建立数据贯标的统一接口,以提高验证数据的汇聚使用能力和新源数据的快速集成能力。验证数据服务数据流如图 3 所示。

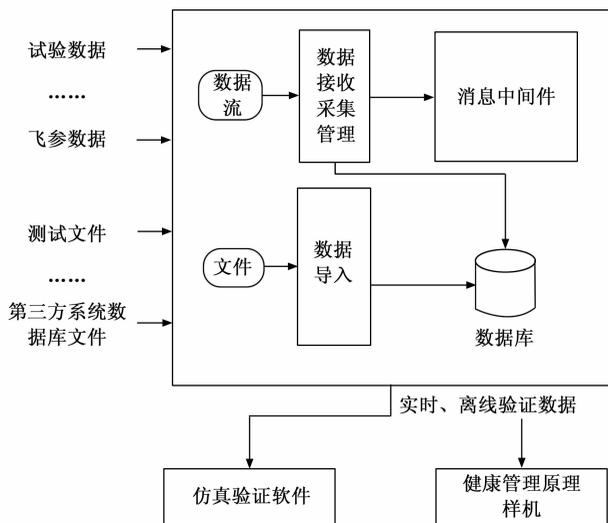


图 3 验证数据服务数据流

针对多源数据不同类型、特点、应用方式,包括数据格式、是否频繁查询、实时性要求等,平台采用与之相适应的多种数据库进行分布式存储,以满足实时、离线等验证对数据查询、管理需求。多源验证数据存储服务如图 4 所示。

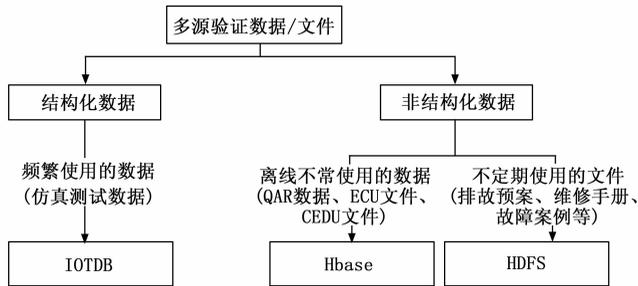


图 4 多源验证数据存储服务

1) 时序数据库服务:采用 IoTDB 等时序数据库,利用其流式数据高效处理能力,可以实时处理传感器数据流,支持复杂的数据分析和挖掘操作;

2) 离线海量数据服务:采用 Hbase 分布式列式存储系统,利用其分布式扩展及高效查询能力,可以实现多型号海量历史验证数据查询;

3) 非结构化数据服务,采用 HDFS 分布式文件系统,为发动机 QAR、故障记录等离线文件提供海量存储服务,借助其大规模数据集服务能力,可有效实现多型号文件管理及高效服务。

### 2.3.2 建模开发服务模块设计

针对发动机仿真验证需求,软件提供建模开发服务模

块,由基础算法库、专用模型库、专家知识开发等功能模块。

1) 在线开发:本模块提供算法模型在线开发、与离线导入功能。其中:在线开发支持基于多语言脚本、源代码在线开发,用户可在线开发 PHM 诊断预测模型和仿真验证模型。软件提供基于发动机系统、分系统、设备结构的图形化开发功能和节点配置功能。用户可开发用于 PHM 验证的发动机仿真模型或压气机等仿真模型。同时,软件提供模型训练、循环迭代计算(包括训练误差损失等)等完成模型在线训练,训练后模型保存至平台,供调用使用仿真调用。考虑到发动机诊断预测算法复杂度及参与在线开发人员技术掌握情况,在线开发功能在设计中采用了轻量级的开源代码编辑器 VSCode 工具,利用其提供的丰富功能和插件,如代码补全、调试、版本控制和代码片段等,以有效提升算法开发效率及开发语言扩展性。目前,在线开发工具已经实现了 C++、Python、Matlab 三种语言开发支持。未来随着软件升级,可进一步支持包括 Java、GO、Modelica 等多计算、仿真语言。

2) 算法模型库:面向发动机健康管理,提供温度、电压、电流等信号检测诊断模型以及压气机、燃烧室、高压涡轮、低压涡轮等油路、气路、控制、振动等典型分系统诊断预测模型管理功能,用于 PHM 诊断预测验证。同样,用户可利用在线开发的诊断预测算法,在验证平台内完成诊断预测模型图形化开发及训练、发布(如图 5 所示)。并利用平台提供测试接口,输出测试结果,用于诊断预测模型确认。

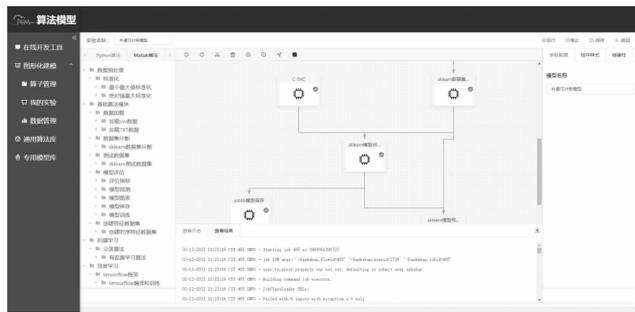


图 5 发动机诊断预测图形化建模

### 2.3.3 知识图谱模块设计

知识图谱构建模块主要分为专家知识开发、数据挖掘、知识图谱构建、知识综合查询等功能。本模块在发动机专家知识数据库模块提供的 Spark 数据挖掘分析、Graph 图计算<sup>[15-16]</sup>基础上,提供发动机数据挖掘分析等功能,并加载显示发动机数据挖掘分析结果、关联关系网络图等。对于无法满足的数据挖掘分析,按数据需求进行数据挖掘算法定制。知识图谱模块功能包括:实体抽取模块,用于从发动机设计文件、故障案例等文本中自动提取数据实体,并标注信息类型和属性信息;关系抽取模块:用于从文本中自

动提取发动机验证信息关系, 包括故障模式关联的故障特征、诊断算法、预测算法等; 知识表示模块, 用于将发动机 PHM 待验证信息、关系和属性等信息转换为计算机可读的形式; 知识存储模块, 用于存储整个知识图谱, 并提供高效的查询和更新接口, 本项目采用图形理论的开源 NoSQL 数据库; 知识推理模块, 用于从发动机 PHM 知识图谱中推导出新的知识, 包括故障间传递影响等; 知识查询与应用模块, 用于根据用户的查询需求, 从知识图谱中检索相关 PHM 验证知识, 并将其应用于 PHM 诊断、预测及决策支持等。主要功能应用包括:

1) 专家知识开发: 面向发动机诊断、预测、辅助决策等应用, 提供定量、定性专家知识集成功能: (1) 采用规则推理方法, 实现基于测试数据、工作状态、控制指令、飞行事件的推理知识集成功能。以发动机故障代码、诊断结果等为索引, 提供异常故障发生所处工况事件、正常操作流程、可能故障原因、处置流程等排故预案知识开发功能; (2) 采用非结构化数据提取方法, 提供基于历史故障记录、维修记录的故障案例信息抽取集成功能, 完成诊断维修知识分级、诊断维修知识基本信息、故障征兆以及维修步骤、维修结果等知识提取与集成。

2) 知识提取挖掘: 针对发动机设计数据、测试数据、维修数据等多源的结构化数据和非结构化文件, 采用最大匹配法、最优匹配法等, 完成无关信息剔除和有关信息分词提取; 提供特征值提取功能, 利用词频、逆向文件频率等方法, 进一步对预处理后的发动机诊断知识进行特征提取, 降低知识挖掘所需文本向量维度; 提供诊断知识挖掘功能, 提供文本集转化功能, 将文本转化为文本矩阵输入至 K 近邻、贝叶斯模型、决策树等模型, 输出文本集分类, 完成诊断知识挖掘, 知识提取挖掘流程如图 6 所示。

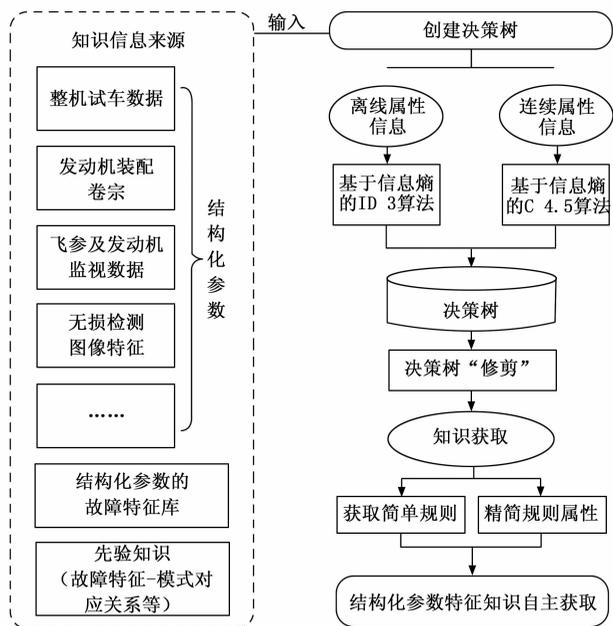


图 6 发动机专家知识采集与提取

3) 知识图谱构建: 依据知识图谱技术架构, 发动机故障专家知识图谱的构建总体流程分为知识融合、增量迭代 2 个流程, 如图 7 所示。其中: 知识融合阶段仅仅是从不同类型的知识源抽取构建知识图谱所需的实体、属性和关系, 形成了一个孤立的抽取图谱。为了形成一个完整的知识图谱, 需要将这些抽取结果集成到知识图谱中, 以进行知识融合; 最后将图谱存储在数据库中才能提高图谱的适应效率, 不同于传统的关系型数据库和分布式数据库, 知识图谱需要存储在专用的图数据库中, 可采用 Neo4j 等数据库实现图谱的存储。

知识流 (知识渠道 → 知识图谱 → 知识价值)

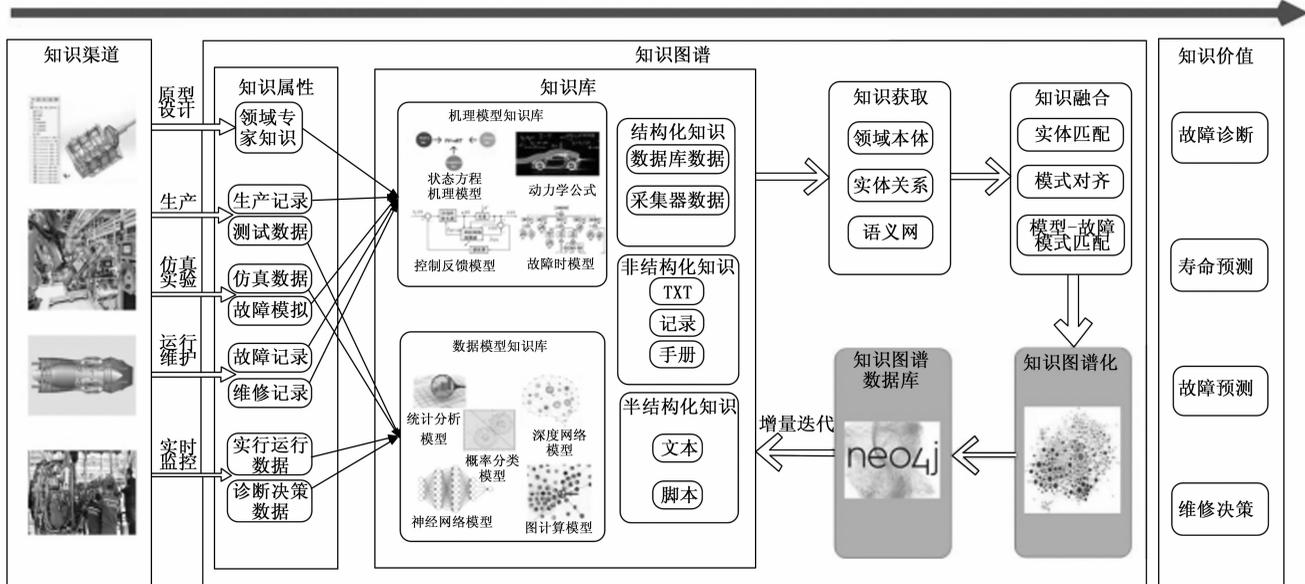


图 7 发动机 PHM 知识图谱构建流程

### 2.3.4 仿真验证评价模块设计

仿真验证评价模块包括用例管理、验证控制、故障注入、验证分析、结果显示等功能，如图 8 所示。其中：用例管理模块，采用用例驱动方式，提供验证用例的开发、配置、管理功能，支持验证过程所需数据管理和验证模型管理功能；验证控制模块，提供仿真验证试验用例的开始、停止控制功能，并利用发动机仿真验证设备接口<sup>[17]</sup>等，实时采集仿真验证数据；故障注入模块，采用指令方式+参数注入方式，驱动验证设备对具体工况、故障模式进行仿真或驱动历史数据库进行对应故障数据回放，覆盖发动机气路、油路、滑油、控制等以及发动机全系统故障模拟；验证分析模块，在验证过程中，提供验证算法接口调用功能，利用验证得到的仿真数据加载调用健康管理算法模型，输出验证诊断预测结果等；结果显示模块，采用文本记录、曲线等方式，显示验证试验进程信息，并根据用户所开展的验证试验进程，滚动显示试验过程信息及故障诊断等结果生成信息。

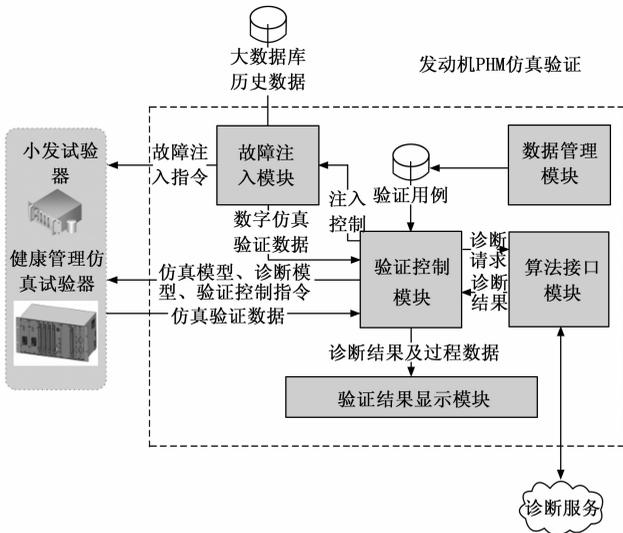


图 8 发动机仿真验证模块工作原理

### 2.3.5 健康管理原理样机模块设计

健康管理原理样机模块包括 PHM 建模与配置、状态监测与故障诊断、趋势预测与维修决策。

1) PHM 建模与配置：采用图形化、向导式方式，提供发动机 PHM 建模功能，实现发动机结构、参数、故障模式、PHM 验证任务模型等基础设计信息配置管理；采集配置模块，提供总线帧格式协议配置、通信协议配置等功能，利用通用数据采集与数据接收服务，实现发动机数据接收、解析、存储。

2) 状态监测与故障诊断：提供履历信息、健康信息、健康数据状态监视功能，支持机队、单机、分系统等多级对象状态监视；异常检测模块，提供异常数据判读、异常趋势检测功能，支持发动机测试、试验、飞行过程异常状态检测、异常趋势检测，并输出检测报警信息。故障诊断

模块，提供基于故障树、信号特征提取、数学物理模型等融合故障诊断，利用实时测试数据、历史飞参数据等，实现故障报警、故障部位显示、故障影响分析等；

3) 趋势预测与维修决策：加载数学物理模型，利用当前数据和历史数据对产品特征参数随时间和环境的变化趋势进行分析，提供产品性能、振动、滑油等特征参数的趋势分析，性能衰减、专题趋势预测功能；维修决策模块，提供故障影响分析、维修排故预案、历史故障案例、知识图谱等综合知识推送服务，支持维修电子手册等资源链接，辅助排故、维修参考，包括健康报告生成、维修知识检索等。

## 3 平台实现技术研究

基于知识图谱的航空发动机 PHM 仿真验证平台所需支撑技术包括：数据挖掘与特征提取、专家知识自主获取以及基于知识图谱的融合验证 3 部分。

### 3.1 结构化特征提取

通过开展发动机数据挖掘与信息提取技术，为构建发动机 PHM 知识图谱提供定量知识构建支持，包括：数据传输、测量参数预处理、故障特征提取与表征、特征相关性分析以及特征增强五部分，主要技术流程如图 9 所示。

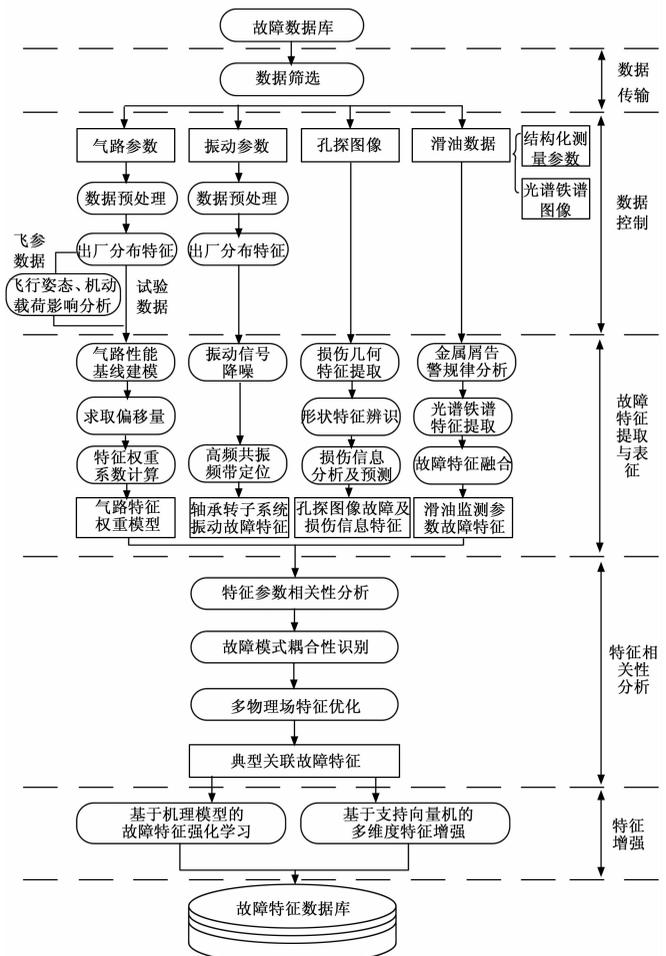


图 9 发动机数据挖掘与特征提取流程

1) 数据传输: 利用批次发动机试车数据 (或飞参数据), 通过筛选测量参数, 从而完成气路数据、振动数据、孔探数据或滑油数据的筛选, 从而可以保证所得数据能够直接进行后续处理。

2) 数据挖掘: 采用元数据方法, 开展面向发动机设计要求、设计方案、设计图纸、加工要求、装配数据、试验数据、运行数据、维护检修等关联分析, 建立全寿命周期数据的映射关系模型。

3) 故障特征提取与表征: 面向发动机气路、滑油等数据, 采用气动热力模型、图像处理方法、主成分分析方法等<sup>[18]</sup>, 完成典型部件故障、气路数据、滑油光谱等故障特征提取。

4) 特征相关性分析: 利用 K-means 的聚类算法、Pearson 系数等方法, 完成故障、特征数据相关性计算, 输出相关性矩阵, 以分析、优化多故障特征及特征敏感度, 为多特征知识融合提供输入。

5) 故障特征增强: 提供基于 Vague 集特征参数的相似度和排序功能<sup>[19]</sup>, 以实现基于参数特征统计的发动机知识表征。同时, 采用迁移学习技术, 将发动机故障模式模型化, 实现基于强化学习生成故障特征库的增广策略, 为发动机仿真验证提供评估、评价依据。

### 3.2 非结构化专家知识提取

针对非结构化知识, 如发动机故障诊断孔探图像、历史故障案例等图片和文本数据等, 采用图像和语义识别方法, 提取非结构知识中的关键特征, 并可转化为粗糙集理论可以处理的数据集形式, 构建图像和语义识别算法库。在此基础上, 利用粗糙集预处理方法等, 完成样本决策表训练、连续数据离散化和以及训练样本属性约简。最后, 利用反向传播神经网络 (BP)、卷积神经网络 (CNN)、对抗神经网络 (GAN)、深度神经网络 (DNN) 算法模型, 完成专家知识自主获取与提取。多源异构数据挖掘技术流程如图 10 所示。

### 3.3 基于知识图谱的融合验证

采用智能导向型推理方法实现基于知识图谱的融合验证, 通过构建多层次决策融合的导向型推理模型, 如图 11 所示, 完成知识图谱的知识组织、表示、融合。利用智能导向型验证推理模型, 可有效融合故障知识、故障特征、诊断预测模型、维修专家知识等内容。在此基础上, 借助业务流程引擎、规则推理与模型计算引擎等, 驱动发动机 PHM 验证, 实现基于机理模型的诊断预测、基于故障特征的诊断预测以及基于故障案例的诊断融合推理验证等。

## 4 仿真验证实例

采用基于知识图谱的航空发动机 PHM 仿真验证平台完成 PHM 建模、仿真建模、诊断

预测建模、知识图谱构建、PHM 仿真验证、PHM 功能原理样机验证。航空发动机 PHM 工程一体化平台验证, 一方面解决传统单点验证不成体系的问题; 同时解决了新型发动机故障样本少、气路、滑油、振动等系统级故障诊断预测精度评价缺乏数据支撑等问题。

### 4.1 PHM 建模

利用 PHM 验证平台提供的 PHM 工程模型, 完成发动机 PHM 建模。以某型发动机为验证对象, 通过导入发动设计信息、测试性模型等, 在解析测试性模型中 FST 信息 (Fault-Signal-Test) 信息<sup>[20]</sup>基础上, 完成装备构型、测点、故障模式导入, 并根据机载/地面 PHM 业务需求, 创建发动机 PHM 验证任务。

### 4.2 仿真建模

利用 PHM 验证平台提供的在线开发功能, 完成发动机仿真验证模型开发。利用发动机工作原理构建发动机仿真模型, 利用平台提供的算法模型接口, 实现发动机仿真输入、输出接口, 并发布至仿真验证模型库, 如图 12 所示。

### 4.3 诊断预测建模

利用 PHM 验证平台提供的算法模型库, 采用图形化建模方式, 调用数据驱动、特征提取、故障诊断、故障预测等算法, 构建发动机及关键分系统、部件故障诊断预测模型, 并配置至发动机 PHM 模型中, 如图 13 所示。诊断预测建模支持开放式的服务调用功能, 可向符合平台标准接口的算法模型提供集成与接口自动读取功能。用户即可调用在线开发、图形化建模的诊断预测算法, 也可读取外部诊断预测服务接口, 轻松调用各类 PHM 算法模型。

### 4.4 知识谱图构建

利用 PHM 验证平台提供的专家知识管理功能, 包括故障特征、故障案例、故障预案、知识图谱可视化等工具, 实现发动机 PHM 知识图谱结构。平台底层通过加载数据挖掘、故障增强等方法, 完成知识提取与图谱构建, 如图 14

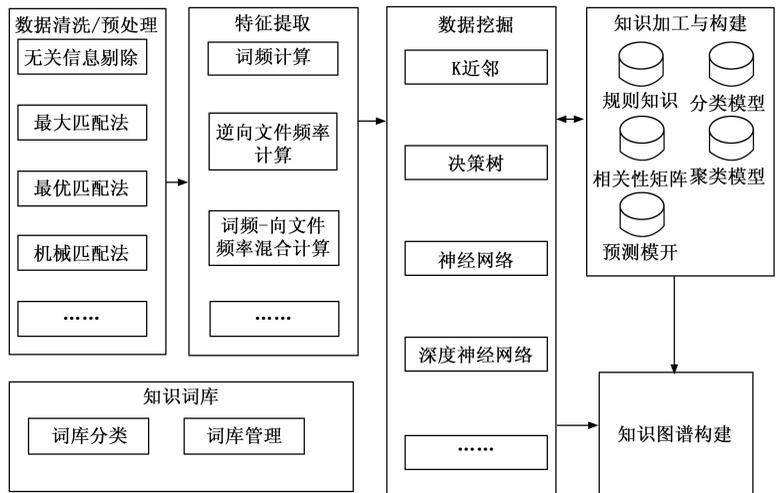


图 10 多源异构数据关联挖掘流程

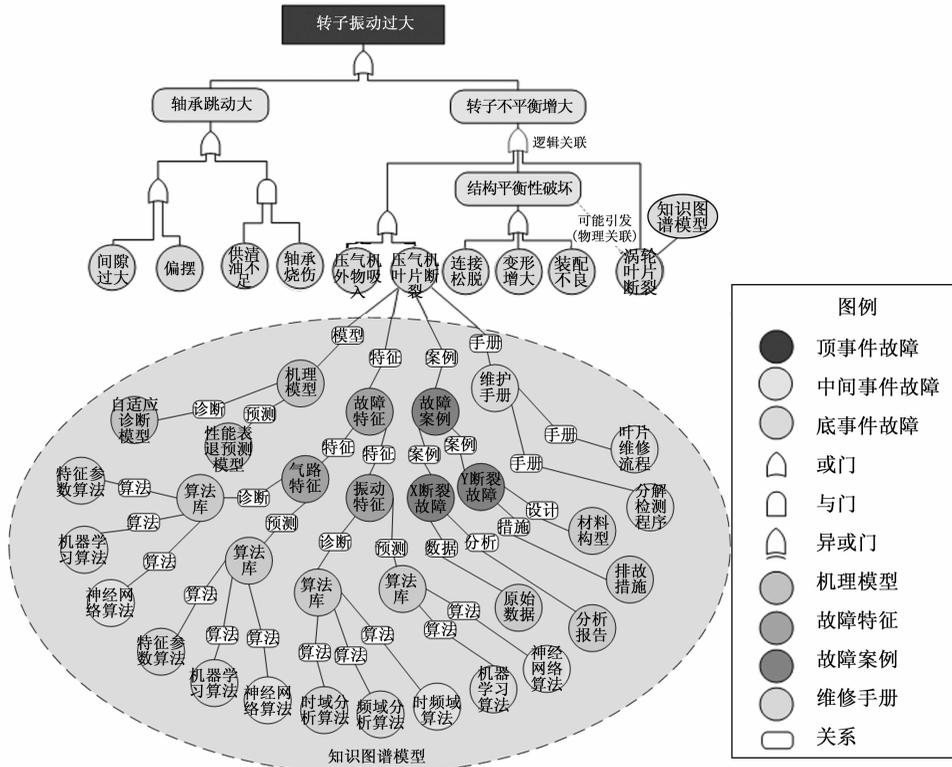


图 11 智能导向型 PHM 验证模型

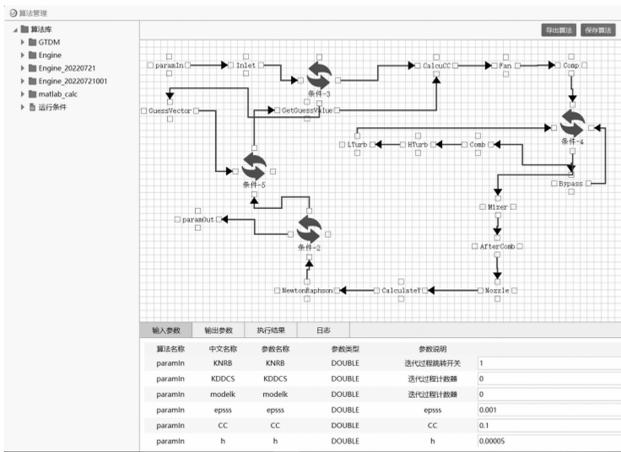


图 12 发动机仿真验证建模

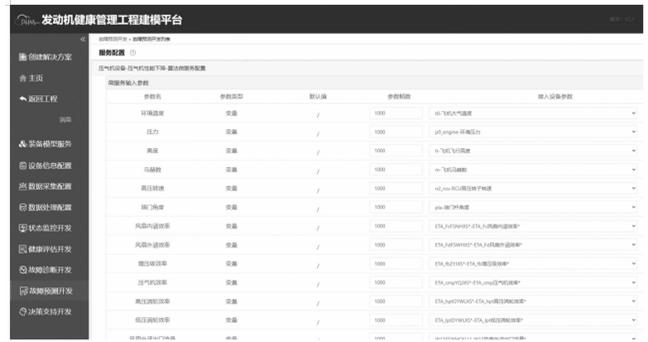


图 13 发动机 PHM 算法验证配置

所示。

### 4.5 仿真验证评估

利用 PHM 验证平台提供的仿真验证功能，创建发动机仿真验证任务、验证试验，并通过驱动发动机仿真验证模型及诊断预测模型，完成发动机故障诊断、故障预测等仿真验证，如图 15 所示。

### 4.6 原理样机验证

利用 PHM 验证平台提供的原理样机功能，通过加载历

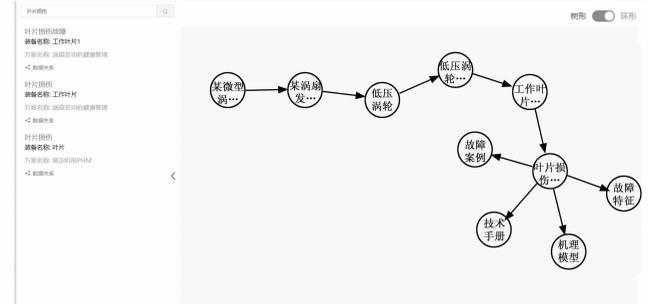


图 14 发动机知识图谱构建



图 15 发动机仿真验证

史 QAR 飞参数据等, 调用已完成仿真验证的 PHM 模型、诊断预测算法模型、专家知识等, 完成发动机故障诊断、故障预测、辅助决策等功能验证, 如图 16 所示。

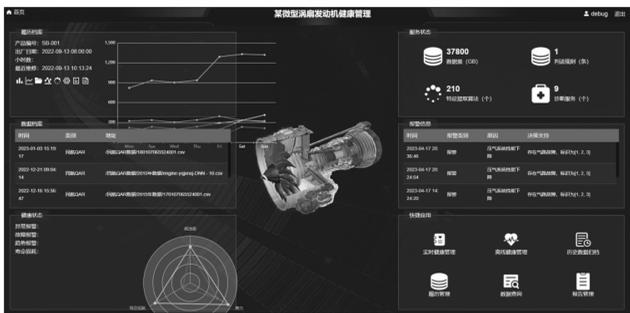


图 16 发动机 PHM 功能原理验证

目前, 利用本文提出 PHM 仿真验证方法及 PHM 仿真验证平台, 已经完成了 3 型航空发动机 PHM 工程验证, 包括气路、振动、滑油等 20 多种典型故障模式、30 余个诊断预测模型、100 余条排故决策知识等, 与发动机台架试验、航后 QAR 数据验证配合, 有效地支撑了航空发动机 PHM 系统研制。

### 5 结束语

本文提出了一种基于知识图谱的仿真模型验证设计方法, 通过完成发动机故障知识图谱数据架构设计, 实现了发动机试验数据、飞参数据等多源验证数据接入、诊断预测验证算法模型集成、排故维修验证知识集成, 为发动机 PHM 系统研制提供技术与功能验证手段, 并有望推广至多型号航空发动机的 PHM 系统设计、研发过程, 以加速发动

机 PHM 系统研制与配套。

### 参考文献:

[1] 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.

[2] 朱昕昫, 颜子琛, 杨彩琼, 等. 面向 PHM 的民机飞行数据分析及应用研究进展 [J]. 测控技术, 2022: 1-9.

[3] 陆航, 董威, 董光磊. 国内外轨道交通 PHM 应用现状综述 [J]. 中国铁路, 2023 (4): 82-92.

[4] 李彦夫, 韩特. 基于深度学习的工业装备 PHM 研究综述 [J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42 (5): 835-847.

[5] 曹明, 王鹏, 左洪福. 民用航空发动机故障诊断与健康管理现状、挑战与机遇 II: 地面综合诊断、寿命管理和智能维护维修决策 [J]. 航空学报, 2022, 43 (9): 42-81.

[6] 瞿红春. 民用涡扇发动机健康智能监控技术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2022.

[7] 闻化, 胡志伟. 装备故障预测与健康管理能力验证评估技术 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 260-264.

[8] 吕镇邦, 沈新刚, 邹会荣. 机载 PHM 系统软件设计与验证 [J]. 测控技术, 2020, 39 (4): 11-16.

[9] 刘恩朋, 杨占才, 靳小波. 国外故障预测与健康管理系统开发平台综述 [J]. 测控技术, 2014, 33 (9): 1-4.

[10] 喻凡坤, 胡超芳, 罗晓亮, 等. 无人系统故障知识图谱的构建方法及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 66-71.

[11] 李建青. 高校 IT 运维知识图谱构建及应用 [J]. 现代信息技术, 2023, 7 (7): 1-5.

[12] 元尼东珠, 罗亚锋, 房红征, 等. 基于卷积神经网络的发动机气路故障诊断方法 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (12): 14-19.

[13] 陈乐平, 余静, 褚波, 等. 基于 OSA-CBM 体系结构的地面 PHM 系统研究 [C] //2021 年中国航空工业技术装备工程协会年会, 2021: 471-474.

[14] 朱志胜, 丁淑君, 许松林. 基于 RFID 技术的机载设备维护管理系统 [J]. 航空工程进展, 2022, 13 (1): 144-150.

[15] 黎俊虹. 跨平台统一分布式图计算框架研究及系统实现 [D]. 南京: 南京大学, 2022.

[16] 李鑫, 曾琢琳, 石鹏, 等. 基于图计算的电力系统故障建模方法 [J]. 四川电力技术, 2021, 44 (5): 36-40.

[17] 江平, 时瑞军, 武一冰, 等. 航空发动机控制系统半物理仿真试验器设计 [C] //航空试验测试技术学术交流会论文集, 2012: 76-79.

[18] 范满意, 张瑞, 孔祥兴, 等. 基于统计分布特征的发动机气路故障诊断方法研究 [C] //第六届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第四十二届技术交流会暨 2021 航空发动机技术发展高层论坛, 2022: 199-204.

[19] 宋栋. 基于双论域 Vague 粗糙集的矿井通风机故障诊断 [J]. 煤矿机电, 2018 (3): 42-45.

[20] 刘冬婷, 戴苏榕, 方力. 航电产品测试性模型的建立与应用 [J]. 航空电子技术, 2015, 46 (4): 13-17.