

大型旋转机组健康管理软件通用平台研究*

汤宝平

(重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室 重庆,400044)

摘要 针对大型旋转机组健康管理存在全生命周期数据“整合难”、健康预测评价“量化难”、维修决策“优化难”和系统平台“泛化难”等问题,首先,引入云原生思想,采用容器化技术和微服务架构,设计了大型旋转机组健康管理软件开放通用架构;其次,研发了大型旋转机组健康管理软件通用平台,包括后台通用开发引擎和前台个性化定制应用程序编程接口(application programming interface,简称API);最后,提出了大型旋转机组健康管理应用软件“1+3”敏捷化定制开发方案,以通用平台为底座,融合应用对象的数据接入、算法模型封装部署和可视化设计3个关键环节,实现大型旋转机组健康管理应用软件敏捷化开发。通过开放共赢方式让更多模型算法开发者参与构建健康管理业务算法银行,利用系统软件的协同机制解决全生命周期数据整合难题,为构建大型旋转机组健康管理应用软件开发生态奠定基础。

关键词 大型旋转机组;健康管理;系统软件;敏捷化定制

中图分类号 TH39;TK01

引言

大型旋转机组是服役于国民经济主战场和国防领域的核心装备,特别是航空发动机和燃气轮机,长期在高温、高压、高转速和交变负荷等极端严酷工况下运行,机组结构复杂,维修决策困难,容易发生故障,甚至引发严重安全事故,造成重大经济损失。因此,开展大型旋转机组健康管理,对保障机组安全运行、降低机组维修成本具有重要意义^[1-2]。

大型旋转机组健康管理(prognostic and health management,简称PHM)是采用机组全生命周期数据,进行机组故障预测、健康评价和维修决策,是实现远程运维、保障重大装备可靠运行的重要核心技术^[3-4]。大型旋转机组健康管理软件通用平台和应用软件敏捷化开发^[5-6]是推进大型旋转机组健康管理深入发展的关键。

大型旋转机组全生命周期数据具有不完备性、封闭性和多源多模态性等特点,即:有价值的大型旋转机组健康状态数据小样本居多,同时数据分散且数据质量不高;设计阶段和试验阶段的数据对于制造商、使用数据对于用户都缺乏有效集成和共享机制而相互孤立,数据隐私问题等导致数据持有方对外分享有限;数据缺乏统一标准,呈现格式/协议/架

构多样性。针对上述特点,美国通用电气公司(General Electric Company,简称GE)为每一台航空发动机建立履历档案,服役的每一台航空发动机数据均定期传回公司,通过大量数据积累,不断地迭代优化和验证GE航空发动机健康管理软件。空客、波音及美国航空航天局等经过几十年、多批次和大样本数据的积累,不断更新和优化飞行器健康管理软件。国内相关企业信息化建设滞后,非电子化数据居多,难以被有效利用。数据分散在不同运营主体,缺乏有效集成和共享机制,存在数据隐私保护与数据安全、跨域跨机构多源多模态数据间互兼容性等问题,大型旋转机组全生命周期数据整合困难。面对此挑战,除大力加强信息化和数据基础条件建设外,大型旋转机组健康管理软件的数据开放共享协同机制在打通机组设计制造数据、用户使用数据和维护数据之间的堵点方面起关键作用。

大型旋转机组具有结构复杂、故障致因繁多以及作业数据特征严重混叠等特点,健康管理中存在部件结构建模、传感数据分析、微弱故障捕捉和多源信息融合困难等问题,导致大型旋转机组关键部件和整机健康预测评价难以量化。因此,需要开展以下工作:①研究大型旋转机组高温高速关键部件性能劣化机理,建立早期故障与特征参量的映射模型;

* 国家重点研发计划资助项目(2020YFB1709800);国家自然科学基金资助项目(52275087)

收稿日期:2024-07-15;修回日期:2024-07-30

②研究机理模型和作业数据模型的决策级融合方法,建立数模混合增强的关键部件早期故障预测模型和多源信息深度融合的整机早期故障预测模型^[7];③研究数模混合的大型旋转机组健康定量评价方法,构造多源信息融合的整机健康指示标尺^[8-9]。大型旋转机组维修决策主要包括何时维修(维修时机分析)、如何维修(维修工作范围分析)、维修需要的资源(维修成本分析和维修资源分配)以及维修效果(修后性能)评估等内容。因为作业与运维服务耦合、整机与部件耦合及不确定因素多等造成大型旋转机组维修决策优化困难,需研究动态扰动下群体长期维修计划优化模型、高柔性群体短期维修计划优化模型、整机与部件维修工作范围协同优化模型,构建价值导向与数据驱动的群体维修决策技术体系^[10-11]。预测评价与维修决策模型的开发需要多学科专业人员协同完成,反复迭代,确保健康管理模型算法的有效性、准确性和通用性。大型旋转机组健康管理软件需要提供模型算法标准化封装接口和部署方案,模型算法开发者将能够分享、发布和交流各类模型算法,并通过标准化接口和数据格式实现各模型算法的无缝集成,解决应用中的数据涉密、预测评价量化及维修决策优化等问题。

大型旋转机组类型繁多,服役环境差异大,因健康管理软件开发模式及架构固化等原因导致健康管理软件平台泛化困难。国外已经形成了大型旋转机组健康管理设计、开发及验证的流程、方法和体系,可结合具体机组特点进行验证和迭代改进^[12-13],这些平台架构灵活,支持开放式系统架构体系,能够满足不同机组健康管理软件设计与开发要求,但因技术封锁,难以获得应用支持。知名的大型旋转机组健康管理应用软件有美国GE公司的RM&D系统、德国Siemens公司的PDS系统、国内内容知日新科技公司的SuperCare设备智能运维平台等,其功能丰富,但设备对象开放性不足,中心化数据管理存在数据安全隐患。为了突破系统软件平台泛化难题,既要分布对分布式健康管理软件资源动态自组织及重用,又要开放资源让更多开发者参与平台提升,需要设计能够在分布式资源上实现动态自组织、资源重用和开放通用的健康管理软件架构,兼顾数据处理效率、模型算法通用化应用及资源有效管理等多元需求,开发基于微服务化、容器化和去中心化的大型旋转机组健康管理软件通用平台,提供应用软件敏捷化定制开发方案。

综上所述,目前大型旋转机组健康管理面临全

生命周期数据“整合难”、健康预测评价“量化难”、维修决策“优化难”和系统平台“泛化难”等问题,需要开放通用可扩展的大型旋转机组健康管理软件。针对此,笔者主要论述了大型旋转机组健康管理软件架构设计、通用平台开发以及应用软件“1+3”敏捷化定制等方面的研究进展。

1 大型旋转机组健康管理软件开放式通用架构设计

开放式通用架构设计原则如下:①引入云原生思想,采用容器化技术,将各个服务打包成容器,实现快速部署和弹性管控;借助云服务的弹性伸缩和自动化运维,提高系统的可靠性和可用性,并将系统解耦,降低系统的复杂性,更好地应对健康管理业务需求的变化;②提升系统架构灵活性,采用微服务架构,将系统划分为相对独立的小服务单元,每个服务单元都有自己的数据库和业务逻辑,彼此之间通过API进行通信,使系统可以根据需要独立扩展,每个服务单元可以独立部署和更新,从而提升系统整体灵活性和可维护性;③加强定制开发敏捷性,采用敏捷开发方法,降低系统耦合性,使得应用系统新增功能通过迭代快速响应需求变化,确保系统软件在不断变化的业务环境中保持敏捷;④支持模型算法复用性,采用开放式算法接口和标准化数据输入输出格式,使各种模型算法可以方便地被集成和替换,建立算法库和模型银行,将经过校验的算法和模型以可复用的形式存储,确保能够在不同场景下被反复利用;⑤动态适配不同设备,通过元数据配置的方式实现对不同设备的动态适配,以兼容不同类型、不同型号和不同厂商的大型旋转机组。

大型旋转机组健康管理软件通用平台总体架构见图1。数据接入与管理框架采用先进的数据采集和整合技术,无缝对接各类工业现场的数据源,涵盖各种不同格式和协议的设备监测数据,确保实时、准确地汇集数据至系统内部,为后续分析处理奠定基础。健康管理大数据存储、管理框架设计及高效的大数据存储解决方案,不仅能够海量存储机组运行的各项指标数据,还具备数据清洗、预处理及索引功能,便于进行快速检索和深度挖掘。健康管理智能应用开发框架提供一套完整的健康管理模型开发工具链,支持在统一的业务建模环境中研发大型旋转机组故障预测模型、健康定量评价模型及维修决策优化模型,以提升模型开发效率,保障模型应用于实际业务场景



图1 大型旋转机组健康管理软件通用平台总体架构
Fig.1 Overall architecture of system software of PHM for large-scale rotary machinery

的精准性和可行性。健康管理微服务运行框架基于容器化技术,实现智能应用服务的模块化、松耦合部署和管理,各个微服务可以独立注册、运行和监控,有效保证系统的灵活性和高可用性。在应用层提供对大型旋转机组运行状态信息、性能指标、作业信息及报警信息的实时监测界面和可视化展示,满足用户对机组全方位健康管理的需求。

笔者采用先进的模型驱动智能应用开发框架,构建了集大数据、云计算和物联网等先进技术于一体大型旋转机组健康管理软件通用平台技术架构,如图2所示。最底层的基础设施即服务层(infra-structure as a service,简称 IaaS),其平台能够无缝对接企业自建私有云环境或主流公有云平台(如阿里云、华为云等),通过集群资源的有效管理,确保基础硬件设施的高效利用和灵活扩展能力。服务层(platform as a service,简称 PaaS)的核心是基于容器云的管理体系结构,深度融合 Kubernetes 容器编排引擎,实现对容器资源的自动化调度与管理。在此基础上,提供多元化存储方案及数据服务支持,满足各类结构化、半结构化和非结构化数据的全生命周期处理需求,包括采集、存储、分析和挖掘,并开放多种标准化接口以供调用。此外,PaaS层还包含通用中间件服务组件,如消息、缓存、计算服务等,支撑

上层应用开发。在微服务架构方面,平台预置标准化的微服务开发与管理框架,不仅支持用户采用微服务模式进行二次开发,而且内建鉴权机制、安全防护、服务注册与发现、配置中心以及日志追踪等功能组件,使得微服务可以自动发布至 API 网关,实现从开发、上线到运行维护整个生命周期的统一管理和监控。前端应用层遵循工程化管理模式,构建了组件化、可扩展、可重用的用户界面(user interface,简称 UI)组件体系,能够适应各种 Web 浏览器以及移动端设备,满足不同工业应用场景下的定制开发需求和友好的人机交互展示效果。

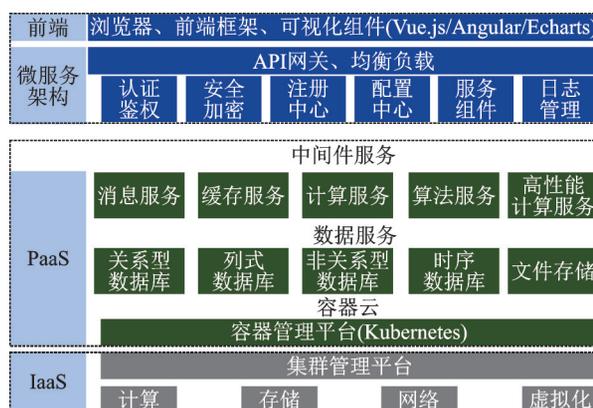


图2 大型旋转机组健康管理软件通用平台技术架构
Fig.2 Technical architecture of system software of PHM for large-scale rotary machinery

大型旋转机组健康管理软件通用平台部署架构如图3所示。该设计充分考虑实际业务场景的多样性和复杂性,采用基于模型的智能应用开发框架和虚拟化技术,构建了高效、灵活且高度可扩展的容器化微服务集群部署体系。部署架构采用集团级与现地级两级分布式自治运行机制,支持在集团中心与现地现场采用不同的 IaaS 环境,实现云边协同运行和现地独立运行两种模式,既具备集团级大规模部署能力,能够支持构建包含大数据处理的重量



图3 大型旋转机组健康管理软件通用平台部署架构
Fig.3 Deployment architecture of system software of PHM for large-scale rotary machinery

级应用平台,又兼顾现地小型应用场景需求,实现轻量化系统的快速部署与运行。基于服务化和模块化开发手段,统一并标准化平台应用服务的开发规范,确保集团云平台与现地系统的互联互通,实现服务组件的共享,以及云边数据同步和模型远程部署更新,提高了业务应用的开发效率和实施速度。

面向大型旋转机组健康管理业务对象划分的、基于松耦合和轻量化通信机制的大型旋转机组健康管理软件开放式通用架构,通过开放式API设计和插件化架构,满足业务规模不断扩大及业务模式调整的需要,解决了系统软件架构固化的难题。

2 大型旋转机组健康管理软件通用平台设计与开发

笔者基于大型旋转机组健康管理软件通用平台的开发需求与架构设计,研制了大型旋转机组健康管理软件通用平台,包括后台通用开发引擎和前台个性化定制API接口。大型旋转机组健康管理软件通用平台主要功能如图4所示,包括设备建模与管理功能、数据储存和管理功能、算法服务功能、微服务管理功能及可视化服务功能等模块,基本的业务流程包括数据接入、数据管理、模型算法的开发部署和验证、微服务组件开发部署以及前端可视化无代码一键生成与定制开发。通用平台提供的后台开发引擎具备专业快速重构能力,支持一键自动化构建设备和数据模型,支持数据接入通道的批量化构建和模型任务批量化发布,实现敏捷化业务建模,提供API接口以支持通过第三方平台进行低代码二次开发。

设备建模与管理功能涵盖部件建模、模型管理、

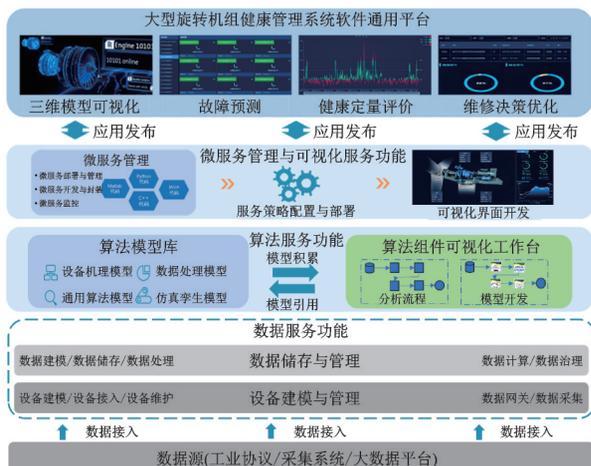


图4 大型旋转机组健康管理软件通用平台主要功能
Fig.4 Main functions of system software of PHM for large-scale rotary machinery

测点信息管理和对象管理等环节,能够对设备采集数据测点进行配置,可方便地关联主要设备及其相关信息,以便进行数据、模型和服务的共享与应用;支持常用工业协议的适配,负责设备数据采集任务,实现大型旋转机组及采集数据协议定义及多源异构数据的采集,完成大型旋转机组健康管理所需测点数据的接入。数据储存和管理功能建立面向大型旋转机组健康管理的数据仓库,针对不同主题域数据按照数据处理不同阶段内容进行分层存储,支持设备数据、实时监控数据、实时诊断数据、统计分析数据、特征数据和算法结果数据的存储和管理。算法服务功能涵盖模型算法的需求分析、开发调校、验证评估、可视化分析以及交互设计与部署实施等。大型旋转机组健康管理软件算法服务封装方案如图5所示。构建专门的健康管理算法模型微服务中心,提供算法模型的日常管理、运行监控、结果评估以及预警管理等功能,确保模型算法的有效运作和准确执行。支持从数据处理业务场景构建到数据分析、业务编排等全流程的设计开发,提供丰富多样的业务组件库,涵盖数据源组件、数据流处理组件、批处理组件、流程控制组件以及特征提取组件等,满足不同业务场景下的灵活配置和扩展需求。

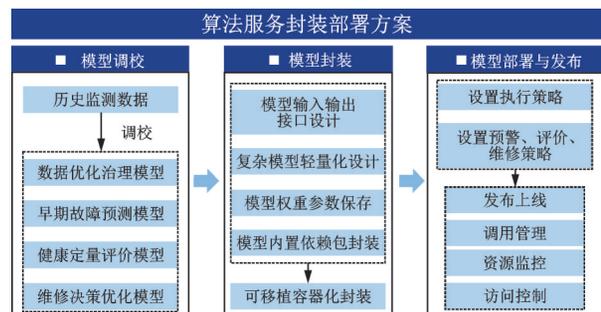


图5 大型旋转机组健康管理软件算法服务封装方案
Fig.5 The packaging and deployment plan of system software of PHM for large-scale rotary machinery

微服务管理功能开发了基于微服务技术的智能应用服务运行和管理框架,包括微服务容器、微服务治理、API网关、微服务开发管理以及运维管理等,为各种大型旋转机组健康管理应用的持续集成和持续部署提供统一管理运维框架。可视化服务功能支持针对各业务场景定制开发前台可视化应用及Web页面形式的健康管理信息概览页面。平台提供统一的界面开发框架和数据可视化开发工具,方便进行可视化界面设计和二次开发,同时提供即插即用的标准业务组件,所有组件是开放的、可扩展的及可配置的。提供系统软件API接口,包括设备信息类访问接口、设备数据集类访问接口、设备数据类

访问接口、设备工况数据类查询接口、算法模型类访问接口、业务数据访问接口、缓存数据访问接口、文件库/文件夹/文件管理接口、自定义任务类查询接口和消息服务接口等。

大型旋转机组健康管理软件通用平台支持企业大数据平台、商用数据库和其他个性化数据对接方案,支持通过容器化技术以微服务的形式进行健康算法模型的标准化封装部署,提供 API 接口进行信息交互以定制开发可视化前台,充分体现了系统软件的开放、通用和可扩展性。

3 大型旋转机组健康管理应用软件“1+3”定制开发方案

以大型旋转机组健康管理软件通用平台为底座,融合应用对象的数据接入、算法模型封装部署和可视化设计 3 个关键环节,实现大型旋转机组健康管理应用软件敏捷化开发。“1+3”定制集成开发方案如图 6 所示。该方案支持企业大数据平台、商用数据库和其他个性化数据对接方案,支持通过容器化技术以微服务的形式进行健康算法模型的标准化封装部署,提供 API 接口进行信息交互以定制开发可视化前台。

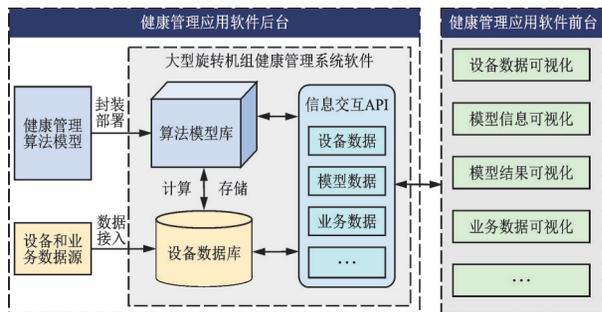


图 6 “1+3”定制集成开发方案

Fig.6 "1+3" customized integrated development solution

笔者基于松耦合技术理念设计了高效的数据服务框架,实现与企业大数据平台、商用数据库等第三方运维平台以及在线/离线检测数据的深度集成。针对工业物联网通讯协议(message queuing telemetry transport,简称 MQTT)进行了适配,构建了可部署于公有云端、私有云及现地环境的数据接入服务器集群,包含 MQTT 服务器和消息队列服务器集群。MQTT 服务器对外开放消息服务接口,通过边缘工业网关接收采集端推送的各种类型数据(如结构化、半结构化和非结构化数据),而消息队列则负责对数据进行缓冲并周期性存储,确保旋转机组实时运行数据的稳定接入与处理。

健康管理算法模型的可移植容器打包方案,能

够实现多类型模型算法解耦与通用/专用算法对象构建。针对批处理、流处理、实时处理等不同场景需求,独立封装微服务组件,并统一实施算法模型的设计、训练、测试及分析流程,确保模型算法的高效管理和调用。在离线环境中进行模型算法开发与调校,通过数据筛选优化、超参数设计和样本训练,提高模型的性能。随后,对模型算法进行规范化封装,明确输入输出接口、依据库信息、硬件需求以及执行策略,满足平台部署规范要求。在部署阶段,为已封装模型设定执行策略和触发规则,并配置预警、评价及维修策略,上线后进行模型调用管理、资源监控和访问控制。推出了“健康管理业务算法银行”,开发者将能够分享、发布和交流各类先进的算法模型,使用者则能够获得更多高质量、多样化的算法模型,这种开放共赢的业务模式将成为开发者和使用者共同成长的平台,以解决应用中的数据涉密等问题。

所设计的可视化 API 接口体系,提供了基于 Vue 框架、Jmix 开发平台和 WebReal 图形化编程云平台等前端可视化定制开发方案,不仅增强与第三方平台的高度集成和定制能力,还能实现系统深度数据分析、图表展示、业务扩展及无缝接入外部环境等功能。针对不同业务分类下的数据存储类型,研发了适应性数据框架并提供多样化数据操作 API 接口,如 API 管理、主题式即席查询等,支持用户自定义监测数据、振动数据等多种数据类型,并允许在各个业务维度下进行数据的增删改查操作,同时也兼容常用的时间区间查询、字段筛选和模型匹配等查询条件。为深化数据分析及应用,平台还提供复杂查询接口以及多维分析接口。

基于“1+3”定制开发方案,以大型旋转机组健康管理软件为底座,创建了领域知识驱动应用软件敏捷化设计范式,以助推企业制造服务转型。某风电机组健康管理软件开发案例如图 7 所示。



图 7 某风电机组健康管理软件开发案例

Fig.7 A development case of PHM system for a wind turbine

4 结 论

1) 研制了大型旋转机组健康管理软件通用平台,具备成熟稳定的架构、良好的弹性和可配置性,支持业务规模的不断扩大及业务模式调整与变化的需要,开放通用性好,解决了健康管理软件平台泛化难的问题。

2) 提出了大型旋转机组健康管理应用软件“1+3”定制开发方案,以可配置的柔性方案满足大型旋转机组健康管理的业务需求,通过微服务开发框架、二次开发接口等方式支持新功能模块和接口的扩充,对于业务变化具有敏捷的适应能力。

3) 构建大型旋转机组健康管理应用软件开发生态,通过开放共赢方式让更多模型算法开发者参与构建健康管理业务算法银行,依托工业软件专业公司进行健康管理软件运维管理,利用系统软件的协同机制解决全生命周期数据整合难题。通过构建开放、共享及互助、互利的健康管理业务生态,助推企业制造服务转型。

参 考 文 献

- [1] 曹明,黄金泉,周健,等.民用航空发动机故障诊断与健康管理系统现状、挑战与机遇 I:气路、机械和FADEC系统故障诊断与预测[J].航空学报,2022,43(9):625573.
CAO Ming, HUANG Jinquan, ZHOU Jian, et al. Current status, challenges and opportunities of civil aero-engine diagnostics & health management I: diagnosis and prognosis of engine gas path, mechanical and FADEC[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(9): 625573.(in Chinese)
- [2] 李思雨,程中华,刘子昌,等.故障预测与健康管理系统研究与应用现状分析[J].火炮发射与控制学报,2023,44(6):99-105.
LI Siyu, CHENG Zhonghua, LIU Zichang, et al. Review and application status of prognostics and health management system[J]. Journal of Gun Launch& Control, 2023, 44(6):99-105.(in Chinese)
- [3] LIA Y F, WANG H, SUN M X.ChatGPT-like large-scale foundation models for prognostics and health management: a survey and roadmaps [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2024, 243:109850.
- [4] REZAEIANJOUYBARI B, SHANG Y.Deep learning for prognostics and health management: State of the art, challenges, and opportunities [J]. Measurement, 2020,163:107929.
- [5] LIU H, WEI C, SUN B, et al.Adaptive robustness evaluation for complex system prognostics and health

management software platform[J]. The Journal of Systems & Software, 2023, 204:111768.

- [6] LI R, VERHAGEN W J C, CURRAN R.A systematic methodology for prognostic and health management system architecture definition [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2020, 193:106598.
- [7] HUANG C, BU S Q, LEE H H, et al. Prognostics and health management for predictive maintenance: A review [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2024, 75: 78-101.
- [8] DING J, LU H, WANG Y, et al. Adaptive angle-weighted cumulative sum for interpretable machine condition monitoring [J]. Applied Acoustics, 2024, 224: 110140.
- [9] ZHANG G Y, WANG Y, LI X M, et al. Health indicator based on signal probability distribution measures for machinery condition monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 198:110460.
- [10] XIA X Z, FU X Y, ZHONG S S, et al. A multi-agent convolution deep reinforcement learning network for aeroengine fleet maintenance strategy optimization [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 68: 410-425.
- [11] XIA X Z, FU X Y, ZHONG S S, et al. Gravity particle swarm optimization algorithm for high-dimensional combinatorial optimization problems [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117: 105543.
- [12] 范永欣,郭阳明,肖翼.燃气涡轮发动机PHM系统设计与实现技术研究[J].测控技术,2024,43(2):26-34.
FAN Yongxin, GUO Yangming, XIAO Yi. Research on gas turbine engine phm system design and implementation technology [J]. Measurement & Control Technology, 2024, 43(2):26-34.(in Chinese)
- [13] 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.
LIU Enpeng, YANG Zhancal, JIN Xiaobo. Overview of foreign prognostics and health management system development platform [J]. Measurement & Control Technology, 2014, 33(9):1-4.(in Chinese)



第一作者简介:汤宝平,男,1971年9月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为高端装备健康管理与智能运维、无线传感器网络、测试计量技术及仪器。“百千万人才工程”国家级人选,国家重点研发计划项目负责人,中国振动工程学会动态测试专委会副主任。曾发表210余篇论文,入选爱思唯尔中国高被引学者榜单。获国家技术发明二等奖1项、国家科技进步二等奖1项。

E-mail: bptang@cqu.edu.cn