

基于工业互联网的船用燃气轮机健康管理平台

曹思佳¹, 胡汀², 唐瑞², 周彤彤¹

(1. 上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:船用燃气轮机由于结构复杂、工作环境恶劣, 对其进行状态监测与健康管理工作十分必要。通过工业互联网技术对燃气轮机运行过程中产生的大量数据进行分析, 可以极大提升处理效率。本文调研了现有健康管理信息系统应用情况, 通过案例分析说明了国内外先进的工业互联网平台的结构组成和主要功能, 基于工业互联网面向船用燃气轮机提出了健康管理平台总体架构, 并对其各个层次进行分析。该平台架构将工业互联网的优势与船用燃气轮机健康管理的实际应用需求结合, 实现状态监测、故障分析、寿命预测等重要功能, 为用户提供决策支持。

关键词:工业互联网; 健康管理; 燃气轮机

中图分类号: U664.131 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.05.025

[引用本文格式] 曹思佳, 胡汀, 唐瑞, 等. 基于工业互联网的船用燃气轮机健康管理平台[J]. 热能动力工程, 2022, 37(5): 180-186. CAO Si-jia, HU Ting, TANG Rui, et al. Marine gas turbine health management based on industrial internet platform[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 180-186.

Marine Gas Turbine Health Management based on Industrial Internet Platform

CAO Si-jia¹, HU Ting², TANG Rui², ZHOU Tong-tong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;
2. The No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: Due to the complex structure and harsh working environment of marine gas turbines, the condition monitoring and health management for them are very necessary. Analyzing the large amount of data generated during the operation of marine gas turbines through industrial Internet technology can greatly improve processing efficiency. This paper investigates the current application status of existing health management information systems, illustrates the structure and main functions of advanced industrial Internet platforms at home and abroad through case analysis. Then it proposes the overall architecture of an industrial Internet-based health management platform for marine gas turbines and introduces each level. The platform architecture proposed in this paper combines the advantages of industrial Internet with the practical application requirements of marine gas turbine health management, realizes the important functions such as condition monitoring, fault analysis and life prediction, and provides decision support for users.

收稿日期: 2021-03-25; 修订日期: 2021-05-13

基金项目: 国家重大科技专项(2017-I-0007-0008); 国家工信部2019年工业互联网创新发展工程—工业互联网标识解析二级节点(家电行业应用服务平台)项目(TC190A3X8-10); 上海市经济和信息化委员会2019年度上海市工业互联网创新发展专项(2019-GYHLW-01007)

Fund-supported Project: National Major Science and Technology Project (2017-I-0007-0008); 2019 Industrial Internet Innovation Development Project-Industrial Internet Identification Resolution System's Secondary Node (Application Service Platform for Home Appliance Industry) Project supported by the Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China (TC190A3X8-10); 2019 Shanghai Industrial Internet Innovation and Development Special Project supported by Shanghai Municipal Commission of Economy and Informatization (2019-GYHLW-01007)

作者简介: 曹思佳(1998-), 女, 江苏南通人, 上海交通大学硕士研究生。

通讯作者: 周彤彤(1993-), 女, 陕西榆林人, 上海交通大学博士。

Key words: industrial Internet, health management, gas turbine

引言

燃气轮机是一种常见的旋转叶轮式热力发动机,目前在航空系统、电力系统、动力系统和舰船系统等国防工业领域已得到广泛应用^[1]。船用燃气轮机具有功率大、尺寸小、质量轻、起动迅速、加速性和机动性好等优点,能够大大提高舰船的战斗力和可靠性^[2]。

可靠性和可维护性是保障船用燃气轮机工作的关键指标,对确保燃气轮机运行的稳定性来说十分重要^[3]。在燃气轮机运行过程中,面临的恶劣条件一方面来自机组内部的高温、高压、高转速及高机械应力和热应力的恶劣工况;另一方面来自外部污染的环境^[4]。由于船用燃气轮机装备长期在海洋环境下运行,高温、潮湿及多盐雾的恶劣环境易导致部件出现污染、腐蚀和磨损等情况发生,而且随着运行时间的增加会变得越来越严重,甚至可能会引起运行失效,造成重大的安全事故^[5]。因此对船用燃气轮机健康管理技术的研究尤为重要。

本文调研分析了现有健康管理系统和工业互联网平台的功能特点,从船用燃气轮机运行维护的实际需求出发,提出基于工业互联网的船用燃气轮机健康管理信息系统平台架构。并对架构各层级的功能模块及具体内容进行介绍,说明了本架构的优势。

1 健康管理信息系统应用现状

健康管理系统在飞机行业的应用最为普遍,主要有波音 AHM 系统、空客 AIRMAN 系统、Embraer 飞机健康分析和诊断系统以及庞巴迪的飞机故障诊断解决方案(ADS, Aircraft Diagnostics Solutions)等^[6]。维护人员可以根据飞机飞行过程中运行状况数据和其他有效信息等监控的早期信息,即时判断出故障位置,保证飞机飞行的稳定性。

禹建伟等人^[7]提出的基于地铁车辆制动的健康管理平台,包含了数据采集、故障诊断、故障预测、健康状态评判及运维任务管理等几个模块。余

涛^[8]提出航天地面测控健康管理系统,主要包括健康信息采集、健康管理知识库和健康管理应用服务等,基于多层级的健康信息采集和健康业务知识对故障诊断、健康状态评估等业务提供数据和知识支撑,为设备提供运维保障服务。

在船用燃气轮机应用方面,由于我国船用燃气轮机运行数量不多,采用传统人工巡视、定时维修和事后维修的模式尚能满足当时的需求^[9]。由于制造技术的飞速进步,燃气轮机基建成本比例下降,间接导致维修成本比例逐渐上升。这种模式已难以满足当前船舶动力装备的需要,因此预防性维修保养已十分必要^[10]。

目前,国内在燃气轮机健康管理方面主要研究了气路部件、传感器及控制系统执行机构等部件的故障和退化,研究内容包括寿命预测、状态监控等多个方面^[11]。调研发现,现有健康管理系统多已包含数据采集、故障诊断和故障预测等基本功能,但随着工业大数据的发展,现有健康管理系统对数据的采集和处理量已不能满足要求,基于人工检修的方式在速度和准确率方面还有待提高。因此,燃气轮机预测和健康管理平台需要进行优化和提升。

2 国内外先进工业互联网平台架构分析

工业互联网由于其低时延、高可靠及广覆盖的特点,已经成为工业智能化发展必须的工业信息网络基础设施,是新一代信息通信技术与先进制造业深度融合的新兴业态模式。而工业互联网平台是工业互联网实施落地与生态构建的关键载体^[12]。通过工业互联网平台可以更好地收集燃气轮机健康管理的重要信息和大量实时数据,监测和跟踪燃气轮机各部件的健康状况,根据历史和实时信息分析和预测故障发展的潜在趋势。信息的全面性和实时性有助于制定合理有效的维护计划,减少不必要维护,降低成本,提高燃气轮机可靠性。

近年来,国内外制造企业在工业互联网平台应用方面已经做出了很多研究。2013年,美国 GE 公司率先推出工业互联网平台 Predix;2015年,法国达索公司推出 3D EXPERIENCE 体验平台;德国西门

子公司 2016 年推出工业互联网操作系统 Mind-sphere;国内工业互联网平台有航天科工 INDICS 平台、海尔 COSMOPlat 平台和三一重工根云平台。

2.1 GE 公司 Predix 平台

美国 GE 公司工业互联网平台 Predix,由 Predix 机器、Predix 连接、Predix 云、Predix 服务和针对开发人员的 Predix 工具等主要组件构成,囊括了机器设备和云系统,是一个综合性的现代化工业互联网平台。Predix 机器是软件层,负责与工业资产以及 Predix 云通信,同时可以运行边缘分析等本地应用功能;Predix 连接可以在没有互联网直接连接的情况下使机器能够通过移动电话、固定线路和卫星技术组成的虚拟网络与 Predix 云进行会话;Predix 服务提供了开发人员用于构建、测试和运行工业互联网应用程序的工业服务,同时提供了开发人员发布自己的服务和使用第三方提供的服务的微服务市场;针对开发人员的 Predix 是为开发人员提供的一个与服务通信的框架。

2.2 海尔 COSMOPlat 平台

海尔集团的工业互联网平台 COSMOPlat 也是一个有代表性的平台,可以实现需求的即时响应、全过程的可视化和资源的无缝连接。其架构分为 4 层:第 1 层是资源层,可以实现各种资源的分布式调度和优化匹配;第 2 层是平台层,支持快速开发、部署、运营和集成,帮助加快实现各种工业技术软件化;第 3 层是应用层,为各互联工厂提供特定的应用服务,形成全过程的解决方案;第 4 层是模式层,依靠应用层实现模式创新和资源共享。

2.3 三一重工根云平台

根云平台主要划分为 4 个层次架构,分别为连接层、计算层、应用层及创新层。连接层的作用是开放物联,根云提供一站式物联接入的核心产品和服务,支撑全行业各种类型设备的物联入网;计算层为根云提供丰富的工业数据处理经验以及云平台强大的数据计算与存储能力;应用层主要包含 4 大服务功能,包括资产管理、智能服务、物联监控和机械猫;创新层主要是为了将数据沉淀以更好地驱动业务,最终形成以设备为中心的大数据运营体系,做出相应的销售策略。

通过分析典型工业互联网平台架构,发现其层

级由下至上通常都包括基础设施的接入连接、数据的分析处理、工业应用和服务软件的开发平台,共同构建一个可扩展的应用支持系统。最上层是对企业制造各个环节的高度抽象,构建基础的、共性的工业信息化应用模块。可见,各不同企业的工业互联网平台都包含了工业互联网的类似主要功能,但根据服务对象和服务内容的不同,在平台的具体功能上进行了相应的扩充和调整。本文从船用燃气轮机健康管理的实际需求出发,结合自动化和信息化现状,提出总体架构。

3 基于工业互联网的船用燃气轮机健康管理平台

3.1 总体架构

在借鉴已有工业互联网平台参考架构、功能和价值研究成果的基础上^[13-14],根据对典型工业互联网平台总体架构的分析,提出船用燃气轮机工业互联网平台总体架构如图 1 所示。该平台自底向上分为 4 个层级,包括工业控制网络层、数据服务层、分析服务层和整合应用层。

3.1.1 工业控制网络层

船用燃气轮机健康管理信息系统的工业控制网络层构成了信息系统的信息源,是船用燃气轮机健康管理信息系统的基础。其主要包括设备层、传感层,数据源层以及网络层。

(1) 设备层

工业控制网络层中的设备层可分为启动系统、燃气发生器、动力涡轮、控制和监测系统、润滑系统和一些零部件如护罩、叶片等。由于燃气轮机的转子在工作过程中高速旋转,承受高负荷,在故障发生时会导致振动异常。因此,燃气轮机的振动信号能迅速反映其运行状态^[15]。据统计,机组的各种故障类型中 70% 以上都能通过振动信号来表现^[16]。所以,通过传感器采集转子、轴承等转动部件的振动信号是实现燃气轮机健康管理的有效方法之一。

(2) 传感层

传感层的传感器从设备及组件上采集需要的状态数据,以实现状态监测和信息系统源数据的生成。船用燃气轮机健康管理平台包含的主要传感器有温度传感器、压力传感器、加速度传感器、电磁信号传感器、振动传感器及位置传感器等。

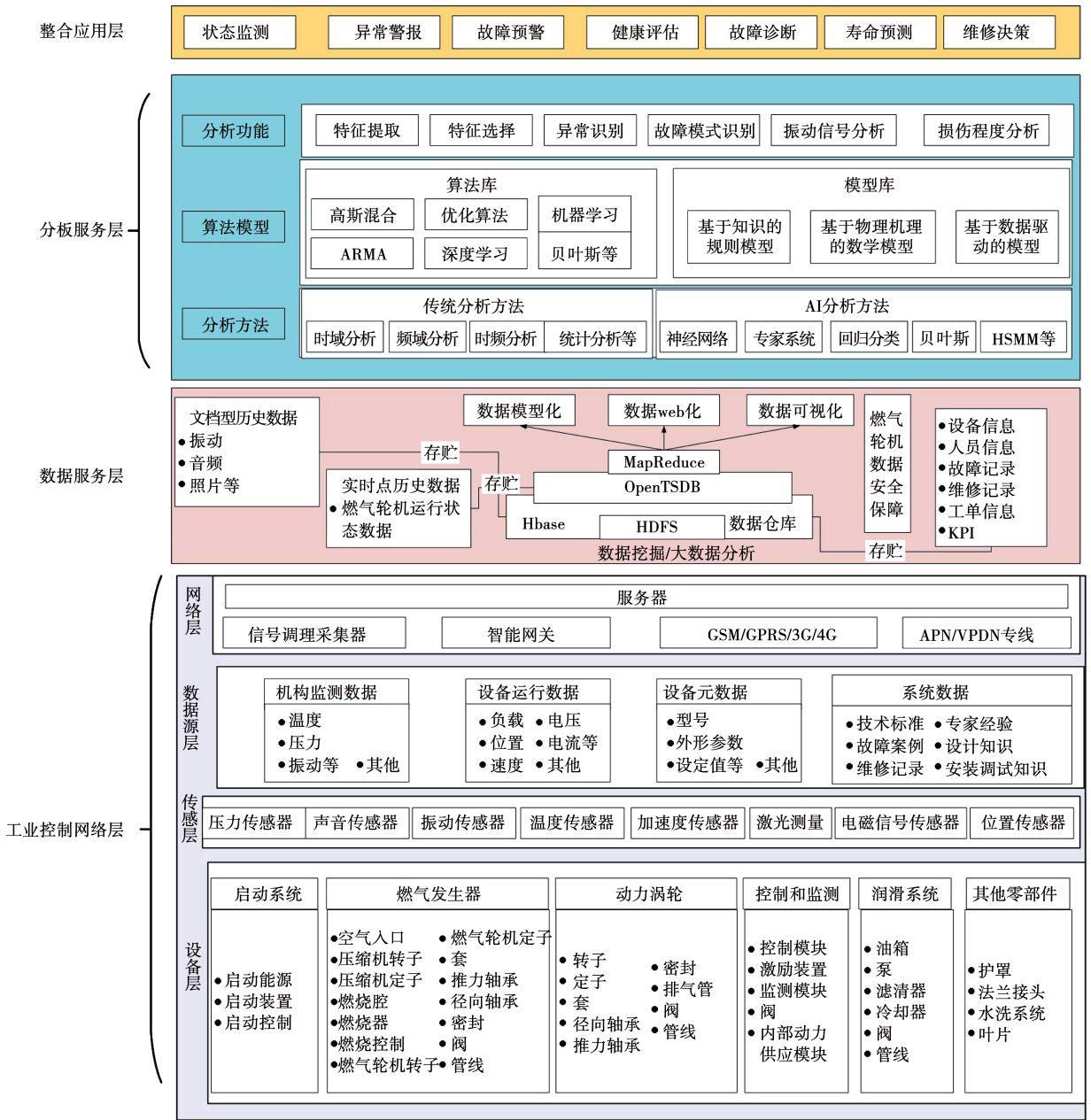


图 1 船用燃气轮机工业互联网平台总体架构

Fig. 1 Overall architecture of the marine gas turbine industrial Internet platform

(3) 数据源层

数据源层的数据包括传感器监测到的状态量,重点包括油温、液压和振动信号等;还包括设备运行数据,如负载、电压及电流等,以及基于这些测量值计算的功率、效率等数据;另外,还有型号、外形参数等设备元数据。除此之外,还有各种结构化、非结构化和半结构化的知识资源,这些系统数据较为复杂,如技术标准、故障案例、文本类型的知识和专家经验等数据。所有数据通过接口接入到平台的网络层中。

(4) 网络层

船用燃气轮机健康管理信息系统的网络层由信号调理采集器、智能网关、GSM/GPRS/3G/4G 网络技术、APN/VPDN 专线和服务器等模块构成。网络层可以帮助分布于各地的燃气轮机与远程数据中心实现互联互通,依托于云技术、物联网技术实现燃气轮机健康管理体系全功能。基于 TCP、UDP 协议实现设备到系统、系统到系统的数据传输。通过 OPC UA、MQTT 和 HTTP 等协议,实现数据信息传输安全通道的建立、维持与关闭,以及对支持数据资源模型

的装备、传感器、远程终端单元与服务器等设备节点进行管理。

3.1.2 数据服务层

数据服务层将文档型历史数据和实时点历史数据加上设备、人员等各种其他信息,通过对客户端数据进行实时接收后存储在数据仓库中,达到远程监控的目的。

数据仓库的主要框架中,openTSDB 是基于 Hbase 的时间序列数据库,比较适合存储具有时间特性的数据,同时提供特定的工具进行查询等操作。TSD 的用户不需要直接访问底层仓库。直接通过 telnet 协议,HTTP API 或者简单的内置 GUI 与 TSD 进行通信,所有的通信都发生在同一个端口上。

Hadoop 是一个分布式系统基础架构,其分布式文件系统(HDFS)容错性高、可提供访问的数据吞吐量且数据传输带宽高,因此支持的文件数多,适合在大规模数据集上的应用。基于 Hadoop map/reduce 软件框架开发的应用程序可在可靠性和容错性能得到保证的情况下并行处理 T 级数据集,且操作简单便捷。map/reduce 作业的工作方式通常是将输入数据集划分为几个独立的数据块,对 map 的输出进行排序,然后将结果输入 reduce 任务。可以以完全并行的方式处理 map 任务。由于该框架使计算节点和存储节点运行在一起,能保证任务运行调度的高效性。本平台基于 Hadoop 框架,存储采集到的海量数据,构建船用燃气轮机运行数据特征数据库,将数据模型化、web 化及可视化,使积累的大量数据转换为有价值、可执行和可复现的知识。因此,平台能够提供高质量的基础数据源,有效支撑燃气轮机运行数据特征挖掘、故障诊断、健康评估和预测的实现。

3.1.3 分析服务层

分析服务层包含分析方法、算法模型和分析功能 3 个层级。分析方法分为传统和人工智能(AI)两类。传统方法有时域、频域及时频域分析等;AI 分析方法有神经网络、贝叶斯及专家系统等。

算法模型分为算法库和模型库。算法库用来存储故障模式识别、趋势预测、决策优化相关的人工智能算法,包括高斯混合和贝叶斯方法等。算法库可采用合适算法提取高维特征并进行网络结构改良创新,或利用信息融合技术融合关联传感器信号进行

微弱故障信息鲁棒提取等。在船用燃气轮机的故障检测与定位方面,能够模拟不同海洋环境参数和运行时间下船用燃气轮机热力性能退化规律,实现对船用燃气轮机系统与部件的健康评估与预测。

模型库包括基于知识的规则模型、基于物理机理的数学模型和基于数据驱动模型等。具体的模型类型有:设备监控类模型,如运行状态监测模型、用户行为习惯监测模型等;设备维修类模型,如故障智能诊断模型、维修智能决策模型等;设备维护类模型如健康评估模型、剩余寿命模型等。模型库具体的功能应用是建立损伤部件数值计算模型,采用数值模拟方法评估损伤条件下压气机性能衰退程度。此外,机组故障信号数据库能够基于时频域变化特征,借助复杂网络模型(如滚动轴承动力学模型)进行故障诊断。

分析功能层包含平台通过方法、算法和模型能够实现的主要服务内容,具体有特征提取、特征选择、振动信号分析等。

3.1.4 整合应用层

整合应用层的各个模块实现了平台的主要服务功能:状态监测、异常警报、故障预警、健康评估、寿命预测和维修决策等。这些模块功能有些是可以独立调用的,如状态监测和故障预警等功能;而健康评估、寿命预测及维修决策等模块则需要根据一定的输入输出和内在逻辑进行组合,以实现其总体功能。

(1) 状态监测

状态监测服务包括实时数据采集、监测数据可视化、运行特征提取、运行模式识别、运行控制优化等,用于状态实时监测、参数离线监测及历史数据查询。该服务建立性能指标以适应设备级与系统级的监控任务,统计并显示各类参数信息,并根据阈值信息进行预警。

(2) 异常警报

该服务对接收到的实时数据进行处理后,比较特征值与期望值,设置一定的规则和方法实现报警。

(3) 故障预警

故障预警服务基于性能模型进行故障预警,通过性能模型仿真得到各工况下的气路参数正常值作为判断基准,与实测参数进行对比实现参数预警。目前通常采用固定阈值方式来判断燃气轮机是否处于异常状态,不考虑工况变化的影响。在任何工况

下都采用固定的报警限,易造成低工况下漏警和高工况下的误警,导致故障预警效果难以达到预期。故障预警服务能够改善当前应用中的预警效果。

(4) 健康评估

健康评估主要数据来源是状态监测等模块数据,对此进行实时的接收处理。如果发现某部件或系统出现性能退化,则根据其历史趋势、工作状况及历史维修情况,进行性能退化建模和诊断。健康评估模块挖掘运行参数与工况参数间的关系,基于部件监测参数之间的量化规则,对关键部件健康度进行评估,将关键部件划分不同等级,采用不确定层次分析法等,建立关键部件的健康度与系统健康度之间的映射关系。

(5) 故障诊断

故障诊断服务的数据来源包括两个部分:一是对状态数据实时进行接收,二是直接采用用户提供的离线数据。通过建立性能指标与故障模式的映射关系,以完成故障检测、故障原因分析、故障定位等任务。故障诊断的方法也包括2种:模型驱动或数据驱动。基于模型的方法以故障机理为基础,融合模型在线修正、多种算法模糊决策融合、特征参数估计等,对传感器故障、燃气轮机故障进行检测和自动隔离,并利用数据平台进行验证优化。基于数据驱动的方法构建复杂信息网络,对机组故障进行特征提取,并根据不同燃气轮机故障特征通过选择有效的分析方法进行有效诊断。例如,针对轴承部件失效问题,基于在线铁磁磨粒特征信号的轴承磨损状态检测技术、声-振-磨粒异类多源信息的交叠互补特性,构建特征空间多层次诊断模型,实现轴承故障诊断。同时,在多因素影响下建立完整、关联的船用燃气轮机故障模式信息库,对运行风险进行动态分析。

(6) 寿命预测

寿命预测模块的服务数据来自其他服务模块提供的资源,可以根据设备当前的状态对未来状态、性能、健康状态和剩余寿命等进行预测。寿命预测方法主要有2种:一种是模型驱动的预测,即对各部件建立数学或物理退化模型,分析部件的性能退化规律;另一种是数据驱动的预测是指设备性能退化遵循全过程数据训练的模型,将反映设备退化的指标因子提取,计算得到剩余使用寿命。

(7) 维修决策

该服务主要进行维修计划制定、维修备件管理、预防性维修、维修任务分配,以完成状态反馈、监测评价、纠正措施、检修措施和建议报告等任务。主要包括设备报修管理、维保人员注册与管理模块、设备信息管理、现场维保管理、维保记录管理、维保方案决策和维保方案评估优化等模块。该服务能够分析操作历史,结合当前状况,将来自健康评估、状态监测和预测服务等其他模块中提到的数据和信息作为输入,为用户提供决策支持,给出有效的维修方案和建议。这些方案系统可以根据用户需求主动提供,用户也可以根据需要对应地查询。

3.2 优势及效果

本文提出的船用燃气轮机工业互联网平台架构在建立过程中参考了现有工业互联网平台的体系架构,结合船用燃气轮机的实际功能和需求,符合船用燃气轮机健康管理的真实需要。在对平台功能进行模块划分时,以用户和业务需求为导向,原则设计遵循松耦合、高聚类,采用分解拓扑模型,逻辑清晰的同时,尽可能使用较少的模块。

基于此架构搭建的船用燃气轮机健康管理平台,各功能模块能够实现燃气轮机各部件全面的健康情况实时监测,并通过数据分析手段综合评价,将健康管理的全要素进行连接,实现数据可视化、过程透明化的全生命周期动态管控,全面提升安全性;基于大数据分析,对采集的数据资源和信息进行智能化处理,提高资源利用率;建立故障预警系统,依据历史数据建立各参数变化与故障损伤的概率模型,结合当前运行参数,进行健康状态判断、趋势分析与异常情况自动报警,降低运行维护成本。

4 结 论

首先,调研了各领域健康管理系统的发发展现状,发现在健康管理系统国内已有较多应用,但将工业互联网与健康管理系统结合的研究还不够充分,已有工业互联网平台在健康管理方面的实施应用能够说明此研究的有效性和必要性。因此,本文参考现有典型工业互联网平台的架构和功能,提出基于工业互联网的船用燃气轮机健康管理平台架构。架构自底向上分为工业控制网络层、数据服务层、分析服务层和整合应用层4个层次,分别对每个层次的具

体内容进行了描述。将提出的工业互联网平台运用在船用燃气轮机的健康管理上将可提高燃气轮机运行维护的智能化水平,降低维护成本。

参考文献:

- [1] 伍赛特. 燃气轮机设计原则及设计方法研究综述[J]. 中国标准化, 2019(20): 210-213.
WU Sai-te. Summary of research on gas turbine design principles and design methods [J]. China Standardization, 2019 (20): 210-213.
- [2] 蒋东翔, 刘超, 杨文广, 等. 关于重型燃气轮机预测诊断与健康管理的综述[J]. 热能动力工程, 2015, 30(2): 173-179, 314.
JIANG Dong-xiang, LIU Chao, YANG Wen-guang, et al. Summary of research on predictive diagnosis and health management of heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2015, 30(2): 173-179, 314.
- [3] 闻雪友, 任兰学, 祁龙, 等. 舰船燃气轮机发展现状、方向及关键技术[J]. 推进技术, 2020, 41(11): 2401-2407.
WEN Xue-you, REN Lan-xue, QI Long, et al. Development status, direction and key technologies of ship gas turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(11): 2401-2407.
- [4] TAHAN M, TSOUTSANIS E, MUHAMMAD M, et al. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: a review [J]. Applied Energy, 2017, 198: 122-144
- [5] 曹磊. 盐雾腐蚀条件下燃气轮机压气机性能衰退研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
CAO Lei. Research on performance degradation of gas turbine compressor under salt spray corrosion [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [6] 周密愉. 飞机液压系统健康管理技术研究进展[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(3): 6-8, 15.
ZHOU Mi-yu. Research progress on health management technology of aircraft hydraulic system [J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2021, 41(3): 6-8, 15.
- [7] 禹建伟, 师帅. 地铁车辆制动系统故障预测与健康管理技术研究[J]. 铁道车辆, 2021, 59(1): 38-41, 77.
YU Jian-wei, SHI Shuai. Research on fault prediction and health management technology of metro vehicle brake system [J]. Rolling Stock, 2021, 59(1): 38-41, 77.
- [8] 余涛. 航天地面测控系统的健康管理应用[J]. 电讯技术, 2021, 61(1): 30-35.
YU Tao. Health management application of space ground measurement and control system [J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(1): 30-35.
- [9] 应雨龙, 李靖超, 庞景隆, 等. 基于热力模型的燃气轮机气路故障预测诊断研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 731-743, 952.
YING Yu-long, LI Jing-chao, PANG Jing-long, et al. Summary of gas turbine gas path fault prediction and diagnosis based on thermal model [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2019, 39(3): 731-743, 952.
- [10] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理工作的发展及应用[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(5): 591-594.
ZHANG Bao-zhen. Development and application of comprehensive diagnosis, prediction and health management technology abroad [J]. Computer Measurement and Control, 2008, 16(5): 591-594.
- [11] 任茹菲. 燃气轮机预测与健康管理工作关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
REN Ru-fei. Research on key technologies of gas turbine prediction and health management [D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [12] 王艳广, 宿春慧, 高方方, 等. 基于工业互联网平台的航天产品智能制造应用[J]. 制造业自动化, 2020, 42(12): 1-5, 11.
WANG Yan-guang, SU Chun-hui, GAO Fang-fang, et al. Application of intelligent manufacturing of aerospace products based on industrial Internet platform [J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(12): 1-5, 11.
- [13] GUTH J, BREITENBÜCHER U, FALKENTHAL M, et al. A detailed analysis of IoT platform architectures: concepts, similarities, and differences [M]. Internet of Everything. Springer, Singapore, 2018: 81-101.
- [14] 李君, 邱君降, 窦克勤. 工业互联网平台参考架构、核心功能与应用价值研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(6): 103-106, 126.
LI Jun, QIU Jun-jiang, DOU Ke-qin. Research on reference architecture, core functions and application value of industrial Internet platform [J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(6): 103-106, 126.
- [15] 王莎莎. 燃气涡轮机械监测及故障早期预警关键技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
WANG Sha-sha. Research on key technologies of gas turbine machinery monitoring and failure early warning [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [16] 蔡卫峰. 动态系统故障诊断技术研究进展与展望[J]. 计算机自动测量与控制, 2002(12): 775-777, 781.
CAI Wei-feng. Progress and prospect of research on fault diagnosis technology of dynamic system [J]. Computer Measurement & Control, 2002(12): 775-777, 781.