

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2023.03.023

基于工业互联网的民机研发 数字化环境探索应用

张小雯*

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 随着航空制造业竞争的不断加剧,民机产品研制面临复杂度增加、研制成本和研制周期大幅压缩的挑战。从民机研发设计端的业务特点出发,利用工业互联网通用体系架构,探索搭建民机研发的数字化环境方法,基于云计算技术、物联网技术、工业软件服务化技术、基础环境服务化技术等数字化转型关键技术,提出基于工业互联网的数字化环境架构,并以飞机上某型号副翼操纵系统研发为应用场景,分析数字化设计环境中的关键技术应用,探索实践数字化环境架构应用对研制效率提升、优化资源利用、降低数据管理风险等方面的提升,实现推进民机研制产业数字化赋能改造提升,为推进信息技术与航空制造业融合发展的数字化转型升级提供参考,为后续的民机研发数字化环境建设发展提供借鉴。

关键词: 工业互联网;民机研发;数字化设计;体系架构;应用场景

中图分类号: TP399

文献标识码: A

OSID:



0 引言

在航空业竞争日益激烈的发展环境下,民机产品作为国家航空制造业的代表,面临研制复杂度增加、研制成本和研制周期大幅压缩的挑战。在新一代信息技术与制造业深度融合的发展政策推动下,探索将云计算、大数据、工业互联网等信息技术融入民机制造业,以数字化转型创新驱动民机产品研制高质量发展是大势所趋。信息技术在工程系统研制中的深度融合,促使数字模型逐渐替代文档成为信息的载体,仿真等虚拟验证方法逐渐替代实物试验手段^[1]。在这一业务发展趋势下,研究应用基于模型的系统工程方法(model-based system engineering, 简称 MBSE)的飞机协同研发数字化环境如何帮助航空企业应对研制挑战、如何应用新一代信息技术更好地支持飞机系统集成与设计综合过程,是十分必要且紧迫的。

近年来,随着国内外政策环境的发展变化和国

家深入实施制造强国战略,围绕融入制造业的数字化、网络化、智能化发展趋势探索日趋增加,其中研发成本高、技术含量高、集成度高的高端制造装备的研制过程成为国内外研究的热点。涉及不同行业领域的方法论方面的研究多聚焦在研发模式、影响因素方面,如针对复杂电子信息系统研发数字化转型,提出基于系统工程理论的 RFLP 方法论和基于 MBSE 的跨域协同设计方法论^[2],通过建立包含过程、组织、支持系统三个要素的大型复杂产品协同研发分析模型来分析影响协同研发能力的因素^[3]。不同行业的复杂产品协同研发应用研究由点及面开展,如针对航天产品研制特点提出的基于企业服务总线多院协同研发平台^[4]、搭建异地协同研发云数据中心在中车协同研发场景的应用^[5]等。随着工业互联网、云计算、工业云等新一代信息技术的不断发展应用,工业互联网的体系架构^[6]、工业互联网标准体系^[7]、工业互联网的发展本质^[8]、发展趋势与挑战^[9-10]的相关理论研究逐步

* 通信作者. E-mail: zhangxiaowen@comac.cc

引用格式: 张小雯. 基于工业互联网的民机研发数字化环境探索应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2023(3):153-160. Zhang X W. Exploration and application of digital environment for civil aircraft research and development based on industrial internet[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2023(3):153-160(in Chinese).

发展成熟,另外工业互联网安全管控^[11-12]也是研究重点。但在应用方面,各制造企业实际推进两化融合发展应用的数字化转型,还处在从实施路径^[13]和关键技术^[14]逐步着手的阶段,如融合边缘计算和区块链的工业互联网资源分配优化方法研究^[15];复杂机械制造领域的基于层次化多粒度数字孪生、可定制重构的工业互联网新模式应用等。面向民机研发领域的工业互联网应用研究聚焦在航空制造协同方面,如在航空装备制造企业应用基于工业联网平台技术构建复杂装备协同制造的工业互联网平台^[16]、基于工业云对航空产品协同研发资源的分类分配进行深入研究^[17]等。

综合看来,民机产品研发的高度复杂性使得航空研制领域工业互联网的深度应用与发展面临很多挑战。本文从民机研发业务与工业互联网融合的企业数字化转型需求角度出发,基于工业互联网通用体系架构,围绕民机研发设计端的业务架构,提出基于工业互联网的数字化设计环境架构,并以某型号飞机副翼操纵系统研制为例,探讨应用基于工业互联网的数字化设计环境架构的具体案例场景,并对未来面向民机研发的数字化设计环境建设给出展望与建议。

1 基于工业互联网的民机研发数字化环境框架

1.1 民机研发业务流程

民机产品研发应用系统工程方法贯穿民机产品全生命周期的全过程,以最大程度满足客户和利益相关方需求为目的,通过建立产品全生命周期系统工程过程集,实现组织企业内外部单位、研制单位部门、研制专业的人、财、物、技术资源的全局优化协同。对应的技术过程包括市场分析过程、利益攸关方需要捕获过程、功能分析过程、需求分析过程、设计综合过程、安全性评估过程、需求确认过程、产品实施过程、产品集成过程、实施验证过程、产品确认过程、交付过程、运行支持过程和报废回收过程^[18]。虽然所有的过程由民机主制造商各大主体单位作为一个统一整体参与其中,但对研发设计端而言,主要涉及的是需求管理、总体设计、结构强度、飞机系统、试验验证、适航取证、构型控制过程。

从民机研制设计端的角度出发,需要实现飞机

级、系统级、子系统级的研发需求过程管理和基线管理,支撑多专业协同飞机设计、数字样机管理,支持多专业系统的集成试验、多业务层级及专业领域建模仿真,必须要利用产品全生命周期管理研发平台(product lifecycle management,简称 PLM)来作为支撑。面向民机协同研发的传统数字化研发平台侧重点在产品的全生命周期数据管理,核心是对设计研发过程、构型基线文档、设计模型数据的结构化。随着基于模型的系统工程方法应用于业务过程研制,传统数字化研发平台虽然可以实现模型数据的连续传递,但要实现跨专业的高效协同设计建模协作、过程的高效协同,需要研发平台内含的运行架构机制来支持研制方法论的实现。主制造商+供应商的协同业务模式要求数字化环境能够支持设计模型跨域传递、建模仿真多专业联合、异地试验联动联调的业务场景,因此需要具备强大的三维图像处理 and 计算处理能力。另外,民机设计研发过程本身专业复杂度高,建模仿真任务多样、时效性高,故要求支持设计研制建模、仿真建模的数字化工程软件也需兼备高可靠性和易用性特点。

基于对民机协同研发业务流程的分析,为整合支撑飞机设计研发的各项过程、各种资源,保证设计研发过程可控、数据高效传递贯通、过程协同紧密可实现,本文主要建立面向民机协同研发的基于工业互联网的数字化设计环境架构,建设支持高效协同的设计研发信息技术基础设施环境,推进民机研制基于 MBSE 的正向设计模式应用实现,支撑实现研制成本的降低、研发周期的缩短和民机产品研制的快速迭代。

1.2 面向民机协同研发的数字化设计环境架构

围绕民机研发的设计端,基于我国已趋成熟的工业互联网平台实施框架理论,本文建立了面向民机协同研发的基于工业互联网的数字化设计环境五层架构,分为 SaaS 层、PaaS 层、IaaS 层、边缘层、现场层,如图 1 所示。

在现场层,以物联网技术为基础,涵盖了融合先进工业制造技术的设计试验现场数据采集设备,如支持研发试验的各种形态的机械臂、工业机器人,高精度、高可靠性、支持多功能集成的智能传感器,支持试验现场识别的 RFID 系统和现场监控的智能摄像头等,另外还支持各类飞机研发试验、有工业互联网可行性的专业嵌入式定制化设备。



图 1 基于工业互联网的数字化设计环境架构

边缘层作为现场设备与信息化基础设施之间的连接层,对于民机设计端而言,该层环境设备包括对各种异构网络接入的现场设备信息进行通信协议解析和转换的智能网关,支持边缘计算的边缘控制器、路由器、基站等边缘节点设备,以及在设计研发试验中借助数据压缩、缓存、规则引擎及复杂算法等手段对大量试验试飞数据实时预处理,如遥测数据实时预处理系统等。

IaaS 层围绕民机产品协同研发设计特点建立了满足多云融合应用场景的基础设施设备,满足设计研发数据及知识存储、共享的虚拟化数据中心,集群化高性能硬件资源管理、并行开发环境以支持建模与仿真的分布式开展,同时配备满足等保要求的安全防护设备和数据灾备系统。

PaaS 层划分为面向民机协同研发的专业平台和通用平台。专业平台能够承载并支持设计研发端标准的正向研发体系及虚拟验证与确认的技术方法实现,在研制过程中能够基于 MBSE 方法进行运行场景分析、需求开发、功能分析及架构和物理协同设计,并能够进行协同端到端的模型数据流转。基于平台不断叠加积累的组件库、流程模板库、各专业模型库等,可提供应用开发框架实现设计研发知识的软件化沉淀,实现在不同研制阶段的快速建模与仿真生成。伴随研制技术的不断

成熟,提升研发质量、缩短研发周期的益处将显现。通用平台包括实现硬件资源与软件平台的必要有机联系的集群资源管理调度平台和部署运维管理平台,聚焦研发设计各专业产生的工程元数据、元模型进行结构化及非结构化统一集成管理的数据库管理系统,及对工程软件许可端管理的许可监控平台等数字化资源治理及共享管理平台。

SaaS 层根据 IaaS 及 PaaS 层提供的软硬支持技术能力,结合民机研制设计产品及流程差异性,一方面实现传统单机化或网络化工程软件的服务化部署,另一方面借助 PaaS 层的平台应用开发环境,面向特定设计研发场景定制开发相关的工业应用 APP,例如模型校验 APP、系统仿真 APP 等。

2 民机设计研发数字化环境应用实践

从设计端数字化建模与仿真切入,围绕“基于模型定义、虚拟集成仿真”的核心要素,以飞机上某型号副翼操纵系统为例,搭建了完整的基于工业互联网的数字化设计环境应用,该应用是基于场景-需求-功能-逻辑-物理系统工程研发框架,核心采用达索 3DE 平台作为 PaaS 层数字化研发平台底座,IaaS 层部署侧重计算处理的 CPU 服务器节点和侧重图形显示的 GPU 服务器节点,建设并行存储集群和并

行文件系统,结合集群资源调度系统和高性能计算配置,也为 SaaS 层的服务化软件应用提供条件支持,在 SaaS 层部署设计业务过程用到的建模仿真软件工具,促进设计工具规范化应用。边缘层通过工业以太网、工业光纤网络等接入现场层的研发试验

现场智能专用产品/装备,利用协议转换实现试验数据预处理。

2.1 基于 MBSE 的数字化研发平台底座应用实践

某型号副翼操纵系统研制的数字化设计环境 PaaS 层应用架构如图 2 所示。

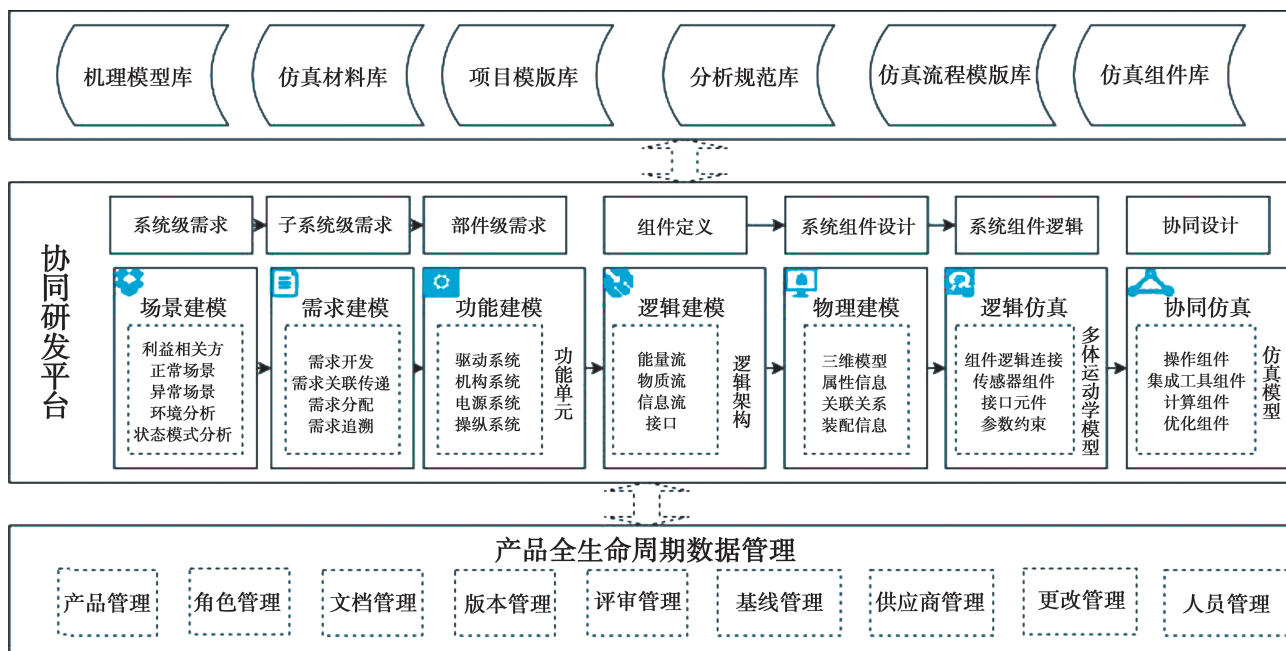


图 2 数字化设计环境 PaaS 层应用架构

场景建模在民机产品设计研发项目前期非常重要,是形成产品功能和需求的必要手段。场景建模分析时需全面考虑正常场景和异常场景下的产品系统运行情况,以保证运行场景过程中的分析完整度。

进行副翼操纵系统的场景建模和需求开发建模需在协同研发平台上开展底层研发层级的场景建模、需求建模、功能建模、逻辑建模和系统逻辑集成仿真,逐步开展系统级需求向子系统级需求、部件级需求的分解,从功能和逻辑层面建立副翼操纵系统的功能逻辑模型。

通过协同研发平台的功能静态分析,可创建副翼操纵系统详细工作流程,从而分析副翼及其操纵系统实现飞机滚转的每一步行为,建立一个操作功能单元。通过动态分析功能单元的时间顺序分析功能场景,这个建模过程是从相关方对副翼操纵系统的需求问题域向系统本身特征的解决域的转换过程。

利用协同研发平台的逻辑建模功能,在副翼操

纵系统逻辑块中创建相应组件,基于功能分析结果建立逻辑组件之间的关系,通过逻辑组件之间的数据流、控制流实现副翼操纵系统的功能。逻辑组件及其之间的交互关系(能量流、物质流、信息流)通过逻辑架构图进行描述。其所形成的接口数据可转化为 XML 文件被 ICD 接口工具读取和处理,以生成物理建模所需的模型框架,用于开展机械、电子、软件的模型实现、进而实现将接口数据受控地传递至设计的参数化物理模型,保证接口数据的统一和复用。

通过协同研发平台的转换工具 Dymola 行为模型模块将物理模型转换成多体运动学模型。借助平台的 Modelica 标准学科库、液压专业库,在多体运动学模型中添加传感器和接口元件,建立控制系统、作动器、液压系统模型与舵面运动学模型连接,共同组成副翼操纵系统行为模型,模型调试完后按系统分配到对应的逻辑模型中,对行为模型设置参数约束条件,在逻辑层中完成副翼操纵系统的仿真。基于仿真模型可实现查看副翼操纵系统及部

件机构的运动及运动时性能参数的变化,并根据仿真结果验证了副翼操纵系统在不同专业耦合下的性能参数,达到了预期目标。

2.2 数字化设计基础环境服务化探索实践

民机研发试验验证过程中,研制人员需要搭建基于实时计算的模型在环、软硬件仿真在环场景,调用不同类型的实时仿真机及其上位机开展不同

系统模型的交联计算,研究系统之间的接口实时交互关系。围绕某型号副翼操纵系统研制应用,IaaS层的网络部署支持企业局域网、研发专网和限制权限的外部互联网搭建,配备数据中心级别的安全管理、存储管理、灾备管理,在服务器集群管理基础上建立高性能计算平台,具体数字化设计环境硬件及网络应用架构如图3所示。

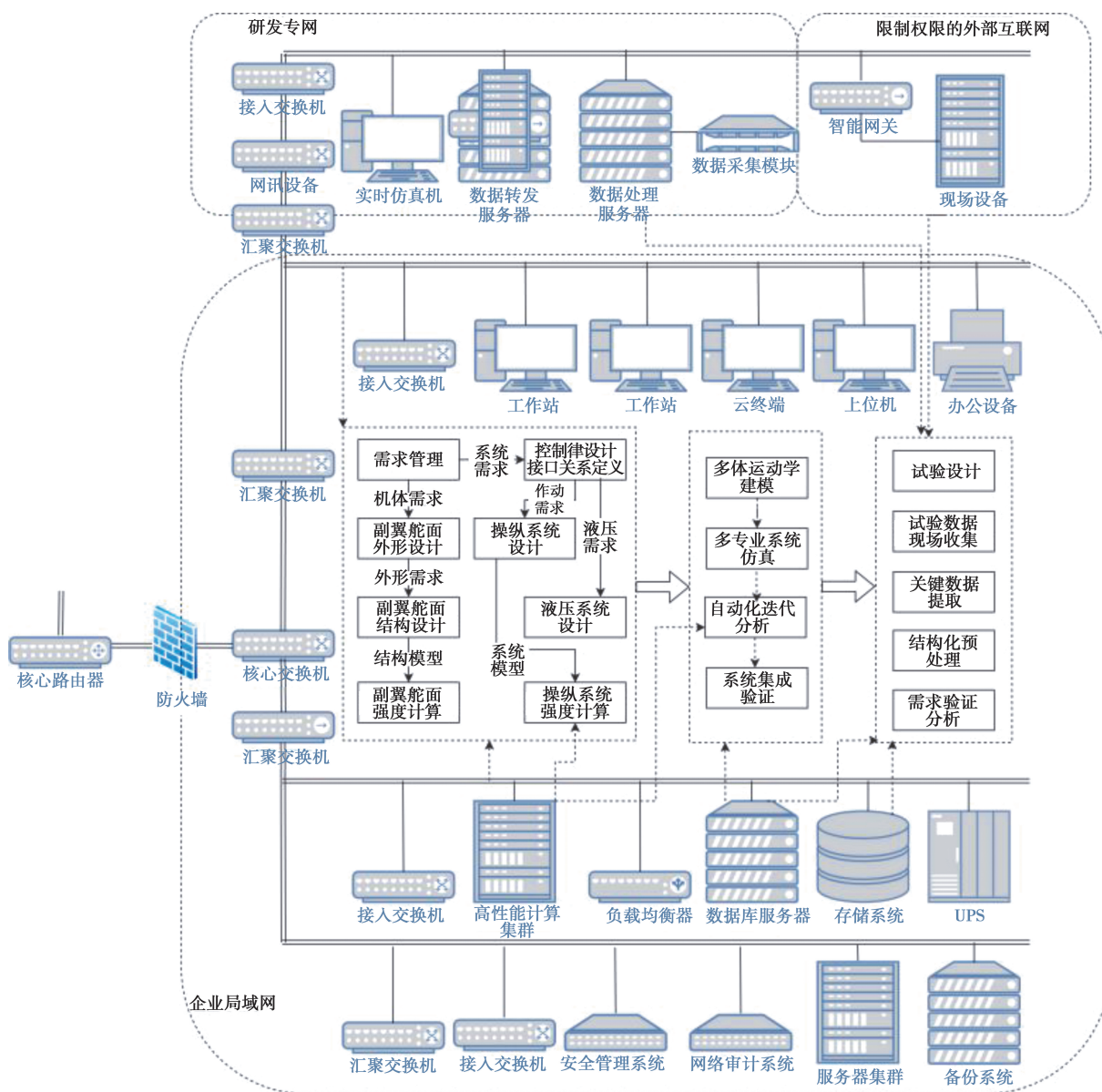


图3 数字化设计环境硬件及网络应用架构

某型号副翼操纵系统研发试验现场通过摄像头、压力传感器、电流传感器等试验场景监控设备采集数据,经智能网关实现协议转换和转发,将设备接入专用网络,在边缘层通过预处理设备系统对

大量试验数据进行结构化预处理,监测并提取试验现场关键指标数据后,通过网络传输进入 IaaS 层数据处理服务器,再进入 PaaS 层协同研发平台供不同专业设计人员开展进一步分析。

在根据副翼结构数模建立有限元模型进行强度分析时,涉及高保真度性能仿真有限元计算,通过 PaaS 层协同研发平台与高性能计算平台集成,结合仿真过程和高性能计算平台命令流进行自动化数据传递和结果存储,用户只需要在协同研发平台中上传计算模型数据,并设置好计算参数,后续应用软件的结果提取分析、报告自动生成等工作将在高性能计算平台进行。因此,充分利用 IaaS 层硬件资源可提高计算使用效率、节约研发人员时间,同时由于用于计算的输入和输出数据由协同研发平台统一管理,故也有效降低了数据丢失、混淆、错用

等风险。

2.3 硬件集成融合工业软件服务化探索实践

围绕某型号副翼操纵系统,基于 IaaS 层部署侧重计算处理的 CPU 服务器节点、侧重图形显示的 GPU 服务器节点、并行存储集群、并行文件系统,并通过搭建高带宽、低延时的 IB 网络保证大规模并行计算及频繁数据访问的高速实现。与 SaaS 层结合,借助可视化传输软件支持实现流畅的人机交互,搭建 SaaS 管理平台以实现硬件资源与服务化软件部署的融合,图 4 为数字化设计环境 SaaS 层应用架构。

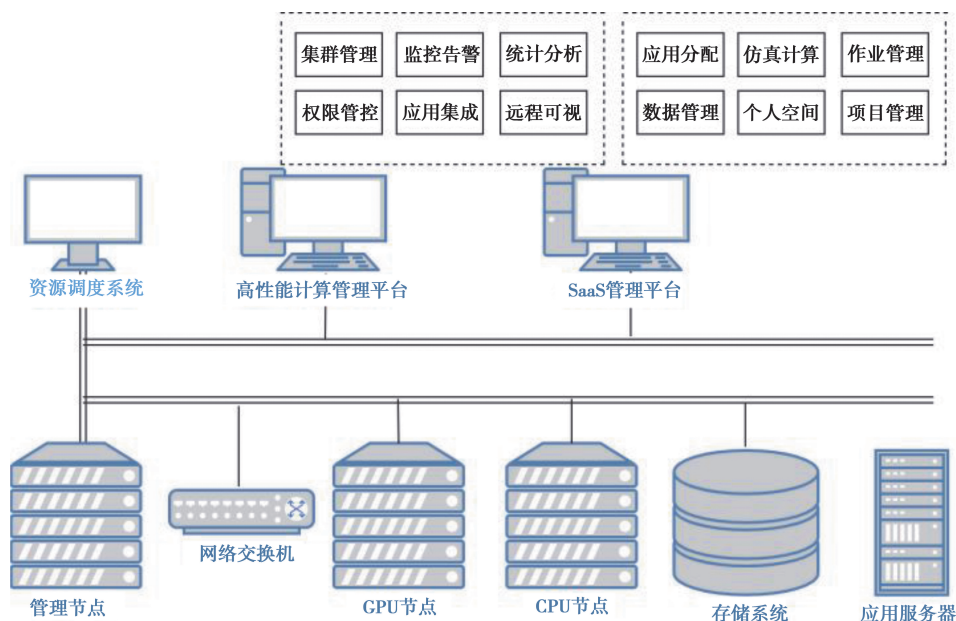


图 4 数字化设计环境 SaaS 层应用架构

围绕某型号副翼操纵系统研制应用,该研制场景在 PaaS 层部署集群资源调度系统,叠加软件许可管理,实现分布式多异构资源调度管理、节点负载信息汇集,对于设计人员的多项仿真任务,可以按照用户、用户组、队列和主机等资源情况和调度策略进行多个维度的混合调度。对于用户来说,设计工程软件运行所需的 CPU、GPU、内存、软件许可证都是一项作业任务可选择的前置配置,任务前置资源均满足时启动设计建模或仿真计算,从而实现各类资源的最大化利用。在副翼操纵系统场景中运用到的强度仿真分析软件、动力学仿真软件、流体仿真计算软件、系统性能分析软件等可以作为服务化的资源被设计人员使用。基于 SaaS 管理平台,设计人员可实现用户个人空间管理、软件作业管理、

项目数据权限管理,该管理端可实现服务化软件应用部署、权限管控、统计分析、项目管理、硬件资源管理等功能,从而统筹工程软件资源和计算所需硬件资源,实现对民机协同研发过程的有效支持。

3 结论

本文提出了面向民机研发的基于工业互联网的数字化设计环境五层体系架构,以飞机上某型号副翼操纵系统研发场景探索实践了数字化设计环境对于研发设计的支持过程,并分析数字化关键技术对于民机设计研发的有效推进。结果表明,运用先进信息技术的数字化环境可以有效支撑民机设计研发创新理论体系应用,研制手段工具的规范化有助于提升研制需求的验证率,多层数字化环境资

源的融合应用可有效支持设计研制效率提升。

随着未来我国工业互联网核心关键技术的不断发展和深化应用,基于工业互联网的数字化环境对于民机研发设计端的高效支撑价值将愈加明显地显现。本次实践作为基础性探索,可以为后续的数字孪生技术应用、元宇宙建设研究等提供基础性探索。针对工业互联网与民机研发制造的融合应用,还有一些问题需要不断深入讨论,包括:

1) 民机研制各阶段的研发试验和验证试验种类多,涉及试验设备类型复杂多样,对于现场设备的试验数据采集、数据转换、数据预处理、通信协议转换的数据规范管理方面需要进一步研究;

2) 为实现民机研发现场边缘设备的集成管理,支持各类执行机构功能耐久试验、疲劳试验、振荡故障试验的边缘设备状态监控及预测性维护管理,在边缘系统集成架构设计、工控系统网络安全、边缘软硬件融合实践方面还需要进一步探讨;

3) 随着更多飞机型号的研制推进,设计、试验过程将源源不断产生海量的设计模型数据、仿真分析数据、试验试飞数据,数据的存储、分析、利用对于信息化基础环境的配置、性能、稳定性和可扩展性要求不断提升,企业信息资源的集约化配置以满足研制业务连续性方面也需要优化分析;

4) 民机研制任务的专业分析信息化平台很多是基于不同的开发语言、工程应用标准开发,如何与通用研发管理平台建立集成化研制应用管理的问题也值得不断探讨;

5) 面向民机研制方面的软件服务化应用标准、集成部署架构、规范分类方面需要进一步分析。

参考文献:

- [1] 贾晨曦,王林峰. 国内基于模型的系统工程面临的挑战及发展建议[J]. 系统科学学报, 2016, 24(4): 100-104.
- [2] 陈竹梅. 复杂电子信息系统 R&D 数字化转型综述[J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15(12): 1219-1231.
- [3] 朱永坤,明新国,郑茂宽,等. 大型复杂产品协同研发能力分析模型及评价方法[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(4): 1-5.
- [4] 蒋丹鼎. 航天多院所协同研发平台的架构与协同机

制研究[J]. 航天制造技术, 2012(3): 59-61.

- [5] 彭飞,陆斌. 基于云技术的企业异地协同研发云数据中心设计及应用[J]. 机械工程与自动化, 2018(3): 191-192; 195.
- [6] 余晓晖,刘默,蒋昕昊,等. 工业互联网体系架构 2.0 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 2983-2996.
- [7] 胡琳,杨建军,韦莎,等. 工业互联网标准体系构建与实施路径[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 88-94.
- [8] 任保平. 工业互联网发展的本质与态势分析[J]. 人民论坛, 2021(18): 88-91.
- [9] 王晨,宋亮,李少昆. 工业互联网平台:发展趋势与挑战[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 15-19.
- [10] TAN S F, AZMAN S. Recent technologies, security countermeasure and ongoing challenges of industrial internet of things (IIoT): A survey[J]. Sensors, 2021, 21(19): 6647.
- [11] SUKIASYAN A, BADIKYAN H, PEDROSA T, et al. Secure data exchange in industrial internet of things [J]. Neurocomputing, 2022, 484(1): 183-195.
- [12] DAKHNOVICH A D, MOSKVIN D A, ZEGZHDA D P. Using security-through-obscure principle in an industrial internet of things [J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2021, 55(8): 1061-1067.
- [13] 樊佩茹,李俊,王冲华,等. 工业互联网供应链安全发展路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 56-64.
- [14] 罗军舟,何源,张兰,等. 云端融合的工业互联网体系结构及关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(2): 195-220.
- [15] 杨乐,李萌,叶欣宇,等. 融合边缘计算与区块链的工业互联网资源优化配置研究[J]. 高技术通讯, 2020, 30(12): 1253-1263.
- [16] 蒋敏,郑力. 面向航空协同制造的工业互联网架构研究与应用[J]. 中国科学:技术科学, 2022, 52(1): 3-13.
- [17] 吴敬铭. 基于工业云的航空产品协同研发资源配置研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2017.
- [18] 贺东风,赵越让,郭博智,等. 中国商用飞机有限责任公司系统工程手册[M]. 第3版. 上海:上海交通大学出版社, 2019.

作者简介

张小雯 女,硕士,工程师。主要研究方向:工程信息化。E-mail: zhangxiaowen@comac.cc

Exploration and application of digital environment for civil aircraft research and development based on industrial internet

ZHANG Xiaowen *

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: With the increasing competition in the aviation manufacturing industry, the development of civil aircraft products is facing the challenges such as increased complexity, greatly reduced the development costs and development cycles. Starting from the characteristics of civil aircraft research and development, using the industrial internet architecture, we explore methods for building a digital environment for civil aircraft R&D. Based on key technologies for digital transformation such as the cloud computing technology, Internet of Things technology, industrial software service-oriented technology, basic environment service-oriented technology, this paper proposes a digital environment architecture based on industrial Internet, and takes the research and development of an aircraft aileron control system as an application scenario, analyzes the key technologies in the digital environment, explores and practices the application of digital environment architecture to improve research and development efficiency, optimize resource utilization, and reduce data management risks. It helps achieving the promotion of digital empowerment and transformation in the civil aircraft development industry. It can provide a reference for promoting the digital transformation and upgrading of the integration of information technology and aviation manufacturing industry and provide references for the construction and development of the digital environment for the subsequent civil aircraft R&D.

Keywords: industrial internet, research and development of civil aircraft, digital design, implementation architecture, application scenario

* Corresponding author. E-mail: zhangxiaowen@comac.cc