

文章编号: 1674-8190(2024)06-001-12

军用飞机敏捷研发数字化技术展望

王海峰^{1,2}, 李嘉骏^{1,2}, 于凯², 程曦^{1,2}

(1. 飞行器数字敏捷设计全国重点实验室, 成都 610091)

(2. 航空工业成都飞机设计研究所, 成都 610091)

摘要: 军用飞机具有综合性能强、技术难度大、精度要求细、质量要求高的特点。随着军用飞机研制要求的不断提高, 数字化研发技术因具有开放、敏捷、协同等优势, 已经成为军用飞机提升综合性能、提高制造质量、压缩试验周期、压减研发成本的重要手段。本文回顾了国内外军用飞机数字化研发历程, 对以歼-20飞机为代表的我国军用飞机研制过程中的数字化协同研制体系的特征进行总结, 结合军用飞机发展趋势对现有数字化研发技术体系的挑战和创新需求, 提出从“数字化”到“敏捷化”的发展转型, 并进一步从面向性能、面向制造、面向试验三方面针对性地给出未来军用飞机数字化敏捷研发的技术建议与展望。

关键词: 军用飞机; 数字化; 设计仿真; 敏捷研发; 数字化转型

中图分类号: V271.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.06.01

The outlook for digital technologies in military aircraft agile development

WANG Haifeng^{1,2}, LI Jiajun^{1,2}, YU Kai², CHENG Xi^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Digital and Agile Aircraft Design, Chengdu 610091, China)

(2. AVIC Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract: Military aircraft is characterized by outstanding comprehensive performance, considerable technical difficulties and high demand for precision and quality. With the ever-increasing requirements of military aircraft development, digital technologies have become an important means of improving the comprehensive performance, enhancing the manufacturing quality, shortening the test cycle and reducing the development cost by virtue of openness, agility and collaboration. This paper reviews the digital development history of military aircraft both at home and abroad and summarizes the digital collaborative development system features taking shape in the development of China's military aircraft represented by J-20 fighter jet. Based on the challenges presented by the future development trend of military aircraft to the existing digital technologies as well as the requirements for innovation and progress, this paper proposes a transformation from "digital" development to "agile" development and puts forward the key technologies and outlook for digital agile development of future military aircraft from the aspects of performance, manufacturing and testing.

Key words: military aircraft; digitization; design simulation; agile development; digital transformation

收稿日期: 2024-06-26; 修回日期: 2024-07-08

通信作者: 王海峰(1964-), 男, 博士, 研究员, 中国工程院院士。E-mail: hkxb@buaa.edu.cn

引用格式: 王海峰, 李嘉骏, 于凯, 等. 军用飞机敏捷研发数字化技术展望[J]. 航空工程进展, 2024, 15(6): 1-12.

WANG Haifeng, LI Jiajun, YU Kai, et al. The outlook for digital technologies in military aircraft agile development[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(6): 1-12. (in Chinese)

0 引言

军用飞机需要具备高度适应性和灵活性以满足各种作战需求,并能在各种复杂环境条件下执行作战任务,具有综合性能强、技术难度大、精度要求细、质量要求高的特点,是典型的技术密集型高科技产品,是多学科综合集成优化的产物。军用飞机研制是航空工程项目中的大型、复杂系统工程,在我国航空事业发展中占有重要地位^[1],其研制高度依赖国家的工业能力和技术水平。随着国际环境和地缘局势的变化,要求在极短的研制周期下设计研发高质量、高品质的军用飞机,对于高效研发手段的需求更为迫切。为了实现军用飞机快速、卓越研发并在未来战争中取得一席之地,必须主动应对、积极作为,实施全产业链数字化建设是提高军用飞机研制质量和效率的一种主要方法。

数字化研发是一种基于数字化技术的产品研发方法,通过数字化技术和工具,将产品的设计、分析、仿真、制造等过程数字化,以提高研发效率、提升产品质量、降低研发成本。通过利用数字化研发手段,实施数字化建设,可有效满足军用飞机

快速生成迭代、研制成本精准控制、作战效能高效聚合等迫切发展需求,从而推动军用航空装备体系化、高质量、低成本发展。

本文总结国内外军用飞机数字化研发历程,结合军用飞机发展趋势对现有数字化研发技术体系带来的挑战,针对性地提出军用飞机数字敏捷研发关键技术,并进行系统性思考与展望。

1 军用飞机研发数字化技术发展回顾

20世纪80年代以前,所有飞机都“诞生”在绘图板上,直到波音公司提出数字化产品定义(Digital Product Definition,简称DPD),飞机的设计制造开始正式进入数字化研发时代。通过逐步淘汰基于工程图纸的产品数据定义研发模式,国外军用飞机项目在研发过程中减少了设计错误,提升了设计精度,精简了设计流程,在很大程度上提高了研发效率。我国从“九五”开始,航空工业领域率先实施军用飞机科研生产数字化工程,对标国际标杆,开展了具有前瞻性且体系完备的工程规划和实践。国内外飞机数字化研发历程如图1所示。



图 1 国内外飞机数字化研发历程
Fig. 1 Digital development history of domestic and foreign aircraft

1.1 国外军用飞机数字化研发历程

随着计算机辅助设计、制造与工程(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing/Computer Aided Engineering,简称CAD/CAM/CAE)、计算机数据管理技术和网络技术的发展,数字化研发能力应运而生。以美国为代表的发达国家率先开展军用飞机数字化研制技术研究及相关应用实践,从根本上改变了传统的军用飞机研发模式。

1.1.1 基于“二维图纸+三维数模”的产品数据定义阶段

自20世纪60年代起,美国军用飞机研发领域已逐步认识到数字化设计工具的重要性,如洛克希德·马丁公司研发了CADAM设计软件,其二维和三维版本先后用于美国空军C-141运输机、F-117A隐身攻击机的研发^[2]。20世纪90年代初,美国国防部公布了军用飞机全生命周期数据/信息管理计划,确定了在集成数据环境中进行军用飞机设计、分析、制造和使用的目标^[3]。该计划标志着数字化技术在军用飞机研发领域的应用进入实质性阶段。这一时期,波音公司将法国达索系统开发的计算机辅助三维交互设计软件CATIA用于飞机的数字化研发,并以CATIA的技术架构为底座,集成开发了约800个应用程序以满足研制需求^[4]。通过这套先进的CAD/CAM/CAE集成系统,波音公司建立了多种应用于飞机设计和制造的工程数据库,制定了一整套计算机应用标准和规范,形成了全面有效的飞机数字化设计方法。

1.1.2 基于模型的完全产品数据定义阶段

进入21世纪,数字化研发模式在国外军用飞机行业中得到了更广泛应用。联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter,简称JSF)作为全数字化设计的第一型军用飞机,数字化技术贯穿了战斗机的整个研发过程。通过集成应用建模与仿真、产品数据管理、企业资源规划、精益制造等数字化技术,JSF项目构建了从概念设计、详细设计,到制造交付、训练保障的全生命周期数字研发与管理体系统,支持并行开展三种基本型别的研制,并管理全球供应链^[5],实现了对复杂装备系统的准确表达、一致理解和数字化验证确认,使得在研制早期识别设计缺陷,大幅减少物理试制试验,确保设计一

次正确生成^[6]。相比传统研发模式,快速发展的数字化研发手段显著缩短了飞机研制周期、降低了研发成本,如洛克希德·马丁公司比预定进度提前15个月完成了首架F-35B飞机的制造^[7]。

1.1.3 基于数字化系统工程的全面数字化转型阶段

当前,美军为有效应对战略对手挑战,适应装备及技术创新加速、复杂度不断提升的研制与采办需求,日益重视数字工程及其在装备采办与研发领域的应用。2018年,美国国防部发布《国防部数字工程战略》,提出运用集成多学科手段和数字线索、数字孪生等先进数字技术方法,构建并综合运用权威数据源和数字模型,有效支撑装备从概念设计到退役处置的全生命周期活动^[8]。随后,美国国防部及各军种进一步出台规范数字工程实施的系列政策文件,有序推进数字模型与数据的开发,积极开展武器装备研发领域数字工程应用试点^[9-11]。具体到军用飞机型号研发,美国空军研究实验室和洛克希德·马丁公司早在F-35战斗机研发初期就创造了“数字线索”一词,并提出围绕数字线索生产构建F-35战斗机,提高生产效率,分包商诺斯罗普·格鲁曼公司则通过数字线索来支撑劣品处理决策,通过数字孪生改进多个工程流程^[12];波音公司T-7A“红鹰”教练机采用基于模型的工程和敏捷软件开发方法,通过生成集中所有工程数据的数字模型,将数字工程技术与复杂航空航天结构先进制造技术相结合^[13],令T-7A从确定概念到首次飞行测试仅耗时36个月,装配时间缩短80%,软件开发时间缩短50%^[14]。美军陆续发布的“数字工程”战略文件如图2所示。

纵观国外军用飞机数字化研发技术发展历程,先后走过了从单纯数字化的三维设计到虚拟装配、并行工程,直至全面实施设计制造的协同工作,已彻底走上数字化转型之路,利用复杂系统工程和设计,将信息、网络、智能能力与平台能力融合,设计复杂系统,快速迭代发展节点平台。其中,美军推进的军用飞机数字化转型,旨在将以往线性的、以文档为中心的采办流程转变为动态的、以数字模型为中心的数字工程生态系统,使美军完成以模型为中心谋事做事的范式转移^[15]。



图2 美军陆续发布的“数字工程”战略文件

Fig. 2 "Digital Engineering" strategic documents released by the US Military

1.2 国内军用飞机数字化研发历程

与国外相似,国内军用飞机的数字化研发历程也经历了从二维到三维、从部件到全机、从“2D工程图纸+3D实体模型”到全面实施基于模型的产品数据定义的历程。

在歼-10飞机研制中,“计算机辅助设计制造技术”作为重点型号关键技术之一,极大地促进了我国军用飞机产品数据定义、产品数据管理、计算机辅助设计制造技术的进步和发展。1998年,歼-10飞机理论外形做了较大改动,面临巨大的研制进度压力,首次通过将三维数字化技术应用于该机型的研制过程,解决了制造周期十分紧迫的问题,实现了三维数字化设计制造技术应用零的突破。后续在枭龙飞机研制中所采用的数字化设计制造技术,使用了“九五”数字化预研课题的成果,从部件级结构拓展到全机结构系统,专业范围从结构专业拓展到总体、系统专业,其应用广度迅速扩展。枭龙飞机从技术状态确定到首飞仅用23个月,突显了三维数字化技术在军用飞机研制中全面应用实施的巨大效益。

2011年1月11日,歼-20飞机首飞,时隔五年,歼-20飞机精彩亮相珠海航展,标志着中国国产先进战斗机正式走上世界的前台。基于“完全产品数字化定义”的歼-20飞机数字化研发体系创造了中国军用飞机研制新速度,贯穿飞机研制全过程、遍布飞机研制各专业的全新数字化协同研制模式是主要推动力之一。

在歼-20飞机研制过程中,通过大力发展数字化自主创新能力建设,重点突破了全三维数字化设计与制造、数字化计算仿真优化设计、基于模型的系统工程和全生命周期产品数据管理等关键技术,创新构建全三维数字化协同研制体系,在设计、制造、试验验证以及产品技术状态管理等方面,实现了数字化定义、数字化仿真、数字化传递、数字化管理、数字化协同,完成了从理念方法到工具手段的数字化变革,促进了研发效率的显著提升。

1.2.1 全三维数字化设计与制造

全三维数字化设计与制造技术,从根本上改变了飞机产品数据定义的方法,其核心为“基于模型的定义(Model Based Definition,简称MBD)”。MBD技术是将产品的所有相关设计定义、工艺描述、属性和管理信息都附着在产品三维模型中的先进数字化定义方法。该方法能够将产品研制过程中的设计、制造、检验、装配等信息集成在综合的三维模型中,从而使之成为承载产品研制过程的唯一数据源^[16]。在歼-20飞机研制中,全面采用MBD技术,突破了大型复杂结构三维模型的构造、MBD模型数据结构、基于A模型^①的复杂装配结构定义、模型三维标注等关键技术,建立了较为完整的基于MBD的军用飞机全三维设计技术体系,在飞机外形、结构、系统管路、系统安装等方面实现了100%的完全数字产品定义。飞机结构三维设计如图3所示。

①A模型: Assembly Data Model, CAD/CAM/CAE领域概念。集合(Assembly)由多个实体(Instance)组成,实体由多个部件(Part)形成,一个模型(Model)中能包括许多部件,但只能包含一个集合。

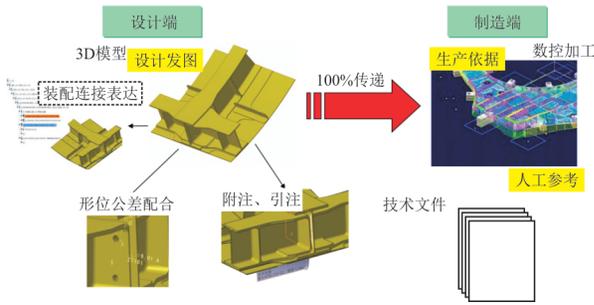


图 3 飞机结构三维设计
Fig. 3 3D design of aircraft structure

1.2.2 数字化计算仿真优化设计

数字化仿真优化设计是数字化研发的一个重要环节,旨在通过建立数学模型,模拟和分析不同边界条件下响应特性,进行设计方案的优化和改进,减少物理原型的试验。随着军用飞机复杂程

度和性能指标的不断提高,平台设计涉及的气动、飞控、载荷、强度以及结构专业之间耦合关系显著增强,多学科仿真优化技术和方法的发展对军用飞机研发产生了积极而深远的影响。在歼-20 飞机研制中,针对载荷优化与强度设计问题,首先建立载荷计算全流程集成优化设计框架,包括结构模态计算、静弹修正、机动仿真、载荷计算筛选环节;然后对计算复杂且费时的数值分析流程,基于代理模型建立局部的响应面模型,实现高效率全局仿真;最后根据设定的载荷与强度优化目标,基于局部代理模型的全局仿真流程开展优化设计,实现飞控、载荷、强度三个学科的耦合设计,有效支持控制律优化,在保证性能指标和作战需求不变的前提下,实现载荷轻量化和结构减重。数字化计算仿真技术如图 4 所示。

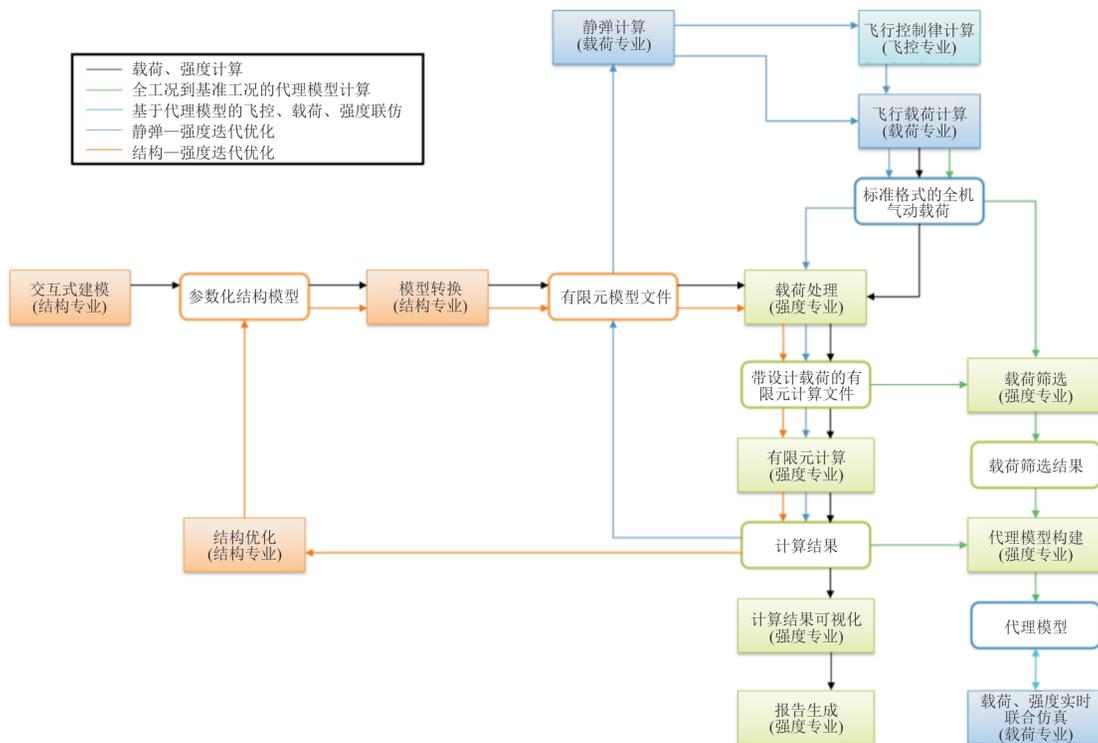


图 4 数字化计算仿真技术
Fig. 4 Digital computation and simulation technology

1.2.3 基于模型的系统工程

基于模型的系统工程(Model Based Systems Engineering, 简称 MBSE)是对系统工程活动中建模方法应用的正式认同,以使建模方法支持系统要求、设计、分析、验证和确认等活动^[17]。这些活动从概念性设计阶段开始,持续贯穿到设计开发及后续所有生命周期阶段。第一步,论证需求:首

先通过需求模型分析军用飞机全生命周期概念,识别分析顶层需求,从能力视角入手开展体系需求论证;然后从作战任务视角制定作战任务架构,分析任务场景下各装备的交互关系,完善装备能力需求;最后站在系统视角定义系统功能架构,实现装备任务活动到系统功能的映射,完成装备顶层功能需求的捕获。第二步,构建模型:基于系统

建模语言构建军用飞机系统功能模型,开展系统需求定义与架构设计,完成架构方案的评估选型;接着通过各系统专业协调完善系统接口定义、软硬件设计要求和成品设计要求,构建军用飞机系统性能模型,使用专业工具完成专业系统设计与实现。MBSE技术如图5所示。

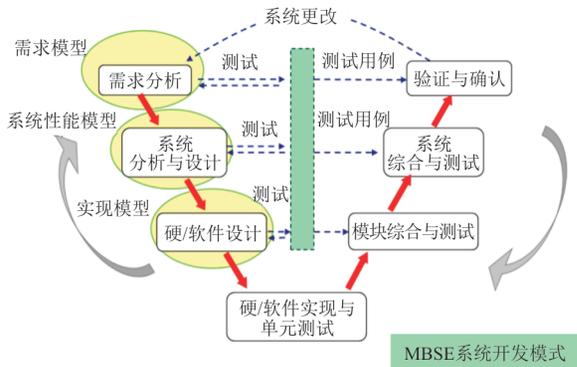


图5 MBSE技术
Fig.5 MBSE technology

1.2.4 全生命周期的产品数据管理

产品数据管理(Product Data Management,简称PDM)能够帮助研发人员管理产品数据和产品研发过程中的工具^[18],确保跟踪军用飞机设计、制造所需的大量数据和信息,支持产品研制。军用

飞机具有产品结构及功能系统复杂、标准化程度低、零部件数量众多、研制周期长、使用周期长、产业链长的特点,其研制涉及到多企业、多部门、多业务、多专业之间的复杂协同;在数十年的服役过程中不断改型,需要对全生命周期过程中技术状态的演变进行严密控制。要实现产业链高效协同和全生命周期产品技术状态的有效管控,产品数据管理是基础和前提。通过将设计阶段产生的面向工程全线的“设计数据集”——工程物料清单(Engineering Bill of Material,简称EBOM)作为唯一数据源,后续在EBOM的基础上生成“制造数据集(MBOM)”“单机装机数据集(BBOM)”“使用保障数据集(SBOM)”,构建从设计制造到使用环节的统一数据基线,使产业链协同不会因各阶段数据状态不一致而脱节,带来飞机实物状态与设计定义之间的偏离。这种以“物料清单多视图(x Bill of Material,简称xBOM)”为基础的数据构架体系是实施军用飞机全生命周期产品数据管理的核心,其重点是统一标准、统一数据、统一流程。在歼-20飞机设计转入制造过程中,基于xBOM体系,融合了来自于供应链和制造运营活动过程的数据,确保飞机定义状态和实物状态的一致和可控。多属性产品数据管理如图6所示。

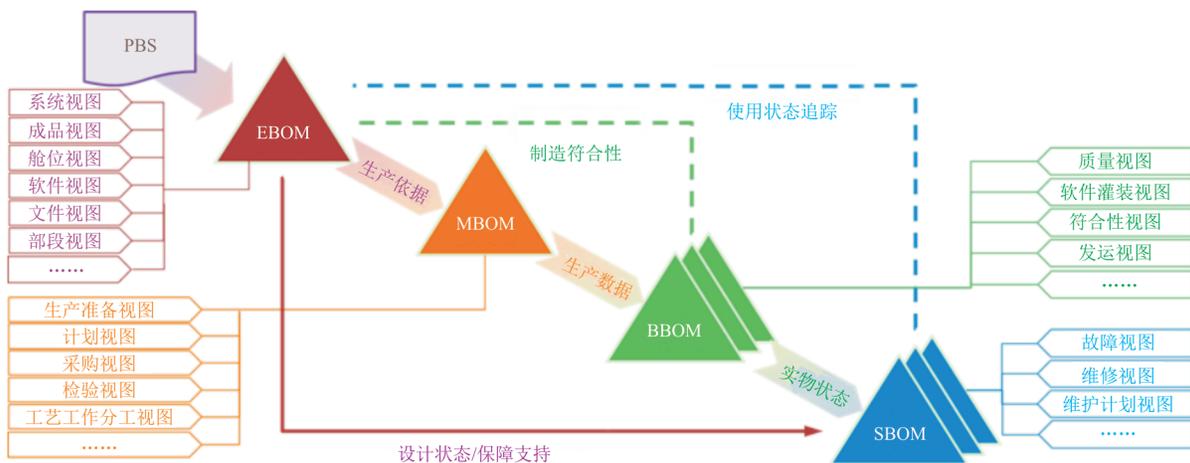


图6 多属性产品数据管理
Fig.6 Multi-attribute product data management

2 军用飞机研发数字化技术发展需求

未来战争将是集陆、海、空、天多角度全方位,常规作战与精确打击、通信网络干扰与电子信息侦察等新型模式的综合运用的“一体化”作战场

景。其中,影响战争胜负关键的制空权所属尤为重要。作为争夺未来战场制空权的航空装备是首战迎敌、正面接敌的核心装备,歼击机、预警机、侦察机和轰炸机等多型军用飞机的频繁出动,组建立体的制空屏障将成为未来作战的主要形式^[19]。

为攫取未来战争中的制空优势,美国空军已经开始实施全面数字化转型计划。2019年9月,美国《防务新闻》详细介绍了美国空军对“下一代空中主宰(Next Generation Air Dominance,简称NGAD)”计划的全新安排,提出“数字化百系列”采办新模式:通过采用现有的最新技术快速完成战斗机的制造,取代技术成熟但耗时长的一代完备战斗机^[20]。为实现这一目标,美国国防部通过“数字三位一体”架构^[14],即三种工业技术支撑了“数字化百系列”概念的发展和成型:

1) 敏捷开发:快速编写、测试、发布代码并迭代的开发模式;

2) 开放式架构:具有可互换的硬件,可授权第三方进行软件开发的开放、即插即用的系统;

3) 数字工程:可模拟从设计、生产到维护的装备全生命周期,且具有高度准确性和保真度的数字模型。

以上三点关键技术,都明确地指向未来装备发展的重要思路,即通过数字化敏捷开发的方式实现控制成本和提升效能的装备建设目标。

一代产品一代研发体系,全三维数字化协同研制体系支撑和加速了歼-20飞机的研制生产,但未来体系对抗的现代战争趋势对航空装备提出了快速精准、敏捷迭代、综合择优等创新发展要求,即隐身、航程、载荷、协同综合性能最优的“极限性能”,设计制造一体高度并行的“极短周期”,和高效费比、低成本研制的“极优成本”的“三极”研制需求。

要研发出尖端的航空装备,需要具备一定的研发能力,研制技术手段和研制体系必须从“数字化”向“敏捷化”发展转型。面对“三极”需求,军用飞机研制领域需要具备三个数字化敏捷研制能力。

2.1 平台方案数字空间快速生成能力

未来战场对抗环境复杂多变,为更快取得竞争优势,必须加快飞行器研发速度。军用飞机研发虽然是一个长链条的大系统工程,但只要抓住关键环节,就能显著提升研发效率,而这个关键环节就是作战需求—性能指标—平台方案。通过数字空间构建技术,面对气动收益与隐身收益的权衡、推进特性与隐身遮挡的权衡、减阻减重与设备空间需求的权衡、信息交互量与机载运算能力的

权衡等,以数字手段进行基础需求捕获、耦合机理建模、快速闭环评估,解决极限性能需求下的气/固/控/隐多场强耦合综合权衡问题,实现多约束平台方案快速生成与优化迭代。

2.2 复杂结构设计制造数字耦合优化能力

军用飞机不断追求极致性能,设计端为确保性能指标会不断增加结构复杂度、提高制造精度要求,必然导致制造难度加大、周期延长、成本增加,甚至常引发“设计出来但造不出来”的现象,不仅会严重影响研制进度,还会大幅降低结构设计制造环节的效费比。传统设计和制造分离的结构研制模式难以满足要求,需要面向制造的不确定性从理论基础、协同机制、制造工艺方面突破,构建复杂结构设计和制造数字耦合与协同优化能力,实现面向敏捷制造的敏捷设计。

2.3 复杂系统数字化可信确认评价能力

传统以实物和试验为基础的设计、测试和试验方法及流程已成为制约军用飞机敏捷研发、精准交付、快速迭代的主要障碍。针对军用飞机复杂系统多学科集成、多物理域共构的特点,机内系统需要电/液/气/磁多学科综合,机间系统需要探/通/火/光多物理域融合,需要具备系统数字化敏捷设计与试验验证能力,在设计前端构建多方案快速精准评估、敏捷迭代及综合择优的创新性设计方法,形成对仿真/试验/试飞等多阶段系统功能验证闭环的合理分配设计。通过虚拟域可验证的最优设计,有效规避有限研制周期内新技术引入带来的不确定性风险。

通过方案快速迭代、设计制造耦合、系统可信确认这三个数字能力的构建,可有效应对军用飞机多约束综合性能最优的“极限性能”、设计制造一体高度并行的“极短周期”和高效费比低成本的“极优成本”的“三极”研制需求。

为了在虚拟数字域实现上述多学科、多物理域融合的综合设计,从装备平台方案顶层来确保交付后的功能性能,从军用飞机研制的设计源头来提高整个过程的研制效率,从理论、方法、手段层面来进一步提升军用飞机研制能力,需要攻克从设计、制造到试验验证方面的一系列数字化敏捷研发技术。

3 军用飞机研发数字化技术发展方向

聚焦制约军用飞机方案优选和能力提升的设计理论与方法,探索先进数字化技术和流程以提升军用飞机设计效率和综合效能,数字化敏捷研制技术是赋能军用飞机敏捷研发的原始创新动力。

面向未来研制需求,需要以数字孪生为对象构建虚实精准映射赛博物理系统原理,以数据驱动为目标进行研制成本、进度、性能、质量和风险的智能评估与决策,围绕数字空间建立虚拟设计、综合与优化方法,支持对军用飞机几何特征和物理特性等进行多学科、多尺度、多状态的高保真数字化表征,以数字方法提升军用飞机功能/性能的分析与验证水平。

综上所述,数字化技术在军用飞机研制中将继续发挥引领性作用,未来主攻方向包括:

- 1) 面向性能的平台方案快速生成技术;
- 2) 面向制造的复杂结构精准设计技术;
- 3) 面向试验的复杂系统虚拟验证技术。

3.1 面向性能的平台方案快速生成技术

从作战场景到性能指标再到军用飞机平台的快速闭环是军用飞机成功研发的关键环节。充分利用数字空间虚拟、灵活、可变的优势,针对作战需求推演出典型作战场景,准确捕获平台性能指标,基于多学科联合设计仿真手段对多方案进行快速评估和迭代优化(如图7所示),能够加速军用飞机平台方案收敛。

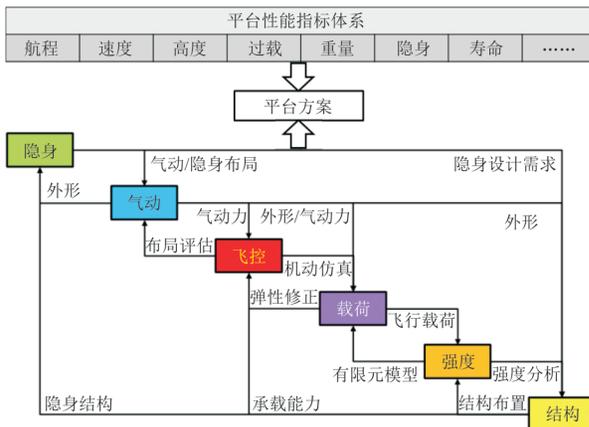


图7 面向性能的平台方案快速生成技术
Fig. 7 Performance-oriented platform scheme rapid generation technology

3.1.1 基于作战需求的平台多方案快速设计方法

基于作战需求确定的性能指标约束,为快速生成平台概念方案,需结合军用飞机设计的流程、知识和方法,研究建立性能指标与总体设计参数(如重量、翼载、发动机等)以及气动布局参数之间的映射矩阵,以支持快速形成多种备选概念方案。

实现基于作战需求的平台多方案快速设计,首先要研究多场耦合机理及联合建模方法。军用飞机平台方案涉及气动、隐身、载荷、飞控、结构强度等多个学科,且相互间耦合关系复杂,要实现平台高质量的快速设计,需要研究建立多场耦合分析模型,如气动/结构/控制耦合模型、气动/控制/隐身耦合模型等,打通学科间的数据鸿沟,匹配分析精度及效率,建立一套基于多学科集成优化的高效设计方法。

通过这套高效设计方法,实现多方案的快速闭环评估。飞机平台涉及可飞、可隐、可控以及可承载的综合指标约束,需要研究建立工程适用的多阶段、多层级的评估策略,在此基础上对军用飞机综合性能进行分析,利用关键能力实现决策机制,综合评估原型方案优劣,支持对原型方案快速修订及迭代设计,提高军用飞机方案设计的质量和效率。

3.1.2 高精度多学科联合建模及仿真技术

基于作战需求的飞机平台多方案快速设计方法,通过使用高精度多学科联合建模及仿真技术,对多方案进行快速评估和迭代优化,形成从场景到指标再到平台的闭环方案,为军用飞机的快速研发提供“源头活水”和关键引领。

首先,明确仿真的目标,根据目标建立涵盖气动、隐身、载荷、飞控、结构强度等多个学科的原始模型,如在控制律设计中开发通用、鲁棒、快速、原型分析模型,在载荷强度分析中研究基于降维方法的多工况高效分析模型,在结构设计中采用轻量化、参数化设计模型等。利用超级计算机的庞大计算节点和高性能GPU矩阵计算能力,在原始模型上并行运行仿真试验来高效、快速地收集关键数据点。然后,选择合适的代理模型,通过试验设计获取仿真程序数据样本,预处理后选择合适的样本进行训练和验证,使代理模型能够近似原始模型的响应,同时具备准确性和可靠性。最后,通过将各个学科的代理模型集成到统一的仿真框架中并进行迭代优化,分析仿真结果,为飞机平台

快速设计决策提供支持,并实现最终设计目标。同时,进行敏感性分析和不确定性量化,以识别对系统性能影响最大的参数,并对模型的不确定性进行评估,根据新的实验数据或设计变更,定期更新代理模型以保持其准确性。

现代军用飞机的设计需要在革命性能力与经济可承受性之间寻求平衡,设计要求也变得越来越苛刻。多学科联合建模及仿真技术的应用能够打通学科间的数据鸿沟,匹配分析精度及效率,降低设计成本,提升军用飞机设计的可靠性。随着计算能力的提升和仿真算法的改进,多学科联合建模与仿真技术或将在不远的未来成为以军用飞机为代表的复杂装备系统设计问题的终极解决方案。

3.2 面向制造的复杂结构精准设计技术

结构件组成了军用飞机的骨架,未来军用飞机要求更高、更快、更隐身,与之相应的军用飞机结构设计技术必然将朝着更轻质、更高效、长寿命、低成本的方向发展,以满足军用飞机平台不断提高的技术性能和作战能力要求^[21]。为应对军用飞机研制对复杂结构设计和制造提出的极短周期和高效费比等挑战,解决传统设计和制造分离结构研制模式造成的难题,提出复杂结构设计和制造的数字耦合与协同优化研究思路。基于军用飞机复杂结构设计变量与制造变量数字耦合方法研究,既可以拓展军用飞机结构设计空间,又可以保障复杂结构短周期、低成本制造,是面向效费比最优化的设计方案决策方法。通过云上智能协同的数字化手段,为设计端到制造端的设计迭代提供有力支撑。面向制造的复杂结构精准设计技术如图8所示。

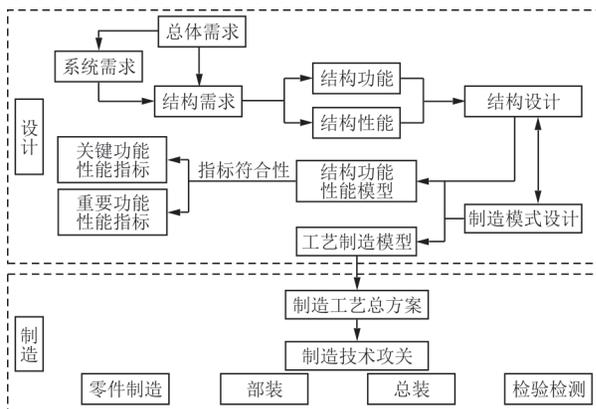


图8 面向制造的复杂结构精准设计技术

Fig. 8 Manufacturing-oriented complex structure precision design technology

3.2.1 结构与制造关联建模与双向优化方法

设计和制造并行协同优化的基础是建立设计变量与制造变量间的关联模型。通过构建面向设计迭代和制造工艺迭代的结构件属性图,将结构件的属性图和加工特征进行关联,建立起设计变量与制造变量间的多粒度数字关联模型,当设计发生变化时,结构件的属性图及所包含的加工特征也随之第一时间更新,制造端的工艺决策和工艺方案以及设计端相对应的设计变量也随之变更。

基于结构设计变量与制造变量的多粒度数字关联模型,建立结构设计过程与制造工艺过程的双向协同优化机制,是实现设计和制造精准匹配的关键。通过研究不同阶段设计变量的分布规律,分析材料、工艺等带来的制造能力不确定性,以及这些不确定性对设计和制造带来的影响,提出面向设计变更的制造工艺动态调整策略和面向效费比最优化的设计方案决策方法;同时引入优化算法,构建基于不同约束条件和优化目标的设计和制造双向优化的迭代收敛机制,是实现军用飞机复杂结构设计制造精准匹配的有效途径。

3.2.2 工业智能辅助的云上协同设计制造技术

工业智能是工业4.0时代的一项新概念,结合了AI、大数据、云计算和物联网等多种数字化技术,旨在提高工业生产效率、优化运营以及增强决策能力^[22]。面向未来军用飞机的设计制造协同与快速迭代,工业智能体系中的各项技术不可或缺。

一方面,为打通设计制造数据、流程与工具,需建设基于产品全生命周期的云上协同研制管理平台,实现xBOM之间的关联与管理,从设计到制造、维护到保障的全生命周期数据技术状态管理和双向传递,以及科研任务活动管理、统一基础资源库、大数据采集、存储、分析与决策。通过云端部署和组织数据权限控制的模式,在主机厂所和各成品单位之间定义、传递、共享单一数据源,支持型号参研单位跨组织层级、跨业务领域、跨生命周期的数据创建和消费。当涉及工程变更时,能够基于xBOM形成的数据脉络,建立全过程变更影响评估和一体化变更流程,实现不同专业、单位之间有效的产品关联更改控制机制,统一变更管理条件,统筹各承研单位之间的数据变更流程和变更管理。

另一方面,通过工业大模型、快速原型等先进数字化技术,为军用飞机的快速设计和试制提供能力支撑。在设计方面,大模型可以与CAD、CAE

等工业设计软件结合,通过连接相关数据库,更好地调用相关的设计模块,提升研发设计的效率。比如在结构设计方面,借助预训练工业大模型的生成能力,根据文本提示给出精确的设计草图,快速为外形或零部件提供多种设计方案,提升发图效率的同时赋予多种创造性选项^[23]。在试制过程中,通过快速原型技术,如 3D 打印,可以为工程师快速制作实体模型进行简单的功能和性能测试,识别设计缺陷并及时反馈^[24]。

通过将云上协同平台和先进数字化技术的有机结合,快速迭代设计,优化产品性能和制造工艺。在工业大模型中模拟制造过程,预测问题并进行调整,使用云上协同研制平台管理各类数据流和信息流,确保设计员和工程师访问到最新数据,根据实时更新的信息,准备生产所需的材料、工具和设备,有效提高军用飞机产品研发和交付质量。

3.3 面向试验的复杂系统虚拟验证技术

体系作战的形式决定了军用飞机今后的试验验证将划分为机内机载系统综合、机间分布式系统和跨平台多装备协同三大模式,试验晚、试验慢、验证覆盖率不足,且存在技术颠覆性风险,是导致军用飞机研制周期长、交付问题多、后续系统迭代设计困难的痛点、难点。围绕虚实映射机制,基于数字孪生,研究基于多物理域融合的单机及多机间的敏捷、可信数字试验验证技术(如图 9 所示),通过数字研发、数字试验、数字作战等技术手段,研究形成跨平台作战及战术能力等级、作战效能考核等测评体系,支撑军用飞机全面、快速、敏捷的研发和交付。

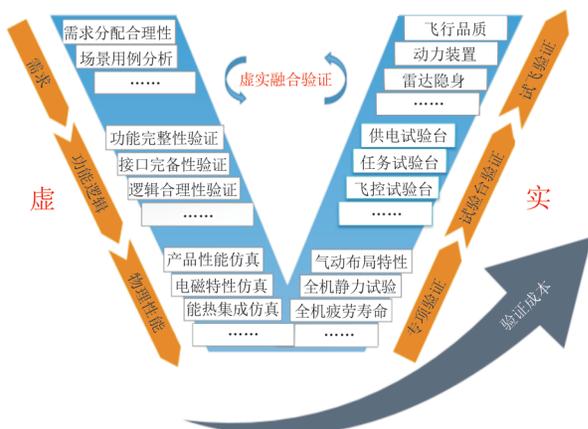


图 9 面向试验的复杂系统虚拟验证技术
Fig. 9 Testing-oriented complex system virtual verification technology

3.3.1 复杂系统可信数字试验验证方法

军用飞机跨平台联合作战是未来战场的典型模式,面向未来战场的立体、多维、广域的强对抗、高动态环境,需研究机内系统、机间系统、机间协同的复杂系统可信验证方法。

针对新型军用飞机机载系统跨专业功能耦合复杂、多学科协同验证困难、物理试验难以全面覆盖交联逻辑等问题,开展跨系统、多维度虚实融合方法研究,构建机载系统信息物理融合原理验证平台,验证机载系统虚拟模型运行调度以及与实物样机的数据交互,实现在实物综合试验阶段测试用例的快速部署,以及虚拟综合试验和实物综合试验的统一数据分析及试验结果的一致性评价。

针对军用飞机机间协同作战平台多、样式多、交互数据种类复杂和战场环境瞬时变化的特点,以机载设备为载体,机间通讯为纽带,研究多域表征方法,综合机间异构平台间的传感器、武器以及平台基础设施等资源,构建异构分布式装备互联架构,实现机间能力从任务级协同向资源级协同、从信息级协同向信号级协同的提升,支撑机间异构系统互联验证。

面对复杂任务的军用飞机作战及战术能力升级规律与确认机制的问题,基于上述多物理域综合机载系统及机间异构分布式互联系统融合验证方法,研究跨平台作战闭环模拟验证方法,实现军用飞机性能测试、系统测试、任务测试、体系测试以及跨平台复杂条件下的全方位综合测试能力,形成军用飞机跨平台虚实融合训练系统构建理论,提升军用飞机、人机协作效率,加速跨域装备间综合作战能力的持续生成。

3.3.2 基于数字孪生的虚实结合验证技术

数字孪生技术的关键是通过在虚拟空间中创建实际物理系统的高逼真虚拟模型对象,模拟真实世界中的行为来提供相应的信息反馈,并对未来的行为趋势进行预测和优化^[25]。基于数字孪生的虚实结合验证使得军用飞机试验过程与全流程、全寿命周期各环节的模型能够在虚实空间进行数据的双向同步和沟通,支持军用飞机从设计到维护全过程研发和交付的需求。

首先对整机级模型进行轻量化处理,使用单一权威数据源,创建包括几何特性、物理属性、运

行机理的军用飞机高精度三维模型,从外形到零部件与数字样机模型保持高度一致,打通“端到端”的数字信息流,基于模型的方式传递数据信息。利用高级建模和仿真软件进行数值模拟,根据收集的数据构建出能够反映军用飞机系统功能的数字孪生模型。通过机体和试验台上部署的传感器,收集军用飞机飞行试验和地面试验的关键参数,并对数字孪生模型进行校准,确保与真实的试验结果可信统一,实现虚拟域到物理域“以虚映实”。在此基础上,将试验数据与数字孪生模型实时同步,使模型能够实时反映物理实体的状态,分析数字孪生提供的数据和模拟结果,达到对镜像实体进行远程操控或自动调整的“以虚控实”的目的。

基于数字孪生的虚实结合验证技术不仅可以模拟不同的飞行条件和操作场景,评估军用飞机性能,验证其强度和可靠性,还可通过模拟各种故障模式,评估军用飞机的安全性和应急响应能力,利用收集的数据和模型分析,预测军用飞机的维护需求和潜在故障,实现预测性维护。进一步地,开发虚拟现实(Virtual Reality,简称VR)或增强现实(Augmented Reality,简称AR)训练程序,利用数字孪生模型为飞行员提供模拟飞行体验,提高训练效率和安全性。

数字孪生技术通过在数字虚拟世界中开展分析计算,以智能计算、数据挖掘、机器学习等手段驱动现实物理世界中任务的高效开展,提升了试验系统的自感知、自预测及自适应能力,从“虚实交互”走向“以虚预实”,为军用飞机智能试验提供了一种新途径。

通过面向性能的平台方案快速生成技术、面向制造的复杂结构精准设计技术、面向试验的复杂系统虚拟验证技术的突破,基于数字空间进行设计综合权衡,可有效解决军用飞机研发面临的全系统、多学科、多约束设计难题,支持数字化研制能力从全实物、半实物,到全数字的根本性转型,实现军用飞机数字化敏捷研发模式和能力的重大进步。

4 结束语

纵观国内外军用飞机数字化研制历程,特别是从歼-10、枭龙、歼-20的研制实践来看,数字化

技术推动军用飞机研发已取得丰硕成果。面向未来军用飞机“极限性能、极短周期、极优成本”的研发需求,军用飞机研发必需从“数字化”向“敏捷化”发展转型。

在性能综合优化方面,针对作战场景准确捕获平台性能指标,基于多学科联合设计手段对多方案进行快速评估和迭代优化,加速飞机平台方案收敛。

在精准设计制造方面,开展基于军用飞机复杂结构设计变量与制造变量数字耦合方法研究,拓展军用飞机结构设计空间,促进复杂结构短周期、低成本制造。

在虚实结合试验方面,构建高置信度数字仿真模型和不确定性评价模型,在设计端形成仿真/试验/试飞等多阶段系统功能验证闭环的合理分配,确定适当的实物试验验证方式。

基于快速发展的新一代信息技术与智能技术,对新一代军用飞机研发数字技术开展机理研究,快速形成数字化敏捷研发核心能力,是推进模型驱动、数据驱动、快速迭代研发模式转型的根本途径,将为未来军用飞机敏捷研发创新提供强劲助力。

参考文献

- [1] 任为民. 新型军用飞机研制特点及项目管理[C]// 市场经济与航空产业研讨会. 西安: 中国航空学会, 1999: 160-164.
REN Weimin. Development features and project management of modern military aircraft[C]// Seminar on Market Economy and Aviation Industry. Xi'an: CSAA, 1999: 160-164. (in Chinese)
- [2] WEISBERG D. The engineering design revolution: the people, companies and computer systems that changed forever the practice of engineering[EB/OL]. (2023-03-27) [2024-06-26]. <https://www.shapr3d.com/blog/history-of-cad>.
- [3] 孙虹, 张厚新. 装备采办与CALS战略[J]. 海军装备, 2003(10): 14-16.
SUN Hong, ZHANG Houxin. Military equipment acquisition and CALS strategy[J]. Naval Equipment, 2003(10): 14-16. (in Chinese)
- [4] SNYDER C R, SNYDER C A, SANKAR C S. Use of information technologies in the process of building the Boeing 777[J]. Journal of Information Technology Management, 1998, 9(3): 31-42.
- [5] KINARD D A. F-35 digital thread and advanced manufacturing[C]// AIAA Aviation Forum: Aviation Technology,

- Integration, and Operations Conference. Atlanta: AIAA, 2018: 161-182.
- [6] 朱长征. 国外航空工业数字化的发展及启示[J]. 国防科技工业, 2020(6): 24-25.
ZHU Changzheng. Development and enlightenment of digitalization of foreign aviation industry[J]. Defence Science & Technology Industry, 2020(6): 24-25. (in Chinese)
- [7] MICHEL R. Fly high on a thread[EB/OL]. (2008-03-01) [2024-06-26]. <https://www.controleng.com/articles/fly-high-on-a-thread/>.
- [8] U. S. Department of Defense. Digital engineering strategy [EB/OL]. (2018-11-22) [2024-06-26]. <https://man.fas.org/eprint/digeng-2018.pdf>.
- [9] U. S. Department of Defense. Department of defense software modernization strategy [EB/OL]. (2022-02-22) [2024-06-26]. <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/2924187/dod-software-modernization-strategy-approved/>.
- [10] U. S. Department of Defense. Department of defense handbook: digital engineering and modeling practices: MIL-HD-BK-539 [R]. Washington DC: Washington Navy Yard, 2022.
- [11] U. S. Department of Defense. Digital engineering: DOD Instruction 5000.97 [EB/OL]. (2023-12-21) [2024-06-26]. <https://www.esd.whs.mil/DD/>.
- [12] The SLD Team. The F-35 digital thread production process: donald kinard provides an overview[EB/OL]. (2018-11-07) [2024-06-26]. <https://sldinfo.com/2018/11/the-f-35-digital-thread-production-process-donald-kinard-rov-ides-an-overview/>.
- [13] VELOCCI T. How a model based systems engineering approach wins business for Boeing [EB/OL]. (2019-06-18) [2024-06-26]. <https://blog.3ds.com/industries/aerospace-defense/how-a-model-based-systems-engineering-approach-wins-business-for-boeing/>.
- [14] U. S. Air Force. Air Force acquisition biennial report 2019+2020: building the digital force[EB/OL]. (2021-04-09) [2024-06-26]. https://www.af.mil/Portals/1/documents/2021SAF/04_Apr/FY19_FY20_Dept_of_the_Air_Force_Acquisition_Biennial_Report_final.pdf.
- [15] 刘亚威. 管窥美军数字工程战略: 迎接数字时代的转型[J]. 科技中国, 2018(3): 30-33.
LIU Yawei. On the digital engineering strategy of the US army—meeting the transformation of the digital age[J]. China Scitechnology Business, 2018(3): 30-33. (in Chinese)
- [16] 范玉青. 基于模型定义技术及其实施[J]. 航空制造技术, 2012, 55(6): 42-47.
FAN Yuqing. Model based definition technology and its practices [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(6): 42-47. (in Chinese)
- [17] INCOSE. INCOSE systems engineering vision 2020: INCOSE-TP-2004-004-02[R]. Seattle: International Council on System Engineering, 2007.
- [18] MILLER E. PDM today [J]. Computer-Aided Engineering, 1995, 14(9): 32-41.
- [19] 司晓, 陈松. 加快航空兵器发展 提高空天防御能力: 中国航空兵器论坛综述[J]. 国防科技工业, 2009(6): 39-41.
SI Xiao, CHEN Song. Speeding up the development of aviation weapons and improving air and space defense capability—a summary of China aviation weapons forum [J]. Defence Science & Technology Industry, 2009(6): 39-41. (in Chinese)
- [20] INSINNA V. The US Air Force's radical plan for a future fighter could field a jet in 5 years[EB/OL]. (2019-09-16) [2024-06-26]. <https://www.defensenews.com/digital-show-dailies/2019/09/16/the-us-air-forces-radical-plan-for-a-future-fighter-could-field-a-jet-in-5-years/>.
- [21] 李航航, 阎勇, 尹航. 战斗机新结构应用与新材料需求分析[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4): 8-13.
LI Hanghang, YAN Yong, YIN Hang. New structure application and new material requirement analysis for fighter aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(4): 8-13. (in Chinese)
- [22] PERES R S, JIA X D, LEE J, et al. Industrial artificial intelligence in industry 4.0: systematic review, challenges and outlook[J]. IEEE Access, 2020, 8: 121-139.
- [23] 腾讯研究院. 工业大模型应用报告[EB/OL]. (2024-04-02) [2024-06-26]. <https://www.tisi.org/27724>.
Tencent Research Institute. Industrial large-scale model application report [EB/OL]. (2024-04-02) [2024-06-26]. <https://www.tisi.org/27724>. (in Chinese)
- [24] 杨延华. 增材制造(3D打印)分类及研究进展[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 309-318.
YANG Yanhua. Analysis of classifications and characteristic of additive manufacturing (3D print)[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 309-318. (in Chinese)
- [25] 张文杰, 王国新, 阎艳, 等. 基于数字孪生和多智能体的航天器智能试验[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(1): 16-33.
ZHANG Wenjie, WANG Guoxin, YAN Yan, et al. Intelligent test of spacecraft based on digital twin and multi-agent systems [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(1): 16-33. (in Chinese)

(编辑:马文静)