

引文格式: 杨波, 赵闯, 康玲, 等. 面向协同制造云平台的航空装备数字模型构建 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(19): 56-65, 73.

YANG Bo, ZHAO Chuang, KANG Ling, et al. Digital model construction of aviation equipment for collaborative manufacturing cloud platform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(19): 56-65, 73.

面向协同制造云平台的航空装备数字模型构建*

杨波, 赵闯, 康玲, 易力力

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

[摘要] 随着云计算、物联网等技术的发展, 基于云平台的复杂装备跨企业协同制造模式在航空装备制造等领域得到了广泛关注。然而, 不同企业产品数字模型间存在语义异构和数据孤岛等问题, 难以进行语义统一的集成表达, 极大地制约了云平台上跨企业协作的质量和效率。分析了航空装备在协同制造云平台模式下各企业业务交互中涉及的数字模型, 将其分为4个维度进行描述; 并通过全生命周期业务交互方式提取出航空装备数字模型的产生流程。基于此, 结合本体理论和元建模方法, 设计了本体元模型的构建原则和流程, 并结合航空装备生命周期的特点和数据种类建立了面向协同设计云平台的航空装备本体元模型。以无人机为例, 通过本体构建软件 Protégé 对其本体模型进行了构建, 以统一语义对无人机全生命周期内的模型交互信息进行了表达, 验证了所提航空装备数字模型构建方法的正确性。

关键词: 航空装备; 网络协同制造; 云平台; 数字模型; 本体元模型

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.19.056



杨波

副教授, 博士, 研究方向为智能制造、网络协同制造、工业大数据等。

航空装备作为国防安全的重要基础, 体现着国家的工业发展水平。

现阶段航空装备制造多采用“主制造商和供应商联合模式”, 以主机厂为龙头, 完成航空装备方案设计, 部分初步设计后将其余部件或系统外包给“供应商”进行设计和生产^[1]。随着航空装备复杂程度的不断提高, 其生产制造过程呈现出设计所-主机厂-配套厂并行协同研制、研制与批产混线等特点, 且涉及产品设计、工艺设计、零件制造、结构装配、总装集成、试验试飞、服务保障、供应链管控、生态集成等多业务过程。因此, 航空装备生命周期内涉及的企业范围不断扩大, 协作企业间地域分布分散, 然而制造资源间存在的“信息孤岛”现象导致研制的业务过程协同难、技术状态管控难、生产效能提升难等问题尤为突出^[2]。尽管现有的

分布式网络系统环境支持跨企业协同的生产模式, 但受软硬件系统静态性的限制, 难以对异构、异地且海量的制造资源与制造知识进行高效地共享、配置和管控, 无法充分满足航空装备制造过程管控的动态性要求^[3]。关于产品生命周期不同方面的数据在企业内部可能由不同的IT系统进一步管理, 如产品数据管理(PDM)系统、企业资源规划(ERP)系统、供应链管理(SCM)系统或制造执行系统(MES), 这些系统在信息管理方面有很高的复杂性, 特别是在信息必须跨公司边界交换的情况下, 难以进行跨企业间的数据统一管理^[4]。

随着现代信息技术、云计算、资源管理技术、物联网技术的发展, 基

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1713300); 国家自然科学基金(51975074); 重庆市自然科学基金(cstc2021jcyj-msxmX0732)。

于云平台制造模式的提出和发展实现了制造资源高效共享且具有较高的系统开放性和用户参与度,通过任务模式匹配、任务自动分解技术和协同服务技术为制造云平台中的用户和参与企业提供敏捷服务^[5]。美国GE公司在2013年推出以PaaS(平台即服务)为核心的Predix工业公有云平台,开启了国际工业互联网云平台发展的序幕^[6]。纪妍等^[7]提出了基于云制造服务平台的复杂装备网络协同平台服务模式,实现了服务资源选择与配置、服务流程计划与控制和服务信息反馈的联动协同。Mas等^[8]提出了建立工业化决策单元(iDMU)的构想,包括产品信息、装配过程、装配资源和工具以及装配作业指导书,但是由于iDMU软件框架仅限于来自单一供应商,因此没有解决互操作性问题。刘明周等^[9]结合物联网技术在机械产品制造系统中的应用模式,构建了物联制造资源本体模型,实现了制造资源的互联感知与信息集成,为航空装备制造模式提供了发展方向和思路。在航空数字化转型发展的大背景下,现代飞机研制模式正由传统的设计-制造-试验模式,向设计-虚拟综合-数字制造-物理制造的新模式转变,通过建立数字主线和基于数字主线模型的过程、数据无缝融合与高效的协同研制体系,实现多点异地的多专业高效协同,有效支撑产品快速迭代^[2]。Karasev等^[10]开发了分布式信息生命周期管理系统的原型,并对其进行了动态测试,为生命周期管理系统开发应用M.A.S模型提供了理论依据,有助于实现分布式多智能体生命周期管理系统工业商用版的需求形式化。

基于协同制造云平台的航空装备制造模式为航空装备的协同设计、协同制造、管理和维护过程提供了全新模式,也对航空装备数字模型的构建方法提出了新要求。航空装备数

字模型将航空产品全生命周期中不同层次、不同阶段、不同学科的复杂信息进行集成以代替物理样机,能够将航空装备各阶段信息进行准确表达,其作为一种实体化语言,为服务委托者、生产单位、设计人员提供直接沟通的渠道。随着产品概念设计和结构设计等方面的CAX工具不断成熟以及系统统一建模等领域研究不断发展^[11],现阶段航空装备数字模型通常包含装备几何信息、非几何信息、拓扑信息等,并涉及多领域、多学科、多阶段、多层次的数字化知识模型,如基于模型的数字定义(Model based definition, MBD),是由美、日、欧等国家提出的数字模型构建理论和方法,在航空装备领域已经得到广泛应用^[12]。2003年,美国机械工程师协会起草第1份标准《ASME Y14.41—2003》;2006年,国际标准化组织发布相应标准ISO 16792—2006;2009年,中国制定了《技术产品文件 数字化产品定义数据通则:GB/T 24734—2009》等11项国家标准。张嘉易等^[13]建立了基于MBD的三维装配工艺设计系统,以产品结构树为基础实现了对装配过程中设计、工艺信息的有效管理。邱世广等^[14]构建了基于MBD的飞机工艺数字样机体系,实现了以三维模型为核心的数字化工艺设计/制造的先进生产模式。DPD技术,即数字化产品定义最初由美国波音公司提出,并在波音777等机型的研制中得到成功应用,其飞机零件的数字化产品定义采用CATIA系统进行零件的三维建模,建立了100%的数字化飞机,所有零件的三维设计结果是唯一的权威性数据集,能够支持全生命周期内各个相关领域的操作,并实现集成化^[15]。基于此,蔡文沁等^[16]提出了飞机产品-过程-资源知识(PRP)模型,支持飞机全生命周期内知识的扩展、共享,并实现知识的集成,建立了具有开放结构和有效使

用先验知识的模型。然而基于理论模型的制造过程仿真无法真实反映出物理对象的几何时变特性,并缺乏对制造过程信息、制造状态信息的表达,导致制造过程仿真结果可能偏离实际工况^[17]。

国内外学者在航空装备分布式建模与仿真领域进行了大量研究,但是目前对复杂航空产品全生命周期一体化设计与管理的研究仍存在明显不足,航空产品数字模型建模技术涉及多个学科领域,所使用的建模语言必须能够支持多学科领域的协同建模与仿真,并完整地描述设计对象的层次结构和逻辑关系。朱俊^[18]根据产品特有的生命周期特点,将建模技术与本体有机结合在一起,构建了基于元数据产品本体的建模技术,并证明了本方法对于产品管理的重要作用。张峰等^[19]在分析性能样机功能结构和设计流程的基础上,建立了基于本体元模型的性能样机协同概念建模方法,从顶层系统开始分解,然后根据性能样机的元模型进行建模,通过描述系统分层结构耦合模型,为复杂产品多学科协同建模提供了理论基础。然而SysML语言对于没有软件工程背景的工程师(如机械工程师)来说较难掌握,需要专业人士来对系统进行建模^[20]。

由上述分析可知,目前研究所构建的航空装备数字模型多针对传统制造模式下航空装备制造或装配过程中的信息进行表达,缺乏对云平台制造模式下航空装备信息的有效管理和多学科、多领域知识及数据的共享与表达,难以实现在云平台制造模式下跨企业间动态数据的有效管理、信息共享、数字模型互操作的要求,无法指导云平台制造模式下航空装备数字模型构建。

本文通过云平台功能架构分析定义面向云平台的航空装备数字模型产生流程,并据此搭建航空装备数字模型框架;结合本体理论和元模

型建模方法对航空装备数字模型进行语义表达,构建面向云平台的航空装备本体元模型,以解决模型之间的语义异构问题,实现航空装备复杂信息的准确表达。

1 协同制造云平台功能架构分析

协同制造云平台以制造过程为主线,将工程项目作为对象,系统地解决项目管理、协同工作、资源共享3方面的问题。从项目的立项、实施到完工等进行全过程管理,实现制造资源的合理利用。在基于协同制造云平台的制造模式中,客户、各级供应商、制造企业扮演不同利益主体的角色,产品的所有制造任务都由一个分配系统集中分配给最优主机厂,再由其进行任务分解和配置^[21]。协同制造云平台制造模式将柔性制造、网络化制造等先进制造模式的优势进行集成,具有更强的系统开放性和更高的企业、用户参与度,能够高效共享与协同海量异构制造资源和社会中的各项资源,并在企业间或产业联盟成员间共享。企业的生产经营范围和方式不再受地域的限制,在高质量、高效率满足市场需求的同时,降低了生产研发制造成本,进而增强了企业竞争力^[22]。

协同制造云平台功能架构如图1所示,项目需求池中包含由服务需求方所提出的项目需求。服务需求方通常有用户、核心企业等,用户指产品使用者,其需求多为对产品功能的总体要求。核心企业是指在产品生命周期中承担主要制造任务的企业,如航空装备生命周期内的主机厂、主制造商企业等。核心企业将项目需求分解为多项子任务后寻找协作企业进行任务分配。项目需求池中进行的活动包括需求提取、需求定义、需求聚类,对需求进行初步划分和分解后将其传入任务活动池。

任务活动池由具体任务组成, T

代表任务集; t 代表某个具体任务,可表示为 $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$ 。航空装备全生命周期内主要包括设计任务 T_1 、制造任务 T_2 、装配任务 T_3 、试验仿真任务 T_4 等。对任务进一步划分得子任务集,如设计任务 T_1 可分为总体方案设计任务 t_1 、结构设计任务 t_2 、零部件设计任务 t_3 、装配设计任务 t_4 、工艺设计任务 t_5 、施工设计任务 t_6 等。

共享服务池是将云平台入驻企业所提供的云服务进行聚类、分类所构成的共享区域。服务集是由多项具体服务组合而成,而某项服务可由一个企业单独提供或多家企业共同承担。服务需求者在共享服务池中进行服务检索和匹配,以满足供需需求。

协同制造云平台为航空装备制造提供了包括需求分析、生产研发、制造及维护的全生命周期解决方案新模式,解决了航空装备终端客户、制造企业、各级供应商、服务提供商分布地区分散,难以进行跨领域、跨地域协作的问题,实现已有资源的最大化利用。随着网络信息技术的发展,云平台在航空装备制造中的应用将能够有效提升航空装备设计、工艺、制造过程和多供应链协同运作的

生产效率。

在协同制造云平台的制造模式下,企业以更加自由、灵活的方式参与到航空装备生命周期当中,满足“小核心、大协作、专业化、开放型”高效航空产业链协同研制体系的要求,促进航空工业研制生产模式的转型升级^[2]。在此制造模式下,参与到航空装备全生命周期中的各类相关企业均应具备对其数字模型进行操作的相关权限,即根据承担的任务按照规定流程对数字模型信息进行提取或更改。现有的传统航空装备数字模型构建方法虽能够表达出航空装备相关的静态信息如几何、工艺等信息,但却难以描述协同制造云平台模式下的航空装备全生命周期内实时变化的信息(如不同企业对数字模型进行的操作以及数字模型在企业间传递时产生的数据等),无法实现对面向云平台的航空装备相关数据的全面、准确表达。因此需要提出新的航空装备数字模型构建方法以满足云平台制造模式下的需求。

2 面向协同制造云平台的航空装备数字模型框架构建

为全面表达航空装备生命周期

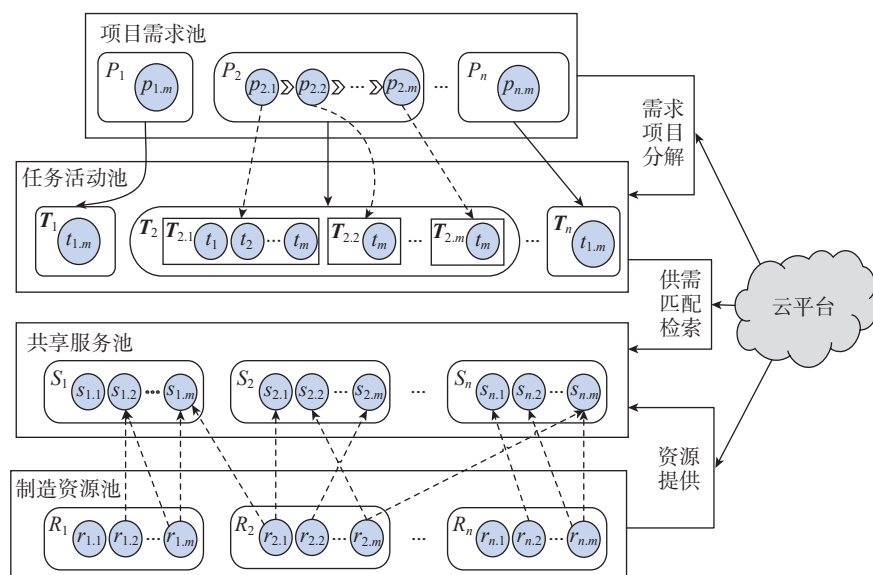


图1 协同制造云平台功能架构

Fig.1 Functional architecture of cloud manufacturing service platform

内涉及信息,本文通过分析基于协同制造云平台的航空装备全生命周期业务交互方式,设计航空装备数字模型构建流程,并对数字模型构建过程中涉及的数据按照不同维度进行集成和归纳。搭建面向协同制造云平台的航空装备数字模型框架,以实现航空装备全生命周期数据的有效表达和管理。

2.1 航空装备数字模型维度分析

基于协同制造云平台的航空装备全生命周期业务交互数据涉及多学科领域、多层次、多阶段以及承担不同任务的多个厂所,具有分布性、结构性、多样性、复杂性、广泛性、隐含性、动态性等特点。本文从阶段维、供应链维、层次维和学科维4个维度对航空装备全生命周期业务数据抽象化表达,搭建航空装备数字模型框架。

面向云平台的航空装备数字模型维度可描述为

$$D ::= D_{\text{stage}} \times D_{\text{discipline}} \times D_{\text{layer}} \times D_{\text{supply chain}} \quad (1)$$

式中, D_{stage} 为阶段维; $D_{\text{discipline}}$ 为学科维; D_{layer} 为层次维; $D_{\text{supply chain}}$ 为供应链维。

(1) 阶段维(Stage dimension) D_{stage}

阶段维是对产品全生命周期中各阶段活动的划分,主要包括需求分析、设计研发、试制试飞、批量生产、运维服务、升级退役等,不同阶段内的信息之间具备关联性,可通过一致性语义进行表达。在此维度内涉及承担相应任务的企业以及企业业务交互产生的数据。

(2) 学科维(Discipline dimension) $D_{\text{discipline}}$

学科维对航空装备全生命周期内不同学科领域的信息、知识进行表达。航空装备所实现的功能和行为是由不同学科领域信息和知识协同支撑实现的。航空装备数字模型需实现对结构、力学、电学、加工、仿真等多学科领域知识的一体化集成和语义表达。

(3) 层次维(Layer dimension) D_{layer}

航空装备全生命周期涉及产品结构的多个层次,如特征、零件、部件、组件、整机等。层次维包含该层次的属性信息、约束和映射关系。航空装备数字模型需准确表达其生命周期内各层次信息。

(4) 供应链维(Supply chain dimension) $D_{\text{supply chain}}$

供应链维是指航空装备在不同供应链中进行转换时,不同链对数字模型信息要求有所不同,如设计链侧重分析服务需求,制造链以航空装备制造信息为主,服务链以提升航空装备服务水平为目的,同时解决产品服务之外各种延伸服务问题。云平台制造模式中,各类企业得以自由地参与到航空装备生命周期中,因此加强对供应链的安全管理和流程管控尤为重要,航空装备数字模型需对供应链信息进行准确表达与管控。

以上4个维度涵盖了面向协同制造云平台的航空装备所有信息,本文基于上述维度搭建航空装备数字模型框架,对面向协同制造云平台的航空装备全生命周期多阶段、多学科、多领域、多供应链的信息进行集成与表达,为航空装备全生命周期内活动和任务提供指导,并为航空装备数字模型构建和工程应用奠定基础。

2.2 面向云平台的航空装备数字模型构建流程

基于协同制造云平台的制造模式对航空装备数字模型构建流程提出新要求。云平台的任务分配和资源配置安排需要各利益主体进行多次迭代优化。航空装备作为复杂产品其研发、制造、供应任务由多个不同企业承担。因此,航空装备数字模型需要在承担不同任务的企业间传递,而且各企业需要按照任务要求结合自身资源和能力对数字模型信息进行增删、修改和优化等操作,然后将更新后的数字模型上传至云平台中。航空装备数字模型构建本质上是面向航空装备生命周期各环节、各阶段业务交互不断迭代、调整的过程。其与各参与主体的关系如图2所示。

设计院职能主要集中在航空装备的工程设计领域,其在云平台制造模式下主要任务是根据服务需求方在云平台上发布的需求完成系统需求定义、功能性需求定义、非功能性需求定义和系统约束定义,生成包括总装设计、结构设计、软件设计、热控设计、电子设计、电气设计等初步设计数字模型,并将其发布至云平台供其他参与方使用。

主机厂作为航空装备产业链中最重要的组成环节,掌握着航空装备的核心知识,主要负责航空装备成品

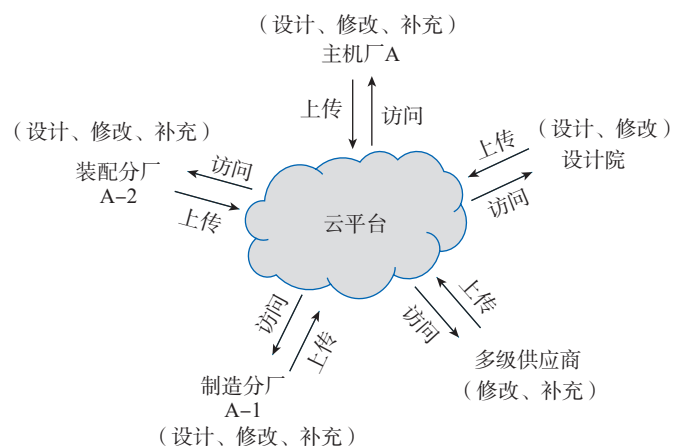


图2 航空装备数字模型构建流程

Fig.2 Generation process of aviation equipment digital model

生产、装配与装备交付任务。在云平台制造模式中,主机厂在航空装备数字模型的指导下进行制造、装配工作,并完成制造方法设计、产品组件划分、工装设计、工艺规程设计、工艺方案设计任务。如图2所示,主机厂A结合自身制造能力对数字模型进行修改,如对数字模型中错误数据修正或对数据集的补充等,并将其上传至云平台中。主机厂下设的制造分厂A-1承担航空装备非关键部件的生产制造、成品试验检测和售后维修任务,需要访问航空装备数字模型并进行完善,如将生产过程监测和质量检测数据实时上传并储存在数字模型之中。装配分厂A-2承担航空装备的装配任务,根据航空装备装配工艺特征和工艺需求构建航空装备工艺模型,并将装配过程中所使用的加工工艺和几何数据抽象处理后融入工艺模型中。

云平台中的多级供应商与主机厂密切配合,为其提供关键成品、材料、零组件等,需要对数字模型具有访问权限,并根据数字模型中的相关信息进行产品生产和供应,以满足主机厂或用户的使用需求,同时供应商也可根据自身生产能力提出对数字模型的变更申请,对其进行完善。

云平台中的参与主体企业更改航空装备数字模型内信息时需按照图3所示流程进行变更申请。由云平台中航空装备数字模型使用者如用户或相关制造企业在云平台中提出航空装备数字模型的变更申请,通过云平台系统后台的专家知识系统

进行数字模型变更评审,审核通过后则将变更申请通过云平台传递至航空装备数字模型发布方进行具体修改活动,若审核未通过,则将变更申请退回申请方修改变更请求,其中,模型发布方是指数字模型的设计方,如研究所或企业内的设计部门等。完成数字模型修改后利用预设的自动化模型检测模块对模型进行规范性检测,若符合数字模型标准则通过审核再次发布至云平台中供数字模型需求方使用,若不符合要求则退回发布企业继续进行修改,直至通过审核条件后发布至云平台上,发布完成后由云平台系统自动通知各企业、科研院所,之后再由其他数字模型使用方根据变更后的数字模型情况结合其负责的具体部分决定是否需要进行变更,通过循环以上步骤不断完善航空装备数字模型,最终完成航空装备数字模型的更新和完善。

3 基于本体元模型的航空装备数字模型构建

在工程领域,常使用本体表达相关规范概念、术语及其关联关系;元模型是对模型的抽象表达,定义和描述模型结构、属性、组元、约束等信息;本体元模型由本体和元模型特性结合而成,采用本体技术对元模型进行构建和表达,能够更好描述复杂产品的层次、逻辑结构,从而满足云平台制造模式下制造资源异地异构分布的特点以及异构模型之间数据交换、信息共享和互操作的要求^[23]。

基于上述航空装备数字模型的

维度分析,本文将本体理论和元模型构建方法相结合,构建基于本体元模型的航空装备数字模型。

3.1 航空装备本体元模型层次分析

面向协同制造云平台的航空装备本体元模型由元元模型层 M_0 、元模型层 M_1 、模型层 M_2 、实例层 M_3 4层构成^[24],如图4所示。其中元元模型层 M_0 具有极强的抽象性,用来定义包含元模型的元类、元属性、元关系以及元方法等组元信息,对本体元模型进行描述。元模型层 M_1 是对元元模型层 M_0 的实例化,描述模型对象类、属性、操作、关系等组元。本体元模型是在元数据的基础上针对某些领域或某些行业所建立的通用业务与数据模型。模型层 M_2 是对元模型 M_1 的实例化,用于描述特定领域内的具体模型,定义描述模型的语言。基于元模型层中本体元模型定义,将对象数据进行本体转化和描述生成本体模型。实例层 M_3 是对模型层 M_2 的实例化,由航空装备数字模型中的具体数据组成,描述航空装备的详细信息。

3.2 航空装备本体元模型框架构建

基于上文中提出的阶段维、层次维、学科维、供应链维等4个维度构建本体元模型,本质是对上述信息进行抽象处理后的表达,以实现在更高层次上的分析和研究,通过本体元

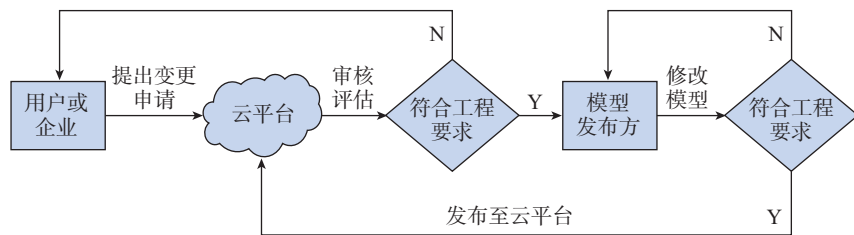


图3 航空装备数字模型更改流程

Fig.3 Aviation equipment digital model change process

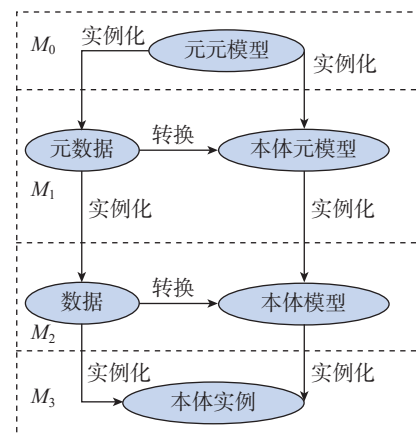


图4 航空装备本体元模型构建层次

Fig.4 Construction hierarchy of aviation equipment ontology meta model

模型映射可实现对以上 4 个维度所包含的全部信息的准确表达。面向协同制造云平台的航空装备本体元模型框架如图 5 所示,可表达为如下形式:

$$\text{Ontology- Meta-Model} = \{O_{PM}, O_{PDM}, O_{RM}, O_{MM}, O_{CSM}\} \quad (2)$$

(1) O_{PM} 过程本体元模型(Process meta-model, PM)。

航空装备全生命周期由众多过程(Process) 所构成,如装备开发、工艺准备、订单下发、零部件制造、整机装配等,每个过程可分解为若干任务(Task) 和活动(Activity)。云平台制造模式下,数据虚拟化后封装在不同业务系统中,数据间具有异构性。过程本体元模型是对航空装备全生命周期所涉及活动、任务的抽象性表达,其他业务交互数据均是在此基础上产生的。

(2) O_{PDM} 产品本体元模型(Product meta-model, PDM)。

产品本体元模型是对航空装备实体信息表达的模型集合,包括实体对象、实体属性、实体间的映射和约束关系、实体设计形态等,对装备的实体功能、行为、结构等属性进行描述。

(3) O_{RM} 资源本体元模型(Resource meta-model, RM)。

资源本体元模型是对航空装备生命周期内所需资源的统一表达。云平台制造模式下,制造资源被虚拟封装在云平台上,将各类资源合理配置到航空装备生命周期内各过程中能够有效提高航空装备生产效率。而航空装备数字模型需要对制造过程的所需资源进行表达,以满足制造企业的信息需求。

(4) O_{MM} 管理本体元模型(Manage meta-model, MM)。

管理本体元模型是对企业管理领域、业务流程、控制点和任务分配与授权信息的表达。云平台制造模式对航空装备数字模型管理提出更高要求,如对航空装备生产流程管理、项目任务管理、多级供应链管理、供应链管理、制造资源管理等。

(5) O_{CSM} 云服务本体元模型(Cloud service meta-model, CSM)。

云服务本体元模型是对云平台所提供的制造服务进行抽象表达的模型,对云服务类型、属性等信息进行定义。云服务本体元模型对云平

台在航空装备全生命周期中所提供的服务进行表达,以适应云平台制造模式下航空装备数字模型构建的需求。基于云平台的航空装备生产过程的本质是对不同种类云服务进行的组合,而航空装备数字模型应当具备相对应的云服务描述、云服务选择和云服务组合等模块。

面向协同制造云平台的航空装备本体元模型以过程本体元模型为核心和基础,产品本体元模型、资源本体元模型、管理本体元模型、云服务本体元模型为辅助,对航空装备相关信息进行准确表达。

3.3 航空装备本体元模型语义表达

面向协同制造云平台的航空装备本体元模型可采用五元组进行语义表达^[11]:

$$\text{Ontology- Meta-Model} = \{ \text{Class, Attribute, Relation, Constraint, Method} \} \quad (3)$$

本文对上述五元组中各元素的定义如下。

(1) Class 表示航空装备本体元模型所描述的对象集合,用五元组形式化表示为

$$\text{Class} = C_{\text{Entity}} \times C_{\text{Process}} \times C_{\text{Service}} \times C_{\text{Manage}} \times C_{\text{Resource}} \quad (4)$$

$$C_{\text{Entity}} ::= \langle \text{Product} \rangle | \langle \text{Assembly} \rangle | \langle \text{Part} \rangle | \langle \text{Feature} \rangle \quad (5)$$

$$C_{\text{Process}} ::= \langle \text{Stage} \rangle | \langle \text{Task} \rangle | \langle \text{Operation} \rangle | \langle \text{Activate} \rangle \quad (6)$$

(2) Attribute 表示航空装备本体元模型中对象类属性集合,可表示为

$$\text{Attribute} ::= A_{\text{Entity}} \times A_{\text{Process}} \times A_{\text{System}} \times A_{\text{Resource}} \times A_{\text{CS}} \quad (7)$$

$$A_{\text{Entity}} ::= \langle \text{Function} \rangle | \langle \text{Behavior} \rangle | \langle \text{Structure} \rangle | \langle \text{Data} \rangle \quad (8)$$

$$A_{\text{Resource}} = (T, V, S, M) \quad (9)$$

$$A_{\text{CS}} = (S_b, S_c, S_s, S_n) \quad (10)$$

式中, S_b 、 S_c 、 S_s 、 S_n 分别代表云服务属性信息的基本属性、产能属性、阶段属性、非功能属性。

(3) Relation 定义航空装备本体元模型中不同对象模型间和模型内

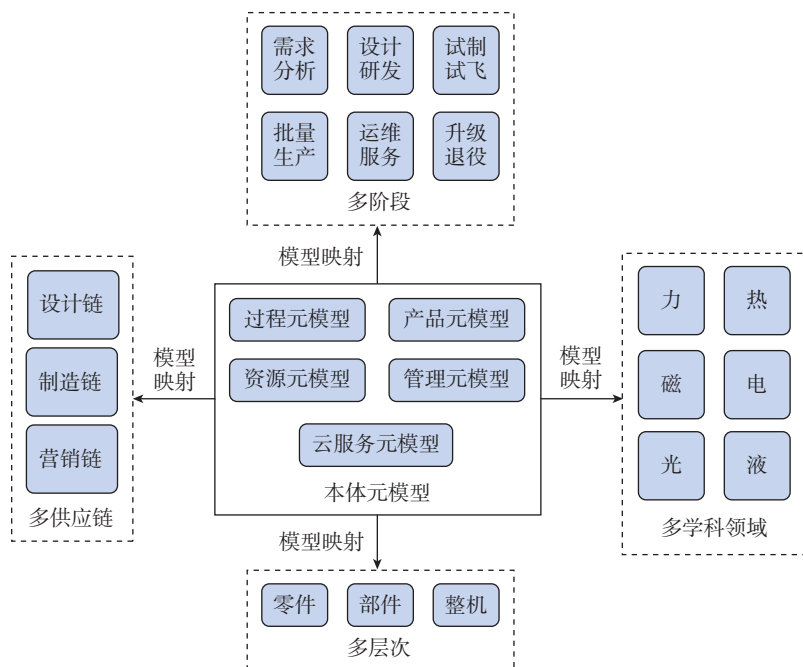


图 5 航空装备全生命周期本体元模型框架

Fig.5 Ontology meta model framework of aviation equipment life cycle

部的映射关系,可表示为

$$\text{Relation} ::= \langle \text{Member-of} \rangle | \langle \text{Instance-of} \rangle | \langle \text{Attribute-of} \rangle \quad (11)$$

(4) Constraint 表示对航空装备本体元模型定义的约束,可表示为

$$\text{Constraint} ::= C_{\text{Design}} \times C_{\text{Manufacture}} \times C_{\text{Assemble}} \quad (12)$$

(5) Method 表示对航空装备本体元模型对象、属性、映射、约束等信息进行操作的方法集合,可表示为

$$\text{Method} ::= \langle \text{Get} \rangle | \langle \text{Change} \rangle | \langle \text{Add} \rangle | \langle \text{Delete} \rangle | \langle \text{Extract} \rangle | \langle \text{Gather} \rangle \quad (13)$$

其中,各元素的具体含义和内容如表 1 所示^[25]。

4 应用实例

为验证本文提出的航空装备数字模型建模方法的可行性,以无人机为例构建其面向协同制造云平台的本体模型。无人机是利用无线遥控和程序控制的航空装备,其系统结构涉及传感通信、信息处理、智能控制、动力推进等多学科信息,同时涉及多个厂所,对制造资源配置的要求较高。

无人机生产研发涉及学科系统可划分为飞机机体、动力系统、飞控系统、任务载荷、数据链系统和发射回收系统等,进一步划分后可得层次结构如图 6 所示。

按照上述划分的无人机系统层次,通过本体构建工具 Protégé 构建面向云平台的无人机本体模型(图 7),并对各层次内实体关系、实例、约束、属性等信息进行定义。

以无人机机翼为例,在基于云平台的制造模式下数字模型中需要对机翼尺寸参数、工程特征信息、阶段信息、约束信息、MRO 信息、供应商、制造商、制造资源、人员信息、权限分配、管理信息、特征数据等信息进行定义和描述。

其中尺寸参数包括翼展长、平均气动弦长、圆柱长度、动量基准中心、上反角、半锥角、参考面积、机翼长

表 1 本体元模型元素组成及内容^[25]

Table 1 Ontology meta model element composition and content^[25]

元素	组成	含义描述	内容
Class	C_{Entity}	基于云平台的航空装备实体类	产品、部件、零件、特征等
	C_{Process}	基于云平台的航空装备制造过程	阶段、任务、操作、活动等
	C_{Service}	基于云平台的航空装备制造所需云服务	制造资源虚拟化获得的云服务;利用寻优算法实现以主机厂或用户的个性化需求为导向,选取最优的组合云服务
	C_{Manage}	基于云平台的航空装备管理信息	实体管理信息和传递管理信息,如设计人员信息、工艺人员信息、质量审核信息、供应商信息、阶段信息、流程信息等
	C_{Resource}	基于云平台的航空装备制造资源	人力、知识、服务、计算、软件、设备、物料和能力资源等
Attribute	A_{Entity}	实体类属性信息	功能、行为、结构、数据等
	A_{Process}	过程属性信息	产品生命周期参与企业、任务分解规则、模型权限分配、职责定义规则等
	A_{Resource}	资源属性信息	资源类型(T)、资源属性值(V)、资源提供者(S)和资源配置管理(M)等
	A_{CS}	云服务属性信息	基本属性、产能属性、阶段属性、非功能性属性等
Relation	Member-of	从属关系	整体与部分间的从属关系,可表示为 Member-of(W, P)
	Instance-of	实例化关系	类与实例间的关系,可表示为 Instance-of(A, B)
	Attribute-of	属性关系	属性间的从属关系,可表示为 Attribute-of($E F, B$)
Constraint	C_{Design}	设计约束	几何外形参数、结构参数、性能参数等属性值的类型和范围等
	$C_{\text{Manufacture}}$	制造约束	尺寸公差、几何公差、表面粗糙度、加工精度、工艺处理要求、工艺流程要求等
	C_{Assemble}	装配约束	几何拓扑关系
Method	Get	获取	数字模型信息提取
	Change	更改	更改数字模型已有属性、映射关系、约束关系等
	Add	添加	为本体元模型对象增加某些特征
	Delete	删除	移除已有对象或属性关系
	Extract	引用	实例化本体元模型中定义的对象、属性关系
	Gather	集聚	对航空装备本体元模型中组元进行的逻辑运算和整合操作

度、翼根翼尖弦长、翼剖面、后掠角等参数,通过映射关系 Has-value 进行表示,并对参数值类型约束为浮点型 (Float),如图 8 所示。

(1)阶段信息指数字模型在航空装备制造周期中所处的阶段;供应商、制造商信息指参与装备制造过程的企业详细信息、供应方式、合同

信息等。

(2)制造资源指装备制造需要云平台所提供的制造资源信息,包括资源类型、数量、组合方式和能力评估等信息。

(3)管理信息指云平台内航空装备制造生命周期参与企业进行的管理操作,包括数字模型历史版本、更改

审批记录等信息。

(4)MRO 信息指无人机装备制造后端需要的维护、服务、保障信息,即无人机从主机厂交付后,向客户提供全寿命周期飞机维护、修理等售后服务的信息,主要包括无人机使用信息、故障信息、备件跟踪信息、技术支持人员信息、项目文件信息等,如图 9

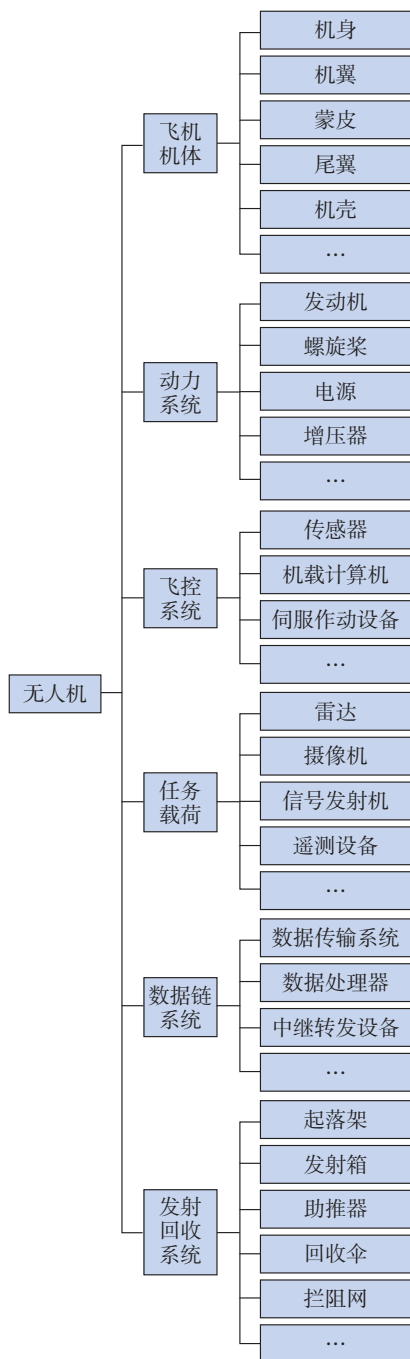


图 6 无人机系统层次结构

Fig.6 Hierarchical structure of UAV system

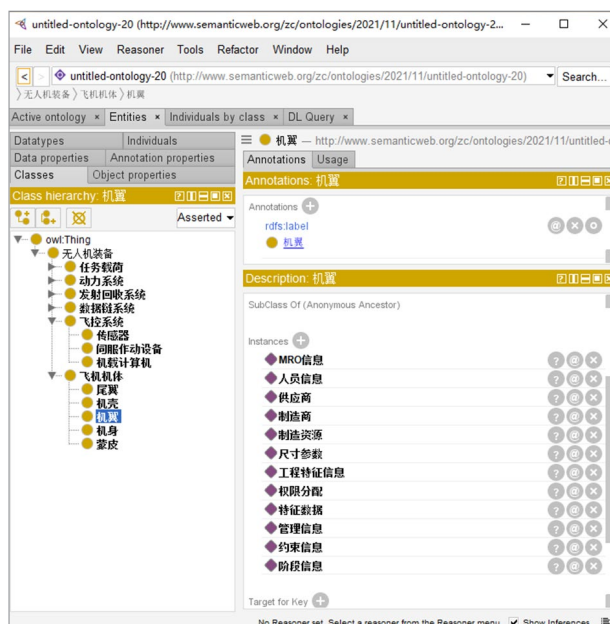


图 7 无人机本体模型构建

Fig.7 Construction of UAV ontology model

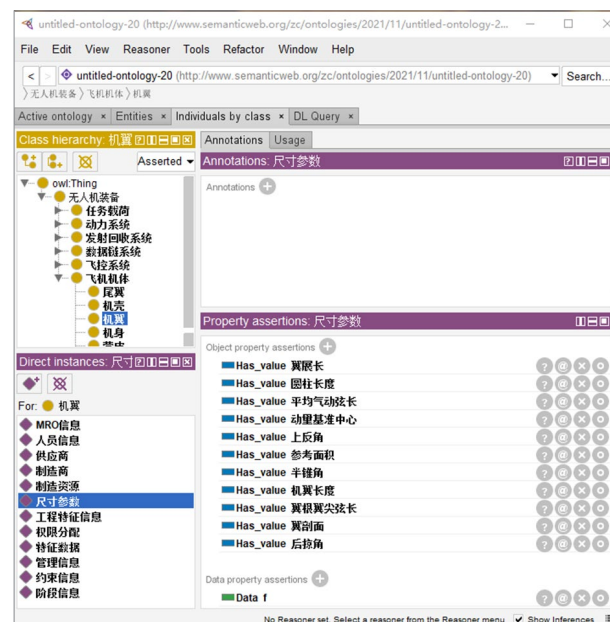


图 8 无人机机翼尺寸参数定义

Fig.8 Definition of UAV wing size parameters

所示。

使用软件内的 OntoGraf 插件可生成无人机本体模型的可视化表达,如图 10 和 11 所示。

由上述本体模型知,本文所提航空装备数字模型构建方法能够全面、准确地表达云平台制造模式下无人

机全生命周期信息,将多领域、多层次、多学科信息进行一体化集成。

5 结论

针对目前缺乏面向协同制造云平台的航空装备数字模型复杂信息集成理论,难以进行统一语义表达的

问题,本文提出面向协同制造云平台的航空装备数字模型构建方法。从云平台功能架构入手分析基于协同制造云平台的航空装备生命周期业务交互方式,据此提出云平台制造模式下航空装备数字模型产生流程,并结合本体理论和元模型建模方法,构建了以过程本体元模型为核心,产品本体元模型、资源本体元模型、管理本体元模型和云服务本体元模型为支撑的航空装备数字模型,实现对航空装备全生命周期多阶段、多学科、多领域、多层次、多供应链信息的语义表达,以解决数字模型间语义异构问题。以无人机为例,通过本体构建软件 Protégé 构建无人机本体模型,验证了本文所提航空装备数字模型构建方法的可行性,为航空装备数字模型多领域信息一体化集成系统的建立提供思路。目前本文仅提出了一种面向协同制造云平台的航空装备数字模型构建方法,但对于如何实现面向协同制造云平台的数字模型精准管控方法仍待探究。

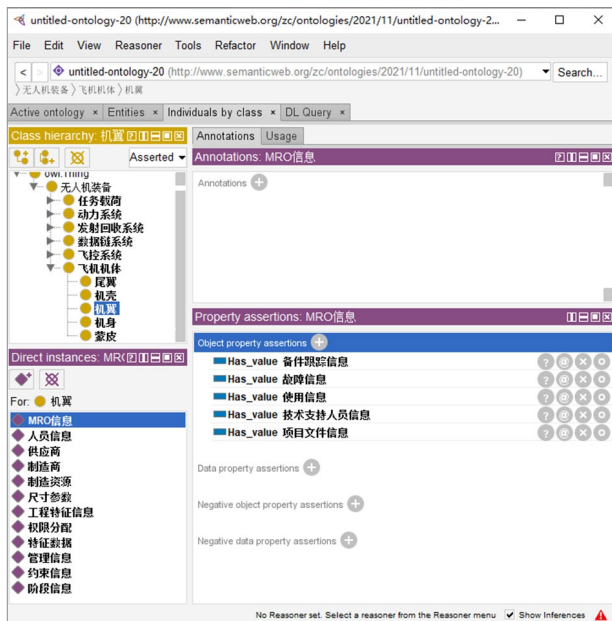


图 9 无人机机翼 MRO 信息定义

Fig.9 Definition of UAV wing MRO information

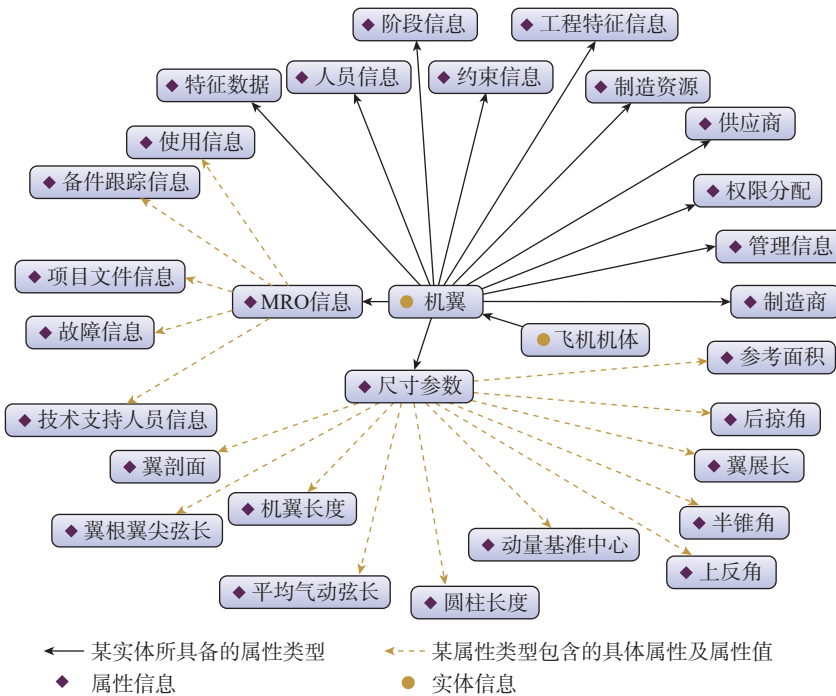


图 10 无人机机翼属性信息可视化本体模型

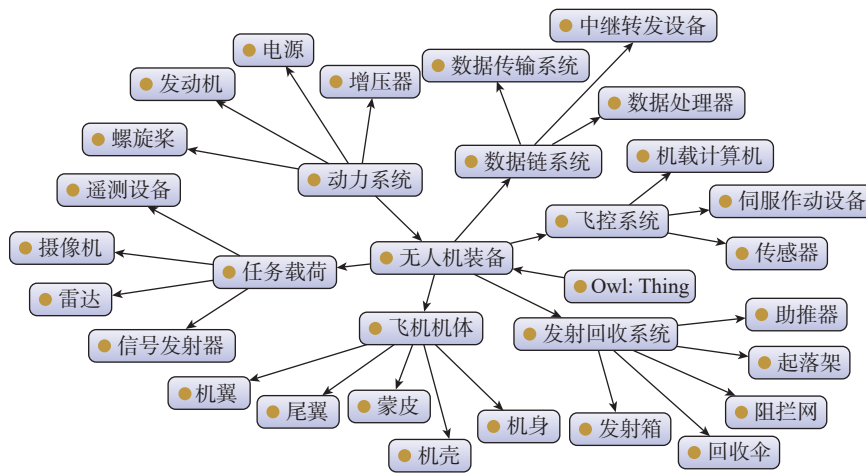
Fig.10 Visual ontology model of UAV wing attribute information

参考文献

[1] 崔德刚,刘看旺,郑党党,等.基于MBD的飞机设计与制造技术研究与应[J].计算机集成制造系统,2019,25(12):3052-3060.
CUI Degang, LIU Kanwang, ZHENG Dangdang, et al. Research and application of aircraft design and manufacturing technology based on MBD[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(12): 3052-3060.

[2] 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.
JIANG Min, ZHENG Li. Industrial internet architecture for collaborative manufacturing of aviation equipment[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(1): 3-13.

[3] 魏巍,王宇飞,陶永.基于云制造的产品协同设计平台架构研究[J].中国工程科学,2020,22(4):34-41.
WEI Wei, WANG Yufei, TAO Yong. The architecture of a product collaborative design platform based on cloud manufacturing[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 34-41.



[4] HALSTENBERG F A, LINDOW K, STARK R. Utilization of product lifecycle data from PLM systems in platforms for industrial symbiosis[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 8: 369–376.

[5] 陶飞, 张霖, 郭华, 等. 云制造特征及云服务组合关键问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 477–486.

TAO Fei, ZHANG Lin, GUO Hua, et al. Typical characteristics of cloud manufacturing and several key issues of cloud service composition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 477–486.

[6] 傅荣校. 工业互联网发展的多维度观察——基于概念簇、战略、政策工具视角[J]. 人民论坛·学术前沿, 2020(13): 6–13.

FU Rongxiao. Multidimensional observation on the development of industrial internet—From the perspectives of concept cluster, strategy and policy tools[J]. Frontiers, 2020(13): 6–13.

[7] 纪妍, 吴锋. 复杂重型装备网络协同平台服务模式研究[J]. 重型机械, 2021(1): 1–7.

JI Yan, WU Feng. Dynamic and rapid response service mode of complex heavy equipment network collaborative platform[J]. Heavy Machinery, 2021(1): 1–7.

[8] MAS F, OLIVA M, RÍOS J, et al. PLM based approach to the industrialization of aeronautical assemblies[J]. Procedia Engineering, 2015, 132: 1045–1052.

[9] 刘明周, 马靖, 王强, 等. 一种物联网环境下的制造资源配置及信息集成技术研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(3): 339–347.

LIU Mingzhou, MA Jing, WANG Qiang, et al. Research on manufacturing resources allocation and information integrated technology based on IoT[J]. China Mechanical Engineering, 2015,

26(3): 339–347.

[10] KARASEV V O, SUKHANOV V A. Product lifecycle management using multi-agent systems models[J]. Procedia Computer Science, 2017, 103: 142–147.

[11] 闫雪峰. 复杂产品虚拟样机统一建模方法研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.

YAN Xuefeng. Research of unified modeling method for virtual prototyping of complex product[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.

[12] 王康, 郭瑞振, 杜福洲. 面向船舶制造的MBD技术应用分析[J]. 造船技术, 2021, 49(1): 65–70.

WANG Kang, GUO Ruizhen, DU Fuzhou. Application analysis of MBD technology towards ship manufacturing[J]. Marine Technology, 2021, 49(1): 65–70.

[13] 张嘉易, 许世璞, 郝永平, 等. 基于MBD的三维装配信息系统的设计开发[J]. 电子世界, 2018(21): 141–142.

ZHANG Jiayi, XU Shipu, HAO Yongping, et al. Design and development of 3D assembly process information system based on MBD[J]. Electronics World, 2018(21): 141–142.

[14] 邱世广, 陈雪梅. 基于模型定义的飞机工艺数字样机体系构建与应用[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(3): 123–126.

QIU Shiguang, CHEN Xuemei. Aircraft process digital mock-up construction and application[J]. Machine Design & Research, 2019, 35(3): 123–126.

[15] 范玉青. 现代飞机制造技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.

FAN Yuqing. Modern aircraft manufacturing technology[M]. Beijing: Beihang University Press, 2001.

[16] 蔡文沁, 姜寿山. 飞机数字化产品定义知识模型[J]. 计算机集成制造系统, 2003, 9(12): 1053–1056.

CAI Wenqin, JIANG Shoushan. Knowledge model of digital product definition for aircraft[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(12): 1053–1056.

[17] 姜珊, 王仲奇, 夏松, 等. 飞机柔性工装数字孪生几何模型构建方法[J/OL]. 航空制造技术, [2021–10–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail//11.4387.v.20211028.1613.002.html>.

JIANG Shan, WANG Zhongqi, XIA Song, et al. Construction method of digital twin geometric model of aircraft flexible tooling[J/OL]. Aeronautical Manufacturing Technology, [2021–10–29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail//11.4387.v.20211028.1613.002.html>.

[18] 朱俊. 基于元数据的产品数据本体建模技术[J]. 信息通信, 2014, 27(11): 102–110.

ZHU Jun. Product data ontology modeling technology based on metadata[J]. Information & Communications, 2014, 27(11): 102–110.

[19] 张峰, 薛惠锋, 徐源. 基于本体的航天产品性能样机协同建模方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(8): 1887–1899.

ZHANG Feng, XUE Huifeng, XU Yuan. Collaborative modeling method of performance prototype for aerospace products based on ontology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(8): 1887–1899.

[20] 徐爱国. 大飞机研发趋势带来的PLM挑战与应对[J]. 航空制造技术, 2014, 57(21): 38–41.

XU Aiguo. PLM challenge and response solution in large aircraft development[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(21): 38–41.

[21] 张炜, 侯亮. 云平台数据驱动的产品与供应商资源主从协同优化[J]. 中国机械工程, 2021, 32(9): 1061–1072.

ZHANG Wei, HOU Liang. Cloud platform data-informed leader-follower joint optimization of products and supplier resources[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(9): 1061–1072.

[22] 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.

WU Jingming. Research on collaborative development resource allocation of aviation products based on industrial cloud[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.

[23] 闫雪峰, 段国林, 姚涛, 等. 复杂产品虚拟样机本体元数据建模方法与应用[J]. 机械设计, 2015, 32(4): 74–80.

(下转第 73 页)

Springback Prediction of Rocket Frame Ring Based on Digital Twin

ZHANG Zaifang, ZHOU Liang
(Shanghai University, Shanghai 200444, China)

[ABSTRACT] In order to address the problem that the springback brought about by the bending of the rocket frame ring can seriously affect the qualification rate of the frame ring and the assembly accuracy of aerospace products, a digital twin-based rocket frame ring bending springback prediction method is proposed. By constructing a twin model that matches the actual production process of the rocket frame ring, establishing a communication relationship between the twin model and the physical entity model, and realizing the mutual mapping between the twin model and the physical entity, so that the data of the physical entity can be used to continuously modify the twin model. After the twin model has been diagnosed, predicted, and evaluated, the simulation results can be output to the controller for state control of the physical entity, thus achieving consistency between the twin model and the physical entity. The amount of springback in frame ring drawing and forming is effectively reduced by providing real-time guidance on frame ring machining and forming, compared to traditional modeling and simulation, digital twin technology has the advantages of short specific design cycles, high product accuracy, high reliability, and low production costs.

Keywords: Digital twin; Rocket frame ring; Stretch bending forming; Springback prediction; Process parameter

(责编 晓月)

(上接第 65 页)

YAN Xuefeng, DUAN Guolin, YAO Tao, et al. Application and research on ontology meta-data-modeling method of virtual prototyping for complex product[J]. Journal of Machine Design, 2015, 32(4): 74-80.

[24] 庄培杰, 尹超, 李孝斌. 基于元数据的机床装备资源轻量化建模方法 [J]. 组合

机床与自动化加工技术, 2019(12): 6-9, 14.

ZHUANG Peijie, YIN Chao, LI Xiaobin. Metadata-based machine tool resources lightweight modeling method[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(12): 6-9, 14.

[25] 魏军英, 钟佩思, 郭春芬, 等. 基

于 OWL 的制造资源本体建模 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2011, 30(1): 58-61.

WEI Junying, ZHONG Peisi, GUO Chunfen, et al. Ontology modeling of manufacturing resources based on OWL[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2011, 30(1): 58-61.

Digital Model Construction of Aviation Equipment for Collaborative Manufacturing Cloud Platform

YANG Bo, ZHAO Chuang, KANG Ling, YI Lili

(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[ABSTRACT] With the development of cloud computing, internet of things and other technologies, collaborative design cloud platform manufacturing mode has been widely used in the field of aviation equipment manufacturing. In this mode, there are semantic heterogeneity and data island problems among aviation equipment digital models, so it is difficult to carry out semantic unified integrated expression. This paper analyzes the data involved in the business interaction of aviation equipment enterprises under the collaborative design cloud platform mode, and describes it in four dimensions. Then, the generation process of aviation equipment digital model is extracted through the whole life cycle business interaction. Combined with ontology theory and meta modeling method, the construction principle and construction process of ontology meta model are analyzed. Combined with the characteristics of aviation equipment life cycle and data types, the aviation equipment ontology meta model for collaborative design cloud platform is constructed. Taking unmanned aerial vehicle (UAV) equipment as an example, the UAV ontology model is constructed through ontology construction software Protégé. The information in the whole life cycle of UAV is expressed with unified semantics, which verifies the correctness of the construction method of aviation equipment digital model proposed in this paper.

Keywords: Aviation equipment; Network collaborative manufacturing; Cloud platform; Digital model; Ontology meta model

(责编 七七)