

液体火箭发动机协同设计平台关键技术

胡海峰, 刘 芬, 许 婷, 林 源
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要:针对液体火箭发动机协同设计工程实际需求,围绕研制数据高效流转与协同,面向产品全生命周期跨地域、跨专业特点,提出了协同设计平台框架。针对协同平台中的 5 项关键技术,给出了相应解决途径。基于 PLM 系统构建协同环境,建立统一编码,整合研制过程中的标准件、原材料等共性基础数据;通过基于 MBD 的三维结构设计,采用 MBSE 理念,以模型为载体升级发动机设计流程;采用线上 IPT 模式提升产品设计效率,同时实现全过程数据记录知识累积。采用 BOM 结构组织和展示不同设计阶段形成的数据;基于 Hadoop 平台分布式数据存储模式,实现结构化和非结构化数据综合管理。通过工程实践验证表明,构建的协同平台实现了基于数字化模型的设计工艺定制化协同,科研生产全过程的信息整合和多维度监控,促进了业务流程持续优化和研制效率不断提升,支撑发动机研制模式的转型升级。

关键词:协同设计平台;MBD;系统工程;IPT;大数据分析

中图分类号:V433 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2020)04-0082-08

Key technologies of collaborative design platform for liquid rocket engine

HU Haifeng, LIU Fen, XU Ting, LIN Yuan
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: According to the requirement of liquid rocket engine development, the framework of collaborative design platform is proposed. The platform is focused on the efficient transfer and collaboration of research data, and the cross-region and cross-professional characteristics of the product's full life cycle. Five key technologies in the collaborative platform are analyzed and the corresponding solutions are proposed. Based on the PLM system, collaborative environment is built, unified coding is established, and common basic data such as standard parts and raw materials are integrated in the development process. Through the MBD-based three-dimensional structure design, the MBSE concept is adopted to upgrade the engine design process with the model as the medium. The online IPT mode is adopted to improve the efficiency of product design, and the data recording in the whole process is also realized. BOM is used to organize and display data formed at different design stages. Based on the distributed data storage mode of Hadoop platform, comprehensive management of structured and unstructured data is achieved. The verification through engineering practice shows that the constructed collaborative platform realizes customized collaboration of design process based on digital model. The information integration and

收稿日期:2019-03-09;修回日期:2020-04-22

作者简介:胡海峰(1986—),男,博士,高级工程师,研究领域为液体火箭发动机数字化设计技术

multi-dimensional monitoring of the whole process of scientific research and production promotes the continuous optimization of business process and the continuous improvement of development efficiency, and supports the transformation and the upgrade of development model for liquid rocket engine.

Keywords: collaborative design platform; MBD; MBSE; IPT; big data

0 引言

新一代信息技术与制造业深度融合,正在引发影响深远的产业变革,形成新的生产方式、产业形态、商业模式和经济增长点。液体火箭发动机是运载火箭的心脏,航天动力水平有多高决定了航天舞台有多大^[1]。提升液体火箭发动机设计水平有两条途径,一方面不断深入分析挖掘液体火箭发动机工作原理,在掌握规律基础上进一步提升产品设计和可靠性;另外一方面,在设计工具研发模式方面开展研究与应用,不断提高发动机设计的效率和质量。液体火箭发动机研制是一项系统工程,涉及到众多的分工协作,传统的串行模式越来越难以适应目前“高效率、高质量、高效益”的发展要求,迫切需要以数字化并行协同设计为先导开展研制模式的转型升级。

1 国内外研究现状分析

1.1 国外研究现状

NASA 在 2000 年启动了 Advanced Engineering Environment^[2-3] (AEE,先进工程环境)项目,支撑新一代飞行器研发设计验证,通过互联网将六大设计中心(ARC、GRC、JSC、KSC、LaRC、MSFC)联系起来。采用 Windchill 和 ModelCenter 平台结合方式,实现跨地域数据集中管理,通过平台实现设计过程管理、设计与工程分析工具集成。在发挥 CAX 单项学科仿真、多学科优化技术(MDO)构建的数字化设计工具的基础上,引入并行设计理念,为研发人员提供了分布、并行、协同、全流程管理的全新研发设计环境。

上世纪 90 年代初,波音公司全面采用法国 CATIA 软件进行 777 飞机结构数字化设计^[4]。在 737-NX 项目中波音公司构建并推行 DCAC/MRM,深化数字化设计和应用技术在其产品研制中的应用。在 787 项目中数字化环境由 DCAC/MRM 改为全新的、适合 787 研制需要的全球协同设计 GCE 平

台^[5-6]。通过全球 GCE 协同平台,波音公司实现了全球 135 个研发中心、180 个供应商的数字化设计协同,进一步提升了产品研发效率和质量。在航天领域,波音参与的研制空天飞机项目中,全面采用 GCE 协同平台。通过采用协同模式,实现了:实物产品装配/工装干涉降低 30%;产品技术状态变更降低 40%;装配时间降低 30%;产品返工率降低 50%;维保准备降低 15%。

洛克希德马丁在 JSF 飞机研制过程中,工程师在不同的学科领域中应用不同的建模活动,但支持跨学科领域的集成能力往往是有限的或缺失的。彼此割裂的单学科建模难以适应复杂装备系统的研发要求。因此提出了“数字化织锦”项目,即通过数字化的手段,以系统架构模型为核心,将不同专业基于架构模型关联起来,形成不同业务依赖、学科交织的仿真协同^[7-11]。洛克希德·马丁构建信息技术架构时,大量参考了波音 DCAC/MRM 架构,实现跨国虚拟企业;通过数字织锦设计人员可以访问任何团队成员的数据而不用管这些产品定义数据保存在何处;同时数字织锦支持 IPD 协同。通过技术革新实现设计时间缩短 50%,制造时间缩短 66%,加工时间缩短 90%,专用零件缩短 50%,维护支持时间缩短 50% 等关键目标。

在美国国防发展领域,美国国防部(DoD)推出了很多开创性的研究,提出了数字化工程协作生态构建计划(Digital Engineering Strategy)^[12-14],全面推行基于模型的产品数字化协同设计。将模型作为产品全生命周期过程的协同载体,实现系统功能模型、设计模型、制造模型、管理模型之间数据的关联。搭建面向异地协同的环境,实现跨地域、跨专业的产品研发深度协同。

1.2 国内研究现状

在推进“中国制造 2025”的大背景下,我国航空航天等单位积极推进数字化工程。在实现单项领域技术发展、基础理论研究的基础上,开展了设计工具端协同设计环境的探索尝试。CAX、PDM 等商

用软件已经成为航天产品研发的重要工具,同时结合航天产品研制的特点,订制开发了一批面向工程应用的分析工具,应用于数字化设计的信息化条件已经初步形成。

新一代运载火箭研制总体采用并行协同设计与开发理念,将数字样机技术应用于运载火箭研制全过程^[15-16],其中 CZ-7 运载火箭更以打造“数字火箭”为愿景,树立了“设计数字化、模装数字化、试验预示化、生产自动化、管理信息化”的目标。通过各型号的持续改进,实现以数字样机仿真为手段提前开展设计优化。上海航天技术研究院通过采用 AV-IDM 系统^[17],建立了以流程协同和产品数据管理为建设重点的应用系统,在型号设计阶段通过与设计工具(MCAD、ECAD)的集成实现模型数据的管理,通过基线、变更、转阶段的业务过程实现技术状态的管理。中国航空发动机集团有限公司深入推进基于模型的厂所协同^[18-19]。2000—2010年在沈阳606所、410厂率先开展数字化设计制造协同,基于二维工程图的数字化设计制造协同,由于金航网建设等原因没有开展广域协同,各单位分头建设,版本、架构、数据没有统一。2011年至今,航发集团主要推进基于模型的系统工程,采用统一架构、统一版本、统一数据源模式,推广应用三维建模和MBD技术,实现基于三维模型的广域协同。

1.3 技术发展特点

以 NASA、波音公司、洛克希德·马丁等为代表的国外军工企业将逐步实现数字化作为企业的发展目标。分析国内外军工领域发展特点,为适应未来工程需求的发展需求,在军工领域需要深化数字化技术应用,提升在产品研发过程中研制、管理等分析手段水平。具体特点如下:

1) 产品全生命周期内协作研发:跨地域、跨部门协同研发,在产品研制的不同环节,采用异地协同实现产品的并行研制。

2) 产品定义全数字化模型化表达:产品从市场需求开始,到设计研发、产品加工、试验测试、交付维护等环节信息均以数字化模型化表达,实物产品均采用 MBD 模型表达。

3) 产品数据存储虚拟化:广泛采用虚拟化技术为支撑异地协同,存储采用云技术,实现数据的高效管理和数据信息的高效服务。

通过国内外典型军工企业产品研发方面的迭代历程,CAX、PLM 等数字化技术经过几十年的发展已经进入产品研发的成熟应用阶段。通过设计工具的革新大幅提升产品研发的质量和效率,通过工具改进,促进管理、研发模式升级。

2 液体火箭发动机数字化协同平台架构

2.1 液体火箭发动机协同设计现状和需求

在积极推进落实航天强国的背景下,数字化信息化成为发展的重要抓手。液体火箭发动机是一个高温、高压、高转速的热机系统,其工作过程涉及众多专业领域。研制过程技术难度大、协作单位多、批量少、质量要求高是其典型特点。围绕这些技术特点,针对不同专业领域,开发了对应的分析工具。数字化设计技术在液体火箭发动机设计中的单点应用,解决了产品研发中的一些瓶颈问题,提升了产品研制水平,缩短了研制周期,保证了研制任务的正常开展。但是数字化的研发体系与之适应的管理模式尚未形成,随着众多应用系统的建设推进,围绕产品研发形成的 PDM、TDM、MES、ERP 等不同应用背景构建的系统之间的壁垒渐渐凸显,已经制约了产品研发的效率。因此,需要开展围绕数字化研发体系中协同场景的研究。通过集成的环境实现围绕产品设计、生产、试验过程中全生命周期的数据管理和技术状态控制。

2.2 液体火箭发动机数字化协同平台架构

针对液体火箭发动机设计、生产、试验、维保等不同阶段,面向产品全生命周期,构建跨地域、跨专业的协同设计平台,采用多站点技术,实现液体火箭发动机研制过程中利益相关方在统一的环境下开展工作(见图1),保证整个研制过程中数据流的高效流转。整个协同设计平台,包括数字化设计、数字化工艺、数字化试验等发动机研制过程中的主要环节,通过协同方式实现不同业务场景、任务阶段高效协作,确保质量及技术状态控制下,最大限度发挥并行设计的优势。同时,整个协同环境已基于 MBSE 的系统设计方法、MBD 的数字设计方法和 MDU 虚拟样机组织模式,实现在整个研发过程中数字化技术的应用落地。通过线上 IPT、在线视频方式实现跨地域协同。

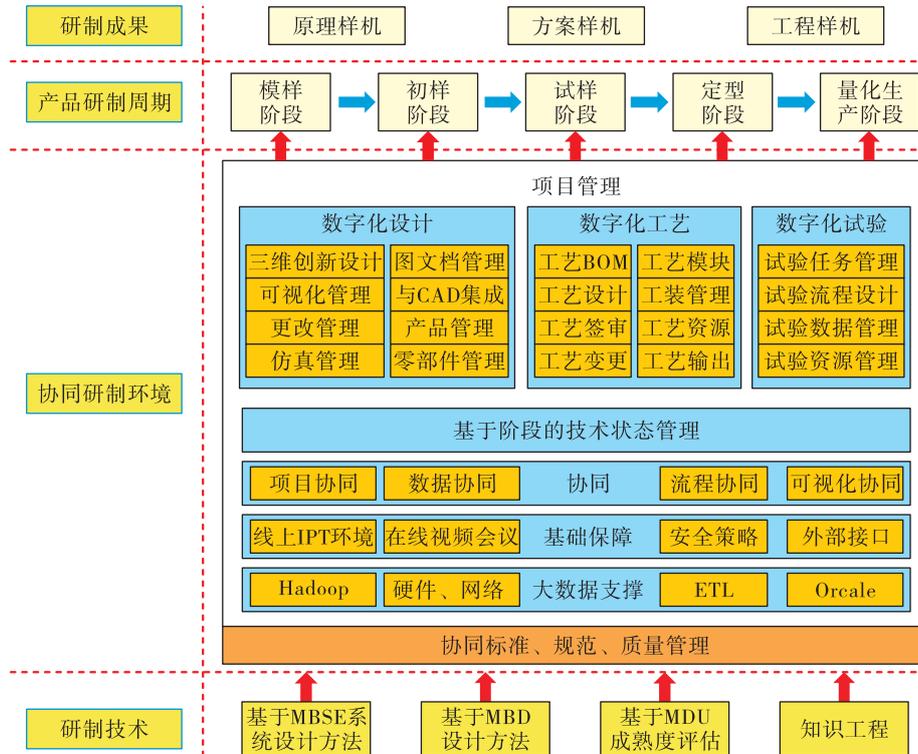


图 1 基于模型的协同设计平台框架示意图

Fig. 1 Frame of integrated design platform for liquid rocket engine

3 协同设计平台关键技术

3.1 基础设计资源库构建技术

液体火箭发动机设计过程中应用了大量的基础数据,包括标准件、元器件、原材料等。由于不同的型号要求不同,需要根据型号给出的选用目录设计人员选择相应的信息。

采用信息化手段,破解液体火箭发动机数字化研制各阶段基础物料信息的传递困难难题,提出了统一编码方案,通过对不同类别的产品分类采用唯一编码标示具体的材料、元器件、标准件对象。在 Q/QJA 40.1-5 航天型号配套物资分类与代码基础上,扩展编码字节,实现对液体火箭发动机常用的外购件分类码、外购件编码、供应商编码、型号目录编码、目录条目标识码、文档标识码、标准规范标识码、CAD 模型编码、数据字典代码统一管理。建立了统一的设计选用数据库——设计资源库管理系统,实现了对发动机数字化设计过程中原材料、标准件、元器件的统一、规范、动态管理,确保产品数据的规范性、一致性。制定了统一编码相关标准规

范,构建标准件三维离散化模型库、Altium 电气符号库、封装库等元器件库,实现了数字化研制各阶段设计信息一致、规范的有效传递。构建的选用组件与 PDM 系统集成,简化设计过程,提高工作效率。

3.2 基于 MBD 的设计建模及管理技术

传统的液体火箭发动机设计论证过程,设计人员首先按照总体要求的发动机参数指标,开展发动机方案论证,论证完成之后开展产品结构,以二维工程图的模式将设计意图表达出来,根据质量体系要求采用三级审签模式,不同角色人员依次完成对技术文件的校对、审核、会签、标审,最后通过批准,将二维工程图晒兰下发,厂里依据二维工程图完成产品加工所需的工艺分解、备料、检验等过程。产品加工完成之后根据要求开展不同产品的试验,通过试验验证产品性能。可以看出,传统设计模式以纸质介质为载体进行信息交互,且整个研制过程是一个串行模式(见图 2)。围绕液体火箭发动机全生命周期内生成的数据的组织管理分布在不同的应用系统中,限制了产品数据的效能发挥。

MBD (Model Based Definition) 基于模型定义技

术,是将产品全生命周期内所有相关设计模型尺寸定义、工艺过程描述、检验测试要求等信息附加在三维几何模型中的数字化应用方法。通过该技术,实现传统的二维工程图表达产品信息向以三维模型为载体的产品信息定义转变,通过带注释的三维数字模型成为设计、仿真、制造过程信息的主载体,实现整个设计过程全数字化,驱动并加快产品开发过程的业务变革。围绕 MBD 模型定义,国外定义了 ASMEY14.41 数字化标准^[20]。在此基础上,根据航天产品的主要特点,订制化地推出了符合工程实际的相关管理要求,具体包括建模过程中的坐标定义、模型图层设置、三维建模标准、标注规范、着色标准、装配标准等,指导液体火箭发动机基于 MBD 三维建模的高效开展。

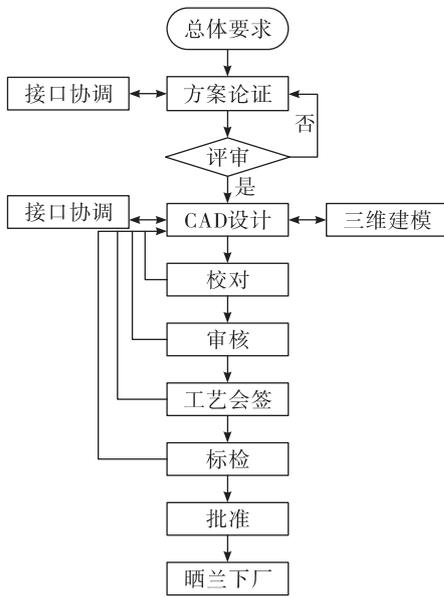


图2 传统发动机设计审签过程示意图
Fig.2 Diagram of the traditional design model

在液体火箭发动机协同研制过程中,推广应用 MBD 技术通过三维模型完整地表达设计信息、工艺要求,在各项标准要求的前提下,开发符合液体火箭发动机特点的标注工具,通过订制 PMI 模式,实现产品加工信息高效在设计、工艺之间交互等,从全流程中提升模型的应用。通过 PDM 技术,实现面向产品全生命周期内的信息全管理。

采用 MBD 设计方式,全三维建模,开展三维模型设计,三维模型相关人员结合自身专业特点和职

责分工,组织开展线上 IPT,对三维模型进行审查,提出修改意见,结束后自动根据角色签署;待批准后,进行三维模型电子分发(见图3)。通过骨架模型将结构设计要求从总体向组件传递,同时采用轻量化模型实现总装过程中大模型的复杂零件装配消耗计算机资源等问题。

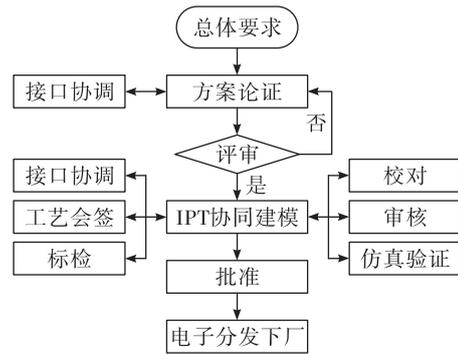


图3 基于三维数字化协同设计流程

Fig.3 Schematic illustration of 3D digital collaborative design

3.3 统一数据源管理技术

在发动机研制过程中,引入 MBSE 设计理念,实现研发过程中不同应用阶段交付物模型表达。通过实践,采用需求模型、架构模型、参数模型、系统模型、产品模型、仿真模型、工艺模型、测试性模型能够完整地表达液体火箭发动机产品研制过程中的所有数据信息(见图4)。

众多的模型如何统一组织,通过实践采用 BOM 模式实现管理。BOM 即产品物料清单,贯穿于液体火箭发动机方案论证、详细设计、工艺设计、产品加工、测试试验、交付维护直至产品退役等过程。液体火箭发动机产品全生命周期内容在不同应用阶段不同专业有众多的数据产生,这些数据需要通过结构化手段实现集中统一管理。因此,在构建液体火箭发动机协同设计平台过程中明确以零件对象为最小的管理单元,该管理单元下可以包括三维模型(材料属性性能、PMI 标注信息等)、工艺信息、仿真信息、质量信息、试验信息等元模型。通过 XML 技术实现异构数据的综合管理。在不同的阶段,通过 BOM 的转化实现在不同的环境数据的交互。

业务流程的所有阶段,都与过程设计数据管理模块有数据交互,数据管理模块需要考虑数据杂、数据量大、频繁交互、即时保存。通过对液体火箭发

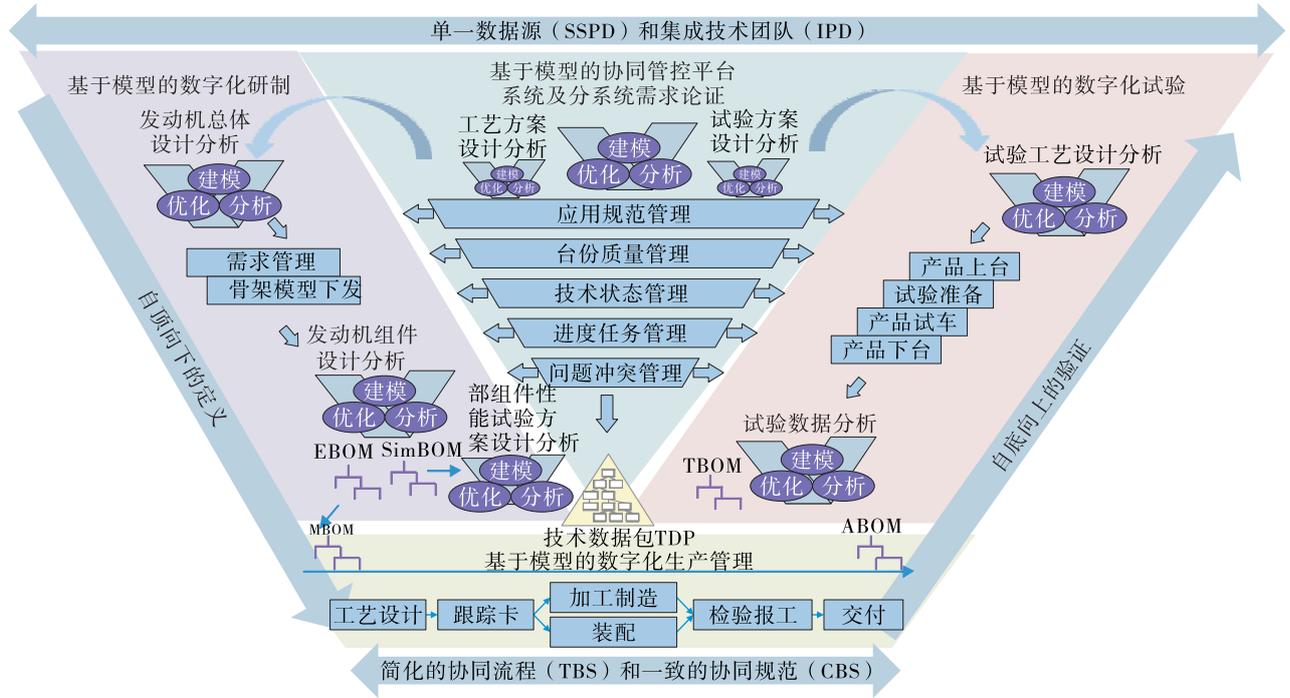


图 4 研制过程数据流示意图

Fig. 4 Schematic illustration of research and development for liquid rocket engine

动机研制过程分析,面向业务对象的数据结构及其关系模型,包括数据类型及其属性,保证数据的一致性。具体通过基于 XML 的设计数据与仿真数据的映射机制,主要解决设计参数与仿真参数互传互通的交换规范或中性文件格式。燃气发生器为 BOM 中的 Item 条目,其下关联设计模型、仿真结果。

通过分析以业务过程为主线,采用 BOM 关联不同设计阶段形成的各类数据。采用分层管理思路,构建树状结构来管理不同层次之间数据。最后采

用结构化的内存文件映射技术使用内存与物理文件的映射,大量减少 I/O 操作,解决了访问速度、即时保存、分类处理的问题。

3.4 大数据存储及分析技术

液体火箭发动机研制过程中,需要开展设计建模、仿真模拟、试验验证等环节,整个过程中形成众多的数据,同时需要提供高效的计算能力。底层通过高性能计算服务器存储等基础设备为整个协同设计提供三维建模、数值模拟仿真硬件条件(见图 5)。基于 Hadoop 生态组件进行整合优化,实现性



图 5 大数据基础平台组织示意图

Fig. 5 Organization diagram of big data foundation platform

能多源数据流式计算、统一动态分类存储、统一运维、数据安全的一站式大数据基础支撑。基于产品BOM,采用分布式模式管理模型数据。同时通过MPI高算架构实现并行计算管理和调度计算机集群,为三维建模和仿真数值模拟计算支撑。采用时序数据库方式,实现对并发的试验缓变、速变数据实时在线分析。

液体火箭发动机设计过程中不同专业、不同阶段形成不同的数据文件,其中有结构化数据类型如三维模型BOM,结构化的三单,也有非结构化的文件,如方案论证报告、仿真计算的数据文件等。为了支撑协同设计,采用分布式存储模式对不同类别的差异化数据存储。数据采用分布式管理;具体的非结构化数据存储,通过Hadoop提供的集群功能接口,完善文件管理功能;针对三维模型等结构化数据,通过构建数据逻辑映射表,在HDFS的上层采用开源工具Hive和HBase实现数据管理。

3.5 多站点协同技术

通过对目前液体火箭发动机研制过程中涉及

的协同单位、主要的功能进行梳理。基于J2EE构建MVC模式的液体动力系统C/S模式设计协调环境。分析目前协同涉及的部门,采用多站点协同模式。基于Web消息服务方式实现各站点之间信息通信,服务器Web Portal和客户端通过HTTP协议服务形式,通过相应的Servlet调用相应应用对象模型。协同过程中不同应用站点数据采用复制模式,通过权限审核机制对最终状态进行确认保存。实现设计、生产、试验等主要液体火箭发动机产品全生命周期的参与人员能够异地协同办公,提高设计效率,保证产品状态,严控产品技术状态。实现协同的技术途径如图6所示。

在设计工艺协同过程中,采用MDU虚拟样机技术,根据液体火箭发动机结构设计特点,定义三维模型成熟度标准,根据模型的不同成熟度结合流程驱动实现在不同的阶段工艺与设计的协同。针对异地特点,构建了线上IPT系统,能够实现多人异地在线围绕相同模型协同。建立仲裁机制,确保产品面向制造设计。整个协同过程中综合任务计划协同、业务流程协同、过程数据协同等核心业务。

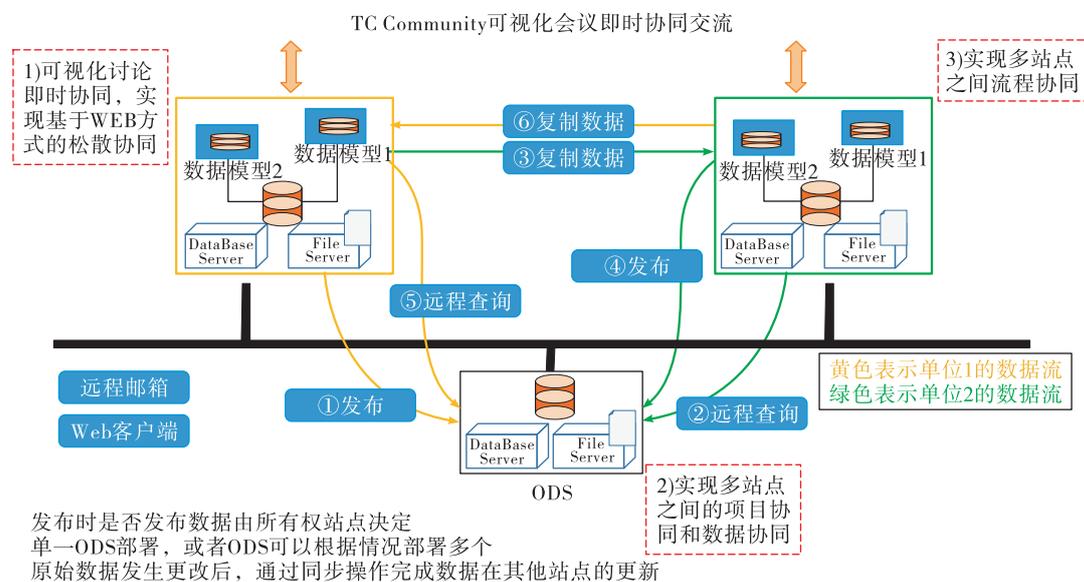


图6 多站点异地系统协同示意图

Fig. 6 Schematic diagram of multi-site remote system collaboration

4 结语

近年来,随着云计算、大数据、物联网等信息化技术新理念的迅猛发展,未来液体火箭发动机研制

模式将是传统液体火箭发动机与新一代信息技术的重塑性融合。在型号研制过程中,协同研发是技术发展的方向,同时也是适应未来航天强国“三高”发展的重要措施。

本文针对液体火箭发动机研制工程需求,提出了协同设计平台框架。分析了协同平台中的五项关键技术,提出了相应解决途径。通过工程实践,构建了液体火箭发动机协同平台,实现了基于三维模型的设计工艺协同,科研生产全过程的数据信息整合和多维度监控。通过平台提升了型号研制管控精细化程度,推进了液体火箭发动机设计模式由“任务型”向“能力型”转变。通过设计工具革新,提升液体火箭发动机设计水平,支持液体火箭发动机通用化、系列化、模块化、体系化设计。

以信息化技术为核心应用的协同技术目前正处于高速发展时期,技术发展牵引设计革新,设计革新反向促进技术发展,二者相互耦合。这也导致液体火箭发动机数字化设计体系是一个螺旋迭代的过程。本文提出的体系架构模式和尝试,仍需工程验证过程中不断完善和拓展,以期适应液体火箭发动机发展需求。

参考文献:

- [1] 王小军,陈海东. 运载火箭数字样机工程[M]. 北京:中国宇航出版社,2017.
- [2] ERIC R, JOSEPH P. Requirements development for the NASA advanced engineering environment (AEE) [C]//42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada;AIAA,2004.
- [3] 陈海东,沈重,张冶,等. 航天数字化应用技术的发展与趋势[J]. 导弹与航天运载技术,2008(3):23-27.
- [4] SHOLBERG J, ILLBACK J. Application integration framework for a large business process redesign project[C]//Proceedings of the Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications (Addendum). Minnesota,USA:[s. n.],2000.
- [5] 于勇,陶剑,范玉青. 波音787飞机装配技术及其装配过程[J]. 航空制造技术,2009(14):44-47.
- [6] CHING T H. A Comparative analysis of supply chain management practices by boeing and airbus; long-term strategic implications [D]. Taiwan: Civil Engineering National Taiwan University,2007.
- [7] MATTHEW A, DEANM J. Model-based advancements at lockheed martin space systems company [C]//AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition. Pasadena, California;AIAA,2015.
- [8] OSTER C. The lockheed martin digital tapestry, 2012 IN-COSE international workshop model-based systems engineering workshop [R/OL]. 2012. http://www.omgwiki.org/MBSE/lib/exe/fetch.php?media=mbse:mbse_iw_2012-lm_digital_tapestry-oster.pptx.
- [9] MATTHEW R L, HEIDI D. Design-to-cost and robust liquid rocket engine design using PMDA/PMDO and MBSE [C]//AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition. San Diego;AIAA,2014.
- [10] JEFFREY Z, RAYMOND K. Digital thread and twin for systems engineering: pre-MDD through TMRR[C]//55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Grapevine, Texas;AIAA,2017.
- [11] MARK E C. Digital engineering and U. S. army air vehicle technical description reports[C]//AIAA Scitech 2020 Forum. Orlando, FL;AIAA,2020.
- [12] DREDWARD M K. Value-creating decision analytics in a lifecycle digital engineering environment [C]//AIAA Scitech 2019 Forum. San Diego, California;AIAA,2019.
- [13] DEREGIS F, BERGOMI G. Model based approach for test and operations procedures [C]//2018 Space Ops Conference. Marseille, France:[s. n.],2018.
- [14] SEBASTIAN J I, HERZIG S J, ROBERT K. Towards a reference architecture for model-based engineering environments [C]//AIAA SPACE. Long Beach, California;AIAA,2016.
- [15] 范瑞祥,程堂明,李彩霞,等. 长征七号运载火箭“2+9+2”可靠性工程综述[J]. 载人航天,2017,23(3):285-289.
- [16] 方建平,宋凯歌,米弘. 并行工程在航天型号研制中的应用与实践[J]. 航天工业管理,2018(5):3-9.
- [17] 姜海丽. AVIDM在航天企业中的应用[J]. 现代制造工程,2005(11):47-49.
- [18] 李伟,侯凯,俞玉澄,等. 三维可视化装配工艺设计系统及应用[J]. 制导与引信,2018,39(2):54-60.
- [19] 刘晓玉,杨宁. 航空发动机数字化协同研制技术的应用研究[J]. 科技视界,2018(11):40-41.
- [20] 秦红强,王猛,杨亚龙,等. 液体火箭发动机三维数字化协同设计研究[J]. 火箭推进,2016,42(3):76-80. QIN H Q, WANG M, YANG Y L, et al. Study on 3D digital collaborative design of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion,2016,42(3):76-80.