

基于数据的火箭总体设计方法研究及软件实现

刘秉, 秦瞳, 牟宇, 李莉

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 为了提升火箭总体设计能力, 通过集成化的设计工具实现设计方法的统一和规范, 解决总体设计流程通过文档传递速度慢、缺乏统一接口和设计工具、设计效率低的痛点问题, 提出基于数据驱动的运载火箭总体协同设计方法, 并开发软件实现应用。遵循基于模型的系统工程 (Model Based System Engineering, MBSE) 理念, 通过制定专业间接口数据规范, 构建总体多专业协同设计数据物料清单 (Bill of Materials, BOM), 形成统一数据接口, 围绕统一数据 BOM 模型开展协同设计工作, 成功应用于总体协同设计工作中的多个场景, 实现设计过程数据同源、状态变化同知。基于数据的总体协同设计方法, 设计效率显著提升, 设计精度与传统设计方法整体相当, 局部更优。

关键词: 基于模型的系统工程; 运载火箭; 总体设计; 协同设计

中图分类号: V475.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 03-0022-07

Research on Data Based Rocket Overall Design Method and Software Implementation

LIU Bing, QIN Tong, MOU Yu, LI Li

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to improve the overall design capability of rockets, achieve the unification and standardization of design methods through integrated design tools, solve the pain points of the overall design process through document transfer, lack of unified interfaces and design tools, and low design efficiency, a data driven overall collaborative design method for launch vehicles is proposed, and software is developed to implement applications. By formulating inter professional interface data specifications, building an overall multi professional collaborative design data BOM, forming a unified data interface, conducting collaborative design work around a unified data BOM model, and successfully applying it to multiple scenarios in overall collaborative design work, achieving the same source of design process data and state change awareness. The data based overall collaborative design method is used. The design efficiency has been significantly improved, and the design accuracy is equivalent to that of traditional design methods as a whole, with some parts being better.

Key words: MBSE; Launch vehicle; Overall design; Collaborative design

收稿日期: 2023-11-01; 修订日期: 2024-02-29

基金项目: 中国工程院院士咨询课题项目 (2022-XY-06)

作者简介: 刘秉 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为运载火箭总体技术和数字化总体技术

通信作者简介: 秦瞳 (1983—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为运载火箭总体技术

0 引言

运载火箭的研制是一项多学科协同的系统工程。当前航天产品研制任务重、研制周期短、质量要求高，对总体协同设计能力提出更高要求。

基于模型的系统工程 (Model Based System Engineering, MBSE) 在工业界尤其在复杂航天领域, 受到广泛关注。发达国家在利用 MBSE 技术提升航天产品制造效率、生产力及开发部署上已经在世界前列。美国通过实施数字工程战略 (Digital Engineering Strategy, DES), 将以往串行的、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化工程生态系统, 实现以模型和数据为核心的模式转移^[1]。

本文结合数字化和协同设计在运载火箭研制中的工程实践, 提出了适用于研制的基于数据驱动的运载火箭总体协同设计方法。该方法遵循 MBSE 思想^[2-5], 研究总体协同设计方法, 贯通总体协同设计各专业模型/数据体系, 研发总体协同设计工具/软件。构建了数据驱动的总体协同设计流程, 采用标准化数据结构和接口, 实现了总体多学科协同设计数据架构, 总体相关专业间的模型定义和连续传递, 以及基于流程的高效协同设计模式。

1 运载火箭总体协同设计需求分析

运载火箭总体方案设计需要多专业开展协同设计, 按照系统工程的思想, 总体、气动等各专业共同参与, 结合不同任务需求, 开展火箭方案的小回路、中回路、大回路论证工作^[6-9], 见图 1。

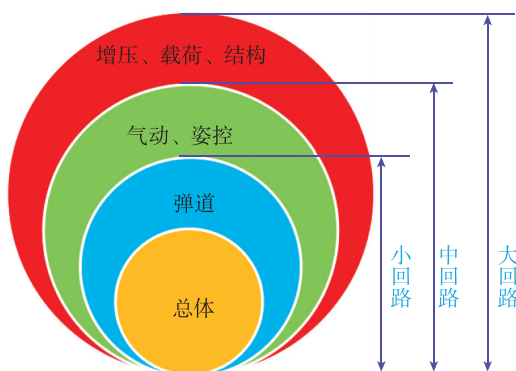


图 1 回路论证示意图

Fig. 1 Circuit demonstration diagram

从图 1 可以看出, 运载火箭总体设计需要多个

专业按照一定流程, 进行原始数据计算、气动特性计算、轨道初步设计、攻摆角计算等。当下一环节设计的性能不能满足需求时, 就需要重新回到总体设计的上一环节或者初始阶段, 而且有可能多次重复这一过程, 导致总体设计开发周期长、成本高。

为提高运载火箭总体设计效率, 就需要开发专业的数字化软件平台, 将各专业的仿真工具、流程与知识经验进行集成, 作为运载火箭总体协同设计工具^[10-11], 提供总体方案快速论证、典型设计参数优化与仿真验证等功能, 实现各专业设计与仿真工作的数字化、标准化、流程化与协同化。通过数字化总体协同设计平台, 构建各专业共同参与的协同研制基础工程环境, 把总体设计开发看成一个整体、集成的过程, 在设计早期使总体方案提前暴露出参数模型等不匹配、不协调的问题, 缩短总体设计周期。

2 现有总体协同设计方法的不足

运载火箭的研制是复杂系统工程方法的典型应用, 其数字化的产品结构和数据类型繁多, 具有多技术状态、多研制阶段、多批次生产、多学科协作的特征。采用数字化设计手段, 提高总体设计质量和效率, 是有效提升总体设计能力的途径, 也是确保型号论证研制工作质量和总体方案优化、避免方案反复的重要基础。

基于文档传递的总体协同设计流程如图 2 所示。这种模式使得专业人员要花费大量时间对输入、输出数据进行转换, 且数据的一致性需要通过文件会签确认。在该过程中, 数据人工转换、确认等重复性工作多, 严重制约了总体设计效率的提升。

利用数字化工程资源, 构建通用化的数字协同设计平台, 实施跨平台、跨地域、多方协同的航天产品研制模式, 以快速验证航天产品的有效性和可靠性, 支持产品设计、研制、验证的并行实施, 已成为当代航天产品研制的趋势^[12-18]。

3 基于数据驱动的总体协同设计方法

3.1 总体思路

提出以“数据驱动”为核心、以“总体方案论证”为业务牵引, 带动专业间模型接口设计、工具平台研发、标准规范制定的数字化建设应用总体架构。基于流程和模板、数据驱动方案, 以数

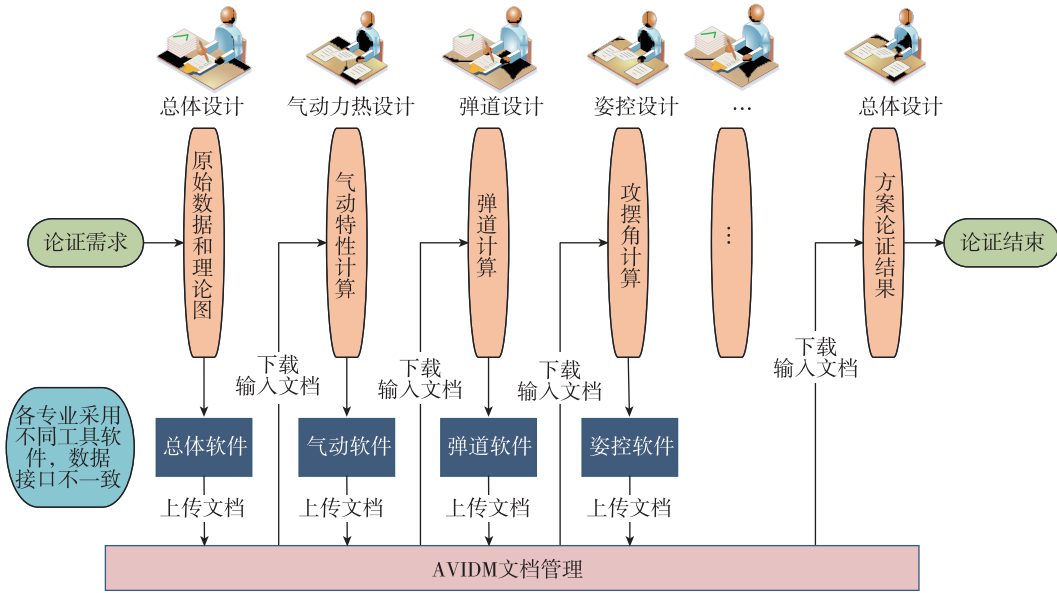


图 2 基于文档传递的总体协同设计流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of overall collaborative design process based on document delivery

字协同设计平台为支撑、专业设计工具为基础，以计算机的信息交互替代传统的人员交互，创建构型论证中的参数设计规范，理顺各专业间接口关系和设计流程，实现数据驱动的运载火箭总体快速协同设计。

总体协同设计重点面向总体方案论证过程，强调“需求快速响应”，更快更好地承接火箭方案构建需求，减少相关系统平台的重复建设与论证工作，提高论证效率。

总体协同设计形成描述总体方案的系统型数字样机模型，实现方案设计闭环，达到方案设计的快速验证与迭代，完成多方案快速优化筛选。因此，需要用户开展工程顶层规划论证相关的统一建模方法、统一建模语言、统一交互接口、统一工具平台等技术研究与能力建设，实现工程总体任务目标、能力分析 & 需求论证等工作的无缝衔接及信息的高效流转。

3.2 整体架构

专业间接口数据规范是实现数据驱动的基础。为满足不同构型、不同发射任务的接口数据使用要求，制定了多专业间接口数据规范。根据总体回路典型论证流程，按照传统专业分工，以模块化的架构思路，梳理出 3 大类数据标准接口，形成近 2 000 个标准数据，实现对火箭总体设计数据命名方式和使用单位的标准化。并对总体协同设计进行数据建模，建立数据字典，如图 3 所示。

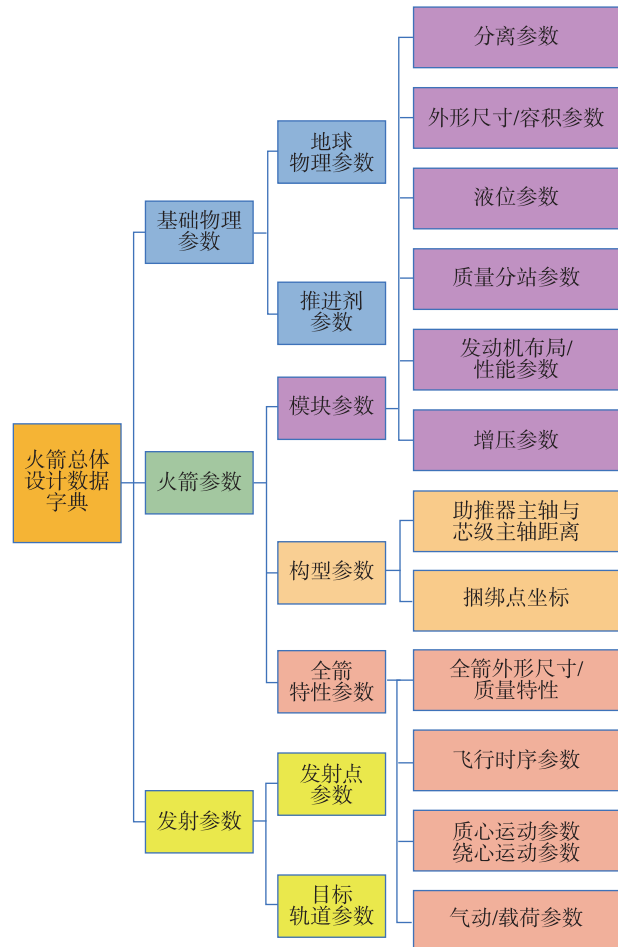


图 3 火箭总体协同设计数据字典示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rocket overall collaborative design data dictionary

构建火箭总体协同设计数据物料清单 (Bill of Materials, BOM) 是实现数据驱动的途径。通过 BOM 显性化表达总体相关专业间的数据关系, 对总体设计流程全过程数据进行管理, 旨在实现统一数据源、追溯数据变更过程。火箭总体协同设计的数

据 BOM 严格遵照数据组织规范, 按规范进行 BOM 数据层级建立。BOM 拓扑可存为模板, 数据支持导入、导出, 支持数据自顶向下的规划建模。支持构型物理维度、专业维度、过程维度等多维度组织数据。数据 BOM 结构示意图如图 4 所示。

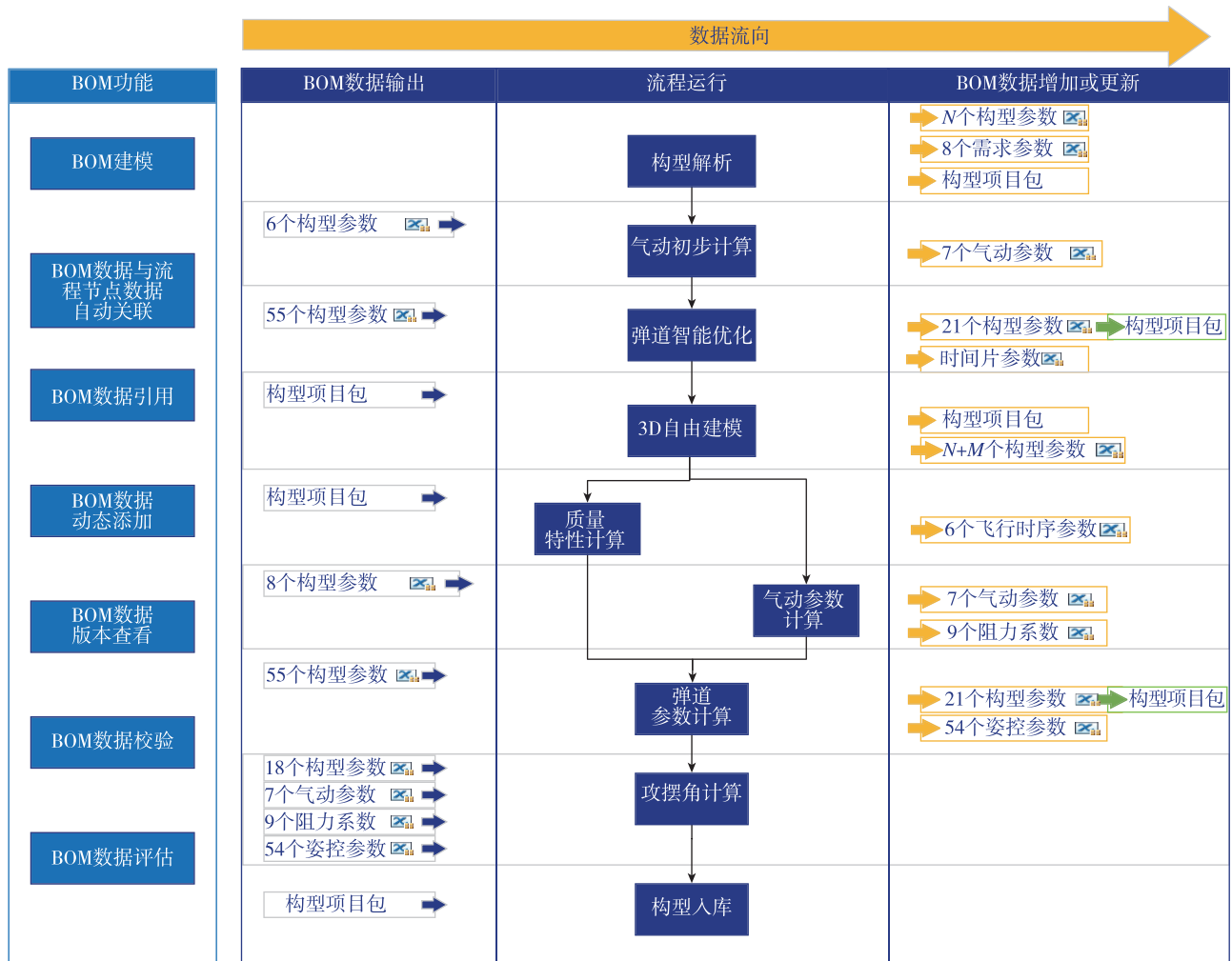


图 4 火箭总体协同设计数据 BOM 示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rocket overall collaborative design data BOM

3.3 关键技术

(1) 总体协同设计流程标准化技术

协同设计横跨的专业门类众多, 需要在灵活多变的环境下寻求一种各个专业均能够兼容的协同模式。流程标准化技术包括典型协同设计流程构建和模板管理。用模型化设计流程替代传统的文档和二维图设计流程, 做到数据驱动代替文本驱动。

(2) 总体协同设计接口规范化技术

运载火箭各专业接口数据多, 形式需求多, 接口规范化技术采用统一的变量名称、数据量纲、

数据精度和数据结构的方法, 构建火箭基础模块、发射工位、高空风和发动机数据库。具备数据、一维数组、多维数组、数值矩阵等多种接口形式, 做到接口统一量化。

(3) 总体协同设计数据结构化技术

协同设计数据结构复杂, 涉及空气动力学、结构力学、飞行控制等多个学科数据。数据结构化技术采用多学科属性定义区分方法, 标识每个学科的数据特征, 包括编码、字段、类型等, 同时定义学科间数据输入输出接口。通过上述技术, 实现总体协同设计相关数据的结构化、可解析、

可量化、可验证、显性化，形成信息共享、闭环管理的统一数据库，做到数同源、变同知。

4 基于数据驱动的总体协同设计软件实现

4.1 软件总体架构

搭建的总体协同设计软件，分为数据层、服务层、功能层、应用层4部分，如图5所示。

1) 数据层为软件定义了数据的基本属性和逻辑关系，包括数据的分类、命名、关系以及数据元素之间的层次和关联。总体协同设计软件的数据分为3类，分别是构型数据、三维建模数据和BOM/流程/接口数据。

2) 服务层为软件基础支撑模块，由基础服务和应用服务组成。基础服务支撑平台通用基础功能的正常运行，包括分布式数据存储、统一身份

认证服务等；应用服务包含定制化服务模块，用于支撑专业应用功能的正常运行，包括门户中间件、业务流程引擎等。

3) 功能层主要分为构型数据库、三维建模工具、数据BOM以及数据接口4个部分，共同构建以数据模型驱动为核心的多专业协同设计环境。其中，构型数据库提供构型存储功能，三维建模工具提供总体构型建模和初步构型计算功能，数据BOM提供型号项目统一共享数据池功能；数据接口为根据各专业数据特点定制的多个数据导入导出接口。

4) 应用层主要为参与型号总体设计的各专业活动，通过流程将各个专业之间的设计工作串联起来，通过数据BOM关联及数据接口，实现多专业闭环协同设计。

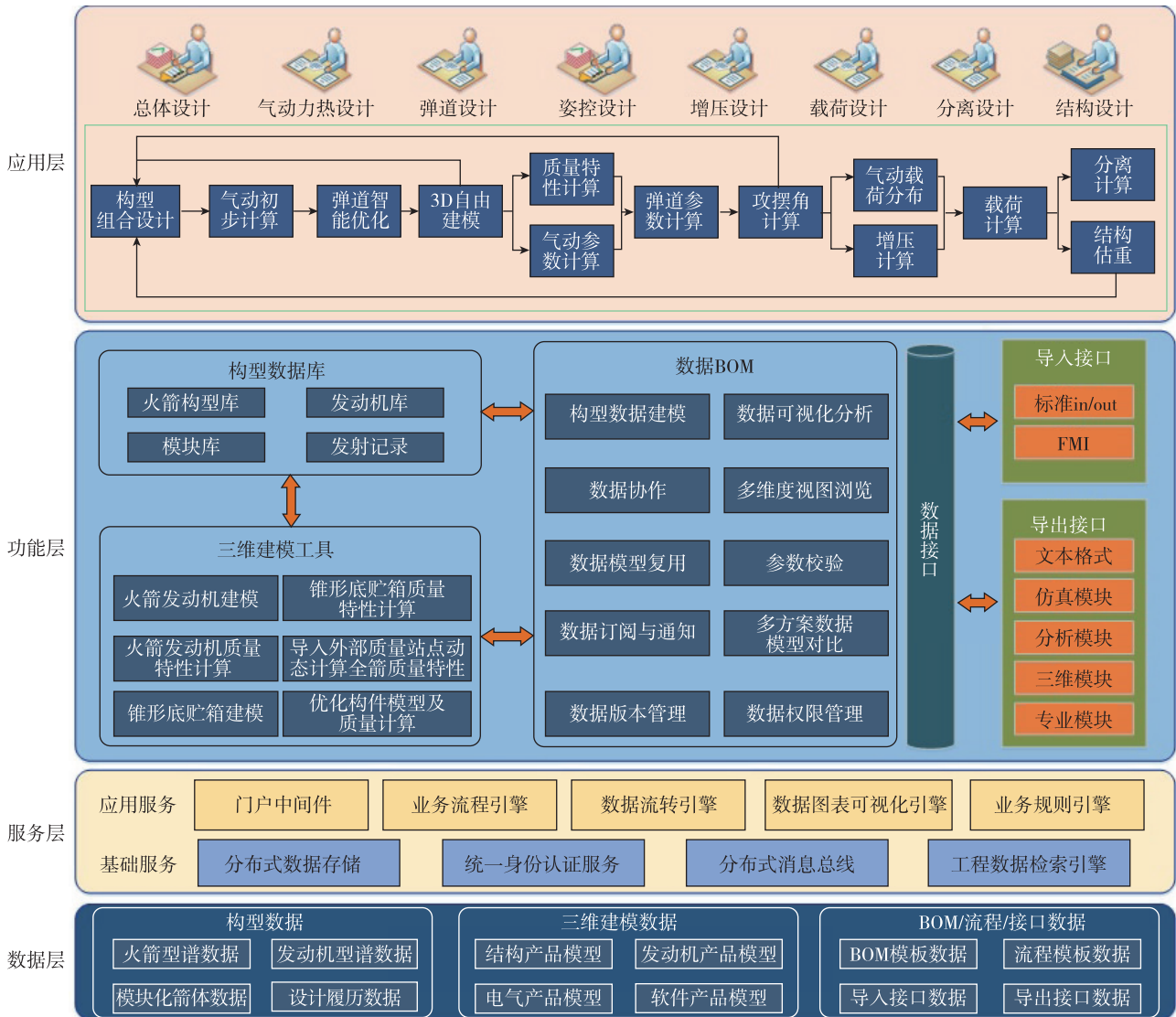


图5 火箭总体协同设计软件架构

Fig. 5 Software architecture for rocket overall collaborative design

4.2 软件典型使用流程

总体构型方案详细设计过程围绕统一数据BOM模型开展协同设计工作,典型的总体协同设计工作流程可以分为以下步骤。

1) 总体专业接收总体任务需求,根据目标运载能力,从构型数据库获取相关模块单元,快速组合设计出若干初始构型方案,并形成多构型的数据BOM模型。

2) 各专业从数据BOM中下载本专业用数据,进行相关仿真、计算、设计等工作后,将结果上传到对应的构型数据BOM模型中。

3) 完成一次大回路设计后,将数据传回总体,总体根据各专业优化的数据再次进行构型方案验证,完成一个火箭构型的详细设计。

5 基于数据驱动的总体协同设计应用

遵循总体各个专业间数据同源、变化同知的核心理念,开发基于数据驱动的总体协同设计软件,使用专业设计工具转变研制理念,实现研制手段的数字化转型升级,在总体方案论证、需求分析与验证等过程中得到了应用。

总体协同设计应用体现在多个业务场景,具体可以分为以下3类。

5.1 多构型筛选论证

针对潜在发展进行需求分析,通过对不同理论构型进行建模,可形成多种构型的总体参数,在运载能力、推进剂种类、箭体直径等约束条件下,筛选出最优构型。

论证流程从发动机平衡计算→构型解析→弹道计算,其中弹道设计采用经验参数库给出的气动阻力数据作为输入。

多构型筛选论证中,应用总体协同设计平台大回路紧耦合论证功能,调用发动机平衡计算模块,得出不同面积比下的发动机参数,进而优化级间段长度,对质量进行评估,并对运载能力的影响开展分析,给出最优方案。开展通用火箭末级模块适配不同基础级火箭的多构型运载能力快速分析,达到最优运载能力。在多构型论证时,以运载能力最优为原则,结合箭体直径、发动机台数、加注量等条件,对多种构型进行筛选。

5.2 基础构型功能拓展

通过对基础模块进行组合,对已有基础构型

进行功能拓展,可形成多个模块化的新构型,在箭体直径、发动机种类确定的情况下,对箭体长度、加注量等参数进行调整,对比分析不同构型的运载能力。

论证流程拓展为构型解析→三维建模→气动计算→弹道计算,其中弹道设计采用代理模型给出的气动阻力参数作为输入。

5.3 成熟构型应用发射

针对成熟火箭的应用发射任务,结合目标轨道、整流罩、卫星适配器的特殊需求,开展运载能力满足情况的分析计算。论证流程从构型解析→三维建模→气动计算→弹道计算,在总体方案确定的情况下,开展一轮总体设计工作。

6 结束语

提出基于数据驱动的运载火箭总体协同设计方法,开展专业设计工具集成和通用特性软件建模,实现设计过程数据同源、状态变化同知。

与传统设计方法相比,使用基于数据的火箭总体协同设计方法设计效率显著提升,设计精度与传统设计方法整体相当,局部更优,满足总体设计使用要求。

参考文献

- [1] 崔艳林,王巍巍,王乐.美国数字工程战略实施途径[J].航空动力,2021(4):84-86.
- [2] 何巍,胡久辉,赵婷,等.基于模型的运载火箭总体设计方法初探[J].导弹与航天运载技术,2021(1):12-17,32.
- [3] 邓昱晨,毛寅轩,卢志昂,等.基于模型的系统工程的应用及发展[J].科技导报,2019,37(7):49-54.
- [4] Shishko R, Aster R, Cassingham R C. NASA systems engineering handbook[M]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1995.
- [5] 王崑声,袁建华,陈红涛,等.国外基于模型的系统工程方法研究与实践[J].中国航天,2012(11):52-57.
- [6] 龙乐豪,等.总体设计(上)[M].北京:宇航出版社,1993.
- [7] 鲁宇.中国运载火箭技术发展[J].宇航总体技术,2017,1(3):1-8.
- [8] 龙乐豪,李平岐,秦旭东,等.我国航天运输系统60年发展回顾[J].宇航总体技术,2018,2(2):1-6.
- [9] 刘竹生,张博戎.运载火箭总体设计多学科优化方法发展及展望[J].宇航总体技术,2017,1(2):1-6.

- [10] 张兵, 陈建伟, 杨亮, 等. 基于模型的系统工程在航天产品研发中的研究与实践[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(1): 1-7.
- [11] 吴浩, 杨帆, 王斌, 等. 基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(2): 7-13.
- [12] 肖进, 孙树森, 杜可君. 基于主模型的协同设计软件架构技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(7): 146-149, 153.
- [13] 马洪波, 王艳. 模型驱动的复杂系统协同设计平台构建[J]. 科技与创新, 2020(5): 65-67, 69.
- [14] 李飞, 章乐平, 王志勇, 等. 航天器数字化协同设计技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(1): 71-74.
- [15] 胡庆军, 邱晓刚, 黄柯棣, 等. 航天器协同设计平台总体框架设计[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(2): 129-131.
- [16] 郭坚, 李瑞军, 范延芳, 等. 航天器信息流数字化协同设计方法[J]. 航天器工程, 2020, 29(4): 59-65.
- [17] 张涛, 王悦, 彭波, 等. 基于工作流驱动的航天产品分布式协同设计环境[J]. 计算机系统应用, 2015, 24(6): 24-31.
- [18] 韩凤宇, 林益明, 范海涛. 基于模型的系统工程在航天器研制中的研究与实践[J]. 航天器工程, 2014, 23(3): 119-125.

引用格式: 刘秉, 秦瞳, 牟宇, 等. 基于数据的火箭总体设计方法研究及软件实现[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(3): 22-28.

Citation: Liu B, Qin T, Mou Y, et al. Research on data based rocket overall design method and software implementation [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(3): 22-28.