

# 基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术研究

吴浩, 杨帆, 王斌, 吴会强, 王哲,  
蒋亮亮, 黄蔚, 王桂娇, 乐晨

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 对数字孪生技术和运载火箭结构设计制造与验证的数字化技术现状进行介绍, 在此基础上对基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术开展论证, 主要包括基于数字孪生的结构设计技术、基于数字孪生的结构制造仿真技术和基于数字孪生的结构试验仿真与控制技术3个方面。与现有技术相比, 基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术增加了面向过程的虚拟映射、模型驱动和数字管理等关键要素, 加强了模型和数据对结构研制过程的预测、监测和控制作用, 能够进一步提高设计效率, 加快试验周期, 提升结构的精细化和轻量化水平。

**关键词:** 运载火箭; 结构系统; 数字孪生

中图分类号: V421

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2021) 02-0007-07

## Study of Digital Twin Based Launch Vehicle Structural Design Manufacture and Validation Technology

WU Hao, YANG Fan, WANG Bin, WU Huiqiang, WANG Zhe, JIANG Liangliang,  
HUANG Wei, WANG Guijiao, YUE Chen

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

**Abstract:** This work introduces the digital twin and launch vehicle structural digital design manufacture and validation technologies, then presents the digital twin based launch vehicle structural design manufacture and validation technology, which consists of digital twin based structural design, structural manufacturing simulation and structural experimental simulation/dominance. Compared with the structural digital design manufacture and validation, the virtual-mapping, model-driven and data-management are included in the digital twin based structural design manufacture and validation, reinforcing the effects of model and data in structural monitoring, forecasting and dominating, which further increases the design efficiency, accelerates experimental progress, promotes the structural refinement and lightweight.

**Key words:** Launch vehicle; Structural system; Digital twin

### 0 引言

我国“十四五”发展规划明确指出, 如何开展数据的有效应用已成为加快信息技术与制造业

深度融合、促进产业转型升级的重要支撑。在此之前, 随着通信水平和信息技术的飞速发展, 将工业产品制造的各阶段形成的物理实体数字化表达已是智能制造的大势所趋。在这样的背景下,

收稿日期: 2020-09-25; 修订日期: 2020-11-11

基金项目: 航天科技集团有限公司自主研发项目 (YF-ZZYF-2020-007)

作者简介: 吴浩 (1982-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为壳段结构设计及结构强度分析。

E-mail: wuhao1212@foxmail.com

近年来先进的数字孪生技术不断应用到我国的工业领域,以模型驱动的虚拟与现实交互越来越多地出现在航空航天科研过程中,展现出快速而直观的数字化虚拟技术在预测与监测实际设计制造过程方面的优势。

在此之前,随着我国新一代运载火箭的研制,北京宇航系统工程研究所在火箭结构系统研制方面形成了一套数字化的技术体系,通过结构设计与分析、结构工艺仿真和结构试验仿真等手段,不断提高结构的轻量化水平和设计效率,缩短结构的研发周期,降低型号的综合成本,有力保障了新一代运载火箭研制的全过程。

为更好地促进模型和数据在运载火箭结构系统中的应用,本文将火箭结构设计制造与验证的数字化技术与先进的数字孪生技术相结合,提出了基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术,包括基于数字孪生的结构设计、制造仿真、试验设计与控制3大技术要点,以期提升模型和数据在结构研制中的作用提供途径,也为“十四五”期间结构研制模式升级奠定基础。

## 1 数字孪生技术综述

### 1.1 国内外发展现状

2003年,Michael Grieves在密歇根大学的产品全生命周期管理课程上提出了“与物理产品等价的虚拟数字化表达”的概念<sup>[1]</sup>,成为了数字孪生的最初定义。2012年,面对未来飞行器小质量、高负载以及更加极端环境下更长服役时间的需求,NASA和美国空军研究实验室共同提出了未来飞行器的数字孪生体概念,即充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据集成而成的多学科、多尺度的仿真过程,这种仿真过程作为虚拟空间中对实体产品的镜像,用于反映相对应物理实体产品的全生命周期过程<sup>[2]</sup>。该研究的目的是为了解决飞行器在复杂服役环境下的维护及寿命预测问题,并使得数字孪生迎来发展契机<sup>[3]</sup>。

之后,许多行业开始探索数字孪生在产品的设计、制造和服务等方面的应用。在产品的设计方面,达索公司建立了基于数字孪生的3D体验平台,利用用户反馈的信息不断改进产品设计虚拟模型,并反馈到实体产品改进中<sup>[4]</sup>。在生产制造方面,西门子通过数字孪生构建了生产系统的模型,用于评价和整合制造流程,并在工业设备Nanobox PC的生产流

程中开展了应用验证。在产品服务方面,PTC基于数字孪生,在虚拟世界与现实世界之间建立了实时的连接,将智能产品的每一个动作延伸到下一个产品设计周期,实现了产品的预测性维修,为客户提供了高效的产品售后服务与支持<sup>[5]</sup>。美国通用电气公司计划基于数字孪生体,通过其自身搭建的云服务平台Predix,采用大数据、物联网等先进技术,实现对发动机的实时监控、及时检查和预测性维护<sup>[6]</sup>。图1给出了空客集团A400M飞机总装环境的数字孪生示意图。

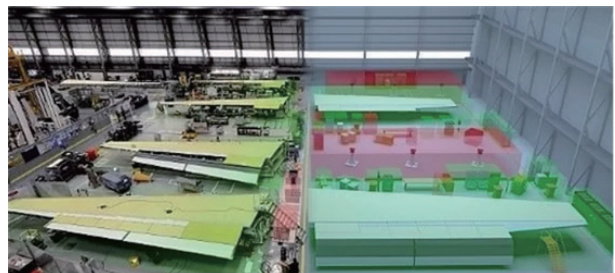


图1 空客集团A400M飞机总装环境的数字孪生

Fig. 1 Digital twin of Airbus A400M airplane assembly

随着近几年我国智能制造的发展,国内数字孪生研究与应用迎来蓬勃发展。Tao等<sup>[7]</sup>提出了数字孪生车间的实现模式,为实现制造车间物理世界与信息世界的交互融合提供了理论和方法参考。邹琦等<sup>[8]</sup>面向机械加工工艺优化和质量预测等应用需求,构建了包括几何层孪生模型、数据层孪生模型和孪生模型文件层的3层模型架构,实现了实物零件在数字空间的表达与理论加工特征的信息关联。周军华等<sup>[9]</sup>初步探索了航天飞行器系统数字孪生的应用模式和架构,并阐述了实现装备数字孪生需要突破的一些关键技术。刘蔚然等<sup>[10]</sup>将数字孪生与卫星工程中关键环节、关键场景、关键对象紧密结合,从空间维度和时间维度对数字孪生卫星的概念内涵进行阐述。孙惠斌等<sup>[11]</sup>研究了数字孪生驱动的航空发动机装配技术,基于物理装配与虚拟模型的交互与共融,实现了装配流程控制、零件选配、装配操作引导、装配间隙控制、装配技术状态控制和装试数据关联分析。

### 1.2 数字孪生3大要素

本文通过大量文献研究,总结出数字孪生技术的3大要素:虚拟映射、模型驱动和数据管理。

1) 虚拟映射。数字孪生最大的特点在于建立了实际过程在虚拟世界中的映射,这包括虚拟模

型以及其与实际过程之间的信息交互和数据传递等方面,通过这些方式对实际过程进行反映、监测、预测甚至控制。

2) 模型驱动。虚拟模型是数字孪生的核心,但与一般的仿真分析不同之处在于,数字孪生的虚拟模型不止反映对象的特征,还要具有过程属性,要通过虚拟模型驱动信息在过程中的传递。

3) 数据管理。数字孪生的本质是数据,包括虚拟模型、虚拟模型与实际过程之间的信息交互以及过程中不同阶段之间的数据传递。数字孪生的运行过程将产生大量的上述数据,如何实现高效的管理,是数字孪生能够发挥实际作用的根本。

## 2 火箭结构设计制造与验证的数字化技术

近十几年来,随着我国新一代运载火箭的研制,数字化在火箭结构研制中发挥着越来越重要的作用。火箭结构的设计、制造与验证已经形成了结构设计与分析技术、结构工艺仿真技术和结构试验仿真技术的技术体系,本节对技术现状和发展需求进行介绍。

### 2.1 结构设计与分析技术

目前,火箭结构设计与分析主要包括方案设计和有限元分析两种手段。首先,根据总体提出的结构设计要求,确定结构构型、零部件布局和初步参数,在三维建模软件中开展方案设计;然后,在有限元软件中开展有限元建模、多学科仿真分析和优化设计,并反馈改进建议;最后,在三维建模软件中进行方案改进,并再次开展有限元建模分析。该过程如图 2 所示。

由于火箭结构设计方案需满足装配、承载、传热、振动冲击等多种指标要求,所以结构设计与分析过程需开展大量有限元仿真分析以验证设计方案能否满足所有指标要求。因此,目前的火箭结构设计与分析一般包括大量的方案设计与有限元分析的循环迭代。面向未来,急需打通结构设计、有限元分析之间的壁垒,从而压缩环节、减少迭代、更加充分地开展仿真验证,在提高结构设计效率同时提升方案的最优化水平。

### 2.2 结构工艺仿真技术

目前,火箭结构的工艺仿真主要针对零部件开展,包括两个方面:1) 为了确保零部件加工后变形符合预期,开展工艺过程仿真并反馈工艺参数;2) 为了有效预测零部件的工艺试验结果,开

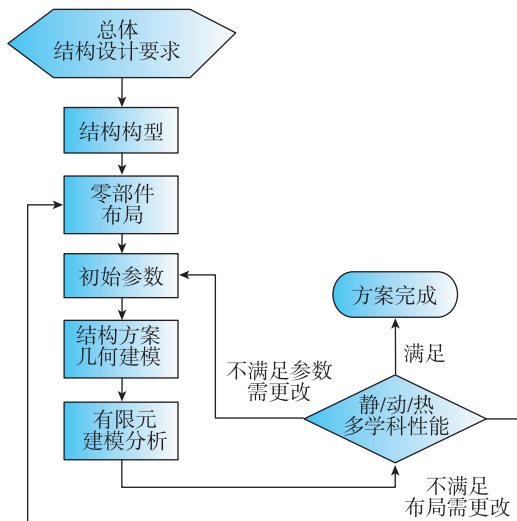


图 2 结构设计与分析技术示意图

Fig. 2 Schematic diagram of structural design and analysis technology

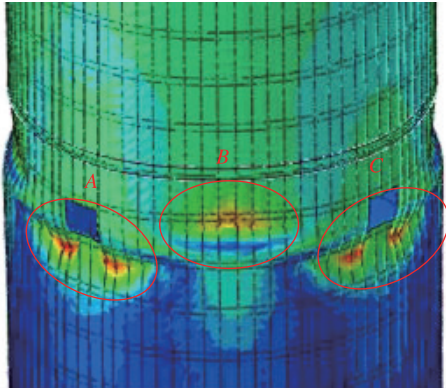
展工艺试验仿真并反馈试验载荷参数。

此外,制造过程的热处理、机械加工等环节会产生材料乃至结构层面的孔隙缺陷、残余应力、装配预应力以及几何偏差(统称制造缺陷),继而对结构产品的性能存在不同程度的影响。而且,这类影响很难在结构方案设计时进行准确预估,所以会导致真实产品性能和方案设计指标之间的差距。随着一体化成型等先进工艺手段在运载火箭结构中的应用,这方面的问题将更加突出。因此,面向未来,应当建立基于数字化的结构制造缺陷预测和控制技术手段,以便更为准确地预测结构的真实性能。

### 2.3 结构试验仿真技术

为保证运载能力,运载火箭结构系统的精细化和可靠性要求日益提高,因此结构地面试验、大型结构联合地面试验和超大规模跨系统联合地面试验(统称结构试验)越来越多地出现在运载火箭的研制过程中。由于此类试验成本高,准备周期长,因此为使试验快速、顺利通过,目前一方面通过基于有限元的试验仿真分析对试验过程进行预测,以提前发现问题,及时实施改进。图 3 展示了结构试验仿真结果与实际试验结果的一致性。另一方面,在试验现场,通过试验仿真结果和试验过程数据的人工对比,对试验过程进行监测和把控。

虽然,目前通过试验仿真可以较好地预测试验风险,控制试验过程,但由于试验仿真和试验



(a) 地面试验过程



(b) 试验仿真结果

图3 结构变形的仿真与试验结果对比

Fig.3 Comparison of structural deformation in simulation and experiment

因此只能通过人工手段进行数据的转换和对比,无法高效地发挥模型和数据在试验验证全过程的作用。面向未来,必须建立试验仿真与试验数据之间的交互与联系,用数字化虚拟试验指导试验设计,预测和实施的全过程,从而进一步缩短试验周期,提高一次通过率。

### 3 基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术

#### 3.1 概述

面向火箭结构设计制造与验证的数字化发展需求,本文在现有基础上引入先进的数字孪生技术,提出了基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术。该技术与现有基础相比,在数字孪生的虚拟映射、模型驱动和数据管理3大要素方面进行强化,旨在增强模型与数据在结构研制中预测、监测和控制的作用,以达到进一步提高设计效率,提高结构的轻量化水平,加快试验验证周期的目的。

基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术包括3个关键技术:基于数字孪生的结构设计、基于数字孪生的结构制造仿真、基于数字孪生的结构试验仿真与控制。表1从虚拟映射、模型驱动和数据管理的角度,对3个关键技术的特点进行介绍。

数据分别处于独立的两个系统,尚未建立关联,

表1 基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证技术特点

Tab.1 Characteristics of digital twin based launch vehicle structural design manufacture and validation technology

	虚拟映射	模型驱动	数据管理
基于数字孪生的结构设计	在结构设计阶段建立使用工况下结构虚拟映射,即在设计同时就能够全面验证结构性能	CAD与CAE模型双向驱动,在开展几何三维设计的同时快速形成有限元模型并开展多学科仿真分析	包括两方面数据管理:结构设计迭代(如优化设计)将产生大量过程数据,设计经验的数据化、积累与知识推送
基于数字孪生的结构制造仿真	建立从原材料加工、零部件制造到产品装配和性能评价过程的结构虚拟映射,旨在有效获得产品制造缺陷,准确预测产品真实性能	通过模型计算和表征结构在各环节的制造结果和缺陷,一方面通过反馈工艺参数、驱动制造以尽可能减少制造缺陷;另一方面能够反映最终的真实产品性能	不仅要实现各个环节中制造结果和缺陷数据的传递与表征以及与工艺参数之间的转换,也要实现产品外形光测海量数据的处理与表征
基于数字孪生的结构试验仿真与控制	建立从试验设计、仿真预示到试验实施全过程的虚拟映射,旨在提高试验方案精细度、试验过程预测的准确度和试验一次通过率	包括面向复杂试验设计的分析模型,以及面向试验过程预测的仿真模型,需建立试验仿真模型与试验过程数据之间的关联,实现仿真模型对试验过程的监测与控制	首先要实现试验仿真结果向测点图的坐标数据转换;然后基于测点图,建立试验仿真结果与试验实际过程之间的大量数据交互,达到仿真与实际实时对比分析的目的

#### 3.2 基于数字孪生的结构设计技术

基于数字孪生的结构设计技术以CAD/CAE一体化平台为基础,在方案设计的同时形成CAD

向CAE的虚拟模型映射,将几何参数、材料属性和结构性能等全部数据保留至CAE模型中,并对CAE模型开展面向各个指标要求的多学科仿真分

析，实现设计方案的全面验证，反过来将设计改进信息传递至 CAD，形成设计和分析之间的闭环，示意图如图 4 所示。

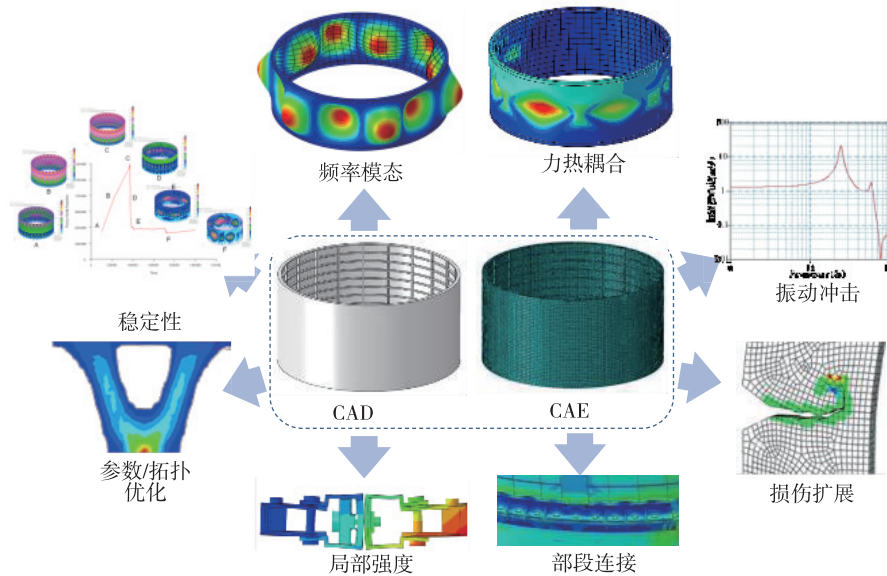


图 4 基于数字孪生的结构设计技术示意图

Fig. 4 Schematic diagram of digital twin based structural design technology

基于数字孪生的结构设计技术与当前的结构设计手段相比，存在几个特点：1) 打通 CAD 与 CAE 之间的壁垒，即实现 CAD 向 CAE 参数的传递，也实现 CAE 仿真分析结果在 CAD 中的快速优化更改，因此建立的是二者之间的双向驱动；2) 将以往先有 CAD 后开展 CAE 的模式压缩为并行进行，在方案设计的同时实现结构在全部使用工况性能指标的分析与验证，设计效率提高 50% 以上；3) 通过大量 CAD 和 CAE 工作的开展，实现结构设计和仿真分析优秀经验的积累与传承。

### 3.3 基于数字孪生的结构制造仿真技术

为了尽可能降低结构制造过程的缺陷，同时也促进对结构真实性能的准确把控，基于数字孪生的结构制造仿真技术建立了从原材料加工、零部件制造、产品装配和性能评价的全过程虚拟映射，示意图如图 5 所示。

该技术主要包括 4 个阶段：

1) 原材料加工阶段，通过开展原材料加工过程仿真，预测原材料加工结果、反馈相关工艺参数，并通过加工后的检验获取原材料加工的制造缺陷；

2) 零部件制造阶段，将原材料加工制造缺陷引入仿真模型并开展零部件制造仿真，实现原材

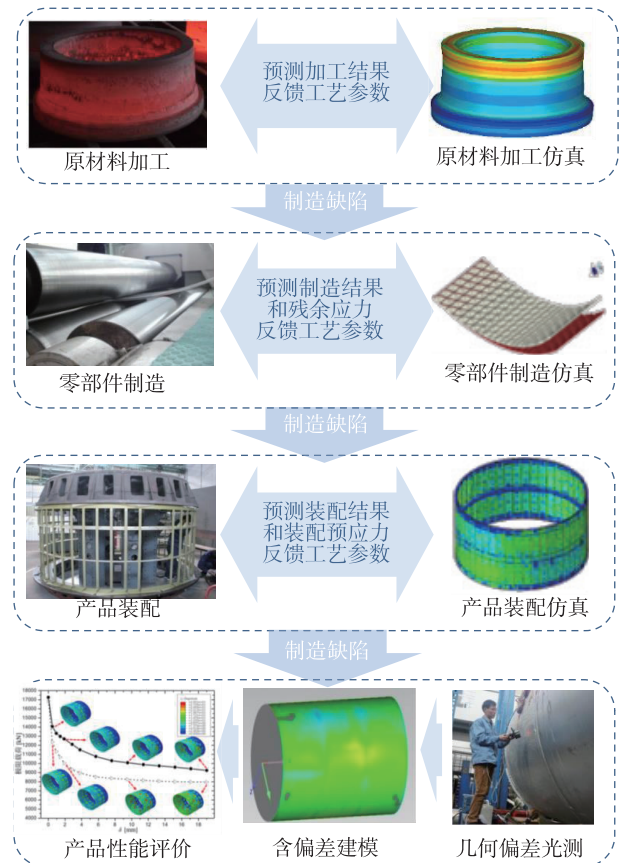


图 5 基于数字孪生的结构制造仿真技术示意图

Fig. 5 Schematic diagram of digital twin based structural manufacturing simulation technology

料加工制造缺陷影响下的零部件制造结果预测、残余应力等制造缺陷预测和工艺参数反馈，再结合零部件制造后的检验，获取该阶段制造缺陷；

3) 产品装配阶段，将原材料加工制造缺陷和零部件制造缺陷引入仿真模型并开展产品装配过程仿真，实现包括原材料加工缺陷和零部件制造缺陷双重影响下的产品装配结果预测，装配预应力等制造缺陷预测和工艺参数反馈，再结合产品装配后的检验，获取该阶段制造缺陷；

4) 产品性能评价阶段，将上述原材料加工、零部件制造和产品装配阶段产生的制造缺陷进行综合考虑并引入结构产品的仿真模型，开展结构产品在总装、运输、试验和飞行等各种使用工况下的性能仿真，实现包括真实制造缺陷的结构产品性能评价。

通过上述所有工作的不断开展，可积累起结构典型制造缺陷数据库，形成制造缺陷的建模标准规范，以及制造缺陷对结构性能的折减系数库，从而使设计人员在结构方案设计时就能够有效预测真实产品的性能，因此能够进一步降低设计余量，提高结构的轻量化与精细化。

### 3.4 基于数字孪生的结构试验仿真与控制技术

基于数字孪生的结构试验仿真与控制技术流程如图6所示，包括3个阶段：1) 试验设计阶段，通过建立试验件的虚拟模型，全面评估各种载荷工况对试验件的影响，从而提高试验工况的精细化水平；2) 试验仿真预示阶段，建立试验实施过程的虚拟模型，通过精细化仿真分析对试验过程进行预测，及时采取加强措施，并基于仿真结果快速生成试验测点图，作为试验仿真结果与试验过程数据之间的介质；3) 试验实施阶段，建立试验仿真结果与试验过程数据之间的实时交互，将目前需要人工开展的数据分析转化为基于计算机的自动化执行，提高试验过程监测的严密程度，能够更好地发现问题、避免试验的反复。

通过这3个阶段的实施，可进一步加快试验进度，缩短结构系统的研制周期。

## 4 结论

本文面向“十四五”期间模型与数据在我国工业领域的应用趋势，将火箭结构设计制造与验证的数字化技术与先进的数字孪生技术相结合，提出了基于数字孪生的火箭结构设计制造与验证

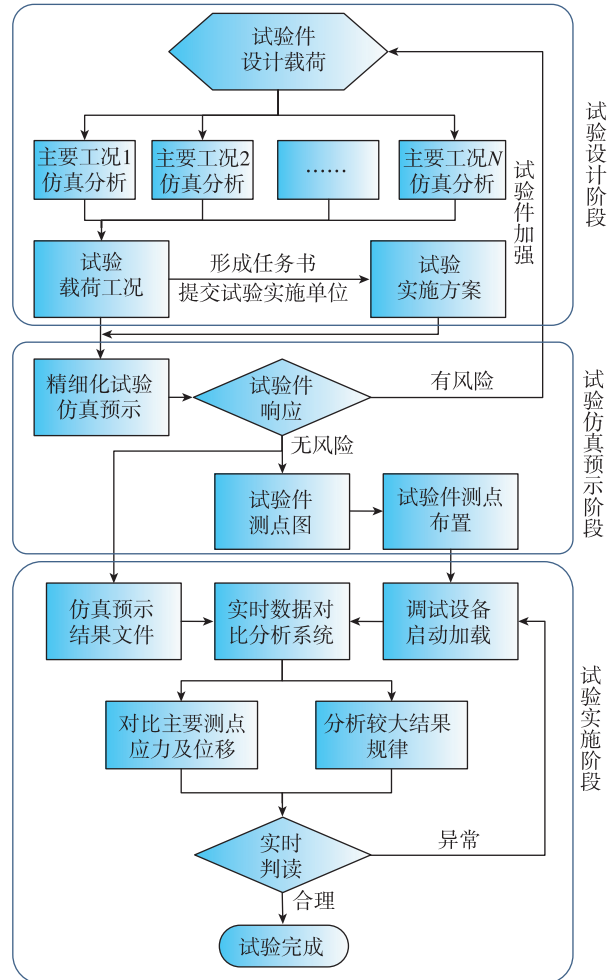


图6 基于数字孪生的结构试验仿真与控制示意图

Fig. 6 Flow chart of digital twin based structural simulation/dominance

技术。该技术包括基于数字孪生的结构设计、基于数字孪生的结构制造仿真和基于数字孪生的结构试验仿真与控制3方面，在当前数字化技术基础上，通过增加虚拟映射、模型驱动和数据管理的数字孪生关键要素，加强了模型和数据在结构研制过程中预测、监测和控制的作用，能够实现3方面的提升：

1) 打通结构与有限元分析之间的壁垒，提高设计效率，也提高结构的优化水平；

2) 建立结构产品制造全过程的工艺仿真手段，更为准确地预测结构性能，提升方案的轻量化水平；

3) 通过虚拟试验全面指导结构试验的设计、预测和实施，进一步缩短试验周期，提高一次通过率。

通过本文的论述，为提升模型和数据在结构

研制中的作用提供了技术途径,也为“十四五”期间结构研制模式升级打下基础。

### 参考文献

- [1] Grieves M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication[EB/OL]. [http://www.aprison.com/library/Whitepaper\\_Dr\\_Grieves\\_DigitalTwin\\_ManufacturingExcellence.php](http://www.aprison.com/library/Whitepaper_Dr_Grieves_DigitalTwin_ManufacturingExcellence.php), 2014.
- [2] Glaessgen E, Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. air force vehicles[C]. Proceedings of the 53<sup>rd</sup> Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston, Va., USA: AIAA, 2012:1-14.
- [3] 庄存波,刘检华,熊辉,等.产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J].计算机集成制造系统, 2017,23(4):753-768.
- [4] 陶剑,戴永长,魏冉.基于数字线索和数字孪生的生产生命周期研究[J].航空制造技术, 2017(21):26-31.
- [5] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统, 2018,24(1):1-18.
- [6] Warwick G. GE advances analytical maintenance with digital twins[N]. Aviation Week & Space Technology, 2015-10-19.
- [7] Tao F, Zhang M, Cheng J F, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1):1-9.
- [8] 邹琦,侯志霞,王明阳.机加零件的数字孪生模型构建方法[J].航空制造技术, 2020,63(3):67-75.
- [9] 周军华,薛俊杰,李鹤宇,等.关于系统数字孪生的若干思考[J].系统仿真学报, 2020,32(4):539-552.
- [10] 刘蔚然,陶飞,程江峰,等.数字孪生卫星:概念、关键技术及应用[J].计算机集成制造系统, 2020,26(3):565-588.
- [11] 孙惠斌,颜建兴,魏小红,等.数字孪生驱动的航空发动机装配技术[J].中国机械工程, 2020,31(7):833-841.
- [12] 邢汉峥,吴浩,王雨田,等.基于 TANA 函数的非概率可靠度分析方法[J].宇航总体技术, 2020,4(4):35-45.
- [13] 孙成志,闫晓东.基于神经网络和证据理论的火箭发动机故障诊断[J].宇航总体技术, 2020,4(4):20-30.
- 引用格式: 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.
- Citation: Wu H, Yang F, Wang B, et al. Study of digital twin based launch vehicle structural design manufacture and validation technology [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(2): 7-13.