

# 面向3D打印的设计制造一体化探索

牛飞, 杨东生, 许俊伟, 姚重阳, 徐志良

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘要:** 紧密围绕航天结构未来发展需求, 以增材制造复杂产品研发为研究对象, 对实现设计制造一体化的技术路线和关键技术进行分析。把设计、仿真和制造有机统一起来, 把工艺设计纳入结构设计流程, 通过仿真驱动设计来提高产品质量、降低制造成本。研究成果可应用于航天领域增材制造产品研发, 对传统设计制造模式向智能制造转型具有积极探索意义。

**关键词:** 3D打印; 航天结构; 设计制造一体化

**中图分类号:** V19

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-4080 (2023) 05-0045-06

## Exploration of Design and Manufacturing Integration for 3D Printing

NIU Fei, YANG Dongsheng, XU Junwei, YAO Chongyang, XU Zhiliang

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** This paper focuses on the future development needs of aerospace structures, takes complex products for additive manufacturing as the research object, and analyzes the technical route and key technologies to realize the integration of design and manufacturing. Organically unify design, simulation and manufacturing, incorporate process design into the structural design process, and improve product quality and reduce manufacturing costs through simulation-driven design. The results can be applied to the research and development of additive manufacturing products in the aerospace field, and have positive exploration significance for the transformation of traditional design and manufacturing models to intelligent manufacturing.

**Key words:** 3D printing; Aerospace structure; Design and manufacture integration

### 0 引言

3D打印(又称增材制造, Additive Manufacturing, AM)是近年来新开发并逐渐成熟起来的一种先进制造工艺,它完全基于三维数字化模型文件,把粉末状或者丝状的金属、非金属等可打印材料,通过逐层累积的方式来实现产品制造。随着高性能增材制造装备和专用材料制备技术的不断突破,增材制造凭借无模化、短周期及近净成型的显著优势,已经成为提高复杂结构设计和制造能力的一项关键技术<sup>[1]</sup>。目前,增材制造技

术已应用于多个航天型号,已成为航天结构轻量化、一体化和功能性创新设计的关键技术。然而,由于设计、工艺及检验等关键环节的相互脱节,设计工艺性不足、制造缺陷频发、质量一致性差、检验判据不合理等问题制约着增材制造产品向着更高质量和性能发展。

本文紧密围绕航天飞行器未来发展需求,以3D打印产品研发为研究对象,对实现设计制造一体化的技术路线和关键技术进行分析。将结构多学科优化、工艺成型过程仿真、无损检测及逆向重构技术等先进手段融入设计制造流程,把设计、

收稿日期: 2023-08-01; 修订日期: 2023-08-18

基金项目: 科技部研发计划

作者简介: 牛飞 (1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为结构优化设计。

仿真和制造有机统一起来，把工艺设计纳入结构设计流程，利用统一数据模型实现结构性能仿真和成型工艺仿真，通过仿真驱动设计来提高产品质量、降低制造成本。本文研究成果可应用于航天领域增材制造产品研发，对传统设计制造模式向智能制造转型具有积极探索意义。

## 1 相关研究

### 1.1 面向增材制造的设计

近年来，国内外一些学者提出了面向增材制造的设计（Design for Additive Manufacturing, DFAM）概念<sup>[2]</sup>。主要表现在两个方面，一是在传统优化设计模型的基础上考虑增材制造工艺约束，以得到适合增材制造的设计；二是以增材制造的工艺能力拓展优化设计空间，得到具有更丰富层次和更优异性能的创新结构。Kumke等<sup>[3]</sup>对传统设计理念 and 实现方法进行优化，把用户体验和设计新颖性引入设计目标，为设计工程师提供具体的指导；Ponche等<sup>[4]</sup>提出一种从功能规范到工艺路线的零件设计方法，从设计结构初期就结合增材技术的优势；李涤尘等<sup>[5]</sup>结合增材制造的成型过程特点，整体研究了微观结构和宏观结构的制造方法，提出一种宏微观结构整体设计的一体化设计思路；刘书田等<sup>[6]</sup>提出一种结构拓扑优化设计与增材制造工艺相结合的设计制造一体化策略，从自支撑结构、打印工艺约束、制造缺陷等多个方面对设计进行探讨。全栋梁等<sup>[7]</sup>提出了

考虑工程经验的结构优化设计理念，将二者有机结合以最大限度发挥结构优化设计的作用，实现真正的面向性能的正向设计。

### 1.2 设计制造一体化技术

设计制造一体化的实现要有软件平台和相关流程规范的保证。冷峻<sup>[8]</sup>通过对航空产品设计制造一体化技术途径的关键要素进行分析，认识到通过单一数据源、管控研制过程、改进业务流程等技术手段，可提高航空产品的研制质量和效率；党卫兵等<sup>[9]</sup>分析了某航天产品设计与制造协同的业务现状，提出了基于模型定义（Model Based Definition, MBD）的航天产品设计制造一体化解决方案，将三维模型作为制造过程唯一数据源，大幅提高了设计制造协同工作效率。张振伟<sup>[10]</sup>提出了基于产品数据管理（Product Data Management, PDM）的设计制造一体化技术，将传统的设计、工艺、制造数据纳入PDM统一管理，实现了设计模型、工艺文件、数控程序、装配仿真文档的电子化归档和管理，规范统一了产品研制过程数据和流程，保证了过程数据的完整性，并提出了一套实用的集成工程应用环境和方法。Chang等<sup>[11]</sup>将制造工艺性和成本约束纳入设计过程，来解决结构形状优化问题，获得了较好收益。

## 2 技术路线及关键技术

面向3D打印产品特点，对现有航天结构产品研制流程进行改进，形成图1所示的设计制造一体

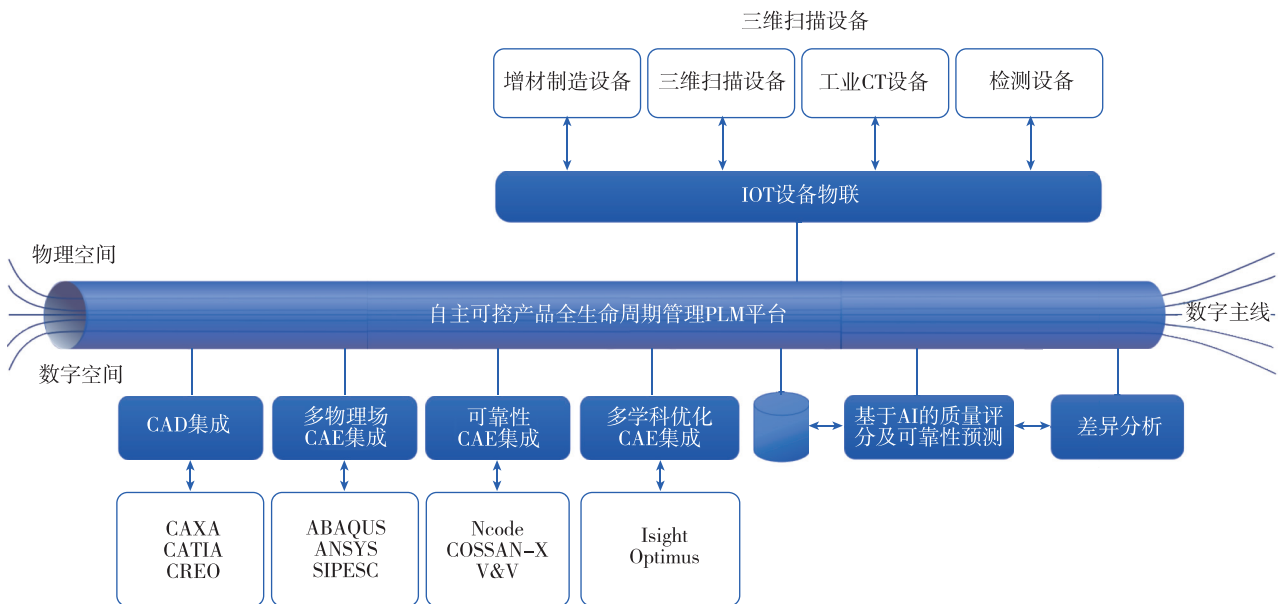


图1 技术路线

Fig. 1 Technical route

化技术路线。基于国产化的产品全生命周期 PLM 平台，建立集成产品设计制造过程的数字化建模和管理软件，实现对设计模型、工艺模型和基于实物数据逆向重构的数字模型的统一管理；构建包含设计、制造、使用、维护等产品全生命周期各阶段的统一数据库，打通制造设备和相关软件接口，对产品全生命周期不同阶段产生的异构、多态、海量数据进行采集和管理。

通过对实物重构数字模型进行虚拟装配和虚拟试验验证，实现增材制造产品的性能预测和质量评价，这就把设计模型、工艺模型与产品质量联系起来。借助敏感性分析技术对影响产品性能的关键设计、制造要素进行辨识，进而建立这些要素与产品性能之间的映射关系；以设计可靠性提升为目标，以产品性能、几何包络、质量、接口以及制造缺陷为约束，通过优化迭代实现增材制造产品的优化设计。关键技术包括以下 3 方面。

## 2.1 面向设计制造一体化的数字化建模与管理平台

统一数据模型是实现设计制造一体化的源头和核心。与传统产品数据模型仅支持对物理产品的设计、工艺等图纸、模型和文档的管理不同，面向设计制造一体化的数字化模型需要包含设计、制造、使用、维护等产品全生命周期各阶段统一的数据。这就需要软件工具和平台提供支持。

如图 2 所示，面向增材制造产品的数字化建模与数据管理平台软件框架，要在数据层构建产品全生命周期各阶段的统一数据库，打通制造设备和相关软件接口，采集产品全生命周期不同阶段产生的多态、异构和海量数据；以数据支撑模型层的各类模型创建，包括几何模型、仿真模型、优化模型等；进一步，在运算层通过计算机软硬件资源调度，实现仿真分析优化功能，最终支撑应用层对产品质量进行预测、评价和优化，为航天增材制造产品设计和工艺优化提供软件平台保障。

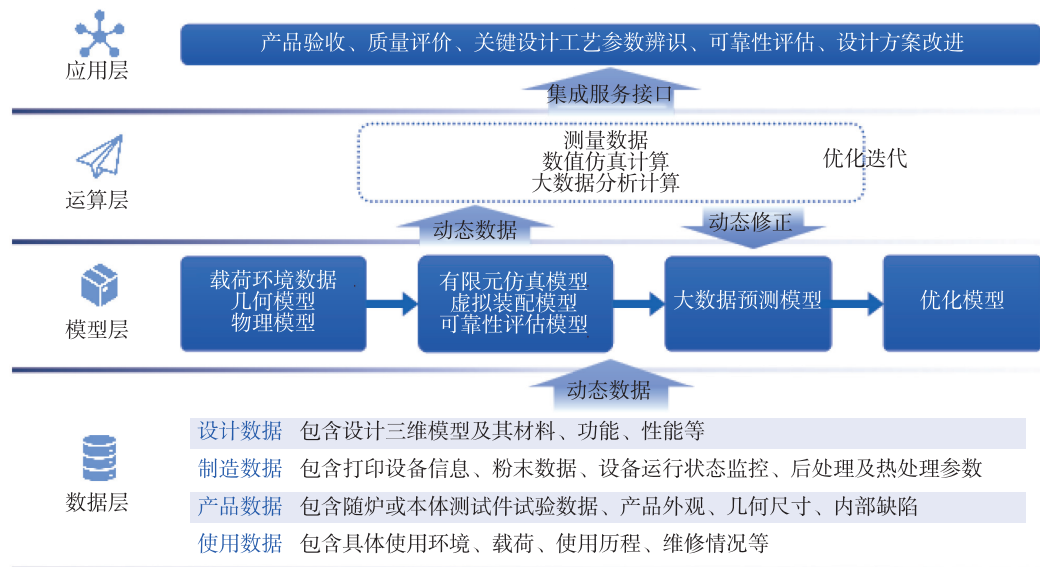


图 2 平台框架

Fig. 2 Platform framework

## 2.2 基于数字化模型的增材制造产品质量评价技术

制造过程中不可避免地会与理想设计状态产生差异，或是长宽高等尺寸的伸缩，或是特征表面的起伏不平，又或是表面/内部的各种缺陷，由这类具有“偏差”的零件组装而成的产品难以达到理想性能要求。对于特定的零件产品，其几何特征、材料属性、表面和内部缺陷等都是有所区别的。

对现阶段基于少量实物数据的质量评价体系

进行优化，更多地借助数字化模型来评价产品质量。首先，借助三维扫描、工业 CT 等无损检测技术得到包含产品缺陷的点云数据；其次，通过逆向建模得到实物产品的数字化重构模型；然后，将精确反映实物产品特征的数字重构模型代入三维数字化装配模型和虚拟验证模型，通过仿真手段对产品逐件进行接口匹配、几何干涉、强度和刚度性能预测，最终实现增材制造产品的逐件快速化质量评价。

### 2.3 面向可靠性提升的增材制造产品优化设计技术

在模型空间中对物理实体的可靠性工作状态开展全要素重建及数字化映射，以产品性能预测的数字重构模型为基础，依据失效模式分析对产品可靠性进行评估。借助敏感性分析技术对产品可靠性的关键影响因素进行辨识（材料性能、几何特征、制造缺陷等），进而建立这些要素与产品可靠性之间的映射关系，实现基于数字重构模型的实物产品可靠性评估和优化设计。以最大化产品设计可靠性为目标，以产品性能、质量、接口以及制造缺陷为约束，构建优化列式，提高增材制造产品的可靠性预计。同时，根据优化结果确定产品关键验收指标和偏差范围。

### 3 实践案例

本章以某 3D 打印点阵夹层弧板产品为例，对设计制造一体化技术探索进行简要描述。如图 3 所示的弧形点阵夹层结构，内部填充体心立方点阵。经前期分析校核，确定点阵及蒙皮几何参数，得到满足设计要求的结构 CAD 模型。

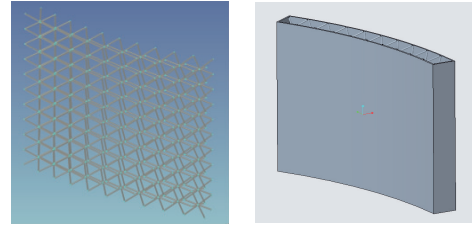


图 3 点阵夹层弧板

Fig. 3 Arc plate with lattice sandwich

在产品制造环节，首先将三维 CAD 模型数据传递至增材制造工艺软件进行打印支撑设计和切片设计，生成打印路径轨迹，得到如图 4 所示的打印工艺模型。进一步，利用实际的打印厚度、激光功率、扫面速度、扫描间距等工艺数据代入仿真模型，对增材制造过程进行仿真，得到图 5 所示的产品变形情况。通过仿真对打印工艺参数进行优化调整，确定最终的上机数据。

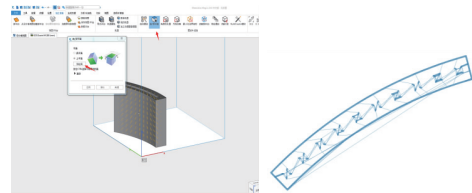
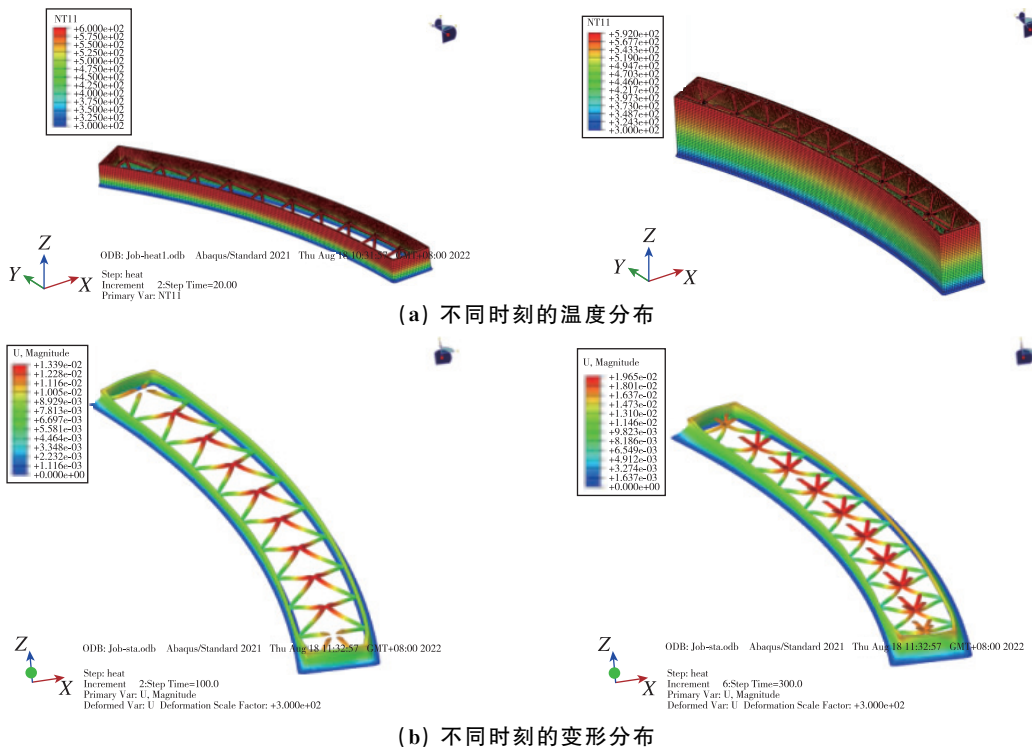


图 4 工艺模型

Fig. 4 Process model



(a) 不同时刻的温度分布

(b) 不同时刻的变形分布

图 5 成型过程仿真

Fig. 5 Simulations of the molding process

在质量评价环节，对图 6 给出的实物产品进行工业 CT 检测，利用点云数据对实物产品进行逆向建模，得到能够反映产品真实的变形翘曲缺陷的数字重构模型。将数字重构模型代入设计模型，对产

品几何尺寸、外形轮廓、接口匹配和几何干涉进行量化检查。进一步，通过数字重构模型对有限元仿真模型进行修正，对产品的使用性能进行评价。

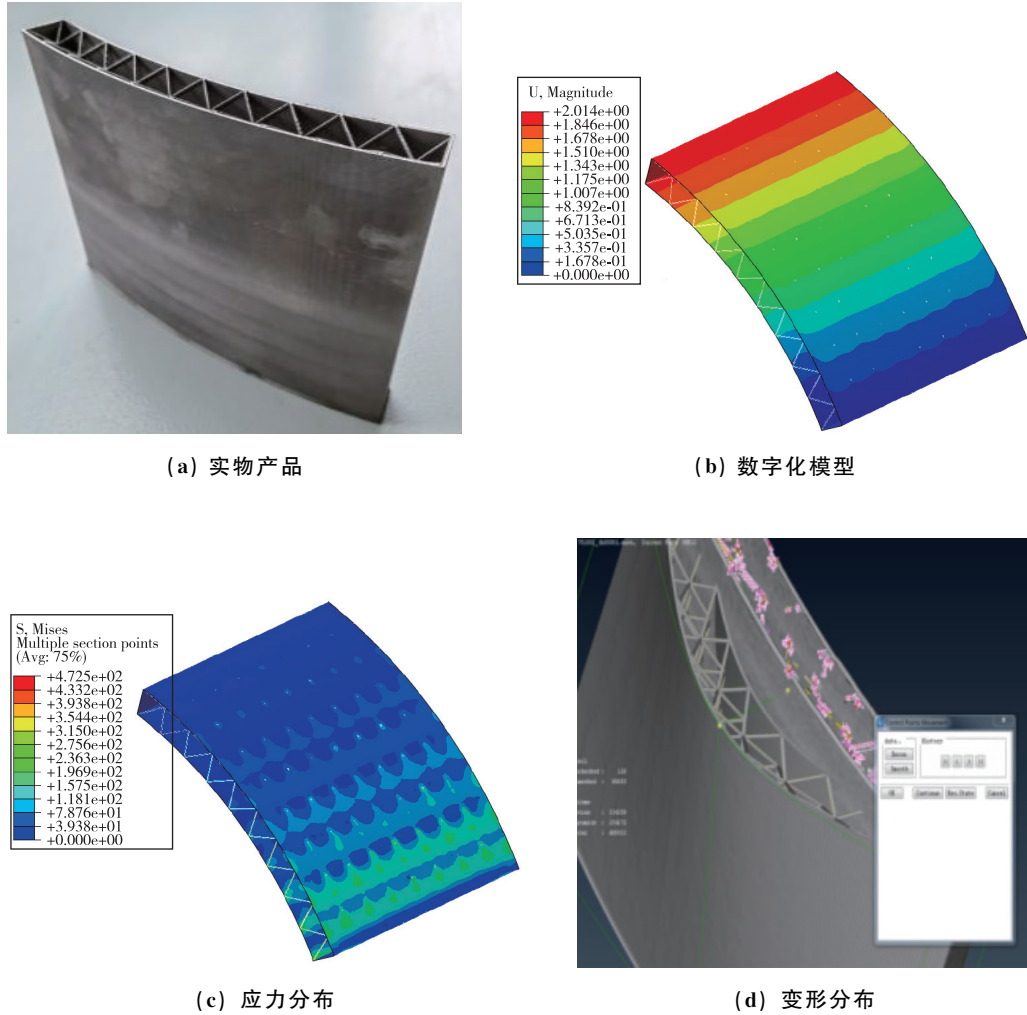
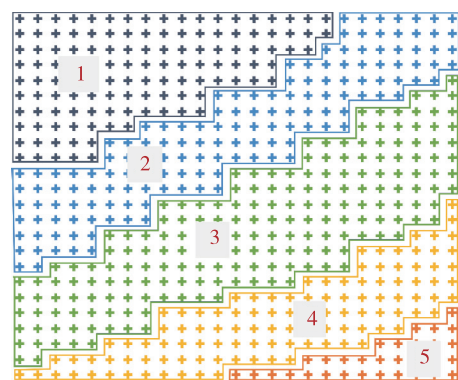


图 6 产品质量评价

Fig. 6 Product quality evaluation

在可靠性提升环节，首先基于概率模型对点阵夹层弧板进行可靠性建模，通过灵敏度分析，在材料性能（杨氏模量和泊松比）、几何特征（点阵半径）和制造变形缺陷中，选取几何特征，即夹层区域杆件半径作为可靠性优化设计变量。考虑外荷载特点，对点阵杆径进行分区定义，图 7 给出了分区定义的优化变量和优化结果，具体数值见表 1。5 个区域的点阵半径被重新分配，优化设计的质量略低于初始设计，但设计可靠度由 0.999 78 提升至 0.999 99，提高了 21%，达到可靠性提升目标。



(a) 优化变量分区示意

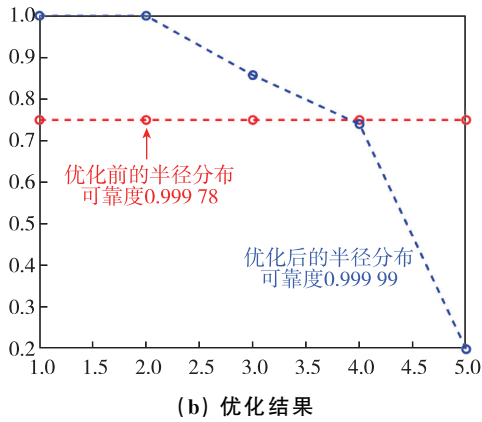


图7 优化变量及优化结果

Fig. 7 Optimization variables and result separation

表1 优化前后对比

Tab. 1 Comparison of before and after optimization

	点阵半径/mm	质量/kg	最大位移/mm	设计可靠度
优化前	(0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75)	2.453	0.69	0.999 78
优化后	(1.00, 0.98, 0.85, 0.74, 0.20)	2.425	0.66	0.999 00

#### 4 结束语

本文将结构多学科优化、工艺成型过程仿真、无损检测及逆向重构技术等先进手段融入设计制造流程,把设计、仿真和制造有机统一起来,通过仿真驱动设计来提高产品质量、降低制造成本。未来对复杂产品设计和增材制造产品的需求量都将大幅度提升。单件小批量高性能制造的高附加值复杂产品运用设计制造一体化技术,对降低产品制造成本,提高产品质量有着重要的意义。

引用格式:牛飞,杨东生,许俊伟,等.面向3D打印的设计制造一体化探索[J].宇航总体技术,2023,7(5):45-50.

Citation: Niu F, Yang D S, Xu J W, et al. Exploration of design and manufacturing integration for 3D printing [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023,7(5):45-50.

#### 参考文献

- [1] 卢秉恒.增材制造技术——现状与未来[J].中国机械工程,2020,31(1):19-23.
- [2] 齐晓明,刘少岗,张义飞.面向增材制造的设计方法研究及展望[J].机械设计,2021,38(2):1-9.
- [3] Kumke M, Watschke H, Vietor T. A new methodological framework for design for additive manufacturing[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2016, 11(1): 3-19.
- [4] Ponche R, Hascoet J Y, Kerbrat O, et al. A new global approach to design for additive manufacturing [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2012, 7(2): 93-105.
- [5] 李涤尘,贺健康,田小永,等.增材制造:实现宏微结构一体化制造[J].机械工程学报,2013,49(6):129-135.
- [6] 刘书田,李取浩,陈文炯,等.拓扑优化与增材制造结合:一种设计与制造一体化方法[J].航空制造技术,2017,60(10):26-31.
- [7] 全栋梁,时光辉,关成启,等.结构优化技术在高速飞行器上的应用与面临的挑战[J].力学与实践,2019,41(4):373-381,415.
- [8] 冷俊.航空产品设计制造一体化创新研制关键技术分析[J].大众标准化,2021(1):46-48.
- [9] 党卫兵,徐增光,郑丹力,等.基于MBD的航天设计制造一体化研究与应用[J].空天防御,2018,1(3):38-43.
- [10] 张振伟.基于PDM的离散制造企业设计制造一体化技术[J].设备管理与维修,2022(2):28-29.
- [11] Chang K H, Tang P S. Integration of design and manufacturing for structural shape optimization[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(7): 555-567.