

文章编号: 2097-1974(2024)05-0034-07

DOI: 10.7654/j.issn.2097-1974.20240506

液体火箭发动机设计工艺可行性研究

胡海峰, 高新妮

(航天液体动力全国重点实验室, 西安, 710100)

摘要: 分析了液体火箭发动机产品实现设计工艺特性, 应用模型定义 (Model based Definition, MBD) 技术表征液体火箭发动机产品加工信息, 在此基础上分析了设计工艺可行性审查实现技术途径, 结合产品设计制造特点开发了液体火箭发动机面向制造的设计 (Design for Manufacture, DFM) 工艺性审查系统。该系统以MBD模型为载体, 将发动机产品加工信息、尺寸信息、材料等属性信息通过PMI标注方式表达, 开发模型检查工具, 实现了在设计阶段对产品几何模型进行自动化工艺检查的目标, 对产品工艺可行性进行了分析。通过与工艺规则库匹配, 给出设计人员检测分析结果, 供设计人员进一步优化改进设计。通过采用工艺可行性分析手段, 在设计阶段提升了产品的工艺可行性, 减少产品制造过程中的设计、工艺更改, 缩短了产品研制周期。

关键词: 基于模型定义; 工艺可行性; 面向制造的设计; 液体火箭发动机; 开发与验证

中图分类号: V434.34

文献标识码: A

Research on the Feasibility Analysis of Design Technology for Liquid Rocket Engine

HU Haifeng, GAO Xinni

(National Key Laboratory of Aerospace Liquid Propulsion, Xi'an, 710100)

Abstract: The Model based Definition (MBD) technology digital process verification approach is examined. A process verification system for Design for Manufacture (DFM) is introduced. The system uses PMI, or product and manufacturing information, as a vehicle to express product processing information and dimensional information. In the concept design phase, the automatic process testing of the product geometry model is realized, and the viability of the product process is examined, thanks to the development of the model testing tool. The test's outcome is evaluated in accordance with the guidelines for producing liquid rocket engines. The designer can adjust and enhance the sketch of the geometry for the liquid rocket engine in light of the outcome. By using DFM, the process accessibility of the product in the design phase is improved, the design and process changes in the product manufacturing process are reduced, and the product development cycle is shortened.

Keywords: Model based Definition; feasibility analysis; Design for Manufacture; liquid rocket engine; development and validation

0 引言

航天液体火箭发动机产品具有多品种、小批量、定制化等特点^[1]。为了进一步提升性能和可靠性, 液体火箭发动机产品结构复杂度、集成度大幅提高。随着产品复杂度提升, 发动机加工实现的工艺难度也随之增大, 但是发动机研制生产交付周期缩短, 如何实现产品的快速高效制造成为了研究的重要方向。面向制造的设计 (Design for Manufacture, DFM)^[2], 在设计阶段提升工艺可行性是一个重要的应用措施。在

液体火箭发动机产品研制过程中, 考虑产品全生命周期内设计、生产等不同阶段, 及时全面评价产品设计工艺可行性, 提出针对性改进的意见建议, 及时改进产品方案, 保证产品功能、性能满足要求, 减少迭代过程, 以达到降低产品成本、提高产品质量和提升产品研发效率的目的。

1 研究现状分析

国内外在产品领域围绕DFM开展了大量的实

践及理论分析。20世纪70年代，机械行业采用DFM方法实现了简化产品结构、降低加工成本、提高产品加工效率的目标。1991年，DFM的应用成为美国提高制造业竞争优势的加速器，时任美国总统布什授予了DFM技术创始人P·德赫斯特赫G·布斯劳美国国家技术奖^[3]。在国防军事、农机电器、通信设备等领域的制造单位广泛采用DFM技术提升研制效率。

美国的DARPA、DoD、NIST等机构长期以来一直支持DFM等相关技术的研究^[4]，在大型的航空企业中广泛应用DFM技术，取得了显著的效果。在麦道Northrop B-2轰炸机的研制中也大量采用了DFM、制造一体化集成技术，使设计和制造中因返工、废品和缺陷造成的故障率降低了60%，研制周期缩短了50%以上。在波音公司，其制造过程中的一个重大难点是孔加工，通过采用DFM的设计策略，以焊接工艺替代了原来的铆接等连接方法，减少了孔加工设备，同时提高了产品质量。中国航空航天及机械行业学者持续关注DFM领域的研究发展，同时也开展了大量的理论研究及实践。何煜琛等^[5]开展了制造企业DFM的研究，提出了设计工艺制造全局变化的观点，评价加工可制造性的相应准则。范庆明等^[6]结合机械产品并行工程的思想，对DFM进行了分析，讨论了DFM与并行工程之间相互支撑的关系，同时对产品零件的可制造性进行了评价。刘适^[7]开展了飞机典型加工特征DFM研究，重塑加工工艺过程，加强了飞机典型结构设计的规范性，数控工艺加工难度明显降低，产品制造效率提升。王威等^[8]通过调研分析军工企业研发生产的特点，系统梳理了军工科研单位在开展面向制造设计方面的技术难点，同时提出了解决方案。尹大鹏^[8]通过DFM技术分析了提升航天产品质量和管理水平的方法，通过生产过程控制确保产品质量。

在液体火箭发动机领域，面向制造的设计相关技术论文发表较少。本文分析了目前液体火箭发动机设计制造过程中的突出问题，对推广DFM开展了关键技术分析，给出了相关软件框架。针对液体火箭发动机制造过程工艺性进行分析，开发了相应的软件系统，结合管路设计验证了软件工具的有效性、准确性和便捷性。

2 液体火箭发动机研发过程分析

2.1 液体火箭发动机设计现状

液体火箭发动机系统包括总装机架、涡轮泵、推

力室、阀门、总装直属件等类别。液体火箭发动机的设计研制，首先根据总体提出的发动机系统设计输入完成发动机方案设计和结构设计，完成产品结构^[9]设计，将相关的加工制造信息标注在二维图纸或三维模型上，通过三级审签，将二维图纸晒蓝或受控三维模型下厂作为产品加工的依据。设计人员通过串行会签与工艺人员协同，最终确定产品图样或模型技术状态。通过分析上述过程，研究在结构设计环节引入设计制造的可行性，使设计与工艺提前协同，提升产品的可制造性，同时缩短研制周期。

2.2 液体火箭发动机DFM需求分析

可制造性设计的过程主要有5方面内容：通过分析构建DFM规范、建立工艺检查表、形成分析报告、开展测试、分析评价工艺可行性。构建DFM规范，需要针对液体火箭发动机产品特点，围绕设计、生产、试验、服务等阶段分析研发全生命周期常用的检测规则，构建数字化工艺规则库，把设计规则和工艺规则的规则库与CAD工具集成，改变传统的研制模式。工艺人员在产品型号研发阶段就开始充分参与，通过数字化工艺规则库中的分析规则，快速发现制造中可能存在的工艺性问题，进而做出预见性的决策，使产品一次性制造成功。图1为基于三维模型的发动机设计制造工艺可行性分析整体框架。

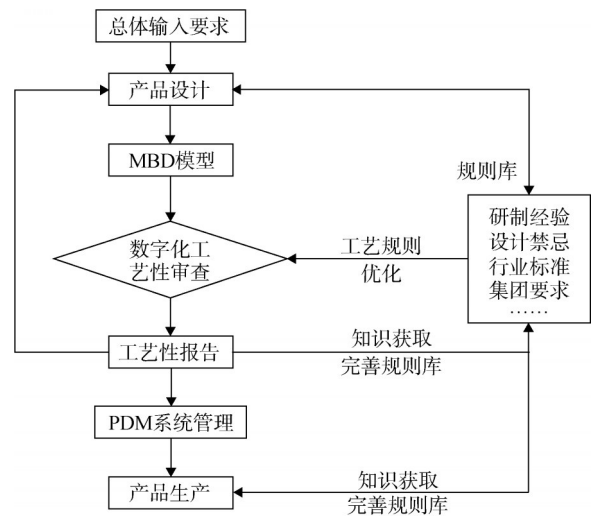


图1 基于模型的设计工艺可行性分析框架

Fig.1 MBD feasibility analysis framework

制造可行性检查需要信息载体，传统的二维图纸信息很难自动提取转化。模型定义（Model based Definition, MBD）是一种将产品的所有设计结构尺寸、工艺描述、材料属性和管理等信息都定义在产品三维模型中的表达方法^[10]。三维MBD技术为设计信

息表达提供了新的解决方案。本文以发动机MBD模型为信息载体，开展工艺可行性检查分析。

3 液体火箭发动机工艺可行性系统技术方案

3.1 液体火箭发动机工艺可行性系统

液体火箭发动机工艺可行性分析系统需要设计工艺性检查工具应用、规则库梳理标定、产品数据管理

(Product Data Management System, PDM)系统集成，最终实现三维模型的高效工艺性审查功能。建立符合液体火箭发动机工艺性要求的规则库，并实现在PDM系统中对规则库和工艺检查报告的统一管理，保证工艺规则的有效性和唯一性，完成规则库的快速调用和分析报告的快速上传。图2为液体火箭发动机工艺可行性检查系统总体技术方案架构。

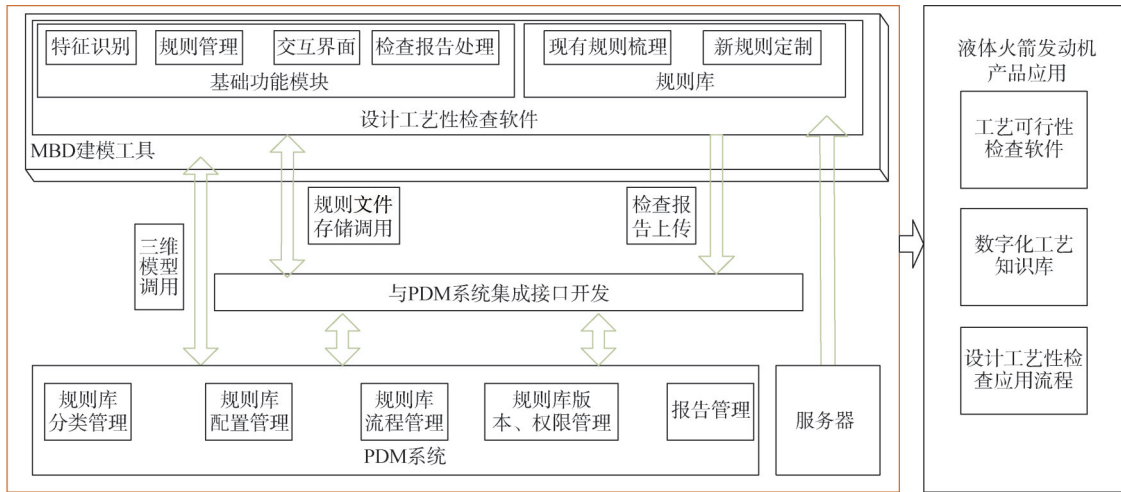


图2 总体技术方案架构

Fig.2 Framework for the general technical program

3.2 技术原理

设计工艺可行性检查工具软件能够实现与MBD建模工具的无缝集成，基于标准规范和生产加工能力对液体火箭发动机零部件进行可制造性分析，并提出

合理的改进建议，同时支持和模型的高亮交互显示，以便设计人员跟踪问题和快速定位，工艺人员审查完成后，可以快速生成模型的工艺审查报告。图3为软件的应用技术原理。

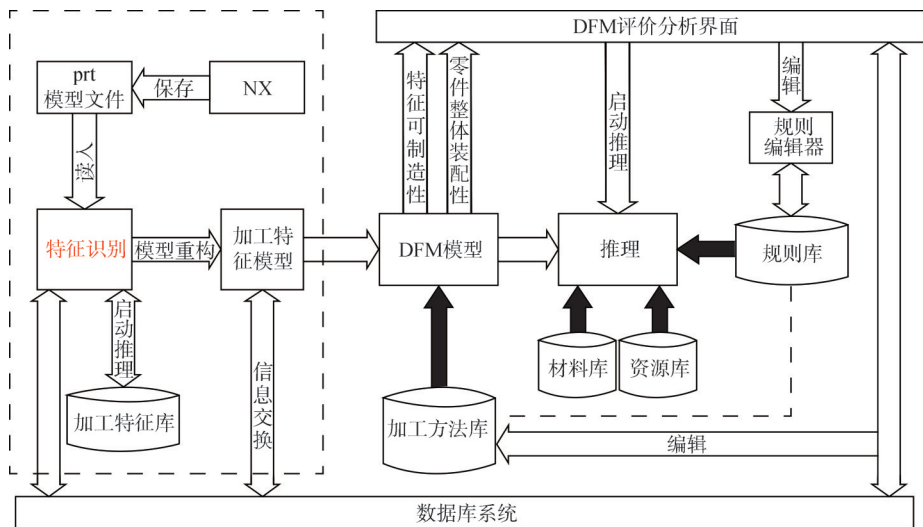


图3 可行性检查技术原理

Fig.3 Principles of feasibility inspection technology

3.3 三维标注数据组织方式说明

采用三维模型标注方法实现液体火箭发动机产品

的加工制造信息表达^[11]，通过预设建模模板，确定模型中基本属性以便后续自动化提取信息，同时，PMI

标注信息能够完整表示产品的加工实现过程。针对液体火箭发动机产品加工过程所需要的相关信息进行梳理,围绕几何元素、基准、尺寸、公差、粗糙度、精度、热处理方式等进行结构化分类管理。图4为基于NX三维建模工具构建的MBD模型数据集信息构成。

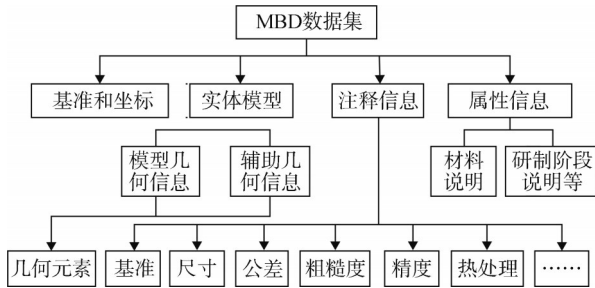


图4 NX模型MBD信息构成

Fig.4 The MBD information composition based on NX model

通过建模工具二次开发技术,获取三维MBD模型上的PMI特征信息,通过与规则库知识匹配,对信息进行分类过滤,评估三维建模的工艺可行性。图5为典型特征识别的流程。

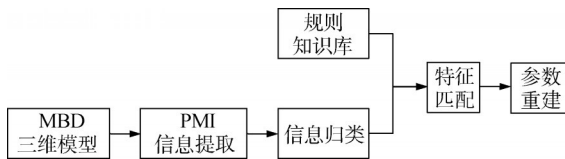


图5 典型特征识别的流程

Fig. 5 The process of typical feature recognition

在获取MBD模式的几何图元信息基础上,识别建模过程中的关键特征模型。对于液体火箭发动机,机加工工艺模块可以识别孔、腔、倒角、槽、凸台等特征;钣金工艺模块可以识别壁、孔、面、边缘、切口、凸起、折边等特征;铸造模块可以识别孔、肋板等特征。PMI信息与基础的特征及图元信息结合,能够获得与发动机产品相关加工信息完整的结构化信息。图6为MBD模型中形状特征分类。

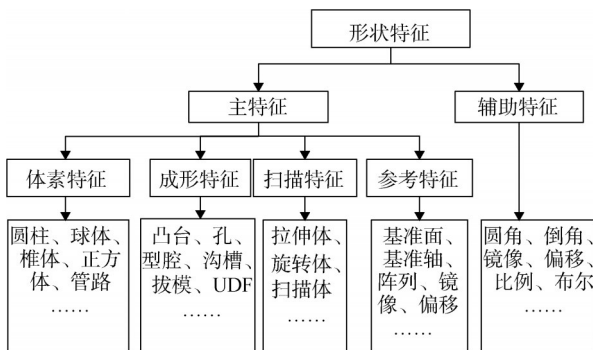


图6 MBD模型中形状特征分类示意

Fig. 6 Illustrative classification of shape features in MBD model

3.4 液体火箭发动机工艺规则库建设

液体火箭发动机作为机械产品,加工主要工艺包括机加工、装配、铸造、弯管、焊接、钣金等。根据研制经验积累,在设计禁忌、工艺禁忌基础上,综合产品实现过程中设备、工装、人员配置和成本等多种因素,最终形成液体火箭发动机产品加工工艺规则库。表1为部分规则示意。

表1 液体火箭发动机设计工艺规则库

Tab.1 Liquid rocket engine design process rule library

功能项	规则检查示例	检查内容
通用规则库	三维标注有效性检查	检查三维标注中的无效尺寸,即由于零件更新或者删除等原因导致尺寸标注不具备实际意义的尺寸。
机加工规则库	沉头孔边缘	沉头孔设计在零件边缘,孔口不全且该孔在零件内的面积大于孔截面积的50%时应尽量改成铣刀加工的豁口设计,避免产生毛刺。
钣金规则库	钣金件沉头孔到折弯距离	如果沉头孔到钣金折弯处的距离小于最小值,在零件加工的过程中孔特征不仅不易加工成型而且容易导致该处开裂褶皱。
装配规则库	孔对齐检查	检查为安装紧固件而设计的孔的对齐情况可以避免在装配过程中遇到问题,同时用户也可以检测堵塞孔和无用孔。
铸造规则库	铸造孔的最小孔径和深径比检查	压铸件对要求不高的孔可以直接压出,为了保证铸件有良好的成形条件,铸造加工的孔的直径和深度-直径比应满足一定限制。
弯管规则库	弯管折角不应为锐角	为了避免折弯后弯管发生变形,导致强度降低,弯管折角不应为锐角。
焊接规则库	点焊的焊点间距检查	为降低分流现象对焊点强度的影响,点焊接头的点距设计应合理。
发动机设计规则库	模板检查	三维模型是否采用所标推进的建模模板,属性信息是否完整。

工艺规则库设计主要分为机加工、钣金、装配、铸造等类别,主要方法步骤包括分类、筛选、参数配置、关键度配置、数据库配置等。

规则管理需要对工艺知识库进行自定义配置,规则库中包括多个工艺类别,客户端的规则管理器界面分类清晰,可以方便快捷地完成现有规则的参数定义、数据库的导入等,并支持基于现有的开发技术和识别特征范围对用户提出的规则开发需求进行定制开发和扩充。当产品设计人员初步筛选完规则后,需要仔细查看每条规则的参数,了解参数配置方式,确认是否与相关的工装设计标准切合,如果没有不符,可以参照设计、制造专业或行业的相关经验进行参数配

置。图7为规则配置的原则，其中关键度的定义原则 如表2所示。

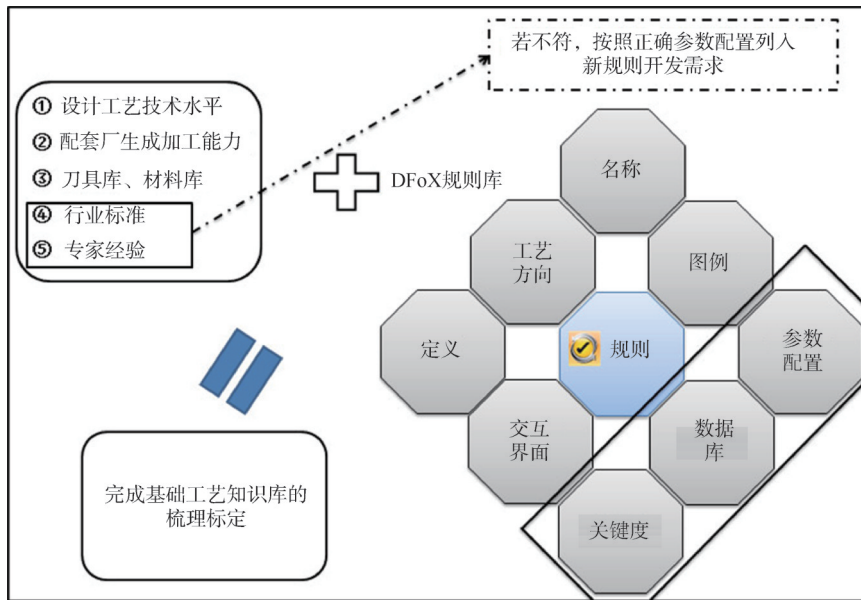


图7 规则配置示意

Fig.7 Rule configuration scheme

表2 工艺规则关键度定义原则

Tab.2 Definition of criticality of process rules

关键度	定义原则
禁用(关键)	如果发现关键度为高的工艺性问题,设计必须进行优化。
限用(中)	如果发现关键度为中的工艺性问题,设计与工艺之间需要通过不同程度的沟通和协商讨论是否进行修改。如果在满足性能和功能的约束下,可以优化并且能够达到节约时间和成本的目的,需要进行设计优化。
提示(低)	关键度定义为低的设计工艺性问题,只做提醒,使用者可以忽略此种设计特征。

3.5 PDM系统集成

产品PDM是管理三维模型的系统工具。航天产品质量管理要求采用三级审签模式对文件进行质量确认,因此,围绕可行性检查的结果可以作为结果

文件进行管理。设计人员可以基于PDM线上环境,完成一套完整的产品三维模型设计工艺性检查。图8为可行性检查系统工具与PDM系统集成应用原理示意。

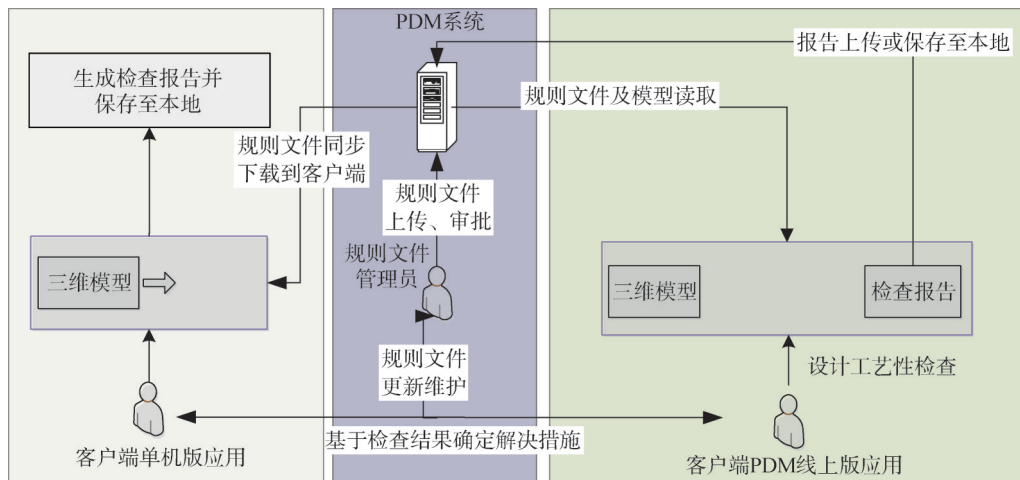


图8 与PDM系统集成应用原理示意

Fig. 8 Application principle of integration with PDM system

a) 设计人员利用三维建模软件读取保存在PDM上的三维模型, 利用工艺可行性检查软件选择保存在PDM上的最新检查规则文件, 对产品三维模型进行设计工艺性检查;

b) 完成对产品三维模型的设计工艺性检查后, 一键式生成检查报告, 可选择将报告上传至PDM中与模型关联(上传报告格式为MS Excel), 还可以选择将报告下载至本地任意位置, 也可以同时实现上传和下载, 按需操作;

c) 设计人员可以基于检查结果及时解决问题, 其中对于检查规则参数等问题, 可以与规则管理员及时沟通反馈。

4 典型示例

液体火箭发动机中广泛采用小导管结构, 实现流体或者气体控制。在复杂工作环境下导管设计有很多禁忌约束。以某导管为例开展工艺性检查, 打开规则管理器, 其中包括弯管半径、管路外径、管路间距等特征识别规则, 并利用软件对三维模型相关特征进行识别、分析, 具体见图9, 通过分析辨识出折弯半径、弯管折弯夹角、管路长度、折弯半径与管路直径比值4个规则的量化结果, 为管路设计提供了参考。

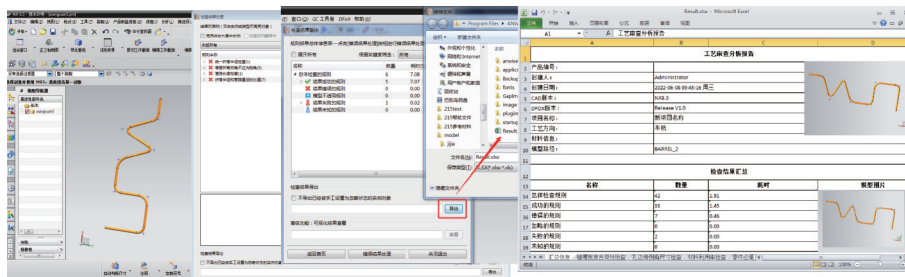


图9 管路DFM检查示意

Fig. 9 Diagram of pipe DFM check

5 结束语

本文针对液体火箭发动机产品结构工艺可行性分析开展专题研究, 分析了目前产品实现过程中的工艺现状、能够实现的产品加工精度, 形成了液体火箭发动机机加工、钣金、铸造和装配等工艺规则库, 建立了数字化制造工艺知识库, 将产品工艺实现经验进行积累传承。通过软件开发, 实现了在设计阶段对产品几何模型的自动化工艺检查, 对产品工艺可行性进行了分析。确保了三维模型的建模规范性、工艺可行性, 审查效率大幅提高。通过采用工艺可行性分析手段, 在设计阶段提升了产品的工艺可行性, 减少了产品制造过程中的设计、工艺更改, 缩短了产品研制周期。

参考文献

[1] 包为民, 汪小卫, 董晓琳. 航班化航天运输系统对动力的发展需求与技术挑战[J]. 火箭推进, 2021, 47(4): 1-5.
BAO Weimin, WANG Xiaowei, DONG Xiaolin. Development demands and challenges of propulsion technology for space transportation system in airline-flight-mode[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2021, 47(4): 1-5.

[2] 钟元. 面向制造和装配的产品设计指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
ZHONG Yuan. Design for manufacturing and assembly[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.
[3] 张俊. 数字化制造关键性技术进展之DFM[J]. CAD/CAM与制造业信息化, 2008(6): 8-10.
ZHANG Jun. The progress of key technologies in digital manufacturing: DFM[J]. Intelligent Manufacturing, 2008(6): 8-10.
[4] 张旭. DFMA技术在航空工业中的应用[J]. 航空制造技术, 2012, 55(6): 26-29.
ZHANG Xu. Application of DFMA in aviation industry[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(6): 26-29.
[5] 何煜琛, 张和明, 刘成颖, 等. DFM的关键技术与实现模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(11): 45-49.
HE Yuchen, ZHANG Heming, LIU Chengying, et al. The key technology and application modes of DFM[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2001, 7(11): 45-49.
[6] 范庆明, 刘红军. 并行工程下的面向制造的设计[J]. 机械工程与自动化, 2011(5): 212-213.
FAN Qingming, LIU Hongjun. Design for manufacturing under concurrent engineering[J]. Mechanical Engineering & Automation,

- 2011(5): 212-213.
- [7] 刘适. 面向飞机结构件数控加工的DFM方法研究[J]. 制造技术与机床, 2021(2): 66-69.
LIU Shi. Research on design for manufacture of NC machining for aircraft structural parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(2): 66-69.
- [8] 王威, 张伟, 刘剑, 等. 军工科研单位DFM工作的推广策略[C]. 成都: 第十三届中国高端SMT学术会议, 2019.
WANG Wei, ZHANG Wei, LIU Jian, et al. Promotion strategy of DFM work in military scientific research units[C]. Chengdu: The 13th China High-End SMT Academic Conference, 2019.
- [9] 尹大鹏. 面向航天产品制造过程的质量管理方法研究[J]. 国防制造技术, 2016(3): 42-44.
YIN Dapeng. Research on quality management methods for the manufacturing process of aerospace products[J]. Defense Manufacturing Technology, 2016(3): 42-44.
- [10] 胡海峰, 刘芬, 许婷, 等. 液体火箭发动机协同设计平台关键技术[J]. 火箭推进, 2020, 46(4): 82-89.
HU Haifeng, LIU Fen, XU Ting, et al. Key technologies of collaborative design platform for liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2020, 46(4): 82-89.
- [11] 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.
DANG Weibing, XU Zengguang, ZHENG Danli, et al. Research and application of aerospace design and manufacturing integration based on MBD[J]. Air & Space Defense, 2018, 1(3): 38-43.

作者简介

胡海峰 (1986—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为液体火箭发动机数字化设计仿真分析。

高新妮 (1984—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机设计。

(上接第33页)

- [10] 付军锋, 赵凤红. 膨胀循环液体火箭发动机推力调节阀仿真研究[J]. 火箭推进, 2013, 39(6): 12-18+59.
FU Junfeng, ZHAO Fenghong. Simulation of thrust regulating valve of expansion cycle liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2013, 39(6): 12-18+59.
- [11] DAIWA Satoh, SEIJI Tsutsumi, MIKI Hirabayashi, et al. Estimating model parameters of liquid rocket engine simulator using data assimilation[J]. Acta Astronautica Volume, 2020(177): 373-385.

作者简介

董立宝 (1996—), 男, 工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机系统。

张泽昊 (1997—), 男, 工程师, 主要研究方向为液体火箭发动机燃烧不稳定性。

何博 (1985—), 男, 副教授, 主要研究方向为液体火箭发动机燃烧不稳定性。

聂万胜 (1969—), 男, 教授, 主要研究方向为航天推进理论与技术。