

航空产品设计制造一体化创新研制关键技术

蒋 敏,余志强,王 攀

(航空工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610073)

[摘要] 以航空产品研制为对象,探讨了航空产品设计制造一体化创新研制关键技术,对研制过程中的基于MBD的航空产品单一数据源管理、基于精益化系统工程的航空产品研制业务流程建模与优化、基于成熟度模型的航空产品研制过程控制进行了研究,研究成果对促进复杂产品研制模式创新,提高我国航空行业研制水平具有重要意义。

关键词: 航空产品;基于模型的定义;成熟度模型;单一数据源;设计制造一体化

Key Technologies of Innovative Development for Aviation Product With Integration of Design and Manufacturing

JIANG Min, YU Zhiqiang, WANG Pan

(AVIC Chengdu Aircraft Industry (Group) Co., Ltd, Chengdu 610073, China)

[ABSTRACT] This paper discusses the key technologies of the integration of design and manufacturing for aviation product, especially for the management of single source of aviation product data based on MBD, aviation product development business process modeling and optimization based on lean system engineering, aviation product development process control technology based on maturity model. The research of this paper accelerates the evolution of the development mode of complex product, and also improves the development ability of aviation industry.

Keywords: Aviation product; Model-based definition; Maturity model; Single source of product data; Integration of design and manufacturing

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.22.095

航空工业是国家的“工业之花”,在外部竞争、客户需求的牵引和影响下,飞机产品研制模式的组织变革正在积极推进,缩短研制流程、提高产品质量已经成了迫切需要解决的问题,而通过设计制造一体化实现设计、制造的并行开展,则为该问题提供了有效的解决方法。飞机设计制造一体化是伴随全三维设计、MBD技术、模块化设计、关联设计、并行设计、协同设计、仿真验证技术、构型管理、成熟度管理等单点研制技术全面进步之后的一个新阶段,是对这些技术的综合集成^[1-5]。设计制造一体化是打破当前厂所分离状态的有效手段,已经成为飞机数字化设计制造发展的趋势和潮流。

目前,我国大部分航空企业在数字化设计、数字化制造、数字化管理、企业应用集成等领域均取得了显著的成绩^[6-7],构建了相对完善的数字化集成应用基础,但尚不足以支撑设计制造一体化的开展。具体而言,还存在以下问题:(1)研制过程缺乏单一数据源,导致设计制造过程中产品数据源头多且分散、关联性差、技术状态难以控制等问题;(2)研制业务流程缺乏优化和控制,

导致研制业务流程存在断点、执行周期长、难以实现研制业务横向集成和纵向管控。

针对上述问题,本文以航空产品研制为对象,探讨了航空产品设计制造一体化创新研制关键技术,对其中的基于MBD的航空产品单一数据源管理、基于精益化系统工程的航空产品研制业务流程建模与优化、基于成熟度模型的航空产品研制过程控制进行了研究。上述研究对促进复杂产品研制模式创新、提高航空研制水平具有重要的理论意义和实践价值。

1 基于MBD的航空产品单一数据源管理

针对航空产品设计、制造、试飞等研制过程中数据来源分散、关联性差、中间环节多、准确性无法保证等问题,根据设计制造一体化研制流程,通过基于MBD的航空产品单一数据源,实现设计和制造过程的数据交换和信息共享。

1.1 面向多厂所异地协同的单一数据源管理

由于航空产品本身的复杂性和研制流程的复杂性,

航空产品设计数据存在多种版本、构型、状态的区别。同时,航空产品的研发涉及大量协作单位的深度参与,分布式的数据源之间存在严密的逻辑关联。为了保证多版本、构型、状态区别的设计数据能够在多个单位间顺畅流通、准确辨识,需要对多厂所异地研发平台之间流通的数据加以严格管控,构建单一数据源,通过以MBD为核心的数据传递实现流畅、准确和清晰的数据共享和发放。

在飞机设计制造过程中,重点存在工艺审查和工程更改两个数据变更的环节,因此,从单一数据源管理的角度出发对这两个环节的流程进行规定。

(1) 工艺审查。

工艺审查的价值体现为设计阶段对产品的工艺/制造可行性进行分析和确认,以便尽可能将产品的工艺问题能够在设计环节进行发现和解决,促进产品研制质量的提高,并有效缩短研制周期。其流程如下:

基于成熟度数据的工艺预审。当设计数据在VPM系统中达到指定成熟度后,制造单位的工艺人员进行设计数据的工艺性分析,及时发现、分析和解决工艺性问题。

设计数据部门发布。当设计数据达到部门发布成熟度后,设计数据导入PDM系统。导入PDM的数据则是专业部门审核和批准的设计数据。

设计数据工艺审查/预分工。设计数据导入PDM系统将启动正式的工艺审查。在工艺审查环节,

制造单位工艺人员完成工艺审查并录入初步的工艺分工信息。

设计数据所内批准。设计数据履行完成审批流程后,表明该数据已达到发放状态并成为正式的设计数据,将通过协同平台进行数据的正式发放和接收。

(2) 试制协调/工程更改。

随着研制工作的推进,工作重心将从以设计为核心逐步过渡到以工程试制为核心的工作模式。生产现场的试制协调工作,以及所产生的工程更改将是该阶段的工作重心。其流程如下:

现场问题分析与确认。设计人员对试制现场的问题(如零件设计问题、零件工艺性问题、装配协调问题等)进行分析和确认,与工艺、制造人员共同协商处理方式,并对问题进行归类,分别适用不同的处理流程。

现场发起更改申请。当生产现场发现的问题涉及到需要多专业协调分析才能确认并提出解决方案时,需要设计人员在设计单位提出更改申请,并执行协同平台的工程更改业务流程进行现场问题的处理。

设计数据更改落实。对于生产现场反馈的需要对设计资料进行落实的问题,在协同平台内依据更改类别判定执行相应的更改程序,并最终做到设计更改归零。

1.2 航空产品全生命周期XBOM多视图管理

BOM (Bill of Material)是以产品结构为核心组织的各种数据的总称。不同部门、用户角色对数据的

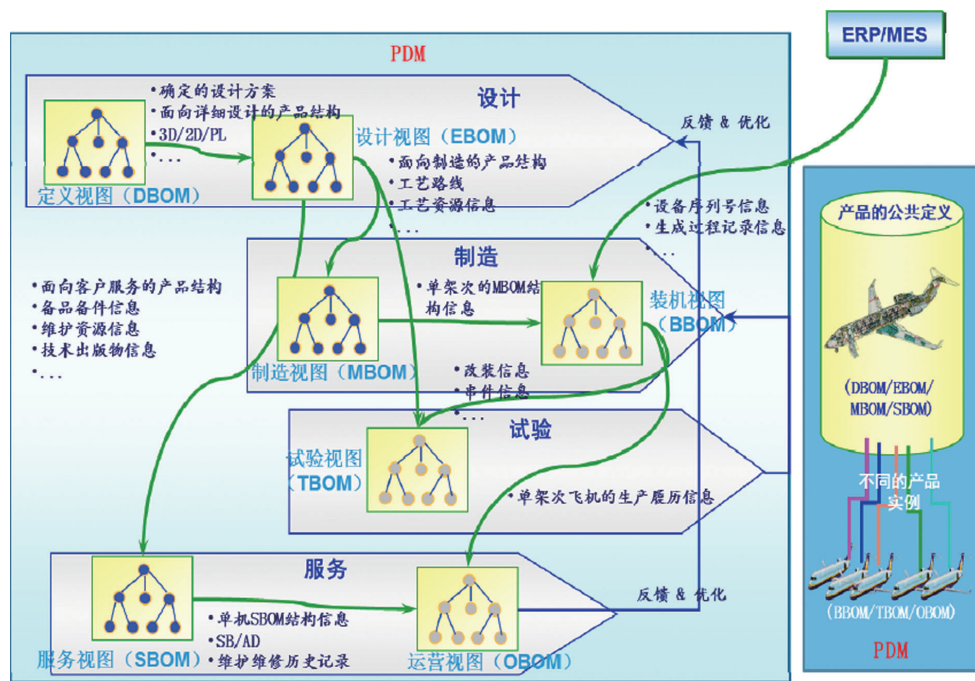


图1 基于XBOM的业务框架
Fig.1 XBOM-based business framework

要求不尽相同,因此从不同视角对飞机型号的结构组成也有不同的理解。基于XBOM的总体业务框架如图1所示,通过EBOM、MBOM、BBOM等BOM的有效管理,对产品不同阶段的数据进行有效组织、管理,实现技术状态的控制和质量追溯。

对于制造企业,最重要的是其中的EBOM和MBOM:

(1) EBOM 管理。

EBOM是企业产品设计部门用来组织和管理构成某种产品所需的零部件物料清单^[8]。产品设计工程师根据客户需求或者设计要求完成产品设计工作后,设计BOM从设计图纸提取产品名称、产品结构、零部件的版本和有效性、物料明细表、产品使用说明书等相关数据。就目前航空工业而言,一般设计和制造分别属于不同的企业,从信息化建设来说,制造和设计一般都拥有自己的产品数据管理平台,制造和设计属于紧密协同单位。制造厂数据管理平台中,EBOM管理需要与设计数据管理平台上EBOM结构保持一致,设计端的改动需要及时体现到制造端,制造端的一些意见也需要及时反馈到设计端。

(2) MBOM 管理。

MBOM为制造物料清单,是一种基础性的数据共享资源,被广泛应用于生产计划、工艺分工、质量保证、物料供应等各个环节。MBOM作为制造部门主要数据,是MES、ERP系统运行所需的基础数据,确保MBOM的完整性和准确性是有效协调各部门的工作的基础,对于缩短生产准备周期具有十分重要的作用。

飞机工艺处理过程的复杂性和对经验的高度依赖,导致了从EBOM到MBOM直接自动转化的难度极大,需要对MBOM进行各种专门的处理和应用,将其中隐含的BOM信息提取出来,以显式的形式表达和管理^[9]。由于飞机不同架次的MBOM很可能不一样,则每一架次都需要以装配数据为基础运算生成一套完整的MBOM。MBOM的生成是对装配工艺中隐含的BOM结构及各结点本身的相关信息提取和重构的过程,通常遍历各装配单元、AO等查找相关信息,并且将这些信息记录在MBOM数据库中。

2 航空产品研制业务流程建模与优化

针对航空产品研制流程中业务活动数量庞大,活动之间关系复杂,航空产品研制企业缺少对流程的规范与优化等问题,以产品单一数据源为基础、数字样机为中心、三维数字量为主要传递方式,开展基于精益化系统工程的航空产品研制业务流程建模与优化。

2.1 流程驱动的多学科、多项目协同管理

通常的项目管理是单项目管理,即项目的资源得到保障的前提下进行的项目管理。与之不同的是,多项目管理是在存在多个项目的前提下,重点考虑如何协调和分配现有项目资源以获取最佳项目实施组合的管理过程。

各业务部门都会接到不同的项目任务,一些复杂的任务可能会涉及到不同的专业部门参与,项目的计划也是从纲要里程碑到详细的项目计划。因而根据项目群不同管理层次的分工通过多级计划控制体系来实现对项目群目标与责任的分解及项目群各项目实际进展状态的动态反馈。

从专业部门到项目组成员与WBS在每一级一一对应,都可以建立组织分解结构(OBS),并确定计划任务责任图,即构建以组织单元为行、工作元素为列的责任图以定义项目实施过程中单位和个人的角色和责任。

工作界面是项目中各个参与单位之间的交接点,包括上游工作完成节点和需要交付给下游工作的节点。界面计划在上下游作业之间约定交付的信息范围、类型、约束和交付的时机,并在执行中加以监督协调。

2.2 设计制造一体化关键业务流程优化

如图2所示,根据基于模型的产品研制业务流程,首先是总体部门提出顶层的功能,并定义各顶层功能之间的接口和数据传递关系,定义功能能够实现的需求。然后各专业基于总体分配的功能分解,完善子功能,定义子功能间的接口和数据传递关系,定义子功能能够实现的需求。最终形成完整的产品功能树,确保功能完全能够实现产品功能需求,并能够约束、指导产品的集成测试。

在整个产品研制流程吸收引入系统工程模型的价值,每个环节充分利用系统工程模型的优势,提升研制效率和效果,在此基础上研究重构研制流程,调整环节业务重点,重新排列环节顺序,优化业务流程:

(1)在初步设计阶段和详细设计阶段,制造就参与框架的布置,细节设计的工作。负责结构设计的团队中加入负责工艺设计等制造环节的工程师。

(2)在布置结构框架的同时,制造工程师开始构思可能的装配和工艺,给出制造方面的评估意见。

(3)细节设计开展后,制造工程师根据制造的习惯和需要,构思装配过程。细节零部件的产品结构要经过制造工程师认可,体现实际装配顺序和组合关系。

(4)在详细设计达到足够成熟后,同步开展工艺设计,并将工艺设计中发掘的问题即时反馈到详细设计,以便优化和修改。详细设计结果必须经过工艺性审查才能发放制造。

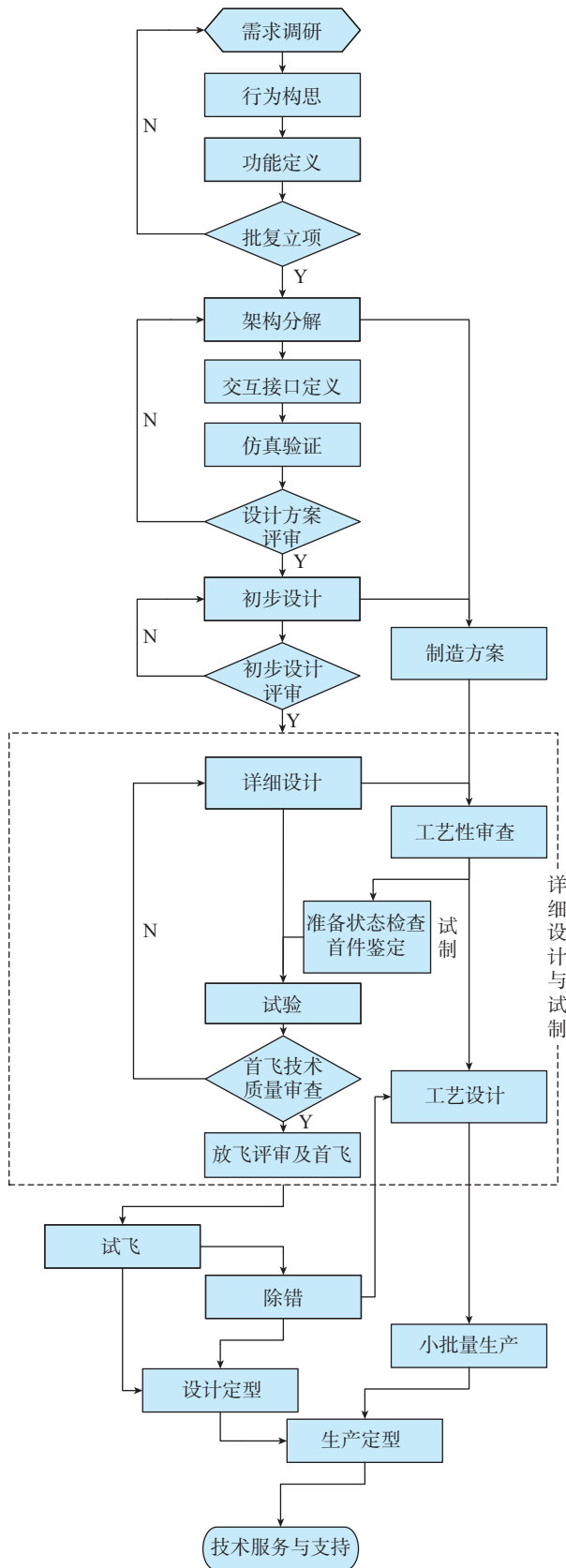


图2 基于系统工程模型的研制流程

Fig.2 Developing process model based on system engineering

3 基于成熟度模型的航空产品研制过程控制

为了在航空产品研制过程中实现上下游多专业并行协同,让工艺设计与生产准备等工作在设计数据正式发放前可以提前介入并开展工作,使航空产品研制过程具备可追溯性,提高发放前设计数据质量,从而提升航空产品研制质量、缩短整体研制周期,实现以项目为中心向以流程为中心的模式转变,开展基于成熟度模型的航空产品研制过程控制。

3.1 航空产品研制业务流程的成熟度模型

为了系统、全面的构建面向航空产品设计与制造的成熟度模型,基于系统工程中的霍尔三维结构模型,通过重新定义各维度的参数,用于确定成熟度模型边界,如图3所示。其中,时间维包括方案设计、初步设计、详细设计、工艺设计、工装设计,专业维包括总体、结构、系统、管路等,数据维主要是定义每个阶段多个专业需要共享的数据内容。

根据上述方法确定成熟度模型的系统边界,以时间维为主视图,构建了如图4所示的成熟度建模流程。

通过对航空产品业务流程的梳理,将主要业务按流程图串联起来,为开展业务流程划分,确定成熟度等级提供模型依据。

3.2 基于成熟度模型的飞机研制流程双向跳转

根据航空产品成熟度模型,有针对性地在产品研发不同阶段,根据各环节研究所到状态,即产品成熟状态,分步把控项目研发的进程,及时发现并解决问题,降低项目的风险和成本,将项目研究的成果最大化,综合优化产品的设计和研发工作。

里程碑是一个中间对象,它将研制流程和产品成熟

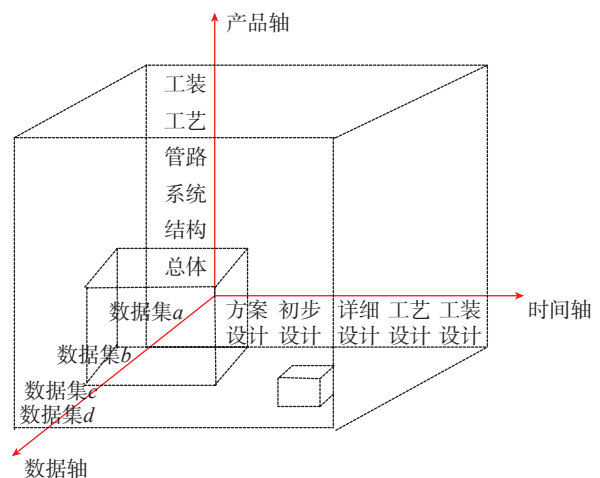


图3 航空产品成熟度系统维度

Fig.3 Aviation product maturity system dimension

度结合在一起,对研制中一定阶段所要达到的重要事件和措施进行控制。只有符合里程碑要求的产品研制内容才能进入下一流程,以此来保证研制流程的有效性和畅通性。

产品成熟度的定义和划分是实现并行协同设计的关键。基于产品成熟度的并行协同设计模式使得下游

部门提前介入产品设计成为可能,并且能够在提前介入中发现产品的制造问题和质量隐患,从而提高产品一次制造合格率,减少设计返工。同时,下游部门可以提前进行备料、排产等准备工作,能够有效缩短产品生产周期。

在产品设计中,产品成熟度也可能发生反向降低,发生研制流程的逆向跳转,如图5所示,在这种情况下,同样基于成熟度模型,建立产品成熟度降级更改流程,实现基于成熟度模型的产品研制流程双向跳转控制。

3.3 基于成熟度等级的飞机多学科专业协同

复杂的航空产品协同设计可描述为一个多维设计活动状态空间:产品研发对象维、产品研发专业维、产品研发设计进程维、产品研发任务维和产品研发约束维,产品研发的任意环节任意对象,都可以通过以上5个维度进行具体描述。产品协同设计的层次模型具体如图6所示。

根据航空装备制造企业组织结构划分,参与飞机研发的主要部门有总体、结构、系统、工艺、工装,进一步根据该企业并行工作模式,定义了上述不同阶段多部门协同关系。

多专业协同过程图充分体现了多维建模所提出的需求,将整个多专业协同设计过程用执行流程的形式模拟了出来。进度维和专业维以横向和纵向的形式表示,任务维、约束维和对象维则具体体现在了流程中。

整个协同设计过程是从总体专业开始设计工作,在总体专业完成部分工作后,达到约束点,触发协同工作事件,设计部门结构和系统根据已有数据信息开始部分工作任务,遵循基本的顺序流程。而工艺和工装专业则

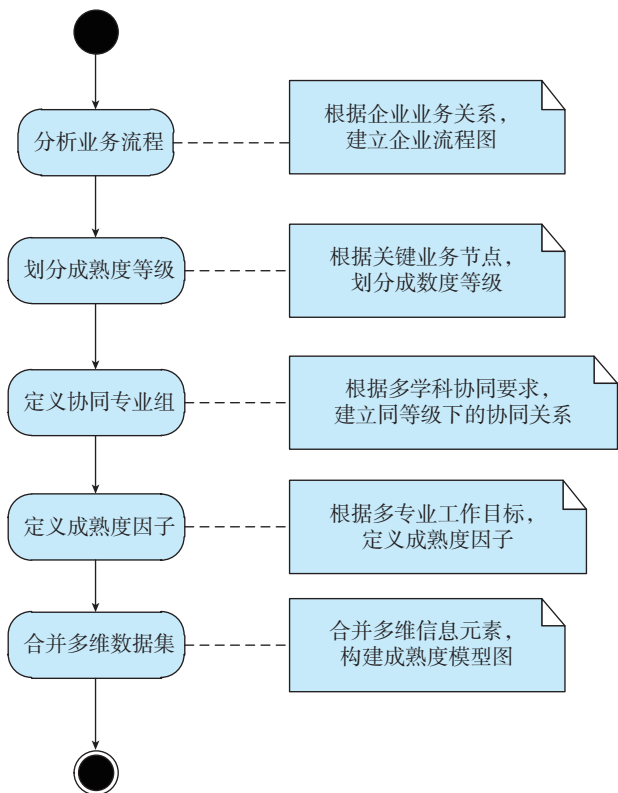


图4 成熟度建模流程
Fig.4 Maturity modeling process

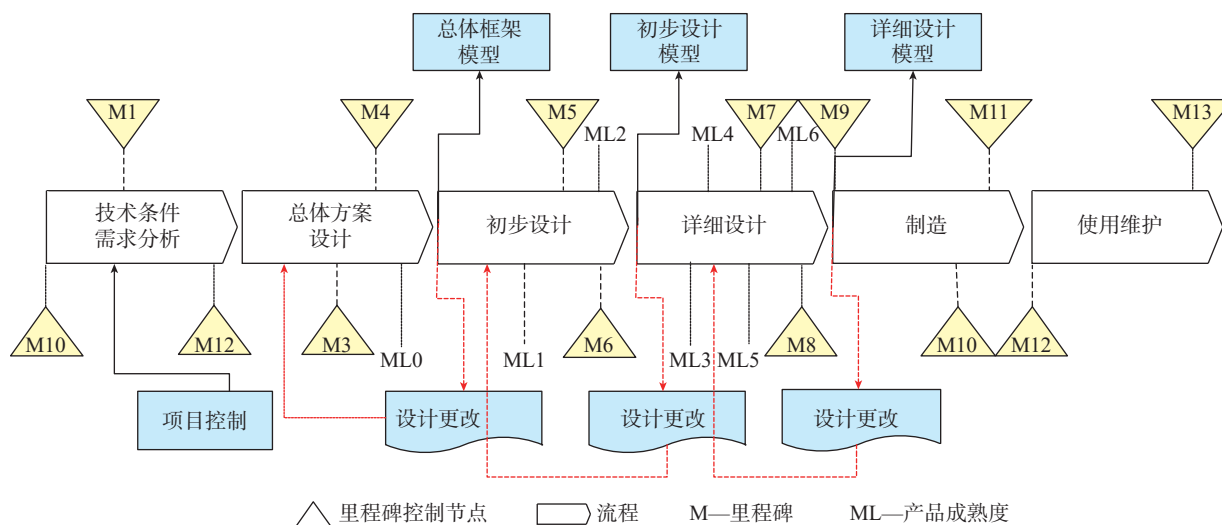


图5 基于成熟度模型的飞机研制流程双向跳转
Fig.5 Two-way jump of aircraft development process based on maturity model

更多地体现并行关系,在总体、结构或系统要开始某项任务时,工艺和工装则也同时开展相应工作,工艺和工装专业的主要目的是辅助设计工作的开展,所以除了会并行开展工作外还会跨阶段进行工作。

从方案设计到初步设计,再到详细设计,通过对工艺设计、工装设计/制造和产品制造3个方面对航空产品的生产过程进行不同的分工安排,多学科专业彼此之间相互联系,并将各个环节的设计信息通过数据共享的方式从设计方传递给制造方,促进设计与制造融合,从而缩短航空产品的研制周期。

基于上述提出的协同设计模型,根据相关设计内



图6 航空产品协同设计的多维度模型

Fig.6 Multi-dimensional model of collaborative design for aviation product

容和设计目的,将设计任务具体到每个细小环节。由于不同的层级包含多个作业,具体的设计阶段和层次决定了作业的具体内容,当这些内容在不同的部门之间进行有效、准确的交流和转移,就可以达到数据共享、提高设计效率、实现协同设计的最终目标。而航空产品设计较为复杂,需要一个反复迭代的优化过程结合上述的协同模型,多专业协同优化设计过程如图7所示。

多专业协同设计活动状态操作交互图主要描述了总体、结构和系统3个主要专业的优化设计过程,优化过程主要存在于总体专业和结构专业、结构专业和系统专业之间,工艺和工装专业主要是以辅助设计为目的。在逆向设计过程中要注重考虑工艺和工装专业的反馈,让设计更为合理,同时应停止后续工作防止错误设计延续到后续设计,若后续工作已经开展,也需要根据反馈的新问题对已做工作进行更正。

4 结论

本文立足我国航空行业现状,以飞机设计制造一体化研制发展需求为背景,研究了单一数据源、研制业务流程优化、研制过程控制等关键技术,对促进复杂产品研制模式创新、提高我国航空行业研制水平具有重要的理论意义和实践价值。此外,本文所研究的设计制造一体化创新研制关键技术具有通用性,可推广应用于国内其他飞机型号的研制中。同时,可以发挥航空行业在制造业中的影响,将本文所研究的技术推广应用于制造领域其他行业。

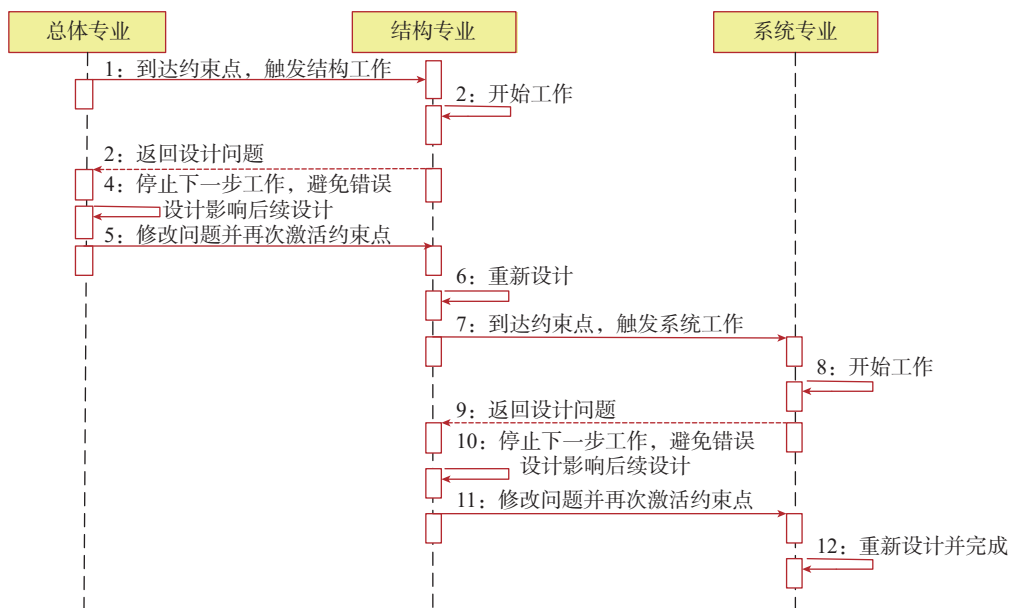


图7 多专业协同设计活动状态操作流程

Fig.7 Active operation process of multidisciplinary collaborative design

参考文献

- [1] 白永红, 梁可, 周盛, 等. 基于MBD的飞机设计制造协同关联技术探讨[J]. 航空制造技术, 2015, 58(18): 40-44.
- BAI Yonghong, LIANG Ke, ZHOU Sheng, et al. Research on the cooperative association of aircraft design and manufacturing based on MBD [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(18): 40-44.
- [2] 李海泳, 唐秀梅, 亢亚敏, 等. 基于MBD技术的航空制造数字化工艺实施应用[J]. 航空制造技术, 2013, 56(13): 40-42.
- LI Haiyong, TANG Xiumei, KANG Yaming, et al. Research on the cooperative association of aircraft design and manufacturing based on MBD [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(13): 40-42.
- [3] 唐敦兵, 殷磊磊. 基于MBD的飞机-装配工装协同变更方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 718-726.
- TANG Dunbing, YIN Leilei. Research on the cooperative association of aircraft design and manufacturing based on MBD [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics Astronautics, 2017, 49(5): 718-726.
- [4] 魏志强, 王先逵, 吴丹, 等. 基于单一数据源的产品BOM多视图映射技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002(6): 802-805.
- WEI Zhiqiang, WANG Xiankui, WU Dan, et al. BOM multi-view mapping of product base on a single data source[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002(6): 802-805.
- [5] 陶剑, 范玉青. 成熟度在飞机研制一体化流程的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9): 1117-1120.
- TAO Jian, FAN Yuqing. Application of maturity in development of aircraft integrated process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautical and Astronautics, 2006, 32(9): 1117-1120.
- [6] 朱海平, 苟坤, 何非, 等. 飞机装配制造执行系统关键技术研究及系统实现[J]. 航空制造技术, 2012, 55(15): 26-29.
- ZHU Haiping, GOU Kun, HE Fei, et al. Key technology of aircraft assembly manufacturing execution system and its implementation [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012, 55(15): 26-29.
- [7] 朱海平, 杨馥铭, 何杰, 等. 飞机装配质量管理体系关键技术研究及系统实现[J]. 航空制造技术, 2015, 58(9): 26-30.
- ZHU Haiping, YANG Fuming, HE Jie, et al. Key technology of aircraft assembly quality management system and its implementation [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(9): 26-30.
- [8] 党卫兵, 蔡红霞, 俞涛, 等. 飞机AO工艺文件在Windchill MPMLink中的实现[J]. 现代制造工程, 2012(4): 67-72.
- DANG Weibing, CAI Hongxia, YU Tao, et al. The implementation of aircraft AO process document in Windchill MPMLink [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(4): 67-72.
- [9] 贾晓亮, 张振明, 朱名铨, 等. 飞机制造工艺路线分工计划及BOM管理系统研究[J]. 机械设计与制造, 2003(1): 113-115.
- JIA Xiaoliang, ZHANG Zhenming, ZHU Mingquan, et al. Research of manufacturing process route planning and BOM management system oriented airplane manufacturing venture [J]. Machinery Design & Manufacture, 2003(1): 113-115.

通讯作者: 蒋敏, 研究员级高级工程师, 研究方向为制造业信息化, E-mail: jiang_min2000@163.com.

(责编 大漠)

(上接第94页)

- flows[J]. Physics of Fluids, 2017, 29(9): 1-16.
- [3] LI W, WEAVER J C, GEORGE V L. Biomimetic shark skin: design, fabrication and hydrodynamic function[J]. Journal of Experimental Biology, 2014, 217: 1656-1666.
- [4] MALSHE A, RAJURKA R K, SAMANT A, et al. Bio-inspired functional surfaces for advanced applications[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013, 62: 607-628.
- [5] KIMG D, LOHB G. An ultrasonic elliptical vibration cutting device for micro V-groove machining: kinematical analysis and micro V-groove machining characteristics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190: 181-188.
- [6] KIMG D, LOHB G. Machining of micro-channels and pyramid patterns using elliptical vibration cutting[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49: 961-968.
- [7] MATSUMUR A T, TAKAHASHI S. Micro dimple milling on cylinder surfaces[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 14: 135-140.
- [8] CLAUDIA C B, SCHULZ U. Shark skin inspired riblet coatings for aerodynamically optimized high temperature applications in aeroengines[J]. Advanced Engineering Materials, 2011, 13(4): 288-295.
- [9] 姬俊锋, 周来水, 安鲁陵, 等. 一类开式整体叶轮五坐标数控加工刀轴矢量生成及其光顺方法的研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(2): 202-206.
- Ji Junfeng, ZHOU Laishui, AN Luling, et al. Generation and the smoothing method of 5-axis NC machining tool orientation for the open integrated impeller[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(2): 202-206.
- [10] 吴宝海, 梁满仓, 张莹, 等. 复杂曲面通道多轴加工的刀具选择方法[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 117-124.
- WU Baohai, LIANG Mancang, ZHANG Ying, et al. Tool selection of multi-axis machining for channel parts with sculptured surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 117-124.
- [11] TANGT D, BOHEZEL J. A new collision avoidance strategy and its integration with collision detection for five-axis NC machining[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81: 1247-1258.
- [12] 尹周平, 丁汉, 熊有伦. 基于可视锥的可接近性分析方法及其应用[J]. 中国科学, 2003, 33(11): 979-989.
- YIN Zhouping, DING Han, XIONG Youlun. Accessibility analysis method based on visible cone and its application[J]. Science in China, 2003, 33(11): 979-989.
- [13] WANG N, TANG K. Automatic generation of gouge-free and angular velocity-compliant five-axis tool path[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(10): 841-852.

通讯作者: 张臣, 教授, 博士, 研究方向为数字化设计与制造、加工过程仿真、超声椭圆振动辅助切削技术、减阻结构设计与制造技术, E-mail: meeczhang@nuaa.edu.cn.

(责编 大漠)