

# 模型驱动的民机数字化制造工艺技术研究与实践\*

来云峰,李婉丽

(中航西飞民用飞机有限责任公司,西安 710089)

[摘要] 新一代涡桨支线民机正在构建以模型数据驱动、设计制造一体化为典型特征的全数字化研制体系。以模型为核心驱动制造工艺数据构建和传递的技术,正成为我国支线民机研制的新模式。详细介绍模型驱动的数字化制造技术特征和方法,阐述了某型国产民机制造业务模型和协同平台架构的内容,总结了模型驱动思想在国产民机数字化制造工艺技术应用过程中的具体实践内容和成效,对未来的应用趋势进行了展望。

关键词: 涡桨支线飞机; 模型驱动; MBD 技术; 数字化制造; 成熟度; 并行协同; 数据

## Research and Practice of Digital Manufacturing Technology Based on Model-Driven Civil Aircraft

LAI Yunfeng, LI Wanli

(AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] The new generation of turboprop regional civil aircraft is constructing a fully digital development system with typical features of model data-driven, design and manufacturing integration. The technology of constructing and transmitting manufacturing process data with model as the core is becoming a new mode for the development of regional civil aircraft in our country. This paper introduces the certain type of domestic civil aircraft manufacturing business model and collaborative platform architecture, and introduces the concrete practice content and results of model-driven thoughts in domestic commercial digital manufacturing technology application, meanwhile the future application trend is prospected.

**Keywords:** Turboprop regional civil aircraft; Model-driven; MBD technology; Digital manufacturing; Maturity; Parallel collaboration; Data

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.08.070

随着 MBD 技术在大型装备制造业中的应用,目前基于模型的产品及工装数字化设计已在我国各航空制造企业中基本实现。飞机研制流程也从设计制造分离的“抛过墙”式串行研发模式向设计制造一体化集成的异地并行协同研发模式转变,航空制造企业产品研制数字化转型的步伐不断提速。但受传统制造模式和技术手段的影响,基于模型的数字化工艺技术发展依旧滞后,传统基于二维工程图的、工卡式的工艺过程设计模式和方式,因不能有效继承上游的 MBD 模型而无法顺利地将设计信息传递到制造后段,直接影响了产品的工艺设计周期和产品制造质量。因此,开展模型驱动的飞机数字化工艺设计技术研究和应用成为推动航空制造发展的重要趋势。

### 1 模型驱动的数字制造技术

模型是产品的虚拟表达,从产品设计制造过程来说,无论是传统的实物、二维图纸、图表还是现在的音频、视频、数据、架构、VR 等可视化手段,这些数字化描述的方式都可以认为是产品的模型,更确切地说,模型就是产品所有属性的电子化表达,作为制造源头的设计模型和面向工艺的制造模型共同决定了制造的效率和质量。新一轮科技革命和产业变革深刻影响航空制造业数字化技术的应用,系统的复杂度也在不断增加以满足客户增长的需求和更多法规的约束。传统基于单一文档和单一产品模型的产品研制模式不能很好地表达业务逻辑和流程,从而造成产品最终装配问题的出现,影响产品原型的集成和准时交付<sup>[1]</sup>。

\* 基金项目: 民机专项技术研究项目(MJ-2018-G-55)。

为解决这些问题,越来越多的组织和产品开发过程转向了模型驱动的创新工程。模型驱动式开发(MDD)是一种以模型为中心、根据不同的抽象层次或者不同的视角构造模型的开发方法<sup>[2]</sup>。与其他软件开发方法相比,模型驱动开发方法的特点主要表现在,该方法更加关注不同业务知识构造及流程的抽象描述,基于这些抽象模型刻画软件或系统架构,并通过自动(半自动)的层层转换完成从设计向实现的过渡,从而最终完成整个系统的开发。美国国家技术和标准研究院(NIST)提出从基于模型的定义(MBD)到基于模型的企业(MBE)的跃升,其要义是模型驱动关系系统生命周期的各个方面和领域,模型一次创建并为制造、服务等所有下游重用<sup>[3]</sup>。

与基于模型的定义(MBD)不同,模型驱动尽管在不同的领域有不同的含义,但在飞机数字化研发领域,模型驱动的工程(MDE)中模型概念主要强调产品模型、产品数据模型和业务过程模型,借助于这些多维模型(或模型化知识),驱动研发人员将隐含于文档内部的管理要素和管理思想通过模型的方式进行显性化、固化、持久化<sup>[4]</sup>,构建并行协同的研发系统平台,在虚拟制造环境内部进行飞机研制。全寿命周期过程业务信息的定义,如样机设计、结构定义、工艺规划与装配仿真、生产线规划仿真、数据管理、指令仿真以及指令传递到物理设备之后的控制和数据采集等内容。模型驱动的数字制造过程交付物成果包括系统平台、三维工艺作业指导书、三维动态离散事件仿真等。如果使用得当,该技术不仅能够消除传统的以手工方式创建面向生产的工艺定义过程,而且可以将所有制造准备活动或工作在产品完成之前完成,并向设计团队反馈制造数据问题,以创建和完善面向可制造性的更好设计,提升产品制造多专业、多供应商的协同效率,有效缩短整个产品研制周期,改善生产现场工作环境,提高产品质量和生产效率<sup>[5]</sup>。

## 2 数字化制造业务模型与应用架构设计

### 2.1 应用业务模型分析

某型国产民机是一款面向全球市场开发的新型涡桨支线飞机,其研制阶段主要划分为需求分析和立项论证、可行性论证、预发展设计、工程发展和产业化等阶段。其采用了全新、开放的飞机研制模式,产品制造配套的零件品种和数量众多,产生的制造数据巨大、制造资源协调复杂,所以每一个阶段都存在大量“需求-设计-验证”迭代,需要多专业以及多单位协同工作。

为有效应对上述挑战,以模型驱动飞机,协同研制企业中的数据、业务过程、应用系统并有效地整合在一

起,按照设计端全面推进应用MBD技术要求,制造工艺端积极开展了数字化制造工艺应用数据模型、业务模型和系统模型研究,如图1所示。确定制造过程业务应用场景主要包括以下方面。

(1)设计-制造协同:基于设计-制造并行业务模型实现与承制单位的工程协同,基于单一虚拟产品研制环境支撑产品工艺模型关联产品模型,实现产品工艺性审查与可制造性评估,并支持零部件制造和装配工艺设计。

(2)制造工艺多专业协同:基于产品模型实现机加工工艺、钣金工艺、工装设计、结构装配、系统装配、总装集成等多专业技术协同。

(3)异地多厂所制造协同:基于数据模型实现制造数据并行分工审查和各层次供应商交付状态定义,包含实体模型、轻量化模型、制造要求、交互式动画/视图等。

(4)制造数据管理与共享:推动设计模型数据向生命周期各阶段传递和增值复用,整体规划飞机设计制造相关信息的定义、共享、传递、使用、关联等机制,进行逻辑单一数据源的全面构型管理。

### 2.2 应用系统架构设计

基于系统工程的构型管理要求,按照“模型驱动”这一核心理念,以业务过程数据管理模型和并行协同机制为基础,搭建跨越产品设计与制造的一体化数字化制造协同平台,面向数字化工艺数据管理模型,建立独立的集三维工艺设计、仿真与制造数据管理为一体的系统平台,形成飞机统一的产品制造数据管理中心,支持基于产品模型开展产品-工艺-工装一体化关联并行设计,工艺资源的知识化、结构化管理,实现工艺、工装、检验数据一体化管理,为后续数字化生产过程和客户服务提供保障。

应用系统架构主要包含数字化工艺设计、数字化制造构型管理、数字化工装数据管理、工艺资源管理、一体化工程更改控制、制造供应商协同管理等内容,如图2所示。

(1)数字化工艺设计:根据设计制造并行协同业务模型,根据飞机成熟度在飞机研制早期就开展工艺规划的工作,确定飞机的工艺/制造分离面,定义装配单元的划分,提供3D可视化、可交互环境下的工艺规划能力和工艺指令编制能力。

(2)数字化制造构型管理:提供基于模型的产品制造物料构型(MBOM)结构编辑器,支持三维可视化、消耗式数据重构,实现MBOM顶层规划、基于模块的工艺路线分工管理和相应的底层数据分工管理。

(3)数字化工装数据管理:提供工装数字化业务过程模型的管理,包括工装申请,工装协同设计,工装物料

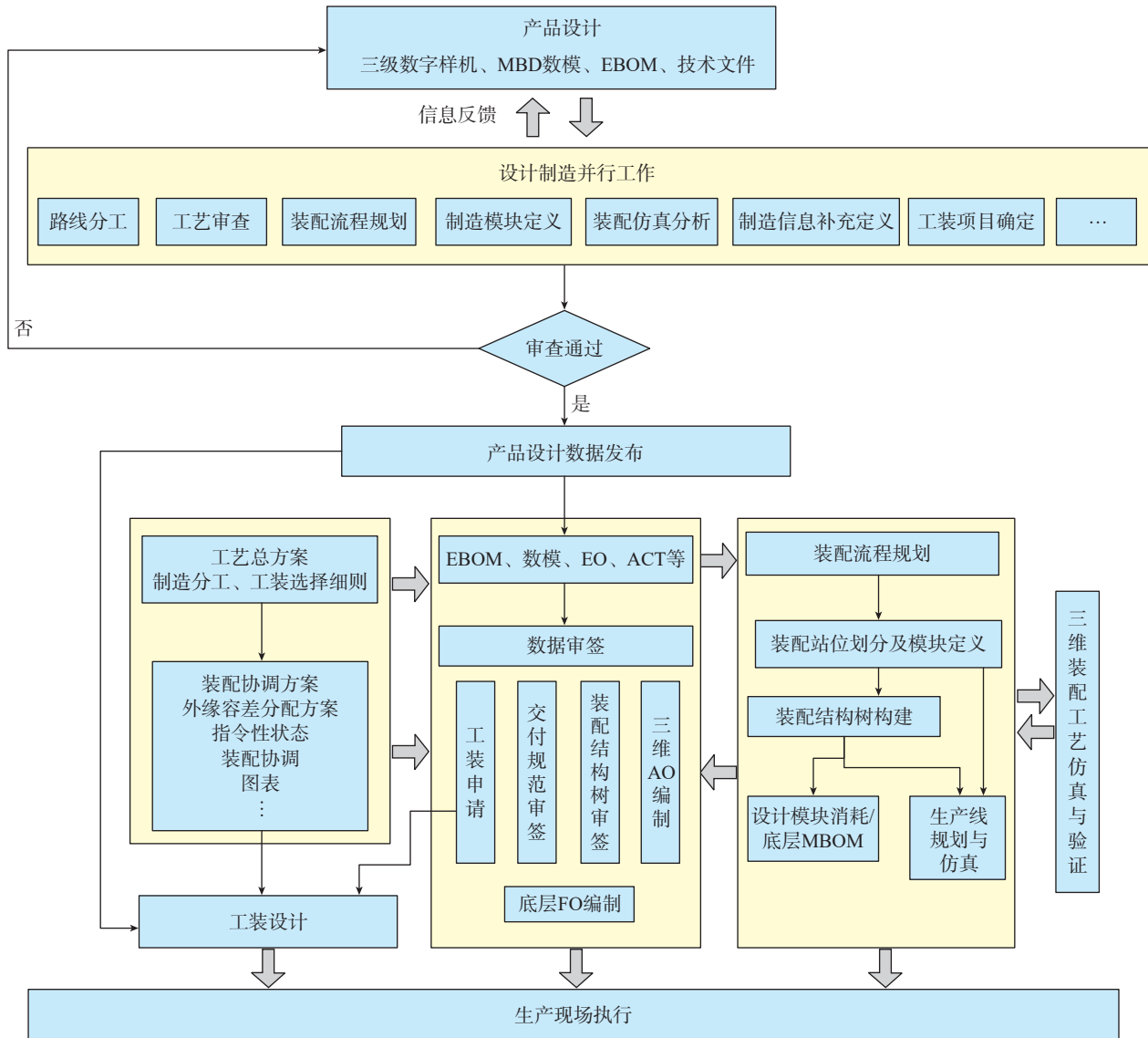


图1 飞机数字化制造业务模型  
Fig.1 Aircraft digital manufacturing business model

构型(TBOM)管理等,使参与同一个工装产品设计的不同人员之间能够方便地进行协作,并行开展同一个工装产品不同组成部分的设计工作。

(4) 工艺资源管理:对数字化工艺设计过程中用到的各种工具、设备和工装等资源进行结构化的、统一的管理,为工艺设计过程的数字化定义和装配仿真等提供强大制造资源管理能力。

(5) 一体化工程更改控制:提供基于构型更改业务模型的产品数据更改的贯彻和落实功能,支持正向、反向的一体化更改过程追溯,即从设计更改能够追溯下游贯彻状态,从工艺制造更改能够向上游追溯对应的设计更改及问题报告。

(6) 制造供应商协同管理:提供基于制造分工的供

应商交付规范业务模型的数据结构化管理和数据发放功能,通过与产品设计制造协同管理平台和供应商制造平台的无缝集成,实现主制造商与供应商之间的数据的双向发放、提交和管理。

### 3 模型驱动的数字化工制造工艺技术应用实践

#### 3.1 应用原则

(1) 以在生命周期的早期阶段发现更多问题支撑实现虚拟产品的“可制造性”决策为目标,模型驱动技术应贯彻产品制造的核心业务流程,实现设计与制造业务协同、工艺设计与仿真、工装设计与仿真、生产线设计与仿真、三维工艺规划、制造数据管理等的全面应用,保证足够应用的广度和深度。

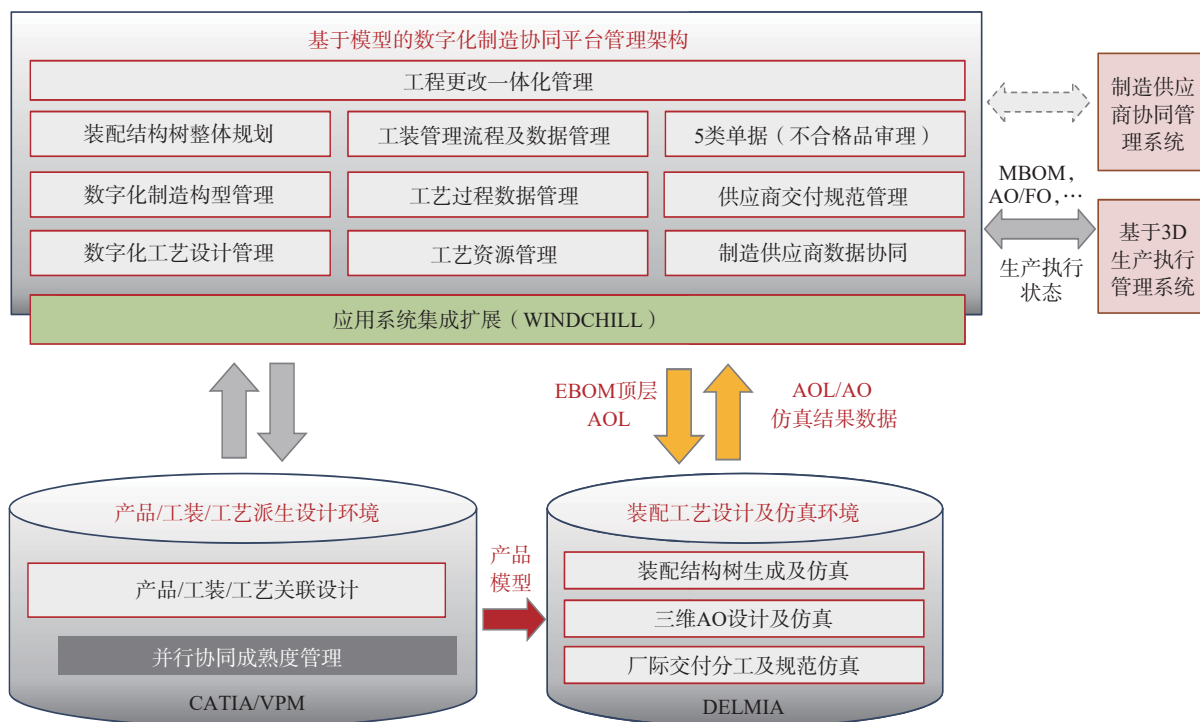


图2 数字化制造协同平台架构

Fig.2 Digital manufacturing collaborative platform architecture

(2) 借鉴国际主流民机制造业数字化应用的成熟基础理论和工具,应用模型驱动技术应着力在工具成熟度和应用范围上,结合型号特点,进行再创新、再发明,保证应用先进性和创新性。

(3) 注重模型驱动过程中模型知识的捕获和重用,夯实技术基础,积累提炼模型驱动的技术标准和规范体系。

### 3.2 主要实践内容

(1) 以设计制造并行业务模型驱动基于成熟度的数据发放。

参照国际先进模式,按照产品数据的信息完整程度,建立基于成熟度管理的设计制造并行业务模型,见图3。在数据发布形成正式版本之前采用成熟度控制,即产品数据只有达到成熟度级别提升时才进行发放,工艺设计人员分阶段拿到产品模型并开展工作<sup>[6]</sup>。按照不同阶段数据的成熟度,组织制造各部门进行制造性分析,并通过与设计部门协调和完善,完成面向装配站位的工艺设计过程,包括依据三维产品模型进行装配工艺仿真、装配站位(CA)制造数据分配等工艺设计活动。同时,依据工艺性评审,发现产品设计、工装设计中存在的问题,并且将存在的问题及时反馈到设计部门和工装部门。在数据发布形成正式版本之后发生的更改则不采用成熟度控制,按构型更改的控制方法进行管理。通

过模型的并行协同,快速提升产品制造的成熟度,使其达到灵活、精益等高级状态,提高整个产品研发的效率。

(2) 以模块化数据模型为核心驱动制造数据构建。

面向制造需求的模块组织和管理技术是在产品模块化设计基础上发展形成的,不同于传统以产品零组件为中心的装配定义,面向制造需求的构型模块概念,是指具有独立功能,可作为整体进行设计、制造、装配、服务保障的独立单元。模块化业务模型主要包含两个方面的内容:衍生产品数据管理的“CA-AOL-MDM”制造数据结构模型和以“装配结构树-制造物料清单(MBOM)-装机物料清单(BBOM)”为主线的制造构型构建模型。

在某型国产民机研制中,按照模块化业务模型开展了产品设计模块的分解和重构,按照特定模块化的制造需求,将模块作为构型管理和工程更改控制的基本单元<sup>[7]</sup>。在设计模块进行划分时,充分考虑制造分离面的划分和制造的组装工序等制造需求,使设计分离面与工艺分离面趋于一致,保留设计模块的完整性和在制造工艺中的一致性,使得各种对应的逻辑关系都较为简化,设计制造符合性的追踪较为容易,避免出现若干个设计模块拆散重组成若干个AO的情况,如图4所示。CI2、CI3、CI4与AO2、AO3、AO4一一对应,CI1划分为两个AO进行分别组装,CI5与AO5对应体现了CI1~CI4

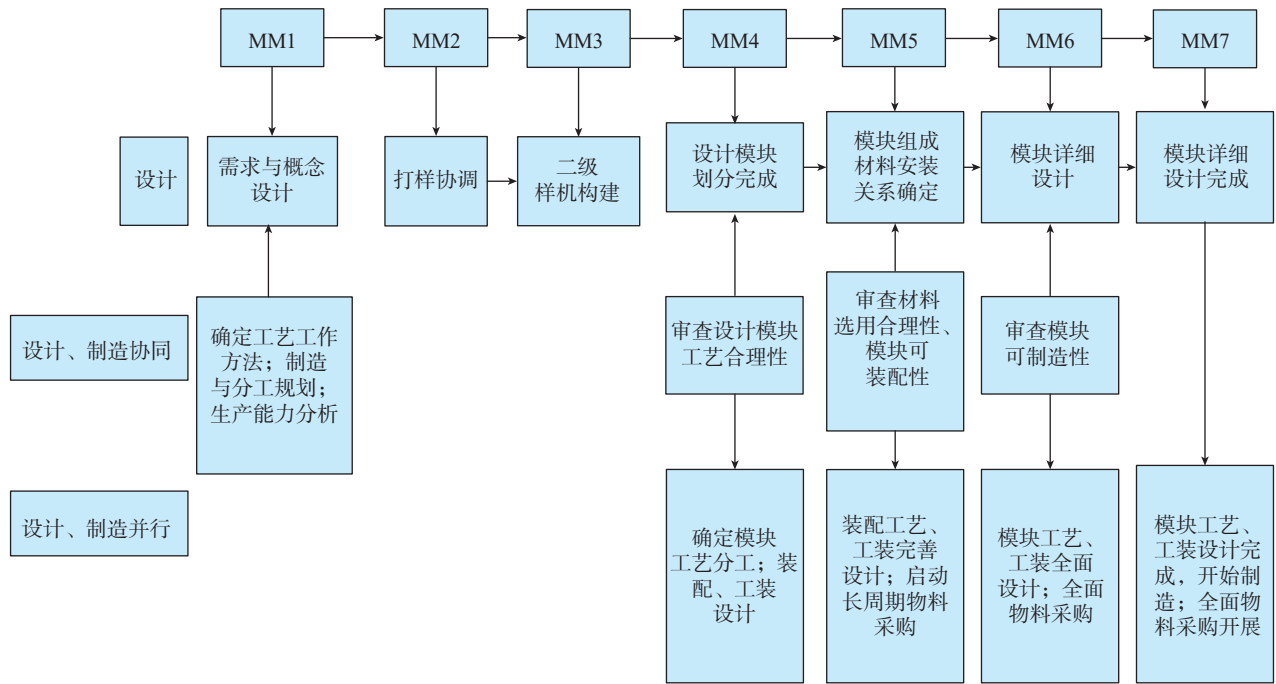


图3 基于成熟度的设计制造并行业务模型

Fig.3 Design and manufacture parallel business models based on maturity

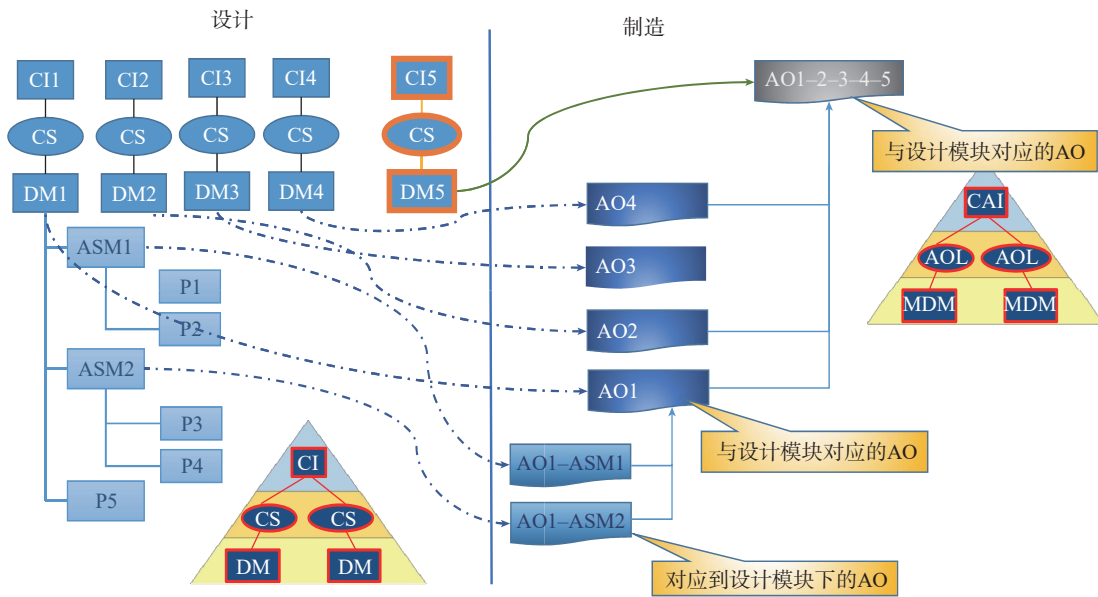


图4 产品模块化制造数据管控业务模型

Fig.4 Control business model of product modular manufacturing data

的组装。

(3)以产品数据消耗式模型保证制造配置的符合性。

保证设计数据的一致性和可追溯性,是某型国产民机研制过程中的适航符合性要求。传统二维装配工艺设计在面对三维模型定义(MBD)技术暴露出来的不

足主要有:无法直接充分利用产品三维模型及其工程信息,从而导致设计制造协同性差;基于装配规划,重构工艺组件和工艺物料清单(PBOM)与工程物料清单(EBOM)的一致性难以保证。

产品数据消耗式模型强调照搬设计数据而不衍生工艺构型,主要通过承接产品工程物料清单(EBOM)、

三维产品模型数据,根据装配工艺业务需要可以直接基于设计发布模块,在顶层装配工艺结构树节点下消耗式完成产品数据的制造配置、工艺设计任务的分工,从而将工艺设计任务与所关联的模块及模型数据下发给工艺设计人员<sup>[8]</sup>,进行装配指令编制,实现单一数据源,确保工程数据集及更改信息在设计与制造之间完整、系统地传递,实现工程设计数据集与制造数据集的一致性、准确性及可追溯性,如图5所示。

(4)以产品设计模型开展可视化工艺模型设计与仿真。

制造工艺方案中通常要研究工序规划、路径规划及过程仿真等过程,传统的方法是将其划分成机加、部装、总装等几个相互隔离的部分,造成了工艺规划各部分工作结果难以及时共享,不利于提高工艺规划效率。建立在数字化样机基础上进行的设计工程仿真主要是针对飞机设计的合理性、飞机的功能和性能进行仿真,但有大量飞机制造装配过程中的信息,如装配过程所要用的场地、工艺装备的分析;装配过程所要用的工具、设备、器件等的分析;装配过程中人员运动的分析等都会被忽略<sup>[9]</sup>。

在以模型驱动的某型国产民机研制过程中,面向飞机工艺研制全过程,基于三维产品设计模型的可视化、可交互的环境,开展了装配工艺模型的构建、装配工艺仿真和结构化装配工艺BOP(工艺、工序、工步)编制,将产品、资源模型数据导入装配指令编制工具,从装配

工艺知识库中获取典型工艺、标准工序/工步等工艺知识库数据,进行包含详细装配操作工序内容、技术要求、物料信息等的三维装配指令编制,实现制造工艺结构化、可视化工作指令的快速生成及有效性验证,完成工艺总流程的制定、评审及工艺计划的快速下发<sup>[10]</sup>。

(5)以统一产品BOM数据模型驱动制造数据构型管理。

统一产品BOM数据从结构化设计到结构化工艺,再到结构化生产的传递流程、共享机制(图6),打通从产品数据管理(PDM)到制造数据管理(MDM)到生产计划(ERP)以及制造执行(MES)的数据流转链路,开展PDM系统与制造ERP和MES底端系统的数据集成。改变传统的基于文件的数据模拟量传递方式,提升为以模型数据为核心的数字量传递模式,真正发挥工艺环节的桥梁作用,有力支撑设计、工艺、制造一体化集成业务的应用。

#### 4 实践效果

通过模型驱动理念的应用,国产某型机以业务对象模型结合系统架构约束完成了行业典型的设计制造并行一体化协同环境构建,开展了5000余项产品模块的可制造性审查、制造分工确认,以及300多个制造装配站点规划和数据消耗式配置,完成了机翼、中机身等大部件装配仿真及结构供应商三维交付规范快速编制,下发了1500余份基于产品模型的制造指令编制。与传

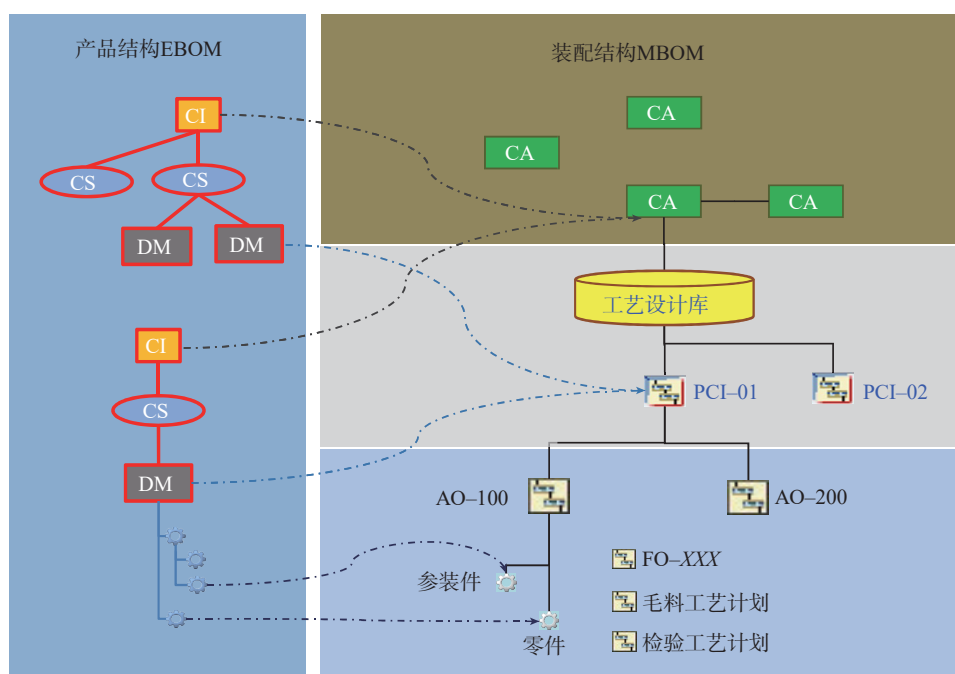


图5 消耗式工艺数据管控模型

Fig.5 Consumptive process data control model

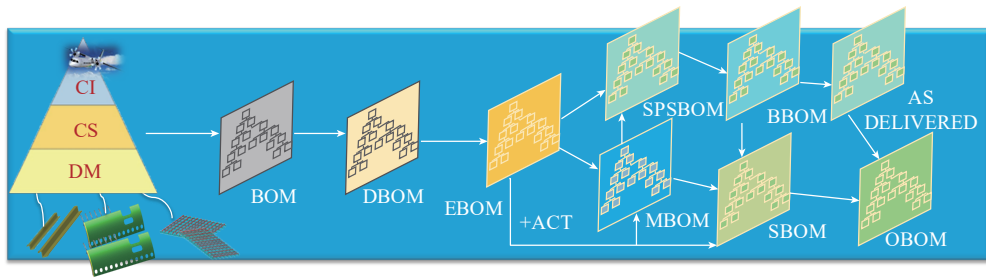


图6 统一的产品BOM数据管理模型  
Fig.6 Unified product BOM data management model

统国内其他型号对比分析,产品数模发放后工艺工装设计效率大幅提高,制造数据与产品数据的符合性提高了100%,有力支撑了飞机研制阶段的产品协同定义和部件准时交付,飞机工艺创新能力得以极大提升。

## 5 结论

模型驱动的产品制造思想,已经成为制造业降低系统复杂性、开展系统分而治之的有效手段。该技术的优势在于使用更接近于人的理解和认识的模型,以及方便灵活的业务建模语言,如可视化业务模型、产品模型和数据模型来推动系统的构建和业务的实现,有利于技术人员将注意力集中在和业务逻辑相关的信息上,更好地将产品研制过程中的经验、知识复用于新的产品研制过程,使业务专家、设计人员、工艺人员以及操作人员等不同人员之间基于业务知识和过程实现的良好沟通,从而进一步推动数字化制造工程的发展,全面提升企业的核心竞争力,让企业在技术和经济方面取得双重效益。

## 参考文献

[1] 西门子工业软件公司, 西门子中央研究院. 工业 4.0 实战[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.  
Siemens Digital Industries Software, Central Technology of Siemens. On the way to industry 4.0[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.

[2] FRANCE R, RUMPE B. Model-driven development of complex software: a research roadmap[C]//Proceedings of Future of Software Engineering 2007 at ICSE. New York: IEEE, 2007: 37-54.

[3] 张德芬, 李师贤, 明仲. 模型驱动工程中的模型合成技术研究[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(12): 2611-2617.  
ZHANG Defen, LI Shixian, MING Zhong. Research of model composition in model driven engineering[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33(12): 2611-2617.

[4] 赵寒, 张荣霞. 模型驱动的航天型号技术状态管理方法研究[J]. 航天制造技术, 2013, 56(4): 4-8.

ZHAO Han, ZHANG Rongxia. Research on model-driven aerospace configuration management method[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013, 56(4): 4-8.

[5] 罗恒雨, 刘德庆. 基于模型的数字化制造工程技术[J]. 现代制造, 2014(9): 70-73.

LUO Hengyu, LIU Deqing. Model based digital manufacturing engineering[J]. Modern Manufacturing, 2014(9): 70-73.

[6] 惠巍, 金哲珠, 胡保华, 等. 基于产品成熟度的设计制造高度并行研发模式[J]. 航空制造技术, 2016, 59(23/24): 137-141.

HUI Wei, JIN Zhezhu, HU Baohua, et al. Design and manufacture high parallel R & D model based on the product maturity[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(23/24): 137-141.

[7] 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.

[8] 张昕, 秦坤, 张超, 等. 基于 MBD 的三维工艺研究与实现[J]. 航空精密制造技术, 2013, 49(2): 45-47, 56.

ZHANG Xin, QIN Kun, ZHANG Chao, et al. Design and implementation of three-dimensional CAPP base on MBD[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2013, 49(2): 45-47, 56.

[9] 孙中雷, 陶华. 飞机装配工艺仿真与可视化技术研究[J]. 现代制造工程, 2006(2): 55-58.

SUN Zhonglei, TAO Hua. Research on technologies of airplane assembly process simulation and visualization[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006(2): 55-58.

[10] 张玉金. 基于 MBD 的商用航空发动机数字化设计与制造技术实施方法[J]. 航空制造技术, 2018, 61(22): 62-68.

ZHANG Yujin. Study of construction method for commercial aero-engine design and manufacturing based on MBD[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2018, 61(22): 62-68.

通讯作者: 来云峰, 硕士, 高级工程师, 研究方向为企业信息化与数字化制造, E-mail: 479409681@qq.com。

(责编 思齐)