

引文格式: 邱燕平, 熊光利, 吴兴杰, 等. 航空制造企业工艺设计与管理平台研究与应用[J]. 航空制造技术, 2022, 65(6): 82-89.

QIU Yanping, XIONG Guangli, WU Xingjie, et al. Research and application of process design and management platform for aviation manufacturing enterprises[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(6): 82-89.

航空制造企业工艺设计与管理平台研究与应用*

邱燕平¹, 熊光利¹, 吴兴杰², 付彬¹, 甄文斌¹

(1. 航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌 330024;

2. 金航数码科技有限责任公司, 北京 100028)

[摘要] 针对型号研制及交付对工艺设计提出的高效率、高质量和快速响应的要求, 结合企业数字化转型的发展趋势, 开展了面向航空制造企业的数字化工艺设计与管理平台构建技术的研究, 论述了平台架构、业务模式和关键技术。提出构建以产品模型与制造构型信息作为数据主线, 以型号研制工艺业务过程作为业务主线, 以工艺工作任务管理为抓手的面向工艺全过程的集成化、一体化、基于模型、可扩展的数字化工艺设计与管理平台, 实现数字化技术赋能工艺业务能力提升。

关键词: 数字化平台; 工艺设计; 工艺管理; 基于模型; 并行工艺设计

Research and Application of Process Design and Management Platform for Aviation Manufacturing Enterprises

QIU Yanping¹, XIONG Guangli¹, WU Xingjie², FU Bin¹, ZHEN Wenbin¹

(1. AVIC Jiangxi Hongdu Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Nanchang 330024, China;

2. AVIC Digital Technology Co., Ltd., Beijing 100028, China)

[ABSTRACT] In this paper, the construction technology of digital process design and management platform for aviation manufacturing enterprises is studied, and the architecture, business model and key technologies of the platform are discussed. In the context of the development trend of enterprise digital transformation, the research is based on the requirements of product development and delivery for high efficiency, high quality and rapid response of process design. It is proposed to build an integrated, comprehensive, model-based, scalable and whole process oriented digital process design and management platform, to improve the process business capability by applying digital technology. This platform takes product model and manufacturing configuration information as the main data line, product development process as the main business line, and the task management of process design as the management starting point.

Keywords: Digital platform; Process planning; Processing management; Model-based; Concurrent pattern of processing design

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2022.06.082

工艺是指使各种原材料、半成品成为产品的方法和过程^[1]。工艺文件作为工艺的载体说明了实物制造过程中的“人、机、料、法、环”^[2], 是虚拟产品向实物产品转化的关键价值链环节。一方面, 由于航空产品的高度复

杂性、高质量要求和短交付周期要求决定了航空制造工艺复杂、工艺协调难度高、质量要求高和工艺设计工作周期紧张的特点^[3]。另一方面, 工艺部门涉及与设计、生产、检验等部门以及工艺组织内部的大量协同工作。为了高效的组织和开展高质量的工艺设计工作, 企业建立了相关的标准、流程和信息系统。其中工艺信息化系

* 基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFB1701805)。

统的建设工作往往被列为重要的专项工作,尤其是在当前数字化转型背景下,通过信息化手段支撑企业业务高效运转,通过数字化转型支撑企业业务能力提升和激活创新动力已经成为当前企业建设的重要课题之一。那么如何通过信息化手段提高工艺设计与管理的效率和质量,支撑工艺业务能力的提升和创新已经成为工艺信息化工作面临的重要课题^[4]。

国内航空企业一般建设了计算机辅助工艺设计系统 CAPP (Computer aided process planning),同时采用 PDM 系统、专业仿真软件,为工艺业务工作提供了部分有效的数字化设计手段,也为工艺数据的集成应用创造了基本条件。传统 CAPP 系统主要实现了制造指令、制造作业指导书的结构化编制;PDM 的侧重点则在于产品数据对象生命周期的管理^[5],对于工艺业务来说主要覆盖了工艺文件管理和工程更改流程。可见上述系统和工具的应用并未有效覆盖工艺策划、工艺详细设计、工艺组织与管理、工艺知识管理、工艺基础数据管理等业务,各项业务往往在不同系统和工具之间切换或在线下以手工帐的方式进行管理,且没有实现各项业务流程的衔接和数据的贯通;另一方面,国内多数航空制造企业应用的传统 CAPP 仍以工艺文件编制功能为主,应用模式也是串行方式,即设计正式发图后才接收设计 BOM 数据,开展工艺文件编制;国内多数航空制造企业应用的传统 CAPP 没有能够为设计与工艺之间、工艺组织内部、工艺与生产、检验之间提供流程协同和数据协同的有效手段,没有从根本上改变传统的串行工艺设计模式,无法支撑精细化、显性化、闭环的工艺管理和高效、快速、一致性的工艺设计。国外航空企业的信息化建设方面,以波音、空客、洛克希德·马丁等为代表的国外先进航空制造企业在建设型号研制平台过程中更加注重从整体角度对产品研制进行分析、决策、规划、设计、管理、运筹和评价。基于科学的体系统筹规划,建设一体化的研制平台,避免了各系统的无序集成,贯通了数据链路,消除了业务壁垒。

因此,本研究提出建设一个覆盖数字化工艺设计、精细化工艺业务管理、统一工艺数据与工艺知识管理的

工艺业务全过程的集成化、一体化的数字化工艺设计与管理平台,重点支撑工艺各专业的协同工艺设计,支撑工艺技术管理工作模式的创新。数字化工艺设计与管理平台通过流程建模等手段,显性化型号工艺研发流程,支持以型号研制业务流程为主线统筹规划各类工艺设计和管理业务,支撑型号工艺工作标准化、精细化管理。通过建立基于设计成熟度的并行工艺设计机制,明确各阶段的并行工作任务,基于单一数据源(即设计三维数模)开展并行化的三维工艺设计。

1 数字化工艺设计与管理平台架构研究

本研究提出数字化工艺设计与管理平台应该是一个面向工艺全过程的,能够支撑智能化、结构化、三维化的工艺设计和精细化、闭环化、显性化的工艺管理的一体化、集成化、可扩展的数字化业务平台,支撑工艺业务能力提升。数字化平台中工艺业务的运营以产品模型与制造构型信息作为数据主线,以型号研制业务过程作为业务主线,以工艺任务管理为抓手。平台通过将型号研制业务过程显性化,基于型号研制流程派生工艺任务,并且以型号项目为管理单元进行工艺任务管理,实现工作业务工作的有序组织和闭环管理。平台支持基于三维产品模型开展工艺设计,实现基于模型的数字量向下游传递^[6]。同时平台支持对以各类设计和仿真工具为代表的工艺 APP 的集成应用,实现工艺设计与仿真数据的数据源共享、结果数据共享,如图 1 所示。

1.1 管理业务架构

航空制造企业尤其是主机厂一般为两级工艺管理体系,分为主管工艺部门和车间工艺室,由型号工艺总师、专业总师、主管工艺负责工艺的策划,由车间工艺负责工艺的详细设计和仿真验证。工艺业务主要包括型号工艺设计业务域和工艺技术管理业务域。型号工艺设计主要包括工艺性审查、工艺方案策划、详细工艺设计等,涉及产品工艺研发的整个过程^[7];工艺技术管理包括工艺文件体系管理、工程更改管理、工程数据管理、工艺质量管理、原材料应用技术管理等,用于保证型号工艺研发的有效组织、追溯和监控。基于航空制造企业

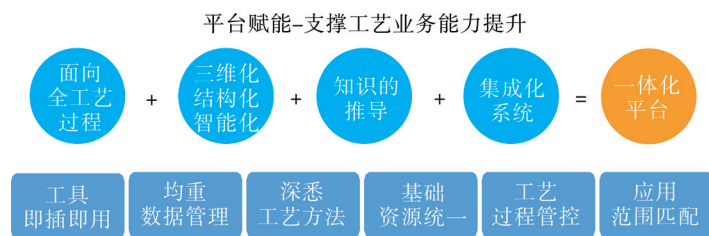


图1 数字化工艺设计与管理平台概念图

Fig.1 Concept map of digital process design and management platform

工艺业务体系,结合数字化转型需求定义数字化工艺设计与管理业务架构如图2所示。

1.2 管理平台IT架构

数字化工艺设计与管理平台包括硬件层、系统基础管理层(工程化基础业务平台层)、工艺资源、工艺数据层、业务过程管理引擎层(工艺设计与管理平台层)、业务组件层(应用层)和工艺业务门户层。

数字化工艺设计与管理平台以工程化基础业务平台为基础平台,整合工程应用数据、工艺仿真数据、工艺资源数据、工艺知识数据实现统一的工艺数据管理;通过提取工艺管理共性功能构建业务过程管理引擎,在此基础上建设工艺业务组件或对专业仿真工具进行集成;应用数字化平台支撑公司工艺业务过程,包括流程、任务、数据及资源等一体化管理,并通过工程数据统一集成接口接入企业统一数据平台,实现与PDM、MES等系统集成,以支持业务和数据的整合应用,其总体架构设计如图3所示。

系统以B/S架构为主,开发基于Web的工艺数据和工艺业务管理组件,将专业工艺设计和仿真工具通过C/S架构实现统一管理,且支持在Web端进行各类专业工艺设计的审签和有效性控制,客户端和网页端均对应同一个服务器。

2 数字化工艺设计与管理关键技术研究

数字化工艺设计与管理平台的构建应面向型号工

艺业务,基于上述数字化平台的IT架构展开,主要工作包括工程化基础业务平台的建设、统一数据管理与集成应用建设、业务过程管理引擎的构建以及各工艺业务组件的建设。下面基于数字化平台开展的主要工艺业务的模式与关键技术进行论述。

2.1 型号工艺业务管理

2.1.1 型号工艺业务过程建模技术,明确型号工艺业务管理主线

型号研制工艺的实际工作内容都遵循一套总体研制工艺工作流程,通过对工艺工作进行梳理,构建工艺业务流程模型,并在工艺设计与管理平台中将工艺业务主线显性化,以此作为工作的驱动和依据。按照型号研制成熟度(论证及研制、试制与设计定型、小批生产与生产定型、成批生产)^[8]对各阶段的工艺工作进行梳理,建立各级业务职能部门的工作分解结构,并可指定各工作元素之间的先后顺序和制约关系,梳理各类工艺工作的输入、输出、责任部门、工具、约束以及关联关系。在系统中将工艺业务流程按照技术状态的不同阶段划分为3级:工艺业务流程、工艺任务流程和工艺设计工作操作流程,对不同层级的流程节点在信息系统中均称为活动,对于活动采用统一描述方式,均由活动基本信息、输入、输出和工具构成。

2.1.2 以型号项目为管理单元的工艺任务管理

工艺业务工作活动具有多层次、多专业、跨车间、多

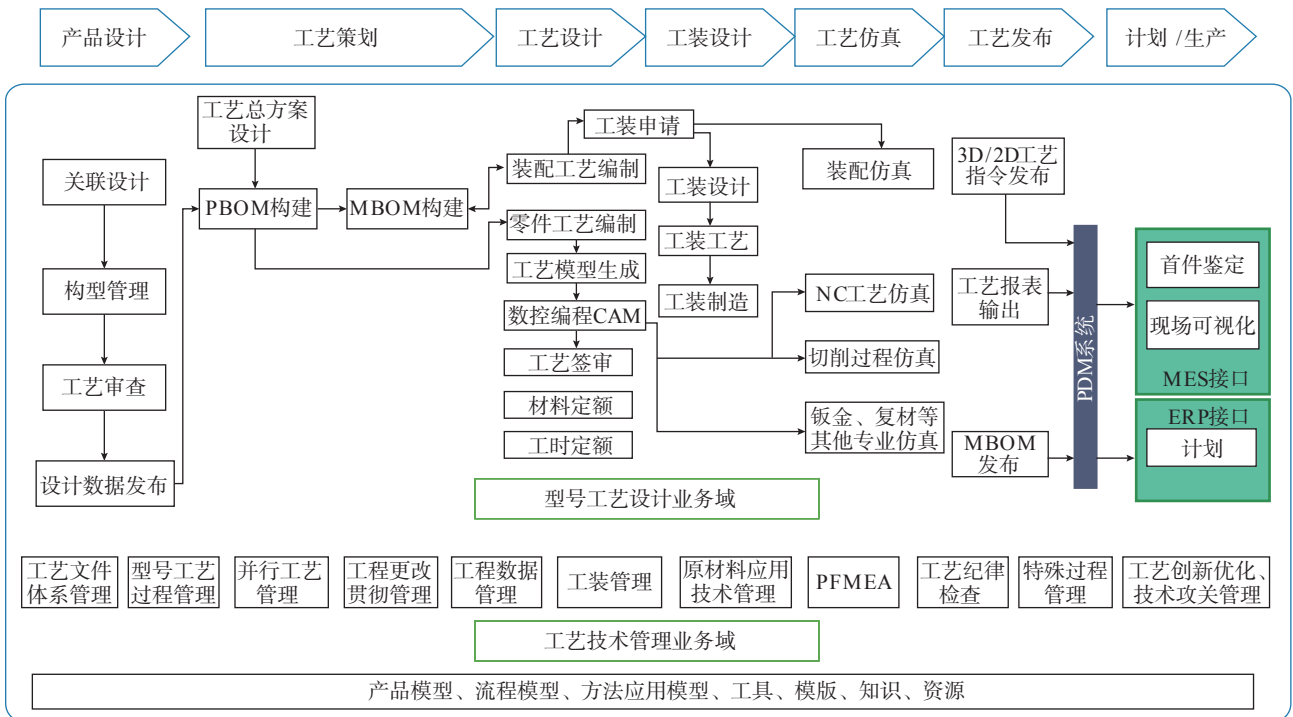


图2 数字化工艺设计与管理业务架构

Fig.2 Digital process design and management business framework

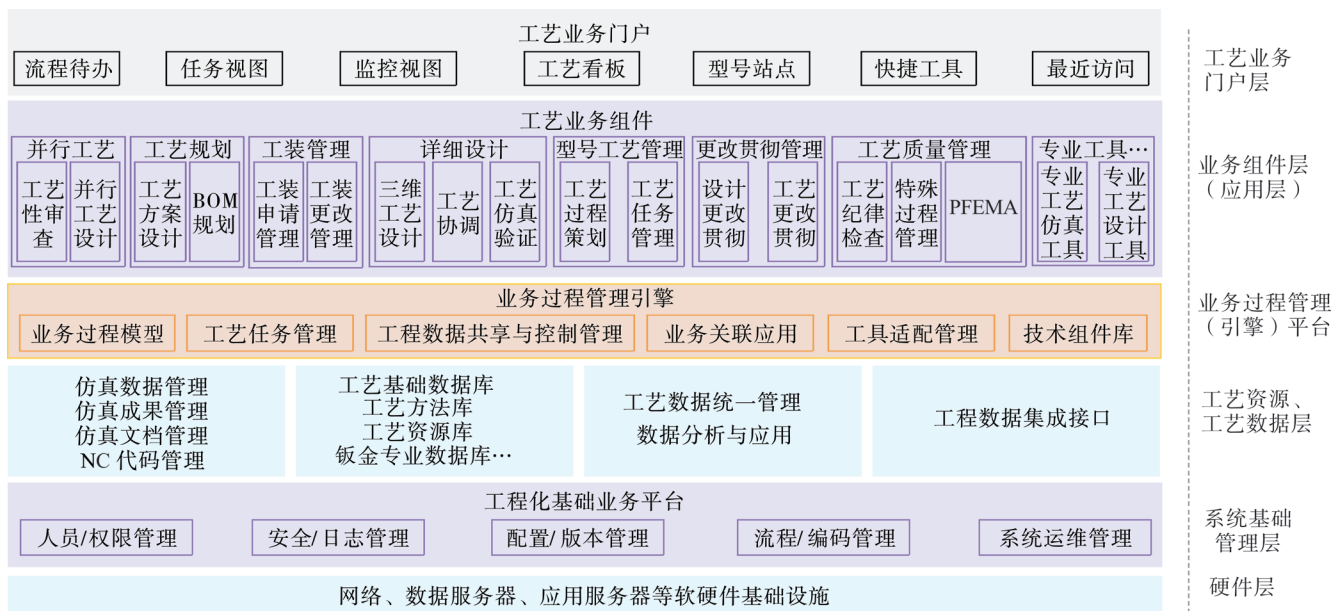


图3 数字化工艺设计与管理平台IT架构

Fig.3 IT architecture of digital process design and management platform

更改的特点,而且与产品结构、产品数据组织模式、产品模型、工艺模型等数据密切相关。因此,一方面工艺任务管理需要能够衔接当前企业项目管理系统中发布的项目计划,能够以型号项目为管理单元开展管理和考核工作;另一方面通过应用系统的工艺任务管理组件使各型号项目的工艺任务通过细分责任到具体工艺人员,工艺人员负责的工艺任务与具体的工艺工作关联,相关的工艺工作在系统中开展,并能够将工作的成果物与任务的完成情况进行挂钩,如图4所示。

在工艺设计与管理平台中统筹管理各类工艺工作,工艺任务的管理主要分为项目视图和月度视图,共享同一数据源,项目视图作为项目负责人(型号工艺总师、课题负责人等)的工作界面,月度视图作为各科室、车间工艺工作人员的工艺任务管理界面。工艺任务来自于型号工艺业务过程模型,项目负责人可以基于型号工艺业务过程模型实例化型号项目的工艺任务,任务发布后支持各级工艺人员进行逐级的层层分解与反馈,最终实现任务的闭环管理。

2.2 并行工艺设计

型号研制周期短,要求必须提高工艺和设计的并行程度:(1)要求工艺尽早开展设计模型审查,以发现设计模型不符合工艺性的地方;(2)要求工艺在设计正式发布设计模型之前就开展并行的工艺设计工作。为了合理安排工艺介入的时机,可以根据设计模型的成熟度来确定何时开展相应的审查工作与并行工艺设计工作。

2.2.1 基于单一数据源的协同工艺性审查管理技术

基于单一数据源开展工艺性审查并实时反馈审查意见^[9],且能够对审查问题进行闭环管理是开展工艺性协同审查的基本需求。在工艺设计与管理平台中构建工艺性审查业务组件,作为对产品设计数据在成熟度期间进行并行审查的流程管理系统,其管理功能通过Web实现,基于模型的可视化审查通过CATIA二次开发客户端模块实现。包括了材料审查管理功能、工艺性审查管理功能、工艺预分工管理功能、设计与工艺意见交互功能、争议处理功能、审查报表输出功能等。以C/S架构和B/S架构结合的方式实现审查流程管理与审查数据三维可视化,支持审查流程的动态配置、而且实现基于工艺标准的审查以提高审查的效率和质量。系统实现了基于三维模型的可视化审查与审查流程的追溯,实现了审查流程与设计成熟度的关联与控制,如图5所示。

2.2.2 并行工艺设计与并行工艺管理技术

在设计正式发图前,即正式发布设计数模的成熟度期间,按照相应的阶段并行开展工艺策划和工艺设计工作。在某一成熟度开展相应的工作是企业型号研制流程需要明确的问题,而将这一流程显性化在系统中,能够在相应的阶段给相关工艺人员推送工艺策划和设计任务是并行设计工作得以有序组织和开展的保障。此外,要求开展并行工艺设计工作,系统就要能够适应并行开展工作的要求:(1)能够在成熟度期间按阶段承接设计的有效数据,因为传统模式是在正式发图

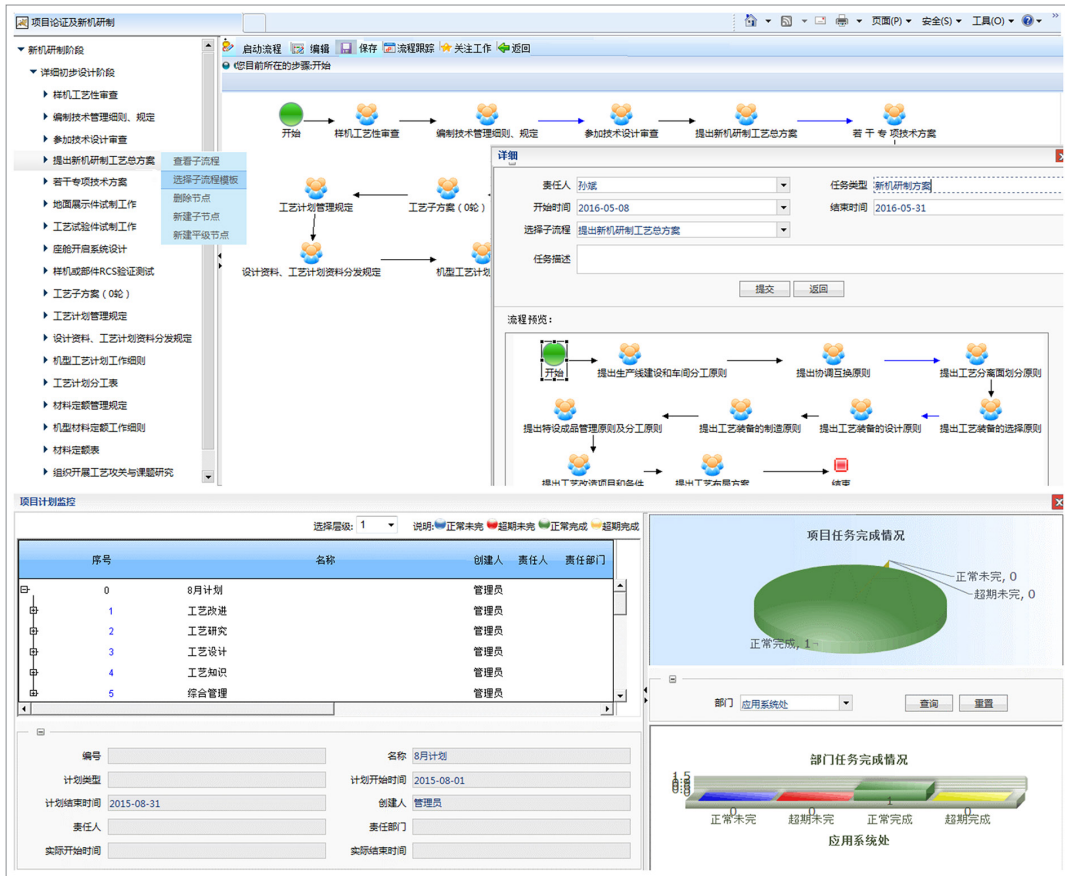


图4 型号工艺业务过程建模与工艺任务管理业务

Fig.4 Process business process modeling and process task management of product development

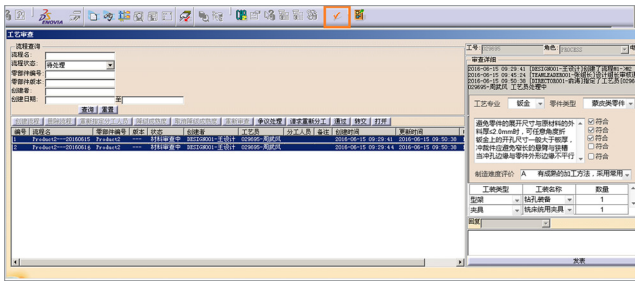


图5 标准化工艺性协同审查

Fig.5 Collaborative review of product manufacturability based on standards

签署流程发布后,工艺才能在 PDM 系统中获取到有效的 EBOM,然后再进行 PBOM、MBOM 的定义,最终传递给车间工艺进行详细设计,如此串行的模式已不能适应型号研制要求;(2)并行设计期间的成果要能够继承到正式发图后的工艺工作中。如在工艺设计与管理平台的并行工艺管理子系统中,根据设计数模的成熟度在 $M_1 \sim M_2$ 、 $M_2 \sim M_3$ 阶段分别开展材料审查和工艺性审查,并在开展工艺性审查的同时进行特殊过程识别、关键过程识别以及零部件级的工艺策划工作,并将上述工作在

系统中生成对应的并行工艺设计任务,如图 6 所示。

2.3 基于模型的三维工艺设计技术研究

工艺设计工作包括工艺总方案策划、各专业方案策划、制造 BOM 设计、详细工艺设计等工作。随着信息化与计算机技术的发展,基于模型的定义(Model based definition, MBD)技术已在国内外航空制造企业得到了广泛应用^[10],通过系统间协同设计及三维数字样机(Digital mockup, DMU)^[11]技术实现了飞机产品的全三维无纸化设计,统一了飞机研发数据源,大大提高了研发效率和设计质量^[12]。在工艺设计与管理方面,航空制造企业通常采用 CAPP 技术,并且实现了工艺数据的结构化表达,支撑下游生产系统对结构化工艺数据的需求。然而,现有 CAPP 技术以二维形式进行工艺设计,工艺端、制造端无法直接利用设计端三维数模,需将三维数模转化为二维图纸,展现形式不直观,转化过程繁杂。因此,各项基于模型的三维工艺设计技术应运而生。

2.3.1 基于3D技术出版物的三维工艺方案策划技术

对于工艺总方案、装配方案等技术文件先前多为文字和图片相结合的方式,以 Word 为载体进行编制和发布,

在数字化平台中通过应用3D可视化技术,将三维模型对象插入到文档中以支持工艺人员根据需要在文档中添加三维动画,实现三维工艺模型、仿真结果等三维动画与文字内容的整合应用,并且支持3D技术出版物^[13]的发布,发布的文档中支持浏览三维动画。

此外,对于新机BOM的规划采用三维工艺规划软件实现基于三维模型的可视化分配与仿真验证,提高BOM设计的效率和质量。工艺设计工作的开展是基于产品模型和产品设计BOM展开, PBOM、MBOM既是工艺策划的成果物,又是后续开展详细工艺设计的依据。

2.3.2 基于模型的三维工艺详细设计技术

基于模型的三维工艺设计针对不同专业的特点采用多模式集成工艺设计环境,以基于MBD的结构化工艺信息模型为框架,多种信息视图相辅相成,建立集成化三维工艺设计环境,实现工艺结构树、三维工艺模型、工序路线图表、工艺BOM、标准化工艺表单编辑等多视图的互联互动,以实现工艺信息和工艺过程的准确和直观表达,如图7所示。

2.3.3 工艺仿真流程和数据管理

实现了三维工艺设计的一个优势就是能够基于三维模型开展专业工艺仿真工作,而且企业也在不同程度上应用了各类工艺专业仿真软件,如支持装配工艺仿真的DELMIA、数控仿真的Vericut、钣金仿真的PAM-STAMP等,部分提高了工艺设计的质量,但是存在仿真要求和流程没有固化、仿真数据离散管理等问题,使得仿真的应用不充分、应用效果不够理想。因此,在数字化工艺设计与管理平台构建了工艺仿真管理模块,固化工艺仿真要求,明确工艺仿真任务,并实现对工艺仿真数据的统一管理。

2.4 工程更改贯彻管理

本研究提出希望通过实施工程更改贯彻的数字化管理,结合并行工艺管理业务的开展实现对工程更改贯彻的快速评估、快速响应和快速闭环。工艺人员要处理的工程更改业务包括设计更改贯彻和工艺文件更改。对于设计更改,主管工艺部门和车间工艺部门参与的工作可以概括为更改审查与更改贯彻,其流程通常已在PDM系统中实现,但一份设计更改引起的工艺更改可能包括BOM变更、工装更改、工艺指令更改、工艺作业指导书更改、交接状态更改、在制品处理等,所以亟需一个统一的集成化环境进行工程更改贯彻执行,并且能够实现工艺技术管理部门对更改贯彻情况进行监控。因此在工艺设计与管理平台中规划了工程更改贯彻执行的业务组件,以实现更改贯彻任务的接入、更改贯彻过程的管理、更改贯彻环境的集成和更改贯彻的统计与监控。

2.5 工艺数据的分析与应用技术

工艺过程管理是一个动态的、复杂的、多专业的工程管理活动,然而各个组成部分之间相互联系、相互支撑,需要从整体角度进行分析和综合。通过对各项工艺设计与管理业务产生的数据进行统计和分析,量化工艺过程的执行状态和工艺设计要素的应用情况,并形成各种报表和图表,进一步组成工艺管理数据看板,为工艺管理提供决策支持,如图8所示。

3 数字化工艺设计与管理平台的建设与应用建议

本研究论述了工艺设计与管理平台的构建关键技术和应用场景。在工艺设计与管理平台构建过程中主

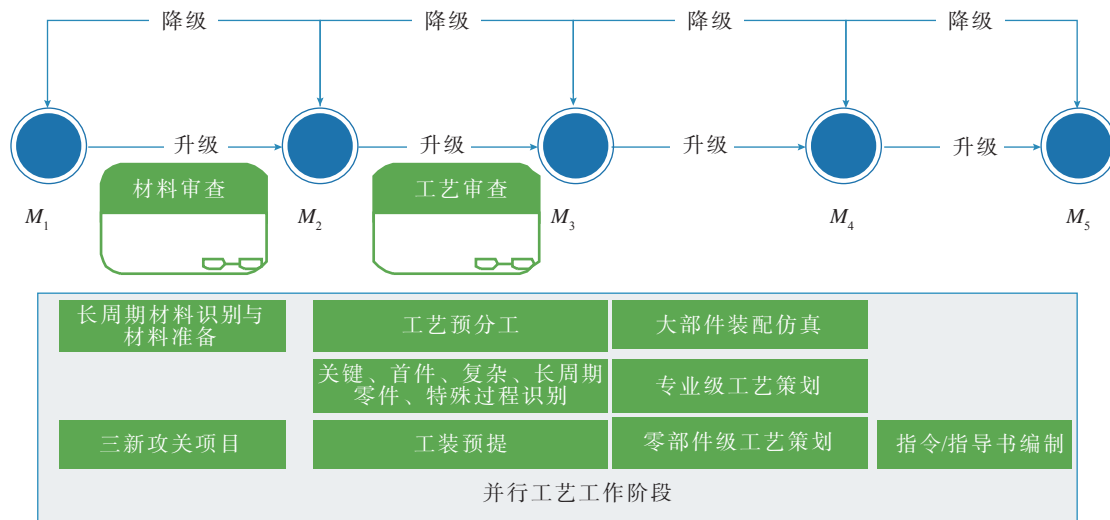


图6 基于成熟度的并行工艺设计
Fig.6 Concurrent process design based on maturity

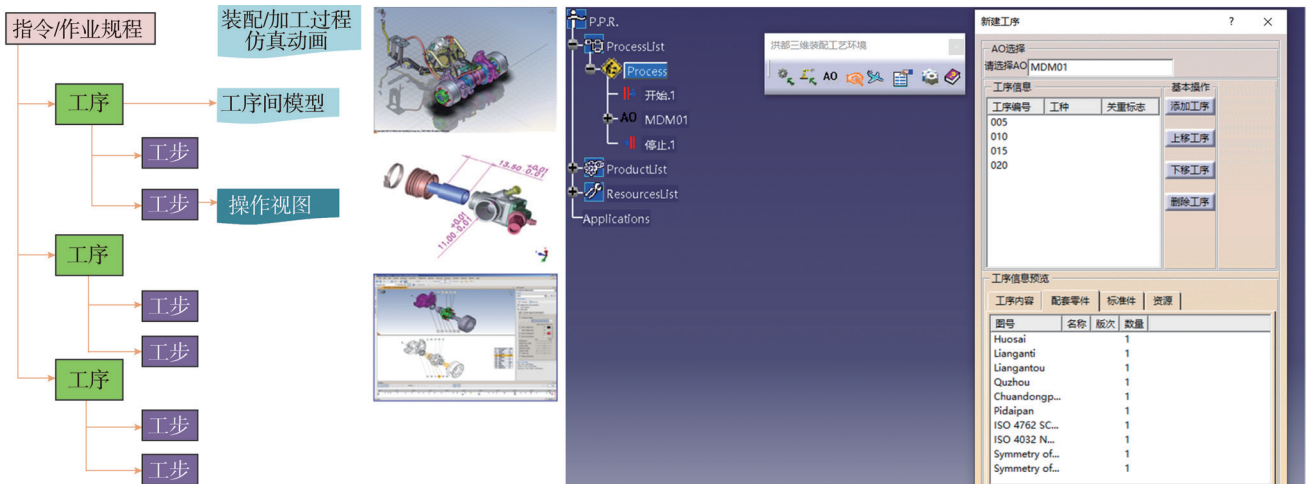


图7 基于模型的三维工艺设计
Fig.7 3D process design based on model



图8 工艺业务管理过程数据看板
Fig.8 Process business management process data screen

要关注统一工程化平台的架构设计、实现与组件化的建设模式,既支持自建组件又支持商用成熟专业设计与仿真工具的集成应用。平台化和组件化的架构模式可以较好地支持后续组件升级、扩展和集成应用。平台从工艺设计、工艺管理、工艺数据3部分进行组件的建设,完成了工艺设计管理平台的建设,在此基础上开展了某型号的应用,主要应用了型号工艺研发过程的策划与型号项目计划管理、工艺性审查与并行工艺设计、三维工艺设计与仿真、三维作业指导书现场可视化等数字化工艺业务场景。根据在建设和应用过程中的经验,提出如下建议。

3.1 统筹规划和分步实施

信息化项目的建设应该统筹企业业务发展和IT战

略规划,由于信息化建设无法一蹴而就,项目的实施应依据“统一规划、分步实施、逐步深化”的策略开展,同时在项目规划和平台架构设计时要考虑系统的可扩展性。

3.2 架构引领和规范配套

数字化平台应用的IT技术和IT架构是为业务服务的,IT规划应该以业务架构为导向,同时工艺业务架构的设计也不应该孤立进行,而是对企业业务架构和型号研制业务架构进行承接。在数字化平台应用过程中,应该有配套的文件来规范数字化平台应用,加强信息化与业务的融合,以支持研制模式的转变和体制机制创新,显著提升信息化对业务的价值贡献。

3.3 模型驱动和应用集成

以型号工艺设计业务过程为导向,通过流程建模的方式支撑标准化、精细化和可扩展的工艺业务过程,同时注重与上下游系统的集成,从而实现业务贯通、数据共享、交互便捷。

4 结论

本研究基于飞机制造企业对于通过数字化技术赋能工艺设计业务能力提升的需求,对数字化工艺设计与管理平台架构以及关键技术进行了研究,提出以产品模型和制造构型信息作为数据主线,以型号研制工艺业务过程作为业务主线,以型号项目为管理单元的工艺工作任务管理为抓手,构建面向工艺全过程的集成化、一体化、基于模型的数字化工艺设计与管理平台。在完成工艺设计与管理平台及其关键业务组件的构建后,应该面向知识化、智能化的方向去研究以及规划后续的建设方向。

(1) 关注工艺仿真的应用成效,深化工艺设计与仿真一体化技术的研究与应用。

(2) 关注对历史工艺数据的统计分析,探索应用机器学习技术来挖掘历史工艺数据的价值。

(3) 关注工艺设计的知识化,深入对工艺设计领域中如何应用特征识别、人工智能等技术进行知识化工艺设计的研究与应用。

(4) 关注基于数据分析尤其是现场实测数据分析的工艺设计技术的研究与应用。

参考文献

- [1] 丁晓东. 加强企业的工艺标准化工作[J]. 机械工业标准化与质量, 2003(12): 20-28.
DING Xiaodong. Strengthen the process standardization of enterprises[J]. Machinery Industry Standardization & Quality, 2003(12): 20-28.
- [2] 马自勤. 现代工艺管理及若干关键技术研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2008.
MA Ziqin. Research on contemporary technology and process management and key techniques[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2008.
- [3] 亢亚敏. PLM在航空制造业的应用研究[D]. 上海: 复旦大学, 2006.
KANG Yamin. Application of PLM in aviation manufacturing enterprises[D]. Shanghai: Fudan University, 2006.
- [4] 任承峰, 吴世强. 汽车工艺设计与管理系统的研究与应用[J]. 中国制造业信息化, 2012, 45(12): 43-44.
REN Chengfeng, WU Shiqiang. Research and application of automobile process design and management system[J]. Manufacturing Information Engineering of China, 2012, 45(12): 43-44.
- [5] 曹畅. G公司基于Windchill的产品数据管理流程研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
CAO Chang. Research on product data management process of G company based on Windchill[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [6] 周红桥, 张红旗, 陈兴玉. 机械产品三维数字化工艺标准体系研究[J]. 中国标准化, 2012(12): 108-112.
ZHOU Hongqiao, ZHANG Hongqi, CHEN Xingyu. Research on three-dimensional digital process planning technology standard system for mechanical products[J]. China Standardization, 2012(12): 108-112.
- [7] 邱福生. 型号产品工艺分工系统及其关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
QIU Fusheng. Research on product process assignment system and key technologies for project[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [8] 郭源, 刘鼎, 张镇琦, 等. 航天型号方案研制阶段技术状态与进度管理探索[J]. 质量与可靠性, 2019(4): 11-15.
GUO Yuan, LIU Ding, ZHANG Zhenqi, et al. An exploratory study on the configuration management in project design period and process control of aerospace model engineering project[J]. Quality and Reliability, 2019(4): 11-15.
- [9] 郭超朋, 吴志鹏, 郑炜, 等. 产品MBD数字化模型的工艺审查系统研究探析[J]. 现代制造技术与装备, 2020(2): 16-18, 25.
GUO Chaopeng, WU Zhipeng, ZHENG Wei, et al. Research analysis on process examination system of the product based on model based definition[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020(2): 16-18, 25.
- [10] 崔德刚, 刘看旺, 郑党党, 等. 基于MBD的飞机设计与制造技术研究与应用[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(12): 3052-3060.
CUI Degang, LIU Kanwang, ZHENG Dangdang, et al. Research and application of aircraft design and manufacturing technology based on MBD[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019, 25(12): 3052-3060.
- [11] 樊留群, 丁凯, 刘广杰. 智能制造中的数字孪生技术[J]. 制造技术与机床, 2019(7): 61-66.
FAN Liuqun, DING Kai, LIU Guangjie. Digital twin technology within intelligent manufacturing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(7): 61-66.
- [12] 宁振波, 张晓梅. 先进飞机设计技术发展展望[J]. 航空制造技术, 2016, 59(5): 24-28.
NING Zhenbo, ZHANG Xiaomei. Development and prospect of advanced aircraft design technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(5): 24-28.
- [13] 曲建东. 基于S1000D的民用直升机持续适航文件编制技术研究[J]. 航空维修与工程, 2019(12): 28-31.
QU Jiandong. Research on instructions for continued airworthiness documentation based on S1000D for civil helicopter[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2019(12): 28-31.

通讯作者: 邱燕平, 研究员级高级工程师, 主要从事工艺技术研究与管理工

(责编 古豪)