

航空制造业数字化协同技术 综述

Review of Digital Cooperative Technology in Aeronautical Manufacturing Industry

中航工业第一飞机设计研究院 刘雅星



刘雅星

中航工业第一飞机设计研究院研究员,一级技术专家,专业主任设计师,工程信息化领域学术带头人。曾参与中航工业多项目协同平台的论证和工程应用,负责国家重大专项协同平台的建设与实施,参与多型号产品数据管理与技术状态管理体系的设计与实施工作。

作为高端装备制造业的典型代表,航空制造业具有集成与综合化程度高、多元化广域协同范围广等显著特征,需要充分利用先进的数字化协同技术,构建多层次、多方位的全价值链协同业务体系和应用体系。我国航空制造业在全球产业竞争格局

航空制造数字化协同体系包括了业务体系和应用体系,其建设和应用的过程也是实现企业业务变革和管理创新的过程,涉及到商业模式、组织体系、业务流程、资源技能、工具及应用等方方面面的优化和整合。在体系化建设和应用推进中应注意业务与IT的紧密融合,以业务变革推动IT应用体系构建,以IT应用体系保障业务变革的成功实施。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.18.066

大调整、大变革和大发展的历史时期,迫切需要优化产业结构,突出核心能力,以抢占价值链高端。在此背景下,有必要面向企业业务转型升级的总体目标,从全生命周期产业链、端到端价值链等多个角度,重新梳理飞机工程研制与服务保障的协同业务模型体系,并引入新的信息化技术和先进管理思想,构建数字化协同的先进协同应用体系,推动飞机研发、制造、服务保障的业务模式变革,提升核心竞争力。

国内外现状

1 国外情况

计算机支持的协同工作(Computer Supported Cooperative

Work,简称CSCW)的思想是1984年由Grief和Cashman提出的,其目的是构建一个计算机支撑下的虚拟共享环境,使分布在异地的人员能够基于该环境进行快速、高效的协同工作^[1]。欧美等发达国家对CSCW的研究和应用高度重视,并且通过政府、机构和大公司的资助,支持科研院校进行了大量面向工程实际的协同技术研究工作。如欧洲的Esprit II计划中的Euro-CoOp项目^[2]就是为了开发能支持分布式协同的系统,并将其应用于大型的工程项目。Stanford大学联合Lockheed、EIT及HP进行的PACT项目^[3]用于研究大规模、分布式并行工程系统,重点研究分布式协同设计的问题。

题。由 APAR SISTO 资助 Stanford 大学 CDR、EIT 及 SIMA 合作开发的 SHARE 项目^[4]支持 Internet 网上的设计小组进行同步的产品设计。

随着欧美高端制造业企业纷纷采用全球化战略,不断优化产业结构,并通过产业链的分散化协同实现优势互补,从工业化需求层面大大推动了协同技术的发展和工程化应用,形成了大量数字化协同的成功案例和最佳实践。如 Airbus 的 ENHANCE、VIVACE 项目^[5],以及 Airbus 集团(原 EADS 集团)发起的 PHENIX 项目^[6],并基于这些项目构建了 A380/A350/A400M 等型号的 PLM 协同平台。Boeing、Lockheed Martin、Raytheon、NASA、Thales 等公司也通过实施 PLM 协同平台推进了其业务变革和转型工作。下文以 Airbus 集团为例进行说明。

在全球化战略指引下, Airbus 集团的业务模式由“Build to Print”(来图加工模式)向“Integrators”(集成商模式)转换,即只关注顶层设计及集成、客户服务、适航等核心业务,剥离非核心业务,将 70% 以上的零部件分包给 RSP(风险共担供应商)和二级、三级供应商。为了适应该业务模式, Airbus 集团在 2007 年实施了 PHENIX 等项目,以推进 PLM 等信息化平台在三大子公司和扩展企业(EE)范围内的应用、工具及流程的统一。基于该项目, Airbus 集团面向产品全生命周期构建了市场营销、研发、生产、客户服务的一体化应用体系。该应用体系通过 xBOM 实现单一数据源管理和全生命周期构型管理,通过构建面向全球的协同环境实现 EE(Extended Enterprise)的广域协同,以支撑空客内部以及 17000 多名供应商之间的协同研发,保证了 A380/A350 XWB 等型号研制的成功。

在 Airbus 集团的业务转型过程中,其 90 年代专门成立的 ACE(Airbus Concurrent Engineering)部

门强调将业务与新的管理理念和 PLM 等信息化工具紧密结合,不断优化组织结构、业务流程、标准体系及应用工具,将传统的串行研制模式转变为并行工程研制模式,并在 A380、C295、A400M 和 A350 等型号的研制中成功地进行了应用,大大提高了协同效率,缩短了研制周期。在 A320neo 新型号研制中, ACE 又提出了协同工程^[7](Collaborative Engineering)的新研制模式。在并行工程模式中,功能设计(Functional Design)与生产工艺设计(Industrial Design)虽然存在并行,但是仍然是两个不同团队、不同业务流程,设计交付 DMU 之后,工艺仍然需要进行转换工作。在协同工程模式中,功能设计与生产工艺设计的业务和组织完全融合,采用统一的设计流程,并将一个统一的 iDMU(Industrial DMU)交付给生产执行环节(MES/ERP)。生产执行环节的超差偏离将反馈至 iDMU,形成 As-Built(单架次实例化 DMU)。传统模式、并行工程及协同工程的差异性比较见表 1^[7]。

2 国内情况

国内制造业从 20 世纪 70 年代开始应用数字化技术,经过近 30 年的努力取得了显著成效,在产品设计、制造、管理的各个环节已广泛应用数字化技术,各种诸如 CAD、CAPP、CAM、PDM 和 ERP 等单项技术与系统的应用比较普及,产品研制周期明显缩短,设计制造质量显著提高。面对市场与研制的全球一体化

趋势,我国的航空制造业从原来一厂一所的独立研制模式向多厂所联合研制甚至国际合作研制的模式转变。借助大飞机等重大工程项目,中航工业第一飞机设计研究院、中国商飞等单位纷纷开展了分布式数字化协同研制平台的建设^[8],型号研制中的多家参研单位可以基于该协同虚拟工作环境开展协同工作、数据共享、构型状态管理和控制等,以消除多家参研单位的地域障碍,提高协同效率,确保了型号研制的成功。

与国外高端制造业企业的数字化工程协同能力建设情况相比,国内航空制造企业虽然构建了相应的数字化协同应用体系,但是传统的业务模式仍然没有发生大的改变,工程协同的建设内容主要限于数据的发送与接收、现场单据协调等,缺少与业务的紧密融合和相互促进,数字化协同技术的效能和价值远未发挥。针对这些问题,下文将从数字化协同技术架构和关键技术两个方面分别进行详细论述。

数字化协同技术架构

为了提高市场竞争力,航空制造业未来将持续推进业务转型升级,通过调整和优化产业结构,进一步开放价值链体系,以实现优势互补和降低成本。未来航空制造业全球化开放式价值链体系如图 1 所示。在该体系中,大部分的产品设计、原型制造、零部件生产、系统集成都将外包给多级供应商,主制造单位主要负责顶层

表 1 传统模式、并行工程与协同工程的比较

特点	传统模式	并行工程	协同工程
时间周期	设计工艺串行	设计工艺并行	设计工艺高度共享
团队	两个独立团队	部分成员形成 IPT	一个团队
交付	二维图纸	DMU	iDMU
关注重点	产品设计	缩短周期	客户需求
目标	面向功能的设计 (Design for Functionality)	面向装配和制造的设计 (Design for Assembly and Manufacturing)	虚拟化制造 (Virtual Manufacturing)

架构设计、标准工艺过程开发、关键系统及整机总装集成、销售服务、项目管理、质量管理、商业模式开发等。主制造商通过供应链管理 SCM、产品全生命周期管理 PLM 等软件实现与供应商的协同和管理。

基于上述价值链模式,引入先进的研制管理模式,结合航空制造业的业务特点,给出了如图 2 所示的数字化协同技术架构。该架构包括 3 个层次:业界先进的管理思想、4 个维度的数字化协同技术和标准化工程中间件技术。

其中,业界先进的管理思想包括基于模型的系统工程、并行工程/协同工程、精益化管理、全球产业链分散化管理等。数字化协同技术包括以模型为核心的多专业/多学科协同技术(Model Centric)、以模块化为核心的全生命周期价值链端到端一体化协同技术(Module Centric)、以规划和计划为核心的工程管理协同技术(Plan Centric)、以合同协议为核心的全球供应链协同技术(Contract Centric)。该协同技术体系涵盖了全寿期、多层次、多要素、多维度的协同业务。其中,全寿期包括立项论证至售后保障的全生命周期各个阶段,多层次包括专业内、多专业、企业间等,多要素包括进度、质量、技术状态等,多维度包括管理、工程、多级供应商、用户方等。标准化工程中间件主要为不同层次的协同提供通用技术支持,以实现信息集成、流程协同和数据共享。下文将分别对上述技术进行详细论述。

关键技术

1 以模型为核心的多专业/多学科设计协同技术

飞机的设计及更改工作贯彻于产品全生命周期各个阶段,并且涉及多个专业、多个学科。为了确保产品设计质量和满足客户需求,有必要改变传统的以详细设计阶段为主的管

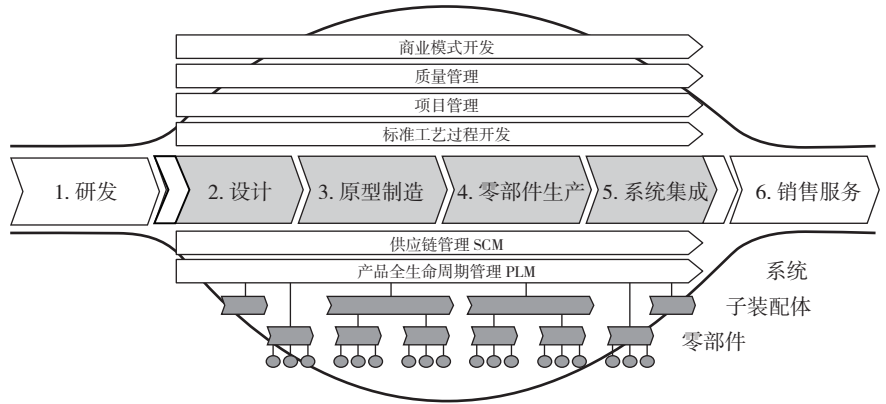


图1 航空制造业全球化开放式价值链

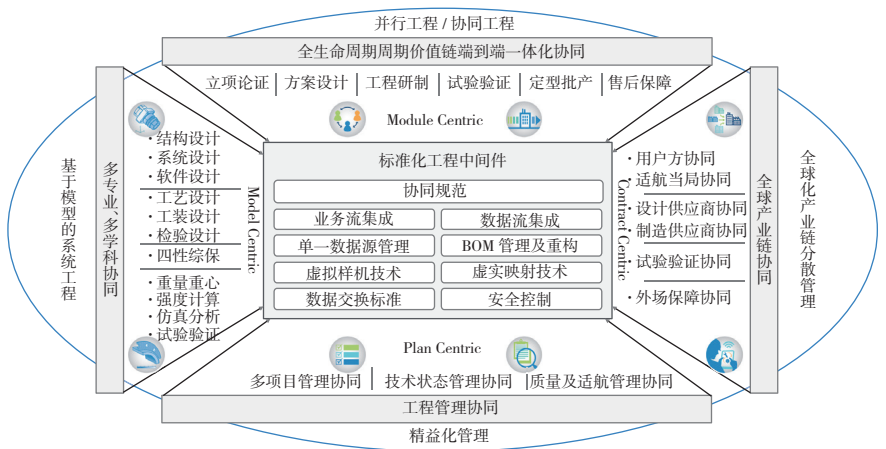


图2 航空制造数字化协同技术架构

理模式,引入基于模型的系统工程管理思想,实现需求、架构设计、方案设计、详细设计、仿真验证的一体化;改变注重结构设计单一专业的管理模式,扩展为广义研发领域多专业的协同,其中广义研发多专业包括结构设计、系统设计、软件设计、工艺设计、工装设计、检验设计、维修保障设计等;改变注重产品设计单一学科的管理模式,扩展为产品设计与四性综保、重量重心、强度分析、仿真分析等多个学科的协同,以优化产品设计特性;改变传统的数据模拟量传递方式,提升为以模型为核心的数字量传递模式,并逐步过渡至虚拟产品联合定义的模式,其中虚拟产品联合定义指的是协同工程模式下的多专业、多学科高度融合的业务协同模式。

在基于模型的系统工程研发体系中,模型代表不同阶段产生的模型

集合,它们互相联系,并分别解决不同领域的问题。模型集合的组成及其逻辑关系如图 3 所示,包括产品设计模型集合和衍生模型。其中,产品设计模型包括需求模型、顶层架构设计模型(参数模型、架构模型、行为模型)、电气/通信设计模型、硬件设计模型、软件设计模型等,这些模型是按照产品研制流程而产生的输出结果。衍生模型是由产品设计模型派生出来,用以验证、说明、分析等用途的特殊模型,主要包括仿真模型、工序模型、检验模型、维修模型、安全分析模型、成本分析模型等。

在基于模型的设计方面,国内外航空先进制造企业已经或正在开展基于 MBD (Model Based Definition) 的数字化产品定义、基于 MBD 的数字化工艺设计及仿真、基于 MBD 的工艺装备设计制造集成、基于 MBD

的数字化检测及质量控制等技术^[9]的应用和标准制订工作,基本实现了全数字量传递的数字化工程协同工作模式。MBD 技术重点解决传统研制模式下的数据表达、传递及二义性转换的问题,数据的核心以产品设计数据为主。如图 3 所描述的模型体系,在 MBD 技术深入应用的基础上,需要向前端的需求设计、系统架构设计,后端的仿真验证、生产、维修、质量(安全、成本、可靠性分析等)等环节进行扩展,并逐步与业务组织调整相结合,向协同工程研制模式下的模型整合方向发展。

基于模型的系统工程管理思想除了强调以模型为核心的设计,还强调全生命周期过程中基于模型的协同管理,即通过管理环境实现产品全生命周期模型数据的管理和基于模型的设计协同,支持各阶段、各学科模型的关联性和可追溯性。

2 以模块化为核心的全价值链端到端一体化协同技术

全生命周期价值链端到端的业务过程包括立项论证、方案设计、工程研制、试验验证、定型批产、售后保障等各个阶段。为了提高各个阶段业务工作的协同效率,确保各个阶段的关联性和符合性,实现模块化统一管理是重要的基础保障。

模块化是一种产品设计及管理理念,在全生命周期价值链端到端的协同体系中贯彻模块化思想,其优点包括^[10]:可以提高产品数据重用性,快速推出适应客户需要的系列化和个性化产品;实现产品结构扁平化,可以简化工程管理和技术状态管理,提高数据管理的准确度;采用先进的模块化生产和装配模式,缩短交付周期;利于产品维修和客户增值服务;利于合作伙伴的接口定义和合作研制机制。

基于模块化的全价值链端到端协同核心技术及支撑规范如图 4 所示。在产品设计初期就需要面向未

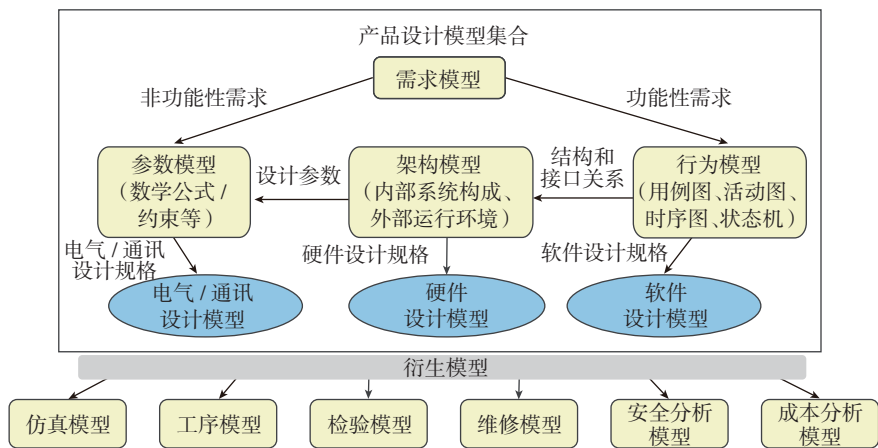


图3 广义产品研发模型体系

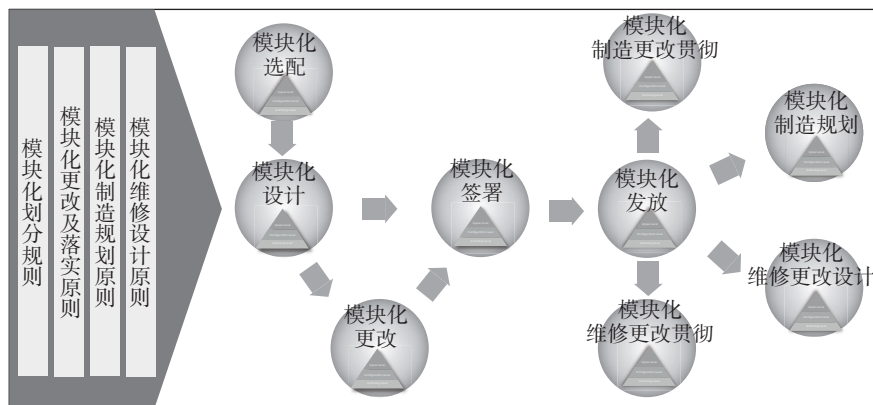


图4 基于模块化的端到端协同核心技术及支撑规范

来的平台系列化发展目标进行模块化规划,并在各个设计环节贯彻模块化设计的原则。在模块化设计过程中,引入并行工程或协同工程的思想,采用DFx的设计方法,以保持底层设计模块在全生命周期各个阶段的一致性和完全共享,避免模块在不同阶段的重新打散,从而影响其符合性和可追溯性。其中,DFx包括面向需求的设计(Design for Requirement)、面向制造的设计(Design for Manufacturing)、面向装配的设计(Design for Assembly)、面向维修的设计(Design for Maintenance)等。

除了模块化的设计技术外,还需要模块化管理和应用技术。模块化主要管理包括基于模块化的数据签署、发放、更改、供应商协同,以保持模块的原子化和完整性管理。模块

化应用主要包括模块化生产、模块化选装选配、模块化交付、模块化维修、模块化技术协调等。

3 以规划和计划为核心的工程管理协同技术

航空制造工程研制工作是一项复杂的系统工程,应用技术复杂且具有不确定性,持续周期长,需要巨大的资金、资源支持和大量参研人员协同工作。因此,为了保障项目的研制成功,需要以规划、计划为核心,采用精益化管理思想,构建相应的工程管理协同应用体系。

图5为以规划和计划为核心的工程管理协同体系框架,该框架将任务规划、计划制定、工程执行、结果反馈等环节紧密结合起来,形成一体化、透明化的精益管理基础模式。基于该框架思想,首先需要利用需求管理工具RT进行协同任务的规划,包

括需求规划、模块规划、质量规划、适航规划、试验规划、工艺规划、维修规划等；然后根据任务规划进行资源配置和进度安排，并在多项目管理平台中形成工程协同计划；工程协同计划可以直接传递给工程研制协同环境 PLM/MES/ERP，使工程人员根据计划任务开展相应的研制工作，并将结果和状态进行反馈。

关键支撑技术包括多项目管理、质量和适航管理、技术状态管理等。其中，多项目管理强调以项目管理为主线，实现复杂装备研制进度、资源、风险、合同、成本等要素的统一管理，并将项目管理与工程研制协同平台进行整合，实现计划及交付的透明化监控和可视化追溯。质量和适航管理将改变传统的事后检查管理模式，通过与工程研制过程的捆绑，实现质量和适航目标定义、分解、实现的关联和全过程监督，以加强事前规划和事中控制。技术状态管理^[11]强调从标识、控制、审核和记实 4 个方面实现全寿期、全要素、全方位、全特性的技术状态管理。其中，全寿期指产品全生命周期各个阶段，全要素包括产品设计、工艺、工装、质量/适航、仿真、试验等方面，全方位包括设计、制造、客户服务、供应商等不同的参研主体，全特性包括虚拟产品的功能特性和实物产品的物理特性。

4 以合同和协议为核心的全球产业链协同技术

随着产业结构的调整和产业链的进一步分散化，飞机研制过程中的协作主体和协作关系将愈发复杂。为了消除地域障碍，有效地管控协同过程并提高协同效率，有必要从总制造商的角度，面向航空制造产业链体系，构建完善的全球产业链协同环境，以合同和协议为核心实现不同协作主体（客户、适航当局、多级供应商、试验单位等）的不同维度（计划、质量、工程等）的无缝协同。

以供应商协同为例，在方案阶段

与供应商进行联合产品定义，确定供应商所承担工作包的技术规格（或技术协议）；基于该技术规格，形成供应商交付计划，指导供应商研制工作，并管理交付和试验状态；基于技术规格和交付计划，总体设计单位按照工作包划分协调区，并将协调区相应的上下文数据发送给相应的供应商，供应商基于接收的设计上下文环境开展分包设计工作，设计完成后提交设计结果，并根据交付和试验情况反馈交付和试验状态。

关键技术包括客户协同、适航当局协同、供应商协同、试验协同、外场保障协同等。其中，供应商协同主要解决一级和二级供应商的协同和管理问题，标准件及零部件供应商管理通常纳入供应链管理体系中进行管理，或者由一级、二级供应商根据配套需求进行管理。外场保障协同则主要实现产品交付后的外场技术支持协同，包括技术资料信息发布、外场技术支持过程管理、装备运行可靠性数据管理等。

5 标准化工程中间件技术

标准化工程中间件技术可以分为集成技术、协同技术和数据共享技术 3 类。其中，集成技术主要解决异构应用或数据库层面的集成问题，集成模式将逐步从点对点的模式向基于 SOA（Service Oriented Architecture，面向服务的架构）的集

成 HUB 模式转变^[12-13]，以实现集成模式的规范化、标准化和可扩展性。协同技术主要解决异地不同协作主体之间的同步或异步协同问题^[14]，包括协同规范和业务流程集成协同。在协同中，需要遵循协同规范进行协同应用环境搭建及对接，并按照规范开展相应的协同业务；业务流程集成协同需要解决跨地域、跨应用的流程对接问题，保证流程的顺畅流转。数据共享技术包括单一数据源管理、BOM 管理、数据交换标准、虚拟样机技术、安全控制等。

在数据交换标准方面，基于 STEP 的数据表达、数据交换和信息系统集成机制，正成为解决不同的异构系统之间数据交换和信息共享的根本机制^[15]。在机械设计与制造领域常用的 STEP 协议包括^[16]：系统工程领域的 AP233、MCAD 领域的 AP203/AP214、ECAD 领域的 AP210、CAE 领域的 AP209、工艺规划领域的 AP224、数控加工领域的 AP238、PLCS（Product Lifecycle Support，产品生命周期支持）领域的 AP239 等。在数字化工程协同中，需要按照上述标准进行异构工具及应用的集成、数据传递和共享。

在虚拟样机技术方面^[17-19]，按照研制阶段划分包括需求样机、概念样机、工程样机、产品样机等。其中，产品样机指工程基本定型后，在工程

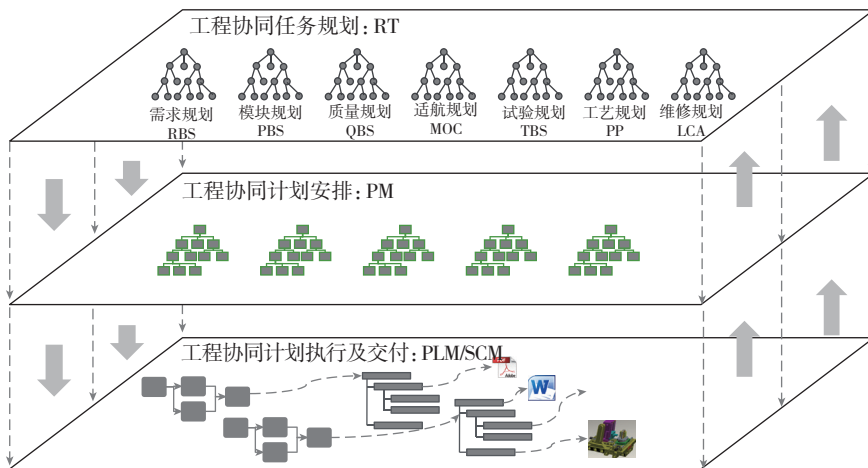


图5 以规划和计划为核心的工程管理协同体系框架

样机基础上增加工装模型、可靠性模型、维护模型、虚拟仿真模型、操作模型等,以支持生产、维修、训练、操作等用途,因此也可以按照用途分为销售样机、生产样机、维护样机、训练样机等。按照专业可以划分为结构样机、功能或性能样机,按照组成关系又可以分为全机样机、分区样机等。目前对虚拟样机的应用主要侧重在结构设计样机 DMU 的展示和干涉检查方面,但 DMU 与工程协同具体应用的结合尚不紧密。未来虚拟样机技术将逐步向全生命周期各个阶段、多专业、多用途的方向发展,并将与工程协同环节紧密融合,实现虚拟样机支撑下的数字化工程协同新体系。

发展趋势

当前,新一轮科技革命和产业变革酝酿新的突破,特别是新一代信息技术与制造业深度融合,正在引发影响深远的产业变革。发达国家纷纷实施“再工业化”战略,强化制造业创新,重塑制造业竞争新优势,如德国提出“工业 4.0”,美国提出“工业互联网”,中国提出“中国制造 2025”等。在“中国制造 2025”战略中^[20],航空航天制造被列为需要重点突破的十大领域之一,在新常态、新战略、新信息技术的大背景下,航空制造的数字化协同呈现如下的发展趋势。

(1) 新业态下的协同商业模式不断变化:随着互联网+与制造业的结合,将催生基于互联网的研制众包等新业态,支持产业链进一步分散至社会个体化的研制资源,从而实现基于互联网的按需设计与制造协同新模式。

(2) 基于企业联盟的云制造协同:通过物联网,实现企业联盟的资源聚合统筹和云端资源整合,催生制造资源运营管理服务的新业态,形成“分散资源、集中管理”和“集中资源、分散服务”的制造资源接入、管理、

使用的新协同模式。

(3) 增强现实支持下的纵向集成协同:在未来,生产过程中的每一步都将在虚拟世界被设计、仿真以及优化。真实的物理世界如物料、产品、工厂等将被建立起一个高度仿真的数字“双胞胎”,通过虚拟与物理世界的纵向集成,实现更深层次的人机动态协同。

(4) 大数据支持下的智能化工程协同:大数据主要包括设计数据、生产设备数据、产品运营数据等,这些数据可以利用物联网从智能产品和智能设备中进行动态感知,然后进行实时分析和自主智能决策,并能够将决策指令反馈给智能产品和智能设备,以实现精准执行。

结束语

航空制造数字化协同体系包括了业务体系和应用体系,其建设和应用的过程也是实现企业业务变革和管理创新的过程,涉及到商业模式、组织体系、业务流程、资源技能、工具及应用等方面面的优化和整合。在体系化建设和应用推进中应注意业务与 IT 的紧密融合,以业务变革推动 IT 应用体系构建,以 IT 应用体系保障业务变革的成功实施。展望未来,随着“中国制造 2025”的逐步推进,新的信息化技术、先进的管理思想将与业务紧密融合,一定能全面促进航空制造业的业务变革,支撑并推动型号研制成功以及先进的数字化协同体系的形成。

参考文献

[1] Reinhard W, Schweitzer J, Volksen G. CSCW tools: Concepts and architectures. *IEEE Computer*, 1994, 27(5):28-36.
 [2] Petal H. Distributed work management activity coordination within the EuroCoOp project. *Computer Communications*, 1992, 15(8):477-488.
 [3] Cutskoskey M R. PACT: an experiment in integrating concurrent engineering systems. *IEEE Computer*, 1993, 26(1):28-37.

[4] Enterprise Integration Technologies' SHARE: A methodology an environment for collaborative product development[EB/OL]. 1993[2015-07-10]. <http://www.eit.com/projects/share/share/share-home.html>.

[5] Thierry Pardessus. Concurrent engineering development and practices for aircraft design at Airbus. *Proceedings of 24th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2004.

[6] Michel Vrinat. PLM BENCHMARK raising the bar for PLM: EADS' PHENIX Program. CPDA Report, 2007.

[7] Mas F, Menendez J L, Oliva M, et al. Collaborative Engineering: an Airbus case study. *Proceedings of the 5th Manufacturing Engineering Society International Conference*. Zaragoza, 2013.

[8] 吴光辉, 刘虎. 大型客机数字化设计支持体系框架. *航空学报*, 2008, 29(5):1386-1394.

[9] 余志强, 陈嵩, 孙炜, 等. 基于 MBD 的三维数模在飞机制造过程中的应用. *航空制造技术*, 2009(25):82-85.

[10] 王庆林. 飞机构型管理. 上海: 上海科学出版社, 2012:89-104.

[11] 刘雅星, 郑晶晶. 飞机产品数据模块化构型管理. *航空制造技术*, 2010(3):57-60.

[12] 张瑞红, 李楠, 查建忠, 等. 基于 SOA 的工程协同设计环境. *河北工业大学学报*, 2008, 37(4):40-44.

[13] 高峰. 基于 SOA 的应用集成中间件研究. *中外企业家*, 2015(8):268.

[14] 高曙明, 何发智. 分布式协同设计技术综述. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, 16(2): 149-157.

[15] 卢炎麟, 周晓, 贾虹, 等. 面向产品全息信息传送的三维 STEP 模型网络浏览器. *机电产品开发与创新*, 2005(18):138-142.

[16] Eckert R, Mansel W, Specht G. STEP AP233 + Standard PDM = Systems Engineering PDM? Munich:CCE, 2005:405-412.

[17] 郑朔昉, 王俊彪. 飞机数字样机研制规范化解决方案. *航空制造技术*, 2003(9): 67-71.

[18] 杜平安, 与德江, 岳萍. 虚拟样机技术的技术与方法体系研究. *系统仿真学报*, 2007, 19(15):3447-3451.

[19] 王钢林, 武哲. 基于虚拟样机的飞机总体设计环境的体系研究. *航空学报*, 2005, 26(2):162-167.

[20] 国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[EB/OL]. 2015[2015-07-15]. <http://www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n13095885/16594578.html>. (责编 谷雨)