

大飞机扩展企业协同业务及技术体系研究

李梅

(中航通飞华南飞机工业有限公司, 珠海 519040)

[摘要] 大型飞机研制模式从一厂一所模式向“主制造商-供应商”模式的转变,也是对飞机研制体系从单一协作体系向扩展企业协作体系的转变。对空客、波音的供应商协同模式进行了描述,分析了某型号飞机供应商协同实践中的问题。在此基础上,从飞机全生命周期角度提出了扩展企业模式下的协同业务框架和数字化平台应用框架,并对关键技术及其验证情况进行了论述。

关键词: 大飞机; 扩展企业; 供应商; 全生命周期协同; 供应商协同体系

Business and Technology Research of Large Aircraft Extended Enterprise Collaboration

LI Mei

(AVIC GA Huanan Aircraft Industry Co., Ltd., Zhuhai 519040, China)

[ABSTRACT] The development and manufacturing mode of large aircraft has transformed from one design institute with one factory to “Main manufacturer – Supplier” mode. Which also is the significant transformation from single collaboration systems to extended enterprise collaboration systems. This article describes the supplier collaboration mechanism of Boeing and Airbus, analyzing the key challenges in supplier collaboration processes of one specific large aircraft. On the basis, proposes the collaboration architecture and digital platform application architecture for extended enterprise, finally demonstrates the key technologies and validation results in detail.

Keywords: Large aircraft; Extended enterprise; Supplier; Lifecycle collaboration; Suppliers collaboration system

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.23/24.089

飞机研制具有集成及综合化程度高、多元化广域协同研制、研制周期紧、服务保障响应快速等特点,其工程化研制及服务保障工作是一项庞大的系统工程。为了突出核心能力,优化飞机产业链体系,空客、波音、洛克希德·马丁等先进航空企业通过推进扩展企业(Extended Enterprise, EE)模式^[1],从最初的制造商向集成商模式进行了转变,在强化主制造商核心能力的基础上,推动了飞机整个供应链体系的全数字化广域协同能力,提高了飞机研制质量,缩短了研制交付周期。

扩展企业是指单个企业为了自身的利益将其供应商、消费者和合作伙伴扩展到合作网络中,并由主制造企业控制管理模式,其与虚拟企业或动态联盟企业的主要区别见表 1^[2]。

通过借鉴国际先进航空企业的经验,国内大飞机研制模式从一厂一所的传统协同模式,逐步向“主制造商-供应商”的模式进行转变,并在大运、C919、鲲龙 600 飞机研制中取得了一定的成效,但是仍然存在主设计、主

制造分离体制带来的多级供应商协同模式不统一、全生命周期衔接度不够、主制造与各级供应商的飞机构型状态不一致、实物交付状态难以管控等问题,从而带来大量成本浪费,影响了飞机研制进度和质量。针对上述问题,本文围绕鲲龙 600 飞机项目为背景,从全生命周期角度分析主制造商与供应商的协同业务体系及工作分界面,提出数字化平台支撑下的供应商全生命周期协同框架,并对供应商协同关键技术进行了详细阐述。

1 飞机研制供应商协同体系及挑战

1.1 空客及波音的供应商协同体系分析

空客和波音为了减少产品投放市场的时间,并与供应商分担较高的开发成本,都将大量的工作外包给了他们选择的供应商,而自身承担核心的需求、架构、集成、客服等高附加值的工作^[3-5]。基于该协作体系(如图 1 所示),在主制造商形成完整的数据源,并构建数字化广域协同环境支持内部多部门/多专业协同,与外部一级

机体结构供应商和二级系统供应商的协同,以及与三级/四级的零部件/材料供应商的协同。其协同机制也根据内部、外部供应商级别进行紧密、松散的模式区分。

随着飞机研制过程中的不断创新(如复合材料、低油耗发动机、航空电子设备、电气系统等),加大了供应商管理的复杂性,并通常遇到如下的主要问题^[1]:制造方法不同导致的制造协同困难,风险共担供应商的分工界面难以协调,复杂创新型飞机项目研制的管理经验欠缺,项目规划与工程实践能力的平衡难度高,快速及有效的员工培训问题,产品质量及材料可用性问题等。基于上述问题,空客在其 A350XWB 型号研制中推行扩展企业的模式,从全生

命周期、全供应链体系优化其研制体系;波音公司则在其 787 型号研制中推行 Exostar 供应商协同应用体系,以推动联合创新和缩短研制周期。两种模式的比较见表 2^[6]。

1.2 鲲鹏600供应商协同中的管理挑战

鲲鹏 600 飞机是我国为满足森林灭火和水上救援的迫切需要,首次研制的大型特种用途民用飞机,是国家应急救援体系建设急需的重大航空装备。鲲鹏 600 飞机按照“水陆两栖、一机多型、系列发展”的设计思路,在满足森林灭火和水上救援要求的同时,兼顾改装成海洋环境监测和保护等用途的可能性和灵活性。鲲鹏 600 飞机研制采用“主制造商-供应商”的“大

表1 虚拟企业与扩展企业对比
Table 1 Virtual enterprise VS extended enterprise

对比项	虚拟企业 / 动态联盟	扩展企业
目标	为了共赢某特定业务机会而形成的优势互补企业联盟	为了主制造企业自身利益而形成的无缝集成扩展实体
适用企业	中小企业	大型企业
组织结构	共同目标及联合声明进行约束	主制造企业控制
生命周期	短暂的、临时的	长期的、稳定的
参与方式	参与企业可以灵活地加入或退出,并同时加入多个动态联盟	参与者基于商务合同加入扩展企业,要求部分参与企业具有排他性
动态配置性	高度配置性	配置性不高,除非商务合同变化或主制造商生产负荷需求变化
合作依赖性	依赖度低,可以动态加入和退出	依赖程度适度,保持扩展企业参与方的适度灵活性及知识产权保护

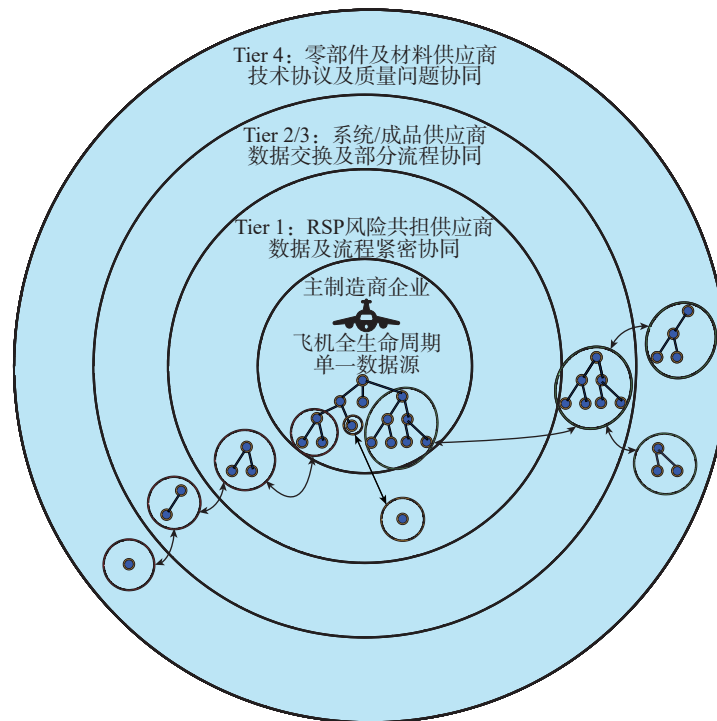


图1 供应商协同层次体系
Fig.1 Supplier collaboration level

协作”模式^[7],充分调动上下游产业链共同参与研制,供应商体系如图2所示。由于参与研制的供应商众多,信息的复杂程度、协同的广度深度都比以往型号更高,作为主制造商,面临供应商管理方面的巨大挑战,主要包括:

(1)产业链协作主体复杂,管理压力大。鲲龙600由航空工业珠海通用航空研发制造基地(简称“通飞珠海基地”)作为主制造商,供应商包括机体结构供应商、机载系统/设备供应商、主要零部件供应商共150多家。由于各个供应商在型号研制过程中所承担的角色不同、工作包分工不同、参与阶段不同、部分分工界面存在交叉,并且供应商还有自己下一级供应商,主制造商的管控压力较大。

(2)产品复杂、一机多型,构型管理难度高^[8-9]。鲲龙600飞机包括5万多个结构及系统零部件、780多项

机载设备、近120万个标准件,产品复杂、水陆两栖技术涉及专业多、一机多型,主制造商对飞机总体构型、各供应商构型、实物构型及其一致性和符合性管理的难度较大。

(3)全生命周期参与,协同周期长。主制造商侧重总体设计、总装集成、试飞验证、适航取证、客户服务等核心工作,并强调对全生命周期各个环节的有效管理。上述过程都需要供应商的共同参与,协同业务面广、周期长、对接流程不统一等问题将导致协同效率低,影响研制周期。

(4)主制造商内部管理压力大。国内的主制造商通常由一个主设计单位和一个主制造单位共同组成,传统的主设计与主制造分离的组织和管理机制,使得主制造商内部与各供应商的协同模式及对接主体存在差异,主制造商内部的管理压力较大。通飞珠海基地打破传

表2 空客公司扩展企业与波音公司Exostar模式对比
Table 2 Airbus extended enterprise VS Boeing Exostar

空客扩展企业(Extended Enterprise, EE)	波音 Exostar
采用统一的业务流程及IT工具,优化A350XWB项目的供应商工作模式; 更多复杂和集成工作包,让供应商更早参与飞机前期开发; 为供应商创建风险档案及详尽计划,以衡量和提高供应商协同工作效能; 实现主要供应商的运营过程监控,支持对供应商的审计及评估; 新模式下的供应商培训宣贯机制	建立与供应商的紧密协作关系,实现风险共担; 支持所有参与的供应商使用统一的工具,支持全局供应商协同过程可视; 加强与供应商之间的数据交换,对订单进行全过程追踪; 对供应商的供应商进行过程监控; 支持波音与供应商对供应链的整体效能进行统计; 实现一系列后勤保障措施保证各部位的及时交付

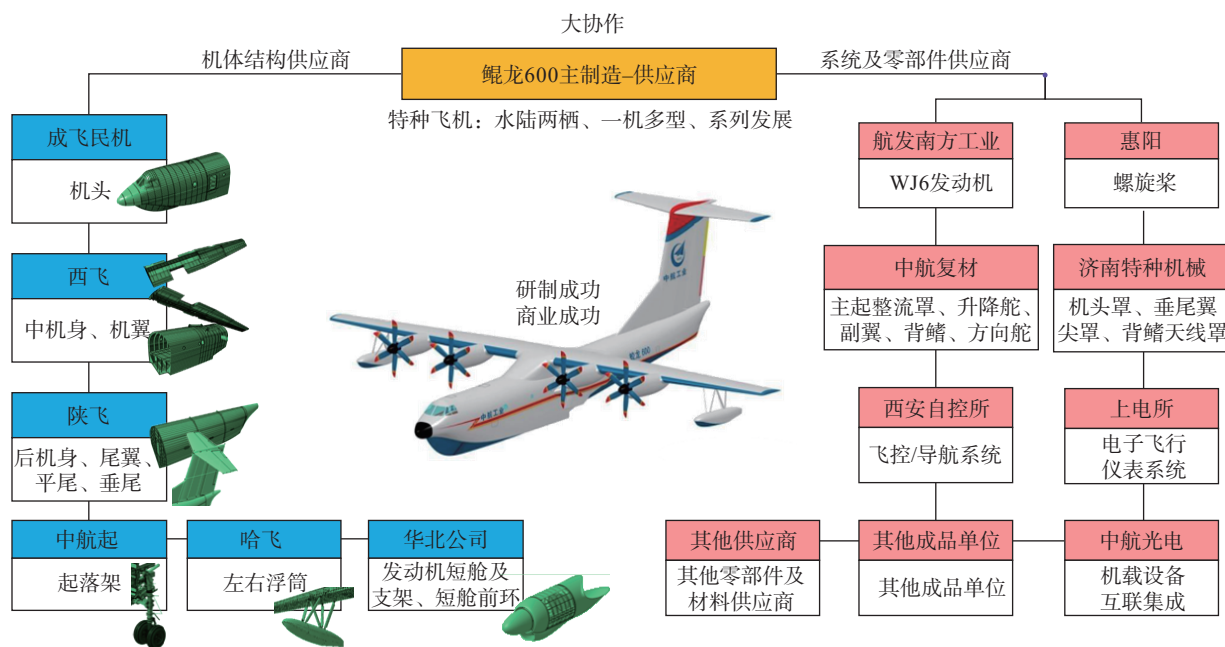


图2 鲲龙600型号主要供应商
Fig.2 AG600 aircraft key suppliers

统的组织体系障碍,对设计制造和客户服务的组织体系进行了整合,具备了主制造商业务体系一体化的优势基础,还需要从内部业务管理流程上进行优化完善,并能够将内部一体化的管理机制延伸至供应链各层次协作主体。

2 扩展企业协同业务及管理模式

2.1 鲲龙600供应商协同业务总览

围绕“主制造商-供应商”模式,本文给出图3所示的鲲龙600全生命周期协同业务框架。基于该框架,围绕鲲龙600飞机项目,从全生命周期各个阶段、供应商级别两个维度,对主要的协同业务进行了重点描述。可以看出,供应商参与了全生命周期各个阶段,并与主制造商在不同层次上开展协同工作^[10-11]。

2.2 鲲龙600供应商协同管理模式

为了有效地推进鲲龙600型飞机未来系列化的可持续发展,有必要从全生命周期的角度,借鉴空客扩展企业和波音Exostar的供应链协同管理模式,围绕上述供应商全生命周期协同业务,明确供应商协同管理模式,构建鲲龙600扩展企业内外一体的协同流程,提高供应商管理能力、协同效率和总体质量,如图4所示。

该扩展企业协同模式的特点如下。

2.2.1 统一基础体系文件

统一飞机全生命周期扩展企业的基础体系,作为总制造商与各级供应商共同遵守的基础。其主要包括统一的构型管理机制、统一的数据协同模式、规范化的协作流程、统一的工具及环境以及供应商IP(知识产权)控制机制等。这些都将成为管理体系文件进行制定和

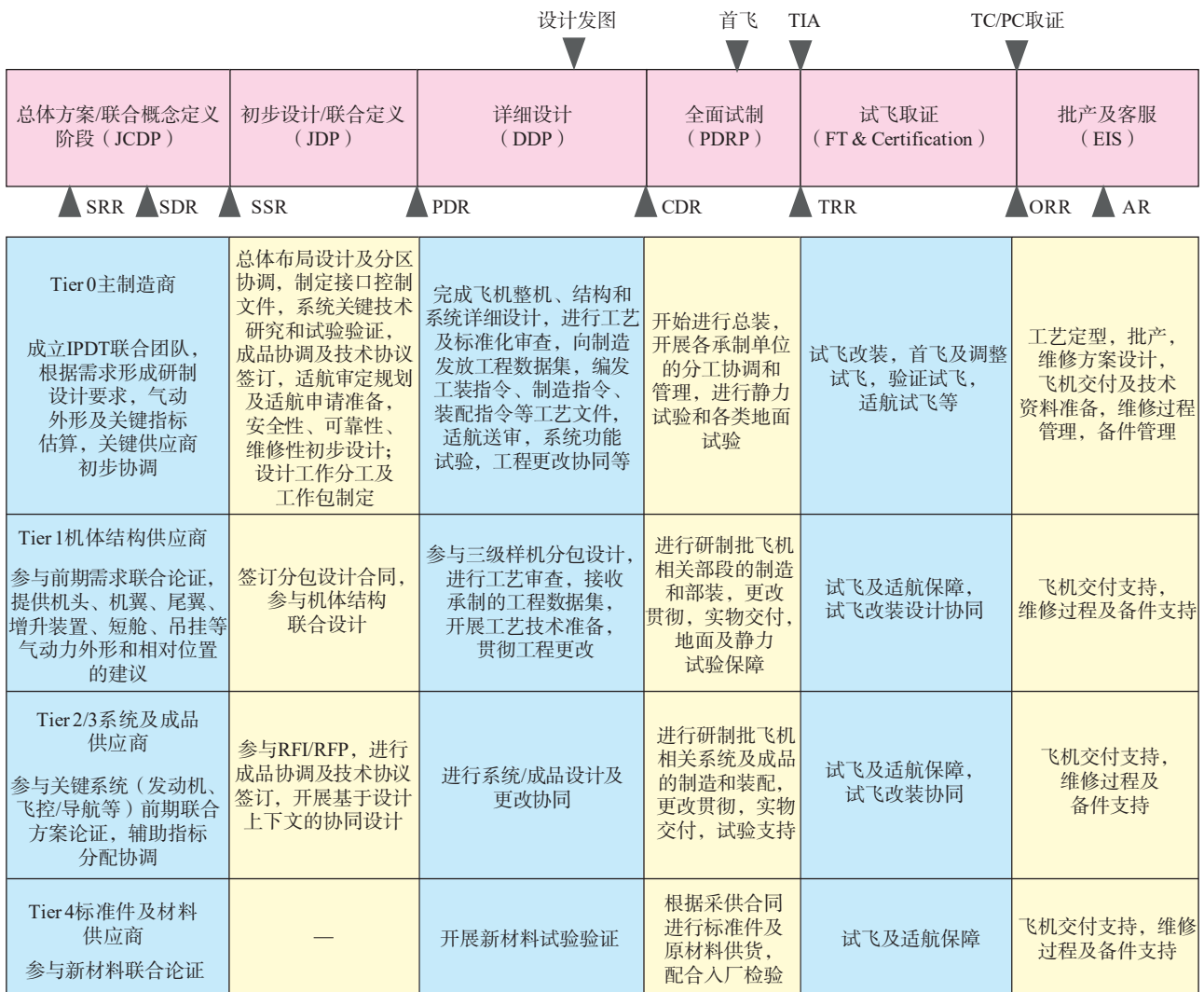


图3 鲲龙600型号“主制造商-供应商”全生命周期协同业务
Fig.3 AG600 “main manufacturer-supplier” collaboration business through lifecycle

下发。

(1) 统一的构型管理机制。包括供应商构型标识、控制、纪实、审核等。主制造商和供应商的构型管理都将模块化为基础,实现标识、控制及审核流程的一体化衔接,并在纪实维度实现二者构型数据的关联性、完整性和符合性。

(2) 统一的数据协同模式。统一数据交换协议、交换方式、共享机制和数据协同流程,保持数据协同的过程可控、可追溯以及协同数据的准确、有效。

(3) 规范化的协作流程。梳理并优化各个阶段、各个类型供应商的协同流程,制定清晰的机体结构供应商管理流程、系统及成品供应商管理流程等,明确主制造商与各级供应商的不同工作分工界面。

(4) 统一的工具及环境。主制造商与一级供应商采用统一的工具及管理环境(PLM平台等),消除异构数据障碍,各个二级和三级供应商需要提交统一格式的数据。

(5) 供应商 IP 控制机制。制定明确的供应商知识产品保护机制,保护各级供应商的知识产权。

2.2.2 一个协同环境

遵照统一的基础体系文件,借助数字化手段,构建主制造商研发、制造、客户服务一体化的协同环境,在此基础上实现与供应商协同环境的一体化,消除供应商协同中数据及流程对接的异地、异构系统障碍。

2.2.3 规范化协同流程

围绕飞机全生命周期研发、制造、客户服务三大业务域,根据协同业务框架,明确协同业务流程并固化至数字化协同平台中,支持基于不同供应商类型的应用协同环境快速配置,使供应商能够基于平台开展相应的协同工作,规范化协同过程,提高协同效率。

3 面向全生命周期的供应商数字化协同框架及关键技术

3.1 总体框架

鲲鹏 600 型号供应链协同业务体系复杂且周期长,传统的各自发展和人工对接方式已经难以满足型号发展的需要。因此,借助先进的 PLM 基础平台,构建面向全生命周期的供应商数字化协同平台,其总体应用框架如图 5 所示。

该框架将遵从统一的鲲鹏 600 供应商协同管理模式要求,按照扩展企业的技术架构延伸特点,将鲲鹏 600 的内部研制平台进行模块扩展,实现供应商协同空间管理,分别针对不同层次的供应商提供相应的应用功能,并在通飞珠海基地内部实现与供应商协同空间的无缝对接,主要实现内容包括:

(1) 通飞珠海基地对外协同功能: 主要实现结构/系统设计、维修等过程中的对外协同,数据异地会签,异地更改协同,供应商工作包划分及协同,供应商交付状

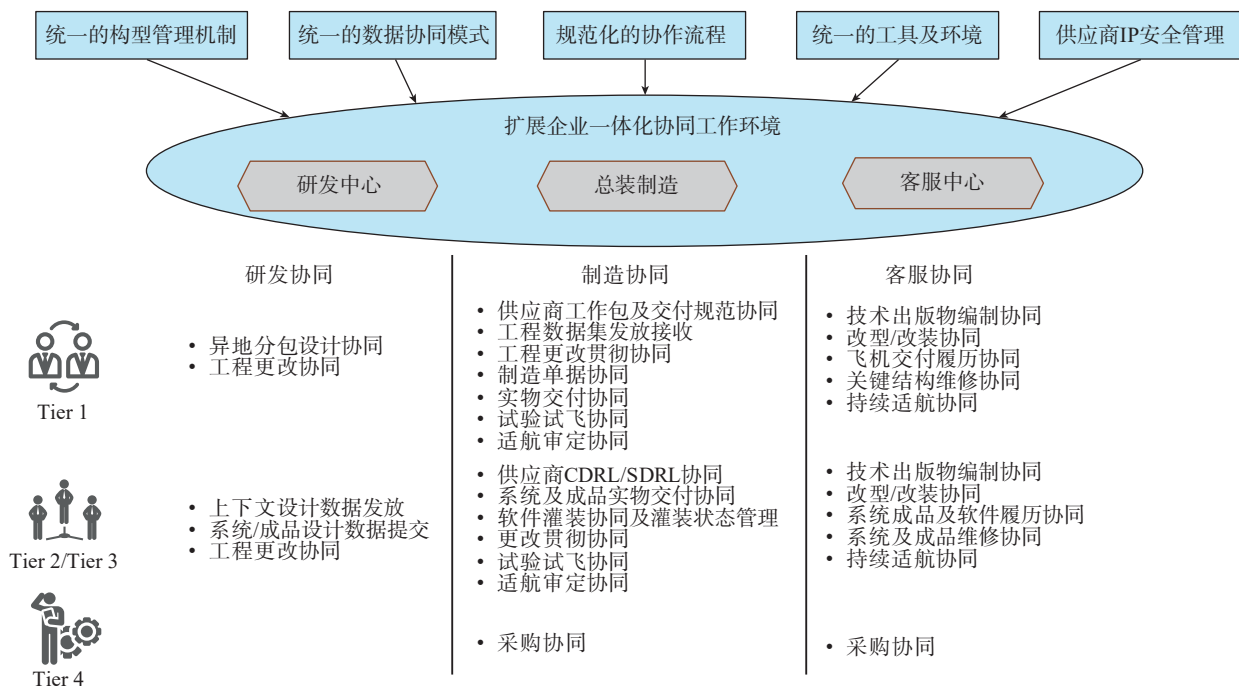


图4 扩展企业协同模式

Fig.4 Extended enterprise collaboration mode

态协同,各类质量单据的协同等。

(2) 机体结构供应商协同功能: 基于统一供应商门户参与飞机机体结构联合设计、工艺会签、更改贯彻、交付协同、维修支持等工作。

(3) 系统/成品供应商协同功能: 基于统一供应商门户提供设计上下文协同、成品数据提交、成品更改协同、各类单据协同、维修支持协同。

该应用架构具有如下的特点:

(1) 依托 PLM 为基础打造端到端应用体系。本平台将依托 PLM 作为基础平台,实现设计、工艺、客户服务、适航、供应商的端到端工程应用一体化,并实现与 MES、ERP、项目管理等系统的对接。

(2) 基于角色的供应商统一门户: 面向全生命周期的各个协同业务应用将按照应用组件方式进行构建,支持基于供应商角色的应用适配。此外,开放相应的 API 接口,支持供应商平台的直接对接。

(3) 供应商 IP 安全控制。通过供应商协同空间与内部数据区的逻辑分离机制,以及高密网 VPN 和防火墙等控制机制,对供应商的知识产权资料进行严格把控,确保主制造商和各供应商数据的安全性。

(4) 业务柔性扩展。随着型号的系列化发展以及业务管理水平的不断提升,主制造商与各个供应商的协同业务也将不断进行优化,该平台具有业务组件灵活扩展性,支持未来的业务柔性扩展。

3.2 关键业务模式及支撑技术

3.2.1 异地分包协同设计

主制造商与关键的一级机体结构供应商为紧密协同工作模式,为了解决异地手工提交大数据量的性能障

碍,实现基于统一平台的跨地域分布式协同设计,构建了图 6 所示的异地分包协同设计技术架构,支持基于电子仓库的定期同步复制机制。异地供应商或主制造商驻厂设计代表可以登录并访问本地电子仓库的设计数据,进行浏览或设计数据提交。系统后台自动保证分布式站点之间的数据一致性。

3.2.2 模块化为核心的工程数据集协同

由于工程数据集的复杂性以及更改过程的反复,为了有效地保障主制造商与各个供应商在数据基础管理规则上的统一,将采用模块化管理思想,实现设计模块为核心的构型数据标识和组织、构型数据工艺审查、构型数据集发放(包括预发放)、工程更改评估及改后数据发放、构型配置信息发放、工程更改贯彻等,确保工程数据集在整个产业链环节中流转的一致性、符合性、正确性、有效性和可追溯性^[12]。

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: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^[13]。

为了有效地实现模块化为核心的工程协同,简化大型复杂飞机的构型管理工作,将飞机产品结构进行了规范化划分:顶层结构、构型层(模块)、底层结构(模块实现)。其中,顶层结构反映飞机结构安装或功能构成,基本保持不变;构型层为飞机的所有设计模块及设计

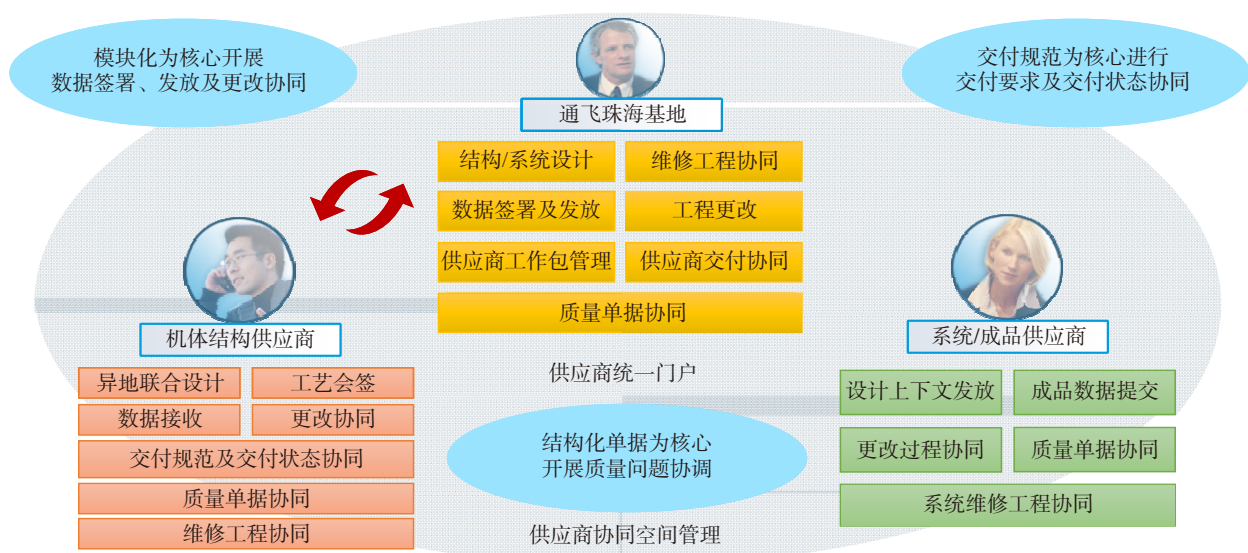


图5 供应商协同总体应用框架

Fig.5 Supplier collaboration application architecture

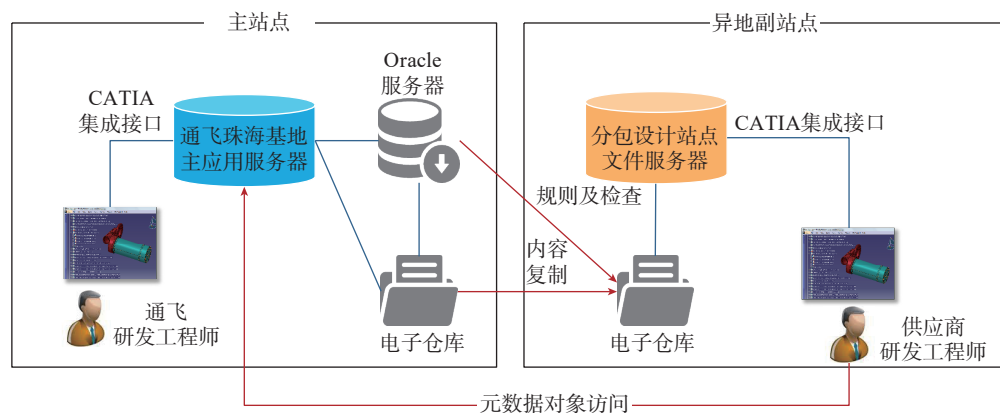


图6 异地分包设计协同架构

Fig.6 Multi-site design collaboration architecture

方案,进行统一规划和分配;底层结构为模块的方案设计实现。设计模块在设计、工艺、生产、客服维修的过程中将保持完整性,以支持设计制造符合性、设计维修符合性。

3.2.3 交付规范为核心的制造协同

传统的纸质/电子分工单及供应商技术协议管理模式,难以有效地指导和控制多个制造供应商的多架次飞机交付状态,为此将借鉴 CDRL/SDRL (Contract Data Requirement List / Subcontract Data Requirement List) 的管理模式,对各供应商按照工作包进行划分,基于工作包对其交付规范进行结构化定义,明确供应商数据输入、工艺及交接状态分离面、供应商交付要求等。其中,工艺及交接状态分离面通过装配连接三维模型进行表述,便于供应商内部基于该分离面进行内部分工及工艺准备。

基于该交付规范,各供应商进行制造,并定期进行架次交付状态反馈,主制造商基于交付规范、供应商提交的架次交付状态进行实物验收,并记录实物实际交付状态,保证交付规范、供应商提交交付状态、供应商实物交付三者的符合性。

3.2.4 供应商结构化单据闭环管理

供应商制造过程中存在超差/偏离等问题,为了维护统一的构型状态,需要对超差/偏离的各类单据进行结构化管理,并对其内外部协同流程进行完整过程闭环控制。基于平台,实现供应商各类超差/偏离等单据(不合格品审理单、器材代用单等)的结构化创建,支持供应商在线或导入至供应商内部平台进行流转,最终实现流程闭环,确保质量问题关闭并保持可追溯性。

3.2.5 工程实现及验证

基于上述研究,依托鲲鹏600型号项目,在面向全生命周期的扩展企业总体框架指导下,初步构建起内外

一体的数字化协同研制平台,为机体结构和系统/成品供应商提供了基于角色适配的协同门户,支持异地设计协同、基于模块化的工程数据集协同、异地工艺审查、工程更改协同、供应商单据协同等,图7所示为界面示意。

通过该平台的建设,在提升主制造商内部研发、制造、客户服务体系一体化的基础上,有效地促进了供应商管理能力的提升,为提高研制效率、缩短交付周期和提高交付质量提供了基础。后续,将随着型号发展需求,扩展对客户协同的支持。

4 结论

随着“主制造商-供应商”模式在国内各飞机型号研制中的深入推进,借助数字化手段并遵循统一机制的扩展企业协同模式成为不断提升主制造商供应商管理水平的趋势。本文围绕鲲鹏600水陆两栖大型飞机型号项目,通过分析空客、波音的供应链管理,从全生命周期角度,总结了鲲鹏600飞机供应商协同业务框架,给出了数字化技术支撑下的供应商全生命周期协同框架,描述了关键技术并进行了工程验证,为飞机全生命周期供应商管理能力和供应链高效协同体系的建设提供了参考。



图7 基于角色的供应商协同门户

Fig.7 Role-based supplier collaboration portal

参考文献

[1] DAVIS E W, SPEKMAN R E. Introduction to the extended enterprise: gaining competitive advantage through collaborative supply chains [M]. Prentice Hall/Financial Times, 2003.

[2] GOEL A, SCHMIDT H, GILBERT D. Formal models of virtual enterprise architecture: Motivations and approaches[C]// Pacific Asia Conference on Information Systems. DBLP, 2010.

[3] FOLAN P, HIGGINS P, BROWNE J. A Communication framework for extended enterprise performance measurement[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2006, 19(4): 301-314.

[4] LI Y X. Supply chain management of aircraft industry[C]//8th International Conference on Management, Education and Information (MEICI 2018). Shenyang, 2018.

[5] CHOPRA S, MEINDL P. Supply chain management: strategy, planning & operation [M]. 5th ed. San Francisco: Person Education, 2012.

[6] MOCENCO D. Supply chain features of the aerospace industry particular case airbus and boeing[J]. Scientific Bulletin – Economic Sciences, 2015, 14(2): 17-25.

[7] 侯兆珂, 溥光星, 刘宣辰, 等. 主供模式下飞机模块化装配工艺设计探析[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 55-60.

HOU Zhaoke, PU Guangxing, LIU Xuanchen, et al. Analysis of aircraft modular assembly process design in main manufacturer-supplier patterns[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 55-60.

[8] MYRODIA A, RANDRUPT, HVAM L. Configuration lifecycle management maturity model[J]. Computers in Industry, 2019, 106: 30-47.

[9] 陆汉东, 侯兆珂, 刘宣辰. 民用飞机机体供应商制造构型差异管理研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2019, 54(2): 89-104.

LU Handong, HOU Zhaoke, LIU Xuanchen. Research on manufacturing configuration difference management of civil aircraft suppliers[J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2019, 54(2): 89-104.

[10] 曾晶. 商用飞机研制阶段的供应商管理模式初探[J]. 科技创新导报, 2015, 12(21): 190-191.

ZENG Jing. Preliminary study on supplier management mode in the development stage of commercial aircraft[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(21): 190-191.

[11] 王龙. 民用飞机供应商管理职能体系分析[J]. 民用飞机设计与研究, 2013(2): 81-86.

WANG Long. Analysis of supplier management functions system of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2013(2): 81-86.

[12] 陈娟, 蔡建丽, 王咏梅. 民用飞机供应商构型管理技术研究与应用[J]. 航空维修与工程, 2014(3): 85-88.

CHEN Juan, CAI Jianli, WANG Yongmei. Technology research and application for civil aircraft suppliers configuration management[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2014(3): 85-88.

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

WANG Qinglin. Aircraft configuration management[M]. Shanghai: Shanghai Science Press, 2012: 89-104.

通讯作者: 李梅, 高级工程师, 研究方向为航空制造信息化应用技术, E-mail: aslm_7206@163.com.

(责编 阳光)

(上接第88页)

failure rate comparison analysis in aircraft wiring risk assessment[J]. Procedia Engineering, 2011, 14: 428-432.

[6] GRIFFITHS L A, PARAK R, CYNTHIA F, et al. The invisible fray: a critical analysis of the use of reflectometry for fray locating[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 697-706.

[7] CHUNG Y C, FURSE C, PRUITT J. Application of phase detection frequency domain reflectometry for locating faults in an F-18 flight control harness[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(2): 327-334.

[8] 张俊民, 魏娟, 谢华博, 等. 基于时域反射法的航空导线绝缘故障检测与分析[J]. 航空学报, 2009, 30(4): 706-712.

ZHANG Junmin, WEI Juan, XIE Huabo, et al. Detection and analysis of aerospace wire insulation faults based on TDR[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(4): 706-712.

[9] 张正团, 文锋, 徐丙垠. 基于小波分析的电缆故障测距[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 49-53.

ZHANG Zhengtuan, WEN Feng, XU Bingyin, et al. Wavelet analysis based power cable fault location[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(1): 49-53.

[10] 刘晓琳, 袁坤. 基于互相关算法的飞机导线故障诊断与定位系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(12): 3903-3905.

LIU Xiaolin, YUAN Kun. Design of fault diagnosis and localization system of aircraft wire based on cross-correlation algorithm[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(12): 3903-3905.

[11] 翟禹尧, 郭纲. 航空电缆 TDR 数据去噪与故障定位新方法[J]. 现代防御技术, 2016, 44(6): 128-134.

ZHAI Yuyao, GUO Gang. New method of data denoising and fault location for aviation cable TDR[J]. Modern Defence Technology, 2016, 44(6): 128-134.

[12] CUPERTINO F, LAVOPA E, ZANCHETTA P, et al. Running DFT-based pll algorithm for frequency, phase, and amplitude tracking in aircraft electrical systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(3): 1027-1035.

[13] 刘晓琳. 飞机导线故障诊断与定位方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.

LIU Xiaolin. Research on fault diagnosis and location method of aircraft wire[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013.

[14] 李保生. 基于时域脉冲反射原理的电线电缆精确测长技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

LI Baosheng. Study on wire-cable length precision measurement technology base on TDPR[D]. Xi'an: Xidian University, 2010.

[15] 宋建辉. 基于时域反射原理的电缆测长若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.

SONG Jianhui. Some key techniques of cable length measurement based on time domain reflectometry[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

通讯作者: 唐健钧, 博士, 高级工程师, 研究方向为飞机集成装配技术及数字化车间, E-mail: tang8848@126.com.

(责编 阳光)