

直升机产品信息全生命周期 管理与集成技术研究*

曾卫平^{1,2},于春江¹,米卫平¹,黄 玮¹

(1. 中国直升机设计研究所,景德镇 333001;

2. 北京航空航天大学经济管理学院,北京 100191)

[摘要] 直升机产品研制随着信息技术的发展得到了进一步规范 and 固化,数字化手段对产品研制数据进行自顶向下有效地管控,同时自底向上高效地反馈。在系统工程及并行工程思想的影响下,结合元模型建模理论,对直升机产品全生命周期研制流程及管理体系进行梳理,阐述了直升机产品全生命周期管理业务逻辑结构和集成技术架构,并分析了全生命周期管理系统集成技术,为直升机产品全生命周期管理与集成提出了一种有效的解决方法。

关键词: 元模型; 全生命周期管理; 直升机系统工程; 系统集成

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2017.12.058



曾卫平

中国直升机设计研究所信息技术研究室工程师,主要从事数字化设计仿真与 PLM 应用研究,获江西省科技进步三等奖 1 项、中国航空工业集团公司科技进步三等奖 2 项。

直升机的设计发展是一个极复杂而又漫长的过程,需要多种工程和制造学科之间相互协调^[1]。直升机整个生命周期业务与协作过程中各个研制阶段都是相互影响的,但现有技术和管理方法存在关系粗放、效率低下、风险较大等问题。随着直升机系统及产品研制过程的复杂度不断上升,复杂产品全生命周期管理与集成技术已成为企业面向产品及系统正向研制的一个重要应用研究问题,也是企业信息化重要的组成部分。

产品全生命周期管理技术在以往理论和实践中都侧重于产品数据管理的文件管理和设计协同等方面的研究^[2-3]。随着系统工程理论相关流程和方法的引入,产品全生命周期管理的复杂度、内涵和外延正在发生变化,以文件为中心的产品数据管理模式远不能满足直升机行业越来越复杂的产品实现过程,系统工程正在成为产品全生命周期管

理(Product Lifecycle Management, PLM)的理论核心,基于模型的系统工程(Model Based System Engineering, MBSE)是 PLM 的发展趋势。

直升机产品全生命周期管理

1 论证与需求体系结构

直升机研制是一项复杂的系统工程,各项工作、各个专业的工作关联性非常密切和复杂,因此在研制流程体系中要准确表达各项工作之间、各个专业之间的关联关系,使工作流程、管理流程清晰受控。整个研制流程体系应全面描述直升机产品全生命周期中各阶段各专业的工作内容,甚至要描述各项工作具体的输出成果,确定所需编制的需求文件、技术文件、更改文件和图样文件,因此直升机产品研制流程应突出产品全生命周期管理。

DoDAF 描述了体系结构的 3 个视图:作战体系结构视图、系统体系

* 基金项目:工业和信息化部民用飞机专项科研项目(MJ-F-2013-01)。

结构视图和技术体系结构视图。在直升机需求论证阶段,基于系统设计标准和系统建模语言(SysML),以面向对象的方法,在需求分析的基础上,设计作战概念并做出各视图层面的用例模型,体系结构设计方法根据系统执行功能和活动需要,不断分解得到系统、分系统及子系统层次的结构图,实现系统模型驱动的论证与需求体系结构。

2 数字化环境下的直升机产品研制

系统工程要考虑产品生命周期内遇到的全部问题,是一个跨学科的协同工作方法。并行工程也强调综合设计和协同工作,使用系统工程的方法进行多学科协同设计已逐渐成为工程领域及制造类企业解决已有问题的一种有效思路,根据业务数据和信息模型的转换,根据集成业务数据的转换进行集成。

数字化技术在直升机产品全生命周期研制流程中各阶段发挥了重大作用。以航空制造业的MBD技术应用为例,基于MBD技术实现三维模型表达产品的设计制造信息,保证产品全生命周期中产品数据的完整性。协同化、集成化、虚拟化、智能化是未来直升机数字化研制的发展趋势,在直升机系统生命周期的项目流程和技术流程中,信息技术应用在包括立项论证、概念设计、详细设计、试验试飞、工艺装配、生产制造、交付使用、保障维护、退出回收等全过程内,通过UPDM、CAD、CAE、CAM等工具软件以及需求管理系统、PDM、SDM、TDM、CAPP、MES、ERP、PAC、SCM、CRM等数字化应用系统对工程研制过程进行管控,构建了以任务和需求定义、逻辑和功能集成、功能和逻辑架构设计为核心的覆盖产品全生命周期的MBSE过程,从运行概念到需求到设计到生产,降低直升机型号研制风险,提高直升机产品质量且满足产品研制各节点的要求。

元模型建模技术

元模型是用于描述模型的模型,是关于模型基本概念、基本关系、基本约束的语义^[4]。元模型(Meta-Model)包括类、属性、关联、操作以及约束等,它体现了产品信息的基本语义关系^[5]。传统信息分析与表达方式无法支持产品全生命周期中信息的管理和集成需要,企业需要统一模型、应用集成、全面协同的产品全生命周期元模型,即在基于模型的系统工程理论上,建立可重构、可扩展、高度集成的关联信息模型,实现覆盖直升机系统工程各流程活动(包含项目流程和技术流程)语义级的互操作。

对于系统建模语言而言,OMG组织陆续提出了UML语言和SysML语言^[6-7],支持了基于模型的系统工程理论在实际工程中的应用。元模型技术是企业建模实施的有效方法,它具有丰富的模型分析和设计功能,通过扩展可满足不同领域的建模需要^[8]。作为一种抽象模型,元模型不局限于具体某一领域,被不同的目标模型所共享,可表达领域模型^[6],也可表达三维实体模型的结构信息模型、仿真信息模型、性能信息模型、管理信息模型等。OMG标准^[9-11]中描述了4个建模层次,分别是信息层(Information Layer)、模型层(Model Layer)、元模型层(Meta-Model Layer)、元-元模型层(Meta-Meta-Model Layer),这些建模层次由不同实例构成,定义了对应不同抽象层面的业务对象或数据对象的描述元素。

产品全生命周期信息元模型分析与表达

1 产品全生命周期的信息模型

产品的信息模型是对产品的形状、功能、技术、制造和管理等信息的抽象理解和表示^[12]。在并行工

程中,统一的产品信息表达和交换式是并行设计的基础^[13]。产品全生命周期的信息模型是对产品全生命周期研制过程中的信息进行形式化的描述,定义除了包含几何形状及拓扑信息、非几何信息等设计制造信息之外,还包括描述产品功能、逻辑、机电液压、仿真、结构、技术规范等更高层次的总体信息等。直升机全生命周期信息模型包括:客户需求模型、需求与论证模型、产品概念模型、产品功能模型、产品仿真模型、产品设计模型、产品试验模型、产品制造模型、产品工艺装配模型、产品验证模型、产品交付与确认模型、产品采购模型、产品运行模型、产品维护模型以及产品退役模型等,图1为按系统工程定义的产品全生命周期各阶段模型化的过程。

统一产品模型连接产品不同生命周期阶段的数据、过程等企业资源^[14],由于SysML、AADL^[15]、Modelica^[16]、ReqIF^[17]、OSLC^[18]、SPICE^[19]等信息建模、数据建模、系统建模、系统仿真标准语言的出现,系统工程定义下的信息模型正逐步取代文档成为直升机研制沟通的主要手段,建立功能、逻辑模型后仿真再验证,模型本身成为过程管理的对象,进而实现全生命周期所管理的各专业领域模型的一致性、可追踪性、可验证性和关联性。

BOM是研究产品数字化数据的产生、加工、拓延、控制和管理的重要组成部分^[20]。BOM中记录了用来描述产品研制信息及研制流程之间的转化关系,不同BOM记录的不尽一致,但是它们都体现了产品全生命周期各阶段信息模型的重要特征,而这些特征都是关联的,如图2所示,制造BOM产品结构中零部件对象与工程BOM(EBOM)相对应,由于装配关系描述不统一,需要根据EBOM产品结构树重构MBOM产品结构树。实际上,EBOM到

MBOM 重构的过程中,产品设计模型与制造模型发生关联,设计制造的业务流程也发生了重构。同理,需求 BOM (RBOM)、仿真 BOM、试验 BOM、工艺 BOM (PBOM)、维护 BOM (SBOM)与工程 BOM 的相应对象具有一致性,基于 BOM 重构的直升机产品全生命周期信息模型成为“基于模型”的研制范式能否从系统工程领域拓展到直升机产品全生命周期的重要转变。

2 产品全生命周期信息元模型的表达

为实现产品全生命周期中元数据级的信息集成,对产品全生命周期信息模型进行有效管理,需建立产品全生命周期信息元模型统一表达产品全生命周期各阶段数据之间的语义关系,避免信息冗余且保持信息模型的一致性。为满足产品全生命周期信息元模型的表达要求,用五元组表示产品全生命周期信息元模型(Product Lifecycle Information Meta-Model, PLIMM),将 PLIMM 描

述为类别、实体、集合、视图、关系这 5 种元素,其形式化定义如下所示: $PLIMM = \{ \langle Type \rangle \langle Entity \rangle \langle Version \rangle \langle Relationship \rangle \langle View \rangle \}$ 。

定义 1——Type 为产品全生命周期信息元模型类别 PType,产品全生命周期管理过程中不同数据信息按种类进行细分,以建模化的思想按照属性、描述等信息差异,将隶属于不同领域的信息模型以类别 ID 号(PtID)和类别名称(Ptname)进行区别并归纳分类,例如文档类模

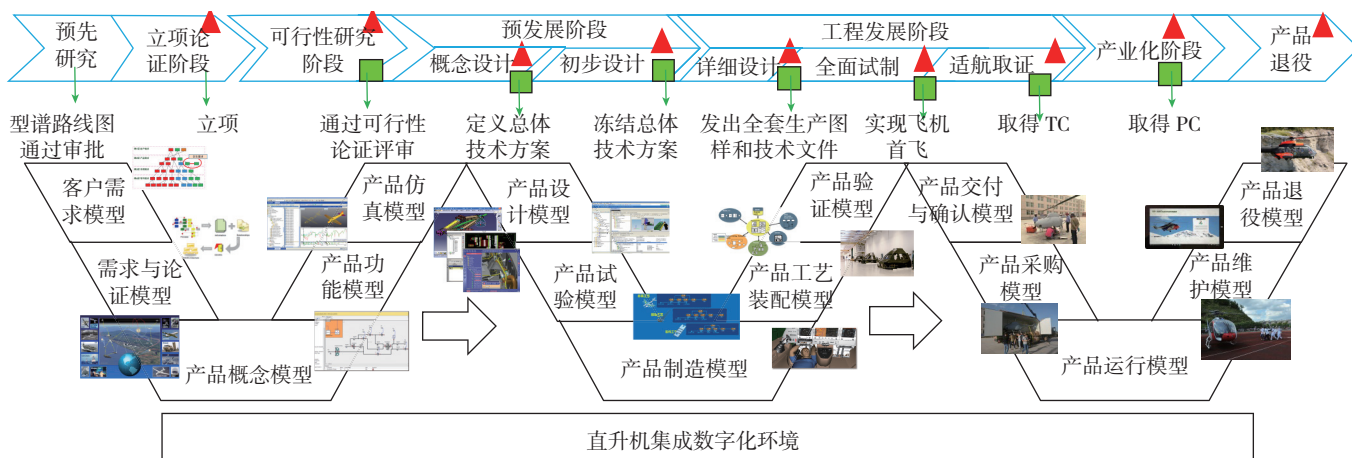


图1 系统工程定义下的直升机全生命周期信息模型
Fig.1 Helicopter lifecycle information model defined as SE

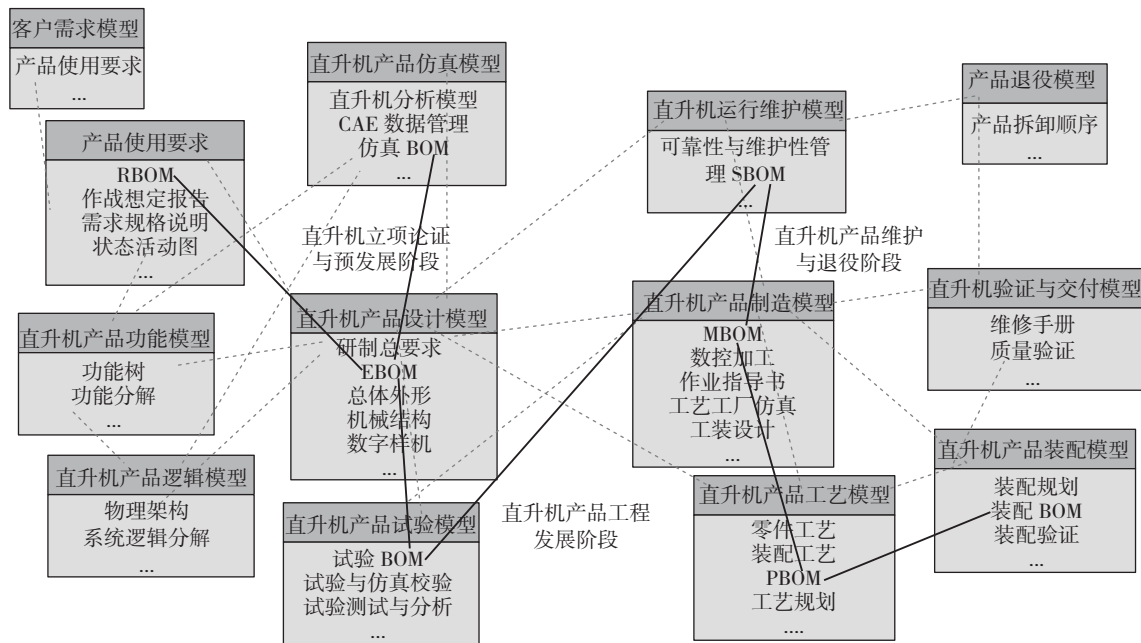


图2 基于BOM重构的直升机产品全生命周期信息模型
Fig.2 Helicopter lifecycle information model based on BOM reconfiguration

型可作为一个类别进行划分,文档集合中可按聚合形式不同再划分出技术文档、说明性文档等子类别,同理图样文件模型作为另一个类别进行划分及再划分。

定义2——Entity 为产品全生命周期信息元模型实体 PEntity,五元组方式表达 $P\text{Entity}=\{\langle PeID\rangle\langle P\text{tID}\rangle\langle Pename\rangle\langle Pecomment\rangle\langle PeAttr\rangle\}$,信息元模型中实体对象的确定是产品全生命周期信息元模型建立过程中最为关键且困难的一个步骤,一个实体可由若干属性来描述,实体对象可被描述和实例化,且实例之间可进行区分与标识。

定义3——Version 为产品全生命周期信息元模型版本状态 PVersion,信息元模型版本状态 $P\text{Version}=\{\langle PeID\rangle\langle PvID\rangle\langle PvStatus\rangle\langle P\text{View}\rangle\langle P\text{Versionlist}\rangle\}$,PvID 为模型对象版本的版本号,PvStatus 标识信息模型的状态,版本 PView 用于标识模型的视图信息,PVersionlist 用于维护模型对象的版本信息。

定义4——Relationship 为产品全生命周期信息元模型关系 PRelationship,元模型关系 PRelationship 是两个或多个实体之间的逻辑联系,即包含两种最基本的联系:依存联系和分类联系。 $P\text{Relationship}=\{\langle PrID\rangle\langle Prname\rangle\langle PrType\rangle\langle PeID\rangle\langle P\text{Version}\rangle\}$ 。

定义5——View 为产品全生命周期信息元模型视图 PView, $P\text{View}=f(P\text{Type}, P\text{Entity}, P\text{Version}, P\text{Relationship})$,元模型视图 PView 按照不同元模型表达目的的不同进行组合。

3 产品全生命周期信息元模型分析

采用层次分析法分析直升机产品全生命周期信息元模型,可将直升机产品全生命周期信息模型分为设计级、协同级、系统级这3个层次。其中设计级是产品全生命周期信息元模型的最原始单元,包括产

品需求论证、概要设计、仿真分析、详细设计等直升机产品全生命周期过程在内,以一定组织形式形成产品仿真与设计数据的视图管理;协同级在生命周期维度中增加了工艺制造、销售交付、运行服务、退役回收等阶段,按照系统工程及系统生命周期流程管理产品数据;系统级是协同级信息模型按照产品研制要求,在PLM系统内完成数据信息的共享和传递。系统级层次模型是直升机产品生命周期维、SE方法体系维和视图结构维3个维度信息所构成的空间信息结构。应用矩阵形式描述直升机产品全生命周期系统级信息结构,获得矩阵 $A=[L\times V]\oplus SE$,式中:SE为系统工程及系统全生命周期流程管理信息维中各种项目流程、技术流程等信息的集合,L为全生命周期维,V为组合视图维,则系统级模型A上任一点的结构信息a描述为PLM系统某阶段内不同视图结构信息的聚合。

产品全生命周期信息元模型采用形式化语言定义和描述数据元模型克服了传统产品模型的不足,在产品协同研制的模型信息交互过程中,对传统的产品模型进行了功能抽象及再抽象,形成元模型及模型的结构化、非结构化的描述文件(如*.xml等)。元模型信息(如文本、结构、电磁、流体等)结构化、非结构化的描述文件不需要参与需求分析、联合仿真、协同设计、工艺制造等全生命周期过程中,支持对产品结构、功能和在特定环境下的行为描述。

直升机产品全生命周期管理技术与系统集成

关于全生命周期管理的OMG标准有AP203(针对通用机械设计的标准)、AP209(关于有限元分析的应用协议)、AP214(基于特征的面向汽车设计全过程的设计协议)、AP224(用于CAPP支持特征的机

械设计应用协议)、AP239(PLCS,构建产品生命周期支持系统的标准)、AP233(计算机可识别表达和系统工程数据交换的标准)、AP242(管理基于模型的三维工程)、PDM Schema^[21]以及PLM Services^[22],这些标准都是基于全生命周期管理的产品数据对产品数据管理系统底层数据库进行扩展的,主要管理不同生命周期阶段产品数据的关系及其有效性。集成技术用于实现产品研制的全生命周期过程中所涉及的各种软件工具的集成与封装,并通过流程与方法实现软件工具间的数据传递,支持不同软件工具的模型抽取、脚本及参数驱动等功能^[23]。集成技术根据集成的松散耦合程度不同而不一样:一类是基于API接口和第三方工具(如Portal等)完成系统集成,这类集成对结构化数据和信息处理较少,主要做数据查询、信息处理、数据整理等产品数据信息发布对接的松散集成;另一类是基于OMG标准的紧集成,即基于标准模型实现多种CAx协同和集成,利用中间件或中性文件(如XML等)获取处理相关信息。

直升机全生命周期管理通过不同信息应用系统之间的集成,从而实现直升机产品的全生命周期数据综合集成和协同创新,这就要求在统一的直升机产品全生命周期管理业务逻辑结构下实现。按照系统工程V&V流程^[4]和系统生命周期流程概览(ISO/IEC 15288:2008)内容要求,结合直升机系统与产品研制的特点,如图3所示,直升机产品全生命周期管理集成架构(Helicopter Lifecycle Integration Architecture, HLIA)是在通过对直升机研制过程中产生的信息和数据进行归纳,发现在基于模型的系统工程理论上,不同工具、不同系统所产生的不同类型数据在直升机产品全生命周期管理过程中流转规律。

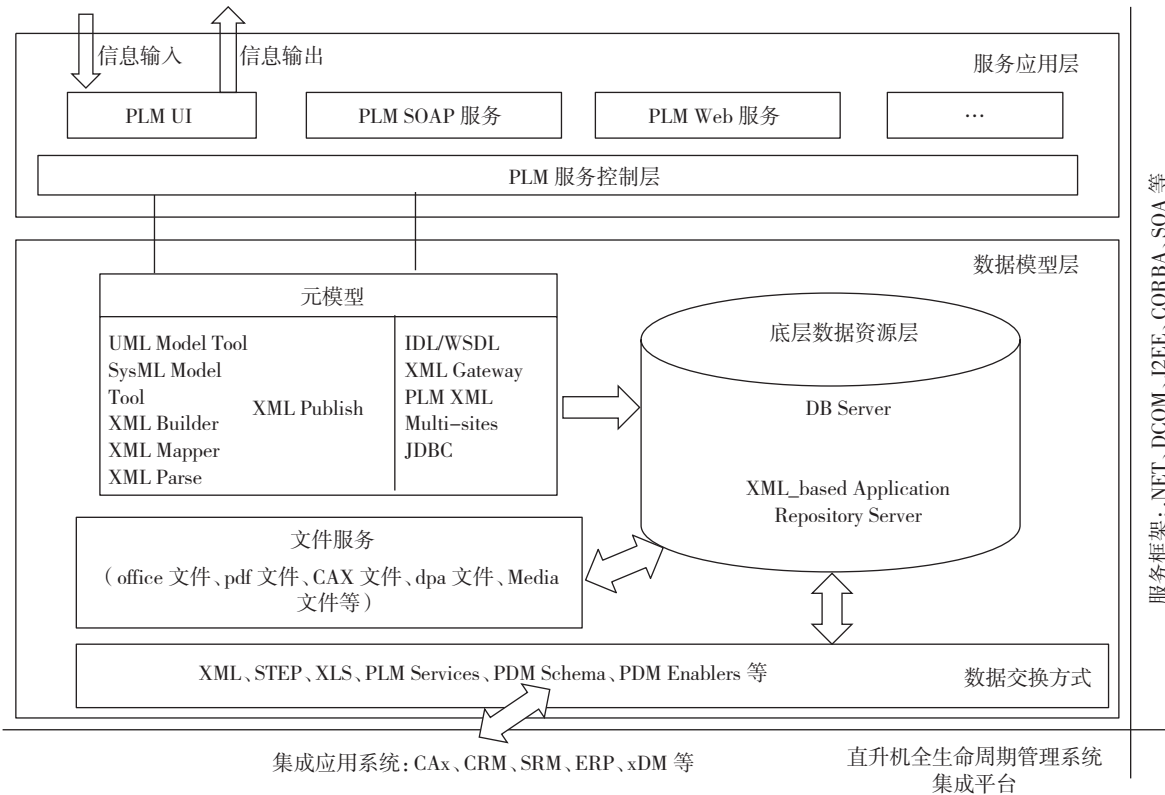


图3 直升机产品全生命周期管理集成架构

Fig.3 Integration architecture of helicopter product lifecycle management

HLIA 在整个直升机复杂系统全生命周期管理过程中一般采用多层体系结构,即在元模型驱动下完成由直升机全生命周期管理业务逻辑结构向直升机产品全生命周期管理系统集成和数据集成的转换。元模型驱动的直升机产品全生命周期管理集成架构以元模型为核心,整个集成平台具备更好的开放性和集成性, DB Server 和 File Server 为底层资源层,由 PLM UI 完成信息的输入和输出。元模型支持以 UML 和 SysML 为建模语言,使用 UML Model Tool 和 SysML Model Tool 建立信息模型,以 XML Builder、XML Mapper 等实现信息模型的转变,基于 PLM XML、Multi-sites、JDBC 等方式提供 PLM 系统内部级数据交换,通过 XML、STEP、XLS、PLM Services、PDM Schema、PDM Enablers 等数据交换方式与直升机产品全生命周期过程中的其他应用系统(CAx、

CRM、SRM、ERP、xDM 等)进行集成。

结束语

按系统工程方法定义下的直升机产品全生命周期的主要工作内容已发生包含平台、架构、体系及过程等在内的质的变化。元模型驱动解决了直升机产品全生命周期数据单一源与系统集成性的问题,通过元模型的构建与转换表达,形成了直升机产品全生命周期管理业务逻辑和集成技术架构,结合相应数据交换标准总结了直升机产品全生命周期的系统集成技术。目前,随着系统工程理论和计算机信息系统有关工具不断发展,基于元模型构建的直升机产品全生命周期管理和集成技术也将随之日趋成熟和完善。

参考文献

[1] BARBER J R, DONALD J M,

HAGLICH B J. Integrated helicopter design tools[C]// 52nd AHS,1996:266-276.

[2] 王建民. 产品全生命周期管理技术初探[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2001(11):7-8.

WANG Jianmin. First exploration of product overall lifecycle management technology[J]. CAD/CAM AND Manufacture Informatization, 2001 (11):7-8.

[3] 周康渠,徐宗俊,郭钢. 制造业新的管理理念——产品全生命周期管理[J]. 中国机械工程,2002,13(15):1343-1346.

ZHOU Kangqu, XU Zongjun, GUO Gang. Manufacture new management idea-product lifecycle management[J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(15): 1343-1346.

[4] 崔剑,陈月艳. PLM 集成产品模型及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

CUI Jian, CHEN Yueyan. PLM integrated product model and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

[5] 江伟光,武建伟,潘双夏,等. 基于元模型的产品全生命周期信息模型研究[J]. 中国机械工程,2008,19(12):1451-1456.

JIANG Weiguang, WU Jianwei, PAN Shuangxia, et al. Research on product lifecycle

information model based on meta-model[J]. China Mechanical Engineering, 2008,19(12):1451-1456.

[6] 刘辉,麻志毅,邵维忠. 元建模技术研究进展[J]. 软件学报, 2008,19(6):1317-1327.

LIU Hui, MA Zhiyi, SHAO Weizhong. Progress of research on metamodeling[J]. Journal of Software, 2008,19(6):1317-1327.

[7] 田川,田罡,刘笑达,等. 系统建模语言(SysML)及其在 DoDAF 产品描述中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2008(9):102-106.

TIAN Chuan, TIAN Gang, LIU Xiaoda, et al. Systems modeling language (SysML) and its application in the DoDAF products description[J]. Fire Control and Command Control, 2008(9):102-106.

[8] 崔剑. PLM 需求流动链及其决策控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.

CUI Jian. PLM demand flow chain and its decision control[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.

[9] Object Management Group. Product lifecycle management services[EB/OL]. [2016-04-28]. <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/2009-08-02.pdf>.

[10] Object Management Group. OMG unified modeling language superstructure[EB/OL]. [2016-04-28]. <http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/09-02-03>.

[11] Object Management Group. OMG systems modeling language[EB/OL]. [2016-04-28]. <http://www.omg.org/spec/SysML/1.4/>.

[12] 谢鹏寿,张聚礼,贵向泉. 基于 SOA 的制造业集成服务平台构建方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

XIE Pengshou, ZHANG Juli, GUI Xiangquan. Method for constructing integrated service platform of manufacturing industry based on SOA[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013.

[13] 黄红星,张和明,熊光楞. 并行工程中产品信息集成研究[J]. 计算机工程与应用, 2002(10):30-32.

HUANG Hongxing, ZHANG Heming, XIONG Guangleng. Research of product information integration in concurrent engineering[J]. Computer Engineering and Applications, 2002(10):30-32.

[14] 黄双喜,范玉顺. 产品生命周期管理研究综述[J]. 计算机集成制造系统, 2004,10(1):1-9.

HUANG Shuangxi, FAN Yushun. Overview of product lifecycle management[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004,10(1):1-9.

[15] Carnegie Mellon Software Engineering Institute. Architecture analysis and design language[EB/OL]. [2016-04-28]. <http://www.aadl.info/aadl/currentsite/>.

[16] MATTSSON S E, ELMQVIST H, OTTER M. Physical system modeling with modelica[J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(6): 501-510.

[17] Object Management Group. Requirements interchange format [EB/OL]. [2016-04-28]. <http://www.omg.org/spec/ReqIF/>.

[18] Lifecycle Integration Inspired by the Web. Open services for lifecycle collaboration [EB/OL]. [2016-04-28]. <http://open-services.net>.

[19] Maxim Integrated Products, Inc. Simulation with SPICE models[EB/OL]. [2016-04-28]. <https://www.maximintegrated.com/en/design/tools/modeling-simulation/spice/>.

[20] 王焕春,王琛,蔡红霞. 基于 Windchill 的 EBOM 到 MBOM 重构[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008(4): 20-26.

WANG Huanchun, WANG Chen, CAI Hongxia. EBOM to MBOM reconstruction based on Windchill[J]. Combined Machine Tool Automatic Machining Technology, 2008(4): 20-26.

[21] 魏群,段国林,周桂霞. 集成环境下的基于 STEP 的 PDM 产品数据建模[J]. 制造业自动化, 2010, 32(7):10-12.

WEI Qun, DUAN Guolin, ZHOU Guixia. Product data modeling based on STEP in integrated environment[J]. Manufacturing Automation, 2010,32(7): 10-12.

[22] 吴含前,方宁生,吴跃金. 基于 PLM Services 的异构 PDM 系统集成[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(6): 970-973.

WU Hanqian, FANG Ningsheng, WU Yuejin. Integration of heterogeneous PDM systems based on PLM Services[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2007,37(6): 970-973.

[23] 精益研发研究中心. 精益研发[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.

Lean R&D. Lean development[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.

通讯作者: 曾卫平, E-mail: zwp18904846@avic.com.

Research On Helicopter Product Information PLM Integration Technology

ZENG Weiping^{1,2}, YU Chunjiang¹, MI Weiping¹, HUANG Wei¹

(1. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China;

2. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Helicopter product development with the development of information technology has been further standardized and solidified, and digital means could effectively control the development of product data with effectively bottom-up feedback. Under the influence of system engineering and concurrent engineering idea, combined with meta model theory, the helicopter in the whole lifecycle of products development process and management system is sorted out, expounds the helicopter product lifecycle management business logic architecture and technology integration architecture, and analyzes the whole lifecycle management system integration technology. An effective solution is proposed for whole lifecycle management and integration of helicopter product.

Keywords: Meta-model; PLM; Helicopter systems engineering; System integration

(责编 铃兰)