

基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理

冯蕴雯¹, 陈俊宇¹, 侯杰然², 路成¹, 刘晚移¹

(1.西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072; 2.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘 要:弹箭产品的多视图物料清单 XBOM(X bill of material)是多利益攸关方从不同寿命阶段的结构组成、数据信息以及交互流程等角度对弹箭产品的全方位基础支持文件。对弹箭产品 XBOM 数据进行管理,统筹管控全生命周期内的数据,可消除不同寿命阶段相关方、业务及数据间的交互脱节及单向传递,为弹箭产品实现全数字模型供应提供有效数据源支持。为满足面向弹箭产品 XBOM 数据的有机集成及多方协同需求,提出了基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系和方法。通过剖析数字主线框架,提出并建立了基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系。以“数据-交互-建模-应用”的体系层次为指导,提出了基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理方法,包含数据组织、数据关联关系分析、数据建模及数据应用。以某型运载火箭结构系统为对象,开发基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系并进行了应用验证。文中所提出体系和方法为实现弹箭产品 XBOM 数据管控、集成及共享提供具体指导,有利于促进我国弹箭产品全生命周期数据管理系统的发展。

关 键 词:数字主线;物料清单;数据管理;弹箭产品;数据模型

中图分类号:V57

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2024)03-0521-10

弹箭产品全生命周期有着多方协同及数据繁杂的特点,且各生命周期的产品组成数据皆以物料清单(bill of material, BOM)进行信息记录^[1-3]。受限于文档信息的非标准化、关联薄弱及单向传递的本质,缺乏全生命周期 BOM 的多视图协同关联、统一模型管控及变更信息传递等技术的有效支持,导致现阶段弹箭产品全生命周期工作存在信息冗乱、延时反馈及追溯不足等问题^[4-6]。为促进弹箭产品全生命周期 BOM 信息管控的规范化、集成化及可视化,有必要立足于多视图物料清单,开展弹箭产品 XBOM 数据管理研究。

为了有效指导弹箭产品 XBOM 数据管理,众多学者在不同问题板块及技术领域中进行了相应研究。郑怀芳等^[7]提出了将 BOM 传统特性和配置属性相结合的 BOM 数据包,将其作为全生命周期 BOM 数据模型构建技术的基础;刘义珩^[8]探索了基于 PDM 的 BOM 航天研制管理技术,包含信息建模、

配置、多视图等方面;Yan 等^[9]提出了基于单源数据的 BOM 建模方法,以提高 BOM 间视图的一致性;夏秀峰等^[10]提出了基于 MapReduce 的 BOM 数据遍历查询方法,以实现高并发 BOM 信息层次查询;Bian 等^[11]设计了基于 Windchill 平台的 BOM 管理方案,探究了 BOM 变更及多视图映射方法;胡云鹏等^[12]搭建了 BOM 信息追溯流程,实现航天产品多方协同研制探索。上述研究分别在数据视图分析、数据信息建模及数据系统方面提供了相应的见解和方法。基于 SJ/T 11729-2018 产品全生命周期管理(PLM)规范^[13]的指导,弹箭产品 XBOM 数据管理技术领域的局限性可归纳为 BOM 多视图板块缺失、关联分析未能兼顾跨 BOM 和单 BOM、未能实现信息变更推送、储存脱离 BOM 编码信息本质、建模未能统筹多方协同及可视化未能实现“业务-数据-应用”的体系化集成。

国外军工行业率先引领了弹箭产品 XBOM 数据管理的发展。如美国国防部发布了国防部数字现代化战略文件^[13],并指导建立了工程弹性系统^[14];英国国防部发布了国防数字战略^[15],旨在通过数据体系的变革带领军事体系运作的进步;国际商业机

收稿日期:2023-05-23

基金项目:国家自然科学基金(51875465)资助

作者简介:冯蕴雯(1968—),教授

通信作者:冯蕴雯(1968—) e-mail:fengyunwen@nwpu.edu.cn

器公司形成了数据生命周期管理系统及信息圈主数据管理服务^[16],为产品研制方和用户提供准确的数据收集、整理、分析和协作方案;达索公司提供了 DELMIA 和 ENOVIA 软件^[17],以促进数字化流程和全生命周期协同的环境建设。国内军工业领域发布了产品生命周期管理规范^[18]及大数据白皮书^[19]等,为弹箭产品 XBOM 数据管理提供了规范支持;航天工业集团正在搭建产品全生命周期管理系统,用以服务弹箭产品的 XBOM 信息管理。但由于我国尚未形成弹箭产品 XBOM 数据的多视图标准化体系、XBOM 追溯关系尚未明确、多方协同的数据交互建模不充分、符合数据本质的储存及集成程度不够贴切,导致国内弹箭产品 XBOM 数据分布散乱、信息与协同方的交互不畅且流程不明晰、反馈应答变更滞后、XBOM 数据管理能力不充分。其主要原因在于国内弹箭产品 XBOM 数据管理尚未形成“数据-业务-建模-应用”的贯穿性体系建设,使得相应的数据梳理、分析技术及集成应用无法获得充分发展。

为了解决上述问题,本文以基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据体系建设为基点,根据体系层次进行数据梳理、关联分析、变更机制、数据储存、数据建模及数据集成的技术与方法提出,建立弹箭产品 XBOM 数据管理技术支点。以某型运载火箭为案例对象,开展基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系与技术的双向验证,可为国内弹箭产品 XBOM 数据管理的发展提供可行的思路和支持。

1 基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系

1.1 数字主线架构分析

数字主线^[20-21]被美国 SAF/QAR 于 2013 年定义为针对武器装备系统的链接多数据信息“孤岛”和协同全生命周期的数据架构,并在《全球地平线:美国空军全球科技愿景》^[22]中,将数字主线视为“改变游戏规则”的颠覆性机遇。数字主线旨在基于基础数据,通过数据分析和数据建模将数据组织在业务流程与管理功能中,实现数据的可追溯关联性和可访问性,改变产品全生命周期各阶段数据的应用方式,从而作为数字孪生的应用前提。

立足于产品数字域和实体域,结合弹箭产品全

寿命周期 XBOM 信息,提出了基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理双层闭环思维。内层闭环分为弹箭产品交付前闭环和弹箭产品交付后闭环,单个闭环内部由业务需求相关联。产品实体的始端是产品交付前的 XBOM 数据定义,并通过方案阶段、工程研制阶段及定型阶段的实现形成产品实体的本身。在产品上述的寿命周期中,产品实体与设计人员进行协同交互。这些交互由数据分析、数据建模、数据储存及数据推送等技术促进,所产出信息反馈回产品数据域,被用于支持跨部门、跨地域的决策和应用。在产品交付前寿命阶段的内部闭环结束后,进行交付后闭环,即产出产品交付后的服务、运营数据,经过实际的业务实现产品实体的后勤保障,并开展多方协同。由数据技术手段支撑信息交互,从而开展数据应用。前后内层闭环的结束代表着外层闭环的完成,该流程使得数字主线在弹箭产品 XBOM 数据管理中具有完备的层次化和体系化思维,有效推动产品数据管理的发展。

1.2 基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系构建

数字主线以“数据全面分析、信息全面建模、功能全面集成”的特点,致力于收集并分析全生命周期数据,充分提供各类分析技术的无缝交互空间,实现基于数据的实施管理。为实现弹箭产品 XBOM 数据信息的数字化管理,保障产品与数据的同步作用,有必要构建如图 1 所示的“数据流-交互流-建模流-应用流”的基于数字主线的弹箭产品数据管理体系,划分和建立数据管理的层次和技术基点数据层作为基础,通过开展跨专业关联的 XBOM 技术,划分具备弹箭产品特征的全生命周期阶段,构建和组织其 XBOM 体系和信息数据,提供基础数据源;为保证人员交互与数据交互的统筹分析,交互层在数据层的基础上开展 XBOM 逐级演进及关联关系技术研究,明确 XBOM 体系间单 BOM 及跨 BOM 的构建流程及数据交互关系;作为交互层的实现手段,模型层立足于 XBOM 数据技术状态管理,探索模型建立方法,实现 XBOM 信息的技术状态管理建模规则及模型的构建;应用层是 XBOM 数据管理落地的技术基点,通过研究 XBOM 可视化、变更追溯及变更推送等方面的 XBOM 数据关系,实现数据、人员及业务的集成,为弹箭产品 XBOM 数据管理提供决策和应用的载体。

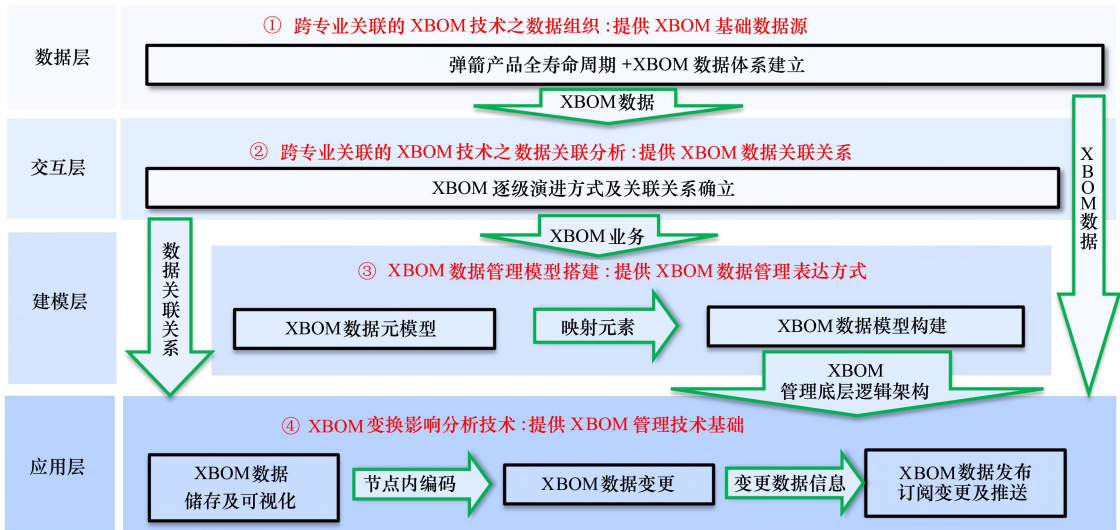


图 1 基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理双层闭环思维

2 基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理方法

2.1 跨专业关联的 XBOM 数据组织

跨专业关联的 XBOM 数据组织^[23]的目的是提供弹箭产品的 XBOM 基础数据源,从而将产品中的断层数据以视图与阶段并行的方式进行构建。根据我国弹箭产品手册及产品生命周期管理规范^[24-25],可将弹箭产品阶段划分为方案、工程研制、交付部署、使用保障与退役处理阶段。由于弹箭产品全寿命周期阶段业务的各异性和传递性,XBOM 的数据存在如(1)~(2)式所示的组织特性。

$$X = \sum_{i=1}^n B_i \tag{1}$$

$$B_i = (P_i, S_i, C_i, V_i) \tag{2}$$

式中: B 为单个寿命阶段的物料清单; i 为寿命阶段的序号; n 为全寿命周期的阶段总和; P, S, C 及 V 分别为数据的发布方、订阅方、内容及视角。

在弹箭产品的方案阶段,XBOM 数据内容始于产品系统的技术指标及研制流程信息,形成 DfBOM (defining BOM,定义 BOM)数据。将产品系统的指标与流程下分至子系统、组件、零件,形成 StBOM (system BOM,总体设计 BOM)。数据视角为“产品总体-系统-组件-零件”为结构组织的系统视角。

通过方案阶段的弹箭产品需求的指定,可开展工程研制阶段 BOM 数据组织,包含产品设计 BOM

(engineering BOM, EBOM)、工艺 BOM (processing BOM, PBOM) 及制造 BOM (manufacturing BOM, MBOM)。为开展详细设计和支撑制造装备工作,EBOM 采用双数据视角,进行各系统的非外购件物料信息、外购件物料信息及细化的研制流程信息记录。其基础视角为承接自 StBOM 而来的系统视角,根据各数据节点包含的部位安排信息进行二次分类,得到以“子级-子级系统-子级分系统-组件-零件”为组织结构的初步装配视角。作为 EBOM 和 MBOM 的衔接 BOM,PBOM 的数据内容与 EBOM 一致,数据视角向实际工艺路线进行转化,形成以“总装位-段位-工位”为数据组织的实际装配视角。在此基础上,增加工艺信息,形成以实际装配视角为组织结构的 MBOM。

在交付部署阶段,装机 BOM (Building BOM, BBOM)承接 MBOM 的全部数据及数据视角,并新增实物状态信息及生产制造信息,反映了弹箭产品在交付时的装机状态。

在使用保障与退役处理阶段,其物料信息被服务 BOM (servicing BOM, SBOM) 和运营 BOM (operating BOM, OBOM) 所记录。SBOM 在 EBOM 的基础上定义最小维修区域及现场可更换最小单元,数据组织采用系统视角。OBOM 承接 SBOM 的数据信息及视角,并纳入 BBOM 的实物数据,新增履历信息、使用记录信息、故障及维修信息。

2.2 跨专业关联的 XBOM 数据关联分析

基于跨专业关联的 XBOM 数据组织,根据弹箭产品全寿命周期业务演进规则,在时间序列后序的

BOM 数据与前序的 BOM 数据间存在向前反馈的关联关系,定义如下:

定义 1 相关关联。指后序新增数据节点诱发于前序数据节点。

定义 2 外部应用转换。指在相关关联的基础上,后序新增数据节点与外部系统之间存在信息交互。

定义 3 遗传映射。指在相关关联的基础上,在同一视图中,后序新增数据节点与前序 BOM 数据节点的位置一致,节点数据属性发生增删改的变化。

定义 4 变异映射。指在相关关联的基础上,后序新增数据节点与前序 BOM 数据节点的数据信息一致,节点位置或视图发生变更。

定义 5 综合映射。指在相关关联的基础上,后序新增数据节点与前序 BOM 数据节点的数据信息及节点位置或视图均变更。

2.3 XBOM 数据管理模型搭建

为使得 XBOM 数据管理模型具备 XBOM 完整的业务,按照统一标准的语义和规范进行建模,使其被数字主线应用层技术稳定无歧义地读取,结合 MBSE 实施框架^[26],基于 DoDAF 体系^[27-28]设计了适用于弹箭产品 XBOM 数据管理的“需求-功能-架构”三部分建模方法,如图 2 所示。

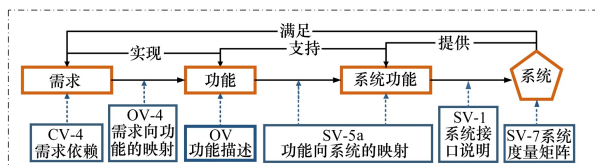


图 2 XBOM 数据管理模型

图 2 中,需求模型采用 CV-4 能力依赖关系 (capability viewpoint-capability model descriptions) 进行表征,能力的分层结构用于反映需求逐级细化过程及其包含关系。关键概念包括顶层需求、子需求、子子需求等,概念关系包含依赖、扩展及包含。

OV-4 (operational viewpoint-organizational relationships chart) 描述了特定需求下的组织结构和交互表达,承接 CV-4 的需求分解结果,从而为后续功能模型 OV 的建立提供了基本的组织分析和关键执行者。其关键概念为功能操作的执行者和系统对应的执行模块,概念关系为控制和指挥关系。进而,采用 OV-5b 操作活动模型 (operational viewpoint-operational activity model) 及 OV-6b 状态转换说明 (opera-

tional viewpoint-state transition description), 分别描述需求指导下的操作活动和功能状态响应。OV-5b 中的关键概念分别为功能操作的执行者、活动、次序、传递信息及度量,相应的关系为活动的输入、输出及持续性。OV-6b 是在 OV-5b 的基础上,将功能操作的起始点、活动、次序、输入输出信息及终止点进一步描述。

功能模型向架构模型的传递采用 SV-5a 功能活动到系统功能可追溯矩阵 (system viewpoint-operational activity to systems function traceability matrix), 描述系统功能与操作活动之间的关系,其关键概念为功能操作的活动和系统的功能,关系为功能的分配关系。针对明确的功能,使用 SV-1 系统接口说明 (system viewpoint-systems interface description) 和 SV-7 系统度量矩阵 (system viewpoint-systems measures matrix) 进行系统的控制关系管理。前者描述系统结构和与人员交互将操作与系统进行链接。关键概念为系统的执行者、模块、度量及传递信息,相应的关系为系统执行者与模块或模块与模块之间的控制关系。SV-7 基于 SV-1 中所描述的弹箭产品 XBOM 数据管理系统特征进行性能与度量的拓展描述,以及非功能性需求的识别,关键概念为系统的执行者、模块与度量,关键关系为系统约束参数的接收限制。

2.4 XBOM 变换影响分析技术

XBOM 数据储存形式为带有结构特征的节点数据唯一标识符,由 BOM 信息标识符和结构信息标识符两部分构成,前者定位类别信息,后者定位数据节点位置。其表达式定义为:

$$C_{i-j} = (I_{BOM_i}; L_0, L_1, \dots, L_j, \dots, L_n) \quad (3)$$

式中: C_{i-j} 说明数据位于第 i 个 BOM 的第 j 层; I_{BOM_i} 表示 BOM 类别信息标识; L_j 表示数据的结构信息; n 为第 i 个 BOM 的数据总层数。

通过节点内编码的应用,弹箭产品 XBOM 数据关联数学形式如 (4) 式所示。

$$D_{i-j} = (I_{BOM_i}, L_j; I_{BOM_k}, L_p; R_q) \quad (4)$$

式中: D_{i-j} 表示第 i 个 BOM 的第 j 层数据,其关联数据位于第 k 个 BOM 的第 p 层;两者之间的关系为 R_q ,类别为独立新增、遗传映射、变异映射、外部应用转换及综合映射关系之一。

在弹箭产品 XBOM 体系中,其数据存在强烈的关联关系。当其中的 BOM 节点属性发生变更后,势必对其关联的 BOM 节点属性产生影响。由于节

点内编码技术对 XBOM 数据的支撑性,在关联变更及结构非删变更时,只需修改如(3)式所示的对应内编码信息,并对删除节点进行空位递补。

结合 SpringBoot 框架中的 CommandLineRunner 接口,开启数据自动订阅机制。将所需发布数据进行封装演变为数据实体,调用发布接口进行数据实体的发布,并利用 OpenDDS 的数据监听和订阅接口进行数据实体的实时订阅。当发布数据在前端变更时,携带节点内编码、数据库表和修改状态等参数向后端发送请求,后端会将变更的节点信息进行数据封装,并调用发布接口将数据实体发布出去,同时订阅方会订阅到数据实体,采用 Websocket 协议进行

前端订阅展示。

3 案例应用

以某型运载火箭一子级燃料箱结构系统 XBOM 中的 StBOM 和 EBOM 为数据管理对象开展了数据管理体系及方法应用验证。

3.1 XBOM 数据组织

运载火箭结构系统 StBOM 生成于方案阶段的方案设计环节,具体信息如表 1 所示,均由研制部门发布,由研制部门及研制主管部门订阅。

表 1 某型运载火箭结构系统 StBOM 数据内容(部分)

节点名称	子节点名称	节点数据	数据属性
	结构设计要求	外形尺寸	直径为 3.35 m,壁厚 10 mm
一子级燃料箱系统 细化性能指标	结构强度计算情况及安全	起吊情况结构安全系数	2.0
	系数质量、标准化及可靠性 设计要求		

案例应用中以一子级燃料箱的壳段组合件为代表,进行由研制部门发布、被研制部门、供应商、使用

部门及研制主管部门订阅的 EBOM 系统级自研部件信息说明,如表 2 所示。

表 2 某型运载火箭结构系统 EBOM 数据内容(部分)

节点属性		节点数据	数据属性
壳段组合 件信息	功能特性	结构性能 结构强度计算情况\安全系数	相关标准文档 1.5
	物理特性	系统组成	详见 EBOM 结构视图
	数字样机	C:/XBOM/EBOM/3DModel.stp	

3.2 XBOM 数据关联分析

以壳段组合件 EBOM 为例,结构系统 EBOM 中非外购件物料信息需要依据 StBOM 中细化技术性能指标,即存在关联。EBOM 的系统级自研部件物料信息与外部系统无关联,即不存在外部系统应用。

结构 EBOM 与 StBOM 两者中的性能指标数据内容和结构位置均不一致,构成综合映射关系。壳段组合件的系统组成和节点编码为工程研制阶段新增数据,故关联关系为独立新增。数据关联关系如表 3 所示。

表 3 结构系统 StBOM 与 EBOM 数据关联关系(部分)

节点属性		节点数据	关联方式	关联节点
壳段组合 件信息	功能特性	结构性能	综合映射	StBOM 一子级燃料箱系统 细化性能指标
		结构强度计算情况及安全系数	综合映射	StBOM 安全系数
	物理特性	系统组成	独立新增	
	数字样机	C:/XBOM/EBOM/SNPUAO-01-01-03-3DModel.stp	综合映射	EBOM 壳段组合件功能特性

3.3 XBOM 数据管理模型建模

EBOM 数据(简称为技术状态文件)业务相关

方包括研制主管部门、发射支持部门、供应商、制造部门、使用部门及研制部门 6 个组成单元,主要使命

可分类为图 3 中的任务和需求,并通过 CV-4 进行建模。

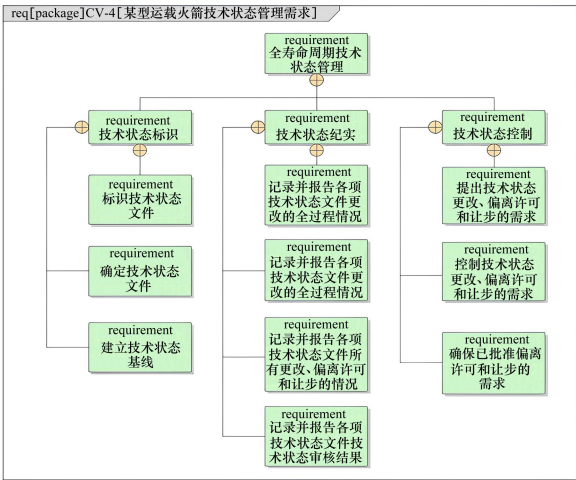


图 3 技术状态文件管理 CV-4

基于某型运载火箭技术状态文件管理需求,其系统模块划分划分为 XBOM 数据显示、变更请求审批、变更时间记录等。基于功能意义,将案例系统技术状态管理分解为标识、审批、控制及实施的子系统。基于 OV-5b、OV-6b,分别描述业务方与技术状态管理系统的操作活动和状态转换,如图 4~5 所示。

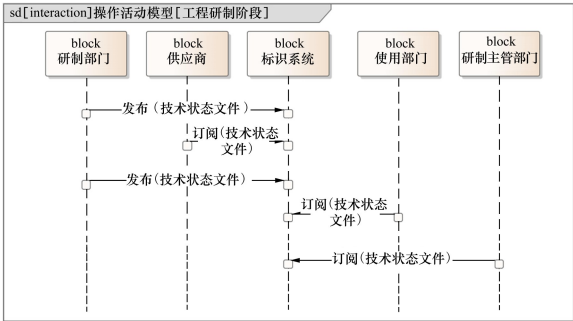


图 4 工程研制阶段 OV-5b

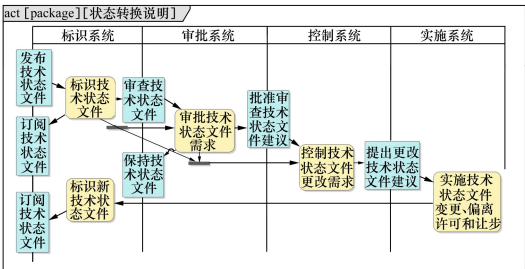


图 5 技术状态文件管理 OV-6b

将功能模型分析的活动分配到实际的技术状态文件管理子系统,并定义相应的系统功能,建立活动到系统功能的分配关系,如图 6 所示。

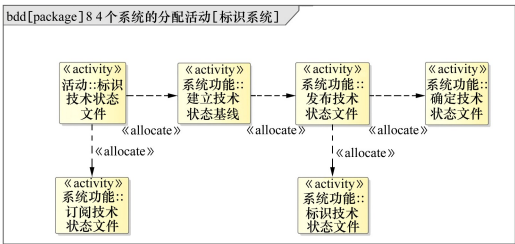


图 6 活动到标识系统功能 SV-5a

基于标识系统功能的映射,采用 SV-1 将工程研制阶段的技术状态管理参与者与系统模块的交互进行建模,如图 7 所示。

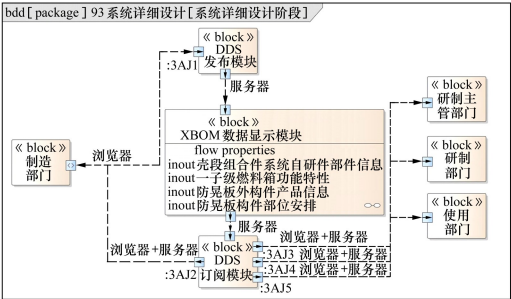


图 7 工程研制阶段 SV-1

基于系统逻辑接口设计,采用 SV-7,对某型运载火箭结构系统技术状态文件管理的参与者与子系统、子系统之间的参数限制进行定义,如图 8 所示。

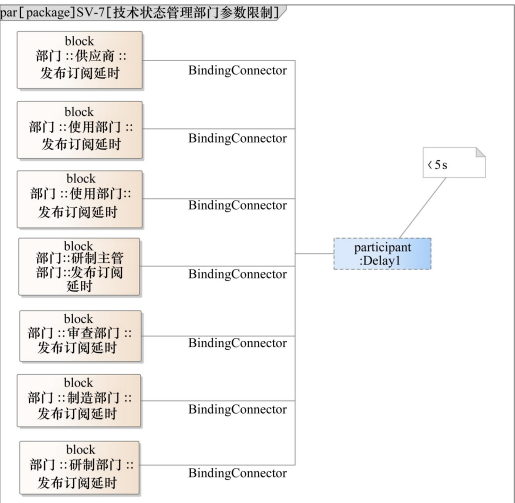


图 8 参与者与各子系统之间 SV-7

3.4 XBOM 数据变更影响分析

某型运载火箭结构系统 StBOM 及一子级燃料箱 EBOM 数据应用层通过搭建 XBOM 数据管理平台提供技术落地。XBOM 数据管理平台的总体架构如图 9 所示。

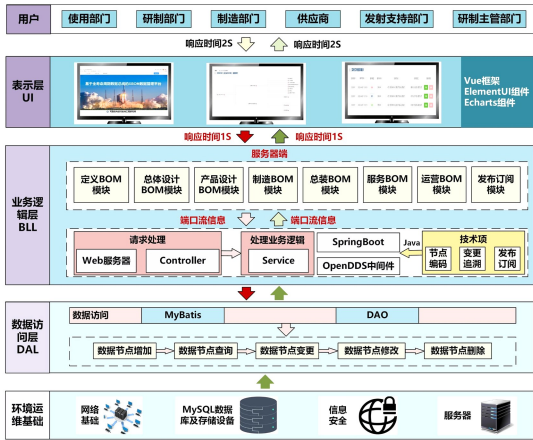


图 9 XBOM 数据管理平台架构

通过递归算法的嵌入,可将上述数据结构和内容可视化前端界面相应的结构表和结构树,如图 10~11 所示。

id	connect_node_name	connect_relatic	connect_node_value	connect_value
47	StBOM—子级燃料箱系统细化性能指标	综合映射	B0-2-2-0	C0-1-1-1-3-4-0-2
48	StBOM—子级燃料箱系统细化性能指标	综合映射	B0-2-2-0	C0-1-1-1-3-4-0-2
49	EBOM隧道管功能特性	综合映射	C0-1-1-1-3-4-0-1	C0-1-1-1-3-4-0-3
50	EBOM隧道管物理特性	综合映射	C0-1-1-1-3-4-0-2	C0-1-1-1-3-4-0-3
51	StBOM—子级燃料箱系统细化性能指标	综合映射	B0-2-2-0	C0-1-1-1-3-4-0-4
52	StBOM—子级燃料箱系统细化性能指标	综合映射	B0-2-2-0	C0-1-1-1-3-2-0-0-0
53	StBOM结构强度计算情况及安全系数	综合映射	B0-2-2-0-2	C0-1-1-1-3-2-0-0-1
54	StBOM结构设计要求	综合映射	B0-2-2-0-0	C0-1-1-1-3-2-0-0-1
56	StBOM质量、标准化及可靠性设计要求	综合映射	B0-2-2-0-3	C0-1-1-1-3-2-0-0-1

图 10 储存于 MySQL 中的 BOM 内编码(部分)



图 11 前端页面的 BOM 结构树(系统视角)

当 XBOM 数据管理相关方在前端界面进行变更操作时,节点后的推进剂贮箱性能指标和管路系统性能指标在节点删除前分别为“B0-2-2”和“B0-2-3”,节点删除后这两个节点分别递补为“B0-2-1”和“B0-2-2”,其节点关联也被同步更新,如图 12 所示。

connect_node_name	connect_relatic	connect_time	connect_node_value
A型火箭EBOM,主要技术指标,有效载荷接口	综合映射关系	2022/10/13-16:49:47	AO-0-4
A型火箭EBOM,主要研制流程信息,保障条件	综合映射关系	2023/10/17-18:14:03	B0-1-0-3
A型火箭EBOM,主要研制流程信息,保障条件	综合映射关系	2023/10/17-18:14:03	B0-1-0-3

图 12 StBOM 空位递补节点的关联关系更新

XBOM 数据管理参与者在前端页面创建 StBOM 一子级燃料箱系统细化性能指标-质量、标准化及可靠性设计要求节点,并根据提示信息关联相关数据节点。当成功创建节点后可在订阅界面接收到节点添加信息,如图 13 所示。

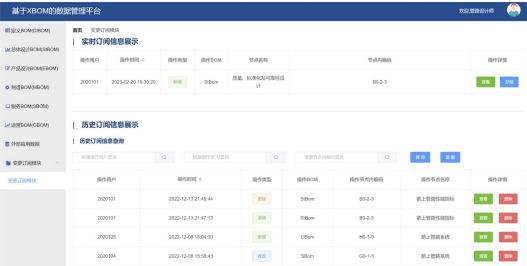


图 13 BOM 节点创建成功后推送界面

4 结 论

- 1) 基于数字主线的理论和思想,以"数据-交互-建模-应用"的结构层次,提出并搭建了基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系,形成了贯穿数据生成、数据交互、数据业务协同建模及数据应用的数字化闭环。可适用于复杂产品的 XBOM 数据构建、关联关系搭建、业务建模、储存和变更管理。
- 2) 依据基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系,提出和设计了符合体系结构要求的弹箭产品 XBOM 数据管理技术与方法,分别解决了数据内容及结构的双层组织、基于业务流程的数据关联关系构建、基于数据管理需求的模型规则制定及兼具数据存储和数据应用的变更影响分析等问题。
- 3) 以某型运载火箭结构系统 StBOM 和 EBOM 数据为管理对象,开展了基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理体系和方法的案例应用和有效性验证,并通过平台将上述内容进行集成和开发。结果表明,所提出的方法可有效服务于弹箭产品 XBOM 数据管理,为推进多数据源产品业务及应用双向交互的数据技术提供可行的路线,为全寿命周期数字孪生技术实施提供了必要前提。

参考文献:

- [1] 王腾. 面向弹箭体复杂结构的统一数字化模型描述机理及应用技术研究[D]. 北京: 中国运载火箭技术研究院, 2020
WANG Teng. Research on description mechanism and application technology of unified digital model for complex structure of projectile and rocket body[D]. Beijing: China Academy of Launch Vehicle Technology, 2020 (in Chinese)
- [2] ZHOU C L, LIU X B, XUE F H, et al. Research on static service BOM transformation for complex products[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 36: 146-162
- [3] 褚士震, 贾晓亮, 耿俊浩, 等. 面向制造的重型装备产品 BOM 管理方法研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(6): 34-38
CHU Shizhen, JIA Xiaoliang, GENG Junhao, et al. Research on manufacturing-oriented BOM management method for heavy equipment products[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(6): 34-38 (in Chinese)
- [4] 董振义, 李维. 航天复杂产品制造企业 BOM 构建及应用探索[J]. 智能制造, 2020, 7: 44-47
DONG Zhenyi, LI Wei. BOM construction and application exploration for aerospace complex product manufacturing enterprises[J]. Intelligent Manufacturing, 2020, 7: 44-47 (in Chinese)
- [5] CHEN J, WANG G F, XUE T, et al. An improved poly-chromatic graphs-based BOM multiview management and version control method for complex products[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2021, 18(1): 712-726
- [6] VIERIA D, SCHMOLLER E, BRAVO A. Product BOMs in different lifecycle contexts managed by a PLM system as a requirement for implementing digital twins[J]. International Journal of Product Lifecycle Management, 2022, 14(1): 1-17
- [7] 郑怀芳, 杨锋, 周璇, 等. 面向航天产品全生命周期 BOM 管理研究——以航天发射支持系统为例[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43(2): 142-150
ZHENG Huaifang, YANG Feng, ZHOU Xuan, et al. Research on BOM management for the whole life cycle of aero-space products——taking the aerospace launch support system as an example[J]. Space Return and Remote Sensing, 2022, 43(2): 142-150 (in Chinese)
- [8] 刘义珩. 基于 PDM 的 BOM 航天研制过程管理技术研究 with 实现[J]. 电子技术与软件工程, 2016(15): 196
LIU Yiheng. Research and implementation of BOM aerospace development process management technology based on PDM[J]. Electronic Technology and Software Engineering, 2016(15): 196 (in Chinese)
- [9] YAN C, SONG Y. A new method for BOM modeling[J]. Advanced Materials Research, 2011, 213: 604-607
- [10] 夏秀峰, 梁利亮, 李佳佳. PDM 中 BOM 数据的 MapReduce 遍历查询研究[J]. 小型微型计算机系统, 2016, 37(12): 2685-2689
XIA Xiufeng, LIANG Liliang, LI Jiajia. Research on MapReduce traversal query of BOM data in PDM[J]. Micro Computer System, 2016, 37(12): 2685-2689 (in Chinese)
- [11] BIAN G R, CAO H, ZHANG Y L. Windchill based research on management method of BOM[C]//2016 23rd Annual International Conference on Management Science & Engineering, Switzerland, 2016: 589-595
- [12] 胡云鹏, 王淑坤, 杨公孝. 面向客户的可配置化 BOM 系统研究[J]. 制造业自动化, 2020, 42(12): 41-44
HU Yunpeng, WANG Shukun, YANG Gongxiao. Research on customer-oriented configurable BOM system[J]. Manufacturing Automation, 2020, 42(12): 41-44
- [13] 中华人民共和国工业和信息化部. 产品生命周期管理(PLM)规范[S]. SJ/T 11729-2018
- [14] MACK R, MUKHERJEA S, SOFFER A, et al. Text analytics for life science using the unstructured information management architecture[J]. IBM Systems Journal, 2004, 43(3): 490-515
- [15] LIU H J, TONG X Y, LV S L, et al. The application of DELMIA in ARJ21 aircraft central wing assembly simulation[J]. Advanced Materials Research, 2011(314/315/316): 2287-2292
- [16] DOD Architecture Working Group. DoD digital modernization strategy[R]. FY 19-23, 2019
- [17] 潘星, 张国忠, 张跃东, 等. 工程弹性系统与系统弹性理论研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(9): 2006-2015
PAN Xing, ZHANG Guozhong, ZHANG Yuedong, et al. Overview of engineering elastic system and system elastic theory[J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2019, 41(9): 2006-2015 (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国工业和信息化部. 产品生命周期管理(PLM)规范[S]. SJ/T 11729-2018

- [19] 中国信息通信研究院. 大数据白皮书[R]. 202121, 2023
China Academy of Information and Communication. Big Data White Paper[R]. 202121, 2023 (in Chinese)
- [20] VODYAHO A, ZHUKOVA N, SUBBOTIN A, et al. Towards dynamic model-based agile architecting of cyber-physical systems [J]. Sensors, 2022, 22(8): 3078
- [21] PANG T Y RESTREPO J P D, CHENG C, et al. Developing a digital twin and digital thread framework for an 'Industry 4.0' shipyard[J]. Applied Sciences, 2021, 11(3): 1097
- [22] United State Air Force. Global horizons final report: united states air force global science and technology vision[R]. AF/ST TR 13-01, 2013
- [23] 刘殷杰, 李文昊, 蒲瑶, 等. 基于 Teamcenter 的弹箭产品三维数字化装配工艺设计技术研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(1): 117-120
LIU Yinjie, LI Wenhao, PU Yao, et al. Research on teamcenter-based 3D digital assembly process design technology of missile and rocket products[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2022, 50(1): 117-120 (in Chinese)
- [24] BORSATO M, WOGUNM N. Integrated approach bridging PLM, ERP, SCM in manufacturing: an industrial case study[M]. Berlin: Springer, 2014
- [25] 袁志华, 吴玉斌. 现代弹箭系统概论(上)[M]. 北京:兵器工业出版社, 2007
YUAN Zhihua, WU Yubin. Introduction to modern missile systems(I)[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007 (in Chinese)
- [26] 卫翔, 张立民, 齐新战, 等. 武器装备仿真训练软件元模型设计研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 24(1): 223-226
WEI Xiang, ZHANG Limin, QI Xinzhan, et al. Research on the meta-model design of weapon equipment simulation training software[J]. Journal of System Simulation, 2021, 24(1): 223-226 (in Chinese)
- [27] 裴照宇, 康焱, 马继楠, 等. 基于模型的国际月球科研站协同论证方法[J]. 航空学报, 2022, 43(12): 226066
PEI Zhaoyu, KANG Yan, MA Jinan, et al. Model-based collaborative demonstration method for international lunar scientific research station[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(12): 226066 (in Chinese)
- [28] DOD Architecture Working Group. DoD architecture framework (DoDAF) and DoDAF meta model (DM2) version 2.02[R]. DoDAF2.02, 2015

Data management of X bill of material of missile and rocket products based on digital thread

FENG Yunwen¹, CHEN Junyu¹, HOU Jieran², LU Cheng¹, LIU Wanyi¹

(1.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The X bill of material (XBOM) of a missile and rocket product is a comprehensive and basic support document produced by a multi-stakeholder that considers structural composition, data information and interactional processes in different life stages. The XBOM data management of missile and rocket products coordinates the data organization and control in the whole life cycle, eliminates the interactional disconnection and one-way transmission between related parties, business and data in different life stages and provides effective data source support for the full digital model supply. To meet the requirements of organic integration and multi-party collaboration, this paper proposes the XBOM data management method based on digital thread. Firstly, the digital thread framework is analyzed, and the XBOM data management architecture based on the digital thread is proposed and established. Secondly, guided by the hierarchy of "data-interaction-modeling-application", the XBOM data management method for the missile and rocket product are developed, including data organization, data relational analysis, data modeling and data application. Finally, the structural system of a certain model of carrier rocket is studied, and the XBOM data management system based on digital thread is developed and its application is validated.

Keywords: digital thread; bill of material; data management; missile and rocket product; data model

引用格式:冯蕴雯, 陈俊宇, 侯杰然, 等. 基于数字主线的弹箭产品 XBOM 数据管理[J]. 西北工业大学学报, 2024, 42(3): 521-530

FENG Yunwen, CHEN Junyu, HOU Jieran, et al. Data management of X bill of material of missile and rocket products based on digital thread[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2024, 42(3): 521-530 (in Chinese)