

DOI:10.11918/202110038

面向动态 MRO 活动的 SBOM 演化研究

李婷玉^{1,2,3}, 刘 刚^{1,2,3}, 高 琦^{1,2,3}

(1. 山东大学 机械工程学院, 济南, 250061; 2. 山东大学 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南, 250061;

3. 山东大学 机械工程国家级实验教学示范中心, 济南, 250061)

摘 要: 为了解决静态服务物料清单(Service BOM, SBOM)不能实时反映动态维修、维护和大修(Maintenance, Repair and Overhaul, MRO)服务过程的问题,针对动态 MRO 业务中不同的管理需求和服务需求,设计了面向产品服务生命周期的 SBOM 演化模型。通过分析批次产品、单件产品以及单次 MRO 服务三类管理需求下 SBOM 结构的差异性,从装配位置、供应商和 MRO 任务角度,对 SBOM 的节点和节点间约束进行分类并给出定义,建立不同类型 SBOM 的演化关系模型。基于 MRO 服务需求对通用 SBOM 和实例 SBOM 节点的变更影响,描述了 SBOM 在动态服务过程中的两种变更类型以及每种变更类型下的节点状态,构建随时间而变化的 SBOM 动态演化模型。最后,以某型号机车转向架为例验证了演化模型的可行性,并基于节点追溯目的提出两种 MRO 服务追溯机制,大大提高了机车 MRO 服务中动态数据信息的管理和追溯能力。

关键词: 服务物料清单; 维修、维护和大修; 管理需求; 动态演化; 服务追溯

中图分类号: TH17

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)01-0140-09

Research on SBOM evolution oriented to dynamic MRO activities

LI Tingyu^{1,2,3}, LIU Gang^{1,2,3}, GAO Qi^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Key Laboratory of High-Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Mechanical Engineering Education, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To solve the problem that the static service bill of material (service BOM, SBOM) cannot reflect the service process of dynamic maintenance, repair and overhaul (Maintenance, Repair and Overhaul, MRO) in real time, a SBOM evolution model in the product service life cycle for different management and service requirements in the dynamic MRO business is designed. By analyzing the difference of SBOM structure under the three management requirements of batch product, single product and single MRO service, from the perspective of assembly location, supplier and MRO tasks, the nodes and constraints of SBOM are classified and defined, and the evolution relationship model of different types of SBOM is established. Based on the influence of MRO service requirements on the changes of general SBOM and instance SBOM nodes, two types of SBOM changes in the dynamic service process and the node states under each type of changes are described, and the dynamic evolution model of SBOM changing with time is constructed. Finally, a locomotive bogie is taken as an example to prove the feasibility of the evolutionary model, and two MRO service traceability mechanisms are proposed according to the node traceability purpose, which greatly improves the management and traceability ability of dynamic data information in locomotive MRO service.

Keywords: service bill of material; maintenance, repair and overhaul; management requirement; dynamic evolution; service traceability

在企业向服务型制造模式转型的趋势下,服务化不断向制造业进行渗透^[1],服务逐渐成为产品生命周期的重要环节之一^[2]。MRO 是服务阶段中进行的各种维修、维护和大修等活动的总称,是产品价值增长的重要来源^[3]。

物料清单文件(Bill of Material, BOM),是组织产品数据的一种有效方式,反映了产品的层次结构,也是产品服务数据管理的核心^[4]。不少学者对 MRO 服务过程中的服务物料清单的构建进行了相关研究。任良全^[5]通过分析各类维修信息资源,提出了由中性物料清单、物理物料清单和实例物料清单组成的复合式维修 BOM。Zhou C^[6]提出了一种复合静态 SBOM,实现了位置信息管理和可替代部件管理等 MRO 服务。针对复杂装备的检修服务,刘晓冰^[7]提出了具有不同需求的 3 种检修物料清单

收稿日期: 2021-10-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1702601);

山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010442)

作者简介: 李婷玉(1998—),女,硕士研究生;

高 琦(1970—),女,教授,博士生导师

通信作者: 高 琦, gaoqi@sdu.edu.cn

结构。李浩^[8] 基于 SBOM 结构, 构建了复杂产品 MRO 业务信息集成模型。Liu^[9] 基于维修部件的追踪性, 定义了维修物料清单中三种特殊零件形式及转换规则。李玲^[10] 基于设备的工程物料清单 (Engineering BOM, EBOM) 和服务需求, 构建了复合式维修物料清单。

目前 MRO 服务中的 SBOM 研究主要集中于 SBOM 结构和 EBOM 向 SBOM 的转换过程, 对于服务生命周期中 SBOM 的演化过程关注较少。对于飞机、机车等复杂装备而言, MRO 活动的实施不仅需要产品设计、制造和维修相关知识和资料^[11], 同时活动实施过程中又会依据不同的服务需求产生动态多变的 MRO 服务记录^[12], 大大增加了 MRO 服务数据的管理难度。为了识别及追踪航空发动机大修过程中的服务活动, Hu^[13] 提出了三维配置管理模型。Shi L^[14] 以在役大型民用飞机为研究对象, 分析各种飞机维修保障作业引起的构型特征变化, 构建了在役飞机构型数据模型。李青^[15] 提出单机构型的追溯方法, 实现了使用服务阶段中任一追溯时间点的飞机构型结构的获取。当前所研究的动态服务数据模型, 一般只以单个产品为管理粒度, 忽略了服务生命周期中不同粒度的管理需求。因此, 建立面向不同管理需求和服务需求的产品服务数据模型是亟需解决的问题。

动态 MRO 活动实施过程中, 一方面 SBOM 在不同管理需求下结构具有差异性, 另一方面在不同服务需求下的 SBOM 变更类型也不同。本文基于动态 MRO 业务中产品的数据特点, 定义了 SBOM 的节点及节点间约束类型, 用形式化的表达描述了不同类型 SBOM 间的演化关系模型、不同服务需求下 SBOM 的动态演化模型, 并在此基础上提出了基于 SBOM 的两种 MRO 服务追溯机制, 为动态 MRO 活动中的 SBOM 服务数据组织和追溯提供了理论模型。

1 动态 MRO 业务中的 SBOM 结构

1.1 节点和节点间约束的定义及分类

对于零件数量众多、结构复杂的产品而言, SBOM 节点并非包括全部零件, 例如螺栓、螺母这样的标准件不需要在 SBOM 中进行管理^[6]。将产品在 MRO 服务过程中需要记录与管理的零件表示为 SBOM 的节点, 需要关注的零件间的结构关系表示为 SBOM 的节点间约束。在服务过程中, 一方面, 零件装配位置或者供应商的差异性会造成 MRO 服务的不同, 需要关注的零件结构关系也可能不同; 另一方面, 零件在不同 MRO 任务下可能会展现出不同的结构关系。因此从零件的装配位置、供应商以及

MRO 任务这三个方面出发, 将 SBOM 的节点和节点间约束进行如下分类并给出定义:

定义 1 通用节点。通用节点表示 MRO 服务要求与装配位置无关的零组件。

定义 2 位置节点。位置节点表示 MRO 服务要求与装配位置相关的零组件, 位置节点需要体现位置信息。

定义 3 可选节点。产品某位置处的可选节点表示该位置处允许装配的具有不同供应商来源的同类型零组件。

定义 4 通用约束。通用约束表示同类型零件在不同的装配位置和 MRO 任务中都需要关注的零件装配关系。

定义 5 可变约束。可变约束表示只在特定装配位置处的 MRO 任务中需要关注的零件装配关系。

1.2 面向不同管理需求的 SBOM 分类

SBOM 是一种面向产品 MRO 服务的复合物料清单, 管理产品初始静态属性数据和动态服务数据。即便同一批产品具有相同的初始状态, 但是后续服务过程中产品的动态演化过程也可能不同, 因此 SBOM 必须管理到单件产品。而单件产品在服务全生命周期中, 需要进行多次 MRO 服务, 不同 MRO 服务之间存在大量重复的基础数据, 增大了服务数据的管理难度。为了提高 MRO 服务信息的重用性, 减少 MRO 服务数据冗余, 本文提出了管理批次产品的通用 SBOM、管理单件产品的实例 SBOM 和管理单次 MRO 服务的任务 SBOM, 不同类型的 SBOM 间关联关系如图 1 所示。

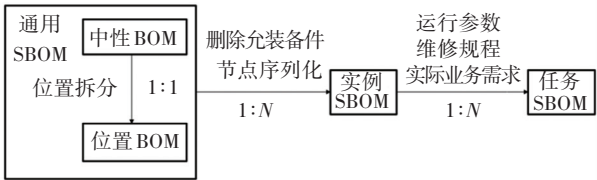


图 1 不同类型的 SBOM 间关联关系

Fig.1 Relationship between different types of SBOM

1.2.1 管理批次产品的通用 SBOM

通用 SBOM 节点关联的是批次产品与服务相关的共性信息, 包括零件的三维模型、各类的维修规程和专用设备等。由于不同位置运行环境的差异性, 具有相同设计要求的零件可能具有不同的服务标准, 一般使用位置节点进行管理。根据共性服务信息与位置的相关性, 将通用 SBOM 划分为中性 BOM 和位置 BOM。中性 BOM 用于组织与位置无关的共性服务信息, 位置 BOM 用于组织与位置相关的共性服务信息。位置 BOM 是中性 BOM 的附加物料清单, 在中性 BOM 的基础上, 将位置节点进行拆分, 如

果零组件的 MRO 服务要求与装配位置均无关,则位置 BOM 不存在。同时考虑到服务过程中允装备件具有多种供应商来源,可能会产生不同成本,因而在通用 SBOM 中采用具有不同物料号的可选节点进行管理。

1.2.2 管理单件产品的实例 SBOM

实例 SBOM 节点关联的是单件产品的个性服务信息,管理服务生命周期中的实物产品信息,记录和跟踪实物部件的 MRO 业务信息,为日常的检查、维护和跟踪提供依据。通用 SBOM 向实例 SBOM 转化的过程中,如果位置 BOM 存在,则以位置 BOM 为核心;如果位置 BOM 不存在,则以中性 BOM 为核心,依据制造履历选定允装备件的供应商,删去同位置处其他可选节点,同时获取零件的序列号、供应商和出厂时间,添加到通用 SBOM 节点中,将其转换为实例 SBOM 节点。一个通用 SBOM 可以序列化多个实例 SBOM。

1.2.3 管理单次 MRO 服务的任务 SBOM

进行 MRO 服务时,由于产品运行状态的不同,会产生不同的服务需求,服务内容也不同。以某时刻实例 SBOM 的节点参数为输入数据,服务人员依据维修规程和实际业务需求实施 MRO 服务。任务 SBOM 用于管理单次 MRO 服务下需要关注的产品结构,涵盖了一次 MRO 服务的全部内容,包括服务内容、服务方法、服务所需的资源等,用于对 MRO 服务过程的指导。单次任务 SBOM 基于 MRO 服务需求,选定服务节点和节点间的可变约束,对实例 SBOM 进行部分映射而成。一个实例 SBOM 可以映射成多个任务 SBOM。

2 不同类型的 SBOM 演化关系模型

2.1 通用 SBOM 的内部演化关系

通用 SBOM 包含产品全部的 MRO 服务范围,是产品服务生命周期的数据源头,采用三元组 $K_G = \langle P_G, R_G, C_G \rangle$ 进行表示,其中 P_G, R_G, C_G 指通用 SBOM 中的节点、节点间约束和属性集合。通用 SBOM 节点 p 一般以物料号 BMN_p 为标识符号,同一批次或型号的零件具有相同的物料号,节点 p 的数量为 n_p ,在产品通用 SBOM 中表示为 $(n_p)p$,则节点集合 P_G 可表示为 $\sum \{(n_p)p\}$ 。依据 SBOM 的节点分类,还可将 P_G 表示为三种类型节点集合的并集,即 $P_G = P_{sg} + P_{sp} + P_{sr}$,其中 P_{sg} 表示通用节点集合, P_{sp} 表示位置节点集合, P_{sr} 表示可选节点集合。 R_G 指零件间的装配关系即节点间约束集合,依据 SBOM 的节点间约束分类,可将其表示为通用约束

集合 R_{su} 和可变约束集合 R_{sc} 的并集,即 $R_G = R_{su} + R_{sc}$ 。节点 p 的装配约束关系为

$$R_p = \{r_p \mid r_p = \langle p, p_j, z_1 \rangle, p \neq p_j, (n_{p_j})p_j \in P_G, n_{p_j} \in N^+, z_1 \in Z\} \quad (1)$$

式中 z_1 为节点 p 和节点 p_j 的装配约束数量关系。当 $z_1 > 0$ 时, p 是 p_j 的父项;当 $z_1 < 0$ 时, p 是 p_j 的子项;当 $z_1 = 0$ 时, p 和 p_j 无父子关系。

因此通用 SBOM 中的节点间约束集合可以表示为

$$R_G = \sum_{(n_p)p \in P_G, r_p \in R_p} \{(n_p)r_p\} \quad (2)$$

节点 p 的静态属性集合 C_p 中包含多种不同类型的属性 c_p ,即 $C_p = \sum \{c_p\}$,则通用 SBOM 中所有节点的静态属性集合 C_G 可表示为

$$C_G = \sum_{(n_p)p \in P_G, c_p \in C_p} \{(n_p)c_p\} \quad (3)$$

将中性 BOM 表示为 $K_{GM} = \langle P_{GM}, R_{GM}, C_{GM} \rangle$,其中 P_{GM}, R_{GM}, C_{GM} 指中性 BOM 中的节点、节点间约束和属性集合,可表示为

$$P_{GM} = \sum \{(n_{pm})p\} \quad (4)$$

$$R_{GM} = \sum_{(n_{pm})p \in P_{GM}, r_{Mp} \in R_{Mp}} \{(n_{pm})r_{Mp}\} \quad (5)$$

$$C_{GM} = \sum_{(n_{pm})p \in P_{GM}, c_{Mp} \in C_{Mp}} \{(n_{pm})c_{Mp}\} \quad (6)$$

式中: n_{pm} 指节点 p 在中性 BOM 中的数量, R_{Mp}, C_{Mp} 指节点 p 在中性 BOM 中的节点间约束和通用属性集合。

位置 BOM 不仅继承了中性 BOM 结构,同时又将中性 BOM 中的位置节点进行拆分,并添加位置相关属性。位置 BOM 可以表示为 $K_{GP} = \langle P_{GP}, R_{GP}, C_{GP} \rangle$,其中 P_{GP}, R_{GP}, C_{GP} 指位置 BOM 中的节点、节点间约束和属性集合,可表示为

$$P_{GP} = \sum \{(n_{pp})p\} \quad (7)$$

$$R_{GP} = \sum_{(n_{pp})p \in P_{GP}, r_{Pp} \in R_{Pp}} \{(n_{pp})r_{Pp}\} \quad (8)$$

$$C_{GP} = \sum_{(n_{pp})p \in P_{GP}, c_{Pp} \in C_{Pp}} \{(n_{pp})c_{Pp}\} \quad (9)$$

式中: n_{pp} 指节点 p 在位置 BOM 中的数量, R_{Pp}, C_{Pp} 指节点 p 在位置 BOM 中的节点间约束集合和位置属性集合。

通用 SBOM 为中性 BOM 和位置 BOM 复合而成的物料清单,因此节点 p 在这三类 BOM 中的数量和属性的关联关系为

$$n_p = n_{pm} + n_{pp} \quad (10)$$

$$C_p = C_{Mp} + C_{Pp} \quad (11)$$

对于中性 BOM 中的任一位置节点 $p((n_p)p \in P_{GM} \text{ and } (n_p)p \in P_{sp}, n_p \in N^+)$,按照其位置管理要

求, 在位置 BOM 中需要将装配数量关系为 $|z_2|$ ($|z_2| > 1, z_2 \in Z$) 的 p 节点约束拆分成 $|z_2|$ 个装配数量关系为 1 的 p 节点约束, 则位置节点在中性 BOM 和位置 BOM 中的节点数量及节点间约束的关联关系为

$$n_{pp} = n_{pm} + |z_2| - 1 \quad (12)$$

$$R_{Mp} = \{r_{mp} \mid r_{mp} = \langle p, p_j, z \rangle, p \neq p_j, (n_{p_j}) p_j \in P_G, n_{p_j} \in N^+, |z_2| > 1, z_2 \in Z\} \quad (13)$$

$$R_{Pp} = \{(|z_2|) r_{pp} \mid r_{pp} = \langle p, p_j, 1 \rangle, p \neq p_j, (n_{p_j}) p_j \in P_G, n_{p_j} \in N^+, |z_2| > 1, z_2 \in Z\} \quad (14)$$

位置节点在通用 SBOM、中性 BOM 和位置 BOM 中的节点间约束的关联关系为

$$R_p = R_{Mp} + R_{Pp} \quad (15)$$

而对于中性 BOM 中的非位置节点 $p((n_p)p \in P_{GM} \text{ and } (n_p)p \notin P_{sp}, n_p \in N^+)$, 其在中性 BOM 和位置 BOM 中具有相同的节点数量和节点间约束:

$$n_{pm} = n_{pp} \quad (16)$$

$$R_{Mp} = R_{Pp} \quad (17)$$

非位置节点在三类 BOM 中的节点间约束关联关系为

$$R_p = 2R_{Mp} = 2R_{Pp} \quad (18)$$

2.2 通用与实例 SBOM 间的演化关系

实例 SBOM 在通用 SBOM 的基础上, 根据零组件的供应商确定可选节点的物料号, 删去同一位置处的其他可选节点, 并增加实例零件的序列号、零件剩余寿命等动态属性。实例 SBOM 节点可以看成是通用 SBOM 节点与实例零件的组合, 以零件安装时间为关联关系, 采用六元组 $K_i = \langle P_i, R_i, C_i, P_c, A_c, T \rangle$ 进行表示, 其中 P_i, R_i, C_i 表示单件与批次产品相同的节点、节点间约束和属性集合, P_c 表示实例 SBOM 中装配的实例零件集合, A_c 表示实例零件的动态属性集合, T 表示实例 SBOM 的时间戳。 p' 表示节点 p 处安装的实例零件, 以序列号 USN 为标识符号。通用 SBOM 中可选节点集合 P_{sr} 包含了所有位置处的可选节点, 可选节点位置数量为 n_{sr} , 任一 $i(i \in Z \text{ and } 1 \leq i \leq n_{sr})$ 项位置的可选节点集合 $P_{sr}(i)$ 为

$$P_{sr}(i) = \sum_{j=1}^{n(i)} \{(n_{sr}(i)) p_{sr}(i, j)\} \quad (19)$$

式中: $n(i)$ 为第 i 项位置处可选的供应商数量, $n_{sr}(i)$ 为第 i 项位置处的零件数量关系, 节点 $p_{sr}(i, j)$ 指第 i 项位置处由第 j 个供应商制造的零件。

可选节点集合 P_{sr} 可看成是各个位置处的可选节点集合之和, 表示为

$$P_{sr} = \sum_{i=1}^{n_{sr}} P_{sr}(i) \quad (20)$$

初始实例化 SBOM 时, 需要选定可选节点位置处的供应商, 同时删去该位置处的其他可选节点。设定第 i 项节点位置处选用的零件由第 $j(i)$ ($j(i) \in Z \text{ and } 1 \leq j(i) \leq n(i)$) 个供应商提供, 则通用 SBOM 与实例 SBOM 之间的关联关系可表示为

$$P_G = P_l + P_{sr} - \sum_{i=1}^{n_{sr}} \{(n_{sr}(i)) p_{sr}(i, j(i))\} \quad (21)$$

$$R_G = R_l + \sum_{(n_p) p \in P_G - P_l, r_p \in R_p} \{(n_p) r_p\} \quad (22)$$

$$C_G = C_l + \sum_{(n_p) p \in P_G - P_l, c_p \in C_p} \{(n_p) c_p\} \quad (23)$$

2.3 实例与任务 SBOM 间的演化关系管理

任务 SBOM 是根据 MRO 服务需求对实例 SBOM 进行部分映射而成, 涵盖了单个产品的单次 MRO 服务的全部内容。每次任务执行后, 实例 SBOM 会根据服务需求发生变更, 因而任务 SBOM 也是会随着时间的改变而改变的。进行 MRO 服务时, 首先需要根据维修规程和产品状态确定此次 MRO 服务的范围以及内容。产品具有不同级别的 MRO 服务范围 and 深度, 例如在机车小修时只需要检查转向架, 而中修时则需要对转向架进行拆检, 因而在不同的任务 SBOM 中具有不同的节点和节点间约束; 而产品在不同时间段也会进行相同的 MRO 服务, 不同的任务 SBOM 中也有相同的节点和节点间约束。为了提高 MRO 服务信息的重用性, 构建了通用模板-实例模板-服务实例即 CIS 三层结构 (Common Templet-Instance Templet-Service Instance) 管理任务 SBOM, 如图 2 所示。

在以 CIS 结构为核心的数据管理模式中, 通用模板是面向型号产品的, 实例模板和服务实例是面向单件产品的。由于同一批次或型号的产品共用一套维修规程, 因而具有相同的 MRO 服务, 使用通用模板对这类 MRO 服务进行管理, 对应着同型号的 N 个实例产品, 并存储在通用模板库中。而单件产品具有使用环境多变、故障复杂的特点, 可能会产生超出维修规程范围的 MRO 服务, 例如附加检修等, 因而同一批次或者型号的产品的 MRO 服务模式具有差异性, 使用实例模板对实例产品的 MRO 服务进行管理。实例模板在通用模板的基础上, 根据实际的 MRO 服务需求进行增删改, 与实例产品是一一对应的关系, 并存储在实例模板库中。对某个产品实施 MRO 服务时, 可从该产品的实例模板库中获取相应的任务模板, 并根据任务执行时间确定安装的实例零件, 扩展实例属性, 生成任务 SBOM, 并作为服务实例存储在服务实例库中。任务 SBOM 是对实例 SBOM 的部分映射, 表示为 $K_{IT} = \langle P_{IT}, R_{IT}, C_{IT}, P_{CT}, A_{CT}, T_T \rangle$, 其中 $P_{IT}, R_{IT}, C_{IT}, P_{CT}, A_{CT}, T_T$ 分别表示

任务 SBOM 中的节点、节点间约束、静态属性、实例零件及其动态属性集合和任务时间戳,任务映射主

要体现在节点和节点间约束上,可以表示为 $P_{IT} \subseteq P_I, R_{IT} \subseteq R_I$ 。

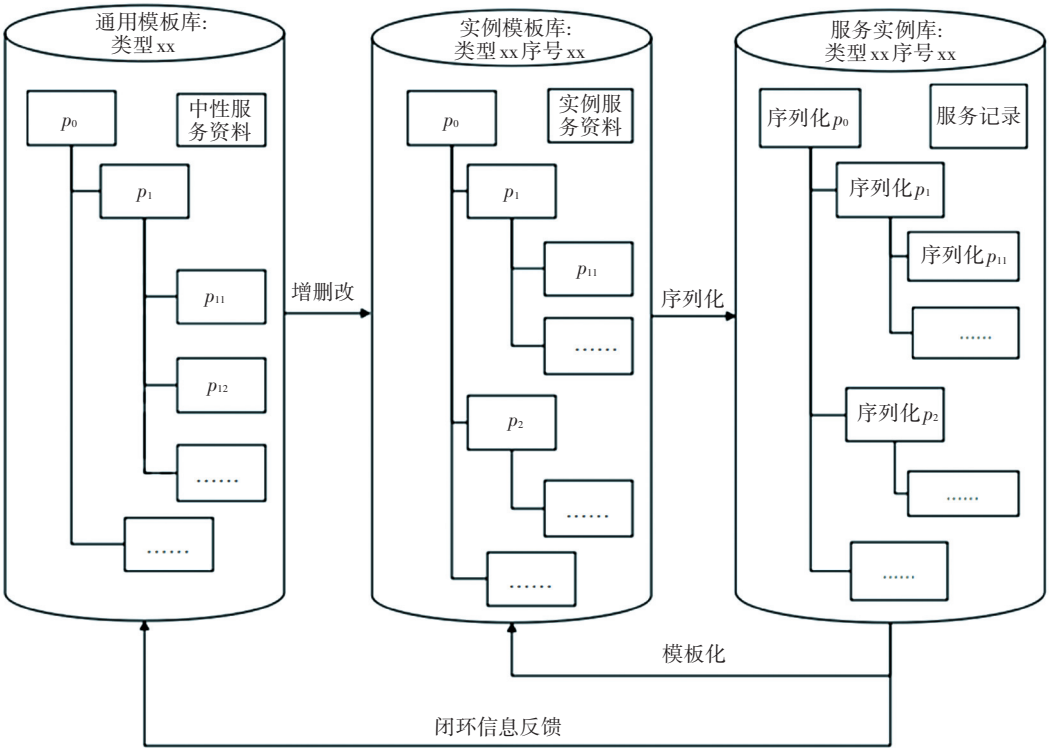


图 2 基于 CIS 三层结构的任务 SBOM 的管理模式

Fig.2 Task management mode of SBOM based on CIS three-tier structure

一个实例模板会产生 N 个服务实例,但是存在某些加改装任务由于初次实施找不到相对应的任务模板的情况,此时需要根据当前的 MRO 服务需求构建新的任务 SBOM。而当该项任务执行次数过多时,经服务人员决策后,可以将其转化成实例模板,添加到实例模板库中。此外,生产厂家还可以根据实际的 MRO 服务情况,对维修规程中不合理的地方进行修改,并应用到同型号产品的 MRO 服务中去,从而改进该型号产品的 MRO 服务质量,实现 MRO 服务过程中的闭环信息反馈。

3 不同 MRO 服务需求下的 SBOM 动态演化模型

在服务阶段,MRO 服务的实施会带来单个产品在结构、组成零件或者性能参数的改变。MRO 服务需求一般分为维护、修复、更换和加改装四种,通过分析不同服务需求对产品结构关系和装配零件产生的影响,将 SBOM 节点的变更分成两种:第一种为节点和节点间约束的变更,该变更类型下通用 SBOM 和实例 SBOM 均发生了改变;第二种为实例零件及动态属性的变更,该变更类型下通用 SBOM 不变,实例 SBOM 发生了改变。对每一种变更类型下的节点状态进行分析,讨论不同节点状态下通用 SBOM 和

实例 SBOM 的动态演化过程。

3.1 节点和节点间约束的变更

产品在投入使用后,会有较长的产品服务周期,使用环境也在不断发生变化。当运营商发现零部件或者软件版本不满足现有的使用要求时,会向生产商提出改装、加装或者软件升级的服务需求;或者是生产商通过产品的历史服务记录,发现重大的质量缺陷,对已经出厂的产品召回后进行设计结构或者生产工艺的更改服务。这类服务需求往往先由设计人员评定分析,对产品的设计制造结构或者属性进行更改后,再调整通用 SBOM 的产品结构、零件属性和维修规程。由于实例 SBOM 是对通用 SBOM 的序列化,因此不仅节点的需求版本或节点间约束会发生改变,安装的实例零件的版本也会发生变化。在这种变更类型下,节点具有新增、删除和升版三种状态。

以图 3 中的 SBOM 结构为例进行说明,该结构下的通用 SBOM 可表示为 $K_G = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_1, c_2\} \rangle$ 。初始时刻 T_0 时,该实例 SBOM 可表示为 $K_I = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_1, c_2\}, \{p'_m, p'_1, p'_2\}, \{a_m, a_1, a_2\}, T_0 \rangle$ 。

3.1.1 新增状态

当节点处于新增状态时,通用 SBOM 中新增该

节点、节点父约束及静态属性,同时实例 SBOM 中的产品结构、静态属性、实例零件及动态属性也进行新增操作。如图 3(a)所示, T_1 时刻节点 p_3 处于新增状态, 变更后的通用 SBOM 为 $K_G = \langle \{p_m, p_1, p_2, p_3\}, \{r_{m1}, r_{m2}, r_{m3}\}, \{c_m, c_1, c_2, c_3\} \rangle$, 而实例 SBOM 可以表示为 $K_I = \langle \{p_m, p_1, p_2, p_3\}, \{r_{m1}, r_{m2}, r_{m3}\}, \{c_m, c_1, c_2, c_3\}, \{p'_m, p'_1, p'_2, p'_3\}, \{a_m, a_1, a_2, a_3\}, T_1 \rangle$ 。

3.1.2 删除状态

当节点处于删除状态时,通用 SBOM 中删除该节点、节点父约束和静态属性,同时实例 SBOM 中的产品结构、静态属性、实例零件及动态属性也进行删除操作。如图 3(b)所示, T_2 时刻节点 p_2 处于删除状态, 变更后的通用 SBOM 可以表示为 $K_G = \langle \{p_m, p_1\}, \{r_{m1}\}, \{c_m, c_1\} \rangle$, 实例 SBOM 变为 $K_I = \langle \{p_m, p_1\}, \{r_{m1}\}, \{c_m, c_1\}, \{p'_m, p'_1\}, \{a_m, a_1\}, T_2 \rangle$ 。

3.1.3 升版状态

由于 MRO 服务过程中存在多次的版本变更,节点在不同的时间要求安装的零件或者软件的版本可能不同。有的实例零件的版本需要同节点的需求版本保持一致,但是有的节点也可以在不影响产品功能的情况下,安装多种版本的实例零件。因此,当

节点处于升版状态时,通用 SBOM 节点及静态属性发生变更,实例 SBOM 中该节点的静态属性发生变更,但该节点位置安装的实例零件及动态属性可能改变也可能不变。如图 3(c)所示, T_3 时刻节点 p_1 处于升版状态,该节点需求版本和实例零件版本要求一致,因此升版后不仅节点 p_1 的静态属性变为 c_{1r} ,同时装配的实例零件更换为相应版本的 p'_{1r} ,与实例零件相关的动态属性变为 a_{1r} , 因此变更后的通用 SBOM 表示为 $K_G = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_{1r}, c_2\} \rangle$, 实例 SBOM 表示为 $K_I = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_{1r}, c_2\}, \{p'_m, p'_{1r}, p'_2\}, \{a_m, a_{1r}, a_2\}, T_3 \rangle$ 。

而有的节点版本升级后,只需要改变维修规程中的规定版本,之前版本的实例零件或者软件还是可以使用。如图 3(d)所示, T_4 时刻节点 p_2 处于升版状态,需求版本虽然由版本 B 升级成版本 C,静态属性变为 c_{2r} ,但是原先版本 B 的实例零件依旧满足安装要求,因此不需要进行零件更换。此时通用 SBOM 表示为 $K_G = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_1, c_{2r}\} \rangle$, 而实例 SBOM 变为 $K_I = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_1, c_{2r}\}, \{p'_m, p'_1, p'_2\}, \{a_m, a_1, a_2\}, T_4 \rangle$ 。

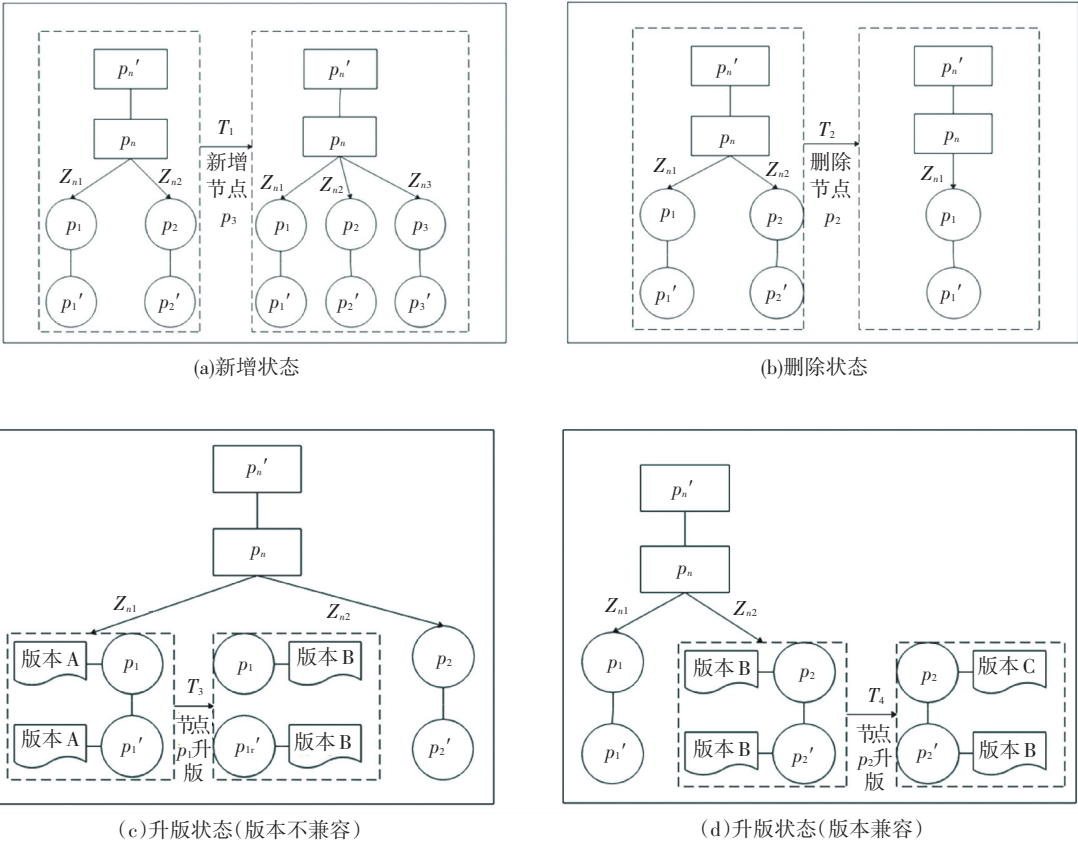


图 3 节点和节点间约束变更类型下的节点状态

Fig.3 Node status under node and inter-node constraint change types

3.2 实例零件及动态属性的变更

在对产品进行维护、修复和更换服务时,由于产品通用 SBOM 节点不会发生改变,因而其实例 SBOM 中的产品结构及零件静态属性也不会发生改变,该变更类型下只讨论实例 SBOM 中实例零件及动态属性的变化。节点具有修复和更换两种状态,而更换分为整体更换和拆卸更换,整体更换时,该组件及其所有子件都会同时发生变更,而拆卸更换只会更改部分子件。

如图 4 所示,组件 p_m 由两个零件装配而成,在不同的 MRO 业务下关注不同的组件结构:进行 MRO 业务一时,只需要对组件表面进行维护;但是在 MRO 业务二下,则需要先将组件 p_m 拆分成零件 p_1 和 p_2 后,然后再进行维护或更换,因此该 MRO 业务下需要关注组件 p_m 的内部零件结构关系。以图 4 中的 SBOM 结构为例进行说明,初始 T_0 时刻时,该实例 SBOM 表示为 $K_I = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_1, c_2\}, \{p'_m, p'_1, p'_2\}, \{a_m, a_1, a_2\}, T_0 \rangle$ 。

3.2.1 修复状态

当节点处于修复状态时,实例 SBOM 中该节点位置的实例零件的部分动态属性发生改变。如图 4 (a) 所示, T_1 时刻对组件 p_m 进行了维护, p_m 节点为修复状态,其动态属性变为 a_{mr} , 维护后实例 SBOM

变为 $K_I = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_1, c_2\}, \{p'_m, p'_1, p'_2\}, \{a_{mr}, a_1, a_2\}, T_1 \rangle$ 。

3.2.2 零件更换状态

当节点处于零件更换状态时,实例 SBOM 中只有该节点位置安装的实例零件及全部动态属性发生改变。如图 4(b) 所示, T_2 时刻对零件 p_2 进行了更换, p_2 节点为零件更换状态,该节点处安装的实例零件 p'_2 更换成 p'_{2r} , 动态属性变为 a_{2r} , 更换后的实例 SBOM 为 $K_I = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_1, c_2\}, \{p'_m, p'_1, p'_{2r}\}, \{a_m, a_1, a_{2r}\}, T_2 \rangle$ 。

3.2.3 组件更换状态

当节点处于组件更换状态时,实例 SBOM 中该节点及其所有子节点位置安装的实例零件及全部动态属性均发生改变。如图 4(c) 所示, T_3 时刻对组件 p_m 进行了整体更换服务,实例组件 p'_m 更换成 p'_{mr} 。而实例组件 p'_{mr} 是由实例零件 p'_{1rr} 和 p'_{2rr} 装配而成,此时 p_m 节点为组件更换状态, p_1 和 p_2 节点为零件更换状态,组件 p_m 的动态属性 a_m 变为 a_{mr} , 而零件 p_1 和 p_2 的动态属性 a_1, a_2 变为 a_{1rr}, a_{2rr} , 更换后的实例 SBOM 可以将其表示为 $K_I = \langle \{p_m, p_1, p_2\}, \{r_{m1}, r_{m2}\}, \{c_m, c_1, c_2\}, \{p'_{mr}, p'_{1rr}, p'_{2rr}\}, \{a_{mr}, a_{1rr}, a_{2rr}\}, T_3 \rangle$ 。

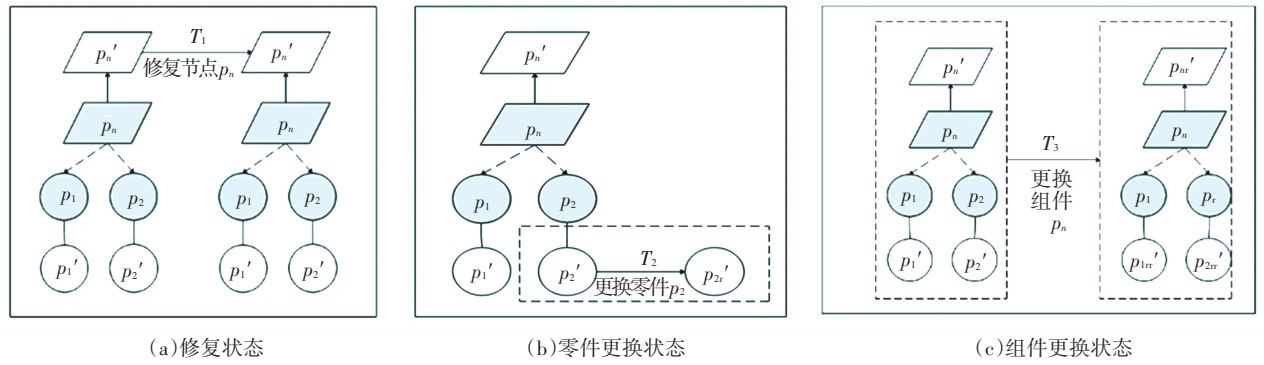


图 4 实例零件及动态属性变更类型下的节点状态

Fig.4 Example parts and node states under dynamic property change types

4 应用实例

基于上文对 SBOM 演化模型的研究,本文以某机车转向架的部分结构为例,描述产品服务生命周期中面向不同管理需求和服务需求的 SBOM 演化过程。其中,机车转向架的通用 SBOM、实例 SBOM 和任务 SBOM 结构及其之间的转换关系如图 5 所示。

对于部分关键节点,需要对其整个服务生命周

期进行管理,要求能快速追溯到该节点处特定时间安装的实例零件以及实施的 MRO 活动,实现 MRO 服务追溯。服务追溯一般是基于实例 SBOM 而言,依据节点追溯目的本文定义了两种 MRO 服务追溯机制:

1) 节点在特定时间点 t_0 安装的实例零件追溯。依据追溯节点的物料号 BMN 和 t_0 , 基于实例 SBOM 结构,确定该时刻安装的零件序列号 USN。

2) 节点在特定时间段 $[t_s, t_e]$ 的安装历史序列追溯。依据追溯节点的物料号 BMN、开始时间 t_s 和结束时间 t_e , 确定初始和末尾追溯时刻安装的实例零件序列号 USN_s 、 USN_e , 并沿着时间坐标生成该节

点在此时间段的安装历史序列 $[t_s, \frac{USN_s}{USN_e} \dots \frac{USN_e}{t_e}]$ 。

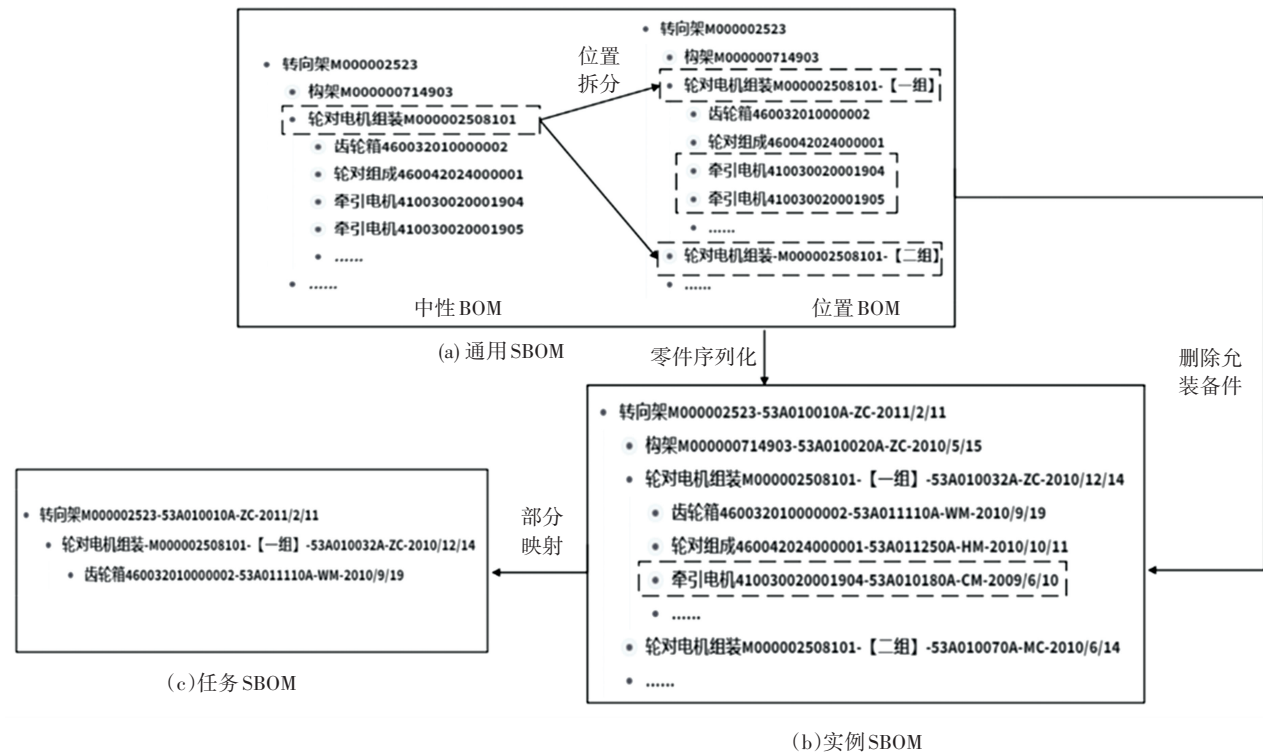


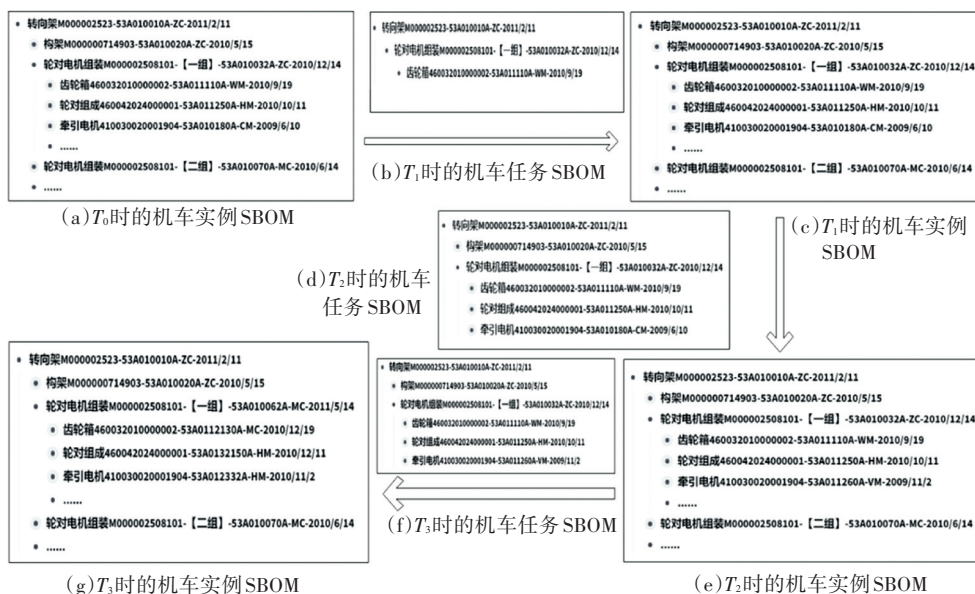
图 5 面向不同管理需求的机车转向架 SBOM

Fig.5 SBOM of locomotive bogie for different management requirements

本文以该机车转向架的实例 SBOM 在 $T_0 - T_3$ 期间的三次 MRO 服务下的动态演化过程为例, 对 MRO 服务追溯机制进行验证。初始时刻 T_0 时, 机车实例 SBOM 结构如图 6(a) 所示。 T_1 时刻, 维修人员在出发前对机车转向架中的轮对电机组装一组进行齿轮油位的外观检查任务, 该服务下的任务 SBOM 如图 6(b) 所示。通过检查发现齿轮油位较低, 因此按照维修说明对齿轮箱进行了加油操作。该 MRO 服务下, 齿轮箱节点为修复状态, 加油后的机车实例 SBOM 结构如图 6(c) 所示。 T_2 时刻, 维修人员在日常检修时对机车转向架的轮对电机组装一组进行了拆检任务, 需要将轮对电机拆下后再进行检查, 该服务下的任务 SBOM 如图 6(d) 所示。检查后发现牵引电机故障, 按照维修说明对该牵引电机进行了更换操作。该项 MRO 服务下, 牵引电机节点为零件更换状态, 其零件序列号及其他动态属性均发生了改变, 而其他节点保持不变, 更换后的机车实例 SBOM 结构如图 6(e) 所示。 T_3 时刻, 由于机车

在运行过程再次出现了牵引电机异常的情况, 维修人员再次对机车转向架的轮对电机组装一组进行了拆检任务, 该 MRO 服务下的任务 SBOM 如图 6(f) 所示。为了避免再次出现异常情况, 按照维修说明对轮对电机组装一组进行了整体更换。该项 MRO 服务下, 由于更换了轮对电机组装一组, 轮对电机组装一组的子件也会随之进行更换, 因此轮对电机组装一组为组件更换状态, 其子件为零件更换状态, 两者的零件序列号及其他动态属性均发生了改变, 整体更换后的实例 SBOM 如图 6(g) 所示。

该机车转向架中, 以轮对电机组装一组中的牵引电机为追溯对象, 追溯得到某一时间点 t_1 ($T_0 \leq t_1 \leq T_1$) 安装的实例零件序列号 $USN_1 = 53A010180A$, 以及某一段时间 $[t_2, t_3]$ ($T_1 \leq t_2 \leq T_2, T_2 \leq t_3 \leq T_3$) 的实例零件的安装历史序列为 $[t_2, \frac{53A010180A}{T_2}, \frac{53A011260A}{t_3}]$ 。

图6 T_0 ~ T_3 期间机车转向架实例 SBOM 动态演化过程Fig. 6 Dynamic evolution process of instance SBOM of locomotive bogie between T_0 and T_3

5 结 论

本文通过分析动态 MRO 业务特点,定义了 SBOM 的节点和节点间约束,建立了不同类型 SBOM 间的演化关系模型,以及不同服务需求下的 SBOM 动态演化模型,并以某型号机车转向架为例进行了演化模型及 MRO 服务追溯机制的验证。演化模型将动态服务需求与产品结构结合起来,实现了 SBOM 对于动态 MRO 活动的支持,为复杂装备企业提供了产品服务生命周期中动态数据的管理方法。

参考文献

- [1] 陶飞, 戚庆林. 面向服务的智能制造[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 11
TAO Fei, QI Qinglin. Service-oriented smart manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 11
- [2] 程曜安, 张力, 刘英博, 等. 大型复杂装备 MRO 系统解决方案[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2026
CHEN Yaoan, ZHANG Li, LIU Yingbo, et al. Solution of MRO support system for large complex equipment[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(10): 2026
- [3] SUN H B, CHANG Z Y, WAN N, et al. Study on key technologies of aero-engine AMRO support system[J]. Materials Science Forum, 2011, 697-698: 554
- [4] LEE J H, KIM S H, LEE K. Integration of evolutionary BOMs for design of ship outfitting equipment[J]. Computer-Aided Design, 2012, 44(3): 253
- [5] 任良全, 张君, 张力, 等. 面向信息资源管理的维修 BOM 结构设计与分析[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(7): 1545
REN Genquan, ZHANG Jun, ZHANG Li, et al. Information resources organizing-oriented design and analyzing of maintenance BOM[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(7): 1545
- [6] ZHOU C, LIU X, XUE F, et al. Research on static service BOM

transformation for complex products[J]. Advanced Engineering Informatics, 2018, 36: 146

- [7] 刘晓冰, 赵国志, 周春柳. 面向复杂装备的检修 BOM 构建[J]. 计算机工程与设计, 2019, 40(3): 894
LIU Xiaobing, ZHAO Guozhi, ZHOU Chunliu. Construction of MRO BOM for complex equipment[J]. Computer Engineering and Design, 2019, 40(3): 894
- [8] 李浩, 李奇峰, 杜文辽, 等. 基于服务 BOM 的复杂产品 MRO 信息集成建模研究[J]. 制造技术与机床, 2017(10): 124
LI Hao, LI Qifeng, DU Wenliao, et al. An information integration modeling method of the complex product MRO service based on service BOM[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2017(10): 124
- [9] LIU M, LAI J, SHEN W. A method for transformation of engineering bill of materials to maintenance bill of materials[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2014, 30(2): 142
- [10] 李玲, 刘敏, 吴鸣. 基于复合维修物料清单的设备运行状态管理模型[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(6): 1529
LI Ling, LIU Min, WU Ming. Equipment operation management model based on composite maintenance BOM[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(6): 1529
- [11] LI J, TAO F, CHENG Y, et al. Big data in product lifecycle management[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1): 667
- [12] GENG J, TIAN X, BAI M, et al. A design method for three-dimensional maintenance, repair and overhaul job card of complex products[J]. Computers in Industry, 2014, 65(1): 200
- [13] SUN H, CHANG Z. An approach to configuration management in the aero-engine overhaul process[J]. Aircraft Engineering, 2018, 90(2): 418
- [14] SHI L, HU D, HUANG A. Research on construction method of in-service aircraft configuration data model[J]. Journal of Physics Conference Series, 2019, 1168(2): 022004
- [15] 李青, 冯丹, 梅正朋. 飞机使用寿命周期构型管理和追溯[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(2): 476
LI Qing, FENG Dan, MEI Zhengpeng. Aircraft configuration management and retrospective in life cycle[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2016, 22(2): 476 (编辑 王小唯)