

基于 DS 理论的高层体系结构协同仿真建模^①

李 犁^② 肖田元^③ 马 成

(清华大学自动化系国家 CIMS 中心 北京 100084)

摘 要 研究了高层体系结构(HLA)下基于设计模型的仿真建模在虚拟产品开发中的应用,提出了一种基于 DS 理论的 HLA 协同仿真建模方法。该方法根据上游设计模型的主模型本体实例,使用领域规则和 DS 不确定性推理创建实现不同目标的仿真模型,进而基于产品资源联邦动态创建 HLA 仿真任务的联邦对象模型(FOM)和仿真对象模型(SOM),并实现将协同仿真结果通过 HLA 支撑环境动态返回上游设计模型。建立了复杂产品协同仿真平台原型系统,通过实例验证了该方法的可行性。该方法保证了基于设计模型的 HLA 协同仿真建模的语义一致性,提高了建模效率。

关键词 虚拟产品开发, DS 理论, 高层体系结构(HLA), 本体, 仿真建模

0 引 言

基于设计模型的仿真建模在虚拟产品开发(virtual product development, VPD)中日益得到重视。VPD 是指在计算机上设计、开发产品并产生虚拟样机的过程和活动^[1]。高层体系结构(high level architecture, HLA)作为当前流行的分布式仿真体系结构,可满足 VPD 将不同领域仿真模型纳入同一仿真任务的需求,因而在复杂产品的虚拟产品开发中已得到广泛应用^[2,3]。HLA 是新一代分布仿真体系结构标准。基于该标准的分布仿真系统主要由完成各种仿真任务的联邦成员和完成联邦成员之间数据交互的联邦运行支撑环境(run time infrastructure, RTI)组成。数据交互只能在对象模型模板(object model template, OMT)对交互数据进行了正确定义的情况下才能顺序执行。OMT 的应用主要通过联邦对象模型(federation object model, FOM)和仿真对象模型(simulation object model, SOM)形式得以体现。

传统上,产品设计模型与仿真模型由不同领域的人员分别开发。随着 VPD 技术的发展,基于上游设计模型创建仿真模型,可以更好地保证产品模型

在全开发周期中的一致性,并大大节约开发成本。然而,产品设计模型和仿真领域模型所要表达的侧重点可能不同。一般说来,根据仿真目标,仿真模型是在保持产品主要性能和数据、语义一致性的前提下对设计模型的简化。而且,考虑到仿真任务的多样性,同一产品模型可能需要创建不同的仿真模型。本体技术作为消除语义差异性的通用工具和方法,在复杂产品仿真建模的各相关领域都得到了广泛应用^[4,5]。当前诸多研究都以本体技术为基础,以实现复杂产品开发过程中各领域互理解与仿真建模。例如,Zhan 创建了领域本体和应用本体^[6],通过本体映射实现基于设计的仿真建模,但该方法只能实现设计模型到仿真模型元素的一一映射,无法满足一对多映射的需求。Kim、Fiorentini 等使用网络本体语言(OWL)构建产品主模型^[7,8],并通过本体映射以及领域规则实现仿真建模,但为满足复杂产品仿真建模灵活性的需求,规则库将会非常庞大并难以建立。上述研究均未涉及 HLA 环境下基于本体映射创建 FOM 和 SOM,为此,Sun 等提出了基于交互本体创建 FOM 的方法^[9],但交互本体并不能对仿真成员自身的领域概念及知识进行描述。Özdikis 等提出一种将领域本体映射成联邦执行所需 FOM 的方法^[10],但该方法仅能针对单一领域的领域本体

① 863 计划(2009AA110302,2006AA04Z160)和国家自然科学基金(60874066)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:协同仿真建模;E-mail: lili04@mails.tsinghua.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail: xty-dau@tsinghua.edu.cn
(收稿日期:2011-12-26)

进行映射。针对产品开发周期的需要及目前建模方法存在的不足,本文提出了一种基于处理不确定性的 Dempster-Shafer (DS) 理论的 HLA 仿真建模方法。该方法将 DS 理论的不确定性推理与基于领域规则的确定性推理相结合,根据用户需求创建不同仿真模型,进而动态创建仿真任务的 FOM 和 SOM,实现基于 HLA 运行支撑环境(RTI)的仿真,结果返回到设计模型,保证了产品设计模型数据和语义与仿真模型的一致性。

1 DS 理论

DS 理论是由 Dempster 于 1976 年提出的一种不确定性推理方法。该理论首先构造一个识别框架 U , U 由一系列对象构成,且对象间两两互斥。DS 理论所解决的问题是根据证据判明一个先验未定元素属于 U 的某一子集 A 的程度。DS 理论使用基本概率分配函数 $m: 2^U \rightarrow [0, 1]$ 来表示证据对子集 A 的信任度,其中 $m(\phi) = 0$, $\sum_{A \subseteq U} m(A) = 1$ 。

将 DS 理论应用于 HLA 仿真建模主要有如下几点优势:(1)DS 理论的判定元素与判定结果间可能是一对一或一对多的关系,这满足了基于设计的仿真建模可能出现的单一元素映射成为多个元素的情形。(2)DS 理论可以根据 Dempster 合成法则对多种规则进行融合,避免规则冲突。(3)DS 理论引入了信任函数以区分不确定性与不知道,这使得当仿真建模无法获得足够的确定性推理信息时,可通过领域专家设定基本概率分布函数处理这种不确定性。

2 基于 DS 理论的领域仿真建模

本文在 HLA 环境下基于 DS 理论仿真建模方法的流程如图 1 所示。

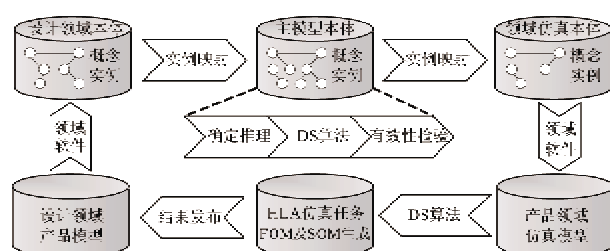


图 1 基于 DS 理论的建模与仿真流程

主模型被广泛用于复杂产品信息集成^[8],本文研究根据设计模型得到设计领域本体实例,并以实例映射的方式创建主模型本体实例,实现复杂产品开发中各领域的互理解和信息集成。

由于本文主要研究基于 DS 理论的仿真建模,因此对如何构建主模型本体不做详细阐述。图 2 (左半部分)所示为一种主模型本体结构。构建方法是通过确定性规则推理、DS 推理和有效性校验三个步骤完成对主模型本体实例的修改,再将实例映射为目标领域本体实例,并在相应仿真软件支持下完成领域仿真模型的创建。完成领域仿真建模后,基于产品资源联邦和 DS 推理创建 HLA 仿真任务联邦所需的 FOM 及 SOM 文件。

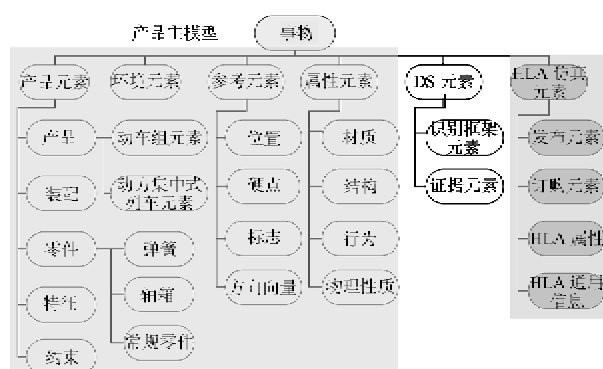


图 2 主模型本体主要结构

图 2 中的 HLA 仿真元素部分为 HLA 建模所特有,HLA 仿真元素描述产品模型在协同仿真中的交互能力。发布元素与订购元素概念实例通过特定对象关系与相应主模型本体概念实例相连接,说明模型可发布和订购的对象,其具体属性由 HLA 属性概念实例描述。HLA 通用信息概念实例则描述当前模型参与协同仿真时的时间推进方式、数据分发机制等信息。由于设计模型中并不包含这些信息,因此 HLA 协同仿真信息需要在完成实例映射后导入主模型本体。

本节首先给出面向复杂产品开发的本体、DS 识别框架模型等的定义。本文中提到的本体均使用 OWL 构建。

定义 1 面向复杂产品开发的本体可被形式化定义为一个七元组 $O ::= \langle C, R, I, H_C, H_R, \sigma_o, \sigma_d \rangle$, C 和 R 分别是本体中概念和概念关系的集合, I 为概念实例的集合。 H_C 和 H_R 分别是本体中概念和概念关系形成的有序二元组集,即 $H_C \subseteq C \times C$, $H_R \subseteq R \times R$, 存储父子关系。 $\sigma_o: R \rightarrow C \times C$ 或 $I \times I$ 是对象

关系到概念或概念实例的映射, $\sigma_d: R \rightarrow C$ 或 I 是数据属性关系到概念或概念实例的映射, 以上两者用以描述本体概念间除父子关系外的关系。

定义 2 基于 DS 理论仿真建模中识别框架模型可以定义为一个六元组 $E::=(H, M, K_{HM}, K_M, \sigma_{HM}, \sigma_M)$ 。

识别框架中某一子集可表述为一个概念实例, H 是这些实例的集合。例如 h_1 : “常规零件-硬点”实例可表述识别框架中“常规零件”和“硬点”对象的集合, $h_1 \in H$ 。表述所有对象集合的实例可记为 h_A 。证据也可表述为本体概念实例, M 是证据概念实例的集合。 K_{HM} 是基本概率分配函数值的集合, 元素为 $k = d + \omega$ 或 $k = d - \omega$, 其中 d 是设定某一证据对某子集的分配函数值, ω 则是由用户设定, 用以调整分配函数值的参数。由于在仿真建模中不会出现将某一概念实例转化为识别框架中所有对象的情况, 因此 h_A 所对应的分配函数值设为零。 K_M 是证据可信度的集合, 证据可信度是未定元素存在某一证据的可信程度。 $\sigma_{HM}: H \times M \rightarrow K_{HM}$ 是识别框架子集与证据到其分布函数值的映射, 满足 $\sum_{h \in H} \sigma_{HM}(h, m) = 1$, 其中 $m \in M$ 。 $\sigma_M: M \rightarrow K_M$ 是证据到其可信度的映射。

DS 识别框架及设定的基本概率分配函数值等以主模型本体子本体形式进行描述与存储。其主要结构如图 3 所示, 圆角框代表本体概念, 方形框代表概念实例, 平行四边形框代表数据, 实线代表父子关系和概念与实例关系, 虚线代表其他类型关系。

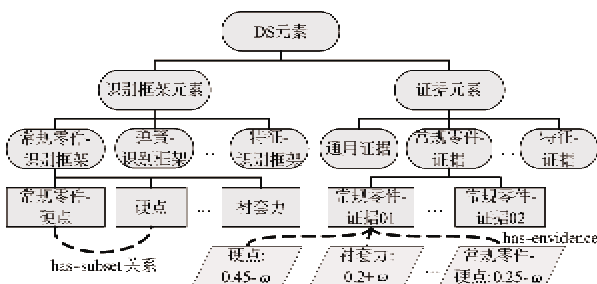


图 3 DS 识别框架本体

本体中主要含有两类概念: 识别框架元素与证据元素。前者包含的概念实例为主模型本体实例在仿真建模中可能转化为概念实例集, 这些实例间使用“has-subset”对象关系, 以描述不同概念所表示的子集间的包含关系。例如“常规零件-识别框架”概念存在实例“常规零件-硬点”, 这说明主模型本体

中“常规零件”概念实例可能被转化为一个“常规零件”概念实例和一个“硬点”概念实例。证据元素概念下包含概念实例可能存在的证据, 其中每一证据元素概念实例使用“has-evidence”数据属性关系存储该证据对相应识别框架子集的基本概率分配函数值。DS 子本体中概念及关系对应于定义 2 中的识别框架模型, 本体中各概念实例对应集合 H 和 M , 实例间关系对应集合 K_{HM} 、 K_M 及映射 σ_{HM} 和 σ_M 。

定义 3 根据 Dempster 法则的证据合成可定义为:

$$m = m_1 \oplus m_2$$

其中 m_1 和 m_2 为 M 中的证据, m 为合成后证据。设 A, X, Y 分别为识别框架某子集的概念实例, 那么 m 对应的基本概率分配函数关系为:

$$\sigma_{HM}(A, m) = K \sum_{X \cap Y = A} \sigma_{HM}(X, m_1) \sigma_{HM}(Y, m_2)$$

其中 $K = (1 - \sum_{X \cap Y = \phi} \sigma_{HM}(X, m_1) \sigma_{HM}(Y, m_2))^{-1}$ 。

定义 4 DS 理论中的信任函数可被定义为 $Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} \sigma_{HM}(B, m)$, 其中 A, B 分别为识别框架的某子集概念实例, m 为 M 中某证据概念实例, $B \subseteq A$ 表示 B 所表示的子集包含于 A 所表示的子集。

定义 5 DS 理论中的似真函数可被定义为 $Pl(A) = 1 - Bel(A')$, 其中 A 为识别框架的某子集概念实例, A' 是 A 所表示的子集在识别框架中的补集。

基于以上定义, 本文给出如下仿真建模算法。设主模型本体为 $O_M = (C_M, R_M, I_M, H_{CM}, H_{RM}, \sigma_{oM}, \sigma_{dM})$, 规则集为 $R = (R_{def}, R_{pre}, R_{rul})$ 。规则集中 R_{def} 表示确定性领域规则; R_{pre} 规则是根据概念实例的不同情形, 给出其存在某一证据的可信度 k_M 的规则, $k_M \in K_M$ 。 R_{rul} 是在算法判定出当前概念实例应转化为识别框架某子集后, 完成实例转化的规则。设用户设定参数为 ω , 信任阈值为 λ , 算法输出为修改后的主模型本体 $O'_M = (O_M, R_M, I'_M, H_{CM}, H_{RM}, \sigma_{oM}, \sigma_{dM})$ 和目标仿真领域本体 O_O 。建模方法可描述如下:

Algorithm 1: Simulation_Instance_Create (O_M, R, ω, λ)

Input: $O_M = (C_M, R_M, I_M, H_{CM}, H_{RM}, \sigma_{oM}, \sigma_{dM}), R, \omega, \lambda$

Output: $O'_M = (O_M, R_M, I'_M, H_{CM}, H_{RM}, \sigma_{oM}, \sigma_{dM}), O_O$

Intermediate Variable: $E_i = (H_i, M_i, K_{HMi}, K_{Mi}, \sigma_{HMi}, \sigma_{Mi})$,

$I_{temp}, H_{in}, H_{out} / * E_i$: 实例 i 的识别框架模型, I_{temp} : 暂存实例集合, H_{in} 和 H_{out} : 候选实例集合 */

Initial Conditions: $I_M = \phi, I_{temp} = \phi, H_{in} = \phi, H_{out} = \phi$

```

1  for all  $i \in I_M$  do
2    if exist (reasoner( $R_{def}, i$ )) / *  $i$  可被确定性推理 */
3    then  $I'_M \leftarrow I'_M \cup \text{reasoner}(R_{def}, i)$ 
4    else  $I_{temp} \leftarrow I_{temp} \cup i$ 
5  end
6  for all  $i \in I_{temp}$  do
7     $E_i = \text{reasoner}(R_{pre}, i, \omega)$ 
/* 根据  $R_{pre}$  确定  $i$  存在证据可信度  $k_M$ , 构造  $i$  的识别框架模型, 各证据原始分配函数值通过设定值与参数  $\omega$  得到 */
8    for all  $m \in M_i$  do
9      for all  $h \in H_i, h \neq h_A$  do
10        $\sigma'_{HMI} \leftarrow \sigma'_{HMI} \cup (m, h) \mapsto \sigma_{HMI}(m, h) \times \sigma_{MI}(m)$ 
11     end
12     $\sigma'_{HMI} \leftarrow \sigma'_{HMI} \cup (m, h_A) \mapsto 1 - \sum_{h \in H_i, h \neq h_A} \sigma'_{HMI}(m, h)$ 
13  end / * 使用可信度修改  $m$  的原始分配函数值并归一化 */
14  replace ( $\sigma_{HMI}, \sigma'_{HMI}$ ) / * 使用  $\sigma'_{HMI}$  替代  $\sigma_{HMI}$  */
15   $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_i, m_i \in M_i$  / * 证据合并 */
16  for all  $h \in H_i$  do
17    if  $Bel(h) > \lambda$  / * 判定子集的信任度是否达到阈值 */
18    then  $H_{in} \leftarrow H_{in} \cup h$ 
19    else  $H_{out} \leftarrow H_{out} \cup h$ 
20  end
21  for all  $h \in H_{in}$  do
22    if  $h$  has-subset  $h', h' \in H_{out}$ 
23    then remove( $H_{in}, h$ ) / * 使用 DS 子本体中的 has-subset 对象关系判断  $h$  的子集已被排除, 若为真则在  $H_{in}$  中移除  $h$  */
24  end
25  for all  $h \in H_{in}$  do
26    if  $[Bel(h) - Pl(h)]/2 = \text{Max}\{[Bel(h) + Pl(h)]/2\}$  / * 判定当前  $h$  信任度和似真度的平均值是否在  $H_{in}$  中最大 */
27    then  $I'_M \leftarrow I'_M \cup \text{reasoner}(R_{def}, i, h)$ 
28  end
29 end
30 consistencytest( $O'_M$ ) / * 判定修改后的本体实例是否有效 */
31 mapping( $O'_M, O_0$ ) / * 使用本体间映射关系完成  $O_0$  创建 */

```

基于上述方法,不能直接使用领域规则推理的概念实例的修改过程转化为了基于若干证据,判定实例对其可能转化的识别框架子集的隶属程度。由于 ω 和 λ 分别影响识别框架各子集的分配函数值

和对子集最终选择,因此用户可以通过调整 ω 和 λ 来创建满足不同目标的领域仿真模型。而基于主模型本体实例映射创建领域仿真模型,进一步保证了仿真模型与设计模型的数据一致性和语义一致性。

3 HLA 的 FOM 和 SOM 文件生成

创建领域仿真模型只完成了 HLA 建模的一部分,还应根据具体仿真任务要求,创建仿真任务联邦执行所需的 FOM 和 SOM 文件。根据已构建的领域仿真模型,本文给出了一种基于 DS 理论动态创建 FOM 和 SOM 的方法。

本文在 RTI 中构建了两类联邦:产品资源联邦和仿真应用联邦。产品资源联邦是为实现对各物理节点上所有产品模型进行感知和管理而建立的联邦。仿真应用联邦则是根据具体协同仿真任务构建的联邦。产品资源联邦在各仿真应用联邦执行过程中一直存在,负责根据具体仿真任务的联邦概念模型(federation conceptual model, FCM),基于 DS 推理给出完成当前任务需要的产品模型候选集,并创建应用仿真联邦的 FOM 和 SOM。产品资源联邦的主要架构可如图 4 所示。

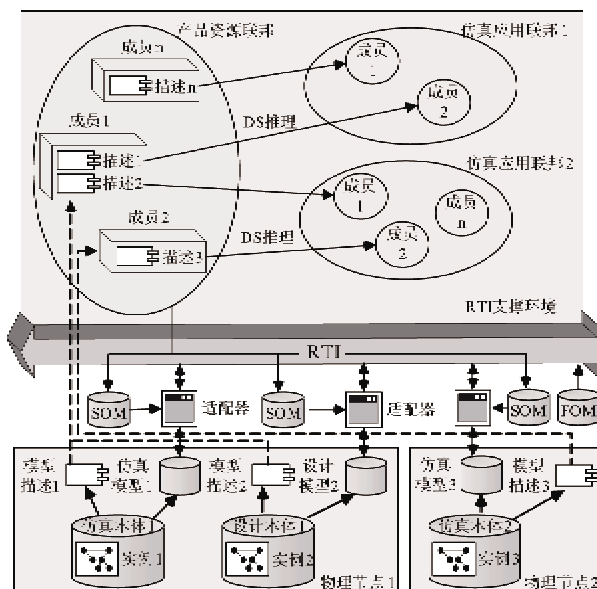


图4 产品资源联邦与应用联邦

由于各节点上的领域仿真模型基于主模型本体实例创建,因此可根据主模型本体的概念限定,对每一产品模型生成一个表示该模型协同仿真角色和能力的模型描述文件。对于设计模型,该描述文件涵盖模型可发布的模型修改信息、可订购的仿真结果

信息以及对应的领域仿真模型等。对于领域仿真模型,该描述文件涵盖模型在主模型本体中的概念信息、在协同仿真中可发布、订购的对象信息、可发布的仿真结果信息、模型所属的领域以及其他 HLA 协同仿真相关参数。这些信息可直接从主模型本体实例中抽取。

每一节点均作为联邦成员加入产品资源联邦,并将模型描述内容以对象类的形式对外发布,同时订购其他成员的产品模型描述对象类。每一节点将感知到的产品模型描述信息进行集成,并根据当前模型对应主模型本体的概念信息进行模型分类,形成一个产品资源本体实例集(图 5,表示方法同图 3)。

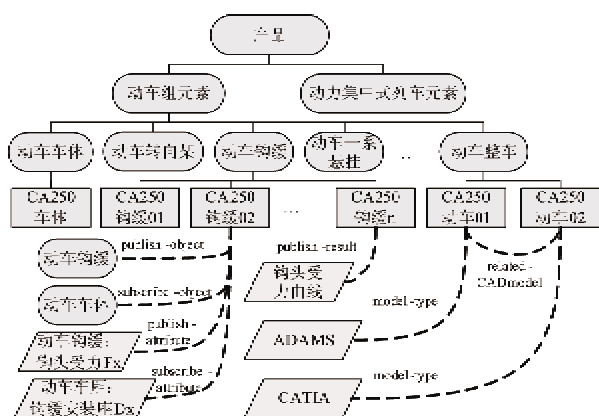


图 5 产品资源本体实例集

图 5 中所有概念、实例及关系均基于主模型本体和产品模型描述信息构建,每一个概念实例代表着当前产品资源联邦中的一个产品模型。每一实例使用对象关系和数据属性关系存储产品模型描述。例如图 5 中实例“CA250 钩缓 02”使用 publish-object 关系描述其可发布的对象概念为“动车钩缓”,即该模型在 HLA 协同仿真中发布的对象类。对象类属性采用 publish-attribute 数据属性关系描述。模型还使用 publish-result 数据属性关系说明其可发布的仿真结果,model-type 数据属性关系描述产品模型的创建领域,related-CADmodel 对象关系描述设计模型与仿真模型的对应关系。

仿真任务 FCM 模型同样使用本体实例构建,如图 6 所示(表示方法同图 3)。联邦元素概念实例描述仿真任务所需要的各类产品模型,使用 connect-to 对象关系描述实例间连接关系,使用 model-type 关系描述需要使用何种软件构造的模型。协同仿真元素概念实例描述仿真任务所需的仿真时长、仿真步

长、仿真精度要求等。任务元素概念实例描述任务需要向哪些产品模型发布何种仿真结果等信息。

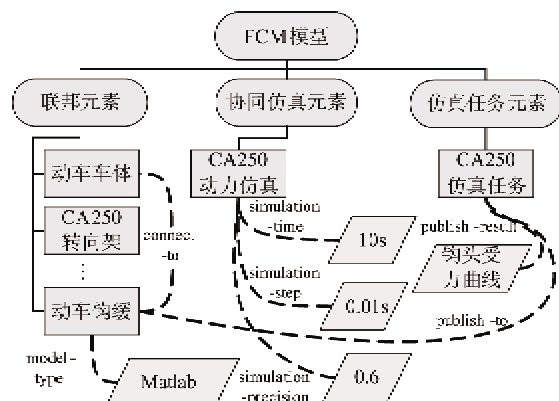


图 6 FCM 模型

根据 FCM 模型,产品资源联邦可以对产品资源本体实例集进行 DS 推理,以获得任务的成员候选集,DS 推理方法类似于第 2 节给出的算法。首先产品资源联邦通过字面距离相似度,根据 FCM 中联邦元素概念实例来获取可能成为仿真任务联邦成员的产品模型。这些模型构成当前 DS 推理的识别框架,并可设定识别框架对象子集对所有证据的基本概率分配函数值为 0.5。其后使用产品资源联邦中设定的 R_{pm} 规则完成对各子集分配函数值的修改。例如 FCM 中两个实例“动车车体”与“动车钩缓”间存在 connect-to 对象关系,则可判定任务中不需要整车仿真模型,因此将该证据对识别框架中所有包含“整车模型”实例的子集分配函数值调低。在完成调整后归一化分配函数值,通过 Dempster 法则合并所有存在的证据,得出当前任务的产品模型候选集。

根据候选集,用户可进一步调整参与仿真任务的产品模型,确定模型间映射关系,即应用联邦 SOM 文件中描述成员间发布订购的属性和交互事件的信息。此后产品资源联邦根据映射关系自动为每一产品模型建立 SOM 文件,并通过 RTI 布置到相应的节点上。由于主模型本体中包含了各领域本体的全部概念,因此任意应用联邦的 FOM 都可直接使用主模型本体创建,即将 HLA 仿真元素概念下除交互类概念外所有概念表示为 HLAobjectRoot 的各级子类,交互类概念表示为 HLAinteractionRoot 的各级子类。

4 应用实例

为验证本文提出的方法,笔者以国家 863 项目

为背景,基于 Java 和 VC 构建了 HLA 复杂产品开发协同仿真平台原型系统,并以 CA250 高速动车组开发中的 HLA 协同仿真建模作为应用实例。系统根据上游的 CATIA 模型,基于主模型本体以及 DS 推理构建了 CA250 动车组的各领域仿真模型,包括车体 ADAMS 模型、VAMPIRE 四车模型等。下面以构建车体一系弹簧悬挂 ADAMS 模型为例,说明基于 DS 理论的领域仿真建模方法的应用过程。

CA250 动车组每台转向架的一系弹簧悬挂包含四个外部弹簧组和四个内部弹簧组,它们被装配在转向架构架和轴箱之间,传递车辆的垂向力。根据设计模型,使用 CATIA Automation API 和领域本体创建领域本体实例,其后主模型本体中每一弹簧组实例通过本体实例映射创建,主要构成如图 7 所示,所有零件初始时均为“常规零件”概念的实例,实例间使用 surface-contact 或 related-to 关系连接。为方便描述与其他装配间关系,图 7 将轴箱也包含在内。

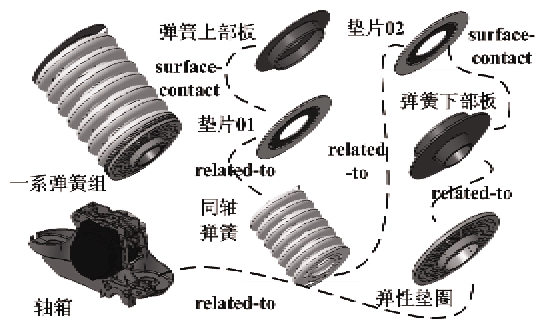


图 7 弹簧组实例构成

方法首先使用 R_{def} 对实例集进行确定性推理,根据 R_{def} 中的规则(图 8),可将“常规零件”概念实例“同轴弹簧”和“轴箱”分别转化为与 ADAMS 领域本体存在一一映射关系的“弹簧”概念实例和“轴箱”概念实例,这样在随后的实例映射中,弹簧组中

规则集	
R_{def}	[r1:(?c1 prehas_type generalpart) (?c1 prehas_function spring) -> (?c1 prehas_type Spring)]
	[r2:(?c1 prehas_type generalpart) (?c1 prehas_function axlebox) -> (?c1 prehas_type Axlebox)]
R_{pre}	[m:(?x prehas_type PublishElement)(?x prerelative_to ?y) -> (?x prehas_type PlantOutput)(?x prerelative_to ?y)]
	[r1:(?c prehas_type generalpart) (?c prehas_mass ?p) lessthan(?p 3.) -> (?c prehas_m01 0.5)]
	[r2:(?c prehas_type generalpart) (?c prehas_mass ?p) morethan(?p 0.1) -> (?c prehas_m01 0.8)]
	[m:(?c prerelative_to ?b)(?b prehas_type spring) -> (?c prehas_m02 0.8)]

图 8 规则集

弹簧零件将不会被映射为 ADAMS 中常规的“GeneralPart”元素而是“Spring”功能元素。其他各实例由于无法满足确定性领域规则要求而不能直接转化,形成了 DS 推理的输入。此外,主模型本体中协同仿真元素也进行确定性转化,例如将 HLA 仿真元素下“发布元素概念”实例转化为 ADAMS 所能理解的“植入输出”概念实例。

完成确定性推理后,根据主模型本体中 DS 识别框架与 R_{pre} ,可给出剩余各实例对应不同证据的分配函数值。例如对于“常规零件”概念实例“垫片 01”,其识别框架子集集合 H 为: $\{h_1$: 常规零件, h_2 : 硬点, h_3 : 衬套力, h_4 : 常规零件-零点, $h_A\}$ 。根据 R_{pre} 和分配函数值可得,实例存在 m_{01} 与 m_{02} 两个证据(垫片质量小于 0.1kg,且垫片与弹簧相连接),可信度分别为 0.5 与 0.8。根据实例“垫片 01”识别框架可得证据对 H 中各子集的基本概率分配函数值为:

$$\begin{aligned}\sigma_{HM}(m_{01}, h_1) &= 0.45 - \omega, \sigma_{HM}(m_{01}, h_2) \\ &= 0.1 + \omega, \sigma_{HM}(m_{01}, h_3) \\ &= 0.2 + \omega\end{aligned}$$

$$\sigma_{HM}(m_{01}, h_4) = 0.25 - \omega, \sigma_{HM}(m_{01}, h_A) = 0$$

$$\begin{aligned}\sigma_{HM}(m_{02}, h_1) &= 0.45 - \omega, \sigma_{HM}(m_{02}, h_2) \\ &= 0.1 + \omega, \sigma_{HM}(m_{02}, h_3) \\ &= 0.2 + \omega\end{aligned}$$

$$\sigma_{HM}(m_{02}, h_4) = 0.25 - \omega, \sigma_{HM}(m_{02}, h_A) = 0$$

设用户设定的 ω 和 λ 分别为 0.05 和 0.2。则归一化后分配函数值为:

$$\begin{aligned}\sigma_{HM}(m_{01}, h_1) &= 0.2, \sigma_{HM}(m_{01}, h_2) = 0.075, \\ \sigma_{HM}(m_{01}, h_3) &= 0.125;\end{aligned}$$

$$\sigma_{HM}(m_{01}, h_4) = 0.1, \sigma_{HM}(m_{01}, h_A) = 0.5;$$

$$\begin{aligned}\sigma_{HM}(m_{02}, h_1) &= 0.04, \sigma_{HM}(m_{02}, h_2) = 0.44, \\ \sigma_{HM}(m_{02}, h_3) &= 0.12;\end{aligned}$$

$$\sigma_{HM}(m_{02}, h_4) = 0.2, \sigma_{HM}(m_{02}, h_A) = 0.2。$$

引入 h_A 并将原函数值归一化,可避免不同证据分配函数值相差过大而带来的 Zadeh 悖论。此后使用 Dempster 法则进行证据合并可得:

$$\begin{aligned}\sigma_{HM}(m, h_1) &= 0.144, \sigma_{HM}(m, h_2) = 0.42, \\ \sigma_{HM}(m, h_3) &= 0.128;\end{aligned}$$

$$\sigma_{HM}(m, h_4) = 0.18, \sigma_{HM}(m, h_A) = 0.128。$$

由于 $Bel(h_1) = 0.144 < \lambda = 0.2$, 因此舍去包含“常规零件”的各子集。计算各子集的信任函数值和似真函数值并比较可知,“垫片 01”应转化为“硬点”概念实例,使用 R_{sol} 完成转化过程。其他实例进行同样的 DS 推理。在所有实例完成转化后,

系统使用 Jena 推理机对主模型本体实例进行有效性校验,并使用本体映射创建 ADAMS 领域本体实例。领域本体实例可转化为 ADAMS cmd 文件,通过导入的方式完成一系弹簧悬挂 ADAMS 模型创建。用户可调整 ω 和 λ 以生成满足不同仿真目标的领域仿真模型。例如将 ω 值设为 -0.1 时,通过计算可知“垫片 01”应转化为“常规零件”和“硬点”两个概念实例。基于不同 ω 和 λ 设定创建出的不同 ADAMS 模型可如图 9 所示。在上述过程中,使用 DS 方法仅需设定 16 条规则便可创建满足不同仿真目标的仿真模型,而使用确定性规则完成相同工作需设定近 50 条规则。

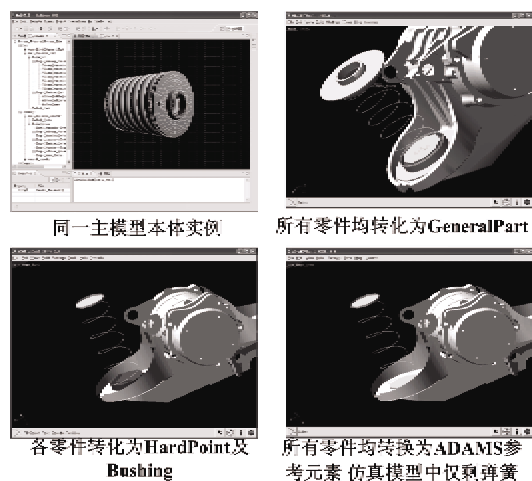


图 9 创建满足不同目标的 ADAMS 模型

完成领域仿真模型创建后,系统根据主模型本体实例创建相应的模型描述文件,并建立产品资源联邦。在产品资源联邦中,根据拟进行的协同仿真任务描述创建 FCM 模型。系统根据 FCM 模型信息,使用 DS 推理方法给出产品模型候选集,并由用户确定模型间映射关系。案例中用户选择 ADAMS 车体模型、MATLAB 钩缓模型和 VAMPIRE 四车模型共同完成 HLA 协同仿真任务,用以分析动车组在运行过程中一系弹簧悬挂的动力学性能,如图 10 所示。

基于用户确定的模型映射关系,产品资源联邦自动为当前任务构建各成员的 SOM 文件,并使用主模型本体构建 FOM 文件。此后适配器调用 FOM 和 SOM 文件发起仿真应用联邦,完成当前协同仿真任务(图 11)。仿真结果通过适配器发布并传递到一系弹簧悬挂设计模型,指导设计模型的优化。

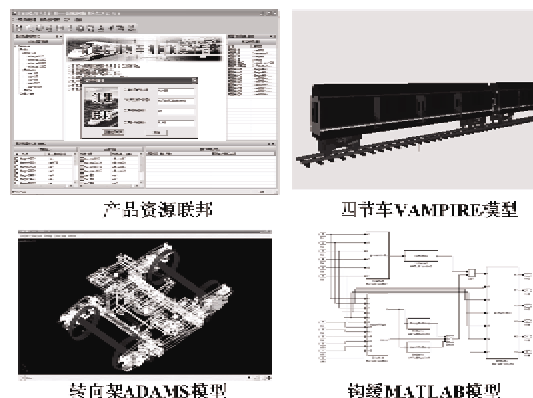


图 10 应用联邦中各模型

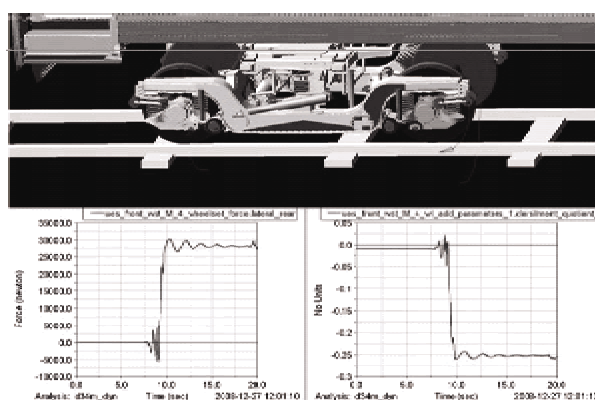


图 11 应用联邦协同仿真结果

5 结论

将 DS 不确定性推理与确定性推理相结合,会进一步提升基于主模型本体仿真建模的适用范围,并提高建模的效率。

与其他方法相比,本文提出的方法主要有以下几个特点:(1)在不大规模增加领域规则的条件下,基于 DS 理论实现了本体概念实例的一对多映射,改善了其他方法只能实现一一映射或基于确定性规则推理的局限,可以基于同一主模型本体实例创建满足不同仿真目标的领域仿真模型。(2)将 DS 识别框架表述为主模型本体子本体实例,在原有的本体推理框架下完成 DS 不确定推理,提升了主模型本体的推理能力,同时通过设定基本概率分配函数将各领域专家的设计思想固化到主模型本体中,提升了领域仿真建模的效率。(3)创建了产品资源联邦,进一步加强了设计模型与仿真模型的联系,提升了创建 HLA 联邦的效率。

本文研究的方法只是 HLA 在复杂产品 VPD 开发中应用的一个组成部分。如何基于主模型本体在

HLA 联邦框架下实现基于仿真的协同优化将是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] 范文慧, 张林鎡, 肖田元等. 虚拟产品开发技术. 北京: 中国电力出版社, 2008
- [2] Tang S, Xiao T, Fan W. A collaborative platform for complex product design with an extended HLA integration architecture. *Simulation Modeling Practice and Theory*, 2010. 18(8): 1048-1068
- [3] Park J, Moraga R, Rabelo L, et al. Addressing complexity using distributed simulation: a case study in spaceport modelling. In: *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Orlando, USA, 2005. 1804-1812
- [4] Lee J, Fenves J, Bock C, et al. A Semantic Product Modeling Framework and Its Application to Behavior Evaluation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, 9(1): 110-123
- [5] Kim K, Manley D, Yang H. Ontology-based assembly design and information sharing for collaborative product development. *Computer-Aided Design*, 2006, 38(12): 1233-1250
- [6] Zhan P. An Ontology-based Approach for Semantic Level Information Exchange and Integration in Applications for Product Lifecycle Management; [Ph. D dissertation]. Washington: Washington State University, 2007
- [7] Kim O. Semantic Approach Based on Ontologies to Support Engineering Knowledge Retention and Exchange in the Product Assembly Design and Training Domains; [Ph. D dissertation]. Washington: Washington State University, 2011
- [8] Fiorentini X, Gambino I, Liang V, et al. An Ontology for Assembly Representation. NISTIR 7436. U. S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology (NIST), 2007
- [9] Sun H, Fan W, Shen W, et al. Ontology fusion in HLA-based collaborative product development. In: *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Kudret Basim Ambalaj, Kudret Press, 2010. 2526 -2532
- [10] Özdikis O, Durak U, Oguztuzun H. Tool support for transformation from an OWL ontology to an HLA Object Model. In: *Proceedings of the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques*, Belgium, 2010. 1-6

Dempster-shafer theory based HLA collaborative simulation modeling

Li Li, Xiao Tianyuan, Ma Cheng

(National CIMS ERC, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

This paper pays its attention to CAD model based collaborative simulation modeling for virtual product development under the high level architecture (HLA), and gives a novel HLA collaborative simulation modeling method based on the Dempster-Shafer (DS) theory. The proposed method using ontology reasoning and the Dempster-Shafer theory for uncertainty reasoning, to create different simulation models for different objectives based on the basic belief assignment and the master model ontology, and then, a product resource federation is constructed, which could dynamically generate the federation object model (FOM) and the simulation object model (SOM) for specific simulation tasks based on the DS theory. The method could also send collaborative simulation results back to CAD models. A prototype for HLA collaborative simulation and an industrial case were well established to demonstrate the feasibility of this method. The method could maintain the semantic consistency in collaborative simulation modeling and improve the modeling efficiency.

Key words: virtual product development, dempster-shafer theory, high level architecture (HLA), ontology, simulation modeling