

化解“信息孤岛”危机的软件模型按需服务互操作技术

王 翀 何克清 王 健 冯在文 何扬帆 何 非

(武汉大学计算机学院 武汉 430072)

摘 要 “沟通成就一切、互动创造价值”。面对无处不在的网络化交互,实现“互联网+”应用的创新价值服务,其关键在于如何通过支撑供-需交互的语义互操作技术,实现多样化涉众需求制导的业务协作以及面向软件模型资源的服务供给侧可互操作构造,以化解云计算中深层 Web 服务资源的“信息孤岛”难题。该文从软件服务工程的角度,探索了从模型驱动架构 MDA 到模型交互驱动架构 MiDA 的演进;提出并论述了 MiDA 的三大内核技术,即 RGPS 需求元描述、服务供给侧的 O-RGPS 构造元模型以及互操作性元模型框架标准系列 MFI(O-RGPS),揭示了三者之间多个“含意三角形”模式联动的基本过程以及虚实互动的软件模型互操作过程,阐明了 MiDA 与 MDA 的兼容性。最后,论述了作者负责研制的、面向模型语义互操作性治理与管理的 ISO 国际标准系列,对其中“过程模型注册元模型”的语义互操作性能力进行了分析与度量。上述理论和方法有助于提升我国“互联网+”企业在云计算与大数据关联分析方面的创新服务能力,可满足企业的动态业务协作以及面向多租户的个性化服务推荐需求,能够为供-需互动提供可互操作的服务供给侧结构,具有重要的实际应用价值。

关键词 模型交互驱动的架构;RGPS 需求元模型;服务供给侧的可互操作构造;模型语义互操作性治理与管理;互操作性能力分析与度量;服务计算

中图法分类号 TP311 **DOI 号** 10.11897/SP.J.1016.2018.01314

On-Demand Interoperability Techniques for Software Model Services: A Standardized Solution for the Information Islands Crisis

WANG Chong HE Ke-Qing WANG Jian FENG Zai-Wen HE Yang-Fan HE Fei

(School of Computer Science, Wuhan University, Wuhan 430072)

Abstract ‘Communication achieves all, and interaction creates value.’ To realize innovative value services of ‘Internet plus’ applications in the context where networking interaction exists everywhere, the supply-demand interaction and its semantic interoperability techniques become the golden key to facilitate on-demand business collaboration, construct ‘Supply-Side’ services oriented towards software models, and finally resolve the ‘Information Islands’ crisis of deep Web resources (e. g. services) in Cloud Computing. From the perspective of service-oriented software engineering, this paper explores the nature that Model Driven Architecture (MDA) evolves into Model-interaction Driven Architecture (MiDA), and proposes three core techniques in MiDA, including RGPS requirements metamodel framework, O-RGPS construction metamodel for ‘Supply-Side’ services, and their international standardization on Metadmodel framework for

收稿日期:2016-06-06;在线出版日期:2017-03-18. 本课题得到国家自然科学基金(61373037,61672387)、国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2014CB340404)资助。王 翀,女,1981 年生,博士,讲师,主要研究方向为软件服务工程和服务计算。E-mail:cwang@whu.edu.cn. 何克清(通信作者),男,1947 年生,博士,教授,主要研究领域为软件工程和服务计算。E-mail:hekeqing@whu.edu.cn. 王 健,男,1980 年生,博士,讲师,主要研究方向为软件工程和服务计算。冯在文,男,1980 年生,博士,讲师,主要研究方向为软件工程和服务计算。何扬帆,女,1979 年生,博士,副教授,主要研究方向为服务计算、需求工程和语义技术。何 非,男,1974 年生,博士,讲师,主要研究方向为需求工程。

interpretability, i. e. MFI(O-RGPS). In detail, RGPS requirements metamodel framework intends to characterize diverse and personalized service requirements at different levels of granularity, and then it can support requirements directed interaction between models. O-RGPS construction metamodel can facilitate domain knowledge or topic mining for the subjects of ‘Supply-Side’ service. In addition, it introduces the semantics enhanced ontology and metamodeling approach to construct an interoperable structure for ‘Supply-Side’ services, in terms of RGPS annotations, semantic annotations and inherent associations between them. Considering MFI(O-RGPS), it provides a series of standard registration metamodels for different types of models, including ontology, role and goal models, process models, and service models. With these metamodels, semantic interoperation between heterogeneous models can be conducted by sharing registration information in a unified way. Furthermore, this paper reveals two types of relationships between these three core techniques in MiDA. One is the basic relationships derived from the joint action of multiple meaning triangle patterns; the other is the virtual-reality interaction and interoperation between software models. Moreover, the authors conclude that as the evolution of MDA, MiDA is compatible with MDA. In the end, this paper discusses the ISO international standard series named MFI(O-RGPS), which was proposed by the authors and aims at semantic interoperability governance and management of software models. In order to evaluate the interoperability capability of MFI(O-RGPS) standards, this paper takes MFI-5, Metamodel for process model registration, as an example and proposes a method to measure the semantic interoperability capability of MFI-5 for heterogeneous business process models. More specifically, we define the mappings from specified process modeling languages or specifications (e. g. BPEL and EPC) to the metamodel in MFI-5 to register administrative information and selected metadata of process models. Based on these mapping rules, for each specific process modeling language, the proportion of mapped elements in the total number of elements can be used to quantify the interoperability degree of MFI-5 to the process models described with this modeling language. The results suggest that our proposed interoperability theory and method can enhance the innovation and service ability of ‘Internet plus’ enterprises in cloud computing and big data analysis, and satisfy the requirements for both dynamic business collaboration across enterprises and personalized services recommendation oriented towards multiple tenants. This implies that our method can provide interoperable construction for ‘Supply-Side’ services to support supply-demand interaction in practice.

Keywords model-interaction driven architecture; RGPS requirements metamodel framework; interoperable construction of “Supply-Side” services; model semantic interoperability governance and management; interoperability capability analysis and measurement; service computing

1 引言

作为“互联网+”应用的重要技术引擎之一，网络化交互涵括了人(包括涉众用户的业务及软件服务系统需求)、信息物理系统 CPS(Cyber-Physical System)、现实世界中的业务内容以及虚拟空间中的网页内容、模型、数据及其软硬件资源等各种要素

之间的无边界交互. 由于这类交互衍生出的服务价值与意义更易获得广泛认可, 这种全方位的交互需求已经初现端倪. 然而, 与其相关的软件工程技术还没有被高度重视, 尚未成为目前研究的热点.

支撑网络化交互的软件工程技术, 应包含松耦合语义互操作及其能力的治理与管理方法. 事实上, 国内外学者对互操作技术的认识和重视由来已久. 2009 年, Nelson 在发表于《科学》杂志上论

文“Building an Open Cloud”中,强调了云的开放性和互操作性^[1]. Giles 在《自然》杂志上提出了社会科学的十大挑战性问题^[2],其中问题 3 和问题 5 均提及“期盼解决交互与协作的技术”. 2008 年,作者在《网络式软件》一书中提出并论述了需求制导的松耦合互操作方法^[3];同时,提出了支撑数据、元数据和软件模型的语义增强型互操作性理论、方法及其互操作性元模型框架技术标准 ISO/IEC 19763-3“本体注册元模型”^[4].

然而,在互联网飞速发展的今天,支撑“互联网+”的软件工程技术正在经历变革性的发展. 特别是在现代服务业与服务计算中,服务供给侧与需求侧之间无所不在的网络化交互,正成为学界和业界研究和关注的重点. 2017 年 2 月,浙江大学吴朝晖教授等在《基于回型关系模型的共享服务研究》一文中提出了服务计算的“回型”服务关系模型^[5],利用服务供给侧主体的服务资源与能力,为客体传递有价值、有意义的服务以满足其需求. 在该模型中,服务提供主体与客户主体围绕服务的载体、过程、目标和价值,通过载体交互、过程协作、目标协商、价值传递等多种形式共同进行价值服务创造. 不难看出,面向网络化交互的软件服务工程创新研究与应用,需围绕与互操作相关的软件工程理论、方法及其标准化技术逐步展开和深入.

目前,“互联网+”应用形态(如“互联网+”智慧城市等)的发展仍处于“信息孤岛”的风口期,其主要原因是“信息孤岛”成为了云计算与大数据时代的危机,且这一危机还远没有解决. 特别是,云计算中基础服务资源(即承载数据-信息-知识-价值-意义的服务)的按需业务消费,往往需要多个业务异构云之间的互操作,以实现服务的整合、迁移、移植、整体监控以及全局优化. 面对异域、异构、异质的多样化供给侧服务资源与服务能力的分享需求,不仅需要构建与“信息孤岛”对接和互动的桥梁,更需要为深层 Web 的信息服务资源提供灵活的分享和互操作技术. 据统计,万维网中的数据量目前约为 8.2 ZB. 其中,遵循标准协议的浅层 Web 数据仅占 4%,而占其内容 96%的资源主要有两类:(1)深层 Web 的业务模型;(2)软件服务模型及其数据资源,如内部业务网站、移动应用 App 和个人电脑应用中的 Web 资源等. 由于上述深层 Web 数据大都未遵循公共的标准协议,已成为万维网中的基础服务资源“孤岛”. 现有的数据互操作技术主要面向万维网中的浅层

Web 数据,如数据层互操作、协议层互操作等. 然而,仅依靠上述面向浅层 Web 数据的互操作技术,依然无法化解深层 Web 内容的“信息孤岛”难题. 特别是,面对多租户业务协作需求和个性化服务需求的动态变化,异构云服务资源的网络化供需交互与协作以及服务供给侧的软件模型资源互操作性构造显得更加重要. 如何实现“按需服务”,已经成为云计算、服务计算和大数据分析追逐的目标. 因此,面向网络化交互的软件服务工程研究必须解决以下 3 个核心问题:(1)服务需求如何制导网络化交互及其逐步细化的展开过程?(2)如何刻画涉众客户个性化和多样化的网络化服务需求,使其为供需对接提供科学支撑,以实现供给侧软件资源服务之间灵活的互操作?(3)如何管理供给侧服务资源的互操作性能力?

近年来,作者所在研究团队提出了描述网络化服务需求的 4 大基本元素,即角色(Role)、目标(Goal)、过程(Process)和服务(Service),为 RGPS 需求元模型及其之间的关联关系构建了一个元模型框架^[3,6-7]. 进一步提出了基于本体-RGPS(O-RGPS)的语义互操作性治理与管理技术并对其进行了标准化,在互操作性元模型框架 MFI (Metamodel Framework for Interoperability, ISO/IEC 19763)下主持研制了 5 项国际标准 ISO/IEC 19763-3/-5/-7/-8/-9^[8-12],均已在 ISO 官方网站正式发布. 在上述研究成果的基础上,本文首先从软件服务工程的角度,探索了从模型驱动架构 MDA (Model Driven Architecture)^[13]到模型交互驱动架构 MiDA (Model-interaction Driven Architecture)的演进. 其次,提出了 MiDA 的三大内核技术,即 RGPS 需求元描述、服务供给侧的 O-RGPS 构造元模型以及互操作性治理的元模型框架 MFI(O-RGPS),并阐述了三者之间的虚实互动及其互操作的基本过程. 最后,作者以 MFI (O-RGPS)中的 MFI-5“过程模型注册元模型”为例,分析和度量了该注册元模型对异构过程模型的语义互操作性治理和管理能力.

2 相关工作

在互联网高度发展的今天,“沟通成就一切、互动创新价值”这一理念显得尤为重要. 对云计算、大数据关联分析、智慧城市、物联网等来说,互动能显著提升其服务价值. 因此,需要从交互的视角重新对

相关基础技术进行科学认识和分析,进而发现软件工程基础技术的演进与发展方向。

2.1 传统交流与沟通模式的演进

1927年,Ogden等人^[14]提出了语言学领域中人与人之间交流与沟通的含意三角形(Meaning Triangle)模式理论,如图1所示。含意三角形主要包含三个基本组成要素:指示物、指示物的描述符号以及指示物在人脑中形成的概念。如果两个人希望对某一实际指示物达成一致理解,就必须对指示物对应的概念及其含意、符号的构成规则(即语法和语义)以及符号指代的情境均达成一致的理解或约定。当一个人说“这是一张玫瑰剪贴画”时,另一个人能够正确理解这句话的含义需要具备两个前提:一是交流双方对这个句子的组成结构和成分有相同的认识,二是两者对玫瑰、剪贴画等符号的指示物有相同的约定。

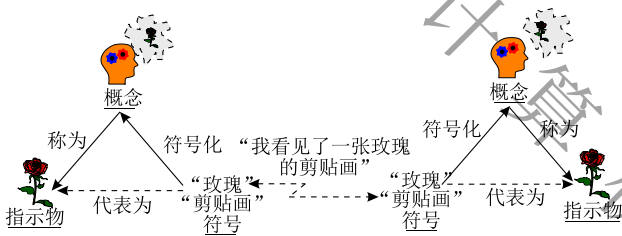


图1 人与人之间交流与沟通的含意三角形模式^[14]

图1展示了含意三角形模型理论中信息沟通的基本过程:人与人之间处在相同的情境之中,通过含意三角形模式传递玫瑰花、剪贴画等符号信息,并在所传递的“我看见了一张玫瑰花剪贴画”这一信息模型中蕴涵了对应的语法结构和语义信息。如果两个人的理解完全满足上述条件,他们就能达成“这是一张玫瑰花剪贴画”的一致理解,实现含意互操作,即深度语义互操作。在网络空间中,深度语义互操作是一种理想的互操作级别。面对实际的信息资源交互需求,需要着重研究部分语义互操作能力,以及不同层级互操作的语义深度及其特征^[15-17]。

随着软硬件资源的服务化发展,含意三角形模式逐步演进为支撑服务供给侧与需求侧间交流与沟通的面向服务架构 SOA(Service Oriented Architecture)^[18]。而文献[5]中提出的“回型”服务关系模型,本质上也可看作是一种对服务供给侧与服务需求侧主体之间的交互进行了细化的含意三角形模式,即通过载体交互、过程协作、目标协商、价值传递等形式实现服务供给侧主体与服务需求侧主体之间的交流与沟通。

2.2 互操作技术

根据美国电气和电子工程师协会 IEEE 的定义,互操作性是两个或多个系统交换信息并且使用所交换信息的能力^[19]。在交换和使用信息的过程中,系统可以不了解或者在一定程度上了解这些功能单元的独特特性。根据系统对其所交换信息的理解深度,可以将互操作分为两大类:一是语法互操作,即部分语义互操作;二是含意互操作,即完全语义互操作。

作者曾经在《本体元建模理论与方法及其应用》一书中,明确提出了增强型语义互操作的概念和方法^[4]。该方法在概念本体的层次树结构中,保留了父子关系、包含关系、组成关系等纵向关系,并逐步嵌入传递关系、逆反关系、先后关系、因果关系以及与行为有关的参照关系、使用关系等横向语义关系,通过构建本体来增强本体模型的语义描述能力,使其能有效刻画含意复杂的知识。部分语义互操作是根据需求的情境与应用策略来选择特定的语义关联关系或对其进行约束的互操作,是一种介于语法互操作和完全语义互操作之间的互操作类别。2008年,作者提出了“互联网环境中松耦合服务的模型语义互操作,往往呈现部分语义互操作特性”这一观点^[4]。

我们认为,需求制导的“数据-信息-知识-价值-意义”这一服务信息学流程^[20]是通过复杂的交互秩序来实现的,涉及不同的互操作层级。在国际上,已有研究将互操作层级划分为意义层、决策层、知识层、业务层、过程层、服务层、数据(包含元数据)层、协议层、物理层等多个层级^[16]。目前,数据(包含元数据)层、协议层、物理层等位于下层的互操作已经基本实现;服务层、过程层、业务层等位于中层的互操作需要借助面向模型的语义互操作方法来开展,也是本文论述的重点;知识层、决策层、意义层等位于上层的语义互操作方法是本团队正在开展的研究内容。

2008年,美国国防部发布了《面向系统的系统 SoS 的系统工程指导》^[21]。2009年,Jamshidi 编著了《面向 21 世纪创新的系统的系统工程》^[22]和《系统的系统工程:原理与应用》^[23]。2010年,卡内基梅隆大学软件工程研究所针对 SoS 软件服务系统互操作中信息和数据的共享、交互以及互用问题,提出“网络化企业解决方案有望应对 SoS 互操作性挑战议题”^[24]的观点。然而,当前 SoS 主要采用开放、互

联、异构和共享的服务架构设计,致力于从设计时(design-time)互操作的角度解决系统之间的互操作难题. 尽管系统之间的运行时(run-time)互操作更适合开放的系统,但实现起来更加困难. 本文将重点论述网络化需求制导下的业务协作方法和软件模型服务的松耦合互操作机理,以引导并实现系统之间的动态运行时互操作.

2.3 模型驱动架构 MDA 的演进

近 30 年来,面向对象 OO(Object Oriented)的软件开发范型和统一建模语言 UML(Unified Modeling Language)^[25]成为软件工程的重要技术. 为解决 OO 系统的集成与协同以及基于 UML 建模的软件架构问题,对象管理组织 OMG(Object Management Group)提出了模型驱动架构 MDA 并于 2003 年将其标准化. 2002 年,OMG 主席 Richard Mark Soley 博士在业务对象与软构件国际会议上指出,“MDA 是软件工程中 20 年不变的技术”.

事实上,在设计可扩充的 OO 系统、解决 UML 模型与构件的重用以及实现同构 OO 系统的集成和协同等方面,MDA 与 UML 发挥着重要作用. 然而,作为一种面向领域和封闭系统的建模架构,MDA 更加强调系统中纵向的模型转换及其一致性,以及模型的重用性和可扩充性. 2005 年以来,围绕 MDA 的改进型研究成果显著. 2013 年, Saraswathi 与 Singh 提出了事件驱动架构(Event-Driven Architecture),并在文献[26]中详细阐述了请求驱动的交互方法(Request-driven interaction). 文献[27]指出,角色、职责和合作者是对象交互的核心,从这三个维度来审视对象可以得到更加动态、灵活的设计. 尽管在上述研究工作中意识到了需求者属性在 MDA 模型设计中的重要性,但依然针对的是 OO 系统在不同层次间的交互,对应的 MDA 扩充研究依然局限在 MDA 框架内.

对网络化交互中同域或跨域的涉众用户而言,不同角色和职责的合作者之间会产生不同的业务需求协作,这使得不同的业务模型之间需要在计算无关模型 CIM(Computing Independent Model)层中进行动态交互与协作,导致软件层中不同的平台无关模型 PIM(Platform Independent Model)之间以及异构的平台相关模型 PSM(Platform Specific Model)之间需要进行动态交互和松耦合的语义互操作. 封闭的 MDA 显然难以支撑异构模型的动态交互与协作需求. 因此,模型交互的架构研究应着重

突破封闭的同构系统,面向开放的异构系统.

综上,异构系统和模型间的语义互操作性交互及协同服务的理论方法,无疑是 MDA 演进型研究的一个重要方向. 因此,需要研究涉众需求制导下,开放业务模型、异构软件服务系统、软硬件资源和数据资源的深度共享以及按需分享机理,实现以人为本的软件服务系统互操作及其适应性协作配置,推动 MDA 架构的演进发展.

3 MiDA 内核技术

为推动 MDA 的演进发展,本节提出了一种模型交互驱动架构 MiDA,旨在解决网络化交互驱动下不同涉众之间的业务协作需求,支持开放环境中异构软件模型之间的松耦合互操作和动态协同,实现网络化需求制导的按需模型/服务选择,以化解服务供给侧结构与行为的“信息孤岛”难题.

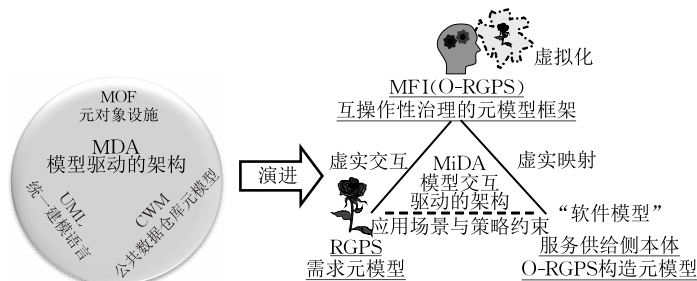
如图 2(a)左部所示,MDA 内核^[13]由 UML^[25]、元对象设施 MOF(Meta-Object Facility)^[28]和公共仓库元模型 CWM(Common Warehouse Metamodel)^[29]三大技术构成. MiDA 的内核是含意三角形模式演进而来的,由 RGPS 需求元描述、互操作性元模型框架标准系列 MFI(O-RGPS)以及服务供给侧的 O-RGPS 构造元模型这三大技术构成,如图 2(a)右部所示. 图 2(b)则展现了模型之间基于 MiDA 进行语义互操作的基本过程.

(1) RGPS 需求元描述

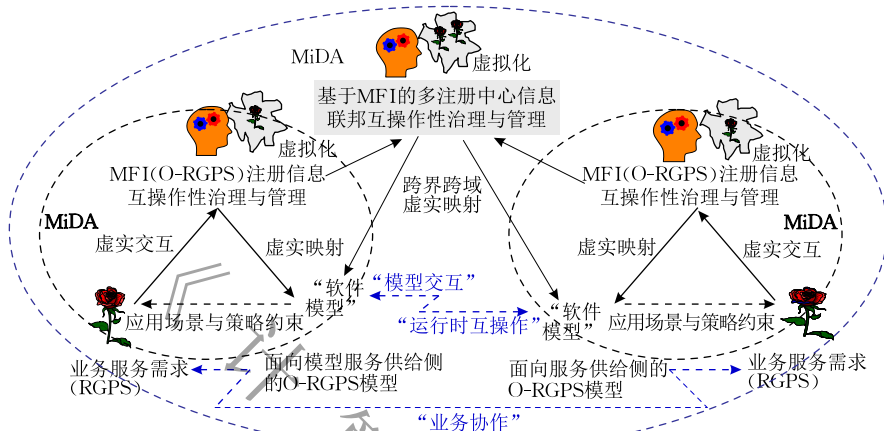
网络化需求主要是指涉众对网络化服务系统的个性化、多样化、多粒度业务需求,通常描述为协同业务或者软件模型系统的功能与非功能服务期望. 具体来说,网络化需求主要包括需求请求者的角色、职责及其合作者等涉众属性(“我是谁”)、需求请求者的目标属性(“做什么”)、协作过程(“如何做”)的业务描述、协作资源(“获取什么价值资源”)的服务描述等. 因此,作者团队之前提出的 RGPS 需求元描述及其元模型框架^[3,6-7,30-32],既可为 MiDA 提供需求制导的模型交互引导技术,还能够为 MiDA 中服务供给侧的 O-RGPS 模型构造提供解决方案. 本文将在 4.1 节详细论述.

(2) 服务供给侧的 O-RGPS 构造元模型

在面向网络化交互的 MiDA 中,实现开放系统和开放服务资源的深度分享,化解业务服务供给侧的“信息孤岛”,其前提是为服务供给侧不同层级的



(a) 从MDA到MiDA的内核技术演进



(b) 基于MiDA的模型互操作基本过程

图 2 MiDA 的内核技术及其支撑模型互操作的基本过程

异构模型和异构系统等之间的交互和运行时互操作提供相应的支撑结构和行为协同能力. 因此, 需要研究跨越业务层(CIM)与软件层(PIM)之间鸿沟的知识-语义互操作方法, 使软件层中的异构模型(包括PIM和PSM)间能够进行松耦合交互和语义互操作性协同.

作为 MiDA 的内核技术之一,面向服务供给侧的 O-RGPS 构造元模型能够指导服务供给侧主体所属领域或主题中的知识发掘;同时,基于增强型语义互操作的本体元建模方法^[4],为服务供给侧构造基于 O-RGPS 的语义互操作性结构,使其具备相应的互操作能力.具体构造方法如下:

① 面向业务领域主题,分析公共的领域概念、规则、经验等定性知识,并将其构建为本体.然后,对与其相关的活动文档进行密集型数据驱动的定量分析与知识发掘,融合业务规则和情境约束,基于本体格对领域知识进行刻画.

②对涉众产生的数据(如问卷、评论、标签、事件报告、服务日志等网络流式数据)进行分析,抽取其中隐含的愿望、服务偏好、情境等多样化、个性化的感性知识.通过 RGPS 内容标签及其语义关联关系,采用语义综合集成的迭代式整合方法,将面向

业务领域主题的感性知识集成到本体格中,构造服务供给侧的 O-RGPS 结构.

③ 遵循语义综合集成迭代式整合的结构和语义引导机理,支撑“定性-定量-感性”的①~②循环认知过程,以构造服务供给侧的 O-RGPS 知识-语义结构。该引导机理包括定性知识的本体分类结构引导、基于 RGPS 内容标签及其之间语义关联关系的引导、业务元规则与规则约束的引导、应用情境与策略约束的引导等。

④ 基于面向领域主题的共性业务协作需求,结合涉众的个性化需求,通过迭代式整合的方式构建领域主题需求模型.同时,针对不断演化的需求模型,构造可弹性伸缩、可互操作的服务供给侧 O-RGPS 模型,以实现服务供给侧 O-RGPS 知识-语义结构的规模化定制,为化解业务服务供给侧的模型和数据“信息孤岛”提供了可能,也为供需之间的灵活交互和对接提供了支撑.

作为 MDA 的三大内核之一, CWM 为问题域中的信息资源提供了基于模型的元数据集成解决方案. 而在 MiDA 中, 服务供给侧的 O-RGPS 构造元模型能为面向问题域或主题的服务供给侧模型资源, 提供基于语义增强型本体元建模方法构造的知

识-语义结构,以支撑跨域、跨主题的 O-RGPS 模型互操作. 综上, MiDA 是 MDA 从封闭到开放、从同构模型集成到异构模型互操作服务的演进.

(3) 互操作性治理的元模型框架 MFI

为实现开放系统、异构模型之间的动态交互和运行时互操作,必须解决系统、模型或其相关服务资源的互操作性治理与管理难题. 特别是,对软件服务的供给侧结构及其互操作性能力而言,通过标准化手段对数据、模型等服务资源进行互操作性治理和管理显得十分重要. 服务注册(Registry)是一种让涉众和网络感知服务存在的虚拟化共享手段,服务存储(Repository)则使得服务供给侧资源能够被多租户客户分享. 作为 MiDA 的第三个核心技术,互操作性元模型框架 MFI 为本体、角色和目标模型、过程模型以及服务模型分别提供了标准化的注册机制,构成了互操作性元模型框架标准系列 MFI(O-RGPS).

MFI(O-RGPS)的主要目标是促进上述类型的异构信息模型互操作,进而为异构服务资源的互操作性治理提供有力支撑.

图 3 以过程模型为例,描述了如何基于 MFI 实现过程模型的注册,以促进和实现异构过程模型之间的互操作. 目前,不同企业开发和使用的过程模型已存储在面向不同过程描述语言构建的过程模型资源库中. 基于 MFI 对异构的过程模型进行注册后,用户则可根据过程模型的规范化注册信息在多个过程模型资源库中查询并且找到所需的过程模型资源,即过程模型资源库中实际存在的、可互操作的过程模型或者过程碎片,如图 3 下部所示. 在软件服务平台的支撑下,这些过程模型或过程碎片能够以用户的业务协作需求为导向,在业务层完成按需应变的业务过程互操作性组态化配置与合并^[33-34],实现相应的业务服务需求,如图 3 上部所示.

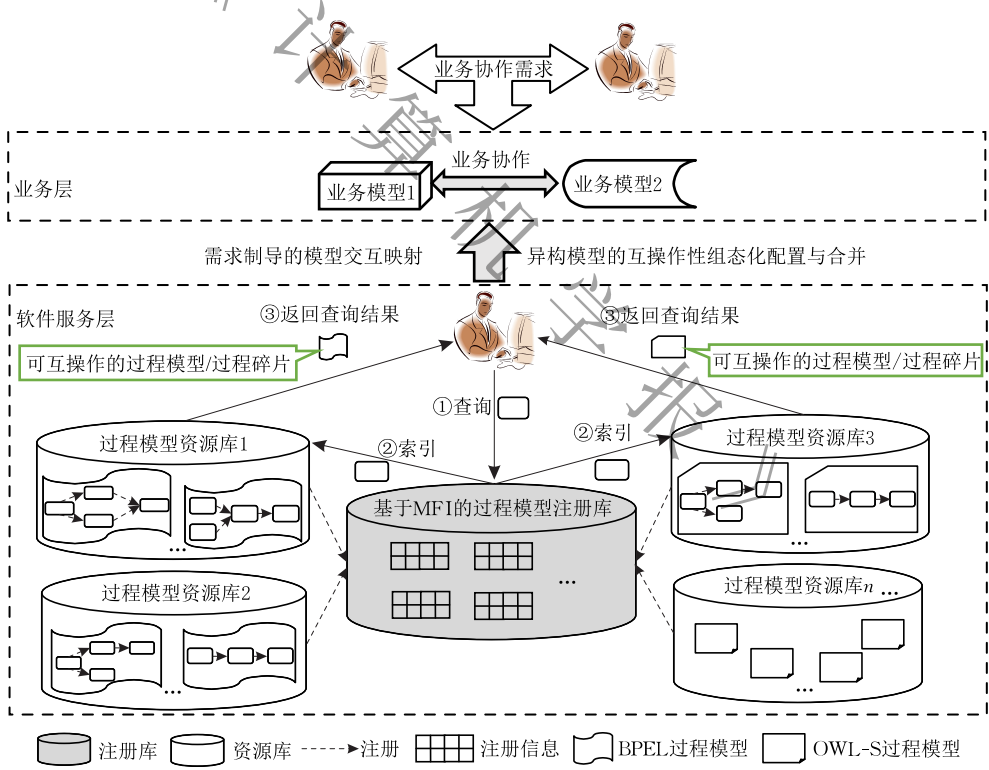


图 3 以过程模型为例的异构模型互操作性治理

在云计算中,业务服务供给侧的软件模型数据资源往往部署于深层 Web. 软件服务的虚实互动与沉浸式互操作,要求为服务供给侧 O-RGPS 模型的互操作能力提供相应的治理与管理标准,实现多租户的按需服务和按需应变的多粒度服务共享,进而为化解服务供给侧的“信息孤岛”提供支撑. MFI 中包含了面向 O-RGPS 模型的注册元模型,可支持 23 种异构本体及 RGPS 模型的注册,以促进

它们之间的部分语义互操作能力. 本文第 5 节将对 MFI(O-RGPS)中过程模型注册元模型的互操作性治理能力进行分析与度量.

在 MDA 内核中,MOF 是面向对象进行元建模治理时所遵循的层次体系结构标准. 而在 MiDA 内核中,MFI(O-RGPS)则为服务供给侧 O-RGPS 结构的互操作性治理提供了标准化的解决方案. 因此, MiDA 是 MDA 从面向对象的模型重用与集成到网

络化需求制导的异构模型互操作服务的演进。

(4) MiDA 内核中模型互操作的基本过程

MiDA 的三大内核技术相互依赖,互为支撑,形成基于含意三角形模式的模型互操作基本过程,具体如下:

①虚实交互:实际的业务协作需求采用 RGPS 需求元描述框架进行描述;同时,在查询基于 MFI (O-RGPS)的虚拟化注册信息时,实施如图 2 所示的 MiDA 虚实交互.当查询无法匹配或匹配信息缺失时,通过模型交互的方式查询图 2(b)上部的 MFI 联邦互操作性注册中心,以获得匹配的虚拟化注册信息.其中,面向领域主题的互操作性治理与管理可对 MFI 的互操作性能力进行标准化设置,并为 MFI 联邦互操作性注册中心设定相应的互操作层级。

②虚实映射:根据查询到的模型虚拟化注册信息,发现可互操作的 RGPS 模型、模型碎片及其对应的数据资源.进一步,通过 RGPS 内容标签及其语义关联关系的引导,实施需求制导的模型交互和运行时语义互操作,实现异构模型的互操作性配置与合并. RGPS 内容标签及其语义关联关系将在 4.1 节论述。

③应用场景与策略约束:依据需求度量价值、治理策略和应用场景决定价值服务的原则,对②中的模型配置与合并进行约束,为多租户的业务协作需求提供个性化的智能服务支撑。

综上,含意三角形模式中的虚实互动以及含意三角形模式间的联动,构成了 MiDA 中模型互操作的基本过程. MiDA 能促进多样化业务需求与服务供给侧资源之间的互操作,为实现供需互动的业务协作价值服务提供了基础技术。

(5) MiDA 与 MDA 的兼容性

首先,MDA 面向封闭且同构的软件、模型和数据,为 MiDA 提供了系统集成和协同所需的基础软件资源. 尽管资源不等于服务,但服务的封装性可以使服务成为一种资源. 面向软件服务的 MiDA 突破了 MDA 的封闭性局限,可解决不同开放系统和异构模型间的交互、协作和语义互操作性问题。

其次,MDA 的目标是保证面向对象软件系统中不同层级(CIM、PIM 以及 PSM)之间模型转换的一致性. 为了满足动态变化的业务协作需求,MiDA 为异构的系统和模型提供了可互操作的服务供给侧结构,可促进系统间或模型间的交互、协作和语义互操作性问题的解决. 因此,MiDA 是 MDA 面向开放模型资源的服务化和互操作能力的提升。

最后,MDA 主要基于 MOF 对模型进行元建模治理,以实现基于元模型的模型重用和集成. MiDA 中的互操作性治理与管理技术 MFI 旨在促进异构软件系统或模型之间的相互理解与协作,支撑面向云服务的异构模型共享与多粒度分享。

综上,MDA 为 MiDA 提供了基础的软件系统和模型资源,MiDA 则是 MDA 面向开放软件服务和网络化交互需求的语义互操作技术演进,两者是兼容的。

4 需求制导的 RGPS 模型交互与互操作方法

本节着重论述面向网络化交互、服务需求制导的软件模型交互与互操作技术。

4.1 RGPS 需求元模型框架概述

服务需求制导的网络化交互,其核心是如何对个性化、多样化的服务需求进行刻画. 作者在研究中提出了服务需求元描述的 4 个基本要素,即角色、目标、过程和服务;在此基础上,定义了 RGPS 需求元模型框架^[3,6-7,30-32],并提出了服务需求制导的软件模型交互与互操作技术。

在 RGPS 需求元模型框架中,我们从语法、语义、社会性、情境、服务质量等刻画出发,提出并规范了 RGPS 四个元模型及其之间的九类语义关联关系,用于引导 RGPS 模型之间的交互。

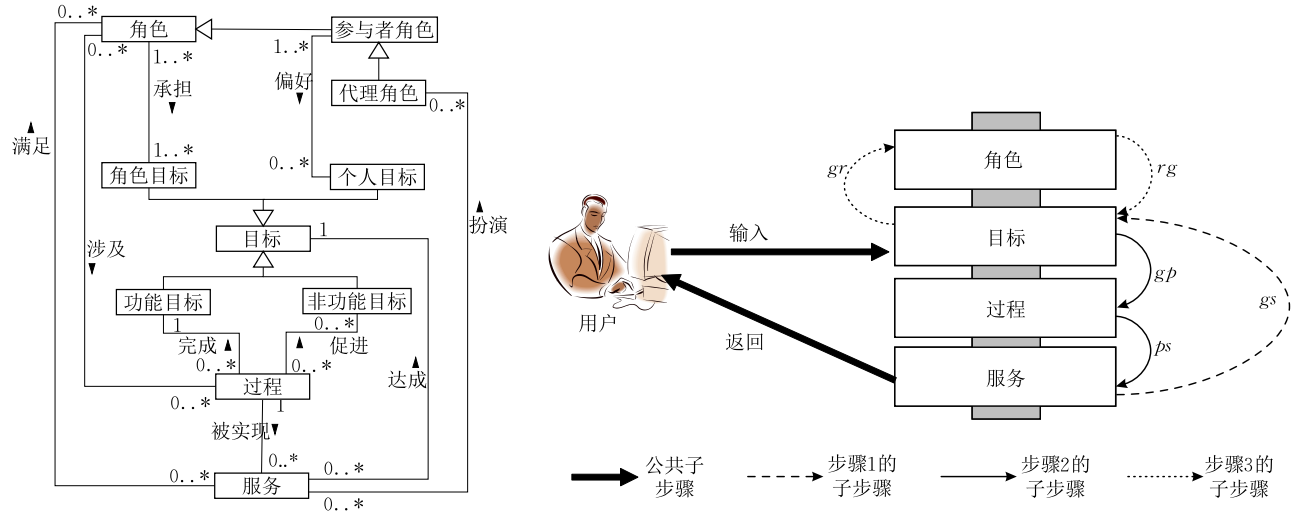
角色元模型定义了业务需求问题空间中人的社会性角色、参与者、协作者及其组织属性、所属涉众之间交互的关联关系;目标元模型针对用户提出的业务目标,定义了目标之间的逐层精化和分解关系,同时强调了非功能性目标,并确定了目标之间的层次关系和约束关系;过程元模型定义了达成目标的业务过程,并定义了过程中原子过程和组合过程中的输入/输出、控制结构、前置/后置条件、以及情境约束与服务质量约束. 服务元模型定义了用以实现过程的服务链的构造、情境与质量属性约束,及其所需数据资源的聚合,为用户需求提供了面向具体服务的实现方案。

图 4(a)展示了 RGPS 需求元模型中的九类关联关系,具体定义如下:

(1) 从“角色”出发的关联关系

①<角色-角色目标>间的承担关系:角色需要承担与其职责对应的目标。

②<角色-个人目标>间的偏好关系:用户作为个



(a) RGPS元模型之间的语义关联关系

(b) 从目标到服务的按需服务(模型)选择示例

图 4 RGPS 元模型定义的关联关系及按需服务(模型)选择

人扮演参与者角色,根据其自身的特征偏好,具有不同的个性化目标。

③〈角色-过程〉间的参与关系:用户能够扮演不同的角色对过程进行编制。

(2) 从“过程”出发的关联关系

④〈过程-目标〉间的完成关系:过程能按照一定的规则将资源组织起来完成既定的目标。

⑤〈过程-非功能目标〉间的促进关系:过程能促进非功能目标的实现以满足非功能需求。

⑥〈过程-服务〉间的被实现关系:通过服务调用能够实现业务过程。

(3) 从“服务”出发的关联关系

⑦〈服务-目标〉间的达成关系:调用的服务能够达成相应的目标。

⑧〈服务-角色〉间的满足关系:服务需要满足不同角色的用户需求。

⑨〈服务-角色〉间的扮演关系:服务能够用来扮演相应的角色。

作者团队与企业合作,基于 RGPS 需求元模型框架理论,面向企业管理软件云服务聚合和城市交通领域按需服务,在开发的软件服务平台及其搭载的多种异构业务云服务系统支撑下,实施了服务供给侧 O-RGPS 模型和服务资源的规模化定制开发,实证了 RGPS 元模型框架的有效性。

4.2 基于 RGPS 交互的按需模型选择

网络化交互的关键是实现供-需双方的交互。RGPS 需求元模型框架可以制导供-需双方的交互:服务需求方的服务需求采用 RGPS 定制的语义模板提出;服务供给方包含面向领域或业务主题、采用

RGPS 组织的业务模型和软件服务。在 RGPS 关联关系基础上,可以支持诸如“我是谁”与“我为谁”、“要做什么”与“能做什么”、“如何做”与“能怎么做”、“需要何种价值服务 Vaas(Value as a Service)”与“能提供何种价值服务”的 R、G、P、S 对接与供-需双方的交互与匹配。

当需方采用 RGPS 语义模板来描述其需求时,将通过供-需双方的角色、目标、过程与服务匹配来完成模型选择,满足其需求。下面,我们将用一个以目标为需求表达类型进行选择服务的案例来介绍按需模型选择的基本过程。

在本案例中,用户选择目标作为需求表达类型,并且选择服务作为结果类型。基于 RGPS 间的关联关系以及领域本体提供的语义标注,通过执行如下步骤查找合适的服务。步骤 1:用户需求可以与 MFI 已注册的目标模型中目标的语义标注相匹配(图 4(b)的输入子步骤)。作为一个可选步骤,由该匹配目标分解的子目标可以返回给用户进行选择。根据“目标-服务”间的关联,如果在服务模型注册库中可以找到实现该目标的服务(图 4(b)的 gs 子步骤),则将结果直接返回给用户(图 4(b)的返回子步骤)。如果返回的结果可以满足用户请求,则终止模型选择过程;否则,执行如下步骤。

步骤 2:模型选择引擎根据“目标-过程”间的关联查找 MFI 过程模型注册库,基于过程的语义标注查找可以实现该目标的过程(图 4(b)的 gp 子步骤)。然后查找服务模型注册库,使用“过程-服务操作”间的关联及相应的语义标注查找候选服务(图 4(b)的 ps 子步骤)。如果返回的结果可满足用户请

求,则终止模型选择过程;否则,执行如下步骤。

步骤 3:模型选择引擎根据“角色-目标”间的关联查找 MFI 角色与目标模型注册库,查找可以承担该目标的角色(图 4(b)的 gr 子步骤),然后查找和补充该角色承担的其它目标(图 4(b)的 rg 子步骤)。通过这种方式可以扩充候选目标集。对于这些候选目标,后续的选择过程与步骤 1 和步骤 2 相同。如果返回的结果不能满足用户请求,模型选择过程将以一种没有合适模型或服务能满足用户的状态结束。

值得注意的是,在模型选择的过程中,用户请求与注册信息间的匹配以及 RGPS 模型的不同注册信息间的匹配均基于相应的注册在本地注册库中的领域本体。

类似地, RGPS 需求元模型框架还能支持业务过程查询、服务组合、业务过程碎片的组态化配置与合并等灵活交互与服务互操作。例如,用户还可以选择过程模型作为需求表达类型,并且选择服务作为结果类型。在基本约束的基础上, RGPS 需求元模型框架还能进一步支持需求制导的服务 QoS(Quality of Service)保证、情境适应、应用策略约束等请求。其中,文献[20]详细阐述了一个物联网中可互操作的服务供给侧 O-RGPS 模型构造案例,验证了上述方法的实用性和有效性。

5 模型服务的 MFI(O-RGPS)互操作性治理和管理

需求制导的 RGPS 模型互操作方法为基于模型的供-需对接提供了基本的实施步骤。然而,在面对具体的应用领域或主题时,供-需对接的实现以及供-需交互的深度取决于特定软件模型的互操作能力。因此, RGPS 模型的互操作性治理与管理技术成为度量特定模型的互操作能力、激励或阻断异构模型之间互操作的关键。

基于 4.1 节中论述的 RGPS 需求元模型框架,作者分别抽取了本体(O)、角色与目标模型(R&G)、过程模型(P)和服务模型(S)的公共核心元数据和管理信息,为不同类型的模型构建了相应的注册元模型,以促进异构信息模型的跨域或跨系统查询以及多粒度复用。

进一步,我们将上述模型注册技术和 4.2 节中阐述的按需模型选择方法进行了标准化,在互操作性元模型框架 MFI 下主导研制了 5 个 ISO 国际标

准,即: MFI-3“本体注册元模型”、MFI-5“过程模型注册元模型”、MFI-7“服务模型注册元模型”、MFI-8“角色和目标模型注册元模型”和 MFI-9“按需模型选择方法论”,并形成了互操作性元模型框架标准系列 MFI(O-RGPS)。目前, MFI(O-RGPS)能够对 23 种异构的 O-RGPS 模型资源进行语义互操作性治理和管理。其中, MFI-3 能够支撑 OWL(Web Ontology Language)^[33]、KIF(Knowledge Interchange Format)^[34]、Common Logic^[35]、RDFS(Resource Description Framework Schema)^[36]、DL(Description Logic)^[37]、E/R(Entity/Relationship)^[38]等 6 种语言描述的本体之间的互操作; MFI-8 能支撑 FOAF^[39]、RM-ODP(Reference Model of Open Distribution Processing)^[40]、Trops^[41]、BMM(Business Motivation Model)^[42]、 i^* ^[43]、KAOS(Keep All Objects Satisfied)^[44]、NFRF(Non-Functional Requirements Framework)^[45]等 7 种语言描述的角色和目标模型之间的互操作; MFI-5 能支撑 BPEL(Business Process Execution Language)^[46]、BPMN(Business Process Model and Notation)^[47]、EPC(Event-driven Process Chain)^[48]、PSL(Process Specification Language)^[49]、UML、OWL-S(Ontology Web Language for Services)^[50]等 6 种语言描述的过程模型之间的互操作; MFI-7 能支撑 WSDL(Web Service Description Language)^[51]、WADL(Web Service Application Description Language)^[52]、WSMO(Web Service Modelling Ontology)^[53]、OWL-S 等 4 种语言描述的服务模型之间的互操作。

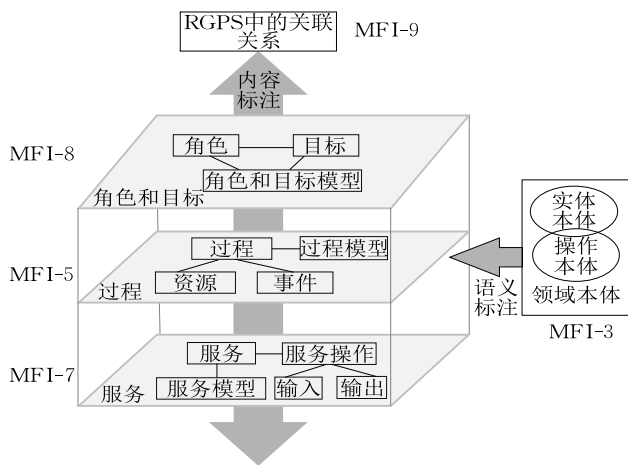


图 5 MFI-3/-5/-7/-8/-9 之间的关联关系

在 MFI 框架下, MFI-3/-5/-7/-8/-9 五个标准间存在如图 5 所示的关联关系。一方面,基于 MFI-3 注册的领域本体或服务主题本体,可通过语义标注

的方式与 MFI-5/-7/-8 中的部分元类建立语义关联,为基于 MFI-5/-7/-8 得到的模型注册信息提供语义标签;另一方面,MFI-9 建立了 MFI-5/-7/-8 中部分元类之间的 RGPS 关联关系,可以用于为不同类型的信息模型提供不同抽象层次的 RGPS 内容标签.例如,以过程模型作为研究对象,这些关联既能为过程模型的注册信息提供更加抽象的角色和目标标签,又可帮助我们找到可用于实现该过程的具体服务资源,以支持不同粒度、不同程度的业务过程协作.因此,基于 4.1 节中 RGPS 之间的关联关系,我们可以从多个维度对基于 MFI-3/-5/-7/-8 的模型互操作性能力进行综合分析,为其提供语义互操作性能力的管理依据.

由于篇幅限制,本文将主要关注以过程为中心的互操作性管理,分析 MFI-5“过程模型注册元模型”对异构过程模型的互操作性管理能力,并度量其对过程模型共享和协作的支持程度. MFI 中其它部分的互操作性管理能力分析与度量见文献[54]和文献[55].

5.1 MFI-5 的动机和范畴

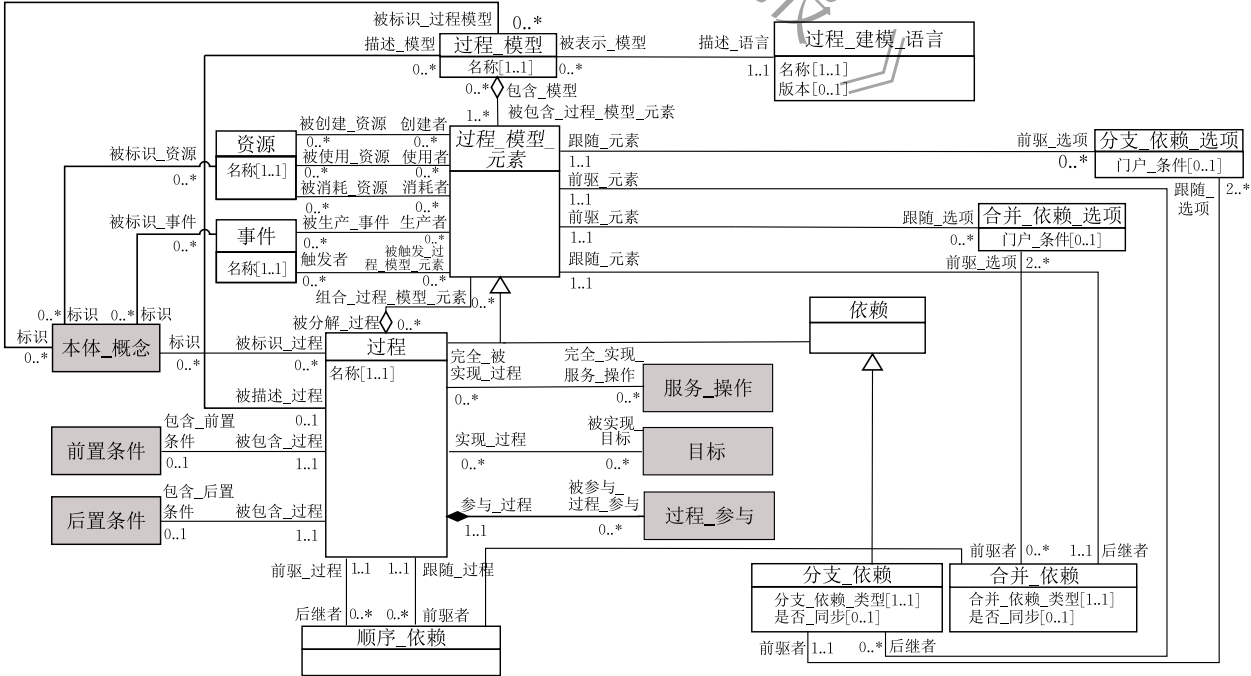
近年来,许多企业和组织使用不同的过程建模语言和描述规范(如业务过程模型记法 BPMN、事件驱动的过程链 EPC、业务过程执行语言 BPEL、UML 活动图等)对业务过程进行建模,得到了大量在语法和语义上存在较大差异的业务过程异构模型.相应地,不同的业务过程模型库被用于存储不同过程建模语言构建的业务过程模型,如 IBM BPEL

存储库^[56]、BPMN 存储库^[57]等.为促进企业之间的业务协作,迫切需要为已有的过程模型提供一套通用的注册和索引机制,支持异构过程模型和不同粒度过程碎片的跨库查询,以提升过程模型的利用率.

MFI-5 定义了一个用于注册过程模型管理信息和部分核心元数据的元模型,可帮助发现过程的功能和组成. MFI-5 独立于过程模型的描述语言及其在过程存储库中的存储结构,仅关注过程模型的互操作性管理信息、组成结构等核心元数据,能够促进不同语言描述的、不同粒度的过程模型及其碎片的互操作性配置、合并与重用.具体地,MFI-5 主要支持注册异构的过程模型下述三类信息:(1)过程模型的概要信息(Profile),即过程模型使用的描述语言、过程实现的业务目标、完全实现特定过程的服务等,可用于支持较大粒度的业务过程及其碎片的发现和重用;(2)过程模型的组成结构,即过程模型包含的活动、子过程及其之间的依赖关联等,能够支持不同粒度的过程碎片发现和重用;(3)过程模型的语义信息,即过程模型注册元模型允许注册者使用本体对过程或过程的输入/输出进行标注,通过基于语义的过程发现和集成,提高过程模型或不同粒度过程碎片的查全率和查准率.

5.2 MFI-5 的主要结构

通过定义和组织与过程模型相关的元类,我们为过程模型中核心元素的注册定义了一个元模型.结合 5.1 节中 MFI-3/-5/-7/-8 之间的关系,图 6 描



注:名称为斜体的元素为抽象元素;灰色的元素是在MFI-3、MFI-7和MFI-8中定义的元素.

图 6 O-RGPS 标注的过程模型注册元模型结构

述了基于 O-RGPS 标注的过程模型注册元模型结构。

过程模型是过程的表示,它使用一种特定的过程建模语言描述了该过程模型所包含的过程模型元素.过程模型元素既可以是过程,也可以是过程与其他过程模型元素之间的依赖关系.对每一个过程模型元素而言,存在可触发该过程模型元素的事件或由该过程模型元素产生的事件.过程模型元素需要使用、创建或者消耗资源以实现既定的目标.

依赖描述了过程模型所描述的过程之间的控制约束,主要包括顺序依赖、分支依赖或合并依赖.顺序依赖指定过程为依次执行.分支依赖规定,当前驱过程模型元素完成后,一个或多个后继过程模型元素将并发执行.合并依赖规定,当选定的前驱过程模型元素完成后,后继过程模型元素将开始执行.在分支依赖中,分支依赖的类型可为后续过程指定一种逻辑门.类似地,在合并依赖中,合并依赖的类型可为前驱过程指定逻辑门.在过程模型注册元模型中,分支依赖类型和合并依赖类型均可以是“异或”、“或”和“与”.对分支依赖类型而言,“异或”表示有且仅有一个后继过程模型元素可以被执行,“或”表示一个或多个后继过程模型元素可以被执行,“与”表示所有的后继过程模型元素都必须被执行.对合并依赖类型而言,“异或”表示有且仅有一个前驱过程模型元素成功完成后,后继过程模型元素才可以执行;“或”表示当一个或多个前驱过程模型元素成功完成后,后继过程模型元素才可以执行;“与”表示当且仅当所有的前驱过程模型元素成功完成后,后继过程模型元素才可以执行.此外,分支依赖选项表示分支依赖类型确定后,将被执行的后续过程模型元素的门户条件.类似地,合并依赖选项表示合并依赖类型确定后,将被执行的前驱过程模型元素的门户条件.

基于 MFI-3/-5/-7/-8 间的关联关系,本体概念可对过程、过程模型、资源、事件等进行语义标注.每个过程可以实现零个或一个目标,每个目标可以被零个、一个或多个过程实现.存在没有指定被某个特定过程实现的目标,也存在没有被应用于实现特定目标的过程.类似地,每个过程可以参与零个、一个或多个过程参与,其中每个过程参与是指参与过程的角色,如参与者或受益者.每个过程参与指定一个角色可以参与当且仅当一个过程,而一个过程参与只能拥有一个相关联的过程.同时,每个过程可以被零个、一个或多个服务操作完全实现,每个服务操作可以完全实现零个、一个或多个过程.既存在没有指定被某个特定服务实现的过程,也存在没有被用于实现某个特定过程的服务.每个过程可能拥有一个前置条件或一个后置条件.存在没有前置条件或后置条件的过程.每个前置条件和后置条件均可以通过组合表达或原子表达来定义.

5.3 基于 MFI-5 的过程模型注册

MFI-5 为过程模型的管理信息、组成结构等信息的注册定义了一组公共的注册项,并指定了注册项之间的关系.基于 MFI-5 注册已有的过程模型,需要构建基于 MFI-5 的过程模型注册库,其关键在于对待注册过程模型的原始信息进行筛选,并按照 MFI-5 定义的注册项及其之间的关系对其中的部分信息进行梳理,完成待注册过程模型信息到基于 MFI-5 的注册库间的映射,最终实现基于 MFI-5 的过程模型注册.

基于 MFI-5 的过程模型注册过程如图 7 所示.首先,解析层将待注册过程模型的描述文件转换为相应的文档对象;其次,建立特定过程描述语言与 MFI-5 之间的对应关系,由映射层对上述解析得到的文档对象进行映射和组织,得到基 MFI-5 的待注册过程文档对象图;然后,由存储层定义基于 MFI-5

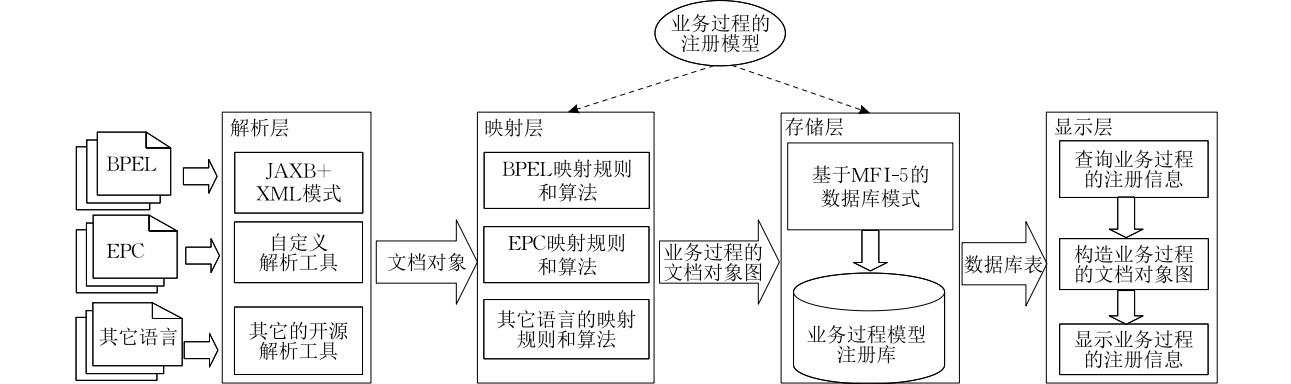


图 7 基于 MFI-5 的过程模型注册过程

的数据库模式,使用关系数据表存储待注册过程的文档对象图,完成过程模型的注册;最后,在显示层,根据过程或过程模型的查询请求,从数据库中读取相应的关系数据库表,构造所查询过程的文档对象图,并显示该过程的注册信息.

从上述过程模型的注册步骤可以看出,基于 MFI-5 对已有的过程模型进行注册时,在解析层和映射层均需要为不同过程建模语言描述的过程模型提供相应的文档解析模块和映射规则.考虑已有过程描述语言的应用范围,下面将以过程建模语言 EPC 为例,详细阐述如何定义特定过程建模语言到 MFI-5 的映射规则.

基于 MFI-5 注册 EPC 过程模型,需要首先解析待注册业务过程的 EPC 描述文件,将过程模型的名称、URL、建模语言等信息记录为待注册业务过程模型的注册信息.同时,还需对 EPC 文件的内容进行解析,将 EPC 文件对象化,以得到待注册过程的 EPC 对象.具体而言,可以定义 EPC 文档对象到 MFI-5 中元类、元类属性或者元类之间关联的映射(详见表 1),将待注册过程的 EPC 描述文件转换为基于 MFI-5 的过程对象图.如图 8 所示,其左部是

一个 EPC 的过程片段,由功能 A、功能 E、事件 C、事件 D、异或连接子 B、异或连接子 E 等元素组成.根据表 1 中定义的基本元素映射规则,功能 A 和功能 E 可映射为 MFI-5 中的过程 A 和过程 E;规则 9 可以将连接子 B 映射成一个分支依赖和两个分支依赖选项;规则 12 可以将连接子 E 映射成一个合并依赖和两个合并依赖选项;事件 C 和事件 D 不会直接映射到基于 MFI-5 的过程对象图中,而是通过规则 1 传播到过程 A 和过程 E,分别作为其后置条件和前置条件.

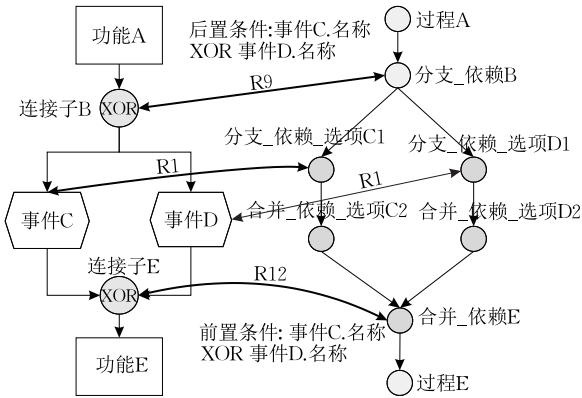


图 8 EPC 基本元素的映射

表 1 EPC 到 MFI-5 的映射

序号	EPC 对象	MFI-5 中的类及其属性
		事件(当事件为第一个或最后一个元素时)
1	Event	分支_依赖_选项
		合并_依赖_选项
		顺序_依赖
2	Event/name	分支_依赖_选项/门户_条件
		合并_依赖_选项/门户_条件
		前置条件/名称
		后置条件/名称
3	Function	过程
4	Function/name	过程/名称
5	Information resource	资源
6	Information resource/name	资源/名称
7	AND-split	分支_依赖(当分支_依赖_类型为 AND 时)
8	OR-split	分支_依赖(当分支_依赖_类型为 OR 时)
9	XOR-split	分支_依赖(当分支_依赖_类型为 XOR 时)
10	AND-join	合并_依赖(当合并_依赖_类型为 AND 时)
11	OR-join	合并_依赖(当合并_依赖_类型为 OR 时)
12	XOR-join	合并_依赖(当合并_依赖_类型为 XOR 时)
13	Event/documentation	本体_概念
	Function/documentation	本体_概念
	Organization unit/documentation	本体_概念
	Information resource/documentation	本体_概念
	AND-split/documentation	本体_概念
	OR-split/documentation	本体_概念
	XOR-split/documentation	本体_概念
	AND-join/documentation	本体_概念
14	OR-join/documentation	本体_概念
	XOR-join/documentation	本体_概念
	Organization unit	角色
	Organization unit/name	角色/名称
15	Organization unit assignment	过程_参与
16		

在上述映射规则的基础上,还需要提供相应的算法以实现基于 MFI-5 的 EPC 过程模型自动注册。

5.4 基于 MFI-5 的过程模型互操作性能力度量

根据 5.3 节的阐述,MFI-5 被认为可以支持多种不同过程建模语言或规范所描述的过程模型的自动注册,以促进异构过程模型之间的互操作。然而,将 MFI-5 应用于实际的业务协作或互操作场景时,对不同过程建模规范的支持程度将影响不同业务过程之间的互操作程度。

对基于 MFI-5 注册的过程模型的互操作性进行度量,其基本思想是计算不同过程描述语言中被映射的元素在该语言全部元素中所占的比例,以此作为 MFI-5 对该类过程模型注册的支持度。因此,度量 MFI-5 对不同过程建模语言或规范的互操作性能力,其前提是已经建立了该语言到 MFI-5 的映射规则。具体地,本文将从以下四个角度对 MFI-5 的互操作性能力进行度量:

(1) 精确率(P ; Precision):用于衡量过程模型注册元模型 MFI-5 中定义的元类及其属性的合理性与完整性。对某种业务过程建模语言来说,需要计算该语言到 MFI-5 映射中 MFI-5 所涉及的元类及其属性数量在 MFI-5 定义的所有元类及其属性总数中所占的比例。具体的计算公式为

$$p_i = \frac{a_i}{m}, i \in [1, k],$$

其中, p_i 表示第 i 种过程建模语言或规范的精确率, m 表示 MFI-5 中所有元类及其属性的总数, k 为待度量的过程建模语言或规范总数; a_i 表示在该语言到 MFI-5 的映射规则中,MFI-5 中被实际映射到的元类和属性数量,且 $a_i \leq m$ 。

鉴于 MFI-5 支持对多种语言描述的过程模型进行注册,MFI-5 互操作性能力的综合精准率则为已知 k 种语言精准率的平均值,即

$$P = \frac{\sum_{i=1}^k p_i}{k}.$$

(2) 召回率(R ; Recall):可用于衡量特定过程建模语言对 MFI-5 的符合性,如特定语言到 MFI-5 的映射中实际涉及的元素,在该语言所有元素中所占的比例。其计算公式为

$$r_i = \frac{b_i}{n}, i \in [1, k],$$

其中, r_i 表示第 i 种过程建模语言或规范的精确率, n 表示特定过程建模语言中元素的总数; a_i 表示在该语言到 MFI-5 的映射中,实际被映射到的元素总

数,且 $b_i \leq n$ 。

鉴于 MFI-5 支持对多种语言描述的过程模型进行注册,MFI-5 互操作性能力的综合召回率则为已知 k 种语言召回率的平均值,即

$$R = \frac{\sum_{i=1}^k r_i}{k}.$$

(3) F 值(F -Measure):综合精确率和召回率的 F 值,度量的 MFI-5 的互操作性能力综合指标,其计算公式如下

$$F = \frac{2PR}{P + R}.$$

(4) 区分度(D ; Discrimination Degree):主要针对特定语言到 MFI-5 的映射规则,可用于衡量 MFI-5 的抽象程度。 D 值越大表明映射到 MFI-5 中指定元类或属性的元素越多,进而说明 MFI-5 的抽象程度越高,反之,抽象程度越低。也可以说是用于衡量在特定语言到 MFI-5 的映射中,MFI-5 对所映射对象的区分能力。在本节中,MFI-5 对特定语言的区分度 D_i 主要取决于该语言到 MFI-5 的映射规则数量及其相应的映射类型。假设第 i 种过程建模语言或规范到 MFI-5 的映射规则共有 s 条,则第 j 个映射的区分度 d_j 的取值如下:当第 j 个映射为一对一映射时, $d_j = 1$;当第 j 个映射为一对 x ($x > 1$) 映射(即在第 j 个映射中,该语言的一个元素对应于 MFI-5 中的 x 个元素)时, $d_j = \frac{1}{x}$;当第 j 个映射为 y ($y > 1$) 对一映射(即在第 j 个映射中,该语言的 y 个元素对应于 MFI-5 中的 1 个元素)时, $d_j = \frac{1}{y}$ 。故第 i 种语言的区分度计算公式为

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^s d_j}{s}.$$

鉴于 MFI-5 支持对多种语言描述的过程模型进行注册,MFI-5 互操作性能力的综合区分度则为已知 k 种语言区分度的平均值,即

$$D = \frac{\sum_{i=1}^k D_i}{k}.$$

下面,我们将基于文献[58]和文献[59]中定义的 BPEL 到 MFI-5 的映射规则以及 5.3 节中 EPC 到 MFI-5 的映射规则,计算 MFI-5 对上述两种语言的支持度以及综合互操作性能力。为此,作者从精准率、召回率、 F 值和区分度 D 这 4 个角度,对 MFI-5

的互操作性管理能力进行度量. 表 2 中的实验结果表明, 针对 BPEL 和 EPC 这两种异构的过程建模语言, MFI-5 对过程模型的互操作性能力的 F 值区间是[46.2%, 78.7%].

表 2 面向 BPEL 与 EPC 的 MFI-5 互操作性能力			
	BPEL	EPC	MFI-5 互操作性能力区间
精准率 P	0.875	0.846	[84.6%, 87.5%]
召回率 R	0.347	0.735	[34.7%, 73.5%]
F 值	0.497	0.787	[46.2%, 78.7%]
区分度 D	0.360	0.850	[36%, 85.0%]

5.5 基于 MFI-5 的互操作性能力治理和管理

“治理(Governance)”一词来源于拉丁语和古希腊语, 原意是控制、引导和操纵. 在计算机领域, IT 治理可以简单理解为信息化构筑的控制、引导和操纵, 其核心是对 IT 应用达到期望的行为进行激励和决策.

MFI-5 以标准化手段, 定义了设计时的过程模型互操作性能力, 为以过程模型为中心的设计提供了相应的互操作性能力治理区间. 对于互操作性能力的管理, 本文倡导应面向特定领域或服务主题应用的服务需求, 根据相应的互操作性能力治理区间, 对该领域中异构信息模型资源之间的语义互操作程度进行评估和判断, 并在互操作性能力区间中设定合适的语义互操作性能力阈值. 在具体应用中, 可通过阈值对模型的互操作性治理区间进行调控和管理, 激励或阻断异构模型之间的互操作. 特别是在互联网环境中, 激励异构模型之间的互操作对预先判定异构信息系统、异构模型之间的交互程度或者协作结果, 以及调控化解“信息孤岛”的互操作性能力而言, 均具有重要的应用意义; 阻断异构模型之间的互操作, 对于软件服务的“信息安全”也具有重要的应用价值.

6 总结与展望

本文论述了作者团队十多年来为化解云计算与大数据时代软件服务的“信息孤岛”危机, 在“互联、互通”的基础上, 针对网络化业务协作需求和异构软件模型间的语义互操作难题所开展的导向型研究.

本文从软件工程技术研究的角度, 提出并论述了模型交互驱动架构 MiDA 的三大内核技术; 剖析了 MiDA 三种内核技术之间基于“含意三角形模式”的联动过程以及虚实互动的模型互操作过程; 阐明了 MiDA 内核技术演进的内涵及其与 MDA 的兼

容性. 最后, 论述了作者团队主导研制的模型互操作性注册与存储的 ISO 国际标准系列 MFI(O-RGPS), 并重点分析了其中的 MFI-5“过程模型注册元模型”的语义互操作性能力及其度量方法.

应用本文的核心技术, 作者所在研究团队与武钢工程技术集团公司、金蝶软件(中国)有限公司合作研发了企业云管理平台, 在国内成功实施了产业化推广和应用, 并取得了显著的社会与经济效益. 同时, 本文核心技术还被国际 IT 业界技术开放群组 TOG(The Open Group)采纳应用, 被确定为云计算参考架构标准 CCRA(Cloud Computing Reference Architecture)的基础技术, 从业界标准化的角度印证了本文方法的有效性. 综上, 本文的核心技术可用于构造涉众需求制导、支撑供需精准对接以及可互操作的服务供给侧结构, 对科学融合人、机、物三大世界、化解深层 Web 服务资源的“信息孤岛”和软件服务的“信息安全”难题, 具有重要的应用价值.

下一步, 我们将重点关注网络化交互的 RGPS 语言以及位于互操作性上位的知识、决策、意义层的互操作性理论方法, 深入关注知识型服务供给侧的知识-语义结构的构造方法、异构知识模型的语义互操作性能力治理和管理等研究.

参 考 文 献

[1] Nelson M R. Building an open cloud. Science, 2009, 324 (5935): 1656-1657

[2] Giles J. Social science lines up its biggest challenges. Nature, 2011, 470(7333): 155

[3] He Ke-Qing, Peng Rong, Liu Wei, et al. Networked Software. China Science Publishing & Media Ltd, 2008 (in Chinese)
(何克清, 彭蓉, 刘玮等. 网络式软件. 北京: 科学出版社, 2008)

[4] He Ke-Qing, He Yang-Fan, Wang Chong, et al. Theory of Ontology and Metamodeling Methodology and Its Application. China Science Publishing & Media Ltd, 2008 (in Chinese)
(何克清, 何扬帆, 王翀等. 本体元建模理论与方法及其应用. 北京: 科学出版社, 2008)

[5] Yin Jian-Wei, Deng Shui-Guang, Wu Jian, Wu Zhao-Hui. Service sharing based on loop-model of service. Communications of the CCF, 2017, 13(2): 18-23(in Chinese)
(尹建伟, 邓水光, 吴健, 吴朝晖. 基于回型关系模型的共享服务研究. 中国计算机学会通讯, 2017, 13(2): 18-23)

[6] Wang Jian, He Ke-Qing, Gong Ping, et al. RGPS: A unified requirements meta-Modeling frame for networked software// Proceedings of the 3rd International Workshop on Advances

- and Applications of Problem Frames (IWAAPF 2008) at 30th International Conference on Software Engineering, Leipzig, Germany, 2008; 29-35
- [7] Liu Jian-Xiao, He Ke-Qing, Wang Jian, et al. An approach of RGPS-Guided on-demand service organization and recommendation. *Chinese Journal of Computers*, 2013, 36(2): 238-251(in Chinese)
(刘建晓, 何克清, 王健等. RGPS制导的按需服务组织与推荐方法. *计算机学报*, 2013, 36(2): 238-251)
- [8] He Ke-Qing, He Yang-Fan. ISO/IEC 19763-3:2010, Information technology-Metamodel for interoperability—Part 3: Metamodel for ontology registration. 2010
- [9] He Ke-Qing, Wang Chong. ISO/IEC 19763-5:2015, Information technology-Metamodel for interoperability—Part 5: Metamodel for process model registration. 2015
- [10] He Ke-Qing, Feng Zai-Wen. ISO/IEC 19763-7:2015, Information technology-Metamodel for interoperability—Part 7: Metamodel for service model registration. 2015
- [11] He Ke-Qing, He Fei. ISO/IEC 19763-8:2015, Information technology-Metamodel for interoperability—Part 8: Metamodel for role and goal model registration. 2015
- [12] He Ke-Qing, Wang Jian. ISO/IEC 19763-9:2015, Information technology-Metamodel for interoperability—Part 9: On demand model selection. 2015
- [13] Object Management Group. Model Driven Architecture (MDA): MDA Guide rev. 2.0. 2014. OMG Document ormsc/2014-06-01
- [14] Ogden C K, Richards I A. *Meaning of Meaning*. New York: Harcourt, Brace & Company, 1927
- [15] Tolk A, Muguira J A. The levels of conceptual interoperability model. *Fall Simulation Interoperability Workshop*, 2003, 311(1-2): 127-130
- [16] Hofmann M. Essential preconditions for coupling model-based information systems//*Proceedings of NATO Modeling and Simulation Group (NMSG) Conference on C3I and Modeling and Simulation Interoperability*. Antalya, Turkey, 2004, Vol. 123
- [17] Mike K. Semantic interoperability: Is it always achievable? *Open Forum on Metadata Registries*, ISO/IEC JTC 1/SC 32, 2008
- [18] The Open Group. SOA Reference Architecture. The Open Group Technical Standard, 2011
- [19] Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries*. New York, 1990
- [20] He Ke-Qing, Li Bing, Ma Yu-Tao, Huang Yi-Wang. Key technologies of software engineering in Big Data era. *Communications of the CCF*, 2014, 10(3): 8-18(in Chinese)
(何克清, 李兵, 马于涛, 黄贻望. 大数据时代的软件工程关键技术. *中国计算机学会通讯*, 2014, 10(3): 8-18)
- [21] Office of the Under Secretary of Defense. *Systems Engineering Guide for System of Systems*. Vers. 1.0. 2008
- [22] Jamshidi M. *Systems of Systems Engineering Innovations for the 21st Century*. John Wiley & Sons Inc., 2008
- [23] Sledge C A, et al. Reports from the field on system of systems interoperability challenges and promising approaches. Technical Report; CMU/SEI-2010-TR-013
- [24] Grace L, Edwin M, Soumya S. Service orientation and systems of systems. *IEEE Software*, 2010, 28(1):58-63
- [25] Object Management Group. Unified Modeling Language (UML). Version 2.5, 2015. OMG Document formal/15-03-01
- [26] Saraswathi R, Singh J. *Oracle SOA BPEL Process Manager 11gR1—A Hands-on Tutorial*. Packt Publishing, 2013
- [27] Zhao Li-Ping. Designing application domain models with roles //*Proceedings of European MDA Workshops: Foundations and Applications on Model Driven Architecture*. Linköping, Sweden, 2004; 1-16
- [28] Object Management Group. Meta Object Facility (MOF). Version 2.5.1, 2016. OMG Document formal/2016-11-01
- [29] Object Management Group. Common Warehouse Metamodel (CWM). Version. 1.1, 2003. Available at: <http://www.omg.org/spec/cwm/1.1>
- [30] Liu Jian-Xiao, He Ke-Qing, Ning Da. A kind of on-demand Web services selection method based on RGPS. *Journal of Computational Information Systems*, 2011, 7(1): 1-8
- [31] Wang Jian, Feng Zai-Wen, Zhang Jia, et al. A unified RGPS-based approach supporting service-oriented process customization. *Web Services Foundations 2014*: 657-682
- [32] Liu Jian-Xiao, Wang Jian, He Ke-Qing, et al. Service organization and recommendation using multi-granularity approach. *Knowledge-Based Systems*, 2015, 73: 181-198
- [33] Smith M, Welty C, McGuinness D. *OWL web ontology language guide*. W3C Candidate Recommendation, 2004
- [34] Michael G, Richard F. *Knowledge Interchange Format Version 3.0 Reference Manual*. Stanford Logic Group Report, Stanford University, 1992. Logic-92-1
- [35] International Organization for Standardization. ISO/IEC 24707: 2007-Information technology-Common Logic (CL): A framework for a family of logic-based languages. 2007
- [36] Brickley D, Guha R V. *Resource Description Framework (RDF) Schema Specification 1.0*. W3C Candidate Recommendation, 2000
- [37] Franz B, Diego C, Deborah M, et al. *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003
- [38] Chen P. The entity-relationship model-toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*, 1976, 1(1): 9-36
- [39] Dan B, Libby M. *FOAF Vocabulary Specification 0.99*. 2014
- [40] International Organization for Standardization. ISO/IEC 19793: 2008, Information technology-Open distributed processing-Use of UML for ODP system specifications. 2008

- [41] Castro J, Kolp M, Mylopoulos J. Towards requirements-driven software development methodology: The tropos project. *Information Systems*, 2002, 27: 365-389
- [42] Object Management Group, Business Motivation Model (BMM). Version 1.3. 2015. OMG Document Number: formal/2015-05-19
- [43] Yu E. Modeling Strategic Relationships for Process Reengineering [Ph. D. dissertation]. Department of Computer Science, University of Toronto, 1994
- [44] Nuseibeh B, Kramer J, Finkelstein A. A framework for expressing the relationships between multiple views in requirements specification. *IEEE Transaction on Software Engineering*, 1994, 20(10): 760-773
- [45] Chung L, Nixon B A, Yu E, Mylopoulos J. Non-Functional Requirements in Software Engineering. Massachusetts, US: Kluwer Academic Publishers, 2000
- [46] Advancing Open Standards for the Information Society. Web Services Business Process Execution Language Version 2.0. 2007
- [47] Object Management Group. Business Process Model and Notation (BPMN) Version 2.0. 2011. OMG Document Number: formal/2011-01-03
- [48] Ekkart K. On the semantics of EPCs: A framework for resolving the vicious circle//Proceedings of the 2nd International Conference on Business Process Management, Potsdam, German, 2004: 82-97
- [49] International Organization for Standardization. ISO 18629-1: 2004, Industrial automation systems and integration—Process specification language—Part 1: Overview and basic principles. 2004
- [50] David M, Mark B, Jerry H, et al. OWL-S: Semantic Markup for Web Services. W3C, 2004
- [51] Erik C, Francisco C, Greg M, Sanjiva W. Web Services Description Language (WSDL) 1.1. W3C, 2001
- [52] Marc H. Web Application Description Language. W3C, 2009
- [53] Roman D, Keller U, Lausen H, et al. Web service modeling ontology. *Applied Ontology*, 2005, 1(1): 77-106
- [54] He Ke-Qing, Wang Jian, Lianh Peng. Semantic interoperability aggregation in service requirements refinement. *Journal of Computer Science and Technology*, 2010, 25(6): 1103-1117
- [55] Li Zhao, Liang Peng, Zhao Yi, He Ke-Qing. MFI based interoperability measurement of business models in service-based enterprises//Proceedings of the 9th International Conference on Computational Intelligence and Security. Sichuan, China, 2013: 358-36
- [56] Jussi V, Jana K, Frank L. Repository for business processes and arbitrary associated metadata//Proceedings of the BPM Demo Session at the 4th International Conference on Business Process Management. Vienna, Austria, 2006: 25-31
- [57] Thomas T, Jörg Z, Peter L, Dominik V. An architecture for collaborative scenarios applying a common BPMN-Repository//Proceedings of the 5th IFIP WG 6.1 International Conference on Distributed Applications and Interoperable Systems Athens. Greece, 2005: 169-180
- [58] Wang Chong, Luo Zhong, Zhang Xiu-Wei, et al. An approach to business process registration for enterprise collaboration: using BPEL as an example. *International Journal of Business Process Integration and Management*, 2015, 7(3): 181-196
- [59] Cheng Jing-Wei, Wang Chong, He Ke-Qing, et al. Mappings from BPEL to PMR for business process registration//Proceedings of the 13th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises. Bournemouth, UK, 2012: 207-214



WANG Chong, born in 1981, Ph. D. , lecturer. Her research interests include software engineering and service computing.

HE Ke-Qing, born in 1947, Ph. D. , professor. His research interests include software engineering and service computing.

WANG Jian, born in 1980, Ph. D. , lecturer. His

research interests include software engineering and service computing.

FENG Zai-Wen, born in 1980, Ph. D. , lecturer. His research interests include software engineering and service computing.

HE Yang-Fan, born in 1979, Ph. D. , associate professor. Her research interests include service computing, requirements engineering and semantic technologies.

HE Fei, born in 1974, Ph. D. , lecturer. His research interests include requirements engineering.

Background

This work was supported by the National Basic Research Program (973 Program) of China under Grant No. 2014CB340404, and the National Natural Science Foundation of China

under Grant No. 61373037 and No. 61672387 during the last decade.

Based on the Internet platform where everything can be

connected and communicated, this work aims to resolve the issue of semantic interoperability among heterogeneous software systems, software models and fragments for complex business collaboration. This paper explores the nature that Model Driven Architecture (MDA) evolves into Model-interaction Driven Architecture (MiDA), and proposes three core techniques in MiDA, i. e. RGPS requirements metamodel framework, O-RGPS construction metamodel for “Supply-Side” services, and their standardization for interoperability v governance and management. This work proposes novel semantic interoperability technologies, which contributes to mitigate the “Islands” crisis of deep Web content in Cloud Computing and Big Data, and provides on-demand services for personalized requirements.

The authors would like to express their gratitude to all the collaborators in participating in the National Basic Research Program of China under Grant No. 2007CB310800 for their valuable guidance and suggestions on RGPS requirements metamodel framework. In particular, these collaborators consist of the chief scientist of the project and Chinese Academy of Engineering academician, Prof. Li De-Yi, as well as other

principal participants, e. g., Prof. Li Bing, Dr. Liu Jing, Dr. Chen Gui-Sheng, Prof. Wang Qing, Prof. Liu Zhi-Yong, Prof. Zhang Li, Prof. Li Juan-Zi, Prof. Li Xing, Prof. Liu Jing-Nan, and Prof. Lyu Jin-Hu. The authors also appreciate Mr. Bruce Bargmeyer, who was the chair of ISO/IEC SC32, and the experts in Working Group 2 of ISO/IEC SC32 including Ms. Denise Warzel, Mr. Hajime Horiuchi, and Mr. Masao Okabe. They gave us valuable guidance and suggestions during the development of ISO/IEC 19763-3/5/7/8/9.

The authors would also appreciate Dr. Zhang LJ, the chief scientist of Kingdee Software (China), Mr. Li Yong-Bing and Hu Xing, the leading scientists and experts in the software department of Wuhan Iron and Steel (Group) Corp.

Many thanks to the researchers of our research group, including Prof. Liang Peng, Prof. Peng Rong, Prof. Li Bing, Dr. Ma Yu-Tao, Dr. Liu Jing, Dr. He Cheng-Wan, Dr. Liu Jin, Dr. Liu Wei, Dr. Liu Jian-Xiao, Dr. Gong Ping, Dr. Hu Bo, Dr. Tian Jing-Bai, Dr. Li Zhao, Dr. Li Zheng, Dr. Huang Yi-Wang, and Dr. Huang Ying. They have made important contributions for this work.