

doi: 10.19562/j.chinasae.qcgc.2024.08.004

面向智能汽车赛博物理系统的领域特定建模 语言研究*

赵静, 梁浩, 徐天啸, 肖雅月, 姜博文

(国汽(北京)智能网联汽车研究院有限公司, 北京 102607)

[摘要] 智能汽车信息物理系统(IVCPS)是具有多领域交叉融合特征的复杂大系统,在设计IVCPS领域特定建模语言时,应用现有建模语言存在扩展性差、成熟度低、学习成本高等问题,因此,本文根据V模型和创新架构方法,分别从IVCPS顶层设计流程、IVCPS元语言对象集语言要素定义两部分对面向IVCPS领域特定建模语言(DSML)进行研究,对IVCPS系统层元语言和组件化元语言的规范化进行定义,研究赛博物理组件中表达物理实现、动态特性和赛博计算的组件,以期对赛博物理组件的封装和创建提供参考。

关键词: 智能汽车赛博物理系统; SysML; 领域特定建模语言; 架构设计流程

Research on Domain Specific Modeling Language for Intelligent Vehicle Cyber-Physical System

Zhao Jing, Liang Hao, Xu Tianxiao, Xiao Yayue & Jiang Bowen

National Innovation Center of Intelligent and Connected Vehicles, Beijing 102607

[Abstract] The intelligent vehicle cyber-physical system (IVCPS) is a complex large-scale system with cross-fusion features across multiple fields. When designing domain-specific modeling languages (DSML) for IVCPS, the application of existing modeling languages has problems such as poor scalability, low maturity, and high learning cost. Therefore, based on the V-model and innovative architecture methods, this article studies the DSML for the IVCPS from two aspects: the top-level design process of IVCPS and the definition of language elements in the IVCPS meta-language knowledge set. The normalization of the IVCPS system-level meta-language and component-based meta-language is defined, and the components that express physical implementation, dynamic characteristics, and cyber computation in cyber-physical components are studied, so as to provide reference for the encapsulation and creation of cyber-physical components.

Keywords: intelligent vehicle cyber physical system (IVCPS); SysML; domain specific modeling language (DSML); architecture design process

前言

智能汽车赛博物理系统(intelligent vehicle cyber-physical system, IVCPS)是一种深度集成计算、通信和控制功能的复杂大系统,通过车载传感器、嵌

入式系统、车载网络、无线通信等技术,实现V2V和V2P的信息交互与共享,从而加强环境感知、智能决策、协同控制等智能化功能,最终达到提升交通效率与安全、节能环保、提供出行服务等目标^[1]。

国内外关于IVCPS的研究正处于发展阶段,整体技术尚未成熟,所以具体概念目前还没有统一的

* 国家重点研发计划项目(2021YFB2501000)资助。

原稿收到日期为2023年11月28日,修改稿收到日期为2024年04月19日。

通信作者:梁浩,博士, E-mail: lianghao@china-icv.cn。

明确定义,但其主要是指智能汽车领域物理世界和信息世界高度融合的智能化系统。由于IVCPS系统复杂性特征和系统中含有大量的多样时变的物理过程信息,目前国内外缺乏对IVCPS系统架构描述的良好形式;其次,由于IVCPS系统的复杂异构性,系统内部各个功能各异的物理系统之间,乃至同一个物理系统各模块内部之间的信息的描述都不尽相同;而目前的CPS在公路运输^[2]和铁路运输^[3]的规划层面、拥堵路段交通流分配^[4]、边缘云计算^[5]、信息安全管理^[6]等方面均有应用,但是针对于智能汽车领域的CPS的研究比较缺乏。综上,目前迫切需要一种规范对IVCPS中的元素以及异构集成规范进行统一的描述,来确保不同系统或同一系统之间信息的有效性和可交互性^[7]。

最近10年,特定领域的软件开发开始在软件产业界获得广泛的接受,如一些商业化的DSML Tools相继出现,如:DeepDSL^[8]、OptiML^[9]、Chipotle^[10]、MetaEdit+^[11]、Eclipse GMF^[12]、Microsoft DSL Tools^[13]、Xactium's XMF-Mosaic^[14]分别针对特定领域软件开发给出了自己的解决方案^[15]。

领域特定建模语言(domain specific modeling language, DSML)是专门用于表达某一清晰界定的特定领域而构建的计算机语言,它为特定的问题领域设计了贴合其语义模型的语法记号和概念抽象,可以用来直接描述该领域内的模型,是编程语言技术与领域特定知识的融合^[16]。目前国内外对于IVCPS的研究正处于起步阶段,虽然对于领域特定语言的研究已经有很多,但是大多是基于代码和编程的领域特定语言研究,很少有基于图形化建模语言SysML^[17](systems modeling language)系统建模语言的领域特定语言研究。同时,现有研究没有针对IVCPS领域特定建模语言的研究,而又因为IVCPS是具有现代机械、电子、通信、计算、控制、交通运输等多领域交叉融合的复杂大系统,在设计IVCPS领域特定建模语言时,很多语言又存在成熟度低、学习成本高等问题,所以针对于IVCPS的研发,需要设计一种领域特定建模语言。

本文根据“V”模型和需求-功能-逻辑-赛博物理架构(requirements-functional-logical-cyber physical architecture, RFLCP)方法,采用SysML建模语言,按照领域特定语言相关文献研究-确定系统建模方法流程-系统层和组件层的建模-建立对象之间的相关关系-SysML元语言拓展的技术路线,分别从IVCPS架构设计流程、IVCPS元语言知识集两部分进

行IVCPS领域特定建模语言的设计,其中IVCPS架构设计流程定义了统一的架构设计流程、明确了流程的成果物、确保了需求追溯的一致性,而元语言知识集则解决了系统层级的复杂建模和组件层异构问题,提供统一的接口描述和一致性语义,帮助设计人员更好地管理和处理系统的复杂性建模,提高系统设计和开发的效率和质量,为未来IVCPS领域特定建模语言的设计和落地应用提供参考和借鉴。

1 IVCPS建模元语言设计方法

IVCPS作为一个复杂大系统,其具备复杂性、异构性、高度耦合性、不确定性等特点,通常由多个不同类型的组件、子系统或部分构成,这些组件具有不同的功能、特性或技术架构,在交互维度存在复杂的相互依赖关系和耦合性,在运行维度存在不确定性和高风险性,往往难以管理和维护。因此,亟须建立IVCPS领域特定建模语言来对IVCPS系统的信息交互、功能描述等进行规范和定义。而领域建模元语言提供了一个共享的语义模型,用于描述和交流特定领域的概念、关系和约束。通过统一的语言和共享的理解,解决IVCPS复杂系统的数量多维庞大等特性。

定义领域特定建模语言(DSML)的方法是要基于成本并考虑其是否易于实施,定义DSML的方法主要有如下两种方式。

(1)定义一门全新的语言。这种方法的优势在于其高度自由度,允许根据领域需求设计灵活而清晰的语法结构。然而,这种自由度也伴随着较高的成本和学习曲线,同时缺乏广泛的工具和库支持。

(2)细化或扩展现有的通用建模语言。这种方式结合了通用性和领域特定性,允许在满足通用建模语言的同时,通过细化或扩展来适应特定领域的需求,可以充分利用通用语言的生态系统和工具支持,同时具备适应不同领域需求的灵活性^[18-19]。

考虑智能汽车赛博物理系统在进行IVCPS建模过程中可能出现语义歧义、工作量大、交流障碍等问题,本文采用第2种方式,即扩展SysML语言的方式进行IVCPS领域特定建模语言设计,从而解决包括领域复杂性、语义表达和模型可扩展性等难点问题。最终实现提高建模语义准确性、促进领域交流和合作的目标,其与传统方法相比具备综合性和可扩展性优势。

在IVCPS领域特定建模语言研究中,首先对智能汽车赛博物理架构组成元素和特性进行分析,通

过增加属性与约束,从人员、需求、所属功能域、组件、用途、活动、交互关系等方面对SysML语言进行拓展;再从需求架构、功能架构和逻辑物理架构3方面进行IVCPS系统的“元语言体系结构”设计。IVCPS系统元语言体系设计一般流程如图1所示。

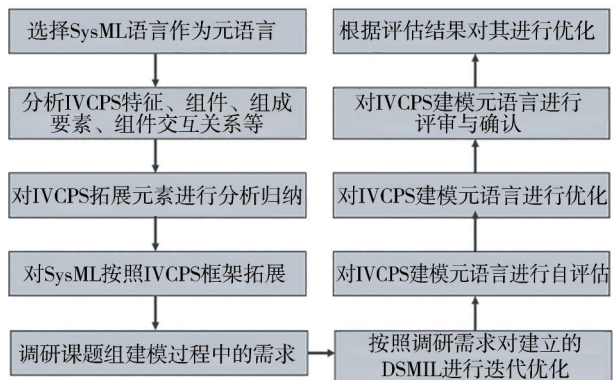


图1 IVCPS建模元语言研究流程

2 IVCPS 架构设计流程

2.1 IVCPS 架构设计流程方法

IVCPS是一个涉及到车辆、通信、控制系统等多个方面的复杂系统,使用特定的语义来表达,可以准确理解和描述架构的各个方面。如果缺乏这些语义层面的特性设计,会导致在描述IVCPS架构时无法完整地表达,会给系统的设计和实现带来风险和挑战。

通过在特定领域语言中定义架构设计流程,可以更好地适应和表达该领域中的概念、需求和约束,使得设计流程更加贴合实际需求。RFLCP是一种系统工程方法,用于从需求出发逐步推导出系统的逻辑和信息-物理结构。在IVCPS的架构设计上,采用RFLCP(requirements, functional, logical architecture, cyber-physical architecture)方法来定义。

RFLCP相对于RFLP的优势主要体现在引入了“Cyber”一词,强调了赛博物理结构在系统设计中的关键作用和智能车辆系统数字化、网络化的需求。RFLCP更加深入地关注了赛博层面,包括车辆间通信、车辆与基础设施的交互,以及与云端的连接。这对于实现智能车辆的实时决策、协同操作和安全性至关重要,它分为如下4个阶段。

Requirements(需求):这一阶段着重于捕获系统的功能和性能需求,以确保系统能够满足用户的期望。

Functional(功能):在此阶段,需求被进一步细化为系统应该执行的具体功能。这些功能可以看作

是系统的任务或操作,用于满足需求。

Logical Architecture(逻辑架构):在逻辑架构阶段,系统的功能被映射到逻辑结构上,以确定如何将这些功能组织在一起以实现系统的基本工作原理。

Cyber Physical Architecture(赛博物理架构):逻辑架构被映射到赛博物理结构上,确定系统的实际硬件、软件组件和赛博组件,以及它们之间的关系。

智能汽车赛博物理系统顶层设计流程是整个IVCPS统筹考虑各层次和各要素、统揽全局的最高层的设计流程,包括业务设计分析、需求分析设计、需求追溯、功能分解、架构定义5个方面,IVCPS架构设计流程图如图2所示。首先,对IVCPS架构设计流程中的领域本体概念进行了界定。然后,对SysML元语言中的概念进行了识别。将IVCPS架构设计流程中的领域本体中识别出的概念映射到SysML中相应的概念。这两个概念之间的映射如表1所示,这个映射表是IVCPS架构设计流程中流程元语言展开的基础。

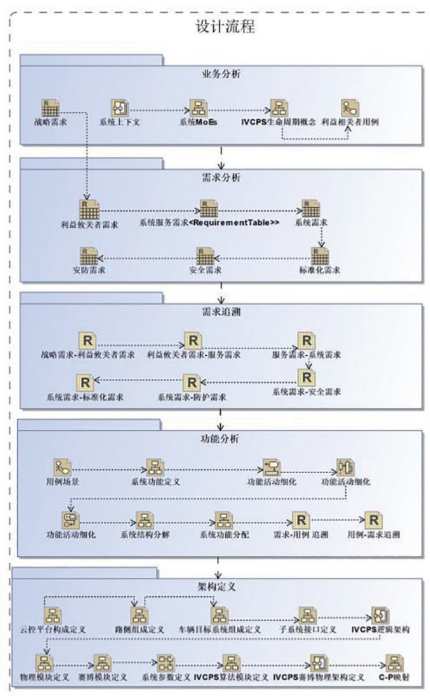


图2 IVCPS 架构设计流程图

表1 IVCPS 架构设计流程领域本体概念与SysML语言概念映射

序号	分类	领域本体概念	SysML概念	关系
1	设计流程	业务分析流程	pkg	属于设计流程
2	设计流程	需求追溯流程	pkg	属于设计流程
3	设计流程	功能分析流程	pkg	属于设计流程
4	设计流程	架构定义流程	pkg	属于设计流程

2.2 IVCPS 架构设计流程通用元素设计

IVCPS 架构设计流程通用元语言主要用于描述 IVCPS 架构设计各个流程通用的元语言定义及其交互关系,其由关系(relation)、事件(incident)、属性(attribute)3个模块组成。《stereotype》来标记这个类是一个“关键组件”,Element是基本单位。

根据 IVCPS 各模块的功能、属性以及模块与模块之间的关系,定义关系模块由 Inclusion Relation (包含关系)、Successive Relationship(连续关系)、Interface Relation(接口关系)、Citation Relation(引用关系)等7种关系组成,关系模块定义图如图3所示。根据 IVCPS 中有关事件的属性和处理方式,定义事件模块由 Cyber incident (赛博事件)、Physical incident(物理事件)、Cyber physical incident(赛博物理事件)组成,事件模块定义图如图4所示。

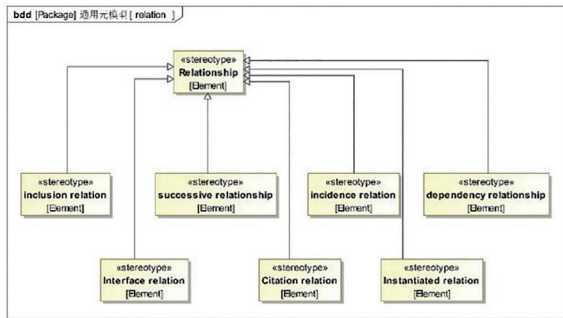


图3 关系模块定义图

IVCPS 中,涉及智能车辆的位置、环境、行为以及路侧基础设施、交管部门的交互等功能,因此定义属性模块由 Service Attribute(服务属性)、Affect

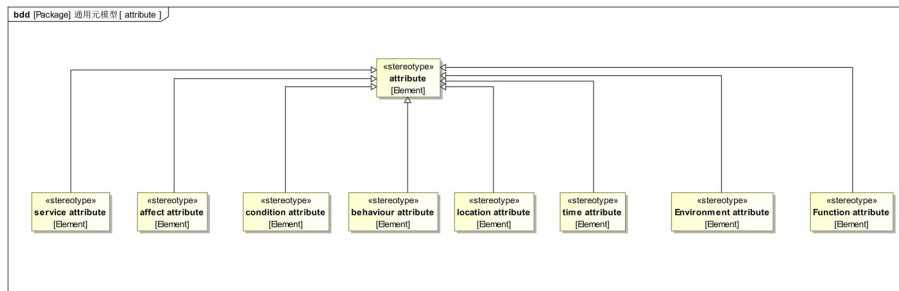


图5 模块定义图

2.4 需求分析流程设计

智能汽车赛博物理系统需求分析设计是一个复杂的过程,涉及到对智能网联汽车、智能交通和赛博物理系统的综合性考量。在需求分析阶段,须深入理解并转化用户的需求,这包括系统应该具备哪些

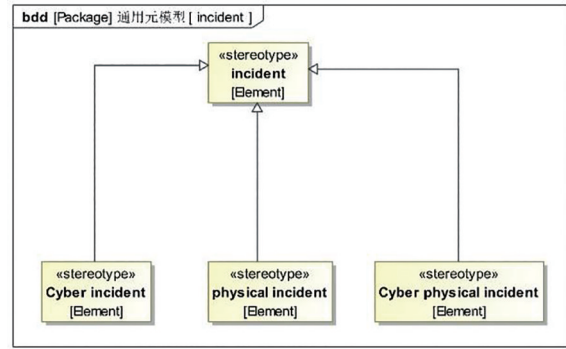


图4 事件模块定义图

Attribute(影响属性)、Condition Attribute(条件属性)等8种属性组成,模块定义图如图5所示。IVCPS 通用元语言领域本体概念与 SysML 概念映射如表2所示。

2.3 业务分析流程设计

业务分析流程的目的是通过确定顶层战略层面需求,分析目标系统的业务与任务目标,同时确定目标系统的系统上下文环境、系统效能测度(MoEs)、系统利益攸关方,具体流程可分解为:战略需求、系统上下文→系统 MoES→IVCPS 生命周期概念→利益相关者用例,如图6所示。

业务分析元语言对 IVCPS 业务分析的过程建模中广泛应用的、体现 IVCPS 业务分析特征的语言要素进行定义,业务分析元语言由 Use(用途)、According(依据)、Process(过程阶段)3类组成,IVCPS 业务分析领域本体概念与 SysML 概念映射表如表3所示,IVCPS 业务分析元语言详细定义如图7所示。

功能、如何操作等。IVCPS 7S 理论^[4] (strategy-stakeholder-service-system-safety-security-standard, 战略-利益攸关者-服务-系统-安全-安防-标准化)提供了7个视角,根据需求种类和层级的不同,将需求分析设计分解为以下流程:利益攸关者需求→系

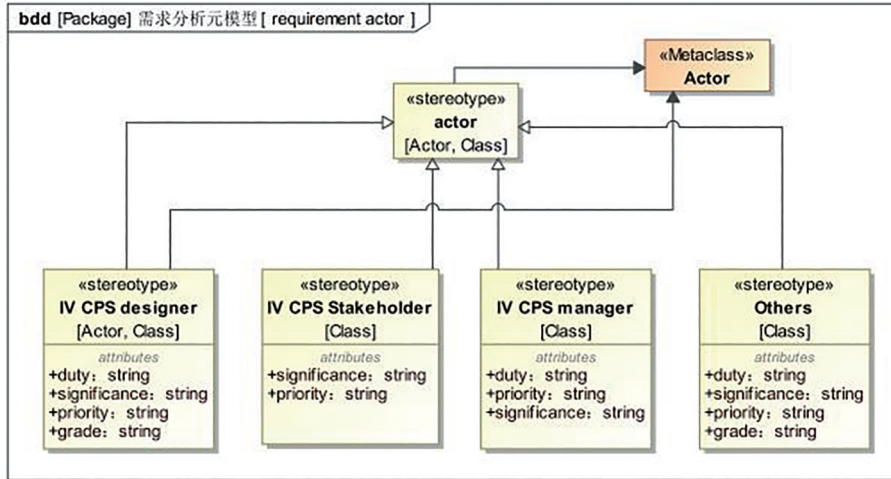


图9 需求参与者元语言

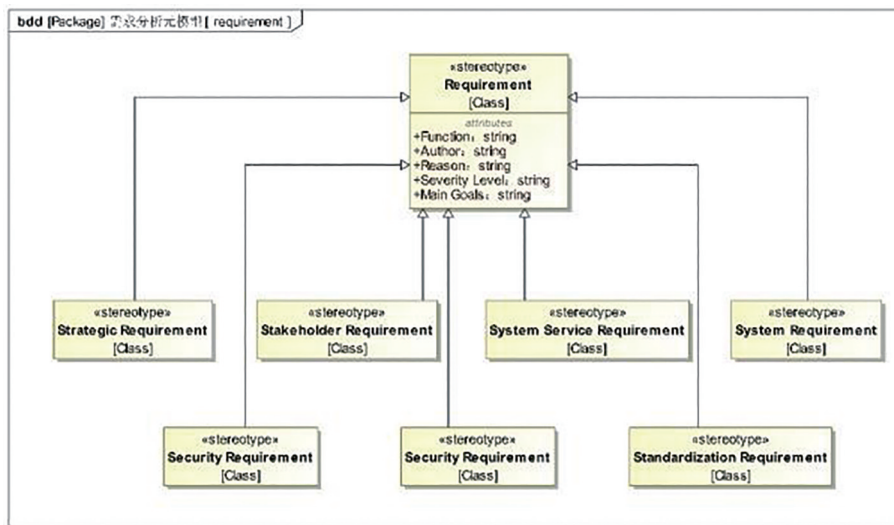


图10 需求元语言

表4 IVCPS需求分析元语言领域本体概念与SysML概念映射

序号	分类	领域本体概念	SysML概念	关系
1	元语言拓展	IVCPS designer	actor	继承 actor
2	元语言拓展	IVCPS stakeholder	actor	继承 actor
3	元语言拓展	IVCPS manager	actor	继承 actor
4	元语言拓展	Others	actor	继承 actor
5	元语言拓展	strategic requirement	requirement	继承 Requirement
6	元语言拓展	stakeholder requirement	requirement	继承 Requirement
7	元语言拓展	system serice requirement	requirement	继承 Requirement
8	元语言拓展	security requirement	requirement	继承 Requirement
9	元语言拓展	system requirement	requirement	继承 Requirement
10	元语言拓展	standardization requirement	requirement	继承 Requirement

口和物理接口,赛博接口为赛博空间中进行信息流交互的接口,物理接口则为物理设备数据交互的接

口,逻辑流分为物质流、能量流和信息流。接口定义细节如图15所示,逻辑流定义细节如图16所示,架

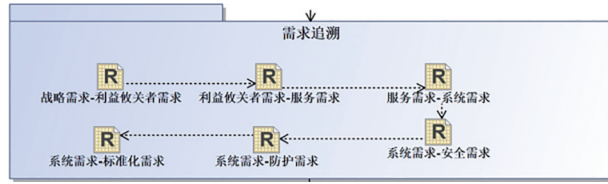


图11 IVCPS需求追溯流程

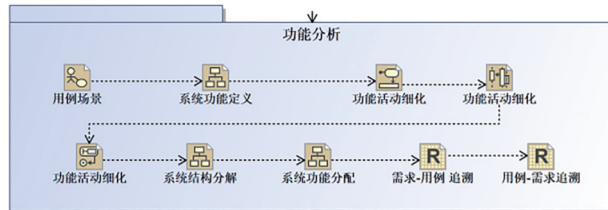


图12 IVCPS功能分析流程

表5 IVCPS功能定义领域本体概念与SysML概念映射

序号	分类	领域本体概念	SysML概念	关系
1	元语言拓展	功能域	Block	由 Activity 构成
2	元语言拓展	功能基	actor	继承功能域
3	元语言拓展	流	item flow	依赖功能域

构定义元语言领域本体概念与 SysML 概念映射表(部分)如表6所示。

3 IVCPS元语言对象集研究

上文描述了IVCPS顶层设计的流程、各个流程的元语言元素定义,但是在实际的顶层设计建模过程中只有流程定义是不够的,IVCPS建模元素复杂、繁多,如果在实施过程中再对每个元素进行建模则花费时间长,且模型要素不能进行复用,而且模型有重复定义的风险,因此,本节则从IVCPS领域要素建

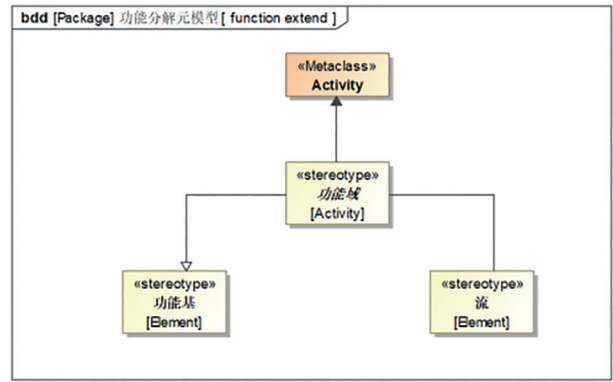


图13 功能分解元语言

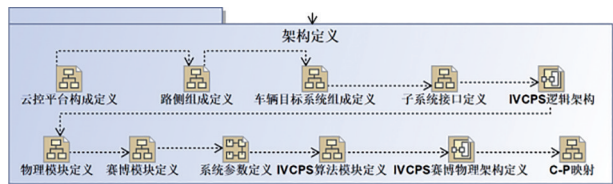


图14 IVCPS架构定义流程

模入手,定义IVCPS领域特征元素、元素关系、元素属性等,形成IVCPS元语言对象集,从而解决建模周期长、复用难等问题。

本研究将IVCPS元语言对象集分为两个层次,即系统层和组件层,系统层从赛博层、物理层和赛博物理融合层进行定义,组件层从原子组件和复合组件进行定义。

3.1 IVCPS系统层元语言研究

智能汽车赛博物理系统层元语言是面向IVCPS系统层需求并解决系统层问题的特定语言。它提供了一组抽象、符号和规则,以描述智能汽车系统层次中的概念、语义和行为。IVCPS系统层分为赛博层、物理层以及赛博物理融合层3个部分,IVCPS系统层

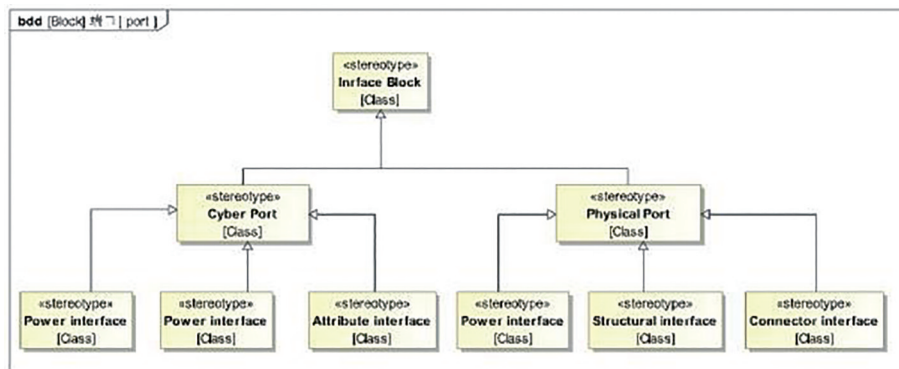


图15 端口模块定义图

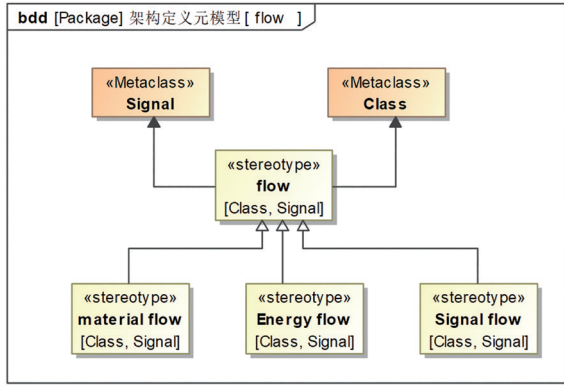


图 16 流模块定义图

表 6 IVCPS 架构定义元语言领域本体概念与 SysML 概念映射

序号	分类	领域本体概念	SysML 概念	关系
1	元语言拓展	Cyber Port	Proxy Port	继承 Interface Block
3	元语言拓展	flow	Item flow	由信号和类构成
5	元语言拓展	Attribute interface	Proxy Port	继承 Cyber Port
6	元语言拓展	Power interface	Proxy Port	继承 Physical Port
11	元语言拓展	Signal flow	Item flow	继承 flow

领域本体概念与 SysML 概念映射(部分)如表 7 所示。系统层中涉及的元素属性如表 8 所示。

表 7 IVCPS 系统层领域本体概念与 SysML 概念映射

序号	分类	领域本体概念	SysML 概念	关系
1	元语言知识集	赛博空间	Block	属于系统层
2	元语言知识集	云平台节点	Block	赛博空间组成部分
3	元语言知识集	路侧模型	Block	路侧节点组成部分
5	元语言知识集	路侧设备	Block	物理实体组成部分
6	元语言知识集	光承载网	Block	继承车外通信设备
7	元语言知识集	云平台实体	Block	物理实体组成部分
8	元语言知识集	云控基础平台	Block	云控平台组成部分
9	元语言知识集	车辆实体	Block	物理实体组成部分
10	元语言知识集	中央网关	Block	车辆实体组成部分
11	元语言知识集	车辆预警	Activity	继承赛博物理融合

表 8 系统层元素属性列表

序号	标记值	含义
1	Concept	用于解释该块中模型的概念或理念
2	Expression	表示块中的数学表达式或计算式
3	Characteristic	用于表示块的特性或属性
4	Name	用于给块命名
5	Function	指块中的一个功能或行为
6	Category	用于将块进行分组
7	format	它被用于表示块的格式或类型
8	range	用于表示块的值范围
9	ID	用来标识一个原子组件的唯一的标识符
10	Relationship	用来描述块之间的连接和依赖关系
11	Computational power	是描述信息数据处理能力的一种指标
12	network protocol	是为进行网络中的数据交换而建立的规则、标准或约定的集合

3.1.1 赛博层元语言设计

赛博空间在 CPS 中的主要作用是作为一个信息处理和决策平台,它能够收集、传输、存储和处理来自各个传感器和执行器的数据,并根据这些数据决策和控制。赛博空间主要由云平台节点、路侧节点、通信节点、车辆节点、高精度地图节点组成,以上节点都使用其模型进行数据交互从

而提供赛博空间的服务,其详细定义如图 17 所示。

3.1.2 物理层元语言设计

在 CPS 中,物理实体通过感知环境提供数据,物理实体是 CPS 中控制指令的参与者。IVCPS 物理实体由车辆实体、路侧设备、云平台实体和通信设备构成,其详细的组成与拆分如图 18 所示。

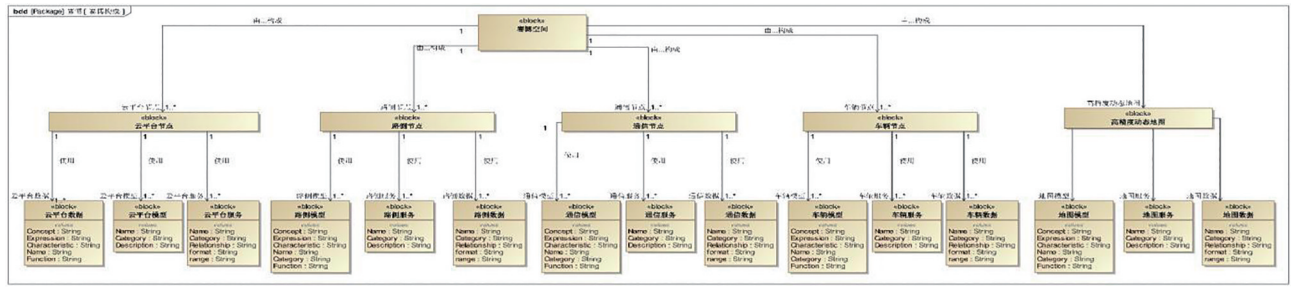


图 17 赛博层元语言定义

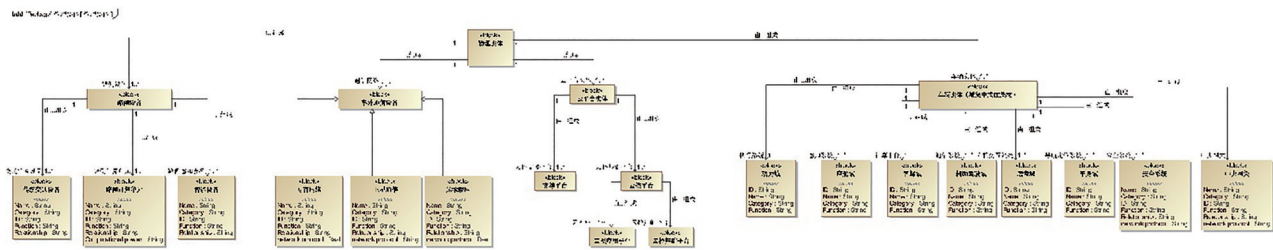


图 18 物理层元语言定义

3.1.3 赛博物理融合层元语言设计

赛博物理融合层旨在定义由赛博层与物理层交互融合实现的IVCPS功能,本研究选取了目前业界

认可的5大功能进行定义,包括:自动驾驶功能、实时导航与车辆控制、车辆远程监控与诊断、交通流量优化和车辆预警,其详细定义如图19所示。

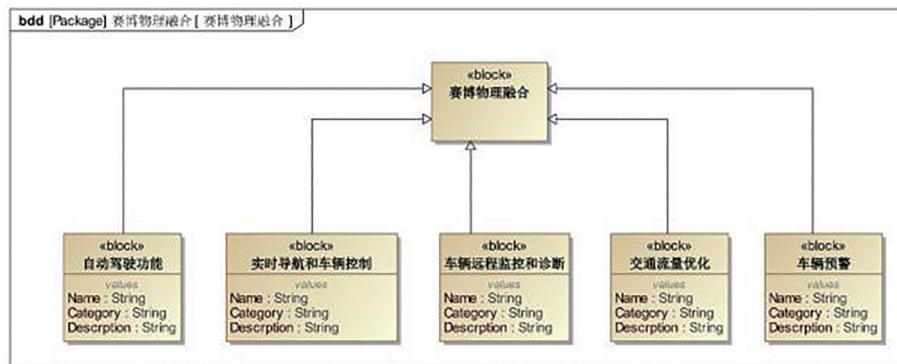


图 19 赛博物理融合元语言架构

3.2 IVCPS 组件层元语言研究

组件指构成系统的基本元素,具有独立属性、组成结构和行为方法,IVCPS组件包括原子组件和复合组件,其中原子组件为实现某一单一功能的单一组件,按照组件在不同层运行的不同,将其分为Cyber组件、P2C组件、C2P组件和Physical组件,将需要多个组件复合工作的组件称为复合组件,其详细定义如图20所示。组件层中涉及的组件元素属性如表9所示。组件层的领域本体与SysML映射概念的映射如表10所示。

4 IVCPS元语言与SysML定量对比

由于智能汽车信息物理系统领域内,可以与本研究成果物类似且可以进行对比的IVCPS语言很少,且类似语言的侧重点有所不同,所以本文将IVCPS元语言与母体语言—SysML语言进行定量对比,表11显示了IVCPS架构设计流程和IVCPS对象元语言集在构造型、流程、属性、模板4个方面的对比,IVCPS元语言相比SysML语言数量上的拓展,总

表9 组件层标记值概念

序号	标记值	概念
1	Allocation Status	分配状态,用于描述一个对象或组件在系统中的分配情况
2	Validation Status	验证状态,主要用于描述模型的验证情况
3	Hosted Status	承载状态,主要用于描述一个模型元素是否被其他模型元素所承载
4	ID	用来标识一个原子组件的唯一的标识符
5	Function	指系统的性能,包括系统的吞吐量、响应时间、资源利用率等性能指标
6	Performance	指系统的性能,包括系统的吞吐量、响应时间、资源利用率等性能指标
7	Form	指系统的一种形态或结构,它用于描述系统的物理结构和组织方式
8	Input/Output	Input 和 Output 被用来描述系统中的数据流动
9	Lifetime	用来描述系统中组件的生命周期

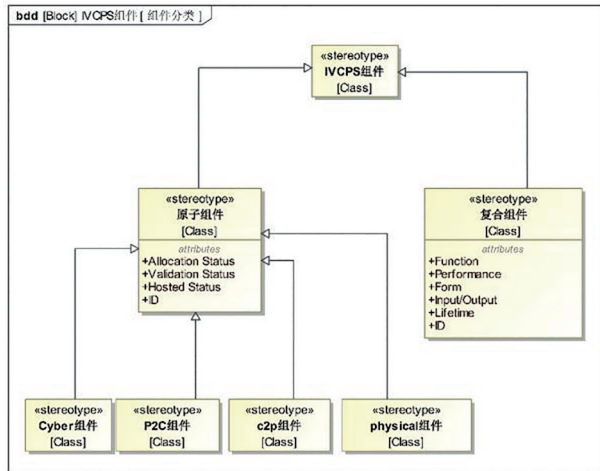


图20 IVCPS组成

表10 组件层的领域本体与SysML映射概念的映射表

分类	领域本体	SysML概念	关系
元语言知识集	IVCPS 组件	Class	组件层组成部分
元语言知识集	原子组件	Class	继承 IVCPS 组件
元语言知识集	Cyber 组件	Class	继承原子组件
元语言知识集	P2C 组件	Class	继承原子组件
元语言知识集	C2P 组件	Class	继承原子组件
元语言知识集	物理组件	Class	继承原子组件
元语言知识集	复合组件	Class	继承 IVCPS 组件

计拓展 127 个构造型、34 个流程、30 个元素属性和 37 个模板,对比结果表明 IVCPS 元语言对 SysML 语言进行了丰富的拓展,能够适应 IVCPS 领域架构设计

建模的需要。

表11 与SysML语言定量对比表

对比方面		构造型增加数	流程增加数	属性增加数	模板增加数
IVCPS 架构设计流程	流程通用元素	21	0	0	0
	业务分析流程	17	4	0	5
	需求分析流程	13	6	9	6
	需求追溯流程	0	6	0	6
	功能分析流程	4	8	0	9
IVCPS 对象元语言集	IVCPS 系统层	50	0	12	0
	IVCPS 组件层	7	0	9	0
总计		127	34	30	37

5 IVCPS 元语言应用案例

本节选取了智能汽车信息物理系统典型应用场景——基于云控的快速公交系统(bus rapid transit, BRT)车辆控制场景,主要针对云控系统下 BRT 公交车的自适应控制策略,研究基于车云协同系统的车速群控和车间距保持场景。本文将从实际 IVCPS 场景的设计流程、实际业务建模、需求建模、功能建模、架构定义 5 个角度分析 BRT 公交车的自适应控制场景建模对 IVCPS 元语言定义要素的复用情况,图 21~图 24 右上角对复用的流程模板和未复用的流程模板进行分类和标识。

BRT 车辆控制系统设计流程参考 IVCPS 建模元

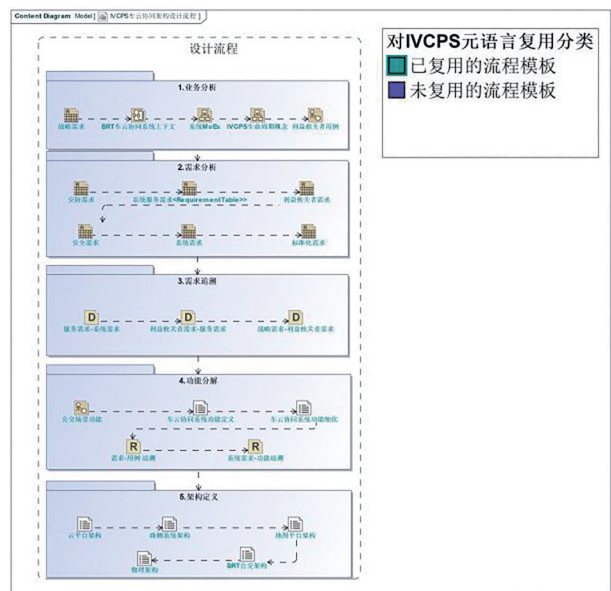


图21 BRT 场景架构设计流程 IVCPS 元语言复用图

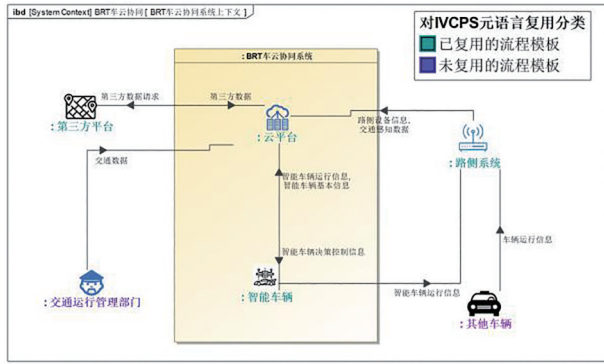


图22 BRT场景系统上下文IVCPS元语言复用图

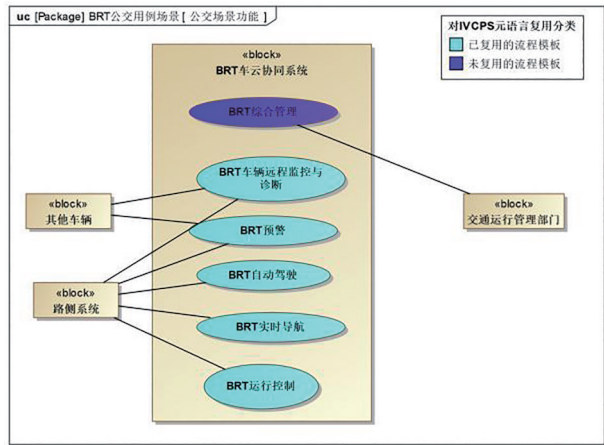


图23 BRT场景功能分析IVCPS元语言复用图

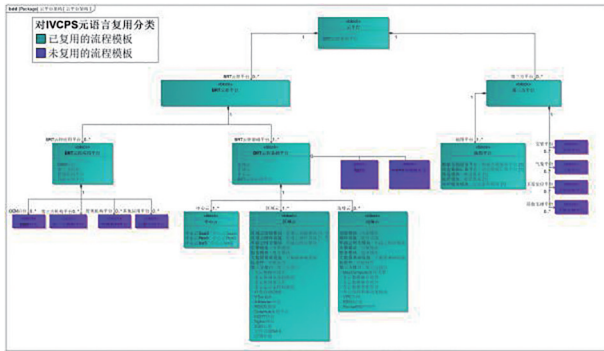


图24 BRT场景架构分析IVCPS元语言复用图

语言设计定义,根据车云协同系统特性进行裁剪和迭代设计,包括业务设计分析、需求分析设计、需求追溯、功能分解、架构定义5个方面,如图21所示。业务分析、需求分析与功能定义部分完全采用IVCPS元语言的流程设计规定,而架构定义流程则基于IVCPS元语言流程设计进行了部分裁剪,裁剪掉了赛博物理架构定义、物理模块定义、算法模块定义等内容。

图22展示了BRT车辆控制场景下定义的系统上下文业务分析,系统上下文业务运行描述如下:智能车辆向云控平台发送车辆运行情况数据,根据车速规划序列与车端感知设备生成车速并反馈规划指令执行情况数据,云控平台根据车辆运行数据反馈、其他车辆运行数据反馈、路侧设施状态数据反馈、交通运行管理部门指令以及高精度地图平台提供的地图数据实时更新车辆行驶策略,保证智能车辆正常平稳运行。

图23展示了BRT车辆控制场景下定义的系统顶层功能分析流程,顶层功能主要有BRT综合管理、车辆远程监测与诊断、车辆预警、自动驾驶、实时导航和运行控制5类。

图24展示了BRT车辆控制场景下定义的系统云平台架构分析流程,云控平台的组成拆解为云控基础平台(区域云)、云控基础平台(边缘云)和云控应用平台。

综上所述,在实际的车路云一体化系统应用场景—BRT车辆控制场景下,本研究分别对其整体的设计流程、系统上下文业务场景分析、系统顶层功能定义和架构定义的部分过程进行了分析,分析结果显示:典型IVCPS场景架构设计中对IVCPS元语言的元素复用率均在比较高的水平,图21~图24分别显示该场景下模型对IVCPS元语言的复用率分别为66%、83%、83%和47%,IVCPS元语言不仅能大大减轻建模的工作量而且能提升一定的建模效率。

6 结论

本文设计了针对IVCPS的领域特定建模语言。这种语言不仅考虑了IVCPS系统的复杂性和异构性,还借助于V模型和RFLCP架构方法,采用SysML建模语言,通过顶层设计流程和元语言知识集构建了一个完整的IVCPS领域特定建模语言框架,通过BRT案例模型复用程度的分析表明:IVCPS元语言在语言丰富、模型可拓展、可复用等方面均表现良好的效果。研究内容和创新点主要表现在如下几个方面。

(1)IVCPS建模元语言通过定义IVCPS系统设计流程和流程成果物,通过统一的设计流程、明确的流程成果物、需求全过程追溯和连贯性,以及模型驱动设计等方面,使得系统设计过程更加有序、可控和可追溯,提高了系统设计的质量和效率。

(2)解决了智能汽车赛博物理系统系统层级的复杂建模问题,进行多层次建模支持、组合和复用能力、系统级可视化建模和分析,能够更好地管理和处理系统的复杂性,提高系统设计和开发的效率和质量。

(3)IVCPS建模元语言解决了智能汽车赛博物理系统组件的异构性问题,通过提供语义一致性、接口描述和集成能力以及可扩展性和灵活性,实现了对异构组件的统一建模和集成,从而促进了智能汽车赛博物理系统的开发和设计过程。

(4)本研究提出的IVCPS元语言在语言丰富、模型可拓展、可复用等方面均表现出良好的效果。首先,经过与母体语言SysML语言在构造型、流程、属性、模板等4个方面进行定量对比,从BRT控制场景的设计流程、实际业务建模、需求建模、功能建模4个角度分析IVCPS元语言要素的复用情况,分析结果表明:IVCPS元语言在语言丰富、模型可拓展、可复用等方面均表现出良好的效果,IVCPS元语言在促进建模效率、建模一致性方面有一定的实用价值。目前定义的IVCPS建模元语言特性无法方便、快捷、大规模地应用于其他案例与建模中,未来研究将进一步把IVCPS设计流程定义与元语言集封装成IVCPS语言包,将其转化成建模软件能够识别的基于SysML语言的Profile拓展包形式,并且导入到其他建模、仿真软件中进行调试,进行场景案例应用与优化。Profile可以对定义的IVCPS领域元语言要素进行封装并可以在其他软件和模型创建中进行调用。

参考文献

- [1] 李克强.智能网联汽车信息物理系统参考架构1.0发布[J].智能网联汽车,2019(6):4.DOI:CNKI:SUN:ZNWL.0.2019-06-019.
- [2] 王同军.中国智能高铁发展战略研究[J].中国铁路,2019(1):9-14.
WANG T J. Study on the development strategy of China intelligent high speed railway[J]. China Railway, 2019(1):9-14.
- [3] 夏元清,闫策,王笑京,等.智能交通赛博物理融合云控制系统[J].自动化学报,2019,45(1):132-142.
XIA Y Q, YAN C, WANG X J, et al. Intelligent transportation cyber-physical cloud control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2019,45(1):132-142.
- [4] CHEN C, LIU B, WAN S, et al. An edge traffic flow detection scheme based on deep learning in an intelligent transportation system [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021,22(3):1840-1852.
- [5] HATZIVASILIS G, FYSARAKIS K, IOANNIDIS S, et al. SPD-Safe: secure administration of railway intelligent transportation systems[J]. Electronics, 2021,10(1):92.
- [6] ZHAO T, HUANG X. Design and implementation of deepdsl: a DSL for deep learning [J]. Computer Languages Systems and Structures, 2018:S1477842418300319.
- [7] 胡轶涵,杜金莲,苏航,等.面向不可移动文物自然灾害风险图生成的领域特定语言[J].计算机应用,2023:1-8.
HU Y H, DU J L, SU H, et al. Domain specific language for natural disaster risk map generation of immovable cultural relics [J]. Journal of Computer Applications, 2023:1-8.
- [8] KHAMIS M A, GOMAA W, et al. Domain specific languages for machine learning[J]. GPCE, 2016,56(2):62-69.
- [9] KAI S, LIER A, REICHE O, et al. A high-performance image processing DSL for heterogeneous architectures [C]. European Lisp Symposium on European Lisp Symposium, 2016.
- [10] SUJEETH A K, LEE H J, BROWN K J, et al. OptiML: an implicitly parallel domain-specific language for machine learning [C].International Conference on Machine Learning.DBLP, 2011.
- [11] KELLY S, TOLVANEN J P. Collaborative modelling and metamodelling with MetaEdit+[C].2021 ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems Companion (MODELS-C), 2021:27-34.
- [12] KWAK J H, PIAO S, KIM W Y. Development of the media art contents authoring tool using eclipse-based GMF technique [J]. ACM, 2010:123.
- [13] DANTRA R, GRUNDY J C, HOSKING J G. A domain-specific visual language for report writing using Microsoft DSL tools [C]. IEEE Symposium on Visual Languages & Human-centric Computing.IEEE, 2009.
- [14] ABDULLAH M S, PAIGE R, KIMBLE C, et al. A UML profile for knowledge-based systems modelling[C].SERA, 2007.
- [15] 张天目,安晓强,孙志彬,等.基于SysML的系统架构设计与建模方法[J].飞机设计,2023,43(4):46-51.
ZHANG T M, AN X Q, SUN Z B, et al. The system architecture design and modeling method based on SysML [J]. Aircraft Design, 2023,43(4):46-51.
- [16] 徐天啸,梁浩,赵静,等.基于MBSE的智能汽车信息物理系统建模方法[J].汽车文摘,2023(10):1-16.
XU T X, LIANG H, ZHAO J, et al. Modeling method of intelligent vehicle information physical system based on MBSE [J]. Automotive Digest, 2023(10):1-16.
- [17] DELLIGATTIL. SysML精粹[M].北京:机械工业出版社,2015.
DELLIGATTIL. SysML distilled[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2015.
- [18] NEWTON R, KO T. Experience report: embedded, parallel computer-vision with a functionaldsl [C].Acm Sigplan International Conference on Functional Programming. ACM, 2009.
- [19] KURTEV I, BEZIVIN J, JOUAULT F, et al. Model-based DSL frameworks [C].Companion to the 21th Annual ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications, OOPSLA 2006, October 22-26, 2006, Portland, Oregon, USA.2006.