

基于 UML 的面向 C4ISR 能力需求分析的对象建模语言

王 聪¹ 王智学² 徐友云¹

(解放军理工大学通信工程学院 南京 210007)¹ (解放军理工大学指挥信息系统学院 南京 210007)²

摘 要 军事电子信息系统是一种典型的大规模复杂系统,如何获取这种复杂系统的需求仍然是一个难题。提出了一种新的能力需求分析方法。该方法从领域概念化入手,构造了 C4ISR 能力概念化的元本体;利用 UML 元层扩展机制,提出了一种用于定义 C4ISR 能力概念的对象建模语言,并给出了该语言的抽象语法和详细语法,利用 OWL DL 定义了形式语义。最后以一个 C4ISR 体系结构仿真建模为案例,说明了该方法的有效性和可用性。

关键词 C4ISR 能力,领域特定建模,UML,需求工程

中图法分类号 TP311.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.2.033

UML-based C4ISR Capability Requirement Modeling Language

WANG Cong¹ WANG Zhi-xue² XU You-yun¹

(Institute of Communication Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)¹

(Institute of Command Information System, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)²

Abstract This paper discussed the domain conceptualization, suggested a meta-ontology for C4ISR capability conceptualization under a domain-specific modeling language, which can be defined to describe the C4ISR capability concepts. The method is elaborated upon the multi-leveled domain reusable object modeling technology by taking advantage of the UML extension mechanism. In the paper, the abstract syntax, concrete syntax and formal semantic of the modeling language were discussed. Finally, a case study of C4ISR architectural simulation modeling was provided to demonstrate the availability and applicability of the method.

Keywords C4ISR capability, Domain-specific modeling, UML, Requirements engineering

1 研究背景

C4ISR (Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Resonance)能力是指利用 C4ISR 系统执行一定使命任务时所应具备的基本素质。C4ISR 能力需求是指 C4ISR 系统为有效完成作战使命、任务而对其应具有的系统能力的基本要求,它是与作战使命任务紧密结合的综合能力要求。分析能力需求的目的是为了分析实现或满足能力需求的各种途径,具体地说就是分析各作战节点、实体的能力配置情况,形成不同的能力实现方案,为最终系统建设提供依据。如何科学分析、论证以及合理规划 C4ISR 能力,已成为发达国家发展战略中的一个关注热点。

C4ISR 能力需求十分复杂,一般采用体系结构分析方法捕捉上层需求,以确保系统之间可以互操作,发挥系统的总体效能,比如美国《国防部体系结构框架》^[1] (Department of Defense Architecture Framework, DoDAF) 和英国《国防部体系结构框架》^[2] (Ministry Of Defence Architecture Framework, MODAF) 等。西方国防工业界提出了基于能力的规划方法

(Capability-based Planning, CBP)^[3],这对国防装备系统的规划及需求生成过程产生了很大影响。美国国防部在 2004 年已制定了新的需求获取过程(CJCSI 3170.01D),以“联合能力集成与开发系统”取代了传统的面向单个威胁服务的“需求生成过程”,需求过程也从过去的自下而上变为自上而下。加拿大军方早在 2000 年就开始在国防武器装备采购中采用了基于能力的规划,颁布了“加军战略能力规划”。

近年来学术界提出了能力工程(Capability Engineering)的思想,将复杂系统的分析焦点放在系统的全面能力集上。不过,能力工程仅仅给出了一种认识和分析复杂系统的思维观和方法论。尽管这种方法论已经普遍应用于西方国防工业界,但目前尚没有形成完整的科学方法用以指导实践工作。

此外,CBP 越来越多地采用了模型驱动工程(Model-Driven Engineering, MDE)思想方法。比如,DoDAF 和 MODAF 强调模型驱动的体系结构开发过程,采用各种视图建立的系统模型来表达不同利益相关方的关注点,为系统评估分析、报告生成以及维护等提供良好的手段。国际对象管理组织(OMG)专门研究并初步形成了针对各种体系结构框

到稿日期:2014-03-25 返修日期:2014-06-04 本文受国家“八六三”高技术研究发展计划基金(2007AA01Z126),国家自然科学基金(61273210)资助。

王 聪(1975—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为指挥自动化系统理论与技术、软件工程,E-mail:dolphin6488@163.com;王智学(1961—),男,硕士,教授,博士生导师,主要研究方向为指挥自动化系统理论与技术、软件工程;徐友云(1966—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为移动通信。

架的统一建模方法^[47],以减少不同实现方法、工具以及语义等对体系结构开发造成的影响。此外,OMG 还在逐步建立 C4ISR 领域模型,如作战管理系统中的警报管理服务^[5],为 C4ISR 领域知识复用奠定基础。

在需求建模领域,国内也开展了相关的研究,陆汝钊、金芝等以企业信息系统为研究背景,以企业本体和领域本体作为需求获取过程的基本线索,引导领域用户全面描述现实系统^[6,7]。此后,他们又在原有的 PROMIS 技术基础上提出了知件(Knowware)的概念,形成了 PROMIS/KW * * 的应用系统开发和部署框架^[8]。李明树等提出了用户主导的需求获取方法^[9,10],根据用户特征,为用户需求定义提供个性化的领域知识支持。梅宏等提出的面向特征的领域模型及建模过程也是一种基于模型的方法^[11,12],该方法对领域特征模型的组织框架进行了统一抽象的描述。杨芙清等提出了网构软件(Internetware)技术体系^[13],通过模型驱动的方式支持网构软件基本实体和结构化协同的高效开发以及遗产系统向网构软件的半自动转换。吕建等提出了一个面向网构软件的环境驱动结构模型^[14]。李德毅等提出了基于本体元建模的理论与方法,建立了描述网络化软件需求的统一元模型框架 RGPS,用来指导网络化软件系统的需求获取、建模、验证与管理^[15,16]。文献[17]提出系统能力-功能-性能的 SCFP 模型,研究了基于该模型的系统能力集成与开发方法。文献[18]介绍了一种基于能力的指挥信息系统需求获取方法。文献[19]提出一种基于特征组合的软件需求建模方法。解放军理工大学提出了基于业务本体的需求获取方法(MEISRDL1.0)^[20,21],开发了相关工具(MEISRET1.0),并以能力工程为指导,提出了能力需求的概念,在理论方法上有所突破^[22,23]。

然而,基于能力的分析规划存在一些难以逾越的技术障碍:(1)能力概念的描述、分析和理解受制于复杂、易变的C4ISR业务背景知识,因此在分析中难以捕捉准确的概念,建立形式化模型;(2)现有的体系结构框架方法(如MOD AF、DOD AF等)缺乏应用领域概念支撑,不能有效指导领域分析和概念建模;(3)现有的系统建模方法(如UML、IDEF等)建模语义过于抽象,领域适用性较弱,模型建立后难以验证其有效性和正确性。

本文提出一种基于领域知识复用的 C4ISR 能力需求建模方法,由领域专家定义领域特定建模语言,使得军事人员可以运用熟悉的概念来准确定义 C4ISR 能力需求。文章组织如下:第 2 节从 C4ISR 能力概念化入手,定义了 C4ISR 能力的元本体,在能力元本体的基础上定义一种面向 C4ISR 系统能力需求分析的对象建模语言,并讨论了能力需求建模过程;第 3 节以一个假想的联合火力打击行动方案仿真建模示例说明了该语言在 C4ISR 体系结构分析和设计中的作用;最后总结本文的主要工作。

2 面向 C4ISR 系统能力需求分析的对象建模语言

2.1 概念化元本体

目前,较为流行的 C4ISR 能力概念描述方法是將体系结构标准框架中的元概念作为概念描述框架。本文主要参考英国国防部的 MODAF 标准,在 MODAF Meta Model(M3)的基础上提取与 C4ISR 能力相关的抽象概念,形成一个 C4ISR 能力元概念的层次结构,即 C4ISR 能力概念化的元本体;以

UML 为基础,通过元层扩展机制,定义领域建模语言的抽象语法与详细语法。通过 OWL DL 定义语言的形式语义。

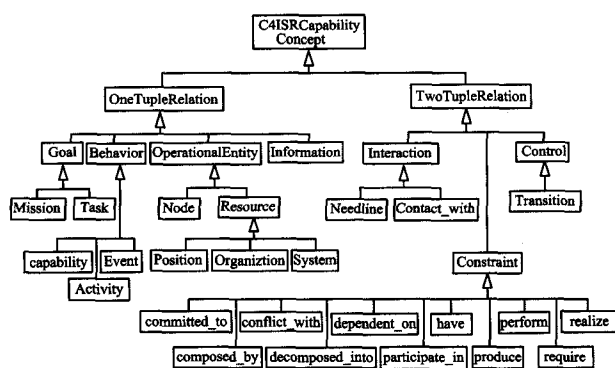


表 1 C4ISR 能力元概念

名称	英文名	含义
活动	Activity	完成使命任务须开展的活动。
能力	Capability	执行特定使命和任务,实现其目标时所表现出的功能和效能。
事件	Event	在任务执行过程中发生的、引起事态变化的行为结果。
目标	Goal	军事组织的业务目标,可以细化为使命和任务。
信息	Information	包含在节点间需求线或资源间交互中的交换信息。
使命	Mission	针对某项使命须完成的目标,可以根据使命对任务进行分解。
节点	Node	军事组织的作战关系网络中的节点,也是资源的汇聚点。
机构	Organization	军事组织中执行任务的机构类资源。
岗位	Position	军事组织中执行任务的人员类资源。
资源	Resource	拥有能力的实体,是节点中为完成使命任务而开展活动的主体。
系统	System	军事组织中执行任务的武器平台、系统或自动化设备类资源。
任务	Task	某项具体任务须完成的目标。

表 2 C4ISR 能力元关系

名称	英文名	含义
完成	Committed_to	能力与目标之间的完成关系,指明能力可以完成的目标。
组成	Composed_by	资源之间的组成关系,指明某资源由其它资源所构成。
冲突	Conflict_with	目标之间的冲突关系,指明某目标的实现将抑制另一目标的实现。
联络	Contact_with	资源之间信息交互的有向线,指明两个资源之间的信息交流。
分解	Decomposed_into	目标之间的分解关系,指明目标可以分为子目标。
依赖	Dependent_on	能力之间的依赖关系,指明某能力的施展依赖于其它能力。
拥有	Have	节点与能力之间的拥有关系,指明节点所拥有的能力。
具备	Featured_by	资源与能力之间的具备关系,通过能力实例定义资源所具备的具体能力。
需求线	Needline	节点之间信息交互的有向线,指明一个节点向另一个节点提供信息。
参与	Participate_in	资源与活动之间的参与关系,指明参与活动的具体资源。
执行	Perform	节点与活动之间的执行关系,指明节点所开展的活动。
产生	Produce	活动与事件之间的产生关系,指明活动所产生的事件。
实现	Realize	活动与目标之间的实现关系,指明活动所实现的目标。
需要	Require	活动与能力之间的需求关系,指明活动开展所需要的能力。
变迁	Transition	活动之间的变迁关系,指明系统执行由一个活动向另一个活动的转换。

根据 C4ISR 系统体系结构框架及相关军事应用术语,可以选取能力、使命、任务、目标、节点、实体、活动、信息等概念进行分析,建立顶层概念框架,形成领域概念化元本体,如图 1 所示。

从 C4ISR 体系结构顶层抽象角度来看,C4ISR 能力概念分为一元关系和二元关系。一元关系定义能力相关的元概念,分为目标、行为、操作实体和信息 4 大类,每一类又可以继续细分,具体定义如表 1 所列;二元关系(元关系)定义元概念上的关系,分为交互、约束和控制 3 大类,每一类也可以进一步细分,具体如表 2 所列。

2.2 抽象语法

C4ISR 能力元本体实际上给出了一种 C4ISR 能力需求建模语言。图 2 所示的元模型给出了面向 C4ISR 能力分析的对象建模语言(Object Modeling Language for C4ISR Capability Requirement Analysis)的抽象语法。

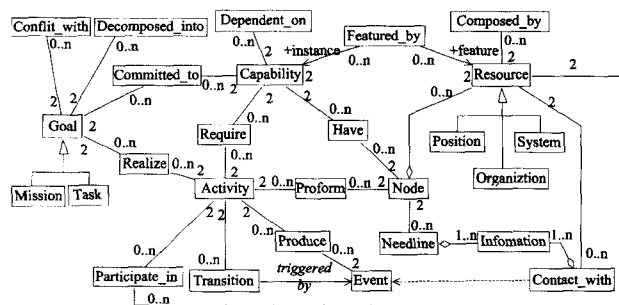


图 2 C4ISR 能力建模语言的元模型

2.2.1 目标(Goal)

目标图元的元类型是《Goal》,扩展 UML2.1 元概念层的 UseCase 元概念。由于作战任务都是围绕着作战目标而设定的,每个任务都拥有至少一个目标。我们借鉴 KAOS 方法的思想,通过任务分析目标,再以目标为线索分析实现作战目标需要的作战节点、开展的作战活动、使用的作战资源等。

2.2.2 使命任务(Mission and Task)

使命任务的作用是用用户从业务角度出发,描述和分析作战领域应解决的根本问题,它是作战需求分析的根本点和出发点。作战任务可以看作是作战使命的具体组成部分,使命围绕战略层的目标而设定,任务则是围绕战术或操作层面而设定。因此作战使命的完成需要多个作战任务之间协作,它们构成一个自上而下的分解树。模型主要包括使命类和任务类,图元的元类型分别是《Mission》和《Task》,扩展元概念《Goal》。

2.2.3 资源(Resource)

资源描述参与使命/任务的实体,其图元元类型是《Resource》,扩展了 UML2.1 元概念 Class。资源分为 3 类,Position、Organization 和 System,都有组成关系《Composed_by》,具备《Featured_by》能力,且参与《Participate_in》活动。

2.2.4 作战节点(Node)

作战节点作为实现作战任务的基本作战单元,能够为相

关作战目标的实现提供一组潜在的必要功能,其图元元类型是《Node》,扩展了 UML2.1 元概念 Class。将资源分配到节点,则节点就拥有《Have》能力,节点执行《Perform》活动,节点都不是孤立存在的,节点间具有通信关系《Contact_with》。

2.2.5 作战活动(Activity)

在明确作战节点后,进一步分析作战节点为实现作战目标并完成使命任务而采取的作战过程和活动,其图元元类型是《Activity》,扩展了 UML2.1 元概念 Activity。作战过程由一系列的作战活动组成,作战活动由事件触发,执行活动会消耗作战资源,产生的作战结果也可以作为资源使用,此外活动还受到作战条件和约束的限制。

作战活动模型以过程和活动为中心,建立了与相关概念的关联。条件和约束施加于作战过程之上,由于过程由多个活动组成,因此形成了间接的约束关系。在描述各个作战活动时,将相关的作战节点、能力、目标与事件显示地与活动关联起来,如活动的执行需要《Require》能力,活动具体实现《Realize》目标。

2.2.6 作战信息(Information)

作战节点在执行作战活动的过程中,必须与外界数据信息进行交换。在作战节点关系模型中,从节点出发明确了节点之间的交互关系,而建立作战信息模型是对交换的信息进行细化,明确信息的属性、信息交换的要求以及交换信息所支持的活动等,其图元元类型是《Information》,扩展了 UML2.1 元概念 Message。

2.2.7 能力(Capability)

在领域知识中建立能力模型,目的就是为了通过积累而分析出所有作战节点的作战能力,形成能力需求分析可参考的能力字典。作战节点的能力是通过其执行的作战活动体现出来的,任务目标的实现都依赖于作战能力。其图元元类型是《Capability》,扩展了 UML2.1 元概念 Class。

能力概念存在依赖关系,用《Dependent_on》进行连接,形成了能力概念的层次结构。如“指挥能力”可以具体分为“作战规划能力”、“控制能力”、“领导能力”和“决策能力”。作战节点通过《Featured_by》与能力连接,一个作战节点可以拥有多种作战能力,所有作战节点的能力按层次结构进行组织即形成能力词典。同样,如果一个作战节点需要执行某项活动进而完成某项任务,都需要得到作战能力的支撑,因此我们将这些关系在模型中用《Have》及《Committed_to》表示。

2.3 详细语法

在 C4ISR 能力描述框架基础上,采用 UML 元层扩展机制,形成一种 C4ISR 领域特定的对象建模语言。UML 元层扩展是一种成熟的技术,它通过赋予 UML 构造子领域特定的语义来增强 UML 的领域适用性。采用上述 C4ISR 能力概念化元本体扩展 UML2.1 的构造型(stereotype),就可以得到一种可用于面向 C4ISR 能力分析的对象建模语言,具体方法如表 3 所列。

表3 用于 C4ISR 能力建模的 UML 扩展

Stereotype	Base Class/UML	Parent	Tags	Constraints
活动《Activity》	Activity	《Behavior》		
能力《Capability》	Class	《Behavior》		
事件《Event》	MessageEvent	《Behavior》		
目标《Goal》	UseCase	N/A		
信息《Information》	Message	N/A		
使命《Mission》	Class	《Goal》		
节点《Node》	Class	N/A	type: String	C4ISR 元模型
机构《Organization》	Class	《Resource》		
岗位《Position》	Class	《Resource》		
资源《Resource》	Class	N/A		
系统《System》	Class	《Resource》		
任务《Task》	Class	《Goal》		
完成 《Committed_to》	Association	《Constraint》		
组成 《Composed_by》	Property	《Constraint》		
冲突 《Conflict_with》	Directed Relationship	《Constraint》		
联络 《Contact_with》	Interaction	《Interaction》		
分解 《Decomposed_into》	Directed Relationship	《Constraint》		
依赖 《Dependent_on》	Dependency	《Constraint》		
拥有《Have》	Association	《Constraint》	N/A	
具备 《Featured_by》	Association	《Constraint》		
需求线 《Needline》	Interaction	《Interaction》		
参与 《Participate_in》	ObjectFlow	《Constraint》		
执行《Perform》	ObjectFlow	《Constraint》		
产生《Produce》	ObjectFlow	《Constraint》		
实现《Realize》	ObjectFlow	《Constraint》		
需要《Require》	ObjectFlow	《Constraint》		
变迁《Transition》	ControlFlow	《Control》		

2.4 形式语义

本文通过 OWL DL 来定义建模语言的形式语义。由于建模语言主要是在 UML 的基础上通过元层扩展机制定义的,因此需要定义 UML 的类图以及相应的关系。具体地说可以如下定义,UML 的类图直接通过 OWL DL 的原子概念来定义,而关系主要分为一般关联关系、聚合关系、继承关系等分别定义即可。

元模型中的类与描述逻辑中的原子概念具有良好的对应关系,不同的类在描述逻辑中可以用不同的原子概念描述。以元模型中使命任务概念框架模型为例,需要在描述逻辑 TBox 中创建以下概念:Goal、Mission、Task、Capability、Capability 等。原子概念描述相对比较容易,由于篇幅关系,这里就不详细介绍了。下面主要关注各种联系在描述逻辑中的定义。

2.4.1 一般关联关系

元模型中类 C_1, C_2 之间存在的一般关联关系(方向由 C_1 指向 C_2),在描述逻辑中描述如式(1)所示:

$$C_1 \sqsubseteq \forall A. C_2 \quad (1)$$

其中,类 C_1, C_2 分别用原子概念 C_1, C_2 描述,一般关联关系用原子关系 A 描述, A 的定义域是概念 C_1 ,值域是概念 C_2 。根据描述逻辑对算子 $\forall$ 的语义规定, $\forall$ 限制 C_1 只能够同 C_2 存在 A 关系,因此 $\forall$ 算子保证了元模型中某一种关系只能存在于特定的类之间的语义。由于元模型中不同类之间存在的一般关联关系是有区别的,因此在模型转换时,不同的一般关

联关系的名称应当各不相同。

一般关联关系中关联双方的基数约束描述如式(2)所示:

$$C_1 \sqsubseteq (\geq n_{\min} A. C_2) \sqcap (\leq n_{\max} A. C_2) \quad (2)$$

$$C_2 \sqsubseteq (\geq m_{\min} A^{-}. C_1) \sqcap (\leq m_{\max} A^{-}. C_1)$$

其中, A^{-} 是 A 的逆关系,上述表达式的含义为:对于 C_1 的任意一个实例,与该实例存在 A 关系的概念 C_2 的实例数量大于 $n_{\min}$,小于 $n_{\max}$;对于 C_2 的任意一个实例,与该实例存在 A^{-} 关系的概念 C_1 的实例数量大于 $m_{\min}$,小于 $m_{\max}$ 。

描述逻辑允许根据原子关系的特点,声明关系的传递、可逆、函数等属性。基于能力的系统需求分析方法规定,对于元模型中“活动”之间的“优先于”关系、“状态”之间的“变迁”关系、“操作”之间的“顺序”关系,应当在描述逻辑 TBox 中声明关系具有传递属性。

2.4.2 聚合关系

在元模型中,整体类 C_1 同部分 C_2 之间存在的聚合关系,采用描述逻辑描述如式(3)所示:

$$C_1 \sqsubseteq \forall Agg. C_2$$

$$C_2 \sqsubseteq \forall Agg^{-}. C_1 \quad (3)$$

$$C_1 \sqsubseteq \geq n_{\min} Agg \sqcap \leq n_{\max} Agg$$

$$C_2 \sqsubseteq \geq m_{\min} Agg^{-} \sqcap \leq m_{\max} Agg^{-}$$

其中,整体类 C_1 和部分类 C_2 分别采用原子概念 C_1, C_2 描述,聚合关系采用原子关系 Agg 描述, Agg^{-} 是 Agg 的逆关系。原子关系 Agg 的定义域是整体概念,值域是部分概念。整体类的基数约束由 $m_{\min}, m_{\max}$ 表示,部分类的基数约束由 $n_{\min}, n_{\max}$ 表示。与一般关联关系相同, $\forall$ 算子限制整体概念 C_1 只能够同部分概念 C_2 之间存在 Agg 关系,因此保证了元模型中某一具体的聚合关系只能存在于特定的类之间的语义。

基于能力的系统需求分析方法在保留 UML 聚合关系原有语义的同时,给强聚合关系附加了更强的语义约束。例如关系《Composed_by》只能够出现在资源之间,如果出现在其它概念类之间,那么则违反了元概念语义约束。在描述逻辑中描述如式(4)所示:

$$C_1 \sqsubseteq \forall Composed_by. C_2$$

$$C_2 \sqsubseteq \forall Composed_by^{-}. C_1 \quad (4)$$

$$C_1 \sqsubseteq \geq n_{\min} Composed_by \sqcap \leq n_{\max} Composed_by$$

$$C_2 \sqsubseteq \leq 1 Composed_by^{-}$$

其中,整体类 C_1 和部分类 C_2 分别采用元概念 Resource 或其子概念(Position、Organization 或 system)定义其构造型。强聚合关系采用元关系 Composed_by 描述,由于强聚合关系规定部分类的实例只能强聚合于唯一的整体类实例之中,并且部分类的实例不能够脱离整体类的实例而独立存在,因此规定整体类的基数应当为 1。

2.4.3 连接属性

元模型中类 C_1, C_2 之间存在连接属性 C_3 ,采用描述逻辑描述如式(5)所示:

$$C_3 \sqsubseteq \forall R_1. C_1$$

$$C_3 \sqsubseteq \forall R_2. C_2 \quad (5)$$

$$C_3 \sqsubseteq \geq m_{\min} R_1 \sqcap \leq m_{\max} R_1$$

$$C_3 \sqsubseteq \geq n_{\min} R_2 \sqcap \leq n_{\max} R_2$$

$$C_1 \sqsubseteq \forall Link. C_2$$

其中,类 C_1, C_2, C_3 分别采用原子概念 C_1, C_2, C_3 描述,关联类 C_3 与 C_1, C_2 之间的关联关系分别采用原子关系 R_1, R_2 描述。 R_1 的定义域是 C_3 ,值域是 C_1 。 R_2 的定义域是 C_3 ,值域是 C_2 。通过关联类 C_3 ,使得类 C_1, C_2 之间发生的关系采用

原子关系 Link 描述, Link 关系的定义域是 C_1 , 值域是 C_2 。
 $m_{\min}, m_{\max}, n_{\min}, n_{\max}$ 分别表示 Link 关系中 C_1 与 C_2 的基数。

以元模型中, “Activity”类之间存在的“Event”链接属性为例, 在描述逻辑 TBox 中描述如式(6)所示:

$$\begin{aligned} \text{Event} &\sqsubseteq \forall R_1. \text{Activity} \\ \text{Event} &\sqsubseteq \forall R_2. \text{Activity} \\ \text{Activity} &\sqsubseteq \forall \text{Precedence}. \text{Activity} \end{aligned} \quad (6)$$

2.4.4 继承关系

描述逻辑提供了表示概念之间继承关系的算子 $\sqsubseteq$, 该算子左侧为子概念, 右侧为父概念。 $\sqsubseteq$ 算子保证子概念继承父概念所拥有的全部原子关系以及关系上的约束条件。子类 C_1 与父类 C 之间的继承关系在描述逻辑中的描述如式(7)所示:

$$C_1 \sqsubseteq C \quad (7)$$

描述逻辑规定算子 $\sqsubseteq$ 只能作用于 TBox 中的概念之间, ABox 中的个体之间不存在继承关系。然而在能力需求模型中, 虽然领域概念类是元概念类的实例化个体, 但是领域概念类之间仍然可以存在继承关系, 由此导致领域概念类之间的继承关系在描述逻辑中无法表示。为了解决这一问题, 本方法在将元模型中子类同父类之间的继承关系转换为描述逻辑 TBox 中子概念与父概念之间的继承关系后, 还应当在 TBox 中子概念与父概念之间创建 Subconcept 关系, 该关系的定义

域为子概念, 值域为父概念, 并且具有传递属性。

以元模型中“资源”和“系统”、“岗位”和“组织”之间的继承关系为例, 如图 3 所示, 采用描述逻辑描述, 如式(8)所示:

$$\begin{aligned} \text{System} &\sqsubseteq \text{Resource} \\ \text{Position} &\sqsubseteq \text{Resource} \\ \text{Organization} &\sqsubseteq \text{Resource} \end{aligned} \quad (8)$$

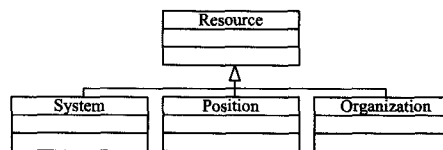


图3 继承关系举例

本文之所以选择 OWL DL 来描述建模语言的语义, 原因在于 OWL DL 在逻辑推理方面具有优势, 通过 OWL DL 可以检查模型中概念的一致性问题。

2.5 建模过程分析

能力建模分两阶段完成。第一阶段是获取领域知识, 即领域概念化建模。第二阶段是获取应用需求, 即应用概念建模。

能力需求可以在不同的层次上进行抽象。本文采用 3 层概念抽象来构成一个完整的需求体系, 使得能力需求的获取可以在不同抽象层次上进行描述, 如图 4 所示。

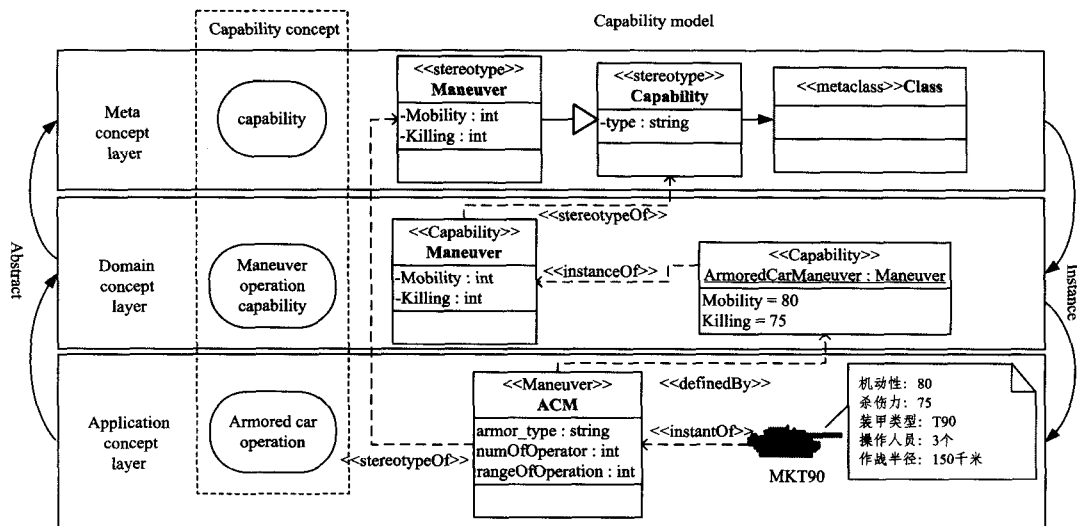


图4 能力需求概念抽象的3个层次

元概念层是对不同军事领域的能力需求获取时可能涉及到的基本概念类型进行的高度抽象, 只包含体现不同领域能力需求本质的最重要的少数元概念及其关系和约束。与元概念层对应的是元概念模型。元概念模型是领域概念模型的抽象, 其目的在于引导和规范领域概念模型的建立: 1) 在建立领域模型过程中, 指定的元概念可以给出领域概念的确切含义, 使不同建模分析人员得到一致的理解; 2) 可以根据领域需求的特点, 对元模型进行裁减或具体化, 设计领域建模的模板, 引导领域不同方面的建模; 3) 元模型为领域建模提供了模型语义约束规则, 可以作为领域模型完整性检查的知识, 为规范建模和一致性检查奠定了基础。因此元概念模型在建立领域模型时又起着引导领域概念获取的框架作用。

领域概念层给出了特定领域的基本概念及其关系。领域专家使用这种带语义的概念元素建模, 不会偏离体系结构框架范畴。与领域概念层相对应的是领域概念模型。领域概念模型中的概念和关系是对领域不同用户的需求中可能涉及到的概念实例或个体的高层抽象, 为领域用户的需求获取提供了基本的概念类别, 以规范领域用户的应用需求的获取。因

此领域概念模型在建立用户需求模型时又起着引导应用概念获取的框架作用。

应用需求层则包含了构成用户需求的特定概念。与应用需求层相对应的是用户需求模型。在获取这些应用对象时, 以领域概念模型作为其需求概念框架模板, 填入领域概念的具体解释即可。如果从 UML 模型的角度来看, 用户需求模型相当于领域概念框架之间的实例, 而领域概念框架则相当于元概念框架的实例。

3 案例分析

下面通过一个 C4ISR 体系结构仿真建模为案例, 来说明方法的有效性和可用性。针对军事行动计划制定, 设计一套基于计算机模拟仿真的辅助决策软件。该软件可根据具体的作战方案模拟和推演人机交互的复杂系统活动过程, 分析体系对抗中我方的军事能力需求, 预测作战效果, 从而制定出合理的作战计划。辅助决策软件的使用人员是军事指挥或参谋人员, 由他们根据作战方案建立系统仿真模型, 并在辅助决策环境中执行、观察和分析作战需求及效果。

该软件需求的难点是:由于军事人员缺乏形式化建模知识,因此难以建立完整的语义精确的仿真模型。解决问题的方法是:设计一种仿真对象建模工具,支持领域专家根据特定的C4ISR领域背景定义符合UML语义的概念建模语言,使得军事人员在其熟悉的建模环境中建立语义明确的仿真对象模型,工具自动生成可执行的仿真对象。

3.1 领域概念建模

本例针对一个假设的联合火力打击行动,首先由军事领

域专家利用UML元层扩展机制设计一个仿真建模语言。图5反映了其中部分概念化模型。参与该行动的我方包括空军和陆军。需求分析主要关注的是我方的“机动”、“情报”和“打击”3个能力需求。领域专家通过这3个类定义了6个实例来表示6种不同的具体能力,并赋予系统中4种作战资源(轰炸机、侦察机、火箭炮和步兵营)。此外,专家还定义了我方参战的指挥节点(指挥部、空军部队、空中侦察部队、炮兵部队和步兵部队)以及它们与作战资源之间的联络关系。

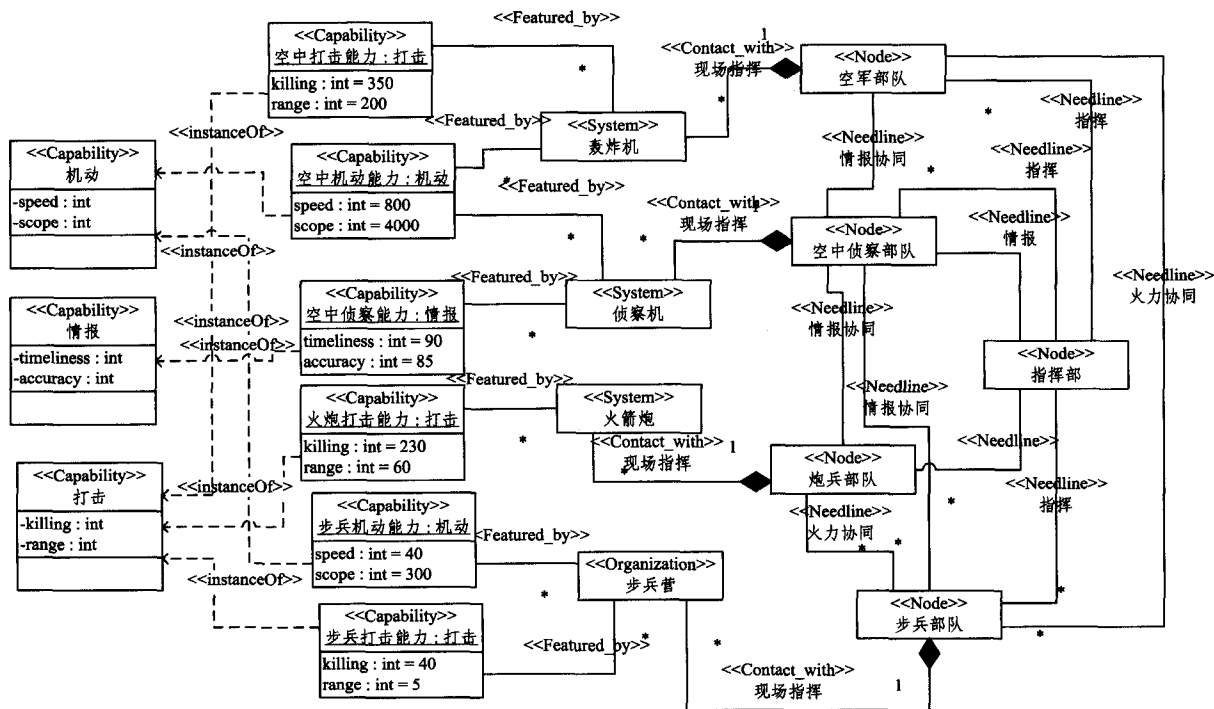


图5 联合打击领域概念模型

3.2 应用概念建模

通过领域模型引导,最终用户能够建立应用模型。最终用户所需要做的就是根据应用背景将领域模型中的概念和联系实例化。

这里列举一个假想的“纵深打击”使命任务——阻击敌机

械化增援部队。任务能力包由6个指挥节点和7个作战资源组成,如图6所示。虽然这幅图与作战体系结构中的高级概念图(OV1)十分类似,但其实是一个UML模型。建模者不需要懂得UML建模语义,可将注意力集中在其业务操作方式上,而建模工具自动进行概念化语义映射,生成可执行对象。

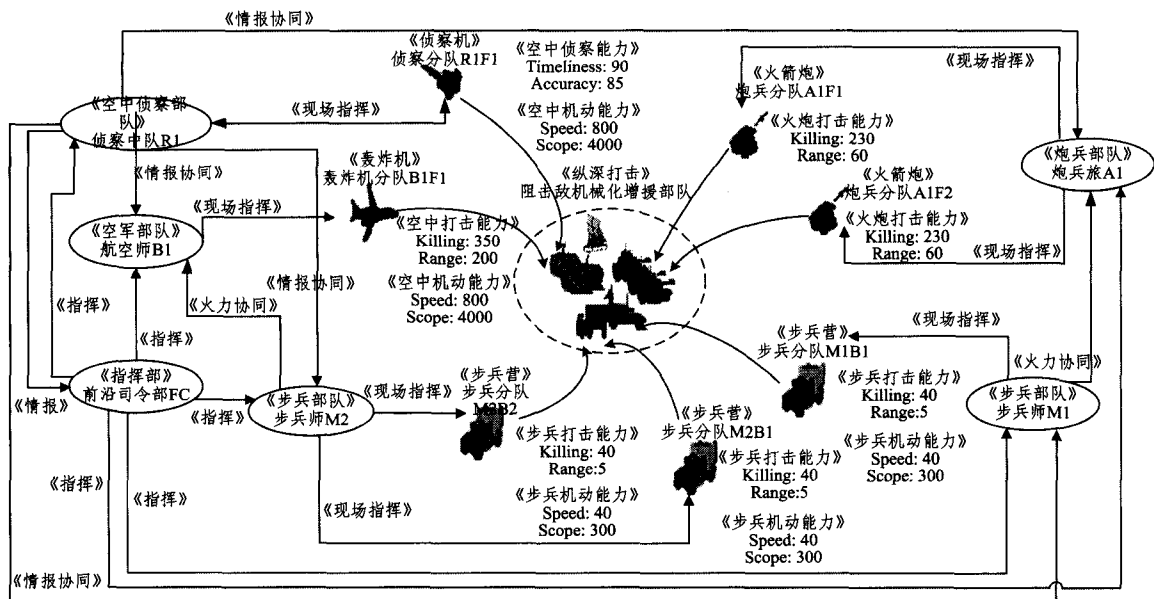


图6 联合打击应用模型示例

结束语 目前将通用的需求工程方法应用到 C4ISR 系统需求获取中普遍存在以下问题:1)这些方法不是以军事应用为背景的,由于领域差异,军事人员难以理解和掌握;2) C4ISR 需求涉及宏观、微观两个方面,而一般需求工程方法的开发机制往往直接面向微观层次的设计问题,通常难以从宏观把握 C4ISR 需求,更难以指导 C4ISR 系统的顶层设计;3)更重要的是, C4ISR 系统的策划和研制必须与部队的使命任务紧密联系,从充分发挥武器装备的功能和效能、提高部队作战能力出发,才能获得满足用户需要的需求。

在 C4ISR 体系结构建模方面,虽然已经逐渐认识到能力概念在系统设计、开发中的重要性,但还很少有方法将能力作为核心概念去引导用户建立系统需求模型。

本文旨在以能力概念为核心,提出了一种面向 C4ISR 能力分析的领域建模语言。主要工作为:从 C4ISR 能力概念化入手,定义了 C4ISR 能力的元本体,利用 UML 元层扩展机制定义了领域特定描述语言,并利用 OWL DL 定义了语言的形式语义,使得基础概念推理的模型一致性验证得以进行;采用 3 层概念抽象定义 C4ISR 能力需求模型,为 C4ISR 能力需求复用奠定基础。本文工作具有以下特点:(1) C4ISR 能力概念化的元本体是在体系结构元模型 M3 基础上提出的,对国际流行的 C4ISR 体系结构标准有良好的支持,适用性较广,同时可以很好地支持基于 UML 技术的软件建模与开发。(2) 采用 3 层概念抽象来描述系统能力需求,不仅可以通过定义领域特定建模语言来复用领域知识,而且可以运用领域概念化约束规范应用建模行为,检验应用模型的领域适用性和正确性。(3) 采用 OWL DL 对概念模型进行形式化描述,给出形式语义,可以实现领域概念和应用概念模型的一致性验证。

参考文献

- [1] US Department of Defense. DoD Architecture Framework Version 1.5 (Volume I-II-III) [OL]. 2007. <http://www.defenselink.mil/cio-nii/>
- [2] UK Ministry of Defence. The MOD Architectural Framework v1.2 [OL]. 2008. <http://www.modaf.org.uk>
- [3] CapDEM CEP Team, Capability Engineering Process Version 1 [R]. Defence Research and Development Canada, Valcartier, 2004
- [4] OMG. Unified Profile for the Department of Defense Architecture Framework (DoDAF) and the Ministry of Defence Architecture Framework (MODAF) Specification [OL]. 2008. <http://www.updm.com/index.htm>
- [5] OMG. ALert Management Service (ALMAS) Specification (Be-

ta 2) [OL]. 2008. http://www.omg.org/technology/documents/domain_spec_catalog.htm

- [6] 金芝. 基于本体的需求自动获取[J]. 计算机学报, 2000, 23: 486-492
- [7] Jin Zhi, Bell D, Wilkie F D. Automated requirements elicitation: Combining a model-driven approach with concept reuse[J]. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2003, 13(1): 53-82
- [8] 陆汝钊, 金芝. 从基于知识的软件工程到基于知件的软件工程[J]. 中国科学 F 辑, 2008, 38(6): 843-863
- [9] 舒风雷, 赵玉柱, 王继喆, 等. 个性化领域知识支持的用户主导需求获取方法[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(6): 1044-1052
- [10] 翟健, 杨秋松, 肖俊超, 等. 一种形式化的组件化软件过程建模方法[J]. 软件学报, 2011, 22(1): 1-16
- [11] 张伟, 梅宏. 一种面向特征的领域模型及其建模过程[J]. 软件学报, 2003, 14(8): 1345-1356
- [12] 王波, 赵海燕, 张伟, 等. 问题驱动的需求捕获中问题分析与解决技术研究[J]. 计算机研究与发展, 2013, 50(7): 1513-1523
- [13] 杨美清, 吕建, 梅宏. 网构软件技术体系: 一种以体系结构为中心的途径[J]. 中国科学 F 辑, 2008, 38(6): 818-828
- [14] 吕建, 马晓星, 陶先平, 等. 面向网构软件的环境驱动模型与支撑技术研究[J]. 中国科学 F 辑, 2008, 38(6): 864-900
- [15] 李德毅. 需求工程——对复杂系统的软件工程的基础研究[J]. 中国基础科学, 2009, 11(2): 4-8
- [16] Wang Jian, He Ke-qing. RGPS: a unified requirements meta-modeling frame for networked software[C]//Proceedings of the 3rd International Workshop on Applications and Advances of Problem Frames at 30th International Conference on Software Engineering. 2008: 29-35
- [17] 马国普, 余滨, 沙基昌, 等. 系统能力集成与开发的 SCFP 模型[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(7): 36-39
- [18] 付广胜, 陈洪辉. 基于能力的指挥信息系统需求获取方法[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(9): 72-75
- [19] 谢仲文, 李彤, 代飞, 等. 基于特征组合的软件需求建模[J]. 计算机学报, 2012, 35(1): 130-141
- [20] 王聪, 王智学. UML 活动图的操作语义[J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(10): 1801-1807
- [21] 王聪, 王智学. 军事电子信息系统需求模型[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 9(4): 328-334
- [22] 王智学, 董庆超, 陈彬, 等. 基于 UML 模型的 C4ISR 系统能力需求分析与验证[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(9): 2167-2171
- [23] 王智学, 董庆超, 朱卫星, 等. 一种支持能力需求概念一致性和合理性分析的方法[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 10-21

(上接第 133 页)

- [12] Elberfeld M, J T. Negative selection algorithms on strings with efficient training and linear-time classification[J]. Theoretical Computer Science, 2011, 412(6): 534-542
- [13] Zarges C. Rigorous runtime analysis of inversely fitness proportional mutation rates[C]//Proceedings of Parallel Problem Solving from Nature (PPSN). LNCS 5199, 2008: 112-122
- [14] Zarges C. On the utility of the population size for inversely fitness proportional mutation rates[C]//Proceedings of the 10th

ACM SIGEVO Workshop on Foundations of Genetic Algorithms (FOGA). 2009: 39-46

- [15] Timmis J, Home A, Stibor T, et al. Theoretical advance in artificial immune systems[J]. Theoretical Computer Science, 2008 (403): 11-32
- [16] Janse T, Zarges C. Analyzing different variants of immune inspired somatic contiguous hypermutations[J]. Theoretical Computer Science, 2011, 412(6): 517-533