

C4ISR 系统的非功能需求建模与分析

朱卫星¹ 王智学¹ 董庆超¹ 刘影^{2,3}

(1. 解放军理工大学指挥自动化学院, 南京, 210007; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016;
3. 解放军理工大学工程兵工程学院, 南京, 210007)

摘要: 为了实现C4ISR系统功能需求与非功能需求分析的统一, 提出一种C4ISR系统能力非功能需求的分析和建模方法, 首先构建C4ISR系统能力元本体, 在元本体的引导下, 领域专家从任务分析入手, 围绕目标构建C4ISR系统能力的功能和非功能需求模型。同时采用本体描述语言精确描述能力非功能模型, 并借助逻辑推理的手段, 有效判断能力非功能需求对使命任务的支持程度。结果表明该方法自动化程度较高, 是对现有效能评估技术的有益补充。

关键词: 能力需求; 非功能需求; 本体

中图分类号: E917; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2011)06-0774-06

Non-functional Modeling and Analysis of C4ISR Requirements

Zhu Weixing¹, Wang Zhixue¹, Dong Qingchao¹, Liu Ying^{2,3}

(1. Institute of Command Automation, PLA University of Science & Technology, Nanjing, 210007, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics &
Astronautics, Nanjing, 210016, China; 3. Engineering Institute of Corps of Engineers,
PLA University of Science & Technology, Nanjing, 210007, China)

Abstract: In order to integrate the description of the functional and non-functional requirements in one model, a method for non-functional analysis and modeling of C4ISR capability requirements is proposed. It constructs a capability meta ontology (CMO) and suggests that C4ISR functional and non-functional requirements elicitation should be initiated with mission analysis by modeling goals with the help of CMO. After that the non-functional requirements (NFR) should be precisely described using an ontology description language, which enables model checking to verify the reasonability of NFR by using a symbol inference system. A detailed analysis demonstrates that the method proposes a new technology on the research of effectiveness evaluation.

Key words: capability requirements; non-functional requirements; ontology

近年来, 西方国家国防工业部门普遍采用能力工程方法, 并将该方法应用于C4ISR系统的需求获取、分析、论证和管理工作中。美国国防部体系结构框架(DoDAF 2.0)指出: “C4ISR系统的能力是指军事组织借助网络与信息系统遂行作战任务的功能与效能表现^[1]。”为了规范各军兵种C4ISR系统的建设, DoDAF 2.0提出了一种面向C4ISR系统能力功

能分析的能力元模型(Capability meta model, CMM), 并统一采用UML作为需求建模语言。采用UML的好处有: (1) UML具有领域通用性, 模型可以为系统分析师和软件工程师所共同理解。(2) UML可以准确建模表示C4ISR系统的功能需求。

然而目前C4ISR系统的能力需求分析还存在以下问题: (1) 能力需求分析包含功能分析和非功

能分析(效能分析)两部分,DoDAF 2.0虽然给出了C4ISR系统能力的功能分析方法,即应该“做什么”,却没有提出非功能需求的获取和分析方法,即回答能力“做的怎么样”。(2)正如文献[2]指出,现有的一些需求分析方法,独立处理系统的功能和非功能需求,却只是在软件开发的后期完成二者的统一。这种做法一方面割裂了系统功能需求与非功能需求的内在联系,另一方面也会给系统的功能需求与非功能需求集成带来风险。(3)非功能需求决定了C4ISR系统完成使命任务的质量,目前业界主要采用仿真技术判断系统非功能需求的合理性,即是否支持系统的预期使命任务,但是该方法在操作过程中会产生大量数据,不够直观,因而不利于普通技术人员使用。

针对以上问题,本文提出一种C4ISR系统能力的非功能需求建模和分析方法,方法在DoDAF 2.0能力元模型的基础上提出一种兼顾C4ISR系统功能、效能分析的能力元本体,在元本体的引导下,领域专家从使命任务分析入手,围绕目标,构建C4ISR系统能力的功能和非功能需求模型,形成领域知识。在应用系统开发中,技术人员利用领域知识复用技术,获取应用需求模型,并借助本方法提出的本体形式化逻辑推理技术,判断应用系统的非功能需求对预期“使命任务”的支持程度。

1 C4ISR系统的非功能需求获取方法

1.1 能力元本体

在效能评估方法中,评价C4ISR系统的效能,首先要构建一棵效能指标树,树中最顶层为C4ISR的效能概念,通过逐层分解效能指标,叶节点变成一些可以直接度量的系统性能,最终通过数学计算的方式得出复杂效能的数值^[3-4]。虽然本方法的目

的不是讨论如何构建效能指标树,如何计算效能的数量值,但是为了实现与上述方法的统一,同时扩展DoDAF 2.0能力元模型,使之可以表示能力的效能相关概念,本方法在能力元模型的基础上引进效能、效能指标、性能等非功能概念。同时在效能相关概念间加入继承(Generalization)、精化(Refine)、冲突(Conflict)和依赖(Depend)关系,在此基础上,为了实现能力的功能概念与非功能概念的统一,方法还在功能概念与非功能概念之间加入新的关系,如任务与效能之间的需求关系;能力与效能之间的拥有关系,具体见图1。通过以上扩展,能力元本体已经具有足够的力量,引导构建领域功能模型和非功能模型,同时将能力元本体用于扩展UML Profile,就可以得到一种领域特定建模语言(Domain-specific language, DSL)。DSL中模型元素的元类型(stereotype)取自能力元本体中的元概念和元关系,如:使命、能力、能力拥有效能、活动需要能力等,表明领域概念(关系)是元概念(关系)在领域层的一个实例。

1.2 领域非功能需求的获取方法

文献[5]提出了一种C4ISR系统能力功能需求的获取方法。该方法借鉴面向目标的需求方法,首先从系统的使命任务入手,分析使命任务所需完成的目标、实现目标的任务场景以及开展的活动中,通过活动分析,获得与活动相关的能力概念,进而获取C4ISR系统的功能需求。在该研究的基础上,本方法将进一步研究以下问题:(1)与效能关联的软目标如何分析(2)如何判断效能、能力、任务之间的关系。通过回答以上问题,可以完整地捕捉领域层C4ISR系统的非功能需求。

文献[5]以“城市防空领域”为背景,介绍了城市防空C4ISR系统能力功能需求的获取方法和过

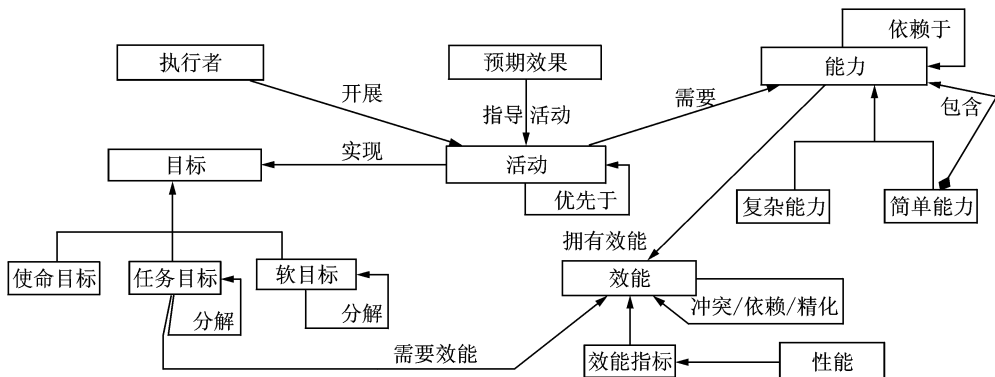


图1 能力元本体

程,并根据其中的“战术导弹拦截任务”子用例,获取了相关系统的功能需求。下面在该研究的基础上,扩展提出一种非功能需求的分析获取方法。

1.2.1 系统软目标分析

软目标是指C4ISR系统在活动执行中必须达到的非功能目标。可以采用面向目标的需求分析方法^[6],对目标进行形式化描述和推理分析,去除一些不合理或无法实现的目标,得到可实现的目标。通过使命任务分析,可以获得软目标分析树,其中叶目标是一些只能由单一活动完成的软目标。这里采用“与/或”分解模式。

(1)“与”分解模式:如果目标G是通过实现多个目标 $G_1 \cdots G_n$ 而得以实现, $n > 1$,则称 $G_1 \cdots G_n$ 是G的与分解,记为: $G_1 \wedge \cdots \wedge G_n | = G$ 。

(2)“或”分解模式:如果目标G是通过实现目标 $G_1 \cdots G_n$ 中的任意一个而得以实现, $n > 1$,则称 $G_1 \cdots G_n$ 是G的或分解,记为: $G_1 \vee \cdots \vee G_n | = G$ 。

软目标分解的目的有:(1)使C4ISR系统的非功能目标逐步清晰,便于指导系统开发。(2)以活动为线索,将软目标与能力、使命、任务等功能概念联系起来,实现功能需求与非功能需求的统一。图2给出了“确保城市领空安全”软目标分解模型。

1.2.2 效能映射算法

从软目标分解模型,可以发现每个叶目标均与惟一的效能概念相关联。以“延长预警时间”目标为例,该目标便与“提前预警”效能密切相关。从能力元本体还可以发现,活动在能力的支持下得以实现目标,因此目标、效能和能力之间必然存在映射关系。本算法的目的是借助能力元本体和软目标分解模型,引导领域专家找出能力的效能相关概念,构建效能指标树。

效能映射过程需要领域专家的参与,由领域专家提炼与软目标相关的效能概念。映射算法的基本过程可以描述如下:

步骤1 对于任意软目标(叶节点)(stereotype = “软目标”):

(1)领域专家给出与该软目标相关的效能概念,并创建该概念(stereotype = “效能”);

(2)识别与该软目标相关的活动概念,进而获取与之相关的任务、能力概念;

(3)在能力概念与效能概念之间添加关联关系,置该关系的stereotype = “拥有效能”;

(4)在任务概念与效能概念之间添加关联关系,置该关系的stereotype = “需要效能”。

步骤2 领域专家在能力元本体的语义约束下,针对每一个效能概念(stereotype = “效能”),构建效能指标树。

按照该算法,这里构建假想的城市防空领域非功能需求模型(空中目标识别能力相关片断)。

1.3 应用系统的非功能需求建模方法

领域专家构建领域非功能模型后,技术人员可以借助领域知识复用技术^[7],构建现实系统的能力需求非功能模型。应用建模时采用领域概念和关系扩展UML Profile,其他方法与领域建模一致。下面重点讨论应用系统中能力的效能值表示方法。

文献[4]指出,武器系统的效能是指在特定条件下,武器系统被用来执行规定任务所能达到预期可能目标的程度。在本方法中,领域概念是领域专家就理想状态下C4ISR系统完成特定的使命任务,所应当具备的能力以及能力的效能而达成的共识,如图3中空中目标识别能力和提前预警效能。显然

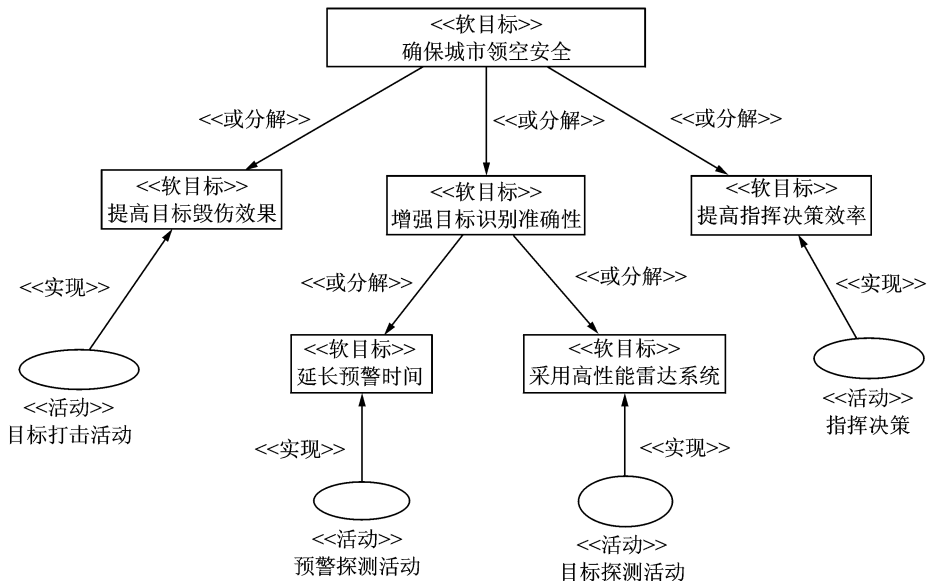


图2 “确保城市领空安全”软目标分解模型

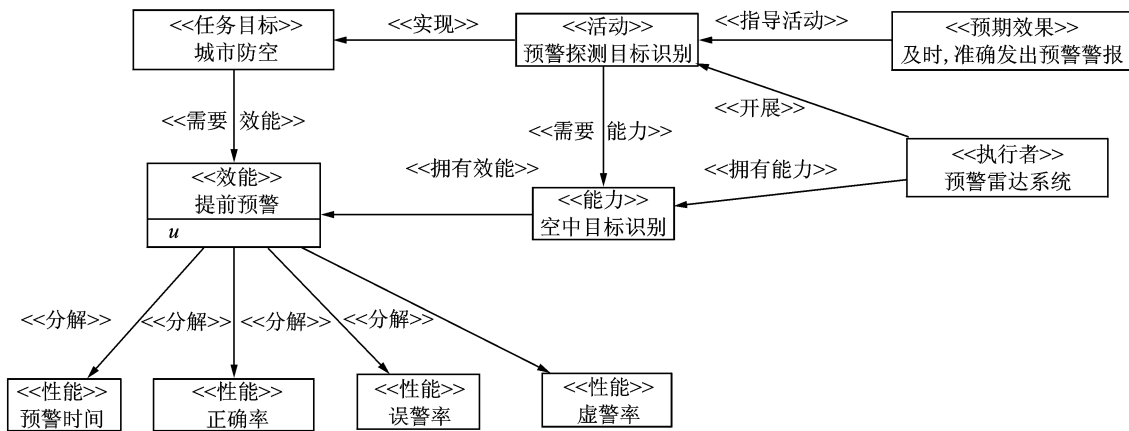


图3 城市防空领域非功能需求模型

应用系统能力的效能与领域能力的效能(理想的效能)存在一定的差别,这种差别就可以反映为效能值,在模型中用隶属度(即模糊集理论中的同名概念,表示元素属于某个集合的程度)属性 u 表示 ($0 \leq u \leq 1$),见图3。 u 值通过模糊效能评估函数(Fuzzy efficiency evaluation functions, FEEFs)计算得出。

以图3中提前预警效能为例,它的FEEF可以表示为

$$\text{Early}(x) = \begin{cases} 1 - 0.01x & 0 \leq x \leq 100 \text{ min} \\ 0 & x > 100 \text{ min} \end{cases}$$

其中模糊系数0.01由领域专家根据实际情况自行定义,变量 x 代表装备的实际预警时间。当装备预警时间在0~100 min,效能评估函数自动生成一个介于0和1之间的模糊效能值。如果预警时间超过100 min,根据常识就认为该装备的目标拦截能力并不具备提前预警的效能。

2 效能的合理性分析方法

效能的合理性,是指C4ISR系统能力的效能是否可以支持预期的使命任务。这种合理性判断,传统采用系统仿真的做法,但是由于仿真方法对技术人员技术背景要求高,中间环节产生的数据量大,因此,本文考虑采用本体推理的方法,推理证明能力效能的合理性。文献[8]采用描述逻辑形式化和推理技术,实现了能力功能模型的一致性、完整性判定。文献[9]通过引进隶属度概念改进了UML的模糊信息建模能力,同时提出了改进后UML模型到模糊描述逻辑 $f\text{-DLR}$ 本体的形式化转换算法。在上述研究的基础上,采用模糊描述逻辑 $f\text{-SHIN}$ 描述能力非功能模型,并借助 $f\text{-SHIN}$ 提出的推理算法,判断能力效能的合理性。主要工作

包含模型转换和推理两部分。

2.1 模糊描述逻辑 $f\text{-SHIN}$

描述逻辑是一种本体表示语言,同时也是一阶谓词逻辑的一个可判定的子集,具有良好的推理可判定性和知识表达能力^[10]。为了表示模糊信息,描述逻辑派生了模糊描述逻辑分支。 $f\text{-SHIN}$ 是模糊描述逻辑的一个子系统,提供了可以表述隶属度信息的构造子。文献[11]证明了 $f\text{-SHIN}$ 系统的推理可判定性,同时提出了相应的本体推理算法(Tableau 算法)。文献[12]就 $f\text{-SHIN}$ 本体的自动推理也做出了有益的研究,通过转换算法,可以借助 Pellet, Fact 等目前成熟的本体推理引擎,实现 $f\text{-SHIN}$ 本体的自动推理。上述研究为本方法的实现提供了有力的支持。

基于 Tableaux 算法的模型推理可以解决以下问题。

本体逻辑一致性: 将本体看成一个逻辑理论,只要本体是可满足的且不包含矛盾信息,则本体是逻辑一致的。

概念的一致性: 如果本体 O 存在解释 I , 并且概念具有非空的实例集合,那么说明概念是一致的。

概念的包容关系: 如果存在概念 C_1 和 C_2 , 根据模型中定义的其他关系,可以得到 C_2 是 C_1 的子概念,那么概念 C_1 包容 C_2 。

概念等价关系: 如果根据定义的模型关联,可以得到两个概念定义一致,则认为两个概念相等。如果两个概念的实例集合完全相同也说明两个概念相等。

隐含的不一致性: 由于概念之间存在关联,在模型中能够指定概念之间关联的基数限制,因此概念的不一致将导致与其相关联的概念不一致,因此还需结合关联的基数限制判断隐含的不一致性,从

而增加模型的可读性。

2.2 非功能模型转换

模型转换的主要思路是:将元概念模型和领域模型转换为 f -SHIN 系统 Tbox 中的公理集,将应用系统模型转换为 f -SHIN 系统 Abox 中的实例集,转换算法描述如下:

步骤1 生成 Tbox 公理集:

- (1)对于元(领域)概念模型中出现的各种元(领域)概念,在 Tbox 中创建相应的概念;
- (2)对于元(领域)概念模型中出现的各种元(领域)关系在 Tbox 中相应概念间加入该关系。

步骤2 生成 Abox 实例集:

- (1)对于应用模型中出现的各种应用概念,根据其元类型 stereotype 的类别,在 Abox 中创建对应元概念的实例;
- (2)对于应用模型中出现的各种应用关系,根据关系的元类型 stereotype 的类别,将其映射为 Tbox 中已存在的关系,并在相应实例之间加入该关系;
- (3)对于应用模型中概念的隶属度 u 值,在

Abox 中相应实例上声明隶属度值。

2.3 模型推理

通过以上模型转换算法,可以将能力非功能需求模型,转换为能力需求本体,进而模型的推理问题,自然转换为本体推理问题。文献[11]指出 f -SHIN 本体推理的核心算法是 Tableau 算法,目前已经有 Pellet,Fact 等推理引擎支持该算法的自动执行。算法可以发现本体中不相匹配的隶属度数值。例如:应用任务概念隶属于领域任务概念的隶属度较高时,自然会要求与之相关的应用效能概念具备较高的隶属度值(即任务对能力的效能值要求较高),如果效能值过低,各种隶属度数值不相匹配,本体存在合理性问题。结合本方法和自动推理引擎,就可以实现能力效能合理性的自动推理和论证,与仿真技术比较,该方法可以将技术人员从繁杂的仿真数据中解脱出来。

3 案例分析

下面在城市防空领域非功能模型的基础上,构建 X 城市假想的防空系统应用非功能需求模型,见图4。

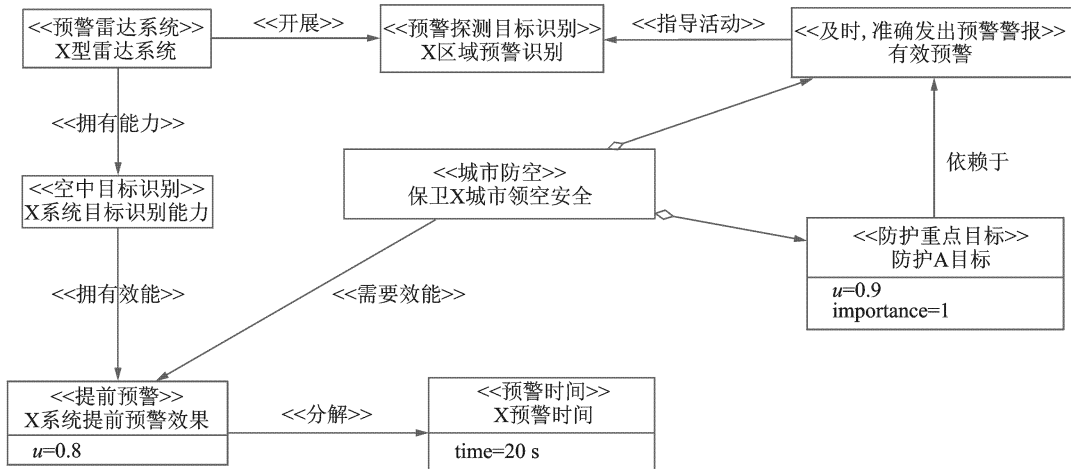


图4 X城市防空系统应用需求非功能模型

图中X型雷达系统具有空中目标识别能力,假设该能力的提前预警效能可以提供20min的提前预警时间,通过Early函数计算,该效能隶属领域效能概念的隶属程度为0.8(即效能值大小为0.8)。假设引入一个新的预期任务效果概念“防护A目标”,A的重要性(importance)数值为1,其相应的FEEF定义为

$$\text{Importance}(x) = \begin{cases} 1 - 0.1x & 0 \leq x \leq 10 \\ 0 & x > 10 \end{cases}$$

式中 x 表示保护目标的重要性属性。通过计算,该应用概念隶属于相应领域概念(防护重点目标)的

隶属度为0.9。由于“防护A目标”是“保卫X城市领空安全”任务的子效果,因此“防护A目标”间接需要提前预警效能“X系统提前预警效果”的支持。从图中发现,“X系统提前预警效果”的隶属度 u 值为0.8,效能值过低不足以支持这个新的预期作战效果,模型存在合理性问题,也就是“模型是否合理存在疑问”。在模型验证中,采用本体编辑器 Protégé 加载转换后的能力非功能需求本体,并借助 Pellet 1.5.0 自动推理引擎的推理服务。通过自动执行 Tableau 算法,在 Protégé 冲突概念栏中,工具提示“防护A目标”与“X系统提前预警效果”是不一致

概念,推理结果与预期效果一致。

4 结束语

本文提出一种能力非功能需求的分析和建模方法,其特点是领域专家从系统的软目标分析出发,结合功能需求,在能力元本体的引导下获取C4ISR特定领域内能力的非功能需求。在应用系统需求分析中,技术人员利用领域知识复用技术,构建应用系统的非功能需求模型,并借助本方法提出的效能合理性逻辑推理方法,判断应用系统能力的效能特征对预期使命任务、作战效果的支持程度。较系统仿真技术,这种基于逻辑推理的效能合理性验证方法,自动化程度比较高,便于普通技术人员的理解和使用,是现有效能评估技术的一个有益补充。下一步的工作是实现本文中提出的模型形式化转换算法,开发设计支持该方法的建模工具。

参考文献:

- [1] US Department of Defense. DoD architecture framework version 2.0 (Volume I-II-III) [EB/OL]. 2009-05-01 [2011-06-20]. <http://www.us.army.mil/suite/page/454707> MOD Partner, 2009.
- [2] Brito I, Moreira A. Integrating the NFR framework in a RE model [C]//Proceedings of AOSD 04. Lancaster UK, UK: ACM, 2004:22-26.
- [3] 刘俊先. 指挥自动化系统效能评价的概念和方法研究 [D]. 长沙:国防科技大学信息系统与管理学院,2004.
- [4] 刘俊先,修胜龙,欧阳震铮,等. 指挥自动化系统效能评价指标体系的结构[J]. 火力与指挥控制,2005,30(6):18-21.
- [5] 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.
- [6] Javier R L, Joan S, Marinos C, et al. Using linear temporal model checking for goal-oriented policy refinement frameworks [C]//6th IEEE International Workshop on Policies for Distributed Systems and Networks (POLICY'05). Stockholm, Sweden: IEEE Computer Soc, 2005:181-190.
- [7] Li Z Y, Wang Z X, Zhang A H, et al. The domain rules modeling for ontology-based requirements engineering [J]. Journal of Computational Information Systems, 2007,3(6):2503-2508.
- [8] 董庆超,王智学,陈剑,等. 基于描述逻辑的能力需求模型验证方法[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(3):533-539.
- [9] Ma Z, Zhang F, Cheng J, et al. Representing and reasoning on fuzzy UML models: a description logic approach [J]. Expert Systems with Applications, 2011,38(3):2536-2549.
- [10] Horrocks I, Sattler U. A tableau decision procedure for SHOIQ [J]. Journal of Automated Reasoning, 2007,39(3):249-276.
- [11] Stoilos G, Stamou G, Pan J Z, et al. Reasoning with very expressive fuzzy description logics [J]. Artificial Intelligence Research, 2007,30(1):273-320.
- [12] Bobillo F, Delgado M, Gomez-Romero J. A crisp representation for fuzzy SHOIN with fuzzy nominals and general concept inclusions [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2008, 5327(1): 174-188.