

一种模糊扩展的 C4ISR 系统效能需求建模与分析方法

王庆龙¹, 王智学¹, 朱卫星², 陈彬¹, 朱宗科³

(1. 解放军理工大学指挥自动化学院, 江苏南京, 210007; 2. 解放军理工大学信息中心, 江苏南京, 210007;
3. 东海舰队司令部通信处, 浙江宁波, 315122)

摘要: 针对经典UML建模语言无法描述C4ISR能力需求中模糊信息的问题, 本文提出一种模糊扩展的UML的效能需求建模与分析方法。首先, 提出一种兼顾C4ISR系统功能和效能综合建模的需求分析框架, 其次结合该框架提出一种基于贝赛尔曲线的效能评估函数, 用于评价分析系统能力的效果。较传统的效能分析技术, 该方法操作简单, 直观, 便于普通技术人员的使用。

关键字: 模糊UML; 效能需求; 效能评估函数; 建模

中图分类号: E917; TP391.9 **文献标识码:** A

0 引言

目前在大型系统的开发与设计中, 西方国家国防工业部门普遍采用能力工程方法。美军的国防部体系结构框架 2.0 (DoDAF 2.0) 指出能力是指网络与信息系统的执行作战任务的功能与效能表现[1]。C4ISR(Command, Control, Communication, Computing, Intelligence, Surveillance, Resonance)系统的能力是指军事组织借助网络与信息系统的遂行作战任务的功能与效能表现。它主要涉及运用现代信息技术大幅提升部队指挥、武器控制、情报共享、侦查监视等各种军事能力, 是赢得现代化战争的关键。能力需求就是站在最终用户的角度, 对待建系统支持的业务过程以及系统应当具备的能力、速度和正确性等特征的要求[2]。本文认为能力需求包括功能需求和效能需求两个部分。功能需求主要回答了系统能够做什么, 效能需求则说明了系统执行任务的效果如何。

目前, C4ISR 系统能力需求大多采用体系结构的分析方法[1, 3, 4], 在体系结构描述语言的选择方面, 各国国防工业部门也大多采用 UML 对象建模语言[5]。然而, 现实世界中存在许多含糊 (vague) 信息和不确定 (uncertain) 信息, 特别是在 C4ISR 系统能力分析的效能需求建模和分析方面, 例如区域防空系统防空能力的强弱; 火力打击系统目标打击命中率的高低等, 这些系统效能信息都是模糊信息, 信息的边界比较模糊。对于此类模糊效能信息, 经典的 UML 很难描述。针对这些问题, 马宗民人提出了一种 UML 的扩展——模糊 UML (Fuzzy-UML), 表示需求中存在的模糊信息[6]。模糊 UML 既可以对明确信息建模, 又可以对模糊信息进行建模, 这样模糊 UML 就可以对 C4ISR 系统作战能力的功能和效能需求进行建模。

为了解决 C4ISR 系统效能需求分析中模糊信息的领域特定建模以及效能需求分析问题, 本文提出一种面向 C4ISR 系统效能需求分析的模糊信息建模与分析的方法。该方法主要解决以下问题, 首先提出 C4ISR 系统能力需求的领域本体, 然后结合领域知识复用技术, 实现待建系统功能和效能的综合建模分析。文章整体结构如下: 第 2 节提出效能需求建模框架。第 3 节提出一种效能评估函数。第 4 节采用一个案例证明本方法的可行性。

1 效能需求建模框架

1.1 能力建模的元模型

参考文献[7], 本方法将能力需求的建模框架设定为三层结构, 即元层、领域层和应用层。元层对应于 UML 的 M2 层, 元层模型, 即能力元模型, 由体系结构概念及其之间关系组成, 例如使命、任务、能力等, 见图 1。这些概念源于 DoDAF2.0 提出的元模型数据组, 不同的是元模型增加了效能相关概念, 如效能、效能指标、性能等概念; 元层模型实例化后得到领域层模型, 该模型由领域特定概念及关系组成, 以防空领

域为例, 诸如火力打击能力、提前预警效能等概念, 领域层对应于 UML 的 M1 层。应用层对应于 UML 的 M0 层, 应用层模型是领域模型的实例化结果, 由 UML 对象图组成。

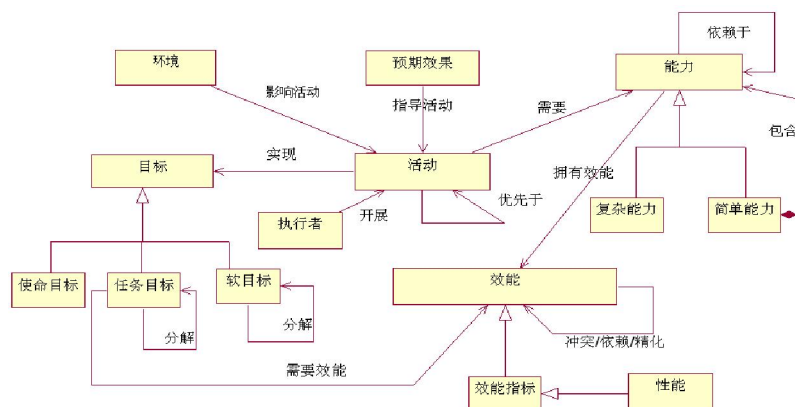


图 1 能力元模型

1.2 UML 建模方法的改进

1.2.1 增加模糊信息建模能力

文献[6, 8]指出在现实世界普遍存在模糊信息, 文献[9]也提出在能力需求中, 特别是在领域知识中存在模糊信息, 这些信息是经典 UML 无法表示的。在能力需求的领域知识中, 如果向领域概念加入效能特征时, 概念会发生模糊化, 例如: 预警能力是一种明确的概念, 提前预警反映的是该能力的一种效果, 就是一种模糊概念, 因为何谓提前并没有一个明确清晰的边界。当然这样的领域概念还有很多, 例如保护重点目标、精确打击能力等。为了表达模糊的领域知识, 引入模糊数据库建模中的 fuzzy UML[6, 8]并对其进行改进, 使其可以建模能力需求的效能概念。这里, 将模糊类定义为具有三层模糊性, 其表示方法如下(其中 $\mu: X \rightarrow [0,1]$ 是隶属度函数):

(1) 一个对象是否属于某个类是不确定的。它的形式化语义为: $\forall x. \text{ClassA_FuzzyLevel1}(x) \rightarrow \mu_{\text{ClassA}}(x) \triangleright \triangleleft n$

($\triangleright \triangleleft$ 表示 $\leq, <, \geq, >$)。它的建模表示方法是在类的属性栏中, 增加隶属度 μ 属性项, 且 $0 \leq \mu \leq 1$;

(2) 类具有一个模糊属性, 即属性的值域是一个模糊类。它的形式化语义为: $\forall x. (\text{ClassA_FuzzyLevel2}(x) \wedge \text{HasAttribute}(x, y)) \rightarrow \text{Class_Fuzzy}(y)$ 它的建模表示方法是在模糊属性前增加 FUZZY 关键字;

(3) 第三层模糊性是指一个类的父类或者子类是模糊类, 那么这个类是模糊类。它的形式化语义可以表示为: $\forall x. \text{ClassA_FuzzyLevel3}(x) \rightarrow \text{FatherClass_Fuzzy}(x)$

或者是: $\forall x. (\text{ClassA_FuzzyLevel3}(x) \wedge \text{SubClass}(x, y)) \rightarrow \text{Class_Fuzzy}(y)$ 。它的建模表示方法是在模糊类之间构建继承关系; 在以上三层模糊性建模表示方法的基础上, 还需要将模糊类的实线框变换为虚线框。

文献[10]指出, 军事装备效能可以划分为三类: 单项效能、系统效能和作战效能。单项效能是指装备在特定的条件下运用时, 达到单一使用目标的程度; 系统效能是指装备在特定的条件下, 规定的时间内, 满足特定任务的程度; 作战效能是指在规定的作战环境和条件下, 运用装备系统执行规定的作战任务, 所达到预期目标的程度。

从上述定义中我们可以发现单项效能、系统效能和作战效能主要讨论的是现实系统与理想状态之间的差距程度。在本方法中这种差别程度就可以用隶属度函数 $\mu: X \rightarrow [0,1]$ 来建模表示。以能力的效能为例, 领域层能力的效能是一个模糊概念, 应用层中出现的具体能力效能是领域能力效能的一个实例, 二者之间的差别由隶属度函数 $\mu: X \rightarrow [0,1]$ 表示, 差别的大小就是效能值。效能值的大小如何确定, 这里根据效能的类型差别将其划分为两类:

(1) 说明预期效果的效能值。此类效能值说明的是待建系统完成预期的使命、任务、作战活动以及能力效果的预想完成程度，无法通过具体的性能指标计算得出，只能直接给定一个预期值；

(2) 可以计算度量的效能值。此类效能值可以通过对系统可测性能值的数学计算最终得出，例如通过对车速性能的度量，给出快慢效果的评价。这种效能值通过效能评估函数得出，下一节具体介绍该函数。

1.2.2 提高语言领域适用性

文献[9]指出 UML 在领域特定建模中存在领域适用性问题，为了提高模糊 UML 在能力建模中的领域适用性，可以使用能力元模型扩展 UML 的构造子，形成一种兼顾能力功能和效能分析的领域特定建模语言 (Domain-specific Language, DSL)。DSL 中构造子的元类型 (stereotype) 取自领域知识中的概念，如：使命、任务、效能、能力等。结合以上技术，并以城市防空领域为背景，这里构建其领域知识模型，见图 2。

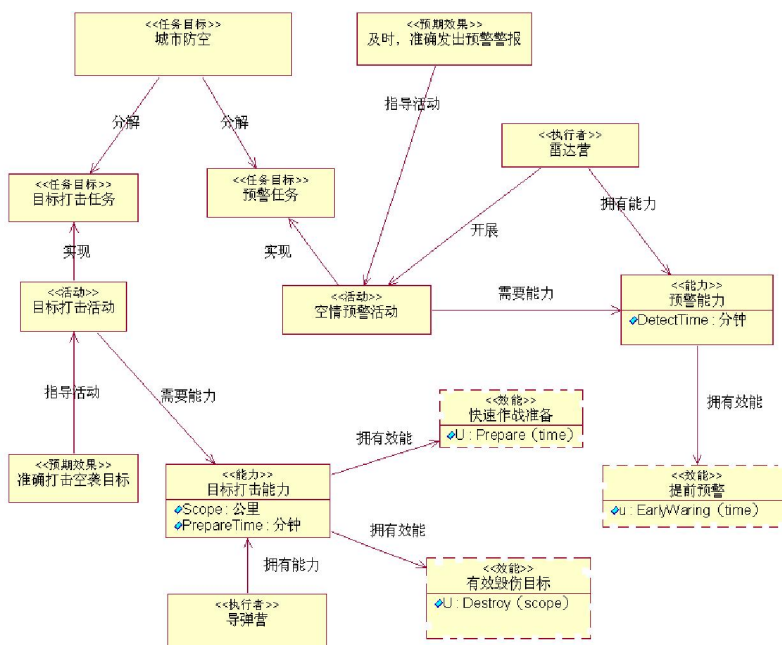


图 2 城市防空领域知识模型

2 效能评估函数

2.1 基于贝赛尔曲线的效能计算

我们已经指出效能值可以建模为模糊类第一层模糊性 μ 值。为了辅助技术人员评估具体系统的效能值，本文提出效能评估函数，通过该函数计算能力的效能值。

定义 1 效能评估函数是一个将效能特征转换为实现其相应预期效果概率值的函数。

如何确定效能评估函数的形式是能力需求中效能建模的一个重要问题。在构建效能评估函数时，领域专家应该考虑到效能评估函数的相应特征，从使命任务出发，充分考虑业务活动中，可能会影响效能发挥的各种因素，结合领域经验，通过一些样本点，确定函数的基本形式，下面给出一种基于 Bézier 贝赛尔曲线的效能评估函数确定算法。

Bézier 曲线是一种采用样条逼近的方法来描述曲线，其许多良好性质使它在外形设计中易用、易实现。所以，Bézier 曲线在许多图形系统和 CAD 系统中得到了广泛的应用[11]。

定义 2: 一个具有 $n+1$ 个样本点的 Bézier 曲线 $p \triangleq (p_0, \dots, p_n)$ 的形式是：
$$f(t, n, p) \triangleq \sum_{k=0}^n B_{n,k}(t) P_k$$
，其中 $t \in [0, 1]$ ，

$P_k \triangleq (x_k, y_k)^T$ ， $B_{n,k}(t) = \binom{n}{k} t^k (1-t)^{n-k}$ 是伯恩斯坦 Bernstein 多项式。由于 $f(t, n, p) \in R^2$ ，我们通常指派

$f(t, n, p) = [f_x(t, n, x), f_y(t, n, y)]^T$, 其中 $x \triangleq (x_0, \dots, x_n)$, $y \triangleq (y_0, \dots, y_n)$ 。

基于 Bézier 曲线的效能评估函数由左右两条单调变化的 Bézier 曲线 $\mu_{A_L}(x)$ 和 $\mu_{A_R}(x)$ 组成:

$$[x(t), \mu_{A_L}(x(t))]^T = \mu_{A_L}^{\rightarrow}(t, n_L, \mathbf{p}_L) \triangleq \sum_{k=0}^{n_L} B_{n_L, k}(t) \mathbf{p}_{L, k},$$

$$[x(t), \mu_{A_R}(x(t))]^T = \mu_{A_R}^{\rightarrow}(t, n_R, \mathbf{p}_R) \triangleq \sum_{k=0}^{n_R} B_{n_R, k}(t) \mathbf{p}_{R, k},$$

2.2 效能计算效果分析

这里以防空导弹打击能力的目标毁伤效能评估函数为例，分别从效能评估函数应对使命任务、外界环境变化的敏感性两个方面，说明效能评估函数在领域模糊信息建模中的作用。目标打击能力是一个明确的概念，具有打击范围 (Scope) 属性。该能力具有有效毁伤目标效能，效能值由 Destroy(scope) 函数计算得出 (scope 是表示打击范围的变量)，见图 2。

防空任务分为远程防空和近程防空两类，以近程防空为例，根据本文提出的基于 Bézier 曲线的效能评估函数构建方法，首先由领域专家给出部分样本数据点，见下表 1:

表 1 近程防空导弹效能参数

k	$P_{L,k}$		$P_{R,k}$	
	scope _{L,k} (公里)	$\mu_{L,k}$	scope _{R,k} (公里)	$\mu_{R,k}$
0	0	0.0	15	1
1	1	0.5	20	0.7
2	10	0.9	25	0.3
3	15	1.0	30	0.0

表 1 中给出了导弹打击能力的毁伤效果效能评估函数 (Destroy(scope)) 左右 Bézier 曲线的样本点。从样本数据容易发现，完成近程防护任务导弹的最大打击范围是 30km，当打击范围在 15 km 左右，目标毁伤效果最优。依据本方法，通过表中的样本点，得出以下 Destroy(scope) 效能评估函数，见图 3:

$$Scope_L(t) = 3t + 24t^2 - 12t^3, \quad \mu_L(t) = 1.5t - 0.3t^2 - 0.2t^3; \quad Scope_R(t) = 15 + 15t, \quad \mu_R(t) = 1 - 0.9t - 0.3t^2 + 0.2t^3$$

下面分别从效能评估函数应对使命任务、外界环境变化的敏感性两个方面，说明基于 Bézier 曲线的效能评估函数的优势特点。

2.2.1 不同使命任务下的效能评估函数变化情况

表 2 远程防空导弹效能参数

k	$P_{L,k}$		$P_{R,k}$	
	scope _{L,k} (公里)	$\mu_{L,k}$	scope _{R,k} (公里)	$\mu_{R,k}$
0	5	0.0	30	1
1	10	0.7	40	0.7
2	20	0.9	45	0.1
3	30	1.0	50	0.0

前文指出当使命任务发生变化而引起样本数据改变时，效能评估函数应该随之变化，并准确的反映样

本点的变化情况。假设使命任务由现有的近程防护, 转变为远程防护任务, 防空导弹的打击范围由 30km 扩展到 50km, 领域专家根据经验数据给出远程防护任务样本数据点, 见表 2:

同理, 构建远程防护任务的 Destroy (scope) 效能评估函数, 函数图形见图 4:

$$Scope_L(t) = 5 - 5t + 15t^2 + 15t^3, \quad \mu_L(t) = 2.1t - 1.5t^2 + 0.4t^3; \quad Scope_R(t) = 30 + 30t - 15t^2 + 5t^3, \quad \mu_R(t) = 1 - 0.9t - 0.9t^2 + 0.8t^3$$

图 4 比较了使命任务发生变化后, Destroy (scope) 效能评估函数的改变情况。我们可以发现, 在不同的使命任务下, Destroy (scope) 效能评估函数可以随着任务样本数据的改变, 而相应发生改变。

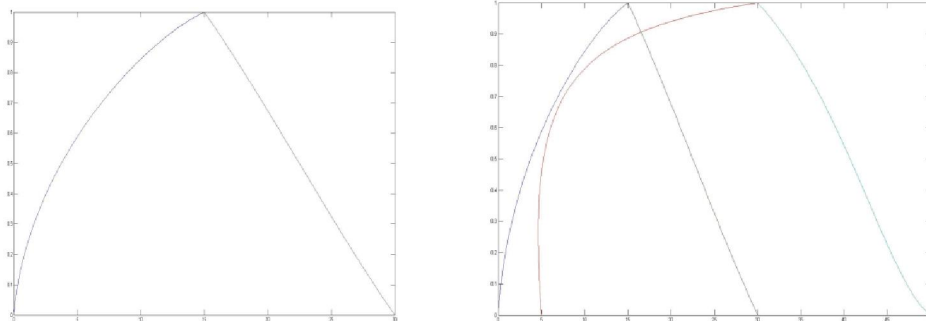


图 3 近程防空导弹毁伤效能评估函数曲线图 4 近、远程防空导弹毁伤效能评估函数对比曲线

2.2.2 相同使命任务下, 外界环境影响下的效能评估函数变化情况

在相同的使命任务下, 人、天气、环境等外界因素可能会影响系统的性能发挥, 进而影响效能评估值的大小。本方法也可以体现上述外界因素对系统效能的影响, 主要体现在两个方面:

(a) 在效能评估函数中, 性能变量是效能评估函数的自变量, 由于效能评估函数是一个单射函数, 因此对于任何给定的性能参数, 都可以通过函数计算得出相应的效能评估值。当系统的性能受到外界因素而改变时, 就可以直接借助效能评估函数计算得出效能新值。

(b) 在能力元模型中, 能力元本体定义了环境、执行者等外界因素元概念, 同时构建了上述概念与系统效能概念之间的元关系, 因此依据模糊 UML 建模理论, 某项外界因素概念效能评估值的改变必然会影响到与之关联的系统效能值, 那么在后续的逻辑推理判断中, 就可以通过推理判断系统的效能是否可以支持完成系统的使命任务。

4 案例分析

下面以一个假想的某城市防空系统为例, 说明本文所提出的 C4ISR 系统效能需求建模与分析方法理论的可行性。这里采用本课题组开发的 OBCREAT1.0 工具作为需求开发分析环境, 该工具支持 UML2.0 和形式化推理技术。假设某城市是一个中小城市, 以城市中重点防护区域为中心, 一定半径范围内为受保护区域。城市防护任务由导弹营完成, 导弹营部署两种防空导弹, 根据保护范围的差别分为近程防护导弹和远程防护导弹两类, 各自打击效果见表 1 和表 2。应用模型中, 应用任务概念保护 X 城市任务是一个模糊概念, 具有效能评估函数 Importance, 用于评估城市的重要程度 (这里假设城市的规模越大, 重要性越大)。根据城市防空任务的特点, 领域专家首先定义一条合理性规则: 如果城市的重要性为 n, 那么防空部队的目标打击能力毁伤效果必须大于等于 n。此外附加一个假设条件, 假设城市防护范围为 10 公里, Importance 效能值为 0.8; 城市防护范围为 20 公里, Importance 效能值为 0.9。

首先在应用需求模型中设定城市防护范围, 以及导弹打击范围为 10 公里, 见图 5。此时根据表 1 和表 2, X 近程导弹的毁伤效果是 0.9, X 远程导弹的毁伤效果是 0.7, 因此 X 远程导弹的毁伤效果不满足任务的要求。采用 OBCREAT1.0 工具模型验证结果见图, 模型检验结果与预想结果一致; 同理将城市防护范围和导弹打击范围扩大为 20 公里, 此时 X 近程导弹的毁伤效果是 0.7, X 远程导弹的毁伤效果是 0.9, 近程导弹的毁伤效果不再满足新的任务要求, 必须采用远程导弹完成新任务, 工具分析结果与预期效果一致, 这里不再列举。两种任务下的模型检验结果说明, 本方法一方面可以在需求分析阶段发现不满组使命、任务要求

的非功能需求；另一个方面，在不同的使命和任务背景下，可以为技术和军事人员针对武器装备的选择提供参考依据。

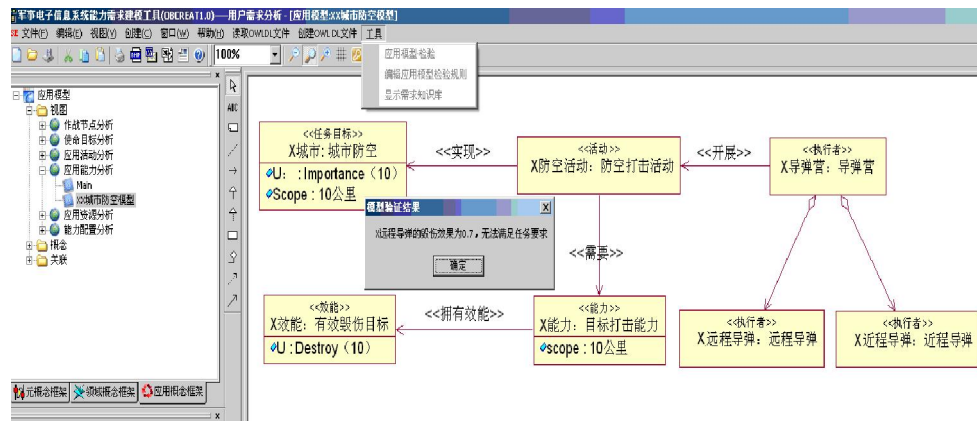


图5 某城市防空系统应用模型

5 总结

本文针对 C4ISR 系统能力需求分析中非功能需求的建模分析问题，提出了一种模糊扩展的效能需求建模与分析方法。方法首先定义了一种兼顾功能和效能建模的能力需求三层建模框架，此外针对效能需求中存在的模糊信息难以表示的问题，改进了现有的 UML 建模语言，提出了效能评估函数。通过案例分析可以发现，较传统的效能分析技术，该方法操作简单，直观，便于普通技术人员的理解与使用。

参考文献:

- [1]UK Ministry Of Defence. MOD architecture framework overview version 1.0 (MODAF-M09-002) [S/OL]. <http://www.modaf.org.uk/>.
- [2]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.
- [3]US Department of Defense. DoD architecture framework version 2.0 (Volume I-II-III) [S/OL]. <http://www.us.army.mil/suite/page/454707> MOD Partner, 2009.
- [4]The Open Group. Part III: ADM Guidelines and Techniques, TOGAF Version 9 [S/OL]. <http://www.opengroup.org/architecture/togaf9/download.htm>, 2009.
- [5]OMG Group. OMG Unified Modeling Language, Superstructure. Version 2.4.1 [EB/OL]. [2011-08-05]. <http://www.omg.org/spec/UML/2.4.1/Superstructure>.
- [6]Ma, W. J. Zhang, W. Y. Ma. Extending object-oriented databases for fuzzy information modeling [J]. Information Systems, 2004, 29(5): 421-435.
- [7]金芝. 基于本体的需求自动获取[J]. 计算机学报, 2000, 23(5):486-492.
- [8]Ma, Z., Zhang, F., Cheng, J., Yan, L., 2011. Representing and reasoning on fuzzy UML models: A description logic approach[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(3), 2536-2549.
- [9]Dong QC, Wang ZX, Zhu WX, He HY. Capability requirements modeling and verification based on fuzzy ontology[J]. System Engineering and Electronics, 2012, 23(1),2012:78-88.
- [10]郭齐胜, 鄧志刚, 杨瑞平等. 装备效能评估概论[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [11]Andres L, Shu-Cherng F. An efficient and flexible mechanism for constructing membership functions [J]. Journal of Operational Research, 2002, 139 (2002):84-95.