

# 采办协同工程中的不确定多属性决策技术

冯 珊<sup>1</sup>, 郭四海<sup>1,2</sup>

(1. 华中科技大学 控制科学与工程系, 武汉 430074; 2. 武汉理工大学 自动化学院, 武汉 4300701)

**摘 要:**针对复杂武器装备采办协同工程全寿命周期、全系统、全方位的决策需求,在分析了虚拟采办 SBA 信息具有宏观、定性和不确切特点基础上,提出将不确定多属性决策引入到 SBA 问题空间的策略. 通过将 SBA 问题求解过程分解与归纳为不确定多属性决策过程,继而根据 SBA 信息不确定类别确定解的获取方式,从而将理论上的复杂采办决策问题转化为能工程化处理的迭代逼近的数值计算,并建立了基于 Web 服务的多属性个人决策和群体决策 2 类不确定算法工具包. 最后在 SBA 协同工程平台中检验了该方法的可行性和工具包使用有效性.

**关键词:**虚拟采办; 决策支持技术; 不确定多属性决策; 协同工程环境

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2010)04-0283-09

## Uncertain multiple attribute decision making techniques in a cooperative engineering environment

FENG Shan<sup>1</sup>, GUO Si-hai<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Systems Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430074, China.)

**Abstract:** Acquisition requirements for complex weapon systems in a cooperative engineering environment include an analysis of the full life cycle of the total system and an all-round, multi-angle [multi-discipline?] view of the problem. Analysis of the system for business automation (SBA) procedures for virtual acquisition revealed them to be macroscopic, qualitative and inaccurate. A multi-attribute decision making system was therefore developed for the SBA problem space. With this method, the process of solving an SBA problem was reduced to an uncertain and multi-attribute decision-making process. Then according to the degree of uncertainty in the SBA information, the decision making problem was further transformed into an iterative approximation of a numerical calculation. Based on web services, two multiple attribute software packages were developed, one for individual decision-making and the other for group decision-making. Finally, on the SBA cooperative engineering platform, we verified the feasibility of the proposed method and the effectiveness of the software packages.

**Keywords:** virtual acquisition; intelligent decision support technique; uncertain multiple attribute decision making; cooperative engineering environment

虚拟采办 SBA (simulation based acquisition) 主旨是基于建模与仿真技术使能的协同工程环境支撑下,决策者依靠有关潜在解(备选方案)及其风险的充分知识,在最恰当的时机获得满意的采办决策,使真实采办更好、更快和更便宜<sup>[1-3]</sup>. SBA 的驱动因素是军事需求,它的表达常是宏观、定性和不确切的简

略说明. 决策者在信息不确定、不完备、可改变条件下,提出备选方案集,使之在智能决策支持系统辅助下演化为实用方案. 决策机制应从 SBA 初始阶段即开始介入,并贯穿于系统采办全生命周期,并且决策过程与真实采办过程并发进行,不断地将改进方案反馈到真实采办过程中,只有通过以决策者为中心的知识创新及其决策认知能力提高的反复的过程,才能降低采办风险,达到采办装备的最佳效费性能,最终提供满足采办目标和用户需求的武器系统.

在武器装备系统采办协同工程的全生命周期的各阶段,决策主体(们)面对的主要困难就是如何处

收稿日期: 2009-01-15.

基金项目: “十一五”国家部委资助项目(513040501); 国家部委重点基金资助项目(9140A04050707); 国家自然科学基金重大基金资助项目(79990580).

通信作者: 冯 珊. E-mail: sfeng@mail.hust.edu.cn.

理与决策客体相关的信息随机性、模糊性、粗糙性、时变性和由之产生的多重不确定性。采办使命要求决策者在能采集到的有限信息基础上,通过甄别、筛选、集结等处理过程,适时作出抉择,形成初步方案,再通过个人理性决策和群体研讨决策循环迭代的逼近最优解过程,使初步方案演化为满意方案。本文在对 SBA 中不确定决策特点进行分析的基础上,提出基于 Web 服务的多属性个人决策和群体决策 2 种算法工具包,旨在支持将不确定的 SBA 问题求解转化为确定性决策和代数方程组问题求解,从而成为在 SBA 协同工程平台上供决策者易于掌控的辅助工具集。基于不确定多属性算法工具包,本文建立的 SBA 不确定多属性决策案例从 SBA 任务需求描述、任务演进、研讨模型与决策灵敏度分析 4 个方面描述了如何从少参量、信息不完整的采办需求演化成多参量、信息较完整的概念设计多属性决策的全过程。

## 1 SBA 中不确定决策特点分析

SBA 中的不确定性可以体现为在多属性决策过程中的许多方面,如决策属性值有区间数和语言类型,决策权重有完全未知和部分未知等形式。针对 SBA 中不确定性的特点首先建立不确定多属性决策算法工具包,再通过预置的智能选择机制,决策用户可从算法工具包中选用适合当前具体采办任务的决策方法集合,由此切入备选方案集生成、评估和排序、进而运用群决策方法考察群体的选择等 SBA 决策全生命周期过程<sup>[4-6]</sup>。

### 1.1 SBA 中不确定多属性决策定义

记  $M = \{1, 2, \dots, m\}$ ,  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  有如下定义,称  $A = (X, W, F)$  为一个多属性决策模型,其中  $X$  为方案集,  $X = \{x^1, x^2, \dots, x^m\}$  表示多属性决策的方案;  $W$  为属性权重集,  $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ ,  $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ ;  $F$  为属性集  $F = \{f_j | \omega_j \rightarrow x_j^i\}$ , 其中  $x_j^i$  为方案  $x^i$  的第  $j$  个属性值,  $A$  为决策目标,多属性决策的目标是从已知方案集  $X$  中得到一个满意方案、一组方案满意度的排序或方案的分类。对一个多属性决策  $A = (X, W, F)$ , 当  $W$  和(或)  $F$  为不确定值时,称为不确定多属性决策<sup>[7-9]</sup>。

根据不确定多属性决策的定义,在 SBA 系统中涉及的多属性决策问题的方案集  $X$  一般已知确定,采办决策者需要根据权重集  $W$  和属性集  $F$  综合得出决策结果。根据采办经验和有限的采办数据分析,采办决策者往往不能给出决策属性值或权重精确信

息,因此将采办目标系统能掌控和获取的信息按属性值和权重不确定类型划分为以下类型。在虚拟采办实际决策过程中,权重  $W$  不确定形式包括以下 5 类:

1) 属性权重完全未知。这种不确定多属性决策无法给出关于属性权重的任何信息。

2) 仅有方案偏好的权重信息。这种没有直接给出属性权重量化数值,但决策者对方案有偏好,即对属性的偏好隐藏于对方案的偏好中给出。

3) 属性权重信息不完全已知。属性权重的不完全信息至少包括以下 3 种情形: ①  $\omega_i \geq \omega_j$ ; ②  $\omega_i - \omega_j \geq \alpha_i$ ; ③  $\alpha_i \leq \omega_i \leq \alpha_i + \varepsilon_i$ 。其中  $\alpha_i$  和  $\varepsilon_i$  为非负常数。①和②中  $\omega_i$  和  $\omega_j$  具有一定的可比相关性,③中描述属性权重为区间形式,属性  $\alpha_i$  和  $\varepsilon_i$  为非负常数。

4) 属性权重表示为模糊数。常采用的模糊数为梯形模糊数和三角模糊数。在决策者无法以精确的数值给出属性权重时,以模糊数表示权重是较好的选择。

5) 可知属性之间的两两判断关系。这种情况没有直接给出属性权重,而是利用一定的标度对属性进行两两比较,得到判断矩阵,一般是构造互反判断矩阵和模糊互补判断矩阵、残缺互补判断矩阵、混合判断矩阵等。

在虚拟采办实际决策过程中,将方案属性集  $F$  不确定形式分为以下 3 种类型:

1) 属性值为区间型。属性值为区间数即决策者对属性以区间值形式进行决策,如方案属性集合  $\{x_j^i\}$  中的元素都是区间型数值  $\tilde{a} = [a^L, a^U] = \{x | a^L \leq x \leq a^U\}$ 。

2) 属性为语言值。决策者通过设定一组语言评估标度对决策问题进行测度。常用的语言标度有(低、中、高), (很差、差、一般、良好、优)等。

3) 属性值为模糊数。决策者评估方案的属性值不是以确定的数值给出,而是以梯形模糊数或三角模糊数形式给出。

### 1.2 不确定多属性决策算法工具包

通过把 SBA 决策中的不确定信息按属性值和权重划分成不同类别分别处理,建立的不确定多属性决策算法工具包可以支持决策者提升关于“问题-解”的知识深度,不但是将理论上的复杂采办决策问题工程化处理的一种务实的方法,也是通过可执行的简单数值计算的迭代逼近复杂问题求解的一种定性定量相结合的有效方法。目前已经实现的不确定多属性决策算法工具包包括 2 类算法

工具:基于 Web 服务的多属性个人决策算法工具包和基于 Web 服务的群决策算法工具包。

1) 基于 Web 服务的多属性个人决策算法工具包. 该工具包收入了基于 OWA 算子的多属性决策方法、基于信息熵的多属性决策方法、基于投影的区间值多属性决策方法、逼近理想点的区间值多属性决策方法等普遍认可的 45 种常用多属性个人决策

算法,并根据 Web 服务提供方式对其进行标准化,为了提高算法计算精度和效率,采用 Matlab R2007 作为 Web 服务计算平台,并对输入输出数据进行规范化处理. 表 1 和表 2 分别是该工具包中按决策属性集  $F$  和权重集  $W$  的不确定类型进行分类的部分决策算法说明.

表 1 按决策属性集  $F$  分类的工具包算法说明

不确定类型	典型决策方法	主要算法
属性值为区间型	基于可能度的多属性决策方法	$\begin{cases} r_{ij}^L = a_{ij}^L / \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{ij}^U)^2} \\ r_{ij}^U = a_{ij}^U / \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_{ij}^{L2})} \end{cases} \quad i \in N, j \in I_1$
属性值为语言型	基于 GIOWA 的多属性决策方法	$\begin{aligned} \tilde{z}_i(\omega) &= \text{GLOWA}_w(\langle r_{i1}, \pi_1, \bar{\alpha}_{i1} \rangle, \dots, \langle r_{im}, \pi_m, \\ \bar{\alpha}_{im} \rangle) &= \sum_{j=1}^m \omega_j b_{ij} \end{aligned}$
属性值为模糊数型	基于理想点 LHA 的多属性决策方法	$\begin{aligned} D(\tilde{x}^+, \tilde{x}_i) &= \omega_1 D(\tilde{r}_1^+, \tilde{r}_{i1}) \oplus \omega_2 D(\tilde{r}_2^+, \tilde{r}_{i2}) \oplus \dots \oplus \\ &\omega_m D(\tilde{r}_m^+, \tilde{r}_{im}), i \in N \end{aligned}$

表 2 按权重集  $F$  分类的工具包算法说明

不确定类型	典型决策方法	主要算法
权重未知	基于离差的多属性决策方法	$\omega_j = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n  r_{ij} - r_{kj} }{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n  r_{ij} - r_{kj} }$
权重为偏好	基于最小偏差的多属性决策方法	$v(k) = \sqrt{\frac{\sum_{j \neq m} \frac{b_{mj} \omega_j(k)}{b_{jm} \omega_m(k)}}{\sum_{j \neq m} \frac{b_{jm} \omega_m(k)}{b_{mj} \omega_j(k)}}$
权重部分未知	基于方案满意度的多属性决策方法	$\rho_i(\omega) = \frac{Z_i(\omega) - Z_i^{\min}}{Z_i^{\min} - Z_i(\omega)}, i \in N$
权重为语言模糊数	基于 LWM 的多属性决策方法	$\begin{aligned} z_i^{(k)}(\omega) &= \text{LWM}_\omega(r_{i1}^{(k)}, r_{i1}^{(k)}, \dots, r_{im}^{(k)}) = \max_{j \in N} \min \{ \omega_j, r_{ij}^{(k)} \}, \\ j &\in N, k = 1, 2, \dots, t \end{aligned}$
权重为判断矩阵	基于模糊互补判断矩阵的多属性决策方法	$\theta = \frac{e_m Q^{-1} g_m^T - 1}{e_m Q^{-1} e_m^T}, \omega = Q^{-1}(g_m^T - \theta e_m^T)$

2) 基于 Web 服务的多属性群决策算法工具包. 针对 SBA 过程的特点,群体研讨决策主要解决个人理性决策基础上的多层次、多领域专家研讨协同决策. 基于 Web 服务的群体决策集结算法工具包收入

了具备明确性、中性、匿名性、单调性、齐次性和 pareto 最优性的 6 种常用社会选择函数和基于特征向量方法的 25 种多属性群体决策算法. 可以根据群体决策的不同需求支持多个决策者各自持有对备选方

案的优劣排序结论,通过不同函数运算得出最具群体代表性的方案排序,或与个人决策结论最一致的群决策结论.表3给出工具包中典型的群决策算法.

表3 工具包中典型群决策算法

方法类型	典型方法
社会 选择 函数	➢ Borda-函数
	➢ Condorcet-函数
	➢ Copeland-函数
	➢ Nanson函数
	➢ Kemeny函数
	➢ Cook-Seiford函数
多属性 群体 决策 方法	➢ 基于CWGA的多属性群体决策方法
	➢ 基于模糊判断矩阵的多属性群体决策方法
	➢ 基于EOWA的多属性群体决策方法
	➢ 基于理想点和LHA的多属性群体决策方法

## 2 SBA 中不确定决策实施策略

运用不确定多属性决策方法在 SBA 任务中具体解题路线是:在采办决策问题空间,将现实复杂任务归结为不确定多属性决策问题,决策者应确定属性集、权重、可能的算法,收集相应信息,并根据信息的类别确定解的获取方式.

Matlab 在科学计算领域则具有强大的功能,尤其在人工智能领域拥有众多功能强大的函数库,可以较为容易的实现功能非常复杂的不确定多属性决策算法,因此不确定多属性决策算法工具包采用 Matlab 来实现相应的算法设计和运算.采用了组件编程的思想,应用 Matlab Builder for .NET 将上述算法封装为 COM 组件,然后在 Visual Studio 2005 中将不确定多属性决策算法 COM 组件包装成 Web 服务方式供分布式用户方便调用,并设计友好的用户交互界面,从而实现 B/S 模式下的基于 Web 服务的不确定多属性决策算法工具包.不确定多属性决策算法的设计演化过程如图 1 所示.下面详细说明演化过程中各阶段具体工作.

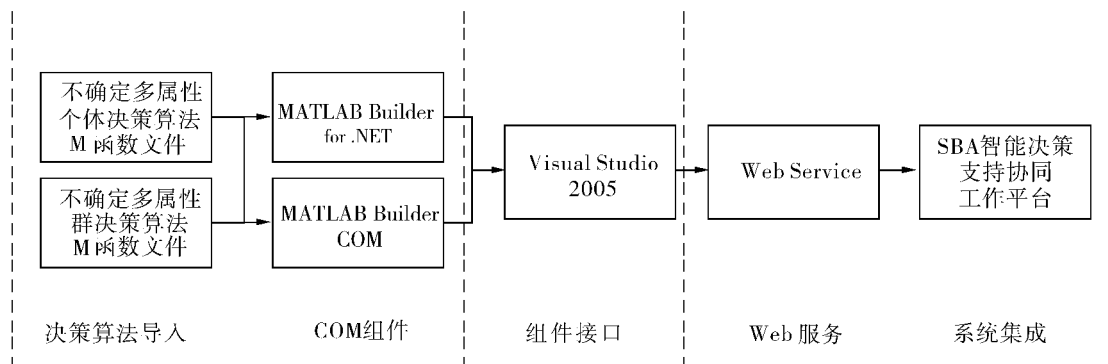


图1 不确定多属性决策算法设计演化过程

1) 决策算法导入. 先根据预选的不确定多属性决策方法理论,设计其详细的算法流程,再依照 Matlab 的语法编写算法 Matlab 函数,经过编译无误后保存为 M 文件.

2) 封装决策算法组件. 通过 Matlab Builder for .NET 工具将已经编写完毕的不确定多属性决策算法 M 文件转变为 .NET assembly 类库或 COM 对象提供给分布式 Web 服务调用,并可支持在未安装 Matlab 的平台上运行所用的计算引擎.

3) 通过标准接口调用生成的算法组件. 在 Visual Studio 2005 平台中调用算法其标准接口,可以实现组件与调用方输入输出的标准化,优点是不确定多属性决策组件本身不用提供多种接口,特别当不确定多属性决策方法更新后接口有变化时也不用对

所有使用该方法的模块进行修改,降低系统维护成本,提高了系统灵活性.

4) 决策 Web 服务形成. 基于 Web 决策服务方式实现在 Internet 上 SBA 决策模型的动态调用与互操作. 决策服务封装了离散的决策模型与计算模型,每一个决策服务的模块都有明确的接口、输入、输出、功能等方面的描述,并通过服务提供者、服务注册中心与服务申请者 3 类角色的交互执行发布、查找、绑定等基本操作. 在具体 Web 服务调用过程中,决策方法服务将通过输入接口得到的决策数据经过相应处理后,在服务器端调用计算引擎进行精确的计算并将结果返回给对应的决策方法 Web 服务,再由 Web 服务以 XML 格式的输出返回给调用方查看结果. Web 决策服务工作体系见图 2 所示.

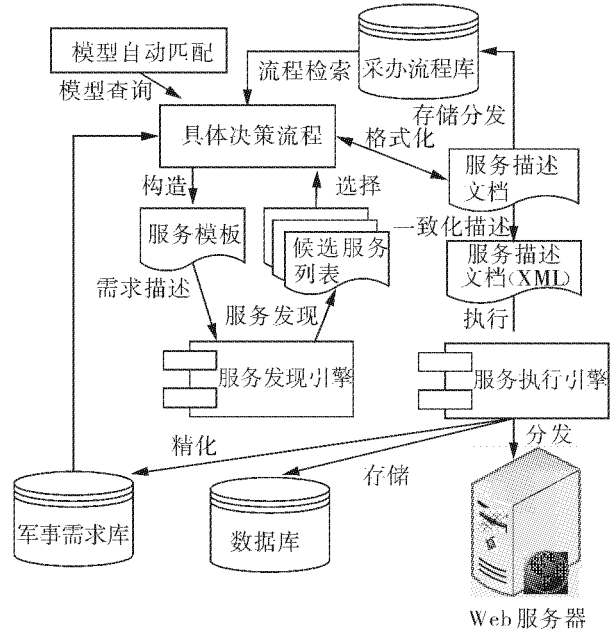


图2 采办 Web 决策服务工作体系

3.1 SBA 任务需求描述

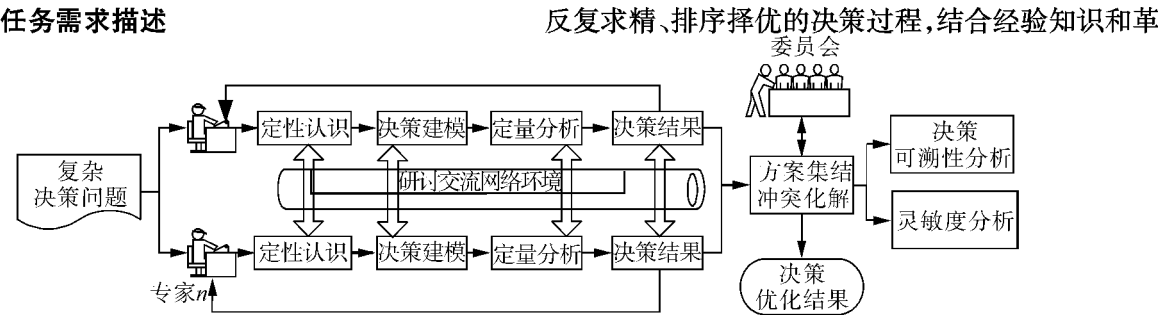


图3 SBA 决策形成过程示意图

进行 SBA 复杂问题决策之前,首先需要对相关军事需求文件进行理解并形式化描述,该形式化描述要求不仅要能准确表达 SBA 这类大型复杂系统,达到便于用户正确理解与系统分析决策的无二义性,而且还要有利于机器的自动处理,从而提高人一机解决复杂问题的能力.由于武器装备虚拟采办中使用不同来源的各种数据、信息、知识、模型通常有各种不同的表达规范,为了达到采办决策主体间基于共享信息的共识和模型与仿真可重用和互操作的要求,所有数据/信息/知识/模型/仿真均采用 XML 进行统一描述.

相应实施的 SBA 任务需求描述策略中,首先将下达的军事需求指南文件转换成 XML 格式的描述文件,在对上述需求文件理解形成初步作战概念、功能概念和体系结构的基础上进行采办初始分析,采取渐进方式逐步细化采办需求形成备选方案集,然后采用基于 XML 的方案描述格式形成可供人一机系统共同使用的备选方案集,然后在此基础上再经过

3 SBA 中不确定决策案例

本文以防空导弹虚拟采办为例说明在 SBA 不确定决策方法的应用.在 SBA 全生命周期中的各个阶段均存在决策需求,如在概念设计阶段,需要对多种备选方案进行比较,以便从中选出最佳的或折中的方案;在方案实施阶段,需对实际的部署情况与设计方案进行比较,确定实施方案总体性能是否到达设计要求;在武器装备使用阶段,需对战斗部署方案进行跟踪决策,以便及时发现问题,调整部署方案.这里仅以概念设计阶段为例说明 SBA 不确定决策方法实施的步骤和评估结果.在 SBA 协同工程环境中,实现从决策问题提出到决策优化结果的全过程如图 3 所示.

反复求精、排序择优的决策过程,结合经验知识和革

表4 军事需求文件对照表

文字描述	XML 描述
基本信息描述	< SBAMID > < InfList Name = "BaseIn" Memo = "基本信息描述" >
采办目标	< CoDetailModel Memo = "采办目标" >
采办任务范围	< CoSBATaskRange Memo = "范围" Content = " " >
关键边界条件	< SBAkeyId Value = " " Memo = "边界条件项" /> < SBAkeyName Value = " " Memo = "边界条件值" />
作战环境	< CoSBAEnv Memo = "环境" Content = " " > < /InfList >

续表4

文字描述	XML 描述
技术性能描述	< TecList Name = " SchemeContent " Memo = " 技术性能 " >
战术性能	< Tactics Memo = " 战术性能属性 " >
飞行速度	< Speed Unit = " Ma " Value = " " Memo = " 飞行速度 " / >
射程	< Range Unit = " Km " Value = " " Memo = " 射程 " / >
作战高度	< Altitude Unit = " Km " Value = " " Memo = " 作战高度 " / >
...	< /Tactics > < /TecList > < /SBAMID >

### 3.2 SBA 任务演进

由于上述军事需求文件通常是少参量、信息不完整的,为了形成多参量、信息较完整的决策方案,需要通过采办全生命周期中各类活动进行分析从而实现螺旋上升式的演化过程,目标是确定具体武器装备系统的作战使用性能、战术技术指标,采办全生命周期的规划和目标,具体演化内容从功能领域分析和功能需求分析与2个方面展开。

功能领域分析主要是分析识别作战任务、条件、标准和完成军事任务的标准,确定将要执行的作战任务,包括确认武器装备采办全局信息和确定关键指标2类具体任务,具体包括以下分析内容:

1) 从军事需求文件衍生具体采办任务信息. 确定采办任务名称、类别、任务解释、重要程度、密级、目的、牵头单位、支持单位、开始时间、预期结束时间、任务来源等。

2) 构建采办任务全生命周期相关阶段信息. 确定阶段名称、开始时间、数据来源、是否需要 VV&A、结束时间、限制条件、阶段目标等,并建立采办全生命周期中各阶段的相互关系。

3) 构建采办全生命周期各阶段详细内容. 采用多种可扩展节点方式详细描述采办各阶段的相关内容,并可容易转换成 XML 格式文件用于后续的分析 and 决策。

4) 构建采办进度规划. 按照采办持续时间具体分配各阶段及各项决策任务的进度。

5) 绘制采办任务 workflow 示意图. 在系统提供的工作流绘图板中初步描述采办工作流程作为后续具体任务分配的指导依据。

6) 形成具体采办武器系统总体关键指标集. 确定与具体武器系统性能、费用、进度及风险等相关的关键指标集。

7) 形成具体采办武器系统部件关键指标集. 确定与具体武器系统重要部件相关的性能、费用、进度及风险等关键指标集。

在功能领域分析的基础上进行的功能需求分析主要完成作战任务现有的和已上项目所具有的能力,得出能力缺陷名单. 具体包括下列两类具体任务。

1) 确定采办任务基线. 对上述关键指标拟定相应的门限值和目标值,从而为武器系统分析决策提供可信的参考依据,其中门限值是武器系统作战的最低要求,必须达到;而目标值是期望达到的要求,用于辅助决策者在性能与费用/进度/风险间作出最优决策。

2) 优先级分析. 在系统提供的研讨厅环境中,邀请专家对需要进行的采办决策任务确定各自的优先排序,并采用基于理想点的群决策方法进行方案集结得出最终的任务优先级,用于辅助采办管理人员根据任务重要程度合理分配各类采办资源。

上述功能领域分析和功能需求分析不是一蹴而就的,每一次分析的结果应作为下一次分析的开始,通过螺旋上升式的不断细化扩展,最终达到可以建立采办备选方案供 SBA 研讨厅专家决策的目标. 备选方案可以是在已有系统上的改进,也可以是原创性的方案,但是必须具有技术上和经济上的综合竞争性来满足任务的需求,备选方案内容包括费用、目标、进度、性能、软件要求、总的采办策略、试验及评价策略. 那些明显不符合要求或不可能达到采办任务目标的方案应预先剔除,筛选的结果就是决策备选方案集. 可以采用个人决策和群体研讨决策2种策略对备选方案集进行排序择优。

图4所示的是在 SBA 研讨厅中邀请 10 位专家分析当前新型防空导弹采办决策任务优先级排序结果图. 本例进行采办决策任务优先级分析采用基于理想点的群决策方法进行专家群体方案集结,在个体专家确定效能决策、风险决策与费用决策的个人优先级排序结果的基础上,通过计算专家群体目标与理想点的接近程度进行集结排序。

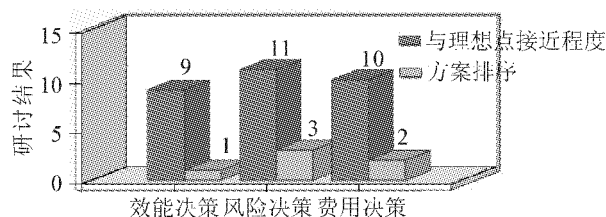


图4 任务优先级分析结果

3.3 SBA 任务研讨模型

首先根据采办任务演进结果给出本次研讨议题基本信息报告,例如议题标题、议题摘要,议题相关模型数、研讨预计轮次等,其中议题模型是指在将采办任务转化成不确定多属性决策问题时,决策者根据决策属性集、权重等信息的不确定相应选定的决策模型类别,如区间数型决策模型、语言值型决策模型、权重未知的实数型决策模型等.研讨专家可根据拟定的议题模型在不确定决策方法库中选定相应的决策算法,从而提高采办决策的效率和有效性.为了体现循环迭代、螺旋上升的研讨机制,在进行具体专家研讨前需初设定研讨轮次,并确定每轮次完成和进入下轮次的基本准则和方案淘汰机制(如末位淘汰制等),如果达到多专家一致性阈值要求,也可提前结束议题研讨,将优选方案提交研讨主持人进行里程碑决策.表 5 是防空导弹效能决策研讨议题报告中相关内容的节选部分.

其次,对研讨过程中重要的研讨模型进行按预定流程的细化,给出本次议题相关模型详细内容,例如模型名称、模型类型、模型拥有的备选方案数、备选方案属性数,相关方案详细信息等;在每一轮中可以采用多种不同类型的决策模型,从而在一定程度上弥补单一决策模型所造成的各轮决策结果趋同性.表 6 给出防空导弹效能决策模型相关内容的节选部分,所给出的是前两轮研讨决策所使用的决策模型,由于在第 1 轮研讨结束后淘汰了最劣的一个备选方案,所以在第 2 轮决策模型中备选方案数量

较第 1 轮减少.

表 5 研讨议题基本信息

信息栏目	信息内容
议题标题	防空导弹效能研讨决策
议题摘要	导弹武器系统的效能分析贯穿于方案论证、设计和作战运用等所有需要决策的阶段.根据采办任务书对新型防空导弹的效能需求,确定了 5 个备选方案供研讨.
议题下达时间	2009-3-11 16:01:53
议题模型数	6
预定研讨轮次	4

对应于不同的决策模型,根据 SBA 决策中属性不确定性,分别按表 7 所示实数型、区间型、语言型、不确定语言型 4 类方式对某一备选方案属性基本信息进行描述,继而通过不确定多属性决策方法工具包中适合方法进行决策和评估.其中区间型和不确定语言型用下限值和上限值表示方案属性的不确定性,语言型通过{极差,很差,差,较差,一般,较好,好,很好,极好}语言标度表示方案属性的不确定模糊性.

在第 1 轮决策模型中采用的研讨议题方案集属区间型属性值的不确定类别.方案属性包括射程、射高、速度、单发杀伤概率、机动过载、发射质量等 11 项,表 8 仅列出其中的 5 项.

表 6 研讨议题模型信息

模型名称	方案数	属性数	所属研讨轮次	模型类型	备注(说明)
第 1 轮决策模型 (区间值型)	5	15	1	区间值型	采用区间型数据对各采办方案的总体效能进行排序.
第 2 轮决策模型 (语言值型)	4	15	2	语言值型	采用语言型数据对各采办方案的总体效能进行排序.

表 7 研讨议题方案信息

方案描述	射程/KM	射高/KM	速度/Ma	单发杀伤概率/%	机动过载/G
实数型	70	12	3	75	23
区间型	[10,70]	[2,12]	[2,3]	[50,75]	[0,23]
语言型	一般	较差	较好	较好	好
不确定语言型	[较差,一般]	[差,一般]	[较好,好]	[一般,好]	[较好,很好]

表8 研讨议题方案信息

方案描述	射程/KM	射高/KM	速度/Ma	单发杀伤概率/%	机动过载/G
方案1	[1,74]	[4,24]	[0,3]	[30,50]	[0,2]
方案2	[2,32]	[6,14]	[0,2.5]	[30,50]	[0,2]
方案3	[3,37]	[1,20]	[0,2.5]	[30,50]	[0,1.5]
方案4	[3,80]	[3,24]	[0,5]	[40,60]	[0,4]
方案5	[4,42]	[5,24]	[0,4]	[50,76]	[0,3]

接着,参与本议题研讨的各位专家,在研讨主持人及研讨厅智能向导指引下,进行指定轮次的研讨决策.依据已经建立的议题决策模型及备选方案集基本信息,各位专家可根据自身专业知识对方案信息进行微调,并从已有不确定多属性决策方法库工具包中选定适合的决策方法并给出必要的决策信

息,最后得出本轮次专家个人决策结果,包括备选方案集的排序和数值结果等.表9给出了研讨主持人邀请4位相关领域的专家针对第一轮区间型不确定决策模型采用不确定多属性决策工具包中方法得出的个人决策结果.

表9 研讨过程专家个人决策结果

专家名称	采用多属性决策方法	方案排序	方案结果
专家1	基于投影的区间值决策方法	1,3,2,4,5	0.91,0.76,0.85,0.65,0.56
专家2	基于可能度的决策方法	1,3,2,4,5	0.23,0.20,0.21,0.18,0.16
专家3	对方案有偏好的区间值决策方法	3,2,1,5,4	0.21,0.22,0.24,0.15,0.17
专家4	基于UOWA算子的区间值决策方法	2,3,1,4,5	0.22,0.30,0.24,0.18,0.16

最后在专家进行个人理性决策基础上,研讨主持人在基于Web服务的群体决策工具包支持下对研讨专家群体结果进行意见集结.经过预定轮次的循环迭代、螺旋上升研讨精化过程后,最终可获得防空导弹概念设计的可行方案集.并根据决策灵敏度分析对采办全生命周期中的后续设计阶段提供关键参考依据,从而有利于采办顺利完成.

### 3.4 SBA 决策灵敏度分析

在SBA研讨厅中进行专家个人决策得出相应方案排序后,需要对该决策结果的稳定性进行分析,也就是需要知道决策信息的变化对方案排序结果的影响程度,若属性权重或决策矩阵中属性值的灵敏度高,则方案排序结果不稳定;反之,若灵敏度低,则结果稳定.建立的相应的决策属性灵敏度分析方法如下:

对于某一多属性决策问题,属性的权重完全确知.对于方案 $x_i$ ,按属性 $u_j$ 进行测度,得到 $x_i$ 关于 $u_j$ 的属性值 $\bar{a}_{ij}$ ,从而构成决策矩阵 $\tilde{A} = (\bar{a}_{ij})_{n \times m}$ .对于实数型数据按照效益型,成本型进行规范化,消除不同物理量纲对决策结果的影响.可以利用一下公式分别得到效益型和成本规范型 $\tilde{R} = (\tilde{r}_{ij})_{n \times m}$ .

效益型:

$$r_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^m a_{ij},$$

成本型:

$$r_{ij} = (1/a_{ij}) / [\sum_{i=1}^m 1/a_{ij}].$$

在多属性决策问题中,由于是考虑属性值的灵敏度,故将方案集记为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_m\}$ ,属性集记为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ .若方案的综合评价有 $z_i \succ z_k$ ,则称方案 $S_i$ 优于方案 $S_k$ ,记为 $S_i \succ S_k$ .方案 $S_i$ 的灵敏度计算公式为

$$\text{sens}(S_i) = \frac{1}{\min_{1 \leq j \leq n} \min_{1 \leq k \leq m, k \neq i} \{|\gamma'_{ijk}|\}}, \quad 1 \leq i \leq m$$

式中: $\gamma'_{ijk}$ 为当方案 $S_i$ 与方案 $S_k$ 之间的排序位置颠倒时, $S_i$ 关于属性 $P_j$ 的属性值 $a_{ij}$ 的最小相对变化量,即 $\gamma'_{ijk} = \gamma_{ijk}/a_{ij}$ . $\gamma_{ijk}$ 为当方案 $S_i$ 与方案 $S_k$ 之间的排序位置颠倒时属性值 $a_{ij}$ 的最小变化量, $i \leq i, k \leq m, i \neq k, 1 \leq j \leq n$ .

根据多属性决策方案灵敏度计算公式得出5个备选方案的综合灵敏度值分别为(4.5707, 3.9594, 7.1678, 9.5663, 6.6655),方案灵敏度排序为(4, 3, 5, 2, 1).每个方案在5个属性的最小变化量的相对



关系以及最终方案的灵敏度值的相对关系如图5所示。图5所示的大部分属性对于方案的最小相对变化量是一致的,也是和方案的灵敏度值是一致的,因而方案的灵敏度值和方案属性项基本是一致的,可作为主持人在多轮次研讨中不断修正备选方法的重要依据。

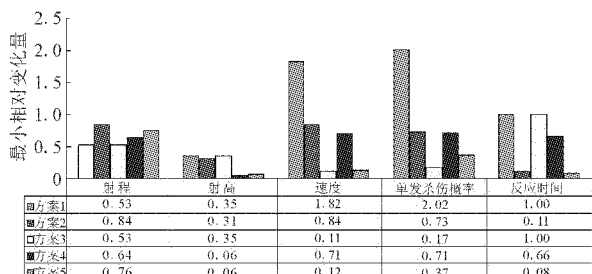


图5 SBA 决策灵敏度分布图

## 4 结束语

复杂武器装备 SBA 必须依赖决策与评估技术,美国国防部在采办建模与仿真主计划 AMSMP 系列文档中已明确指出将系统工程的决策与评估技术融入基于仿真的采办 SBA 全生命周期过程中<sup>[10]</sup>。

本文针对当代作战概念牵引的武器装备采办协同工程需求,提出了采办决策为主导的技术路线。为充分发挥定性定量综合集成方法中人-机结合,以人为原则在科学技术创新中的指导作用,进行了将复杂采办全系统、全寿命周期问题分散和归纳为不确定多属性决策问题的实践,实现了包含 70 种不同类别求解器的不确定多属性决策算法工具包,有力地支持采办决策者的采办目标方案形成与优化过程。在独立开发的 SBA 协同工程环境中,对不确定多属性决策算法工具包中的算法进行测试的结果表明,该工具包满足正确性、有效性和可用性的质量要求,具有很好的工程实用性。

建立的不确定多属性决策算法工具包可结合具体武器装备虚拟采办的先进管理方式,为我军装备管理部门进行具体武器型号发展和研制的分析、评价和决策提供科学、有效的技术依据。

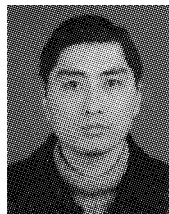
## 参考文献:

- [1] 李伯虎, 柴旭东. SBA 支撑环境技术的研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(2): 181-185.  
LI Bohu, CHAI Xudong. Supporting environment technology of simulation based acquisition[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(2): 181-185.
- [2] CHAI Xudong, LI Bohu. Research and application on service oriented infrastructure for networked M&S[C]//Proceedings of 2006 International Workshop on Distributed Simulation on the Grid. Washington, DC, USA, 2006: 113-125.
- [3] 冯珊, 郭四海, 周凯波, 等. 虚拟样机概念设计工具中的智能技术[J]. 华中科技大学学报, 2007, 35(8): 48-51.  
FENG Shan, GUO Sihai, ZHOU Kaibo, et al. Intelligent technology used in the tools for the conceptual design of virtual prototypes and its evolution[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology, 2007, 35(8): 48-51.
- [4] XU Z S, DA Q. The uncertain OWA operators[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2002, 17(6): 569-575.
- [5] EDUARDO S, SCHWARTZ C. Investment under uncertainty in information technology: acquisition and development projects[J]. Management Science, 2003, 49(1): 57-70.
- [6] 徐泽水. 基于语言标度中术语指标的多属性群决策方法[J]. 系统工程学报, 2005, 20(1): 84-88.  
XU Zeshui. A multi-attribute group decision making method based on term indices in linguistic evaluation scales[J]. Journal of Systems Engineering, 2005, 20(1): 84-88.
- [7] FRADA B, GEORGE W. Decision support in an uncertain and complex world[J]. Decision Support Systems, 43(4): 1647-1649.
- [8] YANG Z. L, BONSALL S. Use of hybrid multiple uncertain attribute decision making techniques in safety management[J]. Expert Systems with Applications, 36(2): 1569-1586.
- [9] FERNANDO G. Analysis and decision making in uncertain systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 158(24): 2767-2768.
- [10] MARK D S. Acquisition modeling and simulation master plan [OL/EB]. [2009-12-14]. <http://www.acq.osd.mil/>.

### 作者简介:



冯 珊,女,1935 年生,教授,博士生导师。主要研究方向为复杂系统建模与仿真,人工智能与计算智能的工程应用及多 Agent 系统等。多年来主持智能集成系统工程研究室工作,承担国家自然科学基金及国防预研基金重点科研项目并多次获国家及省部级科技进步奖。国内外刊物发表学术论文 160 余篇,其中有 66 篇被 SCI, EI, ISTP 及 INSPEC 等全文收录。



郭四海,男,1976 年生,博士研究生,主要研究方向为建模与仿真、人工智能技术及虚拟采办决策支持系统等。