

# 武器装备虚拟采办技术风险综合评估

冯 珊<sup>1</sup>, 郭四海<sup>1,2</sup>, 周凯波<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:** 技术风险是武器装备虚拟采办全寿命周期过程中的根源性风险, 是导致费用风险、进度风险和性能风险的主要因素。针对武器装备采办过程中技术风险的非结构特性和难以量化的问题, 在阐述了武器装备虚拟采办、技术风险、定性定量综合集成等概念的基础上, 提出了一种定性定量综合集成的技术风险评估模型, 并给出了详细的评估过程和重要步骤。最后通过防空导弹技术风险评估进行实例分析, 表明该模型在实际运用中是有效的, 具有实际应用价值。

**关键词:** 虚拟采办; 技术风险; 定性定量综合集成; 云模型

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785 (2008) 05-0384-09

## A comprehensive means for evaluating technical risk in the simulation-based acquisition model for weapon systems

FENG Shan<sup>1</sup>, GUO Si-hai<sup>1,2</sup>, ZHOU Kai-bo<sup>1</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:** When using simulation-based acquisition (SBA), technical risk is the fundamental risk in the lifecycle of the process, particularly for weapon systems. Technical risk is a major factor leading to cost, time and effectiveness risks. Because of the non-structural features of SBA, it is difficult to derive quantitative measurements of technical risk in the lifecycles of weapon systems SBA. To resolve this, the concepts of weapon system SBA were analyzed, including technical risk and comprehensive integration, then a qualitative and quantitative model for technical risk evaluation was developed. And evaluation procedures and a sequence of steps were established. Finally, to clarify the feasibility and effectiveness of the evaluation model, technical risk was evaluated for an air defense missile system.

**Keywords:** simulation based acquisition; technical risk; qualitative and quantitative meta-synthesis; cloud model

武器装备虚拟采办 SBA (simulation-based acquisition) 是开发、获取和使用高新技术武器装备的数字化全过程。它包括确定需求、设计、研制、试验、生产、部署、保障、改进、更新和最后退役处置等现实采办活动中的建模与仿真技术的运用。武器装备虚拟采办风险管理是武器装备全系统、全寿命管理的重要有机组成部分, 它旨在从武器装备采办的总目标和全寿命周期的角度出发, 通过仿真技术预测可能发生的一切事态, 采取措施规避各类风险, 从而有

效地实现有限资源在全寿命周期的优化配置。风险评估和风险对策方案的选择是基于全寿命周期的装备采办风险管理的 2 个关键问题, 而风险评估作为风险管理的前提和基础, 其重要性尤其突出。

造成主要武器装备采办项目无法实现预期目标的风险因素很多, 但最核心、最根本的是技术风险, 它在采办全程始终存在, 而且是造成费用风险、进度风险和性能风险的主要因素。据国内外 453 个航天项目研制风险案例统计分析, 结果发现技术风险发生的频率最高, 是导致项目研制失败或延误的主要风险<sup>[1]</sup>。因此, 对技术风险的识别、评估、控制和管理在武器装备采办风险管理中占据极为重要的地

收稿日期: 2008-07-17.  
基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目 (79990580); “十一五”  
国家部委预研资助项目 (4130400501); 国家部委预研重点  
基金资助项目 (40A04050707).  
通信作者: 冯 珊. E-mail: sfeng@mail.hust.edu.cn

位. 由于现代大型复杂武器装备采办的全寿命周期中采用新技术多、项目复杂性高、投入经费多,必须对其建构高效的技术风险评估模型,为其技术风险管理提供事前评估预测、事中评估预警和事后评估验证的一整套风险评估预警管理机制,从而保证武器装备采办能顺利达到预定目标.

20 世纪末,大型武器装备采办工程的技术密集型兼资金密集型活动的特征日趋明显,一项装备如弹道导弹潜艇造价达数十亿美元,从研制到服役的周期长达 15 年以上,其寿命过程中的技术风险若无严格的监察与有效的控制,可能造成研制过程中断. 如果研制中断,其损失是难以估量的. 这样的例证在各国装备采办中普遍存在. 解决问题的对策的主要出路在建模与仿真.

由于技术风险问题的复杂性和非结构化的特点,长期以来技术风险的研究成果较少,往往以定性的主观评价为主,缺乏定性定量综合集成的风险评估模型. 本文重点探讨了武器装备虚拟采办过程中技术风险的概念与内涵,构思并设计了一种基于定性定量综合集成方法的技术风险评价模型. 将该模型用于一个防空导弹采办项目总体技术风险评估实例,并在所建武器装备虚拟采办综合集成研讨系统中进行实证分析,在决策者个人决策的基础上,通过定性定量综合集成研讨过程对该技术风险复杂问题进行决策精化,获得该实例最终的总体技术风险评估结果.

本文第 1 节介绍虚拟采办技术风险评估模型,阐明虚拟采办技术风险和定性定量综合集成的概念,并对常用的武器装备技术风险评估模型进行分析比较,说明对于武器装备这类复杂产品,采用定性定量综合集成进行技术风险评估的必要性. 第 2 节集中讨论基于定性定量综合集成的技术风险模型中的多项关键技术,包括定性定量转换云模型、多专家研讨方法等,并给出了技术风险评估的具体步骤. 第 3 节是应用实例,采用该模型进行防空导弹技术风险评估. 第 4 节是结论和讨论.

## 1 虚拟采办技术风险评估模型

### 1.1 虚拟采办战略技术风险

虚拟采办于 1997 年由美国国防部仿真委员会

首次提出,即已明确其宗旨是在更小风险条件下,使采办能更好、更快和更便宜<sup>[2]</sup>. 所以,在很大程度上,虚拟采办是真实采办的一种转移风险、规避风险的技术手段. 将真实采办按串行顺序进行的单循环采办流程,改变为开发式的功能逐步升级的多循环流程, SBA 可同时探索更多方案,还可将作战概念研究和训练环节纳入仿真环境,使用户在采办过程中早期参与和持续参与达到及时确定军事需求的目的,这些优势导致采办将收敛于全局最优方案. 但这一切优势都立足于 M&S 技术可以创造逼真的装备研制与作战试验场景, M&S 的技术发展水平是否能担当此重任,成为最大的技术风险问题,并且随着作战需求的迅速改变, M&S 技术面临着日益严峻的挑战,这是举世瞩目的军用仿真技术难题,本文内容不涉及这个领域,文中的 SBA 实例默认 M&S 技术的支持完备性以简化讨论<sup>[3-4]</sup>.

### 1.2 虚拟采办实施的技术风险

目前进行虚拟采办的新型武器装备系统通常是机、电、液、气一体化的高新技术综合体,其采办过程是一个创新性的探索过程,在此过程中往往采用了大量的新技术、新工艺、新材料,因此,在采办初期,对这些新技术、新工艺、新材料能否在规定的时间内、预定的资源条件下达到规定的技术任务需求具有不确定性,这就是武器装备采办的技术风险. 一般来说,技术风险主要由技术成功的不确定性、采办的全寿命周期各个阶段存在的技术不确定性、技术效果的不确定性、技术寿命的不确定性等造成的. 因此,技术风险包括可能采用的新技术与性能方面要求有关的风险(如高精度、高速度、高机动性等),同时还涉及设计概念的可行性,或采用新工艺、新材料、新产品、新软件而导致武器装备采办“失败”的风险. 这里,“失败”的形式主要表现为以下 3 种:不能达到预定的技术任务要求(性能风险)、大大超出了预定的经费要求(费用风险)和不能在规定的时间内完成项目(进度风险)等<sup>[5]</sup>.

武器装备虚拟采办技术风险是采办项目风险在技术领域的一种体现方式,它是指在采办的全寿命周期过程中,由于技术上的不足或缺陷等所带来的危害或危险,从而对整个系统效能产生相关影响的概率和后果,具体表现形式为费用的增加或进度的

延误. 据此, 可以将武器装备虚拟采办技术风险定义为采办项目在规定时间内、在一定的经费保障条件下, 达不到预定战术技术指标要求的可能性, 或者说采办计划的某个部分出现意想不到的结果, 从而对整个系统效能产生有害影响的概率及后果.

1.3 定性定量综合集成概念

定性定量综合集成方法是由钱学森先生在对开放的复杂大系统研究的基础上提炼、概括、抽象出的一种新方法. 作为一种突破了还原论与整体论的科学方法论, 它摆脱了单纯还原论与整体论方法的束缚, 是一种方法论上的创新. 从其研究路线的角度来说, 它采取了从上而下和从下而上的路线, 从整体到部分再由部分到整体, 把宏观和微观研究统一起来, 最终从整体上研究和解决问题. 其技术实现是把专家体系、数据和信息体系以及计算机体系有机结合起来, 构成一个高度智能的人—机结合、人—网结合, 以人为主的信息、知识和智慧的综合集成系统<sup>[6]</sup>.

武器装备虚拟采办系统通常是复杂大系统, 其中的技术风险评估问题具有很强的非结构化特征,

应属多层次与多维复杂性问题, 这种问题只有通过定性与定量综合集成这种系统方法论所具备的人—机结合, 以人为主的方式, 把专家的定性知识同评价模型的定量描述有机结合起来, 实现定性变量和定量变量之间的相互转化, 形成综合集成体系 (包括总体部、专家体系和知识体系), 在多层次信息、多学科工具与经验知识并重的各种知识处理方式支持下, 渐次完成剔除参与决策者间的认知冲突的决策优化与知识精化过程, 最后获得满意解<sup>[7-8]</sup>.

武器装备虚拟采办定性定量综合集成风险评估主要包括 2 个大部分: 研讨系统综合和资源集成. 研讨系统综合主要是在风险评估各个子目标研讨决策的基础上, 进行综合系统分析, 以求最优的评价方案. 资源集成的核心思想是尽可能运用相关知识、工具、方法去解决技术风险评估问题. 从系统和软件设计的角度看, 武器装备虚拟采办风险评估研讨厅体系实质上就是一种优化的软硬件系统结构, 使信息、模型、资源和专家群体有机地联结在一起的系统集成架构. 武器装备虚拟采办定性定量综合集成研讨过程如图 1 所示<sup>[9-10]</sup>.

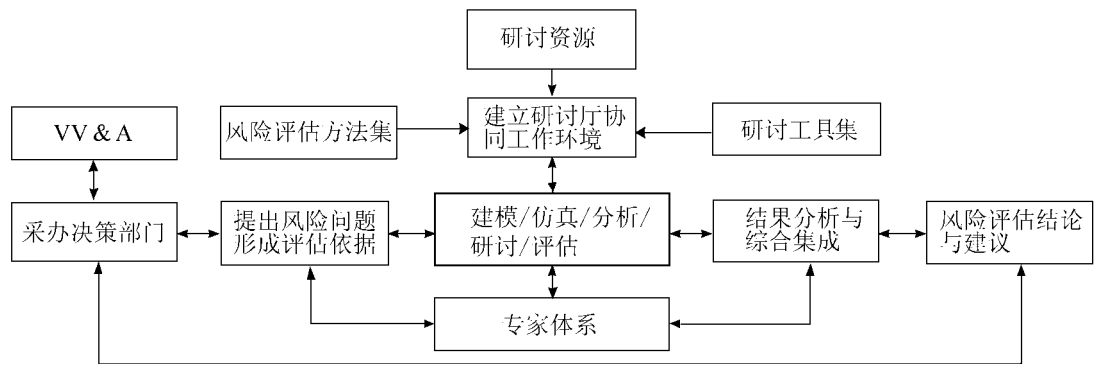


图 1 虚拟采办定性定量综合集成研讨过程

Fig 1 The group discussion procedure of SBA meta-synthesis

1.4 技术风险评估模型比较

武器装备技术风险评估的方法有定性分析法和定量分析法两大类. 常用的定性方法有专家调查法、层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 等. 这类方法依靠专家的主观判断和经验来识别风险, 由于缺乏评估依据的指导, 风险评估结果过多依赖专家的知识 and 经验, 缺乏一定的可靠性和准确性. 常用的定量分析方法有 Monte Carlo 仿真方法、失效模式

及影响分析 (failure mode and effect analysis, FMEA)、关键项目列表 (critical items list, CL)、概率风险分析法 (probability risk analysis, PRA)、故障树分析法 (failure tree analysis, FTA)、多目标决策法、风险因子评价法 (risk factor evaluation method, RFEM)、等风险曲线法 (equip-risk contour method, ECM)、系统动力学 (system dynamics, SD)、模糊风险分析 (fuzzy risk analysis, FRA)、网络分析法 (风险评审技术 VERT、图示评审技术 GERT)、影响图分析

(influence diagrams, Ds)、过风险过滤、排序和管理框架 (risk filtering, ranking and management framework, RFRM) 等。这类定量分析方法结果的可信性依赖于所用数据的真实性、大容量的数据样本与仿真模型求解复杂度<sup>[11-14]</sup>。

在武器装备虚拟采办技术风险评估实际应用中,根据技术风险的特点,技术风险结构不能以单一视角、用单一模型静态地进行描述,技术风险评估方法也不能采用单一的评估方式进行分析,应采用定性定量综合集成的方式,针对具体武器装备的技术风险结构将多种技术风险评估方法组合进行评估。本文采用的基于定性定量综合集成的技术风险评估模型具有这样几个特点:1)是一种定性与定量相结合的技术风险综合评估模型,集成了定性定量转换云模型、群决策、模糊分析法、风险因子评价法、等风险曲线图法等多种风险评估方法,根据各风险评估方法的特点运用在武器装备虚拟采办技术风险评估的不同阶段;2)运用工作分解结构 (work breakdown structure, WBS) 对武器装备采办的全寿命周期各阶段进行过程 (动态) 和功能 (静态) 相结合的技术风险结构构建,并借鉴层次全息模型 (hierarchical holographic model, HHM) 多维度、多模型的思想建立技术风险分解结构<sup>[15]</sup>,将复杂系统以互补、协作的方式分解为部件、子系统等层次,并从多维的角度进行总体综合分析评估,从而实现武器装备虚拟采办全寿命周期技术风险评估管理的动态性和综合性。

## 2 基于定性定量综合集成的技术风险评估模型

根据风险的定义,风险可表示为 SBA 项目“失败”的概率  $P$  与“失败”的影响程度  $C$  的函数,即  $R = f(P, C)$ 。风险估计  $R_f$  就是该风险的似然估计:

$$R_f = 1 - P_s C_s = 1 - (1 - P_f)(1 - C_f) = P_f + C_f - P_f C_f$$

式中:  $P_f$  表示 SBA 项目的失败的概率,即风险发生的可能性;  $P_s$  表示 SBA 项目成功的概率,即风险不发生的可能性;  $C_f$  表示风险发生对 SBA 项目的影响程度;  $C_s$  表示风险不发生对 SBA 项目的影响程度。

### 2.1 技术风险定性定量转换云模型

武器装备虚拟采办技术风险评估中,经常遇到

以语言文字表明的风险概率和风险结果,必须将之转换为数值才能进行计算和评估。反之,采办决策者常用文字描述采办方案相关信息,如技术风险的高低评价,此时需要将某些数值运算结果转换成语言表征,并且表示技术风险的发生可能性与影响程度均存在一定范围内的模糊性和不确定性,而云模型正是处理这类概念定性描述与定量描述间互相转换的一种不确定型计算工具。

云模型是李德毅院士提出的一种定性定量转换模型,已经在智能控制、模糊评测等多个领域得到应用。云模型是用自然语言值表示的某个定性概念  $A$  与其定量表示之间的不确定性转换模型。设  $U$  是一个用精确数值表示的论域 (一维的、二维的或多维的),  $U$  上对应的定性概念  $A$ , 对于论域中的任意一个元素  $x$ , 都存在一个有稳定倾向的随机数  $y = \mu_A(x)$ , 称作  $x$  对概念  $A$  的确定程度,  $x$  在论域上的分布称为云模型, 简称为云。云的数字特征用期望  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$  来表征, 它们反映了定性概念  $A$  整体上的定量特征, 用 3 个数字特征表示的定性概念的整体特征, 记作  $C(E_x, E_n, H_e)$ , 称为云的特征向量<sup>[16]</sup>。期望  $E_x$  (expectation): 在论域空间最能够代表定性概念  $A$  的点, 或者是这个概念量化的最典型样本点; 熵  $E_n$  (entropy): 熵代表定性概念的可度量粒度, 通常熵越大概念越宏观。熵还反映了定性概念的不确定性, 表示在论域空间可以被定性概念接受的取值范围大小, 即模糊度, 是定性概念亦此亦彼性的度量; 超熵  $H_e$  (hyper entropy): 超熵是熵的不确定性的度量, 它反映代表定性概念值的样本出现的随机性, 揭示了模糊性和随机性的关联。

通过正向云算法, 可以把定性概念的整体特征变换为定量数值表示, 实现概念空间到数值空间的转换; 通过逆向云算法, 可以实现从定量值到定性概念的转换, 将一组定量数据转换为以数字特征  $C(E_x, E_n, H_e)$  来表示的定性概念。下面分别给出正向云算法和逆向云算法。

正向云发生器算法描述:

输入: 表示定性概念  $A$  的 3 个数字特征值  $E_x$ 、 $E_n$ 、 $H_e$  和云滴数  $N$ 。

$$E_x = \text{mean}(x_i), E_n = \text{Stdev}(x_i), H_e = \text{Stdev}(E_n).$$

输出:  $N$  个云滴的定量值以及每个云滴代表概

念  $A$  的确定度.

算法执行步骤:

- 1)生成以  $E_n$  为期望值、 $H_e$  为标准差的正态随机数  $E_n$ ;
- 2)生成以  $E_x$  为期望值、 $E_n$  为标准差的正态随机数  $x$ ;
- 3)令  $x$  为定性概念  $A$  的一次量化值,称为云滴;
- 4)计算  $y = \frac{(x - E_x)^2}{2(E_n)^2}$ ;
- 5)令  $y$  为  $x$  属于定性概念  $A$  的确定度;
- 6)  $\{x, y\}$  完整地反映了一次定性定量转换的全部内容;
- 7)重复 1) ~ 6)直到产生  $N$  个云滴为止.

逆向云发生器算法:

输入:  $N$  个云滴的定量值及每个云滴代表概念的确定度  $(x, y)$ .

输出: 这  $N$  个云滴表示的定性概念  $A$  的期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$ .

算法执行步骤:

- 1)以  $E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$  作为  $E_x$  的估计值;
- 2)将  $y > 0.999$  的点剔除剩下  $m$  个云滴;
- 3)由  $E_n = \frac{|x - E_x|}{\sqrt{2 \ln y}}$ , 求出  $E_n$ ;
- 4)根据  $E_n = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m E_{n_i}$ , 求出  $E_n$  的估计值  $E_n$ ;
- 5)根据  $H_e = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (E_{n_i} - E_n)^2}$  求出估计值  $H_e$ .

2.2 技术风险定性定量综合评估过程

武器装备系统是一个结构复杂、全寿命周期中各阶段涉及的子系统众多的复杂大系统,从技术风险分析评估的角度来看,需要设计的分系统、子系统(技术状态项目)、部件、组件数目较多,因此,首先按照工作分解结构的方法构建体现采办阶段相对应的技术风险层次体系,然后进行底层各个子系统技术风险的评估,在确定底层各个子系统技术风险基础上对上一层分系统技术风险进行评估,依照确定的技术风险层次结构逐层向上进行,直到确定采办的全寿命周期某阶段的武器装备技术风险评估结果.

2.2.1 采用多专家研讨方式确定技术风险概率

在武器装备采办全寿命周期内,技术风险受许多因素的影响,如技术成熟度、技术复杂性、标准化等,这里选取技术先进性、技术复杂性与技术可参考性 3 类典型的影响技术风险的因素作为分析风险概率的特征因子.故首先设定风险特征因子集为  $U = \{ \text{技术先进性, 技术复杂性, 技术可参考性} \} = \{ u_1, u_2, u_3 \}$ ,再根据各个风险特征因子对武器装备研制“失败”的作用程度赋予不同的权重,令  $A = (a_1, a_2, a_3) = (0.4, 0.4, 0.2)$ . 风险特征因子集  $U$  对应的评价集  $W$  的量值向量  $W = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5) = (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9)$ ,评价集中 5 个量值描述如表 1 所示.

表 1 特征因子对技术风险概率的影响程度量值

Table 1 Impacts value of factors for technical risk probability

量值	技术先进性 因子 $a_1 = 2/5$	技术复杂性 因子 $a_2 = 2/5$	技术可参考性 因子 $a_3 = 1/5$
$w_1 = 0.1$	国内现有水平	简单设计	有完整的技术资料可供参考
$w_2 = 0.3$	部分国内领先	局部增加复杂性	有部分技术资料可供参考
$w_3 = 0.5$	国内领先	复杂性中等程度增加	有样机(或样品)可供研仿
$w_4 = 0.7$	部分国际领先水平	复杂性显著增加	有关键零部件或元器件可供研仿
$w_5 = 0.9$	国际领先水平	涉及专业技术门类很多,极其复杂	无可供参考、研仿的技术资料和样机

完成上述初始化步骤后,由主持人确定相关专家组,请各位专家参照表 1 的评价标准,通过研讨方式对武器装备的各子系统技术成熟性、复杂性、相关性进行评价,各自独立确定各子系统的相应量值,最终由主持人按照下述公式对各位专家的结果进行统计,从而得出研制技术风险概率  $P_f$ .

$$P_f = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 (a_i e_{ij} w_j) = A \cdot E \cdot W^T.$$

式中:  $e_{ij}$  表示专家选择第  $i$  个因子的第  $j$  个量级的比例.

2.2.2 采用模糊综合评价确定技术风险影响程度  
武器装备技术风险失败对采办项目造成的影响

后果很多,主要有效能指标不达标、进度拖延和研制费用的增加,即:1)不能在规定的时间内完成(进度风险);2)大大超过了预定的资源条件,需要追加经费方可完成(费用风险);3)现有的技术、工艺水平达不到原有技术要求,只能降低性能指标要求。因此从技术性能、费用、进度 3 个方面评估技术风险影响程度具有典型性意义。但是由于这种估计受诸多不确定性因素影响无法给出具体定量结果,具有模糊性的显著特征,故拟采用模糊综合评判法进行估计。首先设技术风险影响因子集  $V = \{\text{技术性能, 费用, 进度}\} = \{v_1, v_2, v_3\}$ , 赋予各因子相应的权重向量  $B = (b_1, b_2, b_3) = (1/3, 1/3, 1/3)$ 。因子集  $V$  对应的评价集  $Q$  的量值向量  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_5) = (0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9)$ 。评价集  $Q$  中 5 个量值的描述如表 2 所示。

表 2 特征因子对技术风险后果的影响程度量值

Table 2 Impacts value of factors for technical risk consequences			
量值	技术性能 因子 $b_1 = 1/3$	费用因子 $b_2 = 1/3$	进度因子 $b_3 = 1/3$
$q_1 = 0.1$	对技术性能影响极小或无影响	费用略有变化,但不超过预算估计	对进度的影响极小,可忽略不计,或可由进度松弛时间补偿
$q_2 = 0.3$	技术性能下降很小	费用超出预算约 1% ~ 5%	部分进度延后,但超过计划进度的 10%,需对进度计划调整
$q_3 = 0.5$	技术性能有某种程度下降	费用超出预算约 5% ~ 20%	进度延后,超过计划进度的 10% ~ 30%
$q_4 = 0.7$	技术性能显著下降	费用超出预算约 20% ~ 50%	进度延后,超过计划进度的 30% ~ 50%
$q_5 = 0.9$	技术性能指标不能达到	费用超出预算约 50% 以上	进度延后,超过计划进度的 50%,并影响系统的里程碑进度

完成上述初始化步骤后,由主持人确定相关专家组,请各位专家参照表 2 的评价标准,对武器装备

研制技术风险影响程度,从技术性能、费用、进度 3 个方面进行评价,确定相应的量值。综合各位专家的结果,可得到评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \end{bmatrix}.$$

式中:  $r_{ij}$  表示选择第  $i$  个因子的第  $j$  个量级的专家比例。由此得出技术风险影响程度的模糊综合评价矩阵  $D$  是  $Q$  上的模糊子集:  $D = B \cdot R$ , 采用功效系数法对  $D$  进行规范化处理,得到  $D = (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5)$ , 公式如下:

$$D = \frac{D_{ij} - D_{\min(j)}}{D_{\max(j)} - D_{\min(j)}} + (1 - \quad).$$

式中:  $D_{\max(j)} = \max(D_{1j}, D_{2j}, \dots, D_{mj})$  代表列最大值;  $D_{\min(j)} = \min(D_{1j}, D_{2j}, \dots, D_{mj})$  代表列最小值,  $(0, 1)$ 。

则武器装备研制失败的影响程度可表示为

$$C_f = D \cdot Q^T = \sum_{j=1}^n (D_i - Q_{ij}) = \max[\min(D_1 - Q_{1j}), \min(D_2 - Q_{2j}), \dots, \min(D_m - Q_{mj})].$$

2.2.3 计算各子系统风险估计值

根据上述步骤确定各子系统的技术风险概率  $P_f$  和风险影响程度  $C_f$  后,按照公式  $R_f = P_f + C_f - P_f C_f$  计算各个子系统的风险估计值。并依据计算出的各个子系统层次的风险概率  $P_f$  和风险影响程度  $C_f$ ,在等风险曲线图上绘制各个子系统技术风险所处的位置,确定各子系统间技术风险等级。一般认为  $R_f > 0.7$  为高风险,  $R_f < 0.3$  为低风险,介于两者之间  $(0.3 \leq R_f \leq 0.7)$  为中等风险。

2.2.4 采用云模型计算系统总体研制风险

首先按各子系统发生风险时对总体影响重要程度设定权重等级为  $W = \{\text{很重要, 较重要, 一般重要, 次重要, 不重要}\}$  5 个档次,应用逆向云发生器的实现算法,分别转化为云表示  $(1, 0.085, 0.002)$ 、 $(0.75, 0.085, 0.005)$ 、 $(0.51, 0.085, 0.005)$ 、 $(0.24, 0.085, 0.005)$ 、 $(0.01, 0.085, 0.002)$ ,如图 2 所示。再按照已确定的各子系统风险估计值和风险等级(高风险、中等风险和低风险三级),也应用逆向云发生器分别转化为云表示  $(0.7, 0.125, 0.002)$ 、 $(0.30, 0.125, 0.005)$ 、 $(0.01, 0.125,$

0.002)。最后计算出系统总体研制风险结果,并采用正向云发生器转换成定性语言值确定其技术风险状况。

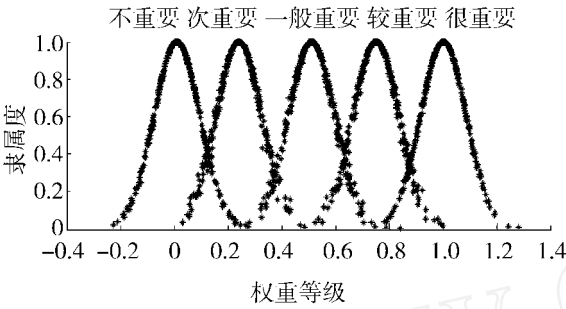


图 2 云表示的权重等级  
Fig 2 Weight class with cloud representation

3 防空导弹总体技术风险评估实例

本文以防空导弹虚拟采办为例说明总体技术风险定性定量综合集成评估方法的应用。在防空导弹虚拟采办全寿命周期每一个里程碑阶段都应进行正式的风险评估,这里为了简化,仅以概念设计阶段为例说明方法实施的步骤和评估结果。应指出,此时,采办项目已通过立项论证,总体效能指标已经确定,技术实现已有备选方案集,所以,可以按照某一方案进行技术风险评估。首先根据防空导弹的特点,根据各子系统效能体现不同及分别不同程度地采用了新技术、新材料、新工艺等情况,可基于工作结构分解建立技术分解结构 (technology breakdown structure, TBS),将防空导弹研制技术风险分为图 3 所示的 2 层结构:

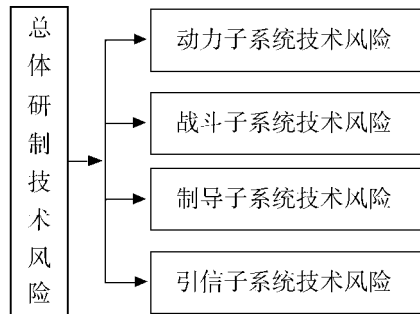


图 3 防空导弹技术风险结构分解图  
Fig 3 Air defense missile technical risk structure decomposition

在本次评估过程中,首先由研讨主持人邀请 18 位相关领域的专家参加了本次技术风险评估研讨过

程,按照上述的定性定量综合集成评估模型进行具体分析计算如下:

1) 请专家根据表 1 的评判标准对最底层的 4 类技术风险的技术先进性、技术复杂性、技术可参考性进行量值评分,下面给出专家对动力子系统技术风险概率  $P_f$  的影响程度量值统计结果。

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

计算得出动力子系统的技术风险概率为

$$P_f = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^5 (a_i e_{ij} \cdot j) = A \times E \times W^T =$$
$$[0.4 \quad 0.4 \quad 0.2] \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.6 & 0.1 \\ 0.2 & 0.8 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.3 \\ 0.5 \\ 0.7 \\ 0.9 \end{bmatrix} =$$

0.423

2) 请各位专家参照表 2 的评价标准,对武器装备研制技术风险影响程度,从技术性能、费用、进度 3 个方面进行评价,确定相应的评分量值。下面给出专家对动力子系统技术风险后果  $C_f$  的影响程度量值统计结果。

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{bmatrix}$$

计算得出动力子系统的技术风险后果的模糊综合评价结果为

$$D = B \times R = [0.3 \quad 0.3 \quad 0.4] \times$$
$$\begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0.4 & 0.4 \end{bmatrix} =$$
$$[0.0 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.3 \quad 0.4]$$

采用功效系数法对  $D$  进行规范化处理,取  $\alpha = 0.9$ ,得到  $D = (0, 0.17, 0.276, 0.276, 0.342)$ ,则动力子系统的技术风险后果影响程度为  $C_f = D \cdot Q^T =$

$$\sum_{j=1}^n (D_i \cdot Q_{ij}) =$$
$$\max [\min (D_1 \cdot Q_{1j}) \min (D_2 \cdot Q_{2j}) \dots$$
$$\min (D_m \cdot Q_{mj})] =$$
$$[0.0 \quad 0.17 \quad 0.276 \quad 0.276 \quad 0.342] \cdot$$

$[0.1 \ 0.3 \ 0.5 \ 0.7 \ 0.9]^T = 0.6337$

3) 根据上述计算得到的技术风险概率  $P_f$  和风险影响程度  $C_f$  后,计算动力子系统的风险估计值为

$R_f = P_f + C_f - P_f C_f =$   
 $0.423 + 0.6337 - 0.423 \times 0.6337 = 0.7886$

由于  $R_f > 0.7$ ,故确定动力子系统技术风险估计值语言表达为“高风险”,其他 3 个子系统分别按照上述步骤进行计算,得出相应的技术风险估计值,如图 4 所示的等风险曲线图上绘制出每个子系统技术风险所处的位置。

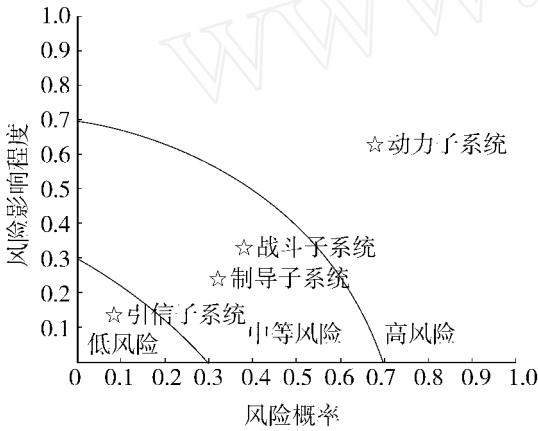


图 4 防空导弹各子系统风险分布图

Fig 4 Distribution map of air defense missile subsystem risk

4) 根据已确定的各子系统风险估计值和风险等级 (高风险、中等风险和低风险三级),采用逆向云发生器将其转化为云表示  $A_1$ 。再将各子系统发生风险时对总体影响重要程度也转化成云表示  $A_2$ 。最后计算出系统总体研制风险结果如图 5 所示,并采用正向云发生器转换成定性语言值从而确定其技术风险状况,其中总体风险定量估计值为 0.7005;总体风险定量估计值的确定度为 0.8131;总体风险等级为高风险。

对上述防空导弹武器技术风险评估结果分析,动力子系统技术风险最大,而引信子系统风险最小,系统总体风险发生概率在 0.7 左右,武器装备采办过程中出现风险的概率是较高的,但主要原因在于动力子系统。在工程实施中应对该子系统实施前馈控制,随着采办系统的运行对该子系统的技术过程进行预先分析,制订具体风险降低计划,并跟踪其执行情况,以利采办在低风险条件下完成。

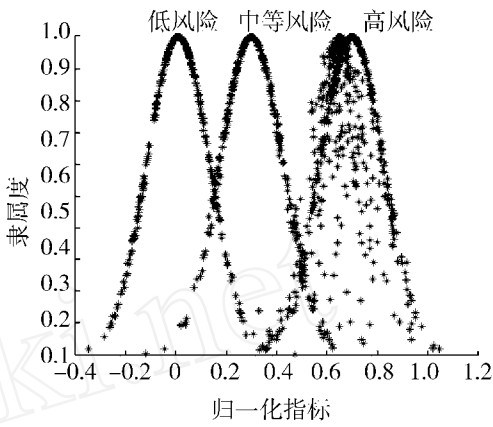


图 5 防空导弹技术风险综合评价结果

Fig 5 Evaluation results of air defense missile technical risk

4 结束语

本文对武器装备虚拟采办技术风险评估问题进行了探讨,在考虑技术风险复杂性和非结构化等特点的基础上,提出了定性定量综合集成的技术风险评估模型。其实质是体现虚拟采办仿真综合集成的现代要求,为支持虚拟采办仿真复杂系统决策科学化、智能化提供支持与服务。在武器装备型号发展对 SBA 全系统、全寿命、全方位管理的应用需求牵引和复杂系统问题求解的定性定量综合集成方法论及相应计算技术发展的推动下,面向武器装备虚拟采办风险决策,构建一种基于定性定量综合集成技术的新型智能决策支持系统,支持典型装备虚拟采办示范系统的全生命周期风险决策,这是要继续努力实现的目标。

参考文献:

[1] 符志民,李汉铃. 航天研发项目风险分析、等级评估和相关性研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (1): 52-59.  
FU Zhimin, LI Hanling Risk analysis, evaluation and correlation study for aerospace research and development project [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27 (1): 52-59.  
[2] 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.



- [3] FENG Shan, GUO Sihai, LI Xiaodong The fuzzy technological framework for a web-based decision support system [C] // Proceedings of the 11th World Multi-Conference on Systems, Cybernetics and Informatics Orlando, 2007: 7-11.
- [4] CHA I Xudong, LI Bohu Research and application on service oriented infrastructure for networkized M&S [C] // Proceedings of 2006 International Workshop on Distributed Simulation on the Grid Washington, DC, USA, 2006: 113-125.
- [5] FRANK M V. Choosing among safety improvement strategies: discussion with example of risk assessment and multi-criteria decision approaches for NASA [J]. Reliability Engineering and System, 1995, 49: 311-324.
- [6] 于景元, 周晓纪. 系统集成方法与总体设计部 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004 (1): 20-26
- YU Jingyuan, ZHOU Xiaoji Meta-syntheses and department of integrative system design [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004 (1): 20-26
- [7] 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 and Technology, 2007, 35 (8): 48-51.
- [8] 冯珊, 郭四海. 面向虚拟采办的智能决策支持系统概念框架 [J]. 智能系统学报, 2008, 3 (3): 201-211.
- FENG Shan, GUO Sihai A conceptual framework for the SBA-oriented intelligent decision support system [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2008, 3 (3): 201-211.
- [9] SHIM J P, WARKENTIN M. Past, present, and future of decision support technology [J]. Decision Support Systems, 2002, 33 (2): 111-126.
- [10] HEMANT K, DANIEL J. Progress in web-based decision support technologies decision support systems [J]. Decision Support Systems, 2007, 43 (4): 1083-1095.
- [11] MUSTAJOKI J, RAMO P. Interactive computer support in decision conferencing: two cases on off-site nuclear emergency management [J]. Decision Support Systems, 2007, 42 (4): 2247-2260.
- [12] GRACE D. Technical risks and mitigation measures in combustion turbine project development [J]. Transactions of the ASME, 2003, 125 (1): 225-238.
- [13] 徐哲, 冯允成, 鲁大伟. 武器装备研制项目的技术风险评估 [J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27 (6): 1123-1127.
- XU Zhe, FENG Yuncheng, LU Dawei Appraisalment model of technical risk for weapon system development [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27 (6): 1123-1127.
- [14] KLEN J H, CORK R B. An approach to technical risk assessment [J]. International Journal of Project Management, 1998, 16 (6): 345-351.
- [15] HAMES Y Y, LAMBERT J, LID, et al Hierarchical holographic modeling for risk identification in complex systems [C] // IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics Vancouver, Canada, 1995: 1027-1032.
- [16] 李德毅, 刘常昱, 杜鹤. 不确定性人工智能 [J]. 软件学报, 2004, 15 (11): 1583-1594.
- LIDeyi, LIU Changyu, DU Yi Artificial intelligence with uncertainty [J]. Journal of Software, 2004, 15 (11): 1583-1594.

#### 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. 承担国家级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. 在国内外刊物上发表学术论文 160 余篇, 其中有 66 篇被 SCI EI ISTP 及 N-SPEC 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.



周凯波, 男, 1972年生, 副教授, 主要研究方向为智能化集成系统. 在国内外刊物上发表学术论文 20 余篇.