

面向武器装备体系组合规划的集成决策优化框架*

周宇, 杨克巍, 姜江, 谭跃进

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南长沙 410073)

摘要:针对当前武器装备体系组合规划存在选择空间规模大、决策目标数量多等问题,提出一种集成决策优化框架,用于组合选择和规划武器装备的发展型号、时间和数量。首先对武器装备体系组合规划问题的 NP-Hard 和高维多目标性质进行定量化分析和公式化描述;然后采用目标规划方法将该问题构建为双目标优化模型;再基于 NSGA-II 多目标演化计算方法,开发面向本问题的优化算法,求得该模型的 Pareto 解集合;最后通过 TOPSIS 方法,从 Pareto 解集合中求取符合决策者偏好的满意解。通过某侦察预警监视体系发展规划示例,验证了当给定经验数据和决策者偏好信息后,该框架可获得符合要求的武器装备体系组合规划方案,能够支撑武器装备体系发展论证和规划。

关键词:武器装备体系;组合规划;目标规划;NSGA-II;TOPSIS

中图分类号:N94 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2013)03-0036-06

An integrated decision making and optimization framework for system of armament systems portfolio planning

ZHOU Yu, YANG Kewei, JIANG Jiang, TAN Yuejin

(College of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Aiming at the complexities such as huge solution space and many decision-making objectives in the system of armament systems portfolio planning, an integrated decision making and optimization framework is proposed to select the models from the candidate armament systems, and to plan the development time and production quantity of the selected armament systems. By quantitatively describing and formulating the system of armament systems portfolio planning, and focusing on the NP-hard and the large-dimensional multi-objective nature firstly; a dual-objective optimization model was proposed through adopting the goal programming method; an intelligent optimization approach was developed based on the NSGA-II evolutionary computation method, in order to obtain the Pareto solutions set thirdly; the TOPSIS method was applied to acquire the compromise solution finally. A portfolio planning example on a system of intelligence, surveillance, and reconnaissance systems validated the effectiveness of the framework. When given empirical data and decision-makers preferences, the framework can get the satisfactory portfolio plan, which supports the demonstration and development for the system of armament systems.

Key words: system of armament systems; portfolio planning; goal programming; NSGA-II; TOPSIS

武器装备体系组合规划是指,随着联合作战和体系对抗成为现代战争的必然发展趋势,在武器装备体系顶层发展规划工作中,需要组合选择和规划多个武器装备,并行确定其发展时间和发展数量,综合考虑这一组合的作战能力、发展风险和所需费用,使得所选择和规划武器装备相互配套并成体系的发展,向未来战场最大化投递作战能力,同时分散装备发展风险和节约发展费用。可见,武器装备体系组合规划具有重要的军事意义和经济价值。

但是,随着国防经济和军事科技的发展,武器装备体系组合规划涉及装备的种类、型号和数量

越来越多,装备功能重叠和相似的情况愈加突出^[1]。在此基础上,需要考虑武器装备体系发展多项能力和实现每项能力的风险最小等目标,以及相关约束等^[2]。可见,目前武器装备体系组合规划存在方案选择空间大、决策目标多等问题。因此,迫切需要相关决策理论和运筹学方法,辅助顶层规划人员确定如何发展武器装备的型号、时间和数量等问题,使得所有规划的武器装备成体系发展,从而更好地满足未来作战能力需求和完成多元化的军事任务。

当前对武器装备发展和规划的研究主要有两类。一类集中在基于能力的规划(Capability

* 收稿日期:2012-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71031007, 70901074, 71001104, 71201168)

作者简介:周宇(1983—),男,湖南常德人,博士研究生,E-mail:zhouyu_gfkd@126.com;

谭跃进(通信作者),男,教授,硕士,博士生导师,E-mail:yjtan@nudt.edu.cn

Based Planning, CBP)^[3],其核心是强调通过能力需求对上映射多元化的军事任务,对下牵引武器装备体系发展目标,但公开发表的相关文献主要是研究CBP的概念、过程和建模框架^[4-6],以及面向特定装备发展问题的定量分析^[7-8],未见完整的和定量的方法基于CBP概念组合规划武器装备体系发展。另一类是采用多目标决策方法或多属性决策方法,解决武器装备体系组合选择的问题^[9-11],未见文献继续考虑选择空间存在组合爆炸的情况,以及选择后如何规划装备发展时间和数量的问题。

因此,本文拟定量分析和建立武器装备体系组合规划中存在的决策问题和优化问题模型,并针对这些问题,综合集成多目标决策方法目的规划,多目标演化算法NSGA-II和多属性决策方法TOPSIS,以此构建面向武器装备体系组合规划的集成决策框架,支撑武器装备体系需求论证和发展规划。

1 问题分析

1.1 问题描述及其NP-Hard属性分析

对武器装备体系组合规划进行定量化描述如下:从 M 项武器装备中,选择 m 项装备进行发展($m < M$),并规划每项装备的发展时间 x_i 和发展数量 y_i ($i = 1, 2, \dots, m$),使得尽可能满足未来 N 种作战能力需求,以完成多样化军事任务。根据武器装备的作战功能和活动范围,将 M 项武器装备分为不同类型,每种类型武器装备包含不同型号,不同类型的武器装备满足的能力需求种类不同,相同类型但不同型号装备满足各种能力需求程度不同。根据现代武器装备的多功能属性,假设每种类型装备可以支撑一种以上的能力需求;根据联合作战的军事特点,假设每种能力需求由一种类型以上的装备共同满足。

由于存在发展费用和发展时间的约束,因此假设第 i 项装备的发展时间可选范围为 (tl_i, tu_i) ;发展数量可选范围为 (ql_i, qu_i) ;由此可供武器装备组合规划选择的解空间规模为

$$S = \prod_{i=1}^M (tu_i - tl_i) \times (qu_i - ql_i)$$

且随着 M 的增加,解空间规模 S 呈指数增长,因此,武器装备体系组合规划问题具有NP-hard属性。

1.2 决策目标及其高维性质分析

当前文献关于能力需求的描述主要集中在定

性研究和特定应用背景^[4-8],缺乏统一的、量化的能力需求描述,能够用于武器装备体系组合规划。因此,为了量化武器装备体系组合规划的目标及构建目标函数,本文提出如下能力需求定量描述方式:

$$\{CR_j | CR_j = (CRq_j, CRt_j) | j = 1, 2, \dots, N\}$$

假设根据军事需求和使命任务,得到 R_i 到 R_N 种能力需求, R_j 表示第 j 种能力需要在时间 Rt_j 内达到的数值为 Rq_j 。为了便于建模和求解,将各种能力需求数值 Rq_j 统一量纲和归一化,令 $0 < Rq_j < 1$ 。而且这 N 项能力需求相互不可替代,且存在相互矛盾的情况。因此,对于武器装备体系组合规划,存在 N 个能力目标需要优化,第 j 个能力目标 CO_j 可以定量描述如下:

$$\min CO_j = |C_j - CRq_j|$$

$$C_j = F_j(C_{ij}) \quad i = (1, 2, \dots, m_j)$$

$$C_{ij} = \begin{cases} f_{ij}(x_i, y_i) & x_i \leq Rt_j \\ f_{ij}(Rt_j, y_{ij}) & x_i > Rt_j \end{cases}$$

其中, C_j 为武器装备体系发展方案规划的第 j 种能力值,该目标函数表示当第 j 种规划能力值与能力需求的偏差越小,则对能力需求的满足度越大。 F 为能力聚合函数,将武器装备体系所提供的第 j 能力聚合为体系能力。 C_{ij} 为武器装备体系中第 i 项装备具备的第 j 项能力值, f_{ij} 为能力生成函数, x_i 和 y_i 分别为第 i 项装备的规划发展时间和发展数量, y_{ij} 为在能力需求时间内的装备发展数量, m_j 为武器装备发展方案中支撑第 j 种能力的装备数量。

武器装备的发展还存在诸多不确定因素的制约:一是军事技术发展速度以及有效性的不确定;二是武器装备发展过程和条件如经费、人才或管理决策的不确定^[12]。而这些不确定性都会造成武器装备体系的发展最终达不到或超过其最初规划的能力值,根据经验数据,以达不到规划能力值居多。这就使武器装备体系的能力发展存在风险,因此,针对武器装备体系组合规划构建对应的风险目标,使武器装备体系达到预期能力的风险最小。在此,基于期望下方风险指标^[13-14],构建风险目标如下:

$$\min RO_j = \sum_{g=1}^G p_j^g \cdot f_j^g$$

$$f_j^g = \begin{cases} (C_j - C_j^g)^\gamma & C_j > C_j^g \\ 0 & C_j \leq C_j^g \end{cases}$$

其中, C_j^g 为武器装备体系的规划的第 j 项能力,可能出现的第 g 可能值; p_j^g 为出现该可能能力值的

概率($g = 1, 2, \dots, G$), γ 为可能能力与规划能力的差距, 对风险的增幅系数。对应于 N 项能力, 则存在 N 项风险目标。因此, 武器装备体系组合规划共存在 $2N$ 决策目标, 而根据经验数据, $2N$ 通常大于 10。显然, 武器装备体系组合规划问题具有高维多目标性质。

1.3 解决思路

通常对于 NP-Hard 属性的多目标决策和优化问题, 存在以下两种解决方法, 一是运用多目标决策方法^[15], 将多目标决策问题转化为单目标问题, 再采用智能优化算法求得满意解。由于本问题存在能力和风险两类度量不统一, 且相互矛盾的决策目标, 难以将其直接转化为单一目标, 所以上述解决方法并不能直接解决武器装备体系组合规划问题。二是运用多目标优化算法求取 Pareto 解集^[16], 然后对这有限个解的方案集采用多属性决策方法^[17], 获取最终的解决方案。该方法同样不能直接解决本问题, 因为武器装备体系组合规划问题的目标数是高维的, 而高维多目标优化仍是当前多目标优化研究领域的前沿问题, 尚未见成熟可靠的方法^[18]。

因此, 本文综合上述两种解决方法, 提出如下求解思路, 首先采用多目标决策方法将武器装备体系组合规划问题中的 N 个能力目标和 N 个风险目标, 分别构造为能力总目标和风险总目标, 将这一高维多目标优化问题转换为两目标的决策优化问题, 然后采用多目标智能优化算法求出该问题的 Pareto 解集合, 最后采用多属性决策方法从该集合中求得符合决策者偏好的折衷解和对应的武器装备体系规划方案。

分别采用目标规划^[19]和 TOPSIS^[20]作为本问题解决思路中的多目标决策和多属性决策方法, 因为上述两种方法均具有实用可靠和计算量小的特点, 易于工程应用, 在产能规划, 安全科学和质量控制等领域均有广泛运用^[21-24]。同时, 采用 NSGA-II^[25]作为本解决思路中的多目标智能优化算法, 该算法源于遗传算法, 为近十年来最为优秀的多目标优化算法之一, 对离散组合优化问题有很好的求解效率, 适用于解决本文中的问题。

综上所述, 本文通过有机结合目标规划, NSGA-II 和 TOPSIS, 构建完整支持武器装备体系组合规划的集成决策优化框架。首先基于目标规划, 对上述高维目标进行降维, 构建双目标优化模型; 然后设计基于 NSGA-II 的求解算法, 获得关于武器装备体系规划方案的 Pareto 解集合; 再通过 TOPSIS 方法获得方案排序, 最后获得决策者满意

的规划方案。

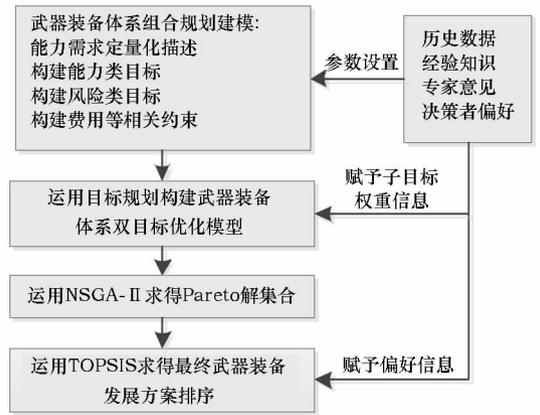


图 1 集成决策优化框架

Fig. 1 The integrated decision making and optimization framework

2 集成决策优化框架设计

根据前文分析, 对武器装备体系组合规划的需求、能力和风险目标, 以及各类约束进行建模; 结合历史数据、经验知识、专家意见以及决策者偏好; 综合运用目标规划、NSGA-II 和 TOPSIS 方法, 构建如图 1 所示的集成决策框架。

由此可见, 该框架的重点决策过程是如何运用目标规划构建武器装备体系双目标优化模型; 如何运用 NSGA-II 算法求解 Pareto 方案集合; 以及如何运用 TOPSIS 求得最终武器装备体系规划方案排序, 因此, 以下重点论述这三个过程。

2.1 基于目标规划构建双目标优化模型

目标规划的原理是对于每个目标函数, 根据实际情况提出一个目标值, 考虑使各目标函数都尽可能达到或接近对应的目标值。考虑到对于能力类的目标, 我们不仅希望达到能力需求值, 还希望越大越好, 而对于风险类目标, 我们同样不仅希望低于风险可接受程度, 还希望越小越好, 此处可以认为风险的目标值为 0。则基于目标规划模型, 可以把武器装备体系的能力类目标和风险类目标构建为如下双目标优化模型:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{j=1}^N w_{1j} d_j^- \\ & \min \sum_{j=1}^N w_{2j} e_j^+ \\ \text{s. t. } & \begin{cases} C_j + d_j^- = CRq_j \\ RO_j - e_j^+ = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

式中 d_j^- 为武器装备体系的第 j 项能力值不足能力需求 CRq_j 的部分; e_j^+ 为武器装备体系的第 j 项能力实现风险超过期望水平的部分; w_{1j} 表示能力类

目标中单项能力目标的权重,其值的确定取决于决策者对每项能力的重视程度; w_{2j} 表示风险类目标中单项能力实现风险的权重,其值的设置取决于决策者对各项风险的敏感程度。以上目标函数结合费用等其他相关约束即可构成完整的双目标优化模型。

2.2 基于 NSGA-II 的多目标智能求解算法

根据武器装备体系组合规划的双目标优化模型特点,设计基于 NSGA-II 的智能优化算法求取该问题的 Pareto 解集合,具体求解步骤如下:

步骤 1:定义种群规模、交叉概率、变异概率和迭代次数,并初始化计数器 $\text{count} = 1$ 。设计种群编码方式,按照如下方式进行编码:

$$\overbrace{x_1, \dots, x_i, \dots, x_m}^{\text{拟发展装备序号}} \quad \overbrace{y_1, \dots, y_i, \dots, y_m}^{\text{装备发展数量位}} \quad \overbrace{z_1, \dots, z_i, \dots, z_m}^{\text{装备发展时间位}}$$

步骤 2:初始化种群 pop_1 ,评价每一个个体的能力总目标值和风险总目标值,并根据这两类目标值对种群进行快速非占优排序,获得 Pareto 解集合,确定每个个体的边界集序号。对每个边界集类的个体计算其拥挤距离。

步骤 3:判断计数器是否小于迭代次数,若是,则继续,否则,转步骤 9。

步骤 4:计数器加 1,对种群 pop_1 进行二元锦标赛选择,产生新的种群 pop_2 ,具体选择原则为当两个个体属于不同边界集时,优先考虑其边界集序号小的个体;当边界集序号相同时,这优先考虑拥挤距离大的个体。

步骤 5:对 pop_2 中的个体,依次进行单点交叉和双点交叉操作,然后依次进行变异操作。

步骤 6:计算 pop_2 中的各个个体的能力和风险总目标值,然后合并 pop_1 和 pop_2 这两个种群为中间种群。

步骤 7:对中间种群进行快速非占优排序,并计算每个边界集内个体的拥挤距离。

步骤 8:从中间种群中提取个体生成新的种群 pop_3 ,具体提取原则是,首先选择边界集序号小的放入新的种群中,同一边界集中的个体选择拥挤距离大的个体放入新种群中。用 pop_3 中的个体替换 pop_1 中的个体,更新 pop_1 ,转步骤 3。

步骤 9:迭代结束,输出最终种群的 Pareto 解集合。

2.3 基于 TOPSIS 的 Pareto 集方案排序

当获得武器装备体系组合规划的 Pareto 方案集合后,根据决策对能力和风险的偏好对比,运用 TOPSIS 方法求取最终的发展方案,具体求解步骤如下:

步骤 1:以武器装备体系组合规划的能力总目标和风险总目标构成 TOPSIS 方法的两类决策属性,假设 Pareto 解集中存在 n 套可供选择的规划方案,其决策矩阵 \mathbf{A} 为

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \dots & a_{n1} \\ a_{12} & a_{22} & \dots & a_{n2} \end{bmatrix}^T$$

则标准化的武器装备体系组合规划决策规范矩阵

$$\bar{\mathbf{R}} = (r_{ij})_{2 \times n}, \text{其中: } r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_{ij}^2}}$$

步骤 2:构造加权的标准化规范决策矩阵 $\bar{\mathbf{R}}_w = (v_{ij})_{2 \times n}$,且 $v_{ij} = w_j \times r_{ij}$,其中 w_j 为第 j 个属性的权重。

步骤 3:以决策矩阵 \mathbf{A} 中每类属性的最优值和最差值分别作为 TOPSIS 中的正理想点 X^+ 和负理想点 X^- ,具体计算如下:

$$X^+ = \{(\max v_{ij} | j \in J), (\min v_{ij} | j \in J') | i \in \mathbf{N}\}$$

$$X^- = \{(\min v_{ij} | j \in J), (\max v_{ij} | j \in J') | i \in \mathbf{N}\}$$

式中的 J 是效益型指标的下标集, J' 是成本型指标的下标集。能力目标实质为武器装备体系规划能力与能力需求之间的差距,显然,能力和风险均为成本型指标。

步骤 4:计算每个武器装备体系规划方案目标值到正、负理想点的欧氏距离。

方案 i 到正理想点的距离:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (v_{ij} - X_j^+)^2}$$

方案 i 到负理想点的距离:

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (v_{ij} - X_j^-)^2}$$

步骤 5:计算每个方案对理想点的相对贴近指数 $C_i = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}$ 。

显然,可以按照 C_i 由大到小的顺序,排列 Pareto 集中武器装备体系组合规划方案的优先次序。 C_i 值最大的规划方案即为最符合决策者偏好的折衷解。

3 示例

假设当前需要规划和发展某陆、海、空、天一体的侦察监视预警体系 (ISR, Intelligence, Surveillance, Reconnaissance)^[26-27],该体系的未来作战能力需求以及可选装备型号、发展时间和数量如图 2 所示。

图中箭头表示某一类型装备所支撑的能力需

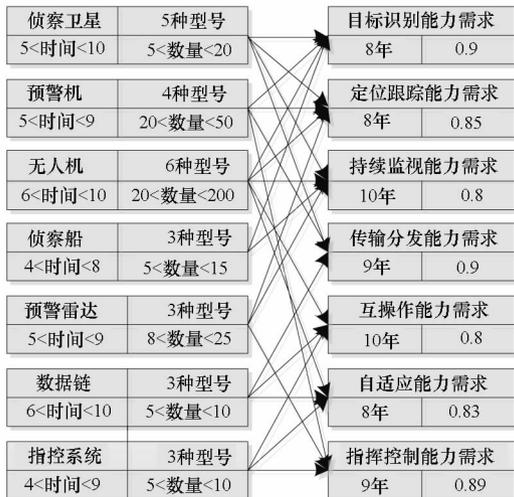


图 2 待发展装备与能力需求关系

Fig. 2 The relations between the candidate armaments and the capabilities requirements

求, 每种类型装备有几种型号可供选择, 如侦察卫星有 5 种型号可供选择是否发展, 选择完成后需要规划所选型号的发展时间和发展数量, 如侦察卫星的时间规划范围为 5 ~ 10 年, 数量为 5 ~ 20 颗。在不考虑约束的条件下, 可计算出该规划方案的解空间规模大于 10^{27} 。同时假设装备选择空间内的每种装备规划的能力值, 都存在 5 种可能取值, 由韦布尔分布生成其数值和对应概率。

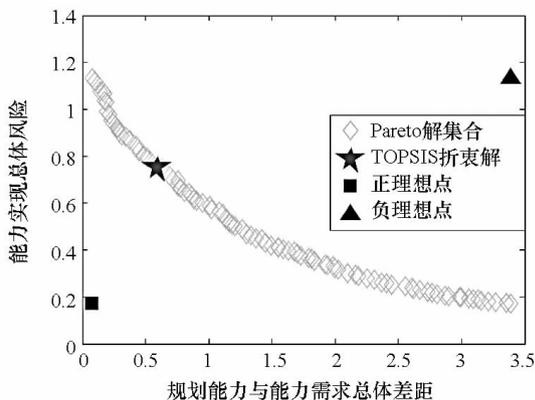


图 3 Pareto 解集合和 TOPSIS 折衷解

Fig. 3 The Pareto solutions set and the TOPSIS compromise solution

按照武器装备体系组合规划集成决策优化框架的求解步骤, 采用 MATLAB 仿真计算, 求得该侦察预警监视体系的 Pareto 解集合如图 3 所示。图中 TOPSIS 折衷解的能力目标和风险目标的权重分别为 0.6 和 0.4, 表示决策者相对更看重能力的发展, 则贴度最大的解对应于决策者最满意的武器装备体系规划方案。由该最优解对应的规划方案如表 1 所示。

表 1 侦察预警监视体系组合规划方案

Tab. 1 The portfolio planning solution of ISR

类型	型号	时间	数量
侦察卫星	型号—1	8	9
	型号—2	8	11
预警机	型号—3	9	21
无人机	型号—2	10	22
	型号—4	9	177
	型号—5	10	138
预警雷达	型号—2	7	20
数据链	型号—3	10	10
指控系统	型号—1	10	5

由规划方案所示, 侦察船没有纳入发展方案, 侦察卫星发展了两种型号装备, 无人机发展了 3 种型号装备, 这是由于无人机属于高能力和低成本的装备, 应该重点发展。继续考察该方案针对 ISR 体系规划的单项能力和对应风险水平, 由此得到图 4。

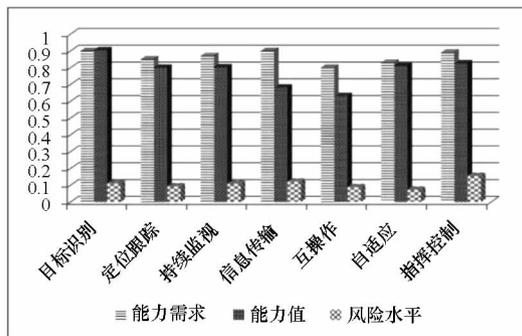


图 4 ISR 体系规划的单项能力和对应风险水平

Fig. 4 The single planned capability and corresponding risk level of the ISR system of systems

由图可见, 目标识别能力完全满足能力需求, 信息传输能力存在差距最大; 各单项能力的实现风险均不超过 15%, 其中指挥控制能力的风险水平最高。因此, 下一步还需要重点发展能够支撑信息传输能力和指挥控制能力的 ISR 装备, 并提高其能力发展的成功率。

4 结论

本文首先定量分析和建立武器装备体系组合规划中具有 NP-Hard 属性的高维多目标优化和决策问题模型, 然后结合目标规划, NSGA-II 和 TOPSIS, 提出并构建了集成决策优化框架, 能够完整解决上述问题。最后, 通过 ISR 体系发展规

划示例,验证了本框架的有效性。当给定历史经验数据和决策者偏好等信息后,基于本文所提出的决策优化框架,能够获得包含发展型号、时间和数量的武器装备体系组合规划方案,可支撑武器装备体系发展顶层论证和规划。

进一步还需要研究不确定信息条件下武器装备体系组合规划能力评价和模型构建方法;如何提高多目标求解算法的搜索效率和鲁棒性;能力类目标和风险类目标权重值的获取和两者间的关联关系;引入费用约束并基于时间考虑其动态变化后,应如何优化和调集成决策优化框架等。

参考文献(References)

- [1] 牛新光. 武器装备建设的国防系统分析[M]. 北京:国防工业出版社,2007.
NIU Xinguang. National system analysis on weapon and armament development[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] Don S, Patrick M, Adam C R, et al. Assessing capabilities and risks in air force programming [R]. Pittsburgh: RAND Corporation, 2009.
- [3] MORS Workshop. Capabilities based planning: the road ahead [R]. Institute for Defense Analysis Arlington, Virginia, Oct., 2004.
- [4] Yi Y. A holistic view of UK military capability development [J]. Defense & Security Analysis, 2009, 25(1): 53 - 67.
- [5] Elena I N, Miachael H, Yi Y. The influence of the concept of capability-based management on the development of the systems engineering discipline[J]. 7th Annual Conference on Systems Engineering Research 2009, Loughborough University, UK, 2009:34 - 41.
- [6] 程贲, 鲁延京, 葛冰峰, 等. 武器装备体系能力多视图模型研究[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(6): 163 - 168.
CHENG Ben, LU Yanjing, GE Bingfeng, et al. Capability view model for weapon system of systems [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(6): 163 - 168. (in Chinese)
- [7] Cheryl M S, Jeff L. Portfolio influences on air force capabilities-based assessment and capabilities-based planning activities[C]//Proceedings of the 6th International Conference on System of Systems Engineering, Albuquerque, New Mexico, USA, 2011:83 - 89.
- [8] Yaw A. Determining extreme capability requirements using orthogonal arrays: an empirical study [J]. Journal of the Operational Research Society, 2011, 62(8): 1574 - 1584.
- [9] Greiner M A, Fowler J W, Shunk D L, et al. A hybrid approach using the analytic hierarchy process and integer programming to screen weapon systems projects [J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2003, 50(2): 192 - 203.
- [10] Metin D D, Serkan Y, Nevzat K. Weapon selection using the AHP and TOPSIS methods under fuzzy environment [J]. Expert Systems with Applications, 2009, 36:8143 - 8151.
- [11] Jaewook L, Suk-Ho K, Rosenberger J, et al. A hybrid approach of goal programming for weapon systems selection [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58: 521 - 527.
- [12] Mary M B. Acquisition risks in a world of Joint capabilities [R]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2011.
- [13] Peter C F. Mean-Risk analysis with risk associated with below-target Returns [J]. The American Economic Review, 1977, 67(2): 116 - 126.
- [14] Gary D E, Kipp M, Linus S. A scenario approach to capacity planning [J]. Operations Research, 1989, 37(4): 517 - 527.
- [15] 徐玖平, 李军. 多目标决策的理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
XU Jiuping, LI Jun. Multiple objective decision making theory and methods [M]. Beijing: TsingHua University Press, 2005. (in Chinese)
- [16] 雷德明, 严新平. 多目标智能优化算法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
LEI Deming, YAN xiping. Multi-objective intelligent optimization algorithm and its applicaitons [M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [17] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
XU Jiuping, WU wei. Multiple attribute decision making theory and methods [M]. Beijing: TsingHua University Press, 2005. (in Chinese)
- [18] 孔维健, 丁进良, 柴天佑. 高维多目标进化算法研究综述 [J]. 控制与决策, 2010, 25(3): 321 - 326.
KONG weijian, DING jingliang, CHAI Tianyou. Survey on large-dimensional multi-objective evolutionary algorithms [J]. Control and Decision, 2010, 25(3): 321 - 326. (in Chinese)
- [19] Ignizio J P. Goal programming and extensions [R]. Massachusetts: D. C. Heath Company, 1976.
- [20] Lai Y J, Liu T Y, Hwang C L. TOPSIS for MODM [J]. European Journal of Operational Research, 1994, 76(3): 486 - 500.
- [21] Chen A, Xu X D. Goal programming approach to solving network design problem with multiple objectives and demand uncertainty [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 4160 - 4170.
- [22] Arunraj N S, Maiti J. Risk-based maintenance policy selection using AHP and goal programming [J]. Safety Science, 2010, 48: 238 - 247.
- [23] Yi-Kuei L, Cheng-Ta Y. Multi-objective optimization for stochastic computer networks using NSGA-II and TOPSIS. [J] European Journal of Operational Research, 2012, 218: 735 - 746.
- [24] Ching-Shih T. Multi-objective inventory planning using MOPSO and TOPSIS [J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35: 136 - 142.
- [25] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2).
- [26] Stephen C, Price J. Close ISR support: Re-organizing the combined forces air component commander's intelligence, surveillance and reconnaissance processes and agencies [R]. Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2011.
- [27] United States Government Accountability Office: DOD Can Better Assess and Integrate ISR Capabilities and Oversee Development of Future ISR Requirements [EB/OL]. [2012 - 7 - 18]. <http://www.gao.gov/assets/280/273939.pdf>.