

文章编号: 1001 - 2486(2011)03 - 0140 - 05

基于多目标优化模型的武器装备体系能力规划*

熊 健, 赵青松, 葛冰峰, 陈英武

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 武器装备体系能力规划是武器装备体系研究的重要内容。在武器装备体系能力空间描述的基础上, 将规划时间和规划成本作为优化目标, 建立了武器装备体系能力规划的多目标优化模型, 提供了基于武器装备体系能力空间描述到能力规划模型的建模方法, 采用多目标遗传算法对优化模型进行求解。在此基础上, 提供了武器装备体系能力差距定量分析的方法, 为武器装备体系能力的定量分析奠定了一定的基础。最后给出算例说明方法的可行性。

关键词: 武器装备体系; 能力规划; 多目标优化; 能力差距分析

中图分类号: E917; TP311 **文献标识码:** A

Weapon Equipment System-of-Systems Capability Planning Based on Multi-objective Optimization Model

XIONG Jian, ZHAO Qing-song, GE Bing-feng, CHEN Ying-wu

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

Abstract: Weapon equipment system-of-systems (WESoS) capability planning is an important part of the WESoS research area. Taking the time span and cost of capability planning as the optimization objectives, the multi-objective optimization model of WESoS capability planning is proposed. At the base of WESoS capability spaces description, the method of modeling WESoS capability planning is presented. Genetic algorithm is employed to solve the optimization problem. Then the quantitative method of capability gap analysis is presented as well. The proposed approach provides groundwork in certain degree for quantitative analysis of WESoS capability. Finally, a numerical example is given to illustrate the reasonability of the proposed approach.

Key words: weapon equipment system-of-systems; capability planning; multi-objective optimization; capability gap analysis

武器装备体系是在一定的战略指导、作战指挥和保障条件下, 为完成一定作战使命, 而由功能上相互联系、相互作用的各种武器装备系统组成的更高层次的系统^[1-2]。目前武器装备体系建设的指导方法主要包括基于威胁 (Threat-Based)、基于场景 (Scenario-Based)、基于预算 (Budget-Based) 和基于能力 (Capability-Based) 等方法^[3]。其中, 基于能力的方法逐渐取代了基于威胁的方法, 并结合了其它几种方法, 成为目前指导未来武器装备体系建设的主要思想^[4-5]。因此, 国内外逐渐开展了对军事能力规划方法的研究。澳大利亚国防部的 Richard 等^[6]将一般系统层次理论应用于国防体系, 提出了一种新的国防能力规划方法; 赵青松等^[2]从能力的个体、能力的关系、能力的系统三个层面对武器装备体系能力空间进行了描述。以上对武器装备体系能力的研究主要是集中在能力

底层模型的关系方面, 针对武器装备体系能力规划顶层的优化和决策问题, 杨镜宇等^[7]提出了基于效果的体系能力规划方法; 岑凯辉等^[8]提出了从军事能力到系统项目的双层规划模型, 为解决国防资源分配问题提供了思路; 澳大利亚国防学院的 Bui 等^[9]提出了一种任务能力规划方法, 该方法将能力规划问题建立为一个考虑进度、成本和风险的多目标优化问题模型。

武器装备体系能力规划针对于未来特定作战使命, 是一个长期的过程, 涉及多个互相冲突的目标 (如能力规划的周期、能力规划的成本和风险)。武器装备体系能力差距分析是能力规划研究的一个重要内容, 反映了能力规划方案在未来特定时间点上对作战使命的满足程度。目前对武器装备体系能力的研究中, 缺乏有效的能力规划方法和能力差距分析方法。文献^[7]提出了基于效果的

* 收稿日期: 2010 - 09 - 14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70901074, 70971131)

作者简介: 熊健 (1984 -), 男, 博士生。

体系规划方法的总体框架,但是没有考虑能力之间的相互关系和能力开发过程所需要的时间和资源等约束;文献[8]建立的资源分配模型没有考虑能力之间的相互关系,不能很好地反映未来的能力规划情况;文献[9]在能力开发先后顺序的基础上建立了多目标优化模型,反映了在不同资源约束条件下的能力规划周期,但是该方法没有考虑能力间的层次结构关系,也没有对能力差距进行分析;英国国防部的体系结构框架手册^[10]中给出了能力差距分析的一些半量化的分析结果,但由于保密原因,没有给出能力差距分析的方法和过程。

本文旨在立足于我军武器装备体系建设的实际情况,为武器装备体系顶层设计人员和决策者提供一种定量的武器装备体系能力规划和能力差距分析方法。在资源约束条件下,将武器装备体系能力规划的时间和成本作为优化目标,建立了武器装备体系能力规划的多目标优化模型。本文在建模过程中,考虑了武器装备体系能力的层次结构和相互关系等固有属性,以武器装备体系能力需求开发过程和能力空间描述为基础,提供了从武器装备体系能力结构图到能力规划网络图的转换方法和步骤。在武器装备体系能力规划模型的基础上,提供了能力差距的定量分析方法,以武器装备体系建设过程中的特定时间点为切面,分析不同的武器装备体系能力规划方案对未来作战任务的满足程度。本文采用多目标遗传算法对武器装备体系能力规划模型进行求解,并给出算例说明了方法的可行性和有效性。

1 问题描述

武器装备体系的开发和建设是针对未来特定的作战场景和作战使命,在高级作战概念层次,将作战使命分解为一系列作战任务,尔后通过能力需求分析过程,获得满足各项作战任务的能力需求。武器装备体系能力规划的主要任务就是相关部门和人员针对未来特定的作战使命,制定适当的能力开发方案,使得未来的作战使命能够得到满足。能力规划首先以能力的量化为基础^[9]。武器装备体系能力需求开发过程就是为了完成武器装备体系能力的需求指标量化、能力结构和关系描述等工作^[2,4-5,7],由于篇幅原因,本文不再详述该过程。本文所研究的武器装备体系能力规划是以文献[2]所描述的武器装备体系能力结构为基础。

武器装备体系能力规划立足于未来武器装备

体系发展的需求,同时受到战略方针、可用资源等条件的影响和限制。武器装备体系能力本身固有的结构和相互关系也从本质上影响着武器装备体系能力规划方案中各个能力开发的顺序。武器装备体系能力规划就是要在资源约束的条件下,能够在最短的时间内,用最少的资源来完成特定的作战使命。因此,武器装备体系能力规划是一个多目标优化问题,本文将能力规划的时间和成本作为两个同时考虑的优化目标,在第2节中详细给出了武器装备体系能力规划的多目标优化模型以及相关的建模方法。能力差距分析作为武器装备体系能力规划的重要内容,能够针对特定的时间点,分析各个能力规划方案对特定作战使命的满足程度,为顶层设计人员和决策者提供科学的决策依据。本文在第3节中给出了能力差距定量分析的方法。

2 武器装备体系能力规划模型

2.1 模型描述

武器装备体系的能力是可以分解的,一个能力可以分解为多个子能力。每一个子能力的开发需要一定的时间和资源。能力空间中各个子能力之间,子能力和父能力之间的相互关系决定了在能力规划方案中各个能力的开发具有一定的先后顺序关系。因此,武器装备体系能力规划可以建立一个多目标项目调度问题模型,其数学模型描述如下所示:

用 I 表示一个能力规划方案, $I = (I_1, I_2, \dots, I_n)$, $I_j (1 \leq j \leq n)$ 表示在能力规划方案中按前后顺序开发的能力, n 为能力的总数。武器装备体系能力的集合表示为 $C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$, 每个能力 C_j 具有以下属性:

d_j : 开发第 j 个能力所需要的时间;

R_{ij} : 开发第 j 个能力所需要的第 i 种资源的数量, 其中 $1 \leq i \leq m$, m 为资源种类的数量。

能力规划方案的实施必须满足资源容量的约束, 资源容量表示为 $R = (R_1, R_2, \dots, R_m)$, 各类资源单位成本表示为 $r = (r_1, r_2, \dots, r_m)$ 。在确定能力规划的方案后, 可以确定每个能力开发的开始时间, 表示为 ts_j , 其结束时间表示为 te_j , 则有 $te_j = ts_j + d_j$ 。

因此, 武器装备体系能力规划的多目标优化模型可以表示为

$$\text{Obj.} : f_1 = \min te_n, f_2 = \min \sum_{i=1}^m r_i R_i$$

$$\text{S.T.} : ts_k + d_k \leq te_j, \forall k \text{ and}$$

$$j, \text{ satisfying } k \in \text{Prec}(j),$$

$$\sum_{j=1}^n R_{ij}(t) \leq R_i, \forall i, t$$

其中, n 表示能力的数量; m 表示资源种类的数量; t 表示能力规划的时间轴; $\text{Prec}(j)$ 表示第 j 个能力的紧前能力。

武器装备体系能力规划是一个多目标优化问题, 本文采用多目标遗传算法对优化模型进行求解。多目标遗传算法是一种随机的优化方法, 在求解多目标优化问题时通过一次迭代可以同时产生多个 Pareto 最优解, 是一种高效的多目标优化方法^[11]。本文的求解算法以 NSGA-II^[12] 为基础。

2.2 能力结构图到能力规划网络图的转换

武器装备体系能力空间中能力结构图描述的各个能力之间的关系主要包括聚合关系和协作关系^[2]。在生成能力规划方案时, 需要考虑能力间的相互关系, 在能力规划方案中体现为不同能力开发的先后顺序。因此, 需要将描述能力分解结构和相互关系的能力结构图转化为描述能力开发前后序列关系的能力规划网络图。

能力规划网络图用 $G = (V, E)$ 表示, 其中, V 是节点的集合, 表示任务(即能力开发的过程); E 是边的集合, 表示任务的前后关系; $\text{Prec}(j)$ 表示第 j 个任务的紧前节点, $\text{Succ}(j)$ 表示第 j 个任务的紧后节点。本文在文献[2]描述的武器装备体系能力空间的基础上, 定义了能力结构图到能力规划网络图的转换规则, 如下所示。

规则 1 能力空间中任何一个能力 C_j 对应于能力规划网络图中一个节点 V_j 。

规则 2 能力规划网络图 G 包含两个虚拟节点, V_{start} 和 V_{end} , 分别表示起始和结束, 在能力规划方案中不用安排该任务; 能力结构图中所有叶节点的紧前节点为 $\text{Prec}(j) = V_{start}$; 能力结构图中根节点的所有子节点(即层次数为 1, $\text{level}(C) = 1$) 的紧后节点为 $\text{Succ}(j) = V_{end}$ 。

规则 3 聚合关系的能力中, 子能力对应节点的紧后节点是父能力对应的节点。即, 若 $(x, y) = \{x: \text{Capability}, y: p\text{Capability} \mid x \notin y, x = \cup y\}$, 则 $\text{Succ}(y) = x$, 其中 x 表示父能力, y 表示其所有子能力的集合。

规则 4 由于聚合关系的父能力和子能力具有相同的生命期, 如果父能力对应节点的所有紧

前节点代表的能力都是其子能力, 则父能力不需要实现时间和实现资源, 此时有 $d_j = 0, R_{ij} = 0$ 。

规则 5 协作关系的能力对应的节点为相邻节点, 具有协作关系的两个能力对应节点的先后顺序视信息传递的方向而定。即, 若 $(x, y) = \{x, y: \text{Capability} \mid \exists \text{information}(x, y)\}$, 则有 $\text{Prec}(x) = y$ 或 $\text{Prec}(y) = x$ 。

3 武器装备体系能力差距分析

能力差距分析是以未来某个时间点为切面, 分析能力规划方案中各个能力的满足情况, 进而确定整个能力规划方案在完成特定作战使命上存在的能力差距。能力规划方案 I 在 t 时刻的能力差距表示为 $\text{Gap}(I)_t$, 能力差距分析是一个以底层能力满足程度为基础, 按照能力间的相互关系, 自底向上聚合的过程。

本文按照能力开发和实现的类型, 将武器装备体系能力分为两类: 渐进型能力和阶跃型能力。

对于渐进型能力, 其满足程度的计算如式(1)所示。

$$\text{Sat}(C_j)_t = \begin{cases} 0, & \text{if } t < ts_j \\ \min(1, \frac{t - ts_j}{d_j}), & \text{if } t \geq ts_j \end{cases} \quad (1)$$

对于阶跃型能力, 其满足程度的计算如式(2)所示。

$$\text{Sat}(C_j)_t = \begin{cases} 0, & \text{if } t < te_j \\ 1, & \text{if } t \geq te_j \end{cases} \quad (2)$$

在底层能力满足程度的基础上, 通过能力的聚合关系可以得到更高层次的能力满足程度。聚合关系中父能力的满足程度可以通过式(3)计算。

$$\text{Sat}(x)_t = \sum_{p=1}^q \partial_p \text{Sat}(y_p)_t \quad (3)$$

其中, x 表示父能力, $y_p (1 \leq p \leq q)$ 表示子能力, q 为子能力的数量, $\partial = (\partial_1, \partial_2, \dots, \partial_q)$ 表示子能力对父能力的贡献度, 有 $\sum_{p=1}^q \partial_p = 1$ 。

能力结构图的顶点用 $C_{\text{level}(0)}$ 表示, 通过逐层的聚合可以得到顶点的满足程度 $\text{Sat}(C_{\text{level}(0)})_t$, 整个能力规划方案在 t 时刻的能力差距表示为

$$\text{Gap}(I)_t = 1 - \text{Sat}(C_{\text{level}(0)})_t \quad (4)$$

4 算例分析

选取某典型武器装备体系为实例研究背景, 针对未来特定作战使命, 通过能力需求分析过程得到的能力结构图如图 1 所示(由于篇幅所限, 作

战想定和具体武器装备体系能力此处不再详述)。图 1 所示的能力结构图包含了武器装备体系能力空间描述中的能力聚合关系和能力协作关系。其中, C_1 是能力结构图中的根节点, 可以分解为三个子能力, 即 C_2, C_3, C_4 , 整个能力结构图划分为四层, 其中能力结构图中的叶节点集合为 $\{C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{14}, C_{15}, C_{16}, C_{17}\}$ 。

根据 2.2 节所描述的能力结构图到能力规划网络图的转换规则, 得到表示能力开发先后顺序

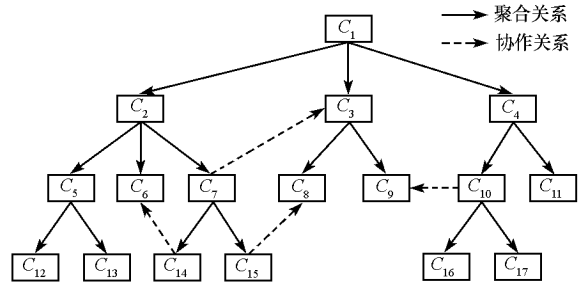


图 1 能力结构图

Fig.1 Structure of capabilities

的能力规划网络图, 如图 2 所示。

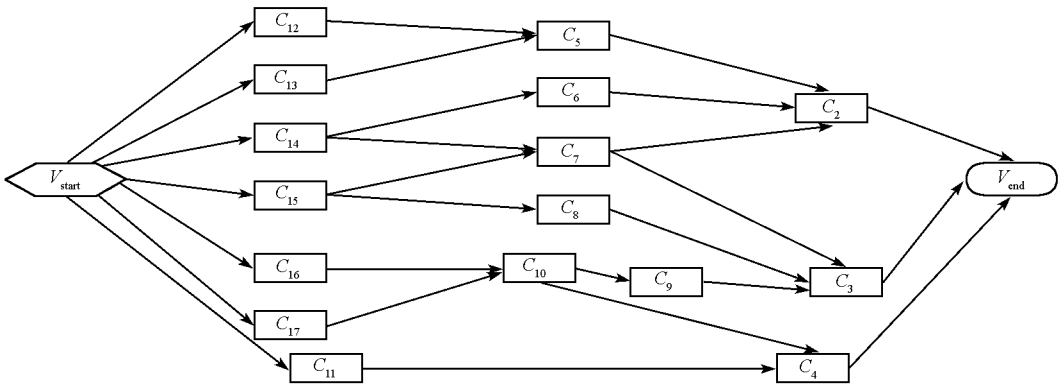


图 2 能力规划网络图

Fig.2 Precedence network graph of capability planning

假定能力规划过程的可用资源共有 8 种, 各类资源的单位成本为 $r = (3, 6, 4, 6, 7, 8, 11, 10)$,

表 1 给出了实现各个能力所需要的资源数量和实现时间。

表 1 实现能力需求的资源参数

Tab.1 Resource parameters of capabilities development

Capability (C_j)	Required resources								d_j	Capability (C_j)	Required resources								d_j
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8			R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	
C_2	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	0	C_{10}	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	0	C_{11}	(5, 0, 5, 0, 6, 0, 2, 0)	5	C_{12}	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 15, 8)	3								
C_3	(5, 2, 1, 0, 3, 0, 4, 0)	2	C_{13}	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 15, 10)	4	C_{14}	(0, 12, 0, 20, 0, 14, 0, 0)	6	C_{13}	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 15, 10)	4								
C_4	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	0	C_{14}	(0, 12, 0, 20, 0, 14, 0, 0)	6	C_{15}	(0, 0, 0, 18, 20, 10, 0, 0)	8	C_{14}	(0, 12, 0, 20, 0, 14, 0, 0)	6								
C_5	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	0	C_{15}	(0, 0, 0, 18, 20, 10, 0, 0)	8	C_{16}	(6, 0, 0, 0, 0, 10, 0, 4)	5	C_{15}	(0, 0, 0, 18, 20, 10, 0, 0)	8								
C_6	(6, 4, 8, 0, 6, 0, 0, 8)	5	C_{16}	(6, 0, 0, 0, 0, 10, 0, 4)	5	C_{17}	(0, 0, 8, 0, 10, 0, 6, 0)	6	C_{16}	(6, 0, 0, 0, 0, 10, 0, 4)	5								
C_7	(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)	0	C_{17}	(0, 0, 8, 0, 10, 0, 6, 0)	6				C_{17}	(0, 0, 8, 0, 10, 0, 6, 0)	6								
C_8	(0, 0, 0, 8, 6, 0, 12, 6)	3																	
C_9	(0, 0, 0, 14, 18, 6, 8, 0)	4																	

采用多目标遗传算法对规划模型进行求解, 参数设置如下: 种群数量为 40; 交叉和变异概率分别为 0.9 和 0.05; 最大迭代数为 2000 代。图 3 显示了优化算法在运行 2000 代后得到的可行解。

由图 3 可以分析武器装备体系能力规划各个方案在目标函数空间中的权衡关系。 I^1 和 I^2 分别表示了资源消耗最小和规划时间最短的两个武器装备体系方案, 有 $f_1(I^1) = 35, f_2(I^1) = 717; f_1(I^2) = 14, f_2(I^2) = 1502$ 。 I^1 和 I^2 可分别表示为

$I^1 = \{C_{14} \rightarrow C_{11} \rightarrow C_{13} \rightarrow C_6 \rightarrow C_{17} \rightarrow C_{16} \rightarrow C_{10} \rightarrow C_9 \rightarrow C_4 \rightarrow C_{15} \rightarrow C_8 \rightarrow C_7 \rightarrow C_3 \rightarrow C_{12} \rightarrow C_5 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1\}$, 方案 I^1 所要求的资源容量为: $R_1 = \{7, 12, 8, 20, 20, 15, 12, 8\}$ 。

$I^2 = \{C_{16} \rightarrow C_{11} \rightarrow C_{17} \rightarrow C_{14} \rightarrow C_{15} \rightarrow C_{13} \rightarrow C_{10} \rightarrow C_9 \rightarrow C_6 \rightarrow C_8 \rightarrow C_4 \rightarrow C_{12} \rightarrow C_5 \rightarrow C_7 \rightarrow C_3 \rightarrow C_2 \rightarrow C_1\}$, 方案 I^2 所要求的资源容量为: $R_2 = \{11, 14, 14, 38, 37, 39, 30, 20\}$ 。

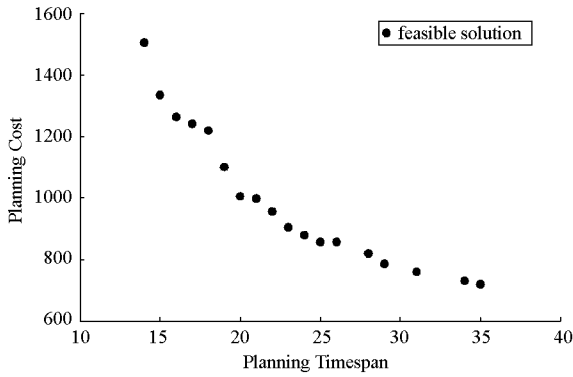


图3 运行2000代后得到的可行解
Fig.3 Obtained feasible solutions after 2000 iterations

假定算例研究中各个能力都是渐进型能力，

子能力对父能力的贡献度分别为

$$\partial_{c_1} = \partial\{(C_2, C_3, C_4) \rightarrow C_1\} = (0.4, 0.3, 0.3)$$

$$\partial_{c_2} = \partial\{(C_5, C_6, C_7) \rightarrow C_2\} = (0.3, 0.5, 0.2)$$

$$\partial_{c_3} = \partial\{(C_8, C_9) \rightarrow C_3\} = (0.4, 0.6)$$

$$\partial_{c_4} = \partial\{(C_{10}, C_{11}) \rightarrow C_4\} = (0.3, 0.7)$$

$$\partial_{c_5} = \partial\{(C_{12}, C_{13}) \rightarrow C_5\} = (0.5, 0.5)$$

$$\partial_{c_7} = \partial\{(C_{14}, C_{15}) \rightarrow C_7\} = (0.8, 0.2)$$

$$\partial_{c_{10}} = \partial\{(C_{16}, C_{17}) \rightarrow C_{10}\} = (0.6, 0.4)$$

以 $t = 20$ 为时间切面分析各个能力规划方案的能力差距,根据本文第3节所示的能力差距分析方法,可以计算各个能力规划方案的能力差距,如表2所示。

表2 能力规划方案的能力差距分析 ($t = 20$)

Tab.2 Gap analysis of each feasible solution ($t = 20$)

No.	Timespan	Cost	Gap	No.	Timespan	Cost	Gap	No.	Timespan	Cost	Gap
1	14	1502	0	7	20	1005	0	13	26	854	0.21
2	15	1335	0	8	21	996	0.07	14	28	820	0.27
3	16	1262	0	9	22	957	0.14	15	29	786	0.30
4	17	1239	0	10	23	902	0.03	16	31	758	0.34
5	18	1217	0	11	24	876	0.21	17	34	730	0.27
6	19	1099	0	12	25	857	0.21	18	35	717	0.30

由表2可知,第1至7个能力规划方案在 $t = 20$ 时能力差距为0,说明这些能力规划方案在 $t = 20$ 的时间点上能够完全满足作战使命的需求。在可用资源约束范围内,优先选择能力差距小的规划方案,如能力规划的成本范围为[900,1000],则方案8,方案9和方案10满足要求,此时若不考虑能力规划方案的能力差距,则应选择规划时间短的方案,即选择方案8;若考虑能力规划方案的能力差距,则应选择方案10。

5 结束语

根据武器装备体系能力的特点,建立了考虑能力规划时间和成本的多目标优化模型,在此基础上提供了武器装备体系能力差距分析的方法,为武器装备体系能力规划的研究提供了一个新的思路,分析结果为武器装备体系发展的顶层设计人员和决策者提供了科学的决策依据。武器装备体系能力规划是一个复杂的过程,面临诸多不确定性,武器装备体系能力规划的风险是下一步值得深入研究的问题。

参考文献:

[1] DoD Architecture Framework Working Group. DoD Architecture Framework

Version 1.0 Volume I: Definitions and Guidelines[R]. U.S.: Department of Defense, 2003.
 [2] 赵青松,谭伟生,李孟军. 武器装备体系能力空间描述研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(1): 135 - 140.
 [3] NATO. Handbook on Long Term Defense Planning[R], St. Joseph Print Group Inc., Canada, 2003.
 [4] McQuay W K. Collaborative Environment for Capability-based Planning [C]//Proceeding of SPIE Enabling Technologies for Simulation Science, 2005: 318 - 327.
 [5] The Joint Capability Integration and Development System(JCIDS) [R]. PM - 2001 - ISE, 2003.
 [6] Richard H, Geoff W. A Systems Approach to Defence Capability Planning-A Work in Progress [C]//SETE99, Adelaide, Australia, Oct. 1999.
 [7] 杨镜宇,司光亚,胡晓峰. 战争系统体系能力需求的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(12): 3599 - 3502.
 [8] 岑凯辉,谭跃进,杨克巍,等. 军事能力到装备系统的双层规划模型及其求解算法[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(5): 128 - 131.
 [9] Bui L T, Barlow M, Abbass H A. A Multi-objective Risk-based Framework for Mission Capability Planning[J]. New Mathematics and Natural Computation, 2009, 5(2): 459 - 485.
 [10] Ministry of Defence. MOD Architectural Framework Customer 1 Community of Interest Deskbook, Version 1.0 [R]. MODAF, Aug. 2005.
 [11] Carlos A. Evolutionary Multi-Objective Optimization: A History View of the Field [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2006, 02: 28 - 36.
 [12] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 - 197.