文章编号: 1001- 2486(2007) 05- 0128- 04

军事能力到装备系统的双层规划模型及其求解算法*

岑凯辉, 谭跃进, 杨克巍, 李孟军
(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 阐述了基于能力的军事规划新思路, 提出了从军事能力到系统项目的两层规划模型。该模型上层以效果和效果- 成本比值最大化为目标, 通过资本规模来约束下层决策。下层以各种能力最大化为目标, 在成本约束下寻求不同系统项目的最佳组合, 并将结果返回上层影响最终的决策。应用了多目标遗传算法来求解该规划模型。算例结果表明, 所建立的双层规划模型及其求解算法对于国防资源分配问题是有效的。

关键词: 双层规划; 基于能力的方法; 采办; 遗传算法; 多目标
中图分类号: E917;TP311 文献标识码: A

Military Capability-to-system Bilevel Programming Model and Its Solution Algorithm

CEN Kai-hui, TAN Yue-jin, YANG Ke-wei, LI Meng-jun
(College of Information System and Management, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A new methodology of Capability Based Planning is introduced, and a bilevel programming model to allocate resources at military capability and system level is presented. The upper level of the model has two global objectives of effect and effect-cost ratio, which determines the constraint of investment scale to the lower. At the lower level, the optimal combinations of alternative systems are attained to maximize each kind of capabilities under the specified cost constraint, and then returned to the upper. To solve the bilevel programming model, the multiobjective genetic algorithm is adopted. The results of the presented example suggest that the bilevel programming model and its solution algorithm are valid to the problem of military acquisition and resource allocation.

Key words: bilevel programming; capability based planning; acquisition; genetic algorithm; multiobjective

面对未来不确定、多方位的军事威胁, 基于能力的规划(Capability-Based Planning, CBP) 方法被提出[1]。该方法认为: 能力是为达成作战效果而执行一系列相关任务的内在本领, 是底层装备、组织、条令等具体作战要素的有效综合, 因此基于能力来规划发展装备, 可缓解国防采办中存在的部门利益化问题, 并有利于联合作战条件下国防资源的优化配置[1-2]。本文探索了基于能力的规划方法, 对其中的规划问题开展研究。参考资金预算与资源分配问题, 应用双层规划[3-4]技术建立了军事能力到装备系统的双层规划模型, 并给出了基于多目标遗传算法的模型求解方法。

1 问题描述

基于能力的规划可以看作一个两层的资源分配问题, 参见图 1。一个是能力层次, 在资源的总体约束下, 为最大限度达成未来作战使命及效果, 顶层规划人员对各种能力的发展优先级、资源分配比例等问题进行决策, 寻求最佳的能力发展方案。另一个是系统项目层次, 项目决策人员按照能力发展方案, 把资源分配给可行的装备系统项目, 并优化系统项目组合, 最大程度地发展各种能力。

2 能力到系统的双层规划模型

基于双层规划思想[3-4], 本文建立了一个能力到系统的双层规划模型: (1) 在上层规划中, 选择总体

* 收稿日期: 2007- 04- 18
基金项目: 国家部委资助项目(513300102)
作者简介: 岑凯辉(1979—), 男, 博士生。

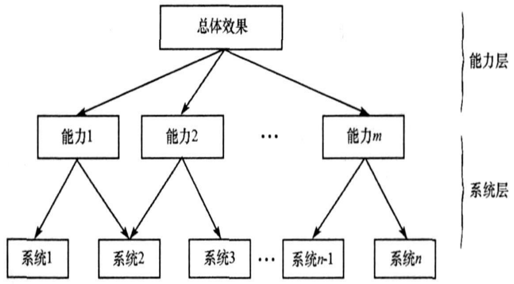

图 1　基于能力的规划示意图

Fig. 1　A graphic representation of capability based planning

效果和效费比作为全局目标, 以资金规模为上层决策变量, 通过该变量来约束下层规划。(2) 下层规划以最大化各能力为目标, 在资金规模约束下寻求最佳的系统项目组合, 并将规划结果反馈到上层, 由上层进行总体费效权衡, 从而得到最终决策结果。

$$\begin{aligned}&\max_y\Big[F_1(\boldsymbol{x},y)=\sum_{i=1}^{m} r_i\times f_i(\boldsymbol{x}),\,F_2(\boldsymbol{x},y)=F_1(\boldsymbol{x},y)/y\Big]\\&\text{s.t. } y\in[\mathrm{CMIN},\mathrm{CMAX}]\end{aligned}\tag{1a}$$

$$\begin{aligned}&\max_x[f_1(\boldsymbol{x}),f_2(\boldsymbol{x}),\cdots,f_m(\boldsymbol{x})]\\&\text{s.t. } \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})\geqslant \boldsymbol{M}\\&\quad\; g(\boldsymbol{x})\leqslant y\\&\quad\; \boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^{\mathrm{T}},x_i\in\{0,1\}\end{aligned}\tag{1b}$$

式中, $F_1\left(\boldsymbol{x},y\right)$ 为总体效果目标, 是各能力水平 $f_i\left(\boldsymbol{x}\right)$ 的加权和, $r_i\in[0,100]$ 表示能力 i 对作战效果的贡献, 由军事领域专家打分得到; $F_2\left(\boldsymbol{x},y\right)$ 为总体效费比, 描述了资金的利用效率; CMIN, CMAX 为资金规模 y 可能的最小、最大值; x_i 为 1 表示系统项目 i 将被开发, 否则不开发; $g\left(\boldsymbol{x}\right)$ 为项目组合 $\boldsymbol{x}$ 的成本函数; M 为各能力水平的最低门限值。公式(1a)中, 变量 $\boldsymbol{x}$ 是变量 y 的隐函数, 通过(1b)来求解。

在上述双层规划模型中, 记 $S=\left\{y\mid y\in[\mathrm{CMIN},\mathrm{CMAX}]\right\}$ 为(1a)的可行域, $Q=\left\{\boldsymbol{x}\mid \boldsymbol{f}\left(x\right)\geqslant \boldsymbol{M},g\left(\boldsymbol{x}\right)\leqslant y,x_i\in\{0,1\}\right\}$ 为(1b)的可行域。

定义 1　对于上层规划的任意决策变量 $y\in S$, 下层规划的合理反应集为: $T=\arg\max_x[f_1\left(\boldsymbol{x}\right),f_2\left(\boldsymbol{x}\right),\cdots,f_m\left(\boldsymbol{x}\right)]$, 则 $Z=\left\{\left(\boldsymbol{x},y\right)\mid y\in S,\boldsymbol{x}\in T\right\}$ 是双层规划模型的可行解集。

定义 2　如果存在 $\left(\boldsymbol{x}^*,y^*\right)\in Z$, 使得对任意 $\left(\boldsymbol{x},y\right)\in Z$, 有 $F_i\left(\boldsymbol{x},y\right)\leqslant F_i\left(\boldsymbol{x}^*,y^*\right)$, $i=1,2$ 成立, 那么 $\left(\boldsymbol{x}^*,y^*\right)$ 称为双层规划模型的有效解, 也称为 Stackelberg-mash 均衡解。

对于项目组合 $\boldsymbol{x}$, 如何处理系统项目之间的相关性是一个值得关注的问题, 这里给出仅考虑系统项目两两相关情况下的能力水平函数和成本约束函数。

$$f_i\left(\boldsymbol{x}\right)=\sum_{j=1}^{n}u_{ji}x_j+\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{k=j+1}^{n}v_{jki}x_jx_k=\boldsymbol{U}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+hf\left(\boldsymbol{x}\right)\tag{2}$$

$$g\left(\boldsymbol{x}\right)=\sum_{i=1}^{n}a_ix_i-\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}b_{ij}x_ix_j=A^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}-hg\left(\boldsymbol{x}\right)\tag{3}$$

上两式中, 矩阵 U 表示系统项目对能力的独立贡献, $hf\left(\boldsymbol{x}\right)$ 表示项目之间由于相互配合所产生的额外贡献; 向量 A 表示各项目的单独成本, $hg\left(\boldsymbol{x}\right)$ 表示项目通过资源共享减少的成本。当不考虑项目相关性时, 略去两式的非线性部分。

3　求解算法

本文建立的双层规划模型具有多目标、多约束和整数型决策变量等特点, 增加了求解难度。考虑到

下层模型(1b)拥有多个目标、多个约束以及众多的二进制决策变量,因此适合采用多目标遗传算法[6]进行求解,而上层模型(1a)只有一个整数型决策变量,可直接采用枚举法。

3.1 算法流程

Step 1 参数初始化。确定能力对效果的贡献值、成本规模的范围、各系统项目对能力的贡献等模型参数,并设置下层遗传算法的种群规模、代数、交叉、变异概率等参数。

Step 2 从上层成本规模可行域中选择当前成本规模,进入下层规划。

Step 2.1 随机产生染色体初始种群 $P(0)$。

Step 2.2 计算当前代 $P(t)$ 中染色体(系统项目组合)的适应度。

Step 2.3 采用二进制锦标赛方法从当前代中选择染色体进行交叉、变异操作,得到子群 $P'(t)$。

Step 2.4 组合当前代种群和子群,利用非支配排序技巧(non-dominated sorting)从组合群中抽取下一代种群 $P(t+1)$。

Step 2.5 如果满足代数要求,则进入Step3,否则转入Step2.2。

Step 3 从下层规划的最终种群中找出当前成本规模下系统组合的最优解。

Step 4 计算当前成本规模与系统组合最优解的上层规划目标,比较得到双层有效解。

Step 5 如果成本规模的可行域被完全搜索,则算法完毕;否则,转入Step 2。

3.2 约束处理与适应度比较

利用多目标遗传算法计算下层规划模型时,对两类约束 $g_i(\boldsymbol{x}) \leqslant 0$ 和 $h_i(\boldsymbol{x}) = 0$,构造如下罚函数。式中 opf 表示综合惩罚值,等于0表示 $\boldsymbol{x}$ 为可行解,大于0则 $\boldsymbol{x}$ 为不可行解。

$$pf_i(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} \max\left(0, g_i(\boldsymbol{x})\right), & 1 \leqslant i \leqslant l \\ |h_i(\boldsymbol{x})|, & l+1 \leqslant i \leqslant p \end{cases} \tag{4}$$

$$opf = \sum_{i=1}^{p} pf_i(\boldsymbol{x})$$

由于存在多个极大化目标,染色体的适应度难以明确计算,但通过如下规则进行比较:

规则1 如果解(或染色体) $\boldsymbol{x}_1$ 和 $\boldsymbol{x}_2$ 都不是可行解,则综合惩罚值小的占优。

规则2 如果解 $\boldsymbol{x}_1$ 不可行,解 $\boldsymbol{x}_2$ 可行,则解 x_2 占优。

规则3 如果解 $\boldsymbol{x}_1$ 和 $\boldsymbol{x}_2$ 都是可行解,那么根据它们的目标值向量进行Pareto占优比较,即当且仅当 $f_i(\boldsymbol{x}_1) \geqslant f_i(\boldsymbol{x}_2)$, $i=1, \dots, q$ 且至少存在一个 $j \in \{1, \dots, q\}$ 使 $f_j(\boldsymbol{x}_1) > f_j(\boldsymbol{x}_2)$,则 x_1 优于 x_2。

规则4 如果两可行解互不占优,则它们处在相同的Pareto前沿。

4 算例

该例子中,使命效果需要6种能力的支持,为实现能力需求拟考察10个系统项目。首先由军事领域专家根据定性分析结果,给不同想定下各能力对作战效果的贡献打分,再根据想定发生概率或重要程度对打分值加权平均,所得各能力对效果的平均贡献值为 $\boldsymbol{r} = (22.5, 25.2, 32.5, 15.6, 32.5, 24.8)^{\mathrm{T}}$。给定总成本规模范围: CMIN = 30, CMAX = 150,系统项目各自独立,其成本向量 $\boldsymbol{A} = (16, 20, 15, 12, 17, 6, 8, 5, 24, 14)^{\mathrm{T}}$,对能力的贡献矩阵 $\boldsymbol{U}$ 如下所示,项目组合的能力门限值 $\boldsymbol{M} = (0.2, 0.2, 0.2, 0.3, 0.3, 0.3)^{\mathrm{T}}$。

$$\boldsymbol{U}=\begin{pmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 \\ 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0.1 & 0.4 & 0 & 0 & 0.2 \end{pmatrix}$$

求解算法采用 C 语言在 NSGA- II[5] 基础上实现。求解时, 上层按 5 个资金单位间距进行枚举; 设置下层算法的种群规模 64, 运行代数 100, 交叉概率 0. 6, 变异概率 0. 5。在 CPU P4 1. 7G, 256M RAM 配置上该算法平均求解时间约 8 秒。所求得的模型有效解如表 1 所示。

表 1 所求例子的有效解

Tab. 1 The Pareto solutions of the example

编号	效果	效/费	系统组合	成本	编号	效果	效/费	系统组合	成本
1	99. 070	1. 981	1010011100	50	8	154. 320	1. 543	1101111101	100
2	119. 550	1. 839	1010011101	65	9	154. 590	1. 472	1010111111	105
3	118. 590	1. 694	1010011101	70	10	158. 860	1. 444	1101011111	110
4	124. 880	1. 665	1101001101	75	11	164. 040	1. 426	1111111101	115
5	132. 670	1. 658	1011011101	80	12	168. 580	1. 405	1111011111	120
6	139. 070	1. 636	1101011101	85	13	174. 110	1. 393	1101111111	125
7	147. 920	1. 557	1011111101	95	14	183. 830	1. 313	1111111111	140

从表 1 中发现: (1) 系统项目 1、7 和 8 出现在所有最优系统组合中, 系统项目 6、10 在最优组合中出现的频率较大; 系统项目 5、9 出现的频率较小。可以认为, 系统 1、7 和 8 具有很强的适应性和竞争力, 能够适应于不同组合要求。(2) 最优组合的成本规模在 50 到 140 之间; 资金规模在 95 和 125 之间时, 只有 1~ 2 个项目被淘汰。

5 结 论

在基于能力的规划和采办这一思路下, 建立了军事能力到装备系统的两层规划模型, 并开发了以多目标遗传算法为基础的混合求解算法。算例结果表明: 所建立的多目标双层规划模型及其求解算法能够有效地计算出系统组合最优解集, 为进一步的采办决策奠定了基础。

参 考 文 献:

[1] Davis P K. Analytic Architecture for Capabilities-based Planning, Mission-system Analysis, and Transformation[R]. RAND, MR- 1513- OSD, 2002.

[2] 张栋, 罗飞, 罗小明. 武器装备全寿命费用宏观控制的系统动力学模型[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(3): 110- 114.

[3] Bard J. Some Properties of the Bilevel Linear Programming [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1991, 32: 146- 164.

[4] Liu B. Stackelberg-nash Equilibrium for Multilevel Programming with Multiple Follows Using Genetic Algorithms[J]. Computers Math. Applic., 1998, 36(7): 79- 89.

[5] 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.