

doi: 10.7690/bgzd.2022.09.001

基于层次分析法和差动法的作战部队力量编组方法

李新宇, 朱 昱

(火箭军工程大学保障学院, 西安 710025)

摘要: 针对作战力量编组在作战任务中出现的作战资源分配调度不合理问题, 以作战资源消耗最少为目标函数构建整数规划模型。利用层次分析法评估作战能力, 并采用差动法进行作战力量分配编组, 使得优化结果满足任务要求的同时代价花费最小; 差动法基于作战任务的量化分析, 可以快速准确地完成作战力量编组并形成行动方案。实验结果表明: 该方法切实可行, 符合现阶段作战部队编组作战的现实要求。

关键词: 资源分配; 编组作战; 差动法; 层次分析法

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

Combat Force Organization Method Based on Analytic Hierarchy Process and Differential Method

Li Xinyu, Zhu Yu

(Operational Support College, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to solve the problem of unreasonable allocation and scheduling of combat resources in the combat task of combat force formation, the author constructs an integer programming model with the minimum consumption of combat resources as the objective function. The analytic hierarchy process (AHP) is used to evaluate the combat capability, and the differential method is used to allocate and organize the combat forces, so that the optimization results meet the mission requirements and the cost is minimized. The differential method is based on the quantitative analysis of combat tasks, which can quickly and accurately complete the combat force organization and form the action plan. The experimental results show that the method is feasible and meets the realistic requirements of the current combat force.

Keywords: resource allocation; organization and operation; differential method; analytic hierarchy process

0 引言

对作战力量进行编组的思想自古就有, 然而将“编组”作为一种理论来研究, 近些年才出现。许多资源在一定时间内的供给量是一个随机变量^[1], 作战力量在不确定因素影响下的作战能力同样是个随机数。编组合理性和模式科学性制约着作战效能的发挥, 影响任务的完成^[2]。科学合理地制定作战力量编组方案, 对充分发挥作战能力, 高效精确地完成作战任务至关重要, 从而实现“任务—资源—时间”三者之间的最佳匹配^[3]。资源调度问题的研究通过协同任务规划得到了初步解决, 但仍存在着诸多问题。王坚浩等^[3]只考虑了任务时序逻辑关系约束和任务完成效能约束, 任务需求和实际作战能力仍存在不匹配的问题。朱传军等^[4]采用的整数规划精确求解方法耗时长, 不适用于协同任务规划问题。此外, 赵劲松等^[2]通过提取编组单元之间的特征, 确定模糊相似矩阵的模糊聚类法也仅是一种较为合理的定性分析方法。美军对编组作战问题的研

究开始较早, 而国内关于后勤、卫勤、装备等保障力量的编组研究起步较晚。李国耀^[5]分析了二炮部队阵地作战的编组要求; 万仕君等^[6]讨论了后勤保障分队编组工作应注意的问题; 黄潇潇^[7]研究了美军步兵营保障力量编组的缘由、方法、特点和意义。以上均是从定性讨论和理论分析的角度开展编组作战的研究, 没有解决定量计算编组作战的现状。

笔者针对部队作战与装备运用的实际特点, 建立整数规划模型, 通过层次分析法对作战能力进行评估, 并采用差动法对力量进行编组, 使每一次作战力量分配都使得毁伤效果最大, 可递推实现作战力量最优分配, 称之为循序最优编组方案。

1 问题描述与模型构建

以作战单元整体作战为问题背景, 分析约束条件, 建立模型假设, 通过层次分析法对作战单元的作战能力进行评估, 并确定优化指标函数, 构建作战力量编组的整数优化模型。

收稿日期: 2022-05-20; 修回日期: 2022-06-28

作者简介: 李新宇(1997—), 男, 河南人, 硕士, 从事运筹学与资源管理优化研究。E-mail: 1025997454@qq.com。

1.1 问题描述

实施作战行动,既要满足任务的毁伤要求,又要保证消耗资源最少。假设某次任务的目标有 U 个子目标,每个子目标的价值定义为 $A[u](u=1, 2, 3, \dots, U)$ 。执行任务的共有 N 个作战单元,每个作战单元的作战能力会由于战场环境、训练水平、要素保障、综合性能等影响因素的不同而存在差异。通过对作战能力的量化评估和子目标相对价值情况,确定作战单元和子目标的对应关系,快速形成作战编组方案。

1.2 问题约束与假设

假设不再考虑其他因素对作战任务的影响,每个作战单元对一个子目标作战,同一个编组内的作战单元只能攻击同一个子目标,且各单元之间不存在相互影响。

1.2.1 毁伤要求约束

作战单元的编组毁伤能力要满足作战任务的毁伤条件,即作战效能之和要大于目标的毁伤要求。

$$\sum_{i=1}^{n_u} D_i * A_i > K_{dy} * \sum A[u]。 \quad (1)$$

式中: K_{dy} 为给定的毁伤要求比例; $\sum_{i=1}^{n_u} D_i * A_i$ 为参与编组的单元完成的总作战效能。

1.2.2 作战单元总数约束

共有 N 个作战单元执行作战任务,参与编组的作战单元数量不得超过其总数,即:

$$\sum_{u=1}^U n_u \leq N。 \quad (2)$$

1.2.3 毁伤条件约束

由问题假设可知,每个作战单元只能编入一个作战编组内或不参与编组。当第 i 个单元攻击第 u 个子目标时:

$$X_i(u)=1。 \quad (3)$$

否则为 0。

1.3 作战能力的层次分析

笔者采用层次分析法评估作战能力。层次分析法根据决策者的经验,衡量指标之间对目标问题的相对重要程度,并进行量化评估,是一种定性定量相结合的解决多目标复杂问题的决策分析方法^[8]。

1.3.1 建立层次结构模型

将决策的目标、考虑的因素和决策对象按它们之间的关系依次建立目标层、准则层和方案层,层次结构如图 1 所示。

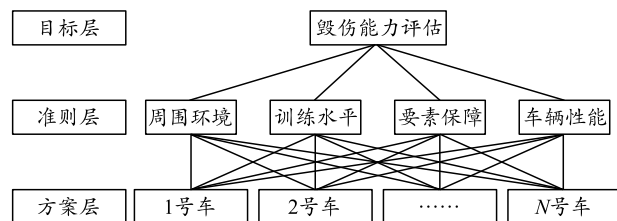


图 1 层次结构模型

1.3.2 构造成对比较矩阵

仅通过定性分析来确定各层次之间的权重时,往往不具有足够说服力,因而 Santy 等提出了一致矩阵法。通过两两比较的方式替代所有因素同时比较,采用相对尺度比较避免了性质不同的因素比较的困难。成对比较矩阵元素 a_{ij} 用 Santy 的 1-9 标度法表示^[9],由专家进行评估给出,含义是本层所有影响因素与上一层某一个因素比较的相对重要性。则不同影响因素之间的成对比较矩阵为:

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} \text{周围环境} & \text{训练水平} & \text{要素保障} & \text{车辆性能} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{周围环境} \\ \text{训练水平} \\ \text{要素保障} \\ \text{车辆性能} \end{matrix} & A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中: $a_{ii}=1$, $a_{ij}=1/a_{ji}$ 。

每个作战单元对各影响因素的打分同样由专家进行评估给出,该元素表示同一种影响因素,不同的 2 个作战单元影响程度的比较权值。可得作战单元之间的成对比较矩阵为:

$$\begin{matrix} & \begin{matrix} \text{1号车} & \text{2号车} & \cdots & \text{N号车} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \text{1号车} \\ \text{2号车} \\ \cdots \\ \text{N号车} \end{matrix} & A = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

其中: $d_{ii}=1$, $d_{ij}=1/d_{ji}$ 。

1.3.3 层次单排序及一致性检验

利用方根法对各指标权重进行求解,计算判断矩阵每一行元素乘积的 n 次方根:

$$W_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}。 \quad (4)$$

式中: a_{ij} 为判断矩阵中的元素 n 为判断矩阵阶数;

W_i 为判断矩阵的第 i 行元素的乘积的 n 次方根。然后对向量 $\mathbf{w}=(W_1, W_2, W_3, \dots, W_n)^T$ 进行归一化处理。归一化的方法是:

$$w_i = W_i / \sum W_n. \quad (5)$$

则 $\mathbf{w}=(W_1, W_2, W_3, \dots, W_n)^T$ 为所求的判断矩阵的特征向量, 即指标权重。

进行判断矩阵的一致性检验, 需要计算判断矩阵最大特征根, 其 λ_{\max} 计算式为

$$\lambda_{\max} = \sum w B_i / n w_i. \quad (6)$$

其中 B_i 为判断矩阵的第 i 个行向量。进而计算判断矩阵的一致性指标 (CI), 检验其一致性。

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1). \quad (7)$$

n 为矩阵维数。已知平均随机一致性指标 (RI) 如表 1 所示, 已知矩阵维数查表可得 RI 。

表 1 随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7
RI	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32

定义一致性比率 $CR=CI/RI$ 。一般认为 $CR<0.1$ 时不一致性满足要求, 可以通过一致性检验。否则要对 a_{ij} 进行调整, 重新构造对比较矩阵。

1.3.4 层次总排序

通过一致性检验的判断矩阵可以计算出矩阵的权值向量进行层次总排序, 通过计算影响因素成对比较矩阵对各单元的权重 W_{Ai} 和作战单元成对比较矩阵对各影响因素的权重 W_{Dj} , 对应项乘积之和即为作战单元作战能力的权向量 Dk_i 。计算公式为:

$$Dk_i = a_{i1} \times d_{1i} + a_{i2} \times d_{2i} + a_{i3} \times d_{3i} + a_{i4} \times d_{4i}. \quad (8)$$

其中: $W_{Ai} = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, a_{i4}) \quad i=1, 2, \dots, N$,

$$W_{Dj} = (d_{1j}, d_{2j}, d_{3j}, d_{4j}), \quad j=1, 2, 3, 4.$$

作战能力评估系数为 $0 \sim 1$ 的小数, 越接近于 1 表示毁伤能力越强。

1.4 优化指标的设计

优化指标是进行运筹规划的目标函数, 当使得优化指标最小时的可行解即为最优解。作战部队的任务繁重, 以更少的装备投入任务, 可以减少不必要的损失和资源浪费。故设计作战编组的优化指标 f 为在满足毁伤要求的前提下参与编组的作战单元最少。数学表达式为:

$$\min f(x) = \min \sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^N X_i(u). \quad (9)$$

式中: $\sum_{i=1}^N X_i(u)$ 为打击第 u 个子目标时参与的作战

单元数: $\sum_{u=1}^U \sum_{i=1}^N X_i(u)$ 为此次作战任务全部参与的作战单元。

结合式(1)~(3)、式(8)、(9)即可完成作战力量编组单目标函数优化问题的模型构建。

2 实验仿真

假设执行本次作战任务共有 12 个作战单元, 所选目标有 5 个子目标, 且已知其相对价值, 毁伤要求比例为 80%, 成对比较矩阵的元素值已获取。其中 k 为作战能力常值系数, 其作用是作战单元作战能力计算的权值系数, 文中取 $k=29$ 。

2.1 作战能力计算

假设影响作战能力的 4 种因素在各个作战单元之间的影响程度不存在差异, 即影响因素成对比较矩阵是相同的, 比对结果如表 2 所示。

表 2 作战能力影响因素成对比较系数

作战能力	要素保障	战场环境	训练水平	综合性能
要素保障	1	1/3	4	7
战场环境	3	1	2	5
训练水平	1/4	1/2	1	1/6
综合性能	1/7	1/5	6	1

由层次单排序计算式(4)、(5), 可得到影响因素权重向量为 $\mathbf{W}_A=[0.163, 0.054, 0.307, 0.476]$ 。按照同样的方法分别对 4 种影响因素评估出 12 个作战单元之间的成对比较矩阵, 代入层次单排序计算公式可得作战能力权重向量为:

$$\mathbf{W}_{D_1}=[0.148, 0.073, 0.092, 0.101, 0.055, 0.108,$$

$$0.174, 0.032, 0.132, 0.028, 0.040, 0.017];$$

$$\mathbf{W}_{D_2}=[0.083, 0.092, 0.056, 0.066, 0.103, 0.125,$$

$$0.018, 0.056, 0.097, 0.100, 0.088, 0.116];$$

$$\mathbf{W}_{D_3}=[0.174, 0.032, 0.132, 0.028, 0.040, 0.017,$$

$$0.092, 0.135, 0.056, 0.066, 0.103, 0.125];$$

$$\mathbf{W}_{D_4}=[0.040, 0.159, 0.027, 0.102, 0.135, 0.056,$$

$$0.066, 0.125, 0.028, 0.056, 0.174, 0.032]。$$

代入式(8)可得 1 号单元作战能力系数为: $k \times 0.163 \times 0.148 + 0.054 \times 0.083 + 0.307 \times 0.174 + 0.476 \times 0.040 = 0.776$ 。同理可得其他 11 个单元的作战能力系数, 结果如表 3 所示。

2.2 作战能力排序编号

作战能力系数是一个 $0 \sim 1$ 的数, 其表达的含义是该单元打击后会使得该子目标的价值量下降的比例。为了尽量减少使用作战资源, 所以将单元按

照作战能力由大到小的顺序重新编号，并按此顺序依次进行任务的分配，排序结果如表 4 所示。

表 3 作战能力结果

单元编号	作战能力	单元编号	作战能力
1	0.776	7	0.883
2	0.436	8	0.255
3	0.491	9	0.660
4	0.538	10	0.185
5	0.342	11	0.308
6	0.549	12	0.140

表 4 作战能力排序

单元编号	作战能力	单元编号	作战能力
1	0.883	7	0.435
2	0.776	8	0.342
3	0.660	9	0.308
4	0.549	10	0.255
5	0.538	11	0.184
6	0.491	12	0.140

2.3 差动法分配与编组

差动法是指按照上述确定的顺序，依次逐个进行任务分配，原则是每一次分配都使得系统的价值量下降得最多。分配完一个单元之后，将剩余的价值量更新，再进行下一个单元的分配，直到达到终止条件为止。

2.3.1 确定子目标相对价值量

作战任务确定后，5 个子目标的价值量是个确定的值，分别设定为 $A=0.35$ ， $B=0.15$ ， $C=0.1$ ， $D=0.15$ ， $E=0.25$ 。目标总价值为 5 个子目标价值之和， $Z=A+B+C+D+E=1$ 。

2.3.2 依次逐个单元分配

按照 2.2 节的单元排序编号，由编号 1 依次分配，分别计算将编号 1 分配到 A—E 5 个子目标的毁伤效果并比较大小，将最大的毁伤量及对应的子目标编号记录下来，该子目标与编号 1 对应，并将该子目标的价值量减去成功毁伤的价值量，更新编号 1 打击后目标的价值状态，按该方法依次进行。

2.3.3 算法终止条件

按照给定的毁伤要求，毁伤的价值总量不小于 $K_{dy} \times Z$ 。

$$V_{sy} < (1 - K_{dy}) \times Z. \quad (10)$$

当达到毁伤要求后，算法即可终止；若 12 个作战单元分配完仍然没有达到毁伤要求，则最后一个单元分配完即为终止条件，并定义该情况为任务失败。其中 V_{sy} 为目标剩余价值量。

2.3.4 作战单元编组

经过上述过程完成了作战单元分配，得到每个

编号单元对应的子目标，从而每个子目标对应的所有作战单元即为一个作战编组。至此完成了作战任务的分配和作战力量编组。

3 实验结果与分析

笔者使用 Visual studio 2012 软件，基于对话框的 MFC 应用程序界面设计对算例进行仿真计算。根据已知条件，可以计算作战能力并进行排序，程序设计界面如图 2 所示。



图 2 作战单元调度优化编组界面

使用差动法逐个依次分配作战单元，子目标 1—5 号分别对应 A—E 号子目标，得到的分配方案如图 3 所示。

子目标价值	作战单元	子目标
A 0.35	作战单元01	子目标1号
B 0.15	作战单元02	子目标5号
C 0.1	作战单元03	子目标2号
D 0.15	作战单元04	子目标4号
E 0.25	作战单元05	子目标3号
	作战单元06	子目标4号
	作战单元07	子目标5号
	作战单元08	子目标2号

图 3 作战单元分配方案结果

由上图可知，当满足毁伤要求 80% 时，共出动作战单元 8 个，满足题意。将分配方案按照子目标对应重组，即可获得作战编组方案如图 4 所示。

子目标	作战单元编组1	作战单元编组2
子目标A	作战单元1	作战单元0
子目标B	作战单元3	作战单元8
子目标C	作战单元5	作战单元0
子目标D	作战单元4	作战单元6
子目标E	作战单元2	作战单元7

图 4 作战单元调度编组结果

更改毁伤要求为 90%，对该方法再次进行检验，结果如图 5 所示。总出动单元数为 8 589 934，数据溢出的原因是所有作战单元分配完毕后仍没有达到毁伤要求。

(下转第 21 页)

参考文献:

- [1] 欧长劲, 姚斌, 田国华. 摆动滚子从动件共轭凸轮的参数化设计[J]. 轻工机械, 2010, 28(3): 48-51.
- [2] 唐善华. 应用复极矢量函数设计摆动从动件共轭凸轮机构[J]. 机械传动, 2007, 31(4): 38-40.
- [3] 曾鹏飞, 张星. 基于 Pro/E 的平面共轭凸轮机构设计及运动分析[J]. 机械传动, 2014, 38(12): 55-58.
- [4] 刘飞, 张大伟. 基于 Pro/E 和 Adams 的共轭凸轮设计与仿真[J]. 机械研究与应用, 2010(1): 60-62.
- [5] 唐春阳, 许兴稳, 陈荣发. 滚子摆动从动件平面共轭凸轮的设计与制造[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2010, 13(2): 37-40.
- [6] 李郝林, 董波, 陈锐. 凸轮轴共轭磨削中共轭凸轮的计算方法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2008, 34(5): 624-626.
- [7] 贺向东. 共轭凸轮轮廓曲线曲率半径的计算[J]. 鹭江大学学报, 1994, 3(4): 48-54.
- [8] 金国光. 打纬机构钢筘的柔性动力学分析[J]. 天津工业大学学报, 2020, 39(4): 73-81.
- [9] 邱海飞. 剑杆织机打纬共轭凸轮仿真设计与验证[J]. 机械设计, 2021, 38(4): 107-111.
- [10] 葛乐乐, 张龙, 胡凯文. 基于遗传算法的共轭凸轮机构计算机辅助设计[J]. 机电工程, 2021, 38(2): 210-215.
- [11] TANG X M. Calculation algorithm for kinematics accuracy reliability of conjugate cams beating-up mechanism[J]. Journal of Information & Computational Science, 2014, 11(18): 6787-6793.
- [12] 石永刚, 吴央芳. 凸轮机构设计与应用创新[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 20-63.
- [13] ZHANG L, HE H, SU Z S. The effect of the components' material properties to the conjugate cam weft insertion mechanism with clearance[J]. Materials Research Innovations, 2015, 19(9): 245-249.
- [14] 刘昌祺, 刘庆立, 蔡昌蔚. 自动机械凸轮机构实用设计手册[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 18-27.
- [15] 朱理, 王贤民, 黄忠东. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 129-140.

(上接第4页)



图5 二次试验编组结果

4 结论

在已知目标相对价值和相关作战信息的条件下, 给定毁伤要求, 笔者研究可以完成任务的最优化分配并实现编组作战。该方法不仅操作流程简单, 快捷方便, 而且任务分配精准, 在高效完成作战任务的同时不产生冗余负担, 具有较好的应用价值和发展前景。

参考文献:

- [1] 陈均明. 随机资源分配问题建模和随机模拟遗传算法求解[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2006, 23(5): 430-434.
- [2] 赵劲松, 李忠光, 门君. 基于模糊聚类装备保障力量单元编组研究[J]. 军事交通学院学报, 2008, 20(1): 32-36.
- [3] 王坚浩, 张亮, 史超. 基于入侵杂草蝙蝠双量子群优化的装备保障编组协同任务规划[J]. 控制与决策, 2019, 34(7): 1375-1384.
- [4] 朱传军, 刘明英. 基于改进遗传算法的民航客机地勤调度问题[J]. 湖北工业大学学报, 2020, 35(5): 17-22.
- [5] 李国耀. 二炮坑道阵地卫勤保障力量编组要求[J]. 人民军医, 2006, 49(5): 310.
- [6] 万仕君, 周军, 唐浩. 预备役部队后勤保障分队编组思考[J]. 后勤战线, 2005(7): 35.
- [7] 黄潇潇. 美军战斗营保障力量编组问题[EB/OL]. [2021-07]. <http://www.knowfar.org.cn>.
- [8] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
- [9] 张士杰, 王辛. 基于组合评价的皖北城市竞争力研究[J]. 安徽广播电视大学学报, 2013(1): 41-45.