

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.11.010

## 一种不完全信息条件下 C<sup>4</sup>ISR 系统效能指标赋权方法

李璇, 姜江, 邓苏

(国防科学技术大学 C<sup>4</sup>ISR 技术国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 针对指标赋权中存在的多专家判断信息、不完全信息以及不一致信息等情况, 提出一种不完全信息情况下的 C<sup>4</sup>ISR 系统效能指标赋权方法。其实施步骤为: 首先收集多个专家的经验信息, 构建比较判断矩阵, 通过不完全参数矩阵描述专家不完全信息; 然后以求得总偏差变量最小为目标构建多目标优化模型, 通过目标规划方法求解此多目标优化模型, 从而得到指标权重值。最后选取某一子指标进行实例计算, 求得各指标权重, 验证该方法能有效地综合考虑多专家经验信息, 充分利用现有数据, 有效地消除不一致性, 求得最一致的判断结果。

**关键词:** C<sup>4</sup>ISR 系统; 指标赋权; 目标规划; 不完全信息; 判断矩阵

**中图分类号:** TP393.02 **文献标识码:** A

## A Method to Weight Determination Under Incomplete Information for C<sup>4</sup>ISR Efficiency Evaluation

Li Xuan, Jiang Jiang, Deng Su

(Key Lab of C<sup>4</sup>ISR Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In order to deal with multiple experts' judgment information, incomplete information and inconsistent information in C<sup>4</sup>ISR system efficiency evaluation, an approach is proposed for obtaining criteria weights under incomplete information environment. The approach is made up of five steps: collecting the multiple experts' opinion and constructing judgment matrices; defining incomplete coefficient matrices; constructing multiple objectives optimization model by minimizing the deviation degrees; resolving model using goal programming method; and analyzing result. Finally, a numerical example for sub-criteria weights determination is studied and shows the advantages that the proposed approach can integrate multiple experts' information, avoid inconsistent and obtain most satisfied criteria weights successfully.

**Keywords:** C<sup>4</sup>ISR system; criteria weights determination; goal programming; incompleteness information; judgment matrices

### 0 引言

C<sup>4</sup>ISR 系统是以网络为中心的, 集指挥、控制、通信、计算机、情报、监视、侦查等功能为一体的综合系统, 又称指挥自动化系统、综合电子信息系统<sup>[1]</sup>。随着 C<sup>4</sup>ISR 系统在信息化战争中的地位日益增强, 在系统建设前期对其进行科学的论证评估是保障其能否满足作战需求和系统建设需要必要手段。C<sup>4</sup>ISR 系统效能评估一般要经过 4 个阶段: 建立指标体系、确定指标权重、数据收集处理、指标聚合与结果分析。其中, 系统效能指标赋权是关键环节, 而对如何确定指标权重的研究还不是很多。大部分研究选用层次分析法 (AHP, Analytic Hierarchy Process) 确定指标权重<sup>[2-3]</sup>; 文献[4]采用了熵权分析法, 文献[5]提出了群体可拓层次分析法集结多专家的意见给指标赋权, 文献[6]研究了一种在对抗条件下 C<sup>4</sup>ISR 系统效能指标权重确定方法。但由于专家的经验知识不足或其它原因, 可能给出

的初始判断信息是不完全的、缺失的。

故针对 C<sup>4</sup>ISR 系统效能评估指标赋权问题展开研究, 考虑在多个专家给出不完全初始判断信息的情况下, 通过构建多目标优化模型, 运用目标规划方法计算<sup>[7-8]</sup>, 最大程度地保留多专家意见, 得到尽可能一致的权重分析结果。

### 1 C<sup>4</sup>ISR 系统效能评估指标体系

首先, 遵循科学性、客观性、独立性、系统性、实用性、可行性、简捷性、层次性等指标构建原则, 建立 C<sup>4</sup>ISR 系统效能评估指标体系如图 1<sup>[2,3,5]</sup>。

### 2 不完全信息条件下的效能指标赋权方法

假设某上层能力指标  $C$  分解为  $n$  个子能力指标  $C = \{C_i\}, i = 1, \dots, n$ 。  $n$  个子能力指标分别对应的权重为  $w = \{w_i\}, i = 1, \dots, n$ , 根据指标权重的一般化定义, 权重向量应满足  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。

收稿日期: 2010-05-19; 修回日期: 2010-07-01

作者简介: 李璇 (1982-), 女, 湖南人, 助教, 从事智能决策技术、指挥自动化系统研究。

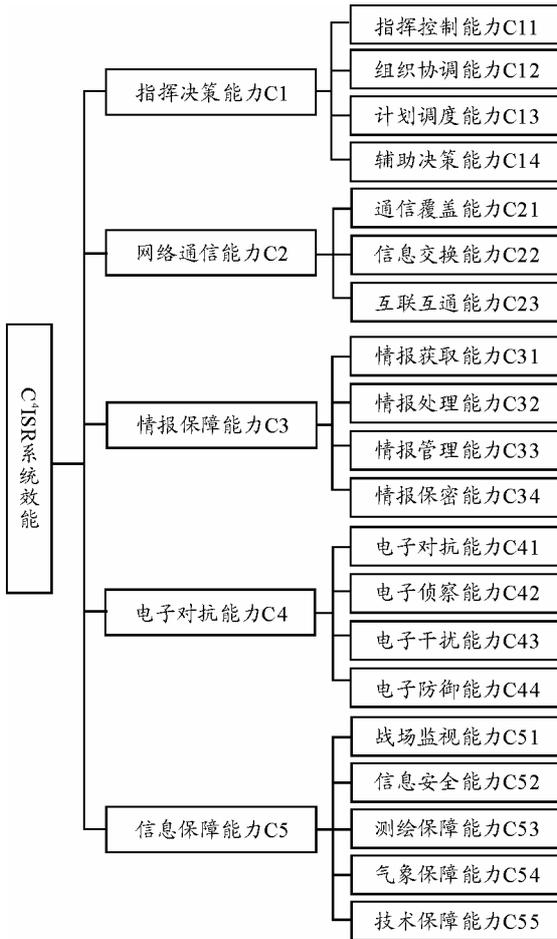


图 1 C<sup>4</sup>ISR 系统效能评估指标体系

现有来自不同领域的  $m$  名专家分别给出其对指标重要程度的两两判断, 可得到  $m$  个判断矩阵  $R_k = (r_{ij}^k)_{n \times n}, k = 1, \dots, m$ .  $r_{ij}^k$  表示第  $k$  个专家对第  $i$  个能力指标  $C_i$  和第  $j$  个能力指标  $C_j$  相互重要程度的判断, 此处采用 Saaty 提出的九标度法, 满足  $r_{ij}^k r_{ji}^k = 1, \forall i, j \in \{1, \dots, n\}$  [9]. 这里, 每名专家的权重系数为  $\lambda_k, k = 1, \dots, m$ , 满足  $\sum_{k=1}^m \lambda_k = 1$ . 如果某一专家  $k$  由于知识缺乏或其他原因, 没有对指标  $i$  和指标  $j$  的相互关系给出判断, 那么视为信息不完全, 在判断矩阵  $R_k$  中记  $r_{ij}^k = x$  为描述判断矩阵中的不完全信息, 定义不完全参数矩阵  $\Delta^k = (\delta_{ij}^k)_{n \times n}$ , 这里  $\delta_{ij}^k = \begin{cases} 0, & r_{ij}^k = x \\ 1, & r_{ij}^k \neq x \end{cases}, (k = 1, 2, \dots, m)$ .

理想条件下, 判断矩阵  $R_k$  真实地反应指标之间的权重关系, 即有:

$$r_{ij}^k = w_i / w_j \Leftrightarrow w_i = r_{ij}^k w_j, \quad i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (1)$$

此时,  $R_k$  为完全一致判断矩阵, 满足  $r_{ij}^k = r_{ik}^k r_{kj}^k$ . 但实际收集到的专家判断矩阵不一定全部满足一致性要求, 即存在

$$w_i \approx r_{ij}^k w_j, \quad i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (2)$$

因此, 取差值  $w_i - r_{ij}^k w_j$ , 同时考虑不完全信息  $r_{ij}^k = x$  的情况, 定义偏差变量  $\varepsilon_{ij}^k$  为:

$$\varepsilon_{ij}^k = \delta_{ij}^k |w_i - r_{ij}^k w_j|, \quad i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m \quad (3)$$

则  $m$  个判断矩阵的总偏差为:

$$F_{ij}(w) = \varphi_{ij} \sum_{k=1}^m \lambda_k |\varepsilon_{ij}^k| = \varphi_{ij} \sum_{k=1}^m \lambda_k \delta_{ij}^k |w_i - r_{ij}^k w_j|, \quad i, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

其中,  $\lambda_k$  是第  $k$  个专家的权重,  $\varphi_{ij}$  为归一化系数,  $\phi_{ij} = (\sum_{k=1}^m \lambda_k \delta_{ij}^k)^{-1}$ .

显然,  $F_{ij}(w)$  值越小, 所有专家的判断越一致, 越能满足式(1). 故构建多目标规划模型如下:

$$\min F_{ij}(w) = \varphi_{ij} \sum_{k=1}^m \lambda_k \delta_{ij}^k |w_i - r_{ij}^k w_j|, \quad i, j = 1, \dots, n; i \neq j \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (6)$$

上述模型的求解, 可以转化为求解下列目标规划模型:

$$\min J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n (s_{ij} d_{ij}^+ + t_{ij} d_{ij}^-) \quad (7)$$

$$s.t. \varphi_{ij} \sum_{k=1}^m \lambda_k \delta_{ij}^k [w_i - r_{ij}^k w_j] + d_{ij}^- - d_{ij}^+ = 0, \quad i, j = 1, \dots, n; i \neq j, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$d_{ij}^- \geq 0, d_{ij}^+ \geq 0, d_{ij}^- d_{ij}^+ = 0, i, j = 1, \dots, n; i \neq j \quad (10)$$

其中,  $d_{ij}^+$  是正偏离变量,  $d_{ij}^-$  是负偏离变量.  $s_{ij}$  是正偏离变量  $d_{ij}^+$  的重要度系数,  $t_{ij}$  是负偏离变量  $d_{ij}^-$  的重要度系数; 笔者认为正负偏离变量具有同等地位, 故取  $s_{ij} = t_{ij} = 1, i, j = 1, \dots, n; i \neq j$ .

对模型(7)~(10), 进行优化求解, 即可得到结果权重  $w^* = (w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*)^T$ .

综上所述, 该方法的 5 个步骤为:

- 1) 根据 C<sup>4</sup>ISR 系统效能指标体系, 收集整理专家判断信息, 以判断矩阵形式描述, 对没有收集到的判断以缺失信息形式描述;
- 2) 根据判断矩阵构建不完全参数矩阵;
- 3) 采用多目标目标规划模型 (7)~(10) 对问题进行建模;
- 4) 对模型进行优化求解 (可选用相关优化工具, 比如 Matlab 优化函数包);
- 5) 对结果进行分析。

### 3 计算实例

笔者以 C<sup>4</sup>ISR 系统效能指标体系中的“指挥决策能力 C1”子指标为例, 收集整理专家数据, 通过上述方法建模求解, 求解其子指标“指挥控制能力 C11”、“组织协调能力 C12”、“计划调度能力 C13”和“辅助决策能力 C14”的权重值。

1) 假设有 4 位专家 (重要度相等  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = 1/4$ ) 给出其两两判断矩阵信息如下:

$$R^1 = (r_{ij}^1)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 & 4 \\ 1/3 & 1 & x & 1 \\ 1/2 & x & 1 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R^2 = (r_{ij}^2)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & x & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 & 2 \\ x & 1 & 1 & 4 \\ 1/3 & 1/2 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R^3 = (r_{ij}^3)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & x \\ 1/3 & 2 & 1 & 1 \\ 1/2 & x & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R^4 = (r_{ij}^4)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1 & x & 2 \\ 1 & x & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

2) 专家判断矩阵  $R^k$  中的  $x$  为缺失信息, 构建不完全参数矩阵为:

$$\Delta^1 = (\delta_{ij}^1)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta^2 = (\delta_{ij}^2)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta^3 = (\delta_{ij}^3)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta^4 = (\delta_{ij}^4)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

3) 采用模型 (7)~(10) 对问题建立规划模型如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & J = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1, j \neq i}^4 (d_{ij}^+ + d_{ij}^-) \\ \text{s.t.} \quad & w_1 - 2.5w_2 + d_{12}^- - d_{12}^+ = 0, \\ & w_1 - 2w_3 + d_{13}^- - d_{13}^+ = 0, \\ & w_1 - 3w_4 + d_{14}^- - d_{14}^+ = 0, \\ & w_2 - 0.4w_1 + d_{21}^- - d_{21}^+ = 0, \\ & w_2 - 0.75w_3 + d_{23}^- - d_{23}^+ = 0, \\ & w_2 - 1.6667w_4 + d_{24}^- - d_{24}^+ = 0, \\ & w_3 - 0.6111w_1 + d_{31}^- - d_{31}^+ = 0, \\ & w_3 - 1.5w_2 + d_{32}^- - d_{32}^+ = 0, \\ & w_3 - 2.5w_4 + d_{34}^- - d_{34}^+ = 0, \\ & w_4 - 0.3542w_1 + d_{41}^- - d_{41}^+ = 0, \\ & w_4 - 0.6667w_2 + d_{42}^- - d_{42}^+ = 0, \\ & w_4 - 0.5208w_3 + d_{43}^- - d_{43}^+ = 0, \\ & w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1, \quad w_1, w_2, w_3, w_4 \geq 0, \\ & d_{ij}^- d_{ij}^+ = 0, \quad d_{ij}^- \geq 0, d_{ij}^+ \geq 0, i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j \end{aligned}$$

4) 运用 Matlab 提供的优化函数 fmincon 对上述规划问题求解, 得到:

$$\begin{aligned} J^* &= 0.3118, \quad w_1 = 0.4523, \quad w_2 = 0.1809, \\ w_3 &= 0.2412, \quad w_4 = 0.1256, \quad d_{12}^- = 0, \quad d_{12}^+ = 0, \\ d_{13}^- &= 0.0302, \quad d_{13}^+ = 0, \quad d_{14}^- = 0, \quad d_{14}^+ = 0.0754, \quad d_{21}^- = 0, \\ d_{21}^+ &= 0, \quad d_{23}^- = 0.0285, \quad d_{23}^+ = 0, \\ d_{24}^- &= 0.0729, \quad d_{24}^+ = 0, \quad d_{31}^- = 0, \quad d_{31}^+ = 0, \quad d_{32}^- = 0.0352, \end{aligned}$$

$$d_{32}^+ = 0, \quad d_{34}^- = 0.030 \ 2, \quad d_{34}^+ = 0, \quad d_{41}^- = 0.034 \ 5,$$

$$d_{41}^+ = 0, \quad d_{42}^- = 0, \quad d_{42}^+ = 0.005, \quad d_{43}^- = 0, \quad d_{43}^+ = 0,$$

5) 最后得到的“指挥控制能力 C11”、“组织协调能力 C12”、“计划调度能力 C13”、“辅助决策能力 C14”相对于上层指标“指挥决策能力 C1”的权重系数为:

$$w_1 = 0.452 \ 3, \quad w_2 = 0.180 \ 9,$$

$$w_3 = 0.241 \ 2, \quad w_4 = 0.125 \ 6$$

同理，可以求得其他各子指标体系的权值。

### 4 结束语

算例结果证明，该方法能有效地综合考虑多专家经验信息，充分利用现有不完全数据，有效地消除不一致性，求得最满意的权重结果，对 C<sup>4</sup>ISR 系统实际应用有借鉴意义。

### 参考文献:

[1] Department of Defense. Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms: Joint Publication 1-02[R]. Department of Defense, 2009.

[2] 肖慧鑫, 王静滨, 崔首东, 等. AHP-Fuzzy 法评估 C<sup>4</sup>ISR

系统作战效能中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2006, 31(12): 105-111.

[3] 俞静, 张勇涛, 张松良. 基于灰色聚类理论的 C<sup>4</sup>ISR 系统效能评估研究[J]. 现代防御技术, 2009, 37(3): 64-67.

[4] 袁诗龙, 王金山. 基于熵权理想解法的炮兵 C<sup>4</sup>ISR 系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(12): 81-83.

[5] 孟庆均, 宋爱斌, 朱立民. 群体可拓层次分析法在 C<sup>4</sup>ISR 系统效能指标赋权中的应用[J]. 装甲兵工程学院学报, 2008, 22(2): 25-29.

[6] 刘俊先, 姜志平, 舒振. 对抗条件下 C<sup>4</sup>ISR 系统效能指标权重确定方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(10): 2418-2421.

[7] Fan Z.P., Ma J., Jiang Y.P., et al. A goal programming approach to group decision making based on multiplicative preference relations and fuzzy preference relations[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(1): 311-321.

[8] Xu Z.S. Multiple-attribute group decision making with different formats of preference information on attributes[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B: Cybernetics, 2007, 37(6): 1500-1511.

[9] Saaty T.L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.

[10] 刘文博, 耿艳栋. 美国 C<sup>4</sup>ISR 系统发展及启示[J]. 四川兵工学报, 2009(9): 140-142.

\*\*\*\*\*

(上接第 34 页)

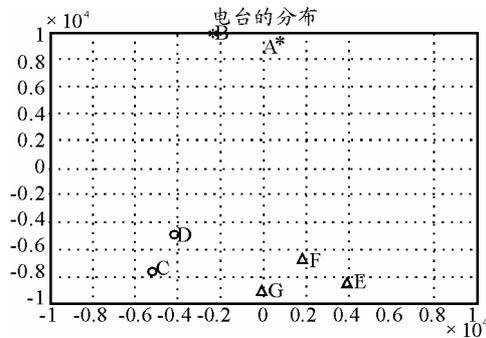


图 2 电台的一种优化分布

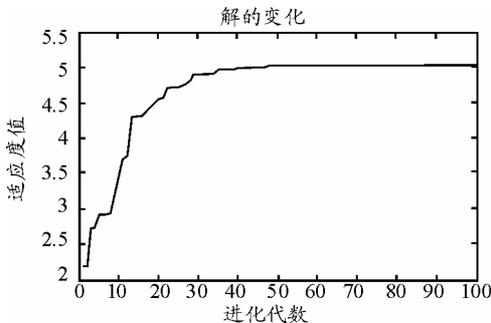


图 3 解的变化

### 3 结束语

该研究为在较小区域内布阵电台提供了参考。

由于采用了理想化的模型，只考虑了定频通信的情况，未考虑跳频电台通信，且忽略了部分影响因素如建筑物遮挡等，故还有待进一步研究。

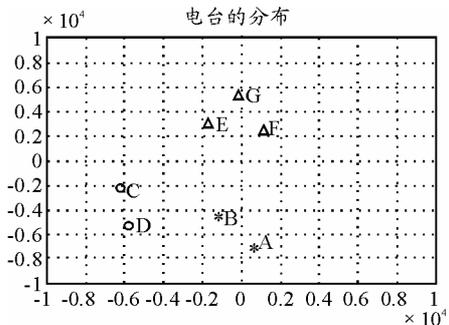


图 4 电台的另一种优化分布

### 参考文献:

[1] 陈涛, 郑巧珍. 编队通信网频率规划的建模与仿真[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(10): 141-143.

[2] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 11-16.

[3] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 317-321.

[4] 张继敏, 杨金虎, 冯志强. 复杂电磁环境对炮兵作战的影响及其对策[J]. 四川兵工学报, 2009(12): 131-132.