

控制与决策

Control and Decision

指挥信息系统生成方案综合评估方法

焦志强, 张杰勇, 姚佩阳, 王勋, 曾慧洁

引用本文:

焦志强,张杰勇,姚佩阳,王勋,曾慧洁. 指挥信息系统生成方案综合评估方法[J]. *控制与决策*, 2022, 37(12): 3297–3306.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0660>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于新型距离测度的概率犹豫模糊多属性群决策方法](#)

Probabilistic hesitant fuzzy multi-attribute group decision-making based on new distance measure

控制与决策. 2022, 37(3): 729–736 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1118>

[基于矩阵的双论域模糊概率粗糙集增量更新算法](#)

Incremental updating of fuzzy probability rough sets over two universes based on matrix method

控制与决策. 2021, 36(3): 553–564 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0692>

[基于群决策考虑属性效用一致性的DEA他评交叉效率公共权重排序法](#)

A common-weight ranking method for DEA peer-efficiency based on group decision-making and considering the consistency of attribute utility

控制与决策. 2021, 36(9): 2279–2289 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1719>

[考虑决策者心理行为的灰色多属性群体决策方法](#)

Grey multi-attribute group decision making method with consideration of psychological behavior of decision makers

控制与决策. 2021, 36(7): 1779–1785 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1621>

[一种基于MOEA/D的组合权重方法](#)

A combination weight method based on MOEA/D

控制与决策. 2021, 36(12): 3056–3062 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0592>

指挥信息系统生成方案综合评估方法

焦志强^{1,2†}, 张杰勇¹, 姚佩阳¹, 王 勋³, 曾慧洁⁴

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 95910 部队, 甘肃 酒泉 735018;
3. 国防科技大学信息通信学院, 西安 710106; 4. 95806 部队, 北京 100076)

摘要: 针对指挥信息系统生成方案评估问题进行研究. 在分析系统生成过程的基础上设计指标体系架构; 将 Kendall 协和系数检验法与基于距离优化的权重计算方法相结合, 对专家意见进行更为客观地融合; 通过引入评估基准改进相对优势关系评估方法, 在规避数据规范化过程的同时减少增量评估中对已评估方案的重复计算. 算法能够有效运用于增量评估过程并在方案数量较多的情况下降低评估时间开销, 实验分析验证了所提出方法的可行性与有效性.

关键词: 指挥信息系统; Kendall 协和系数; 群决策; 评估基准; 相对优势关系

中图分类号: C934 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2021.0660

引用格式: 焦志强, 张杰勇, 姚佩阳, 等. 指挥信息系统生成方案综合评估方法 [J]. 控制与决策, 2022, 37(12): 3297-3306.

Comprehensive evaluation method for construction scheme of C4ISR system

JIAO Zhi-qiang^{1,2†}, ZHANG Jie-yong¹, YAO Pei-yang¹, WANG Xun³, ZENG Hui-jie⁴

(1. College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Unit 95910, Jiuquan 735018, China; 3. College of Information and Communication, National University of Defense Technology, Xi'an 710106, China; 4. Unit 95806, Beijing 100076, China)

Abstract: The construction scheme evaluation method of the C4ISR system are studied in this paper. Based on the analysis of the constuction process of the C4ISR system, the index system architecture is designed. The Kendall concordance coefficient test method and the weight calculation method based on distance optimization are combined to integrate the expert opinions more objectively. The evaluation method of comparative advantage relationship is improved by introducing the evaluation benchmark, which avoids the data normalization process and reduces the repeated calculation of the evaluated scheme in the incremental evaluation. The algorithm can be effectively applied to the incremental evaluation process and can also reduce the evaluation time cost when the number of schemes is large. Experimental analysis verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Keywords: C4ISR system; Kendall concordance coefficient; group decision; evaluation benchmark; comparative advantage relationship

0 引言

为了应对未来跨域联合作战的挑战, 面向服务构建指挥信息系统已经成为了必然趋势^[1]. 在面向服务架构下, 指挥信息系统的各项功能将以服务的形式进行封装, 并根据任务需求对服务进行组合与部署, 从而快速聚合系统能力, 保障任务顺利完成. 指挥信息系统服务组合与部署方案构成了指挥信息系统生成方案, 对该方案评估的目的是通过对不同方案进行优

劣排序, 帮助作战人员快速有效地进行决策. 由于在系统服务组合与部署过程中影响最终方案的因素较多, 指挥信息系统生成方案评估问题本质上是一个多指标评估问题.

传统的多指标评估方法包括加权和法^[2]、Delphi 法^[3]、层次分析法^[4]、TOPSIS 法^[5]等, 并已经在云制造^[6]、指控组织设计^[7]、网络信息体系^[8]、武器装备体系^[9]等多个领域得到了广泛应用. 随着对该问题研

收稿日期: 2021-04-17; 录用日期: 2021-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61403414, 61573017).

责任编委: 刘民.

†通讯作者. E-mail: jzq_paper@163.com.

究的不断深入,区间数分析^[10]、粗糙集理论^[11]、Meta回归^[12]、证据理论^[13]、云理论^[14]、灰色关联分析^[15]、神经网络^[16]等方法被引入到多指标评估中,有针对性地解决了不同情况下的评估问题.文献[17]针对武器系统作战能力评估问题开展研究,基于距离优化模型对多位专家的意见进行集结,缓解了分歧意见对结果的影响,并结合心理活动特点设计了效用函数,从而对武器系统作战能力进行有效地评估.文献[18]为了应对威胁评估问题中实时性要求高、影响因素多以及获取信息不确定的特点,通过引入多个专家意见构建了一种基于群广义直觉软集的评估模型,并与多种评估方法进行对比,验证了该评估模型的有效性.文献[19]将关联分析与多属性决策相结合,在评估过程中考虑产品失效问题并利用网络拓扑参数修正优先数,从而实现对各方案优劣的准确排序.文献[20]针对当前决策程序与决策者考虑决策问题方式不一致的问题,通过考虑备选方案之间相互竞争和影响,在决策场论的框架下建立了一种基于决策域理论的直觉模糊群体决策模型,并取得了不错的评估效果.文献[21]研究了军事威胁评估问题,利用直觉模糊TOPSIS估计各目标的条件概率,并基于评价价值构造各目标的决策阈值,从而提出了一种在直觉模糊多属性决策环境下的目标威胁评估方法,该方法能有效地处理动态不确定的态势信息并给出三方决策的客观分类结果.

值得注意的是,上述研究大多是在决策矩阵已经进行了归一化和规范化处理的基础上开展的,忽略了归一化和规范化操作对最终评估结果的影响.文献[22]对此情况进行了分析,基于案例说明了采用不同的归一化和规范化方法以及归一化和规范化的先后顺序不同均有可能导致评估结果的不同,并基于相对优势对多组方案进行评估,避免了归一化和规范化对评估结果的影响.然而,该方法还存在以下两个问题:一是在确定指标权重时,通过专家权威性权重加权的方式具有一定的主观性;二是基于相对优势的方法只能对当前方案进行评估,其计算得到的效用值描绘的是当前方案的相对关系,无法作用于后续方案.当有新的方案加入评估过程时,该方法需要将评估过的方案与新方案一起进行重新评估才能得到最终的方案排序.因此,本文将Kendall协和系数检验法与基于距离优化的权重计算方法^[17]相结合,将多个

专家的指标权重意见进行客观、有效地集结,并在相对优势评估^[22](comparative advantage evaluation method, CAEM)的基础上引入评估基准,使得每次计算都是当前方案对于基准的相对评估,从而避免新方案加入时对原有方案的重复计算.

1 指挥信息系统生成方案评估指标体系

指挥信息系统生成方案由服务组合方案和服务部署方案共同组成,因此对系统生成方案优劣程度的评估可以分解为对服务组合方案和服务部署方案各自优劣程度的评估.

在服务组合过程中,首先通过抽象服务编排得到面向任务的整体服务流程,然后在相应的服务集中选择合适的服务实例得到最终的组合方案.对于抽象服务编排方案而言,其优劣程度主要由服务序列长度决定.服务序列长度是一个实数类的成本型指标,即长度越短的抽象服务方案越好.对于服务选择而言,其优劣程度主要由综合服务质量和服务使用代价决定.其中,综合服务质量由多个原子服务的服务质量根据流程结构聚合而成,属于区间类的效益型指标;服务使用代价则是对所选服务运行代价的总体描述,属于实数类的成本型指标.

在服务部署过程中,主要考虑服务在云平台的部署和在终端平台的部署两个方面.对于云平台中服务的部署方案,利用所有虚拟机的平均系统资源利用率对方案进行评价,该指标属于区间类的效益型指标.而对于终端平台中服务的部署方案,则可以利用信息流转路径长度评估各服务/平台间信息流转的效能,该指标属于实数类的成本型指标.

综上所述,本文提出的指挥信息系统生成方案评估指标体系如图1所示,各指标的相关信息见表1.

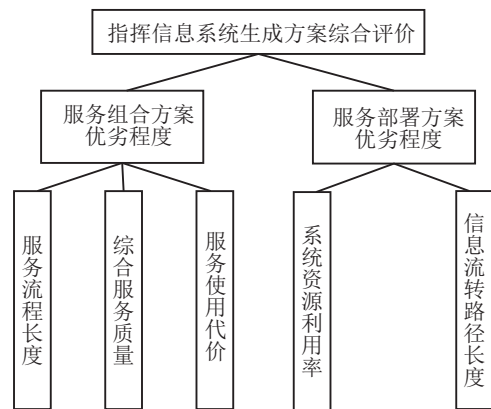


图1 指挥信息系统生成方案评估指标体系

表1 指标具体类型

评估指标名称	服务流程长度	综合服务质量	服务使用代价	系统资源利用率	信息流转路径长度
指标类型	成本型	效益型	成本型	效益型	成本型
数值类型	实数类	区间类	实数类	区间类	实数类

2 基于距离优化的专家意见一致性集结

假设指标权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$, 其中 n 为指标数量且满足 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$; 专家集合为 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, m 为专家总人数; $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ 为专家权重向量, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 为专家的意见集合, $y_i \in R^{n \times 1}$ 为专家 i 给出的指标权重. 在利用群决策理论综合多位专家的意见时, 一种简单的方式是采用专家权重加权的方式进行群体意见的融合, 即

$$W = \sum_{i=1}^m u_i y_i. \quad (1)$$

显然, 当专家意见出现不一致的情况时, 这种加权方式容易造成最终的结果完全偏离所有专家的意见. 与此同时, 在实际评估过程中多个专家权威性的相对权重也很难确定, 很多研究中专家的权威性往往都是以已知条件的方式直接给出, 因此专家权重的确定也是相对主观的. 基于上述分析, 本文首先利用 Kendall 协和系数对专家意见的一致性进行检验, 并根据一致性程度对所有专家意见进行分类, 选取意见一致且人数占优势的意见集合作为主流意见集

合. 在此基础上, 基于距离优化的思想构建专家权重优化模型, 通过对模型的求解获得各专家的权重矩阵, 从而避免了给定专家权重矩阵的主观性.

2.1 专家意见的一致性检验与主流意见集合的生成

Kendall 协和系数是对多列等级变量一致性程度的描述, 对于 $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ 而言, 其 Kendall 协和系数定义为

$$\text{Kendall}(Y) = \frac{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n r_{ji} - \bar{R}_i \right)^2}{m^2 n(n^2 - 1) / 12}. \quad (2)$$

其中: r_{ji} 为第 j 个专家意见中第 i 个指标的重要度排序号; $\bar{R}_i = n(m + 1) / 2$ 为所有专家第 i 个指标的重要度排序号均值的均值. 当出现专家认为两个或两个以上指标具有相同重要度时, 式(2)可调整为

$$\text{Kendall}'(Y) = \frac{12 \sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n r_{ji} - \bar{R}_i \right)}{m^2 n(n^2 - 1) - mT}, \quad (3)$$

$$T = \sum_{j=1}^m T_j, \quad T_j = \sum_{g_j} (t_{g_j}^3 - t_{g_j}). \quad (4)$$

其中: t 为同分秩序列的长度; g_j 为第 j 个专家意见中同分秩出现的次数, 具体计算方法见表2算例.

表2 排序中的同分秩算例

	指标1	指标2	指标3	指标4	指标5	指标6	g_j	t	T_j
专家1	6	5	3.5	3.5	2	1	1	2	6
专家2	5.5	5.5	4	2.5	2.5	1	2	2, 2	12
专家3	6	5	4	3	2	1	0	-	0
专家4	5.5	5.5	4	2	2	2	2	2, 3	30
专家5	5.5	5.5	3.5	3.5	1.5	1.5	3	2, 2, 2	18

在得到专家意见集合 Y 的 Kendall 协和系数 $\text{Kendall}'(Y)$ 后, 可通过显著性检验判断 Y 中的专家意见是否一致, 即当 $m(n-1)\text{Kendall}'(Y) < \chi_{\alpha}^2(n-1)$ 时认为专家意见不一致, 当 $m(n-1)\text{Kendall}'(Y) \geq \chi_{\alpha}^2(n-1)$ 时认为专家意见一致.

当 Y 中的专家意见不一致时, 为了将相对应的意见进行分类, 定义 Y 中单个意见对群体意见的一致性影响程度 $C(y_i, Y)$ 为

$$C(y_i, Y) = \text{Kendall}'(Y \setminus y_i) - \text{Kendall}'(Y). \quad (5)$$

当 $C(y_i, Y)$ 越大时, 表明单个意见 y_i 对群体意见的一致性程度影响越大, 其有可能与当前群体意见不一致; 当 $C(y_i, Y)$ 越小甚至为负时, 则表示 y_i 对群体意见的一致性程度影响较小, 与当前群体意见一致性程度较高. 在此基础上, 可通过如下所述算法1对 Y 中意见进行分类, 以保证分类后每个类中的意见具有较高的一致性.

算法1 专家意见一致性分类算法.

输入: 意见集合 Y ;

输出: 分类后的意见集合 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{n_c}\}$.

step 1: 算法初始化, 设定显著水平 α , 令 $j = 1$, 当前意见集合 $CY \leftarrow Y$, 不一致意见集合 $UY \leftarrow \emptyset$.

step 2: 由式(3)求 $\text{Kendall}'(CY)$, 若 $\text{Kendall}'(CY) < k_{\alpha}$, 则执行 step 3; 若 $\text{Kendall}'(CY) \geq k_{\alpha}$, 则转至 step 4.

step 3: 求解优化问题 $\max_i C(y_i, CY)$, 令 $UY \leftarrow UY \cup y_i, CY = CY \setminus y_i$, 执行 step 2.

step 4: 令 $Z_j \leftarrow CY, CY \leftarrow UY, UY \leftarrow \emptyset, j \leftarrow j + 1$, 若 $CY = \emptyset$, 则执行 step 5, 否则执行 step 2.

step 5: 输出分类后的意见集合 $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_{n_c}\}$.

在得到分类后的意见集合 Z 后, 取 Z 中第 i ($\max_i |Z_i|$) 个类中的意见作为主流意见集合 Z' . 需要注意的是, 主流意见集合中专家的人数应满足

$|Z'| \geq 2|Z_j|(\max_{j,j \neq i} |Z_j|)$, 否则认为本次专家意见分歧较大, 需要进一步协商以达成较为统一的共识.

2.2 基于权重距离的主流意见集结

为了更加合理地将主流意见集合中的所有专家意见进行集结, 基于距离的优化思想, 可以认为合理的专家意见集合应该聚集在最佳指标权重分配结果附近. 假设主流意见集合中各个意见的权重为 $\zeta = [\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{n_z}]^T$, n_z 为主流意见集合中的意见数量, 则对于主流意见集合中的两个意见 y_i 和 y_j , 其权重距离定义为

$$D(y_i, y_j) = \sum_{k=1}^n (\zeta_i y_i(k) - \zeta_j y_j(k))^2. \quad (6)$$

则最佳的意见权重可以通过求解如下优化问题1得到.

优化问题1 有

$$\begin{aligned} \min_{\zeta} & \sum_{i=1}^{n_z} \sum_{j=1, i < j}^{n_z} D(y_i, y_j). \\ \text{s.t.} & \sum_{i=1}^{n_z} \zeta_i = 1; \\ & 0 \leq \zeta_i \leq 1, \quad i \in [1, 2, \dots, n_z]. \end{aligned} \quad (7)$$

为了方便求解, 将优化问题1转化为一个标准型的二次规划问题, 注意到权重距离可以用矩阵乘法表示, 即

$$D(y_i, y_j) = (\zeta_i y_i - \zeta_j y_j)^T (\zeta_i y_i - \zeta_j y_j). \quad (8)$$

在此基础上对决策变量进行重构, 有

$$\begin{aligned} \xi = & \underbrace{[\zeta_1, \zeta_2]}_{1,2} \underbrace{[\zeta_1, \zeta_3, \dots, \zeta_{n_z}]}_{1,3} \dots \underbrace{[\zeta_2, \zeta_3, \dots]}_{2,3} \underbrace{[\zeta_i, \zeta_j]}_{i,j(i < j)}, \dots, \\ & \underbrace{[\zeta_{n_z-1}, \zeta_{n_z}]}_{n_z-1, n_z}^T \in R^{n_z(n_z-1) \times 1}. \end{aligned}$$

Hessian矩阵可定义为

$$\begin{aligned} H &= h^T h \in R^{(n_z(n_z-1)) \times (n_z(n_z-1))}, \\ h &= \text{diag}([y_1, -y_2], \dots, [y_1, -y_{n_z}], [y_2, -y_3], \dots, \\ & \quad [y_2, -y_{n_z}], \dots, [y_{n_z-1}, -y_{n_z}]). \end{aligned}$$

由于决策变量重构后, ζ_i 在 x 中出现了重复, 需要添加新的约束条件以保证决策变量间不发生冲突. 首先定义定位向量为

$$\begin{aligned} L &= [\underbrace{1 \ 2}_{\leftarrow 2} \ \underbrace{1 \ 3}_{\leftarrow 2} \ \dots \ \underbrace{1 \ n_z}_{\leftarrow 2} \ \underbrace{2 \ 3}_{\leftarrow 2} \ \rightarrow \\ & \quad \leftarrow \underbrace{2 \ 4}_{\leftarrow 2} \ \dots \ \underbrace{2 \ n_z}_{\leftarrow 2} \ \dots \ \underbrace{i \ j}_{\leftarrow 2} \ \dots \ \underbrace{n_z-1 \ n_z}_{\leftarrow 2}]. \end{aligned}$$

则所有 i 在 L 中的位置向量为 $L^i = [p_1^i, p_2^i, \dots, p_{n_z-1}^i]$, 其中 p_j^i 为 i 在 L 中第 j 次出现时的下标号. 对于 ζ_i 而言, 其对应的约束可以表示为

$$\begin{aligned} A'_i \xi &= 0, \\ A'_i &= [A'_{i,1} \ A'_{i,2} \ \dots \ A'_{i,n_z-2}]^T, \\ A'_{i,j} &= [0 \ \dots \ 0 \ \underset{L^i(j)}{1} \ 0 \ \dots \ 0 \ \underset{L^i(j+1)}{-1} \ 0 \ \dots \ 0] \in \\ & \quad R^{1 \times n_z(n_z-1)}. \end{aligned}$$

其中: $L^i(j)$ 为 L^i 中的第 j 个元素, $A'_{i,j}$ 中 1 处于第 $L^i(j)$ 位, $A'_{i,j}$ 中 -1 处于第 $L^i(j+1)$ 位. 约束 $\sum_{i=1}^{n_z} \zeta_i = 1$ 可以表示为

$$\begin{aligned} A'_0 \xi &= 1, \\ A'_0 &= [\underset{1 \times 2-2}{1} \ \underset{2 \times 3-2}{1} \ 0 \ \underset{2 \times 4-2}{1} \ 0 \ \underset{2i-2}{1} \ \dots \ 1 \ \dots \ 0] \in R^{1 \times n_z(n_z-1)}. \end{aligned}$$

约束 $0 \leq \zeta_i \leq 1$ 可以表示为

$$\begin{aligned} A_i \xi &\leq 1, \quad -A_i \xi \leq 0; \\ A_i &= \begin{cases} [1 \ 0 \ \dots \ 0] \in R^{2 \times n_z(n_z-1)}, \quad i = 1; \\ [0 \ \dots \ 0 \ \underset{2i-2}{1} \ 0 \ \dots \ 0] \in R^{2 \times n_z(n_z-1)}, \quad 1 < i \leq n_z. \end{cases} \end{aligned}$$

基于上述定义, 优化问题1可以转化为一个标准型的二次规划问题.

优化问题2 有

$$\begin{aligned} \min_x & \xi^T H \xi. \\ \text{s.t.} & [A_1^T, A_2^T, \dots, A_{n_z}^T, A'_0]^T \xi = \underbrace{[0, 0, \dots, 0, 1]}_{n_z(n_z-2)}^T; \\ & [A_1^T, A_2^T, \dots, A_{n_z}^T, -A_1^T, -A_2^T, \dots, A_{n_z}^T]^T \xi \leq \\ & \quad \underbrace{[1, 1, \dots, 1, 0, 0, \dots, 0]}_{n_z \quad n_z}^T. \end{aligned} \quad (9)$$

优化问题2可直接利用内点法进行求解, 从而集合主流专家意见, 得到合理的指标权重. 值得注意的是, 这里需要区分优化问题2中的决策变量 ξ 与原决策变量 ζ 的差别, 得到 ξ 后应当根据定义对 ζ 进行提取. 最后根据专家权重对主流意见进行加权, 得到各指标的最终权重 $W_e = \sum_{e_i \in Z'} \zeta_i e_i$.

3 基于评估基准的改进相对优势评估

相对优势评估能够有效消除归一化、规范化的具体方法以及操作顺序对最终评估结果的影响, 但无法进行增量评估过程, 有一定局限性. 为了解决这一

问题,将评估基准引入到相对优势评估过程中,提出基于评估基准的改进相对优势评估方法(evaluation benchmark based comparative advantage evaluation method,EBBCAEM).该方法为参与评估的方案计算一个效用值,后续方案只需要与已经评估过的方案比较效用值即可获得方案优劣顺序,从而避免对同一方案的多次重复评估.

3.1 评估基准的确定

评估基准本质上是一个方案集合,在增量评估过程中以该集合中的方案为基准对其他方案进行评估,从而得到具有通用比较意义的效用值.但评估基准的选择也会对后续的评估结果产生一定的影响,假设初始方案集合为 $S_0 = \{s_1^0, s_2^0, \dots, s_{n_0^s}^0\}$,利用CAEM得到各方案的优劣排序为 $s_1^0 < s_2^0 < \dots < s_{n_0^s}^0$.若以 s_1^0 为基准对后续方案集合 $S_1 = \{s_1^1, s_2^1, \dots, s_{n_1^s}^1\}$ 进行评估(即将 s_1^0 加入到 S_1 中),得到各方案的优劣排序为 $s_1^0 < s_1^1 < s_2^1 < \dots < s_{n_1^s}^1$.可以看到,在前后两次评估中,两个集合中最优的方案 $s_{n_0^s}^0$ 和 $s_{n_1^s}^1$ 没有进行直接比较,他们之间的优劣关系需要通过评估基准 s_1^0 确定.然而,由于 s_1^0 方案质量过低,在两个集合中均是最劣方案,这种情况下容易出现对 $s_{n_0^s}^0$ 和 $s_{n_1^s}^1$ 之间优劣关系的误判,从而导致后续评估的失效.

基于上述分析,采用多个基准对后续待评估方案进行定位,以提高评估的准确性.同时,为了避免评估基准过优或者过劣带来的影响,通过分散选取的方式提高评估基准在各个性能度量上的覆盖程度.综上,评估基准可以定义为

$$S^b = \left\{ s_i^0 \mid i = \left\lfloor \frac{n_0^s - 1}{n_b - 1} (j - 1) + 1 \right\rfloor, j = 1, 2, \dots, n_b \right\}. \quad (10)$$

其中: n_b 为评估基准的数量, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算.

3.2 带有评估基准的相对优势矩阵构造

对于后续待评估的第 i 个方案集合 $S_i = \{s_1^i, s_2^i, \dots, s_{n_i^s}^i\}$,首先构造带有评估基准的评估矩阵

$$X_i' = [X_i^T, (X^b)^T]^T \in R^{(n_i^s + n_b) \times n_z}, \quad (11)$$

其中 X^b 为 S^b 中方案对应的评估矩阵.第 j 个指标的相对优势矩阵可以定义为

$$V_i^j = [v_{k,l}^{i,j}], \quad v_{k,l}^{i,j} = C_j \frac{X_i'(k,j) - X_i'(l,j)}{X_i'(l,j)}. \quad (12)$$

其中: $X_i'(k,j)$ 为矩阵 X_i' 中第 k 行第 j 列元素; C_j 为第 j 个指标的类型,当指标 j 为效益型指标时 $C_j = 1$,当指标 j 为成本型指标时 $C_j = -1$.需要注意的是,若

第 j 个指标为区间数,则可通过定义区间数距离 $d(\cdot)$ 将区间数转化为实数参与计算.借鉴文献[22]的定义,对于区间数 $q = [q_L, q_R]$,其与0之间的距离可以定义为

$$d(q) = \text{sqrt}((q_L^2 + q_L q_R + q_R^2)/3).$$

在此基础上,可通过指标权重 ζ 对第 i 个待评估方案集合的相对优势矩阵进行加权,得到综合相对优势矩阵

$$V_i = \sum_{j=1}^{n_z} \zeta_j V_i^j. \quad (13)$$

3.3 增量评估效用值的计算

综合相对优势矩阵反映了评估基准与当前待评估方案集合间的优劣关系,因此合理的效用值向量 $U_i \in R^{(n_i^s + n_b) \times 1}$ 应当与综合相对优势矩阵保持一致,即满足

$$\frac{U_i(j) - U_i(k)}{U_i(k)} = V_i(j,k), \quad (14)$$

其中 $U_i(j)$ 为效用值向量中第 j 个元素.为了统一效用值的量纲,令

$$\sum_{j=1}^{n_i^s + n_b} U_i(j) = 1, \quad U_i(j) \geq 0, j = 1, 2, \dots, n_i^s + n_b.$$

综上,效用值向量可以通过求解优化问题3得到.

优化问题3 有

$$\begin{aligned} \min_{U_i} & \sum_{j=1}^{n_i^s + n_b} \sum_{k=1, j \neq k}^{n_i^s + n_b} |U_i(j) - U_i(k) - U_i(k)V_i(j,k)|. \\ \text{s.t.} & \sum_{j=1}^{n_i^s + n_b} U_i(j) = 1; \\ & U_i(j) \geq 0, j = 1, 2, \dots, n_i^s + n_b. \end{aligned} \quad (15)$$

考虑到优化问题3中目标函数含有绝对值,通过引入新变量 $a \in R^{(n_i^s + n_b) \times (n_i^s + n_b)}$ 和 $b \in R^{(n_i^s + n_b) \times (n_i^s + n_b)}$ 将其转化为线性规划问题.

优化问题4 有

$$\begin{aligned} \min_{U_i} & \sum_{j=1}^{n_i^s + n_b} \sum_{k=1, j \neq k}^{n_i^s + n_b} (a_{j,k} + b_{j,k}). \\ \text{s.t.} & U_i(j) - U_j(k) - U_j(k)^* V_i(j,k) - a_{j,k} + b_{j,k} = 0; \\ & a_{j,k}, b_{j,k} \geq 0, j, k \in [1, n_i^s + n_b]; \\ & \sum_{j=1}^{n_i^s + n_b} U_i(j) = 1; \\ & U_i(j) \geq 0, j = 1, 2, \dots, n_i^s + n_b. \end{aligned} \quad (16)$$

为了便于求解,将优化问题4整理为标准型线性

规划问题.

优化问题5 有

$$\begin{aligned} \min_{x_t} Bx_t. \\ \text{s.t. } Px_t = p, x_t \geq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

其中决策变量为

$$\begin{aligned} x_t = [& U_i(1), U_i(2), \dots, U_i(n_i^s + n_b), a_{1,2}, a_{1,3}, \dots, \\ & a_{1,n_i^s+n_b}, a_{2,1}, a_{2,3}, \dots, a_{2,n_i^s+n_b}, \dots, \\ & a_{n_i^s+n_b,1}, a_{n_i^s+n_b,2}, \dots, a_{n_i^s+n_b,n_i^s+n_b-1}, \\ & b_{1,2}, b_{1,3}, \dots, b_{1,n_i^s+n_b}, \\ & b_{2,1}, b_{2,3}, \dots, b_{2,n_i^s+n_b}, \dots, \\ & b_{n_i^s+n_b,1}, b_{n_i^s+n_b,2}, \dots, b_{n_i^s+n_b,n_i^s+n_b-1}]^T \in \\ & R^{(2(n_i^s+n_b)(n_i^s+n_b)-(n_i^s+n_b)) \times 1}. \end{aligned}$$

为了表示优化问题4中的目标函数,结合决策变量 x_t 的定义,将矩阵 B 定义为

$$B = \begin{bmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{n_i^s+n_b} & \underbrace{1 \dots 1}_{2(n_i^s+n_b)(n_i^s+n_b-1)} \end{bmatrix}.$$

$Px_t = p$ 用来描述优化问题4中的等式约束,主要包括两部分:一是决策变量与综合相对优势矩阵 V_i 以及引入变量 a 和 b 间的等式关系,用 P' 表示;二是决策变量自身求和为零的等式关系,用 g 表示. 有

$$\begin{aligned} P &= [P'^T, g^T]^T, \\ P' &= [P_0 \quad -I_{(n_i^s+n_b)(n_i^s+n_b-1)} \quad I_{(n_i^s+n_b)(n_i^s+n_b-1)}], \\ g &= \begin{bmatrix} \underbrace{1 \dots 1}_{n_i^s+n_b} & \underbrace{0 \dots 0}_{2(n_i^s+n_b)(n_i^s+n_b-1)} \end{bmatrix}, \\ p &= \begin{bmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{(n_i^s+n_b)(n_i^s+n_b-1)} & 1 \end{bmatrix}^T. \end{aligned}$$

其中: $P_0 = [(P_0^1)^T, (P_0^2)^T, \dots, (P_0^{(n_i^s+n_b)(n_i^s+n_b-1)})^T]^T$ 主要描述等式约束中决策变量与 V_i 的关系; $P_0^i = [0, \dots, 0, \underset{l_1}{\uparrow} 1, 0, \dots, 0, \underset{l_2}{\uparrow} -1 - V_i(l_1, l_2), 0, \dots, 0] \in R^{1 \times (2(n_i^s+n_b)(n_i^s+n_b)-(n_i^s+n_b))}$ 为 P_0 中的第 i 行; l_1 和 l_2 分别为 1 和 $-1 - V_i(l_1, l_2)$ 所在的位置,其满足

$$\begin{aligned} l_1 &= \lfloor \frac{i}{n_i^s+n_b-1} \rfloor; \\ l_2 &= \begin{cases} i\% (n_i^s+n_b-1), & i\% (n_i^s+n_b-1) < l_1; \\ i\% (n_i^s+n_b-1) + 1, & i\% (n_i^s+n_b-1) \geq l_1. \end{cases} \end{aligned}$$

显然,优化问题5可以利用单纯形法快速解得决策变量,在此基础上,方案的效用值可以通过与定位基准比较得到. 为了充分利用多个定位基准,这里根据不同定位基准得到的效用值进行加权,则第 i 个集合中第 j 个方案的最终效用值为

$$AU_i^j = \frac{1}{n_b} \sum_{k=1}^{n_b} \frac{U_i(j) - U_i(n_i^s+k)}{U_i(n_i^s+k)}. \quad (18)$$

值得注意的是,由于定位基准的存在,所有方案在评估时都与基准方案进行比较,AU具有通用比较意义,即直接对每个方案的AU值进行排序便可对所有方案进行比较,从而避免了对所有历史方案的重复评估.

综上所述,本文提出的EBBCAEM方法流程如图2所示.

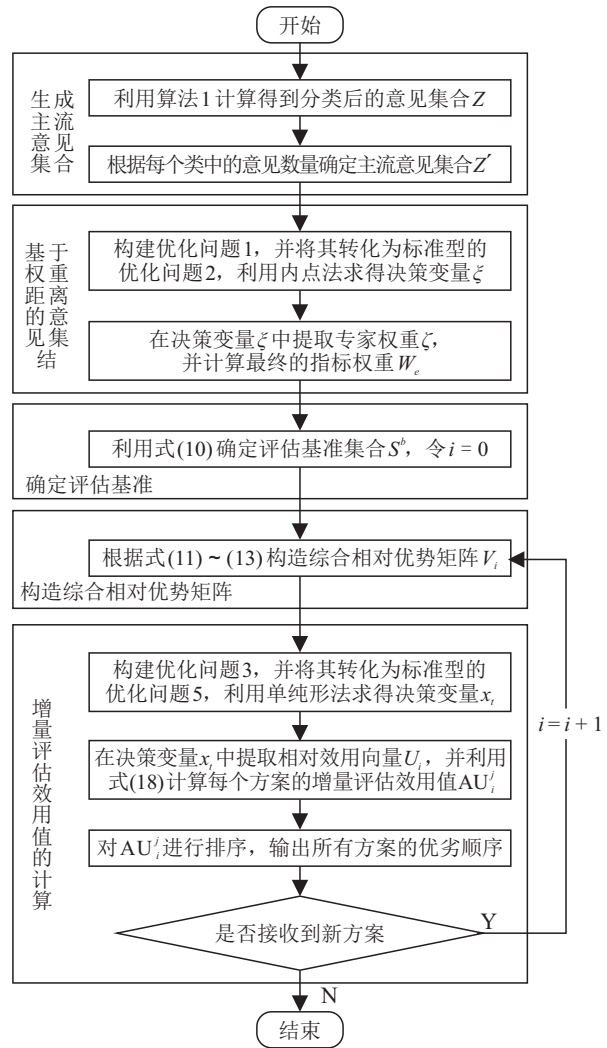


图2 EBBCAEM方法流程

4 实验分析

为了验证所提出的专家意见一致性集结与方案效用值计算方法,以一个面向任务的指挥信息系统生成方案评估为案例,分析所提出评估方法的有效性.

4.1 案例分析

1) 专家意见一致性集结.

针对图1中的指标体系,共有10位专家 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{10}\}$ 给出了权重分配方案,如表3所示. 利用算法1对表3中的专家意见进行分类,得到分类后的意见集合 $Z = \{Z_1, Z_2\}$, 其中

$$\begin{aligned} Z_1 &= \{e_1, e_2, e_5, e_6, e_7, e_8, e_{10}\}, \\ Z_2 &= \{e_3, e_4, e_9\}. \end{aligned}$$

表3 权重分配方案

专家	服务流程长度	综合服务质量	服务使用代价	系统资源利用率	信息流转路径长度
1	0.25	0.15	0.05	0.05	0.50
2	0.30	0.20	0.10	0.05	0.35
3	0.06	0.35	0.24	0.20	0.15
4	0.10	0.40	0.20	0.20	0.10
5	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
6	0.15	0.40	0.20	0.15	0.10
7	0.23	0.17	0.08	0.06	0.46
8	0.27	0.18	0.05	0.05	0.45
9	0.12	0.48	0.15	0.15	0.10
10	0.30	0.15	0.10	0.15	0.30

这说明10位专家的意见主要可以分为两类,一类认为服务流程长度和信息流转路径长度的重要度较高,另一类认为综合服务质量的重要度较高. 由于 $|Z_1| \geq 2|Z_2|$,可以选取 Z_1 作为主流意见集合.

得到主流意见集合 Z_1 后,通过求解优化问题2对主流意见进行集结,求得专家权重为

$$\zeta = [0.125\ 8, 0.149\ 8, 0.162\ 4, 0.132\ 1, 0.135\ 9, 0.134\ 1, 0.159\ 9]^T.$$

经过加权可得各指标的最终权重为

$$W_e = [0.277\ 1, 0.172\ 4, 0.113\ 7, 0.104\ 9, 0.331\ 8]^T.$$

2) 增量评估效用值计算.

在指挥信息系统生成方案评估中,方案集合 S_0 中共有10套方案备选(s_1, s_2, \dots, s_{10}),评估指标包括服务流程长度、综合服务质量、服务使用代价、系统资源利用率和信息流转路径长度,对应的评估矩阵为

$$X_0 = \begin{bmatrix} 15 & [0.55, 0.75] & 0.80 & [0.72, 0.90] & 162 \\ 12 & [0.60, 0.85] & 0.55 & [0.63, 0.87] & 157 \\ 20 & [0.65, 0.95] & 0.90 & [0.59, 0.78] & 180 \\ 18 & [0.45, 0.65] & 0.80 & [0.76, 0.84] & 174 \\ 15 & [0.50, 0.60] & 0.65 & [0.67, 0.72] & 163 \\ 16 & [0.65, 0.70] & 0.70 & [0.87, 0.91] & 178 \\ 16 & [0.40, 0.50] & 0.45 & [0.57, 0.83] & 172 \\ 13 & [0.70, 0.85] & 0.50 & [0.63, 0.74] & 160 \\ 13 & [0.75, 0.90] & 0.40 & [0.88, 0.91] & 156 \\ 12 & [0.80, 0.85] & 0.45 & [0.87, 0.94] & 149 \end{bmatrix}.$$

首先对 X 中的区间数进行处理,通过计算区间数与0的距离将其转化为实数以便于后续步骤的执行. 然后直接采用相对优势评估方法得到10套方案的优劣排序为

$$s_3 \prec s_4 \prec s_7 \prec s_5 \prec s_6 \prec s_1 \prec s_8 \prec s_2 \prec s_9 \prec s_{10}.$$

这里令 $n_b = 3$,由式(10)可得到定位基准集合 $S^b =$

$\{s_3, s_6, s_{10}\}$,其对应的评估矩阵为

$$X^b = \begin{bmatrix} 20 & [0.65, 0.95] & 0.90 & [0.59, 0.78] & 180 \\ 16 & [0.65, 0.70] & 0.70 & [0.87, 0.91] & 178 \\ 12 & [0.80, 0.85] & 0.45 & [0.87, 0.94] & 149 \end{bmatrix}.$$

利用式(18)计算得到各方案的最终效用值为

$$AU_0 = [-0.052\ 9, 0.324\ 6, -0.350\ 9, -0.331\ 7, -0.125\ 4, -0.099\ 0, -0.208\ 2, 0.272\ 5, 0.518\ 8, 0.599\ 6].$$

假设后续方案集合 S_1 为 $\{s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}\}$,对应的评估矩阵为

$$X_1 = \begin{bmatrix} 17 & [0.63, 0.82] & 0.65 & [0.68, 0.80] & 170 \\ 13 & [0.58, 0.65] & 0.74 & [0.65, 0.73] & 145 \\ 19 & [0.68, 0.75] & 0.92 & [0.75, 0.83] & 175 \\ 16 & [0.72, 0.80] & 0.67 & [0.79, 0.88] & 162 \\ 14 & [0.58, 0.67] & 0.48 & [0.85, 0.90] & 150 \end{bmatrix}.$$

将评估基准加入到 X_1 中并求解优化问题5,可以得到 $\{s_{11}, s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{15}\}$ 对应的最终效用值为

$$AU_1 = [-0.104\ 7, 0.111\ 6, -0.290\ 2, 0.039\ 2, 0.230\ 3].$$

将 AU_0 与 AU_1 合并排序得到当前15个方案的优劣排序为

$$s_3 \prec s_4 \prec s_{13} \prec s_7 \prec s_5 \prec s_6 \prec s_{11} \prec s_1 \prec s_{14} \prec s_{12} \prec s_{15} \prec s_8 \prec s_2 \prec s_9 \prec s_{10}.$$

为了便于比较,将 X_0 与 X_1 合并,直接作为文献[22]所提出相对优势评估方法的输入,通过计算可以发现,EBBCAEM得到的方案排序结果与文献[22]方法相同,从而验证了EBBCAEM的可行性.

4.2 有效性分析

为了进一步验证EBBCAEM的有效性,通过蒙特卡洛模拟方式对不同方案数量及评估基准数量

下EBBCAEM所得结果与CAEM所得结果进行比较. 实验中,方案的数量分别为15、20、25和30,评估基准数量分别为1、2、3、4和5. 方案集合随机生成,前10个方案构成初始评估集合,后续每5个方案分为一组作为新加入方案. 每组实验仿真次数为1000,主要针对两种方法的排序结果一致性、最优方案判断成功率以及评估时间开销3个指标进行统计计算,结果如图3~图7所示.

图3显示了不同方案数量下EBBCAEM得到的方案排序与CAEM得到的方案排序间的一致性和评估基准数量的变化关系. 可以看到,随着评估基准数量的增加,两种方法得到的方案排序一致性逐渐提高,且这种上升趋势在初始阶段(基准数量从1变化到3时)尤为明显,在一定程度上表明了加入多个基准的有效性.

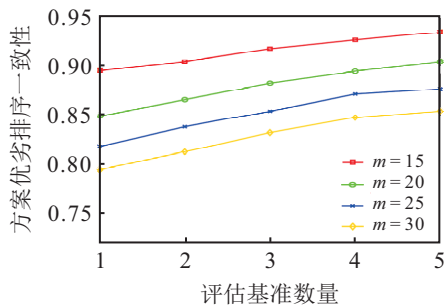


图3 不同方案数量下评估基准数量与方案排序一致性的变化关系

图4为EBBCAEM判断最优方案的成功率(以CAEM的结果为评判标准). 由于评估的目标是帮助确定最优的方案,该项参数有较强的实际意义. 从总体上看,其变化趋势与平均一致性大致相同,随着评估基准数量的增加不断增长.

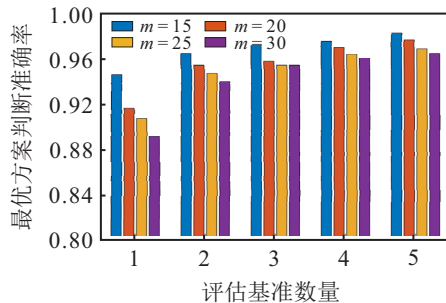


图4 不同方案数量与评估基准数量下最优方案的判断准确率

为了进一步体现算法的性能,图5显示了当EBBCAEM的结果对最优方案判断失误时其认定的最优方案在CAEM结果中的排序情况. 可以看到,当出现误判时EBBCAEM认定的最优方案在CAEM的排序主要集中于第2位,少部分排在第3和4位. 这

表明即使出现误判的情况,EBBCAEM认定的最优方案也是一个可接受的次优方案.

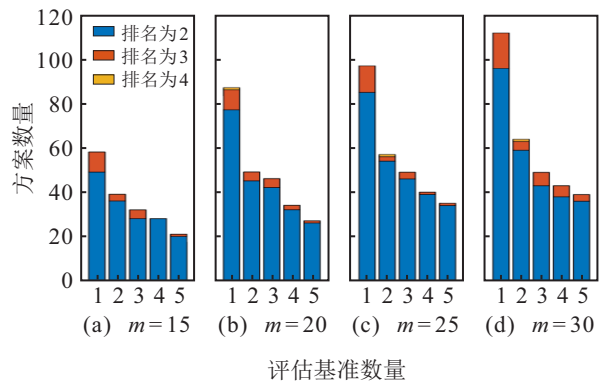
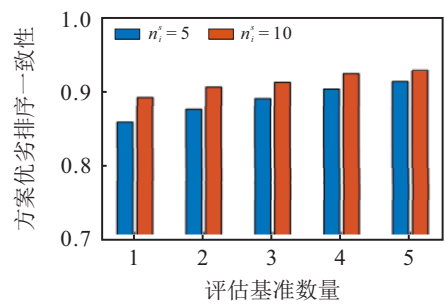
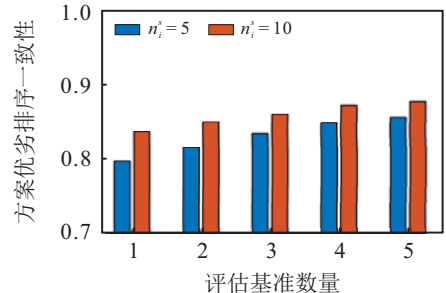


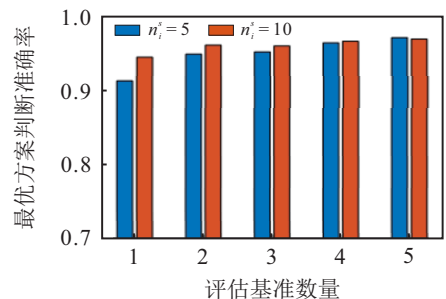
图5 发生误判时最优方案在CAEM所得结果中的排序



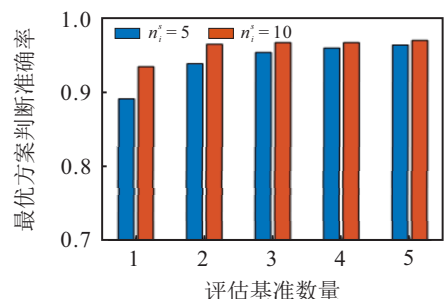
(a) $m=20$ 情况下的排序一致性对比



(b) $m=30$ 情况下的排序一致性对比



(c) $m=20$ 情况下的判断准确率对比



(d) $m=30$ 情况下的判断准确率对比

图6 不同增量方案数量下的一致性 & 准确率对比

图6显示了不同 n_i^s 下方案优劣排序一致性与最优方案准确率的对比。在一定程度上, $n_i^s = 10$ 时的效果要优于 $n_i^s = 5$,因此在实际评估过程中可以等集合中方案数量较多时再统一进行增量评估,从而提高方案优劣排序一致性和最优方案的判定成功率。

图7显示了不同评估基准数量和方案数量下EBBCAEM和CAEM的平均时间开销。由于EBBCAEM将方案进行划分并进行了多次评估计算,且每次评估所有求解的优化问题规模要小于CAEM中优化问题的规模,这相当于将一个大规模的优化问题分解为多个小规模优化问题进行求解,所以EBBCAEM的时间开销要小于CAEM。可以看到,当方案总数量超过25时,CAEM的时间开销急剧上升,而EBBCAEM仍然能够在1s内得到优化结果。因此,EBBCAEM也可用于解决方案数量较多情况下的相对优势评估问题,从而缩短方案评估时间。

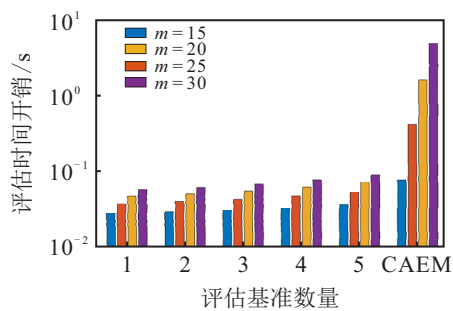


图7 不同方案数量与评估基准数量下评估时间开销对比

5 结论

本文在分析指挥信息系统服务组合与部署过程的基础上提出了方案评估指标体系,将Kendall协和系数与距离优化模型相结合设计了专家意见一致性集结方法,并通过引入评估基准改进了相对优势关系评估方法。该评估方法能够更加客观地融合多位专家的指标权重意见,并赋予CAEM增量评估的能力,从而减少了对同一方案的多次重复计算。实验结果表明,所提出方法能够对指挥信息系统生成方案进行有效的增量评估,并能在方案数量较多的情况下对问题进行有效分解进而减少评估时间开销。

参考文献(References)

[1] 曹雷, 鲍广宇, 陈国友. 指挥信息系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 268-286.
(Cao L, Bao G Y, Chen G Y. C4ISR system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 268-286.)

[2] 夏新涛, 徐永智, 金银平, 等. 用自助加权范数法评估三参数威布尔分布可靠性最优置信区间[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 481-488.

(Xia X T, Xu Y Z, Jin Y P, et al. Assessment of optimum confidence interval of reliability with three-parameter Weibull distribution using bootstrap weighted-norm method[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 481-488.)

- [3] 殷铭. 民用飞机飞行试验测试项目中的风险管理研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
(Yin M. Study on risk management for civil aircraft flight test instrumentation project[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.)
- [4] Hapsari M A, Subiyanto S. Fuzzy AHP based optimal design building-attached photovoltaic system for academic campus[J]. International Journal of Photoenergy, 2020, 2020: 6508329.
- [5] Vavrek R. Evaluation of the impact of selected weighting methods on the results of the TOPSIS technique[J]. International Journal of Information Technology & Decision Making, 2019, 18(6): 1821-1843.
- [6] 刘元兵, 张文芳, 王小敏. 云制造环境下基于多属性模糊信任评估的访问控制方案[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(2): 321-330.
(Liu Y B, Zhang W F, Wang X M. Multi-attribute fuzzy trust access control scheme for cloud manufacturing system[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(2): 321-330.)
- [7] 孙昱, 姚佩阳, 张杰勇. C2组织信息结构效能测度及综合评估[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(6): 1313-1318.
(Sun Y, Yao P Y, Zhang J Y. Measurement and comprehensive evaluation of C2 organizational information structure efficiency[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(6): 1313-1318.)
- [8] 张杰勇, 何宜超, 孙昱, 等. 网络信息体系联动的影响因素重要性等级评估方法[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(10): 2287-2292.
(Zhang J Y, He Y C, Sun Y, et al. Method for assessing the importance level of influencing factors of network information system-of-systems linkage[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(10): 2287-2292.)
- [9] 齐晓光. 技术对武器装备体系的贡献度评估方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
(Qi X G. Research on evaluation method of technology contribution to weapon equipment system[D]. Changsha: University of Defense Science and Technology, 2015.)
- [10] Wu X H, Wang J Q, Peng J J, et al. A novel group decision-making method with probability hesitant interval neutrosophic set and its application in middle-level manager selection[J]. International Journal for Uncertainty Quantification, 2018, 8(4): 291-319.

- [11] Agbodah K. The determination of three-way decisions with decision-theoretic rough sets considering the loss function evaluated by multiple experts[J]. *Granular Computing*, 2019, 4(2): 285-297.
- [12] Moeltner K. Bayesian nonlinear meta regression for benefit transfer[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2019, 93: 44-62.
- [13] Alsharqawi M, Zayed T, Parvizsedghy L, et al. Reliability assessment model for water distribution networks[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2020, 11(2): 04019059.
- [14] Wang J Q, Peng L, Zhang H Y, et al. Method of multi-criteria group decision-making based on cloud aggregation operators with linguistic information[J]. *Information Sciences*, 2014, 274: 177-191.
- [15] 王月, 郝金明, 刘伟平. 基于灰色关联分析和模糊综合评判的GNSS欺骗干扰效能评估[J]. *电子学报*, 2020, 48(12): 2352-2359.
(Wang Y, Hao J M, Liu W P. GNSS spoofing effectiveness evaluation based on grey relational analysis and fuzzy comprehensive assessment[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2020, 48(12): 2352-2359.)
- [16] Fotio Tiotsop L, Mizdos T, Uhrina M, et al. Modeling and estimating the subjects' diversity of opinions in video quality assessment: A neural network based approach[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2021, 80(3): 3469-3487.
- [17] 姚天乐, 陶凤和, 胡起伟, 等. 基于多属性效用的主战坦克武器系统作战能力评估[J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41(2): 358-364.
(Yao T L, Tao F H, Hu Q W, et al. Assessment of weapon system combat capability of main battle tank based on multi-attribute utility[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2019, 41(2): 358-364.)
- [18] 武华, 苏秀琴. 基于群广义直觉模糊软集的空袭目标威胁评估方法[J]. *控制与决策*, 2015, 30(8): 1462-1468.
(Wu H, Su X Q. Threat assessment of aerial targets based on group generalized intuitionistic fuzzy soft sets[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(8): 1462-1468.)
- [19] 安相华, 于靖博, 蔡卫国. 基于混合多属性决策和关联分析的模糊粗糙FMEA评估方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(11): 2613-2621.
(An X H, Yu J B, Cai W G. Fuzzy rough FMEA evaluation method based on hybrid multi-attribute decision and correlative analysis[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(11): 2613-2621.)
- [20] Hao Z N, Xu Z S, Zhao H, et al. Novel intuitionistic fuzzy decision making models in the framework of decision field theory[J]. *Information Fusion*, 2017, 33: 57-70.
- [21] Gao Y, Li D S, Zhong H. A novel target threat assessment method based on three-way decisions under intuitionistic fuzzy multi-attribute decision making environment[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 87: 103276.
(Sun Y, Yao P Y, Wan L J, et al. Multiple attribute decision making method based on weights aggregation and relative dominance relation[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(2): 317-322.)
- [22] 孙昱, 姚佩阳, 万路军, 等. 基于权重集结和相对优势关系的多属性决策方法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(2): 317-322.
(Sun Y, Yao P Y, Wan L J, et al. Multiple attribute decision making method based on weights aggregation and relative dominance relation[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(2): 317-322.)

作者简介

焦志强(1992—), 男, 工程师, 博士, 从事指挥信息系统、指控组织设计等研究, E-mail: jzq_paper@163.com;

张杰勇(1983—), 男, 副教授, 博士, 从事指挥信息系统、指控组织设计等研究, E-mail: dumu3110728@126.com;

姚佩阳(1960—), 男, 教授, 从事指挥信息系统、指控组织设计、有人/无人机协同作战等研究, E-mail: ypy_664@163.com;

王勋(1990—), 男, 讲师, 博士, 从事有人/无人机协同作战、指控组织设计等研究, E-mail: wxkgdxy@163.com;

曾慧洁(1995—), 女, 助理工程师, 从事指挥信息系统的研究, E-mail: bonnie1995@126.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)