

研究论文

武器装备体系满足需求程度评估方法

赵擎天, 李立伟*, 侯立志, 雷震, 陈鑫

摘要 为系统评估武器装备体系使命任务需求满足度,提出一种基于质量功能展开(quality function deployment, QFD)和基于证据推理的信度规则库推理(belief rule base inference methodology using evidential reasoning, RIMER)的组合方法。首先,通过 QFD 方法将高层次的使命任务需求逐层分解到具体装备能力需求,构建不同层级需求的相关映射关系;其次,采用决策实验室分析法(decision-making trial and evaluation laboratory, DEMATEL)确定各子任务需求重要度,运用犹豫模糊数评分改进传统关系矩阵确定方式;在底层装备能力评估中,基于 RIMER 方法构建信度规则库,通过证据推理提高复杂和不确定性指标数据的评估准确度;最后,基于 QFD 映射关系逆向推导,实现从底层能力到使命任务的需求满足度评估。以城市智能有人/无人协同夺控任务为例,验证了方法的有效性。研究表明,该方法在处理复杂和不确定性数据方面具有优势,可以提高评估的准确性和可靠性。

关键词 武器装备体系;使命任务需求;满足度评估;质量功能展开;基于证据推理的信度规则库推理

基于作战概念进行武器装备体系正向设计,已成为当前建设发展武器装备的重要理念。使命任务需求是作战概念开发的起点,也是武器装备体系设计的归宿。科学评估武器装备体系对使命任务需求的满足度,是武器装备体系正向设计迭代反馈、不断优化的重要环节。现代武器装备体系具有高度复杂性和不确定性,随着智能化武器装备编配比例的提高,武器装备体系使命任务需求满足度评估将面临更多挑战。如何在准确把握武器装备体系各层级需求关系的基础上,科学评估各层级任务和能力的需求满足度,是武器装备体系使命任务需求满足度评估需要解决的关键问题。

武器装备体系使命任务需求满足度评估是针对具体的使命任务,分析度量武器装备体系对使命任务

完成情况的支撑度。目前,国内关于使命任务需求满足度评估方面的研究较少,主要集中在武器装备体系能力需求满足度评估方面^[1-4]。程贵等^[5]提出一种基于证据推理的武器装备体系能力需求满足度评估方法,通过建立信度规则库并运用证据推理,计算获得能力需求满足度分布,其在处理底层能力指标的多样性和评估信息不确定性方面表现出色,但构建信度规则库的过程较为复杂且实施困难;王琴琴等^[6]提出了基于质量功能展开(quality function deployment, QFD)和粗糙集的保障能力需求满足度评价方法,解决了评估指标和权重确定的不一致性问题;禹明刚等^[7]研究了利用复杂网络技术进行网信体系能力需求满足度分析的方法,该方法在系统性和层次性方面表现良好,但处理不确定性数据时存在不足;荆涛^[8]提出了基于多场景的装备需求满足度评估方法,通过结合不同场景下的需求变化,综合评估装备的需求满足度;杜占龙等^[9]采用 QFD 方法实现了使命任务需求满足度评估,

军事科学院系统工程研究院,北京 100101

收稿日期: 2024-06-20; 修回日期: 2024-10-16

作者简介: 赵擎天, 博士研究生, 研究方向为智能装备体系设计与评估, 电子信箱: zhaopingtian1986@163.com; 李立伟(通信作者), 研究员, 研究方向为军事需求和装备论证, 电子信箱: xtzts_bj_2024@126.com

引用格式: 赵擎天, 李立伟, 侯立志, 等. 武器装备体系满足需求程度评估方法[J]. 科技导报, 2025, 43(7): 116-125; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.07.00772

通过构建逐层映射关系,确保了各层次需求间的逻辑一致性和关联性,但在处理模糊信息时还存在局限;赵陆昊等^[10]提出了针对装备保障能力需求满足度的综合方法;刘麦笛等^[11]首次将集群策略分析引入需求满足度评估中;邱凯等^[12]研究了体系的任务满足度评估方法,以使命任务需求为具体评估对象,提出了一种主、客观综合的体系任务满足度定量评估方法。综合分析,现有研究主要存在以下问题:(1) 缺乏动态使命任务评估,已有研究大多集中于静态装备体系能力的评估,未充分考虑使命任务的多样性和抽象性,静态能力评估结果不能完全反映使命任务需求满足度;(2) 复杂不确定数据处理不足,在处理武器装备体系评估复杂不确定性数据时,现有方法表现较为薄弱,常依赖于确定性或简单的模糊处理;(3) 综合性指标聚集方法单一,在应对复杂武器装备体系中指标的串行和并行聚集问题时方法单一,难以全面反映各指标间的相互关系。

针对以上问题,采用基于 QFD 和基于证据推理的信度规则库推理(belief rule base inference methodology using evidential reasoning, RIMER)的组合方法,通过构建信度规则库和关系矩阵,实现对武器装备体系使命任务需求满足度的全面评估。QFD 方法可以实现需求的层次化映射,通过构建关系矩阵,明确各层次需求之间的映射关系;基于 RIMER 的方法能够处理多种类型的不确定性数据,通过构建信度规则库,定义各装备能力指标之间的关系,将指标数据转换为统一的信度结构,能够灵活处理串行、并行和选择性关系,评估各装备能力的需求满足度^[13]。基于底层装备能力需求满足度的评估结果,运用 QFD 方法逐层向上推导,从能力到元任务,再到子任务,最终实现使命任务需求满足度评估。基于 QFD 和 RIMER 的方法,具有处理不确定性数据强、需求层次明确的优势,可有效改进复杂武器装备体系使命任务评估中的复杂性和不确定性问题。

1 基础理论

1.1 QFD 理论

QFD 方法是由日本质量专家赤尾洋二在 1966 年提出的一种用于针对顾客需求的产品设计决策方

法^[14-15]。QFD 的核心是构建质量屋(house of quality, HOQ),通过质量屋可将顾客需求逐级分解转化为产品工程技术特性,并通过对各产品工程技术特性的重要度评价,确定影响产品的关键因素,从而采取针对性措施以最大程度满足客户需求。从多属性决策角度看,QFD 实质是应用矩阵和定量方法系统地顾客需求转化为产品的技术参数和设计指标,以便实现优化的多属性决策过程。

1.2 基于 RIMER 的评估理论

RIMER 方法由英国曼彻斯特大学杨建波提出,该方法在统一框架下结合了证据理论、多属性决策理论和模糊理论等多种方法,用于评估和优化复杂系统中的不确定信息^[16]。其能够有效处理模糊数据、主观数据、概率数据及未知信息,通过信度来刻画不确定性,从而解决信息不完全或未知时的表示问题。RIMER 方法在复杂系统评估和优化中具有显著优势^[17-18]。基于 RIMER 的评估方法,主要包括以下 5 个步骤。

1) 构造信度规则库。

信度规则库是通过统一框架表达整合专家经验和评价标准,用以处理不确定性和模糊性数据的知识表示和推理系统。信度规则库一般由“if-then”规则表示,其具体表示形式为:

$$R_k: \text{If } A_1^k \wedge A_2^k \wedge \cdots \wedge A_{T_k}^k, \\ \text{Then } \{(r_1, \beta_{1k}), (r_2, \beta_{2k}), \cdots, (r_i, \beta_{ik})\} \quad (1)$$

式中, $A_1^k \wedge A_2^k \wedge \cdots \wedge A_{T_k}^k$ 表示规则前提, A_i^k 表示规则 k 中第 i 个输入变量的取值, R_k 表示规则结论, T_k 表示输入变量个数; β_{ik} 表示结论为 r_i 的第 k 条规则前提条件成立的信度,且 $\sum_{i=1}^L \beta_{ik} \leq 1$ 。

2) 输入数据的转换。

输入数据的转换是指将输入数据与规则库中的前提条件进行匹配的过程。通过匹配计算,可以识别出与输入数据高度匹配的前提条件,从而找到更符合输入数据的规则,并调整相应的结论信度。获得带有信度的输入数据之后,即可对输入数据与规则前提条件的匹配程度进行计算,输入数据对信度规则前提项匹配程度的计算公式为:

$$T(x_i, \varepsilon_i) = \{(A_{ij}, \alpha_{ij}); i = 1, 2, \cdots, P; j = 1, 2, \cdots, |A_i|\} \quad (2)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\varphi(x_i, A_{ij}) \varepsilon_i}{\sum_{|A_i|} \varphi(x_i, A_{ij})} \quad (3)$$

式中, ε_i 为数据 x_i 的信度, 表示该数据值 x_i 出现的可能性; $T(x_i, \varepsilon_i)$ 表示数据转换后, 所匹配到前提条件的集合; α_{ij} 表示输入对第 j 个取值 A_{ij} 的匹配程度, $\alpha_{ij} \in [0, 1]$ 。 $\varphi(x_i, A_{ij})$ 为相似函数, 表示 x_i 与 A_{ij} 的相似程度。相似函数有多种类型, 其选取与指标类型有关, 本研究主要涉及以下 3 种。

(1) 前提属性取值为离散数值。假设规则库中输入数据值 x_i 取值 A_{ij} 为 $A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{i|A_i|}\}$, 并按单调递增排列, 则

$$\varphi(x_i, A_{ij}) = \begin{cases} \frac{A_{i(k+1)} - x_i}{A_{i(k+1)} - A_{ik}}, & j = k (A_{ik} \leq x_i \leq A_{i(k+1)}) \\ \frac{x_i - A_{ik}}{A_{i(k+1)} - A_{ik}}, & j = k + 1 \\ 0, & j = 1, 2, \dots, |A_i|; j \neq k, k + 1 \end{cases} \quad (4)$$

(2) 前提属性取值为单点 A^* , 则

$$\varphi(x_i, A_i^*) = 1 - \frac{|x_i - A_i^*|}{\max\{|A_i^* - p|, |q - A_i^*|\}} \quad (5)$$

式中, $[p, q]$ 为 x_i 的实际取值区间。

(3) 前提属性取值为专家主观判断值, 则 $\alpha_{ij} = \varepsilon_i$ 。

3) 匹配程度计算公式。

匹配度计算是指确定输入数据与规则前提中各项能力或能力指标的相符程度。匹配度的计算结果反映了输入数据与规则匹配的程度。根据式(3), 输入数据被转换为相应规则的前提条件, 即 (A_1^k, α_1^k) , (A_2^k, α_2^k) , $\dots$, $(A_{T_k}^k, \alpha_{T_k}^k)$, k 表示前提条件隶属于第 k 条规则。 α_k 表示输入数据与第 k 条规则的匹配程度, 当前提条件使用“ $\wedge$ ”连接时, α_k 为

$$\alpha_k = \prod_{i=1}^{T_k} (\alpha_i^k)^{\delta_{ki}}, \quad \delta_{ki} = \frac{\delta_{ki}}{\max\{\delta_{ki}\}} \quad (6)$$

式中, δ_{ki} 表示前提条件的相对权重, $\delta_{ki} \in (0, 1]$, $\alpha_i^k \in [0, 1]$, $\alpha_k \leq \min_{i=1, 2, \dots, T_k} \{\alpha_i^k\}$ 。

计算得到匹配程度 α_k 后, 根据规则权重 θ_k 进行激活, 通过数据归一化计算便可得到激活程度 ω_k ,

$$\omega_k = \frac{\theta_k \alpha_k}{\sum_{i=1}^L \theta_i \alpha_i} \quad (7)$$

式中, 如果 $\alpha_k = 0$, 则 $\omega_k = 0$, 表示规则库中的第 k 条规则没有被激活。

4) 构造基本可信数。

经过信度规则库的构建、输入数据的转换和数据

匹配程度的计算后, 需进行基于证据推理的数据聚合。对于装备能力的满足度评估, 通过对各项指标满足度的推导, 逐层计算出上一级的装备能力需求满足度。构造基本可信数则是根据输入数据激活规则的程度以及每条规则结论的信度, 确定每个规则对最终推理结果的贡献度, 通过以下公式计算得出:

$$\begin{cases} m_{l,k} = \omega_k \bar{\beta}_{l,k}, & l = 1, 2, \dots, L; k = 1, 2, \dots, K \\ m_{R,k} = 1 - \omega_k \sum_{l=1}^L \bar{\beta}_{l,k} \\ \bar{m}_{R,k} = 1 - \omega_k \\ \tilde{m}_{R,k} = \omega_k \left(1 - \sum_{l=1}^L \bar{\beta}_{l,k} \right) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $m_{l,k}$ 表示第 k 条规则第 l 个结论分配的基本可信数; ω_k 表示第 k 条规则的激活程度; $\bar{\beta}_{l,k}$ 表示第 k 条规则第 l 个结论分配的信度; $m_{R,k}$ 表示第 k 条规则没有分配到任何结论的基本可信数; $\bar{m}_{R,k}$ 表示与激活权重 ω_k 相关的不确定性部分; $\tilde{m}_{R,k}$ 表示与规则结论相关的不确定性部分。

5) 证据组合。

证据组合是将多个规则的基本可信数进行整合, 以生成最终的置信度分布。如果前 S 条规则被激活, 则 β_l 表示由输入值得到结果值的信度, β_R 表示对结果不确定的度量, K 表示证据组合归一化因子。采用文献[19]提出的解析形式证据推理算法进行求解, 通过计算就可得到 β_l 的置信度。计算过程为

$$\begin{cases} K = \left[\sum_{l=1}^L \prod_{s=1}^S (m_{s,l} + \bar{m}_{s,R} + \tilde{m}_{s,R}) - (L-1) \prod_{s=1}^S (\bar{m}_{s,R} + \tilde{m}_{s,R}) \right]^{-1} \\ m_l = K \left[\prod_{s=1}^S (m_{s,l} + \bar{m}_{s,R} + \tilde{m}_{s,R}) - \prod_{s=1}^S (\bar{m}_{s,R} + \tilde{m}_{s,R}) \right], & l = 1, 2, \dots, L \\ \bar{m}_R = K \prod_{s=1}^S \bar{m}_{s,R} \\ \tilde{m}_R = K \left[\prod_{s=1}^S (\bar{m}_{s,R} + \tilde{m}_{s,R}) - \prod_{s=1}^S \bar{m}_{s,R} \right] \\ \beta_l = \frac{m_l}{1 - \bar{m}_R}, & l = 1, 2, \dots, L \\ \beta_R = \frac{\tilde{m}_R}{1 - \bar{m}_R} \end{cases} \quad (9)$$

2 评估模型构建

评估模型是基于 RIMER 方法进行底层装备能力

满足度评估,在计算得到各装备能力需求满足度后,用质量功能展开 QFD 方法逐层向上推导,求解使命任务需求满足度。RIMER 方法考虑了复杂装备体系中因指标类型多样、评估信息不完全给评估带来的不

确定性,而 QFD 方法针对使命任务满足度评估中各层次需求之间的映射关系,通过逐层向上推导、从底层能力到使命任务,实现了系统化的评估。基于 RIMER 和 QFD 的满足度评估模型如图 1 所示。

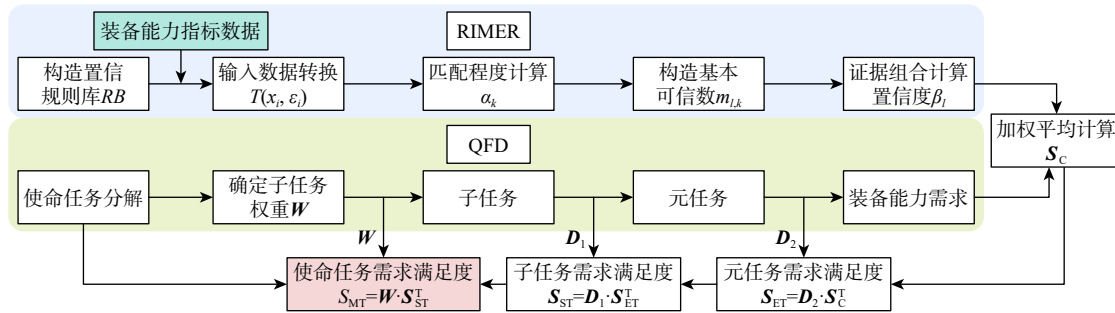


图1 满足度评估模型

2.1 基于 RIMER 的装备体系能力需求满足度评估

装备体系能力需求满足度评估主要是利用 RIMER 方法对底层能力需求满足度进行评估,前提是底层能力是可测量的,且至少可由专家评价,其关键是构建置信度规则库,主要包含 5 个步骤。

步骤 1: 根据历史数据、专家经验和知识,构建置信度规则库。

步骤 2: 根据测量或评价的底层装备能力指标数据,依据式(2)~(5)进行数据转换。

步骤 3: 根据式(6)、(7),计算输入数据对规则的匹配程度。

步骤 4: 根据式(8)、(9),构造基本可信数和证据组合,计算装备体系能力需求满足的置信度。

步骤 5: 通过以上计算得到装备体系能力需求满足的置信度,例如某一装备能力需求的置信度为 c_1 (满足,基本满足,不满足)=(0.7, 0.2, 0.1)。在装备体系使命任务需求满足度评估和比较时,通常需要一个具体数值。针对此问题,本研究采用加权平均法进行聚合,构造权重向量 $\gamma=(1, 0.5, 0)$,用 $S_c=c_j \cdot \gamma^T$ 描述底层能力需求满足度,其中 S_c 表示装备体系底层能力满足度向量, c_j 为装备体系各底层能力置信度向量矩阵, i 表示第 i 个装备能力, j 代表置信度向量第 j 个数值,即对应满足、基本满足和不满足的置信度值。

2.2 基于 QFD 的装备体系使命任务分解

1) 使命任务分解。

装备体系的使命任务往往是宏观的,需求通过层层分解为底层单元可执行的具体任务。首先,将使命

任务需求划分为若干子任务需求,每个子任务再分解为多个元任务,而每个元任务所需的装备底层能力则用装备相关指标数据进行满足度评估。通过自顶向下的分解,使命任务逐层展开,直至分解到具体的、可评估的底层能力需求,为装备体系使命任务满足度评估奠定基础。在分解过程中,需要注意任务分层的合理性、逻辑关联的完整性,并在分解框架形成后进行必要的优化和完善,使命任务分解示意如图 2 所示。

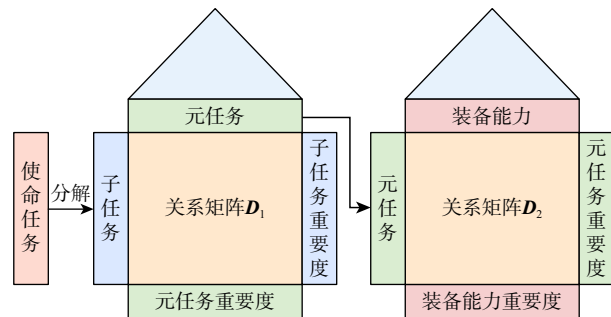


图2 使命任务分解流程

2) 确定子任务需求重要度。

子任务需求重要度一般可通过层次分析、德尔菲法和组合加权等方法确定,本研究基于不同任务间的作用关系对其重要度的影响,采用 DEMATEL 方法捕捉任务间的复杂关系,确定装备体系 n 个任务重要度 $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$, DEMATEL 方法的具体计算步骤可参考文献[20]。

3) 确定关系矩阵。

确定 QFD 关系矩阵的方法主要是专家评判打分,但由于专家履历经验、知识背景和时间限制等原

因,专家在打分时难以给出精确值,存在犹豫模糊信息,而传统方法忽视了犹豫模糊信息的影响,造成了评估信息损失。针对此问题,本研究基于犹豫模糊理论,采用犹豫模糊数评分和有序加权平均算子(ordered weighted averaging, OWA)信息集成的方法改进传统关系矩阵确定方式。该方法充分考虑了专家在评估过程中的犹豫模糊信息,并运用基于正态分布的 OWA 算子进行信息集成,可最小化不同意见对决策结果的影响。OWA 算子是一种多属性决策方法,通过考虑属性的排序和权重确定最佳决策选项,可以灵活地处理不确定性和模糊性信息^[21]。因满足度评估取值范围为[0,1],需对信息集成得到的关联矩阵按行和归一化,最终得到子任务需求到元任务需求关系矩阵 D_1 和元任务需求到装备能力需求的关系矩阵 D_2 ,具体如下

$$D_1 = (d_{ij})_{nm} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$D_2 = (d'_{ij})_{ml} = \begin{bmatrix} d'_{11} & d'_{12} & \cdots & d'_{1l} \\ d'_{21} & d'_{22} & \cdots & d'_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d'_{m1} & d'_{m2} & \cdots & d'_{ml} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, d_{ij} 、 d'_{ij} 分别为第 i 项子任务、元任务与对应 j 项元任务、装备能力的相关度,取值采用 0.1~0.9 标度法作为量化标准,数值越大、相关度越高。

2.3 使命任务需求满足度计算

经过以上步骤,先后计算得到了装备体系底层能力需求满足度 S_C 、子任务需求重要度 W 和使命任务逐层分解的关系矩阵 D_1 、 D_2 ,按照由下向上的顺序对 QFD 的过程进行逆向计算,分别得到元任务需求满足度 S_{ET} 、子任务需求满足度 S_{ST} 和使命任务需求满足度 S_{MT} ,具体如下

$$\begin{cases} S_{ET} = D_2 \cdot S_C^T \\ S_{ST} = D_1 \cdot S_{ET}^T \\ S_{MT} = W \cdot S_{ST}^T \end{cases} \quad (12)$$

3 实例验证

以“城市智能有人/无人协同夺控任务”为例,对所提基于 QFD 和 RIMER 组合方法的武器装备体系使命任务需求满足度评估模型进行验证。选择该任务作为案例,主要基于其体系复杂性高、任务需求层级多、装备能力关联性强等特点,能够全面考察方法在多层次需求分解、权重确定及不确定性数据处理方面的适用性和准确性。通过本案例分析,首先运用 QFD 方法对使命任务需求逐层分解至装备能力需求,并基于 DEMATEL 方法确定任务需求重要度,同时结合 RIMER 方法处理复杂不确定数据,确保评估结果的科学性和可靠性。通过案例验证,能进一步说明本研究方法在复杂武器装备体系评估中的有效性。城市智能有人/无人协同夺控任务需求结构如图 3 所示。

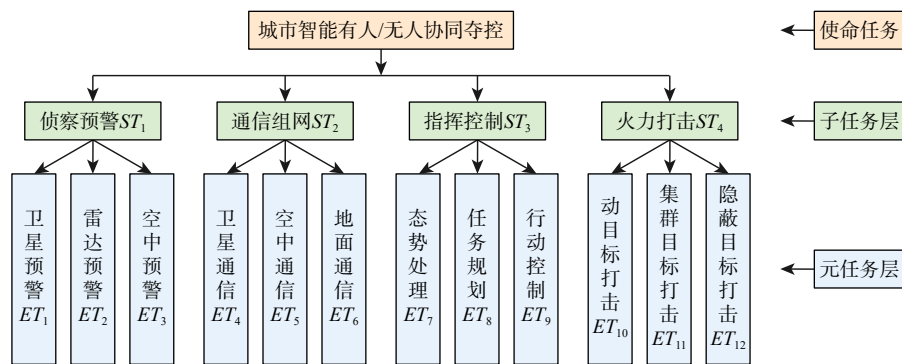


图3 城市夺控任务需求结构

3.1 子任务分解

首先,采用 DEMATEL 方法对子任务需求重要度进行计算,评估各子任务之间的影响关系,并确定其在整体任务中的权重。计算结果如表 1 所示,其中子任务需求重要度向量为 $W=(0.22, 0.25, 0.28, 0.25)$,反

映了各子任务在使命任务中的相对重要性。子任务需求之间的相互影响关系如图 4 所示,进一步揭示了不同任务间的关联性和相互作用。

第二,邀请专家评估打分,计算子任务需求到元任务需求关系矩阵 D_1 。为减小专家打分主观性对结

表 1 各任务需求“四度”及权重排序

子任务	影响度	被影响度	中心度	原因度	权重
ST_1	2.02	2.72	4.74	-0.7	0.22
ST_2	2.96	2.25	5.21	0.71	0.25
ST_3	3.32	2.43	5.75	0.89	0.28
ST_4	2.12	3.04	5.16	-0.92	0.25

果的影响,采取邀请多层次专家参与、匿名打分和多轮反馈的措施,同时考虑专家评分时出现的犹豫模糊情况,采用犹豫模糊数进行打分,其值越大表示影响度或关联度越高,评估结果如表 2 所示。

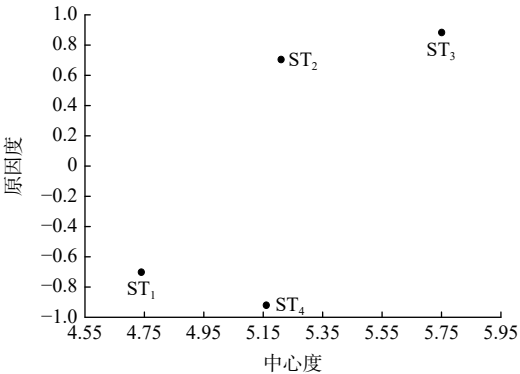


图 4 任务需求影响关系

表 2 子任务需求与元任务需求关联关系

子任务	元任务											
	ET_1	ET_2	ET_3	ET_4	ET_5	ET_6	ET_7	ET_8	ET_9	ET_{10}	ET_{11}	ET_{12}
ST_1	{0.8, 0.9, 0.7}	{0.7, 0.8, 0.6}	{0.6, 0.7, 0.5}	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}
ST_2	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}	{0.2, 0.3}	{0.8, 0.9, 0.7}	{0.7, 0.8, 0.6}	{0.6, 0.7, 0.5}	{0.1, 0.3}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.2}
ST_3	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}	{0.8, 0.9, 0.7}	{0.7, 0.8, 0.6}	{0.6, 0.7, 0.5}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.2, 0.3}
ST_4	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.3}	{0.8, 0.9, 0.7, 0.6}	{0.7, 0.8, 0.6, 0.5}	{0.6, 0.7, 0.5, 0.4}

采用基于正态分布的 OWA 算子对以上犹豫模糊数进行信息集成,按行和归一化得到关联关系矩阵,如 D_1 所示。本研究以指挥控制任务需求为例验证方法应用,计算元任务与装备能力关联关系矩阵

D_2^c ,评估结果见表 3。采用基于正态分布的 OWA 算子进行信息集成,并按行和归一化得到指挥控制任务的关联关系矩阵,如 D_2^c 所示。

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0.21 & 0.19 & 0.16 & 0.04 & 0.05 & 0.04 & 0.07 & 0.05 & 0.04 & 0.05 & 0.04 & 0.05 \\ 0.04 & 0.05 & 0.06 & 0.21 & 0.18 & 0.15 & 0.05 & 0.06 & 0.05 & 0.04 & 0.06 & 0.04 \\ 0.05 & 0.04 & 0.06 & 0.05 & 0.04 & 0.05 & 0.21 & 0.18 & 0.15 & 0.06 & 0.04 & 0.06 \\ 0.04 & 0.05 & 0.04 & 0.07 & 0.05 & 0.04 & 0.05 & 0.07 & 0.05 & 0.20 & 0.18 & 0.15 \end{bmatrix}$$

表 3 指挥控制元任务需求与装备能力需求关联关系

元任务	装备能力								
	态势融合 CC_1	态势生成 CC_2	态势共享 CC_3	任务管理 CC_4	任务调配 CC_5	冲突消解 CC_6	状态监控 CC_7	智能协同 CC_8	人工调控 CC_9
态势处理 ET_7	{0.8, 0.9, 0.7}	{0.7, 0.8, 0.6}	{0.6, 0.7, 0.5}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}
任务规划 ET_8	{0.1, 0.2}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.3}	{0.8, 0.9, 0.7, 0.6}	{0.7, 0.8, 0.6, 0.5}	{0.6, 0.7, 0.5, 0.4}	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}	{0.2, 0.3}
行动控制 ET_9	{0.1, 0.2}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.2}	{0.1, 0.3}	{0.2, 0.3}	{0.1, 0.3}	{0.8, 0.9, 0.7}	{0.7, 0.8, 0.6}	{0.6, 0.7, 0.5}

$$D_2^c = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.22 & 0.18 & 0.06 & 0.05 & 0.08 & 0.06 & 0.05 & 0.06 \\ 0.05 & 0.08 & 0.06 & 0.24 & 0.21 & 0.17 & 0.05 & 0.06 & 0.08 \\ 0.05 & 0.08 & 0.05 & 0.06 & 0.08 & 0.06 & 0.24 & 0.21 & 0.18 \end{bmatrix}$$

3.2 装备能力满足度评估

假设信度规则库中的规则权重和前提条件的相对权重各自相等,且城市夺控装备体系使命任务需求满足度评估所构建装备体系的底层装备能力指标是可测或者根据专家经验可评价的,指挥控制任务需求涉及的底层装备能力指标既有定性指标如“保密性 c_{32} ”,又有定量指标“准确度 c_{12} ”,具体取值如表4所示,构造带信度结构的部分装备能力评估规则库如表5所示。

表4 指挥控制涉及的各项能力取值

装备能力	能力取值	能力指标	指标取值
态势融合 CC_1	满足/基本满足/不满足	数据整合能力 c_{11}	高/中/低
	满足/基本满足/不满足	准确度 c_{12}	(0.7,0.8,0.9)
	满足/基本满足/不满足	实时性 c_{13}	(10,15,20)/s
态势生成 CC_2	满足/基本满足/不满足	准确度 c_{21}	(0.7,0.8,0.9)
	满足/基本满足/不满足	生成频率 c_{22}	(5,10,15)/min
态势共享 CC_3	满足/基本满足/不满足	覆盖范围 c_{31}	(0.5,0.7,0.9)
		保密性 c_{32}	高/中/低
任务管理 CC_4	满足/基本满足/不满足	资源利用率 c_{41}	(0.7,0.8,0.9)
	满足/基本满足/不满足	成功率 c_{42}	(0.8,0.9)
任务调配 CC_5	满足/基本满足/不满足	调配速度 c_{51}	(5,8,10)/min
	满足/基本满足/不满足	灵活性 c_{52}	高/中/低
冲突消解 CC_6	满足/基本满足/不满足	冲突识别度 c_{61}	(0.7,0.8,0.9)
	满足/基本满足/不满足	响应时间 c_{62}	(5,10,20)/s
	满足/基本满足/不满足	消解成功率 c_{63}	(0.8,0.9)
状态监控 CC_7	满足/基本满足/不满足	数据覆盖率 c_{71}	(0.9,0.95)
	满足/基本满足/不满足	实时性 c_{72}	高/中/低
智能协同 CC_8	满足/基本满足/不满足	智能程度 c_{81}	高/中/低
	满足/基本满足/不满足	协同效率 c_{82}	(0.7,0.8,0.9)
人工调控 CC_9	满足/基本满足/不满足	调控精度 c_{91}	高/中/低
	满足/基本满足/不满足	反馈速度 c_{92}	(5,10,20)/s

表5 带信度结构的能力评估规则库(部分)

ID	前提条件	结论
1	$(c_{61}=0.9)\wedge(c_{62}=5)\wedge(c_{63}=0.9)$	$CC_6(A,1.0),(B,0),(C,0)$
2	$(c_{61}=0.9)\wedge(c_{62}=10)\wedge(c_{63}=0.9)$	$CC_6(A,0.8),(B,0.2),(C,0)$
3	$(c_{61}=0.9)\wedge(c_{62}=5)\wedge(c_{63}=0.8)$	$CC_6(A,0.8),(B,0.2),(C,0)$
4	$(c_{61}=0.9)\wedge(c_{62}=20)\wedge(c_{63}=0.9)$	$CC_6(A,0.6),(B,0.3),(C,0.1)$
5	$(c_{61}=0.9)\wedge(c_{62}=20)\wedge(c_{63}=0.8)$	$CC_6(A,0.4),(B,0.4),(C,0.2)$
6	$(c_{61}=0.8)\wedge(c_{62}=5)\wedge(c_{63}=0.9)$	$CC_6(A,0.8),(B,0.2),(C,0)$
7	$(c_{61}=0.8)\wedge(c_{62}=10)\wedge(c_{63}=0.9)$	$CC_6(A,0.6),(B,0.3),(C,0.1)$
8	$(c_{61}=0.8)\wedge(c_{62}=20)\wedge(c_{63}=0.9)$	$CC_6(A,0.4),(B,0.4),(C,0.2)$
9	$(c_{61}=0.8)\wedge(c_{62}=20)\wedge(c_{63}=0.8)$	$CC_6(A,0.2),(B,0.5),(C,0.3)$
10	$(c_{61}=0.7)\wedge(c_{62}=5)\wedge(c_{63}=0.9)$	$CC_6(A,0.6),(B,0.3),(C,0.1)$

表 5 带信度结构的能力评估规则库(部分)(续)

ID	前提条件	结论
11	$(c_{61}=0.7)\wedge(c_{62}=5)\wedge(c_{63}=0.8)$	$CC_6(A,0.4),(B,0.4),(C,0.2)$
12	$(c_{61}=0.7)\wedge(c_{62}=20)\wedge(c_{63}=0.8)$	$CC_6(A,0.1),(B,0.5),(C,0.4)$
...	...	...

注: A代表满足, B代表基本满足; C代表不满足。

假设城市智能有人/无人协同夺控装备体系方案中, 指挥控制元任务需求的冲突消解装备能力指标为: $c_{61}=(0.85,1)$, $c_{62}=(8,0.8)(12,0.2)$, $c_{63}=(0.93,1)$ 。

(1) 根据信度规则库表 5, 对输入数据进行转换, 将输入值 c_{61} 、 c_{62} 、 c_{63} 分别代入式(4)可得, $\varphi_1(0.85, 0.9)=0.5$, $\varphi_1(0.85,0.8)=0.5$, $\varphi_1(0.85,0.7)=0$; $\varphi_2(8,5)=0.4$, $\varphi_2(8,10)=0.6$, $\varphi_2(8,20)=0$, $\varphi_2(12,5)=0$, $\varphi_2(12, 10)=0.8$, $\varphi_2(12,20)=0.2$; $\varphi_3(0.93,0.9)=0.7$, $\varphi_3(0.93, 0.8)=0$ 。

(2) 根据式(6)计算输入数据的匹配度, 得到规则库中的第 1、2、4、6、7、8 的规则被激活, 匹配程度为 $\alpha_1=0.13$, $\alpha_2=0.27$, $\alpha_4=0.02$, $\alpha_6=0.13$, $\alpha_7=0.27$, $\alpha_8=0.02$ 。利用式(7)计算可得, $\omega_1=0.16$, $\omega_2=0.32$, $\omega_4=0.02$, $\omega_6=0.16$, $\omega_7=0.32$, $\omega_8=0.02$ 。

(3) 利用式(8)构造基本可信数可得, $(m_{1,1}, m_{2,1}, m_{3,1}, m_{R,1}, \tilde{m}_{R,1}, \tilde{m}_{R,1})=(0.16,0,0,0.84,0.84,0)$, $(m_{1,2}, m_{2,2}, m_{3,2}, m_{R,2}, \tilde{m}_{R,2}, \tilde{m}_{R,2})=(0.26,0.06,0,0.68,0.68,0)$, $(m_{1,4}, m_{2,4}, m_{3,4}, m_{R,4}, \tilde{m}_{R,4}, \tilde{m}_{R,4})=(0.01,0.01,0.002,0.98,0.98,0)$, $(m_{1,6}, m_{2,6}, m_{3,6}, m_{R,6}, \tilde{m}_{R,6}, \tilde{m}_{R,6})=(0.13,0.03,0,0.84,0.84,0)$, $(m_{1,7}, m_{2,7}, m_{3,7}, m_{R,7}, \tilde{m}_{R,7}, \tilde{m}_{R,7})=(0.19,0.1,0.03,0.68,0.68, 0)$, $(m_{1,8}, m_{2,8}, m_{3,8}, m_{R,8}, \tilde{m}_{R,8}, \tilde{m}_{R,8})=(0.01,0.01,0.004,0.98, 0.98,0)$ 。

(4) 根据式(9)进行证据组合计算可得, $K=1.1239$, $\bar{m}_R=0.3522$, $\tilde{m}_R=0$, $\beta_i=(0.80,0.17,0.03)$, 即冲突消解装备能力的满足程度置信度为 $(0.80,0.17,0.03)$ 。计算结果表明, 当输入信息是完全的, 即 $\varepsilon_{61}=1=\varepsilon_{62}=0.8+0.2=\varepsilon_{63}=1$, 则输出信息也是完全的, 即 $0.80+0.17+0.03=1$, 且结果不确定度 $\beta_R=0$ 。

(5) 在进行装备体系使命任务需求满足度评估时, 需要将 β_i 置信度向量信息集成为一个具体数值。采用加权平均法进行聚合, 构造权重向量 $\gamma=(1,0.5,0)$, 用 $S_{Ci}=\beta_i \cdot \gamma^T$ 描述底层能力需求满足度, 其中 i 表示指挥控制需求涉及的装备能力数量。计算可得冲突消

解装备能力满足度为 0.89。

利用上述方法可依次计算出另外 8 种装备能力的满足度, 计算结果为 $S_C=(0.86,0.82,0.95,0.92,0.85, 0.89,0.9,0.85,0.95)$ 。

3.3 元任务满足度评估

城市智能有人/无人协同夺控任务共分为指挥控制、侦察预警、通信组网和火力打击等 4 个子任务(图 3)。以指挥控制元任务需求为例, 根据式(12)计算指挥控制元任务需求满足度 $S_{ET}^C=D_2^C \cdot S_C^T=(0.88, 0.89,0.89)$ 。

同理, 利用以上计算方法可依次计算侦察预警、通信组网和火力打击元任务需求满足度, 得到城市智能有人/无人协同夺控元任务需求满足度 S_{ET} , 计算结果为 $S_{ET}=(0.8,0.84,0.81,0.8,0.85,0.91,0.88,0.89,0.89,0.94, 0.9,0.92)$ 。

3.4 使命任务需求满足度评估

根据式(12), 首先计算子任务需求满足度 S_{ST} , $S_{ST}=D_1 \cdot S_{ET}^T=(0.85, 0.86, 0.88, 0.89)$; 再根据子任务权重 $W=(0.22, 0.25, 0.28, 0.25)$, 最终得到城市智能有人/无人协同夺控使命任务需求满足度 $S_{MT}=W \cdot S_{ST}^T=0.87$ 。

4 分析讨论

基于 QFD 和 RIMER 组合方法的武器装备体系使命任务需求满足度评估模型, 将高层次的使命任务需求逐层分解到具体的装备能力需求, 建立了从上至下的映射关系, 模型通过引入 DEMATEL、模糊逻辑、构建信度规则库和证据推理, 不仅利用了专家知识, 同时减少了因专家主观评价带来的不确定性。QFD 方法提供了一个自顶向下的需求分解框架, 确保了每一层次的任务和能力需求能够被明确识别和评估; RIMER 方法在处理模糊数据和不确定性信息方面表现突出, 通过构建信度规则库, 能够灵活处理串行、并

行和选择性关系,确保评估过程的可靠性和准确性。采用基于 QFD 和 RIMER 组合方法进行评估,可以提高单一 QFD 方法^[9]的不确定性数据处理能力,同时改善了证据推理方法^[5]在不同层次需求之间逻辑关系和重要度处理能力偏弱、多层次需求信度规则库构建复杂困难的问题。该方法在 QFD 映射分析过程中,运用 DEMATEL 方法对子任务权重进行分析求解,并引入犹豫模糊理论分析不同层次需求间的相关性,能系统处理文献[12]中不同层次需求指标聚集时存在串行、并行和选择性问题。

通过城市智能有人/无人协同夺控任务案例,验证了所构建评估模型的有效性。首先,通过 QFD 方法逐层分解和映射,从使命任务到子任务,再到元任务,最终到具体的装备能力,系统化评估了各层次的需求满足度。验证结果表明,这种方法能够有效反映各层任务需求满足度对整体目标的贡献。其次,基于 RIMER 方法构建信度规则库和证据推理算法,评估了指挥控制任务中各项装备能力的满足度。结果表明 RIMER 方法能够处理复杂装备体系底层能力指标的不确定性数据,并提供可靠的评估结果。最后,通过逐层逆推,得到了城市智能有人/无人协同夺控武器装备体系的使命任务需求满足度,验证了模型的有效性。评估结果显示,QFD 与 RIMER 方法的组合使用,可在复杂武器装备体系需求满足度评估中提供系统性强、准确性高的评估结果。

5 结论

本研究提出一种基于 QFD 和 RIMER 组合方法的武器装备体系使命任务需求满足度评估模型,并通过城市智能有人/无人协同夺控案例验证了其有效性。与传统方法相比,该模型在需求分解、权重计算和不确定性数据处理方面具有明显优势。首先,QFD 方法建立了层次化需求映射框架,确保了从使命任务到装备能力的系统性关联,相较于传统方法增强了需求分解的逻辑一致性。其次,结合 DEMATEL 方法与犹豫模糊评分,提升了任务需求权重计算的准确性,减少了专家打分的主观偏差。在需求满足度评估方面,RIMER 方法通过信度规则库和证据推理,提升了对复杂不确定数据的处理能力,使评估结果更加可

靠。随着智能化武器装备广泛应用,武器装备体系使命任务需求满足度评估将日趋复杂,在本研究组合评估方法的基础上,可通过扩展信度规则库、改进需求映射方法,为智能化武器装备体系使命任务需求满足度评估提供借鉴。

参考文献(References)

- [1] 魏兆磊,陈春良,申莹,等.数字化部队保障装备能力需求满足度评价模型[J].火力与指挥控制,2017,42(3):90-95.
- [2] 周荣基,邹强,宋佳明,等.基于需求满足度的潜艇对空探测预警能力分析[J].火力与指挥控制,2020,45(9):90-96.
- [3] 樊延平,郭齐胜,王金良.面向任务的装备体系作战能力需求满足度分析方法[J].系统工程与电子技术,2016,38(8):1826-1832.
- [4] 焦安龙,许俊飞.武器系统作战能力需求满足度评估方法[J].指挥控制与仿真,2019,41(1):68-72.
- [5] 程贲,姜江,谭跃进,等.基于证据推理的武器装备体系能力需求满足度评估方法[J].系统工程理论与实践,2011,31(11):2210-2216.
- [6] 王琴琴,宋太亮,汤伟达.基于QFD及粗糙集的保障能力需求满足度评价方法[J].火力与指挥控制,2015,40(4):136-139,143.
- [7] 禹明刚,余晓辉,权冀川,等.面向任务与基于ANP的网络信息体系能力需求满足度分析方法[J].系统工程理论与实践,2020,40(3):795-806.
- [8] 荆涛.基于多场景的装备需求满足度评估方法研究[J].军事运筹与系统工程,2020,34(4):25-30.
- [9] 杜占龙,任旭.基于QFD的装备体系使命任务需求满足度评估方法[J].测控技术,2022,41(3):33-37,67.
- [10] 赵陆昊,阮拥军,朱应丽,等.面向任务的装备保障能力需求满足度分析方法[J].指挥控制与仿真,2022,44(4):60-65.
- [11] 刘麦笛,夏博远,杨志伟,等.考虑集群协同特性的马赛克战体系能力需求满足度评估方法[J].系统工程理论与实践,2023,43(8):2447-2466.
- [12] 邱凯,高岚岚,刘怡静.体系的任务满足度评估方法研究[J].中国电子科学研究院学报,2023,18(2):154-159.
- [13] 王小燕,孙建彬,赵青松,等.不完备信息条件下基于置信规则库的能力满足度评估方法[J].系统工程与电子技术,2019,41(11):2507-2513.
- [14] 邱华清.基于QFD的产品服务系统设计需求多目标优化研究[D].上海:上海理工大学,2018.
- [15] 杨强.群体模糊信息环境下的质量功能展开理论与应用研究[D].成都:西南交通大学,2020.
- [16] Yang J B, Liu J, Wang J, et al. Belief rule-base inference

- methodology using the evidential reasoning Approach-RIMER[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans, 2006, 36(2): 266–285.
- [17] 钱立伟, 徐向前, 豆亚杰, 等. 基于RIMER方法的体系能力需求推荐方法[J]. 系统工程与电子技术, 2022, 44(12): 3719–3727.
- [18] 周立尧, 刘小方, 郑祥, 等. 基于RIMER的导弹部队作战单元作战效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(12): 92–96.
- [19] Wang Y M, Yang J B, Xu D L. Environmental impact assessment using the evidential reasoning approach[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(3): 1885–1913.
- [20] 吕锋, 刘芬, 冯壮壮, 等. 产品服务系统设计中顾客需求重要度确定方法研究[J]. 制造技术与机床, 2024(4): 173–180.
- [21] Wu S M, Liu H C, Wang L E. Hesitant fuzzy integrated MCDM approach for quality function deployment: A case study in electric vehicle[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(15): 4436–4449.

A combined method for evaluating the satisfaction degree of mission task requirements in weapon equipment systems

ZHAO Qingtian, LI Liwei*, HOU Lizhi, LEI Zhen, CHEN Xin

Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100101, China

Abstract To systematically assess the satisfaction of mission task requirements for weapon systems, a combined method based on quality function deployment (QFD) and belief rule base inference methodology using evidential reasoning (RIMER) is proposed. First, the QFD method decomposes high-level mission task requirements into specific equipment capability requirements, constructing relevant mapping relationships across different levels of needs. Second, the Decision-making Trial and Evaluation Laboratory method identifies the importance of each sub-task requirement and utilizes hesitant fuzzy number scoring to improve the traditional relationship matrix determination. In the evaluation of underlying equipment capabilities, the RIMER method builds a belief rule base to enhance the accuracy of assessing complex and uncertain indicator data through evidential reasoning. Finally, by reverse deduction of the QFD mapping relationship an assessment of requirement satisfaction is achieved from underlying capabilities to mission tasks. An example of an urban intelligent manned/unmanned collaborative control task has validated the effectiveness of the method. The results indicate that this method has advantages in handling complex and uncertain data, thus improving the accuracy and reliability of the assessment.

Keywords weapon system; mission task requirements; satisfaction evaluation; QFD; RIMER ●



(责任编辑 傅雪)