

doi: 10.7690/bgzdh.2023.11.001

## 基于直觉梯形模糊 TOPSIS 的装备在役考核评估

齐分岭<sup>1,2</sup>, 韦国军<sup>3</sup>, 孙金<sup>1</sup>, 侯炜<sup>1</sup>

(1. 航天工程大学研究生院, 北京 101400; 2. 中国人民解放军 66389 部队, 太原 030031;  
3. 航天工程大学航天保障系, 北京 102206)

**摘要:** 针对当前在役考核评估困难的问题, 提出一种基于直觉梯形模糊多属性决策的综合评估方法。构建在役考核概念模型, 阐述其基本内涵及评估指标; 构建在役综合能力评价矩阵, 利用直觉梯形模糊数将语言评价矩阵转换为标准评估矩阵; 利用 AHP 与熵权法计算各指标组合权重, 采用 TOPSIS 法进行综合评估, 得到装备在役综合能力评估结果。仿真结果表明, 该方法在装备在役考核综合能力评估应用中合理有效。

**关键词:** 直觉梯形模糊; TOPSIS; 在役考核; 在役综合能力评估; 通信保障装备

**中图分类号:** TJ0 **文献标志码:** A

## Equipment In-service Assessment Based on Intuitionistic Trapezoidal Fuzzy TOPSIS

Qi Fenling<sup>1,2</sup>, Wei Guojun<sup>3</sup>, Sun Jin<sup>1</sup>, Hou Wei<sup>1</sup>

(1. College of Graduate, Space Engineering University, Beijing 101400, China;

2. No. 66389 Unit of PLA, Taiyuan 030031, China;

3. Department of Space Support, Space Engineering University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In response to the difficulties in the current in-service assessment and evaluation, a comprehensive evaluation method based on intuitionistic trapezoidal fuzzy multiple attribute decision making is proposed. The concept model of in-service assessment is constructed, and its basic connotation and evaluation indicators are elaborated. The in-service comprehensive evaluation matrix is constructed, and the linguistic evaluation matrix is converted into a standard evaluation matrix using intuitionistic trapezoidal fuzzy numbers. The weight of each indicator combination is calculated using AHP and entropy weight method. The TOPSIS method is used for comprehensive evaluation to obtain the in-service comprehensive evaluation results of communication support equipment. Simulation results show that the method is reasonable and effective in the application of in-service evaluation and comprehensive evaluation of equipment.

**Keywords:** intuitionistic trapezoidal fuzzy; TOPSIS; in-service assessment; in-service comprehensive evaluation; communication support equipment

### 0 引言

在役考核是新时期装备试验鉴定工作的一种新型模式, 目的是全面了解装备服役期间的综合表现, 考察装备是否满足当前使命任务需求, 切实摸清装备性能保持及效能发挥情况。装备列装服役后一般需要按计划组织在役考核, 通过在役考核能够检验考核装备在适编性、适配性、经济性、任务完成能力等方面在实际使用环境下的真实表现, 检验装备是否“好用”, 进而挖掘装备研制生产、维护管理、编配使用等层面存在的问题隐患, 为装备采购配备、改进改型、退役报废提供意见建议。

在役考核评估是在役考核工作中的关键环节, 是对在役考核工作进行的鉴定性评价<sup>[1]</sup>, 是对装备服役能力进行的综合性评价。当前装备在役考核研究仍在起步阶段, 缺乏可供借鉴的成熟经验, 由文

献研究可知<sup>[2-4]</sup>, 装备在役考核指标中存在大量难以量化计算而需要定性评价的指标, 一般由专家以语言变量的形式进行描述, 一些指标的数据值在实际评估过程中难以获取, 受采集设备或方法等影响获取的指标数据存在不确定性特征。从装备在役考核的目的与内容分析, 在役考核评估具有多属性综合性评估的特点。李赫才等<sup>[5]</sup>利用深度置信网络模型进行装甲装备在役考核评估; 周泽云等<sup>[6]</sup>运用 TOPSIS 法进行装备综合水平评估; 徐海波等<sup>[7]</sup>应用层次分析法与模糊量化分析法进行了作战试验综合能力评估; 杨罗章等<sup>[8]</sup>提出一种改进的多属性决策目标威胁评估方法; 甘佳霖<sup>[9]</sup>将相对熵引入模糊多属性综合评估, 实现雷达干扰效果的评估。结合文献研究及装备在役考核实际需求, 笔者结合模糊理论与多属性决策理论, 对装备在役综合能力进行评

收稿日期: 2023-06-30; 修回日期: 2023-08-05

基金项目: 全军军事类研究生资助课题(JY2020C251)

第一作者: 齐分岭(1986—), 男, 安徽人, 硕士。

估,以固定台站通信保障装备为在役考核评估分析对象,引入基于直觉梯形模糊 TOPSIS 法开展在役综合能力评估分析。

## 1 在役考核概念模型及阐述

为科学系统地介绍在役考核概念,笔者采取 5W1H 方法进行在役考核概念模型设计<sup>[10]</sup>。5W1H 的含义分别为 Why(为何?)、What(是什么?)、Where(何地?)、When(何时?)、Who(谁做?)、How(如何做?),映射到在役考核中的具体概念如表 1 所示。

表 1 在役考核 5W1H 分析

5W1H	在役考核概念
Why	在役考核的目的
What	在役考核的主要内容
Where	在役考核的组织地点与环境
When	在役考核的组织时机
Who	在役考核的试验主体
How	在役考核组织的方式方法

### 1.1 在役考核的目的

在役考核的目的是在装备列装服役后持续跟踪装备使用和保障情况,进一步验证装备基础性能及作战效能实际发挥情况,考核装备适编性、适配性及在性能试验及作战试验中难以充分考核的指标,全面考察装备在役综合能力,发现装备在研制设计、编配使用等方面存在的问题,为装备战法创新、改进升级、后续采购、退役报废提供决策依据。

### 1.2 在役考核的主要内容

在役考核主要包含 3 大部分<sup>[4]</sup>: 1) 对装备部分关键作战效能指标进行验证,虽然装备已经历作战试验列装部队,但鉴于我军装备作战试验发展水平仍不够成熟,对在长期的战备训练、联合演训、真实战斗等复杂环境下的多样化军事活动中的实际表现如何仍需进一步关注。2) 考核装备在役适用性,在役适用性考核内容主要包括直接影响装备效能发挥的适编性、适配性,还包括反映装备是否好用耐用的可靠性、维修性、保障性等部队适用性情况以及质量稳定性、服役经济性内容。3) 对装备历史遗留问题及以往试验鉴定问题的解决情况。

### 1.3 在役考核的组织地点与环境

在役考核主要依托部队、院校及科研单位组织实施,在役考核分为结合式在役考核及专项在役考核,主要组织地点为任务部队,结合部队战备训练、联合演训、装备维护等任务组织实施,有些科目也

可以依托任务部队在试验基地组织实施,在役考核环境主要为装备实际使用环境,涵盖平时训练环境、演习环境、战备环境、真实战场及模拟战场环境。

### 1.4 在役考核的组织时机

在役考核的组织时机为: 1) 新装备小批量列装后组织,此时组织在役考核可及早发现装备在性能试验与作战试验鉴定时遗留的部分问题,以利于装备改进完善进而大批量列装; 2) 部队使命任务及编制体制调整时组织,考核装备的编制体制效能是否满足新的使命任务需求; 3) 问题暴露突出时组织考察装备存在问题的具体原因,提出改进更新建议; 4) 接近服役期时组织考核装备的技战术性能,为退役报废具体时间安排提供决策依据。

### 1.5 在役考核的试验主体

在役考核的试验主体是试验鉴定部门,在上级机关的领导下由试验鉴定部门相关人员负责组织,在承担在役考核任务的部队具体配合下共同完成。

### 1.6 在役考核组织的方式方法

在役考核主要依据在役考核大纲,结合部队训练、管理、演习等任务组织实施,主要分为结合式在役考核与专项在役考核: 结合式在役考核是依托部队正常工作任务,依据平时积累的历史数据及现场采集数据进行考核评估; 专项在役考核是针对在役考核特殊的任务要求,按照专项试验流程开展。

## 2 在役综合能力评估指标确定

由第 1 节对在役考核概念的阐述可知在役考核评估是对装备在役综合能力的整体评估,通过开展在役考核可评估装备是否适应当前使命任务、技战术性能是否满足战备值勤、装备保障维修效能是否稳定。根据在役考核内容的划分,结合影响装备在役适用性的关键因素,可将在役综合能力评估指标确定为适编性、适配性、服役经济性、质量稳定性、部队适用性及任务效能 6 大指标,指标含义及评估依据如表 2 所示,在组织装备单项考核评估内容时这 6 类指标可根据需要进一步分解,由于笔者仅进行多属性综合性评估,在此不作详细分解。

## 3 模型构建

### 3.1 直觉梯形模糊数理论

定义 1<sup>[11]</sup>: 设  $A$  是某实数集  $R$  上的直觉模糊数,其参数  $b_1 \leq a_1 \leq b_2 \leq a_2 \leq a_3 \leq b_3 \leq a_4 \leq b_4$ , 记

$A = \langle (a_1, a_2, a_3, a_4), (b_1, b_2, b_3, b_4) \rangle$ ，则，隶属度函数和非隶属度函数分别为：

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ (x - a_1)/(a_2 - a_1), & a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ (x - a_4)/(a_3 - a_4), & a_3 \leq x \leq a_4 \\ 0, & x > a_4 \end{cases}; \quad (1)$$

$$v_A(x) = \begin{cases} 1, & x < b_1 \\ (x - b_1)/(b_2 - b_1), & b_1 \leq x \leq b_2 \\ 0, & b_2 \leq x \leq b_3 \\ (x - b_4)/(b_3 - b_4), & b_3 \leq x \leq b_4 \\ 1, & x > b_4 \end{cases}。 \quad (2)$$

其犹豫度  $\pi_A(x)$  的表达式同样为： $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - v_A(x)$ 。

表 2 在役综合能力评估指标含义及评估依据

指标名称	指标含义	评估依据
适应性	反映本装备与当前编配的值勤人员、编制的岗位以及担负的任务是否适应	官兵反映、问卷调查资料
适配性	反映装备与台站内不同厂家的同类装备以及程控、电源装备在网管引接、组网运行等方面是否匹配	官兵反映、问卷调查资料
服役经济性	反映日常维护、装备整修、故障处理等方面的平均费用消耗情况及费效比	官兵反映、年度维护经费消耗情况等登记统计资料
质量稳定性	反映装备运行是否稳定，主要性能指标下降快慢	官兵反映、问卷调查资料、各类测试记录
部队适用性	反映装备在实际使用环境中的可靠性、经济性、维修性、电磁兼容性、人机功效、保障适应性如何	官兵反映、机历本、故障障碍登记表、维护保养记录等登记统计资料
任务效能	反映在执行多样化军事任务中综合传输效能、抗干扰效能等关键作战效能指标实际发挥情况，反映装备主要性能的传输带宽、容量等关键指标在完成任务中的用户满意度	官兵反映、问卷调查资料、保障任务资料、登记统计资料

定义 2<sup>[11]</sup>：设  $A_1, A_2$  为 2 个直觉梯形模糊数，其中： $A_1 = \langle (a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}), (b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{14}) \rangle$ ， $A_2 = \langle (a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}), (b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}) \rangle$ ，则：

$$A_1 + A_2 = \left\{ (a_{11} + a_{21}, a_{12} + a_{22}, a_{13} + a_{23}, a_{14} + a_{24}), (b_{11} + b_{21}, b_{12} + b_{22}, b_{13} + b_{23}, b_{14} + b_{24}) \right\}; \quad (3)$$

$$\lambda A_1 = \left\langle (\lambda a_{11}, \lambda a_{12}, \lambda a_{13}, \lambda a_{14}), (\lambda b_{11}, \lambda b_{12}, \lambda b_{13}, \lambda b_{14}) \right\rangle。 \quad (4)$$

定义 3<sup>[11]</sup>：直觉梯形模糊数  $A_1, A_2$  间的距离为： $d(A_1, A_2) =$

$$\left\{ \frac{1}{12} \left[ \sum_{i=1}^4 (a_{2i} - a_{1i})^2 + \sum_{i=1}^4 (a_{2i} - a_{1i})^2 + (a_{21} - a_{11}) \right] \right. \\ \left. \left[ (a_{22} - a_{12}) + (a_{23} - a_{13})(a_{24} - a_{14}) + (b_{21} - b_{11}) \right] \right. \\ \left. \left[ (b_{22} - b_{12}) + (a_{23} - a_{13})(a_{24} - a_{14}) \right] \right\}^{\frac{1}{2}}。 \quad (5)$$

### 3.2 基于直觉梯形模糊 TOPSIS 法的评估模型

多属性决策 TOPSIS 模型经常用于方案选优，是处理多属性决策问题的一种常用方法，在经济、管理、军事等领域应用广泛，多方属性决策和多指标评估问题具有一定的相似性。对于在役考核来说，装备在役综合能力评估实际上就是多属性评价问题，且装备在役考核评估中的部分指标不易量化，仍需要专家定性评价，具有不确定性及模糊性评价的特征；因此，可以用直觉模糊语言获取定性评价意见，再应用 TOPSIS 法进行在役综合能力评估<sup>[6,8]</sup>，模型建立流程如图 1 所示<sup>[11]</sup>。

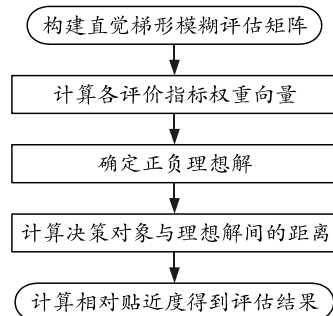


图 1 TOPSIS 评估流程

1) 构建直觉梯形模糊数评估矩阵。假设有  $m$  个评估对象，每个对象有  $n$  指标属性值，由德尔菲法得到各指标语言评价矩阵，再运用直觉梯形模糊数将语言评价矩阵转化为直觉梯形模糊数评估矩阵：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}。 \quad (6)$$

根据直觉梯形模糊数特点可知，矩阵  $X$  已是标准化矩阵，因此不需要再进行标准化处理。

2) 计算各属性指标权重。为克服主客观权重各自的缺点，采用主客观综合赋权法求解指标组合权重<sup>[12]</sup>，利用 AHP<sup>[13]</sup>及熵权法<sup>[9,14]</sup>分别计算主客观权重  $\omega_{1j}$ 、 $\omega_{2j}$ ，而后通过下式计算指标组合权重：

$$\omega_j = \xi \omega_{1j} + (1 - \xi) \omega_{2j} (i = 1, 2, \dots, n)。 \quad (7)$$

式中  $\zeta$  为调整系数, 取值为范围(0, 1)。

AHP 计算主观权重计算一般过程为:

① 利用 1-9 标度法<sup>[13]</sup>构造判断矩阵  $A$ 。

② 通过特征根法求解权重向量, 存在唯一的最大特征根式  $\lambda_{\max}$  和相应的权重向量  $W$ , 使得  $AW=\lambda_{\max}W$  成立, 再进行归一化处理即可得到权重向量。

③ 通过一致性检验, 计算一致性比例  $C_R$ , 此数小于 0.1, 则通过检验, 否则不通过。

熵权法计算权重的一般过程为:

① 将原始评价矩阵进行归一化处理, 得到归一化后的矩阵  $\bar{E} = \{\bar{e}_{ij}\}$ 。

② 计算信息熵。第  $j$  个指标的熵为:

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \left( \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \right), \quad f_{ij} = \frac{\bar{e}_{ij}}{\sum_{i=1}^m \bar{e}_{ij}} \quad (8)$$

③ 计算熵权  $g_j$ :

$$g_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{i=1}^m H_j} \quad (9)$$

④ 计算各指标的权重:

$$W_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (10)$$

3) 确定正负理想解。由标准化矩阵  $X$  确定正负理想解:

$$R_j^+ = [\max(r_{i1}), \max(r_{i2}), \dots, \max(r_{in})]; \quad (11)$$

$$R_j^- = [\min(r_{i1}), \min(r_{i2}), \dots, \min(r_{in})]。 \quad (12)$$

4) 分别计算决策对象到正负理想解的距离:

正理想解距离:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (r_{ij} - r_j^+)^2}; \quad (13)$$

负理想解距离:

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j (r_{ij} - r_j^-)^2}。 \quad (14)$$

5) 计算每个评估对象到正理想解的相对贴近度:

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-}。 \quad (15)$$

并根据相对贴近度大小对评估结果进行排序, 相对贴近度越大说明评估结果越好。

## 4 在役综合能力评估仿真

### 4.1 评估背景

为适应用户部队通信保障任务需求, 某固定台站面临传输装备扩容改造任务, 需要从现役不同品牌的 4 型传输装备中选择一类在役适用性强、综合服务表现好的装备作为装备扩容采购对象, 试验鉴定部门接到在役考核任务后, 在任务单位的配合下对 4 型传输装备进行在役综合能力评估比较, 以协助首长机关确定在综合能力最好的扩容装备。

### 4.2 评估流程

步骤 1: 结合评估任务背景设评估对象为集合  $T=\{T_1, T_2, T_3, T_4\}$ ,  $T_1 \sim T_4$  为传输装备代号。选取适用性、适配性、服役经济性、质量稳定性、部队适用性及任务效能 6 个在役考核指标作为在役综合能力评估内容, 即评估指标集为  $I=\{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6\}$ , 各指标含义及评估依据如表 2 所示。

成立由装备机关业务部门领导、厂家代表、值勤官兵、保障单位代表组成的 10 人专家组, 专家组成员参考考核组所收集的在役考核历史数据各评价指标先进行定量打分, 分值为 1~10 分, 打分结束后计算装备在役考核指标得分均值, 并根据得分结果划分为 4 个等级, 其中得分在[9, 10]区间的定性为极好, 得分在[8, 9)区间的定性为好, 得分在[6, 8)区间的定性为中, 得分在[1, 6)区间的定性为差。依据上述规则可通过计算各评价指标平均分, 并得到各装备在役综合能力定性评价结果, 如表 3 所示。

表 3 专家评价结果

装备编号	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$
$T_1$	中	好	中	好	极好	中
$T_2$	好	中	差	差	中	中
$T_3$	极好	中	中	中	极好	好
$T_4$	中	差	极好	好	中	中

为更加灵活准确地描述定性语言评价信息, 再将该语言评价表转换为用直觉梯形模糊数表示的标准评估矩阵  $R$ , 其中直觉梯形模糊数与语言评价变量按照表 4 所示的转换规则进行转换<sup>[15]</sup>。

表 4 直觉梯形模糊数表示语言评价变量转换

语言变量	直觉梯形模糊数
极差	$\langle(0.0, 0.1, 0.2, 0.3), (0.0, 0.1, 0.2, 0.3)\rangle$
差	$\langle(0.1, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.5)\rangle$
中	$\langle(0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7)\rangle$
好	$\langle(0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9)\rangle$
极好	$\langle(0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0)\rangle$

$$R = \begin{bmatrix} \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9) \rangle & \langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle \\ \langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.1, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.5) \rangle \\ \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.1, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.5) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle \\ \langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle & \langle (0.1, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.5) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9) \rangle \\ \langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle \\ \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle & \langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9) \rangle & \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle \end{bmatrix}^T. \quad (16)$$

步骤 2：计算指标组合权重，由于篇幅有限在此只依据 3.2 节所计算流程给出计算结果。

1) 采用 AHP 计算主观权重向量：

$$\omega_{1j} = (0.078\ 1, 0.074\ 2, 0.062\ 9, 0.140\ 2, 0.274\ 6, 0.370\ 0)。$$

2) 采用熵权法计算客观权重向量：

$$\omega_{2j} = (0.172\ 8, 0.169\ 8, 0.161\ 0, 0.167\ 8, 0.158\ 8, 0.169\ 8)。$$

3) 利用式(11)计算组合权重，取权重调整系数  $\xi$  为 0.5。

$$\omega = (0.125\ 5, 0.122\ 0, 0.111\ 9, 0.154\ 0, 0.216\ 7, 0.269\ 9)。$$

步骤 3：确定正负理想解。由于直觉梯形模糊数构建的决策矩阵已经是标准化矩阵，因此可直接由标准化评估矩阵  $X$  确定正负理想解：

正理想解为：

$$\begin{aligned} R_1^+ &= \langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle; \\ R_2^+ &= \langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9) \rangle; \\ R_3^+ &= \langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle; \\ R_4^+ &= \langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9) \rangle; \\ R_5^+ &= \langle (0.7, 0.8, 0.9, 1.0), (0.7, 0.8, 0.9, 1.0) \rangle; \\ R_6^+ &= \langle (0.5, 0.6, 0.7, 0.8), (0.4, 0.6, 0.7, 0.9) \rangle。 \end{aligned} \quad (17)$$

负理想解为：

$$\begin{aligned} R_1^- &= \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle; \\ R_2^- &= \langle (0.1, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.5) \rangle; \\ R_3^- &= \langle (0.1, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.5) \rangle; \\ R_4^- &= \langle (0.1, 0.2, 0.3, 0.4), (0.0, 0.2, 0.3, 0.5) \rangle; \\ R_5^- &= \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle; \\ R_6^- &= \langle (0.3, 0.4, 0.5, 0.6), (0.2, 0.4, 0.5, 0.7) \rangle。 \end{aligned} \quad (18)$$

则：

$$R^+ = [R_1^+, R_2^+, R_3^+, R_4^+, R_5^+, R_6^+],$$

$$R^- = [R_1^-, R_2^-, R_3^-, R_4^-, R_5^-, R_6^-]。$$

步骤 4：分别计算决策对象到正负理想解的距离  $d_i^+$ 、 $d_i^-$ 。根据各指标权重计算各传输装备在役综合能力与正负理想解之间的距离，利用式(13)、(14)计算得到结果如下：

$$\begin{aligned} d_1^+ &= 0.149\ 4, & d_1^- &= 0.273\ 9; \\ d_2^+ &= 0.295\ 2, & d_2^- &= 0.103\ 5; \\ d_3^+ &= 0.100\ 2, & d_3^- &= 0.323\ 1; \\ d_4^+ &= 0.337\ 5, & d_4^- &= 0.172\ 2。 \end{aligned} \quad (19)$$

步骤 5：计算待评估传输装备到正理想解的相对贴进度  $C_i$ ，根据相对贴进度结果大小进行评估结果优劣对比。由式(15)计算相对贴进度：

$$\begin{aligned} C_1 &= d_1^- / (d_1^+ + d_1^-) = 0.647\ 1; \\ C_2 &= d_2^- / (d_2^+ + d_2^-) = 0.259\ 6; \\ C_3 &= d_3^- / (d_3^+ + d_3^-) = 0.763\ 3; \\ C_4 &= d_4^- / (d_4^+ + d_4^-) = 0.337\ 8。 \end{aligned} \quad (20)$$

由计算结果可见  $C_3 > C_1 > C_4 > C_2$ ，评估结果如图 2 所示。

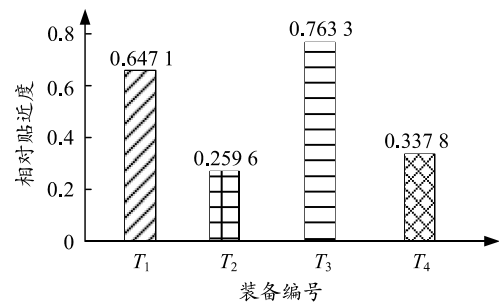


图 2 装备在役综合能力评估结果