

航天装备在役考核评估方法研究

杨萍¹, 秦留洋², 韩惠婕²

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;

2. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041)

摘要: 航天装备在役考核的性质和阶段决定了对其分析评估的侧重点与装备研制和验证阶段是不同的, 需要将装备置于完整的作战/保障的体系之下, 注重全面、多维度的指标考核, 评估的关键问题是“航天装备是否能够有效形成和保持既定的作战使用能力, 是否满足服役要求”; 聚焦于航天装备领域, 通过深入分析、梳理在役考核阶段综合评估的评估重点, 明确评估对象和层级; 对主流通用评估方法进行了研究, 在对多种评估方法优缺点的综合对比分析之下, 采用“层次分析法与灰色关联聚类法有机融合”的关键技术和方法, 提出改良的层次灰色评估方法, 突破了传统层次分析法计算冗余, 灰色聚类法主观性强等缺点; 实现航天装备在役考核分析评估算法模型的构建与应用。

关键词: 航天装备; 作战保障体系; 在役考核; 综合评估; 层次灰色评估方法

Research on Evaluation Method for In-Service Inspection of Space Equipment

YANG Ping¹, QIN Liuyang², HAN Huijie²

(1. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China;

2. Beijing Aerospace Measurement and Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China)

Abstract: The stages of in-service inspection (ISI) assessment of aerospace equipment determine the focus of its evaluation, equipment development and validation stage, the equipment needs to be placed in a complete fight and support system, the multi-dimensional indicators should be considered, the key problem of evaluation is whether the aerospace equipment effectively forms and maintains a predetermined combat effectiveness, and whether it meets the combat effectiveness of service; Focusing on an aerospace equipment field, the evaluation focus of the ISI is deeply analyzed and sorted out, and the evaluation object and level are clarified. The general evaluation methods are studied by the comparison and analysis of the advantages and disadvantages of various evaluation methods. By using the fusing method of analytic hierarchy process (AHP) and grey relationship analysis (GRA), an improved hierarchical grey evaluation method is proposed to overcome the shortages of redundant calculation of AHP and strong subjectivity of GRA, which realizes the construction and application of the ISI evaluation model of aerospace equipment.

Keywords: aerospace equipment; fight and support system; in-service inspection; overall assessment; hierarchical grey evaluation method

0 引言

航天装备研制技术要求高、成本高、周期长, 可靠性要求高, 生产数量少, 技术状态变化快, 因此科研试验性强^[1]。航天装备在役考核指的是在航天装备列装服役期间, 为检验“装备满足部队作战使用与保障要求的程度”所进行的持续性的试验鉴定活动。在役考核重点跟踪掌握部队装备使用、保障、管理情况, 完成在性能试验和作战试验阶段难以考核的内容, 促进装备的升级改进。

在役考核的性质和阶段决定了对其分析评估的侧重点与装备研制和验证阶段是不同的, 主要聚焦于两个方面。

首先需要将装备置于完整的作战/保障的体系之下, 注重全面、多维度的指标考核。另外评估的关键问题是“装备是否能够有效形成和保持既定的作战使用能力, 是否满足服役要求”。

为解决上述在役考核关注的重难点, 聚焦于航天装备这一特定的领域, 本文通过梳理航天装备在役考核分析评估的评估重点, 综合分析层次分析法、模糊分析法、灰色关联法等多种分析评估方法, 在归纳对比多种方法各自的优缺点的前提下, 提出一种改良的层次灰色评估法, 对航天装备在役考核任务进行全面、综合的分析评估。

收稿日期: 2023-02-11; 修回日期: 2023-02-21。

作者简介: 杨萍(1977-), 女, 江苏南京人, 博士, 副研究员, 主要从事仿真评估技术方向的研究。

引用格式: 杨萍, 秦留洋, 韩惠婕. 航天装备在役考核评估方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(6): 299-304.

1 航天装备在役考核评估

航天装备指的是以卫星为核心的空间装备及以功能逻辑为依据构建的有机整体（如星座）。航天装备广泛应用于各种军民领域，为国防发展、国民经济等保驾护航。为实现航天装备的功能最大化发挥，对在轨服役的航天装备进行在役考核成为了航天装备使用应用和维护期间的重要工作，对航天装备的运行状态、任务支援能力等指标验证具有重要意义。

1.1 装备在役考核关键问题

航天装备在役考核是推进航天装备发展和应用的重要手段，为此需要深入研究在役考核的特点。航天装备在役考核具有“平战一体化、试战一体化、天地一体化、虚实一体化、全军一体化、军民一体化”等六大一体化特点，决定了其组织实施涉及范围广，难度大，需要加强组织管理和综合评估工作，确保在役考核能顺利、高效地实施。在役考核阶段的关键问题是装备是否能够有效形成和保持既定的作战使用能力，满足服役要求^[2]。

结合在役考核的阶段性特点，总结了装备在役考核的关注侧重点，为在役考核综合评估的指标体系建立提供了基础。图 1 为航天装备在役考核的关注侧重点。

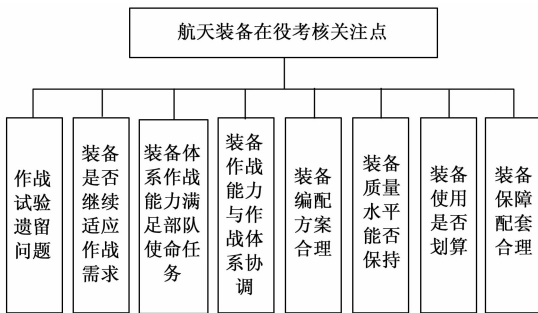


图 1 航天装备在役考核关注点

1.2 航天装备在役考核指标

在役考核的内容应能够反映影响装备战斗力发挥的关键问题或困扰装备建设的实际问题。结合在役考核的阶段性特点和功能定位，对于在役考核试验的综合评估主要关注部队适用性、质量稳定性、装备经济性、装备适配性、装备适编性和作战（保障）效能等 6 个方面^[3-7]。

根据系统性、层次性、可测性、一致性、简明性和独立性 6 项指标选取原则，选取多层次、多方面的指标，建立航天装备在役考核评估模型。对指标体系进行分析检验，确立评估模型。包括：

- 1) 特征属性分析：确定各指标的本质属性；
- 2) 满足原则分析：判断指标体系的可用度；
- 3) 信息来源分析：确定指标参数值的科学有效性；
- 4) 权重计算分析：确定指标对总目标的贡献度；
- 5) 标准化分析：实现指标间的可比性。

针对航天装备的实际应用情况，充分考虑不同的层级

特点，航天装备在役考核综合评估的指标体系对上述 6 个方面进行了优化和完善。本文对其定义为 4 个主要方面，分别为作战效能、体系适应性、作战适用性和在役适用性。

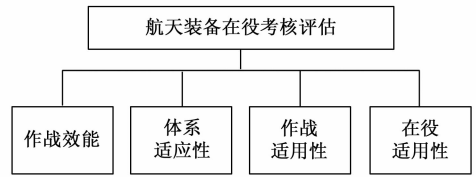


图 2 航天装备在役考核指标体系

1) 作战效能：是指航天装备在实际使用条件下完成作战（保障）任务时，发挥有效作用的程度。是装备体系的核心评价指标。反映了航天装备满足典型任务要求的可能程度；

2) 体系适应性：针对体系评估的特殊要求，设计体系适应性指标。是指在典型作战场景下，航天装备单装或系统完成体系作战使命任务时，起到的作用；

3) 作战适用性：是指航天装备在列装使用部队后，处于实际使用环境条件下，满足部队训练和作战使用要求的程度；

4) 在役适用性：是在役考核阶段的特殊指标，综合考虑装备系统的在役特性，对系统可用性、可靠性等指标进行评价，在装备实际服役阶段判断系统令人满意地投入外场使用并维持自身预定性能的程度。

在役适用性包含了装备经济性（最大化装备应用效能，同时最小化应用成本）、适配性（保证装备体系有机融合、力量倍增的重要因，是衡量各构成要素之间的匹配程度的重要指标和依据）和适编性（装备编配是否与部队现行编制契合，部队等装备使用机构设置、人员编配、职责分工与装备能否有机融合）等多重指标。

航天装备在役考核综合评估结果由各上述各指标综合计算得到。

2 传统评估方法的应用与局限

装备综合能力的评价评估方法，根据其参评因素的选择、指标权重的确定、数学计算方法的应用等维度的区别和不同，在当前阶段，主要包括层次分析法、模糊评判法、主成分分析法、灰色聚类法等^[8-10]。

2.1 层次分析法

层次分析法是一种多目标决策方法，是将主观判断客观化的多维决策分析方法^[11-13]。层次分析法建立一个描述系统功能或特征的内部独立的层次结构，通过两两比较因素的相对重要性，构造上层某要素对下层相关元素的权重判断矩阵。通过将决策问题的元素逐层逐级进行分解（自上而下），以指定的指标权重进行逐层逐级的综合（自下而上），以统一的标准的完成指标的综合评估和决策的方法。层次分析法具有实用性、系统性、简洁性等优点。

因判断矩阵不一致, 单一应用层次分析法会产生多次调整和检验过程, 涉及众多复杂计算, 存在一定的缺陷。

2.2 主成份分析法

在综合评估过程中, 影响评估结果的成分分量繁杂众多, 每个变量都在不同程度上反映了所研究问题的某些信息。然而各个分量的影响程度也不尽相同, 在兼顾评估效率和准确率的前提下, 通过对成分集“降维”的方法, 把多指标转化为少数综合指标的方法称为主成分分析法。

主成分分析法虽然可以降低变量的维度, 然而航天装备在役考核的综合评估难以对指标进行简单的析分简化, 定量定性评估因素复杂、参数繁琐。另外但是主成分分析法仅应用于静态情况下的参数计算和分析评估, 无法在动态情况下对航天装备的各项指标进行处理, 难以适应航天装备动态评估的需求^[14-15]。

2.3 模糊评判法

模糊评判法是对受多个因素影响的事物做出全面有效的一种综合评价方法。基于模糊数学理论中的模糊隶属度相关概念, 将复杂多元的评价过程量化^[16]。

模糊评判法在使用过程中要求分析者能准确地给出各指标的模糊隶属度函数, 而模糊隶属关系和量化函数的准确性与适应性在现阶段缺乏相应经验和专业人员的条件下难以保证, 实际应用相当困难和死板, 存在一定的缺陷。

2.4 灰色聚类法

灰色聚类法作为一种多因素统计分析方法, 通过分析系统指标的灰色关联度, 实现对指标的综合评判。灰色关联度是表征指标因素之间关系的重要度量, 通过判定多因素的大小顺序或强弱关系, 形成灰色关联系数, 反应各评价对象对参考对象的距离^[17-19], 从而判定指标因素的综合情况。

灰色聚类法通过创建并分析灰色关联矩阵, 将指标因素和评价对象聚集为若干可定义类别, 通过对已知信息的集成开发和挖掘, 实现对现实世界的认识。正确把握和描述系统运行行为和演化规律。

在实际应用中, 灰色聚类法也存在一定的不足。灰色评估模型的开发和应用, 需要大量的借助专家资源, 根据专家的个人经验对指标确定权重, 会产生明显的主观性偏差。

3 层次灰色评估法

由上述分析可知, 传统的单一评估方法难以直接应用于航天装备的在役考核综合评估的领域。本文通过综合层次分析法和灰色关联聚类法, 提出一种改良的层次灰色评估法。基于丰富的专家知识, 采用一种自主迭代权重向量生成方法, 实现权重的自适应生成和优化迭代。更为科学地对航天装备在役考核进行综合分析和评估。

层次灰色评估法首先对航天装备在役考核的核心指标参数因素进行分析, 然后通过层次分析法确定各因素的权

重集, 再根据灰色评估模型, 联合运用灰数和白化权函数数量化比较指标, 对航天装备在役考核进行总体评估。具体过程如图 3 所示。

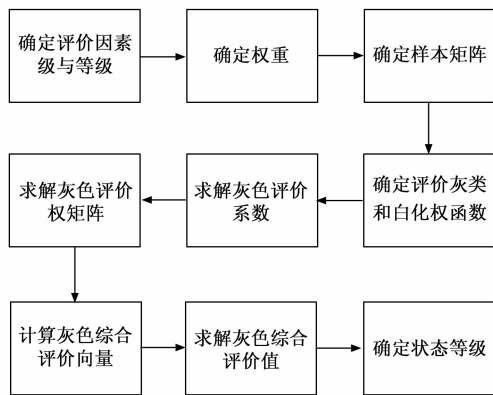


图 3 层次灰色评估法流程

1) 确定评价因素集与评级等级。各指标均是由底层指标综合而来, 指标的下级指标作为该指标的评价因素集被赋予权重。可表示为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$;

当评价指标是定性指标时, 需通过制定指标评分等级标准将其转化为定量指标。采用评价标度对指标进行相对性归一化计算。评价标度是各个因素的相对重要程度, 本文采用 9 级标度法, 可以得到更加精确的权重计算结果。表 1 为标度含义说明;

表 1 9 值标度法含义说明

标度	标度含义
1	表示矩阵横向指标和纵向指标, 具有同样重要性
3	表示矩阵横向指标比纵向指标稍微重要
5	表示矩阵横向指标比纵向指标明显重要
7	表示矩阵横向指标比纵向指标强烈重要
9	表示矩阵横向指标比纵向指标极端重要
2、4、6、8	上述两个相邻判断的中值

2) 确定中间层和指标层权重。利用层次分析法(AHP)确定权重集, 首先构造评价指标的判断矩阵, 并对判断矩阵进行一致性检验。以评价因素级 U 为行列, 构建相对权重矩阵 A 。规定矩阵元素 a_{ij} 为评价因素 u_i 相对于 u_j 的相对标度。不难发现, A 为 N 阶正互反方阵。即满足:

$$a_{ij} \cdot a_{ji} = 1, a_{ii} = 1, i, j = 1, \dots, N$$

然后确定评估指标结构体系中各个层次相对于上一层的权重集。运用 AHP 确定权重集可以减少依靠专家经验赋权重的主观性, 提高所确定权重集的客观准确性。

计算归一化权重值。根据相对权重矩阵计算下一层指标对于上一层指标的重要性权重 $AW = \lambda_{\max} W$ 。 λ_{\max} 是 A 的最大特征根, ω 为与其对应的特征向量。根据 A 的阶数进行一致性检验, 对通过检验的特征向量进行归一化处理, 得

到最终的归一化权重向量。

3) 组织专家组打分并确定样本矩阵。组织评价专家组按照评分标准, 依据航天装备在役考核的综合指标参数情况, 对作战效能、体系适应性、作战适用性和在役适用性等指标进行基于专业知识和功能、任务等综合因素的评估, 得到评估样本矩阵。假设第 k 个评估专家对指标 C_{ij} 给出的评分为 d_{ijk} , 得到该系统的评估样本矩阵 D :

$$D = \begin{bmatrix} d_{111} & d_{112} & \cdots & d_{11k} \\ d_{121} & d_{122} & \cdots & d_{12k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{ij1} & d_{ij2} & \cdots & d_{ijk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \vdots \\ C_{ij} \end{bmatrix}$$

4) 确定评价灰类和白化权函数。鉴于评价专家在认识水平上的差异, 评估样本矩阵仅仅反映一个指标灰数的白化值。需要确定评估灰类, 即确定其等级数、灰数及灰数的白化权函数。由于采用 9 值标度法, 含有 5 个主要的标度值, 因此分为 5 种评价灰类。

设第一种评估灰类 $e=1$, 灰数 $\otimes_1 \in [5, \infty)$, 白化权函数为:

$$f_1(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/5 & d_{ijk} \in [0, 5] \\ 1 & d_{ijk} \in [5, \infty) \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, \infty) \end{cases}$$

设第二种评估灰类 $e=2$, 灰数 $\otimes_2 \in [0, 4, 8]$, 白化权函数为:

$$f_2(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/4 & d_{ijk} \in [0, 4] \\ (8 - d_{ijk})/4 & d_{ijk} \in [4, 8] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, 8] \end{cases}$$

设第三种评估灰类 $e=3$, 灰数 $\otimes_3 \in [0, 3, 6]$, 白化权函数为:

$$f_3(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/3 & d_{ijk} \in [0, 3] \\ (6 - d_{ijk})/3 & d_{ijk} \in [3, 6] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, 3] \end{cases}$$

设第四种评估灰类 $e=4$, 灰数 $\otimes_4 \in [0, 2, 4]$, 白化权函数为:

$$f_4(d_{ijk}) = \begin{cases} d_{ijk}/2 & d_{ijk} \in [0, 2] \\ (4 - d_{ijk})/2 & d_{ijk} \in [2, 4] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, 4] \end{cases}$$

设第五种评估灰类 $e=5$, 灰数 $\otimes_5 \in [0, 2, 4]$, 白化权函数为:

$$f_5(d_{ijk}) = \begin{cases} 1 & d_{ijk} \in [0, 1] \\ 2 - d_{ijk} & d_{ijk} \in [1, 2] \\ 0 & d_{ijk} \notin [0, 2] \end{cases}$$

5) 求解灰色评价系数。对于评价指标 C_{ij} 属于第 e 个评价灰类的灰色评价系数记为 x_{ije} , 有:

$$x_{ije} = \sum_{k=1}^q f_e(d_{ijk})$$

式中, q 为打分专家人数; f_e 为灰类 e 的白化权函数。属于各个评价灰类的总灰色评价系数记为 X_{ij} , 则有:

$$X_{ij} = \sum_{e=1}^e x_{ije}$$

6) 求解灰色评价权向量及权矩阵。对于评价指标 C_{ij} 第 e 个评价灰类的灰色评价权为 $r_{ije} = x_{ije}/X_{ij}$, C_{ij} 对各灰类的灰色评价权向量为 r_{ij} 。综合权向量得到权矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{111} & r_{112} & \cdots & r_{11e} \\ r_{121} & r_{122} & \cdots & r_{12e} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & \cdots & r_{ije} \end{bmatrix}$$

7) 计算灰色综合评价向量。用综合权重评价集 A 与灰色评价权矩阵 R 进行运算, 求出灰色综合评价向量:

$$\sigma = A \cdot R = W \begin{bmatrix} A_1 R_2 \\ A_2 R_2 \\ \cdots \\ A_i R_i \end{bmatrix} = (\sigma_1, \cdots, \sigma_e)$$

8) 求解综合灰色评价价值。对灰色综合评价向量 σ 作进一步单值处理, 得到评估对象的综合灰色评价价值 V , 进而得到各评价灰类等级属性 U , 从而求出综合评价价值: $V = \sigma U^T$ 。

9) 根据评判标准评估航天装备在役考核综合指标。根据评价指标的评分等级和评价灰类的划分结果, 确定航天装备在役考核综合指标各等级的综合评价价值范围。

4 系统验证

为实现对层次灰色评估法在航天装备在役考核过程中应用的验证, 基于自主研发的航天装备在役考核综合考核评估系统, 采用基于该方法的综合评估功能, 分别对典型定量和定性指标进行评估。选取人机结合性指标作为定性指标评估装备的在役适应性, 选取质量稳定性指标作为定量自闭啊评估装备的作战效能。

4.1 指标参数处理

指标评估过程中, 需要对不同意义、不同量纲的指标进行去量纲化归一标准处理, 从而实现指标的综合。根据指标的意义和评估需求, 不同指标项归一化遵循不同的标准。评估中大量要素虽然可以定量描述, 但由于影响装备性能的各种要素的测试项目和量纲各不相同, 数值量级相差也很大, 所以综合前必须将各种定量要素进行统一量纲处理, 才能进一步比较综合。为了实现无量纲化处理, 首先要明确各性能要素要求量值 (即期望值), 然后通过正确、合理的无量纲化模型, 获得各要素无量纲化评估值。该无量纲化评估值反映了各项要素的实际量值满足需求的程度。

4.1.1 直线型模型

当参数值有一最大允许值, 且参数值越接近其最大允许值, 对装备质量影响越大时, 直线型模型可表示为:

$$f(x) = 1 - k \frac{x}{x_0}$$

x 为参数值, x_0 参数最大允许值。

4.1.2 折线型模型

参数有上下限要求且参数处于边限附近时质量状态较差采用折线型模型的无量纲化模型来分段处理:

$$f(x) = \begin{cases} 1 - k \frac{(2x - x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1)} & x \geq \frac{x_1 + x_2}{2} \\ 1 + k \frac{(2x - x_2 - x_1)}{(x_2 - x_1)} & x < \frac{x_1 + x_2}{2} \end{cases}$$

x 为参数值, x_1 、 x_2 为参数技术要求值。

4.1.3 升半柯西分布模型^[20]

参数有下限要求且实测值越小时质量状态越差, 此时可采用升半柯西分布模型:

$$f = (1 - k) + k \frac{(x - a)^2}{1 + (x - a)^2}$$

x 为参数值, a 参数技术要求值。

所有的多层指标体系均有其下层指标进行加权求和。表 2 给出典型案例中体系级、系统级和单装级的指标体系和计算模型。

4.2 定量指标评估计算

选取质量稳定性作为代表性定量指标, 装备质量稳定性通过核心参数的质量稳定性进行表征。应用层次分析法和解析法对多参数的质量评价结果进行综合评估计算。

对于特定参数 $\theta, \theta'_0, \theta_0, \theta_i$ 分别为各参数的稳定性要求值、出厂测试值和历次新测值。根据不同参数的特性分 4 类计算其比值 M 。

$$M(\theta) = \begin{cases} \frac{(\theta_i - \theta_0)}{\theta'_0} \\ \frac{(\theta_i \frac{K'_0}{K_0} - \theta_0)}{\theta'_0} \\ \frac{(\theta_i \frac{K'_0}{K_0} - \theta_0)}{\theta'_0} \\ \frac{(\theta_i - \theta_0)}{\theta'_0} + cM(\varphi_i) \end{cases}$$

K_0, K'_0, c 分别为已知常数, $M(\varphi_i)$ 为已得出的和该参数相关的参数比值 (选取的典型参数均相互独立的情况系, $M(\varphi_i)$ 退化为 0)。以厂家测试时间为 0, 其历次测试时间为累加的天数 t_i , 则有 $M(t_i) = kt_i$ 。采用最小二乘法拟合得到:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n t_i M(t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^2} \xrightarrow{\text{倒数表示参数 } \theta \text{ 的稳定期}} T(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2}{\sum_{i=1}^n t_i M(t_i)}$$

则其稳定性评估参数为:

$$E(\theta) =$$

$$\begin{cases} 1, & T(\theta) > T_{\max} \\ E_s + (1 - E_s) \frac{T(\theta) - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}, & T_{\min} \leq T(\theta) \leq T_{\max} \\ E_s, & T(\theta) \leq T_{\min} \end{cases}$$

其中: T_{\max} 和 T_{\min} 分别为稳定期的研制要求中的上下限, E_s 为稳定性的下限评估值。

按照航天装备参数数据体系进行单参数稳定性评估后, 采用层次分析法, 对各参数指标权重进行自适应生成和验证, 然后进行逐层分析计算。

4.3 定性指标计算

定性指标计算中, 需要应用层次灰色评估法对指标权重进行专家采集、归一化处理 and 校验。采用 9 值标度法和 5 级灰类进行评估处理, 对以人机结合性为代表的定性指标进行量化聚类 and 综合评估。

首先分解人机结合性指标为 7 个要素, 然后根据要素的相对重要性进行矩阵化处理和排列, 如表 2 所示。

表 2 相对权重信息采集表

因素	界面设计	可操作性	自动化	容错性	集成度	稳定性	可恢复性
界面设计	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17
可操作性	a21	a22	a23	a24	a25	a26	a27
自动化	a31	a32	a33	a34	a35	a36	a37
容错性	a41	a42	a43	a44	a45	a46	a47
集成度	a51	a52	a53	a54	a55	a56	a57
稳定性	a61	a62	a63	a64	a65	a66	a67
可恢复性	a71	a72	a73	a74	a75	a76	a77

由专家对指标相对重要性进行打分排序 (a11— a77), 获取判断矩阵:

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} a_{i1} \\ \vdots \\ a_{kj} \\ \vdots \\ a_{i7} \end{bmatrix}$$

为后续的综合加权计算提供依据。系统应用层次单排序法对权重进行自动计算, 并赋予给相应的指标。

层次单排序法即通过上述矩阵的特征转换与一致性校验, 获取自适应的归一化权重参数。具体方法如下:

根据上述判断矩阵计算下一层指标对于上一层指标的重要性权重, 计算判断矩阵的特征根和特征向量。计算判断矩阵 D 满足:

$$DW = \lambda_{\max} w$$

其中: λ_{\max} 是判断矩阵 D 的最大特征根, w 为与其对应的特征向量。

在完成计算之后, 进行一致性检查, 对权重向量矩阵的一致性按照下式进行检查:

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

$$RI = CI / RI$$

其中: n 为矩阵阶数, 根据矩阵阶数的差异, RI 取值如表 3 所示。

表 3 RI 取值表

n	3	4	5	6	7	8	9	1	2
RI	0.58	0.96	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	0	0

在完成权重的配置之后，定性指标的计算采用调查问卷方法。基于专家经验和数据，为航天装备的核心软件的人机结合性进行打分。表 4 说明了调查问卷的填报格式模板。

表 4 专家满意度调查表

因素	优	良	中	差
界面设计	1	0	0	0
可操作性	0	1	0	0
自动化	0	0	0	0
容错性	1	0	0	0
集成度		1	0	0
稳定性	0	1	0	0
可恢复性	1	0	0	0

对于单项定性指标，根据实验过程中航天装备的工作情况和效能表现，由领域专家按照上表四级模糊度评价的划分填写调查问卷。采用模糊层次分析法进行最终指标的计算。

在获取模糊隶属度函数（包括优良中差的正向和负向隶属度）之后，对于人机结合性综合指标，通过模糊处理，每个指标每一次的试验结果都可以转化为模糊向量：

$$F_{ji} = (f_{ij1}, f_{ij2}, f_{ij3}, f_{ij4})^T$$

$j=1\sim ji$ 表示指标 i 的试验数据样本集。定性指标向量 F_{ji} 只有一个元素不为 0，为 1。于是可对各指标的各次试验结果进行综合，形成评价向量：

$$P_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, p_{i4})^T, p_{ik} = \sum_{j_i} \frac{f_{ijk}}{j_i}$$

各个指标的评价向量合并在一起，构成高层指标的评价矩阵 P ，于是高层指标的聚合评价结果为 $E=WP$ 。

在完成综合分析评估之后，对数据结果进行回溯分析，对评估过程、评估模型、数据内容等进行复盘，发现问题、完善方案、更新装备，实现完整的闭环。

5 结束语

随着我国太空战略的逐步深入，航天装备体系的逐渐完善，对核心装备的在役考核阶段的分析评估也越来越重要。本文重点围绕航天装备在役考核评估的关键问题，结合航天装备的重点功能应用，创建多层次在役考核评估指标，为实现系统地评估装备的综合表现，摸清装备在部队服役期间的真实情况和底数，验证装备各类效能和适用性提供扎实的理论基础和指导。通过综合比对多种评估方法的优缺点，提出改良的灰色层次评估法，融合了灰度关联聚类法和层次分析法的优点，实现了航天装备在役考核的综合评估，辅助相关人员和单位发觉影响装备任务能力的制约因素或问题，特别是影响装备使用性能发挥的装备质量问题、编配问题和保障问题等在役考核关注的核心问题，以及装备使用效益的经济性问题等，支撑装备研制开发、

改进升级、使用维护等全寿命周期的决策。

参考文献：

- [1] 刘党辉. 卫星在役考核相关问题研究 [J]. 国防科技, 2017, 38 (6): 46-51.
- [2] 孟庆均, 郭齐胜, 曹玉坤, 等. 装备在役考核评估指标体系 [J]. 装甲兵工程学院学报, 2018, 32 (1): 18-24.
- [3] 张川泉. 军工产品定型部队试用工作的探讨 [J]. 军用标准化, 2015 (5): 5-7.
- [4] 王亮. 武器装备作战试验评估方法研究 [J]. 装备学院学报, 2016, 27 (2): 117-122.
- [5] 陈林霜, 曹涛, 黄兆东, 等. 新形势下航空装备经济性专业发展探索 [J]. 航空财会, 2022, 4 (3): 45-49.
- [6] 郭润兆, 段卓毅, 李小卫. 舰载机机舰适配性体系研究 [J]. 航空科学技术, 2014, 25 (3): 10-13.
- [7] 杨娟, 朱延雷, 何榕. 面向装备体系作战效能评估的 SEM 建模与评估方法 [J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38 (2): 33-36.
- [8] 谭跃进. 定量分析方法 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002.
- [9] 卜新旺, 张杨, 杨一凡. 基于综合模糊评价法的修复性维修备件确定优化研究 [J]. 价值工程, 2016, 35 (30): 125-128.
- [10] 唐琪林. 一种高稳定性卫星地面测试微波开关矩阵的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [11] 王冠球, 郑国杰, 冯辅周, 等. 基于模糊层次分析的装甲车辆 PHM 系统性能评估 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 239-244.
- [12] 陈希祥, 邱静, 刘冠军. 基于层次分析法与模糊综合评判的测试设备选择方法研究 [J]. 兵工学报, 2010, 31 (1): 68-73.
- [13] 程庆文, 汪波. 基于 AHP 和模糊理论的企业经营能力评价体系 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37 (1): 123-127.
- [14] 郝海燕, 王新军. 基于主成分分析和奇偶向量的动态检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 36-40.
- [15] 张琪, 吴亚锋, 徐建. 主成分分析与遗传神经网络在制冷系统故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (9): 23-27.
- [16] 刘皓玉. 间歇性风电并网能源调度综合模糊评价系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (3): 284-287.
- [17] 朱东济, 蔡红维, 欧阳霄, 等. 基于 AHP、灰色关联法和 TOPSIS 的航天测控装备评估模型研究 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 240-244.
- [18] 刘晓玲, 谢仙斌, 张家录, 等. 基于灰色综合关联分析的网络安全评估 [J]. 集成技术, 2014, 3 (4): 44-49.
- [19] 王昊, 李旷代, 沈海阔, 等. 基于改进灰色模型的模拟电路故障预测研究 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (10): 20-24.
- [20] 宋杰, 许冰, 杨森中. 基于自适应步长果蝇优化算法图像分割 [J]. 计算机工程与应用, 2020, 56 (4): 184-190.