

doi: 10.7690/bgzd.2025.07.014

基于层次属性模型的高炮武器系统性能评估方法研究

马金龙, 魏成亮, 曹国祥

(中国人民解放军 32201 部队, 吉林 白城 137000)

摘要: 为解决高炮武器系统性能的定量评估问题, 以层次属性模型(attribute hierarchical model, AHM)为基础构建高炮武器系统性能评估模型。基于该模型给出高炮武器系统性能的定量评估计算方法, 并在加权条件下对该评估方法进行优化, 提高了性能评估的准确性。结果表明: 该方法能够将性能评估问题具体量化, 且准确度更高, 为其他武器装备性能的定量评估提供了借鉴方法。

关键词: 层次属性模型; 武器系统; 性能评估; 指标体系

中图分类号: TJ35 **文献标志码:** A

Research on Performance Evaluation Method of Antiaircraft Gun Weapon System Based on Hierarchical Attribute Model

Ma Jinlong, Wei Chengliang, Cao Guoxiang

(No. 32201 Unit of PLA, Baicheng 137000, China)

Abstract: In order to solve the quantitative evaluation problem of the performance of antiaircraft gun weapon system, the performance evaluation model of antiaircraft gun weapon system is constructed based on the attribute hierarchical model (AHM). Based on the model, a quantitative evaluation method for the performance of antiaircraft gun weapon system is given, and the evaluation method is optimized under the weighted condition, which improves the accuracy of the performance evaluation. The results show that this method can quantify the performance evaluation problem concretely and has higher accuracy, which provides a reference method for the quantitative evaluation of other weapon equipment performance.

Keywords: hierarchical attribute model; weapon system; performance evaluation; index system

0 引言

高炮火控系统是高炮武器系统的核心装备, 集目标探测和火力控制等功能为一体, 根据其完成的功能^[1], 现代高炮武器系统被称为高炮武器系统的五官、大脑和中枢神经系统。高炮武器系统性能优劣很大程度直接影响着高炮武器作战效能的发挥^[2]。高炮配备火控系统的目的是提高瞄准和射击目标的快速性和准确性, 增强对恶劣战场环境的适应性, 以充分发挥武器对目标的毁伤能力。

基于层次属性模型研究高炮武器系统综合性能评估问题, 需要重点研究评估模型、指标标准化和评估算法。其中评估模型是综合性能评估的基础, 评估模型的建立需要根据具体的装备和评估目的确定; 指标标准化方法是将各个指标量化归一, 便于多个指标的融合计算; 评估算法是性能评估的核心, 将归一化的指标融合计算得到一个具体量化的综合性能值^[3]。为适应高炮武器系统的发展, 更好

地量化评估高炮武器系统的性能, 笔者基于层次属性模型, 分别研究了评估模型、指标标准化和评估算法问题, 针对高炮武器系统建立综合性能指标体系, 给出指标标准化方法, 并改进了综合评估算法, 最终结果表明该方法有效, 且该方法得到高炮武器系统的综合性能更加准确, 可信度更高, 对于靶场状态鉴定性能试验有一定的借鉴性^[4]。

1 层次属性模型

复杂系统的性能鉴定往往需要简化为多个分系统综合评价, 各个分系统再通过具体的指标来定量评估^[5]。复杂系统综合性能的鉴定方法很多, 但各种方法的解决问题角度不同, 适用对象也不同, 所以不同的鉴定方法各有优缺点^[6]。笔者针对几种常用的鉴定评估方法, 对其方法进行了描述, 分析了各种方法的优缺点, 并给出了各种方法的适用对象。方法对比具体情况如表 1 所示。

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-10-15

第一作者: 马金龙(1993—), 男, 陕西人, 硕士。

表 1 综合评估方法对比

方法名称	简介	优点	缺点
层次分析法(AHP)	针对多层次结构的系统,根据评估系统的目的将系统分解为不同的元素,形成一个多层次的分析结构模型,转化为确定最底层指标相对重要权值的问题	计算简单、可靠度高、误差较小	评价对象的指标因素不能太多
层次属性模型(AHM)	类似于 AHP,不同之处在于相对重要权值确定的方法不同		
网络分析法	针对多层次结构的系统,当各个阶层的指标元素存在相互关联影响的情况时,利用“超矩阵”对关联指标因素进行综合分析得出其混合权重	能够解决指标因素交叉耦合时的权重分配问题	计算量大,过程复杂,增大了复杂问题的评估难度
模糊评判法	系统中存在模糊指标时,引入隶属函数,加入到模糊综合评价矩阵中,表示指标相对于评价对象属性值的隶属度,并将约束条件量化表示,进行数学分析	能够解决指标模糊性和多层次体系的问题	计算量较大,且实现较为困难

由表 1 分析可知：模糊评判法主要针对指标模糊、难以构建指标模型的对象，网络分析法主要针对多系统的体系相互融合的性能评估，相比较而言 AHP 和 AHM 评估方法可靠性高、误差小，针对单一的系统评估其综合性能有着较高的置信度^[7]。对于 AHP 和 AHM 2 种评估方法，区别在于其指标权重值计算方法的不同，AHP 一般采用“1—9 标度”，而 AHM 在 AHP 指标权重计算的基础上进一步优化，因此置信度也更高，结果也更加准确。

基于 AHM 建立高炮武器系统的综合性能评估模型，分解为多个分系统，而各个分系统性能又可以分解为具体的测试指标，其综合性能指标体系较为简单；因此，笔者基于层次属性模型方法量化分析高炮武器系统的综合性能^[8]。

2 高炮武器系统指标体系的建立

笔者基于综合性能量化评估的目的建立系统的综合性能指标体系，最顶层为评估的目标(根节点)，最底层为能够直接获取或者计算的指标(叶节点)，各个分系统作为第二级指标，共同组成最终需要量化评估的综合性能，又可通过测试计算得到其具体的性能优劣程度。高炮武器系统的性能指标体现了高炮武器系统的设计能力、技术水平和使用适应性，其指标体系由组成高炮武器系统的各分系统、单体的性能指标和通用质量特性指标构成^[9]。

2.1 指标体系的构建

为便于分析，将高炮武器系统分为目标搜索跟踪分系统、武器计算分系统、通信定位分系统和通用质量特性，其中车辆底盘等不在本文中分析讨论，实际也可以根据试验鉴定需要增加或者减少分系统。高炮武器系统分系统综合性能评估体系如图 1 所示。

搜索跟踪分系统主要装置有各种搜索跟踪雷达

和白光微光电视远红外(热成像)等光学仪器等，其性能指标可分解为 2 大类，分别是搜索性能(搜索覆盖范围、搜索精度)和跟踪性能(跟踪覆盖范围、跟踪精度)^[10]。

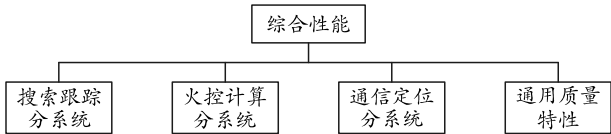


图 1 综合性能评估指标体系

武器计算分系统一般是一台数字式计算机和武器软件，其性能指标通常包括开机自检、故障诊断、模拟训练、射击诸元输出精度、射表切换、跳角补偿、目标速度假定等指标，为方便分析，将其性能指标分为功能类指标和技术类指标，功能类指标包括开机自检、故障诊断、模拟训练、射表切换、跳角补偿等，主要衡量基本功能是否可以实现，技术类指标包括射击诸元输出精度、火力反应时间等，主要衡量武器计算机性能优劣程度。

通信定位分系统由陀螺仪和其他传感器组成，主要功能是测量气温、气压、风速等气象参数，修正载体运动时的平移参数和转动参数，使武器系统的射击更加精准。

通用质量特性指标是衡量武器装备的重要参数，也应作为分系统指标评价高炮武器系统的综合性能。以高炮武器系统综合性能为根节点，其分系统作为第二级指标，各个分系统由底层测试指标构成；因此，可建立高炮武器系统评估指标体系。

为便于分析，笔者简化了各个分系统的底层指标构成，实际应用时可根据具体情况进行细化。笔者建立的 4 个分指标的层次结构如图 2—5 所示。

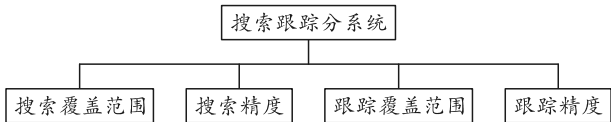


图 2 搜索跟踪分系统指标



图 3 武器计算分系统指标

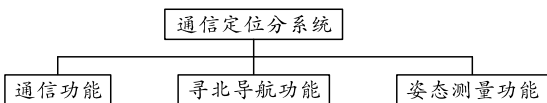


图 4 通信定位分系统指标



图 5 通用质量特性分系统指标

将高炮武器系统综合性能指标分为以上 4 个分指标，分别令 A 代表目标搜索跟踪分系统、 B 代表武器计算分系统、 C 代表通信定位分系统、 D 代表通用质量特性， α 表示权值， S 为定量评估分值，则：

$$S_{\text{系统}} = \alpha_A S_A + \alpha_B S_B + \alpha_C S_C + \alpha_D S_D。 \quad (1)$$

同理可得：

$$S_A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_{A_i} + \alpha_2 S_{A_2} + \cdots + \alpha_n S_{A_n}。 \quad (2)$$

式中 n 为分系统 A 有 n 个子指标，以此类推可得 S_B 、 S_C 和 S_D 的计算公式。

综合 4 个分指标得到高炮武器系统的综合性能，以分值的形式具体量化。通过两层的递进评估，既减少了运算复杂度，又不至于使某个评估分值的误差被放大，减小评估结果的误差。基于 AHM 分析计算各个指标的权值，给出具体的计算方法。

2.2 指标标准化方法研究

性能指标测试值由于其单位不统一、度量方式不同而无法直接进行综合指标的评估计算，需要通过一定的指标标准化方法将底层性能指标测试值转化为可以计算的评估分值^[1]。

指标标准化方法就是将底层测试指标通过一定的转化关系变为统一标准的分值，通常根据指标测试值得的优劣程度将其映射到 $[0, 100]$ 中。映射方法主要分为线性递增形式、线性递减形式、线性梯形形式 3 种。由于笔者的研究对象是武器系统，武器系统的优劣直接影响着武器系统的最终性能；因此，将某些不合格指标的影响放大，便于更好地评估武器系统的综合性能。笔者将底层测试指标映射到 $[60, 100]$ 中，令 $M=100$ 表示某指标超过合格值到某阶段时分值定为 100， $L=60$ 表示某指标达到合格值时分值定为 60，则可得到指标标准化的 3 种形式如图 6—8 所示。

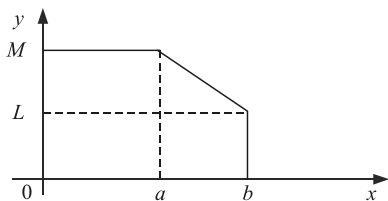


图 6 线性递减形式

$$y = \begin{cases} 100 & a \leq x \\ (M-L) \frac{b-x}{b-a} + L & a < x < b \\ 0 & x \geq b \end{cases}。 \quad (3)$$

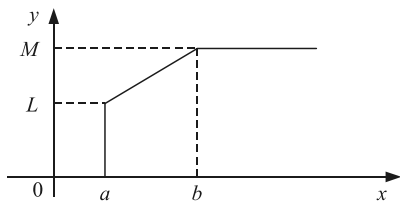


图 7 线性递增形式

$$y = \begin{cases} 0 & a \leq x \\ (M-L) \frac{x-a}{b-a} + L & a < x < b \\ 100 & x \geq b \end{cases}。 \quad (4)$$

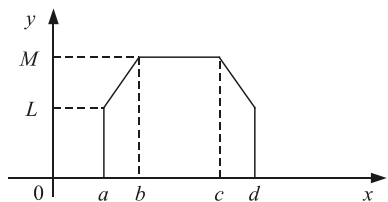


图 8 线性梯形形式

$$y = \begin{cases} 0 & x \leq a \text{ 或 } x \geq d \\ (M-L) \frac{b-x}{b-a} + L & a < x < b \\ 100 & b \leq x \leq c \\ (M-L) \frac{d-x}{b-c} + L & c < x < d \end{cases}。 \quad (5)$$

靶场试验鉴定过程中，若某项指标不达标，则表示该指标不被接受。对应分值映射中，若某一项指标分值小于 60 分，即表示该指标不被接受，为放大该指标对综合性能的影响，需要加入分值惩罚机制，即当分指标分值小于 60 分，则可认为该较差指标对系统性能影响较大，此时该分指标性能不合格，其分值归 0，这也是符合试验鉴定的目的，如表 2 所示。

表 2 惩罚分值对比

指标	A	B	C	D	综合评估
不惩罚分值	80	80	50	80	72.5
惩罚分值	80	80	0	80	60.0

表 2 中假设各指标权重相等， C 指标按 $[0, 100]$ 映射得到分值为 50 分，其余指标分值均为 80 分，得到综合评估分值(不惩罚)为 72.5，惩罚分值为 60。对比可知评估分值大幅降低，这也说明了本文中指标标准化公式评估分值设定为 $[60, 100]$ 对较差的指标起到了惩罚作用。在实际应用中也更加符合试验鉴定目的。

3 基于层次属性模型的指标权值计算方法

3.1 构建属性判断矩阵

建立综合性能评估体系之后，需要分析确定各个指标的权值。根据层次属性模型构建相应的属性判断矩阵。定义准则 C ：设 $u_1, u_2, \cdots, u_n$ 为 n 个球队，每 2 队进行一场比赛，每场比赛总分为 1 分， u_i 与 $u_j(i \neq j)$ 比赛 2 队得分分别为 u_{ij} 和 u_{ji} 。要求 u_{ij} 满足 $u_{ij} \geq 0, u_{ij}+u_{ji}=1, u_{ii}=0(i \neq j)$ 。基于准则 C 很难得到 AHM 的属性判断矩阵，实际中 AHM 的属性判断矩阵通常由 AHP 的两两判断矩阵转化而来。根据 AHP 评估方法构建两两比较判断矩阵，指标的重要度一般采用“1—9 标度”^[12]，具体取值及其含义如表 3 所示。

表 3 AHP 评估方法中 1—9 标度的含义

取值	含义
1	元素 A 和元素 B 同等重要
3	元素 A 比元素 B 轻微重要
5	元素 A 比元素 B 明显重要
7	元素 A 比元素 B 非常重要
9	元素 A 比元素 B 极度重要
2, 4, 6, 8	上述重要程度的中间值

根据上述的指标标度方法，由专家打分，得到的总体性能指标的两两判断矩阵如表 4 所示，其中： A 为目标搜索跟踪分系统、 B 为武器计算分系统、 C 为通信定位分系统、 D 为通用质量特性。

表 4 综合指标判断矩阵

G	A	B	C	D
A	1	1/3	2	1/2
B	3	1	6	3/2
C	1/2	1/6	1	1/4
D	2	2/3	4	1

得到 AHP 评估方法的两两判断矩阵后，可根据转换公式得到 AHM 评估方法的属性判断矩阵，转换公式为：

$$u_{ij} = \begin{cases} \beta k / (\beta k + 1) a_{ij} = k \\ 1 / (\beta k + 1) a_{ij} = 1 / k \\ 1 & a_{ij} = 1, i \neq j \\ 0 & a_{ij} = 1, i = j \end{cases} \quad (6)$$

当 $\beta \rightarrow \infty$ 时，相当于 2 队比赛，一队实力强得 1 分，另一队实力稍弱得 0 分。此时 AHM 评估方法的属性判断矩阵与 AHP 的两两判断矩阵相同。通常转换公式中取 $\beta=1$ 或者 $\beta=2$ 。笔者取 $\beta=1$ ，此时转换公式为：

$$u_{ij} = \begin{cases} k / (k + 1) a_{ij} = k \\ 1 / (k + 1) a_{ij} = 1 / k \\ 1 & a_{ij} = 1, i \neq j \\ 0 & a_{ij} = 1, i = j \end{cases} \quad (7)$$

根据转化公式可得 AHM 属性判断矩阵如表 5 所示。

表 5 AHM 属性判断矩阵

C	A	B	C	D
A	0	1/4	2/3	1/3
B	3/4	0	6/7	3/5
C	1/3	1/7	0	1/5
D	2/3	2/5	4/5	0

3.2 计算分系统指标权重值

AHM 判断矩阵的一致性条件较为宽泛，只需满足：当 $u_i > u_j, u_j > u_k$ 时，总能得到 $u_i > u_k$ 即可。依此检验笔者所构建的判断矩阵，满足一致性条件，可对系统的综合性能进行评估。

根据 AHM 属性判断矩阵可计算各指标的权值。设指标 u_i 的得分为 $g_i = \sum u_{ij}$ ，则：

$$\sum g_i = n(n-1)/2 \quad (8)$$

设 W_C 为各元素 u_i 在准则 C 下的相对属性权重，其计算公式为：

$$W_C = (W_{C1}, W_{C2}, W_{C3}, W_{C4}, W_{C5}) \left. \vphantom{\sum_{i=1}^5} \right\} W_{Ci} = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{j=1}^5 u_{ij}, i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (9)$$

且满足 $\sum W_{Ci} = 1$ 。根据式(4)可得 A 、 B 、 C 、 D ，如表 6 所示。依据此方法可得到各个分系统底层指标的权值分配结果，笔者直接给出结果，如表 7 所示。

表 6 综合性能指标权重值

指标	A (战术性能)	B (技术性能)	C (环境适应性)	D (可靠性)
权重	0.208	0.368	0.113	0.311

表 7 分系统指标权重值

指标	搜索跟踪分系统	武器计算分系统	通用质量特性
权重	搜索范围(0.167)	功能指标(0.153)	可靠性(0.222)
	搜索精度(0.333)	动射精度(0.362)	维修性(0.126)
	跟踪范围(0.167)	火力反应(0.225)	保障性(0.126)
	跟踪精度(0.333)	武器解算(0.260)	测试性(0.126)
			安全性(0.126)
			环境适应性(0.274)

4 算法应用

笔者建立的高炮武器系统三级指标体系权值已得到确定, 可以根据实际试验数据给出系统的综合性能量化值。由式(1)和(2)可得式(10):

$$S_{\text{系统}} = \alpha_A \left(\sum_{i=1}^n \alpha_1 S_{A1} + \alpha_2 S_{A2} + \cdots + \alpha_n S_{An} \right) + \\ \alpha_B \left(\sum_{i=1}^n \alpha_1 S_{B1} + \alpha_2 S_{B2} + \cdots + \alpha_n S_{Bn} \right) + \\ \alpha_C \left(\sum_{i=1}^n \alpha_1 S_{C1} + \alpha_2 S_{C2} + \cdots + \alpha_n S_{Cn} \right) + \\ \alpha_D \left(\sum_{i=1}^n \alpha_1 S_{D1} + \alpha_2 S_{D2} + \cdots + \alpha_n S_{Dn} \right)。 \quad (10)$$

根据指标标准化方法, 指标达到合格值时分值为 60, 超过合格时到某一程度时分值为 100, 下面

表 8 综合性能评估结果对比

底层指标	权重	数据 1	数据 2	分系统 1	分系统 2	权重	综合性能评价	
							数据 1	数据 2
搜索范围	0.167	66.4	66.1	A 76.67	A 75.91	0.208	69.92	66.78
搜索精度	0.333	78.2	80.3					
跟踪范围	0.167	76.3	72.6					
跟踪精度	0.333	80.5	78.1					
功能指标	0.153	60.0	60.0	B 70.64	B 65.87	0.368		
动射精度	0.362	76.6	62.1					
火力反应	0.225	70.3	71.6					
武器解算	0.26	68.9	69.6					
通信功能	0.222	60.0	60.0	C 70.35	C 71.59	0.113		
寻北导航	0.389	60.0	60.0					
姿态测量	0.389	86.6	89.8					
可靠性	0.222	80.0	60.0	D 64.4	D 60.0	0.311		
维修性	0.126	60.0	60.0					
保障性	0.126	60.0	60.0					
测试性	0.126	60.0	60.0					
安全性	0.126	60.0	60.0					
环境适应性	0.274	60.0	60.0					

5 结束语

笔者所提评估方法能够解决武器系统综合性能的量化评估问题, 并且可信度较高, 在试验鉴定领域或者比测试验中都可以进行应用。笔者在指标体系建立和标准化过程中都进行了简化, 实际中存在部分指标难以量化考核, 且分值对应关系是非线性的, 这也是今后继续优化该方法的一个方向, 建立更加完备的指标体系和分值对应关系。

参考文献:

- [1] 姚志军, 陈国军, 姚兴太, 等. 武器试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 22-31.
- [2] 李强, 欧阳攀. 基于外弹道的高炮武器算法与仿真[J]. 火力与指挥控制, 2014(39): 131-136.
- [3] 汤锦祖, 张欣光. 高超声速飞行器滑翔再入性能评

给出 2 组示例数据对比, 如表 8 所示。

对比数据 1 和 2 的评估结果可知, 在 2 个武器系统大部分指标分值接近时, 关键指标动态射击精度影响了最终的评估结果, 这与实际应用中的需求是相符合的, 说明笔者的评估方法有效。若同时出现了不合格指标, 假设数据 2 跟踪精度指标不合格, 则此规则下数据 2 的综合性能评价分值为 50.99, 其分值差距也会进一步被放大, 这也符合试验鉴定过程中的评价目的。这表明笔者的评估方法可以对武器系统在同一评价规则下给出定量的评估结果, 且评估结果是可信的。笔者在某型高炮武器系统试验中, 分别对 1 号和 2 号武器系统的数据进行了验证, 评估结果能反映出武器系统的差距, 也验证了该评估方法的有效性。

估[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(8): 120-123.

- [4] 姚兴太, 宋春燕, 杨宁国. 高炮武器射击精度试验技术研究[J]. 火力指挥与控制, 2017, 12(42): 8-13.
- [5] 史海龙, 王晶晶, 李文才. 基于误差投影的着发射击高炮毁歼概率计算方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(9): 8-13.
- [6] 陈凯, 房立清, 王宏凯. 现有高炮毁歼特点及改进方向[J]. 兵工自动化, 2012, 31(2): 17-19.
- [7] TURKUZAN M. Increasing air defense capability by optimizing burstdistance[D]. Ankara: Middle East Technical University, 2010.
- [8] 潘长鹏, 王中发, 王海涛. 基于 BP 神经网络的舰载机对陆打击作战效能评估[J]. 兵工自动化, 2022, 12(12): 9-12.