

doi: 10.7690/bgzd.2023.09.009

基于优化组合隶属函数的火箭炮作战效能评估

贾萌珊, 齐子元, 薛德庆, 李亚男, 张阳阳

(中国人民解放军陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

摘要: 针对单一隶属度函数会发生隶属度突变问题, 提出基于优化组合隶属函数的方法。利用各种隶属函数的评价信息, 对多种单一隶属函数的评价信息进行优化组合; 以某型火箭炮的作战效能评估需求作为研究背景, 建立效能底层指标体系, 并运用优化组合隶属函数方法进行定性分析和定量计算, 实现对火箭炮作战效能的模糊综合评判。结果表明: 该方法能够提高评价结果的准确性, 对部队开展实战化训练具有重要参考价值。

关键词: 隶属度突变; 火箭炮; 组合隶属函数; 优化组合

中图分类号: TJ393 **文献标志码:** A

Evaluation of Combat Effectiveness for Long-range Rocket Launcher Based on Combined Membership Function

Jia Mengshan, Qi Ziyuan, Xue Deqing, Li Ya'nan, Zhang Yangyang

(Shijiazhuang Campus, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the problem that the single membership function may have a sudden change in membership, a method based on the optimized combination of membership functions is proposed. By using the evaluation information of various membership functions, the evaluation information of various single membership functions is optimized and combined. Taking the operational effectiveness evaluation requirements of a certain type of rocket launcher as the research background, the underlying effectiveness index system is established, and the qualitative analysis and quantitative calculation are carried out by using the optimization and combination of membership functions, and the fuzzy comprehensive evaluation of the operational effectiveness of rocket launcher is realized. The results show that this method can improve the accuracy of the evaluation results, and has important reference value for the army to carry out actual combat training.

Keywords: membership degree mutation; rocket launcher; combination membership function; optimization combination

0 引言

远程火箭炮武器系统作为陆军装备的“杀手锏”武器, 作用显著, 对其进行作战效能评估, 为该火箭炮装备的研发、性能改进、列装且更好地服务部队提供科学依据支撑^[1-3]。当前对武器系统效能评估方法总体上有3种类型: 1) 基于统计决策的方法: 层次分析法、加权和法与加权积法、模糊综合评判法、证据推理法; 2) 基于数据挖掘的方法: 聚类分析法、关联规则法; 3) 基于机器学习的方法: 人工神经网络法、贝叶斯网络法、支持向量机法。火箭炮的作战效能评估是一个复杂的评估系统, 不仅要考虑武器装备, 而且要考虑人员、环境、作战应用等要素。其中一些指标无法通过数据直观体现, 需要专家的经验知识进一步评估、评判^[4-5]。针对火箭炮作战效能进行评估时, 需要将定性分析和定量计算相结合, 满足各个指标的评估需求, 仅靠数据

驱动的评估方法无法满足对无法用数据直接表示的指标的需求^[6]。笔者采用基于模糊综合评判的方法, 利用隶属度函数对测试数据进行效能评估, 无法用数据直接表达的指标则采用专家打分的方法, 既考虑了客观性, 又考虑了主观性。

传统的模糊综合评判采用一种隶属度函数进行评估, 需要隶属度函数尽可能符合评判因素及数据应用, 但因评判指标的差异和采集数据的异常会导致隶属度突变, 进而影响评判结果^[7]。结合上述情况, 笔者运用组合隶属函数的方法进行隶属度的计算, 减少因突变产生的弊端。

1 模糊综合评判相关理论

1.1 模糊综合评判模型

模糊综合评价的计算步骤:

1) 确定评价的因素集:

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}。$$

2) 确定评语集: $V=\{V_1, V_2, \dots, V_p\}$; 不论被评价的层次有多少, 评语集只有 1 个, 这里的 p 表示评语的等级个数, 一般情况下取 4~9, 常用的数值是 5。确定评价因素的权重向量 A 。

3) 建立评价因素的模糊关系矩阵 $R \circ B = A \circ R$ 。其中“ \circ ”表示模糊综合算子。由于笔者在对火箭炮作战效能进行评估研究时, 并没有对其指标中的任一指标存在偏好, 运用加权平均型的模糊综合算子($\circ+$), 该种模型依据指标权重的大小充分考虑了所有指标的信息。

4) 对评价结果进行研究。常用的方法有最大隶属度原则、模糊向量单值化等^[8]。

1.2 隶属度

隶属度是连接评判影响因素和等级的桥梁, 实现隶属度需要隶属函数; 因此, 隶属函数作为显著、准确的构建隶属函数直接对模糊评判结果产生影响^[9]。通常情况采用模糊统计法、专家给定法和模糊分布法^[10]。

由于火箭炮的底层参数指标不符合连续分布, 因此模糊统计法不适用于对火箭炮作战效能评估。

2 组合隶属函数的构建

隶属度函数由偏小型、偏大型和中间型构成。从分布情况来看, 隶属度函数有矩形分布、三角形分布、抛物线型分布、正态分布和柯西分布等。在火箭炮效能评估的过程中, 选择不同的隶属度函数会导致评价结果出现差异^[11-12]。

鉴于单一隶属函数可能产生函数突变情况, 采用组合隶属度函数能够对不同评判因素的信息优化组合, 从而使评判结果更加客观、准确^[13-14]。

组合隶属函数的构造步骤:

1) 参考评判的综合影响因素, 对隶属函数进行选择。

2) 计算不同函数隶属度的均值:

$$\bar{r} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_j \quad (1)$$

式中: r_i 为第 i 个隶属函数求解得到的隶属度值; m 为隶属度函数的种类。

3) 通过方差-协方差的方法构建组合隶属函数^[15]。

设 r_1, r_2 为无偏隶属度(相同指标下不同函数的相同安全级别情况下), r_c 为加权平均的组合隶属度值, 偏离 \bar{r} 的误差分别为 e_1, e_2 和 e_c , w_1 和 w_2 分别

为相应的权系数, 且 $w_1+w_2=1$, 则有 $r_c=w_1r_1+w_2r_2$; 若 r_c 也是无偏的, 则有 $e_c=e_1+e_2$, 从而 e_c 的方差为: $\text{Var}(e_c) = w_1^2 \text{Var}(e_1) + w_2^2 \text{Var}(e_2) + 2w_1w_2 \text{cov}(e_1, e_2)$ 。(2)

w_1 对 $\text{Var}(e_c)$ 求极小值可得:

$$w_1 = \frac{\text{Var}(e_2) - \text{cov}(e_1, e_2)}{\text{Var}(e_1) + \text{Var}(e_2) - 2\text{cov}(e_1, e_2)} \quad (3)$$

又有 $w_2=1-w_1$, 令方差 $\text{Var}(e_1)=\sigma_{11}$, $\text{Var}(e_2)=\sigma_{22}$, 协方差 $\text{cov}(e_1, e_2)=\sigma_{12}$, 由于 e_1, e_2 相互独立, 则协方差 $\text{cov}(e_1, e_2)=\sigma_{12}=0$, 则有:

$$w_1 = \sigma_{22}/(\sigma_{11} + \sigma_{22}), w_2 = \sigma_{11}/(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (4)$$

4) 拓展到一般情况, m 个隶属函数对应的隶属度值为 r_1, r_2, \dots, r_m , 与 \bar{r} 误差方差记为 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \dots, \sigma_{mm}$, 误差之间彼此不相关。在 $\sum w_i=1$ 的条件下, 求 $\text{Var}(e_c)$ 的极小值, 此为条件极值的问题, 通过 Lagrange 乘子来计算 $\text{Var}(e_c)$ 极小值, 从而得到相对应的权重:

$$w_i = 1/\sigma_{ii}(1/\sigma_{11} + 1/\sigma_{22} + \dots + 1/\sigma_{mm}) \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, \dots, m$ 。结果表明, σ_{ii} 越小, 所得的权重就越大。很明显如果 r_1, r_2, \dots, r_m 都为 0, 则 w_i 相同。

因此, 新的组合隶属函数为:

$$r_c = w_1r_1 + w_2r_2 + \dots + w_mr_m$$

3 火箭炮效能评估模型

3.1 火箭炮指标体系及权重

3.1.1 基于网络层次分析法的指标权重确立

以某型火箭炮为例, 其作战效能作为 ANP 的控制层。在火箭炮运行中, 各指标之间存在相互影响的关系, 作为网络层。结合专家的参考意见, 确立被评价对象指标间的关系, 进而得到关于火箭炮作战效能的 ANP 结构如图 1 所示。

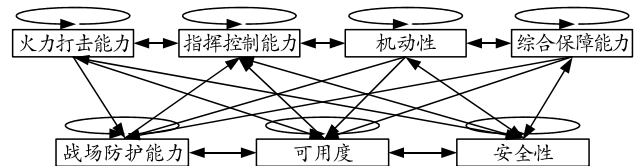


图 1 某型火箭炮作战效能指标 ANP 结构

借助指标间的 ANP 结构图, 通过 1-9 标度法把指标两两比较打分, 运用 Super Decision 软件得到指标权重。

3.1.2 熵权法确定指标权重

熵主要用来表示系统的无序程度, 能够代表各指标在实际问题中提供信息量的多少, 是一种将评

价指标所含信息进行量化与综合的赋权方法。在火箭炮作战效能评估过程中，利用熵权法对多位专家对各指标的评分结果进行综合量化得到客观的赋权结果，有效降低火箭炮作战效能评估过程中主观因素对评估结果的影响。

为避免单一赋权方法无法兼顾主观经验与客观信息的问题，火箭炮作战效能指标主要通过博弈论对网络层次分析法和熵权法组合赋权进行研究。通过相互比较协调的集成过程获得考虑实际情况的客观权重，使组合权重更接近火箭炮作战效能评估实际情况^[16-17]。以某型火箭炮指挥控制能力指标为例，基于博弈论的网络层次分析法和熵权法的组合赋权重如图 2 所示。

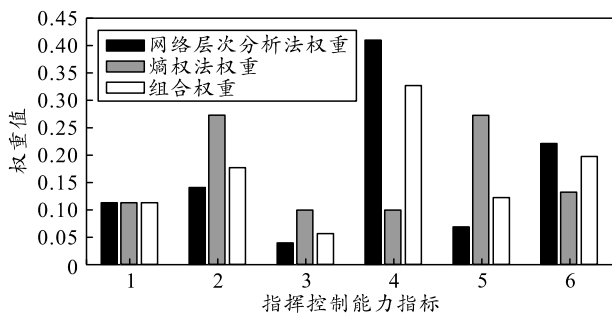


图 2 指挥控制能力指标组合赋权重

某型火箭炮作战效能指标组合权重如图 3 所示，熵权法、网络层次分析法权重如表 1 所示。

3.2 某型火箭炮底层指标边界值及测试值

火箭炮底层指标边界值和评判方法是自底向上层层计算，即上层隶属函数等于下一层计算值；因此，明确了最底层每个指标的权重及边界范围就可以进行计算。边界值参考国军标的远程火箭炮武器系统、美军的 M-270 自行火箭炮和 M-1142 型自行火箭炮及俄罗斯军队的 BM-30 自行火箭炮等，火箭炮作战效能底层指标的边界值及测试值如表 2 所示。

4 基于组合隶属函数的模糊综合评价

评价目标不同，评价的准则也各不相同。准则按照所进行的评判目标和指标属性来制定。一般情况下，效能评价准则分为 4 级：①好：0.8~1；②较好：0.6~0.8；③一般：0.4~0.6；④较差：0~0.4。确立权重和指标间的隶属度后，根据实际需求，运用加权求和算子： (\oplus, \cdot) 。通过中间型的隶属函数求隶属度。梯形、钟形和双 S 形三者有着相同的结构类型，原理上属于模糊数学的范畴。半梯形和三角形隶属度函数结构简单，对数据要求低，可以和其他函数组合起来求解隶属度。构建半梯形/梯形/

三角形隶属度函数如图 4 所示、半梯形/钟形/三角形隶属度函数如图 5 所示、半梯形/双 S 形/半三角形隶属度函数如图 6 所示。以后喷射物抛洒范围指标为例，其改进隶属度如图 7 所示。

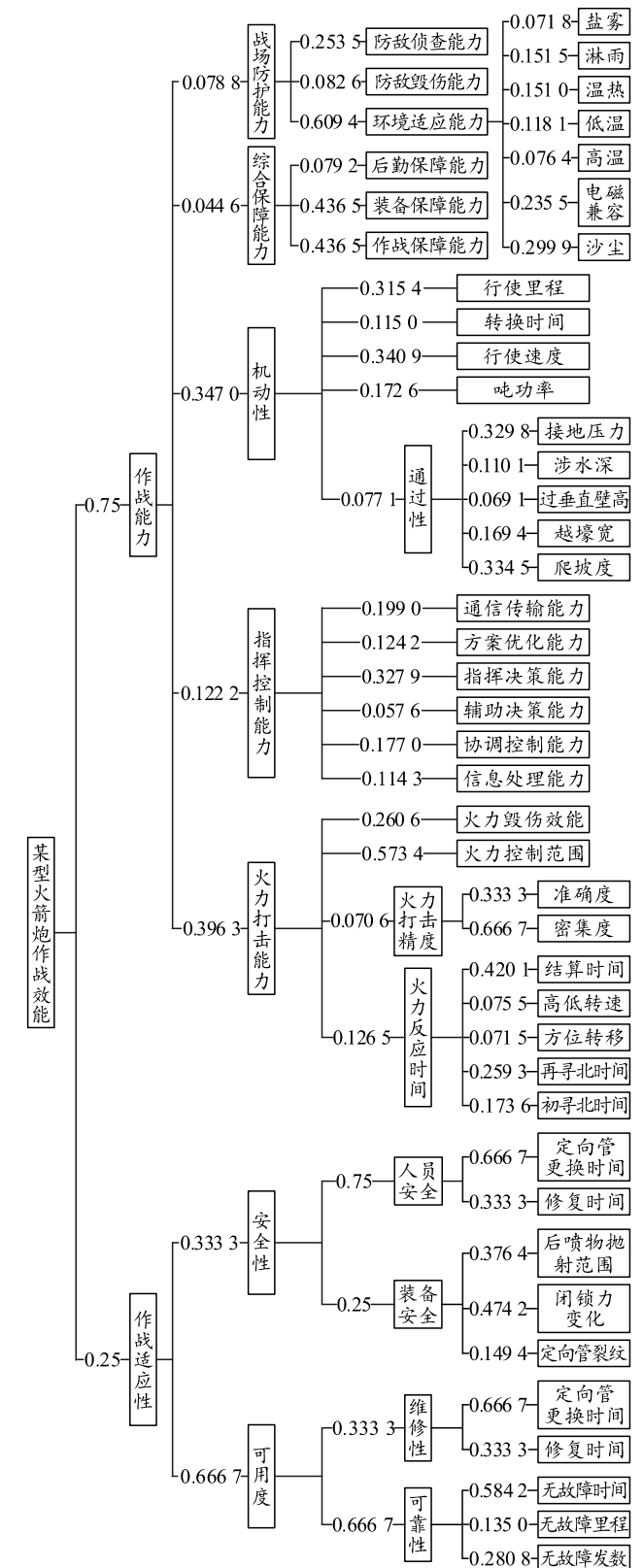


图 3 某型火箭炮作战效能指标权重

表 1 某型火箭炮作战效能指标权重

一级	权重	二级	ANP	熵权法	组合	三级	ANP	熵权法	组合	四级	ANP	熵权法	组合		
火箭炮作战效能评估	0.25	作战适应度	0.666 70	0.666 7	0.666 7	可靠性	0.666 70	0.666 7	0.666 7	无故障发数	0.280 83	0.361 20	0.280 80		
						无故障里程	0.135 01	0.321 80	0.135 00						
						无故障时间	0.584 16	0.317 00	0.584 20						
						修复时间	0.333 33	0.333 33	0.333 33						
						定向管更换时间	0.666 67	0.666 67	0.666 67						
		安全性	0.333 30	0.333 3	0.333 3	人员安全	0.750 00	0.750 0	0.750 0	噪声	0.333 33	0.333 33	0.333 33		
						冲击波	0.666 67	0.666 67	0.666 67						
						定向管裂纹	0.149 37	0.297 80	0.149 40						
						闭锁力变化	0.474 23	0.418 50	0.474 20						
						装备安全	0.250 00	0.250 0	0.250 0						
作战能力	0.75	火力打击能力	0.393 70	0.193 7	0.396 3	火力反应时间	0.125 88	0.287 4	0.126 5	初寻北时间	0.173 59	0.144 10	0.173 60		
						火力控制范围	0.573 63	0.247 6	0.573 4	再寻北时间	0.259 33	0.202 50	0.259 30		
						火力毁伤效能	0.230 46	0.217 3	0.260 6	方位转移	0.071 51	0.137 30	0.071 50		
						火力打击精度	0.070 03	0.247 6	0.070 6	高低转速	0.075 51	0.144 10	0.075 50		
						结算时间	0.420 06	0.372 00	0.420 10	洒水范围	0.376 40	0.283 70	0.376 40		
		指挥控制能力	0.125 40	0.178 4	0.122 2	信息处理能力	0.113 95	0.115 3	0.114 3	后喷射物抛洒范围	0.376 40	0.283 70	0.376 40		
						协调控制能力	0.141 78	0.274 2	0.177 0	初寻北时间	0.173 59	0.144 10	0.173 60		
						辅助决策能力	0.041 78	0.101 2	0.057 6	再寻北时间	0.259 33	0.202 50	0.259 30		
						指挥决策能力	0.410 16	0.101 2	0.327 9	方位转移	0.071 51	0.137 30	0.071 50		
						方案优化能力	0.069 73	0.274 2	0.124 2	高低转速	0.075 51	0.144 10	0.075 50		
机动性	0.346 62	0.224 8	0.347 0	通信传输能力	0.222 61	0.133 9	0.199 0	结算时间	0.420 06	0.372 00	0.420 10				
				吨功率	0.168 69	0.176 4	0.172 6	洒水范围	0.376 40	0.283 70	0.376 40				
				行驶速度	0.347 17	0.180 9	0.340 9	初寻北时间	0.173 59	0.144 10	0.173 60				
				转换时间	0.103 20	0.228 0	0.115 0	再寻北时间	0.259 33	0.202 50	0.259 30				
				行驶里程	0.315 40	0.217 9	0.313 9	方位转移	0.071 51	0.137 30	0.071 50				
				通过性	0.065 55	0.196 4	0.077 1	爬坡速度	0.168 69	0.176 4	0.172 6	高低转速	0.075 51	0.144 10	0.075 50
								越壕宽	0.166 39	0.182 70	0.169 40	洒水范围	0.376 40	0.283 70	0.376 40
								过垂直壁高	0.062 26	0.180 00	0.069 10	初寻北时间	0.173 59	0.144 10	0.173 60
								涉水深	0.101 81	0.238 10	0.110 10	再寻北时间	0.259 33	0.202 50	0.259 30
								接地压力	0.332 63	0.194 00	0.329 80	方位转移	0.071 51	0.137 30	0.071 50
综合保障能力	0.049 40	0.178 4	0.044 6	作战保障能力	0.425 87	0.362 8	0.436 5	洒水范围	0.376 40	0.283 70	0.376 40				
				装备保障能力	0.428 57	0.362 8	0.436 5	初寻北时间	0.173 59	0.144 10	0.173 60				
				后勤保障能力	0.142 86	0.274 3	0.079 2	再寻北时间	0.259 33	0.202 50	0.259 30				
				防敌侦察能力	0.280 83	0.324 5	0.253 5	方位转移	0.071 51	0.137 30	0.071 50				
				防敌毁伤能力	0.135 01	0.298 9	0.082 6	高低转速	0.075 51	0.144 10	0.075 50				
战场防护能力	0.084 64	0.224 8	0.078 8	环境适应能力	0.584 10	0.376 6	0.609 4	洒水范围	0.376 40	0.283 70	0.376 40				
				高温	0.064 61	0.123 00	0.076 40	初寻北时间	0.173 59	0.144 10	0.173 60				
				低温	0.114 28	0.109 60	0.118 10	再寻北时间	0.259 33	0.202 50	0.259 30				
				温热	0.152 12	0.107 90	0.151 00	方位转移	0.071 51	0.137 30	0.071 50				
				淋雨	0.146 17	0.142 80	0.151 50	高低转速	0.075 51	0.144 10	0.075 50				

表 2 某型火箭炮作战效能底层指标的边界值及测试值

指标	边界值		测试值	指标	边界值		测试值
	X_1	X_2			X_1	X_2	
射击密集度/m	0.5	1	0.63	越壕宽/m	1.0	3.8	2.3
射击准确度/m	0.5	2	1.20	过垂直壁高/m	0.5	1.0	0.9
初寻北时间/min	3.0	5	4.00	平均接力压力/kPa	160.0	250.0	130.0
再寻北时间/s	20.0	30	20.00	涉水深/m	1.0	2.0	1.2
方位转速/((°)/s)	10.0	20	12.00	无故障发数/发	100.0	200.0	140.0
高低转速/((°)/s)	8.0	15	8.00	无故障里程/km	100.0	300.0	200.0
解算时间/s	1.5	3	2.00	无故障时间/h	20.0	80.0	36.0
最大射程/km	200.0	600	480.00	修复时间/min	20.0	60.0	45.0
发射速度/(发/min)	6.0	16	12.00	定向管更换时间/h	0.5	2.0	0.8
吨功率/(kW/t)	25.0	50	28.00	噪声/dB	40.0	150.0	96.0
行驶速度/(km/h)	60.0	120	80.00	冲击波/kPa	1.0	12.0	8.3
战斗转换时间/min	0.3	3	1.50	定向管裂纹/mm	4.0	20.0	4.3
行驶里程/km	300.0	650	500.00	闭锁力变化量/N	100.0	400.0	135.0
最大爬坡度/((°)/s)	20.0	60	60.00	后喷射物洒范围/m	2.0	10.0	6.4

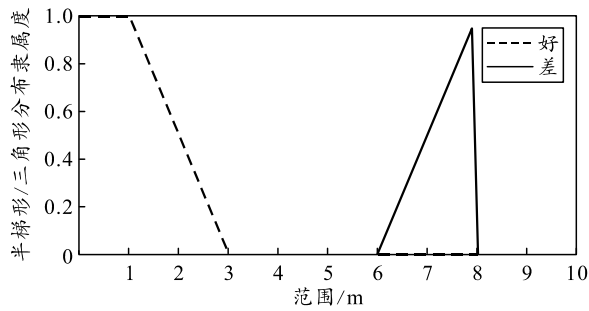


图 4 半梯形/三角形隶属度函数

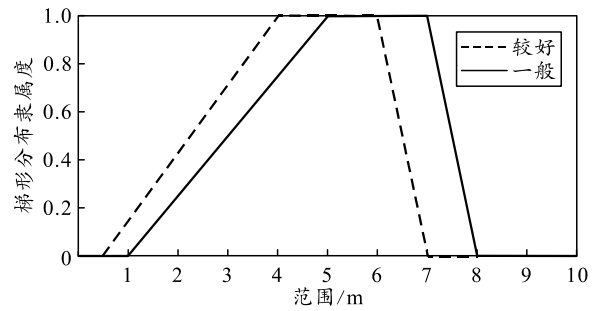


图 5 梯形隶属度函数

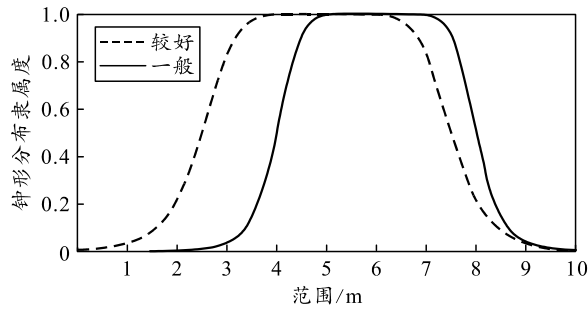


图 6 钟形隶属度函数

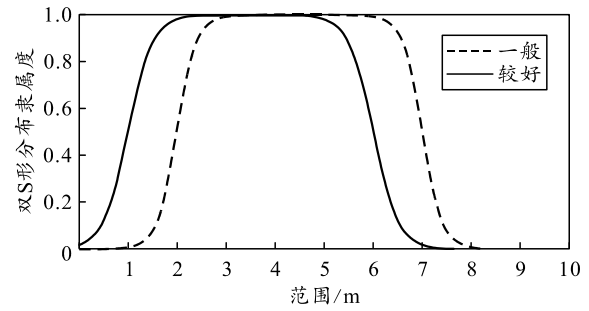


图 7 双 S 形隶属度函数

结果表明，改进的隶属度函数能简化隶属度函数对数据的要求，提高评估的可靠性。

由于个别指标参数不能进行实际测试所得，但

可以结合专家评价打分的原则得出。某型火箭炮隶属度关系如表 3 所示，通过专家打分的隶属度如表 4 所示。

表 3 某型火箭炮隶属度关系

评语集隶属度	半梯形/梯形/三角形				半梯形/钟函数/三角形				半梯形/双 S 形隶属函数/三角形				组合隶属度函数			
	较差	一般	较好	好	较差	一般	较好	好	较差	一般	较好	好	较差	一般	较好	好
射击密集度	0	0.2	1.0	0.8	0	0.2	1.0	0.8	0	0	0	0.8	0	0.2	0.8	0.8
射击准确度	0	0.6	1.0	0.4	0	0.6	1.0	0.4	0	0	0.3	0.4	0	0.5	0.9	0.4
杀伤面积	0	0.3	1.0	0	0	0.3	1.0	0	0	0.5	1.0	0	0	0.3	0	0
最大射程	0	0	1.0	0.8	0	0	1.0	0.8	0	0	1.0	0.8	0	0	1.0	0.8
发射速度	0	0.5	1.0	0	0	0.5	1.0	0	0	0	1.0	0	0	0.4	1.0	0
吨功率	0.5	1.0	0.5	0	0.5	1.0	0.9	0	0.50	1.0	0	0	0.5	1.0	0.5	0
行驶速度	0	0.7	1.0	0.3	0	1.0	1.0	0.3	0	1.0	1.0	0.3	0	0.9	1.0	0.3
战斗转换时间	0	0	1.0	0	0	0.1	1.0	0	0	0	0.3	0	0	0	0.9	0
行驶里程	0	0	1.0	0	0	1.0	1.0	0	0	0.6	1.0	0	0	0.5	1.0	0
最大爬坡度	0	0	0.0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0
越壕宽	0	0.7	1.0	0.3	0	0.1	0.8	0.3	0	0.3	0.7	0.3	0	0.3	0.8	0.3
过垂直壁高	0	0	0	0	0	0.6	0.7	0	0	0	0	0	0	0.1	0.1	0
平均接力压力	0	0	0	0	0	1.0	1.0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0
涉水深	0	1.0	1.0	0	0	1.0	0.9	0	0	0.1	0.1	0	0	0.8	0.8	0
无故障发数	0	0.4	1.0	0.6	0	1.0	1.0	0.6	0	1.0	1.0	0.6	0	0.9	1.0	0
无故障里程	0	0	1.0	0	0	0.5	1.0	0	0	0.5	1.0	0	0	0.4	1.0	0
无故障时间	0	0.9	1.0	0.1	0	1.0	1.0	0.1	0	1.0	1.0	0.1	0	0.9	1.0	0.1
初寻北时间	0	0	1.0	0	0	0	1.0	0	0	0.4	0.7	0	0	0.9	0.1	0
再寻北时间	1	1.0	0	0	1	1.0	0	0	1.00	0.5	0	0	0	0	0.9	1.0
方位转速	0.2	1.0	1.0	0	0.1	1.0	1.0	0	0.20	1.0	0	0	0	0.8	1.0	0.2
高低转速	1	1.0	1.0	0	1.0	1.0	1.0	0	1.00	0.5	0	0	0	0.8	0.9	1.0
解算时间	0	1.0	0.9	0	0	1.0	1.0	0	0	0.4	0.4	0	0	0.8	0.9	0
修复时间	0	0	0.5	0	0	0	1.0	0	0	0	1.0	0	0	0.9	0	0
定向管更换时间	0.3	1.0	0.7	0	0.3	0.5	0.5	0	0.25	0.2	0.4	0	0	0.5	0.5	0.3
噪声	0	0.1	1.0	0.9	0	0	1.0	0.9	0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	0.2	0
冲击波	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	0	0	0.2	0.1	0
定向管裂纹	0.9	0.9	0.1	0	0.9	0	0	0	0.90	0.3	0	0	0	0	0.3	0.9
闭锁力变化量	0.6	1.0	0.4	0	0.6	0	0	0	0.60	1.0	0	0	0	0.1	0.8	0.6
后喷物抛洒范围	0	0	0.8	0	0	0	1.0	0	0	0.2	0.8	0	0	0.8	0.1	0.6

表 4 某型火箭炮专家打分隶属度矩阵

评语集隶属度	较差	一般	较好	好	评语集隶属度	较差	一般	较好	好
高温	0	0.3	0.8	0.8	协调控制能力	0.2	0.2	0.3	0.5
低温	0	0.2	0.7	0.7	辅助决策能力	0.1	0.2	0.5	0.4
湿热	0	0	0.7	0.8	指挥决策能力	0.3	0.2	0.7	0.6
淋雨	0	0.3	0.6	0.8	方案优化能力	0.2	0.1	0.6	0.3
盐雾	0	0.3	0.6	0.9	通信传输能力	0.1	0.1	0.4	0.6
沙尘	0	0.2	0.5	0.5	作战保障能力	0.1	0	0.8	0.5
电磁兼容	0	0.1	0.6	0.8	装备保障能力	0.3	0.4	0.6	0.4
火力控制范围	0.1	0.4	0.7	0.8	后勤保障能力	0.2	0.4	0.7	0.4
火力毁伤效能	0.1	0.3	0.6	0.6	防敌侦察能力	0.1	0.3	0.6	0.5
信息处理能力	0.1	0.2	0.4	0.3	防敌毁伤能力	0.1	0.2	0.5	0.5

结合隶属度矩阵，通过多级模糊综合评判法，自底向上进行计算，求得结果向量：(0.041 6, 0.222 2 0.616 5, 0.650 0)，按照最大隶属度评价规则，火箭炮的效能评价为：好。

5 结论

笔者以某型火箭炮作战效能为研究对象，构建火箭炮的评价指标体系和评价模型，利用综合模糊评判的方法将专家打分的主观性和监测数值的客观性相结合进行计算，客观全面地对火箭炮作战效能进行评价。针对单一隶属度函数会产生隶属度突变的问题，采用组合隶属度函数的方法，有效避免了隶属度突变问题，通过对隶属度函数的改进，提高了评估结果的可靠性。通过实例验证得出评价结果，符合预期，说明该评价方法相较于传统方法，对于火箭炮作战效能评价有一定的借鉴意义。

参考文献：

[1] 李思雨, 黄少罗, 孟硕, 等. 远火射击指挥车半实物仿真训练模拟器设计与实现[J]. 火炮发射与控制报, 2020, 41(3): 68-72.
 [2] 王越, 赵凯, 刘学超, 等. 多防空武器平台一体化协同

作战样式与关键技术探[J/OL]. 火炮发射与控制学报: 1-5[2022-03-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1280.TJ.20211129.1223.002.html>.
 [3] 姚天乐, 陶凤和, 齐子元. 基于 AHP 与多属性效用的自行火炮作战效能评估[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(2): 44-48.
 [4] 邓辉咏, 王炎, 王涛, 等. 基于 Vague 理论和模糊综合评判的火箭炮效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(10): 130-133.
 [5] 毛保全, 梁博巍, 宋鹏. 多算法组合的反坦克导弹作战效能评估方法研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2015, 36(04): 29-33.
 [6] 郑潇. 体系效能仿真分析优化方法与工具研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
 [7] 杨家豪, 欧阳森, 石怡理, 等. 一种组合隶属度函数及其在电能质量模糊评价中的应用[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(2): 63-69.
 [8] 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 121-172.
 [9] 吕金建, 贾长治, 杨建春. 基于模糊综合评判法的装备备件应急制造性评价[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(1): 82-86, 91.
 [10] 袁永真, 裴发根, 张鹏辉, 等. 利用模糊统计法进行天然气水合物靶区预测——以青海木里地区为例[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1281-1286.
 [11] 汪同三, 张涛. 组合预测: 理论、方法及其应用[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2008: 179-183.
 [12] 康重庆, 夏清, 刘梅. 电力系统负荷预测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 124-153.
 [13] 加小红, 雷涛, 伍忠东, 等. 基于组合隶属度的快速模糊聚类算法[J]. 兰州交通大学学报, 2017, 36(1): 62-69.
 [14] 郭煜涛, 谢丽蓉, 包洪印, 等. 基于多参数融合和组合赋权的风电机组健康状态评估[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 39(1): 119-128.
 [15] 张云超, 黄铭, 姚亮. 基于检测资料的闸门安全状态模糊综合评判[J]. 水力发电, 2019, 45(3): 85-89.
 [16] 夏成龙, 卢天鸣, 洪梅. 基于 ANP-FUZZY 法的通用装备指挥车作战效能评估研究[J]. 中国设备工程, 2020(18): 118-120.
 [17] 张列航. 基于组合赋权的空战威胁评估方法研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(2): 17-21.