

doi: 10.7690/bgzdh.2022.06.016

一种灰色关联和集对分析相结合的装备作战效能评估新方法

陈家辉¹, 柯宏发²

(1. 航天工程大学研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学航天保障系, 北京 102206)

摘要: 针对装备作战效能评估的不确定性, 提出一种灰色关联和集对分析相结合的新方法。通过挖掘联系度表达式中宏观层面上各参数对微观层面上不确定系数的影响, 运用灰色关联分析法确定差异度系数在其自由度中的取值, 从而进一步减小装备作战效能评估中不确定性带来的影响; 通过对 4 种防空导弹系统作战效能的评估比较对该方法进行检验。结果表明: 该方法概念清晰、简单易行, 具有较高的可靠性, 为装备作战效能评估提供了新思路。

关键词: 效能评估; 集对分析; 差异度系数; 灰色关联分析

中图分类号: E91 **文献标志码:** A

A New Method of Equipment Operational Effectiveness Evaluation Based on Grey Relational Analysis and Set Pair Analysis

Chen Jiahui¹, Ke Hongfa²

(1. Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

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

Abstract: Aiming at the uncertainty of equipment operational effectiveness evaluation, a new method combining grey relational analysis and set pair analysis is proposed. By mining the influence of each parameter on the macro level on the uncertainty coefficient on the micro level in the expression of connection degree, the gray relational analysis method is used to determine the value of the coefficient of difference degree in its degree of freedom, so as to further reduce the influence of uncertainty in the evaluation of equipment operational effectiveness; The method is tested by evaluating and comparing the operational effectiveness of four air defense missile systems. The results show that the method is clear in concept, simple and easy to implement, and has high reliability, which provides a new idea for equipment operational effectiveness evaluation.

Keywords: effectiveness evaluation; set pair analysis; difference coefficient; grey relational analysis

0 引言

装备作战效能是装备建设和应用的重要依据, 国内外各军兵种以及工业部门都非常重视装备作战效能评估问题的研究。

我国对于装备作战效能的研究已取得了很多成果。其研究方法按照基本途径分类大致分为 3 类:

1) 基于仿真的模拟分析法; 2) 基于数学模型的解析分析法; 3) 基于上述仿真、解析和专家知识等多种方法的混合方法。其中, 基于数学模型的解析分析法因其计算简明、省时省力, 且能较好地克服诸多主观因素或随机不确定性的影响, 得以广泛应用, 灰色理论和集对理论更是受到诸多学者青睐。例如, 张栋等^[1]采用改进的加权分析法确定智能水雷战技性能评价指标权重, 以改进的灰色系统理论建立智能水雷战技性能评估模型并进行评估; 朱晓亮等^[2]运用灰色系统理论和 AHP 法, 构建基于多层次灰色

理论的对侦察部队侦察能力评估模型, 并通过实例进行检验; 史玮等^[3]运用集对分析有关知识建立基于集对分析的空战武器系统作战效能评估模型, 对国外几种典型空战武器系统作战效能优劣进行了排序; 鞠巍等^[4]运用集对分析的方法, 对现役的 7 种反舰导弹进行数值仿真, 建立模型并进行了分析验证。上述文献大多是通过各种单式不确定性的研究方法对装备作战效能中不确定性造成的影响进行研究, 难免会造成评估信息的遗漏, 较少文献通过采用复式不确定性研究方法进行装备作战效能评估的研究。笔者综合运用灰色理论与集对分析 2 种不确定性研究方法, 运用联系度的形式, 从联系度宏观层面上的同异反参数 a 、 b 、 c 和微观层面上的差异度系数 i 描述了装备作战效能, 并采用灰色关联分析法确定了差异度系数 i 的取值, 在此基础上进行了装备作战效能评估。该方法不仅为装备作战效能评估研究提供了新思路, 对灰色理论和集

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-03-24

基金项目: 国防科技基础加强计划资助项目(2019-JCJQ-JJ-114)

作者简介: 陈家辉(1992—), 男, 河南人, 硕士, 从事军事装备效能评估研究。E-mail: 495906469@qq.com。

对分析的发展也具有一定的意义。

1 装备作战效能评估的集对分析思路

所谓集对,就是具有一定联系的 2 个集合所组成的对子,如系统和环境、系统和工程、信息和控制、军事和国防、电脑和人脑及生产与销售等,在一定条件下都可以看成是集对的例子。

根据赵克勤^[5]的相关研究可得常用的 2 种联系度表达式:

$$\mu = S/N + (F/N)i + (P/N)j; \quad (1)$$

$$\mu = a + bi + cj. \quad (2)$$

式(1)为联系度的定义式,其中: μ 为联系度,在进行装备作战效能评估时表示评估指标与参考指标之间的确定性不确定性关系程度; N 为评估指标与参考指标二者的特性数量总和; S 为评估指标与参考指标共有的特性数量; P 为评估指标与参考指标相互对立的特性数量; F 为既不对立,又不共有的特性数量, $F=N-S-P$ 。

式(2)为联系度定义式的简化式,其中: $a=S/N$,为同一度参数,表示评估指标与参考指标之间的同一程度; $c=P/N$,为对立度参数,表示评估指标与参考指标的对立程度; $b=F/N$,为差异度参数,表示评估指标与参考指标的差异程度。

式(1)、(2)中: i 、 j 分别为差异度系数和对立度系数, i 的取值区间为 $[-1, 1]$, j 取值为 -1 。

装备作战效能评估的集对分析基本思路:将待评估装备的作战效能评估指标(即在进行指标量化时通过定性或定量手段得到的指标量化值)与参考指标(即根据实际情况针对各指标人为选取的理想值或根据实际需求人为设定各指标的标准值)视为集对,针对具体问题选择相应的算法,对评估指标与参考指标所具有的特性加以定量刻画并做“同一性、差异性、对立性”分析,从而得到这二者之间的联系度表达式 μ ,并在此基础上对待评估武器装备的作战效能进行深入研究。通过集对分析法进行装备作战效能评估,不仅能够对实际装备作战效能与理想作战效能的确定不确定性关系进行整体刻画,而且可以通过分析联系度 μ 所刻画的同异反态势获取更多价值信息。

装备作战效能评估的研究工作一般分为 2 步:

- 1) 明确评估装备及其所处的使命任务背景,建立该型装备的效能评估指标体系;
- 2) 对装备作战效能指标体系各指标值进行量化、求取指标权重再由下向上逐层进行加权求和,

直至得到评估装备的装备作战效能并进行分析。

然而,传统的装备作战效能评估在进行指标量化时对指标的赋值通常为白数,容易造成信息遗漏缺失。笔者根据实际背景选取合适的集对,采用联系度的方法对指标进行量化,由下往上逐层聚合,最终得到用联系度的形式表达的装备作战效能从而进行分析。

基于集对分析的装备作战效能评估方法,其核心在于通过分析评估指标与参考指标之间的确定性与不确定性关系建立联系度表达式,对集对的同异反态势进行刻画,从而进行装备作战效能评估。联系度表达式 $\mu=a+bi+cj$ 中差异度系数 i 的取值自由区间为 $[-1, 1]$,当 a 、 b 发生变化时, i 的值也会随之发生变化,并有可能在宏观上呈现出某种分布规律。这种分布规律有时对分析至关重要。例如有时 i 的变化会改变联系度 μ 所刻画的子层指标与参考指标的同异反态势,但有时不论 i 在 $[-1, 1]$ 上取什么值,都不改变联系度 $\mu=a+bi+cj$ 所刻画的评估指标与参考指标的同异反态势。在集对分析中关于 i 的取值要具体问题具体分析,不强求做统一处理。尤其在某些问题研究中,常把 i 的取值作为理论模型与实际情况的一个接口和调节器,从研究对象的实际演化过程和演化结果来确定 i 的取值。对此,赵克勤^[5]采用了顺势取值法、逆势取值法、计算取值法和特殊取值法进行差异度系数 i 的计算,力求使联系度 μ 在对集对系统的同异反态势刻画结果符合实际情况。

联系度式中 a 、 b 、 c 是联系度 μ 对装备作战效能同异反态势刻画的宏观表现,而差异度系数 i 和对立度系数 j 是微观表现^[6]。宏观层次上的 a 、 b 、 c 数值约束着微观层次上的差异度系数 i 的取值,而微观层次上差异度系数 i 的取值也对宏观层次上 a 、 b 、 c 的装备作战效能同异反态势刻画起到影响作用,即微观层次上的差异度系数 i 的取值变化能否切实反映装备作战效能的同异反态势刻画结果与宏观层次上的 a 、 b 、 c 的内在联系密不可分。笔者将 a 、 b 、 c 分为 b 、 a 和 b 、 c 2 组数据,采用灰色关联分析对它们之间的关联程度进行计算,并将计算结果进行归一化处理作为差异度系数 i 的取值,而后将 i 代入装备作战效能评估的联系度表达式中,得到形如 $\mu=a+cj$ 的联系度,从而对该型装备的作战效能进行多种手段的分析。该方法充分尊重了研究对象宏观不确定性和微观不确定性之间的联系,使得联系

度 μ 对装备作战效能同异反态势的刻画更加复合实际情况，能够有效减少信息遗漏缺失的问题，增强评价结果的可靠性，为决策者提供更多的有效信息。

2 差异度系数的计算方法

灰色关联分析是灰色理论中一个十分活跃的分支，其基本思想是根据序列曲线几何形状的相似程度来判断2个序列之间的联系是否紧密。常用的分析法有基于局部点关联的邓氏灰色关联分析模型，基于整体或全局的绝对关联度、相对关联度和综合关联度等新型灰色关联分析模型等^[7]。在集对的同异反态势一定的情况下，集对之间的同一度越大则差异度系数 i 的取值应使联系度 μ 越大，此时集对中差异度参数 b 和同一度参数 a 的关系大于与对立

$$\xi(k) = \frac{\min_m \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_m \max_k |X_0(k) - X_m(k)|}{|X_0(k) - X_m(k)| + \rho \max_m \max_k |X_0(k) - X_m(k)|} \quad (3)$$

式中： $\xi(k)$ 为关联函数； $\min_m \min_k |X_0(k) - X_m(k)|$ 为参考序列与比较序列的最小绝对差值，简记为 Δ_{\min} ； $\max_m \max_k |X_0(k) - X_m(k)|$ 为参考序列与比较序列的最大绝对差值，简记为 Δ_{\max} ； $|X_0(k) - X_m(k)|$ 为参考序列与比较序列的绝对差值，简记为 Δ ； m 为比较序列的序号； ρ 为分辨率系数，取值在 $[0, 1]$ 之间，通常取0.5。

由于关联函数过多会导致信息过于分散，故定义关联度计算公式为：

$$\gamma = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi(k) \quad (4)$$

式中 γ 为参考序列与比较序列的关联度，是较序列中各数与参考序列中对应各数关联系数的平均值。

分别计算参考序列 $X_0(k)$ 与比较序列 $X_1(k)$ 、 $X_2(k)$ 的绝对差值 $\Delta_{ba}(k)$ 、 $\Delta_{bc}(k)$ 。根据式(3)、(4)分别计算参考序列 $X_0(k)$ 和 $X_1(k)$ 、 $X_2(k)$ 的关联系数 $\xi_1(k)$

和 $\xi_2(k)$ ，以及关联系数平均值 $\gamma_{ba} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_1(k)$ 、

$\gamma_{bc} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_2(k)$ 。为确保取值规范性，不宜将 γ_{ba} 和 γ_{bc}

直接作差异度系数使用，应先进行归一化处理后再使用为宜。因此，当 $\gamma_{ba} > \gamma_{bc}$ 时，集对之间同一度占主导态势， $i = \gamma_{bc} / (\gamma_{ba} + \gamma_{bc})$ 且符号取正号；当 $\gamma_{bc} > \gamma_{ba}$ 时，集对之间对立度占主导态势， $i = \gamma_{bc} / (\gamma_{ba} + \gamma_{bc})$ 且符号取负号。

度参数 c 的关系；集对之间的对立度越大则差异度系数的取值应使联系度越小，此时集对中差异度参数 b 和对立度参数 c 的关系大于与同一度参数 a 的关系。可以运用灰色关联分析法，计算差异度参数 b 与同一度参数 a 和对立度参数 c 的关联程度，以此判断联系度的当前态势，并结合当前态势进行判断，秉着联系度 μ 在对集对系统的同异反态势刻画结果应该符合实际情况的与理念，选择差异度参数 b 与同一度参数 a 或对立度参数 c 的灰色关联度作为差异度系数 i 的取值。

假设有 n 组研究对象，其作战效能联系度表达式为 $\mu_k = a_k + b_k i + c_k j$ ， $(k=1, 2, \dots, n)$ ，参考序列为 $X_0(k) = b_1, b_2, b_3, \dots, b_n$ ，比较序列分别为 $X_1(k) = a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 和 $X_2(k) = c_1, c_2, c_3, \dots, c_n$ 。

根据文献[8]可知灰色关联度的计算公式如下：

3 计算步骤

第1步：明确评估对象及其使命任务要求。

第2步：建立合理的装备作战效能评估指标体系，根据其具体军事需求等实际情况选取合适的集合作为集对。

第3步：建立底层指标的联系度表达式，通过专家赋权法、层次分析法等确权法计算各指标权重系数 $\omega_{x,y}$ ，其中 $x \geq 2$ ， $y \geq 2$ ，且 x, y 皆为实数。

第4步：将上一步求得的联系度中的 a 、 b 、 c 分为 b 、 a 和 b 、 c 2组，根据式(3)对 b 、 a 和 b 、 c 分别作灰色关联分析，求取各关联系数。

第5步：根据式(4)计算 b 、 a 和 b 、 c 的平均关联系数并进行归一化处理，当 $\gamma_{ba} > \gamma_{bc}$ 时， $i = \gamma_{bc} / (\gamma_{ba} + \gamma_{bc})$ 且取正值；当 $\gamma_{bc} > \gamma_{ba}$ 时， $i = \gamma_{bc} / (\gamma_{ba} + \gamma_{bc})$ 且取负值。

第6步：根据上一步计算结果选取差异度系数 i 的取值，将 i 值代入联系度表达式中消除差异度部分，得到形如 $\mu = a + cj$ 的联系度表达式。

第7步：设该型装备作战效能的联系度为 $\mu_{1,1}$ ，最底层指标联系度为 $\mu_{x,y}$ ，其中 $x \geq 2$ ， $y \geq 2$ ，且 x, y 皆为实数。根据第3步可得对应的权重系数 $\omega_{x,y}$ ，计算 $\omega_{x,y} \times \mu_{x,y}$ 得到上一层指标 $\mu_{x-1,y-1} = a + cj$ 。

第8步：重复第7步加权求和的步骤，直至得到该型装备的作战效能 $\mu_{1,1}$ 。

以上8个步骤如图1所示。

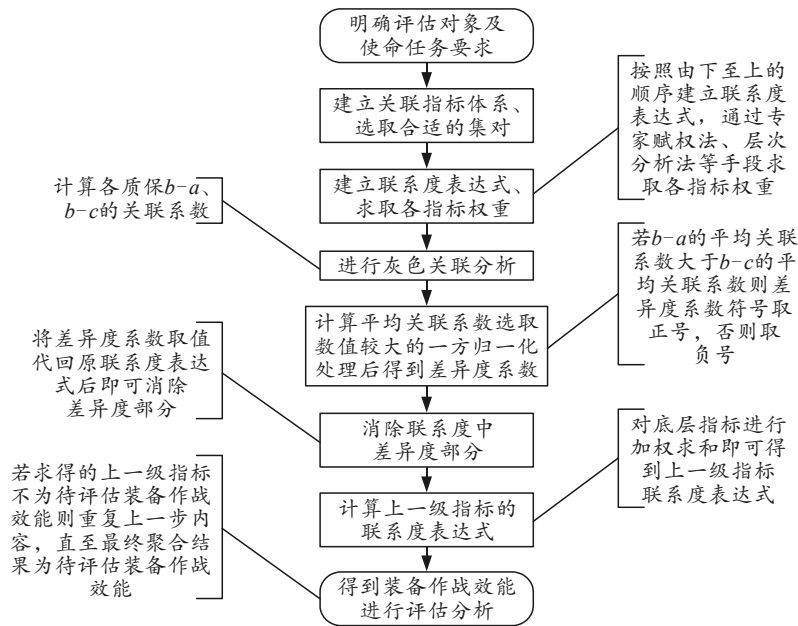


图 1 灰色理论和集对分析相结合的装备作战效能评估计算步骤

假设已明确评估对象为某型装备，且已知该型装备所处的使命任务背景，其装备效能评估指标体系含有 n 层，每层含 a 个指标。根据实际背景选取合适的集对后，则该型装备的效能评估计算步骤如下：各层指标的联系度表达式为 $\mu_{x,y}$ ；指标权重为 $\omega_{x,y}$ ； $x=1, 2, 3, \dots, n$ ； $y=1, 2, 3, \dots, a$ 。用 $\mu_{x,y}$ 表示第 x 层第 y 各指标的效能， $\omega_{x,y}$ 表示其权重； $\mu_{1,1}$ 表示一级指标即该型装备的作战效能。首先，从第 n 层开始逐个指标建立形如 $\mu=a+bi+cj$ 的联系度表达式。然后，将同属于 $n-1$ 层中同一指标的第 n 层指标联系度中的 a 、 b 、 c 分为 b 、 a 和 b 、 c 2 组数据，根据式(3)、(4)求得差异度系数 i 的取值。接着，将 i 值分别代入第 n 层中对应的联系度表达式中，消除差异度部分，得到形如 $\mu=a+cj$ 的第 n 层指标的联系度表达式。随后，对消除了联系度中差异度部分的第 n 层指标进行加权求和得到第 $n-1$ 层指标的效能联系度表达式；由 $n-1$ 层至第 1 层反复加权

求和，直至得到 $\mu_{1,1}$ 。

4 实例检验

基于上述方法，根据文献[9]对响尾蛇、长剑、罗兰特、沙伊纳 4 种防空导弹武器系统的作战效能进行综合评价。

用于评估这 4 种防空导弹武器系统的作战效能的战术性能指标主要有 7 个：拦截低界 h_{\min} 、远界 R_{\max} 、近界 R_{\min} 、反应时间 t_0 、单发杀伤概率 P_1 、发射单元待发导弹数 N 和抗干扰能力 C 。文献[9]采用了组合赋权法确定各指标权重，根据系统目标需要，选取了正理想方案和负理想方案，并将方案中的指标分为收益型、成本型和适中型 3 类指标，在明确这 3 类指标的联系度计算方式后，对各指标联系度进行了计算。根据文献[9]相关公式进行数据处理后，得到各型导弹指标计算值结果如表 1 所示。

表 1 各型导弹作战效能影响因素联系度

指标	响尾蛇	长剑	罗兰特	沙伊纳
h_{\min}	$0.213+0.769i$	$0.769+0.231i$	$0.769+0.231i$	$0.769+0.231i$
R_{\max}	$0.531+0.028i+0.441i$	$0.375+0.625i$	$0.394+0.011i+0.595i$	$0.625+0.375i$
R_{\min}	$0.615+0.385i$	$0.385+0.615i$	$0.615+0.385i$	$0.615+0.385i$
t_0	$0.538+0.462i$	$0.538+0.462i$	$0.462+0.538i$	$0.538+0.462i$
P_1	$0.452+0.548i$	$0.452+0.548i$	$0.548+0.452i$	$0.548+0.452i$
N	$0.5+0.125i+0.375i$	$0.5+0.125i+0.375i$	$0.25+0.75i$	$0.75+0.25i$
C	$0.414+0.586i$	$0.586+0.414i$	$0.505+0.015i+0.480i$	$0.525+0.013i+0.462i$

以响尾蛇防空导弹为例，因文献[9]已完成本文中计算步骤的第 1、2、3 步，明确了评估对象及其任务背景，选取合适的集对，并已建立了各底层指标的联系度表达式，故按照计算步骤中第 4、5

步，运用灰色关联分析计算其作战效能的联系度表达式中差异度系数 i 的取值，根据式(3)对数据处理可得响尾蛇防空导弹系统的灰色关联分析如表 2 所示。表中： Δ_{ba} 、 Δ_{bc} 分别为参考序列 b 与比较

序列 a 、 c 的绝对差值； ζ_{ba} 、 ζ_{bc} 分别为各指标的关 联系数。

表2 响尾蛇型防空导弹系统灰色关联分析

影响因素	联系度	b	a	c	Δ_{ba}	Δ_{bc}	ζ_{ba}	ζ_{bc}
h_{\min}	$0.213+0.769i$	0	0.213	0.769	0.213	0.769	1.000	0.518
R_{\max}	$0.531+0.028i+0.441i$	0.028	0.531	0.441	0.503	0.413	0.673	0.743
R_{\min}	$0.615+0.385i$	0	0.615	0.385	0.615	0.385	0.598	0.776
t_0	$0.538+0.462i$	0	0.538	0.462	0.538	0.462	0.648	0.706
P_1	$0.452+0.548i$	0	0.452	0.548	0.452	0.548	0.714	0.641
N	$0.5+0.125i+0.375i$	0.125	0.500	0.375	0.375	0.250	0.787	0.942
C	$0.414+0.586i$	0	0.414	0.586	0.414	0.586	0.748	0.616

按照计算步骤第5步，根据式(4)可得其关联系数平均值 γ_{ba} 、 γ_{bc} ，结果分别为 0.738 和 0.706，将其归一化处理后的结果为 0.511 和 0.489，因为 $\gamma_{ba} > \gamma_{bc}$ ，故取响尾蛇防空导弹系统作战效能的联系度表达式中差异度系数 i 的值为 0.511。

按照计算步骤第6、7步，将 i 值代入联系度表达式中消除差异度部分，与各指标权重加权求和可得响尾蛇型防空导弹系统的作战效能。各影响因素的权重集在文献[9]中已给出，为 $\omega = \{0.167, 0.167,$

$0.083, 0.083, 0.167, 0.083, 0.25\}$ ，故响尾蛇型防空导弹系统的作战效能联系度表达式为 $\mu = 0.425 + 0.541j$ 。

由于这4种防空导弹武器系统的作战效能指标体系为一个只含有二级指标的指标体系，故不用进行计算步骤8中反复加权求和的过程。参照上例分别对长剑、罗兰特、沙伊纳这3种防空导弹武器系统进行计算，可得其差异度系数 i 取值和作战效能联系度表达式如表3所示。

表3 4种防空导弹系统作战效能结果计算

效能指标	响尾蛇	长剑	罗兰特	沙伊纳
i	0.511	-0.518	-0.505	-0.569
μ	$0.425+0.541j$	$0.526+0.459j$	$0.519+0.472j$	$0.611+0.383j$

通过直观分析法对上表进行分析可知，4种防空导弹系统作战效能排列顺序为沙伊纳、长剑、罗兰特、响尾蛇，与文献[9]一致。运用文献[10]中的集对势分析法进行二次检验，当联系度中 $c \neq 0$ 时，同一度 a 与对立度 c 的比值称为所论集对在制定问题背景下的集对势，用 shi 表示，此时的集对势相对稳定。根据 a 、 b 、 c 的大小关系，集对势存在一定的次序关系，可以简单地认为，集对势越大，其同一度态势越强，根据集对势的计算方法^[10]，这4种防空导弹系统的集对势分别为 0.786、1.146、1.100、1.595，按照其与理想指标值的同一度态势大小进行排列，排列次序依次为沙伊纳、长剑、罗兰特、响尾蛇，与本文中和文献[9]的排名结果一致，再一次验证了本文中方法的可行性。

当前大部分基于集对分析的作战效能评估文章在进行指标量化时往往采用白化数的形式进行描述^[11-13]，容易造成信息遗漏缺失等问题，而文献[9]和笔者则是采用联系数的形式进行指标描述，可以有效地避免这一问题的发生。此外，相对于文献[9]采用一个确定数对装备作战效能进行描述的方式，笔者采用了联系度的方式对作战效能进行刻画，根据实际情况确定了差异度系数 i ，消除了不确定部分，不仅使结果便于比较分析，更在极大程度上保

留了更多有效信息，能够为决策者提供更多有价值的信息。

5 结束语

装备作战效能评估是一项较为复杂且充满不确定性的军事活动，需要对评估对象的使命任务、指标体系构建、指标值的量化、指标权重的求取等多方面进行研究。为克服装备作战效能评估中不确定性对评估结果带来的影响，笔者通过挖掘联系度宏观上各参数对微观上不确定系数产生的影响，确定了通过分析 a 、 b 、 c 的联系紧密程度计算差异度系数的思想，分别对 b 、 a 和 b 、 c 进行灰色关联分析，计算二者的灰色关联系数，将占主导态势的灰色关联系数进行归一化处理视为差异度系数 i 的取值结果。将此结果代入联系度表达式中实现了消除不确定性的目的，增强了装备作战效能评估的可靠性，并将此方法应用到4种防空导弹系统作战效能评估中进行实例检验；同时采取集对势分析法进行二次验证。结果表明：该方法合理可行，且概念清晰、计算简明、可信度较高。

参考文献：

- [1] 张栋, 宋裕农. 基于灰色理论的智能水雷作战效能评估[J]. 鱼雷技术, 2011, 19(1): 55-58.

[2] 朱晓亮, 蔡群, 朱华振. 基于多层次灰色理论的电子对抗侦察部队侦察能力评估[J]. 雷达与对抗, 2012, 32(4): 15-17, 51.

[3] 史玮韦, 马琳, 苏永前, 等. 基于集对分析的空战武器系统作战效能评估[J]. 火力指挥与控制, 2010, 35(7): 143-146.

[4] 鞠巍, 童幼堂, 王泽, 等. 基于集对分析法的反舰导弹武器作战效能评估[J]. 战术导弹技术, 2010(6): 13-15.

[5] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2007: 83-88.

[6] 朱兵, 王文圣, 王红芳, 等. 集对分析中差异不确定系数的探讨[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(1): 5-9.

[7] 刘思峰, 杨英杰, 吴利丰, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 50.

[8] 李立伟, 鞠巍, 王泽. 基于灰色系统理论的反舰导弹武器系统综合作战效能分析[J]. 战术导弹技术, 2010(6): 20-23.

[9] 余亮, 邢昌凤. 集对分析在武器系统效能评估中的应用[J]. 电光与控制, 2008, 15(3): 68-71.

[10] 王亚鹏, 王运斗, 李雅平, 等. 基于集对势的卫生装备效能评估与优化方法[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 60-63, 71.

[11] 邹兆嵩, 阳平华. 基于 AHP 和 SPA 的地空导弹效能评估[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(4): 42-44.

[12] 杨鑫, 王莹, 王龙, 等. 基于集对分析理论的云南省水资源承载力评估模型[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 98-102.

[13] 续源, 吴家锋. 基于集对分析的野战管线部队保障效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(2): 153-156.

(上接第 66 页)

[2] 王晓冰, 梁子长, 岳慧, 等. 海环境近场电磁散射特性模拟测量研究[J]. 微波学报, 2010(S2): 44-47.

[3] MASUKO H, OKAMOTO K, SHIMADA M, et al. Measurement of Microwave backscattering signatures of the Ocean Surface Using X Band and Ka Band Airborne Scatterometers[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1986, 91(C11): 13065-13083.

[4] 张玉石, 张忠治. 高分辨海杂波观测研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(6): 1119-1122.

[5] HORST M M, DYER F B, TULEY M T. Radar sea clutter model[C]//Antennas and Propagation Conference. Maryland, IEEE, 1978, 1: 6-10.

[6] 曹奕涛, 淳莉, 张宏军, 等. 低信噪比信号相位差检测算法优化设计与实现[J]. 空天防御, 2019, 2(1): 47-52.

[7] GREGERS-HANSEN V. An Improved Empirical Model for Radar Sea Clutter Reflectivity[C]//Naval Research Laboratory. Washington DC: NRL/MR/5310-12-9346.

[8] 周平, 张新征. 海面后向散射机载测量结果及分析[J]. 系统工程与电子技, 2006, 28(3): 325-328.

[9] PIERSON W J, MARKS W. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii[J]. IEEE Trans, 1964, 49(24): 5181-5190.

[10] FUNG A K. A semi-empirical sea-spectrum model for scattering coefficient estimation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1982, 10(4): 116-176.

(上接第 77 页)

1) 改进遗传算法对复杂舰面环境下舰载机转运具有较强的规划能力, 动态初始化染色体提供较多路径方案, 改进遗传算子提高了寻优效率和精度。

2) NURBS 具有更好的平滑能力和局部控制能力, 适合复杂环境下进行路径平滑。

3) 基于交通规则等的停策略和重规划策略能有效解决舰载机转运时的碰撞问题。

参考文献:

[1] 郑茂, 黄胜. 超级航母的超级甲板尼米兹级飞行甲板的布列与调运[J]. 舰船知识, 2013(2): 48-49.

[2] JOHNSTON J S, SWENSON E D. Feasibility Study of Global-Positioning-System-Based Aircraft-Carrier Flight-Deck Persistent Monitoring System[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(5): 1624-1635.

[3] 王云翔, 范加利, 丁飞, 等. 多机移动条件下飞行甲板路径规划研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(2): 55-59.

[4] 陈宇, 张公平, 宋韬, 等. 多任务空地武器多目标协同优化任务规划算法研究[J]. 航空兵器, 2021, 28(2): 62-68.

[5] 徐源正. 多移动机器人系统中路径规划算法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

[6] VEMURI B C, CHEN L, VU-QUOC L, et al. Efficient and Accurate Collision Detection for Granular Flow Simulation[J]. Graphical Models and Image Processing, 1998, 60(6): 403-422.

[7] LES P, WAYNE T. 非均匀有理 B 样条[M]. 赵罡, 穆国旺, 王拉柱, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010: 86-87.

[8] JAN G E, SUN C C, WEI C T, et al. An Shortest Path Algorithm Based on Delaunay Triangulation[J]. Mechatronics IEEE/ASME Transactions on, 2013, 19(2): 660-666.

[9] KATO S, NISHIYAMA S, TAKENO J. Coordinating Mobile Robots By Applying Traffic Rules[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2002.