导弹战术技术性能综合评价模型

宁伟华 1, 陈绍顺 1, 张武森 2, 陈永革 1

(1. 空军工程大学导弹学院，陕西三原 713800；2. 空军工程大学理学院，陕西西安 710051)

摘要：基于正负理想方案，以灰色关联度为基础，并借鉴TOPSIS方法的基本思想，建立了评价导弹战术技术性能的综合评价模型，论述了分析导弹性能的具体过程。最后，用实例表明模型在评价导弹战术技术性能中的可行性和实用性。

关键词：灰色关联度；导弹性能；模型

中图分类号： 0159 文献标识码： A 文章编号： 1009-3516(2005)02-0036-04

影响导弹战术技术性能的因素很多[1],由于往往不能得到与它有关的所有信息,即导弹行为信息的不完全和不确知性,从而给研究带来了困难。对于处理这种既有已知信息又有未知的或非确知信息,宜于从灰色系统理论观念出发,使数学处理服从于技术要求,可以达到更符合实际的满意结果。

1 综合评价模型

假设有 n 种型号的导弹待评,每种导弹由 m 个因素构成评价体系,则第 i 种型号导弹的 m 个因素组成的集合为 $v_i=(v_{i1},v_{i2},\cdots,v_{1m})$,则 n 种型号导弹的原始指标构成的矩阵为

$$\boldsymbol{V}=\begin{bmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ v_{n1} & \cdots & v_{nm} \end{bmatrix}$$

1.1 指标值的规范化处理

规范化(标准化)处理的实质是利用一定的数学变换把量纲、性质各异的指标值转化为可以综合处理的“量化值”,一般是把各指标值都统一变换到[0,1]范围内[1-2]。

对于效益型指标,可令
$$x_{ij}=\frac{v_{ij}-v_j^{\min}}{v_j^{\max}-v_j^{\min}} \tag{1}$$

对于成本型指标,可令
$$x_{ij}=\frac{v_j^{\max}-v_{ij}}{v_j^{\max}-v_j^{\min}} \tag{2}$$

式中,$v_j^{\max}$、$v_j^{\min}$分别表示第 j 个指标的最大值、最小值。进行规模化处理后得矩阵

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

1.2 正理想方案和负理想方案的定义

参考序列是一个理想的比较标准,受距离评价方法的启示,选最优指标数据和最劣指标数据作为参考序列。通过比较各种方案与最优和最劣方案的关联程度,来评价各种方案相互之间的优劣。最后评价结果应是与正理想方案关联最大,与负理想方案关联最小的方案。

根据规范化矩阵 $\boldsymbol{X}=[x_{ij}]_{n\times m}$,取 $x^+=(x_1^+,x_2^+,\cdots,x_m^+)$ 作为正理想方案,其中 $x_j^+=\max\{x_{ij}\mid i=1,2,\cdots,$

收稿日期:2004-06-14

作者简介:宁伟华(1976-)男,山西稷山人,博士生,主要从事防空作战决策分析.

$n\}$, $j=1,2,\cdots,m$；同理取 $x^-(x_1^-,x_2^-,\cdots,x_m^-,)$ 作为负理想方案,其中 $x_j^-=\min\{x_{ij}|i=1,2,\cdots,n\}$, $j=1,2,\cdots,m$。

1.3 计算关联度

设给定的参考序列为 $(x_1,x_2,\cdots,x_m)$，则关联系数 $\zeta_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$ 按照下式计算[3-6]:

$$\zeta_{ij}=\frac{\min_i\min_j|x_{ij}-x_j|+\rho\max_i\max_j|x_{ij}-x_j|}{|x_{ij}-x_j|+\rho\max_i\max_j|x_{ij}-x_j|} \tag{3}$$

式中: $\min_i\min_j|x_{ij}-x_j|$ 为两级最小差; $\max_i\max_j|x_{ij}-x_j|$ 为两级最大差; ρ 为分辨系数, $\rho\in(0,1)$, 一般取 $\rho=0.2$ 时有较高的分辨率[7]。由此得到关联矩阵

$$\boldsymbol{E}=\begin{bmatrix}\zeta_{11} & \cdots & \zeta_{1m}\\ \vdots & & \vdots\\ \zeta_{n1} & \cdots & \zeta_{nm}\end{bmatrix}$$

那么,对于正理想方案 $x^+=(x_1^+,x_2^+,\cdots,x_m^+,)$ 为参考序列可以得到 E^+，负理想方案 $x^-=(x_1^-,x_2^-,\cdots,x_m^-)$ 为参考序列可以得到 E^-。

1.4 综合关联度计算

关联度系数很多,信息分散,它的每一个值表明某一个指标对参考数列的关联程度。为表现总体上两个数列的关联程度,常对所有关联系数取加权平均值

$$r_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}w_j\zeta_{ij}\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{4}$$

式中, r_i 为方案 p_i 对参考方案的综合关联度,对正理想方案的综合关联度为 r_i^+，对负理想方案的综合关联度为 r_i^-。

1.5 权重的确定

通常权系数的确定方法大致可分为主观赋权法和客观赋权法两大类。为了兼顾到决策者的偏好,同时又要力争减少主观随意性,使所赋权值达到主观和客观的统一,需要将主观和客观两类权重相结合,进行组合赋权[8-9]。

令 $\boldsymbol{w}^*=(w_1^*,w_2^*,\cdots,w_m^*,)^{\mathrm{T}}$ 为用上述主观和客观共 l 种方法所确定的权向量 $\boldsymbol{v}^1,\boldsymbol{v}^2,\cdots,\boldsymbol{v}^l$ 的线性组合权向量,用向量形式表示为

$$\boldsymbol{w}^*=\sum_{k=1}^{l}x_k\boldsymbol{v}^k \tag{5}$$

其中, x_k 表示线性组合系数,满足 $\sum_{k=1}^{l}x_k=1,x_k\geqslant 0$。很容易验证式(5)确定的权向量 $\boldsymbol{w}^*$ 满足: $\sum_{j=1}^{m}w_j^*=\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{l}x_kv_j^k=1$。

从数理统计的观点来看,在现实系统中,真实权数是一个随机变数(量)。通过主观和客观 l 种方法所确定的权向量 $\boldsymbol{v}^1,\boldsymbol{v}^2,\cdots,\boldsymbol{v}^l$，可以看作是对真实权数这个随机变量的一次随机抽样中抽取容量为 l 的子样,那么每种权系数赋值方法给出的权数只相当于一个样本值。

从概率论的观点来看,式(5)中 $\boldsymbol{v}^k$ 的线性组合系数 x_k 可以理解为真实权向量取样本值 $\boldsymbol{v}^k$ 的概率,因此组合系数 $x_k(k=1,2,\cdots,l)$ 具有不确定性,这种不确定性可以用 Shannon 信息熵来表示: $H=-\sum_{k=1}^{l}x_k\ln x_k$。

求取真实的权重,实际上就是确定合适的线性组合系数 $x_k(k=1,2,\cdots,l)$，一方面使所有方案与理想方案的加权广义距离和为最小,即

$$\min D=\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{l}x_kv_j^k(1-x_{ij})$$

$$\text{s.t.}\ \sum_{k=1}^{l}x_k=1,x_k\geqslant 0$$

而另一方面,应尽量消除组合系数 $x_k(k=1,2,\cdots,l)$ 的不确定性,根据 Jaynes 最大熵原理,确定的组合系数应使 Shannon 信息熵取极大,即

$$\min H = -\sum_{k=1}^{l} x_k \ln x_k$$

$$\text{s.t.} \sum_{k=1}^{l} x_k = 1, x_k \geqslant 0$$

因此,依据上述两个方面的考虑,可以构造如下的单目标优化模型:

$$\begin{aligned} &\min z = \mu \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} x_k v_j^k (1 - x_{ij}) + (1-\mu) \sum_{k=1}^{l} x_k \ln x_k \\ &\text{s.t.} \sum_{k=1}^{l} x_k = 1, x_k \geqslant 0 \end{aligned} \tag{6}$$

其中 $0 < \mu < 1$ 为参数,用来表示两个目标之间的平衡系数,可根据实际问题预先给出。

构造 Lagrange 函数为

$$L(x,\lambda) = \min z = \mu \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} x_k v_j^k (1 - x_{ij}) + (1-\mu) \sum_{k=1}^{l} x_k \ln x_k - \lambda\left(\sum_{k=1}^{l} x_k - 1\right)$$

根据极值存在的必要条件,有 $\begin{cases} \dfrac{\partial L}{\partial x_k} = \mu \sum\limits_{i=1}^{n} \sum\limits_{j=1}^{m} v_j^k (1 - x_{ij}) + (1-\mu)(\ln x_k + 1) - \lambda = 0 \\ \dfrac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum\limits_{k=1}^{l} x_k - 1 = 0 \end{cases}$

通过求解方程组可得 $x_k = \dfrac{\exp\{-[1 + \mu \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} v_j^k (1 - x_{ij})/(1-\mu)]\}}{\sum_{k=1}^{l} \exp\{-[1 + \mu \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} v_j^k (1 - x_{ij})/(1-\mu)]\}}, k = 1,2,\cdots,l$

1.6 确定最终评价系数

一般情况下,某一方案与正理想方案关联最大,即是与负理想方案关联最小,但计算结果有可能产生如下情况:方案 x_2 与正理想方案之间的关联比 x_1 大,但方案 x_2 与负理想方案之间的关联也比 x_1 大,如图 1 所示,图中 x^+、x^- 分别为正负理想方案。

基于以上考虑,按照 TOPSIS 法的思想,可以与正理想方案的贴近度来评价方案的优劣。评价系数 C_i 定义如下:

$$C_i = r_i^+ / (r_i^+ - r_i^-) \qquad i = 1,2,\cdots,n \tag{7}$$

显见,$0 \leqslant C_i \leqslant 1$,当某一方案为正理想方案时,$C_i = 1$;当某一方案为负理想方案时,$C_i = 0$。若某一方案与正理想方案越接近,$C_i$ 越接近 1;某一方案与负理想方案越接近,C_i 越接近 0。

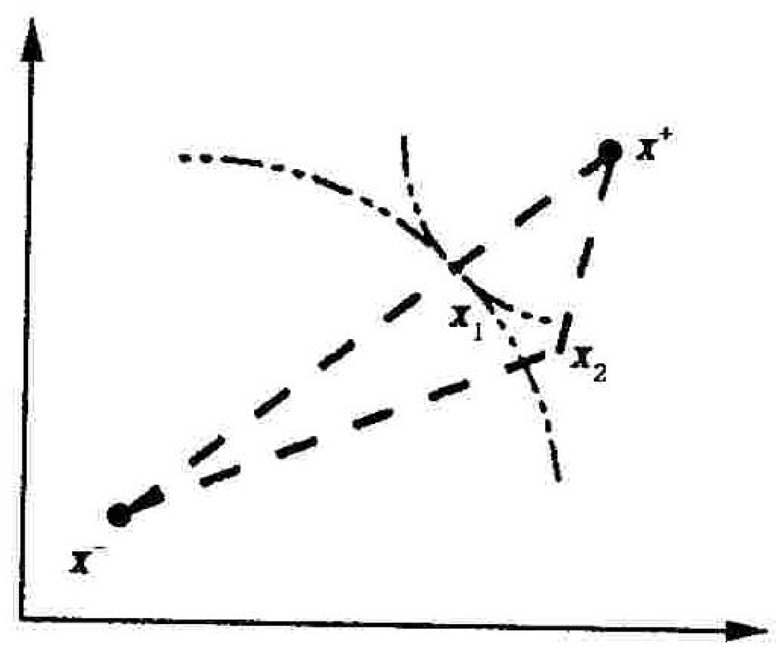

图 1 正负理想点示意图

2 应用实例

以某型导弹及其各种改进型为例,利用文中所述方法对其进行综合评价与排序。各导弹的战术技术性能指标如表 1。

表 1 某型导弹各种改进类型的战术技术性能指标

导弹类型	射程 /km	射高 /km	最大速度 /Ma	发射质量 /kg	战斗部			
					装药质量/kg	破片数量/块	破片质量/g	破片速度/(m · s⁻¹)
B1	21	22	3	2.163	137	3 600	11.6	3 050
B2	22	27	3.5	2.283	139	3 600	9.5	3 050
B3	20	27	3.5	2.283	120	12 000	5	2 300
B4	18	32	4	2.375	116	800	8.2	2 500

按照式(1)、(2),对表 1 中的数据进行规范化后得

$$X=\begin{bmatrix}0.75 & 0 & 0 & 1 & 0.913 & 0.25 & 1 & 1\\ 1 & 0.5 & 0.5 & 0.434 & 1 & 0.25 & 0.682 & 1\\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.44 & 0.174 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.485 & 0.267\end{bmatrix}$$

根据 X ,可取 $x^+=(1,1,\cdots,1)$, $x^-=(0,0,\cdots,0)$,再按照式(3),可得

$$E^+=\begin{bmatrix}0.4444 & 0.1667 & 0.1667 & 1.0000 & 0.6967 & 0.2105 & 1.0000 & 1.0000\\ 1.0000 & 0.2857 & 0.2857 & 1.2611 & 1.0000 & 0.2105 & 0.3861 & 1.0000\\ 0.2857 & 0.2857 & 0.2857 & 0.2611 & 0.1949 & 1.0000 & 0.1667 & 0.1667\\ 0.1667 & 1.0000 & 1.0000 & 0.1667 & 0.1667 & 0.1667 & 0.2797 & 0.2144\end{bmatrix}$$

$$E^-=\begin{bmatrix}0.2105 & 1.0000 & 1.0000 & 0.1667 & 0.1797 & 0.4444 & 0.1667 & 0.1667\\ 0.1667 & 0.2857 & 0.2857 & 0.3155 & 0.1667 & 0.4444 & 0.2415 & 0.1667\\ 0.2857 & 0.2857 & 0.2857 & 0.3155 & 0.5348 & 0.1667 & 1.0000 & 1.0000\\ 1.0000 & 0.1667 & 0.1667 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.2920 & 0.4283\end{bmatrix}$$

取 $\mu=0.5$,根据式(5)确定的权重为 $w=(0.1731,0.2025,0.2158,0.0042,0.0525,0.1378,0.1104)$,则可算得 $r^+=(0.0538,0.0657,0.0442,0.0665)$, $r^-=(0.0702,0.0329,0.0554,0.0644)$, $C=(0.4339,0.6664,0.4483,0.5083)$,故按照关联度的大小可得到4种类型导弹的优劣次序为 $B2>B4>B3>B1$,结果与专家意见一致。

3 结束语

本文用灰色关联度和正负理想方案对导弹战术技术性能评价进行了研究,给出了评价导弹性能优劣的具体步骤,为评价导弹性能提供了一种新途径。它克服了某些信息不确知性的因素,使对导弹性能评价的精确性和灵敏性得到提高,因此具有一定的实用性和推广价值。

参考文献:

[1] 陈绍顺,宁伟华,王 君. 不完全权重信息下的属性决策方法研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版)2004,5(5):24-27.
[2] 胡永宏,贺思辉. 综合评价方法[M]. 北京:科学出版社, 2000.
[3] 袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学出版社, 1991.
[4] 邓聚龙. 灰色系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
[5] 傅 立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社, 1992.
[6] 马亚龙,王精业,徐享忠,等. 基于理想方案的灰色关联综合评估研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002,24 (7):51-53.
[7] 申卯兴,薛西峰,张小水. 灰色关联分析中分辨系数的选取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2003,4(1):68-70.
[8] 汪泽焱. 基于理想最优方案的指标赋权法及其应用[J]. 系统工程,2002,20(2):6-9.
[9] 汪泽焱. 一种基于最大离差和熵的多指标评价方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2002,3(6):93-95.

(编辑:田新华)

The Comprehensive Evaluation Model of Missile Performance in Tactic and Technology

NING Wei - hua1 , CHEN Shao - shun1 , ZHANG Wu - shen2, CHEN Yong - ge1
(1. The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China; 2. The Science Institute, Air Force Engineering University, Xihn, Shaanxi 710051, China)

Abstract : In view of the positive and negative ideal plans, a comprehensive evaluation model of missile performance in tactic and technology is established, based on the gray correlation degree and taking regard to TOPSIS method. At the same time, the concrete course is illustrated during the analysis of the problem. Finally, the practical calculation shows that the model is feasible in evaluating missile performance.

Key words : gray con-elation degree ; evaluation ; normalization ; missile performance ; model