

# 雷达系统效能的灰色综合评估

黄建新, 杜文字, 张志峰

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**针对雷达系统性能指标的相对性、不可比性和灰色性,运用灰色系统理论对雷达系统效能评估问题,提出了一种基于层次-灰色关联度分析法评估效能的模型。以四种型号系列警戒雷达为例给出综合评估的分析实例,实例表明该方法较模糊综合评估更有效。

**关键词:**雷达系统;层次-灰色关联度分析法;效能评估

**中图分类号:**N945.16 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)01-0035-04

雷达系统随着科学技术的发展,越来越复杂,战术技术性能指标也越来越多,因此需要寻求一种能对雷达相对效能进行有效评估的方法。在雷达系统效能评估中,对备择方案进行优次排序时,如备择方案的比较性数值相差很小时,就会使决策困难。为此,针对雷达系统性能指标的相对性、不可比性和灰色性,为了寻找另外一个比较性参数,本文提出基于层次-灰色关联度分析法对雷达系统效能进行评估的模型。通过建立多层次的评估指标体系,对单项指标采用专家评判法,计算出评估因素间的灰色关联度,由关联度的大小给出优劣评定,是对雷达系统技术性能指标评估的一种可靠而有效的方法。

## 1 建立综合评估模型

灰色系统理论运用控制论与运筹学相结合的数学方法,发展了一套解决信息不完备系统的理论与方法,能够较好地处理贫信息系统的问题<sup>[1]</sup>。

### 1.1 属性矩阵

设系统有  $n$  个待优选的评估对象,每个对象又有  $m$  个评价因素,每个评价对象在相应各个评价因素下的属性值构成属性矩阵:  $X' = (x'_{ij})_{m \times n}$ 。式中,  $x'_{ij}$  代表第  $j$  个评估对象在第  $i$  个评价因素下的指标属性值。若评价因素为定性指标,则  $x'_{ij}$  为专家评分值 ( $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ )。

### 1.2 规格化矩阵

规格化可使变量无量纲化、张弛成  $[0, 1]$  之间的数,增加离散性。对象的属性指标有以下 3 种:

$$1) \text{“越大越优型”} : x_{ij} = \frac{x'_{ij} - \min_i x'_{ij}}{\max_i x'_{ij} - \min_i x'_{ij}};$$

$$2) \text{“越小越优型”} : x_{ij} = \frac{\max_i x'_{ij} - x'_{ij}}{\max_i x'_{ij} - \min_i x'_{ij}};$$

$$3) \text{“适当型”,即“越接近某一标准值 } \gamma_i \text{ 越优”} : x_{ij} = 1 - \frac{|x'_{ij} - \gamma_i|}{\max_i |x'_{ij} - \gamma_i|}。$$

于是,得到规格化矩阵为:  $X = (x_{ij})_{m \times n}$

显然,  $0 \leq x_{ij} \leq 1$ ,  $x_{ij}$  越大,表明第  $j$  个方案的第  $i$  个因素评价越优,  $x_{ij}$  越小,表明第  $j$  个方案的第  $i$  个因素评价越次。

### 1.3 系统的优向量 $G$ 和次向量 $B$

$$G = (g_1, g_2, \dots, g_m) = (x_{11} \vee x_{12} \vee \dots \vee x_{1n}, \vee x_{21} \vee x_{22} \vee \dots \vee x_{2n}, \dots, x_{m1}, \vee x_{m2} \vee \dots \vee x_{mn})$$

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_m) = (x_{11} \wedge x_{12} \wedge \dots \wedge x_{1n}, x_{21} \wedge x_{22} \wedge \dots \wedge x_{2n}, \dots, x_{m1} \wedge x_{m2} \wedge \dots \wedge x_{mn})$$

其中  $\vee$ 、 $\wedge$  分别为取大、取小运算符, 又记

$$X_j = (x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}), \quad j = 1, 2, \dots, n$$

#### 1.4 关联度分析

灰色系统理论中的关联度分析法, 是系统发展态势的量化比较分析, 这种比较是系统统计数据列几何关系的比较, 认为诸个统计数据列所构成的曲线几何形状越接近, 则变化态势越接近, 关联度就越大。关联度的计算, 就是因素间关联程度大小的一种定量分析<sup>[2]</sup>。

##### 1.4.1 AHP 法确定评估指标体系各指标权重

利用 AHP 法确定评估指标体系各指标的权重, 限于篇幅, 不再讨论, 具体见文献[3]。

##### 1.4.2 关联系数 $\xi_i$

第  $j$  个方案向量  $X_j$  与优向量  $G$  的关联系数为

$$\xi_i(X_j, G) = \frac{\min_i \min_j |x_{ij} - g_i| + \rho \max_i \max_j |x_{ij} - g_i|}{|x_{ij} - g_i| + \rho \max_i \max_j |x_{ij} - g_i|} = \frac{\rho \max_i \max_j |x_{ij} - g_i|}{|x_{ij} - g_i| + \rho \max_i \max_j |x_{ij} - g_i|}$$

第  $j$  个方案向量  $X_j$  与次向量  $B$  的关联系数为

$$\xi_i(X_j, B) = \frac{\min_i \min_j |x_{ij} - b_i| + \rho \max_i \max_j |x_{ij} - b_i|}{|x_{ij} - b_i| + \rho \max_i \max_j |x_{ij} - b_i|} = \frac{\rho \max_i \max_j |x_{ij} - b_i|}{|x_{ij} - b_i| + \rho \max_i \max_j |x_{ij} - b_i|}$$

$\rho$  为分辨系数,  $\rho \in [0, 1]$ , 通常应取  $\rho = 0.05$  为宜<sup>[4]</sup>。

##### 1.4.3 关联度

第  $j$  个方案向量  $X_j$  与优向量  $G$  的关联度为

$$\gamma(X_j, G) = \sum_{i=1}^m w_i \xi_i(X_j, G)$$

第  $j$  个方案向量  $X_j$  与次向量  $B$  的关联度为

$$\gamma(X_j, B) = \sum_{i=1}^m w_i \xi_i(X_j, B)$$

其中  $w_i$  是评估体系中各指标的权重。

##### 1.4.4 综合评估模型<sup>[5]</sup>

假设第  $j$  个方案向量  $X_j$  以  $u_j$  从属于优向量  $G$ , 那么  $X_j$  即以  $(1 - u_j)$  从属于次向量  $B$ 。将最小二乘准则拓展, 使目标函数最小化:

$$\min \{F(u) = \sum_{j=1}^n [(1 - u_j) \gamma(X_j, G)]^2 + [u_j \gamma(X_j, B)]^2\}$$

其中  $u$  为系统的最优解向量:  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 。

由  $\frac{\partial F(u)}{\partial u_j} = 0$ , 得出灰色综合评估向量:

$$u_j = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\gamma(X_j, B)}{\gamma(X_j, G)} \right]^2} = \frac{1}{1 + \left[ \frac{\sum_{i=1}^m w_i \xi_i(X_j, B)}{\sum_{i=1}^m w_i \xi_i(X_j, G)} \right]^2}, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

##### 1.4.5 灰色关联度排序

由灰色综合评估模型计算出第  $j$  个备择方案向量  $X_j$  从属于优向量的程度, 即反映了该方案的优次程度, 根据  $u_j$  的大小对各个备择方案进行优次排序, 即得灰色关联序。灰色关联序就是评估方案的优劣次序。

## 2 实例分析

现有某 cm 波型号系列警戒雷达: 原型、甲型、甲改、乙型, 对它们的效能进行综合评估。其功能可分为

探测能力、定位能力、识别能力、数据处理(终端)能力、生存能力、抗干扰能力及可用性等,每种能力又由具体技术指标构成,从而构成雷达效能评估指标体系<sup>[6]</sup>,其具体技术指标如表 1 所示。

表 1 某 cm 波型号系列警戒雷达具体技术指标

指标	型号系列			
	乙型	原型	甲型	甲改
探测空域	较好(0.75)	较好(0.75)	较好(0.75)	较好(0.75)
数据率	差(0.25)	差(0.25)	一般(0.50)	较好(0.75)
目标影响	一般(0.50)	一般(0.50)	一般(0.50)	好(0.625)
测量精度	一般(0.50)	一般(0.50)	一般(0.50)	好(0.625)
分辨率	一般(0.50)	一般(0.50)	好(0.625)	较好(0.75)
识别容量	一般(0.50)	一般(0.50)	一般(0.50)	一般(0.50)
正确识别	一般(0.50)	一般(0.50)	好(0.625)	很好(1.00)
目标容量	一般(0.50)	好(0.625)	好(0.625)	较好(0.75)
跟踪范围	一般(0.50)	一般(0.50)	一般(0.50)	较好(0.75)
隐蔽性	差(0.25)	差(0.25)	差(0.25)	一般(0.50)
机动性	差(0.25)	差(0.25)	差(0.25)	一般(0.50)
抗箔条	差(0.25)	差(0.25)	好(0.625)	较好(0.75)
抗噪声	一般(0.50)	一般(0.50)	好(0.625)	较好(0.75)
抗杂波	差(0.25)	一般(0.50)	好(0.625)	较好(0.75)
抗有源假目标欺骗	差(0.25)	差(0.25)	一般(0.50)	好(0.625)
故障维修	差(0.25)	差(0.25)	一般(0.50)	好(0.625)
预防性维修	一般(0.50)	一般(0.50)	好(0.625)	较好(0.75)

2.1 建立评估集

设  $v = \{v_1, v_2, \dots, v_5\} = \{\text{很好, 较好, 好, 一般, 差}\}$ , 即很好 = 1.0, 较好 = 0.75, 好 = 0.625, 一般 = 0.50, 差 = 0.25, 评估定量化如表 1 所示。

2.2 建立评估对象因素集

由对雷达系统的全面分析及专家咨询综合归纳出雷达系统效能层次结构模型见文献[7]。

2.3 计算各层指标权重

利用 AHP 法,向专家咨询得到各层指标的权重如下:

$$\begin{aligned}
 W &= (0.211, 0.072, 0.115, 0.065, 0.115, 0.211, 0.211), \\
 W^{(1)} &= (0.429, 0.142, 0.429), W^{(2)} = (0.5, 0.5), \\
 W^{(3)} &= (0.333, 0.667), W^{(4)} = (0.5, 0.5), W^{(5)} = (0.5, 0.5), \\
 W^{(6)} &= (0.333, 0.167, 0.167, 0.333), W^{(7)} = (0.5, 0.5).
 \end{aligned}$$

2.4 效能指标的一级评估

由表 1 可知,雷达系统效能的探测能力的属性矩阵为

$$X^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.75 & 0.75 & 0.75 & 0.75 \\ 0.25 & 0.25 & 0.50 & 0.75 \\ 0.50 & 0.50 & 0.50 & 0.625 \end{bmatrix}$$

规格化矩阵为

$$X^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可得优向量:  $G^{(1)} = (0, 1, 1)$ , 次向量:  $B^{(1)} = (0, 0, 0)$

已知权向量:  $W^{(1)} = (0.429, 0.142, 0.429)$

计算向量  $X_j^{(1)}$  与优向量  $G^{(1)}$  的关联系数如下:

$$\begin{aligned} \xi_1^{(1)}(x_{11}^{(1)}, g_1^{(1)}) &= 1.0, & \xi_1^{(1)}(x_{12}^{(1)}, g_1^{(1)}) &= 1.0, & \xi_1^{(1)}(x_{13}^{(1)}, g_1^{(1)}) &= 1.0, \\ \xi_1^{(1)}(x_{14}^{(1)}, g_1^{(1)}) &= 1.0, & \xi_2^{(1)}(x_{21}^{(1)}, g_2^{(1)}) &= 0.0476, & \xi_2^{(1)}(x_{22}^{(1)}, g_2^{(1)}) &= 0.0476, \\ \xi_2^{(1)}(x_{23}^{(1)}, g_2^{(1)}) &= 0.0909, & \xi_2^{(1)}(x_{24}^{(1)}, g_2^{(1)}) &= 1.0, & \xi_3^{(1)}(x_{31}^{(1)}, g_3^{(1)}) &= 0.0476, \\ \xi_3^{(1)}(x_{32}^{(1)}, g_3^{(1)}) &= 0.0476, & \xi_3^{(1)}(x_{33}^{(1)}, g_3^{(1)}) &= 0.0476, & \xi_3^{(1)}(x_{34}^{(1)}, g_3^{(1)}) &= 1.0. \end{aligned}$$

计算向量  $X_j^{(1)}$  与次向量  $B^{(1)}$  的关联系数如下:

$$\begin{aligned} \xi_1^{(1)}(x_{11}^{(1)}, b_1^{(1)}) &= 1.0, & \xi_1^{(1)}(x_{12}^{(1)}, b_1^{(1)}) &= 1.0, & \xi_1^{(1)}(x_{13}^{(1)}, b_1^{(1)}) &= 1.0, \\ \xi_1^{(1)}(x_{14}^{(1)}, b_1^{(1)}) &= 1.0, & \xi_2^{(1)}(x_{21}^{(1)}, b_2^{(1)}) &= 1.0, & \xi_2^{(1)}(x_{22}^{(1)}, b_2^{(1)}) &= 1.0, \\ \xi_2^{(1)}(x_{23}^{(1)}, b_2^{(1)}) &= 0.0909, & \xi_2^{(1)}(x_{24}^{(1)}, b_2^{(1)}) &= 0.0476, & \xi_3^{(1)}(x_{31}^{(1)}, b_3^{(1)}) &= 1.0, \\ \xi_3^{(1)}(x_{32}^{(1)}, b_3^{(1)}) &= 1.0, & \xi_3^{(1)}(x_{33}^{(1)}, b_3^{(1)}) &= 1.0, & \xi_3^{(1)}(x_{34}^{(1)}, b_3^{(1)}) &= 0.0476. \end{aligned}$$

代入灰色综合评估模型,得出评估结果:

$$u^{(1)} = (0.1723, 0.1723, 0.2198, 0.8277)$$

同理可求:

$$u^{(2)} = (0.0023, 0.0023, 0.0159, 0.9977), u^{(3)} = (0.1174, 0.1174, 0.4157, 0.8826)$$

$$u^{(4)} = (0.0023, 0.0159, 0.0159, 0.9977), u^{(5)} = (0.0023, 0.0023, 0.0023, 0.9977)$$

$$u^{(6)} = (0.0023, 0.0042, 0.8076, 0.9977), u^{(7)} = (0.0023, 0.0023, 0.6582, 0.9977)$$

## 2.5 效能指标的二级评估

规格化矩阵为

$$X = \begin{bmatrix} 0.1723 & 0.1723 & 0.2198 & 0.8277 \\ 0.0023 & 0.0023 & 0.0159 & 0.9977 \\ 0.1174 & 0.1174 & 0.4157 & 0.8826 \\ 0.0023 & 0.0159 & 0.0159 & 0.9977 \\ 0.0023 & 0.0023 & 0.0023 & 0.9977 \\ 0.0023 & 0.0042 & 0.8076 & 0.9977 \\ 0.0023 & 0.0023 & 0.6582 & 0.9977 \end{bmatrix}$$

可得:  $G = (0.8277, 0.9977, 0.8826, 0.9977, 0.9977, 0.9977, 0.9977)$

$$B = (0.1723, 0.0023, 0.1174, 0.0023, 0.0023, 0.0023, 0.0023)$$

已知  $W = (0.211, 0.072, 0.115, 0.065, 0.115, 0.211, 0.211)$ , 计算向量  $X_j$  与优向量  $G$  及次向量  $B$  的关联系数,代入灰色综合评估模型,得出评估结果:

$$u = (0.0029, 0.0031, 0.1199, 0.9971)$$

## 2.6 结论对比分析

由以上评估结果可知,雷达系统效能综合评估的排列次序为乙型 > 甲改 > 甲型 > 原型。该评估结果与实际雷达型号系列的效能相符。

本文结果与文献[7]、[8]相比,计算简便、科学合理,使数据的离散性,评估结果的可信性都大大增强,较模糊综合评估更有效。

## 3 结束语

本文着重阐述了雷达系统效能分析的模型与效能分析的方法,用灰色系统理论中的关联度分析法有效解决了多指标的相对性、不可比性和灰色性问题,对多目标评估的结果清晰、准确。文中提出的利用灰色系统理论的关联度分析法,是一种新的衡量因素间关联程度大小的量化方法,结合拓展的最小二乘准则来建立灰色综合评估模型,是综合评估的一条新途径,较模糊综合评估在数量化描述方面更为有效和精确。