基于 GAHP 的水声对抗策略评估方法研究

王红萍，张永峰，陈晓辉，王延求
(广东湛江 91388 部队，广东湛江 524022)

摘要：以灰色系统理论为基础，结合层次分析法，建立了基于 AHP 和灰色评估法的混合评估模型。论述了该模型应用的基本步骤，并对不同对抗策略下的水声对抗效果评估进行了研究，给出了评估不同对抗策略对抗效果优劣的具体过程。实例表明，该评估方法科学合理，可以减少主观因素的影响，实现不同对抗策略下对抗效果的量化分析，为水声对抗策略的优选提供了一种新方法。

关键词：层次分析法；灰色评估；白化权函数；对抗策略
中图分类号：TB565 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-3630(2009)-05-0660-04
DOI 编码：10.3969/j.issn1000-3630.2009.05.020

Research on evaluation method of acoustic countermeasure strategy based on GAHP

WANG Hong-ping, ZHANG Yong-feng, CHEN Xiao-hui, WANG Yan-qiu
(*Unit* 91388, *PLA*, *Zhanjiang* 524022, *Guangdong*, *China*)

Abstract: Based on grey system theory and analytic hierarchy process, a hybrid evaluation model of acoustic countermeasure strategies is established and the basic processes of the model are described. The concrete procedure of evaluating the inferiors and superiors of countermeasure effectiveness is given by further studying on the countermeasure effectiveness of different strategies. An illustrative example shows that the method is scientific and rational, and also indicates that this method can effectively avoid the subjective factor influences on effectiveness evaluation. The result shows that the evaluation model can be used to realize the quantitative analysis of effectiveness evaluation of different countermeasure strategies, and provides a new method for optimization of acoustic countermeasure strategies.

Key words: analytic hierarchy process; grey evaluation; whiten weight function; countermeasure strategies

1 引 言

海战中根据现代鱼雷的技术和战术特点，制定和选择不同的水声对抗策略，提高本艇的生存概率，是水声对抗的主要目的。不同的对抗策略带来水声对抗效果的差异，可以作为区分水声对抗策略优劣的依据。通常，在选定的对抗态势下，采用计算机仿真技术，通过一定的指标体系，提取影响水声对抗效果的因素，对不同对抗策略下的水声对抗效果做出评估，依据评估值对策略的优劣做出区分。文献[1]利用器材有效对抗率、器材平均有效对抗时间、舰艇生存概率的提高率百分比等指标对不同对抗策略下的水声对抗效果进行了描述；文献[2]、[3]分别针对采用生存概率和有效对抗时间评价水声对抗效果的方法进行了研究和探讨。采取单个指标的方法简单明了，易于仿真计算，可是存在单个指标不能全面准确地反映器材对抗效果的不利因素；多个指标的方法能够较全面地描述对抗效果，但是各指标间的权重大小及相互关系严重地影响到评估的可信度。

文中将 AHP(层次分析法)与灰色评估法相结合，形成了基于 AHP 和灰色评估法的混合评估模型(GAHP)。模型中 AHP 用于合理确定对抗效果评估中的层次结构及指标权重，而指标的量化和比较则是运用灰数和白化权函数取得的。该混合评估模型兼具灰色评估法和 AHP 的优点，用于区分不同对抗策略的优劣，可解决信息不确定情况下的综合评估问题，并且突破了传统评估方法需要样本量大、计算量大等局限，具有良好的应用前景。

2 基于 AHP 和灰色评估法的混合模型

AHP[4]将影响水声对抗效果的有关元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础上进行定性和定量分析，解决权重分配的问题。对于指标数据间不确定的信息相互关系，可借助灰色系统理论。灰

收稿日期：2008-08-30；**修回日期**：2008-12-12
作者简介：王红萍(1971-)，女，湖北孝感人，硕士研究生，工程师，研究方向为水声工程。
通讯作者：王红萍，E-mail: wanghongping2007@21cn.com

色系统理论(Grey System Theory)由邓聚龙教授于1982 年提出。控制论中常借助颜色来形容获取系统内部信息的多少或对系统本身的了解程度。系统内部信息全部明确的系统称为白色系统；信息完全不了解的系统称为黑色系统；部分了解、部分不了解的系统称为灰色系统。灰色系统理论是将系统科学和运筹学的数学方法相结合的一种理论方法，它利用已知信息来确定系统的未知信息，从而使系统由“灰”变为“白”[5]。灰色评估法可用于一般评估模型与灰色模型相结合情况下的评估。

2.1　构建评估指标体系

首先把目标(评估对象)分解成为一个个的元素，然后把这些元素按不同属性分成若干组，形成不同的层次。以同一层次的元素作为准则，它对下一层次的元素起支配作用，同时又受上一层次元素的支配，这种从上至下的支配关系形成了一个递阶层次结构。层次的多少要由评估对象的复杂程度和分析深度来决定，其底层元素即为所求的评估指标。

2.2　计算评估指标的合成权重

建立层次结构后，上下层次元素之间的隶属关系就确定了。根据层次分析法，在上层的准则下，采用 1~9 标度法[6]对本层元素进行两两比较，按照各自的重要程度进行评分，构造判断矩阵。根据权重求解方法计算相邻层次下层元素对于上层元素的相对权重，在此基础上再算出底层元素对于目标的合成权重 w：

$$w=(w_1,w_2,\ldots,w_m) \tag{1}$$

2.3　构造评估指标样本矩阵

设有 m 个评估指标，假设有 p 个评估对象参与评估，第 $k(k=1,2,\ldots,p)$ 个评估对象中第 i 个评估指标的值为 $d_i^{(k)}$，则指标的评估样本矩阵 $\boldsymbol{D}$ 为：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} d_1^{(1)} & d_1^{(2)} & \ldots & d_1^{(p)} \\ d_2^{(1)} & d_2^{(2)} & \ldots & d_2^{(p)} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ d_m^{(1)} & d_m^{(2)} & \ldots & d_m^{(p)} \end{bmatrix}=\left(d_i^{(k)}\right)_{m\times p} \tag{2}$$

2.4　确定评估灰类

确定评估灰类就是要确定评估灰类的等级数、灰类的灰数以及灰数的白化权函数，针对具体对象，通过定性分析确定。

常用的白化权函数 $f_N(x)$ 有下述 3 种形式[7]：

(a) 灰数为 $\otimes\in[0,d_1,\infty)$，其白化权函数为：

$$f_1(x)=\begin{cases} x/d_1 & x\in[0,d_1] \\ 1 & x\in(d_1,\infty] \\ 0 & x\in(-\infty,0) \end{cases} \tag{3}$$

(b) 灰数为 $\otimes\in[0,d_1,2d_1]$，其白化权函数为：

$$f_2(x)=\begin{cases} x/d_1 & x\in[0,d_1] \\ 2-x/d_1 & x\in(d_1,2d_1] \\ 0 & x\notin(0,2d_1) \end{cases} \tag{4}$$

(c) 灰数为 $\otimes\in[0,d_1,d_2]$，其白化权函数为：

$$f_2(x)=\begin{cases} 1 & x\in[0,d_1] \\ \dfrac{d_2-x}{d_2-d_1} & x\in(d_1,d_2] \\ 0 & x\notin(0,d_2) \end{cases} \tag{5}$$

2.5　计算综合评估值，给出评估结果

取灰色评估类个数为 n，计算第 $k(k=1,2,\cdots,p)$ 个对抗方案中，第 $i(i=1,2,\cdots,m)$ 个评估指标 $d_i^{(k)}$ 对于第 $N(N=1,2,\cdots,n)$ 个评估类的灰色评估系数记为 $x_{i,N}^{(k)}$，各个评估灰类的总灰色评估系数记为 $x_i^{(k)}$，属于第 N 个评估灰类的灰色评估权记为 $r_{i,N}^{(k)}$，则：

$$x_{i,N}^{(k)}=f_N(d_i^{(k)}) \tag{6}$$

$$x_i^{(k)}=\sum_{N=1}^{n}x_{i,N}^{(k)} \tag{7}$$

$$r_{i,N}^{(k)}=x_{i,N}^{(k)}/x_i^{(k)} \tag{8}$$

将 $d_i^{(k)}$ 的各灰色评估权 $r_{i,N}^{(k)}$ 组成灰色评估权向量 $\boldsymbol{r}_{i,N}^{(k)}$：

$$\boldsymbol{r}_{i,N}^{(k)}=[r_{i,1}^{(k)},r_{i,2}^{(k)},\cdots,r_{i,n}^{(k)}] \tag{9}$$

综合第 k 个方案所属指标 $d_i^{(k)}(i=1,2,\ldots,m)$ 的灰色评估权向量 $\boldsymbol{r}_{i,N}^{(k)}$，构成灰色评估矩阵 $\boldsymbol{R}^{(k)}$ 为：

$$\boldsymbol{R}^{(k)}=\begin{bmatrix} \boldsymbol{r}_{1,N}^{(k)} \\ \boldsymbol{r}_{2,N}^{(k)} \\ \vdots \\ \boldsymbol{r}_{m,N}^{(k)} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} r_{1,1}^{(k)} & r_{1,2}^{(k)} & \cdots & r_{1,n}^{(k)} \\ r_{2,1}^{(k)} & r_{2,2}^{(k)} & \cdots & r_{2,n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m,1}^{(k)} & r_{m,2}^{(k)} & \cdots & r_{m,n}^{(k)} \end{bmatrix} \tag{10}$$

结合权重 w，得出第 k 个评估对象灰类评估结果向量：

$$\boldsymbol{G}^{(k)}=\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{R}^{(k)}=[g_1^{(k)},g_2^{(k)},\cdots,g_n^{(k)}] \tag{11}$$

根据灰类评估结果向量 $\boldsymbol{G}^{(k)}$ 的最大值判断评估对象归属于哪一评估灰类等级：

$$\sigma^{(k)}=\max_n\{g_1^{(k)},g_2^{(k)},\cdots,g_n^{(k)}\} \tag{12}$$

计算评估对象综合评估的单值 $E^{(k)}$：

$$E^{(k)}=\sigma^{(k)}\cdot\eta_N \tag{13}$$

其中，η_N 从 n 个评价灰类对应的等级分值 η 中取值，若评价灰类 $n=4$，则四个评价灰类对应的等级分值向量为 $\boldsymbol{\eta}=[9,7,5,3]^{\mathrm{T}}$，由 $\sigma^{(k)}$ 对应的灰类确定 η_N 的取值。不同的评估对象可得到不同综合评估单值 $E^{(k)}$。

3　应用混合模型的水声对抗策略评估实例

按照上述混合模型，利用文献[1]中不同对抗策

略下的评估指标统计数据，可对不同对抗策略下的对抗效果进行评估。文献[1]中典型态势下四种不同对抗策略下的评估指标数据见表 1。

表 1 评估指标统计数据

Table 1 Statistical data of evaluation index

对抗策略	$(MOE)_1$	$(MOE)_2$	$(MOE)_3$	$(MOE)_4$	$(MOE)_5$
策略一 (器材射向+150°)	86	302	205.81	0.60	22
策略二 (器材射向+120°)	100	391	25.352	0.42	38
策略三 (器材射向+90°)	95	310	160.24	0.55	92
策略四 (器材射向+60°)	60	125	1679.3	0.87	42

3.1 构建水声对抗效果的层次模型

水声对抗中，影响对抗效果的因素很多。以下是评估不同对抗策略下对抗效果优劣的两条准则：(1) 策略中对抗器材的使用是否为舰艇的规避赢得了时间；(2) 使用对抗器材是否比不使用对抗器材舰艇的生存概率有所提高。按照这样的评估准则，应用层次分析法，形成图 1 所示的水声对抗效果的递阶层次结构，其底层元素即为所求的评估指标。

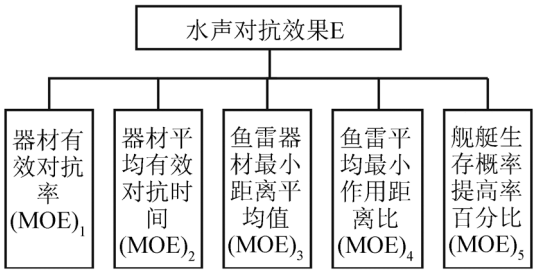

图 1 水声对抗效果层次结构模型

Fig.1 The hierarchical structure model of countermeasure effectiveness

3.2 计算评估指标的合成权重

通过六名专家进行“背对背”式问卷调查，对指标的重要性进行评选，两两重要性比较可求得指标重要性判断矩阵 $\boldsymbol{A}$：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 4 & 2 & 1/5 \\ 3 & 1 & 7 & 5 & 1/4 \\ 1/4 & 1/7 & 1 & 1/5 & 1/9 \\ 1/2 & 1/5 & 5 & 1 & 1/7 \\ 5 & 4 & 9 & 7 & 1 \end{bmatrix}$$

求得判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的最大特征根 $\lambda_{\max}=5.3559$，将其对应的特征向量归一化处理后得到水声对抗效果评估指标的权重向量 $\boldsymbol{w}$=(0.1079，0.2448，0.0315，0.0774，0.5383)，再对矩阵 $\boldsymbol{A}$ 进行一致性检验，可得：

$$CR=\frac{\lambda_{\max}-n}{RI(n-1)}=0.0795$$

其中，CR 为判断矩阵随机一致性指标；RI 为平均随机一致性指标，阶数 n 为 5 时，RI 取值为 1.1185[6]，CR<0.1，可以认为判断矩阵的一致性是满足要求的，说明权重的分配是合适的。

3.3 给出评估指标样本矩阵

表 1 中各指标量纲、数值不同，需要对指标数据进行最值无量纲化处理：

越大越好型指标：$d_i^{(k)}=d_i^{(k)}\big/d_{i\ \max}^{(l)}$ (14)

越小越好型指标：$d_i^{(k)}=d_{i\ \min}^{(l)}\big/d_i^{(k)}$ (15)

无量纲化处理后，得出指标的评估样本矩阵 $\boldsymbol{D}$ 为：

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix} 0.86 & 1 & 0.95 & 0.6 \\ 0.7724 & 1 & 0.7928 & 0.3197 \\ 0.1232 & 1 & 0.1582 & 0.0151 \\ 0.7 & 1 & 0.7636 & 0.4828 \\ 0.2391 & 0.413 & 1 & 0.4565 \end{bmatrix}$$

3.4 确定评估灰类

策略优选的目的是区分优劣，因而本文采用层次型的灰数类，取评估灰类 n=4，对应了 4 个评价等级：优、良、中、差，分别记为 $N=\{1,2,3,4\}$。其中：好的层次分为优和良两个等级，以利于优中选优。根据具体分析，选用 2.4 节中(c)类型白化权函数，白化权函数图形如图 2 所示。

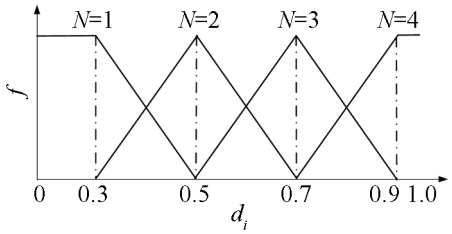

图 2 灰色白化权函数示意图

Fig.2 Sketch map of greyed weight function

(1) 灰类 N=1，对应高评估等级，灰数 $\otimes_1\in[d_0,\ d_1,\ d_2]$=[0.7, 0.9, 1.0]，其白化权函数表达式为：

$$f_1(d_i^{(k)})=\begin{cases} \dfrac{d_i^{(k)}-d_0}{d_1-d_0}, & d_i^{(k)}\in[d_0,d_1) \\ 1, & d_i^{(k)}\in[d_1,d_2] \\ 0, & d_i^{(k)}\notin[d_0,d_2] \end{cases} \tag{16}$$

(2) 灰类 $N=\{2,3\}$，中间评估等级，对应灰数分别为 $\otimes_2\in[0.5,0.7,0.9]$，$\otimes_3\in[0.3,0.5,0.7]$，其白化权函数图形如图 2 中所示，其中 $\{d_3,d_4,d_5\}$ 依次取 $\{0.5,0.7,0.9\}$，$\{0.3,0.5,0.7\}$，表达式为：

$$f_N(d_i^{(k)})=\begin{cases} \dfrac{d_i^{(k)}-d_3}{d_4-d_3}, & d_i^{(k)}\in[d_3,d_4) \\ \dfrac{d_i^{(k)}-d_5}{d_4-d_5}, & d_i^{(k)}\in[d_4,d_5] \\ 0, & d_i^{(k)}\notin[d_3,d_5] \end{cases} \tag{17}$$

(3) 灰类 N=4，对应低评估等级，灰数 $\otimes_4 \in [d_6, d_7, d_8]=[0, 0.3, 0.5]$，白化权函数表达式为：

$$f_5(d_i^{(k)})=\begin{cases}1, & d_i^{(k)}\in[d_6,d_7)\\ \dfrac{d_i^{(k)}-d_8}{d_7-d_8}, & d_i^{(k)}\in[d_7,d_8]\\ 0, & d_i^{(k)}\notin[d_6,d_8]\end{cases} \tag{18}$$

3.5 计算不同对抗策略下对抗效果评估值

利用白化权函数和式(6)~(8)计算各对抗策略下评估指标的灰色评估系数，以策略一为例：

N=1，$x_{1,1}^{(1)}=f_1(d_1^{(1)})=0.8$；$x_{2,1}^{(1)}=f_1(d_2^{(1)})=0.3619$；$x_{3,1}^{(1)}=f_1(d_3^{(1)})=0$；$x_{4,1}^{(1)}=f_1(d_4^{(1)})=0$；$x_{5,1}^{(1)}=f_1(d_5^{(1)})=0$

同理，N=2、3、4 时策略一下评估指标的灰色评估系数，经组合可得灰色评估向量 $\boldsymbol{r}_{1,N}^{(1)}$、$\boldsymbol{r}_{2,N}^{(1)}$、$\boldsymbol{r}_{3,N}^{(1)}$、$\boldsymbol{r}_{4,N}^{(1)}$ 和 $\boldsymbol{r}_{5,N}^{(1)}$，由灰色评估向量组成灰色评估矩阵 $\boldsymbol{R}^{(1)}$：

$$\boldsymbol{R}^{(1)}=\begin{bmatrix}0.8 & 0.2 & 0 & 0\\ 0.3619 & 0.6381 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

同理可求得其它策略下对应的灰色评估矩阵 $\boldsymbol{R}^{(2)}$，$\boldsymbol{R}^{(3)}$ 和 $\boldsymbol{R}^{(4)}$，分别为：

$$\boldsymbol{R}^{(2)}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0.5652 & 0.4348\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}^{(3)}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0.4642 & 0.5358 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0.3182 & 0.6818 & 0 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}^{(4)}=\begin{bmatrix}0 & 0.5 & 0.5 & 0\\ 0 & 0 & 0.0985 & 0.9015\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0.9138 & 0.0862\\ 0 & 0 & 0.7826 & 0.2174\end{bmatrix}$$

结合权重 w，利用式(11)得出 4 个策略方案下灰类评估结果向量：

$$\boldsymbol{G}^{(1)}=\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{R}^{(1)}=[0.1749\ \ 0.2552\ \ 0\ \ 0.3780]$$

$$\boldsymbol{G}^{(2)}=\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{R}^{(2)}=[0.4616\ \ 0\ \ 0.3043\ \ 0.2340]$$

$$\boldsymbol{G}^{(3)}=\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{R}^{(3)}=[0.7845\ \ 0.1839\ \ 0\ \ 0.0315]$$

$$\boldsymbol{G}^{(4)}=\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{R}^{(4)}=[0\ \ 0.0539\ \ 0.5701\ \ 0.3759]$$

最后，利用式(12)和式(13)，可得出 4 个策略方案下水声对抗效果的综合评估值，如表 2 所示。

表 2　策略方案综合评估值

Table 2　Synthetic evaluation value of tactics schemes

对抗策略	策略一	策略二	策略三	策略四
综合评估值($E^{(k)}$)	1.71	4.15	7.06	2.85

由表 2 可知，策略三是该典型态势下的最优对抗策略，四个对抗策略下对抗效果优劣次序分别为 $E^{(3)}>E^{(2)}>E^{(4)}>E^{(1)}$，策略二和策略三同属于“优”层次，策略四属“中”层次，策略一最差。可见，评估结果定量给出了不同策略方案下的水声对抗效果评估值，与文献[1]中的定性评价结论基本相符。

4 结 论

基于 AHP 和灰色评估法的混合评估模型利用层次分析法确定效果评估指标的权重，充分考虑水声对抗效果中指标数据相互间的不确定关系，通过灰数和白化权函数将其量化和比较，对不同策略方案下的水声对抗效果进行了综合评估。基于 AHP 和灰色评估法的混合评估模型可以减少主观因素的影响，提高评估结论的准确性、科学性，是区分和优选水声对抗策略的一种有效的探索方法。

参 考 文 献

[1] 罗修波，董晓恒，钱斌. 水声对抗器材对抗效果评估方法研究[J]. 系统仿真, 2007, **19**(3): 657-659.
LUO Xiubo, DONG Xiaoheng, QIAN Bin. Research on Method of Counterwork Effectiveness of Underwater Acoustic Countermeasure Equipment[J]. Journal of System Simulation, 2007, **19**(3): 657-659.

[2] 刘保果，章新华. 拖曳声诱饵对抗自导鱼雷的效能评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2001, (4): 57-60.
LIU Baoguo, ZHANG Xinhua. Evaluation of Anti-Torpedo Operation Effectiveness for Towed Acoustic Decoy[J]. Military Operations and Systems Engineering, 2001, (4): 57-60.

[3] 刘春跃. 用有效对抗时间评价对抗效果的方法探讨[J]. 水声对抗, 1996.
LIU Chunyue. Discussions on Taking Effective Countermeasure Time as an Evaluation Index for Countermeasure Effectiveness[J]. Underwater Acoustic War, 1996.4.

[4] 王莲芬，许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京：中国人民大学出版社, 1990.
WANG Lianfen, XU Shubo. Introduction to Analytic Hierarchy Process[M]. China Renmin University Press, 1990.

[5] 刘思峰，郭天榜，党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京：科学出版社, 2000.
LIU Sifeng, GUO Tianbang, DANG Yaoguo. Grey System Theory and Its Applications[M]. BeiJing: Science Press, 2000.

[6] 侯定丕，王战军. 非线性评估的理论探索与应用[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社, 2001.
HOU Dingpi, WANG Zhanjun. Research and Application of Nonlinear Theory[M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2001.

[7] 吕艳辉，潘成胜. 基于 AHP 的灰色评估模型及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2005, **30**(8): 80-82.
LU Yanhui, PAN Chengsheng. Grey Evaluation Model based on AHP and Its Application[J]. Fire Control and Command Control, 2005, **30**(8): 80-82.