

应用改进 AHP 对潜艇水声对抗的效能评估

马广义, 刘高峰, 顾雪峰

(海军工程大学 电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 潜艇的水声对抗效能对于潜艇的生存力具有极大的影响。针对现代海战条件下潜艇水声对抗效能问题, 分析了影响潜艇水声对抗效能的因素, 给出评价其效能的指标体系。为了克服传统 AHP 在评估过程中存在的标度缺陷以及专家评分主观性强等问题, 采用改进 AHP 与 Delphi 结合的方法对潜艇水声对抗效能进行了评估, 并与传统 AHP 进行了对比分析, 证明了改进 AHP 适用于水声对抗效能评估, 提高了评估结果的科学性和合理性。

关键词: 潜艇; 水声对抗; 改进层次分析法; 效能评估

中图分类号: U674.760.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-05-0401-05

Applying reformed AHP to evaluation of acoustic warfare effectiveness for submarine

MA Guang-yi, LIU Gao-feng, GU Xue-feng

(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Effectiveness of acoustic warfare is very important for the survival of submarines. Factors of acoustic warfare effectiveness are analyzed. A system of effectiveness evaluation is built to deal with problems in modern sea battle. A combined method of the reformed AHP and Delphi is applied to resolve of scale limitation problems and overcome subjectivity in the expert evaluation of the effectiveness. Compared with the traditional AHP, the method is analyzed, showing that the reformed AHP provides an effective method for the acoustic warfare effectiveness evaluation which is more reasonable with scientific bases.

Key words: submarine; acoustic warfare; reformed AHP; effectiveness evaluation

1 引 言

潜艇由于其优越的隐蔽性和作战突然性, 在现代战争中发挥了巨大的攻击力和威慑力。由于工作环境的特殊性, 水声对抗成为影响其生存力和战斗力的决定性因素。1982 年英阿马岛海战中, 英国潜艇用一枚鱼雷就击沉了阿根廷海军的贝尔格拉诺巡洋舰, 迫使阿根廷撤出战争, 继续让英国占领马

岛。与此同时, 阿根廷海军使用从德国购买的潜艇和鱼雷向英国海军的旗舰进行攻击, 但因英军舰艇装备的反鱼雷水声对抗系统起了作用, 阿根廷海军的鱼雷攻击没有得逞。

现代战争的胜负, 首先决定于电子战的能力, 然后才是武器的威力及其战术。水声对抗是潜艇电子战的一个重要组成部分, 世界各国军事部门投入了大量的人力、物力, 积极地进行水声对抗系统的研究。20 世纪 80 年代以来, 随着潜用声纳技术、鱼雷制导技术及计算机等技术的飞速发展, 各种反潜兵力和兵器对潜艇生存构成的威胁越来越大。因此, 对潜艇水声对抗效能进行合理的评估, 正确利用水声

对抗器材,恰当采取水声对抗措施,保证潜艇作战和反潜战的胜利至关重要。本文介绍了基于新标度的层次分析法,并尝试利用改进 AHP 对潜艇的水声对抗效能进行了评估,得出评估数据,既能为潜艇水声对抗作战提供指导,也可对潜艇改进提供量化依据。采用 Delphi 专家咨询法,能有效克服由一位专家确定权重带来的较大主观性问题。

2 层次分析法(AHP)及其判断标度的改进

2.1 AHP 的基本原理

层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 是一种将定性分析与定量分析相结合的系统分析方法,是分析多目标、多准则的复杂大系统的有力工具。应用 AHP 解决问题,首先把要解决的问题分层系列化,根据问题的性质和要达到的总目标,将问题分解为不同的组成因素,按照因素间的相互关联、隶属关系,形成一个递阶的、有序的层次结构模型;然后对模型中每一层次因素的相对重要性,依据人们对客观现实的判断给与定量表示,再利用数学方法确定每一层次全部因素相对重要性次序的权值;最后通过综合计算得到最低层相对最高层的相对重要性次序的组合权值,以此作为评价和选择方案的依据^[1,2]。

假设 n 个变量 $W_1, W_2, \dots, W_n$ 的总和为 1, 把这 n 个变量两两比较 (相除), 得到表示变量相对关系的判断矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} W_1/W_1 & W_1/W_2 & \dots & W_1/W_n \\ W_2/W_1 & W_2/W_2 & \dots & W_2/W_n \\ & & \dots & \\ W_n/W_1 & W_n/W_2 & \dots & W_n/W_n \end{bmatrix} = (a_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

显然 $a_{ii}=1, a_{ij}=1/a_{ji}, a_{ij}=a_{ik}/a_{jk} (i, j, k=1, 2, \dots, n)$ 。

判断矩阵 A 的最大特征向量 $\bar{w}_i = \bar{w}_i / \sum_{i=1}^n \bar{w}_i, \bar{w}_i = \sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}$,

$$\bar{b}_{ij} = b_{ij} / \sum_{i=1}^n b_{ij}, i, j=1, 2, \dots, n; \quad (2)$$

$$A \text{ 的最大特征根 } \lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nw_i} \quad (3)$$

检验矩阵的一致性, 需计算它的一致性指标

$$CI, CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

平均随机一致性指数 RI 如表 1。

表 1 1-9 阶矩阵随机一致性指数 RI

Table 1 Stochastic consistency index RI of 1-9 rank matrix

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

相对一致性指数 $CR=CI/RI$ 。当 $CR<0.1$ 时, 可以认为判断矩阵具有满意的一致性; 当 $CR \geq 0.1$ 时, 应重新调整判断矩阵的元素, 直到具有满意的一致性为止。

2.2 传统标度及其缺陷

T.L.萨蒂创建层次分析法时, 标度方法是用 1-9 标度法, 其标度的含义见表 2, 确定指标因素的权重是通过两两比较判断矩阵而得到的。实际应用时, 这种标度法并不理想, 在确定决策方案排序上还比较可靠, 但由它得出的权系数值用于计算, 往往与人们估计偏差较远, 并不合理。而且不符合人们的心理习惯, 与人们估计偏离较远; 按照该标度方法建立的判断矩阵, 其一致性经常会遭到破坏, 即系统本身存在非一致性; 没有体现奖罚原则。由于这些问题的存在, 使得由传统 AHP 得出的结论常与实际不符, 应用受到很大限制。因此, 非常有必要建立一种合理的、实用性强的新标度来进行替代。

表 2 传统 AHP 标度

Table 2 Scale of traditional AHP

标度	含 义
1	两因素相比, 具有同样重要性
3	两因素相比, 一个因素比另一个因素稍微重要
5	两因素相比, 一个因素比另一个因素明显重要
7	两因素相比, 一个因素比另一个因素强烈重要
9	两因素相比, 一个因素比另一个因素极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若前者与后者的重要性之比为 $a_i (=3)$, 则后者与前者的重要性之比为 $a_i (=1/3)$

2.3 新标度的建立

为了能使两两比较判断更加符合实际, 所选取的标度应体现奖罚原则, 即对优于平均值的指标给予奖励, 相反则给予惩罚的原则, 即判断给出的相对重要性程度评分应该与定性分析的结果基本相符。设任意两变量 W_i, W_j , 当 W_i 与 W_j 同样重要时, 仍然使标度值为 1; 当 W_i 比 W_j 极端重要时, 仍然使标度值为 9。于是提出了形如 X^{2k} (k 为非负整数) 的函数,

该函数能够满足上述原则, 建立新旧标度转换函数为^[3]:

$$P \pm a \times (P_i)^{2k} + b \tag{5}$$

式中: P' ——转换后的标度;
 a, b ——转换函数系数;
 P_i ——传统的标度;
 K ——调和系数。

在转换函数中, 调和系数 K 直接决定奖罚程度的大小。当 K 取不同值时可以得到一系列曲线(图 1)。从图 1 中可以明显看出, 当 k 值不同时, 不同曲线在同一个 X 值时的斜率是不同的, 当 $k=0$ 时, 即为传统的 AHP 标度, 即奖罚程度为 0 的标度。

通过实际调查测试, 并使用非线性规划模型计算得出标度转换上下限曲线, 经对比, 专家一致认为当 $k=1$ 时奖罚程度较合适^[4]。当 $P_i=1$ 时, $P \pm 1$; 当 $P_i=9$ 时, $P \pm 9$; 于是可得转换函数为:

$$P \pm 0.1 \times (P_i)^2 + 0.9 \tag{6}$$

通过这样变换能够使权重更合理, 更符合实际。该标度遵循了奖罚原则, 有利于决策者在两两判断过程中提高准确性。

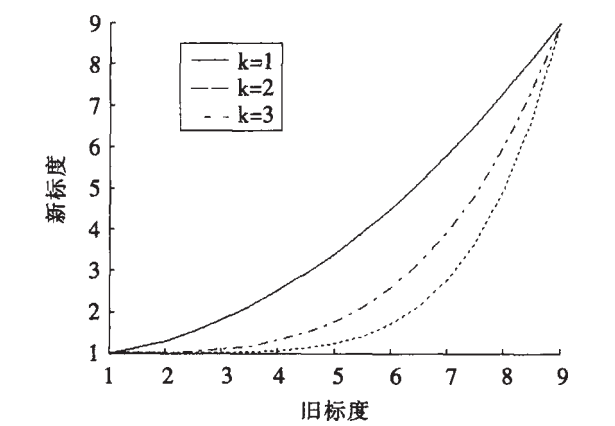


图 1 新旧标度转换曲线
Fig.1 Conversion curve of new and traditional scale

2.4 Delphi 法的基本原则

确定各指标的权重是综合评价的难点, 为了克服由一位专家确定权重带有较大主观性问题, 采用 Delphi 专家咨询法进行处理。

Delphi 测定法是一种常用的测定方法, 它是用问卷方式对一组选定的专家进行一轮或数轮咨询, 最后使专家的意见趋于一致而获得预测结果的评价方法, 可用于各种另域的决策和判断过程。Delphi 法能对大量非技术性的无法定量分析的要素作出概率

估算, 并能将概率估算结果告诉专家, 充分发挥信息反馈和信息控制的作用, 使分散的评估意见逐次收敛, 最后集中在协调一致的结果上。

3 潜艇水声对抗效能的层次分析法评估

3.1 潜艇水声对抗效能评估指标体系的建立

潜艇水声对抗 (Acoustic Warfare, Aw), 广义地讲是海战的对抗; 狭义地讲是潜艇与反潜兵力之间的对抗。通常表现为对抗双方用水声技术所完成的发现、反发现, 跟踪、反跟踪, 识别、反识别, 攻击、反攻击等的过程。水声对抗的手段多种多样, 如应用气幕弹、声干扰器、诱饵等对敌水声设备和来袭的鱼雷实施声、电磁干扰和诱骗, 使敌水声设备和鱼雷失去探测和跟踪能力或者跟踪假目标, 或运用反鱼雷武器对来袭目标进行硬摧毁等。因此, 进行潜艇水声对抗效能评估时, 不能单由某一个或几个指标来确定系统性能的优劣, 而必须进行多性能指标的综合评价。改进 AHP 与传统 AHP 在本质上是一致的, 适合于具有复杂层次结构的多指标评估问题。在构建评价指标体系时, 还要遵循如下原则:

- (1) 被选因子之间的相关性要小, 相对于上层准则有交叉的因子, 本文将其归属到一个因子集里, 在确定权重时加大此因子在该因子集中的权重, 以确保该因子对整个系统性能的影响不会改变;
- (2) 被选因子必须对潜艇的水声对抗效能有明显的影响;
- (3) 要体现各指标因子对潜艇水声对抗作战效能影响程度不同;
- (4) 评估指标的评分等级标准参照表 3。

表 3 评分等级标准
Table 3 Criterion of grading

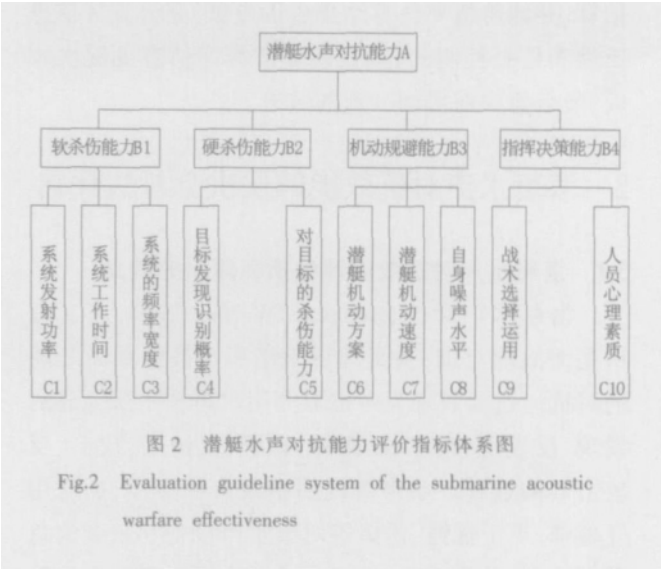
等级	很好	好	一般	差	很差
评分	0.8~1	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	0~0.2

按照上述原则, 参考相关文献^[5,6], 经过部分修改, 构建如下的评价指标体系(图 2)。

3.2 改进的层次分析法评估潜艇水声对抗作战效能

3.2.1 具体计算步骤

由多位专家用 1-9 标度, 同时确定两两指标间的相对重要程度。咨询进行两轮, 第一轮各位专家独立地根据自己的实际工作经验进行打分, 不允许



相互间讨论。经过信息反馈, 根据反馈信息重新进行第二轮打分。对于准则层一, 设有 n 位专家, b_{ijm} 为第 m 位专家给出的 b_i 相对于 b_j 的权重, 则综合各专家之后得到综合值 $b_{ij}=(\prod_{m=1}^n b_{ijm})^{\frac{1}{n}}$, b_{ij} 反映了 n 位专家对因子 i 相对于因子 j 权重的倾向性意见, b_j 相对于 b_i 的重要度权重为 $b_{ji}=1/b_{ij}$, 可以构成两两判断矩阵。取 $b_{ij}(b_{ij} \geq 1$, 否则取 $b_{ji})$, 经转换函数

$$P \pm 0.1 \times (P_i)^2 + 0.9$$

得到新的标度法下对应的两两判断 b_{ij} (或 b_{ji}), 则对应的 $b_{ji}=1/b_{ij}$ (或 $b_{ij}=1/b_{ji}$), 可以构成判断矩阵。同理, 准则层 K 相对于上一层某个因子两两判断矩阵也可以通过类似的方法进行构造。

定义: $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 为最后的得到的两两判断矩阵。

对于新得到的判断矩阵应用层次分析法中的和法, 通过计算机计算, 得到准则层相对于目标层的权重、判断矩阵的最大特征值, 及一致性指标 CI 和 CR , 现将其各参数的计算结果列于表 4、5。

表 4 判断矩阵(A- B_i)和权重

Table 4 Judging matrix (A- B_i) and weights

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W
B ₁	1	5.596	2.062	2.837	0.488
B ₂	0.179	1	0.313	0.485	0.082
B ₃	0.485	3.192	1	0.556	0.204
B ₄	0.353	2.062	1.800	1	0.226

$\lambda_{\max}=4.1043$ $CI=0.0384$ $CR=0.0387<0.10$ 满足一致性检验。

表 5 判断矩阵(B- C)和权重

Table 5 Judging matrix (B- C_i) and weights

B ₁	C ₁	C ₂	C ₃	P ₁
C ₁	1	5.596	2.062	0.595
C ₂	0.179	1	0.313	0.101
C ₃	0.485	3.192	1	0.304

$\lambda_{\max}=3.0033$, $CI=0.0016$, $CR=0.0028<0.10$, 满足一致性检验。

(a)

B ₃	C ₆	C ₇	C ₈	P ₃
C ₆	1	2.062	3.857	0.566
C ₇	0.485	1	2.400	0.299
C ₈	0.259	0.417	1	0.135

(b)

B ₂	C ₄	C ₅	P ₂
C ₄	1	3.192	0.762
C ₅	0.313	1	0.238

(c)

B ₄	C ₉	C ₁₀	P ₄
C ₉	1	3.698	0.787
C ₁₀	0.271	1	0.213

(d)

对于二阶矩阵 $CR=0$, 总是完全一致的, 满足一致性检验。

准则层相对于目标层的传统判断矩阵见表 6。

表 6 传统判断矩阵和权重

Table 6 Traditional judging matrix (A- B_i) and weights

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	W
B ₁	1	6.852	3.409	4.401	0.551
B ₂	0.146	1	0.208	0.293	0.056
B ₃	0.293	4.787	1	0.333	0.165
B ₄	0.227	3.409	3.000	1	0.227

$\lambda_{\max}=4.3504$, $CI=0.1168$, $CR=0.1298>0.10$, 不满足一致性检验。

通过比较可以看出, 按传统 AHP 计算得出的 CI 较大, 即由传统未经转换的标度得出的矩阵的一致性较差。由于篇幅限制第二层准则层的传统判断矩阵略去, B_1 、 B_3 相对于下一层因子构成的判断矩

阵, 经计算得到的相对一致性指数 CR 分别为 0.0736 和 0.0767。

3.2.2 总排序

由上面的计算结果, 可以得出最底层的元素相对于目标层(潜艇水声对抗效能)的权重, 其计算过程如下。

$$W = \begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.454 \\ 0.253 \\ 0.189 \\ 0.105 \end{bmatrix} = (0.2904 \ 0.0493$$

0.1484 0.0625 0.0195 0.1155 0.0610 0.0275 0.1779 0.0481)^T

3.2.3 底层元素隶属度的确定

通过专家及技术人员综合评判得到某次战斗底层元素的指标值为:

$$R = (0.95 \ 0.80 \ 0.85 \ 0.73 \ 0.85 \ 0.91 \ 0.68 \ 0.75$$

0.85 0.82)

3.2.4 作战效能的计算

根据上面的计算结果可以得到本次战斗潜艇的水声对抗作战效能为:

$$E = R \times W = 0.8615$$

计算结果参照表 3 评分等级, 可以得出该次战斗效能比较明显, 作战效果很好。

4 结束语

本文在介绍了改进 AHP 基础上, 建立了基于该方法的评估潜艇的水声对抗效能的模型, 经过具体计算得出如下结果:

- (1) 通过总排序可以看出, 系统发射功率、系统的频率宽度、潜艇机动方案及战术选择运用对潜艇的水声对抗效能的影响最大。对系统进行效能评估时必须充分考虑到这几个因素的影响。
- (2) 通过定量计算发现, 对于目标层同样的专家打分构成的判断矩阵, 经过标度转换矩阵能够很好的满足一致性检验, 其相对一致性指数 CR 也比未经过标度转换的矩阵要小。应用改进的层次分析法对潜艇的水声对抗效能进行评估, 使决策者更容易构造好的

- 矩阵, 判断更加符合实际, 应用范围更广泛。
- (3) 从最后得到的权重指标来看, 潜艇的硬杀伤作战效果并不明显。而从实际的作战分析知道, 对于潜艇的水声对抗, 硬杀伤是最有效的作战手段。
- (4) 本文在处理专家打分时应用了 Delphi 专家咨询法, 能有效克服单个专家打分存在着较大主观性问题。

参 考 文 献

[1] De Meter E C. A model to predict minimum required Clamp pre-loads in light of fixture workpiece Compliance [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(7): 83-85.

[2] 谭跃进, 陈英武, 易进先. 系统工程原理[M]. 北京: 国防科技大学出版社, 1999. 64-66.

TAN Yuejin, CHEN Yingwu, YI Jinxian. The Principle of Systems Engineering[M]. Beijing: National Defense Science and Technology University Press, 1990. 64-66.

[3] 张淑娟, 何勇, 葛晓锋, 吴春霞. 改进层次分析法用于农用运输车综合性能的评价[J]. 农业工程学报, 2002, 18(6): 91-94.

ZHANG Shujuan, HE Yong, Ge Xiaofeng, WU Chun Xia. Application of Reformed AHP on Agricultural Transportation Tractor Synthesis Capability Evaluation[J]. Journal of Agriculture Engineering, 2002, 18(6): 91-94.

[4] 唐崇禄. 国防系统分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003. 531-544.

TANG Chonglu. The Method of Nation Defense Systems Analysis[M]. Beijing: National Defense and Technology Press, 2003. 531-544.

[5] 周勇, 洪贞启. 层次分析法在潜艇作战能力评估中的应用[J]. 情报指挥控制系统与仿真技术, 2004, 26(3): 42-45.

ZHOU Yong, HONG Zhenqi. Application of AHP on Operation Capability Evaluation for Submarine[J]. The System of Intelligence Command and Control and Simulation, 2004, 26(3): 42-45.

[6] 姚蓝, 刘平香. 反鱼雷水声对抗技术的现状与发展[J]. 声学技术, 2000, 20(4): 183-187.

YAO Lan, LIU Pingxiang. Present and Future of Anti-torpedo Countermeasure Technology[J]. Technical Acoustics, 2000, 20(4): 183-187.