第55卷第4期
2015年7月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol.55, No.4
July 2015

船舶、土木工程

文章编号：1000-8608(2015)04-0380-07

基于Choquet模糊积分算子的多指标属性船型方案优选模型

张维英*， 陈 静， 张光发， 林 力， 张光耀

（大连海洋大学 航海与船舶工程学院，辽宁 大连 116023）

摘要： 船型方案排序及优选是一个多指标属性、多层次且指标属性相互关联的决策问题．考虑船型方案评价中各评价指标间存在的模糊性和相互关联性，利用模糊测度和Choquet模糊积分算子对船型方案进行优选．此方法的优点是考虑了方案各指标属性的关联关系，而且决策过程不用确定各指标属性的权重，减少了决策过程中决策者的主观臆断性，使排序结果更具客观性和科学性．计算实例说明：基于Choquet模糊积分方法建立的船舶方案优选模型正确，方法简单，结果合理，为船型方案选择提供了一种可靠的参考．

关键词： Choquet模糊积分算子；多属性多层次结构模型；船型方案排序与优选

中图分类号： U662.3 **文献标识码：** A **doi：** 10.7511/dllgxb201504007

0 引 言

船型技术经济论证是依据船舶用途及船东要求，从船舶主尺度及技术性、经济性、营运环境和公约规范等方面，对多个可行的设计方案进行分析、选优和实验验证，依据评价指标进行综合分析并选择最优方案的过程[1]．船型方案优选通常在众多因素构成的复杂评价指标体系中进行，由于系统的评价指标多，且呈现层次、递阶结构，最佳船型选择问题成为一个多参数、多指标属性及多层次的设计方案优选和排序问题[2]．

传统的多目标船型方案论证方法采用权重平均值来综合各评价指标评估值[3-5]，这种方法的前提条件是假设各属性指标间是相互独立和互不交叉且各指标的权重已知，但对于船型的技术经济论证和优选问题，常常遇到各属性指标相互关联、互不独立的情况，如净现值与年费用指标、航速及燃料费等都具有相互关联关系，指标间并不完全独立．对这些具有相互关联关系的属性指标如果采用简单加权相加关系与问题的实际不相符合．本文将模糊测度和模糊积分的概念用于船型方案论证，考虑评价方案各指标属性间的关联关系，以约束条件较弱的单调性取代经典概率中的可加性条件，此方法已在其他的决策领域取得了成功的应用[6-9]，期望为合理选择船型方案提供新的科学方法．

1 基于Choquet模糊积分算子的决策模型

1.1 模糊测度定义

模糊测度的概念由Sugeno于1974年首次提出，其主要特征是考虑非可加性，原理是将一般对事物衡量基础的概率理论转换成可能性理论，并将评价指标间的相关性列入考虑．因此模糊测度是指待测对象属于候选集合的确定程度．

模糊测度是指对于任意给定元素 $x_i \in X$，猜想 x_i 可能属于 X 的某个子集 A，即有 $A \subseteq X$，$x_i \in A$，但这个猜想是不确定的、模糊的．定义函数 $g(X) \in [0,1]$ 作为这个猜想的度量．若 $A = \varnothing$，则可以肯定 $x_i \notin A$，则 $g(\varnothing) = 0$；若 $A = X$，则必有 $x_i \in A$，则 $g(X) = 1$；若 $A \subseteq B$，$A, B \subseteq X$，则 $x_i \notin A$ 的可能性要比 $x_i \notin B$ 的可能性小，故有 $g(A) \leqslant g(B)$．由此定义模糊测度如下[10]．

收稿日期：2014-10-11； 修回日期：2015-04-15．
基金项目：国家自然科学基金资助项目(E091002-51109033)；校级蓝色建设学科基金资助项目．
作者简介：张维英*(1963-)，女，博士，教授，E-mail：zwy@dlou.edu.cn．

定义 1　设 $X_i = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 为一非空经典集合，函数 g 是从 X 的幂集 $P(X)$ 到 $[0,1]$ 上的映射，若满足下列条件：

i. $g(\varnothing) = 0$，$g(X) = 1$

ii. $\forall A, B \in P(X)$，if $A \subseteq B$ then $g(A) \leqslant g(B)$

则称 g 是 X 上的模糊测度. 如果 X 是无限的，则要加上一个连续性的条件. 要确定 n 个属性指标集上的模糊测度，通常需要 $2^n - 1$ 个值，在实际问题中，为了减少模糊测度计算的复杂性，通常用 λ 模糊测度来代替一般的模糊测度.

定义 2　对于任意 $A, B \in P(X)$，$A \cap B = \varnothing$，则如果模糊测度 g_λ 满足以下条件：

$$g(A \cup B) = g(A) + g(B) + \lambda g(A) g(B) \tag{1}$$

式中：$\lambda \in (-1, \infty)$，则称 g_λ 为 λ 的模糊测度.

由定义 2 可知：

$\lambda = 0$ 表示 λ 的模糊测度 g_λ 是可加的，此时 A、B 间无相互作用关系存在，呈现独立状态；

$\lambda \neq 0$ 表示 λ 的模糊测度 g_λ 是非可加的，此时 A、B 间存在相互作用关系；

$\lambda > 0$ 时 $g(A \cup B) > g(A) + g(B)$，则表示 A、B 间呈现相乘作用；

$\lambda < 0$ 时 $g(A \cup B) < g(A) + g(B)$，则表示 A、B 间有替代作用，二者的作用会相互重复.

对于 λ 模糊测度 g_λ，借助于参数 λ 可完全描述实际中属性指标存在不同类型的相互作用（关联）现象.

对于属性指标集 $X_i = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$，如果对于任意的 $i, j = 1, 2, \cdots, n$ 且 $i \neq j$，$i \cap j = \varnothing$，那么 $Y_{i=1}^{n} x_i = X$，此时 g 满足

$$g(X) = \begin{cases} \dfrac{1}{\lambda}\left(\prod\limits_{i=1}^{n}[1 + \lambda g(x_i)] - 1\right); & \lambda \neq 0 \\ \sum\limits_{i=1}^{n} g(x_i); & \lambda = 0 \end{cases} \tag{2}$$

由上式可知，对于任意的 $A \in P(X)$，

$$g(A) = \begin{cases} \dfrac{1}{\lambda}\left(\prod\limits_{i \in A}[1 + \lambda g(x_i)] - 1\right); & \lambda \neq 0 \\ \sum\limits_{i \in A} g(x_i); & \lambda = 0 \end{cases} \tag{3}$$

对于单个属性指标 $x_i \in X$，$g(x_i)$ 称为 x_i 的模糊测度函数，它表示满意属性 x_i 的重要程度，此时可简记为 $g_i = g(x_i)$. 因为 $g(X) = 1$，根据式(3)，可由式(4) 确定唯一的参数 λ：

$$\lambda + 1 = \prod_{i=1}^{n}(1 + \lambda g_i) \tag{4}$$

1.2　Choquet 模糊积分算子

定义 3　设 $X_i = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 为一非空经典有限集合，f 是定义在 X 上的非负离散函数，函数值为 $f(x_1), f(x_2), \cdots, f(x_n)$，不失一般性，假设 $f(x_1) \leqslant f(x_2) \leqslant \cdots \leqslant f(x_n)$，$\mu$ 是 X 上的一个 λ 测度，函数 f 关于 μ 的 Choquet 模糊积分算子定义为

$$CI_\mu(f) = (C)\int f \mathrm{d}\mu = \sum_{i=1}^{n}[f(x_i) - f(x_{i-1})]\mu(A_i) \tag{5}$$

或者

$$CI_\mu(f) = (C)\int f \mathrm{d}\mu = \sum_{i=1}^{n} f(x_i)[\mu(A_i) - \mu(A_{i+1})] \tag{6}$$

式中：$(C)\int f \mathrm{d}\mu$ 表示 Choquet 模糊积分算子；$A_i = \{x_i, x_{i+1}, \cdots, x_n\}$；定义 $f_0 = 0$.

由上可知，离散 Choquet 模糊积分算子的特点是：它是对数据 $(f(x_1), f(x_2), \cdots, f(x_n))$ 按从大到小或从小到大的顺序重新进行排序后的线性表示，同时考虑了实际决策问题中属性指标及指标集之间普遍存在的相互作用和相互关联现象，并且这种排序方法也决定了不同属性指标集的重要程度.

因为 $A_i = \{x_i, x_{i+1}, \cdots, x_n\}$，$A_{i+1} = \{x_{i+1}, x_{i+2}, \cdots, x_n\}$，由式(3) 可得

$$g(A_i) - g(A_{i+1}) = g_i\left[1 + \lambda \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \left(\prod_{j=i+1}^{n}(1 + \lambda g_j) - 1\right)\right] = g_i \prod_{j=i+1}^{n}(1 + \lambda g_j)$$

所以可得如下命题：

$$d(j) = CI_\mu(f) = \sum_{i=1}^{n} f(x_i)[\mu(A_i) - \mu(A_{i+1})] =$$

$$\sum_{i=1}^{n} r_{j(i)}^{k} \cdot g_i \prod_{h=i+1}^{n}(1+\lambda g_h) \qquad (7)$$

式中：$r_{j(i)}^{k}$ 表示第 j 个方案 i 大的属性，即 $r_{j(1)}^{k} < r_{j(2)}^{k} < r_{j(3)}^{k} < \cdots < r_{j(n)}^{k}$；$d(j)$ 表示第 j 个方案的评价值.

2 基于 Choquet 模糊积分算子的目标决策方法

对于船型方案多目标决策问题，设 D 是一组可行候选方案：

$$D=\{D_1,D_2,\cdots,D_m\}=(D_j);\ j=1,2,\cdots,m \qquad (8)$$

式中：D_j 表示第 j 个决策方案.

X 是方案集 D 的决策属性集：

$$X_i=\{x_1,x_2,\cdots,x_n\};\ i=1,2,\cdots,n \qquad (9)$$

多方案、多指标属性决策问题可以表示成如下的矩阵形式：

$$\boldsymbol{X}=(\boldsymbol{X}_{i1}\quad \boldsymbol{X}_{i2}\quad \cdots\quad \boldsymbol{X}_{im})=\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}=(x_{ij}) \qquad (10)$$

式中：$i=1,2,\cdots,n,j=1,2,\cdots,m;x_{ij}\in \mathbf{R}^{+}$，表示第 j 个方案的第 i 指标的属性值.

下面将利用 Choquet 模糊积分算子对各个备选方案进行综合评价，根据每一个备选方案的评价值，对方案进行优选排序，得到优选的方案. 具体步骤如下：

Step 1 假设 m 个方案 n 个指标的指标属性值矩阵如式(10) 所示. 对于方案 D_j 按属性 x_i 进行测度时，规范化处理采用文献[11] 的方法.

对越大越优指标属性：

$$r_{ij}=(x_{ij}-\bigwedge_j x_{ij})/(\bigvee_j x_{ij}-\bigwedge_j x_{ij}) \qquad (11)$$

或

$$r_{ij}=x_{ij}/(\bigvee_j x_{ij}+\bigwedge_j x_{ij}) \qquad (12)$$

越小越优指标属性：

$$r_{ij}=(\bigvee_j x_{ij}-x_{ij})/(\bigvee_j x_{ij}-\bigwedge_j x_{ij}) \qquad (13)$$

或

$$r_{ij}=1-x_{ij}/(\bigvee_j x_{ij}+\bigwedge_j x_{ij}) \qquad (14)$$

对中间型指标属性：

$$r_{ij}=1-|x_{ij}-x_i|/\max|x_{ij}-\bar{x}_i| \qquad (15)$$

式中：r_{ij} 为方案 D_j 指标属性 i 的相对隶属度；$\bigvee_j x_{ij}$ 为方案 D_j 指标属性 i 的最大特征值；$\bigwedge_j x_{ij}$ 为方案 D_j 指标属性 i 的最小特征值；$\bar{x}_i$ 为指标属性 i 的中间最优值.

当指标属性特征值变化范围大时采用式(11)、(13)，否则采用式(12)、(14).

变换后得指标属性归一化处理矩阵 $\boldsymbol{R}$ 如下：

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix}=(r_{ij}) \qquad (16)$$

式中：$i=1,2,\cdots,n,\ j=1,2,\cdots,m;\ r_{ij}\in[0,1]$，表示方案 D_j 的第 i 个指标的归一化处理后的属性值.

Step 2 将属性指标按性质分成不同的指标体系群中决策属性集 $\boldsymbol{R}_t^k(t=1,2,\cdots,p)$，如船型方案优选中可按各属性指标的性质分成技术性指标体系群、经济性指标体系群和安全性指标体系群，并作为第一层进行评价计算.

Step 3 确定各个指标体系群 $\boldsymbol{R}_t^k(t=1,2,\cdots,p)$ 中决策属性集中属性的模糊测度 $g(x_t^k)$. 其中 $t=1,2,\cdots,p$，表示评价指标体系层数；$k=1,2,\cdots,q$，表示评价指标体系群数. 根据式(4) 确定相应的 λ_t^k.

Step 4 利用式(7) 模糊算子 CI_μ 对各个方案进行评估，得到方案 D_j 第 X_t 群的评估值 R^t.

Step 5 再利用模糊算子 CI_μ 对下一层次的评估值进行集结，得到综合评价结果. 如果系统的层数多于二层时，则利用模糊算子 CI_μ 一层层向上集结，直到得到最终的评价结果.

Step 6 依据评价值进行优选排序(评价结果为最大最优).

3 实例研究

本文以文献[12]提供的实例为验证实例，根据技术性、经济性及安全性建立船型方案评价结构模型如图 1 所示[3]. 图中各变量的意义如下：x_1 为航速、x_2 为稳性指数、x_3 为耐波性指数、x_4 为

振动性、x_5 为操纵性、x_6 为内部收益率、x_7 为净现值、x_8 为必要运费率、x_9 为投资回收年限、x_{10} 为船舶造价、x_{11} 为年燃润料费、x_{12} 为噪声指数、x_{13} 为船型成熟度、x_{14} 为甲板上浪指数、x_{15} 为每日班次.

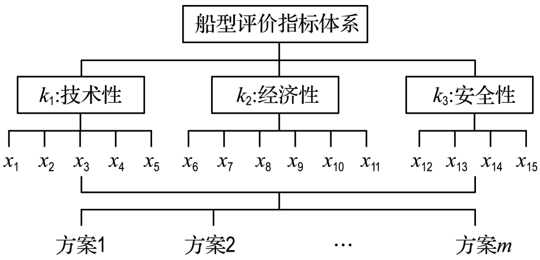

图 1　船型方案多指标属性综合评价层次结构模型

Fig. 1　Hierarchical model for the multi-attribute ship form projects assessment

3.1　原始数据的归一化处理

船型方案评价的原始数据如表 1 所示(原始数据来自文献[12]).表中数据的意义与图 1 中各变量的意义相同,为进行船型方案分析的最底层数据.

对于航速 x_1 考虑主机功率的选取(主机型一律采用节能型的低速柴油机,主机功率围绕服务速度 13.0 ～ 13.5 kn 考虑[13]),考虑经济性取中间型,取值为 13.25 kn,而 x_4、x_8、x_9、x_{10}、x_{11}、x_{12}、x_{14} 为越小越优型指标属性,其余为越大越优型指标属性.使用极差规范化处理方法将属性特征值 $\boldsymbol{A}(k)(k=1,2,3)$ 转换为指标属性相对隶属度值 $\boldsymbol{R}^{(k)}(k=1,2,3)$,见表 2.

表 1　船型方案评价的原始数据

Tab. 1　Original data of ship form projects assessment

方案	x_1/kn	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7/万元	x_8/(t·元$^{-1}$)	x_9/a	x_{10}/万元	x_{11}/万元	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}
D_1	12.88	2.0	1.5	4	4	0.232	4 068.50	16.53	3.986	3 723.40	10.51	3	5	2.0	5.0
D_2	13.23	2.5	1.5	4	4	0.224	3 979.63	16.87	4.089	3 810.50	11.74	3	4	2.5	4.5
D_3	13.35	2.5	1.5	4	4	0.207	3 731.02	17.50	4.320	3 952.80	12.98	3	5	2.5	5.0
D_4	13.97	3.0	2.0	4	4	0.183	2 464.54	18.66	4.710	3 096.57	12.61	3	5	3.0	4.5

表 2　船型方案评价数据归一化处理

Tab. 2　Data normalization of ship form projects assessment

方案	技术性 $\boldsymbol{R}^{(1)}$					经济性 $\boldsymbol{R}^{(2)}$						安全性 $\boldsymbol{R}^{(3)}$			
	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}	r_{11}	r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}
D_1	0.486 1	0.4	0.75	0.5	0.5	0.559 0	0.622 8	0.530 3	0.541 6	0.471 8	0.552 6	0.50	0.5	0.6	0.526 3
D_2	0.972 2	0.5	0.75	0.5	0.5	0.539 8	0.609 2	0.520 6	0.529 8	0.459 5	0.500 2	0.50	0.4	0.5	0.473 7
D_3	0.861 1	0.5	0.75	0.5	0.5	0.498 8	0.571 1	0.502 7	0.503 2	0.439 3	0.447 4	0.50	0.5	0.5	0.526 3
D_4	0	0.6	1.00	0.5	0.5	0.441 0	0.377 2	0.469 7	0.458 4	0.560 7	0.463 2	0.50	0.5	0.4	0.473 7

3.2　基于 Choquet 模糊积分算子计算各指标体系群的评价值

将各指标数据按指标体系群表示成如下矩阵形式：

$$\boldsymbol{R}_1^1=\begin{pmatrix} 0.486\,1 & 0.972\,2 & 0.861\,1 & 0 \\ 0.400\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.600\,0 \\ 0.750\,0 & 0.750\,0 & 0.750\,0 & 1.000\,0 \\ 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 \\ 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_1^2=\begin{pmatrix} 0.559\,0 & 0.539\,8 & 0.498\,8 & 0.441\,0 \\ 0.622\,8 & 0.609\,2 & 0.571\,1 & 0.377\,2 \\ 0.530\,3 & 0.520\,6 & 0.502\,7 & 0.469\,7 \\ 0.541\,6 & 0.529\,8 & 0.503\,2 & 0.458\,4 \\ 0.471\,8 & 0.459\,5 & 0.439\,3 & 0.560\,7 \\ 0.552\,6 & 0.500\,2 & 0.447\,4 & 0.463\,2 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{R}_1^3=\begin{pmatrix} 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 \\ 0.500\,0 & 0.400\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 \\ 0.600\,0 & 0.500\,0 & 0.500\,0 & 0.400\,0 \\ 0.526\,3 & 0.473\,7 & 0.526\,3 & 0.473\,7 \end{pmatrix}$$

式中：$\boldsymbol{R}_1^k$ 表示第1层第 k 个属性指标群.

利用 Choquet 模糊积分算子计算第1层各属性指标体系群的评价值，下面以经济性指标体系群的计算为例说明计算过程.

经济性指标体系群中包含的属性指标有6个，分别是船舶造价、年燃润料费、内部收益率、净现值、必要运费率及投资回收年限.

取各属性的模糊密度分别为 $g(x_6)=0.20$，$g(x_7)=0.15$，$g(x_8)=0.15$，$g(x_9)=0.15$，$g(x_{10})=0.20$，$g(x_{11})=0.15$，根据式(4)计算参数 $\lambda=0.01$.

将 $\boldsymbol{R}_1^2$ 中各方案指标属性按升序排序，排序后得 $\boldsymbol{R}_1^{2'}$ 如下：

$$\boldsymbol{R}_1^{2'}=\begin{pmatrix}0.4718 & 0.4595 & 0.4393 & 0.3772\\ 0.5303 & 0.5002 & 0.4474 & 0.4410\\ 0.5416 & 0.5206 & 0.4988 & 0.4584\\ 0.5526 & 0.5298 & 0.5027 & 0.4632\\ 0.5590 & 0.5398 & 0.5032 & 0.4697\\ 0.6228 & 0.6092 & 0.5711 & 0.5607\end{pmatrix}$$

利用 Choquet 模糊积分算子计算各个方案属性矩阵的评估值，根据式(7)计算公式如下：

$$d_1^2(j)=\sum_{i=1}^{n} r_{j(i)}^k\cdot g(x_i)\prod_{h=i+1}^{n}(1+\lambda g(x_h))$$

式中：$d_1^2(j)$ 表示第1层第2个指标体系群中第 j 个方案的模糊集结值，$r_{j(i)}^k$ 表示第 k 个指标体系群中第 j 个方案第 i 大的属性，即 $r_{j(1)}^k<r_{j(2)}^k<r_{j(3)}^k<\cdots<r_{j(n)}^k$，是将属性值按从小到大排序，与属性的原始位置无关.

将 $g(x_i)$、λ、$\boldsymbol{R}_1^{2'}$ 中的数据代入上式中，评价结果如下：

$d_1^2(1)=0.4513$，$d_1^2(2)=0.4388$，

$d_1^2(3)=0.4071$，$d_1^2(4)=0.3749$

对其他两个指标体系群进行同样的计算，各个方案的评价结果如下：

$d_1^1(1)=0.5118$，$d_1^1(2)=0.6210$，

$d_1^1(3)=0.5988$，$d_1^1(4)=0.4314$

依据安全性指标进行评价的结果为

$d_1^3(1)=0.5585$，$d_1^3(2)=0.4731$，

$d_1^3(3)=0.5135$，$d_1^3(4)=0.4731$

3.3 对船型方案的综合排序

利用 Choquet 模糊积分算子，综合3个指标体系群的计算结果，$g(k_1)=0.3$，$g(k_2)=0.4$，$g(k_3)=0.5$，模糊测度参数 $\lambda=-0.5845$，得各个方案的最终评价值分别为 $d(1)=0.4720$，$d(2)=0.5126$，$d(3)=0.5008$，$d(4)=0.3948$.

总的排序结果为 $d(2)>d(3)>d(1)>d(4)$. 即方 D_2 为最优方案，方案 D_3 次之，方案 D_4 为最劣方案（注：评价结果为评价值越大越优）. 此排序结果与文献[12]的排序结果完全相同.

3.4 对计算结果的分析

各个方案的分项评价结果与综合评价结果见表3（注：评价结果为评价值越大越优）.

方案 D_1 以安全性和经济性为指标体系时为最优，即如果不考虑技术性指标，则方案 D_1 为最优方案. 但方案 D_1 的技术评价指标值较低，所以综合评价后不是最优方案.

对于方案 D_4，其3个指标体系群的评价结果均较差（排序结果为第3和第4），所以为最劣方案.

与文献[12]评价结果比较见图2，4个方案的满意度排序完全相同，但文献[12]只给出了最终的排序结果，不能依据各分项指标群判断方案的优劣. 本排序结果也与文献[3]的结果相同.

表3 船型方案评价结果

Tab. 3 Results for the ship form projects assessment

方案	技术性评价值	基于技术性排序	经济性评价值	基于经济性排序	安全性评价值	基于安全性排序	综合评价值	综合评价结果排序
D_1	0.5118	3	0.4513	1	0.5585	1	0.4720	3
D_2	0.6210	1	0.4388	2	0.4731	3	0.5126	1
D_3	0.5988	2	0.4071	3	0.5135	2	0.5008	2
D_4	0.4314	4	0.3749	4	0.4731	3	0.3948	4

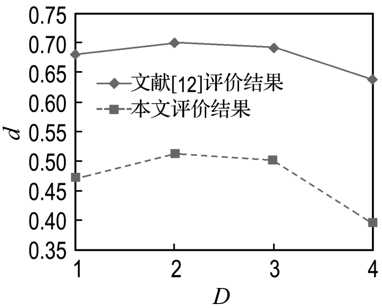

图 2　与文献[12]评价方法结果比较

Fig. 2　Comparison of the evaluation results with that of Lit. [12]

本文提供的方法可以在属性权重完全未知的情况下对船型方案进行选择，而且 Choquet 模糊积分算子能较好地描述各决策属性之间的非线性影响即各属性之间存在的相互关联现象.

4　结　语

船舶方案一般依据多个属性指标进行优选，这些属性指标间往往相互关联，并不独立，传统的决策方法通常将各个属性指标间视为独立变量，而且权重的选择具有较大的主观性，权重表明了决策者对不同属性指标的重视程度，对决策的结果具有导向作用. 本文利用 Choquet 模糊积分算子对船型方案进行优选，具有如下两个特点：

(1)确定船型方案优劣的各个属性指标间具有一定的关联关系，模糊算子的大小不与各个属性的重要性和决策者的主观性相连，可客观、合理地确定方案的优劣，算例说明模型建立正确，计算结果可信，为船型方案选择提供了一种简单、易行的方法.

(2)不需要确定各属性指标的权重，评价结果不依赖各属性指标的权重，可以在各属性权重完全未知的情况下进行船型方案优选，解决了多指标属性船型优选过程中属性权重难以确定的问题，使决策更加客观和准确，为合理、科学地选择船型方案提供了参考.

参考文献：

[1]　刘寅东，唐焕文. 船舶设计决策理论与方法[M]. 北京：高等教育出版社，2006.
LIU Yin-dong, TANG Huan-wen. **Decision Making Theories and Methods in Ship Design** [M]. Beijing: High Education Press, 2006. (in Chinese)

[2]　刘寅东，唐焕文，王世连. 我国船舶设计决策分析方法、理论及应用研究的某些进展与展望[J]. 系统工程理论方法应用，1997，**6**(3)：55-60.
LIU Yin-dong, TANG Huan-wen, WANG Shi-lian. Study and progress of decision making approaches in ship design [J]. **Systems Engineering-Methodology Applications**, 1997, **6**(3): 55-60. (in Chinese)

[3]　张维英，林　焰，纪卓尚. 多目标多层次船型方案模糊优选法[J]. 中国造船，2004，**45**(3)：31-36.
ZHANG Wei-ying, LIN Yan, JI Zhuo-shang. Model for multi-objects and multi-layers system for ship form fuzzy optimization [J]. **Ship Building of China**, 2004, **45**(3): 31-36. (in Chinese)

[4]　刘寅东，李克秋，唐焕文. 数据包络分析模型与方法在船型方案排序择优中的应用[J]. 中国造船，1998(3)：1-6.
LIU Yin-dong, LI Ke-qiu, TANG Huan-wen. Cone ratio data envelopment analysis and evaluation of multi-objective ship plan [J]. **Ship Building of China**, 1998(3): 1-6. (in Chinese)

[5]　侯远杭，胡玉龙，王文全，等. 船型方案优选的多目标群决策方法[J]. 上海交通大学学报，2012，**45**(3)：385-389.
HOU Yuan-hang, HU Yu-long, WANG Wen-quan, *et al*. Ship type selection based on group decision-making with multi-objects [J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2012, **45**(3): 385-389. (in Chinese)

[6]　毕克新，孙金花，张铁柱，等. 基于模糊积分的区域中小企业技术创新测度与评价[J]. 系统工程理论与实践，2005，**64**(2)：40-46.
BI Ke-xin, SUN Jin-hua, ZHANG Tie-zhu, *et al*. Measurement and evaluation of regional technological innovation in small and medium enterprises based on fuzzy integral [J]. **Systems Engineering Theory & Practice**, 2005, **64**(2): 40-46. (in Chinese)

[7]　刘希宋，刘长奎，李　玥. 设备新度模糊积分综合评价模型[J]. 统计与决策：理论版，2007(7)：174-176.
LIU Xi-song, LIU Chang-kui, LI Yue. Comprehensive assessment model of equipments depreciation [J]. **Statistics & Decision: Academic**

Edition，2007(7)：174-176.（in Chinese）

[8] 孙群英，毕克新. 制造企业工艺创新能力多指标模糊测度评价模型[J]. 哈尔滨工程大学学报，2010，**31**(6)：797-801.
SUN Qun-ying，BI Ke-xin. Optimized multi-attribute fuzzy measuring and appraisal model for process innovation in manufacturing enterprises [J]. **Journal of Harbin Engineering University**，2010，**31**(6)：797-801.（in Chinese）

[9] 陈晓红，等. 复杂大群体决策方法及应用[M]. 北京：科学出版社，2009.
CHEN Xiao-hong，*et al*. **Method and Application of Complex Huge System** [M]. Beijing：Science Press，2009.（in Chinese）

[10] 王熙照. 模糊测度和模糊积分及在分类技术中的应用[M]. 北京：科学出版社，2008.
WANG Xi-zhao. **Choquet Application of Fuzzy Measure and Fuzzy Integral in Classification Technique** [M]. Beijing：Science Press，2008.（in Chinese）

[11] 陈守煜. 系统模糊决策理论与应用[M]. 大连：大连理工大学出版社，1994.
CHEN Shou-yu. **Fuzzy Decision-making Theory and Application** [M]. Dalian：Dalian University of Technology Press，1994.（in Chinese）

[12] 桑　松，林　焰，纪卓尚. 采用改进的AHP方法进行船型方案MCDM论证[J]. 大连理工大学学报，2002，**42**(2)：204-207.
SANG Song，LIN Yan，JI Zhuo-shang. An improved AHP method for MCDM in ship type′s demonstration [J]. **Journal of Dalian University of Technology**，2002，**42**(2)：204-207.（in Chinese）

[13] 李树范，纪卓尚，王世连. 运输船舶可行性分析[M]. 大连：大连理工大学出版社，1990.
LI Shu-fan，JI Zhuo-shang，WANG Shi-lian. **Feasibility Analysis of Merchant Ships** [M]. Dalian：Dalian University of Technology Press，1990.（in Chinese）

Optimization model of multi-attribute ship form project based on Choquet fuzzy integral operator

ZHANG Wei-ying*，CHEN Jing，ZHANG Guang-fa，LIN Li，ZHANG Guang-yao

（School of Navigation and Naval Architecture Engineering，Dalian Ocean University，Dalian 116023，China）

Abstract：The ranking and optimization of ship form project are multi-attribute multi-layer decision-making problems，in which the attributes are relative. Considering the fuzziness and relevance between the evaluation indexes，fuzzy measurement and Choquet fuzzy integral operator are used to select the optimum solution. The distinct advantages are as follows：the correlation of every attribute is considered，the weights of attributes need not be decided in decision-making，so the subjective supposition from the decision-makers is reduced，and the solution is more objective and scientific. The case study shows that the optimization model of the ship form project based on Choquet fuzzy integral method is correct，the method is simple and the result is reasonable. It provides a reference for choosing the solution of a ship form reasonably.

Key words：Choquet fuzzy integral operator；multi-attribute multi-layer structural model；ship form project ranking and optimization