

## 基于熵权-TOPSIS-灰色关联的 航道宽度设计结果评价\*

陈婷婷, 施朝健, 雷 琴

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

**摘要:** 通过对国内外3种不同的航道宽度设计规范进行分析对比, 从通航安全和效率的角度建立综合评价指标, 旨在对不同的航道宽度设计结果进行排序, 为航道宽度的合理设计提供借鉴。建立熵权-TOPSIS-灰色关联度综合评价模型, 采用熵权法获取各指标的客观性权重, 分别获取备选方案与正理想解和负理想解的正、负灰色关联度, 综合得出各方案的灰色关联相对贴近度, 从而进行方案排序与优选。并假定评价环境, 对3种不同的设计规范进行了实例分析与评价, 从安全、效益和综合水平上给出了各规范在假定环境下的设计效果排序情况。评价结果基本符合实际情况, 可以对航道宽度设计规范的进一步研究与发展提供一定的基础。

**关键词:** 水路运输; 航道宽度评价; 熵权; TOPSIS; 灰色关联度; 通航安全; 通航效率

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)12-0136-06

### Entropy weight-TOPSIS-grey correlation method on assessment of channel width design result

CHEN Ting-ting, SHI Chao-jian, LEI Qin

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** For ranking and comparing different design results of the channel width given by different codes to promote the reasonable design of channel width, comprehensive evaluation indices are determined from the point of navigation safety and efficiency after analyzing and comparing three different kinds of channel width design codes. The entropy weight-TOPSIS-grey correlation comprehensive assessment model is built, in which, the objective weight of each index is obtained from the entropy method. The positive & negative grey correlation grade between alternative schemes and positive & negative ideal solution are calculated respectively, and the grey correlation relative closeness between each alternative and ideal solution is obtained. So the scheme ranking and optimization can be achieved based on the relative closeness. Given practical assessment situation, three different kinds of design codes are taken into practical example analysis and assessment. Then, from the view of navigation safety, navigation efficiency and comprehensive benefit, the reasonability of the channel width given by different codes for the given situation is clarified. The assessment result tallies with the actual situation and can provide the basis for further study and development for the channel width design code.

**Key words:** waterway transportation; channel width assessment; entropy weight; TOPSIS; grey correlation; navigation safety; navigation efficiency

航道宽度的合理设计一方面能够为过往船舶提供安全的航行空间, 满足船舶安全通航的需

要, 方便船舶的操纵, 提高航道整体通航能力; 另一方面, 能够在一定程度上避免航道工程的重

收稿日期: 2013-03-11

\*基金项目: 上海市重点学科建设项目 (S30602)

作者简介: 陈婷婷 (1987—), 女, 博士研究生, 研究方向为交通信息工程及控制关键技术。

复进行,降低了航道建设和维护成本。

目前国内外关于航道宽度设计的规范或行业标准在很多方面上都存在着差别,一是考虑的因素不同,二是即使针对同一设计船型与同样的设计工况,不同标准或规范给出的航道宽度设计结果有着很大的差别。这些规范或标准相互独立,目前尚无研究建立相应的方法或指标对这些航道宽度设计结果进行评价,不能在最大程度上加深对这些标准或规范的理解,阻碍了航道宽度设计方面的发展。

本文从通航安全和效率的角度,确定评价指标,结合熵权-灰色关联度和TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Solution)方法对我国《海港总平面设计规范》<sup>[1]</sup>、国际航运协会(PIANC, Permanent International Association of Navigation Congress)《进港航道设计导则》<sup>[2]</sup>与加拿大《航道设计参数》<sup>[3]</sup>这3个比较有代表性的规范中的航道宽度设计结果进行对比评价,指出各规范在安全、效益和综合水平上的优劣排序,为航道宽度设计方面的发展提供一定的建议。

## 1 国内外航道宽度设计规范初步比较

### 1.1 国内外航道宽度设计规范简介

直线段航道有效宽度( $W$ )一般由航迹带宽度( $A$ )、船舶间富裕宽度(船船间距 $b$ )和船舶

与航道底边间的富裕宽度(船岸间距 $C$ )构成<sup>[1]</sup>,如图1所示。国内外规范和设计手册中通常将航道宽度表示为设计船宽 $B$ 的倍数。

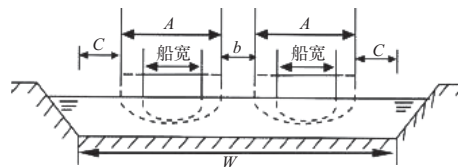


图1 双向航道有效宽度

根据JTJ 211—1999《海港总平面设计规范》<sup>[1]</sup>的有关规定,定义航道宽度 $W$ 为:

$$W=A+2C \quad (\text{单向航道}) \quad (1)$$

$$W=2A+b+2C \quad (\text{双向航道}) \quad (2)$$

在PIANC《进港航道设计导则》<sup>[2]</sup>中,航迹带宽度分为基本操纵带宽度和附加宽度两部分。PIANC考虑了由航速、横风、横流、纵流、波浪、助航标志、航道底质、航道水深、货物危险等级、船舶通航密度等因素造成的附加宽度。

加拿大的《航道设计参数》<sup>[3]</sup>定义航道宽度的方法与PIANC的方法基本相同,只是在划分附加宽度等级时采用了船舶的操纵性而不是航速。

### 1.2 初步比较

#### 1.2.1 考虑的因素

经过归纳总结,得出这3种规范进行航道宽度设计时分别考虑的影响因素(表1)。

表1 航道宽度设计时考虑的影响因素

规范	横风	横流	船舶操纵性/船型	航速	波浪	助航设施	航道底质	航道水深	货物危险度	交通密度	岸坡结构
中国	√	√	√	√							
PIANC	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
加拿大	√	√	√	√		√	√	√	√	√	√

相对于PIANC和加拿大的设计规范,我国规范在航道宽度设计时考虑的外部影响因素较少,尤其是助航设施水平和交通密度这些重要因素,有必要进一步地研究和试验。

#### 1.2.2 宽度设计结果

由于各国规定的方法不同,很难做出一个全面的对比,先做一些条件假定:对于不同船型,假

定船舶操纵性能中等,横风为4~7级,纵向流速为1.5~3 kn,有良好的航标助航设施,波高 $H_s \leq 1$  m,航道底质较软,航道水深约为 $1.2T$ ( $T$ 为船舶满载吃水),无危险品船通过,航道断面不变,双向航道,船舶交汇密度中等。船岸间距和船船间距在各规范中均有直观设计值,这里不再进行深入比较。在设定环境下,航迹带宽度对比如图2所示。

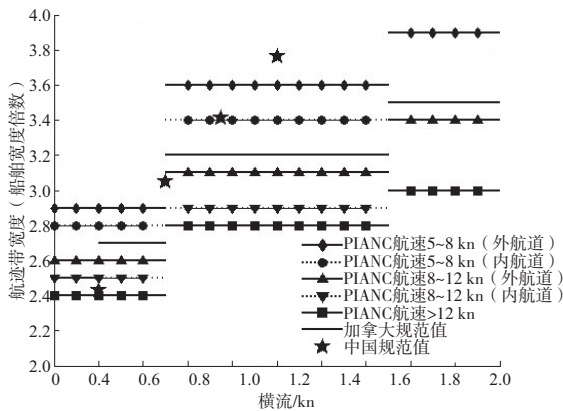


图2 中国规范与PIANC导则和加拿大规范的航迹带宽度值对比

由图2可知，各国规范在进行航道宽度设计时，考虑的影响因素有较大不同，在同等设计工况下，给出的宽度值也有很大的差别。加拿大规范与中国的规范都没有考虑航速和航道位置对航迹带宽度的影响，数值上与PIANC导则的略有不同，在航速为8~12 kn时最为接近。横流较小时 (<0.5 kn)，中国规范的设计值偏小；横流较大时，航速较高 (>12 kn) 时，中国规范的设计的航迹带宽度值较为保守<sup>[4]</sup>。

### 2 航道宽度设计结果的评价标准

航道宽度的设计应在保证安全的前提下，尽可能提高通航效益。因此，本文从通航安全和效益的角度对不同的航道宽度设计结果进行对比评价。

定义 $Ship_{max}$ 为航道内通航的最大设计船型；航道宽度最大设计值 $W_{max}$ 为： $W_{max} = \max(W_{1-max}, W_{2-max}, \dots, W_{n-max})$ ，其中 $W_{i-max}$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 为 $n$ 种不同设计规范针对 $Ship_{max}$ 给出的 $n$ 种不同的航道宽度设计值，本文 $n$ 取值为3。后文中把 $W_{max}$ 作为航道宽度设计标准值。

#### 2.1 安全指标

##### 2.1.1 考虑因素的全面性 $F_c$

航道宽度由多方面因素确定，航道宽度设计时考虑的影响因素的全面性会直接关系到设计结果准确性。通过对前文介绍的3种不同规范在航道宽度设计时考虑的因素进行归纳分析，把总因素个数定为11，见表1。

$F_c \in (0, 1]$ ，是指宽度设计时考虑到的因素个数与总因素个数的比值。

##### 2.1.2 最大船舶通航的安全度 $S_{i-maxS}$

对航道内的通航船舶尺度进行统计分析，针对 $Ship_{max}$ ，各规范分别计算出来的双向航道宽度值为 $W_{i-max}$  ( $i=1, 2, 3$ )，比较 $W_{i-max}$ 与航道宽度最大设计值 $W_{max}$ ，定义 $S_{i-maxS}$ 为：

$$S_{i-maxS} = W_{i-max} / W_{max} \quad (i=1, 2, 3) \quad (3)$$

$S_{i-maxS} \in (0, 1]$ ，其值越大，说明最大船舶通航安全度越高。

#### 2.2 效益指标

##### 2.2.1 航道利用率 $A_w$

对航道内的通航船舶尺度进行统计分析，找出占比最大的船舶尺度类型，把这种尺度的船舶作为代表船型。针对代表船型，各规范定值计算出来的双向航道宽度值 $W_{DES}$ 与 $W_{max}$ 进行对比，则航道利用率 $A_w$ 为：

$$A_w = W_{DES} / W_{max} \quad (4)$$

在不考虑航道工程建设经济投入的情况下，航道利用率越高，则航道通航能力越大。

##### 2.2.2 船舶追越安全度 $S_o$

航道宽度的设计应尽可能满足不同复杂通航需求，当船舶因为靠泊计划等要求，发生不可避免的追越现象时，应保持两船间的横向间距，即使在追越过程中主机失控，也不至于立即导致碰撞的发生。即当两船达到近似如图3所示的追越局面时，两船间距 $D$ 应足够大。

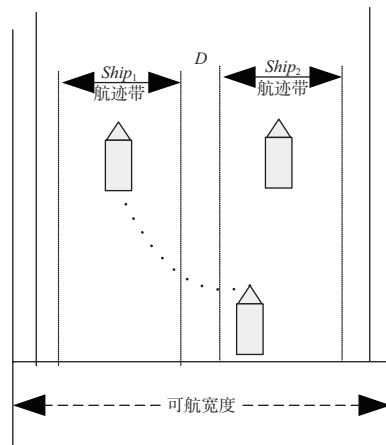


图3 船舶追越局面

为了计算简便,假设追越船 $Ship_1$ 与被迫越船 $Ship_2$ 是同为一般设计船型,不同航道宽度设计规范为 $Ship_1$ 和 $Ship_2$ 设计的航迹带宽度和船岸间距分别为 $A_{i1}, C_{i1}$ 和 $A_{i2}, C_{i2}$  ( $i=1,2,3$ ),则对应的不同规范给出的两船横向间距为

$$D_i = W_{i-\max} - (A_{i1} + C_{i1}) - (A_{i2} + C_{i2}) \quad (5)$$

其中,  $A_{i1} = A_{i2}$ ,  $C_{i1} = C_{i2}$ , 则定义船舶追越安全度 $S_{ot}$ 为:

$$S_{ot} = D / W_{\max} \quad (6)$$

$S_{ot} \in (0,1)$ , 其值越大, 则说明船舶安全追越的可能性越大, 保障了船舶通航效率。

### 3 基于熵权-TOPSIS-灰色关联度的综合评价模型

灰色关联度分析方法的基本思想是通过确定参考数列和若干比较数列集合曲线的接近程度来判断其联系是否紧密, 并用灰色关联度来反映曲线间的这种相关程度, 与理想方案关联度越大的方案越优<sup>[5]</sup>。然而, 某个方案与正理想方案的关联度大, 其与负理想方案的关联度未必就小。TOPSIS方法通过构造相对贴近度指标, 综合考量各方案与正、负理想方案间欧式距离的相对大小, 完成优选决策<sup>[6-7]</sup>, 得出比较可靠的决策结论。本文基于TOPSIS方法的思想, 分别计算各方案与正、负理想方案间的灰色关联度, 从而综合出各方案的相对贴近度, 进行方案排序与优选。

#### 3.1 构造多属性决策矩阵

设多属性决策问题有 $m$ 个候选方案, 组成方案集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ , 指标集为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ , 方案 $V_i$ 对指标 $U_j$ 的决策样本值为 $a_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ ), 设 $V^+$ 为正理想方案,  $V^-$ 为负理想方案, 即:

$$\begin{cases} V^+ = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+\} \\ V^- = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^-\} \end{cases} \quad (7)$$

则多属性问题的决策矩阵 $A$ 为:

$$A = (a_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

#### 3.2 指标值的规范化处理

为了保证结果的可靠性, 需要对原始指标值

进行规范化处理, 将其规范化为隶属于区间 $[0,1]$ 上的数。本文所选指标均为正性指标, 采用极差法处理<sup>[6]</sup>, 得:

$$y_{ij} = \frac{a_{ij} - \min_i(a_{ij})}{\max_i(a_{ij}) - \min_i(a_{ij})} \quad (9)$$

则规范化处理后的各方案的决策矩阵为:  $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ 。

#### 3.3 计算灰色关联系数:

方案 $V_i$ 与正、负理想方案 $V^+$ 和 $V^-$ 关于第 $j$ 个指标的灰色关联度系数 $r_{ij}^+$ ,  $r_{ij}^-$  ( $i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$ ) 分别为<sup>[5]</sup>:

$$r_{ij}^+ = \frac{\min_i \min_j |y_{ij} - y_j^+| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - y_j^+|}{|y_{ij} - y_j^+| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - y_j^+|} \quad (10)$$

$$r_{ij}^- = \frac{\min_i \min_j |y_{ij} - y_j^-| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - y_j^-|}{|y_{ij} - y_j^-| + \rho \max_i \max_j |y_{ij} - y_j^-|} \quad (11)$$

其中,  $\rho \in [0,1]$ , 为分辨系数, 引入它是为了减少极值对计算的影响, 一般取0.5。则各方案的正、负灰色关联系数矩阵为 $R^+ = (r_{ij}^+)_{m \times n}$ 及 $R^- = (r_{ij}^-)_{m \times n}$ 。

#### 3.4 基于熵权法确定指标权重

熵是系统无序程度的一个度量, 指标的信息熵越小, 该指标提供的信息量越大, 在综合评价中所起的作用越大, 权重也越高。用评估指标值构成的判断矩阵确定指标权重, 能尽量地消除主观因素对各指标权重计算的影响, 使评价结果更加客观合理<sup>[8]</sup>。

熵权法确定指标权重的步骤如下:

定义第 $j$ 个指标的熵值为:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \quad (12)$$

定义第 $j$ 个指标的差异系数为:

$$g_j = 1 - e_j \quad (13)$$

计算第 $j$ 个指标的权重为:

$$w_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j \quad (14)$$

得各指标的权重为:  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

#### 3.5 计算正、负灰色关联度

根据确定的指标权重, 可得方案 $V_i$ 的正灰色关联度与负灰色关联度分别为:

$$r_i^+ = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}^+ \quad (15)$$

$$r_i^- = \sum_{j=1}^n w_j r_{ij}^- \quad (16)$$

则, 方案 $V_i$ 的灰色关联相对贴近度 $R_i(i=1,2,\dots,m)$ 为<sup>[6-7]</sup>:

$$R_i = \frac{r_i^+}{r_i^+ + r_i^-} \quad (17)$$

$R_i$ 是将TOPSIS方法里相对贴近度的概念引进到灰色关联度决策中, 用以综合考虑候选方案类似于正理想方案且不同于负理想方案的程度。 $R_i$ 越大, 方案越优。

### 4 航道宽度设计结果的比较实例分析

#### 4.1 设定评价环境

选定长江口深水航道作为设计对象, 此航道有良好的航标助航设施, 航道底质较软, 水深12.5 m。通过对航道某一时段的进出口船舶交通流的分析, 得出该时段内占据比重最大的通航船舶为总长 $L=183$  m, 型宽 $B=27.6$  m, 型深 $H=14.4$  m, 满载吃水 $T=10.5$  m, 载箱量为1 051~1 900 TEU的集装箱船, 设为代表船型。最大设计船型 $Ship_{max}$ 取第5代集装箱, 船舶载质量70 000 t, 船舶总长 $L_{max}=300$  m, 型宽 $B_{max}=40.3$  m, 满载吃水14.0 m。长江口深水航道最高限速15 kn, 数据统计得出平均航速约为12 kn, 则设计的船舶航速定为12 kn。

假设, 该时段, 该双向航道的横风为4~7级, 横流为0.5~1.5 kn, 纵向流速为1.5~3 kn, 波高 $H_s \leq 1$  m, 无危险品船通过, 航道断面不变, 船舶交汇密度较大, 设计船舶的操纵性能中等。

#### 4.2 指标值与指标权重的确定

对于一般代表船型和最大设计船型 $Ship_{max}$ 分别计算各规范给出的航道宽度值和航迹带宽度值(表2)。3种不同设计规范即为3种不同设计方

表2 3种规范的航道宽度设计值

规范	一般设计船型 ( $L=6.63B$ )		最大设计船型 $Ship_{max}$ ( $L=7.44B_{max}$ )	
	航迹带宽度	双向航道宽度	航迹带宽度	双向航道宽度
中国规范	$3.42B$	$9.34B$	$3.64B_{max}$	$9.78B_{max}$
PIANC导则	$3.10B$	$9.30B$	$3.10B_{max}$	$9.30B_{max}$
加拿大规范	$3.40B$	$9.90B$	$3.60B_{max}$	$10.20B_{max}$

注: 以船宽 $B$ 的倍数表示。

案, 根据各指标的定义, 确定3个不同规范对应各指标的量值, 且由于各指标均为正性指标, 因此选取最优解设为正理想, 而最差值设为负理想(表3)。

表3 评价指标初值

方案	规范 $V_1$	规范 $V_2$	规范 $V_3$	正理想解	负理想解
$U_1: F_C$	0.364	1.000	0.909	1.000	0.364
$U_2: S_{T-max}$	0.959	0.912	1.000	1.000	0.912
$U_3: A_w$	0.627	0.624	0.665	0.665	0.624
$U_4: S_{ot}$	0.399	0.428	0.409	0.428	0.399

应用熵权法计算出各指标的权重为:

$$W = \begin{bmatrix} U & U_1 & U_2 & U_3 & U_4 \\ W & 0.296 & 0.473 & 0.129 & 0.102 \end{bmatrix} \quad (18)$$

#### 4.3 关联度的计算与结果说明

经计算, 得出各规范的正、负灰色关联度与相对贴近度如表4所示。

表4 灰色关联度计算与排序结果

关联度	规范 $V_1$	规范 $V_2$	规范 $V_3$	$r_i^+$ 排序	$r_i^-$ 排序	最终排序
正灰色关联度	0.099	0.473	0.099			
负灰色关联度	0.296	0.158	0.048	$V_2 > V_3 \approx V_1$	$V_1 > V_2 > V_3$	$V_2 > V_3 > V_1$
灰色关联相对贴近度	0.250	0.750	0.673			

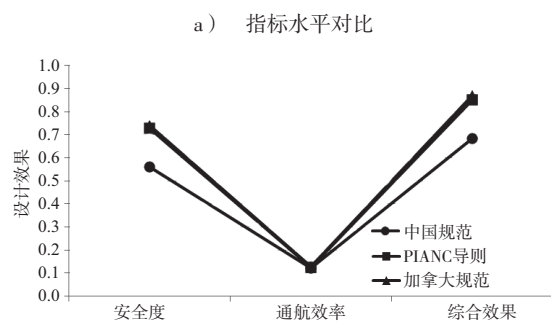
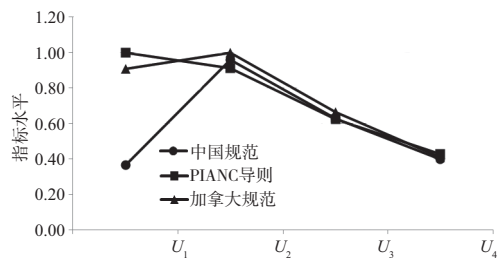


图4 3种规范各指标水平对比

由图4a)可以看出,未进行关联度计算前,很难对各国规范设计结果进行排序与决策。图4b)显示中国规范在安全度水平明显低于另外两则规范,3种不同设计规范在通航效率方面水平基本相当,造成中国规范设计的综合效果不佳。经过正、负关联度计算后,如表4和图5所示,根据灰色关联相对贴进度,各规范在给定评价环境下的优劣排序变得很明显,即PIANC导则明显更适合给定环境下的航道宽度设计,安全和效益的综合水平表现最好,中国规范和加拿大规范综合水平次之。

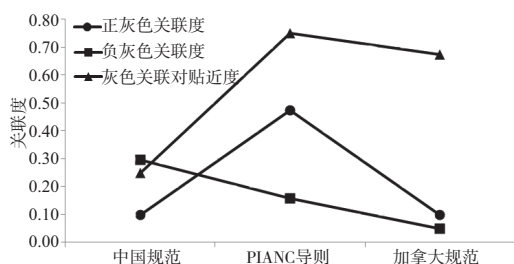


图5 3种规范的关联度对比

同时,我国规范与PIANC导则和加拿大规范相比:1)指标 $U_1$ 的对比说明中国规范在航道宽度设计方面考虑的风险因素相对较少,设计的安全性方面稍有欠缺,应进一步进行扩展研究,为我国规范的发展奠定基础。2)各规范在指标 $U_2$ ,  $U_3$ 和 $U_4$ 方面差别不明显。从数值上看,采用PIANC导则进行设计的航道适应能力更强,更能够满足大型船舶的安全通航。在航道利用率方面,各规范设计效果基本相当,在同样的通航效率下,中国规范设计结果给出的船间距较小,船舶追越安全度相对较低。

总之,PIANC导则在通航安全和通航效率方面的综合水平较高,加拿大规范稍微次之,中国规范仍有待于进一步的研究和发展,尤其是通航安全性方面。

## 5 结语

分析比较国内外3种航道宽度设计规范,提出了从安全和效率方面对航道宽度设计结果进行对比评价,并确定了评价指标。采用熵权法获取各指标的客观性权重,并融合了TOPSIS和灰色关联度这两种决策排序方法,分别计算备选方案与正理想解和负理想解的正、负灰色关联度,并综合得出各方案的灰色关联相对贴进度,从而进行方案排序与优选。通过设定评价环境,从安全、效益和综合水平上指出了3种设计规范的优劣排序。评价结果符合实际情况,也为我国航道宽度设计规范的进一步研究和发展指明了方向。

由于航道宽度设计结果评价方面的研究较少,在评价指标的选取上可能存在不足之处,这将是进一步研究的重点。

## 参考文献:

- [1] JTJ 211—1999 海港总平面设计规范[S].
- [2] PIANC. Approach Channels: A Guide for Design, Supplement to Bulletin no.95.Final report of the joint Working Group PIANC and IAPH, in cooperation with IMPA and IALA[R]. Brussel: PIANC, 1997.
- [3] Waterways Development, Marine Navigation Services, Canadian Coast Guard, Fisheries and Oceans Canada. Canadian Waterways National Maneuvering Guidelines: Channel Design Parameter[S].
- [4] 吴澎. 深水航道设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [5] 杜栋, 庞庆华, 吴炎. 现代综合评价方法与案例精选 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [6] 钱吴永, 党耀国, 熊萍萍, 等. 基于灰色关联定权的TOPSIS法及其应用[J]. 系统工程 2008(8): 124-126.
- [7] 杨宝臣, 陈欣. 基于变权和TOPSIS方法的灰色关联决策模型[J]. 系统工程, 2011(6): 106-112.
- [8] 刘智, 端木京顺, 王强, 等. 基于熵权多目标决策的方案评估方法研究[J]. 数学的实践与认识, 2005(10): 114-119.

(本文编辑 武亚庆)