



多目标协同下航道承载力计算模型研究^{*}

赵艺为¹, 张培林²

(1. 中船重工集团第714研究所, 北京 100044; 2. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 当河流兼具发电、供水、防洪和生态保护等多种功能时, 航道承载力如何兼顾多目标协同发展及量化问题成为当前航道建设研究的重要问题。运用改良变异法, 并结合航道承载力对生态、经济、河流多功能利用等目标的承载水平评价价值, 对航道承载力进行协同互适的调控, 计算出多目标协同下的最大航道尺度, 并通过 AE 航道作为算例对评价模型与计算方法的合理性及可操作性进行验证。结果表明, 计算出的最大航道尺度可缓解当前航道建设与经济、生态和河流多功能利用发展中的矛盾; 计算模型合理、可行。

关键词: 水路运输; 航道承载力; 改良变异系数法; 内河航道; 多目标协同; 计算模型

中图分类号: U 611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0142-08

Research on calculation model of channel carrying capacity under multi-objective cooperation

ZHAO Yi-wei¹, ZHANG Pei-lin²

(1. CSIC No.714 Institute, Beijing 100044, China; 2. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: The rivers have many other functions, such as generating power, supplying water, preventing flood and protecting ecological areas, and how to balance multiple goals and achieve synergistic development and quantification of channel carrying capacity in channel construction has become one of the most important problems today. By using the modified variance coefficient, we carry out coordinated and adaptive regulation of channel carrying capacity combining with the horizontal evaluation value of channel carrying capacity on ecological, economic and multi-function utilization of river, calculate the maximum channel size under multi-objective coordination, take AE channel as an example to verify the rationality and operability of the evaluation model and calculation method. The results show that the maximum channel size calculated can alleviate the contradiction between current channel construction and economy, ecology and rivers, and multi-purpose utilization. The calculation model is reasonable and feasible.

Keywords: channel transportation; channel carrying capacity; modified variance coefficient calculation; inland channel; multi-objective cooperation; calculation model

如今在我国生态文明建设时代下, 内河航道建设的方向已从片面追求经济需求转变为与其他多种需求的协同发展, 如生态、供水、防洪和发电等多种类型的需求。因此在多目标需求的影响下, 航道建设过程中就会出现经济与生态、防洪等目标的利益矛盾, 从而阻碍航道建设的有序发

展。航道尺度增长需求应与阶段性的经济社会发展需求相一致, 不能因过度追求经济利益增长, 而造成生态环境不可逆的破坏, 从而抑制防洪、发电等目标的实现。

目前针对内河航道承载力的定义及最大航道尺度计算方法的研究相对较少, 大多数研究将生

收稿日期: 2020-04-13

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402103)

作者简介: 赵艺为(1991—), 女, 博士, 研究方向为交通运输规划、长江水运发展、船舶市场、交通运输系统分析与优化。

态、防洪、供水、发电等因素作为单一限制因素而非需求影响因素进行协同计算。例如: 长江上游东溪口水道^[1]、长江下游太平洲捷水道^[2]、长江中游周天—藕池口河段^[3]等航道工程的实施, 主要根据水文特征(天然河道情况下河道稳定水深的预测)及经济社会发展的未来需求对航道建设的最大尺度进行预测。但在航道建设过程中, 对河道水生态影响因素的考虑不够全面, 多属于单向静态的以经济社会需求为基础的航道尺度研究, 再通过航道对生态的影响程度作为限制条件进行计算。

在以往研究中为了应对航道尺度研究的新方向提出了“航道承载力”的概念: 航道基于自然禀赋, 在一定社会经济与技术条件下, 响应生态、航运、防洪、用水等多目标协同需求下能够开发的最大航道尺度与最优通过能力^[4]。同时根据定义确定航道承载力以生态因素为重要影响因素, 经济因素为驱动因素, 河流多功能利用为限制因素(主要包括防洪、水资源综合利用等因素)的影响因素体系, 并明确各目标与航道发展之间的互适关系^[5-6]。在此基础上, 本文运用航道承载力评价值, 结合层次分析法(AHP法)及改良变异系数法, 构建综合协同计算模块, 最终得到极限航道承载力的最大航道尺度, 为航道承载力的衡量、航道潜力发挥等提供决策支撑。

1 多目标协同下航道承载力计算模型理论结构

1.1 自然禀赋条件模块

由于自然资源、水资源等条件对航道承载力具有重要影响, 因此自然禀赋模块是指航道承载力发展过程中自然禀赋条件对自然条件下最大航道尺度的影响。本模块根据径流量、水位变化、天然河道现状及演变、水资源、气候等对航道建设尺度的直接限制, 运用稳定航深法计算优良河相关系下的最大航道尺度。本模块计算结果为不考虑技术条件下最大可开发的航道尺度, 即航道尺度开发的上限。航道尺度的下限为当前航道尺度。

1.2 经济与航运目标模块

本模块主要根据经济发展对航道承载力提出的两方面的目标需求进行计算: 1) 航道尺度提高以满足更高的经济货运需求, 需要进行相应的经济发展趋势的预测, 量化经济需求; 2) 航道承载力发展在一定程度上促进其运输经济性提高, 使成本降低, 排污量降低进一步支撑经济的可持续发展, 并能与环境互适发展^[7]。运输经济性包括运输船舶的经济合理性、运输效率提升、降低水运成本等需求^[8]。综合以上两种目标的考量, 通过货运需求与成本要求测算出经济船型进而计算出经济与航运子模块下的最大航道尺度。

1.3 河流多功能利用协同模块

河流多功能利用模块的计算思路为: 计算最大供水、发电效益下的流量和水位的需求, 同时考虑最大防洪限制水位的要求, 进而计算出此目标下的最大航道尺度^[9]。

1.4 生态目标模块

航运的发展是为了满足经济社会的发展, 理论上航道建设可以根据人为预期进行改造。但由于当前我国的生态发展战略的导向, 航道承载力应在经济因素的驱动下注重对生态效益的影响。生态效益不仅与航运子系统有关, 更与经济、河流多功能利用子系统发展相关^[10]。航道承载力中的生态效益的实现主要取决于航道建设对其的影响, 因此为了航道承载力能够实现可持续发展, 必须贯彻生态导向型的发展模式, 即根据适宜的生态流量计算该目标下的最大航道尺度。

1.5 航道承载力“最大航道尺度”概念模型

航道承载力能够反映极限性的特征指标是最大航道尺度, 因此航道承载力的极限值是指在一定时间范围内的最大航道尺度。这个极限尺度的计算是通过以上生态目标、经济与航运目标和河流多功能利用目标3个子模块的综合加权平均得到航道尺度(寻求最优解或近优解权重组合)。该航道尺度要根据自然禀赋模块的计算结果进行最大航道尺度的上、下限控制, 同时结合生态红线、浅滩、急滩等具有一票否决权的特殊指标的控制, 最

终得到多目标协同下的最大航道尺度^[11]。最大航道尺度的计算结果要经过验证,保证最大航道尺度下生态目标、经济与航运目标、河流多功能利用目标的评价值均大于等于3,且耦合协调度需要在

0.9~1.0^[12]。验证通过,则计算结果即为多目标协同下最大航道尺度;如果验证不通过,需要调控各子模块的计算结果(方案)及各模块的权重,直至验证结果通过。航道承载力极限概念模型见图1。

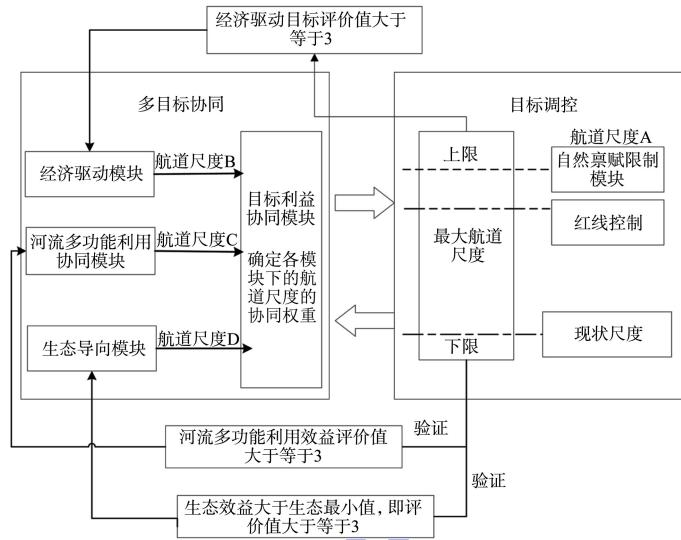


图 1 航道承载力极限概念模型

2 多目标协同下航道承载力计算方法设计

2.1 单模块协同定权方法

多目标协同下极限航道承载力的计算模型的构建,主要研究难点在于如何对航道承载力各子模块进行科学的定权,既要客观又能体现协同性,还需要尽可能让各利益主体满意^[13]。本文选择应用“AHP-改进变异系数法”的组合定权法构建多目标协同下航道承载力各子模块定权模型。AHP法(层次分析法)能够有效反映各利益部门的发展需求,从而根据多种主观目标需求对航道承载力各子模块进行定权^[14]。由于AHP法运用较广泛,本文不再对其进行赘述,着重解释变异系数法。

2.1.1 变异系数法

变异系数法可有效判定指标实现的难易程度(系数越大越难实现)。计算方法是直接利用各项指标所包含的信息,通过计算公式得到指标的权重,公式为:

$$V_i = \sigma_i / \bar{x}_i \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中: V_i 为第 i 项指标的变异系数,也称为标准差系数; σ_i 为第 i 项指标的标准差; \bar{x}_i 为第 i 项指标

的平均数。

各项指标的权重为:

$$W_i = V_i / \sum_{i=1}^4 V_i \quad (2)$$

2.1.2 改进变异系数法

改进变异系数法是通过在变异系数法计算原理的基础上,结合评价模型中各层次的评分值与总分值之间的差值,计算出各子模块达到最优状态的难度(达到可承载状态的差距),能够根据现状承载力的评价值进行有效调控。由于自然禀赋模块(模块1)为最大航道尺度的上限,因此不与模块2、3、4进行多目标协同。计算公式如下:

$$\varphi_i = \frac{w_i}{x_i} \quad (i=2,3,4) \quad (3)$$

式中: φ_i 为第 i 项指标的变异系数; w_i 为第 i 个模块的与最优状态的偏离程度; x_i 为第 i 个模块的总分值(根据评价模型,模块总分为 5,则 $x_i = 5$)。式(3)可变形如下:

$$\varphi_i = \frac{5-r_i}{5} \times 100\% \quad (i=2,3,4) \quad (4)$$

式中: r_i 为经济驱动承载评价值 ($i=2$)、河流多功能利用承载评价值 ($i=3$)、生态承载评价分值 ($i=4$)。

各项指标的权重为:

$$W'_i = \sigma_i / \sum_{i=2}^4 \sigma_i \quad (5)$$

综上, 多目标协同下航道承载力单模块权重为:

$$W = \alpha W'_i + (1-\alpha) W''_i \quad (6)$$

式中: W'_i 、 W''_i 分别为 AHP、变异系数法所确定的权重; α 为权重偏好系数 ($0 \leq \alpha \leq 1$), 本文取 0.5。

2.2 多目标协同下极限航道承载力计算模型

航道基于自然禀赋, 在一定社会经济与技术条件下, 响应生态、经济、河流多功能利用等多目标协同需求下能够开发的最大航道尺度与最优通过能力计算模型如下:

最大航道尺度:

$$\begin{cases} H^* = \sum_{i=2}^4 W_i H_i & (i=2,3,4) \\ B^* = \sum_{i=2}^4 W_i B_i & (i=2,3,4) \end{cases} \quad (7)$$

最优通过能力:

$$Q_{y(s)} = \frac{3600MT}{K_h} \left[m_u \cdot \frac{(v_u - v_w)}{l_u} + m_d \cdot \frac{(v_d + v_w)}{l_d} \right] \quad (8)$$

式中: H_i 、 B_i 为各单模块计算的航道水深、航道宽度; H^* 、 B^* 分别为综合协同各模块下的最大航道水深、宽度, 由于自然禀赋模块 (模块 1) 为最大航道尺度的上限, 不在式 (7) 中进行计算; T 为年通航时间 (d); M 为船舶的平均吨级 (t); K_h 为设计小时系数; m_u 、 m_d 分别为船舶上行、下行的通道数目 (条); v_u 、 v_d 分别为船舶交通流中给定船型对应的上水、下水航速 (m/s); v_w 为航道内的水流速度 (m/s); l_u 、 l_d 分别为上、下行船舶流中给定船型的船舶领域纵长 (m)。

2.3 结果验证

根据多目标协同下最大航道尺度计算模型理论结构的阐述, 以上 H^* 与 B^* 必须通过验证满足以下限制条件:

$$\begin{aligned} & \left. \begin{cases} H' \leq \min(h_{\text{洪}}, h_{\text{生}}, h_{\text{碍}}) \\ B' \leq \min(b_{\text{洪}}, b_{\text{生}}, b_{\text{碍}}) \\ r' \leq \min(r_{\text{洪}}, r_{\text{生}}, r_{\text{碍}}) \\ 0.9 \leq D(H', B', r') \leq 1 \\ E_2 \geq 3 \\ E_3 \geq 3 \end{cases} \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

式中: H' 为经过红线控制后的最大航道水深; B' 为最大航道宽度; r' 为最大转弯半径; $h_{\text{洪}}$ 、 $h_{\text{生}}$ 、 $h_{\text{碍}}$ 分别为防洪限制水位、生态红线、碍航特征下最大航道水深; $b_{\text{洪}}$ 、 $b_{\text{生}}$ 、 $b_{\text{碍}}$ 分别为防洪限制水位、生态红线、碍航特征下最大航道宽度; $r_{\text{洪}}$ 、 $r_{\text{生}}$ 、 $r_{\text{碍}}$ 分别为防洪限制水位、生态红线、碍航特征下最大航道转弯半径; E_2 、 E_3 分别为最大航道尺度下的河流多功能利用目标、生态目标的评价值; $D(H', B', r')$ 为最大航道尺度下的航道承载力的耦合协调度, 即最大航道尺度下各子系统的耦合协调度 (旨在验证航道承载力系统中各子系统的协同互适的程度), 公式为:

$$D = (H', B', r') = \sqrt{CT} \quad (10)$$

其中:

$$C = \left[\frac{(U_1 \cdot U_2 \cdot \dots \cdot U_m)}{\prod_{i=1}^m (U_1 + U_2 + \dots + U_m)^m} \right]^{1/m} \quad (11)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 + \gamma U_3 \quad (12)$$

式中: C 为系统耦合度, $C \in (0, 1)$; m 为子系统个数, 本互适系统中包括生态子系统、经济与航运子系统、河流多功能利用子系统, 故 $m = 3$; T 为子系统综合协同指数, 反映航道承载力系统的整体系统效益; α 、 β 、 γ 为子系统贡献度待定系数, 且其和为 1, 即各子系统对航道承载力的重要程度权重, 可根据客观赋权、专家评议等方法制定; U_i 为各子系统对总系统有序度的贡献值, 即 U_i ($i=1, 2, 3$) 分别为生态承载子系统、经济承载子系统、河流多功能利用子系统对航道承载力总系统有序度的贡献值, 相当于子目标的承载现状水平, 计算公式为:

$$U_i = \sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} u_{ij} \quad \left(\sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} = 1 \text{ 且 } 0 \leq U_i \leq 1 \right) \quad (13)$$

式中: n_i 为第 i 个子系统中指标的个数; λ_{ij} 为第 i

个子系统中第 j 个影响因子的权重; u_{ij} 为生态、经济与航运、河流多功能利用耦合系统的有序功效系数, 反映了各影响因子达到目标的满意程度, 取值范围为 $[0,1]$, 1 表示最满意, 0 表示最不满意。本文 u_{ij} 的计算方法为: 效用函数计算结果应为 $0 \sim 1$ 之间, 数据结果才能具有数学意义。因此, 需要将评价模型中各指标的评价值按等级换算为对应 $0 \sim 1$ 之间的数值, 即评价值 1~5 对应为 $0.2 \sim 1.0$ 。

以上验证通过, 则计算结果即为多目标协同下最大航道尺度, 如果验证不通过, 需要调控目标权重或航道尺度方案直至验证结果通过。

3 算例

3.1 AE 航道承载力现状评价值计算

为了验证计算模型的可行性, 选取 AE 航道作为验证算例, AE 航道现状条件为: AE 河段属于

该流域中游段, 起点为 a 地区, 终点为 e 地区, 包含 30 个水道。c 地区将 AE 河段分为上下两部分, 上河段微弯分汊, 下河段弯曲蜿蜒。该航段存在航道边界持续性变化的问题, 如中低滩体受冲萎缩、高滩岸线崩退和支汊发展等问题, 因此该河段依然是整个流域航道建设的限制性河段。AE 河段有 3 个自然生态保护区和 1 个水产资源保护区, 其中根据各保护区对水位的要求, 红线设定为 4.6 m。经核查该航段有 6 个碍航河段。

根据计算模型理论结构的论述, 以生态、经济与航运和河流多功能利用目标为准则层, 结合 AE 航段的现状态条件及数据可得性等原则, 选取具有普适性的评价指标进行 AE 航段的航道承载力的现状评价, 并通过指标的评价标准对评价指标进行分值标准化处理, 评价指标的数据、评价值与评分标准见表 1^[15-17]。

表 1 AE 航道承载力评价指标及分值

目标层	准则层	一级评价指标	二级评价指标	数据	评价值		评价标准			
					5	4	3	2	1	
生态目标	B ₁	生态保护 C ₁₁	生态需水满足度 D ₁₁	80%~90%	4	≥90	≥80	≥60	≥40	≥20
		植被覆盖率 D ₁₂	59.99%	4	≥90	≥80	≥60	≥40	≥20	
		水土流失率 D ₁₃	17.41%	3	<10	<15	<25	<30	≥30	
	B ₂	生物多样性 C ₁₂	珍稀物种存活状况 D ₁₄	一般	3	很好	较好	一般	差	极差
		鱼类生物完整性指数 C ₁₅	D ₁₅	44	3	58~60	48~52	40~44	28~34	<22
		污染排放量 C ₁₃	石油类排放 D ₁₆	0.01 mg/L	5	≤0.05	≤0.06	≤0.07	≤0.07	>0.07
航道承载力	A	货运需求 C ₂₁	溶解氧量 D ₁₇	8.06 mg/L	5	≥7.5	≥6	≥5	≥3	≥2
		运输需求满足率 D ₂₁	D ₂₁	57	1	>110	>105	≥100	>95	≥90
		航运 GDP 贡献度 C ₂₂	D ₂₂	9.61%	3	优	良	中	差	劣
	B ₂	水运成本 C ₂₂	必要运费率 D ₂₃	583.65 元/TEU	3	优	良	中	差	劣
		航运成本占航运产值比例 C ₂₄	D ₂₄	15.9%	3	<10	<13	<16	<18	≥18
		通航水深保障率 C ₂₅	D ₂₅	98%	5	≥98	≥90	≥80	≥70	<70
A	B ₂	航道能力 C ₂₃	航道饱和度 D ₂₆	0.89	3	<0.35	<0.55	<0.75	<0.9	>0.9
		船舶尺度适应度 C ₂₇	D ₂₇	0.57	3	<0.49	<0.54	<0.59	<0.64	>0.64
		服务水平 C ₂₄	航道应急响应时间 D ₂₈	30 min	1	<12	<15	<20	<25	≥25
	B ₃	服务水平 C ₂₄	航道尺度信息更新周期 D ₂₉	7 d	2	≤1	≤3	≤5	≤7	>7
		水资源综合功能利用 C ₃₁	水资源开发利用率 D ₃₁	16.57%	5	<20	<30	<40	<50	≥50
		供水保障率 D ₃₃	D ₃₂	90.70%	4	≥90	≥80	≥60	≥40	<40
河流多功 能利用目 标	B ₃	饮用水安全保障率 D ₃₄	D ₃₃	100.00%	5	≥95	≥90	≥80	≥70	<70
		防洪 C ₃₂	防洪工程措施达标率 D ₃₅	80%~95%	4	≥95	≥80	≥65	≥60	<60
	B ₃	最大排蓄洪水能力 D ₃₆	D ₃₆	1 000 a —遇	5	1 000 a —遇	100 a —遇	50 a —遇	20 a —遇	10 a —遇

据专家建议, 本文结合不同航段的实际情况和其他资源类承载力评价分级的标准, 同时满足航道承载力的互适发展过程, 运用5级评价对航道承载力水平进行判别。5级划分为完全可承载(5分)、可承载(4分)、临界可承载(3分)、不可承载(2分)和完全不可承载(1分)5个等级。AE航道经济、航运、河流多功能利用承载力现状评价值及综合承载力评价值见表2。

表2 AE航道承载力现状评价值计算结果

指标层次	指标名称	组合权重	指标评价分值	承载力现状评价值
A-B _j	B ₁	0.21	3.64	3.37
	B ₂	0.44	2.67	
	B ₄	0.34	4.22	
B ₁ -C _{1j}	C ₁₁	0.30	3.81	3.64
	C ₁₂	0.50	3.00	
	C ₁₃	0.20	5.00	
B ₂ -C _{2j}	C ₂₁	0.33	2.25	2.67
	C ₂₂	0.25	3.00	
	C ₂₃	0.25	3.67	
	C ₂₄	0.17	1.50	
B ₃ -C _{3j}	C ₃₁	0.58	4.03	4.22
	C ₃₂	0.42	4.50	
C ₁₁ -D _{1j}	D ₁₁	0.30	4.00	3.81
	D ₁₂	0.51	4.00	
	D ₁₃	0.19	3.00	
C ₁₂ -D _{1j}	D ₁₄	0.50	3.00	3.00
	D ₁₅	0.50	3.00	
C ₁₃ -D _{1j}	D ₁₆	0.63	5.00	5.00
	D ₁₇	0.38	5.00	
C ₂₁ -D _{2j}	D ₂₁	0.38	1.00	2.25
	D ₂₂	0.63	3.00	
C ₂₂ -D _{2j}	D ₂₃	0.42	3.00	3.00
	D ₂₄	0.58	3.00	
C ₂₃ -D _{2j}	D ₂₅	0.34	5.00	3.67
	D ₂₆	0.45	3.00	
	D ₂₇	0.21	3.00	
C ₂₄ -D _{2j}	D ₂₈	0.50	1.00	1.50
	D ₂₉	0.50	2.00	
C ₃₁ -D _{3j}	D ₃₁	0.10	5.00	4.03
	D ₃₂	0.17	4.00	
	D ₃₃	0.33	5.00	
	D ₃₄	0.40	3.00	
C ₃₂ -D _{3j}	D ₃₅	0.50	4.00	4.50
	D ₃₆	0.50	5.00	

根据表2选取的评价指标运用层次分析法与熵值法对其进行AE航道承载力现状的评价。结果表明: AE航道承载力现状评价值为3.37, 承载力水平为临界可承载。根据以上各子目标承载水平的分析, 发现经济与航运目标承载水平是制约AE航道承载力现状水平的主要因素(评价值及仅为2.67), 说明该航段供给水平不能与经济目标适应, 不能满足AE航段的经济发展的可持续需求。生态目标的承载评价值为3.64属于临界可承载, 航道承载力中对生态目标的实现进行调控时应该予以重视。AE航道河流多功能需求目标承载评价值为4.22, 为可承载等级, 说明AE航道的水资源综合利用(用水和水质等方面)与防洪功能的目标承载相较于其他子目标承载水平更高。

3.2 AE航道承载力现状评价值敏感性分析

航道承载力现状评价值的计算中选取的权重值对最终计算结果的影响较大, 本文权重的确定运用了AHP方法, 虽然结合了熵值法进行组合定权, 但是依然具有一定的主观性。因此, 权重的敏感性分析是有效检验评价结果稳定性的方法。新权重的确定主要是将已经确定的各功能的权重上下分别调动20%, 其余目标层的权重依照原有比例进行相应变化, 重新计算后, 权重会相应变化, 改变后航道承载力现状评价值见表3。

表3 权重上下浮动20%AE航道承载力现状评价值变化

目标层	准则层	W	1.2W	0.8W
航道承载力	生态目标	3.64	3.67	3.54
	经济与航运目标	2.67	2.69	2.58
	河流多功能利用目标	4.22	4.21	4.19

根据计算结果发现: 权重在20%的上下调整, 发现其权重上调20%后各目标的评价值为3.67、2.69、4.21, 与原结果3.64、2.67、4.21相差仅为0.03、0.02、0.01不影响AE航道各目标的评价等级。同理权重下调20%后其各目标的评价值与原评价值的等级无变化, 说明评价结果对各目标承载状态的总权重的20%幅度波动敏感性不高, AE航道承载力现状评价值评价结果具有较高的稳定性和可靠性。

3.3 多目标协同下 AE 航道最大航道尺度计算结果

各模块的主要计算方法为自然禀赋模块应用稳定航深法计算、生态目标模块应用生态流量计算的方法、经济与航运目标模块为以运输需求及成本为优化目标的的计算方法，河流多功能利用模块主要应用以供水、发电、防洪为主要用水目标的多目标优化的计算方法。以上各模块(除经济与航运目标模块)均会计算出不同目标模块下的特征流量结果，并根据不同特征流量计算出各模块目标下的航道尺度，经济与航运模块是根据四阶段法预测运输需求，并预测经济船型(船型需要经过运输需求满足度及成本目标满足度的验证)，通过船型尺度预测该模块下的航道尺度。数据来源主要为实地调研数据、中经网数据库、长江航道局、交通运输部等相

关部门披露的数据。根据各模块的计算方法，单一模块下航道尺度结果见表 4。

表 4 单一模块下航道尺度结果

子模块	航道尺度计算结果(水深×宽×弯曲半径)/(m×m×m)
自然禀赋模块	5.51×133×1 000
生态目标模块	2.80×164×1 000
经济与航运目标模块	5.00×150×1 000
河流多功能利用模块	5.48×220×1 000

3.3.1 各模块协同定权

根据多目标协同下航道承载力的计算方法，首先计算各模块的协同权重。根据表 2 中各模块的评价值运用改进变异系数法及层次分析法计算各模块的协同定权，结果及计算步骤见表 5。

表 5 单一模块下航道尺度结果

步骤	应用方法和公式	结果
(1) 各模块变异系数	式(4)	$\begin{cases} \sigma_2 = 0.47 \text{ (经济与航运模块)} \\ \sigma_3 = 0.16 \text{ (河流多功能利用模块)} \\ \sigma_4 = 0.27 \text{ (生态模块)} \end{cases}$
	层次分析公式(由于层次分析法已经应用的十分普遍,故未在本文详细说明)	$\begin{cases} W'_2 = 0.44 \\ W'_3 = 0.34 \\ W'_4 = 0.22 \end{cases}$
(2) 各模块的权重计算	变异系数法, 式(5)	$\begin{cases} W''_2 = 0.52 \text{ (经济与航运模块)} \\ W''_3 = 0.17 \text{ (河流多功能利用模块)} \\ W''_4 = 0.30 \text{ (生态模块)} \end{cases}$
	组合后协同定权, 式(6)	$\begin{cases} W_2 = 0.48 \text{ (经济与航运模块)} \\ W_3 = 0.26 \text{ (河流多功能利用模块)} \\ W_4 = 0.26 \text{ (生态模块)} \end{cases}$

3.3.2 多目标协同下 AE 航道尺度极限值计算

通过上述各模块协同定权的结果，并结合表 4 中各模块最大航道尺度的计算结果，根据式(7)得到 $H=4.55 \text{ m}$ 、 $B=171 \text{ m}$ 。

综上，根据 AE 航段的核查情况，假设该航段内的碍航特征在工程手段的帮助下，只能达到 4.5 m ，且生态保护区对航道建设的最高限制为 $4.6 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ (水深×宽×弯曲半径,下同)，则 AE 航段的多目标协同下最大航道尺度为 $4.5 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ ，将以上最大航道尺度的计算结果代入到式(8)得到 $Q_{y,s} = 5.15$ 。

在极限尺度下的通过能力为 5.15 亿 t。此计

算结果为理想船舶组织运营模式下的计算结果。

3.3.3 验证

根据以上计算结果得到最大航道尺度为 $4.50 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ ，为了验证该水深下，AE 航道互适协同度确实为预测期内各方案的最优解，因此根据机理之间的关系分别计算出航道尺度： $4.50 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 、 $4.60 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 、 $4.0 \text{ m} \times 150 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 时的互适协同度(图 2)。发现在 $3.50 \sim 4.60 \text{ m}$ 之间， 4.60 、 4.50 m 情况下耦合协调度都达到优质互适阶段，其耦合协调度分别为 0.94 和 0.93 ，较 3.5 m 时的 0.80 明显提高，且经济目标满足程度明显提高， $3.5 \sim 4.4 \text{ m}$ 之间的航

道尺度方案的耦合协同度低于 0.9 因此应予以排除。同时满足生态目标, 经济与航运目标、河流多功能利用目标评价值大于等于 3。由于当前的生态、防洪等条件的控制^[18-19], 多目标协同下 AE 航道承载力的最大航道尺度为 4.5 m×150 m×1 000 m, 该结果可接受且为最优解。

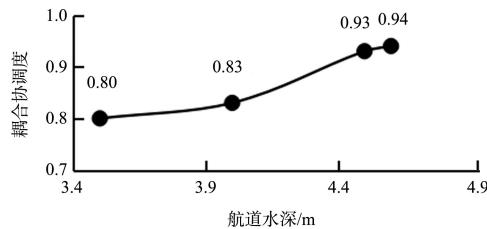


图 2 耦合协调度验证

经过计算与验证, 4.5 m×150 m×1 000 m 为 AE 航段一定时期内可实现的满足多目标协同发展的最大航道尺度。该水深下的航道尺度对经济目标与生态目标的完成度(评价值)高于 3.5 m 水深下航道对多目标的完成度, 因此其各目标子系统的效用函数结果高于效用函数的现状值, 即达到各目标子系统高水平发展及各目标之间的高度互适, 使 4.5 m×150 m×1 000 m 尺度下各子目标系统的耦合协同度呈现大于 0.9 的结果。

4 结语

1) 在航道承载力极限的理论结构基础上, 将极限航道承载力的计算模型设计为 4 个单一模块(自然禀赋、经济与航运、河流多功能利用及生态导向模块)及一个综合协同模块, 最终确定多目标协同下最大航道尺度的计算方法。

2) 综合协同模块设计, 以研究航段内的各模块的承载评价值为基础, 结合 AHP 法及改良变异系数法, 进行各模块的组合定权, 最终得到多目标协同下最大航道尺度。后续研究可根据研究角度的不同对协同定权的方法进行研究。

3) 本文采用算例进行评价模型及计算方法的可行性验证。因此后续研究可以根据实际航段的具体数据进行实证研究, 以指导实际工程的应用。

参考文献:

- [1] 陈建. 长江上游东溪口水道航道尺度提升可能性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(3): 61-65, 172.
- [2] 雷雪婷, 李有为, 马奕, 等. 长江下游太平洲捷水道设计航道尺度标准[J]. 水运工程, 2015(4): 163-169.
- [3] 闫军. 长江中游周天—藕池口河段航道尺度提升可能性探析[J]. 水运工程, 2014(12): 68-73.
- [4] 赵艺为, 张培林. 长江航道承载力概念研究[J]. 水运工程, 2018(3): 124-128, 165.
- [5] 赵艺为, 张培林, 陈沿伊. 长江航道承载力影响因素体系构建[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(9): 1498-1504.
- [6] 赵艺为, 张培林, 陈沿伊, 等. 长江航道承载力影响因素互适性内涵研究[J]. 物流技术, 2018, 37(10): 40-47.
- [7] 苏凡. 长江干线航运发展与流域经济适应性评价研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [8] 刘婷. 水位变化对长江中游航运物流成本的影响机理及模型研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [9] 赵汛舟. 资源节约型限制性Ⅲ级航道尺度优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [10] 李天宏, 丁瑶, 倪晋仁, 等. 长江中游荆江河段生态航道评价研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(2): 221-234.
- [11] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 等. 流域生态空间与生态保护红线规划方法: 以长江流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 835-843.
- [12] 黄珺端. 土地综合承载力系统构建与评价研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.
- [13] ZHANG J S, TAN W. Research on the coupling coordinative degree of transportation and regional economy in China[J]. Advanced materials research, 2012, 1549: 1732-1735.
- [14] 张运书, 曾德凤, 刘雅庆. 基于变异系数法的长江经济带绿色治理能力综合评价[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2019, 33(4): 56-60.
- [15] TAN G, YI R, CHANG J, et al. A new method for calculating ecological flow: distribution flow method[J]. AIP advances, 2018, 8(4): 1-18.
- [16] 蒋玲茜, 张培林, 赵艺为. 考虑碳排放的航道整治工程直接经济效益测算[J]. 水运管理, 2018, 40(9): 29-33.

(下转第 195 页)