

# 基于 TOPSIS-灰色关联分析的内河船舶动力 推进方案综合评估

陈辉<sup>1,2\*</sup>, 汪丽娟<sup>1,2</sup>, 杜志鹏<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 高性能舰船技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063)

**摘要:**为适应内河船舶复杂运行工况,满足船舶绿色化、智能化发展的需求,针对船舶动力推进方案选型问题,提出一种基于熵权法和 TOPSIS-灰色关联分析的综合评价方法。利用船机桨匹配基本理论估算船舶推进所需功率,确定船舶实际航行过程中推进系统功率和4种动力推进方案的选型配置。构建船舶动力推进方案评价指标体系,通过熵权法确定各项指标的权重,并运用逼近理想解的排序方法(TOPSIS)和灰色关联分析法(GRA)对某内河散货船4种动力推进方案进行综合评价。结果表明方案4(柴气电混合推进)为最优动力推进方案。研究成果可为高效绿色船舶的动力推进方案选择提供参考。

**关键词:**内河船舶;动力推进方案;熵权法;TOPSIS法;灰色关联分析法;综合评价

中图分类号:U662

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2026.01.013

## Comprehensive evaluation of power and propulsion schemes for inland waterway vessels based on TOPSIS and Grey Relational Analysis (GRA)

CHEN Hui<sup>1,2\*</sup>, WANG Lijuan<sup>1,2</sup>, DU Zhipeng<sup>1,2</sup>

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Key Laboratory of High Performance Ship Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** To accommodate the complex operating conditions of inland waterway vessels and address the needs for green and intelligent development in the shipping industry, this paper proposes a comprehensive evaluation method for selecting ship propulsion schemes based on the entropy weight method and TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)-Grey Relational Analysis (GRA). The power required for ship propulsion is estimated using the fundamental theory of ship-engine-propeller matching. Based on this, the power of the propulsion system and the selection and configuration of four power and propulsion schemes during actual ship navigation are determined. An evaluation index system is established for ship propulsion options, in which the weight of each indicator is determined by the entropy weight method. The four power and propulsion schemes of an inland bulk carrier are then comprehensively evaluated using the TOPSIS and GRA. The results indicate that scheme 4 (diesel-gas-electric hybrid propulsion) performs best among the alternatives. The findings of this study can provide a reference for the selection of propulsion schemes for efficient and green ships.

**Key words:** inland waterway vessels; power and propulsion scheme; entropy weight method; TOPSIS method; Grey Relational Analysis; comprehensive evaluation

收稿日期:2025-01-17

基金项目:绿色智能内河船舶创新专项资助项目(工业和信息化部[2019]358号)资助

作者简介:陈辉(1962—),男,博士,教授,研究方向为船舶动力系统建模与智能船舶控制。\*通信作者:hchen@whut.edu.cn

引用格式:陈辉,汪丽娟,杜志鹏.基于 TOPSIS-灰色关联分析的内河船舶动力推进方案综合评估[J].中国航海,2026,49(1):125-134.

CHEN H, WANG L J, DU Z P. Comprehensive evaluation of power and propulsion schemes for inland waterway vessels based on TOPSIS and Grey Relational Analysis (GRA) [J]. Navigation of China, 2026, 49(1): 125-134. (in Chinese)

内河航运是水资源综合利用以及国民经济发展的重要根基,其发展对交通事业和国民经济增长有重要贡献。然而,随着内河船舶数量的增多,环境问题逐渐产生。随着内河船舶朝着智能化、绿色化和标准化的趋势发展,船舶动力系统如何提升经济性、绿色性和可靠性,已成为学者关注的焦点。对内河船舶而言,由于其通航环境受到地理环境和水文条件的限制,如航道曲折、水流速度变化大以及上下水航行对船舶功率需求差距大等,船舶无法长期稳定运行在最佳工况点。此外,由于水流因素的影响,上下水工况的船舶推进功率差异巨大,因此,船舶在实际营运过程中,“大马拉小车”的现象尤为突出,导致能源利用效率降低以及排放高。此外,内河航道通常受到更多的法规限制,且受到港口吞吐量大和航速约束等原因,内河船舶在实际航行时,动力系统大多处于低负荷水平,效率较低。<sup>[1]</sup>船舶动力是整个船舶的核心,直接影响到船舶实际航行的安全、经济和排放等性能。船用混合动力系统源自20世纪70年代,由轴带发动机和柴油机共同作为船舶推进动力来源。<sup>[2]</sup>世界上第一艘混合动力拖船“Carolyn Dorothy”号采用“柴油发动机+铅酸电池+储能”动配置,显著降低了排放与能耗。<sup>[3]</sup>在国内,田晨曦<sup>[4]</sup>通过对一艘金枪鱼钓船进行并联式油电混合动力系统设计,并结合 Simulink 仿真验证其在燃油经济性和节能环保性方面的潜力。孙晓军等<sup>[5]</sup>以某型内河拖船为研究对象,完成其气电混合动力系统的建模,并提出基于模糊逻辑推理的能量最优分配策略,实现动力系统性能的显著提升。“长航货运001”号采用油、气、电混合的动力系统,兼具安全可靠、绿色、智能、高效等特点。

研究表明每种混合动力系统都具有独特优势和适用场景,故在满足航行动力需求的前提下实现动力推进方案的选择至关重要。李凯等<sup>[6]</sup>基于6500 m<sup>3</sup>耙吸式挖泥船的工作性质与功率需求提出3种拖动方案,采用层次分析法建立模糊评价模型确定了最佳动力系统配置方案,并通过功率核算计算证明所选用模型和评价方法的合理性。石慧等<sup>[7]</sup>以一艘内河散货船为研究对象,构建内河船舶绿色化评价指标体系,通过专家打分和实船营运测试数据证明油电气混合动力推进方案能降低碳排放、减少成本。熊云峰等<sup>[8-9]</sup>提出构建基于加权灰关联评估模型和基于加权TOPSIS法的船舶性能综合评价方法。仝金强<sup>[10]</sup>建立基于熵权-TOPSIS法的舰船设计方案评估模型并通过实例验证评估模型的有效性。

总体来说,上述研究为动力推进方案的选型配

置和综合评价提供了参考。然而,现有针对内河船动力系统架构选型和综合评价的相关文献较少,且多采用主观赋权法和单一的评价模型,在一定程度上会影响评价结果的科学性和准确性,因此在动力推进方案综合评价方面还有待完善。

本文利用熵权法(Entropy Weight Method, EWM)对指标权重进行客观赋值确定指标的权重系数,同时提出基于TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)-灰色关联分析模型对船舶动力推进方案进行综合评价,该法在采用TOPSIS法<sup>[11]</sup>求解多指标多决策问题的基础上引入灰色关联分析法,将两者的优势相结合,考虑备选方案与理想解(最优方案)的距离和各评价指标之间的关联程度,提高评价结果的科学性、准确性。以航行于长江上海—重庆航线的一艘7500吨级散货船为例,进行柴油机直推方案、柴电混合动力推进方案、气电混合动力推进方案和柴气电混合动力推进方案的选型配置和综合评价,确定其最优动力推进方案,并针对参数变化进行敏感性分析,以验证其评价模型得出的综合排序的合理性与客观性,可为内河绿色船舶推进方案的设计和选型提供一种新的综合评估方法。

## 1 动力推进方案选型与分析

目标船舶在不同工况(上水、下水等)下,主机负荷差距大,主机长期低负荷运营。其次,传统柴油机直推模式不节能,因为柴油机设计工况点单一。且固定最佳油耗区间窄,通常位于60%~100%。负荷为适应多变工况的船舶功率需求,本研究基于船机桨匹配理论,计算推进系统功率,并结合散货船实际营运需求,确定4种动力推进方案和主要设备选型配置。

### 1.1 船机桨匹配确定主机功率

船机桨匹配的任务是针对不同特性的船、主机和螺旋桨进行某一设计工况的选型与匹配,从而实现船机桨参数的优化配置,以期选择最优的推进系统。船舶动力系统选型的首要任务是明确船舶航行所需的推进功率。根据船舶的设计参数、试航速度和阻力曲线等相关参数,完成船机桨匹配工作,从而求得目标船舶螺旋桨所需的单机功率 $P_s$ 。<sup>[12]</sup>船机桨初步匹配流程见图1。

7500吨级散货船船机匹配参数设置见表1。根据散货船的设计参数,如阻力曲线、有效功率曲线和机桨匹配参数等,完成该船推进系统单机功率的估算工作。其中,对于船舶阻力曲线,本文利用船模

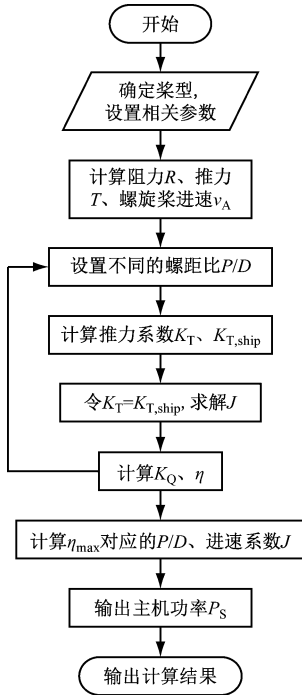


图1 船机桨初步匹配流程

Fig. 1 Preliminary ship-engine-propeller matching procedure

表1 7 500 吨级散货船船机匹配参数设置

Tab. 1 Ship-engine matching parameter settings for a 7,500-ton bulk carrier

| 技术参数            | 尺度大小    |
|-----------------|---------|
| 螺旋桨模型           | B 系列螺旋桨 |
| 阻力系数            | 409 6   |
| 螺旋桨数/个          | 2       |
| 螺旋桨直径/m         | 1.8     |
| 桨叶数/个           | 4       |
| 盘面比             | 0.45    |
| 设计航速/(km/h)     | 18      |
| 伴流系数 $\omega$   | 0.251 2 |
| 推力减额系数 $t$      | 0.202 8 |
| 轴系效率 $\eta_s$   | 0.94    |
| 相对旋转效率 $\eta_R$ | 0.99    |

注:1 km/h  $\approx$  0.539 957 kn

试验确定该散货船的航行阻力,见图2。

该散货船的推进系数曲线与螺旋桨的敞水性曲线见图3。螺旋桨推力系数曲线和船舶推进系数曲线相交的位置为功率平衡点,即为螺旋桨设计工况点,进而确定推进系统额定功率。

经过计算可得螺旋桨最佳工况点的进速系数  $J=0.386$ ,螺旋桨效率  $\eta_0=0.517$ ,最大推进效率对

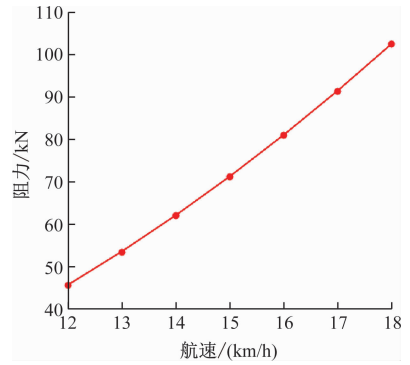


图2 内河7 500 t级散货船阻力曲线

Fig. 2 Resistance curve of a 7,500-ton inland bulk carrier

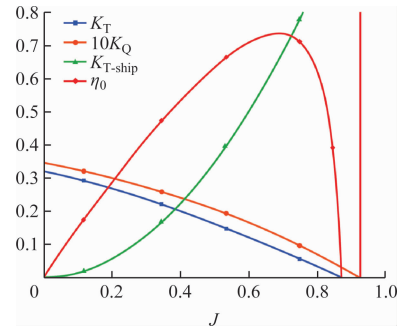


图3 推力系数曲线与螺旋桨的敞水特性曲线

Fig. 3 Thrust coefficient curve and propeller open-water characteristic curves

应的螺距比  $P/D$  为 0.78,螺旋桨所需单个发动机输出功率(双机双桨)为  $P_s = 499.91$  kW。

## 1.2 动力系统选型方案

本文在计算船舶推进系统需求功率时,假设<sup>[13]</sup>上水时船舶航行的设计航速为 18 km/h,由船舶-主机匹配方法,可得目标船舶推进系统额定需求功率  $P_s = 499.91$  kW,考虑到水流流速对试航航速的影响,选取平均水流速率为 3.6 km/h,可得下水单机额定功率  $P'_s = 255.95$  kW。从满足船舶航行中典型工况的功率需求角度出发,完成 4 种动力推进方案的选型配置。

### 1.2.1 柴油机直推方案

考虑到内河船舶的风浪侵袭和动力效率损耗等影响,选取匹配功率的 15% 作为推进系统的功率储备。<sup>[13]</sup>同时,根据柴油机的实际比油耗曲线可知,额定功率约在 80% 时是柴油机的最佳工况点,即该运行工况下的柴油机燃油的耗油量最低。

从满足实际航行功率需求出发,并综合考虑柴油机的最佳工况点和功率储备,此方案下动力推进系统配置为

$$P_1 = P_s \cdot \frac{1 + 15\%}{80\%} = 499.91 \text{ kW} \cdot \frac{1.15}{0.80} =$$

718.62 kW (1)

式(1)中: $P_1$ 为柴油机直推方案下柴油机单机所需功率,kW。

推进系统采用2台单机功率约718.62 kW的柴油机;此外,根据7 500吨级散货船轮机说明书,需配置2台250 kW的柴油发电机组供船上其他设备及日常负荷用电,柴油机的具体配置见图4。

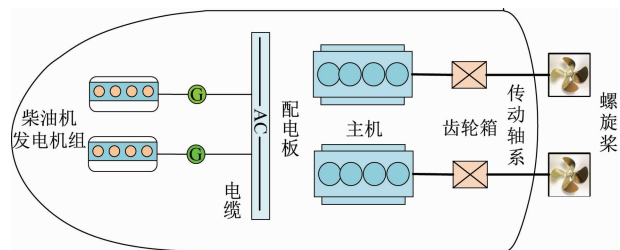


图4 柴油机直推方案配置

Fig. 4 Configuration of the diesel direct-drive propulsion scheme

### 1.2.2 柴电混合动力推进方案

混合动力拓扑结构按工作方式可分为串联式、并联式和混联式等3种。基于内河散货船船型庞大、载重量大及通常为单向运输等营运特点,本文研究的7 500 t级散货船采用并联式柴电混合动力系统结构。该系统将发动机和电动机机械耦合,构成机械推进与电力推进的组合。与串联式系统相比,其柴油机和可逆电机不仅能单独作用于螺旋桨,还能通过耦合模式协同驱动螺旋桨。此外,可逆电机可回收柴油机发出的过剩功率并存储在复合储能系统中,实现再利用。因此,该系统的能源利用效率更高,营运成本相对更低。

内河船舶实际航行工况比较复杂,在上水功率需求较大时利用柴油机推进工作;当处于机动航行时,采用柴电混合推进模式;而在水下功率需求较低时,主要采用电力推进模式。综合考虑营运过程中的功率供给和最佳工况点匹配,计算得到柴电混合推进方案的配置:推进系统采用2台单机功率约为 $499.91 \text{ kW}/80\% = 624.89 \text{ kW}$ 的柴油机,并基于其轮机说明书,配置2台功率为320 kW的可逆轴带电机,用于辅助推进及工况调节。本船设有双轴系,其柴油主机和轴带电机都是通过弹性联轴节后传送至齿轮箱。然后,齿轮箱输出功率,通过传动轴系驱动螺旋桨转动进而推动船舶运动。其中:轴带电机由3台250 kW的发电机组提供能量;3台并车以满足船舶最大工况要求;配置360 Ah锂电池,与发电机组一起用于其他设备和日常负荷的供电。柴电混合推进方案配置见图5。

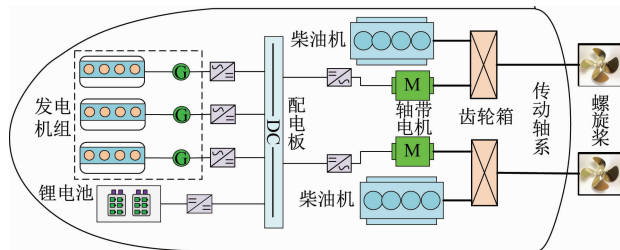


图5 柴电混合推进方案配置

Fig. 5 Configuration of the diesel-electric hybrid propulsion scheme

### 1.2.3 气电混合动力推进方案

对于气电混合推进模式,本船采用“天然气发动机+轴带电机+发电机组+锂电池”推进方案。

推进系统采用2台单机功率约为624.89 kW的天然气发动机,并配置2台功率为320 kW的可逆轴带电机,用于辅助推进及工况调节。其中:轴带发电机由3台250 kW的发电机组提供能量;3台并车以满足船舶最大工况要求;配置360 Ah锂电池,与发电机组一起用于其他设备及日常负荷的供电。气电混合推进方案配置见图6。

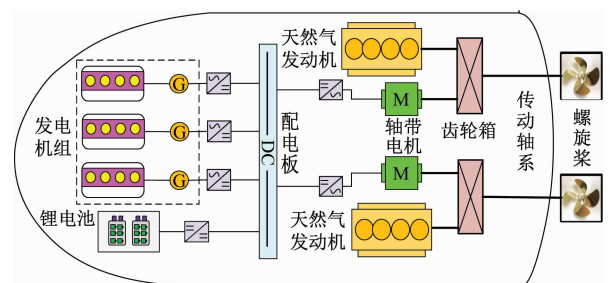


图6 气电混合推进方案配置

Fig. 6 Configuration of the natural gas-electric hybrid propulsion scheme

### 1.2.4 柴气电混合动力推进方案

对于柴气电混合动力推进模式,本船采用“柴油机+轴带电机+气体发电机组+锂电池”推进方案,除发电机组使用3台功率均为230 kW的气体发电机组(LNG燃料)便于供应轴带电机和日常负荷外,其他动力形式的配置皆与柴电混合动力推进系统相同,柴气电混合推进方案配置见图7。

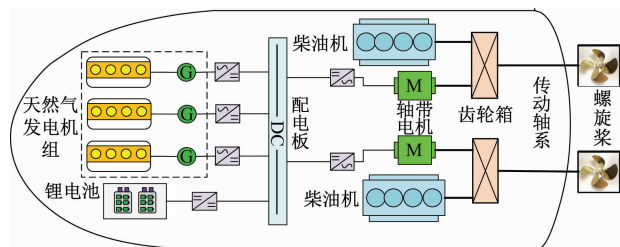


图7 柴气电混合推进方案配置

Fig. 7 Configuration of the diesel-natural gas-electric hybrid propulsion scheme

结合市场上动力系统设备供应厂的机型范围,对上述4种待评估的船舶动力推进方案进行了功率匹配,各推进方案的具体功率配置见表2。

根据市场调研和参考绿色智能内河船舶创新专

项资助项目中关于该7 500吨级散货船的课题研究<sup>[13]</sup>,结合功率需求和产品优势,最终确定了各备选动力方案及其主机型号,不同方案主机设备选型结果见表3。

表2 不同推进方案的功率需求配置

Tab.2 Power demand configuration of different propulsion schemes

| 方案类型   | 常规推进          | 柴电混合动力推进   | 气电混合动力推进   | 柴气电混合动力推进  |
|--------|---------------|------------|------------|------------|
| 主机     | 2台柴油机,约735 kW | 2台,约648 kW | 2台,约660 kW | 2台,约648 kW |
| 发电机组   | 2台,250 kW     | 3台,250 kW  | 3台,250 kW  | 3台,~230 kW |
| 可逆轴带电机 | 无             | 2×320 kW   | 2×320 kW   | 2×320 kW   |
| 储能     | 无             | 锂电池,360 Ah | 锂电池,360 Ah | 锂电池,360 Ah |

表3 不同方案主机设备选型结果

Tab.3 Selection of main engines for different schemes

| 传动方案 | 主机型号         | 主机额定功率/kW | 主机额定转速/(r/min) | 生产厂家 |
|------|--------------|-----------|----------------|------|
| 方案1  | WH620C1000-3 | 735       | 1 350          | 潍柴   |
| 方案2  | XCW6200ZC-4  | 648       | 900            | 潍柴   |
| 方案3  | 6230SG       | 660       | 750            | 广柴   |
| 方案4  | XCW6200ZC-4  | 648       | 900            | 潍柴   |

## 2 构建推进方案综合评估模型

### 2.1 指标权重确定

#### 2.1.1 评价指标体系的建立

动力系统是船舶设计的核心,其推进方案的选择直接影响船舶航行过程中的性能水平。由于在对比分析不同推进方案时需要考虑的评价因素复杂繁多,故构建一个多指标、分层次的科学的船舶动力推进方案评价指标体系至关重要。

参考船舶行业评价原则,并兼顾通用性和典型性,内河船动力推进方案评价指标体系见图8,构造目标船舶动力推进方案的评价指标体系对4个方案进行综合评价。

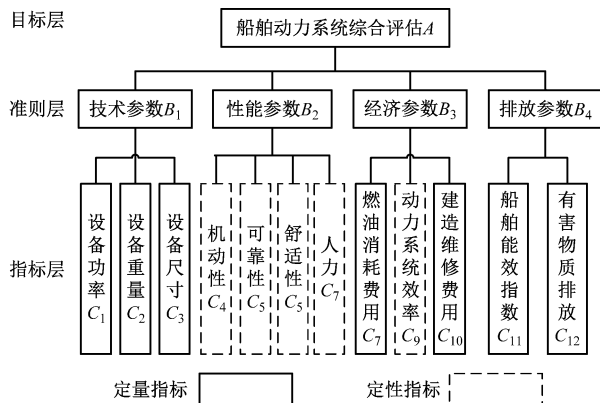


图8 内河船动力推进方案评价指标体系

Fig.8 Evaluation index system for inland waterway vessel propulsion schemes

#### 2.1.2 基于熵权法的指标权重确定

动力推进方案的评估往往会有很强的主观性和模糊性,而熵权法是根据各指标变异性的确定客观权重<sup>[14]</sup>,即利用评价指标的原始数据,借助信息熵确定客观权重大小,在一定程度上降低权重计算过程中主观因素的干扰,真实反映指标原始信息的差异,其计算出的指标权重具有较高的客观性,被广泛应用于各类评估问题中。

假设船舶动力推进方案选择中有*i*个方案*j*个评价指标,则 $x_{ij}$ 表示第*i*个方案的第*j*个指标的数据,以下为熵权法确定指标权重的具体计算步骤<sup>[15]</sup>如下:

1) 建立原始矩阵*X*,将各个备选方案的评价指标的原始数值构成矩阵的横向向量。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} = (x_{ij})_{m \times n},$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

2) 数据标准化:利用极值处理法将原始数据矩阵进行无量纲标准化处理。假设各指标的原始数据经标准化后的值为 $x_{ij}^*$ 。

$$X^* = \begin{pmatrix} x_{11}^* & \cdots & x_{1n}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1}^* & \cdots & x_{mn}^* \end{pmatrix} = (x_{ij}^*)_{m \times n} \quad (3)$$

式(3)中:  $x_{ij}^* = (x_{ij} - \min x_{ij}) / (\max x_{ij} - \min x_{ij})$ 。

3) 计算评价指标特征比重:第  $j$  项指标在第  $i$  个方案下占该指标的比重,即计算指标的变异性大小。

$$P_{ij} = x_{ij}^* / \sum_{i=1}^m x_{ij}^* \quad (4)$$

4) 计算各评价指标信息熵。

$$E_j = -k \cdot \sum_{i=1}^m P_{ij} \cdot \ln P_{ij} \quad (5)$$

式(5)中:  $k = 1/\ln m$ , 且若  $P_{ij} = 0$ , 定义  $E_j = 0$ 。

5) 计算各指标权重系数:通过计算信息冗余度来确定评价指标权重,则权重矩阵为  $\mathbf{W} = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

$$w_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^n (1 - E_j) \quad (6)$$

式(6)中:  $w_j$  为第  $j$  项评价指标的权重。

## 2.2 TOPSIS-灰色关联分析综合评价模型

TOPSIS 法是利用原始数据信息进行统计分析,通过计算各评价方案到理想方案的贴近度来对方案进行优先排序;其优点在于能同时考虑多个评价指标,有助于全面评估备选方案的优劣,但定性指标的存在会使评价的结果存在一定主观性。<sup>[16]</sup> 灰色关联分析法对原始数据没有太高的要求,计算简单,能研究和处理复杂模糊的问题,利用各方案与最优方案之间的关联度对备选方案进行排序,从而得到最佳选择,但在定量结论的解释上存在一定局限。故基于以上 2 种方法的长处和不足,本文将 TOPSIS 法和灰色关联分析法进行结合,构建 TOPSIS-灰色关联分析模型<sup>[17]</sup> 对备选方案进行优劣排序,基于 TOPSIS-灰色关联分析的综合评估流程见图 9。

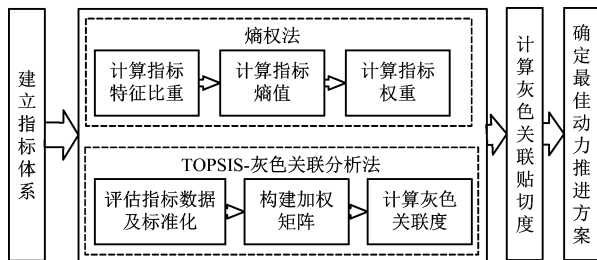


图9 基于 TOPSIS-灰色关联分析的综合评估流程

Fig.9 Comprehensive evaluation process based on TOPSIS-GRA

1) 构建原始数据矩阵  $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ ; 标准化后的矩阵为  $\mathbf{X}^* = (x_{ij}^*)_{m \times n}$ 。

2) 计算指标的权重  $w_j$ , 以其为主对角线元素构造矩阵  $\mathbf{W}^*$  为

$$\mathbf{W}^* = \begin{pmatrix} w_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & w_j \end{pmatrix} \quad (7)$$

3) 计算加权规范化决策矩阵  $\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n}$

$$\mathbf{Y} = (y_{ij})_{m \times n} = \mathbf{X}^* \cdot \mathbf{W}^* = \begin{pmatrix} w_1 x_{11}^* & \cdots & w_n x_{1n}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 x_{m1}^* & \cdots & w_n x_{mn}^* \end{pmatrix} \quad (8)$$

4) 确定加权规范矩阵  $\mathbf{Y}$  的参考样本,即最理想样本  $\mathbf{Y}^+$  和最劣样本  $\mathbf{Y}^-$ 。

$$\mathbf{Y}^+ = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+) \quad (9)$$

$$\mathbf{Y}^- = (y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^-) \quad (10)$$

式(9)和式(10)中:  $y_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} \{y_{ij}^+\}$ ;  $y_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} \{y_{ij}^-\}$ 。

5) 计算各样本与最理想样本  $\mathbf{Y}^+$  和最劣样本  $\mathbf{Y}^-$  的灰色关联系数矩阵  $\mathbf{R}^+ = (r_{ij}^+)_{m \times n}$  和  $\mathbf{R}^- = (r_{ij}^-)_{m \times n}$ , 其中:

$$r_{ij}^+ = \frac{\min_{i=1}^m \min_{j=1}^n |Y_j^+ - Y_{ij}^+| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |Y_j^+ - Y_{ij}^+|}{|Y_j^+ - Y_{ij}^+| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |Y_j^+ - Y_{ij}^+|} \quad (11)$$

$$r_{ij}^- = \frac{\min_{i=1}^m \min_{j=1}^n |Y_j^- - Y_{ij}^-| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |Y_j^- - Y_{ij}^-|}{|Y_j^- - Y_{ij}^-| + \rho \max_{i=1}^m \max_{j=1}^n |Y_j^- - Y_{ij}^-|} \quad (12)$$

式(11)和式(12)中:  $\rho$  为分辨系数,通常取  $\rho = 0.5$ 。

6) 计算各方案的灰色关联度矩阵  $\mathbf{R}^*$  和  $\mathbf{R}^0$ 。

$$\mathbf{R}^* = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R}^+ = (r_i^*)_{1 \times m} \quad (13)$$

$$\mathbf{R}^0 = \mathbf{W} \cdot \mathbf{R}^- = (r_i^0)_{1 \times m} \quad (14)$$

7) 计算灰色关联贴切度  $Q_i$ 。

$$Q_i = r_i^* / (r_i^* + r_i^0), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

比较计算并各备选方案的灰色关联贴切度,计算结果  $Q_i$  越大,即越靠近 1,则表明此被评价方案与最优方案越接近。

## 3 评价实例分析

本文采用熵权法 + TOPSIS-灰色关联分析的方法,以某 7 500 吨级散货船的动力推进方案为例进行综合评价。

### 3.1 熵权法确定权重

本文将综合评价指标体系分为综合评价层和 4 个准则层,包括技术参数、性能参数、经济参数和排放参数,4 个动力推进方案的 12 个评价指标的原始数据<sup>[13]</sup> 见表 4。

根据不同动力系统配置方案的评价指标的原始

表 4 各备选方案评估指标原始数据表

Tab. 4 Original data of evaluation indicators for alternative schemes

| 准则层  | 参数                        | 柴油机<br>动力推进 | 柴电混合<br>动力推进 | 气电混合<br>动力推进 | 柴气电混合<br>动力推进 |
|------|---------------------------|-------------|--------------|--------------|---------------|
| 技术参数 | 设备功率/(kW/t)               | 0.262 7     | 0.272 8      | 0.268 0      | 0.272 8       |
|      | 设备质量/(kg/kW)              | 49.286      | 57.855       | 68.333       | 59.186        |
|      | 设备尺寸/(m <sup>3</sup> /kW) | 0.021 9     | 0.025 2      | 0.026 5      | 0.027 2       |
| 性能参数 | 机动性                       | 80          | 83           | 65           | 90            |
|      | 可靠性                       | 80          | 85           | 77           | 84            |
|      | 舒适性                       | 72          | 85           | 78           | 90            |
|      | 人力                        | 82          | 75           | 66           | 75            |
| 经济参数 | 动力系统效率                    | 80          | 70           | 65           | 90            |
|      | 燃滑油消耗/(万元/(a·kW))         | 0.293 6     | 0.258 7      | 0.179 9      | 0.217 5       |
|      | 建造维修费用/(万元/(a·kW))        | 0.137 6     | 0.167 0      | 0.202 7      | 0.186 9       |
| 排放参数 | 船舶能效指数/(g/(t·kn))         | 10.09       | 7.32         | 5.55         | 6.35          |
|      | 有害物质排放/(t/(a·kW))         | 0.039 7     | 0.032 6      | 0.018 9      | 0.022 4       |

数据可得原始矩阵为  $X$ 。基于原始数据矩阵,对其进行无量纲标准化处理,得到的标准化矩阵  $X^*$  为

$$X = \begin{pmatrix} 0.262\ 7 & 0.272\ 8 & 0.268\ 0 & 0.272\ 8 \\ 49.286 & 57.855 & 68.333 & 59.186 \\ 0.021\ 9 & 0.025\ 2 & 0.026\ 5 & 0.027\ 2 \\ 80 & 83 & 65 & 90 \\ 80 & 85 & 77 & 84 \\ 72 & 85 & 78 & 90 \\ 82 & 75 & 66 & 75 \\ 80 & 70 & 65 & 90 \\ 0.293\ 6 & 0.258\ 7 & 0.179\ 9 & 0.217\ 5 \\ 0.137\ 6 & 0.167\ 0 & 0.202\ 7 & 0.186\ 9 \\ 10.09 & 7.32 & 5.55 & 6.35 \\ 0.039\ 7 & 0.032\ 6 & 0.018\ 9 & 0.022\ 4 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$X^* = \begin{pmatrix} 0 & 0.072\ 5 & 0.038\ 2 & 0.072\ 5 \\ 0 & 0.035\ 4 & 0.078\ 6 & 0.040\ 9 \\ 0 & 0.042\ 7 & 0.058\ 5 & 0.067\ 9 \\ 0.041\ 5 & 0.049\ 8 & 0 & 0.069\ 1 \\ 0.030\ 0 & 0.080\ 1 & 0 & 0.070\ 1 \\ 0 & 0.060\ 0 & 0.027\ 7 & 0.083\ 1 \\ 0.073 & 0.041 & 0 & 0.041 \\ 0.06 & 0.02 & 0 & 0.10 \\ 0.083\ 5 & 0.057\ 9 & 0 & 0.027\ 6 \\ 0 & 0.033\ 8 & 0.074\ 8 & 0.056\ 6 \\ 0.113\ 0 & 0.044\ 1 & 0 & 0.019\ 9 \\ 0.104\ 5 & 0.068\ 6 & 0 & 0.017\ 5 \end{pmatrix} \quad (17)$$

根据第 2.1.2 节中关于熵权法求解步骤计算得到各指标的特征比重、熵值和各指标的权重,其具体

计算的数据结果见表 5,由此可知权重矩阵为  $W = (w_1, w_2, \dots, w_{12})$ , 得到参与评价的各指标的权重。

表 5 动力推进方案评价指标的权重系数

Tab. 5 Weight coefficient of the evaluation index for propulsion scheme

| 目标层                  | 准则层  | 指标层    | $E_j$   | $w_j$   |
|----------------------|------|--------|---------|---------|
| 船舶动力<br>系统综合<br>评估模型 | 技术参数 | 设备功率   | 0.765 0 | 0.072 5 |
|                      |      | 设备质量   | 0.745 1 | 0.078 6 |
|                      |      | 设备尺寸   | 0.779 8 | 0.067 9 |
|                      | 性能参数 | 机动性    | 0.775 9 | 0.069 1 |
|                      |      | 可靠性    | 0.740 3 | 0.080 1 |
|                      |      | 舒适性    | 0.730 8 | 0.083 1 |
|                      |      | 人力     | 0.763 5 | 0.073 0 |
|                      | 经济参数 | 动力系统效率 | 0.729 4 | 0.083 5 |
|                      |      | 燃滑油消耗  | 0.675 8 | 0.100 0 |
|                      |      | 建造维修费用 | 0.757 7 | 0.074 8 |
|                      | 排放参数 | 船舶能效指数 | 0.633 6 | 0.113 0 |
|                      |      | 有害物质排放 | 0.661 3 | 0.104 5 |

经计算得指标权重矩阵为

$$W = (0.072\ 5, 0.078\ 6, 0.067\ 9, 0.069\ 1, 0.080\ 1, 0.083\ 1, 0.073\ 0, 0.100\ 0, 0.083\ 5, 0.074\ 8, 0.113\ 0, 0.104\ 5) \quad (18)$$

### 3.2 标准化决策矩阵

为提高评价的客观性,构建基于熵权的评价矩阵,即根据指标的权重系数,构建主对角线矩阵

$W^*$ ,将标准化矩阵结合权重系数,构建加权规范化决策矩阵  $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ 。

$$Y = X^* \cdot W^* =$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0.0725 & 0.0382 & 0.0725 \\ 0 & 0.0354 & 0.0786 & 0.0409 \\ 0 & 0.0427 & 0.0585 & 0.0679 \\ 0.0415 & 0.0498 & 0 & 0.0691 \\ 0.03 & 0.0801 & 0 & 0.0701 \\ 0 & 0.0600 & 0.0277 & 0.0831 \\ 0.073 & 0.041 & 0 & 0.041 \\ 0.06 & 0.02 & 0 & 0.10 \\ 0.0835 & 0.0579 & 0 & 0.0276 \\ 0 & 0.0338 & 0.0748 & 0.0566 \\ 0.113 & 0.0441 & 0 & 0.0199 \\ 0.1045 & 0.0686 & 0 & 0.0175 \end{pmatrix} \quad (19)$$

式(19)中:  $y_{ij} = w_j \cdot x_{ij}^*$ 。

由矩阵  $Y$  可确定评价方案的正理想解  $Y^+$  和负理想解  $Y^-$ 。

$$Y^+ = (\max_{1 \leq i \leq 4} y_{ij} \mid i = 1, 2, 3, 4) = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+) = (0.0725, 0.0786, 0.0679, \dots, 0.1130, 0.1045) \quad (20)$$

负理想解为

$$Y^- = (0, \dots, 0), y_j^- = 0; j = 1, \dots, 12 \quad (21)$$

式(20)中:  $Y^+$  为决策矩阵中各行向量的最大值构成的方案。

### 3.3 计算 TOPSIS-灰色关联贴近度

计算各备选方案评价指标的正理想灰色关联系数  $r_{ij}^+$  和负理想灰色关联系数  $r_{ij}^-$ , 得到灰色关联系数矩阵  $R^+$  和  $R^-$ 。结合评价指标权重得到4种动力推进方案的灰色关联度矩阵  $R^*$  和  $R^0$  分别为

$$R^* = (0.6826, 0.6581, 0.5388, 0.7367) \quad (22)$$

$$R^0 = (0.6574, 0.5437, 0.8205, 0.5438) \quad (23)$$

由式(22)和式(23)可计算4种动力推进方案的灰色关联贴近度,具体综合评价结果见表6。其中,基于熵值法+TOPSIS-灰色关联分析法的综合评估结果矩阵  $Q$  为

$$Q = (0.5094, 0.5476, 0.3964, 0.5753) \quad (24)$$

表6 综合评价结果

Tab.6 Comprehensive evaluation results

| 传动方案 | $r_i^*$ | $r_i^0$ | $Q_i$  | 排序 |
|------|---------|---------|--------|----|
| 方案1  | 0.6826  | 0.6574  | 0.5094 | 3  |
| 方案2  | 0.6581  | 0.5437  | 0.5476 | 2  |
| 方案3  | 0.5388  | 0.8205  | 0.3964 | 4  |
| 方案4  | 0.7367  | 0.5438  | 0.5753 | 1  |

根据最大灰色关联贴近度原则判断可知,该内河7500吨级散货船的最优动力推进方案为柴气电混合推进。

### 3.4 敏感性分析

TOPSIS法和灰色关联分析法对权重和分辨系数的变化较为敏感,构建的TOPSIS-灰色关联分析综合评价模型所计算的相对贴近度结果可能不稳定,故需进行敏感性分析以验证评估结果的稳健性。

在区分不同因素或方案的关联程度时,分辨系数的选择对关联度的计算结果有重要影响。本文分辨系数  $\rho$  初始设置的中性起点为  $\rho = 0.5$ , 通过逐步调整分辨系数的大小,观察TOPSIS-灰色关联贴近度计算结果的变化,以评估其对最终决策的影响。沿用上文所述的TOPSIS-灰色关联分析法计算不同方案综合性能的步骤,得到敏感性分析计算结果(即不同分辨系数设置下各方案的综合评价的灰色贴近度)见表7。

表7 敏感性分析计算结果

Tab.7 Sensitivity analysis results

| 分辨系数         | 常规推进   | 柴电混合动力推进 | 气电混合动力推进 | 柴气电混合动力推进 |
|--------------|--------|----------|----------|-----------|
| $\rho = 0.1$ | 0.5054 | 0.6398   | 0.2963   | 0.7180    |
| $\rho = 0.3$ | 0.5090 | 0.5691   | 0.3648   | 0.6105    |
| $\rho = 0.5$ | 0.5094 | 0.5476   | 0.3964   | 0.5753    |
| $\rho = 0.7$ | 0.5091 | 0.5366   | 0.4155   | 0.5574    |
| $\rho = 0.9$ | 0.5085 | 0.5298   | 0.4284   | 0.5464    |

为直观描述TOPSIS-灰色关联分析综合评价模型中  $\rho$  的选择对综合评估结果的影响,将上述计算所得的灰色关联贴近度  $Q$  绘制为点线图,敏感性分析对比见图10。

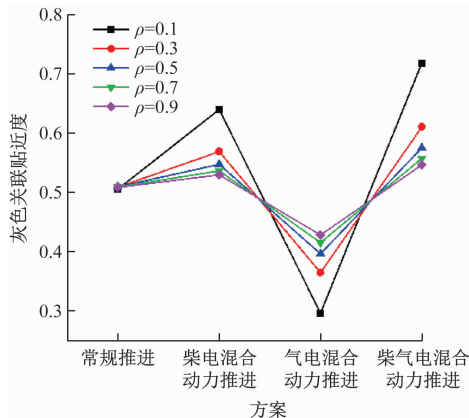


图10 敏感性分析对比

Fig.10 Sensitivity analysis comparison

由图 10 可知:尽管分辨系数的改变引起相对贴近度数值的波动,但柴气电混合动力推进方案的 TOPSIS 灰色关联贴近度始终高于其他备选方案。基于最大灰色关联贴近度原则的决策结果表明,方案最终的综合评价结果没有变化,柴气电混合动力推进仍是最佳的动力推进方案。这表明所使用的熵权法 + TOPSIS-灰色关联分析模型具有较高的稳健性,综合评估结果的可靠性较高,能很好地处理船舶动力推进方案多指标综合评价的问题。

## 4 结束语

本文以 7 500 吨级散货船为研究对象,基于船舶-主机匹配基本原理,选定 4 种备选动力推进方案;构建目标船动力推进方案的评价指标体系模型,并采用熵权法确定评价指标的权重;最后构建 TOPSIS-灰色关联分析模型对船舶动力推进备选方案进行综合评价,确定柴气电混合为示范船舶 7 500 吨级散货船的最佳动力推进方案。同时,通过敏感性分析进一步验证基于熵权法和 TOPSIS-灰色关联分析法的船舶性能综合评价方法的可靠性和稳健性,为船舶动力推进方案的选择设计提供参考。本文主要研究船舶动力推进方案选择的综合评价方法,故在后续研究中将进一步优化指标权重的确定。

## 参 考 文 献

[1] 苏丽. 绿色智能散货船混合动力直流组网系统设计[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 257-267.  
SU L. Design of DC grid system for green intelligent hybrid bulk carrier [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 257-267. (in Chinese)

[2] GEERTSMA R D, NEGENBORN R R, VISSER K, et al. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: a review of developments[J]. Applied Energy, 2017, 194: 30-54.

[3] DEDES E K, HUDSON D A, TURNOCK S R. Assessing the potential of hybrid energy technology to reduce exhaust emissions from global shipping [J]. Energy policy, 2012, 40: 204-218.

[4] 田晨曦. 金枪鱼钓船油电混合动力系统研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.  
TIAN C X. Research on diesel-electric hybrid propulsion system in tuna fishing boat [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019. (in Chinese)

[5] 孙晓军, 宋恩哲, 姚崇, 等. 基于模糊逻辑推理的船舶并联气电混合动力系统能量最优分配研究[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 397-409.  
SUN X J, SONG E Z, YAO C, et al. Optimal energy

allocation of ship parallel gas electric hybrid power system based on fuzzy logic reasoning [J]. Propulsion Technology, 2022, 43 (6): 397-409. (in Chinese)

[6] 李凯, 胡以怀, 赵野, 等. 耙吸挖泥船的动力装置选型及综合评估[J]. 船舶工程, 2019, 41(3): 67-75.  
LI K, HU Y H, ZHAO Y, et al. Power plant selection and comprehensive evaluation of trailing suction hopper dredger [J]. Ship Engineering, 2019, 41(3): 67-75. (in Chinese)

[7] 石慧, 张彦, 袁成清, 等. 内河船舶绿色化评估体系及评估方法研究[J]. 中国航海, 2024, 47(1): 131-138.  
SHI H, ZHANG Y, YUAN C Q, et al. On assessment system for examining inland ship greenization level and its application [J]. Navigation of China, 2024, 47(1): 131-138. (in Chinese)

[8] 熊云峰, 毛筱菲. 基于加权灰关联模型的船舶性能综合评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005(4): 638-640.  
XIONG Y F, MAO X F. Comprehensive evaluation of performance of ships based on weighted grey relational model [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Traffic Science and Engineering Edition), 2005(4): 638-640. (in Chinese)

[9] 熊云峰, 陈章兰, 袁红莉. 基于复合权重 TOPSIS 的船舶性能综合评价法[J]. 船舶工程, 2012, 34(3): 28-31.  
XIONG Y F, CHEN Z L, YUAN H L. Comprehensive evaluation of ship performance based on synthesized weight and TOPSIS [J]. Ship and Sea Engineering, 2005(4): 638-640. (in Chinese)

[10] 全金强. 基于熵权 TOPSIS 法的舰船设计方案评估[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(1): 9-12.  
TONG J Q. Evaluation of warship design schemes based on entropy-weight TOPSIS method [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2018, 37(1): 9-12. (in Chinese)

[11] 杜文龙, 郭凤祥, 陈俐. 破冰船柴电混合动力系统优化设计及敏感性分析[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 127-136.  
DU W L, GUO F X, CHEN L. Optimization design and sensitivity analysis of diesel/battery hybrid propulsion system for polar icebreaker [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(5): 127-136. (in Chinese)

[12] 孙林, 陈辉, 管聪. 内河多工况船机桨匹配优化设计[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 187-195.  
SUN L, CHEN H, GUAN C. Optimal design of ship-engine-propeller matching for inland ships under multiple operation conditions [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(1): 187-195. (in Chinese).

- [13] 赵文博. 内河船舶动力系统选型及评估研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2021.  
ZHAO W B. Research on selection and evaluation of inland[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [14] 张涛,毕毅. 基于熵权法和模糊集的船舶操纵性综合评价研究[J]. 中国舰船研究,2013,8(3):45-49.  
ZHANG T, BI Y. Synthesized evaluation of ship maneuverability based on the entropy-weight method and vague value method [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013,8(3): 45-49. (in Chinese)
- [15] 赵云瑞,高海波,林治国,等. 基于组合赋权-TOPSIS法的极地邮轮减摇鳍选型评价[J]. 中国舰船研究, 2021,16(5):121-126.  
ZHAO Y R, GAO H B, LIN Z G, et al. Selection and evaluation of polar cruise fin stabilizer based on combination weighting-TOPSIS method [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(5): 121-126. (in Chinese)
- [16] LAI Y J, LIU T Y, HWANG C L. TOPSIS for MODM [J]. European Journal of Operational research, 1994, 76(3): 486-500.
- [17] 黄胜,郭海鹏,侯远杭,等. 基于改进 TOPSIS 法的舰船总体方案群决策方法[J]. 上海交通大学学报, 2014,48(1):92-97.  
HUANG S, GUO H P, HOU Y H, et al. Group decision-making method for warship based on improved TOPSIS[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2014,48(1): 92-97. (in Chinese)
- [7] 丁一,陈杭钦,林国龙. 成对自动堆垛起重机在集装箱码头中的实时调度研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 34(2): 11-19.  
DING Y, CHEN H Q, LIN G L. Real-time Scheduling of Twin Automatic Stacking Crane in Container Terminal [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2017, 34(2): 11-19. (in Chinese)
- [8] LU H J, WANG S. A study on multi-ASC scheduling method of automated container terminals based on graph theory[J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 129(1): 404-416.
- [9] HAN X L, WANG Q Q, HUANG J W. Scheduling cooperative twin automated stacking cranes in automated container terminals [J]. Computers & Industrial Engineering, 2019, 128(1): 553-558.
- [10] HU Z H, SHEU J B, LUO J X. Sequencing twin automated stacking cranes in a block at automated container terminal[J]. Transportation Research Part C-Emerging Technologies, 2016, 69(1): 208-227.
- [11] 秦磊磊,胡志华,郑玉馨. 自动化集装箱码头同轨双堆垛起重机交接缓冲贝位优化 [J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(5): 537-545.  
QIN L L, HU Z H, ZHENG Y X, et al. Handover buffer bay optimization for same-track double stacking crane in automated container terminal [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 61(5): 537-545. (in Chinese)
- [12] ZHANG Q L, HU W X, DUAN J G, et al. Cooperative scheduling of AGV and ASC in automation container terminal relay operation mode [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 1-18.
- [13] HU Z H, TIAN X D, YIN Y Q, et al. Positioning a handshake bay for twin stacking cranes in an automated container terminal yard block [J]. Journal of Advanced Transportation, 2022, 2022(1): 1-17.
- [14] WANG H, Villa F, Vallada E, et al. Solving the yard crane scheduling problem with dynamic assignment of input/output points [J]. Computers & Operations Research, 2025, 173.
- [15] 马飞扬,朱瑾. 自动化码头同时考虑握手区容量和位置的双ASC调度 [J]. 计算机工程与应用, 2024, 60(17): 302-311.  
MA F Y, ZHU J. Twin ASC Scheduling Considering Capacity and Location of Handshake Area in Automated Terminal [J]. Computer Engineering and Applications, 2024, 60(17): 302-311. (in Chinese)
- [16] Oladugba A O, Gheith M, Eltawil A. A new solution approach for the twin yard crane scheduling problem in automated container terminals [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 57(1): 102015.

(上接第95页)