文章编号：0253-374X(2025)09-1444-13
DOI：10.11908/j.issn.0253-374x.24133

三峡–葛洲坝枢纽引航道和船闸群协同调度的多目标混合启发式算法

张　煜[1]，郑倩倩[2]，李　然[3]，田宏伟[3]，刘　顺[1]
（1. 武汉理工大学 交通与物流工程学院，武汉 430063；2. 郑州大学 管理学院，郑州 450001；
3. 长江三峡通航管理局，湖北 宜昌 443002）

摘要：为提升三峡–葛洲坝枢纽通航效率，研究了带同步移泊过程的引航道和船闸群协同调度问题(CSP-AC&SLG)。考虑船舶干舷高度和掌船技能，构建以水资源利用率最大化、平均船舶等待时间最小化及平均船舶总能耗最小化为目标的CSP-AC&SLG数学模型，并采用多目标混合启发式算法(MOHHA)进行求解。MOHHA采用双链编码方案和分阶段成组右移解码机制实现个体表述和求解，并引入模糊关联熵分析法评估多目标解，同时嵌入自适应参数调整策略和变邻域模拟退火提升算法求解能力。仿真结果表明，MOHHA能够求解CSP-AC&SLG，实现了通航效率提升和船舶能耗节约的双重目标。

关键词：三峡–葛洲坝枢纽；同步移泊过程；引航道和船闸群协同作业；多目标混合启发式算法
中图分类号：U169　　**文献标志码**：A

Multi-objective Hybrid Heuristic Algorithm for Co-scheduling of Approach Channel and Ship Lock Group at Three Gorges-Gezhou Dams Hub

ZHANG Yu[1], *ZHENG Qianqian*[2], *LI Ran*[3], *TIAN Hongwei*[3], *LIU Shun*[1]
(1. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. School of Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. The Administrative Bureau of Changjiang Three Gorges Navigation, Yichang 443002, China)

Abstract: To improve the passing efficiency of Three Gorges-Gezhou Dams Hub, a co-scheduling problem of approach channel and ship lock group (CSP-AC&SLG) with synchronous moving process was studied. In consideration of the ship freeboard height and steering skill, a mathematical model of CSP-AC&SLG was formulated, aiming to maximize the water resource utilization, minimize the average waiting time of ships and minimize the average total energy consumption of ships. A multi-objective hybrid heuristic algorithm (MOHHA) was proposed to solve the problem. MOHHA makes use of dual chain coding scheme and staged group right-shift decoding strategy to respectively represent and decode each solution. A fuzzy correlation entropy analysis method was triggered to assess multi-objective solutions. An adaptive parameter adjustment strategy and variable neighborhood simulated annealing were then inserted to enhance the resolution ability of the algorithm. Simulation results demonstrate that MOHHA can deal with CSP-AC&SLG, realizing the dual goals of improving the navigation efficiency and saving the energy consumption of ships.

Keywords: Three Gorges-Gezhou Dams Hub; synchronous moving process; cooperative operation of approach channel and ship lock group; multi-objective hybrid heuristic algorithm

内河航运是一种常见的运输方式，具有成本低、运量大及占地少等优点。然而，这些内河航运船舶往往需通过船闸或水坝等通航设施，以克服两侧的水位差。三峡–葛洲坝枢纽(Three Gorges-Gezhou Dams Hub，TGGDH)是世界上最大的水利工程，在现代内河水路运输中扮演着重要角色[1]。随着现代物流的快速发展，长江中上游地区水路交通运输需

收稿日期：2024-04-12
基金项目：国家自然科学基金(71874132)；国家资助博士后研究人员计划(GZC20250543)
第一作者：张　煜，教授，工学博士，主要研究方向为智能港航及其系统研发等。E-mail：sanli@whut.edu.cn
通信作者：郑倩倩，助理研究员，工学博士，主要研究方向为内河枢纽通航调度优化等。
E-mail：qianqianzheng@zzu.edu.cn

论文拓展介绍

求空前增长。作为长江下游引航道和上游水库的连接纽带，TGGDH的通航容量限制已经成为内河航运的一大挑战。2011年，通过三峡枢纽的货运量突破1亿吨，已达到5级船闸设计通过量，比原计划提前了19年[2]。2018年，船舶锚地平均等待时间由17 h增加到106 h，在航运繁忙季节，等待时间可能长达200 h[3]。如何提升通航效率、控制锚地和航道船舶数量，是目前需要高度关注的现实问题。传统TGGDH通航作业常以船闸为研究对象。为避免闸等船现象，船舶过闸前均需在引航道内靠船墩（导航墙）待闸，直至存在空闲船闸。因此，形成了本文所研究的引航道和船闸群协同调度问题（co-scheduling problem of approach channel and ship lock group，CSP-AC&SLG），以实现船舶发航间隔、发航顺序及发航点等全过程优化。由于Hermans[4]、Passchyn[5]已证实闸室调度问题是NP-hard问题，因此更复杂的CSP-AC&SLG也具有NP-hard特性。

日益增长的航运需求与三峡枢纽设计能力不足的矛盾加剧，造成了大量船舶延迟和航道阻塞。解决该问题的方案主要归纳为建造新通道、提升船闸运营效率和翻坝3类。现有研究较多从三峡枢纽船闸运营效率的提升方面进行研究。刘祖伟[6]建立了三峡枢纽5级船闸仿真模型，并优化了闸次顺序、进闸时间与操作时间。杨全林等[7]针对三峡船闸运行调度模式，提出了基于知识建模和机器学习的人机集成智能仿真模型。Zhang等[8]研究了考虑同步移泊过程的三峡枢纽引航道和船闸协同调度问题，采用多目标元启发式算法优化闸室面积利用率、船舶平均等待时间和总能耗目标。此外，也有一些学者对三峡枢纽升船机和船闸协同调度问题进行了研究。Zheng等[9]结合同步移泊过程，采用离散多目标人工蜂群算法实现闸室面积利用率、船舶能耗和平均等待时间优化目标，Zhao等[3]设计混合元启发式算法和CPLEX优化通航效率和闸室利用率。

当前存在三峡大坝和葛洲坝2坝船闸通过能力不匹配、升船机和葛洲坝船闸3运力运量不相适应的现象[3,10]。为提升通航效率，TGGDH船闸群协同调度问题受到高度关注，但大多数文献忽略了升船机的影响。Yuan等[11]以分子为总加权船舶等待时间、分母为总加权船舶尺寸构造目标函数，采用混沌嵌入粒子群优化算法求解。Ji等[1]设计了基于正交设计的非支配排序遗传算法Ⅲ以最小化加权总延误时间并最大化闸室面积利用率。Ji等[12]针对闸室面积利用率和延误时间加权目标，结合量子启发二元引力搜索与改进的蛾焰优化开发了混合智能算法。章建玲等[13]考虑气象信息约束，提出了增强帕累托进化算法。Zhang等[14]针对柔性制造系统和通航调度差异和相似性构建数学规划模型，并提出了改进混合算法。目前，还有一些考虑升船机的船闸群协同作业问题的研究。Zhang等[2]提出了智能调度系统框架以改善现有调度模式，并设计了混合智能算法优化等待时间、水资源利用率等多个目标。Zheng等[15]考虑有限缓冲约束，采用协同自适应多目标算法优化船舶等待时间、船舶能耗和闸室面积利用率。

目前，TGGDH通航作业研究存在的不足主要体现在以下3个方面：①在三峡枢纽船闸运营效率提升方面以及不考虑升船机的TGGDH船闸群协同调度问题优化上，Zhang等[2]、Zheng等[15]研究了升船机，但未引入同步移泊过程，而齐俊麟等[16]已证明同步移泊方法可有效提高通航效率；②忽略了引航道内操作细节，实际运输、待闸等航道物流活动占总通航时间的比重较大，Zhang[8]、Zheng[9]仅解决了三峡枢纽船闸调度问题；③多以闸室面积利用率和船舶等待时间为优化目标，少数文献考虑了船舶能效目标[8-9,15]，但缺乏带同步移泊过程的船闸群协同作业问题研究。为解决上述问题，研究了考虑同步移泊过程的TGGDH引航道和船闸群协同调度问题，建立平均船舶等待时间、平均船舶总能耗和水资源利用率最优的数学模型。鉴于问题复杂性，提出多目标混合启发式算法（MOHHA），为长江三峡通航管理局决策者在船舶过闸方式和资源投入等方面提供决策支持。

1　问题描述与模型构建

1.1　问题描述

TGGDH主要由三峡大坝（Three Gorges Dam，TGD）和葛洲坝（Gezhou Dam，GD）组成。其中，TGD有南线5级船闸、北线5级船闸和升船机3个并行通航设施；GD有3个并行单级船闸，即船闸1～3。正常情况下，南线5级船闸和船闸1以下行为主，北线5级船闸和船闸2上行，升船机和船闸3迎向。图1所示为TGGDH结构及船舶路径示意。其中，N_1表示依次通过TGD和GD的上游船舶集，N_2表示依次经过GD和TGD的下游船舶集。为使船舶快速进入闸室，在TGGDH引航道内，设置船舶停泊储备区、虚拟编队区、虚拟待闸区，实现船舶成组进闸调度的同步移泊[8]。

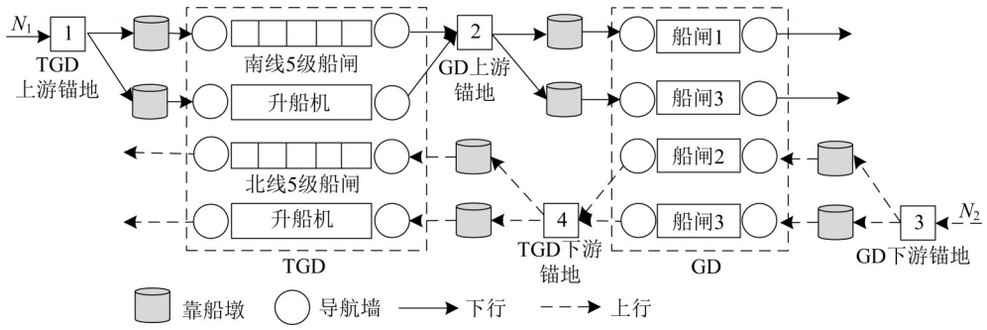


图1 TGGDH结构和船舶路径示意

Fig.1 Schematic diagram of TGGDH structure and ship routes

考虑同步移泊的CSP-AC&SLG可归纳为设施分配、船舶位置安排和闸次作业调度3个子问题。在进行船舶位置安排时,将虚拟编队区(虚拟闸室)和船舶均简化为矩形,且船舶的安全距离为零,如图2所示,灰色船舶表示位置安排不符合要求[17]。闸次调度问题涉及转换时间、闸次间隔及操作时间等术语。闸次操作时间由虚拟待闸区到相邻闸室的同步进闸时间(t_{enter})、闸门操作时间(t_{gate})、闸室充水时间(t_{fw})、闸室泄水时间(t_{ew})以及同步出闸时间(t_{exit})组成。t_{gate}、t_{fw}和t_{ew}为固定已知值;$T_{enter}=D_1/v_2$,其中D_1为同步进闸距离,v_2为同步进闸速度;$T_{exit}=D_2/v_3+t_0$,其中D_2为同步出闸距离,v_3为同步出闸速度,t_0为解队总耗时。在实际应用中,同步速度与船舶干舷高度和掌船技能密切相关。因此,对于不同的船舶分配不同的干舷高度、掌船技能因子,对干舷高度标准差越小和掌船技能因子越高的待闸单元赋予较高的同步移泊速度、同步进闸速度、同步出闸速度。

为建立模型,将组队、待闸及过闸操作看成机器操作,船舶视为工件。船舶通过TGD时可能被分配在5级船闸或升船机上,通过GD时可能被分配在船闸1(船闸2)或船闸3上,分配不同的船闸时操作时间不同,则5级船闸与升船机、船闸1(船闸2)和船闸3可视为异构并行机。基于以上问题特征可提炼出一类异构柔性车间调度问题,结构如图3所示。其中,K_{m1}和K_{m2}为设施m上游和下游的待闸单元上限,$m=1,2,\cdots,6$分别表示南线5级船闸、北线5级船闸、升船机、船闸1、船闸2、船闸3。与一般车间问题不同的是,机器操作时需考虑船舶速度、船舶位置、闸室和船舶尺寸等特征。研究目标为同时优化水资源利用率、船舶平均等待时间及船舶总能耗,旨在提升通航效率和改善生态环境。

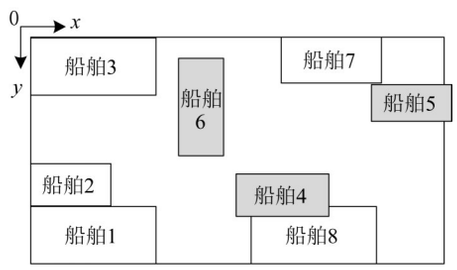


图2 船舶位置安排

Fig.2 Ship placement

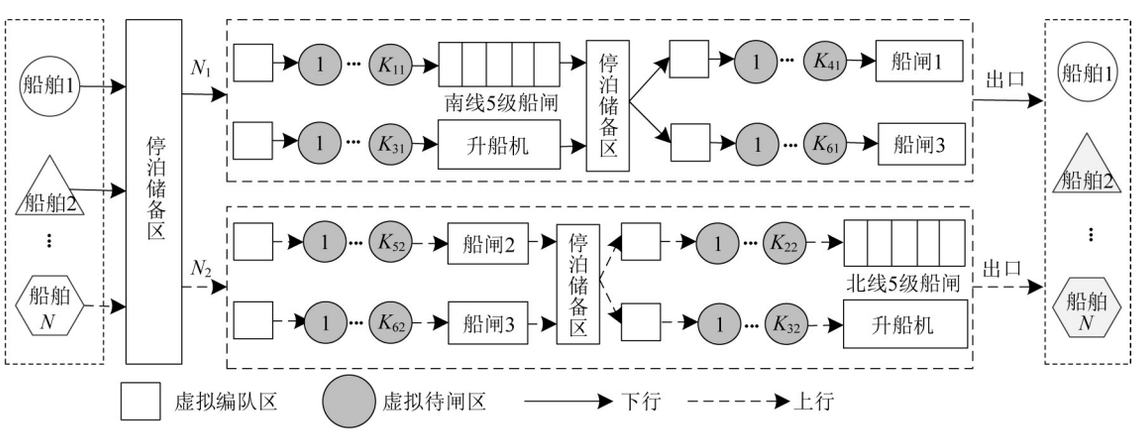


图3 异构柔性车间结构

Fig.3 Structure of heterogeneous flexible flow shop

1.2　数学模型

目标函数为：

$$F_1=\max 2\sum_{i\in N}l_iw_i\Big/\sum_{m\in M}B_mL_mW_m \tag{1}$$

$$F_2=\min\sum_{i\in N}(t_{i,\text{anchor}}+t_{i,\text{berth}})\Big/|N| \tag{2}$$

$$F_3=\min(E_1+E_2+E_3) \tag{3}$$

$$E_1=\sum_{i\in N}(P_{i,2}\alpha_2\beta_2t_{i,\text{anchor}}) \tag{4}$$

$$E_2=\sum_{i\in N}(P_{i,2}\alpha_2\beta_2t_{i,\text{berth}}) \tag{5}$$

$$E_3=\sum_{i\in N}((P_{i,1}\alpha_1\beta_1+\vartheta_iP_{i,2}\alpha_2\beta_2)t_{i,\text{sail}}) \tag{6}$$

$$t_{i,\text{anchor}}=\begin{cases}t_{i,\text{AFg}}-R_i-\sum\limits_{m\in\{1,3\}}\left(X_{ibm}\dfrac{D_{3m,1}}{v_i}\right)+t_{i,\text{ASg}}-t_{i,\text{LFd}}-\sum\limits_{m\in\{4,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}\dfrac{D_{3m,1}+D_{4m}}{v_i}\right),\forall i\in N_1\\ t_{i,\text{AFg}}-R_i-\sum\limits_{m\in\{5,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}\dfrac{D_{3m,2}}{v_i}\right)+t_{i,\text{ASg}}-t_{i,\text{LFd}}-\sum\limits_{m\in\{2,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}\dfrac{D_{3m,2}+D_{4m}}{v_i}\right),\forall i\in N_2\end{cases} \tag{7}$$

$$t_{i,\text{berth}}=\begin{cases}t_{i,\text{EFd}}-t_{i,\text{AFg}}+t_{i,\text{ESd}}-t_{i,\text{ASg}}-\sum\limits_{m\in\{1,3,4,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{im,1}),\forall i\in N_1\\ t_{i,\text{EFd}}-t_{i,\text{AFg}}+t_{i,\text{ESd}}-t_{i,\text{ASg}}-\sum\limits_{m\in\{2,3,5,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{im,2}),\forall i\in N_2\end{cases} \tag{8}$$

$$t_{i,\text{sail}}=t_{i,\text{LSd}}-R_i-t_{i,\text{anchor}}-t_{i,\text{berth}}-\sum_{m\in M}\sum_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}Q_m),\forall i\in N \tag{9}$$

式(1～9)中：F_1为最大化水资源利用率；w_i、l_i分别为船舶i的宽度和长度；B_m为设施m转移闸次总数，$b\in\{1,2,\cdots,B_m\}$，b表示闸次序号；W_m、L_m分别为设施m闸室的宽度和长度；M为通航设施集合，$M=\{m|m=1,\cdots,|M|\}$，m为设施序号，$|M|$为设施总数；N为所有船舶集合，i，j为船舶序号，$i,j\in N$；F_2为最小化船舶平均等待时间；$t_{i,\text{anchor}}$、$t_{i,\text{berth}}$分别为船舶i在停泊储备区(锚地)的等待时间、靠船墩(导航墙)等待时间；$|N|$为集合N的船舶总数；F_3为最小化船舶总能耗，主要包括锚地等待能耗E_1、靠船墩和导航墙等待能耗E_2、行驶总能耗E_3[18]；$P_{i,1}$、$P_{i,2}$分别为船舶i的主引擎和辅引擎功率；α_1、α_2分别为主引擎和辅引擎的柴油消耗率；β_1、β_2分别为主引擎和辅引擎的负载系数；ϑ_i为船舶i辅引擎的个数；$t_{i,\text{sail}}$为船舶i的航行时间；$t_{i,\text{AFg}}$、$t_{i,\text{ASg}}$分别为船舶i到达第1和第2编队区时间，对于下行船舶，第1编队区指TGD船闸上游编队区，第2编队区指GD船闸上游编队区，对于上行船舶，第1编队区指GD船闸下游编队区，第2编队区指TGD船闸下游编队区；R_i为船舶i到达停泊储备区(锚地)时间；X_{ibm}为0–1变量，若船舶i分配到设施m的闸次b上，取值为1，否则取值为0；$t_{i,\text{LFd}}$为船舶i离开第1大坝时间；$D_{3m,1}$、$D_{3m,2}$分别为设施m上游和下游停泊储备区(锚地)到虚拟编队区间距离；v_i为船舶i的行驶速度；D_{4m}为船舶离开设施m到停泊储备区(锚地)距离；N_1和N_2分别表示上、下游船舶集，$N=N_1\cup N_2$；$t_{i,\text{EFd}}$、$t_{i,\text{ESd}}$分别为船舶i进入第1和第2大坝时间；$t_{im,1}$、$t_{im,2}$分别为船舶i由通航设施m的上游和下游虚拟编队区到设施m的行驶时间；$t_{i,\text{LSd}}$为船舶i离开第2大坝时间；Q_m为设施m的闸门操作时间(开关门)和灌水(泄水)时间总和($m\in\{1,2,4,5,6\}$)或升船机上升(下降)时间和灌水(泄水)时间总和($m\in\{3\}$)。

约束条件为：

$$\sum_{i\in N_1}\sum_{m\in\{1,3\}}\sum_{b=1}^{B_m}X_{ibm}=\sum_{i\in N_1}\sum_{m\in\{4,6\}}\sum_{b=1}^{B_m}X_{ibm}=|N_1| \tag{10}$$

$$\sum_{i\in N_2}\sum_{m\in\{5,6\}}\sum_{b=1}^{B_m}X_{ibm}=\sum_{i\in N_2}\sum_{m\in\{2,3\}}\sum_{b=1}^{B_m}X_{ibm}=|N_2| \tag{11}$$

$$|N_1|+|N_2|=|N| \tag{12}$$

$$\Phi_{b1}=\Phi_{b4}=1,\forall b\in\{1,\cdots,B_m\} \tag{13}$$

$$\Phi_{b2}=\Phi_{b5}=0,\forall b\in\{1,\cdots,B_m\} \tag{14}$$

$$(\Phi_{bm}-\Psi_i)X_{ibm}=0,\forall i\in N,m\in M,b\in\{1,\cdots,B_m\} \tag{15}$$

$$\sum_{b=1}^{B_m}X_{ibm}\leqslant 1,\forall i\in N,m\in M \tag{16}$$

$$\sum_{i\in N}X_{ibm}=\Omega_{bm},\forall m\in M,b\in\{1,\cdots,B_m\} \tag{17}$$

$$\begin{cases}\sum\limits_{b=1}^{B_m}Y_{bmt,1}\leqslant K_{m1},\forall m\in M,t\in T\\ \sum\limits_{b=1}^{B_m}Y_{bmt,2}\leqslant K_{m2},\forall m\in M,t\in T\end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases}\sum\limits_{m\in\{1,3\}}X_{ibm}=\sum\limits_{m\in\{4,6\}}X_{ibm}=1,\forall i\in N_1,b\in\{1,\cdots,B_m\}\\ \sum\limits_{m\in\{5,6\}}X_{ibm}=\sum\limits_{m\in\{2,3\}}X_{ibm}=1,\forall i\in N_2,b\in\{1,\cdots,B_m\}\end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\sum\limits_{m\in\{1,2,3\}}H_{bmt}\leqslant 7,\forall t\in T\\ \sum\limits_{b=1}^{B_m}\sum\limits_{m\in\{4,5,6\}}H_{bmt}\leqslant 3,\forall t\in T\end{cases}\tag{20}$$

$$\begin{cases}0\leqslant x_{im}X_{ibm}\leqslant X_{ibm}(L_m-l_i),\\ \quad\forall i\in N,m\in M,b\in\{1,\cdots,B_m\}\\ 0\leqslant y_{im}X_{ibm}\leqslant X_{ibm}(W_m-w_i),\\ \quad\forall i\in N,m\in M,b\in\{1,\cdots,B_m\}\end{cases}\tag{21}$$

$$\max\left\{x_{im}-(x_{jm}+l_j),x_{jm}-(x_{im}+l_i),y_{im}-(y_{jm}+w_j),y_{jm}-(y_{im}+w_i)\right\}X_{ibm}X_{jbm}\geqslant 0,$$
$$\forall i,j\in N,m\in M,b\in\{1,\cdots,B_m\}\tag{22}$$

$$\begin{cases}t_{i,\mathrm{EFd}}\geqslant t_{i,\mathrm{AFd}}\geqslant R_i+\sum\limits_{m\in\{1,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}\left(t_{im,1}+\dfrac{D_{3m,1}}{v_i}\right)\right),\forall i\in N_1\\ t_{i,\mathrm{EFd}}\geqslant t_{i,\mathrm{AFd}}\geqslant R_i+\sum\limits_{m\in\{5,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}\left(t_{im,2}+\dfrac{D_{3m,2}}{v_i}\right)\right),\forall i\in N_2\end{cases}\tag{23}$$

$$\begin{cases}t_{i,\mathrm{ESd}}\geqslant t_{i,\mathrm{ASd}}\geqslant t_{i,\mathrm{LFd}}+\\ \quad\sum\limits_{m\in\{4,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}\left(t_{im,1}+\dfrac{D_{3m,1}+D_{4m}}{v_i}\right)\right),\forall i\in N_1\\ t_{i,\mathrm{ESd}}\geqslant t_{i,\mathrm{ASd}}\geqslant t_{i,\mathrm{LFd}}+\\ \quad\sum\limits_{m\in\{2,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}\left(t_{im,2}+\dfrac{D_{3m,2}+D_{4m}}{v_i}\right)\right),\forall i\in N_2\end{cases}\tag{24}$$

$$\begin{cases}\sum\limits_{t\in T}Z_{it}=t_{i,\mathrm{LFa}}-t_{i,\mathrm{AFa}}+t_{i,\mathrm{LSa}}-t_{i,\mathrm{ASa}},\forall i\in N\\ t_{i,\mathrm{AFa}}=R_i,\forall i\in N\\ t_{i,\mathrm{ASa}}=t_{i,\mathrm{LFd}}+\sum\limits_{m\in M}\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}\dfrac{D_{4m}}{v_i}\right),\forall i\in N\end{cases}\tag{25}$$

$$t_{bm,\mathrm{s}}-t_{(b-1)m,\mathrm{s}}\geqslant t_{(b-1)m,\mathrm{p}}-\Gamma_m,$$
$$\forall m\in\{1,2\},b\in\{1,\cdots,B_m\}\tag{26}$$

$$t_{bm,\mathrm{s}}-t_{(b-1)m,\mathrm{s}}\geqslant t_{(b-1)m,\mathrm{p}}+t_{m,\mathrm{cs}},$$
$$\forall m\in\{4,5\},b\in\{1,\cdots,B_m\}\tag{27}$$

$$\begin{cases}t_{bm,\mathrm{s}}-t_{(b-1)m,\mathrm{s}}\geqslant t_{(b-1)m,\mathrm{p}}+(1-\chi)t_{m,\mathrm{cs}}+\chi t_{m,\mathrm{cd}},\\ \quad\forall m\in\{3,6\},b\in\{1,\cdots,B_m\}\\ \chi=\left|\Phi_{bm}-\Phi_{b-1,m}\right|,\forall m\in\{3,6\},b\in\{1,\cdots,B_m\}\end{cases}\tag{28}$$

$$\begin{cases}\sum\limits_{m\in\{1,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{i,\mathrm{EFd}})=\sum\limits_{m\in\{1,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{s}}),\forall i\in N_1\\ \sum\limits_{m\in\{4,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{i,\mathrm{EFd}})=\sum\limits_{m\in\{4,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{s}}),\forall i\in N_1\\ \sum\limits_{m\in\{5,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{i,\mathrm{EFd}})=\sum\limits_{m\in\{5,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{s}}),\forall i\in N_2\\ \sum\limits_{m\in\{2,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{i,\mathrm{EFd}})=\sum\limits_{m\in\{2,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{s}}),\forall i\in N_2\end{cases}\tag{29}$$

$$\begin{cases}\sum\limits_{m\in\{1,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{i,\mathrm{LFd}})=\sum\limits_{m\in\{1,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{c}}),\forall i\in N_1\\ \sum\limits_{m\in\{4,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{i,\mathrm{LFd}})=\sum\limits_{m\in\{4,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{c}}),\forall i\in N_1\\ \sum\limits_{m\in\{5,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{i,\mathrm{LFd}})=\sum\limits_{m\in\{5,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{c}}),\forall i\in N_2\\ \sum\limits_{m\in\{2,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{i,\mathrm{LFd}})=\sum\limits_{m\in\{2,3\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{c}}),\forall i\in N_2\end{cases}\tag{30}$$

$$\begin{cases}t_{i,\mathrm{LFd}}=t_{i,\mathrm{EFd}}+\sum\limits_{m\in\{1,3,5,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{p}}),\forall i\in N\\ t_{i,\mathrm{LSd}}=t_{i,\mathrm{ESd}}+\sum\limits_{m\in\{2,3,4,6\}}\sum\limits_{b=1}^{B_m}(X_{ibm}t_{bm,\mathrm{p}}),\forall i\in N\end{cases}\tag{31}$$

$$\begin{cases}t_{im,1}=\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}K_{m1}\dfrac{D_5}{V_{bm,1}}\right),\forall i\in N_1,m\in\{1,3,4,6\}\\ t_{im,2}=\sum\limits_{b=1}^{B_m}\left(X_{ibm}K_{m2}\dfrac{D_5}{V_{bm,1}}\right),\forall i\in N_2,m\in\{2,3,5,6\}\end{cases}\tag{32}$$

$$t_{bm,\mathrm{p}}=\begin{cases}\dfrac{5D_1}{V_{bm,2}}+\dfrac{D_2}{V_{bm,3}}+Q_m+t_0,\\ \quad\forall b\in\{1,\cdots,B_m\},m\in\{1,\ 2\}\\ \dfrac{D_1}{V_{bm,2}}+\dfrac{D_2}{V_{bm,3}}+Q_m+t_0,\\ \quad\forall b\in\{1,\cdots,B_m\},m\in\{3,4,5,6\}\end{cases}\tag{33}$$

$$\mu_{bm}=\sqrt{\frac{1}{\Omega_{bm}-1}\sum_{i=1}^{\Omega_{bm}}\left(\lambda_{h_{bi}}-\frac{1}{\Omega_{bm}}\sum_{i=1}^{\Omega_{bm}}\lambda_{h_{bi}}\right)^2},$$
$$\forall m\in M,b\in\{1,\cdots,B_m\}\tag{34}$$

$$\sigma_{bm}=\frac{1}{\Omega_{bm}}\sum_{i=1}^{\Omega_{bm}}\varpi_{h_{bi}},\forall m\in M,b\in\{1,\cdots,B_m\}\quad(35)$$

$$V_{bm,f}=f\left(\frac{\mu_{bm}}{\sigma_{bm}},\upsilon_{bm,f}\right),$$
$$\forall m\in M,b\in\{1,\cdots,B_m\},f\in\{1,2,3\}\quad(36)$$

式(10)～(36)中：$|N_1|$、$|N_2|$分别为集合N_1和N_2的船舶总数；Φ_{bm}为0–1变量，若设施m的闸次b下行，取值为1，否则取值为0；Ψ_i为船舶i的方向，若船舶i下行，则取值为1，否则取值为0；Ω_{bm}为设施m的闸次b中船舶总数，$h_{bi}\in\{1,2,\cdots,\Omega_{bm}\}$，$h_{bi}$为闸次$b$中第$i$艘船舶；$Y_{bmt,1}$、$Y_{bmt,2}$为0–1变量，若时刻$t$闸次$b$在设施$m$上游、下游靠船墩(导航墙)等待，取值为1，否则取值为0；K_{m1}、K_{m2}分别为设施m上游和下游的待闸单元上限；H_{bmt}为0–1变量，若通航设施m的闸次b在时刻t通过TGD或GD，取值为1，否则取值为0；T为时间集合，t为时刻序号，$t\in T$；x_{im}、y_{im}分别为船舶i在设施m闸室内的停靠横纵坐标位置(以闸室左上角为原点)；$t_{i,\mathrm{AFd}}$、$t_{i,\mathrm{ASd}}$分别为船舶i到达第1和第2大坝时间，对于下行船舶，第1大坝指TGD，第2大坝指GD，对于上行船舶，第1大坝指GD，第2大坝指TGD；Z_{it}为0–1变量，若时刻t船舶i在停泊储备区(锚地)等待，取值为1，否则取值为0；$t_{i,\mathrm{LFa}}$、$t_{i,\mathrm{LSa}}$分别为船舶i离开第1和第2停泊储备区时间；$t_{i,\mathrm{AFa}}$、$t_{i,\mathrm{ASa}}$分别为船舶i到达第1和第2停泊储备区(锚地)时间，对于下行船舶，第1停泊储备区指TGD船闸上游锚地，第2停泊储备区指2坝间锚地，对于上行船舶，第1停泊储备区指GD船闸下游锚地，第2停泊储备区指2坝间锚地；$t_{bm,\mathrm{p}}$为设施m的闸次b操作时间；$t_{bm,\mathrm{s}}$为设施m的闸次b开始时间；Γ_m为设施(5级船闸)m的纠正参数，$m\in\{1,2\}$；$t_{m,\mathrm{cs}}$为设施m相同方向的相邻闸次转换时间，$m\in\{3,4,5,6\}$；$t_{m,\mathrm{cd}}$为设施m不同方向的相邻闸次转换时间，$m\in\{3,6\}$；$t_{bm,\mathrm{c}}$为设施m的闸次b结束时间；D_5为虚拟编队区(待闸区)与虚拟待闸区间距离；$V_{bm,1}$为调整后通航设施m闸次b的同步移泊速度；D_1、D_2分别为同步进闸距离和同步出闸距离；$V_{bm,2}$、$V_{bm,3}$分别为调整后通航设施m闸次b的同步进闸速度和同步出闸速度；t_0为船舶离开闸室时解队总耗时；μ_{bm}、σ_{bm}分别为设施m闸次b中船舶干舷高度因子标准差和掌船技术均值；λ_i、ϖ_i分别为船舶i的干弦高度和掌船技能因子；$\upsilon_{bm,1}$、$\upsilon_{bm,2}$、$\upsilon_{bm,3}$分别为随机生成的通航设施m的闸次b同步移泊速度、同步进闸速度、同步出闸速度。

约束式(10)～(12)分别定义下行船舶、上行船舶及所有调度船舶总数。约束式(13)、(14)表明南线5级船闸、北线5级船闸、船闸1、船闸2单向运行。约束(15)表示同一闸次中所有船舶采用相同运行方向。约束式(16)说明每艘船舶在任一设施上至多安排在一个闸次内。约束式(17)保证组成一个闸次的船舶总数满足该闸次的容量要求。约束式(18)确保任一时刻待闸区等待的待闸单元数不会超过待闸区上限。约束式(19)保证每艘船舶在任一大坝上只能选择一个通航设施过闸。约束式(20)表明任一时刻转运闸次数不能超过任一大坝可利用闸室数，其中双线5级船闸可同时转运3闸次船舶。约束式(21)、(22)为船舶位置约束，其中x_{im}和y_{im}为船舶i在闸室内的横纵坐标(具体位置)。具体可描述为，约束式(21)确保每艘船舶必须在闸室平面集尺寸内，违反约束见图2中船舶5。约束式(22)保证同一闸次内任何2艘船舶不能重叠和翻转，违反约束见图2中船舶4和船舶6。约束式(23)、(24)表示船舶过闸优先级约束，即船舶在过闸前须经过停泊储备区和虚拟编队区(虚拟待闸区)，每艘船舶只有离开第1大坝后才能到达第2大坝。约束式(25)体现锚地等待现象。约束式(26)～(28)表明2个连续闸次最小时间间隔，其中约束式(26)确保南北双线5级船闸最小时间间隔不会超过闸次运转时间，其原因在于该船闸的5级结构。约束式(29)、(30)定义闸次与船舶间时间关系，即同一闸次中所有船舶有相同开始时间和结束时间。约束式(31)表明船舶一旦过闸即可离开，不存在阻塞现象。约束式(32)、(33)分别定义船舶在虚拟待闸区总行驶时间和闸次操作时间。约束式(34)、(35)分别计算干舷高度标准差和掌船技能因子平均值。约束式(36)映射得到每组船舶同步移泊、同步进闸及同步出闸速度，即将干舷高度标准差作为分母，掌船技能因子作为分子，该值越高的组赋予较高的同步速度。

2　多目标混合启发式算法

结合进化算法(evolutionary algorithm，EA)和变邻域模拟退火算法(variable neighborhood simulated annealing，VNSA)，引入模糊关联熵分析方法，提出了一种多目标混合启发式算法(MOHHA)求解CSP-AC&SLG。MOHHA流程如图4所示，其中g和G分别指迭代数和最大迭代数。在该算法中，首先设计双链编码方案和分阶段成组右移解码策略，实现染色体的表述和求解；接着，采用模糊关联熵分析法评估多目标解的质量，并嵌入融合参数自适应

策略的EA进行全局寻优[19];最后,设计VNSA策略进一步提升MOHHA的寻优能力[20]。

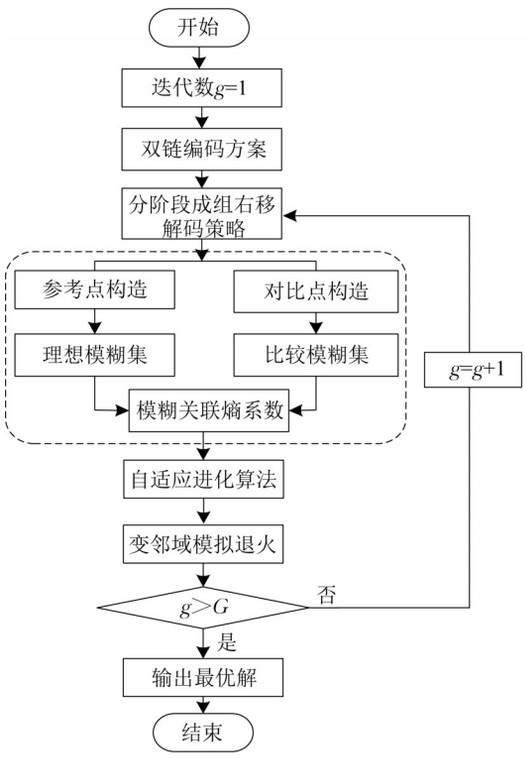


图4 MOHHA流程

Fig.4 Flowchart of MOHHA

2.1 双链编码方案

结合问题特征,采用基于船舶信息链和通航设施选择链的双链编码方案。首先,随机产生$2\times|N|$阶二维矩阵$\boldsymbol{\xi}$。由$\boldsymbol{\omega}=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_N)$表示船舶序号,$\omega_i$表示在第$i$列安排的船舶,$\omega_i\in U[1,|N|]$;由$\boldsymbol{\Psi}=(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_N)$表示船舶方向,$\Psi_i$表示第$i$列安排的船舶对应方向,$\Psi_i\in\{0,1\}$。接着,依据船舶方向随机生成设施选择链,由$\boldsymbol{\pi}=(\pi_1,\pi_2,\cdots,\pi_N)$表示。由于升船机和船闸3尺寸较小,不能容纳较大尺寸船舶,因此需检查并修订π_i中是否存在不合理设施。最后,由$(\boldsymbol{\xi},\boldsymbol{\pi})$组成调度个体$\boldsymbol{\Delta}$,如图5所示。

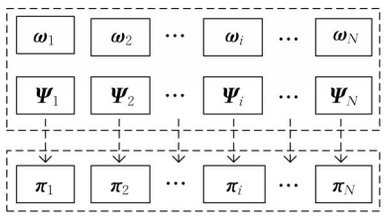


图5 双链编码方案

Fig.5 Dual-chain encoding scheme

2.2 分阶段成组右移解码策略

为获取问题的解,需执行分阶段成组右移解码策略。首先,针对船舶和闸室尺寸依次选取相邻的若干艘船舶进行填充,形成由Ω_{bm}艘船舶组成的B_m个闸次;接着,安排设施m中闸次1过闸,该闸次船舶到达停泊储备区即刻前往虚拟编队区,不存在停泊储备区等待时间;最后,安排设施m中闸次$b(b>1)$进入虚拟编队区(虚拟待闸区或船闸),若行驶至相应虚拟编队区(虚拟待闸区或船闸)时闸次$(b-1)$正在占用该区域,则需在停泊储备区(编队区或待闸区)等待,否则直接进入虚拟编队区(虚拟待闸区或船闸)。

例子:取通过船闸1的10艘船舶、虚拟编队区和虚拟待闸区数均为1的实例,闸室有效尺寸设为(266 m,32.8 m),闸门操作时间和充放水时间总和为28 min,转换时间为30 min。假设船舶离开闸室自行解队,即$t_0=0$。停泊储备区到虚拟编队区距离为1 km,同步移动距离均为200 m。主引擎负载系数、辅引擎负载系数及辅引擎数分别为0.8、0.5、2,辅引擎和主引擎柴油消耗率均为1。船舶速度v_i等参数如表1所示。给定船舶序列3→7→6→4→1→8→2→10→5→9。详细解码过程如下:

表1 测试数据

Tab.1 Testing data

船舶	v_i/(m·s^{-1})	R_i/s	l_i/m	w_i/m	$P_{i,1}$/kW	$P_{i,2}$/kW	λ_i	ϖ_i
1	1.0	13	87	14	1 724	169	18	2
2	1.2	19	108	16	2 236	253	12	10
3	1.0	1	108	18	2 315	274	9	10
4	1.5	14	85	16	1 267	116	18	5
5	1.4	12	92	17	1 684	218	14	9
6	1.2	3	150	25	2 839	382	11	5
7	1.2	8	120	17	2 693	341	14	10
8	1.4	12	74	13	1 073	100	17	10
9	1.0	28	60	11	724	85	9	2
10	1.0	24	90	16	1 251	182	16	2

步骤1　在虚拟编队区上，根据船舶序列和位置安排约束形成4个闸次及其闸次序列：[3,7]→[6,4]→[1,8,2,10]→[5,9]。根据λ_i和ϖ_i，计算得到同步速度$v_{b,1}$、$v_{b,2}$、$v_{b,3}$分别为：(0.2, 0.7, 1.0)、(0.5, 1.0, 1.4)、(0.4, 0.8, 1.2)、(0.1, 0.6, 0.8) $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$。

步骤2　计算闸次b中每艘船舶离开停泊储备区时间($t_{i,\mathrm{LFa}}$)、到达和离开虚拟编队区时间($t_{i,\mathrm{AFg}}$, $t_{i,\mathrm{LFg}}$)、到达和离开虚拟待闸区($t_{i,\mathrm{AFw}}$, $t_{i,\mathrm{LFw}}$)、离开第1大坝时间($t_{i,\mathrm{LFd}}$)。

当 b=1 时，$t_{3,\mathrm{LFa}}=1\ \mathrm{s}$, $t_{7,\mathrm{LFa}}=8\ \mathrm{s}$; $t_{3,\mathrm{AFg}}=1+1\,000/v_3=1\,001\ \mathrm{s}$, $t_{7,\mathrm{AFg}}=8+1\,000/v_7=841.33\ \mathrm{s}$, $t_{3,\mathrm{LFg}}=t_{7,\mathrm{LFg}}=\max\{t_{3,\mathrm{AFg}}, t_{7,\mathrm{AFg}}\}=1\,001\ \mathrm{s}$; $t_{3,\mathrm{AFw}}=t_{7,\mathrm{AFw}}=2\,001\ \mathrm{s}$, $t_{3,\mathrm{LFw}}=t_{7,\mathrm{LFw}}=2\,001\ \mathrm{s}$; $t_{3,\mathrm{LFd}}=t_{7,\mathrm{LFd}}=2\,001\ \mathrm{s}+2\,165.7\ \mathrm{s}=4\,166.7\ \mathrm{s}$。

当 b=2 时，$t_{6,\mathrm{LFa}}=\max\{R_6, t_{3,\mathrm{LFg}}-1\,000/v_6\}=167.67\ \mathrm{s}$, $t_{4,\mathrm{LFa}}=\max\{R_4, t_{3,\mathrm{LFg}}-1\,000/v_4\}=334.33\ \mathrm{s}$; $t_{6,\mathrm{AFg}}=t_{4,\mathrm{AFg}}=1\,001\ \mathrm{s}$, $t_{6,\mathrm{LFg}}=\max\{t_{6,\mathrm{AFg}}, t_{3,\mathrm{LFw}}-200/V_{2,1}\}=t_{4,\mathrm{LFg}}=1\,601\ \mathrm{s}$; $t_{6,\mathrm{AFw}}=t_{4,\mathrm{AFw}}=2\,001\ \mathrm{s}$, $t_{6,\mathrm{LFw}}=\max\{t_{6,\mathrm{AFw}}, t_{3,\mathrm{LFd}}+30\times60\ \mathrm{s}\}=t_{4,\mathrm{LFw}}=5\,966.7\ \mathrm{s}$; $t_{6,\mathrm{LFd}}=t_{4,\mathrm{LFd}}=5\,966.7\ \mathrm{s}+2\,022.9\ \mathrm{s}=7\,989.6\ \mathrm{s}$。

当 b=3 时，$t_{1,\mathrm{LFa}}=\max\{R_1, t_{6,\mathrm{LFg}}-1\,000/v_1\}=601\ \mathrm{s}$, $t_{8,\mathrm{LFa}}=\max\{R_8, t_{6,\mathrm{LFg}}-1\,000/v_8\}=886.71\ \mathrm{s}$, $t_{2,\mathrm{LFa}}=\max\{R_2, t_{6,\mathrm{LFg}}-1\,000/v_2\}=767.67\ \mathrm{s}$, $t_{10,\mathrm{LFa}}=\max\{R_{10}, t_{6,\mathrm{LFg}}-1\,000/v_{10}\}=601\ \mathrm{s}$; $t_{1,\mathrm{AFg}}=t_{8,\mathrm{AFg}}=t_{2,\mathrm{AFg}}=t_{10,\mathrm{AFg}}=1\,601\ \mathrm{s}$, $t_{1,\mathrm{LFg}}=\max\{t_{1,\mathrm{AFg}}, t_{6,\mathrm{LFw}}-200/V_{3,1}\}=t_{8,\mathrm{LFg}}=t_{2,\mathrm{LFg}}=t_{10,\mathrm{LFg}}=5\,466.7\ \mathrm{s}$; $t_{1,\mathrm{AFw}}=t_{8,\mathrm{AFw}}=t_{2,\mathrm{AFw}}=t_{10,\mathrm{AFw}}=5\,966.7\ \mathrm{s}$, $t_{1,\mathrm{LFw}}=\max\{t_{1,\mathrm{AFw}}, t_{6,\mathrm{LFd}}+30\times60\ \mathrm{s}\}=t_{8,\mathrm{LFw}}=t_{2,\mathrm{LFw}}=t_{10,\mathrm{LFw}}=9\,789.6\ \mathrm{s}$; $t_{1,\mathrm{LFd}}=t_{8,\mathrm{LFd}}=t_{2,\mathrm{LFd}}=t_{10,\mathrm{LFd}}=9\,789.6\ \mathrm{s}+2\,096.7\ \mathrm{s}=11\,886.3\ \mathrm{s}$。

当b=4时，$t_{5,\mathrm{LFa}}=\max\{R_5, t_{1,\mathrm{LFg}}-1\,000/v_5\}=4\,752.4\ \mathrm{s}$, $t_{9,\mathrm{LFa}}=\max\{R_9, t_{1,\mathrm{LFg}}-1\,000/v_9\}=4\,466.7\ \mathrm{s}$; $t_{5,\mathrm{AFg}}=t_{9,\mathrm{AFg}}=5\,466.7\ \mathrm{s}$, $t_{5,\mathrm{LFg}}=\max\{t_{5,\mathrm{AFg}}, t_{1,\mathrm{LFw}}-200/V_{4,1}\}=t_{9,\mathrm{LFg}}=7\,789.6\ \mathrm{s}$; $t_{5,\mathrm{AFw}}=t_{9,\mathrm{AFw}}=9\,789.6\ \mathrm{s}$, $t_{5,\mathrm{LFw}}=\max\{t_{5,\mathrm{AFw}}, t_{1,\mathrm{LFd}}+30\times60\ \mathrm{s}\}=t_{9,\mathrm{LFw}}=13\,686\ \mathrm{s}$; $t_{5,\mathrm{LFd}}=t_{9,\mathrm{LFd}}=13\,686\ \mathrm{s}+2\,022.9\ \mathrm{s}=15\,708.9\ \mathrm{s}$。

步骤3　计算闸次b中每艘船舶在停泊储备区、虚拟编队区及虚拟待闸区的等待时间。

对于停泊储备区等待时间$t_{i,\mathrm{anchor}}=t_{i,\mathrm{LFa}}-R_i$，得到$t_{3,\mathrm{anchor}}=t_{7,\mathrm{anchor}}=0$, $t_{6,\mathrm{anchor}}=164.67\ \mathrm{s}$, $t_{4,\mathrm{anchor}}=320.33\ \mathrm{s}$, $t_{1,\mathrm{anchor}}=588\ \mathrm{s}$, $t_{8,\mathrm{anchor}}=874.71\ \mathrm{s}$, $t_{2,\mathrm{anchor}}=748.67\ \mathrm{s}$, $t_{10,\mathrm{anchor}}=577\ \mathrm{s}$, $t_{5,\mathrm{anchor}}=4\,740.4\ \mathrm{s}$, $t_{9,\mathrm{anchor}}=4\,438.7\ \mathrm{s}$。

对于虚拟编队区等待时间$t_{i,\mathrm{WTg}}=t_{i,\mathrm{LFg}}-t_{i,\mathrm{AFg}}$，得到$t_{3,\mathrm{WTg}}=0$, $t_{7,\mathrm{WTg}}=159.67\ \mathrm{s}$, $t_{6,\mathrm{WTg}}=t_{4,\mathrm{WTg}}=600\ \mathrm{s}$, $t_{1,\mathrm{WTg}}=t_{8,\mathrm{WTg}}=t_{2,\mathrm{WTg}}=t_{10,\mathrm{WTg}}=3\,865.7\ \mathrm{s}$, $t_{5,\mathrm{WTg}}=t_{9,\mathrm{WTg}}=2\,322.9\ \mathrm{s}$。

对于虚拟待闸区等待时间$t_{i,\mathrm{WTw}}=t_{i,\mathrm{LFw}}-t_{i,\mathrm{AFw}}$，得到$t_{3,\mathrm{WTw}}=t_{7,\mathrm{WTw}}=0$, $t_{6,\mathrm{WTw}}=t_{4,\mathrm{WTw}}=3\,965.7\ \mathrm{s}$, $t_{1,\mathrm{WTw}}=t_{8,\mathrm{WTw}}=t_{2,\mathrm{WTw}}=t_{10,\mathrm{WTw}}=3\,822.9\ \mathrm{s}$, $t_{5,\mathrm{WTw}}=t_{9,\mathrm{WTw}}=5\,896.4\ \mathrm{s}$。

步骤4　经以上计算，可得水资源利用率$F_1=47.8\%$，船舶平均等待时间$F_2=6\,293.7\ \mathrm{s}=1.748\ \mathrm{h}$，船舶总能耗$F_3=10\,655.18\ \mathrm{kWh}$。

2.3　模糊关联熵分析法

为解决水资源利用率、船舶平均等待时间及船舶总能耗等多个目标函数相互冲突的情况，引入模糊关联熵分析法，即采用模糊关联熵系数ρ表征目标质量，ρ值越大表明该解质量越优，求解过程如下：

步骤1　依据目标函数值构造对比点$\eta(\Delta_{ng})=\{F_1(\Delta_{ng}), F_2(\Delta_{ng}), F_3(\Delta_{ng})\}$、动态参考点$\eta_{g,\mathrm{best}}=\{F_{1g,\mathrm{best}}, F_{2g,\mathrm{best}}, F_{3g,\mathrm{best}}\}$、动态最差点$\eta_{g,\mathrm{worse}}=\{F_{1g,\mathrm{worse}}, F_{2g,\mathrm{worse}}, F_{3g,\mathrm{worse}}\}$，其中$F_1(\Delta_{ng})$、$F_2(\Delta_{ng})$、$F_3(\Delta_{ng})$分别表示迭代$g$中个体$\Delta_{ng}$的水资源利用率倒数、船舶平均等待时间及船舶总能耗，$n\in\{1,\cdots,Q\}$，Q为种群个数，$g\in\{1,\cdots,G\}$，G为最大迭代数；$F_{kg,\mathrm{best}}$和$F_{kg,\mathrm{worse}}$分别为迭代g中目标k的最小和最大值，$k\in\{1,2,3\}$，3为目标总数。

步骤2　采用相对隶属度函数映射子目标k的隶属度$u(F_k(\Delta_{ng}))$，计算式为

$$u(F_k(\Delta_{ng}))=\begin{cases}1, F_k(\Delta_{ng})\leqslant F_{kg,\mathrm{lb}}\\ \dfrac{F_k(\Delta_{ng})-F_{kg,\mathrm{ub}}}{F_{kg,\mathrm{lb}}-F_{kg,\mathrm{lb}}}, F_{kg,\mathrm{lb}}<F_k(\Delta_{ng})<F_{kg,\mathrm{ub}}\\ 0, F_k(\Delta_{ng})\geqslant F_{kg,\mathrm{ub}}\end{cases}\tag{37}$$

式中：$F_{kg,\mathrm{ub}}=\sigma F_{kg,\mathrm{worse}}$, $F_{kg,\mathrm{lb}}=\mu F_{kg,\mathrm{best}}$，$\sigma$和$\mu$分别为上下界因子($\alpha>1$, $0<\beta\leqslant1$)。

步骤3　转换对比点和动态参考点为比较模糊集$U(\Delta_{ng})=\{u(F_1(\Delta_{ng})), u(F_2(\Delta_{ng})), u(F_3(\Delta_{ng}))\}$

和理想模糊集 $U(Y_{g,\text{best}})=\{u(F_{1g,\text{best}}),u(F_{2g,\text{best}}),u(F_{3g,\text{best}})\}$。

步骤4 根据理想模糊集和比较模糊集,计算模糊关联熵系数ρ,其求解过程参考文献[21]。

2.4 嵌入参数自适应策略的进化算法解更新过程

(1)选择算子。选择算子采用轮盘赌规则,利用下式计算个体Δ_{ng}的选择概率:

$$\delta_{n,R}=\frac{\rho(U(\Delta_{ng}),U(Y_{g,\text{best}}))}{\sum_{n=1}^{z}\rho(U(\Delta_{ng}),U(Y_{g,\text{best}}))} \tag{38}$$

将$\delta_{n,R}$与随机数rand(rand∈[0.1])进行比对,从而确定选择范围。

(2)单点倒置交叉。交叉操作采用基于双链协同作用的单点倒置交叉,即首先互相交换2个相邻的父代染色体θ列左侧或右侧部分基因;接着,比较船舶子序列$\{\omega_{\text{A},1},\omega_{\text{A},2},\cdots,\omega_{\text{A},\theta}\}$和$\{\omega_{\text{B},\theta+1},\omega_{\text{B},\theta+2},\cdots,\omega_{\text{B},N}\}$或者$\{\omega_{\text{B},1},\omega_{\text{B},2},\cdots,\omega_{\text{B},\theta}\}$和$\{\omega_{\text{A},\theta+1},\omega_{\text{A},\theta+2},\cdots,\omega_{\text{A},N}\}$,记录重复船舶序号集$\theta(\sigma)$和$\theta(\mu)$;最后,对其进行修正,形成2个新的可行染色体。交叉概率采用自适应调整机制,计算式为:

$$p_{\text{c},g}=\begin{cases}p_{\text{cmax}}-(p_{\text{cmax}}-p_{\text{cmin}})\left(\dfrac{g}{G}+\dfrac{\rho_n}{\rho_{g\text{max}}-\rho_{g\text{avg}}}\right),\rho_n\geqslant\rho_{g\text{avg}}\\ p_{\text{cmax}},\rho_n<\rho_{g\text{avg}}\end{cases} \tag{39}$$

式中:$p_{\text{c},g}$指迭代g的交叉概率;p_{cmax}、p_{cmin}为交叉概率上下界;ρ_n为个体Δ_{ng}的模糊关联熵系数(适应度值);$\rho_{g\text{max}}$、$\rho_{g\text{avg}}$分别为迭代g中最大模糊关联熵系数和平均关联熵系数。

(3)均匀多点变异。变异操作采用结合设施选择链的均匀多点变异方法,即随机产生由0和1组成的屏蔽字向量$\boldsymbol{W}=\{\xi_1,\xi_2,\cdots,\xi_i,\cdots,\xi_N\}$,根据可行范围重新分配屏蔽字为1的设施分配链基因部分,形成新的子代染色体。变异概率同样采用自适应调整策略,定义如下:

$$p_{\text{m},g}=\begin{cases}p_{\text{mmin}}+(p_{\text{mmax}}-p_{\text{mmin}})\left(\dfrac{g}{G}+\dfrac{\rho_n}{\rho_{g\text{max}}-\rho_{g\text{avg}}}\right),\rho_n\geqslant\rho_{g\text{avg}}\\ p_{\text{mmin}},\rho_n<\rho_{g\text{avg}}\end{cases} \tag{40}$$

式中:$p_{\text{m},g}$指迭代g的变异概率;p_{mmax}、p_{mmin}为变异概率上下界。

3 仿真实验

为验证MOHHA求解CSP-AC&SLG的性能,将其与MOEA/D、SPEA-Ⅱ以及NSGA-Ⅱ3种经典多目标算法进行比对。所有测试均在Matlab R2019a及处理器为AMD R5-5600H、3.30 GHz,内存为16 GB的微机上进行。

由于p_{cmin}、p_{cmax}、p_{mmin}、p_{mmax}等参数的设置对算法性能影响较大,因此依据问题特征和模型特征,利用经验估算方法确定主要参数的取值范围。执行不同取值组合的仿真实验20次,通过对比实验结果均值,从中找到一组最优参数设置。经大量实验测试,将MOHHA参数设置为:$(p_{\text{cmin}},p_{\text{cmax}})=(0.40,0.99)$,$(p_{\text{mmin}},p_{\text{mmax}})=(0.20,0.60)$,$\sigma=1.4$,$\mu=0.8$。MOEA/D交叉概率$p_{\text{c}}$设置为0.7,变异概率$p_{\text{m}}$设置为0.1,交叉分布指数$\eta_{\text{c}}$为20,变异分布指数$\eta_{\text{m}}$为20,网格分布值为10。SPEA-Ⅱ参数设置为:$p_{\text{c}}=0.7$,$p_{\text{m}}=0.3$,$\eta_{\text{c}}=20$,$\eta_{\text{m}}=20$。NSGA-Ⅱ参数设置为:$p_{\text{c}}=0.7$,$p_{\text{m}}=0.1$,$\eta_{\text{c}}=20$,$\eta_{\text{m}}=10$。MOEA/D、SPEA-Ⅱ、NSGA-Ⅱ和MOHHA的种群规模Z均为90,最大迭代数G为120。

3.1 测试数据

船舶长度w_i和宽度l_i分别服从U(82 m,107 m)和U(14 m,18.2 m)均匀分布[9];船舶主引擎功率$P_{i,1}$和辅引擎功率$P_{i,2}$分别服从U(1 410 kW,8 750 kW)和U(90 kW,800 kW)离散均匀分布,主引擎和辅引擎负载系数(β_1和β_2)分别设置为0.8和0.5,辅引擎个数ϑ_i为2[18];船舶到达停泊储备区时间R_i服从高斯分布函数$N(10,5^2)$[1];船舶速度v_i服从$U(1.0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1},1.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,同步移泊速度$v_{bm,1}$、同步进闸速度$v_{bm,2}$、同步出闸速度$v_{bm,3}$分别服从均匀分布:$U(0.1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1},0.6\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,$U(0.1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1},1.0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$,$U(0.1\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1},1.4\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1})$[16]。船舶干舷高度$\lambda_i$和掌船技能因子$\varpi_i$分别服从$U$(8 m,18 m)和$U$(1,10)。依据实地调研获取通航设施相关数据,如表2所示。

表2　通航设施相关数据

Tab.2　Related data of navigation facilities

m(通航设施)	L_m/m	W_m/m	t_{gate}/min	t_{fw}/min	$t_{m,\text{cs}}$/min	$t_{m,\text{cd}}$/min
1(南线5级船闸)	266	32.8	4	12	13	
2(北线5级船闸)	266	32.8	4	12	13	
3(升船机)	110	17.2				40
4(船闸1)	266	32.8	4	12	13	30
5(船闸2)	266	32.8	4	12	13	30
6(船闸3)	118	17.2	3	6	8	15

3.2　不同虚拟待闸区数量效果分析

为分析虚拟待闸区对TGGDH通航效率的影响，设计了不同虚拟待闸区数量效果实验。以$|N|=\{50,150,200,350\}$，$K_{m1}=K_{m2}=\{0,1,2\}$(含上下游)为例，构造4种常见船舶过闸路径：船舶下行且仅通过南线5级船闸(Route-1)、船舶下行且可选择南线5级船闸和升船机(Route-2)、船舶上行且仅通过船闸2(Route-3)、船舶上行且可选择船闸2和船闸3(Route-4)。假设船闸上下游虚拟待闸区数量相同，不同参数组合共产生4×3×4=48种不同场景。表3展示了MOHHA的船舶平均等待时间F_2和船舶总能耗F_3目标值。表3中所有值均为20次实验平均值(除最后一行)，最佳结果由粗体表示。

表3　不同虚拟待闸区数量下MOHHA的实验结果

Tab.3　Experimental results of MOHHA under different waiting area sizes

$\|N\|$	路径	MOHHA(F_2/h,F_3/kWh)		
		K_m=0	K_m=1	K_m=2
50	Route-1	(11.0,5 801 460)	**(8.6,3 166 820)**	(11.2,3 887 380)
	Route-2	(10.8,5 665 289)	**(8.0,3 138 644)**	(11.1,3 819 783)
	Route-3	(7.9,4 318 136)	**(5.8,2 243 882)**	(8.0,2 938 033)
	Route-4	(6.1,3 498 851)	**(4.9,2 025 801)**	(6.0,2 834 956)
150	Route-1	(35.4,182 307 954)	**(28.8,133 499 642)**	(36.0,163 532 303)
	Route-2	(33.0,172 800 561)	**(26.7,124 928 833)**	(34.5,158 348 289)
	Route-3	(24.3,116 057 354)	**(19.7,84 744 752)**	(24.8,104 548 194)
	Route-4	(18.4,95 918 671)	**(16.4,77 146 178)**	(20.3,99 785 112)
200	Route-1	(48.7,411 687 353)	**(40.5,317 804 686)**	(49.2,379 870 782)
	Route-2	(45.1,373 980 546)	**(38.0,291 576 695)**	(45.0,337 519 138)
	Route-3	(33.8,305 302 286)	**(28.4,238 693 875)**	(34.4,284 264 959)
	Route-4	(23.9,220 416 253)	**(21.3,180 958 863)**	(26.5,232 617 342)
350	Route-1	(90.5,2 432 764 923)	**(90.2,2 344 073 860)**	(90.0,2 300 832 142)
	Route-2	(77.6,2 051 250 964)	**(73.8,1 871 462 138)**	(77.4,1 928 153 652)
	Route-3	(59.1,1 632 662 598)	(58.3,1 555 763 328)	**(58.1,1 523 165 752)**
	Route-4	(41.8,1 149 880 006)	**(39.7,1 108 528 322)**	(47.0,1 256 161 393)
平均		(35.5,572 769 575)	**(31.8,521 234 770)**	(36.2,548 892 451)

由表3可知：在不同路径问题下，采用MOHHA求解3种虚拟待闸区数量问题时得到的平均船舶等待时间分别为35.5、31.8、36.2 h，平均船舶总能耗分别为572 769 575、521 234 770、548 892 451 kWh，这表明虚拟待闸区数量对等待时间和能耗2个目标均产生极大影响；虚拟待闸区数量由0增至1，极大地降低了船舶等待时间和能耗目标值，原因为提前安排更多船舶停靠在船闸附近可有效避免闸等船的现象；虚拟待闸区数由1到2，增加了等待时间和能耗目标值，即降低了过闸效率，该结果表明船舶同步移泊过程过多也不利于船舶过闸；在相同虚拟待闸区数量问题下，不同路径也会影响通航性能，如Route-2明显优于Route-1，Route-4明显优于Route-3，这表明增加设施(升船机或船闸3)可有效改善通航水平，此外，Route-3优于Route-1，Route-4优于Route-2，原因在于三峡船闸5级结构增加了船舶过闸时间。

3.3　不同场景问题实验测试

为验证算法求解质量，以船舶数$|N|=\{50,80,100,110,120,135\}$，虚拟待闸区数量$K_{m1}=K_{m2}=1$为例，船舶过闸路径采用Route-1和Route-3，将MOHHA与MOEA/D、SPEA-Ⅱ以及NSGA-Ⅱ进行比较。公平起见，所有算法均采用相同的编码、解码、交叉及变异方式，设置3种对比算法终止

时间与MOHHA运行120代时间相同,每个算法独立运行20次,平均目标值和运行时间如表4所示。表4中,所有值均为20次实验平均值(除最后一行),最佳结果由粗体表示。

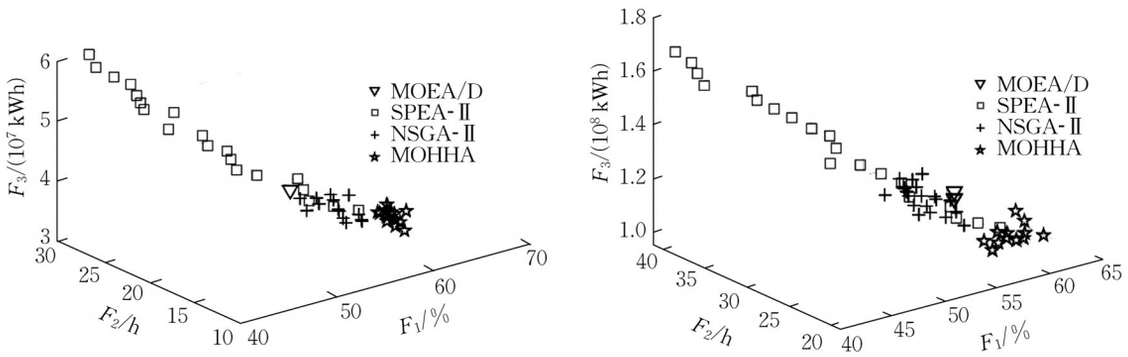
表4 4种算法平均目标值和运行时间

Tab.4 Mean objective values and running time of four algorithms

$\|N\|$×Route	目标值(F_1/%,F_2/h,F_3/kWh)				运行时间/s
	MOEA/D	SPEA-Ⅱ	NSGA-Ⅱ	MOHHA	
50×Route-1	(59.9,11.3,5 029 651)	(58.3,12.4,5 653 820)	**(71.3**,8.8,3 588 320)	(71.1,**8.6,3 495 846**)	10.2
50×Route-3	(54.9,9.0,3 821 725)	(53.7,9.6,4 124 900)	(61.5,6.7,2 649 200)	(**62.0,6.4,2 497 775**)	11.2
80×Route-1	(58.9,19.3,24 377 178)	(58.8,20.3,25 834 412)	(**61.8**,14.9,17 860 061)	(61.4,**14.5,17 318 990**)	16.5
80×Route-3	(61.1,12.7,14 906 537)	(59.9,13.8,16 473 157)	(**71.9**,9.8,11 093 873)	(69.8,**9.6,10 814 637**)	15.6
100×Route-1	(55.3,26.7,53 991 946)	(56.0,27.2,54 987 384)	(65.7,20.1,39 066 297)	(**67.9,19.9,38 695 498**)	40.2
100×Route-3	(59.9,16.8,31 058 873)	(60.0,17.7,32 887 437)	(60.9,13.0,23 229 307)	(**61.6,12.7,22 677 188**)	42.3
110×Route-1	(56.4,29.7,70 319 937)	(57.1,30.0,70 934 335)	(57.1,22.6,51 637 731)	(**61.9,22.2,50 720 998**)	44.3
110×Route-3	(58.9,19.1,48 042 992)	(58.3,20.1,50 856 663)	(63.4,15.1,36 989 123)	(**66.2,14.6,35 665 209**)	43.2
120×Route-1	(56.8,31.4,95 382 264)	(57.6,31.8,96 793 241)	(**68.8**,23.9,70 638 082)	(**68.8,23.6,69 472 593**)	45.8
120×Route-3	(51.3,19.1,51 984 407)	(50.2,20.3,55 365 186)	(61.3,15.3,40 548 451)	(**61.4,14.9,39 279 409**)	43.5
135×Route-1	(56.8,35.8,137 643 954)	(58.0,35.9,137 727 118)	(58.7,27.1,101 237 077)	(**60.7,26.9,100 318 248**)	47.0
135×Route-3	(58.1,23.3,85 868 833)	(57.8,24.3,89 827 668)	(**67.5**,18.7,67 511 561)	(66.0,**17.9,64 413 449**)	47.7
平均	(57.4,21.2,51 869 025)	(57.1,21.9,53 455 443)	(64.2,16.3,38 837 423)	(**64.9,16.0,37 947 487**)	34.0

由表4可见:对于不同场景问题,在平均计算时间34.0 s内,由4种算法求解获得的平均水资源利用率分别为57.4%、57.1%、64.2%、64.9%,平均船舶等待时间分别为21.2、21.9、16.3、16.0 h,平均船舶总能耗分别为51 869 025、53 455 443、38 837 423、37 947 487 kWh;MOHHA求解质量最好,得到平均水资源利用率、平均船舶等待时间及平均船舶总能耗分别为64.9%、16.0 h、37 947 487 kWh;SPEA-Ⅱ求解质量最差,得到3个平均目标值分别为57.1%、21.9 h、53 455 443 kWh。虽然在某些场景下MOHHA相对于NSGA-Ⅱ某一个目标并无改进,即其水资源利用率目标略差于NSGA-Ⅱ,但差别较小,且该现象仅占所有算例的一小部分。因此,就整体求解性能而言,MOHHA的表现一致优于3种对比算法。

图6为4种算法求解实例100×Route-1和135×Route-1的三维解集。由图6可见,MOHHA在2个场景下均能获得较高质量的非支配解。结果表明,MOHHA在优化水资源利用率、平均船舶等待时间和平均船舶总能耗等目标时表现出最佳性能。



a 100艘船舶 b 135艘船舶

图6 4种算法的三维解集

Fig.6 Three-dimensional solution sets of four algorithms

4 结语

本文研究了带同步移泊过程的TGGDH引航道和船闸群协同调度问题,以同时优化水资源利用率、平均船舶等待时间和平均船舶总能耗为目标建立了数学模型,基于双链编码方案和分阶段成组右移解

码策略，嵌入模糊关联熵分析方法解决多目标冲突问题，结合EA和VNSA提出了MOHHA，以得到最优调度方案。为避免EA陷入局部最优，设计参数随迭代进程而变化的自适应调整机制，并提出协同单点倒置交叉和均匀多点变异；为平衡全局和局部搜索能力，设计VNSA进一步改进EA新解。依据实地调研数据，对不同场景问题进行实验测试。结果表明，MOHHA在求解质量方面优于3种经典多目标方法，能较好地解决实际通航作业CSP-AC&SLG。未来可考虑对应急场景下引航道和船闸群协同调度问题作进一步研究。

作者贡献声明：

张　煜：设计研究思路和论文框架，负责论文文字与图表修改完善。

郑倩倩：提出问题，算法的编程实现，完成实验设计与实施，撰写论文。

李　然：技术指导及论文修改。

田宏伟：技术指导及论文修改。

刘　顺：模型构建与算法设计指导。

参考文献：

[1] JI B, YUAN X H, YUAN Y B. Orthogonal design-based NSGA-Ⅲ for the optimal lockage co-scheduling problem [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(8): 2085.

[2] ZHANG H, KE J C. An intelligent scheduling system and hybrid optimization algorithm for ship locks of the Three Gorges Hub on the Yangtze River [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024, 208: P110974.

[3] ZHAO X, LIN Q J, YU H. A co-scheduling problem of ship lift and ship lock at the Three Gorges Dam [J]. IEEE Access, 2020, 8:132893.

[4] HERMANS J. Optimization of inland shipping [J]. Journal of Scheduling, 2014, 17(4): 305.

[5] PASSCHYN W. The lockmaster's problem [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 251(2): 432.

[6] 刘祖伟. 三峡五级船闸过闸仿真模型及其应用 [J]. 现代工业经济和信息化, 2019, 9(10): 26.
LIU Zuwei. Three Gorges five-stage lock simulation model and its application [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2019, 9(10): 26.

[7] 杨全林, 李涵钊, 陈鹏. 三峡船闸运行调度人机集成设计方案研究 [J]. 人民长江, 2021, 52(1): 114.
YANG Quanlin, LI Hanzhao, CHEN Peng. Research on human-machine integrated design scheme for operation and scheduling of Three Gorges Ship Lock [J]. Yangtze River, 2021, 52(1): 114.

[8] ZHANG Y, ZHENG Q Q, HE L J, *et al*. Ship traffic optimization method for solving the approach channel and lock co-scheduling problem of the Three Gorges Dam on the Yangzi River [J]. Ocean Engineering, 2023, 276: P114196.

[9] ZHENG Q Q, ZHANG Y, HE L J, *et al*. Discrete multi-objective artificial bee colony algorithm for green co-scheduling problem of ship lift and ship lock [J]. Advanced Engineering Informatics, 2023, 55: P101897.

[10] 长江三峡通航管理局. 长江三峡和葛洲坝既有船闸通过能力挖潜提升研究 [R]. 宜昌：长江三峡通航管理局, 2022.
Three Gorges Navigation Authority. Research on the potential improvement of the passing capacity of existing locks in the Three Gorges and Gezhou Dam of the Yangtze River [R]. Yichang: Three Gorges Navigation Authority, 2022.

[11] YUAN Y B, JI B, YUAN X H, *et al*. Lockage scheduling of Three Gorges-Gezhouba dams by hybrid of chaotic particle swarm optimization and heuristic-adjusted strategies [J]. Applied Mathematics and Computation, 2015, 270(C): 74.

[12] JI B, YUAN X H, YUAN Y B. A hybrid intelligent approach for co-scheduling of cascaded locks with multiple chambers [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(4): 1236.

[13] 章建玲, 王澎涛, 袁晓辉, 等. 基于进化算法和气象信息的三峡–葛洲坝通航调度研究 [J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 91.
ZHANG Jianling, WANG Pengtao, YUAN Xiaohui, *et al*. Co-navigation scheduling of Three Gorges-Gezhouba Dam based on evolutionary algorithm and meteorological information [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2): 91.

[14] ZHANG X P, YUAN X H, YUAN Y B. Improved hybrid simulated annealing algorithm for navigation scheduling for the two dams of the Three Gorges Project [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2007, 56(1): 151.

[15] ZHENG Q Q, ZHANG Y, GUO W J, *et al*. Solving energy-efficient lock group co-scheduling problem with ship lift and approach channel using a collaborative adaptive multi-objective algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2024, 242: P122712.

[16] 齐俊麟, 向华雄, 闫小青, 等. 一种船舶通过船闸同步移泊的运行调度方法：CN110029645A [P]. 2019-07-19.
QI Junlin, XIANG Huaxiong, YAN Xiaoqing, *et al*. An operational scheduling method for the synchronous moving process of ships passing the ship lock: CN110029645A [P]. 2019-07-19.

[17] LODI A, MARTELLO S, MONACI M. Two-dimensional packing problems: a survey [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 141(2): 241.

[18] XIA Z C, GU Z J, WAN W Y, *et al*. Joint optimization of ship scheduling and speed reduction: a new strategy considering high transport efficiency and low carbon of ships in port [J]. Ocean Engineering, 2021, 233: P109224.

[19] 王家海, 李营力, 刘铮玮, 等. 柔性作业车间调度的精确邻域结构混合进化算法 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 440.
WANG Jiahai, LI Yingli, LIU Zhengwei, *et al*. Evolutionary

algorithm with precise neighborhood structure for flexible workshop scheduling [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(3): 440.

[20] ZHENG Q Q, ZHANG Y, TIAN H W, *et al*. An effective hybrid meta-heuristic for flexible flow shop scheduling with limited buffers and step-deteriorating jobs [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2021, 106: P104503.

[21] 贺利军, 刘超, 朱光宇. 基于模糊关联熵的高维多目标流水车间调度优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(10): 2704.
HE Lijun, LIU Chao, ZHU Guangyu. High dimensional multi-objective flow shop scheduling optimization based on relative entropy of fuzzy set [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(10): 2704.

(上接第1371页)

[22] CHENG T, TEIZER J. Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications [J]. Automation in Construction, 2013, 34: 3.

[23] CARBONARI A, GIRETTI A, NATICCHIA B. A proactive system for real-time safety management in construction sites [J]. Automation in Construction, 2011, 20(6): 686.

[24] ZHANG S, HOU D, WANG C, *et al*. Real-time safety evaluation for slope during construction using numerical forecast and sensor monitoring platform [J]. Sensors, 2018, 18(9): 2978.

[25] SUGIMORI Y, KUSUNOKI K, CHO F, *et al*. Toyota production system and Kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system [J]. International Journal of Production Research, 1977, 15(6): 553.

[26] SUGANUMA T, OGASAWARA T, TAKEUCHI M, *et al*. Overview of the IBM Java just-in-time compiler [J]. IBM Systems Journal, 2000, 39(1): 175.

[27] ABBASI S, TAGHIZADE K, NOORZAI E. BIM-based combination of takt time and discrete event simulation for implementing just in time in construction scheduling under constraints [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2020, 146(11): 04020143.

[28] BAMANA F, LEHOUX N, CLOUTIER C. Simulation of a construction project: assessing impact of just-in-time and lean principles [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2019, 145(2): 05019005.

[29] BOSCH-SIJTSEMA P, CLAESON-JONSSON C, JOHANSSON M, *et al*. The hype factor of digital technologies in AEC [J]. Construction Innovation, 2021, 21(4): 899.

[30] ALMATARED M, LIU H, TANG S, *et al*. Digital twin in the architecture, engineering, and construction industry: a bibliometric review [C]// Construction Research Congress (CRC): Project Management and Delivery, Contracts, and Design and Materials. Arlington: [s.n.], 2022: 670-678.

[31] GRIEVES M, VICKERS J. Transdisciplinary perspectives on complex systems [M]. Berlin: Springer, 2017.

[32] LI Xiaojun, TANG Li, LING Jiaxing, *et al*. Digital-twin-enabled JIT design of rock tunnel: methodology and application [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 140: 105307.

[33] 朱合华, 李晓军, 林晓东. 基础设施智慧服务系统(iS3)及其应用 [J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 1.
ZHU Hehua, LI Xiaojun, LIN Xiaodong. Infrastructure intelligent service system (iS3) and its application [J]. Journal of Civil Engineering, 2018, 51(1): 1.

[34] ZHANG W, QI J, WAN P, *et al*. An easy-to-use airborne LiDAR data filtering method based on cloth simulation [J]. Remote Sensing, 2016, 8(6): 501.

[35] KAI Y K, PARVATHY R. A review on stereo vision algorithm: challenges and solutions [J]. ECTI Transactions on Computer and Information Technology, 2019, 13(2): 134.

[36] YASUTAKA F, CARLOS H. Multi-view stereo: a tutorial [J]. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2015, 9(1/2): 1.

[37] TRIGGS B, MCLAUCHLAN P F, HARTLEY R I, *et al*. Bundle adjustment: a modern synthesis [C]// Vision Algorithms, Theory and Practice. Berlin: Springer, 2000: 298-372.

[38] HIRSCHMULLER H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 328.

[39] ARGYRIOU V, PETROU M. Advances in imaging and electron physics [M]. New York: Elsevier, 2009.