

均衡作业下的散货港口卸船设备协同调度研究

尤祺,柳林燕,汪惠芬

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

摘要:针对散货港口卸船设备协同调度问题以及货船舱位作业均衡要求,以卸船最大完工时间最小化、作业成本最小化为目标建立卸船设备协同调度模型,设计多目标遗传算法进行求解,将贪婪策略引入染色体解码过程以提升求解效果。计算结果表明:基于贪婪策略的多目标遗传算法求解得出的作业时间和作业成本均少于传统的多目标遗传算法,能够有效优化人工调度结果,进而验证了算法的实用性。

关键词:散货港口;设备调度;作业均衡;多目标遗传算法

中图分类号:TP39; U691 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)01-0011-05

Research on Ship Unloading Equipment Cooperative Scheduling in Bulk Cargo Port with Cargo Holds Balance Constraints

YOU Qi, LIU Linyan, WANG Huifen

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To solve the problem of ship unloading equipment cooperative scheduling in bulk cargo ports and meet the requirements of cargo ship space operation balance, a cooperative scheduling model of unloading equipment with the goal of minimizing the maximum completion time and unloading operation cost is established, a multi-objective genetic algorithm is designed, and by greedy strategy, chromosome is decoded to improve the solution effect. The calculation results show that the operation time and cost of the multi-objective genetic algorithm based on the greedy strategy are less than the traditional multi-objective genetic algorithm, which can effectively optimize the manual scheduling results, and in turn the practicability of the algorithm is verified.

Keywords: bulk cargo port; equipment scheduling; job balance; multi-objective genetic algorithm

0 引言

散货港口的装卸作业较为复杂,同时受到船型、装卸设备、货物种类等多种因素的影响,且对作业的连续性和均衡性要求较高。在卸船作业过程中,涉及到如何安排各卸船设备的作业区间与作业顺序以达到最小化船舶在港时间,即卸船设备调度问题。随着散货船的大型化发展,由于货物装卸不合理而导致的船舶倾覆事故时有发生,各舱位装卸作业不均衡造成货船配载不均,也可能引起货船结构受损。因此,港口实际作业中多采用分批卸货的方式,以实现舱位间的均衡作业^[1-3]。在考虑船舶安全性的前提下,如何对散货港口卸船设备进行协同调度,缩短船舶作业总时间以提高港口岸线资源利用率,同时降低成本减少电耗油耗以实现绿色生产,具有重要研究意义。

针对卸船设备调度问题,多以对码头起重机调度问题(quay crane scheduling problem, QCSP)的研究为主。LEE D F等^[4]考虑码头起重机之间的相互干扰,建立混合整数规划调度模型,采用遗传算法求解货舱处理顺序。杨明珠^[5]针对单船装卸作业的起重机调度问题,提出一种改进的贪婪算法,通过实验验证了有效性。LEGATO P

等^[6]以起重机的作业优先级、作业效率等为约束条件,建立多约束起重机调度模型,运用分支定界法进行求解。AL-DHAHERI N等^[7]考虑多个任务间隔之间剩余工作量的均衡性,建立混合整数模型,设计客观函数以解决码头起重机调度问题。ZHANG A等^[8]设计了针对集装箱船的分舱算法,考虑码头起重机的非交叉约束,划分任务区间以最小化完工时间。ALSOUFI G等^[9]通过松弛作业期间起重机分配数量固定这一约束条件,使得调度计划更加灵活。梁承姬等^[10]以集装箱码头全岸线的岸桥为研究对象,建立混合整数规划模型,设计了改进的遗传算法进行求解。张思等^[11]针对不确定性操作时间下的岸桥调度优化问题,采用粒子群算法和禁忌搜索算法进行求解,对于解决中小规模问题取得了不错的效果。

虽然国内外学者针对码头起重机调度问题开展了深入研究,但仍存在一些不足:研究对象多为集装箱港口,有关散货港口的研究较少;没有把除起重机以外其他卸船设备纳入研究范围;研究目标主要为最小化作业时间,很少把作业成本一起考虑;对于舱位作业不均衡导致的安全性问题也鲜有提及。本文在已知卸船设备数量和配置的前提下,对包括起重机、清舱设备在内的多种卸船设备协同考虑进行调度,优化作业顺序和时间,使得在满足舱位作

基金项目:国家自然科学基金项目(51705256)

第一作者简介:尤祺(1994—),男,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为工业大数据、智能优化算法等。

业均衡等约束的条件下,实现卸船最大完工时间最短、作业成本最低的目标。

1 问题描述

散货港口卸船设备主要包括门座式起重机、浮式起重机等各类起重机以及装载机、推把机等各类清舱设备。起重机可沿轨道移动作业于不同的舱位或泊位,实际调度中需要考虑起重机的移机时间对作业总时间的影响。清舱设备的主要约束在于数量有限,并且需要起重机停止卸货来进行吊入吊出的操作。

图1为散货港口卸船作业示意图。卸船作业主要分为两个阶段:第一阶段起重机的抓斗可以满载卸货,此时卸船作业效率取决于起重机的效率;第二阶段为清舱阶段,此时船舱内大部分物料已被卸下,舱底和四周死角处的物料不便于起重机的抓斗抓取,需要向船舱吊入清舱设备协助起重机作业,此时卸船作业效率主要取决于清舱设备的生产率。由此可见,卸船作业总时间由纯卸船作业时间和起重机械的移动、吊入吊出等产生的生产性辅助作业时间等组成。卸船阶段的作业成本与作业时间、卸货量和卸船设备属性有关,主要由电耗油耗等能源成本以及设备折旧成本组成。

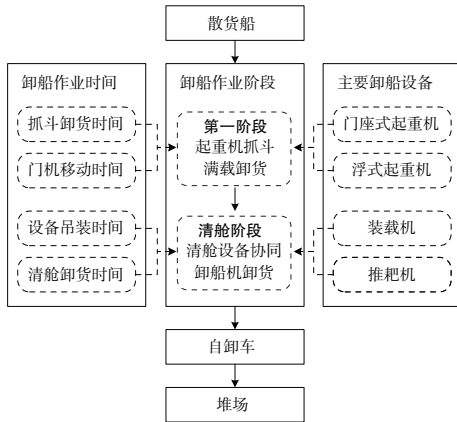


图1 卸船作业示意图

在卸船作业过程中,不同卸船设备工作效率存在差异,造成货船各舱位卸货速率不同、货船配载不均,从而引起货船底层结构变形,严重时会导致船舶结构总纵强度超过极限强度,造成船体断裂。因此,多个卸船设备共同作业时除了需要重视总体作业效率,还需要协同配合,保证均衡作业以避免因舱位货量差异过大导致的安全性问题。

综上所述,多卸船设备协同调度优化问题可以描述为:以已靠泊散货船作为研究对象,考虑起重机和清舱设备等多个卸船设备的诸多约束以及舱位作业均衡性和清舱阶段对卸货作业的影响,把作业时间最短、作业成本最低作为优化目标,建立不同卸船设备之间的协同调度模型,最终得出调度方案。

2 数学模型

2.1 模型假设

散货港口卸船设备协同调度模型基于以下假设:

1) 码头起重机被固定在同一轨道上,相互之间不可交叉,即不能相互穿越;2) 同一时刻同一舱位最多允许两台起重机作业,并且忽略相互之间干扰造成的效率损失;3) 起重机单次移机时间与吊入清舱设备时间恒定;4) 卸货过程中压载水操作合理,能够保证卸货作业顺利进行;5) 同一舱位最多只能容纳一台清舱设备,且清舱效率相同;6) 调度模型为静态模型,不考虑作业过程中卸船设备数量的改变。

2.2 模型参数与决策变量

模型参数: i 表示舱位; H 表示舱位集合, $H = \{1, 2, \dots, |H|\}$; j 表示起重机; C_q 表示可用起重机集合, $C_q = \{1, 2, \dots, |C_q|\}$; m 表示清舱设备; C_m 表示可用清舱设备集合, $C_m = \{1, 2, \dots, |C_m|\}$; Q_i^0 表示舱位 i 的初始货量; Q_i 表示舱位 i 的实时货量; Q_i^c 表示舱位 i 的清舱货量; P_j 表示起重机 j 的作业效率; P_m 表示清舱作业效率; k 表示子任务; K_i 表示舱位 i 所包含的任务集合; Z_p 表示起重机平均电量消耗成本; Z_f 表示清舱设备平均柴油消耗成本; Z_t 表示设备折旧费; p_1 表示第一阶段起重机平均功率; p_2 表示清舱阶段起重机平均功率; p_3 表示移机时起重机平均功率; α 表示电费价格; β 表示油费价格; γ 表示清舱设备单位平均耗油量; λ 表示设备的折旧费率; μ 表示一次移机所需时间; $T_{S_{ijk}}$ 表示起重机 j 在舱位 i 所进行的任务 k 的开始作业时间; $T_{E_{ijk}}$ 表示起重机 j 在舱位 i 所进行的任务 k 的结束作业时间; $T_{L_{ijk}}$ 表示起重机 j 在舱位 i 所进行的任务 k 的作业时长; T_j 表示起重机 j 在舱位 i 第一阶段累计卸货作业时长; T_m 表示清舱设备 m 在舱位 i 清舱阶段累计卸货作业时长; T_Y 表示起重机移机花费的时间; d 表示均衡作业下不同舱位间允许的最大货量差异。

决策变量: X_{ij} 是布尔型变量, $X_{ij} = 1$ 表示起重机 j 分配至舱位 i 作业,否则 $X_{ij} = 0$ ($\forall i \in H, \forall j \in C_q$); Y_k 是布尔型变量, $Y_k = 1$ 表示移机时间需要考虑,否则 $Y_k = 0$; V_k 是布尔型变量, $V_k = 0$ 表示任务 k 处于第一阶段, $V_k = 1$ 表示任务 k 处于清舱阶段。

2.3 目标函数与约束条件

$$\min T = \max \{ T_{E_{ijk}} \} - \min \{ T_{S_{ijk}} \} \quad (1)$$

$$\min Z = Z_p + Z_f + Z_t \quad (2)$$

$$Z_p = \alpha p_1 \sum_{j \in C_q} \sum_{i \in H} T_j + \alpha p_2 \sum_{m \in C_m} \sum_{i \in H} T_m + \alpha p_3 T_Y \quad (3)$$

$$Z_f = \beta \gamma \sum_{i \in H} Q_i^c \quad (4)$$

$$Z_t = \lambda \sum_{j \in C_q} (T_j - \max \{ T_{E_{ijk}} \}) \quad (5)$$

$$T_j = \sum_{k \in K_i} T_{L_{ijk}} (1 - V_k) \quad (6)$$

$$T_m = \sum_{k \in K_i} T_{L_{ijk}} V_k \quad (7)$$

$$T_{L_{ijk}} = T_{E_{ijk}} - T_{S_{ijk}} \quad (8)$$

$$T_Y = \mu \sum_{i \in H} \sum_{k \in K_i} Y_k \quad (9)$$

$$\sum_{j \in C_q} P_j T_j + \sum_{m \in C_m} P_m T_m = Q_i^0, \forall i \in H \quad (10)$$

$$\max \{Q_i\} - \min \{Q_i\} \leq d, \forall i, i' \in H, i \neq i' \quad (11)$$

$$0 \leq \sum_{j \in C_q} X_{ij} \leq 2, \forall i \in H \quad (12)$$

$$0 \leq \sum_{i \in H} X_{ij} \leq 1, \forall j \in C_q \quad (13)$$

$$X_{ij} X_{i'j'} = 1, \forall i, i' \in H, \forall j, j' \in C_q, i > i', j > j' \quad (14)$$

目标函数式(1)是最小化最大完工时间,完工时间等于最后一个子任务的结束时间与第一个子任务的开始时间之差;目标函数式(2)是最小化卸货成本,总成本等于起重机耗电成本、清舱设备耗油成本与设备闲置时间成本之和;约束式(3)定义了起重机耗电成本;约束式(4)定义了清舱设备耗油成本;约束式(5)定义了起重机闲置产生的时间成本;约束式(6)定义了起重机 j 在舱位 i 第一阶段累计卸货作业时长;约束式(7)定义了清舱设备 m 在舱位 i 清舱阶段累计卸货作业时长;约束式(8)定义了任务 k 的作业时间与开始时间和结束时间的关系;约束式(9)定义了移机时间的计算;约束式(10)表示每一设备作业效率与在该舱位作业时间的乘积之和等于该舱位初始货量;约束式(11)表示舱位作业均衡要求下,不同舱位货量相差不超过舱位间允许的最大差异;约束式(12)表示同一舱位最多只能有两台起重机同时作业,最少没有起重机作业;约束式(13)表示同一起重机最多只能在一个舱位作业;约束式(14)表示当起重机 j 作业于舱位 i 、起重机 j' 作业于舱位 i' 时,起重机 j 和舱位 i 必须要在起重机 j' 和舱位 i' 的同一侧,即起重机之间不能相互穿越。

3 算法设计

本文考虑到问题的复杂程度,以作业时间最短和作业成本最小为目标,提出了一种基于贪婪策略的多目标遗传算法。在传统多目标遗传算法的基础上,将贪婪策略引入染色体解码过程,以提升遗传算法的求解效果;在交叉和变异之后,加入基因修复策略以避免求解结果与实际不符;通过目标值惩罚策略对不可行解进行隔离,保证舱位作业的均衡性。

算法流程如图2所示。主体采用了快速非支配排序遗传算法^[12],其基本思想:1)对初始父代进行选择、交叉、变异3种遗传操作以及非支配排序、拥挤度分配后生成初始子代;2)从第二代开始,将父代与子代进行种群合并,对合并后的种群进行非支配排序和拥挤度分配,根据个体间的支配关系和拥挤度择优组成新的父代,再通过前述步骤生成新的子代;3)反复迭代,直至产生最优解或达到最大迭代数,最后输出 Pareto 最优解。

3.1 染色体编码

受分轮次卸货方式的启发,将货量进行切片处理,每个货量切片作为一个子任务,子任务编号构成了染色体。如图3所示,以一艘各舱载货9000t的五舱散货船为例,在卸货第一阶段以500t作为切片大小进行子任务编号,清舱阶段为1500t,则每个舱位分为16个子任务,该散货船的染色体长度即为80。需要注意货量切片大小的设置,如果设置过小,可能会造成频繁的移机,同时增加调度时间成本,如果设置过大,容易导致舱位作业不均衡的情况。

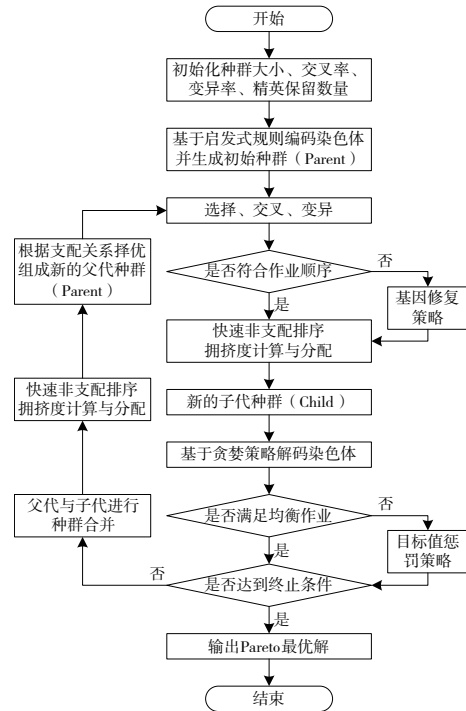


图2 遗传算法流程图

	一舱	二舱	三舱	四舱	五舱
第一阶段	1	2	3	4	5
	6	7	8	9	10

清舱阶段	76	77	78	79	80

图3 编码方式示意图

3.2 染色体解码

为了提高遗传算法的收敛速度和寻优能力,将贪婪策略引入染色体解码过程。首先根据场景自适应的启发式算法进行起重机作业舱位区间分配,为各个舱位 i 建立可用的起重机集合 C_i ;对于某一待调度的子任务 k ,根据其所代表舱位的 C_i 中各个起重机 j 的当前作业情况及其作业效率,比较并找出 j 对于 k 的最小完工时间 $T_{E,ijk}$,然后将起重机 j 调度至该舱位 i ;遍历染色体基因位,逐个对子任务进行调度,最后完成染色体解码。通过与货量切片编码方式的配合使用,实现对每一个子任务的最优调度。

3.3 交叉与变异

染色体交叉采用顺序交叉的方式。遍历种群个体,根据精英保留数目和预先设定的交叉率确定当前个体是否需要交叉,若无需交叉则直接加入下一代种群。否则,将当前个体设置为父代1,从中截取一部分连续的基因片段复制到子代中相同的基因位置,再通过二元锦标赛选择法在种群中选出父代2,对其染色体顺序遍历,将子代中没有的基因依次填补进空缺的基因位。

染色体变异采用交换变异的方式。对染色体基因逐位检查,根据预先设定的变异率确定当前位置基因是否需要变异,再随机选择下一个基因与当前基因交换。由

于染色体的特殊结构,随机选择的下一个基因所代表的子任务有可能与当前基因所代表的子任务属于同一个舱位。交换之后染色体解码结果实际上是一样的,没有起到迫使遗传算法搜索新领域的作用,因此需要重新选择交换基因。

3.4 基因修复策略

交叉和变异都在一定程度上打乱了基因顺序,可能导致清舱阶段子任务被调换到第一阶段子任务之前,造成作业顺序不符合实际要求的情况。因此,在执行完交叉和变异操作之后,需要对染色体基因进行修复。修复策略如下:对于某一舱位,遍历染色体基因位,找到该舱位的清舱子任务 k' 和第一阶段最后一个子任务 k 。若 k' 在 k 前面,则交换二者的位置,以保证作业顺序符合实际。

3.5 目标值惩罚策略

针对舱位作业均衡这一约束,在个体适应度的计算过程中加入惩罚策略,通过惩罚不可行解将约束问题转化为无约束问题。对作业过程中出现舱位货量差异超过限定值的个体,将其目标值 $f(x)$ 按照超出程度 $d(x)$ 乘以相应的惩罚系数 $p(x)$,从而在种群中将可行解与不可行解区分开来,引导遗传算法搜索有效的解空间。式(15)~式(17)即为惩罚策略操作过程,其中 d_{\max} 为作业过程中舱位货量最大差异。

$$f(x) = f(x) \cdot p(x) \quad (15)$$

$$p(x) = 1 + d(x) \quad (16)$$

$$d(x) = d_{\max} - d \quad (17)$$

4 算例分析

为了验证本文所提出的模型与算法的可行性,从某散货港口的实际生产作业数据中提取了部分数据作为算例进行测试。如表1所示,共计6组不同舱位数、起重机数和清舱设备数的算例,其中算例编号表示“舱位数-起重机数-清舱设备数”,作业时间和作业成本均为人工调度下的实际生产数据。

表1 散货船相关参数

算例编号	货物种类	货物总吨数/t	作业时间/h	作业成本/元
4-4-4	矿石粉	45 046	38.92	10 443
4-4-3	焦煤	45 086	62.50	14 445
4-3-2	焦煤	22 256	41.50	6 911
4-2-1	铜精矿	34 816	93.50	13 472
5-4-2	矿石粉	58 608	43.50	14 148
5-3-3	铜精矿	31 499	40.67	8 010

进行调度计算时,设备作业效率、清舱货量等以实际生产情况而定。计算作业成本时的各项参数:电费价格 0.646 5 元/kWh,柴油价格 7 000 元/t,设备折旧费率 80 元/h,一次移机耗时 0.1h,吊入一台清舱设备耗时 0.5 h。根据港口实际生产经验,将舱位货量差异极限值设定为 2 000t。

遗传算法的参数为交叉概率 0.9,变异概率 0.1,种群大小为 100,最大迭代数为 500,精英保留数目为 2,染色体编码所需的货量切片大小随货船载货量不同而各有差异。实验使用的计算机配置为 IntelCore i5 处理器,CPU 频率为 1.6 GHz,内存为 16 GB,算法采用 Java 编程实现。

将传统的多目标遗传算法(MOGA)和基于贪婪策略的多目标遗传算法(GSMOGA)对各个算例进行调度方案的求解,两种遗传算法各项参数保持一致,分别求解5次取平均值,得到表2中的结果。以表1中的实际生产数据为基准,将表2中的作业时间与作业成本与之对比作差,求出该差距占实际生产数据的比例,即为表2中的时间对比与成本对比两项内容,它反映了解的优化程度。在作业时间方面,MOGA平均优化了2.90%,GSMOGA平均优化了5.12%;在作业成本方面,MOGA平均优化了6.55%,GSMOGA平均优化了9.38%。通过数据对比可知,相同规模的算例下,GSMOGA的作业时间和作业成本均少于MOGA,并能够有效优化人工调度结果。尤其是在卸船设备资源受限的情况下,GSMOGA对人工调度结果优化效果最为明显,作业时间与作业成本均有明显减少;而在卸船设备资源充足的情况下,GSMOGA相比于MOGA的优越性更加明显。求解时间方面,GSMOGA运算时间耗费较大,但依然能在较短时间内得到最优解。

表2 不同方法的求解结果对比

算例编号	传统的多目标遗传算法(MOGA)					基于贪婪策略的多目标遗传算法(GSMOGA)				
	作业时间/h	时间对比/%	作业成本/元	成本对比/%	求解用时/s	作业时间/h	时间对比/%	作业成本/元	成本对比/%	求解用时/s
4-4-4	38.82	0.26	10 651	-1.99	4.7	38.74	0.46	10 003	4.21	16.7
4-4-3	61.47	1.65	14 517	-0.50	4.1	59.74	4.42	14 138	2.13	10.5
4-3-2	40.27	2.96	6 399	7.41	3.2	39.58	4.63	6 266	9.33	6.3
4-2-1	84.55	9.57	10 290	23.62	3.4	82.57	11.69	10 296	23.57	8.8
5-4-2	43.05	1.03	12 651	10.58	4.0	42.47	2.37	12 489	11.73	8.4
5-3-3	39.88	1.94	7 994	0.20	3.2	37.76	7.16	7 584	5.32	6.3

以算例4-3-2为例进行调度结果说明。如图4所示,横轴为作业时间,纵轴为起重机编号,矩形代表子任务,矩形之间的间隔代表移机时间或清舱设备吊入时间。矩形内的数字代表子任务详情,例如图4中1号起重机的

第一个子任务1-1-8.33表示1号起重机在1号舱位进行了8.33h的第一阶段作业,而1号起重机的最后一个子任务2-2-8.57表示1号起重机在2号舱位进行了8.57h的清舱作业。

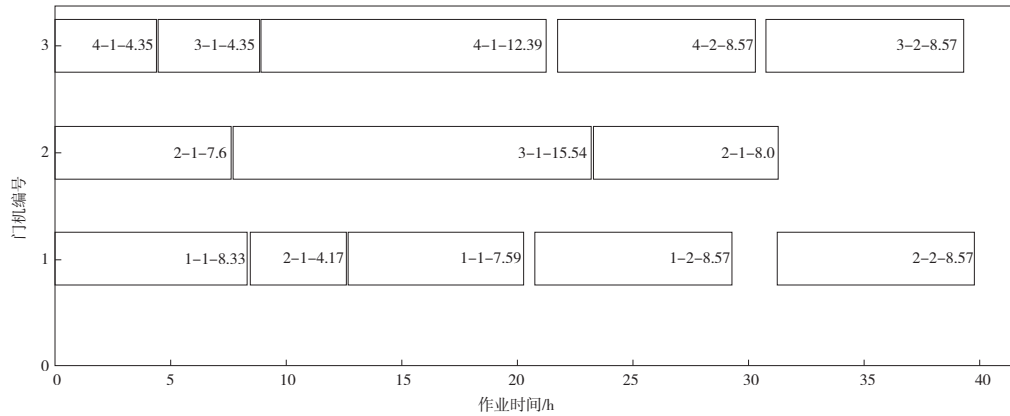


图4 算例4-3-2调度结果

5 结语

本文对散货港口单条船舶的卸船设备协同调度问题进行了研究,考虑到散货船舱位作业均衡、分阶段卸船作业、起重机不可相互穿越等约束,以最小化卸货作业时间和卸货作业成本为目标,建立卸船设备协同调度模型,并设计了基于贪婪策略的多目标遗传算法进行求解。算例实验结果表明,该模型和算法可以有效解决卸船设备的协同调度问题,卸货作业时间和作业成本均有明显减少。后续研究可以将码头自卸车等运输设备纳入协同调度范围,并进行全岸线卸船设备协同调度研究。

参考文献:

- [1] 陈国权. 散货船装载方案及过程优化设计[D]. 上海:上海海事大学,2006.
- [2] 林志忠. 船载精矿倾覆事故成因及其控制[J]. 航海技术,2011(5):34-36.
- [3] 邢向辉,东昉. 散货船分轮装卸最佳方案的确定[J]. 大连海事大学学报,2003,29(2):31-33,46.
- [4] LEE D H, WANG H Q, MIAO L X. Quay crane scheduling with non-interference constraints in port container terminals [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review,2008,44(1):124-135.

- [5] 杨明珠. 单船装卸作业的岸桥调度[J]. 计算机工程与应用,2011,47(10):224-228.
- [6] LEGATO P, TRUNFIO R, MEISEL F. Modeling and solving rich quay crane scheduling problems [J]. Computers & Operations Research,2012,39(9):2063-2078.
- [7] AL-DHAHERI N, DIABAT A. The quay crane scheduling problem[J]. Journal of Manufacturing Systems,2015,36:87-94.
- [8] ZHANG A, ZHANG W S, CHEN Y, et al. Approximate the scheduling of quay cranes with non-crossing constraints [J]. European Journal of Operational Research,2017,258(3):820-828.
- [9] ALSOUFI G, YANG X N, SALHI A. Combined quay crane assignment and quay crane scheduling with crane inter-vessel movement and non-interference constraints [J]. Journal of the Operational Research Society,2018,69(3):372-383.
- [10] 梁承姬,余健. 干扰约束下集装箱码头全岸线岸桥调度研究[J]. 计算机工程与应用,2020,56(10):273-278.
- [11] 张思,吕梦晴,代剑环,等. 基于不确定性操作时间的岸桥调度优化研究[J]. 工业工程与管理,2020,25(5):50-58.
- [12] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation,2002,6(2):182-197.

收稿日期:2021-08-16