

基于两阶段启发式算法的引航员 排班调度及培训优化

刘磊^{1,2}, 胥佳明³, 胡泊⁴

1. 辽宁师范大学 教育学部, 辽宁 大连 116081;
2. 大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026;
3. 大连海事大学 学生就业指导中心, 辽宁 大连 116026;
4. 大连港引航站 引航调度科, 辽宁 大连 116007)

摘要:通过研究引航员排班调度优化问题,不仅能减少引航员工作时间和人力成本,而且可为引航员的培训训练提供新的方法。针对引航员排班问题,以船舶在港总等待时间、引航员总工作时间和引航员人力成本最小作为调度优化目标,建立基于单向航道的进出港船舶与引航员联合调度优化模型。结合模型设计基于革命分裂算子自适应进化策略的多目标帝国竞争算法(ICA)和变邻域算法的两阶段启发式算法进行求解。试验结果表明:该模型及算法合理有效,相较于传统的先到先服务(FCFS)调度规则,引航员的平均工作时间和人力成本分别减少了17.4%和12.4%。所提出的模型和算法可引入引航员的培训内容或教学指南,以便在实际工作中更好地整合港口多个部门的调度工作,提高港口的组织效率和服务水平,推进绿色、智慧港口建设。

关键词:引航员调度;两阶段启发式算法;教育培训

中图分类号:U692.4

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.008

An optimization study of pilot scheduling and pilot training based on a two-stage heuristic algorithm

LIU Lei^{1,2}, XU Jiaming³, HU Bo⁴

1. Education Department, Liaoning Normal University, Dalian 116081, China;
2. Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
3. Student Employment Guidance Center, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;
4. Pilot Dispatch Department, Dalian Port Pilot Station, Dalian 116007, China)

Abstract: Optimising pilot scheduling can reduce working hours and labour costs for pilots, while offering new approaches to pilot training. This paper addresses the scheduling of pilots for inbound and outbound vessels in a one-way waterway by establishing a joint optimisation model, with the aim of minimising total vessel waiting time, total pilot working hours and labour costs. It proposes a two-stage heuristic algorithm that combines an imperialist competitive algorithm, an adaptive evolutionary strategy, and a variable neighbourhood search (VNS) algorithm. Case studies and comparative experiments demonstrate the effectiveness of the model and algorithm. Compared with the traditional first-come, first-served (FCFS) rule, the proposed approach reduces pilots' average working hours and labour costs by 17.4% and 12.4%, respectively. Therefore, integrating the model and algorithm into pilot training programmes or operational guidelines could enhance coordination among port departments, improve organisational efficiency and service quality, and support the development of green and smart ports.

收稿日期:2024-04-17

作者简介:刘磊(1989—),男,讲师,博士研究生,研究方向为航海教育。E-mail:dmuliulei@dlnu.edu.cn

引用格式:刘磊,胥佳明,胡泊.基于两阶段启发式算法的引航员排班调度及培训优化[J].中国航海,2025,48(2):52-61.

LIU L, XU J M, HU B. An optimization study of pilot scheduling and pilot training based on a two-stage heuristic algorithm[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 52-61. (in Chinese)

Key words: pilot scheduling; two-stage heuristic algorithm; education and training

港口是交通运输的枢纽,对经济社会的发展起着重要的作用。近年来,进出港船舶数量的增多,不但增加船舶调度的难度,而且增加引航需求,这对如何保障船舶安全、高效地进出港并且合理安排引航调度工作提出了更高的要求。在港口的实际操作中,船舶和引航员的调度过程考虑因素众多,比如船舶进出港流量转换、大型船舶乘潮、引航员工作时间限制和引航员等级等因素,涉及船舶交通服务(Vessel Traffic Service, VTS)中心、码头公司和引航站等多个部门之间的协调。原有的人工调度方法难以兼顾众多的影响因素,很难满足船舶高效进出港的要求。因此,在保证船舶安全的前提下,本文提出一个高效的进出港船舶与引航员联合调度方法,减少船舶在港等待时间、引航的工时和人力成本。

目前,针对进出港船舶与引航员联合调度的研究相对较少,相关研究主要集中在进出港船舶调度或引航员调度的单一方面。

1)在船舶调度方面,王金涛^[1]考虑港口与船公司不同的利益诉求,以船舶总调度时间和船舶在港总等待时间最短为目标,构建基于单向航道的港口船舶调度模型。张新宇等^[2]考虑港口航道与泊位资源协调利用,建立单向航道船舶调度优化模型。LI等^[3]针对多港池受限航道的港口船舶调度问题,考虑潮汐、通航模式和航行连续性等约束,构建多目标优化模型。HTLL等^[4]考虑潮汐变化、船舶交通等因素对船舶交通调度问题进行研究,并表明该问题等效于多模式资源受限项目调度问题的变体,建立基于整数规划的优化模型。JIA等^[5]建立同时优化航道交通和锚地利用的混合整数规划(Mixed Integer Programming, MIP)模型,并提出拉格朗日松弛启发式算法,将松弛问题分解为2个非对称分配问题进行求解,实例验证表明拉格朗日松弛启发式算法能在合理的计算时间内获得令人满意的计算性能。上述研究根据港口的实际情况,综合流量转换,航道与泊位协调,泊位冲突消解,大型船舶乘潮等约束对进出港船舶调度问题进行研究,提高港口船舶调度效率。对于进出港船舶和引航员调度问题,作为调度过程中的主要利益方,船方和港方的要求不同。船方期望各自船舶在港的等待时间最小,节约船期;港方期望节约引航员的工作时间,以便为船舶提供更好的引航服务,保证船舶进出港的航行安全。因此,本文兼顾船方和港方在时间角度的利益诉求,在现有进出港船舶调度优化理论的基础上,以最小化引航员的总工作时间为目标,协调引航等资源,从

而提高港口船舶调度效率,改善船舶服务的同时节约引航资源。

2)在引航调度方面,WU等^[6]研究引航计划问题,该问题涉及引航员班次分配和每个班次引航员的调度问题。XIAO等^[7]研究具有工作时间规定的引航员调度问题,建立MIP模型。李伟峰^[8]从充分利用引航资源的角度,提出引航作业与引航员的级别以及任务组合中的引航作业级别的匹配原则,但未建立数学模型并在求解中充分考虑。本文针对引航工作的特殊性,级别较高的引航员很难在短期内得到补充,可能会影响调度方案的执行,造成港口拥堵等问题,在模型中考虑以尽量低的引航级别完成一组引航任务,从而提高引航员人员紧缺时的应对能力,降低引航的人力成本。

3)在进出港船舶与引航员联合调度方面,谭哲一等^[9]建立以船舶延误成本和引航员调度成本最小化为目标的整数规划模型,并设计一种两阶段变邻域搜索算法对模型进行求解。JIA等^[10]以最小化船舶延误成本,未满足船舶服务申请的成本与引航员调度成本之和为目标,在具有船舶和引航员相关弧成本的时空网络上制定问题并开发一个整数规划模型。上述研究未考虑引航员调度的公平性等因素,未从防止疲劳引航的角度考虑引航员的连续工作时间限制等问题。引航员的连续工作时间过长,不仅会增大引航员的工作负荷,还会严重影响引航员的工作状态,从而影响港口的运营效率甚至船舶安全。

综上所述,本文在重点考虑引航员的工时限制以及节约引航的人力成本等因素的基础上,建立以船舶在港总等待时间、引航员总工作时间和引航员的人力成本最小为目标的单向航道进出港船舶与引航员联合调度优化模型,并设计两阶段启发式算法进行求解。

1 问题描述

进出港船舶与引航员的调度是一个连续的过程,且由多部门协调完成。在船舶进出港作业中,船舶交通服务(Vessel Traffic Service, VTS)操作员必须先通过雷达设备和甚高频无线电通信来确认船舶的位置,再根据船舶的申请时间确定船舶的优先级,然后根据港口管理规则制定进出港船舶调度方案。在引航员调度中,港口计划员和港口调度员初步考虑组合船舶,将船舶动态发送到引航站,引航站从安全、专业角度审核计划,并根据船舶动态中的计划进

出港时间、船舶代理发送的引航申请和港口相关规定,进行引航员排班。

在港口进出港船舶的调度方案和引航员调度方案制定过程中,不确定因素众多,需各方协调并反复确认,管理难度大。为兼顾港方和船方在调度过程中的不同利益诉求,减少船舶在港等待时间,为船方节约船期的同时减少引航员的工作时间和人力成本,本文建立以船舶在港总等待时间、引航员总工作时间和引航员人力成本最小作为调度优化目标的基于单向航道的进出港船舶与引航员联合调度优化模型,整合港口多个部门的调度工作。

2 引航员联合调度数学模型建立

2.1 模型假设

1) 船舶的申请时刻为船舶到达锚地或船舶在泊位申请离港的时刻。

2) 每艘船舶在调度之前预停靠的泊位是已知的,因为模型中泊位指派问题先于船舶调度问题。

3) 进港船舶调度从锚地到泊位位置,出港船舶调度从泊位到航道入口位置;引航员调度从引航站或码头开始,到引航站或码头结束。

2.2 进出港船舶与引航员联合调度优化模型

以引航员总工作时间和人力成本最小为目标,建立引航员联合调度优化模型为

$$\min F_1 = \sum_{i \in S} (T_{le,i} - T_{le,i-1}) + T_{le,1} - T_{r,0} + \alpha_2 \quad (1)$$

$$\min F_2 = \sum_{p \in E} y_p c_p \quad (2)$$

s. t.

$$\hat{T}_i = \begin{cases} T_{tr,i}, & T_i < T_{tr,i} \\ T_i, & T_{tr,i} < T_i \leq T_{td,i} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_{r,i} \geq \max(T_i, \hat{T}_i) \quad (4)$$

$$(T_{r,i} - T_{r,0} - t_1 - \lambda_{i,0} t_3) \times (1 - (D_i - D_0)^2) \geq 0 \quad (5)$$

$$(T_{le,i} - T_{le,0} - t_1 - \lambda_{i,0} t_3) \times (1 - (D_i - D_0)^2) \geq 0 \quad (6)$$

$$(T_{r,i} - T_{le,0} - t_2) \times (D_i - D_0)^2 \geq 0 \quad (7)$$

$$\frac{d_{\beta,i}}{v_i} \leq t_{\beta,i} \leq T_{le,i} - T_{r,i} \quad (8)$$

$$q_{i,j}, \delta'_{h,u}, a_{h,u,k,p}, a_{u,h,k,p}, a_{h,k,p}, a_{u,k,p}, y_p, x_{h,u,k}, x_{u,h,k}, x_{h,k}, x_{u,k}, \psi'_{h,u}, \varepsilon_{u,h,p}, \varphi_{u,h,p}, \sigma_{h,u,p} \in \{0,1\} \quad (31)$$

式(1)为引航员总工作时间最短;式(2)为引航员的人力成本最小;式(3)为大型船舶乘潮约束,为能进/出港口,需调整他的申请进/出港时间;式(4)为船舶开始调度时间不早于船舶进/出港申请时间;式

$$(T_{r,i} - T_{r,j} - M \times q_{i,j} - t_{\beta,i} - t_2) \times (D_i - D_j)^2 \geq 0 \quad (9)$$

$$(T_{r,i} - T_{r,j} + M \times q_{i,j} - t_1 - \lambda_{i,j} t_3) \times (1 - (D_i - D_j)^2) \geq 0 \quad (10)$$

$$(T_{le,i} - T_{le,j} + M \times q_{i,j} - t_1 - \lambda_{i,j} t_3) \times (1 - (D_i - D_j)^2) \geq 0 \quad (11)$$

$$1 - B_{i,m} + (1 - D_i) \times M \geq 0 \quad t = T_{r,i} \quad (12)$$

$$\alpha_1 \geq \sum_{h \in W} \sum_{u \in H} x_{h,u,k} + \sum_{h \in W} \sum_{u \in H} x_{u,h,k} + \sum_{h \in W} x_{h,k} + \sum_{u \in H} x_{u,k} \quad (13)$$

$$\alpha_2 \geq \sum_{h \in W} \sum_{u \in H} (x_{h,u,k} t_{\tau,h,u}) + \sum_{h \in W} \sum_{u \in H} (x_{u,h,k} t_{\tau,u,h}) + \sum_{h \in W} x_{h,k} t_{\tau,h} + \sum_{u \in H} x_{u,k} t_{\tau,u} - \sum_{h \in W} \hat{t}_h - \sum_{u \in H} \hat{t}_u \quad (14)$$

$$(\delta'_{h,u} + \delta'_{h,u^*} + \psi'_{h,u} - 3 - \psi'_{h,u^*}) \times M + x_{h,u,k} \leq 0, \quad u^* \in v; u^* \neq u \quad (15)$$

$$\hat{t}_h D_i + \hat{t}_u (1 - D_i)^2 \geq D_i (T_{le,i} - T_{r,i}) + (T_{le,i} - T_{r,i}) \times (1 - D_i)^2 \quad (16)$$

$$t_{\tau,h} \geq t_{\eta,h} + \hat{t}_h \quad (17)$$

$$t_{\tau,h,u} \geq t_{\eta,h} + \hat{t}_h + t_{\delta,h,u} + \hat{t}_u + t_{\eta,u} \quad (18)$$

$$t_{\tau,u,h} \geq \hat{t}_u + t_{\delta,u,h} + \hat{t}_h \quad (19)$$

$$L_{\min} \leq x_{h,u,k} t_{\delta,h,u} \leq L_{\max} \quad (20)$$

$$0 \leq t_{\tau,h,u}, t_{\tau,u,h}, t_{\tau,h}, t_{\tau,u} \leq \tilde{L}_{\max} \quad (21)$$

$$\sum_{h \in w} [a_{h,u,k,p} t_{\tau,h,u} + a_{u,h,k,p} t_{\tau,u,h}] + \sum_{h \in w} a_{h,k,p} t_{\tau,h} + \sum_{u \in v} a_{u,k,p} t_{\tau,u} \leq \hat{L}_{\max} \quad (22)$$

$$0 \leq 2 \times \sum_{h \in w} a_{h,u,k,p} + 2 \times \sum_{h \in w} a_{u,h,k,p} + \sum_{h \in w} a_{h,k,p} + \sum_{u \in v} a_{u,k,p} \leq 3 \quad (23)$$

$$\gamma_h + \gamma_u = 0 \quad (24)$$

$$\sum_{h \in w} a_{h,k,p} + \sum_{u \in v} a_{u,k,p} \leq 1 \quad \gamma_h = 1 \quad (25)$$

$$(x_{h,u,k} - 1 - \varepsilon_{h,u,p}) \times M + a_{h,u,k,p} \leq 0 \quad (26)$$

$$(\sigma_{h,u,p} - 1 - \sigma_{h,u,p^*}) \times M + a_{h,u,k,p} \leq 0 \quad (27)$$

$$(a_{h^*,u,k,p} - 1 - \varphi_{h^*,u,h,p}) \times M + a_{h,k,p} \leq 0, \quad h^* \in w; h^* \neq h \quad (28)$$

$$\sum_{h \in w} (a_{h,u,k,p} + a_{u,h,k,p} + a_{h,k,p}) = 1 \quad (29)$$

$$\sum_{u \in v} (a_{h,u,k,p} + a_{u,h,k,p} + a_{u,k,p}) = 1 \quad (30)$$

$$D_i, B_{i,m}, N_{i,j}, R_h \in \{0,1\} \quad (31)$$

(5)~式(7)为本阶段与上一阶段最后1艘船舶在调度全程满足泊位远近、安全时间间隔等约束;式(8)为船舶实际通过航道的的时间不小于船舶以平均速度通过航道的的时间;式(9)为流量转换约束,如果

船舶调度序列中前后 2 艘为异向船舶,后调度的船舶必须在前一艘进出港的船舶通过航道并完全让清时才能进入航道;式(10)和式(11)为同向船舶在调度全程满足泊位远近、安全时间间隔等约束;式(12)为泊位冲突消解,表示船舶 i 进港时,其所停靠的泊位必须可用;式(13)为引航任务组数;式(14)为引航员不在船的总工作时间;式(15)为使引航任务等级相当的任务尽量组合在一起;式(16)进出港船舶引航任务的时长;式(17)~式(19)为引航员工作时间;式(20)为对连续引航的 2 个任务间的间隔时间的限制;式(21)为引航任务组合总时间限制;式(22)为引航员每天最长工作时间不得超过规定的限制;式(23)为 1 名引航员负责引航的任务数量限制;式(24)为排班规则中,考虑引航员负责引航吃水过大或距离过长的船,1 艘即可结束本次轮班;式(25)为引航员等级与作业级别的匹配;式(26)为尽量减少被分配的引航船舶的作业级别与引航员级别相差较大的指派;式(27)为引航员被分配的 2 个不连续任务之间需满足间隔时间的下限;式(28)和式(29)为船舶的引航任务必须分配引航员;式(30)和式(31)分别为对输入变量和决策变量的二进制要求。

2.3 模型相关符号

S 为船舶集合,有

$$S = \{1, 2, \dots, i, \dots, j, |S|\}, i, j \in S; i < j \quad (32)$$

W 为进港引航任务集合有

$$W = \{1, 2, \dots, |W|\}, h \in W \quad (33)$$

H 为出港引航任务集合有

$$H = \{1, 2, \dots, |H|\}, u \in H \quad (34)$$

Z 为引航任务组合方案集合有

$$Z = \{1, 2, \dots, |Z|\}, k \in Z \quad (35)$$

E 为引航员集合有

$$E = \{1, 2, \dots, |E|\}, p \in E \quad (36)$$

式(1)~式(36)中: $T_{r,i}$ 和 $T_{e,i}$ 分别为船 i 进/出港的开始时刻和结束时刻; t_1 、 t_2 和 t_3 分别为同向船舶的安全时间间隔、异向船舶的安全时间间隔和由于泊位次序原因需要增加的安全时间间隔; $t_{\beta,i}$ 和 $d_{\beta,i}$ 分别为理论上船 i 从航道入口到达泊位的时间和理论上船 i 从航道入口到泊位的距离; v_i 为理论上船 i 的平均速度; T_i 和 \hat{T}_i 分别为船 i 进/出港申请时刻和调整后进/出港申请时刻; $D_i = 1$ 为船 i 是进港船,否则为0; $q_{i,j} = 1$ 为船 j 晚于船 i 进/出港,否则为0; $\lambda_{i,j} = 1$ 为船 i 早于船 j 进港的情况下,停靠较靠外的泊位,否则为0; $B_{i,m} = 1$ 为船 i 被分配的泊位 m 被占

用,否则为0; M 为极大值; $T_{r,i}$ 和 $T_{e,i}$ 分别为船 i 乘潮进出港的开始时刻和结束时刻; L_{\min} 和 L_{\max} 分别为连续引航的 2 个引航任务之间的最短时间间隔和最长时间间隔; \bar{L}_{\min} 为引航员负责的 2 个相邻的引航任务之间的最短时间间隔; \bar{L}_{\max} 为引航员连续工作时间上限; \hat{L}_{\max} 为引航员每天工作时间上限; $x_{h,u,k} = 1$ 为最优解中包含引航任务组合方案 k ,即一进一出的船舶任务 h 和 u 连引,否则, $x_{h,u,k} = 0$; $x_{u,h,k} = 1$ 为最优解中包含引航任务组合方案 k ,即一出一进的船舶任务 u 和 h 连引,否则, $x_{u,h,k} = 0$; $x_{h,k} = 1$ 为最优解中包含引航任务组合方案 k ,即进港引航任务 h 不连续引航,否则, $x_{h,k} = 0$; $\sigma_{h,u,p} = 1$ 为引航员 p 的等级与任务 h 和 u 的等级相差较大的指派,否则 $\sigma_{h,u,p} = 0$; \hat{t}_h 为引航任务 h 的任务时间,引航任务时间为从引航员登上船舶到引航工作结束后离船的时间段; $t_{\tau,h,u}$ 和 $t_{\tau,h}$ 分别为一进一出的船舶引航任务 h 和 u 的引航员工作时间和进港船舶引航任务 h 不连续引航的引航员工作时间,其中,引航员工作时间为拖船运送引航员执行连续引航或单艘次引航任务时,从引航站或码头出发,到完成连续引航或单艘次引航任务回到引航站或码头的时段; c_p 为派遣引航员 p 的成本; $t_{\delta,h,u}$ 和 $t_{\delta,u,h}$ 分别为一进一出和一出一进的船舶引航任务 h 和 u 之间的时间间隔; $\delta'_{h,u} = 1$ 为 2 个引航任务 h 和 u 之间的时间间隔符合连续引航的要求,即 $L_{\min} \leq t_{\delta,u,h} \leq L_{\max}$,否则, $\delta'_{h,u} = 0$; $\gamma_h = 1$ 为进港引航任务 h 对应的为大吃水船舶,引 1 艘即可结束本次轮班,否则, $\gamma_h = 0$; $t_{\eta,h}$ 为拖船运送引航员从引航站到任务 h 对应的船舶所在的引航员登离船点需要的时间; $y_p = 1$ 为引航员 p 被派遣,否则, $y_p = 0$; $a_{h,u,k,p} = 1$ 为任务组合的最优解中包含引航任务组合方案 k ,且一进一出的船舶引航任务 h 和 u 被分配给引航员 p ,否则, $a_{h,u,k,p} = 0$; $a_{h,k,p} = 1$ 为任务组合的最优解中包含引航任务组合方案 k ,且进港引航任务 h 单独引航,被分配给引航员 p ,否则, $a_{h,k,p} = 0$; $\psi'_{h,u} = 1$ 为引航任务 h 和 u 等级相差较大,否则, $\psi'_{h,u} = 0$; $\varphi_{u,h,p} = 1$ 为引航员 p 负责的 2 个相邻的引航任务 u 和 h 之间的最短时间间隔符合时长下限 \bar{L}_{\min} 要求,否则, $\varphi_{u,h,p} = 0$; $\varepsilon_{u,h,p} = 1$ 表示引航员 p 为任务 h 和 u 的适任引航员,否则, $\varepsilon_{u,h,p} = 0$ 。

3 两阶段启发式算法

引航员调度模型的解由船舶调度方案和引航员调度方案两部分组成,考虑到本文的模型中与进出港船舶调度相关的约束与引航员调度关联较小,算法的求解思路为分解成两阶段求解。

1) 第一阶段求得的进出港船舶调度方案为第二阶段引航员调度方案求解的基础,并考虑船舶调度与引航员调度的关联;本文研究的问题是典型的NP-hard问题。因此,设计两阶段启发式算法求解,第一阶段考虑船舶调度对引航员工时的影响,根据问题特征设计基于革命分裂算子自适应进化策略的多目标帝国竞争算法(Imperialist Competitive Algorithm, ICA)^[11],以最小化船舶在港等待时间和引航员在船总工作时间为算法目标对船舶调度方案进行优化求解。

2) 第二阶段考虑船舶与引航调度在时间和空间上的关联,以第一阶段求得的船舶调度方案为输入,采用变邻域算法(Variable Neighborhood Search, VNS)得到引航任务组合方案,再根据指派规则算法生成引航员调度方案。

3.1 考虑引航员工作时间的进出港船舶调度优化阶段

ICA是一种受社会政治行为启发的新型智能算法,能有效地实现全局搜索与局部搜索的协调,已开始逐渐应用于调度优化领域。本阶段将ICA引入进出港船舶调度问题,并兼顾船方和港方的利益,以船舶在港总等待时间和引航员在船总工作时间最小为优化目标见式(37)和式(38),设计基于革命分裂算子自适应进化策略的多目标ICA进行求解。本阶段的进出港船舶调度问题属于离散型优化问题。因此,根据问题的特点,面向多目标离散优化,对传统的ICA进行设计。

$$f_1 = \sum_{i \in S} (T_{r,i} - T_i) \quad (37)$$

$$f_2 = \sum_{i \in S} (T_{le,i} - T_{le,i-1}) + T_{le,1} - T_{r,0} \quad (38)$$

相较于传统的ICA,其特点在于根据解的特点,每个国家个体采用排列编码方式;基于船舶在港总等待时间和引航员在船总工作时间的多目标船舶序列成本函数的构建;革命过程采用变邻域搜索策略增强算法的搜索能力;在帝国间竞争操作之后,加入面向多目标离散优化的分裂操作,缓解算法过早收敛的情况;引航员调度排班算法流程见图1。

设置多目标ICA的国家数 n_{pop} ,殖民国家数 n_{imp} ,最大迭代次数 i_{max} ,殖民地在计算整个帝国势力时占的比重 θ ,分裂操作的阈值为 K ,算法步骤如下:

1) 初始化帝国,先随机生成的 n_{pop} 个初始国家,国家个体采用排列的编码方式,即每个国家个体编码是由一组需要调度的船舶组成的排列,代表船舶进出港的一个方案。

计算每个国家个体对应的目标函数值,即船舶

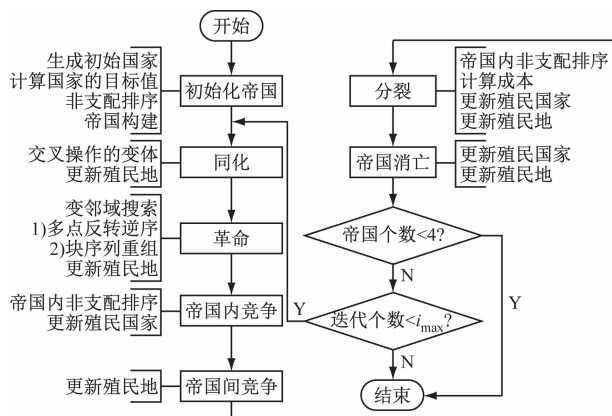


图1 引航员调度排班算法流程

Fig. 1 Pilot dispatch scheduling algorithm process

在港总等待时间和引航员在船总工作时间,对目标值进行非支配排序,根据计算得到的非支配排序序值和拥挤距离,构建基于船舶在港总等待时间和引航员在船总工作时间的多目标船舶序列成本函数见式(39),用于计算每个国家个体的成本值;取成本值较优的前 n_{imp} 个国家作为殖民国家,并根据殖民国家的成本占总成本的比重确定每个帝国的殖民地个数,将殖民地随机分给帝国,生成殖民国家以及殖民地。

$$C_{co} = \frac{D_{co,cr}}{\bar{\omega} + \zeta \times R_{co,ra}} \quad (39)$$

式(39)中: $D_{co,cr}$ 为国家个体的非支配排序拥挤距离; $R_{co,ra}$ 为国家个体的非支配排序序值; $\bar{\omega}$ 、 ζ 为算法参数; co 为国家个体; cr 为非支配排序拥挤距离; ra 为非支配排序序值。

2) 同化,殖民地向其所属帝国的殖民国家移动的过程,称为同化。通过参考遗传算法中交叉操作的思想,将帝国内殖民地和殖民国家进行交叉操作,保留交叉操作后的殖民地和交叉操作前的殖民国家,将殖民国家包含的优势片段传播到殖民地,实现帝国内的同化。

3) 革命,对殖民地进行一定的移动,模拟某种非预期的变化^[12]。根据问题的特性,革命操作的具体步骤如下。

① 判断殖民地是否为革命对象,为防止可行解的多样性过高,每次迭代中选择部分相对优秀的殖民地参与革命过程更容易获得更好的可行解。因此,选择当次迭代中,帝国内国家个体的非支配排序序值为1的殖民地,即帝国内其他国家个体都不能支配该殖民地,作为革命对象。

② 对被选为革命对象的殖民地进行变邻域搜索,采用2种邻域结构:多点反转倒序,块序列重组进行殖民地革命,增强算法的搜索能力。

4) 殖民国家更新,在帝国内进行快速非支配排序,若殖民地的成本值优于对应的殖民国家,则该殖民地代替殖民国家成为该帝国内新的殖民国家,否则,不发生变化。

5) 帝国间竞争,各个帝国间殖民地重新分配的过程。计算所有帝国的总成本,最弱帝国需选出一个最弱殖民地,较强帝国的可争抢殖民地。其中,帝国的总成本 $C_{ic,n}$ 、标准化处理后的帝国的总成本 $C_{nrc,n}$ 和帝国抢占最弱殖民地的概率 P_n 的具体计算公式参考文献[13]。

6) 分裂,当一个帝国内除最强的殖民国家外有另一个殖民地的成本与其相当,会导致帝国的分裂,从而减少帝国数量下降导致的群体多样性减弱使算法过早收敛的情况。

①判断帝国是否满足分裂操作的条件:如果帝国内存在殖民地满足与殖民国家的非支配排序序值差值小于等于阈值 T_s 且对应的船舶调度序列不相同,则进行分裂操作。

②将满足条件的殖民地作为新的帝国的殖民国家,依据新、旧殖民国家的成本大小,确定殖民国家对应的帝国被分配殖民地的数量,并将剩余的殖民地随机分配给帝国。

7) 帝国消亡,当某个帝国没有殖民地时,帝国将会消亡,殖民国家变为殖民地。

8) 如果满足终止条件,则搜索结束;否则,转至2)。

3.2 引航员调度优化阶段

引航调度问题可分为引航任务组合和指派,其中,引航任务组合是将一段时间内的引航任务连接,产生许多的引航任务组为下一阶段引航员指派提供基础,以满足相关规定和节约成本为主要目的。

3.2.1 基于变邻域搜索的任务组合生成算法

变邻域搜索算法是一种结构简单但功能强大的元启发式算法。针对引航员调度中的引航任务组合问题,本文引入变邻域搜索的方法,根据引航任务组合问题的特点设计基于变邻域搜索的任务组合生成算法,算法的适应度函数见式(40),其中,通过在适应度函数中加入引航时间标准差考虑引航的公平性等因素。

$$f_{k,3} = \chi_1 \alpha_1 + \chi_2 F_2 + \chi_3 \alpha_3 \quad (40)$$

式(40)中: χ_1 χ_2 和 χ_3 是制定的权重,为排班人员提供设置权重的灵活性; α_1 为引航任务组数; F_2 为引航员总工作时间; α_3 为引航时间标准差; k 为引航任务组合方案。

1) 解的编码形式。将各引航任务按序号自然

排序,每个位置对应的数字为与相应的引航任务组合的任务号,如果位置上的序号为其本身,则表示这一引航任务单独引航,不连引。

2) 任务组合初始解生成。从第一个引航任务开始遍历,根据模型约束得到任务组合的初始解。

3) 邻域结构设置,设计如下2种邻域结构生成引航任务组合方案:

①组合交换,随机交换一个位置号与任务号相等和一个位置号与任务号不等的2个任务,即在个体代表的方案中,一个是连续引航的任务,一个是单独引航的任务。

②2点交换,随机交换位置号与任务号相等的2个任务,即在个体代表的方案中,2个都是单独引航的任务。

3.2.2 指派规则算法

根据指派的考虑因素和港口管理规则,提出指派规则算法对引航员的指派问题进行求解,具体步骤如下:

1) 根据引航员的次序表的顺序,依次为任务安排引航员,这时的次序就是引航员按要求完成上次作业返回引航站的顺序。

2) 根据约束式(22)和式(23)以及式(27)~式(29),从引航员等级、工时限制的角度判断任务是否可分配给引航员,如果满足要求则进入3),如果不满足要求,则返回1)。

3) 判断引航员级别和作业的等级差别,根据约束式(27)判断引航员级别和作业的等级是否差别较大,若差别不大($\sigma_{h,u,p} = 0$),进入5);若差别较大($\sigma_{h,u,p} = 1$),进入4)。

4) 继续往下遍历引航员,依次判断引航任务是否可分配给引航员,将所有符合约束式(22)、式(23)以及式(27)和式(29)并且和作业等级相近的引航员组成集合,考虑到尽量减少引航员因分配到的船舶数量未够等待的情况,优先选择顺序靠前的引航员。

5) 判断引航任务对应的船舶是否为大吃水船舶,如果是,分配到这艘船的引航员放入分配完成的集合中。

6) 更新待分配的引航员列表以及分配到的引航任务信息。

7) 重复1)~6),直到所有的引航任务分配完成,算法结束。

4 数值试验

本文采用某港区2020年5月的船舶实际运营

数据以及模拟的引航员数据进行验证。测试所用计算机: Intel i5-7200 CPU, 主频 2.50 GHz, 内存为 12.00 GB。ICA 用于求解进出港船舶调度问题的最佳参数设置如下: $n_{pop} = 100, n_{imp} = 10, i_{max} = 300, \theta = 0.5, \bar{\omega} = 0.1, \zeta = 0.5, T_s = 0$, 终止条件为 $n_{imp} \leq 4$ 。

4.1 实例验证

港区单向航道示意图 2, 6# 锚地到航道入口 1.52 n mile, 8# 锚地到航道入口 8.87 n mile, 航道长度 31.75 n mile, 共 15 个泊位。为衔接每个时间段, 需考虑研究的时间范围内航道和泊位中船舶的初始状态, 例如航道内是否有船。上一阶段最后一艘船舶(编号为 0)以及本阶段调度的船舶信息见表 1。泊位初始状态: 泊位 HG3、HG2、7、4、3、K01、K02 状态为忙, 泊位 HG5、HG4、HG1、8、6、5、2、1 状态为闲。综合港区船舶吃水大于 16 m 需乘潮进出港。模拟的各级别引航员信息: 高级 5 人, 一级 2 人, 二级 1 人, 三级 4 人, 共 12 人, 并依次为引航员编号, 引航员成本分配规则为: $L \leq 90$ m 的一般船舶: 每艘次为 15 min; $90 \text{ min} < L < 180 \text{ min}$ 的一般船舶: 每艘次为 12 min; $180 \text{ min} \leq L \leq 210 \text{ min}$ 的一般船舶: 每艘次为 15 min; $210 \text{ min} < L \leq 241 \text{ m}$ 的一般船舶: 每艘次为 20 min; $241 \text{ m} < L \leq 266 \text{ m}$ 的一般船舶: 每艘次为 30 min; $L > 266 \text{ m}$ 的一般船舶: 每艘次为 40 min。模型参数设置为: $\bar{L}_{max} = 12 \text{ h}, L_{min} = 0 \text{ h}, L_{max} = 1 \text{ h}, \bar{L}_{min} = 0.5 \text{ h}, \bar{L}_{max} = 14 \text{ h}, t_{\eta} = 3 \text{ h}, t_1 = 12 \text{ min}, t_2 = 10 \text{ min}, t_3 = 8 \text{ min}$ 。

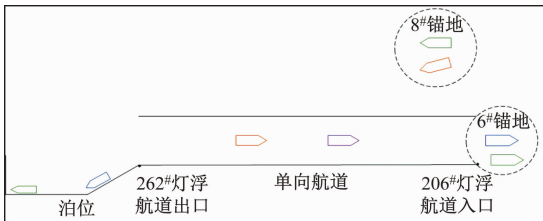


图2 港区单向航道示意

Fig. 2 Schematic diagram of one-way channel in the port

将上述数据读入程序中进行计算, 求得第一阶段的最优解, 以最优解中引航员在船总工作时间最小的解对应的船舶序列为例, 得到进出港船舶调度优化方案见表 2, 表 2 中最优解对应的船舶调度序列为: 13、1、12、8、7、6、11、4、2、15、14、9、5、10、3; 船舶在港等待时间和引航员在船总工作时间分别为: 64.62 h 和 8.83 h。假设所有船舶都需要引航, 各目标值前的系数为: $\chi_1 = 0.33, \chi_2 = 0.01, \chi_3 = 1.05$ 。以第一阶段求得船舶序列为输入, 通过第二阶段的变邻域搜索以及指派规则算法得到的引航员调度方案和被指派的引航员信息见表 3。本文中

的调度周期开始时刻从 0 计算, 单位为 min。例如 15 号船舶的申请时刻 477 为本调度周期内第 477 分钟, 下同。

表 1 调度船舶信息

Tab. 1 Scheduled vessel information

船舶编号	方向	泊位	申请时刻/min	船长/m	航行距离/n mile	平均航速/kn
0	出	HG5	17	189.99	37.14	10.8
1	出	K02	45	160.60	32.89	11.2
2	进	8	77	115.20	35.89	9.6
3	进	HG2	110	168.00	36.79	10.4
4	进	2	110	291.98	35.09	11.1
5	进	HG5	113	121.73	37.14	10.0
6	出	7	123	299.97	35.76	10.2
7	出	4	157	132.72	35.34	11.9
8	出	K01	160	139.92	33.05	11.5
9	进	5	177	159.60	35.49	9.8
10	进	1	180	112.00	34.94	10.4
11	进	HG1	237	88.40	36.67	9.2
12	出	3	257	187.88	35.22	12.8
13	出	HG3	290	96.90	36.94	11.0
14	进	HG4	460	189.99	37.06	11.5
15	进	6	477	189.99	35.63	11.0

表 2 进出港船舶调度优化方案

Tab. 2 Optimization scheme for vessel scheduling

in and out of port

船舶编号	方向	开始被调度时间/min	到达航道出口时刻/min	到达航道入口时刻/min	结束时间/min
0	出	17.0	46.16	199.5	206.4
13	出	290.0	317.50	484.7	491.5
1	出	292.8	298.17	487.7	494.3
12	出	296.1	311.69	491.8	497.6
8	出	298.2	304.23	493.2	499.7
7	出	300.5	317.83	495.7	501.9
6	出	305.4	328.10	508.5	515.7
11	进	522.1	730.07	530.1	761.2
4	进	528.2	750.11	534.9	767.4
2	进	545.2	744.59	553.0	769.6
15	进	549.1	753.04	555.8	773.4
14	进	567.4	749.82	573.9	776.8
9	进	570.1	765.42	577.7	787.4
5	进	587.6	778.93	595.0	810.4
10	进	589.7	795.03	596.9	812.6
3	进	607.9	791.89	615.0	820.1

表3 引航员调度方案和被指派的引航员信息

Tab.3 Pilot scheduling program and assigned pilot information

引航员编号	等级	船舶编号	任务适任引航员级别	任务开始时间/h	任务结束时间/h	引航员工作时间/h
1	高级	10	高级、一级、二级、三级	6.83	13.54	6.71
10	三级	3	高级、一级、二级、三级	7.13	13.67	6.54
12	三级	7,2	高级、一级、二级、三级	5.01	12.83	7.82
3	高级	13	高级、一级、二级、三级	4.83	11.19	6.36
2	高级	6,14	高级、一级	5.09	12.95	7.86
9	三级	5	高级、一级、二级、三级	6.79	13.51	6.71
8	二级	12,11	高级、一级、二级	4.93	12.69	7.75
7	一级	—	—	—	—	—
11	三级	9	高级、一级、二级、三级	6.50	13.12	6.62
6	一级	1,15	高级、一级、二级	4.88	12.89	8.01
4	高级	—	—	—	—	—
5	高级	8,4	高级、一级	4.97	12.79	7.82

4.2 算法对比试验分析

将从目标值和计算时间的角度来评估本文设计的两阶段算法 ICA-VNS 的性能。目前,对于进出港船舶调度问题以及引航员调度问题,大部分港口常用先到先服务(First Come First Served, FCFS)策略解决实例。对于算法第一阶段的船舶调度问题,选用文献[1]中的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm, NSGA-II)和文献[14]中的差分进化算法(Differential Evolution, DE)用于对比;算法第二阶段,对于组合优化问题,选用穷举法(Exhaustive Method, EM)用于对比。本文将上述3种算法分别与本文设计的 ICA 或 VNS 结合起来,分别用 DE-VNS、NSGA-II-VNS 和 ICA-EM 表示,并将这3种启发式算法作为对比算法,用于验证本文所提出的两阶段算法,3种算法迭代收敛见图3。计算结果对比见表4。表4中:第一列显示需要调度的不同的船舶数量 V 和可用引航员数量 P 的实例,并针对每个实例运行10次并取平均值。其中 NSGA-II 的参数设置如下:种群规模为100,交叉概率为0.8,变异概率为0.2,最大迭代次数为100;DE 的参数设置如下:种群数量为100,交叉概率为0.7,最大迭代次数为200。

由表4可知:与 FCFS、DE-VNS 和 NSGA-II-VNS 比较,本文设计的算法 ICA-VNS 在不同船舶数量和可用引航员人数的问题中均可取得较优的结果。GAP 为本文设计的算法 ICA-VNS 与 FCFS 结果的差距为

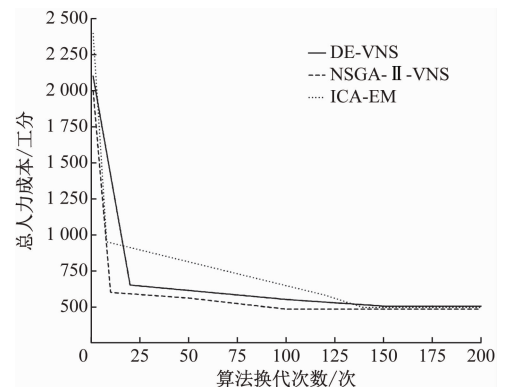


图3 算法迭代收敛图

Fig.3 Iterative convergence diagram of the algorithm

$$GAP = (O_{FCFS} - O_{ICA-VNS}) / O_{FCFS} \quad (41)$$

式(41)中: O_{FCFS} 为FCFS求得的目标值; $O_{ICA-VNS}$ 为本文设计算法 ICA-VNS 求得的目标值。

尽管在实例中,FCFS 都能以较短的计算时间得到结果,但其结果并不是最优的。当 $V = 15$ 、 $V = 20$ 时,ICA-VNS 均得到更优的解。在算法运行时间上;当 $V = 15$ 、 $V = 20$ 时,ICA-VNS 所用时间更长,其原因在于算法中革命和分裂步骤带来更精细的搜索能力,实现全局搜索与局部搜索的协调,但也增加算法的复杂度。算法 ICA-EM 在 $V = 10$ 时,引航员的不在船的工作时间的优化结果优于本文设计的算法,但当调度规模增大时,算法 ICA-EM 无法在3600s的时间限制内求出最优解。算法第二阶段通过EM获得组合问题的最优解,该算法属于精确搜索算法。然而,当问题规模增大时,很难在能接受时间内求出最优解,在实际问题中无法应用。综上,试验证明在

表4 不同调度规模实例 FCFS, DE-VNS, NSGA-II-VNS, ICA-EM 和 ICA-VNS 结果对比
 Tab.4 Comparison of FCFS, DE-VNS, NSGA-II-VNS, ICA-EM and ICA-VNS results for different scheduling scale instances

船舶数量 可用引航员数量(V P)	目标值	FCFS	NSGA-II-VNS	DE-VNS	ICA-EM	ICA-VNS	GAP/%
516	总人力成本/工分	151.48	130.45	130.45	130.45	130.45	13.88
	引航员总工作时间/h	16.44	15.97	15.97	15.97	15.97	2.88
	计算时间/s	< 1.00	5.78	8.46	24.19	24.19	-
10110	总人力成本/工分	279.26	240.87	243.35	237.72	239.55	14.22
	引航员总工作时间/h	33.58	20.41	29.05	14.81	15.05	55.19
	计算时间/s	< 1.00	6.44	15.63	39.91	36.92	-
15112	总人力成本/工分	457.73	398.91	403.77	-	396.80	13.31
	引航员总工作时间/h	56.76	38.49	43.30	-	25.42	55.22
	计算时间/s	< 1.00	7.23	16.75	-	47.18	-
20112	总人力成本/工分	551.87	483.44	504.01	-	494.49	17.40
	引航员总工作时间/h	92.37	76.29	60.15	-	48.29	12.40
	计算时间/s	< 1.00	12.47	25.36	-	64.66	-

不同待调度的船舶数量 V 和可用的引航员数量 P 的实例,本文设计的算法均能稳定地求出较优解。

5 结束语

本文针对引航员调度问题进行研究,建立基于单向航道的引航员调度模型,减少引航的工时和人力成本,并针对模型设计两阶段启发式算法进行求解。实例验证以及对比试验结果表明,该模型及算法合理有效。在保证船舶安全的前提下,所提出的引航员调度方法求得的调度方案相较于传统的 FCFS 调度规则,引航员的平均工作时间和人力成本分别减少 17.4% 和 12.4%。不仅能减少引航员工作时间和人力成本,提出的模型和算法也可引入引航业务的培训内容或教学指南,进而在各港口引航部门推广,以便在实际工作中更好地整合港口的调度工作,提高港口引航服务效率。

参 考 文 献

- [1] 王金涛. 基于单向航道的船舶调度优化模型与算法研究[D]. 大连:大连海事大学, 2014.
 WANG J T. Research on ship scheduling optimization model and algorithm based on unidirectional channel [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. (in chinese)
- [2] 张新宇, 郭子坚, 王金涛, 等. 基于航道与泊位资源协调调度的船舶交通优化[J]. 中国航海, 2015, 38(3): 33-36.

ZHANG X Y, GUO Z J, WANG J T, et al. Optimization of vessel scheduling based on coordination of one-way channel and berths[J]. Navigation of China, 2015, 38(3): 33-36. (in chinese)

- [3] LI J, ZHANG X, YANG B, et al. Vessel traffic scheduling optimization for restricted channel in ports [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 152(3): 107014.
- [4] HILL A, LALLA-RUIZ E, VOSS S, et al. A multi-mode resource-constrained project scheduling reformulation for the waterway ship scheduling problem [J]. Journal of Scheduling, 2019, 22(2): 173-182.
- [5] JIA S, LI C L, XU Z. Managing navigation channel traffic and anchorage area utilization of a container port [J]. Transportation Science, 2019, 53(3): 728-745.
- [6] WU L, JIA S, WANG S. Pilotage planning in seaports [J]. European Journal of Operational Research, 2020, 287(1): 90-105.
- [7] XIAO L, WANG Z, TAN Z, et al. A solution method for the maritime pilot scheduling problem with working hour regulations[J]. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2021, 38(3): 1-15.
- [8] 李伟峰. 基于 Oracle 的引航排班及可视化[D]. 大连:大连海事大学, 2009.
 LI W F. Oracle-based pilotage scheduling and visualization[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. (in chinese)
- [9] 谭哲一, 王正培, 张毅文. 面向复杂航道的引航员与船舶集成调度优化[J]. 系统工程理论与实践,

- 2021, 41(2): 332-344.
- TAN Z Y, WANG Z P, ZHANG Y W. Integrated optimization of pilots and ships scheduling for ports with complex channels [J]. *Systems Engineering Theory and Practice*, 2021, 41(2): 332-344. (in chinese)
- [10] JIA S, WU L, MENG Q. Joint scheduling of vessel traffic and pilots in seaport waters [J]. *Transportation Science*, 2020, 54(6): 1495-1515.
- [11] HOSSEINI S, AL KHALED A. A survey on the imperialist competitive algorithm metaheuristic: implementation in engineering domain and directions for future research[J]. *Applied Soft Computing*, 2014, 24: 1078-1094.
- [12] 张军峰, 游录宝, 杨春苇, 等. 基于多目标帝国竞争算法的进场排序与调度[J]. *航空学报*, 2021, 42(2): 475-487.
- ZHANG J F, YOU L B, YANG C W, et al. Arrival sequencing and scheduling based on multi-objective imperialist competitive algorithm [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(2): 464-476. (in chinese)
- [13] 张国辉, 陆熙熙, 胡一凡, 等. 基于改进帝国竞争算法的柔性作业车间机器故障重调度[J]. *计算机应用*, 2021, 41(8): 2242-2248.
- ZHANG G H, LU X X, HU Y F, et al. Machine breakdown rescheduling for flexible job shop based on improved imperialist competitive algorithm[J]. *Journal of Computer Application*, 2021, 41(8): 2242-2248. (in chinese)
- [14] NEARCHOU A C, OMIROU S L. Differential evolution for sequencing and scheduling optimization[J]. *Journal of Heuristics*, 2006, 12(6): 395-411.
-
- (上接第 51 页)
- [6] 杨志钢, 孙鹏. 基于 Gerstner 函数和 JONSWAP 海浪谱的海浪仿真[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2021, 37(6): 676-682.
- YANG Z G, SUN P. Wave simulation based on combination of Gerstner function and JONSWAP wave spectrum[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2021, 37(6): 676-682. (in Chinese)
- [7] MAZZARETTO O M, MENÉNDEZ M, LOBETO H. A global evaluation of the JONSWAP spectra suitability on coastal areas [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266(9): 112756.
- [8] 米晓林, 王晓冰, 贺新毅, 等. JONSWAP 谱海面散射特性受相关参量的影响分析[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(6): 971-975.
- MI X L, WANG X B, HE X Y, et al. Sea surface scattering characteristics of JONSWAP spectrum influenced by its parameters [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(6): 971-975. (in Chinese)
- [9] 张学敏, 吴立民, 张丽, 等. 基于 JONSWAP 谱的海面浪形模拟[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(增刊1): 162-167.
- ZHANG X M, WU L M, ZHANG L, et al. Ocean wave simulation based on JONSWAP spectrum [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(Suppl. 1): 162-167. (in Chinese)
- [10] International Association of Classification Societies. History files and technical background documents for recommendation[R]. London: International Association of Classification Societies, 2022.
- [11] HOBGEN N, DACUNBA L F, OLLIVER H N. *Global Wave Statistics (GWS)* [M]. London: Brown Union Publishing, 1986.