

管理科学

长江上游集装箱码头泊位 — 锚地系统配置策略

刘名武, 樊文平, 吴开兰

(重庆交通大学 经济与管理学院, 重庆 400074)

摘 要: 针对内河集装箱运输增长与内河航道制约所导致的集装箱运输系统运作效率与航运安全问题, 讨论长江上游集装箱码头泊位 - 锚地系统最优配置策略. 通过构建码头泊位 - 锚地系统的船舶候泊排队服务模型, 推导出队长水平状态的稳态概率分布, 计算出平均等待队长, 并建立泊位 - 锚地系统配置模型, 采用数值算例考察相应的最优配置策略和锚泊溢出概率.

关键词: 泊位 - 锚地系统; 集装箱码头; 配置策略; 稳态概率分布

1 引言

2014 年 9 月, 国务院印发《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》, 发挥长江黄金水道在构建现代综合运输体系、推进对内、对外开放中的独特作用, 给沿江港口建设带来新机遇. 集装箱运输代表现代化的先进运输方式, 是内外贸货物运输的主要方式. 随着长江上游地区开放、开发的深入推进, 产业聚集效应的进一步加剧, 适箱货物运输不断增长, 对集装箱运输系统运作与管理效率提出了更高要求. 港口作为内河集装箱运输系统的核心枢纽, 其运作效率直接关系到整个集装箱运输系统效率的发挥. 然而, 长江上游集装箱内河运输系统受航道条件、枯荣水位变化等因素限制, 加上集装箱船舶大型化发展趋势, 码头锚地紧张, 船舶靠泊作业与待泊安全隐患问题日趋突出, 港口枢纽功能得不到有效发挥. 通过码头泊位 - 锚地的优化配置, 增强作为港口生产配套设施的锚地与码头泊位间的协调, 是提升长江上游集装箱港口枢纽运作效率和锚泊安全性的有效措施. 因此, 长江上游集装箱码头泊位 - 锚地配置策略问题的研究现实意义显著.

集装箱运输系统效率发挥涉及到集装箱运输各个环节间的协调. 集装箱码头泊位分配 (见文 [1-2])、堆场作业调度 [3-4] 等问题是集装运输枢纽港口码头生产调度的关键问题之一, 国内外学者开展了大量富有成效的研究, 构建了离散泊位分配模型 [5]、连续泊位分配模型 [6] 并开发了一系列算法. 对泊位分配问题的研究解决了码头作业调度需求, 但因未考虑锚地与泊位间的协调配置, 导致泊位分配策略常为局部最优, 具有一定的局限性. 锚地是进出港船舶汇集的中心, 其合理配布与优化设计是港口规划与建设的重要环节. 常采用静态方法规划锚地规模, 即根据船舶所占据的水域面积进行计算. 然而, 船舶不可能同时到达且不同港口不同锚地的锚泊船舶占用锚地时间具有动态随机特点. 针对锚地规划的静态方法不能反映动态随

收稿日期: 2016-01-19

资助项目: 国家社会科学基金资助项目 (内河集装箱港口设施资源优化配置策略研究, 14CGL013)

机性特征,刘敬贤等探讨了基于排队服务模型的锚地规模动态评价方法,考虑了船舶到达规律与占用锚地时间等因素^[7]. Fan & Cao 提出一个可用于一般锚地的容量模型,定义锚地容量是一定时期内容纳的最大船舶数量^[8]. Bugaric 等在先到先出的排队规则下研究锚地的容量问题^[9],锚地被看成是一个固定的数值,独立于船舶的大小.但是,实际中的船舶抛锚点与船舶形体大小都影响了锚地的容量规模,锚地研究中需要反映典型船舶及其对水域空间的利用特征. Huang 等提出了一种估算多种类锚地容量的方法以及锚地空间利用率提升算法^[10], Dindar 从安全和利用率的角度建立一个多目标锚地规划模型,目的是最大化利用锚地水域同时最小化事故风险^[11]. 上述针对海港锚地的研究成果难以直接用来指导内河港口锚地规划建设. 与海港不同,内河港口水域水位落差变化大、航道可利用水域资源少,导致内河港口锚地呈现分散性特征. 早在 1990 年,周明星等就对内河港口锚地建设规模进行了研究,给出几种常见用途锚地规模计算公式^[12]. 沈俊华等采用 M/M/S 排队模型计算了一般性的公用锚地^[13]. 到目前为止,针对内河集装箱港口锚地的系统性研究还不够深入,对锚地安全性的考量欠缺.

综上所述,本文研究长江上游集装箱码头泊位 - 锚地系统的配置策略问题,将船舶锚地待泊溢出因素考虑到集装箱码头泊位 - 锚地系统的配置策略中,通过建立锚地船舶排队候泊队长水平状态的稳态概率分布平衡方程,导出船舶队长水平状态的稳态概率分布,从而获得用于设计泊位 - 锚地系统的系列指标,进而考察泊位 - 锚地系统优化配置策略与船舶锚地待泊的溢出概率.

2 问题描述与分析

本文考虑的长江上游集装箱码头泊位 - 锚地系统可刻画成如图 1 所示的结构示意图,如果码头泊位空闲,到达的集装箱船则进港靠泊,所载货物集装箱由岸桥起重机卸载,否则,集装箱船舶进入锚地停泊区抛锚候泊,一旦锚地被占满,新到的集装箱船舶只能在锚地周边等待,从而影响航道通航以及自身泊船安全. 基本假设如下:

1) 集装箱船舶抵港规律服从参数为 λ 的 Poisson 分布,即单位时间内进港的集装箱船舶数平均为 λ 艘(焦海贤等根据重庆港 3 年的数据拟合得出船队日抵港批数参数是服从 $\lambda = 1.5867$ 的 Poisson 分布^[14]. 一般来说,船舶到港具有很大的随机性,现有研究普遍用 Poisson 分布来描述港口船舶到达规律);

2) 集装箱码头泊位作业区有 S 个同型泊位,一个泊位只能靠泊一艘集装箱船,单个泊位的卸载服务时间长度也是一随机过程,可刻画成服从参数为 μ 的负指数分布,平均服务率为 μ ,即单位时间内单个泊位平均能完成 μ 艘集装箱船的卸船任务(当前长江上游重庆段集装箱码头靠泊的主要船型载箱量为 334TEU、325TEU,单个岸桥起重机完成整船集装箱吊装卸载任务时间近似恒定. 但是,当前集装箱运输在主要航线上大多采用班轮形式运作. 众多不确定性因素往往导致集装箱船舶运载箱量的不确定. 同时,一个泊位可以由单个岸桥起重机或者两个岸桥起重机同时作业. 综合这些因素将单个泊位服务时间长度假设为负指数分布,不仅应用广泛而且易于构建模型进行解析分析);

3) 码头锚地有 m 个锚位,进入锚地停泊区的集装箱船按照先到先服务的规则在锚位处排队候泊,一旦码头有空闲泊位,最先到达锚地候泊的船舶由引航道向泊位靠泊(实践中的船舶排队规则有时是非严格的先到先服务,例如外贸船舶常优先于内贸船舶靠泊,特殊货物船

船也常优先于普通货物船舶, 特定航线班轮也会优先于一般船舶等等. 优先服务规则对船舶进港靠泊顺序产生影响, 但是对码头泊位 - 锚地系统的利用率影响甚微. 因此, 所假设的先到先服务规则不仅可以刻画船舶排队大多数情况, 同时也对实践中的复杂服务规则进行简化, 便于对本文所要考虑的码头泊位 - 锚地系统的建模分析);

4) 船舶通过引航道到达码头泊位的时间基本恒定, 可忽略不计 (长江上游段集装箱码头现有锚地距离码头泊位作业区虽然可达几十公里, 但相对于班轮航线数千公里的距离来说很短, 忽略这个短暂引航通过时间产生的影响有限, 但更易于泊位 - 锚地系统的分析).

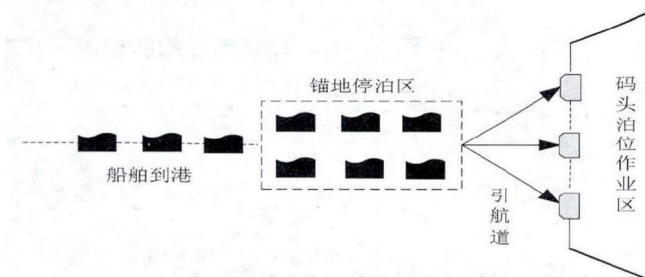


图 1 集装箱船舶进港靠泊示意图

令锚地候泊的船舶数量水平状态为 x , 其状态空间 E 为 $\{0, 1, \dots, m\}$. 当锚地船舶排队的队长大于 m 时, 则船舶产生溢出锚地现象. 将锚地停泊区、溢出锚地停泊的船舶以及码头泊位服务船舶的总数水平状态记为 \hat{x} , 其状态空间 \hat{E} 为 $\{0, 1, \dots, S, S+1, S+2, \dots, S+m, \dots\}$. 因此, 队长水平状态 \hat{x} 的演化特征总结如下:

1) 队长水平状态 \hat{x} 转变到 $\hat{x} + 1$ 的强度为 λ , 即对应于到达一艘集装箱船;

2) 当队长水平状态 $\hat{x} \geq S$ 时, S 个泊位都处于工作状态且每个泊位的吊箱卸载服务能力相同, 整个泊位服务系统可看成是 S - 阶 Erlang 分布, 平均服务率为 $S\mu$, 则队长水平状态从 \hat{x} 转变到 $\hat{x} - 1$ 的强度为 $S\mu$. 当队长水平状态 $\hat{x} < S$ 时, 系统中所有的船舶都在泊位处接受服务, 有 \hat{x} 个泊位处于服务工作状态, 形成 \hat{x} - 阶 Erlang 分布, 平均服务率为 $\hat{x}\mu$, 则队长水平状态从 \hat{x} 转变到 $\hat{x} - 1$ 的强度为 $\hat{x}\mu$.

根据上述队长水平状态的演化特征, 码头泊位 - 锚地系统的船舶队长水平状态在状态空间 \hat{E} 上的状态转移情况如图 2 所示.

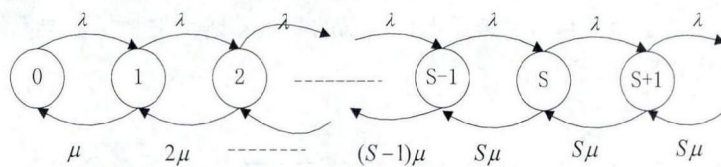


图 2 泊位 - 锚地系统队长水平状态转移图

3 泊位 - 锚地系统稳态分析

长期均衡情况下, 码头泊位 - 锚地系统的流入 - 流出达到均衡, 船舶队长水平状态概率分布达到稳态. 令 $P_j (j = 0, 1, \dots)$ 表示船舶队长水平状态稳态概率分布. 根据状态转移图 2, 可建立如下的稳态平衡方程:

$$\lambda P_0 = \mu P_1 \quad (1)$$

$$(j\mu + \lambda)P_j = (j+1)\mu P_{j+1} + \lambda P_{j-1}, j = 1, 2, \dots, S-1 \quad (2)$$

$$(S\mu + \lambda)P_j = S\mu P_{j+1} + \lambda P_{j-1}, j = S, S+1, \dots \quad (3)$$

令 $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, $\rho_s = \frac{\lambda}{S\mu}$ ($\rho_s < 1$), 从公式 (1) 出发并以 P_0 作为参考, 逐步采用递归方法, 得到下面关系式:

$$P_j = \frac{\rho^j}{j!} P_0, \quad 1 \leq j \leq S \quad (4)$$

$$P_j = \frac{\rho_s^j S^S}{S!} P_0, \quad S < j \quad (5)$$

利用稳态概率分布的归一化条件 $\sum_{j=0}^{\infty} P_j = 1$, 得到船舶队长水平状态稳态概率分布:

$$P_0 = \left[\frac{\rho^S}{S!} \cdot \frac{S}{S-\rho} + \sum_{k=0}^{S-1} \frac{\rho^k}{k!} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$P_j = \frac{\rho^j}{(j!) \left[\frac{\rho^S}{S!} \cdot \frac{S}{S-\rho} + \sum_{k=0}^{S-1} \frac{\rho^k}{k!} \right]}, \quad 1 \leq j \leq S \quad (7)$$

$$P_j = \frac{\rho_s^j S^S}{(S!) \left[\frac{\rho^S}{S!} \cdot \frac{S}{S-\rho} + \sum_{k=0}^{S-1} \frac{\rho^k}{k!} \right]}, \quad S < j \quad (8)$$

根据船舶队长水平状态概率分布 (6)-(8) 式, 可得出船舶的平均等待队长 L_q (等待队长意为处于锚地或锚地周边待泊的船舶队长) 为:

$$L_q = \sum_{j=S+1}^{\infty} (j-S)P_j = \frac{\rho^{s+1}}{(S-1)!(S-\rho)^2 \left[\frac{\rho^S}{S!} \cdot \frac{S}{S-\rho} + \sum_{k=0}^{S-1} \frac{\rho^k}{k!} \right]}. \quad (9)$$

4 泊位 - 锚地系统的配置策略

码头泊位 - 锚地系统的锚地规划与选址原则主要是考虑锚地基本功能与锚地水文条件。但是, 对于长江上游集装箱运输系统来说, 集装箱船舶大型化趋势发展 (如重庆长江轮船公司的主力船型已经增长到 325TEU 载箱量, 吃水深达 4 米, 总吨位近 6000 吨。)使得现有航道条件局限性越来越明显, 特别在枯水期, 航道易受干扰。因此, 长江上游集装箱码头 - 锚地系统配置策略考虑三个方面, 一是锚地总锚位数 (S) 大于集装箱船舶的平均等着队长 (L_q), 二是最大程度上节约锚地水域空间, 即实现锚位数总量上最小, 三是单个锚地锚位数受到航道与水文条件的限制存在安全阈值 T 。满足上述要求的集装箱码头锚地 - 泊位系统的配置策略, 即求解下面的最优化问题 (P):

$$\begin{aligned} & \text{Min}\{m\} \\ & \text{s.t.} \frac{\rho^{s+1}}{(S-1)!(S-\rho)^2 \left[\frac{\rho^S}{S!} \cdot \frac{S}{S-\rho} + \sum_{k=0}^{S-1} \frac{\rho^k}{k!} \right]} \leq m \end{aligned} \quad (10)$$

其中, 优化问题 P 中的决策变量为 m 且为整数型变量。问题 P 是关于整数型变量的非线性不等式约束问题, 目前无解析表达式。针对本问题中目标函数的独特性, 可用枚举法进行求解。按照 (10) 式规划的锚地锚位数, 船舶排队发生溢出锚地的概率 P 为:

$$P = 1 - \sum_{j=0}^{m+S} P_j \quad (11)$$

考虑到长江上游集装箱码头锚地实地分散性特征, 锚地规划则按照 (12) 进行:

$$\sum_{i=1}^L m_i \geq m_i^m \leq T^i (i = 1, \dots, L) \quad (12)$$

其中 L 为锚地个数, m_i 是单个锚地锚位数, 存在安全阈值 T . 由于长江上游航道狭窄, 单个锚地锚位数需根据实际水域情况进行规划设计, 集装箱码头锚地常由多个锚地组合而成.

5 泊位 - 锚地系统配置算例分析

下面以长江上游典型的集装箱码头重庆某集装箱码头泊位 - 锚地系统为对象, 进行码头泊位 - 锚地系统的配置策略算例分析. 重庆某集装箱码头是长江上游年吞吐量最大的集装箱码头, 现建成 5000 吨级集装箱泊位 5 个, 2014 年通过该码头的集装箱吞吐量达 60 万标箱 (TEU), 单个岸桥起重机完成一艘载箱量 330TEU 船舶的吊箱卸载任务平均需要 11 个小时. 根据这些基础数据, 估算出日平均到港船舶数为 6 艘. 下面设计三个实验来考察长江上游集装箱码头泊位 - 锚地系统的优化配置策略与锚地溢出概率.

实验 1 泊位数与服务能力固定, 考察船舶到达强度与锚位数的配置关系.

表 1 给出了船舶不同到达强度下的泊位 - 锚地系统锚位数配置及系列稳态指标. 当船舶到达强度 $\lambda=6$, 系统参数设定为 $S=5, \mu=2$ 时, 船舶平均等待队长为 0.3542, 锚位数设置为 1, 则锚地处船舶排队候泊发生溢出锚地的概率为 8.5%, 这种情况下泊位空闲的概率为 4.66%. 当 λ 上升到 8 时, 即到港船舶增长 33.33%时, 船舶平均等待队长为 2.2165, 锚位数设置为 3, 发生溢出锚地的概率为 22.7%, 当 λ 下降到 4 时, 即到港船舶减少 33.33%时, 船舶平均等待队长为 0.0398, 锚位数设置为 1, 发生溢出锚地的概率为 0.96%. 当船舶到达强度增加时 (或者交通强度 ρ_S 增大), 锚位数也逐渐增加, 但是锚地发生溢出的概率也增加. 交通强度 ρ_S 揭示出船舶在锚地排队候泊发生溢出的概率, 当 ρ_S 不大于 60%时, 锚地发生溢出的概率不高于 8.5%, 当 ρ_S 大于 80%时, 锚地发生溢出的概率不低于 22%. 当 $\lambda=9$ 时, 锚位数为 7 个, 然而该码头实际航道周边单一锚地最多能规划 4 个锚位, 此时锚地由 1 号锚地 (4 个锚位) 和 2 号锚地 (3 个锚位) 组合而成.

表 1 船舶到达强度 VS 锚位数

λ (艘/日)	L_q (艘)	m (个)	P (%)	P_0 (%)	ρ_S (%)
4	0.0398	1	0.96	13.43	40.00
5	0.1304	1	3.26	8.01	50.00
6	0.3542	1	8.50	4.66	60.00
7	0.8816	1	18.51	2.59	70.00
8	2.2165	3	22.70	1.30	80.00
9	6.8624	7	26.59	0.50	90.00

注: 表 1 中参数是在实际港口码头数据基础上进行的换算与估计, 设定为 $S=5, \mu=2$.

实验 2 船舶到达强度与泊位服务能力固定, 考察泊位数与锚位数的配置关系.

表 2 给出了码头泊位数与锚地的配置关系. 当泊位数为 4, 系统参数设定为 $\lambda=6, \mu=2$ 时, 平均等待队长为 1.5283, 锚位数为 2, 则溢出发生的概率为 21.49%(此时交通强度 ρ_S 为 75%). 当泊位数为 6 时, 锚位数为 1, 溢出发生的概率为 2.48%(交通强度 ρ_S 为 50%). 综合实验 1 和实验 2, 锚地发生溢出的概率与交通强度 ρ_S 成正比关系, 较低的交通强度情况下, 按照平均等待队长来设计锚地锚位数的规则, 船舶锚地排队候泊发生溢出锚地的概率小, 作为一种较为安全的泊位 - 锚地系统的规划参考原则. 但是, 当交通强度较高时, 按照平均等待队

长来设计锚地锚位数的规则,就产生相当大的锚地停泊安全隐患.如表1所示,当 $\rho_S = 90\%$ 时,平均等待队长为6.86.然而,规划7个锚位数的情况下,溢出概率达到26.59%.

表 2 泊位数 VS 锚位数

S (个)	Lq (艘)	m (个)	P (%)	P_0 (%)	ρ_S (%)
4	1.5283	2	21.49	3.77	75.00
5	0.3542	1	8.50	4.66	60.00
6	0.0991	1	2.48	4.90	50.00
7	0.0282	1	0.69	4.96	42.85

注:表2中参数是在实际港口码头数据基础上进行的换算与估计,参数设定为 $\lambda=6, \mu=2$.

实验 3 船舶到达强度与泊位数固定,考察泊位服务能力与锚位数的配置关系.

表3给出了泊位数服务能力与锚地的配置关系,系统参数设定为 $\lambda=7, S=4$.当 $\mu=2$ 时,即 $\rho_S = 87.5\%$,平均等待队长为5.16,锚位数为6,则锚地溢出发生的概率为28.98%.当服务能力增加到 $\mu=3$ 时,锚位数为1,溢出发生的概率为9.06%(交通强度 ρ_S 为58.33%),溢出概率下降约20%.当 μ 增加到5时,溢出概率为0.74%.因此,泊位服务能力的提高大大降低了锚地溢出概率,提高了锚地的安全性.

表 3 泊位服务能力 VS 锚位数

μ (个)	Lq (艘)	m (个)	P (%)	P_0 (%)	ρ_S (%)
2	5.160	6	28.98	1.48	87.50
3	0.3726	1	9.06	8.98	58.33
4	0.0921	1	2.27	17.04	43.75
5	0.0325	1	0.74	24.49	35.00

注:表3中参数是在实际港口码头数据基础上进行的换算与估计,参数设定为 $\lambda=7, S=4$.

6 结束语

长江航运在综合运输体系中具有运能大、污染轻等比较优势.长江黄金水道支撑以“长江经济带”为代表的内河区域深层次开发的作用愈发显著.然而,承载着长江上游水运发展的内河航运条件限制以及集装箱运输迅速增长的趋势,激发本文探讨长江上游内河集装箱运输码头泊位 - 锚地配置策略,从而为内河集装箱码头泊位 - 锚地规划提供借鉴.本文研究了长江上游集装箱码头泊位 - 锚地系统,通过建立锚地船舶排队候泊队长水平状态的稳态概率分布平衡方程,导出船舶队长水平状态的稳态概率分布,获得了泊位 - 锚地系统稳态度量指标,采用数值算例考察泊位 - 锚地系统优化配置策略和锚地溢出概率.结果表明,本文提出的锚地规划理论方法在交通强度不高的情况下,依据平均等待队长规划锚地的锚位数,船舶在锚地候泊发生溢出的概率较小,安全性较好.但是,当交通强度处于高位时,根据平均等待队长规划锚地,锚地安全隐患大.

本文从工程角度研究泊位 - 锚地的配置问题,从企业运营管理的角度考虑费用与效率的研究将对企业经营管理更具有指导意义.另外,放松模型的假设条件,虽然具有挑战,但是研究结果更具有普遍意义,值得进一步深入研究.

参考文献

[1] Bierwirth C, Meisel F. A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container

- terminal[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 202(3): 615-627.
- [2] 周鹏飞, 康海贵. 面向随机环境的集装箱码头泊位 - 岸桥分配方法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2008, 28(1): 161-169.
- [3] Petering M E H. Effect of block width and storage yard layout on marine container terminal performance[J]. *Transportation Research E*, 2009, 45(4): 591-610.
- [4] Petering M E H. Decision support for yard capacity, fleet composition, truck substitutability, and scalability issues at seaport container terminals[J]. *Transportation Research Part E*, 2011, 47(1): 85-103.
- [5] Lai K K, Shin K. A study of container berth allocation[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1992, 26(1): 45-60.
- [6] 曾庆成, 胡祥培, 杨忠振. 集装箱码头泊位计划干扰恢复多目标模型 [J]. *管理工程学报*, 2013, 27(2): 154-159.
- [7] 刘敬贤, 李昌伟, 李伟. 基于排队论的锚地规模论证分析 [J]. *航海工程*, 2009, 38(4): 158-161.
- [8] Fan H S L, Cao J. Sea space capacity and operation strategy analysis system[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2000, 24 (1):49-63.
- [9] Bugarcic U, Petrovic D. Increasing the capacity of terminal for bulk cargo unloading[J]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2007, 15 (10): 1366-1381.
- [10] Huang S Y, Hsu W J, He Y X. Assessing capacity and improving utilization of anchorages[J]. *Transportation Research Part E*, 2011, 47(2): 216-227.
- [11] Dindar O, Vural A, Ali F A, Volkan A. An anchorage planning strategy with safety and utilization considerations[J]. *Computers & Operations Research*, 2015, 62(1): 12-22.
- [12] 周明星, 周志丹. 关于内河港口锚地建设规模的研究 [J]. *水运工程*, 1990(11): 20-27.
- [13] 沈俊华, 徐海燕, 蒋小丽. M/M/S 排队论模型的公用锚地设计应用 [J]. *海岸工程*, 2011, 30(1): 36-40.
- [14] 焦海贤, 郭新. 内河港口系统模拟模型研究 [J]. *中国管理科学*, 1993, 1(2): 39-48.

Allocation Strategy on Berth-Anchorage System for Container Terminal at the Upper Reaches of Yangtze River

LIU Ming-wu, FAN Wen-ping, WU Kai-lan

(School of Economics and Management, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: For the operating efficiency and the shipping safety caused by the demand growth of inland-river container transportation and the waterway constraints in the inland-river container transportation system, the optimal allocation strategies for the container berth-anchorage system at the upper reaches of Yangtze River are discussed. The steady-state probability distribution of the queue-length level and the average waiting queue-length are derived based on the vessel queuing and waiting service model for the berth-anchorage system. The allocation model on the berth-anchorage system is established and the corresponding optimal allocation strategies and the probability of overflowing anchorage are investigated through numerical experiments.

Keywords: Berth-anchorage system; container terminal; allocation strategy; the steady-state probability distribution