



合理确定港口锚地规模的仿真方法

刘春泽，郭享，商剑平，唐颖，张佰望
(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：合理确定港口锚地规模，有利于充分利用港航资源，避免投资浪费。针对当前确定锚地规模时未考虑多锚地和复杂航道网络、多码头多泊位、岸边装卸设备等影响因素的问题，开展了基于系统仿真的确定港口锚地合理规模的方法研究。采用构建系统仿真模型的方法，模拟“锚地-航道-泊位”系统的实际作业过程，统计锚地待泊船舶数量、船舶等待时间，确定合理锚地规模，并应用于国内某港锚地规模的确定。结果表明，锚地设计容量可以选用仿真统计得到的锚地最大等待船舶数，或持续时间比较长的锚地等待船舶数量。该方法能够为合理、科学地确定锚地规模提供支撑。

关键词：水路运输；锚地规模；离散事件仿真；待泊船舶数量

中图分类号：U268.6；U65

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)12-0046-06

Simulation method of reasonable determination of anchorage scale in port

LIU Chunze, GUO Xiang, SHANG Jianping, TANG Ying, ZHANG Baiwang
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Reasonable determination of the anchorage scale in port is beneficial to making full use of berth and channel resources and avoiding the waste of investment. At present, the study on the determination of the anchorage scale does not consider the influencing factors of multiple anchorages, complex channel networks, multiple wharfs and berths, and ship-to-shore handling equipment. Therefore, this paper proposes a method to determine the reasonable anchorage scale in port based on system simulation. By constructing a system simulation model, the paper simulates the actual operation process of the “anchorage-channel-berth” system, calculates the number of ships waiting to be berthed in the anchorage and waiting time, and determines the reasonable anchorage scale, which is applied to the determination of the anchorage scale in a Chinese port. The results show that the maximum number of ships waiting to be berthed in the anchorage or the number of ships waiting to be berthed in the anchorage with significant duration obtained from simulation statistics can be taken as the designed anchorage capacity. This method can provide support for the rational and scientific determination of the anchorage scale.

Keywords: waterway transportation; anchorage scale; discrete event simulation; number of ships to be berthed

港口锚地是港口发展的基础和重要保障性设施，在船舶安全营运和航运发展中起着至关重要的作用，直接影响港口经济效益、航道畅通和船舶通航安全^[1]。合理确定锚地规模有利于充分利用港航资源，避免投资浪费。此外，随着我国已建港口码头数量不断增加，规划新建码头及配套

航道、锚地的设计和施工越来越复杂，如已建码头类型、吨级、泊位数量各异，已建航道形成网络，已建锚地数量多且功能不同，锚地规模的确定受已建码头、航道和锚地的影响愈发明显。因此，有必要采用科学、有效的方法确定锚地规模。

收稿日期：2023-03-05

作者简介：刘春泽（1990—），男，硕士，高级工程师，从事水运工程系统仿真研究工作。

国内外学者对锚地规模开展了相关研究。邓斌^[2]利用蒙特卡洛算法对锚地容量进行了研究。刘敬贤等^[3]通过建立船舶离散状态下锚地与泊位之间的转移模型, 考虑船舶锚泊时间, 对到港船舶的排队概率和港口锚位数需求进行研究。Usui 等^[4]建立基于船员经验的锚地锚位数估算模型, 并与蒙特卡洛方法的锚地锚位数计算模型进行了比较。Arango 等^[5]基于最优化理论, 通过仿真模拟分析塞尔维亚内陆港口的分布和所需港口锚位数。Montewka 等^[6]通过对船舶到港过程建模, 提出锚地容量的计算方法。

上述研究奠定了良好的理论基础及探索, 但目前的研究未将锚地和复杂航道网络、多码头多泊位、岸边装卸设备作为一个整体系统进行考虑, 也未考虑这些因素对锚地规模确定的影响。因此, 本文采用系统仿真方法, 构建包括多锚地、网状航道、多港池的船舶航行和码头作业的港口航道系统仿真模型, 依托国内某港口工程, 模拟船舶到港和港口运行, 评价规划锚地使用情况, 为合理、科学地确定锚地规模提供支撑。

1 数学模型构建

合理确定锚地规模的核心是能够构建反映锚地船舶数的数学模型。在“锚地-航道-泊位”系统中, “航道-泊位”子系统是典型的多服务台的排队系统, 锚地作为缓冲来平衡船舶随机到达以及泊位服务时间随机造成的不平衡性。

1.1 船舶到港规律

船舶到港间隔服从二阶爱尔兰分布, 其概率密度函数 $p_a(t_1)$ 为:

$$p_a(t_1) = \frac{t_1}{\lambda_a^2} e^{-t_1/\lambda_a} \quad (1)$$

式中: t_1 为两船相继到达的时间间隔, λ_a 为平均间隔时间的 $1/2$ 。

1.2 泊位服务效率

船舶在泊位接受服务的时间服从三角分布, 其概率密度函数 $p_s(t_2)$ 为:

$$p_s(t_2) = \begin{cases} \frac{2(t_2-a)}{(b-a)(c-a)} & (a \leq t_2 \leq c) \\ \frac{2(b-t_2)}{(b-a)(b-c)} & (c \leq t_2 \leq b) \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_2 为船舶在泊位接受服务的时间, a 、 b 、 c 分别为船舶接受泊位服务时间的下限值、上限值和平均值。

1.3 船舶排队等待进港的数学模型

船舶到达港口时, 若锚地空闲, 则进入锚地待泊; 反之, 则在锚地外排队等待。

$$\begin{cases} N_{q,t} = 0 \text{ 且 } N_{q,t-1} + N_{ap,t} \leq N_A - N_{a,t} & (\text{锚地空闲时}) \\ N_{q,t} = N_{q,t-1} + N_{ap,t} - N_{aa,t} \\ N_A, N_{q,t}, N_{a,t}, N_{ap,t}, N_{aa,t} \geq 0 & (\text{排队等待时}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $N_{q,t}$ 为 t 时刻在锚地外排队等待进入锚地的船舶数; $N_{a,t}$ 为 t 时刻锚地中的船舶数; $N_{aa,t}$ 为 t 时刻进入锚地的船舶数; $N_{ap,t}$ 为 t 时刻到港船舶数, 且 $E(N_{ap}) = \frac{1}{2\lambda_a}$; N_A 为锚地规模。

1.4 锚地泊位系统的数学模型

到港船舶进入锚地的条件限制:

$$\begin{cases} 0 \leq N_{aa,t} \leq N_A - N_{a,t-1} + N_{ab,t} \\ 0 \leq N_{a,t} \leq N_A \end{cases} \quad (4)$$

式中: $N_{ab,t}$ 为 t 时刻进入泊位的船舶数, N_B 为泊位可靠泊船舶数, $N_{b,t}$ 为 t 时刻泊位中的船舶数, 因此有:

$$\begin{cases} 0 \leq N_{ab,t} \leq \min\{N_{a,t}, N_B - N_{b,t}\} \\ 0 \leq N_{b,t} \leq N_B \end{cases} \quad (5)$$

锚地船舶数随时间变化的规律为:

$$N_{a,t} = N_{a,t-1} + N_{aa,t} - N_{ab,t} \quad (6)$$

令 t 时刻离开泊位的船舶数为 $N_{lb,t}$, $0 \leq N_{lb,t} \leq N_{b,t-1} + N_{ab,t}$, 船舶在泊位的服务时间大于 0, 因此其等效条件为:

$$0 \leq N_{lb,t} \leq N_{b,t-1} \quad (7)$$

综上所述, 泊位船舶数随时间的变化规律为:

$$N_{b,t} = N_{b,t-1} + N_{ab,t} - N_{lb,t} \quad (8)$$

2 系统仿真模型构建

2.1 模型范围和边界

模型范围包括多锚地、成网航道、多港池、多泊位。模型的边界为锚地和泊位，船舶通过锚地进入，航行到泊位作业完成后，再返回锚地并离开。仿真模型见图 1。

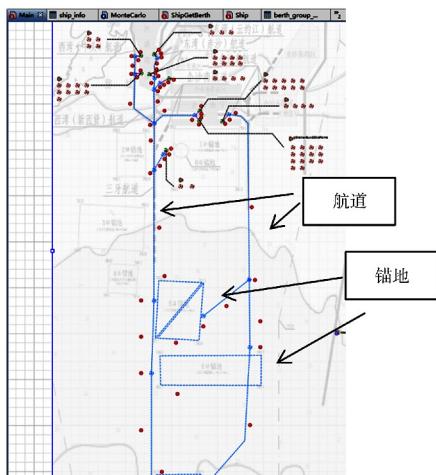


图 1 仿真模型

2.2 船舶进出港模拟算法

根据船舶实际进出港流程，船舶进出港航行前需进行若干条件的判断，包括空闲泊位吨级、潮位条件、夜航条件、航道单双向通航等是否满足通航的要求。算法流程见图 2。

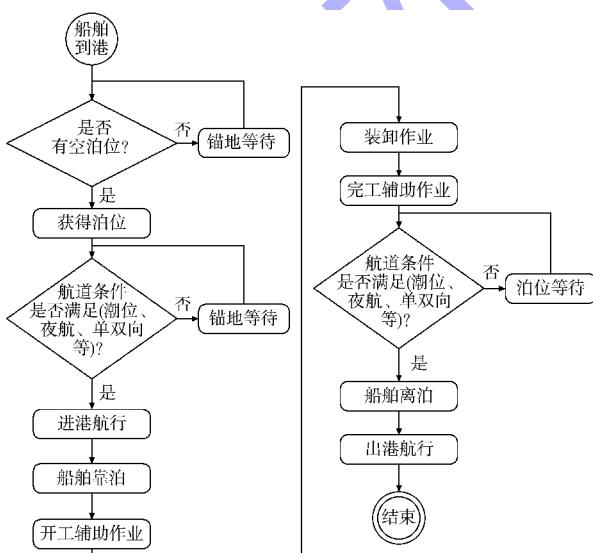


图 2 船舶进出港模拟算法流程

2.3 指定锚地规则

模型中划分为多块锚地，每块锚地停放相应吨级的船舶。模型中不限制锚地容量，通过统计运行时段内的最大待闸船舶，以及不同待闸船舶数的时间占比，分析确定合适的锚地容量。

2.4 指定泊位规则

泊位有类型和吨级两个属性，某泊位仅可用于停靠类型相同且不大于泊位吨级的船舶。例如 20 万吨级干散货船，可以停放在 30 万和 20 万吨级的干散货泊位，但不可以停靠在集装箱泊位。

泊位空闲就可以为船舶指定泊位，即认为船舶占用该泊位，即使船舶未到达，也不用于停泊其他船舶。船舶离开泊位就认定泊位空闲，可为其他船舶指定该泊位。

2.5 潮位变化模拟及乘潮条件判断

基于多年的历史统计数据模拟潮位变化，确定变化曲线，也可基于潮汐理论近似地用分潮叠加表示。考虑到某些港区历史统计数据不易获取，而分潮叠加的方式适用性更强，因此模型中采用后者进行模拟。基于调和分析的方法可对潮位进行分析预报，预报公式为：

$$\zeta_i = A_0 + H_i \cos(\sigma_i t - \theta_i) \quad (9)$$

式中： A_0 为多年平均海平面； H_i 为调和分析结果中的振幅； $\sigma_i = 2\pi/T = 2\pi f$ 为角频率，由各分潮频率 f 计算； t 为时间； θ_i 为分潮迟角。

乘潮的船舶有乘潮水位的要求。只有当船舶通过需乘潮航道段时，潮位均在乘潮水位以上，潮位条件才满足船舶通航要求。

2.6 统计指标

1) 码头完成吞吐量表示码头全年总的船舶装卸量，是评价码头能否满足港口运输需求的重要指标。

2) 在模型中分别统计锚地内等待的船舶数量为 1~8 艘以及 8 艘以上的累积时间。由于模型中不限制锚地容量，因此通过统计锚地使用情况、锚地最大船舶数，确定合适的锚地容量。

3) 锚地最大船舶数为模型运行时段内锚地中最大的船舶数。

4) 船舶平均等待时间包含船舶在锚地等泊位时间、进港等航道时间以及离港等待时间。等泊位时间为从船舶到达锚地至指派空闲泊位的等待时间。进港等航道时间为船舶进港时的等待航道时间。出港等待时间为船舶出港时的等待航道时间。

5) 泊位占用时间为船舶从进港航行开始到出港航行结束的时间。泊位占用率即为全年到港船舶泊位占用时间之和占年日历时间的百分比。当船舶离开泊位就认为泊位空闲, 可指派给其他待泊船舶使用。此时虽然被指派泊位的船舶可能还在锚地等待航道, 但仍认为泊位被占用。

3 工程应用

我国广西某港口工程在规划阶段对于锚地规模考虑不充分, 随着到港船舶特别是 30 万吨级船舶的逐渐增多, 锚地可能成为制约港口能力的瓶颈。而且该港口条件比较复杂, 包括多个作业区, 且各作业区码头泊位的类型、吨级、数量各不相同, 船舶进出港均需乘潮, 锚地数量多且功能定位各不相同。为确定锚地的合理规模, 可应用仿真建模方法, 结合工程实际情况, 分析不同到港船舶艘次和单船作业时间条件下对锚地规模的需求。

3.1 试验方案总体设计

经初步分析, 30 万吨级干散货船是影响锚地容量的主要船型。因此在 30 万吨级干散货船作业时间为 85 h 时, 考虑年到港船舶 50、60、70、80、90、100 艘共 6 组工况; 在该船型年到港 80 艘时, 考虑单船作业平均时间为 65、75、85、95、105 h 共 5 组工况。分别研究到港船舶数、单船作业时间对锚地容量的要求。

每组工况进行多组实验, 对各评价指标取平均值。实验共进行 334 d, 其中包括实验预热 30 d。

3.2 输入参数

3.2.1 泊位

年可作业天数按 304 d 考虑, 日作业小时数为 24 h。模型中的码头泊位吨级为 15 万、20 万和 30 万吨级。各作业区的码头类型、相应的泊位吨级及泊位数量见表 1。

表 1 泊位情况

作业区编号	码头类型	泊位吨级/万吨级	泊位数量/个
1	干散货	15	4
2	干散货	20	3
3	干散货	15 20	9 8
4	干散货	20	4
5	干散货	15 20 30	10 20 2
6	集装箱	15 20	2 2

3.2.2 航道及船舶乘潮

所有船舶均单向通航, 船舶在航道内匀速航行, 平均航速 10 kn, 船舶安全间距 1 nmile。船舶均可夜航。

船舶进出港均需要乘潮, 乘潮水位 2.93 m。由于分潮众多, 因此考虑其中 7 个主要分潮, 各分潮参数见表 2, 多年平均海平面取为 2.27 m。

表 2 7 个主要分潮参数 (95% 置信水平)

分潮名称	f	H_i	θ_i
Q_1	0.037 219	0.183 408	11.123 06
O_1	0.038 731	1.035 718	34.862 00
K_1	0.041 781	0.842 665	79.728 49
N_2	0.078 999	0.095 503	154.678 90
M_2	0.080 511	0.438 132	183.576 40
S_2	0.083 333	0.148 260	224.507 40
M_6	0.241 534	0.005 560	134.119 10

3.2.3 锚地

航道末端有 3 块锚地(图 3): 5# 锚地用于 15 万吨级船舶待泊; 6# 锚地用于 20 万吨级船舶待泊; 7# 锚地用于 30 万吨级船舶待泊。



图 3 锚地位置

3.2.4 船舶到达及作业

船舶到达规律满足二阶爱尔兰分布, 年平均船舶数及装卸量等信息见表 3, 各目的港的到港船舶分别生成且不相互影响。

各类型船舶作业时间(平均值)满足三角分布, 其平均值见表 4, 下限值为平均值的 80%, 上限值为平均值的 120%。

表 3 年船舶量

船舶种类	船舶吨级/ 万吨级	年船舶/艘					
		方案 1-1	方案 1-2	方案 1-3	方案 1-4	方案 1-5	方案 1-6
干散货船	15	450	450	450	450	450	450
	20	400	400	400	400	400	400
	30	50	60	70	80	90	100
集装箱船	15	200	200	200	200	200	200

表 4 船舶作业时间

船舶种类	船舶吨级/ 万吨级	靠泊时间/h	开工准备时间/h	装卸作业时间/h					完工准备时间/h	离泊时间/h
				方案 2-1	方案 2-2	方案 2-3	方案 2-4	方案 2-5		
干散货船	15	1.5	1.5	48	48	48	48	48	1.5	1.0
	20	2.0	1.5	52	52	52	52	52	1.5	1.0
	30	2.0	1.5	65	75	85	95	105	1.5	1.0
集装箱船	15	1.5	1.5	60	60	60	60	60	1.0	1.0

3.3 仿真结果及分析

当 30 万吨级干散货船作业时间为 85 h 时, 考

虑年到港船舶 50、60、70、80、90、100 艘共 6 组工况。由于各锚地相对独立, 重点对 7# 锚地

(30 万吨级船舶锚地) 进行分析, 结果见图 4a)。随着年到港船舶数的增加, 锚地内等待的船舶数量增加明显。锚地最大船舶数相应为 3、3、4、6、9 和 13 艘。

当 30 万吨级干散货船年到港 80 艘时, 考虑单船作业时间为 65、75、85、95、105 h 共 5 组工况, 结果见图 4b)。随着船舶单船作业时间增加, 锚地内等待的船舶数量也随之增加。最大船舶数分别为 4、5、5、6 和 10 艘。

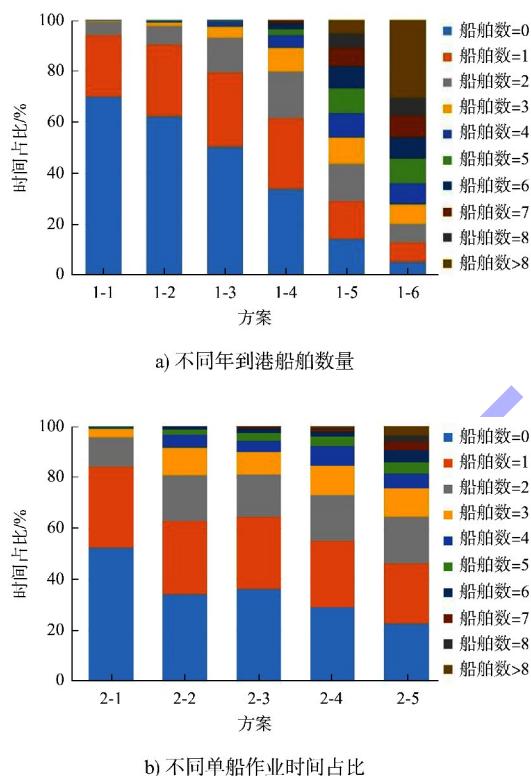


图 4 30 万吨级船舶不同工况时锚地船舶数量及时间占比

根据不同的设计条件, 以锚地最大船舶数作为锚地设计容量。统计得到各方案的锚地最大船舶数量并不大。如果锚地容量有限, 可以结合锚地船舶数量及时间占比做进一步分析。例如方案 1-4 的锚地最大船舶数为 6, 但锚地船舶数量大于 3 的时间占比不超过 5%, 因此可以考虑采用其他措施控制船舶到港, 并将锚地设计容量控制到 3 艘。但对于方案 1-6, 锚地船舶数量大于 8 的时间占比已经

超过 30%, 此时应将锚地最大船舶数作为锚地容量。

4 结论

1) 研究应用系统仿真方法, 通过构建系统仿真模型, 模拟“锚地-航道-泊位”系统的实际作业过程, 对复杂港航条件下的锚地合理规模进行研究, 并将该方法应用于国内某港。结果表明, 该方法可为合理、科学地确定锚地规模提供支撑。

2) 以仿真统计得到的锚地最大等待船舶数作为锚地设计容量。如果海域空间有限, 可以结合锚地内等待船舶数量及时间占比的统计数据, 将持续时间占比较大的锚地等待船舶数量作为设计容量, 并在港口运行时采用其他措施控制船舶到港。

参考文献:

- [1] 李晓磊. 长江下游港口锚地建设规模确定方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- [2] 邓斌. 基于蒙特卡洛算法的锚泊容量研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [3] 刘敬贤, 李昌伟, 刘文. 锚地泊位系统服务能力仿真[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36(2): 11-14.
- [4] USUI H, INOUE K. A method to estimate available number of anchorage[J]. The journal of Japan Institute of Navigation, 1999, 101: 151-160.
- [5] ARANGO C, CORTE P, ONIEVA L. Berth allocation planning in Seville inland port by simulation and optimization[J]. Advanced Engineering informatics, 2011, 25(3): 452-461.
- [6] MONTEWKA J, EHLLERS S, GOERLANDT F, et al. A framework for risk assessment for maritime transportation systems-A case study for open sea collisions involving RoPax vessels [J]. Reliability engineering & system safety, 2014, 124(4): 142-157.

(本文编辑 赵娟)