

基于排队论的锦州港锚地面积需求研究

赵磊¹, 邵国余², 吴鹏飞³, 杨超⁴

(渤海大学航运学院, 辽宁 锦州 121000)

摘要: 为科学规划锦州港锚地面积, 合理利用锚地资源, 以排队论理论为基础, 通过分析港口船舶类型及吨位情况, 划分港口泊位等级, 建立船舶-锚地-泊位排队论模型。利用 Matlab2015 计算程序, 分别计算出不同类型、等级泊位所需的锚位数及锚地面积需求, 分析表明锦州港现有锚地面积不足。文章根据进港船舶情况科学划分泊位等级, 求取不同类型泊位所需的锚地面积, 为锦州港锚地规划建设提供参考。

关键词: 锦州港; 锚地面积; 排队论; 锚位数

中图分类号: U651+.3

文献标识码: A

文章编号: 1006—7973 (2021) 12—0095—03

随着锦州港第四港池建设竣工, 港口规模进一步扩大, 船舶进出港数量将稳步增加, 而锚地容量在锚泊安全、港口运营等环节起到关键性作用, 合理的锚地容量将有助于港口的可持续发展^[1]。为了满足船舶锚泊需求, 保证锚泊安全, 合理利用海洋资源, 科学分析锦州港锚地面积需求势在必行。

1 锚泊船所需锚位面积

1.1 锚泊船所需理论水域半径

根据《海港总体设计规范》(JTS-2013) 规定, 可按式计算^[2]:

风级 ≤ 7 级时,

$$R = L + 3D + 90 \quad (1)$$

风级 > 7 级时,

$$R = L + 4D + 135 \quad (2)$$

R: 所需理论水域半径; L: 船舶长度; D: 锚位水深

1.2 锚泊船间所需安全距离

为保障船舶在锚泊船间安全航行, 锚泊船间需留有足够的安全距离, 根据井上欣三研究^[3], 两锚泊船间的安全距离与航行船和锚泊船船长有关。

1.2.1 两锚泊船间安全距离

两锚泊船之间的安全距离 Lab 按下式计算。

船型相同时

$$Lab = 2.91 \cdot Ln + 1.64 \cdot La + 5.0 \quad (3)$$

船型不同时

$$Lab = 2.92 \cdot Ln + 1.64 \cdot Lam + 0.89 \quad (4)$$

Lab: 两锚泊船间安全距离; Ln: 航行船船长;

La: 锚泊船船长; Lam: 锚泊船平均船长

1.2.2 三艘及以上锚泊船间的安全距离

为使航行船舶能够在锚泊船中安全航行, 三艘以上锚泊船舶之间的安全余量取 1.3 倍 Lab。

1.3 锚泊船实际占用的水域半径

本文假设锚泊船船型相同, 锚泊船实际占用的水域半径 R_a 可通过下式求取:

$$R_a = \max \left\{ R, \frac{1.3Lab}{2} \right\} \quad (5)$$

2 船舶-锚地-泊位排队论模型建立

船舶靠港过程可分为船舶到达、锚地等待、泊位服务三个阶段。结合排队论理论知识, 船舶可视为顾客、锚地视为排队容器、泊位视为服务窗口。建立排队系统模型时, 应考虑船舶到港的特性、船舶在锚地排队规则及泊位服务强度等因素。

2.1 船舶到港特性

由于船舶到达港口过程符合泊松分布特点, 根据泊松流的性质可知, 在时间间隔 t 内到达船舶数为 n 的概率可以表示为 $P_n(t)$, λ 船舶平均到港强度, 即单位时间内到港船舶的平均数量。

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}, (t > 0, n = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

2.2 锚地排队规则

锚地锚泊船等待靠泊的过程一般应遵循“先到先服务”原则^[4]。由于港口锚地功能分类不同, 船舶锚泊的位置不同, 船舶-锚地-泊位模型可理解为多队列多服务窗口的排队模型。为了研究问题方便, 假设锚地排

队容量是无限制的，建立 M/M/S 模型，如图 1 所示。

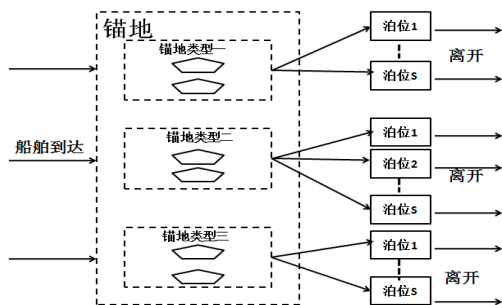


图 1 不同类型船舶锚地排队示意图

2.3 泊位服务强度

在计算不同等级船舶靠泊服务时间时，假定同吨位级别船舶靠泊同级别泊位，且同种类型泊位 S 之间服务相互独立，根据排队论理论可知，船舶到港过程服从泊松分布，船舶到达的强度为 λ ，泊位服务时间遵从负指数分布， μ 为单位时间内能被服务的船舶数，即平均服务率，则单个泊位服务强度 $\rho_i = \lambda/\mu$ ， $\rho = \lambda/S\mu$ ，当 $\rho < 1$ 时排队系统处于平稳状态，称为整个泊位系统服务强度^[5]。假设锚地空间与船舶来源不受限制，泊位服务遵从“先到先服务”原则，因此得到马尔科夫状态流，如图 2 所示。

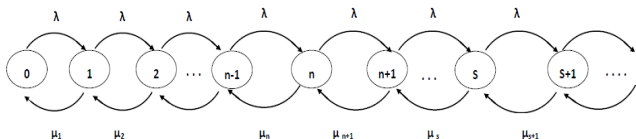


图 2 M/M/S 模型船舶状态流

(1) 当状态 $n(0 \leq n \leq S)$ 时，表示有 n 个泊位处于服务中， $S-n$ 为空闲泊位数量；

(2) 当状态 $n > S$ 时，表示 S 个泊位全部处于服务中， $n-S$ 艘船舶需在锚地等待靠泊。

当排队系统达到稳定后，分别求出在港有 n 艘船（包括港内和锚地）的概率 P_n 及所有泊位空闲的概率 P_0 ，进而求得平均等待的船舶数量。分布概率公式见 (7)、(8) 所示。

$$P_0 = \left[\sum_{n=0}^{s-1} \frac{1}{n!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n + \frac{1}{S!} \cdot \frac{1}{1-\rho} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s \right]^{-1} \quad (n=0,1,\dots,s-1) \quad (7)$$

$$P_n = \begin{cases} \frac{1}{n!} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & (n=1,2,\dots,S) \\ \frac{1}{S!S^{n-S}} \cdot \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n P_0 & n \geq S \end{cases} \quad (8)$$

2.4 锚位数计算

利用公式 (7)、(8)，分别输入 λ 、 μ 、 S 值，

求出在港有 n 条船的的概率 P_n ，由于在港 n 条船的概率和为 1，如公式 (9) 所示，则令 Q_n ，如公式 (10)

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1 \quad (9)$$

$$Q_n = \sum_{i=0}^n P_i \quad (10)$$

Q_n 表示在港出现 n 艘船的保证率，即港内有小于等于 n 艘船的概率之和，根据港口保证率要求（取 95%），计算 Q_n 大于等于保证率时的 n 值，则锚位数 A 由公式 (11) 求取

$$A = n - S \quad (11)$$

3 锦州港锚地面积需求

3.1 排队论模型参数确定

3.1.1 泊位作业天数

根据锦州海事局恶劣天气交通管理执行细则及辖区军事演习管理规定，2020 年因寒潮、大风封航 48 天、大雾封航 16 天，军事演习封航 6 天、港口年作业天数为 295 天。

3.1.2 泊位等级划分

港口实际运营中，到港船舶需要根据船舶类型、泊位吨级及空闲状态进行分配，本文依据规定船舶按照吨级靠泊相应泊位，泊位分级表见 3.2。

3.1.3 λ 和 μ 的确定

锦州港 2020 年进港船舶为 4430 艘次，港口泊位平均作业天数 295 天，根据对泊位等级的划分及分船种分吨级进港船舶统计数据得到不同船型、等级到港船舶数量，然后分别计算得到不同船型不同等级的船舶平均到达率 λ 。

泊位的平均服务率 μ 根据锦州海事局船舶靠离泊综合报告系统，分析不同船型、等级船舶靠泊时间，得到船舶停泊的平均时间，排队论模型参数见表 2。

表 1 锦州港排队论模型参数表

泊位种类	吨位级别	到港艘次	泊位数量	泊位平均作业天数 d	船舶平均到达率 λ	平均服务天数 d	平均服务率 μ
油品	< 1 万吨	530	3	295	1.796	0.82	1.219
	1-5 万吨	465	2	295	1.576	0.85	1.176
	> 5 万吨	27	1	295	0.091	0.78	1.282
液体化工	< 0.5 万吨	322	1	295	1.091	0.46	2.173
散杂	< 1 万吨	752	3	295	2.549	0.54	1.852
	1-5 万吨	1161	6	295	3.935	0.86	1.163
	> 5 万吨	27	3	295	0.091	0.95	1.052
集装箱	1-5 万吨	1146	4	295	3.884	0.65	1.538

3.2 计算程序设计

依排队论理论可知，计算锚位数需要泊位数 S 、船

舶到达率 λ ，泊位平均服务率 μ ，计算 P_0 、 P_n 、 Q_n 及满足靠泊保证率 Q_n 的在港船舶数 n ，利用公式 (2.6) 求锚位数。本文利用 Matlab2015b 编程，设计排队论港口锚位数计算程序。

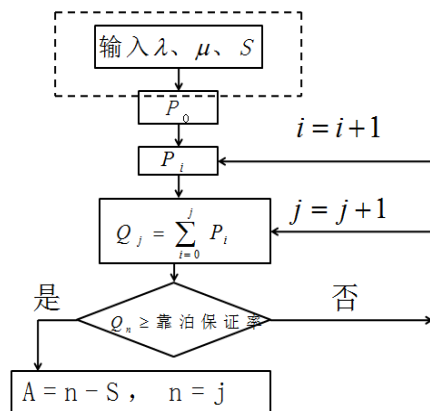


图3 计算程序流程图

3.3 锚位数计算

根据表1中参数，保证率(0.95)，应用 Matlab2015b 计算软件，计算过程如下：

- (1) 小于1万吨级油品船， $\lambda=1.796$ 、 $\mu=1.219$ 、 $S=3$ ， $A=5$ 。
- (2) 1-5万吨级油品船， $\lambda=1.576$ 、 $\mu=1.176$ 、 $S=2$ ， $A=6$ 。
- (3) 大于5万吨级油品船， $\lambda=0.091$ 、 $\mu=1.282$ 、 $S=1$ ， $A=1$ 。
- (4) 小于0.5万吨级液体化工， $\lambda=1.091$ 、 $\mu=2.173$ 、 $S=5$ 。
- (5) 小于1万吨级散杂， $\lambda=3.935$ 、 $\mu=1.852$ 、 $S=3$ 、 $A=6$ 。
- (6) 1-5万吨级通用散杂， $\lambda=2.549$ 、 $\mu=1.163$ 、 $S=6$ 、 $A=5$ 。
- (7) 大于5万吨级散杂， $\lambda=0.091$ 、 $\mu=1.052$ 、 $S=3$ 、 $A=0$ 。
- (8) 1-5万吨级集装箱船， $\lambda=3.884$ 、 $\mu=1.538$ 、 $S=4$ 、 $A=6$ 。

3.4 锚地面积需求

港口锚地面积根据锚泊船实用回转半径，在考虑不同类型和吨级的船舶所需锚位数的基础上，求取基本锚地面积；

$$S_b = n\pi Ra^2 \quad (12)$$

实际锚泊过程中，多数情况并不指定锚位，根据专

家研究结果^[6]基本锚地面积为实用锚地面的80%，油轮、散化船，锚地面积应再增加10%，则锚地实际需要面积为：

$$\text{普通船：} S_{pi} = S_b / 0.8 \quad (13)$$

$$\text{油轮、液化船：} S_{ls} = 1.1S_b / 0.8 \quad (14)$$

根据锚位数计算结果，考虑锚地水深及船型主尺度对应，以港口风力大于7级计算锚地面积需求，得到锦州港不同船型、不同吨级锚地面积需求，见表2。

表2 锦州港锚位数及锚地面积需求

泊位种类	吨位级别	泊位个数	所需锚位数	Ra (km)	实际需要面积 (km ²)
油品	小于1万吨	3	5	0.39	3.285
	1-5万吨	2	6	0.675	11.808
	>5万吨	1	1	0.675	1.968
液体化工	<0.5万吨	1	5	0.33	2.352
	<1万吨	3	6	0.405	3.864
通用散杂	1-5万吨	6	5	0.675	8.945
	>5万吨	3	0	0.675	0
集装箱	1-5万吨	4	6	0.89	18.662
合计		23	37		50.88

4 结论

本文应用排队论理论，建立船舶-锚地-泊位排队论模型，根据锦州港船舶交通流情况，计算锦州港不同类型、等级泊位所需锚位数及锚地面积需求。

(1) 锦州港总锚地面积需求为50.88 km²，其中油轮/液体化工类锚地需求19.42 km²，普通散杂、集装箱船锚地需求31.46 km²，现有锚地面积32.31 km²，锚地面积不足。

(2) 油轮、液体化工船锚地需求计算结果，可为危险品锚地规划提供参考，避免建设过量，浪费水域资源。

参考文献：

- [1] 赵磊. 锦州港锚地规划研究 [D]. 2019.
- [2] 交通运输部. 海港总体设计规范 JTS-2013[S].
- [3] 井上欣三. 对提高恶劣天气中锚泊安全性的研究 [J]. 中国航海, 1984, (2): 56-61
- [4] 魏兴龙, 李冬. 长江安徽段锚地需求预测研究 [J]. 中国水运, 2017, 04: 30-32.
- [5] 刘卫国. MATLAB 程序设计与应用 [M]. 北京, 高等教育出版社, 2006: 83-16.
- [6] 何易培. 锚地安全容量数量研究报告 [R]. 2007.

基金项目：渤海大学海洋研究院开放基金 (BDHYYJY2020009)。