



基于排队论的湛江港湾内锚地总体布局分析

李燊名

(广东航鑫工程勘察设计有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 针对湛江港湾内船舶密度大、种类多、大小各异以及锚位供不应求的情况, 为科学规划锚地, 通过实地调研湛江港湾锚泊需求和锚地运行状况, 在锚位等级划分的基础上, 利用排队论方法建立湛江港湾内最佳锚位数的计算模型, 并基于测算出的锚位需求提出近期和远期锚地规划方案。相比于不做锚位等级划分而单一计算锚位数的做法, 得出的湛江港湾内锚泊需求更符合实际, 锚地位置布局更合理、功能划分更完善、锚泊安全更有保障, 可以减少锚地过度建设造成的资金浪费, 具有显著的社会经济效益。

关键词: 锚位等级划分; 排队论; 锚位需求; 锚地规划

中图分类号: U651

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0056-06

Overall layout of anchorages within Zhanjiang harbor bay based on queuing theory

LI Shenming

(GuangdongHangxin Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: In response to the high density, various types and varying sizes of ships within Zhanjiang harbour bay, as well as the shortage of anchoring points, to scientifically plan the anchorage, on-site research is conducted on the anchorage demand and operation status of the Zhanjiang Port. Based on the classification of anchoring points, a calculation model is established to calculate the optimal number of anchoring points within Zhanjiang harbour bay using queuing theory, and based on the calculated anchorage demand, the short-term and long-term anchorage planning plans are proposed. Compared with the method of calculating the number of anchoring points without classifying the anchoring points, the anchoring requirements in Zhanjiang Harbor obtained in this paper are more in line with reality. The layout of the anchorage location is more reasonable, the functional division is more complete, and the anchoring safety is more guaranteed, which can reduce the waste of funds caused by excessive construction of the anchorage, and has significant social and economic benefits.

Keywords: classification of the anchorage; queuing theory; anchorage requirements; anchorage planning

随着湛江港大型化、专业化码头的加快建设, 湾内到港船舶大型化趋势加快, 加之 30 万吨级主航道改扩建工程的实施占用了部分锚地资源, 湛江港湾内锚地容量愈发不足^[1]。为适应湛江港湾内到港船舶数量的增加及船舶大型化, 采取增加锚地面积、合理布局锚地位置、细化锚地使用功能等措施有助于方便船舶候泊、防台, 从而提高船舶锚泊安全、进出港效率和保障港口业务持续

发展。

目前, 关于待泊锚位数量计算方法, JTS/T 165—2013《海港总体设计规范》^[2]和《海港工程设计手册》^[3]均提出锚地的规模可利用反映船舶到港规律的排队论方法进行计算。而在候潮锚位数量计算方面, 虽已有相关研究, 但目前尚无通用的权威计算方法, 如连石水等^[4]和 JTS/T 177—2013《海港锚地设计规范》^[5]均认为候潮锚位需求与潮汐特征、船舶

收稿日期: 2023-10-27

作者简介: 李燊名 (1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口、航道规划设计工作。

到港时间规律及航道管理等因素有关，且后者对港口资料或港口规划的详细程度有较高的要求。曾建峰等^[6]在条帚门外锚地工程设计中，通过预测每日乘潮到港船舶流量配置候潮锚位。此外，以上文献均未就一港船舶种类多且大小各异等情形先做锚位等级划分、再推算待泊和候潮锚位，导致这种单一计算锚位数的做法难以满足一港自身实际。

本文针对湛江港湾内船舶密度大、种类多、大小各异以及锚位供不应求的情况，实地调研湛江港锚泊需求和锚地运行状况后从湾内港区实际条件、锚地待泊和候潮功能出发，在锚位等级划分的基础上提出兼具待泊与候潮功能的锚地规划方案，旨在为类似锚地规划提供参考。

1 锚地现状与存在的问题

1.1 锚地现状

湛江港湾内现有锚地 32 处，其中万吨级及以上锚地 24 处、小型锚地 8 处，锚地总面积约 155.55 km²。主要锚地现状见表 1。

表 1 湛江港湾内锚地现状

锚地用途	数量/处	底高程/m
临时候泊锚地(1#~4#)	4	-10.2
防台锚地(5#~6#)	2	-18.0
油轮锚地(7#)	1	-10.2
引航锚地 1(北方锚地)	1	-11.0
引航锚地 2(13#~16#)	4	-13.0
引航锚地 3(龙腾引航锚地)	1	-21.0
3 万吨级以下船舶锚地(8#~10#)	3	-10.2
5 万吨级船舶锚地(11#~12#)	2	-13.0
10 万吨级船舶(过驳)锚地	1	-20.0
30 万吨级船舶(油轮过驳)锚地	1	-30.0
大型船舶待泊锚地(17#~20#)	4	-18.0
特呈岛千吨级油轮锚泊区	1	-6.0
南三河口南小型油轮锚泊区	1	-5.0
长桥(小型船舶)锚泊区	1	-6.0
200 净吨以下船舶(国轮)熏蒸锚泊区	1	-6.0
菜塘小型机动船锚泊区	1	-6.0
调顺岛南小型机动船锚泊区	1	-7.0
沙湾港小型机动船锚泊区	1	-7.0
渔业船舶锚泊区	1	-10.0
合计	32	-

1.2 锚地使用分析

目前，3#、4#锚地主要是满足 7 万吨级船舶进调顺岛港区候潮需要，但由于均在麻斜航道上，现已不能使用；湛江港 30 万吨级航道的拓宽造成 8#~11#锚地占用了主航道，且 12#锚地在航道线上，均已不能使用；17#、18#锚地占用主航道，19#、20#锚地位置不满足与安全航道的安全距离，造成以上锚地均难以正常使用。

1#、2#锚地平时不宜锚泊，且小船经常侵占该锚地，避风时也很难用得上；5#~7#锚位平时不宜锚泊，只在必要时且不影响其他船舶通航的情况下，供临时系锚用；此外，随着我国海防力量不断加强，湛江军港的军舰吨位也不断升级，军舰演习、避风等时常使用 13#~16#锚地，造成以上锚地均不能正常使用。

1.3 锚地存在的问题

湛江港湾内锚地存在的主要问题为锚地面积不足，不能满足船舶进港的需要；锚地功能与码头、航道等级不匹配，严重影响船舶进港的作业安全；锚地位置布局不合理，无法满足船舶避风需求和港口发展需要。

2 锚位需求预测

2.1 船舶流量预测

根据湛江港到港船舶种类、流量现状及发展趋势，结合到港船舶平均吨位情况，船舶装载率按 80% 计算，预测 2025 和 2035 年湛江港湾内到港船舶分别为 17 400 和 25 820 艘次。

2.2 锚位需求预测

2.2.1 船舶-锚地-泊位排队论模型

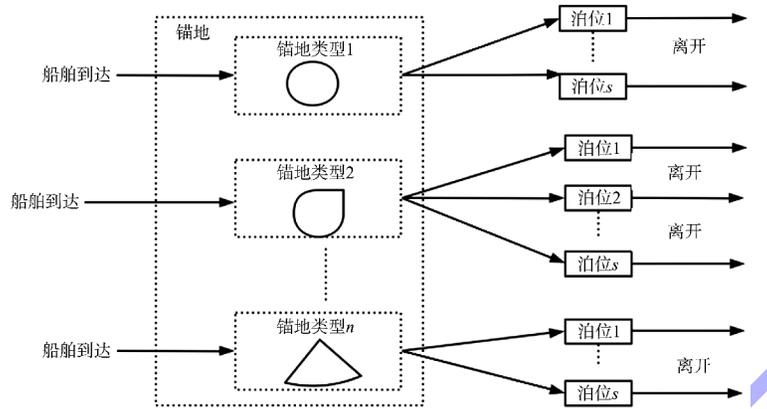
根据排队论理论，船舶靠港过程可分为到达、等待、泊位服务 3 个阶段。建立排队系统模型应考虑船舶到港特性、船舶排队规则及泊位服务强度等因素。

1) 船舶到港特性。经国内外大量资料证实，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 $P_n(t)$ 为：

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

式中： λ 为船舶平均到港强度，即单位时间内到港船舶的平均数量。

2) 锚地排队规则。锚地锚泊船等待靠泊的过



注：S 为同等泊位数量。

图1 M/M/S 模型

3) 泊位服务强度。在计算不同等级船舶靠泊服务时间时，假定同吨级船舶靠泊同级别泊位、同种类型泊位之间服务相互独立，船舶到达强度为 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，则单个泊位服务强度 $\alpha = \lambda/\mu$ ，当 $\alpha < 1$ 时排队系统处于平稳状态，称为整

程一般应遵循“先到先服务”原则。由于港口锚地功能分类和船舶锚泊位置不同，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。为研究方便，假设锚地排队容量是无限制的，建立船舶-锚地-泊位排队论(M/M/S)模型，见图1。

个泊位系统服务强度。假设锚地面积与船舶来源不受限制，泊位服务遵从“先到先服务”原则，得到马尔科夫状态流如图2所示。当 $0 \leq n \leq S$ 时，表示有 n 个泊位处于服务中， $S-n$ 为空闲泊位数量；当 $n > S$ 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。

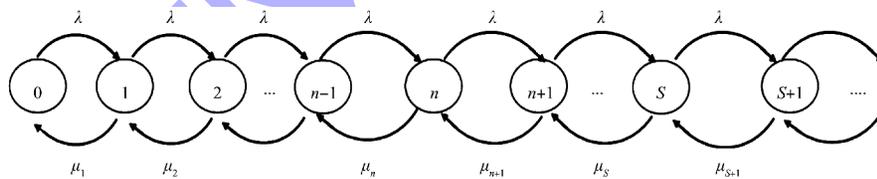


图2 M/M/S 模型船舶状态流

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 ，即可求得平均等待的船舶数量。

2.2.2 待泊锚地

根据《海港锚地设计规范》，锚位数可以根据港口的重要性，按在港船舶保证率 90%~99% 相应推算锚位数：

$$M_{\omega_2} = \omega_2 - S \quad (2)$$

$$Q_{\omega_2} = \sum_{n=0}^{\omega_2} P_n \quad (3)$$

$$\begin{cases} P_n = \frac{\alpha^n}{n!} P_0 & (1 \leq n < S) \\ P_n = \frac{\alpha^n}{S! S^{n-S}} P_0 & (n \geq S) \end{cases} \quad (4)$$

$$P_0 = \left[\sum_{j=0}^{S-1} \frac{\alpha^j}{j!} + \frac{\alpha^S}{S! (1-\alpha/S)} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中： M_{ω_2} 为待泊锚地锚位数； ω_2 为保证率为 90%~99% 时对应应在港船舶数量； S 为泊位数； Q_{ω_2} 为在港有 ω_2 艘船的保证率，即港内少于和等于 ω_2 艘船的概率之和，可取 90%~99%。

由于 25 万吨级散货船到港频次较小且仅 30~40 万吨级泊位能够接卸，其待泊锚位需求纳入 30~40 万吨级散货船待泊锚位需求统一考虑。根据 M/M/S 排队模型计算出湛江港湾内港区水域所需的锚位数，见表 2。

表 2 湛江港湾内待泊锚地锚位数预测

年份	船型	船舶吨级/ 万 DWT	规划泊位 数 S/个	船舶到港 艘次预测/ (艘·a ⁻¹)	保证率/ %	待泊锚地 位数预测 值 M _{ω₂} /个
2025	货船	25~30	3	268	91	14
		20	1	148	90	21
		12~15	2	484	90	24
		7~10	8	788	90	17
	1~5	31	3 182	90	0	
	危险品船	20~30	3	352	90	17
		12~15	1	216	90	14
		8~10	3	150	90	9
1~5		5	696	90	10	
2035	货船	25~40	8	308	96	0
		20	5	178	96	0
		12~15	3	594	90	19
		7~10	13	1 328	91	16
	1~5	91	4 886	99	0	
	危险品船	20~30	5	552	90	13
		12~15	1	280	91	13
		8~10	4	356	91	17
1~5		23	1 304	99	0	

2.2.3 候潮锚地

候潮锚地锚位数的确定应考虑潮汐特征、

航道乘潮保证率、航道管理、乘潮船舶数量及船舶到港时间规律等因素。乘潮船舶到港时间符合泊松分布，其锚位数为：

$$M_{\omega_1} = \omega_1 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad (6)$$

$$Q_{\omega_1} = \sum_{k=0}^{\omega_1} P_k \quad (7)$$

$$P_k = e^{-\gamma} \frac{\gamma^k}{k!} \quad (8)$$

式中：M_{ω₁} 为候潮锚地锚位数；ω₁ 为保证率为 90%~99% 时对应港乘潮船舶数量；ε₁ 为潮汐特征影响系数，ε₁ = t/24，t 为根据逐时潮汐数据统计分析得到保证率 90% 的连续不能乘潮进出港时间，当 t ≤ 24 h 时 ε₁ 取 1.0；ε₂ 为航道管理影响系数，允许夜间通航取 1.0，禁止夜间通航 ε₂ = 1 + 12/t，当 t ≤ 24 h 时 ε₂ 取 1.5；Q_{ω₁} 为在港有 ω₁ 艘乘潮船舶的保证率，即到港少于和等于 ω₁ 艘乘潮船舶的概率之和，可取 90%~99%；P_k 为在港有 k 艘乘潮船舶的状态概率；γ 为平均每天到达的乘潮船舶艘数，按乘潮船舶年运量、船舶的实际载货量、泊位年可营运天数等因素综合考虑。

根据湛江港湾内港区主航道规划指标，25~40 万吨级货运船舶和 30 万吨级危险品船舶进出主航道均考虑乘潮，因此需在口门处设置候潮锚地。基于近年进出港船舶艘次统计数据，预测候潮锚地数量见表 3。

表 3 湛江港湾内候潮锚地锚位数预测

年份	船型	船舶吨级/万 DWT	船舶到港艘次预测/(艘·a ⁻¹)	保证率/%	候潮锚地锚位数预测值 M _{ω₁} /个
2025	货船	25~40	268	99	3
	危险品船	30	352	99	4
2035	货船	25~40	308	98	3
	危险品船	30	552	99	5

2.2.4 锚位数综合配置

在待泊锚位与候潮锚位计算中，到港船舶规律均遵循泊松分布，且船舶到港(在港)保证率均

大于 90%，因此在保证率相当的情况下，锚位数应取待泊锚位数与候潮锚位数之间的大值，即 max(M_{ω₁}, M_{ω₂})。锚位数综合配置结果见表 4。

表4 湛江港湾内船舶待泊、候潮锚地锚位数综合配置结果

年份	船舶种类	船舶吨级/ 万 DWT	待泊锚位数 M_{ω_2}	候潮锚位数 M_{ω_1}	锚位数综合配置结果 /个
2025	货船	25~40	14	3	14
		20	21	-	21
		12~15	24	-	24
		7~10	17	-	17
		1~5	0	-	0
	危险品船	20~30	17	4	17
		12~15	14	-	14
		8~10	9	-	9
		1~5	10	-	10
		2035	货船	25~40	0
20	0			-	0
12~15	19			-	19
7~10	16			-	16
1~5	0			-	0
危险品船	20~30		13	5	13
	12~15		13	-	13
	8~10		17	-	17
	1~5		0	-	0

3 锚地布局规划

3.1 锚地水域要求与锚泊方式选择

锚地水域要求避风条件较好、水深适宜、地形和底质良好、水流较缓、回旋余地大、锚地周边有显著物标、锚地与航道和码头的距离安全。

根据水域实际情况,考虑湛江港湾内港区的进出港船型和吨位大小,为确保锚泊安全,本次锚地布局规划优先考虑采用单锚泊系泊方式,当水域面积小或受限时宜采用双浮筒系泊方式。

3.2 锚地规划

3.2.1 规划原则

针对湛江港湾内港区实际情况,锚地布局规划首先要方便船舶进出港和管理;其次,根据港口规划建设情况、港口功能布局和到港船舶性质,统筹船舶锚泊与通航的关系,布设与之相应的功能锚地;再次,根据是否需要设置专属锚地,如外轮检疫锚地、专用锚地(尤其是油品、液体化工品、LNG 船舶锚地),应考虑该锚地与其他锚地之间的安全距离;最后,如有条件,还应合理布设足够的避风锚地和应急锚地。

3.2.2 现有锚地处理方案

1) 湾内 1[#]~20[#]锚地占用了主航道,平时不再锚泊,只在恶劣天气下供临时避风使用。2) 湾内 8 处小型锚地继续使用。3) 北方锚地继续使用。4) 龙腾引航锚地位于原 30 万吨级主航道起点处,航道改扩建后航道起点向外侧延伸约 9.2 km,予以取消。5) 10 万吨级船舶(过驳)锚地调整为大型货运船舶锚地,主要供 20 万吨级货运船舶检疫、待泊、过驳使用;30 万吨级船舶(油轮过驳)锚地调整为超大型危险品船舶锚地,主要供 15~30 万吨级船舶检疫、待泊、候潮、过驳使用。

3.2.3 规划锚地及分期实施情况

结合湛江港锚地的实际情况和湾内的自然条件,本规划锚地近期(2030年前)着重解决大中型船舶锚泊的待泊、应急的迫切要求;远期(2030年后)规划将湾内可用建设锚地全部开发,最大程度为港口生产服务^[7]。湛江港湾内锚地规划与分期实施情况见表 5。

表5 湛江港湾内锚地布局规划与分期实施情况

锚地编号	水深/m	面积/km ²	用途	分期实施情况	备注
1 [#]	10.5	1.29	万吨级危险品船舶待泊	近期	采用单浮筒系泊方式
2 [#]	18.0	0.57	7 万吨级通用泊位船舶检疫抽样	近期	附近多养殖区,需测定养殖范围
3 [#]	28.0	1.31	30 万~40 万吨级船舶应急,兼 5 万吨级船舶待泊	近期	附近多养殖区,需测定养殖范围
4 [#]	16.0	0.54	5 万吨级危险品船舶待泊	近期	存在硬底,建议进行岩土地质勘察
5 [#]	11.0	1.24	万吨级及以下通用货船待泊	近期	拓展原第二引航锚地水域范围
6 [#]	16.0	0.41	5 万吨级货船应急、待泊	远期	采用单浮筒系泊,结合宝满港区以及东海岛港区建设同步实施

