

· 信息技术 ·



基于多种排挡策略的船闸 通过能力仿真研究

李泳龙, 吴礼国, 周定科

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 传统船闸通过能力的计算基于简单手工排挡得到的主观结果, 不能反映船舶随机到闸的动态过程, 也未体现出船闸的服务水平。为了全面反映并合理评估船舶随机到闸和船闸运行调度对通过能力的影响, 开展船闸通过能力仿真研究。根据航道内船型的比例自动生成船舶随机到达过程, 采用最优配比排挡策略和顺序服务排挡策略进行调度, 运用两个经典的运筹学模型(二维装箱问题和背包问题)进行过闸船舶的组合和一次过闸总吨位的计算。以此理论为支撑开发了船闸通过能力仿真计算软件, 可较好地弥补现有计算方法的不足。

关键词: 船闸通过能力; 排挡策略; 仿真计算

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S1-0119-06

Simulation on ship lock capacity based on multiple gear shifting strategies

LI Yong-long, WU Li-guo, ZHOU Ding-ke

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd, Chengdu 610017, China)

Abstract: The traditional calculation of ship lock capacity is based on the subjective result of simple manual permutation, which cannot reflect the dynamic process of ships arriving at the lock at random, nor does it reflect the service level of the ship lock. To comprehensively reflect and reasonably evaluate the impact of random arrival of ships and operation scheduling of ship lock capacity, this paper carries out a simulation study on the ship lock capacity. The ship random arrival process is automatic generated according to the proportion of ship types in the channel. Scheduling by the optimal matching permutation strategy and sequential service permutation strategy is carried out. Two classical operational research models(two-dimensional packing problem and knapsack problem) are used to calculate the combination of passing ships and the gross tonnage of one-time passing. Based on this theory, a simulation calculation software for the ship lock capacity is developed, which can better make up for the shortcomings of the existing calculation methods.

Keywords: ship lock capacity; gear shifting strategy; simulation calculation

船闸通过能力是确定船闸规模的关键指标, 船闸尺度的论证通常以设计水平年内各时期的通过能力满足预测过闸客货运量的需求为主要准则。现行 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[1]根据一次过闸平均质量、一次平均过闸时间、日

平均过闸次数、年通航时间、船舶平均装载系数和船闸运行不均衡系数等因素综合确定船闸通过能力, 公式结构简单、考虑因素比较全面。但在实践应用中, 简单的手工排挡存在主观性, 不能反映船舶随机到达船闸的动态过程, 也未体现出

船闸的服务水平，可能导致计算结果与实际情况偏差较大。近年来，随着内河航运发展和科学技术手段进步，仿真技术在船闸通过能力分析应用中取得了系列成果^[2-6]，但限于问题的复杂性，对于船闸运营因素和规范要求的适应性仍有待完善。本文根据航道内船型的比例自动生成船舶随机到达过程，结合最优配比排挡策略和顺序服务排挡策略进行调度，运用两个经典的运筹学模型（二维装箱问题和背包问题）进行过闸船舶的组合和一次过闸总吨位的计算，并以此理论为支撑开发了船闸通过能力仿真计算软件，可较好地弥补现有计算方法的不足。

船闸通过能力的研究往往需要各通航河流和船闸的实际运行数据作为支撑，在规划设计阶段缺乏相关资料时，可根据随机过程理论初步假定船舶相继独立到达船闸的间隔时间服从负指数分布。船闸通过能力仿真研究的关键问题还是在等待过闸船舶集合中按照排挡策略确定过闸船舶的组合，并求取一次过闸总吨位。

1 一次过闸总质量的计算

1.1 二维装箱问题

装箱问题是复杂的离散组合最优化问题，经典的装箱问题要求把一定数量的物品放入容量相同的一些箱子中，使得每个箱子中的物品大小之和不超过箱子容量并使所用的箱子数目最少。

船闸过闸问题可近似为：给定等待过闸船舶集合和无数个相同尺度的闸室，要求等待过闸船舶均装入闸室中，而使用的闸室数量（过闸次数）最少。等待过闸的船舶编号为 $i (i=1, 2, \dots, n)$ ，穷举可一次过闸的船舶组合编号为 $j (j=1, 2, \dots, m)$ ，定义 a_{ij} ：当过闸船舶 i 属于过闸组合 j 时 $a_{ij}=1$ ，反之 $a_{ij}=0$ ；定义 x_j ：当船舶组合允许过闸时 $x_j=1$ ，反之 $x_j=0$ ；求解 x_j 算术和的最小值，即最少过闸次数，对应的数学模型如下：

目标函数：

$$\min \sum_{j=1}^m x_j \quad (1)$$

约束条件：

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^m a_{ij}x_j = 1 & (i = 1, 2, \dots, m) \\ x_j \in \{0, 1\} & (j = 1, 2, \dots, m) \end{cases} \quad (2)$$

但船闸过闸问题并不完全等同于二维装箱问题，因为等待过闸船舶集合是一个关联船舶随机到闸的动态集合，求解模型需要一个生成列的动态规划方法，即背包问题。

1.2 背包问题

背包问题属于二维装箱问题的子问题，背包问题描述为：给定一定数量的物品和一个背包，设计一个动态规划算法选择装入背包的物品，对每种物品只有两种选择，即是否装入背包，使得装入背包的物品的总价值最大，对应船舶过闸问题的目标就是一次过闸总吨位最大。等待过闸的船舶按船型尺度分类编号为 $i (i=1, 2, \dots, n)$ ， x_i 为第 i 种船型一次过闸的数量， $L_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为各船型的船长，闸室总长度为 L ，过闸吨位 $W_i(x_i)$ 为各船型过闸数量的函数，对应的数学模型如下：

目标函数：

$$\max f = \sum_{i=1}^n W_i(x_i) \quad (3)$$

约束条件：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n w_i L_i \leq L \\ x_i \geq 0 \quad x_i \in N \quad (i = 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (4)$$

采用背包问题首先求解闸室内第 1 排过闸船舶的组合，再根据闸室剩余空间求解第 2 排过闸船舶的组合，循环求解直至整个闸室完全排满，最终确定满足一次过闸总吨位最大的过闸船舶组合。

2 过闸船舶的组合策略

2.1 最优配比策略

忽略船舶到达船闸的次序和船舶等待过闸的时间, 在所有等待过闸的船舶中挑选出一次过闸总吨位最大的组合安排过闸。循环过闸时不考虑船舶过闸服务体验, 仅以本次过闸的最大吨位为目标, 在最优配比排挡策略下, 船闸仿真通过能力在所有仿真排挡策略中最大。

2.2 顺序服务策略

按照船舶到达船闸的次序进行排挡, 当某一艘船舶无法编排进入闸室内时, 该闸次的排挡计算结束, 不考虑编排后续到达的船舶。循环过闸时不考虑一次过闸总吨位最大, 仅以船舶到达时间前后为标准, 按照公平原则依次排队入闸。在顺序服务排挡策略下, 船闸仿真一次过闸平均质量一定小于最优配比策略。

3 船闸通过能力仿真计算软件

为了全面反映和合理评估船舶随机到闸和船闸运行调度对通过能力的影响, 笔者开发了一套船闸通过能力仿真计算软件。其基本设计思路是: 根据航道内船型的比例自动生成船舶随机到达过程, 按照排挡策略进行过闸船舶的组合, 仿真计算一次过闸总质量、单向年过闸货运量等通过能力指标以及船舶等待过闸时间等服务水平指标。仿真计算程序实现技术路线为:

- 1) 以一次过闸时间作为固定周期, 根据船舶到达船闸的间隔时间期望值, 生成船舶到闸时间序列 T_n 。

- 2) 根据航道内船型的比例分配确定每艘船舶的船型, 生成到达船闸的船舶序列 D_n 。

- 3) 第 n 次过闸时等待过闸船舶集合 P_n 即为第

n 次过闸作业时段内到达船闸的船舶序列 D_n 与第 $n-1$ 次过闸后剩余等待过闸船舶集合 S_{n-1} 之和, $P_n = S_{n-1} + D_n$ 。

- 4) 从第 n 次过闸时等待过闸船舶集合 P_n 中按照排挡策略选择本次过闸船舶的组合 G_n 。

- 5) 计算仿真计算一次过闸总吨位、单向年过闸货运量等通过能力指标以及船舶等待过闸时间等服务水平指标。

- 6) 第 n 次过闸后剩余等待过闸船舶集合 S_n 即为第 n 次过闸时等待过闸船舶集合 P_n 减去第 n 次过闸船舶的组合 G_n , $S_n = P_n - G_n$ 。

- 7) 根据仿真流程, 循环迭代进行下一闸次的计算, 直到实现收敛或达到最大循环次数。

4 仿真应用分析

4.1 嘉陵江各梯级单向过闸货运量

嘉陵江是全国第 1 条实施全江梯级渠化的高等级航道, 梯级规划见图 1, 各梯级通航建筑物见表 1。目前规划的 18 个梯级中除水东坝和井口暂未建设外, 各个梯级均按照Ⅳ级标准建设了通航建筑物, 已实现跨省全线梯级建筑物过闸联合调度, 嘉陵江航运将迎来复苏到发展的时期。

嘉陵江川境段亭子口以下各梯级的船闸闸室平面尺度均为 $120 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ (长 \times 宽), 门槛水深不小于 3.0 m 。针对嘉陵江川境段亭子口以下通航建筑物特定尺度开展通过能力仿真计算应用, 并与传统方法计算成果进行对比。

传统船闸通过能力的计算一般采用船队排列法, 即按照各吨级设计船型尺度在闸室内能基本排满为目标, 给出几类排挡方案, 并取平均值作为一次过闸平均吨位。



图 1 嘉陵江航运梯级规划

表 1 嘉陵江渠化工程通航建筑物

名称	正常蓄水位/m	回水里程/km	通航建筑物尺度/(m×m×m)	设计通过能力/万 t	建成年份
上石盘	472.5	15.0	120×12×2.5	109.0	在建
水东坝	458.0	21.5	120×12×3.0	202.0	规划
亭子口	458.0	150.0	110×11.7×2.0	338.5	2016
苍溪	373.0	11.8	120×16×3.0	376.0	2013
沙溪	364.0	21.0	120×16×3.0	319.0	2011
金银台	352.0	23.0	120×16×3.0	240.0	2007
红岩子	336.0	29.9	120×16×3.0	228.9	2002
新政	324.0	37.0	120×16×3.0	223.9	2008
金溪	310.0	41.0	120×16×3.0	222.3	2008
马回	292.5	36.0	120×16×3.0	196.0	1992
凤仪	280.0	24.0	120×16×3.0	368.0	2010
小龙门	269.3	20.0	120×16×3.0	350.0	2009

续表1

名称	正常蓄水位/m	回水里程/km	通航建筑物尺度/(m×m×m)	设计通过能力/万t	建成年份
青居	262.5	23.0	120×16×3.0	154.0	2008
东西关	248.5	50.0	120×16×3.0	222.5	2000
桐子壕	224.0	40.0	120×16×3.0	198.0	2004
利泽	213.0	30.4	180×23×3.5	988.0	在建
草街	203.0	72.0	180×23×3.5	1 049.0	2008
井口	177.5	38.5	180×23×4.2	1 640.0	规划

以现有已建成船闸尺度为标准, 分别使用船队排列法和计算机仿真法计算嘉陵江各梯级单向过闸货运量, 结果见表2。

表 2 传统方法计算各船闸通过能力 万t

船闸	船队排列法		最优配比策略仿真		顺序服务策略仿真	
	近期	远期	近期	远期	近期	远期
苍溪	193	430	230	437	204	416
沙溪	196	435	229	441	204	422
金银台	158	351	166	345	160	333
红岩子	199	441	228	464	208	430
新政	190	423	234	437	202	409
金溪	192	427	234	438	200	409
马回	167	370	186	346	168	347
凤仪	165	366	186	349	170	347
小龙门	190	423	209	436	196	409
青居	190	392	185	408	183	378
东西关	181	401	209	409	187	385
桐子壕	194	430	227	438	199	416

各船闸仿真通过能力略小于船队排列法通过能力, 最优配比仿真通过能力约为船队排列法的 89.4%、顺序服务仿真通过能力约为船队排列法的 70.6%。这是船舶排队过闸必然引起的现象。

即船舶按照某一种规律到闸, 而船闸又按照另一种规律提供放行服务, 这样一方面出现船舶过闸延误, 另一方面形成闸室面积利用不足、降低船闸通过能力。

4.2 不同排挡策略近远期对比分析

不同船闸排挡策略具有不同的运营特性, 同时决定了枢纽通航设备的服务水平和使用效率。最优配比排挡策略是以船闸管理者身份为出发点, 希望船闸在相同时间内通过最大吨位的船舶, 最大限度提高船闸的使用效率和经济效益。在这种排挡策略下, 船闸通过能力得到充分挖潜提效, 但其服务水平将会严重下滑。顺序服务排挡策略则是以船员身份为出发点, 希望各船舶能够按照先到先过闸的基本规则有序进行过闸作业, 并不关心船闸的经济效益和船闸能力紧张与否。在这种排挡策略下, 虽然船闸服务公平, 但是通过能力将大大降低, 造成能力紧张。

以双向过闸方式下的近期两种排挡策略为分析对象, 两种排挡策略下的单向年过闸船舶总吨位和单向年过闸船舶总货运量对比见图 2、3。

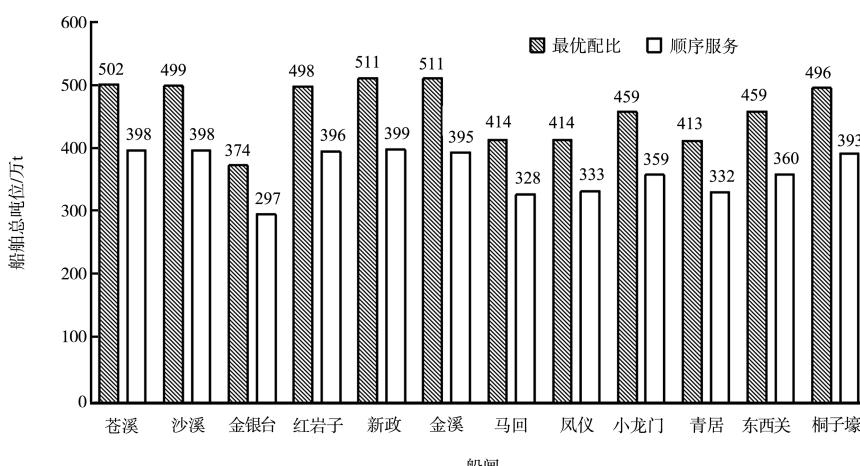


图 2 两种排挡策略下的近期单向年过闸船舶总吨位

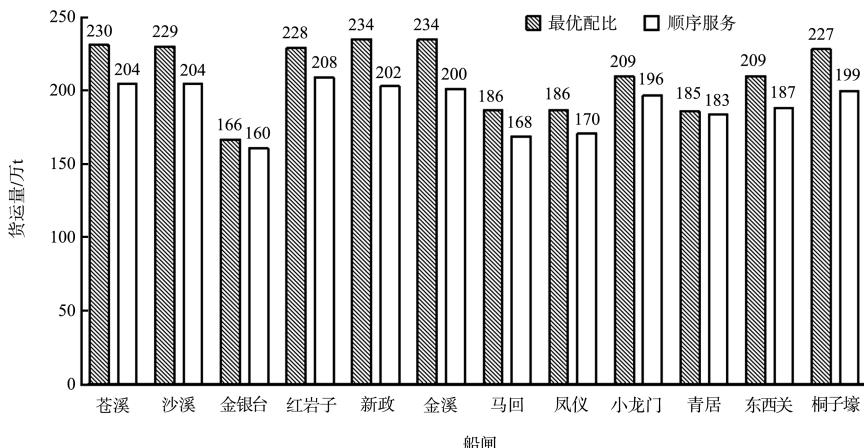


图 3 两种排挡策略下的近期单向年过闸货运量

在相同作业时间标准和技术条件下，采用最优配比策略约可提高年过船能力 14%；在装载系数较小却运量不均衡系数较大情况下，通过最优配比策略提高的过船能力并没有有效转变成过货能力。因此，在能力较为富裕时，可采用顺序服务策略提高船闸服务水平；在能力十分紧张情况下，宜采用最优配比策略，尽可能提高船闸通过能力；当能力处于中间水平时，可将顺序服务和最优配比两种策略相结合，既能提高船闸通过能力，同时也能提升船闸服务水平，兼顾各方利益要求。

4.3 同一排挡策略近远期对比分析

在同一排挡策略中，近远期船闸通过能力有所不同，须对近期和远期的通过能力进行对比分析，得出不同时期通过能力差异的影响因素，为船闸通过能力提升得出建议。最优配比排挡策略下的各船闸近、远期通过能力见表 3。

表 3 最优配比策略下近、远期能力 万 t/a

船闸	单向年过闸船舶总吨位		单向年过闸货运量	
	近期	远期	近期	远期
苍溪	502	699	230	437
沙溪	499	705	229	441
金银台	374	562	166	345
红岩子	498	739	228	464
新政	511	701	234	437
金溪	511	704	234	438
马回	414	563	186	346
凤仪	414	567	186	349

续表3

船闸	单向年过闸船舶总吨位		单向年过闸货运量	
	近期	远期	近期	远期
小龙门	459	699	209	436
青居	413	655	185	408
东西关	459	656	209	409
桐子壕	496	701	227	438

单向年过闸船舶总吨位远期约为近期的 1.4 倍，单向年过闸货运量远期约为近期的 1.9 倍，日工作时间是近、远期影响通过能力差异的主要因素。其次，随着航运的发展，船舶装载系数和运量不均衡系数逐年提升也间接增加了船闸通过能力。除此之外，船型尺度、比例与船闸尺度的匹配度也对通过能力造成一定影响。

5 结论

1) 船舶到达的时间间隔和船型均为随机因数，采用仿真研究可弥补规范计算方法的不足，可较全面地反映和预估不同条件下船闸的运行状况及对通过能力的影响。

2) 采用最优配比和顺序服务策略船闸仿真通过能力约分别为船舶排列法的 89.4% 和 70.6%，这是船舶排队过闸的真实反映。

3) 最优配比排挡策略较顺序服务排挡策略通过能力更大，但该策略下船舶平均待闸时间长。日常船闸运营过程中可将两种策略相结合，兼顾船闸通过能力和服务水平。

(下转第 137 页)