



基于动态二叉树的西江航运干线 多梯级船闸链调度

王 勇

(广西壮族自治区港航发展中心, 广西 南宁 530029)

摘要: 针对西江航运船闸调度以经验管理为主、缺乏有效定量分析现状, 提出了基于船闸拥堵系数、船舶日积压损失、航道安全水位各要素于一体的西江航运干线多梯级船闸联合调度链。基于西江航运干线天然的叶脉状分布特点, 提出了动态二叉树模型的王西多梯级船闸链的调度算法。结果表明: 通过对船舶的合理分流, 能够有效缓解船闸滞航减少事故发生率。其模型已应用于航运管理部门, 有效地优化了船闸链调度、保障了航运物资安全。

关键词: 水路运输; 船闸链调度; 动态二叉树; 西江航运干线; 多梯级船闸

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0159-05

Multi-step ship locks chain scheduling of the Xijiang River shipping line based on dynamic binary tree

WANG Yong

(Port and Waterway Development Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530029, China)

Abstract: Since the scheduling of the Xijiang River navigation ship locks is mainly based on experience management and lack of effective quantitative analysis, a multi-stage ship locks joint scheduling chain of the Xijiang River shipping line is proposed based on the factors of lock congestion coefficient, daily ship overstock loss, and channel safe water level. Based on the natural leaf vein distribution characteristics of the Xijiang River shipping line, a dynamic binary tree model of the Xijiang River multi-stage ship locks chain is proposed. The results show that the reasonable diversion of ships can effectively alleviate the lock stagnation and reduce the accident rate. The model has been applied to the shipping management department to effectively optimize the lock chain scheduling and ensure the safety of shipping materials.

Keywords: waterway transportation; ship locks chain scheduling; dynamic binary tree; the Xijiang River shipping line; multi-stage ship locks

西江黄金水道是广西、云南、贵州通往粤港澳的唯一水运通道, 但西江黄金水道多梯级多线船闸却面临诸多亟需解决的技术问题。自 2007 年 3 月以来, 每年都存在滞航现象, 最长滞航时间为 130 d/a, 单日滞航船舶曾高达 1 534 艘、滞留船员近万名、延绵十几公里。目前, 航运管理部门主要以经验管理和定性分析为主。确立西江黄金

水道上下游锚地船舶停靠数、港口船舶出港数、整个西江流域船闸链的放行数, 可以为航运管理部门提供定量依据和决策支持, 具有重要的理论意义和实用价值。

在梯级枢纽多线船闸联合调度问题上, 王小平等^[1]主要依托三峡-葛洲坝水利枢纽的整体通过能力开展研究, 设计了基于串联排队网络的船

船编排算法, 而研究西江干线船闸链的调度问题较少甚至没有; Carroll J. L.^[2] 主要构建仿真模型研究内河航道交通系统的运营特征, 并将其应用于在伊利诺伊水道和密西西比河上; Adhikari G. 等^[3] 采用敏感性分析对俄亥俄河内河航运系统能力进行评价。国内外学者^[4] 对船闸调度问题的研究按照优化方向可分为闸室利用率最大化、等待时间最小化及综合评价 3 种, 针对船舶积压多梯级多线船闸联合调度问题国内相关研究较少。

1 西江干线多梯级模型

目前, 西江有长洲、桂平、贵港、西津、邕

宁、老口、金鸡、鱼梁、那吉、东笋、先锋、大藤峡、红花、桥巩等 14 座船闸。长洲船闸^[5] 为四线船闸, 一、二线船闸闸室有效尺度分别为 200 m×34 m×4.5 m(长度×宽度×门槛水深) 和 185 m×23 m×3.5 m, 设计单向年通过能力均为 4 012 万 t; 三、四线船闸闸室有效尺度为 330 m×34 m×5.8 m, 设计单向年通过能力均为 3 100 万 t。桂平船闸为二线船闸, 一、二线船闸闸室有效尺度为 190 m×23 m×3.5 m 和 280 m×34 m×5.6 m, 设计单向年通过能力分别为 1 100 万 t 和 1 700 万 t。贵港、西津、红花二线船闸正在建设, 有南宁港、贵港港、柳州港、来宾港、崇左港、百色港等 6 个主要内河港口。西江主要船闸和港口见图 1。

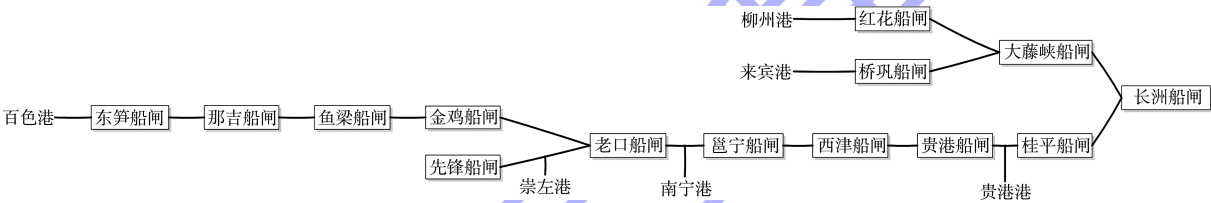


图 1 西江主要船闸和港口

模型以西江航运干线船闸、港口为控制节点, 以船舶为调度主体, 通过分析船闸、港口、在行船舶的实际情况, 结合各船闸的通过能力、船舶日积压损失, 科学计算出各船闸、港口的放行量, 其中, 模型求解算法仅对下行计算实现。结合数据结构二叉树构建思想, 将整个西江流域船闸抽象为一棵动态的二叉树, 并将长洲船闸抽象成二叉树的根节点, 由其逐层向子节点进行推算, 直至叶子, 生成预放行方案, 再根据船舶动态调整再次生成放行方案, 多次循环, 直至次优或最优。

2 调度模型算法与分析

在调度模型中需要求出各船闸的放行量。传统算法通过船闸的设计通过能力来折算各船闸的放行量, 仅考虑标准船舶的有效转化, 而未考虑西江船型的多样化及小型化。通过分析 2017-01-01—2020-04-30 的实际通过船舶数, 测算出船闸通过能力。港口作为控制节点, 可分为港口管制和自由放行两种方式, 传统管理以港口签证作为

港口船舶出港的管控方式, 但随着管理机构职能的改变, 不再以港口管制为研究对象, 仅以自由放行为主要研究状态, 通过对船舶的日积压损失来确定船舶是否离港。

2.1 船闸拥堵系数

对整个船闸链进行拥堵分析, 任何一个船闸的拥堵都能导致整个船闸链的拥堵, 在此须确定产生拥堵的船闸, 通过拥堵系数的排序来确定各船闸的拥堵程度及拥堵的实际位置。

引入拥堵系数 λ_n (其中 n 根据从下游至上游依次取 1,2,3,...):

$$\lambda_n = \frac{W_n}{\sum_t \sum_j \sum_i CP_{ijt}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

式中: W_n 为枢纽船闸上游的滞留船舶数; CP_{ijt} 为船闸第 i 线船闸、第 j 次、第 t 天的放行量; T 为放行总天数(d); k 为每天放行总次数; m 为船闸线数。

对船闸拥堵系数进行降序排列:

$$\mathbf{A}=\text{sort}([\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\cdots,\lambda_n],\text{'ascend'}) \tag{2}$$

根据船闸链中的拥堵系数的降序排列可以确定各船闸的拥堵程度，拥堵系数 $\lambda_n>1$ 说明出现了拥堵， λ_n 值越大说明拥堵越严重。从式(2)的降序排列中选出最大值，即为拥堵最严重的船闸，选取拥堵系数最大的船闸进行分析。

2.2 分析拥堵系数最大的船闸

各船闸的放行是一个动态量，对单个船闸而言，其流入和流出量见图 2，且满足： $\lambda_{\text{流入量}}+\lambda_{\text{待闸量}}+\lambda_{\text{船闸过闸量}}\leqslant\lambda_{\text{流出量}}$ (非拥堵状态)。

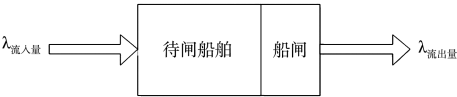


图 2 船闸船舶流入流出量

长洲四线船闸是国内设计和调度最复杂的船闸之一，它作为西江干线的主要瓶颈，是堵船事件发生最严重、发生频率最高的船闸。本文以长洲船闸为代表进行研究，其他船闸的分析依次类推。长洲船闸流入流出量需满足：

$$\sum_t^T\sum_j^k\sum_i^4CP_{ijt}\geqslant\sum_t^T\sum_j^m\sum_i^2GP_{ijt}+$$

$$\sum_t^T\sum_j^nDP_{jt}+\sum_t^T\sum_i^2PP_{it}+W_n \tag{3}$$

且满足 $CP_{ijt}\leqslant\lambda_{\max} \tag{4}$

式中： λ_{\max} 为船闸最大通过能力； CP_{ijt} 为长洲船闸第*i*线船闸、第*j*次、第*t*天的放行量(四线船闸)； GP_{ijt} 为桂平船闸第*i*线船闸、第*j*次、第*t*天的放行量(二线船闸)； DP_{jt} 为大藤峡船闸第*j*次、第*t*天的放行量(一线船闸)； PP_{it} 为大藤峡船闸至长洲船闸之间和桂平船闸与长洲船闸之间码头的船舶数； W_n 为长洲船闸上游的滞留船舶数。该模型为多元一次方程，故存在多组可行解。

为确立船闸的通过能力，国内大多数学者通过闸室利用率最大生成闸室排档方案。该方法充分考虑了单个闸室的利用率，但忽略了船舶先到先过的调度原则，即船舶到达的无序性。本文以数理统计的方法来确定船闸的通过能力。

对长洲船闸一至四线船闸自 2017-01-01—2020-04-30 的调度数据进行分析，见图 3、4，此处省略长洲船闸二线至四线的下行闸数和单日常开闸数(数据来源于广西船舶过闸联合调度系统)，可求得各线船闸的 λ_{\max} 值。

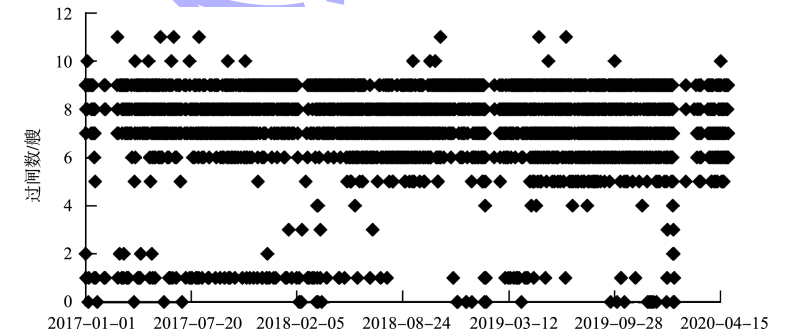


图 3 长洲一线船闸单次船舶下行过闸数

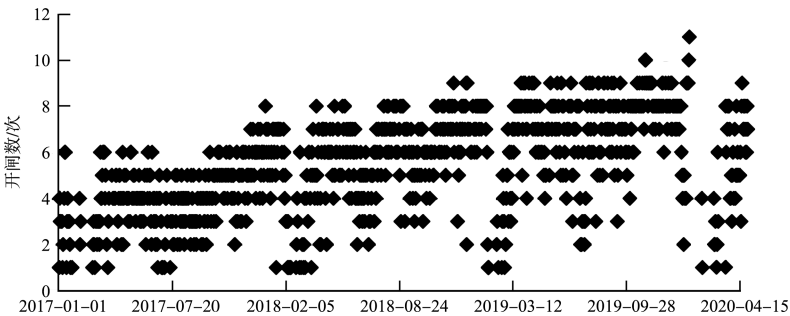


图 4 长洲一线船闸单日常开闸数

2.3 船舶日积压损失分析

当拥堵系统 λ_n 大于等于某个阈值时，表示其拥堵程度达到一定程度，船舶会根据其拥堵程度来确定是否离港，本文以船舶日积压损失 E 作为船舶是否出港的判定条件。其函数表达式为：

$$E=\frac{\frac{C_c}{m}+w+C_a}{T}+GP$$

(5)

式中： C_c 为船舶投资成本(万元)； m 为船舶使用年限(a)； w 为船员年工资(万元)； T 为船舶年运营时间(d)； C_a 为船舶其他固定成本，包括修理、保险、物料、管理费等； G 为船舶滞留燃油消耗量(t/d)； P 为燃油价格(万元/ t)；

对西江船型(西江干线主要以货船为主)进行统计分析，根据式(5)，通过测算可得各船型的日均直接损失值，见表1。

表 1 西江船型滞留日均直接损失值

干散货船型	投资成本/万元	使用年限 (按三类船舶)/a	船员年工资/元	船舶年运营时间/d	其他固定成本/万元	滞留燃油消耗 (按 6~8kW)/ ($t \cdot d^{-1}$)	燃油价格/ (元· t^{-1})	日均直接损失值/元
500 吨级(载质量 400~749 t)	60.95	31	54 000×3	336	2.30	0.013	5 500	680.60
1 000 吨级(载质量 750~1 249 t)	166.33	31	57 600×3	336	2.30	0.014	5 500	819.40
1 500 吨级(载质量 1 250~1 749 t)	248.33	31	60 000×3	336	2.40	0.015	5 500	928.00
2 000 吨级(载质量 1 750~2 499 t)	396.97	31	66 000×3	336	2.50	0.016	5 500	1 132.80
3 000 吨级(载质量 2 500~3 499 t)	573.00	31	72 000×3	336	2.50	0.016	5 500	1 355.40

注：信息来源于西江航运网船舶实际交易价，且船龄为 0~2 a 的干散货船为主要研究对象，选取 2020 年 4—5 月的最新交易数据。

船舶的有效配载量，不仅取决于船舶的载质量，同时应考虑航道的水位影响，在此需要对航道水位和船舶吃水进行分析。

2.4 航道水位和船舶吃水量

要确保航道的安全畅通，船舶是主要考虑因素，而船舶的载质量完全取决于航道水位、船闸的拥堵情况，涉及到船闸的检修及航道的水位，如果水位低于临界值，则会导致船舶搁浅、船闸关闭，也将导致拥堵。因此，须考虑各港口船舶配载吃水问题，其解决方式主要是取船舶经过的水域航道水位的最小值。

航道水深由经过该航道内最浅水位所决定，因此有：

$$H_{\min}=\min \left\{ H_1,H_2,H_3,\cdots,H_n \right\}$$

(6)

式中： $H_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为经过船闸需要经过的水域(因西江干线基本渠化,故以两个船闸之间的航段作为一个水域)。

由于航道水位数据具有趋势性和周期性，一些非稳定的时间序列模型适用于航道水位数据的分析。本文不以水位数据预测作为研究的重点，在

此考虑 3 a 一遇的水位最低数据，选取 3 a 数据作为数理统计(数据来源于广西船舶过闸联合调度系统 2017-04-30—2020-04-30)，可预测出船舶所经过区域的最低水位，即可求出 H_{\min} 。因此船舶配载最大吃水为：

$$\max T_i=H_{\min}-\alpha$$

(7)

式中： α 为安全系数。

通过数理统计的方式对问题进行必要的求解，实际上，西江航运干线已经逐步采用了自动水位仪，可逐步减少大量的数理值的预测，保证水位的准确性和及时性，便于根据船舶的载质量进行安全配载。

结合船舶吃水量，经过数据对比，按式(7)要求确定各船舶的配载系数(为便于计算选取1 500 t 以上配载系数为 0.816)。综合考虑物资情况、运输距离、季节等因素，除去固定成本(运价参照西江航运网 2020 年的运价)经过加权后取 5 元/ t 作为利润参考值，通过计算可得西江过闸代表船型最多滞留时间，见表2。

表 2 西江过闸代表船型最多滞留时间

船型	利润/元	日损失/元	最多滞留时间/d
500 吨级机动货船	4 119. 50	680. 60	6. 05
1 000 吨级机动货船	6 869. 50	819. 40	8. 38
1 500 吨级机动货船	9 619. 50	928. 00	10. 36
2 000 吨级机动货船	13 744. 50	1 132. 80	12. 13
3 000 吨级机动货船	19 244. 50	1 355. 40	14. 20

3 动态二叉树模型的建立及求解

本文以拥堵情况为研究对象，通过统计分析，结合长洲船闸下行过闸数和单日常行开闸数确定 λ_{\max} ，并结合在行船舶情况，反推上游船闸、船闸间的港口船舶量，根据船舶日积压损失由船主自动确定离港还是待港(在此约定,自起始港至目的港总共耽误的时间超过表 2 中各代表船型的最多滞留时间时,即认定其日积压损失过大,船主选择待港)，从贵港、大藤峡，上推直至红花、桥巩、鱼梁、先锋等船闸。

推算规则：采用分层推算的模式，即：根据父节点通过能力、任务量、待闸情况推算子节点分配量。以长洲船闸为例，需推算大藤峡、桂平两船闸、大藤峡与长洲、桂平与长洲间港口的船舶离港数。并逐层推算直至上游终叶子节点。上述过程，只在船闸出现堵航现象时才自动计算。具体计算过程如下：如果船闸 n 的 W_n 突破预先设定的拥堵系数 $\lambda_n > 1$ ，(此处拥堵系数的选择需要根据上游锚地的船舶停靠能力来确定)，则反推直至叶节点。推算要求船闸 n 的各子节点船闸、流域内港口、在行船舶放行满足：

$$\lambda_n \sum_t \sum_j^k \sum_i^4 CP_{ijt} = \sum_t \sum_j^m \sum_i^2 (GP_{ijt} R_m) + \sum_t \sum_j^n (DP_{jt} R_n) + \sum_t \sum_i^2 PP_{it} \cdot \left(\frac{1}{0} \right) + W_n \quad (8)$$

式中： R_m 、 R_n 为放行权重，船舶出港选择 1，不出港选择 0。

每一个船闸的放行量还受权重比例限制，放行权重划分规则：船闸放行权重(R_m, R_n)按照动态划分方式计算得出。要求直接子节点的权重总值和为 1，其间，船闸放行权重分配按照如下方法计算：船闸 i 上游船闸 $i-1$ 放行权重(R_m, R_n) (注：此处上游有两个船闸)，根据集装箱、危化品、军工、农产品优先保障运输的原则，制定上游船闸

$i-1$ 货运级别，以历史基础信息为支撑，采用层次分析法，确定货物权重等级，同时船舶配载最大吃水必须满足式(8)。

根据船闸单次船舶下行过闸数、船闸单日常行开闸数以及船舶报闸数(数据主要来源于广西船舶过闸联合调度系统)，通过仿真分析可生成西江船闸的调度方案、放行方案。以长洲船闸为例，方案见表 3。

表 3 长洲船闸下行拥堵调度方案、放行方案

闸室编号	放行方向	日开闸数/次	单闸放行量/艘	下行放行量/艘
1 线船闸	下行	10	10	100
2 线船闸	下行	13	7	91
3 线船闸	下行	12	18	216
4 线船闸	下行	12	18	216
小计				623

由式(8)可得：

$$\sum_t \sum_j^m \sum_i^2 (GP_{ijt} R_m) + \sum_t \sum_j^n (DP_{jt} R_n) + \sum_t \sum_i^2 PP_{it} \cdot \left(\frac{1}{0} \right) = 626\lambda_n - W_n \quad (9)$$

为便于计算，假定 $\lambda_n=2$ ， $W_n=626$ ， $\sum_t \sum_i^2 PP_{it} = 0$ ，对于上游大藤峡船闸和桂平船闸，通过其过闸船舶的统计，测算出两个船闸的比例系数。按计算，可得出大藤峡船闸的调度能力为 215 艘，桂平船闸为 411 艘，以大藤峡枢纽船闸的 $\lambda_{\max} = 215$ ，继续按计算方法递推至红花船闸和桥巩船闸形成调度，以桂平船闸的 $\lambda_{\max} = 411$ ，继续重复计算递推至贵港船闸，由贵港船闸生成的调度量，递推至西津船闸，生成西津船闸的调度量，依此类推，直至形成整个西江所有船闸的调度量为止。

4 结论

1) 针对西江多梯级船闸链调度缺乏定量分析方法的问题，在保证整个调度区段内各船闸间相对独立的航道中航行密度负载平衡，确保各船闸待闸压力均衡条件下，构建了基于船闸、港口、航道各关键要素于一体的多梯级船闸调度链，提出基于动态二叉树模型的水江多梯级船闸链的调度模型及算法。
(下转第 190 页)