

闸室船舶组合优化动态模型

丰 玮¹ 吴凤平² 张玉韬²

(1. 江苏省交通厅航道局, 江苏 南京 210004; 2. 河海大学商学院, 江苏 南京 210098)

摘要 基于心理学理论, 对待闸船舶提出了极限等待时间的概念. 提出将船舶按照特大型、大型、中型、小型设立排队队列, 并基于 0-1 规划建立闸室船舶组合优化动态模型. 以泰州船闸某一天上行过闸为例, 应用闸室船舶组合优化动态模型对其进行优化调度. 结果表明, 优化后总闸次数、平均每闸吨位、船舶平均待闸时间、平均闸室利用率等指标比优化前均有了不同程度的改善.

关键词 闸室; 船舶组合; 0-1 规划; 动态模型

中图分类号 U697 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2006)06-0697-04

随着我国经济的快速发展, 许多内河船闸的通过量已大大超过船闸设计通过能力. 目前解决船闸拥挤状况的途径有 2 条: 一是粗放型外张方式, 通过建设复线船闸甚至三线船闸增加船闸规模来增加过闸船舶的数量; 二是集约型内张方式, 即通过加强对船闸运行调度的管理, 提高船闸的运行效率, 以达到减少船舶待闸时间、增加过闸船舶数量的目的. 由于第一种方式不仅投资巨大, 而且将占用大量的土地资源, 因此, 目前多采用第二种方式. 确定闸室船舶组合优化方案是实现船闸优化运行调度的关键环节.

国内外已有许多关于船闸运调体系的研究. Kim 等^[1]提出了用于船只调度的一般性 Packing 集合模型方法. Kjetil^[2]研究了一个可以认作具有时间窗口的多船只目标传递的实时船舶调度问题. 卢方勇等^[3]提出了将船只归类并运用计算机对过闸船只进行编排的方法. 周剑等^[4]提出了基于经典 Best fit 算法的安排闸次和调度船舶的数学模型. 杜经农等^[5-6]讨论了多个并联船闸的智能调度问题, 并在优化软件的支持下, 编排了船闸运行的 24 h 调度总体计划, 已在三峡工程进行试验运行. 毛筱菲等^[7]以闸室面积利用率最大、船舶总体待闸时间最短等为准则, 建立分时段多目标优化的动态规划模型. 但堂咏等^[8]对京杭大运河苏北段连续梯级船闸排队系统的营运调度方案进行了分析计算. 目前, 国外在船闸运行管理上, 已基本形成船型、船闸和航道协调发展的模式, 而国内对闸室船舶组合优化尚未形成成熟的方法, 主要还是依靠船闸管理人员的经验进行调度安排.

本文在分析待闸船舶排队规则的基础上, 基于心理学理论, 提出限时服务方式, 并构建了闸室船舶组合优化动态模型. 其基本思路是: 在提出每一闸室的组合方案后, 根据船舶到达情况, 立即对当前排队等候的船舶集合进行“动态”调整. 根据调整后新的排队等候的船舶集合提出下一闸室组合优化方案. 简言之, 动态模型是按闸次进行优化的.

1 船舶排队规则设计

在船闸运行调度管理过程中, 当船舶到达船闸不能及时通过时, 就可能形成船舶排队等候过闸的现象. 因此, 必须预先设定好排队规则.

1.1 船舶排队队列设计

由于船舶有大小的差别, 因此其对闸室面积的占用程度也有所不同. 本文在详细分析江苏泰州、江阴、泗阳等船闸待闸船舶的基本尺寸基础上, 将船舶按宽度分为 4 类, 即要求到达远调站的船舶按照这 4 种类型分别排队: 小型船舶(记为 X); 中型船舶(记为 Z); 大型船舶(记为 D); 特大船舶(记为 T). 这 4 种类型船舶的具体尺寸可根据具体船闸分别确定(以下简称“4 种不同船型”).

1.2 船舶过闸顺序设计

- a. 先到先服务方式.对排队队列中的一般船舶,依照‘先到先服务’的原则听候调度过闸.
 - b. 优先服务方式.对符合优先过闸条件的船舶,按照‘优先服务’的原则提前调度过闸,如在苏北运河上的电煤船舶享有优先过闸的权利.
 - c. 单独服务方式.对符合单独过闸条件的船舶,按照‘单独服务’的原则单独过闸,如在苏北运河上的危险品船舶基本实行单独过闸.
 - d. 限时服务方式.确定各种船型能够忍耐的‘极限等待时间’,一旦船舶的等待时间超过最大待闸时间,就必须安排船舶尽快过闸.
- 上述前 3 种方式都是传统的方式,比较容易理解,对于第 4 种方式,可通过心理学的知识予以解释.心理学的研究成果表明,无所事事的等待、过程前过程后的等待、焦虑的等待等感觉等待时间会更长.船舶在过闸过程中,船民基本处于无所事事的等待、过程前(过闸前)的等待、焦虑的等待,这就会使船民处于极度烦躁的状态,轻者可能导致船民不听从指挥,船舶不能按照要求停靠在指定位置,重者可能发生船民强行要求过闸,导致船舶调度混乱,甚至引发交通事故或斗殴事件.设立极限等待时间后,船民对排队待闸的认知就有了心理预期,因此,船民就会比较满意.对于不同的船闸,由于到闸船舶的规律、密度不同以及平均待闸时间历史数据的差异,使极限等待时间不尽相同,对于船舶到达密度比较大的船闸、历史上平均待闸时间比较长的船闸,到达船舶的极限等待时间则相对较长.

2 模型构建

为尽可能提高闸室面积利用率,需要针对当前船舶的排队状况,对闸室的船舶进行优化组合.可采用以下基本步骤确定优化组合方式:

- a. 确定等待过闸的船舶组合.记当前特大型、大型、中型、小型 4 种不同船型队列中排列的船舶数目分别为 $\{b_T, b_D, b_Z, b_X\}$,根据船闸的长和宽,并考虑安全船舶间距,预先确定闸室船舶的可行组合方式,称之为可行方案集.记可行方案集中的方案数量共有 n 种,其中第 i 种包含 4 种不同船型的船舶数量分别是 $\{b_{iT}, b_{iD}, b_{iZ}, b_{iX}\}$,闸室利用率(即船舶总面积与闸室面积之比)为 $r_i, i = 1, 2, \dots, n$.
- b. (a)判断是否有船舶需单独放行.“是”则按实际情况选择闸次,单独放行;否”则转(b)(b)判断当前队列中是否有符合优先放行条件的.“有”则记优先放行 4 种不同船型船舶的数量分别为 $\{b_{优T}, b_{优D}, b_{优Z}, b_{优X}\}$ (c)判断当前等待队列中是否有船舶等待时间超过“极限等待时间”的.“有”则记超过“极限等待时间”的 4 种不同船型船舶数量分别为 $\{b_{极T}, b_{极D}, b_{极Z}, b_{极X}\}$ (d)将 $\{b_{优T}, b_{优D}, b_{优Z}, b_{优X}\}, \{b_{极T}, b_{极D}, b_{极Z}, b_{极X}\}$ 计入待放行队伍集合.
- c. 建立如下线性规划模型,选择最优闸室船舶组合方式:

$$\max P = \sum_{i=1}^n r_i y_i$$
$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n y_i b_{ij} \geq (b_{优j} + b_{极j}) \alpha_j \\ \sum_{i=1}^n y_i b_{ij} \leq b_j \\ \sum_{i=1}^n y_i = 1 \\ y_i = 0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \quad \begin{matrix} (j \text{ 分别表示 } T, D, Z, X \text{ 4 种船型}) \\ (i = 1, 2, \dots, n) \end{matrix}$$

此模型为一线性规划模型,可直接利用 DSS/OR 软件进行求解.为简化模型,可先取 $\alpha_T = \alpha_D = \alpha_Z = \alpha_X = 1$ 进行运算,可能有以下两种情形:

- 情形一 模型已获得最优解,转步骤 d.
- 情形二 模型无可行解,则取 $\alpha'_j = k\alpha_j$,这里 j 分别表示 T, D, Z, X 4 种船型, $0 < k < 1$.修改该模型,重新求解.重复这一过程,直至模型存在可行解.

- d. 在 $\{y_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 中有唯一的值 1, 设 $y_k = 1$, 则选择第 k 种组合方式, 即过闸船舶安排 4 种船型分别为 $\{b_{kT}, b_{kD}, b_{kZ}, b_{kX}\}$.
- e. 记在过闸时间内新来的船舶数为 $\{n_T, n_D, n_Z, n_X\}$, 离去的船舶数为 $\{m_T, m_D, m_Z, m_X\}$, 重新统计排列各类型船队中船舶的数目: $b'_T = b_T + n_T - m_T$; $b'_D = b_D + n_D - m_D$; $b'_Z = b_Z + n_Z - m_Z$; $b'_X = b_X + n_X - m_X$, 将船队中各类船舶的数目进行修改, 转步骤 b.

3 实例分析

以泰州船闸为例, 应用闸室船舶组合优化动态模型对其进行优化调度.

3.1 船闸基本情况

泰州船闸建于 1953 年, 是苏北水运干线——建口线上的重要过船建筑物. 船闸北为鲁汀河, 可直通苏北里下河地区, 南接南官河由口岸出长江, 是苏北里下河地区与苏南、上海及外省的水上交通枢纽, 也是江苏省较为繁忙的中型船闸. 原闸室长 80 m, 宽 10 m, 扩建部分闸室长 107.5 m, 宽 12 m, 设计通过能力 400 万 t. 随机抽取泰州船闸 2003 年 9 月 15 日的资料, 经统计, 该日上行船舶 103 艘(船队 13 艘, 单船 90 艘), 总吨位 24 743 t. 实际共安排 26 闸次, 每闸平均吨位 952.0 t, 船舶平均待闸时间 154.7 min, 平均闸室利用率 49.3%. 现利用上述模型对该日上行船舶进行优化以确定各闸次的船舶组合.

3.2 确定相关参数

- a. 4 种不同船型的尺寸. 规定小型船舶宽度 $W \leq 5$ m, 中型船舶 $5 \text{ m} < W \leq 6$ m, 大型船舶 $6 \text{ m} < W \leq 7$ m, 特大船舶 $W > 7$ m.
- b. 确定可行方案集. 根据泰州船闸的尺寸, 确定可行方案共 63 种.
- c. 确定极限等待时间. 根据泰州船闸的繁忙程度, 确定上下船舶一般船队极限等待时间不超过 8 h; 单船极限等待时间不超过 4 h.
- d. 在模型中, 取 $k = 0.9$.

3.3 船舶组合优化结果分析

根据基础资料, 针对每一闸次建立优化模型, 从可行方案集中选出满意方案, 结果见表 1.

由表 1 可知, 优化后总闸次数为 25 闸次, 比优化前减少 1 个闸次, 优化后平均每闸吨位为 989.7 t, 船舶平均待闸时间为 130.2 min, 平均闸室利用率为 51.27%. 这些指标比优化前均有了不同程度的改善, 表明该优化模型是可以提高运行效率的.

目前, 京杭运河苏北段的泗阳船闸、淮安船闸、淮阴船闸等均先后采用闸室船舶组合优化动态模型对过闸船舶组合进行优化, 结果平均每天可增加 3

表 1 泰州船闸 2003 年 9 月 15 日上行船舶闸次安排

Table 1 Arrangement of ascending ships through Taizhou shiplock on Sep. 15 th , 2003					
优化后 闸次序	组合 方式	优化闸次 吨位/t	优化后 闸次序	组合 方式	优化闸次 吨位/t
1	5D	1 250	14	1T1D2X	587
2	5D	1 250	15	1T2D1Z4X	1 030
3	1T3D4X	1 500	16	9Z	1 395
4	2D4Z2X	880	17	1D2Z3X	490
5	2D3Z6X	940	18	5D	890
6	6Z2X	720	19	1D1Z	290
7	7Z	700	20	5D	1 160
8	2T1D2Z2X	1 215	21	4D1Z	985
9	3Z3X	500	22	4D1Z	1 150
10	12X	1 236	23	12X	825
11	2D3Z4X	1 105	24	7Z	1 320
12	2D2Z1X	585	25	2D2Z4X	760
13	12X	1 980			

~ 4 个闸次, 平均每闸船舶的吨位增加 400 ~ 500 t. 如果全年采用这一模型对京杭运河苏北段全线进行优化, 经测算全年可增加直接经济效益 1.9 亿元. 本模型也可为其他船闸提供借鉴.

参考文献:

[1] KIM Si-hwa, LEE Kyung-keun. An optimization-based decision support system for ship scheduling[J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 12: 689-692.

[2] KJETILA F. Ship scheduling with soft time windows: An optimisation based approach[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 6: 559-571.

[3] 卢方勇, 齐欢, 曹杰. 永久船闸运行闸室编排调度计算机应用与研究[J]. 计算机应用与研究, 2000(6): 65-67.

[4] 周剑, 陈铁英. Best fit 算法在三峡船闸调度中的应用[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(7): 38-40.

[5] 杜经农,余绍明.三峡工程船舶智能调度系统的动态规划建模与算法[J].计算机与数字工程,2003,31(3):47-50.
[6] 杜经农,陈淑楣.三峡工程两坝联合调度辅助决策系统的研究与实施[J].交通与计算机,2002,20(5):40-44.
[7] 毛筱菲,谭廷寿.三峡坝区船舶过坝优化调度的动态规划模拟[J].交通与计算机,2005,23(4):96-99.
[8] 但堂咏,熊英,刘守善.基于动态规划的梯级船闸营运调度优化[J].交通与计算机,2004,22(2):108-110.

Dynamic optimization model for ship combination in lock chambers

FENG Wei¹, WU Feng-ping², ZHANG Yu-tao²

(1. Waterway Bureau, Communications Department of Jiangsu Province, Nanjing 210004, China;
2. Business School, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The concept of ultimate waiting time of ships at shiplocks was proposed based on psychological theory. A dynamic optimization model for ship combination in lock chambers was developed by using 0-1 programming with ships arranged in the sequence of extra-large-scale, large-scale, medium-scale, and small-scale. The application of the model to Taizhou shiplock according to the data of ascending ships one day through the shiplock shows that the total lockage, the average tonnage per lockage, average waiting time of ships at the shiplock, and the average utilization rate of a chamber after optimization have been improved in different degrees respectively.

Key words lock chamber; ship combination; 0-1 programming; dynamic model

欢迎订阅 2007 年《水资源保护》

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊

《水资源保护》是河海大学和环境水利研究会主办的科学技术期刊.本刊 1985 年创刊,统一刊号:CN32-1356/TV,现为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊和江苏省一级期刊,国内外公开发行.

《水资源保护》主要刊登与水资源保护有关的基础研究、应用技术、工程措施、综合述评、专题讲座、国外动态、书刊评介、科技简讯、水资源管理、评价、监测、优化配置、节水技术、水环境污染控制等方面的文章.近年来,本刊重点关注与水有关的生态环境领域中的研究方向,新增设相关的基础研究、防治技术、城市水环境治理等内容.

主要读者对象:全国从事与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理干部以及大专院校的师生.

《水资源保护》邮发代号 28-298,双月刊,8 元/期,全年 48 元,每逢单月 30 日出版.欲订购者,请向当地邮局订购.若无法从邮局订阅,亦可与编辑部联系索取征订单.

地址 210098 南京市西康路 1 号 河海大学《水资源保护》编辑部

电话 (025)83786642 传真 (025)83786642

电子信箱 bh@hhu.edu.cn