



湘江船闸的过闸调度算法研究

李楠, 李桂华, 尹剑平

(湖南湘江航运建设开发有限公司, 湖南长沙 410011)

摘要: 船闸调度主要任务是确定排哪些船舶及其各自在船闸中相对位置, 是一个多目标非线性规划问题。为解决此问题, 首先建立调度数学模型, 通过研究调度算法进行求解, 试验证明船闸面积利用率比前期提高, 工作效率得到改善。

关键词: 多目标非线性规划; 数学模型; 调度算法

中图分类号: U 692. 4; TP 391

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0171-05

Scheduling algorithm for Xiang river lock chamber

LI Nan, LI Gui-hua, YIN Jian-ping

(Hunan Xiangjiang Navigator Construction and Development Co., Ltd., Changsha 410011, China)

Abstract: The scheduling of lock is a multi-objective nonlinear programming problems, the main task is to determine what vessels and their respective row in the relative position of lock. In order to solve this problem, the mathematical model of this problem is constructed and through the research scheduling algorithm, experimental proof the utilization ratio of lock chamber is increased and the working efficiency is improved.

Key words: multi-objective nonlinear programming; mathematical model; scheduling algorithm

湘江是长江水系重要支流之一, 也是湖南省境内最大的一条河流, 为沿江经济发展提供了支撑保障。湘江流域中的大源渡、株洲枢纽船闸过闸量逐年增加, 但目前靠手工编制调度计划, 编制速度慢、精度和性能不高, 因此急需对此问题进行理论和算法上的研究, 力求降低船闸调度中的工作难度, 提高船闸的运行效率, 不断提高企业的管理水平和经济效益。实现湘江船闸调度信息化, 是适应国家政策要求、提升安全生产管理水平的必然。

湘江船舶过坝通航调度以“先到先过”为前提, 经济、合理地调度船舶, 在船闸有限的空间里排较多的船舶, 追求船闸闸室面积利用率最大化为目标。文献[1-4]针对三峡永久船闸调度问题进行了研究, 提出启发式算法、深度优先搜索等算法进行编排调度。本文针对湘江调度的计划编

制系统和实际情况, 研究调度模型和算法。

1 调度模型

1.1 数学模型

船闸过闸调度的实质任务就是确定某一闸进哪些编号的船舶以及各船舶在船闸中的相对位置。为深入研究解决此问题, 将实际问题转化为数学问题, 基于以下3个假设建立数学模型进行研究: 1)忽略航道、水情和气象等客观因素对船闸调度的影响; 2)假设船舶和船闸两种对象可以视为矩形; 3)闸室排档过程中, 船舶的支架及其角度、船舶之间以及船舶与边界区域之间的安全距离为一个定值, 可增加到船舶的长宽中(忽略对船闸面积利用率的影响)。

考虑单个船闸(180 m × 23 m), L 为船闸的长, W 为船闸的宽, 将其视为一个矩阵的容器,

收稿日期: 2012-12-14

作者简介: 李楠(1980—), 男, 工程师, 研究方向为枢纽建设、企业管理信息化。

以左下方为原点建立坐标系，同时将船舶视为小矩阵，第*l*艘船的长度为 len_l ，宽度为 wid_l 。船闸进船的过程可以看作小矩阵填充大矩阵的过程^[2]，如图1所示。第*l*艘船是否被选中以及具体位置是排挡的任务，也是该数学模型的求解目标（ $z_l=1$ 表示选中， $z_l=0$ 表示未选中 $xlen_l$ 和 $ywid_l$ 是第*l*艘船在船闸中以船闸左下角为原点的停泊坐标）。

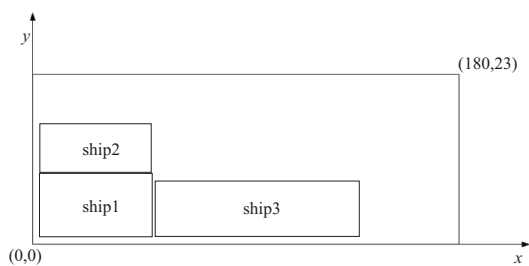


图1 船闸与船舶

定义以下符号：*N*为登记处等待调度的船舶总数量；闸室的面积为 $A=LW$ ，其中*L*为船闸的有效长度，*W*为船闸的有效宽度；对于第*l*艘船，面积为 S_l ， $S_l=len_l \cdot wid_l$ ，其中 len_l 为船的长度， wid_l 为船的宽度； $z_l=1$ 或0，如果第*l*艘船选中过闸，则 $z_l=1$ ，否则 $z_l=0$ ； $xlen_l$ 和 $ywid_l$ 是第*l*艘船在船闸中的停泊坐标（以船闸左下角为原点）；*t*指定过闸的时间， t_l 为第*l*艘船到达的时间； $u(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$ 为阶跃函数。

湘江航运船闸排挡同时考虑航运部门的经济效益和船舶船主的经济效益，即要求：1) 先到先过；2) 船闸闸室面积利用率最大化。然而这两点是不可调节的矛盾，综合考虑船舶通航以及船闸的一些基本约束，故此数学模型归结为一个多目标的非线性规划决策问题。

1.2 目标函数

1)目标1: 闸室面积利用率最大化。

闸室面积利用率的公式定义为：船闸调度中安排过闸船舶的面积之和与船闸面积的比值，简称闸室利用率。在船闸有限的空间里编排较多的船舶，追求船闸闸室面积利用率最大化。*f*表示船闸在每一闸的平均闸室面积利用率，目标函数即为 $\max f$ 。

$$f = \sum_{l=1}^N (z_l \cdot S_l) / A \quad (1)$$

$$S_l = len_l \cdot wid_l \quad (2)$$

2)目标2: 先来先过。

先定义船舶等待时间为船舶开始登记到船舶调度的时间差值。在此性能指标中，主要考虑调度的所有船舶的到达登记时间和实际过坝时间的差值之和。*g*表示船闸的船舶等待时间之和，以同一次调度的时间为基数，先来的船等待时间必定最长，为满足先来先过，定义目标函数为 $\max g$ 。

$$g = \sum_{l=1}^N z_l \cdot \Delta t_l \quad (3)$$

$$\Delta t_l = t - t_l \quad (4)$$

1.3 约束条件

每一船舶要能够进入船闸必须满足以下3个条件：1) 每个小矩阵的边界不能超出大矩阵容器的边界；2) 在大矩阵中的任意2个小矩阵之间不能相互重叠；3) 闸室内安排的船舶面积之和不能超过船闸的面积。故船舶能否放入闸室必须同时满足以下约束条件：

1) 船舶边界约束。

$$\begin{aligned} 0 &\leq xlen_l \leq L - len_l \\ 0 &\leq xwid_l \leq W - wid_l \\ l &= 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

2) 闸室排挡的约束条件。

$$u(z_l \cdot xlen_l - z_c \cdot xlen_c - z_c \cdot len_c) + u(z_c \cdot xlen_c - z_l \cdot len_l - z_l \cdot len_l) + u(z_l \cdot xlen_l - z_c \cdot xlen_c - z_c \cdot len_c) + u(z_c \cdot xlen_c - z_l \cdot xlen_l - z_l \cdot len_l) \geq 1$$

*C*为闸室内已有船舶，*l*为新增的船舶^[5]。

3) 闸室面积的约束。

$$\sum_{l=1}^N z_l \cdot S_l \leq A \quad i = 1, 2, \dots, N$$

2 调度算法及其应用

2.1 调度算法

1) 先来先服务算法。

目前湘江上人工编排船闸调度主要依据先来先服务(FIFO)算法，此算法调度简单，是典型的被动式管理方法，如图2所示，它调度船舶的方法是：所有船舶到达锚地后，到海事登记处排队登记，登记处根据船舶登记的时间把船舶编号进行排队，然后根据约束条件从队列中按照先后顺序选择船只进入船闸接受服务。



图2 先来先服务算法原理

如图3所示, 先来先服务(FIFO)算法步骤:

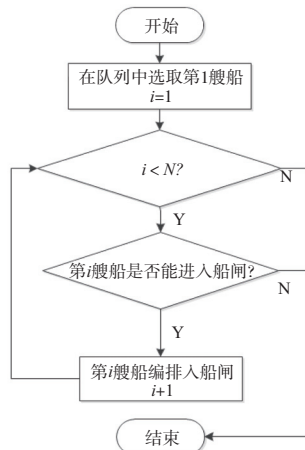


图3 先来先服务算法流程

先来先服务是一种简单高效的服务方式, 能满足公平性, 不足之处是FIFO船闸面积利用率不高, 目标函数往往得不到最优解。

2) 基于先来先服务的面积最大利用算法(MAU)。

FIFO算法有两个弊端: 1) 船舶按照先后顺序, 依次进闸, 如果连续的两艘船不能摆在同一横排, 船舶横向剩余的空间没有得到充分利用; 2) 船舶排挡到接近闸尾, 如果后面等待进闸的是一艘不满足进闸的条件的船, 则闸室的空间也没有得到充分的利用。

船舶先到达锚点, 先进入船舶调度队列, 也就是先来先服务, 是航运船舶调度的一个基本原则。如图1所示, 长边为x轴, 宽边为y轴。为了最大地利用剩余空间, y轴容纳的船只越多越好。同时, x轴的船只的长度尽量接近, 避免因船舶长度参差不齐, 长板效应以至于浪费过多的长度。最后, 通常船舶入闸, 是先来者先进, 在对闸室剩余空间进行排挡时, 如果等待排挡的船只长度过长, 例外检索船舶等待队列, 选择长度合适的船只入闸。

MAU算法是基于FIFO算法的, 满足了先来先服务的一个基本原则。同时对先来先服务做了一定的改进, 减少了横向, 纵向船闸面积的浪费, 提高了船闸使用率(图4)。

3) 改进DFS算法。

求解此问题可视为遍历二叉树的问题, 如图5所示, 对于每一只船有选中和未选中2种状态(1代表选中, 0代表未选中)、如果采用枚举, 遍历二叉树的所有枝条, 可以得到最优解, 但当参与排挡的船舶较多时, 计算量非常大, 每增加1艘船, 计算量将增加1倍。

文献[2]使用深度优先(DFS)搜索的算法对遍历算法进行了改进, 引入了估计函数, 用于对当前分枝的后枝上是否有继续搜索的必要性进行判断, 在没有必要进行向下搜索时即回溯, 减少了不必要的搜索过程。在此算法基础上以及结合湘江上调度的实际情况, 对算法进行小的限定优化, 其一从登记的N艘船中选取前M艘船进行排挡可以减少计算的复杂度, 计算量减少; 其二根据湘江上调度的实际要求, 第一艘船必须排挡, 故可以减掉树枝的一半, 时间复杂度减少, 可以得到局部最优解。

4) 数学规划方法。

有多个目标函数并且需同时处理的最优化问题称为多目标优化问题, 此调度模型即为多目标优化问题。通过权重和法将多目标优化问题转换为单目标优化问题, 用数学规划来求解多目标优化问题^[6]。对目标函数(1)和(3)式进行权重和法处理得到单个目标为 $\max(\gamma_1 f + \gamma_2 g)$, 其中 $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$, γ_1, γ_2 的系数按各自对应的权重决定, 在lingo软件中输入以下代码:

```
!目标函数;
max =  $\gamma_1 * (@sum(ship(i): x(i) * len(i) * wid(i))) / (L * W) + \gamma_2 * (@sum(ship(i): x(i) * t(i)));$ 
!闸室面积约束条件;
@sum(ship(i): x(i) * len(i) * wid(i)) < (L * W);
!指定x(i)为0/1变量;
@for(ship(i): @Bin(x(i)));
!闸室排挡的约束条件;
```

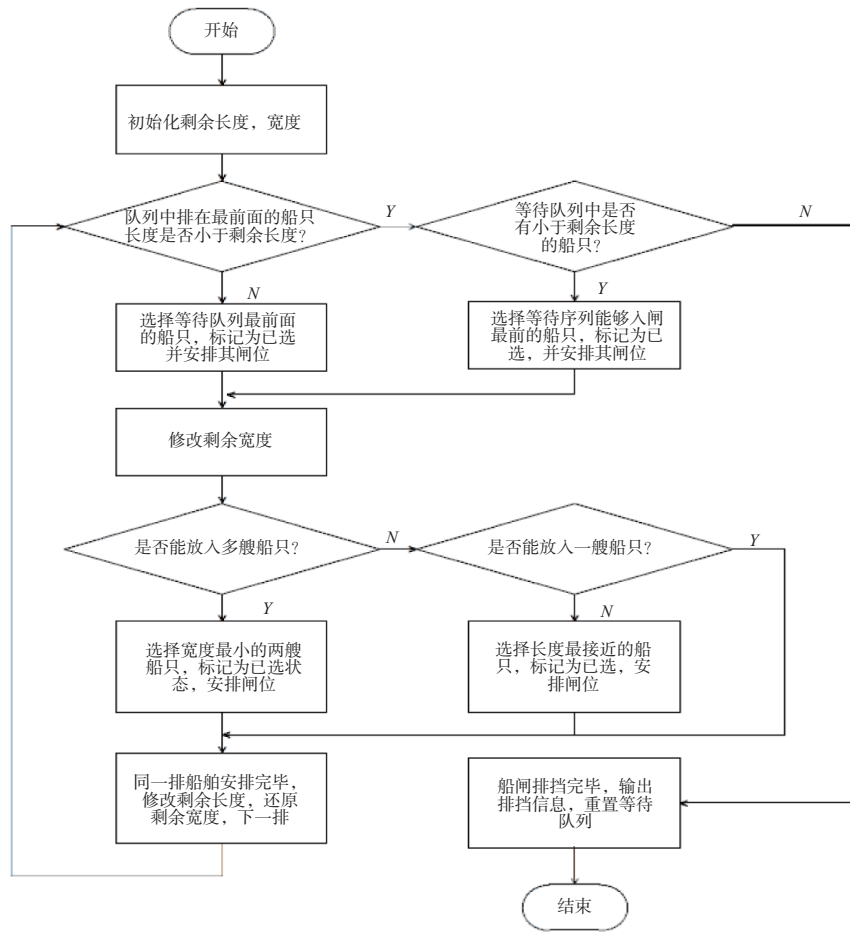


图4 MAU算法流程

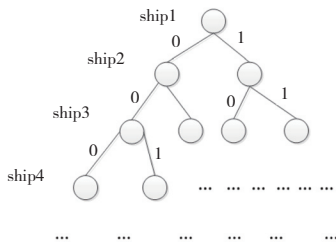


图5 遍历二叉树算法

```

@for(ship(i):@for(ship(j)|j#ne#i:@
if(x(i)*x(j)#eq#1,@if((xlen(j)+len(j)-
xlen(i))#le#0,0,1)*@if((ywid(j)+wid(j)-
ywid(i))#le#0,0,1)*@if((xlen(i)+len(i)-
xlen(j))#le#0,0,1)*@if((ywid(i)+wid(i)-
ywid(j))#le#0,0,1,0)=0));

```

```

@for(ship(i):@bnd(0,xlen(i),L-len(i));
@for(ship(i):@bnd(0,ywid(i),W-wid(i));

```

2.2 算法应用

算法用matlab和lingo实现, 试验环境为 Microsoft

windows xp professional的PC(硬件配置Intel (R) Core™2 CPU T6570, 2GB内存)。随机选取一个时间段数据, 试验测试数据见表1(等待时间为模拟值), 试验结果见表2。

表1 试验数据

| 船编号 | 最大长度/m | 最大宽度/m | 等待时间/h |
|-----|--------|--------|--------|
| 1 | 65 | 11.7 | 10.0 |
| 2 | 31 | 5.8 | 9.9 |
| 3 | 29 | 6.3 | 9.8 |
| 4 | 54 | 9.8 | 9.7 |
| 5 | 51 | 9.8 | 9.6 |
| 6 | 40 | 7.8 | 9.5 |
| 7 | 36 | 7.2 | 9.4 |
| 8 | 57 | 10.5 | 9.3 |
| 9 | 60 | 11.5 | 9.2 |
| 10 | 70 | 12.0 | 9.1 |

表2 试验结果

| 算法 | 闸室面积利用率/% | 先来先过(前5艘选中) | 选择的船编号及其坐标 |
|-------------------------------------|-----------|-------------|--|
| FIFO | 59.5 | 1,2,3,4,5 | 1(0,0),2(0,11.7),3(65,0),4(65,6.4),5(119,0),6(119,9.8) |
| MAU | 72.6 | 1,2,3,4,5 | 1(0,0),8(0,12.2),2(65.5,0),3(65.5,6.3),7(65.5,13.1),4(102,0),5(102,10.3) |
| 改进的DFS算法($m=10$) | 80.8 | 1,4 | 4(0,0),10(0,10.35),6(55,0),7(70,9.5),8(106,0),1(106,10.5) |
| 数学规划($\gamma_1=0.9 \gamma_2=0.1$) | 77.8 | 1,2,3,5 | 6(20,0),9(0,7.8),2(60,0),3(60,5.8),8(60,12.5),1(91,0),5(116.8,13.2) |

FIFO算法满足公平性,时间复杂度低,船闸面积利用率相对较低;MAU算法是基于FIFO算法的,做了一定的改进,减少了横向、纵向船闸面积的浪费,提高了船闸面积利用率,前5艘100%选择。改进的DFS算法闸室面积利用率较高,但前5艘船只选中2艘,时间复杂度非常高;数学规划法前5艘船选中4艘,面积利用率较好,时间复杂度非常高。

3 结论

在深入分析湘江船闸调度问题后,将船闸调度问题转化为数学问题,即建立调度数学模型和研究调度算法求解实际问题,并借助数学方法和计算机技术有效解决了船闸调度问题。本文对调度算法进行深入研究,以闸室面积利用率和先来先过为主要评价指标,分析各种算法的优劣,并提出了独创性的MAU算法,为开发船闸管理系统提供了基石。在权衡前述评价指标和时间复杂度等因素后,从多个算法中选取了FIFO和MAU算法开发了船闸管理系统:FIFO算法严格满足时间公平性(先来先过),实现也最简单;MAU算法兼顾了时间公平性和闸室面积利用率,有较好的闸

室面积利用率,总体达到了先来先过,算法实现较为复杂,更重要的是它的复杂度可控,不像DFS和数学规划法的复杂度以几何级数增长。目前系统在湘江大源渡船闸和株洲闸运行80 d内,成功调度1 006闸次,调度各种船只3 468艘,有效提高了工作效率和船闸利用率。

参考文献:

- [1] 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].计算机应用研究,2000,17(6):65-67.
- [2] 刘云峰,齐欢.DFS算法在三峡永久船闸优化编排中的应用[J].计算机工程,2002,28(8):224-226.
- [3] 刘云峰,齐欢.二维优化编排启发式算法及其在三峡永久船闸调度决策系统中的应用[J].计算机与现代化,2002,18(1):1-3.
- [4] 赖炜,齐欢.三峡船闸运行调度中的多属性决策问题[J].控制与决策,2002,17(2):163-166.
- [5] 齐欢,肖恒辉,张晓盼,等.三峡-葛洲坝两坝联合调度数学模型及算法[J].系统工程理论与实践,2007(2):101-106,119.
- [6] 公茂果,焦李成.进化多目标优化算法研究[J].软件学报,2009,20(2):271-289.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

二航局中标安徽望东长江公路大桥北岸接线工程

3月11日,二航局中标安徽望东长江公路大桥北岸接线WDQ-1标段,中标金额5.2亿元,工期26个月。自此,二航局在望东长江公路大桥项目累计中标金额达11.7亿元。

望东长江公路大桥起自安庆市望江县城东北茶庵,止于池州市东至县城南良田,接已建的安庆至景德镇高速公路,路线全长38.02 km,其中长江大桥长3.6 km。二航局承建的北岸接线WDQ-1标段全长11.4 km,路基宽28 m,设计时速120 km。施工内容包括路基土石方、望江北互通立交、华阳互通立交、望江服务区土石方和幸福河特大桥。

该项目的实施,对完善安徽高速公路网,加快安徽参与泛长三角分工合作和对外开放水平具有重要推动作用。

摘编自中国交通建设网