



# 基于元胞自动机的船舶过闸运输组织仿真

柯姜岑, 甘露, 程超

(武汉理工大学交通学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 三峡水利枢纽船闸设计通行能力与船闸实际通过能力不足的矛盾日益突出, 为解决这一尴尬现实, 将三峡船闸入口船舶流特征与道路交通中三线轨道交通模型结合起来, 运用船舶过闸调度原理和元胞自动机理论构建了水利枢纽区域过闸组织模型, 并对双向船闸和升船机组成的过闸系统进行模拟。研究结论反映了船舶达到规律对船舶流聚集和疏散的影响。最后对仿真结果给出具体的分析。

**关键词:** 船闸; 元胞自动机; 运输组织; 水利枢纽; 船舶交通流

中图分类号: TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0124-06

## Simulation of ship lock organization mode with cellular automata

KE Jiang-cen, GAN Lu, CHENG Chao

(School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** Nowadays, the contradiction between the designed capacity of lockage and the practical capacity in hydro-junction is becoming increasingly prominent. Therefore, this paper combines vessel flow characteristics with three-line rail traffic model in road traffic to solve this problem. Moreover, an organized model for hydro-junction lockage is set up based on the scheduling theory and cellular automata theory. Besides, by simulating the lockage system which consists of two-way navigation lock and ship lift, the pattern of the coming ships is studied to analyze its influences on the converging and diverging ship flow. Finally, a specific analysis is obtained through the simulation results.

**Key words:** lock; cellular automata; transport organizations; hydro-junction; vessel flow

经济全球化的发展趋势和长江流域经济社会的迅猛发展, 使近年来长江客、货运量持续走高, 三峡过坝运输呈现高速增长态势。仅2010年, 三峡断面货物通过量8 794.5万t, 与2009年同比上升18.44%。其中, 三峡船闸累计运行9 407闸次, 通过船舶高达58 302艘次。客、货运量的增长对长江航运业带来巨大发展契机的同时也对三峡船闸通过能力提出更高要求。与此同时, 由于升船机的推迟建成, 三峡大坝双线船闸通过能力严重不足, 船舶坝前等待情况严重。特别是受到洪水、大风、大雾等恶劣天气影响时, 三峡船闸多次停航, 仅2010年船舶积压最高值达504艘。针对

对此现象, 长江通航管理局自2004年6月起对载货船舶滚装船舶实施“水-陆-水”翻坝转运, 虽在一定程度上改善了船舶滞留问题, 但翻坝转运运输转运次数多、效率低、运输成本高等缺点仍制约着大坝通过能力的提高。因此, 运用科学管理手段, 使调度工作智能化、决策方案最优化, 从根本上解决三峡船舶过闸等候现象是至关重要的。

### 1 三峡大坝过闸设施的组成与分工

三峡枢纽通航建筑物由三峡船闸、三峡升船机及相应的引航道等组成(图1)。

收稿日期: 2012-05-31

作者简介: 柯姜岑(1982—), 女, 博士研究生, 主要研究领域为交通运输系统规划。

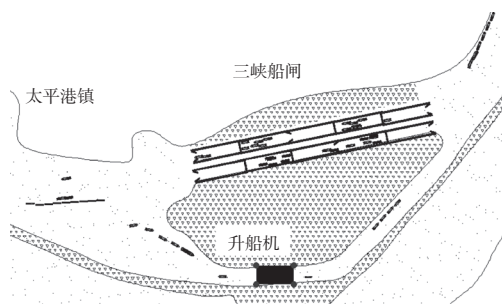


图1 三峡过闸建筑物

1) 三峡船闸。三峡船闸为双线连续5级船闸,由船闸主体段和上、下游的引航道共同组成。每线船闸主体段由6个闸首和5个 $280\text{ m} \times 34\text{ m}$  (长 $\times$ 宽)大小的闸室组成,总长 $1\,621\text{ m}$ ,设计可通过 $3\,000$ 吨级客货轮或万吨级船队。正常情况下采用单向运行方式,即北线上行,南线下行<sup>[1]</sup>。双线5级船闸全长 $1\,621\text{ m}$ ,上下游总落差 $113\text{ m}$ ,年单向通过能力 $5\,000$ 万吨,有5间闸室,每间闸室宽 $34\text{ m}$ ,长 $280\text{ m}$ ,每一级落差 $22\sim 23\text{ m}$ ,每次可通过由3条 $3\,000$ 吨级的驳船和1个机动拖船组成的万吨级船队,见图2。

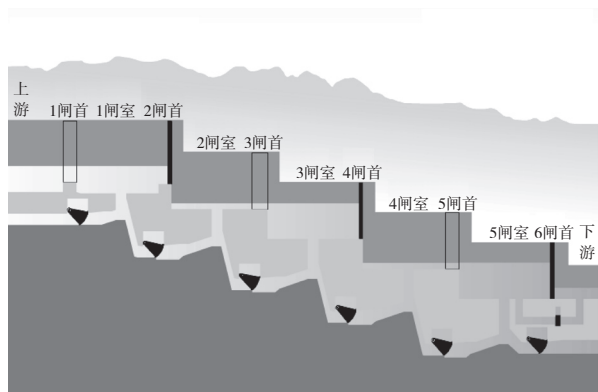


图2 5级船闸

多级船闸的单向过闸在实际调度中是单向连续过闸,过闸船舶列队进入相隔闸室并鱼贯地通过船闸,且在单向连续过闸过程中前后船舶相隔一个闸室。三峡船闸是周期性批量过闸,在船闸的服务时间上,以船闸的开启周期为基准计算。

2) 升船机。三峡升船机是三峡工程用于快速过坝的永久通航建筑物,位于长江左岸,与大坝轴线成 $80^\circ$ 交角。升船机由上游引航道、上闸首、升船机主体、下闸首及下游引航道等主要部分组成。其平面有效尺寸 $120\text{ m} \times 18\text{ m}$  (长 $\times$ 宽),最大能提升 $113\text{ m}$ ,设计通过 $3\,000$ 吨级客货轮<sup>[1]</sup>。由于其

技术难度大,预计2015年正式投入运行,目前塔柱土建施工已浇筑过 $175\text{ m}$ 高程,与平台及横向联系结构高程只相差 $21\text{ m}$ 距离,升船机构造见图3。

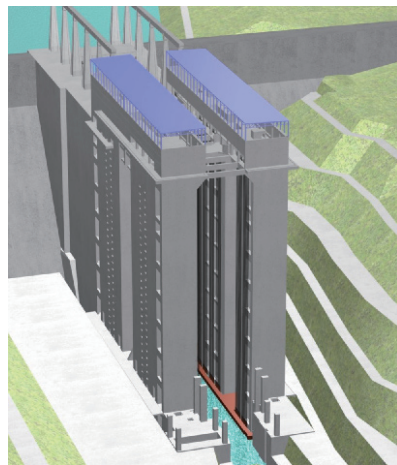


图3 升船机

三峡升船机虽然尚未建成,但凭借其快速升降的工作特性将极大改善三峡大坝的通过能力,因此,在仿真中也需要列入研究。

这种主要为过坝客轮和特种船提供快速通道的升船机运行时符合双向单通道特点,即类似于A站与B站之间,船舶既可以从A到B,也可以从B到A,但是不能混行,平均日上升和下降运行次数可达18次。

在元胞自动机建模过程中,将三峡5级船闸作为一个整体,因双线航道被建筑物隔开,符合道路交通工程中的双线通道交通的特点,再考虑到升船机也是一个类似轨道交通的单通道模式,因此,本文把升船机和三峡船闸视作三线轨道交通系统来处理。三峡枢纽船舶过闸流程见图4。

## 2 过闸运输组织元胞自动机模型构建

为船舶提供通航功能的三峡过闸枢纽区域是有双向5级船闸和 $196\text{ m}$ 高的垂直升船机组成的三线航道交通系统,如图5所示。有过闸需求的船舶在航道分岔处经由不同的航道进站过闸,然而不论是船闸还是升船机一次的运量受其设计通过能力的限制,制约了船舶流通过三峡大坝的流畅性和效率,特别是在船舶交通量较大的时候容易使同一时刻在闸室外等候的船舶形成排队现象。因此,由船闸和升船机组成的三线航道交通系统是

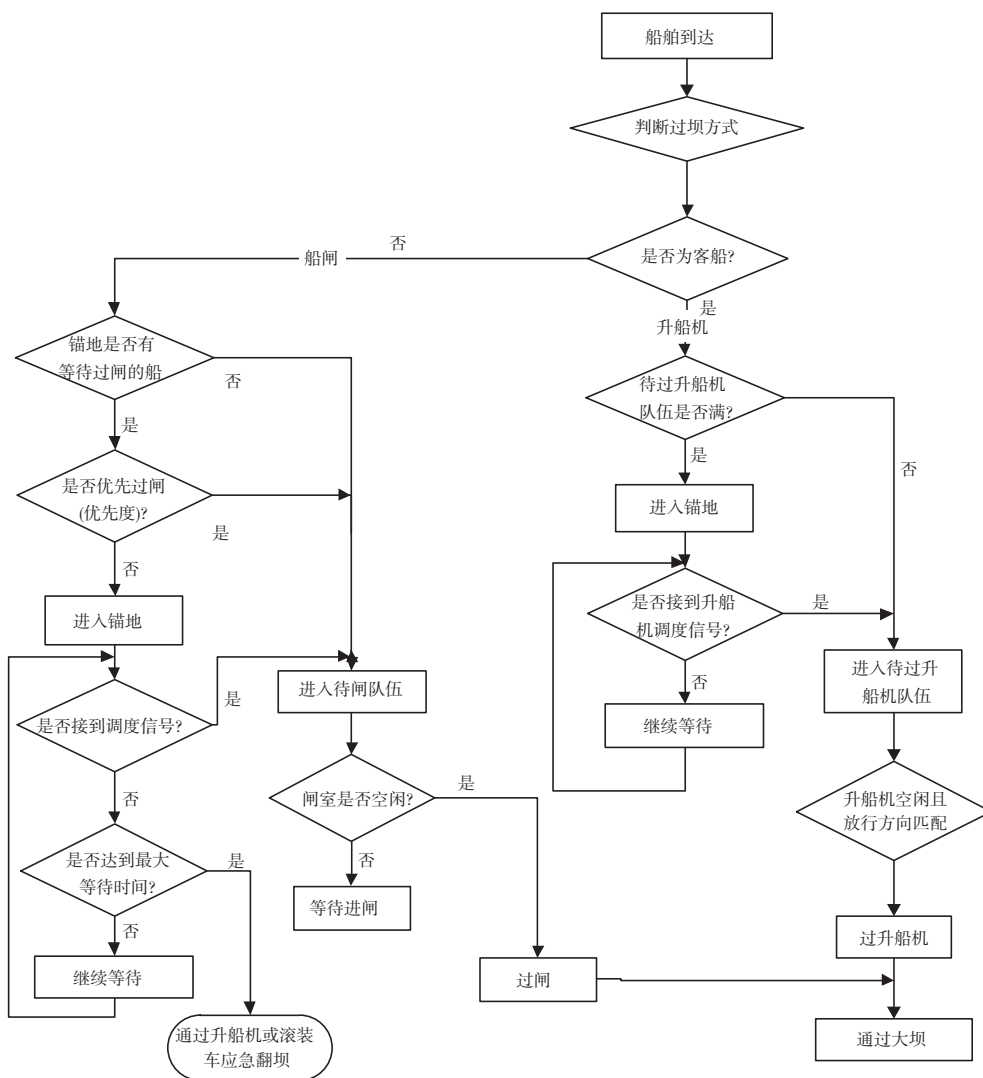


图4 三峡枢纽过闸工作流程

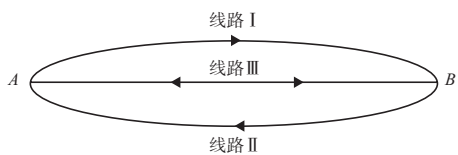


图5 船舶流向

整个线路通航能力的瓶颈。

本文将船闸和升船机组成的合围区域看做是一个封闭环路，大坝两边航道的交汇点看作是道路交通流中的航道，这样就形成了上游闸口到下游闸口之间的船舶移动线路，线路 I 是船舶由上游至下游通过船闸的通道，线路 II 是船舶由下游至上游通过船闸的通道，而线路 III 则可双向随机选择的升船机通道，可调节上游闸口或者下游闸口发送的船舶量。也就是说，当上游闸口有大量船舶需要从上游向下游方向移动时，线路 III 开启 A—B

方向通道；下个时刻，当下游闸口有大量船舶需从下游向上游方向移动时，线路 III 此时开启 B—A 方向通道。利用元胞自动机模型对具有三线航道的交通系统中队船舶运行影响的复杂情况进行研究，构建水运枢纽过闸模型<sup>[2]</sup>。

### 2.1 船舶到达规律

随机抽查 1 d 24 个工作小时的船舶密度流，船舶到达数  $n$  的出现次数如表 1 所示。

根据调查数据，三峡下行过闸船舶平均到达

表 1 船舶在单位时间内到达数的频数分布

到达数 $n$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	$\geq 8$
出现次数 $f_n$	2	3	5	3	2	5	2	1	1	0

注：单位时间为 1 h。

率  $\lambda = 3.42$  艘/h。

根据优先权船舶的比例,以及泊松分布的可加性质,除去集装箱、商品车、鲜活货物船舶到达数,船舶到达率服从 $\lambda=2.736$ 的泊松分布;而装载集装箱、商品车、鲜活货物优先过闸船舶,船舶到达率服从 $\lambda=0.684$ 的泊松分布。

理论上可证明若船舶在单位时间内到达闸口的艘数 $X$ 是服从参数为 $\lambda$ 的泊松分布,则船舶到达系统的间隔时间 $T$ 服从参数为 $\lambda$ 的负指数分布,反之亦然。即同一随机过程可从两种不同的角度用两种分布来描述。

## 2.2 水运枢纽过闸元胞自动机模型

针对由双向船闸和升船机组成的封闭系统进行研究,不难发现除去三峡船闸过坝时间长这个设计能力不满足运力需求这个客观条件外,三峡的过闸瓶颈还存在于船舶流到达闸口是不均衡的。在运输任务繁重的时间段里,三峡船闸过坝量激增就容易形成船舶排队的现象。通过2.1的分析,得到三峡船闸的船舶符合参数为 $\lambda$ 的泊松分布。该模型有以下几个现象需要实现:

1) 所有船舶中有概率 $P$ 的船舶需要从升船机(即线路I)通过,概率 $P$ 为船舶中客船所占比例。

2) 线路I与线路III船舶过闸次数需小于3(升船机I最多可过闸18次,而船闸每次耗时4~6h)。

3) 当线路III繁忙时,线路I的方向是从上游到下游方向通行。

4) 当线路II繁忙时,线路I的方向是从下游到上游方向通行。

5) 当线路I闲置过长,可将候闸的船舶以 $p_2$ 的比例调配至线路I( $p_2$ 是3000t以下货船)。

6) 线路II或III一次可通过多艘船舶。

为了实现以上现象的模拟,本文采用 $N-S$ 模型为基础进行研究,将双向船闸(船闸内部闸室不区分,视作整体)和升船机看做3条独立通道,各自被划分成 $L$ 个元胞,每个元胞大小为30m,记为1, 2, ...,  $L$ ,每个元胞可以为空也可以为1,一艘船占据3个格网。船舶的速度取整数,为1, ...,  $v$ 。为了简化仿真的复杂程度,将每个通道都虚拟成10个元胞,也包含0和1两种状态。只

有在10个元胞的状态都为空,即取值都为0时,才表示该通道空闲<sup>[3]</sup>。

在此模型中,当船舶进船闸后不再判断航道是否被占用,而是开始考虑要判断是否有其他的通道可以满足当前船舶的需求。倘若在闸口等候的第 $n$ 艘船舶前方就是航道,且航道里的元胞状态都为1(船舶前方有其他排队船舶,航道被占据),也意味该船舶不能选择原有路径过闸,设定该船舶此刻需与航道入口至少保持最小瞬间距离;如果前方航道并没有被其他船舶占据(前方无排队船舶),那么它就可以从原有速度开始减速进入候闸区航道。当第 $n$ 艘船舶在航道内候闸超过原计划等候时间时,且后方船舶与其间距超过船舶领域安全距离时,则该船重新启动驶离航道;否则将继续停留等候<sup>[4]</sup>。

用 $d$ 来表示第 $n$ 艘船舶与航道间的距离, $d_s=L-x_n$ ,航道的位置则由 $L$ 表示, $x_n$ 表示第 $n$ 艘船舶的位置),船舶减速进船闸的速度应为 $\text{int}(\sqrt{2a_n d_s})$ ( $a_n$ 为船舶减速航道的加速度,元胞设定的速度只能为整数),用 $x_c$ 表示第 $n$ 艘船减速进航道的距离。

1) 当航道有空闲通道时,第 $n$ 艘船舶的速度变化如下:

$$\begin{aligned} & d_s > x_c \\ & x_c = v_n^2 / (2a_n) \quad \text{and} \\ \text{If} & \quad d_n = x_{n+1} - x_n \quad \text{Then} \\ & \quad v_n = \min(v_n + a_n, v_{\max}) \\ \text{Elseif} & \quad d_s < x_c \quad \text{Then} \\ & \quad v_n = \max(v_n - a_n, \text{int}(\sqrt{2a_n d_s})) \\ & \quad \text{(不能以最大的减速度行驶)} \\ \text{Else} & \\ & \quad v_n = v_n \\ \text{End If} & \end{aligned}$$

2) 当第 $n$ 艘船舶在航道内候闸超过原计划等候时间 $T_d$ 时,且第 $n+1$ 艘船舶与它的距离超过行驶安全距离,则该船由静止启动离开航道,船舶停留时间再从零开始计;否则,船舶将继续在航道停留,船舶停留时间值加1。

船舶间的安全距离即船头距与船舶的加减



速有着密切的关系。当后方船舶的船首接近被保护船舶的船尾时，两艘船舶均会因其相对于该波（船首波和船尾波）的不同位置处而受到向前加速或向后加速，并迫使该船被迫向他船转头的现象。船舶驾驶员为避免碰撞都会控制两船首尾距离大于安全船头距（领域边界），因此在过闸模型中，也将根据船舶间安全距离的不同阶段选取不同的加、减速。本文以藤井模型的船舶领域模型计算船舶间安全船头距。由于船舶交叉相遇时，前后船舶呈鱼贯入内的队列，跟驰模型中 $\theta$ （两船航向线的夹角）为0，而 $D=vT_{90^\circ}$ ，因此，可得船舶边界：

$$D = \sqrt{D_A^2 + D_B^2 + 2D_A D_B \cos\theta} + L_B/2 = (v_A T_{A90^\circ} + v_B T_{B90^\circ}) + L_B/2 \quad (1)$$

式中： $D$ 为船舶领域的边界； $D_A$ 为经过 $T_{A90^\circ}$ 时A船的航程； $D_B$ 为经过 $T_{B90^\circ}$ 时B船的航程； $v_A, v_B$ 为A, B两船的航速； $T_{A90^\circ}, T_{B90^\circ}$ 为A, B两船转过 $90^\circ$ 时所需的时间。

因此，此时航道里的船舶速度变化如下：

```

if  $t_{stop,n} > T_d$  and  $d_n > D$  Then
     $d_n = x_{n+1} - x_n$ 
     $v_n = \min(v_n + a_n, v_{max})$  (加速但不超过最大速度)
     $t_{stop,n} = 0$ 
Elseif  $t_{stop,n} < T_d$  and  $d_n > D$  Then
     $t_{stop,n} = t_{stop,n} + 1$ 
     $v_n = 0$ 
Elseif  $d_n < D$  Then
     $v_n = \max(v_n + a_n, 0)$ 
End If

```

$t_{stop,n}$ 表示第 $n$ 船舶在航道里实际停留的时间， $d_n = x_{n+1} - x_n$ 是航道里的第 $n$ 艘船舶与其前方的第 $n+1$ 艘船舶间的间距，第 $n+1$ 艘船舶和第 $n$ 艘船舶的位置则用 $x_{n+1}$ 和 $x_n$ 表示。

3) 如果第 $n$ 船舶没有条件进入前方通道（可能排队长，可能被占用）则第 $n$ 船舶满足线路Ⅲ（升船机）过闸条件则更换队列：

```

If  $d_n > d_{min}$  Then
     $v_n = v_n$  (原速度换道)
Elseif  $d_n < d_{min}$  Then
     $v_n = \max(v_n - a_n, 0)$  (最大减速度换道)

```

Else

$$v_n = v_n$$

End If

$d_n$ 含义同上， $d_{min}$ 是最小瞬间距离，根据等式得到 $d_{min} = v_{max}^2 / (2b_n)$

4) 在船舶过闸时，船舶严格按照船闸调度中心的指令进行通道选择，因此，在航行的过程中不允许驾驶员随机的行为出现，将随机概率 $p$ 设为0便得到了船舶追踪严格遵守的规则：

①第 $n$ 船舶在航道。

Step1: 加速。

```
If  $t_{stop,n} > T_d$  and  $d_n > D$  Then
```

$$v_n = v_n + a_n$$

$$t_{stop,n} = 0$$

Else

$$t_{stop,n} = t_{stop,n} + 1$$

$$v_n = 0$$

End If

step2: 运动。

$$x_n = v_n + x_n$$

其中，因为元胞自动机模拟中，船舶速度是以船舶向前移动元胞的数量表示的，所以运动后船舶的位置可用当前元胞位置与当前船舶速度的和表示。

②第 $n$ 艘船舶未进入候通道，并且前方被第 $n+1$ 艘船舶占据。

Step1: 考察线路Ⅲ排队情况，满足下列条件换道

$$d_n^3(t) \geq D_{min} \geq v_{max} \text{ and } d_n^3(t) \geq d_n^1(t)$$

Step2: 加速。

```
If  $d_n > d_{min}$  Then
```

$$v_n = v_n$$

```
Elseif  $d_n < d_{min}$  Then
```

$$v_n = \max(v_n - a_n, 0)$$

Else

$$v_n = v_n$$

End If

Step3: 减速。

$$v_n = \min(v_n, gap_n)$$

其中， $gap_n = x_{n+1} - x_n - 3$ 为第 $n$ 艘船舶与前方第 $n+1$ 艘船舶间空元胞的数目（减去3是因本文设定标准船

船长度为90 m,需占据3个元胞)

Step4: 运动。

$$x_n = v_n + x_n$$

③第 $n$ 艘船舶即将进入航道,且通道状态为0。

Step1: 加速。

If  $d_s < x_c$  Then

$$v_n = \min(v_n + a_n, v_{\max})$$

Elseif  $d_s < x_c$

$$v_n = \max(v_n - a_n, \text{int}\sqrt{2a_n d_s})$$

Else

$$v_n = v_n$$

End If

step2: 运动。

$$x_n = v_n + x_n$$

If  $x_n \geq L$  Then (船舶进闸) 通道状态=1

$x_n = L$  (船舶进闸到相应的通道停靠)

$$v_n = 0$$

$t_{\text{stop},n} = 1$  (记录船舶在航道的停靠时间)

End If

5) 以开放边界条件为边界条件。定义如下:

①以船舶到达规律 $\lambda = 2.736$ 和 $\lambda = 0.684$ 的泊松分布随机产生不同载货种类船舶,客船占有所有船舶的比例为 $P$ ,且如航道入口位置无船舶,则发生一艘船速为 $v_{\max}$ 的船舶,并遵守更新规则, $T_s$ 是发船时间间隔, $T_{\min}$ 是最小船舶追踪间隔时间。

②每隔 $T_d$ 时刻,检查仿真区域内3个通道状态是否为0,如果是,则发出1列速度 $v=0$ 的船舶,并且这些船舶在航道停留 $T$ 时间后再根据更新规则运动,航道始发船舶的发船时间间隔为 $T_s$ 。

③在 $i=L$ 位置,船舶从仿真边界驶离。元胞迭代时间以5 s为基本单位。

### 2.3 模拟结果及其分析

从图6的通道交通流的时刻演化图不难看出线路I和III在船舶运行中的特点。系统总仿真时间取12 h,即720 min,以180 min为1个节点进行绘制;点表示船首位置(三峡5级船闸每一闸室长280 m,故以280 m为划分节点)。从图6中不难看出,线路I和III的船舶密度发生了4个阶段的变化:

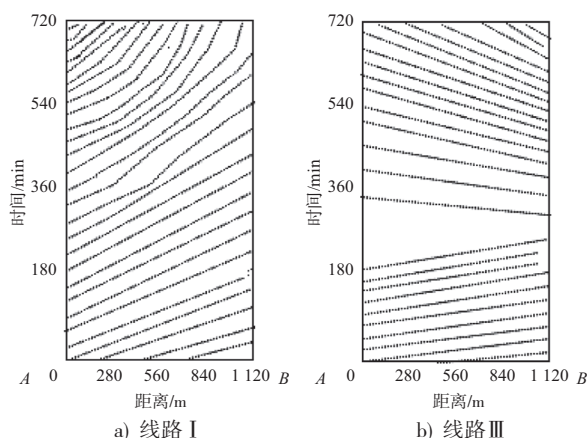


图6 交通流演化横坐标是船舶行进的方向

1) 在 $T_1$ 时刻(0~180 min)属于船舶过闸的高峰期,船舶密度比较高,这是由于当时船舶大量到船闸造成的。船舶均通过线路I和III通过船闸,前进的方向是从长江上游至长江下游。船闸与升船机均处于繁忙状态,因此,在这两条线上相邻船舶间的船头间距较短。

2) 在 $T_2$ 时期(180~360 min),路线III(升船机)因完成长江上游至长江下游船舶的过坝,属于空闲期,路线I仍处于高峰期。在大约190 min左右时,路线III升船机开始由长江下游至长江上游方向运送船舶过坝。由于方向的转变,使得路线III 180~360 min时船舶间的船头间距较大(因船舶过坝还是主要集中在从上游至下游,下游至上游船舶较少,且路线II和III同时分担了下游至上游的待过坝船舶流)。

3) 在 $T_3$ 时期(360~540 min),路线III运输方向再次发生改变,船舶再次由长江上游向长江下游方向从路线III过坝,经 $T_1$ 和 $T_2$ 两个时刻的过坝,该方向的船舶流等待情况有所缓解,但路线III船舶流的密度虽小于 $T_1$ 时刻的密度但仍大于 $T_2$ 时刻的密度。

4) 在 $T_4$ 时刻(540~720 min),路线III开始再次由长江下游向长江上游方向转变。此时,路线I由于只有1条通道承担上游至下游的过坝船舶流,船舶密度达到了最高峰值,而路线III通道此时迎来了下游至上游船舶过坝的高峰期,船舶密度逐渐增大,船头间距不断变小。

(下转第134页)