



疏浚工程中泥驳配置和装驳顺序方案的优化

李金峰¹, 秦亮¹, 田桂平²

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要:《疏浚与吹填工程施工规范》中泥驳数量计算公式具有局限性, 疏浚工程中性能参数不同的泥驳采用不同配置和装驳顺序, 会对主船的时间利用率和泥驳等待时间产生不同影响。通过引入泥驳系统运行网络线路图和横道图的概念, 在此基础上建立泥驳系统运行数学模型, 引入主船累积停滞时间和泥驳累积停滞时间评价指标, 提出主船单面或双面靠驳的泥驳配置及装驳方案优化方法, 通过实例对模型和优化方法进行验证。结果表明, 对既定泥驳船队实现了泥驳装驳顺序优化; 对拟组建的泥驳系统, 实现泥驳最佳配置方案和初始装驳顺序优化。

关键词:疏浚; 泥驳; 装载线; 运行模型; 装驳顺序

中图分类号: U616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0159-06

Optimization of mud barge configuration and loading sequence scheme for dredging works

LI Jinfeng¹, QIN Liang¹, TIAN Guiping²

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: The calculation formula for the number of mud barges in *Construction Code for Dredging and Reclamation Works* has limitations. Different mud barges with different performance parameters and loading sequences in dredging engineering have different impacts on the time availability of the main ship and the waiting time of the mud barges. We introduce the concepts of the operation network circuit diagram and bar chart of the mud barge system, and establish a mathematical model for the operation of the mud barge system on this basis. We introduce the evaluation indicators of the accumulated dead time of the main ship and the accumulated dead time of the mud barge, propose an optimization method for the mud barge configuration and loading plan of the main ship with one or two sides berthing, and verify the model and optimization method through examples. The results show that the optimization of the mud barge loading sequence is achieved for the established mud barge fleet. For the proposed mud barge system, the optimal configuration plan and initial loading sequence optimization of the mud barge are achieved.

Keywords: dredging; barge; loading line; operating model; loading sequence

泥驳是装载和运输疏浚土的驳船, 疏浚工程中常采用挖泥船装驳、泥驳卸泥的方式进行疏浚作业, 如射流泵船、潜水泵船、气动泵船、斗式挖泥船及部分配备装驳系统的绞吸船在取土区挖泥后装驳, 泥驳重载航行到卸泥区后卸泥返航继续下一个挖泥周期^[1], 此时需要根据挖泥船性能及工况配备适量、适用的泥驳。

针对一艘挖泥船, 一般配备多艘泥驳构成一

个泥驳船队, 本文称为一个泥驳系统。在某配备泥驳系统卸泥作业的挖泥船施工之前, 要在工前策划阶段根据土质、运距等工况条件以及挖泥船性能, 在可用的备选泥驳中确定泥驳系统中驳船的数量、具体组成以及泥驳初始装驳顺序, 同一泥驳系统中驳船的性能参数可相同也可不同。对于驳船性能参数相同的泥驳系统, 仅需要确定泥驳系统中驳船的数量即可, 但对于驳船性能参数

收稿日期: 2023-04-07

作者简介: 李金峰 (1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚技术管理。

不同的泥驳系统，不同的泥驳数量、组成方式、泥驳初始装驳顺序都会有不同的施工效果。针对特定的施工工况和挖泥船，用几艘泥驳？用什么样的泥驳？泥驳初始装驳顺序如何安排？以上是疏浚技术管理人员需要回答的 3 个问题。

本文分析 JTS 207—2012《疏浚与吹填工程施工规范》^[2]中关于泥驳数量计算的内容，引入泥驳系统运行网络线路图和泥驳系统运行横道图的概念，在此基础上建立泥驳系统运行模型，以挖泥船待驳时间和泥驳累积停滞时间为指标，对泥驳系统进行分析评价，实现泥驳系统中驳船数量、组成方式、泥驳初始装驳顺序的优化。

1 驳船数量分析

驳船数量的确定十分重要，泥驳数量不足会导致施工主船待驳时间过长影响时间利用率和产量，泥驳数量过多则会造成泥驳因等待靠驳而停滞时间过长。

为方便和直观地表示泥驳一个装、运、卸施工周期，引入泥驳运行线路图的概念。线路图中横坐标表示时间，纵坐标表示航程，其中将离驳时间与重载航行时间、靠驳时间与轻载航行时间

分别合并处理，则每艘泥驳一个运行周期内经历 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 共 4 个时段，如图 1 所示。其中 t_1 时段代表驳船装驳阶段时间，本时段横线称为装载线； t_2 时段代表离驳与重载航行时间； t_3 时段代表卸泥及掉头时间； t_4 时段代表轻载航行及靠驳时间。

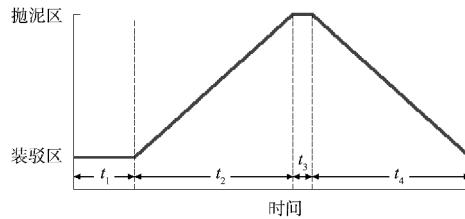


图 1 泥驳运行线路及时段

各艘泥驳的运行线路共同构成了泥驳系统运行网状线路。在施工主船双面装驳的情况下，当装驳阶段各泥驳装载线不间断连接时，施工主船施工连续、无等待装驳时间，当装载线之间出现间断，则施工主船将出现相应非装驳时间，当不同泥驳的装载线之间出现重合，将会出现因泥驳等待装驳而产生的泥驳停滞时间。若泥驳系统中各驳船的运行性能参数均相同，则典型的泥驳系统运行网络线路如图 2 所示。

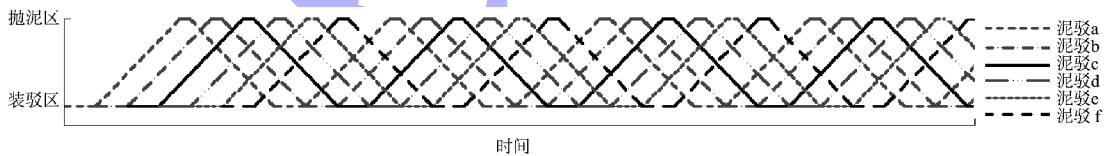


图 2 单一泥驳类型泥驳系统运行网络线路

由图 2 可以看出，若保证施工主船连续施工，即各装载线之间不出现间断，则须有 $(N-1)t_1 \geq t_2 + t_3 + t_4$ (N 为泥驳数量)，此时不会出现挖泥船非装驳状态。又有：

$$t_2 + t_3 + t_4 = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} + t_0 \quad (1)$$

$$t_1 = \frac{q_1}{BW} \quad (2)$$

式中： l_1 为挖泥区至卸泥区的航程，km； v_1 为重载航速，km/h； l_2 为卸泥区至挖泥区的航程，km； v_2 为轻载航速，km/h； t_0 为装泥、卸泥、转头及靠离

挖泥船时间的总和，h； B 为土的搅松系数； W 为挖泥船生产率， m^3/h ； q_1 为泥驳装载量， m^3 。

推导得出：

$$N = \frac{(l_1/v_1 + l_2/v_2 + t_0)BW}{q_1} + n_B \quad (3)$$

式中： n_B 为备用泥驳数量，艘。式(3)即 JTS 207—2012《疏浚与吹填工程施工规范》中关于泥驳数量的计算公式，其具有一定局限性，仅限于计算主船双面靠驳、单一泥驳船型的情况，而实际施工中，主船可能仅满足单面靠驳条件，且同一泥驳系统中各泥驳性能往往不同^[3]，常用泥驳

的舱容在数百至二千立方米, 部分为自航泥驳、部分为非自航泥驳, 载质量、卸泥方式各不相同, 因而装驳时间、航行时间、卸泥时间、离靠驳时间等会有所区别, 面对复杂的泥驳系统,

无法通过公式计算不同泥驳投入的最佳数量, 更无法确定不同泥驳装驳方案的最佳初始装驳顺序。复杂情况的泥驳系统运行网络线路图如图 3 所示。

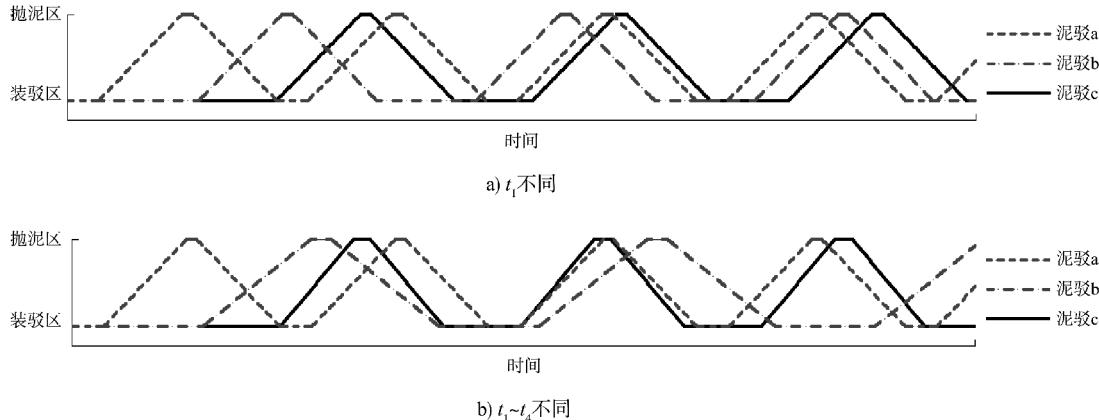


图 3 复杂泥驳系统运行网络线路

2 泥驳系统运行模型

假定泥驳系统共有泥驳 n 艘, 定义 $i=1, 2, \dots, n$, 且初始装驳按此顺序进行装驳作业, 重载运距 L_{i1} , 轻载运距 L_{i2} , 泥驳重载航速 v_{i1} , 轻载航速 v_{i2} 。

泥驳 i 一个运行周期各阶段的时间为: 装驳时间 t_{i1} , 离驳时间 t_{i2} , 重载航行时间 $t_{i3}=L_{i1}/v_{i1}$, 卸泥掉头时间 t_{i4} , 轻载航行时间 $t_{i5}=L_{i2}/v_{i2}$, 靠驳时间 t_{i6} 。

定义矩阵 \mathbf{U} :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} \\ U_{21} & U_{22} \\ \vdots & \vdots \\ U_{n1} & U_{n2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

双面装驳时, 定义 $U_{i1}=t_{i1}$, $U_{i2}=t_{i2}+t_{i3}+t_{i4}+t_{i5}+t_{i6}$; 单面装驳时, 定义 $U_{i1}=t_{i6}+t_{i1}+t_{i2}$, $U_{i2}=t_{i3}+t_{i4}+t_{i5}$ 。为方便表达泥驳系统运行情况, 引入泥驳运行横道图如图 4 所示。

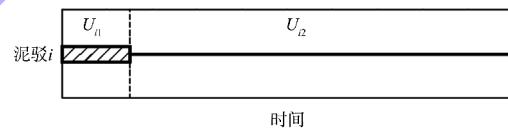


图 4 泥驳运行横道示意

各艘泥驳的运行横道图共同组成泥驳系统运行横道图, 横道图中各艘泥驳的装驳时间不能重叠, 每艘泥驳一个运行周期结束后才能开始下一个周期的装驳作业, 等待时间最长的泥驳优先进行装驳。由 3 艘泥驳组成的典型泥驳系统运行横道图如图 5 所示。

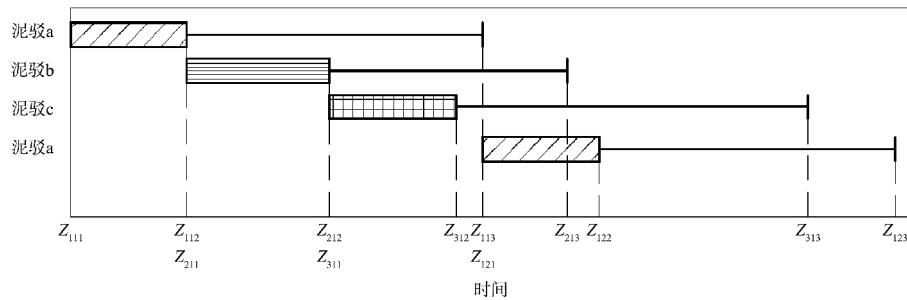


图 5 3 艘驳船的泥驳系统运行横道示意

定义三维矩阵 \mathbf{Z} :

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{111} & Z_{112} & Z_{113} \\ Z_{211} & Z_{212} & Z_{213} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n11} & Z_{n12} & Z_{n13} \end{bmatrix} \quad (5)$$

当主船双面靠驳时, Z_{ij1} 表示第 i 艘泥驳第 j 次装驳开始时间点, Z_{ij2} 表示结束装驳时间点, Z_{ij3} 表示卸泥结束返航后做好装驳准备的时间点; 当主船单面靠驳时, Z_{ij1} 表示第 i 艘泥驳第 j 次开始靠驳时间点, Z_{ij2} 表示离驳结束时间点, Z_{ij3} 表示卸泥结束返航后做好靠驳准备的时间点。令:

$$Z_{ij2} = Z_{ij1} + U_{il} \quad (6)$$

$$Z_{ij3} = Z_{ij1} + U_{il} + U_{ir} \quad (7)$$

系统运行的初始条件为:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{111}=0 \\ Z_{211}=Z_{112} \\ \vdots \\ Z_{n11}=Z_{(n-1)12} \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{112}=Z_{112}+U_{11} \\ Z_{212}=Z_{211}+U_{21} \\ \vdots \\ Z_{n12}=Z_{n11}+U_{n1} \end{array} \right. \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{113}=Z_{112}+U_{12} \\ Z_{213}=Z_{212}+U_{22} \\ \vdots \\ Z_{n13}=Z_{n12}+U_{n2} \end{array} \right. \quad (10)$$

定义矩阵 \mathbf{d} 、 \mathbf{m} , 首个元素分别为:

$$d(1)=\min(Z_{113}, Z_{213}, \dots, Z_{n13}) \quad (11)$$

$$m(1)=\max(Z_{112}, Z_{212}, \dots, Z_{n12}) \quad (12)$$

定义矩阵 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 。主船双面靠驳时, \mathbf{X} 表示主船非装驳时间矩阵, \mathbf{Y} 表示泥驳等待装驳时间矩阵; 主船单面靠驳时, \mathbf{X} 矩阵表示主船待驳时间, \mathbf{Y} 矩阵表示泥驳等待靠驳时间。下文统称 \mathbf{X} 为主船停滞时间指标矩阵, \mathbf{Y} 为泥驳停滞时间指标矩阵。

分两种情况判断: 1) 若 $d(1) \geq m(1)$, 则 $X(1)=d(1)-m(1)$, $Y(1)=0$ 。若第 i 艘泥驳 $Z_{i13}=d(1)$, 则:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{i21}=d(1) \\ Z_{i22}=Z_{i21}+U_{il} \\ Z_{i23}=Z_{i22}+U_{ir} \end{array} \right. \quad (13)$$

2) 若 $d(1) < m(1)$, 定义矩阵 \mathbf{S} , 其中的元素为:

$$S(i)=\begin{cases} m(1)-Z_{i13} & (m(1)-Z_{i13}>0) \\ 0 & (m(1)-Z_{i13}\leq 0) \end{cases} \quad (14)$$

$X(1)=0, Y(1)=\sum_{i=1}^n S(i)$, 若第 i 艘泥驳 $Z_{i13}=d(1)$, 则有:

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_{i21}=m(1) \\ Z_{i22}=Z_{i21}+U_{il} \\ Z_{i23}=Z_{i22}+U_{ir} \end{array} \right. \quad (15)$$

完成上述判断和计算后, 矩阵 \mathbf{Z} 、 \mathbf{d} 、 \mathbf{m} 更新如下:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{111} & Z_{112} & Z_{113} \\ Z_{211} & Z_{212} & Z_{213} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{i21} & Z_{i22} & Z_{i23} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Z_{n11} & Z_{n12} & Z_{n13} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$d(2)=\min(Z_{113}, Z_{213}, \dots, Z_{i23}, \dots, Z_{n13}) \quad (17)$$

$$m(2)=\max(Z_{112}, Z_{212}, \dots, Z_{i22}, \dots, Z_{n12}) \quad (18)$$

按照以上步骤, 不断判断 $d(j)$ 与 $m(j)$ 的大小关系, j 为迭代次数, 计算 $X(j)$ 与 $Y(j)$ 的数值 ($j=2, 3, \dots, k$), 更新 \mathbf{Z} 矩阵, 直到模型运行时间超过设定的模拟运行时间。则此泥驳系统作业方案在设定的模型运行时间内, 主船累积停滞时间

指标为 $T_X = \sum_{j=1}^k X(j)$, 泥驳累积停滞时间指标为

$$T_Y = \sum_{j=1}^k Y(j) \circ$$

3 泥驳系统分析优化

3.1 泥驳装驳方案

对于既定泥驳船队, 泥驳的数量和船舶性能无法改变, 可对泥驳装驳的初始顺序进行分析优化。假设船队共有 n 艘泥驳, 则共有 $n!$ 种不同的初始装驳顺序方案, 采用不同装驳顺序方案往往会得到

不同的挖泥船主船停滞时间和泥驳停滞时间, 因此可在 $n!$ 种方案中进行优选, 将主船累积停滞时间降至合理区间, 并取合适的泥驳累积停滞时间。

令 $w=1, 2, 3, \dots, n!$, 根据泥驳系统运行模型, 计算得主船停滞时间 $T_x(w)$, 泥驳停滞时间 $T_y(w)$, 据此优选最佳泥驳装驳方案, 一般情况下, 根据挖泥船必要的停歇时间确定合理的挖泥船累积停滞时间 $T_x(w)$, 适当选取泥驳累积停滞时间 $T_y(w)$ 。

3.2 泥驳系统配置及装驳方案

当泥驳系统中泥驳组成未确定时, 如某项疏浚工程使用泥驳卸泥作业, 在项目前期策划阶段, 假设可用 m 种不同泥驳, 不同泥驳施工周期不同, 当从 m 种泥驳中不放回抽样选取 n 艘泥驳时, 可

有 m^n 种不同的泥驳系统配置及初始装驳顺序方案。令 $w=1, 2, 3, \dots, m^n$, 泥驳系统模型经 m^n 次模拟运行后, 计算得主船累积停滞时间 $T_x(w)$, 泥驳累积停滞时间 $T_y(w)$ 。可根据计算结果和泥驳数量等限制条件, 得出最佳泥驳系统配置及装驳方案。

4 案例分析

某疏浚工程计划投入抓斗船进行疏浚作业, 当前有 3 种泥驳(1 000 m³ 泥驳 a、1 500 m³ 泥驳 b、2 000 m³ 泥驳 c)可以投入使用, 其中泥驳 a 最多可投入 3 艘, 泥驳 b、c 最多均可投入 2 艘。泥驳仅能单面靠驳。通过测算估算抓斗船装舱时间分别为 45、60、75 min, 其他信息见表 1。

表 1 泥驳系统信息

泥驳	舱容/m ³	重载运距/n mile	轻载运距/n mile	装驳时间/min	离驳时间/min	重载航速/kn	卸泥时间/min	轻载航速/kn	靠驳时间/min
a	1 000	15	10	45	5	8	7	9	5
b	1 500	15	10	60	5	9	8	10	5
c	2 000	15	15	75	5	10	10	11	5

计划在 7 艘泥驳中挑选适当数量的泥驳, 并安排好泥驳的初始装驳作业顺序, 将抓斗船非装驳时间降至最低。

设定模拟运行时间 24 h, 设定泥驳数量 3~5 艘,

共运行不同泥驳系统模型 351 个, 其中 3 艘泥驳计算结果 27 个, 4 艘泥驳计算结果 81 个, 5 艘泥驳计算结果 243 个, 截取部分符合条件的典型计算结果见表 2。

表 2 截取部分的模型典型计算结果

方案	泥驳数量/艘	泥驳 1	泥驳 2	泥驳 3	泥驳 4	泥驳 5	待驳时间/h	泥驳停滞时间/h
1	3	泥驳 c	泥驳 b	泥驳 c	-	-	1.8	1.9
2	3	泥驳 c	泥驳 a	泥驳 c	-	-	2.8	1.7
3	3	泥驳 b	泥驳 b	泥驳 a	-	-	3.6	0.0
4	3	泥驳 b	泥驳 a	泥驳 b	-	-	3.8	0.2
5	3	泥驳 c	泥驳 a	泥驳 a	-	-	4.8	3.4
6	3	泥驳 a	泥驳 a	泥驳 b	-	-	5.1	0.2
7	3	泥驳 a	泥驳 a	泥驳 a	-	-	6.3	0.0
8	4	泥驳 a	泥驳 b	泥驳 a	泥驳 a	-	0.5	0.2
9	4	泥驳 a	泥驳 a	泥驳 b	泥驳 b	-	0.0	2.9
10	4	泥驳 c	泥驳 a	泥驳 a	泥驳 a	-	1.1	4.7
11	4	泥驳 a	泥驳 a	泥驳 b	泥驳 c	-	0.1	5.3
12	4	泥驳 c	泥驳 c	泥驳 a	泥驳 a	-	0.0	5.6
13	4	泥驳 a	泥驳 c	泥驳 a	泥驳 c	-	0.0	6.1
14	4	泥驳 a	泥驳 c	泥驳 b	泥驳 c	-	0.0	9.7
15	4	泥驳 b	泥驳 b	泥驳 c	泥驳 c	-	0.0	12.9
16	5	泥驳 b	泥驳 a	泥驳 a	泥驳 a	泥驳 b	0.0	18.9
17	5	泥驳 c	泥驳 a	泥驳 b	泥驳 a	泥驳 a	0.0	21.6

续表2

方案	泥驳数量/艘	泥驳1	泥驳2	泥驳3	泥驳4	泥驳5	待驳时间/h	泥驳停滞时间/h
18	5	泥驳b	泥驳c	泥驳a	泥驳a	泥驳c	0.0	28.0
19	5	泥驳b	泥驳c	泥驳c	泥驳b	泥驳a	0.0	33.0
20	5	泥驳a	泥驳b	泥驳b	泥驳c	泥驳c	0.0	35.1

由计算结果可以看出,投入5艘泥驳时,抓斗船无待驳时间,但泥驳累积停滞时间均超过18 h,造成泥驳资源浪费;投入3艘泥驳时,在24 h模拟运行时间内,抓斗船将会出现1.8~6.3 h的待驳时间;投入4艘泥驳较为符合当前工况,抓斗船待驳时间为0~1.1 h,泥驳累积停滞时间为0.2~12.9 h,

其中最佳方案可基本将待驳时间和泥驳停滞时间降为0 h左右,见表2的方案8、9。

方案9采用2艘1 000 m³泥驳、2艘1 500 m³泥驳,装驳顺序为1 000、1 000、1 500、1 500 m³泥驳,泥驳系统模拟运行结果如图6所示。

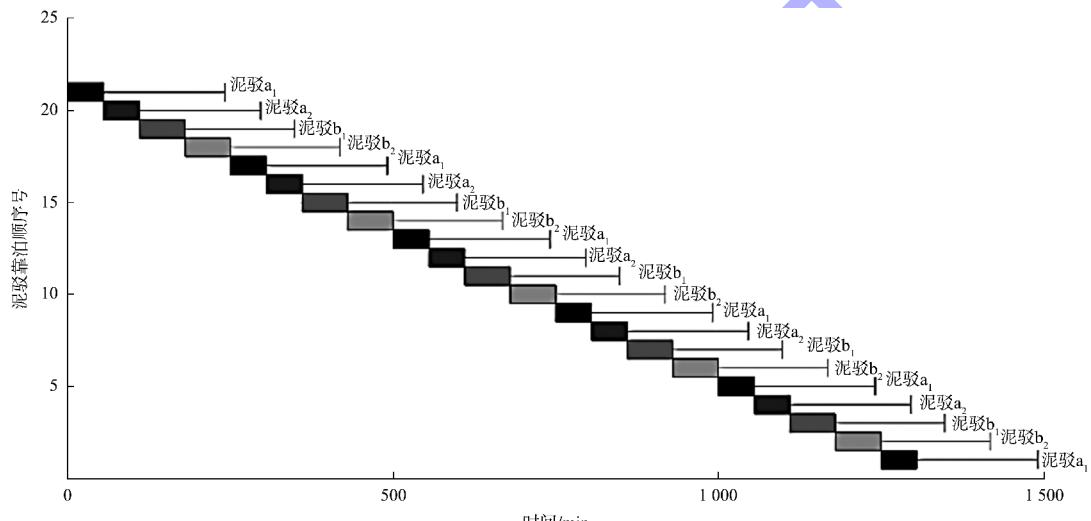


图6 最佳泥驳配置及装驳方案模拟运行结果

5 结语

1) JTS 207—2012《疏浚与吹填工程施工规范》中关于泥驳数量的计算公式有一定局限性,仅限于计算主船双面靠驳、单一泥驳船型的情况;同一泥驳系统中驳船的性能参数可相同也可不同,对于驳船性能参数不同的泥驳系统,不同的泥驳配置方案、泥驳装驳顺序会对主船和泥驳的停滞时间产生影响。

2) 本文引入了泥驳系统运行网络线路图和横道图的概念,在此基础上建立了泥驳系统运行数学模型,引入主船累积停滞时间和泥驳累积停滞时间评价指标,提出了主船单面或双面靠驳的泥驳配置及装驳方案优化方法,本数学模型和优化方法适用于泥驳单面或双面靠驳、非单一泥驳船型的情况。

3) 本文提出的泥驳系统运行数学模型和泥驳配置及装驳方案优化方法,针对既定泥驳船队实现了泥驳装驳顺序优化,针对拟组建的泥驳系统,实现了泥驳最佳配置方案和初始装驳顺序优化,可在部分疏浚工程的投标方案制定、工程前期策划等阶段得到应用。

参考文献:

- [1] 天津航道局. 疏浚技术[R]. 天津:天津航道局, 1997.
- [2] 中交天津航道局有限公司, 中国水运建设行业协会, 中交上海航道局有限公司, 等. 疏浚与吹填工程施工规范: JTS 207—2012[S]. 北京:人民交通出版社, 2012.
- [3] 周建西, 梁东琼. 泥驳设计中的几个问题[J]. 广西交通科技, 1999(6): 35-40.

(本文编辑 王璁)