



# 船舶成组通过大型船闸匹配 运行方式与工艺研究

齐俊麟, 鄢玲祉, 闫晓青, 金 锋, 彭享文

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 针对三峡—葛洲坝梯级枢纽通航建筑物长期处于满负荷运行状态, 船舶待闸数量大、时间长的问题, 国家正研究推进三峡水运新通道和葛洲坝航运扩能工程, 葛洲坝航运扩能工程施工期将对葛洲坝船闸通过能力造成较大影响。为了提升施工期葛洲坝船闸通过能力, 开展电动智能工作船牵引船舶成组过闸研究, 提出船舶成组通过葛洲坝1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>船闸的3种运行方案, 并进行理论计算分析, 从安全、效率、经济等多维度进行综合论证, 得出葛洲坝1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>船闸双向匹配循环运行方式为较优方案, 船舶成组过闸可显著提升船舶进出闸效率, 提高葛洲坝航运扩能工程施工期间的通过能力。

**关键词:** 葛洲坝船闸; 电动智能工作船; 匹配运行; 成组过闸

中图分类号: U642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0084-05

## Matching running mode and technology of ships passing through large ship locks in groups

QI Junlin, YAN Lingzhi, YAN Xiaoqing, JIN Feng, PENG Xiangwen

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In view of the problems that the navigation buildings of the Three Gorges-Gezhouba cascade hub are in full load operation for a long time, and the number of ships waiting for locks is large and the time is long, the country is studying to promote the Three Gorges water transport new channel and Gezhouba shipping capacity expansion project. The construction period of the Gezhouba shipping capacity expansion project will have a significant impact on the passing capacity of the Gezhouba ship lock. To improve the passing capacity of Gezhouba shiplock during the construction period, the research is carried out on the electric intelligent working boat towing ships to pass through the lock in groups. Three operation schemes for the group passing through the 1<sup>#</sup> and 2<sup>#</sup> shiplocks of Gezhouba are proposed, and theoretical calculations and analysis are conducted, and comprehensive demonstration is carried out from multiple dimensions such as safety, efficiency, and economy. It is concluded that the bidirectional matching cycle operation mode of Gezhouba 1<sup>#</sup> and 2<sup>#</sup> shiplocks is the optimal scheme, and the group passing of ships through the lock can significantly improve the efficiency of ship entry and exit, and improve the passing capacity of the Gezhouba shiplock during the construction period of the Gezhouba shipping capacity expansion project.

**Keywords:** Gezhouba shiplock; electric intelligent working boat; matching running; ships passing through the shiplock in groups

葛洲坝水利枢纽通航建筑物布置目前为两线三闸总格局, 两线分居枢纽两侧的大江和三江<sup>[1]</sup>。在24 h船舶满负荷的情况下, 船舶通过葛洲坝1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>船闸的运行方式为双船同步移泊进闸、单船

出闸<sup>[2]</sup>, 单个船闸每日可运行15~16闸次。随着沿江经济的不断发展, 船舶日益增长的过坝需求和船闸通过能力不足之间的矛盾日益突出, 国家正研究推进三峡水运新通道和葛洲坝航运扩能工

收稿日期: 2023-11-12

作者简介: 齐俊麟(1964—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事船舶内燃机设计与制造及枢纽通航管理工作。

程<sup>[3]</sup>。葛洲坝航运扩能工程施工区将占用通航区域, 葛洲坝船闸将成为三峡—葛洲坝梯级枢纽通航瓶颈<sup>[4]</sup>。

葛洲坝 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 船闸闸室有效长度 280 m, 宽 34 m; 单闸次 4 艘船舶占比 87%。因此, 以单闸次通过 4 艘船舶为研究对象, 前排 2 艘船舶长 130 m, 后排两艘船舶长 105 m。4 艘单船在船闸导航墙处编组, 电动智能工作船(简称“工作船”)航行至两排过闸船舶中间, 通过工作船船首、船尾布置的机械臂分别与前后两排过闸船舶连接定位, 通过缆绳将过闸单船与工作船捆绑编组成船队, 过闸单元由单船 4 个减少至船队 1 个。经实船捆绑及航行试验, 验证了此船舶成组方式的可行性, 实现工作船牵引过闸船队同步走以提高效率。在此基础上, 提出船舶成组通过大型船闸匹配运行方式的 3 种方案, 方案 1 为双闸双向匹配循环运行, 方案 2 为单闸定时换向运行, 方案 3 为单闸单向运行, 本文通过计算与现状对比分析, 选出最优方案。

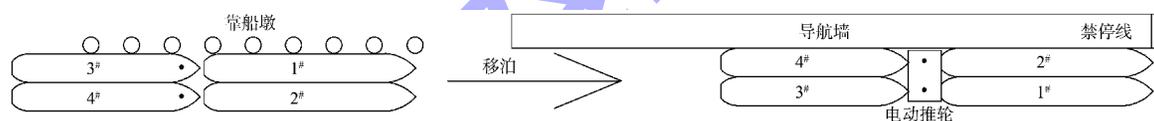


图1 船舶导航墙直接成组方式

## 1.2 成组过闸工艺流程

成组过闸指过闸船舶与工作船在导航墙处形成“2+1+2”模式后同步进闸、在船闸运行、同步出闸后在引航道解队。其中前后的“2”均为过闸船舶, 中间的“1”为工作船, 过闸单元由 4 艘单船变为 1 个船队<sup>[5]</sup>。

以 2<sup>#</sup> 船闸上行为例, 船舶成组过闸工艺流程为: 1) 4 艘过闸船舶与工作船在 2<sup>#</sup> 闸下游导航墙处形成“2+1+2”成组模式并待闸; 2) 2<sup>#</sup> 船闸下游人字门开到位后, 工作船牵引成组船队同步进闸并系泊; 3) 按照船闸运行流程, 关下游人字门、闸室充水、上游人字门开到位后, 工作船牵引成组船队同步出闸; 4) “2+1+2”成组船队在上游引航道解队。

## 1 船舶成组过闸工艺

### 1.1 船舶导航墙成组工艺流程

导航墙成组指 4 艘过闸船舶与工作船在导航墙处形成“2+1+2”的模式。如图 1 所示, 以 2<sup>#</sup> 闸上行为例, 导航墙直接成组工艺流程如下: 1) 靠船墩第 1 排外挡 2<sup>#</sup> 船自航至导航墙第 1 排内挡; 2) 等待 2<sup>#</sup> 船航行拉开安全距离 45 m 后, 靠船墩第 1 排内挡 1<sup>#</sup> 船开始自航至下游导航墙第 1 排外挡; 3) 1<sup>#</sup> 与 2<sup>#</sup> 船的船头与船尾分别并排系缆捆绑成组; 4) 工作船航行至第 1 排船尾部, 通过工作船船首机械臂与第 1 排 2 艘船舶船尾连接定位, 并通过缆绳将工作船船首与第 1 排船船尾捆绑固定; 5) 等待 1<sup>#</sup> 船航行拉开安全距离 45 m 后, 靠船墩第 2 排外挡 4<sup>#</sup> 船开始自航至下游导航墙第 2 排内挡; 6) 等待 4<sup>#</sup> 船航行拉开安全距离 45 m 后, 靠船墩第 2 排内挡 3<sup>#</sup> 船开始自航至下游导航墙第 2 排外挡; 7) 3<sup>#</sup> 与 4<sup>#</sup> 船的船头与船尾分别并排系缆捆绑成组; 8) 通过工作船船尾机械臂与第 2 排两艘船舶船首连接定位, 并通过缆绳将工作船船尾与第 2 排船船首捆绑固定。

### 1.3 成组过闸基础数据及公式

根据现场测量与实船统计, 得到船舶成组过闸历时计算基础数据, 见表 1。参照《三峡—葛洲坝水利枢纽通航管理办法》中对三峡船闸闸室船舶同步移泊和单船出闸的速度规定<sup>[6]</sup>, 船舶同步进出闸按照 0.5 m/s 速度控制, 单船出闸按照 1.0 m/s 速度控制。因成组过闸船舶主机功率不同, 船舶进出闸的速度均按 0.4 m/s 计算。通过实船测试得出, 船舶启动和停泊的平均加减速度均为 0.007 7 m/s<sup>3</sup>。由于 1<sup>#</sup> 船闸下游目前实际无趸船, 为方便计算, 假设在距离下游导航墙 550 m 处设置趸船 1 艘, 船舶从趸船上行移泊至导航墙的速度均参照下行速度, 单船取 0.38 m/s, 双船同步移泊取 0.75 m/s。

表1 船舶成组过闸历时计算基础数据

工况	下/上游导航墙禁停线至闸室上/下游禁停线距离/m	下/上游人字门开始关闭至上/下游人字门开闸时间/min	闸室下/上游禁停线至上/下游人字门运行区域外距离/m	上/下游人字门开始关闭至上/下游人字门开闸时间/min	下/上游第1艘趸船船首/靠船墩至导航墙禁停线距离/m	下/上游第1艘趸船船首/靠船墩到导航墙禁停线单船移泊速度/(m·s <sup>-1</sup> )	下/上游第1艘趸船船首/靠船墩到导航墙禁停线双船移泊速度/(m·s <sup>-1</sup> )	成组船舶进出闸速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1#船闸上行	365.7	19	297.40	20	550.0	0.38	0.75	0.4
1#船闸下行	356.5	20	298.10	19	360.0	0.38	0.75	0.4
2#船闸上行	392.2	20	301.25	21	611.8	0.62	0.75	0.4
2#船闸下行	415.9	21	320.30	20	543.1	0.75	0.75	0.4

船舶成组过闸主要为2种动态,一种为船舶从起始位置开始到匀速航行的过程,另一种为船舶从起始位置开始到目标位置停止的过程。

根据匀加速位移、匀速位移、匀减速位移公式之和以及速度与时间的关系推导出:

$$\text{动态 1: } T_1 = \frac{v^2 + 2aS}{2av} \quad (1)$$

$$\text{动态 2: } T_2 = \frac{v^2 + aS_1}{av} \quad (2)$$

式中:  $T_1$  为一段匀加速、一段匀速总历时, s;  $T_2$  为一段匀加速、一段匀速、一段匀减速总历时, s;  $v$  为匀速运动速度, m/s;  $S$  为一段加速与一段匀速所行驶的位移, m;  $a$  为加速度, m/s<sup>2</sup>;  $S_1$  为一段加速、一段匀速、一段减速所行驶的位移, m。

## 2 葛洲坝双闸联合运行工艺流程及分析

### 2.1 双闸匹配循环运行(方案1)

双闸匹配循环运行方式有2种,分别为1#船闸单向上行、2#船闸单向下行(简称“一上二下”),2#船闸单向上行、1#船闸单向下行(简称“二上一下”)。

以“一下二上”为例,船闸匹配运行过程为:

1) 成组船队上行通过2#船闸,在2#船闸上游引航道解队;2) 工作船航行至1#船闸上游引航道,与过闸船舶成组;3) 成组船队下行通过1#船闸,在1#船闸下游引航道解队;4) 工作船航行至2#船闸下游引航道,与过闸船舶成组。

计算得出,方案1工艺流程运行需要4艘工作船;如考虑调度计划衔接、工作船过河航行等让、工作船维修与充电等相关因素,则需6艘工作船参与运行。

### 2.2 单闸定时换向运行(方案2)

单闸定时换向运行指葛洲坝1#、2#船闸单向成组过闸运行 $N$ 个闸次,工作船解队停靠在靠泊区等待下一次成组,船闸定时换向后,成组过闸再运行 $N$ 个闸次,以此为1个工作单元,达到单闸定时换向运行工作模式。

以2#船闸上行为例,单闸定时换向运行过程为:1) 成组船队上行通过2#船闸,在2#船闸上游引航道解队;2) 工作船解队后航行2#船闸上游靠泊区,当成组上行运行 $N$ 个闸次后与下行船舶成组;3) 成组船队下行通过2#船闸,在2#船闸下游引航道解队;4) 工作船解队后航行2#船闸下游靠泊区,当成组下行运行 $N$ 个闸次后与上行船舶成组。

计算得出,以需要最少工作船为标准,1#船闸运行5个闸次定时换向,2#船闸运行6个闸次定时换向,共需要11艘工作船;考虑到工作船维修、换电等情况,需13艘工作船参与运行。

### 2.3 单闸单向运行(方案3)

单闸单向运行指1#船闸单向上行或下行独立运行,2#船闸单向上行或下行独立运行。葛洲坝1#、2#船闸单向成组过闸运行 $N$ 个闸次,工作船解队后在靠泊区等待,以第 $N$ 个闸次后的空载为契机,单独进行工作船过闸,将工作船运输至成组起始位置,以此为1个单元,达到单闸单向循环运行工作模式。

以2#船闸单向上行为例,单闸单向运行过程为:1) 成组船队上行通过2#船闸,在2#船闸上游引航道解队;2) 工作船航行至2#船闸上游靠泊区,2#船闸连续上行运行 $n$ ( $n \leq 8$ )个闸次,船队解组后工作船均航行至2#船闸上游靠泊区;3) 2#船

闸第  $n+1$  个闸次空载运行时,  $n$  艘工作船利用空载运行至 2# 船闸下游靠泊区; 4) 工作船继续与过闸船舶成组通过 2# 船闸上行过闸。

计算得出, 以最少工作船为标准, 1# 船闸运行 4 个闸次、2# 船闸运行 7 个闸次, 然后利用空载将工作船进行运输, 共需要 11 艘工作船; 考虑到工作船维修、换电等情况, 需 13 艘工作船参与运行。

### 2.4 方案分析与选取

3 个方案优缺点对比见表 2。由表可知, 1) 从安全角度考虑, 方案 1 中工作船循环运行时需要在航道掉头过河, 可能存在安全风险, 方案 2、3

中不存在工作船在航道掉头, 但增加了船舶会船次数, 当航道水位波动较大和天气环境较差时, 可能存在船舶擦碰风险。2) 从效率角度考虑, 方案 1 中船舶导航墙成组与船舶成组过闸同步进行, 历时计算时只用考虑船舶成组的时间, 而方案 2、3 还要考虑船舶会船、船舶导航墙成组以及工作船集中返回时进出闸的时间, 影响运行效率。3) 从经济角度考虑, 工作船越少越节约设备与人工成本, 方案 2、3 理论计算上所需工作船数量较多; 而方案 1 由于工作船所需数量少, 占用航道空间少, 也便于后期维修和维护。

表 2 不同方案优缺点对比

方案	工作船计算个数/个	工作船运行个数/个	优点	缺点
1	4	6	工作船所需数量少	工作船换向需在航道掉头过河, 有安全风险
2	11	13	工作船换向无需掉头	工作船所需数量多, 出闸会船、船舶导航墙成组且换向时影响运行效率
3	11	13	工作船换向无需掉头	工作船所需数量多, 将工作船集中返回时影响过闸效率

经对比分析得出, 方案 1 (双闸匹配循环运行) 所需工作船数量少, 利用充分, 设备与人工成本较低, 运行效率更高。

### 3 双闸匹配循环运行计算与分析

1) 根据船舶导航墙直接成组历时工艺流程计算:

$$T_3 = t_4 + t_5 + t_6 + t_7 + t_8 \quad (3)$$

式中:  $T_3$  为 4 条单船分别从靠船墩移泊到导航墙的时间也即船舶导航墙直接成组历时, s;  $t_4$  为 1# 船等待 2# 船行驶安全距离 45 m 的时间, s;  $t_5$  为 4# 船等待 1# 船行驶安全距离 45 m 的时间, s;  $t_6$  为 3# 船等待 4# 船行驶安全距离 45 m 的时间, s;  $t_7$  为 3# 船从靠船墩移泊至导航墙靠泊完毕时间, s;  $t_8$  为工作船与船舶系缆和解缆的时间, 为 240 s。

2) 根据船舶成组过闸历时工艺流程计算:

$$T_{\text{组}} = t_{\text{进}} + t_{\text{出}} + t_{\text{设备}} + t_9 \quad (4)$$

式中:  $T_{\text{组}}$  为船舶成组过闸历时, s;  $t_{\text{进}}$  为成组船队从下(上)游导航墙禁停线到闸室上(下)游禁停线的时间, s;  $t_{\text{出}}$  为成组船队从闸室下(上)游禁停线移泊至上(下)游人字门运行区域外的时间, s;  $t_{\text{设备}}$  为船闸设备运行时间, 即船闸开门、关门、充泄水运行时间, s;  $t_9$  为成组船队在导航墙和闸室解缆和系缆的时间, 为 270 s。

3) 根据闸次间隔时间  $T_{\text{间隔}}$  表示船舶成组过闸的时间  $T_{\text{组}}$  与空载时间  $t_{\text{空}}$  总和:

$$T_{\text{间隔}} = T_{\text{组}} + t_{\text{空}} \quad (5)$$

由表 1 参数可以计算出船舶导航墙直接成组历时、船舶成组进、出闸历时、船舶成组过闸历时以及 2 个闸次间隔时间, 见表 3。

表 3 船舶成组过闸分步历时

工况	船舶导航墙直接成组历时/min	成组船舶进闸历时/min	成组船舶出闸历时/min	船舶成组过闸历时/min	闸次间隔时间/min
1# 船闸单向上行	46.41	16.10	12.84	52.44	72.44
1# 船闸单向下行	38.07	15.72	12.85	53.07	72.07
2# 船闸单向上行	33.75	17.21	12.98	54.69	75.69
2# 船闸单向下行	28.35	18.19	13.78	57.47	77.47

按照葛洲坝实际工作时间为 24 h, 可计算出循环运行 1 d 闸次数, 分别为 1# 船闸上行 19.88 次, 1# 船闸下行 19.98 次, 2# 船闸上行 19.02 次, 2# 船闸下行 18.59 次。因此葛洲坝双船闸 2 种匹配运行方式的 1 d 闸次数分别为“一上二下” 38.47 闸次, “一下二上” 39 闸次。

通过以上计算可知, “一下二上” 的闸次数总和大于“一下二上” 的闸次数总和, 且在实际运行中, 葛洲坝 1#、2# 船闸匹配运行时, “一下二上” 的匹配运行方式通过闸次数较多, 效率更高。因此, 正常情况下, 建议采取 1# 船闸下行和 2# 船闸上行的匹配运行方式。

#### 4 船舶成组过闸效率提升分析

由表 3 可知, 船舶导航墙成组时间远小于 2 个

表 4 船舶成组与传统过闸方式效率对比

方式	1# 船闸下行进出闸历时/min		1# 船闸上行进出闸历时/min		2# 船闸下行进出闸历时/min		2# 船闸上行进出闸历时/min	
	进闸	出闸	进闸	出闸	进闸	出闸	进闸	出闸
传统	17.43	22.17	17.40	20.50	19.97	26.17	18.15	24.17
成组	15.72	12.85	16.10	12.84	18.19	13.78	17.21	12.98
效率提升/%	9.81	42.04	7.47	37.37	8.91	47.34	5.18	46.30

#### 5 结语

1) 在葛洲坝航运扩能工程施工期间采用电动智能工作船牵引 4 艘船舶成组进出闸, 建议双闸双向匹配循环运行方式, 其中葛洲坝 1# 船闸下行、2# 船闸上行运行效率更高, 工作船循环利用充分, 方便后期维修和维护, 且占用航道位置较少, 方便停靠。

2) 工作船采取充电方式, 充电时长 5~6 h。考虑工作船充电、故障、维修保养等因素, 需建造 12 艘工作船, 其中 6 艘处于运行状态, 6 艘处于充电或维修保养状态, 才能满足实际工作船运行维护需要。

3) 经对比分析, 船舶成组较现有方式的进出闸效率有显著提升, 其中单闸进闸最大提升 9.81%, 出闸最大提升 47.34%, 有效缩短了进出闸的时间, 提高了葛洲坝航运扩能工程施工期船闸通过能力。

4) 由于理论计算时间与实际时间之间存在误

差, 需要进行实船试验以验证成组进出闸的效率, 同时根据实际情况确定工作船的航行路线以及航道掉头过河的位置。

葛洲坝船闸传统过闸方式为船舶逐排同步进闸, 单船逐条出闸。成组方式与传统过闸方式的进出闸时间对比见表 4。由表可知, 船舶成组较现有方式的进出闸效率有显著提升, 其中进闸最大提升 9.83%, 出闸最大提升 47.34%。

差, 需要进行实船试验以验证成组进出闸的效率, 同时根据实际情况确定工作船的航行路线以及航道掉头过河的位置。

#### 参考文献:

[1] 齐俊麟. 三峡—葛洲坝船闸通过能力分析 & 扩能工程对策[J]. 航海工程, 2019, 48(3): 169-174.

[2] 张勃, 万韬, 杨珏. 葛洲坝船闸船舶同步出闸运行组织[J]. 水运工程, 2020(2): 48-51.

[3] 王晓春, 余金燕. 葛洲坝三江下引航道扩能施工方案对通航的影响[J]. 水运工程, 2023(3): 173-178.

[4] 朱俊凤. 三峡大坝至庙河河段待闸锚地建设规划研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.

[5] 舒荣龙, 陈桂馥, 杜宗伟. 提高三峡—葛洲坝两坝间通航能力试验研究[J]. 人民长江, 2005, 36(7): 31-33, 72.

[6] 交通运输部长江航务管理局. 三峡—葛洲坝枢纽河段通航管理办法[A]. 武汉: 交通运输部长江航务管理局, 2016.

(本文编辑 王传瑜)