



巢湖一线船闸改造工程船闸规模论证

董 霞，吴 澄，朱芮娴，黄道刚
(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：巢湖闸枢纽位于巢湖入裕溪河口，是合裕线航道和巢湖防洪的关键控制工程；上游紧邻巢湖生态风景名胜区，受生态环保和防洪因素制约，建设条件受限。现状一线船闸技术状态差，不能正常运行，船闸通过能力不能满足运量需求。依据老闸闸室宽度，通过现状不同船宽过闸船舶数量占比分析，提出过闸船舶应根据船宽选择从闸室尺度适应性较好的船闸过闸，尽量提高闸室利用率的运行方案。一线船闸改造后门槛最小水深为 4.5 m，通过过闸船舶临界航速分析发现，正常进出闸航速条件下，设计船舶满载时最大吃水可由规范允许值 2.80 m 提升至 2.92 m，满足过闸要求的 2 000 吨级船舶数量占比可由 64.68% 提高至 83.10%，当航速降低至 0.6 m/s 时，基本可满足所有 2 000 吨级船舶过闸。同时从运输经济性角度，通过设计船型对船闸门槛水深与下游航道设计水深匹配性分析，论证了设计船舶最大吃水取值的合理性。

关键词：船闸规模；门槛水深；临界航速

中图分类号：U612.3

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2025)12-0122-06

Demonstration of ship lock scale for Chaohu first-line ship lock renovation project

DONG Xia, WU Peng, ZHU Ruixian, HUANG Daogang

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The Chaohu Ship Lock Hub is located at the entrance from Chaohu River to the Yuxi River, and is a key control project for the Heyu line channel and Chaohu River flood control. Its upstream is adjacent to the Chaohu ecological scenic area. Due to the constraints of ecological and flood prevention factors, construction conditions are restricted. The current technical condition of the first-line ship lock is poor and cannot operate normally. The throughput capacity of ship lock cannot meet the demand for transportation volume. Based on the width of the old lock chamber and the analysis of the proportion of ships passing through the lock chamber with different widths, it is proposed that the ships passing through the lock chamber should choose the ship lock with better adaptability to the size of the lock chamber according to the width of the ship, and try to improve the utilization rate of the lock chamber as much as possible. After the renovation of the first-line ship lock, the minimum water depth of the threshold is 4.5 m. Through the analysis of the critical speed of the ships passing through the lock, it is found that under normal entry and exit speed conditions, the maximum draft of the designed ship when fully loaded can be increased from the allowable value of 2.80 m to 2.92 m. The proportion of 2,000-ton class ships that meet the requirements for passing through the lock can be increased from 64.68% to 83.10%. When the speed is reduced to 0.6 m/s, it can basically meet the requirements for all designed 2,000-ton class ships to pass through the lock. At the same time, from the perspective of transportation economy, the rationality of the maximum draft value of the designed ship is demonstrated by analyzing the matching between the threshold water depth of the ship lock and the downstream channel design water depth through the design of the ship type.

Keywords: ship lock scale; threshold water depth; critical speed

收稿日期：2025-04-15 录用日期：2025-06-04

作者简介：董霞(1979—)，女，硕士，正高级工程师，从事港航工程设计工作。

国内早期建设的部分船闸, 规模尺度偏小, 结构强度存在不同程度降低, 局部结构破损和设备老化等现象, 不能满足近年来水运需求的快速增长和船舶大型化发展。为适应大型船舶过闸需求, 需对老闸进行改造或新建复线船闸。部分船闸受闸址位置地形条件、防洪影响和环境保护要求等因素影响, 无新建船闸条件; 老闸闸室尺度和门槛水深均受现状限制; 如何合理确定船闸规模, 提高船闸通过能力十分重要。

船闸门槛水深是船闸规模的重要参数之一。国内外许多学者对船闸门槛水深开展了大量研究, 曹凤帅等^[1]总结了国内外设计规范关于船闸门槛水深的相关规定及其影响因素分析的有关研究成果, 提出门槛水深主要影响因素包括船舶满载吃水、船舶航行下沉量、非恒定流引起的水面波动, 船舶纵倾等; 汪璐等^[2]通过三峡—葛洲坝船闸的交通组织研究, 提出充分利用高水位时段门槛水深条件, 提高船舶吃水控制标准, 提高三峡船闸通过能力。上述研究成果对完善门槛水深影响因素分析, 合理确定门槛水深具有重要意义, 但因门槛水深影响因素复杂, 不同船闸运行条件差异较大, 实际运用存在一定难度, 对船闸调度运营管理要求较高。

本文针对巢湖一线船闸闸室尺度和门槛水深受限条件, 拟通过不同船宽过闸船舶占比和过闸船舶的临界航速分析, 从提高闸室利用率, 提高过闸船舶允许最大吃水等方面进行论证, 合理确定船闸规模, 可为同类型船闸改造加固工程船闸规模分析提供借鉴参考。

1 工程概况

合裕线航道是安徽省干线航道网“一纵两横五干二十线”总体布局中的“一纵”, 也是全国高等级航道“四纵四横两网”中“纵二·江淮干线”的重要组成部分。合裕线航道现状航道等级为二级, 在巢湖口和裕溪河口建有巢湖和裕溪两座枢纽。巢湖枢纽由节制闸和双线船闸组成, 工程等别为二等, 是控制巢湖流域防洪、排涝、航运及蓄水灌溉的综合性水利枢纽。2023 年随着裕溪一线船闸扩容

改造工程和引江济淮工程江淮沟通段相继完工和通航, 船舶大型化发展趋势明显, 巢湖船闸过闸运量快速增长, 高高峰期出现堵闸现象。巢湖一线船闸因建成年代久远, 技术状态较差^[3], 不能满足正常运行需求, 迫切需要改造。

2 建设条件

2.1 枢纽现状

巢湖枢纽于 1962 年 12 月建成, 2002 年加固扩建, 巢湖枢纽由西北至东南方向依次布置节制闸、一线船闸和二线船闸。巢湖一线船闸于 1962 年建成, 采用原苏联三级标准, 闸室有效尺度为 $15.4\text{ m} \times 195\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ (宽度×长度×门槛最小水深), 与节制闸平行布置, 两闸中心距约 80 m; 巢湖二线船闸于 2012 年 12 月建成, 设计最大船舶吨级为 1 000 吨级, 船闸等级为三级, 闸室尺度为 $23\text{ m} \times 230\text{ m} \times 4.5\text{ m}$, 船闸中心线与一线船闸中心线间距约为 80 m, 巢湖枢纽现状见图 1。



图 1 枢纽现状
Fig. 1 Current state of the hub

2.2 防洪影响

根据巢湖流域防洪泄洪能力提升要求, 节制闸拟向右岸增孔扩建, 船闸建设应避免占用巢湖节制闸右岸工程用地, 影响节制闸改扩建; 船闸闸室结构、停泊段不得占用节制闸管理范围, 影响节制闸工程管理。

2.3 生态环境影响

闸位邻近巢湖风景名胜区, 闸位布置不允许占用生态红线。

2.4 建设紧迫性

受生态环境保护和巢湖防洪要求限制, 原位

改建大规模船闸方案不可行。原设计在二线船闸右岸预留三线船闸，因预留闸位处现在建有枢纽管理区、企业和居民区，建筑物密集，征地拆迁难度大，新建三线船闸前期研究和建设工期较长，施工期间仅二线船闸可通行，可能在巢湖湖区和裕溪河航道造成大量船舶滞留，湖区风浪大，待泊条件差，环境影响压力大，下游航道水域宽度有限，不具备大量船舶临时停泊的空间，堵闸风险大，迫切需要加快一线船闸改造。

3 总体设计思路

鉴于生态环保、防洪要求及工程建设的紧迫性，船闸总体布置拟采用原位加固改造方案^[4]，建设规模为 15.4 m×240 m×4.5 m，设计船型为 2 000 吨级。由于下闸首位于枢纽防洪线上，加固改造方案维持下闸首位置不变；结合地形条件，在现有船闸基础上适当向上游延长闸室，拆除重建上闸首，增大船闸通过能力，对现状闸室和下闸首进行加固处理，对启闭机、金属结构和电气等设备进行更新，改善船闸运行条件。论证在该设计方案下船闸规模能否满足近期的过闸需求。

4 船闸规模论证

4.1 过闸船舶现状分析

4.1.1 过闸船舶不同吨级船舶占比

根据 2023 年巢湖船闸过闸船舶不同吨级船舶占比分析，结果见表 1，过闸船舶以 1 000 吨级和 2 000 吨级为主，两者占比超过 73%，3 000 吨级船舶占比超过 20%。

表 1 2023 年巢湖船闸过闸船舶不同吨级船舶占比

Tab. 1 Proportion of ships by different tonnage class passing through Chaohu Ship Lock in 2023

船舶分类	过闸船舶数量/艘	占比/%
500 吨级以下	231	0.50
500 吨级	1 211	2.62
1 000 吨级	14 412	31.15
2 000 吨级	19 593	42.34
3 000 吨级	9 381	20.28
5 000 吨级	1 439	3.11
合计	46 267	100

4.1.2 过闸船舶宽度

判断已建船闸是否满足 2 000 吨级船舶过闸要求，主要根据船舶宽度和吃水，船舶长度则主要决定过闸船舶的数量。根据 2023 年巢湖船闸过闸船舶不同船宽艘次占比分析，见表 2；船宽以 11.0~13.8 m 为主，占比超过一半；船宽小于 13.8 m 船舶占比为 92.7%。2 000 吨级船舶不同船宽占比见表 3，可知 2 000 吨级船舶的船宽小于 13.8 m 的数量占比为 99.77%，船宽 11.0~13.8 m 的船舶占比为 86.79%。

表 2 2023 年巢湖船闸过闸船舶不同船宽艘次占比

Tab. 2 Proportion of different width ships passing through Chaohu Ship Lock in 2023

船宽/m	船舶数量/艘次	占比/%	合计/%
$B < 6.0$	38	0.08	
$6.0 \leq B \leq 8.0$	504	1.09	
$8.0 < B \leq 10.0$	9 430	20.38	92.66
$10.0 < B \leq 11.0$	7 205	15.57	
$11.0 < B \leq 13.8$	25 696	55.54	
$13.8 < B \leq 15.0$	3 390	7.33	
$15.0 < B \leq 16.5$	1	0.00	7.34
$B > 16.5$	3	0.01	
合计	46 267	100	100

表 3 2 000 吨级船舶不同船宽占比

Tab. 3 Proportion of different width of 2,000-ton class ships

船舶吨级	船宽/m	船舶数量/艘次	占比/%
	$8.0 < B \leq 10.0$	448	2.28
	$10.0 < B \leq 11.0$	2 094	10.69
	$11.0 < B \leq 13.8$	17 004	86.79
2 000	$13.8 < B \leq 15.0$	46	0.23
	$15.0 < B \leq 16.5$	0	0.00
	$B > 16.5$	1	0.01
合计		19 593	100

巢湖一线船闸现状闸室有效宽度为 15.4 m，可满足船宽小于 13.8 m 船舶过闸，从船宽角度而言，基本可满足现状所有 2 000 吨级船舶过闸。巢湖复线船闸闸室有效宽度为 23 m，适合小于 11.0 m 船舶组合过闸，从尽量提高闸室利用率角度考虑，船宽 11.0~13.8 m 船舶宜选择从一线船闸过闸。

4.1.3 过闸船舶长度

根据 2023 年过闸船舶统计数据，2 000 吨

级过闸船舶长度以 53~73 m 为主, 占比大于 90%, 其中船长 53~63 m 占比为 27.79%, 63~73 m 占比为 63.62%, 见表 4。2023 年船宽 11.0~13.8 m 的 2 000 吨级船舶不同船长的船舶数量占比分析见表 5。

表 4 2023 年 2 000 吨级过闸船舶不同船长占比
Tab. 4 Proportion of different length of 2,000-ton class ships passing through ship lock in 2023

船舶吨级	船长/m	船舶数量/艘次	占比/%
2 000	42≤L≤53	54	0.28
	53<L<63	5 445	27.79
	63≤L≤73	12 466	63.62
	73<L≤85	1 627	8.30
	85<L≤90	0	0.00
	L>90	1	0.01
合计		19 593	100

表 5 2023 年船宽 11.0~13.8 m 2 000 吨级船舶不同船长船舶数量占比

Tab. 5 Proportion of different length of 2,000-ton class ships with a width of 11.0~13.8 m in 2023

船舶吨级	船宽/m	船长/m	船舶数量/艘次	占比/%
2 000	11.0<B≤13.8	42≤L≤53	1	0.01
		53<L<63	3 171	90.43
		63≤L≤73	12 207	9.56
	73<L≤85	1 625		9.56
合计		17 004		100

由表 5 可见, 船宽为 11.0~13.8 m 的 2 000 吨级船舶, 船长 53~73 m 的船舶占比大于 90%, 73~85 m 的船舶占比为 9.56%。

4.2 设计船型最大吃水的选取

4.2.1 2 000 吨级船舶满载吃水

根据内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列^[5-6], 长江支线过闸干散货船, 2 000 吨级船舶船宽为 13.8 m, 船长包括 63、73、85 m, 京杭运河、淮河水系干线船闸的内河干散货船, 2 000 吨级船舶船宽为 13.8 m, 船长为 67.6 m。不同船长的 2 000 吨级船舶满载吃水见表 6。

表 6 不同船长的 2 000 吨级船舶的满载吃水

Tab. 6 Full loaded draft for 2,000-ton class ships of different length

船舶吨级	载质量/t	船宽/m	船长/m	满载吃水/m
2 000	1 500~2 500	13.8	63	2.33~3.88
			67.6	2.17~3.62
			73	2.01~3.35
			85	1.73~2.88

注: 考虑船舶自重力和船舶方形系数等, 满载吃水按照船宽、船长和满载吃水的乘积为载质量的 1.35 倍估算。

4.2.2 设计船型最大吃水取值及船舶数量占比

巢湖一线船闸下闸首位于防洪挡水线上, 一线船闸改造不能破坏现状防洪线, 改建一线船闸门槛最小水深受下闸首限制, 为 4.5 m, 根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[7], 门槛最小水深要求为设计吃水的 1.6 倍, 反算过闸船舶最大吃水为 2.80 m。2023 年过闸 2 000 吨级船舶吃水 2.80 m 的船舶占比见表 7。

表 7 2023 年过闸 2 000 吨级船舶吃水 2.80 m 的船舶占比

Tab. 7 Proportion of ships with a draft of 2.8 m for 2,000-ton class ships passing through ship lock in 2023

载质量/t	船宽/m	船长/m	吃水 2.80 m 船舶数量/艘次	船舶总数量/艘次	占比/%
1 500~1 516	42≤L≤53	0	1	0.00	
1 500~1 803	53<L<63	1 587	3 171	50.05	
1 500~2 089	63≤L≤73	7 345	12 207	60.17	
1 665~2 432	73<L≤85	1 602	1 625	98.58	
合计		10 534	17 004		

由表 7 可见, 2023 年现状情况下, 船长为 73~85 m 吃水 2.80 m 的过闸船舶占比为 98.58%; 船长 53~73 m、吃水 2.80 m 船舶的占比为 58.08%。设计船型按规范取标准船型, 船长为 63~85 m, 由表 7 可见船长 63~85 m、吃水 2.80 m 船舶占比为 64.68%。

船闸总体设计规范中门槛设计最小水深为不小于设计船舶最大吃水的 1.6 倍, 该系数的含义

是门槛最小水深在满足设计船舶满载时最大吃水加富余深度要求的基础上，应充分考虑船舶航行下沉量、变吃水多载时吃水增大以及船舶大型化发展需要等因素^[8]，设计过程中应结合实际情况具体分析。

4.2.3 设计吃水与临界航速的关系

在限制性航道中，水深和宽度的限制将影响船舶的航速。根据美国陆军工程兵团公式^[9]，船舶临界航速可按下式计算：

$$V_{\text{lim}} = \sqrt{gh} \cdot \sqrt{8 \cos \left[\frac{\pi + \arccos(1 - A_s/A_c)}{3} \right]^3} \quad (1)$$

式中： V_{lim} 为临界航速，m/s； A_s 为船舶水下面积， m^2 ； A_c 为航道断面面积， m^2 ； h 为等效水深，m； g 为重力加速度， m/s^2 。

根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》，单船进闸平均速度可取 0.8 m/s，对应临界航速约为 1.0 m/s。门槛水深为 4.5 m 时，按临界航速 1.0 m/s 计算，计算船舶水下面积为 40.30 m^2 ，船舶设计吃水为 2.92 m；若临界航速按 0.75 m/s 计算，对应设计航速约为 0.6 m/s，计算船舶水下面积为 45.54 m^2 ，船舶设计吃水为 3.30 m。由上述计算分析可知，在正常设计航速条件，可满足设计吃水为 2.92 m 船舶过闸，当设计航速降至 0.6 m/s，可满足设计吃水 3.30 m 船舶过闸，基本满足所有 2 000 吨级船舶过闸。

4.2.4 提高门槛水深对过闸船舶数量的影响

根据 2003—2023 年水文资料^[10]分析，采用保

证率频率法计算的巢湖船闸上下游水位大于或等于 8.5 m 的频率为 41.41%，根据巢湖防汛抗旱调度和裕溪闸控制运用计划，巢湖及裕溪河近年水位保证率逐步提高，根据 2014—2023 年水文资料分析，巢湖船闸上下游水位大于或等于 8.5 m 的频率为 58.1%。

门槛水深为 5.0 m 时，按临界航速 1.0 m/s 计算，计算船舶水下面积为 45.54 m^2 ，船舶设计吃水为 3.30 m。根据 2023 年巢湖船闸过闸船舶数量统计，2 000 吨级船长 63~85 m 满载吃水小于 3.30 m 的船舶占比为 97.7%。

由上述分析可知，1 年中约有 210 d 以上基本可满足所有 2 000 吨级船舶以正常航速过闸。

4.2.5 船闸门槛水深与下游航道设计水深匹配性

当船舶设计航速较低时，船舶舵效低，操纵性差，通航效率低，航速较高时又将增加船舶油耗，因此合理的设计航速既要满足船舶操纵性，保证通航效率，又要满足运输经济性，通常不低于 10 km/h。据统计，京杭运河水系船舶设计航速普遍为 12~15 km/h。

根据合裕线（施口—裕溪口）航道改造工程初步设计文件^[11]，巢湖船闸下游合裕线航道设计水深为 4.0 m，航道断面为梯形断面，底宽为 60 m，疏浚边坡坡比为 1:4。为分析下游航道水深条件下船舶航速，对设计吃水为 2.80 和 3.30 m（规范标准 2 000 吨级船舶吃水）对应设计航速进行对比，见表 8。

表 8 不同设计吃水船舶设计航速计算结果
Tab. 8 Calculation of design speed of ships with different drafts

设计吃水/m	航道断面面积/ m^2	船舶水下面积/ m^2	重力加速度/(m/s^{-2})	等效水深/m	临界航速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	设计航速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)
2.80	$(60+4\times4)\times4=304$	$13.8\times2.8\times0.85=32.84$	9.8	3.3	12.46	9.97
3.30	$(60+4\times4)\times4=304$	$13.8\times3.3\times0.85=38.71$	9.8	3.3	11.80	9.44

由表 8 可知，设计船舶吃水为 2.80 m 时，设计航速为 9.97 km/h，设计船舶吃水为 3.30 m 时，设计航速为 9.44 km/h。在航道水深一定条件下，随着设计船舶吃水的增加，设计航速有所降低，

船舶运输经济性变差。设计吃水取 2.80 m 时，船舶在下游合裕线航道内通航设计航速在合理范围内，与过闸船舶吃水相适应。

5 结语

1) 巢湖一线船闸闸室有效宽度为 15.4 m, 复线船闸闸室有效宽度为 23 m, 现状过闸 2 000 吨级船舶船宽 11.0~13.8 m 船舶占比为 86.79%, 根据不同船宽数量占比分析, 结合现状船闸规模尺度, 提出大型船舶(船宽 11.0~13.8 m)从一线船闸过闸、小型船舶组合从复线船闸过闸, 尽量提高闸室利用率。

2) 一线船闸改造后门槛最小水深为 4.5 m, 对应设计船舶最大吃水为 2.80 m, 根据现状过闸统计资料分析, 可满足 64.68% 设计 2 000 吨级船舶过闸; 通过过闸船舶的极限航速分析, 正常进出闸航速条件下, 设计船型最大吃水可由 2.80 m 提升至 2.92 m, 可满足 83.10% 设计 2 000 吨级船舶过闸; 当船舶过闸航速降低至 0.6 m/s 时, 基本可满足所有设计 2 000 吨级船舶过闸, 此时需加强过闸船舶航速管理, 保证通航安全, 对运输经济性有一定影响。巢湖和裕溪河航道为闸控河段, 1 年中巢湖一线船闸约有 210 d 门槛水深可达到 5.0 m, 此时可满足所有设计 2 000 吨级船舶正常航速过闸。

3) 在下游航道 4.0 m 通航水深条件下, 设计船型最大吃水取 2.80 m 时, 航道内船舶航速为 9.97 km/h, 位于经济航速范围内。设计船型最大吃水取 2.80 m 可适应船闸门槛水深, 且在航道内航行时也可达到经济航速, 说明设计船舶最大吃水取值适宜。

4) 实际运行过程中, 不同宽度船舶选择从不同规模船闸过闸涉及复杂的调度, 需开展多线船闸船舶过闸调度仿真模拟研究。

参考文献:

- [1] 曹凤帅, 黄瑶. 船闸门槛水深研究进展[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 162-166.
CAO F S, HUANG Y. Research progress on water depth above ship lock sill[J]. Journal of waterway and harbor, 2018, 39(2): 162-166.
- [2] 汪璐, 周建武, 刘莹. 三峡—葛洲坝船闸通过 4.5m 吃水船舶的交通组织研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(11): 33-35, 75.
WANG L, ZHOU J W, LIU Y. Traffic organization of 4.5m draft ships in the Three Gorges Gezhouba Ship Lock[J]. China water transport (the second half of the month), 2019, 19(11): 33-35, 75.
- [3] 安徽省水利水电工程检测有限公司. 巢湖一线船闸检测和质量评定报告[R]. 合肥: 安徽省水利水电工程检测有限公司, 2019.
Anhui Water Conservancy and Hydropower Engineering Inspection Co., Ltd. Inspection and quality assessment report of Chaohu first-line ship lock [R]. Hefei: Anhui Water Conservancy and Hydropower Engineering Inspection Co., Ltd., 2019.
- [4] 中交水运规划设计院有限公司. 合裕线航道巢湖船闸扩容改造工程工程可行性研究报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2024.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Feasibility study report on the expansion and renovation project of Chaohu Ship Lock on the Heyu line navigation channel[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2024.
- [5] 内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列: 第 1 部分: 长江水系: GB 38030. 1—2019[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会, 2019.
Dimensions series of standard transport ship types passing the locks of inland rivers: part 1: Yangtze River system: GB 38030. 1-2019 [S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, China National Standardization Administration, 2019.
- [6] 内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列: 第 2 部分: 京杭运河、淮河水系: GB 38030. 2—2019[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会, 2019.
Dimensions series of standard transport ship types passing the locks of in landrivers: part 2: Crand Canal and Huai River system: GB 38030. 2-2019 [S]. Beijing: State Administration for Market Regulation, China National Standardization Administration, 2019.