

## 船闸开通闸工程实践与安全控制研究

齐春风, 张明进, 欧阳群安, 杨燕华, 王丹媛

### Research on the engineering practice and safety control of open-gate operation in locks

QI Chunfeng, ZHANG Mingjin, OUYANG Qunan, YANG Yanhua, WANG Danyuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20240930001>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 非掩护引航道通航控制标准分析方法

Analysis method for navigation control standards of non-sheltered approach channels

水利水电工程学报. 2025(6): 37 <https://doi.org/10.12170/20240815002>

##### 现代运河发展与省水船闸通航水力安全调控

Modern canal development and hydraulic safety regulation of water-saving locks

水利水电工程学报. 2025(5): 1 <https://doi.org/10.12170/20250930002>

##### 赣江龙头山枢纽一线船闸通航水流条件及改善措施研究

Study on navigation flow conditions and improvement measures at Longtoushan Junction in the Ganjiang River

水利水电工程学报. 2023(6): 213 <https://doi.org/10.12170/20221231002>

##### 船闸末级闸首超长输水廊道泄水水力特性数值模拟

Numerical simulation of hydraulic characteristics of the ultra-long water conveyance corridor at the head of the last-step ship lock chamber

水利水电工程学报. 2021(4): 92 <https://doi.org/10.12170/20200728003>

##### 平陆运河多类型支流汇入口航道治理研究

Study on channel regulation of multi-type tributary confluences in the Pinglu Canal

水利水电工程学报. 2025(4): 184 <https://doi.org/10.12170/20250311001>

##### 超高水头大型船闸闸室明沟消能特性研究

Energy dissipation characteristics of the open ditch located in a large-scale ship lock chamber with an extreme high water head

水利水电工程学报. 2022(5): 69 <https://doi.org/10.12170/20210805008>





扫码进入官网，阅读更多精彩文章

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20240930001

齐春风, 张明进, 欧阳群安, 等. 船闸开通闸工程实践与安全控制研究 [J]. 水利水运工程学报, 2026(2): 37-47. (QI Chunfeng, ZHANG Mingjin, OUYANG Qunan, et al. Research on the engineering practice and safety control of open-gate operation in locks[J]. Hydro-Science and Engineering, 2026(2): 37-47. (in Chinese))

# 船闸开通闸工程实践与安全控制研究

齐春风<sup>1</sup>, 张明进<sup>1</sup>, 欧阳群安<sup>1</sup>, 杨燕华<sup>1</sup>, 王丹媛<sup>2</sup>

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456; 2. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230051)

**摘要:** 开通闸运行方式可显著提升船闸通航效率, 但随之产生的通航风险也较为突出。针对当前该模式推广应用过程中安全控制标准系统性不足的问题, 本文系统梳理了开通闸在我国的工程应用现状, 识别了其运行中的核心安全挑战; 基于闸门动水启闭力学与限制性航道船舶航行理论, 构建了以闸首水位差、闸室流速、船舶船速及船舶间距为核心指标的安全控制体系; 结合多座船闸的工程实践经验, 提出了按闸室宽度、船闸等级及船舶类型分级的安全控制标准; 进而形成完整的开通闸运行条件设定方法, 并以白山船闸为例进行了应用验证。结果表明: 所建立的指标体系与分级标准能够有效量化安全边界, 为开通闸的科学决策与安全运行提供系统的理论依据与技术支持。

**关键词:** 船闸; 开通闸; 通航安全; 安全控制标准; 限制性航道

**中图分类号:** U641.7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2026)02-0037-11

船闸是保障船舶顺利通过航道集中水位落差的关键通航建筑物, 也是水路运输网络的重要控制节点。随着水运经济的发展和船舶大型化趋势的日益明显, 船闸通过能力不足的问题逐渐凸显。在船闸上下游水位差较小时段, 采用敞开闸门允许船舶快速自由通过的方式, 即“开通闸”运行方式<sup>[1-3]</sup>, 可显著提升船闸节点的通行效率。例如, 1 000 t 级船舶在常规套闸运行方式下的一次过闸时间为 30~50 min, 而在开通闸方式下可缩短至 3~5 min。然而, 由于该方式对水文条件要求严格且通航风险较高, 在荷兰、德国、美国等航运发达国家, 开通闸一般仅作为辅助运行方式, 多局限于航运量小、水位差低的小型船闸临时使用, 应用范围有限<sup>[4-6]</sup>。相比之下, 得益于优越的自然条件与迫切的航运效率提升需求, 开通闸在我国的应用较为广泛。自 20 世纪 50 年代江阴船闸<sup>[7]</sup>首次试行以来, 国内已有多座具备条件的船闸工程<sup>[8-10]</sup>采用过该运行方式。

尽管开通闸在提升通行效率方面优势明显, 但运行期间如何确保船闸结构设备安全<sup>[11-12]</sup>与船舶航行安全<sup>[13-16]</sup>, 仍是制约其推广应用的核心挑战。目前, 已有学者结合具体工程开展了初步研究, 如张桂秀<sup>[17]</sup>基于江阴船闸提出了以船闸上下游潮位差和闸室进出口流速表征的适航水力条件; 吴腾等<sup>[18-19]</sup>基于焦港船闸和南通船闸, 建立了船闸上下游潮位差与闸室最大流速、最大启闭机受力的相关关系, 进而给出了以上下游潮位差表示的开通闸安全运行条件。然而, 由于不同船闸在建筑物布置和运行条件上存在差异, 目前尚未形成系统性、普适性的安全控制准则, 难以指导工程实践。总体而言, 当前对开通闸运行方式的认知仍处于工程实践阶段, 安全控制多依赖经验管理, 其安全运行条件有待进一步明确。

为此, 本文基于中国船闸开通闸工程实践, 系统梳理该方式的应用现状, 并聚焦安全控制中的关键问题

收稿日期: 2024-09-30; 修回日期: 2024-12-02; 接受日期: 2024-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600501); 安徽省引江济淮集团有限公司科技项目(YJJH-ZX-20220705481, YJJH-ZX-20220705482, YJJH-ZX-20221128512); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(TKS20240202)

作者简介: 齐春风(1988—), 女, 河北沧州人, 副研究员, 博士, 主要从事枢纽通航及泄洪安全研究。

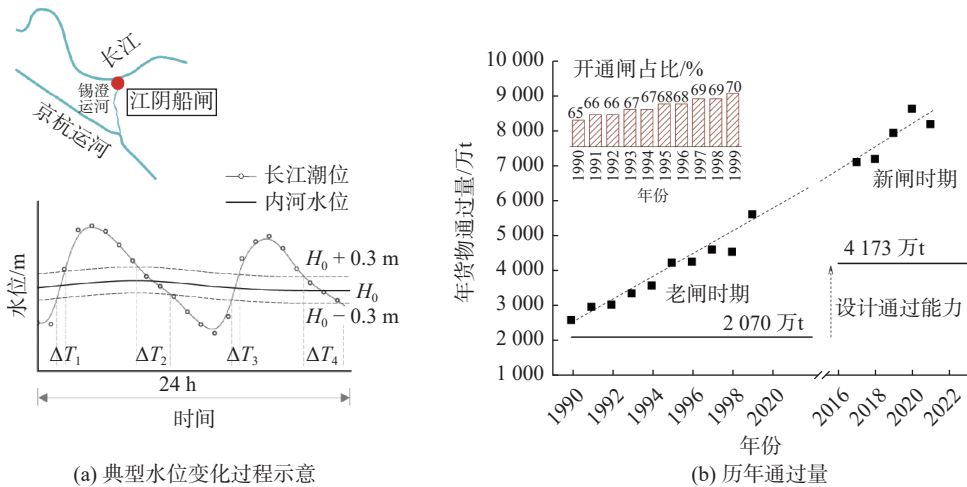
E-mail: qichunfeng2007@126.com 通信作者: 欧阳群安(E-mail: oyqa@tju.edu.cn)

开展针对性研究,旨在提出具有一般性的开通闸运行条件确定方法,以期为该过闸方式的规范化推广提供理论依据与实践参考。

## 1 工程应用现状与安全挑战分析

### 1.1 工程应用现状

开通闸运行方式最早由江阴船闸引入实践。该闸位于锡澄运河长江口门处,是连接长江和京杭运河的重要枢纽,其两侧水位受黄海不规则半日潮汐影响显著,每日有 4 次平水机会且平水时间较长,如图 1(a) 所示(图中  $H_0$  为内河水位)。船闸建成初期,便平潮期尝试开通闸运行,后来随着货运需求的增加和相关运行经验的积累,允许的水位差逐步提高至 0.10、0.30 m,全天开通闸时间也由 2~3 h 延长至 4~6 h。如图 1(b) 所示,通过常规闸方式和开通闸方式的协同调度,该闸实际通过能力已远超设计值。常年数据统计显示,虽然开通闸时间仅占全部通航时间的 20% 左右,但平均约 80% 的船舶可在此方式下放行,开通闸时段货运量常年占据过闸货运总量的 60% 以上。



(a) 典型水位变化过程示意

(b) 历年通过量

图 1 江阴船闸典型水位变化过程及历年通过量

Fig. 1 Typical water level variation and annual throughput of the Jiangyin Lock

作为提升通过效率的有效手段,开通闸在我国内河航运中应用渐广,典型案例如表 1 所示,该模式主要适用于以下两类船闸工程:

(1) 河口潮汐区船闸。这类船闸位于内河与入海河流感潮河段的交汇口,受潮汐影响具备开通闸条件,如长江感潮河段的江阴、谏壁<sup>[10]</sup>、张家港、焦港<sup>[20]</sup>、南通<sup>[21]</sup>、九圩港、口岸等船闸。它们利用平潮期开通闸以缓解航运压力,但其条件优劣受地理位置影响显著,如江阴船闸条件最优,而上游谏壁船闸仅春秋两季具备条件且每日可开放时间波动较大。

(2) 具备特定水文条件且可承受双向水头的枢纽船闸。此类船闸位于内陆运河,其开通闸条件源于自然水文变化(如洪水、干旱、汛期、枯水期)或人为水资源调度(如引水、排水、调水),前者虽不具备长期开通闸条件,但可在特殊时期应急使用,如裕溪船闸曾在 2022 年利用水位持平窗口期,通过连续 3 d 开通闸缓解了严重拥堵;后者则往往具备较长的开通闸时间,如受太湖引排水影响的丹金船闸<sup>[9]</sup>,具备开通闸条件的年平均天数达 335 d,而江淮运河沿线的白山、派河口等船闸<sup>[22]</sup>在调水不同阶段也均具备条件。

总体而言,开通闸已成为提升我国内河航道通过效率的重要技术手段,其运行模式从常规使用(如丹金船闸)、组合调度(如江阴、张家港船闸)到试点探索(如江淮运河船闸)不一而足。长江沿线开通闸应用实例分布见图 2。

表 1 开通闸应用实例概况  
Tab. 1 Overview of open-gate operation application cases

序号	项目	船闸等级	设计船舶	船闸	闸室尺度 (长/m×宽/m×门槛水深/m)	位置	主要影响条件
			吨级/t	线数			
1	江阴船闸	III	1 000	双线	180×23×4.0	锡澄运河长江口门	潮汐
2	丹金船闸	III	1 000	单线	180×23×4.0	丹金溧漕河中段	引排水
3	谏壁船闸	III	1 000	双线	230×23×4.0	京杭运河长江口门	潮汐
4	张家港船闸	III	1 000	单线	230×23×4.0	申张运河长江口门	潮汐
5	焦港船闸	III	1 000	单线	230×23×4.0	焦岗运河长江口门	潮汐
6	南通船闸	V	300	单线	160×12×3.3	通吕运河长江口门	潮汐
7	九圩港船闸	III	1 000	双线	230×23×4.0	九圩港运河长江口门	潮汐
8	口岸船闸	V	300	单线	140×16×3.0	南官河长江口门	潮汐
9	善后河枢纽船闸	III	1 000	单线	230×23×4.0	云善河、盐河善后河口门	潮汐
10	盐灌船闸	III	1 000	单线	230×23×4.0	盐河灌河口门	潮汐
11	新坝船闸	V	300	单线	200×12×2.5	萧山内河浦阳江口门	潮汐
12	瑞安渔港海船闸	IV	500	单线	160×23×4.0	飞云江入海口门	潮汐
13	龙洲垵	III	1 000	单线	180×23×3.5	江汉运河长江口门	潮汐&径流
14	裕溪船闸	III	1 000	双线	230×23×4.5	合裕航道长江口门	潮汐&径流
15	巢湖船闸	III	1 000	双线	230×23×4.5	合裕航道巢湖口门	潮汐&径流
16	白山船闸	III	1 000	单线	240×23×5.2	江淮运河巢湖口门	调水
17	兆河船闸	III	1 000	单线	240×23×5.2	江淮运河巢湖口门	调水
18	派河口船闸	II	2 000	单线	280×23×5.2	江淮运河巢湖口门	调水
19	东淝河船闸	II	2 000	双线	280×23×5.2	江淮运河淮河口门	调水



图 2 长江沿线开通闸应用实例分布

Fig. 2 Distribution of open-gate operation application cases along the Yangtze River

### 1.2 面临的关键挑战

开通闸在提升效率的同时, 也因运行环境复杂化而带来了显著高于传统套闸模式的风险, 主要可归纳为两方面:

(1) 闸门动水启闭风险。开通闸起始与结束阶段, 闸门需在动水条件下启闭, 若因水位骤变(如上游泄洪、潮汐剧烈波动等)或启闭时机控制不当, 导致闸门两侧水位差过大, 将引起启闭机荷载剧增, 可能超出设备额定容量, 威胁闸门、闸室结构及船舶停泊安全。为保障闸门运行安全, 实践中通常将实际启闭力控制在启闭机额定容量以内, 并引入安全折减系数作为控制限值, 如江阴船闸取系数 0.60<sup>[17]</sup>、南通船闸取 0.83<sup>[19]</sup>、焦港船闸取 0.80<sup>[18]</sup>。

(2) 限制性航道船舶航行风险。开通闸运行时, 闸室及引航道处于持续动水状态, 且闸室断面在短距离内急剧变化易导致流速升高并诱发斜流、回流等不良流态。船舶在断面系数极小(1.5~3.0)的闸室内航行时, 受动水、浅水及岸壁效应综合影响, 操纵性能显著下降, 易发生触壁、触底或失控事故<sup>[23-25]</sup>。为保障船舶航行安全, 现有工程多参照套闸模式下的引航道流速标准并乘以折减系数进行控制, 但标准不统一, 且部分取值可能不尽合理。例如, 江阴船闸<sup>[17]</sup>与焦港船闸<sup>[18]</sup>参考引航道口门区标准, 分别取系数 0.75 与 0.80, 要

求闸室流速不大于 1.50 m/s 与 1.60 m/s; 而南通船闸<sup>[19]</sup>则参考引航道制动段与停泊段标准, 取系数 0.83, 要求闸室流速不大于 0.42 m/s。然而, 套闸模式下引航道制动段与停泊段的严格流速限制旨在保障船舶停泊系缆安全, 与开通闸模式下船舶直航通过的需求不匹配, 直接沿用可能导致条件过于严苛。

综上, 当前开通闸安全控制仍多依赖经验, 缺乏统一、系统的技术标准, 这已成为制约其安全、高效推广的核心挑战。因此, 构建一套科学量化、普遍适用的安全控制体系势在必行。

## 2 安全控制指标与分级标准构建

### 2.1 控制指标体系建立

三角闸门是承受双向水头船闸的首选门型, 在开通闸的开始和结束时刻, 闸门关闭, 其与闸首、水流的相对状态见图 3。闸门启闭力按下式计算:

$$F = \frac{K \sum M}{R} \quad (1)$$

式中:  $F$  为启门力或闭门力 (kN);  $K$  为安全系数;  $\sum M$  为总阻力矩 (kN·m);  $R$  为牵引力至旋转中心的力臂 (m)。总阻力矩  $\sum M$  包括顶枢和底枢摩擦阻力矩  $M_1$ 、底止水摩擦阻力矩  $M_2$ 、中、侧止水摩擦阻力矩  $M_3$ 、非对称式羊角引起的水压偏心阻力矩  $M_4$  和水流阻力矩  $M_5$ 。

闸门启闭时, 中、侧止水瞬间脱离或接触,  $M_3$  可忽略。多数三角闸门羊角为对称布置, 即  $M_4=0$ 。则总阻力矩可简化为:

$$\sum M = M_1 + M_2 + M_5 \quad (2)$$

$$M_1 = \frac{1}{2} f(N_1 d_1 + N_2 d_2) + \frac{1}{3} f G_0 d_3, \quad M_2 = b_1 p_1 f_2 R_2^2 \frac{\pi \theta}{180}, \quad M_5 = p_2 R_5$$

式中:  $N_1$ 、 $N_2$  为顶、底枢水平反力 (kN);  $G_0$  为闸门自重 (kN);  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  为顶、底枢轴径和蘑菇头轴径 (m);  $f$ 、 $f_2$  为相应摩擦因数;  $b_1$  为底止水承载宽度 (m);  $p_1$  为底止水单位面积压力值 (kPa);  $R_2$  为底止水至旋转中心的距离 (m);  $\theta$  为闸门中心角 ( $^\circ$ );  $p_2$  为水压力 (kN);  $R_5$  为水压力作用位置至旋转中心距离 (m)。

对于既定闸门, 其结构布置及自重为定值, 且水流阻力距常占总阻力矩绝大部分, 故启闭力  $F$  可近似表示为水压力  $p_2$  的函数:

$$F = f(p_2) \quad (3)$$

$$p_2 = C_w \frac{\rho}{2} v^2 A \quad (4)$$

式中:  $C_w$  为水流阻力系数;  $\rho$  为水密度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $v$  为闸门门缝断面流速 (m/s);  $A$  为构件在与流向垂直平面上的投影面积 ( $\text{m}^2$ ), 为航道水深  $h$  与闸室宽度  $b$  的乘积, 表示为  $A=bh$ 。

忽略闸门门缝断面收缩和启闭惯性的影响, 门缝断面流速可近似表示为闸门两侧水位差的函数, 即  $v = f(\sqrt{\Delta h})$ , 则水压力为:

$$p_2 = C_w \rho g b \Delta h h \quad (5)$$

综合式 (3) 和式 (5), 闸门启闭力可表示为闸室宽度、闸门两侧水位差和航道水深的函数:

$$F = f(b \Delta h h) \quad (6)$$

根据式 (6), 在启闭机额定容量折减系数确定后, 对于既定闸室, 不同航道水深条件下闸门两侧都有临

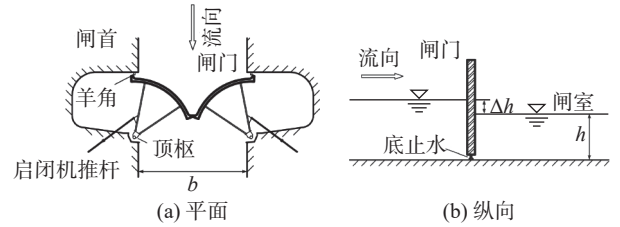


图 3 闸门、闸首与水流的相对状态

Fig. 3 Relative positions of the gate, lock head, and water flow

界水位差。工程实践中,考虑调度管理方便,常以可通航水位范围内闸门两侧临界水位差的最小值作为控制条件,并以闸首水位差(船闸上下游闸首处的水位差)替代闸门两侧水位差作为控制指标。因此,闸首水位差是控制闸门动水启闭安全的核心水力指标。

开通闸运行时,闸室犹如一段开敞的限制性航道(图4)。航道断面系数  $n=bh/A_s$  ( $A_s$  为船舶舢横剖面水下面积)是影响船舶动力特性及操纵性能的关键因素,断面系数越小,阻塞效应越显著。研究表明,当  $n<5$  时,船舶航行阻力和下沉量随断面系数的减小迅速增大,船舶操纵性显著降低<sup>[26-29]</sup>。而闸室断面系数常为 1.5~3.0,属于极小断面系数限制性航道,船舶在闸室内的航行条件更为复杂。

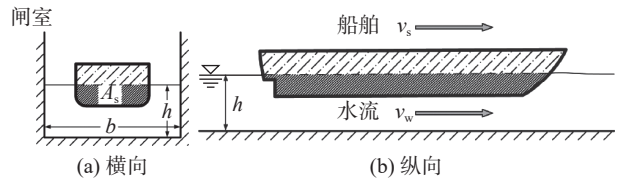


图4 开通闸运行过程中船舶与闸室的相对状态  
Fig. 4 Relative positions of vessels and the lock chamber during open-gate operation

船舶在闸室段的航行状态,应以不碰壁、不触底并顺利通行为控制标准。在给定航道参数下,船舶航行状态是航速的函数,船舶既要保持足够速度以维持舵效并可逆流通过,又不可过快以防碰壁或触底,即存在一个安全航速区间<sup>[30-31]</sup>。此外,为保持足够的操纵空间和反应时间,船舶间还需维持足够的纵向安全距离<sup>[32-33]</sup>。据此,船舶在闸室内的航行状态( $N$ )可表示为闸室断面系数( $n$ )、水流流速( $v_w$ )、船舶船速( $v_s$ )和船舶间距( $\Delta L$ )的函数,具体如下:

$$N = f(n, v_w, v_s, \Delta L) \tag{7}$$

对于既定闸室与船型,  $n$  为定值,根据式(7),船舶直航过闸时,须对闸室流速、船舶船速和船舶间距加以限制。此三者是保障船舶在限制性闸室内安全航行的三大关键控制指标。

由此,构建了以闸首水位差、闸室流速、船舶船速、船舶间距为核心的四指标安全控制体系,可全面覆盖开通闸运行的主要风险环节。

### 2.2 既有工程控制经验分析

表2 汇总了部分船闸基于经验制定的开通闸控制限值。

表2 实际工程的开通闸运行条件  
Tab. 2 Operational criteria for open-gate operation in actual projects

序号	项目	船闸等级	b/m	开通闸控制指标采用限值			
				$\Delta h_{lim}/m$	$v_{w,lim}/(m/s)$	$v_{s,lim}/(m/s)$	$\Delta L_{lim}$
1	江阴船闸	III	23	0.30	1.50	1.60	50~60 m
2	丹金船闸	III	23	0.30	1.60	1.80	
3	张家港船闸	III	23	0.30	1.60	1.60	1~2倍船长
4	焦港船闸	III	23	0.30	1.60		
5	盐灌船闸	III	23	0.30	1.60		
6	裕溪船闸	III	23	0.30	1.00		重载70~80 m; 空载150~200 m
7	龙洲垸船闸	III	23	0.30	1.00		
8	九圩港船闸	III	23	0.30	1.60		
9	谏壁船闸	III	23	0.30	1.60	1.60	50~100m
10	渔港海船闸	IV	23	0.30	0.80		—
11	口岸船闸	V	16	0.30	1.40		—
12	南通船闸	V	12	0.20			—
13	新坝船闸	V	12	0.20	1.40	1.40	1~2倍船长

注:表中 $\Delta h_{lim}$ 、 $v_{w,lim}$ 、 $v_{s,lim}$ 、 $\Delta L_{lim}$ 分别为 $\Delta h$ 、 $v_w$ 、 $v_s$ 、 $\Delta L$ 的控制限值。

分析表2可见:

(1) 闸首水位差: 水位差限值与闸室宽度相关,当  $b=23$  m 时,  $\Delta h_{lim}$  通常取 0.30 m; 当  $b=12$  m 时,  $\Delta h_{lim}$  则

多采用 0.20 m。宽度为 16 m 的闸室应用相对较少,其水位差限值参考 23 m 闸室标准,同样取 0.30 m。尽管部分  $b=23$  m 船闸(如江阴、焦港、南通)曾通过动水启闭试验获得更高的临界水位差(分别达  $-0.50\sim 0.50$  m、 $-0.37\sim 0.39$  m、 $-0.35\sim 0.37$  m)<sup>[17-19]</sup>,实际应用中仍普遍保守采用  $\pm 0.30$  m 作为控制标准。

(2) 闸室流速: 流速限值与船闸等级相关,多数 III 级船闸流速限值集中于 1.5~1.6 m/s, V 级船闸则多在 1.4 m/s。裕溪船闸、龙洲垸船闸因仅进行过初步探索而保守取 1.0 m/s; 渔港海船闸则因环境复杂控制更严,限值为 0.8 m/s。

(3) 船舶船速: 仅部分工程有明确规定, III 级船闸中, 江阴、张家港、谏壁船闸取 1.6 m/s, 丹金船闸因过流条件较好提高至 1.8 m/s; V 级船闸如新坝船闸取 1.4 m/s。总体呈现船闸等级越高、允许船速越高的趋势。

(4) 船舶间距: 仅部分工程有明确规定,其表述方式分为两类: 一类规定实际距离,如江阴船闸 50~60 m, 谏壁船闸 50~100 m, 裕溪船闸则按载重区分,重载时 70~80 m、空载时 150~200 m; 另一类规定船长倍数,如张家港与新坝船闸要求 1~2 倍船长。结合内河航道代表船型尺度分析,现有工程控制范围大致在 1~2 倍船长之间,经验丰富的船闸控制相对从紧。

### 2.3 分级安全控制标准建议

基于上述理论分析与工程经验,并参考《船闸总体设计规范》(JTJ 305-2001)及国内外相关研究成果,提出以下分级安全控制建议标准:

(1) 闸首水位差控制标准: 依据闸室宽度分级,常见闸室宽度  $b$  为 23、16、12 m 下,闸首水位差限值  $\Delta h_{lim}$  分别取 0.30、0.25 和 0.20 m。

(2) 闸室流速控制标准: 依据船闸等级分级,参照引航道口门区流速标准并考虑闸室断面系数影响进行折减, III 级与 IV 级船闸闸室流速最大限值  $v_{w,lim}$  取 1.6 m/s, V 级船闸取 1.4 m/s,分别对应引航道口门区流速限值的 70%~80%。

(3) 船舶船速控制标准: 依据船闸等级设定上限, III、IV、V 级船闸闸室内的船舶船速最大限值  $v_{s,lim}$  分别取 1.6、1.5 与 1.4 m/s,同时为保证舵效,船舶对岸航速需不低于 1.0 m/s。

(4) 船舶间距控制标准: 依据船舶类型与载况设定,船队及重载船舶的安全间距限值  $\Delta L_{lim}$  最低取 1 倍船长,空载(轻载)船舶因操纵灵活性较高、取 2 倍船长。

构建的开通闸安全控制指标体系及其推荐评判标准,如图 5 所示。

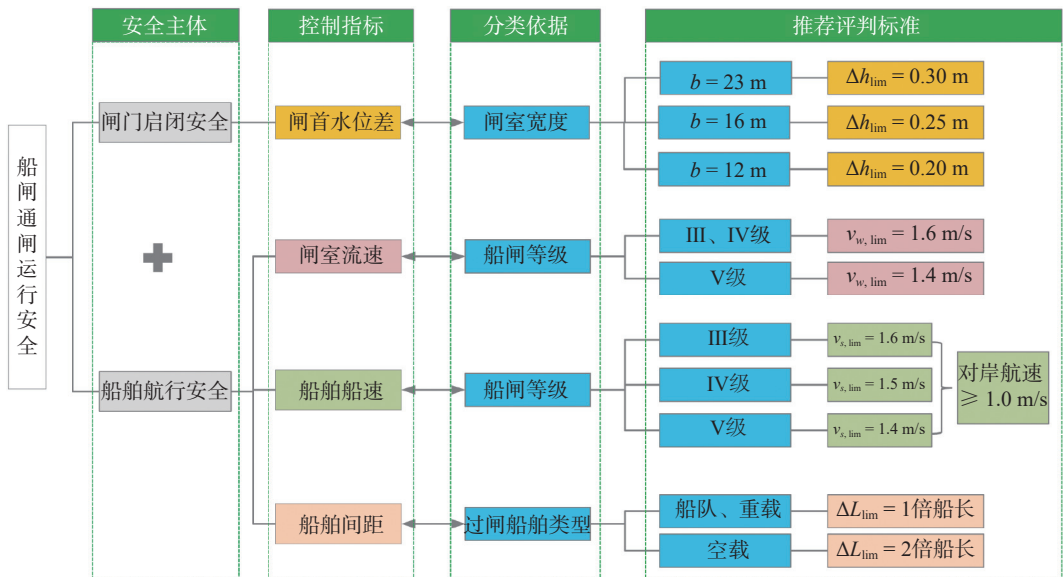


图 5 开通闸安全控制指标体系及推荐评判标准

Fig. 5 Safety control indicator system and recommended evaluation criteria for open-gate operation

### 3 运行条件设定方法及工程实例应用

#### 3.1 运行条件设定方法

基于上述构建的指标体系与分级标准, 开通闸运行条件的设定是一个系统性的决策过程, 涵盖“开启-航行-关闭”三个阶段, 其逻辑流程如图6所示。具体设定方法如下:

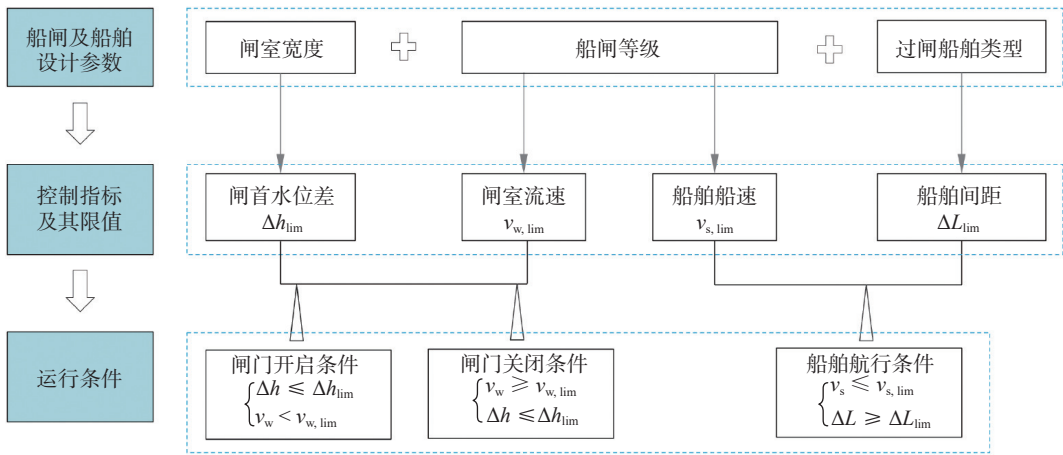


Fig. 6 Logical flowchart for setting operational criteria for open-gate operation

(1) 闸门开启条件: 实时监测闸首水位差, 当实际水位差满足  $\Delta h \leq \Delta h_{lim}$  时, 方可启动闸门开启程序。闸门开启后, 需待闸室内水流趋于平稳, 且监测到的闸室流速满足  $v_w < v_{w,lim}$  时, 方可允许船舶进入闸室航行。

(2) 船舶航行条件: 在兼顾船舶航行安全与通航效率的前提下, 船舶应在闸室内保持推荐航速行驶, 并维持必要的安全间距, 即需同时满足  $v_s \leq v_{s,lim}$  及  $\Delta L \geq \Delta L_{lim}$ 。此外, 航行期间应持续监测闸室内的流速变化, 确保其处于可控范围。

(3) 闸门关闭条件: 当监测到闸室流速达到或超过限值  $v_{w,lim}$  时, 应立即启动闸门关闭程序, 结束本次开通闸运行。闸门关闭过程中及关闭后, 闸首水位差仍需满足  $\Delta h \leq \Delta h_{lim}$  的要求。

综上所述, 可依据船闸等级、闸室尺度及过闸船舶类型, 参照图5建立的指标体系和评判标准, 初步设定相应的开通闸运行条件, 其逻辑关系如图6所示。

#### 3.2 工程实例应用分析

白山船闸是引江济淮工程的关键节点, 设计等级为 III 级, 闸室有效尺度为 240 m×23 m×5.2 m(长×宽×门槛水深), 当枢纽通过节制闸调节使船闸两侧水位持平时, 即具备开通闸条件。代表船型为 1 000 t 级货船(船长 58 m)和 1 顶 2×1 000 t 级船队。依据前述设定方法, 设定白山船闸开通闸运行条件, 如表3所示。

表3 白山船闸开通闸运行条件

Tab. 3 Operational criteria for open-gate operation at the Baishan Lock

类型	运行条件
闸门开启条件	闸首水位差, $\Delta h \leq 0.30$ m
	闸室流速, $v_w < 1.6$ m/s
船舶航行条件	船舶间距, 空载船舶取 $\Delta L \geq 58$ m、船队和重载船舶取 $\Delta L \geq 116$ m
闸门关闭条件	闸室流速, $v_w \geq 1.6$ m/s
	闸首水位差, $\Delta h \leq 0.30$ m

应用所构建方法可为白山船闸设定明确、量化的运行条件,与依赖单一水位差或模糊经验值的传统方法相比,本方法形成了多指标协同的完整逻辑链,增强了安全管理的系统性与可操作性。为保障该方法的有效实施,建议配套以下措施:

(1)监测与预报:在枢纽上游设立水文站,建立水文站流量、水位与闸首水位差、闸室流速的相关关系,实现基于上游来流条件的风险预警。

(2)调度与管理:实行单向放行、分类、分批调度(优先重载、船队);加强现场巡查与联动执法;原则上避免夜间开通闸。

(3)应急预案:制定风险清单、防控预案及驾引指南,并开展船员培训。

## 4 结 语

聚焦于船闸开通闸运行中的安全控制问题,系统梳理了国内开通闸的工程实践,识别了闸门动水启闭与限制性航道船舶航行两大核心风险,在此基础上构建了覆盖“开启-航行-关闭”全过程的安全控制指标体系,提出了基于船闸等级、闸室宽度和船舶类型的分级控制标准,并形成了可操作的运行条件设定方法,为该模式的规范化、安全化推广提供了系统的理论依据与技术支持。主要结论如下:

(1)开通闸适用于河口潮汐区和具备双向水头适应能力的枢纽船闸,可显著提升通航效率,但也伴随明显的闸门启闭与船舶航行风险。

(2)建立了以闸首水位差、闸室流速、船舶船速和船舶间距为核心的四指标控制体系,并提出了对应的分级建议值。闸室宽度 23、16、12 m 对应的水位差限值分别为 0.30、0.25、0.20 m; III 级与 IV 级船闸闸室流速限值为 1.6 m/s, V 级为 1.4 m/s; III、IV、V 级船闸船舶船速上限分别为 1.6、1.5 和 1.4 m/s; 船舶间距按船队与重载船舶 1 倍船长、空载船舶 2 倍船长进行控制。

(3)通过白山船闸的实例验证,表明所提方法具有较好的系统性与可操作性,其有效实施需辅以水文监测、调度管理与应急预案等配套措施。

需要说明的是,本文建立的控制标准主要基于现有船闸的运行数据,对大型船闸、大吨位船舶及复杂编队情况的适用性仍需进一步验证。未来工作可结合实船试验与长期监测,开展多因素耦合作用下的安全阈值动态优化研究,为开通闸的安全、高效与规模化应用提供更完善的支持。

## 参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2002. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2002. (in Chinese))
- [2] 重庆交通大学, 交通运输部水运科学研究院, 中交水运规划设计院有限公司, 等. 中国内河通航建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 2021. (Chongqing Jiaotong University, China Waterborne Transport Research Institute, CCCC Water Transport Planning and Design Institute Co., Ltd, et al. Inland navigation structures of China[M]. Beijing: China Communications Press, 2021. (in Chinese))
- [3] 廖鹏. 内河船闸通过能力研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2009(3): 34-40. (LIAO Peng. Review on research of lock capacity at inland waterway locks[J]. Hydro-Science and Engineering, 2009(3): 34-40. (in Chinese))
- [4] WANG T S, LI T L. Ship lock management and dynamic congestion toll for ships[J]. Ocean & Coastal Management, 2022, 230: 106369.
- [5] PIANC. Ship behavior in locks and lock approaches[M]. Brussels: PIANC, 2015.
- [6] Department for Transport (UK). Maritime 2050: navigation the future[R]. London: Department for Transport (UK), 2019.

- [7] 瞿剑钧. 利用潮汐开放通闸提高船闸通过能力[J]. 水运工程, 2001(1): 37-38. (QU Jianjun. Utilizing the tide to open lock and improve shiplock capacity[J]. Port & Waterway Engineering, 2001(1): 37-38. (in Chinese))
- [8] 陆俊. 长三角感潮河段通闸新途径的探讨[J]. 水道港口, 2006, 27(4): 249-252. (LU Jun. Discussion on a new operation scheme of shiplocks at tidal reach of the Yangtze Delta[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2006, 27(4): 249-252. (in Chinese))
- [9] 姜兴良, 周广群, 袁淑文. 具备长期开通闸条件的船闸设计方案[J]. 水运工程, 2015(12): 104-107. (JIANG Xingliang, ZHOU Guangqun, YUAN Shuwen. Design scheme of long-term opened shiplock[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(12): 104-107. (in Chinese))
- [10] 常致, 孙俊锋. 江苏省沿江口门船闸运行规程研究[J]. 交通科技, 2015(4): 172-174. (CHANG Zhi, SUN Junfeng. Study on operation regulations of ship locks along Yangtze River Estuary in Jiangsu Province[J]. Transportation Science & Technology, 2015(4): 172-174. (in Chinese))
- [11] XU J C, CHEN Q, LI Y, et al. Study on the hydrodynamic resistance moment of horizontally-framed miter gates[J]. Water, 2018, 10(10): 1345.
- [12] 姜育松. 不同工况下三角闸门启闭力计算[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(11): 99-100. (JIANG Yusong. Calculation of opening and closing force of triangle gate under different working conditions[J]. China Water Transport, 2019, 19(11): 99-100. (in Chinese))
- [13] 周华兴, 郑宝友. 关于深水、浅水与限制性航道界定的探讨[J]. 水运工程, 2006(1): 53-58, 67. (ZHOU Huaxing, ZHENG Baoyou. Discussion on defining deep water, shallow water and restricted channel[J]. Port & Waterway Engineering, 2006(1): 53-58, 67. (in Chinese))
- [14] CONSTANTINE T. On the movement of ships in restricted waterways[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1960, 9(2): 247-256.
- [15] BELLAFIORE D, ZAGGIA L, BROGLIA R, et al. Modeling ship-induced waves in shallow water systems: the Venice experiment[J]. Ocean Engineering, 2018, 155: 227-239.
- [16] 杨万宇. 船舶航行事故统计与分析[J]. 中国水运, 2021(5): 28-30. (YANG Wanyu. Statistics and analysis of ship navigation accidents[J]. China Water Transport, 2021(5): 28-30. (in Chinese))
- [17] 张桂秀. 江阴船闸通闸水流条件试验[J]. 水运工程, 1989(4): 15-17. (ZHANG Guixiu. Experimental study on flow conditions of Jiangyin Shiplock[J]. Port & Waterway Engineering, 1989(4): 15-17. (in Chinese))
- [18] 吴腾, 朱瑞虎, 丁坚. 三角门船闸开通闸运行条件试验研究[J]. 水道港口, 2014, 35(3): 247-253. (WU Teng, ZHU Ruihu, DING Jian. Experimental study on critical conditions of Jiaogang ship lock running as an open channel[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(3): 247-253. (in Chinese))
- [19] 朱瑞虎, 吴腾, 丁坚. 开通闸条件下船闸安全运行试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(5): 445-450. (ZHU Ruihu, WU Teng, DING Jian. Experimental study on the safe operation of ship lock running as an open channel[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(5): 445-450. (in Chinese))
- [20] 丁坚, 宋荔钦. 焦港船闸开通闸适航水力条件研究[J]. 水道港口, 2014, 35(6): 613-617. (DING Jian, SONG Liqin. Study on hydraulic condition of Jiaogang ship lock at the time of locks opening[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2014, 35(6): 613-617. (in Chinese))
- [21] 房建国. 南通船闸通过能力成倍增加的原因[J]. 水运工程, 1992(1): 29-32. (FANG Jianguo. On the increase of traffic-carrying capacity for Nantong shiplock[J]. Port & Waterway Engineering, 1992(1): 29-32. (in Chinese))
- [22] 王丹媛, 齐春风, 张明进, 等. 考虑调水不均匀性的船闸开通闸通过能力计算方法[J]. 水道港口, 2023, 44(6): 930-937. (WANG Danyuan, QI Chunfeng, ZHANG Mingjin, et al. Estimation method for throughput capacity of navigation lock running as an open channel considering the non-uniformity of water diversion[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2023, 44(6): 930-937. (in Chinese))
- [23] 周明贵, 邹早建, 姚建喜. 限制水域船体下蹲预报[J]. 船舶力学, 2013, 17(6): 625-634. (ZHOU Minggui, ZOU Zaojian, YAO Jianxi. Prediction of ship squat in restricted waters[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(6): 625-634. (in Chinese))
- [24] TANG X Y, TONG S C, HUANG G X, et al. Numerical investigation of the maneuverability of ships advancing in the non-uniform flow and shallow water areas[J]. Ocean Engineering, 2020, 195: 106679.
- [25] QI C F, PU X G, PENG W, et al. Development and application of a new auxiliary diversion structure for mountain ship lock: a

case study of Wuqiangxi lock in China[J]. *Water*, 2023, 15(5): 941.

- [26] 童思陈, 许光祥, 邓明文. 内河船舶航行阻力及通航水力指标计算[J]. *水利水电工程学报*, 2010(2): 100-106. (TONG Sichen, XU Guangxiang, DENG Mingwen. Calculation of sailing resistance and navigable hydraulic parameters for inland ships[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(2): 100-106. (in Chinese))
- [27] 俞中奇, 袁章新, 周超. 限制性Ⅲ级航道船舶阻力试验研究[J]. *上海船舶运输科学研究所学报*, 2014, 37(4): 23-27, 49. (YU Zhongqi, YUAN Zhangxin, ZHOU Chao. Resistance performance of ships in grade Ⅲ restricted channels[J]. *Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute*, 2014, 37(4): 23-27, 49. (in Chinese))
- [28] 吕建伟, 陈涛, 高家镛, 等. 限制性Ⅲ级航道船舶下沉量研究[J]. *上海船舶运输科学研究所学报*, 2014, 37(2): 12-17. (LÜ Jianwei, CHEN Tao, GAO Jiayong, et al. On subsidence of ships in class Ⅲ restricted channel[J]. *Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute*, 2014, 37(2): 12-17. (in Chinese))
- [29] DU P, OUAHSINE A, SERGENT P, et al. Resistance and wave characterizations of inland vessels in the fully-confined waterway[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 210: 107580.
- [30] 杜嘉立, 高凯, 姜华. 基于船行波安全航速的限定[J]. *大连海事大学学报*, 2005, 31(2): 4-6, 14. (DU Jiali, GAO Kai, JIANG Hua. Determination for safe speed based on ship's waves[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2005, 31(2): 4-6, 14. (in Chinese))
- [31] 杨帆, 刘康, 郭国平. 船舶安全航速的定量模糊研究[J]. *航海技术*, 2013(4): 67-69. (YANG Fan, LIU Kang, GUO Guoping. Quantitative fuzzy study on ship's safe speed[J]. *Marine Technology*, 2013(4): 67-69. (in Chinese))
- [32] DU P, OUAHSINE A, SERGENT P. Influences of the separation distance, ship speed and channel dimension on ship maneuverability in a confined waterway[J]. *Comptes Rendus Mécanique*, 2018, 346(5): 390-401.
- [33] 干伟东, 邓健, 李延伟. 通航隧洞内船舶安全间距模型[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(3): 1124-1129. (GAN Weidong, DENG Jian, LI Yanwei. Practical trace and examination of the safety intermediate distance between and among the sailing ships in the navigational tunnel[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(3): 1124-1129. (in Chinese))

## Research on the engineering practice and safety control of open-gate operation in locks

QI Chunfeng<sup>1</sup>, ZHANG Mingjin<sup>1</sup>, OUYANG Qunan<sup>1</sup>, YANG Yanhua<sup>1</sup>, WANG Danyuan<sup>2</sup>

(1. *Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China*; 2. *Anhui Provincial Group Limited for Yangtze-to-Huaihe Water Diversion, Hefei 230051, China*)

**Abstract:** The open-gate operation (a mode in which the lock gate is opened to allow vessels to pass quickly and freely when the water level difference across the lock is minimal) can significantly enhance the navigation efficiency of locks. However, it also introduces notable navigation risks and safety challenges for lock structures and equipment. In response to the current lack of systematic and universally applicable safety control standards in the promotion and application of this mode, this study first conducted a comprehensive review of the engineering application status of open-gate operation in China. The analysis indicates that this mode is predominantly applied to two categories of locks in China: tidal estuary locks and inland canal locks with specific hydrological conditions that allow bidirectional head adaptation. While significantly boosting lock throughput—for instance, reducing passage time for a 1,000-ton vessel from 30–50 minutes to 3–5 minutes—the operation introduces two core safety risks: gate operation under dynamic flow conditions and vessel navigation within the highly confined lock chamber. To address these risks, this research established a theoretical framework based on the mechanics of gate operation under dynamic water conditions and the theory of vessel navigation in restricted channels. For gate safety, the analysis simplified the force equilibrium during miter gate operation, identifying the water level difference across the lock head as the dominant factor influencing the operating force, which is critical for preventing overload of hoisting machinery. For navigation safety, by considering

the lock chamber as an extremely restricted channel with a typical cross-sectional coefficient ( $n$ ) between 1.5 and 3.0, the vessel's navigation state was theorized to be a function of chamber flow velocity, vessel speed, and inter-vessel spacing. Consequently, a safety control framework was constructed with four parameters—lock head water level difference ( $\Delta h$ ), lock chamber flow velocity ( $v_w$ ), vessel speed ( $v_s$ ), and inter-vessel spacing ( $\Delta L$ )—as the core indicators, covering the entire “opening–navigation–closing” cycle of open-gate operation. Building upon theoretical analysis and synthesizing practical engineering experience from multiple locks, this study proposes graded safety control standards. The recommended limits are categorized based on key influencing factors: (1) The water level differential limit ( $\Delta h_{lim}$ ) is primarily related to lock chamber width ( $b$ ), with suggested values of 0.30 m for  $b=23$  m, 0.25 m for  $b=16$  m, and 0.20 m for  $b=12$  m, derived from both empirical practice and theoretical safety margins, despite higher values observed in some dynamic tests. (2) The chamber flow velocity limit ( $v_{w,lim}$ ) is graded according to lock class, proposed as 1.6 m/s for Class III and IV locks, and 1.4 m/s for Class V locks, representing a 70%–80% reduction from typical approach channel standards in view of the restricted chamber geometry. (3) The vessel speed limit ( $v_{s,lim}$ ) is also class-dependent, suggested as 1.6 m/s, 1.5 m/s, and 1.4 m/s for Class III, IV, and V locks respectively, with a minimum speed of 1.0 m/s required to maintain steerage. (4) The vessel spacing limit ( $\Delta L_{lim}$ ) is based on vessel type and load condition, recommending a minimum of one times the vessel length for convoys and loaded vessels, and two times the length for empty or lightly loaded vessels. Based on this indicator system and the hierarchical standards, a comprehensive and operational method for establishing open-gate operational criteria was developed. This method outlines specific logic for gate opening (requiring  $\Delta h \leq \Delta h_{lim}$  and  $v_w < v_{w,lim}$ ), vessel navigation (requiring  $v_s \leq v_{s,lim}$  and  $\Delta L \geq \Delta L_{lim}$ ), and gate closing (triggered when  $v_w \geq v_{w,lim}$ , while still ensuring  $\Delta h \leq \Delta h_{lim}$ ). The proposed methodology was subsequently applied and validated using the Baishan Lock, a key node in the Yangtze-to-Huaihe Water Diversion Project, as a case study. For this Class III lock with a chamber width of 23 m, the specific operational criteria were set, demonstrating the method's practicality. The results confirm that the established indicator system and hierarchical standards can effectively quantify the safety boundaries for open-gate operation. This research provides a systematic theoretical basis and technical support for the scientific decision-making, standardized management, and safe implementation of open-gate operations, facilitating its broader and safer application. Future work should focus on validating these standards for larger locks and vessels and optimizing dynamic thresholds through real-world monitoring.

**Key words:** lock; open-gate operation; navigation safety; safety control standard; restricted channel