“船闸+升船机”串联布置通航系统鲁棒性仿真分析

刘春泽[1]，李向龙[2]，郭　享[1]，毕　磊[1]，唐　颖[1]，张佰望[1]

（1. 中交水运规划设计院有限公司，中交集团综合交通虚拟仿真应用技术研发中心（港口与城市），北京 100007；
2. 中交一航局第一工程有限公司，天津 300456）

摘要：由串联布置的船闸、升船机，以及连接两者的中间航道所构成的内河通航系统，组成复杂，可用通航缓冲的锚地容量有限，易受突发事件影响，恢复稳定运行存在较大挑战。以船闸和升船机串联布置的方案为研究载体，提出将 $t_1/(Qt_2)$ 的值作为其鲁棒性的量化指标，其中 t_1 为恢复时长，Q 为货运量，t_2 为故障天数。结合构建串联布置通航建筑物联合运行下的船舶过闸系统仿真模型，对多种货运量和故障持续时间的情景，定量分析通航系统鲁棒性。结果表明，在通航系统的通过能力较货运量有较大富余时，货运量的提高或者故障天数的增加对鲁棒性的影响比较平稳；但当货运量接近通过能力时，故障天数对系统鲁棒性影响显著增大。研究成果为多通航建筑物联合运行下的鲁棒性研究，以及量化设施故障等短期突发事件的影响、分析通航保证性提供参考。

关键词：船闸；升船机；通过能力；串联布置；仿真分析；鲁棒性

中图分类号：U612　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)08-0194-08

Robustness simulation analysis of navigation system with ship lock and ship lift arranged in series

LIU Chunze[1], LI Xianglong[2], GUO Xiang[1], BI Lei[1], TANG Ying[1], ZHANG Baiwang[1]

(1. CCCC Comprehensive Transportation Virtual Simulation Application Technology Research and Development Center(Port and City), CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. No. 1 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: The inland navigation system, composed of series arrangement of ship lock, ship lift, and the intermediate channel connecting them, features a complex structure and limited anchorage capacity for navigation buffering. This makes it vulnerable to unexpected disruptions and poses significant challenges to restoring stable operation. Taking the configuration of series arrangement of ship lock and ship lift as the research object, we propose using the value of $t_1/(Qt_2)$ as a quantitative robustness indicator, where t_1 is the recovery duration, Q is the freight volume, and t_2 is the number of failure days. By developing a simulation model of ship lockage operations under coordinated functioning of these structures, we quantitatively analyze the robustness of navigation system under various scenarios of freight volume and failure duration. The results indicate that when the passage capacity of the navigation system substantially exceeds the freight volume, increases of freight volume or failure days have a relatively mild effect on robustness. However, when freight volume approaches the system's passage capacity, the effect of failure days on robustness becomes significantly more pronounced. The findings provide references for robustness research in multi-structure navigation systems, quantifying the impact of short-term disruptions such as facility failures and analyzing navigation reliability.

Keywords: ship lock; ship lift; passage capacity; series arrangement; system simulation; robustness

收稿日期：2025-12-18　　**录用日期：**2026-03-11

作者简介：刘春泽(1990—)，男，硕士，高级工程师，从事水运工程系统仿真研究工作。

水运工程

在高水位落差或通航条件复杂的山区流域，内河航运需要依赖船闸、升船机、航道、通航隧洞等组合而成的通航建筑物系统保障通行。此类多通航建筑物串联布置，各设施通过能力相互制约，其联合运行的效率和系统稳定性直接决定流域航运效率。在多通航设施联合运行方面，现有研究已取得系列成果。遗传算法被用于解决三峡升船机与船闸的闸室编排矛盾，提升闸室面积利用率[1]。刘盈斐等[2]通过船闸通过能力仿真，明确船舶进出闸速度随机性对通过能力影响微弱，而启动间隔随机性无显著作用；鲁彦汝等[3]通过开发船闸系统仿真模块，快速搭建三峡船闸仿真模型，模拟并分析船闸运行过程；李泳龙等[4]开发船闸通过能力仿真计算软件弥补手工排档不能考虑船舶随机到闸动态过程的缺陷；穆森等[5]建立船舶进闸的排队仿真模型，分析并比较合理尺度下大、小船闸分工运行和双线船闸随机运行两种模式的船闸通过能力；董霞等[6]针对多设施组合布置，提出以船闸或升船机单次运行时间为基准，复核其他设施运行时间匹配性的设计思路；杨港等[7]借助 Arena 平台构建仿真模型，通过敏感性试验与预测模型提出调度优化策略；庄元等[8]建立多线船闸调度优化仿真模型，对航道船舶交通流时空分布特性、船闸调度优化指标等进行仿真分析。这些研究为船闸运行仿真、方案评价及效率提升提供了重要参考。商剑平等[9]对船闸通过能力相关的研究进行分类和总结，提到多级船闸综合通过能力将成为研究热点。但现有研究均未充分考量多通航设施联合运行中，突发情况对枢纽稳定运行的影响，尤其缺乏对设施故障等突发事件下，系统运行状态演变规律的深入探索。在交通领域的鲁棒性方面，相关研究多聚焦于公路网络[10-13]或航道整体网络，虽然针对长三角航道网络的研究证实关键节点故障对鲁棒性的影响显著[14]，然而研究范围未深入多设施系统内部，针对多通航建筑物单体故障的系统鲁棒性分析不足。

针对当前研究的局限性，本文提出通航系统性能鲁棒性评价指标，基于系统仿真建模方法，以船闸和升船机串联布置的方案为例，开展多通航建筑物联合运行下的通过能力与鲁棒性研究，量化设施短期故障影响，分析通航保证性，并结合鲁棒性指标确定通航设施的合理通过能力。

1　通航设施鲁棒性评价

1.1　鲁棒性分析

鲁棒性指系统在扰动或不确定性条件下保持稳定运行的能力，核心是“抗扰能力+恢复能力”。鲁棒性是衡量系统可靠性的主要指标，其意义在于为系统筑牢“抗干扰屏障”，避免微小波动引发连锁故障。系统具有良好的鲁棒性，不仅能提升系统运行稳定性，降低故障损失，还能增强系统适应性，为技术应用和产业发展提供安全保障。

典型的复杂网络系统经常以最大连通子图比例、网络可达性等指标评价网络的结构鲁棒性(即拓扑结构干扰对鲁棒性的影响)，结合网络效率、吞吐能力等指标评价性能鲁棒性(即负载变动、环境扰动对鲁棒性的影响)。

1.2　通航设施鲁棒性评价指标与计算方法

在内河通航的船舶可选择行驶路径相对有限，因此在研究内河通航设施的鲁棒性时，主要考虑其性能鲁棒性，暂不考虑其结构鲁棒性。

“恢复正常的时间”定义为从通航设施故障解除、恢复运行开始，到系统内滞留船舶全部完成过闸、待闸时间回归日常均值的时间跨度。该指标直接量化扰动消退后系统回归稳态的效率，聚焦“扰动后功能复原能力”，更贴合工程实践中“故障处置效果”的核心诉求。但是仅采用恢复时间评价系统鲁棒性，缺少了对故障干扰强度的考虑，因此在其基础上，结合扰动强度(如故障持续时间、滞留船舶数以及通航枢纽年货运量)进行综合评价。定义通航系统鲁棒性指标如下：

$$R = t_1/(Qt_2) \tag{1}$$

式中：R 为通航系统鲁棒性指标；t_1 为系统恢复正常的时间，min；Q 为货运量，万 t；t_2 为通航设施故障天数，d。鲁棒性指标值越小，代表系统

鲁棒性越强，并结合恢复正常的时间进行鲁棒性的综合分析。

2 “船闸+升船机”串联布置联合调度通航系统仿真建模

在通航设施投入运营前，应对其运营进行全面的风险分析。而在实际工程中进行试验的成本高，也很难获得相关的试验数据。因此，通过仿真建模方法，在计算机中模拟多种故障干扰情景，并记录各情景下的通航系统拥堵后恢复正常的时间，对通航系统的鲁棒性进行分析，是一种快速、有效且低成本的方法。

“船闸+升船机”串联布置的通航系统，涵盖船闸、升船机、中间航道、上下游及中间锚地等设施，通航设施种类较全，系统相对复杂，中间航道中可用于通航缓冲的锚地容量有限，受设施联合调度、临时停运的影响明显。此外该类通航系统的航道网络结构简洁，影响船舶通过能力的因素相对单一，适宜作为通航设施鲁棒性研究的对象。

2.1 模型组成

“船闸+升船机”串联布置的通航系统仿真模型包含两大系统：外部驱动系统和内部作业系统。外部驱动系统包括船舶生成子系统；内部作业系统包括联合调度子系统、航道子系统、锚地子系统、待闸段子系统、船闸子系统、升船机子系统。上述子系统相互配合，共同实现系统功能。

2.2 模块设计

2.2.1 船舶生成子系统

船舶生成子系统按照预先选定的概率分布确定各类型的船舶生成时间，船舶生成后，放至锚地实体。

2.2.2 待闸子系统

待闸段子系统包括船闸、升船机的上下游待闸段实体。待闸段是船舶调直的水域空间，在通航仿真系统中航道实体与待闸段实体通过交汇处实体相连，船舶在待闸段进行航行自然条件判断、航行冲突判断以及待闸段泊位占用判断。

2.2.3 锚地子系统

锚地子系统包括所有的锚地实体，为船舶分配锚地以及对船舶进行排档。

2.2.4 航道子系统

航道子系统包括所有的航道段以及航道交汇处实体，其中航道段包括进出系统的航道以及连接串联布置的通航建筑物的中间航道。航道子系统为船舶确定所有可能航线以及为船舶进行航行条件判断。航道网络的初始化算法以及船舶在航道中的航行判断算法详见文献[15]，不在此赘述。

2.2.5 船闸子系统

船闸子系统包括闸室以及闸门。模拟船闸的整个作业流程，其时间包括船闸需要的灌水和泄水时间、船闸开闸门和关闸门的时间。船舶过闸排档算法详见文献[16]，不在此赘述；船闸子系统中船闸的作业逻辑参考文献[15]，不在此赘述。

2.2.6 升船机子系统

升船机子系统包括承船厢以及上游工作门、下游工作门。在承船厢到达目标水位后，上游工作门或者下游工作门开启，船舶驶入或者离开承船厢，承船厢复位，准备下一次升降作业，船舶进入升船机成功后，升船机的状态为繁忙状态，船舶离开升船机时，升船机状态恢复为空闲状态。升船机的作业逻辑见图1。

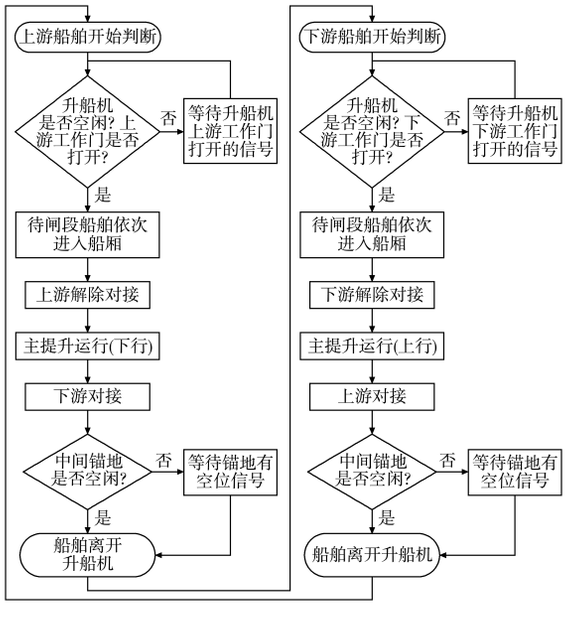


图1 升船机作业逻辑

Fig. 1 Operation logic of ship lift

3　实例研究

3.1　试验方案设计

结合国内某船闸和升船机串联布置的内河通航系统开展实例研究，分析故障停航时间与年货运量对系统鲁棒性的影响，并结合鲁棒性指标确定通航系统的合理通过能力。本文研究聚焦两类场景：系统年货运量保持不变背景下船闸或升船机等设施故障停运、年货运量逐年增长背景下的通航设施故障停运。结合场景设计 3 组试验，见表 1。

表 1　试验工况设计

Tab. 1　Design of test conditions

试验组	工况	故障停航天数/d	年单向货运量/万 t
A	工况 A-1	2	500
	工况 A-2	4	500
	工况 A-3	6	500
	工况 A-4	8	500
	工况 A-5	10	500
B	工况 B-1	4	260
	工况 B-2	4	340
	工况 B-3	4	420
	工况 B-4	4	500
	工况 B-5	4	580
C	工况 C-1	2	580
	工况 C-2	4	580
	工况 C-3	6	580
	工况 C-4	8	580
	工况 C-5	10	580

依据相关设计文件，该船闸近期设计年单向货运量通过能力为 260 万 t；基于预设仿真分析结果，其最大年单向货运量测算值约为 600 万 t。国内现有船闸检修工程实例及统计记录，各类船闸的检修时间普遍分布于 2~10 d。

为兼顾试验效率与研究精度、最大限度减少试验组数，仿真试验划分为 5 组，对应的输入单向货运量梯度设定为 260 万~580 万 t/a，故障停航天数梯度设定为 2~10 d，构建多变量耦合工况体系。

试验组 A 和 C 的年单向货运量分别选取 500 万和 580 万 t 两个水平，以便研究通航设施通过能力在接近年最大货运量的情况下，系统鲁棒性对故障天数的的敏感性；在分析货运量的影响效应时，选取故障停运时间为 4 d 的情况，该故障天数也可以为其他值。

在各工况中，通过上游锚地船舶数量判定系统恢复稳定状态的时间，并作为重点统计指标，采用 $t_1/(Qt_2)$ 计算系统的鲁棒性。仿真试验设定为单次运行 335 d、预热 10 d，每日有效工作时间 22 h。

3.2　输入条件

模型中船闸和升船机均为双向运行为主、根据需要进行换向运行的方式。由于中间航道内待闸锚地容量有限，为了避免系统死锁，船舶进入闸室前需要判断中间航道内的锚地容量。船舶生成后，在上游或下游锚地等待排档，船舶排档采用“先到先服务”的规则。模型中假设船舶在航行中保持匀速，在航道中的航行速度取 13 km/h，安全时间间隔取 2 min。船闸的灌水、泄水时间均为 14 min，升船机的一次上升或一次下降时间取 5.92 min。船舶进入船闸的速度取 0.7 m/s，船舶出闸的速度取 1.1 m/s；船舶进出升船机的速度取 0.5 m/s。模型输入的船型比例见表 2。

表 2　船型比例

Tab. 2　Ship type ratio

类型	载质量/t	装载率	船长/m	船宽/m	船型比例
干散货船	500	0.70	32.4	10	0.142
干散货船	500	0.70	46.0	10	0.142
干散货船	1 100	0.75	50.0	11	0.500
干散货船	1 600	0.70	68.0	11	0.186
集装箱船	1 050	0.87	60.0	11	0.030

3.3　结果分析

3.3.1　通过能力测算

假设“船闸+升船机”串联布置的通航系统在发生故障前后的运行均无人工干预，且到达船舶密度持续为均匀理想状态，即本文不考虑出现故障后的人工介入和特定的检修时间，“船闸+升船机”串联布置的通航系统故障后恢复到稳态的时间也基于上述假设条件。

作为研究基础，首先对“船闸+升船机”串联布置的通航系统通过能力进行测算，该情景下船闸不会发生故障停运，此时模型在船舶到达饱和状态下运行，即上下游边界的待闸锚地中始终有足够的船舶等待。通过仿真模拟运行，单向通过能力为 625.4 万 t/a。

水运工程

3.3.2　鲁棒性分析

仿真试验得到的恢复时间及计算得到的鲁棒性指标见表 3。可以看出，在研究对象年单向货运量达 500 万 t 的情况下(试验组 A)，随着船闸故障天数的增加，恢复时间增加，但鲁棒性并没有发生太大变化。但在保持故障天数不变(试验组 B)，随着研究对象年货运量的增加，该系统的稳态恢复时间逐渐增长，鲁棒性逐渐减弱。

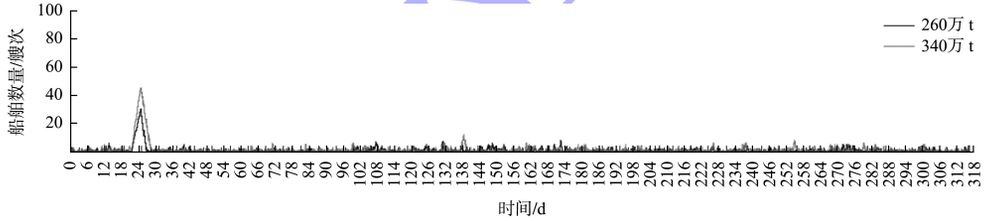
通过试验组 A 与 B 的结果对比，当研究对象的年单向货运量不高于 500 万 t 时，此时通过能力较货运量有较大富余，系统有一定的运行弹性，虽然恢复时间有所增加，但研究对象的鲁棒性相差不大；当研究对象的年单向货运量达到 580 万 t 时，货运量与通过能力比较接近，研究对象的鲁棒性指标急剧加大，鲁棒性急剧降低。

不同年货运量工况下系统积存船舶数量变化见图 2。可以看出，在相同的故障持续时间下，随着研究对象的年货运量增加，研究对象的稳态恢复所需时间也在不断增长，尤其是研究对象单向货运量达到 580 万 t/a 时，其恢复时间明显增加，在 1 a 内很难自行恢复稳态。

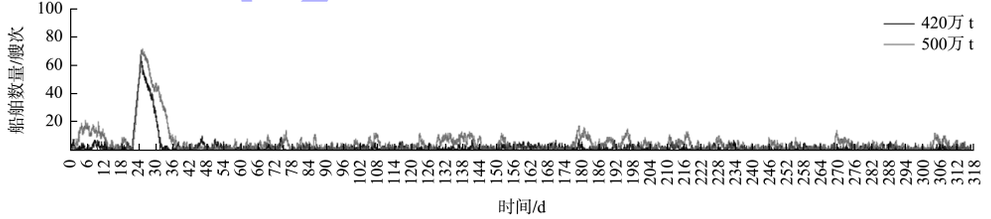
表 3　恢复时间及鲁棒性指标结果

Tab. 3　Results of recovery time and robustness indicator

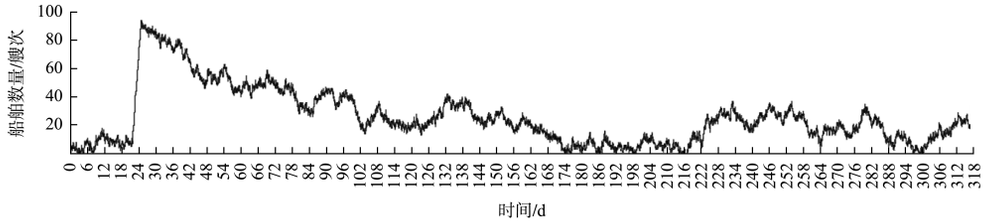
试验组	工况	恢复时间/min	鲁棒性指标
A	工况 A-1	8 370	8
	工况 A-2	22 260	11
	工况 A-3	48 840	16
	工况 A-4	57 780	14
	工况 A-5	80 370	16
B	工况 B-1	6 810	7
	工况 B-2	9 420	7
	工况 B-3	14 760	9
	工况 B-4	22 260	11
	工况 B-5	219 660	95
C	工况 C-1	35 760	31
	工况 C-2	219 660	95
	工况 C-3	无法恢复	无法恢复
	工况 C-4	无法恢复	无法恢复
	工况 C-5	无法恢复	无法恢复



a) 260万和340万 t



b) 420万和500万 t



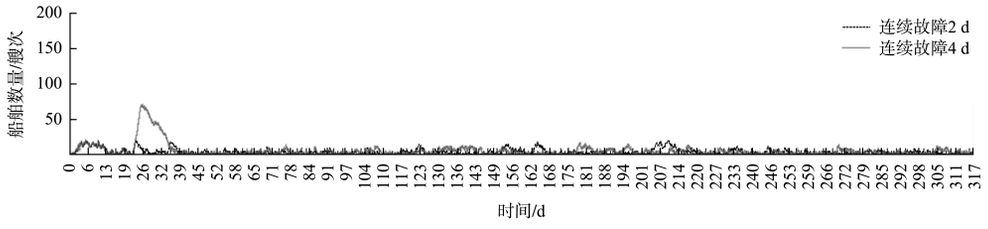
c) 580万 t

图 2　不同年单向货运量工况下连续故障 4 d 系统积存船舶数量变化

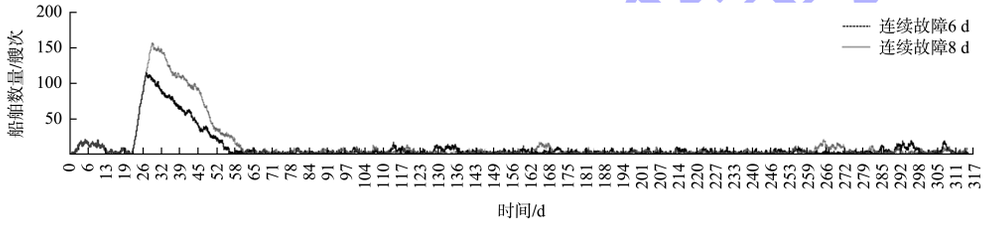
Fig. 2　Number variation of vessels blocked in system during consecutive failure 4 d under different annual unidirectional freight volume conditions

年单向货运量 500 万 t 时不同故障天数下系统积存船舶数量变化见图 3。可以看出，此时研究对象的稳态恢复时间会随故障天数不断增加而逐渐增长，但是各状态的恢复速度较快，总的恢复时间较短。说明在该情景下，故障天数的变化对研究对象的稳定运行影响较小，研究对象对短时间突发故障有较好的应急能力。

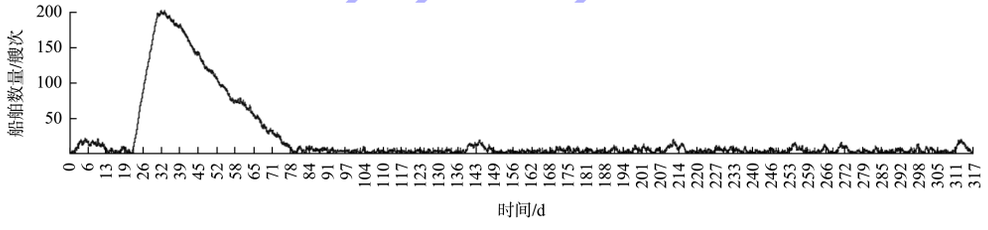
年单向货运量 580 万 t 时不同故障天数下系统积存船舶数量变化见图 4。可以看出，此时研究对象的稳态恢复时间会随故障天数增加而逐渐增长，且各状态的稳态恢复速度较慢。当研究对象的故障天数为 2 和 4 d，其还能通过较长时间恢复稳态，但当研究对象的故障天数为 6、8、10 d，其很难在 1 a 内恢复到稳态。



a) 连续故障2和4 d



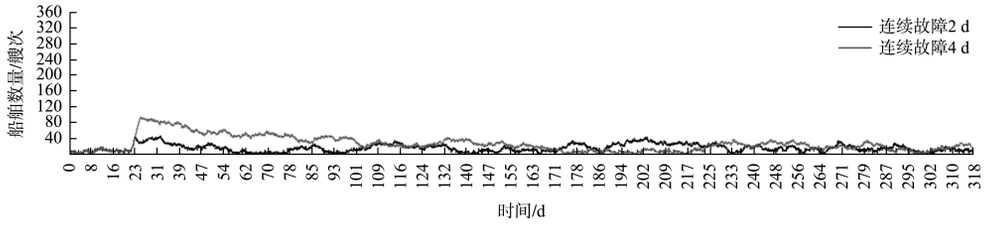
b) 连续故障6和8 d



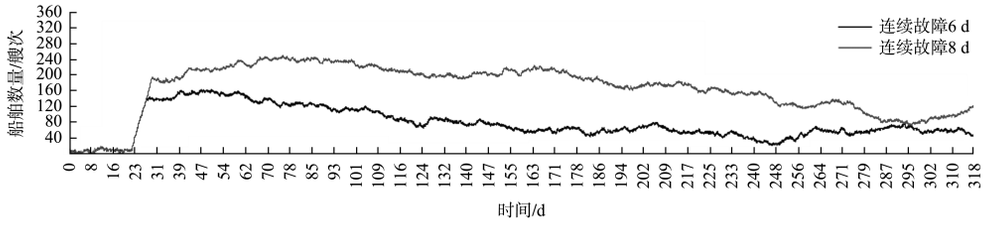
c) 连续故障10 d

图 3　年单向货运量 500 万 t 时不同故障天数下系统积存船舶数量变化

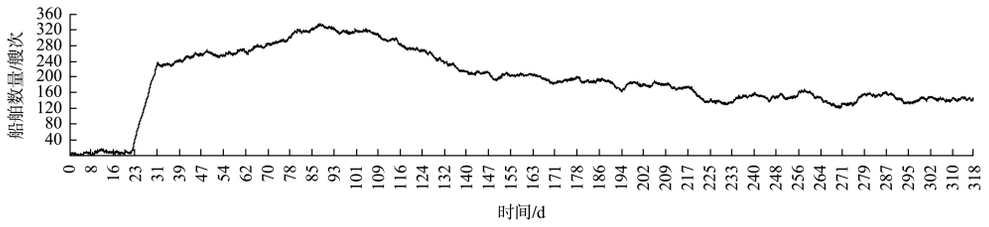
Fig. 3　Number variation of vessels blocked in the system under different fault durations when annual unidirectional freight volume is 5 million tons



a) 连续故障2和4 d



b) 连续故障6和8 d



c) 连续故障10 d

图 4　年单向货运量 580 万 t 时不同故障天数下系统积存船舶数量变化

Fig. 4　Number variation of vessels blocked in the system under different failt durations when annual unidirectional freight volume is 5. 8 million tons

对比图 3 与 4，当研究对象年单向货运量由 500 万 t 增至 580 万 t 时，研究对象稳态恢复变得困难。随着系统的年单向货运量逐渐接近其通过能力(625. 4 万 t)，该系统应对突发故障的能力急剧减弱。可以认为，在考虑通航设施故障停航的影响因素下，系统的年单向合理通过能力在 500 万~580 万 t。

4　结论

1）本文将 $t_1/(Qt_2)$ 的值作为内河通航系统运行稳定性的指标，为量化复杂内河通航系统的抗风险能力提供借鉴，后期可引入其他相关变量因素，完善该量化指标。

2）本文通过仿真方法，结合内河通航系统运行鲁棒性的计算公式，可基本确定考虑通航设施故障停航的影响因素下的系统合理通过能力。

3）对繁忙的内河通航系统而言，货运需求与通过能力比较接近，其鲁棒性较低，应制定完备的应急预案，降低设施故障等突发事件的影响，尽量降低发生严重拥堵的可能性。

4）应用系统仿真建模方法开展多通航建筑物联合运行下的鲁棒性研究，对量化设施故障等短期突发事件的影响、分析通航保证性提供了研究思路，具有重要的理论与实践价值。

参考文献：

[1] 邓伟, 邝祝芳, 余绍军, 等. 基于遗传算法的三峡-葛洲坝船闸闸室编排算法[J]. 人民长江, 2016, 47(24): 55-59, 67.
DENG W, KUANG Z F, XU S J, et al. Study on lock chamber scheduling algorithm of Three Gorges and Gezhouba ship locks based on genetic algorithm [J]. Yangtze River, 2016, 47(24): 55-59, 67.

[2] 刘盈斐, 曹凤帅. 内河船闸通过能力系统仿真模型分析中随机参数选取研究[J]. 水道港口, 2023, 44(2): 211-216.
LIU Y F, CAO F S. Research on the selection of random parameters in the system simulation model analysis of inland lock capacity[J]. Journal of waterway and harbor, 2023, 44(2): 211-216.

[3] 鲁彦汝, 周强. 船闸系统仿真模块库的建立与应用[J]. 水运工程, 2016(8): 125-130.
LU Y R, ZHOU Q. Establishment and application of simulation module library for lock system [J]. Port & waterway engineering, 2016(8): 125-130.

[4] 李泳龙, 吴礼国, 周定科. 基于多种排挡策略的船闸通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2023(S1): 119-124, 137.
LI Y L, WU L G, ZHOU D K. Simulation on ship lock capacity based on multiple gear shifting strategies [J]. Port & waterway engineering, 2023(S1): 119-124, 137.

[5] 穆森, 吕小龙. 平陆运河船闸通过能力研究[J]. 水运工程, 2021(3): 145-150.

MU S, LYU X L. Lock capacity of the Pinglu Canal[J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 145-150.

[6] 董霞, 赵凯, 吕小龙, 等. 多种通航建筑物组合布置的通过时间研究[J]. 水运工程, 2024(1): 97-104.
DONG X, ZHAO K, LYU X L, et al. Transit time of multiple navigation building combination arrangements[J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 97-104.

[7] 杨港, 邓健, 刘少勇, 等. 内河典型单级单线船闸待闸时间预测模型及优化调度策略[J]. 水运工程, 2022(12): 196-203.
YANG G, DENG J, LIU S Y, et. al. Waiting time prediction model and optimal dispatching strategy of typical single-stage single-line ship locks in inland rivers[J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 196-203.

[8] 庄元, 黄惠欣, 汪秉义. 基于航道-船闸系统模型的内河多线船闸调度优化仿真[J]. 中国航海, 2023, 46(1): 80-87.
ZHUANG Y, HUANG H X, WANG B Y. A navigation channel-ship lock system model for multi-line ship lock running simulation [J]. Navigation of China, 2023, 46(1): 80-87.

[9] 商剑平, 刘春泽, 唐颖, 等. 船闸通过能力研究综述[J]. 水运工程, 2018(7): 103-108.
SHANG J P, LIU C Z, TANG Y, et al. Overview of researches on lock throughput capacity [J]. Port & waterway engineering, 2018(7): 103-108.

[10] 李浥东, 臧钊, 章子凯, 等. 面向动态交通场景理解的多模态鲁棒学习综述[J]. 北京交通大学学报, 2025, 49(5): 52-65.
LI Y D, ZANG Z, ZHANG Z K, et al. Review on multimodal robust learning for dynamic traffic scenario understanding [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2025, 49(5): 52-65.

[11] 李洁, 张欣宇, 朱全军, 等. 滑坡灾害影响下高速公路网络鲁棒性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2025, 52(1): 176-186.
LI J, ZHANG X Y, ZHU Q J, et al. Robustness analysis of expressway network under influence of landslide disasters [J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2025, 52(1): 176-186.

[12] XU Z Z, ZHANG C W, CHOPRA S S. Robustness assessment of public bus transit system with a response-integrated approach for a resilient public transport system in Hong Kong[J]. Transportmetrica B: transport dynamics, 2023, 11(1): 361-375.

[13] CAO Y, BU X Z, ZHANG J L. Robustness evaluation of bus-subway composite network considering accessibility[J]. Scientific reports, 2025, 15(1): 10770.

[14] 娄乃元, 黄常海, 陈宇里, 等. 长三角高等级航道网的网络特性与鲁棒性分析[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(1): 28-36.
LOU N Y, HUANG C H, CHEN Y L, et al. Network characteristics and robustness analysis of high level waterway network in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2021, 47(1): 28-36.

[15] 李薇, 王翠, 刘春泽. “航道-船闸”通航系统中的多线船闸运行规则仿真研究[J]. 水运工程, 2025(10): 179-187.
LI W, WANG C, LIU C Z. Simulation research on operation rules of multi-line locks in “waterway-lock” navigation system [J]. Port & waterway engineering, 2025(10): 179-187.

[16] 商剑平, 吴澎, 唐颖. 基于计算机仿真的船闸联合调度方案研究[J]. 水运工程, 2011(9): 199-204.
SHANG J P, WU P, TANG Y. On multiple-lane lock's joint scheduling plan based on computer simulation[J]. Port & waterway engineering, 2011(9): 199-204.

(本文编辑　王璁)

水运工程