



基于随机排挡的船闸通过能力研究

王伟, 黄涛

(安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要:建立船闸过闸简化模型,运用蒙特卡洛方法与二维装箱启发式算法相结合的随机仿真方法,对不同尺度船闸设计方案的通过能力进行计算,结合船闸通过能力的影响因素和定量计算结果进行分析讨论,论证和优选合理的设计方案。计算结果表明:采用船舶先到先服务策略时,同等宽度船闸的闸室利用率大致相同,一次过闸吨位指标随闸室长度扩大而增加;采用船舶优选服务策略时,一次过闸吨位指标较先到先服务策略计算指标略高,而平均待闸次数指标在船闸达到繁忙状态后呈单增趋势;L4船闸方案在船型适应能力、通过保证能力、服务质量水平等指标上均显示出优势;在随机排挡一次过闸吨位的基础上计算通过能力时,须结合船闸实际运营情况,合理确定规范公式参数。

关键词:蒙特卡洛方法;二维装箱;船闸通过能力;方案优选

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0162-06

Research on ship lock capacity based on stochastic simulation method

WANG Wei, HUANG Tao

(Anhui Transport Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: Establishing a simplified model for ship lock passing, using the stochastic simulation method combining the Monte Carlo method and 2D bin-packing heuristic algorithm, we compute the passing capacity of different ship lock design schemes at different scales, discuss the results for different simulation implementations considering different factors, and optimize the reasonable design scheme. The results show that when using the ship's first-come-first-served strategy, the lock chamber utilization rate of ship locks of the same width is about the same, and the tonnage index of one-pass ship lock increases as the ship lock chamber length increases. When the ship selection service strategy is adopted, the tonnage index of the first pass is higher than the calculated index of the first-come-first-served service strategy, and the average number of times to ship lock the gate shows a single increase trend after the ship lock reaches the busy state. The L4 ship lock design scheme shows advantages in ship type adaptability, pass ability, service quality level and other indicators. When calculating the pass capacity on the basis of the random simulation of the ship lock, it is necessary to reasonably determine the specification formula parameters in conjunction with the actual operation of the ship lock.

Keywords: Monte Carlo method; 2D bin-packing; ship lock capability; design optimization

在内河航运中,船闸作为重要的通航枢纽建筑起到了沟通水系、改善航行条件的重要作用。但船舶过闸的不连续通行特性限制了船闸的通过能力^[1],尤其在运输繁忙河段,船闸往往成为航道中的通行瓶颈,进而影响整个航运系统的运行

效率。因此,船闸设计通过能力的计算是否合理,将直接影响航运系统预期发挥的经济效益。在内河航道网和船闸闸室尺度标准化建设大背景下,船闸通过能力也是待建闸室候选方案比较及优选的关键评价指标。

影响船闸通过能力的因素很多,包括基础设施条件、运营条件和管理条件等因素^[2]。在船闸工程设计中,规范^[3]对通过能力影响因素进行了简化,使得船闸通过能力的计算主要是一次过闸时间和一次过闸平均吨位2个参数的确定,计算简便、直观,但人工过闸船舶编排和船闸实际运营情况还存在差距^[4],导致一次过闸平均吨位核心参数取值的不合理性,最终影响到船闸通过能力计算结果的准确性。随着水运事业的发展,对于干线航道大型船闸,按照手工排挡或经验公式计算得到的设计指标已经无法适应通航现状的需要^[5]。

虽然基于随机排挡的一次过闸平均吨位和船闸通过能力计算在国内已得到初步应用^[6],但计算参数和计算过程对于船闸运营因素和规范要求的适应性仍有待完善。本文针对船闸建设规模论证及闸室尺度标准化设计需求,以引江济淮工程中某复线船闸为例,采用考虑综合随机船型、调度策略和闸室排挡等因素的仿真方法计算船闸的单次过闸能力指标,分析和讨论仿真计算中的影响因素和计算要点,以期为船闸设计中的通过能力分析及计算提供技术参考,保证船闸设计通过能力的合理性,为工程建设提供科学的决策依据。

1 工程背景

1.1 工程概况

为改善引江济淮工程中某一线船闸运能不足的现状,拟建复线船闸工程的规划等级为Ⅱ级。在船闸上、下游各设置待闸锚地,泊位数18个;上、下游导航段长均为180 m;船闸上游设计最高通航水位10.7 m,最低通航水位5.8 m;船闸下游设计最高通航水位10.6 m,最低通航水位5.8 m。

1.2 设计过闸船型组合

根据规划航道等级、航线平均运距、预测货种流量流向,以及长江水系、淮河水系航道现状等多种因素,考虑安徽省船舶现状和船型标准化、大型化的趋势,结合已建一线船闸资料和规范推荐,该复线船闸工程在各设计水平年的代表船型如表1所示。

表1 设计水平年过闸船型艘次比例及尺度

船舶/吨级	总长/m	型宽/m	艘次比/%		
			2020年	2030年	2040年
500	44.0	8.8	7.5	5.0	2.5
	45.0	8.9	7.5	5.0	2.5
1 000	60.0	10.8	30.0	27.5	27.5
	63.0	11.0	30.0	27.5	27.5
2 000	67.6	13.8	8.0	11.0	15.0
	85.0	13.8	8.0	12.0	15.0
	73.0	13.8	9.0	12.0	15.0

目前,该复线船闸工程正在进行开发建设的前期工作,合理确定船闸的通过能力是建设工作开展的基本前提,因此有必要对船闸建设规模及闸室尺度设计方案进行分析和论证。

2 计算方法

2.1 过闸简化模型

船舶过闸需要遵循船闸管理机构制定的管理和调度作业流程,过闸流程虽受各自区域的自然、社会、经济等条件影响而存在差异,但大体可归纳划分为船舶航行至锚地报备、接受指令到指定锚地锚泊、申报过闸计划、接受安检、等待过闸计划发布、按计划过闸等环节。参考上述流程并结合规范要求,建立了船舶单向过闸的简化模型(图1),主要包含影响船闸通过能力的5个过闸过程。

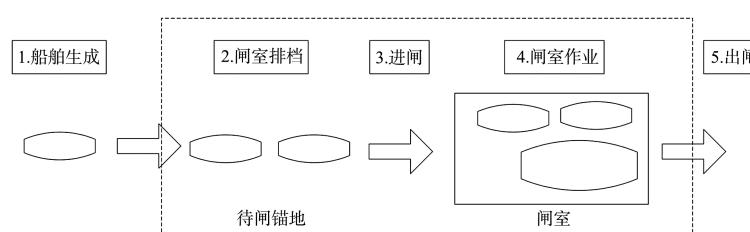


图1 简化的船舶单向过闸模型

在图 1 简化模型中, 到达船舶生成部分作为模型的输入部分, 而闸室排挡部分负责对待闸船舶进行闸室位置的编排。进出闸和闸室作业部分负责闸室排挡方案对应过闸时间的计算。

2.2 船舶生成

手工船型组合方法是目前确定船闸一次过闸吨位的常用方法。但该方法对船型选择主观性强, 无法全面反映设计过闸船型到闸的随机性, 进而影响排挡结果, 导致一次过闸平均吨位和实际运营情况的误差较大。

根据设计船型资料, 以到达船型为随机变量, 采用蒙特卡洛方法(随机模拟法)生成待闸船型, 步骤如下:

- 1) 根据设计船型比例建立到达船型的概率密度函数;
- 2) 生成到达船型的累积概率分布函数;
- 3) 为到达船型抽取随机数;
- 4) 将随机数转化为到达船型的抽样值;
- 5) 根据采样数重复 3)、4) 步, 生成到达船型序列。

图 2 显示随机生成 4 种船型的蒙特卡洛随机数抽样方法。

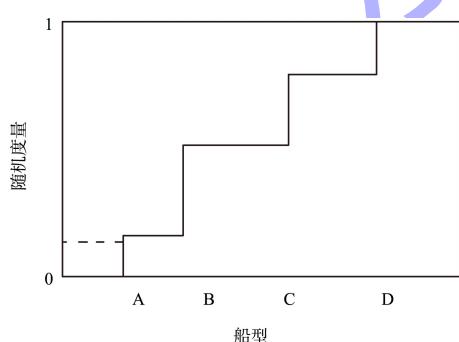


图 2 蒙特卡洛随机数抽样方法

2.3 闸室排挡

在随机生成待闸船舶序列的基础上, 对待闸船舶进行闸室调度排挡。将闸室视作一个长、宽分别为 L 、 W 的二维大方箱, 将待编船舶视为小尺寸的二维矩形物品, 将闸室编排过程简化为物品装箱的过程, 可以将闸室编排问题转化为二维装箱问题,

本质上属于复杂的 NPC (non-deterministic polynomial complete) 问题。

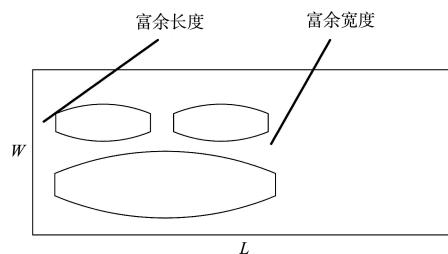


图 3 带富余尺寸的闸室编排

为了过闸停泊安全, 船闸内的船队或船舶要留有一定的富余或安全间隔, 因此可以利用的闸室有效尺度应根据闸室尺度和具体排挡方案进行折减, 增加了求解的复杂度。针对上述问题, 采用考虑富余宽度因素的启发式算法计算近似最优的闸室编排方案。此外, 针对实际船闸满负荷运营的情况, 采用优化的船舶过闸策略优选闸室利用率最大的组合方案进行过闸, 计算船闸在船舶积压时的满负荷通过能力, 研究运营模式因素对船闸通过能力指标的影响, 并对结果进行定量分析和讨论。

3 仿真研究

3.1 仿真方案设计

仿真实验中规划复线船闸闸室宽度取标准船型宽度的倍数, 拟定闸室尺寸分别取 L_1 ($280\text{ m} \times 23\text{ m}$)、 L_2 ($280\text{ m} \times 34\text{ m}$)、 L_3 ($340\text{ m} \times 23\text{ m}$) 和 L_4 ($340\text{ m} \times 34\text{ m}$) 4 种方案。

本研究在船舶过闸简化模型的基础上编制了仿真实程序, 采用前述船型组成预测和拟定闸室尺度方案进行仿真实验研究。同时考虑下列因素:

- 1) 在考虑闸室船舶泊靠的安全间距因素的基础上, 根据过闸船舶闸室内编排的临界情况对所需富余尺寸进行适当折减, 以适应船闸实际运营和服务状况, 保证标准化船型和闸室尺度在设计时的一致性。仿真实程序中实现 3 种富余尺寸计算方法, 即 E_1 (紧凑方法、不考虑富余尺度)、 E_2 (灵活方法, 根据排挡情况适当加密) 和 E_3 (规范方

法),结合前述船型,3种计算方法对于各船型在23 m宽闸室中可能的排列形式及对应通过约束真值如表2所示。

表2 船型编排方式在各富余尺寸计算方法下的通过约束真值

船舶组合	船舶宽度/m	规范富余宽度/m	闸室有效宽度/m	E ₁	E ₂	E ₃
1 000 t×2	10.8×2	1.470	23.070	T	T	F
1 000 t×2	10.8+11	1.475	23.275	T	T	F
1 000 t×2	11.0×2	1.475	23.475	T	T	F
1 000 t+2 000 t	10.8+13.8	1.545	26.145	F	F	F
1 000 t+2 000 t	11.0+13.8	1.545	26.345	F	F	F
...

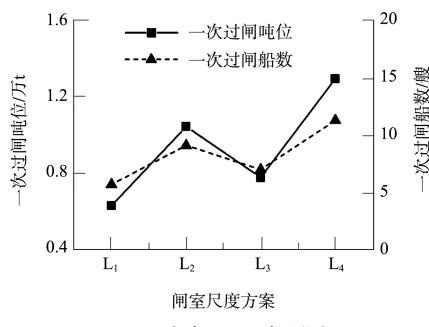
注:T表示船型组合可编排,F表示不可编排。

2)由于仿真试验是通过大量等概率试验得出船舶过闸相关参数的统计过程,考虑到船闸尺度的离散性和船舶到闸时间的随机性所对应的船闸运行方式和服务水平不同,仿真程序在船舶生成后设置了一定大小的待闸区域,并实现了2种排挡策略。排挡策略S₁为严格先到先服务(FCFS, first come first serve)排挡策略,当到达船舶无法排入闸室时立刻结束闸室编排,不考虑后续有合适尺度的船舶填入闸室的情况;排挡策略S₂假设待闸区有一定数量的船舶,在不考虑船舶到达次序以及待闸次数的假设下,优选闸室占用率最大的船舶组合进行过闸。

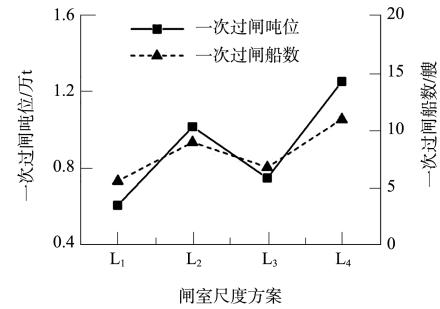
3.2 仿真结果与讨论

3.2.1 先到先服务策略

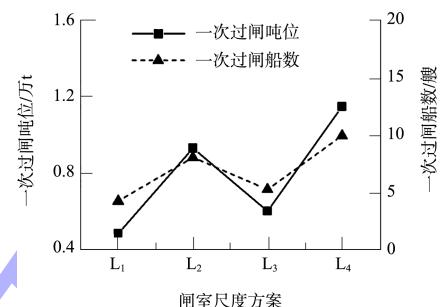
使用先到先服务策略,采用不同的闸室编排方法对各设计水平年的一次过闸吨位和一次过闸船数等指标进行计算,图4显示了闸室尺度、编排方法因素对上述指标的影响。



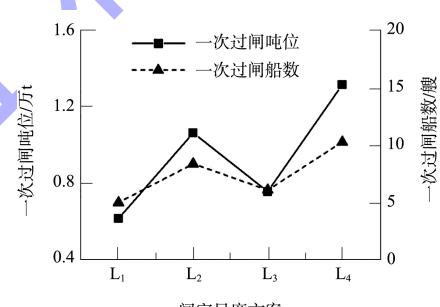
a) E₁方案, 2030年预测



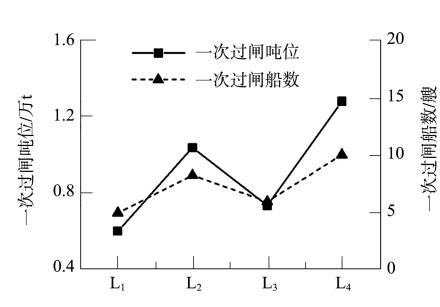
b) E₂方案, 2030年预测



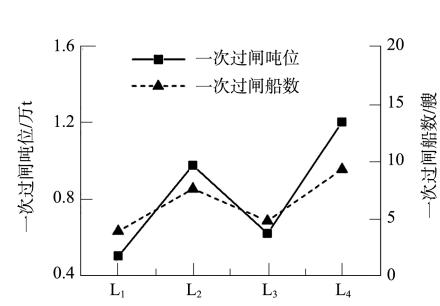
c) E₃方案, 2030年预测



d) E₁方案, 2040年预测



e) E₂方案, 2040年预测



f) E₃方案, 2040年预测

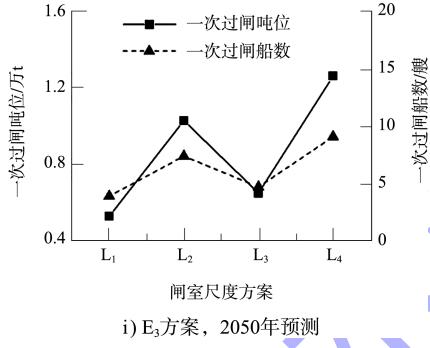
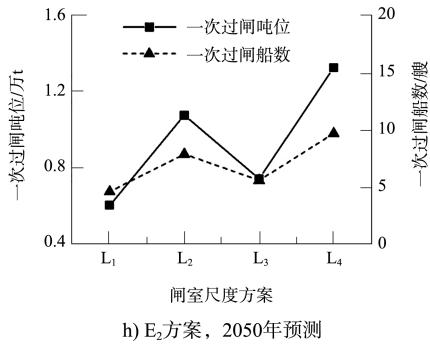
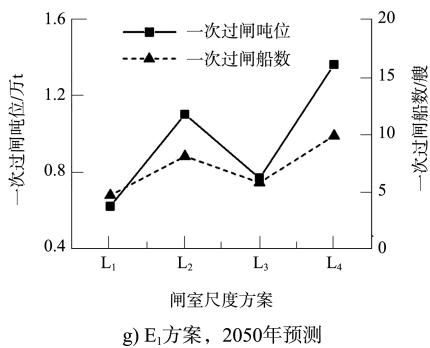
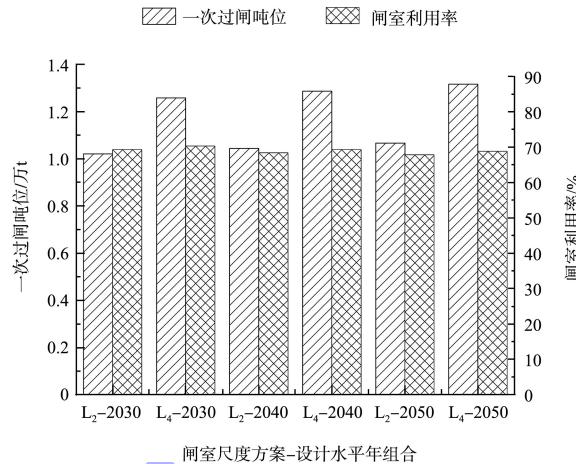


图 4 不同闸室尺度、编排方法因素对一次过闸指标的影响

由于在 E₃方法中严格按规范计算富余宽度,而设计船型中存在过闸组合宽度的略超闸室设计宽度的情况,导致一次过闸吨位和一次过闸船数指标偏低 20%左右;而采用 E₂方法时,过闸指标与不考虑富余宽度的 E₁编排方法接近,表明对富余宽度计算和闸室编排方法根据实际船闸运营状况进行灵活调整,在符合设计规范的前提下,提高了标准船型对于标准尺度闸室的适应性。随着设计水平年份递增,设计船型的中大型船舶比例逐渐上升,34 m 宽闸室无论从一次过闸吨位还是一次过闸船数指标都远高于 23 m 宽同等长度船闸方案 40%左右,表明 34 m 宽船闸方案的船型适应能力和通过保证能力更优。

图 5 将 L₂、L₄ 方案的过闸指标进行对比。其中, L₄ 方案在各个设计水平年的闸室利用率受船

型变化影响不大,稳定在 70%左右,和 L₂ 方案持平,而一次过闸吨位指标要高出 L₂ 方案 30%左右。



3.2.2 优选服务策略

参考设计锚地的泊位设置,使用全局启发式方法对锚地待闸船舶队列进行过闸编排。图 6 显示队列长度对 L₂ 和 L₄ 闸室方案在 2030 设计水平年过闸指标的影响。

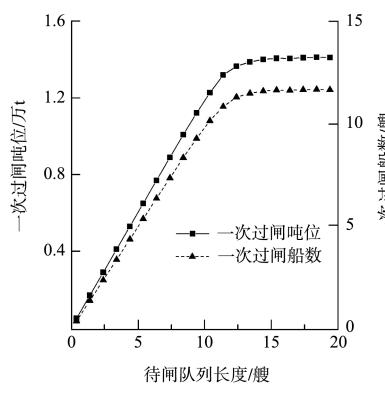
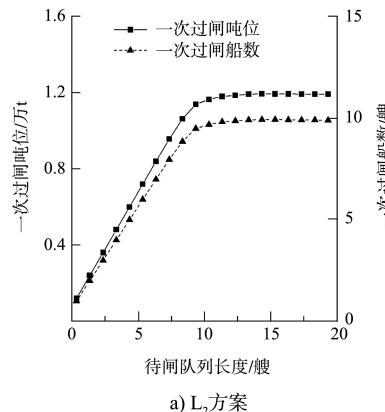


图 6 L₂、L₄ 闸室尺度方案过闸指标与待闸队列长度关系

从图 6 可以看出,一次过闸吨位和一次过闸船

数指标随待闸队列长度的增加而增加,当达到一定队列大小时,船闸运行能力达到峰值,此时上述过闸指标保持稳定,船闸的实际通过能力不再增加。优选策略的船舶选择空间较先到先服务策略更大,闸室编排的效率也更大,但设计水平年大船比例与船闸的峰值通过能力关联性不大,船闸通过能力达到极限时的过闸指标较先到先服务策略的过闸指标在2040年时最多可增加50%左右。

图7显示各设计水平年中待闸队列长度对平均每船待闸次数指标的影响。该指标在微观上反映了船舶个体对于过闸的服务质量感受。在待闸队列长度小于单次过闸船数时,队列中的船舶可以一次编排过闸,每船待闸次数为0;当待闸队列长度超过单次过闸船数指标时,过闸每船待闸次数均值随之增加,反映了船闸在繁忙时期拥堵情况的量化指标。在各设计水平年,L₄方案的平均每船待闸次数指标均小于L₂方案,尤其在2050年大船比例较大时,L₄方案的平均每船待闸次数指标仅为L₂方案的60%,表明L₄方案在适应大船型和高负荷方面的优势。

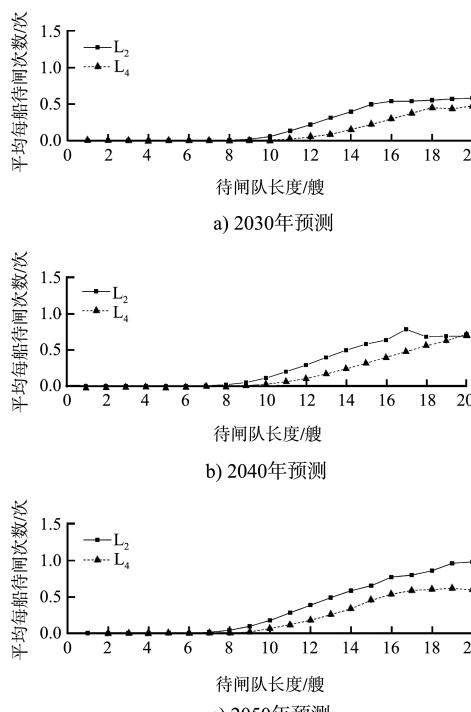


图7 L₂、L₄平均每船待闸次数与待闸队列长度关系

4 结论

1)采用船舶先到先服务策略时,大型船舶比

例随设计水平年上升,同等宽度船闸的闸室利用率大致相同,一次过闸吨位指标随闸室长度扩大而增加,各设计水平年增幅基本一致。

2)考虑锚地排队因素,采用船舶优选服务策略,船闸的实际通过能力随队列长度增加逐渐逼近峰值后呈平稳趋势,一次过闸吨位指标较先到先服务策略计算指标略高,而平均每船待闸次数指标在船闸达到繁忙状态后呈单增趋势。

3)采用一次过闸吨位、船数指标比较时,34 m宽船闸方案在船型适应能力和通过保证能力优于23 m宽方案;而采用平均每船待闸次数指标比较时,34 m宽船闸L₄方案也显示出在高负荷运营时服务质量的优势。

4)先到先服务策略的计算过程反映了船闸在无拥堵理想运营状态的一次通过能力,而船舶优选服务策略的计算过程反映了船闸的繁忙运营状态,在船闸拥堵时的极限通过能力。在上述2种方法计算结果中进行比较、选择的基础上进行船闸年通过能力指标计算时,须在船闸实际运营情况调查的前提下,审慎确定月运量不均衡系数,以确保利用规范公式计算时参数意义的一致。

5)随机排挡方法虽然能考虑船型组合比例和船舶编排的随机性,但该方法不能考虑船舶到达的时间因素,对应一次过闸时间的计算方法仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张玮,廖鹏,吴玲莉,等.船闸通过能力主要影响因素[J].交通运输工程学报,2004(3):108-110.
- [2] 胡晓琴.岷江下游船闸通过能力研究[D].成都:西南交通大学,2011.
- [3] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [4] 廖鹏.船闸通过能力研究[D].南京:河海大学,2007.
- [5] 朱俊,张玮,余劲.三峡船闸通过能力计算研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008,32(3):401-404.
- [6] 袁和平,刘春泽,张婧姝.京杭运河台儿庄三线船闸通过能力及闸室尺度[J].水运工程,2016(10):169-173.