

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.008

孔庄, 廖鹏, 杨春红, 等. 船闸运行状态与通过能力仿真分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(1): 73-79. (KONG Zhuang, LIAO Peng, YANG Chunhong, et al. Analysis of shiplock operation and throughput capacity based on traffic simulation model[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(1): 73-79. (in Chinese))

船闸运行状态与通过能力仿真分析

孔庄¹, 廖鹏¹, 杨春红¹, 张明²

(1. 东南大学 交通学院 港航工程系, 江苏 南京 210096; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 为定量分析和预报船闸的运行状态并指导其交通调度, 基于 Arena 离散事件仿真平台, 以湘江长沙枢纽双线船闸为例, 通过已有研究成果建立船闸交通仿真模型, 经实际资料验证该模型的可靠性, 并分析了船闸在不同交通调度方案下的运行状态参数及最大通过能力。仿真分析结果表明, 只有提高每个闸次的闸室利用率, 才能有效增加船闸的通过能力; 每个闸次的船舶艘数越多, 一次过闸时间就长, 平均延误就长。运行实践中可根据船闸状态和过闸交通需求, 合理进行交通调度, 在保障过闸安全的前提下协调船闸通过能力与船舶延误之间的关系。借助仿真输出的运行状态参数, 有助于充分掌握船闸系统的交通规律, 分析不同设计水平下的船闸最大通过能力, 或是视不同交通负荷预选调度方案, 综合提高过闸能力与服务质量。

关键词: 船闸; 仿真; 运行状态; 调度; 长沙枢纽

中图分类号: U641.7

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)01-0073-07

随着我国内河水运交通量的持续增加, 船闸通过能力相对航运过闸需求不足的矛盾愈发突出^[1]。在不改变基础设施的情况下, 优化交通组织能够高效节约地发挥作用^[2], 有利于提高船闸通过能力与服务质量。就船闸调度问题而言, 进行交通建模与仿真是一种有效手段, 需要考虑通过能力、延误和安全等多个相互联系与制约的目标^[3-4], 是一个复杂的多目标的不确定性组合优化问题^[5]。国外现有的船闸交通建模主要基于标准化程度很高的船型(过闸船舶)^[6-9], 难以适用于国内复杂的非标准船型。针对船闸交通建模中关键的复杂船型的闸室排档问题^[10], 结合三峡-葛洲坝船闸通航调度理论问题, 国内学者提出了一些实用的交通建模方法^[11], 为船闸运行仿真研究奠定了较好的基础。尽管以往在船闸仿真建模方面做了许多工作^[12-15], 但需要加强对仿真结果的验证与船闸运行状态的分析, 充分掌握其交通规律, 再现船舶过闸的时空变化, 分析各种条件变化引起的船闸状态的改变, 以利于优化交通组织方案, 缩短船舶延误, 定量预测其通过能力。本文在已有研究基础上, 以湘江长沙枢纽双线船闸为例, 基于 Arena 离散事件仿真平台^[16]建立船闸交通仿真模型, 并根据实际运行数据进行验证, 预报该船闸在不同设计水平下的闸室利用率、船舶延误和通过能力等运行状态参数, 通过对比船闸在不同船舶到达分布与调度策略下的运行状态, 提出适用于不同工况的交通组织方案。

1 调度规则与算法

1.1 调度规则

船闸调度与其优化目标、到达船舶和交通负荷等有关, 往往难以直接建模求解。通常是先根据实践拟定某种调度规则, 并设计相应的算法, 通过仿真建模分析对应的船闸运行状态, 最后比较优化目标而确定相对

收稿日期: 2016-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009028); 中央高校基本科研业务费项目(2242016K40109)

作者简介: 孔庄(1992—), 男, 福建厦门人, 硕士研究生, 主要从事港口航道工程的研究。E-mail: 283409786@qq.com

通信作者: 廖鹏(E-mail: pliao@seu.edu.cn)

较优的方案。根据国内船闸的实际运行情况,船闸调度中的基本规则是先到先过和重点优先,故拟定基本调度规则:①过闸优先级按下列次序:危险品船>公务船>客船和鲜货船(载运鲜活货的货船)>普通货船等,其中,危险品船又分为运输固体危险品船与液体危险品船两大类,公务船指担任特殊任务的军事运输船等;②危险品船安排专闸通过,同类型危险品船可一同过闸,反之则不能同一闸通过;③同一优先级船舶采用先到先过。

为提高过闸效率,在基本调度规则基础上,针对同一优先级别船舶,注意大、小船协同,以闸室利用率最大为目标进行排挡优化,形成优化调度规则。当船闸将要或已经出现大量船舶积压时,采用应急调度规则,即在优化调度规则基础上,危险品船将不再优先和专闸通过,而是进入锚地等待,待危险品船舶数量满足一定条件时才允许集中过闸,但不同类型的危险品船仍不能同一闸通过。

1.2 调度算法

图1为基本调度规则的双线船闸单向调度算法。其中,危险品船不进入锚地,直接前往引航道内靠船墩等待过闸;其余船舶进入锚地等待。船舶排队算法的具体步骤为:①船舶进入锚地后按优先级及先后顺序形成待闸队列;②按顺序提取待闸队列中一批船舶进入排挡模块;③按船舶长度指标(该方法排序可得到较大的闸室利用率)再次排序形成排挡队列;④调用闸室排挡算法,按顺序对排挡队列中船舶进行排挡,选取闸室利用率最大的一组为该闸次的排挡方案;⑤判断是否满足调度条件,若满足则进入闸室判别,否则继续等待来船;⑥如当前仅有唯一导航墙空闲,则直接前往该导航墙,否则判断能够较早形成当前方向过闸的导航墙;⑦如两导航墙在同一时刻均能过闸,则均衡两闸室通过量,选择当日通过量较小的并前往待闸;⑧下一闸次排挡前根据锚地排队顺序补充船舶进入排挡模块,然后重复③~⑦。

每闸次调度结束条件有两种:一是锚地中尚有船舶,但没有合适的船舶能够进入闸室;二是锚地中没有船舶,考虑船闸运行成本和船舶延误时间,根据闸室利用率 λ 和已排挡船舶等待时间来控制,具体判断条件是:①当 $\lambda < 0.3$ 时,本闸次最多等待60 min;②当 $0.3 \leq \lambda < 0.6$ 时,本闸次最多等待30 min;③当 $\lambda \geq 0.6$ 时,本闸次最多等待15 min;若超过既定等待时间,锚地中仍无船舶,则立即调度该闸次。另外,应急调度规则中若满足 $\lambda \geq 0.50$,即可安排集中过闸。

基于可排点的闸室排挡算法为:①将排挡队列中首位船舶安排在闸室的(0,0)点上,将该船舶左下角坐标 (x,y) 赋值(0,0),将该船从队列移除;②将新产生的可排点放入原有的可排点队列中,并进行排序(先按 x 坐标升序排列, x 相同时按 y 升序排列);③调用排挡队列中首位船舶,将可排点队列队首的坐标赋给该船,若能通过约束检验,就把该船放在该点,对应的可排点从队列移除;反之则试探下一个可排点;若所有的可排点都放不下该船舶,就放弃该船舶,取队列中下一个船舶来试排;④重复步骤②~③直到排挡队列为空或闸室排满为止,停止计算。具体算法流程图可参照文献[4]。

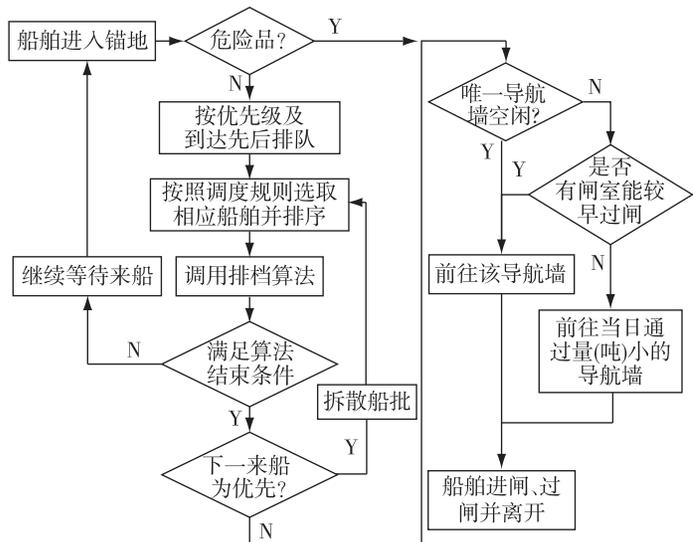


图1 双线船闸单向调度算法流程

Fig. 1 One-directional operation scheduling algorithm of shiplock

2 仿真建模

2.1 工程背景

湘江为我国“一纵两横,两网十八线”高等级航道网中的“一线”,是连接长株潭沿江经济走廊与长江干线的水上交通要道。长沙枢纽是湘江干流九级开发中的最下游梯级,位于望城县境内的蔡家洲河段,是一座以改善航运和滨水环境为主,兼有供水、发电等综合效益的枢纽工程^[4]。长沙枢纽建有双线 2 000 t 级船闸,闸室有效尺度 280 m×34 m×4.5 m(长×宽×底槛水深),2012 年 9 月建成并试通航运行。

2.2 仿真输入参数

基于 Arena 离散事件仿真平台建立模型,范围从上游锚地至下游锚地,包括两个锚地、上下游引航道及靠船墩、两线船闸等。在仿真模型中,船舶到达规律与过闸服务时间是重要输入参数。其中,船舶到达规律包括一定时间间隔内到达的船舶数量及其属性(类型、吨位、总长、总宽等)。为简化问题,通常先将复杂的船型进行统计分类,选取代表船型及其对应比例(代表船型越多越接近实际情况),然后分析船舶到达数量的分布,按船型概率生成船舶。根据文献^[4],选取 16 种船型作为仿真模型的代表船型。因缺乏系统的到船资料,在此不妨假定小时到船率服从泊松分布。

过闸服务时间不仅与灌泄水时间、闸门启闭时间等有关,还与船舶类型、船舶进出闸的速度与数量以及船员的操作熟练程度等有关。为简化问题,仿真模型中灌泄水时间、船舶进出闸速度等参数均看成常数,重点考虑过闸船舶艘数对一次过闸时间的影响;同时考虑两种工况,工况 1 考虑船闸在试运行期情况,船闸日运行 19 h;工况 2 表示船闸经过一段运行后所达到的设计水平,船闸日运行 21 h,具体参数取值参看文献^[4]。此外,根据船闸的通航水流条件,一线和二线船闸运行时不能同时进行灌水或泄水操作。

假定船闸具有良好运行状态,不考虑船闸运营中因各种原因造成的停航,忽略航道、水文、气象等客观因素对船闸运行的影响。为节约模型运行时间,同时减小随机性带来的误差,设置仿真运行时间为 30 d,各工况重复模拟次数为 10 次。

3 运行状态与通过能力分析

3.1 模型验证

根据实际情况,试运行初期设备故障较多,且船长对于船舶过闸有一个适应过程,为减小延误并提高船闸的通过能力,工况 1 采用应急调度规则;工况 2 下船闸正常运行,可采用优化调度规则。为率定并验证该仿真模型,收集了该船闸试运行期第 3 个月(2012 年 12 月)以及运行 10 个月(2013 年 7 月,详见文献^[17])的月运行资料。其中,2012 年 12 月过闸船舶的平均吨位为 772 t/艘,双向流量 $V=179$ 艘/d;2013 年 7 月的双向流量 $V=200$ 艘/d。两次实际运行情况分别与工况 1 和工况 2 的运行条件接近,用来验证该模型,结果详见表 1。仿真模型计算得到的各项主要参数与实际运行数据一致,相对误差均不超过 10%。进一步,图 2(a)绘出了工况 1 条件下仿真与实际的闸室利用率分布,两者吻合良好,除了仿真的闸室利用率在 0.3~0.5 区间的比例略高。由此可见,模型验证情况良好,证明了仿真模型的可靠性,故可用来分析船闸的运行状态与通过能力。

表 1 船闸交通仿真结果与实际运行数据比较

Tab. 1 Comparison between simulated result and actual operation data

工况	工况 1				工况 2		
	一次过闸 平均吨位 G/t	一次过闸 平均艘数 m	平均日 过闸次数 n	平均闸室 利用率 λ	一次过闸 平均艘数 m	一次过闸 平均时间 T/min	平均日 过闸次数 n
仿真	4 871	6.4	27.1	0.603	5.2	64	37.0
实际	4 950	7.0	25.2	0.618	5.1	67	36.0
相对误差	-1.6%	-8.5%	7.5%	-2.4%	2.0%	-4.5%	2.8%

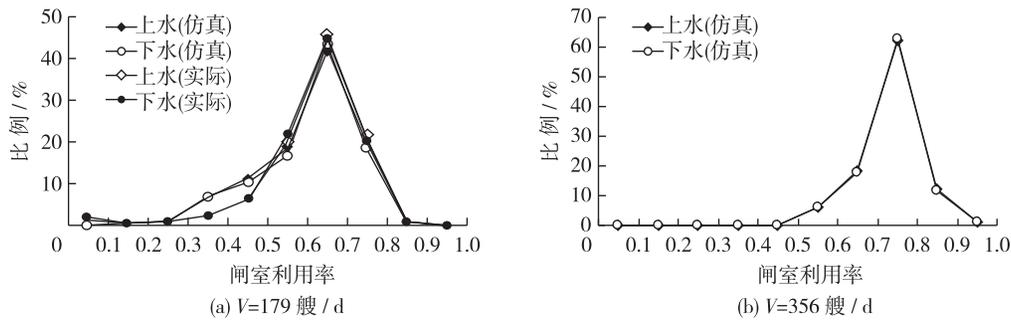


图2 工况1 闸室利用率统计

Fig. 2 Distribution of chamber utilization under working condition 1

3.2 运行状态分析

表2为模型验证时仿真运行1个月的各参数值。平均延误是指船舶从进入锚地到离开锚地(准备过闸)为止的这段时间。排队长度指停泊在锚地的船舶数量,不包括准备过闸的船舶。交通负荷 ρ ($\rho=V/C$,服务率 $C=m/T$)反映船闸服务系统的繁忙程度;当 $\rho < 1$ 时,该排队系统稳定;当 $\rho > 1$ 时,该系统不稳定,意味着系统延误随着时间的推移将越来越大。

表2 船闸在不同条件下运行1个月的状态参数($V=179$ 艘/d)

Tab. 2 Shiplock performance parameters under different conditions in a month

工况	船闸/ 航向	一次过闸 平均吨位 G/t	一次过闸 平均艘数 m	一次过闸平均 时间 T/min	平均日 过闸次数 n	平均闸室 利用率 λ	平均 延误 D/h	平均排队 长度 $L/艘$	船舶总吨 合计 $P/万 t$	交通 负荷 ρ
工况 1	一线上水	4 837	6.3	80.3	6.8	0.602	2.55	2.0	206.8	0.91
	二线上水	4 832	6.3	80.2	6.7	0.597				
	一线下水	4 903	6.3	80.5	6.8	0.606	2.61	2.2		
	二线下水	4 916	6.4	80.6	6.8	0.608				
工况 2	一线上水	4 010	5.2	63.7	9.3	0.495	1.20	2.1	229.8	0.85
	二线上水	3 986	5.2	63.6	9.2	0.495				
	一线下水	3 960	5.1	63.5	9.3	0.490	1.14	2.2		
	二线下水	3 991	5.2	63.7	9.2	0.496				

注:①工况1和2的船舶过闸双向流量分别为179和200艘/d;②工况1和2的调度规则分别为应急调度和优化调度。

从表2可见,工况1下船舶的平均延误约为2.58 h(约2闸次),平均延误船舶量约2.1艘,交通负荷约0.87,闸室利用率亦达到国内其他船闸的多年平均值^[1],反映出工况1下采用应急调度时,尽管交通负荷较大但船闸运行状态尚可。同工况1相比,工况2减小了一次过闸时间,增加了过闸次数,将船舶平均延误缩短至1.17 h,不过,也使得平均闸室利用率和一次过闸平均艘数有所降低。仿真结果表明,每个闸次的船舶艘数越多,则一次过闸时间就长,平均延误就长。在实际调度中,可根据船闸状态和过闸交通需求,合理进行交通组织调度,在船闸通过能力(过闸船舶总吨位)与船舶平均延误之间取得平衡。

需要说明的是,当交通需求量较小时,由于到达船舶的随机性,为兼顾船闸运行成本和船舶延误时间,闸室利用率并不能显著提高。若考虑交通需求量大的情况,将日均流量增加1倍(即 $V=358$ 艘/d),其他条件同工况1,仿真得到的闸室利用率为0.7~0.8的所占比例可达62%,如图1(b)。表明交通需求较大时,积压的船舶有利于优化排挡,同时采用应急调度规则降低危险品船的优先级,能够显著提高闸室利用率,但要注意设置临时专用锚地并加强管理,确保船舶过闸安全;同时亦需要组织协调,避免可能造成危险品船舶待闸时间过长。

3.3 船舶到达的影响

船舶到达的种类、数量和规律与船闸的运行状态有着直接关系。为分析船舶到达分布的影响,在工况1

相同调度规则下, 仿真计算了船舶按均匀到达时船闸的运行指标, 详见表 3。对比工况 1 船舶按泊松分布到达时的结果(表 2), 在交通需求相同($V=179$ 艘/d)的情况下, 船舶到达分布对过闸船舶总量没有影响, 但能影响船闸的服务质量。当船舶到达从泊松分布变为均匀分布时, 一次过闸平均吨位从 4 871 t 增加到 5 157 t, 平均排队长度从 2.1 艘减小到 1.4 艘; 船舶平均延误从 2.6 h 减少到 2.0 h, 每月可减少延误 3 222 h。仿真结果表明, 降低船舶到达的随机性, 有助于提高船闸的闸室利用率和通过能力, 减小船舶平均延误和平均排队长度, 经济效益显著。在运行实践中, 可通过航运企业的配合进行有计划地安排, 提前组织船舶过闸, 降低船舶延误费用。

表 3 工况 1 船闸应急调度运行 1 个月的运行状态参数(船舶均匀到达)

Tab. 3 Shiplock performance parameters of emergency scheduling under working condition 1 in a month

船闸/航向	一次过闸 平均吨位 G/t	一次过闸 平均艘数 m	一次过闸 平均时间 T/min	平均日 过闸次数 n	平均闸室 利用率 λ	平均 延误 D/h	平均排队 长度 $L/艘$	船舶总吨 合计 $P/万 t$	交通 负荷 ρ
一线上水	5 145	6.6	82.0	6.4	0.636	2.00	1.4	210.0	0.87
二线上水	5 138	6.7	82.2	6.3	0.637				
一线下水	5 166	6.7	82.1	6.3	0.638	2.02	1.4	211.3	0.88
二线下水	5 179	6.6	82.0	6.4	0.638				

3.4 通过能力分析

船闸的通过能力不仅与其规模和技术指标有关, 还与船型、交通负荷和调度方式等因素有关。考虑排队系统的稳定性, 认为当该船闸的交通负荷无限接近 1 但小于 1 时, 对应的通过能力是该条件下船闸的最大通过能力, 由此可根据不同交通负荷预先选取最优船闸调度方案, 避免出现船闸滞航现象。仍以工况 1 为例, 假设船舶到达符合泊松分布, 仿真计算得到基本调度规则、优化调度规则及应急调度规则对应的船闸最大日通过量分别为 185 艘/d, 190 艘/d, 215 艘/d。综合考虑各调度规则特点, 以减小系统船舶延误为目标, 兼顾公平, 工况 1 条件下, 到船率 $V \leq 185$ 艘/d 时, 可采用基本调度规则进行调度; 当 185 艘/d $< V \leq 190$ 艘/d 时, 可采用优化调度规则; 当 190 艘/d $< V \leq 215$ 艘/d 时, 宜采用应急调度规则; 当 $V > 215$ 艘/d 时, 船闸将会有大量船舶积压。

另外, 根据船闸的设计条件(运量不均衡系数 1.3, 装载系数 0.8, 船舶平均吨位 956 t/艘, 工况 2), 暂不考虑船舶的标准化和大型化, 以优化调度规则为例, 仿真计算得到不同运量时船闸的运行状态参数, 见表 4。图 3 绘出了工况 2 不同调度规则下平均排队长度与通过能力的关系曲线。可以看出, 当排队长度较小时(通常小于 5 艘), 船闸通过能力随着排队长度增加而迅速增加, 然后缓慢逼近一条渐近线。表明随着船闸系统的延误无限增加, 船闸的通过能力也不会显著增加。根据交通负荷推断, 在设计条件下长沙枢纽船闸在基本调度规则、优化调度规则及应急调度规则时船闸最大单向通过能力分别约为 3 076 万 t, 3 378 万 t 和 3 764 万 t, 超过该船闸 2013 年、2014 年 2 934 万 t 和 4 971 万 t 的实际双向过闸货运量, 但小于原设计的 4 800 万 t 的单向年通过能力。

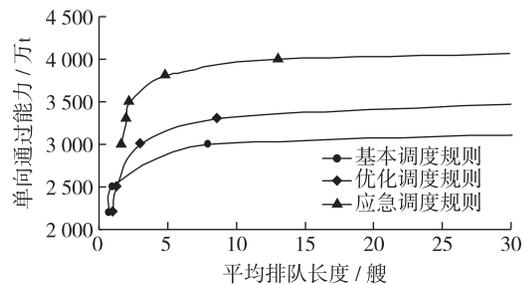


图 3 平均排队长度与单向通过能力的关系

Fig. 3 Relationships between average queue length and one-directional throughput capacity of shiplock

表 4 工况 2 时不同过闸运量条件下的船闸运行状态参数(优化调度规则)

Tab. 4 Shiplock performance parameters with optimal operation under different throughput conditions of working condition 2

单向过闸货运量(万 t)	2 200	2 500	3 000	3 300	3 500
平均到船率 V (艘/h)	4.27	4.85	5.82	6.40	6.79
平均服务率 C (艘/h)	5.403	5.665	6.067	6.453	6.729
交通负荷 $\rho(\rho=V/C)$	0.790	0.856	0.959	0.992	1.009

(续表)

单向过闸货运量(万 t)		2 200	2 500	3 000	3 300	3 500
平均延误 D/h	上水	0.71	0.75	0.96	2.01	5.50
	下水	0.75	0.76	1.05	1.92	5.81
平均排队长度 $L/艘$	上水	1.0	1.3	2.6	9.0	31.1
	下水	1.0	1.3	3.4	8.3	34.9
日平均过闸次数 n	上水	19.6	21.1	23.9	24.9	24.8
	下水	19.4	21.3	23.9	24.8	24.8

4 结 语

(1) 将船闸视为单个或多个服务窗口的排队系统,基于 Arena 离散事件仿真平台进行交通建模与仿真,可再现船舶过闸的时空变化及其运行状态,并通过实际数据能够验证模型的可靠性。通过分析仿真模型输出结果(船闸运行状态参数),有助于充分掌握船闸系统的交通规律。

(2) 仿真结果表明,只有提高每个闸次的闸室利用率,才能有效增加船闸的通过能力;不过,每个闸次的船舶艘数越多,一次过闸时间就长,平均延误就长。运行实践中,可根据船闸状态和过闸交通需求,合理进行交通调度,如危险品集中过闸、航运企业有计划过闸等,在保障过闸安全的前提下协调船闸通过能力与船舶延误之间的关系。

(3) 考虑排队系统的稳定性,当船闸的交通负荷无限接近 1 且小于 1 时,对应的通过能力是船闸的最大通过能力。据此可分析不同设计水平下的船闸最大通过能力,或是根据不同交通负荷预先优选调度方案,以便提高船闸的通过能力与服务质量。

参 考 文 献:

- [1] 廖鹏, 张伟. 船闸一次过闸平均吨位计算模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 207-212. (LIAO Peng, ZHANG Wei. Analytical model for average lockage tonnage of waterway locks[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2010, 40(1): 207-212. (in Chinese))
- [2] 王炜, 过秀成. 交通工程学[M]. 2版. 南京: 东南大学出版社, 2011. (WANG Wei, GUO Xiucheng. Traffic engineering [M]. 2nd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2011. (in Chinese))
- [3] 庞雪松, 潘荣友, 廖鹏. 提高长洲枢纽现有船闸通过能力对策研究[J]. 水运工程, 2011(4): 114-119, 125. (PANG Xuesong, PAN Rongyou, LIAO Peng. On improvement of navigation lock capacity at Changzhou hydro-complex[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(4): 114-119, 125. (in Chinese))
- [4] 蒋明锋, 张明, 廖鹏, 等. 长沙枢纽船闸运行初期的通过能力研究[J]. 水道港口, 2013, 34(4): 359-363. (JIANG Mingfeng, ZHANG Ming, LIAO Peng, et al. Study on recent lock capacity of Changsha hydro-junction[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2013, 34(4): 359-363. (in Chinese))
- [5] VERSTICHEL J, CAUSMAECKER P, SPIEKSMAN F, et al. The generalized lock scheduling problem: An exact approach[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2014, 65(2): 16-34.
- [6] DAI M D M, SCHONFELD P. Metamodels for estimating waterway delays through series of queues[J]. Transportation Research: Part B, 1998, 32(1): 1-19.
- [7] TING C J, SCHONFELD P. Control alternatives at a waterway lock[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2001, 127(2): 89-96.
- [8] CORTÉS P, MUÑUZURI J, GUADIX J. Simulation of freight traffic in the Seville inland port[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2007, 15(3): 256-271.
- [9] SMITH L D, SWEENEY D C II, CAMPBELL J f. Simulation of alternative approaches to relieving congestion at locks in a river transportation system[J]. Journal of the Operational Research Society, 2009, 60: 519-533.
- [10] VERSTICHEL J, CAUSMAECKER P, VANDEN BERGHE G. An improved best-fit heuristic for the orthogonal strip packing problem[J]. International Transactions in Operational Research, 2013, 20(5): 711-730.

- [11] 齐欢, 肖恒辉, 张晓盼. 三峡-葛洲坝通航调度的理论研究与工程实践[M].北京: 科学出版社, 2010. (QI Huan, XIAO Henghui, ZHANG Xiaopan. The theory research and engineering practice for the co-scheduling of the Three Gorges dam and the Gezhouba dam[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [12] 朱顺应, 朱凯, 王丽铮. 基于 Arena 的三峡枢纽运输系统仿真模型[J]. 水运工程, 2011(2): 40-44. (ZHU Shunying, ZHU Kai, WANG Lizheng. A simulation model based on Arena for the transportation system of the Three Gorges region[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(2): 40-44. (in Chinese))
- [13] 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 Jianping, WU Peng, TANG Ying. On multiple-lane lock's joint scheduling plan based on computer simulation[J]. Port & Waterway Engineering, 2011(9): 199-204. (in Chinese))
- [14] 李楠, 李桂华, 尹剑平. 湘江船闸的过闸调度算法研究[J]. 水运工程, 2013(3): 171-175. (LI Nan, LI Guihua, YIN Jianping. Scheduling algorithm for Xiang River lock chamber[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(3): 171-175. (in Chinese))
- [15] 柯姜岑, 甘露, 程超. 基于元胞自动机的船舶过闸运输组织仿真[J]. 水运工程, 2013(1): 123-129. (KE Jiangcen, GAN Lu, CHENG Chao. Simulation of ship lock organization mode with cellular automata[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(1): 123-129. (in Chinese))
- [16] KELTON W D. Simulation with Arena[M]. Columbus: The McGraw-Hill Companies, 2002.
- [17] 王伟凡. 浅析长沙枢纽船闸投运初期提升通过能力的措施[J]. 湖南交通科技, 2014, 40(2): 171-173. (WANG Weifan. Measures to improve the navigation lock capacity during the initial operation of Changsha hydro-complex [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2014, 40(2): 171-173. (in Chinese))

Analysis of shiplock operation and throughput capacity based on traffic simulation model

KONG Zhuang¹, LIAO Peng¹, YANG Chunhong¹, ZHANG Ming²

(1. Department of Port, Waterway and Coastal Engineering, School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: In order to quantitatively analyse and predict the shiplock operation conditions and give some guidances in the lock scheduling, a traffic simulation model for a double-lane lock was developed based on the discrete event simulation platform of Arena. Taking the double-lane lock of the Changsha hydroproject located at the Xiangjiang River as a case study, the operation state parameters and the maximum throughput capacity of the Changsha lock were simulated and analyzed under different traffic scheduling modes and working conditions, and the reliability of the simulation model was validated by the measured operation data. The simulated results show that the utilization rate of the lock chamber is only improved in each lockage time and that the lock throughput capacity can effectively increase. The greater the number of ships in the lock chambers for each lockage time is, the longer the lockage time and the mean delay are. From the engineering practices it is found that the relationships between the lock throughput capacity and delays can be coordinated and the navigation lock scheduling can be optimized under the conditions of protection of the lockage safety, according to the traffic demands and the lock working conditions. With the operation state parameters given by the simulation model, which can help to fully grasp a traffic law of the lock system, the lock maximum throughput capacity at different design levels are analyzed or the lock scheduling programs are optimized in dependence on different traffic loads to improve the lock throughput capacity and the quality of service.

Key words: shiplock; simulation; operation state; scheduling; Changsha hydroproject