

内河船闸通过能力研究进展

廖 鹏

(东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 船闸作为内河航运系统中的服务节点,其通过能力不仅是船闸通过船舶数量的表达,而且还是船舶通过船闸质量的描述,而国内关于船闸通过能力的研究仅仅强调了“量”而忽略了“质”.本文从交通工程的角度出发,回顾了船闸通过能力的研究进展.依据研究的对象和方法不同,将船闸通过能力的“量”和“质”研究分为数量学派和质量学派,并简要归纳了它们的研究内容和方法.同时,分析了近年来船闸通过能力的量质结合研究,并为进一步的工作提出了建议.

关 键 词: 内河航运; 船闸; 通过能力; 服务质量; 综述

中图分类号: U641.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)03-0034-07

在内河水运中,船闸被广泛用于沟通水系联系、提高航道等级、改善水流条件等,促进了内河水运的发展.不过,船闸是联通不连续航道水域的通航建筑物,通过能力有限,往往成为内河水运交通网络的控制节点、甚至是瓶颈口,船闸的通过能力影响着整个水运交通网络的运输能力^[1].因此,船闸通过能力分析在内河航道(网)规划与评价、船闸规划与设计占有举足轻重的地位.尽管我国在大中型通航水利枢纽通航建筑物的研究、设计和建设中取得了巨大的成就,但对其通过能力的研究尚没有引起足够的重视,如三峡船闸在试通航期间就出现了通过能力相对航运过坝需求不足的矛盾,虽然许多学者从设计、运行和管理等方面进行了分析,但仍未取得较为一致的认识^[2,3];京杭运河苏北段梯级船闸因通过能力有限而引发的船舶堵航带来了巨大经济损失,也造成了不良的社会影响.因此,进行船闸通过能力研究显得尤为重要.

1 船闸通过能力研究的分类

船闸通过能力作为船闸设计的一项重要技术经济指标^[4],是港航工程中的交通规划问题,属土木工程与交通运输工程的交叉内容,涉及的因素非常广泛.目前,我国关于船闸通过能力的研究主要是从土木工程的角度出发,力求船闸工程的效益得到最大发挥,强调船闸通过船舶的数量(吨位),而忽略了船舶通过船闸时可能出现的待闸时间以及由此产生的经济损失.随着对“以人为本”的科学发展观认识的逐渐深入,人们愈来愈关心船舶和货物能否及时、安全地通过船闸,仅从土木工程的角度研究船闸通过能力显然已不能适用内河航运现代化的需要.若从交通工程的角度来看,船闸作为交通运输系统中的一个服务节点,其运行指标必然涉及到服务的主体(船闸本身)和客体(船舶)两个方面的内容,既要考虑船闸通过船舶的数量(如过闸货运量),也要考虑船舶通过船闸时的质量感受(主要表现为船舶的待闸时间),就如在道路交通运输中,不仅要考虑道路的最大交通服务量,也要考虑驾驶员和乘客的感受^[5].由此可见,船闸通过能力不仅表现在所

收稿日期: 2008-10-13

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目“提高三峡船闸综合通过能力关键技术研究”(2005 328 222 25),“三峡枢纽区域运输组织模式及对策研究”(200732822251)

作者简介: 廖 鹏(1979-),男,湖北赤壁人,讲师,博士,主要从事港口航道工程研究. E-mail: pliao@ seu. edu. cn

能通过的船舶总吨位(数量),也反映在船舶排队等待过闸需要的时间(服务质量)。

目前国内外的主要研究工作可分为两类,一类是以前苏联、中国学者为代表的船闸通过能力计算(仅仅强调了通过船舶的数量),可称为数量学派,它主要受当时内河航道的繁忙程度和计划经济环境的影响,重视船闸操作运行的结果,而忽略了船舶过闸时可能发生的时间延误;另一类是在市场经济环境下重点考察(繁忙)船闸提供的服务质量,可称为质量学派,这主要以美国学者最近40年来的船舶待闸时间研究为代表,通过对船闸运行过程数据的收集和整理,基于排队理论等建立了一套比较完整的船舶待闸时间计算模型和内河航道网交通模拟模型,但因对服务质量的特别强调而逐渐忽略了船闸所能通过船舶的最大数量。

2 船闸通过能力研究的数量学派

船闸通过能力的数量研究,就是考虑单位时间内船闸通过的货物总吨位,衡量船闸通过货物的能力能否满足客、货运过闸的需要。分析船闸的通过能力时需考虑诸多影响因素,首先是基础设施条件(技术指标),包括船闸设计水头和灌泄水时间、闸门型式和启闭时间、闸室有效尺度、引航道尺度和布置、导航和靠船建筑物布置、通航水流条件等;其次是运营条件,包括过闸船型、船队的类型和组成、各类船舶尺度、载重量及技术条件,过闸货物的品种、批量、流向及不平衡性,洪枯水停航期和需减载日数、上下游港口能力、到闸船舶均衡性,气象条件对通航期的影响等;最后是管理因素,主要包括管理人员的技术水平、工作效率、通讯联络、系统控制、事故处理和检修能力等^[4,6]。

为便于计算船闸的通过能力,数量学派从船闸运行的角度出发,将复杂的影响因素进行概化。例如,采用一次过闸时间(或日平均过闸次数)集中反映船闸的技术影响因素,采用一次过闸平均吨位来概括船舶的类型和组成及其过闸特点,认为船闸的理想通过能力等于每年实际运行天数中每天过闸次数与一次过闸平均吨位的乘积的总和,实际通过能力等于最大能力除以高峰月通过能力与平均月通过能力的比值^[7,8]。依据该思路,国内外学者提出了许多不同的船闸通过能力计算公式,周华兴^[9]曾作了详细介绍。但从这些公式的结构形式和计算参数来看,它们基本上是一致的。我国的船闸总体设计规范(JTJ305-2001)^[10]推荐采用下式计算船闸设计通过能力:

$$P_1 = \frac{n}{2}NG \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{1}{2}(n - n_0) \frac{NG\alpha}{\beta} \quad (2)$$

式中: P_1 为单向年过闸船舶总载重吨位(t); P_2 为单向年过闸客、货运量(t); n 为日平均过闸次数; n_0 为日非运客、货船过闸次数; N 为年通航天数(d); G 为一次过闸平均载重吨位(t); α 为船舶装载系数; β 为运量不均衡系数。例如,根据葛洲坝船闸1990年以前的运行经验和三峡大坝建成后的远景船队过闸吨位, n 取22.1次(单向一次过闸时间为59.7 min、昼夜平均工作时间22 h), n_0 取0次(客船均通过升船机), N 取335 d, G 取10 200 t(长航12 000 t×80%、地航3 000 t×20%), α 取0.9; β 取1.3,计算得到三峡船闸2030年单向通过能力为5 152万t^[11]。

从 P_1 的计算可以看出,其计算参数均与船闸的规模和运行管理有关,并不依赖于船闸当地的货流特点,反映的是与船闸规模有关的通过能力,对船闸的规划、设计和管理等具有指导意义。 P_2 的计算则主要是对 P_1 再打两个折扣——除以 $\beta(>1)$ 并乘以 $\alpha(<1)$,显而易见,这两个参数对 P_2 的计算非常重要。特别地, β 是考虑了货运量在12个月中分布的不均衡特性,给设计通过能力一定的富裕,反映了船闸货运量的不均衡性对通过能力的影响。

实践经验表明,规范^[10]推荐的公式结构比较合理,考虑的因素也比较全面,在一定程度上能够满足工程需要。不过,随着我国经济的持续高速增长以及近年来水路运输的快速发展,繁忙河段(如京杭运河苏北段)上出现了大量的待闸船舶,引起了各方的关注。有学者开始对通过能力的计算方法以及相关计算参数的取值

提出了不同的意见^[12-16]. 例如,张玮等^[12]对船闸通过能力计算中的一次过闸时间、一次过闸平均吨位、通过能力的单双向问题等进行了深入讨论,指出规范^[10]中推荐采用考虑设计船型及其组合的船队排列法计算一次过闸平均吨位虽然简便、直观,但设计船型的选取及其组合难以反映过闸船舶的实际情况及船舶的大型化和标准化趋势,考虑到船舶过闸需要的是闸室水域面积(假定水深条件满足),提出了基于过闸船舶的吨位与面积关系的一次过闸平均吨位 G 计算方法:

$$G = g_a \frac{\lambda S}{s(g)} \quad (3)$$

式中: g_a 为过闸船舶平均吨位; $s(g)$ 为内河船舶吨位与面积的函数关系; S 为闸室有效面积; λ 为闸室有效面积利用率. 式中各参数可根据实际资料统计得到. 该方法的最大特点是建立了一次过闸平均吨位计算的连续函数关系,有效避免了传统方法中的设计船型及其组合等不确定性问题,能够连续动态地反映船舶大型化和标准化趋势的影响,为船闸通过能力计算提供了新思路.

另一方面,船闸设计和管理人员从船闸设计、船舶构成和船闸管理及调度方式等三个方面提出了许多具体的建议^[17-19],如对船闸进行技术改造,增加日平均过闸次数;加强船舶的标准化建设,提高一次过闸平均吨位;引进计算机管理,提高船闸的运行、调度和管理水平等,旨在提高船闸本身的通过能力以减少船舶的待闸时间.

3 船闸通过能力研究的质量学派

质量学派的研究重点是船舶的待闸时间,并据此来反映船闸的服务质量. 船舶的待闸时间研究最初是在上世纪 60 年代基于排队论发展起来的. 它将船闸视为 1 个或 2 个服务窗口的排队服务系统(单线或双线船闸),研究分析船舶的到达分布和船闸服务时间分布等,根据排队论计算和预测船舶的待闸时间. 由于船舶的到达分布等需要以船闸的实际运行数据为基础,因而它非常重视船闸运行过程的数据收集. 美国陆军工程师兵团(USACE)通过建立船闸运行监测系统 LPMS,从 1975 年 3 月开始收集全美内河船闸的详细运行资料,具体包括船闸信息、船舶信息、到闸和过闸时间、过闸情况(航向、船队解编)、停航等^[20]. 可以说,目前质量学派的研究离不开这些船闸运行的基础资料.

排队论是研究“服务”系统因“需求”拥挤而产生等待(排队)的现象以及合理协调“需求”和“服务”关系的数学理论. 它自 20 世纪初丹麦数学家爱尔朗(A. K. Erlang)创立以来,经诸多数学家的努力,得到了巨大的发展并成为运筹学的重要分支,在通信、交通运输、计算机系统与网络、管理、军事等方面得到了广泛应用^[21]. 在内河航运方面,DeSalvo 等^[22]最早利用 M/M/1 排队模型(即船舶到达服从泊松分布或船舶相继到达的间隔时间服从负指数分布,服务时间也服从负指数分布)研究分析了船队的待闸时间. 不过,Wilson^[23]指出采用 M/M/1 排队模型得到的船舶待闸时间与实际情况存在较大的误差,而采用 M/G/1 模型(即船舶到达服从泊松分布,服务时间服从一般分布)预测单线船闸的待闸时间能够得到较好的结果.

顾客的到达分布、系统的服务时间和排队规则是决定系统等待时间的重要因素. 对船闸服务系统而言,船舶到达和船闸服务时间的分布是非常复杂的. Carroll 等^[24]根据实测资料的分析指出,船闸的服务时间并不服从指数分布,船舶到达分布也不是泊松分布. 事实上,采用常用的标准统计分布来描述船舶达到和服务时间并不具有普遍性^[25]. 但由于泊松分布和负指数分布在排队论中具有很好的性质,因而还是得到了广泛地应用,如 Martinelli 等^[26]关于船闸相互影响的研究以及 Ting 等^[27-29]关于船闸调度管理(即排队规则)策略的研究中均假定船舶到达为泊松流. 另一方面,到达间隔和服务时间均服从一般分布(只需已知均值和方差)的排队系统 G/G/n,因其一般性而具有更高的实用价值,其结果也更符合实际情况^[25,30]. 不过,G/G/n 模型的求解非常复杂,而且难以得到显式解,在实际应用中不甚方便.

在船舶待闸时间的早期研究中,尽管考虑了船闸服务系统的一些基本特征,但并没有考虑双线船闸以及相邻船闸之间的相互影响. 为了更准确和全面地研究船舶的待闸时间,反映梯级或相互影响(interdependent)

船闸之间的关系、船闸的调度方式等对船舶到达分布、服务时间分布的影响,还需要建立更复杂的排队模型。但这些模型数量指标的分布或均值、方差的求解过程非常复杂,或难以得到明显的表达式,因此通常采用近似简单的模型去逼近或是数字仿真直接求其数值解^[31]。由此,出现了研究船舶待闸时间的数字仿真模型,它较以往的解析模型,更能准确地描述航道网交通流的复杂性。最早开展此类工作的是 Howe 等^[32],通过 OD 调查确定排队长度,再根据系统的仿真模块来分析船舶的待闸时间,但该模型采用泊松流到达,也没有考虑船闸因故障或检修等出现的停航。类似的模型还有 Bronzini 等^[33],最具代表性的是 Dai 等^[34]为 USACE 开发的仿真模型。该模型以 LPMS 数据为基础,考虑了船舶到达、船舶航速、服务时间、船舶尺度、船闸的停航等因素,允许船队之间相互超越,采用 G/G/n 排队模型及先到先服务 (first come, first service, FCFS) 的排队规则,研究单线或双线船闸的待闸时间。在该模型的基础上, Martinelli 等^[26]引入表征船闸相互影响的参数 T/I ($1/m \leq T/I \leq 1$, 其中, T 表示系统的总待闸时间, I 表示单个船闸待闸时间的总和, m 为系统的船闸数) 重点研究了相互影响船闸的待闸时间。Ting 等^[27-28]据此研究船闸的调度管理策略时指出,虽然 FCFS 看上去对所有船舶是公平的,但并不利于减少船舶行程总的时间延误,认为较好的调度原则是提高系统的操作效率并减少其费用,并提出了系统的最短过闸时间原则 (SPF) 和最省过闸时间原则 (SAVE), 结果表明 SPF 可使繁忙 (或高负荷, 即 Volume/Capacity 值较大) 船闸的船舶待闸时间相对 FCFS 最多可减少近 80%, 从而显著地提高系统的通过能力和服务质量, SAVE 则适宜于双线船闸的联合调度。此后, Ting 等^[29,35]还提出了许多改进的排队规则,并强调可通过公布船闸的运行信息来预警和控制航道上的船舶航速以减少其待闸时间,从而减少能耗、节约运输成本。

采用排队论研究船舶待闸时间的最终目的是为船闸和航道网规划及建设提供基础数据^[36]。当进行航道网内船闸系统的改扩建工程时,船闸工程的选择、优化、投资评估等往往是一个复杂的大型求解问题,计算量非常大,仿真模型因其计算速度相对较慢而逐渐被数值近似模型所代替。根据所采用的数值近似方法,主要有 Wei 等^[37]的人工神经网络模型 (ANN)、Jong 等^[38]的遗传算法模型 (GA)、Wang 等^[39]根据仿真结果改进的 GA 模型,以及 Biles 等^[40]采用的 GIS 模型等等。

总体上,随着船舶待闸时间研究的积累和深入,研究的对象从点 (单级单线船闸和多线船闸) 到线 (梯级或相互影响船闸和航道) 再到面 (航道网),研究的方法从简单的排队模型逐渐发展到数字仿真模型、再到复杂的数值模拟,研究的手段随着其他学科的发展从排队论到 ANN、GA 和 GIS 等,研究的目的也从模拟船舶待闸时间发展到航道网和船闸系统改扩建工程的规划和投资评估等。可以说,经过近四十年的努力,质量学派基本上建立了一套比较完整的数学模型,为解决工程问题提供了大量的技术支持。

4 发展趋势

近几年来,有学者开始注意到船闸通过能力研究的质量学派和数量学派这两种比较独立的研究方法均不能全面地反映船闸的运行情况,而需要进行综合考虑。或者说,船闸通过能力不仅是船闸通过船舶数量的表达,而且还是船舶通过船闸质量的描述,既要充分考虑船闸工程的效益,也要兼顾船舶的效益。只有这样,才能全面地反映船闸的实际运行情况,船闸工程的综合效益才可能最优,如港口规划中提出的使得港方和船方总费用最小的码头最优泊位数和泊位利用率^[41]。

2001 年 4 月,在美国运输研究委员会 (Transportation Research Board) 主办的水道及港口通过能力研讨会上, Edwards^[42]指出现有通过能力仅从总量上定义了船闸的交通量,需要进一步反映航道安全、拥堵、环境及顾客满意度等内容。廖鹏^[43]借助京杭运河施桥船闸、三峡船闸等船闸运行数据,通过对内河船舶交通 (流) 特性的分析,引入船闸服务水平概念来描述和量化船闸通过能力的量质结合,建立了基于服务质量的船闸通过能力研究新方法,将船闸通过能力的计算由“以量为主”改进为“量质结合”。

上述工作开展的船闸服务水平理论研究,能够较好地反映船闸通过能力的量质结合,是船闸通过能力研究中的重要内容。但限于认识和资料,仍有许多基础问题未能深入探讨,例如内河船舶交通流理论、船闸服务

水平的等级划分及量化指标、船闸通过能力的计算模型等.应该说,综合考虑数量和质量的船闸通过能力研究仍处于起步阶段.同时,基于交通工程学方法,研究内河船舶交通流问题是深入研究船闸通过能力的重点所在.此外,借助更多的数学方法,如排队模型、交通仿真模型等开展船闸通过能力研究,将有助于提高船闸的调度管理水平和服务质量.

就内河航道网来说,船闸仅是其中的一个控制节点,单个船闸的通过能力研究仅是基础性的内容,下一步的研究工作除了继续深入研究单级船闸外,还需要考虑梯级船闸和相互影响船闸的通过能力,以及航道通过能力的研究,从而发展到航道网的交通问题研究.研究的方法可借助其他学科(如数学、道路交通工程学),从概率论和数量统计、排队模型到交通仿真、再到复杂的交通数值模拟模型,并将其应用于内河航道(网)交通数学模型,形成适合我国国情的船闸通过能力研究方法和指标体系,为内河航道网的基础设施规划和投资评估等提供科学可信的研究成果.

最后,强调指出的是,内河航道和船闸的交通问题研究具有很强的实践性,需要大量系统完整的观测数据和资料.内河航道船舶流和船闸运行数据资料的收集和整理是一项非常重要的基础性工作,而这恰恰是目前国内比较薄弱的环节,需引起相关部门的重视.

参 考 文 献:

- [1] ANTLE L G. Economic impacts of lock delays; estimation of logistics cost impacts[J]. Transportation Research Record, 1986: 1-4.
- [2] 高 雄. 三峡船闸试通航回眸[J]. 水运工程, 2005(1): 45-49. (GAO Xiong. Looking back of trial navigation of Three Gorges Ship Lock[J]. Port & Waterway Engineering, 2005(1): 45-49. (in Chinese))
- [3] 朱 俊, 张 玮, 余 劲. 提高三峡船闸综合通过能力对策研究[J]. 水运工程, 2008(3): 93-98. (ZHU Jun, ZHANG Wei, YU Jin. On improvement of comprehensive navigation capacity of Three Gorges Lock[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(3): 93-98. (in Chinese))
- [4] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (WANG Zuo-gao. Ship lock design [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1992. (in Chinese))
- [5] 王 伟, 过秀成. 交通工程学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000. (WANG Wei, GUO Xiu-cheng. Traffic engineering [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2000. (in Chinese))
- [6] 涂启明. 船闸总体设计与图例[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992: 33-42. (TU Qi-ming. Master design of ship lock and legend [M]. Beijing: China Communications Press, 1992: 33-42. (in Chinese))
- [7] 艾利克. E. 鲍特姆斯. 渠化水道的实际通过能力[J]. 水运工程专题情报, 1974(3): 1-9. (ALIC E BOTTOMS. Practical channel capacity[J]. Special Information of Port and Waterway Engineering, 1974(3): 1-9. (in Chinese))
- [8] KOOMAN C, DE BRUIJN P A. Lock capacity and traffic resistance of locks[J]. Rijkswaterstaat Communications, 1975.
- [9] 周华兴. 船闸通过能力计算中有关问题的探讨[J]. 水运工程, 2002(3): 35-38. (ZHOU Hua-xing. On some questions concerning calculation of navigation lock capacity[J]. Port & Waterway Engineering, 2002(3): 35-38. (in Chinese))
- [10] JTJ 305-2001, 船闸总体设计规范[S]. (JTJ 305-2001, Code for Master Design of Ship Locks [S]. (in Chinese))
- [11] 水利部长江水利委员会. 长江三峡水利枢纽初步设计报告(枢纽工程)[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 1992. (Changjiang Water Resources Commission. Preliminary design report of Three Gorges Project [R]. Wuhan: Changjiang Water Resources Commission, 1992. (in Chinese))
- [12] 张 玮, 廖 鹏, 梁应辰, 等. 船闸通过能力计算中的若干问题研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(5): 681-684. (ZHANG Wei, LIAO Peng, LIANG Ying-chen, et al. Discussion on the calculation of lock capacity [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering, 2005, 29(5): 681-684. (in Chinese))
- [13] 闵朝斌. 水资源综合利用与航运现代化[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. (MIN Chao-bin. Integrated utilization of water resources and waterborne modernization[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2005. (in Chinese))

- [14] 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, 4(3): 108-110. (ZHANG Wei, LIAO Peng, WU Ling-li, et al. Main parameters of waterway lock capacity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(3): 108-110. (in Chinese))
- [15] 陶桂兰, 张 玮, 丁 坚, 等. 船闸1次过闸平均吨位的确定[J]. 水运工程, 2003(4): 50-52. (TAO Gui-lan, ZHANG Wei, DING Jian, et al. Determination of average tonnage for one lockage[J]. Port & Waterway Engineering, 2003(4): 50-52. (in Chinese))
- [16] 王振喜. 关于船闸通过能力计算中若干问题探讨[J]. 水运工程, 1998(6): 19-22. (WANG Zhen-xi. Discussion on calculation of navigation lock capacity[J]. Port & Waterway Engineering, 1998(6): 19-22. (in Chinese))
- [17] 丰 玮, 吴凤平, 张玉韬. 闸室船舶组合优化动态模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(6): 697-700. (FENG Wei, WU Feng-ping, ZHANG Yu-tao. Dynamic optimization model for ship combination in lock chambers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2006, 34(6): 697-700. (in Chinese))
- [18] 王小平, 齐 欢, 肖恒辉, 等. 基于串联排队网络的三峡——葛洲坝水利枢纽联合调度模型[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 82-86. (WANG Xiao-ping, QI Huan, XIAO Heng-hui, et al. Co-scheduling model of Three Gorges-Gezhou Dam based on series queuing network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3): 82-86. (in Chinese))
- [19] 夏国星. 提高京杭运河徐扬段通过能力途径的探讨[J]. 水运工程, 1995(10): 11-15. (XIA Guo-xing. Discussion on way of increasing the throughput capacity of X-Y section of the great canal[J]. Port & Waterway Engineering, 1995(10): 11-15. (in Chinese))
- [20] FLEMING M, WOOD D, GOODMIN R. Lock performance monitoring system user's manual for data analysis[R]. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Rescource, Fort Belvoir, Virginia, 1985.
- [21] 孙荣恒, 李建平. 排队论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (SUN Rong-heng, LI Jian-ping. Foundation of queuing theory [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [22] DESALVO J S, LAVE L B. An analysis of towboat delay[J]. Journal of Transportation Economy Policy, 1968, 2: 232-241.
- [23] WILSON H G. On the application of queuing theory to lock capacity analysis[J]. Transportation Research, 1978, 12(3): 176-180.
- [24] CARROLL J L, BRONZINI M S. Waterway transportation simulation models: Development and application[J]. Waterway Resources Research, 1973, 9(1): 51-63.
- [25] 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.
- [26] MARTINELLI D, SCHONFELD P. Approximating delays at interdependent locks[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1995, 121(6): 300-307.
- [27] 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.
- [28] TING C J, SCHONFELD P. Integrated control for series of waterway locks[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1998, 124(4): 199-206.
- [29] TING C J, SCHONFELD P. Effects of tow sequencing on capacity and delay at a waterway lock[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 1996, 122(1): 16-26.
- [30] BERTSIMAS D. An exact FCFS waiting time analysis for a general class of G/G/s queuing system[J]. Queuing Systems Theory and Application, 1998, 3: 306-320.
- [31] 唐应辉, 唐小我. 排队论: 基础与分析技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006. (TANG Ying-hui, TANG Xiao-wo. Queuing theory: Foundation and analysis technique[M]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese))
- [32] HOWE C W, RAMSEY S G, CARROLL J L, et al. Inland waterway transportation studies in public and private management and investment decisions[M]. Baltimore: John Hopkins Press, 1969.
- [33] BRONZINI M S, MARGIOTTA R A. Analysis of lock capacity by simulation[J]. Transportation Research Record, 1982: 7-13.
- [34] DAI M D M, SCHONFELD P. Simulation of waterway transportation reliability[J]. Transportation Research Record, 1991,

- 1313: 98–105.
- [35] TING C J, SCHONFELD P. Efficiency versus fairness in priority control: Waterway lock case[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2001, 127(2): 82–88.
- [36] GOICOECHEA A, CARR J, SHARP F M, et al. Methodology for risk-benefit analysis of lock-and-dam rehabilitation in the US Corps of Engineers[C]// *Proceedings of an Engineering Foundation Conference*, USA: Santa Barbara, ASCE, 1986: 258–283.
- [37] WEI C H, SCHONFELD P. An artificial neural network approach for evaluating transportation network improvement[J]. *Journal of Advanced Transportation*, 1993, 27(2): 129–152.
- [38] JONG J C, SCHONFELD P. Genetic algorithm for selecting and scheduling interdependent projects[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2001, 127(1): 46–52.
- [39] WAND S L, SCHONFELD P. Scheduling interdependent waterway projects through simulation and genetic optimization[J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2005, 131(3): 89–97.
- [40] BILES W E, SASSO D, BILLBREY J K. Integration of simulation and geographic information systems: Modeling traffic flow in inland waterway[C]// *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference*, USA, Washington DC, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004: 1392–1397.
- [41] 洪承礼. 港口规划与布置[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999. (HONG Cheng-li. Port planning and layout[M]. Beijing: China Communications Press, 1999. (in Chinese))
- [42] EDWARDS R. Inland waterway capacity[C]// *Marine Board Seminar on Waterway and Harbor Capacity*, USA: Washington DC. Transportation Research Board, 2001.
- [43] 廖 鹏. 船闸通过能力研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (LIAO Peng. Research on lock capacity at inland waterway locks[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))

Review on research of lock capacity at inland waterway locks

LIAO Peng

(*School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

Abstract: As a point in the inland waterway service system, the lock's capacity is not only the quantity of freight volumes, but also the measurement of the lock's service quality. However, the domestic research only focuses on the quantity, and the service quality is ignored. The paper reviews the development in the studies on lock capacity at inland waterway locks from the point of view of transportation engineering. According to the problem with which the research is concerned, the research contents are divided into the quantity of lock capacity and the quality of lock capacity. And their methods are presented briefly, respectively. Some suggestions are given for the recent integrated study of the quantity and quality of lock capacity.

Key words: inland navigation; ship lock; lock capacity; service quality; review