



# 船闸开通闸运行与门缝输水研究进展 \*

刘红剑<sup>1</sup>, 王 新<sup>2</sup>, 马海涛<sup>2</sup>, 吴英杰<sup>2</sup>

(1. 徐州市水利工程有限公司, 江苏徐州 221000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029)

**摘要:** 船闸三角闸门可双向挡水和动水启闭, 具有开通闸运行和门缝输水的突出优势, 能够显著提高船闸的运行效率。针对内河水运高质量发展要求和多座新建船闸开通闸运行技术需求, 系统总结了三角闸门船闸开通闸和门缝输水实际应用及相关研究进展, 阐述了影响其应用的主要影响因素。在分析目前存在主要问题的基础上, 提出应将运行经验与相关技术指标观测研究相结合, 构建开通闸和门缝输水运行的基础理论与规范标准, 为其广泛应用提供科学依据。

**关键词:** 船闸; 三角闸门; 开通闸; 门缝输水

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0126-05

## Research progress of opened ship lock operation and filling and emptying by gate gap

LIU Hongjian<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>, MA Haitao<sup>2</sup>, WU Yingjie<sup>2</sup>

(1. Xuzhou Water Conservancy Engineering Construction Co., Ltd., Xuzhou 221000, China;

2. NanjingHydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The sector gate of the ship lock can hold water in both directions and operate under some water head, and has the outstanding advantages of opened lock operation and filling and emptying by gate gap, which can significantly improve the operation efficiency of the ship lock. In view of the high quality development requirements of inland water transport and the technical requirements of opened lock operation of many new ship locks, this paper systematically summarizes the practical application and the related research progress of opened lock operation and filling and emptying by gate gap of sector gate, and expounds the main influencing factors affecting its application. Based on the analysis of the main problems existing at present, it is proposed that the operation experience should be combined with the test and research of relevant technical indicators to create the basic theory and standard of opened lock operation and filling and emptying by gate gap so as to provide scientific basis for its wide application.

**Keywords:** ship lock; sector gate; opened lock operation; filling and emptying by gate gap

三角闸门是船闸工作闸门的一种主要形式, 具有双向挡水和动水启闭的突出优势, 在长江、淮河沿岸口门船闸中得到广泛应用, 据不完全统计, 国内船闸工作闸门采用三角闸门的占比达到了 15.7%, 三角闸门已成为仅次于人字闸门的主

要门型。对于长江下游感潮河段沿岸的口门船闸, 受长江季节性水位变化和非正规半日潮变动(二涨二落)的影响, 工作闸门通常采用可双向挡水的三角闸门, 不仅可以承担双向水头, 还可以采用门缝输水及利用平潮期开放通闸提高船闸的运行效

收稿日期: 2023-07-22

\*基金项目: 南京水利科学研究院院基金重大项目(Y123004)

作者简介: 刘红剑 (1983—), 男, 工程师, 从事水利水运工程建设管理。

率。感潮河段三角闸门船闸具备不同时长的开通闸运行条件, 可极大提高船闸的通过能力。

实际运行情况表明, 船闸开通闸的运行效益是套闸的8~12倍<sup>[1]</sup>, 江苏某三线船闸开通闸运行一天的过闸货运量曾超过100万t, 经济社会效益十分显著。然而, 船闸开通闸有其运行条件、合适的时机, 应用不当也会存在一定的风险, 同时, 开通闸运行中一定会涉及到闸门的动水启闭, 与闸门动水启闭门缝输水性能有密切关联。当前, 内河水运高等级航道畅通延伸发展迅速, 在建或拟建的多座大型三角闸门船闸均对开通闸运行技术提出了迫切需求, 因此, 本文就船闸开通闸运行和门缝输水相关研究进展和存在问题展开探讨。

## 1 船闸开通闸应用情况与研究进展

### 1.1 开通闸应用情况

三角闸门在国内外船闸中应用非常广泛, 但未发现国外船闸开通闸的相关报道, 而国内应用实践较多。江苏境内长江沿岸十余座口门船闸基本都采用过开通闸运行, 如黄田港、新夏港、张家港、九圩港、谏壁、南通、杨家湾、焦港、施桥、虞山船闸等; 安徽合裕线航道裕溪复线船闸、巢湖船闸也都有开通闸运行的实践经验; 还有一些其他内河船闸, 如盐灌、杨林、樊川、杭州新坝船闸等也都采用过开通闸运行, 使得船闸的通过能力显著提升, 船舶的待闸时间和船闸的通航压力均大幅降低, 发挥了显著的经济社会效益。

国内关于船闸开通闸运行的相关研究实践较早, 江苏省江阴船闸(原黄田港船闸)早在20世纪50年代开始就利用每日二涨二落潮汐的4次平潮时段进行了船闸通闸运行方式实践, 其1972年的货运量统计资料显示, 利用三角闸门在平潮期开通闸完成了全年约56%~66%的货运量, 而通闸运行时间仅占总通航时间的17%<sup>[2]</sup>。20世纪70年代初, 南通船闸曾经进行开通闸的尝试, 取得明显的效果, 后考虑到船闸紧靠长江口, 潮位变化较为迅速, 横拉门承受动水作用的能力较低, 设备

老化, 从安全角度出发, 于1974年中止通闸运行, 为了使船闸能够适应开通闸的要求, 1981年进行技术改造, 确定通闸时的安全流速为2 m/s, 相应的安全水位差为±20 cm, 并以闸门能够承受±30 cm水位差和一定的浪、风压力作为抗倾覆设计依据<sup>[3]</sup>。在长期的不断探索中积累了大量的开通闸运行经验, 目前仍有多座船闸根据经验应用开通闸运行。

### 1.2 开通闸研究进展

已有实践经验和研究表明, 船闸开通闸运行安全影响因素较多, 包括水位差、潮汐变化特性、闸室内流速、引航道流态、闸门启闭力等等, 采用开通闸运行存在一定风险。南通船闸由于临近长江口, 潮位变化较为迅速, 汛期尤为突出, 有时3~5 min内潮位就有可能下降30~40 cm, 给闸门的正常关闭带来很大的困难, 开通闸时必须根据潮位涨落情况, 严格控制闸门关闭的时间范围。开通闸运行时船舶在动水状态下航行, 顺水时若流速过大, 尾舵将失去作用, 船舶漂流而行, 状态无法控制; 逆水时若流速较大, 则船舶吃水加深, 阻力加大, 航行十分困难, 稍有疏忽, 就有可能酿成重大事故, 故流速控制十分重要。开通闸运行时, 闸门动水条件启闭, 因水流力较大, 启闭力会显著提高<sup>[4]</sup>, 需要明确闸门的启闭力是否满足安全运行要求, 不能给设备设施造成危害甚至发生重大事故。

尽管船闸开通闸应用较多, 但基本都是根据船闸运行条件和实践经验判断开通闸时机, 没有形成相关的规范标准。谏壁、九圩、口岸等船闸开通闸条件为上下游闸首水位差基本控制在0.3 m左右; 夏港船闸设计考虑水头差在0.3 m内开通闸运行, 实际开通闸运行中水头差可达到0.6 m; 裕溪复线船闸曾组织通闸试验, 总结认为在上下游水位差0.3 m、风速3级内可通闸运行; 江苏沿江口门船闸曾尝试制定相关开通闸标准, 针对沿江口门船闸特点及运行中存在的问题进行分析, 详细论述开通闸开启条件, 着力从闸门设计动水

启闭能力、上下游闸首水位差以及船舶过闸控制能力等方面进行研究、分析和求证，最后设定开通闸开启条件为“上下游闸首水位差宜在 0.3 m 以内”，关闭条件为“闸室内的流速宜在 1.6 m/s 以内”。

《运河通航标准》<sup>[5]</sup>规定“运河中船闸开通闸条件应经过充分论证确定”；《航道工程基本术语标准》<sup>[6]</sup>对开通闸进行了定义，“开通闸：当船闸上下游水位差很小时，上、下闸首闸门均打开，让船舶自由通过的运行方式”；《船闸总体设计规范》<sup>[7]</sup>规定“对受潮汐影响的船闸及承受双向水头的船闸，当具备开通闸条件时，可设开通闸，开通闸的运行时间可根据实际情况确定，开通闸通过能力的计算应考虑开通闸运行通过能力的提高”，主要关注了开通闸带来的通过能力提高计算问题；《船闸闸阀门设计规范》<sup>[8]</sup>规定“闸门外边缘与闸首边墙之间的间距确定，主要考虑三角门有开通闸的要求，船舶在水流作用下不易控制，特别是小吨位的挂机船，很容易碰撞闸门。所以要求闸门完全位于门库内，并留有一定安全距离”、“三角闸门用于有潮汛的河流中，一般有开通闸的要求，在开通闸的条件下，船舶是在较大的水流速度下航行，往往会碰到闸门迎水面的杆件，所以应在闸室迎水面侧布置防撞设施”，主要考虑了开通闸时船舶对闸门带来的碰撞风险。长期以来，沿江各口门船闸不断探索实践，积累了丰富的开通闸运行管理经验，在无法规依据和规范支撑的情况下，总结自身实践经验，制定了适合各船闸开通闸运行的程序和规章制度，但具体做法差异较大，缺乏系统性和规范性，开通闸运行风险较大。

在船闸开通闸运行研究方面，国外未见相关报道，而国内开展了不少工作。南京水科院曾在 20 世纪 80 年代结合江苏省江阴二线船闸开展了开通闸运行水力条件试验研究<sup>[9-10]</sup>，90 年代开展了谏壁复线船闸开通闸运行水流条件研究<sup>[11]</sup>，为新船闸开通闸运行的布置设计及安全运行控制提供

依据；吴腾等<sup>[12]</sup>结合焦港船闸设计，开展了船闸开通闸水力条件模型试验，关注启闭机的受力条件；王振喜等<sup>[13]</sup>探讨了船闸开通闸运行时通过能力计算方法；常致等<sup>[14]</sup>结合江苏交通口门船闸通闸运行方式，提出有必要建立相关的规程或标准。姜兴良等<sup>[15]</sup>以丹金船闸为研究对象，对具备开通闸运行条件船闸的门机电系统、输水系统、平面布置方案进行系统分析论证和经济比选。朱瑞虎等<sup>[16]</sup>、丁坚等<sup>[17]</sup>采用物理模型试验对南通焦港船闸开通闸的安全运行条件进行研究，得出其通闸安全运行条件为上下游潮位差处于 -0.37~0.39 m。

## 2 三角闸门门缝输水应用情况与研究进展

### 2.1 门缝输水应用情况

在船闸三角闸门门缝输水方面，国外尤其美国的三角闸门船闸应用很多，代表性的有芝加哥的 O'brien 船闸、洛杉矶的 Bowman 船闸等<sup>[18]</sup>，口门宽度均达 33.53 m，在低水头船闸中，直接采用门缝输水取代闸首输水廊道和阀门，但需要妥善解决闸门的流激振动问题<sup>[19]</sup>。国内早期采用三角闸门的十圩港、张家港、黄田港、谏壁、淀浦河等船闸均采用过门缝输水技术，有的在水头差 20 cm 时开启闸门，有的在水头差 1 m 时慢速开启闸门，而张家港船闸直接全水头使用门缝输水。近年建成的吕四、虞山复线、大柳巷、云善、前黄枢纽船闸等也采用门缝输水，积累了大量的工程实践经验。在船闸门缝输水相关的规范标准方面，仅在 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》<sup>[20]</sup>中有所规定，“直接利用闸门输水包括三角闸门门缝”，并提出门缝输水的要求：“三角闸门输水适用于闸室最大的断面平均流速小于 0.25 m/s 和设计水头小于 4 m 的条件，水头在 1.4 m 以下可以直接用三角闸门门缝输水，水头在 1.4~4 m 之间，必须严格控制三角门的开启方式，采用分段间歇开启，当高于上述水力指标时，应采用组合式输水”。

### 2.2 门缝输水研究进展

三角闸门局部开启门缝输水运行方式与输水

效率、闸室内流态及船舶的停泊条件、闸门启闭力和流激振动等因素有关, 门缝宽度同时影响输水时间和闸室内水流条件, 需要合理确定闸门开度; 在门缝输水时, 中缝和两侧边缝同时过流, 易引起三角闸门结构振动, 同时水流作用力也会反映到闸门的启闭力上, 考虑到动水启闭运行易引起闸门流激振动问题, 目前实际工程中门缝输水应用较少。

美国陆军工兵团水道试验站针对三角闸门门缝输水问题曾开展了大量的模型试验研究, 美国的 Bayou Boeuf、Freshwater、Calcasieu 等船闸<sup>[21]</sup>均进行过门缝输水试验研究, 门缝输水的工作水头  $1 \sim 18 \text{ ft}$  ( $1 \text{ ft} = 0.305 \text{ m}$ ), 门缝开度  $1 \sim 10 \text{ ft}$ ; Oswalt<sup>[22]</sup>曾针对船闸三角闸门反向水头门缝输水时闸门水流作用力开展试验研究, 提出了减小闸门水流作用力的措施。国内早在 20 世纪 80 年代, 徐泽中<sup>[23]</sup>已探讨过三角闸门门缝输水方式, 在输水方式水力计算、船舶停泊条件及启闭机设计方面开展了研究; 杨斌等<sup>[24]</sup>从理论上研究了船闸短廊道与门缝组合输水水力计算方法; 刘本芹等<sup>[25]</sup>提出短廊道和三角门门缝联合输水的水力计算方法, 并建立了短廊道和门缝联合输水的输水过程数学模型; 邢述炳等<sup>[26]</sup>采用理论分析和现场实测相结合, 分析三角闸门门缝输水时的水力及启闭力; 汪昕等<sup>[27]</sup>通过船闸三角闸门模型试验, 从闸室船舶停泊条件角度对三角闸门门缝输水运行条件进行探讨。但到目前为止, 尚无相关规范标准对门缝输水运行方式进行明确规定。

### 3 问题讨论

交通强国战略实施对内河水运高质量发展提出了明确要求, 随着经济发展, 船闸作为内河航道畅通成网的控制节点与纽带, 通航压力与日俱增, 尤其是苏皖地区与长江干线连接的多座采用三角闸门的口门船闸, 长期超负荷运行仍会造成大量船舶积压, 提高船闸的通过能力十分必要和迫切。三角闸门船闸开通闸运行和门缝输水均可

以有效提高船闸通过能力, 但目前两项技术应用并不多, 与以下因素有关: 1) 缺乏明确的规范支撑, 到目前尚没有针对开通闸和门缝输水运行方式的规范; 2) 运行条件差异较大, 包括水文条件、船闸设备设施条件等, 运行方式与控制标准难以统一; 3) 相关研究不足, 针对不同条件、运行方式的科研工作还不深入, 设计标准不明确, 主要根据经验判断, 缺乏科学依据; 4) 存在一定安全风险, 主观上不愿采用, 开通闸风险主要体现在对条件变化的预判不足, 导致无法及时停止通闸运行, 门缝输水风险主要体现在闸门的动水启闭与流激振动问题。

为了充分发挥三角闸门开通闸运行和门缝输水的突出优势, 针对目前实际存在的相关问题, 建议从总结经验、深化研究、制定标准等方面开展工作, 以解决其实际应用难题。目前已形成的开通闸和门缝输水相关运行经验可为开展深化研究指明方向, 重点通过对实际工程原型观测, 系统性研究分析水位、流速、启闭力、振动等系列参数变化规律, 形成一系列经验公式及完善的理论体系, 不仅可为工程运行提供科学依据, 也将为船闸阀门及启闭机设计等相关行业标准修订提供支撑, 并将为形成针对性的船闸开通闸、门缝输水等相关规范奠定基础。

当前, 引江济淮、合裕线、大芦线、谏壁改扩建船闸等正在建设的新船闸均采用三角闸门, 多座三角闸门船闸的口门宽度达到了  $34 \text{ m}$ , 在船闸设计中陆续考虑到了开通闸运行、动水启闭等问题, 裕溪和巢湖复线船闸也提出希望能在运行经验的基础上, 提出开通闸的理论依据和科学标准。可见, 实际工程中对相关技术的需求是十分迫切的, 未来针对该问题的研究仍具有重要的理论意义和实用价值。

### 4 结语

1) 实践证明, 三角闸门船闸开通闸运行和门缝输水能够显著提高船闸的通过能力, 但目前并

未得到广泛应用。在内河水运高质量发展的背景下,面对一批大型三角闸门船闸设计建设对开通闸运行和门缝输水技术的迫切需求,开展相关问题深化研究具有重要意义。

2) 三角闸门船闸开通闸和门缝输水应用与水位变化、水流条件、闸门结构及启闭力、通航船舶等诸多因素有关,目前仍主要依据经验判断,尚无针对性的规范标准,相关研究明显不足,未来可将运行经验与相关技术指标测试研究相结合,形成开通闸和门缝输水运行的基础理论与规范标准,为其广泛应用提供科学依据。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 龚剑钧.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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 交通运输部天津水运工程科学研究所.运河通航标准:JTS 180-2—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [6] 长江航道局.航道工程基本术语标准:JTS 103-2—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.
- [7] 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.
- [8] 四川省交通厅内河勘察规划设计院.船闸闸阀门设计规范:JT T 308—2003[S].北京:人民交通出版社,2003.
- [9] 南京水利科学研究院.江苏省江阴船闸通闸水力条件模型试验报告[R].南京:南京水利科学研究院,1987.
- [10] 张桂秀.江阴船闸通闸水流条件试验[J].水运工程,1989(4):15-17.
- [11] 南京水利科学研究院.京杭运河谏壁复线船闸通闸运行水流条件研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,1998.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] RIGO P. Innovations in navigation lock design [R]. Liege: University of Liege, 2010.
- [19] DANIEL R, PAULUS T. Lock gates and other closures in hydraulic projects [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [20] 南京水利科学研究院,天津水运工程科学研究所.船闸输水系统设计规范:JTJ 306—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [21] DAVIS J P. Hydraulic design of navigation locks [R]. Mississippi: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1989.
- [22] OSWALT N R. Operating forces on sector gates under reverse heads[J]. Hydraulic model investigation, 1970.
- [23] 徐泽中.三角闸门门缝输水方式的商榷[J].华东水利学院学报,1982(3):83-93.
- [24] 杨斌,黄启亮.短廊道和三角闸门门缝组合输水的水力计算[J].重庆交通大学学报,1996(S1):91-98,121.
- [25] 刘本芹,宣国祥,李中华.船闸短廊道和三角门门缝联合输水的水力计算[J].水道港口,2008,29 (4):278-282.
- [26] 邢述炳,丁兆铭,董浩.三角闸门门缝输水运行工况研究[J].水运工程,2020(8):146-151.
- [27] 汪昕,王新,孙立武,等.大型三角闸门门缝输水运用条件试验研究[J].水运工程,2021(3):12-16,40.

(本文编辑 王传瑜)