



省水船闸输水系统水力学研究综述^{*}

陈 明^{1,2}, 吕森鹏¹, 刘 原¹, 黄海津¹

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 在省水船闸工程建设和运行管理过程中, 输水系统水力学问题是最为关注的内容之一。相较常规船闸, 省水船闸输水操作过程更为复杂。在大量研究资料的基础上, 系统论述省水船闸类型及水力特点、输水系统形式、阀门启闭方式以及输水水力特性等, 总结分析了各方面的研究成果与进展。今后可着重围绕以下几个方面开展深入研究: 省水船闸分散输水系统支孔出流分配规律, 双线船闸互通输水廊道形式、数量和截面类型, 阀门启闭组合方式, 省水船闸防咸效果等。

关键词: 省水船闸; 输水系统; 水力学; 省水池

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0106-07

Review of hydraulics investigations of filling and emptying system in ship locks with water-saving basins

CHEN Ming^{1,2}, LYU Sen-peng¹, LIU Yuan¹, HUANG Hai-jin¹

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Hydraulics investigations of filling and emptying systems should be one of the most concerned contents when constructing and administrating for ship lock projects with water-saving basins. Compared with conventional ship locks, the water filling/emptying operation process of water-saving ship locks is more complicated. On the basis of a large amount of research data, we systematically discussed the types and hydraulic characteristics of ship locks with water-saving basins, water delivery system forms, valve opening and closing methods, and water delivery hydrodynamic characteristics, etc., and summarized and analyzed the research results and progress in various aspects. In the future, we can focus on the following aspects to carry out in-depth research: flow rate distribution law of ship locks with water-saving basins through side ports in a long culvert filling/emptying system, types, number and cross-section type of the culvert connecting with double lane ship locks, combined valve operation schemes, and performance of reducing the intrusion of saltwater.

Keywords: ship lock with water-saving basins; filling and emptying system; hydraulics; water-saving basin

省水船闸通过在灌泄水过程中进行蓄水和放水, 达到节约航运用水、解决发电和航运间矛盾的目的。同时, 输水量的减少也有利于缓解灌泄水过程中船闸上、下游引航道可能出现的往复流问题。

此外, 省水船闸也可降低输水系统阀门的工作水头, 为简化输水系统提供了技术空间。在省水船闸建设过程中, 输水系统水力学问题是关键内容之一, 且相较常规船闸, 输水操作过程更为复杂^[1-2]。

收稿日期: 2020-12-16

***基金项目:** 国家重点研发计划项目(2016YFC0402001); 重庆市自然科学基金项目(cstc2019jcyj-msxmX0759); 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室开放基金项目(Yt918002); 重庆市研究生科研创新项目(CYB19171)

作者简介: 陈明(1983—), 男, 博士后, 副教授, 从事通航水力学方面的教学和研究。

因此, 本文基于国内外大量研究资料, 对省水船闸类型及水力特点、输水系统形式、阀门启闭方式以及输水水动力特性等方面进行了概述, 并结合省水船闸研究动态提出了须进一步研究的课题。

1 省水船闸类型及水力特点

省水船闸大致可分为 4 类, 即带省水池的省水船闸、不待航多级船闸、双线互灌互泄船闸以

及带中间渠道的船闸, 它们都具有省水功能^[3]。现阶段带省水池的省水船闸应用较多, 后文未做特殊说明时“省水船闸”指带省水池的省水船闸。

1.1 带省水池的省水船闸

带省水池的省水船闸一般在船闸边上设置调节水池, 在船闸泄水时进行蓄水, 在船闸灌水时进行补水, 以达到节省航运用水和改善阀门工作条件的目的。

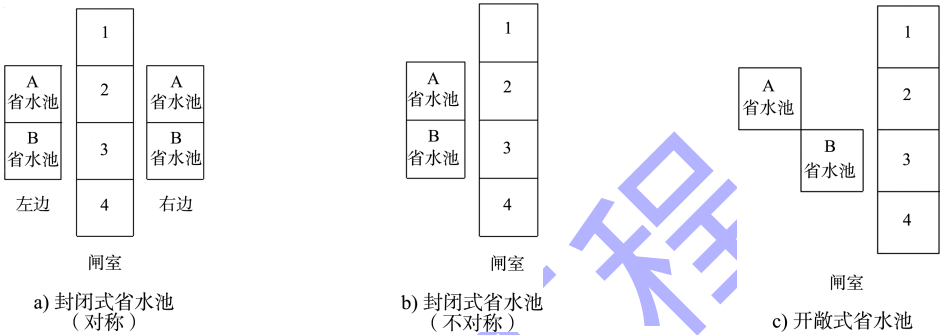


图 1 省水池布置形式

省水池尺度和级数决定了带省水池船闸的理论省水率, 理论省水率随着省水池级数的增加而升高。然而, 在省水池数量超过 3 级后, 省水效益提升空间有限^[4-5]。省水池的布置方式一般可分为封闭式和开敞式两种(图 1), 前者是在船闸一侧或者两侧进行水平分层布置省水池, 后者是将省水池错落布置在船闸一侧^[6-7]。巴拿马运河上新建设的省水船闸采用的即为开敞式布置形式, 在一侧交错布置了 3 级省水池^[8-9]。开敞式结构简单, 省水池之间可以部分重合, 水级划分较为灵活, 同时也有着占地面积相对较大的局限性。封闭式布置紧凑, 占地面积较小, 但结构相对复杂, 且需要充分考虑省水池底板厚度对布置高程和省水率的影响。德国 Uelzen 船闸对以上两种布置形式均有应用, 其中 1 号船闸采用开敞式省水池布置形式, 后扩建的 2 号船闸采用左右各 3 级对称分布的封闭式布置形式^[10-11]。同在德国易北河

Schernebeck 升船机旁边, 当地计划主管部门进行过大型省水船闸的规划, 从经济效益角度进行 8~12 个省水池布置方案的选型, 基于地质断层条件的考虑, 最终选定了相对稳定的非对称省水池

布置形式^[12]。

1.2 不待航多级船闸

不待航多级船闸也称为不停航多级船闸或多级低水头船闸, 是将船闸的集中水头划分, 形成水头较低的连续多级船闸。在船舶过闸、船闸输水以及闸、阀门启闭相互协调配合下, 可以使船舶在平水或者接近平水的水面条件下不待航过闸行进, 闸室即航道。不待航多级船闸的闸室就相当于航道, 与一般船闸一样具有闸首和闸门, 不同之处主要是不待航多级船闸为了满足不停顿连续过闸, 设置的各级水头较低, 级数相对较多^[13]。船舶过闸时, 闸室内一部分的水体保持相对不变, 船舶单次过闸耗水量仅为每次过闸时需要交换的水体体积。

不待航多级船闸的布置方式与一般船闸大体一致, 需要根据枢纽的水源条件、水位变幅以及运量大小选择相应的船闸布置方式, 如运量较小时可选择单线运行, 通过拓宽闸室还可实现同时双向航行。由于不待航多级船闸的连续低水头分级特点, 输水条件得到简化, 改善了阀门工作条件, 在提高过闸效率的同时还能达到节约航运用

水的目的。此外,该分级特点会使船闸的闸身比一般船闸长,实际工程应用中需要综合考虑其工程量大小以及管理难度。

1.3 双线互灌互泄省水船闸

在一些双线船闸工程中,由于船闸运行过程中耗水量及闸室输水流量较大的原因,常采用双线船闸互通输水方案,即在两个并列的闸室之间通过输水廊道连接,设置阀门进行灌泄水共用互补。这样既能降低船闸运行耗水量,也能达到改善闸、阀门工作条件的效果。

双线互灌互泄省水船闸的输水过程主要原理是在其中一线船闸泄水时,将一部分水体通过连通两个闸室的输水廊道输入到另一线船闸,即一线船闸的部分泄水满足另一线船闸的灌水所需,在两线闸室尺度一致时,理论省水率可达 50%。在省水运行时两线的船闸灌泄水过程相反,输水过程中的水资源交换可以比一般双线运行时节省更多的航运用水;同时相较于普通运行方式输水过程中的反向水头问题也能得到较大的改善,韦德鉴等^[14]在西江长洲三四线船闸运行方式的研究中对这一结论进行了验证。此外,省水运行时需要双线船闸统一协调配合才能达到较好的省水效益,运行程序较为复杂,输水时间相对较长,过闸效率较一般双线运行时要低,因此使用时应综合考虑其经济效益。

1.4 带中间渠道的船闸

带中间渠道的船闸是在上下两级船闸之间设置一段中间渠道用于船舶航行,将相近两级船闸分成上下两个相互独立的船闸^[15]。湖南永州双牌枢纽对该型船闸进行了应用,采用的是两级带中间渠道,其余为连续多级的船闸设计方案^[16]。

带中间渠道的船闸与不待航连续船闸具有相同的省水原理,两者都有降低船闸工作水头的优点,但区别在于前者的上下两级船闸是独立的,整个船闸的通过能力基本可由各级船闸代表,不受船闸之间的关联约束,能比连续船闸提高 25%~35%的船闸通过能力。同时,带中间渠道的船闸还可适用于较为复杂的地质地形条件,根据不同

情况可以调整中间渠道使其存在具有一定角度的弯道段,乃至纯弯道。

具有中间渠道的船闸输水系统在输水过程中会产生较为复杂的水力学问题,主要有渠道内因灌泄水过程产生的非恒定波流运动,在渠道有限的范围内波与反射波相互叠加,水流流态十分复杂,会对渠道内船舶的航行条件造成影响。

2 省水船闸输水系统形式

省水船闸与常规船闸相比需要增设省水设施,输水过程将分段进行,船闸总体输水时间会有不同程度的延迟。省水船闸设计中,为了综合满足省水、通过能力、闸室安全以及船舶过闸安全等条件要求,输水系统类型选择和设计至关重要。

2.1 集中输水系统布置

与常规船闸相同,在水头较低的情况下,省水船闸可采用集中输水系统布置,但同时也需要考虑镇静段对船闸尺度的要求。小清河水牛韩省水船闸的设计水头为 5.3 m,采用了带消能工的闸首短廊道集中输水系统,上下闸首与闸室之间的连接段均设有消力梁,并采用陡坎连接。省水池与上下闸首之间均设一根输水廊道并采用平交连接方式衔接,连接廊道与闸首主廊道尺寸一致,交汇处和省水池输水廊道出(进)水口都采用了修圆工艺以避免漩涡产生^[17]。

安徽省航道管理局对淠淮航道木场梯级的不待航省水船闸进行了水工模型试验,提出通过卧倒闸门输水的集中式输水系统方案,经过试验论证得出:采用初期门底泄流、后期门顶溢流的输水方式,可以较好地优化闸室水流条件并降低闸门启闭力。

2.2 分散输水系统布置

当水头较高时,省水船闸一般适合采用中部分流的闸底或闸墙长廊道分散输水系统。具体布置方式还须结合省水池的布置形式考虑,当省水池在闸室一侧布置时,输水系统适合采用中部分流的分区段出水形式;当省水池在闸室两侧分别布置时,输水系统适合采用对称输水的分区段等

惯性输水系统^[18]。水头为 36.5 m 的乌江银盘船闸省水方案中曾提出采用闸墙长廊道闸底两区段纵支廊道分散输水系统, 水流由闸墙长廊道中部水平分流进入闸室, 在闸室中部再次分流消能, 通过闸底长廊道的侧支孔双明沟消能后进入闸室, 省水池与闸室之间通过独立的输水廊道平接^[19]。绣江白马枢纽省水船闸水头为 23.7 m, 前期研究中提出采用闸底长廊道侧支孔输水系统, 消能方式采用明沟消能^[20]。在闸墙长廊道输水形式应用方面, 安徽郑家岗船闸水头差 28.35 m, 采用的是闸墙长廊道短管顶部格栅出流的输水方式, 消能工形式为盖板消能。刘本芹等^[21]以 40 m 水头、闸室尺度 280 m×34 m 的船闸为例, 采用闸墙长廊道闸底两区段纵支廊道侧支孔出水明沟消能输水系统, 用以满足闸室输水时的水力平衡条件。以上几个省水船闸的省水池输水系统, 均采用相对独立的输水廊道与闸室输水系统廊道中部平接的连接方式。而对于省水池廊道尺寸设计而言, 阀门处廊道断面面积的确定尤为重要, 目前基本上依靠经验确定, 原因在于阀门处廊道断面面积的计算公式中的一些参数取值与常规船闸简单的灌泄水过程差异较大。

目前国内的双线省水船闸中一般采用的是分散式输水系统, 在两线船闸之间设置连接廊道实现互灌互泄相互补水的省水功能。桂林春天湖船闸采用的是闸墙长廊道闸室横支廊道输水系统, 飞来峡二、三线省水船闸采用的是闸底长廊道侧支孔输水形式^[22]。长洲三、四线船闸进行了闸底长廊道输水系统和单侧闸墙长廊道闸底横支廊道输水系统的比选, 最终确定了闸底长廊道侧支孔双明沟消能输水系统方案^[23]。然而, 目前关于双线船闸互通输水的廊道形式、数量和截面类型报道相对较少。

德国吕讷堡省水船闸采用闸底纵廊道输水方式, 廊道交错布置; 爱尔兰根省水船闸采用简单的等惯性分散输水系统, 水流由横向廊道流入在口门处向两端分别接出的中间廊道, 再经支廊道流出分布在闸底板上的竖向支孔流出。巴拿马运

河新扩建的省水船闸同样采用的是闸墙长廊道分散式输水系统, 省水池通过多个次级输水廊道对水流进行分配, 次级廊道汇集于主廊道后与闸室连接以供省水池的水体交换^[24]。巴西的图库鲁伊船闸为带中间渠道的省水船闸, 其闸底设有 8 条纵支廊道, 分 4 区段等惯性输水。

3 省水船闸阀门启闭方式研究

为了满足船闸的省水功能, 势必增加阀门数量, 而所有阀门必须按照一定的程序启闭, 各步骤紧密相连, 环环相扣, 这与过闸时间以及船闸运行安全息息相关, 因此合理的阀门启闭程序是保障船闸运行安全的一个重要因素。

3.1 阀门形式选择

省水船闸输水阀门可分为闸室阀门和省水池阀门两部分, 即在常规船闸输水系统主廊道阀门设计之外, 省水船闸还需对省水池与闸室主廊道之间的连接廊道进行阀门设计。省水船闸闸室主廊道输水阀门与一般船闸一样按单向水头设计即可, 特殊情况如一些海船闸要承受潮汐引起的船闸双边水头差正负变化时, 需要按承受双向水头进行阀门设计。省水池阀门由于要同时满足泄水和灌水功能要求, 应按照双向水头设计, 除此之外还应满足动水快速启闭的要求。

省水船闸主廊道输水阀门选型与常规船闸一样, 常用的主要有平面阀门和反向弧形阀门; 省水池阀门可选用平面阀门和蝴蝶阀门等具有双向挡水功能的阀门形式, 目前平面阀门形式应用较多, 如乌江银盘省水船闸、绣江白马省水船闸、清水河水牛韩省水船闸等均采用平面阀门形式。

3.2 组合式启闭方式

输水系统的分级输水, 阀门将按照一定的程序进行启闭, 省水池的设立将导致阀门的增加而延长整个输水系统的灌泄水时间。合理的阀门启闭程序设计是缩短省水船闸总输水时长、增大通过能力的关键因素。

常规船闸可以通过特定的阀门启闭程序缩短输水时间和改善闸室水流条件, 而阀门相对较多

的省水船闸更需要合理的阀门启闭程序所带来的优化效果。杨忠超等^[25]运用数学模型,分析了银盘省水船闸阀门启闭速度与阀门开启提前量以及总灌、泄水时间的关系,得出了考虑一定的提前量条件下,可以明显缩短船闸输水时间的结论。麦建清等^[26]对绣江复航工程白马枢纽省水船闸布置方案进行数值模拟研究,经不同阀门启闭方式的输水水力指标计算和初步分析,得出较优阀门启闭的组合运行方式,满足了输水时间和省水率要求,可有效解决枯水期船闸正常运行水量不足的问题。陈莹颖等对小清河水牛韩省水船闸不同的阀门启闭程序进行计算,提出了以特定量局部开启、匀速开启和提前启闭相结合的阀门启闭方式。综上,通过对省水船闸阀门启闭程序组合的研究,可以在一定程度上提高船舶过闸效率,进一步提高船闸运行安全。

双线船闸的输水原理和带省水池的省水船闸原理类似,其阀门启闭程序对船闸总输水时间和闸室水流条件有很大的影响。随娟娟^[27]在对飞来峡二、三线船闸双线互灌互泄省水运行时的阀门组合启闭方式进行了研究,得出两线闸室之间的连通廊道阀门开启时间与船闸总输水时间和输水过程流量峰值成正比;连接阀门关闭时两边闸室水位差与船闸总输水时间成反比,而与输水过程流量峰值成正比。与飞来峡二、三线船闸一样,长洲枢纽三、四线船闸同样具有双线省水运行设计,是较为典型的双线互灌互泄省水船闸案例。陈亮等^[28]建立物理模型对长洲三、四线船闸省水运行闸首阀门开启提前量进行研究,研究在两闸室存在 0~5 m 不同水头差时提前开启二线船闸闸首阀门对省水量和通过能力的影响,结果表明水位差越大则双线运行的省水量越大,对通过能力的负面影响越小;随后,吴波等^[29]同样以长洲枢纽三、四线船闸为研究对象建立数学模型,分析了双线省水运行时连接阀门关闭后两闸室之间的剩余水头与省水率之间的关系。

对于带中间渠道船闸,采用阀门的曲线型变速开启方式可以平缓流量的峰值,改善闸室水面

条件^[30];各闸室阀门合理的组合运行调配,对梯级闸室灌泄水的开启时间进行错开处理,可以使中间渠道的涌浪问题得到改善,提高船舶过闸和船闸运行安全度^[31]。

4 省水船闸输水水力特性研究

4.1 物理模型试验研究

20 世纪 70 年代末,南京水利科学研究院对郑家岗船闸进行了水工模型试验研究,这是我国首次对省水船闸进行试验研究。虽然存在着经验不足的困难,但经过反复的模型试验修正,最终使得船闸各项主要水力指标均达到设计标准。

重庆交通大学针对乌江银盘省水船闸建立了 1:25 的整体物理模型进行研究,结果表明:省水方案的耗水量为普通单级方案的一半,实际工作水头下降了 50%,各项输水系统技术指标均满足船闸输水系统设计的相应规范要求^[32]。王健^[33]针对银盘省水船闸方案,通过整体水力学模型试验,采用大于常规单级船闸所要求的廊道尺寸,同时对比了 3 种输水廊道设计方案在不同阀门事故条件下对船闸通航的影响,得到了更好的输水效果。B. Deleu 等^[34]对塞纳北欧运河建立了 1:25 的物理模型进行试验研究,对同时进行的数值模型试验进行验证,得出了最优的省水池输水系统设计方案。法国里昂的罗纳河国家实验室针对巴拿马运河上新扩建的省水船闸进行了 1:30 的物理模型试验,模型尺寸为 60 m×10 m(长×宽),配备了约 100 个传感器对闸室的前后部水位、纵向和横向水位差、输水系统的管道流速和阀门压力、船舶的纵向和横向系缆力进行了系统的测量。

严振石等^[35]采用物理模型试验手段,提出了长洲三四线船闸采用互通省水布置的创新方案。试验表明:与单线船闸正常运行方式相比,两线船闸节水达到 60% 以上,同时改善了输水系统水流条件与阀门工作条件,降低了船舶系缆力,优化了引航道水流条件。在带中间渠道省水船闸的物理模型试验方面,曹玉芬等^[36]利用 1:40 的水工概化模型,对闸室尺度为 130 m×12 m(长×宽)的

两级船闸进行研究分析,总结出了一定的交错运行时间间隔可以较好改善渠道水流条件、最佳错开时间随渠道长度增加而增加的规律。孟祥玮等^[37]采用 50 m×2.5 m(长×宽)的中间渠道物理模型,并辅以渠道一维数学模型加以分析,总结出中间渠道通航水流条件受振荡波波高的影响较大;同时发现了正的推进波在前进过程中波前坡度会逐渐增大,波高逐渐减小,坡度增大到一定程度后波前形状会失去稳定。这些结论对进一步探索中间渠道的水力学研究具有重要的意义。

4.2 数值模型试验研究

对于省水船闸输水水力特性研究,物理模型无法做到对许多细部结构的精确还原,除此之外还存在比尺效应等影响因素,而数学模型可以较好地解决此类问题。

海显胜通过数值仿真手段,对省水船闸方案的主要水力特性和省水池输水系统运行条件进行了试验研究。该数值模型仅针对省水池的水力特性曲线进行仿真计算,尚未给出船闸输水时闸室以及省水池等细部的流场、压力场。Lucas E. 等对巴拿马运河上新扩建的省水船闸建立了数学模型,包括省水池输水的 OD 模型、船闸时间计算的一维模型以及系缆力和局部能量损失计算的 CFD 模型,并结合物理模型对船闸输水系统方案进行研究。A. N. Menéndez 等^[38]以巴拿马运河 3 号船闸为例,建立了一系列三维数值模型和物理模型分析验证其输水系统,计算船舶平均通过率和淡水消耗量,并采用物理模型进行验证。杨艳红^[39]对带两级省水池省水船闸进行了三维水流数值模拟研究,得到输水系统各阀门的压力特性和闸室细部的三维水流特性。陈莹颖等采用船闸输水过程数学模型计算水牛韩船闸非省水运行和省水运行时的输水水力特性,结果表明省水运行时的船舶停泊条件优于非省水运行。随娟娟通过数学模型分析计算了飞来峡二、三线船闸在不同运行方式下的水力特性,包括普通单线运行与省水运行下阀门开启时间、闸室最大流量、闸室水面升降速度以及阀门关闭时剩余水头之间的关系。吴波

等建立数学模型对长洲枢纽三、四线船闸进行输水系统研究,总结了双线省水运行时剩余水头对船闸输水时间和省水率的影响规律,并对输水优化方案进行探讨。

5 研究展望

1)对于分散输水系统而言,廊道支孔出流流量分配规律是关注的重要内容之一,为保障良好的闸室水力条件,常规船闸中的支孔布置常采用沿闸室纵向分组方式,如闸底长廊道和闸墙长廊道侧支孔输水系统等。然而,对于省水池廊道经闸室中部与主廊道连通的布置方案,其边界条件与常规船闸差异较大,现有的支孔分组设置方法是否仍适用,取决于支孔出流情况。因此,急需开展省水船闸分散输水系统支孔出流分配规律的相关研究。

2)双线船闸的互补输水可在一定程度上实现闸、阀门工作条件的优化与航运用水的缩减,具有较高的经济效益。现阶段关于双线船闸互通输水廊道形式、数量和截面类型的研究相对较少,而这些参数影响着输水效率,后续可以围绕这些方面展开深入研究。

3)采用“动水关阀+提前量”的阀门启闭组合方式可以缓解省水船闸输水时间长的问题,然而目前对于“提前量”的定义局限于按水位作为控制目标,是否以更为全面的水力参数作为控制目标,如流速、压力等,可作为下一步的研究工作。

4)由于省水船闸闸室与省水池水体的多级交换,会加剧海水入侵至船闸上游河段,尤其是对于连接外海的人工运河而言,其省水和防咸要求比较突出。因此,如何解决省水与防咸要求间的矛盾是亟待开展和解决的问题。

参考文献:

- [1] 杨忠超,陈明栋.省水船闸省水效益分析及在内河航运建设中的应用[J].水运工程,2013(12):131-135.
- [2] 周玉华,刘锋.省水船闸初探[J].水运工程,2006(10):156-159.
- [3] 卿云.小尺度省水船闸布置及输水系统型式研究[D].重

- 庆: 重庆交通大学, 2016.
- [4] 张星星, 陈明栋, 许光祥, 等. 高坝通航枢纽中省水船闸方案探讨[J]. 水运工程, 2016(5): 76-81.
- [5] 杨忠超, 陈明栋. 省水船闸省水效益分析及在内河航运建设中的应用[J]. 水运工程, 2013(12): 131-135.
- [6] 陈明栋, 陈明, 罗忠义. 适用于高坝通航的船闸输水系统型式探讨[C]//自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(2). 北京: 中国科学技术协会学会学术部, 2009: 1326-1332.
- [7] WONG J H. The Experience of the New Panama Canal Locks[C]//2nd International Workshop, PIANC. Brussels: PICNIC, 2011.
- [8] NEWBERY M J. KRAUSE A J. Design of the Panama Canal third set of locks[C]//LOUCKS E D. World environmental and water resources congress, 2012: Crossing boundaries. Reston, VA: ASCE, 2012.
- [9] ROUX S, BADANO N. Numerical simulations & experimental models: the experience of the new Panama model[C]//2nd International Workshop, PIANC. Brussels: PICNIC, 2011.
- [10] 吴澎, 曹凤帅. 省水船闸建设技术和进展[C]//第 167 场中国工程科技论坛暨 2013 水安全与水利水电可持续发展高层论坛论文集. 北京: 中国工程院, 中国水利学会, 2013: 188-193.
- [11] 张丽媛, 汤建宏. 高水头省水船闸水工结构及输水系统研究[J]. 水运工程, 2016(10): 146-151.
- [12] THORENZ C, ROTHER R, SCHULZ G. A self-contained high-lift lock with water saving basins[C]//2nd International Workshop, PIANC. Brussels: PICNIC, 2011.
- [13] 周华兴. 水运工程中省水建筑物型式及对有关问题的探讨[J]. 水运工程, 1994(7): 1-5.
- [14] 韦德鉴, 宣国祥, 李君, 等. 长洲四线并列船闸运行方式对下游引航道水流条件的影响[J]. 水运工程, 2012(8): 119-124.
- [15] 许铎. 60 m 级船闸省水布置与水力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2020.
- [16] 海昱盛. 银盘省水船闸省水池水力特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [17] 陈莹颖, 李中华, 许铎. 小清河水牛韩省水船闸输水系统布置及水力计算[J]. 水运工程, 2020(1): 63-69, 102.
- [18] 杨裔轩. 省水船闸的水力计算[J]. 水运工程, 1985(12): 20-22.
- [19] 陈明栋, 杨忠超, 杨斌. 乌江银盘船闸输水系统选型研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006(5): 30-34.
- [20] 陶园园, 麦建清, 陈明栋, 等. 绣江复航工程白马枢纽省水船闸三维水力特性数值模拟[J]. 水运工程, 2018(3): 112-117, 123.
- [21] 刘本芹, 李云, 胡亚安, 等. 高水头大尺度船闸省水布置与水力计算[J]. 水运工程, 2016(12): 42-46.
- [22] 王晓青, 刘兆存, 张长腾. 飞来峡双线省水船闸水力学特性试验[J]. 水利水电技术, 2016, 47(5): 53-55.
- [23] 覃业传, 李君, 宣国祥, 等. 并列双线船闸单侧闸墙长廊道输水系统布置及水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2015(5): 139-144.
- [24] LUCAS E. CALVO G. Design of the filling and emptying system of the new Panama Canal locks[J]. Journal of applied water engineering and research, 2013, 1(1): 28-38.
- [25] 杨忠超, 陈明栋, 杨斌, 等. 乌江银盘水利枢纽省水船闸运行方式研究[J]. 水运工程, 2009(6): 111-116.
- [26] 麦建清, 罗翔云, 王多银, 等. 白马枢纽省水船闸布置及输水水力特性初步分析[J]. 水运工程, 2019(4): 115-121.
- [27] 随娟娟. 相互灌泄水船闸水力学特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2015.
- [28] 陈亮, 王晓青. 飞来峡二、三线相互灌泄水船闸省水特性及效益分析[J]. 水运工程, 2015(6): 106-110.
- [29] 吴波, 李文轩, 傅陆志丹, 等. 双线互输水船闸剩余水头优化研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(4): 61-67.
- [30] 周华兴, 解曼莹, 孙玉平. 船闸输水阀门开启方式的研究[J]. 水道港口, 1989(2): 37-44.
- [31] 周华兴. 船闸输水阀门开启对停泊条件影响的研究[J]. 水道港口, 1989(3): 10-16.
- [32] 杨忠超, 陈明栋, 杨斌. 乌江银盘省水船闸整体水力学模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2010(2): 61-66.
- [33] 王健. 省水船闸水力特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [34] DELEU B, MAILLET J. N. Seine Nord Europe canal-Hydraulic design of locks [C]//International Workshop, PIANC. Brussels: PICNIC, 2009.
- [35] 严振石, 李君, 宣国祥, 等. 适应通过能力发展需求的多线船闸输水系统设计与应用[J]. 水运工程, 2020(1): 70-75.
- [36] 曹玉芬, 戈龙仔, 孟祥玮, 等. 带中间渠道船闸运转方式的试验研究[J]. 水道港口, 2007(2): 126-132.