



船闸闸底长廊道侧支孔输水系统研究进展*

张星星, 陈明栋, 陈明, 王涛, 王蛟

(重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 闸底长廊道侧支孔输水系统属于一种典型的船闸分散输水系统, 在中、高水头船闸工程中应用广泛。在其设计和建设过程中, 支孔布置形式、明沟消能设施、闸室船舶系缆力以及阀门空蚀空化等是必须考虑的关键水动力学问题, 直接影响输水系统的工作效率和闸室停泊条件。发展至今, 已取得了一些研究成果, 但同时还存在许多技术难题。本文基于国内外大量研究资料, 从上述方面对闸底长廊道侧支孔输水系统进行系统阐述与分析, 并提出下一阶段需要研究的重点问题, 以期为后续研究提供参考。

关键词: 输水系统; 支孔布置; 明沟消能; 系缆力; 阀门空化

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)06-0135-09

Review of studies on filling and emptying system with chamber floor's long culvert and lateral orifice

ZHANG Xing-xing, CHEN Ming-dong, CHEN Ming, WANG Tao, WANG Jiao

(Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The filling and emptying system with chamber floor's long culvert and lateral orifice is one of the typical dispersed filling and emptying systems. They are widely applied in the medium and high water head ship lock engineering. In the process of its design and construction, the pores' layout, open ditch energy dissipation, in-chamber ship's mooring forces and cavitation of valves are the key hydrodynamic problems, which directly affect the work efficiency of the filling and emptying system and the berthing conditions. Nowadays, fruitful achievements have been already made. Whereas, there are many difficult problems to study. Based on a large amount of research data at home and abroad, we study the filling and emptying system with chamber floor's long culvert and lateral orifice from the above aspects. Moreover, we set four key problems to be researched in the next stage, hoping to provide reference for further research in this field.

Keywords: filling and emptying system; layout of pores; open ditch energy dissipation; mooring force; cavitation of valve

船闸输水系统作为完成闸室灌泄水程序的主要设备, 运行频繁, 是船闸最重要的组成部分, 其形式选择与设计水平, 将直接影响船闸通过能力和船舶安全。输水系统经历了几百年的发展历史, 形式多种多样, 但主要分为集中输水系统和

分散输水系统两大类^[1-2]。闸底长廊道输水系统是一种典型的分散输水系统形式, 一般分为顶缝出水加盖板与侧支孔出水加明沟, 而侧支孔输水形式较多应用于条件较好的岩石基础, 包括进水口、阀门段、输水廊道、出水支孔和明沟等部分

收稿日期: 2016-01-19

***基金项目:** 重庆市研究生科研创新项目(CYB15112); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400322)

作者简介: 张星星(1990—), 男, 博士, 从事通航水力学及船闸水力学方面的研究。

(图1)。从图1可见,这种输水系统将纵向主廊道布置在闸室底部,使用一排或多排错位布置的侧支孔使廊道与闸室相连,构成水流进出闸室的通道。由于主廊道与闸室墙分开,闸室输水时,水流直接由布置在闸室底部长廊道上的支孔流入闸室。与闸室长廊道侧支孔输水系统相比,其具有2个鲜明的特点:1)对船闸闸墙结构尺寸没有特殊要求,可避免大面积开挖,适用于闸墙断面尺寸较小的衬砌式船闸;2)闸室内水流消能效果较好,船舶停泊条件良好,对阀门单边开启或两侧阀门不同步开启的情况适应性较强。近年来,对该布置形式进行的许多极有价值的研究^[3-7]表明其具有优良的水力特性,于是在最新修订的《船闸输水系统设计规范》^[8]中将闸底长廊道侧支孔输水系统调整为第二类较复杂式分散输水系统。

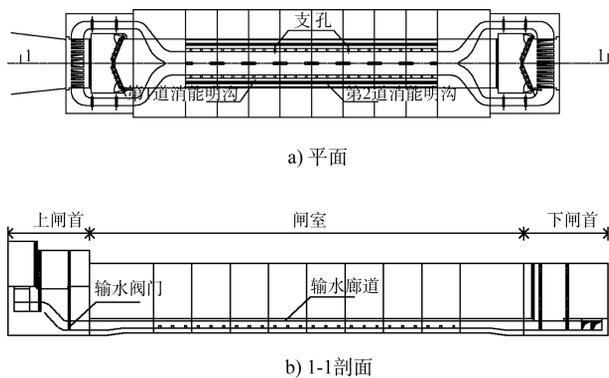


图1 闸底长廊道侧支孔输水系统布置

在闸底长廊道侧支孔输水系统建设和设计过程中,需满足两方面要求:1)要达到输水时间要求,以满足船闸的通过能力;2)须保证灌泄水时闸室及引航道内船舶的停泊安全。不难看出,以上要求在一定程度上是相互矛盾的。要使输水时间缩短,就必须增加支孔数目、改变支孔宽高比或间距等,加大灌泄水的流量和流量增率,而流量和流量增率越大,过闸船舶的停泊条件就越差。同时,由于船舶停泊条件主要取决于船闸灌泄水时水流对船舶作用力的大小,为保证船闸停泊安全,往往需要延长输水时间,或者采用消能设施消耗尽可能多的水流的剩余能量,使闸室内水面平稳、流速分布均匀。可见,输水系统技术性能

的优劣与支孔布置形式、消能设施的设计水平和闸室船舶系缆力密切相关。此外,输水阀门是船闸输水系统的咽喉,工作条件复杂,在非恒定高速水流作用下频繁启闭,极易在阀门段、分流口等部位形成空化,危及阀门自身安全,影响输水系统正常运行。鉴于此,本文基于国内外大量研究资料,针对闸底长廊道侧支孔输水系统,从支孔布置形式、明沟消能设施、闸室船舶系缆力和阀门空蚀空化研究等方面进行综述,并提出需要深入研究的问题,以期为后续的研究工作提供参考。

1 支孔布置形式

1.1 物理模型试验

支孔不同布置形式将导致支孔流量分配发生变化,直接关系到输水时间和闸室内水流条件。限于输水系统水动力学的复杂性,物理模型试验研究仍是当前最主要的研究手段。在国外,早在二十世纪三四十年代,前苏联的水工实验室就进行过大量试验研究,其中也包括闸底长廊道输水形式^[9]。之后,美国陆军工程兵团在对已建船闸工程的规划和通航能力提升的研究过程中,Richak'd L等^[10-14]对船闸闸室底板纵向廊道输水系统做了大量的模型试验研究工作,试验内容包括船闸运行性能、廊道设计、出水支孔布置以及消力档槛布置等,研究成果为该形式的应用打下了坚实的基础。由于这种输水系统在水力条件上的突出优点,国外船闸设计者开始重视并进行了一系列深入的试验研究,陆续建成了康杰船闸(尼日利亚)和老邦纳维尔船闸(美国)。需要说明的是,前者采用闸底长廊道侧向支孔出水布置,辅以明沟消能设施,运转良好,而后者采用顶支孔出水方案,但并未布设消能盖板,闸室内水面紊动剧烈,不得不延长输水时间,以保证船舶停泊安全,后该船闸被重建。

20世纪60年代中期,国内相关科研基地开始对闸底长廊道输水系统形式展开模型试验研究。

首先进行试验的是七里垅船闸, 它是我国第 1 座单级高水头船闸, 设计水头 19 m, 采用单根底部长廊道顶部出水支孔的输水系统布置方案(共 15 个出水支孔), 输水时间为 11.36 min。原型观测发现, 灌水时闸室水面十分平稳, 无不良水力现象, 停泊条件较好。随后, 该类输水系统逐步在全国得到了广泛应用(表 1), 如沙溪口、那吉、红花、桂平二线、桥巩船闸等, 其中大部分进行了水工模型试验研究。试验表明, 输水系统各项水力指标均满足规范要求。曾涛^[15]结合渠江金盘子船闸的地质条件与衬砌式闸墙结构形式, 确定闸底长廊道侧支孔出水式输水系统及各部分尺寸, 并进行了水力计算和模型试验, 表明在条件较好的岩石基础及闸室宽度足够的情况下, 选用该种输水系统能收到较好的经济及使用效果。之后, 刘平昌等^[16]对渠江金盘子船闸输水系统进行了水力学原型观测, 发现该船闸进出口、闸室内流态较好, 闸室内船舶系缆力满足规范要求。宣国祥等^[17]根据《船闸输水系统设计规范》和柳江红花船闸的特点, 在调查和分析大量资料的基础上, 设计确定闸底长廊道侧支孔出水明沟消能布置形式及关键尺寸, 水力计算表明其输水水力特性满足要求。为进一步研究闸底长廊道侧支孔输水系统水力特性, 赖子机等^[18]通过 1:25 的整体物理模型, 对右江那吉航运枢纽船闸闸底长廊道侧支孔输水系统方案进行试验研究, 结果表明采用闸底长廊道侧支孔输水系统布置, 输水系统各水力指标均满足设计和规范要求。卢文蕾等^[19-20]依托嘉陵江新政船闸, 通过模型试验, 对闸室灌泄水特性、廊道压力、出水支管的形式、支管管径与排列层数、消能明沟的体型、船舶系缆力等做了全面研究。宣国祥等^[21-22]针对西江桂平二线船闸, 在水力分析的基础上, 建立了 1:30 输水系统整体物理模型, 重点研究了 34 m 宽闸室单根主廊道的闸室水流条件和船舶系缆力。试验表明, 输水水力特性满足相关规范要求, 经过调整后的闸室出水布置可以满足闸室停泊条件要求。近年来, 基于该输水形

式优良的水力指标、适用水头较高等优点, 愈来愈多的船闸采用闸底长廊道侧支孔输水系统布置, 其中包括部分改扩建工程。金国强等^[23-24]根据富春江七里泷航道第二通道工程船闸及其上游通航隧道总体布置的特点, 确定了富春江改扩建船闸输水系统形式(闸底长廊道侧支孔输水系统)及具体布置, 通过 1:30 的物理模型试验分析, 得出该输水系统布置是合理的。同时, 由于富流滩改扩建船闸水力指标较高, 陈作强等^[25]通过船闸整体物理模型试验对闸底长廊道侧支孔输水系统进行优化。试验结果表明, 各项输水水力特征均满足设计和规范要求。吴澎等^[26]通过物理模型试验, 对比了闸底长廊道侧支孔输水系统方案和单侧闸墙长廊道闸底横支廊道输水系统, 推荐长洲三四线船闸采用闸底长廊道侧支孔输水系统。

表 1 国内部分采用闸底长廊道侧支孔输水系统形式的船闸

船闸名称	闸室规模 (长×宽)/(m×m)	设计 水头/m	输水 时间/min	$m = \frac{T}{\sqrt{H}}$
渠江金盘子船闸	160×12	19.04	12.00	2.75
沙溪口船闸	130×12	24.20	11.67	2.37
那吉船闸	190×12	13.91	8.00	2.14
红花船闸	180×18	17.71	12.62	2.14
桥巩船闸	120×12	24.65	10.0~12.0	2.02~2.42
峡江船闸	180×23	15.70	8.0~10.0	2.02~2.42
长洲(1 [#])船闸	190×23	15.00	9.53	2.46
桂平二线船闸	280×34	10.50	9.00	2.78
西津二线船闸	280×34	20.30	10.0~12.0	2.21~2.66
富春江改扩建工程	300×23	21.22	16.00	3.47
富流滩改扩建工程	180×23	11.80	10.00	2.91
长洲三四线船闸	340×34	17.28	10.0~12.0	2.41~2.89

1.2 数值模拟研究

迄今为止, 国内外关于支孔布置形式与流量分配演化规律的数值模拟研究报道较少。限于多孔射流的复杂性, 目前大多数研究均围绕单孔射流进行^[27-31], 得到了射流流动结构(如中心竖直面和展向流速分布特性、速度半值宽随纵向距离的变化关系、中线流速衰减规律)及漩涡结构等。但是, 多孔射流是研究船闸输水系统水动力学的

基础。Robert等^[32]对一排多孔射流进行了实验研究,得出在强烈的二次流和进口条件以及雷诺应力各向异性的作用下,射流横向扩散十分强烈。Perumal等^[33]针对多孔自由射流,着重研究了射流衰减和扩散特性,同时与单孔射流进行了对比分析。Richak'd L等^[34]对船闸输水系统多支孔射流情况,将廊道中的每个支孔作为一个离散单元,开发了一套用于确定廊道及支孔射流流量及压力分布情况的水力计算程序,得出了各支孔的流量及分配情况,然而他们在计算过程中只考虑恒定流,对计算条件作了简化,这必然影响计算结果的真实性。之后, Richak'd L等^[35]又采用 RANS 方程,通过自适应水力特性的数值计算方法(ADH法)和滑移网格技术的自由水面捕捉方法,对韦伯福尔斯船闸的整体输水系统水动力学进行了三维数值模拟。杨朝东等^[36-38]采用数值模拟手段,计算时考虑支孔形式尺寸、间距、阀门开启时间及廊道阻力对支孔流量分配规律的影响,得出了船闸输水过程的支孔流量分配及演化规律,但该研究成果未充分考虑水流的三维流动过程。事实上,船闸输水系统多孔射流问题是典型的三维壁面射流,它是经支孔分流后的每股水流在闸室水体内部形成三维壁面射流状态^[39]。当前,国内学者针对单侧和双侧支孔射流进行了系统研究,取得了较大的突破。黎贤访等^[40]对单侧支孔射流水力学进行了试验研究,得出无槛条件下断面最大流速及最大流速点相对高度的沿程变化规律,拟合得到设槛条件下沿射流中心线的速度数学表达式。随后,他通过建立 CFD 数学模型,对闸室非恒定流灌水过程进行模拟,经物模验证,研究闸墙长廊道侧支孔充水的水力特性及其对闸室自由水面运动的作用。结果表明,充水初期与后期的支孔流量分配规律相反,充水不均匀造成闸室水面长波运动^[41]。陈明等^[42-43]以带格栅消能室的环绕短廊道输水系统为研究对象,采用数值模拟方法和动网格技术,对船闸输水全过程的三维流动进行了研究,获得双侧廊道多孔对冲射流流动特性。虽

然上述成果的研究对象不是闸底长廊道侧支孔输水系统,但对该输水形式多支孔射流的三维数值模拟研究仍具有极强的指导意义。王蛟^[44]基于某船闸闸底长廊道侧支孔输水系统,借助 FLUENT 软件研究不同侧支孔布置形式下的闸室船舶系缆力,总结出一些侧支孔的布置原则,但并未就支孔优化布置(最优数目、间距等)和流量分配演化规律做详细研究。

2 明沟消能设施

在船闸闸底长廊道侧支孔出水段,通常布置明沟消能设施以调整闸室横向水流和进一步消耗进入闸室中的水流能量(图2)。明沟消能工作作为一种成熟的技术在美国的船闸建设中应用甚广,如米列斯菲雷(Mmers Ferry)、新岸头(New Bankhead)、达旦纳尔、下花岗岩(Lower Granite)、湾泉(Bay Springs)等船闸^[45]。在我国,明沟消能在葛洲坝2#船闸中首次得到应用,由于这种消能工形式结构较为简单,消能效果较好,逐渐被船闸工程所采用。综合分析国内外已建船闸工程,大部分在出水口外仅布置一道明沟,即采用单明沟消能,如康杰船闸、柳江红花船闸等。孔口射流理论表明(图3),单明沟尺度超过一定范围,将不利于闸室水流的扩散和消能,为了使水流分布面广,必须增加廊道数,从而使布置复杂、费用增加,而且增加廊道数量也减少了消能水体、降低消能效果。因此,人们开始探索双明沟消能。最早提出这一设想的是在桂林春天湖旅游船闸工程^[46],考虑到过闸船舶为旅游船,对平稳性要求高,提出了双明沟消能设施。随后在长洲1#船闸闸室中部复合横支廊道中进一步进行了研究,完善了这一布置形式。试验研究表明,将明沟消能的体积增大1倍,在平面上扩大了水流扩散的面积,可获得较好的水流条件,同时提高了停泊在闸室内过闸船舶的稳定性和安全性。基于此,双明沟消能设施在闸底长廊道侧支孔输水系统中扮演着重要角色,被广泛采用,如江西峡江船闸、桂平二线船闸等。



图 2 明沟消能设施

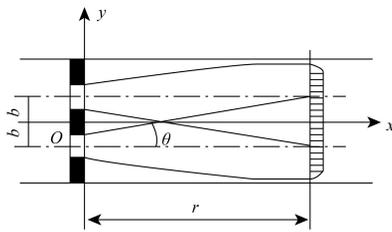


图 3 孔口射流

目前, 国内的明沟形式多样(图 4), 大多数船闸进行过物理模型试验和原型观测(2.1 节), 总结出明沟的尺寸和布置形式, 而数值模拟研究成果较少, 尤其是关于明沟尺度对水力特性的影响、多明沟协同消能特性与消能机理等方面的研究鲜有涉及。朱磊^[47]通过分析国内外实际船闸工程, 从布置形式、消能机理、消能效果等方面对明沟消能设施进行了系统论述和评析。刘保军^[48]依托乌江银盘船闸, 采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型, 对明沟消能和盖板消能两种形式进行了三维数值模拟, 得到两种不同消能形式的流速及压强分布、紊动能及耗散率分布以及空蚀空化危险区域分布等。综合分析闸室的流速、流态及水流的消能机理, 得出在乌江银盘船闸中选用双明沟消能形式较好。杨忠超等^[49-50]通过船闸局部水工模型试验和三维数值模拟, 对高水头船闸闸室双明沟的消能效果和消能机理进行研究, 分析流速分布、剩余比能、水面波动和紊动能耗散率等参数, 得出明沟消能效果较优, 可在高水头船闸中推广应用。张绪进等^[51-52]针对贵港二线船闸, 通过 1:25 的整体物理模型试验, 通过对输水系统水力特性、廊道压力、闸室和上下游进出口流态、船舶系缆力的观测, 提出双明沟和三明沟消能形式的优化布置方案。陈亮等^[53-54]运用 VOF 方法, 在恒定流情

况下, 对单明沟、双明沟及三明沟消能工充水过程进行三维数值模拟, 对比分析三者的消能特性, 发现三明沟布置消能效果最优, 双明沟和单明沟次之。由于多支孔射流是非恒定流, 而上述成果在计算过程中只考虑恒定流情况, 其计算精度还有待提高。综上所述, 对于明沟的消能效果, 双明沟比单明沟好, 三明沟比双明沟好, 这是显而易见的, 故输水系统设计可在满足要求的输水时间和停泊条件要求的前提下, 采用最合适、最简单的消能设施, 但能不能简化主要根据设计要求和地质条件, 有时采用复杂的消能工也不可避免。

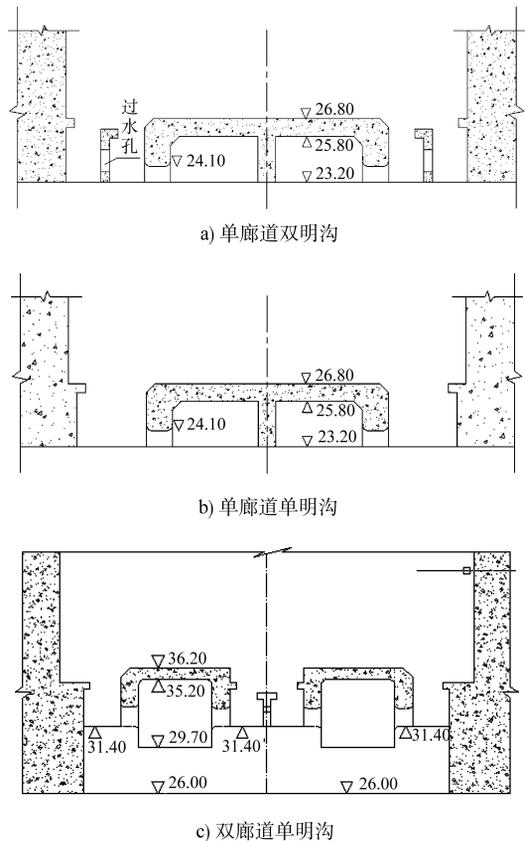


图 4 明沟消能设施 (单位: m)

3 闸室船舶系缆力

研究闸底长廊道侧支孔输水系统支孔布置形式、流量分配演化规律和明沟消能设施, 其最终目的是在满足输水时间条件下, 保证闸室内船舶具有良好的停泊条件。通常, 船舶系缆力的大小是衡量停泊条件好坏的关键指标。考虑船闸紊流场的复杂性, 对于闸室灌泄水过程船舶系缆力的研究, 目前主要采用物理模型试验和现场原型观

测方法,这需消耗大量的人力和物力。比较而言,数值模拟具有先天的优势——省时省力、方便快捷,因而越来越受到人们的重视。

研究表明,船闸灌泄水时,闸室船舶受水流作用引起船体自身的运动,而船体的运动状态又改变船舶周围流场,船舶在闸室水面上的运动是比较典型的“流-固”耦合运动问题。因此,“船舶-水流”耦合动力响应问题是解决闸室船舶系缆力数值计算的重中之重。针对该问题的研究,国内外不少学者做了相关工作。虽然在浮体与水体间的耦合动力响应研究方面已有大量的研究成果^[55-61],但大多研究集中在波浪环境下浮体与流体间相互作用,实际上对于闸室内船舶的受力分析,不仅要考虑黏性水流流速及波浪对船体的作用,而且需考虑在闸室水位大变幅的情况下对船体升降运动控制的动力响应。发展至今,取得了较为丰硕的成果。Richter^[62]将船舶看作“柔性船”,假设船舶随周围水体做无相对位移运动,建立了一个简化的数学模型,并就闸室内波浪的推进过程作了推理分析。R. J. de Jong等^[63]着重分析闸室内涌浪对船舶的水动力作用及船舶的运动响应,开发了闸室内船舶纵向力的计算程序。Luigi Natale等^[64]以闸门上开孔的输水系统或闸门缓慢开启类型的船闸为研究对象,进行了水力学试验和数学模型研究,其中包括闸室内水流条件和船舶纵向力,并模拟了船体单自由度动力学模型在涌浪作用下船舶的上升和下降运动。在国内,黎贤访^[39]基于流体动力学控制方程,运用动网格技术,根据船舶在闸室中的系缆方式,导出了船舶缆绳拉力的计算公式。综上研究,限于问题的复杂性和计算精度,研究方法和控制条件在一定程度上予以了简化,而如前所述,船舶与水体是耦合运动关系。鉴于此,陈明^[43]基于“船舶-水流”耦合动力响应,建立了船舶纵、横向受力方程及运动控制方程,并编制了闸室船舶系缆力数值模拟的并行计算程序,通过系缆力实测值与计算值对比,验证了数值计算方法的正确性。在此基础上,王蛟^[44]以闸底长廊道侧支孔输水系统为研

究对象,选择代表船型,建立“船舶-水流”耦合动力响应的三维数学模型,采用三维紊流模拟方法、动网格技术以及闸室船舶系缆力并行计算程序,对不同侧支孔布置形式下的闸室船舶系缆力进行数值模拟计算,进一步证明了该方法的有效性。

4 阀门空蚀空化

输水阀门是完成闸室灌泄水过程的重要设备,工作条件复杂,动水启闭,运行频繁,承受非恒定高速水流作用,门后流态复杂,极易发生空蚀空化(图5)、振动,严重时可能导致阀门面板、门楣及门后廊道边壁空蚀破坏,使阀门振动,产生“声振”现象^[65-66],直接影响船闸的安全运营。因此,较好地解决阀门空蚀空化问题,是闸底长廊道侧支孔输水系统设计的关键,必须慎重对待。

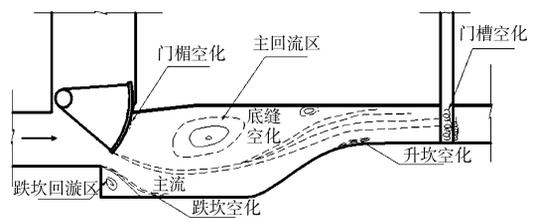


图5 阀门段空化

为解决这种输水形式阀门水力学难题,国内外学者作了许多研究工作,取得了丰硕成果。美国陆军工程兵团采用快速开启阀门及门后廊道顶部自然通气的工程措施来防止阀门空蚀空化,如湾泉船闸(25.6 m)与新岸头船闸(21 m)阀门开启时间均为1 min;下花岗岩船闸(32 m)阀门开启时间为1.33 min等。研究成果显示^[67-68],快速开启阀门能够增大惯性水头,提高门后压力,防止阀门空化。前苏联巴甫洛夫船闸采用侧墙多支孔输水系统,为抑制阀门门槽空化,通过物理模型试验,改变门槽段廊道体型,实施后效果良好。国内针对此类输水系统阀门空化问题也开展了多项研究,取得了较大突破,如降低阀门段廊道高程、将阀门段廊道设计为突扩体型^[69]以及在阀门段关键部位设通气孔^[70]等方法,收效显著。何文辉^[20]依托嘉陵江东西关船闸,阀门段采用了突扩体廊道布置,结合输水系统的水工模型试验和船闸输

水阀门的减压模型试验,对阀门段突扩体的布置方案、相对空化数的计算以及原体空化的预测等作了大量的论证和研究。目前,沙溪口、水口、五强溪等船闸工程均采用此种形式规避阀门空化问题。向祎^[71]通过数值模拟手段,发现廊道突扩体型虽很大程度上解决了阀门空蚀空化问题,不过仍然存在一定范围的空化区,必须增设掺气系统。胡亚安等^[72-73]在乐滩和大化船闸中首次完全采用门楣通气联合门后廊道顶通气措施解决输水阀门空化难题,通过原型观测,取得了良好效果。红水河桥巩船闸水头高达24.60 m,阀门水力学问题相当凸出,方锦秀^[74]等根据原型试验,采用门楣自然通气,结合阀门后底突扩+顶突扩的新型廊道体型,有效地降低了阀门空蚀空化几率。

5 研究展望

在进行中、高水头船闸工程输水系统选型时,常常将闸墙长廊道侧支孔输水形式与闸底长廊道侧支孔输水形式进行比选。研究成果表明,这两类输水形式的输水效率基本相当,若实际工程的基础为岩基情况时,则选用闸底长廊道侧支孔输水形式可大大节省工程投资,而且在相同条件下可以取得较好的过闸船舶停泊条件。结合目前国内该输水形式的研究现状,认为下一阶段还需对以下问题进行重点研究:

1) 总结一套具有普遍适用性的侧支孔布置原则。以往的研究多针对实际工程,主要进行水工整体模型试验,研究手段略显单一,缺乏系统性的研究。因此,下一阶段应着重围绕不同水头、不同规模的船闸展开研究,大力推进物理模型试验与数值模拟研究相结合的方法,归纳总结闸底长廊道输水形式侧支孔布置原则,为进一步丰富和完善我国《船闸输水系统设计规范》提供科学依据。

2) 探寻支孔流量分配的关键控制因素,阐明支孔出流随时间和空间的演化规律。侧出水支孔流量分配取决于廊道及支孔内的水流运动,而水流运动又与廊道及支孔的布置和边界条件密切相关。因此,出水支孔流量分配演化规律受许多因素影响。同时,多支孔射流是典型的三维壁面射

流问题,其演化规律不仅与空间相关,而且与时间密不可分。而就现有研究成果而言,控制因素尚不明确,计算时均对计算条件进行了一定简化,更未充分考虑水流的三维流动过程,其结果的准确性有待检验。

3) 研究多明沟协同消能特性和消能机理,优化双明沟和三明沟的布置形式。目前,单明沟和双明沟消能工技术已经十分成熟,在国内外应用较多。但针对三明沟消能结构的研究报道甚少,多明沟协同消能特性与消能机理研究领域还处于一片空白,仍有大量工作需要进一步深入。

4) 增加国内闸室船舶系缆力数值模拟的研究力度。综合分析船舶系缆力数值模拟研究成果,不难看出,国外已经达到相当高的一个水平,相比之下,我国的数值模拟在评价船舶受力方面还没有看到明显的进展,需建立相关专题加大研究力度。

参考文献:

- [1] 李云,胡亚安,宣国祥.通航船闸水力学研究进展[J].水动力学研究与进展: A 辑,1999,14(2): 233-238.
- [2] 吴澎,宣国祥.船闸设计的新进展[J].水利水运工程学报,2009(4): 122-127.
- [3] 连恒铎.王甫洲船闸输水系统模型试验报告[R].南京:南京水利科学研究院水工所,1989.
- [4] 董凤林,乔文荃.广东北江飞来峡水利枢纽船闸水力学试验研究[R].南京:南京水利科学研究院水工所,1994.
- [5] 宣国祥,黄岳,李中华.广西左江山秀水利枢纽船闸输水系统模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2003.
- [6] 宣国祥,黄岳.柳江红花船闸输水系统水力学模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院水工所,2003.
- [7] 宣国祥,黄岳.西江航运干线桂平航运枢纽二线船闸输水系统水力学模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2006.
- [8] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [9] Б Д 卡洽诺夫斯基.船闸水力学[M].北京:水利出版社,1957.
- [10] Stockstill R L. Innovative lock design; report 1 case study, New McAlpine lock filling and emptying system, Ohio River, Kentucky [R]. Vicksburg, MS: US Army Engineer Waterways Engineer Station, 1998: CHL TR-INP-CHL-1.
- [11] Hite J E. Model study of Marmet Lock filling and

- emptying system, Kanawha River, West Virginia [R]. Vicksburg MS: US Army Engineer Waterways Engineer Station, 1999: CHL TR-99-8.
- [12] Hite J E. New McAlpine Lock filling and emptying system, Ohio River, Kentucky [R]. Vicksburg MS: US Army Engineer Research and Development Center, 2000: CHLTR-00-24.
- [13] John E H. In-chamber longitudinal culvert design for lock filling and emptying system [R]. Vicksburg MS: US Army Engineer Waterways Engineer Station, 2003: CHL TR-03-8.
- [14] John E H, Richard L, Stockstill. Hydraulic design of a longitudinal culvert for lock filling and emptying systems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130 (5): 381-388.
- [15] 曾涛. 渠江金盘子船闸输水系统研究[J]. 水运工程, 1998(11): 20-23.
- [16] 刘平昌, 周家俞, 王召兵, 等. 渠江金盘子船闸输水系统水力学原型观测研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(6): 1 397-1 399.
- [17] 宣国祥, 薛丽金, 李中华. 柳江红花水利枢纽工程船闸输水系统布置[J]. 水运工程, 2006(2): 74-78.
- [18] 赖子机, 宁子秋, 宣国祥, 等. 右江那吉航运枢纽船闸闸底长廊道侧支孔输水系统方案水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2007(2): 68-73.
- [19] 卢文蕾, 陈作强. 闸底长廊道短支孔(管)分散输水系统布置[J]. 水运工程, 2007(12): 104-107.
- [20] 何文辉. 山区河流中、高水头船闸输水系统的选型和布置研究[D]. 四川: 四川大学, 2006.
- [21] 宣国祥, 黄岳, 李君. 桂平二线船闸闸底长廊道输水系统布置研究[J]. 水运工程, 2009(3): 109-115.
- [22] 宣国祥, 黄岳, 李君. 西江航运干线桂平二线船闸闸底长廊道输水系统水力学模型实验研究[J]. 水运工程, 2009(5): 98-102.
- [23] 金国强, 宣国祥. 富春江七里泷航道第二通道工程船闸输水系统布置[J]. 水利水运工程学报, 2007(1): 47-52.
- [24] 金国强, 刘本琴, 宣国祥, 等. 富春江船闸改扩建工程船闸输水系统布置研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 60-64.
- [25] 陈作强, 宣国祥, 黄岳, 等. 渠江富流滩船闸输水系统水力学模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 82-86.
- [26] 吴澎, 曹风帅. 西江长洲水利枢纽 3 号和 4 号船闸总体设计[J]. 港工技术, 2014, 51(5): 5-9.
- [27] Rajaratnam N, Pani B S. Three-dimensional turbulent wall jets[J]. J Hydraul Div Proc Civ: ASCE, 1974, 100(HY1): 69-83.
- [28] Isaac K M, Schetz J A. Analysis of multiple jets in a cross flow[J]. Journal of Fluids Engineering, 1982, 104(4): 489-492.
- [29] Launder B E, Rodi W. The turbulent wall jet, measurements and modeling[J]. Annu Rev Fluid Mech, 1983: 429-459.
- [30] Law A W K, Herlina. An experimental study on turbulent circular wall jets[J]. J Hydraul Eng: ASCE, 2002, 128(2): 161-174.
- [31] Kheirkhah G H, Mohammadian A, Nistor I, et al. Numerical modeling of turbulent buoyant wall jets in stationary ambient water[J]. J Hydraul Eng: ASCE, 2014, 140: 04014012-1-04014012-17.
- [32] Robert F K, Stephen W D A, Peter F V, et al. LDV measurement on confined parallel jet mixing[J]. Journals of Fluids Engineering, 2001, 123: 567-573.
- [33] Perumal G, Mahendra, Sridhar B T N. Effect of wall on mixing of low speed multiple rectangular jets[J]. Earth & Space: ASCE, 2006: 1-10.
- [34] Richard L S, Frank M N, Victor L Z. Hydraulic calculations for flow in lock manifolds [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991(117): 1 026-1 041.
- [35] Stockstill R L, Berger R C. A three-dimensional numerical model for flow in a lock filling system[J]. Great Rivers: World Environmental and Water Resources Congress, 2009: 2 737-2 746.
- [36] 杨朝东, 宣国祥, 张瑞凯. 船闸复杂分散输水系统输水数学模型研究[J]. 水利水运科学研究, 1997(3): 190-199.
- [37] 杨朝东, 宣国祥, 张瑞凯. 船闸输水廊道直角边缘单支孔充水阻力系数试验[J]. 水利水运科学研究, 1997(2): 126-130.
- [38] 杨朝东, 宣国祥, 张瑞凯. 船闸输水廊道复合管单支孔阻力系数试验[J]. 水利水运科学研究, 1998(4): 330-336.
- [39] 黎贤访. 船闸分散输水系统闸室水动力学研究[D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2011.
- [40] 黎贤访, 李云, 王勇. 船闸闸墙廊道侧支孔射流研究[J]. 水利水运工程学报, 2011(1): 97-102.
- [41] 黎贤访, 李云, 邓润兴. 船闸闸墙长廊道侧支孔水力特性[J]. 水运工程, 2015(4): 178-179.

- [42] 陈明,梁应辰,宣国祥,等.船闸输水过程三维水力特性动态仿真研究[J].水动力学研究与进展: A 辑, 2013, 28(5): 557-566.
- [43] 陈明.船闸集中输水系统水力特性与闸室船舶系缆力数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学, 2013.
- [44] 王蛟.不同侧支孔布置形式下的船舶系缆力数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学, 2015.
- [45] 陈明,宣国祥,陈明栋.船闸输水系统水动力学研究综述[J].重庆交通大学学报:自然科学版, 2013, 32(1): 158-159.
- [46] 范惠生.春天湖船闸的特点及设计创新[J].水利规划与设计, 2007(3): 53-56.
- [47] 朱磊.船闸明沟消能研究综述[J].东北水利水电, 2015(7): 67-69.
- [48] 刘保军.船闸明沟消能和盖板消能的消能机理[D].重庆:重庆交通大学, 2006.
- [49] 杨忠超,杨斌,陈明栋,等.高水头船闸闸室明沟消能效果及机理分析[J].水运工程, 2009(12): 169-172.
- [50] 杨忠超,杨斌,陈明栋,等.高水头船闸闸室消能工消能效果实验研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版, 2010, 29(3): 461-465.
- [51] 张绪进,吕伟东,刘平昌,等.贵港航运枢纽二线船闸输水系统水力学试验[J].水利水运工程学报, 2012(4): 34-38.
- [52] 陈亮,刘平昌,张绪进,等.贵港二线船闸闸室双明沟消能工布置及消能特性研究[J].水道港口, 2013, 34(2): 144-149.
- [53] 陈亮.船闸闸室明沟消能工布置及消能机理研究[D].重庆:重庆交通大学, 2013.
- [54] 吕伟东,刘平昌,陈亮,等.船闸闸室明沟消能工消能效果三维数值模拟[J].水道港口, 2013, 34(6): 509-511.
- [55] 张炳夫,钱昆.系泊浮体在浅水波浪中运动响应的计算研究[J].船舶工程, 2010, 39(5): 32-39.
- [56] 王言英,阎德刚.自升式海洋平台波浪荷载谱计算[J].中国海洋平台, 1995, 10(2): 50-58.
- [57] Qian K, Wang Y Y. Analysis of wave loads on a semi-submersible platform[J].China Ocean Engineering, 2002, 16(3): 395-406.
- [58] 肖越.系泊系统时域非线性计算分析[D].大连:大连理工大学, 2005.
- [59] 江召兵,沈庆,陈徐均,等.自适应动网格在流体-浮体耦合运动中的应用[J].解放军理工大学学报:自然科学版, 2007, 8(2): 156-160.
- [60] Sigalotti L Di G, Lopez H, Trujillo L. An adaptive SPH method for strong shocks [J]. Journal of Computational Physics, 2009(228): 5 888-5 907.
- [61] 肖潇,蒋昌波,程永舟.水流对浮体作用的 SPH 方法模拟[J].船舶力学, 2011, 15(8): 861-866.
- [62] Richter J. Das Verhältnis zwischen See- und Binnenschiffahrt und sein Einfluss auf die Gestaltung der Häfen in der Historischen Entwicklung der nordwesteuropäischen Seehäfen[J]. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 1964(29): 91-54.
- [63] Jong R J, Vrijer A. Mathematical and hydraulic model investigation of longitudinal forces on ships in locks with door filling system[R]. Delft: Delft Hydraulic Laboratory, 1980.
- [64] Natale L G, Savi F. Minimization of filling and emptying time for navigation locks[J]. J. Waterway, Port, Coast and Ocean Engng, 2000(126): 274-280.
- [65] 王军,杨斌,陈明栋,等.高水头船闸输水系统研究综述[J].重庆交通大学学报:自然科学版, 2007, 26(5): 126-127.
- [66] 杨忠超,杨斌,陈明栋,等.高水头船闸阀门开启过程水力特性仿真研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版, 2009, 28(4): 759-762.
- [67] 罗家麟,周华兴.高水头船闸阀门空化改善措施的研究[J].重庆交通学院学报, 1997, 16(2): 84-89.
- [68] 周华兴,曹玉芬,宁子秋,等.船闸输水阀门空化研究综述[J].水道港口, 2002, 23(1): 31-36.
- [69] 李云,张瑞凯,陈泰春.突扩廊道体型减免高水头船闸输水阀门空化研究[J].水动力学研究与进展, 1997, 12(2): 246-249.
- [70] 胡亚安,郑楚佩,卞兆盛.葛洲坝 1 号船闸阀门门楣通气设施原型观测研究[J].水运工程, 1995(6): 29-32.
- [71] 向祎.船闸阀门突扩体廊道掺气水流数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学, 2014.
- [72] 胡亚安,李君,宗慕伟.红水河乐滩船闸输水系统水力特性原型调试研究[J].水利水运工程学报, 2008(1): 7-10.
- [73] 胡亚安,李君,李中华.红水河大化船闸输水系统水力特性原型调试研究[J].水运工程, 2008(3): 88-92.
- [74] 方锦秀,龙少江.桥巩船闸工作阀门抑制空化措施与原型试验[J].人民长江, 2009, 40(13): 40-41.