

· 综述 ·



国家高等级航道网通航枢纽 及船闸水力学创新与实践*

李 云, 胡亚安, 宣国祥, 韩昌海, 刘本芹, 李中华, 李 君

(南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 随着内河航运事业的快速发展, 我国在通航建筑物的建设领域, 已取得了丰硕的研究成果。尤其是近 10 年来一大批高水头大型通航建筑物相继建成, 使我国跻身世界高水头通航建筑物建设前列。重点围绕通航枢纽及船闸水动力学的研究难点及关键技术, 总结分析了多年来所取得的创新研究成果及其应用情况。同时基于新形势下的建设要求和面临的挑战, 对通航建筑物水动力学的研究领域提出了展望。

关键词: 航道网; 通航枢纽; 船闸; 水力学

中图分类号: U 612.32; U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0001-09

Navigation hydraulic innovation research and practice of national high grade waterway network

LI Yun, HU Ya-an, XUAN Guo-xiang, HAN Chang-hai, LIU Ben-qin, LI Zhong-hua, LI Jun

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: Along with the fast development of inland water transport industry in our country, fruitful research results have been achieved in the field of navigation structure. Especially in the last 10 years a large number of high head an large navigation structures have been built, which make our country in the forefront of the world high head navigation building construction. The results of innovation research and its application are summarized and analysed mainly around the hydrodynamic research difficulties and key technologies of navigation hub and ship lock. Furthermore, the prospect is presented for the navigation structure hydrodynamic research field based on the construction requirements and challenges under the new situation.

Keywords: waterway network; navigation hub; ship lock; hydraulics

1 研究背景

内河航运是国家综合运输体系和水资源综合利用的重要组成部分, 发展内河航运是我国的国家战略。通航枢纽(图 1)是渠化天然河流、提高

航道等级、沟通不同水系的重要工程措施, 是内河航运网络的咽喉, 直接关系到构建“两横一纵两网十八线”高等级航道网的“通”和“畅”两方面, 地位极其重要, 且建设投资巨大, 影响深

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402001, 2016YFC0402007, 2016YFC0402008)

作者简介: 李云 (1962—), 男, 教授级高级工程师, 从事通航水力学、水工水力学、城市水力学研究。

远,稍有疏漏不可逆转。“九五”以来,我国内河航运建设得到快速发展,至今在长江黄金水道、西江黄金水道、京杭运河、湘江、嘉陵江、松花江、赣江、岷江、渠江、瓯江等高等级航道上已建成百余座通航枢纽和船闸。典型工程有三峡、葛洲坝多线多梯级通航建筑物群,长洲枢纽四线船闸并列布置的船闸群,京杭运河沿线多梯级三线并列布置船闸,渠江梯级开发通航枢纽及船闸、水口连续多级船闸等。这些复杂通航枢纽和多线、多级、大尺度、高水头船闸的建设,标志着我国在船闸水力学领域的研究水平已迈向一个新台阶。

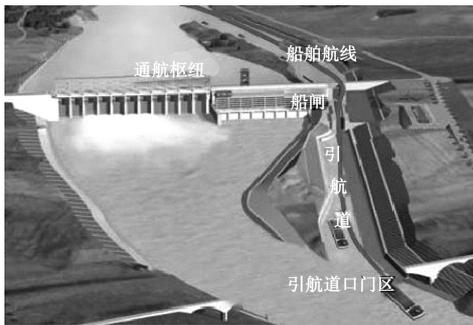
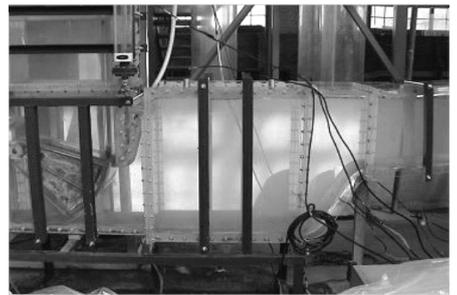


图1 通航枢纽

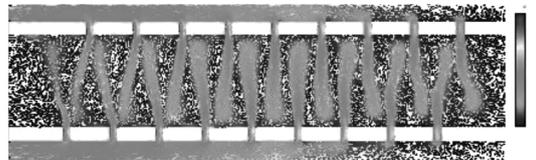
针对我国上百座通航枢纽及船闸建设面临的一系列重大技术问题以及已建枢纽如何进一步挖掘通航潜力以适应内河航运爆发式增长的迫切问题,国内相关单位依托国家、省部级科技项目以及重大工程专项科研,通过理论分析、一百余座物理模型试验、数值模拟仿真以及十余座大型枢纽工程原型试验与反馈分析(图2),以应用基础研究为先导,解决工程技术问题为重点,对通航建筑物水力学关键技术难题进行联合攻关,取得了大量创新性成果^[1-6]。



b) 船闸整体模型



c) 阀门常压模型



d) 数值模型

图2 研究手段

2 通航枢纽布置及船闸主要技术创新

2.1 基础理论研究及进展

2.1.1 船闸水力学重要参数的精确计算公式

船闸输水系统水力设计是整个船闸工程设计是否成功的关键,直接影响过闸船舶的安全及通过能力。以往船闸无法实现精细化设计的主要原因之一是许多重要参数只能近似取值,通过近20年基础研究,提出了船闸精细化水力设计涉及的一大批重要参数的精确计算公式和方法,有力促进了船闸精细化设计。如:计算初始波浪力、确定阀门开启速度的船闸输水过程初始流量增率理论计算公式;计算阀门后最低压力、最大流速以及空化数的收缩系数;判别阀门底缘空化程度



a) 通航枢纽整体模型

和确定阀门处廊道高程的临界空化数; 影响分散输水系统水力计算精度的船闸输水廊道复合阻力系数; 统一了美国雷诺数 Re 校正法和我国糙率校正法, 且校正精度提高 30% 的船闸水力学模型缩尺效应校正新方法。

基于精细化设计的一系列重要参数, 建立了适用于所有输水系统形式的船闸非恒定流水力计算模型(图 3、4), 研发了船闸精细化计算软件与辅助决策支持系统, 缩短设计和试验周期, 提高行业整体设计水平。

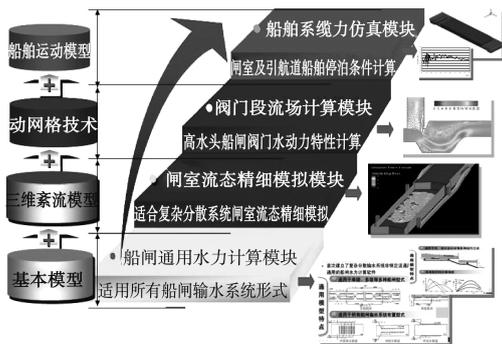


图 3 船闸水力精细化计算模型

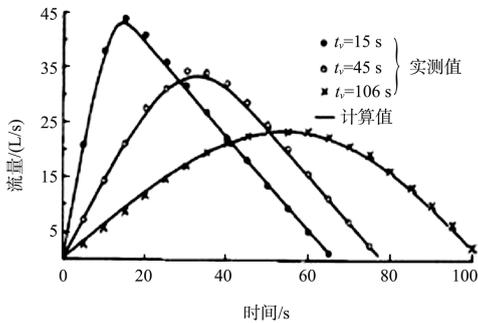


图 4 计算与试验值对比

2.1.2 船闸阀门防空化新理念

我国规范及以往的研究一般从主动防护的角度出发, 要求阀门底缘工作空化数大于临界空化数, 即相对空化数 $\sigma/\sigma_c \geq 1$, 阀门段廊道顶负压控制在 $-3 \times 9.8 \text{ kPa}$ 以内, 如不满足条件, 则采取增大淹没水深直接提高压力, 或者通过采取复杂的工程措施避免阀门发生空化, 通俗意义就是“严防死守”策略。近年来提出的防空化新理念是: 以被动防护为宗旨, 允许阀门发生强空化, 相对空化数容许值由 1.0 降到 0.1, 廊道顶负压允许达

到极限值 $-10 \times 9.8 \text{ kPa}$, 利用各种通气技术形成的气垫作用防止阀门及廊道发生空蚀破坏, 即“因势利导”策略, 从而可彻底解决一直困扰各国船闸建设和运行的阀门空化难题。

2.1.3 复杂水流条件下的数值模拟技术

开发了船闸典型输水系统闸室整体水动力学三维数学模型, 初步实现闸室非恒定流充水过程三维流场的精细化模拟计算; 采用三维水流模型结合动网格技术及船舶运动模型, 模拟了分散输水系统充泄水时船舶受力状态。研发了以大涡模型为基础的阀门段急变流和惯性作用十分强烈的阀门段两相流动态耦合数值模拟技术, 揭示了阀门段非恒定急变分离流机理。

2.1.4 船闸闸门整体水动力学数值模拟技术

开发了船闸工作闸门整体水动力学三维数学模型, 结合动网格技术模拟闸门动边界启闭过程, 较为精确地模拟船闸闸门各种差异边界下水力学参数及细部流场特征; 利用数学模型研究闸门运行边界条件各因子对动水阻力矩峰值的影响, 优化边界条件设计布置, 为船闸闸门水动力特性研究提供新的研究思路和方法。

2.2 通航枢纽及引航道平面布置新方法

2.2.1 基于船舶航行参数的枢纽通航安全评估新方法

引航道口门区水流条件是衡量枢纽布置和安全通航的关键技术指标, 现行规范 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》对引航道口门区的纵向、横向和回流等特征流速大小做出了明确要求。由于我国河流形态复杂, 通航枢纽布置的困难程度大, 若完全满足规范要求往往需增加较大的工程量。大量试验研究和实践发现, 口门区局部流速超标但船舶仍能安全航行, 根据这一结果尝试建立了基于船舶航行参数的口门区通航条件判别方法, 提出满足船舶安全航行的水流特征参数与船舶航行特征量之间的关系式, 可满足全面综合评定引航道口门区通航水流条件与船舶安全航行条件的要求。

$$\text{横漂速度: } \frac{\partial l}{\partial t} = \alpha v_x + \frac{\varphi t}{2b} \left(\frac{dx}{dt} \right)^\beta \quad (1)$$

$$\text{横漂距离: } l = \int_t \left[\alpha v_x + \frac{\varphi t}{2b} \left(\frac{dx}{dt} \right)^\beta \right] dt \quad (2)$$

式中： l 为横漂距离(m)， t 为时间(s)， v_x 为横向流速(m/s)， b 为船宽(m)， α 、 φ 、 β 均为系数。

2.2.2 复杂河势条件下的通航枢纽总体布置形式

针对支流入汇急弯、微弯分汊、洲滩交错多汊等为特征的复杂河段，以河流动力学及泥沙运动规律研究为基础，以保障通航安全高效、航道稳定为目标，提出支流入汇急弯河段船闸“旁侧布置”、微弯分叉河段船闸和电站异汊近岸布置、洲滩交错多汊河段船闸和电站同汊异岸布置，以及多线船闸共用引航道等枢纽布置新形式(图5)^[7-9]，应用于湘江大源渡、株洲等航电枢纽和长沙、桂平、长洲等多线船闸。



图5 复杂河段枢纽布置形式

基于弯道水流特性，提出了“船闸坝上非正交布置”形式，解决因河道弯曲而造成的引航道曲率较大，以及引航道口门区难以满足通航水流

条件的难题，成功应用于衢江小溪滩枢纽。提出利用电站长尾水渠作为船闸引航道的特殊布置形式，并解决了10 km电站长尾水渠非恒定流作用下的通航安全问题，是航运与发电效益有机结合的一次有益尝试，应用于大渡河安谷枢纽。

2.2.3 具有高通过能力特点和适应山区河流特征的引航道布置形式

基于船舶曲线进闸、直线出闸的航行方式，提出了集导航和调顺功能为一体并具有高通过能力的引航船(队)长，还可提高通过能力15%。成果率先应用于万年船闸。

针对山区河流大“S”形弯道，首次提出导航段和停泊段采用半开敞直线型、曲线型和限制式引航道布置新形式，可缩短引航道直线段长度约1.5~2.0倍船(队)长，成果应用于嘉陵江多座通航枢纽，解决我国特有的山区河流直线河段长度不足以规范要求的枢纽通航布置难题。

2.2.4 改善水沙条件的导流导沙建筑物新技术

针对船闸引航道口门区因河宽突扩引起的斜向水流和回流等碍航流态以及泥沙淤积难题，基于水流泥沙运动机理，提出了结构新颖的引航道口门区导流导沙建筑物——菱形导流墩和导沙坎、扇形布置的分流墩群(图6)，显著消减口门区的斜向水流和回流，改变推移质泥沙运动路径，既改善通航水流条件保障通航安全，又减少泥沙淤积维护航道稳定。成果应用于湘江大源渡、株洲、长沙航电枢纽以及北江飞来峡水利枢纽工程。

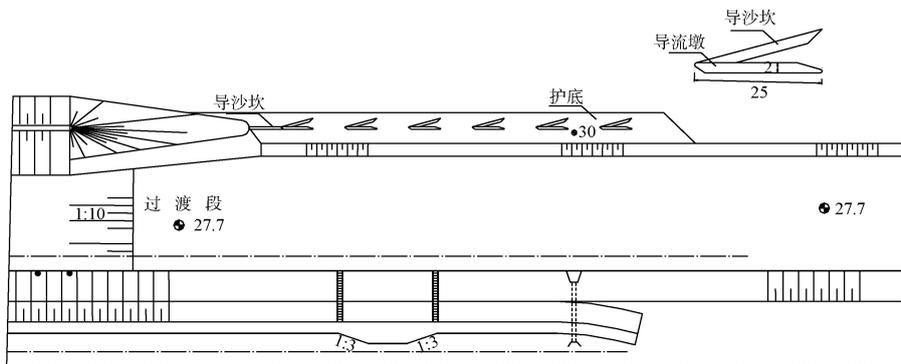


图6 株洲下游引航道口门区导流墩与导沙坎应用布置 (单位: m)

2.2.5 各类枢纽布置形式设计原则及其适用条件

依托多条河流渠化工程, 对异岸布置、同岸布置、旁侧布置、裁弯取直和引水布置等 5 类枢纽布置形式进行系统研究和总结, 提出了各类枢纽布置形式设计原则及其适用条件。

2.3 船闸输水系统新形式

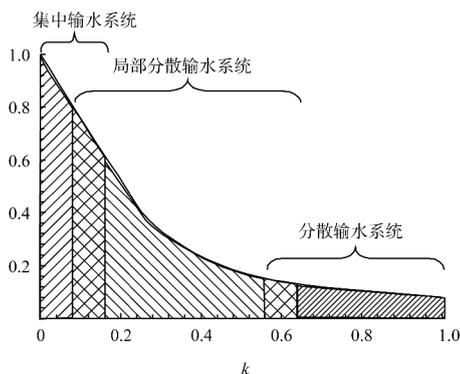
2.3.1 第三类输水系统——局部分散输水系统

船闸输水系统过去一直分为集中和分散两类。前者结构简单、造价较低, 但水流条件限制较多; 而后者消能充分, 但结构复杂。由于这两类输水水力特征和结构布置差异极大, 多年来一直按各自要求进行布置。研发的第三类输水系统——局部分散输水系统(又称集中分散输水系统, 见图 7), 以复合廊道双明沟新型消能技术为基础, 采用分散输水系统消能原理进行集中输水系统布置, 使得水流类似分散输水, 而结构又类似集中输水, 实现了两类输水系统优点的有机结合^[10]。



图 7 局部分散输水系统布置

局部分散输水系统布置下, 闸室船舶系缆力比集中输水系统减小 40% (波浪力系数比较见图 8), 同时工程造价比分散输水系统可减少 20% 左右。首次应用该技术的泗阳三线船闸运行表明, 该船闸已成为京杭运河上充水时间最短、通过能力最大、闸室船舶停泊安全性最好的一座船闸。



注: k 为分散系数; j 为相对波浪力系数。

图 8 相对波浪力系数对比

2.3.2 倒口消能无镇静段集中输水系统

我国 90% 的船闸采用集中输水系统布置, 提出的倒口消能新技术, 即重构消能扩散空间, 调整水流流态, 布置全新消能结构, 突破了传统集中输水系统需在闸室设置镇静段(非停船区域)的技术限制, 不仅节省工程投资和提高闸室利用率, 而且因具有优越的水流条件可将集中输水系统的应用水头提高 30%。应用该系统的汉江王甫洲船闸闸室内最大系缆力不到规范允许值的 50%, 因取消了约占闸室长度 17.5% 的镇静段, 从而降低了工程投资, 且具有节水功能。

2.3.3 多种分散输水系统新形式

在分散输水系统布置上, 提出闸墙廊道侧支孔强迫消能新技术, 替代自由出流剪切消能技术, 成功解决了初始水深小、输水指标高条件下的闸室消能难题, 并将应用水头提升到 15.55 m, 突破美国设计手册不超过 9.2 m 的规定, 同时将 1 000 吨级船闸起始水深需求由 6 m 降低到 3.5 m, 实现了该型输水系统的技术跨越, 在我国 20 多座船闸得到应用。

首次提出船闸单侧闸墙主廊道双阀门布置输水系统, 解决了单侧廊道布置不对称出流和双阀门布置特有的叉管水力安全等技术难题, 比双侧廊道输水系统节省空间, 为山区狭窄河谷船闸建设以及船闸扩能改造提供了前瞻性技术储备^[11]。

首次提出辅助冲沙管闸室减淤新技术, 解决了我国多沙河流闸室淤积严重、影响船舶停泊和航行安全的技术难题。

2.4 阀门分级防空化成套技术

2.4.1 阀门非恒定流空化模拟研究平台

研制了国内外唯一的超大型单级船闸恒定流及非恒定流减压设备(图 9), 建造了规模空前的减压试验工作段, 其体积是国内外减压箱 4 倍以上, 同时将上下游水库内部分割为不同单元, 并通过水位、流量、真空度的全自动调节控制, 解决了各种规模单级船闸阀门非恒定流试验难题。模型比尺由传统的 1:25 提高到 1:10, 不仅有效克

服了空化试验比尺效应，而且满足掺气相似要求。

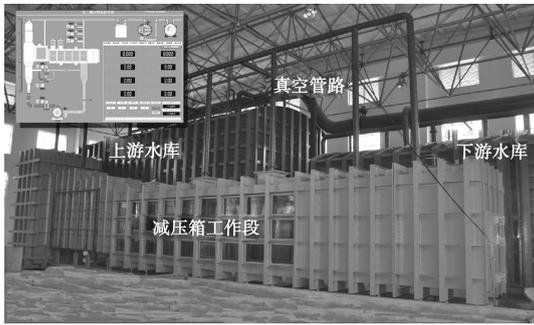


图9 大型非恒定减压设备

针对输水阀门门楣缝隙仅为 20~30 mm 的特点，发明了无缩尺影响的门楣缝隙流高速高压试验装置，为门楣自然通气防空化技术研究创造了先决条件。

2.4.2 门楣自然通气技术

在 20 世纪 80 年代末期葛洲坝船闸原型观测中，除监测到阀门底缘空化现象外，在国内外首次发现了门楣空化现象，并认为是船闸声振的重要根源。利用构建的 1:1 门楣缝隙流试验装置，探明门楣空化发生机理，创造性提出门楣自然通气技术，不仅减免门楣缝隙空化，保护阀门面板免遭空蚀破坏，而且最重要的是发现门楣通气后在阀门后廊道形成的掺气水流覆盖了阀门底缘空化

发生区域，对底缘空化也能起到充分抑制作用。

针对我国河流水位变幅大的特点以及不同的廊道埋设深度，提出了能适应各种水位变化范围的标准门楣体型，并在反弧形阀门成功应用的基础上，首次提出平面阀门门楣自然通气方法以及相应体型。该技术已应用于我国几乎所有高水头船闸，并得到工程检验。

2.4.3 “平顶廊道体型+小淹没水深+门楣自然通气+廊道顶自然通气”完全被动防护新技术

该技术最大特点是允许阀门发生强空化，相对空化数允许值为 0.1，廊道顶负压达极限值的 $-10 \times 9.8 \text{ kPa}$ ，根据门楣通气适应范围广及通气效果好的特点，以门楣自然通气作为基本措施，将美国常用的廊道顶自然通气作为门楣通气措施的补充手段，以适应高水头、大水位变幅下所出现的不同空化强度对通气量的不同需求。提出该技术的应用水头范围为 20~30 m。新技术首次成功应用于水头达 30 m、居世界单级船闸前列的红水河大化和乐滩两座船闸(图 10)^[12]，适应了下游通航水位变幅达 10 m 的不利水文条件，阀门段廊道体型简单，船闸开挖深度可减少 5~7 m，施工方便，工程投资小。

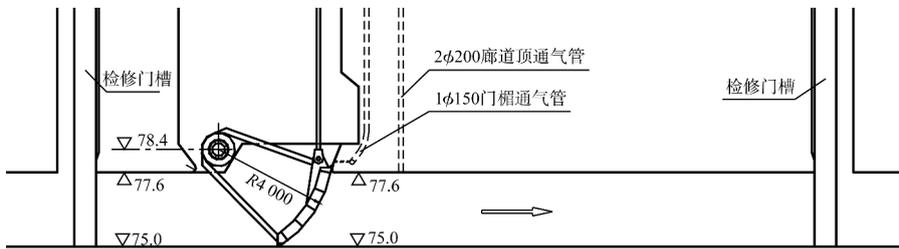


图10 红水河大化及乐滩船闸阀门防空化技术 (高程: m; 尺寸: mm)

2.4.4 “新型阀门段廊道体型+综合通气措施”新技术

吸取顶部突扩廊道增加门后压力和底部突扩廊道改善底缘空化流态的优点，提出“顶突扩+底突扩”的新型阀门段廊道体型(图 11)，改善阀门底缘空化条件，控制阀门底缘相对空化数不小于 0.5；对仍存在的底缘空化，利用门楣自然通气解决(图 12)；首次提出升坎自然通气及跌坎通气抑

制新型廊道体型自身空化(图 13、14)。总结了该技术的最佳应用水头范围为 25~45 m。新技术成功应用于世界上平面阀门水头最高的桥巩船闸、居世界反弧门工作水头前列的乌江银盘船闸和大渡河安谷船闸，以及嘉陵江草街船闸^[13]。该技术可解决水头达 45 m 的超高水头船闸阀门空化难题，为船闸朝 40 m 以上更高水头发展提供技术支撑。

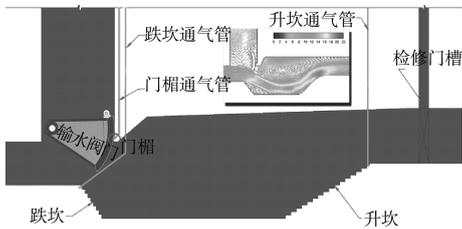


图 11 新型廊道体型

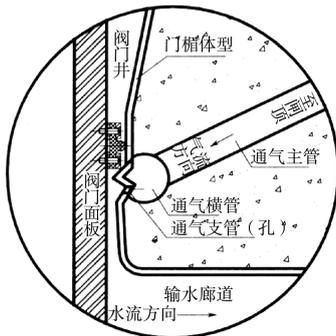


图 12 门楣自然通气技术

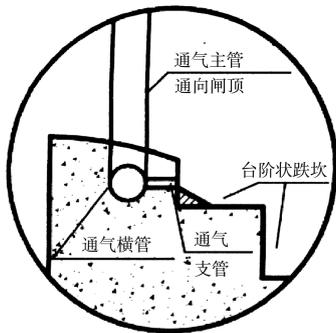


图 13 跌坎

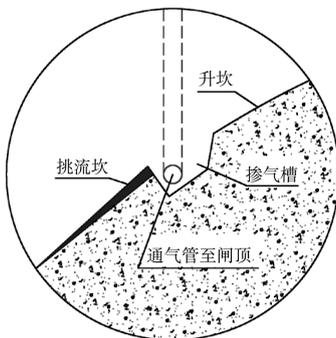


图 14 升坎

2.5 过闸船舶吃水控制新标准及已建枢纽通过能力新技术

2.5.1 过闸船舶吃水控制新标准

随着内河航运快速发展, 过坝船舶日趋大型

化, 实际吃水普遍增大。在现行规范门槛水深设计标准要求下, 大型化船舶必须减载才能通过船闸。针对三峡船闸大型化船舶过闸安全问题, 通过系列物理模型试验与实船试验, 建立了封闭限制水域船舶下沉量 δ 与闸室水深 H 、船舶航速 v 及断面系数之间的计算公式:

$$\frac{\delta}{H} = \sigma \cdot \frac{v^2}{2gH} \cdot \left[\left(\frac{n}{n-1} \right)^2 - 1 \right] - \tau \quad (1)$$

式中: n 为断面系数, 表示渠道过水断面面积与船舶浸水中断面面积之比; σ 、 τ 为经验系数; g 为重力加速度 (m/s^2)。通过精确预测船舶下沉量以及确定合理的安全富裕水深, 制定了能够满足进闸安全要求的船舶过闸吃水控制新标准, 同时解决了过闸船舶吃水增大引起的闸室停泊安全难题, 显著提高已建船闸通过能力。三峡船闸通过将船舶吃水水深由设计标准的 3.3 m 提高到运行标准的 4.2 m, 预计增加年货运量 2 050 万 t 左右。

2.5.2 多级船闸过闸新技术

随着航运需求的增加, 三峡船闸过闸压力日益增大, 挖掘通航潜力十分重要。针对多级船闸运行特点, 提出两项过闸新技术提高三峡船闸通过能力: 1) 提出船闸在 156 m 水位由五级运行改为后四级运行, 中间级闸首最大工作水头由设计允许的最大 45.2 m 增大到 47 m, 突破了船闸应用范围, 提出阀门间歇开启这一新的运行方式, 解决船闸各闸首超设计水头运行时存在的停泊条件、阀门空化和振动等关键技术难题, 缩短船舶过闸时间 20%。2) 在四级运行方式下, 提出新的船舶待闸方式, 即由规范规定的上游引航道靠船墩待闸改变到一闸室待闸, 并制定新的 2 闸首阀门启闭方式, 将一闸室纵向水面比降由 0.15% 降至 0.05%, 最大水面波幅由 0.98 m 降至 0.46 m, 解决了一闸室待闸船舶在非恒定流波动作用下的动水停泊安全这一技术难题, 突破了规范对停泊区的规定, 缩短船舶进闸距离 1 200 m (图 15)。新技术不仅在船闸完建期通航中发挥了重要作用, 显著提高了船闸通过能力, 而且可应用于完建后船闸汛期通航阶段, 经济和社会效益巨大^[4]。



图 15 多级船闸坝新技术

2.5.3 一次过闸载质量计算新方法

通过建立过闸船舶平均载质量与过闸船舶吨位、尺度以及闸室面积利用率的函数关系,评估枢纽通过能力,有效地回避了目前通用的标准船型系数法、船队排列法等存在的设计船型折减系数、船型差异系数选取困难以及实际船型组合复杂等问题。

2.6 大型闸门动水阻力矩变化规律及启闭运行新方式

2.6.1 大尺度一字闸门运行动水阻力矩变化规律

针对我国西部通航河流高坝枢纽船闸水头高、工作闸门为“窄高型”的特点,以及采用人字闸门因“门叶高宽比”大而产生的安装难度大和运行同步性精度难以满足要求等问题,研究了具有结构优越性的超高水头船闸大型一字闸门的启闭运行水力特性。揭示了一字闸门启闭运行动水阻力矩随运行方式、淹没水深、门库边界条件以及门叶高宽比的变化规律,提出了动水阻力矩峰值与闸门角速度、角加速度等运动参数的关系: 1) 匀速运行开门初和关门末的动水阻力矩峰值 M 与闸门角速度 ω 的关系可表示为 $M = k\omega + b$ 形式 (k 、 b 为系数,下同); 2) 一级无级变速运行 M 与角加速度 ε 的关系可表示为 $M = k\varepsilon + b$ 形式; 3) 淹没水深越大,动水阻力矩峰值对角速度的变化越敏感,即 k 随淹没水深 H 的增大而增大; 4) 开门末和关门初的动水阻力矩峰值随门库长度的增加而线性缓慢降低,随门库深度的增加先减

小、后趋于稳定; 5) 门叶越宽,动水阻力矩峰值越大。

2.6.2 一字闸门在船闸中的适用条件和设计要点

在总结我国西部已建高水头船闸工作闸门运行实践经验的基础上,研究提出高水头船闸一字闸门的适用条件^[15]: 1) 适用于采用人字闸门时门叶高宽比在 4.0~5.5 m 的船闸; 2) 一字闸门的门叶高宽比不宜小于 2.5; 3) 尤其适合应用于水头 30.0 m 以上、闸首口门宽度为 12.0 m 的西部高水头船闸。

主要设计要点: 1) 为降低底枢受力,宜将一字闸门门叶旋转中心和支撑中心布置在一条线上; 2) 应布置预应力背拉杆; 3) 门库与闸墙之间宜采用弧形连接形式,不宜采用直角连接形式。

2.6.3 降低动水阻力矩峰值的大型闸门无级变速运行方式

研究提出了有效降低动水阻力矩峰值的“无级变速+匀速+无级变速”这一闸门新型启闭方法,旨在通过减小闸门运行始末阶段的角加(减)速度来降低大型闸门因尺度、淹没水深等因素增大而带来的成倍增加的动水阻力矩峰值,并在三峡船闸人字闸门上得到了原型检验。该方法对人字闸门和一字闸门均可适用,经银盘船闸一字闸门和大藤峡船闸人字闸门模型试验对比分析,与匀速运行相比各阶段动水阻力矩峰值最大降低 50% 以上^[16]。

3 结语

经过 20 年的努力,我国在通航枢纽及船闸水力学研究领域取得了一大批令人瞩目的成果。其中,应用基础理论成果为工程设计及科研奠定了基础,多项成果已纳入行业标准;各项创新技术不仅解决了工程技术难题,节省了工程投资和维护费用,而且保障了通航枢纽及船闸安全高效运行,减少了停航检修时间,显著提高枢纽航运通过能力。此外,上述创新成果保障了我国内河水运主通道的畅通,促进枢纽航运效益的发挥,社会效益不可估量。

“十三五”期间,我国内河水运将持续高速发展,红水河大藤峡、龙滩、赣江新干、京杭运河八堡、邕江邕宁、右江百色等一批通航枢纽正在设计和建设中,湘江株洲、大源渡、郁江贵港、西津、柳江红花等通航枢纽也将扩建二线船闸。基于新形势下的建设要求和面临的挑战,在以下方面需要进一步深入研究和探索:1) 超高水头及巨型船闸水动力学前沿技术;2) 通航设施运行安全保障与风险防控技术;3) 生态节水型省水船闸关键技术。

参考文献:

- [1] 须清华,张瑞凯.通航建筑物应用基础研究[M].北京:中国水利水电出版社,1999.
- [2] 李云,吴时强.水工物理模型与原型观测技术进展(英文版)[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [3] 李云,胡亚安,宣国祥,等.三峡工程围堰发电期及通航初期通过船闸通过能力措施综合研究[R].南京:南京水利科学研究院,2008.
- [4] 胡亚安,宣国祥,李中华,等.高水头船闸阀门防空化创新技术与实践[R].南京:南京水利科学研究院,2009.
- [5] 宣国祥,刘本芹,李君,等.船闸输水系统水力学创新技术研究 and 实践[R].南京:南京水利科学研究院,2009.
- [6] 张瑞凯,李云,胡亚安,等.三峡永久船闸原型调试北线船闸水动力学关键技术研究[R].南京:南京水利科学研究院,2006.
- [7] 韩昌海,杨宇,余之光.多汊河流航电枢纽航线规划及通航水流条件[J].水利水电工程学报,2012(4):39-43.
- [8] 韩昌海,余之光,杨宇.小溪滩枢纽通航建筑物平面优化布置[J].水运工程,2013(6):99-102.
- [9] 韩昌海,杨宇,李艳富,等.微弯河段航电枢纽引航道口门区凸岸布置[J].水运工程,2014(10):121-125.
- [10] 刘本芹,宗慕伟,宣国祥.可不设镇静段的船闸集中输水系统研究[J].水运工程,2008(11):139-143.
- [11] 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.
- [12] 胡亚安,李君,李中华.红水河乐滩船闸原型调试研究[R].南京:南京水利科学研究院,2006.
- [13] 胡亚安,刘本芹,严秀俊,等.嘉陵江草街船闸施工图阶段阀门水力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2007.
- [14] 胡亚安,张瑞凯,李云,等.提高三峡船闸完建期通过能力措施研究[J].水利水电工程学报,2009(4):105-115.
- [15] 李云,刘本芹,陈琼.山区通航枢纽大型船闸新型闸门动力特性研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2016.
- [16] 李云,刘本芹.大藤峡水利枢纽工程船闸下闸首人字闸门水动力与启闭特性研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2016.

(本文编辑 王璁)

· 消 息 ·

中交水运规划设计院有限公司与济宁市签订京杭运河水运开发合作协议

11月26日,中交水运规划设计院有限公司(水规院)与山东省济宁市港航局签署京杭运河水运开发建设战略合作框架协议。协议内容涉及济宁“十三五”期间重大水运项目,工程规模逾40亿元。

自20世纪80年代以来,水规院先后承担了一大批京杭运河干支流水运工程的规划、设计和工程总承包工作。此次合作协议明确,以相关项目为依托,双方将在政策研究、行业发展、咨询设计、建设管理与实施、投融资等方面推进实质性合作,不断扩大合作范围。

http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201612/t20161202_86778.html (2016-12-02)