



广西西江航运资源开发利用的实践及启示

宁 武

(广西北部湾国际港务集团, 广西 南宁 530200)

摘要: 针对广西和国内船闸在不同阶段涉及的重要技术问题所采取的技术方案不同, 导致内河航运资源利用效果迥异的问题, 运用总结、分析的方法, 从技术的角度, 对改革开放以来广西船闸在不同阶段所选取的技术方案对内河航运资源利用效果的关系进行研究, 整理出船闸在前期规划阶段、建设阶段、运营阶段影响内河航运资源充分利用的重要技术问题, 并提出相应的解决方案。结果表明, 必须系统性解决好船闸在前期规划阶段、建设阶段、运营阶段重要技术问题, 才能充分利用内河航运资源。

关键词: 西江航运资源; 船闸; 技术问题

中图分类号: U 612; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)01-0103-08

Practice and enlightenment of development and utilization of Xijiang shipping resources in Guangxi

NING Wu

(Guangxi Beibu Gulf Port Group International Co., Ltd., Nanning 530200, China)

Abstract: Considering the problem that different technical schemes adopted for important technical problems involved in different stages of Guangxi and domestic ship locks cause the different utilization effects of inland navigation resources, this paper uses the method of summary and analysis to study the relationship between the technical schemes selected by Guangxi's ship locks at different stages of reform and opening up and the utilization effects of inland navigation resources from a technical point of view. Then the paper sorts out important technical problems affecting the full utilization of inland navigation resources in the early planning stage, construction stage and operation stage, and puts forward plans or views to solve important technical problems. The results show that to make full use of inland navigation resources, we must systematically solve the important technical problems of the lock in the early planning stage, construction stage and operation stage.

Keywords: Xijiang shipping resource; ship lock; technical problem

广西是全国内河航运大省, 以西江航运干线和右江、红水河、柳黔江等国家高等级航道为核心, 其他地区性重要航道为重要组成部分, 形成横贯东西、干支相连、通江达海的内河航道网络。

改革开放以来, 广西内河水运事业发展成果丰硕, 建成一大批梯级枢纽和船闸; 航道等级大幅度提高; 内河船舶运力显著增加, 由1996年的约50万DWT增加到2020年底的1 068万DWT;

船舶大型化发展迅速, 西江干线过闸船舶平均载质量由1989年的48 t提升到2020年底的2 026 t, 最大运营船舶达到6 300 t; 船闸过货量增长迅速, 梧州长洲水利枢纽船闸过货量从2010年的3 928万t增长到2020年底的1.51亿t, 成为全球通航天然河流过货量最大的船闸; 创新的流域通航管理新模式, 在全国率先实现流域多梯级多线多业主船闸群联合调度和集中管控, 极大地发挥了西江内河

航运资源的航运功能和水运优势作用，显著促进区域社会经济发展。

业内公认，水运是综合运输体系各种运输方式中最低碳、环保的运输方式^[1]，同时内河航运资源稀缺，在技术可行和有需求的情况下，要把内河航运资源的充分利用作为航运建设的指导思想，航运设施的建设要有利于促进航运资源的充分利用，而不能限制航运资源的充分利用。船闸作为内河航道控制性节点，只有系统解决好前期规划、建设和运行阶段的重点技术问题，才能促进内河航运资源航运功能的充分发挥，实现内河航运效益最大化。本文结合多年来西江流域内河水运建设和通航管理实践的经验和启示，系统总结西江流域船闸各阶段须重视的主要技术问题，并提出相应的建议。

1 前期规划阶段技术问题

梯级渠化是西江流域航道建设的显著特点，前期规划阶段需要重点解决好的主要技术问题有梯级枢纽功能定位、船闸等级和规模等，这些问题影响船闸通过能力、安全畅通，影响整条河流航运发展空间和航运效益发挥的基础性、决定性因素。解决不好，船闸（枢纽）建成后会给船闸运行带来“重伤”“致残伤”，工程建成后也难以“补救”，或者“补救”成本巨大！

1.1 强化航运在梯级枢纽中的功能定位

工程的功能定位很大程度上决定了梯级枢纽船闸建设的必要性和建设规模。要以发展的眼光和水资源综合利用效益最大化原则确定梯级枢纽的功能定位和建设任务，航运功能不能受限于枢纽所处河段原有通航状态和航道等级，必须统筹考虑航道的延伸和与高等级航道的衔接。

对于综合性水利枢纽，发电功能带来直接的经济效益，防洪功能往往也因为法定强制性和认识统一性而能够得到充分落实。航运功能的发挥须增加建设和运行成本，且不能带来直接的经济效益（收费船闸除外），因此往往得不到投资方的足够重视，在广西某些河流梯级枢纽开发过程中，

就出现过不建、缓建和缩减船闸建设规模等种种不利于河流航运功能发挥和水资源综合利用效益最大化的情况。

实践证明，通过强化航运在梯级枢纽中的功能定位，有利于梯级枢纽综合效益最大化和促进水运事业发展。广西百色水利枢纽的航运功能就是从“无”调整为“有”的典范，由此成功地将右江1 000吨级高等级航道延伸至云南省，为其新增一条出海水运大通道；大藤峡水利枢纽工程把航运功能从第3位调整为第2位，枢纽船闸建设规模相应从1 000吨级提升为3 000吨级则是强化航运功能的典范。

1.2 重视解决好梯级水位衔接和船闸总体布置

梯级间水位衔接与否，很大程度上决定了整条河流能否实现规划航道等级、能否满足通航保证率、能否为航道等级进一步发展留有余地。梯级枢纽在规划及工程建设阶段，必须保证梯级水位衔接。

水位衔接就是下游梯级水库处于死水位运行时，回水至本枢纽坝下，当下游枢纽水库处于正常蓄水位运行时，水位衔接有余。

要实现梯级水位衔接，在流域梯级规划和项目前期工作阶段的坝址选择和水位论证时必须充分考虑，即便是进入到工程建设阶段，遇到影响水位衔接问题时也必须重视解决。右江鱼梁航运枢纽为了减少库区淹没，将正常蓄水位由此前确定的100 m高程降低为99.5 m，库区运行死水位也相应由99.5 m高程降低为99 m。由此引起与上游那吉航运枢纽水位不衔接，为了解决水位衔接问题，果断暂停那吉船闸施工并修改设计，降低那吉船闸和下游引航道建基面高程解决水位衔接的问题，尽管由此增加投资约4 000万元，但对于提高船闸通航保证率和适应船舶大型化发展是十分有利的。

目前西江流域从上游的百色水利枢纽到下游的长洲枢纽10个航运梯级，各枢纽运行死水位均可衔接，枢纽正常水位运行时，水位衔接有余，有利于船舶大型化发展，并为航道进一步升级奠

定了良好基础。

同时，枢纽的选址要充分考虑船闸的平面布置，在满足枢纽泄洪和其他水工建筑物布置的同时，处理好船闸与电厂厂房、泄洪闸的平面布置关系，原则上船闸宜靠岸布置，不宜布置在电站厂房与泄洪闸之间，并应充分考虑预留远期建设二、三线船闸的空间。

1.3 高等级航道上的船闸等级和规模应尽量超前

船闸属于永久性水工建筑物，建成后难以改造，在确定高等级航道上的船闸等级和规模时，要根据运量和船型发展趋势尽量超前。

运量需求是确定船闸等级、规模的主要因素，首先要辩证看待运量需求预测问题，从船闸设计的角度，运量需求预测是一个十分复杂的问题。改革开放以来，广西建设 1 000 吨级及以上船闸运量需求预测的准确率总体不高，普遍是船闸建成后的实际运量远大于预测量（航道不配套的孤立点除外），因为高等级航道“成线”“成网”以后，运量“井喷”效应难以定量预测，如广西右江 1 000 吨级航道 2018 年初全线贯通后右江过闸量呈井喷式增长；通道建设和产业之间的交替推拉作用，在运量预测中难以定量计算；10、20 年后产业形态的变化以及所带来的运量变化同样难以预见、预测。因此，既要做运量预测，也不能完全依赖于运量预测，不宜以近期、甚至中期的需求定量预测作为确定船闸等级规模的唯一判据。运量预测应该定量和定性相结合，近期，重在看定量；中、远期重在看定性。

从西江流域船闸建设经验来看，西江干线建成的长洲三、四线、桂平二线、贵港二线、邕宁船闸以及在建的西津、红花二线船闸均按 3 000 吨级标准建设，船闸建设等级超前于当时规划的航道等级；已建成的鱼梁船闸、在建的百色升船机和即将开工的洋溪、梅林船闸，在等级和规模论证时均充分考虑了尽量超前和预留。从近 10 年来已经建成投入运行的 3 000 吨级船闸运行效果看，当时建设时船闸等级、规模尽量超前是十分必要且正确的，有力地促进和适应了水运量和船舶大

型化发展，有利于西江航运功能充分发挥。

而预计不足和偏于保守也为水运发展留下了遗憾，长洲枢纽一、二线船闸建成 1 年后过闸货运量就基本上达到饱和；金鸡枢纽船闸在右江 1 000 吨级航道开通 2 年后，船闸过货量就基本达到饱和，目前已启动二线船闸前期工作；红水河岩滩升船机由于建设早、建设等级规模偏低、运行早期航道不畅等原因，建成 20 年来累计货运通过量不足 10 万 t，不到升船机年设计通过能力的十分之一。

1.4 船闸门槛水深要“够深”

船闸门槛水深基本上决定了所能通过船舶的大小。从广西到全国，既有成功的经验，也有因河床下切等导致门槛水深不足的深刻教训。通过梯级水位衔接渠化方式提升航道等级的河流，通过进一步进行航道整治等措施，航道远期提等升级的潜力很大。从防范河床下切、为航道进一步提等升级留有余地，以及充分利用丰水期航道水深走大型船舶出发，船闸门槛设计水深要“够深”。

船闸门槛最小设计水深取决于最低通航水位、船舶吃水以及水深富余系数^[2]。科学确定船闸（枢纽）上、下游最低通航水位是确定门槛最小设计水深的前提。对于下游没有梯级回水顶托或下游航道存在脱水段的枢纽来说，枢纽建成运行后下游河床下切的幅度具有不确定性，下游最低通航水位的确定要本着“保守、再保守”的原则，否则枯水期就可能造成船闸门槛水深不足，降低船闸通航保证率，甚至造成船闸停航，全河航运瘫痪的情况。

广西梧州长州枢纽一、二线船闸在设计阶段，下游设计最低通航水位确定为 5.05 m 高程（预留 0.5 m 河床冲刷水位下切）^[3]。枢纽投入运行 3 年后，枢纽下游河床冲刷水位下降幅度远超预期，达到了约 1.4 m。枯水期流量不足时，造成一、二线船闸闸室、下闸首门槛、下引航道水深不足，船舶被迫大幅度减载，降低吃水过闸。严重时，船闸运行水头超过船闸设计最大运行水头（16.05 m），被迫关闸停航，造成整个西江航运瘫痪。

鉴于一、二线船闸出现的问题，在建设梧州长洲三、四线船闸，确定其下游最低通航水位时采取了十分科学谨慎的态度。在观测、分析计算、数学模型研究的基础上，综合考虑各种不利因素，将下游最低通航水位先是降到 2.4 m 高程，进而降至 1.4 m。从长洲三、四线船闸自 2015 年投入运行至今的情况看，按照 1.4 m 作为设计低水位是正确和更可靠的选择。并且当时相应降低船闸建基面增加的投资大约为 3 000 万元，不到项目总投资的 1%，增加投资的比例较小。

与下游通航低水位出现在枯水期不同，船闸上游通航低水位一般出现在丰水期。在丰水期，由于流量大，航道水深普遍较深，但此时按照水库运行规则，为了防洪以及不增加水库库区淹没的需要，须降低坝前水位，按汛限水位运行，根据《船闸总体设计规范》确定的上闸首门槛水深尽管满足设计最小水深要求，但实际上成了整条航道中的“浅点”，不利于丰水期利用航道水深通航更大的船舶，不利于内河航运效益充分发挥。在广西西江干线、右江、柳江、黔江上的船闸，其上闸首门槛以及上引航道水深均比《船闸总体设计规范》要求得更深，这是因为要解决施工期通航问题，在二期围堰挡水后(此时大坝尚未完成施工)，船闸即要投入运行，此时上游水位比枢纽完工后水库运行死水位、汛期最低运行水位更低。以贵港枢纽为例，水库汛期最低运行水位是 41.1 m 高程，正常运行死水位是 42.6 m。门槛高程按 37.6 m (41.1 m 降低 3.5 m) 即满足《船闸总体设计规范》的要求，但实际上按 35.3 m 高程建设。到汛期，在坝前水位降为 41.1 m 运行的情况下，上闸首门槛及上引航道水深还有 5.8 m，远大于《船闸总体设计规范》要求的 3.5 m，避免其成为丰水期航道中的“浅点”，为丰水期通航更大的船舶创造了条件。因此，在确定上游最低设计通航水位时，还须从船闸所在河流特点出发，在满足现行的《船闸总体设计规范》前提下，从有利于充分发挥内河航运效益出发，适当降低上闸首门槛以及上引航道建基面高程，预留更大的水深。

船闸门槛设计最小水深的确定，除了科学确定最低通航水位，还取决于水深富余系数和代表船型的吃水深度。从广西实践效果看，水深富余系数取大于等于 1.6 是十分成功的，船闸门槛设计最小水深应该毫不动摇地坚持此水深富余系数。除了保证船闸运行安全，也为船泊大型化发展留有空间。

船闸设计代表船型的吃水深度是决定门槛设计最小水深的另一个参数。设计代表船型吃水深度的选取，要根据市场上符合要求的相应等级船舶的实际吃水深度确定船闸设计代表船型的吃水深度。从 2015 年开始，广西船闸设计都是根据市场运营船舶确定设计代表船型吃水深度，如广西 1 000 吨级船舶满载吃水深度普遍在 2.7~3.0 m，计算 1 000 吨级船闸最小门槛水深时，设计代表船型满载吃水取 3.0 m，这是柳江上游洋溪、梅林枢纽 1 000 吨级船闸门槛设计最小水深 4.8 m (3 m × 1.6) 的来由，比过去 1 000 吨级船闸的 3.5 m 明显大，也比 2 000 吨级船闸的 4.5 m 更大。

根据多年建设经验，适当增加船闸门槛水深对船闸总投资增加并不敏感，但却为航道提等升级以及利用丰水期航道水深通过大型船舶，充分发挥内河航运功能提供了条件。西江航运干线贵港—梧州段依托桂平枢纽一线 1 000 吨级船闸(二线船闸当时还在建设之中)在 2009 年把航道等级从 1 000 吨级提升至 2 000 吨级航道标准；南宁—贵港段依托贵港、西津一线 1 000 吨级船闸在 2013 年将航道等级从 1 000 吨级提升至 2 000 吨级；西江干线现在能够航行 3 000、4 000 吨级，最大到 6 300 t 的船舶；以及右江 1 000 吨级航道现在能够航行 2 000 吨级船舶，就是得益于船闸门槛水深的提升。

1.5 统筹好流域各梯级船闸等级规模和过闸能力的协调性

同一条高等级航道上船闸的等级和规模要协调，上、下游梯级间过闸能力也要协调。

西江航运干线 2010 年后建设的船闸等级全部采用了 3 000 吨级，主尺度也基本一致，梯级船闸过闸能力总体上呈上游小、下游大，与流域实际

货流分布总体吻合，流域梯级枢纽间过闸能力基本协调。但也存在局部不协调的情况，柳黔江建设有红花和大藤峡两个枢纽，红花枢纽有已建1 000吨级船闸和在建3 000吨级船闸，下游大藤峡枢纽目前只有一座3 000吨级船闸，上下游梯级通航能力明显不协调，目前已经启动大藤峡枢纽二、三线船闸前期工作，建成后通航能力协调性问题会得到妥善解决。右江下游的金鸡枢纽船闸通过能力只有上游的鱼梁枢纽船闸的一半左右，金鸡枢纽二线船闸前期工作已经启动，建成后该问题也会得到妥善解决。

1.6 保障重要通航河流上船闸(枢纽)施工期通航

枢纽或船闸的施工期一般较长，通航河流上的船闸或者枢纽工程在施工期间要避免长时间断航，如施工期长时间断航，将会造成货物弃水走陆，迫使码头、船运企业另谋出路，航运功能萎缩甚至丧失。广西红水河中游的大化水利枢纽整个施工期断航，并且缓建过船设施，红水河后续建设的梯级也效仿大化枢纽的做法，由此造成红水河长时间断航。

西江干线、右江、柳黔江上的船闸(枢纽)，均采取施工期不断航的施工方案，只是在大江截流到二期围堰挡水、蓄水这个阶段短时间停航，一般只有30~40 d，像大藤峡这样的高坝大库大型水利工程，其停航时间也不超过3个月。二期围堰蓄水到一期蓄水位后，船闸即投入运行，把对航运的不利影响降到最低。

1.7 合理安排梯级枢纽的建设顺序

枢纽的建设顺序决定了枢纽船闸和相关航道建成后能否及时发挥效益。建设顺序安排不当会造成船闸建成后闲置，浪费航道资源。在内河梯级枢纽开发建设时，要统筹好梯级枢纽的建设顺序，力争先建下游梯级，逐级向上游推进，做到建成一座梯级枢纽(船闸)，高等级航道就向上游延伸一段。

西江航运干线是梯级枢纽建设时序合理安排的典范，1978年广西、广东联合提出开发西江航运资源，通过建设桂平、贵港航运枢纽，把西江

干线航道等级从当时的VI级航道标准提升到Ⅲ级^[4]。1986年先期启动的桂平航运枢纽建设，1992年建成蓄水后，库区回水至西江中游的航运中心贵港，结合局部航道整治，库区达到了Ⅲ级航道标准。桂平枢纽以下，由于汇入柳黔江，流量大幅度增大，经过局部航道整治，航道条件也得到了根本性改善。从此，西江航区船舶大型化发展开始提速，水运量也开始节节攀升。1995年动工建设上游的贵港航运枢纽，1998年船闸投入运行，贵港枢纽库区回水至上游已经投入运行的西津航运枢纽，结合相关的航道整治，实现了西江航运干线1 000吨级航道规划建设目标，开启了西江现代化水运事业的新篇章，由此西江水运事业进入飞速发展阶段。后续建设上游邕宁、老口枢纽以及右江各航运梯级，使高等级航道不断向上游延伸。

值得指出的是，西江干线的贵港航运枢纽的发电效益远大于桂平枢纽，但从有利于发挥航运效益考虑，仍然选择先建下游的桂平航运枢纽。

2 建设阶段技术问题

根据广西船闸多年建设和运行效果，建设阶段需要重点解决好的主要技术问题有：船闸口门区和主航道连接、候闸设施设置等。这些问题处理不好会影响过闸安全、过闸效率，增加维护成本。工程建成后，“补救”措施成本高、技术难度大。

2.1 船闸口门区和主航道应平顺连接

船闸口门区和主航道是否平顺连接将直接影响船舶过闸安全和过闸效率。船闸的总体布置应结合枢纽坝址的地形地貌和河道走势，保证口门区与主航道平顺连接，必要时采取工程措施实现平顺连接，避免大角度连接，从而避免船舶大角度穿越河流主流进出闸。

西江干线贵港枢纽一线船闸下游引航道口门区与主航道交角较大，在洪水期船舶上行进入口门区需要较大角度斜穿主流，如遇船舶动力不足或驾驶员经验欠缺时，就存在过闸困难的情况和

安全隐患。

西江干线长洲三、四线船闸布置最终选择大江右岸方案而不选择早期初选的中江方案，主要原因之一就是中江方案船舶下行时需要横穿主流才能进入船闸口门区，通过模型试验验证，在一定的洪水流量下会引起船舶进闸困难，存在安全隐患。

2.2 船闸候闸设施设置应协调

锚泊地、引航道靠船墩等船舶候闸设施设置的协调性直接影响船闸过闸效率、过闸能力。要实现船闸过闸能力最大化，需要通过合理设置候闸设施，做到“船等闸”。如由于锚泊地距离船闸比较远或者引航道和过渡段只能单向通行等原因，集中满闸数量船舶到靠船墩的时间比较长，则靠船墩的数量要相应增加。

梧州长洲枢纽三、四线船闸创新设置候闸设施，获得了良好的运行效果。其下游锚泊地远在船闸 15 km 以外，载货船舶逆水航行至船闸需要 2~3 h；进入枯水期，坝下航道时而实行单向通行，遇到春节等重大节假日，船闸两侧待闸船舶数量严重不平衡时需要倒空闸运行（连续放行某一方向的船舶）。综合上述因素，长洲三、四线船闸上、下游引航道内，在按常规设置候闸靠船墩（长洲船闸称之为一级靠船墩）以外，还增设了二级靠船墩。一、二级靠船墩总数为：上游引航道达到 47 个，下游引航道达到 49 个，均能够容纳约 3 闸船停靠，在倒空闸的情况下，能够停靠 4 闸船。在调度船舶过闸时，实行三级调度，先把船舶从锚泊地调度到二级靠船墩停靠，待一级靠船墩腾空后，再把船舶从二级靠船墩调度到一级靠船墩，较好地实现了“船等闸”，明显提升了过闸效率和船闸通过能力，经初步分析计算，通过能力提升约 6%。

受长洲枢纽三、四线船闸启发，目前正在建设的西津、红花二线船闸，均吸取了以上宝贵经验，增加了近闸靠船墩数量以提升过闸效率和能力。

2.3 船闸结构设计时应充分考虑安全余量

西江流域部分船闸按 1 000 吨级标准设计，然

而过闸船舶有的达到 3 000、4 000 t，虽然系船柱等水工建筑物未出现超载导致断裂或变形的情况，但仍然是一个值得重视的问题。桂江下游某 300 吨级船闸，在洪水期就出现过因停靠 1 000 吨级大型船舶导致靠船墩超载受拉倒塌的情况。

船闸设计和建设时，在建设成本不显著增加的情况下，结构设计时应充分考虑安全余量，增加船闸运行“韧性”，让船闸能更好地适应船舶大型化发展，特别是经常受船舶作用的靠船墩、靠船墩系船柱、闸室浮式系船柱等结构和设施。

2.4 船闸跨河建筑物的通航净空应充分考虑航道发展需求

船闸的跨河建筑物主要包括船闸配套建设的跨闸交通桥、检修桥、电缆廊桥、检修门机设备等，船闸跨河建筑物的通航净空应充分考虑航道发展需求和船舶大型化发展。跨船闸的建筑物中，船闸上游坝孔净空、电缆廊桥净空往往成为船闸通航净空的薄弱环节。广西桂江某 300 吨级小型船闸，上闸首电缆廊桥净空仅有 6.5 m，300 吨级船舶须放倒桅杆才能通过，更大的船舶通过时则需要大量压水、放倒桅杆、降低船舶水线上的高度后才能勉强通过，制约了航道效益发挥。

2.5 船闸上游导流建筑物结构慎用“分水墙加导流洞”的结构形式

船闸上、下游导流结构是为了改善口门区流态而设置的水工建筑物，常见的结构形式有导流墩、分水墙、隔流堤、分水墙加导流孔、分水墙加导流洞（洞在水面下）等不同形式。从广西船闸运行的情况看，不同的导流结构对引航道和闸室漂浮物的聚积有明显不同的影响。贵港枢纽一线船闸上游引航道口门区导流结构采用“分水墙加导流洞”结构，在汛期，随江漂来的漂浮物随水流漂进口门区，但是不能随水流从导流洞流出，从而积聚在上引航道和闸室；同时，由于导流洞的存在，会把靠近分水墙行驶的船舶“吸靠”过去。这两种情况都影响船舶安全进、出闸。贵港一线船闸上游引航道漂浮物积聚情况见图 1。



图1 贵港一线船闸上游引航道漂浮物积聚情况

2.6 船闸输水系统结构应有利于兼顾解决闸室淤积

通过总结广西的船闸，闸室的淤积与输水系统出水孔的分布及闸室水流流场密切相关，在远离出水孔的部位和水流缓流区域容易产生淤积。因而在含沙量较大，容易产生淤积的河流、河段，在投资增加不大的情况下，应采取兼顾减少闸室淤积的输水系统结构，必要时可比选采取“全出水”的输水系统。贵港一线船闸闸室淤积及分布情况见图2，其中靠上闸首无出水孔部位淤积最多，厚的部位约0.8 m。



图2 2015年贵港一线船闸淤积情况

2.7 充分考虑船闸充泄水工作门门槽金属导轨耐磨性和门槽二次混凝土强度和耐久性

船闸充、泄水阀门是船闸动作最频繁的设备之一，启闭过程中受力不断变化且伴随震动。总结西江运行时间长、运行繁忙的1000吨级以上船闸，船闸充、泄水工作门的门槽、轨道和底槛二次混凝土都是易出问题的地方，是船闸每次大修重点关注和处理的部位。1989年投入运行的桂平枢纽一线船闸、1998年初投入运行的贵港枢纽一线船闸、2007年初投入运行的梧州长洲枢纽一和二线船闸、2011年投入运行的桂平二线船闸等，均出现充、泄水阀门的门槽金属导轨磨损严重，

门槽和底槛二次混凝土松动、脱落、淘空等情况，有些船闸充泄水检修门的门槽底部、根部也出现二次混凝土脱落、淘空的情况。均采取了打掉二次混凝土、更换门槽金属导轨(换上摩擦面更厚的导轨)、重新浇筑二次混凝土等措施加以处理。

由于这些部位检修处理空间狭窄，处理时耗时费力，并且影响船闸正常运行。因而，在设计、施工阶段，应充分考虑充、泄水阀门门槽金属导轨的耐磨性；通过采取加粗配筋，或者一次成型、取消二次混凝土等措施(如正在施工的红花二线船闸)提高门槽金属导轨混凝土强度和耐久性，延长门槽部位的大修周期，促进延长整个船闸的停航检修周期。

2.8 选好关键设备

船闸液压启闭系统、人字门(尤其是蘑菇头)、主要电气设备、监控系统是保障船闸安全可靠运行的关键设备，这些设备占船闸建设投资的比例不大，约6%，但却很大程度上决定了船闸运行的稳定性和可靠性。在设计、建设船闸时应与时俱进，采用新技术、新工艺，采购先进、可靠、成熟、稳定的设备可大幅减少维护成本，减少船闸检修时间和频次，保障船闸安全、稳定、可靠运行。目前西江集团管理的船闸停航大修时间间隔平均达到11.5 a，除了科学维护，关键设备的可靠性起到重要作用。

2.9 建设绿色生态船闸

库区防护，保护耕地。1995年开工建设的贵港航运枢纽，共建设26座泵站，采取库区防护方式保护库区支流两岸的优质耕地，避免永久淹没高产水田4.3 km²以上，60 km²以上的耕地获益。

抬填造地，还地于民。2005年开工建设的百色那吉航运枢纽利用工程弃渣在库区河滩浅水区抬填造地22.7万m²，建成高产良田和生态农业示范区，减少库区淹没引起的社会矛盾，深受库区村民欢迎。

水面光伏，产业扶贫。2017年利用右江鱼梁航运枢纽库区河湾水面，和地方政府合资建设装机容量30 MW水面光伏电站，年利润达1300万元，

利润分配给贫困户，帮助 1 200 个贫困户脱贫奔小康。

3 运行阶段技术问题

3.1 流域水库群实行多维度联合调度提高通航保证率

广西西江流域航道等级提升主要是通过渠化方式实现，维持好各梯级坝前水位和航运基流是实现梯级水位衔接、保证船闸门槛水深和航道通航保证率的基础，并且应避免水库和航道水位大幅度频繁波动。近年来，通过开展流域水库群基于防洪、发电、航运、生态、调水等多个维度的联合调度关键技术研究，编制出台了《西江水库群联合调度规程》^[5]，统一由广西电力调度中心执行。《西江水库群联合调度规程》强化了内河航运功能，保证航运水位和下泄航运基流，提升了船闸和航道的通航保证率。

3.2 运用先进技术加强水工建筑物安全监测

为了提高船闸等水工建筑物安全管理服务水平，避免重大安全事故发生，通过建设船闸等水工建筑物安全监测中心，将安全监测信息和传感器信号集成，实现安全监测信息的实时化和在线化^[6]；同时增加基于高精度北斗定位技术的水工建筑物变形在线监测系统，监测信号实时传输至监测中心，实现安全诊断、预警自动化和智能化，极大提升了船闸等水工建筑物运行安全监控水平。

3.3 建立河段水情预报系统

长洲水利枢纽坝下属天然航道，该航段水位受枢纽下泄流量、桂江和贺江支流流量以及海潮的影响，水情复杂，通过研发枢纽坝下水位测报、预报系统，精准预报坝下航道水位，为船舶合理配载、精准调度船舶过闸和通航提供可靠的依据。

3.4 大力提升航运信息服务水平

通过构建西江航运和物流信息平台，为船东、船运公司、港航管理部门等提供实时的水情、船闸运行、船舶候闸、货种及流向、码头作业情况、货源等信息，方便船舶合理配载和制定航行计划，

提升航运管理部门的服务和监管水平，促进内河水运物流整体运营效率提升和航运效益充分发挥。

3.5 对西江流域船闸群实行联合调度和集中管控

目前西江流域梯级船闸群已经建成投入运行，过闸货运量增长迅速，通过北斗导航、云技术、大数据、先进感知等信息技术赋能，研发了西江流域船闸群联合调度和智能管控平台，对分属不同业主的 12 个梯级枢纽和 17 座船闸成功实现了联合调度和集中管控，其中 8 座船闸实现了远程操作，现场无人值班，过闸船舶实现不停船、不离船报闸和缴费、“一次报闸全线通过”，大幅提升了通航效率和服务水平。

4 结语

1) 船闸作为内河航道控制性节点，只有系统解决好前期规划、建设和运行阶段的重点技术问题，才能促进内河航运资源航运功能的充分发挥，实现内河航运效益最大化。

2) 本文成果可为广西西江流域乃至全国内河梯级船闸的规划、建设及运行管理各阶段重要技术方案的选择和确定提供启示和帮助。

参考文献：

- [1] 黄伦超,陶桂兰.渠化工程学[M].2 版.北京:人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [2] 中华人民共和国交通运输部.中交水运规划设计院: JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社, 2001.
- [3] 重庆交通大学, 交通运输部水运科学研究院, 中交水运规划设计院有限公司, 等.中国内河通航建筑物[M].北京:人民交通出版社股份有限公司, 2021.
- [4] 交通部珠江航务管理局.珠江航运史[M].北京:人民交通出版社, 1998.
- [5] 广西西江开发投资集团有限公司.西江水库群联合调度规程[R].南宁:广西西江开发投资集团有限公司, 2011.
- [6] 宋向群,王文渊.水运工程施工[M].2 版.北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.

(本文编辑 王璁)