



百色水利枢纽通航设施建设工程设计方案^{*}

姜兴良^{1,2}, 汪磊³, 刘建超¹

(1. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;
2. 中交集团内河水运建设技术研发中心, 北京 100007; 3. 百色枢纽通航投资有限公司, 广西 百色 533000)

摘要: 百色水利枢纽最大通航水头为 113.80 m, 上游库区水位变幅大, 下游右江水位变化速率快, 航运用水会对枢纽发电效益产生影响, 建设通航设施面临高水头通航、节约水资源、降低对已建设设施安全与运行影响等技术难题, 建设方案应实现高效通航、运行可靠、维护便利、投资经济等多重目标协同效果最优。百色水利枢纽通航设施工程采用船闸与升船机组组合方案、升船机与升船机组组合方案、单级升船机方案和多级船闸方案进行技术经济比选, 推荐船闸与升船机组组合方案, 其发挥了船闸适应大水位变幅和升船机提升高度大、过闸时间短的技术优势, 并对升船机形式进行比选, 推荐的船闸与全平衡卷扬式垂直升船机组合方案能够实现高效通航、运行可靠等建设目标。为实现高坝通航提出了新思路, 对类似工程建设及规范修编具有积极的借鉴意义。

关键词: 升船机; 船闸; 通航线路; 平面布置

中图分类号: U643.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0123-07

Construction plan for navigation facilities of Baise hydropower station

JIANG Xingliang^{1,2}, WANG Lei³, LIU Jianchao¹

(1. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
2. Research and Development Center on Inland Navigation Construction Technology, CCCC, Beijing 100007, China;
3. Baise Hub Navigatigon Investment Co., Ltd., Baise 533000, China)

Abstract: The maximum navigable head of Baise hydropower station is 113.80 m. The water level of the upstream reservoir varies greatly, while the water level of the downstream Youjiang changes rapidly. The construction of navigation facilities is faced with such technical problems as navigation at high water head, saving water resources and reducing the influence on the safety and operation of the built facilities. The construction scheme should achieve the optimal coordination effect of multiple objectives, such as high-efficient navigation, reliable operation, convenient maintenance and economic investment. For the navigation facilities of Baise hydropower station, the combination of lock and ship lift, ship lift and ship lift, single-stage ship lift and multi-stage ship lock are adopted for technical and economic comparison. The combination scheme of ship lock and ship lift is recommended, which gives full play to the technical advantages of ship lock adaptation to large water level amplitude variation, large lifting height of ship lock and short time for ship lock passage. We compare and select the types of ship lift. The proposed combination scheme of ship lock and fully balanced vertical ship lift can achieve the construction objectives of efficient navigation and reliable operation. This paper puts forward a new idea for realizing high dam navigation, which has positive reference significance for the construction of similar projects and the revision of codes.

Keywords: ship lift; ship lock; navigation route; plan layout

收稿日期: 2023-09-04

***基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFC3206100); 北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会科技服务
品牌机构发展基金项目(20230467193)

作者简介: 姜兴良 (1983—), 男, 正高级工程师, 从事港航工程咨询设计及项目管理工作。

船闸和升船机是最常见的通航建筑物，船闸工程具有适应大水位变幅、通过能力大、技术成熟、运行可靠等优势，在苏鲁浙等平原地区普遍采用船闸通航。升船机相对于船闸具有提升高度大、基本不耗水、过闸时间短等优势，在红水河岩滩、金沙江向家坝等高山峡谷地区建设通航设施工程时应用较多^[1]。单级船闸水头超过 30.00 m 时，输水系统较为复杂，输水时间较长。升船机承船厢运行时的允许误载水深值宜小于 0.15 m，对接工况的误载水深受上下游水位变率、电站机组调峰和泄水流量变化影响非常显著，对接停留时间较长，通过能力受到限制^[2]。

百色通航设施工程最大通航水头为 113.80 m，上游库区水位变幅为 25.00 m，下游受东笋电站和泄水闸泄流影响，水位变化速率约 1.50 m/h，采用单一船闸或升船机方案，难以实现高效通航。建设方案充分利用那禄沟地形特点，采用船闸和升船机组合式方案，发挥船闸适应大水位变幅的优势和升船机提升高度大、过闸时间短的优势，有效提升整个通航设施的通过能力。现行规范中尚缺少该类组合式通航设施的布置要求，关于组合式通航设施的研究案例也较为有限。百色水利枢纽工程通航设施建设方案对类似项目建设具有借鉴意义。

1 项目概况

百色水利枢纽工程位于右江上游，是广西三

大防洪控制性工程之一，开发任务以防洪为主，兼顾发电、灌溉、航运、供水等综合利用功能。建设内容包括全断面碾压混凝土主坝、地下式发电厂房、银屯土石副坝、香屯均质土坝及通航建筑物等^[3]。枢纽工程分两期建设，一期工程建设主坝、发电厂房、2 座副坝及位于库区的上游靠船墩，于 2001 年 12 月开工建设，2006 年 7 月首台机组并网发电。通航设施为二期工程，根据地形条件，利用两山之间的那禄沟建设通航设施，连通百色枢纽库区和东笋电站下游实现通航。设计代表船型为 2×500 吨级船队和 1 000 吨级单船。上游最高通航水位 228.00 m，最低通航水位 203.00 m；下游最高通航水位 120.04 m，最低通航水位 114.40 m。上游库区通航水位变幅为 25.00 m，下游航道航水位变幅为 5.64 m，最大通航水头为 113.80 m。根据航运发展需要，于 2021 年开工建设，货运量为 600 万 t/a^[4]。

2 通航线路选择

根据地形条件，为减少土石方开挖和边坡支护工程量，应尽可能利用现状右江河道或选择低洼地形进行局部开挖形成航道。初拟线路方案 1 利用两山之间的那禄沟建设通航设施，连通百色枢纽库区和东笋水电站下游实现通航。方案 2 在主坝和东笋水电站分别建设通航设施，利用现状右江通航。线路方案见图 1。从开挖工程量、通航条件等方面进行线路方案比选，见表 1。



图 1 枢纽总体布置

表1 线路方案比选

方案	开挖工程量	通航条件	对已建设施影响	边坡工程	施工难度	运行管理	工程投资/亿元
1 虽已利用那禄沟,开挖量较方案2多15万m ³	与电站相对独立,不受百色电站调峰影响;主坝泄洪对通航无直接影响	对东笋电站运行控制有一定要求	那禄沟两侧边坡需采用锚固措施,工程量较大	远离已建设施,约束条件少,施工便利	与电站相对独立,运行管理方便		50
2 对右江航道进行疏挖整治,开挖量相对小	电站调峰和主坝泄洪对通航条件影响明显	需对主坝和主坝至东笋电站间的2座桥梁进行改建;需调整百色电站、东笋电站运行规则,以满足通航水流条件要求	对边坡稳定性影响小,边坡加固工程量小	爆破施工对周边设施运行有一定影响,需采取防护措施,施工难度较大	百色电站运行对通航设施的水流条件影响明显,需联合调度,控制程序相对复杂		49

方案1和2各有优势和不足,考虑百色水利枢纽的重要性、百色通航设施高效通航需求、通航设施建设对枢纽运行影响的不确定性,以及两个方案投资额相差不大的情况,推荐通航条件较优、对已建百色水利枢纽工程影响小的方案1。

3 通航建筑物设计方案

单级船闸适应的通航水头通常不超过40.00 m,但采用多级船闸时则不受水头的限制。升船机多用来解决高坝通航问题。本工程属高坝通航,最大通航水头113.80 m,多级船闸、升船机两种形式以及船闸与升船机的组合均可实现过坝功能。考虑4个方案,并根据地形地质、通航条件、工程投资等因素进行比选确定。

3.1 船闸和升船机组合方案

百色水利枢纽工程最低通航水位为203.00 m,那禄沟底高程为190.00~210.00 m,地形条件有

利于将通航建筑物分2级布置。在那禄沟上游与水库衔接处布置第1级通航建筑物,用于解决水库水位变幅问题;在下游七星滩尾左岸的山坡上布置第2级通航建筑物,解决其余水头问题。第1级通航建筑物水头25.00 m,采用单级船闸经济性较好;第2级通航建筑物水头88.80 m,采用垂直升船机,即船闸与升船机组合方案1。

方案1通航设施由省水船闸、中间渠道、挡水土坝、通航渡槽及其挡洪检修闸、垂直升船机组成,线路全长约4 245 m。船闸布置于银屯沟与那禄沟的分水岭处,上游为百色水库,下游接中间渠道,设计最大通航水头25.00 m。中间渠道沿那禄沟布置,长约2 130 m,在那禄左沟设挡水土坝。通航渡槽布置于升船机上游引航道和上闸首之间,长约50 m。升船机布置于七星滩尾左岸的山坡上,设计最大提升高度88.80 m,下游引航道出口距东笋电站约2 km,见图2。

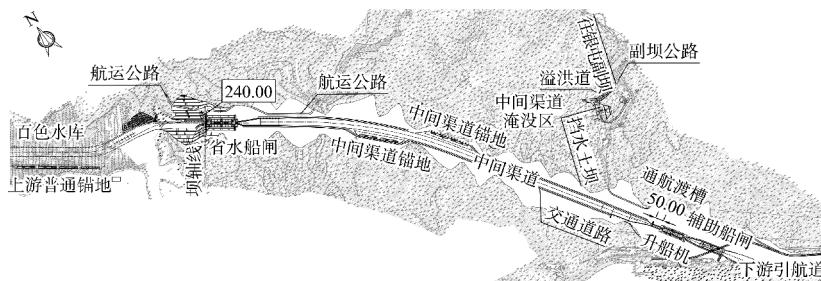


图2 船闸和升船机组合方案平面布置(单位: m)

船闸上闸首两侧的挡水坝组成挡水前沿,考虑坝顶交通需要,靠上游侧悬挑长3.00 m的牛腿做为交通道路,坝顶高程取与上闸首前沿顶高程相同为240.00 m。挡水前沿宽156.50 m,其中

上闸首前沿宽50.00 m,左、右岸重力坝段各长53.25 m。坝顶宽度为15.75 m。

3.2 升船机和升船机组合方案

通航建筑物分2级布置,均采用垂直升船机

形式。第 1 级升船机布置于银屯沟与那禄沟的分水岭处, 上游为百色水库, 下游接中间渠道, 设计最大提升高度 25.00 m。中间渠道沿那禄沟布置, 长约 2 220 m, 在那禄沟左沟设挡水土坝。通航渡槽布置于第 2 级升船机上游引航道和第 2 级升船机上闸首之间, 长约 50 m。第 2 级升船机布置于七星滩尾左岸的山坡上, 设计最大提升高度 88.80 m, 下游引航道出口距百色主坝约 7 km^[5],

见图 3。

第 1 级升船机上闸首和两侧的挡水坝组成挡水前沿, 考虑到坝顶交通方便, 取坝顶高程 240.00 m 与上闸首闸顶高程齐平。挡水前沿宽 162.50 m, 其中上闸首前沿宽 40.50 m, 左、右岸重力坝段各长 61.00 m。坝顶宽度为 11.00 m, 根据上闸首交通布置要求, 靠上游侧悬挑长 3.00 m 的牛腿做为交通道路。

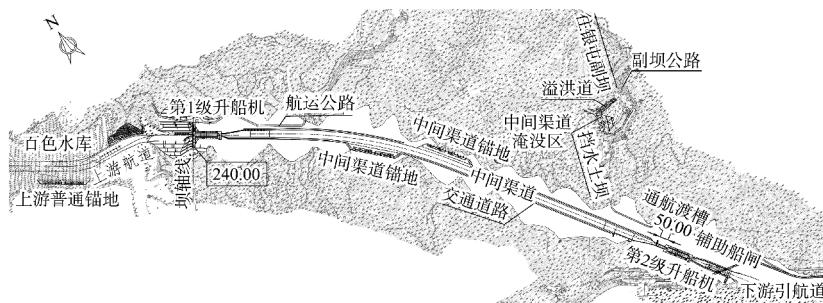


图 3 升船机和升船机组合方案平面布置 (单位: m)

3.3 单级升船机方案 3

升船机布置于七星滩尾左岸的山坡上, 两侧为挡水坝, 采用单级升船机提升高度为 113.80 m, 船舶经过 1 次提升即可过坝。为满足水库挡水要求, 设于那禄沟左汊的土坝, 坝顶高程为 235.50 m。那

禄沟的雨水直接汇入水库无需外排, 土坝处也无需设置溢洪道。方案 3 通航设施由上游航道、上游引航道、挡水重力坝、通航渡槽、垂直升船机、辅助船闸、下游引航道及挡水土坝组成, 线路全长约 3 730 m, 见图 4。

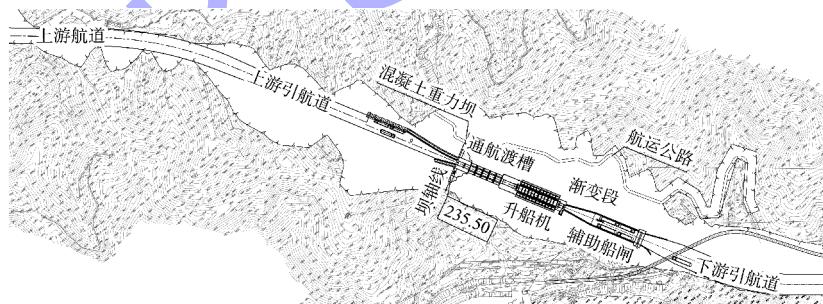


图 4 单级升船机方案平面布置 (单位: m)

3.4 多级船闸方案 4

多级船闸分为连续布置和分散布置两种形式。连续布置的优点是建筑物布置集中, 船闸线路较短, 工程量和耗水量较省, 运行管理方便; 主要缺点是船闸结构的技术难度较大, 在建设单线船闸的情况下, 船闸的运行调度不够灵活、过闸时间长、通过能力低。分散布置的优点是每级船闸仍相当于单级船闸, 结构相对简单, 船闸的运行

调度较灵活; 主要缺点是船闸之间设置错船的中间渠道, 大大增加了通航线路长度, 在枢纽中布置的难度和工程量相对较大, 受充泄水流影响, 中间渠道的通航条件较为复杂, 建筑物布置分散, 运行管理相对不便。

工程设计最大通航水头为 113.80 m, 如采用分散布置, 需分为 3~4 个梯级, 将导致线路过长, 那禄沟的线路长度无法满足要求; 分散布置需要

通航线路上有逐级降低的地形条件, 否则开挖与边坡支护工程量巨大。工程推荐的那禄线路方案中, 那禄沟底高程为 190.00~210.00 m, 与百色水利枢纽库区最低通航水位 203.00 m 接近, 地形条件有利于将通航建筑物分 2 级布置, 在那禄沟上游与水库衔接处布置单级船闸用于解决水库水位变幅问题, 在下游七星滩尾左岸的山坡上布置多级船闸解决其余水头问题。综上分析, 多级船闸考虑 1 级+连续 3 级布置方案。

方案 4 在船闸和升船机组合方案的基础上, 采用 3 级船闸替代升船机。下游连续 3 级船闸布

置于七星滩尾左岸的山坡上, 船闸线路总长约 1 836 m, 设计最大总水头 88.80 m, 级间最大工作水头 60.00 m, 下游引航道出口距上游东笋电站约 730 m。为减少水库耗水、节约水资源, 同时降低输水阀门工作水头, 采用省水型船闸, 每级闸室均带有 3 级省水池, 最大工作水头降为 24.00 m, 可节水 60%。由于连续多级船闸通航效率较低, 且省水运行模式进一步加长了闸室充泄水时间, 为满足过坝货运量需求, 船闸有效尺度取 200 m×23 m×4.70 m(有效长度×有效宽度×门槛水深), 见图 5。

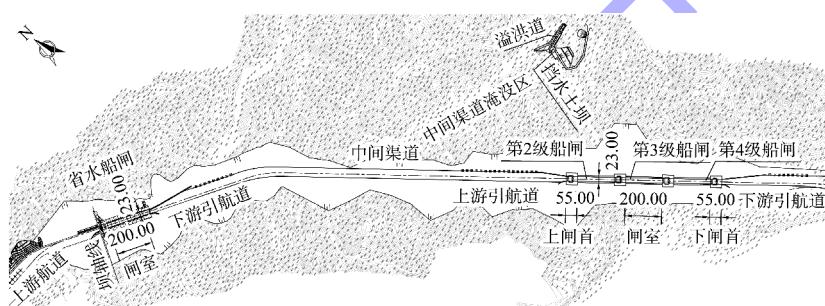


图 5 多级船闸方案平面布置 (单位: m)

3.5 方案比选

方案 1(船闸+升船机组合方案)的主要优点为船闸规模小, 水头为 25.00 m, 升船机最大提升高度为 88.80 m, 船闸和升船机技术成熟可靠; 中间渠道和渡槽保持 4.20 m 的恒定水深, 建设相对简单; 总投资最少, 技术风险最低, 金结设备较少, 后期维护费用较低。

方案 2(两级升船机方案)的主要优点是升船机基本不耗水, 主要缺点为第 1 级升船机提水高度仅 25.00 m, 金结及机电设备投资比例较高, 经济不合理; 另外当库水位变化时, 需调整第 1 级升船机工作门位置或增减叠梁门来满足通航要求, 作业环节多, 运行不方便; 金结设备多不利于后期维护。

方案 3(单级升船机方案)具有建筑物少、布置集中、金结设备少、后期管理简单的优点, 船舶 1 次过闸, 运行环节少, 船舶过闸总历时最短,

升船机运行基本不耗水; 但库区航道开挖工程量大, 且库区航道岸坡稳定性、主体段开挖高边坡稳定性以及建于高边坡上的挡水坝、渡槽、上闸首的安全稳定问题较突出; 当库水位变化时, 需调整工作门位置或增减叠梁门来满足通航要求, 作业环节多, 运行不便; 另外金结设备技术难度大, 投资较高。

方案 4(1 级船闸+连续 3 级船闸方案)运行可靠性高, 但连续布置的船闸工程输水系统及省水池布置复杂, 开挖和弃渣工程量大; 船舶过坝受换向影响, 船舶过坝总历时最长; 为满足货运需求, 闸室需要满足 1 次通过 2 个船队的要求, 加大了船闸的规模, 耗水量大; 工程投资最高, 且弃渣困难将导致投资进一步增加。

综合考虑上述因素, 推荐方案 1 作为实施方案, 见表 2。

表 2 通航建筑物设计方案比选

方案	有效尺寸/ (m×m×m)	单向通 过能力/ (万 t·a ⁻¹)	金属结构	边坡安全	工程挖 方量/ 万 m ³	对百色水利 枢纽的影响	工程 总投资/ 亿元
1	船闸 130×12×4.70 升船机 130×12×3.90	602	1 套升船机设备, 1 套船闸设备, 设备数量中等, 制造运输难度小, 金结设备投资 8.28 亿元	最大边坡高度 10 m, 边坡安全问题较小	2 088	船闸运行耗水, 每年减少发电收益 804 万元	47.00
2	升船机 130×12×3.90	602	2 套升船机设备, 设备多, 制造运输难度中等, 金结设备投资 13.74 亿元	最大边坡高度 10 m, 边坡安全问题较小	2 088	中间渠道的蒸发、渗漏 需从水库引水补充, 但水量很小	53.07
3	升船机 130×12×3.90	663	1 套升船机设备, 设备量较少, 但制造运输难度大, 金结设备投资 8.75 亿元	最大边坡高度 56 m, 边坡安全问题较大	2 746	基本不耗水	52.78
4	船闸 200×23×4.70	707	4 套船闸设备, 设备制造难度小, 数量中等, 金结设备投资 5.43 亿元	最大边坡高度 196 m, 边坡安全问题非常大	3 950	船闸运行耗水, 采用省水船闸, 每年减少发电收益 2 013 万元	63.98

4 升船机形式选择

根据项目特点, 选取全平衡卷扬式、水力式

与齿轮齿条爬升式共 3 种升船机形式进行技术经济比选, 见表 3。

表 3 升船机方案主要技术经济指标比选

升船机 形式	承船厢 有效尺寸/ (m×m×m)	辅助 船闸	日平均 过闸次数/ 次	单向通 过能力/ (万 t·a ⁻¹)	耗水影响	能耗	金属结构	工程 投资/ 亿元	工程 总投资/ 亿元
全平衡 卷扬式	130×12×3.90	有	省水船闸 34.89, 升船机 36.46	省水船闸 650, 升船机 602	升船机不耗水, 省水 船闸平均耗水量 5.10 m ³ /s, 减少发电 收益 804 万元/a	全平衡式只需克服系 统摩擦力, 节能环保, 年运行电费 180 万元	8.28	47.00	
水力式	130×12×3.90	无	船闸 35.70, 升船机 41.41	船闸 665, 升船机 558	耗水量大, 平均耗水 量为 16.10 m ³ /s, 减 少发电收益 2536 万 元/a	采用水力提升, 基本 不耗电, 但耗水量大	12.34	51.73	
齿轮齿 条爬升 式	130×12×3.90	有	省水船闸 34.89, 升船机 36.46	省水船闸 650, 升船机 602	升船机不耗水, 省水 船闸平均耗水量 5.10 m ³ /s, 减少发电 收益 804 万元/a	齿轮齿条爬升式只 需克服系统摩擦力, 节能环保, 年运行电 费 180 万元	17.22	58.20	

全平衡卷扬式垂直升船机工程造价低, 已建工程案例多, 技术相对较成熟, 对土建施工精度要求不高、施工难度小、节能环保、运行费用低。由于下游辅助船闸内可错船设计, 船舶通行效率高、通过能力较大。

水力式垂直升船机船厢下水对下游水位变幅适应性好, 省去下闸首及下游辅助船闸, 过闸流程相对简单, 机电设备简化; 缺点是耗水量大, 承船厢水中运行速度较慢, 通过能力较小。与工

程同等水头和规模的水力式升船机尚无先例, 且对高水头输水系统和竖井的水力学、承船厢运行和准确停位控制等关键技术问题认识不足。

齿轮齿条爬升式垂直升船机安全性相对较高, 节能环保; 缺点是对土建施工精度要求高、施工难度大, 螺母柱金属结构件生产制造难度大、造价高, 后期维修维护成本高。

经综合比选, 推荐采用全平衡卷扬式垂直升船机形式。

5 结论

1) 通航线路应选择在泄水建筑物泄流对通航水流条件影响小的河段, 且充分利用地形低洼优势, 减少土石方开挖工程量, 同时应尽可能降低对已建枢纽调度运行的影响。

2) 船闸与升船机组合方案可发挥船闸适应大水位变幅、升船机提升高度大、过闸时间短的优势, 有效提升整个通航设施的通过能力; 中间渠道和渡槽保持恒定水深, 建设运行简单, 技术风险最低。

3) 升船机形式应根据通过能力、水资源条件、能源供给条件、工程建设与运营投资等因素综合确定。

(上接第 41 页)

完善千亿临港产业布局, 大力发展临港物流、临港制造和智能制造服务业, 为武汉经开区创造新的经济发展引擎; 积极发展江海联运、铁水联运, 打通国内、国际货运通道, 建设武汉西南国际物流枢纽; 完善城区居住、商业、公服配套, 提供生活服务和人才支撑保障, 进一步促进港口和园区发展。

参考文献:

- [1] 杨明俊, 林坚, 李延成. 港城模式与港口城市发展战略探讨: 以潍坊滨海经济开发区为例 [J]. 城市规划, 2010, 34(4): 80-85.
- [2] 王飞. 港产城一体化模式下的大连皮杨黄海新城发展战略研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
- [3] 李嘉靖. 新港临港产业园发展与规划提升路径: 以广西北部湾经济区龙港新区为例 [J]. 交通企业管理, 2021,

(上接第 122 页)

- [6] 沈菊燕, 周灿, 汪宏. 浮式系船柱槽浇筑力学性能分析 [J]. 水运工程, 2022(7): 211-216, 234.
- [7] 刘明维, 曾丽琴, 齐俊麟, 等. 船闸浮式系船柱受力状态数值模拟 [J]. 水运工程, 2020(12): 112-117.
- [8] 刘明维, 王钟浩, 吴林健, 等. 船闸浮式系船柱系缆安全监测方法研究 [J]. 水运工程, 2023(3): 85-91.
- [9] 孙刘林, 李海洋, 杜永春. 船闸浮式系船柱系缆桩动态拉力测量技术研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2022, 22(8): 67-69, 109.

参考文献:

- [1] 胡亚安, 李中华, 李云, 等. 中国大型升船机研究进展 [J]. 水运工程, 2016(12): 10-19.
- [2] 水利部水利水电规划设计总院, 长江勘测规划设计研究院. 升船机设计规范: GB 51177—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [3] 陆民安, 罗继勇, 卢义群. 百色水利枢纽主要工程特点及创新 [J]. 广西水利水电, 2014(5): 19-29.
- [4] 中水珠江规划勘测设计有限公司. 广西百色水利枢纽过船设施工程可行性研究报告 [R]. 广州: 中水珠江规划勘测设计有限公司, 2020.
- [5] 赖耀琪. 百色水利枢纽通航建筑物布置及两级垂直升船机结构设计 [J]. 人民珠江, 1997(6): 36-39, 63.

(本文编辑 赵娟)

- [36(4): 55-57.]
- [4] 黄珺仪, 于敏. 辽宁临港产业集群创新发展路径研究: 以丹东市临港高新技术产业园区为例 [J]. 辽东学院学报(社会科学版), 2016, 18(4): 50-56.
- [5] 张春圆. 天津临港经济区产业集群发展与土地集约利用研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [6] 秦倩茜. 基于“人-居-业”视角的大城市郊区新城空间布局研究: 以上海临港新城地区为例 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [7] 吴晓磊, 刘健, 王嘉琦. 港产城融合发展关键问题研究 [J]. 水运工程, 2022(2): 70-75, 111.
- [8] 孙国东. 从不同视角看港产城融合发展关系 [J]. 交通企业管理, 2018, 33(4): 4-5.
- [9] 何英, 熊巧. 武汉经济技术开发区多式联运发展策略 [J]. 综合运输, 2018(10): 118-121.

(本文编辑 王传瑜)

- [10] 汪益兵, 吴剑锋, 陈亚飞, 等. 船舶系缆柱静力学响应的数值模拟及分析 [J]. 中国航海, 2015, 38(2): 87-91.
- [11] 尹斌勇, 张虎, 刘虎英. 湘江长沙综合枢纽船闸新型浮式系船柱应用及特点 [J]. 湖南交通科技, 2020, 46(3): 150-153.
- [12] 杨元平, 曹颖, 杨利, 等. 阀下变动水位的船闸输水力学计算 [J]. 水科学进展, 2017, 28(1): 76-85.

(本文编辑 赵娟)