



多种通航建筑物组合布置的通过时间研究

董霞, 赵凯, 吕小龙, 张震

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 山区航道高水头通航建筑物多采用船闸、升船机、隧洞和中间渠道组合布置的形式。多种通航建筑物组合布置时, 各通航建筑物的通过能力相互制约和影响, 计算较为复杂。结合工程实际, 在通过能力计算中, 分析了通过各建筑物时间的匹配性及其对通航效率的影响, 指出在组合布置通航建筑物时, 应以船闸或升船机 1 次运行时间为基础, 复核计算通航隧洞、辅助闸门等其他通航建筑物的 1 次运行时间是否小于基础时间, 当大于基础时间时, 应合理调整组合形式、布置形式和建设规模, 成果可为类似工程提供参考。

关键词: 船闸; 升船机; 隧洞; 船闸通过能力; 临界航速

中图分类号: U64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0097-08

Transit time of multiple navigation building combination arrangements

DONG Xia, ZHAO Kai, LYU Xiaolong, ZHANG Zhen

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: High head navigation buildings in mountainous waterways are often arranged in combination with ship locks, ship elevators, tunnels, and intermediate channels. Due to the mutual constraints and influences on the carrying capacity of various navigation buildings, their calculations are relatively complex. This article combines engineering practice and analyzes the matching of time passing through various buildings and its impact on navigation efficiency during the calculation of passing capacity. It is pointed out that when arranging navigation buildings in combination, the one-time operation time of the ship lock or ship lift should be used as the basis to recheck and calculate whether the one-time operation time of other navigation buildings such as navigation tunnels and auxiliary gates is less than the basic time. When it is more than the basic time, the combination form, layout form, and construction scale should be reasonably adjusted. The achievements can provide reference for similar projects.

Keywords: lock; ship lift; navigable tunnel; lock capacity; critical speed

山区航道由于水头差较大, 通航建筑物常采用船闸与升船机组合布置的形式, 为减少或避免山体开挖, 穿越山区段航道采用隧洞方案较为经济环保。船闸是常用通航建筑物形式, 工程应用广泛, 升船机在景洪水电站、三峡水利枢纽工程、构皮滩水电站等工程中得到了一些应用。通航隧洞的研究起步较晚, 工程实践经验较少, 目前国

内已建成的通航隧洞只有长约 400 m 的构皮滩水电站, 在建的有百色枢纽通航工程, 沙沱二线船闸、富春江二线船闸和湘桂运河、赣粤运河分水岭通航方案对通航隧洞开展了初步研究。目前, 多种通航建筑物组合布置面临的主要技术问题有: 1) 通航建筑物形式和组合方式的选择; 2) 通航建筑物建设规模的确定; 3) 通航建筑物的总体布

收稿日期: 2023-04-17

作者简介: 董霞 (1979—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事港航工程设计工作。

轴线方向投影长 66.8 m, 停泊段长 84 m。下游引航道左侧主导航墙为 1:6 的直线, 沿船闸轴线投影长 135.9 m, 停泊段长 120 m; 右侧主导航墙长 126.1 m, 与现有护岸相连。在坝坨河右岸设长度为 120 m 的停泊段, 起点距下闸首 334.4 m。为维持升船机运行装置对接时水位稳定, 在下闸首下游约 583.5 m 设置 2 扇辅助闸门, 并在下游右侧布置长 120 m 停泊段。升船机和下游航道平面布置见图 2。

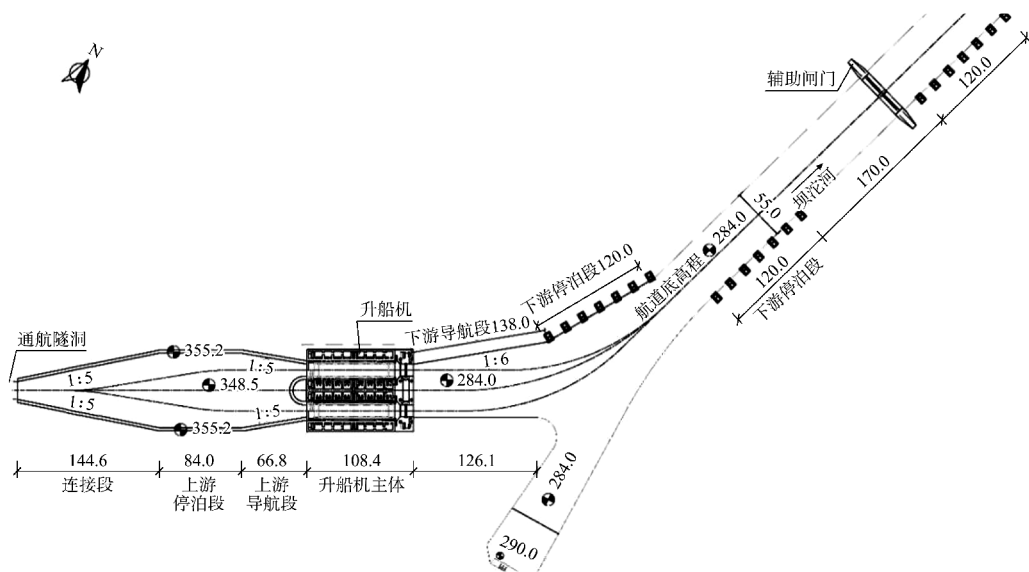


图 2 升船机及下游航道平面布置 (单位: m)

1.4 通过各通航建筑物时间的匹配性对通过能力和通航效率的影响

1.4.1 船型占比

根据运量预测,不同水平年船型艘次占比见表 1。

表 1 不同水平年船舶艘次占比

船舶类型	船舶吨级/t	总长/m	型宽/m	吃水/m	比例/%		
					2030 年	2040 年	2050 年
货船	500	55	10.0	1.8	40	20	0
货船	1 000	57	10.8	2.5	60	80	100

1.4.2 单向 1 次通过船闸和隧洞时间

以下行船舶为例,上闸次船舶已出闸,且上游闸门打开,根据 JTJ 305—2001 船闸总体设计规

范^[9],计算单向 1 次通过船闸和隧洞时间,结果见表 2。沙沱船闸设计水头为 11.5 m,根据沙沱船闸输水系统模型试验研究报告^[7],闸门启闭时间为 3.00 min,灌泄水时间为 8.00 min。设计船型为机动单船,考虑下游引航道与隧洞连接,出闸速度较慢,进出闸速度均取 0.8 m/s。吴澎等在船闸通过能力仿真分析方法中,经过对台儿庄船闸进、出闸现场观测数据的分析,给出船舶进、出闸间隔时间取 2.00 min,本文参照采用。通航隧洞为限制性航道,设计航速不宜大于 2.0 m/s,工程隧洞为曲线隧洞,考虑在隧洞中航行时船舶与隧洞洞壁的安全距离要求和隧洞环境中航行实际操纵的复杂性,隧洞内实际航速取 1.0 m/s。

表 2 单向 1 次通过船闸和隧洞时间

进闸平均速度/ (m·s ⁻¹)	进闸航行 距离/m	单向第 1 个船舶进闸 时间 t ₂ /min	闸门启闭时间 t ₁ /min	灌泄水时间 t ₃ /min	出闸平均 速度/(m·s ⁻¹)	出闸航行 距离/m	单向第 1 个船舶 出闸时间 t ₄ /min
0.8	195	4.06	3.00	8.00	0.8	181	3.77
船舶进、出闸间隔 时间 t ₅ /min	下游引航道与隧洞 连接段长度/m	连接段平均 速度/(m·s ⁻¹)	隧洞 长度/m	隧洞内航速/ (m·s ⁻¹)	过隧洞和连接段 时间 t ₆ /min	双向一次过闸 时间 T ₁ /min	
2.00	133.4	0.8	286.8	1.0	7.56	33.39	

注: T₁ = 2t₁ + t₂ + t₃ + t₄ + 2t₅ + t₆。

1.4.3 升船机单向 1 次过闸时间

沙沱升船机最大提升高度为 64.5 m,根据 GB 51177—2016 升船机设计规范^[8],计算升船机单向 1 次运行总时间和单向 1 次过闸时间分别见

表 3、4。由于承船厢内部的断面系数较小,船舶在进入承船厢时速度会稍缓,厢内设计航速取 0.4 m/s,船舶驶入承船厢前平均速度取 0.8 m/s,驶出承船厢后平均速度取 1.0 m/s。

表 3 升船机单向 1 次运行总时间

抬升/下降 距离/m	承船厢正常 运行速度 $v_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	承船厢正常启、 停加速度 $a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	抬升/ 下降时间 t_1/min	间隙水充或 泄水时间 t_2/min	间隙密封机构 推出或收回 时间 t_3/min	锁定装置推出 或收回时间 t_4/min	对接锁定装置 推出或收回时间 t_5/min	升船机单向 1 次 运行总时间 T_1/min
64.5	0.2	0.01	5.71	1.00	0.75	0.75	0.50	11.71

注： $T_1=t_1+2(t_2+t_3+t_4+t_5)$ 。

表 4 升船机单向 1 次过机时间

驶入承船 厢前长度/ m	驶入承船厢 前平均速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	承船厢 长度/ m	厢内设计 航速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	进闸 时间 t_1/min	承船厢 运行时间 t_2/min	驶出承船 厢后长度/ m	驶出承船厢 后平均速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	出闸 时间 t_3/min	工作闸门 启闭时间 t_4/min	单向 1 次 过机时间 T_2/min
80.2	0.8	76	0.4	4.84	11.71	162.4	1.0	5.87	10.50	32.92

由于上游船闸与下游双线升船机连续布置，隧洞单向行驶，船闸与升船机单向 1 次过闸时间应相互协调，取较大值，即船闸+隧洞+升船机组合布置过闸方案，1 次过闸时间取 33.39 min。

1.4.4 其他参数

考虑天气、船闸检修等停航因素的影响，年通航天数取 330 d，船舶装载系数取 0.85，运量不均匀系数取 1.2。

1.4.5 通过能力计算

在计算船闸通过能力时，需通过船舶过闸排挡确定 1 次过闸平均吨位、1 次闸次船舶数，工程采用基于仿真随机排挡的船闸通过能力计算方法，原理是船闸过闸随机排挡过程等效为二维装箱问题，即将闸室视为 1 个大的矩形，船舶视为小矩形，将船舶放入闸室的过程看作是用小矩形填充大矩形的过程。船闸通过能力计算结果见表 5。

表 5 沙沱二线船闸通过能力计算结果

设计 水平年	1 次过闸平均 吨位/t	1 次过闸时间 T/min	船闸日平均过闸 次数 n	昼夜内非货运 船舶过闸次数 n_0	船闸单向年过闸船舶 总载重吨位 $P_1/\text{万 t}$	船闸单向年过闸 货运量 $P_2/\text{万 t}$
2030	1 600	33.39	39.68	1	1 049	706
2040	1 800	33.39	37.50	1	1 179	793
2050	2 000	33.39	37.50	1	1 310	881

根据工可研究报告，不同设计水平年预测单向最大货运量为 757 万、900 万和 1 000 万吨，一线升船机不同设计水平年通过能力分别为 192 万、210 万和 228 万吨。通过能力满足运量需求，因此所选择的船闸与双线升船机规模及平面布置适宜。

1.4.6 船舶通过辅助闸门运行,对升船机通航效率的影响

为控制下游水位变幅，满足升船机运行需求，在下闸首下游设置辅助闸门。因此在通过能力计算的基础上，还需分析船舶过辅助闸门运行时间与升船机运行时间的匹配性，以及对升船机通航效率的影响，判断辅助闸门设置位置的合理性。

船舶从下游进入升船机关闸门灌水后，辅助闸门可开启过船，升船机提升至上游，船舶出闸、

进闸，再下降至下游，准备泄水开闸门前，辅助闸门需关闭完成。即需复核船舶过辅助闸门进入到停泊段待闸与升船机双向运行 1 次的时间关系，若过辅助闸门时间较短，则不影响升船机运行效率，否则将影响通航效率。

项目下游辅助闸门扬程为 27 m，闸门开启速度为 2.5 m/min，闸门启、闭时间均为 10.8 min。辅助闸门至停泊段起点距离为 290 m，船舶通过辅助闸门航速为 0.8 m/s，1 次过闸船舶艘数为 2 艘，船舶过辅助闸门间隔时间为 2.00 min，辅助闸门 1 次过船运行最短时间为 29.64 min。根据升船机设计规范，计算升船机运行时间为 48.85 min，大于辅助闸门过船运行时间，因此辅助闸门不影响升船机运行效率。

2 富春江二线船闸

2.1 工程概况

富春江水电站位于杭州市桐庐县富春江镇南面的富春江七里垅峡谷出口处, 于 1968 年建成, 枢纽由厂房、鱼道、溢流坝、船闸及两岸挡水坝等建筑物组成, 坝顶高程为 32.16 m, 最大坝高为 47.7 m, 坝轴线长 550 m, 已建一线船闸有效尺度为 300 m×23 m×4.5 m(长×宽×门槛最小水深), 通航 1 000 吨级船舶。方案征集阶段, 设计船型为 2 000 吨级货船, 船舶尺度为 13.8 m×67.6 m×(3.0~3.3)m(长×宽×水深), 兼顾 2 000 吨级海河联运船型, 船舶尺度为 16.2 m×86.5 m×3 m(长×宽×水深), 150 TEU 集装箱船, 船舶尺度为 15.8 m×88 m×(3.0~3.4)m(长×宽×水深)。

2.2 二线船闸方案

枢纽坝址处左岸为富春江镇, 右岸为高山, 枢纽位于富春江—新安江风景名胜区, 为减少对城镇和风景区的影响, 减少土方开挖, 在方案竞

赛阶段, 结合地形条件, 方案征集^[9]阶段布置了船闸+直线隧洞方案和船闸+曲线隧洞方案进行比选。

2.2.1 船闸+直线隧洞方案

二线船闸布置在大坝下游枢纽右岸平地区域, 船闸上闸首距坝轴线约 900 m, 船闸中心线与一线船闸中心线夹角约为 15°, 隧洞入口位于枢纽上游, 距坝轴线距离约为 730 m, 隧洞出口位于枢纽下游, 距坝轴线距离约 400 m。线路全长约 2.6 km, 其中通航隧洞长约 1.3 km。

船闸有效尺度为 230 m×34 m×5.6 m(长×宽×门槛最小水深), 上游引航道采用曲进直出的进出闸方式, 导航段为 1:5 的直线, 沿船闸轴线方向投影长 159.5 m、停泊段长 230 m、引航道底宽 74 m, 与隧洞衔接段坡比为 1:5, 衔接段轴线投影长 122.5 m。下游引航道受地形限制, 采用折线形布置, 导航调顺段长 350.5 m、停泊段长 230 m、引航道底宽 90 m, 见图 3。

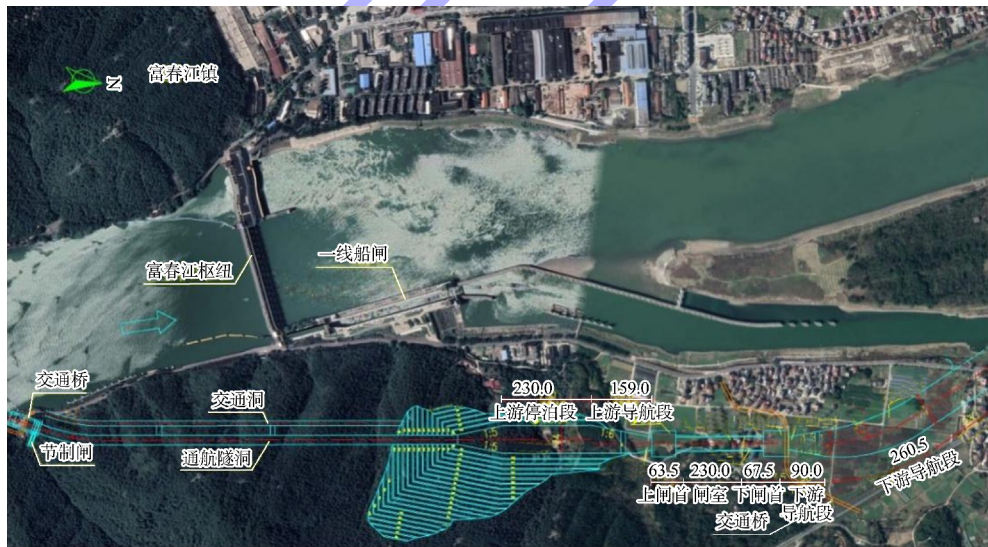


图 3 船闸+直线隧洞方案平面布置 (单位: m)

2.2.2 船闸+曲线隧洞方案

二线船闸布置在大坝下游枢纽右岸平地区域, 船闸上闸首距坝轴线约 900 m, 船闸中心线与一线船闸中心线夹角约为 15°, 隧洞入口位于枢纽上游, 距坝轴线距离约 1.1 km, 隧洞出口位于枢纽下游, 距坝轴线水平距离约 650 m。线路全长约 3.2 km, 其中通航隧洞长约 2.0 km。

船闸有效尺度为 230 m×34 m×5.6 m, 船闸采用反对称布置形式, 上下游引航道均采用曲进直出的进出闸方式, 主导航墙为 1:5 的直线, 导航调顺段沿船闸轴线方向投影长 159.5 m、停泊段长 230 m、引航道底宽 74 m。上游引航道与隧洞衔接段坡比为 1:5, 衔接段轴线投影长 122.5 m。通航隧洞转弯半径 1 200 m, 见图 4。



图 4 船闸+曲线隧洞方案平面布置 (单位: m)

2.3 通过各建筑物时间的匹配性对建设规模和通航效率的影响

船闸与通航隧洞组合布置方案,当通过隧洞的时间大于船闸过闸时间时,过闸时间由通过隧洞时间控制,影响通航效率,因此在计算船闸通过能力之前,需先进行船闸过闸时间与通过隧洞时间的匹配性分析。

从上行船舶开始出闸通过通航隧洞至下行船舶通过隧洞准备进船闸,其运行时间为双向通航 1 次通过隧洞时间。从下行船舶准备进闸至上行船舶准备出闸的过闸时间,为双向 1 次过闸时间。

2.3.1 双向 1 次过闸时间

根据船闸总体设计规范,计算双向 1 次过闸时间,船闸+直线隧洞方案计算结果见表 6、7。富春江二线船闸设计水头为 20.7 m,根据相近水头设计船闸经验,闸门启闭时间取 4.00 min,灌泄水时间取 12.00 min。上游引航道与隧洞连接,进闸速度较慢,进闸速度取 0.8 m/s;两个方案一、二线船闸出闸船舶在下游引航道下游交汇,且直线隧洞方案,下游引航道采用曲进曲出进出闸方式,出闸速度较缓慢,出闸速度取 1.2 m/s。根据富春江二线船闸方案征集报告,2035 年和 2050 年 1 次过闸船舶艘次分别为 7.6 艘和 5.7 艘。

表 6 2035 年下行船舶单向 1 次过闸时间

闸门启闭时间 t_1/min	进闸平均速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	进闸航行距离/ m	单向第 1 个船舶进闸时间 t_2/min	灌泄水时间 t_3/min	出闸平均速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	出闸航行距离/ m	单向第 1 个船舶出闸时间 t_4/min	相邻船舶进、出闸间隔时间/min	1 次过闸船舶艘数/艘	出闸间隔时间 t_5/min	单向 1 次过闸时间 T_1/min
4.00	0.8	456.5	9.51	12.00	1.2	648	9.00	2.00	7.6	15.20	68.91

注: $T_1=2t_1+t_2+t_3+t_4+2t_5$ 。

表 7 2035 年上行船舶单向 1 次过闸时间

闸门启闭时间 t_1/min	进闸平均速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	进闸航行距离/m	单向第 1 个船舶进闸时间 t_2/min	灌泄水时间 t_3/min	相邻船舶进、出闸间隔时间 t_5/min	1 次过闸船舶艘数/艘	出闸间隔时间	单向 1 次过闸时间 T_1/min
4.00	0.8	648	13.50	12.00	2.00	7.6	15.20	48.70

注: $T_2=2t_1+t_2+t_3+t_4$ 。

由表 6、7 可知, 2035 年双向 1 次过闸时间为 117.61 min, 2050 年 1 次过闸船舶艘数为 5.7 艘, 求得 2050 年双向 1 次过闸时间为 106.21 min。

2.3.2 双向 1 次过隧洞时间

上游引航道与隧洞连接段, 船舶通航速度

较缓, 航速取 0.8 m/s。下行船舶, 从上游锚地启动, 进入隧洞前船舶需经过加速、匀速和减速运行过程, 考虑到该航段水域较开阔, 航速取 1.4 m/s。直线隧洞方案单向 1 次过隧洞时间计算见表 8、9。

表 8 2035 年上行船舶 1 次过隧洞时间

出闸距离/ m	出闸速度/ (m·s ⁻¹)	出闸时间 t ₁ /min	相邻船舶进、出闸间隔 时间/min	1 次过闸船舶艘数 (艘)	出闸间隔时间 t ₂ /min	连接段长度/ m	连接段航速/ (m·s ⁻¹)	通过连接段时间 t ₃ /min	隧洞长度/ m	隧洞内航速/ (m·s ⁻¹)	过隧洞时间 t ₄ /min	隧洞 1 次过闸时间 T ₁ /min
456.5	1.2	6.34	2.00	7.6	15.20	122.5	0.8	2.55	1 330	1.15	19.28	43.37

表 9 2035 年下行船舶 1 次过隧洞时间

上游锚地至隧洞口 距离/m	航行速度/ (m·s ⁻¹)	航行时间 t ₁ /min	相邻船舶进、出闸间隔 时间/min	1 次过闸船舶艘数 (艘)	出闸间隔时间 t ₂ /min	隧洞和上游引航道连接段 长度/m	上游停泊段长/ m	连接渡航速/ (m·s ⁻¹)	通过连接段和停泊段时间 t ₃ /min	隧洞长度/ m	隧洞内航速/ (m·s ⁻¹)	过隧洞时间 t ₄ /min	隧洞 1 次过闸时间 T ₂ /min
1 020	1.4	12.14	2.00	7.6	15.20	122.5	230	0.8	7.34	1 330	1.15	19.28	53.96

由表 8、9 可知, 2035 年双向 1 次过隧洞时间为 97.33 min, 2050 年 1 次过闸船舶艘数为 5.7 艘, 求得双向 1 次过隧洞时间为 89.73 min。

2.3.3 过闸时间与通过隧洞时间匹配性分析

按上述方法计算船闸+曲线隧洞方案。两方案不同水平年双向通航过隧洞和过闸时间计算结果见表 10

表 10 过隧洞与过闸时间对比

通航建筑物方案	双向通航过闸 时间/min		双向通航过隧洞 时间/min	
	2035 年	2050 年	2035 年	2050 年
船闸+直线隧洞方案	117.61	106.21	97.33	89.73
船闸+曲线隧洞方案	111.10	99.70	106.10	98.50

由表 10 可知, 不同水平年船闸+直线隧洞和船闸+曲线隧洞方案通过隧洞时间均小于船闸过闸时间, 不影响通航效率。为满足通航效率要求, 直线和曲线隧洞方案, 隧洞航速分别取 1.15 和 1.48 m/s, 可见曲线隧洞方案要求隧洞内航速更高。

2.3.4 隧洞尺度拟定

隧洞为封闭式水域, 出于安全航行等因素考虑, 船舶宜以满足 2 m/s 的设计航速来确定断面系数与开挖断面, 从而达到运输经济性与工程投资的合理平衡。关于断面系数和船舶临界航速的关

系, 采用目前国际上比较认可的美国陆军工程兵团 (USACE)^[10] 公式计算:

$$v_{lim}=\sqrt{gh} \cdot \sqrt{8 \cos ^3\left[\frac{\pi+\arccos \left(1-A_s / A_c\right)}{3}\right]}$$
(1)

式中: v_{lim} 为临界航速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; h 为通航水深, m; A_s 为船舶设计吃水时的舢横剖面浸水面积, m²; A_c 为过水断面面积, m²。

通航隧洞可看作是与船闸类似的狭窄形航道, 通航水深可参照规范取门槛最小水深, 初拟隧洞设计水深不小于上闸首门槛水深 5.28 m。根据 USACE 计算公式, 通航隧洞宽度取 25 m, 水深 5.6 m 时, 断面系数为 2.53, 计算临界航速为 2.09 m/s。考虑船舶发动机功耗等因素, 船舶的设计航速一般不超过临界航速的 80%, 取 0.8 倍, 为 1.67 m/s, 实际航速取设计航速的 0.8 倍, 为 1.34 m/s, 大于直线隧洞方案采用航速 1.15 m/s, 因此直线隧洞方案采用宽度为 25 m, 通航水深为 5.6 m 的尺度适宜。经计算, 曲线隧洞方案在通航水深不变条件下, 隧洞宽度需达到 28 m 时, 设计航速为 1.88 m/s, 方可满足不影响通航效率的航速要求。

因此可见, 为了达到相同的通航效率, 直线+曲线组合通航隧洞方案需要断面尺度更大, 隧洞长度较长, 工程投资更高, 因此推荐船闸+直线隧洞方案。

3 结语

1) 山区航道枢纽通航工程首先应根据水位差大小、库区水位变幅、开挖工程量和生态环境保护等要求,选择不同的通航建筑物组合布置形式。根据设计船型、结合运量需求,初步拟定通航建筑物尺度,计算不同建筑物的通过能力,分析相互间的匹配性和对通航效率的影响,通过优化调整枢纽总体布置,尽量使通过能力和工程投资达到平衡,从而合理地确定建设规模。

2) 船闸与升船机连续布置,采用单向隧洞连接时,过闸时间由船闸、过隧洞时间以及升船机过闸时间中的较大值控制。为控制水位变幅,满足升船机运行需求,设置辅助闸门时,还需分析船舶通过辅助闸门的运行时间与升船机过闸时间关系,以及对升船机通航效率的影响,判断辅助闸门设置位置的合理性。

3) 船闸与隧洞布置方案,需分析过闸时间与过隧洞时间的匹配性,同样满足通航效率时,直线隧洞较曲线隧洞,隧洞内设计航速小,所需隧洞尺度较小,直线隧洞方案经济性更好。

4) 船舶在隧洞等受限水域中航行存在极限航速,航速的大小主要与断面系数和通航水深有关。当断面系数一定时,航速增加,船舶航行阻力增大,燃料消耗增加,运输经济效益降低;当航速不变时,阻力随断面系数的增大而减小。因此在满足通航效率的基础上,还需综合平衡运输经济效益和工程投资,合理确定隧洞断面尺度。

参考文献:

- [1] 吴澎,商剑平,刘春泽,等.船闸通过能力仿真分析方法[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2022: 57-60.
- [2] 李焱,郑宝友,周华兴.构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J].水道港口,2012,33(1): 45-50.
- [3] 汤建宏,阚得静.高坝通航建筑物通航隧洞断面经济性分析[J].水运工程,2017(7): 141-144.
- [4] 钮新强,吴俊东,王小威.基于目标优化的大型通航隧洞断面尺度研究[J].水利水电工程学报,2021(3): 1-8.
- [5] 中交水运规划设计院.沙沱水电站枢纽第二线1000吨级通航建筑物工程可行性研究[R].北京:中交水运规划设计院,2020.
- [6] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [7] 交通运输部天津水运工程科学研究所.乌江沙沱水电站第二线1000吨级通航设施船闸输水系统水力学物理模型试验研究报告[R].北京:交通运输部天津水运工程科学研究所,2020.
- [8] 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.
- [9] 中交水运规划设计院.富春江二线船闸概念设计方案征集[R].北京:中交水运规划设计院,2022.
- [10] MCMAHON J R. Hydraulic design of deep-draft navigation projects[R]. Washington: US Army Corps of Engineers, 2006.

(本文编辑 赵娟)

(上接第96页)

- [6] PERKINS L Z. Division Hydraulic Laboratory Bonneville. Filling and Emptying System for Ice Harbor Lock, Snake River, Washington, Hydraulic Model Investigation [R]. Washington: United States Army Corps of Engineers, 1973.
- [7] 交通部三峡工程航运办公室.国外通航建筑物(第一辑)[R].北京:交通部三峡工程航运办公室,1989.
- [8] PERKINS L Z, CHANDA A J. Filling and emptying system. Little Goose Lock. Snake River, Washington, Hydraulic Model Investigation [R]. Washington: United

States Army Corps of Engineers, 1975.

- [9] 邓廷哲,金峰,彭爱琳,等.葛洲坝船闸水力学问题综合分析[J].人民长江,2002,33(2): 41-47.
- [10] 李广一.大型超高水头船闸输水系统型式试验研究[D].大连:大连理工大学,2017.
- [11] 吴英卓,江耀祖,姜伯乐,等.大型超高水头船闸输水系统型式研究与展望[J].长江科学院院报,2016,33(6): 53-57.

(本文编辑 赵娟)