



三峡库尾乌江河口—涪陵白涛段航道 大型船舶适航条件分析

汪再荣¹, 杨忠超²

(1. 重庆市涪陵区港航海事服务中心, 重庆 408000;

2. 重庆交通大学, 内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 三峡成库后乌江河口—涪陵白涛河段成为三峡库尾常年库区, 通航条件得到较大改善, 超航道标准的大型船舶进入乌江日趋增多, 通航安全隐患凸显。针对船长 130 m 的大型船舶在清溪场水位 160 m 以上时研究河段的适航条件开展研究。结果表明: 在清溪场水位 160~175 m 且乌江武隆来流量小于 2 000 m³/s 时, 研究河段的航深、航宽和弯曲半径满足大型船舶通航尺度, 但三门子、龙船沱、小溪口和新崩子 4 处为受限河段, 渝怀铁路桥和三门子为禁止会船河段, 跨临河建筑物满足大型船舶通航净空尺度要求。提出研究河段调整航标、桥梁设置防撞设施和安全警示标志等通航安全保障措施。

关键词: 大型船舶; 适航条件; 航道尺度; 通航净空尺度

中图分类号: U 612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0148-07

Navigation condition of large ships in channel from Wujiang estuary to Fuling Baitao at tail of the Three Gorges Reservoir

WANG Zai-rong¹, YANG Zhong-chao²

(1. Port, Shipping and Maritime Affairs Center at Fuling District in Chongqing, Chongqing 400800, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Key Laboratory Inland Waterway Regulation Engineering of Ministry of Communication, Chongqing 400074, China)

Abstract: After the Three Gorges became a reservoir, the river section from the Wujiang River Estuary to Baitao at Fuling became a perennial reservoir area at the tail of the Three Gorges reservoir, and the navigation conditions were greatly improved. The increase of the large vessels beyond the channel standard entering the Wujiang River highlighted the navigation risks., Wujiang River beyond the channel standard is increasing, Wujiang River highlighted the navigation safety hazards. This paper probes into the navigation conditions for large ships with a length of 130 m when the water level of Qingxichang is over 160 m. The research results show that when the water level of Qingxichang is 160 ~ 175 m and the flow from Wulong of Wujiang River is less than 2 000 m³/s, the navigation depth, width and bending radius of the research channel meet the navigation scale of large ships, but Sanmenzi, Longchuantuo, Xiaoxikou and Xinbengzi are restricted channels, Chongqing-Huaihua railway bridge and Sanmenzi are the river sections where boat meeting is prohibited, and the buildings across the river meet the dimension of navigation clearance of large ships. The navigation safety guarantee measures such as adjusting navigation aids, setting anti-collision facilities and safety warning signs in the bridge are put forward.

Keywords: large ship; navigation condition; channel dimension; dimension of navigable clearance

乌江河口—涪陵白涛段航道是渝黔湘鄂四省市邻近地区客货运输的重要水上通道, 三峡成库

后该河段成为三峡库尾常年库区, “十二五”期间又对该河段进行了航道整治和支持保障系统建设,

通航条件得到较大改善, 达到了Ⅲ级航道标准, 可通行1000~3000吨级船舶。近年随着白涛化工园区的发展对大宗货物的需求急增, 超航道标准的大型船舶进入乌江日益增多。由于乌江为山区航道, 航道狭窄、弯曲, 大型船舶航行存在较大安全隐患。为了维护正常的航行秩序, 防止发生水上交通事故, 重庆市地方海事局以通告形式对乌江大桥至白马水域实施交通管制^[1], 限制进入乌江的船舶长度最大为110 m。目前进入乌江的船舶载质量已达5000 t, 船长可达130 m, 超过了该通告的要求。为了保障乌江河口—涪陵白涛段航道通航安全, 须开展130 m长度的大型船舶适航条件研究。

1 通航水位分析

1.1 三峡成库后对工程河段水位的影响

根据三峡水库坝前水位过程线及乌江回水里程可知, 对应三峡坝前水位175~155~145 m(吴淞), 乌江回水里程分为80 km(中嘴)、46 km(白马镇)、22 km(网背沱)(图1)。经推算三峡坝前水位高于147.5 m时, 回水可至白涛乌江大桥(距河口27.5 km)(图2)。



图1 长江三峡库区涪陵段干、支流回水示意

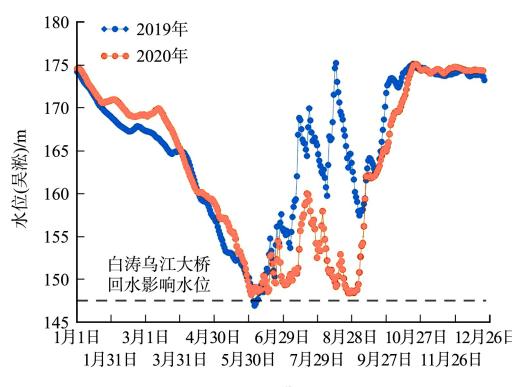


图2 三峡水库坝前水位过程线

1.2 最高通航水位

根据《内河通航标准》^[2]第6.2.1条的规定, 乌江河口—涪陵白涛段最高通航水位取10 a一遇洪水位与三峡枢纽按相应水位时回水外包线的高值确定, 为180.75~181.98 m。

1.3 大型船舶最低通航水位

为了确保大型船舶通航水深安全, 文献[1]规定大型船舶进出乌江清溪场水位须高于160 m。统计清溪场水文站水位流量关系, 长江最小流量 $Q_{\text{长江}}=3500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、乌江来流取银盘电站最小通航流量 $Q_{\text{乌江}}=345 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 采用二维水流数学模型推算得到乌江河口—白涛乌江大桥河段大型船舶通航最低水位为160.03~160.10 m。

2 大型船舶航道尺度分析

2.1 代表船型

根据交通运输部2019年颁布的《内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列》^[3], 大型代表船型尺度见表1。

表1 代表船型参数

代表船型	船长/	船宽/	吃水/	参考载货 吨级/t	主机功率/ kW
	m	m	m		
长江水系货-37	130	16.3	4.3	5 500~6 000	882×2~1 066×2

2.2 通航水深

通航水深 H 按下式计算:

$$H = T + \Delta H \quad (1)$$

式中: T 为船舶吃水(m); ΔH 为富余水深(m), 对于乌江Ⅲ级航道, 取0.5 m, 在卵石河床的富余水深应再增加0.2 m, 共0.7 m。

2.3 航宽

直线航段单线航道宽度 B_1 可按式(2)(3)计算:

$$B_1 = B_F + 2d \quad (2)$$

$$B_F = B_S + L \sin \beta \quad (3)$$

式中: B_F 为船舶或船队航迹带宽度(m); d 为船舶或船队外舷至航道边缘的安全距离(m), 货船取0.4倍航迹带宽度; B_S 为船舶或船队宽度; L 为顶推船队长度或货船长度(m); β 为船舶或船队航行漂角($^\circ$), I~V级航道取 3° 。

直线航段双线航道宽度按式(4)~(6)计算:

$$B_2 = B_{Fd} + B_{Fu} + d_1 + d_2 + C \quad (4)$$

$$B_{Fd} = B_{Sd} + L_d \sin \beta \quad (5)$$

$$B_{Fu} = B_{Su} + L_u \sin \beta \quad (6)$$

式中: B_2 为直线段双线航道宽度(m); B_{Fd} 为下行船舶或船队航迹带宽度(m); B_{Fu} 为上行船舶或船队航迹带宽度(m); d_1 为下行船舶或船队外舷至航道边缘的安全距离(m); d_2 为上行船舶或船队外舷至航道边缘的安全距离(m); C 为船舶或船

队会船时的安全距离(m); B_{Sd} 为下行船舶或船队宽度; B_{Su} 为上行船舶或船队宽度; L_d 为下行顶推船队长或货船长度(m); L_u 为上行顶推船队长或货船长度(m); β 为船舶或船队漂角($^\circ$)。

表 2 是代表航型通航尺度, 计算的航宽是基于顺直航道。对于弯曲航道, 参照过河建筑物通航净宽计算方法, 按照《内河通航标准》附录表 C. 0. 1 根据不同横流大小确定下行偏航距, 加上顺直航道计算航宽可得到大型船舶通航航宽要求。

表 2 代表船型通航尺度

代表船型	船长/m	船宽/m	吃水/m	航深 H/m	单线航宽/m	双线航宽/m	弯曲半径/m
长江水系货-37	130	16.3	4.3	5.0	41.58	83.16	520

2.4 弯曲半径

航道弯曲半径按《内河通航标准》所规定的 4 倍船长进行计算。

2.5 航道尺度论证

图 3 为大型船舶最低通航水位时满足通航水深 5 m 的航道边界及航道弯曲半径, 图 4 统计了研究河段沿程可通航航宽。可见, 渝怀铁路至三门子河段为乌江峡谷河段, 其中三门子可通航航

最小, 为 105 m。采用二维水流数学模型模拟清溪场水位 $H_{\text{清溪}} = 160$ m, 乌江来流 $Q_{\text{乌江}} = 2000$ m^3/s , 长江来流 $Q_{\text{长江}} = 3500$ m^3/s 时研究河段流场, 对航槽中心线流速分解得到横流值, 计算下行偏航距, 加上顺直航道航宽得到要求的大型船舶通航航宽。与可通航航宽比较可知, 研究河段可通航水域宽度大于要求的大型船舶通航航宽。

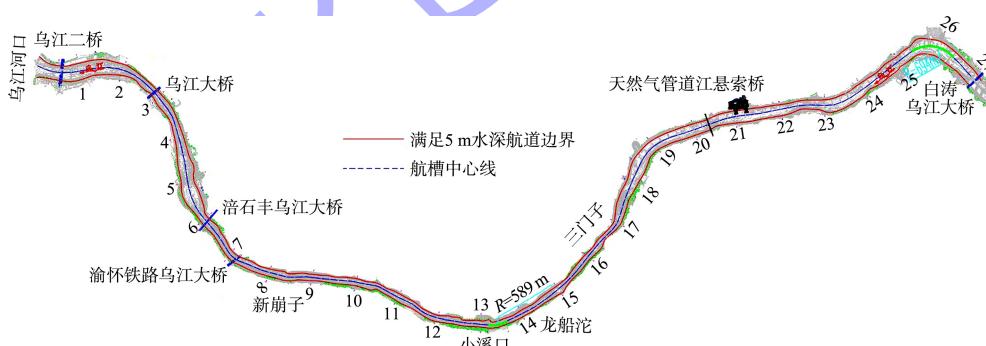


图 3 研究河段满足航深 5 m 的航道边界

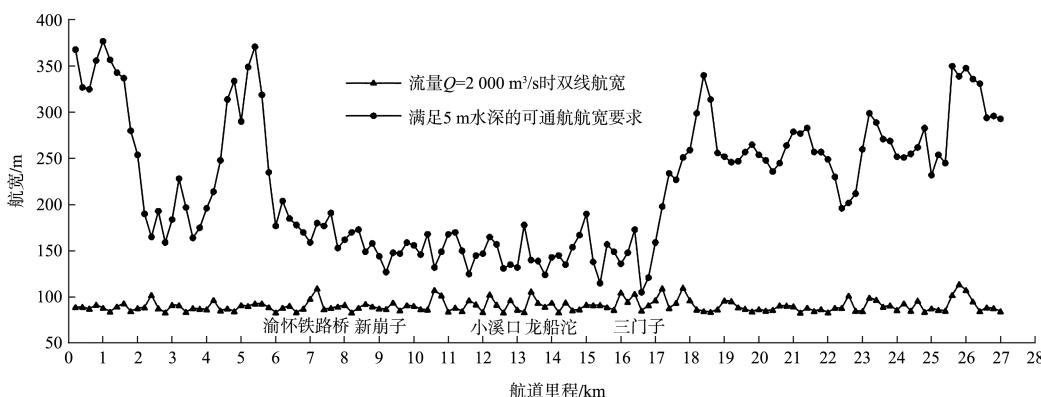


图 4 研究河段可通航航宽与大型船舶要求的通航航宽对比

研究河段航道最小弯曲半径为 589 m, 位于 K13+200—K13+600 河段; 白涛河段弯道弯曲半径为 694 m, 故研究河段满足大型船舶 520 m 弯曲半径的要求。

综上所述, 在清溪场 160 m 以上水位, 乌江来流小于 2 000 m³/s 时, 研究河段满足 130 m 长的大型船舶的 5 m 航深、双向通航航宽和 520 m 弯曲半径要求。

曲半径要求。

3 跨河建筑物净空尺度验算

3.1 跨河建筑物分布

乌江河口—白涛河段共建设桥梁 6 座, 桥梁分布见图 3, 桥梁参数见表 3。跨江电缆 13 座, 参数见表 4。

表 3 研究河段跨越乌江干流桥梁情况

名称	距河口里程/km	桥型	主通航孔尺度/m		设计最高通航水位/m	设计最低通航水位/m	建成年份
			净高	净宽			
涪陵乌江二桥	1.50	斜拉桥	26.25	330	180.75	144.70	2008
涪陵乌江大桥	2.80	拱桥	22.00	56	180.95	144.80	1989
涪丰石高速公路乌江大桥	6.10	双塔斜拉桥	91.00	266	179.02	144.90	2013
渝怀铁路涪陵乌江大桥	7.30	连续刚构	35.50	96	181.10	145.00	2004
渝怀铁路涪陵乌江大桥复线桥	7.55	连续刚构	35.50	192	181.10	145.00	2020
南川水江至涪陵白涛输气管道工程 乌江悬索跨越工程	20.40	悬索桥	18.70	355	176.95	145.85	2019

表 4 研究河段跨越乌江电缆情况

电缆名称	距河口里程/km	最高通航水位/m	电缆弧垂	通航净高/m
			最低点高程/m	
乌江大桥过江电缆	2.8	175.83	229.326	53.496
乌江大桥过江 2 电缆	3.8	175.83	351.055	175.225
乌江大桥下游过江电缆	3.9	175.83	222.400	46.570
涪丰石乌江大桥下游过江 2 电缆	5.0	175.83	243.651	67.821
涪丰石乌江大桥下游过江电缆	5.9	175.83	243.651	67.821
铁路桥上游过江电缆	7.4	175.83	361.94	186.110
磨溪过江电缆 2	10.2	176.50	239.172	62.672
磨溪过江电缆	10.4	176.50	214.800	38.300
小河边过江电缆	19.0	176.50	215.052	38.552
小石溪过江电缆	20.0	176.50	228.782	52.282
乌龟堡过江电缆	20.7	176.50	229.636	53.136
乌龟堡过江电缆 2	20.8	176.50	222.775	46.275
白涛乌江大桥下游过江电缆	27.1	177.00	206.616	29.616

3.2 大型船舶通航净宽验算

基于最不利考虑, 在清溪场水位 160 m、乌江

下行禁航流量 9 930 m³/s 时通航流速最大, 横流最大, 所需航宽最大。图 5 是桥区横流分布, 各桥 3 倍船长范围内最大横流见表 5。按照《内河通航标准》附录 C 天然和渠化河流水上过河建筑物通航净宽的计算方法和相关规定计算得到各桥要求的通航净宽, 与各桥实际通航净宽比较, 可见乌江二桥、涪丰石高速公路乌江大桥和天然气管道乌江悬索桥通航净宽满足要求; 涪陵乌江大桥为拱桥, 在满足通航净高 18 m 时通航净宽为 56 m, 小于单孔单向通航净宽 63 的要求, 见图 6a); 渝怀铁路大桥位于弯道河段, 横流高达 1.4 m, 根据《内河通航标准》要求应一跨过江, 由于铁路跨径限制且建设时间较早, 跨径仅为 96 m, 桥墩位于江中, 见图 6b), 不满足通航净宽要求。

表 5 各桥通航净宽验算

桥名	桥区横流 流速/(m·s ⁻¹)	船长 /m	船宽 /m	偏航 距/m	横流加 宽/m	B _{m1} 单孔单向 通航宽度/m	B _{m2} 单孔双向 通航宽度/m	桥梁通航 净宽/m	是否 满足
涪陵乌江二桥	0.5	130	16.3	15	25	88	170	330	是
涪陵乌江大桥	0.3	130	16.3	15	0	63	120	56	否
涪丰石高速公路乌江大桥	0.8	130	16.3	15	65	128	250	266	是
渝怀铁路涪陵乌江大桥	1.4	130	16.3	15	-	需一跨过江		96	否
渝怀铁路涪陵乌江大桥复线桥	1.4	130	16.3	15	-	需一跨过江		192	否
南川水江至涪陵白涛输气管道 工程乌江悬索跨越工程	0.1	130	16.3	15	0	63	120	355	是

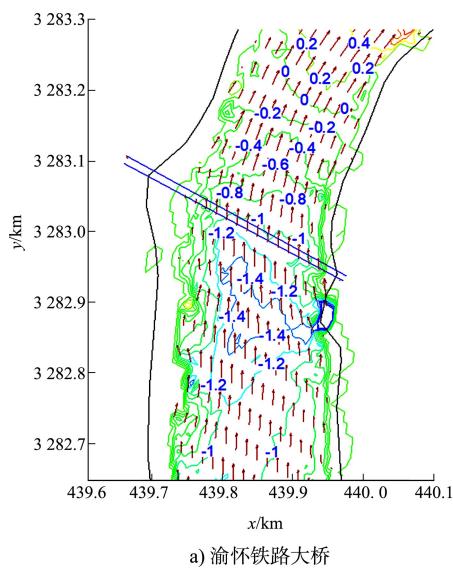


图 5 桥区横流分布



a) 涪陵乌江二桥



b) 渝怀铁路大桥

图 6 桥型

3.3 大型船舶通航净高验算

1) 最大船舶空载高度。根据《内河通航标准》，长江船舶通航净高按 18 m 控制，为实现乌江干支直达要求，乌江河口段通航桥梁通航净高也按 18 m 控制。

2) 船舶航行安全富余高度。由于波浪、壅水可能造成的净空尺度增加，本论证参照《内河通航标准》5.2.6 规定的要求：电力、通信、水文测验和其他水上过河缆线的通航净高，应按缆线垂弧最低点至设计最高通航水位的距离计算，其净高值不应小于最大船舶空载高度与安全富余高度之和。据《中华人民共和国长江海事局航行通告》，参照长江上跨河建筑物的安全富余高度取值 1 m，乌江跨江电缆富余高度控制为 1 m。

3) 过江电缆线安全富余高度。GB 50545—2010《110~550 kV 架空输电线路设计规范》^[4] 对于安全距离规定：500 kV 架空电力线对通航河流最小垂距要求至最高航行水位的最高船桅杆不小于 6.0 m。

表 6 为各跨乌江建筑物实际净高，可见除涪陵乌江大桥通航净高不足外，其余均大于要求的通航净空高度。

表 6 跨河建筑物通航净高验算

跨江建筑物名称	空载控制 桅高/m	航行安全 富余高度/m	电缆安全 加高/m	要求净空 高度/m	实际净高/m	是否满足
涪陵乌江二桥	18	-	-	18	26.250	是
涪陵乌江大桥	18	-	-	18	17.360	否
涪丰石高速公路乌江大桥	18	-	-	18	91.000	是
渝怀铁路涪陵乌江大桥	18	-	-	18	35.500	是
渝怀铁路涪陵乌江大桥复线桥	18	-	-	18	35.500	是
南川水江至涪陵白涛输气管道工程乌江悬索跨越工程	18	-	-	18	18.700	是

续表6

跨江建筑物名称	空载控制 桅高/m	航行安全 富余高度/m	电缆安全 加高/m	要求净空 高度/m	实际净高/m	是否满足
乌江大桥过江电缆	18	1	6	25	53.496	是
乌江大桥过江2电缆	18	1	6	25	175.225	是
乌江大桥下游过江电缆	18	1	6	25	46.570	是
涪丰石乌江大桥下游过江2电缆	18	1	6	25	67.821	是
涪丰石乌江大桥下游过江电缆	18	1	6	25	67.821	是
铁路桥上游过江电缆	18	1	6	25	186.110	是
磨溪过江电缆2	18	1	6	25	62.672	是
磨溪过江电缆	18	1	6	25	38.300	是
小河边过江电缆	18	1	6	25	38.552	是
小石溪过江电缆	18	1	6	25	52.282	是
乌龟堡过江电缆	18	1	6	25	53.136	是
乌龟堡过江电缆2	18	1	6	25	46.275	是
白涛乌江大桥下游过江电缆	18	1	6	25	29.616	是

4 大型船舶适航条件及安全保障措施

4.1 航道航宽狭窄水域

渝怀铁路—三门子河段为乌江峡谷河段, 建议设置4个受限河段, 即三门子、龙船沱、小溪口和新岗子, 并在受限河段上、下游岸边设置受限河段标志; 2个严禁会船河段, 即铁路桥和三门子, 并在禁止会船河段上、下游设置禁止会船标志。

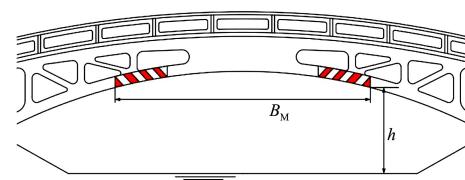
4.2 渝怀铁路涪陵乌江大桥航宽不足

由于渝怀铁路涪陵乌江大桥桥址位于峡谷弯曲河段, 桥轴线垂向与水流方向夹角较大, 当乌江发生大流量时, 桥区横流较大, 通航宽度不足, 存在较大安全隐患, 为此须减小该桥通航流量。经计算, 当乌江武隆来流小于2 000 m³/s时, 桥区横流流速可小于0.3 m/s, 渝怀铁路涪陵乌江大桥净宽96 m, 可满足大型船舶单孔单向通航63 m的航宽要求, 渝怀铁路涪陵乌江大桥复线桥净宽192 m, 可满足大型船舶单孔双向通航120 m的航宽要求。综上所述建议适航条件及安全保障措施如下:

1)三峡库区清溪场水位大于160 m, 武隆来流小于2 000 m³/s; 2)制定桥区通航管理规程, 采取单孔单向通航, 严禁桥区交汇, 在桥区上、下游位置设置禁止会船标志; 3)配布桥区航标和桥涵标^[5], 清楚揭示桥区通航水域, 提醒过往船舶警慎驾驶通过桥区。

4.3 涪陵乌江大桥通航净空不足

涪陵乌江大桥为拱桥结构, 在高水位时, 两侧拱圈净空高度不足, 存在船桅挂撞拱圈的风险, 因此需根据不同通航水位对通过涪陵乌江大桥的船舶桅高进行限制或限制最高通航水位。建议: 1)在桥梁拱圈的2个迎船面上左右侧同时设置乙类主标志^[6], 标示通航净空上底宽度、通航净空宽度(图7); 2)在桥梁上、下游适当位置设置实时净空高度标尺或实时净空高度显示标志; 3)按63 m航宽和18 m通航净高控制计算, 最高通航水位从175.83 m降低为175.19 m, 对应清溪场水位约175.00 m; 4)根据图7所示通航净宽宽度调整桥区航标, 揭示船舶通航水域。



注: B_M 为通航净空宽度; h 为通航净空侧边高度。

图7 乙类主标志设置

4.4 桥墩防撞设施

研究河段内6座桥梁, 除天然气悬索桥采取一跨过江方案外, 其余5座桥梁均有桥墩布设于河道中, 有必要同步开展大桥的防撞措施研究并设置相应的安全警示标志和防撞设施^[7](如防撞桩等), 船舶过桥应减速慢行。

4.5 航标调整措施

2012 年乌江河口—白马段航道支持保障系统实施完成后，沿江进行了航标配布，编制了乌江河口—白马航行参考图，航道维护尺度为 $2.4\text{ m} \times 45\text{ m} \times 480\text{ m}$ (深度 \times 航宽 \times 弯曲半径)。大型船舶进入乌江后，该维护尺度不足，建议在清溪场水位高于 160 m 时对航标进行调整，以满足大型船舶通航宽度和航深要求。

由于乌江河口船舶进出航路与长江航道交叉，存在安全隐患，建议划定长江干线航道与乌江支流航道的分界线，在乌江河口设立大型示位标，以标示干支交汇水域。

4.6 其他安全措施

其他安保措施包括但不限于以下措施：

1) 大型船舶进入乌江时必须提前申报，由管理部门对船舶尺度和高度进行监管。

2) 制定大型船舶乌江航行操作指南，开展安全操作培训，对船长进行技能考核，并制定相应的安全监管措施，同时大型船舶进入乌江时应请当地熟悉乌江航道的船长进行引水。

3) 进入乌江的大型船舶处于适航状态，主机功率不得低于 $2 \times 882\text{ kW}$ 。由于乌江航道狭窄，转向调头不便，建议船长 130 m 的大型船舶安装侧推器，同时不能随意在航道中锚泊，只能抵岸靠泊，下行船不得夜航作业。

5 结论

1) 船长 130 m 的大型船舶适航条件须满足清溪场水位在 160 ~ 175 m，乌江武隆来流量小

于 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2) 清溪场水位 160 m 以上时，研究河段满足 130 m 船长船舶吃水、航宽和弯曲半径的要求，其中三门子、龙船沱、小溪口和新崩子等航区航道狭窄，为受限河段；渝怀铁路桥和三门子河段为禁止会船河段。

3) 满足适航条件下，研究河段内跨河建筑物满足大型船舶通航净空尺度要求。

4) 为确保通航安全，研究河段还应采取航标调整、桥梁设置防撞设施和安全警示标志等措施。

参 考 文 献：

- [1] 重庆市地方海事局.关于乌江白马至涪陵乌江大桥水域实施交通管制的航行通告(渝海事航字[2012]1号)[EB/OL]. (2019-05-21) [2021-12-10]. <https://cqbidcenter.com.cn/diqucontent-70422484-1.html>, 2012.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.内河通航标准: GB 50139-2014[S].北京: 中国计划出版社, 2014.
- [3] 国家市场监督管理总局.内河过闸运输船舶标准船型主尺度系列: GB 38030.1—2019) 第 1 部分: 长江水系[S].北京: 人民交通出版社, 2019.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.西北电力设计院.110~550 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S].北京: 中国计划出版社, 2010.
- [5] 国家技术监督局.内河助航标志: GB 5863—1993[S].北京: 中国计划出版社, 1993.
- [6] 国家技术监督局.内河交通安全标志: GB 13851—2019 [S].北京: 中国交通出版社, 2019.
- [7] 王辉, 詹剑英, 卿云.复线拱桥通航安全影响及船撞风险研究[J].中国水运(下半月), 2017, 17(1): 30-32, 35.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

海口港集装箱码头能力提升项目通过验收

近日，一航局承建的海南海口港集装箱码头能力提升项目通过竣工验收。该项目位于海口市海口港秀英港区，处于琼州海峡南侧的海口湾南岸，与雷州半岛隔海相望，建设内容包括堆场改造、新建门式起重机轨道梁、管网改造等。项目建成后，将满足海口港集装箱增量运输需求，加快推进港口资源整合，为海南自由贸易港重大战略提供支撑和保障。