



向家坝非恒定流对航道通航条件影响的试验研究

蔡新永¹, 蔡汝哲¹, 李晓飏¹, 蔡创²

(1. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 非恒定流对下游河道通航条件影响是向家坝工程实施时需要考虑的主要问题。传统的通航条件影响研究, 不能全面准确反映航道水流条件和边界条件对船舶航行的综合影响以及船舶与航道水流条件的相互作用。利用小比尺船模测控技术, 通过与实船相似性分析和操纵性能率定, 试验研究向家坝非恒定流对下游河道通航条件的影响, 结合试验研究成果定量分析主要影响因素, 为向家坝工程方案的设计优化提供了科学可靠的数据基础。

关键词: 非恒定流; 小比尺船模; 枢纽通航; 向家坝

中图分类号: U 612.32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0077-06

Test research of influence of Xiangjiaba unsteady flow on downstream channel navigation condition

CAI Xin-yong¹, CAI Ru-zhe¹, LI Xiao-biao¹, CAI Chuang²

(1. Southwest Research Institute for Water Transport Engineering, Chongqing 400016, China;

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Influence of unsteady flow on navigation condition of downstream channel is the main issues to consider in the implementation of Xiangjiaba project. Effects of water flow conditions and boundary conditions on the ship navigation and the interaction between the ship and the channel cannot be fully and accurately reflected in traditional study on the influence of navigation conditions. Using measurement and control technology of small scale ship model, based on similar analysis and maneuverability calibration of real ship, we research the influence of unsteady flow on navigation condition of downstream channel. Combined with experimental results, the main influence factors are quantitatively analyzed, which provide scientific and reliable data basis for the optimization design of the Xiangjiaba project.

Keywords: unsteady flow; small scale ship model; navigation hub; Xiangjiaba

用小比尺自航船模研究内河通航问题, 是当今航运发达国家采用的一项新技术。内河通航研究用的自航船模受水工、河工模型比尺限制, 一般尺度都很小。和常规水工、河工模型水流条件量测试验相比, 它能更直观、更真实地反映航道水流条件和边界条件对船舶航行的综合影响, 并能反映出船舶与航道水流条件的相互作用。而且模型试验的造价也比较低。这些, 都是通常水工模型量测试验难以办到的。因此, 通航小尺度船模技术在人工通航建

筑物设计和天然航道治理研究中, 很有实用价值。特别是对长江航道, 由于长江河道蜿蜒曲折, 上游山区河道水流条件比常规河道更为复杂, 利用传统模型或者是实船试验更不切合实际, 因此, 这就更加突出了自航小尺度船模的作用和意义^[1-5]。

1 研究区域概况

向家坝水电站是金沙江梯级开发规划中的最末一级电站, 工程坝址位于四川省宜宾县和云南

省水富县交界处的金沙江干流下游,下距水富港 2.5 km、距宜宾市 33 km。该工程是以发电为主,同时兼顾改善航运、防洪、灌溉,并具有拦沙和对溪洛渡电站进行反调节等综合作用的特大型水利枢纽。枢纽工程主要包括混凝土重力坝、泄洪建筑物、左岸坝后式厂房、右岸地下厂房、垂直升船机和两岸灌溉取水口等。金沙江下游新市镇至宜宾河段为常年通航河段。其中,向家坝工程坝址以下水富至宜宾河段现为Ⅳ级航道,近期将通过整治达到Ⅲ级航道标准,可通行 1 000 吨级船舶。

向家坝水电站枢纽建成后,由于左右岸电站厂房设计最大引用流量近 7 200 m³/s,为满足电力调峰需要,电站下泄流量在日内将随时发生变化,同时电站机组事故及大坝开闸泄洪等也将使泄流出现突变,从而产生明显的非恒定流,改变坝下河段天然水流特征,对坝下游航道、港口、升船机等通航设施的正常使用及船舶安全航行带来重要影响。为了研究向家坝水电站非恒定流的水力学特性,论证非恒定流对船舶安全航行及进出港靠泊作业产生的影响,开展了金沙江向家坝水电站非恒定流对下游河道通航条件影响的相关研究工作,以优化电站日调节和大坝泄洪调度方案,探讨满足适航条件的措施,为电站调度和管理规程的制定提供科学依据。

本文主要介绍小比尺自航船模在优化电站日调节和大坝泄洪调度方案中的研究应用,通过相关试验,进一步探讨向家坝水电站非恒定流对下游河道通航条件影响,为方案的优化设计提供科

学的数据基础。

2 小比尺自航船模及测控系统

2.1 相似原理

由于小比尺船模和实船达到完全相似有很大难度,因此,目前的小比尺船模通过考虑与实船的主要相似条件来满足实际研究应用。在小尺度船模的通航试验应用中,主要保证与实船的航行速度、应舵性指数 T' 、航向改变性指数 P 、排水量、质浮心位置、转动惯矩以及船体、螺旋桨和舵的形状参数指标相似。航行速度保证船模与实船的运动相似;应舵性指数 T' 和航向改变性指数 P 保证船模与实船的操纵性能相似;排水量、质浮心位置、转动惯矩以及船体、螺旋桨和舵的形状保证船模与实船的几何相似、质量相似和水动力相似。在实际研究应用中,由于各种因素造成的船模与实船的不相似,对小尺度船模的修正和控制主要通过对其总体性能的测控率定,以满足船模与实船的主要相似,保证试验成果的精度和可靠性^[6]。

2.2 船模概况

研究采用的小比尺自航船模根据要求采用船型分别为 1+2×1 000 t 顶推船队和 1 000 t 机动货船,其比尺参数为:几何比尺 $\lambda = \lambda_L = \lambda_H = 100$,时间比尺 $\lambda_t = \lambda_L^{1/2} = 10$,速度比尺 $\lambda_v = \lambda_L/\lambda_t = 10$,排水量比尺 $\lambda_\Delta = \lambda_L^3 = 1\ 000\ 000$,力比尺 $\lambda_f = \lambda_L^3 = 1\ 000\ 000$ 。

主要性能参数见表 1。

表 1 主要性能参数

船型	尺度(L×B×T)/(cm×cm×cm)	载质量/g	排水量/g	静水航速/(m/s)		舵角
1+2×1 000 t 顶推船队	160×10.8×2.0	2 090	2 721	上行 0.45	下行 0.40	左 35°~右 35°
1 000 t 机动货船	85.0×10.5×2.0	1 000	1 590	上行 0.50	下行 0.40	无级比例操舵

2.3 操纵性能

在通航小尺度自航船模试验中,一个非常重要的相似条件,就是操纵性能相似。即操舵以后,船模对舵的反应要尽量和实船一致。这样才能较真实地用船模试验成果来预报实船航行情况。对船模和实船的操纵性能进行衡量,通常是通过操

纵性能试验(Z形试验、回转试验、脱开试验等),求解出回转性指数 K' 、应舵性指数 T' 、航向改变性指数 P 等操纵性指数来分析比较其操纵性能。理想的情况是做到船模和实船操纵性能的完全相似。实际上,要做到这点是困难的。在通常的通航小尺度船模试验研究中,只能根据船模

试验的具体情况, 着重保证部分操纵性指数的相似, 并使实船留有一定安全余地。修正后的船模与实船操纵性指数见表 2。

表 2 修正后的船模与实船操纵性指数

船型	船队	K'		T'		P	
		数值	误差/1%	数值	误差/1%	数值	误差/1%
1 000 t	实船	1.895		0.586		1.617	
机动货船	1/100 船模	1.654	-12.71	0.603	2.90	1.371	-15.20
1+2×1 000 t	实船	1.422		0.725		1.184	
船队	1/100 船模	1.265	-11.04	0.748	3.17	1.016	-14.19

2.4 测控设备

采用自行研制的 CMZ-3B 船模自动测控试验系统^[7]。该系统采用激光扫描和无线电接口对船模的航行要素和操纵要素进行高精度、非接触快速遥测, 并用微机自动进行数据处理和实时控制, 做到了计算机实时控制自动完成 Z 形试验全过程, 还能实时显示和事后复演船模试验情况。

CMZ-3B 船模自动试验系统由微机系统、激光船迹仪、CMCD-2 车舵信号无线电遥测仪、专用计算机接口、激光反射光标、JG II-V3.0 船模试验软件等部分组成 (图 1)。

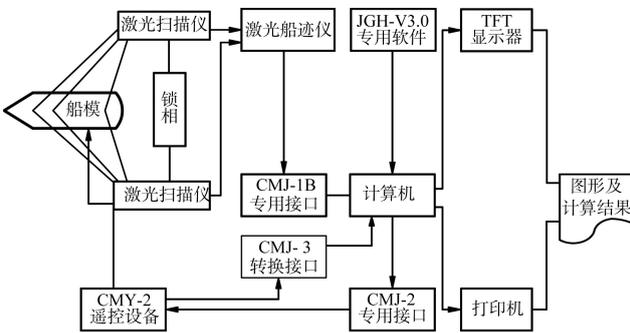


图 1 CMZ-3B 船模自动试验系统

3 试验研究

3.1 试验方案

根据水工模型试验情况, 着重选择了以下 5 个非恒定流工况进行船模通航试验: 日调节工况 6、日调节工况 12、日调节工况 18、事故工况 4 和泄洪工况 5。

3.2 试验航段

根据水工模型试验情况, 着重选择了向家坝枢纽下引航道口门区及连接段航段 (向家坝大桥

一下引航道), 全长约 1 200 m; 向家坝枢纽下引航道口门区是船舶通过枢纽的关键航段。

3.3 研究成果

向家坝枢纽下引航道口门区为船舶通过枢纽的关键航段, 船舶上水航行明显难于下水航行。因此, 着重对船舶在各工况条件下在难点时段的上行情况进行分析。本文主要对 1+2×1 000 t 顶推船队的日调节工况 6、日调节工况 12、日调节工况 18、事故工况 4 和泄洪工况 5 进行介绍 (图 2、表 3)。

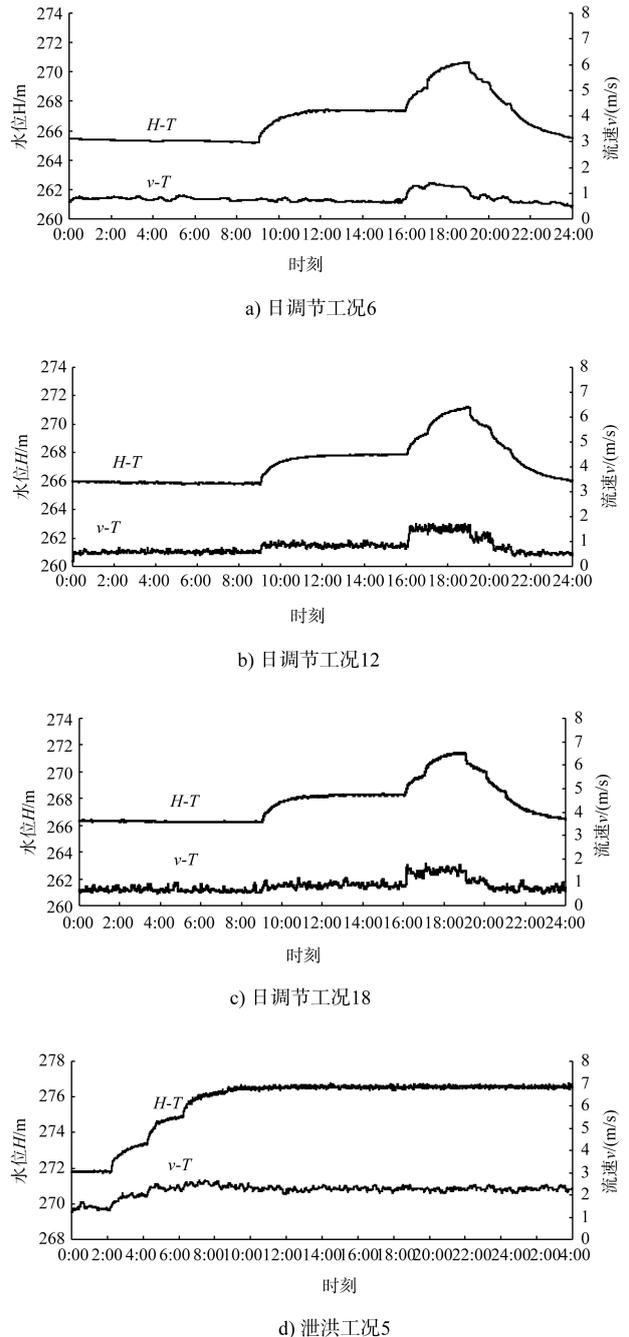


图 2 口门区各工况水位流速过程

表3 下引航道口门区及连接段船模试验成果

工况	船型	航行时段	航向	最大舵角/(°)		最大漂角/(°)		车档/(m/s)		航速/(m/s)		航程/ m	航行时间/ min	平均航速/ (m/s)
				右	左	右	左	最大	最小	最大	最小			
日调节 工况 6	1+2× 1 000 t	14:20:00—14:27:20	上行	11.60	22.23	17.88	7.85	4.50	4.50	2.72	2.02	1 109	7.33	2.52
		16:34:50—16:41:00	上行	21.92	26.67	11.27	16.77	4.50	4.50	3.65	2.46	1 080	6.17	2.92
		17:02:50—17:10:50	上行	16.52	24.91	6.05	24.29	4.50	4.50	2.93	1.66	1 077	8.00	2.24
		14:40:20—14:44:45	下行	11.32	19.39	10.69	1.64	4.00	4.00	4.44	3.06	1 058	4.42	3.99
		16:52:50—16:56:35	下行	18.84	19.39	10.63	2.11	4.00	4.00	5.11	3.60	1 056	3.75	4.69
		17:17:00—17:20:40	下行	14.12	23.47	10.86	5.34	4.00	4.00	5.58	3.35	1 066	3.67	4.85
日调节 工况 12	1+2× 1 000 t	13:55:10—14:01:20	上行	20.28	14.35	8.38	24.59	4.50	4.50	3.58	2.37	1 073	6.17	2.90
		16:12:00—16:18:40	上行	13.64	17.63	5.41	19.39	4.50	4.50	3.53	2.32	1 062	6.67	2.66
		17:09:50—17:21:40	上行	18.28	20.59	11.36	55.56	4.50	4.50	3.24	0.72	1 112	11.83	1.57
		18:49:50—18:59:20	上行	20.20	19.50	9.06	32.83	4.50	4.50	3.45	1.11	1084	9.50	1.90
		14:09:00—14:12:50	下行	21.88	21.15	7.48	0.42	4.00	4.00	4.93	3.75	1 064	3.83	4.62
		16:26:10—16:30:05	下行	14.48	15.15	9.72	0.13	4.0	4.00	5.14	2.59	1 067	3.92	4.54
日调节 工况 18	1+2× 1 000 t	17:30:50—17:34:45	下行	17.32	13.47	11.59	2.86	4.00	4.00	5.40	2.88	1 054	3.92	4.49
		15:46:10—15:52:15	上行	17.76	17.47	15.60	9.94	4.50	4.50	3.22	2.45	1 112	6.08	3.05
		16:13:40—16:20:50	上行	17.32	24.75	4.67	22.35	4.50	4.50	2.98	1.96	1 053	7.17	2.45
		17:19:10—17:31:25	上行	21.00	24.59	11.44	39.39	4.50	4.50	3.11	0.86	1 087	12.25	1.48
		13:09:00—13:12:10	下行	17.44	22.19	4.57	27.71	4.00	4.00	6.34	2.68	1 059	3.17	5.57
		16:27:10—16:30:45	下行	16.80	13.79	9.82	3.40	4.00	4.00	5.73	2.72	1 045	3.58	4.86
事故 工况 4	1+2× 1 000 t	17:43:20—17:47:15	下行	18.48	15.95	19.54	6.09	4.00	4.00	6.29	2.19	1 066	3.92	4.54
		00:37:30—00:44:35	上行	13.76	13.55	2.72	10.32	4.50	4.50	2.78	2.10	1 042	7.08	2.45
		01:02:50—01:09:00	上行	13.60	12.27	8.11	8.17	4.50	4.50	3.22	2.47	1 092	6.17	2.95
泄洪 工况 5	1+2× 1 000 t	00:50:00—00:53:50	下行	16.44	32.67	3.28	2.05	4.00	4.00	5.26	2.78	1 059	3.83	4.60
		00:48:20—00:55:50	上行	20.36	24.47	3.87	25.35	4.50	4.50	3.36	1.71	1 059	7.50	2.35
		02:17:40—02:31:40	上行	19.72	25.95	6.08	47.76	4.50	4.50	3.06	0.48	1 090	14.00	1.30
		01:03:40—01:06:55	下行	20.72	28.03	38.41	1.45	4.00	4.00	6.63	3.12	1 192	3.25	6.11
		02:39:40—02:42:40	下行	18.20	21.63	9.38	1.27	4.00	4.00	7.37	3.34	1 072	3.00	5.95

注：所有数据均已换算为原型值。

1) 日调节工况 6。在波峰到来时(17:02:50—17:10:50 时段)的航行试验中,与波峰到来前的时段相比,主航道流速由 0.7 m/s 左右增加到 1.5 m/s 左右,上行平均航速由 2.52 m/s 降低到 2.24 m/s,上行最小航速由 2.02 m/s 降低到 1.66 m/s (出现在距下引航道口门区下游河段 300 m 附近);最大漂角由 17.88° 增加到 24.29° (出现在船队上行进入下引航道口门区时),船队上行的最大舵角由 22.23° 加大到 24.91°,已接近安全舵角的最大限值 25°。

2) 日调节工况 12。在波峰到来时(17:09:50—17:21:40 时段)的航行试验中,与波峰到来前的时段相比,主航道流速已由 1.0 m/s 左右增加到 1.8 m/s 左右,上行平均航速由 2.80 m/s 降低到

1.57 m/s;上行最小航速由 2.37 m/s 降低到 0.72 m/s (出现在距下引航道口门区下游河段 300 m 附近,此时船队上行较为困难),最大漂角由 24.59° 增加到 55.56° (出现在船队上行进入下引航道口门区时,此时为船队操纵较困难的时候),船队上行的最大舵角由 20.28° 加大到 20.59°。

3) 日调节工况 18。在波峰到来时(17:19:10—17:31:25 时段)的航行试验中,与波峰到来前的时段相比,主航道流速已由 1.0 m/s 左右增加到 1.8 m/s 左右,上行平均航速由 3.05 m/s 降低到 1.48 m/s,上行最小航速由 2.45 m/s 降低到 0.86 m/s (出现在距下引航道口门区下游河段 300 m 附近,此时船队上行较为困难),最大漂角由 15.60° 增加到 39.39° (出现在船队上行进入下引航道口门区

时,此时为船队操纵较困难的时候),船队上行的最大舵角由 17.76° 加大到 24.59° ,已接近安全舵角的最大限值 25° 。

4) 事故工况4。在事故工况到来时(00:37:30—00:44:35时段)的航行试验中,在1100 m左右的上行航程中耗时7.08 min,平均航速为2.45 m/s;上行最大航速为2.78 m/s;最小航速为2.10 m/s(出现在距下引航道口门区下游河段300 m附近);最大漂角为 10.32° ;船队上行的最大舵角为 13.76° 。

5) 泄洪工况5。在泄洪前(00:48:20—00:55:50时段)的航行试验中,在1100 m左右的上行航程中耗时7.50 min,平均航速为2.35 m/s;上行最大航速为3.36 m/s;最小航速为1.71 m/s,出现在距下引航道口门区下游河段300 m附近;最大漂角为 25.35° ,出现在船队上行进入下引航道口门区时;船队上行的最大舵角为 24.47° 。在泄洪工况5的泄洪前时段 $1+2\times 1\,000$ t顶推船队的上行最小航速为1.71 m/s,优于船模试验最低航速安全限值(0.4 m/s);最大舵角为 24.47° ,未超过船模试验舵角安全限值 25° ,船舶可以安全上行通过试验航段,但由于上行的最大舵角为 24.47° ,接近船模试验舵角安全限值 25° 。

3.4 结果分析

在向家坝枢纽日调节工况6的情况下, $1+2\times 1\,000$ t顶推船队上行最小航速为1.66 m/s,明显优于船模试验最低航速安全限值(0.4 m/s),上行的最大舵角为 24.91° ,未超过船模试验舵角安全限值 25° 。向家坝枢纽日调节工况6满足 $1+2\times 1\,000$ t顶推船队顺利上行通过连接段及枢纽下引航道口门区。但由于上行的最大舵角为 24.91° ,接近船模试验舵角安全限值 25° ,因此在船队上行进入口门区需谨慎驾驶,注意用舵克服口门区斜横流对船舶航行的影响,方可保证船舶航行安全。

在泄洪工况5的情况下,在第一次开闸泄洪时(02:17:40—02:31:40时段)的航行试验中,与开闸泄洪前时段相比,主航道流速已由1.5 m/s左右增加到1.9 m/s左右,在1100 m左右的上行航程中耗时14.00 min,平均航速为1.30 m/s;上行最

大航速为3.06 m/s;最小航速为0.48 m/s,出现在距下引航道口门区下游河段300 m附近;最大漂角为 47.76° ,出现在船队上行进入下引航道口门区时;船队上行的最大舵角为 25.95° 。通过试验数据可以看出,在02:17:40—02:31:40时段,由于航道流速比降较前一时段均有较大增加,其最大漂角和最大舵角均较前一时段有所增加;平均航速和最小航速均较前一时段有所减小,船舶上行难度进一步增加,在泄洪工况5第一次开闸泄洪时段 $1+2\times 1\,000$ t顶推船队的上行最小航速为0.46 m/s,十分接近船模试验最低航速安全限值(0.4 m/s);最大舵角为 25.95° ,已超过船模试验舵角安全限值(25°),船舶航行安全已无法得到保证。向家坝枢纽泄洪工况5在第一次开闸泄洪时段及以后时段无法满足 $1+2\times 1\,000$ t顶推船队自航上行通过连接段及枢纽下引航道口门区。在第二次开闸泄洪时段(04:00:00以后的时段),由于航道流速比降较前一时段进一步增加,船队上行难度非常大,通过船模试验, $1+2\times 1\,000$ t顶推船队在此时段已无法自航上行通过连接段及枢纽下引航道口门区。

4 结论

1) 船模试验表明,向家坝枢纽日调节、事故工况和泄洪对其下游的船舶航行条件有较明显影响。

2) 试验结果显示,当向家坝枢纽按日调节工况6、日调节工况12、日调节工况18、事故工况4和泄洪工况5运行时, $1+2\times 1\,000$ t顶推船队均无法自航上行通过该航道。

3) 上行船舶在驶出牛皮滩后靠右岸缓流区上行,在下引航道口门下游100~200 m处,逐步过江向左岸引航道口门靠拢,注意克服口门附近的横流,将船舶驶入引航道。

4) 下行驶出引航道的船舶,在船舶驶出引航道口门时,要适当操右舵,向引航道堤头外扬船头,避免船舶被河道推向下流弯道,然后调整好船位和航线,沿河道中部下行即可。

5) 上下行的难点均是进出引航道口门的操纵, 船舶通过口门时要注意避免堤头附近的横流对船舶航行的影响。

参考文献:

[1] 蔡汝哲. 在水工河工模型中应用小尺度船模试验方法探讨[C]//国际高坝水利学术讨论会论文集. 北京: 中国水利学会, 1988.

[2] VARYANI K S, MCGREGOR R C, WOLD P, et al. Identification of trends in extremes of sway-yaw interference for several ships meeting in restricted waters [J]. Ship technology research, 2009, 49(6): 174-191.

[3] VANTORRE M, DELEFORTRIE G, ELOOT K, et al. Experimental investigation of ship-bank interaction forces[C]// International Conference on Marine Simulation & Ship

Maneuverability. Japan: Society of Naval Architects of Japan, 2003: 437-446.

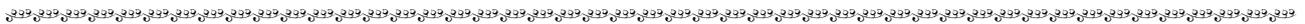
[4] M HASAN A, DUAN W Y, WANG Y, et al. Hydrodynamic coefficients of ships with forward speed in shallow waters[J]. Journal of ship mechanics, 2008(3): 46-54.

[5] WANG D J, BAKOUNTOUZIS L, KANTOR M. Prediction of ship hydrodynamic derivatives in shallow and restricted waters [J]. International shipbuilding progress, 2000, 47(5): 56-62.

[6] 蔡汝哲. 三峡工程通航建筑物布置研究的通航船模相似性问题分析(三峡水利枢纽工程应用基础研究一第二卷)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1997.

[7] 蔡创. 三峡枢纽通航船模试验系统软件开发[J]. 重庆交通大学学报, 2001, 20(2): 110-115.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 70 页)

参考文献:

[1] 艾万政, 丁天明. 桥区航道优化布置设计研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(1): 131-138.

[2] VRIEND H J D. A mathematical model of steady flow in curved shallow channels [J]. Hydraulic research, 1977, 15(1): 37-53.

[3] 艾万政, 马遥珠. 弯曲航道尺度设计探讨[J]. 中国水运, 2012(9): 144-145.

[4] 王巧洋. 内河连续弯道航宽及加宽值分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.

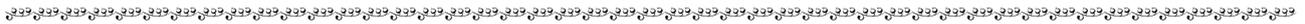
[5] 刘明俊, 吕习道. 船舶过弯道所需航宽建模[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(1): 178-179.

[6] 李一兵, 王育林. 弯曲航道过河建筑物跨度的计算方法探讨[J]. 水道港口, 1997(4): 16-22.

[7] 邓年生, 工炳奇. 弯曲航道平面尺度研究[J]. 水运工程, 2004(2): 74-79.

[8] 孙东坡, 朱歧武. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 61-67.

(本文编辑 王聰)



(上接第 76 页)

参考文献:

[1] 河海大学, 重庆交通学院. 航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 1987.

[2] 刘勇, 张帅帅, 何乐, 等. 长江上游卵石滩群平面形态及碍航特性[J]. 水运工程, 2016(1): 125-129.

[3] 蔡创. 长江渝泸段滩险整治小尺度船模通航试验研究[J]. 中国港湾建设, 2005(4): 29-32.

[4] 李一兵, 王育林. 船模航行试验技术在水运工程研究中的应用[J]. 水道港口, 2004, 25(S1): 8-13.

[5] 蔡创. 长江斗笠子河段滩险整治船模通航试验研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(1): 134-138.

[6] 刘勇, 王涛, 解中柱, 等. 长江上游斗笠子滩航道整治工程试验研究[J]. 水运工程, 2012(10): 47-51.

[7] 付旭辉, 董玉文, 杨胜发, 等. 长江上游斗笠子滩险河床演变分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2005, 24(3): 142-146.

[8] 黄超. 川江斗笠子滩整治[J]. 水运工程, 1992(3): 26-29.

(本文编辑 郭雪珍)