



弯曲河段下游引航道口门区通航水流条件研究

李兴亮, 陈野鹰

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 弯曲河段船闸下游引航道既受弯道水流的制约, 又受河床变宽产生的弯曲水流的影响, 口门区附近回流与斜向流强度大、范围广, 水流条件差, 难以满足船舶安全通行要求。依据流体力学原理和水流运动规律, 结合弯道河段河势变化特征, 提出在引航道外侧的口门区附近设置挑流墩和采用实体与透空导航墙相结合的工程措施, 并通过模型试验的验证, 证明本方法能够较好地调整水流流向、构建缓流水域, 从根本上消除弯曲河道中船闸下引航道口门区的斜向流和回流, 改善通航水流条件, 确保船舶安全过闸。

关键词: 挑流墩; 弯曲河段; 引航道水流条件; 透空式导航墙

中图分类号: TV 691

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0127-04

Navigable flow conditions in entrance area of lower approach channel of curved reach

LI Xing-liang, CHEN Ye-ying

(School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The approach channel of the lock in the downstream of the curved reach is not only restricted by the bend flow, but also affected by the bending water from the broadening riverbed. The energy of reflux and oblique nearby the entrance area is great and with a large range, and the flow condition is unfavorable. Thus it is difficult to meet the requirement of safe navigation. Based on the hydraulic principle and flow motion law and combining with the variation characteristics of the curved reach, we put forward the engineering measure that setting the pier for deflecting flow on the outside of approach channel nearby the entrance area, and adopting the entity and open-piled guide wall. Model test results show that this measure can adjust the flow direction, construct the water area of slow flow, completely eliminate the reflux and oblique, improve the navigable flow condition, and ensure the safe navigation.

Keywords: pier for deflecting flow; curved reach; flow conditions in approach channel; open-type guide wall

受地形、地质、水文、泥沙等各方面的影响, 枢纽及通航建筑常常布置在弯曲河段, 如万安水利枢纽、飞来峡水利枢纽以及那吉航运枢纽等众多水运枢纽工程。平原丘陵地区低水头枢纽较为常见, 一般优先将有江心洲的分岔河段作为坝址布置首选区。受弯曲水流和枢纽泄流的影响, 此类枢纽下游引航道口门区的水流条件复杂多变, 因此, 有必要对类似工程中的口门区通航水流条件进行深入研究。

1 潇湘枢纽概况^[1]

潇湘枢纽是处于湘江中游某弯道顶点的低水头闸坝工程, 所在河段有一江心洲——宋家洲。枢纽整体采取闸坝分离式布置结构, 主要由拦河坝(闸坝)、水电站厂房、变电站、西河土坝及航运单级船闸等组成。拦河坝布置在主河道, 由宽12 m的27孔闸坝组成; 水电站为河床式厂房, 布置在溢流坝左岸、宋家洲右侧; 航运单级船闸布置在西河, 即宋家洲左岸, 呈对称型布置, 船舶

收稿日期: 2015-07-22

作者简介: 李兴亮(1990—), 男, 硕士研究生, 从事水利与航道工程研究。

采用曲线进闸、直线出闸方式；拦河坝坝轴线与船闸轴线斜交，下游侧交角大约呈 60° 。船闸下引航道主导航建筑为外侧导航墙，紧邻宋家洲洲尾，由120 m长的调顺段、180 m长的停泊段组成。潇湘枢纽所在河段规划为Ⅲ级航道，船闸建设标准为Ⅲ级，通行1 000吨级船舶。船闸设计通航流量 Q 范围为 $250 \sim 11\,508 \text{ m}^3/\text{s}$ ；当 $Q \leq 1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，电站发电，泄洪闸门关闭，上游水位为正常蓄水位97.1 m；当 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s} < Q \leq 4\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，电站满发，上游水位为正常蓄水位97.1 m，控制开启闸门下泄发电多余流量；当 $4\,000 \text{ m}^3/\text{s} < Q \leq 6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，电站关闭，控制泄洪闸门开启，控制上游水位为96.1 m；当 $Q > 6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，电站发电，泄洪闸门敞泄。潇湘枢纽布置见图1。

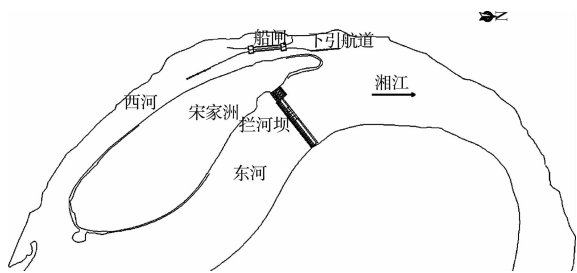


图1 潇湘枢纽布置

2 弯曲河段下游引航道口门区水流特征

水流由顺直河段进入弯曲河段后，受离心惯性力的作用，表层水流流向凹岸侧，但由于弯曲河段的河床面和岸坡共同构成的边界对水流流动具有限制性作用，从而使得凹岸侧的水位升高、自由水面平衡状态遭到破坏、形成水面横比降。表层水流流向凹岸侧后，转向水面以下并沿边界向凸岸流动，再由凸岸侧折向水面以上，构成横向环流。弯曲河段中水流沿河槽运动，会产生岸坡顶冲现象，弯曲河段中水流顶冲点常出现在弯顶前凸岸侧，随流量的增大，顶冲点的位置下移，同时主流线向河道中间移动。受横向水流流动与纵向水流流动的共同影响，弯曲河段的水流呈现出复杂的三维螺旋流^[2]。

枢纽平面布置中引航道常布置于河道的岸边，无论引航道是否占用主河道，因水流流向与航线不一致或水流的分流、扩散和旋涡等不良流态，

引航道口门区通常会表现出斜向流或回流。河道的主流与航道轴线呈现一定的夹角，产生的斜向流使船舶偏离原定的航线，两者夹角越大，斜向流作用越明显；在引航道隔流建筑物的末端，由于主河道运动的水流与引航道内相对静止的水流流速不同、存在压力梯度，因而发生水流扩散现象，形成斜向流；引航道口门区附近静止的水体与河道中流动的水体之间存在相对运动，进而产生旋转翻滚的回流区，使得船舶不能稳定航行。河道中水流流速越大，口门区的回流强度和范围也越大^[3]。

位于弯曲河段的枢纽下游引航道口门区的水流，不仅表现出上述弯曲河段和引航道口门区的水流特性，而且两种情况下的水流特性相结合，使得其水流条件表现得更为复杂多变。首先，弯曲河段枢纽下游引航道的航道轴线与下泄的水流流向存在夹角，引航道口门区必然产生斜向水流，同时受到弯道横向环流的影响，对于凹岸侧口门区的斜向流将被放大，并且枢纽下泄的水流在具有较大能量时，对引航道口门区产生一定的冲击作用，进而加剧口门区斜向流的强度。其次，弯曲河段的三维螺旋流与口门区附近动静水结合部位的水流相互作用，水流的流速场和压力场都发生明显的变化，水流流动呈现出高度的三维性，在口门区出现复杂的回流区。再次，弯曲河段引航道下游末端过水断面发生突扩，水流发生扩散现象，加上弯道河段引航道与河道存在夹角的影响，加剧了口门区的斜向流。

根据潇湘枢纽下游引航道口门区位于弯曲河段的顶点处、河段弯曲半径较小的特点，分析其下游引航道口门区水流特性。流量 Q 在 $250 \sim 11\,508 \text{ m}^3/\text{s}$ 范围内变化时，当下泄流量较小时，水流畅过电站与泄水坝段共同泄流，水动力轴线靠近宋家洲右侧河岸，主河道流动的水流与引航道内相对静止的水流产生动静水交汇作用，在口门区的附近内形成回流区，同时，沿宋家洲右侧河岸流动的水流流向与下引航道的航道轴线斜交，同时水流经过宋家洲洲尾后进行扩散，在口门区

下游端产生斜向流。随着下泄流量的增加, 水流经过泄水坝段下泄, 下泄水流经过宋家洲洲尾后直冲入船闸下引航道口门区, 到岸后一部分水流折向上游在口门区形成较大范围的回流, 而且宋家洲的存在使得其左右两侧一直为相对静止的水流和运动的水流, 动静水的交汇作用一直存在, 进一步扩大了回流区的范围和强度。由于河道弯曲半径较小, 通过泄流坝段下泄的水流流向与引航道的轴线存在夹角, 进而出现斜向流。下泄流量越大, 水流所具有的能量也就越大, 所产生的

回流区和斜流区的范围也就进一步增大。受到上下游水位差和下游水深对下泄水流流态和流速的影响, 下游引航道口门区水流条件在流量 Q 在 $4\ 000 \sim 6\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时呈最差。根据潇湘枢纽整体模型试验的测量水流数据, 无论是在小流量还是大流量情况下, 引航道口门区的水流流速均超过规范的标准, 影响船舶的航行安全, 因此, 有必要采取工程措施消除或弱化不良水流, 改善通航条件, 确保航运安全。下游引航道口门区部分水流流速最大值见表 1。

表 1 下引航道口门区水流流速最大值

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	口门 0 - 20 m		口门 0 + 60 m		口门 0 + 130 m		口门 0 + 220 m		口门 0 + 310 m		口门 0 + 400 m	
	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r
250	0	0.62	0	0.56	0	0.63	0	0.15	0.14	0	0.20	0
2 000	0	0.42	0	0.46	0.15	0.55	0.35	0	0.53	0	0.21	0
4 000	0.23	0.79	0	1.01	0	1.1	0.73	1.01	1.42	0	1.94	0
6 000	0	0.13	0	0.61	0	0.75	0	1.04	0.25	0.59	0.41	0
7 398	0.12	0.24	0.1	0.23	0	0.52	0.14	0.51	0.81	0	0.97	0
9 900	0.14	0.81	0	1.01	0	0.84	0.14	0.8	0.54	0	0.55	0
11 508	0	0.90	0	1.01	0	1.00	0	1.38	0.46	1.08	1.13	0

注: v_x 表示横向流速; v_r 表示回流流速, 最后一个靠船墩的端点为口门区起点; 上游侧距离表示为“-”、下游侧距离表示为“+”。

3 下游引航道通航条件的改善措施

对于引航道口门区水流条件的优化, 国内外专家学者研究了多种改善措施: 调整导流堤的堤头形式、导流堤设置成开孔式、浮式导流堤以及设置导流墩等。不同堤头形式导流堤、开孔式导流堤和浮式导流堤是将引航道内的水体与主河道的水域相连通, 从而有效地减小口门区的斜流和横流作用, 并且将两个区域的表流隔开, 弱地表流波动对引航道内航行船舶的影响。导流墩的工程措施在将引航道与主河道水体相连通的基础上将水流分解为多个不连续的横流区或斜流区, 使得主动力作用长度变短, 水体的总能量减小, 从而有利于船舶的安全通航^[4]。针对以上改善工程措施的适用情况, 选择采用延长下游引航道导航墙并在末端进行部分开孔的措施以解决潇湘枢纽下游引航道口门区回流和斜流问题。然而试验结果表明: 简单地增加外导航墙的长度及导航墙末

端增设透水孔的方式, 除使回流区的位置随导航墙的增长下移外, 并没有从根本上消除或实质上减小口门区的回流范围与强度, 通过透空孔流入水流反而恶化了引航道内的水流条件。因此, 有必要根据潇湘枢纽弯曲河段的河势变化规律、水流特点、枢纽布置特征等因素, 探究改善弯曲河段上引航道水流条件的工程新措施。

为解决潇湘枢纽下游引航道及口门区附近横流、回流流速大幅超标、水流流态复杂多变, 导致船舶无法安全航行的问题, 根据枢纽通航建筑物所在的河势特点及枢纽建筑物本身的布置形式和水流运动规律^[5-6], 结合枢纽河段河势特点, 设置总长 500 m 的导航墙, 其中上游 300 m 为实墙、下游 200 m 设置成 5 孔透空墙 (孔长 20 m、孔高 5 m、间距 40 m); 除此之外, 在口门区外侧附近水域设置 4 个迎水面垂向、挑角各异的挑流墩, 挑流墩沿坝下东河右岸布置, 顺水流方向相邻挑流墩部

分重叠，如鱼鳞般排列（图2）；3个紧邻的挑流墩迎水面垂向与泄流坝轴线交角约70°，中间一个与水流夹角偏大，从而使得该区域水流能够充分掺混消能，为引航道口门区提供一个缓流区域；位于河道中心一侧的挑流墩，则是对挑顺后的水流进行分割，避免挑顺后的水流顶冲河岸产生强度大的斜流以及折向上游产生强度较大的回流区。为有效地改变水流流向，挑流墩长度取为35 m（图2）。

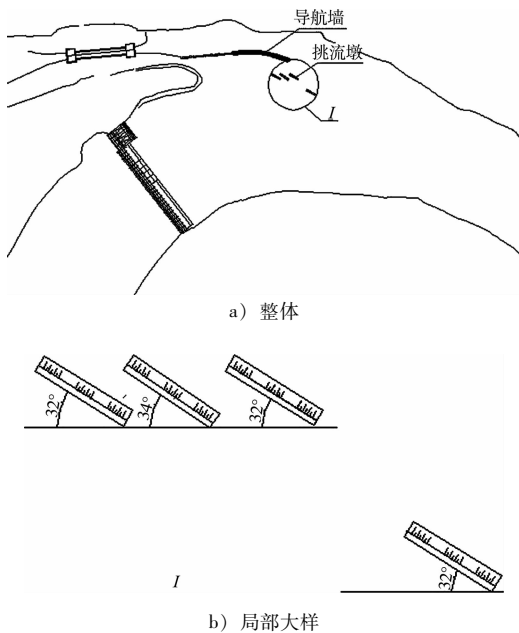


图2 下引航道改善措施布置

模型试验还表明：在中小流量下，实体加透空式导航布置，不仅能够掩蔽引航道内的水流使其表现出静水或缓慢流特征，而且能够有效地阻断经过宋家洲洲尾扩散的电站尾水以及经泄水闸下泄后扩散的水流，避免其在引航道口门区附近形成斜向流；同时，导航墙端头设置为透空式能够将小部分的流量引入引航道内部，进而可以削弱口门区的回流和斜向流。

下游引航道口门区外侧布设挑流墩后，电站尾水以及通过泄洪闸下泄的水流，先是受河道边界的影响，呈现出弯曲流动的特征并在宋家洲洲尾后出现一定程度的扩散；在流经挑流墩时，由于实体边界的存在，挑流墩迫使河道中的主流沿布置趋势改变流向，河道中水流的深泓线向凸岸侧靠近。由于挑流墩将河道中的主流向凸岸侧偏移，凹岸侧引航道和口门区避免了受到能量较大的主流直接影响，挑流墩距导航墙一定距离，一方面将下泄主流冲击挑流墩产生的波动、旋涡等不良的水流流态控制在航道水域之外；另一方面，通过挑流墩与导航墙彼此的间距，将受导航墙边界限制的下泄水流引入两者之间，弱化下泄水流冲击挑流墩后产生的上述不良水流流态。不同角度的挑流墩的设置，使得下泄水流在冲击挑流墩后产生的绕流相互碰撞充分掺混，削减水流的总体强度，使得进入口门区的水流能量减小。多个挑流墩的设置，使得主流被划分为多个不连续的区域，减小水流的主动作用长度，同时，挑流墩受到水流的冲击，受固体边界的限制碰撞后产生垂直于下泄主流的流动，形成不稳定的阻隔带，由此使得挑流墩的有效作用长度增加，充分阻隔河道扩散主流形成的斜流，多个分散布置的挑流墩能够充分发挥这一特点；另外，分散布置的挑流墩允许水流由挑流墩中间经过，对于大流量情况下水流顶冲点下挫时，经过挑流墩之间的下泄水流与受河岸边界作用折回上游的主流相互作用，从而弱化了引航道附近回流强度。部分水流流速模型试验的最大值见表2。而且当来流量 $Q \leq 7\,398 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，枢纽下引航道与口门区的水流条件完全满足安全通航要求。

表2 优化方案下引航道口门区水流流速最大值

流量/ (m^3/s)	口门0+50 m		口门0+100 m		口门0+180 m		口门0+240 m		口门0+290 m		口门0+360 m		口门0+440 m	
	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r	v_x	v_r
4 000	0.06	0	0.08	0	0.25	0	0.37	0	0.16	0	0.17	0	0.28	0
6 000	0.12	0	0.03	0	0.13	0	0.07	0	0.16	0	0.08	0	0.18	0
7 398	0.09	0	0.12	0	0.25	0	0.21	0	0.25	0	0.25	0	0.35	0
9 900	0.05	0	0.10	0	0.22	0	0.15	0	0.33	0	0.43	0	0.69	0
11 508	0.25	0	0.21	0	0.48	0	0.23	0	0.44	0	0.52	0	0.39	0

注： v_x 表示横向流速； v_r 表示回流流速，新建导航墙的末端为口门区计算起点。