

# 船闸布置在弯道凹凸岸附近时通航条件分析

曹玉芬,周华兴

(交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室,天津 300456)

**摘要:**统计了枢纽中通航建筑物的布置现状,阐述了枢纽中船闸布置的有关规定,重点对通航建筑物布置在凹岸或凸岸附近时的边界、水流和航行条件作综合分析.分析表明:船闸布置在凹岸时的有利条件多于凸岸;当船闸引航道口门区处在弯道段时,会受斜向水流与弯道水流的共同作用,增加船舶(队)进出口门的难度;当连接段处在弯道段时,船舶(队)受到弯道水流与航线夹角和船队轴线与航线夹角的双重作用,船舶操舵较顺直河段困难.同时需研究船舶(队)回转半径与操舵角的关系.

**关键词:**船闸;弯道;凹岸;凸岸;通航条件

**中图分类号:** U641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2012)04-0077-05

山区河流蜿蜒曲折,顺直河段相对较短,沿程河床纵横形态和岸线不规则,通航建筑物在枢纽中的布置受地形、地质、水文泥沙等条件的制约,船闸布置要求的直线段长度较难满足,以Ⅲ级航道的船闸为例,直线段长度为闸室+上下闸首+上下游引航道+上下游口门区,总长度约2 km.枢纽往往布置在弯道附近或2个弯道之间,此时船闸布置在弯道的凸岸一侧或凹岸一侧,引航道口门区位于弯道附近,连接段会位于弯道上.鉴于凹凸岸边界条件、水流条件的差异,弯道水流结构与斜向水流的共同作用会增大口门区与连接段横向流速,影响船舶(队)进出口门的安全,所以,有必要分析凹凸岸通航水流条件和航行条件的利弊,为船闸在枢纽布置中相对位置的确定提供设计依据.

## 1 国内枢纽中通航建筑物布置现状

由于枢纽在河段选址中受地质、地形、水文、泥沙等影响,船闸在枢纽中的布置千差万别,统计国内近30座水利、水电和航运枢纽工程<sup>[6]</sup>.可见,枢纽基本布置在弯道附近或2个弯道之间,船闸布置凹、凸岸的情况约各占一半,为此,对船闸布置在凹岸或凸岸的利弊作综合分析比较.

## 2 枢纽中船闸布置的有关规定

(1)在《内河通航标准》<sup>[1]</sup>中要求:①船闸宜布置在顺直和稳定的河段.当船闸布置在弯曲河段或河道外的引渠内时,河床稳定,并与主航道平顺连接.②船闸宜临岸布置、不应布置在2个过水建筑物之间.③船闸引航道口门区及连接段应布置在泥沙不易淤积的部位.

(2)在《船闸总体设计规范》<sup>[2]</sup>中要求:①必须与枢纽总体设计相协调,处理好通航与水利、水电和城市建设的关系,做到水资源的综合利用,远近结合和留有余地;②必须保证船舶(队)的安全畅通过闸;船闸宜临岸布置,上下游引航道口门区宜位于深泓线一侧;并与主航道平顺连接;③当船闸布置在弯曲河段时,引航道口门区均应在河床稳定部位,应满足通航条件.

收稿日期:2011-10-23

作者简介:曹玉芬(1976-),女,天津人,副研究员,硕士,主要从事港口航道工程研究.

E-mail:coolyufen@163.com

(3)在《渠化工程枢纽总体布置设计规范》<sup>[3]</sup>中规定:①当坝址处河面开阔,河床内能同时布置挡水、泄水建筑物、通航建筑物及电站等水工建筑物时的集中布置方式,通航建筑物布置在主河槽的凹岸一侧,其下游引航道出口应与下游主航道平顺衔接.②当坝址处河面较窄、弯曲,其凸岸适宜布置通航建筑物时;或当坝址处河面虽开阔、顺直,但将通航建筑物及电站布置在岸上开挖的渠道内,经论证可采用分散布置方式时,若通航建筑物位于凸岸的渠道中,船闸宜置于渠道的中段或中下段;当挡水、泄水建筑物与电站布置在河床内,通航建筑物宜布置在凸岸的渠道中.

(4)在《船闸设计》<sup>[4]</sup>中建议,船闸引航道口门区尽可能布置在顺直稳定的河段,避免布置在不稳定或过弯的河段,避开凸岸淤积区和枢纽下泄水流携带冲积物的淤积区及回流、缓流淤积区.

表 1 国内枢纽通航建筑物的布置

Tab. 1 Arrangement of navigation structures in domestic hydroprojects

序号	工程名	通航建筑物布置情况
1	葛洲坝水利枢纽	大江船闸上游布置凸岸,下游引航道位于凹岸;三江2号和3号船闸布置在凹岸.
2	三峡水利枢纽	坝址在三斗坪弯道上端,船闸布置在凸岸.
3	大顶子山航运枢纽	河势微弯,船闸位于主河槽右汉的右岸(凸岸).
4	郁江老口航运枢纽	下游引航道位于凸岸上端
5	右江鱼梁航运枢纽	上游引航道位于凸岸下端
6	株洲航电枢纽	坝址在微弯分汉河段,船闸布置在右汉凸岸.
7	大源渡航电枢纽	坝址位于弯道河段的弯顶处,船闸布置在凸岸.
8	草街航电枢纽	枢纽在牛鼻孔、象鼻子和草街3个连续弯道上,船闸布置在凸岸
9	景洪水电枢纽	枢纽区河道弯曲呈s形,通航建筑物(升船机)布置在右岸(凸岸).
10	百龙滩水电枢纽	通航建筑物布置在河道右岸(凸岸).
11	沙溪航电枢纽	整个坝址河段走势呈反“s”形,上游引航道在凸岸,下游引航道在凹岸.
12	四九滩航运枢纽	闸坝址位于2个反向弯道的过渡段.上游引航道为凹岸,下游为凸岸.
13	桂平航运枢纽	船闸布置在弯道的右岸(凸岸).
14	崔家营航电枢纽	船闸布置在弯道的凹岸.
15	飞来峡水利枢纽	枢纽坝址地处弯曲河段上,船闸和引航道布置在河道左岸(凹岸).
16	那吉航运枢纽	近90°弯道的下端,船闸布置在凹岸.
17	万安水利枢纽	下游引航道,船闸布置在弯道凹岸.
18	长洲水利枢纽	分汉河段、微弯,船闸布置在凹岸.
19	风洞子航电工程	位于河道弯曲段下段,船闸上引航道口门区位于弯曲河道凹岸.
20	新政电航枢纽	河段为微弯河段,船闸和电站均布置在其左岸(凹岸).
21	乐滩枢纽工程	船闸布置在河道左岸(凹岸).
22	贵港航运枢纽	船闸布置在河道右岸(凸岸).
23	金溪场航运枢纽	船闸布置在河道左岸(凹岸).
24	向家坝水利枢纽	通航建筑物(升船机)布置在凹岸.
25	凤仪场枢纽	船闸布置在河道右岸(凹岸).
26	红岩子航运枢纽	船闸布置在河道左岸(凸岸).
27	金银台航运枢纽	船闸布置在河道左岸(凸岸).
28	马回航运枢纽	裁弯取直(船闸布置在凸岸).
29	东西关航运枢纽	裁弯取直(船闸布置在凸岸).

### 3 通航建筑物布置在凹凸岸的边界、水流及航行条件

#### 3.1 边界条件

弯曲航道按所处地域,可分为山区、平原和河网地区的弯曲航道,这里仅讨论山区弯曲航道.一般山区河流蜿蜒曲折,沿程河岸边界不规则,河道弯曲半径较小,河岸坡陡;河床大都为石质或沙砾石组成,边界较稳定;凹岸的曲率半径大于凸岸,河床地形边界由凸岸(浅)向凹岸方向逐渐加深,横断面成不对称三角形或抛物线形;弯曲航道由单一弯曲、连续弯曲和弯曲分汉几种类型.

### 3.2 水流条件

**3.2.1 弯道段水流** 弯曲型河道的水流运动有其自身的特点,由于弯道的存在,水流发生弯曲,水流受到重力和离心惯性力的双重作用而形成弯道环流,其等压面不是水平的,而是与重力和离心惯性力的合力相垂直.因为水流沿横向曲线变化,凹岸一侧的水位恒高于凸岸一侧,这一现象决定了弯道水流的结构特点:表层水流向凹岸,造成凹岸冲刷;从凹岸向下转向凸岸的底层会携带部分泥沙,导致凸岸淤积.这种作用致使主流不断向下游凹岸偏移,成为河道演变的必然趋势<sup>[9]</sup>.

凹岸受弯道水流的影响,河床较深,主流偏向凹岸,而凸岸处水流受岸壁边界影响,会分离形成回流和泥沙淤积,因此,从表层流态这一角度来看,凸岸复杂凹岸单一.但从水流流速的绝对值看,凹岸大于凸岸.

**3.2.2 船闸分别位于弯道凹凸岸时口门区流态** 船闸引航道口门区及连接段位于弯道附近时(图1),通航水流条件受斜向水流和弯道水流的共同作用.据文献[6]的研究成果,船闸引航道口门区应距弯道有一定距离(2~2.5) $l_c$ ( $l_c$ 为船队长度).

弯曲段航道的通航条件取决于2个方面:一是水流方向与船舶(队)航线方向的差异,两者不一致时,导致水流对船舶航行产生斜向作用,使船舶(队)偏离航线,偏航程度的大小直接受横向流速的影响,所以弯道段船舶(队)航行难度比顺直段要大;二是水面比降,弯道中水流的水深沿纵向、横向都发生变化,这种不稳定的横向水面高差,必然造成横向流动,形成纵向横向立体空间比降,造成船舶(队)航行阻力变化和航速的不稳定.

山区河流枢纽一般布置在弯道附近或两弯道间,船闸引航道口门区往往靠近弯道.如那吉航运枢纽工程,可行性研究阶段船闸布置在河道的左岸,位于弯道的凸岸(图1),总体而言不顺应河势的发展,并且需要开挖原岸坡台地,通航水流条件在口门区范围内,虽流速不大,但形成范围较大的回流,回流长度接近300 m.在5年一遇水位流量组合下,航线外侧横向流速最大达0.42 m/s,  $V_x > 0.3$  m/s 约占测点的17%,虽基本满足水流条件要求,但不满足船队航行条件要求.

当船闸布置在弯道凹岸,水流顺应主流流向,优化后水流条件平顺,也符合规范要求.

### 3.3 航行条件

根据量纲分析,船舶在弯曲航道段航行时,船舶航行漂角  $\beta = f(R/l_c, V_H/V, B/T, h/T, \dots)$ ,受弯曲半径  $R$ ,船队长度  $l_c$ ,对岸航速  $V_H$ ,对水航速  $V$ ,航道宽度  $B$ ,船舶吃水  $T$  和水深  $h$  的影响外,还受船队队形、风力和驾驶员的心理素质等影响.船舶(队)分别在凸岸或凹岸航行时,凹岸的航线曲率半径大于凸岸,曲率半径越大水流作用于船舶的角度越小,越有利于船舶航行.

图1中航道为Ⅲ级航道,当船闸布置在凸岸时,要求航道最小弯曲半径  $R=480$  m;若船闸布置在凹岸时,凹岸弯道的曲率半径  $R=B_0+480$  (m) ( $B_0$ 为弯道处河宽),显然船舶(队)航线的弯曲度凸岸比凹岸大得多.

在工程实践中,有近50%的枢纽工程位于凸岸,其中部分枢纽处在微弯河段或距弯道一定距离,故弯道水流对船舶(队)航行影响较小.

船队在弯道上航行,船队的重心基本在航线上运动,然而船头与船尾不可能同时在航线上运动,因为船不是柔性结构,不会随圆弧改变自己的形状,所以在弯道上航行存在一个艏向角.艏向角具有瞬时性质,它在一个范围内变化,该范围与航线的曲率半径大小有关,曲率半径越小艏向角越大<sup>[7]</sup>.

船舶(队)在顺直方向航行,当受斜向水流的作用时,船舶受到的纵向和横向流速分别为  $V_y = V \cos \alpha$ ,  $V_x = V \sin \alpha$ ,  $V$ 为斜向流速,  $\alpha$ 为斜向流速与航线的夹角.当船舶在弯道上航行,而口门区又位于弯道附近,船舶航行既受弯道水流的影响,又受斜向水流的作用,船舶重心位于航线上,船头位于航线的内侧或外侧,相反,船尾位于航线的外侧或内侧,此时的横向流速  $V_x = V \sin(\alpha + \Delta\theta)$ ,  $\Delta\theta$ 为船队轴线与航线的夹角.  $\Delta\theta$ 的大小与河

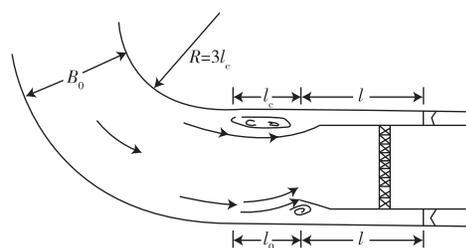


图1 船闸分别位于弯道的凹凸岸时口门区流态

Fig. 1 Flow pattern in the channel entrance area when lock is located along the concave and convex banks of the bend channel

道的弯曲半径、船舶或船队长度宽度、航行漂角等有关,以Ⅲ级航道为例:弯道曲率半径  $R=3l_c$ , 船队长  $l_c=160$  m, 船队宽  $B_c=10.8$  m, 设河道宽  $B_0=380$  m, 船队靠近凸岸航行  $\Delta\theta\approx 10^\circ$ , 船队靠凹岸航行,  $\Delta\theta\approx 3^\circ$  (见图2), 显然凸岸比凹岸要大很多;从这个角度上看,把通航建筑物布置在凹岸,对航行条件是有利的。

船舶上行(逆行)水流作用于船舶操舵上的压力大,有利于舵效的发挥;而船舶下行,作用于舵上的作用力小,不利于舵效的发挥。

这里以那吉航运枢纽为例,当船闸布置在右岸(凹岸)水流顺应主流流向,优化后的通航水流条件平顺,航行条件也较好,船队顺流而下,顶流而上,船队进出口门较顺利,船队上下行的舵角漂角均在许可范围内。若船闸布置在左岸(凸岸),船队下行进口门要经  $90^\circ$  的弯,会造成船头下行时操作不当会碰岸或当船身向河心横漂时船头会碰堤头,当水位流量组合为5a一遇或10a一遇时,船模下行进口门成功次数较少,且船队的操舵角会大于  $20^\circ$ ,漂角大于  $10^\circ$ 。

### 3.4 综合比较

(1)边界条件:弯道曲率半径凸岸  $R\geq 3l_c$ , 凹岸  $R\geq 3l_c+B_0$ ;弯道的横断面呈不等三角形或抛物线形,凸岸浅凹岸深。

(2)水流条件:弯道的水深凹岸比凸岸深;弯道的流速凹岸大,凸岸小;弯道水流受离心力作用,水深沿纵向、横向都发生变化,弯曲水面为一个扭曲面,从纵剖面看,凹岸水位线呈上凸曲线,凸岸水位线使整个水体向凹岸雍高,凸岸水面变低,产生面流指向凹岸,底流指向凸岸的螺旋状水流向前运动。

(3)航行条件:①弯曲航道的曲率半径,凸岸小,凹岸大。②弯曲航道纵向水流流向与航线存有差异,流向与航线轨迹难于一致,总是存在某种夹角,这种夹角不同于口门区由于边界条件造成水流的收缩或扩大,而是形成水流的斜向效应。斜向流速分解成平行航线的纵向流速和垂直于航线的横向流速,横向流速使船舶产生横向漂移,影响船舶(队)进出口门。而弯道段的水流与航线的夹角,对船舶(队)航行的影响,其性质是一样的,但由于弯道段水域宽阔,危险程度比口门区要好。③船舶(队)在弯曲航道段航行,存在艏向角,该角具有瞬时性质,它与弯道段曲率半径有关,一般凸岸处艏向角大,凹岸处小。

## 4 有待研究的内容

船舶(队)回转半径与操舵角的关系。船舶(队)在弯曲航道段航行属曲线运动,是按照一定曲率半径运动,船舶(队)曲线运动时,要预先给定一定的操舵角,该操舵角  $\theta$  与船舶(队)尺寸、航道曲率半径、航速、水深等因素有关,即  $\theta=f(l_c, B_c, T_c, \delta, R, V_1, h, V_2)$ , 式中:  $l_c, B_c, T_c, \delta$  为船舶(队)的长度、宽度、吃水、方形系数;  $R$  为航道的曲率半径;  $V_1$  为水流速度;  $h$  为水深;  $V_2$  为航速等。当船舶(队)尺度一定时,  $\theta=f(R, V_1, h, V_2)$ ; 当弯道为静水时,  $\theta=f(R, h, V_2)$ , 需寻求操舵角与有关因素的关系。

## 5 结 语

(1)当连接段处在弯曲航道段,航宽范围内的水流条件能满足,并不等于航行条件也能满足。对于弯道上的通航条件应以船队的航行参数来衡量,因为船舶(队)受到弯道水流与航线夹角和船队轴线与航线夹角的共同作用,增加了航行难度。

(2)船闸口门区位于弯道段附近时,船舶(队)会受斜向水流和弯道水流的共同作用,增加进出口门的难度,因此口门区应距弯道一定距离。

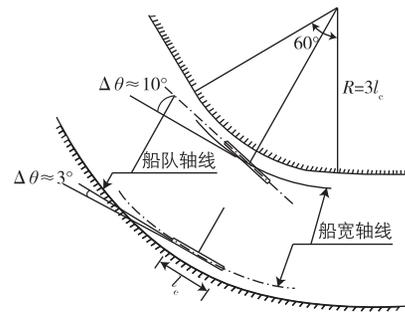


图2 船舶(队)在弯曲航道段凹岸与凸岸上行  
Fig.2 Shipping (team) navigating to the upstream along the concave bank of the bend channel

(3)对于山区河流,通航建筑物宜布置在凹岸.因此,在枢纽工程选址及枢纽中通航建筑物与电站相对位置确定时,应首先考虑将通航建筑物布置在凹岸,其次才是凸岸.

(4)船舶(队)回转半径与操舵角的关系,有待进一步研究.

#### 参 考 文 献:

- [1] GB 50139-2004, 内河通航标准[S]. (GB 50139-2004, Navigation standard of inland waterway[S]. (in Chinese))
- [2] JTJ 305-2001, 船闸总体设计规范[S]. (JTJ 305-2001, Code for master design of shiplocks[S]. (in Chinese))
- [3] JTJ 220-1998, 渠化工程枢纽总体布置设计规范[S]. (JTJ 220-1998, Design code for hydro-junction general layout of canalization works[S]. (in Chinese))
- [4] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992. (WANG Zuo-gao. Ship lock design[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Press, 1992. (in Chinese))
- [5] 周华兴. 船闸通航水力学研究[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2007. (ZHOU Hua-xing. Ship lock hydraulic research [M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2007. (in Chinese))
- [6] 李焱, 郑宝友, 卢文蕾, 等. 引航道与河流主航道的夹角对通航条件影响试验[J]. 水道港口, 2009(1): 42-48. (LI Yan, ZHENG Bao-you, LU Wen-lei, et al. Test on navigation condition influenced by the angle between approach channel and main channel[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2009(1): 42-48. (in Chinese))
- [7] 卢文蕾. 船闸口门区与连接段为弯道时的通航条件[J]. 水运工程, 2009(10): 107-111. (LU Wen-lei. Navigation condition when entrance area and connecting segment of lock are in bend[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(10): 107-111. (in Chinese))
- [8] 李焱, 周华兴, 郑宝友. 那吉航运枢纽通航水流条件水工模型试验报告[R]. 天津: 天津水运工程科学研究所, 2003. (LI Yan, ZHOU Hua-xing, ZHENG Bao-you. The report of hydraulic model test on Naji hydro-junction navigable flow conditions [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2003. (in Chinese))
- [9] 茆长胜. 弯曲航道概化模型试验研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2008. (MAO Chang-sheng. Research report on bending waterway simplified model test[R]. Wuhan: Changjiang Waterway Planning Design and Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [10] 李焱, 李金和, 周华兴. 那吉航运枢纽船闸布置及其通航条件试验研究[J]. 水运工程, 2004(8): 50-54. (LI Yan, LI Jin-he, ZHOU Hua-xing. Optimized arrangement of navigation structures and test study of navigation conditions of Naji hydro-junction[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(8): 50-54. (in Chinese))

## Analysis of navigation condition of the lock located along the concave and convex banks of bend channel

CAO Yu-fen, ZHOU Hua-xing

(Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transportation Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** The actuality of navigation structures layout is summarized in this paper; and some regulations of lock layout in the hinge are explained. The comprehensive analysis of boundary water flow and navigation condition is done. The results indicate: the advantage of being located along concave bank is more than that along convex bank; when the approach channel entrance area of the lock is located along the bend channel, joint action of oblique flow and bend channel flow will occur and the difficulty in ship (team) entering or going out of the entrance is increased; when connecting section is located along the bend channel, shipping rudder operation is more difficult than straight channel when the ship (team) is under the actions of the bend channel flow, navigation line and the axis of ship team. Some relations, such as the relation between turning radius and rudder angle of ship (team), and the relation between stroke and relevant factors, should be studied.

**Key words:** lock; bend channel; concave bank; convex bank; navigation condition