

# 山区河流航电枢纽最大通航流量研究

文训科<sup>1</sup>, 兰芙蓉<sup>2</sup>, 刘晓帆<sup>1</sup>

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对山区河流航电枢纽建设后实际最大通航流量无法满足规范要求的问题, 对山区河流航电枢纽布置后的最大通航流量进行研究。依托东风岩航电枢纽, 采用物理模型试验等方法, 结合东风岩枢纽通航水流条件模型试验和船模试验分析船闸上、下引航道口门区及连接段水流条件和通航条件, 从而对东风岩航电枢纽安全通行的最大通航流量提出建议, 并提出山区河流中低水头航电枢纽最大通航流量不应低于天然情况下该河段的禁航流量等结论。该研究成果可为山区河流中低水头航电枢纽最大通航流量的确定提供借鉴。

**关键词:** 山区河流; 航电枢纽; 禁航流量; 最大通航流量

中图分类号: U 6

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0151-08

## Study on the maximum navigable flow of navigation power junction in mountainous rivers

WEN Xun-ke<sup>1</sup>, LAN Fu-rong<sup>2</sup>, LIU Xiao-fan<sup>1</sup>

(1. Sichuan Communications Surveying and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In view of the problem that the actual maximum navigable flow after the construction of the navigation and power junction in mountainous rivers can't meet the requirement of the code, we study the maximum navigable flow after the arrangement of the navigation and power junction in mountainous rivers. Based on the Dongfengyan navigation power junction, we analyze the flow and navigation conditions of the entrance area and the connecting section of the upper and lower approach channels of the ship lock by means of physical model test and ship model test, and put forward suggestions on the maximum navigation flow for safe navigation of Dongfengyan navigation power junction, and come to the conclusion that the maximum navigable flow of the medium-low-head hydro junction in the mountainous river should not be lower than the forbidden flow of the natural river. The research results may serve as a reference in the determination of the maximum navigable flow of the middle-low-head hydro junction in mountainous rivers.

**Keywords:** mountainous river; navigation power junction; prohibited flow; maximum navigation flow

枢纽最大通航流量通常根据船闸设计最高通航水位确定。根据现行标准<sup>[1]</sup>, 对于山区河流船闸设计最高通航水位, III级船闸的洪水重现期可采用10 a, IV、V级船闸可采用3~5 a。根据四川已建及在建嘉陵江、岷江、涪江上船闸的运行情况发现, 按规范确定的船闸设计最高通航水位值偏高, 在出现相应的最大通航流量时, 河流的流

态早已恢复为天然状态, 纵、横向流速不能满足规范规定的流速限值要求, 进、出船闸的船队操作困难, 不能保证船舶航行安全, 可安全通航的最大通航流量远低于设计最高通航水位对应的流量。因此, 须对山区河流航电枢纽实际最大通航流量进行分析研究。

针对山区河流最大通航流量, 国内已开展一

些研究。郝岭等<sup>[2]</sup>提出采用高水通航历时保证率法确定船闸设计最高通航水位,并对嘉陵江Ⅳ级船闸水位提出高水通航历时保证率 99% 的建议值;闵朝斌<sup>[3]</sup>提出采用高水保证率(或历时率)法结合禁航水位来确定内河航道设计最高通航水位是值得考虑和验证的。本文在上述研究的基础上,依托岷江东风岩航电枢纽工程,结合东风岩枢纽通航水流条件模型试验和船模试验,重点分析东风岩船闸上、下引航道口门区及连接段水流条件和通航条件,以确定东风岩枢纽安全通行的最大通航流量,并对其与河段禁航流量的关系进行研究。

### 1 工程概况

东风岩航电枢纽位于乐山市五通桥区道士观河段,是岷江(乐山—宜宾)干流自上而下开发的第 2 个梯级,是以航运、发电为主,兼顾旅游发

展和其他水资源综合效益的枢纽工程。枢纽正常蓄水位 344.00 m,电站采用低坝开发方式,电站装机容量 270 MW,具有日调节能力,渠化航道里程 14.8 km,航道及船闸等级为Ⅲ级,建成后可常年通行 1 000 吨级船舶。枢纽主要建筑物有河床式水电站厂房、船闸、泄洪冲砂闸和库区防护堤等<sup>[4]</sup>。

#### 1.1 坝址河段地形

推荐坝址位于道士观下游,左岸位于金栗桥上游 300 m 处,坝址处河槽宽约 1 300 m,枯水期江面宽 400~500 m,主河床位于左侧,右侧为失火盆河心洲,洲滩长约 17 km,洲尾河道右岸有神堂溪和石桥沟支流汇入。坝址上游 3.1 km 处为道士观卡口,岷江河道在此处由 1 100 m 缩窄为 600 m 左右。坝址下游约 1.1 km 处河道被双漩坝分为左、右两汉:左汉为支汉,右汉为主汉。坝址河段河势见图 1。

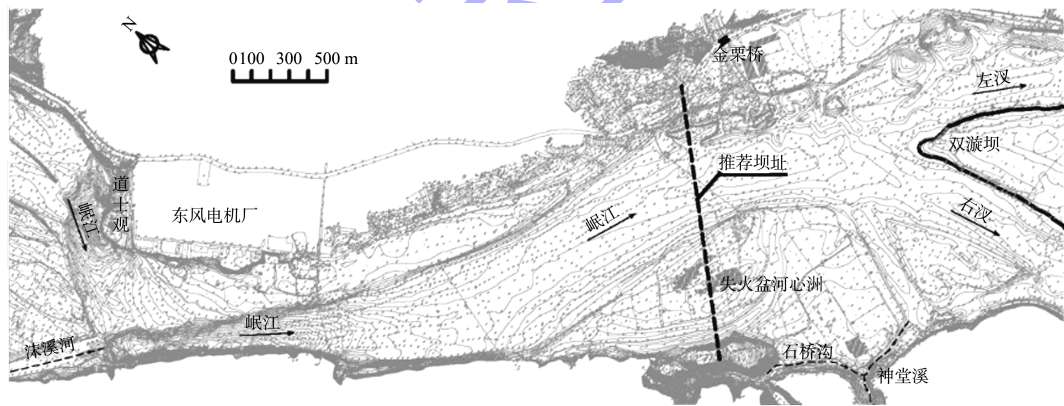


图 1 坝址河段河势

#### 1.2 枢纽总平面布置

枢纽布置方案采用左厂房右船闸方案,即厂房布置于左岸主河床,船闸布置于右岸河心洲,沿坝轴线从左至右依次布置 36.5 m 长左岸接头坝、271.5 m×22.0 m(长×宽)电站厂房及安装间、1 孔 5 m×4 m(宽×高)的排漂闸和 31 孔 20 m×

13.5 m(宽×高)泄洪闸、14 m 宽右侧连接坝、63 m 宽船闸、128 m 右岸接头坝。船闸轴线的确定综合考虑枢纽布置要求、二线船闸布置及与上下游主河道平顺衔接要求。根据枢纽泄洪及通航衔接的要求,船闸侧上游疏挖至 333.00 m 等高线,坝下疏挖至 330.00 等高线。东风岩航电枢纽布置见图 2。

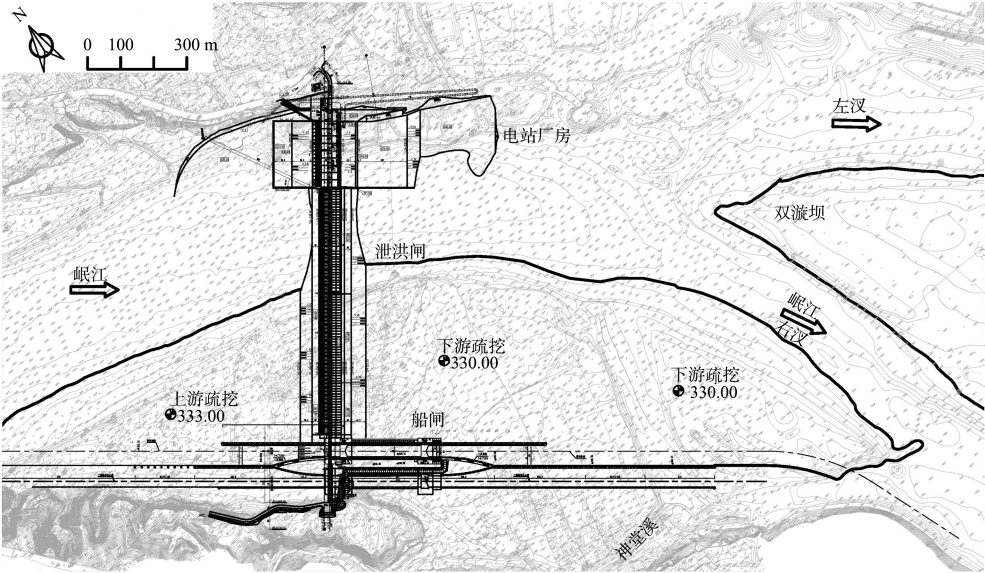


图 2 推荐方案枢纽布置 (单位: m)

船闸轴线沿右侧河岸垂直于坝轴线布置, 船闸由上下闸首、闸室和上下引航道组成, 全长 1 752 m。上闸首上端线位于坝轴线上游 30 m 处, 上闸首顶高程为 347.40 m, 进水口段上方布置了 7 m 宽的交通桥。上闸首长 50 m, 内外边墩顶宽 22 m; 闸室长 200 m, 内外闸室墙顶宽为 8 m; 下闸首长 45 m, 下闸首内外边墩顶宽 22 m。上引航道采用向内拓宽布置, 往上游依次布置了 191.2 m 长的导航段、233.8 m 长的调顺段及 180 m 的停泊段。下引航道采用向内侧拓宽布置, 往下游依次布置了 186.2 m 长的导航段、275.8 m 长的调顺段, 180 m 长的停泊段以及根据模型试验建议增加的 210 m 长的直线段。

1.3 水库运行方式

- 1) 当坝址来流流量小于或等于电站引用流量 4 404 m<sup>3</sup>/s 时, 库水位维持在正常蓄水位 344.0 m, 闸门全关, 流量全部通过水轮机下泄;
- 2) 当坝址来流流量大于 4 404 m<sup>3</sup>/s、小于 12 000 m<sup>3</sup>/s 时, 库水位维持在正常蓄水位 344.0 m 至死水位 343.5 m 之间运行, 水轮机过流 4 404 m<sup>3</sup>/s, 其余水量通过逐步开启闸门全弃;
- 3) 若预报有超过 12 000 m<sup>3</sup>/s 洪水时, 老木孔敞泄后东风岩可根据淹没控制水位及上下游航运要求开始加大泄量下泄;

- 4) 入库流量达 15 000 m<sup>3</sup>/s 左右时水库敞泄, 水位在 339.0~340.0 m;
- 5) 水库退水, 流量为 15 000 m<sup>3</sup>/s 以下时, 可逐步将坝前水位回蓄至正常蓄水位 344.0 m。

1.4 通航参数及要求

- 1) 设计代表船型: 2×1 000 t, 2 排 1 列分节驳顶推船队, 船队尺寸为 168.0 m×10.8 m×(2.2~2.6)m(长×宽×吃水);
- 2) 设计最高通航水位对应流量: 根据规范要求, 东风岩枢纽船闸设计最高通航水位洪水重现期可采用 10 a, 其对应的通航流量为 30 100 m<sup>3</sup>/s;
- 3) 口门区最大流速限值: 纵向流速  $v_y \leq 2.0$  m/s, 横向流速  $v_x \leq 0.3$  m/s, 回流流速  $v_0 \leq 0.4$  m/s;
- 4) 船队航行参数判别标准。船队航行参数判别标准参照相同试验研究采用的航行标准, 船队在口门区航行时, 操舵角应不大于 20°, 航行漂角应不大于 10°。

2 模型设计与验证

根据东风岩整体水工模型试验报告<sup>[5]</sup>, 物理模型采用几何比尺为 1:110, 模拟范围从坝轴线上游约 1.8 km 至坝轴线下游约 2.2 km 处, 总长约 4.0 km。河道地形采用断面桩点法, 模型安装采用水准仪和经纬仪控制, 地形高程误差、平面距



离误差、建筑物高程误差以及长度误差精度符合试验规程规范要求。

模型与原型主要采用洪、中、枯三级流量瞬时水面线进行水位、流速、流向验证试验,结果表明模型与原型的水位差以及模型流速值与原型值差值均满足规范要求,浮标的运动轨迹与原型浮标基本一致,流线基本重合。船模制成后为检验船模与实船的排水量、重力及机动性能的相似性,根据实船资料并按照相关规程<sup>[6-7]</sup>要求进行率定试验,率定了 2.0、2.5、3.0、3.5 和 4.0 m/s 5 种静水航速,并以 2.5 和 3.0 m/s 的航速为主要试验航速。为满足船模的操作性与实船相似,进行了尺度效应修正,根据要求采用减小舵面积的方法改变舵效,从而使船模与实船的操作性能达到相似。

东风岩枢纽通航水流条件模型试验和船模试验在东风岩枢纽整体水工模型试验的基础上,采用 VDMS 实时测控系统,测量船闸上、下游引航道口门区及连接段的流场、流速,测量船模航行时的船位、操舵过程,获取所需的流速流态以及船模航行参数(图 3、4)。



图 3 通航水流条件模型试验



图 4 船模试验

结合枢纽的运行调度方式和通航要求,试验主要分 11 级流量,分别为 856、1 468 m<sup>3</sup>/s(3 台机引用流量)、2 940 m<sup>3</sup>/s(6 台机引用流量)、4 404 m<sup>3</sup>/s(9 台机组满发)、9 000、12 000 m<sup>3</sup>/s(分界流量)、14 000、15 000 m<sup>3</sup>/s(敞泄流量)、16 900 m<sup>3</sup>/s(保证率  $P=50\%$ )、24 300 m<sup>3</sup>/s( $P=20\%$ )和 30 100 m<sup>3</sup>/s( $P=10\%$ )。

3 模型成果分析

3.1 通航水流条件

3.1.1 上引航道口门区及连接段水流条件

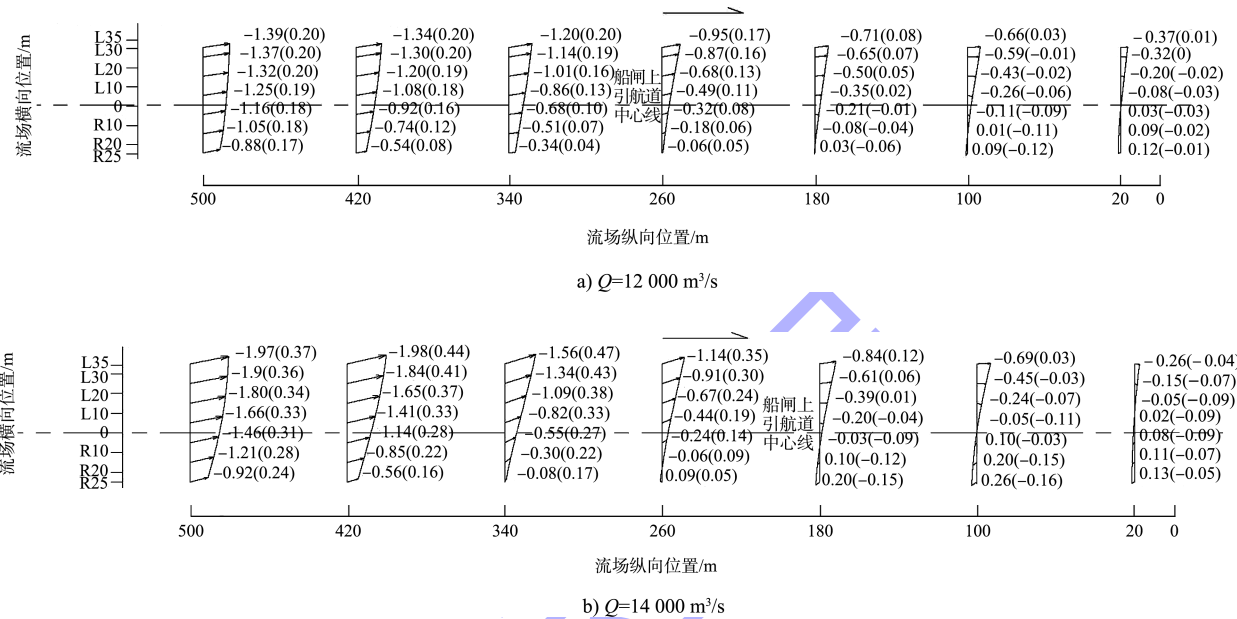
试验结果表明,当流量  $Q < 4\,400\text{ m}^3/\text{s}$  时,由于泄水闸关闭,只有左侧电站泄流,受上游泄水闸阻挡顶托的影响,水流在上引航道口门上游开始斜向电站,口门区及引航道左侧形成 1 个三角形回流区,回流强度不大但范围较大。当  $Q = 4\,400\text{ m}^3/\text{s}$  时,斜流起点在口门上游 600 m 左右,口门区及连接段形成 2 个反向回流区,回流中心在口门上游 40 m 左右,回流速度小于 0.1 m/s,口门区最大纵向流速为 0.41 m/s,最大横向流速为 0.14 m/s;连接段最大纵向流速 0.65 m/s,最大横向流速 0.15 m/s。因此当  $Q \leq 4\,400\text{ m}^3/\text{s}$  时,上游引航道口门区及连接段通航水流条件良好。

当流量  $Q$  在  $4\,400 \sim 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,电站和泄水闸联合运行,上、下游引航道口门区及连接段水流条件受到枢纽泄水闸调度方式的影响。泄水闸下泄洪水时,来水主要沿河道左侧过流,在引航道左侧形成斜流,水流转绕导流堤堤头而流向枢纽,不同流量时水流在距堤头不同的距离有不同的斜流偏角,口门区左侧为斜流区,由于口门右侧导航墙的影响,口门区范围及引航道内受斜流作用下的回流难以测量。

当流量  $Q = 12\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,由于河道主流速度较小,口门区纵、横向流速不大,口门区左侧最大纵向流速 1.39 m/s,最大横向流速 0.24 m/s,连接段最大纵向流速 1.6 m/s,最大横向流速 0.15 m/s,流速分布见图 5a);当流量  $Q = 14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,口门区左侧最大纵向流速 1.14 m/s,最大横向流速

0.35 m/s(>0.3 m/s), 连接段最大纵向流速 1.97 m/s, 最大横向流速 0.47 m/s, 口门区及连接段横向流速超标, 流速分布见图 5b); 当  $Q=15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 口门区左侧最大纵向流速 2.34 m/s, 最大横向流速 0.52 m/s, 连接段最大纵向流速 2.85 m/s,

最大横向流速 0.42 m/s。口门区及连接段纵、横向流速全面超标, 水流条件不能满足规范要求; 当流量  $Q>15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 泄水闸全开敞泄。试验结果表明, 所有流量在口门区及连接段的纵、横向流速均超过规范值, 水流条件不能满足要求。



注: 1. 上引航道口门区流场纵向以堤头为坐标原点, 横向以引航道中心线为原点, 向右为“R”, 向左为“L”。  
2. 纵向流速向上游为“+”, 向下游为“-”; 横向流速向左岸为“+”, 向右岸为“-”。  
3. 括号外为纵向流速, 括号内为横向流速。

图5 上引航道口门区及连接段流速分布

3.1.2 下引航道口门区及连接段水流条件

试验结果表明: 当流量  $Q<4\,400\text{ m}^3/\text{s}$  时, 泄水闸关闭只有电站机组过流, 由于下游河道中心双漩坝地势较高, 阻止水流下泄, 电站下泄水流绝大多数由右侧河床过流, 下泄主流与下游引航道中心线形成较大的交角, 并在口门区形成大范围回流区, 但由于主流流速不大, 回流也较小 ( $<0.24\text{ m/s}$ ); 连接段最大纵向流速 1.19 m/s, 最大横向流速 0.6 m/s, 主要出现在堤头下游 600~700 m 范围内。

当流量  $Q$  在  $4\,400\sim15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 该流量段电站和泄水闸联合运行, 下泄水流主要向右侧河道汇集, 在口门区和连接段形成一条明显的水流分离带, 分离带的左侧为斜流区, 右侧形成回流区, 且随着流量的变化分离带的位置随之变化, 回流区回流强度和范围不稳定, 连接段弯道航线

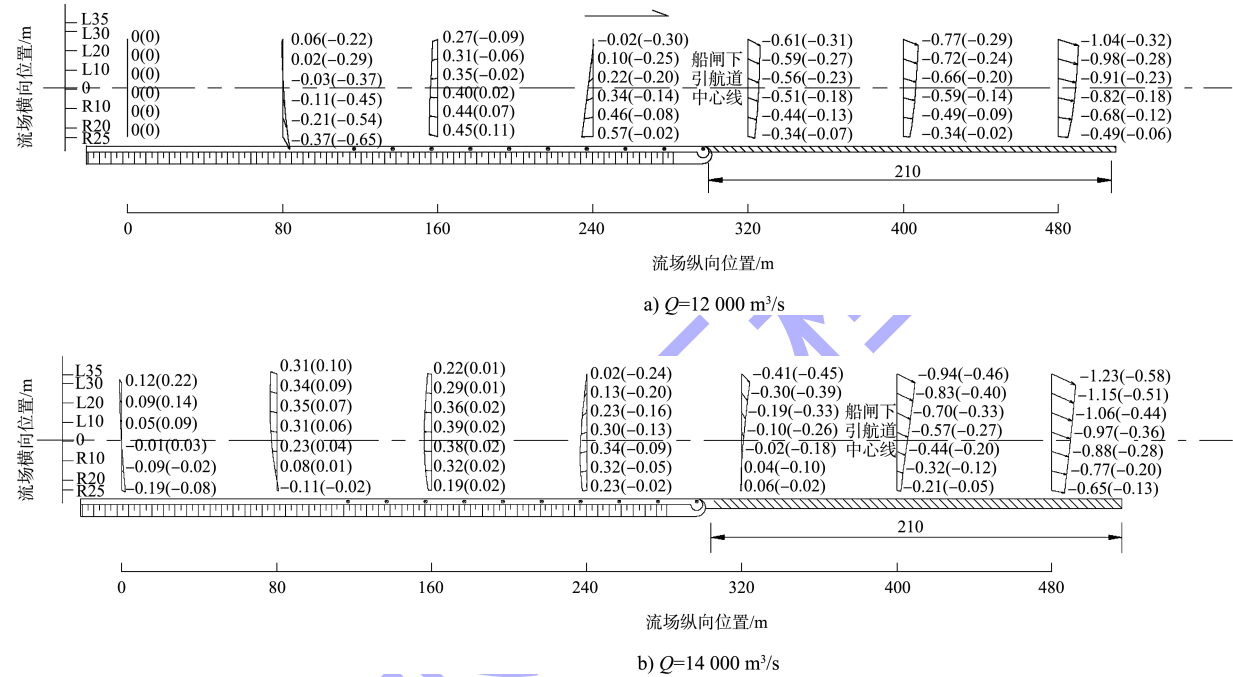
基本处于斜流区内, 且水流与航线的夹角较大, 造成横向流速过大。

当流量  $Q=9\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 口门区左侧最大纵向流速 0.89 m/s, 最大横向流速 0.23 m/s; 当流量  $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 口门区左侧最大纵向流速 1.04 m/s, 最大横向流速 0.32 m/s, 流速分布见图 6a); 当流量  $Q=14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 口门区左侧最大纵向流速 1.23 m/s, 最大横向流速 0.36 m/s, 流速分布见图 6b)。试验结果表明: 当流量  $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 下引航道口门区左侧末端个别点横向流速超标, 其余基本能满足规范要求; 当流量  $Q=14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 下引航道口门区横向流速大面积超标, 无法满足规范要求。当上游来水量  $Q$  在  $15\,000\sim16\,900\text{ m}^3/\text{s}$  时, 泄水闸全开敞泄, 泄水闸下泄水流过右侧沿主河槽汇流而下, 口门区回流区范围减小; 随着流量的增大, 下游水位

抬高,淹没下游江心洲,过水面积增大,水流流线相对较平顺,堤头下水流与引航道中心线的交角减小。当流量  $Q=15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,下引航道口门区纵向流速较  $Q=14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时减小,横向流速超标范围减小,口门区左侧最大纵向流速  $0.71\text{ m/s}$ ,最大横向流速  $0.42\text{ m/s}$ ,但流速随着流量的增加而增大;当流量  $Q>15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,口

门区及连接段横向流速均超标,不能满足规范要求;当流量  $Q\geq 16\,900\text{ m}^3/\text{s}$  时,口门区及连接段纵、横向流速全面超标,水流条件不能满足要求。

根据通航水流条件试验可知,东风岩船闸上下引航道基本能满足规范要求的最大通航流量为  $12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。



注: 1. 上引航道口门区流场纵向以堤头为坐标原点, 横向以引航道中心线为原点, 向右为“R”, 向左为“L”。  
2. 纵向流速向上游为“+”, 向下游为“-”; 横向流速向左岸为“+”, 向右岸为“-”。  
3. 括号外为纵向流速, 括号内为横向流速。

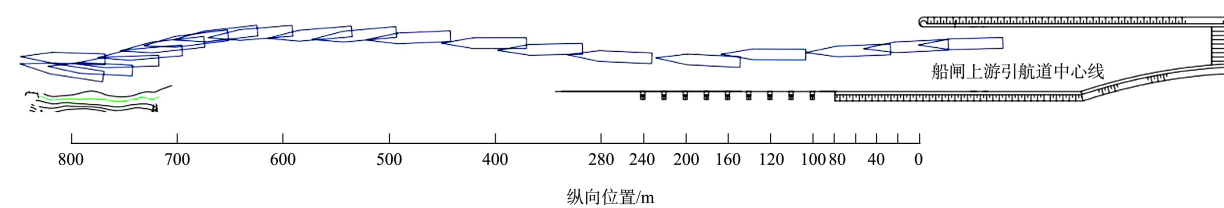
图 6 下引航道口门区及连接段流速分布

3.2 船模试验

3.2.1 上引航道船模试验

船模试验表明: 当流量  $Q<4\,404\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模用  $2.5\text{ m/s}$  的速度进出上引航道口门区均非常顺利, 航行状态良好; 当  $Q=4\,404\text{ m}^3/\text{s}$ , 船模用  $3.0\text{ m/s}$  的速度上行出口门区和  $2.5\text{ m/s}$  的速度下行进口门区均能顺利通过, 该流量口门区存在一定的横流, 因此船模行至堤头附近时, 可适当将船向右靠, 以抵抗横流; 当  $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模用  $3.5\text{ m/s}$  的速度沿航线上、下航行能通过口门, 但

当船模行至距堤头  $400\sim 600\text{ m}$  时需要用较大的舵角 ( $19.7^\circ$  左右), 因此船行至此时须适当压舵航行; 当  $Q=14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模用  $3.5\text{ m/s}$  的航速可以通过该区域, 船模在该区域上行时的操舵角达到了  $27^\circ$ , 最大漂角达  $7^\circ$ , 虽然能勉强上行, 但对船队的操控有很大的风险 ( $Q=14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时上行航线见图 7, 舵角及漂角见表 1); 当  $Q>15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模用  $3.5\text{ m/s}$  航速上行, 进入该区域后横漂严重, 特别是当船队前部或后部已进入强横流区, 船模无法调顺, 很难控制航态, 根本无法上行。



注:  $Q=14\,000\text{ m}^3/\text{s}$ , 船队航速  $v=3.5\text{ m/s}$ 。

图 7 船模上游引航道上行船位

表 1 船闸上、下游口门区及连接段船模航行参数

流量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	航速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	航向	距口门 0~100 m		100~200 m		200~300 m		300~400 m		400~500 m	
			最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )	最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )	最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )	最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )	最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )
14 000(上引航道)	3.5	上行(出)	10.0	3.0	13.4	-2.3	-26.7	-3.4	14.5	1.5	7.8	3.7
12 000(下引航道)	3.5	上行(出)	-26.7	4.4	-5.5	1.1	13.9	-6.7	-17.8	-6.7	-20.0	8.5
14 000(下引航道)	4.0	上行(出)	7.2	1.9	7.2	3.0	7.0	4.5	-17.2	4.5	-17.0	-2.2

流量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	航速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	航向	500~600 m		600~700 m		700~800 m		800~900 m		900~1 000 m	
			最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )	最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )	最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )	最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )	最大舵 角/( $^\circ$ )	最大漂 角/( $^\circ$ )
14 000(上引航道)	3.5	上行(出)	11.2	5.6	17.8	7.1	17.3	6.0	-	-	-	-
12 000(下引航道)	3.5	上行(出)	12.2	9.6	-14.5	12.6	11.7	7.8	10.0	8.5	10.2	9.3
14 000(下引航道)	4.0	上行(出)	-19.5	1.5	-7.8	3.1	-8.9	4.5	12.2	5.9	-21.7	7.5

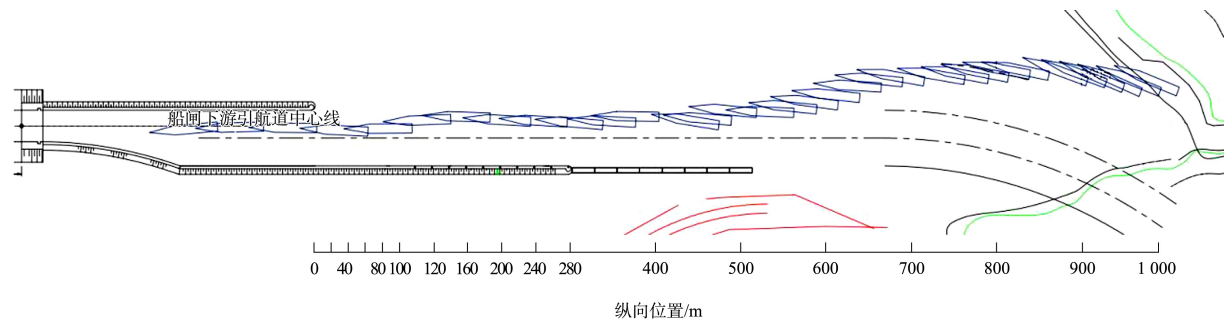
注: 漂角左漂为“-”、右漂为“+”; 舵角左舵为“-”, 右舵为“+”。

3.2.2 下引航道船模试验

船模试验表明: 流量  $Q<4\,404\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模以  $2.5\text{ m/s}$  的速度进出下引航道口门区均非常顺利, 船模航行状态良好; 当  $Q=4\,404\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模以  $3.0\text{ m/s}$  的速度上行进入口门区和  $2.5\text{ m/s}$  的速度下行进入连接段均能顺利通过; 当  $9\,000\text{ m}^3/\text{s}\leq Q\leq 12\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模以  $3.0\text{ m/s}$  和  $3.5\text{ m/s}$  的航速均能在预设的航线上顺利下行通过口门区进入连接段, 但无法沿原设计航线上行进入口门区, 通过多次船模试航, 找出顺利上行的航线方案为: 船模航速  $3.5\text{ m/s}$ , 出弯时航向保持正对来流方向, 操左舵并适时调整舵角, 使船身缓慢行进到河中距岸  $200\text{ m}$  左右; 操右舵, 调整航向顶流上行; 上行

距右导航墙头  $200\text{ m}$  左右时, 适当回舵, 使船身在斜流的作用下, 缓慢向左靠向口门区, 整个船身进入导航墙范围内后, 打左舵, 调顺船身并保持航向进入引航道; 当流量  $12\,000<Q\leq 15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模能安全下行; 当  $Q=14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 船模上行时航速须调至  $4.0\text{ m/s}$  才可按调整后的航线方案勉强上行; 但当  $Q>14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 即便按调整过的上行方案也无法上行; 当  $Q>15\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 水闸敞泄, 船模根本无法上行。  $Q=1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $Q=14\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时上行航线船位见图 8, 舵角及漂角见表 1。

根据船模试验可知, 东风岩船闸上、下引航道能安全通行的最大通航流量为  $12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。



a)  $Q=12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ , 船队航速  $v=3.5\text{ m/s}$



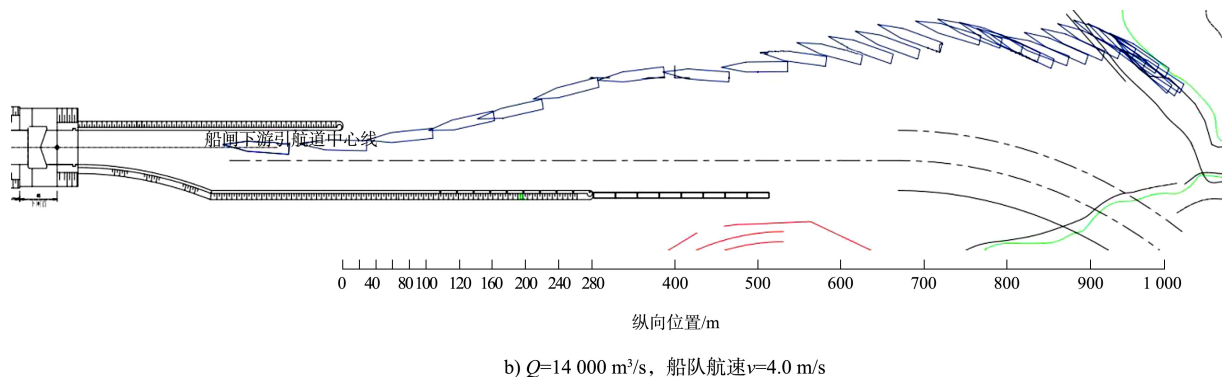


图 8 船模下游引航道上行船位

#### 4 最大通航流量与河段禁航流量的关系

四川省主要通航干流长江、嘉陵江、岷江、金沙江、渠江、沱江、涪江等，均属山区河流，具有河道迂回、河谷狭窄、滩多水急、落差大等特点。同时，山区河流也具有洪、枯水位变幅大，峰高时短，峰形尖瘦，坡降陡；枯水流量小，历时较长、流态险恶；河流泥沙量大，且伴随洪峰出现等水文特点。山区河流的自然条件及水文情势使得山区河流洪水流速大，流态极差，漩、泡、急流交相出现，险态环生<sup>[8]</sup>。洪水期恶劣的流态，严重影响了船舶的航行安全，故通航河流沿岸各地海事管理部门均根据当地河段洪水情势确定了禁航水位：禁航水位大致相当于 1 a 一遇的洪水水位。禁航水位的设定，说明天然情况下，由于河流水文、地形、地质等条件限制，在河道来流量大于一定流量（即禁航流量）的情况下，河流的流速、流态无法满足船舶安全通航的要求。

据调查，岷江下游段当地海事部门根据该河段洪水情势确定了岷江下段禁航流量为 12 000 m<sup>3</sup>/s。综合上述通航水流模型试验和船模试验成果可知，东风岩航电枢纽能满足安全通行的最大通航流量为 12 000 m<sup>3</sup>/s，也就是说东风岩航电枢纽能满足安全通行的最大通航流量与禁航流量基本一致。通过对东风岩枢纽坝址处流量历时综合保证率曲线的分析得知，当来流量为 12 000 m<sup>3</sup>/s 时，相应的历时保证率为 99.5%，对应洪水频率约 1 a 一遇，平均每年出现天数为 1.74 d，占船闸设计通过能力的 0.52%，单向通过能力减少约为 6.32 万 t，对船闸通过能力的影响不大。

上述河流梯级开发时各枢纽大多数为中、低水头枢纽，由于调蓄能力有限，一般为槽蓄型水库。槽蓄型水库具有天然河道和人工水库的双重特性，即当入库流量小于多年平均流量时，人工水库的特性明显；当入库流量大于多年平均流量时，天然河道的特性较为明显。特别是近 20 年来，随着“全节制闸方案”在中、低水头枢纽建设中的全面推广，在大于拉沙流量时（约相当于常年洪水流量），枢纽全闸开启、敞泄拉沙，在洪水期枢纽河段基本恢复为河流的天然情况。综上可知，山区通航河流建设中、低水头枢纽后，主要是枯水期的水流条件得到改善，而洪水期对水流条件的改善主要在敞泄前，敞泄后则与天然情况差别不大。考虑到中、低水头枢纽的上述特性，结合河段禁航水位设定的现实情况，建议渠化后枢纽最大通航流量不应低于天然情况下该河段禁航水位对应的禁航流量。

#### 5 结论

1) 禁航水位的设定说明，天然情况下，由于河流水文、地形、地质等条件限制，在河道来流量大于一定流量（即禁航流量）情况下，其流速、流态无法满足船舶安全通航的要求。

2) 综合东风岩航电枢纽通航水流模型试验和船模试验成果可知，东风岩航电枢纽能满足安全通行的最大通航流量为 12 000 m<sup>3</sup>/s，该流量与河段禁航流量基本一致。