



景洪升船机下游引航道口门区 通航水流条件观测研究^{*}

刘剑明¹, 王新², 黄群¹, 付烈坤¹

(1. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 景洪 666100;

2. 南京水利科学研究院 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对通航建筑物下游引航道口门区复杂流场的现场观测难题, 发明了高精度的水流流速、流场测试方法, 准确获得不同流量工况下景洪升船机下游引航道口门区的横向、纵向及回流流速, 揭示带透水导墙的引航道口门区流场结构特征, 为升船机船舶通航安全评价、航路航法优化等通航管理提供重要依据; 并将原型观测与模型试验结果进行对比分析, 针对通航水流条件模型试验及船舶通航安全评估提出建议, 可为相关研究提供参考。

关键词: 通航建筑物; 下游引航道; 口门区; 通航水流条件

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0006-06

Study on navigation flow conditions of downstream approach channel of Jinghong ship lift

LIU Jian-ming¹, WANG Xin², HUANG Qun¹, FU Lie-kun¹

(1. Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Jinghong 666100, China; 2. Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: In order to solve the problem of the prototype observation for the complex flow field at the entrance area of downstream approach channel of navigation structures, we invent a new method to measure the flow velocity and field more precisely, and obtain the transverse velocity, longitudinal velocity and reflux velocity at the entrance area of the downstream approach channel of the ship lift under different flow conditions and reveal the characteristics of the flow field at the entrance area of the approach channel with permeable guide wall, which provides an important basis for navigation safety evaluation of ship lift and optimization of route and navigation method. Comparing the results of prototype observation and model test, we put forward some suggestions for the model test of navigable flow condition and the evaluation of ship navigation safety, which can provide reference for related research.

Keywords: navigation structure; downstream approach channel; entrance area; navigation flow condition

水利水电工程中通航建筑物运行需要与发电、泄洪相协调, 枢纽运行会在上、下游产生复杂的水流条件, 直接关系到船舶的通航安全。通航建筑物引航道口门区是通航建筑物进出口与上、下游主航道起纽带作用的区域, 是船舶(队)进出引

航道的咽喉^[1]。口门区长度通常为 2.0~2.5 倍的船(队)长, 宽度与引航道口门宽度相同。由于处在边界突变、主流扩散、动水静水相互作用区, 口门区存在斜向流、剪切漩涡、回流等复杂流态^[2-3], 口门区的通航水流条件是通航建筑物通航

收稿日期: 2020-04-10

*基金项目: 中国华能集团科技项目(HNKJ17-H19); 国家自然科学基金项目(51779151)

作者简介: 刘剑明(1983—), 男, 工程师, 从事水电厂技术管理工作。

通讯作者: 王新(1983—), 男, 博士, 教授级高工, 从事通航建筑物相关科研工作。E-mail: xwang@nhri.cn。

安全评价的重要技术指标。现行规范对口门区横向、纵向和回流流速进行了明确规定, 对 I~IV 级船闸, 要求纵向流速不大于 2 m/s , 横向流速不大于 0.3 m/s , 回流流速不大于 0.4 m/s 。

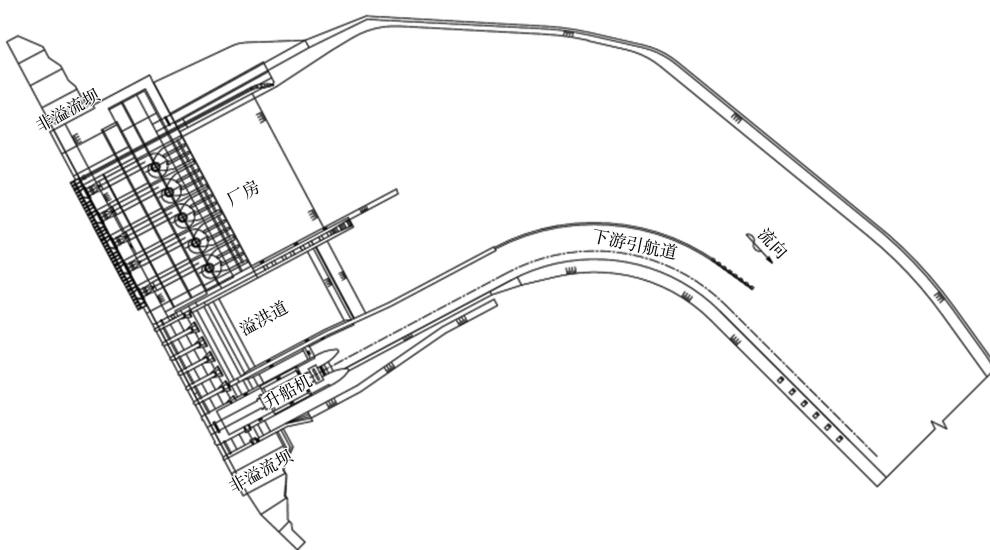
我国大型升船机基本建于高坝大库, 下游引航道口门区通航水流条件是船舶通航安全论证的核心内容。在工程设计阶段, 通常采用整体物理模型试验手段, 研究通航建筑物口门区通航水流条件, 并优化工程设计以满足规范要求; 工程建成投运前, 需要通过原型观测来掌握实际的水流条件, 为通航运行管理提供最直接的依据。目前相关文献报道绝大部分为模型试验研究^[4-6], 水流条件原型观测相对偏少, 而模型与原型之间存在一定的缩尺效应, 因此开展通航水流条件原型观测具有重要意义。本文针对通航水流条件原型观测技术难题, 发明高精度的水流流速、流场测试方法, 准确获得不同流量工况下景洪升船机下游口门区通航水流条件, 为升船机船舶通航安全评价、航路航法优化等通航管理提供重要依据, 并将原型观测与模型试验结果进行对比分析, 可为相关研究提供参考。

1 工程概况

景洪水力式升船机建于 IV 级山区航道, 可通

航 500 吨级船舶, 升船机位于枢纽右侧, 左侧有电站和泄洪坝段。下游引航道总长 508.5 m , 宽 40 m , 由于受地形条件限制, 下游引航道部分布置在近 73° 的弯段内, 转弯半径 222 m 。在下游引航道左侧布置下游导航墙, 总长为 443.2 m , 为方便过坝船舶进出停靠, 在导航墙直线段布置了由系船柱和系船环组成的靠船段。升船机最大通航流量为 $7\ 100 \text{ m}^3/\text{s}$ (其中发电 $3\ 300 \text{ m}^3/\text{s}$), 最小通航流量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (1 台机组发电), 导航墙采用实体墙和透空式结构组合, 在导航墙末端 60 m 采用透空式以减小内外水位差及均化水流波动。

口门区是引航道内外静水动水相互作用的复杂区域, 通常会产生影响船舶通航安全的横流和回流, 因此, 规范对口门区通航水流条件做出明确规定。对于引航道口门区范围, 规范定义口门区长度为设计船型船舶长度的 $2\sim2.5$ 倍, 自口门位置沿引航道中心线向下计算, 取设计船舶最大长度 46.2 m , 则口门区长度为 $92.4\sim115.5 \text{ m}$, 故取 120 m ; 宽度取与口门同宽, 平行引航道中心线布置。对于 IV 级航道, 口门区通航水流条件应满足: 横向流速 $\leq 0.3 \text{ m/s}$ 、纵向流速 $\leq 2.0 \text{ m/s}$ 、回流流速 $\leq 0.4 \text{ m/s}$ 。枢纽及下游引航道总体布置见图 1。



a) 平面布置

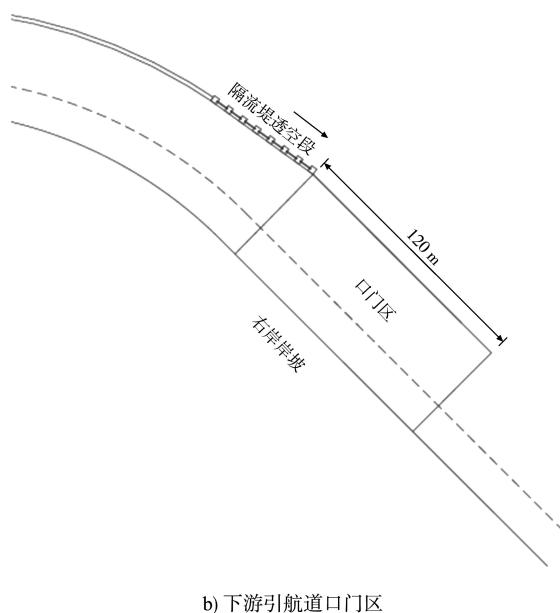


图 1 枢纽及下游引航道总体布置

2 口门区通航水流条件观测

2.1 流速观测新方法

引航道口门区流速一直是测试的难点，最常采用的接触式的高精度流速仪(ADV、ADCP)测试方法及非接触式的大范围流场测试方法(PIV)都存在一定的不足。流速仪测量某点流速需要船舶配合，但船舶在口门区横流、回流复杂水流作用下很难保持稳定状态，测点位置和流速方向无法准确把握；PIV 测试需要抛洒大量浮子，需对拍摄的照片进行修正，测试误差相对较大，而且得到的是水流最表层的流速。针对目前流速测试难题，发明了全新的观测方法，采用自动跟踪式全站仪，配置 360°全方位反射棱镜，发明并设计出能够与水流保持很好跟随性的浮子，上部为浮体，保持浮子漂浮，下部为“十”字中心对称的阻水板，上下相距 50 cm，保证整个浮子与水面以下 50~70 cm 处水流同速运动，在上部浮体中心的顶部安装反射棱镜，将浮子抛入水中后，全站仪自动捕捉棱镜的位置，并实时记录显示棱镜精确坐标，其定位精度达到 0.5 mm，采样频率 10 Hz，能够准确获得浮子水平两个方向的运动速度，即水流横向和纵向流速。另外，通过追踪浮子的运动轨迹，可以得到口门区的流场分布，这是单点或断面流速测试难以实现的。自动跟随浮子设计及流速处理

如图 2 所示。横向流速 v_x 、纵向流速 v_y 、合流速 v 分别为：

$$v_x = \Delta d_x / \Delta t \quad (1)$$

$$v_y = \Delta d_y / \Delta t \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\Delta d_x^2 + \Delta d_y^2} / \Delta t \quad (3)$$

式中： Δd_x 为浮子沿 x 方向的位移， Δd_y 为浮子沿 y 方向的位移， Δt 为时间间隔。计算简图见图 3。

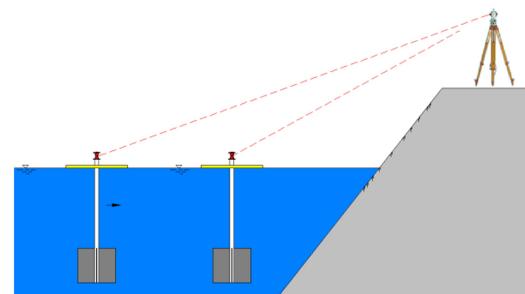


图 2 流速测试

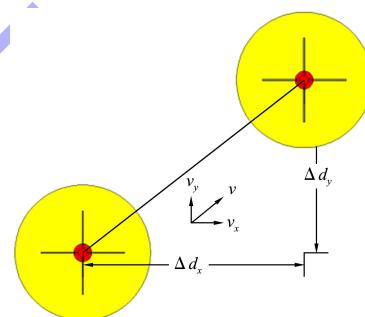


图 3 计算简图

采用跟随浮子高精度测量方法，开展景洪升船机不同流量工况下游引航道通航水流条件观测，掌握下游口门区水流流场、流速分布情况，分析船舶的通航安全。从多次观测中，选取最小出库流量 500 m³/s(最小通航流量)和运行中最大出库流量 3 300 m³/s(5 台机组满发流量)2 个工况进行详细介绍。

2.2 观测成果

2.2.1 最小通航流量工况

在最小通航流量 500 m³/s 发电流量条件下，实测升船机下游引航道口门区流场(图 4)。可以看出，由于下游引航道隔流堤末段采用透空形式，主流经过透空堤进入引航道内，首先横向流动，然后近岸向下游纵向流动，在堤头附近形成范围

很小、强度很弱的回流, 从透空堤进入引航道的水流总体上沿纵向顺流而下, 在口门区与主流汇合, 在其影响下, 主流产生的斜向流未能在口门区形成近岸回流, 口门区内流场较为平顺。

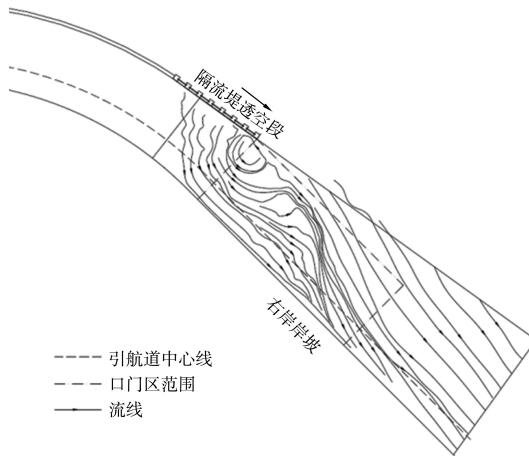


图4 下游引航道口门区流场 ($Q=500 \text{ m}^3/\text{s}$)

从测点流速可以看出, 在最小通航流量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ (发电)条件下, 下游引航道口门区范围内流速总体较小, 纵向流速均小于 2.0 m/s , 最大为 1.617 m/s , 横向流速均在 0.3 m/s 内, 最大接近 0.3 m/s , 在隔流堤堤头局部很小的回流最大流速 0.259 m/s , 均满足规范要求。因此, 在机组发电小流量条件下, 口门区通航水流条件较优, 满足船舶安全通航要求。

2.2.2 5台机组满发流量工况

在实际运行最大流量——5台机组满发流量 $3\,300 \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下, 实测景洪升船机下游引航道口门区流场(图5)。可以看出, 主流经过隔流堤头后扩散, 在引航道口门区形成斜向水流, 斜向水流与引航道静水发生剪切, 形成回流, 均属于引航道口门区的典型流态。升船机下游引航道隔流堤末段采用透空形式, 主流通过透空堤进入引航道内, 首先横向流动, 然后近岸向下游纵向流动, 在口门区内距离口门约 50 m 的位置与下游回流正面相遇, 在相互挤压下共同流向中间主流。因此, 从流场图可以清晰看出, 口门区内形成2个回流, 一个是引航道口门下游 $50\sim150 \text{ m}$ 范围的顺时针主回流区, 另一个是在口门附近的逆时针次回流区。图6为升船机下游引航道口门区附近实

测淤积情况, 阴影部分为需要清淤的范围。可以看出, 淤积的主要区域总体上是与2个回流区对应的, 淤积情况也是对流场的侧面反映。因回流主要出现在靠近岸边的狭长范围内, 对船舶航行影响很小, 且从水流流态看, 2个回流的强度均较小。

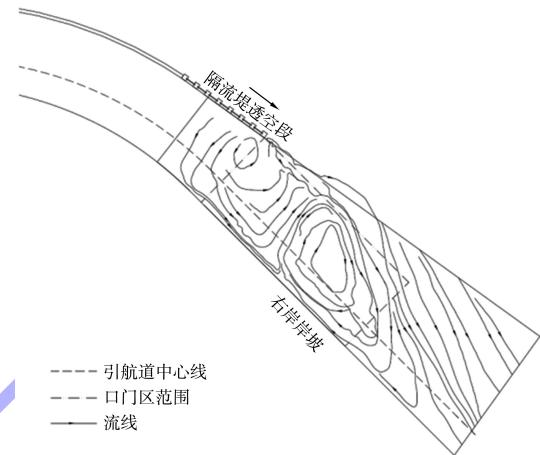


图5 下游引航道口门区流场 ($Q=3\,300 \text{ m}^3/\text{s}$)

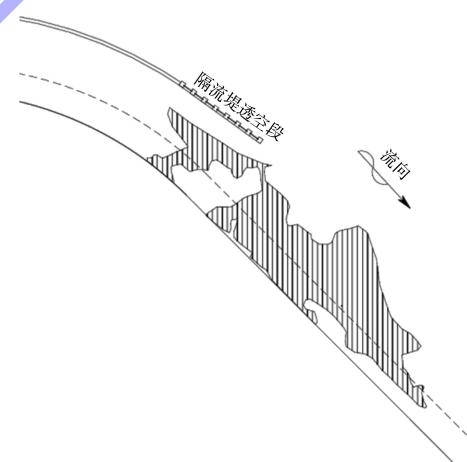
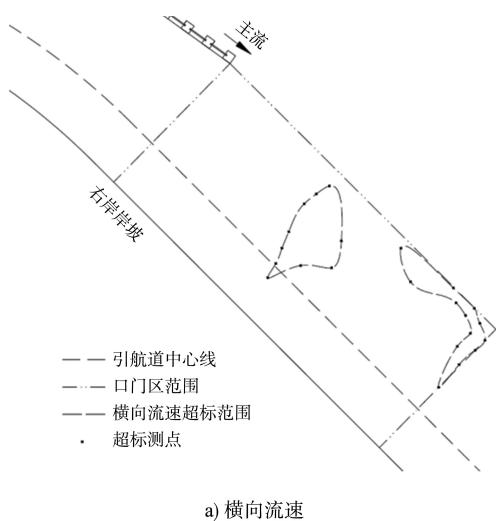
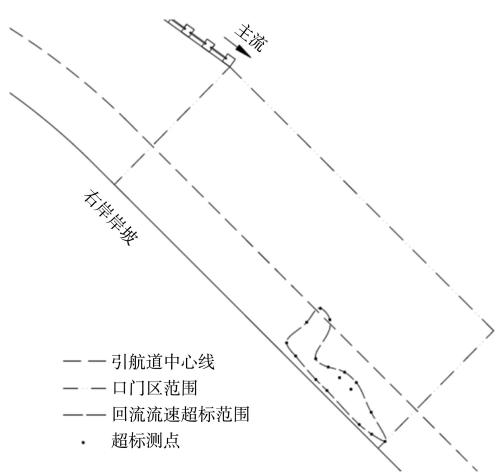


图6 引航道口门区淤积范围

从测点流速可以看出, 在5台机组满发流量下, 下游引航道口门区范围内流速总体较小, 纵向流速均小于 2.0 m/s , 满足规范要求, 但横向和回流流速有部分测点超标, 其超标点位和超标范围分布见图7。横向流速超标范围约为口门区面积的 10% , 主要集中于口门区左上角局部区域和由回流造成的中部小范围区域; 回流流速超标范围约为口门区面积的 5% , 主要集中于口门区右下角靠近岸边较窄的区域。



a) 横向流速



b) 回流流速

图 7 超标点位和范围

尽管实测口门区横向流速和回流流速在局部区域超标，但并不影响船舶通航安全。根据长期研究经验，通航建筑物下游引航道口门区流速局部超标是共性问题，规范中对于引航道口门区流速要求偏于严格，在其规定的口门区范围内基本无法完全达到流速要求。在口门区下游与主流衔接的一角，实际横向流速通常会超标($>0.3\text{ m/s}$)，近岸区域的回流速度也往往会略大($>0.4\text{ m/s}$)，但均不影响船舶的航行安全。因为口门区的横向流速是指垂直于引航道中心线的水流速度，当斜向流与引航道中心线夹角较大时，该分速度就偏大，而实际船舶的航行并非沿着引航道中心线，通常会迎着主流行驶，船舶实际受到的横流侧向作用很小，因此口门区一角横向流速超标区域对船舶航行并不影响；同时，对于靠近岸边的回流区，船舶行驶过程中并不经过该区域，故局部回流超标也不影响。另外，因回流引起的横向流速超标也是常见现象，如图 7a) 中口门区中间超标区，但一般范围较小，从船舶的尺度、动力和操纵性方面综合考虑，回流引起的横向流速超标对船舶安全航行影响很小。

景洪升船机实船试航获得的船舶上行通过口门区过程见图 8。在船舶从主航道通过口门区进入引航道的过程中，船长根据水流条件驾驶船舶，在通过引航道口门区时迎着主流行驶，并非沿引航道中心线，因此，船舶所受横流作用大幅减小，同时口门区内纵向流速很小，船舶能够以较快的速度穿过回流引起的横向流，顺利进入引航道。因此，在 5 台机组满发流量条件下，尽管口门区局部水流流速超标，但对船舶安全通航影响不大，船舶能够安全通过下游引航道口门区。

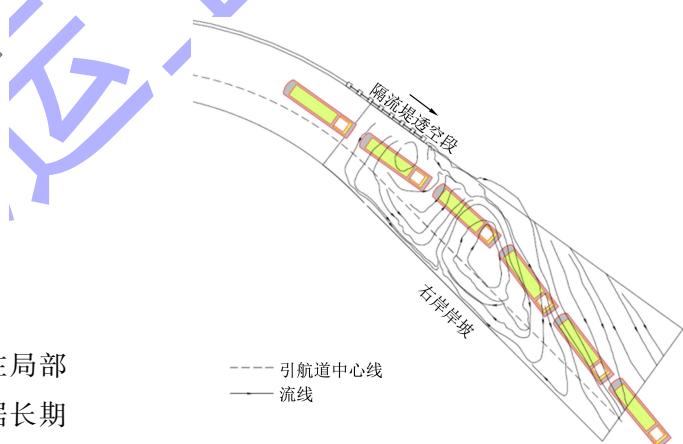


图 8 船舶上行通过口门区过程

3 原型与模型对比分析

大量研究和工程实践表明，通航水流条件的原型与模型存在一定的缩尺效应，尤其当物理模型比尺较小时(几何比尺 ≥ 100)，水面波动问题会出现明显失真，实际通航水流条件往往比模型更恶劣。在景洪升船机设计阶段曾开展下游引航道通航水流条件物理模型试验^[7](比尺为 1:100)，为检验模型试验的可靠性，仍以最小通航流量 500 m^3/s 和运行中最大出库流量 3 300 m^3/s (5 台机组满发流量)2 个工况为例，进行原观与物理模型

成果对比。表1为2个工况物理模型和原型观测的横向、纵向及回流流速极值统计结果。

表1 原型观测与模型试验对比

工况	研究方法	流速极值/(m·s ⁻¹)		
		纵向	横向	回流
最小通航流量 (Q=500 m ³ /s)	模型试验	0.360	0	0
	原型观测	1.617	0.290	0
5台机组满发流量 (Q=3 300 m ³ /s)	模型试验	1.390	0.150	0.310
	原型观测	1.994	0.986	0.683

在最小通航流量条件下, 原型和模型下游引航道口门区流态总体一致, 口门区水流平缓、流速较小, 均无回流。然而, 流速分布和大小原模型存在明显差异, 物理模型最大纵向流速为0.360 m/s, 无横向流速, 其各项流速指标均远小于规范规定的允许值; 而原型观测最大纵向流速为1.679 m/s, 存在横向流速, 最大横向流速为0.290 m/s, 已接近规范限值。

在5台机组满发流量条件下, 原型和模型下游引航道口门区流态也总体一致, 口门区水流平顺、存在回流、无明显不良流态。同样, 在流速大小及分布上存在明显偏差, 物理模型最大纵向流速为1.390 m/s, 最大横向流速0.150 m/s, 最大回流流速0.310 m/s, 均满足规范要求; 原型观测纵向流速均满足小于2.0 m/s的规范要求, 最大1.994 m/s, 但最大横向流速和回流流速超标明显, 分别达到0.986 m/s和0.683 m/s, 由于超标范围较小, 且不在主航线附近, 对船舶通航安全不会构成威胁。

通过2个工况数据对比发现, 由于物理模型比尺较小, 模型与原型之间的存在一定的偏差, 口门区流态总体一致, 但原型实测流速明显要大于模型试验结果, 实际通航水流条件比模型试验结果恶劣。因此, 采用整体物理模型试验研究口门区通航水流条件问题时, 在条件允许的情况下, 应尽量增大模型比尺, 以提高试验成果的可靠性。

4 关于通航水流条件的讨论

大量研究表明, 规范规定的引航道口门区流速要求偏于严格, 在整个口门区范围内, 根据引

航道中心线分解而得到的横向流速很难完全满足要求。正如前文所述, 船舶往往不按设计的引航道中心线航行, 局部小范围的超标对船舶通航安全不会构成威胁, 因此不能以口门区的流速全部满足规范要求来评价通航水流条件。另外, 船舶的动力和操纵性能不断提升, 船舶克服局部超标横流的能力增强, 也有建议修改规范, 适当提高口门区的水流流速控制标准^[8]。除了口门区流速评价指标外, 更能反映船舶航行安全的是船舶的航行特性, 通常通过开展实船试验来获得船舶的航速、横倾、纵倾、航迹线、漂角、舵角等航行特性参数, 评估船舶在各种不同条件下通过引航道口门区的航行安全, 并根据试验情况, 优化船舶的航路航法。多座通航建筑物原型观测与实船试验表明, 在口门区流速超标的情况下, 船舶依然能够安全顺利通过口门区。因此, 口门区通航水流条件有必要根据流速分布和船舶航行特性综合评估。

5 结论

1) 针对引航道口门区流速流场测试难题, 发明自动跟随浮子高精度流速测试方法, 获得景洪升船机下游引航道口门区不同流量工况下的通航水流条件, 为通航安全评估提供重要依据。该测试技术具有较高的推广应用价值。

2) 原型观测揭示了带透水导堤的引航道口门区流场结构特征, 在最小通航流量条件下, 口门区水流平顺、无回流, 在5台机组满发流量条件下, 口门区形成一主一次2个回流区, 口门区横向流速局部超标, 近岸区回流流速局部超标, 不影响船舶通航安全。

3) 模型与原型流态流场基本一致, 但原型流速明显大于模型, 存在一定的缩尺效应。建议口门区通航水流条件模型试验比尺尽量取大, 并综合流速分布与船舶航行特性对口门区通航条件进行评估。