

# 潼南航电枢纽定床泥沙输移试验研究

孙世泉, 王承恩

(重庆航运建设发展有限公司,重庆 401121)

**摘要:**潼南航电枢纽工程完成枢纽总体布置优化后,为论证枢纽在水库泥沙条件下库内泥沙的冲淤形态、泄洪冲沙闸及电厂前拦沙坎的排沙效果、泥沙淤积对船闸上下引航道通航条件的影响,在物理模型试验的基础上,结合天然实测资料,检验了枢纽总体布置方案各建筑物的工作状态和船闸的通航可靠性。研究结果表明:电站进水口由弯道矶头、拦沙坎、泄洪冲沙闸组成的综合防沙措施可有效防止推移质泥沙进入电厂取水口内。

**关键词:**潼南航电枢纽;泥沙输移;通航;物理模型;试验研究

中图分类号:TV7;TV14;TV149

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2018)增1-0023-05

## 1 概述

涪江干流梯级渠化潼南航电枢纽工程位于潼南区涪江大桥下游约3 km处,开发任务以航运为主,兼顾发电以及修复涪江干流潼南城区段水生态系统。水库正常蓄水位高程为236.5 m,相应库容1 571万m<sup>3</sup>,总库容2.19亿m<sup>3</sup>,船闸和航道等级为V级,设计通航船舶吨级为300 t,电站装机容量为42 MW。该工程为河床式枢纽,汛期敞开闸门泄洪,基本恢复天然状态。枢纽主要建筑物泄水闸、船闸上下闸首和闸室、发电厂房、挡水土坝为3级建筑物,引航道建筑物等次要建筑物为4级,临时建筑物为5级。

笔者根据潼南航电枢纽工程正态物理模型试验结果,详细分析了航电枢纽工程完成枢纽总体布置优化后存在的问题,对泥沙输移对航电枢纽造成的问题提出了相应的改善措施。

## 2 模型设计及验证

### 2.1 模型设计

鉴于潼南枢纽挡水高度不大、水库容积较小,河床比降大、在洪水期枢纽18闸全部敞开泄洪,悬移质基本上随水流下泄(滩地或回流缓流区有悬沙淤积)、对水库、电站进水口和船闸上下游引航道及口门区影响较大的主要是推移质泥沙的实际情况,本次试验主要研究卵石推移质泥沙和悬移质泥沙中粒径大于0.5 mm的床沙质泥沙。

根据试验任务要求、模型范围和模型相似条件及推移质模型沙的性质,综合考虑试验场地大

小、供水能力等因素,决定选用几何比尺为 $\lambda_L = \lambda_h = 100$ 的正态模型。对于推移质泥沙模型的相似问题,除满足水流运动相似外,还应满足推移质泥沙起动相似和输沙率及冲淤时间相似条件。

#### (1) 水流运动相似。

重力相似  $\lambda_v = \lambda_h 0.5$

$$\lambda_Q = \lambda_L \lambda_h 1.5$$

阻力相似  $\lambda_n = \lambda_h 1/6 (\lambda_h/\lambda_L)^{0.5}$ 。 $\lambda_L$  为平面比尺。

#### (2) 推移质起动相似。

$$\text{推移质起动流速公式 } v_c = k \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g d \left( \frac{h}{d} \right)^y$$

取 $y = \frac{1}{6}$ 。为达到推移质运动相似,水流泥沙运动一致,应满足 $\lambda_{vc} = \lambda_v = \lambda_h^{1/2}$ ,由此 $\lambda_d = \lambda_h / \lambda_{(\gamma_s - \gamma)/\gamma}^{3/2}$ 。 $\lambda_d$  为泥沙比尺; $\lambda_h$  为垂直比尺。

模型选用中梁山精煤,其 $\gamma_s = 1.4 \text{ t/m}^3$ , $\gamma_0 = 0.69 \text{ t/m}^3$ ,则 $\lambda_d = 11.94$ 。

#### (3) 推移质输沙率相似。

由推移质输沙率公式:

$$g_s = c \gamma_s d \left( \frac{v}{\sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}} g d} \right)^3 (v - v_0) \left( \frac{d}{h} \right)^{\frac{1}{4}}$$

得到推移质输沙率比尺为: $\lambda_{gs} = \frac{\lambda_{r_s}}{\lambda_{(\gamma_s - \gamma)/\gamma}^{13/12}} \lambda_h^{3/2}$

模型选用中梁山精煤,其 $\gamma_s = 1.4 \text{ t/m}^3$ ,则 $\lambda_{gs} = 409.09$ 。

#### (4) 推移质冲淤变形相似。

$$\frac{\partial G}{\partial x} + B \frac{\partial z}{\partial t} = 0, \text{ 式 } \frac{1}{\gamma'} \frac{\partial g_s}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0$$

$$\lambda_t = \frac{\lambda_{\gamma'_0} \lambda_h \lambda_L}{\lambda_{gs}}$$

由此得到:

$$\lambda_{t2} = 63.77 \approx 64$$

众所周知,由于泥沙运动理论不够完善,输沙量比尺和冲淤时间比尺不易计算准确,而涪江流域又没有水文测站进行过推移质测量,因此,其各级流量的输沙率须首先采用梅叶~彼德公式计算值,然后在模型上进行率定。

## 2.2 模型沙的选配

潼南枢纽所在的涪江中游河段推移质泥沙粒配范围较广,不同来流量所起动的粒径不同。如果各级流量均采用同一种级配沙时,则在较小流量的情况下就会有大量的泥沙淤积在河床内。鉴于原体实测推移质资料的缺乏,假定各级流量推移质泥沙的粒配应等于河床质粒配中在该流量能起动的最大粒径以下的全部颗粒,其具体的计算方法为:

①首先按梅叶~彼德公式计算原体各级流量的最大起动粒径:

$$(d_{max})_p = \frac{\gamma h J}{0.03(\gamma_s - \gamma)}$$

②在河床质级配曲线中以各级流量的最大起动粒径值作为上限,截取曲线下段作为该级流量的推移质粒配曲线;

③根据推移质泥沙模型设计中选定的模型沙和粒径比尺,计算出各级流量模型沙的最大起动粒径和粒配曲线,然后按该曲线进行各级流量模型沙的选配试验。

## 2.3 试验流量级及其组合

根据对小河坝水文站的资料进行分析得知:涪江流域的径流主要来源于降水、少量融雪和地下水,涪江多年平均流量为  $478 \text{ m}^3/\text{s}$ ,多年平均径流量为  $150.7 \text{ 亿 m}^3$ ,径流主要集中在 6~10 月,占年径流的 75% 以上,汛期洪水主要集中在 6~10 月,尤以 7、8 月份最集中,河流来水量大、含沙量亦大。据有关分析,涪江推移质沙量主要集中在 6~10 月,该时段沙量约占全年沙量的 96% 左右,尤以 7、8、9 三个月最大,占全年沙量的 77% 左右。据此,在模型试验中结合水库的运行方式,

试验主要考虑汛期频率洪水和相应的泥沙输移。试验采用汛期  $5\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6\ 940 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $9\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $11\ 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $15\ 400 \text{ m}^3/\text{s}$  五级流量组成一个洪峰涨水过程, $15\ 400 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $11\ 600 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $9\ 000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $6\ 940 \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$  五级流量组成一个洪峰降水过程;对于小于  $5\ 500 \text{ m}^3/\text{s}$  的流量,由于此时库区壅水运行,故未加入系列。

## 2.4 模型相似性验证试验

### 2.4.1 水面线验证试验

为满足该枢纽模型试验研究和验证的需要,在模型主河槽的左右两岸分别对称布置水尺 9 对,并在坝下增设一把水尺,总共 19 把水尺。

河道糙率相似的基本实质是河道瞬时水面线相似,正式试验之前,必须进行水边线验证试验。我们将 2013 年 1 月实测的  $Q = 107 \text{ m}^3/\text{s}$  流量情况下工程河段的水面线和 2011 年观测的流量为  $2\ 998 \text{ m}^3/\text{s}$  的水边水位测点资料作为校核该模型糙率与原型河道糙率相似的依据。根据实测资料进行计算,模型试验河段原型糙率在  $0.028 \sim 0.031$  之间,制模时模型河道采用水泥沙浆抹面后拉毛,其糙率在  $0.0125 \sim 0.013$  之间,基本上满足相似要求,但局部河段糙率偏小,实测模型水位低。经对局部河段反复调整,最终决定采用粒径为  $20 \text{ mm}$ 、间距为  $5 \sim 10 \text{ cm}$  的卵石加糙,模型验证试验结果见图 1。由图 1 可知,两级流量时左右岸水尺水位差值均在  $0.1 \text{ m}$ (原型)以内,说明模型河道与原型河道基本上达到了阻力相似的要求。

### 2.4.2 流速、流向验证试验

根据由中水珠江规划勘测设计有限公司提供的 2013 年 1 月实测的流量  $Q = 107 \text{ m}^3/\text{s}$  坝址下游河道沿程浮标图进行模型流速、流向的验证。选择在原型河道上实测的 3 条浮标流速流向线作为验证的依据,在模型相同的位置投放浮标,观测浮标的运动轨迹,并将观测值点绘在实测的浮标图上。在此基础上,选择适当的断面进行流速测量。

验证结果表明:模型浮标的运动轨迹与原型浮标基本一致,流线基本重合,实测模型流速值与原型值相差很小,差值基本控制在 10% 以内。因此,模型河道的流速大小和分布与原型河道基本相似。

## 2.5 泥沙输移试验及成果分析

### 2.5.1 原设计方案试验情况

选沙及流量组合确定后,在模型上施放洪水流量过程并在模型进口CS21#断面按分级流量加入模型沙,试验中观测到模型上从 $5\text{ 500 m}^3/\text{s}$ 开始施放到 $9\text{ 000 m}^3/\text{s}$ 时泥沙已推移到闸下,据试验观测,从上游输移下来的泥沙由于弯道环流作用,在CS23#断面即开始向弯道凸岸(左岸)边滩

输移,主沙带通过纵向围堰两侧4、5、6、7、8、9#闸向下游输移,部分泥沙向进水口移动。由于拦沙坎前沿处于缓流区,泥沙移动缓慢,输移到拦沙坎的泥沙大部分在坎前堆积,而输移至闸下的泥沙亦有少量在电厂尾水池后和尾水出口停留,船闸上下引航道口门区未见有粗颗粒泥沙沉积。闸孔布置情况见图2。

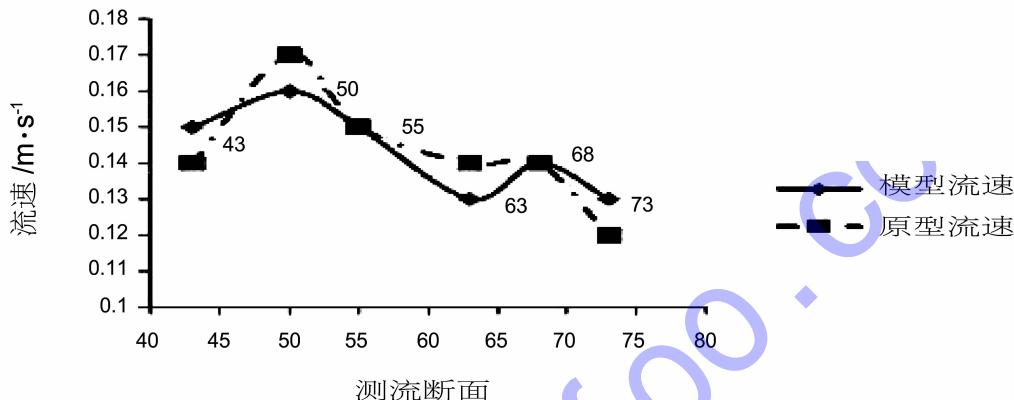


图1 潼南枢纽模型河道深泓线附近流速验证图

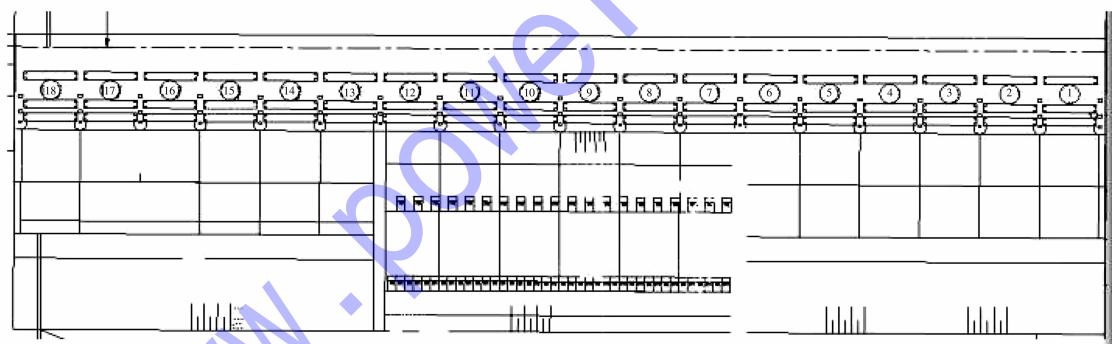


图2 闸孔布置图

### 2.5.2 优化方案试验

#### (1) 优化方案之工程布置。

鉴于泥沙已威胁到进水口,为此,对模型上的防沙措施进行了局部优化,优化方案的主要工程措施有以下五个方面:

①进水口左岸岸线开挖由单一曲线调整为复合曲线,即在两段凹曲线中用一反向曲线连接;

②利用反向曲线外推岸线,在进水口导沙坎前沿形成类似矶头的突咀;

③将拦沙坎高程由228 m提高至230 m,当库水位降低至236.2 m高程运行时,坎上水深仍

保持有6.2 m,拦沙坎长160 m,按侧堰理论计算和模型试验成果可知其满足三台机满发进水口流量达到 $912\text{ m}^3/\text{s}$ 的要求;

④电厂尾水导墙加长30 m,并向河心侧以 $3^\circ$ 角推出,防止出闸泥沙进入尾水池;

⑤将电厂尾水导墙顶高程提高至234 m,防止泄洪冲沙闸泄水时溢入尾水池而造成尾水池波动。

#### (2) 优化方案的试验成果及分析。

##### ①库区泥沙冲淤情况。

枢纽经过长系列输沙运行,库区冲淤形态由

不平衡向相对平衡状态发展,推移质出库沙率逐步增大,连续两个由频率洪水组成的洪峰系列后,泥沙出库率已达 50% 左右,而进口加沙量已有一半输往下游。根据试验观测得知:在模型进口加入的泥沙受弯道水流的影响,部分沿左岸边滩向下游运动,部分沿弯道深槽运动至弯道顶点;受弯道环流的作用,泥沙在弯道顶点稍偏下游(模型 CS23#断面)开始斜过河床向左岸输移,形成以宽约 80~100 m 左右的输沙带从 4、5、6、7、8、9 六孔闸排向下游,并在其相应闸后形成主沙带,输移下来的泥沙部分淤积在河床的深槽(或深坑)河段,部分沿河床输移到下游。对库区淤积分布、淤积断面及河势图等资料进行分析得知:整个河段右岸深槽位置较为稳定,在 CS32#断面至坝前稳定宽度约为 80 m 左右。深槽内基本上为清水带,没有发现明显的推移质泥沙运动。

## ②电站进水口泥沙。

优化方案实施后,电站进水口前沿防沙措施得到了加强;受弯道环流作用,上游输移下来的泥沙大部分沿弯道凸岸(左岸)边滩而来,输移泥沙首先受到第一道人工小弯道环流和其下游突咀(矶头)挑流的作用向河心偏移,其后受泄洪冲沙闸泄流的联合作用,输移下来的泥沙通过 2#闸孔以右闸孔排向下游,1#、2#闸孔未见泥沙运动,在拦沙坎前保持了约 30~40 m 宽的清水带,拦沙坎前及进水前池内均未见推移质泥沙沉积。

试验观测结果表明:电站进水口由弯道矶头+拦沙坎+泄洪冲沙闸组成的综合防沙措施可以有效地防止推移质泥沙进入电厂取水口内。

由于进水前池洪水期水体含沙量较大,汛期电站停机,进水前池区域流速很小或为静水区,悬砂质泥沙的落淤将不可避免。众所周知,悬移质泥沙的输移主要是重力和紊动扩散作用二者结合的结果,当重力起主导作用时,泥沙整个过程表现为淤积,进水口前池处由于左侧缓流区紊动作用减弱,导致悬移质落淤。根据工程河段实测悬沙资料,河段多年平均含沙量为 1.18 kg/m<sup>3</sup>,其悬沙中值粒径为  $d_{50} = 0.036$  mm,其  $d_{95} = 0.24$  mm。悬沙的年内分配主要在 7、8、9 三个月内,其沙量约占全年输沙量的 87% 左右;另外,从悬移质泥沙含沙量沿垂线分布规律看,一般是沿水深分布,呈上小下大,越靠近河床含沙量越大,悬沙中的粗

颗粒大多在最下层运动。有关研究结果显示:对于粒径为 0.1~0.25 mm、含沙浓度为 1.6 kg/m<sup>3</sup>、在相对水深为 0.5~0.6 m 的位置高度上,水流含沙浓度约为 0.06 kg/m<sup>3</sup>,大约为平均含沙浓度的 5% 左右。相关分析认为:在工程正常蓄水位高程为 237.2 m、拦沙坎高程为 230 m 时,其相对水深等于 0.55,汛期 95% 以上的、粒径为 0.1~0.25 mm 的泥沙将被拦在防沙坎以外,从而减少了对水轮机过流部件的磨蚀。同时,由于涪江洪水具有暴涨暴落的特点,洪水历时短,即使有少部分悬沙落淤,也将随水轮机的运行排向下游。

## ③电厂尾水池泥沙。

我们在对原尾水渠布置方案进行试验时发现了以下几方面的问题:

a、在泄洪冲沙闸排沙时,有泥沙绕过尾水池外侧导墙尾部(0+131.23)进入尾水池且颗粒较粗,不易为电站水流所带走;

b、在 0+131.23 断面以下左侧近岸部位,由于其开挖线形不佳,在该处形成了一回流区,导致泥沙在此淤积;

c、外侧导墙顶高程为 233.5 m,基本上与 3 005 m<sup>3</sup>/s 流量电厂发电尾水位持平,泄洪闸泄水引起的水位波动越过导墙引起尾水池的波动。

为此,在模型上进行了以下几方面的修改:

(1) 将尾水池外导墙(靠泄洪闸侧)增长了 30 m。导墙末端延至 0+161.23 并在 0+131.23 起点向河心以 3°角扩展;

(2) 将尾水池内导墙(靠岸侧)扩散角由 12°缩减为 3°,并在其末端 0+156.23 以 R=600 m 的圆弧平顺与下游河岸相接;

将尾水池外导墙墙顶高程提高了 0.5 m,墙顶高程为 234 m,修改布置情况见图 3。

经过上述几方面调整后,尾水池除由电站进入的悬沙外,粗颗粒泥沙获得了较好的解决。

## ④船闸上游引航道泥沙。

根据枢纽所在河段的河势,船闸布置在右岸弯道顶点偏下,从推移质运动情况来看其位于推移质运动的盲区。从模型试验结果看,受上游弯道水流的影响,从上游来的泥沙一部分沿弯道凸岸(左岸)边滩向下游运动,另一部分(少量)沿深槽运动,这部分泥沙受弯道环流的影响,在上游 CS23#断面(坝轴线上游约 600 m 左右)开始向左

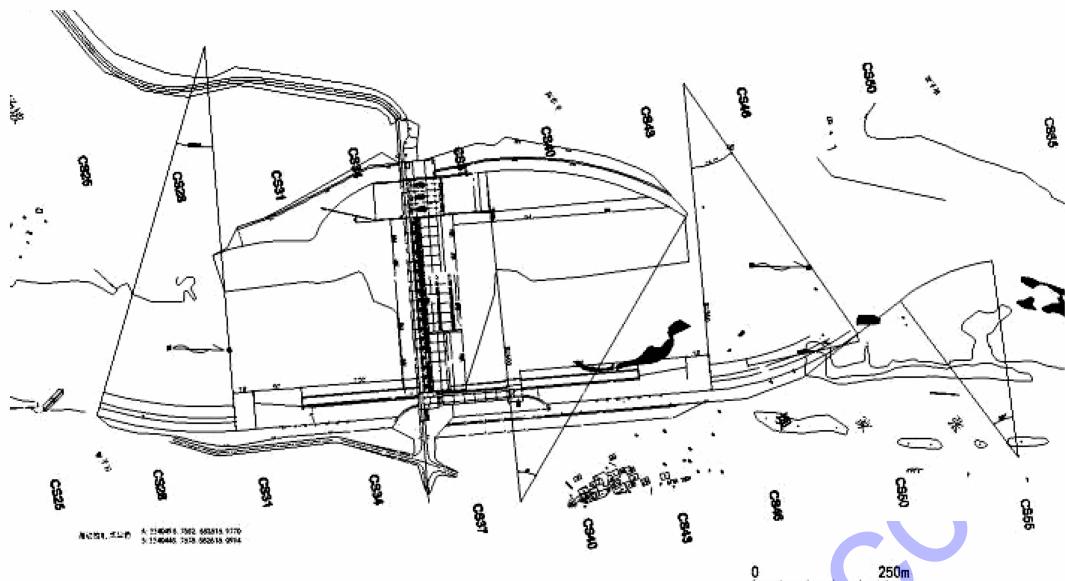


图3 潼南枢纽工程修改方案平面布置图

岸凸岸运动,远离船闸上引航道口门区,库区推移质主沙带在河中偏左运动,通过4#~12#孔闸向下游输移,右岸深槽未见推移质运动。同时,由于引航道底高程为230 m,相邻河床为深槽,河床高程为221~222 m,高差约为8 m左右,即使有临底推移质运动,也无法跃移至上引航道内。

##### ⑤船闸下引航道泥沙。

由于船闸下引航道及口门区仍处于弯道末端,其右岸边滩的滩首受其影响下引航道及口门区仍避开了推移质运动区,受下游弯道的影响,由4#~12#闸排出来的推移质泥沙逐渐向右侧大边滩移动,同时下游右岸边滩受水泥厂挡墙和料场的影响边滩已不完整,边滩头部的泥沙运动已向河心推移,因此,下游引航道及口门区未见推移质,但引航道连接段下游航道横过河心,航道轴线与主流交角较大,已见推移质淤积。模型中比较了两项措施:一是在下游导航墙尾部30 m段以6°角向河心伸出;二是在连接段左侧航道边线设鱼鳞形导沙底墙。第一项措施对防止推移质泥沙进入连接段航道有一定的效果,但对防止推移质泥沙进入下游航道效果不明显。两种工程措施结合起来运用对于防止推移质进入航道连接段及下游航道具有较好的作用,但不能完全阻止推移质

进入,且第二项工程措施投资较大。

## 3 结语

(1)模型验证试验结果表明:模型与原型相似性好,能够正确反映试验河段水流、泥沙运动特性,满足有关标准及规范的要求。

(2)通过潼南航电枢纽泥沙输移试验,重点对库区、电站进水口、电厂尾水池及船闸上下引航道泥沙冲淤情况进行了综合分析。

(3)鉴于枢纽下游河道条件的改变,下游右岸边滩形态已有较大的改变,边滩上游滩首已不完整,河道推移质输沙形态也发生了一定的变化,加之枢纽上游水库的修建、植被森林的恢复、植被的改善和河道采沙、上游来的推移质泥沙的减少也减轻了泥沙对下引航道口门及连接段的威胁。为节约投资,笔者建议:采用航道疏浚的方案解决枢纽下游河道,即当连接段及下游航道在低水期由于泥沙淤积出浅时,采用疏浚船疏浚。

### 作者简介:

孙世泉(1982-),男,重庆市人,高级工程师,硕士,从事航电枢纽、

港口和航道工程建设技术与管理工作;

王承恩(1984-),男,重庆市人,高级工程师,硕士,从事航电枢纽和港口工程建设技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)