

龙溪口航电枢纽工程船闸输水系统设计

王文，吴礼国，李泳龙

(四川省交通勘察设计研究院有限公司，四川 成都 610017)

摘要：龙溪口航电枢纽工程的主要开发任务为畅通岷江航运通道，船闸作为该枢纽的唯一航运设施，是岷江通道畅通中的重要一环，故输水系统作为该船闸核心的组成部分，其重要性不言而喻。针对该船闸输水规模较大、水力指标要求较高的问题，对船闸进行水力学计算分析以及单体物理模型试验研究。结果表明，龙溪口航电枢纽船闸输水系统设计采用闸墙长廊侧支孔输水形式是合理的，满足设计规范要求；闸室灌泄水时水流条件及阀门开启方式满足船舶安全通行需要。

关键词：龙溪口航电枢纽；船闸；输水系统

中图分类号：U641

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)10-0023-04

Filling and emptying system design of ship lock in Longxikou Navigation-power Junction project

WANG Wen, WU Liguo, LI Yonglong

(Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: The main development task of the Longxikou Navigation-power Junction project is to smooth the navigation channel of the Minjiang River. Since the ship lock is the only shipping facility at this junction and an important part of this channel, the importance of the filling and emptying system as the core component of the ship lock is self-evident. In response to the large-scale filling and emptying, and high requirements for hydraulic indicators of the ship lock, we carry out the hydraulic calculation analysis and the study of a single-body physical model test on the ship lock. The results show that it is reasonable to employ the support hole filling and emptying form of the gate wall long corridor side for the filling and emptying system design of the ship lock in the Longxikou Navigation-power Junction, which meets the design specifications. The water flow conditions and valve opening method during the filling and emptying of the ship lock chamber also meet the needs of safe ship passage.

Keywords: Longxikou Navigation-power Junction project; ship lock; filling and emptying system

龙溪口航电枢纽工程建设任务是使岷江下游(乐山—宜宾段)162 km 航道达Ⅲ级航道标准，建成后该段航道常年可通行 1 000 吨级船舶，丰水期可通行 3 000 吨级船舶，对四川省构建以“两横一纵两网十八线”高等级航道为主体的内河航道体系、加快西部陆海新通道和四川南向大通道建设、改善四川综合立体交通条件、为搭建四川现代物流全球服务网络起到积极的助推作用，是深

入贯彻落实“长江经济带”发展战略和“交通强国”战略、构建长江经济带综合立体交通走廊的具体举措。

1 工程概况

岷江龙溪口航电枢纽工程位于岷江干流乐山市犍为县境内，是岷江下游河段(乐山—宜宾)航电规划的最后一个梯级，该梯级上距大渡河汇入口约

收稿日期：2023-06-07

作者简介：王文（1988—），男，硕士，高级工程师，从事港口与航道工程设计。

80.9 km, 距上游犍为航电枢纽梯级约 31.1 km。工程以“以航为主、航电结合”为设计理念, 工程等别为二等, 工程规模为大(2)型。水库总容量为 3.24 亿 m³, 上游最高通航水位 317 m; 船闸等级为Ⅲ级, 船闸闸室有效尺度 220 m×34.2 m×4.5 m (长×宽×门槛水深)^[1], 最大工作水头 17.94 m, 船闸右侧预留二线船闸; 枢纽电站装机容量 480 MW; 枢纽渠化Ⅲ级航道 31.8 km。

2 输水系统的布置

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》(简称“设计规范”), 输水系统类型的选择公式^[2]为:

$$m = \frac{T}{\sqrt{H}} \quad (1)$$

式中: m 为判别系数; T 为输水系统的输水时间, min, 建议值为 10~12 min; H 为最大工作水头, m, 取 17.94 m。经计算 m 为 2.36~2.83, 根据设计规范可采用集中输水或分散输水系统。结合龙溪口船闸工程拟建场址的地形地质条件, 船闸闸室采用分离式结构设计, 船闸输水系统采用闸墙长廊道侧孔出水形式可显著减小闸室底板的厚度, 输水系统的技术经济性较好, 故在综合研究后, 确定采用分散输水系统, 即闸墙长廊道侧支孔出水形式。

输水阀门处廊道断面面积可按设计规范的相关公式计算:

$$\omega = \frac{2C(\sqrt{H+d} - \sqrt{d})}{\mu T \sqrt{2g} [1 - (1-\alpha) k_v]} \quad (2)$$

式中: C 为闸室水域面积, m², 取 8 330 m²; d 为阀门全开后惯性水头, m, 根据类似输水系统船闸的模型试验结果取 0.35 m; μ 为阀门全开时流量系数, 取 0.80; α 为相关系数, 查表取 0.43; T 为输水时间, s, 取 600~720 s; k_v 为相关系数, 取 0.5。经计算可得 ω 为 33.6~40.4 m²。结合船闸结构设计等因素, 确定双边输水阀门的面积 $\omega_1 = 42.0$ m²。

船闸两侧闸室墙各设 18 个出水侧支孔, 布置在闸室的中部, 支孔中心距为 8.5 m(闸室宽的 1/4), 出水支孔长度 4 m, 支孔在单侧墙中分布长度为 153.0 m, 其分布长度约占闸室有效长度的 3/4。两侧闸室墙长廊道每侧 18 个出水支孔, 每侧总共分 3 组, 每组共 6 个孔。采用矩形侧支孔, 各组孔口尺寸的设计高度不变, 宽度由 0.92 m 渐变至 0.76 m。支孔出口消能形式为明沟消能, 闸室内明沟宽为 1.2 m, 消力明沟高 0.9 m、宽 0.5 m。

进水口两侧对称布置, 采用垂直多支孔进水形式, 右侧出水口采用侧面出水形式。为使出水口的水流尽可能均匀, 在右侧出水廊道内设 1 道隔流墩, 并外设消力坎。左侧出水口采用旁侧出水, 外设消力池。

船闸各部位具体尺寸设计数据^[3]及分析见表 1, 船闸输水系统纵断面见图 1。

表 1 输水系统特征尺寸

部位	描述	面积/m ²	与输水阀门面积比
进水口	导墙上垂直布置 6 支进水孔, 喉部高度不变、宽度分级收缩	180.0	5.36
充水阀门段廊道	充水阀门处廊道顶淹没水深 6.36 m, 阀门后廊道顶 1:10 向上扩大, 通过水平转弯与闸室出水廊道相连接	33.6	1.00
闸室出水段廊道	通过转弯, 上与充水阀门段廊道、下与泄水阀门段廊道相连接	40.0	1.19
闸室出水支孔	自上游向下游分 3 组, 每组 6 孔, 各组孔口尺寸的高度不变, 宽度渐窄; 孔中心间距 8.5 m, 总长 153.0 m, 占闸室有效长度的 76.5%	39.3	1.17
消力槛	闸室内两侧出水孔外 1.2 m 处各设 1 道消力槛, 槛高及宽均为 0.5 m	-	-
泄水阀门段廊道	通过水平和垂直转弯与闸室出水廊道相连接, 泄水阀门处廊道顶淹没水深为 8.36 m	33.6	1.00
出水口	左侧泄水廊道采用旁侧泄水的方式, 右侧泄水廊道则将出水口面积放大一倍, 并设中间导墙	左侧 30.0, 右侧 40.0	2.08
格栅消能室	采用顶支孔出水形式, 消能室内设不对称挑流坎	100.0	2.98

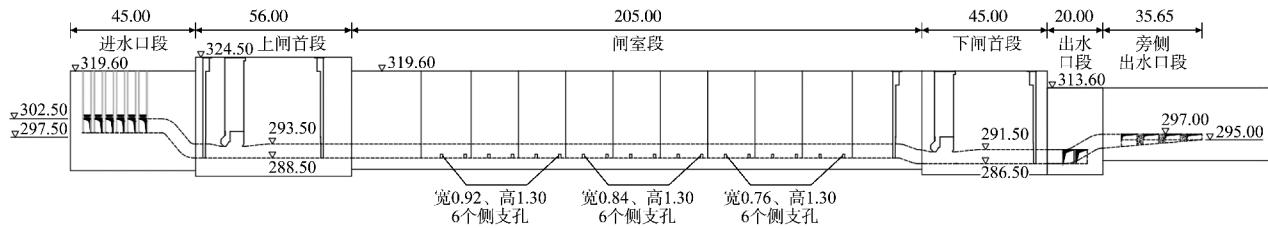


图 1 输水系统布置 (单位: m)

3 输水系统水力学计算

根据设计规范的 4.3.1 条, 设计过程中须对龙溪口航电枢纽工程船闸分散输水系统的阻力系数、流量系数、闸室和引航道停泊条件等相关水

力学指标进行分析计算后确定。本输水系统最大工作水头工况下(上游最高通航水位为 317.0 m, 下游最低通航水位为 299.06 m, 工作水头为 17.94 m)水力学指标计算结果见表 2。

表 2 输水系统水力学计算结果

过程	阀门开启时间/s	输水时间/s	阻力系数	流量系数	主廊道最大流速/(m·s⁻¹)	闸室最大系缆力/kN	上引航道最大系缆力/kN	下引航道最大系缆力/kN	闸室惯性超高/m
充水	240	643	1.67	0.77	10.85	15.52	10.70	-	0.36
泄水	240	666	1.91	0.73	9.17	4.74	-	14.55	0.30
允许值	-	-	-	0.60~0.80	15.00	32.00	40.00	40.00	0.25

根据表 2 的计算结果, 龙溪口航电枢纽船闸输水系统的充泄水时间、闸室和引航道口门区停泊条件及输水系统运行技术指标等满足设计规范要求, 充、泄水时闸室惯性超高超过设计规范值。

4 水力模型试验

4.1 闸室输水水力特性

为进一步验证输水系统水力特性, 选定正态整体物理模型进行试验研究^[4], 模型比尺采用 1:30。试验中对最高水位组合时充、泄水工况(阀门双边运行)下的输水系统主要水力学特征参数进行测定, 结果见表 3。

表 3 主要水力学特征参数测定结果

输水方式	t_v/min	T/min	$Q_{\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	d/m	$\bar{v}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$
双边充水	4	11.4	425.2	0.34	1.47
	5	11.9	404.5	0.34	1.41
	6	12.5	361.3	0.33	1.35
双边泄水	4	11.9	361.8	0.25	1.41
	5	12.5	358.5	0.24	1.35
	6	13.2	346.4	0.23	1.28

注: t_v 为阀门开启时间, T 为闸室输水时间, Q_{\max} 为最大流量, d 为惯性超高(降), \bar{v} 为闸室水面平均速度。

由表 3 可知, 在最大工作水头 17.94 m 下, 船闸充水最长时间为 12.5 min, 对应充水流量为 361.3 m³/s, 其阀门开启时间为 6 min, 船闸充水最短时间为 11.4 min, 对应充水流量为 425.2 m³/s, 阀门开启时间为 4 min; 船闸泄水最长时间为 13.2 min, 对应泄水流量为 346.4 m³/s, 其阀门开启时间为 6 min, 船闸泄水最短时间为 11.9 min, 对应泄水流量为 361.8 m³/s, 其阀门开启时间为 4 min。以上模型试验数据均满足设计规范要求, 且与输水水力学计算值接近。

同时, 模型试验结果还表明, 闸室在充泄水时的惯性超高均存在大于或接近设计规范允许值 0.25 m 的情况, 通过类似船闸的工程经验, 可在实际运行中采用提前关闭充、泄水阀门并在水位齐平时打开人字门的措施解决闸室充泄水水面超高的问题^[5]。

4.2 闸室停泊条件

针对闸室停泊条件的试验研究, 主要在充水工况下, 对设计船队及单船的最大系缆力进行测定, 结果见表 4。

表 4 阀室内船舶(队)最大系统力测定值

船型	T/min	停泊位置	纵向	前横向	后横向
			水平力/kN	水平力/kN	水平力/kN
2 000 t 单船	4	前段右侧	7.7	9.7	6.2
		中段右侧	6.7	6.4	15.1
		后段右侧	12.8	8.2	13.4
	5	前段右侧	10.1	7.9	4.1
		中段右侧	6.5	3.8	10.8
		后段右侧	14.8	10.3	14.7
2×1 000 t 船队	4	中段右侧	3.8	8.1	13.1
	5	中段右侧	4.5	5.6	11.1

由表 4 可知, 阀室内设计船舶(队)纵向最大系统力 14.8 kN, 横向最大系统力 15.1 kN。通过试验观察还可得知, 阀室内纵横向水流未造成阀室内水流紊乱, 水流流态良好, 设计船舶(队)的系统力满足设计规范要求, 由此可以看出龙溪口航电枢纽船闸输水系统在闸墙长廊道侧支孔出水口侧设置消能坎的消能效果较好。

4.3 输水廊道阻力系数和流量系数

通过在输水廊道顶部或侧面布置时均压力测点, 可测定得到当工作阀门不同开度下, 各恒定流工况中输水廊道各部位的压力, 由此可得到输水廊道充水时工作阀门全开时阻力系数为 1.54, 对应流量系数为 0.81, 工作阀门局部开启时阻力系数最大为 60.87, 对应流量系数为 0.13; 泄水时工作阀门全开时廊道阻力系数为 2.04, 对应流量系数为 0.70, 工作阀门局部开启时阻力系数最大为 59.39, 对应流量系数为 0.13。

4.4 进、出水口水流条件

上游引航道采用非对称平面布置, 右导墙为直线型, 与船闸右闸墙齐平, 左导墙在上闸首前为一小段直线型再接上游呈弧线型。进水口设计为闸墙垂直多支孔布置形式。进水口的 6 个支孔总面积为 72 m², 两侧进水口总进水面积为 144.0 m², 最大工作水头为 17.96 m, 充水阀门双边开启($t_v=3$ min)最大流量情况下, 进水口最大流速 2.81 m/s, 流速虽大, 但是仅为瞬时最大流速, 同时由于进水口淹没水深较大, 因此对进水口附近水流流态

影响不大。试验过程中, 通过对进口漩涡情况进行观察, 上游进水口附近水面未有明显水面跌落, 也未形成串心漩涡, 进水口附近仅在最大流量出现前后有浅表漩涡游弋现象, 该现象对船闸正常运行的影响甚微。

下游出水口左侧廊道采用旁侧泄水布置, 右侧廊道通过水平 90°转弯与消能室相连接, 同时该出口廊道断面宽度增大至 8 m, 为阀门处廊道宽度的 2 倍。为使出水口水流尽可能均匀, 在水平转弯段设中间隔墩, 并将隔墩的起点略微偏向弯段外侧, 在消能室内设挑流坎, 并在顶面设置出水孔, 出水口消能室顶部高程设计为 295.0 m。通过模型试验验证, 上述设计能取得较好的效果, 输水系统在泄水时, 水流水平扩散完好, 流态平稳, 无回旋现象, 泄水时(工作阀门双边开启时间为 3 min)下游引航道断面最大流速为 0.75 m/s, 满足设计规范要求。

5 结论

1) 龙溪口航电枢纽船闸工程输水系统通过水力模型试验研究后, 选用的闸墙长廊道侧支孔出水形式在最高工作水头下, 输水时间能够满足设计要求。充、泄水时, 阀室水面超高最大值分别为 0.34、0.25 m, 略高于设计规范要求值 0.25 m, 为此可提前关闭充、泄水阀门并在水位齐平时打开人字门的措施。除此之外, 龙溪口航电枢纽输水系统其余各项水力学特性指标均满足船闸安全运行的需要, 同时水力特性满足设计规范要求。

2) 龙溪口航电枢纽工程作为四川省岷江高等级航道上重要节点工程, 也是内河山区航电枢纽的典型工程, 其输水系统具有流量大、工作水头高及运营强度高等特点, 为保证枢纽船闸的通过能力, 设计选用闸墙长廊道侧支孔出水形式的分散输水系统是合理的, 通过计算分析和试验验证, 该输水系统能够达到设计目标和要求。

(下转第 60 页)