



洪江枢纽船闸扩建工程改造方案研究^{*}

邹开明¹, 熊智²

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011;

2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

摘要: 针对高水头船闸利用部分原水工结构进行改建的技术难题, 以沅水洪江船闸为例, 采取模型试验、枢纽大坝安全综合评估、船闸总体布置优化、老船闸加固改造和输水系统改造等技术创新措施, 尽量避免对枢纽发电、大坝安全及防洪安全带来不利影响, 从引航道布置、通航条件、导流建筑物和原船闸结构影响等方面对 3 个改造方案进行对比研究, 确定船闸扩建改造推荐方案, 可为类似项目提供参考和借鉴。

关键词: 船闸; 扩建; 结构; 改造; 总体布置

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0177-07

Renovation plan for expansion project of Hongjiang hub ship lock

ZOU Kaiming, XIONG Zhi

(1. Hunan Water Transport Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey&Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: In response to the technical difficulties in the renovation of high-head ship locks using part of the original hydraulic structure, taking Hongjiang ship lock in Yuanshui River as an example, innovative measures such as model testing, comprehensive safety evaluation of the hub dam, optimization of the overall layout of the lock, reinforcement and renovation of old ship locks, and renovation of water conveyance systems are adopted to minimize adverse effects on hub power generation, dam safety, and flood control safety. This paper studies the three renovation schemes from the aspects of approach channel layout, navigation conditions, diversion buildings and the influence of the original lock structure, and determines the recommended scheme of lock expansion and renovation, which can provide reference for similar projects.

Keywords: ship lock; expansion; structure; renovation; overall layout

沅水是长江的八大支流之一, 也是贵州东南部和湘西地区通往长江的重要出海通道, 在湖南省的洞庭湖水系(湘、资、沅、澧四水)中属于水量最大、水能资源蕴藏量最丰富的河流, 流域内煤炭、磷、锰、重晶石等矿产资源丰富, 通过航运条件的改善可以补齐湘黔两省水运发展短板, 完善区域综合交通体系。目前, 沅水湖区尾闾段常

德—鲇鱼口 213 km 的 2 000 吨级航道工程已开工建设, 桃源—鲇鱼口 240 km 航道为 1 000 吨级, 浦市—桃源 243 km 为 500 吨级, 金紫—浦市 252 km 仅为 300 吨级。上游段航道通航等级较低, 与近期规划 500 吨级目标尚有明显差距。沅水下游的安江、铜湾、清水塘、大洑潭枢纽的船闸尺度满足Ⅳ级通航标准, 基本满足沅水航道 2035 年前运

收稿日期: 2023-10-20

*基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目 (202316)

作者简介: 邹开明 (1986—), 高级工程师, 从事港口与航道工程建设管理与技术研究工作。

量预测要求。随着怀化国际路港和西部陆海新通道建设，湘黔两省经济发展和货运需求进一步加强，沅水中上游河段受滩险及洪江船闸碍航的影响，现在为Ⅳ级以下(50~300 吨级)航道，各枢纽多年过坝量均远小于船闸的通过能力，航道等级亟待提升。

《湖南省“一江一湖四水”水运发展规划》(湘政函[2021]90 号)明确将沅水湖南段规划为省内骨干高等级航道，其中金紫(湘黔界)—常德 533 km 规划为 1 000 吨级，常德—鲇鱼口 213 km 规划为 2 000 吨级。分期实施方案中提出沅水洪江—辰溪航道建设工程为 2025 年重大工程，沅水金紫—桃源 1 000 吨级航道建设工程为 2035 年重大工程。碍航枢纽实施通航建筑物的改造和扩建技术难度大、制约因素多，金国强等^[1]总结了已建枢纽实施船闸扩建改造工程的主要关键技术与创新设计；华华^[2]总结了平原地区船闸闸位布置一般要求和规律；张爱平等^[3]针对山区河流改扩建船闸受枢纽坝区河势等条件限制布置难度大的情况，开展了上游通航条件试验研究。本文在前期研究的基础上，通过多因素比选，确定沅水洪江船闸扩建工程改造的推荐方案，为项目正式实施提供依据，同时为类似船闸改造工程提供借鉴参考。

1 枢纽现状

洪江枢纽是沅水梯级开发的第 8 级，上距洪江市 21 km，下距洪江区 4.5 km，位于湖南省怀化市洪江区沅水干流上。该工程以发电为主，兼顾航运、灌溉等综合效益。坝址以上控制流域面积 3.5 万 km²，多年平均年径流量 222 亿 m³，多年平均流量 705 m³/s。洪江枢纽工程于 1998 年 3 月正式开工，于 2002 年 12 月 8 日下闸蓄水，2003 年 2 月 25 日实现首台机组发电，年底全部机组投产发电，主体工程竣工。

洪江枢纽从左至右依次布置接岸副坝、电站、9 孔泄水闸、单线二级船闸、右岸副坝。洪江枢纽

两岸山体雄厚，空间狭窄，位于微弯河道。电站坝顶公路与左岸隧道连接，且其左岸侧紧接连片高山，最大山体高度约 250 m，山体内布置有坝体灌浆廊道，临近左岸侧为电站发电厂房和开关站，左岸近坝段已无空间再建设通航建筑物。洪江枢纽右岸的洪黔公路紧邻船闸布置，右侧山体为嵩云山国家森林公园，山体最大高度约 400 m，右岸侧无扩建二线船闸的空间。

原洪江单线二级船闸主体结构由上闸首、一闸室、中闸首、二闸室及下闸首组成，均为整体式结构，建基岩层为中风化板岩或中风化冰碛砾岩。上游引航道由靠船墩、主导航墙、隔水墙组成，下游引航道由主导航墙、靠船墩和辅导航墙组成。

原上闸首尺寸为 28.0 m×38.8 m(长×宽)，建基面底高程为 164.0 m，最大墙高 32.5 m，为枢纽前沿挡水建筑物。原上闸首布置有检修门，兼顾防洪功能。结构右侧为重力式副坝，左侧为泄水闸闸墩，副坝和上闸首右侧边墩连接处布置检修门库 2 座，沿坝轴线方向长度约 30 m。原一闸室尺寸为 64.2 m×28.0 m(长×宽)，建基面高程为 150.5~168.0 m，闸室分为 4 个结构段，沿下游方向的结构段长度分别为 17.0、17.0、16.0、14.2 m。

2 建设标准与规模

2.1 设计通航水位

改造洪江枢纽船闸采用与原枢纽相同的洪水标准。校核洪水为 1 000 a 一遇，对应上游校核洪水位为 194.18 m，对应下游校核洪水位为 186.46 m；设计洪水为 100 a 一遇，对应上游设计洪水位为 190.03 m，对应下游设计洪水位为 183.05 m。

2.2 船闸尺度及通过能力

根据 GB 50139—2014《内河通航标准》^[4]，Ⅲ 级船闸有效尺度不得小于 180 m×12 m×3.5 m(长×宽×门槛水深)。根据设计船型尺度、运营组织方式及运量要求，综合确定新建洪江船闸闸室有效长度采用 215 m、有效宽度采用 23 m。洪江改

建船闸设计单向年过闸船舶总载质量为 1 274 万 t, 船闸单向设计通过能力为 882 万 t, 满足 2050 年预测单向 730 万 t 通过需求。

3 船闸扩建改造方案

3.1 总体布置思路

根据船闸选址比选结果^[5], 推荐洪江枢纽船闸闸位在右岸原船闸址拆除部分原结构的基础上进行船闸改扩建。原船闸为一线二级 300 吨级船闸, 第一级船闸的上闸首与大坝泄水闸相连, 形成挡水前沿。为减少原船闸拆除和建设阶段对原水工建筑物的影响, 设计方案均利用原船闸上闸首及一闸室作为改造后船闸的导航明渠段, 根据原上闸首和一闸室的结构特点, 其改造方案可分为“口门宽度由 12 m 渐变至 23 m”、“维持 12 m 口门宽度”和“口门宽度 23 m” 3 种。

洪江枢纽坝址下游河道局部缩窄且微弯, 改造后船闸下游引航道口门区附近的通航水流条件一般, 根据试验成果^[6]多次优化下游引航道布置方式及航线, 确定了唯一可行性方案。

船闸主体布置方式为拆除原船闸中闸首、二闸室、下闸首和下游部分导航、靠船建筑物, 在此基础上新建 1 座闸室有效尺寸更大、规模更高、可同时通航 4 艘 1 000 吨级货船的单级船闸。拆除部分原建筑物后, 紧邻原船闸一闸室的下游端面布置改建船闸的上闸首、闸室、下闸首和导航、靠船建筑物等。

原船闸上游引航道建筑物均位于洪江枢纽库区内, 上游导航段约 90 m, 其中主导航墙为折线形、辅导航墙为直线形、长 182.2 m, 船舶过闸方式为曲进直出。上距坝轴线 600 m 处有一块河滩地, 位于洪黔公路旁, 紧邻库区水域, 占地约 4 万 m², 现为码头、竹木厂及加油站。该滩地占地面积较大, 伸入河道部分较深, 陆域纵深最大约 120 m, 位于河道右岸, 直接影响过闸航线的走势; 同时河滩地形成了一道自然屏障, 中洪水期

时其下游靠右岸一定范围的掩护水域内几乎为静水状态, 有利于船闸上游引航道的布置。

根据上游右侧地形地貌的特点, 可以通过比较不同的引航道布置方式确定最优设计方案。因此, 总平面布置方案根据“上游引航道不同的布置方式”、“老船闸一闸室不同改造方式”和“老船闸上闸首改造、拓宽”, 提出 3 种方案。

3.2 总平面布置方案 1

3.2.1 船闸主体结构

船闸轴线维持原状, 与坝轴线夹角 92°; 沿用原上闸首作为枢纽挡水建筑物的组成部分, 同时利用原上闸首、一闸室作为通航明渠, 并将一闸室进行局部拓宽, 切除岸侧闸室墙 181.0 m 以上范围, 于岸侧新建闸室墙, 闸室口门宽度由 14.5 m 渐变至 23.0 m, 改造后通航明渠平面尺寸为 103 m×(12~23) m(长×宽)。维持原上闸首顶高程为 196.5~191.5 m, 门槛段边墩拆除原启闭机房, 并局部设置胸墙加高至 194.0 m 以发挥导航作用; 拆除并改造上闸首处坝顶交通桥、门机轨道梁。维持一闸室顶高程 191.5 m, 并局部设置胸墙加高至 194.0 m 以发挥导航作用。

新建洪江船闸有效尺度为 215 m×23 m×4.0 m(长×宽×门槛水深), 由上闸首、闸室、下闸首和上、下游引航道组成。上闸首长 28.5 m, 有效宽度为 23 m; 闸室段长 215 m; 下闸首长 37 m。

船闸右侧陆域部分, 由于老船闸一闸室渐变加宽及闸首、闸室建筑物总宽度加宽^[7], 船闸建筑物部分往右侧坪地延伸 0~14 m, 占用部分电厂坪地, 需重新布置场内道路和绿化。船闸左侧水域部分, 新建船闸边墩加宽应以不影响泄水闸泄洪为原则, 上闸首、闸室、下闸首较原建筑物外边线往河侧延伸 3 m; 由于枢纽下游河道断面调整、河床底高程降低, 各级流量下枢纽下游河段水位均降低; 敞泄工况各级流量下枢纽上下游河段水位均降低, 新建筑的拓宽未影响枢纽泄洪。

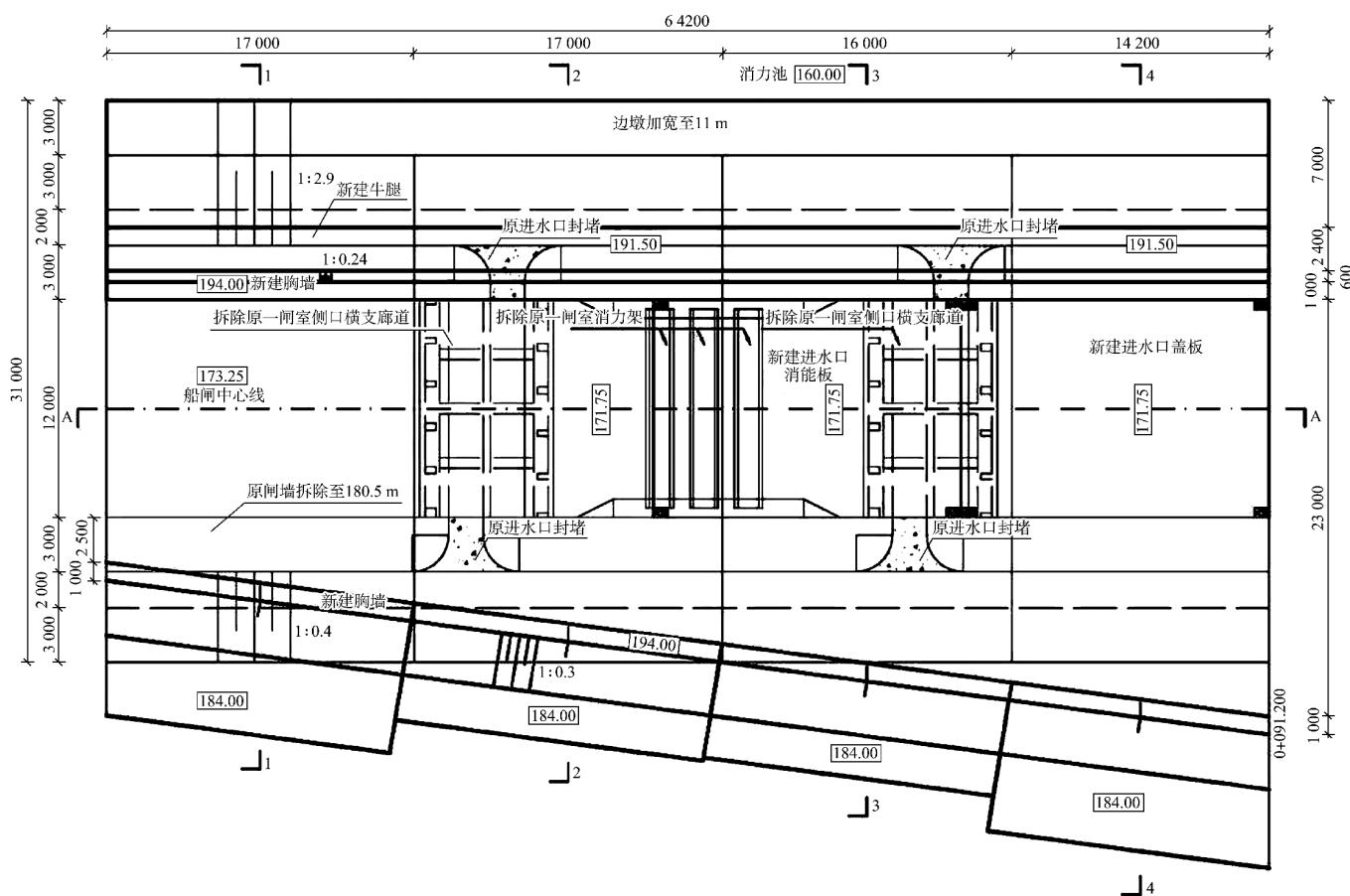


图 1 方案 1 原一闸室改造平面 (尺寸: mm; 高程: m)

3.2.2 下游引航道

下游引航道由直线导航段、曲线调顺段、直线停泊段、制动段及连接段航道组成。

利用原下游段部分导航墙作为改造后的辅助导航墙，结合主体结构布置情况，利用原结构长度 146.8 m，其中直线导航段长度 111 m，曲线调顺段投影长度 66.9 m；主导航墙兼做右岸生态园区挡土墙，由 2 段长为 124.3、72.2 m 的折线段组成，挡土墙下游端部与引航道护岸连接；根据试验研究成果，需新建 225 m 长隔水墙，一方面改善下游停泊段通航水流条件，一方面将水流导向至河床中部，使船舶具有更好的进出引航道条件。直线停泊段长 215 m，设置 9 座靠船墩，靠船墩中心间距 25 m；引航道宽度由 56.5 m 渐变至停泊段下游处 60 m。

制动段长 162 m，接近 2 倍设计船长。连接段航道为曲线，长 330~420 m，弯曲半径均大于 5 倍船长 (425 m)，与下游枯期、中洪期航道相连。

3.2.3 下游新建隔水墙对防洪及左侧边坡冲刷的影响

下游新建隔水墙长 225 m，大体顺水流方向布置。该段河段位于弯曲河道、且下游略有缩窄，洪江枢纽整体物理模型及船舶模型试验研究报告对该区域因工程造成的防洪和岸坡冲刷影响进行了研究。

试验建议对下游左侧河道断面进行调整，将约 5.1 万 m^2 范围河床的底高程降低至 160.5 m，以调整水流流速、流态。各级流量下，枢纽下游河段水位均有所降低，如表 1 所示。

表1 设计方案枢纽上下游水位变化

| 洪水流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$) | 坝址上游水位/m | | | 电站尾水/m | | |
|---------------------------------|----------|--------|-------|--------|--------|-------|
| | 现状 | 工程后 | 水位变化 | 现状 | 工程后 | 水位变化 |
| 245 | 190.00 | 190.00 | - | 164.65 | 164.53 | -0.12 |
| 735 | 190.00 | 190.00 | - | 165.48 | 165.36 | -0.12 |
| 1 470 | 190.00 | 190.00 | - | 167.05 | 166.91 | -0.14 |
| 3 820 | 190.00 | 190.00 | - | 170.23 | 170.11 | -0.12 |
| 7 820 | 190.00 | 190.00 | - | 173.41 | 173.26 | -0.16 |
| 9 930 | 190.00 | 190.00 | - | 175.02 | 174.89 | -0.13 |
| 11 300 | 187.00 | 187.00 | - | 175.76 | 175.64 | -0.11 |
| 13 900 | 187.00 | 187.00 | - | 177.54 | 177.43 | -0.11 |
| 16 400 | 187.08 | 187.04 | -0.04 | 179.11 | 179.03 | -0.08 |
| 19 600 | 188.96 | 188.93 | -0.02 | 181.08 | 181.02 | -0.06 |
| 22 000 | 189.94 | 198.93 | -0.01 | 182.35 | 182.33 | -0.02 |

为对比工程前后坝下近岸流速的变化, 分析新建隔水墙对左侧边坡冲刷的影响, 试验选取3级特征流量 Q 分别为 9 930、13 900、19 600 m^3/s 条件下对坝下 1 700 m 河段的近岸流速进行观测。结果表明: 1) 坝下 500~1 200 m 河段受左凸右凹的微弯河势影响, 加之右岸侧新建隔水墙占据部分河宽, 致使该河段流速相对较大, 且工程后亦有所增加; 工程前后最大近岸流速均位于凸嘴附近, 3 级流量下的最大近岸流速分别为 3.50、4.56、5.04 m/s, 工程后分别增至 4.1、4.9、5.1 m/s; 流速增幅最大处位于坝下 770~900 m 束窄河段, 3 级流量下近岸流速最大增加值分别为 0.96、1.08、0.26 m/s。2) 坝下 500 m 范围内, 近岸流速一般在 1.5 m/s 以内, 工程前后河宽基本不变, 流速变化不大。3) 坝下 1 200~1 700 m 位于凸嘴下游顺直河段, 新建隔水墙对近岸流速的影响作用逐渐减弱, 3 级流量下工程前后近岸流速的变化幅度在 0.3 m/s 以内。

考虑到下游新建隔水墙对近岸流速的影响, 拟采用工程措施对坝下 500~1 200 m 河段左侧岸坡防护。

3.2.4 上游引航道

上游引航道及航线布置以不切上游右侧河滩地为原则, 主动避让。上游引航道由导航段、调顺段、停泊段、制动段(含直线段和曲线段)及连接段航道组成。上游原直线导航墙长 182.2 m, 折

线形导航墙投影长度 91.2 m, 结合原建筑物布置情况, 上游引航道直线段(440.2 m)由导航段、调顺段、停泊段、制动段组成; 曲线制动段(117 m)转弯半径 $R=450$ m。引航道宽 50 m, 弯曲段加宽至 60 m, 最小弯曲半径为 5 倍船长即 425 m, 过曲线段后, 通过连接段与上游主航道连接。根据试验研究成果, 需新建上游插板式隔水墙 108 m, 以改善引航道内及口门区的通航水流条件; 于滩地下游掩护水域的邻近引航道布置浮式检修门系船柱, 桩中心距 21.2 m, 设置在河床底高程 175.0 m 以下位置, 以保证浮式检修门足够的吃水深度和富余水深。

3.3 总平面布置方案 2

该方案相比方案 1, 主要区别在于上游引航道的布置方式及老船闸一闸室的平面形式不同, 其他部分(船闸主体段、下游引航道、船闸锚地、管理区等)与方案 1 完全一致, 因此, 仅对上游引航道布置及一闸室平面布置情况进行说明。

船闸右侧陆域部分, 老船闸一闸室维持原尺度不变, 一闸室口门宽度为 12 m, 墙后回填土顶高程仍为 191.7 m, 原一闸室改造断面见图 2。新建船闸闸首、闸室建筑物总宽度增加, 新建船闸建筑物部分往右侧坪地延伸 12~14 m, 占用部分电厂坪地, 船闸左侧水域部分与方案 1 一致。船闸通过能力为 754 万 t/a, 满足设计水平年通过能力要求。

上游引航道及航线布置适当占用右岸河滩地, 以尽量减少靠右岸布置。上游引航道由导航段、调顺段、停泊段、制动段(含直线段与曲线段)、连接段航道组成, 其中调顺段为曲线段。导航段为直线段, 长 91.2 m, 与方案 1 相同; 调顺段为曲线段, 投影长度为 91 m; 停泊段轴线与船闸中心线夹角为 18°, 停泊段长度、靠船墩数量、间距与方案 1 相同; 切滩处下游至停泊段约 200 m 范围为制动段, 其中直线段长 32 m, 主要起衔接作用, 曲线段弧长 180.6 m、转弯半径 425 m; 连接段长 212.5 m, 与锚地至船闸上游引航道之间的主航道相连接。

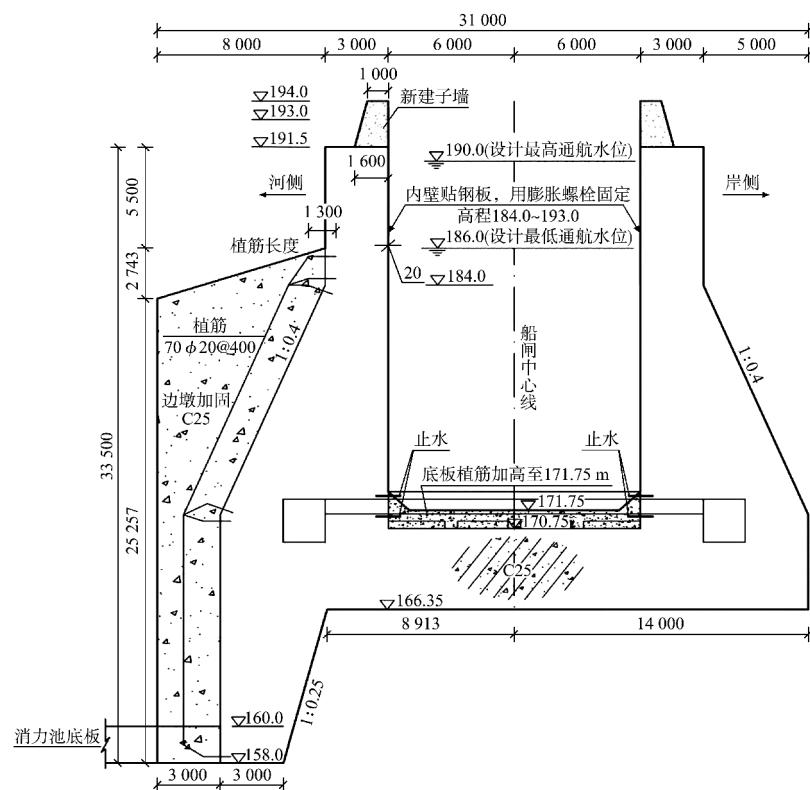


图 2 方案 2 闸室改造断面 (尺寸: mm; 高程: m)

3.4 总平面布置方案 3

相比方案 1、2，主要区别在于将老船闸上闸首、一闸室口门整体拓宽至 23 m，相应拆除邻近的部分主导航墙，使上游引航道最小宽度拓宽至 23 m，改造断面见图 3。其余部分中，上、下游引航道布置方式及新建船闸总平面布置均与方案 2 相同。由于上闸首扩宽，原船闸防洪检修门不再适用，须另外配置 23 m 跨船闸防洪检修门。

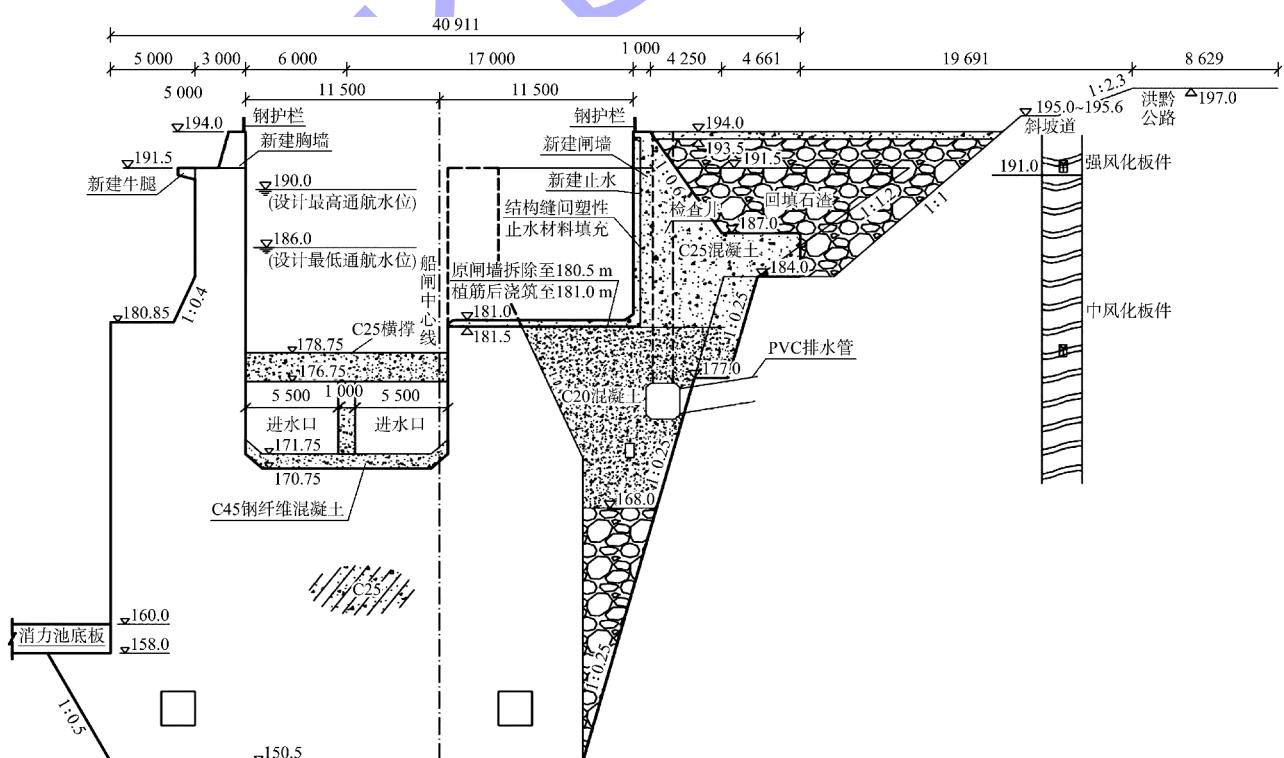


图 3 方案 3 闸室改造断面 (尺寸: mm; 高程: m)

4 方案比选

对于方案1, 直线段由导航段、调顺段、停泊段组成, 长度足够, 船舶过闸方式为曲进直出; 上口门区和制动段为曲线段, 对通航水流条件要求较高。根据试验成果, 河侧需布置较长隔水墙, 才能使停泊段、口门区通航水流条件满足规范要求; 口门区范围靠右侧亦为制动段, 中洪水期水流条件较复杂, 通过延长隔水墙方能确保该区域水流条件满足规范要求。设计通航流量下, 停泊段内水流条件满足规范要求; 导航段和调顺段内基本为静水区, 满足规范要求。对原船闸一闸室进行局部改造, 口门宽度由12 m增大至23 m, 改善了船舶进出闸的通航条件。原一闸室墙拆除和重建涉及土石方工程, 单项工程造价较大。

对于方案2, 调顺段为曲线段, 船舶过闸为曲进曲出; 停泊段与船闸中心线夹角为18°, 船舶可由停泊段安全驶入闸室; 船舶进出闸距离和船闸通过能力与方案1基本相同。引航道、航线均靠右岸布置, 右岸河滩下游局部范围为掩护水域, 有利于船舶进出引航道及停靠; 停泊段、制动段均靠右岸布置, 具有更好的水流条件; 右岸河滩局部切滩形成主航道, 航道靠近右岸侧, 中洪水期通航水流条件更好。未对老船闸一闸室进行拓宽, 对原结构影响较小; 可取消隔水墙, 降低工程造价、缩短工期, 但新建船闸上闸首口门宽度为12 m, 船舶在通航明渠进出闸的便捷性相对方案1较差。

对于方案3, 除了具有方案2的优点外, 船舶通过原船闸时效率更高、安全可靠。由于口门宽度拓宽至23 m, 能够适应远期规划船舶大型化的要求, 上游进水处水域更为开阔, 上游最低通航水位时, 船闸通航明渠内水流条件改善更为明显。需拆除重建临近原上闸首的3段主导航墙结构段, 将口门宽度由12 m拓宽至23 m。对原船闸上闸首、右岸副坝进行局部拆除和加固, 涉及挡水建筑物的改造, 结构安全更为敏感; 废除原船闸防洪门, 另行配置船闸检修、防洪门及启闭设备, 可作为下一阶段研究的推荐方案。

5 结语

1) 通航明渠段口门通航宽度由12 m增至23 m, 并对原船闸上闸首、一闸室、中闸首进行全面改扩建, 对结构整体性有一定损伤, 且结构植筋工艺复杂, 特别是在施工期原船闸上闸首防洪(检修)闸门挡水、下游部分进行改造时, 结构受力条件复杂, 需要采取切实可行的措施确保施工质量和工程安全, 方案3对于远期航道通过能力保证有较大的优势。

2) 施工期间关注原枢纽工程建筑物的检查和监测成果, 特别是右岸混凝土重力坝、溢流坝的坝基渗压等若发生异常, 应及时分析处理。右岸开挖边坡高陡, 施工过程中应加强巡查和监测, 确保边坡稳定。

3) 扩建工程和大坝日常管理工作存在较多的交叉和干扰, 施工和运行管理中需进一步明确扩建工程建设管理单位与洪江水电站运行单位的安全和管理职责, 并在工程建设、运行过程中严格执行。

参考文献:

- [1] 金国强, 张公略, 李浙江, 等. 富春江船闸扩建改造工程创新设计与实践[J]. 水运工程, 2018(2): 98-104.
- [2] 华华. 平原地区船闸闸位布置特点与思考[J]. 中国水运, 2023(5): 109-111.
- [3] 张爱平, 普晓刚, 王能, 等. 山区河势受限段改建船闸上游通航条件试验研究[J]. 水道港口, 2019, 40(4): 421-425.
- [4] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [5] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 沅水洪江至辰溪航道建设工程初步设计[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2022.
- [6] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 洪江枢纽整体物理模型及船舶模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2018.
- [7] 南京水利科学研究院. 湖南洪江枢纽船闸扩建工程建设对电站大坝安全影响专项论证报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2022.