长沙枢纽三线船闸工程总体布置

杨　峰[1]，周杰源[2]，叶雅思[2]，唐玉元[2]，彭厚德[2]，刘　仟[2]

（1. 湖南省交通运输厅规划与项目办公室，湖南 长沙 410200；
2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司，湖南 长沙 410200）

摘要：针对长沙枢纽三线船闸受已建双线船闸制约、边界条件（道路、已建船闸、船闸控制楼等）较为复杂的问题，进行坝址选择、船闸轴线布置、船闸平面布置方案比选以及口门区及连接段通航条件试验成果验证。船闸平面布置通过直进曲出和曲进直出方案展开对比分析，确定直进曲出方案为最优方案，提出船闸平面布置应结合用地、周边制约条件、水流条件、实施可行性、过闸效率、对已建船闸干扰程度以及投资等进行比选，结合工程实际充分利用现有资源，降低工程投资，兼顾工程施工及运营管理方便。该船闸总体布置方案和相关技术措施对周边环境复杂的多线船闸布置有借鉴意义。

关键词：船闸；枢纽；总体布置；三线船闸

中图分类号：U641.2+1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0122-07

General layout of third-line ship lock project at Changsha Hub

YANG Feng[1], ZHOU Jieyuan[2], YE Yasi[2], TANG Yuyuan[2], PENG Houde[2], LIU Qian[2]

(1. Hunan Provincial Transport Department Planning and Project Office, Changsha 410200, China;
2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: To constraints of the existing double line ship locks on the third-line ship lock of Changsha hub, and complex boundary conditions (roads, existing ship locks, control buildings, etc.), this study conducts comprehensive comparisons including dam site selection, ship lock axis arrangement, and layout optimization. The navigation conditions at entrance areas and connecting segments are validated through experiments. By comparing straight entrance-curved exit layout with curved entrance-straight exit layout, the straight entrance-curved exit scheme is identified as optimal. It is proposed that the layout selection should integrate multiple factors: land utilization, surrounding constraints, hydraulic conditions, implementation feasibility, lock transit efficiency, interference with existing ship locks, and investment costs. The existing resources should be fully utilized in combination with the engineering practice to reduce the engineering investment and give consideration to the convenience of engineering construction and operation management. The general layout scheme and related technical measures of the ship lock have reference significance for the layout of multi-line ship locks with complex surrounding environment.

Keywords: ship lock; hub; general layout; third-line ship lock

1　工程概况

湘江是全国高等级航道网“四纵四横两网”中的一纵，是湖南省航道体系的主骨架。长沙枢纽工程位于湘江丁字湾卡口下游的蔡家洲，是一个公益性基础设施建设工程，旨在确保长株潭城市群生产生活用水，适应滨水景观带建设，进一步改善长沙—株洲段通航条件，兼顾发电等功能。由于长沙枢纽坝下航段水位不断下降。长沙枢纽坝下枯水期极枯水位刷低至 18.35 m，比原设计下游最低通航水位 20.50 m 下降了 2.15 m，2021 年

收稿日期：2024-07-01

作者简介：杨峰（1981—），男，硕士，高级工程师，从事港口、枢纽建设管理工作。

水运工程

统计突破最低通航水位天数达到 73 d。由于洞庭湖区水位的不断下降，航道已经无法满足 2 000 吨级船舶安全通行。枯水期是我省保电能、保经济社会稳定的关键期，因此建设长沙枢纽三线船闸是解决当前实际问题的迫切需要，对畅通国内大循环、促进国内国际双循环以及扩大内需具有重大意义。

长沙枢纽三线船闸闸室有效尺度为 365 m×34 m×5.6 m(有效长度×有效宽度×门槛水深)，按 3 000 吨级船闸设计，设计单向通过能力 5 852 万 t。本文通过分析长沙枢纽三线船闸工程的设计条件，分别集中比较上下游曲线进闸和直线进闸的布置方案，并对比优缺点，获得最优的设计方案。

2　设计条件

2.1　最低通航水位

根据扩建三线船闸不改变原水库特性的原则，结合下游最低通航水位水文分析、下游水位的持续下切和相关长江河床变化情况，上游最低通航水位采用 27.8 m，下游最低通航水位采用 16 m。此外，为适应未来河床继续下切引起的水位下降，考虑 2.37 m 水位下降富余，实际控制水头为 13.8 m。

2.2　现有一、二线船闸工程布置及规模

湘江长沙综合枢纽(图 1)正常蓄水位为 29.8 m(1985 国家高程)，水库相应库容 6.75 亿 m^3，泄水闸设计过闸流量 2.64 万 m^3/s，电站装机 57 MW，设计通航船舶吨级 2 000 t。本枢纽工程等别为 Ⅰ 等，主要建筑物按 1 级设计，次要建筑建筑物按 3 级设计。枢纽主要建筑物从左至右依次为左岸改移防洪大堤、左岸副坝及预留三线船闸、二线船闸、一线船闸、26 孔净宽 22 m 的低堰泄水闸、1 孔净宽 7 m 泄洪排污闸、电站厂房、蔡家洲副坝(含坝顶门机平台)、20 孔净宽 14 m 的高堰泄水闸及右岸副坝。

原船闸为双线单级船闸，布置在左汊左岸，设计船型为 1 艘顶推船+2 艘 2 000 吨级驳船船队和 1 艘顶推船+4 艘 1 000 吨级驳船船队，闸室的有效尺度均为 280 m×34 m×4.5 m，设计年通过能力 9 800 万 t。一、二线船闸共用引航道，进出闸采用曲进不完全直出的方式。上下闸首采用整体式结构，闸室采用分离式和整体式相结合的结构形式。输水系统采用闸墙长廊道短支孔的分散输水方式，船闸右侧主导航墙与枢纽工程泄水闸相临。引航道轴线及一、二线船闸轴线与坝轴线垂直，闸室及上闸首布置于坝轴线下游，一线船闸上游部分主导航墙与一、二线船闸上闸首为枢纽挡水线的一部分。坝顶公路桥布置于上闸首上游，跨越进水墙、主辅导航墙。船闸控制楼布置在二线船闸左岸。

图 1　长沙枢纽现状

Fig. 1　Current situation of Changsha Hub

2.3　船闸工程设计规模

长沙枢纽已建有一、二线船闸，根据长沙枢纽实地调查可知，自长沙枢纽通航 5 年以来，年通过货运量已超 9 000 万 t，其设计最大通过能力基本达到 9 800 万 t。长沙枢纽实际运行期间船闸单向年过闸货运量为 3 260 万 t，两线相加为 6 520 万 t，实际单向年过闸货运量已远超设计单向通过能力。因此本工程将对长沙枢纽船闸进行扩建。结合近年来长沙枢纽过坝运量与航道货运量及其流向的相关关系，综合分析预测 2035 及 2050 年长沙枢纽货运量，见表 1。

表 1　长沙枢纽货运量预测结果

Tab. 1　Forecast results of freight volume of Changsha Hub

年份	过坝货运量/万 t			三线船闸过闸货运量/万 t		
	上水	下水	合计	上水	下水	合计
2035	11 000	3 000	14 000	4 800	1 400	6 200
2050	14 000	4 000	18 000	5 400	1 600	7 000

考虑到与湘江水运密切相关的长江航线的技术等级均已达一级，长江干线航道的船舶尺寸对湖南省内大型船舶尺寸发展具有引领作用。结合本航道是湖南融入长江经济带的水上大动脉，其定位应具备直接承接长江干线船舶主尺度的需求。因此采用长江干线推荐船型作为设计代表船型，另外根据长江干线航道发展及湘桂运河 3 000 吨级船型吃水情况，将吃水深度修正为 3.5 m。本工程代表船型为 3 000 吨级货船，尺度为 110 m×16.3 m×3.5 m(长度×宽度×吃水)。

综上，根据 JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》[1] 和 GB 50139—2014《内河通航标准》[2] 进行通过能力计算要求，长沙枢纽三线船闸为一级船闸，采用单线布置，闸室主尺度为 365 m×34 m×5.6 m，通航净高为 18 m。设计代表船型为 3 000 吨级机动船，船闸通过能力为 5 852 万 t。

2.4　工程布置原则

长沙枢纽三线船闸西侧为长沙市交通要道(潇湘北路及湘江左岸堤防)，东侧为正在运营的长沙枢纽一二线船闸(三线船闸与二线船闸轴线距离 114 m)，且三线船闸与一二线船闸中间有 1 栋控制楼(距离闸室墙边线仅 41 m)，基坑受潇湘北路、堤防、船闸控制楼及一二线船闸影响较大，边界条件复杂。根据文献[3-6]，结合长沙枢纽三线船闸的地形地貌、工程地质、以及现有建筑物特点，布置原则为：1）遵循节约集约用地的核心理念，充分利用原三线预留位置，实现土地资源的优化配置和可持续利用；2）妥善处理好拟建船闸与周边建筑物(包括已建枢纽、新改建桥梁等)之间的相互关系，确保施工期间对一、二线船闸正常运营影响降至最低；3）在追求工程效率的同时，兼顾工程施工和运营管理的便捷性，船闸的建设不得对已建枢纽的结构稳定性及日常运行安全构成威胁；4）结合工程实际充分挖掘并利用现有资源，最大限度减少征地、拆迁及土方开挖工程量，从而降低工程投资成本。

3　船闸总体布置

3.1　坝址选择

通过比选长沙枢纽左汊左岸、左汊右岸及右汊左岸、右汊右岸场地及周边情况，结合用地、水流条件、实施可行性及干扰程度等，确定长沙枢纽扩建三线船闸拟建设在预留闸位上，坝址为左汊左岸原预留船闸位置，不另选址建坝。

3.2　船闸轴线布置

在充分利用现有用地，暂不拆改长沙枢纽坝顶桥的情况下，长沙枢纽三线船闸通航轴线需利用现有坝顶桥的通航孔布置。通航孔情况见图 2。

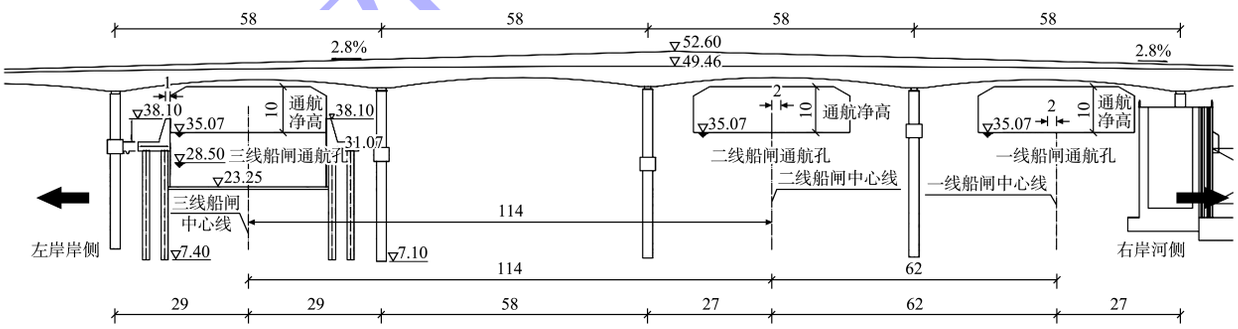

图 2　坝顶桥通航孔（单位：m）

Fig. 2　Navigation holes of dam crest bridge（unit：m）

为确保船闸布置合理，考虑到建设期不拆除跨船闸桥，需在跨船闸下修建主辅导航墙，为减小施工期对坝顶桥和跨船闸桥的影响，并充分利用桥跨空间，将三线船闸轴线顺直布置在预留通航孔中心线处，距二线船闸轴线 114 m，且平行于一、二线船闸轴线。船闸主体结构则布置在坝轴线下游。由于上游进水墙为重力式结构，为减小基坑开挖对桥梁桩基的影响，需留出一定距离作为临时支护空间，因此将上游进水墙上边线与一、二线上闸首上边线齐平，且布置在距坝顶桥边线约 20 m 处。三线船闸轴线如图 3 所示。

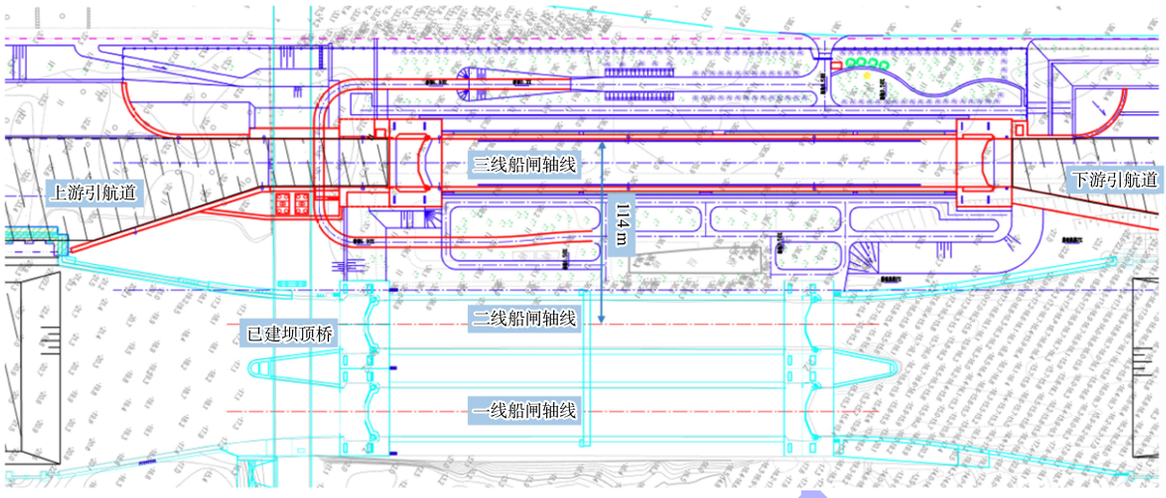

图 3　三线船闸轴线

Fig. 3　Axis of third-line ship lock

3.3　船闸平面布置方案比选

明确三线船闸轴线的具体位置后，为降低施工费用和难度，将闸首布置在坝顶桥下游。同时，为了提升过闸效率和过闸能力，将进水墙和上闸首宜靠近坝顶桥布置，水墙上缘距离坝顶桥下游边线 20 m。船闸的主要构成部分为进水墙、上闸首、闸室以及下闸首等，在位置与布局上基本定型。遵循工程布置原则，参考文献[7-10]的布置思路，特将研究重点聚焦于船闸进出闸方式的优化选择上，主要分上下游，分别集中比较曲线进闸和直线进闸布置方案。

3.3.1　方案 1

直进曲出方案中三线船闸与一、二线船闸分设引航道，引航道采用不对称布置，上下游引航道轴线均与船闸轴线平行，船舶进出闸方式均为直线进闸、曲线出闸。上游引航道直线进闸曲线出闸方案(图 4)直线段位于岸侧，岸侧引航道边线与船闸左边墙边线在同一直线上，即主导航墙、停泊段布置在岸侧，辅导航墙布置在河测。引航道宽度 80 m，设计河底高程 18.0 m。船舶进闸操作简单，靠船墩布置在岸侧施工可以利用现有岸坡，实施简便并且不会影响二线船闸通航。此外，拆除现有检修门库，在岸侧重新布置浮式检修门库，用于放置一、二线船闸上下闸首的浮式检修门以及三线船闸的浮式检修门。

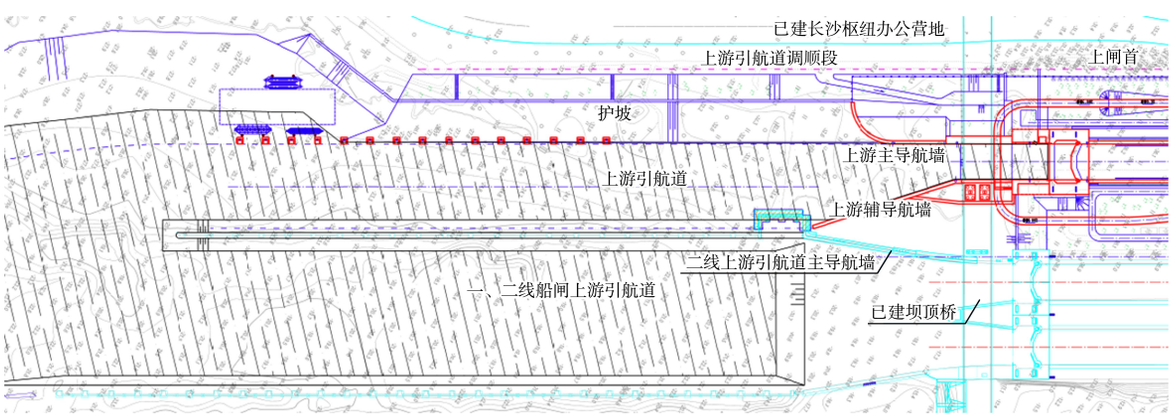

图 4　上游直线进闸曲线出闸方案布置

Fig. 4　Layout of upstream straight entrance-curved exit

水运工程

下游引航道曲线进闸直线出闸方案(图 5)采用曲线布置在右边河测，主导航墙、停泊段布置在河测，辅导航墙布置在岸侧。引航道宽度 81.5 m，设计河底高程 10.4 m。船舶进闸航距短，过闸效率高。拆除部分现有二线船闸靠船墩后，靠船墩采用二、三线船闸靠船墩同柱合建形成，可以避免航道浚深引起二线靠船墩不安全并需要额外加固的情况，也为二线船闸系泊适应未来水位下降提供了便利。

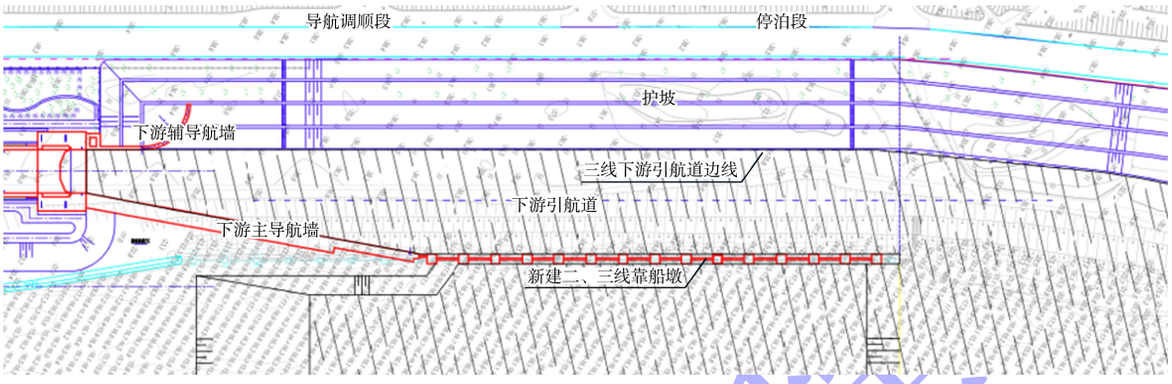

图 5　下游曲线进闸直线出闸方案布置

Fig. 5　Layout of downstream curved entrance-straight exit

3.3.2　方案 2

上游曲线进闸直线出闸方案(图 6)采用曲线布置在右边河测，主导航墙、停泊段布置在河测，辅导航墙布置在岸侧。船舶从停泊段到进闸的最大横向偏距为 38.5 m。引航道宽度 80 m，设计河底高程 18.0 m。船舶进闸航距短，过闸效率高。靠船墩布置在河测，采用简便的筑岛施工也会影响二线船闸通航。另在岸侧布置浮式检修门库(拆除现有检修门库)，放置迁移至此的一、二线船闸上下闸首浮式检修门和三线船闸的浮式检修门。

下游直线进闸曲线出闸方案(图 7)直线段位于岸侧，岸侧引航道边线与船闸左边墙边线在同一直线上，即主导航墙、停泊段布置在岸侧，辅导航墙布置在河测。二线船闸靠船墩由于浚深后入土深度急剧变小，进行加固处置。且前部分 220 m 范围内增设透水隔墙以改善灌泄水条件。引航道总宽度 80 m，设计河底高程 10.4 m。该方案船舶进闸操作简单，靠船墩布置在岸侧施工可以利用现有岸坡实施，但在保护现有堤防的情况下需要采用桩锚结构克服边坡放坡空间不足的缺点。该方案由于需要加固二线船闸靠船墩，因此实施中仍会影响二线船闸通航。

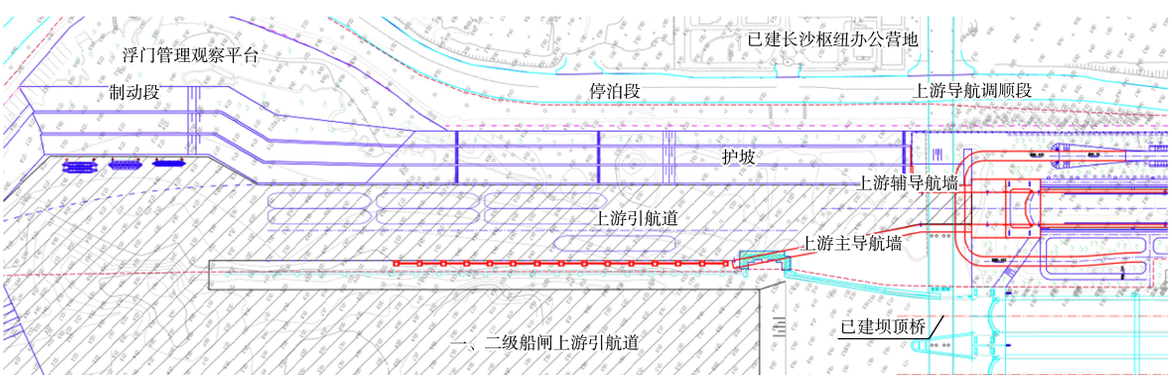

图 6　上游曲线进闸直线出闸方案布置

Fig. 6　Layout of upstream curved entrance-straight exit

水运工程

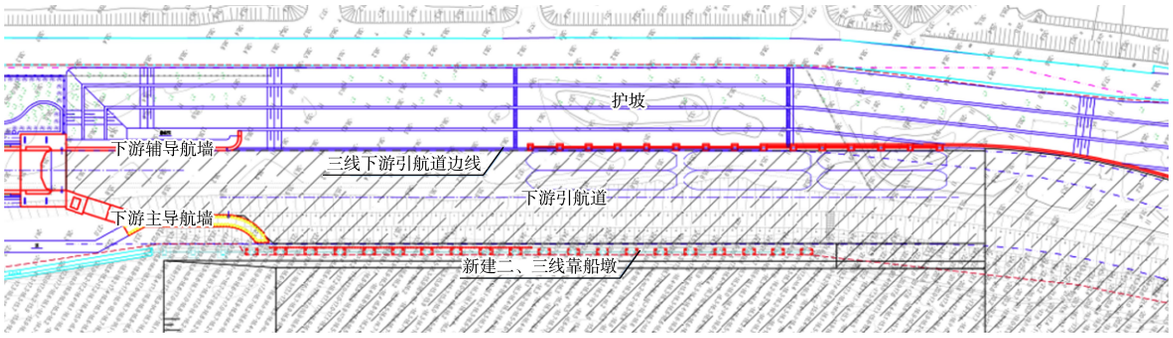

图 7　下游直线进闸曲线出闸方案布置

Fig. 7　Layout of downstream straight entrance-curved exit

3.4　方案比较

方案 1 和 2 均具有建设可行性，2 个方案三线船闸与一、二线船闸分设引航道，引航道采用不对称布置，结合结构特点、对比分析 2 个方案见表 2。

表 2　长沙枢纽三线船闸总平面布置方案比选

Tab. 2　Comparison of general layout schemes for third-line ship lock at Changsha Hub

方案	位置	引航道布置	引航道长度/m	工程内容	过闸耗时/min	成本造价/亿元	对二线船闸影响
1	上游	直进曲出	420.5	三线靠船墩在河滩施工便捷	15.15	1.127	不干扰
	下游	曲进直出	250.0	三线靠船墩与二线靠船墩拆除后融合布置	13.89	1.905	施工干扰约 25 m 范围
2	上游	曲进直出	255.0	三线靠船墩在库区施工,辅助措施较多	14.43	1.200	施工干扰
	下游	直进曲出	390.0	二线靠船墩拆除重建,左岸护坡和堤防需要额外加固	14.71	2.355	施工干扰

综上，方案 1 在上下游引航道的布置上，采用了直线进闸与曲线出闸相结合的方式。此设计显著减少了双排桩支护结构的规模与土石方工程量，大幅降低了工程造价，使整体更为经济合理。方案 1 进闸效率得到了提升，同时有效减少了桩锚支护的需求，实现了对二线船闸靠船墩安全与系泊问题的根本性解决，体现了设计的前瞻性与实用性。此外，方案 1 对一、二线船闸正常运营影响较小，兼顾了工程施工和运营管理的便捷性。相比之下，方案 2 虽然通过曲线进闸、直线出闸的方式缩短了船舶过闸的时间，但停泊段与闸室距离较近，可能带来施工难度的增加以及对二线船闸通航的潜在影响。同时，方案 2 的施工量较大，也是不容忽视的缺点。综合以上分析，推荐采用方案 1 作为总平面布置的最终方案，即上下游引航道采用直线进闸与曲线出闸相结合的方式，以实现更高的进闸效率、更低的工程造价及更优化的通航条件。

3.5　口门区及连接段通航条件试验成果

扩建三线船闸位于已建一、二线船闸左(岸)侧，船闸引航道及口门区向河道左侧拓挖，试验结果表明：扩建三线船闸对原有一、二线船闸口门区通航水流条件影响不大，设计各级通航流量($Q \leqslant 2.19$ 万 m^3/s)下，船闸上下游口门区及连接段通航水流条件能够满足船舶安全航行要求，其中，三线船闸上游口门区最大横向流速 0.13 m/s，下游口门区最大横向流速 0.15 m/s；一、二线船闸上游口门区最大横向流速 0.31 m/s，下游口门区最大横向流速 0.25 m/s[11]。

4　结语

1）布置三线船闸时，充分考虑既有枢纽建筑物对扩建船闸布置可能产生的各种制约因素，以确保设计方案的合理性和可行性。

2）经过综合评估，确定了船闸平面布置采取直线进闸、曲线出闸的最佳方案。该方案的直线

水运工程

段被巧妙地设置于岸侧，使得岸侧引航道边线与船闸左边墙边线在同一直线上，主导航墙、停泊段均布置在岸侧，辅导航墙布置在河测。引航道宽度 80 m，设计河底高程 18.0 m，以确保船舶通行的顺畅与安全和满足船舶吃水需求。

3）此方案布局使得船舶进闸操作变得简便快捷，而靠船墩的岸侧布置更充分利用了现有岸坡条件，大幅简化了施工流程，解决了二线船闸靠船墩安全与系泊问题，提高过闸效率的同时降低了施工难度和造价成本。

参考文献：

[1] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Code for master design of shiplocks : JTJ 305-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

[2] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[3] 张珊, 吴澎. 长洲水利枢纽 3-4 号船闸平面布置研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 1-5.
ZHANG S, WU P. Research on layout for locks No. 3 and 4 of Changzhou water control project on Xijiang River[J]. Hydro-science and engineering, 2012(4): 1-5.

[4] 刘震宇, 唐杰文. 新夏港船闸设计优化[J]. 港工技术, 2018, 55(1): 19-21.
LIU Z Y, TANG J W. Optimum design of ship lock in Xinxia Port [J]. Port engineering technology, 2018, 55(1): 19-21.

[5] 江涛, 罗业辉, 董霞, 等. 淮河入海水道二期配套通航工程淮安东船闸布置方案[J]. 水运工程, 2021(11): 142-147.
JIANG T, LUO Y H, DONG X, et al. General layout of Huai'an east ship lock of the Huaihe River sea-entering channel Phase Ⅱ supporting navigation projects[J]. Port & waterway engineering, 2021(11): 142-147.

[6] 周灿, 段元振, 彭哲, 等. 大源渡二线船闸总体布置方案[J]. 水运工程, 2019(3): 39-42.
ZHOU C, DUAN Y Z, PENG Z, et al. Overall layout plan of Dayuandu second-line ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 39-42.

[7] 董霞, 吴澎, 吕小龙. 平陆运河青年枢纽坝址选择和平面布置[J]. 水运工程, 2023(9): 151-157.
DONG X, WU P, LYU X L. Dam site selection and general arrangement of Pinglu Canal Youth Hub [J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 151-157.

[8] 王勤振, 邹永超, 汤建宏. 某扩容改造船闸工程闸位平面布置[J]. 水运工程, 2017(12): 179-184.
WANG Q Z, ZOU Y C, TANG J H. General layout of lock position of a ship lock expansion and renovation engineering[J]. Port & waterway engineering, 2017(12): 179-184.

[9] 刘志敏, 李志成. 湘祁二线船闸平面布置方案及设计优化创新[J]. 水运工程, 2023(1): 137-142.
LIU Z M. Ll Z C. Layout plan and optimal design innovation of Xiangqi second-line ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2023(1): 137-142.

[10] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 湘江长沙至城陵矶一级航道建设工程可行性研究报告[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2023.
Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Feasibility study report on the first-class waterway construction project from Changsha to Chenglingji in Xiangjiang River[R]. Changsha: Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2023.

[11] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 湘江长沙至城陵矶一级航道建设工程模型试验[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2024.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Model test of the first-class waterway construction project from Changsha to Chenglingji in Xiangjiang River[R]. Tianjin: Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, MOT, 2024.

（本文编辑　赵娟）

水运工程