



一种省水、节能兼具船闸和升船机功能的通航设施

易坚浩

(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 311122)

摘要: 现有通航设施通常指船闸或升船机, 船闸通行效率高, 但耗水较多, 升船机不耗水, 但通行效率低, 结构复杂。因此, 针对现有通航设施的局限性, 本文提出一种新型水力升降机, 应用于通航设施, 可最大限度省水节能且具有良好的通行效率, 该通航设施采用竖井内升降机(母船)承载通航船舶(子船)的模式实现升降, 子船停泊在母船甲板上的池内, 当母船升降至池内水位与上下游水位齐平时, 池内船舶便与上下游船舶进出交换, 达到上下游船舶通航的目的。该通航设施可兼具船闸和升船机功能, 具有良好的通用性和适用性。

关键词: 承船池; 蓄水槽; 储水箱; 浮筒; 竖井; 省水池

中图分类号: U642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0140-06

A navigation facility with functions of ship lock and ship lift

YI Jianhao

(Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 311122, China)

Abstract: The existing navigation facilities generally refer to the ship lock and ship lift. The ship lock has high traffic efficiency, but it consumes more water. The ship lift does not consume water, but it has low traffic efficiency and complex structure. Therefore, in view of some limitations of the existing navigation facilities, this paper proposes a new type of hydraulic lift, which can save water and energy to the maximum extent and has good traffic efficiency when applied to navigation facilities. This navigation facility uses the lift in the shaft (mother ship) to carry the navigation ship (sub ship) to achieve lifting. The sub ship is in the pool on the deck of the mother ship. When the water level in the pool is flush with the upstream and downstream water levels, the vessels in the pool will then enter and exchange with upstream and downstream vessels, so as to achieve the purpose of navigation of upstream and downstream vessels. The navigation facility can have the functions of ship lock and ship lift, and has good universality and applicability.

Keywords: ship basin; trough; tank; pontoon; shaft; water-saving pool

1 水力升降机结构及组成

水力升降机结构和组成见图 1, 分析自重力和浮力的相互作用关系。蓄水槽相对储水箱位置有上置式和下置式。按蓄水槽个数分单蓄水槽和双蓄水槽, 单蓄水槽为储水箱同侧的双蓄水槽合并

形成的, 当双蓄水槽其中 1 个下置时, 竖井水可与下游水一体, 取消下游侧一端的闸门, 在承船池水位与下游水位平齐时, 下游引航道船舶可直接进出承船池。

收稿日期: 2022-09-02

作者简介: 易坚浩 (1966—), 男, 正高级工程师, 从事装卸工艺设计工作。

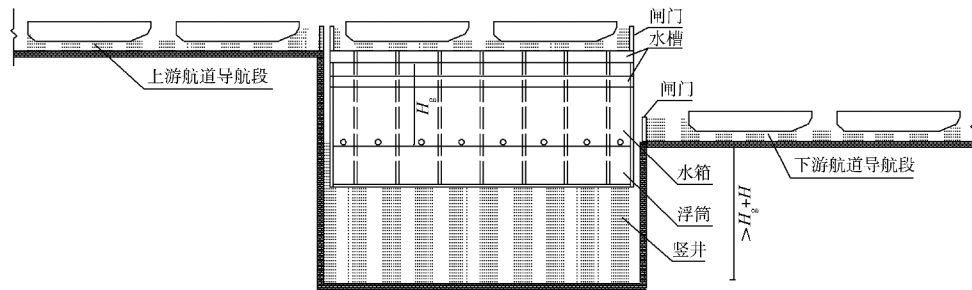


图1 升降机纵断面布置

水力升降机借助浮力运行在竖井内，竖井内水体按运行需要自成体系或与下游水成一体，竖井纵向与上下游引航道闸门^[1]相接，横向宽度稍大于上下游引航道宽度，升降机本体包括承船池、储水箱、蓄水槽、浮筒。升降机自身重力与浮筒浮力构成平衡体；蓄水槽蓄水和排水引起升降机自身重力或浮力变化，驱动平衡体升降；升降过程为储水箱容纳或回吐竖井水的过程。

1) 承船池容纳通航船舶，位于升降机顶部，池内水位满足船舶吃水，承船池的船舶进出的两端设有闸门，当升降机升至最高位(承船池水位与上游水位平)或最低位(承船池水位与下游水位平)时，承船池闸门与上游或下游引航道闸门对接。

2) 储水箱位于承船池和浮筒之间，其高度依升降行程(上下游水位落差)确定，底部阀门控制竖井水进出储水箱，顶部1[#]气道与外部大气相通，下沉和上浮过程中竖井水进出储水箱时内外部气体可自由进出，储水箱进出水孔流量大小和气道开闭可控制升降机起停及升降速度，储水箱可视为使升降机平稳运行及起停的控制箱。

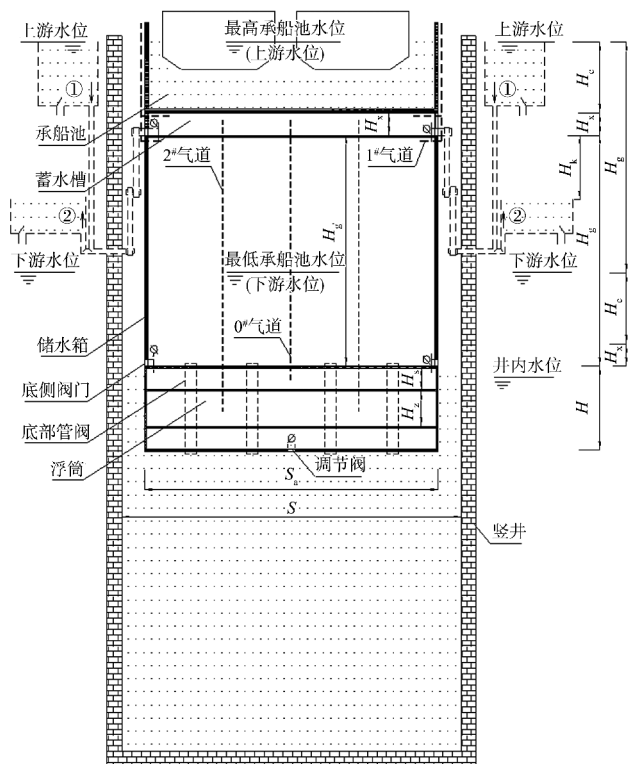
3) 浮筒位于升降机底部，高度为 H ，在水面上能承载整个升降机自重，其内部开辟部分空间高度为 H_s 和 H_z ，使整个浮筒分成 H_s 储能空间、 H_z 储能空间及剩余空间。在蓄水槽顶部储能空间分别具有0[#]和2[#]气道与蓄水槽连通。

4) 蓄水槽位于储水箱上方或下方，见图2、3，

蓄水槽个数有1或2个，蓄水槽进出口端接可折叠管或软管，经阀门切换后可通过输水廊道^[2]连通上、下游或竖井水体。

当蓄水槽从上游蓄水或通过水泵从竖井蓄水，升降机自重增加或浮力减少，升降机下降；当蓄水槽向下游或竖井排水，升降机自重减少或浮力增加，升降机上升。蓄水槽和储水箱按次序不断重复蓄水和排水、进水和放水，浮筒承载承船池在竖井中循环完成上下升降运动。

承船池所需承载船舶数量按通航能力要求确定，船舶数量可达到和船闸^[3]一次通行的相同效率。



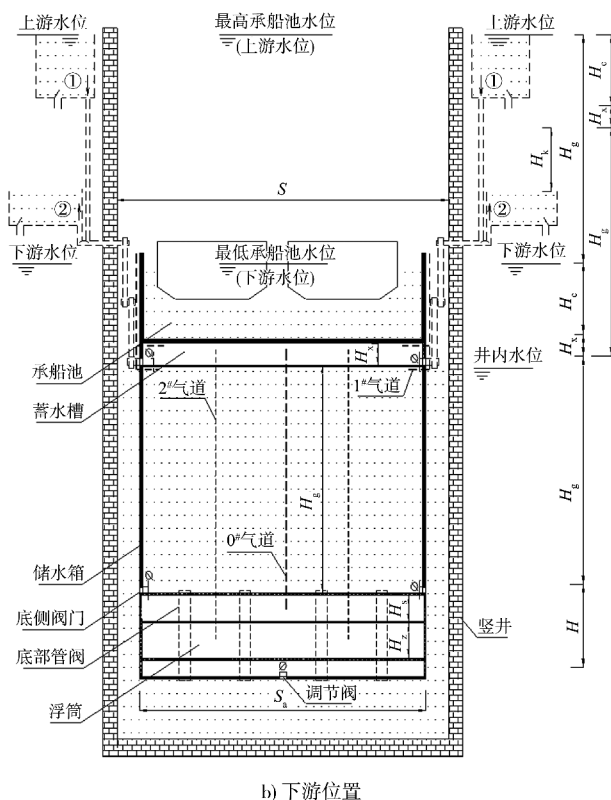
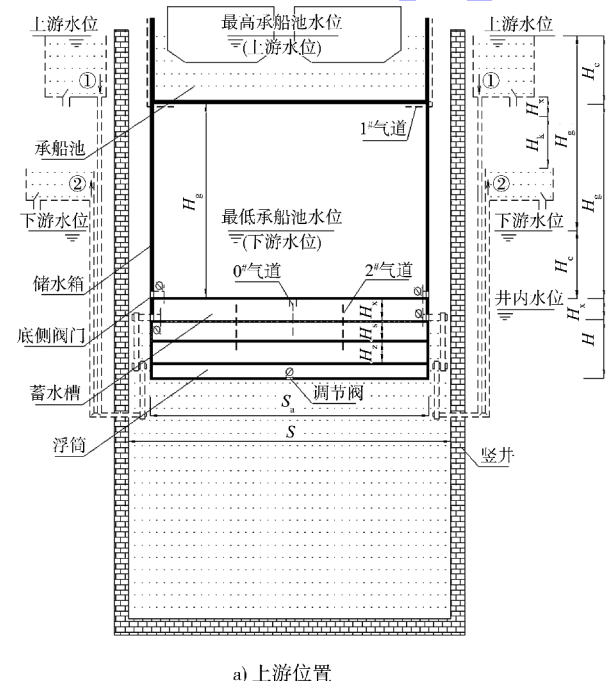
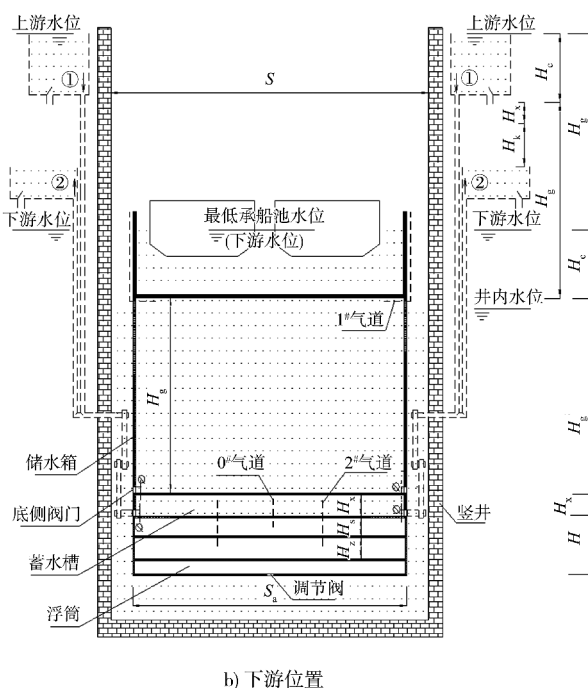


图 2 上置式升降机位置



a) 上游位置



b) 下游位置

图 3 下置式升降机位置

2 水力升降机运行模式及过程

水力升降机运行利用上、下游水位落差或水泵驱动。前者消耗势能，类似船闸运行模式；后者消耗电力，类似升船机^[4]运行模式。两者均需在 upstream 位对蓄水槽充水，在下游位使蓄水槽排水，蓄水槽充水后升降机下降，排空后升降机上升，各种蓄水槽布置形式的升降机运行原理基本相同。

本文按承船池不沉入竖井水中，分船闸运行模式和升船机运行模式，说明升降机的运行原理，并以单蓄水槽上置来说明升降机的运行过程。

2.1 船闸运行模式

2.1.1 下降运行

当升降机在上游位，见图 2a)。蓄水槽连接上游水体的阀门贯通，上游水体在 $H_c + H_x$ 高度压差驱使下，经输水廊道及连接管件充入蓄水槽，打开 0[#]气道，通过计算 H_s 实现蓄水槽充入 $(1-k)H_x$ 高度水后，槽内气压由大气压 p 增大至 $H_c + H_x + p$ ，充水自阻终止。水槽布置形式不同 k (分配系数) 值不同，上置式布置的升降机 k 值为 $k = (p + H_c + H_x) / (2p + H_c + H_x)$ ，此时，升降机重力增加 $(1-k)H_x$ 高度的水重力，槽内相应 $(1-k)H_x$ 高度气体通过 0[#]气道被压入浮筒空间 H_s ，升降机高度下降

$(1-k)H_x$ ，使储水箱进水口位于竖井水位下。与此相关的压力与容积变化可表达为：

$$H_x(p+H_c+H_x)+H_s p=(H_s+H_x k)(p+H_c+H_x) \quad (1)$$

容积大小以空间高度表示，压强以水的高度表达。当1#气道和储水箱阀门打开时，储水箱进水，升降机下降，且关闭0#气道，打开2#气道，蓄水槽随升降机下降继续充水，下降 H_k 高度后蓄水槽满水，蓄水槽剩余的 kH_x 气体被压入浮筒空间 H_z ，浮筒空间气压由 H_c+H_x+p 增强为 $H_c+H_x+p+H_k$ 。

与此相关的压力与容积变化可表达为：

$$(kH_x+H_z)(H_c+H_x+p)=H_z(H_c+H_x+p+H_k) \quad (2)$$

下降 H_k 高度后蓄水槽充满，关闭2#气道，打开0#气道，蓄水槽阀门连通下游水位， H_s 空间存储的气压迫使蓄水槽内 y 高度水体向下游排放，之后 H_s 空间气压恢复为基础气压 p ，关闭0#气道，保证 H_s 空间基础气压不变，直至再次接入上游水体，开启下一次升降循环。与此相关的压力与容积变化可表达为：

$$H_s(p+H_c+H_x)=(y+H_s)p \quad (3)$$

$$\text{简化得 } y=kH_x \quad (4)$$

此时升降机未下降到位，承船池水位距下游水位 $\geq H_c+H_x$ 。保持2#气道关闭，且关闭蓄水槽阀门，以蓄水槽内未排出的剩余 $(1-k)H_x$ 高度的水为动力，在储水箱阀门流量控制下，升降机继续下降，直至储水箱顶或储水箱阀门关闭，升降机下降终止，见图2b)，升降机下沉至下游水位。

2.1.2 上升运行

升降机降至下游位，蓄水槽连接贯通下游水体的阀门，打开2#气道，浮筒空间 H_z 恢复基础气压 H_c+H_x+p ，并迫使蓄水槽内水体向下游排放。相关的压力与容积变化可表达为：

$$H_z(H_k+p+H_c+H_x)+yp=(H_z+H_x)(H_c+H_x+p) \quad (5)$$

经变换后证明等式成立，表明蓄水槽内剩余水体可全部排空，升降机重力减少 $(1-k)H_x$ 高度的水重力。排空后关闭2#气道和蓄水槽阀门，保持 H_z 空间内部基础气压不变，并继续关闭0#气道，直至升降机上升至上游位置，重新接入上游水开启下一次升降循环。此时，打开1#气道和储

水箱阀门，升降机在浮力 $(1-k)H_x/2$ 作用下上升，在阀门流量控制下，储水箱内水返至竖井内，直至储水箱内部水体放空或阀门关闭，升降机上升终止，见图2a)。

2.2 升船机运行模式

在升船机运行模式下只需1个气道连通浮筒内1个储能空间，或蓄水槽在上游充水及在下游排水均由水泵参与完成，无需气道和储能空间参与。

2.2.1 下降运行

当升降机在上游位，蓄水槽需蓄水自竖井水，见图2a)、3a)。选择的水泵扬程约大于 H_g+H_x ，蓄水槽充满 $H_x/2$ 满足下降动力要求，槽内气体 $H_x/2$ 被压入浮筒空间 H_z ，升降机下降 $H_x/2$ 至储水箱进水口。

当1#气道和储水箱阀门打开时，储水箱进水，在储水箱阀门流量控制下，升降机下降，直至储水箱顶或储水箱阀门关闭，升降机下降终止，见图2b)、3b)。

2.2.2 上升运行

当升降机降至下游位，蓄水槽需排水至竖井内，见图2b)、3b)。蓄水槽连通竖井水体的阀门贯通，打开2#气道，浮筒空间 H_z 气压迫使蓄水槽水向竖井排水，排出 $H_x/2$ 水体后满足上浮动力要求，此时，当1#气道和储水箱阀门打开，储水箱内水返至竖井内，升降机在阀门流量控制下上升，直至储水箱内部水体放空或阀门关闭，升降机上升终止，见图2a)、3a)。

3 水力升降机相关计算及尺度

蓄水槽的水体自重力变化要保证升降机有足够的下沉和上浮动力，假设其最低要求为 $H_x(1-k)=0.42$ m高度水的下降重力、 $H_x(1-k)/2=0.21$ m储水箱内外水位的高度差产生的上升浮力：

则当 $H_c=3$ m， $H_x=1$ m时， $k=(p+H_c+H_x)/(2p+H_c+H_x)=0.58$ ；

代入式(1)，得 $H_s=1.5$ m，蓄水槽内充 $(1-k) \cdot H_x=0.42$ m高度的水；

按 $H = H_s + H_z$ 计算得 $H_z = 4.5$ m, 代入式(2), 得 $H_k = 1.85$ m, 下降 1.85 m 后, 蓄水槽内再充入 0.58~1.00 m 高度的水;

计算式(3), 得 $y = kH_x = 0.42$ m, 蓄水槽将排出 0.42 m 高度的水, 剩余 0.58 m 高度的水, 可继续下降;

由式(4)得出升降机在下游时, 可将槽内剩余水体全部排出, 升降机上升。

$H_g \geq H_c + H_x + H_k$ 是升降机船闸模式下的运行条件, 升船机模式没有这样的条件限制。蓄水槽上置式升降机动力计算与升降行程无关, 适用性较强。

以上计算假设 S_a/S 近似为 0, 且升降机各部件的形状规则, 不计各种充放水孔口和气道大小以及各部件间隙和厚度, 在断面宽度相同条件下, 体积与高度成比例关系, 且压强和水的高度可简化互为表达。

由本计算可知, 当蓄水槽水体以 0.42 m 的自重变化, 可满足升降机上升和下降的动力需要, 升降机运行 1 次只需耗水 1 m, 远小于普通船闸 1 次通行耗水, 因此, 采用水力升降机作为通航设施省水效果十分明显; 同时水力升降机完全取消了传统升船机固有的传动机构, 在升船机模式下, 水泵效率高于机械传动效率。采用水力升降机有较好的节能效果, 且结构简单、运行可靠、维护

费用低。

当升降机采用双蓄水槽布置时, 将蓄水槽分隔成 2 个 $0.5H_x$ 蓄水槽, 简化计算, 单蓄水槽可视为储水箱同一侧的双蓄水槽合并而成。当其中有 1 个蓄水槽下置, 且高度约等于承船池高度 H_c , 同时再辅以外置形式扩大 H_z 空间, 摆脱浮筒空间制约, 升降机可在较小上下游水位落差的情况下, 使承船池沉入下游水体中, 竖井水与下游水一体, 船舶直接进出承船池, 达到取消下游侧闸门的可能。双蓄水槽升降机, 循环运行 1 次耗水最多为 $H_x + H_c$, 仍有较好的省水效果。

4 适用场所

本文提出了省水、节能且综合船闸和升船机优点的水力升降机, 作为通航设施构想, 实现常规通航设施的功能, 适合需建设省水池^[5]的通航场所, 更适合应用于无法提供充沛、稳定的通航水资源, 且需达到较高通行效率的场所, 在升降行程不大的通航中, 可作为升船机使用, 减少运行维护成本, 提高通航效率。

船舶通航天桥见图 4, 在天桥左右两端设置水力升降机, 以升船机模式运行, 可达到不抬高桥面实现通航, 替代升船机, 降低升船机运行、维护成本。

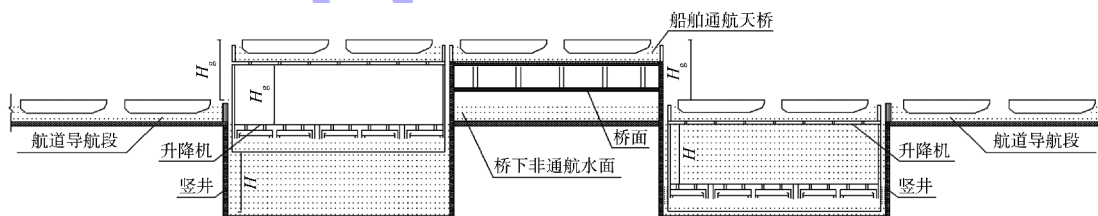


图4 船舶通航天桥

在有水位差的地方, 升降机可由水力直接驱动; 在没有水位差的地方, 升降机可转化电力为水力驱动, 既获得省水效果, 也可超越常规升船机的起重吨位。升降机是 1 台巨型水力升降梯, 上置蓄水槽水体的充水和放水协同承载物的质量变化, 实现升降机自重力和浮力的平衡与再平衡, 完成升降循环。

5 若干技术应用分析与思考

1) 升降机升降时, 储水箱与竖井水体交换应流畅迅捷, 为避免流体阻力过大影响升降速度, 可设置垂直穿越浮筒直接连通储水箱与竖井水体的管阀来加快水体交换; 合理布局储水箱与竖井水体交换管阀, 减少流体阻力, 加快升降速度, 利于升降机平稳运行。

2) 为抵御上、下游船舶进出承船池对升降机的扰动以及风荷载引起的侧倾,可成对设置升降机滚轮与竖井轨道,限制升降机横纵倾摆,保证升降机升降时的平稳性。

3) 承船池结构安全和稳定是升降机运行的首要条件,除必要的结构安全稳定措施外,降低储水箱的气道设置高度,可确保升降机在下游位也使承船池结构底与竖井水之间保持空隙,避免可能的流固耦合带来结构计算的复杂性,提高结构的安全稳定性。

4) 承船池闸门与上、下游引航道闸门如何快速连接是研究的重点,可采用现有成熟技术与新材料研究相结合的方法寻找更可靠、快速的连接方案。

5) 储水箱本体结构有一定体积,升降机下降越接近下游位,其受到的浮力越大,蓄水槽大小设置应考虑该部分的浮力影响,或在下降过程中,通过调节阀利用竖井水压入浮筒空间来抵消该部分浮力影响。

6) 利用 PLC 对通过所有管阀的流量进行数据分析计算,优化管径和流量以及管阀布局,并充分分析每次升降流量数据,得出合理的升降过程,精准平稳定位。

6 结语

1) 本文提出一种新型省水、节能水力升降机,利用浮力与自重力的平衡、失衡、再平衡来

实现升降。从运行机制分析,在升降机本身物理极限及通航设施结构可接受的升降行程范围内,采用升降机作为通航设施理论上可行,相比现有通航设施,具有较广泛的通用性和适用性,最大限度省水、节能。

2) 新型水力升降机应用于通航设施,综合了船闸和升船机的功能特点,具备船闸、升船机或兼具两者的运行模式,可根据航道通航水量的充沛与否选择运行,且选择方便、运行可靠。

3) 如条件许可,升降机采用双蓄水槽布置,且只需其中有 1 个下置,还可取消下游侧一端的闸门,简化通航设施构成。

参考文献:

- [1] 四川省交通厅内河勘察规划设计院. 船闸闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [2] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [4] 水利部水利水电规划设计总院, 长江勘测规划设计研究院. 升船机设计规范: GB 51177—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [5] 广西交通运输标准化技术委员会. 省水船闸设计指南: DBJT 45/T 020—2020[S]. 南宁: 广西人民出版社, 2020.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 139 页)

5) 由于三峡运行以来的资料年份有限,河段内主要控制站最低水位的选取中未纳入 2022 年洪水期的极端水文数据进行分析,研究成果后续在实际运用中需加强观测、分析、总结,并按照 3~5 a 的周期修改调整,逐步完善。

参考文献:

- [1] 游强强. 湖广—罗湖洲河段 6 m 水深航道整治工程动床物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2019(6): 111-118, 185.
- [2] 长江航道规划设计研究院. 长江干线武汉至安庆段 6 m

水深航道整治工程工程可行性研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2017.

- [3] 长江航道规划设计研究院. 长江干线武汉至安庆段 6 m 水深航道整治工程初步设计[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2018.
- [4] 蔡大富, 杨瑞庆. 长江中游罗湖洲水道航道整治工程设计[J]. 水运工程, 2005(10): 59-63.
- [5] 陆英. 长江中游新洲—九江河段航道治理二期工程思路与方案研究[J]. 水道港口, 2018, 39(3): 318-323.
- [6] 长江航道规划设计研究院. 长江干线常年库区航道维护尺度研究[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2020.

(本文编辑 赵娟)