



下水式升船机船厢入水过程 三维数值模拟技术*

程璐^{1,2}, 王本龙³, 胡亚安¹, 薛淑¹

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029;

2. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098; 3. 上海交通大学工程力学系, 上海 200030)

摘要: 船厢出入水过程产生的附加水动力荷载是下水式升船机发展需要解决的一个突出问题。采用 VOF 模型和 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型, 结合动网格技术建立三维数学模型, 对下水式升船机船厢入水过程的水动力学特性进行模拟。研究表明: 该模型具有较好的精确性和稳定性, 可以用于模拟船厢入水后船池内部产生的复杂水流运动。应用该模型分析构皮滩第三级垂直升船机船厢不同入水速度下船池内部水流波动特性以及流场分布特征, 计算结果与物理模型试验结果吻合较好。

关键词: 下水式升船机; 船厢; 入水; 三维; 数值模拟

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0169-07

3D numerical simulation technology on the water-entry process of navigation chamber for chamber-launching ship lift

CHENG Lu^{1,2}, WANG Ben-long³, HU Ya-an¹, XUE Shu¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Department of Engineering Mechanics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 20030, China)

Abstract: The additional hydrodynamic load produced in the process of navigation chamber going into & out of navigation pool is the main problem on development of chamber-launching ship lift. The VOF model, the $\kappa-\varepsilon$ turbulence model, and the dynamic mesh method are used to build a 3D mathematical model for simulating the hydrodynamic characteristics of the water-entry process of navigation chamber. The result shows that the 3D mathematical model built in this paper is more accuracy and stability, which can simulate the complex flow patterns in navigation pool produced by the navigation chamber entering into water. By the 3D mathematical model, we analyze the fluctuation and flow distribution characteristics have been analyzed when the navigation chamber enter into water with different velocities to the third stage vertical ship lift of Goupitan hydropower station. The calculation results are in accordance with the experiment results.

Keywords: chamber-launching ship lift; navigation chamber; water-entry; 3D; numerical simulation

1 研究背景

升船机是高坝通航建筑物的一种主要形式。

按船厢进入下游引航道的方式, 垂直升船机可分为下水式升船机和不下水式升船机。其中, 下水

收稿日期: 2016-09-16

*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402002); 国家自然科学基金 (51479123); 交通运输部科技项目 (2014329746280)

作者简介: 程璐 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事通航水力学研究。

式升船机船厢可直接进入与下游引航道连接的船池,能适应下游水位快速变化,具有安全性能高、安装成本低、运行程序简单高效等特点,在我国高坝通航建设中具有广泛的应用前景^[1]。下水式升船机具备上述优势的同时,也存在主机负荷大、能耗高、船厢出入水受力复杂等问题。船厢出入水会引起船池内水面壅高或降低,在船池室产生较强的水体波动导致尖峰荷载以及电机力矩过零平衡问题,影响电机安全运行;同时,波动产生的附加水动力荷载对船厢制动造成影响,威胁升船机安全。

目前,对船厢出入水过程的研究主要采用物理模型试验方法。如包纲鉴等^[2]通过物理模型和理论分析相结合,初步研究了下水式升船机在正常运行方式下的船厢水力特性和影响船池内水面波动的因素,验证了岩滩升船机船厢底部轮廓、通气孔尺寸布置的合理性。胡亚安等^[3]依托构皮滩升船机模型试验研究认为在船厢形式、船池尺寸确定的情况下,船池内水面壅高和降低的幅度与船厢出入水方式密切相关,并对船厢内船舶停泊条件、船厢运行状况下厢内水位的波动特性、船厢开孔面积与附加荷载的关系等做了详细研究。物理模型试验通常将船厢设计为刚体,未考虑弹性变形,也没有考虑船厢结构的动力响应,对船厢出入水过程流固耦合机理的研究比较缺乏,并且试验结果受到缩尺效应的影响。

数值模拟计算可以解决以上物理模型试验存在的问题,并且数值模拟技术不受试验场地、量测技术等客观条件制约,更适用于水动力荷载的产生机理以及各影响因子权重的研究。但数学模型在控制方程的求解、紊动的假设、计算网格的合理划分、数值解的稳定性和收敛性等方面存在难点,需进一步加以研究。本文尝试建立下水式升船机船厢入水过程三维数学模型,并对模型进行验证,应用于构皮滩第三级垂直升船机船厢入水过程计算,模拟船厢入水后船池内部水流运动情况和流场分布特征。

2 模型的建立及计算方法

升船机船厢进出船池的力学过程的本质是钝体的出入水问题。从流体力学角度来看,入水问题是非定常、非线性问题,需要同时处理空气、水两种介质,属于两相流问题,而且必须要考虑空气的压缩性^[4]。

2.1 数学模型

船厢出入水过程数值模拟采用三维非稳态 $N-S$ 方程描述,湍流采用双方程 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型模拟,自由水面采用 VOF 方法来捕捉。采用 PLIC 算法来计算自由表面的斜率和曲率,描述自由表面的形状。模型求解的控制方程为描述流体运动的 3 大基本方程,分别为质量守恒方程,动量守恒方程和能量守恒方程。此外,补充两个理想流体的热力学状态方程,以使得方程组能够封闭求解:

$$P = \rho RT \quad (1)$$

$$e = c_v T \quad (2)$$

式中: P 为理想气体的压力; ρ 为气体的密度; R 为理想气体常数; T 为理想气体的热力学温度; e 为单位质量内能; c_v 为理想气体的热容量。

由于船厢出入水过程是非定常问题,定解条件包括边界条件和初始条件。在确定边界条件时,考虑到船池及船厢为对称体型,为减少计算量,仅模拟船厢左半部分的入水过程。自由表面不作为边界,而是通过水和空气一起进行求解来确定。边界条件包括 3 个压力边界和 1 个对称边界。

在初始条件中,船厢入水前 $t=0$ 时,平静水面上方的空气的速度处处为零,压强为标准大气压强;船池中水的速度处处为零,压强沿竖直方向,即 z 轴负方向静水压强分布。

2.2 数值计算方法

VOF 法在计算域内,对模型中的每一相引入一个变量——相体积分数 F ,来间接求解自由表面的位置和形状。 F 是空间和时间的函数,即 $F = F(x, y, z, t)$ 。在离散网格内, F 取值是网格内各相流体的体积与能够被流体通过的空间体积的比

值。气水界面的追踪可通过求解 F 的输运方程完成:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad F \in [0, 1] \quad (3)$$

式中: F 是一个空间上的阶梯函数, 当 $F=1$ 时, 表示该处是水; 当 $F=0$ 时, 表示该处是空气。

基本控制方程的数值离散采用有限差分法进行。为保证计算的稳定性和准确性, 动量方程中的黏性项、对流项等都采用显示格式来处理, 压强值的处理采用隐式格式。

控制方程通过压力修正方程迭代求解, 首先对动量方程进行显式的差分近似, 使用初始条件对速度场进行第一次试算, 然后通过迭代计算对压强值进行修正, 获得新的速度场, 再次迭代计算修正压强值直至速度场完全满足质量守恒方程, 该压强值和速度场即为最终的计算结果。如果存在一个自由表面的两相流问题, 需要使用流体体积 VOF 方程给出新的液体分布。对于可压缩的问题, 能量值和密度需要分别使用能量守恒方程和状态方程来进行更新。

3 数学模型的验证

本文采用与 Oh S. H. 等的试验^[5-6]相同的参数设计建立平底厢体入水过程数学模型, 并与 Oh S. H. 等的试验结果进行比较。

模型厢体尺寸为 306 mm×306 mm×70 mm, 以 2.09 m/s 的速度匀速入水, 厢体底板距离水面 0.13 m, 船池水深 0.03 m。尽管理论上厢体底板应在 $t=0.0622$ s 时接触水面, 但数值计算结果显示: 大约 0.06 s 开始, 在厢体底部的左侧壁面边缘下方, 船池水面开始产生轻微波动; 在 0.062 s 时, 水面波动的最高点已经接触到厢体底部。

在 0.063 s 之后, 厢体真正意义上入水。厢体左侧底部面积非常小的一部分底面与水面相接触, 右侧大部分的底面与水面之间隔着一层薄薄的空气垫。在 0.063~0.068 s, 空气垫的厚度不断地增加。在 0.068 s 时, 对称轴附近空气层达到最厚, 厚度约为 6.6 mm。在 0.068 s 之后, 空气垫由边缘开始向中间收缩, 厢体底部逐渐被水浸没, 空

气垫的收缩是一个振荡收缩的过程。图 1 为平底厢体入水时空气垫产生过程数学模型计算结果, 图 2 为 Oh S. H. 等在物模试验中采用高速摄影机拍摄的不同阶段空气垫产生过程。对比分析两种研究结果, 数值模拟与物模试验得到的空气垫产生、发展、收缩、消失规律基本一致。

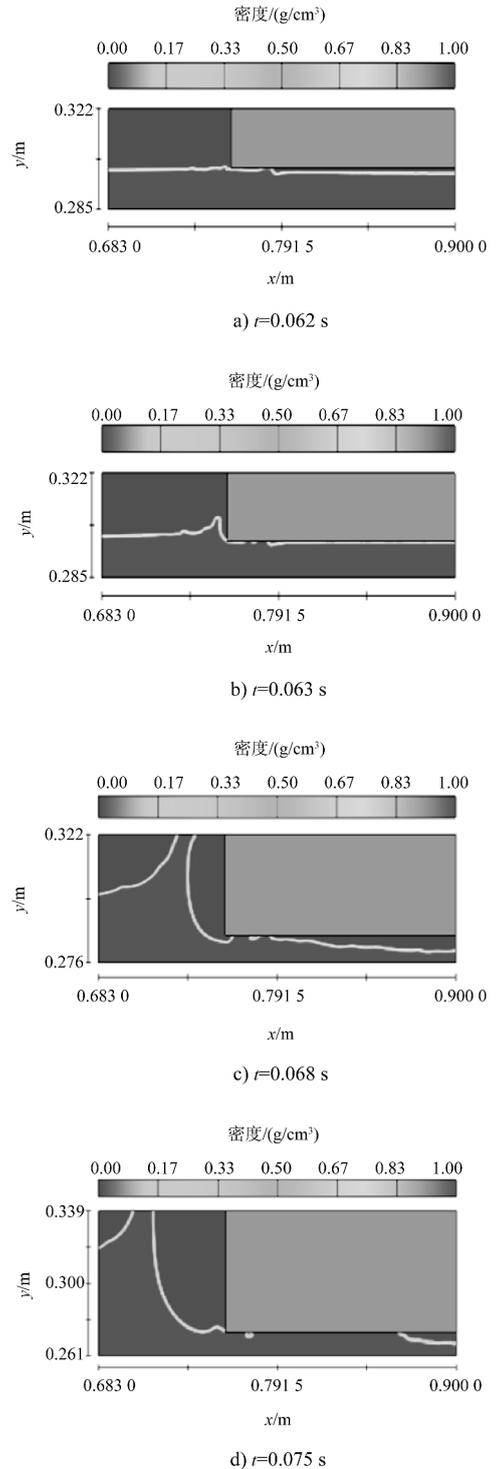


图 1 平底厢体入水空气垫产生过程 (数值计算)

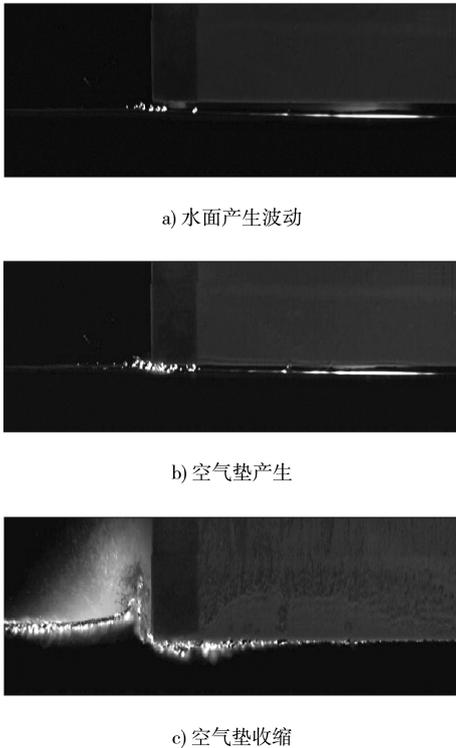


图2 平底箱体入水初期空气垫的产生阶段(物模试验)

Oh S. H. 等在模型箱体底板距离对称轴 0.12 m 处设置了测点, 装上了测量压强的压力传感器。在该测点处, 采用数值计算方法得到的压强-时间曲线与试验结果对比见图 3。

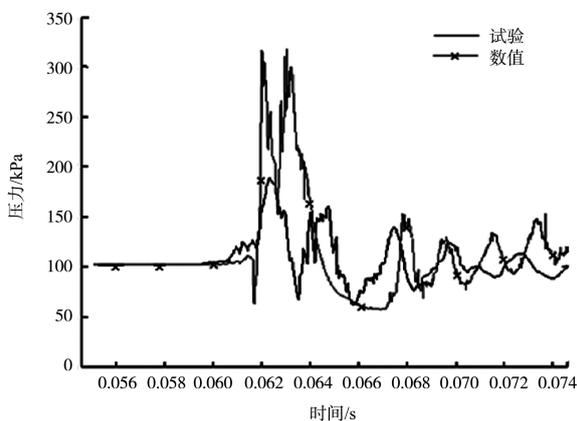


图3 测点处试验结果与数值解对比

从图 3 可以看出, 数值解与试验结果在入水瞬间压强峰值相差较大。第一个峰值处数值解的结果偏大, 试验结果仅为数值解的 1/3。第二个峰值的位置, 数值解在 0.063 s 处, 试验结果在 0.065 s 处。

分析数值计算与试验结果存在差异的原因, 主要是因为试验中尽管使用气压缸来保证物体的匀速下落, 但在撞击水面时的冲击力非常大, 气压缸在受到冲击后影响正常工作, 导致物体瞬间下落速度低于 2.09 m/s, 因此试验测得的压强值偏小。数值模拟中物体被设定为刚体, 而试验中的物体是真实物体, 在撞击水面时会产生变形, 振动的频率比数值计算中要低, 第 2 个波峰的位置也会相应靠后。尽管入水瞬间峰值差距较大, 但之后的振荡曲线和试验结果吻合较好。试验中展现的界面变化规律, 空气泡出现与收缩的现象均在数值模拟中得到了验证。

模型验证结果表明: 本文建立三维数学模型的准确性及精确度可以满足船厢入水过程的模拟仿真计算要求。

4 数学模型的应用

构皮滩水电站最大通航水头 199 m, 上游通航水位变幅 45 m, 是目前世界上通航水头最高、水位变幅最大的通航建筑物。构皮滩通航建筑物选用 3 级垂直升船机方案, 第 1、2 级垂直升船机采用下水式, 是目前国内外规模最大的船厢下水卷扬垂直提升式升船机^[7]。

升船机船厢出入水过程及船厢内水面波动越平稳, 船舶停泊条件越好。本文采用下水式升船机船厢入水过程三维数学模型, 研究构皮滩水电站第 3 级垂直升船机承船厢出入水运行特性、模拟船厢不同入水速度下船池内的水位波动及传播特性, 以及船池内流场分布情况。

4.1 计算区域及网格划分

根据引航道、船池和船厢进实际尺寸行几何建模, 计算域地形和结构见图 4。根据几何特征对计算区域进行网格划分(图 5), 为方便并行计算, 对计算域进行手工区域分解, 并对自由面附近、船池区域进行局部网格加密。

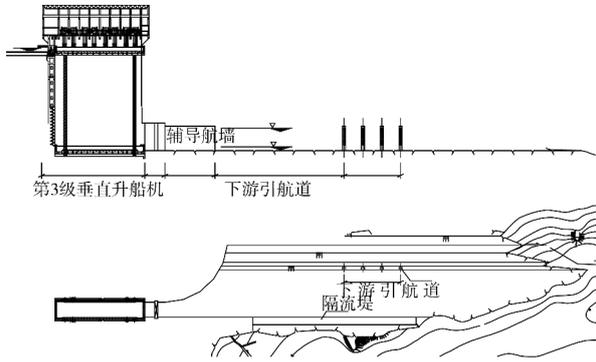


图 4 计算域地形和结构

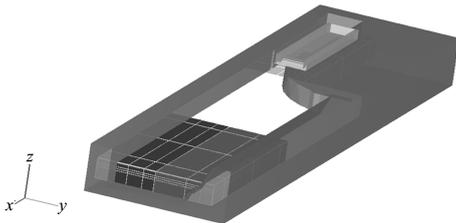


图 5 计算域网格划分

4.2 船厢入水过程水位计算分析

船厢入水前, 棱边距水面距离 0.2 m, 船厢实际入水深度 2.2 m, 船厢宽 12 m, 长 63.4 m, 船厢左右边界位置分别为 $x = -435.85$ 和 -372.45 m (图 6)。模型共布置 12 个探针, 其中 5 个探针位于船厢中线延长线上, 分别为 1[#] (-437 m, 557 m)、2[#] (-360 m, 557 m)、3[#] (-310 m, 557 m)、4[#] (-260 m, 557 m)、5[#] (-210 m, 557 m); 3 个探针位于船厢边线, 分别为 6[#] (-432 m, 564 m)、7[#] (-401 m, 564 m)、8[#] (-376 m, 564 m); 引航道一侧布置了 4 个探针 9[#]~12[#]。探针位置见图 7。

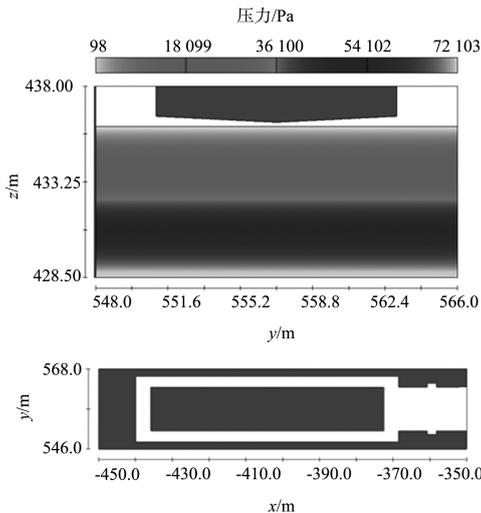


图 6 船厢入水三维数学模型

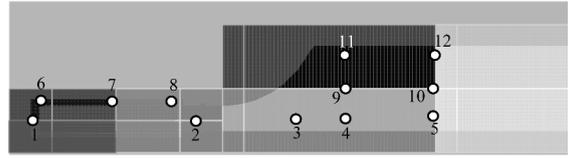
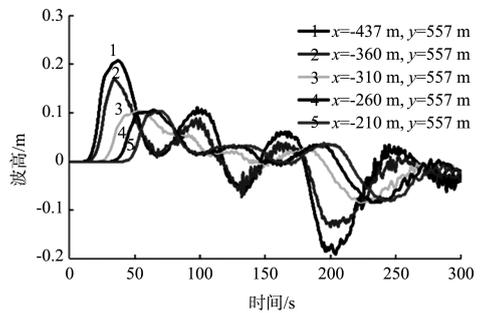


图 7 模型探针位置

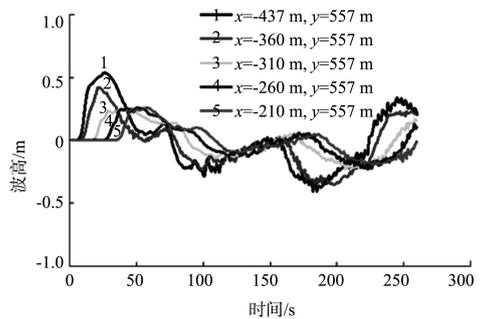
船厢入水速度为 2 cm/s 时, 入水历时 150 s, 船厢封闭端的 1[#] 探针最大水位波动达到 20 cm; 在距离船厢外 100 m 处 4[#] 探针位置, 由于引航道宽度增加波能分散, 波高小于 10 cm。

分析船厢与船池间隙 6[#]、7[#]、8[#] 探针处水位时间过程线, 船池封闭段、中部和右端的水位波动在不同时刻基本相同。船池和引航道内水位波动相差较大, 图 8a) 为入水速度为 2 cm/s 时, 船厢中线延长线上, 船厢入水引起的水位波动从船池开始基本按一维波动向引航道外传播。

当船厢以不同速度入水时, 水位变化规律和扰动传播规律基本一致, 图 8b) 给出了船厢入水速度为 5 cm/s, 入水历时 60 s 条件下 1[#]~5[#] 探针处水位波动情况。与图 8a) 相比, 船池内最大水位波动约 50 cm, 引航道内水位波动约为 25 cm。



a) 入水速度 2 cm/s



b) 入水速度 5 cm/s

图 8 船厢入水时探针水位波动情况

4.3 船厢入水过程流场计算分析

分析船厢入水速度分别为 2、5、10 cm/s 时船池内水体速度分布情况，在船厢底部，速度沿船厢中轴线基本呈对称分布，船厢底部水体向两边船厢与船池的间隙流动，间隙中水流流速向上壅高。

为了分析水体表面的垂向位移，即水面的抬升和降低，模型计算出不同时刻船池水体的垂向速度，垂向速度越大，水面抬升速度越快，壅高越剧烈。船厢入水速度 5 cm/s 情况下，在船池与引航道连接处的 2# 探针位置，水体垂向速度以向上为主，并流向引航道，自由表面附近存在相互对称的两个旋涡(图 9)。流速分布情况及旋涡位置与王敬鹏^[8] 在船厢出入水模型试验中观测到的船池出口处的表面流态相吻合(图 10)。

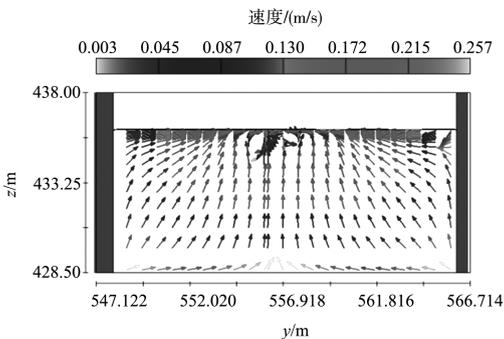


图 9 连接段 2# 探针附近速度分布



图 10 船厢入水过程出口处水流状态

船厢入水速度 5 cm/s 情况下，以楔形体入水为 $t=0$ 时刻，在 $t < 10$ s 时间内，船厢下部楔形体入水，在船厢中间垂向速度最大，速度自中部向船池两端递减。在 $t > 10$ s，船厢矩形体开始入水，船池封闭段水体垂向速度最大，水面迅速上升，1# 探针处在 10 s 左右水位波高达到最高(图 11)，

此时船池与引航道连接位置出现第一个波动，船池内水位迅速壅高，随后水体在水位差作用下向引航道流动，引航道内各点水位也相继增大，由于船池为一侧封闭的水域，在水流惯性作用下，船池水位迅速下降(图 12)，水位差作用下引航道水流再流入船池，水体在船池与引航道之间来回振荡，逐渐衰减。



图 11 船厢 5 cm/s 入水时水面壅高速度 ($t=10$ s)

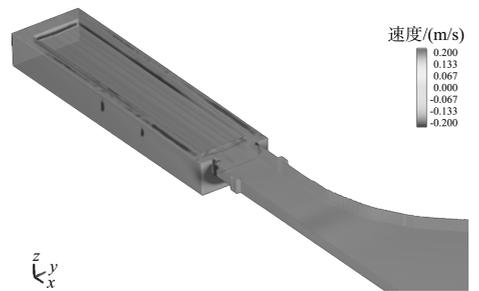


图 12 船厢 5 cm/s 入水时水面降低速度 ($t=24$ s)

船厢入水时在船池室内造成水面明显上升和下降，随着时间增长，船池内水体发生振荡形成的波动逐渐减弱，并依次向引航道传播。在引航道扩张段，这些波动的波峰线基本与引航道方向垂直，以一维波动形式传播。

在船池尺寸确定的情况下，船池水面壅高和降低的幅值与船厢入水方式密切相关。船池内水面壅高值与船厢入水速度基本成线性增长关系，船厢入水速度越快，船池内水面壅高越大。船池内水位下降值与船厢入水速度呈现周期性增大趋势。

5 结论

1) 本文考虑了入水问题的水弹性效应，采用 VOF 模型和 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型，结合动网格技术建立

下水式升船机船厢入水三维数学模型, 并通过平底厢体入水气垫效应的模拟对模型进行验证, 结果表明模型具有较好的精确性和稳定性。

2) 针对构皮滩水电站第 3 级垂直下水式升船机具体工况, 采用三维数学模型模拟船厢不同入水速度下船池内部水流波动特性以及流场分布特征, 分析了不同入水速度下船厢入水过程引起扰动在河道内的传播过程, 计算结果表明: 船厢入水时, 挤压船池内的水体, 船池内水面壅高值与船厢入水速度基本成线性增长关系, 船厢入水速度越快, 船池内水面壅高越大, 船厢入水速度为 2、5 cm/s 时, 船厢封闭端最大壅高为 20、50 cm; 船池内水体波动水位下降值与船厢入水速度呈现周期性增大的趋势, 水面壅高值大于水面下降值; 船池内距离船池封闭端越远, 船池内水面波动幅值越小。数学模型计算结果与物理模型试验结果吻合较好, 三维数值模拟方法可与物理模型试验方法结合, 用于下水式升船机的设计研究, 为下水式升船机推广和大型化发展提供科学依据。

参考文献:

- [1] 胡亚安. 水力浮动式升船机应用基础研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [2] 包纲鉴, 陈锦珍. 卷扬垂直升船机水动力学一些问题的探讨[J]. 水利水运科学研究, 1998 (4): 397-403.
- [3] 胡亚安, 李中华. 构皮滩 1:10 船厢下水式升船机水动力学及运行安全研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.
- [4] 李森虎, 何友声, 鲁传敬. 超声速平头物体垂直撞水的数值模拟[J]. 水动力学研究进展: A 辑, 1992, 7(1): 72-78.
- [5] Oh S H, Kwon S H, Chung J Y, et al. A Close Look at Air Pocket Evolution in Flat Impact[C]. International Workshop on Water Waves & Floating Bodies, 2009.
- [6] Oh S H, Kwon S H, Kwak D W, et al. An Attempt to Demystify Flat Impact [C]. International Workshop Water Wave and Floating Bodies, 2010.
- [7] 胡亚安, 李中华. 构皮滩 1:10 船厢下水式升船机水动力学及运行安全研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012.
- [8] 王敬鹏. 升船机船厢出入水水动力特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2013.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

港珠澳大桥 E32 沉管安装成功, 沉管隧道建设里程突破 5 km

11 月 23 日, 港珠澳大桥岛隧工程曲线段 E32 沉管实现高精度沉放对接。至此, 港珠澳大桥海底沉管隧道建设里程达到 5 130 m。

22 日 8 时整, 总指挥长林鸣发布 E32 沉管浮运安装施工指令。经过 3 个多小时的绞移及编队, 由数十艘专业施工、海事渔政警戒船舶组成的船队载着近 200 名施工人员, 拖着沉管向施工海域进发。19 时, 沉管顺利抵达系泊作业区, 现场风力达到了 4 级, 小雨变为中雨。夜间能见度降低, 各作业队伍先后召开安全班前会, 进一步明确安全注意事项和施工细节, 按照决策组发布的施工指令投入工作。

23 日 7 时 40 分, 经过建设团队紧张的施工, E32 沉管与已安装的曲线段 E33 沉管实现精准对接。这是港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部自东向西安装的第 2 个曲线段沉管, 项目总经理部在寒潮大风到来前实现高精度安装, 为后续三个曲线段沉管及最终接头段安装轴线控制奠定了基础。

http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201611/t20161124_86675.html (2016-11-24)