



三峡升船机下闸首卧倒门运行区域 非恒定流的运动特性

闫晓青

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为了分析三峡升船机下游引航道与下闸首卧倒门运行区域非恒定流运动特性, 采用 Flow-3D 软件建立三峡升船机承船厢与下闸首卧倒门运行区域的三维模型, 通过水面波动荷载概化模型计算分析下游不同水位、不同波幅非恒定流对下闸首卧倒门运行的影响因素。研究下游非恒定流作用于卧倒门的理论计算力矩与卧倒门关门实测力矩的关系, 提出卧倒门安全运行策略, 降低由下游非恒定流作用而引起的下闸首卧倒门运行安全风险。结果表明, 下游引航道较小的水面波动传递到升船机下闸首卧倒门运行区域将引起很大的水面波动, 而枢纽下游水位对卧倒门运行影响较小。

关键词: 升船机; 下闸首; 卧倒门; 概化理论; 水面波动; 运行安全

中图分类号: U 642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0117-05

Unsteady flow motion characteristics in operating region of lower head tumble gate of the Three Gorges ship lift

YAN Xiao-qing

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to analyze the characteristics of the unsteady flow of the downstream approach channel of the Three Gorges ship lift on the operation of lower head tumble gate, we use the Flow-3D to establish a three-dimensional model of the tumble gate operation region and the ship chamber of the Three Gorges ship lift, calculate and analyze the influence factors of different downstream water levels and different fluctuation amplitude flow on the lower head tumble gate by the water flow fluctuation load generalizability theory, analyze the relationship between the calculated moment of the downstream unsteady flow acting on the tumble gate and the measured moment of the tumble gate closing process, and propose the safe operation strategy of the tumble gate to reduce the security risk of the lower head tumble gate due to the unsteady flow of downstream. The results show that the small water surface fluctuation in the downstream approach channel will cause great water surface fluctuation when it transmits to the lower head tumble gate area of the Three Gorges ship lift, but the downstream water level of the hub has little effect on the tumble gate operation.

Keywords: ship lift; lower head; tumble gate; generalizability theory; water surface fluctuation; operating safety

三峡升船机下游引航道总长约 4 400 m, 共分为两段: 第 1 段是口门至升船机与船闸引航道(图 1)分叉部位, 此段长约 1 800 m, 底宽 180 m, 口门拓宽为 200 m, 航道底面高程 56.5 m; 第 2 段

是分叉部分往上游至升船机下闸首, 此段长约 2 600 m, 航道底宽 80~90 m, 航道底面高程 58 m。引航道水流流态繁杂, 水力波动形态也极其复杂, 既有枢纽调节运行产生的泄水长波, 即快慢不一

的相邻水体发生能量的转换和传递而产生的次生波，也存在环境因素产生的风生波、高频振荡等短波运动。其中，长波波能较大，绕射性较强，传播较为稳定，对升船机闸首设备运行、船舶进出船厢时航行影响较大；短波波能较小，易受环境因素干扰，在船舶航行过程中常发生耗散和破碎^[1-2]，对升船机设备运行基本无影响。鉴于此，本文通过概化水面波动模型，选取下引航道内的典型长波运动进行研究，对短波进行滤波和光滑处理，通过数值模拟与原型观测对比的方法，研究三峡枢纽运行的非恒定流对下闸首卧倒门运行的影响，提出卧倒门安全运行的相应回策。

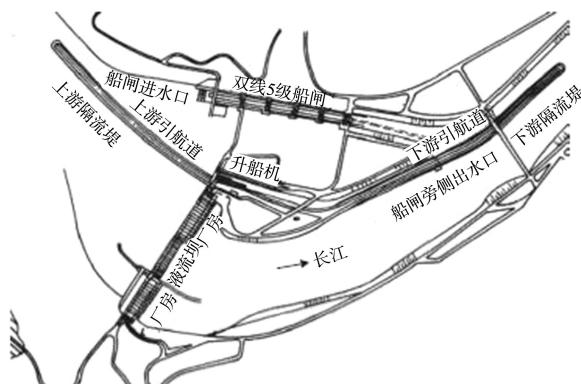


图 1 三峡升船机引航道平面布置

1 模型建立与边界条件

1.1 计算区域

三峡升船机船厢有效水域尺寸为 $120\text{ m} \times 18\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ (长×宽×水深)，在船厢室附近布置有下闸首，下闸首是船厢室的下游挡水建筑物，闸首顶部设置有工作大门，下闸首工作大门能适应下游 $62.0\sim73.8\text{ m}$ 的水位变幅。工作大门的 U 形门体结构由两部分组成：下部主梁结构和两侧的悬臂边柱结构。工作大门上设置有卧倒门，卧倒门底部通过两个支铰与 U 形门体结构连接，启闭时绕

卧倒门支铰在竖直平面内转动，由 2 台 1 MN 液压启闭机操作，开启后卧倒门卧于门龛内。利用卧倒门结构的刚性实现两套卧倒门液压启闭机的同步运行。卧倒门关闭时用于挡水，卧倒门开启后船厢水域与下游水域连通，形成过船通道。

为了精确模拟下闸首整个运行区域流场对卧倒门运行的影响，建立的计算区域包括下闸首喇叭口、下闸首卧倒门运行区域和升船机承船厢，采用 Flow-3D 软件建立上述范围的三维模型如图 2 所示。由于计算范围较大，因此计算区域网格划分分为船厢、卧倒门、喇叭口 3 个网格块，并对自由液面和卧倒门运行区域网格进行细分处理，模型中 x 方向为纵向(顺水流方向)、 y 为横向(航道宽度方向)与 z 为垂直方向(水深方向)^[3-7]。

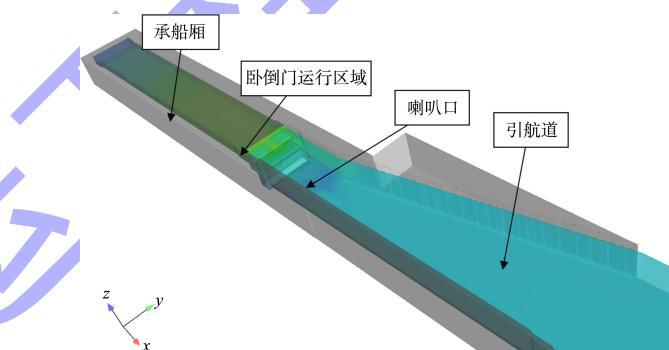


图 2 计算区域与三维模型

三峡升船机设计下游通航水位变幅为 $62.0\sim63.8\text{ m}$ ，枯水期下游水位基本保持在 $63\sim65\text{ m}$ 运行，汛期水位变幅较大，运行水位区间为 $65\sim70\text{ m}$ 。为了计算精度，分别选取三峡升船机下游航道 $63\sim65\text{ m}$ 、 $65\sim67\text{ m}$ 与 $67\sim69\text{ m}$ 这 3 个区间典型水位变化数据，模拟下游引航道水位变化对升船机下闸首卧倒门运行的影响。这里仅列举 $67\sim69\text{ m}$ 之间实测典型水位变化曲线，如图 3 所示。

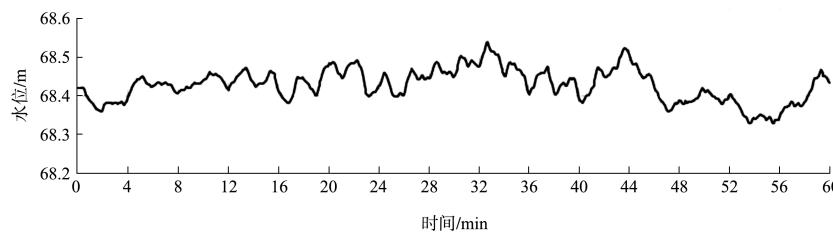


图 3 下游引航道 $67\sim69\text{ m}$ 典型水位变化曲线

1.2 边界条件设置

在下游引航道非恒定流作用下,下闸首卧倒门的关门过程为强非线性问题,因此,求解条件包含模型初始条件与边界条件。边界条件包括船厢侧壁、卧倒门止水座板两侧边柱、下游引航道出口边界采用下游水位边界,承船厢、航道自由水面边界采用大气压边界^[8-12]。初始条件为卧倒门即将关门 $t=0$ s 时,承船厢、航道自由水面压力为 0 Pa,下游引航道出口边界为 4.0 m 水深,卧倒门运行区域水流速度为 0 m/s。

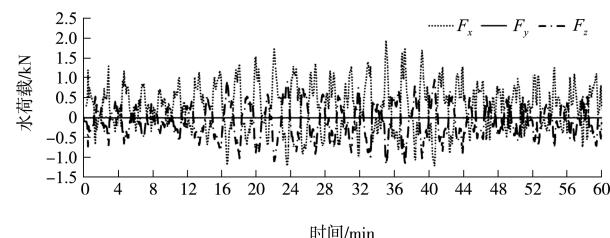
2 水面波动荷载概化分析

三峡升船机下闸首工作大门设计有 6 个锁槽位,以满足下游 11.8 m 水位变幅,利用三维模型,在下游引航道初始水位为 64、66、68 m(工作大门对应锁槽位为 5#、4#、3#)水位条件下,长波在引航道内稳定传递周期约为 33.6 min,分别模拟在下游引航道水面波幅为 0.04、0.06、0.11、0.16、0.21、0.26、0.31、0.41 m 时下游引航道水位为 64、66、68 m 左右条件下卧倒门运行区域产生水面波动值,在卧倒门运行区域产生的水面波动与水荷载特性。

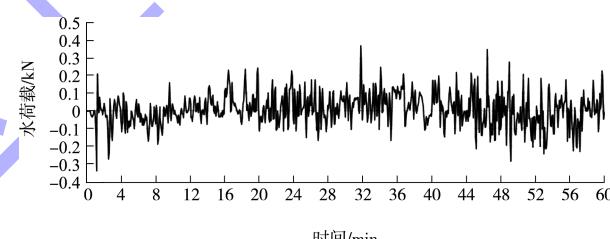
根据模拟计算结果显示,下游水位 64 m 时,引航道水面波幅为 ± 0.06 m,传递到卧倒门运行区域水面波幅为 $-0.27 \sim 0.24$ m;下游水位为 66 m 时,引航道水面波幅为 ± 0.11 m 时,传递至卧倒门运行区域水面波幅为 $-0.27 \sim 0.29$ m;下游水位为 68 m 时,引航道水面波幅为 ± 0.31 m,传递到卧倒门运行区域的水面波幅为 $-0.59 \sim 0.73$ m。模拟得到不同典型水位条件时引航道水面波幅对应喇叭口、卧倒门运行区域水面波动值见表 1。卧倒门开到位时,卧倒门运行区域水荷载的大小均随着下游引航道水面波幅的增大而增大,水位变化作用在卧倒门运行区域的水荷载曲线如图 4~6 所示。

表 1 数值模型的典型水位时水面波幅

水位/m	位置	水面壅高/m		水面下降/m	
		小值	大值	小值	大值
63~65	引航道	0.06	0.16	-0.04	-0.06
	喇叭口	0.12	0.23	-0.07	-0.13
65~67	卧倒门	0.24	0.48	-0.18	-0.27
	引航道	0.11	0.26	-0.11	-0.16
67~69	喇叭口	0.15	0.26	-0.11	-0.19
	卧倒门	0.29	0.54	-0.27	-0.35
69~71	引航道	0.16	0.31	-0.11	-0.29
	喇叭口	0.21	0.31	-0.21	-0.31
71~73	卧倒门	0.36	0.73	-0.31	-0.59

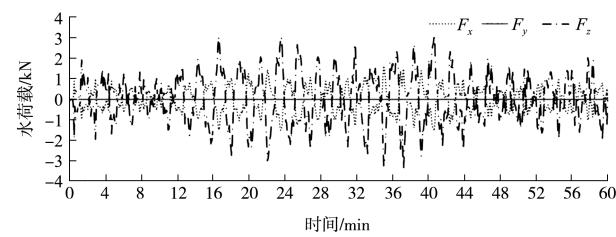


a) x 、 y 、 z 各方向分荷载

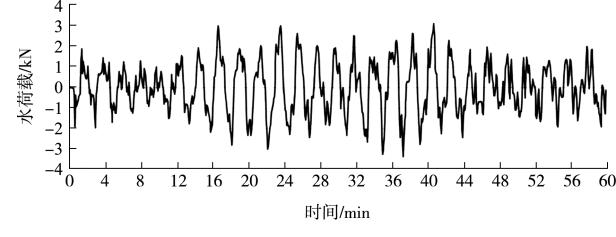


b) 总荷载

图 4 下游水位 64 m、水面波幅 0.06 m 时
水面波动荷载与时间关系



a) x 、 y 、 z 各方向分荷载



b) 总荷载

图 5 下游水位 66 m、水面波幅 0.11 m 时
水面波动荷载与时间关系

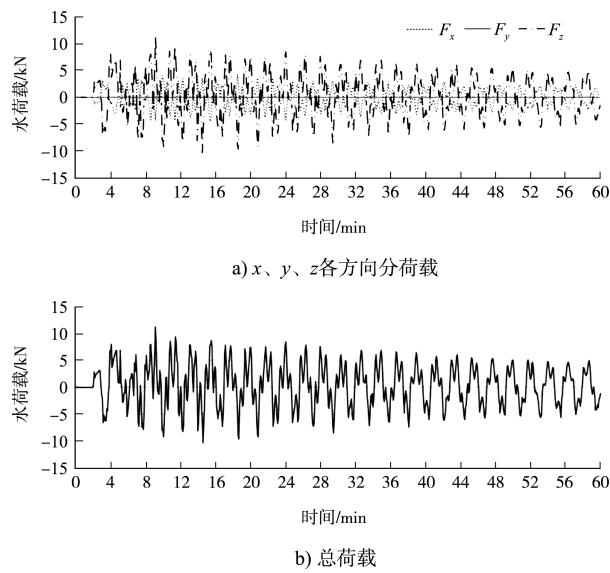


图 6 下游水位 68 m、水面波幅 0.31 m 时
水面波动荷载与时间关系

3 流场计算与卧倒门安全运行策略分析

3.1 流场及水荷载计算分析

为分析下游水面波动流场作用在卧倒门上的力

表 2 理论计算力矩值与实测力矩值对比

水位/m	计算力矩/(kN·m)					实测力矩/(kN·m)				
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s
64	0	721.4	921.3	689.6	763.7	64.3	896.3	761.5	901.8	770.4
66	0	741.6	688.5	945.2	731.2	78.2	853.1	847.9	881.3	801.1
68	0	739.2	701.1	824.4	756.9	66.7	866.2	853.7	906.9	745.2

表 3 不同水面波幅的最大计算力矩值

水位/m	计算力矩/(kN·m)							
	0.04 m	0.06 m	0.11 m	0.16 m	0.21 m	0.26 m	0.31 m	0.41 m
68	436.4	479.1	568.7	599.0	654.2	702.1	769.3	824.4

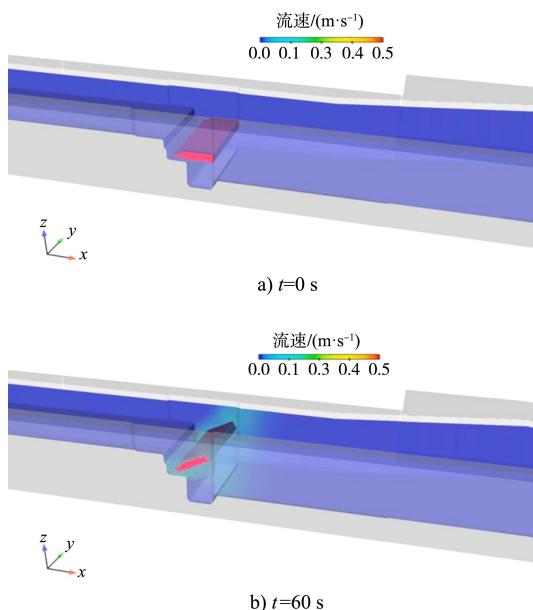


图 7 卧倒门关闭过程的流速云图

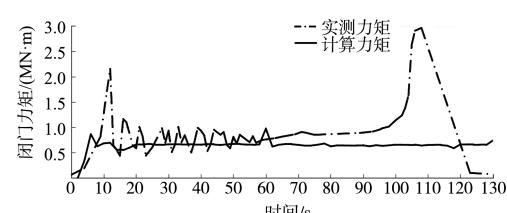


图 8 关门过程实测力矩与理论计算力矩对比

矩, 卧倒门完全开启, 液压系统停机且处于泄压状态下, 即卧倒门启闭油缸有杆腔与无杆腔均无压力, 此时, 卧倒门仅受自身重力、浮力、支铰作用力、水波动荷载。通过 Flow-3D 软件分别模拟下游水位在 64、66、68 m 条件下, 引航道水面波幅为 ± 0.41 m 时, 水波动荷载对卧倒门的力矩, 得到卧倒门运行过程 0、30、60、90、120 s 时的卧倒门计算力矩值与卧倒门关门过程实测力矩值对比见表 2(其中 $t=0$ s 为初始状态, 为关卧倒门之前, $t=120$ s 为卧倒门完全关闭)。在下游 68 m 水位、下游引航道水面波幅 0.04、0.06、0.11、0.16、0.21、0.26、0.31、0.41 m 时对卧倒门所产生力矩值见表 3, 卧室门关闭过程的流速云图如图 7 所示, 通过三维数值模拟计算得到水波动荷载对卧倒门理论计算力矩与关门过程实测力矩对比如图 8 所示。

通过表 2 可以得到, 在下游 64、66、68 m 水位、下游引航道在 ± 0.41 m 水面波幅情况下, 模拟计算得到水波作用在卧倒门上所产生的力矩值较相近, 力矩值在 700~900 kN·m 之间波动, 可以看出下游水位变化对卧倒门运行影响较小。由表 3 可以得到, 下游引航道水面波幅由 0.04 m 增至 0.41 m 时, 水面波动荷载作用在卧倒门力矩也随之增大, 下游航道水面波幅大于 ± 0.21 m 时, 作用力矩值在 700~800 kN·m 之间波动, 与卧倒门关门实测力矩值较接近, 对卧倒门运行影响较大。

对比分析表 2、图 8 可见, 实测的下闸首卧倒门在关门过程初始和完全关闭时分别出现两个力矩的峰值, 初始阶段为液压系统启动建压过程所产生的力矩峰值, 卧倒门完全关闭时压缩 P 型止水产生 5 mm 预压缩量, 曲线表现为再次出现力矩峰值。通过对比图 8 的曲线发现, 水面波动荷载通过流场得到的计算力矩与关门时的实测力矩值在同一数量级且曲线存在交点。

3.2 下闸首卧倒门安全运行策略

根据计算数据与分析, 得出升船机船厢附近的水位波动值与下游引航道水位及口门区水位波动特性(波幅、周期)等诸多因素相关。升船机引航道内水面波动本质上是水流能量在引航道内来回传递衰减的过程, 根据浅水波的特性, 水深越浅波速越慢, 根据能量守恒, 相应的波高越大, 这也就是口门区水面微小波动到升船机下闸首卧倒门运行区域水面波幅显著增大的原因。因此, 在卧倒门完全开启后, 液压系统停机、系统泄压或者液压系统存在泄漏、卧倒门无锁定装置工况下, 卧倒门处于自由状态, 在典型水面波动荷载作用下, 卧倒门启闭油缸行程可能往关门方向发生位移。

为解决三峡枢纽运行产生的非恒定流水面波动对下闸首卧倒门运行安全的影响, 利用三峡升船机下游引航道距离较长达 4.6 km、枢纽运行在引航道口门区产生的非恒定流长波传递到升船机船厢位置至少需要 10 min 以上的特点, 通过在口

门区设置水位监测点, 监测到口门区的水面变化值较大时, 运用长波从口门区传递到闸首卧倒门运行区域的时间差, 及时采取安全保护措施(如卧倒门完全开启锁定、重点关注卧倒门完全开启到位信号和液压系统油箱液位等)保障升船机闸首卧倒门运行安全。

4 结语

1)三峡升船机下游水面波动主要受三峡枢纽运行(电站调峰、枢纽泄洪、船闸充泄水等)影响, 通过对三峡枢纽下游复杂水面波动的分析研究, 采用 Flow-3D 流体仿真软件对卧倒门运行区域流场模拟时, 将升船机下游水面波动概化成单个周期性波动, 通过模拟得到, 下游引航道较小的水位波动传递到升船机下闸首卧倒门运行区域将引起很大的水面波动, 影响卧倒门安全运行主要因素为水面波动的波幅, 枢纽下游水位对卧倒门运行影响较小。

2)针对升船机下游非恒定流对下闸首卧倒门安全运行的影响, 提出加强对闸首卧倒门巡检维护力度和卧倒门开到位后加装锁定装置等方法保障卧倒门的运行安全。

参考文献:

- [1] WU W M, RODI M, WENKA T. 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels[J]. Journal of hydraulic engineering, 2000, 126(1): 4-15.
- [2] FANG H W, WANG G Q. Three-dimensional mathematical model of suspended-sediment transport[J]. Journal of hydraulic engineering, 2000, 126(8): 578-592.
- [3] 陆永军. 三维紊流泥沙数学模型及其应用[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2002.
- [4] 张健, 方杰, 范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 67-70.
- [5] 李中华, 胡亚安. 非恒定水流作用下升船机对接安全预警措施研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(4): 87-90.
- [6] 黄国鲜, 周建军, 吴伟华. 弯曲河道螺旋流作用下的物质输运三维模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008(6): 977-982.

(下转第 138 页)