三峡升船机上游水位预警办法研究

郑卫力，彭享文
（长江三峡通航管理局，湖北 宜昌 443002）

摘要：针对三峡升船机上游水位处于 150 m 以下时三峡船闸灌水时间内上游引航道水位变幅过大的问题，进行了三峡升船机上闸首水位与三峡船闸灌水时刻关系研究。采用理论分析与数值计算方法，研究三峡船闸南北两线灌水引航道内波动叠加后三峡升船机上闸首水位变化规律，得出三峡升船机上闸首最大水位变幅与三峡船闸双线灌水时刻的数学关系，并据此提出升船机上游水位预警办法。通过实际数据与理论预测值比较计算误差值，得到预测模型准确性结果，结果显示通过预测模型建立的升船机上游水位预警办法能够为升船机安全运行提供参考。

关键词：三峡升船机；水位变幅；波动叠加；船厢对接

中图分类号：U642　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0116-06

Upstream water-level warning method of Three Gorges ship lift

ZHENG Weili, PENG Xiangwen
(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China)

Abstract: To the problem of excessive water level variation in the upstream approach channel during the irrigation time of the Three Gorges ship lock when the upstream water level of the Three Gorges ship lift is below 150 m, this paper studies the relationship between the water level of the upper lock of the Three Gorges ship lift and the irrigation time of the Three Gorges ship lock. Theoretical analysis and numerical calculation methods are used to study the variation law of the water level at the upper lock of the Three Gorges ship lift after the wave superposition in the irrigation approach channel of the north and south lines of the Three Gorges ship lock. The mathematical relationship between the maximum water level change at the upper lock head of the Three Gorges ship lift and the double-line irrigation time of the Three Gorges ship lock is obtained, and the early warning method for the upstream water level of the ship lift is proposed. By comparing the actual data with the theoretical prediction and calculating the error value, the accuracy results of the prediction model are obtained. The results show that the early warning method of upstream water level of the ship lift established by the prediction model can provide reference for the safe operation of the ship lift.

Keywords: Three Gorges ship lift; water level variation; wave superposition; chamber docking

三峡水利枢纽工程，由重力式溢流坝、水电站和通航建筑物三部分组成[1]，其中通航建筑物为双线五级船闸与垂直升船机。

三峡升船机与船闸上游引航道共用，如图 1 所示，引航道隔流堤顶高程为 150 m。当三峡水库水位下降至 150 m 以下时，引航道隔流堤超出库区水面[2]，升船机上游引航道水域与主库区隔开，此时三峡船闸采用四级运行方式，船闸二闸室作为实际运行的首级闸室[3]，三峡船闸灌水在上游引航道内引发的周期性往复流影响着上游引航道区域。

收稿日期：2024-07-21

作者简介：郑卫力（1973—），男，教授级高级工程师，研究方向为通航建筑物维护管理与技术研究。

水运工程

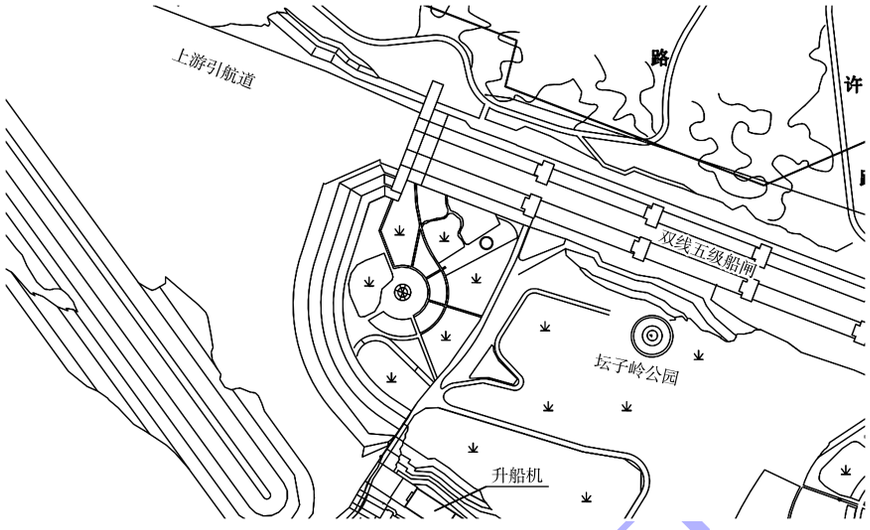

图 1　三峡升船机上游引航道

Fig. 1　Upstream approach channel of Three Gorges ship lift

三峡升船机自投入运行以来，船厢与上闸首对接运行中受水位变幅影响主要出现在三峡水库水位降至 150 m 以下后[4]。如 2019 年 7 月 1 日升船机上闸首对接后，上闸首水位由 19:04:00 时 145.963 m 变化至 19:17:00 时 146.601 m，如图 2 所示，且由于船厢此时与闸首联通，船厢水位由正常水深 3.500 m 上升至 3.985 m，船厢水由船厢边缘低点进入船厢设备区，影响设备运行与安全。通过分析发现，在上闸首水位变化前，三峡船闸南北两线灌水时间差较短。因此研究升船机上闸首水位受船闸灌水影响的变化规律[5]，并提出相应预警办法防止升船机出现此类安全问题十分必要。

对于升船机上游引航道船闸灌水非恒定流运动规律，孟祥玮等[6]提出船闸南北线灌水波动理论模型计算方法，但未根据实际数据验证模型，也未提出理论应用办法；龚国庆等[7]提出根据环境因素采取不同的运行应对方式，侧重于运行管理的措施，未提出具体的水位影响预测方法。本文基于波动叠加的理论，研究升船机上闸首水位最大变幅与三峡船闸灌水时刻的数学关系，提出升船机上游水位变幅的预警办法，计算水位变幅预测值与实际值之差，验证预警办法的可靠性。

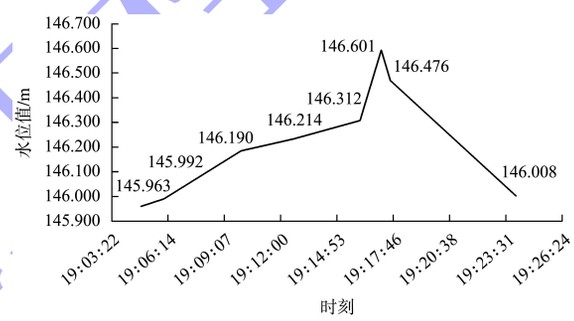

图 2　2019 年 7 月 1 日升船机上闸首水位

Fig. 2　Water level at upper lock head of ship lift on July 1,2019

1　升船机上闸首水位变化与影响

三峡升船机船厢标准水深为 3.5 m，船厢与闸首对接至船舶进出厢完成后，船厢解除对接的时间段内船厢水深随闸首水位变化。升船机过厢船舶标准最大吃水为 2.7 m，船厢水位低于 3.2 m 后，船舶进出厢过程中由于富余水深不足可能存在擦碰船厢底的危险，船厢水深超过 3.8 m 后，船厢内水体可能从船厢低点进入船厢设备区，影响设备运行和安全，当船厢水深超过 4.1 m 或者低于 2.9 m，船厢锁定机构受力达到受力最大临界值[8]，船厢将无法继续运行，因此不应超过 3.2~3.8 m 范围[9]。水位变幅是定义时间段内最高水位高程与最低水位高程的差值，根据三峡升船机设计运行要求，上下游引航道水位 1 h 变幅超过 0.5 m，应停止船舶过厢运行。

根据 2018—2022 年升船机上闸首水位测井内的数据记录，升船机上闸首水位 1 h 变幅超过 0.3 m 的情况均发生于三峡库区水位低于 150 m 情况下，因此在三峡库区水位低于 150 m 时，应用水位预警系统预测闸首水位最大变幅，避免在水位变化过大时间段船厢与闸首对接，从而有效防止船厢上闸首对接期间水位变幅过大对升船机的影响。

闸首水位变幅对升船机的影响主要发生在升船机船厢与闸首对接阶段，升船机运行中船厢与闸首对接时间根据不同船舶类型和尺寸有所不同，三峡升船机运行中进出厢历时 23 min57 s，如表 1 所示，一般船舶进出厢不超过 40 min，即升船机船厢与闸首对接时间长不超过 40 min。因此水位预警时以 40 min 时间内水位最大变幅为判断指标，即可避免对接期间水位变幅过大对升船机的影响。

表 1　2021 年三峡升船机月度及年度平均历时

Tab. 1　Monthly and annual average duration of Three Gorges ship lift in 2021

月份	船舶进出厢平均历时	设备运行平均历时	船舶过厢平均历时
1	27 min14 s	29 min 18 s	56 min 32 s
2	28 min 03 s	26 min 30 s	54 min 33 s
3	27 min 20 s	26 min 57 s	54 min 17 s
4	25 min 52 s	24 min 16 s	50 min 08 s
5	25 min 46 s	24 min 39 s	50 min 25 s
6	23 min 32 s	25 min 53 s	49 min 25 s
7	21 min 17 s	25 min 37 s	46 min 54 s
8	20 min 18 s	26 min 56 s	47 min 15 s
9	24 min 32 s	23 min 49 s	48 min 21 s
10	22 min 02 s	25 min 14 s	47 min 16 s
11	22 min 49 s	25 min 43 s	48 min 32 s
12	23 min 35 s	25 min 51 s	49 min 27 s
平均	23 min 57 s	25 min 44 s	49 min 42 s

2　引航道波叠加原理

在三峡船闸灌水过程中，由于流量变化以及波的传递，升船机上闸首水位出现周期性振动。水位振动的幅值即为波高，2 个峰值或谷值之间的时间间隔即为波动周期。水位波动的波高随时间逐渐衰减，波动周期与引航道水位有关。相关计算模型公式引自《三峡双线船闸灌水引航道内波动叠加的数学模型计算》[10]，波动叠加如图 3 所示。

北线船闸灌水引起的升船机上闸首水位变化为：

$$H_1 = h_1 \cos(\omega t + \phi_1) \tag{1}$$

$$h_1 = k_1 h_{1\max} \tag{2}$$

南线船闸灌水引起的升船机上闸首水位变化为：

$$H_2 = h_2 \cos(\omega t + \phi_2) \tag{3}$$

$$h_2 = k_2 h_{2\max} \tag{4}$$

两线船闸闸室灌水引起水位变化为：

$$H = h_1 \cos(\omega t + \phi_1) + h_2 \cos(\omega t + \phi_2) \tag{5}$$

升船机上闸首水位南北线 2 个波动叠加波高为式(5)的极值差 Y 为：

$$Y = \sqrt{h_1^2 + h_2^2 + 2h_1 h_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)} \tag{6}$$

式中：H_1 为北线船闸灌水引起的升船机水位变化，m；k_1 为北线船闸灌水衰减系数，随时间减小；$h_{1\max}$ 为北线船闸灌水引起升船机上闸首水位最大波高；ϕ_1 为北线船闸灌水初始相位，$\phi_1 = 2\pi t_1 / T$，t_1 为北线船闸灌水初始时刻，min；H_2 为南线船闸灌水引起的升船机水位变化，m；k_2 为南线船闸灌水衰减系数，随时间减小；$h_{2\max}$ 为南线船闸灌水引起升船机上闸首水位最大波高；ω 为角频率，其值为 $\omega = 2\pi / T$；T 为水位波动周期，min；t 为计算时刻，min；ϕ_2 为南线船闸灌水初始相位，$\phi_2 = 2\pi t_2 / T$，t_2 为南线船闸灌水初始时刻，min；H 为两线船闸闸室灌水引起水位变化；Y 为升船机上闸首水位南北线 2 个波动叠加波高。

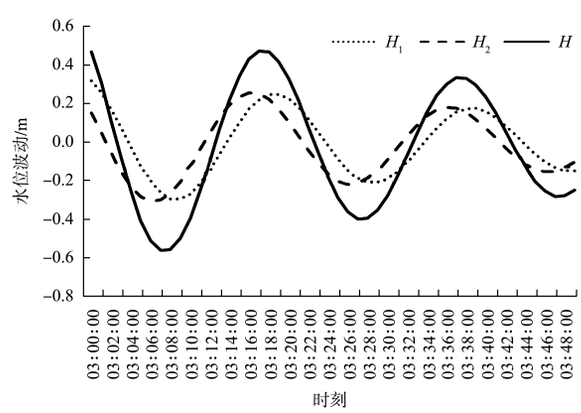

图 3　三峡双线船闸灌水波动叠加

Fig. 3　Wave superposition in irrigation approach channel of double lines of Three Gorges ship lock

水运工程

3　升船机上闸首最大变幅计算

根据式(6)可以得到升船机上闸首水位变幅值，三峡升船机与上闸首对接时段船厢与闸首水域连接，船厢水位随闸首水位同步变化，因此计算升船机闸首水位变幅可以预警对接阶段船厢水位变幅的情况。

根据采实际运行数据，三峡船闸南北线灌水时间间隔为 80~100 min。通过收集三峡船闸灌水运行数据及升船机上闸首水位数据，发现上游水位变化周期为 20 min。

引航道整体水位变化较小时，船闸南北线灌水所引起的水位波动波高基本相同即 $h_{1\max}=h_{2\max}=h$，可以将式(6)进行简化计算得到：

$$Y=h\sqrt{k_1^2+k_2^2+2k_1k_2\cos(\phi_2-\phi_1)} \tag{7}$$

式(7)中最大波高 h 在引航道水位变化较小时基本无变化，因此在一定水位条件下 h 为固定值，可通过一段时间内的升船机上闸首水位实际数据计算得出。k_1、k_2 与双线船闸灌水时刻有关；$\phi_2-\phi_1$ 与双线船闸灌水时刻及水波周期 T 相关，水波周期 T 值约为 20 min。综上，在引航道水位一定的情况下，升船机水位变幅主要与双线船闸灌水时刻 t_1、t_2 相关。

升船机上闸首水位波动变幅最大值为变幅发生 t 时刻波高 Y 的 2 倍加上闸首水位固定波动值 x，即最大变幅 f 为：

$$f=2h\sqrt{k_1^2+k_2^2+2k_1k_2\cos(\phi_2-\phi_1)}+x \tag{8}$$

其中：

$$\begin{cases} k_1=\dfrac{1}{\sqrt{2}^{\frac{t-t_1}{T}}} \\ k_2=\dfrac{1}{\sqrt{2}^{\frac{t-t_2}{T}}} \end{cases} \tag{9}$$

式中：h 为船闸灌水引起升船机上闸首水位最大波动值，与三峡库区水位有关，库区水位越低 h 越大，范围为 0.08~0.27 m；x 为升船机上闸首水位固定波动值，与三峡库区水位、三峡出入库流量、闸首风速等有关，在三峡升船机允许通航条件[11](库区水位 145~175 m、三峡入库流量不超过 5.67 万 m^3/s、出库流量不超过 4.50 万 m^3/s、闸首风速小于 13.8 m/s)下，数值范围为 0.02~0.23 m。

4　实际变幅与理论值比较

通过收集 2019-06-25—2019-07-01 的升船机上闸首水位数据及三峡船闸灌水时刻数据，将其作为样本数据，如图 4 所示，按照式(8)进行回归分析计算。

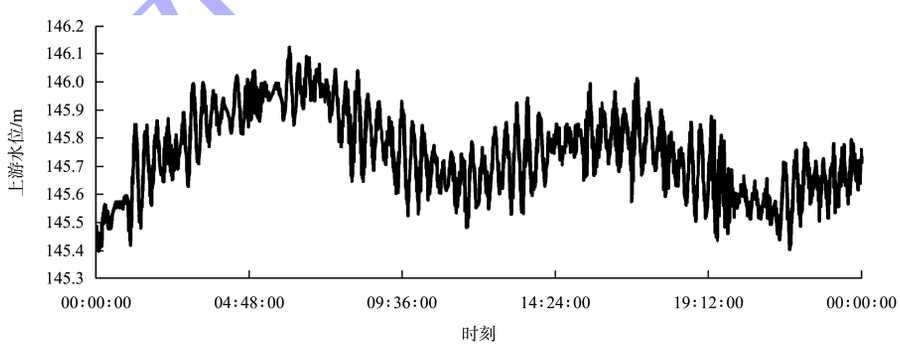

图 4　升船机上闸首水位变化

Fig. 4　Water level variation at upper lock head of ship lift

按照式(8)进行回归分析得到：

$$f=0.157\ 14\cdot\sqrt{1+\left(\frac{1}{\sqrt{2}^{\frac{t_1-t_2}{20}}}\right)^2+2\cdot\frac{1}{\sqrt{2}^{\frac{t_1-t_2}{20}}}\cdot\cos\left(2\pi\cdot\frac{t_1-t_2}{20}\right)}+0.146\ 47 \tag{10}$$

式中：f 为最近一次船闸灌水动作发生时刻后 40 min 内的上游水位最大变幅，m；t_2-t_1 为最近一次南线灌水与最近一次北线灌水时刻差，min。

回归分析结果如图 5 所示，式(10)的预测值与真实值平均误差为 0.038 m，最大误差为 0.099 m，结果显示预测值能够有效反映闸首水位变幅情况。

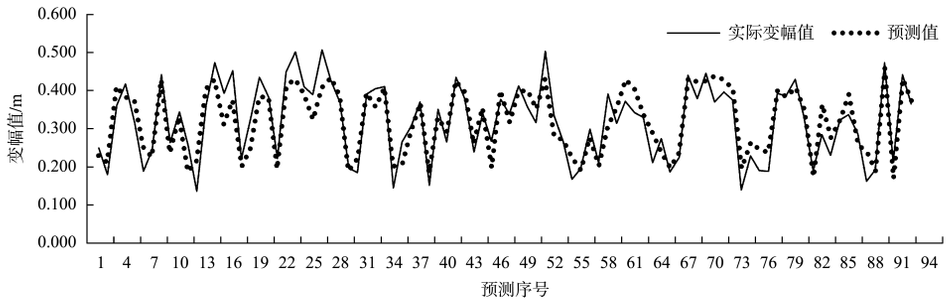

图 5　升船机上闸首水位变幅实际值与预测值对比

Fig. 5　Comparison between actual and predicted values of water level variation at upper lock of ship lift

5　预警系统结构与原理

三峡升船机上游水位系统由三峡船闸北线二闸室灌水信号采集部分、三峡船闸南线二闸室灌水信号采集部分、升船机上闸首水位采集信号部分、数据处理服务器和升船机集控室显示终端部分构成，如图 6 所示。系统主要输入数据有三峡船闸南北线二闸室灌水时刻数据与升船机上闸首水位计测井水位数据，输出升船机上闸首水位预测变幅数据与灯光、声音报警信号。

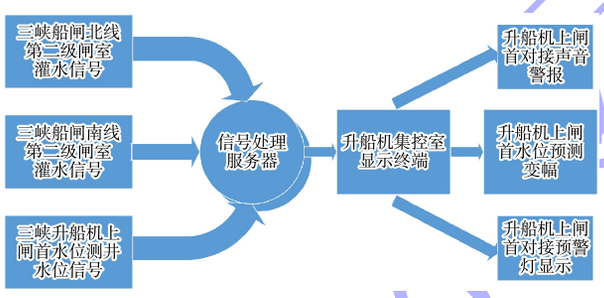

图 6　水位预警系统

Fig. 6　Water level early warning system

预警系统计算原理如图 7 所示，通过采集升船机运行对接前 72 h 内闸首水位数据、三峡船闸南北线灌水时刻信息，采用式(8)进行回归分析计算得到参数 h 与 x，并根据相应参数计算得到计算时刻后 40 min 时间段内升船机上闸首水位最大变幅值。

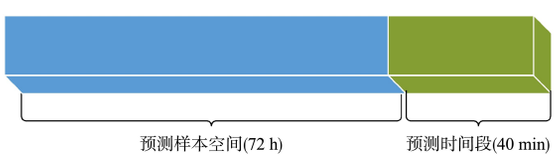

图 7　水位预警系统计算样本区间

Fig. 7　Calculation sample interval of water level early warning system

系统根据收集的信息滚动计算得到升船机上闸首水位 40 min 最大变幅预测值，根据预测值的不同，提供不同级别预警。一级：当变幅预测值不大于 0.3 m 时，显示终端显示变幅预测结果，不触发警报；二级：当变幅预测值大于 0.3 m 且不大于 0.5 m 时，显示终端上闸首对接预警灯亮起，集控人员需停止船厢与上闸首对接，待水位剧烈变化过程结束后对接；三级：当变幅预测值大于 0.5 m 时，显示终端上闸首对接预警灯亮起，并触发声音警报，集控人员需停止船厢与上闸首对接，并通知船舶于靠船墩或导航墙靠泊，待水位剧烈变化过程结束后对接，而后通知船舶进出厢。

6　结论

1）升船机运行对接受上闸首水位变化主要影响的时段为三峡库区水位低于 150 m 以下时段，通过建立此时间段内有效的水位变幅预测方法，可以避免三峡升船机船厢上闸首对接期间水位变幅过大对升船机的影响。

2）当三峡库区处于 150 m 水位以下时，三峡双线船闸灌水所引起的水位波动能够引起升船机上闸首水位变幅的变化，且两者之间存在数学关系，通过波动叠加模型的计算能够得到升船机上闸首水位最大变幅数值。

3）通过使用实际数据对预测模型进行准确性验证，证明模型预测值所预测的三峡升船机上闸首 40 min 水位变幅最大值预测值与实际值最大误

差不超过 0.1 m，预测结果准确可靠，能够为升船机运行提供参考。

4）根据预测模型建立三峡升船机上游水位预警系统，滚动预测三峡升船机上闸首水位变幅，实现三级水位变化预警，能够避免上闸首水位变幅可能导致的运行风险。

参考文献：

[1] 郑守仁. 三峡水利枢纽工程安全及长期使用问题研究[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 1-7, 37.
ZHENG S R. Safe operation and long-term service of Three Gorges Project [J]. Advances in science and technology of water resources, 2011, 31(4): 1-7, 37.

[2] 陈辉, 赵岚, 刘珊燕, 等. 三峡工程运行初期上游引航道通航水流条件研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(3): 64-67.
CHEN H, ZHAO L, LIU S Y, et al. Navigation conditions in upstream approach channel of TGP in initial operation period [J]. Journal of Yangtze River scientific research institute, 2007, 24(3): 64-67.

[3] 王余旺, 乔波, 杜满, 等. 四级运行模式下提升船舶通过能力方式的分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(1): 24-25.
WANG Y W, QIAO B, DU M, et al. Analysis on the way of improving ship's capacity under the four-level operation mode[J]. Modern industrial economy and informationization, 2021, 11(1): 24-25.

[4] 尚桦. 水位波动对三峡升船机运行的影响[J]. 水运工程, 2024(3): 136-139.
SHANG H. Influence of water level fluctuation on operation of Three Gorges ship lift [J]. Port & waterway engineering, 2024(3): 136-139.

[5] 胡亚安, 王新, 陈莹颖, 等. 三峡升船机 145 m 水位上游对接厢内水面波动特性实船试验研究[J]. 水运工程, 2020(12): 1-6.
HU Y A, WANG X, CHEN Y Y, et al. Fluctuation characteristics of water surface in test box of the Three Gorges ship lift with water level of 145 m [J]. Port & waterway engineering, 2020(12): 1-6.

[6] 孟祥玮, 马隽, 周华兴. 三峡双线船闸灌水引航道内波动叠加的数学模型计算[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 382-392.
MENG X W, MA J, ZHOU H X. Mathematic model of wave superposition in double-line ship lock approach channel of the Three Gorges Project [J]. Journal of waterway and harbor, 2014, 35(4): 382-392.

[7] 龚国庆, 徐浩, 邓南云, 等. 三峡工程船闸取水对升船机运行影响与应对策略[J]. 人民长江, 2021, 52(7): 216-220.
GONG G Q, XU H, DENG N Y, et al. Influence on Three Gorges ship lock water intake on ship lift operation and coping strategies [J]. Yangtze river, 2021, 52(7): 216-220.

[8] 欧阳升, 吴鹏, 王婷婷. 浅谈三峡升船机安全锁定机构的受力变化[J]. 中国设备工程, 2017(17): 180-182.
OUYANG S, WU P, WANG T T. On the stress change of the safety locking mechanism of the Three Gorges ship lift[J]. China plant engineering, 2017(17): 180-182.

[9] 尚桦, 李若. 水位变动对三峡升船机船厢下游对接运行操作的影响[J]. 水运工程, 2020(2): 62-66.
SHANG H, LI R. Influence of water level change on downstream docking operation of ship of Three Gorges ship lift[J]. Port & waterway engineering, 2020(2): 62-66.

[10] 孟祥玮, 马隽, 周华兴. 三峡双线船闸灌水引航道内波动叠加的数学模型计算[J]. 水道港口, 2014, 35(4): 382-392.
MENG X W, MA J, ZHOU H X. Mathematic model of wave superposition in double-line ship lock approach channel of the Three Gorges Project [J]. Journal of waterway and harbor, 2014, 35(4): 382-392.

[11] 杨林江, 路卫兵. 三峡升船机概述[J]. 水电与新能源, 2017, 31(1): 7-14.
YANG L J, LU W B. Introduction of the Three Gorges ship lift[J]. Hydropower and new energy, 2017, 31(1): 7-14.

（本文编辑　赵娟）

水运工程