

# 长江下游感潮河段水闸 引排水能力的计算模型应用 ——以新孟河界牌水利枢纽为例

邵 勇<sup>1</sup>, 夏达忠<sup>2</sup>, 周樾旻<sup>3</sup>, 羌鑫梁<sup>4</sup>, 朱 茜<sup>3</sup>

(1. 江苏省太湖治理工程建设管理局, 江苏 常州 213022; 2. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098;  
3. 南京河海科技有限公司, 江苏 南京 210036; 4. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200080)

**摘要:** 针对长江下游感潮河段水闸引排水调度的精细化需求, 以新孟河界牌水利枢纽为研究对象, 构建潮位预报与引排水流量计算模型。采用多元线性回归分析潮汐特性, 结合镇江站与新孟河闸的水位实测资料, 建立镇江站潮位动态预报方案。在此基础上, 推求新孟河闸的过程水位, 并构建闸下水位与引排水流量的函数关系, 实现潮周期内引排水流量的精细化计算以满足水利枢纽调度需求。研究成果可为长江下游感潮河段水闸引排水调度提供理论方法和技术支撑。

**关键词:** 长江下游; 感潮河段; 水闸引排水; 潮位预报; 精细化调度

中图分类号: TV663 文献标识码: A 文章编号: 1007-7839(2024)08-0043-0004

## Application of calculation model of diversion and drainage capacity of sluice in tidal reach of lower reaches of Yangtze River: taking the Jiepai Water Control Project of Xinmeng River as an example

SHAO Yong<sup>1</sup>, XIA Dazhong<sup>2</sup>, ZHOU Xiyang<sup>3</sup>, QIANG Xinliang<sup>4</sup>, ZHU Qian<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Province Taihu Treatment Project Construction Management Bureau, Changzhou 213022, China;  
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;  
3. Nanjing Hohai Technology Co., Ltd., Nanjing 210036, China;  
4. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200080, China)

**Abstract:** Aiming at the refined demand of diversion and drainage operation of sluices in tidal reach of the lower reaches of the Yangtze River, taking Jiepai Water Control Project of Xinmeng River as a research object, a model of tide level forecast and diversion and drainage flow calculation is established. Using multiple linear regression analysis of tidal characteristics, combined with water level measurement data from Zhenjiang Station and Xinmeng River Sluice, a dynamic tidal level forecasting scheme for Zhenjiang Station is established. On this basis, the process water level of the Xinmeng River Sluice is calculated, and a functional relationship between the water level under the sluice and the drainage flow is constructed to achieve precise calculation of drainage flow during the tidal cycle to meet the dispatching requirements of the water conservancy hub. The research results can provide theoretical method and technical support for sluice diversion and drainage operation in tidal reach of the lower reaches of the Yangtze River.

**Key words:** the lower reaches of Yangtze River; tidal river section; sluice diversion and drainage; tidal level prediction; refined dispatch

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021071)

作者简介: 邵勇(1979—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水利工程建设管理工作。E-mail: 46875561@qq.com

## 1 概 述

### 1.1 研究背景与意义

长江下游感潮河段,作为经济发展核心地带与水资源密集利用区域,沿线分布的水闸在防洪减灾、灌溉供水及水资源优化配置中发挥着关键作用。然而,该区域显著的潮汐效应导致水位波动剧烈,传统引排水能力估算方法基于静态水位,难以准确反映实际动态情况。因此,亟待构建一套适用于长江下游感潮河段特性的水闸引排水能力计算模型,为科学调度决策提供精准支持,确保水利工程高效运行及综合效益最大化。

### 1.2 国内外研究现状

感潮河段水位预报和水闸引排水能力预测是河口海岸工程和水资源管理领域的重要课题<sup>[1]</sup>。相关学者对感潮河段水文特性、潮位预报等开展了大量研究,如赵杰等采用小波分析方法对长江口潮汐特性进行了分析<sup>[2]</sup>,王鹏等构建了基于支持向量机的长江口潮位预报模型<sup>[3]</sup>。国外学者多采用基于物理机制的水动力学模型模拟水位变化过程,国内学者则发展了结合机器学习方法的水位预报模型<sup>[4-5]</sup>。

在水闸引排水能力计算方面,传统方法多采用水力学公式,但难以考虑感潮河段水位的动态变化过程。国内学者提出了一些改进方法,如考虑动态水位变化的引排水能力计算公式<sup>[6]</sup>,采用数值模拟方法计算复杂边界条件下的引排水过程<sup>[7]</sup>等。国外较早开发了业务化的水情预报和调度系统,近年来国内也加快了相关系统的开发<sup>[8]</sup>。目前,融合模型、复杂条件下的水力学计算以及多目标调度优化成为研究焦点。

### 1.3 研究内容与技术路线

本研究基于新孟河界牌水利枢纽实测数据,分析该区域水文特征,采用时间序列与多元线性回归建立潮位预报模型,进而构建引排水能力计算模型,并通过实例应用验证模型的有效性。技术路径遵循资料收集分析、潮位预报建立、引排水模型构建、应用评估、成果汇总的途径。

## 2 水文特征分析

### 2.1 区域概况

长江下游感潮河段位于河口上游,潮汐影响显著,呈现不规则半日混合潮特性,涨落有序,大潮通常发生在农历初三、十八前后。潮位受江洪、下游潮汐及台风等因素影响,枯水期潮汐作用更明显。

### 2.2 潮汐特性

#### 2.2.1 镇江站基本情况

镇江站作为重要水文监测点,监测历史丰富,位于感潮河段,潮汐为不规则半日混合型,汛期以径流主导,枯水期潮汐显著。配备完善的水位观测设施,记录最高、最低水位,平均潮差约4.2 m。

#### 2.2.2 镇江站与新孟河闸的相关关系

新孟河闸位于镇江站下游76.7 km处,受镇江站潮位变化的直接影响。新孟河闸与镇江站间潮位关联紧密,通过2020—2022年同步观测数据,运用线性回归分析潮波传播时间,为引排水流量计算奠定基础。统计结果表明,从镇江站到新孟河闸,高潮位的传播时间约为2 h,低潮位的传播时间约为2.2 h,两站闸具有较强的相关性。因此,可根据镇江站的预报潮位推算出新孟河闸下预报水位,进而根据新孟河界牌枢纽泵闸的引排水能力获得相应的引排水方案。

### 2.3 镇江站潮位预报方案

镇江站潮位及其影响因子不仅存在着相互影响,而且其自身也是前后依赖的(即变化趋势),根据时间序列理论可以将其作为动态数据处理。在将影响因子引入模型中时,既要考虑上述因子对镇江站高潮位的直接影响,又要兼顾各因子自身的变化趋势产生的影响,同时也希望考虑到镇江站前期相应高潮位的影响,因此考虑采用5个影响因子的多元线性回归统计模型对长江镇江站高潮位进行预报。同时根据相关规范要求,对长江镇江(二)站高潮位预报方案使用的多个参数进行比较后选择相关参数,主要包括镇江站预报高潮位和前一日相应高潮位,大通站36 h前(与镇江站预报高潮位所在日期比较)的水位和60 h的水位,镇江站预报高潮位相应的吴淞站高潮位和前一日相应吴淞站高潮位。经过多年预报应用,该预报精度均达到甲等标准,方案简单、实用,能满足需要。

## 3 模型构建与应用

### 3.1 潮位预报模型

本文采用多元线性回归模型进行潮位预报,模型的理论基础是利用影响因子与目标潮位之间的线性关系,通过历史数据训练得到回归系数,进而实现对未来潮位的预测。在建模过程中,综合考虑了大通站水位、吴淞高潮位以及前期镇江站高潮位等多个影响因子,以提高预报精度。

模型的参数率定通过2015—2022年的历史数

据进行,采用最小二乘法求解回归系数,通过交叉验证的方式,优化模型结构和参数,以达到最佳的预报效果。

### 3.2 引排水流量计算模型

在获得潮位预报结果的基础上,利用新孟河界牌枢纽与镇江站的相关关系,推算出枢纽的闸下水位,然后基于长系列的闸下水位和流量资料,构建引排水流量计算模型。引水流量采用闸下高潮位与一潮引水平均、最大流量的幂函数关系,排水流量采用闸下低潮位与一潮排水平均流量的幂函数关系。

一潮引水平均流量及一潮引水最大流量公式为

$$\bar{Q} = a \Delta Z_L^\alpha Z_{L_{\text{高}}}^\beta \quad (1)$$

$$Q_m = a \Delta Z_L^\alpha Z_{L_{\text{高}}}^\beta \quad (2)$$

式中: $\bar{Q}$ 、 $Q_m$ 分别为一潮平均流量、一潮最大流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\Delta Z_L$ 为有效波高,  $\text{m}$ ; 其中  $\Delta Z_L = Z_{L_{\text{高}}} - Z_{L_{\text{开}}}$ ;  $Z_{L_{\text{开}}}$ 为开闸稳定水位,  $\text{m}$ ;  $Z_{L_{\text{高}}}$ 为闸下游最高水位,  $\text{m}$ ;  $a$ 为相关系数;  $\alpha$ 、 $\beta$ 为待定指数。

引水流量定线的相关因子取用该水文站闸下推开闸时稳定水位和引水过程中的最高水位。

一潮排水平均流量及一潮排水最大流量公式为

$$\bar{Q} = a \Delta Z_L^\alpha Z_{L_{\text{低}}}^\beta \quad (3)$$

$$Q_m = a \Delta Z_L^\alpha Z_{L_{\text{低}}}^\beta \quad (4)$$

式中: $\bar{Q}$ 、 $Q_m$ 分别为一潮排水平均流量、一潮排水最大流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\Delta Z_L$ 为有效波高,  $\text{m}$ ; 其中  $\Delta Z_L = Z_{L_{\text{开}}} - Z_{L_{\text{低}}}$ ;  $Z_{L_{\text{开}}}$ 为开闸稳定水位,  $\text{m}$ ;  $Z_{L_{\text{低}}}$ 为闸下游最低水位,  $\text{m}$ ;  $a$ 为相关系数;  $\alpha$ 、 $\beta$ 为待定指数。

利用实测数据对参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 进行率定,建立水位-流量关系曲线,为后续引排水流量的计算提供基础。在历年引、排水定线中,其相关因子长期稳定,系数及因子指数年际有所变化,引水年际变化幅度较小,排水受影响因素较多,排水年际变化幅度较大。

### 3.3 一潮推流计算公式

对实测潮次的一潮平均流量及一潮最大流量资料进行综合定线分析,一潮平均流量及一潮最大流量关系线均通过3种检验,标准差满足规范要求。通过对多年实测流量资料进行分析,得到一潮引水平均流量及最大流量水位-流量关系线、排水平均流量及最大流量水位-流量关系线,再根据上述推算方法,分析计算出新孟河闸多年来的一潮引排水平均流量及最大流量水位-流量关系,见表1。

表1 推流计算关系式

|      |    |      |   |
|------|----|------|---|
| 新孟河闸 | 引水 | 平均流量 | $\bar{Q} = 0.029 \Delta Z_L^{0.375} Z_{L_{\text{高}}}^{5.810}$ |
|      |    | 最大流量 | 测流潮次不足  |
|      | 排水 | 平均流量 | $\bar{Q} = 24.7 \Delta Z_L^{0.105} Z_{L_{\text{低}}}^{1.390}$  |
|      |    | 最大流量 | $Q_m = 57.5 \Delta Z_L^{0.034} Z_{L_{\text{低}}}^{0.946}$      |

表1中 $\bar{Q}$ 、 $Q_m$ 分别为一潮平均流量和一潮最大流量。一潮指的是1次洪水涨落的过程,长江沿线感潮河段的潮汐类型为不规则半日潮型,在1个太阴日内(约25 h)有2次潮水涨落过程,相关需求是计算预报日当天的理论最大引排水量(其中可能包含2~3次潮汐涨落过程)。

### 3.4 模型应用流程

潮位预报-引排水流量计算模型的应用流程如下:

(1)利用镇江站附近水文站点的水位数据,结合天文潮预报,获得未来一段时间内镇江站的高低潮位;

(2)根据新孟河界牌枢纽与镇江站的相关关系,推算出枢纽的闸下水位过程;

(3)将闸下水位代入引排水流量计算模型,得到未来各时段的引排水流量;

(4)结合枢纽的调度目标和实际情况,制定引排水调度方案。

通过上述流程,实现了潮位预报和引排水流量计算的无缝衔接,为新孟河界牌枢纽的精细化调度提供重要的技术支撑。

## 4 新孟河界牌水利枢纽引排水实例分析

### 4.1 新孟河界牌水利枢纽概况

新孟河界牌水利枢纽位于新孟河与长江交汇处,是太湖流域综合治理骨干工程,具有引长江水进入太湖、湖西区,排泄流域上游洪水进入长江等重要功能。枢纽由船闸、节制闸、泵站组成,泵站采用9台X型双向立式轴流泵,引、排设计流量均为300  $\text{m}^3/\text{s}$ ,节制闸总净宽80 m,最大引、排流量为745  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

### 4.2 潮位预报方案的建立

为新孟河界牌枢纽的引排水调度提供潮位预报,选择长江干流镇江站作为潮位预报对象,镇江站位于长江下游感潮河段,受上游来流和下游潮汐双重影响。潮位预报采用基于大通站水位和吴淞高潮位等影响因子的多元线性回归模型,并结合前期镇江站高潮位建立动态预报方案。模型在2015—2022年期间经过率定和检验,预报精度均达

到甲等标准,能满足防汛调度需求。

### 4.3 引排水流量的计算

根据新孟河界牌枢纽与镇江站的相关关系,由镇江站潮位预报成果推算出枢纽的闸下水位。在此基础上,利用长系列的枢纽闸下水位和流量资料,建立了引排水流量的计算公式。引水流量采用闸下高潮位与一潮引水平均、最大流量的幂函数关系,排水流量采用闸下低潮位与一潮排水平均流量的幂函数关系。

利用潮位预报结果代入流量计算公式,可得到未来1个潮周期内枢纽的引排水流量。利用模型首先在特征潮位预报界面对镇江站进行特征潮位预报,在引排水能力计算页面获取江阴站特征潮位预报成果数据,再根据新孟河闸与镇江站高低潮之间的相关关系方程式推算出新孟河闸闸下水位,最后调用插值程序对预报特征值数据进行插值,得到新孟河闸闸下逐时预报水位过程数据,根据引排水计算公式进行闸站、泵站的引排水量。引排水流量计算的输入界面需要选择起止时间,填写闸孔数量和过流面积等参数,引排水流量与潮位过程密切相关,高潮位时引水流量较大,而低潮位时排水流量较大。

潮位预报结果向引排水流量的转化过程,是水闸精细化调度的重要部分。通过预报未来1个潮周期内的引排水流量,可以合理安排水闸启闭时间,既满足防洪排涝需求,又兼顾灌溉引水,充分发挥枢纽的综合效益。这种潮位-流量耦合的调度方式可操作性强,为长江下游感潮河段水闸调度提供了新思路。

### 4.4 模型应用效果评价

2023年汛期,镇江水文分局利用本文建立的潮位预报-引排水流量计算模型,为新孟河界牌枢纽的引排水调度提供了技术支撑。汛期共发布相关潮位预报360多个潮次,高低潮位预报合格率达到95%以上,达到甲等预报精度。利用预报的潮位过程,通过引排水流量计算模型,得到了新孟河界牌枢纽逐时的引排水流量,为枢纽的精细化调度提供了重要参考。实践表明,本文建立的基于潮位预报的引排水流量计算模型合理可靠,能够满足新孟河界牌枢纽的引排水调度需求。

## 5 结 语

本文针对长江下游感潮河段新孟河界牌水利枢纽的引排水调度需求,基于长系列实测资料,构建了潮位预报与引排水流量计算模型。潮位预报采用多元线性回归方法,充分利用镇江站与新孟河闸的水位相关性,实现了枢纽闸下水位的精确推算。在此基础上,建立了闸下水位与引排水流量的幂函数关系,实现了潮周期内引排水流量的精细化预测。2023年汛期的实践应用表明,模型预报精度高,能够满足枢纽的精细化调度需求。

本文构建的潮位预报-引排水流量计算模型,采用数据驱动思路,基于长系列实测资料,实现了潮位至流量的精确转换和潮周期内流量的精细化预测,可为枢纽精细化调度提供关键信息支撑。未来可探索水闸与泵站协同调度,提高模型在极端情景下的适用性,并推广至其他湖区水利枢纽。在进一步优化模型架构的同时,加强人机交互功能的开发,以期为更多湖区水利枢纽的精细化调度提供更加智能高效的技术支撑,更好地服务于水利工程安全与水资源优化配置。

### 参考文献:

- [1] 徐振山,王苏东,丁宏伟,等. 基于数值模拟的澄通感潮河段水源地预警站设置研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):61-69.
- [2] 赵杰,沈永明,徐宗学. 长江口潮波特性的小波分析[J]. 海洋学报(中文版),2005,27(5):19-28.
- [3] 王鹏,李一平,王兆印,等. 基于支持向量机的长江口潮位预报模型[J]. 海洋预报,2018,35(5):74-81.
- [4] 刘攀,王浩,王建华,等. 基于EMD和ELM的长江口水位组合预报方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):379-384.
- [5] 郭华,李致家,李一兵. 基于深度学习的河口感潮河段水位预报方法研究[J]. 人民长江,2019,50(增刊1):7-12.
- [6] 杨世伦,王浩,王建华,等. 河口感潮河段水闸引排水能力计算方法研究[J]. 水利学报,2017,48(9):1069-1076.
- [7] 李鹏年,张欣,胡春宏,等. 考虑动态边界的感潮河网水流数值模拟[J]. 水科学进展,2018,29(3):350-356.
- [8] 钟平安,张翔,钟德钰,等. 河口感潮河段水资源配置与水环境综合调度系统开发及应用[J]. 水利信息化,2020(1):67-72.