

# 涡河涡阳枢纽设计最低通航水位研究

黄 涛, 沈保根, 周琪琪, 李云龙

(安徽省交通勘察设计院有限公司, 安徽 合肥 230011)

**摘要:**枢纽建设后对径流的调节破坏了上下游水位样本年际之间的一致性,使得设计通航水位确定的问题复杂化。针对梯级枢纽扩建船闸工程设计最低通航水位取值的问题,以涡阳枢纽复线船闸为例,对非一致性水位序列进行统计分析,选取代表性水文序列进行保证率水位计算,并与枢纽死水位、最低运行水位进行分析比较,并通过工程投资等因素探讨设计通航水位取值的合理性。结果表明,采用涡阳、蒙城枢纽死水位作为上下游设计最低通航水位,在满足通航保证率的同时具有较好的经济性,可确保梯级枢纽间水位衔接和船舶通航安全。

**关键词:**船闸;设计最低通航水位;梯级枢纽

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0138-05

## Designed lowest navigable water level for Guoyang Hydro-junction on Guohe River

HUANG Tao, SHEN Baogen, ZHOU Qiqi, LI Yunlong

(Anhui Transport Survey & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230011, China)

**Abstract:** The adjustment of runoff by a hydro-junction after its construction destroys the inter-annual consistency among upstream and downstream water level samples, consequently complicating the determination of the designed navigable water level. Focusing on the problem of selecting the designed lowest navigable water level for a ship lock expansion project of a cascade hydro-junction, this paper discusses the double-line ship lock of the Guoyang Hydro-junction as an example. Specifically, it statistically analyzes the inconsistent water level sequence and selects the representative hydrological sequence for the calculation of the guaranteed water level. Then, the paper compares the guaranteed water level with the dead water level and the lowest navigable water level of the hydro-junction and discusses the rationality of the designed navigable water level selected according to factors such as project investment. The results show that using the dead water levels of the Guoyang and Mengcheng hydro-junctions as the designed lowest navigable water levels of the upstream and downstream can not only meet the navigation guarantee rate with favorable economy but also ensure the water level connection between the cascade hydro-junctions and the navigation safety of ships.

**Keywords:** ship lock; designed lowest navigable water level; cascade hydro-junction

在内河河流的开发建设中,常采用梯级枢纽对河道进行渠化,以改善通航条件并实现水资源的综合利用。最低设计通航水位是枢纽中船闸工程规划、设计、施工中的重要技术参数,也是影响船闸通过能力的重要指标。《船闸总体设计规

范》<sup>[1]</sup>对枢纽上下游最低通航水位给出了明确的计算方法,然而由于枢纽建设后改变了原天然河流的水文特性,加之枢纽调度运行方式的复杂性,给水文分析及合理计算设计通航水位带来一定难度<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2022-06-13

作者简介: 黄涛 (1979—), 男, 高级工程师, 从事港口、航道工程设计与咨询。

与新建枢纽工程不同，已建枢纽扩建船闸工程还需要考虑对不合理的特殊运行工况进行剔除，以确保最低通航水位的合理性，实现良好的枢纽运行经济效益<sup>[3]</sup>。此外，对于枢纽运行时间不长的船闸扩建工程，水文资料数据年限较短和统计样本存在的非一致性问题使得设计通航水位的确定更加复杂化<sup>[4]</sup>。本文以涡河涡阳复线船闸工程为例，在对水文资料一致性进行分析的基础上，选取代表性水文资料，综合考虑枢纽调度运行方式和枢纽间水位衔接等因素，对枢纽上下游设计最低通航水位问题进行研究，以期为类似工程提供参考。



图 1 涡河安徽段水系、枢纽及水文站点分布

随着腹地工业水平的快速发展，特别是矿建材料和煤炭资源的需求逐年增加，涡阳枢纽一线低等级船闸通过能力已难以达到经济形势发展的需要。为改善涡阳枢纽通航条件，拟建设Ⅲ级复线船闸，以解决枢纽通航能力的瓶颈问题。

## 1.2 水文站点分布

涡河安徽段主要分布有亳县、涡阳、蒙城等水文站，均为省基本水文站，也是涡河安徽段主要控制站，建站时间较早，水文资料观测年限较长，水位、流量、泥沙测验能够满足水利行业相关规范要求，具有较好的可靠性。其中涡阳水文站自 1988 年后主要观测水位，测流资料较少。本文取涡阳站和蒙城站为依据站，如无特殊说明，水位基面采用 1985 国家高程基准。

## 1 工程概况

## 1.1 枢纽概况

涡河是淮河第二大支流，呈西北—东南走向，为跨豫、皖两省黄淮平原区的骨干排水河道。涡河安徽段自亳州市戴桥—怀远入淮口，沿线现有大寺、涡阳、蒙城3座拦河水利枢纽，见图1。以上枢纽均建于20世纪60、70年代，受当时的技术水平和施工工艺条件制约，原设计泄洪流量较低，下泄壅水较严重。2005—2008年涡河近期治理工程对大寺、涡阳枢纽浅孔闸进行加固并扩建深孔闸和船闸；对蒙城枢纽的浅孔闸、分洪闸和船闸进行加固。

## 2 运行低水位分析

## 2.1 枢纽运行方式

大寺、涡阳、蒙城枢纽为兼具蓄水、泄洪、灌溉、航运等功能的综合性枢纽，枢纽上下游水头差均在 10 m 以下，为典型的低水头梯级渠化枢纽。涡阳闸上下游水位受涡阳及蒙城枢纽共同调节控制。由于蓄水主要局限于河道河槽内，调节功能较小，各枢纽以水位为控制标准（表 1），采用以下运行方式：1) 平、枯水期的控制闸上水位不高于正常蓄水位，根据预报上游来水流量和闸上水位控制闸门开启组合和开度，确保枢纽坝前水位在控制水位以下运行。干早期可提高控制水位至最高蓄水位。2) 丰水期采用预泄腾空库容的方式，按汛限控制水位控制枢纽闸上水位，将水位维持在汛限控制水位区间运行；根据上游来水

量预报和实际需要,控制闸门开启组合和开度,直至预报流量达到节制闸泄流能力上限,开启所有闸门,恢复天然河道行洪状态。

表 1 涡河沿线枢纽闸上控制水位

枢纽	正常	最高	汛限控制水位/m	
	蓄水位/m	蓄水位/m	下限	上限
大寺	34.84	35.34	34.00	35.00
涡阳	28.34	29.34	28.00	29.00
蒙城	25.32	25.82	24.32	25.32

## 2.2 低水位特性分析

涡河流域为黄河冲积平原,受大气环流季节性变化影响显著,全年降水量主要集中在汛期,年内各月分配很不均衡。降水量年际变化也很大,丰枯相差悬殊。河道径流量主要取决于降水量,汛期多雨易涝,非汛期少雨缺水,径流年际变化和年内分配不均相当明显<sup>[5]</sup>。汛期干旱与洪涝经常交替出现,非汛期时常出现长达数月的断流。

为研究涡阳闸上水位变化趋势,对涡阳闸上1985—2020年日均水位序列作箱线进行分析,见图2。据涡河流域水文气象资料显示,1994、1999、2001、2013和2019年年降雨量偏低,为涡河流域主要枯水年。由图2各年度水位序列统计特性可知,除1994年外,上述枯水年份闸上低水位部分相较于其他年份处于较高水平。尤其是2008年涡河枢纽加固扩建工程完成后,随着枢纽建设质量的提升以及调度经验的积累,闸上水位控制调节能力显著提高,运行水位区间趋于稳定<sup>[6]</sup>。可知涡阳闸上运行低水位和流域降雨无直接关联,自然条件并不是造成闸上低水位运行的主要成因。

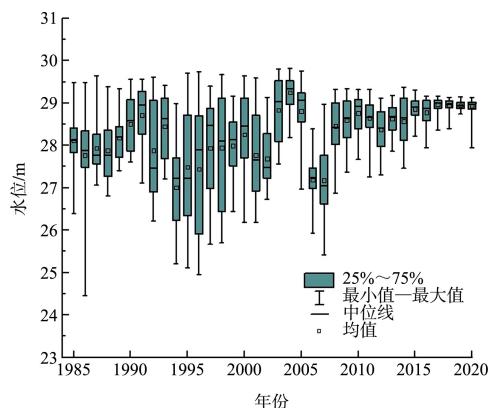


图 2 涡阳枢纽闸上水位统计箱线

据涡阳站历年水文资料显示,涡阳建闸后洪枯期均可能出现年度闸上极低水位。年度极低水位在洪枯期成因不同,但均受到枢纽运行方式影响。以涡阳枢纽2013年闸上和闸下水位过程线为例,见图3。洪水期一般根据上游来流预报进行洪水预泄,以预留河道库容防洪,造成汛期极低水位在汛前或汛期出现,且历时较短。枯水期关闸高位蓄水,由于上游来水偏枯,加之流域生活、生产用水影响,造成闸上低运行水位情况。涡阳闸下水位受下游蒙城枢纽坝前水位影响,洪枯期水位变化规律与闸上类似,具有防洪水利枢纽的一般特性。可见枢纽运行、用水等人为因素是造成涡阳闸上、闸下低水位运行的主要成因。

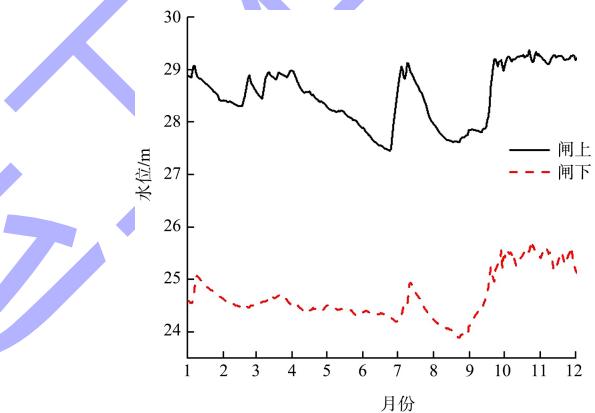


图 3 涡阳枢纽 2013 年闸上和闸下水位过程线

## 3 最低通航水位计算

### 3.1 水文系列选取

根据涡阳站、蒙城站1985—2020年闸上实测日均水位系列进行综合历时保证率统计,各年综合历时保证率98%的水位见图4。剔除2005—2008年枢纽改扩建期间非一致性水位计算结果后,涡阳闸上最低为24.99 m、最高为28.80 m,蒙城闸上最低为22.29 m、最高为24.85 m,差值均较大。结合图4的水位曲线对历年水文资料作进一步分析,闸上运行的低水位主要出现于枢纽建成初期,由于缺乏调度经验,洪水预泄时易造成闸上运行极端低水位。近年来,尤其是涡阳、蒙城枢纽改扩建后,由于节制闸工程质量的提高和调度资料、经验的积累,闸上控制水位逐渐升高并

趋于稳定。这说明 1985—2020 年低运行水位虽具有相同成因, 但一致性具有分时段的特点。

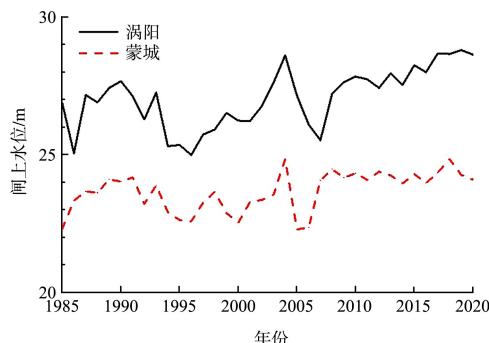


图 4 涡阳、蒙城闸上历年综合历时保证率 98% 水位对比

《内河通航标准》<sup>[7]</sup>规定, 资料不具有良好的一致性时, 应根据其变化原因及发展趋势, 确定代表性资料系列的取用年限。如严格按照水文资料一致性原则, 应对 2008 年之前的数据剔除后进行设计最低通航水位计算, 考虑资料剔除后水文序列年度较短, 不满足相关规范规定的资料年限要求, 且所包含洪枯年份较少, 资料代表性较差, 无法全面涵盖低运行水位出现的情况, 综合涡河流域丰枯交替特征、年度水位统计指标的相似性以及枢纽运行水位的变化趋势因素, 保留 1997—2004 年资料而形成 1997—2020 年 20 a 长水位序列进行最低设计通航水位计算, 上述水文序列所包含涡河流域典型洪水和枯水年份见表 2。

表 2 水文序列所含洪水和枯水年份对比

水位序列 年份	区间 年份	资料 年限/a	洪水 年份	枯水 年份
1997—2020	1997—2004	8	2000、2003	1999、2001
	2009—2020	12	2010	2013、2019

### 3.2 特征水位计算

拟建复线船闸等级为Ⅲ级, 采用综合历时曲线法求设计最低通航水位时, 通航保证率规范取值为 95% ~ 98%。根据涡阳、蒙城枢纽上游 1997—2020 年实测水位资料, 分别对设计最低通航水位所需各特征水位进行计算, 结果见表 3。涡阳、蒙城枢纽为无发电功能的航运枢纽, 其死水位应为保证枢纽航运功能的最低水位, 因此各枢纽死水位取一线船闸的最低通航水位。

表 3 涡阳、蒙城枢纽特征水位

枢纽	死水位/m	最低运行水位/m	95% 保证率水位/m	98% 保证率水位/m
涡阳	26.34	25.67	26.82	26.23
蒙城	22.82	22.49	23.49	23.31

与多数中低水头渠化枢纽运行过程中的最低水位为敞泄时水位的情况不同, 涡阳、蒙城枢纽最低运行水位均发生于极枯水期, 且运行持续时间较长, 此时段节制闸关闭蓄水, 无下泄流量。

### 3.3 上游最低通航水位

船闸上游设计最低通航水位应取枢纽死水位、最低运行水位和保证率水位中的低值。表 3 的涡阳枢纽死水位与 98% 保证率水位较为接近, 而最低运行水位与死水位相差近 0.8 m。而图 2 中 1997—2020 年水位箱体下边缘变化趋势显示, 上游最低运行水位随时间增加较明显, 近年来稳定在 28 m 左右。取死水位 26.34 m 作为涡阳复线船闸上游最低设计通航水位, 1997—2020 年的通航保证率可达 97.4%, 而 2008 年涡河枢纽加固扩建工程后通航保证率达 100%, 可实现全年不间断通航。

### 3.4 下游最低通航水位

船闸下游设计最低通航水位, 在下游有衔接梯级时, 应采用下一梯级上游设计最低通航水位回水到船闸的相应水位。表 3 的蒙城枢纽特征水位规律与涡阳枢纽类似, 取死水位 22.82 m 作为蒙城枢纽上游最低设计通航水位, 1997—2020 年和 2008 年后的通航保证率分别为 99.4% 和 100%。

1997—2020 年水文序列中蒙城闸上水位低于 22.82 m 的时间分布于极枯水期, 无下泄流量, 涡阳枢纽下游水位应为蒙城闸上死水位 22.82 m 平水至涡阳闸下。蒙城枢纽汛限控制水位下限为 24.32 m, 汛期预泄时回水至涡阳闸下水位已远超 22.82 m。因此取涡阳复线船闸下游最低设计通航水位为 22.82 m。

## 4 水位合理性分析

### 4.1 施工风险和工程投资

船闸最低通航水位作为闸首门槛、闸室底板

及引航道底高程的计算基准,直接影响到工程投资。涡阳枢纽建设场地位于城区,施工场地和条件受限较多,根据涡阳低水位特点及水位发展趋势,涡阳复线船闸设计最低通航水位采用高出最低运行水位的涡阳、蒙城枢纽死水位(即一线船闸最低通航水位),在满足规范规定的通航保证率要求的同时,在减小船闸基坑开挖深度和施工期风险的同时,也减少了船闸主体结构和引航道开挖工程量,降低工程总成本。

#### 4.2 枢纽间水位衔接

涡阳复线船闸设计最低通航水位采用上下游枢纽死水位可以满足与上下级梯级枢纽间新老船闸水位衔接的要求。近期涡阳下级蒙城枢纽已迁往原址下游 10.3 km 重建,设计蓄水位不变仍为 25.32 m,船闸等级为 VI 级,上游设计最低通航水位 22.39 m。为适应目前船舶大型化的发展趋势下船舶满载吃水较深的特点,蒙城新船闸设计门槛水深为 4.2 m,上游门槛高程为 18.19 m。设计涡阳枢纽下游门槛水深为 4.5 m,下游门槛高程为 18.32 m。考虑到两枢纽间水位 22.82 m 通航保证率已经为 99.4%,因此涡阳船闸下游设计最低通航水位取值能够保证与蒙城新闸间的水位衔接,实现枢纽间航运畅通。

#### 4.3 水资源调度影响

自 2008 年涡河近期治理工程投入使用后,流域蓄水量增加,洪枯期径流调节能力显著提高。经过多年的运行,包括涡阳闸在内的沿线枢纽管理、调度已趋于成熟,各枢纽上游水位在枢纽调节下基本保持在控制区间内运行。当前,涡河生态流量保障机制正逐步建立,非汛期关闸蓄水导致污染物质蓄积,为调节水质需要开闸维持一定的生态流量,加之伴随腹地经济发展生产、生活用水需求的增长,对枯水期水位会产生一定影响。考虑到引江济淮工程目前处于实施阶段,涡河为从淮河干流向皖北受水区引水的主要输水通道,工程实施后,可以在枯水期增供涡河控制受水区用水量,实现枯水期通航水深的有效控制。可以

预测在未来一定时期内,涡河沿线水位将在现状基础上小幅变化。

综合以上分析,本文的设计最低通航水位成果在满足通航保证率的同时具有较好的经济性,可以确保涡河梯级枢纽间水位衔接和船舶通航安全,并适应未来水资源综合利用和调度的要求。

#### 5 结论

1) 综合涡河流域丰枯交替特征、年度水位统计指标的相似性和枢纽运行水位成因和变化趋势等因素,选取 1997—2020 年(剔除枢纽改扩建年份)连续水位序列进行通航水位分析。

2) 与多数中低水头渠化枢纽不同,涡阳枢纽上游最低运行水位发生于极枯水期,受水位控制调节能力提高影响,近期运行水位区间逐渐抬升并趋于稳定。

3) 经过综合分析,选取涡阳、蒙城枢纽死水位作为涡阳枢纽上下游设计最低通航水位依据,并考虑水位运行工况时回水影响,最终得到闸上、闸下设计最低通航水位分别为 26.34、22.82 m,满足安全性与经济性的要求。

#### 参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 彭厚德, 周千凯. 径流式枢纽改扩建船闸确定最低通航水位的方法[J]. 水运工程, 2019(3): 62-66.
- [3] 姜兴良, 吴志龙, 邹开明. 枢纽扩建船闸工程上游设计最低通航水位的确定[J]. 水运工程, 2019(3): 47-51.
- [4] 徐军辉, 王平, 刘长波. 临淮岗复线船闸设计最低通航水位分析[J]. 水运工程, 2020(6): 137-141.
- [5] 王景深, 韩新庆. 涡河流域水文特征分析[J]. 治淮, 2007(7): 21-22.
- [6] 姜枫. 在涡河涡阳闸枢纽工程管理中的几点体会和作法[J]. 商情(财经研究), 2008(5): 100.
- [7] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

(本文编辑 王璁)