

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221986

外江潮位变化背景下望虞河沿江泵站 设计参数优化探究

柳子豪, 钟 粟, 陈 晔, 秦 灏, 吴心艺, 汪院生

(江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215006)

摘要: 望虞河是太湖流域北排长江的重要通道, 多年实测水文资料表明, 在望虞河进行排水调度时, 启用泵站排水的机会占比可达总排水时间的 25.9%, 这表明望虞河沿江泵站在流域防洪体系中发挥着重要作用。结合水泵特性曲线计算表明, 望虞河沿江泵站现状设计扬程(2.5 m)较实际运行扬程偏高, 其中泵站排水能力超出装机设计流量 20.0% 的运行时间占总排水时间的 65.9%。依据泵站设计规范和相关地方标准, 结合水文资料分析, 建议将泵站设计扬程调整为 1.78 m。优化后的设计扬程更符合泵站实际运行环境, 同时可以减少电耗等泵站运行成本, 延长泵站使用寿命, 对于望虞河工程效益的发挥具有重要意义。

关键词: 太湖流域; 望虞河; 泵站; 排水; 设计扬程; 优化

中图分类号: TV61

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)08-0131-04

1 概况

望虞河是沟通太湖和长江的流域性骨干引排河道, 河流南起太湖沙墩口, 至耿泾口入长江, 全长 60.3 km, 承担着泄洪、排涝、引水等重要功能^[1]。根据《太湖流域防洪规划》(2008), 遇 1954 年型洪水时, 在年内 5~7 月需通过望虞河承泄太湖洪水达 $23.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占太湖外排水量的 51%^[2]。常熟水利枢纽是望虞河连接长江的控制性水工建筑物, 由泵站、节制闸和船闸等组成, 其中泵站安装 9 台套泵机组, 单机流量为 $20 \text{ m}^3/\text{s}$, 总抽水能力 $180 \text{ m}^3/\text{s}$ 。根据太湖流域综合治理总体规划, 遇流域洪水, 望虞河须承泄太湖洪水经常熟水利枢纽排入长江。在常熟水利枢纽进行排水调度期间, 当闸排受限时, 沿江泵站就发挥了至关重要的作用^[3]。根据常熟枢纽管理所对近年来望虞河沿江泵站排水调度运行情况的反馈, 目前泵站实际运行扬程明显低于设计扬程。相关研究表明, 当泵站运行扬程远低于设计扬程时, 会造成泵站在运行过程中汽蚀振动严重, 气蚀余量增大, 损害泵站自身结构, 造成泵站使用寿命降低^[4,5]。因此, 本文针对望虞河沿江泵站运行中的实际情况, 根据望虞河闸上、下游实测水文资料, 分析泵

站运行效益情况, 并依据泵站设计标准与相关规范, 结合近年来泵站实际运行环境, 对泵站的设计扬程提出优化建议, 旨在为后续泵站提升改造提供参考。

2 研究资料及方法

2.1 实测水文资料

沿江河道内河水位与外江潮位的差异性变化, 是评价河道防洪排涝环境的基础。研究重点搜集了近十年望虞河闸上内河水位(望虞闸(闸上游)站)与闸下外江潮位(望虞河(闸下游)站)实测水文资料, 时间步长为 5 min。各水位、潮位站点分布位置见图 1。

2016 年, 太湖流域发生流域性特大洪水事件, 在洪水期的 5 月 27 日至 9 月 4 日, 太湖最高水位达 4.87 m, 该时期望虞河闸上内河平均水位与闸下外江最高潮位过程线见图 2。

2.2 望虞河沿江泵站设计参数

对于泵站不同类型的特征扬程, 设计扬程按泵站进、出水池设计运行水位差计算, 并计入水力损失。最高扬程按照泵站出水池最高运行水位与进水池最低运行水位差, 并计入水力损失确定。平均扬程则通过计算加权平均净扬程, 并计入水

收稿日期: 2022-09-23, 修回日期: 2022-10-13

基金项目: 江苏省水利科技项目(2020008)

作者简介: 柳子豪(1994-), 男, 博士、工程师, 研究方向为水利规划、水利设计与水科学, E-mail: zihao2018@sina.com

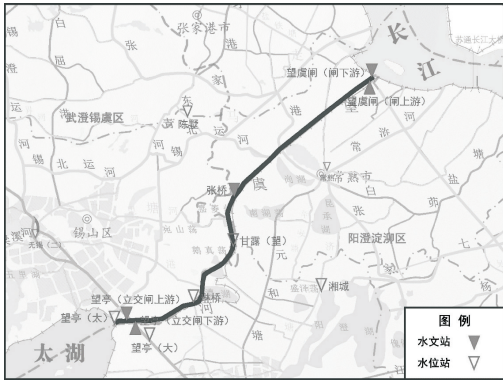


图 1 望虞河沿线水文站点分布示意图

Fig. 1 Distribution of the hydrological stations along the Wangyu River

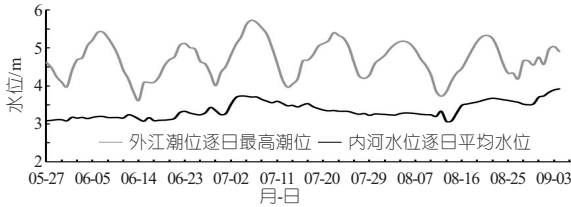


图 2 2016 年洪水期望虞河闸上、下游内河水水位与外江潮位变化

Fig. 2 Variation of water level and tidal level in the upper and lower reaches of the Wangyu sluice in the flood period of 2016

力损失确定,计算公式为:

$$H = \sum t_i H_i Q_i / \sum Q_i t_i \quad (1)$$

式中, H 为加权平均净扬程, m ; H_i 为第 i 时段泵站进出水池运行水位差, m ; Q_i 为第 i 时段泵站流量, m^3/s ; t_i 为第 i 时段历时, d 。

根据泵站特征扬程计算原则,在排水工况下,现状望虞河沿江泵站平均扬程为 $0.92 m$;设计扬程为 $2.50 m$;最高扬程为 $3.15 m$ (该特征扬程计算中,拦污栅水头损失及机械、管路损失未考虑在内)。

2.3 研究方法

根据望虞河闸上内河水水位、闸下外江潮位等实测水文资料进行对比分析,判断望虞河排水调度时期泵排机会,并结合泵站特征扬程参数,对望虞河泵排时期闸上下游潮位特征进行分析。在此基础上,结合望虞河沿江泵站水泵特性曲线,对泵站启用期间排水能力开展分析。通过与泵站装机设计流量进行对比后,综合阐述泵排时期泵站工程效益,进而提出对望虞河沿江泵站设计扬程的优化建议。

3 结果与分析

3.1 望虞河排水调度时期泵排机会

对于望虞河进行排水调度的时机,在《太湖流

域洪水与水量调度方案》^[6]中有明确规定,当太湖水位高于防洪控制水位时,望虞河进行排水调度,其中当望虞河内河水水位高于外江潮位时,进行闸排;望虞河内河水水位低于外江潮位时,进行泵排。结合 2013~2020 年时间步长为 $5 min$ 的望虞闸(闸下游、长江侧)、望虞闸(闸上游、望虞河侧)水位过程资料进行差值对比与统计,计算得到望虞河排水调度时需启用泵站进行排水的时间,进而分析望虞河进行排水调度时间、泵的启用机会,见表 1。

表 1 望虞河排水调度时期沿江闸门、泵站排水机会

Tab. 1 Drainage opportunities of sluice and pump station during the drainage period of the Wangyu River

年份	排水机会			排水机会占比	
	闸排时间/h	泵排时间/h	合计/h	闸排	泵排
2013	253.3	82.8	336.0	0.75	0.25
2014	90.0	30.0	120.0	0.75	0.25
2015	611.2	276.8	888.0	0.69	0.31
2016	1 570.4	565.6	2 136.0	0.74	0.26
2017	/	/	/	/	/
2018	/	/	/	/	/
2019	151.2	40.8	192.0	0.79	0.21
2020	824.2	303.8	1 128.0	0.73	0.27

注:“/”代表该年度太湖水位没有高于防洪控制水位的时段。

当望虞河进行排水调度时,节制闸自排与泵站排水多年平均占比分别为 74.1% 、 25.9% ,表明在望虞河进行排水调度期间,遭遇外江潮位高于内河水水位的几率较大,接近 30% ,利用泵站进行排水的机会较多。在流域洪水事件发生的 2015、2016、2020 年,望虞河进行排水调度的时间达到 $1 384.0 h/a$,该时期进行泵排的排水机会占比达到 28.2% 。其中在 2016 年洪水期,太湖水位上涨迅猛,7 月 8 日太湖水位上涨至 $4.87 m$,仅次于 1999 年的历史最高水位。在 7 月 3~10 日,望虞河进行排水期间,常熟水利枢纽通过节制闸自排和泵站排水的机会占比分别为 67.5% 、 32.5% ,泵排时间占比较多年平均更高,这表明当遭遇流域性洪水事件时,沿江排水条件可能更为恶劣,相应地利用泵站进行排水的几率和需求也更大。

3.2 望虞河泵排时期闸上下游潮位特征

在望虞河利用泵站进行排水调度时,闸上内河水水位与闸下外江潮位的差值是泵站的实际运行扬程。分析结果表明,在 2013~2020 年,使用泵站进行排水时,望虞河闸上内河水水位与闸下外江潮位平均差值为 $0.58 m$,远低于泵站设计扬程 ($2.50 m$);最大差值为 $1.94 m$,发生在 2016 年,这表明即使在流域发生特大洪水事件时,望虞河沿江泵站的实际运行扬程也明显低于现状设计扬程(表 2)。

表 2 望虞河泵排时期期间上水位、闸下潮位特征值

Tab.2 Characteristic values of water level and tidal level in the upper and lower reaches of the Wangyu sluice during the drainage period of the pump station

年份	望虞闸上内河水位/m			望虞闸下外江潮位/m		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
2013	3.83	3.34	3.69	4.70	3.37	4.11
2014	3.73	3.53	3.65	4.68	3.56	4.05
2015	4.61	2.64	3.68	5.38	2.64	4.31
2016	4.65	2.60	3.70	5.73	2.66	4.27
2017	/	/	/	/	/	/
2018	/	/	/	/	/	/
2019	4.05	3.04	3.59	4.93	3.06	4.06
2020	4.60	3.36	3.81	5.71	3.43	4.44

注:“/”代表该年度太湖水位没有高于防洪控制水位的时段。

3.3 望虞河泵排时期工程效益

望虞河沿江泵站实际运行扬程与泵站排水能力之间的水泵特性曲线见图 3。根据望虞河沿江泵站在实际运行环境中闸上内河水位与闸下外江潮位的差值,计算分析了在泵站启用期间的排水能力,结果见表 3。

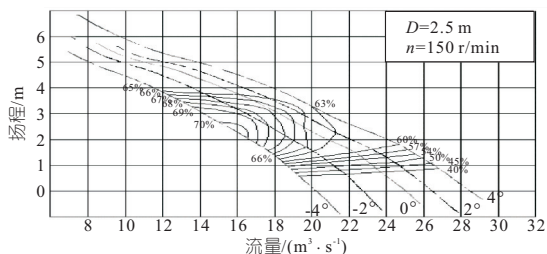


图 3 望虞河沿江泵站现状水泵特性曲线(设计扬程为 2.50 m)

Fig.3 The characteristic curve of the pump of the Wangyu River (the designed lift is 2.50 m)

表 3 望虞河泵排时期泵站不同排水能力运行情况

Tab.3 Operation of pump station with different drainage capacities during the drainage period

年份	泵站不同排水能力运行时间/h				运行时间占比/%		
	20~22	22~24	>24	合计	20~22	22~24	>24
2013	0.0	22.7	60.1	82.8	0.0	27.4	72.6
2014	0.0	5.6	24.4	30.0	0.0	18.6	81.4
2015	4.3	22.5	250.0	276.8	1.5	8.1	90.3
2016	3.7	223.4	338.5	565.6	0.6	39.5	59.8
2017	/	/	/	/	/	/	/
2018	/	/	/	/	/	/	/
2019	0.0	21.1	19.7	40.8	0.0	51.7	48.3
2020	0.0	140.2	163.6	303.8	0.0	46.1	53.9

注:“/”代表该年度太湖水位没有高于防洪控制水位的时段。

在望虞河沿江泵站启用期间,泵站排水能力超出装机设计流量 20%(>24 m³/s)的运行时间为 856.3 h,占总泵排时间的 65.9%;泵站排水能力超出装机设计流量 10%~20%(22~24 m³/s)的运行时间为 435.5 h,占总泵排时间的 33.5%;泵站排水能力超出装机设计流量 0~10%(20~22 m³/s)的运行时间仅为 7.9 h,占总泵排时间的

0.6%(表 3),这说明近十年来望虞河闸上内河水位与闸下外江潮位差值较小,远低于泵站现状设计扬程,这也使望虞河沿江泵站可以发挥更大的排水能力,实际过泵流量明显超出设计流量。

在望虞河利用泵站排水时,闸上内河水位与闸下外江潮位之间多年平均差值仅为 0.58 m,远低于泵站现状设计扬程(2.5 m),这使得在实际运行中,望虞河沿江泵站可以发挥超出装机流量(20 m³/s)的排水能力。在望虞河泵排时期,泵站排水能力在 24 m³/s 的运行时间为 856.3 h,占泵站总运行时间的 65.9%。这些数据反映了在现状泵站设计扬程下,望虞河沿江泵站的排水能力远超设计流量,不利于工程效益的长期稳定发挥^[2]。因此,根据望虞河闸上、下游多年实测水位、潮位资料,依据《泵站设计标准》(GB 50265-2022)^[7]等国家标准,以及《关于确定湖西引排、武澄锡引排沿江枢纽有关水位设计标准确定的通知》^[8]等地方要求,对望虞河沿江泵站的特征扬程重新进行了计算,结果表明:①泵站平均扬程。望虞河闸上内河侧平均运行水位通过望虞河泵排时期内河侧常熟枢纽站前平均水位计算得到,为 3.72 m;望虞河闸下长江侧平均运行水位通过望虞河泵排时期长江侧平均潮位计算得到,为 4.30 m,净平均扬程为 0.58 m。②泵站最高扬程。望虞河闸上内河侧最高运行水位通过警戒水位 3.80 m 推算至站前水位计算得到,为 2.80 m;望虞河闸下长江侧最高运行水位通过 1%连续最高 7 d 平均高潮位计算得到,为 5.31 m,净最高扬程为 2.51 m。③设计扬程。望虞河闸上内河侧设计运行水位通过腹部设计排涝水位 3.80 m 推算至站前水位计算得到,为 3.31 m;望虞河闸下长江侧设计运行水位通过 5%连续最高 4 d 平均高潮位计算得到,为 5.09 m,净设计扬程为 1.78 m,较现状设计扬程降低 0.72 m。

根据望虞河闸上、下游实测水文资料计算分析,建议将望虞河沿江泵站设计扬程调整为 1.78 m,相比泵站现状设计扬程(2.50 m)更低。在后续泵站提升改造中,调整优化后的设计扬程一方面可以提高泵站的有功功率,减少泵站运行时的电耗成本;另一方面也会增加泵站的装置效率,尽可能维持泵站在高效区运行,这在很大程度上延长了泵站的使用寿命。

4 结论

a. 近年来望虞河排水调度时,泵排机会占比

较高。但泵站实际运行扬程远低于设计扬程,这使得启用泵站时实际过泵流量较装机流量明显超出。

b. 过高的泵站设计扬程并不利于工程效益的有效发挥,根据相关规范标准,结合实测水文资料分析,建议将望虞河沿江泵站设计扬程调整为 1.78 m,以进一步提高泵站有功功率和减少运行成本。

参考文献:

[1] 胡琦玉,杨道军. 平原河网区闸控河段入河排污口水环境影响分析及优化调度方案研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(1):63-66.

[2] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域防洪规划[R]. 上海:太湖流域管理局,2008.

[3] 高兴和,吴忠,陈晔. 太湖通江大型水利枢纽工程关键技术研究与应用[J]. 水利规划与设计, 2020, (12):147-150,157.

[4] 于建忠,陈晔,朱颖,等. 最高扬程与平均扬程相差较大的特低扬程泵站选型研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5):68-76.

[5] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域综合规划[R]. 上海:太湖流域管理局,2013.

[6] 国家防汛抗旱总指挥部. 太湖流域洪水与水量调度方案[R]. 北京:国家防汛抗旱总指挥部,2011.

[7] 中国住房和城乡建设部. 泵站设计标准:GB 50265-2022[S]. 北京:中国计划出版社,2022.

[8] 江苏省水利厅. 关于确定湖西引排、武澄锡引排沿江枢纽有关水位设计标准确定的通知[R]. 南京:江苏省水利厅, 1997.

Optimization of Design Parameters of Pumping Station in the Wangyu River Under Tidal Level Change of the Yangtze River

LIU Zi-hao, ZHONG Li, CHEN Ye, QIN Hao, WU Xin-yi, WANG Yuan-sheng

(Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215006, China)

Abstract: The Wangyu River is an important watercourse connecting the Yangtze River and Taihu Lake. Relevant hydrological data shows that the pumping opportunity can account for 25.9% of the total drainage period from the Wangyu River to the Yangtze River, which indicates that the pumping station plays a crucial role in the drainage period of Taihu Basin. The current design lift (2.5 m) of the pumping station is higher than the actual operating lift, and the running time of the pumping station exceeding 20% of the installed designed capacity accounts for 65.9% of the total operation time. According to the design specifications of the pumping station and relevant local standards, combined with the analysis of the hydrological data, it is recommended to adjust the design lift of the pump station to 1.78 m in the subsequent upgrading of the pumping station. The optimized design lift is more compatible with the actual operating environment of the pumping station, and it also reduces the operating costs of the pumping station such as power consumption, and prolongs the service life of equipment, which is of great significance for the overall benefits of the Wangyu River Hydro-junction.

Key words: Taihu Basin; the Wangyu River; pumping station; drainage; designed lift; optimization

(上接第 142 页)

Numerical Simulation of Falling-sill Dissipation Characteristics of Terminal Drainage Outlets in Mountainous Cities

MAO Jun¹, HUANG Heng-yue¹, CHEN Yao¹, LIU Fei¹, YUAN Shao-chun¹, GAN Chun-juan²

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Municipal Research Institute of Design Co., Ltd., Chongqing 400012, China)

Abstract: When the source-based reduction facilities cannot be carried out during the construction of sponge city, the stormwater control measures (SCM) are usually set up at the terminal drainage outlets to achieve the goal of runoff control and pollutant reduction. Because there is usually large drop between the drainage outlet and the waterfront zone in mountain city, resulting in a high flow rate of water from the drainage outlets, it is easy to cause strong hydraulic erosion to the SCM and may adversely affect their normal operation. Based on the falling-sill dissipation facility installed according to the high drop topographic features of drainage outlets in Chongqing urban, the numerical model with FULENT software was constructed to simulate the hydraulic process of different energy dissipation configurations in this study. The results show that the solid-baffle typed falling-sill dissipation facility has out-performance energy dissipation, and the energy dissipation rate was as high as 90%, and the outlet velocity of the end of facilities was irrelevant to the inlet flow, while only related to single drop height. The higher the single drop height, the water flow was susceptible to form a hydraulic vortex in the backwater area of falling-sill under the influence of potential energy, which can lead the greatest extent of turbulence kinetic energy dissipation, and finally result in a gradual decrease of the maximum pressure of water flow in the horizontal direction to achieve the targeted hydraulic energy dissipation.

Key words: stormwater control measures; falling-sill dissipation; dissipation configuration; energy dissipation rate; numerical simulation