

新沟河江边水利枢纽工程 关键技术研究与应用

吴 忠¹, 高兴和², 陈 晔²

(1. 江苏省太湖治理工程建设管理局, 江苏 南京 210029;
2. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128)

摘要:新沟河将太湖与长江联通,为最大限度地实现太湖通江综合利用功能,针对通江大型水利枢纽工程特点和复杂条件,利用科研课题或专题研究、设计研发、模型试验验证与优化等手段,对项目多功能综合利用、规模比选论证、控制与调度、选址与布局优化、水工结构和机泵设备研发创新等关键技术进行重点研究,获得了成功应用于本工程的多个具有推广应用价值的重大关键技术。

关键词:江湖联通; 通江大型水利枢纽; 关键技术; 新沟河; 太湖; 长江

中图分类号:TV544 **文献标识码:**B **文章编号:**1007-7839(2020)S2-0008-05

Research and application of key technology in Xingou riverside water conservancy junction project

WU Zhong¹, GAO Xinghe², CHEN Ye²

(1. Jiangsu Province Taihu Governance Project Construction Administration, Changzhou 213000, China;
2. Jiangsu Taihu Planning and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Suzhou 215128, China)

Abstract: Xingou River connects the Taihu Lake with the Yangtze River. In order to maximize the comprehensive utilization of the Taihu Lake connection with the Yangtze River, according to the characteristics and complex conditions of the Tongjiang large-scale water conservancy project, methods such as scientific research topics or special research, design research and development, model test verification and optimization and other methods were used to conduct key research on key technologies such as multi-functional comprehensive utilization of the project, scale comparison and selection, control and scheduling, site selection and layout optimization, hydraulic structure and pump equipment R&D and innovation, and several key technologies which were of popularization and application value that had been successfully applied in this project were obtained.

Key words: hydrological connectivity; Tongjiang large-scale hydro-junction; key technology; Xingou River; Taihu Lake; the Yangtze River

新沟河江边水利枢纽由五孔中型拦河挡潮水闸($2 \times 8 + 16 + 2 \times 8 = 48$ m)、大(2)型双向泵站($Q_{\text{排(引)}} = 180(90) \text{ m}^3/\text{s}$)、V级船闸(16 m \times 180 m)和长廊道多隔仓鱼道(宽 2 m)组成,具有引排改善

水环境、挡潮、防洪、排涝、航运及生态保护等综合功能。

工程呈南北走向,位于江阴市滨江村新沟河入江口。闸站和船闸分居东西两侧,隔堤衔接。水闸

收稿日期:2020-07-06

作者简介:吴忠(1969—),男,高级工程师,主要从事水利工程建设管理工作。

在西侧,鱼道依附其西岸;泵站在东侧,单向泵靠岸、双向泵临闸。闸、站、鱼道与船闸下闸首并列,与下游翼墙及江堤衔接形成沿江挡潮防洪线。管理区分居东、西两岸,内外道路相通。

1 工程条件及特点

工程位于“长三角”和“苏南”最发达地区,是太湖流域和江苏水利“十三五”期间重点和收官项目。工程将太湖与长江联通,是当时江苏省沿江在建水利工程中条件最局限、技术最复杂、实施难度最大的大型通江水利枢纽工程。

1.1 水文工况条件

江潮涨落动态多变,与内河相对稳定水位形成的双向水头,是“防洪排涝”和“调水引流”天然动力。工程双向运行与控制运用具有明显季节特点,汛期排江、非汛期引江济太为常态;非旱非涝时,引排双向运行,“调水畅流”为主要运行工况。

1.2 地形地质条件

地处苏南经济发达地区,人口密集,土地资源十分珍贵,沿江冲积平原地貌,地势平坦;建筑物基坑及地基为富含承压水的松散砂性土,渗透系数 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s,标准贯入击数12~18击,地基允许承载力140~180 kPa,土体抗剪强度和承载能力一般,典型的沿江砂性透水软弱土地基。

1.3 水力衔接与结构布置条件

工程紧邻滨江大桥,船闸与集中布置的闸站并列分建,建筑物总宽大于河宽,两岸布置局限,入江滩面淤积宽浅,上下游存在弯道和渐变水力衔接;站房临空高度45 m,岸墙挡土高度16~18 m,闸站多层结构复杂、体量高大,以及船闸整体U型闸室结构,均属于水工大体积钢筋混凝土结构。

1.4 专业衔接及施工特点

工程涉及水工、水力机械、金属结构、电气及自动化、房建、道路桥梁和市政绿化等多个专业,工程交叉和衔接错综复杂;分期实施的基坑需双向截渗;施工期跨多个汛期需度汛;主基边坡高于15 m,属饱和砂性软弱土上的高边坡、深基坑^[1];机泵安装非常规条件,试运行条件局限。

2 关键技术研究与应用

项目利用无锡、常州境内老河道进行拓浚整治,将长江和太湖2个超大型水源相互联通,通过口门控制,利用潮差并渗透人为干预,获得双向水头,形成往复水流,使得太湖流域河网水体按治理

需要有序流动,从而达到改善水环境和防洪、除涝等目的,实现江湖联通的各项综合功能。江边枢纽工程是新沟河通江达湖最重要的龙头口门,是保证太湖及其内陆河道适宜水位并抵御长江洪潮的重要屏障,是全面实现新沟河综合功能最重要和最有效的控制性工程。为最大限度地实现太湖通江综合利用功能,针对通江大型枢纽工程特点和复杂条件,利用科研课题或专题研究、设计研发、模型试验验证与优化等手段,对项目各专业关键技术进行了重点研究,获得了成功应用于本工程且具有推广应用价值的多个重大关键技术。

2.1 水功能多模型耦合一体化技术

采用太湖流域河网湖泊水量水质模型、太湖与长江二维水流水质数学模型等完全耦合一体化技术^[2],重点分析典型年型实况下,工程实施对水环境、排水出路、供水与防洪效益的影响和实施可行性。根据降雨径流模型成果及负荷模型废水排放量,河网水质模型模拟成果,耦合计算,加上引、排作用,模拟河网水流运动;利用水量模型水文条件和污染负荷模型负荷量,模拟河网水体水质;并采用丹麦Mike21软件建立长江水域二维水流水质数学模型,模拟排江水质影响。经耦合优化的成果,更真实反映流域河网各项水功能要素情况,符合江湖河网实际。项目实施将增大区域北排长江能力,有效削减入湖污染,促进西太湖3个湖湾水体交换,改善湖湾和区域河网水环境,保障饮用水源地供水安全,生态、经济和社会效益显著。该技术为太湖流域通江河网综合功能研究和可行性分析开创了先例,提供了新思路、新方法。

2.2 选址布局优化及数模验证

前期拟定选址涉及高等级变电所及输电线路搬迁,实施难度大。初设阶段,按避让优化调整:将枢纽向东偏移,并缩小闸站与船闸间距和隔堤宽度,增设截渗墙,解决深基坑双向防渗问题,可减少征地90 000 m²,节省投资1.79亿元(占比25%),工程布局相对更为紧凑、合理和经济,优化效果与效益显著。

总体布置中,闸站按“浅基础靠岸、深基础居中、阶梯型高差”布置型式,将衔接高差呈阶梯型分级,大大节省单、双向泵进出水池与护岸之间高差衔接工程量。施工图阶段,通过“数模优化研究”,进一步优化并验证工程总布局,增设隔水、导流及截渗设施后,工程区域各工况水流流态良好,分期基坑防渗安全可靠,引排和航运安全指标均符合规

范要求,工程选址与布局更趋经济合理、安全可行。

2.3 控制运用方式与安全运行指南

本工程闸门控制采用升卧式与直升式钢闸门组合:节制闸中孔兼顾通航采用升卧门,两侧边孔设胸墙采用直升门;船闸为升卧门组合直升门输水方式。手动与自动控制,操作简便且灵活机动,设备选型经久耐用,安装简便,工程结构和设备维护、管理和检修更为方便快捷,更能适应沿江潮位频繁多变的双向挡洪泄流及通航等复杂运行工况要求。

沿江口门控制后,顺向水头时,内外随潮位涨落可获得双向自流条件,逆向水头时,关闸开泵,全天候可实现双向引排或拦蓄功能。相对于泵站提水,水闸运行效率更高,能耗低,更经济。适应潮位动态变化,沿江水闸调度运用原则为:双向运行、适时启闭、适量过流、动态控制^[3]。研究并用足闸站综合功能,意义重大,工程交付使用后,专题研发了水闸引排安全泄流计算与绘图软件,并利用该软件进一步编制形成沿江工程安全运行指南。该成果可操作性强,对沿江口门控制运用具有普遍和直接指导作用。

2.4 高刚度 T 型高支挡结构研究与应用

为解决单、双向泵下游较大高差衔接以及深基坑、高边坡防渗和永久支挡等关键技术问题,研究了砂性软土地基上临时、永临结合和永久型 3 种断面型式高支挡结构,其核心技术为结构组合变形技术,由液压抓斗成槽、地下 T 型地连墙紧密连续而成。

专题研究^[4]以“扶壁式”和“T 型”钢筋混凝土结构原理、地下桩土共同作用的悬臂式结构理论和成熟的地连墙技术为研究基础,侧重于提高结构刚度和抗弯承载能力,将薄壁地连墙变形重组,形成“T 型”高刚度、高支挡结构。理论研究和实践证明,结构功能技术指标满足规范要求,达到预期效果;其扶壁体增大刚度、减小变形^[5]和提高承载力等作用显著,支挡、防渗、整体性和耐久性等性能优异,其免(少)挖填特性,节约工期和用地,避免边界矛盾,适应软土类各种边界条件,结构尺寸可调,组合多变,经济实用,后续仍有组合预应力技术研发价值。可继续在水利、水运行业的地下、临水高支挡工程中广泛推广和应用。

2.5 “双廊道组合底流输水的闸首”优化与应用

低水头时,直接开启主门底输水,高水头时,短廊道对冲输水;结合桩基布置,借助计算机辅助设计,利用已有成熟坞式结构,对其墩墙进行优化与改进,形成对称空箱结构,搁置于桩基上,廊道位

于下部空箱内,上部空箱作为控制楼基础,既满足闸首结构布置需要,大大改善结构受力条件,又兼顾输水廊道功能和生产用房与上部结构和空间之间的衔接要求,工程结构布置紧凑,功能齐备。该结构的优化,综合解决了闸首地基处理、船闸输水、对冲或底流消能、防冲、控制楼载体以及上下空间衔接和交通沟通等功能性技术问题,控制运行灵活、简便。已在走马塘、新沟河、新孟河等通江大型枢纽中得到广泛应用。

2.6 大跨度整体闸室结构优化

船闸闸室高 8.5 m,底板宽 20 m,高宽比小,跨度大。结合沿江粉砂土地质特性,采用水泥搅拌桩复合地基上整体坞式结构^[6],具有整体性好、刚度大、地基应力小以及抗渗性能好、结构简单、施工方便等显著优点。通过梯级加深复合地基、预留沉降、设置后浇带、组合式止水、分期回填和回升地下水位等一系列简易可行措施,加上变截面优化处理和大体积混凝土抗裂控制措施,不但节省工程投资,而且有效解决大跨度整体结构抗裂以及基础处理、防渗、抗浮、稳定和沉降等一系列功能性问题,经实践检验,达到预期既经济又安全的效果。本工程仅按常规方法进行了优化,未能尝试“非常规”结构研究,如条件许可,类似工程可将“预应力”技术引进大跨度水工结构中,为水(地)下大跨度结构研究尝试新方法、开拓新思路。

2.7 大体积混凝土抗裂防治措施研究与效果

本工程主体结构体量大,属大体积混凝土,需采取温控和抗裂措施,降低内部温升,控制内外温差,避免产生温度裂缝。针对一期闸室大体积混凝土结构,在分析裂缝成因和大体积特征基础上,通过改善地基约束条件、优化结构体量并采取布管通水冷却^[7]、掺抗裂外加剂以及配置温度钢筋等多个设计措施加以控制,结合施工环节自拌混凝土原材料^[8]及配合比控制、温度控制及监测、浇筑及养护等控制措施,有效降低大体积结构内部温升,控制内外温差符合规范要求;二期闸站大体积结构继续落实各项抗裂措施,达到预期效果。实践证明,通过设计和施工两个环节的多重有效控制,研究和采取的措施行之有效,取得了理想的实施效果,获得了宝贵的抗裂实践经验^[9]。

2.8 “双竖缝多隔仓双向洄游鱼道”设置效果

鱼道是供鱼类洄游过闸的人工水槽通道,满足鱼类上溯习性,在低水位侧,鱼类依靠水流吸引,逆流进入,克服流速溯游至高水位侧。在对沿江过鱼

种类、生物学特征、生态特点及鱼类习性和行为学等进行深入调研基础上,结合运行工况和水闸结构设计,鱼道依附水闸及上下游翼墙布置,采用“长槽型双侧竖缝多隔仓”结构,将狭长水槽上、下游总水头,通过多个竖缝和隔仓,分成若干个小的梯级,利用水垫、沿程摩阻、水流对冲、回旋和扩散来消除水头能量,并形成各种鱼类喜好的流速动态变化的溯游水流。

经专题调研和数模验证^[10],“鱼道布置与体型设计,符合长江口双向过鱼水文特性,过流参数符合鱼种习性,满足鱼类洄游需要”。工程建成后,经动态观察,洄游季节各鱼种往复溯游频繁,设施运行有效。该结构构造简单,尺寸可变,施工简便,具有通用性,江苏沿江鱼道可广泛应用。

2.9 机泵选型与装置模型优化试验与研究

经综合比选,采用立式开敞式轴流泵,电机与水泵竖向布置,结构简单,制造、安装技术成熟,运行可靠,维修方便,运管经验丰富;双向泵采用平面蜗壳式进水流道,锥形管轴向管口四周出水方式,正、反向运行效率一致,流道几何形状简单,施工方便,且泵型为抽芯结构,与电机直联,轴向力由电机承受,安装、维修方便,运行可靠;单向泵为钟形进水流道,挖深小,底板面与双向泵箱涵式流道一致,单、双向泵进出口断面相同,整座泵站结构统一,施工更简便。

水泵装置 CFD 优化及试验研究^[11],对流道三维湍流进行数值模拟和优化,使流道型线更优,水泵装置最高效率提高 1.3%~1.9%,进一步提升泵型性能,节能降耗;同时,综合考虑流速分布均匀度及其水力损失两个目标函数,对双向流道喇叭口高度进行多方案优化^[12],当进口高为 0.57 D (D 为叶轮直径),水力损失小,流速分布均匀度最好;出口高度为 0.48 D 时,对流道水力性能影响为最优。将优化的双向流道配置优选泵型,进行装置模型试验,在低扬程 3.26 m 时,装置效率达 71.2%,可为同类型泵装置优化提供参考。

2.10 双速电机研究与推广应用

双速电机技术特点是通过机组变速调节,使机组具有不同转速,从而有效调节水泵高效区。同步电机变极调速难点为转子变极,按“虚拟槽”理念,将凸极转子看作隐极转子圆周表面均匀分布的齿槽,遵循两种极数下绕组系数最大,谐波含量最少且保持转子凸极结构不变的原则,用迭代法不断构建转子变极方案。其核心技术即“虚拟槽位

法”^[13],导体利用率高,谐波含量低。根据测试结果,引、排设计工况下水泵装置效率分别提高 8.1% 和 9%,可节省 18%、8% 电费,节能效果明显。本项目研究与应用,解决了双向泵扬程变幅大、工况复杂、电机高效运行及结构与设备互换性等关键技术问题,为泵站新建或更新改造直接更换双速电机创造了条件,可在机泵领域推广应用。

2.11 机电设备非常规安装及试运行技术研究

因度汛需要,工程提前通水,使机电设备获得水下非常规安装^[14]与试运行实践。泵站 6 台立式机组,设备总高 15m。按预设检修工况,分 3 批、2 个块体各一台机组同期对称安装方法,自下而上分层安装,利用工作闸门挡水,泵室设泵抽排,形成安装环境。不同于常规条件,站外江潮涨落形成双向动态多变水头,加上泵室排空水体后浮力作用,站身重心动态变化,且随机组不同而存在较大差异,而机泵轴向高度大,微小变形便会影响安装精度。根据已有经验^[15],机泵高精度安装须顺应潮位规律,在潮差较小相对平稳条件下进行,并经连续多天多潮位反复调试和监测验证,直到各安装参数及指标精度符合要求为止。

机泵安装完成后,需进行试运行调试。对分批具备条件的机泵,充分利用汛期和非汛期内河高低不同水位和长江动态变化潮位条件,择机打开水闸,采用打循环水的方法,获得机泵双向连续试运行工况,直至满足要求,经反复调试,顺利完成非常规机泵安装和试运行,验收一次通过,投入运行一切正常。

3 关键技术应用总体效果与效益

工程批复概算总投资 54 935 万元。2013 年 12 月 26 日开工建设,2018 年 6 月全面完工投入使用,主体水下工程已不可见,水上建筑跨河凌空,体量宏大,体型庄重且气势磅礴,工程内外道路、景观、绿化相互衔接与点缀,使得工程环境与总布局优美和谐,俨然一幅以大型水利为主题的美丽图画,已成为苏南沿江现代大型水利风景名胜与名片。

截至发稿时,闸排累计 33 985 万 m^3 ,闸引 2 585 万 m^3 ;泵排 3 519 万 m^3 ,泵引 8 998 万 m^3 ;通航 2 919 万 t。工程已历经 2 个汛期和非汛期考验,建筑物及设备运行正常,引排顺畅,控制有效,总体运行状况良好;在全寿命期内,江湖联通控制运用,可获得改善水环境多年平均效益 27 995 万元/a,防洪除涝 25 125 万元/a;水资源综合利用

11 755 万元/a,通航 1 050 万元/a,综合效益合计为 65 925 万元/a。

4 结 语

新沟河将“长三角”重要的超大型水源——太湖,与长江联通,其通江大型水利枢纽是江湖联通的重要控制口门,工程关键技术点多、实施难度大,通过研究与实践,顺利解决其功能与规模、控制与调度、选址与布局、水工结构和机电设备等重大关键技术难题,应用达到经济安全的理想效果。工程已全面建成并投入运行,在调水引流和防洪保安方面,正在并将继续发挥巨大作用,特别是防洪减灾效益显著,有效缓解太湖湖西直武地区洪涝灾害,减轻流域防洪压力。2018 年汛后应急调水试验中,工程持续引水,沿线河网水动力和水质、水环境明显改善,综合效益显著,必将对高度发达的“长三角”地区经济社会及其区域一体化高质量发展产生积极和重大影响。

参考文献:

- [1] 黄强. 深基坑支护工程设计技术[M]. 北京:中国建材工业出版社, 1998.
- [2] 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司. 太湖流域与长江河网水动力及水量水质耦合一体化模型优化研究[R]. 苏州:江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 2013.
- [3] 高兴和, 蔡平, 程实. 万福闸泄流安全与调度运用研究[J]. 水利水电技术, 2013, 44(7):107-110.
- [4] 高兴和, 吴忠, 翟高明, 等. 透水软基上 T 型高刚度高支挡结构的研究与应用[J]. 人民长江, 2018, 49(11):71-75.
- [5] 殷俊鹏, 张啸, 阮怀宁, 等. 基坑开挖对 T 型地下连续墙水平位移的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(7):232-236.
- [6] 高兴和, 严栋兴, 吕彝. 透水软基上大跨度闸室结构选型[J]. 江苏水利, 2013, 185(1):10-13.
- [7] 燕乔, 张利雷, 宋志诚, 等. 大体积混凝土在通水冷却措施下的温控研究[J]. 人民长江, 2014, 45(增刊 2):123-125.
- [8] 郭文康, 王述银. 粉煤灰品质对大体积混凝土性能的影响[J]. 人民长江, 2012, 43(20):66-69.
- [9] 高兴和, 吴忠, 范天忠. 水工大体积混凝土抗裂研究与实践[J]. 水利水电快报, 2018, 39(4):35-40.
- [10] 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 河海大学. 新沟河江边枢纽鱼道过鱼对象资源调查与数值模拟研究[R]. 南京:江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 河海大学, 2015.
- [11] 江苏大学流体机械工程技术研究中心. 新沟河江边枢纽泵站水泵装置模型优化试验与研究[R]. 镇江:江苏大学流体机械工程技术研究中心, 2014.
- [12] 黄良勇, 吴忠, 张啸, 等. 大型双向流道泵装置优化匹配与试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(7):602-607.
- [13] 何勇, 顾晓峰, 王雪帆, 等. 双速同步电动机在大型泵站的应用研究[R]. 南京, 2019.
- [14] 杜海刚. 大型泵站机组安装与检修[M]. 北京:水利电力出版社, 1995.
- [15] 高兴和, 陈兴奎, 王飞, 等. 阳澄湖通江大型泵站扩建关键技术研究与实践[J]. 人民长江, 2019, 50(2):47-52.