

# 数字孪生吴淞江工程(江苏段)建设方案探讨

丁 瑞<sup>1,2</sup>, 范子武<sup>1,2</sup>, 陈 晔<sup>3</sup>, 谢 忱<sup>1,2</sup>, 雷四华<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部太湖流域水治理重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215106)

**摘要:** 数字孪生吴淞江工程以阳澄淀泖区为物理流域范围, 在已有水文监测站网基础上, 开展水位、流量、视频、工情等感知监测, 以基础数据、监测数据、业务数据为底座, 以水文-水动力-水质-水工程调度耦合模型为核心, 以水利知识平台为驱动, 对物理流域全要素全过程进行数字化映射与模拟, 建设吴淞江工程相关业务预报、预警、预演、预案管理的“四预”业务体系, 服务洪涝灾害防御、水资源管理与调配、工程全生命周期管理、生态河湖监管、智慧航运、水文化服务等业务工作, 对于加快太湖流域数字孪生水网工程和智慧水利建设具有重要的指导意义。

**关键词:** 吴淞江工程; 数据底板; 模型平台; 四预业务; 工程全生命周期

中图分类号: TV213.4

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2024)06-0006-0006

## Discussion on the construction scheme of digital twin Wusong River project (Jiangsu section)

DING Rui<sup>1,2</sup>, FAN Ziwu<sup>1,2</sup>, CHEN Ye<sup>3</sup>, XIE Chen<sup>1,2</sup>, LEI Sihua<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Key Laboratory of the Taihu Basin Water Treatment of Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China;

3. Jiangsu Taihu Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Suzhou 215106, China)

**Abstract:** The digital twin of Wusong River project takes Yangchengdianmao District as the physical basin. Based on the existing hydrology monitoring station network, it carries out the perceptual monitoring of water level, flow rate, video and engineering conditions. Based on the basic data, monitoring data and business data, the coupling model of hydrology, hydrodynamic, water quality, and water engineering dispatch which is the key of the digital twin, is established. The water conservancy knowledge platform is the driving force for the digital twin. The whole process of total factors in the physical basin is digitally mapped and simulated, and the “four pre” business system of Wusong River project related business forecasting, early warning, rehearsal and plan management is constructed. Supporting flood disaster prevention, water resources management and deployment, project life cycle management, ecological river and lake supervision, intelligent shipping, water culture services and other businesses has important guiding significance for accelerating the construction of digital twin water network project and intelligent water conservancy in Taihu Lake Basin.

**Key words:** Wusong River project; data baseboard; model platform; “four pre” business; the whole life cycle of engineering

收稿日期: 2024-04-07

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3202604); 江苏省水利科技项目(2021066)

作者简介: 丁瑞(1989—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事河湖治理、智慧水利等研究工作。E-mail: dingrui@nhri.cn

吴淞江(江苏段)位于江苏省苏州市境内,西起太湖瓜泾口,平交穿京杭运河,至苏沪交界与上海段河道相接,流经苏州吴江区、吴中区、工业园区及昆山市,全长 61.7 km(其中苏沪交界段 5.28 km)。吴淞江整治工程是《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》确定的省际重大水利工程和《太湖流域防洪规划》《太湖流域综合规划》等确定的流域综合治理骨干工程之一,并已列入国家 172 项节水供水重大水利工程项目<sup>[1]</sup>。吴淞江(江苏段)整治工程的实施可进一步增加太湖洪水外排出路,提高太湖流域和阳澄淀泖区防洪除涝能力,结合流域、区域其他工程实施,使流域达到 100 年一遇、区域达到 50 年一遇防洪标准。此外,工程实施后,可改善下游地区水资源、水环境和水生态条件,同时提升苏申内港线航运能力<sup>[2]</sup>。

随着物联网、数字孪生等新一代信息技术的发展,为水利行业智慧化建设提供了重要的支撑<sup>[3-4]</sup>,开展数字孪生吴淞江工程建设,将提高工程建设与精细化管理能力。2022 年 3 月底,水利部印发了《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》,构成了水利数字孪生建设的顶层设计框架<sup>[5]</sup>。数字孪生吴淞江工程(江苏段)成功入选水利部数字孪生流域建设先行先试任务<sup>[6]</sup>。吴淞江数字孪生以物理流域为单元、以已

有水文、水质监测站网为基础,以数据为底座、以数学模型为核心、以水利知识为驱动,对物理流域全要素全过程进行数字化映射、智能化模拟,实现预报、预警、预演、预案流域管理的“四预”能力<sup>[7]</sup>。

## 1 总体框架

数字孪生吴淞江工程应满足工程建设、运维管理、业务应用等需求,具体包括:对工程全生命周期管理(设计、建设、运行、维护)的需求,对流域、区域、城市防洪排涝调度支撑的需求,对区域水资源管理与调配调度支撑的需求,对水环境治理的需求,对河湖智慧监管的需求,对航运监控的需求,对水文化公众服务的需求。

根据水利部《数字孪生水利工程建设技术导则(试行)》要求,结合吴淞江工程的实际需求,吴淞江数字孪生应由信息基础设施、数字孪生平台、业务应用等组成,其中数字孪生平台是其建设的核心与关键,包括数据底板、模型平台、知识平台等。根据吴淞江工程实际需求,确定水利 2+N 业务包括洪涝灾害防御、水资源管理与调配、工程建设全生命周期管理、生态河湖监管、智慧航运、水文化服务等,业务应用调用数字孪生平台及信息化基础设施提供的算据、算法、算力等资源。总体框架,如图 1 所示。

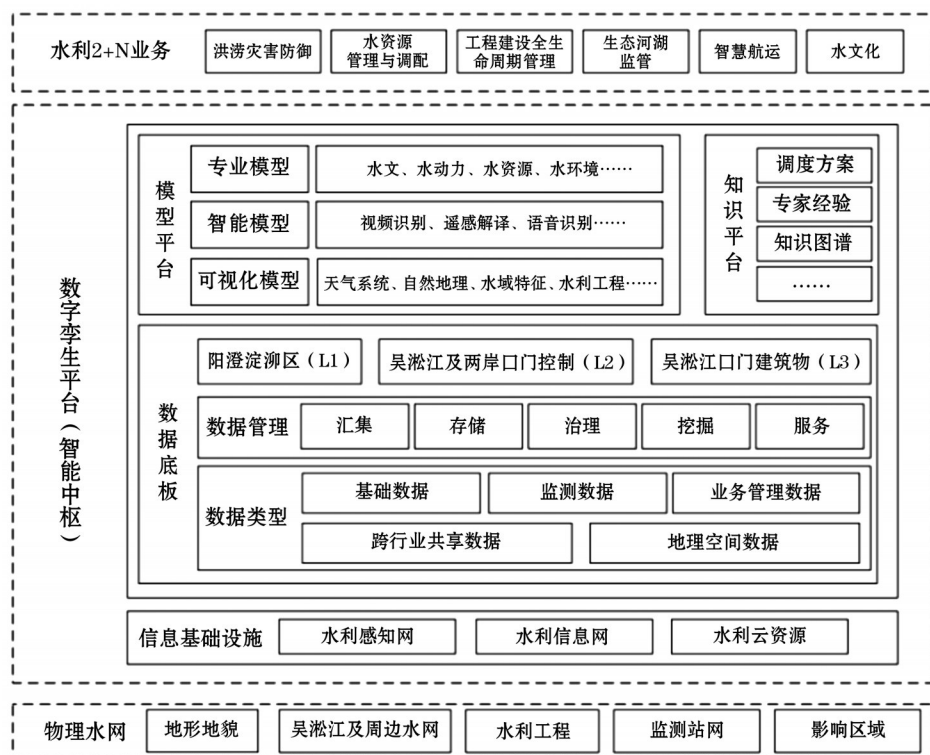


图1 吴淞江数字孪生水网工程总体框架

## 2 数字孪生平台

数字孪生平台主要由数据底板、模型平台、知识平台等构成<sup>[8]</sup>。数据底板汇聚水利信息网传输的各类数据,经处理后为模型平台、知识平台提供数据服务;模型平台利用数据底板成果,以水利专业模型分析物理流域的要素变化、活动规律和相互关系,并将结果通过可视化模型动态呈现;知识平台汇集数据底板产生的相关数据、模型平台的分析计算结果,经水利知识引擎处理形成知识图谱,服务水利业务应用<sup>[9-10]</sup>。

### 2.1 数字底板

依托于江苏省水利一张图,在吴淞江范围内,扩展三维展示、数据融合、分析计算、动态场景等功能,形成基础数据统一、监测数据汇集、二三维一体化、三级贯通的智慧水利数据底板。吴淞江江苏段所在阳澄淀泖区,属平原水网地区,区域内部分布有大小河道2万余条,汇合阳澄湖、淀山湖等诸多蓄水湖荡,形成西引太湖、东泄长江与黄浦江的自然水系。

#### 2.1.1 基础数据

基础数据以吴淞江(江苏段)沿线及阳澄淀泖区内各类水利对象的属性数据及空间数据为主。通过整编基础数据,形成涵盖流域、河流、湖泊、闸、泵、堤防、渠道等水利工程,雨情、水情、水质、生态、工程、视频监控站网水利对象的主要特征信息及空间信息,主要依据水利普查成果、水旱灾害风险普查成果或通过调研踏勘方式获取、更新、完善。数据包括本次吴淞江(江苏段)整治工程的整治后河道数据以及加固后堤防、新(拆)建设的130座口门控制工程(加固的38座口门)及整治工程勘测的工程地质、水文地质等数据成果。

#### 2.1.2 监测数据

依托江苏省及苏州市的水文和生态环境等部门提供的监测信息,并对部分重要工程运行要素、安全要素等进行监测。目前,苏州市已建成雨量站56处,河道水位站306处,河道流量站87处(基本覆盖主要骨干河道),水质监测站115个。重要水工程已开展工程安全监测,建成视频感知点1 000多个。基于数字孪生平台高效汇聚上述吴淞江(江苏段)流域范围内各类水利管理对象监测数据,增补本次工程增设点位数据,形成覆盖雨情、水情、工程、泥沙、水质、取用水、内涝、灾情、水利工程安全监测、视频等各类感知数据的监测数据集。实时获

取当前监测数据,并基于物联网技术进行数据传输、数据集成及展示,实现与吴淞江(江苏段)数字孪生流域的实时对接更新。

#### 2.1.3 业务数据

业务管理数据包括“2+N”水利业务应用产生的数据,其中“2”指流域防洪业务、水资源管理调配业务,“N”指工程建设服务、数字大厅、水环境保障、河湖健康管理、水文化公众服务等其他业务。业务数据将结合项目实施过程中水利知识建设内容,经数字化、标准化处理后存储至业务数据库。按业务应用配置数据资源空间,开通数据管理权限,满足本级水利业务应用运行中产生的数据“存、管、用”需求,按要求完成部、省、市、县四级业务数据实时共享交换。

### 2.2 模型平台

建设集成水文模型、水动力模型、水质模型、工程调度模型、河湖健康评价模型的多功能一体化机理模型。模型构建范围涉及吴淞江及周边直接影响区与间接影响区。模型平台建成后,可作为数字孪生机理内核和理论支撑,为数字孪生场景提供核心模拟数据。建设标准统一、接口规范、分布部署、高效复用的机理模型平台。根据流域防洪和水资源调配等业务对数字孪生流域模型精度的要求,选用不同类型及结构的模型,采用省、吴淞江(江苏段)两级的方式进行布局,根据授权进行数据共享、服务调用。

#### 2.2.1 模型范围

重点针对吴淞江及直接受其影响的沿线河网开展精细化模型构建,同时构建所有吴淞江间接影响的流域性骨干河道。吴淞江工程直接影响范围包括昆山市、苏州工业园区、吴中区、吴江区,完全在模型中实现4个行政区内河网、管网、工程群的孪生水利模型。吴淞江工程间接影响区域为阳澄淀泖区,流域骨干河道包括长江、望虞河、太湖、京杭大运河、太浦河。模型基础采用一维模型构建。

#### 2.2.2 模型功能

水利专业模型的功能包括降雨-产汇流计算、河道水动力过程模拟、河网-管网耦合内涝积水退水过程模拟、瓜泾口二维数学模型、河道水质模拟、工程群调度预演5项主要功能,具体涉及水文模型、水动力模型、水质模型三大类。水文-水动力模型相互耦合能够实现从降雨产汇流到河网水动力再到城市内涝积水退水的全过程洪涝灾害模拟;水动力-水质模型耦合能够实现对污染物运动扩散全过



程的准确模拟;水动力-水质-工程调度模型耦合能够基于水动力机理过程,精确模拟工程调度对水动力、水质的影响。模型可支撑防洪决策、工程群调度方案、河道水位及水质预报、水资源优化配置、畅流活水、河湖健康评价等涉水业务。

### 2.2.3 模型指标

模型精度保证水动力计算误差在厘米级,水质模拟误差控制模拟值与实测值纳什效率系数(NSE)在0.7以上。模型需进行至少3场洪涝过程率定验证,模型的率定验证主要用于调整模型中的相关参数以提高模拟的精确度。此外,水利专业模型应支持云服务的定制模式,模型的分辨率覆盖达到1 km×1 km级网格;实现动态预警,滚动频次30 min,预报期不低于3 d;支持基础信息查询类、监测信息类、统计分析类、河网模型类至少4类接口;模型库集成了所有的调度预案集,能够对模型进行有效的分类管理;模型计算要实现一键生成方案,实时地写入分区降雨、水位、水质、工程运行状态等数据,支持当前调度、优化调度、人工干预方案组的并行计算,智能推荐调度方案。

## 2.3 知识平台

采用大数据深度学习、人工智能等先进信息技术,构建包括水利专业知识库、水利知识引擎的知识平台。水利专业知识库具体包括预案调度库、业务规则库、专家经验库、历史场景与预报调度库。

预案调度库主要根据吴淞江及周边的物理流域水系特点、水利工程设计参数、影响区域范围等,结合气象预报、水文监测、工程安全监测等信息,对典型洪水防御、抗旱保供水调度、水资源调配等预案进行自动化、知识化、图谱化处理,形成预案主题信息索引与关联,构建多场景预案调度库。

业务规则库主要对吴淞江防洪排涝、河湖管理、水资源管理、工程运行管理等涉及的技术标准、管理办法、规范规程等规则抽取、表示与管理,支撑新业务场景的规则适配,应对不断变化的规则需求,规范和约束水利业务知识推理行为。

工程安全知识库以吴淞江控制建筑物、泵站等水利工程为对象,构建工程安全运行管理知识库,包括工程风险隐患、隐患事故案例、事件处置案例、工程安全会商、工程安全鉴定、专项安全检查、专家经验、技术文件等在内的工程安全知识库,涵盖常识类知识、累积知识、策略知识、其他类知识。

历史场景与预报调度库应开展历史调度执行方案数字化和暴雨洪水重现特征挖掘等工作,提取

历史过程相似性形成的历史事件典型时空属性及专题的特征指标组合,通过推演分析不同场景下的演变场景,为同类事件的精准决策提供知识化依据。

水文化知识库以革命历史、历史人物、历史文学等吴淞江及周边的水文化为基础,构建水文化知识库。

水利知识引擎采用知识图谱构建,知识图谱是实现水利知识表示、抽取、融合、推理和存储等功能的基础。

## 3 信息基础设施

感知站点的监测主要针对吴淞江工程、影响区域河网水系等进行雨量、水位、流量、视频、水文化等监测建设。以数据共享为原则,根据模型构建需求构建感知站网体系。按照“应接尽接”原则,接入已建感知设备,避免重复建设;感知设备部署需满足2+N业务应用的需求和模型计算的需求。

### 3.1 水位监测

吴淞江(江苏段)及其影响区域建设水位监测站,主要布设位置包括各级支流汇入口以及吴淞江(江苏段)沿线口门处。若沿线口门为闸站,则闸上闸下均需布设水位监测站点。在瓜泾口枢纽、5处大孔闸以及吴淞江沿线和苏申外港线新(拆)建闸站、排涝站34座,新(拆)建节制闸90座。

### 3.2 流量监测

在吴淞江(江苏段)沿线主要来水、吴淞江江苏段与上海段的交界处进行流量站点布设。在吴淞江(江苏段)3处进出口布设流量监测站点,主要为太湖入吴淞江的进口流量(瓜泾口)、吴淞江江苏段出口流量(赵屯)、京杭大运河汇入吴淞江流量,采用ADCP测流方式。

### 3.3 视频监控

在吴淞江(江苏段)沿线口门布设视频监控站,用于监视闸门的动作情况、河道水位等情况,实现吴淞江河道视频安全监测。在瓜泾口枢纽、5处大孔闸以及吴淞江沿线和苏申外港线新(拆)建闸站、排涝站34座,新(拆)建节制闸90座。加强高点视频等新型监测手段的应用,针对河道安全、工程建设管理,对吴淞江全覆盖监控,拓展水利建设的动态监视监测系统功能,以弥补卫星航空遥感和地面移动监测的不足。尽量接入吴淞江(江苏段)沿岸铁塔公司高杆视频资源,在吴淞江沿岸以6 km为间隔,共建设10处高视距高点视频监控点。

### 3.4 工情采集

对吴淞江(江苏段)沿线口门水利工程进行闸泵的自动化监测,监测水闸开度信息、水泵运行流量信息和闸泵站上下游水位信息。在瓜泾口枢纽、5处大孔闸以及吴淞江(江苏段)沿线和苏申外港线新(拆)建闸站、排涝站34座,新(拆)建节制闸90座,实现工情采集。工情采集分为重点工情和一般工情采集两种。重点水利工程为瓜泾口枢纽、苏申外港、春秋浦、界浦港、昆周线以及青阳港,其余为一般水利工程。

### 3.5 水文化服务站网

按照吴淞江工程特点,选择重点水利枢纽以及沿线村镇附近布设水文化服务站,与旅游休闲运动场所相结合,建设具有文化特色的凉亭、科普宣传栏等文化设施载体,配置语音问答、交互视频、文化广播等服务终端设施,面向公众提供触、视、听等服务。拟布设水文化服务站点共7处,包括主要航道控制建筑物所在地5处,以及河道沿线与人口集中村镇较近处2处。

## 4 应用架构

按照水利业务“四预”功能基本技术要求,以数据底板为基础,将防洪排涝、水资源配置、河湖生态健康管理、智慧航运融入“四预”体系,保留相对独立的工程全生命周期管理、水文化服务。因此,业务应用主要包括数字大厅、工程全生命周期管理、“四预”业务应用3个一级功能模块。

### 4.1 数字大厅

数字大厅是抽取各业务关键信息,汇聚多源数据展示,以图表、统计数据等形式集合展现,达到多元融合、业务全局把握的效果。根据业务需求,设置多个数字大厅,主要分为工程全生命周期管理、防洪排涝、水资源配置、水环境管理、河湖健康、智慧航运、水文化服务7个分厅。

工程全生命周期管理模块针对工程前期设计、建设期、运维期全过程的智能管理平台,提供更规范、更高效、更精确的工程建设管理与运维管理业务平台。防洪排涝模块是抽取阳澄淀泖区域关键雨水工情信息,汇聚多源数据展示,以图表等形式集合呈现,达到多源融合、全局把握的效果。水资源管理模块主要展示吴淞江沿线各取水状况、口门过水量监测计量设施运行状况等信息。水环境管理模块主要展示吴淞江水情、工情以及水环境调度方案,包括水质、水位、闸泵运行状态、引排水量、

水量分配等。河湖健康模块抽取与水生态相关数据,并进行综合展示,主要包括藻类、水生植物、鱼类、底栖动物类、生态流量、生态调度、健康报告及预警推送等。智慧航运模块是抽取吴淞江沿线雨水工情信息,接入交通运输部门共享航道通航条件、航道航标情况、水下地形和障碍物分布以及各船闸运营动态等数据信息,对吴淞江航运信息进行综合展示。水文化服务主要面向公众提供吴淞江水文化相关的触、视、听等服务,包括吴淞江周边的历史、人物、文学、文化、水文、水机械、水管理等。

### 4.2 工程全生命周期管理

吴淞江(江苏段)整治工程建设周期长,建设期管理面临巨大挑战,借助信息化手段,以BIM模型为核心,将工程内容模型化、数字化,精简流程,规范管理,提高效率,依托于BIM数字化模型形成的水利工程全生命周期智慧管理应用系统,提供更规范、更高效、更精确的工程建设管理。通过将BIM模型和建设管理信息化相结合,在统一的平台内实现图纸分享和项目管理,项目参与各方可随时随地基于这个统一平台进行协同工作,改变传统分散低效的协作模式,实现项目信息的集中储存访问,增强协同信息准确性和及时性,提高工作效率。

子系统主要包括工程建设期管理与工程运行维护管理。工程建设期管理主要包括设计管理、施工模拟、进度管理、成本管理、质量与安全管理、施工监理、竣工验收与交付、智慧工地应用。工程运行维护管理主要包括BIM场景展示、工程管理、设备资产管理、安全管理、运行管理、维修养护、人员岗位管理。

### 4.3 “四预”业务应用

“四预”业务应用包括监测预报、动态预警、场景预演、预案管理、决策支持。监测预报主要对吴淞江及阳澄淀泖区域内水系的雨水工情、水质、视频进行监测,并利用精细化河网水文-水动力模型预报关键节点水位、水质。监测预报模块业务功能主要可分为水情监测、雨情监测、水资源监测、工情监测、水质监测、生态监测、航运监测、视频监控、水情预报、气象预报、来水需水预测。

动态预警模块主要功能包括雨情告警(设置告警指标阈值,展示雨情的告警信息)、雨情预警(未来雨量预测预警)、水情告警(设置告警指标阈值,展示水情的告警信息)、水情预警(预测河网未来的水位信息,若超阈值则告警)、工情告警(设置告警指标阈值,展示工情的告警信息)、水质告警(设置



告警指标阈值,展示水质的告警信息)、河湖健康告警(定期开展河湖健康评价,对健康状态告警)、预警发布(根据发布流程,展示发布清单,给不同业务部门及相关人员发布预警信息)。

场景预演模块主要功能包括预演流域行洪调度场景、区域内涝调度场景、区域水环境调度场景、工程全生命周期场景。流域行洪调度场景支持不同下泄流量、不同水情遭遇的预演情景,预演不同场景遭遇的结果。预演暴雨条件下不同调度方案对洪涝防御的影响,三维孪生展示闸泵排水过程、吴淞江水位动态变化过程、局部流场动态展示。区域内涝调度场景支持当前工情与调度预案的场景预演,支持降雨条件变化下的场景预演,支持正向预演提供河道水位过程与城市内涝积水过程展示、反向预演提供调度方案。区域水环境调度场景预演吴淞江从东太湖调水和沿线水量分配带来的效益;预演突发污染、面源污染等事件调度处置方案的效果。工程全生命周期场景预演吴淞江工程建设随时间的推进过程,从开工建设到建成全过程以俯瞰视角或游船视角展示。所有调度方案都入库管理,包括调度管理库与会商库。

预案管理针对场景预演方案以及吴淞江沿线涉水业务进行电子化管理,形成预案库。电子化管理包括方案存储、下发、反馈等。预案管理以方案组形式,对进入预案库后的方案进行管理,可按时间或关键字进行筛选。选中方案后,方案展示内容和逻辑与场景预演一致。预案管理实现对场景预演形成的方案进行电子化归档整理。选择可行的预演方案进入预案集,通过点击查看,并提供对预案的管理功能,包括查询、查看、编辑、删除等功能。

决策支持业务应用主要包括对降雨、水情(太湖、吴淞江、圩区)、工情、水质等形势进行研判;预演不同流域行洪、城市内涝、区域水环境调度方案对重点区域水位、水质影响的对比分析,并提出对应的解决方案措施建议。

## 5 结 语

数字孪生吴淞江工程建设以水利部《数字孪生

水利工程建设技术导则(试行)》要求为基础,结合吴淞江工程的实际需求,以吴淞江(江苏段)沿线及周边工程为重点区域,扩展到阳澄淀泖区为物理流域范围。在流域已建水文监测站网基础上,布设水雨工情感知基础设施,以基础数据、监测数据、业务数据为底座,建设水文-水动力-水质-水工程调度耦合模型与水利知识平台,以满足防洪决策、工程群调度、水资源优化配置、水环境保障等涉水业务。

按照水利业务“四预”功能要求和吴淞江工程特点,业务应用主要包括数字大厅、工程全生命周期管理、“四预”业务应用3个一级功能模块。数字大厅抽取各业务关键信息,汇聚多源数据展示,各业务模块都有数字分大厅;“四预”业务应用从监测预报、动态预警、场景预演、预案管理、决策支持5个方面推动洪涝灾害防御、水资源配置、水环境保障、生态河湖监管等业务开展。

### 参考文献:

- [1] 金美华,吴心艺,夏熙,等. 吴淞江瓜泾口枢纽规模论证分析[J]. 江苏水利,2022(8):6-12.
- [2] 吴心艺,吴小靖,张骁,等. 吴淞江(江苏段)河道整治设计水位探讨[J]. 中国水运,2021,21(6):109-111.
- [3] 张建云,刘九夫,金君良. 关于智慧水利的认识与思考[J]. 水利水运工程学报,2019(6):1-7.
- [4] 陈晓楠,靳燕国,许新勇,等. 南水北调中线干线智慧输水调度的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):46-55.
- [5] 刘家宏,蒋云钟,梅超,等. 数字孪生流域研究及建设进展[J]. 中国水利,2022(20):23-24.
- [6] 刘国庆,范子武,杨光,等. 江苏省数字孪生水网建设总体构想与先试经验[J]. 中国防汛抗旱,2023,33(8):7-12.
- [7] 范子武,刘国庆,杨光,等. 城市防洪“四预”智能调度系统建设与应用[J]. 江苏水利,2022(12):5-10.
- [8] 程海云. 推进长江数字孪生流域建设的水文实践与思考[J]. 中国水利,2022(15):49-50.
- [9] 刘国庆,范子武,廖铁鹏,等. 江苏数字孪生水网建设与预报调度一体化应用初探[J]. 中国水利,2023(3):60-65.
- [10] 郭旭宁,李云玲,唱彤,等. “荆楚安澜”现代水网建设思路与实施路径[J]. 水资源保护,2023,39(3):1-7.