

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.02.002

长江大保护生态云平台顶层设计架构研究

郭亚丽^{1,2}, 魏本胜^{1,2}, 郑思远^{1,2}, 梁漫春³, 邹雨璇^{3,4}

(1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200050; 2. 中国长江三峡集团有限公司长江生态环境工程研究中心, 北京 100038;
3. 清华大学工程物理系, 北京 100084; 4. 北京辰安科技股份有限公司, 北京 100085)

摘要:针对智慧监管平台目标不统一、平台众多、数据集成共享不足等问题,从长江大保护全流域治理目标出发,根据长江节点城市特点,基于已有研究基础,通过将智慧水务“云物大移智”(云平台、物联网、大数据、移动互联网和人工智能)技术的深度融合,从顶层构建由“3个1”(“一张网”“一张图”“一朵云”)、“2中心”(大数据资源中心、智慧运营中心)、“2体系”(技术标准体系、制度保障体系)和“4平台”(产业生态平台、工程任务调度管理平台、业务应用平台、智慧运营平台)组成的“3+2+2+4”长江大保护生态云平台架构系统,可实现长江流域生态环境监测数据和应用管理规范化,建立统一的全周期技术标准体系,打破信息壁垒,提升智慧化管理水平。

关键词:长江大保护;生态云平台;顶层设计;智慧水务;智慧监管

中图分类号:TV213.4;TV882.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)02-0009-08

Research on architecture design of Yangtze River Protection Ecological Cloud Platform // GUO Yali^{1,2}, WEI Bensheng^{1,2}, ZHENG Siyuan^{1,2}, LIANG Manchun³, ZOU Yuxuan^{3,4} (1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200050, China; 2. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 3. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Beijing Global Safety Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: Aiming at the problems of inconsistency objectives of smart monitoring platform construction, prohibitive amount of platforms and insufficient data integration and sharing, starting with the governance goal of the Yangtze River protection, based on the characteristics of the Yangtze River node cities and previous research, by integrating the technologies of Smart Water CIBMA (cloud platforms, internet of things, big data, mobile internet, artificial intelligence), the architecture of “3+2+2+4” Yangtze River Protection Ecological Cloud Platform is designed, consisting of “three 1s” (“one network”, “one picture”, “one cloud”), “2 centers” (big data resource center, intelligent operation center), “2 systems” (technical standard system, institutional guarantee system) and “4 platforms” (industrial ecological platform, project scheduling management platform, business application platform, and intelligent operation platform), which realizes the standardizing of the data monitoring and application management of the ecological environment in the Yangtze River Basin, establishing a unified full-cycle technical standard system, breaking information barriers, and improving the level of intelligent management.

Key words: Yangtze River protection; ecological cloud platform; architecture design; smart water; smart monitoring

长江是中华民族的母亲河,其流域横跨19省(自治区、直辖市),是沿海沿江沿边全面推进的对内对外开放带。随着经济发展,工业化进程加快,长江流域尤其是流经工业城市的河段,工业废水和生活污水大量排放,造成流域污染问题日益凸显。党的十八大以来,国家对长江流域生态环境保护工作

的重视加深。随着长江保护修复攻坚战深入推进,水环境质量整体取得显著改善,但局部污染问题依然严峻,长江流域的废污水排放量虽然增幅减缓,但绝对量仍在持续增长,入河污染物排放量居高不下,缺乏有效的控制手段^[1-2]。

纵观国外发达国家的治水发展史,普遍经历了

基金项目:中国长江三峡集团有限公司项目(202003079)

作者简介:郭亚丽(1971—),女,教授级高级工程师,博士,主要从事智慧水务研究。E-mail: gyl@sidri.com

通信作者:邹雨璇(1988—),女,博士,主要从事智慧水务研究。E-mail: vicki_zyx@qq.com

“先污染后治理”“先末端后前端”“先工程后制度”“先单一后系统”的历程。欧盟于2000年12月启动了欧盟水框架指令(WFD),对水资源管理制定了统一法律文件,提出“流域区域统筹,实施源头控制”的治水理念,在水资源管理中大量运用高科技成果,对各流域管理进行实时在线监测,例如德国汉诺威市、荷兰乌特勒支市都运用了计算机模拟系统对城市雨、污水管网进行实时监控。美国国家智能水网(NSWG)概念始于2009年,由IBM、西门子、苏伊士等在内的一些涉水企业引领,基于先进的计量基础设施建立水管理系统(AMI)对水质、水量进行联合监测,通过对水资源管理设施和智能电网的不断优化调整,实现水资源的高效智能化管理,例如得克萨斯蒸发散网络(Texas Evapotranspiration Network)项目是对其智能水网建设思路的典型性反映,但后期由于网络和数据来源不足,算法更新迭代不及时造成系统停用。

我国流域生态治理起步较晚,对流域生态保护从信息化到数字化再到智能化不断升级换代,如何能够在长江大保护中既满足流域保护和智慧城市的统筹设计需求,又具备安全实用、智慧高效的监管能力,是流域生态保护信息化建设的发展方向^[3-5]。目前,长江流域地方政府不断推进生态环境治理智慧化平台建设,深耕数字生态发展,如长江上游云南水富市用于打击非法采砂、捕捞、排污的智慧“两江”综合执法平台^[6];长江中游湖北咸宁智能监控精准溯源的“智慧长江”监管平台;长江中下游水利部太湖流域管理局建立的太湖流域水环境综合治理信息共享平台等^[7]。目前,中国长江三峡集团有限公司已经在长江中游九江、岳阳、宜昌、芜湖4个试点城市落地智慧水环境综合治理项目,按照“厂网河(湖)岸一体”“泥水并重”等模式推进先行先试,全面建设水环境治理、水生态修复和水资源保护等“三水共治”重点关键性工程。因此结合项目经验和长江大保护实际情况,本文探索提炼出一套可推广、可复制的,以长江全流域生态治理为核心,以长江节点城市为主要对象的水环境治理新模式、新技术、新标准的云平台顶层设计架构模式。

1 长江智慧流域监管平台建设存在的问题

a. 治理主体上下不连通,各自为战。长江大保护参与方主要包括政府、企业、公众等,各方对共治长江的理解、需求和任务不同,政府侧重战略目标层面,面临环保考核压力,重点关注考核断面达标、黑臭水体消除、排口治理等内容;企业侧重技

术、实施层面,重点关注水环境治理规划、工程设计、施工、运维等项目全周期工作,确保项目有效落地;公众重点关注水环境治理社会效益、生态效益,是否可提升幸福指数、增加满意度,最终满足对美好生活的需要。

b. 已建流域智慧监管平台丰富而碎片化。“十一五”以来,多个科研团队在长江流域开展流域智慧监管平台建设,如开发了智汇长江App,可实现对长江经济带重点城市生态环境问题的风险评估^[8];同时针对长江生态环境保护修复还开发了智慧决策平台,可实现长江流域环境问题诊断精准化和决策会商便利化^[9];长江沿线城市智慧水务工作也进行了较多探索和实践,如江西率先上线运行生态云台,启动智慧抚河项目建设。治理主体对智慧长江的建设仍处于探索阶段,存量资源较多,但存在碎片化、系统化不强等问题。

c. 信息孤岛问题突出,亟待打破信息壁垒。当前,信息化建设普遍存在各自为政现象,现有的信息系统主要集中在环保、水利、水务、防汛等业务部门,已建成的各子系统间数据共享难度大,系统间缺乏集成和整合,信息处理和流转存在局限性,信息无法较好共享和有效流转,数据条块化及孤岛现象较为严重^[10]。信息孤岛问题导致对资产管理能力薄弱,无法全面细致了解地下管网设施、水利工程设施等资产的健康状况,不能有效进行资产盘点、管理和运用^[11-12]。

2 长江大保护生态云平台建设需求

长江大保护生态云平台是以长江经济带覆盖的重要节点城市为主要对象,综合运用大数据、人工智能等新一代信息技术打造的智慧水务监管运营平台,以实现长江全流域水生态环境的信息数字化、控制自动化、决策智能化,使得采集信息全掌握,传输时间全天候,应用贯穿全过程,有力支撑长江大保护的宏观水环境、水安全管控。因此,为解决不同主体需求、目标不统一等问题,亟须从顶层设计层面进行统筹谋划,凝聚共识、统一目标,实现“共建、共享、共担”的治水管理机制。对长江流域已有涉水信息化建设平台的研究进行整合,统一建设平台各条块各专业各种感知数据编目规范,共享交换和数据发布接口标准;统一生态云平台监管的监测标准、评估评价标准,建立完善统一的全周期技术标准体系;创新云服务、软硬件服务模式,实现技术层面无缝连接,使涉水部门摆脱信息孤岛和缺乏协同化系统性管理的弊端,实现跨部门资源整合与共享的需求。

3 长江大保护生态云平台顶层设计

3.1 建设目标

生态云平台建设以“三水共治”“四源齐控”“五江共建”为目标,解决长江流域监管平台数据难融合、难共享,管理决策精细化不足等难题,将水务业务与大数据、物联网、人工智能等智慧技术深度融合,推动建设以“流域-城市-项目”进行总体目标分级并集“一云、一库、一图、一体系”为一体的智慧水务管控体系,建立具有长江特色治水特征及水务运营管理特征的智慧水务建管运营模式^[13-14],形成长江沿岸城市水系统治理智慧化运营能力、大保护业务综合智慧监管能力、流域水环境智慧评估预警能力、产业生态智慧管理能力,建立智慧水务产业发展组织机构、机制和制度。

3.2 总体架构

围绕长江大保护生态云平台建设目标,借鉴国内外同类系统建设经验^[11,15-16],结合长江大保护实际情况,在最大程度利用现有系统和数据的前提下,充分融合“云物大移智”(云平台、物联网、大数据、移动互联网和人工智能)先进技术,构建符合长江大保护理念的生态云平台,其总体架构如图1所示,由“3个1”(“一张网”“一张图”“一朵云”)、“2中心”(大数据资源中心、智慧运营中心)、“2体系”(技术标准体系、制度保障体系)和“4平台”(产业生态平台、工程任务调度管理平台、业务应用平台、智慧运营平台)的“3+2+2+4”架构组成,通过提供统一的计算、存储、网络、物联感知等资源服务,开展城市监测数据采集及对接、BIM+GIS基础数据对接、标准化产品调用以及定制化开发,以创新性的共建共享模式实现长江大保护生态云平台的集约化建设、规范化管理、共享式服务、一体化运营。

“一张网”指由前端信息采集和通信网络共同组成的长江大保护监测物联网。按照实际需求选择光纤、4G/5G、WiFi、NB/LoRa(为广域网通信技术的主要应用技术)、数字集群、卫星通信、微波等网络通信方式将前端物联网智能终端采集的数据(包括水雨情、降水量、排水管网、水质、水量、泵闸、视频、内涝积水、卫星遥感、第三方接入等)传回云端数据中心,为长江生态流域的智慧化业务管理和大数据分析提供数据基础。

“一张图”指数字可视化系统的1张图,构建全局任务调度平台,建立效果评估与目标考核机制,实现以保护目标为导向,修复任务为驱动的长江大保护治理的可视化管理,并支持不同业务以专题图形式对其侧重点进行分类管理。

“一朵云”是指生态云平台,是多个专题业务应用版块的依托,是各业务专题的全方位无缝融合和扩展,建立一个“多维业务信息融合”“全方位多手段服务”“可持续可扩展应用”的一体化云平台。主要实现统一门户、单点登录、安全认证、地图服务、消息管理、动态表单、分拨调度、工作流、可视化展示、模型支持等应用支撑。

“2中心”指大数据资源中心和智慧运营中心。大数据资源中心是数据资源层的基础,包含物联网接入管理、数据管理、大数据分析和数据交换与共享,数据管理由综合数据库实现,主要包含基础数据库、监测数据库、业务数据库、决策支持数据库等。智慧运营中心集水环境态势感知、监测预警、决策分析、多方协同与应急指挥、运营管理职能于一体,为实现“流域-城市-项目”相关业务发展的长远目标提供驱动力与服务保障。智慧运营中心既是对长江大保护生态云平台提供运营服务的物理场所,也是水环境大数据的汇聚中心、智能分析中心、可视化展示中心和会商调度中心。智慧运营中心建设既需要从技术上构建信息化服务能力,也要从管理上创新智慧运营新模式,确保智慧运营人员队伍及其能力满足智慧运营要求。

“2体系”是指技术标准体系和制度保障体系。技术标准体系是为了实现资源共享,避免重复建设,减少重复开发,在信息采集、汇集、交换、存储、处理和服务等环节采用或制定的相关技术标准系列;制度保障体系是指建立长江大保护水务建设、运行管理保障体系,逐步完善管理体制,制定管理制度规范,建立业务流程标准,提高信息系统运行管理技术水平,形成较为完善的运行管理保障体系。

“4平台”指产业生态平台、工程任务调度管理平台、业务应用平台、智慧运营平台,其中业务应用平台是包含监测预警、排水管理、决策支持、绩效考评等方面在内的多个业务应用模块。

3.3 技术架构

长江流域具有跨流域、跨省市的特点,基于顶层设计的总体架构,对生态云平台技术体系进行架构设计,主要包括智慧感知层、基础设施层,数据共享与分析层、应用使能层、网关层和智慧应用层,同时提供对外开放接口,以便于同市政、环保等的数据交换。系统技术框架如图2所示。

3.3.1 智慧感知层(IoT)

智慧感知层是通过前端物联网感知设备采集河流、湖泊、水库、管网、地下空间等各项水务监测数据,然后将监测数据通过各类网络回传到各二级节

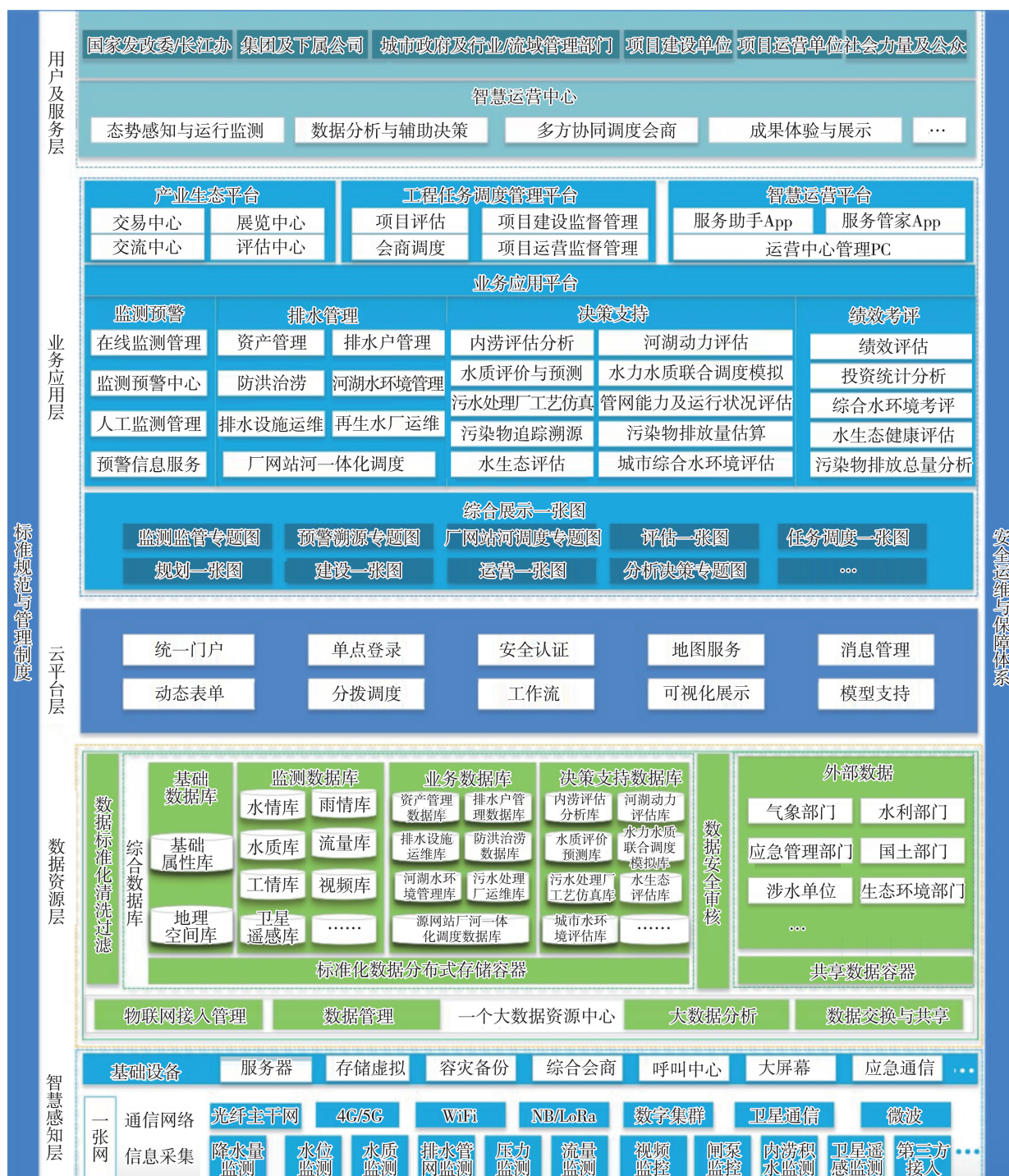


图1 长江大保护生态云平台总体架构

Fig.1 Architecture framework of Yangtze River Protection Ecological Cloud Platform

点的物联网连接平台。数据经物联网连接管理平台协议解析、转换后,以统一的格式回传到长江大保护智慧水系统管控云平台的中心节点,供上层应用进行各项分析、监管^[17-18]。

3.3.2 基础设施层(IaaS)

长江大保护生态云平台整体采用专属云建设方案,基础设施层为平台提供计算、存储和网络资源的基础支撑和保障,不同节点城市作为租户注册到中

心节点后,其计算、存储、网络资源与其他地市资源会进行逻辑隔离,物理专属。通过专属云的搭建,做到资源独享,从而满足性能、安全、可靠性、可扩展性等关键业务诉求。

3.3.3 数据共享与分析层(DaaS)

长江大保护生态云平台实现以“一数一源”为统一规范,以“采集、交互、交换、加工”为手段,以“共享、服务”为宗旨,利用现有的涉水数据资源,新



图2 系统技术框架

Fig.2 System technology framework

增监测监控信息、设备信息、运营信息、数据交换信息、空间地理信息等资源,搭建一个无缝连接、高度融合的数据共享平台,为水资源配置调度、水安全应急预警、水环境监测管控与水生态演变分析、涉水大数据分析以及公众服务等提供基础数据支持。

3.3.4 应用使能层(PaaS)

应用使能层是长江大保护生态云平台的逻辑核心,也是最重要的部分,用以支撑长江大保护生态云平台的智慧决策,实现长江流域环境综合模型分析、环境风险预测、大数据挖掘等。该层分成通用中台(G-PaaS)和业务中台(A-PaaS)两个部分,通用中台用来实现通用、基础的业务服务,而业务中台用来实现应用软件的开。

3.3.4.1 通用中台

a. IoT 服务中台。IoT 服务中台负责提供物联网智能终端的接入管理,是行业数字化/智能化转型中的关键使能器之一。

b. 大数据分析服务中台。主要包括数据集成层、数据存储层、分析挖掘层。数据源为来自企业管理系统的属性数据、感知设备采集的使用状态数据以及来自第三方 CP/SP 的互联网数据,通过离线数据采集、实时数据采集、互联网数据采集 3 种主要方式,将分散在各个系统的数据通过数据

清洗、数据转换集成至统一的大数据平台中。大数据分析服务中台进行统一的持久化数据存储,并提供基于海量数据分析挖掘的接口和实时数据查询接口。

c. GIS 服务中台。GIS 服务主要提供三维地图服务,供 B/S 端、移动端上查看流域三维场景,提供数据查询、专题图底图相关图件等。

d. BIM 服务中台。为解决长江大保护不同项目开发使用的设计软件各不相同,产生的数据类型不同的问题,需选用 iModel 的数据转换桥梁工具(iModelBridge)对多格式数据进行转换,使得不同类型的数据源能方便快捷地转为 Model 格式进行存储。同时借助 iModel 数据管理仓库 iModel Bank,对数据变更进行回溯,实现历史版本的管理控制。

e. 专业模型服务中台。针对城市水环境模型中的计算标准不统一、不同模型之间耦合难度大、计算资源利用率低等问题,构建基于模型标准化的云服务平台,将各类不同功能的模型按照统一标准集成至云平台。筛选主流预测模型,实现管网水力、地表漫流、河网河道、水质传递、水生态等各类模型的统一管理、统一调用^[19-20]。采用并行计算引擎技术,为模型提供相应的计算能力,提高模型计算速度的同时,节省用户对计算机资源的建设与管理成本。

通过制定同时序下的数据交互标准和模型耦合规范,实现多模型的时空耦合模拟,解决大范围时空耦合和多学科交叉的复杂业务问题。运用监测或者预报数据驱动模型进行实时在线计算,实现城市厂网站河联合调度、泵闸管网优化调度、城市内涝预测、管网江河水质传递计算等业务功能。

f. 微服务中台。微服务架构强调将传统的单体应用打散为从数据库到中间件到部署包,即前端和后端完全独立的多个松耦合的微服务模块。在进行通用中台能力建设的过程中,微服务模块更多的是独立承担某个业务域的业务组件模块,而不应该包括类似流程引擎、系统管理等共性底层组件。

g. 软件开发服务中台。平台提供面向 AI 开发者的一站式开发平台,提供海量数据预处理及半自动化标注、大规模分布式训练、自动化模型生成及端-边-云模型按需部署能力,帮助用户快速创建和部署模型,管理全周期 AI 工作流。

3.3.4.2 业务中台

为快速响应业务需求变化并定制化开发系统,需从业务流程驱动的角度去考虑和拆分具体的业务单元。通过微服务来构建应用的架构方式,各个业务单元微服务之间可以独立部署、独立扩展以及提供模块化的边界,还可以使用不同的语言进行开发。

通过领域服务能力下沉,构建厚服务层,真正实现了前端应用和后端服务的解耦和分离,服务可以更加灵活地组合和组装来构建前端应用。从传统偏重的 ESB 服务总线集成模式转变到轻量的去中心

化的微服务网关集成模式,真正实现整个架构搭建中无中心化节点,也就是无关键瓶颈节点,从而实现整个架构极强的资源动态水平弹性扩展能力。另外从传统的代码编译和部署包交付模式转变为基于容器的镜像交付模式,极大地提升了部署和环境迁移的效率,同时提升了整个业务系统的弹性和可伸缩性。

3.3.5 网关层(API)

通过长江大保护生态云平台的实施,对平台各子功能以微服务的方式进行模块化整合,并形成标准的长江大保护生态云管控平台集成调用接口。再通过编制调用接口的系统开发说明、接口调用方法、编码规则、运维标准等,为后续城市智慧水系统平台的开发实施、数据交换、运维等提供标准化的示范。

3.3.6 智慧应用层(SaaS)

基于需求分析,智慧应用层分成业务应用和基础软件开发两个部分,一方面支撑长江大保护智慧水系统的业务应用,可提供桌面应用、WEB 应用、移动应用、小程序等业务应用;另一方面支持基于平台开发的软件与管理应用。

3.4 网络部署架构

长江大保护生态云平台通过构建“一朵云”融合计算、物联网、大数据、人工智能等新兴技术,作为支撑整个长江大保护项目的坚实技术底座。长江大保护生态云平台采用“两地三中心”“一朵云两层级”的架构方式搭建,如图 3 所示。

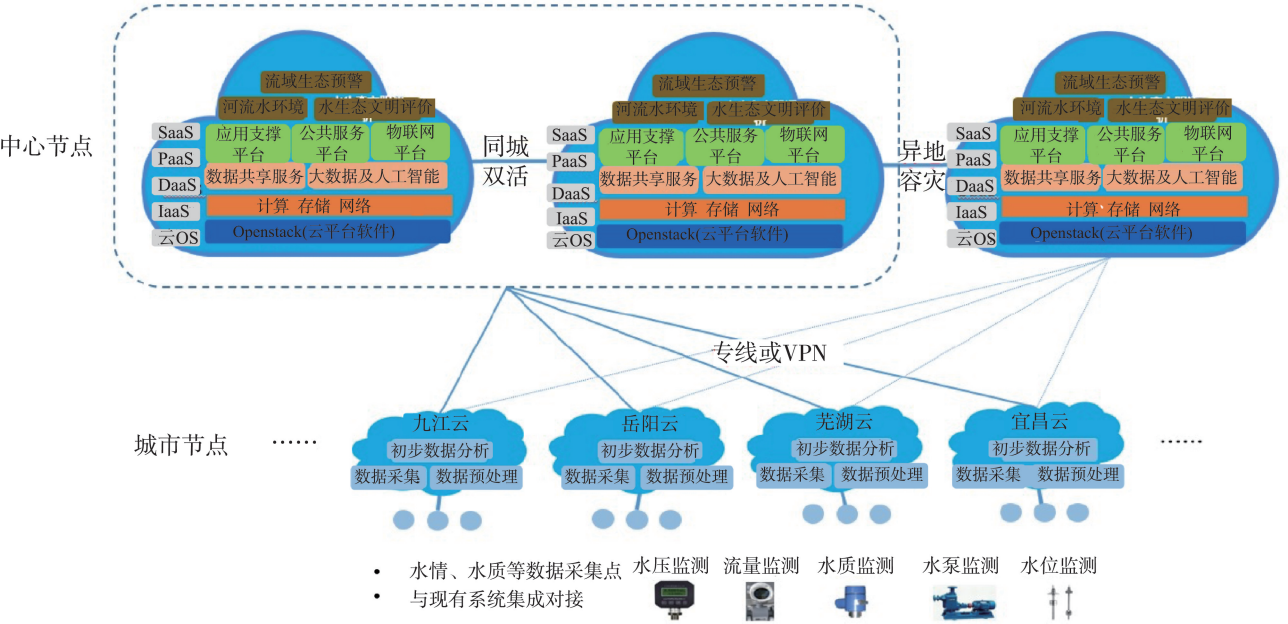


图 3 云平台网络部署架构
Fig.3 Cloud platform network deployment framework

3.4.1 “两地三中心”

中心节点为各城市节点共用,承载绝大部分的资源和服务支撑,为提升中心节点可用性,采用“两地三中心”方式部署,即两个同城双活生产中心和一个异地容灾备份中心。在实际运行中,同城双活生产中心可以分担业务请求,提升响应速度,在出现小概率、大范围的灾难时,造成同城双活生产中心均不可用时,应用可以切换到异地容灾备份中心。各城市节点与中心节点通过搭建 VPN 或专线通道实现网络互通,连接至生产中心节点的网络通道为日常使用通道,连接至异地容灾备份中心节点的为网络备用通道。云平台物理部署示意图如图 4 所示。

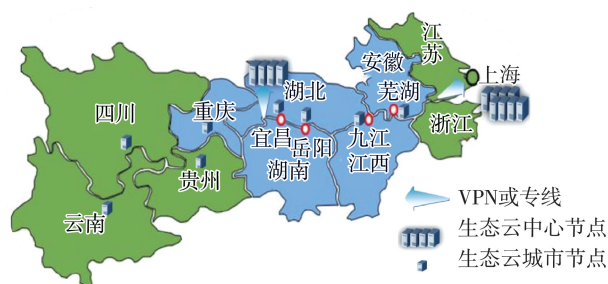


图 4 云平台物理部署示意图

Fig. 4 Cloud platform physical deployment diagram

3.4.2 “一朵云两层级”

“一朵云”采用两层级架构来构建中心节点和城市节点。中心节点采用全栈专属云 (Openstack 云平台) 方式搭建,城市节点采用边缘计算节点搭建,专属云方案融合了公有云以租代建、按需扩容、产品丰富、委托管理和私有云安全合规、物理独占的优点,以一体化全栈方式交付完整的云服务平台,提供独立的物理资源池,同时提供高安全的网络隔离环境满足网络隔离要求,从而满足生态云平台安全合规、稳定可靠、极致性能体验的要求。城市节点采用边缘计算节点构建,与中心节点结构相同,应用和模型在中心节点统一完成开发测试后,可以下发到各城市节点运行,同时,中心节点可同时远程监控运维各城市节点。

4 结 语

随着长江流域生态保护智慧水务管理需求的不断增加,能支撑长江流域、城市和项目多层级需求的顶层设计是长江大保护生态云平台搭建最不可或缺的基石。顶层设计不仅要适配于当下的平台系统环境,也要站在制高点做好全局规划,长远战略布局,才能更好地迎接未来发展的各种挑战,为平台、管理升级留有机会窗口。本文以解决当前长江流域智慧监管平台建设主体目标不同、上下左右不连通、信息

孤岛等难点问题,实现长江大保护生态治理精准调控、智慧化管理为目标,构建了长江大保护生态云平台应用的顶层设计架构,可实现以下目标:①统一规划,统一设计。以“三水共治”“四源齐控”“五江共建”为目标,按照“流域-城市-项目”对总体目标进行三级分解。②上下互通左右互联。流域统筹、区域协调,满足不同流域、城市、项目多层级之间的功能灵活定制需求,实现不同系统间的互联互通、有机融合、应用功能可复制。③构建一套整合、开放、高效的水务数据资源体系。打破信息壁垒,长江大保护生态云平台顶层设计使智慧平台兼容性更强,更有效地推进流域的产学研一体化,实现平台的不断更新,助力长江大保护的长效治理。

参考文献:

- [1] 吴志广,袁喆. 适应长江经济带绿色发展的长江水資源开发保护总体战略[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(7): 132-136. (WU Zhiguang, YUAN Zhe. General strategy of exploiting and protecting Yangtze River water resources in response to the green development of Yangtze River economic zone [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(7): 132-136. (in Chinese))
- [2] 李百炼,伍业钢. 谈“十四五”生态保护与绿色发展的生态关系[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 88-101. (LI Bailian, WU Yegang. On the ecological relationship between ecological protection and green development during the 14th Five-Year Plan [J]. Science & Technology Review, 2021, 39(3): 88-101. (in Chinese))
- [3] 李海生,王丽婧,张泽乾,等. 长江生态环境协同治理的理论思考与实践[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(3): 409-417. (LI Haisheng, WANG Lijing, ZHANG Zeqian, et al. Theoretical thought and practice of eco-environment synergistic management in the Yangtze River [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(3): 409-417. (in Chinese))
- [4] 卢纯. “共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 283-295. (LU Chun. Reflection on several key issues regarding the “Making Efforts to Protect the Yangtze River Together” project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 283-295. (in Chinese))
- [5] 张万顺,王浩. 流域水环境水生态智慧化管理云平台及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(2): 142-149. (ZHANG Wanshun, WANG Hao. Cloud platform and application of watershed water environment and aquatic ecology intelligent management [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 142-149. (in Chinese))

- [6] 管文菁, 闻春红, 束超. 借力 5G, 云南移动打造“智慧城市”标杆[J]. 中国电信业, 2021(5): 46-49. (GUAN Wenjing, WEN Chunhong, SHU Chao. Yunnan Mobile building “smart city” into a new benchmark with 5G[J]. China Telecommunications Trade, 2021(5): 46-49. (in Chinese))
- [7] 左一鸣, 李健, 林荷娟. 太湖流域水资源保护天地一体化监测体系构想[J]. 水利信息化, 2013(1): 57-60. (ZUO Yiming, LI Jian, LIN Hejuan. An idea of an integrated sky-earth monitoring system for water resources protection in Taihu Lake Valley [J]. Water Resources Informatization, 2013(1): 57-60. (in Chinese))
- [8] 杨荣金, 王丽婧, 刘伟玲, 等. 长江生态环境保护修复联合研究设计与进展[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(5): 37-42. (YANG Rongjin, WANG Lijing, LIU Weiling, et al. Design and progress of joint research on ecological environment protection and restoration of the Yangtze River [J]. Environment and Sustainable Development, 2019, 44(5): 37-42. (in Chinese))
- [9] 刘柏音, 刘孝富, 王维. 长江生态环境保护修复智慧决策平台构建与初步设计[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1276-1283. (LIU Baiyin, LIU Xiaofu, WANG Wei. Construction and design of intelligent decision-making platform for environmental protection of the Yangtze River [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1276-1283. (in Chinese))
- [10] 张金松, 李旭, 张炜博, 等. 智慧水务视角下水务数字化转型的挑战与实践[J]. 给水排水, 2021, 57(6): 1-8. (ZHANG Jinsong, LI Xu, ZHANG Weibo, et al. Challenges and practice of water digital transformation from the view of smart water[J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(6): 1-8. (in Chinese))
- [11] 谢丽芳, 邵煜, 马琦, 等. 国内外智慧水务信息化建设与发展[J]. 给水排水, 2018, 44(11): 135-139. (XIE Lifang, SHAO Yu, MA Qi, et al. Development and analysis of smart water system in China and abroad[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(11): 135-139. (in Chinese))
- [12] 朱晓庆, 殷峻暹, 张丽丽, 等. 深圳市智慧水务应用体系研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(增刊2): 176-180. (ZHU Xiaoqing, YIN Junxian, ZHANG Lili, et al. Study on smart water application system in Shenzhen [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(Sup2): 176-180. (in Chinese))
- [13] 孔祥文. 长江大保护试点城市智慧水务系统构建探索[J]. 水利信息化, 2020(6): 12-16. (KONG Xiangwen. Exploration of smart water system construction in pilot cities of great protection of Yangtze River [J]. Water Resources Informatization, 2020(6): 12-16. (in Chinese))
- [14] 郭剑桥, 田甜, 张坤林. 基于新技术的长江大保护智慧水务系统应用[J]. 绿色科技, 2020(14): 63-64. (GUO Jianqiao, TIAN Tian, ZHANG Kunlin. Application of smart water system for Yangtze River Protection based on new technology[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(14): 63-64. (in Chinese))
- [15] WANG Yuanyuan, LIU Ping, SHI Wenze, et al. A new framework on regional smart water[J]. Procedia Computer Science, 2017, 107: 122-128.
- [16] 曾家俊, 麦叶鹏, 李志威, 等. 广州天河智慧城 SWMM 参数敏感性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 15-21. (ZENG Jiajun, MAI Yepeng, LI Zhiwei, et al. Sensitivity analysis of SWMM parameters in Guangzhou Tianhe wisdom city [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 15-21. (in Chinese))
- [17] 王丽川, 侯保灯, 陈晓清, 等. 雄安新区智慧水务建设构想[J]. 智能城市, 2020, 6(18): 1-5. (WANG Lichuan, HOU Baodeng, CHEN Xiaoqing, et al. Construction of Xiong'an New Area smart water [J]. Intelligent City, 2020, 6(18): 1-5. (in Chinese))
- [18] 陈璇. 智慧水务平台系统的构建及关键技术分析[J]. 中国设备工程, 2021(13): 212-214. (CHEN Hu. Construction and key technology analysis of smart water platform system[J]. China Plant Engineering, 2021(13): 212-214. (in Chinese))
- [19] ABBAS O, RJEILY Y A, SADEK M, et al. A large-scale experimentation of the smart sewage system[J]. Water and Environment Journal, 2017, 31(4): 515-521.
- [20] PRASAD A N, MAMUN K A, ISLAM F R, et al. Smart water quality monitoring system [C]//2015 2nd Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering. New York: IEEE, 2015: 1-6.

(收稿日期: 2022-04-12 编辑: 熊水斌)

