

数字孪生技术在水文水资源监测中的应用

孙莲莲

浙江宏禹水利科技有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]传统的水文监测存在着在实体流域和信息空间之间实现实时、完整映射的不足,不能满足动态仿真以及事前推演的要求。数字孪生技术用建立物理流域虚拟镜像的方式把实时感知、数据治理、模型运算、业务场景深度融合起来,形成可计算、可演进的数字化水量水质监控体系。本文对数字孪生水文监测的总体架构和建设流程进行了梳理,从站点实时数据接入、下垫面和遥感信息融合入手,论述了多源数据汇聚的方法;然后介绍了降雨径流产汇流、河道一二维水动力、地下水动态模拟三种主要模型的建立、率定以及在线校正技术;最后给出了实时水情监视告警、短期洪水预报预警、洪水淹没预演、水资源调配预案推演这四种业务应用的实现方式。

[关键词]数字孪生;水文监测;水动力模型;洪水预演

DOI: 10.33142/hst.v9i6.20069

中图分类号: TV213

文献标识码: A

Application of Digital Twin Technology in Hydrological and Water Resources Monitoring

SUN Lianlian

Zhejiang Hongyu Water Conservancy Technology Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract: Traditional hydrological monitoring has shortcomings in achieving real-time and complete mapping between physical watersheds and information spaces, which cannot meet the requirements of dynamic simulation and pre deduction. The digital twin technology deeply integrates real-time perception, data governance, model operation, and business scenarios by establishing a physical watershed virtual image, forming a computable and evolving digital water quantity and quality monitoring system. This article summarizes the overall architecture and construction process of digital twin hydrological monitoring, starting from real-time data access at stations, integration of underlying surface and remote sensing information, and discusses the methods of multi-source data aggregation; Then, the establishment, calibration, and online calibration techniques of three main models were introduced: rainfall runoff and runoff convergence, one-dimensional and two-dimensional hydrodynamics of river channels, and dynamic simulation of groundwater; Finally, the implementation methods of four business applications were provided: real-time water situation monitoring and warning, short-term flood forecasting and warning, flood inundation simulation, and water resource allocation plan deduction.

Keywords: digital twin; hydrological monitoring; hydrodynamic model; flood rehearsal

引言

水文监测一直依靠测站网络以及定期巡测,不能体现产汇流的空间差别,在洪水演进或者水量调度的时候也不能立即推演。近几年来传感器密度、通信能力、模型性能明显提高,从而使得建立与物理流域同步互动的数字孪生系统成为可能。核心就是构造一个可以持续接受实测反馈、实时修正状态的平行系统,把水情态势量化成预演结果和行动预案。已有研究认为时空大数据平台是数字孪生的基础,水利部数字孪生流域技术大纲中提出了感知、数据、模型、业务四个层次的架构。在此顶层设计之下,还要解决由于数据异构、模型耦合、实时同化脱节等所导致的问

题。本文主要研究水文水资源监测领域,以可落地的技术环节为主线,依次论述架构、数据治理、核心模型、业务实现,使各个层次的技术选择和衔接有直接的借鉴意义。

1 数字孪生水文监测总体架构与建设流程

系统纵向分成了感知层、数据层、模型层、应用层。感知层把雨量、水位、流量、地下水、水质、视频等站点的测量数据汇总到同一个数据平台上。数据层用流批结合的方式对清洗、标准化和存储进行处理,并对外提供统一的服务接口。模型层用容器化的方式部署产汇流、河道水动力、地下水模型,并配有在线校正引擎。应用层面向监视、预报、预演和调度,给用户提供人机交互以及推送。

物理部署上,终端用 4G、NB IoT 或者北斗短报文把数据传到前置接入服务,经过规约解析之后写入时序数据库。模型和孪生场景部署在云计算或者边缘节点上,前端使用 Cesium 创建三维场景,实时数据通过 WebSocket 推送给前端。微服务基于 Spring Cloud,各模型封装为独立容器,由 Kubernetes 编排^[1]。

建设流程有五步。一阶段评价监测现状及数据资源,找出感知盲区。二阶段加密站增加雷达水位计、侧扫流量设备,升级通信。三阶段搭建数据治理平台,接入管道、校验规则、标准化模型均予以配置。四阶段适配模型,用历史洪速率定参数、模型链联调。五阶段把孪生场景和业务上线,经过并行预报、人工复核之后投入业务化运行。全程使用增量交付,防止周期过长造成技术堆栈过时。

2 多源数据汇聚与治理

2.1 站点实时监测数据接入

测站按要素可分为降水、蒸发、水位、流量、泥沙、地下水埋深、墒情、水质等。雨量站每 5min 上报累计值,水位站用气泡或者雷达水位计,流量站依靠 ADCP 或者侧扫雷达输出流速和流量,地下水井每小时采集埋深,水质站每小时或者每 4h 上传五参数和氨氮等指标。接入层对 SL651 的报文直接解析入库,MQTT、Modbus TCP 等协议经过网关转换成 JSON 格式的消息。接入服务使用 Netty,消息队列采用 Kafka 进行缓冲,避免数据洪峰造成丢包^[2]。清洗含范围校验、连续性检查、突变标记,异常值写回但是不丢弃。治理之后实时数据写入 TDengine,历史数据保存在 ClickHouse 中,冷数据存放在对象存储上。监测数据接入的技术方案如表 1 所示。

表 1 主要监测数据接入频次与通信方式

站类	监测参数	采集频次	传输协议	数据格式
雨量站	降雨量	5min 累计	MQTT/SL651	JSON/十六进制
水位站	水位	1min	MQTT/SL651	JSON
流量站	流速、断面流量	实时输出	Modbus TCP/SL651	JSON
地下水井	埋深、水温	1h	MQTT/NB IoT	JSON
水质自动站	五参数、氨氮等	1h 或 4h	SL651	JSON
视频站	可见光/热成像	按需/连续	RTSP/RTMP	H.264/H.265

2.2 下垫面与遥感数据融合

下垫面信息属于分布式模型参数化的基本要素。数字高程模型用 ALOS PALSAR 12.5m 数据,填洼之后生成流向、汇流累积量和子流域划分。土地利用以第三次国土调查为本底,结合 Sentinel 2 分类结果进行年度更新,分为水域、城镇、林地、耕地、草地和裸土六个类别。土壤质

地为全国土壤普查图重采样后与 DEM 网格对齐,各类别对应的饱和导水率、田间持水量、凋萎系数。

遥感数据分为准实时和月尺度两条通道。准实时通道处理 Sentinel 1 SAR 影像反演水体范围,洪水期每天一张,经过轨道校正、辐射定标和地形校正之后,阈值分割得到开放水面,给水动力模型提供独立的验证。月尺度通道处理 MODIS NDVI、Landsat 地表温度,得到植被覆盖度图、蒸散发潜力图。所有栅格统一至 WGS84 UTM 投影,重采样为 30m 网格,由 GeoServer 发布 WMS 和 WCS 服务。融合得到的叶面积指数、曼宁系数等参数以 GeoTIFF 的形式接入模型参数库,供产汇流及二维建模使用。

3 核心模型构建与率定

3.1 降雨径流产汇流模型

产汇流用半分布式结构,以子流域为单元。产流采用蓄满产流机制,垂向分为上层张力水层和下层自由水层,主要参数有张力水容量 W_m 、自由水容量 S_m 和壤中流出流系数 K_i 。降雨补充张力水到田间持水量之后,剩余部分进入自由水层,侧向排出形成壤中流,垂向渗漏补给地下水。汇流对地表、壤中、地下径流分别处理,坡面汇流用运动波方程离散,河道汇流用马斯京根分段演算,地下径流用线性水库概化。模型用 Python 实现,NumPy 和 Numba 加速数值计算,封装为 Docker 镜像,通过 RESTful 接口调度^[3]。子流域划分用 D8 算法自动提取河网,人工修正干流连接点。参数率定选择出口站 3 到 5 场典型洪水,目标函数为 Nash Sutcliffe 系数和洪峰相对误差的组合,用 SCE UA 算法迭代收敛后写入数据库,支持版本管理和回滚。

3.2 河道一二维水动力模型

干流洪水演进用一维圣维南方程组,离散格式为 Preissmann 四点隐式差分,上下游边界条件分别为流量过程和断面水位流量关系。断面数据来源于实测大断面成果,每隔 300~500m 设一个计算断面,桥梁、堰坝等内边界用局部损失系数概化。二维水动力模型用来模拟洪水出槽后漫溢的过程,控制方程为二维浅水方程,用非结构三角形网格,网格尺度在河道内精细到 20m,洪泛区放宽到 80m。空间离散用 Roe 格式的有限体积法,时间积分用显式两步 Runge Kutta 法,用 GPU 加速提高运算速度。一维和二维模型的耦合位置选在堤防或者河岸线上,用侧向联解的方式,一维模型给出沿程水位作为二维区域的边界,二维模型把越过堤顶或者岸线的单宽流量反馈给一维模型。联解时步长取两者中的最小值,用迭代的方法保证质量守恒。糙率系数分区赋值,主槽糙率根据实测水面线反

演,滩地、洪泛区糙率根据土地利用类型经验取值,在历史洪水检验中做相应调整。所有的网格、断面以及糙率分区的数据都被存入 PostGIS 空间数据库当中,而这些数据是模型引擎启动之后才会被动态加载进去的。

3.3 地下水动态模拟

地下水流模型用 MODFLOW 6 建立,模拟范围同流域边界一样,垂向上简化成潜水含水层和承压含水层两层。网格分辨率为 200m,和地表水模型网格空间上嵌套,便于交换通量的空间聚合。补给项有降雨入渗、灌溉回归、河道渗漏,排泄项为地下水开采、基流排出。降雨入渗系数分区根据土壤质地和地下水位埋深来确定;河道渗漏用达西定律计算,河水位来自一维水动力模型,河床渗透系数根据河床底质粒径给出。模型校正阶段用长期观测井的月尺度水位序列,用 PEST 自动化率定模块调整渗透系数、给水度,使模拟水位和实测水位的均方根误差小于 0.5m。校正后的模型封装成 Python 调用的动态链接库,给出单步迭代接口,给数字孪生平台在需要评价地下水响应的场景里快速运算,比如干旱期预报或者人工回补方案推演。地下水位变化的计算结果用 NetCDF 文件保存,然后通过 Web 服务发布等值线图 and 过程线。

3.4 模型参数在线校正与验证

模型离线率定得到的参数是静态最优的,不能适应下垫面的变化以及前期土壤湿度的差异。为了提高预报的准确性,平台设了在线数据同化模块。算法用集合卡尔曼滤波 EnKF,选择水位、流量作为观测变量,把河道糙率、上层土壤含水量、自由水含量作为状态变量。每次观测数据到来时,对于集合中的每一个成员分别进行模型预报,求出预报状态和观测的协方差,然后根据卡尔曼增益来更新状态和参数,从而得到下一时间段的预报。预报模型设置 200 个集合成员,每个集合成员的参数以及初始状态加上高斯扰动。同化窗口设为 6h,同化频次和水位遥测同步。模块独立运行,用 Redis 接收观测消息,调用模型微服务做集合预报,完成更新后把分析场写入参数库。通过验证试验可知,连续丰水条件下在线同化可以使得水位预报的均方根误差降低 25%~40%,洪峰时刻相位误差明显收敛。系统还设有模型性能监视指标,当连续三个时段预报误差超过阈值的时候,就会自动执行参数再标定作业,防止预报质量一直下滑。

4 监测业务应用实现

4.1 实时水情监视与异常告警

实时监视页面用流域三维场景做底图,站点按观测类型分层叠加。雨量站用柱状图表示过去 1h 和 24h 的累计

雨量,水位站浮标随水位高低而上下移动,警戒水位和保证水位分别用黄线和红线表示。右侧面板用曲线的形式来显示典型水文站最近 72h 的水位、流量过程,每隔 1min 就刷新一次。平台后台有规则引擎,可以自由设定异常告警条件,比如水位在 15min 内上涨超过 0.8m,库水位高于汛限水位并且持续上升,流量突变超过阈值但是没有跟雨峰一起出现等^[4]。触发条件之后,告警信息通过短信和移动 App 同步发送到场景中,用闪烁的图标和高亮的标识来提醒值班人员。视频联动功能可以同时点击告警站点的时候调出最近监控点的实时画面,从而对河道漂浮物或者堤防情况做出判断。

4.2 短期洪水预报预警

短期洪水预报每天定时启动两次,分别是 7 时和 19 时,有强降雨预报的加密到每 3h 滚动一次。预报流程串联三条链路,先从气象部门获取 24h、48h 格点降水预报,降尺度到子流域后作为模型驱动;然后调用产汇流模型计算各个子流域的出流过程;最后将出流成果传送到一维水动力模型,求得沿程水位和流量。根据降水的不确定性,用集合预报的方法,在降水场上加入时空相关的扰动生成 50 个集合成员,每个成员独立演算,得到洪峰流量的概率分布和超警概率。预报产品有主要站点洪峰流量、峰现时间、超警持续时长、超警河段分布图等,全部成果以 Web 报告和短信简述两种方式发送到防汛部门。

4.3 洪水淹没预演

当预报洪峰有可能超过保证水位或者发现堤防险情的时候,启动洪水淹没预演。预演以二维水动力模型为主,按照溃口展宽过程引入侧向流量或者漫堤方式给定越浪流量,模拟洪水在堤后区域的发展。模拟区域地形用高精度 DEM 生成,建筑物群用阻力项提高局部糙率。预演结果输出每个时间步的网格水深、流速、淹没范围,用带透明度渐变的水深图层叠加到孪生场景上。系统自动统计受淹村庄、受影响人口、淹没农田面积和阻断道路长度,和预案库中撤离路线做空间交叠分析,在图上标出潜在受困区域。为了保证应急决策的时效性,采用 GPU 加速之后,完成 24h 漫堤演进模拟的时间控制在 8min 之内,可以对不同的溃口情景进行对比推演。

4.4 水资源调配预案推演

在旱季或者水库群联合调度时期,平台用数字孪生模型对各种调水预案做“事前演练”。水资源网络拓扑是由水库、引水闸、提水泵站、灌区取水口和生态基流控制断面构成的,节点特性有库容曲线、供水优先级和下泄限制。推演时输入未来 10 天的来水预报和灌区需水计划,系统

先扣除水库蒸发和渗漏,按照调度规程模拟各个工程的下泄和引水过程,再用河道水动力模型计算沿程流量和灌溉取水口的可引水量,最后输出各个灌区供水满足度、水库期末蓄水量和生态断面流量保障率^[5]。方案对比界面并列显示多个预案的过程线,以缺水损失最小化为准则推荐最优方案,可以允许用户手动调节闸门开度进行人机交互推演。推荐方案可以一键生成调度指令草稿,辅助决策人员快速下达指令。

5 结束语

数字孪生技术在水文水资源监测中所起到的作用,实际上就是把感知、模拟和决策这三者之间的数据流打通。本文从架构、数据、模型、业务四个方面给出了具有工程实施条件的技术路径,通过站点监测数据和遥感信息的多源融合来创建高时效数据底座,以产汇流模型、河道一二维水动力模型和地下水模型为基础,加上在线数据同化来加强状态跟踪,然后在这些基础上实现实时告警、洪水预演、水量推演等关键业务。目前还存在低功耗广域网数据

完整性保障、山区河流糙率自动识别、二维模型大规模运算轻量化、人工智能和物理模型无缝融合四个方面的不足。

[参考文献]

- [1]姚璟,朱雪芳.数字孪生技术在水文水资源领域的应用[J].科技视界,2025,15(31):84-86.
- [2]李斌.数字孪生技术在流域水文水资源精细化管理中的应用研究[J].水上安全,2026(6):43-45.
- [3]吴梦凡,李培岩.数字孪生技术在水文水资源领域的应用[J].应用能源技术,2026(1):145-147.
- [4]王威,宋子敬.数字孪生技术在水文水资源管理中的应用研究[J].城市建设理论研究(电子版),2026(12):217-219.
- [5]周强,杨璐宇,杨帆,等.数字孪生技术在水情教育中的应用研究——以江苏水文科普园为例[J].未来与发展,2025,49(12):154-159.

作者简介:孙莲莲(1999—),女,汉族,安徽人,助理工程师,本科,毕业于宿州学院水文与水资源工程专业,研究方向为水资源管理。