

水文站水文监测业务数字化转型模式研究

陈 静, 胡国山, 毛武蓉, 纪 彭, 高 敏

水利部长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年1月21日; 录用日期: 2025年4月3日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

开展水文站水文监测业务数字化转型是顺应数字时代需求、推动新阶段水利高质量发展的重要路径。本文梳理了水文监测模式发展的四个阶段, 分别为萌芽、形成、发展及现代化阶段, 总结了传统水文监测中流量、泥沙自动监测存在“卡脖子”、监测数据存在信息孤岛和业务割据、监测产品缺乏价值等问题, 以构建数字孪生汉口水文站为例, 从基本概述、总体框架、关键技术及对策等方面提出了水文站水文监测数字化转型模式。该成果可为类似水文站水文监测数字化转型提供参考。

关键词

数字化, 水文监测, 汉口水文站, 现代化

Research on Digital Transformation Mode of Hydrologic Monitoring Work in Hydrometric Station

Jing Chen, Guoshan Hu, Wurong Mao, Peng Ji, Min Gao

Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei

Received: Jan. 21st, 2025; accepted: Apr. 3rd, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

The digital transformation of hydrologic monitoring work in hydrometric station is an important way to meet the needs of the digital era and to promote high-quality development of water conservancy in the new stage. This paper reviewed four stages of the development of hydrologic monitoring mode, which were germination, formation, development and modernization. The paper summarized the problems in traditional hydrologic monitoring such as “bottleneck” in automatic monitoring of discharge and sediment,

作者简介: 陈静, 出生于 1990 年 12 月, 籍贯江苏常熟, 硕士研究生, 工程师, 从事水文勘测、水文分析计算, Email: 819929087@qq.com

文章引用: 陈静, 胡国山, 毛武蓉, 纪彭, 高敏. 水文站水文监测业务数字化转型模式研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(2): 209-215. DOI: 10.12677/jwrr.2025.142022

information silos in monitoring data and work division, lack of value in monitoring products. Taking the digital twin in Hankou hydrometric station as an example, it puts forward the digital transformation mode of hydrologic monitoring in hydrometric station from basic overview, overall framework, key technologies and countermeasures. The results can provide reference for digital transformation mode of hydrologic monitoring in similar hydrometric station.

Keywords

Digitalization, Hydrologic Monitoring, Hankou Hydrometric Station, Modernization

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当前,我国已进入数字时代,水利部坚持把建设数字孪生流域作为推动新阶段水利高质量发展的重要路径[1][2]。水文是水利的基础,是推动水利高质量发展的先行性工作[3],发展水文数字经济是顺应经济社会发展大局的需求。

水文站是开展河湖水文监测业务的前哨,主要从事的水文监测工作是水文的基础性工作之一,可为构建数字孪生流域提供算据,水文站水文监测数字化转型可以理解为借助数字化技术、现代测量技术、通讯技术、计算机网络技术等,采集河流或流域的水文要素,在虚拟空间中完成对水文站物理对象的映射,开展水文数字化转型要从水文站水文监测业务数字化转型开始。

本文梳理了水文监测的发展脉络,针对传统水文监测存在的问题,对水文站数字化水文监测的思路、功能及关键技术进行研究,并以百年老站汉口(武汉关)水文站(以下简称汉口站)为例,建设数字化多源感知、耦合管理及展示运用,形成适合于水文行业的水文站水文监测数字化转型模式。

2. 水文监测模式演进

我国水文监测工作开始较早,其演进过程可分为四个阶段:萌芽阶段、形成阶段、发展阶段和现代化阶段。

2.1. 水文监测萌芽阶段(1949 年以前)

我国最早的水文监测可追溯至 4000 多年前的大禹治水,通过水文调查因势利导洪水。公元前 251 年,李冰在都江堰工程设立“石人”观测水位,开创了水文观测的先河。中国古代水文监测技术手段在明、清以前都较为先进。1840 年鸦片战争后,帝国主义者为其侵华舰船航行服务,陆续在沿海、长江流域设立水尺和雨量器进行水位、雨量观测。中国政府开始学习西方技术,在各地利用近代水文仪器做水准和地形测量。流量测验采用流速仪法和浮标法,泥沙测验采用取样过滤法。但受当时落后社会制度的束缚及西方列强的压迫,水文监测工作发展非常有限且极不稳定[4]。

2.2. 水文监测形成阶段(1949~1978 年)

1949 年新中国成立后,随着水利部、水文局、流域水利机构、地方水文总站等组织的成立,1955 年进行了第一次全国水文基本站网规划并颁布《水文测站暂行规范》(1959 年修改为《水文测验规范》),我国水文监测开始形成统一管理,通过自主研发、改进水文仪器、过河设备,增加水文监测能力。1958 年至 1978 年水文工作曲折前进。上世纪 70 年代开始,水文缆道测流及水位、雨量自记有明显进展。1976 年后,水文资料开始由原来的手工编制过渡到采用电子计算机整编、刊印。

2.3. 水文监测发展阶段(1978~2007 年)

1978 年底随着中国进入了改革开放时期,水文监测工作进入了新的发展阶段,水文机构多次重组、改革,水位、降水自记设备占比渐增,流量、泥沙测验在仪器设备、测验方法等研究方面取得了新成果,如流量测验使用水文缆道或水文测船测验智能控制系统,实现了流量的自动或半自动测验。至 1990 年,全国已全部使用计算机整编水文资料。同时,水文自动测报技术开始迅速发展。

2.4. 水文监测现代化阶段(2007 年~至今)

2007 年施行的《中华人民共和国水文条例》,标志着我国水文事业进入有法可依、规范管理的新阶段,自动化程度高的仪器设备得到推广应用,新技术、新方法也取得了突破进展。近些年,根据新发展阶段对水文工作的新需求,监测手段由传统人工观测逐步转向自动化监测,现代化水平逐步提高[5]。雨量、水位等要素自动监测完备,流量、泥沙在线监测也在不断研究及运用中。

2022 年,水利部提出加快建设数字孪生流域和数字孪生工程,推动新阶段水利高质量发展。水文部门将水文站作为数字孪生流域底板的有机集成,在数字化映射中研究实现“四预”功能[6] [7],如沙市水文站对物理水文站监测全要素和建设运行全过程进行数字映射、智能模拟、前瞻预演[8]。戴村坝水文站建设了部分特征段大汶河干流全真模型,实现洪水全过程的数字流场映射和不同量级模拟推演[9]等,为流域防汛提供数字化技术支撑。

3. 传统水文监测存在的问题

进入数字时代以来,水文站在水文监测业务方面暴露出一些不足,主要有以下几个方面。

3.1. 流量、泥沙自动监测存在“卡脖子”难题

水位、降水、蒸发、水温等水文观测要素的在线自动监测运用成熟,流量要素测验已逐渐向实时在线监测方向发展,但主要集中在中小河流,对于位于长江干流的大江大河站点来说,受水情及周围条件影响,流量在线监测正式投产运用的不多,泥沙测验还以采用测船或缆道等利用常规仪器进行水样采集后,在实验室进行水样处理分析为主,历时较长。近些年流量、泥沙在线监测有大量研究,但其代表性、适用性、推广前景还有待检验。

3.2. 监测数据存在信息孤岛和业务割据

在水文现代化快速发展阶段,往往来不及对水文监测信息化开展整体建设,就有大量短平快的建设匆匆上马,导致存在大量的信息孤岛,形成了资源割据,数据规范程度低、业务数据割据、数据家底不清、数据共享不畅等,已成为制约水文监测数字化转型的短板。

3.3. 水文监测产品缺乏价值

近些年,社会对汛期水位、流量等水文监测数据的关注度日益提高,而水文监测产品还不够接地气,多样性欠缺、展现效果不佳、时效不高,和外界连接不够,无法敏锐感知新变化新需求。面对气象、海洋环保、交通等相邻行业跨界渗透不断加剧,水文相较有一定的差距,水文监测数字化转型要求迫切。

4. 水文站水文监测数字化转型模式研究

以汉口(武汉关)水文站为例,创建了数字孪生水文站系统,研究水文站数字化业务管理模式,以下介绍基本内容、总体框架和关键技术和对策。

4.1. 基本概述

水文站水文监测业务数字化转型要实现水文站现实物理系统向三维空间数字化模型的映射,满足水文站日

常生产管理、数据展示分析、“四预”功能的需求，具体如下：

1) 数字化多源感知

利用卫星遥感、无人机、物联网及 5G 等新一代通信技术支持，搭建空天地一体化智能感知体系，对各类水文监测要素、测验环境、工作场景、地理空间数据等进行多源融合，形成数据底板。

2) 数字化耦合管理

统一多源数据接口和设备管理接口，对多源数据进行统一管理、综合研判。对水文要素传感器、无人机、无人船、缆道等设施进行智能感知和控制，对水文站日常测验任务、测验方案、仪器设备等进行智能化管理。

3) 数字化展示运用

充分利用三维仿真、数字孪生引擎、机器学习、计算机视觉等新一代数字技术，实现水文站三维场景及水文要素仿真模拟，对水文要素水文监测要素进行预报、预警，预演水文监测要素过程，为预案制定服务。

4.2. 总体框架

研究水文站水文监测数字化转型模式，构建数字孪生水文站系统可分为四层结构，分别是基础设施层、数据底板层、孪生引擎层及展示运用层(见图 1)。

基础设施：指利用空天地一体的水文监测手段、监控设备、5G 等安全稳定的通讯网络及信息基础环境等实现数字孪生的基础支撑和数据交互。

数据底板：为系统提供业务数据存储支撑，包括水文站基础数据、水文监测数据、地理空间数据及水文站业务管理数据等其他多源数据。

孪生引擎：数据引擎。对多源数据进行统一接入与集成、存储、管理、共享及服务；仿真引擎。利用可视化模型对场景、数据进行可视化显示服务，利用水文、水力学模型、AI 智能模型等进行水文要素过程模拟和预报；知识引擎。利用水文知识、业务规则、专家经验、预报调度方案、水文规范标准等，制定最优方案。

展示运用：根据用户需求提供丰富的应用方式，如数据展示、三维场景仿真、水文站“四预”功能、水文站管理等。



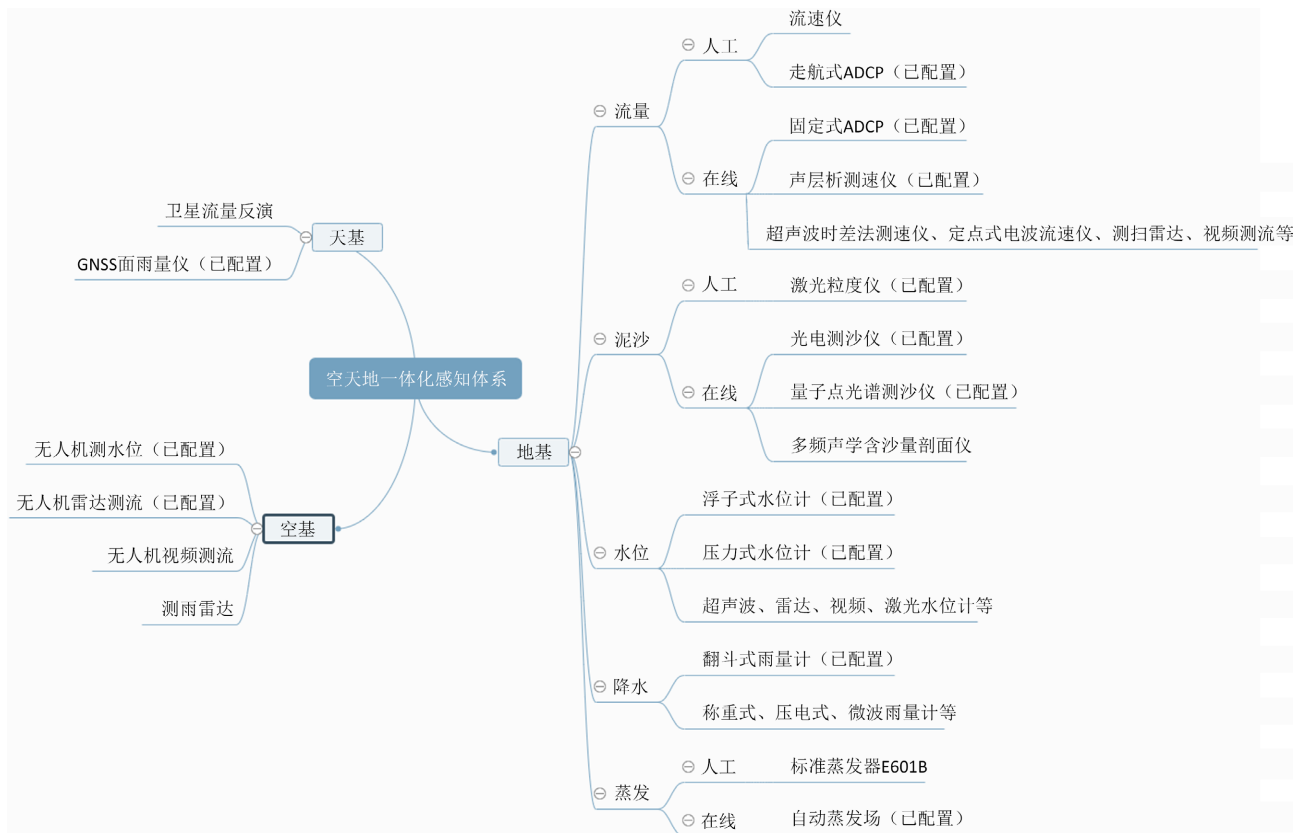
图 1. 水文站水文监测业务数字化转型总体框架

4.3. 关键技术

1) 空天地一体化智能感知技术

水文监测业务数字化转型的首要任务即对水文监测要素开展数字化多源融合，搭建空天地一体化智能感知体系。天基水文监测包括卫星流量反演、GNSS 面雨量观测等；空基水文监测包括无人机测水位、无人机雷达、视频测流、测雨雷达等；地基水文监测范围较广，涵盖水位、流量、泥沙、蒸发、降水等各类要素。

要根据水文站测站特性、地理条件，充分利用现有测报设施设备及场地，通过资源整合，从水情适应性、安装可靠性、仪器稳定性、断面代表性等方面综合考虑新增配备在线监测设备(见图 2)。如汉口站中低水位观测采用气泡压力式水位计、高水采用浮子式水位计，降水采用固态存储翻斗式雨量计，配合 YAC9900 多路径遥测终端实现自动测报。流量在线监测考虑测验断面高水时接近 2 km，岸基雷达、时差法等在线测流方法并不合适，选用在测流固定垂线起点距 1200 m、1700 m 位置附近打造了 2 个专用浮标船，分别安装 1 台垂直式 ADCP 用于在线测流。同时，在专用浮标船上安装光学测沙仪、量子点光谱测沙仪等进行泥沙在线监测。



2) 三维可视化建模技术

汉口站数字孪生系统采用 3D 及 BIM 技术等国际标准通用的技术进行模型搭建，并用 Unity3D、引擎技术进行三维场景动态实现，这种三维建模技术是在 Unity3D 中创建和编辑三维模型，相较于其他常见的三维建模技术，拥有出色的实时 3D 渲染技术，对外展示时考虑对客户端机器、服务器配置以及网络带宽等资源的要求相对较低，访问响应速度快。

针对需要孪生位置使用无人机进行倾斜拍摄后，对数据进行分析处理。然后使用专业的建模软件(如 3dmax、Maya 等)，结合水文站测验大断面、河道数据创建三维地形、建筑物、水体等模型(见图 3)。



图 3. 汉口站站房建模

3) 数据处理技术

对水下地形、数字高程 DEM、倾斜摄影、正射影像 DOM、BIM 模型等地理空间数据进行专业解析，构建多源数据收集处理组件，兼容多种数据源，数据库接入采用 MySQL、Oracle 及 SQL Server 的 JDBC 驱动进行连接。提供文件上传接口，使用文件解析库(如 Apache POI、Jackson 等)对上传的文件进行解析，提取所需数据。设计数据仓库，对从各种数据源获取的数据进行清洗、转换和标准化，使用 ETL 工具或自定义脚本实现数据的抽取、转换和加载过程，通过 REST API、Web Service 或 GraphQL 等方式提供数据共享服务。

4) 专业模型及知识库建设

模型是水文监测数字化转型、水文站实现“四预”功能的重要算法支撑，主要分为三个类型：一类是水文模型，如新安江模型、SWAT 分布式模型、神经网络模型、输沙单位线模型、统计相关法、响应函数模型等[10]；一类是水动力模型如一、二维水沙数学模型、简化水力学模型等[11]；此外还有人工智能 AI 模型。如汉口站在测站特性分析基础上，提出流量概化模型，以机理算法与智能算法“双轮”驱动的形式，采用 scikit-learn 中的 cross_val_score()函数基于均方误差指标来评估算法，最后筛选出 SVM、Ridge 算法进行深入研究，通过大量历史数据的训练，赋能在线推流精度达到整编水平[12]。

利用 AI 知识引擎作为水文知识平台的核心组件，采用自然语言处理、信息检索、机器学习等技术实现对海量水文知识、业务规则、专家经验、预报调度预案、水文规范标准的获取、整合、检索和推理，利用大数据和云计算技术实现知识的高效存储和计算，结合可视化技术，提供直观的知识展示和交互体验。

4.4. 对策

水文站水文监测数字化转型是水文监测业务全流程、管理全过程、服务全链条的数智化升级，水文站水文监测数字化转型过程需要对组织结构、监测技术、人才队伍等多个方面进行系统性的升级改造，以适应数字化时代的变化和挑战。

要根据各个水文站的测站特性,从顶层设计出发,以问题为导向,根据实际需求,明确水文监测业务数字化转型的愿景、目标和路线,切实加强各部门之间的有效沟通和协调。

要加快推进水文国产仪器研发应用,增强创新意识,敢于打破常规,修订在线监测相关的规范准则,因地制宜构建多维感知、多源融合、“天空地”一体化的立体水文感知体系,不断提升水文感知精度与时效性。

要培养一支既掌握数字化、网络现代化技术,又熟悉水文监测业务的专业队伍,引入新一代数字化技术和工具的同时,掌握各类模型、知识库,了解水文站的实际需求,能够从水文监测业务流程、细节、管理要求等全过程、全方位进行数字化映射,真正为水文监测业务服务。

5. 结语

本文从水文监测模式的演进、传统水文监测存在的问题、水文站水文监测数字化转型模式的基本概述、总体框架、关键技术和对策等方面,以汉口站数字孪生系统为例,研究了数字经济时代水文站水文业务监测数字化转型的模式。本文认为,水文站水文监测数字化转型可为构建数字孪生流域提供基础支撑,有效提高水文行业的管理效率和决策水平,是顺应经济社会发展大局的必然选择。这一研究成果可为其他类似水文站的数字化转型提供有益借鉴。

参考文献

- [1] 李国英. 建设数字孪生流域推动新阶段水利高质量发展[J]. 水资源开发与管理, 2022, 8(8): 3-5.
- [2] 李国英. 加快建设数字孪生流域提升国家水安全保障能力[J]. 中国水利, 2022(20): 1.
- [3] 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.
- [4] 王俊. 水文监测体系创新及关键支撑技术[Z]. 长江水利委员会水文局, 2008-09-28.
- [5] 林祚顶. 加快推进水文现代化全面提升水文测报能力[J]. 水文, 2021, 41(3): 4-7.
- [6] 肖仲凯, 宋世柱, 仲跻文, 等. 数字孪生水文站建设与应用关键技术研究[J]. 水利水电快报, 2024, 45(11): 112-118.
- [7] 安觅, 隆威, 李瑶. 数字孪生水文站研究与应用[C]//中国水利学会. 2023 中国水利学术大会论文集(第一分册). 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏南水科技有限公司, 2023: 291-294.
- [8] 王志飞, 原松, 高明, 等. 数字孪生沙市水文站建设研究[C]//水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 《中国防汛抗旱》杂志社, 中国水利学会减灾专业委员会. 第十四届防汛抗旱信息化论坛论文集. 长江水利委员会水文局, 2024: 615-618.
- [9] 魏晓雯. 探索水文站数字化转型路径不断夯实“四预”水文基础[N]. 中国水利报, 2023-06-08(005).
- [10] 任明磊, 赵丽平, 陈智洋, 等. 面向防洪“四预”的数字孪生流域水利专业模型研发与实践应用——以数字孪生飞云江流域为例[J]. 中国水利, 2024(5): 58-64.
- [11] 李强, 张燕, 刘静, 等. 水文数字孪生模型中的水力学方法研究[J]. 水利水电技术, 2021, 52(4): 48-53.
- [12] 周波, 邓山, 陆鹏程, 等. 汉口水文站 AI 流量模型构建及应用研究[J]. 水文, 2024, 44(5): 1-9, 105.