

数字孪生流域，如何智慧管水

本报记者 陈旻

核心提示

2021年，水利部发布《关于大力推进智慧水利建设的指导意见》，指出到2025年，全国将建成包括闽江在内的七大江河数字孪生流域。

作为“数字中国”与水利建设的排头兵，福建率先开启了探索，福州溪源溪小流域（溪源水库）、九龙江北溪两个数字孪生项目于2022年启动建设，入选水利部数字孪生流域建设先行先试试点。目前，两个项目均已建设完成，同时水利部中期评估均为优秀，溪源溪小流域（溪源水库）数字孪生试点项目获选水利部优秀案例。

近日，记者来到溪源溪流域、九龙江北溪流域，感受数字孪生流域项目如何为防洪防汛、水资源调度提供信息技术支撑，为智慧水利带来“可视、可感、可知”的数字化、可视化应用。

智慧测报，防洪更及时

数字孪生技术通过计算机的强大算力，更精准测算出可能出现的险情

什么是数字孪生流域？近日，记者走进福州市水利局综合调度指挥大厅，大屏幕上，虚拟仿真的溪源溪从福州永泰县赤岸发源，一路汇集类雷头溪、大清坑溪、可溪，经过一堤、一库、三河、三站、五闸，从闽侯县上街镇倒著自然村入境，至上街镇马排村汇入南港。屏幕上还清晰叠加着当地的实时雨情、水情、气象预报等监测数据，及各水库、关键节点的断面水位、气象、周边经济社会信息等数据。

溪源溪，福州市闽江下游南港的一条小支流，河长43公里，流域面积208平方公里，是福建省暴雨中心区，暴雨强度大，洪水暴涨暴落，易突发山洪。在2005年“龙王”台风、2007年“圣帕”台风期间，溪源溪流域曾发生严重内涝。此后，溪源溪流域防洪排涝工程体系逐步完工，为流域防洪防涝打下了坚实基础。“溪源溪流域流经闽侯上街镇、福州高新区，沿途汇集福州大学城的涝水。”福州市水利局副局长陈异介绍说，该流域防洪减灾意义重大。

眼前的这套系统，在防御今年9月的“海葵”台风中发挥了作用。9月5—7日，受今年第11号台风“海葵”的严重影响，溪源溪流域遭遇强降雨。数字孪生项目虽是试用，但威力初显。

“预报显示，溪源水库最大入库洪峰将达到每秒1290立方米，最高库水位99.32米，超汛限水位14.12米，水库24小时洪量为2208万立方米，48小时洪量为3265万立方米……达到百年一遇洪水标准。”福州溪源溪小流域（溪源水库）数字孪生项目承建单位——四创科技有限公司的项目负责人陈炜回忆起当时的情形。

根据不断滚动的水雨情预测、预报和预警，9月4日12时，溪源水库管理处启动防御台风、暴雨Ⅱ级应急响应。根据预报的水雨情变化趋势，这套数字孪生系统生成了调度方案，建议溪源水提早预泄腾库，并逐步加大预泄流量。参考预案与实际水情，9月5日零时，水库将预泄流量提高到了泄洪洞的最大允许过流量——每秒93.8立方米。

9月5日5时，溪源水库最大入库洪峰达1290立方米/秒。结合滚动生成的预案，溪源水库及下游流域的各个闸站展开联合调度。5时30分起，水库溢洪道五孔闸全部开闸泄洪，成功削减洪峰1135立方米/秒，削峰率达88%，最大程度减少了下游洪涝灾害损失，保障了人民群众生命财产安全。

“说明系统可为防洪减灾提供有力支撑。”陈炜说，随着在未来实战中的进一步优化，预报、预警、预演、预案将越来越精准，全面提升溪源溪小流域山洪灾害防御能力，为江河安澜筑起一

道“数字屏障”。

“减少台风和暴雨带来的溪源溪小流域洪涝灾害损失，保障溪源溪小流域公众生命财产安全，就是数字孪生项目的主要目的。”陈异说。

上游某条支流上空降下的一场雨，可能对几十公里外的城区产生什么影响？这样的“蝴蝶效应”如何发生，以往靠的是人工现场查看与历史经验，往往有人力难及之处；而数字孪生技术，则通过计算机的强大算力，更精准测算出可能出现的险情。

今年5月份举行的2023年福建省水旱灾害防御综合演练中，该项目通过算力，推演出其中的“蝴蝶效应”过程。

“根据预报，未来24小时，溪源溪流域和闽侯上街区域普降暴雨，平均过程雨量达300毫米，局部将超过450毫米。预测溪源溪流域上游将出现山洪，下游受闽江潮水顶托，大学新区可能出现严重内涝，建议对溪源溪流域库、湖、闸、站进行联合调度！”当指挥调度中心接到预报，溪源溪小流域（溪源水库）数字孪生的“四预”（预报、预警、预演、预案）应用立即作出反应——

水库自动预报显示：溪源水库当前水位84.19米，入库流量690立方米/秒，出库流量120立方米/秒，根据预测，1个小时后即5:00入库洪峰流量将达900立方米/秒，超过10年一遇。

系统实时监测水雨情、水库水位及汛情动态，预警系统滚动开展了洪水预报、发送山洪预警单。

结合洪水预报结果，根据设定的预警阈值，溪源溪流域数字孪生平台对流域内超警水文站点、超汛限水库、超警/超保河段等存在致灾风险区域告警。

参考方案迅速生成：采用“泄洪洞+坝顶溢流”的组合泄洪方式，泄洪洞的设计流量每秒120立方米，根据下游河道安全过流能力，溪源水库按每秒300立方米泄洪，错峰叠加区间洪水，预计榕桥水闸水位7.1米，下游行洪安全，不会出现洪水漫堤。

“模拟了山洪灾害监测预警、溪源溪流域联合调度等场景，溪源溪流域数字孪生项目在水旱灾害防御综合演练试运用中取得良好成效。”福州市水利局副局长陈异说。

自动计量，调水更精准

精细化调度既能保障下游城市不“渴”，也不浪费水源，保障枯水期用水

近日，记者来到福建省九龙江流域中心北溪水闸调度中心。调度中心位于九龙江北溪河口、漳州市台商投资区与龙海区交界处的郭洲头，管理着九龙江北溪最后一级控制性水闸工程——北溪水闸，它是九龙江北溪引水工程的龙头。深秋时节，开阔水面上白鹭不时飞过，这里的水质常年优良，是厦门原水供应的枢纽中心，承担着厦门80%的原水供应。

“流域降水年内分配不均，丰、枯水季节的径流量悬殊。”福建省九龙江流域中心副主任林建洪介绍说，枯水期如何合理利用水资源、保障供水安全，成为九龙江流域工作的重点和难点。

2022年10月，数字孪生九龙江北溪项目启动建设，这是全国第一批数字孪生流域试点中唯一将水资源配置与调度管理作为重点之一的试点项目。

九龙江流域中心副总工余启成介绍说，项目平台汇聚了82个水位监测、52个雨量监测、6个水质监测、3个藻类监测、32个流量监测、186个视频以及水工程信息等数据资源，还要考虑的因素包括万安、白沙、枋洋等周边水库的蓄水情况，厦门、漳州及龙岩市的生活、工业、农业及生态需水情况……

如何对大量水利工程实现互联互通、系统调度，既能保障下游城市不“渴”，也不浪费水源，保障枯水期用水，这样“烧脑”的精细化调度，需要信息化的助力。

经过半年建设，数字孪生九龙江北溪项目逐步成型。今年4月，“数字孪生九龙江北溪”项目成功上线了流域防洪、水资源综合调度、工程综合运行管理等应用场景。

在北溪水闸调度中心大屏幕上的“水资源调度与管理系统”，除了北溪引水工程左、中、右三条干渠的实时水量，还密布更多的数据与节点——江东泵站、江东水闸、漳州二水厂、龙海自

来水厂、角美水厂……这都是下游的“海量”用水户，包括生活用水、生产用水、农业灌溉、生态排涝等多种用水需求。

一旁的实时数据不停滚动：北溪水闸当前蓄水量、未来一段时间的水量增减、预计未来 10 天可供水量，根据取水户计划用水量，是否存在用水缺口……

“在水资源调配应用上，同样能实现‘四预’功能。”余启成打开预报版块，上面显示着北溪流域的水、雨情的实时监测数据，与降雨预测结合，自动生成流域内的来水预报。全流域梯级电站上下游的水位变化，也在实时监控中，结合水量、计划用水量与不同场景的用水需求，系统就可以自动分析供需平衡，计算出水量缺口。

数字孪生九龙江北溪项目的承建方、四创科技的项目负责人苏晋吉向记者模拟演示了调水过程：假使预报系统发现未来 10 天下游有 100 万立方米的用水缺口，在系统中打开预演方案，在设置中输入“应急调水”，时间为一天，为北溪水闸站补水 100 万立方米，以及选择“时间快”的方案需求，点击“分析”键，顷刻间，应急调水简报生成，措施为北溪从上游到下游，万安水库日均最小出库流量为每秒 10 立方米，白沙水库保持日均最小出库流量为每秒 20 立方米，合溪水库为每秒 40 立方米，溪仔口水库为每秒 60 立方米，华口、小杞水库为每秒 80 立方米……

当调度中心确定了较优的可行性方案，系统便自动生成了“操作票”，下发至需要调度的水库水闸，各水库就可依令开闸放水，无需像以往人工调取数据、开会研判后再跨部门协调与下达通知。

“通过‘数字大脑’，在防洪、水资源调度的科学决策上助我们实现精细化决策和科学化调度，保障供水安全，更好地为厦门、漳州等地市经济社会发展服务。”林建洪说。

今年夏天的“海葵”及紧随而来的“苏拉”台风是这套数字孪生技术真正的试金石。余启成说，两个台风形成的“列车效应”，导致九龙江北溪流域发生超过每秒 2000 立方米的洪水，而依托九龙江北溪模型平台的并行计算，每间隔 1 小时，节点预报方案被自主滚动构建。

“在数字孪生的助力下，我们提前一天预判浦南、长泰、北溪水闸等节点水位及洪峰流量；预判了北溪干流洪峰到达北溪水闸的时间和下游潮水高潮时间接近，受潮水顶托，闸门泄水能力可能被削弱。”余启成说，根据项目的三维场景模拟仿真演示，调度专家及时制定、调整调度方案，辅助防汛指挥部及时下达“全开闸”泄洪指令，并于次日上午下达了“下闸蓄水”指令。“全开闸泄洪 12 小时，抵御九龙江北溪流域超警、超保洪水。”

虚实融合，开启“四预”之门

实现物理流域与数字流域之间的动态、实时信息交互与深度融合

“数字化不仅为了‘好看’，更是为了‘好用’。”福建省水利厅水旱灾害防御与水文处蔡海鹏表示，传统水利已难以满足当下经济社会发展提出的专业化、精细化、智能化管理要求，现代水利需要以流域为单元、以江河水系为经络、以水利工程为节点的现代水利基础设施网络平台。

“为防灾减灾‘四预’（预报、预警、预演、预案）提供智慧化支撑，是数字孪生流域的应用之一。”蔡海鹏说，根据当地实际情况，还有水资源调配、节水等许多应用，我省选择溪源溪小流域与九龙江北溪流域试点，除了基础较好，也是现实需要。溪源溪小流域的应用重点在防洪，九龙江北溪流域的数字孪生则着重水资源调配，为下游社会经济发展服务。“希望通过数字孪生流域建设，为我省现代化水利建设的防灾减灾、水资源配置等重要任务激活‘数字引擎’。”

数字孪生流域，是对物理流域进行全要素、水利治理管理全过程的数字化映射，实现物理流域与数字流域之间的动态、实时信息交互与深度融合。

“数字孪生流域的基础，就是流域的物理与水利数据构成的‘数据底板’，也是系统的‘算据’。”陈炜介绍说，系统通过水利专业“算法”，依托“算力”，就可以自动计算分析，生成各类水利应用的决策建议方案，助力科学提前规避风险、减少损失或提升效益。

陈炜打开溪源溪数字孪生流域的预报版块，手动输入溪源水库近 3 天的预报雨情，须臾之间，水库的水量预报、上下游各处水位、预警发布、风险区域淹没影响分析、水情预演、调度作业预

案、淹没地区的逃生路线……全部自动算出，一一呈现在大屏幕上。

反之，在某个断面防洪水位上输入设定值，系统很快逆推出上下游应何时开放水闸、进出水量如何控制，并生成了预演模型，作业全流程与结果一目了然。

2022年，四创科技成为溪源溪小流域（溪源水库）数字孪生项目的承建方。

面对这一全新的课题，项目团队将重点之一放在了数据底板的精细化上。“对数据数量、质量的严苛要求，是精准测算的基础，也是项目的一大挑战。”陈炜说，他和团队整整两个月顶着福州的烈日，沿着溪源溪，在溪源水库、沿途每个水闸、每个村庄实地调研，与水工管理人员、老水利人、村民访谈，一一了解哪个河段容易泛滥，哪个村庄地块容易被淹，日常如何管理水利工程，历史经历过的洪涝数据……在地图上，定出了100多个断面水位感知点。

“比如溪源溪的055断面位于邱阳河，就是在走访中发现的重要点位之一。”陈炜说，此处河道变窄、地势低，容易发生淹没风险；但又紧邻上街镇沙埕村与红峰村交界处，红峰小学就在附近，人口密集。团队在这里设点，并设置了安全的断面水位。基于这个安全水位，一旦发生强降雨，系统可以自动逆推出上游的水库和侯官、榕桥两个水闸如何调度，保证邱阳河附近居民的安全。

经过水利专家助力，与多次无人机航拍、倾斜摄影、BIM模型、激光点云扫描，团队终于打造出全流域的高仿真、智能化的水文映射数字化集成分析展示。“三维地图上每一道弯、沿岸每一个村落、每一个建筑与水利设施，甚至河岸的植被、河流水质，都还原了现实。”陈炜说。

数字孪生技术，犹如给河流装上“最强大脑”。我省从顶层设计上进一步完善智慧水利建设，加快制定《福建省数字孪生水利（一平台）建设三年行动方案》，目标是至2025年，逐步建成信息共享、管理高效、服务优质、具有“四预”功能的福建省数字孪生水利平台，做到对内全行业“一屏管水”、对外全社会“一屏看水”，推动水利高质量发展和治理能力提升。