

基于数字孪生的水资源优化调度管理方法及系统研究

吾尔古丽·吐送尼亚孜

塔里木河流域和田河水利管理中心，新疆 和田 848000

[摘要]随着水资源短缺这一问题变得日益严峻起来，传统水资源管理所采用的方式已经很难去契合那复杂且多变的环境方面的需求了。数字孪生技术属于一种新兴的数字化相关手段，它给水资源优化配置调度管理带来了全新的解决办法。文章着眼于干旱地区水资源调度管理所具有的特殊性，同时结合数字孪生技术自身的内涵特点以及其关键技术层面的内容，对传统水资源调度管理存在的局限性展开了较为细致的剖析，并且在此基础之上提出了一种基于数字孪生的水资源优化配置调度管理的具体方法。

[关键词]数字孪生；水资源调度；多源数据融合

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18062 中图分类号: TV697

文献标识码: A

Research on the Optimization and Scheduling Management Method and System of Water Resources Based on Digital Twins

WUERGULI Tusongniyazi

Tarim River Basin Hotan River Water Conservancy Management Center, Hotan, Xinjiang, 848000, China

Abstract: With the increasingly severe problem of water scarcity, traditional water resource management methods are no longer able to meet the complex and ever-changing environmental needs. Digital twin technology is an emerging digital technology that provides a new solution for optimizing the allocation, scheduling, and management of water resources. The article focuses on the particularity of water resource scheduling and management in arid areas, and combines the inherent characteristics and key technical aspects of digital twin technology to conduct a detailed analysis of the limitations of traditional water resource scheduling and management. Based on this, a specific method for optimizing water resource allocation and scheduling management based on digital twin is proposed.

Keywords: digital twin; water resource scheduling; multi source data fusion

引言

在现代社会发展、人口增长以及气候变化等多方面因素的影响下，水资源污染或短缺问题开始日益突出。随着水利基础设施建设的快速发展，水资源精细化管理的现实需求持续增强，当前水资源利用效率不足与调配机制不健全等问题突出。因此，传统水资源调度方法已无法满足当前的水资源调度需求，基于智能技术的水资源调度也开始备受关注。数字孪生技术通过构建物理世界与数字空间实时交互的映射关系，为实现水资源系统的精准感知与智能决策提供了技术上的可能，近年来在水利行业的应用范围不断扩大且深度持续增加。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生内涵与特征

数字孪生说到底就是借助数字化的方式去构建物理实体的虚拟映射，进而达成物理实体和虚拟映射之间能够实时进行数据交互并且互相驱动优化的一种技术框架，它的核心特点在全要素数字化、实时交互性以及动态预测性等诸多方面都有所体现。具体来讲，在水资源管理这个领域当中，数字孪生系统会依靠布置在流域或者水利工程处的多种多样的感知设备，不断地去采集像水情、工情还有雨情这类的关键数据，而后依据这些数据来构

建起一个有着极高保真度的水资源系统的虚拟模型，如此一来便能对物理实体的运行状况予以实时的监控，同时还能较为准确地预测其未来的发展走向。在干旱地区的某个流域，通过构建数据底板以及模型库这两项举措，成功地将相关业务进行了深度的应用，使得水量调度的精准度得以提高，水资源利用的整体效能也有了明显的提升。

1.2 数字孪生在水资源领域的应用现状

水资源领域的数字孪生技术应用已经逐渐从起初的概念探索阶段迈向实践推广阶段，由此形成了一系列多元化的应用场景，像是流域管理、工程调度以及灌区节水等。就跨区域调水工程来讲，某一大型调水工程在部署了数字孪生系统之后，把设备监测点的数量拓展到了数千个之多，并且还引入了智能设备来开展自动巡检工作，从而达成了从以往被动地等待故障的出现转变为如今主动去防范风险这样一种根本性的改变^[1]。再看灌区节水领域，我国干旱地区的某个地方通过搭建数字孪生灌区试点以及防洪预报预警预演预案系统，基本上实现了对供水主管网和扬水主泵站的自动化远程控制，这在很大程度上提高了该地区水资源调控的能力以及利用的效率。

2 水资源调度管理的问题与需求分析

2.1 传统水资源调度管理的局限性

传统水资源调度管理方式于干旱地区遭遇了数据获取滞后以及决策过程单一这两重困境,很难契合复杂多变的水资源系统运行需求,其局限性突出表现在监测能力不够以及调度模式较为粗放等诸多方面。其一,传统管理模式大多依靠人工巡检和定点监测,数据更新的频次不高,并且覆盖的范围也有限,没办法达成对水资源系统运行状态的完整感知以及实时把控。其二,现有的调度决策过程过分依赖历史经验以及固定规则,缺少对多源信息以及未来情景展开综合分析的能力,这就使得水资源调配难以依据实际需求的变化来实现动态优化。

2.2 数字孪生驱动的调度管理需求

干旱地区水资源短缺情况日益严重,供水保障要求也在提高,水资源调度管理迫切需要借助数字孪生技术,完成从依靠经验到依靠模型的转变,这给系统构建提出了一些明确需求,比如要能全面感知,做出智能决策等^[2]。在数据方面,得突破多源异构水资源数据整合的难题,建立一个可融合遥感监测、地面站点以及物联网设备的全方位感知体系,达成从水源到用水户全链条的数据采集与传输。在模型方面,得开发能准确刻画水资源系统动态特性的仿真模型和优化算法,具备对水资源调配过程进行精准模拟以及多方案比选的能力。

2.3 系统建设目标与功能要求

建设基于数字孪生的水资源优化配置调度管理系统,应把实现水资源可持续利用以及保障供水安全当作根本目标,要满足业务应用实用性和技术架构先进性这两方面功能要求。具体来讲,该系统得有对水资源系统运行状态进行实时监控和动态评估的能力,能借助布置在流域及工程处的多种感知设备,接连不断地采集并更新像气象水文、工程运行这类关键数据。系统还得具备对水资源调度方案展开模拟仿真以及优化比选的功能,可依据来水预报与用水需求的变动情况,动态地生成并评估不同调度策略实际施行的效果。

3 基于数字孪生的水资源优化调度管理方法

3.1 多源异构数据采集与融合方法

多源异构数据的高质量采集以及有效融合,乃是数字孪生系统得以良好运行的重要根基所在,这就要求综合运用天空地一体化监测方面的技术以及数据治理的相关方法,去构建起一个可覆盖全要素并且贯穿全过程的水资源数据采集传输体系。在数据采集这个层面而言,得依据水资源管理业务实际的具体需求状况,合理地去布设像水文站点、水质传感器还有视频监控这类感知设备,并且要积极地引入诸如无人机航拍以及遥感监测等全新的技术手段^[3]。至于数据融合方面,那就需要建立起统一的水资源数据标准以及相应的规范,进而构建起能够对气象水文、

工程运行以及用水需求等多源信息加以整合的数据底板。尤其需要注意的是,干旱地区在开展水资源数据采集工作的时候,务必要更为着重地体现出冰雪融水补给以及农业灌溉用水所具有的特点,从而形成能够精准反映出当地水资源形成以及消耗规律的数据集合,以此来为后续的模型构建以及决策分析给予充足且可信的数据支撑。

3.2 水资源系统动态建模与仿真方法

水资源系统的动态建模以及实时仿真属于数字孪生技术里极为关键的环节,要想达成这一目标,得把机理模型和数据驱动模型很好地融合起来,进而构建起一套能够精准描绘水资源系统行为特点以及演化规律的数学模型体系^[4]。具体来讲,要依据干旱地区特有的水文特性还有用水规律去开发那种可模拟地表地下水相互转化过程以及作物耗水机制的专业模型,并且还得构建能体现水利工程运行特性以及水资源调配规则的调度模型,以此具备在不同来水情形以及用水需求状况下生成方案并评估其效果的能力。若想提高模型的实际应用性以及计算效率,能够引入像机器学习这类的人工智能技术,借助对历史数据展开学习挖掘,建立起虽简化却有效的代理模型,让这些模型有机组合起来协同运行,它们共同组成了数字孪生系统开展情景模拟以及方案优化的模型根基,给水资源调度决策给予了强有力的科学分析工具,能让管理者在虚拟环境当中对各类调度方案予以充分的测试以及比较。

3.3 多目标优化调度决策方法

在干旱地区,其水资源系统较为复杂,这就需要构建起一种多目标优化调度决策的方法,这种方法要能对经济社会的发展以及生态环境的保护加以统筹考虑。借助引入智能优化算法还有多准则决策分析方面的技术,进而达成让资源配置实现综合效益的最大化这一目的。具体来讲,得先去构建一个包含有经济、社会以及生态等诸多维度的调度目标体系,把各个目标之间存在的竞争关系以及它们的优先顺序都明确清楚。就好比某个流域所实施的生产、生活、生态用水的统筹管理目标一样,依靠精准的调控手段,切实保障了该流域里面农业灌溉、居民饮水以及湿地补水等多种用水的需求都能够得到满足^[5]。接着,还得去研发那种能够对高维非线性优化问题予以处理的智能算法,以此来生成在多个存在竞争的目标之间达成平衡的帕累托最优解集。还要建立起考虑到不同主体的偏好情况以及风险态度的决策规则,从数量众多的非支配解当中筛选挑选出能够契合当前决策情景的最优调度方案。

3.4 风险预警与应急响应策略

干旱地区的水资源系统面临着极端气候以及突发污染等诸多风险,这就得去建立起依托数字孪生技术的风险预警以及应急响应办法,进而形成从风险识别一直到应急处置的完整业务闭环。在风险识别这个层面,要充分借助数字孪生系统所具备的实时监测还有动态预测的能力,去

构建起涵盖水文水质以及工程安全等多个类别风险源的识别指标体系。就预警发布来讲,得依照风险的发展状况与可能产生的后果,去制定出科学且合理的预警阈值以及发布流程,并且借助多种通信渠道来保证预警信息可以及时并且准确地传达到相关责任主体那里。在应急响应这块,要依靠数字孪生系统的预案管理功能,形成针对不同风险情景的处置方案库以及资源调度策略。

4 水资源优化调度管理系统设计

4.1 系统总体架构

基于数字孪生理念打造的水资源优化配置调度管理系统,其架构设计宜采用分层模式,具体要构建起由感知层、传输层、数据层、模型层以及应用层这五层所组成的整体框架,借此形成可从数据采集环节一直延伸至业务应用层面的完整技术支撑链条。就感知层来讲,得去布设能够将水源、输水、配水乃至用水整个过程都涵盖在内的监测设施,以此来实时对水资源系统的运行状态数据加以采集。而在传输层这边,需依据监测点的具体分布状况以及所处的环境条件,去挑选与之相适宜的通信方式和网络协议,从而保证监测数据可以及时且可靠地传送到数据中心。

4.2 感知层与数据传输设计

感知层和数据传输系统的设计关键在于搭建起能够实现全面覆盖并且具备可靠传输功能的水资源监测网络,得依据管理对象空间分布以及业务需求所呈现出的特点,对监测站点的布局予以合理规划,并且慎重选择通信方式。在监测要素这个层面,务必要将降水量、河道水位、水库蓄量、地下水埋深、水质参数还有作物需水等一系列关键指标都涵盖进去,从而形成针对水资源循环过程较为完整的描绘。就监测技术而言,要充分综合运用自动水位站、远程水质传感器以及卫星遥感等多种不同的监测手段,进而构建起一个天、空、地相互融合的一体化立体监测体系。

4.3 模型层与仿真引擎设计

模型层以及仿真引擎的设计主要目标是构建起精准且高效的水资源系统模拟环境。要达成这一目标,得把水文水动力模型同优化调度算法整合起来,进而形成针对水资源系统行为特征的数字映射能力,同时也具备对未来情景展开预测预演的能力。从模型的组成情况来看,应当去构建一个完整的模型体系,这个体系里要包含水文模型、水动力学模型、水质模型、水资源调度模型还有工程安全模型等,要能够涵盖水资源管理所涉及的主要业务领域。在计算引擎这块儿,那就得采用高性能计算以及并行处理方面的技术,以此来提高复杂模型的计算效率,并且加快其响应速度。

4.4 应用层与功能模块设计

应用层以及功能模块的设计务必要紧紧围绕水资源调度管理方面的业务实际需求还有用户的使用习惯展开,去开发出具备良好用户体验并且有着实用价值的软件系统,从而能够给予水资源管理整个过程全方位的决策支持功能。就系统的功能而言,起码得涵盖水资源监测、水量调度、应急响应以及综合管理这四大核心模块,进而对水资源管理的主要业务实现较为完善的支撑作用。在人机交互这个层面,那就得运用可视化技术以及交互式设计手段,把那些复杂的专业数据还有模型结果以一种直观且容易理解的形式呈现给用户。

5 结语

数字孪生技术给干旱地区的水资源优化配置调度管理带来了全新的解决办法。其通过建立起物理系统和数字虚体之间的实时互动以及双向映射关联,促使水资源管理从依靠经验来驱动转变为由模型来驱动,达成了根本性的改变。本文所阐述的基于数字孪生的水资源优化配置调度管理方式,把多源数据采集融合、系统动态建模仿真、多目标优化决策还有风险预警响应等诸多关键的技术环节予以系统地整合起来,进而形成了一套涵盖感知、传输、数据、模型以及应用这五层架构的系统设计方案。在未来,伴随着物联网以及人工智能等相关技术不断向前发展,数字孪生系统在水资源管理当中的应用无论是深度还是广度都将会得到进一步的拓展。尤其是在冰雪融水预测以及生态需水保障这类干旱地区所特有的问题方面,数字孪生技术将会发挥出更为重要的支撑作用。

[参考文献]

- [1]寇梦璐.水资源智能调度模型的构建与应用策略[J].河南水利与南水北调,2025,54(8):35-36.
- [2]张猛.面向水资源可持续发展的水文自动化监测与预测方法研究[N].河北经济日报,2025-09-04(12).
- [3]陈华鑫,陈悦云,何建兵,等.新安江流域水资源统一调度实践与思考[N].水利发展研究,2025-10-23(6).
- [4]翁硕,林明财,林建锋,等.基于多目标优化的梯级水库水资源调度协同策略研究 [N]. 水利水电科技进展,2025-10-23(6).
- [5]孙浩,赵迪,赵浩鹏.智慧水利信息化系统在水利工程中的应用研究[J].水上安全,2025(16):19-21.

作者简介:吾尔古丽·吐送尼亚孜 (1972.4—), 毕业院校:新疆农业大学水利水电建筑工程, 所学专业:水利管理, 当前就职单位名称:塔里木河流域和田河水利管理中心, 职称级别:高级工程师。