

数字孪生技术在流域水文预测中的应用研究

叶 繁 苏泽源

黄河水利委员会山东水文水资源局 山东济南 250000

摘 要：数字孪生技术通过在现实世界中建立物理系统虚拟模型来实现实时数据的同步和交互，是一项创新的新技术。它在工业制造、智能城市、健康管理方面的运用已经取得了明显效果。随着气候变化及人类活动对流域生态环境影响的不断加剧，流域水文预测工作越来越显示其重要性。由于数字孪生技术具有效率高，精度高，实时反馈等特点，给流域水文预测带来了新的解决思路。本论文旨在探索将数字孪生技术应用于流域水文预测的研究，希望能对提高流域管理水平及防灾减灾能力起到理论依据及技术支持作用。

关键词：数字孪生技术；流域水文；预测；技术应用

引言

在信息技术与大数据技术飞速发展的背景下，数字孪生技术孕育而生，很快成为复杂系统问题求解的强有力手段。数字孪生技术是通过创建与实际流域系统相匹配的虚拟模型，并运用传感器与物联网技术来实时收集流域内的各类水文数据。结合大数据分析和机器学习算法，该技术能够实现对流域水文过程的精准模拟和预测。它具有动态性、实时性、交互性等特点，可以有效地弥补传统水文预测方法中存在的缺陷，显著提高流域水文预测精度与及时性。

一、数字孪生技术的理论基础

（一）数字孪生技术的定义与构成

数字孪生技术通过构造物理实体虚拟复制体来实现实际系统实时监测，仿真与优化等高级技术。它的核心是建立与物理实体相似度高的虚拟模型，利用传感器和物联网技术对物理实体数据进行实时获取，并把这些数据传送给虚拟模型同步更新。从而使虚拟模型既可以实时地反映物理实体状态又可以对其进行预测与分析并优化其操作。

数字孪生技术组成由物理实体、虚拟模型、数据传输及同步三大部分组成。以数字孪生为基础的物理实体可能成为任何真实存在的体系和装备，例如河流、流域和工业装备。虚拟模型是从数字上再现物理实体，要求包含其几何形状、物理属性和运行状态，并通过数学模型及仿真技术加以仿真。数据传输及同步是物理实体与虚拟模型之间实时互动的关键所在，利用传感器及物联网技术可以对物理实体上的温度、湿度、水流量以及其

他数据进行实时获取，并且将这些数据利用网络传送给虚拟模型来同步更新。

从数字孪生技术来看，传感器技术承担着对物理实体状态的实时监测，物联网技术保障了数据及时传递与有效融合，大数据分析的人工智能技术应用于对数据进行处理与预报，通过对模型的持续学习与优化来增强虚拟模型精度与预测能力。

（二）数字孪生技术的核心技术

1. 传感器技术

传感器技术以数字孪生技术为基础，利用各种传感器对物理实体进行实时状态监控。这些传感器能够对温度、湿度、水流量和压力进行测量，对物理实体实时数据进行采集和传送至虚拟模型。高精度、高灵敏度传感器技术保证数据准确可靠，对虚拟模型准确仿真提供必要支撑。

2. 物联网

物联网技术承担着通过网络向虚拟模型发送传感器获取数据的任务，从而使物理实体和虚拟模型之间达到实时同步。借助物联网技术可使多台传感器设备组成数据采集与传输网络以保证各数据点实时更新与集成。物联网具有高效性、稳定性等特点，是数字孪生技术能够进行实时交互、反馈等功能的关键所在。

3. 大数据分析

大数据分析对数字孪生技术起到数据处理与分析作用。通过采集并分析海量实时数据，可以发现物理实体在运行过程中的变化规律与变化趋势，为预测与决策提供支撑。大数据分析技术可以对大量多源异构数据进行处理，采用数据挖掘与统计分析方法对虚拟模型进行详

细的数据支撑,增强模型的准确性与智能性。

4. 人工智能与机器学习

人工智能和机器学习技术构成了数字孪生技术的核心推动力,通过对数据进行深度学习和模式识别,可以不断地优化和改进虚拟模型的性能。机器学习算法能够通过历史数据对未来趋势与行为进行学习预测,从而提升了预测精度。人工智能技术也能够对复杂系统进行智能控制与优化,从而为物理实体提供智能化的操作解决方案。

二、数字孪生技术在流域水文预测中的应用

(一) 数据采集与预处理

流域水文预测过程中数据采集和预处理是数字孪生技术运用的关键环节,优质的数据获取是流域数字孪生模型的基础。首先,利用各种传感器技术得到流域的各种水文数据,主要有降雨量、蒸发量、土壤湿度、河流流量和水位。这些资料的来源是多种多样的,可包括各种遥感卫星、地面监测站和无人机,为保证数据的时效性与准确性,利用物联网技术把这些传感器与数据采集系统实时相连,通过无线通信技术高效地传输数据。

数据预处理时,原始数据需经过清洗、插补、归一化等处理。由于传感器数据会出现缺失、噪声及异常值等问题,需要通过插值方法及滤波技术来修复数据并消除噪声。比如利用时空插值方法来补全缺失的数据,利用卡尔曼滤波平滑噪声数据。另外,由不同传感器收集的数据可能会出现量纲不一致和尺度不统一的问题,通过进行归一化处理,可以将不同量纲的数据转化为同一尺度,从而提高数据融合的效果。为了更有效地提升数据质量,还可以运用主成分分析(PCA)等降维技术,以减少数据的冗余性并凸显关键特性。以此为基础建设了流域水文数据库并对数据进行了有效存储与管理。该数据库将关系型数据库与时序数据库有机地结合在一起,以支持对大量数据进行快速查询与有效处理。

(二) 数字孪生模型的构建

在流域水文预测中,数字孪生模型构建处于核心地位,需要考虑水文循环复杂动态变化特点,在此过程中深入了解和建模流域水文系统物理过程非常关键。通过采用水文模型,例如SWAT(土壤水文评估工具)和HEC-HMS(水文模型系统),我们能够有效地模拟流域内的降水、蒸发、径流和水位的变化等各种过程。在构建模型的过程中,有必要设定一系列的参数,包括土壤渗透率(K)、蒸散发系数(ET)和水文响应单元(HRU)的分类,这样才能更准确地描述流域的地形、土地使用和气候特性。

利用数字孪生模型实时数据动态标定模型参数具有重要意义。利用优化技术,例如遗传算法(GA)或粒子群优化(PSO),能够对模型的参数进行迭代式的调整,从而最大程度地减少模型输出与实际测量数据之间的偏差,常通过损失函数(如均方根误差RMSE)来衡量模型的准确性。为了对模型进行实时更新和自适应控制可将状态空间模型与Kalman滤波算法相结合来对模型状态进行实时校正。

此外,考虑到流域水文过程的非线性特征,采用机器学习算法(例如随机森林或者支持向量机等等)与传统物理模型相结合的混合建模策略,将有助于提高数字孪生模型的预测能力。在这一过程中模型输出是否可靠不仅取决于输入数据质量,而且还受模型结构、参数设置等因素影响。

(三) 数据融合与智能分析

数据融合与智能分析是提升数字孪生技术在流域水文预测应用效果的重要环节。在流域管理中,数据来源多样,涵盖了气象站的降水、流量监测站的河流流量,以及遥感技术提供的地表变化信息等。为了有效整合这些多源异构数据,采用基于贝叶斯理论的融合框架和加权平均方法,可以综合考虑各数据源的可靠性与时效性,通过公式 $Z = \sum w_i X_i$ 来加权合成每个数据源,以获取更加准确的状态估计与预测结果,其中Z表示融合后的数据, w_i 为权重, X_i 为各数据源的观测值。

在智能分析方面,利用机器学习与深度学习技术对融合后的数据进行深入挖掘,可以发现潜在的水文规律与预测模型。例如,通过训练神经网络模型预测未来的流域径流,可以充分挖掘历史数据中潜在的时间序列特征和非线性关系,从而提高预测的精度。同时,利用聚类分析技术将相似特征的流域进行归类,从而辅助制定针对性的水资源管理策略。

模型性能的评估与反馈机制同样不可或缺,通过计算预测结果与实际观测的偏差指标,如相对误差(RE)和决定系数(R_2),持续优化数据融合与智能分析的流程,以提高模型的自适应能力与精准性。

(四) 实时监测与预测

实时监测与预测作为数字孪生技术应用于流域管理的重点内容,可为水资源管理、防灾减灾等工作提供科学依据。通过部署分布式传感器网络,能够实时采集流域内的各种水文数据,包括降雨、土壤湿度、河流流量等。这些传感器利用物联网技术向中心数据库快速传输数据,保证数据及时准确。数据处理时,利用边缘计算

技术能够从数据生成源头上对数据进行初步分析以降低数据传输所造成的时延,从而提高系统响应速度。

借助实时获取的水文数据,构建基于机器学习的预测模型,可以在动态环境中实时更新预测结果。通过训练模型,如长短期记忆网络(LSTM)或支持向量回归(SVR),能够捕捉流域水文过程中的时序特征,从而对未来的水文状态进行预测。例如,利用公式 $Q(t) = f(X(t), t)$ 表示流量 Q 在时间 t 时的预测值由当前状态 X 及其时间特征决定。根据预测结果,应用决策支持系统实时生成调度建议,指导水库蓄排水、灌溉计划及其他水资源管理策略。实现实时监测和预测还需要注重模型的实时校准,并结合实际观测数据对模型参数进行不断优化,以保证预测结果准确可靠。

三、案例分析

(一) 研究区域概况

长江中游的该支流流域拥有复杂的地形地貌和多样的气候条件,流域面积约为5000平方公里,年平均降水量为800mm,主要集中在4月至9月之间。该流域涉及众多水文单元且土壤类型较多,多为黏土与壤土,上述特点对水文过程有明显的影响。流域管理中,对于降水,蒸散发与径流之间的相互关系,建立准确的水文模型非常重要。

在数据收集领域,该流域已经建立了20个自动化气象观测站和15个水文观测站,以实时获取降水量、气温和湿度等关键数据。另外,利用遥感技术得到流域内土地利用类型及植被覆盖情况等,这类信息为之后建立数字孪生模型提供所需数据支撑。

(二) 数字孪生模型的应用

在此案例研究中,采用了数字孪生模型,并选择了SWAT模型(土壤水文评估工具)作为流域水文研究的核心模型。通过整合流域的地貌、土地使用和气象信息,我们将其细分为多个水文响应模块(HRU)。在模型参数设定中,需要考虑关键因素,如土壤水分容量(S)、降雨到径流的转化率(Curve Number, CN),以及蒸发散发的潜在速率(PET)。

模型构建完成之后,利用优化算法标定模型参数,使得模型输出径流最符合实测数据。在此过程中,使用了遗传算法(GA)对模型参数进行优化,成功地将模型的均方根误差(RMSE)减少到了5%以下,从而确保了模型具有高度的预测准确性。在完成模型构建之后,通过实时数据的输入实现了数字孪生模型的动态更新和预

测能力。

(三) 预测结果分析与评价

实施阶段对流域开展了1个水文周期内实时监测和预报。根据数字孪生模型输出产生未来5天降水和径流预报。与气象模型给出的天气预报数据融合后,该模型成功地预测了一定时期流域会出现过量降水现象,本次降水量估计为100mm左右。然后,应用流域水文模型的输出成果,对径流及水位做出预报,预测该流域河流水位在降水过后会达到警戒线水平,某一地区可能会出现洪涝风险。

为了更好地模拟预警的效果,相关人员使用了决策支持系统(DSS),并根据预测数据生成了水位的趋势图,然后与过去的数据进行比较,以确定是否需要采取相应的调控措施。及时将警报信息送至公共管理部门,提醒有关部门及居民做好预防工作。这一及时响应机制在增强水文管理科学性的同时,也有效地减少了可能发生灾害的风险。

在接下来的模型评估阶段,采用相对误差(RE)和决定系数(R^2)来对模型的预测效果进行了深入的量化研究。监测数据揭示,该模型的相对误差保持在10%的范围内,其决定系数超出了0.85,这证明了该模型在该流域的应用是有效的。利用上述评估指标可证实数字孪生技术应用于流域监测和预测的准确性和可靠性。

结束语

总之,数字孪生技术开拓了流域水文预测的新视角,它在提高水资源管理的科学性、准确性和响应能力等方面所显示出的巨大潜能,在未来的水文学研究和实际应用中,其重要性将日益凸显。希望通过本次研究,可以对相关方面的深入探讨及应用起到一定的借鉴及参考作用,促进水文预测及管理工作的不断创新及发展。

参考文献

- [1] 张建新.数字孪生技术在疏勒河流域的应用和探讨[J].中国水利,2023(23):58-62.
- [2] 李卫政,谈娟娟,张语涵,等.数字孪生甬江流域水资源“四预”应用研究[J].水利信息化,2023(5):1-6.
- [3] 宋文龙,李小涛,桂荣洁,等.遥感技术在数字孪生流域建设中的应用[J].中国防汛抗旱,2022(032-006).
- [4] 黄立锴.浅谈数字孪生技术在智慧水利工程中的应用[J].珠江水运,2022(16):46-48.