

数字孪生黄河水利工程中的大数据应用

武先超 兰国振 李 岩

菏泽黄河河务局 东明黄河河务局 山东 菏泽 274500

摘要: 本文围绕数字孪生黄河水利工程中的大数据应用展开。阐述数字孪生技术原理、黄河水利工程体系构成及平台框架。重点探讨大数据在数据采集整合、存储管理、分析挖掘等关键技术支撑,以及在水资源管理与调度、防洪减灾与应急响应、工程安全监测与维护等核心业务中的应用,为数字孪生黄河水利工程发展提供参考。

关键词: 数字孪生; 黄河水利工程; 大数据

引言: 黄河水利工程对黄河流域发展意义重大。数字孪生技术作为创新手段,为水利工程发展带来新机遇。通过构建精准虚拟模型,实现对水利工程全面模拟与预测。大数据作为数字孪生技术的核心支撑,贯穿数据采集、存储、分析等环节。深入探讨大数据在数字孪生黄河水利工程中的应用,对提升水利工程管理水平、保障流域安全等具有重要价值。

1 数字孪生黄河水利工程基础

1.1 数字孪生技术原理

数字孪生作为创新技术,致力于构建与物理实体精准对应的虚拟数字模型。该虚拟模型如同物理实体在数字世界的复刻,完整呈现其结构、功能及动态运行过程。数字孪生具备显著特性。精确性是首要特质,虚拟模型可精准反映物理实体细节,在水利工程场景里,能细致模拟河道地形、水利设施构造等。实时性同样关键,凭借高效数据传输与处理,虚拟模型与物理实体状态同步更新,物理实体的变化瞬间在数字模型中得以体现,为决策提供最新信息。可重复性也使其优势尽显,在虚拟环境中,能对各类复杂工况反复模拟,规避现实操作的高成本与高风险。在水利工程领域,数字孪生技术围绕水利设施与水文环境展开应用。通过广泛部署的传感器网络,大量采集水利工程设施运行、水位流量、水质等数据。这些数据驱动虚拟模型持续实时运算与模拟。经对历史与实时数据的深度分析,数字孪生模型可预测水利工程在不同条件下的运行状态,为科学管理与决策提供关键支撑。

1.2 黄河水利工程体系构成

黄河水利工程布局广泛且复杂,是保障黄河流域发展的重要基石。从上游至下游,一系列工程节点相互配合,构成有机整体^[1]。上游地区,以龙羊峡水电站为代表的梯级水电工程众多。这些工程一方面致力于水能资源高效开发,将水能转化为电能;另一方面,通过调控水

库水位,有效调节黄河径流,保障中下游用水需求。中游区域,小浪底水利枢纽是核心工程。其功能多元,防洪时可拦蓄洪水、削减洪峰,减轻下游洪水威胁;防凌期,合理调度化解凌汛危机;减淤工作中,利用调水调沙冲刷下游河道,减缓泥沙淤积,维护河道行洪能力。下游主要依靠坚固防洪大堤,结合分洪、滞洪区设置,形成完整防洪体系。防洪大堤作为抵御洪水的关键屏障,其稳固程度直接关乎下游地区安全。

1.3 数字孪生黄河水利工程框架

数字孪生黄河平台架构涵盖多个层次。感知层由众多传感器组成,广泛分布于黄河流域的水利工程设施、河道沿线及水文监测点,持续采集各类数据。数据层负责数据存储、管理与整合,制定统一数据标准,梳理感知层收集的海量数据,为后续分析提供坚实基础。模型层构建多种专业模型,如模拟水流运动的水动力模型、分析水体质量的水质模型、评估水利设施稳定性的工程结构模型等。这些模型借助对数据的深度挖掘与复杂运算,精准模拟黄河水利工程运行状态。应用层面向水利工程项目管理部门、科研机构等用户,以直观可视化界面呈现信息,实现对黄河水利工程的实时监控、模拟预测以及决策支持等功能。该平台有力支撑“四预”功能,即预报、预警、预演、预案。通过对数据的分析与模型运算,准确预报水位、流量变化及洪水发生情况;依据预报及时预警灾害;在虚拟环境预演不同应对方案;结合预演制定科学预案,提升应对灾害能力与效率。

2 大数据在数字孪生黄河水利工程中的关键技术支撑

2.1 数据采集与整合技术

在构建数字孪生黄河水利工程的过程中,数据采集与整合是至关重要的一步。通过先进的技术手段获取全面、准确的数据,为后续的分析与模拟提供坚实基础。先进技术在黄河流域数据采集中的应用十分广泛。传感器网络被部署在河流沿线的关键位置,如大坝、桥梁及

河道,实时监测水流速度、水位变化等重要参数。无人机则用于快速覆盖大面积区域,获取高分辨率的地形地貌信息。卫星遥感技术能够提供广域范围内的植被覆盖、土壤湿度等关键指标。这些技术手段不仅提高了数据的精度和分辨率,还增强了对流域动态变化的理解。例如,传感器可以持续监控河流流量和水质,无人机和卫星则能提供宏观视角下的环境变化情况,共同构成了一个多层次、多维度的数据采集体系^[2]。数据清洗、融合与标准化处理技术对于确保数据质量至关重要。由于数据来源多样,格式和精度差异较大,在使用前必须进行清洗和预处理。数据清洗包括去除噪声、填补缺失值、纠正错误记录等步骤,以提高数据的准确性和一致性。融合技术则是将来自多个源的数据整合在一起,形成一个完整的视图。例如,地面传感器数据与卫星遥感图像结合,可以更精确地描述流域状况。标准化处理则确保所有数据遵循统一的标准,便于后续分析和共享。

2.2 数据存储与管理技术

高效的数据存储与管理技术是数字孪生黄河水利工程的核心支撑。黄河数据中心与超算中心采用分布式计算和存储架构,拥有强大计算能力与海量存储空间,可轻松应对大规模数据处理需求。这种架构扩展性强,能有效处理突发大规模计算任务。超算中心凭借高性能计算集群,为洪水预报、水资源优化调度等复杂模拟仿真任务提供支持。借助云计算平台,用户可按需获取计算资源,降低硬件投资,提升使用灵活性。分布式存储技术极大提升了管理与访问效率。传统集中式存储难以跟上数据量增长步伐,分布式存储将数据分散于多个节点,实现负载均衡与容错。云计算技术则进一步强化数据可用性与安全性。云平台的虚拟化服务可依据实际需求,灵活、动态地调配计算和存储资源,其加密传输、身份认证等安全措施,保障数据安全无虞。实际应用中,黄河数据中心与超算中心通过集成多种先进技术,形成了一个高效、可靠的技术架构。例如,利用分布式文件系统(如HDFS)来存储海量数据,并结合NoSQL数据库(如Cassandra)实现快速查询和分析。借助容器化技术(如Docker和Kubernetes),可以实现应用的快速部署和弹性扩展。

2.3 数据分析与挖掘技术

数据分析与挖掘技术在水利领域的应用日益广泛,特别是在数字孪生黄河水利工程中,机器学习、深度学习等算法发挥着重要作用。机器学习和深度学习算法能够从大量历史数据中提取有价值的信息,辅助决策制定。例如,通过训练模型预测未来一段时间内的水量变

化趋势,可以帮助相关部门提前做好防洪准备。深度学习模型,特别是卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN),在处理时空数据方面表现出色,适用于分析河流流量、水质变化等复杂模式。这些算法能够自动识别数据中的特征和规律,减少人工干预,提高预测精度。数据挖掘技术在关联规则发现和趋势预测中同样具有重要意义。关联规则发现可以帮助揭示不同变量之间的内在联系,例如降雨量与河流流量的关系^[3]。通过挖掘这些关联规则,可以更好地理解流域内各要素之间的相互作用机制。趋势预测则通过对历史数据的分析,预测未来的发展趋势,为长期规划提供依据。例如,利用时间序列分析方法预测未来的气温变化,有助于制定相应的水资源管理策略。自然语言处理(NLP)技术也被应用于文本数据的分析中。例如,通过分析新闻报道、社交媒体上的讨论,可以了解公众对某一事件或政策的态度和反应,从而为政策制定者提供参考。

3 大数据在数字孪生黄河水利工程核心业务中的应用

3.1 水资源管理与调度

在黄河流域水资源管理与调度工作中,大数据作用关键且不可替代。构建全方位数据采集体系,借助卫星遥感、地面传感器网络等手段,可实时监测水资源分布与动态变化。卫星遥感技术能对黄河流域大面积区域进行周期性观测,获取水体面积、水库蓄水量等宏观水资源分布信息。地面传感器深入河道、灌区、水库等关键节点,实时采集水位、流量、水质等微观数据。海量数据经整合后,形成对黄河水资源状况的精准实时画像,让管理者清晰掌握不同区域水资源的多维度信息。基于大数据的智能调度算法为黄河水资源科学调配提供有力支撑。算法综合考虑多种因素,如不同地区用水需求、季节变化对水资源的影响、水利工程调控能力等。利用优化算法,以水资源利用效率最大化、满足各区域基本用水需求为目标,对流域内众多水利设施进行协同调度。在枯水期,算法依据各地区用水优先级,合理安排水库放水,保障居民生活用水与农业灌溉用水,兼顾生态用水需求;丰水期,通过优化调度,将多余水量合理分配至有存储能力的水库或用于生态补水,实现水资源在时间与空间上的高效配置。

3.2 防洪减灾与应急响应

大数据在防洪减灾与应急响应领域发挥着重要作用。在洪水预报预警方面,借助对海量历史气象、水文数据以及地形地貌数据的深度剖析,运用先进机器学习和深度学习算法构建高精度洪水预报模型。此类模型可深度挖掘数据间复杂关联,像降水强度、持续时间与

河流水位上涨幅度、速度之间的联系。这样能提前精准预估洪水发生时间、规模及可能淹没范围,在洪水来临前,通过多种渠道及时向受影响地区发布预警信息,为居民疏散、物资转移赢得宝贵时间。基于数字孪生模型的洪水演进模拟技术,在大数据助力下实现对洪水过程的逼真模拟。数字孪生模型依据黄河流域实际地形、河道特征以及水利工程布局构建,实时模拟洪水在不同时段的演进路径。模拟时,综合考虑水流速度、河道冲淤变化、水利工程设施调节作用等因素,为防洪决策提供直观准确信息。决策者可清晰了解洪水可能威胁区域,以及堤坝可能出现的薄弱环节,进而提前制定针对性防御措施,如加固堤坝、开启分洪设施等。在应急响应决策支持方面,当洪水等灾害发生时,大数据平台迅速整合各类实时信息,涵盖受灾区域人员分布、基础设施受损情况、救援力量部署等^[4]。通过数据分析,快速评估灾害影响程度,为救援资源合理调配提供依据。根据受灾区域人员数量和分布,合理安排救援队伍行动;依据基础设施受损情况,优先调配资源修复关键交通、通信线路和水利设施,保障救援工作顺利开展与灾区基本生活秩序恢复。

3.3 工程安全监测与维护

大数据在水利工程结构健康监测中得到广泛应用。在黄河水利工程设施,如大坝、水闸、堤防等关键部位安装大量传感器,采集应力、应变、位移、渗流等数据。大数据技术对这些海量且复杂的数据进行实时分析,及时发现工程结构可能出现的异常情况。通过对比正常运行状态下的数据模式与实时监测数据,利用数据分析算法识别出应力集中、位移过大、渗流异常等潜在安全隐患,为工程维护提供预警。基于大数据的工程安全评估模型为全面准确评估水利工程安全状况提供了有效手段。该模型整合工程建设资料、历史监测数据、运

行工况数据等多源信息,运用数据挖掘和机器学习算法,建立反映工程结构安全状态的评估指标体系。通过对各项指标的综合分析,对水利工程整体安全等级进行量化评估。例如,根据大坝的沉降数据、坝体应力分布数据以及渗流数据,评估大坝当前的安全状况,判断其是否处于正常运行状态,或存在哪些安全风险等级。大数据在工程维护决策中发挥着关键作用。通过对工程长期监测数据的分析,结合工程使用年限、运行工况等因素,预测工程设施各部件的剩余使用寿命。根据预测结果,制定合理的维护计划,合理安排维护资源与时间。对于接近使用寿命末期或监测数据显示存在较大安全隐患的部件,提前规划更换或维修工作,避免因部件突然损坏导致工程事故,保障黄河水利工程的长期安全稳定运行,提升工程运行效益,更好地服务于黄河流域经济社会发展与生态保护。

结束语

大数据在数字孪生黄河水利工程中发挥着不可或缺的作用。从技术支撑到核心业务应用,大数据为水利工程带来了精准的数据基础、高效的决策支持与科学的维护管理。未来,随着技术的不断进步,大数据与数字孪生技术的融合将更加深入,为黄河水利工程的发展注入新的活力,助力黄河流域实现更高质量的发展与生态保护。

参考文献

- [1]张玉华.基于数字孪生技术的水利工程安全管理系统构建[J].水上安全,2023(14):49-51.
- [2]佟保根,赵智磊.大数据技术在水利工程信息化建设中的运用[J].电子世界,2021,(02):71-72.
- [3]李锴,张晶.数字孪生技术在水利工程中的应用[J].电子技术,2022,51(08):186-187.
- [4]李杰坤.数字孪生架构下水工程数字底座建设研究[J].水利规划与设计,2022(4):70-73.