

数字孪生水利工程关键技术应用探析

戴荣涛 冯 勇 程 赛
江苏省水利建设工程有限公司 江苏 扬州 225000

摘 要：本文深入探讨了数字孪生水利工程的关键技术应用，包括其概述、建模技术、模拟与预测技术、优化决策技术等。数字孪生水利工程通过数字化手段构建水利工程的虚拟模型，实现对物理水利工程的实时监测、模拟、预测和优化，为水利工程的管理和决策提供了科学、精准的支持。文章分析了数字孪生水利工程的核心技术，并结合实际应用案例，展望了其未来的发展前景。

关键词：数字孪生；水利工程；建模技术；模拟预测；优化决策

引言：随着信息技术的飞速发展，数字孪生技术作为一种新兴的数字化手段，正逐渐渗透到各个行业领域。水利工程作为国家基础设施建设的重要组成部分，其运行效率和管理水平直接关系到国家经济发展和人民生命财产安全。数字孪生水利工程将数字孪生技术应用于水利工程领域，通过构建水利工程的虚拟模型，实现对物理水利工程的全面感知、精准模拟和科学决策。本文将对数字孪生水利工程的关键技术应用进行探析。

1 数字孪生水利工程概述

1.1 数字孪生概念解析

数字孪生这一概念起源于工业制造领域，随着信息技术的飞速发展，其内涵不断丰富和拓展。简单来说，数字孪生是指利用数字化手段，构建物理实体的虚拟镜像，使虚拟模型与物理实体之间实现虚实交互与融合。从定义上看，数字孪生不仅仅是对物理实体的简单复制，而是通过实时数据交互，让虚拟模型能够精准反映物理实体的状态、行为和性能。它借助传感器、物联网等技术，收集物理实体的各种数据，并将这些数据传输到虚拟模型中，经过分析和处理后，再将结果反馈给物理实体，从而实现对物理实体的实时监控、预测性维护和优化决策。在不同领域，数字孪生技术已经得到了广泛的应用。（1）在制造业中，数字孪生技术可以实现对生产设备的全生命周期管理，提前预测设备故障，减少停机时间，提高生产效率。（2）在航空航天领域，数字孪生技术用于飞行器的设计和测试，通过虚拟模型模拟飞行过程，降低研发成本和风险。（3）在医疗领域，数字孪生技术可以为患者建立个性化的虚拟模型，辅助医生进行手术规划和治疗方案的制定。未来随着技术的不断进步，数字孪生技术将在更多领域发挥重要作用，呈现出与人工智能、大数据等技术深度融合的发展趋势。

1.2 水利工程特点及数字化转型需求

水利工程具有复杂性、系统性和动态性等特点。复杂性体现在水利工程涉及水资源的调配、防洪减灾、灌溉供水、发电等多个方面的功能，这些功能相互关联、相互影响。系统性则要求水利工程在设计、建设、运行和管理过程中，需要综合考虑各种因素，确保各个环节的协调配合。动态性表现为水利工程所处的自然环境和社会经济条件不断变化，如降雨、水位、用水需求等因素的波动，使得水利工程的运行状态也随之变化^[1]。传统水利工程管理面临着诸多挑战。一方面，信息获取不及时、不准确，导致管理者难以全面了解水利工程的运行状况。例如，对于一些偏远地区的水利设施，由于缺乏有效的监测手段，很难及时发现潜在的安全隐患。另一方面，决策缺乏科学依据，传统的管理方式往往依赖于经验和主观判断，难以应对复杂多变的情况。在防洪减灾方面，如果不能准确预测洪水的规模和到来时间，就难以制定科学合理的防洪措施，从而增加了洪水灾害的风险。因此数字孪生水利工程的数字化转型具有必要性。通过引入数字孪生技术，可以实现对水利工程的实时监测和数据分析，为管理者提供全面、准确的信息支持。并且利用虚拟模型进行模拟和预测，可以提前制定应对策略，提高决策的科学性和准确性，从而有效应对水利工程面临的挑战。

1.3 数字孪生水利工程定义与目标

数字孪生水利工程是利用数字孪生技术构建水利工程的虚拟模型，以此实现对物理水利工程的实时监测、模拟、预测和优化。它以物理水利工程为基础，通过高精度的建模和数据交互，使虚拟模型能够真实反映物理水利工程的运行状态。数字孪生水利工程的目标明确且具有重要意义。（1）提高水利工程的运行效率，通过对水利工程的实时监测和数据分析，优化水资源的调配和运行方案，减少能源消耗和运行成本。（2）增强防洪减

灾能力,利用虚拟模型进行洪水模拟和预测,提前制定防洪措施,降低洪水灾害的损失。(3)保障水资源的合理利用,通过精准的水资源监测和分析,实现水资源的科学调配和可持续利用,为经济社会的发展提供有力支撑。

2 数字孪生水利工程建模技术

数字孪生水利工程建模技术是现代水利信息化和智能化的重要组成部分,它通过构建水利工程的数字镜像,实现对实体水利工程的实时监测、仿真分析和智能决策。

2.1 水利工程物理模型构建

水利工程物理模型是数字孪生水利工程的基础,其构建过程涉及对水利工程实体要素的抽象与表示。水利工程物理模型的主要组成要素包括水库、堤防、水闸、渠道等,这些要素通过特定的拓扑关系相互连接,共同构成复杂的水利系统。在物理模型构建过程中,实地测量是获取水利工程几何信息的基础手段,通过高精度测量设备,可以精确获取水库的库容、堤防的高度与坡度、水闸的开度与尺寸等关键参数。同时三维建模软件的应用使得物理模型的构建更加直观与高效,通过导入实地测量数据,利用软件的三维建模功能,可以快速生成水利工程的三维模型,直观展示水利工程的整体布局与细节特征。

2.2 数据采集与融合技术

数字孪生水利工程的运行依赖于大量实时、准确的数据支持。这些数据类型包括水文数据(如水位、流量、流速等)、气象数据(如降雨量、风速、气温等)以及工程运行数据(如设备状态、能耗等)。为了获取这些数据,需要采用多种数据采集手段,如传感器网络、遥感技术、无人机监测等。(1)传感器网络通过在水利工程关键部位部署各类传感器,实现对水文、气象等数据的实时监测与传输;(2)遥感技术则利用卫星或无人机搭载的传感器,对大范围的水域进行高分辨率成像,获取水库蓄水量、植被覆盖度等信息;(3)无人机监测则具有机动灵活、成本低廉的优势,适用于对水利工程局部区域的快速巡查与监测。在数据采集的基础上,还需要对多源数据进行融合处理,以消除数据间的冗余与矛盾,提高数据的准确性与一致性^[2]。数据融合方法包括数据清洗、特征提取、模型融合等,通过这些方法,可以将不同来源、不同格式的数据整合为统一的数据集,为后续的虚拟模型构建与校准提供数据支持。

2.3 虚拟模型建立与校准

虚拟模型是数字孪生水利工程的核心,它基于物理模型和数据采集结果,通过数学模型与参数设置,实现

对水利工程运行状态的仿真分析。在虚拟模型构建过程中,需要根据水利工程的特点与需求,选择合适的数学模型,如水动力学模型、气象模型等,并设置相应的模型参数。虚拟模型的校准是确保模型准确性与可靠性的关键步骤。通过将虚拟模型的仿真结果与实际监测数据进行对比分析,可以评估模型的预测能力,并根据对比结果不断调整模型参数,优化模型性能。这一过程需要反复迭代,直至虚拟模型的仿真结果与实际监测数据达到高度一致,从而实现对水利工程运行状态的精准预测与智能决策。

3 数字孪生水利工程模拟与预测技术

数字孪生水利工程模拟与预测技术依托数字孪生模型,通过虚拟仿真与数据分析,实现对水利工程运行状态的精准模拟和未来趋势的准确预测,为水利工程的科学管理与决策提供重要支撑。

3.1 水文过程模拟

水文过程模拟是数字孪生水利工程的核心应用之一。其基本原理是基于水文学的基本理论,通过构建数学模型来描述和预测自然水循环过程中的各个环节。常用的水文模型包括降雨-径流模型和洪水演进模型。降雨-径流模型用于模拟降雨如何转化为地表径流、壤中流和地下径流,进而预测流域的出流过程;洪水演进模型则关注洪水在河道中的传播和演变,预测洪水的水位、流量等关键参数。利用数字孪生水利工程的虚拟模型,可以高效地进行水文过程的模拟。通过输入不同的降雨条件,如降雨强度、降雨历时等,虚拟模型能够快速计算出对应的洪水流量和水位变化,为防洪减灾提供科学依据。同时虚拟模型还可以考虑地形、地貌、植被等多种因素的影响,提高模拟的准确性和可靠性。

3.2 工程运行模拟

水利工程在不同运行工况下的模拟需求多样,如水库的调度方案模拟、水闸的启闭操作模拟等。这些模拟旨在评估不同运行方案对水利工程安全、效益和生态环境的影响。通过数字孪生水利工程的虚拟模型,可以对工程运行过程进行全方位模拟。例如,在水库调度方案模拟中,可以设定不同的蓄水、放水策略,通过虚拟模型计算出各方案下的水库水位、发电量、灌溉面积等指标,从而选择最优的调度方案^[3]。在水闸启闭操作模拟中,可以模拟水闸在不同开度下的水流状态,评估水闸的运行性能和安全性。

3.3 预测预警技术

基于数字孪生模型的预测预警技术是数字孪生水利工程的重要应用方向。通过构建预测预警系统,可以实

现对洪水、干旱等自然灾害的提前预警，为防灾减灾提供有力支持。预测预警系统的构建包括数据收集、模型训练、预警发布等多个环节。系统通过收集实时监测数据，利用数字孪生模型进行趋势分析和预测，当预测结果超过预设的阈值时，系统将自动发布预警信息。预警信息可以通过短信、邮件、APP等多种方式及时准确地传达给相关部门和人员，以便他们采取相应的应对措施。

4 数字孪生水利工程优化决策技术

随着数字孪生技术的不断发展，其在水利工程优化决策领域的应用日益广泛。数字孪生水利工程优化决策技术通过构建水利工程虚拟模型，结合多目标优化模型和智能优化算法，为水利工程管理者提供科学、准确的决策依据，实现水利工程的优化运行和管理。

4.1 多目标优化模型建立

水利工程优化决策具有多目标特性，主要包括防洪安全、水资源利用、生态环境保护等。防洪安全要求确保水利工程在遭遇洪水时能够安全运行，减少灾害损失；水资源利用则关注如何高效、合理地利用水资源，满足社会经济发展的需求；生态环境保护则强调在水利工程运行过程中，要尽量减少对生态环境的负面影响。建立多目标优化模型时，需要首先确定目标函数，即根据优化目标，将防洪安全、水资源利用、生态环境保护等转化为具体的数学表达式。同时还需要设置约束条件，如水库的库容限制、水闸的启闭规则、生态流量要求等，以确保优化方案在实际运行中可行。通过综合考虑多个目标函数和约束条件，可以构建出符合水利工程实际运行需求的多目标优化模型。

4.2 智能优化算法应用

智能优化算法在水利工程优化决策中发挥着重要作用。常用的智能优化算法包括遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等。这些算法通过模拟自然界的进化过程、群体行为或物理退火现象，能够在复杂的搜索空间中寻找最优解。在求解多目标优化模型时，可以利用这些智能优化算法进行迭代计算^[4]。算法通过不断调整决策变量的取值，使得目标函数逐渐逼近最优解。同时，算

法还可以考虑约束条件，确保优化方案在实际运行中可行。通过多次迭代计算，可以得到一系列满足不同目标要求的优化方案，供决策者选择。

4.3 决策支持系统构建

数字孪生水利工程决策支持系统是优化决策技术的实际应用平台。该系统通常包括数据管理、模型分析、方案评估等功能模块。数据管理模块负责收集、整理和存储水利工程的相关数据，为模型分析和方案评估提供数据支持。模型分析模块则利用多目标优化模型和智能优化算法，对水利工程进行模拟和优化分析。方案评估模块则根据分析结果，对不同的优化方案进行评估和比较，为决策者提供科学、准确的决策依据。通过数字孪生水利工程决策支持系统，管理者可以直观地了解水利工程的运行状态和优化潜力，快速制定出最优的决策方案。这不仅提高了决策的科学性和准确性，还有助于提升水利工程的运行效率和管理水平。

结语

数字孪生水利工程作为智慧水利的重要组成部分，其关键技术的应用为水利工程的管理和决策提供了科学、精准的支持。随着信息技术的不断发展和完善，数字孪生水利工程将在未来发挥更加重要的作用。然而，数字孪生水利工程的发展也面临着诸多挑战，如数据安全、模型精度、技术标准等。因此，我们需要不断加强技术研发和标准制定，推动数字孪生水利工程向更高水平发展。同时，我们也需要注重人才培养和团队建设，为数字孪生水利工程的发展提供有力的人才保障。

参考文献

- [1]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.
- [2]陈继明.智慧水利发展现状及关键技术研究进展[J].河南水利与南水北调,2023,52(2):101-102.
- [3]刘斌,蒋涛,吉庆伟,等.数字孪生技术与智慧水利系统的融合及应用[J].江苏水利,2022(S2):41-44.
- [4]宋敏,周伊文.数字孪生技术赋能水利工程建设管理路径[J].水利经济,2023,41(06):73-78+113.