

基于数字孪生技术的大型水利枢纽全生命周期智慧管理模式研究

杜 峻 杜辰晨

北京市北运河管理处 北京 100101

摘 要：本文聚焦于大型水利枢纽全生命周期智慧管理模式，深入探讨数字孪生技术在其中的应用。通过分析大型水利枢纽全生命周期各阶段特点及管理需求，阐述数字孪生技术如何构建虚拟模型以实现实时映射、动态监测与智能决策，进而构建涵盖规划、建设、运行、维护及退役等阶段的智慧管理模式，为提升大型水利枢纽管理效率、保障安全运行及可持续发展提供理论支持与实践参考。

关键词：数字孪生技术；大型水利枢纽；全生命周期；智慧管理模式

引言

大型水利枢纽作为国家重要的基础设施，在防洪、灌溉、发电、供水及生态保护等方面发挥着不可替代的关键作用。其全生命周期涉及规划、设计、建设、运行、维护直至退役等多个复杂阶段，各阶段相互关联且管理要求各异。传统管理模式在信息整合、实时监测、精准决策等方面存在明显局限，难以适应现代水利枢纽高效、安全、可持续发展的需求。

1 数字孪生技术概述

数字孪生技术以物理实体为对象，综合运用多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中构建一个与物理实体完全对应的数字化镜像。该镜像不仅包含物理实体的几何形状、结构特征等静态信息，还能实时反映其运行状态、性能参数等动态信息。其核心要素包括物理实体、虚拟模型、数据连接与交互以及智能决策系统。物理实体是数字孪生的基础，提供实际运行数据；虚拟模型通过对物理实体的精确建模，实现对实体状态的模拟与预测；数据连接与交互确保物理世界与虚拟世界之间的信息实时流通；智能决策系统则基于虚拟模型的分析结果，为物理实体的运行管理提供优化建议与决策支持。数字孪生技术具有实时性、精准性、可预测性和可优化性等显著特点。通过实时数据采集与分析，能够及时捕捉物理实体的变化情况；精准的模型构建保证了虚拟世界与物理世界的高度一致性；基于历史数据与实时信息的融合分析，可对物理实体的未来状态进行预测；进而通过模拟不同决策方案的效果，实现运行管理的优化^[1]。

2 大型水利枢纽全生命周期管理需求分析

2.1 规划阶段

在大型水利枢纽的规划阶段，犹如绘制一幅宏伟蓝图，需要综合考虑众多复杂且相互关联的因素。水资源分布是基础要素之一，不同地区的水资源量、水质状况以及水资源的时空分布特征，直接决定了水利枢纽的供水能力与供水范围。流域防洪需求则是关乎人民生命财产安全的关键因素，需要根据流域的地形地貌、降雨特性以及历史洪水情况，科学确定水利枢纽的防洪标准与防洪库容。生态环境保护在当今社会愈发受到重视，水利枢纽的建设不能以破坏生态环境为代价，需充分考虑对河流生态系统、水生生物栖息地等方面的影响，确保水利枢纽的建设与生态环境相协调^[2]。经济社会发展需求也是规划阶段必须考虑的重要方面，水利枢纽的建设应与当地的经济发展规划相适应，为工业、农业、生活用水提供保障，同时促进区域经济的可持续发展。传统规划方法往往局限于有限的历史数据与经验判断，如同在黑暗中摸索前行，难以全面、准确地评估各种因素对水利枢纽规划的复杂影响。例如，对于气候变化这一不确定因素，传统方法很难准确预测其对水资源分布与洪水特性的长期影响。因此，迫切需要一种能够整合多源数据、模拟不同规划方案的数字化工具，如同为规划者配备了一副“智慧眼镜”，能够清晰地看到不同规划方案在各种因素影响下的综合效果，从而辅助决策者制定科学合理的规划方案，确保水利枢纽从规划之初就具备科学性、前瞻性与可持续性。

2.2 建设阶段

建设阶段是大型水利枢纽从规划蓝图变为现实的关键环节，涉及复杂而繁琐的工程设计与施工管理。工程设计需要综合考虑水利枢纽的功能需求、地质条件、材料性能等多方面因素，确保结构的安全性与稳定

性。施工工艺选择则直接影响工程建设的效率与质量,不同的施工工艺适用于不同的工程部位与环境条件,需要根据实际情况进行科学选择。施工进度控制要求合理安排各项工程的施工顺序与时间节点,确保工程建设按计划顺利进行,避免出现工期延误或抢工现象。质量安全管理是建设阶段的重中之重,任何一个环节的质量问题或安全隐患都可能给水利枢纽的后期运行带来严重后果。然而,施工过程中各环节相互关联且受多种因素影响,如地质条件变化可能导致基础处理方案调整,天气因素如暴雨、洪水等可能影响施工进度与安全。传统管理模式难以及时掌握施工全过程的动态信息,信息传递往往存在滞后性,各部门之间的沟通不畅也容易导致问题得不到及时解决,从而影响工程建设的效率与质量。例如,在施工过程中发现地质情况与勘察报告不符时,由于信息传递不及时,可能导致施工方案调整延误,进而影响整个工程的进度。因此,需要实现对建设过程的实时监控与动态管理,通过先进的技术手段及时获取施工现场的各类信息,实现对施工过程的精准控制,确保工程建设按计划顺利进行,打造出高质量的水利枢纽工程。

2.3 运行阶段

运行阶段是大型水利枢纽发挥其核心功能的关键时期,其安全、稳定、高效运行关系到国计民生。这包括对水位、流量、水质等运行参数的实时监测,水位与流量的准确监测是保障水利枢纽防洪、灌溉、发电等功能正常发挥的基础,水质监测则关系到供水安全与生态环境保护。对设备设施的定期维护与检修是确保水利枢纽长期稳定运行的关键,各种机械设备、电气设备等在长期运行过程中不可避免地会出现磨损、老化等问题,及时进行维护与检修能够延长设备使用寿命,降低故障发生率。同时,对突发事件的应急响应能力也是衡量水利枢纽运行管理水平的重要指标,如遇到洪水、地震等自然灾害或设备突发故障时,能够迅速采取有效的应急措施,保障水利枢纽的安全运行。传统运行管理模式主要依赖人工巡检与定期监测,这种方式存在诸多局限性^[3]。人工巡检不仅效率低下,而且难以实现对水利枢纽全方位、实时感知,一些隐蔽部位的故障可能无法及时发现。定期监测的频率有限,不能及时反映运行状态的动态变化,对潜在风险的预警能力有限。例如,对于一些逐渐发展的设备故障,传统模式可能在故障已经较为严重时才能发现,从而增加了维修成本与停机时间。因此,迫切需要构建智能化的运行监测与预警系统,利用先进的传感器技术、物联网技术与数据分析技术,实现对水利枢纽运行状态的实时、全面监测,通过智能算法对运行数据

进行分析处理,及时发现潜在的安全隐患与运行异常情况,并自动触发预警机制,向管理人员发送预警信息,提高运行管理的自动化与智能化水平,确保水利枢纽始终处于安全、稳定的运行状态。

2.4 维护阶段

维护阶段的目标是延长大型水利枢纽的使用寿命,保障其性能稳定,使其能够长期为社会经济发展服务。随着使用年限的增加,水利枢纽的各个部件会逐渐出现磨损、老化等问题,这是不可避免的自然规律。例如,水轮机的叶片会因长期受水流冲击而磨损,闸门的金属部件会因腐蚀而降低强度,电气设备的绝缘性能会逐渐下降等。这些问题如果不及时处理,将严重影响水利枢纽的正常运行,甚至引发安全事故。传统维护模式多为事后维修或定期检修,事后维修是在设备出现故障后进行维修,这种方式会导致设备停机时间较长,影响水利枢纽的正常运行,同时维修成本也较高。定期检修则是按照固定的时间间隔对设备进行检修,虽然能够在一定程度上预防故障的发生,但由于缺乏对设备实际运行状态的精准评估,容易造成过度维护或维护不足的情况。过度维护会增加不必要的维修成本与设备损耗,维护不足则无法及时发现潜在故障,导致故障扩大化^[4]。因此,需要建立基于设备状态监测的预测性维护体系,通过安装各类传感器实时监测设备的运行状态参数,如振动、温度、压力等,利用数据分析技术对设备状态进行评估与预测,提前发现设备可能出现的故障类型与时间,从而有针对性地制定维护计划,实现维护工作的精准化与高效化,在保障设备正常运行的同时,降低维护成本,提高水利枢纽的整体运行效益。

2.5 退役阶段

当大型水利枢纽达到设计使用年限或因其他原因需要退役时,如何进行科学合理的处置是一个亟待解决的重要问题。退役处置包括建筑物的拆除、设备的回收利用、场地的生态修复等多个方面。建筑物的拆除需要考虑到拆除过程中的安全与环保问题,避免拆除作业对周边环境和人员造成伤害。设备的回收利用则要充分发挥设备的剩余价值,对可再利用的设备进行修复与改造,实现资源的循环利用。场地的生态修复是退役阶段的关键环节,水利枢纽的建设往往会对周边的生态环境造成一定影响,退役后需要通过生态修复措施恢复场地的生态功能,保护生物多样性。传统退役管理模式缺乏系统的规划与评估,往往过于注重拆除作业本身,而忽视了资源再利用与生态修复的重要性,容易导致资源浪费与环境污染问题。例如,在拆除过程中,大量可回收利用

的设备被当作废品处理,造成资源浪费;对退役场地的生态修复缺乏科学规划,修复效果不佳,无法恢复场地的生态平衡。因此,需要制定完善的退役管理方案,在退役前对水利枢纽的各个方面进行全面评估,包括建筑物的结构安全性、设备的剩余价值、场地的生态环境状况等,根据评估结果制定科学合理的退役计划,确保水利枢纽退役过程的安全、环保与可持续,实现经济效益、社会效益与环境效益的有机统一。

3 基于数字孪生技术的全生命周期智慧管理模式构建

3.1 规划阶段智慧管理

利用数字孪生技术构建流域水系与地理环境的虚拟模型,集成气象、水文、地质等多源数据,模拟不同气候条件与水资源开发利用情景下的流域水文过程。通过对比分析不同规划方案对防洪、灌溉、发电、生态等方面的影响,为规划决策提供科学依据。例如,通过虚拟模型模拟不同水库库容方案对下游洪水的调蓄效果,结合生态流量需求,优化确定水库的最佳库容规模。

3.2 建设阶段智慧管理

在建设阶段,基于数字孪生技术构建水利枢纽工程的三维数字化模型,将工程设计信息与施工进度计划集成于虚拟模型中。通过在施工现场布置各类传感器,实时采集施工进度、质量、安全等方面的数据,并与虚拟模型进行对比分析。一旦发现实际施工情况与计划存在偏差,及时发出预警信号,指导施工人员调整施工方案。同时,利用虚拟模型进行施工工艺模拟与优化,提前发现施工过程中可能出现的问题,提高施工效率与质量。

3.3 运行阶段智慧管理

运行阶段,数字孪生模型实时接收来自水利枢纽各个监测点的数据,包括水位、流量、水质、设备运行状态等,实现对水利枢纽运行状态的全方位、实时感知。通过数据分析与挖掘技术,对运行数据进行实时处理与分析,建立运行状态评估指标体系,及时发现潜在的安全隐患与运行异常情况。当监测数据超出正常范围时,系统自动触发预警机制,并向管理人员发送预警信息。同时,基于数字孪生模型进行运行调度方案模拟与优化,根据不同的来水情况与用水需求,生成最优的运行调度方案,提高水利枢纽的运行效益^[5]。

3.4 维护阶段智慧管理

在维护阶段,利用数字孪生模型对水利枢纽的设备设施进行状态监测与健康评估。通过分析设备运行数据的历史趋势与实时变化,结合设备故障诊断模型,预测设备可能出现的故障类型与时间,提前制定维护计划。根据设备的重要程度与健康状况,合理安排维护资源,实现维护工作的精准化与高效化。例如,对于关键设备,采用预测性维护策略,在设备出现故障前进行维修或更换;对于非关键设备,根据实际运行情况进行适当维护,降低维护成本。

3.5 退役阶段智慧管理

退役阶段,基于数字孪生模型对水利枢纽的退役过程进行模拟与规划。评估不同拆除方案对周边环境的影响,包括水土流失、水质污染等,选择最优的拆除方案。同时,对拆除后的建筑材料与设备进行分类回收与再利用评估,制定资源再利用方案。通过虚拟模型模拟生态修复过程,预测修复效果,为生态修复工作提供指导。确保水利枢纽退役过程符合环境保护与资源可持续利用的要求。

结束语

本文研究了基于数字孪生技术的大型水利枢纽全生命周期智慧管理模式,通过分析各阶段管理需求,构建了涵盖规划、建设、运行、维护及退役等阶段的智慧管理体系。数字孪生技术凭借其实时性、精准性与可预测性等特点,为大型水利枢纽全生命周期管理提供了强大的技术支持,能够有效提升管理效率、保障安全运行、实现可持续发展。

参考文献

- [1]梁浩.智慧水利内涵及其核心技术分析[J].工程技术与应用,2020(24):97-98.
- [2]石焱文,蔡钟瑶.基于数字孪生技术的水利工程运行管理体系构建[C]2019(第七届)中国水利信息化技术论坛.2019.
- [3]陈健.水务行业利用数字孪生实现智慧水务的途径研究[J].知识经济,2022,595(002):17-18.
- [4]蔡阳.以数字孪生流域建设为核心构建具有“四预”功能智慧水利体系[J].中国水利,2022(20):6.
- [5]赵翠,孙付增,刘少博,等.基于数字孪生技术的农村供水管理系统框架设计[J].人民长江,2022(004):053.