

BIM与数字孪生技术驱动的水利工程质量安全协同管理 框架构建与应用

任少达

河北省水利水电勘测设计研究院集团有限公司 天津 300220

摘要: 随着我国水利工程建设规模持续扩大,传统质量安全管理面临信息孤岛、决策滞后等挑战。本文聚焦BIM与数字孪生技术驱动的水利工程质量安全协同管理。先阐述BIM与数字孪生技术基础,接着构建涵盖模型层、功能层、应用层的协同管理框架。该框架整合数据与功能,实现全生命周期管理。在应用方面,详细探讨其在设计、施工、运维及应急管理阶段的具体实践。研究表明,此框架能有效提升水利工程质量安全管理水平,为行业数字化转型提供有力支撑,推动水利工程高质量发展。

关键词: BIM; 数字孪生; 水利工程; 质量安全; 协同管理

引言: 水利工程作为国家基础设施的关键部分,其质量安全关乎国计民生。传统管理模式存在信息孤岛、协同困难等问题,难以满足现代水利工程建设与运维需求。随着信息技术发展,BIM与数字孪生技术为水利工程质量安全管理带来新契机。BIM可实现工程信息数字化表达与共享,数字孪生能构建虚拟模型映射实体工程。将二者结合构建协同管理框架,可打破传统局限,实现全生命周期质量安全高效管控,对提升水利工程综合效益、保障工程安全运行意义重大。

1 BIM与数字孪生技术基础

BIM(建筑信息模型)技术依托三维数字技术构建工程数据模型,整合建筑工程项目的各类相关信息,以三维数字形式呈现建筑构件。该模型涵盖几何、物理特性及功能要求等多维度数据,实现工程信息的集成与共享。在设计阶段,设计师借助BIM开展多专业协同设计,提前化解专业冲突,提升设计质量与效率;施工阶段,施工人员利用BIM模型模拟施工,优化方案,合理调配资源与进度;运维阶段,运维人员依据模型中的设备、空间等信息,实现高效设施管理与维护。数字孪生技术通过构建物理实体的虚拟映射,达成虚实双向交互与实时更新。它借助传感器、物联网等技术收集物理实体运行数据,在虚拟空间创建对应数字模型,精准反映物理实体状态、行为与性能。数字孪生不仅能实时监控物理实体,还可通过数据分析与模拟预测,提前发现潜在问题并提供优化决策,提升运行效率与可靠性^[1]。

2 BIM与数字孪生技术驱动的水利工程质量安全协同管理框架构建

2.1 模型层构建

模型层作为水利工程质量安全协同管理框架的基

石,承担着整合多源数据、构建精准虚拟映射的重要任务,为后续功能实现与应用开展提供坚实支撑。(1)在数据整合方面,需全面收集水利工程从规划、设计到施工、运维各阶段的信息。包括地理空间数据,如地形地貌、水文地质等,这些数据可通过遥感技术、地理信息系统(GIS)获取,为工程选址与布局提供地理依据;工程结构数据,涵盖建筑物尺寸、材料属性、力学性能等,借助BIM技术的参数化建模功能,能将工程结构以三维形式精确呈现,并关联相关属性信息;设备运行数据,通过在水利设施上部署传感器,实时采集设备的温度、压力、流量等运行参数,反映设备的实际工作状态。(2)基于整合的数据,构建多维度、高精度的数字模型。一方面,利用BIM技术创建水利工程的三维实体模型,该模型不仅能直观展示工程的外观形态,还能集成工程的结构、设备等详细信息,实现信息的可视化与关联化。另一方面,结合数字孪生理念,构建与物理水利工程实时映射的虚拟孪生模型。此模型通过物联网技术实现与物理实体的数据交互,能够实时反映工程的实际运行情况,当物理工程发生状态变化时,虚拟模型能同步更新,确保两者的一致性。(3)为保障模型的准确性与可靠性,需建立严格的数据校验与模型更新机制。定期对采集的数据进行质量检查,剔除错误与异常数据,保证输入数据的准确性。根据工程实际进展与变化,及时对模型进行修正与完善,使模型始终与物理工程保持高度契合,为水利工程质量安全协同管理提供精准的模型支持。

2.2 功能层构建

功能层作为BIM与数字孪生技术驱动下水利工程质量安全协同管理框架的关键组成部分,起着承上启下、

统筹协调的重要作用，主要通过多方面功能实现高效管理。(1)具备信息集成与共享功能。它能够打破水利工程建设各参与方之间的信息壁垒，将设计单位、施工单位、监理单位等多方产生的信息，如设计图纸、施工进度、质量检测报告等，进行全面收集与整合。通过建立统一的信息平台，实现信息的实时共享与交互，让各方人员都能及时获取所需信息，避免因信息滞后或不准确导致的决策失误和工作延误，为协同管理奠定坚实基础。(2)拥有质量与安全监控功能。利用模型层提供的精准模型和数据，对水利工程施工过程进行全方位、动态的质量与安全监控。通过设定质量与安全指标阈值，系统实时比对实际数据与阈值，一旦发现偏差或异常情况，立即发出预警信号。同时，可对质量与安全隐患进行追溯分析，找出问题根源，为采取针对性的整改措施提供依据，有效保障水利工程的建造质量和使用安全。(3)实现协同决策支持功能。基于海量的数据和先进的算法模型，功能层能够为水利工程建设中的各类决策提供科学支持。在面对复杂的工程问题时，如施工方案选择、资源调配等，系统可模拟不同决策方案的效果，预测可能产生的结果，帮助管理人员做出更加合理、优化的决策，提升整个工程的管理水平和综合效益。

2.3 应用层构建

应用层作为BIM与数字孪生技术驱动下水利工程质量安全协同管理框架的最终呈现与价值实现层面，紧密贴合水利工程实际需求，构建起多维度、全流程的应用体系。(1)在设计规划阶段，应用层借助BIM的三维可视化与模拟分析功能，以及数字孪生的前瞻性预测能力，进行多方案比选与优化。设计师可直观查看不同设计方案的空间布局、结构合理性，通过模拟水流、地质等因素对工程的影响，提前规避潜在问题，提高设计质量，减少后期变更成本。(2)施工建设阶段是应用层的核心应用场景之一。利用实时数据采集与传输技术，将施工现场的人员、设备、材料等信息同步至数字孪生模型。管理人员通过应用层平台，可远程监控施工进度、质量与安全状况。一旦发现违规操作或质量隐患，系统立即发出警报，指导现场人员及时整改，确保施工过程规范有序，保障工程质量与人员安全。(3)运维管理阶段，应用层实现了对水利工程的智能化管理。通过持续采集设备运行数据，数字孪生模型可精准预测设备故障，提前安排维护计划，降低设备故障率，延长使用寿命。同时，结合地理信息系统(GIS)，可对工程周边环境变化进行监测，为工程的防洪、灌溉等功能提供科学决策依据^[2]。

3 BIM与数字孪生技术驱动的协同管理框架的应用

3.1 设计阶段应用

在水利工程的设计阶段，BIM与数字孪生技术驱动的协同管理框架发挥着至关重要的作用，为设计工作带来了前所未有的变革与提升。(1)从设计方案的优化来看，BIM技术构建的三维模型能够直观呈现水利工程的整体结构与空间布局。设计师可以借助该模型，从不同角度审视设计方案，及时发现并修正传统二维设计中难以察觉的空间冲突问题，如管道与结构构件的碰撞、设备布置的合理性等。数字孪生技术则进一步拓展了优化的维度，通过模拟水利工程在不同环境条件(如水流、地质变化)下的运行状态，提前评估设计方案对各种工况的适应性，从而对方案进行针对性优化，提高设计的科学性与可靠性。(2)在设计协同方面，该框架打破了各专业设计之间的信息壁垒。不同专业的设计师可以在统一的BIM平台上共享设计信息，实时交流设计思路与修改意见。数字孪生技术提供的虚拟环境，使得各专业能够共同模拟工程的运行过程，更好地协调各专业之间的设计接口，确保设计方案的整体协调性。(3)利用数字孪生模型进行设计验证，可提前发现潜在的设计缺陷。通过输入不同的参数，模拟工程在不同荷载、水位等情况下的受力与变形情况，为设计提供量化依据，减少设计变更，缩短设计周期，提高设计效率与质量，为水利工程的后续建设与运营奠定坚实基础。

3.2 施工阶段应用

在水利工程施工阶段，BIM与数字孪生技术驱动的协同管理框架展现出强大的优势，为施工过程的高效、安全、优质推进提供了有力保障。(1)施工进度管理方面，BIM技术构建的精确三维模型与施工计划紧密关联。通过将施工任务分解并映射到模型中，管理人员能够直观查看每个阶段的施工内容与进度要求。数字孪生技术则实时采集现场施工数据，与计划进度进行动态对比。一旦出现进度偏差，系统迅速分析原因，如资源调配不合理、工序衔接不畅等，并及时调整施工计划，确保工程按期完成。(2)质量管控环节，利用BIM模型集成的设计规范和质量标准，施工人员可随时查阅相关要求。在施工过程中，通过传感器和监测设备收集的实时数据传输至数字孪生模型，对施工质量进行实时监测。例如，对混凝土浇筑的强度、温度等参数进行监控，若发现不符合标准的情况，立即发出警报，指导现场人员采取整改措施，保证施工质量符合设计要求。(3)安全管理上，数字孪生模型模拟施工过程中的各种危险场景，如高处坠落、物体打击等，提前制定安全防范措施。同时，借助现场的监控设备和传感器，实时掌握施工人员的操作行

为和安全状态。一旦发现违规操作或安全隐患，系统及预警，提醒管理人员和施工人员采取措施，有效降低安全事故的发生概率，保障施工人员的生命安全。

3.3 运维阶段应用

在水利工程的运维阶段，BIM与数字孪生技术驱动的协同管理框架发挥着不可或缺的作用，极大地提升了运维管理的效率与质量。(1)从设备管理来看，基于BIM模型所集成的设备详细信息，如设备型号、规格、安装位置等，运维人员能够快速定位设备。数字孪生技术则进一步为设备构建了虚拟镜像，实时采集设备的运行数据，像振动、温度、压力等参数。通过对这些数据的分析，可精准预测设备故障的发生时间和部位，提前安排维护计划，实现从被动维修到主动预防的转变，有效降低设备故障率，延长设备使用寿命，减少运维成本。(2)在工程结构健康监测方面，BIM模型提供了工程结构的精确几何信息，而数字孪生模型结合传感器实时获取的结构应力、变形等数据，能够动态反映工程结构的实际健康状况。一旦监测数据超出预设的安全阈值，系统立即发出警报，运维人员可迅速采取措施，如加固结构、限制运行等，确保水利工程结构的安全稳定。(3)该框架还能优化运维资源的调配。通过分析历史运维数据和实时需求，数字孪生模型可以预测不同时间段、不同区域的运维工作量，合理安排人力、物力资源。同时，BIM模型为运维人员提供了清晰的工程布局和操作指引，提高运维工作的准确性和效率，保障水利工程在运维阶段能够持续、稳定地发挥其防洪、灌溉、供水等重要功能。

3.4 应急管理应用

在水利工程的应急管理领域，BIM与数字孪生技术驱动的协同管理框架展现出了卓越的效能，为应对各类突发状况提供了科学、高效的解决方案。(1)当面临洪水、地震等自然灾害引发的紧急情况时，数字孪生模型能够迅速发挥作用。它依托实时采集的水文、地质等数据，精准模拟灾害的发展趋势和影响范围。例如，通过模拟洪水演进过程，清晰呈现不同水位下淹没的区域，帮助应急指挥人员快速确定受灾范围，为人员疏散、物

资调配提供关键依据。同时，BIM模型所包含的工程详细信息，如建筑物的结构特点、薄弱部位等，可辅助评估灾害对水利工程的破坏程度，以便制定针对性的抢险方案。(2)在应急资源管理方面，该框架实现了资源的优化配置。数字孪生模型根据灾害模拟结果和工程受损情况，预测所需的应急物资种类和数量。结合BIM模型中工程设施的分布信息，合理规划物资运输路线和存放地点，确保应急物资能够及时、准确地送达受灾部位。此外，还能实时监控应急资源的使用情况，避免资源浪费和短缺。(3)应急演练也是该框架的重要应用场景。利用数字孪生技术构建虚拟的灾害场景，结合BIM模型进行三维可视化展示，让应急人员仿佛置身于真实的灾害环境中进行演练。通过模拟不同的应急处置流程，检验和完善应急预案，提高应急队伍的实战能力和协同配合水平，从而在真正的突发事件发生时，能够迅速、有序地开展救援工作，最大限度地减少灾害损失^[1]。

结束语

BIM与数字孪生技术为水利工程质量安全协同管理开辟了全新路径。通过构建协同管理框架，在设计阶段优化方案、施工阶段保障进度质量安全、运维阶段实现智能管理、应急阶段高效应对危机，全方位提升了水利工程的管理水平。该框架的应用有效解决了传统管理模式中信息不畅、协同困难等问题。未来，随着技术的不断发展，其功能将更加完善，应用范围也将进一步拓展。我们应持续探索创新，充分发挥技术优势，为水利工程的可持续发展和人民群众的生命财产安全提供更坚实的保障。

参考文献

- [1]金和江.基于BIM与数字孪生的建筑施工质量精准管控[J].城市开发,2025(11):135-137.
- [2]刘寿辉.探析水利工程施工中的安全管理与质量控制[J].水上安全,2023(13):158-160.
- [3]张强.关于对水利工程质量监督与安全管理工作初谈[J].科技风,2023(14):71-73.