

刘思微, 田莹, 徐永兵, 等. 数字孪生泵站三维智能巡检的研究与应用[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(4): 788-797. LIU S W, TIAN Y, XU Y B, et al. Research and application of digital twin-based 3D intelligent inspection for pump stations[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(4): 788-797. (in Chinese)

数字孪生泵站三维智能巡检的研究与应用

刘思微^{1,2}, 田莹³, 徐永兵^{2,4}, 徐征和¹, 张航钊^{2,4}

(1. 济南大学水利与环境学院, 济南 250022; 2. 山东省水利勘测设计院有限公司济南市数字孪生与智慧水利重点实验室, 济南 250013; 3. 南水北调东线山东干线有限责任公司, 济南 250000; 4. 山东省水利勘测设计院有限公司, 济南 250013)

摘要: 基于数字孪生技术, 深入探讨建筑信息化模型(building information modeling, BIM)与智能图像识别技术在智能巡检领域的集成挑战及其对泵站设备异常等异常事件快速响应能力的提升方法。将 BIM 轻量化后与网络地理信息系统(Web geographic information system, WebGIS)相结合, 为三维智能巡检搭建数字孪生场景。在此基础上, 集成视频融合技术与智能识别算法, 构建 BIM 技术耦合图像识别技术的三维智能巡检系统, 实现 BIM 与视频监控虚实交互, 快速直观地展示告警信息, 辅助值班人员快速响应设备异常等事件。结果表明: BIM 技术耦合图像识别技术在数字孪生泵站中具有巨大的潜力, 可以有效提高巡检质量, 为泵站智慧化管理作依托。

关键词: 数字孪生; BIM; WebGIS; 智能图像识别; 三维智能巡检; 泵站

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0079

南水北调工程是解决我国北方地区水资源短缺问题的举措, 也是关系到我国经济社会可持续发展的基础设施^[1]。随着科学技术的发展和水资源管理的复杂性增加, 数字孪生技术成为解决工程管理和运营挑战的新途径。数字孪生技术在南水北调工程中的应用是数字孪生技术在水利行业从实施方案策划迈入系统研发推进的关键里程碑^[2-3]。

针对南水北调大型泵站数字孪生“无人值守、少人值班”的建设目标要求, 实现感官分析到智能分析是做到智慧化泵站从有人值守到无人值班的跨越式发展标志。某泵站作为南水北调东线工程数字孪生先行先试建设项目, 其成功的建设和试运行为数字孪生南水北调东线工程建设提供宝贵的实践经验。目前, 某泵站已基本实现自动化, 但其在设备的运行状态分析、监管方面还停留在值班人员的感官分析, 距离数字孪生泵站智能化应用还存在一定差距。

智能变电站领域的进展表明, 无人机智能巡视^[4]、智能图像识别技术^[5-6]、智能巡检机器人^[7-8]等

技术已被广泛应用于监控设备的稳定性与安全性, 但这些监测结果的呈现形式对操作人员而言并不直观。此外, 泵站的运行安全性和可靠性不仅受设备运行状态影响, 还受泵站周围环境和水工建筑物影响^[9]。因此, 实现泵站的智能巡检需在数字孪生技术框架的基础上, 利用建筑信息化模型(building information modeling, BIM)精细建模, 并集成网络地理信息系统(Web geographic information system, WebGIS)技术和监控视频系统, 为值班人员提供更直观有效的可视化反馈。

本文对数字孪生泵站三维智能巡检的应用需求进行分析, 并详细设计技术路线, 深入研究智能巡检关键技术, 最后以南水北调某泵站数字孪生智能巡检应用实例分析基于该技术框架的实际应用效果。

1 泵站三维智能巡检的需求及技术路线

1.1 泵站三维智能巡检需求

1.1.1 三维数字场景构建

在数字孪生泵站建设中, 将数字高程模型

收稿日期: 2024-01-11 修回日期: 2024-03-25 网络出版时间: 2024-07-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240711.0851.008>

基金项目: 山东省水利工程数字孪生研发公共服务平台项目(YDZX2022019)

作者简介: 刘思微(1999—), 女, 山东汶上人, 主要从事智慧水利研究。E-mail: 15554165721@163.com

通信作者: 徐永兵(1981—), 男, 安徽望江人, 正高级工程师, 主要从事水利信息化与自动化、智慧水利等研究。E-mail: 1140789225@qq.com

(digital elevation model, DEM)、数字正射影像模型(digital orthophoto model, DOM)与多层次的 BIM (特别是精细化 BIM)融合,构建多尺度、多维度的数字孪生场景。在宏观层面,展现泵站工程的总体布局以及泵站各个水工建筑物;在微观层面,精确地反映泵站内部的详细设备结构和各个组成零件以及相关感知设备等。泵站的数字孪生场景不仅包含空间维度信息,还融合历史与实时数据流映射的时间维度信息,以及设备全生命周期信息。通过多尺度、多维度数字孪生场景的构建实现从宏观到微观、从整体到局部的无缝渲染,为三维智能巡检提供即时的渲染能力和高度交互的可视化场景。

1.1.2 泵站视频巡检需求

根据设定的巡检路线,系统自动指导摄像头沿预定路径进行实景捕捉,并与孪生场景中 BIM 同步联动,融合视频图像信息和设备运行的状态信息,实现泵站巡视工作的可视化、智能化。通过系统自动识别异常状态,在 BIM 虚拟模型中同步明显高亮异常区域,并同时提供视频图像识别反馈以及处置措施,便于值班人员及时洞悉设备状况并快速响应处理,极大地缩短现场巡检时间,提高了泵站故障诊断的准确性与决策效率。

1.1.3 智能图像识别

在执行泵站巡检过程中,尤其面对没有通信接口或已经老化的设备时,采用监控摄像头捕获的图像来提取仪表读数和设备指示灯的状态,利用智能图像识别技术进行分析更为准确高效。图像识别算法处理完毕后,系统会将识别产出的数据与实时

监测数据集进行比对分析,这一过程能够高效地实现对异常事件的监测。系统一旦检测到故障,将立即在 BIM 中通过高亮显示形式标注故障位置,并展示出相应的故障原因和处置措施。这种异常监测机制为值班人员提供了更为直观的视觉指导,辅助决策支持。

对于泵站的水位测定及主机组的油位监测,传统方法依赖于人工读取水位尺与油位计,这一过程不仅耗时耗力,而且容易受到人为误差的影响。相对而言,采用视频识别技术可以自动执行此类任务监测泵站环境信息及设备信息,大幅减轻现场值班人员的工作量,提升泵站监控的效率与精确性。

1.1.4 应用需求

数字孪生场景为智能巡检提供了一种高度集成的可视化界面,通过同步设备状态监控数据、水文监测数据和故障诊断结果等关键信息,实现泵站巡检的实时可视化管理。通过三维直观展示告警信息,辅助值班人员快速响应异常事件。此外,结合视频巡检技术与数字孪生场景,通过融合设备实时运行状态、图像捕获信息以及 BIM 数据,实现对泵站设施的虚拟巡检。这种方法不仅提升了巡检效率,还具备替代传统人工巡检方法的潜力,有效提升泵站维护和管理的效率。

1.2 技术路线

运用 WebGIS 与 BIM 融合技术,实现泵站空间信息的全面可视化模拟。结合智能识别算法和三维视频融合技术,并整合业务信息及监测信息,搭建数字孪生泵站三维智能巡检系统,其技术框架见图 1。

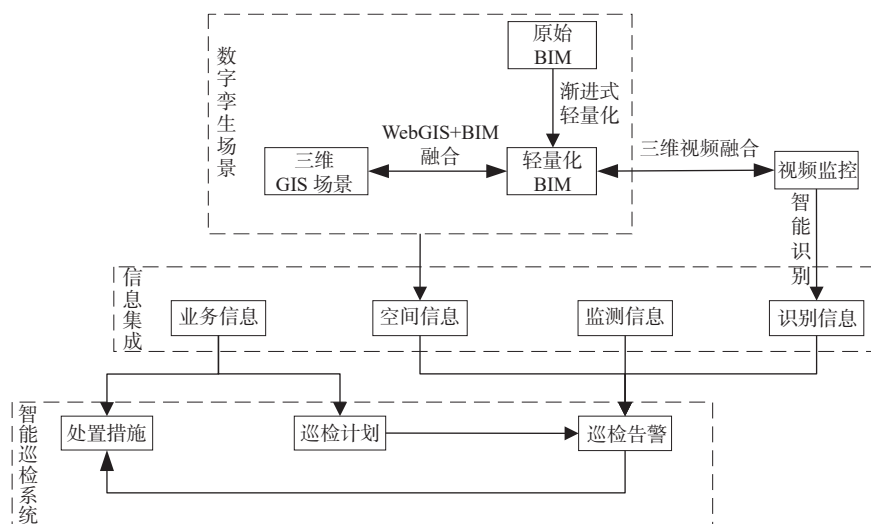


图 1 数字孪生泵站三维智能巡检技术框架

Fig. 1 Technical framework for three-dimensional intelligent inspection of digital twin pump stations

通过渐进式 BIM 轻量化处理和优化,提升模型加载速率,并结合 WebGIS 技术,构建多维度、多尺度的数字孪生场景,为值班人员提供全面的可视化操作平台;将 BIM 与视频监控系统融合联动,实现监测和巡检任务的高度可视化和操作便捷性;集成智能图像识别算法,为泵站视频巡检应用提供算法支撑,在此基础上,整合业务信息与监测信息,实现智能巡检过程中告警的触发,辅助值班人员及时响应异常事件并提供决策支持,完成巡检业务闭环,进一步提升泵站智慧化管理的响应效率。

2 基于 WebGIS 融合的 BIM 技术

2.1 渐进式 BIM 轻量化

泵站工程涉及多个专业,各个专业所使用的 BIM 建模软件各不相同,文件格式不统一,数据兼容性差,导致信息丧失、功能受限、效率下降。同时,随着泵站的运行,还存在着 BIM 信息量庞大,传输和加载困难的问题。为应对上述问题,在南水北调某泵站数字孪生系统建设的过程中采用渐进式 BIM 轻量化策略。通过标准化 BIM 文件格式,结合删减策略与构件分离策略减小文件尺寸,并引入渐进加载策略渲染三维场景,实现 BIM 的最优轻量化。渐进式 BIM 轻量化策略的引入显著提升了整个系统的运行效率和响应速度。

2.1.1 标准化文件格式

大型工程常用的 BIM 文件格式有 IFC (industry foundation classes) 格式、RVT (Revit project file) 格式以及 FBX (FilmBox) 格式。

考虑到泵站工程项目的复杂性及涉及多个软件的情况,IFC 和 RVT 文件格式虽适用范围广,但可能因文件体积庞大及信息准确度问题影响工作效率,且格式转换进一步增加了工作量^[10-13]。相比之下,FBX 文件以其通用性和跨平台特性,广泛应用于多种 3D 建模和动画软件之间的数据交换^[14],尽管在建筑信息建模属性和量化信息上有所欠缺,但其跨平台交互能力较强,有助于解决多种数据不兼容的问题。因此,在大型泵站工程 BIM 建模中,采用 FBX 格式可以提高工作效率,加强团队协作和信息共享,满足高效数字建模需求。

2.1.2 轻量化处理

尽管 FBX 文件不含建筑信息建模属性和数量信息,但随着泵站工程全生命周期的推进,FBX 文

件体积增大是不可避免的,这对计算机硬件资源造成了显著负担。为有效解决此问题,对 FBX 文件轻量化处理成为必要措施。

在轻量化水工建筑物及设备的 BIM 建模过程中,采取删减策略。首先,在 3D Max 中导入 FBX 文件,删除或简化不必要的细节和元素,如辅助物体、相机、材质纹理和装饰性元素,同时将关键信息存储于数据库中。在将模型导入三维场景时,使用 Three.js 引擎的 traverse 函数,逐一遍历模型的子元素,并进行必要的优化处理。除了删除构件等修饰性元素,还需要进行减面操作。曲面物体可以使用 3D Max 中的优化命令来调整面阈值,其他规则性模型则转为可编辑多边形。此外,对模型的布线或结构进行手动修正,以确保模型的准确重建。

为进一步优化 BIM 模型的数据量,采取外部构件与内部构件分离策略,将原始模型拆分为体量更小的模型,减少不必要的冗余,并显著提高加载速度。对外部构件经过二次删减以减小模型体量,而对内部构件适当增加细节以保证模型的准确性。完成构件分离和处理后,手动调整以确保各部分正确对齐,并将处理后的外部构件和内部构件分别导出为单独的 FBX 文件。在导出过程中,将平面坐标系转换为适用于 GIS 场景的球面坐标系,以便与三维 GIS 场景集成加载。通过删减策略和构件分离策略的综合应用,在保证数据完整性的同时得到体量更小的最优轻量化 BIM。BIM 轻量化技术路线见图 2。

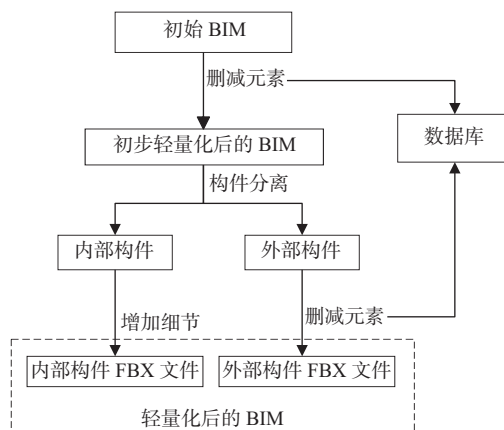


图 2 BIM 轻量化技术路线

Fig. 2 BIM lightweight technology roadmap

为进一步加速渲染过程,提高渲染效率,采用渐进加载策略,首次加载时仅加载 BIM 外部构件,以降低初次加载的数据量。当值班人员缩放或改变

观察角度时,系统根据视角的变化智能地加载不同细节的 BIM,为用户提供更高性能和更佳的三维可视化体验。

2.2 WebGIS+BIM 的融合

2.2.1 地形与倾斜摄影的加载

在南水北调某泵站数字孪生系统的构建中,采用地图引擎 Cesium 加载渲染三维大场景,涵盖了 DEM、DOM 和倾斜摄影数据。这些数据源首先经过 Cesiumlab 工具处理,转换为 3D Tiles 格式,供 Cesium 引擎加载使用^[15-17]。为保障数据的一致性和准确叠加,所有模型导出时均采用了 WGS84(World Geodetic System 1984,世界大地坐标系 1984)坐标系。为提高性能和数据安全性,系统通过 nginx 代理的方式访问 3D Tiles 文件。

加载地形和倾斜摄影数据时,确保倾斜摄影图像与地形完美贴合是关键的第一步。在将 3D Tiles tileset 对象集成到场景后,利用回调函数精细调整模型的经纬度和海拔信息,然后借助 Cesium 引擎的 eastNorthUpToFixedFrame 函数将全局坐标系转换为局部坐标系。最后,通过模型平移变换,对倾斜摄影模型的位置进行调整,确保模型的精确定位。

2.2.2 BIM 与 WebGIS 的融合

南水北调某泵站数字孪生系统采用 Three.js 引

擎加载 BIM 的 FBX 文件,同时利用 Cesium 引擎加载转换为 3D Tiles 格式的数字高程模型 DEM、DOM 和倾斜摄影数据。融合这两种技术的关键挑战在于协调 Three.js 引擎与 Cesium 引擎,以实现复杂三维场景的无缝集成。

为实现三维场景的无缝集成,利用 Three.js 引擎支持背景透明的特性,将 Three.js 渲染的 Canvas 与 Cesium 渲染的 Canvas 重叠。在这一过程中,首要步骤是确保 Three.js 引擎将 BIM 模型坐标从球面坐标系准确地转换为 WGS84 坐标系,以确保模型在两种渲染引擎中位置的一致性。

渲染过程的核心是同步 Three.js 相机和 Cesium 相机的参数。这包括从 Cesium 相机获取垂直视场角,并将其转化为 Three.js 相机的视场角属性,确保两个相机在视觉上的一致性。同时,通过获取并应用 Cesium 相机的视图矩阵和逆视图矩阵到 Three.js 相机,保证相机位置和方向的完全同步。

这一系列的协调过程使得 Cesium 与 Three.js 能够协同渲染复杂的三维场景。渲染完成后,通过 Three.js 引擎适当调整模型的位置、旋转和缩放参数,确保模型与三维场景完美贴合。通过这种方法,构建完成一个多尺度、多维度的数字孪生泵站三维场景,为系统提供了更加丰富和精确的视觉呈现。某泵站数字孪生三维场景的最终展示效果见图 3。

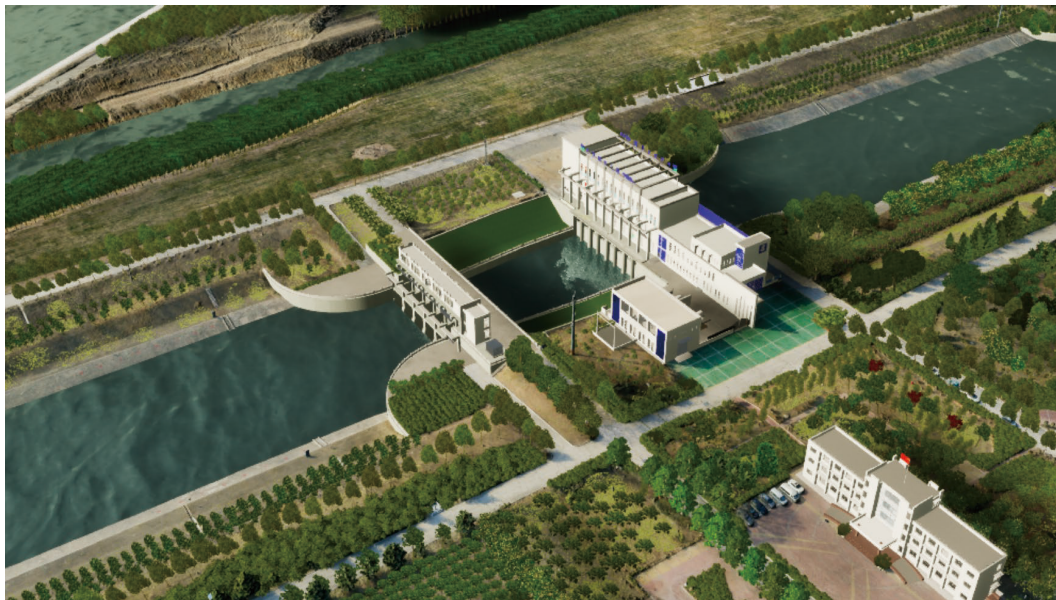


图 3 南水北调某泵站数字孪生三维场景

Fig. 3 Digital twin three-dimensional scene of a pumping station in the South-to-North Water Transfers Project

综上所述,BIM 模型与 WebGIS 融合技术框架总结见图 4。

3 BIM 模型与视频的融合联动

数字孪生泵站三维智能巡检的关键在于实现虚

拟场景与实时监控的联动,使泵站操作人员能够即时切换并互动于虚拟三维场景和实际监控视频,获得实时的可视化反馈。

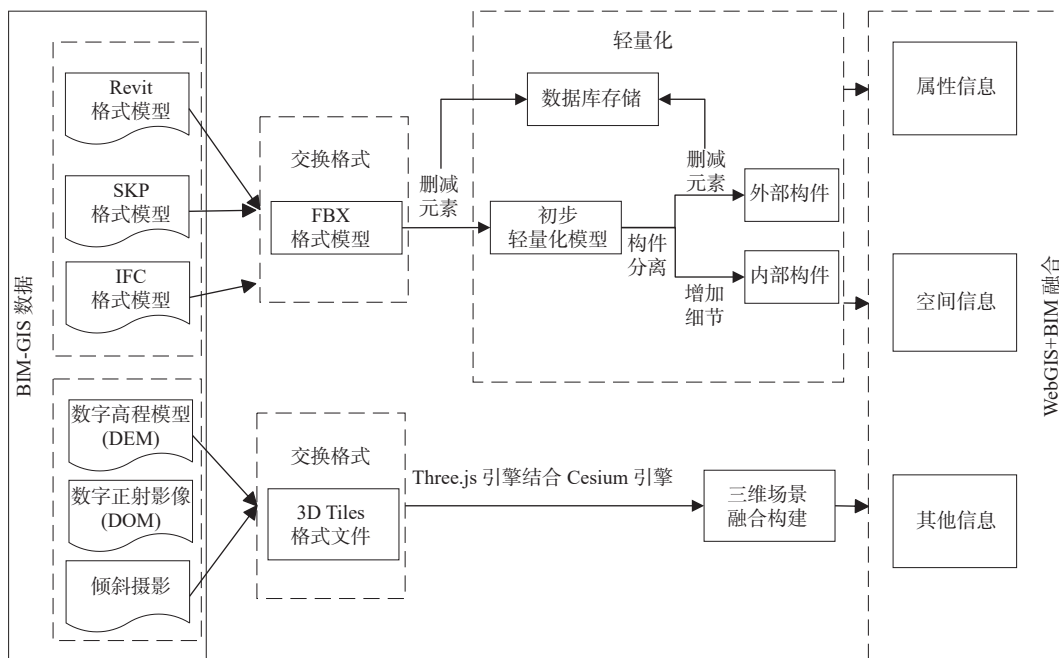


图 4 WebGIS 与 BIM 融合框架
Fig. 4 Integration framework of WebGIS and BIM

通过集成传送流协议(HTTP Live Streaming, HLS)格式的监控视频流,搭建实景与虚拟场景协同作用的数字孪生场景。借助三维视频融合技术以及 BIM 模型与监控数据的联动展示,实现监控视频与三维虚拟场景的无缝融合,为数字孪生泵站的智能巡检提供更直观、实时的体验。

3.1 三维视频融合技术

三维视频融合技术^[18]是数字孪生泵站实现三维智能巡检的关键技术之一。该技术能够将监控画面准确地叠加到三维模型的地理坐标位置上,而不受模型倾斜或旋转等操作的影响,有效发挥了三维场景的直观展示的特性。

泵站监控视频通常以一系列连续图像帧的形式存在,类似于图像文件集合。因此,将监控视频与泵站三维场景融合可以更简化地描述为将监控视频的截图与泵站的三维场景融合。关键在于确保监控图像中的真实坐标与三维场景的相应位置准确匹配,即将图像的地理坐标转换为三维场景坐标^[19]。

在南水北调某泵站数字孪生系统中,每个监控摄像头的位置信息已与相应的设备精准关联,并统一标准化至 WGS84 坐标系中。利用 Cesium 引擎

将实际坐标转为 WGS84 坐标系下的坐标,进而在三维场景中精确定位每个虚拟相机。同时,将监控摄像头提供欧拉角信转为四元数,设定虚拟相机的朝向。这确保了虚拟环境中的相机视角与现实世界中的监控视角完美匹配。通过设置视频图像预置位,将监控视频叠加在场景中,实现真实与虚拟的融合,极大地增强了系统的直观性和互动性。

虚实融合使得值班人员能够在三维场景中直观地查看监测信息,例如设备的运行数据、水位、油位等,赋予值班人员复查和确认系统分析结果的权力,进一步提升系统的可靠性和准确性。

综上所述,三维场景与视频融合的技术路线见图 5。

3.2 BIM 与监控的联动

利用三维视频融合技术,系统能在监控画面启动后即刻自动切换至 BIM 视角。BIM 已细分为外部构件和内部构件,同时,每个监控视频都已与特定设备模型关联。监控画面启动时,系统能够立即提取 BIM 外部构件的信息参数。

借助 Three.js 的 ShaderMaterial 函数创建蓝色(巡检中状态)和红色(异常报警状态)的外发光材质。系统将遍历所有模型的外部构件并根据当前的巡检状态将其材质修改为对应的外发光材质^[20]。图 6 为巡检状态呈现结果。

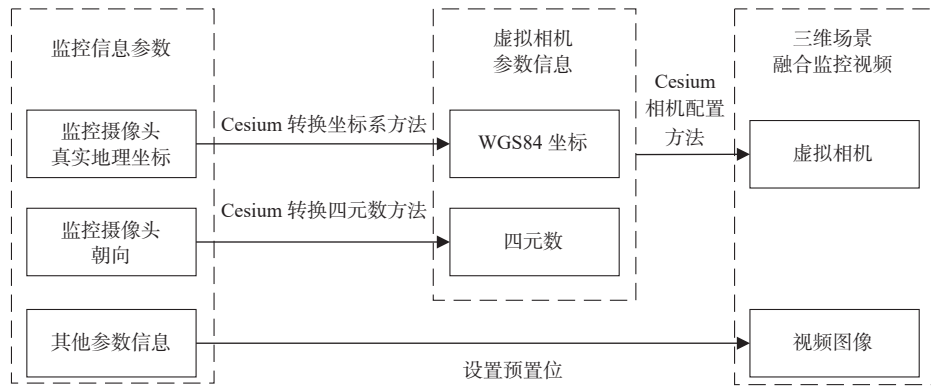


图5 三维场景与视频融合的技术路线

Fig. 5 Technology roadmap for the integration of 3D scenes and videos

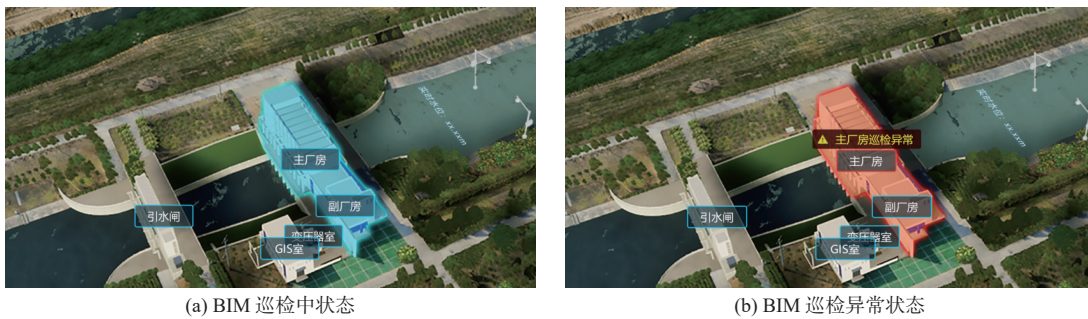


图6 BIM 巡检中状态和巡检异常状态

Fig. 6 Status in BIM model inspection and inspection abnormal status

为确保巡检操作的连贯性,系统内置了事件监听器,实时调用监控平台接口,捕捉摄像头视角变化。将这些变化信息转换为四元数,并同步更新到三维场景虚拟相机,保证了场景视角与实际监控视角的一致性。

通过巡检状态的可视化呈现,系统可在监控画面激活时迅速聚焦于特定的设备或水工建筑物,显著提升了识别效率和操作效率。这不仅加速了问题的诊断过程,还优化了监控信息的可视化呈现,大幅提升了泵站运维管理的效率。

3.3 基于视频流的智能图像识别

在南水北调某泵站数字孪生系统中,结合监控系统的实时视频流,应用智能图像识别技术对泵站关键设备参数进行实时自动化监测,包括设备表盘识数、指示灯状态、液位识别等关键指标的实时自动识别。利用高精度图像捕获技术,系统实时获取监控画面,并通过图像识别算法模型识别表盘数值^[21],采用特征匹配算法^[22]识别指示灯的状态,运用边缘检测技术^[23]进行液位识别。

为确保图像识别结果的高度可靠性,系统利用实时视频流提取一系列连续的静态帧,并对这些帧进行一致性验证,以校正图像分析的结果。此外,

系统还集成了来自监测设备的实时数据,通过对比分析,实时评估设备以及泵站周围环境是否存在异常情况,从而实现泵站的智能化监测和故障预警,为泵站的安全稳定运行提供有力的技术支撑。

3.3.1 设备表盘识数

利用泵站展示数值的设备表盘都是绿底黑字的特征,编写基于 Python 的脚本通过边缘检测法定位设备表盘。通过将图像转换至 HSV(hue-saturation-value, 色相-饱和度-亮度)颜色空间,设定绿色阈值以创建二值图像,使用闭运算填充图像空洞,并在垂直和水平方向上检测边界以准确定位仪表盘区域;采用 Pillow 库的裁剪功能对识别区域进行精确裁剪^[24],处理前后对比图见图 7。最后通过 Tesseract OCR 技术执行高精度的数字文本识别^[25]。

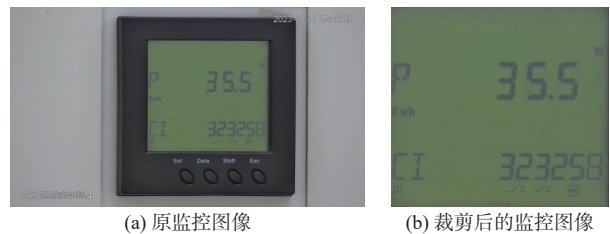


图7 原监控图像和裁剪后的监控图像

Fig. 7 Original monitoring image and cropped image

3.3.2 指示灯状态识别

同一监控图片包含多个指示灯即多个识别区域需要识别,每个识别区域都对应一个特征区域^[26]。通过设定特征区域预置位,使用 Pillow 库中的 crop 函数将指示灯区域裁剪出来,以便将指示灯状态识别的结果与所控制设备相对应。

裁剪图像为 HSV 色彩空间,提取饱和度通道,计算平均饱和度确定饱和度下限。设定颜色范围,创建颜色掩膜以识别绿色和红色指示灯状态。通过统计各色掩膜处理后图像的非空像素数量,确定出现最多的颜色作为指示灯识别结果。多次参数调整对比试验后,确认以下参数设置能实现最准确的指示灯识别结果:饱和度下限取平均饱和度的 1.3 倍,明度下限设为 140。红色色相下限设为 150,上限设为 180;绿色色相下限设为 70,上限设为 100。这些参数设置为智能巡检提供了更加精确和高效的反馈。

3.3.3 液位识别

在泵站的运行管理中,液位监测是确保泵站安全运行的关键。首先对图片进行预处理,接着使用边缘检测算法识别图像中的液位线。应用 OCR 技术,识别水尺或油尺上的刻度。系统将实测液位数据与既定的安全阈值进行对照,以评估当前液位状态是否处于安全范围内。

同时,预设润滑油的正常状态特征,利用图像分割算法提取润滑油的当前状态特征。通过对比分析正常状态特征与实时状态特征,系统能够有效监测并评估机组润滑油的健康状态,确保泵站设备的高效稳定运行。

4 南水北调某泵站数字孪生智能巡检应用

4.1 巡检异常告警

南水北调某泵站利用已部署高分辨率监测设备实时监测设备和周围环境,并在智能巡检系统部署了自动化任务,定时捕捉监控视频流,并调用图像识别和分析算法,将设备当前运行状态与预设异常阈值进行对比分析。在关键水利结构如渠道、前池、后池的巡检过程中,调用图像识别算法,自动测定水位,将识别结果与季节性调节的水位上下限标准进行比较分析。对于水工建筑物,系统调取结构健康监测数值,如变形、应力应变等指标,与设定的告警阈值进行比对,以评估结构的安全状况。在检测到异常情况时,系统会自动触发报警,在监控中心显示报警信息,三维场景将自动对焦在问题区域高

亮异常设备同时调出监控视频,以提供更多的信息和可视化数据,帮助值班人员更好地了解情况。

巡检异常告警机制的应用不仅提升了泵站管理的效率,也显著增强了对设施运行状况和环境安全性的实时监控能力,同时,也大大减少了潜在风险和人员安全方面的担忧。

4.2 基于 BIM 技术的三维智能巡检管理平台

在现有泵站综合在线监测系统的基础上,整合视频监控系统,将设备的图像信息、运行信息以及泵站周围环境和水工建筑物健康状态的分析结果集成在一个画面上,实现设备外观和内在运行状态的统一监视。

以南水北调某泵站非运行期日常巡检为例,巡检任务执行中的界面见图 8。智能巡检系统中已经维护好巡视顺序,明确定义了需要巡检的位置和设备,包括电机、水泵等关键运行设备以及电动机柜、变压器等辅机设备的监测。这些设备都配备了传感器和监测设备,用于实时数据采集,例如电流、电压、振动和温度等各种参数,以及设备的状态信息。这些数据经过数据治理平台的处理,随后被推送至业务系统,使得操作人员能够实时访问这些数据。一旦触发日常巡检的指令,系统会自动调用安全巡检摄像头,并智能切换三维场景至相应视角。此时,系统高亮显示需要巡检的设备或水工建筑物,以便运行人员能够准确定位。在巡检过程中,系统调用业务库中的设备监测数据,同时结合图像识别的结果,进行数据比对和分析。这一综合分析会产生巡检报告,其中包括详细的巡检结果、相关图像信息,如实时摄像头捕捉的图像以及设备的实时监测数据。运行人员可以通过主站或移动设备实时查看这些信息,立即了解设备的情况,及时发现设备潜在的故障,减少紧急维修的成本和时间。此外,通过结合泵站渠道、前池、后池的水位数据与水工建筑物的结构健康监测数据进行分析,系统能够全面评估泵站工程运行的安全性。在检测到潜在风险时,系统会及时提醒值班人员并提供详细的数据分析报告和建议处置措施,从而避免事故的发生。

南水北调某泵站数字孪生三维智能巡检系统的运用切实提高了非运行期日常巡检的效率和准确性。运用传感器、摄像头、数据治理平台以及智能算法,该系统可迅速检测异常情况,提供详尽的巡检信息,为设备和水工建筑物的安全性和可靠性提供了重要保障,同时降低了维护成本和潜在风险,为泵站的智慧化管理提供了坚实的基础。



图8 南水北调某泵站数字孪生三维智能巡检系统界面

Fig. 8 Interface of the digital twin 3D intelligent inspection system for a specific pump station in the South-to-North Water Transfers Project.

5 结语

三维智能巡检是实现设备的运行状态分析与监管从感官分析到智能分析的关键功能,并为实现数字孪生泵站“无人值守、少人值班”应用需求提供重要技术支撑。本文详细分析南水北调某泵站数字孪生三维智能巡检的具体需求,深入探究 BIM 模型轻量化技术、WebGIS 与 BIM 融合技术、BIM 融合视频技术、智能图像识别技术等关键技术,构建数字孪生泵站三维智能巡检系统的技术框架,通过南水北调某泵站数字孪生应用示例,展示 WebGIS 与 BIM 融合技术以及 BIM 融合视频技术在搭建三维精细化场景、智能分析设备运行状态以及抽象数据可视化表达等方面的应用成效。

通过对 BIM 轻量化处理,南水北调某泵站数字孪生智能巡检系统在三维场景加载效率上实现了约 69% 的提升,显著优化了系统的整体运行性能。相较于传统人工巡检,泵站通过系统智能巡检,在巡查效率上实现了约 67% 的提升。在日常巡检中,系统通过分析对比数据,成功发现 4#机组存在异常状态并及时发出告警,有效地避免了潜在危险,真正让数字赋能工程智慧运行。尽管系统在提升泵站运维效率和安全性方面取得了初步成效,但系统仍存在三维视频融合效果差,图像识别结果偏差,视频识别技术难以监测未运行设备等问题,未来将进一步深化探究三维视频融合技术以及智能图像识别技术,提高可视化效果、巡检质量,以促进三维场景、监控视频和业务数据的协同高效运算和深度联动,实现无人值守,为泵站的智慧管理提供基础。

参考文献:

[1] 赵勇,何凡,何国华,等.对南水北调工程效益拓展至滦河流域的若干思考[J].*南水北调与水利科技(中*

英文), 2022, 20(1): 62-69. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2022.0007.

- [2] 曾焱,程益联,江志琴,等.“十四五”智慧水利建设规划关键问题思考[J].*水利信息化*, 2022(1): 1-5. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2022.01.001.
- [3] 李鹏程.奋力开创“十四五”南水北调工程高质量发展新局面[J].*水利发展研究*, 2021, 21(7): 47-51. DOI: 10.13928/j.cnki.wrdr.2021.07.013.
- [4] 吴俊杰.无人机智能巡视系统在变电站巡检中的应用[J].*农村电气化*, 2023(10): 21-23. DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2023.10.006.
- [5] 彭明智,许尧,胡永波,等.基于人工智能技术的变电站二次设备智能巡检技术[J].*高电压技术*, 2023, 49(S1): 90-96. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.2023.0711.
- [6] 龙珊珊,信瑞山.基于人工智能图像识别的输电线路巡检研究[J].*电子测量技术*, 2023, 46(6): 116-121. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2208781.
- [7] 罗宇亮,沈洁.智能机器人巡检系统在输变电工程中的应用研究[J].*电测与仪表*, 2020, 57(23): 17-22. DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2020.23.003.
- [8] 刘武.发电厂升压站智能巡检机器人安全监测研究与应用分析[J].*电气开关*, 2023, 61(4): 28-33. DOI: 10.3969/j.issn.1004-289X.2023.04.008.
- [9] 陈卫冲,刘红伟,邵春兵,等.大型枢纽泵站运行状态智慧诊断系统的架构及应用[J].*流体机械*, 2022, 50(12): 72-78. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2022.12.011.
- [10] 赖华辉,邓雪原,刘西拉.基于IFC标准的BIM数据共享与交换[J].*土木工程学报*, 2018, 51(4): 121-128. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2018.04.014.
- [11] 魏国富,熊晓芸,王金龙.基于IFC的二三维联动BIM可视化引擎[J].*计算机应用与软件*, 2020, 37(7):

- 82-87. DOI: [10.3969/j.issn.1000-386x.2020.07.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-386x.2020.07.013).
- [12] 张国良, 范沛然. 建筑信息化设计Revit的特色与应用[J]. *城市建筑*, 2019, 16(33): 134-135. DOI: [10.19892/j.cnki.csjz.2019.33.051](https://doi.org/10.19892/j.cnki.csjz.2019.33.051).
- [13] 胡夏恺, 陈俊涛, 杨聃, 等. 基于Revit二次开发的BIM+WebGIS融合应用研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(11): 3930-3942. DOI: [10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.015](https://doi.org/10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.015).
- [14] 李壮, 吕瑞升, 张歆雨, 等. 虚拟仿真三维数据交换格式优选[J]. *信息技术与标准化*, 2022(4): 20-24. DOI: [10.3969/j.issn.1671-539X.2022.04.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-539X.2022.04.006).
- [15] 郑志煌, 章欣欣, 何原荣. 基于开源Cesium的三维WebGIS场景实现[J]. *城市建筑*, 2019, 16(19): 95-97. DOI: [10.19892/j.cnki.csjz.2019.19.016](https://doi.org/10.19892/j.cnki.csjz.2019.19.016).
- [16] 黄欣然, 江文萍, 刘一飞, 等. Cesium环境中三维场景数据的加载优化策略[J]. *测绘地理信息*, 2022, 47(S1): 94-98. DOI: [10.14188/j.2095-6045.2021100](https://doi.org/10.14188/j.2095-6045.2021100).
- [17] 杨菁, 陈冰凌, 王文鹏, 等. 基于Cesium的三维可视化场景建设及发布技术的研究[J]. *测绘通报*, 2021(S1):50-53. DOI: [10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0511](https://doi.org/10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0511).
- [18] 伍朝辉, 常莹, 李青, 等. 基于三维视频融合的隧道运营管理创新应用研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(1): 154-161. DOI: [10.3973/j.issn.2096-4498.2022.01.019](https://doi.org/10.3973/j.issn.2096-4498.2022.01.019).
- [19] 马瞳宇, 崔静, 储鼎. 基于WebGL的实景三维场景与视频监控图像融合技术研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(z1): 80-83. DOI: [10.3969/j.issn.1672-5867.2020.z1.024](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-5867.2020.z1.024).
- [20] 宋大明, 轩元, 朱宇锋, 等. WebGL在房屋安全信息管理系统中的应用[J]. *现代测绘*, 2017, 40(2): 42-45. DOI: [10.3969/j.issn.1672-4097.2017.02.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-4097.2017.02.012).
- [21] 王文豪, 高利. 一种基于OpenCV的车道线检测方法[J]. *激光杂志*, 2019, 40(1): 44-47. DOI: [10.14016/j.cnki.jgzz.2019.01.044](https://doi.org/10.14016/j.cnki.jgzz.2019.01.044).
- [22] 余萍, 袁辉, 赵振兵, 等. 图像识别中的兴趣点匹配方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(5): 132-135. DOI: [10.3778/j.issn.1002-8331.2010.05.040](https://doi.org/10.3778/j.issn.1002-8331.2010.05.040).
- [23] 孙海明, 韩国强. 基于改进Canny算法的噪声图像边缘检测[J]. *湖北汽车工业学院学报*, 2023, 37(4): 54-57.
- [24] 林云. 基于OpenCV的车牌识别系统设计与实现[J]. *物联网技术*, 2020, 10(6): 22-25. DOI: [10.16667/j.issn.2095-1302.2020.06.006](https://doi.org/10.16667/j.issn.2095-1302.2020.06.006).
- [25] 聂霜霜, 杨轶男, 卫晶, 等. 基于Tesseract-OCR文本识别的检票系统研究[J]. *现代信息科技*, 2022, 6(5): 1-4. DOI: [10.19850/j.cnki.2096-4706.2022.05.001](https://doi.org/10.19850/j.cnki.2096-4706.2022.05.001).
- [26] 刘艳, 李昌. 基于特征匹配的高压断路器指示灯图像识别[J]. *电器与能效管理技术*, 2022(7): 50-55. DOI: [10.16628/j.cnki.2095-8188.2022.07.008](https://doi.org/10.16628/j.cnki.2095-8188.2022.07.008).

Research and application of digital twin-based 3D intelligent inspection for pump stations

LIU Siwei^{1,2}, TIAN Ying³, XU Yongbing^{2,4}, XU Zhenghe¹, ZHANG Hangfan^{2,4}

(1. School of Water Conservancy and Environment, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Key Laboratory of Jinan Digital Twins and Intelligent Water Conservancy., Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy Co., Ltd., Jinan 250013, China; 3. South-to-North Water Diversion Project Eastern Route Shandong Co., Ltd., Jinan 250013, China; 4. Shandong Survey and Design Institute of Water Conservancy Co., Ltd., Jinan 250013, China)

Abstract: The application of digital twin technology in the South-to-North Water Transfers Project is explored, with a specific emphasis on a pioneering digital twin project at a pumping station, aiming to promote the digitization trend in water resources engineering. Focused on the construction goal of the digital twin pumping station, which aims to achieve "unmanned and minimally manned" operations, the research highlights the critical transition from sensory analysis to intelligent analysis for the realization of key intelligent capabilities at the pumping station. While advanced methods such as unmanned aerial vehicle intelligent surveillance, smart image recognition technology, and intelligent inspection robots have been applied in the field of intelligent substations, limitations exist in the visualization of monitoring results.

To fully consider the multifactorial impacts on the operational safety and reliability of the pumping station, the need for the intelligent inspection of the digital twin pumping station is emphasized, combining Building

Information Modeling for precise modeling, Web Geographic Information System technology, and monitoring videos to provide more accurate visual feedback. The research adopts the integration of Building Information Modeling and Web Geographic Information System technologies to construct a three-dimensional scene. The three-dimensional video integration technology is used to ensure the accurate overlay of monitoring videos onto the geographical coordinates of the three-dimensional model. Through the Cesium engine, the coordinates of monitoring cameras are standardized to World Geodetic System 1984, achieving precise integration of virtual scenes with real-time monitoring. Simultaneously, with the linkage between Building Information Modeling models and monitoring, event listeners are defined to dynamically call monitoring platform interfaces, detecting changes in camera perspectives and ensuring synchronization with the scene. In terms of intelligent image recognition, real-time recognition of numerical values on equipment dials and indicator light statuses is achieved, combined with monitoring device data to judge equipment abnormalities.

Significant practical results have been achieved through the research. The system is equipped with high-resolution monitoring devices, enabling automatic triggering of alarms upon detecting anomalies through real-time data collection and image processing. Furthermore, the digital twin pumping station's three-dimensional intelligent inspection system efficiently generates detailed inspection reports, encompassing inspection results, monitoring images, sensor data, and equipment status information. In application scenarios, the system automatically focuses on problematic areas, highlighting abnormal equipment and achieving digitalized intelligent inspections, thereby enhancing equipment and environmental safety and reducing potential risks.

In summary, a comprehensive technical solution for the three-dimensional intelligent inspection system of the digital twin pumping station is provided. Despite facing some challenges, such as improving three-dimensional video integration effects and image recognition results, efficient operations for the digital twin pumping station have been achieved through the introduction of strategies like progressive Building Information Modeling model lightweighting. Future directions include further advancing three-dimensional video integration and intelligent image recognition technologies to enhance visualization and inspection quality, promoting collaborative operations among components, and realizing unmanned operations for the pumping station's intelligent management on a more robust foundation.

Key words: digital twin; building information modeling(BIM); Web geographic information system (WebGIS); intelligent image recognition; three-dimensional intelligent inspection; pump station