

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.018

基于 B/S 架构的土石坝碾压质量三维智能监控系统研发与应用

林威伟,崔 博,佟大威,王佳俊,王晓玲,张 君

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要:针对目前大坝碾压质量监控系统主要采用二维展示界面且采用 C/S 结构,存在可视化交互水平不佳、无法实现碾压施工信息跨平台查询与共享以及反馈控制水平低等问题,通过耦合基于多细节层次技术的分级加载机制和增强现实技术,采用 B/S 架构构建了土石坝碾压质量三维智能监控系统。在两河口水电站工程的应用结果表明,构建的土石坝碾压质量三维智能监控系统能够实现碾压过程智能监控,施工信息的跨平台高效、流畅交互查询和沉浸式可视化展示,以及碾压质量智能评价,有效提升了施工过程的智能化水平。

关键词:三维智能监控系统;土石坝;碾压质量;多细节层次技术;B/S 架构;增强现实技术;两河口水电站

中图分类号:TV641;TV51 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)05-0131-08

Development and application of three-dimensional intelligent monitoring system for rolling quality of earth-rock dam under B/S framework

LIN Weiwei, CUI Bo, TONG Dawei, WANG Jiajun, WANG Xiaoling, ZHANG Jun

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The current monitoring system of dam rolling quality relies on the two-dimensional visual interface, which has the disadvantages of poor visual interaction level, and the C/S (client/server) architecture cannot realize the cross-platform query and sharing of rolling construction information, resulting in the shortcomings of low feedback-control level. In this study, a three-dimensional intelligent monitoring system of construction quality for the earth-rock dam is constructed under the B/S architecture by coupling the hierarchical loading mechanism based on the level of detail (LOD) technology and augmented reality technology. The application results in the Lianghekou Hydropower Project show that the system established in this study can realize the intelligent monitoring of the rolling process, the efficient and smooth cross-platform interactive query, the immersive visual display of construction information, and the intelligent evaluation of rolling quality, which effectively improves the intelligent level of the construction process.

Key words: three-dimensional intelligent monitoring system; earth-rock dam; rolling quality; level of detail technology; B/S framework; augmented reality; Lianghekou Hydropower Project

填筑碾压是土石坝施工的关键环节之一,填筑碾压质量的好坏对于大坝沉降、变形和渗透系数是否满足要求有重大影响,对坝体填筑碾压质量进行有效且精确控制是保证大坝安全运行的关键。基于 GPS、GPRS、自动控制以及计算机网络等技术,大坝碾压质量监控系统^[1]对大坝施工过程中碾压参数进行实时、连续、自动化、高精度监控,进而实现对填筑碾压过程的实时监控和现场施工反馈控制,使大坝碾压质量始终处于真实受控状态,这对于实现工程建设由粗放式向精细化转变、保证碾压质量具有重要意义。

目前,国内外专家学者在土石坝碾压质量监控领域进行了大量的相关研究。Zhong 等^[1-2]采用 GPS、分组无线服务,研制开发了基于 C/S 架构的心墙堆石坝碾压质量实时监控系统,实现了对碾压参数的二维可

基金项目: 国家自然科学基金委员会-雅砻江流域水电开发有限公司雅砻江联合基金(U1965207)
作者简介: 林威伟(1994—),男,博士研究生,主要从事大坝碾压监控研究。E-mail: weiweilin@tju.edu.cn
通信作者: 崔博(1983—),男,副教授,博士,主要从事水利水电工程智能建设与智慧管理研究。E-mail: cuib@tju.edu.cn
引用本文: 林威伟,崔博,佟大威,等. 基于 B/S 架构的土石坝碾压质量三维智能监控系统研发与应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022,50(5):131-138.
LIN Weiwei, CUI Bo, TONG Dawei, et al. Development and application of three-dimensional intelligent monitoring system for rolling quality of earth-rock dam under B/S framework[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(5):131-138.

视化全过程、精细化实时监控;Pradhananga 等^[3]基于 GPS 技术,提出了解决 GPS 定位精度误差的测量方法和数据处理算法,同时设计用户二维可视化界面,实现对施工设备的实时监控;黄声亨等^[4-5]对碾压参数实时监控技术进行了有益的探索,采用 C/S 架构研究开发了土石坝填筑碾压实时二维可视化监控系统。数字化碾压质量实时监控系统的出现标志着大坝建设进入数字大坝^[6]阶段,通过对大坝现场施工信息的全天候、实时在线、远程监控,为实现大坝建设精细化控制与管理提供了科学指导与技术支持。然而,数字化实时监控采用二维可视化界面进行监控,存在着施工信息分析不够透彻、可视化和反馈控制水平低的不足^[7]。针对上述问题,基于 3D GIS 平台,钟登华等^[8]研发了采用 C/S 架构的心墙堆石坝施工过程信息三维可视化模型,实现了多源异构施工信息动态可视化集成和直观展示。上述土石坝碾压监控系统均采用 C/S 架构,存在无法实现碾压施工信息快速查询与跨平台共享的问题^[9]。B/S 架构具有良好的跨平台性、简单方便的扩展性、易于维护和开发简单等优点,因此逐渐取代 C/S 架构成为系统研发的主流。姜佩奇等^[9]构建了基于 B/S 架构的土石坝碾压监控可视化系统,克服了 C/S 架构无法实现不同平台施工信息快速查询与共享的问题;基于建筑信息模型和 WebGL 技术,刘东海等^[10]基于 B/S 架构实现了输水工程安全监测信息集成与 Web 环境可视化。此外,姜佩奇^[11]通过土石坝现场实例应用验证了采用 B/S 架构搭建系统的实用性。

现有的基于 B/S 架构的碾压监控系统 Web 平台研究局限于二维图形或者小场景模型,而大型水利工程场景大规模三维模型具有精细程度高、数据量大的特点^[12],因此在 Web 端存在模型加载速度慢、内存易溢出问题。如何解决大规模模型在 Web 端的快速、流畅加载是一个亟待解决的难题。多细节层次(level of detail, LOD)技术^[13-14]具有能降低模型复杂度、提高三维数据绘制效率等优点,在模型加载领域得到广泛应用。LOD 技术通过在内存中加载全部多细节层次模型,有效提高了渲染效率,但需要更高的内存容量^[15]。为提高三维模型加载的流畅度,国内外研究者对相关技术进行了改进^[14-18],其中宋卓荣等^[17-18]使用分块加载的策略根据视点移动情况动态加载三维模块,能够有效提升模型加载漫游流畅度。此外,通过三维模型对填筑施工信息进行展示的方式还存在人机交互差、无法对真实施工场景进行直观监控等不足,而增强现实(augmented reality, AR)^[19]技术能够给用户提供一种新的用户界面和人机交互方式,采用增强现实技术对水利工程施工进度进行可视化仿真^[20-21]使得大坝仿真过程更直观与便捷,能有效提高可视化水平。

针对目前土石坝碾压质量监控系统存在可视化水平和反馈控制水平低,C/S 架构无法实现碾压状态跨平台快速查询与共享,基于 B/S 架构的三维可视化模型数据量过大易导致加载卡顿、速度慢、交互友好性差等不足,本文依托王佳俊^[22]提出的智能监控系统,构建了一套基于 B/S 架构耦合分级加载机制和增强现实技术的土石坝碾压质量三维智能监控系统,实现了在 Web 平台上对三维可视化模型与增强现实环境下施工过程信息的直观展示。

1 土石坝碾压质量三维智能监控系统研发关键技术

1.1 基于 LOD 的模型分级加载机制

随着大坝填筑规模不断增大,通过倾斜摄影技术、3D max 等构建的水利工程三维模型的建模精度不断提高,其点云的密度和模型纹理数据量占用内存极高^[18],在 Web 端加载模型时极易出现计算机内存不足、加载缓慢卡顿、模型切换时跳跃模糊等一系列问题。本文采用 LOD 技术降低模型的复杂度,提高三维数据的绘制效率,可实现大规模实景模型实时流畅加载。LOD 技术通过生成场景的不同细节层次模型,在相机距离不同的情况下,显示不同细节层次的模型,从而提高渲染效率。由于水利工程三维模型数据量巨大,直接使用 LOD 技术进行动态加载时,界面往往无法一次性载入整个多细节层次模型,需要使用分块加载的策略根据视点移动情况动态加载三维模块,使运行内存和运算量始终保持在较低水平,以保证 Web 平台能够流畅地运行。模型具体加载流程如图 1 所示。

1.2 增强现实技术

基于增强现实的土石坝碾压施工可视化技术能够将虚拟的土石坝模型和施工过程信息叠加到实际施工碾压场景对应位置。采用视频透视式注册形式实现基于动态实时差分全球定位系统(real-time kinematic difference-GPS, RTK-GPS)和惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)虚拟相机三维注册,通过增强现实技术将虚拟模型和信息叠加在相机实时采集图像的对应像素中。基于增强现实的土石坝碾压施工可视化主要流程如下:①利用 RTK-GPS 与 IMU 相结合的增强现实方式,将经过卡尔曼滤波器滤波处理的 $(x,y,z,\theta,\varphi,$

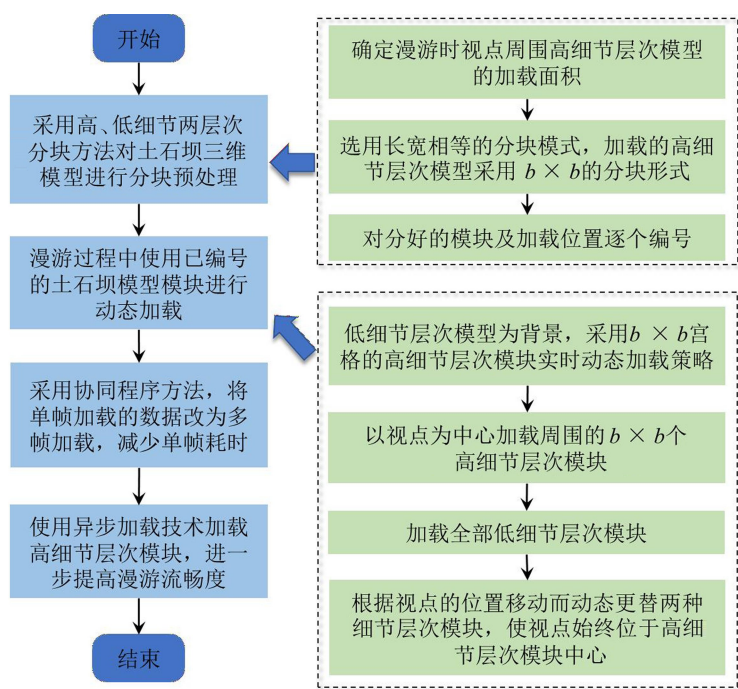


图 1 基于 LOD 的土石坝工程大规模模型在 Web 中快速加载流程

Fig. 1 Flow chart of fast loading for the large scale model of earth-rock dam project in Web based on LOD

ω)6 个空间真实参数实时传递给虚拟相机,完成相机的三维注册;②在同一大坝坐标系下,经过虚实点的融合获得增强现实的成像;③将大坝模型和数据关联实现土石坝信息交互,达到土石坝碾压施工进度可视化交互的目的。基于增强现实的土石坝碾压施工可视化技术架构如图 2 所示。

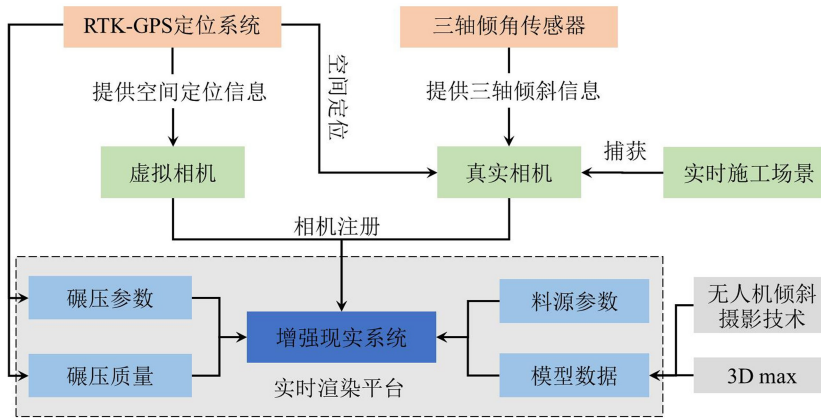


图 2 基于增强现实的土石坝碾压施工可视化技术架构

Fig. 2 Visualization technology architecture of rolling construction of earth-rock dam based on augmented reality

1.3 基于 B/S 架构的 Web 平台

B/S 架构是指浏览器(browser)和服务器(server)的交互架构模式。相比于 C/S 架构,B/S 架构具有节约本地硬件资源、支持跨平台使用和系统维护方便等优点。然而,B/S 架构也存在服务器任务繁重等问题,其稳定性面临巨大挑战;同时,浏览器加载的数据量有限,且请求响应时间较长,容易造成内存溢出等问题。为了克服上述问题,在进行土石坝碾压质量三维智能监控系统研发时,采用多细节层次分级加载的方式实现三维模型的加载,以维持服务端的稳定性。系统架构如图 3 所示。

应用 WebSocket 技术^[9,11]解决传统传输方式存在对服务器配置要求高、资源量大、页面需要持续处于刷新状态以及处理并发问题时资源消耗极大等问题。从图 3 可知,坝面碾压施工信息由局域网络或广域网络传递,传递通信机制均采用套接字(Socket)。后端 Web 服务器和业务逻辑处理系统通过 Transact-SQL 机制与数据库交互。前端在接收数据录入并完成数据一致性校验之后,对后端发送数据请求。JSON 和 XML 是前后端交互的主要数据结构,可与 JavaScript 对象进行置换。

1.4 基于智能算法的压实质量评价方法

基于碾压监控技术^[2],并采用王佳俊^[22]研发的智能监控系统获取料源参数信息、环境参数信息和碾压参数信息等多源异构信息,采用混合智能算法^[23]对碾压质量影响参数和压实度之间的关系进行拟合建模,将建立的碾压质量评价模型嵌入智慧大坝 Web 平台,将碾压参数、料源参数和振动特性参数实时输入智能评价模型,对仓面压实质量进行高效智能预测,实现压实质量智能评价,进而可视化展示压实质量,用于辅助管理人员制定合理有效的反馈控制措施。

1.5 基于 B/S 架构耦合增强现实技术的土石坝碾压质量三维智能监控方法

基于 B/S 架构耦合增强现实技术在 Web 平台实现土石坝填筑碾压信息三维智能监控的具体过程如下:

- a. 构建土石坝施工精细模型。在 Unity3D 软件中建立碾压机模型,将碾压机的坐标和航向角数据通过脚本实时赋给碾压机,使得三维场景中的碾压机位姿与真实场景中碾压机的位姿实时同步。
- b. 仓面编号。按照特定编号模式对不同仓面进行编号,再利用数据库和可视化技术,将上述信息与施工作业面图像一一对应,实现在 Web 平台根据仓面编号查询仓面对应图像信息及其包含的碾压参数、料源参数等施工过程信息和环境信息的功能。
- c. 信息展示。按照模块对信息进行区分展示,即在增强现实界面设置不同按钮,分别代表实时监控视频、料源参数信息、环境参数信息、碾压参数信息和碾压质量评价结果信息等。
- d. 场景渲染。基于 WebGL 技术对虚拟场景进行选择性地渲染,如选择性渲染现场碾压机压实质量评价结果云图,可实现压实质量云图和实景画面的叠加。随后,通过调用工业相机摄像头将上述虚拟模型及附属信息实时地叠加在施工现场作业面上,以提高施工过程信息可视化的水平,并基于 B/S 架构实现 Web 浏览器跨平台的交互分析。

可视化模块集成的信息主要包括仓面的实时监控视频、料源参数、环境参数、碾压参数和碾压质量评价结果等。具体监控流程如图 4 所示。



图 3 土石坝碾压质量三维智能监控系统 B/S 架构
Fig. 3 B/S framework diagram of three-dimensional monitoring system for rolling quality of earth-rock dam

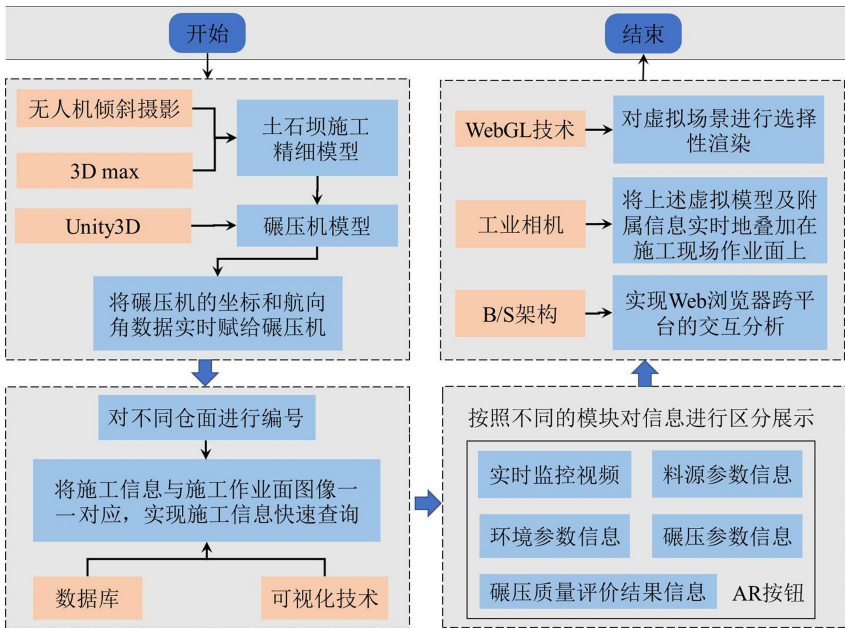


图 4 基于 B/S 架构的土石坝碾压信息三维智能监控流程

Fig. 4 Three-dimensional intelligent monitoring process of rolling information of earth-rock dam under B/S framework

2 系统应用

2.1 工程简介

以我国藏区综合规模最大的水电站——两河口水电站施工为例进行应用分析。两河口水电站是砾石土心墙堆石坝,坝顶高程 2 875.00 m,最大坝高 295.0 m,其建设难度位居世界前列,质量控制难度极大。应用基于 B/S 架构耦合分级加载机制和增强现实技术构建了两河口水电站施工建设管理系统,对大坝填筑施工进行智能管理。

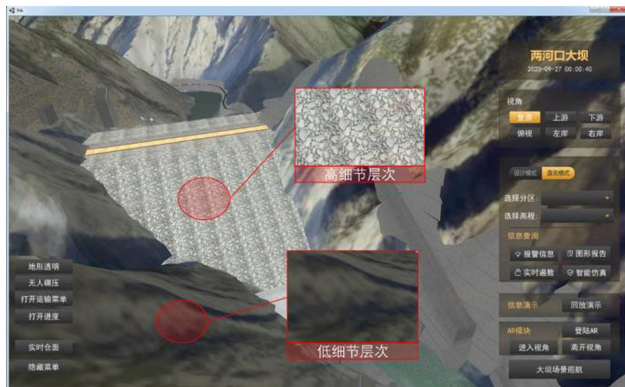
2.2 系统功能与模块

2.2.1 跨平台应用功能

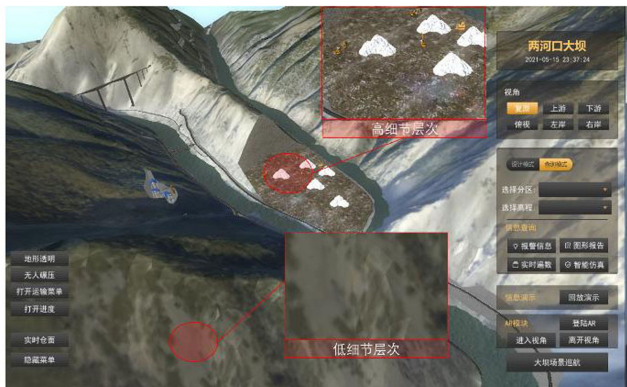
采用 B/S 架构,施工现场管理人员在内网环境下不仅能够计算机上采用 Web 浏览器对指定的地址进行访问,同时能够通过平板等移动设备获取系统信息,实现信息跨平台应用,解决了传统 C/S 架构信息孤岛、共享能力弱的问题,可满足复杂仓面施工管理工作中的移动办公、现场办公需求,将系统功能实现的核心部分集中到服务器上,降低了系统的开发和维护难度,便于操作和使用。

2.2.2 分级加载功能

应用 Web 平台下多细节分块分级加载策略,在进行三维模型漫游时,以低细节层次模型为背景,并且根据视点实时对应的模型位置信息,采用九宫格方式动态加载相应高细节层次模块,同时采用协同程序与异步加载的方法解决多个高细节层次模块同时加载所引起的模型加载卡顿问题。如图 5 所示,三维模型漫游界面中大坝坝体以及石料场可视化精度为高细节层次,而旁边的山体等背景为低细节层次。



(a) 大坝坝体三维模型



(b) 石料场三维模型

图5 土石坝三维模型漫游界面

Fig. 5 Roaming interface diagram of 3D model of earth-rock dam

2.2.3 可视化界面功能

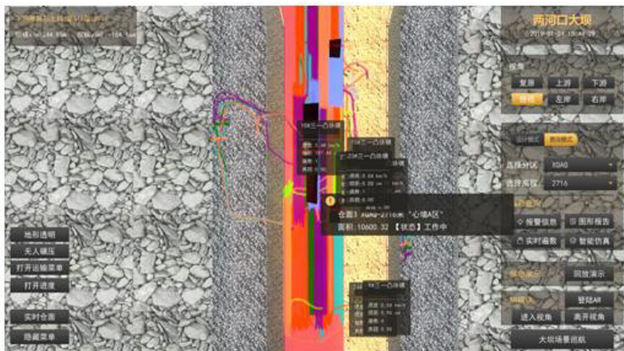
基于多源异构信息集成技术、Web 平台技术、三维可视化以及增强现实技术,实现了在 Web 平台对施工过程中信息的直观展示和反馈,同时各个平台能够实时查看增强现实场景,实现信息的高效集成与可视化展示,提高了展示的直观性与交互的友好性。

a. 坝面碾压施工信息的实时动态展示。支持不同视角快速跳转,如俯视模式中的上游视角、下游视角、左岸视角和右岸视角,以及在三维模式中任意跳转、拖拽和缩放等(图6)。同时可实时智能监控碾压遍数、碾压速度、高程等碾压施工信息(图7)。

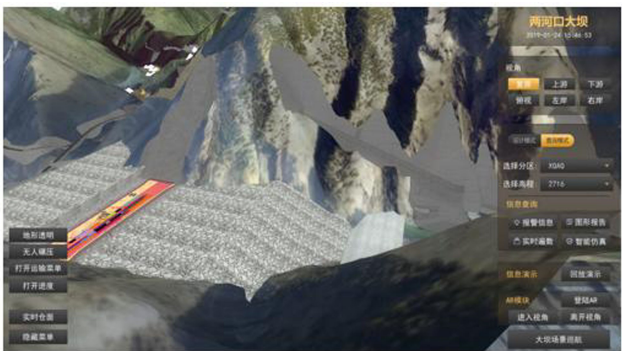
b. 坝面碾压施工信息的实时动态查询。支持按分区、高程、仓面等选择条件,实现相关信息精准查询。此外,通过点击“实时遍数”功能按钮,可实现鼠标触碰处厚度信息及遍数信息的高效可视化查询,同时,当仓面中因仪器埋设等原因出现非碾压区域时,系统将自动进行区域黑色化处理,并记录非碾压原因。

c. 大坝施工信息增强现实可视化。当点击“登录 AR”功能按钮时,可自动调用大坝智能监控所用摄像头,并通过增强现实技术,实现实际施工场景与施工信息虚实融合的沉浸式体验(图 8)。

d. 历史施工信息的回溯。通过点击“回放按钮”,实现坝面碾压施工信息的回放,辅助系统使用人员理解坝面碾压施工信息的时空分布。在信息回放过程中,界面底部显示回放进度条,可支持快进、后退等操作。



(a) 俯视图



(b) 三维模式

图6 土石坝三维界面视角切换

Fig.6 Perspective switching diagram of 3D interface for earth-rock dam

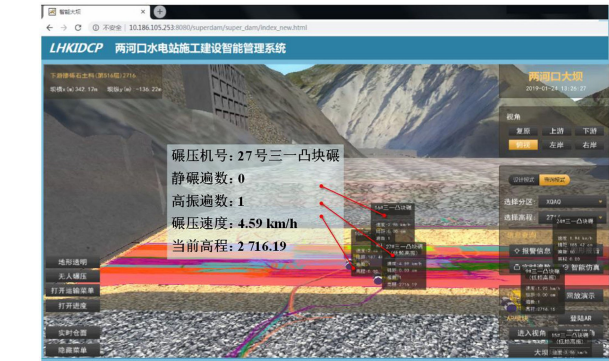


图7 施工仓面智能监控界面

Fig.7 Intelligent monitoring interface of construction warehouse surface

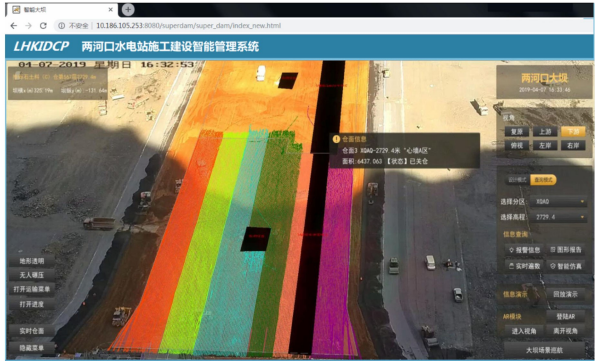


图8 坝面碾压施工增强现实场景

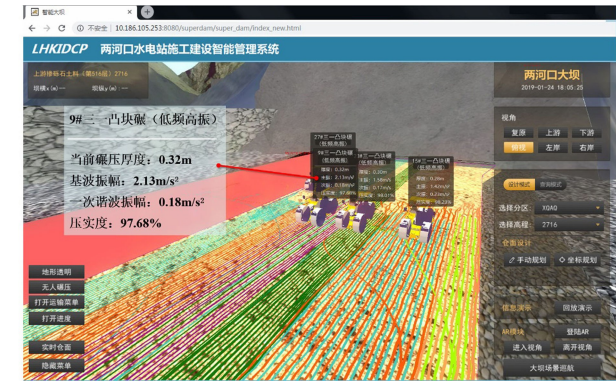
Fig.8 Augmented reality scene of dam surface rolling construction

2.2.4 智能分析模块

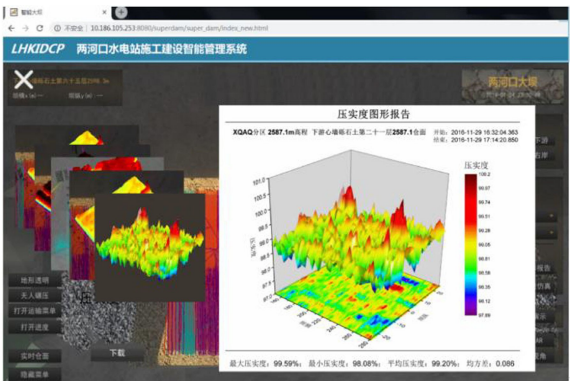
坝面碾压信息智能分析模块实现了对坝面碾压质量的智能评价以及对摊铺高程、摊铺厚度、碾压高程、碾压厚度和压实度的三维图形报告生成功能,因此,该子模块具备以下两大功能:

a. 坝面碾压施工过程中压实质量的高效智能评价。选择右键菜单栏中的“视图”选项下的“智能评价”功能,系统调用训练好的智能评价模型^[23]对压实质量进行实时智能评价(图9(a)),用于辅助管理人员对坝面施工碾压制定合理有效的反馈控制措施。

b. 碾压施工参数二维/三维图形报告。在“查询模式”下,通过点击“图形报告”生成按钮,弹出图形报告生成类型对话框,选择二维或三维图表类型可生成相应的图形报告(图9(b))。图形报告包括摊铺高程、



(a) 压实质量实时智能评价



(b) 图形报告预览

图9 压实质量实时智能评价和图形报告预览

Fig.9 Intelligent real-time evaluation of compaction quality and graphic report preview

摊铺厚度、碾压高程、碾压厚度以及三维压实度图形等信息。

2.2.5 智能控制模块

坝面碾压施工过程智能控制模块实现了对坝面碾压施工中实时控制和事后反馈控制功能。

a. 碾压过程实时报警反馈控制。系统主要通过对碾压速度和激振力进行监控,在碾压机连续超速 10 s 以上或激振力连续 15 m 以上没有达到设计要求时,通过自动报警模块通知现场人员对不规范施工行为进行纠正。碾压完成后的检验指标为碾压遍数和压实厚度,当碾压遍数合格部分的覆盖率不足 90% (心墙区和反滤料区为 95%) 或存在压实厚度偏差超过要求数值的 10% 以上时,需立刻反馈现场人员进行补碾等操作。最终系统会生成监控指标的图形报告,基于图形报告,可对相关数据进行存档和碾压质量评估。

b. 碾压完成后反馈控制。现场碾压完成后反馈控制流程如下:①基于坝面碾压信息智能分析子模块得到二维或三维碾压质量报告;②根据生成的碾压图形报告,对碾压遍数、碾压速度、压实厚度等不达标区域采取补碾或相应措施;③区别于传统的采用随机选点进行试坑的试验方法,以二维或三维碾压质量报告为依托,选择压实度最低的位置进行试坑试验,用于确认全仓面碾压是否合格;④试验验证合格后,进行收仓操作。

2.3 应用效果

相比已有的土石坝碾压监控系统^[1-5,8-9],本文构建的基于 B/S 架构的土石坝碾压质量三维智能监控系统在界面、可视化展示、碾压质量分析和效果控制方面都更具有优越性,能够达到更好的现场应用效果。应用构建的三维智能监控系统对两河口水电站高心墙堆石坝上下游围堰、上下游坝体堆石料、反滤料、过渡料以及砾石土心墙仓面进行监控,保证了各仓面平均碾压达标率达到 95% 以上,其中心墙区碾压达标率达到 98% 以上,根据施工现场智能填筑碾压参数控制标准,各料种碾压遍数保障率均为 100%,为大坝主体工程填筑施工提供了重要的技术支撑。基于 B/S 架构耦合分级加载机制和增强现实技术的土石坝碾压质量三维智能监控系统便于管理人员在 Web 端随时查询和管理各类多源异构信息,提高了压实作业过程的碾压质量智能监控水平和管理效率。

3 结 语

针对当前大坝碾压质量监控系统存在的可视化与反馈控制水平低且 C/S 架构无法实现碾压施工信息跨平台查询与共享等问题,本文构建了基于 B/S 架构耦合分级加载机制和增强现实技术的土石坝碾压质量三维智能监控系统,实现了信息跨平台应用,解决了传统 C/S 架构信息孤岛、共享能力弱的问题;基于 LOD 技术的分块分级加载机制,耦合协同程序与异步加载方法,解决了 B/S 架构下高细节层次模块同时加载引起的智能监控模型加载卡顿、内存溢出的难题;基于增强现实技术,实现了碾压施工信息与真实场景的虚实融合,提供了一种更直观的碾压施工作业智能监控方式,可提高大坝碾压施工反馈控制水平。两河口水电站工程应用结果表明,构建的土石坝碾压质量三维智能监控系统能够有效提高碾压质量智能监控水平和管理效率。

参考文献:

[1] ZHONG D H, CUI B, LIU D H, et al. Theoretical research on construction quality real-time monitoring and system integration of core rockfill dam[J]. Science in China Series E: Technology Sciences, 2009, 52(11): 3406-3412.

[2] ZHONG D H, LIU D H, CUI B. Real-time compaction quality monitoring of high core rockfill dam[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(7): 1906-1913.

[3] PRADHANANGA N, TEIZER J. Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data[J]. Automation in Construction, 2013, 29(1): 107-122.

[4] 黄声享, 刘经南, 吴晓铭. GPS 实时监控系统及其在堆石坝施工中的初步应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, 30(9): 813-816. (HUANG Shengxiang, LIU Jingnan, WU Xiaoming. GPS real-time supervisory system and its preliminary application in the construction of face rockfill dam[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(9): 813-816. (in Chinese))

[5] 倪仕文, 彭卫平, 王蝉, 等. 土石坝填筑碾压施工质量实时监控系统研究与应用[J]. 水力发电, 2019, 45(7): 80-84. (NI Shiwen, PENG Weiping, WANG Chan, et al. Research and application of compaction quality real-time monitoring system for earth-rock dam[J]. Water Power, 2019, 45(7): 80-84. (in Chinese))

- [6] 钟登华,王飞,吴斌平,等.从数字大坝到智慧大坝[J].水力发电学报,2015,34(10):1-13. (ZHONG Denghua,WANG Fei,WU Binping,et al. From digital dam toward smart dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(10):1-13. (in Chinese))
- [7] 钟登华,时梦楠,崔博,等.大坝智能建设研究进展[J].水利学报,2019,50(1):38-52. (ZHONG Denghua,SHI Mengnan,CUI Bo,et al. Research progress of the intelligent construction of dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,50(1):38-52. (in Chinese))
- [8] 钟登华,贾晓旭,杜成波,等.心墙堆石坝4D施工信息模型及应用[J].河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):95-103. (ZHONG Denghua,JIA Xiaoxu,DU Chengbo,et al. 4D construction information model for core rock-fill dam and its application[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2017,45(2):95-103. (in Chinese))
- [9] 姜佩奇,张社荣.基于WebGIS的土石坝碾压监控可视化平台开发[J].水电能源科学,2018,36(6):68-72. (JIANG Peiqi,ZHANG Sherong. Development of visual monitoring platform for roller compaction of rock-fill dam based on WebGIS[J]. Water Resources and Power,2018,36(6):68-72. (in Chinese))
- [10] 刘东海,胡东捷,陈俊杰.基于BIM的输水工程安全监测信息集成与可视化分析[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(4):337-344. (LIU Donghai,HU Dongjie,CHEN Junjie. BIM-based integration and visualization for dynamic safety monitoring information of water diversion project[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(4):337-344. (in Chinese))
- [11] 姜佩奇.基于WebGIS的土石坝碾压过程信息控制研究与系统开发[D].天津:天津大学,2018.
- [12] VU H H,LABATUT P,PONS J P,et al. High accuracy and visibility-consistent dense multiview stereo[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2012,34(5):889-901.
- [13] 何旭锋.大规模复杂场景的加速绘制方法研究与实现[D].成都:电子科技大学,2009.
- [14] 韩莹,杨丽芳,郭娜.基于LOD技术的多分辨率海水场景实时仿真[J].计算机仿真,2020,37(7):409-413. (HAN Ying,YANG Lifang,GUO Na. Real-time simulation of multi-resolution seawater scene based on LOD technology[J]. Computer Simulation,2020,37(7):409-413. (in Chinese))
- [15] 李新维,邓非,李学飞,等.一种大规模倾斜摄影模型三维可视化方案[J].测绘通报,2017,11(4):39-43. (LI Xinwei,DENG Fei,LI Xuefei,et al. A visualization plan for large-scale 3d models with oblique photogrammetry technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,2017,11(4):39-43. (in Chinese))
- [16] 汤延辰.基于细节层次和视点预测的大规模地形实时渲染方法研究[D].合肥:安徽大学,2020.
- [17] 宋卓荣.基于Web的大规模倾斜摄影模型可视化技术研究[D].长沙:国防科技大学,2018.
- [18] 汪光跃,彭杨,张茂军.基于Unity3D的大规模倾斜摄影模型加载策略[J].计算机应用,2019,39(增刊2):194-198. (WANG Guangyue,PENG Yang,ZHANG Maojun. Loading strategy of large-scale oblique photography model based on Unity3D[J]. Journal of Computer Applications,2019,39(Sup2):194-198. (in Chinese))
- [19] 徐劲力,牛强强,陈春晓.增强现实环境下汽车后桥虚拟拆卸系统的设计[J].机械设计与制造,2021,364(6):215-218. (XU Jinli,NIU Qiangqiang,CHEN Chunxiao. The design of virtual disassembly system for automobile rear axle in augmented reality environment[J]. Machinery Design & Manufacture,2021,364(6):215-218. (in Chinese))
- [20] 钟登华,王志宁,关涛,等.基于增强现实的心墙堆石坝施工进度可视化仿真[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2018,51(10):1072-1085. (ZHONG Denghua,WANG Zhining,GUAN Tao,et al. Visual simulation of construction schedule for core rock-fill dam based on augmented reality[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology),2018,51(10):1072-1085. (in Chinese))
- [21] 邹元品,王栋,佟大威,等.基于Web增强现实的高拱坝仓面施工可视化仿真研究[J].水利水电技术,2020,51(6):108-120. (ZOU Yuanpin,WANG Dong,TONG Dawei,et al. Web augmented reality-based study on visual simulation of construction for concrete placement surface of high arch dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2020,51(6):108-120. (in Chinese))
- [22] 王佳俊.心墙堆石坝坝面碾压智能监控方法与应用研究[D].天津:天津大学,2019.
- [23] WANG J J,ZHONG D H,WU B P,et al. Evaluation of compaction quality based on SVR with CFA:case study on compaction quality of earth-rock dam[J]. Journal of Computing in Civil Engineering,2018,32(3):05018001.