

乐世华, 张煦, 张尚弘, 等. 基于 Cesium 的 WebGIS 流域虚拟场景搭建[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 90-96.

LE Shihua, ZHANG Xu, ZHANG Shanghong, et al. Cesium-based construction of WebGIS watershed virtual scene [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(5): 90-96.

基于 Cesium 的 WebGIS 流域虚拟场景搭建

乐世华¹, 张 煦^{1 2}, 张尚弘³, 肖晓春^{1 2}, 张卫君^{1 2}, 王 翔¹

(1. 北京中水科水电科技开发有限公司, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
3. 华北电力大学 可再生能源学院, 北京 102206)

摘 要: 为了在 Web 端更直观展示三维数字流域可视化信息, 结合广泛运用于实际工程项目的倾斜摄影技术、BIM 模型、WebGL 可视化等前沿热点技术, 介绍了基于地图引擎 Cesium 搭建流域虚拟可视化场景环境的方法。Cesium 是一个基于 WebGL 的开源三维地图引擎, 它解决了传统插件式 Web 三维虚拟场景兼容性差的问题, 实现跨平台三维流域信息 Web 端流畅加载。采用 JavaScript 与 WebGL 为开发语言, 基于 B/S 架构, 采用缓存下载、切片技术实现地形与影像的集成加载; 采用 3DMAX、Revit、SuperMap iDesktop 等工具实现倾斜摄影模型与精细模型的转换与集成加载; 采用 nginx 反向代理, Ajax 异步调用技术实现水情信息的集成可视化; 最后达到了流域多种信息集成显示的效果, 对基于 Web 的流域仿真具有较好的参考价值。为流域模拟仿真 WebGIS 平台探索了快速智能的搭建方案。

关键词: Cesium; WebGL; 倾斜摄影; BIM; WebGIS

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.05.014

中图分类号: TV1

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2018)05-0090-07

Cesium-based construction of WebGIS watershed virtual scene

LE Shihua¹, ZHANG Xu^{1 2}, ZHANG Shanghong³, XIAO Xiaochun^{1 2}, ZHANG Weijun^{1 2}, WANG Xiang¹

(1. Beijing IWH Technology Co., Ltd, Beijing 100038, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Renewable Energy School, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to more intuitively exhibit the visualization information of 3D digital watershed at Web end, the method for constructing virtual visual scene environment of watershed with the map engine—Cesium is described herein in combination with the hot-spot and frontier techniques, i. e. oblique photography technology, BIM model, WebGL, etc., which are widely applied to the actual engineering projects concerned. Cesium is a WebGL-based open source 3D map engine, which solves the problem of poor compatibility of the conventional plug-in Web 3D virtual scene, and then realizes the smooth load of the cross-platform 3D watershed information at Web end. Taking JavaScript and WebGL as the developing languages, the integrated load of both terrain and image is achieved with the techniques of cache-download and slicing on the basis of B/S structure, while the conversion and integrated load of the oblique photographic model and the fine model are realized with the tools of 3DMAX, Revit, SuperMap iDesktop, etc. and the integrated visualization of water regime information is realized with the techniques of nginx reverse-proxy and Ajax asynchronous call, finally, the integrated display of various information of watershed is achieved, which not only has a better referential value for the Web-based simulation of watershed, but also explores a quick and intelligent construction scheme for the WebGIS platform for watershed simulation.

Keywords: Cesium; WebGL; oblique photography; BIM; WebGIS

收稿日期: 2017-07-27

基金项目: 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目(AU0145B622016, AU0145C132017)

作者简介: 乐世华(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事数字流域方面的研究。E-mail: leshihua@126.com

0 引言

随着 WebGL、虚拟仿真技术飞速发展,虚拟仿真技术广泛地应用于三维交互式数字流域构建与研发中,很多流域均构建相应三维虚拟仿真平台^[1-11],这些三维虚拟仿真平台多以 C/S(Client Server) 为主, C/S 平台存在用户数受限、异地软件应用安装麻烦、数据同步困难等不足。相比于 C/S 平台, B/S(Browser Server) 平台在安装部署、可用性、升级维护、设备带宽、软件学习推广等方面都具有较强的优势。如何结合快速发展的 Web 技术,实现带交互性能、实时渲染、分布式应用、多平台兼容的 WebGIS 仿真平台成为新研究发展方向。

Web 三维发展过程从早期的 Java Applet 到插件式的 Flash、Java3D、X3D、Silverlight 再到无插件式 WebGL,再发展至最新的对三维图形程序一些常用功能进行封装的 3D 图形引擎,如 Cesium、Three.js、 Babylon.js 等。插件式 Web 三维虚拟场景容易导致兼容性差、性能不稳定等问题,很大程度限制了 Web 三维程序的使用^[12-14];单纯基于 WebGL 开发三维程序复杂费时易出错,因而借助 3D 图形引擎,借鉴前人的经验,可实现更加有效的开发。Three.js、Babylon.js 倾向于基于 Web 的游戏开发,很少涉及三维地理信息,本文暂不讨论。Cesium 的出现既解决 C/S 三维仿真平台以上的不足,又解决插件式 Web 三维兼容性差的问题,满足数据快速传输、分享、实时交互操作,实现跨平台的要求,成为全新 B/S 三维地图引擎。

Cesium 由 AGI 公司于 2011 年创立,作为空间和国防行业动态数据可视化的跨平台虚拟地球。此后发展成长为 3D 地球,服务于地理空间和石油天然气、农业、房地产、娱乐和体育行业。Cesium 是一个基于 JavaScript 编写的使用 WebGL 来进行硬件加速图形化的地图引擎。Cesium 支持 3D, 2D, 2.5D 形式的地图展示,可以自行绘制图形、高亮区域,并提供良好的触摸支持,支持电脑、手机、平板等跨平台跨浏览器多终端设备, Cesium 可以集成不同的来源数据,是最适合的地理空间数据动态可视化工具^[6]。本文将阐述以 Cesium 为三维引擎搭建 WebGIS 流域虚拟环境具体操作过程,从三维地形、影像、倾斜摄影模型、精细模型等方面的建模加载进行叙述,并介绍流域水利信息如水位、流量等集成展现以及水面效果展现技术。

1 三维地形建模

三维地形、影像是 Cesium 最底层的数据图层,

以此为基础,叠加具体业务信息,如水雨情、工况、专业应用模型等,才能实现专业领域的应用。流域范围内地表起伏需要以三维地形数据来进行展示,丰富地物地貌信息以植被树木、河流、道路、建筑、影像等元素来展现。三维地形建模包括地形数据、影像的准备和切片工作。

1.1 三维地形加载

Cesium 中的地形系统是一种支持流式瓦片数据生成地形的技术,它支持两种类型的地形, STK World Terrain 和 Small Terrain。AGI 提供现成 STK World Terrain 数据,对于网络访问便捷的用户,此数据为首选方案,对于访问受限用户而言,可选择利用工具对现成 DEM 数据切片生成 Small Terrain,保证地形数据加载。

STK World Terrain 是高分辨率,基于 quantized - mesh 的地形。这是一种基于 TIN 三角网的地形,可充分利用 GL 中的 Shader 来渲染,效果逼真^[16]。STK World Terrain 地形的加载可通过 AGI 提供的 Webapi 进行在线调用, AGI 同时提供了这种地形的格式细节。STK World Terrain 的调用是基于 CesiumTerrainProvider 类实现的, CesiumTerrainProvider 在初始化的时候通过请求配置文件 layer.json,实现地形文件.terrain 基本属性信息的读取。layer.json 中的属性包括版本、format、extension 扩展(法线和水面信息),层级数和范围,如图 1 所示。地形的切片数据记录在 available 中,不同级别 Level 下,设定了该地形数据对应的范围[startX, startY]到[endX, endY]。

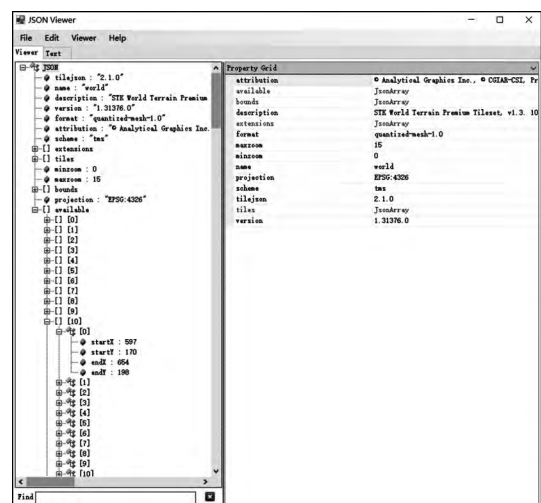


图 1 json 文件结构

STK 存放目录为金字塔结构,通过 HTTP 请求地形的层级(放大级别)、坐标值获取对应的 STK 数据,

服务器向客户端返回结果进行地形展现。STK World Terrain 效果虽好,但在实际生产中,因网络访问速度受限原因,访问在线地形数据受到一定限制(地形服务器一般在国外),不能带来较好用户体验,如何实现本地化部署是流畅加载显示的关键步骤之一。具体实现方法有两种:首先可通过离线下载地形数据实现本地化部署,使用工具 STK Terrain Downloader 对地形数据进行下载,如图 2 所示,将下载的数据部署至数据服务器上,实现海量数据快速加载;其次可通过对 DEM 切片生成 Small Terrain 数据来实现相似的效果。



图 2 STK 地形下载器

Small Terrain 是中等分辨率,基于 heightmap 的地形,渲染出的地形效果不如 quantized mesh 的地形,但也基本体现原有数据精度^[16]。利用地形切片工具可将传统地形 DEM 数据生成规范的 .terrain 文件。这样一方面可有效利用现有高精度 DEM 数据,实现了离线包形式加载方式和本地化部署,另一方面又保证了地形精度,又提高了访问效率。下文介绍 CesiumTerrainBuilder(ctb) 工具使用,具体命令为“ctb -tile -o D:\terrain_tiles -c3 D:\demdata\AST-GTM2_N22E113_dem.tif”,生成的数据亦为金字塔结构。

本研究采用方案为:在网络访问 STK World Terrain 便捷地区,利用 STK 地形下载器对 STK World Terrain14 级以下数据进行下载,随后将其布置到本地服务器,以实现高精数据快速加载。当然,对于更精细的地形可采用 ctb 工具进行切片,然后与 STK World Terrain 地形叠加,因 STK14 级数据已满足本文精度要求,固未采用切片方式。对部署的数据按代码“var terrainProvider = new Cesium. CesiumTerrainProvider({ url: 'path/to/terraintiles' });”进行加载,实现数据地形可视化浏览,如图 3 所示。

1.2 影像加载

Cesium 支持的影像服务类型主要包括: WMS, WMTS, TMS, GoogleMaps, BingMaps 和 OpenStreet-



图 3 地形加载效果

Map 等等^[5],对不同服务提供不同 ImageryProvider 方式,这样满足了用户的不同需求。本文根据实际应用需求和网络环境,即服务器部署于水利部门中,可连接访问局域网和广域网,对部分国外数据访问受限,如 STK World Terrain 数据、第三方在线影像数据;在现有设备、网络环境基础上,要满足平台对数据全面流畅访问需求,选择采用 TMS 加载本地分级金字塔切片影像数据。切片数据可以通过专业软件缓存 googlemaps 数据,同时也可采用测绘部门的高分辨率正射影像,进行切片,使用商业或测绘部门的高分辨率正射影像,既提高了影像访问速度,又保证了影像质量。采用分级缓存策略可流畅地显示大规模影像数据。本文采用数据叠加方案,对于全球范围,采用 SingleTileImageryProvider 对单张影像图进行加载;对于全国范围 10 级以下数据,采用缓存 googlemaps 数据进行加载;对于研究区域,采用高清影像进行切片加载,三种数据叠加既保证了球体表面影像的完整性,又实现局部关注区域精细展现。

将切片后的影像数据存储在数据服务器中,利用 Apache Tomcat 服务器将数据进行发布,通过 Web 服务器数据访问接口调取所需数据文件。

2 三维模型加载

2.1 gltf 模型

Cesium 中支持加载 3D 模型,支持 gltf 格式和 bgltf 两种格式。gltf 是 khronos 组织定义的一种交换格式,用于互联网或移动设备上展现 3D 内容,充分支持 OpenGL, WebGL, OPENGLES 图形加速标准; bgltf 是二进制格式的 gltf 扩展,其二进制格式减少了数据的大小,提升了网络传输速度^[6,16]。

gltf 结构分为四大块,如图 4 所示,json 格式的文件形式(. gltf) 包括一个完整的场景描述:模型的节点层级、相机、材质、动画等相关逻辑结构,是其他三块调度总控;二进制文件(. bin) 则对应这些对象的具体数据信息,包括几何对象、动画、蒙皮等信息;(. glsl) 是对该模型渲染的着色器的脚本文件,针对

该模型的数据信息,给出渲染方案; Texture 指定模型的纹理内容(.jpg, .png 等)。gltf 的 json 文件设计紧凑并易于解析,几何数据、动画这类较大数据则以二进制的方式(ArrayBuffer 形式)传输,同时 gltf 的数据结构尽可能和 GL 接口保持一致,减少了加载时间,满足在 Web 传输和解析上需求。

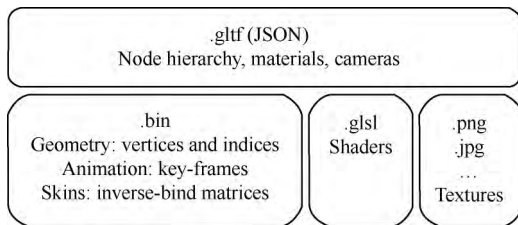


图4 gltf 结构示意图

对于现有 3DMAX 模型,如何转换成 Cesium 支持的 gltf 格式,满足 Web 快速加载响应成为关键。对于较小模型可先将 3DMAX 模型转换生成 dae 格式文件,再将 .dae 文件转换成 gltf 格式来进行加载。常规模型格式,如 obj、3ds、fbx 可通过 3DMAX 软件或者其他的建模工具先转换为 dae 格式,再使用工具 colladaTogltf.exe 将 dae 数据转为 gltf 格式,用代码“var model = scene.primitives.add(Cesium. Model. fromGltf({ url: './data/sanxia. gltf' }));”实现对三峡大坝模型的加载,实现效果如图 5 所示。



图5 三峡大坝 gltf 模型

2.2 精细化模型及 BIM 模型的加载

对于较大三维模型,需要对模型进行一定处理,建立 LOD, Cesium 3DTiles 可实现此功能,以实现 Web 环境下海量三维模型的快速加载。3DTiles 是以流形式处理大规模 3D 地理空间数据集的一种开放规范,现在正被逐步扩大应用至地形和影像的加载,以及流式 3D 内容,包括树木、建筑物、点云和矢量数据。

对于较大的 3DMAX 模型,可将模型转换成 3DTiles

格式,使用四叉树空间索引制作建立 LOD 模型,适用网络快速加载传输渲染。先将 3DMAX 转换生成 3ds 格式文件,再使用 SuperMap iDesktop 软件,设定不同的 LOD 层级,将模型生成 OSGB 缓存,通过 SuperMap iDesktop 软件的“生成 S3M 数据”工具将 OSGB 缓存转换为 S3M 数据。最后将 S3M 模型以三维服务的形式发布到数据服务器上。在 Cesium 加载 3DTiles 实现代码为“var tileset = scene.primitives.add(new Cesium. Cesium3DTileset({ url: './data/3dtileset' }));”。

Building Information Modeling(BIM) 为建筑信息模型,有着充分信息表达、建筑全生命周期、三维可视化技术、协同作业的特点^[17]。将 BIM 模型加载系统中,有机结合模型内部结构、外部虚拟化场景与地理环境,实现大场景与精细化室内场景的完美结合,极大地拓展了 BIM 的工程领域广度和深度。

具体转化过程:首先 Revit 软件中使用第三方插件,导出交换格式(OBJ、3DS、OSGB/OSG 等)模型,并导入 SuperMap iDesktop 进行处理,完成几何数据和属性数据导入后,对属性表结构中关键字 ID 进行关联,实现属性无损集成,为后期属性查询操作奠定基础。处理过程与精细化 3DMAX 模型相似。

本文对灌排发展中心 3DMAX 模型进行处理转换加载,原数据包含 4 个 3DMAX 文件,合计 550 M,1 070 张纹理贴图文件,按上述方法将模型转换成 3DTiles 格式并发布到数据服务器上,图 6、图 7 分别为灌排发展中心三维场景不同视角的 Web 端展现图。

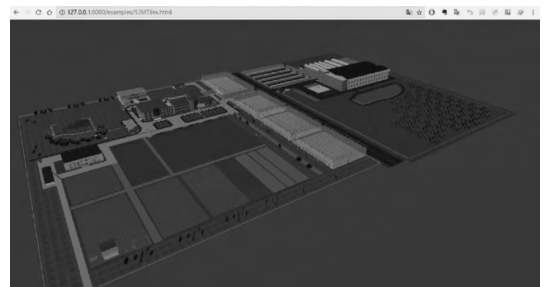


图6 灌排发展中心模型俯视



图7 灌排发展中心室内平视

2.3 倾斜摄影模型加载

倾斜摄影(obliqueimage) 是指由一定倾斜角的航摄影机所获取的影像, 通过在同一飞行平台上搭载多台传感器, 同时从垂直、倾斜等不同角度采集影像, 如图 8 所示, 获取地面物体更为完整准确的信息, 再通过几何校正、平差、多视影像匹配等一系列处理, 获得具有真实空间地理信息的立体模型。



图 8 倾斜摄影数据采集

倾斜航拍影像经过预处理, 设置相关控制参数, 可运算生成基于真实影像的超高密度点云, 点云再构建 TIN 模型, 最后贴上航拍图片作为纹理, 即可形成倾斜摄影三维模型。在经过以上的计算处理之后, 软件可导出多种三维模型格式, 本文采用前文提及 3D Tiles 格式, 以最优化的动态加载方式来进行加载, 最大限度地减少 Web 端的渲染负担, 从而实现 Web 端的流畅加载, 图 9 为倾斜摄影三维建筑模型的 Web 加载效果。



图 9 倾斜摄影数据

3 矢量数据加载

Cesium 引擎支持 topojson、Geojson 和普通的 json 格式及 KML 格式矢量数据的加载, 常规 GIS 矢量数据为 shape 数据, 为实现现有数据有效利用, 可通过开源软件 ogr2ogr 软件工具, 实现从 shape 格式数据到 JSON 数据之间的转换^[6]。对于数字流域中行政区

边界、道路、河流、湖泊、流域边界等 shape 矢量数据, 均可通过此方法实现加载展示。图 10 为中国各省行政边界及水系图加载效果。

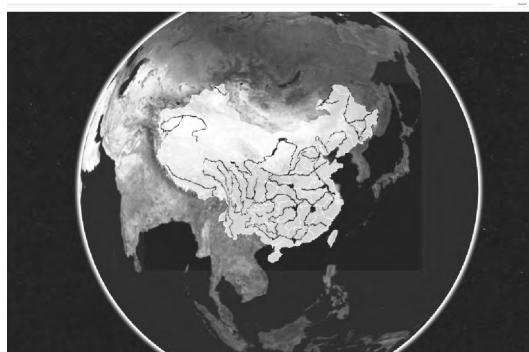


图 10 中国行政边界及水系矢量数据

4 水利数据加载与水面效果的实现

Cesium 支持以流式、可视化方式加载海洋、湖泊和河流的水体效果。Cesium 地形服务水体效果需要添加海岸轮廓数据。通过方式“var terrainProvider = new Cesium.CesiumTerrainProvider({ url: 'path/to/stk-terrain/', requestWaterMask: true});”从地形服务器上请求地形海岸线数据(WaterMask extension) 来开启水体效果^[15]。

此 WaterMask 方式对水面的加载, 原理是通过对全球范围覆盖一层遮罩(WaterMask), 如图 11 所示, 白色透明部分(Alpha = 1) 表示水域, 黑色不透明部分(Alpha = 0) 表示非水域, 实现水陆的区分。此遮罩图片大小为 1 000 × 500 像素, 对应经纬度为 360 × 180 度, 通过计算转换可知每个像素大小代表约 4 km 长度, 此遮罩图不适用于一般中小河流边界精度要求。



图 11 全球水域遮罩

基于 WaterMask 原理, 可自行创建研究区域范围的 mask, 首先选定矩形 rectangle 范围, 其次严格按 rectangle 的大小截取影像图, 最后结合影像, 在图像处理软件里, 对河流边界进行勾画, 新建图层将勾画的水体面部分设置为透明, 其余部分设置为黑色, 从

而得出河流 WaterMask 图,如图 12 所示,为嘉陵江汇口影像与 WaterMask 对比图。此种方式勾画河流边界人为操作误差较大,容易造成水面与三维平台影像不匹配现象。

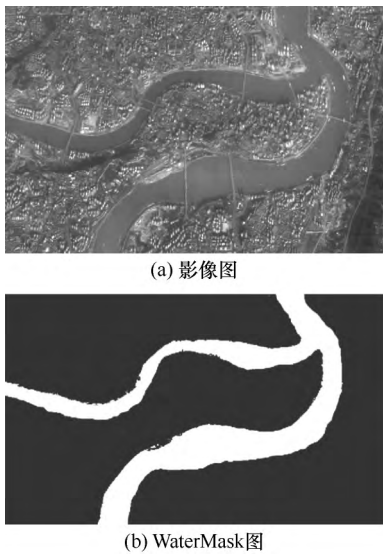


图 12 嘉陵江汇口影像与 WaterMask 对比

为解决以上人为操作造成的精度不足问题,可选择一种新的方式对水体边界进行界定。通过 GoogleEarth 中对河流的勾画,导出 river.kml 文件,用文本编辑器打开 kml 文件,将其内坐标拷出至 Cesium 中,新建 PolygonHierarchy 对象,从而构建河流几何对象 GeometryInstance,示例代码为“rectangle = scene.primitives.add(new Cesium.Primitive({ geometryInstances: new Cesium.GeometryInstance({ geometry: new Cesium.PolygonHierarchy({ kml 坐标... }) }) }));”,效果如图 13 所示。

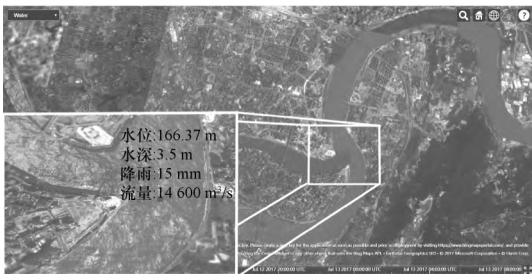


图 13 水雨情展示与水面效果

对于部分水雨情数据,可通过第三方网站数据接口来获取,如长江水文网,对应数据接口为 <http://www.cjh.com.cn/sq/data/sc.action?scid=cjh.sq>,请求的实时数据结果如表 1 所列,通过 nginx 搭建反向代理服务器,解决 Internet 服务器(长江水文网)与内

部网络服务器(Cesium 服务器)在请求数据时产生的跨域问题,通过 Ajax 异步服务技术调用站点实时水位流量数据,并对请求的数据进行一定的解析,最终将数据呈现在 Cesium 平台页面,实现水雨情数据的同步展现。展现结果如图 13 所示。

表 1 2017 年 8 月 17 日实时数据获取

站 名	时 间	水位/m	流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
寸 滩	2017-08-17T16: 00	166.37	14 600
武 隆	2017-08-17T16: 00	172.63	1 540
宜 昌	2017-08-17T16: 00	44.74	19 200
沙 市	2017-08-17T16: 00	36.63	16 500
城陵矶(莲)	2017-08-17T16: 00	28.11	—
汉 口	2017-08-17T16: 00	22.3	30 500
九 江	2017-08-17T16: 00	16.4	31 600
大 通	2017-08-17T16: 00	11.35	40 100
城陵矶(七)	2017-08-17T16: 00	28.16	11 300
湖 口	2017-08-17T16: 00	15.88	7 390
茅 坪(二)	2017-08-17T16: 00	146.3	—
三峡水库	2017-08-17T16: 00	146.3	—(入); 17 600(出)
龙王庙	2017-08-17T16: 00	157.91	—
丹江口水库	2017-08-17T14: 00	157.91	36(入); 749(出)

5 应用案例

基于研究开发的流域虚拟场景,本文将其应用于瀑布沟水电站,对构建的流域场景进行展示介绍。瀑布沟水电站工程位于四川省雅安市汉源县和凉山彝族自治州甘洛县境内,电站控制流域面积 68 512 km^2 ,总库容 53.37 亿 m^3 ,电站装机 6 台,单机容量 550 MW,总装机 3 300 MW,是大渡河流域水电开发的控制性水库之一,对大渡河水利调度十分重要^[18]。作为一个大型的水利工程,其建设和运营涉及到发电、洪水控制、拦沙、生态等诸多方面,通过虚拟场景的构建,实现 Web 模式下水电站多方面信息的直观展示。

通过对影像、地形、行政区及流域数据的加载实现流域水文信息展示[见图 14(a)];通过对水库水体数据、气象数据加载实现水库信息展示及水面效果仿真[见图 14(b)];通过对水电站相关要素进行三维建模,包括拦河大坝、引水发电系统、溢洪道等枢纽建筑物,室外道路,室内厂房、开关站等,并对所建三维模型加载渲染,实现电站场景仿真[见图 14(c)、图 14(d)]。平台对以上数据模型加载外还为操作人员提供三维模型查询功能,以实现对具体模型及其所附属设备的属性信息查询;同时,实现放大、缩小、平移、选择、测量、沿线飞行等 GIS 基本功能。证明了 Cesium 在流域空间数据动态可视化中适用性。

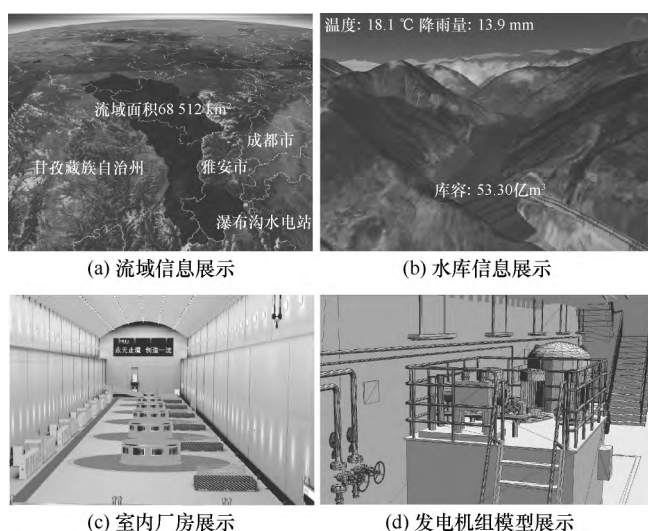


图 14 瀑布沟水电站虚拟场景展示

6 结 论

基于 B/S 结构的三维虚拟仿真是三维数字流域可视化发展一个较为热点、前沿的技术,本文结合中国灌排发展中心模型、倾斜摄影模型及其他相关模型加载展示,通过采用 JavaScript 与 WebGL 为开发语言,基于 B/S 架构,阐述了流域虚拟场景搭建方法,并成功运用于瀑布沟水电站虚拟场景中,获得如下结论:

(1) Cesium 可有效集成三维地形、影像、三维建筑模型和道路、水系数据,实现地理环境、工况、水雨情等多种信息的集成展示,是适用于流域空间数据动态可视化的基础工具。

(2) 为提高显示的精度与速度,采用了多精度数据分层叠加与本地部署的技术,测试结果证明这些技术能有效提高地形与影像的精度与速度。

(3) 除常规的地理信息数据集成展示外,采用 nginx 反向代理, Ajax 异步调用技术实现了流域水情数据的可视化及与空间信息的融合展示,可有效辅助流域问题的认识与决策。

本文研究只针对较小范围,对大范围的海量数据仍需进一步测试系统性能;另外与专业模型的深度结合也将是下一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 何莉飞. 基于 Cesium 的防汛三维电子沙盘研究[C]//河海大学,中国水利学会. 探索“智慧水利”推动科技创新——2017(第五届)中国水利信息化技术论坛论文集. 南京:河海大学出版社,2017.
- [2] 李俊金. 基于 3D GIS Cesium 的数字城市建模技术[J]. 信息与

电脑(理论版),2016(19):45-46.

- [3] 王世超. 基于 HTML5 的水利枢纽仿真系统的研究与实现[D]. 邯郸:河北工程大学,2016.
- [4] 于力超,张贤锋. 基于 WebGL 的网上虚拟太阳系漫游系统的设计与实现[J]. 电脑与信息技术,2015,23(1):49-53.
- [5] 朱棚逸,苗放. 基于 Cesium 的三维 WebGIS 研究及开发[J]. 科技创新导报,2015,12(34):9-11,16.
- [6] 牛艺博. 基于 WebGL 的地理信息三维可视化技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2015.
- [7] 高云成. 基于 Cesium 的 WebGIS 三维客户端实现技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [8] 徐健. 三维虚拟仿真关键技术和示范应用[D]. 南昌:江西师范大学,2013.
- [9] 刘李霞. 蔡家川流域场降雨径流模拟与数字化研究[D]. 北京:北京林业大学,2012.
- [10] 冶涛涛,蒋云钟,梁翠丽. 流域虚拟仿真中水沙模拟时空过程三维可视化[J]. 水科学进展,2011,22(2):249-257.
- [11] 张尚弘,赵登峰,姜晓明. 洪水淹没预报的虚拟仿真表达[J]. 清华大学学报(自然科学版),2010,50(6):861-864.
- [12] 艾丛. 基于 WebGL 的倾斜摄影三维模型可视化方案设计与实现[D]. 北京:北京建筑大学,2016.
- [13] 方强. 基于 WebGL 的 3D 图形引擎研究与实现[D]. 合肥:安徽大学,2013.
- [14] 朱丽萍,李洪奇,杜萌萌,等. 基于 WebGL 的三维 WebGIS 场景实现[J]. 计算机工程与设计,2014,35(10):3645-3650.
- [15] PATRICK C, KEVIN R, SEAN L, et al. Terrain Tutorial[EB/OL]. (2009-04-22) [2017-07-16]. <https://cesiumjs.org/tutorials/Terrain-Tutorial/>.
- [16] 铭巍. Cesium 中导入三维模型方法[EB/OL]. (2015-07-05) [2017-07-16]. <http://blog.csdn.net/l491453302/article/details/46766909>.
- [17] SuperMap 技术控. 3D GIS 与 BIM 融合技术方案[EB/OL]. (2017-03-31) [2017-07-16]. <http://blog.csdn.net/supermap-support/article/details/68928140>.
- [18] 陈五一,叶发明. 瀑布沟水电站枢纽布置[J]. 水力发电,2010,36(6):36-38,89.

(责任编辑 康健)

