

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.03.004

区域水资源监控三维可视化仿真平台研究

柴立, 解建仓, 姜仁贵, 刘建龙, 于翔

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对当前区域水资源监控中存在的基础数据共享性差、表现力不佳以及应用单一等问题, 基于三维地理信息系统 Worldwind 组件设计了三维可视化仿真平台, 为水资源监控提供决策支持服务。提出了 3D-VSP 四层体系结构, 采用组件式开发、三维可视化场景建模、空间地理信息集成以及三维可视化仿真等技术对 3D-VSP 进行开发。以陕西省为研究区域开展实例应用, 基于 3D-VSP 开发了支撑区域水资源监控的信息服务、水资源监视模拟以及严格水资源管理考核等业务应用。本文设计的 3D-VSP 实现了海量数据的集成, 为区域水资源监控提供三维可视化仿真环境和辅助决策业务应用, 具有可扩展性、较好三维表现力和人机交互等优点。

关键词: 水资源监控; 三维可视化仿真平台; 组件开发; 业务应用; 陕西省

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)03-0271-07

Research on the three dimension visualization simulation platform for regional water resources monitoring

CHAI Li, XIE Jiancang, JIANG Rengui, LIU Jianlong, YU Xiang

(State Key Laboratory Base of Eco-hydrologic Engineering in Northwest in the Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Aiming at the problems including difficulty in basic data sharing, single application and poor three-dimension expression existing in current water resources monitoring application, the paper designs a three-dimension visualization simulation platform (3D-VSP) based on 3D GIS named World Wind component, to provide decision support service for water resources monitoring. The framework of the 3D-VSP is proposed, with key technologies including component development, three dimension visual modeling, integration of geographic information, and visualization simulation of 3D-VSP used to develop the 3D-VSP. Taking Shaanxi province as research area, the paper develops the business applications including information service, water resources monitoring and simulation, strict water resource management and assessment on supporting the water resources monitoring. Result shows that the 3D-VSP has the advantages of good expandability and three-dimension expression, which could implement integration of mass data and provide 3D visualization simulation operation environment and decision support applications for regional water resources monitoring, indicating the advantages of better expandable, three-dimensional visualization and human-computer interaction.

Key words: water resources monitoring; three-dimension visualization simulation platform (3D-VSP); component-based development; business application; Shaanxi Province

区域经济的飞速发展进一步加剧了区域水资源供需矛盾, 对水资源的可持续利用及其发展提出更

高的要求。2011 年中央一号文件《关于加快水利改革发展的决定》指出: 新形势下水利发展应建立用水

收稿日期: 2016-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509201, 51479160, 41471451); 中国博士后科学基金资助项目(2016M590964); 陕西省教育厅科研计划资助项目(15JK1503)

作者简介: 柴立, 男, 博士生, 研究方向为环境资源与水利信息化。E-mail: 409537165@qq.com

通讯作者: 姜仁贵, 男, 讲师, 博士, 研究方向为水利信息化。E-mail: jrengui@163.com

总量控制、用水效率控制和水功能区限制纳污制度,加强水量水质监测能力建设,严格实施水资源管理考核,实行最严格的水资源管理制度,以此增强水资源可持续利用能力。国务院《关于实行最严格水资源管理体制的意见》(国发[2012]3号)中将健全水资源监控体系作为实施最严格水资源管理体制的保障措施,要求“全面提高监控、预警和管理能力”^[1]。当前,水利相关部门已经建成了较为完善的雨水情和水资源数据采集设备,收集了大量的雨情、水情、工情及水资源数据,建立了相应的监测站点和管理系统,为实施合理有效的区域水资源监控以及实施最严格的水资源管理制度奠定了坚实基础。

然而,当前主要以前端的监控和数据采集为主,后端的数据分析与业务应用相对偏弱,普遍存在着基础数据的多用户共享性较差,规范化程度相对较低,系统建设分散导致的异构与重复建设严重,重传统的数据管理,而忽略支撑决策的业务应用开发等问题,尤其是在水资源监控业务应用的三维可视化仿真与集成上研究较少。在水利业务可视化仿真领域,诸多专家学者开展研究,并取得一些有益的成果。王兴奎^[2],张尚弘^[3]等在三维虚拟仿真场景支撑下,提出数字流域研究平台建设构想,设计了都江堰虚拟现实系统;钟登华等^[4]提出基于 GIS 的水利水电工程三维可视化图形仿真方法;另外,科学计算可视化仿真^[5]、人工耦合技术^[6]和虚拟现实技术^[7-8]等可视化技术在不同水利业务中得到应用,以虚拟现实技术为例,由于受到技术和资金等多方面因素制约,未能得到大范围推广应用,水利行业涉及到的数据量大,应用复杂,数据分析和可视化效果相对不是很好,且存在应用单一和三维空间关联较少等不足。

本文针对区域水资源监控存在的问题和当前水利信息技术上存在的不足,采用组件式软件开发技术、框架技术以及计算机三维建模与可视化仿真等技术,基于三维地理信息系统 Worldwind 设计了面向区域水资源监控的三维可视化仿真平台(three-dimension visualization simulation platform, 3D-VSP),将支撑区域水资源监控的不同业务应用以组件的形式在 3D-VSP 上进行有效的协同与集成应用,弥补当前水资源监控建设中存在的不足。融合多源数据资源,进行三维可视化场景建模,采用框架技术将不同的水资源监控业务应用划分为不同的子系统,并最终在三维可视化场景中进行集成,实现面向区域水资源监控的多源信息集成与监测、水资源监视模拟和最严格水资源管理考核等业务应用。以

陕西省为研究区域,将设计的 3D-VSP 应用到陕西省水资源监控中,基于 3D-VSP 开发支撑陕西省水资源监控业务应用,为区域水资源管理和水资源可持续利用提供支持。

1 三维可视化仿真平台(3D-VSP)设计

1.1 3D-VSP 内涵

3D-VSP 指采用组件技术、可视化仿真和计算机应用框架等现代信息技术,结合区域水资源监控业务应用特点,在区域水资源监控多源数据集成的基础上,将分散在不同服务器或异构的水资源业务系统中相关的数据资源和业务应用以组件的方式进行有机整合,实现底层数据的交互和上层应用的集成,在三维可视化仿真环境中,为不同用户提供统一的界面,实现对不同的水资源监控业务应用进行开发、操作与管理,为决策提供支持。3D-VSP 不是水资源监控业务应用的简单拆分与拼接,而是将不同的水资源监控业务应用以组件的形式在 3D-VSP 进行集成。数据层面上,对 Worldwind 的基础数据和水资源监控业务应用数据进行高效组织与管理,提出多源数据集成方案,实现不同业务应用多源数据的集成;功能层面上,水资源监控业务应用组件通过开放应用接口进行集成,并采用框架对应用组件进行封装,使得不同的水资源监控业务应用逻辑上相对独立,满足不同用户的需求,避免彼此相互影响与制约;应用层面上,弥补了传统水资源监控业务应用系统应用单一和表现力不足的缺陷,采用具有较好三维可视化效果的组件作为基础平台,为用户提供较好的表现效果。

1.2 3D-VSP 总体设计

总体上,3D-VSP 设计目标为实现多源的区域水资源监控数据管理,业务应用开发与集成,以及数据和业务应用的可视化展现,进而为用户提供决策支持服务。具体包括:(1)基于 Worldwind 数字地球模型搭建三维可视化仿真环境,遵循国际通用规范和行业标准,实现多源数据的标准化处理与存储,通过 3D-VSP 的开放数据接口,实现对不同来源水资源监控业务应用数据的分类处理与管理,以及多源数据在 3D-VSP 上的集成、分析和可视化展示。(2)根据区域特征和水资源监控业务应用需求设计不同的水资源监控功能模块,每个功能模块包括若干个具体的应用,不同模块和应用以组件的形式进行独立开发,便于分布式开发和后期的运行管理及维护,与此同时,采用分级用户方式,不同的用户执行权限范围内的操作,保证数据和应用的安全性。

结合当前水资源监控业务应用中存在的问题,3D-VSP在设计时充分考虑水资源监控业务应用开发和用户使用的需求,根据上述设计目标,3D-VSP在开发过程中需要遵循实用性、数据一致性、应用可扩展性、集成性、安全性、人机交互及较好三维表现力等原则。其中,实用性要求3D-VSP能够满足不同水资源监控业务应用实际需求,通过组件式开发模式,实现不同业务应用功能模块的单独开发,为多用户协同开发提供便利。数据一致性要求3D-VSP应尽量采用国际上通用规范,国家及行业标准,本文中采用的数据标准包括:OpenGIS协会(Open Geospatial Consortium,OGC)和水利行业标准实时雨水情数据库表结构与标识符标准等,避免由于采纳规范的不一致造成业务应用的不兼容等问题。集成包括水资源监控业务应用的集成和技术上的集成两个方面,前者是对水资源监控涉及的大量数据资源和业务应用在3D-VSP上的集成,后者是指3D-VSP采用的组件,开发采用的技术以及运行所需要的环境应该是现代信息技术的集成。安全性包括:数据安全、业务应用安全以及版权安全等内容。此外,传统的水资源业务应用系统大多是对数据与应用的网页表现,3D-VSP基于Worldwind三维组件开发模块化应用,具有较好的表现力,以数字地球的方式为用户提供水资源监控应用服务,界面友好,易于操作,人机交互,提供三维可视与空间分析服务。

1.3 3D-VSP 体系结构

按照1.2中3D-VSP的总体设计,本文提出了面向区域水资源监控3D-VSP的数据层、服务层、应用层和客户层四层体系结构:(1)数据层通过多源数据集成方案对Worldwind基础数据和区域水资源监控业务数据进行有机融合,其中,Worldwind数据主要包括航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission,SRTM)数字高程数据、区域纹理影像以及中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer,MODIS)数据等,采用瓦片金字塔技术和四叉树结构对海量数据进行处理、组织和管理。区域水资源监控业务数据包括历史数据和实时数据两种,采用数据集成中间件对数据进行集成,经处理后存入到标准数据库中。区域空间地理信息采用网络地图服务(Web Map Server,WMS)的方式在三维可视化仿真环境中集成,并和区域数字高程模型(Digital Elevation Model,DEM)数据和水资源监控相关数据资源按照不同图层的方式进行加载与提供服务。(2)服务层是3D-VSP开发的关键部分以及重点开发内容,其

中,3D-VSP组件应用接口主要包括worldwindow接口、Globe接口和Layer接口,用于三维可视化仿真环境的搭建;Web应用服务器包括支持区域空间地理信息的GeoServer服务区、基础数据发布的Tomcat服务器;所采用的数据标准化互操作标准主要包括XML、WMS和KML等,以及预警监视、管理考核和应急管理 etc 区域水资源监控应用的数学模型等。(3)应用层主要由3D-VSP基本应用、3D-VSP地图服务、水资源信息服务、水资源监视模拟和水资源管理考核等五大功能模块组成,每个功能模块又包括若干个具体的水资源监控业务应用,例如,水资源信息服务包括:用水信息服务、工情信息服务和供用水信息服务等,水资源监视模拟服务包括水功能区监视、水源地监视、地下水监视、水污染模拟和警报服务等,水资源管理考核则主要包括用水总量考核、工业用水考核、农业用水考核和水功能区纳污考核等内容。(4)客户层相当于开发流程中的用户界面集成,处于3D-VSP的最上层,本文主要基于Worldwind三维客户浏览器为不同的区域水资源监控业务应用提供人机交互和三维可视化仿真环境。

2 三维可视化仿真平台(3D-VSP)开发

2.1 基础平台组件式开发

采用组件式软件开发技术对3D-VSP进行开发,实现软件开发中“高内聚、低耦合”的要求,根据上述总体设计,文中采用数字地球Worldwind组件作为3D-VSP的基础平台,目前该组件已经在多个文献中得到应用^[9-11]。该组件由美国国家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration,NASA)组织发布的开发源代码项目,目前提供.Net和Java两种版本,考虑到计算机开发语言的平台无关性,文中采用Java技术开发的WorldWind Java SDK 2.0版本作为底层组件。该基础组件主要由三维可视化球体模型、图层管理器、视图加载器、配置文件机制、事件触发和监听等模型构成,在基础组件之上开发面向区域水资源监控的业务应用,通过组件内置的数据处理机制实现海量地形和地理数据的集成,通过金字塔结构的球体模型搭建基础数字地球,采用图层管理器和视图加载器实现不同区域水资源监控业务应用组件在数字地球上的加载,通过事件触发和监听机制实现对图层和视图的管理与人机交互,为用户提供可视化效果好,易于操作的环境。

2.2 三维可视化场景建模

3D-VSP 三维可视化场景需要海量的 DEM、地形纹理和高清影像数据的支撑,文中采用瓦片金字塔模型对上述数据资源进行划分,采用四叉树结构将经处理的海量瓦片数据进行加载,通过对海量瓦片数据的合理调度和组织便可构建出数字地球三维可视化场景^[9]。3D-VSP 提供了两种瓦片数据的加载机制,一种是平台客户端直接从服务器端的 Tomcat 中数据存储目录中读取瓦片数据,在数字地球上加载和无缝拼接,另外一种是以本地化缓存的方式对瓦片数据进行管理,其中,前者存在数据速度受到网络的限制,后者数据读取很快,但是需要将瓦片数据事先根据指定的目录结构存储到本地化服务器中。在对海量数据进行瓦片化处理之后,按照四叉树结构将瓦片存储到服务器 Tomcat 指定的文件目录,用户通过界面进行操作,3D-VSP 在获取用户操作事件监听之后发出数据请求,通过事先写好的 xml 配置文件获取用户访问所在区域的范围,根据范围确定经纬度值,根据经纬度值和瓦片数据存储规则实现所在区域和瓦片数据的匹配和精确定位,并将用户请求的区域所在瓦片数据投影到数字地球球体模型相应的经纬格网中,实现不同分辨率和不同数据资源在数字地球球体模型中的无缝拼接,为用户提供三维可视化研究区域场景。

2.3 空间地理信息集成

遵循 OGC 规范,通过基于 GeoServer 的 Web-GIS 将空间地理信息以 WMS 的形式进行存储和管理,并在 3D-VSP 上进行集成。WebGIS 客户端根据 WMS 提供的 GetCapabilities, GetMap 及 GetFeatureInfo 三个操作协议来实现 WMS^[10],在发送 WMS 请求之前,事先发送 GetCapabilities 操作获取 GeoServer 中所能提供的地图信息的地图元数据描述 XML 属性文档,经解析后发出 GetMap 请求,确认地图的经纬度范围,使用的空间参照系统,图层的样式,输出的格式、大小和颜色等信息。WMS 的 GetMap 操作能集成异构服务器的地图服务并创建个性化地图,GeoServer 服务器在获取 GetMap 请求后,根据 HTTP 语句中的相关参数,生成相应的地图,采用 OpenLayers 进行封装后返回给客户端^[11],并通过 3D-VSP 的 WMS 接口进行集成。针对矢量地理信息,纸质数据先进行数字化处理, CAD 等矢量数据通过 ArcGIS 转换成 GIS 数据后进行集成,对于不同来源或者不同比例尺的 GIS 数据,需要先进行投影变换,使 GIS 数据与 3D-VSP 投影坐标系一致后再进行集成。

2.4 JOGL 技术

OpenGL 是一种通用的三维图形接口语言,包含一套核心函数库和应用函数库,Java 支持 OpenGL(Java Bindings for OpenGL, JOGL)是与 OpenGL API 绑定并建立在 OpenGL 公共图形接口基础上的三维仿真技术,为采用 Java 开发的应用程序提供 3D 图形硬件支持和扩展的完整访问,并对 Swing 界面组件进行集成。JOGL 核心类方法包括 GLDrawable, GLCanvas, GLJPanel, GLCapabilities 及 GLDrawableFactory 共 5 个^[12]。在 3D-VSP 业务应用开发中,采用 JOGL 技术进行可视化仿真,在三维可视化场景构建,数据图层的加载,水资源信息服务展示、预警图标的绘制,水资源管理考核分析,空间路径绘制,水污染事件动态运移等功能中得到应用。以图标的绘制为例,先得到图标的 Double-Buffer 缓存,采用 JOGL 在 3D-VSP 上绘制不同形状、颜色与大小的图标,实现的核心代码如下:

```
public static void drawBuffer(DrawContext dc, int glMode, DoubleBuffer verts) {
    GL gl = dc.getGL();
    gl.glPushClientAttrib(GL.GL_CLIENT_VERTEX_ARRAY_BIT);
    gl.glEnableClientState(GL.GL_VERTEX_ARRAY);
    gl.glVertexPointer(2, GL.GL_DOUBLE, 0, verts.rewind());
    gl.glDrawArrays(glMode, 0, verts.limit() / 2);
    gl.glPopClientAttrib();
}
```

方法中 DrawContext 是指三维可视化内容接口, glMode 指 GL 模式,值 0 为 GL_POINTS 模式, 1 为 GL_LINES 模式, 9 为 GL_POINTS 模式, DoubleBuffer 指数据的双精度缓存,该方法执行的前提是 DrawContext 和 DoubleBuffer 非空。

3 应用实例

3.1 研究区概况

陕西地处中国西部内陆腹地,地跨黄河、长江两大流域,全省水资源总量 423.3 亿 m³,南多北少,时空分布不均,旱涝灾害频繁,局部灾害多发。全球气候变化影响和城镇化水平的加快,使得水资源短缺、水污染和水生态等问题日益突出,直接制约全省经济社会可持续发展。以实行最严格水资源管理制度为契机,陕西省近年来通过严控用水总量,提高用水效率和严控入河湖排污等方式,优化水资源监测监控体系,加强用水监控,提高水资源预警和管理

能力。

按照水利部关于《国家水资源监控能力建设项目实施方案(2012—2014)》的统一部署,陕西省结合区域实际情况制定了陕西省技术方案,开展水资源监控管理业务系统的建设。当前陕西省水资源监控工作重点集中在取用水户的监测、水功能区的监测、饮用水源地监测等内容上,前期以硬件的投入为主,先期已经建成了覆盖全省范围的取用水户实时监测管理系统和雨水情自动测报等应用系统,建成各类防汛雨量监测速报站 400 多个、水位和雨量遥测站 130 余处,可为水资源监控和防汛工作提供重要数据资源。当前,尚未涉及基于三维可视化仿真的区域水资源监控应用系统,结合上述背景,本文在前期研究基础上,以陕西省水资源监控为研究对象,开发陕西省水资源监控业务应用,为陕西省水资源监控能力建设项目的实施提供数据资源和业务应用支撑。

3.2 3D-VSP 应用效果

结合陕西省水资源监控建设现状,本文将设计开发的 3D-VSP 应用到陕西省水资源监控中,为用户提供三维可视化操作环境和地图服务的基础上,

提供水资源信息服务、水资源监视模拟和水资源管理考核等业务应用,为陕西省水资源监控提供三维可视化仿真平台,为严格水资源管理服务,促进陕西省经济社会平稳较快发展。下面以基于 3D-VSP 的陕西省水资源监控信息服务、监视模拟服务和严格水资源管理考核服务为例说明 3D-VSP 的应用效果。

图 1 所示为基于 3D-VSP 开发的陕西水资源监控信息服务应用实例,该服务为区域地理信息、基础雨水情信息和工情信息提供信息集成、处理、分析和空间展示功能,其中工情信息服务实现了对陕西省范围内泵站工程、水库工程、水闸工程、水电站工程和机电井工程五大类工情信息的高效组织、管理和应用。以机电井信息服务为例,用户通过 3D-VSP 可以实现对陕西省 40809 个机电井的信息进行查询、基础信息和监测信息的展示、以及监测数据曲线的绘制等功能,用户可以按照“名称”、“行政区划”、“水资源区”、“编码”、“所在河流”和“所在灌区”等查询条件进行查询,点击“基础信息”和“监测信息”按钮可分别查询指定测站的基础信息和监测信息。



图 1 基于 3D-VSP 的机电井信息服务

Fig. 1 Information service for electromechanical well based on 3D-VSP

图 2 所示为基于 3D-VSP 的水资源监视模拟服务应用实例。水资源监视模拟服务主要包括:水功能区监视、水源地监视、地下水监视、水污染模拟和警报服务 5 类。其中前 3 类,用户可以通过 3D-VSP“查询”界面按照“代码”、“行政区划名称”、“所在流域”、“监测单位”、“测站代码”等个性化定制所需查询的水功能区、水源地、地下水等。以水功能区监视为例,鼠标选中水功能区之后,点击“基础信息”

可将水功能区的基础信息进行可视化仿真,包括:代码、行政区划、起止断面、水质目标、监控级别和实际水质等,此外,还可以绘制各月水质曲线、氨氮和 COD 浓度变化曲线等,如下图所示。“警报服务”实现对不同预警类型的警报服务,主要包括:降雨量超警戒、河道超限水位、含沙量超警戒等,用户点击“预警显示”,则 3D-VSP 从数据库中获取所有超过阈值的测站,并根据该测站的空间位置提供“红色警

报”服务^[9]。水污染模拟服务则针对突发水污染事件,基于 3D-VSP 对水污染事件进行可视化模拟,按

照事件、方案和污染物步骤进行操作,实现对突发性水污染事件的监视模拟^[13]。



图 2 基于 3D-VSP 的水功能区监视服务

Fig. 2 Monitoring service for water function zone based on 3D-VSP

图 3 所示为基于 3D-VSP 的严格水资源管理考核应用实例。

将数据采集端采集的区域供用水信息通过 3D-VSP 的数据集成中间件进行数据融合处理,存储到标准化数据库中,根据“陕西省实行最严格水资源管理制度考核办法”制定的“三条红线(包括:水资源开发利用控制红线、用水效率控制红线和水功能区限制纳污红线)、六项指标”和打分标准对省、市、县三

级行政区分别进行考核,并根据考核结果在 3D-VSP 上进行红、黄、蓝展示。以水功能区纳污红线考核为例,在 3D-VSP 中选择区域,再选择时间,平台调用底层的水功能区红线考核计算方法和计算组件,计算得到考核结果,其中区域考核根据达标数和监测数计算达标率,水功能区考核根据水质目标和实际水质计算是否达标,最终在 3D-VSP 上将考核结果进行可视化仿真。

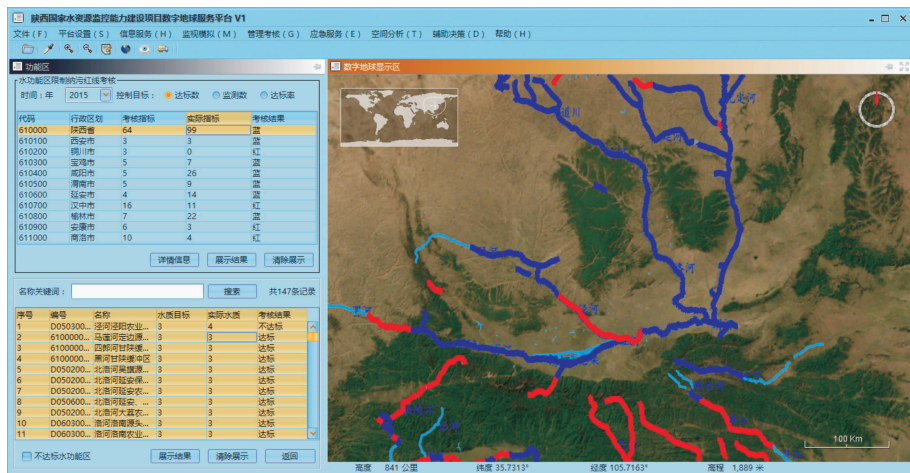


图 3 基于 3D-VSP 的水功能区考核服务

Fig. 3 Assessment service for water function zone based on 3D-VSP

4 结论

本文针对当前区域水资源监控中普遍存在的数据共享性差、应用单一以及三维表现力不足问题,在三维地理信息系统 Worldwind 组件上设计开发了 3D-VSP,并以陕西省水资源监控为例开展实例应用,结果表明:基于 3D-VSP 开发的水资源监控业务

应用具有可扩展性、较好三维表现力等特点,以组件的方式实现不同水资源监控业务应用在 3D-VSP 上的集成,一定程度上避免了由于不同水资源监控业务应用系统带来的异构和重复建设问题,为严格水资源管理制度的实施与考核提供技术支撑,促进水利信息化建设和区域水资源可持续发展,具有较好应用前景。

3D-VSP 采用三维地理信息系统 Worldwind 组件作为基础平台,由于 Worldwind 的开源性使得底层组件源码时刻都在更新,因此后期考虑在 WorldWind 提供的数字地球建模基础上进行组件的自主研发。当前 3D-VSP 基础平台数据大多来自于开源社区,鉴于安全性考虑,后期将根据实际项目需求,采用高清影像作为基本数据源,通过网格计算实现三维可视化场景构建所需海量数据的高效组织与管理。

参考文献:

- [1] 蒋云钟,万毅. 水资源监控能力建设功能需求及实施策略[J]. 中国水利, 2012,(7):26-30.
JIANG Yunzhong, WAN Yi. Demand analysis of water resources monitoring capacity and implementation strategy study[J]. China Water Resources, 2012,(7):26-30.
- [2] 王兴奎,张尚弘,姚仕明,等. 数字流域研究平台建设雏议[J]. 水利学报, 2006, 37(2):233-238.
WANG Xingkui, ZHANG Shanghong, YAO Shiming, et al. On the construction of research platform of digital valley[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(2):233-238.
- [3] 张尚弘,曲兆松,郑钧,等. 虚拟现实技术在都江堰三维信息系统中的应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(5):643-648.
ZHANG Shanghong, QU Zhaosong, ZHENG Jun, et al. Application of virtual reality to Dujiangyan 3D information system [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(5):643-648.
- [4] 钟登华,宋洋. 基于 GIS 的水利水电工程三维可视化图形仿真方法与应用[J]. 工程图学学报, 2004,(1):52-58.
ZHONG Denghua, SONG Yang. Study on 3D visual graphic simulation method and application for hydraulic and hydropower engineering construction based on GIS [J]. Journal of Engineering Graphics, 2004,(1):52-58.
- [5] 戴会超,田斌. 科学计算可视化仿真及其在水利行业中的应用[J]. 水力发电学报, 2005, 24(6):88-93.
DAI Huichao, TIAN Bin. Visual simulation technique in scientific computation and its application in the water conservancy [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(6):88-93.
- [6] 田禹,孙德智,南军,等. 基于现代人工耦合技术的流域水资源监控系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(12):1439-1443.
TIAN Yu, SUN Dezhi, NANG Jun, et al. Online moni-

toring system of river basin water resources based on artificial coupling techniques[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(12):1439-1443.

- [7] 尹习双,周宜红,胡志根,等. 基于虚拟现实的水电工程施工动态可视化仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7):1690-1693.
YIN Xishuang, ZHOU Yihong, HU Zhigen, et al. Research on dynamic simulation and visualization for construction process of hydropower project based on virtual reality[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7):1690-1693.
- [8] 靳萍,刘永,欧阳建国. 水利系统中虚拟现实技术的发展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2001, 34(6):107-109.
JIN Ping, LIU Yong, OUYANG Jianguo. Development of virtual reality technology in hydraulic system [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001,34(6):107-109.
- [9] 姜仁贵,解建仓,李建勋. 面向防汛的三维预警监视平台研究与应用[J]. 水利学报, 2012, 43(6):749-755.
JIANG Rengui, XIE Jiancang, LI Jianxun. Research and application of 3D early warning monitoring platform for flood prevention[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6):749-755.
- [10] 姜仁贵,解建仓,李建勋,等. 基于数字地球的洪水淹没分析及仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(13):219-222.
JIANG Rengui, XIE Jiancang, LI Jianxun, et al. Analysis and simulation of flood inundation based on digital earth[J]. Computer Engineering and Application, 2011, 47(13):219-222.
- [11] 姜仁贵,解建仓,李建勋,等. 基于数字地球的 WebGIS 开发及其应用[J]. 计算机工程, 2011, 37(6):225-227.
JIANG Rengui, XIE Jiancang, LI Jianxun, et al. Development of WebGIS based on digital earth and its applications[J]. Computer Engineering, 2011, 37(6):225-227.
- [12] XU Zhigen, YAN Yusong, CHEN Jim X. OpenGL programming in Java[J]. Computing in Science & Engineering, 2005, 7(1):51-55.
- [13] 解建仓,姜仁贵,李建勋,等. 面向突发性水污染事件的三维可视化系统[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(3):217-223.
XIE Jiancang, JIANG Rengui, LI Jianxun, et al. Three-dimensional visualization system facing sudden water pollution incidents[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(3):217-223.

(责任编辑 杨小丽)