

基于云渲染的三维 BIM 模型可视化技术研究

刘 北 胜

(中国铁道科学研究院,北京 100081)

摘 要:利用 BIM(Building Information Modeling)技术进行工程建设的精细化管理需要实现三维 BIM 模型的在线展示及交互操作,传统的三维图形可视化技术虽然能够实现模型展示,但存在模型文件格式兼容性差,对终端设备硬件要求高,缺少必要的交互功能等问题,针对这些问题进行系统分析,提出了一套基于云渲染技术的三维 BIM 模型可视化解决方案,其中包括源模型文件轻量化转换技术,基于 HOOPS 的图形引擎开发技术,以及基于云渲染的大体量模型浏览器展示和交互技术,通过系统研发实现了主流建模软件 Revit、Catia、Microstation、Tekla 模型源文件的轻量化转换,以及基于云渲染的图形引擎系统,并在北京至张家口铁路工程建设项目中进行了验证。

关键词:BIM;云渲染;轻量化;图形引擎

中图分类号:TP319 **文献标志码:**A

Research on cloud rendering based 3D BIM model visualization techniques

LIU Beisheng

(China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The use of BIM for fine engineering project management requires online display and interaction of 3D BIM models. Although traditional 3D graphics visualization technology can display models, there are still some problems such as poor compatibility of the model file format, high hardware requirements of devices and lack of necessary interactive functions. In order to solve these problems a cloud rendering based 3D BIM model visualization solution is proposed. The solution includes BIM model lightweight conversion technology, HOOPS based graphics engine development technology, cloud rendering based large model display and interactive technology. Through the research and development of the system, BIM models designed using Revit, Catia, Microstation, Tekla etc. are converted into light-weighted formats, and a cloud rendering based graphics engine system is developed and verified in Beijing to Zhangjiakou railway project.

Keywords: BIM; cloud rendering; lightweight conversion; graphic engine

收稿日期:2017-08-01

基金项目:中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题(2017G001-C, 2017G001-D);中国铁道科学研究院科研项目重大课题(2016YJ098)

Foundation items: Science and Technology Research and Development Key Program of China Railway Corporation(2017G001-C, 2017G001-D); Science and Research Major Program of China Academy of Railway Sciences(2016YJ098)

第一作者:刘北胜(1984—),男,北京市人,副研究员,博士。研究方向为 BIM 及工程建设信息化。email:liubeisheng130@hotmail.com.

引用格式:刘北胜.基于云渲染的三维 BIM 模型可视化技术研究[J].北京交通大学学报,2017,41(6):107—113.

LIU Beisheng. Research on cloud rendering based 3D BIM model visualization techniques[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(6):107—113. (in Chinese)

<http://jdx.bjtu.edu.cn>

随着 BIM 建筑信息模型技术在工程建设领域中的应用,逐步改变了传统工程项目信息的组织和表达方式.在没有 BIM 的时代,工程项目信息大多以离散的方式进行组织并以二维图表的方式展现给用户.在基于 BIM 的工程项目管理应用中,各种项目信息通过统一的编码与三维 BIM 模型关联起来,用户通过与三维模型进行交互来获取所需的信息,这些信息再通过三维模型更加直观地展现给用户^[1].由此可知,三维 BIM 模型可视化技术是基于 BIM 的工程项目管理应用的核心技术支撑.

文献[2-3]应用 OpenGL 接口,通过对鼠标的二维位置变换,实现三维模型的平移、缩放、旋转操作,但是在基于 BIM 的工程项目管理应用中,用户需要与 BIM 模型进行多种复杂的交互操作,如不同粒度的模型/构件检选、模型剖切、标记、测量、漫游等.使用这些图形引擎提供的 API(Application Programming Interface)编程接口进行复杂交互功能开发难度较高,需要投入较多的人力且开发周期较长.

文献[4-5]提出一种集成了网格重建、去噪、简化等步骤的一体化三维图形文件格式转换方法,可将一些标准的三维图形格式转化成基于网格的轻量化文件格式.但是,这种方法只能处理一些通用的三维图形格式,例如 3DS、OBJ、OFF 等.然而 BIM 模型大多是使用专用的建模软件(例如 Revit、Catia、Microstation、Tekla 等)创建,不同建模软件创建的 BIM 模型都基于其专有的格式,仍需要将各种建模软件创建的 BIM 模型转化为一种统一的、图形引擎可以识别和处理的格式.另外,建模软件创建的 BIM 模型中包含许多冗余的设计信息,为了提高模型的传输和加载效率,需要将模型中有用的装配信息和属性信息提取出来进行结构化存储并将几何信息转换成一种体量相对较小的轻量化格式.

文献[6-9]利用 WebGL 技术实现了异构的 CAD 模型跨平台 Web 浏览器显示,但是采用这种方式进行三维图形渲染时需要消耗大量的终端设备资源,随着三维模型面片数的增加,渲染模型消耗的硬件资源会迅速增长.当模型的体量超过用户终端设备的承受范围时,会出现程序卡死或崩溃的现象.在 BIM 应用中,经常需要展示大体量的三维模型,这些模型在专业的图形工作站中展示时也会经常出现卡顿的现象.然而,BIM 应用的使用环境经常是在施工现场,很难要求用户配备专业的设备,这就需要有有一种能够支持在配置较低的终端设备甚至是移动设备上流畅的展示大体量三维模型的技术以满足 BIM 应用的特殊需求.

综上所述,传统的三维图形渲染技术虽然可以实现图形展示功能,但不足以完全支持基于 BIM 的工程项目管理应用对三维 BIM 模型的展示要求.为了解决上述问题,本文作者通过模型设计插件实现了 BIM 模型源文件的轻量化转换,利用 HOOPS 三维图形应用开发 BIM 图形引擎,并部署到高性能图形服务器上对三维模型进行渲染,采用虚拟桌面的方式将模型展示区域以图片流的形式发送到 Web 浏览器上,并通过消息服务实现了图形展示区域、用户及 BIM 应用之间的信息交互.

1 基于 HOOPS 的图形引擎开发

为了解决与三维模型的展示与交互以及 BIM 模型专有格式的支持问题,本文采用专门为 BIM 定制的图形应用集成开发套件 HOOPS Visualize 进行三维图形引擎开发.HOOPS Visualize 作为 Dassault、Autodesk 等主流 BIM 模型设计软件的图形技术支撑,提供丰富的 BIM 交互开发功能以及三维 BIM 图形文件的格式转化功能.

HOOPS Visualize 建立在 OpenGL、Direct3D 等图形渲染内核之上,实现了更加高级的图形功能(如图形高级渲染、动画、动态干涉检查、图形高级操作、显示性能优化等).可以集成到微软的 Visual Studio 开发环境,主要使用 C++ 语言开发.通过调用 HOOPS Visualize 提供的 API 接口或者直接引用其类库中的图形操作类即可实现三维图形的渲染和交互操作.另外,HOOPS Visualize 还提供 Exchange 组件,可将 BIM 模型的几何信息和属性信息转化并存储成 HOOPS 专用的轻量化模型文件格式 hsf(Hoops Stream Format).

1.1 源模型文件轻量化转化

通过设计软件二次开发可将设计源模型中的几何信息导出成通用格式的三角面片图形数据,并可通过设计软件提供的二次开发接口将模型中各个构件的属性数据读取出来,之后使用 HOOPS Exchange 组件中提供的 API 接口建立轻量化模型文件的数据结构并最终生成 hsf 文件.以 Bentley 公司的 Microstation 建模软件为例,模型轻量化程序架构如图 1 所示.

源模型文件的轻量化转换过程如下:

1)调用 DGN Direct 组件提供的接口将源模型文件中的第 1 个构件(此处的构件为模型实体结构分解的最小单元)的几何信息导出成三角面片数据(三角面片数据由若干个顶点坐标和构件的空间坐

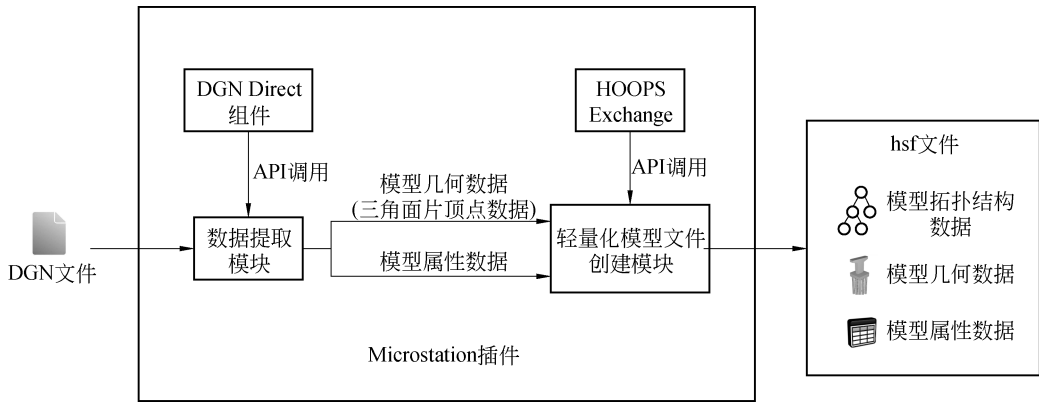


图 1 模型轻量化程序架构

Fig.1 Model lightweight program architecture

标组成);2)调用 HOOPS Exchange 组件的 API 接口,创建一个模型片段,将构件的几何信息保存到片段中;3)调用 DGN Direct 组件的接口将构件的属性数据读取出来,然后调用 HOOPS Exchange 模块的接口将属性数据保存到之前创建的片段中;4)调用 DGN Direct 组件提供的接口将源模型文件中的下一个构件的几何信息导出成三角面片数据并重复步骤 2)和 3),直到模型中的所有构件的几何信息和属性数据都导出到对应的片段中。5)根据实际需求对片段进行分组,例如对于桥梁的 BIM 模型可将一个桥墩包含的所有构件片段分成一组,组成一个桥墩片段,再将所有的桥墩片段组成一个下部结构片段。同理可将一跨梁包含的所有构件片段组成一个梁片段,再将所有的梁片段组成一个上部结构片段。

至此,源模型文件就被转化成一个轻量化的 hsf 模型文件,hsf 文件可以被基于 HOOPS 开发套件开发的图形引擎加载展示并进行丰富的交互操作。另外,设计源模型一般采用精确的数学表达式表达模型的几何信息,因此该模型在转化为三角面片数据后,几何外形精确但面片数量庞大,一般无法满足 Web 浏览器实时渲染的要求,必须通过简化算法精简模型^[10-11]。通过分析可知,参数化的实体模型面片化后,三角面的排列顺序具有一定的规律,根据这个特点,可将网格数据分为:面上的点都在边界线上,面上的点不全在边界线上。对于第 1 类网格数据,只需要对边界上的点进行简化即可。对于第 2 类的,需要从边界线开始,对原始网格数据进行从左向右,自下至上逐层简化。

由于 hsf 文件只包含必要的几何信息、属性数据及模型拓扑结构数据,极大地减小了模型的体量,降低了模型渲染的硬件资源消耗,增强了模型展示和操作的流畅度。采用类似的方式可将主流设计软

件(包括 Revit、Catia、Microstation、Tekla)设计的源模型文件转化成轻量化文件格式,解决了模型源文件格式不统一的问题。

1.2 图形引擎设计

采用 HOOPS 开发套件开发的图形引擎程序架构如图 2 所示。各模块功能独立,可相互操作。

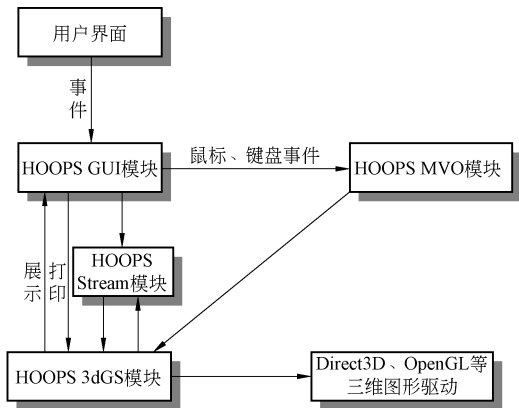


图 2 图形引擎架构

Fig.2 Graphic engine architecture

1)3dGS.

3dGS 负责三维图形渲染和数据管理任务,它屏蔽了不同底层图形渲染内核 (OpenGL、DirectX 等)的接口,向外提供一套统一、直观、便于调用的高级图形操作接口。这些接口封装了一系列 3D 图形数据处理和优化算法。这些算法可用于实现 2D 和 3D 图形数据的存储、创建、编辑、操纵、查询、展示和打印等操作。

2)MVO.

MVO 是独立于平台或用户界面的 C++ 类库,它能够实现大部分三维模型交互功能,例如模型查看、创建、注释、操纵、拣选等。通过引用这些类可以实现不同的业务逻辑,从而使图形引擎能够适应大型图形应用程序的开发需要。

3)Stream.

Stream 模块提供给 hsf 格式文件的输入/输出控制功能,它将定制化的 hsf 格式文件或数据流输入到 3dGS 模块,或将 hsf 格式文件或数据流从 3dGS 导出.

4)GUI.

GUI(Grrophic User Interface)模块用于将图形引擎的各模块与用户界面相集成.用户在用户界面上进行的操作由 GUI 模块分配到相关的模块进行处理.

用户操作的处理流程为:①用户触发的事件由用户界面捕获并插入到事件队列;②HOOPS GUI 模块对事件队列进行监控并将事件分发到 HOOPS MVO、HOOPS Stream 或 HOOPS 3dGS 模块;③HOOPS MVO 模块调用 HOOPS 3dGS 模块进行相应的数据处理与信息交互.

基于 HOOPS 开发的三维图形应用如图 3 所示.该应用程序可以加载和显示轻量化的 hsf 格式三维 BIM 模型文件(图 3 中显示的是一部分桥梁 BIM 模型),并且可实现视角切换、渲染模式切换、构件检选、颜色/透明度/消隐设置、剖切、漫游等符合 BIM 应用需求的复杂交互功能.

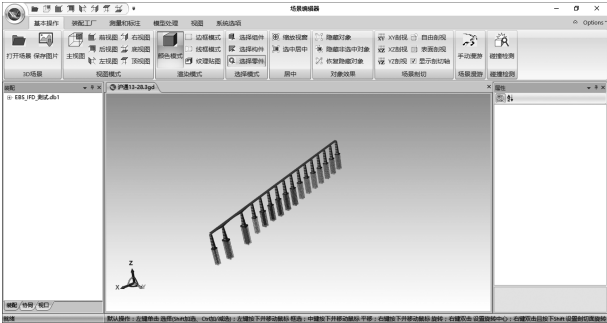


图 3 基于 HOOPS 的三维图形应用

Fig.3 HOOPS based 3D graphic application

2 三维模型云端渲染

为了使 BIM 管理信息系统具有 B/S 架构系统的优势,要求用户能够在浏览器上浏览和操作 BIM 模型.但是目前浏览器原生的编程语言如 JavaScript 并不支持三维图形渲染内核 API 的直接调用.一种解决办法是通过使用微软组件对象模型(Component Object Model,COM)技术将图形引擎程序封装成一个 ActiveX 控件^[12].用户在浏览 BIM 模型之前需要先下载 ActiveX 控件并在浏览器上注册该控件,之后当用户第 1 次打开 BIM 模型时,需要先将模型文件下载到本地缓存,下载完成后就可在浏览器上观看和操作 BIM 模型.采用这种方式虽然在一定程度上解决了浏览器展示 BIM 模型的问题,

但是也带来了一些问题,归纳如下:

1)大部分主流浏览器例如 Chrome、Firefox、Safari 等都不能很好的支持 ActiveX 控件加载和运行;2)不支持大体量模型的加载和展示.通过实验,当模型文件超过 80 M 时,加载模型可能会导致浏览器崩溃;3)用户在第 1 次浏览模型之前需要将模型下载到本地进行缓存,当模型文件较大时需要一段很长的等待时间;4)在浏览模型之前需要下载并注册 ActiveX 控件,增加了用户操作的复杂度.由于一些操作系统安全性限制,可能会阻止 ActiveX 控件的加载;5)当在浏览器上移动或遮挡部分模型展示区域时,会导致模型展示区域闪烁,降低用户体验.

为了解决这些问题,本文提出基于云端渲染的三维模型展示和交互引擎(简称云引擎).在此方案中,图形引擎程序被部署在服务器上,模型的渲染和展示都在服务端完成,并不占用用户终端设备的硬件资源.图形展示区域以图片流的形式发送到前端浏览器.当用户在浏览器上点击图形展示区域操作模型时,鼠标点击的位置坐标及该用户的识别信息会通过消息队列(Message Queue, MQ)发送至服务端.服务端上的消息处理程序接收到鼠标点击事件后会在图形引擎上的相应位置完成点击操作,操作的结果会以图片流的形式发送到该用户的前端浏览器.另外,图形展示区域和 BIM 应用的用户界面也可通过消息队列进行交互.例如,当用户在浏览器页面上点击模型结构树上的某个节点时,该节点对应模型的全局唯一标识符(Globally Unique Identifier, GUID)、用户操作类型以及用户识别信息会发送至服务端上的消息处理程序进行处理,即根据操作类型在用户选中的模型上完成操作,然后把操作结果以图片流的形式返回到该用户的浏览器页面.云渲染引擎的系统架构如图 4 所示.

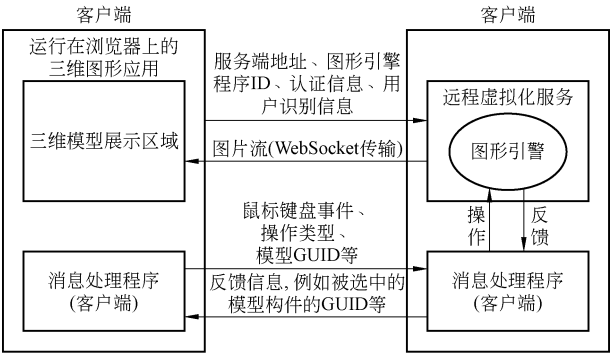


图 4 云引擎系统架构

Fig.4 Cloud engine system architecture

云引擎的客户端为一个运行在浏览器上的三维

图形应用,它包含三维模型展示区域和消息处理程序两部分.云引擎的服务端包含一个远程虚拟化服务程序、图形引擎和消息处理程序.在展示三维模型之前,客户端会给服务端的远程虚拟化服务程序发送图形引擎程序 ID(服务端会为每个在线用户开启一个图形引擎程序)、认证信息以及用户信息(包括用户地址等)并且建立服务端与客户端之间的连接.三维模型展示区域为一个浏览器页面上的 iFrame,用于接收远程虚拟化服务发送过来的图片流并展示.客户端的消息处理程序用于和服务端的消息处理程序进行通信,发送用户操作事件、操作类型以及模型或构件的 GUID 等信息并接收服务端的反馈信息.服务端的消息处理程序在接收到用户的操作信息后会控制图形引擎程序完成相应的操作并将接

收到的反馈信息发送给客户端.图形引擎程序为本文 1.1 节中描述的基于 HOOPS 技术开发的图形引擎.远程虚拟化服务用于图形引擎程序管理、用户认证管理、用户连接管理以及向客户端发送图片流.

3 系统应用

3.1 模型轻量化转换

采用 1 中介绍的模型轻量化插件可将源模型文件转换成轻量化的 hsf 文件,由于去掉了不必要的设计信息,极大的减小了文件的体量.而且通过轻量化转换可使不同设计软件创建的模型文件转换成统一的格式,更加便于设计成果的传播和共享.目前主流软件的源模型文件进行轻量化转换后的结果对比如表 1 所示.

表 1 源模型文件轻量化转换结果

Tab.1 Source model file lightweight conversion results

所属公司	软件名称	版本	源文件格式	专业	源文件体量/MB	轻量化文件体量/MB	轻量化比例/%
Autodesk	Revit	2016	rvt	站房	254.092	100.04	39.37
Dassault	Catia	V5R22	CATProduct	隧道	1170.000	48.20	4.12
Trimble	Tekla	2016	文件夹	桥梁	3.720	1.73	46.51
Bentley	Microstation	v8i	dgn	四电	17.800	11.60	65.17

通过表 1 可得,目前所有主流软件创建的源模型均可以转换成统一格式的轻量化模型,源模型文件在经过轻量化转换以后,体量缩小为原来的 5%~60%,在加载和展示时能够减少设备资源的占用.

3.2 模型展示和操作

由于模型的渲染是在服务器上完成的,所以本系统并不需要对终端设备的硬件性能做要求.当需要展示大体量模型或需要支持高用户并发数量时,只需增加服务器的图形处理能力.另外,由于在用户浏览器上展示的模型实际上是图片流,并不需要插件支持,所以该系统具有跨浏览器兼容的特性.用于验证本系统的硬件设备配置如下:属性数目为 356 377 条;构件数目为 10 916 个;轻量化文件大小为 100.04 MB;刷新率为 60 Hz;显示分辨率为 1366×768;网络带宽为 10 MB/s;浏览器采用 Google Chrome.服务器配置为 NVIDIA M6000,Windows Server 2013,Intel Xeon E5506×2,16 GB.终端设备配置为 Windows 10 家庭版,i7-6500U 2.5 GHz,8 GB.

采用云渲染引擎对大体量三维模型进行渲染和展示的结果如图 5 所示.通过实际验证,当展示由超过 10 万个构件组成的大体量模型时,图形展示区域仍然能够保持接近 60 Hz 的刷新率,网络带宽占用的峰值仅为 60 KB/s.另外,云引擎还实现了用户

图形应用和模型之间的流畅交互操作.

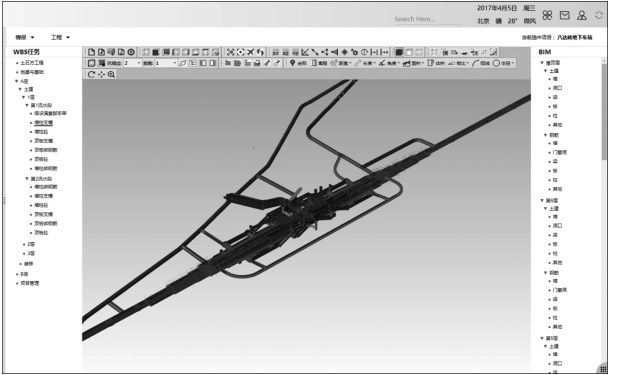


图 5 三维模型展示

Fig.5 3D model display

采用不同类型的技术路线进行 BIM 模型的 WEB 浏览器展示的结果分析如表 2 所示.

本文提出的基于云渲染的三维 BIM 模型可视化解决方案被应用于基于 BIM 的北京至张家口铁路工程项目建设管理平台中.京张八达岭隧道 BIM 模型采用 Bentley 公司的 Microstation 软件设计,模型包含十几万个构件,三角面片数量达到千万级别,采用云渲染图形引擎可保证 BIM 模型在 WEB 浏览器上流畅展示(即模型展示区域的刷新率达到 60 Hz 左右),如图 6 所示.

另外,云渲染图形引擎还支持模型与用户操作

界面的交互、模型剖切、爆炸图展示及标记等操作功能,如图 7 所示.当用户选中模型上的某个构件时,与该构件相关的信息即可在平台页面上展示,如图 7(a)所示;当用户选择模型剖切方式及需要剖切的

位置后,即可展示出相应的模型剖面,如图 7(b)所示;当用户选择爆炸图模式时,可将模型中的各构件分解展示,如图 7(c)所示;另外,用户还可以在模型展示区域上进行标注,如图 7(d)所示.

表 2 技术路线对比
Tab.2 Comparison of technical routes

对比项目	云渲染	Activex	WebGL
支持的最大文件体量	无限制,但需要根据展示模型的体量和用户并发数目增加服务器硬件资源	50 MB	40~50 MB
文件加载时间	视文件大小而定,50 M 的模型加载时间约 10~15 s	首次加载需要下载模型,50 M 的模型首次加载时间约 2 min,之后约 1 min	50 M 的模型加载时间约 2 min
图形展示区帧率	加载 100 M 模型,刷新率可达 60 帧/s,模型操作流畅	在普通个人计算机上刷新率在 5~10 帧/s,模型操作时有明显卡顿	在普通个人计算机上刷新率在 10~20 帧/s,模型操作时有明显卡顿
模型交互操作	支持漫游、剖切、标注、爆炸图等复杂操作	支持漫游、剖切、标注、爆炸图等复杂操作	暂时不支持剖切和爆炸图
浏览器兼容性	支持所有主流浏览器	只支持 IE 11 内核浏览器	支持所有主流浏览器
插件安装	不需要	需要	不需要

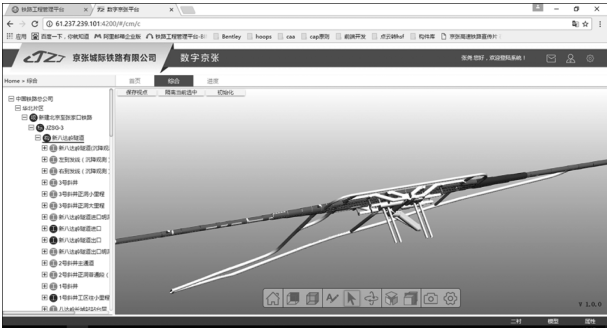
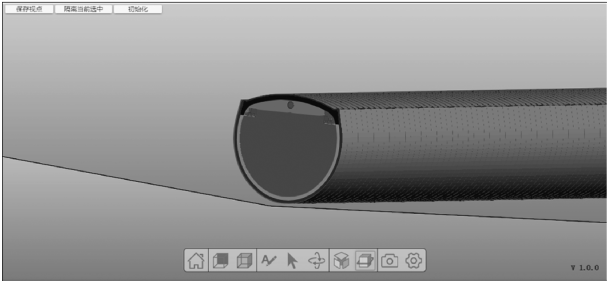


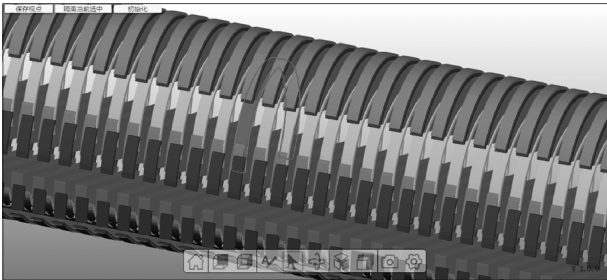
图 6 八达岭隧道模型 Web 浏览器展示
Fig.6 Badaling tunnel model displayed on Web browser



(a) 模型与用户操作界面的交互



(b) 三维模型剖切



(c) 模型爆炸图



(d) 模型标注

图 7 模型交互操作
Fig.7 Model interacting

4 结论

1) 通过 BIM 模型设计软件二次开发并集成 HOOPS Exchange 组件实现的源模型文件的轻量化转换,解决了源模型文件格式不统一的问题,并且减小了模型的体量,有利于 BIM 模型的传播和共享.

2) 基于 HOOPS 技术研发出一套 BIM 图形引擎,实现了 BIM 模型的展示和丰富的交互操作功能.

3) 提出了基于云渲染技术的大体量模型浏览器

展示解决方案,并研发出一套云渲染引擎,实现了大体量模型浏览器展示和交互操作。目前云渲染引擎已应用于北京至张家口铁路工程 BIM 管理平台、铁路工程信息模型库管理系统等多个大型 BIM 应用系统中。

在今后的工作中,拟将云渲染引擎与 ActiveX、WebGL 等技术结合,当展示大体量模型时使用服务端的硬件资源进行图形渲染,当模型体量较小且无法获取稳定的网络连接时,使用户终端设备硬件资源进行图形渲染,确保 BIM 应用系统能够适应多种复杂的现场环境。

参考文献(References):

[1] 徐萍飞,熊峰,夏伟杰,等.基于 BIM 的桥梁信息集成管理系统研究[J].施工技术,2016,45(12):119—123.
XU Pingfei, XIONG Feng, XIA Weijie, et al. Research on BIM-based information integrated management system for bridge[J]. Construction Technology, 2016, 45(12):119—123. (in Chinese)

[2] 叶帅,游有鹏,邢永彦.基于 OpenGL 的三维模型交互控制研究[J].机械设计与制造工程,2015,44(1):15—18.
YE Shuai, YOU Youpeng, XING Yongyan. Study on the interactive control of three-dimensional models based on OpenGL[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2015, 44(1):15—18. (in Chinese)

[3] 靳柯.图形引擎若干重要技术的研究[D].长春:吉林大学,2011.
JIN Ke. Research some important technologies of graphics engine[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)

[4] 颜家勇,周莹皓,乐毅,等.基于三维研制模式的设计模型跨平台转换技术[J].航天制造技术,2017(3):58—62.
YAN Jiayong, ZHOU Yinghao, YUE Yi, et al. Technology of design modeling exchange between different CAD/CAM platforms based on full three-dimensional manufacturing mode [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2017(3):58—62. (in Chinese)

[5] 罗东.三维模型表现形式转换技术及存储格式定义的研究与实现[D].西安:西北大学,2010.
LUO Dong. Conversion technology of three-dimensional models' representation and the custom storage format [D]. Xi'an: Xibei University, 2010. (in Chinese)

[6] 罗年猛.面向 Web 的 CAD 模型跨平台显示浏览系统研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
LUO Nianmeng. Research of web-oriented CAD model cross-platform display system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[7] 王磊,高珏,金野,等.基于 Web3D 无插件的三维模型展示的研究[J].计算机技术与发展,2015,25(4):217—220.
WANG Lei, GAO Jue, JIN Ye, et al. Research on three-dimensional model display based on Web3D without plug-in [J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(4):217—220. (in Chinese)

[8] 赵韩,曾文萱,黄方毅,等.基于 Web 的三维模型库系统的研究与开发[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2005,28(11):1384—1388.
ZHAO Han, ZENG Wenxuan, HUANG Fangyi, et al. Development of the web-based model library system of 3D machine parts [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2005, 28(11):1384—1388. (in Chinese)

[9] 郑华,宿景芳.面向 Web 的三维模型生成与处理技术[J].现代电子技术,2015,38(24):83—86.
ZHENG Hua, SU Jingfang. Web-oriented 3D model generation and processing technology [J]. Modern Electronics Technique, 2015, 38(24):83—86. (in Chinese)

[10] JEZEMIK A, HREN G. A solution to integrate computer aided design (CAD) and virtual reality (VR) databases in design and manufacturing processes [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003(22):768—774.

[11] GHOSH S, BHANDARI Y, GROEBER M. CAD-based reconstruction of 3D polycrystalline alloy microstructures from FIB generated serial sections [J]. Computer-Aided Design, 2008, 40(3):293—310.

[12] 蓝朝桢,周杨,徐青.数字城市 3 维景观 Web 发布系统模型的设计与实现[J].测绘学院学报,2003,20(3):190—197.
LAN Chaozhen, ZHOU Yang, XU Qing. Design and realization of a system model for the expression of cyber city 3-D scenic on Web [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2003, 20(3):190—197. (in Chinese)