

基于虚拟现实的截流施工动态可视化仿真研究

佟大威

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300072)

[摘要] 利用虚拟现实和3dsmax技术进行了截流施工场景三维仿真建模,并在此基础上,结合龙口水力指标的动态计算,提出了基于虚拟现实的截流施工三维动态可视化仿真技术,实现了截流过程的逼真预演和多方案的比较分析,从而为截流组织设计与决策提供了强有力的可视化分析手段。

[关键词] 虚拟现实;截流;三维动态;可视化仿真

[中图分类号] TV551.2 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)12-0080-04

1 前言

在大江大河上进行截流施工是一项艰巨复杂的系统工程,涉及到大量数据和图形信息,如坝区的水文、地形、地质状况以及枢纽建筑物、施工场地和截流方案设计,使得截流施工组织设计和管理往往面临巨大的困难。如何直观、科学地描述这一不断动态变化的过程,把截流过程中涉及的龙口水力特征指标、工程施工实体间复杂时空逻辑关系等三维或多维的动态数据和信息,转化为可显示的逼真图形,并对这些信息进行高效便捷的管理,来辅助设计和支持决策,是提高施工组织设计效率和决策水平的难题及关键。目前,对截流的研究大多数强调龙口水力特征的分析,而很少考虑随龙口大小同步变化的截流戗堤动态形象、施工场地变化以及运输车辆的配置和管理等动态信息。现有的有关截流可视化仿真研究中,戴会超和田斌^[1,2]、蒋晗^[3]等较好地实现了截流施工布置的形象显示和截流过程的动态演示。钟登华^[4]利用GIS及可视化技术建立了截流施工三维动态数字模型,结合龙口水力指标的动态分析,实现了不同截流方案下截流过程的三维动态可视化仿真及信息查询。然而,水利水电工程截流设计和施工不仅仅是主体工程戗堤的施工,与之相

关的备料场地、道路布置、车辆运输管理等也非常重要,而以往的截流可视化研究注重反映戗堤的施工过程及相应的水力信息,难以使人们对工程有总体全局的把握,无法对工程设计方案进行全面的比较分析。笔者针对水利水电工程截流施工系统的复杂性,基于虚拟现实技术和3dsmax技术,进行三维数字建模、物理系统和动态行为的模拟,展现出具有真实感的、可实时交互的、包括戗堤、备料场地、运输车辆的截流施工整体场景,并将截流仿真计算结果信息与图形紧密结合起来,为水电站截流的设计、管理提供一种全新的环境,为决策者提供更科学、直观的依据。

2 虚拟现实技术概述

虚拟现实(virtual reality, VR)是信息科学领域一类新兴的工程技术,是在计算机图形学、计算机仿真、传感技术和多媒体技术、网络通信、面向对象技术和智能决策支持系统的基础上发展起来的一门交叉学科,提供了一种全新的人机交互方式,用户可以通过它以自然的方式与虚拟世界中的对象进行交互操作。

水利水电工程设计和施工是一项非常复杂庞大的系统工程,传统的模型实验和二维设计成果直观

[收稿日期] 2011-09-16

[基金项目] 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51021004);“十二五”国家科技支撑计划重大资助项目(2011BAB10B06)

[作者简介] 佟大威(1982—),男,山西交城县人,天津大学博士研究生,主要研究方向为水利水电;E-mail: tongdw@tju.edu.cn

性不强、真实感较差,将 VR 技术引入到水利水电工程设计和管理中,制造出逼真的造型和场景,可使设计者具有身临其境的感觉,从而充分发挥人的认识能力和主观能动性,提高工作效率和决策能力^[5-7]。

水利水电工程虚拟现实技术是以水利水电工程的勘测、规划、设计、施工、运行管理为对象,建立贯穿方案论证、协同设计、工程进度控制、运行管理全过程的可实时显示的可视化仿真系统,使项目参与各方都能在此环境中直观清晰地看到该项目过程的整体或局部、动态或静态、历史的或现实的,以及将来的真实场景,提出自己的意见要求,并可进行各类信息查询。其主要表现在:a. 在计算机中真实的表现水利水电工程将要形成的整体面貌;b. 在虚拟环境中实现水利水电工程设计多专业的协调和合作;c. 为工程建成后的运行管理提供三维可视化平台;d. 为水利工程的宣传汇报提供一个良好的展示平台。

3 截流施工仿真 VR 建模

截流施工仿真 VR 系统可以分为两大模块:截流施工仿真模块和可视化模块,两个模块作为单独的进程实现,采用进程间通信交换数据。对于截流施工仿真模块,作为离散性系统,运用系统工程的方法,建立截流水力学动态仿真模型,对整个截流施工过程进行仿真计算,求得施工过程各时期的戽堤进占情况和龙口水力学特征。可视化模块将仿真计算的结果利用 VR 和 3dsmax 技术形象逼真的显示出来,并可进行信息查询与动态分析。如图 1 所示,建立了截流施工的仿真模块与可视化模块。

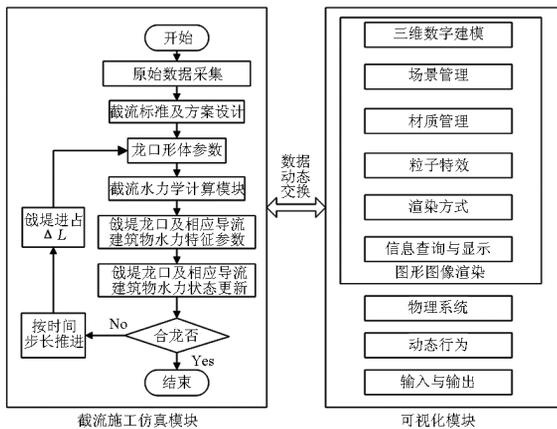


图 1 截流施工仿真 VR 系统建模

Fig. 1 Virtual reality system modeling for construction simulation of river closure

4 截流水力学动态仿真分析

对工程设计人员而言,在截流方案设计时最为关心的是龙口处水流状况。截流可视化仿真正是通过分析截流过程中龙口处各水力参数的变化情况,逼真形象地反映随戽堤进占截流的三维动态面貌及相应信息。在截流过程中,随着戽堤进占,龙口处的水力特征指标是不断变化的,可用试算法确定不同龙口宽度 B 下的龙口水力指标,包括龙口流量、平均流速、落差、抛投料粒径及单宽功率等^[8]。

1) 龙口流量

$$Q = \sigma_s m \bar{B} (2g)^{\frac{1}{2}} (H_1 - H_d)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式(1)中, σ_s 为淹没系数; m 为龙口流量系数; \bar{B} 为龙口平均过水宽度, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; H_1 为上游水位, m ; H_d 为戽堤底高程, m 。

2) 龙口平均流速

$$v = \frac{Q}{Bh} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{cases} h = H_2 - H_d, (H_2 \text{ 为下游水位}), \\ \text{龙口为淹没流} \\ h = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \\ (\alpha = 1.0, g = 9.8, q = \frac{Q}{B}), \\ \text{龙口为非淹没流} \end{cases}$$

3) 落差

$$\Delta h = H_1 - H_2 \quad (3)$$

4) 抛投粒径

$$d = \frac{\gamma_w}{2g(\gamma_m - \gamma_w)} \cdot \left[\frac{v}{k_m} \right]^2 \quad (4)$$

式(4)中, γ_w 、 γ_m 分别为水和抛投料的容重; k_m 为抛投料的伊兹巴什稳定系数。

5) 龙口单宽功率

$$N = \gamma_w \frac{Q}{B} \Delta h \quad (5)$$

随着戽堤进占,龙口宽度 B 的不断变化,即 $B = f_B(V(t))$,进占段体积 $V(t) = \eta Pt$, P 为由施工机械的运输能力决定的平均抛投强度, η 为损耗系数, t 为截流历时。而龙口断面面积 S 及底板高程 H_d 也随之变化,即有 $S = f_s(B)$, $H_d = f_h(B)$ 。假定龙口戽堤匀速推进,推进步长为 ΔL ,仿真中通过自动获取 B 、 S 及 H_d ,并调用截流水力学计算模块,可动态

地计算和分析龙口处的各项水力指标。

5 基于 VR 的截流过程三维动态可视化

5.1 截流施工场景的三维数字建模

三维数字建模属于几何建模,是基于几何信息来描述物体对象的建模方法。数字模型一般分为面模型与体模型,面模型用三角形面片来表现对象的表面,体模型用体素来描述对象的结构。表现截流施工场景的三维数字模型主要包括数字地形模型、场地道路开挖模型和水工建筑物模型等^[9]。

1) 数字地形模型。数字地形模型(digital terrain model, DTM)是工程动态可视化仿真的重要组成部分,所有的工程对象布置和施工都在其上面进行。DTM 的表达形式可以是不规则三角网(TIN)模型、NURBS 曲面、三维网格面和三维实体等。TIN 模型是由分散的地形点按照一定的规则构成一系列不相交的三角形组成,它能充分表现地形高程变化细节,适用于地形起伏较大的山区。一般水利水电工程所处的地表地形较为复杂,适合采用 TIN 模型来建立工程地表 DTM^[10]。

2) 场地道路开挖模型。场地和道路边坡的填筑体和开挖体在 AutoCAD 或 3DSMAX 中建立与地形格式一致的网格或实体模型,通过与地形进行布尔操作,可得出场地在地形上的分布,同时相应地得到工程量等信息。

3) 水工建筑物模型。水工建筑物可以通过参数化建模实现,所有的建筑物模型都有对应的时间属性,通过控制其随着时间的形象面貌变化情况来表达施工过程。

5.2 物理系统建模

物理建模^[11]是在几何建模的基础上,考虑对象的物理属性,引入质量、力、惯性等物理量,以弥补纯几何建模的不足,增强了仿真的真实感。Reactor 技术和粒子系统是典型的物理建模方法。Reactor 技术通过给对象加入简单物理力学参数,可以近似模拟物体在真实环境下的受力行为。粒子系统是由大量称为粒子的简单体素构成,每个粒子具有位置、速度、颜色和生命期等属性,通过这些简单体素构造实现复杂运动的建模,如火焰、水流、雨雪等现象^[12,13]。在截流施工仿真场景物理建模中,Reactor 技术主要用于模拟抛投料施工过程,粒子系统的应用包括龙口水流、雨雾天气、挖掘机的粉尘等。

5.3 动态行为建模

几何建模与物理建模相结合,可以部分实现真

实施工场景“看起来真实、动起来真实”的特征,而要构造一个能够逼真地模拟现实世界的真实施工场景,必须采用行为建模方法。行为建模就是在创建模型的同时,不仅赋予模型外形、质感等表现特征,同时也赋予模型物理属性和“与生俱来”的行为与反应能力,并且服从一定的客观规律。

虚拟现实一个很重要的特征就是实现模型的交互控制,这一控制主要是对模型行为的控制,故模型的动态行为建模就显得非常重要了,它是模型实时交互与控制的基础。如通过关键帧法或样条驱动画法建立运输汽车的装载、运输、抛投料和排队等动作行为后,才可以通过仿真逻辑来控制运输汽车的动作,或者由用户通过鼠标键盘等输入设备来实时控制运输汽车的行为。

5.4 模型拾取与操作

三维模型的拾取与操作是交互式系统的重要组成部分。用户在系统场景漫游的过程中,希望通过拾取某个模型,可以查询此模型对象所包含的各种信息,或对其进行基本的操作如平移、旋转、缩放。其中模型的拾取是实现的难点,一旦正确的拾取了所需的模型,再根据面向对象的思想调用模型相应的属性即可实现模型的反馈。比如拾取了截流施工中的备料场地,通过调用该模型类的相关属性如场地位置、与上下游围堰运距、备料方量等,从而实现了场景中三维模型信息的实时交互查询。图 2 所示为截流施工场景模型信息的触发式查询。



图 2 场景模型信息查询

Fig. 2 Information query for scene model

三维模型的拾取主要是在基于 OpenGL 的选择模式基础上,再构造一些图形学算法而实现的。其中 OpenGL 的选择模式是其实现的主要机制。在 OpenGL 下拾取模型的部分程序框架代码如下:

```
void CPDCView::OnLButtonDown (UINT nFlags, CPoint point)
/* 响应鼠标左键单击消息来拾取模型 */
{
    glSelectBuffer(); /* 指定存储选中模型记录的数组 */
    glRenderMode( GL_SELECT ); /* 进入选择模式 */
```

```

glInitNames();          /* 初始化名称堆栈 */
glPushName();          /* 向名称堆栈压入一个名称 */
glMatrixMode(GL_PROJECTION);
glPushMatrix();
glLoadIdentity();
gluPickMatrix(x, (viewport[3] - y), width, length, viewport);
gluFrustum(); /* 定义有效拾取区域和选择待定实体 */
.....

```

6 工程应用

西南某水电站施工采用分期导截流方式,一期施工左岸,由右侧束窄后的主河床泄流,二期施工右岸,由左岸坝体内预留的6个导流底孔及缺口泄流。二期截流采用从右至左单向立堵进占的截流方式,龙口位置设于河床中部偏左岸,预进占以右岸为主,左岸为辅,经数字化后建立的三维截流布置模型如图3所示。截流流量采用12月中旬十年一遇的旬平均流量 $2\ 600\text{ m}^3/\text{s}$ 。考虑施工机械配备及抛投料运输情况,戗堤龙口段的平均抛投强度为 $937\text{ m}^3/\text{h}$,截流历时约为36 h。对上述截流方案进行动态可视化仿真分析,得到了不同龙口宽度下的龙口水力信息及截流三维形象。图4所示为龙口宽20 m时典型时刻的截流面貌与信息。

当然,通过改变截流方案,运用本文方法,可以方便地进行多方案的比较与分析,进而辅助截流设计与决策。



图3 某工程截流布置三维数字模型

Fig.3 3D digital model for river closure layout

7 结语

利用虚拟现实技术和3dsmax技术进行了截流三维数字模型、物理系统和动态行为建模,提出了基于虚拟现实的截流施工三维动态可视化仿真技术,把施工截流这样一个复杂的动态过程用直观的方式



图4 龙口宽20 m时的截流面貌及信息

Fig.4 River closure scene and information at the closure-gap width of 20 m

描述出来。实例应用表明,该方法为实现截流方案的直观分析与比较提供了一个强有力的可视化分析手段,从而大大提高了施工截流设计与管理的现代化水平。

参考文献

- [1] 戴会超,田 斌.三峡工程大江截流施工过程三维仿真研究及应用[J].长江科学院院报,1998(1):11-47.
- [2] 蔡宜洲,孟永东,田 斌,等.三峡工程三期截流三维施工仿真研究[J].湖北水力发电,2003(3):11-14.
- [3] 蒋 晗,刘德富,王炎廷.导截流工程施工的计算机三维仿真技术[J].武汉水利电力大学(宜昌)学报,1998,20(3):20-23.
- [4] 刘东海,钟登华,郑家祥.数字化截流及其三维动态可视化仿真[J].天津大学学报,2004,37(4):298-302.
- [5] 唐文惠.VR技术及其在水电工程中的应用[J].水利水电科技进展,2001,21(4):17-20.
- [6] 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.
- [7] 黄少华,张德文,李小帅.虚拟现实技术在水利工程仿真中的应用[J].人民长江,2006,37(5):36-38.
- [8] 钟登华,郑家祥,刘东海.可视化仿真及其应用[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [9] 钟登华,周 锐,刘东海.水利水电工程施工系统三维建模与仿真[J].计算机仿真,2003,20(2):86-91.
- [10] Victor J D. Delaunay triangulation in TIN creations; an overview and a linear time algorithm [J]. International Journal of Geographical Information System, 1993, 7(6): 501-524.
- [11] 杨克俭,刘舒燕,陈定方.虚拟现实中的建模方法[J].武汉工业大学学报,2001,23(6):47-50.
- [12] 刘晓波,王 柏,鲍家元.粒子系统模拟自然景物的探讨[J].西北大学学报(自然科学版),1995,25(1):71-74.
- [13] 刘东海,崔广涛,彭文怀.虚拟高坝泄洪挑流运动的建模与实现[J].系统仿真学报,2007,19(9):1996-1999.

(下转90页)