

# 基于虚拟现实技术的钻井仿真系统设计

王武礼, 王延江, 李瑞民

(中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院, 山东 东营 257061)

**摘 要:**针对基于三维动画和 OpenGL 技术的钻井仿真系统存在画面沉浸感不强、交互性差等不足, 开发了基于虚拟现实技术钻井仿真系统。在对钻井过程进行数学建模的基础上, 设计了模型计算软件, 该软件逼真地再现了钻井现场参数的变化情况。利用 3D MAX 建模软件构建了复杂的钻井设备模型, 并在 Virtools 平台下利用行为模块控制各模型独立的运动, 实现了动态的钻井虚拟场景。该场景在硬件平台的配合下, 能够逼真地再现钻进、起下钻、接单根、上扣、卸扣等几十种钻井工艺流程。该系统的实现为油田安全作业的培训提供了一条新的途径, 具有一定推广价值。

**关键词:**虚拟现实; 钻井仿真系统; 数学建模; Virtools; 动态场景

中图分类号: TP319

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2011)09-0171-04

## Design of Drilling Simulation Training System Based on Virtual Reality

WANG Wu-li, WANG Yan-jiang, LI Rui-min

(College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum, Dongying 257061, China)

**Abstract:** Because the drilling simulation system based on 3D animation and OpenGL technology has not strong immersion and good interaction, a drilling simulation system based on virtual reality technology was developed. The model calculation software was designed on the basis of mathematical modeling to process of drilling, which can realistically reflect the changes of parameters in drilling field. Dynamic drilling virtual scene was realized by constructing a complex drilling equipment model with 3D MAX software and using behavior block control independent movement of each model in Virtools platform. In the hardware platform coordination, this scene can simulate all kinds of drilling operation process vividly, such as drilling, tripping, making a connection, screwing on, screwing off and so on. The realization of the system provides a new way for the training of oil-fixed safety task operation, has certain value to spread.

**Key words:** virtual reality; drilling simulation system; mathematical modeling; Virtools; dynamic scene

## 0 引言

钻井过程中可能会遇到各种各样的问题, 特别是井涌, 如控制不当, 则有可能发展为井喷, 造成严重的钻井事故。为使钻井工程技术人员和现场操作人员熟练掌握钻井过程及井内发生异常情况后的处理过程, 优质安全快速的钻井, 则需开发钻井仿真系统对其进行训练。仿真系统的视景显示是系统最关键的一部分, 其逼真程度和实时交互性则直接影响着钻井工人后续的操作, 乃至整个系统的训练效果。随着对培训要求的不断提高, 以 3D 动画作为三维虚拟场景的培训系统不断显露出不足, 如操作过程不灵活, 场景画面固定, 场景不能随时根据硬件操作台的动作灵活变化。

针对这种需求, 开发了基于虚拟现实技术的钻井仿真系统, 其主要思想是采用虚拟现实技术在计算机中生成逼真的虚拟环境, 用户通过硬件平台自然地与虚拟环境中的客体进行实时交互, 相互影响, 形成动态的虚拟场景, 产生亲临现场的感受和体验<sup>[1-4]</sup>, 弥补了原有场景不能根据硬件操作台灵活变化的不足。

## 1 钻井仿真系统总体结构及工作原理

### 1.1 系统结构

钻井仿真系统是一套基于虚拟现实、计算机仿真、电子电路、传感器技术、计算机网络以及多媒体技术, 对石油钻井过程进行模拟的仿真训练系统, 能够实现正常钻进、起下钻具、井涌关井、压井及钻井事故处理等过程的模拟培训。该系统由硬件仿真操作台、OPTO 数据采集、数学模型计算、视景显示及仪表显示输出等部分组成, 整个系统加上接受培训的钻井工人形成一个闭环, 其总体结构如图 1 所示。

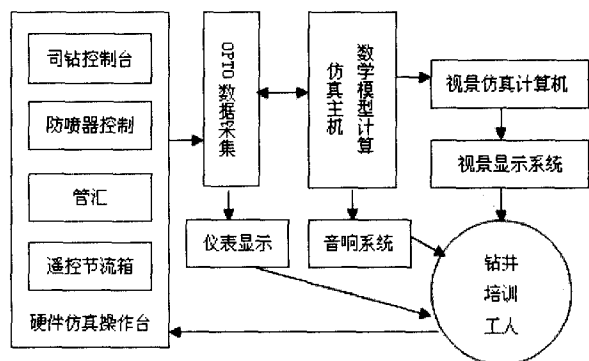
收稿日期: 2011-02-28; 修回日期: 2011-06-03

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2009FL029)

作者简介: 王武礼(1978-), 男, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为虚拟现实、计算机测控与仿真; 王延江, 博士, 教授, 博导, 研究方向为智能信息处理、模式识别及其在钻井、石油勘探开发中的应用。

## 1.2 系统工作原理

系统启动后,设定好仿真井的参数,钻井工人便可对硬件操作台上的按钮、调速旋钮等器件进行操作,产生相应的控制信号。OPTO 数据采集系统不断采集各设备的控制信号,通过以太网传给仿真主机,经过数据处理和模型计算后,得到训练操作过程相应的数据。其中一部分数据通过 OPTO 数据采集系统送给显示仪表进行显示;另一部分数据通过以太网传给视景显示系统,由视景显示系统根据接收到的数据控制虚拟井场中的 3D 设备模型平滑运动,生成相应的动态虚拟场景,反馈给钻井培训工人;同时仿真主机根据计算的



结果控制音响系统发出相应的声响。另外,系统运行过程中,教师和培训工人可查看钻井仿真设备的运行状况、钻井参数的变化情况以及重要参数的变化曲线。

图 1 钻井仿真系统的总体结构图

## 2 钻井过程的数学建模

钻井仿真是一个非常复杂的过程,涉及的数学模型较多,主要分为三类:一是专业的数学模型,如泥浆流速模型、机械钻速模型、泥浆流动阻力模型、钻头压力损耗模型、环空压力损耗模型、立管压力计算模型、套管压力计算模型、压井液密度计算模型等,系统中对这些专业数学模型的处理原则是在不影响仿真效果的前提下,对其进行简化和改进;二是利用已有知识进行推导的数学模型,如压井时节流阀开度与套管压力之间的关系模型及井涌的动态模型;三是操作器件动作效果数学模型,如刹把操作模型及辅助刹把操作模型。限于篇幅关系,仅对每类模型中的一个进行描述。

### 2.1 专业数学模型—机械钻速模型

利用进尺对时间的微分,将机械钻速模型描述如下<sup>[5]</sup>:

$$v_{pe} = \frac{dy}{dt} = \frac{131.27}{(5.5076)^d \times 60^{\lambda} \times (10.26)^f} \times W_s^d \times n_r^{\lambda} \times HP_e^f \times e\Delta\rho_d(\rho_d - 1.15) \quad (1)$$

$$HP_e = 3P_{bs} \times \frac{d_1^4 + d_2^4 + d_3^4}{(d_1^2 + d_2^2 + d_3^2)^2} \quad (2)$$

式中,  $v_{pe}$ —机械钻速;  $d$ —钻压指数  $(0.5366 + 0.1993k_d)$ ;  $k_d$ —岩石可钻性级值;  $\lambda$ —转速指数  $(0.9250 - 0.0375k_d)$ ;  $f$ —地层水力指数  $(0.7011 - 0.05682k_d)$ ;  $W_s$ —单位钻头直径钻压,  $\text{KN/mm}$ ;  $n_r$ —转速,  $\text{r/min}$ ;  $HP_e$ —喷嘴等效比水功率,  $\text{W/mm}^2$ ;  $\Delta\rho_d$ —钻井液密度差系数  $(0.97673k_d - 7.2703)$ ;  $\rho_d$ —钻井液密度,  $\text{g/cm}^3$ ;  $P_{bs}$ —钻头比水功率,  $\text{W/mm}^2$ ;  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$  分别为钻头喷嘴直径,  $\text{mm}$ 。

仿真过程中,岩石可钻性级值  $k_d$  可根据地层情况设置不同的数值,以反映不同地层下的机械钻速。

### 2.2 推导数学模型—套管压力模型

压井时,随着重泥浆在钻杆内的量越来越大,钻杆内由于液体本身产生的静液压力也越来越大,在重泥浆没有达到钻头时,环空内的静液压力不变,根据连通器的原理,环空内的套管压力就会不断增大,为防止套管压力超过最大关井套管压力,压裂地层,就需要通过调节节流阀的开度来改变套管压力的大小。由于节流阀开度与井口套压之间没有现成的数学模型,所以这里运用连续性方程和伯努利方程<sup>[6]</sup>进行推导得出。节流阀内部结构示意图如图 2 所示。

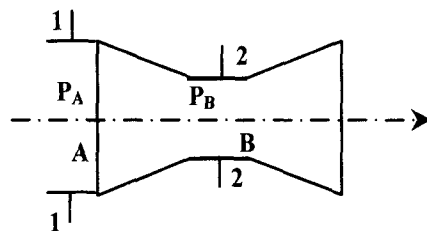


图 2 节流阀内部结构

假设节流阀水平放置,井口泥浆流量为  $Q_m$ , 密度为  $\rho_m$ , 不考虑能量损失,也不考虑两断面处的动能修正系数,则总流的 1-1 及 2-2 两个缓变流断面的伯努利方程为

$$z_1 + \frac{P_A}{\rho_m g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_B}{\rho_m g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (3)$$

由于节流阀是水平放置的,所以比位能  $z_1 = z_2$ , 根据连续性方程

$$v_1 \times A = v_2 \times B = Q_m \quad (4)$$

$$\text{则 } P_a = P_A - P_B = \rho_m Q_m^2 \left( \frac{1}{B^2} - \frac{1}{A^2} \right) / 2 \quad (5)$$

其中,  $P_a$ —套管压力;  $P_A$ 、 $P_B$ —断面处流体的压力;  $v_1$ 、 $v_2$ —断面处流体速度;  $Q_m$ —泥浆流量;  $\rho_m$ —泥浆密度;  $A$ —节流管汇横截面面积;  $B$ —节流阀横截面面积,即节流阀开度。

### 2.3 器件动作效果模型—刹把作用模型

刹把的作用是产生一个摩擦力,用来阻止钻具在井内的上下运动。仿真系统中将刹把的作用考虑成一个在 0~1 之间连续变化的模拟量,即当刹把完全压下

时,其作用为1,表示盘刹片将绞车完全刹住,钻具停止运动;当刹把完全抬起时,其作用为0,表示将盘刹片完全松开,钻具做自由落体运动;当刹把处于自然状态时,将其作用词整为0.5,即刹把处于自然状态时,具有一定的刹车能力,更符合实际情况。刹把作用模型描述如下:

$$\text{Break} = 0.5 + (V - 2.5) \times 0.2 \quad (6)$$

式中,Break—刹把作用(0~1);V—刹把状态(0~5,完全压下时为5,完全抬起时为0)

### 3 模型计算软件的实现

模型计算软件的功能主要是根据预先设置的仿真井参数及来自硬件操作台的控制信号,利用建立的数学模型动态计算钻井过程中的一些重要参数,并将计算的结果提供给显示仪表进行显示,同时与操作台的控制信号一起作为三维场景变化的命令。该软件由系统管理、参数设置、硬件平台通信、视景通信、训练项目选择、仿真运算、故障设置、训练评价、学员管理、声响控制、参数显示、压井曲线实时显示、打印以及帮助等模块组成,其运行流程如图3所示。

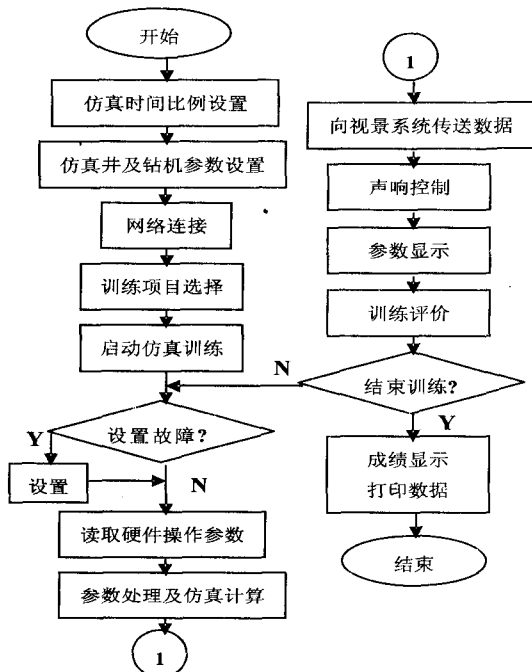


图3 模型计算软件运行流程

### 4 钻井三维虚拟场景的实现

虚拟场景是整个仿真系统的重要组成部分,其任务是根据操作台的控制信号,对虚拟环境中各种钻井设备的三维模型进行实时控制,实现司钻视角下井场设备运行情况的视景仿真。该场景是在 Virtools 平台下开发的, Virtools 是目前比较流行的虚拟现实开发工具,其三维引擎已经成为微软 XBox 认可系统,是由法

国全球交互三维开发解决方案公司 VIRTOOLS 所开发<sup>[7]</sup>。Virtools 4.0 版本具有 450 多个行为交互模块 (Building Blocks, 简称 BB), 只需利用鼠标将 BB 添加到相应的对象或虚拟角色上,再使用流程图来确定 BB 的处理顺序,就可实现一个完整的交互式虚拟世界<sup>[8-11]</sup>。钻井三维虚拟场景的开发分为以下三个步骤:钻井设备三维模型的创建;三维模型的导入;Virtools 平台下三维模型的控制。

#### 4.1 钻井设备三维模型的创建

钻井设备三维模型的创建是设计虚拟钻井场景的基础,模型创建的好坏直接关系到虚拟场景的逼真度。由于 Virtools 平台中没有建模工具,所以在建模阶段采用功能强大、方法丰富并可直接与 Virtools 平台实现无缝接合的专业建模软件 3D MAX<sup>[12]</sup>对钻井设备进行建模。主要采用 3D MAX 中的几何建模技术,如点、直线、多边形图形、曲线和曲面方程等方法对钻井设备进行建模。为了降低场景中实时渲染的复杂度,根据场景中对不同模型的质量要求不同,采用粗略建模和精细建模结合的方式,并将层次细节技术和纹理映射技术结合使用。

钻井虚拟场景中涉及的三维设备模型较多,主要包括井架、钻井平台、方钻杆、方补芯、大钩、游车、吊环、液压钳钻杆、水龙头、转盘、吊卡和卡瓦等,这里仅给出液压钳的三维透视图,如图4所示。

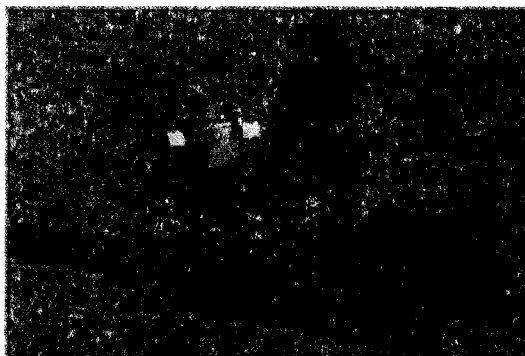


图4 液压钳的三维模型

#### 4.2 Virtools 平台三维模型的导入

为使 3D MAX 下创建的钻井设备模型和 Virtools 平台能完美结合,必须先利用 Max2Virtools 插件先将三维钻井模型保存为 NMO 格式的文件,并在 Virtools 平台下利用导入功能将其导入;然后在 Virtools 平台的视口中按照实际井场的布局对导入的 3D 模型的位置、方向和大小进行调整,同时还要添加必要的灯光、摄像机及背景贴图。这样 3D MAX 下钻井设备模型才能在 Virtools 平台下有机地组织在一起,形成一个逼真的三维场景。

#### 4.3 模型的运动控制

三维模型的运动是通过 Virtools 中内置的行为模

块来实现的,这些行为模块提供了各种基本、复杂的操作,如缩放、旋转、颜色变化、大小变化、三维贴图、光线变化、后退、行走和转向等。控制三维模型运动的具体步骤如下:

(1)先到 Data Resource 中选择 Animations 类中需要的动作,并利用鼠标将选择的动作行为添加到三维模型上;

(2)然后到相应的 Script 中编辑各个参数,实现对三维模型的运动控制。

#### 4.4 虚拟场景的实现

钻井三维虚拟场景是在硬件仿真控制台的配合下,利用 Virtools 平台下的行为模块控制大钩、吊环、水龙头、吊卡、卡瓦、液压大钳、转盘、游车和方钻杆等三维模型在虚拟钻井场景中有规律的运动,实现钻井现场环境的动态仿真。下面以正常钻进场景的实现为例,说明 Virtools 平台下钻井三维场景的实现过程。

##### 4.4.1 正常钻进场景的实现

正常钻进场景包括转盘旋转、钻进、上扣、卸扣、起钻等功能模块,下面分别介绍各模块的实现过程。

###### 1. 转盘旋转模块。

该模块主要是对转盘的旋转速度和方向进行控制,步骤如下:

(1)在转盘旋转 Script 中新增一个 Test BB,并编辑其相应的参数“转盘转动方向”,这里 1 表示转盘反转,0 表示转盘正转;

(2)新增一个 Multiply BB 与其他参数一起运算,其输出(即运算的结果)就是转盘的转速;

(3)添加两组 Rotate BB、Bezier Progression BB、Multiply BB 到转盘 Script,并编辑参数,构成转盘“正转”、“反转”两个 Behavior Graph,BG 的输入与 Test BB 和 Multiply BB 的输出相连,控制转盘的旋转方向和速度。

###### 2. 钻进模块。

该模块主要是对水龙头、水龙带、方钻杆、游车和大钩等设备模型的下放进行控制,步骤如下:

(1)在钻进 Script 中新增多个 Test BB 和 Get Position BB 构成一个 Behavior Graph,根据 BG 中的 Test BB 的条件,决定“是否钻进”;

(2)新增若干个 Add BB、Division BB 和 GetY BB 等运算模块,组成“速度控制”Behavior Graph,通过计算得到钻进的速度,输入给“钻进”BG;

(3)在 Script 中新增 Translate BB、Bezier Progression BB、Multiply BB 并编辑相应的参数,组成“钻进”Behavior Graph,这里 Translate BB 用来控制方钻杆、大钩、水龙头和游车等钻井三维模型下移。

###### 3. 起钻模块。

该模块主要是对场景中的水龙头、水龙带、方钻杆、游车和大钩等设备模型的上提及其速度进行控制,步骤如下:

(1)在 Script 中新增一个 Test BB,根据条件决定是否进行起钻;

(2)新增 Translate BB、Bezier Progression BB 和 Multiply BB 到 Script 中并编辑参数,用来控制钻具的上移;

(3)新建一个 Behavior Graph 用来控制起钻的速度,该 BG 的输入为硬件操作平台的“绞车”和“滚筒”参数,输出就是起钻速度。

###### 4. 上、卸扣模块。

该模块主要是对液压大钳的动作进行控制,如大钳移动到井口、大钳移动到小鼠洞、大钳复位、大钳上扣和大钳卸扣等。该模块接收硬件平台的消息,决定执行什么操作,其实现过程与前面各模块类似。

##### 4.4.2 正常钻进实例

基于虚拟现实的正常钻进场景如图 5 所示。该场景在硬件操作台的作用下,使得虚拟场景中的大钩、游车、转盘、方钻杆、卡瓦和大钩等三维模型连续、有规律地运动,逼真地再现出钻井现场的实际工艺流程,如正常钻进(边旋转边下移)、转盘正反转和转速连续可调、空转、上提钻具和上提速度连续可调,液压大钳的上扣、卸扣操作,卡瓦的上卡、去卡、接单根和对扣等操作过程。

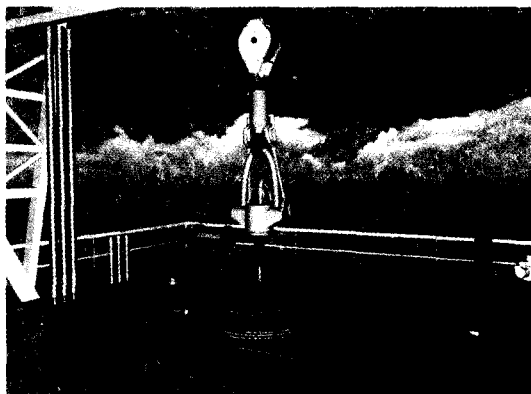


图 5 正常钻进场景

## 5 结束语

文中实现了一个基于虚拟现实技术的钻井仿真系统。钻井培训工人通过系统中的硬件操作台自然地与虚拟场景中的客体进行交互,形成生动逼真、灵活多变、可控性强的动态场景,真实地再现了正常钻进、起下钻具、井涌关井、压井以及钻井事故处理等三十多种钻井工艺流程。基于虚拟现实钻井仿真培训系统的实现为油田安全作业的培训提供了一条新的途径,具有一定推广价值。

(下转第 178 页)

语句本地的 Web 应用程序和异地的应用程序可以使用 SOAP 协议进行通信,通过调用 Web Service 的方法实现将远程的元数据集成到本地。

```
01. //创建 Web Service 的 proxy 对象
02. ws35_2. Service1 ss = new DrugAdmin. ws35_2.
Service1();
03. //调用远程 Web Service 的方法
04. DataGrid1. DataSource = dataFromWebService.
getMetaData();
```

### 3 应用实例

将上述数据仓库元数据集成技术应用于消防工程领域的一个实际数据仓库建设项目中,取得了较好的效果:

(1) 该技术以 Web Service 技术为应用框架,以 CWM 为元数据模型,采用 XML 设计元数据封装器,实现了真正意义上的异地、异构元数据的集成与重用;

(2) 通过 Web 方法增加与修改,可以便捷地扩充系统对各类元数据的集成能力,满足了软件扩展性的要求;

(3) 与传统元数据集成方法相比,通过元数据包装器屏蔽了不同企业数据源的差异,为在不同数据源之上构建数据仓库奠定了基础。

### 4 结束语

文中在对目前元数据集成技术进行综合分析的基础上,提出了一种基于 SOA 架构的数据仓库元数据集成技术,并详细讨论了实现的关键技术。采用该技术

实现了分布环境下数据仓库元数据的集成与重用。

#### 参考文献:

- [1] 聂 茹,张 虹. 数据仓库元数据管理模式的分析与比较[J]. 计算机应用研究,2005(2):57-58.
- [2] 张英朝,邓 苏,张维明. 数据仓库元数据管理研究[J]. 计算机工程,2003,29(1):8-10.
- [3] 谢福成,王备战,史 亮,等. 基于银行数据仓库的元数据管理系统[J]. 计算机工程,2009,35(9):79-81.
- [4] Sen A. Metadata management: past, present and future[J]. Decision Support Systems,2004,37(1):151-173.
- [5] 戴超凡,刘青宝,黄宏斌,等. 数据仓库中的元数据管理[J]. 计算机工程与科学,2003,25(4):54-57.
- [6] 王裕明,吴 忠. 商务智能中元数据管理模型研究[J]. 计算机应用与软件,2005,22(8):34-35.
- [7] 李姗姗,宁 洪,彭绍亮. 基于 CWM 的元数据管理系统中数据交换格式的研究[J]. 计算机工程与应用,2004(14):192-195.
- [8] Thiru T, Greggl W, Jacquell G, et al. Metadata Management: the Foundation for Enterprise Information Integration[J]. Intel Technology Journal,2004,8(4):337-344.
- [9] Tseng F S C, Chen Chia-Wei. Integrating heterogeneous data warehouses using XML technologies[J]. Journal of Information Science,2005,31(3):209-229.
- [10] 周爱武,李孙长. 基于 Web 服务数据集成框架的设计与应用[J]. 计算机技术与发展,2010,20(11):246-248.
- [11] 先晓兵. 基于 Web Service 的外贸业务智能决策系统[J]. 微机发展(现更名:计算机技术与发展),2005,15(4):51-53.
- [12] 钟 路,张开松,江 琼. Web Service 技术在数据仓库系统中的应用[J]. 武汉理工大学学报,2004,26(8):74-76.

(上接第 174 页)

#### 参考文献:

- [1] 王 炜,包卫东,张茂军,等. 虚拟仿真系统导论[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2007.
- [2] 肖 甫,王汝传,孙力娟. 多关联性虚拟现实系统的设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2009,19(12):36-39.
- [3] 赵 伟,穆志纯,张 玉. 基于虚拟现实的轧钢实时仿真训练系统[J]. 系统仿真学报,2006,18(4):909-912.
- [4] 郑 坚,关正西. 虚拟现实系统中的视景仿真研究[J]. 微机发展(现更名:计算机技术与发展),2003,13(9):18-21.
- [5] 赵金洲,张桂林. 钻井工程技术手册[M]. 北京:中国石化出版社,2005.
- [6] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社,2006.
- [7] 刘明昆. 三维游戏设计师宝典—Virtools 行为模块词典大全[M]. 成都:四川电子音像出版社,2005.
- [8] 张雪鹏,陈国华,戴莺莺. 基于 3D 的虚拟运动仿真平台设计及 Virtools 功能实现[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2009,36(4):93-95.
- [9] Teng Yingyan, Zheng Junsheng, Gao Zhijun. Design and Implementation of Interactive 3D Scenes Based on Virtools[C]//2009 International Forum on Computer Science-Technology and Applications. Dalian, China: [s. n.], 2009:87-89.
- [10] Li Xunxiang, Li Anding, Chen Dingfang. Research on Distributed Multi-Screen Display Technique Based on Virtools[C]//Proceedings of 7th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design. [s. l.]:IEEE Press,2006:756-761.
- [11] Li Jizu, Zhang Shaohong. Application of Virtual Reality Technologies to the Simulation of Coal Miners' Safety Behaviors[C]//Open-source Software for Scientific Computation(OS-SC). Guiyang, China: [s. n.], 2009:60-62.
- [12] 王 瑶. 3ds Max 2008 完全手册—建模篇[M]. 北京:科学出版社,2008.