

油田钻井虚拟仿真系统^①

刘贤梅, 高 飞

(东北石油大学 计算机与信息技术学院, 大庆 163318)

摘 要: 利用计算机仿真技术, 研究构建一个参数化的油田钻井虚拟仿真系统, 对虚拟设备进行参数化的运动控制, 逼真地模拟钻井工艺过程。提出了基于数字计算仿真和视景仿真混合技术的虚拟仿真系统架构, 分析并建立了井架提升系统和旋转钻进系统的数学模型, 利用数学模型控制虚拟钻井设备运动, 实现了对缠绕在滑轮组上钢丝绳的实时变形运动控制。最后, 能够初始化系统参数、实时显示并控制钻井工艺过程中参数的变化, 实现系统的交互性。

关键词: 虚拟仿真; 钻井工程; 参数化控制; 数学模型; 变形动画

Oil-Field Drilling Virtual Simulation System

LIU Xian-Mei, GAO Fei

(College of Computer & Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: Based on computer simulation technology, parametric oil-field drilling virtual simulation system is created. The motion of virtual equipments is controlled by parameters to simulate the drilling processes realistically. The development framework of virtual simulation system based on numerical simulation technology and visual simulation technology is proposed. The mathematical models of hoisting system and rotating system are analyzed and formed to control the motion of virtual equipments. Furthermore, real-time deformable simulation of a rope passing through several pulleys is achieved. Finally, to realize the interaction of the system, initializing of the system parameters, displaying and controlling of the drilling process parameters in real-time are achieved.

Key words: virtual simulation; drilling engineering; parametric control; mathematical model; deform animation

随着仿真技术的飞速发展, 仿真技术的应用越来越多样化和全面化, 其在石油工业中的应用也越来越广泛, 发挥着极大的作用, 产生了极好的效果^[1]。针对不同仿真技术的特点, 应用在石油工业中的仿真技术主要分为数字计算仿真技术和视景仿真技术两类。其中, 数字计算仿真主要用于数学模型的建立以及精确数值的求解, 以进行数据监控或油田机械制造; 视景仿真是沉浸式交互环境, 在石油行业中主要是构造油田设备的三维模型、再现真实的环境并模拟油田工艺的过程, 达到非常逼真的仿真效果。

数字仿真侧重于精确的数值计算, 得到的是精确

的数据。在实际系统过于复杂或知识不完备时, 无法构造系统的精确定量模型^[2], 并且不对数据进行三维可视化显示; 而视景仿真侧重的是对过程的模拟, 以及画面的真实感, 三维动画没有定量的数据控制。鉴于以上两种仿真技术的缺点, 结合两种仿真技术, 研究构建一个参数化的油田钻井虚拟仿真系统, 实现具有数据支持的逼真的三维可视化场景。这种参数化的油田钻井虚拟仿真系统应用于技术人员的培训中, 不仅使技术人员对钻井过程有很直观的认识, 同时能够获得设备的参数, 便于技术人员判断钻井状态和过程故障。

^① 基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12511011); 黑龙江省研究生创新科研项目(YJSCX2011-109HLJ)

收稿时间: 2011-10-20; 收到修改稿时间: 2011-11-27

1 系统功能与结构

1.1 系统功能

该系统对油田钻井工程中钻进、起钻及下钻工艺进行参数化的三维可视化模拟。系统根据井场环境及设备型号或属性不同，进行系统的初始化设置，给定虚拟设备参数的初始值；根据工艺流程分析虚拟设备运动特性和联动关系，建立虚拟设备运动的数学模型，对虚拟设备进行运动控制，对可变参数进行显示与控制，最终实现对钻进及起下钻工艺流程的参数化三维动画模拟。

1.2 系统结构

油田钻井虚拟仿真系统通过系统参数初始化模块和参数显示与控制模块实现对钻进和起下钻模块进行参数化控制的功能。油田钻井虚拟仿真系统的组成如图 1 所示。

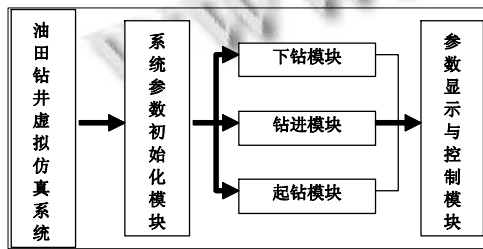


图 1 油田钻井虚拟仿真系统组成图

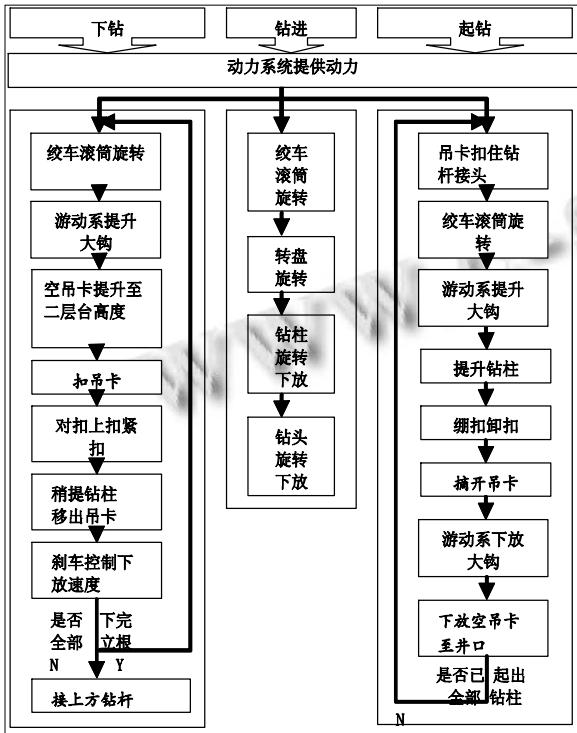


图 2 钻进及起下钻工艺流程图

其中，钻进、起钻及下钻模块分别对钻井工程的钻进、起钻下钻工艺进行模拟，工艺流程图如图 2 所示。钻井地面设备总称为钻机，根据其工作性质分为八个子系统，包括提升系统、泥浆循环系统、旋转钻进系统、动力系统、传动系统、控制系统、钻机底座以及辅助设备。

钻机的动力系统为其他设备的运转提供动力。其中，钻进模块模拟钻头钻入地层并不断地破碎岩石，从而形成钻孔并加深井眼的过程，由钻机的旋转钻进系统运动实现；下钻模块模拟将钻具组合下入井中使钻头接触井底准备钻进的过程，起钻模块模拟的是将井中全部钻柱起出的过程，这两个模块主要由钻机的提升系统带动钻具起落。

2 系统的设计与开发

根据数字计算仿真技术和视景仿真技术的特点，针对钻进及起下钻工艺，系统主要对钻机的提升系统和旋转钻进系统进行运动分析和数学建模，以达到系统实时性、准确性及真实性之间的平衡。

提升系统主要由钻井绞车、游动系（钢丝绳、天车、游动滑车及大钩）、悬挂游动系统的井架及起升操作的工具（吊钳、吊环、吊卡、卡瓦及上扣器等）组成，根据设备属性设计虚拟设备的基本参数。

- 1) 井架高度及倾斜角
- 2) 游动系：结构 $n(n+1)$ 、滑轮直径 D_c 、钢丝绳直径 D_w 、有效绳数 z
- 3) 绞车：滚筒尺寸（直径 X 宽度）、速度档
- 4) 起升操作的工具的尺寸

旋转钻进系统主要由转盘、水龙头、方钻杆、钻杆、钻铤及钻头等组成，其基本参数主要包括钻盘直径、钻杆外径及钻头尺寸。

对参数进行分类管理，将上述基本参数可视化于初始界面上，由用户控制输入；运动参数实时显示于界面中，以供用户监控虚拟设备运转参数，用户可以以此判断设备运转状态及故障来源。

针对这种参数化控制的仿真系统，由于其涉及诸多的计算机图形学等知识，采用如 OpenGL 和 Direct3D 和底层图形接口并不理想，会占用大量时间、精力来研究复杂的计算机图形学的知识，加大开发难度延长开发周期。选择如 Virtools、OGRE 等基于底层图形接口之上的开发环境是可行的，这种三维渲染引擎将底

层图形接口封装好，灵活性强。经过分析对比，本系统采用 Visual Studio2008 作为开发环境，开源三维图形渲染引擎 OGRE 作为开发平台。

3 系统开发框架

对于三维交互式虚拟仿真环境的开发，一般没有通用的框架和结构，通常依赖于目标应用系统的需求，很难为所有可能的虚拟环境应用系统设计标准特征^[3]。作为参数化的交互式虚拟仿真系统，要结合数字计算仿真和视景仿真的特点，要求有逼真的三维动画效果、准确的数据支持、可控的参数显示以及可交互的界面。因此采用如图 3 所示开发框架进行系统开发。

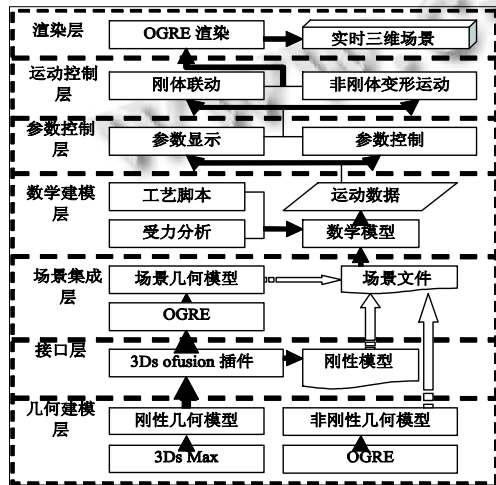


图 3 参数化油田钻井虚拟仿真系统开发框架

油田钻井虚拟仿真系统中从两个角度对模型进行管理，包括静态模型与动态模型、刚性模型与非刚性模型。其中，刚性模型在 3DS Max 中创建并利用插件导入 OGRE 中，非刚性模型则直接在 OGRE 中通过 Manual 对象来创建。

3.1 参数初始化

系统以大庆油田为例，原型为 JC-40 型号绞车，四个提升档位速度，适应于 2500~4000 深井作业；YC301 型号游车；ZP175 型号转盘。从大庆油田设备获取虚拟设备属性值，进行参数初始化，初始参数值列表如表 1 所示。

3.2 建立数学模型

3.2.1 动力系统数学模型

动力系统是驱动起升系统和旋转钻进系统的动力

表 1 初始参数值列表

设备属性	参数变量	参数初始值
发动机输出功率	pe	600 kw
发动机扭矩	Te	8668
绞车第 I 档时总传动比	i	9.006/5.211/2.431/1.406
游系结构 n*(n+1)	n	3
有效绳数	Z	6
滚筒直径	Di	600mm*1200mm
钢丝绳直径	Dw	35mm
滑轮直径	Dc	1000mm
井筒直径	D	444.5mm
单位钻压	ω	25KN/in
钻柱外径	d	10mm

设备。钻机用的动力设备主要是柴油机，其次是电动机。系统针对柴油机发动机，由式（1）计算其输出转速 ne：

$$p_e = T_e (2\pi n_e / 60) / 1000 \quad (1)$$

其中，pe 为发动机输出功率，kw；Te 为发动机扭矩，N·m。

3.2.2 提升系统数学模型

提升系统在起下钻作业中有重要的作用，其核心是绞车、游车、天车以及钢丝绳，因此又可称为游车-天车-绞车系统。对游车-天车-绞车系统动力学模型进行分析，获得其运动关系的数学模型。

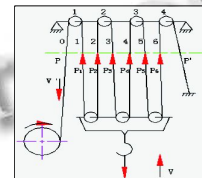


图 4 游车-天车-传动绞车系统分析计算模型

首先假设：a)钢丝绳与各定滑轮和动滑轮之间不打滑 b)钢丝绳为不伸长柔索 c)不计各处摩擦损失。在此假设条件下,根据如图 4 某钻机起升系统建立的 n(n+1)轮系游车-天车-传动绞车系统分析计算模型，建立游车-天车-绞车系统运动速度的数学模型^[5]。

由动力系统获得动力，通过公式（1）计算得到发动机输出转速 ne，通过 ni=ne/i 得到不同档位时绞车滚筒的转速 ni。

钢丝绳缠绕在滚筒、天车以及游车上，以滑轮组的方式带动游车大钩运动。根据滑轮组运动特点及角速度与线速度间的关系，不同档位下游车大钩的提升

或下降速度 V_{dgi} 通过式 (2) 计算得到。

$$V_{dgi} = \frac{\pi D_i n_i}{60z} \quad (2)$$

其中, D_i 为滚筒工作直径, mm; n_i 为滚筒转速, rad/min; z 为有效绳数。

钢丝绳有效绳数 $z=2n$, 靠近绞车一端为快绳, 固定的一端为死绳, 从快绳侧到死绳侧钢丝绳速度为:

$$v_i = v_{i+1} + (z-i)V_{dg} \quad i=0, 2 \cdots z \quad (3)$$

其中, v_i 为两个相邻定动滑轮间钢丝绳移动速度, m/s; v_{i+1} 为大钩移动速度, 由公式(2)得出, m/s; z 为有效绳数, $z=6$ 。

天车滑轮切向速度和 v_i' 转速 n_i 为:

$$v_i' = (z - 2(i-1))V_{dg} \quad i=1, 2 \cdots (n+1) \quad (4)$$

$$n_i = \frac{60V_{dg}}{\pi D_c} (z - 2(i-1)) \quad i=1, 2 \cdots (n+1) \quad (5)$$

其中, z 为有效绳数; V_{dg} 为大钩移动速度, 由公式(2)得出, m/s; D_c 为滑轮直径, m。

3.2.3 旋转钻进系统数学模型

旋转钻进系统的核心是转盘和钻柱, 因此又称为转盘-钻柱系统。在系统中钻井方法采用的是旋转钻井法, 即动力机驱动转盘, 带动钻柱和钻头一起旋转, 破碎岩石。在钻进过程中钻柱的受力比较复杂, 运动方式也是混合多样的, 包括自转、反转以及多方向的振动。由于系统主要模拟地上部分设备的运动, 并不考虑钻头磨损和振动情况。因此, 忽略钻柱的振动, 仅考虑钻柱的自转和反转。

动力系统提供动力, 驱动转盘转动, 如式 (6) 所示:

$$p_e = 0.36n_r \omega L_{max}' \quad (6)$$

其中, p_e 为发动机功率, n_r 为转盘转速, r/min; ω 为单位钻压, KN/in; L_{max}' 为钻井深度, km。

钻柱反转转速与转盘转速的关系如式 (7) 所示:

$$n_f = [d / (D - d)] n_r \quad (7)$$

其中, n_f 为钻柱反转转速, r/min; n_r 为钻柱自转转速, r/min; D 为井筒直径, m; d 为钻柱外径, m。

3.3 系统控制

3.3.1 物体运动控制

通过对物体运动的控制来模拟油田钻井工程中钻进和起下钻工艺流程。在 OGRE 中使用控制器来操作

运动物体, 给定控制器的输入数据, 利用数学模型作为函数, 输出结果可以作为下一个控制器的输入或者一个动画的驱动输入, 这样就可以控制虚拟井场中的虚拟设备按照脚本依次进行计算并按照输出数据值运动。

非刚性物体钢丝绳的运动引用了参考文献[6]中的方法, 采用分段处理的方式来实现。在运动过程中, 对移动后绕在滑轮上的钢丝绳几何模型进行等长的分段, 每两段间由球形关节连接。在每一个关节处有一个螺旋弹簧来反抗关节的偏移。给定钢丝绳起始点和终止点的位置, 计算钢丝绳达到最小总能量时的形状。总能量是钢丝绳段的势能和弹簧的弹性势能的和。首先, 计算缆绳两个圆柱体段的最小总能量, 作为四段缆绳计算的一个基础。在接下来的每一步, 段数都是双数, 并且缆绳的新形状是基于前一步骤来计算的。

3.3.2 输入事件控制

参数化油田钻井虚拟仿真系统中, 参数化是其重要的特点, 其关键是对输入事件的控制。输入事件包括鼠标输入事件和键盘输入事件。通过鼠标和键盘事件的处理来操作场景。参数化仿真系统则在此基础上需要鼠标、键盘事件配合界面的设计, 实现对参数值的控制。在 OGRE 中, 采用 OIS 面向对象输入系统控制鼠标键盘事件处理, 实现鼠标点击与滑动等功能, 配合 SDKTray 系统对界面进行设计。在界面中添加 overlay、按钮、滑块等元素, 将参数以数字、滑块等方式显示在 overlay 上; 用户通过鼠标滑动滑块来实现对参数的控制, 利用帧监听类将界面上对参数值的操作传递给数据变量。

4 实验结果

研究并实现了一个参数化的钻井虚拟仿真系统, 由用户进行参数初始化后, 进入油田钻井三维虚拟场景, 动态模拟钻井工艺流程, 如图 5 所示为系统初始化界面和三维场景界面。



图 5 系统效果图

(下转第 17 页)

了运行测试,我们将开发的 OPC XML DA 服务器安装在中央空调主机服务器上,以采集中央空调的数据点信息并以 Web Service 的形式将数据信息提供到 Internet 上,然后用我们开发的基于 Windows 的 OPC XML-DA 客户端进行访问,运行界面如图 7 所示:

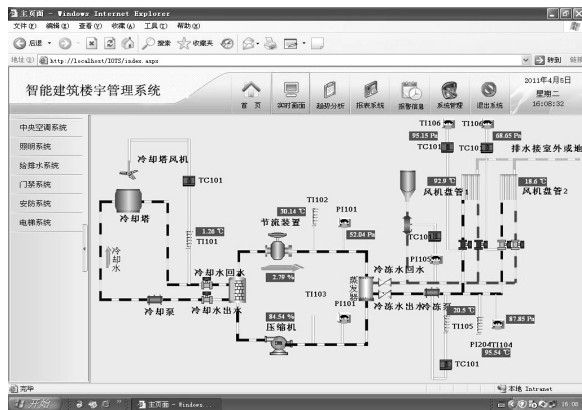


图 7 OPC XML-DA 客户端界面

6 结语

本文构建了一种基于 Web 服务的智能建筑信息集成框架,并采用 vc6.0 开发了 OPC XML DA 服务器,最后使用 .NET 平台编写 OPC-XML 客户端来调用 Web 服务,最终实现了跨 Internet 访问数据。这个框架还具有跨平台的特点,改善了现场数据访问的灵活性,增

强了系统的开放性和互连性,在智能建筑信息集成技术上有非常广阔的应用前景。

参考文献

- 1 梁伟卓.基于 Web 服务的智能楼宇集成技术的研究[硕士学位论文].柳州:广西工业大学,2007.
- 2 许毅平,周曼丽.基于 Web 服务的智能楼宇系统集成模型.计算机工程,2006,32(24):234-236.
- 3 陆会明,朱耀春.OPC 服务器开发设计与应用.北京:机械工业出版社,2010.
- 4 汪洪涛,高璟.基于 Web+服务的 OPC+XML-DA 系统的研究.计算机应用研究,2006,11:101-104.
- 5 陆会明.基于 Web 服务技术的 OPCXML_DA 服务器分析与实现.电力自动化设备,2010,30(6):96-99.
- 6 Connolly R. ASP.NET 2.0 网络应用开发核心技术.北京:机械工业出版社,2007.
- 7 张跃廷.ASP.NET 开发实战宝典.北京:清华大学工业出版社,2010.
- 8 Shen B, Zhang GQ, Zhang L. Multi-agent system design for energy saving. Proc. of the 5th IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications. Taiwan, China, 2010. 73-76.
- 9 周金桥.ASP.NET 夜话.北京:电子工业出版社,2009.

(上接第 8 页)

5 结语

本文提出了设计和实现参数化油田钻井虚拟仿真系统的方法,能够结合数值仿真与视景仿真的优点,对钻进和起下钻工艺的模拟达到了预期的效果,对钻井工艺流程进行了实时、逼真的参数化模拟。与传统仿真系统相比,参数化油田钻井虚拟仿真系统不仅具有很强的逼真性,也有较高的重用性,能够给用户展示可视化的工艺过程,同时给出虚拟设备间的数值关系,大量数据能够让用户从根本上了解系统原理,对钻井工艺有视觉上和数值上的双重认识。

参考文献

- 1 孙彪,陈利学.计算机仿真技术在石油工业中的应用.西南石油学院学报,1999,19(1):88-92.

- 2 李逢新.可视化仿真技术在井底钻具组合受力与变形分析中的应用.西南石油学院,2005.
- 3 刘贤梅,郝爱民.油田安全作业虚拟仿真训练系统研究.系统仿真学报,2006,18(11):3082-3087.
- 4 Kerger F. Ogre3D 1.7 Beginner's Guide. Packt Publishing Ltd, November 2010.
- 5 曾兴昌,栾苏,等.游车-天车-绞车系统运动及动力学特性探讨.石油矿场机械,2009,38(3):54-57.
- 6 Hergenrother E, Dahne P. Real-time Virtual Cables Based on Kinematic Simulation. Proc. of the WSCG 2000. 2000.