

基于Unity3D的岩心钻机模拟实训平台研究

任启伟^{1,2}, 赵远^{*1}, 孟义泉¹, 陈剑铭¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 针对我国地质岩心钻探钻机培训现状, 综合分析国内外虚拟现实可视化现状, 结合虚拟现实技术、Unity3D游戏引擎以及利用实物教具开发了一套区别于现有钻机仅限于钻机基本功能培训操作的模拟实训平台。平台由实物模型、可编程控制器、虚拟场景组成, 本模拟实训平台一方面模拟操作钻机的相关动作; 另一方面显示钻进过程中的相关数据, 使学员熟练掌握钻进规程参数、孔内复杂事故的判断、预防和处理方法。经过多个虚拟场景的控制和实验测试, 平台可稳定运行, 学员可直观感受被控对象的运行, 增强现场体验感, 加深对地质岩心钻探的认识, 降低了同程度下的培训成本。

关键词: 岩心钻机; 模拟实训平台; 3ds Max; Unity3D; PLC; 虚拟现实

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)03-0051-09

Research on core drill simulation training platform based on Unity3D

REN Qiwei^{1,2}, ZHAO Yuan^{*1}, MENG Yiquan¹, CHEN Jianming¹

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the current situation of core drill training in China, and with comprehensive analysis of the virtual reality visualization at home and abroad, a training system different from the existing one which is limited to the basic function training operation of the drill has been developed through combination of virtual reality technology, Unity3D and teaching AIDS. The platform is composed of the full size model, the programmable controller and the virtual scene. On one hand, the simulation training system software simulates the operation of the drill; on the other hand, the relevant data in the drilling process can be displayed to enable students to master drilling procedure parameters, and identification, prevention and treatment methods of complex accidents in the hole. After several virtual scene control experiments and tests, the platform can run stably, students can intuitively feel the operation of the controlled object, enhance the hands-on experience, deepen the understanding of geological core drilling, and reduce the teaching cost.

Key words: core drill; simulation training platform; 3ds Max; Unity3D; PLC; virtual reality

0 引言

岩心钻机是带动钻具和钻头向地层深部钻进实施钻探施工的主机, 并通过钻机上的升降机构完成起下钻具和套管、提取岩心、更换钻头等辅助工

作, 承担着钻取岩心这一核心任务, 取心的完整性对于地层数据分析的准确性和有效性起着至关重要的作用, 完整的岩(矿)心可以准确地分析地层区域的岩石特性、地质构造以及水文情况^[1-2]。大型岩

收稿日期: 2022-03-03; 修回日期: 2022-03-21 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.03.007

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“智能化深部钻探技术升级与应用示范”(编号: DD20211421); 中国地质科学院勘探技术研究所所管科技项目“立轴式岩心钻机模拟操作培训系统开发”(编号: ZD202105)

第一作者: 任启伟, 男, 汉族, 1990年生, 中国地质大学(北京)硕士研究生在读, 工程师, 主要从事钻探设备的研究、地质云信息化工作, 河北省廊坊市金光道77号, rqw1990@163.com。

通信作者: 赵远, 男, 汉族, 1989年生, 工程师, 主要从事项目管理、钻探设备与钻井工艺研究等工作, 河北省廊坊市金光道77号, 3064597416@qq.com。

引用格式: 任启伟, 赵远, 孟义泉, 等. 基于Unity3D的岩心钻机模拟实训平台研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 51-59.

REN Qiwei, ZHAO Yuan, MENG Yiquan, et al. Research on core drill simulation training platform based on Unity3D[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 51-59.

心钻机价格相对较高、操作工序复杂,导致先理论学习后直接上机的传统培训方式难以产出技术纯熟的操作人员,如此跨越式的培训不仅增加了岩心钻机损坏与报废的风险,也提高了被培训者自身门槛。

虚拟现实技术(Virtual Reality Technology)是一种可以创建和体验虚拟世界的计算机技术,20世纪50年代美国科学院和工程院院士 SUTHERLANDIE 在一篇名为 The Ultimate Display 的文章中首次系统地阐述了虚拟现实技术的应用^[3]。2003年 BURDAE G 综合论述了虚拟现实技术的实际应用^[4],后经过不断发展被广泛应用于工程机械^[5]、城市建设、医疗和文化教育^[6]等多个方面。

在钻机模拟操作系统中,2012年,为提高操作人员面对钻井平台事故时的应急能力 LORENT-SEN B 开发了能够保障岩心钻机高效、安全工作的井下事故的模拟训练系统 eDrilling^[7];2013年曾勇实现了具有挖掘机模拟训练系统的界面、虚拟环境、挖掘机的基本运动等游戏模块等功能的挖掘机模拟操作系统^[8];2016年王凤钦开发了具有理论学习、动作演示、操作培训和考核的凿岩台车的模拟操作系统^[9];2019年彭博等基于土行孙 DDW-35/12 型水平定向钻机开发了钻机的模拟操作系统^[10]。上述模拟操作系统基本兼具机械控制、参数显示、场景漫游等基本功能,可进行设备的虚拟展示和教学示范。2019年,BAJPAI A 等通过无量纲刚度比、钻头-岩石相互作用模型和设定的岩层破坏性进行分析和设计、实验室再现钻井系统的物理行为等开发了基于实验室的井下钻进仿真系统^[11];2020年胡自飞等研发了一种基于 Unity3D 的岩心钻机虚拟实训系统,该实训系统设置了认知视频学习、操作要领学习、单步训练以及整体训练和操作知识4个学习场景^[12];同年杨明晟等设计了一种基于 Unity3D 的岩心钻机模拟操作系统,该模拟操作系统通过多视角、钻进控制、参数显示和语言指导等功能呈现了身临其境的钻机操作体验^[13]。

然而目前随着钻孔深度不断增加,对操作钻机的机班长的技术水平提出了更高的要求:对钻进过程中发生的孔内复杂情况做出准确判断并能正确处理;设备故障时能够进行现场诊断和维修。针对上述问题,本文以 XY-6B 型立轴式岩心钻机为模型开发了基于 Unity3D 与实物模型相结合的并具有沉浸感与交互性于一体的岩心钻机工况模拟实训平台,

该平台通过 SolidWorks 软件进行三维建模、3ds MAX 软件进行渲染贴图、Unity3D 软件搭建虚拟场景和 C# 脚本编程控制。

1 虚拟仿真平台总体框架设计

岩心钻机工况模拟操作系统根据岩心钻机的实际工程使用情况和目前操作人员的技术水平设计了各个功能模块,其主要分为3个部分:3D虚拟模型搭建、岩心钻机实物模型制作、模拟操作系统开发。为满足不同层次学员达到相应的操作培训效果,本系统设置了理论学习界面、操作培训界面、自由练习界面、成绩考核界面和闯关练习界面,系统平台框架如图1所示。

2 工况模拟实训平台开发

2.1 实物模型设计与控制

岩心钻机是地质找矿、水文水井、煤田地质勘探、石油和天然气勘探开发等领域的深孔钻探设备,主要分为全液压式岩心钻机与立轴式岩心钻机^[14-19]。而 XY-6B 型钻机集中了立轴式液压钻机的优点,可进行金刚石小口径钻进,也可进行大口径钻进,可以垂直钻孔,也可以钻斜孔,是深孔地质勘探钻孔的理想设备^[20]。但是其主机质量超过 3.8 t,在后期进行教学时极为不便,为便于与 Unity3D 软件更好的衔接,在保留 XY-6B 型钻机主要功能的前提下,按照实际 XY-6B 型岩心钻机的尺寸大小,对本系统的操作平台进行了 1:4 比例模型加工,同时使钻机实物模型保留如下动作:动力头正转/反转、动力头提升/给进、机架前进/后退、绞车提升/下放、主电机回转。各动作均为电驱,其中动力头正转/反转、主电机回转、绞车提升/下放为普通电机驱动,动力头给进/提升与机架前进/后退由步进电机驱动。模型实物见图2,模型与系统控制流程见图3。

2.2 三维模型与场景搭建

模型与场景搭建是设计一个虚拟现实平台的必要前提,本虚拟仿真实训平台使用几何建模和物理建模来创建三维模型^[8]。当前有诸如 3ds MAX、UG、CATIA、SolidWorks 等三维建模软件,其中 SolidWorks 具有操作灵活、运行流畅、模型制作易上手等优点,因此采用 SolidWorks 软件进行建模。根据 XY-6B 型设计图纸与现场测量的钻机参数,用 SolidWorks 进行三维模型创建后以 .stp 文件格式导

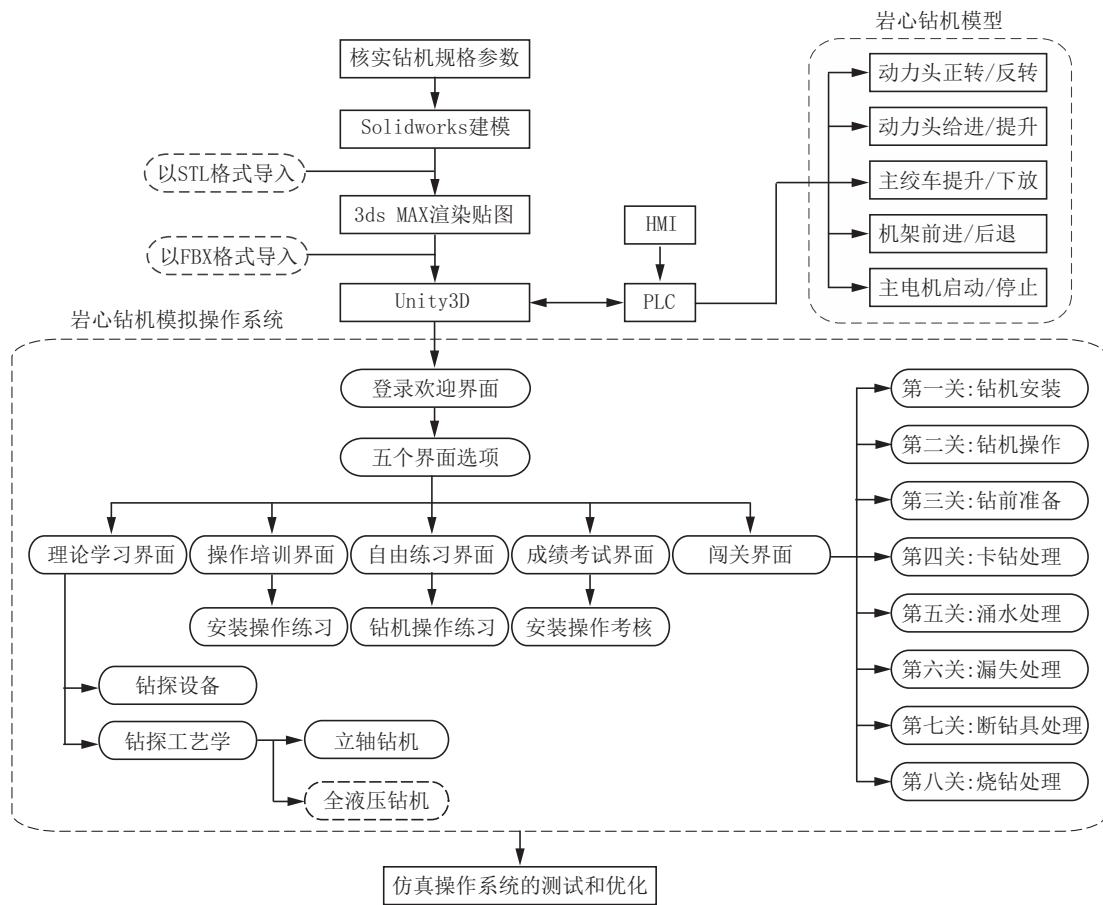


图 1 平台整体框架

Fig.1 Layout of the platform



图 2 XY-6B 型钻机实物模型

Fig.2 XY-6B drilling rig full-size model

入 3ds MAX 软件进行贴图渲染,同时导出 .fbx 文件格式导入到 Unity3D 中进行场景搭建^[9]。通过场景漫游技术、多摄像机技术、物理碰撞检测、射线检测技术等实现钻机基本动作的控制、操作和闯关练习。

交互系统的真实度和流畅性对于用户体验都非常重要,模型越精细就越真实,但生成的数据量就越

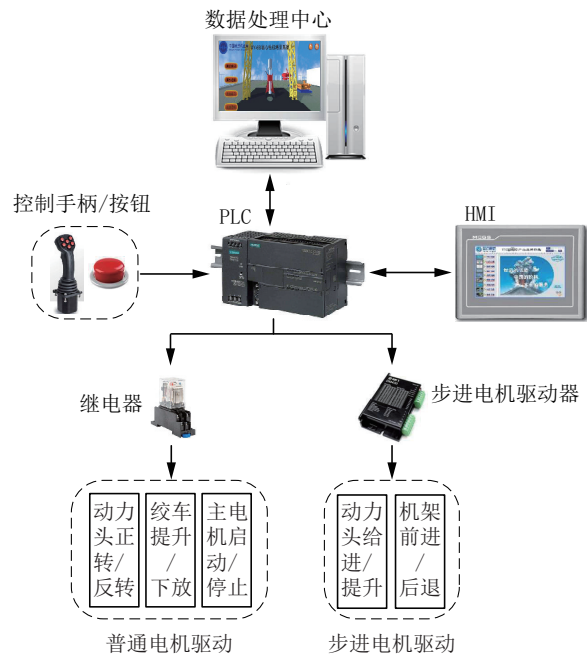


图 3 钻机模型与模拟系统控制流程

Fig.3 Drill model and simulation system control flow

大,影响系统运行的流畅性,从而降低用户体验^[21]。因此要优化模型:在不影响整体效果的情况下,建模时尽量减少模型面数,删除看不见的面和重叠的面;通过现场采集的照片经过专业软件处理后赋予模型,既增加真实感又可减少多边形的数量,达到优化模型的目的;在不同层次、不同视觉条件下,利用LOD(Level of Detail)技术为每个物体建立不同精细程度的模型,当物体离视点远时就调用相对简单的模型,而近距离观察时调用相对复杂的模型,以提高场景的显示速度^[22]。

如图4所示,XY-6B型岩心钻机主要分为10个部分:主电机、离合器、变速箱、主绞车、分动箱、卡盘、回转器、操作系统、机架和底座^[20]。动力机主要选择100HP 4135AG型柴油机或Y250M-4型(55 kW)电动机,本系统采用电动机模型。

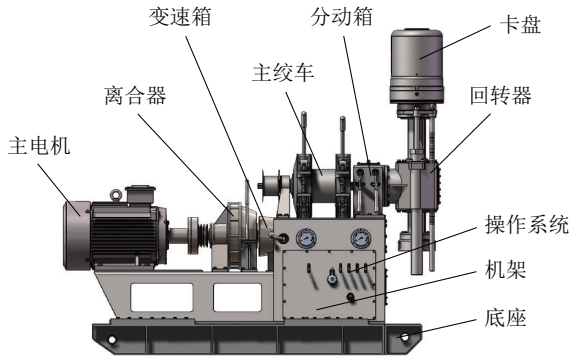


图4 培训系统岩心钻机各部件

Fig.4 Components of the training system core drill

在实际岩心钻机操作过程中,为保证钻机的正常工作,钻机操作人员需实时观察钻机上各种仪表的数据变化。为了满足虚拟实训系统的培训要求,本系统通过Unity3D自带的GUI和NGUI模块设计了系统软件的主界面、钻进参数界面、闯关界面等。在检视面板中,采用Panel组件为主界面和钻进参数界面赋予相应的背景,使用Dropdown组件实现闯关关卡中钻进面向角的选择功能,利用Terrain组件创建了施工地周围环境。虚拟实训场景如图5所示,该场景为学员提供了惟妙惟肖的操控环境,缩小了虚拟培训与实际培训之间的差距。

2.3 钻机动作控制

实现岩心钻机的真实工况,需要对钻机的每个动作进行相对应的模拟,因此钻机仿真需要建立强大的逻辑动作库,命令与动作紧密联系、环环相

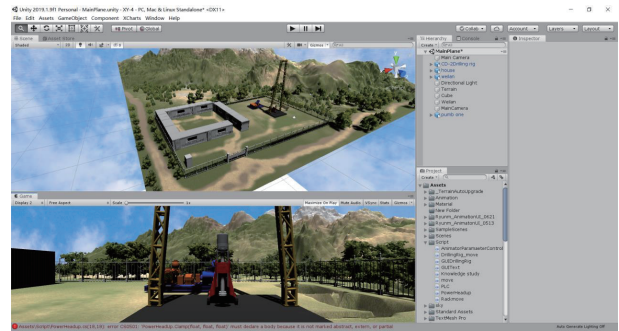


图5 岩心钻机仿真环境场景

Fig.5 Simulated environment scenario for the core drill

扣^[10]。在实际的岩心钻机操作中,控制钻机部件的回转和移动是操作人员必不可少的工作内容之一。系统使用Translate()函数和Rotate()函数分别实现了钻机机架的移动、动力头回转、动力头给进/提升、绞车提升/下放等功能,图6为钻机操作培训场景。

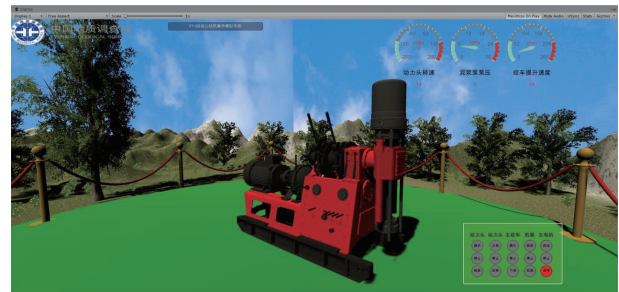


图6 操作培训场景

Fig.6 Operation training scenario

其中完成动力头给进/提升动作的影响因素较多,在控制脚本编写时需要设置多个限制条件,主要为:速度因数;前方限位物体(如前方已入井的钻杆、卡盘);卡盘夹持状态;动力头或回转器与钻杆的连接状态等。如果把动力头前进动作看作一个函数,这个函数为:

$$F = Speed \times a_1 \times a_2 \times a_3$$

式中:Speed——速度因数; a_1 ——孔口夹持器限位因数,限位取0,非限位取1; a_2 ——卡盘加持状态因数,加持时取0,松开时为1; a_3 ——一个综合因数,由卡盘夹持状态和钻杆连接状态共同决定,具体逻辑关系如表1所示。

2.4 场景切换与场景漫游

模拟教学系统的主要目的是用户多角度、全方位地观察岩心钻探设备组装、设备操作、钻进时钻进轨迹和出现钻探事故各类征兆。本系统依托 Vi-

表 1 参数 a_3 取值逻辑关系

Table 1 Logical relationship of parameter a_3 values

序号	卡盘夹持状态	钻杆连接状态	a_3 取值
1	松开	分离	1
2	松开	连接	1
3	加紧	分离	1
4	加紧	连接	0

sual Studio 2019 软件,利用 C#进行脚本编写,通过对多个摄像机进行标记实现摄像机的切换。场景切换设计逻辑框图如图 7 所示。

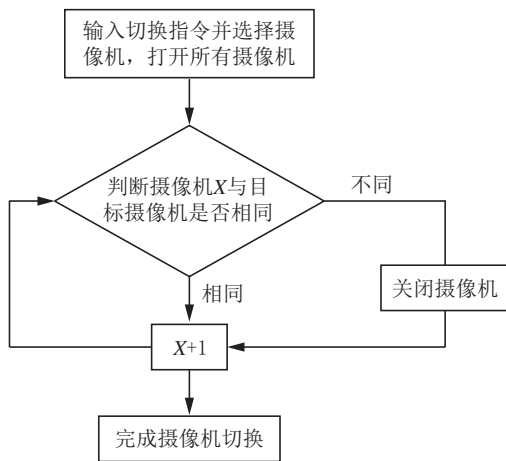


图 7 场景切换设计逻辑框图

Fig.7 Logical block diagram of scene switching design

场景漫游技术主要包括 HMI 控制、键盘控制和鼠标控制,能让用户身临其境的在虚拟钻探施工现场中前后左右任意方向行走并学习钻探现场周围的环境,从而更好地进行钻进施工作业。该技术的逻辑框图如图 8 所示。

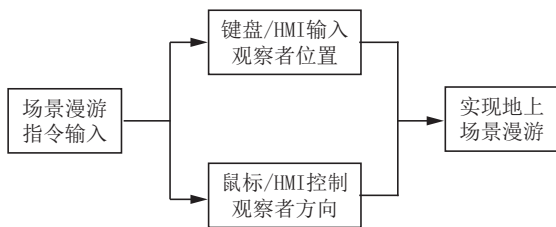


图 8 场景漫游流程

Fig.8 Scene roaming flow chart

2.5 PLC 与工况模拟软件的交互设计

由实物模型、PLC 和 PC 机虚拟场景组成的本虚拟仿真实训平台中,控制手柄或 HMI 发出的控制

信号通过 PLC 将输出的控制信号利用串口传送到 Unity3D 虚拟场景,虚拟 XY-6B 岩心钻机根据接收到的控制信号来模拟实际运行效果,同时 PLC 接收 PC 机中虚拟场景输出的虚拟传感信号,实训平台整体设计和数据流如图 1 所示。运行过程中,Unity3D 中的虚拟传感信号经过串口传送给 PLC,PLC 接收到信号后检测虚拟 XY-6B 岩心钻机的运行情况并发出控制信号进行相应的调整,实现虚拟仿真实训平台的正常运行。

PC 机接收到的数据利用 Unity3D 中的虚拟模型 Transform 下 Parent 属性并通过 Translate 和 Rotate 函数控制模型的移动、旋转等运动^[23]。利用粒子发射系统 Particle System 实现了一些无规则物体(例如水)的建模、渲染和贴图,通过 ReceiveData 和 DealData 判断缓冲区数据后在物体数据的顶点上来模拟发射粒子。

为避免数据结构队列线程阻塞,使用多线程和数据池的设计模式实现 Unity3D 的串口接收^[23-24]。其中在 Unity3D 中,利用 C#命名空间 System. IO. Ports 中的 SerialPort 类来接收数据。在 Start 函数内实例化一个 SerialPort 类 sp 串口,并设置串口号 (COM3)、波特率(9600)、数据位(8)、校验位 (IO. Ports. Parity. None)、停止位 (IO. Ports. StopBits. One),与下位机串口保持一致。

2.6 闯关设置

在钻孔施工过程中,由于种种原因,常常发生各种孔内故障而终断正常钻进,通常把这些故障统称为孔内故障,它耽误钻探进尺、推迟施工进度、影响地质材料和矿区储量报告的提交。如果处理不当,还会报废钻探工作量和管材,使钻探成本提高,严重时还会损坏机器设备、造成人身伤亡事故等严重后果^[25]。因此本培训系统的重点内容是工况模拟和事故处理,也就是本培训中的闯关关卡。孔内事故发生的原因及事故主要分类见图 9。

由图 9 可见根据孔内事故发生的具体原因及现象,孔内事故主要由埋钻事故,烧钻事故,挤夹、卡钻事故,钻具折断、脱落和跑钻事故,工具、物件落入事故,套管事故等组成。本文在结合理论知识与客观实际后,主要实现井涌、井漏,卡钻、断钻具、烧钻等关卡,为便于初学者能更好地掌握技术知识,下文中的各类事故均为优化后功能,通过学习能解决常见的孔内事故。

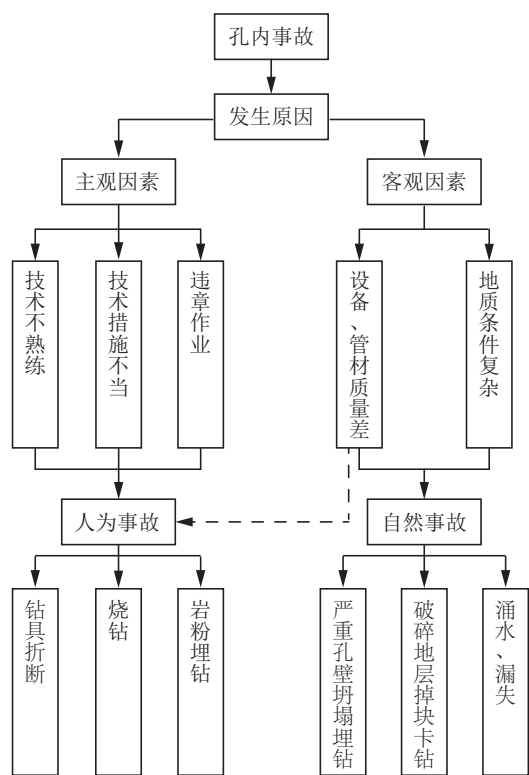


图9 孔内事故的发生原因及分类

Fig.9 Causes and classification of down hole accidents

2.6.1 井涌、井漏关卡

为实现井漏、井涌事故的有效预警,需要进行事故特性分析,选取适合表征事故特征的钻进参数来建立预警模型^[25-26]。当井漏事故发生时总池体积减小,在入口流量无变化的情况下出口流量减小,立管压力可能下降,井漏事故较为严重时井口会出现无钻井液返出的情况(即出口流量为零)。当井涌事故发生时总池体积增加,在入口流量无变化的情况下出口流量增大,立管压力可能下降,井涌事故较为严重时,即使停泵后,井口也会伴随钻井液的外溢。基于上述分析,本关卡选取总池体积、立管压力、入口流量和出口流量4个钻进参数建立钻进过程中井漏、井涌事故模拟模型。具体实现流程见图10。

2.6.2 卡钻关卡

钻井过程中,由于各种原因造成的钻具陷在井内不能自由活动的现象,称为卡钻^[25]。卡钻往往是由于粗径钻具顶部在钻孔内卡住,钻具、钻杆提不上来,回转器或转盘回转时有阻力或卡死,但一般能疏通钻井液。引起卡钻的主要原因有:(1)孔壁岩石掉块,(2)岩石遇水膨胀,孔径收缩,(3)钢粒或碎硬质

合金挤夹钻具,(4)孔壁和岩心不规则,(5)孔身弯曲,(6)孔壁不平整,孔径大小变化悬殊,(7)套管柱偏斜,管鞋突出,(8)小物件落入孔内。不同性质的卡钻事故有不同的处理程序,多数卡钻事故的处理方法一般遵循如下6个处理工序:一是保持水眼畅通恢复钻井液循环;二是以上下提拉或扭转形式活动钻具(以提拉为主);三是对卡钻部位进行浸泡(注入解卡剂);四是使用震击器震击(单独震击或泡后震击);五是套铣或倒扣;六是在“鱼顶”以上进行侧钻。

本软件中的卡钻模型主要为掉块卡钻,具体实现流程见图11。

2.6.3 断钻具关卡

钻具断落事故是钻井作业中常见的事故之一,若井况正常,处理也容易,成功率较高,若井筒条件差,井况复杂,可伴随卡钻事故发生,处理不慎,也会造成复杂事故^[25]。常见的断钻具主要以钻杆折断、钻铤及井下工具折断、滑扣、脱口、刺口、粘扣等类型为主。本软件系统中的断钻具模型主要为钻杆脱扣,具体实现流程见图12。

2.6.4 烧钻关卡

在钻进过程中由于孔底冲洗液不足,钻头冷却不良,岩粉排除不畅,钻头与孔壁、岩心和岩粉摩擦产生高热,使钻头、孔壁岩层、岩心烧结为一体,此时冲洗液循环中止,钻具不能回转也不能提动,这种孔内事故称为烧钻事故^[25]。软件中烧钻实现流程见图13。

3 系统试验与分析

采用上述的设计思想和技术方法,基本实现了基于Unity3D的岩心钻机模拟实训平台模拟软件。经测试,系统中理论学习、操作培训、自由练习、成绩考核和闯关五个模块可初步实现设计功能,钻机动作动画流畅,无异常错误。测试结果表明实训平台为培训对象提供了一个直观、经济、安全、高效的环境,通过该平台学员可以快速、准确地操作钻机组装、钻机操作,动态分析各种被控对象的执行效果,同时能更多地学习各类钻井事故的处理方法,加上惟妙惟肖的环境音效,加深了现场体验感,激发了学习兴趣,提高了学习效率。同时避免了现场实操的设备损坏和安全隐患,降低了同程度下的实训教学成本,具有较高的经济性和安全性。

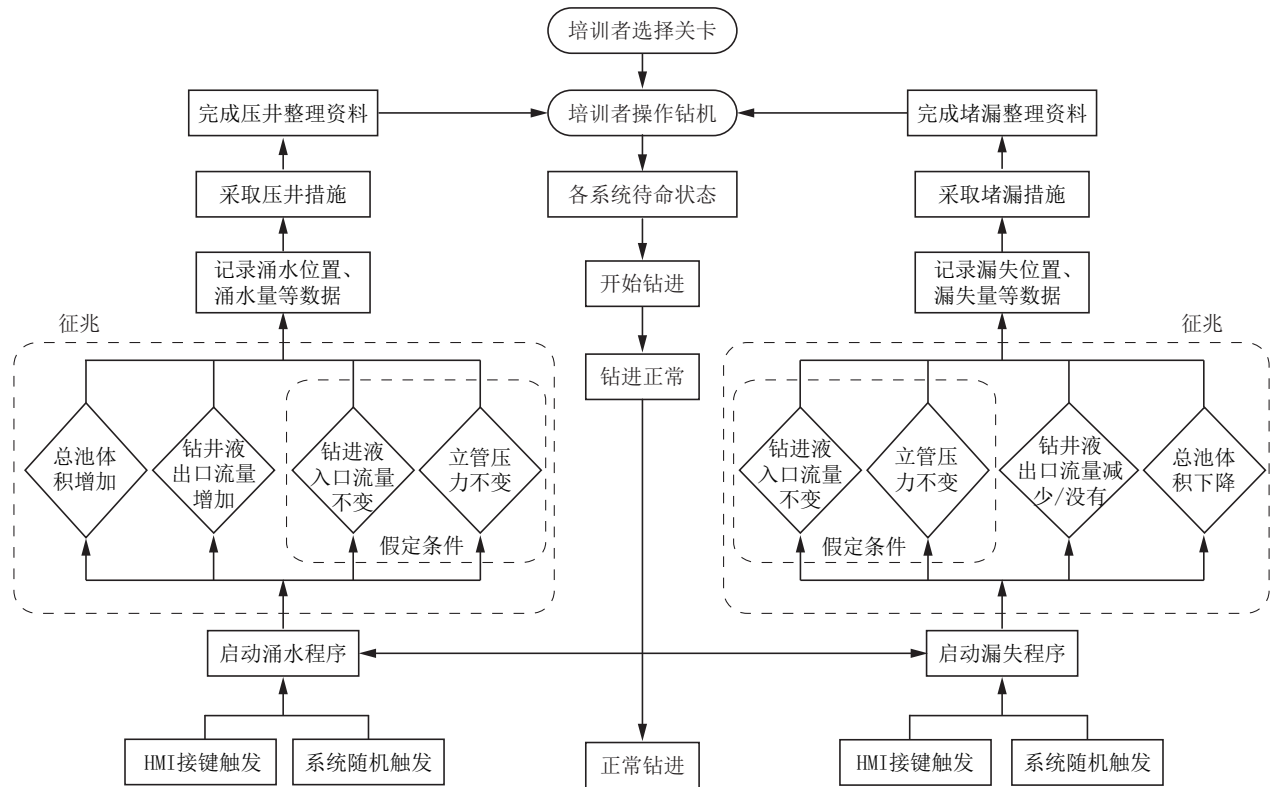


图 10 井涌、井漏关卡实现流程

Fig.10 Realization flow chart for Level of well kick and circulation loss

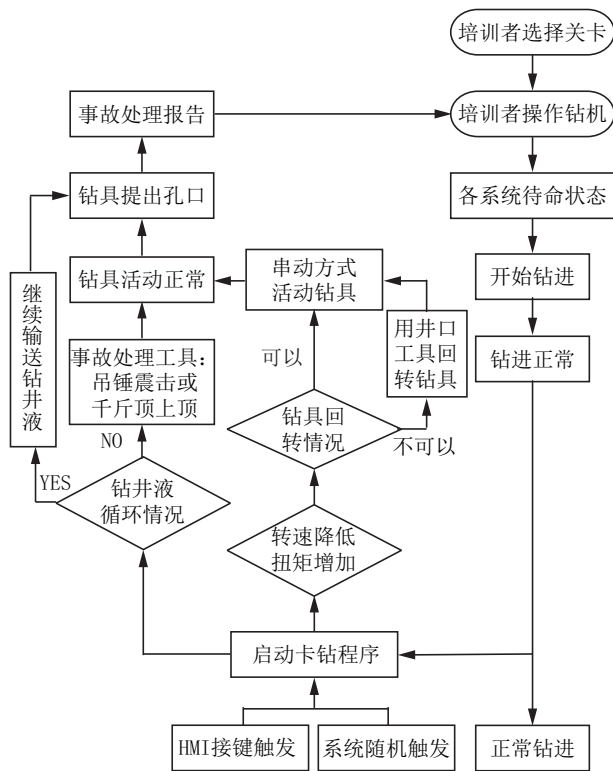


图 11 卡钻关卡实现流程

Fig.11 Implementation flowchart for Level of drill sticking

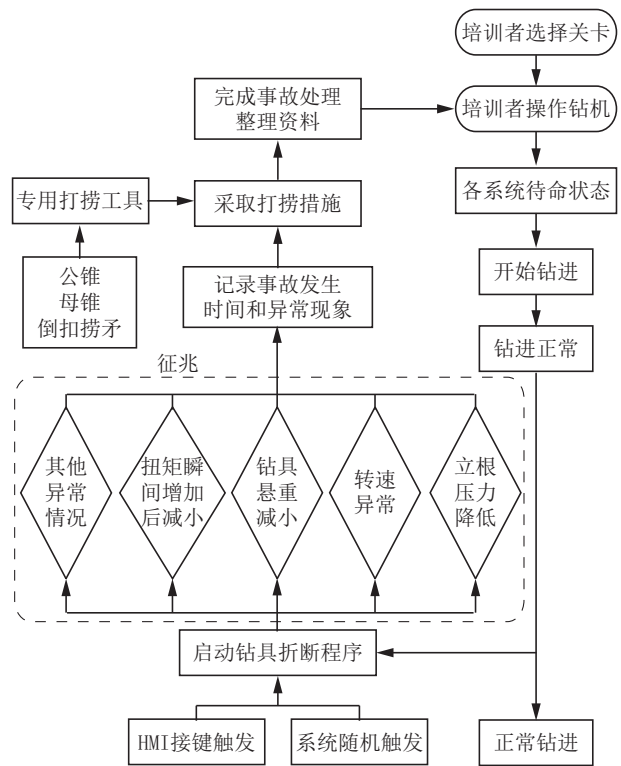


图 12 断钻具关卡实现流程

Fig.12 Realization process for Level of broken drilling tools

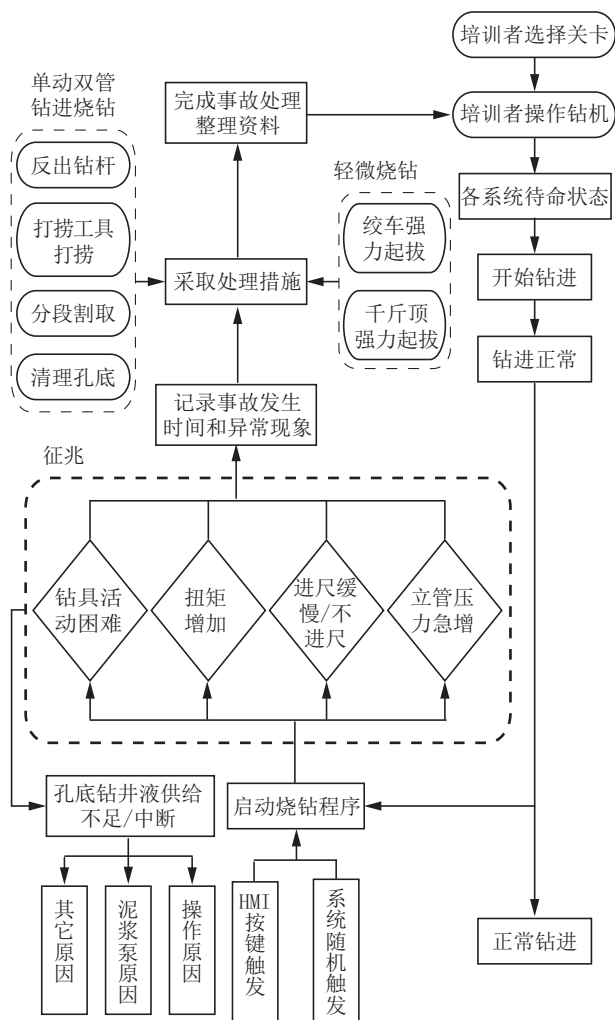


图 13 烧钻关卡实现流程

Fig.13 Implementation process for Level of drill burning

4 结论

本系统是基于Unity3D交互沉浸感的特性实现现实场景中岩心钻机的实际操作,为教学培训提供了新的方法。本系统软件满足了用户模拟操纵立轴式岩心钻机的需求,并给予用户多种视觉感受,通过场景漫游技术,用户自由观察钻探施工场地周围的环境;通过模拟控制钻进技术,用户完全自主控制钻进过程;利用场景切换技术,用户多角度、全方位地观察钻探施工过程中钻头的行进路线;依托实物模型和几个场景内容的学习,用户从认知层面到熟练操作虚拟XY-6B型岩心钻机的层面。整个软件系统运行情况较好,内容丰富、真实感强,取得了较好的仿真效果,让用户沉浸式地学习操作钻机,解决了大批量人员培训的问题,也降低了培训成本和培训

过程中存在的安全隐患。

除此之外,本系统在头戴式VR显示操作、地层钻进参数反馈、钻机复杂参数控制、精细化钻井事故模拟等几个方面需不断创新、提升、优化和完善。为达到更真实、全面的钻机模拟操作体验,应从以下几点进行完善:

(1)现阶段虚拟现实技术已向增强现实技术延伸,比如采用Stewart并联平台搭建沉浸式座椅^[27], 可让司钻体验到钻机启动、运行等过程中的抖动或振动。

(2)搭建多场景模式。钻机的工作场景可设置为譬如山林、草地、隔壁、沙漠等不同场景,也可增加降雨、降雪、大风等气候因素,并配备不同场景下的钻机操作注意事项,以增强实际培训效果,同时也增加趣味性。

(3)本文是基于立轴式岩心钻机开发的系统,目前全液压钻机和模块化轻便钻机已普遍采用,且这些钻机的成本较立轴式钻机更高,操作更复杂,下一步应丰富钻机类型,使被培训者在短期内熟练掌握多种类型钻机的操作。

参考文献 (References):

- [1] 鄢泰宁,等. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2001:131-133.
YAN Taining, et al. Rock & Soil Drilling and Tunneling[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001:131-133.
- [2] 王达,何远信,等. 地质钻探手册[M]. 长沙:中南大学出版社, 2014:53-55.
WANG Da, HE Yuanxin, et al. Geological Drilling Handbook [M]. Changsha: Central South University Press, 2014:53-55.
- [3] Ivan E. Sutherland. The ultimate display[C]//Proceedings of International Foundation of Information Processing. WAYNE AK, WASHINGTON DC. Spartan,165.
- [4] BURDER G, COIFFET P. Virtual reality technology[J]. Presence Teleoperators & Virtual Environment, 2003,12(6):663-664.
- [5] STIX GARY. Boeing uses CAD to design 130,000 parts for its new 777[J]. Scientific American, 1991,264(3):110-111.
- [6] 朱名毅,李俊,等. 虚拟仿真技术在口腔医学教育中的应用与挑战[J]. 科教文汇(上旬刊),2021(2):111-112,121.
ZHU Mingyi, LI Jun, et al. Application and challenge of virtual simulation technology in stomatological education [J]. Science and Education Literature Review, 2021(2):111-112,121.
- [7] LORENTSEN B. Evaluation of a full scale drilling simulator [D]. Rogaland, Norway: University of Stavanger, 2012.
- [8] 曾勇. 基于Unity3D的挖掘机模拟训练系统研究[D]. 西安:长

- 安大学,2013.
- ZENG Yong. Research of excavator simulated training system based on the Unity3D game engine[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [9] 王凤钦. 基于Unity3D凿岩台车虚拟培训系统的研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2016.
- WANG Fengqin. Research on virtual training system based on Unity3D drilling trolley[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.
- [10] 彭博,胡远彪. 水平定向钻进虚拟仿真培训系统研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(1):83-88.
- PENG Bo, HU Yuanbiao. Research on virtual simulation training system for HDD[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(1):83-88.
- [11] BAJPAI A, GHASEMI M, SONG X Y. Design and simulation of a lab-scale down-hole drilling system[C]//Archive Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part C. Journal of Mechanical Engineering Science, 2019,233(8):1-8.
- [12] 胡自飞,文国军,王玉丹,等. 基于Unity3D的岩心钻机虚拟实训系统设计[J]. 地质科技通报,2020,39(3):222-226.
- HU Zifei, WEN Guojun, WANG Yudan, et al. Design of virtual training system for core drill in Unity3D[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020,39(3):222-226.
- [13] 杨明晟,胡远彪. 基于Unity3D的岩心钻机模拟操作系统设计与实现[J]. 有色金属工程,2020,10(9):117-121.
- YANG Mingsheng, HU Yuanbiao. Design and implementation of core drilling simulation operating system based on Unity3D[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020,10(9):117-121.
- [14] 伍晓龙,刘凡柏. 4000 m岩心钻机桅杆结构与有限元分析[J]. 钻探工程,2021,48(1):88-94.
- WU Xiaolong, LIU Fanbai. Structural design and finite element analysis of the 4000m core drill mast[J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):88-94.
- [15] 高鹏举,董耀,刘凡柏,等. 5000米地质岩心钻机主绞车设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):40-45.
- GAO Pengju, DONG Yao, LIU Fanbai, et al. Design of the drawwork of 5000m geological core drilling rig[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):40-45.
- [16] 任启伟,刘凡柏,高鹏举,等. 5000米绳索取心绞车设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):46-52,57.
- REN Qiwei, LIU Fanbai, GAO Pengju, et al. Design of 5000m wireline coring winch [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):46-52,57.
- [17] 李文秀,孟义泉,董向宇,等. YDX-1型轻便岩心钻机的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(2):8-14.
- LI Wenxiu, MENG Yiquan, DONG Xiangyu, et al. Development of YDX-1 portable core drill and its application[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(2):8-14.
- [18] 张金昌,刘凡柏,冉恒谦,等. 2000 m地质岩心钻探关键技术与装备[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(1):3-8.
- ZHANG Jinchang, LIU Fanbai, RAN Hengqian, et al. Key technology and equipment of 2000m core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(1):3-8.
- [19] 刘凡柏,王庆晓,李文秀,等. YDX-2型全液压岩心钻机的研制[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(9):32-35.
- LIU Fanbai, WANG Qingxiao, LI Wenxiu, et al. Development of YDX-2 all hydraulic core drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2009,36(9):32-35.
- [20] 彭儒金,戴圣海,邱华,等. XY-6B型岩心钻机的研制与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(9):59-61.
- PENG Rujin, DAI Shenghai, QIU Hua, et al. Development and application of XY-6B core drill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(9):59-61.
- [21] 查小菲. 基于Open Scene Graph的数字矿井三维可视化系统的研究与开发[D]. 焦作:河南理工大学,2011.
- ZHA Xiaofei. Research and development of 3D visualization system of digital mine based on Open Scene Graph[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2011.
- [22] 肖鹏,刘更代. Open Scene Graph三维渲染引擎编程指南[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- XIAO Peng, LIU Gengdai. Open Scene Graph 3D rendering engine programming guide [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [23] 王大虎,刘海洋,王敬冲. 基于虚拟现实的采煤机培训系统开发[J]. 计算机仿真,2015,32(6):262-265,283.
- WANG Dahu, LIU Haiyang, WANG Jingchong. Development of shearer training system based on virtual reality [J]. Computer Simulation, 2015,32(6):262-265,283.
- [24] 王大虎,史艳楠,陈文博. 基于Quest3D的煤矿副井提升机虚拟实操系统的开发[J]. 制造业自动化,2014,36(17):114-117.
- WANG Dahu, SHI Yannan, CHEN Wenbo. Development of virtual operation system for auxiliary shaft hoist in coal mine based on Quest3D[J]. Manufacturing Automation, 2014,36(17):114-117.
- [25] 刘广志. 岩心钻探事故预防与处理[M]. 北京:地质出版社,1982.
- LIU Guangzhi. Prevention and Treatment of Core Drilling Accidents[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.
- [26] 付娜. 钻井过程中工况异常监测与预警系统研究与开发[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2014.
- FU Na. Research and development of abnormal condition monitoring and early warning system in drilling process [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2014.

(编辑 荐华)