

# 基于虚拟现实技术的实验教学改革与实践

## ——以土木工程中三轴实验教学为例

刘 聪<sup>1</sup>, 李锦辉<sup>1</sup>, 程 鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学(深圳)实验与创新实践教育中心, 广东 深圳

收稿日期: 2022年6月22日; 录用日期: 2022年7月20日; 发布日期: 2022年7月27日

### 摘 要

实验教学是创新人才培养的重要途径, 然而目前高校实验教学受到实验仪器短缺、实验周期过长、试错机会缺乏等弊端, 限制了大学生实验试错的机会和思考问题、解决问题的能力。为解决传统实验教学中存在的问题, 将虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术与工程实验课程相结合, 构建了虚拟实验系统, 探索了基于VR技术的实验教学在创新人才培养上的优越性。以土木工程中的三轴实验为例, 提出了基于三轴VR实验系统的“以学为本”、“虚实结合”的创新人才培养实验教学模式, 革新了实验教学课堂、提升了学生的兴趣, 为改善传统实验教学的缺陷提供了新的解决方案。

### 关键词

虚拟现实技术, 实验教学改革, 三轴实验

# Experimental Teaching Reform and Practice Based on Virtual Reality Technology

## —Taking Triaxial Test Teaching in Civil Engineering as an Example

Cong Liu<sup>1</sup>, Jinhui Li<sup>1</sup>, Peng Cheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen Guangdong

<sup>2</sup>Education Center of Experiments and Innovations, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen Guangdong

Received: Jun. 22<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Jul. 20<sup>th</sup>, 2022; published: Jul. 27<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Experimental teaching is an important way to cultivate innovative talents. However, experimental teaching in colleges and universities suffers from shortages of experimental instruments, which limits the ability of innovative talents to think and solve problems. The long experimental cycle and lacking of mistakes opportunities also restrict the innovative ideas. In order to solve problems during traditional experimental teaching course, the virtual reality technology is combined with engineering experimental course and a virtual experiment system is developed. Taking triaxial test in civil engineering as an example, this study puts forward experimental teaching mode of innovative talents cultivation based on triaxial VR experimental system, which is “learning-oriented” and “combination of virtual and real”, and innovates the experimental teaching class and enhances students’ interest. This study provides a new solution to improve traditional experimental teaching course.

## Keywords

Virtual Reality Technology, Experimental Teaching Reform, Triaxial Tests

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着计算机技术的高速发展,虚拟现实(Virtual Reality, VR)技术逐渐走向人们的视野之中,这项新的技术由于其 3I 的特性(沉浸感(Immersion)、交互性(Interaction)和想象性(Imagination)),被越来越多的人喜爱,并逐渐广泛应用在教育、医疗、军事、娱乐等诸多领域[1] [2]。2018 年工信部颁发的《关于加快推进虚拟现实产业发展的指导意见》落地,文件提出“VR + 教育”,打造虚拟实训基地,提高专业技能训练水平,满足各领域专业技术人才培养需求。在国家高等工程教育改革方面,教育部在 2018 年召开了第一次中国高等学校本科教育工作会议,提出推动建设虚拟仿真“金课”,明确将加强实践教学,提高大学生创新实践能力作为重点内容[3]。应用信息技术推进实践教学模式改革,正在成为当前教育改革的核心问题和主要方向[4] [5]。

## 2. 实验教学当下存在的问题

实验教学对于理论的深入理解和推陈出新,对于创新人才培养尤为重要。然而传统实验教学中依旧存在诸多问题,以土木工程学科实验教学为例,问题主要体现在以下几个方面:

1) 由于实验仪器昂贵或者缺乏,实验动手操作环节被观摩实验所取代,学生没有动手操作的机会,缺乏对于实验和理论的直观理解,不利于创新人才的培养。

2) 在大部分教学过程中,理论部分的讲授在课堂上进行,而由于学生多、设备少、实验周期长等原因,导致学生很难有机会重复操作实验并探索规律,从而“思辨创新”效果不理想。

3) 由于传统的工程实验大多是验证实验,按照操作手册按部就班的实验模式缺乏趣味性,学生只能是被动地接受知识,而不能主动地探索知识,这对于创新人才培养而言弊端尤显。

所以,传统实验教学存在着“缺乏实验平台,缺乏试错机会,缺乏创新实践”的问题,不利于国家

大力提倡的创新人才培养，亟待发展能够解决上述实验教学弊端的新教学模式，提升学生在实验教学过程中的兴趣，提高学生的创新实验能力，培养工程创新人才。

本项目以土木工程中的三轴实验为例，结合 VR 技术提出了一个不受时间、空间以及场地等诸多因素限制的虚拟现实三轴实验新方法，用来解决上述传统实验教学中实验平台缺乏、试错机会缺乏、以及创新实践缺乏的问题。

### 3. 基于 VR 技术的三轴实验教学改革

#### 3.1. VR 技术研究现状

虚拟现实技术作为一种新兴的计算机技术，通过充分调动人的各种感觉器官包括视觉、听觉、触觉等，使佩戴 VR 设备的用户能够身临其境地体验并且与虚拟出来的场景进行感知交互(图 1) [6] [7]。目前 VR 技术主要的硬件是虚拟现实头盔以及手柄等(图 2)。

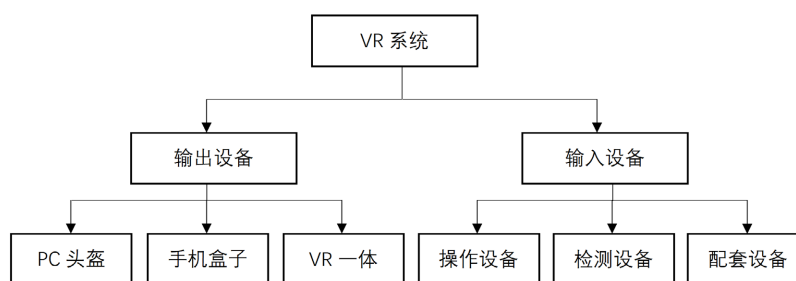


Figure 1. Composition of VR equipment

图 1. VR 设备构成



Figure 2. VR helmet illustration

图 2. VR 头盔图

目前，VR 技术在各个领域应用已较为广泛，但与土木工程的结合研究在国内仍然较少，主要应用集中在建筑展示以及教学模拟方面。东北大学研究出了一套基于虚拟现实技术与数值仿真技术的矿山数据分析处理的集成系统[5]；辽宁石油化工大学构建了建筑工程虚拟实训系统[8]；沈阳工业大学构建了基于云端的三维建筑方案展示系统[9]。在国外，VR 技术与土木工程的结合主要应用在建筑施工以及教学模拟方面。新西兰的 Massey 大学提出了将 VR 技术与增强现实技术应用在土木工程中，展示工程施工过程的诸多细节，以此减少安全隐患[10]。而葡萄牙里斯本理工大学与波尔图大学用虚拟现实技术模拟建筑工程的一些材料以及设备，为土木工程的教学提供了更加生动的展示方案[11]。目前研发的土木工程虚拟仿真教学系统尚属较少，而且绝大部分系统还仅仅停留在展示阶段，未能实现身临其境的教学体验，交互式的实验过程以及深入的理论分析和错误反馈。

#### 3.2. 三轴 VR 实验系统功能设计

通过 VR 建模语言、网络多媒体制作工具，设计制作实验仪器(三轴仪等)模型，仿真渲染了土木工程

实验仪器(图 3)。所架构的 VR 系统模拟的是固结不排水三轴剪切实验,分为试样安装、反压饱和、固结排水、不排水剪切四个过程。其中,试样安装阶段主要是通过安装透水石、上盒帽、压力室罩以及螺栓等完成对三轴实验中土体的安装工作;试样的反压饱和阶段是通过对虚拟的 GDS 压力体积控制器进行操作,逐级施加反压与围压,通过对虚拟面板中的孔隙水压力计算得到相应的  $B$  值,判断试样是否达到饱和状态;试样的固结排水阶段通过操作虚拟的控制器对试样进行施加固结压力操作,通过虚拟面板得到的孔隙水压力判断试样是否达到固结要求;试样的不排水剪切阶段则是通过在 UI 面板设定剪切速率,记录孔隙水压力-轴向应变与偏应力-轴向应变曲线。

在 VR 开发平台中导入实验相关操作,通过对 VR 环境的模拟与仿真,建立三轴 VR 实验系统,并实现系统原理演示、多功能仿真、错误诊断、数据模拟等多功能(图 4),最终能让学生在 VR 设备中操作整个实验流程。所开发的三轴 VR 实验系统能够模拟固结排水实验、固结不排水实验、不固结不排水实验。学生通过手柄与虚拟环境中的实验仪器互动,从而实现整个三轴实验流程的亲自操作,并获得与在传统实验室进行三轴实验相同的感受。实现了让学生戴上 VR 头盔能操作三轴实验、观测相关实验数据的功能。

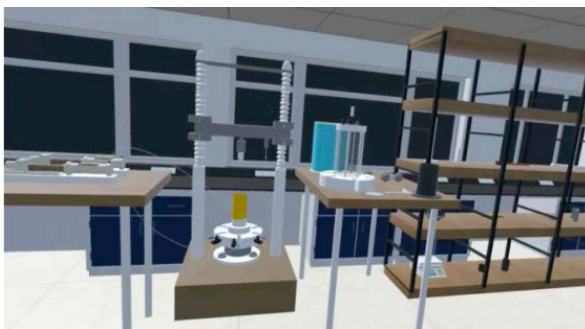


Figure 3. Three-axis experimental scene simulated by VR  
图 3. 三轴实验场景 VR 模拟

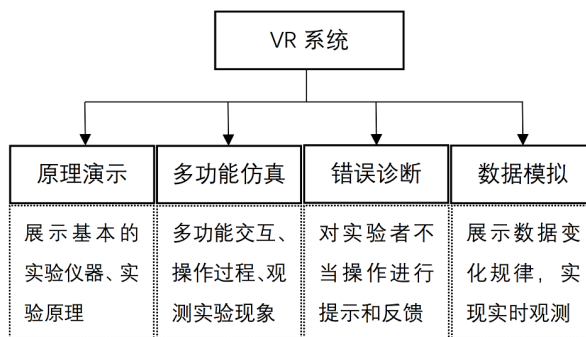


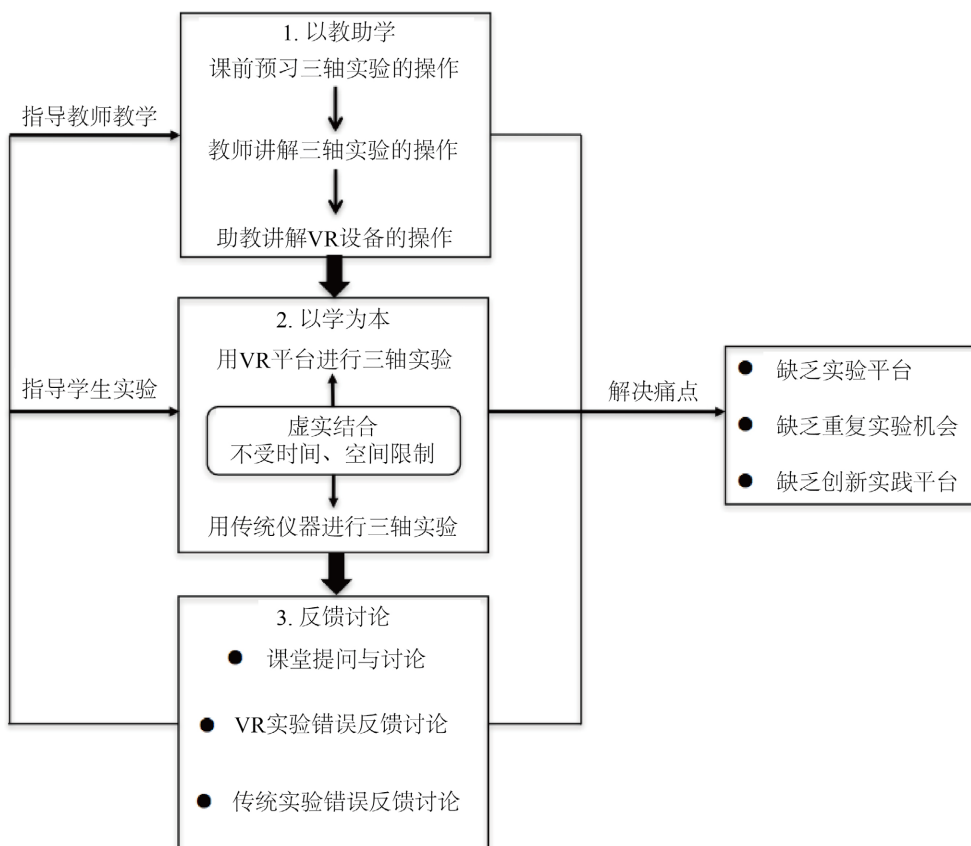
Figure 4. The functional architecture of the three-axis VR experiment system  
图 4. 三轴 VR 实验系统功能架构

系统为学生提供了一套相对完备的纠错机制和一个可进行创新实验探索的接口。其中纠错机制是通过将实际操作实验中常见的错误现象转化为 VR 模拟出来的现象来实现。学生进入三轴 VR 实验系统进行实验,一旦在实验过程中出现了错误,系统就能显示错误现象,并给出相应的错误提示,可培养学生的批判性思维。同时我们还预留了可以扩展编译的接口,当学生想尝试完成一些创新实验,如进行应力路径三轴实验或考虑温度影响的三轴实验,都可根据自己的想法在原系统的基础上进行编译,并可在编

译后进行实验验证。上述系统的两大特色丰富了创新人才培养教学体系，同时也为实验教学创新人才培养保驾护航。

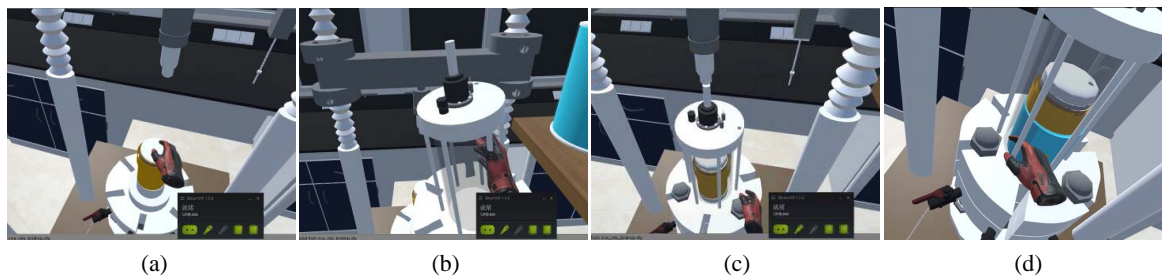
### 3.3. 教学改革流程设计

在课程改革实施中，基本流程主要包括以下三个阶段(图 5)：

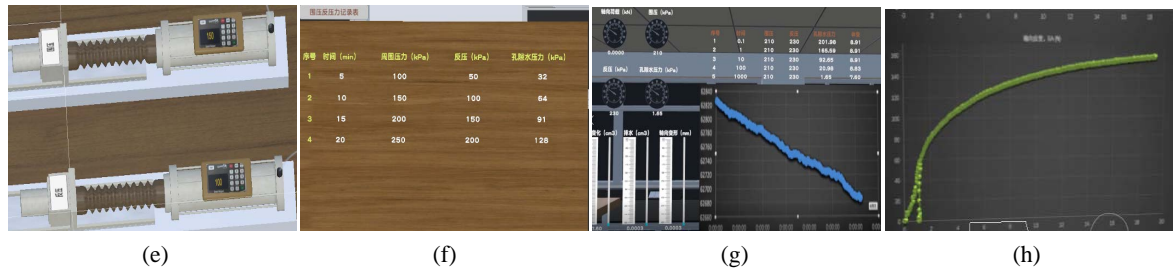


**Figure 5.** The flow chart of the three-axis VR experiment system teaching  
**图 5.** 三轴 VR 实验系统教学流程图

1) 第一阶段为“以教助学”阶段，通过教师以及助教的讲授演示达到帮助学生学习的目的。学生先进行课程预习，在课堂环节中教师讲授相关理论和实验基本原理，然后由助教戴上 VR 设备引导学生进行相应的演示操作，最后由学生自己戴上 VR 设备进行虚拟实验，实验中的部分步骤模拟场景见图 6。整个过程不需要昂贵的实验仪器和专门的实验空间，克服了传统实验教学的缺点。



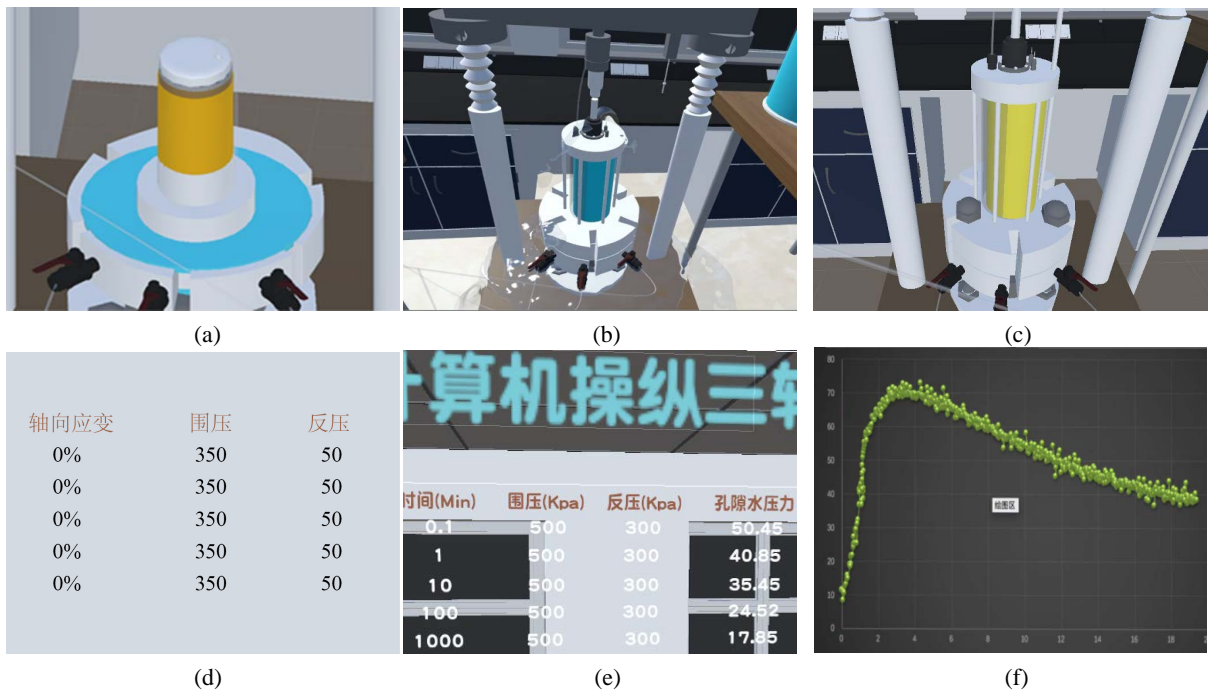




**Figure 6.** Some virtual interfaces in VR system. (a) Install the sample; (b) Install the pressure chamber; (c) Tighten the screws; (d) Fill the pressure chamber; (e) Apply cell pressure and (f) Detect B value; (g) Drain consolidation; (h) Cut curve back pressure to saturate

**图 6.** VR 系统中的部分虚拟界面。(a) 安装试样；(b) 安装压力室；(c) 拧紧螺丝；(d) 压力室注水；(e) 施加围压、反压进行饱和；(f) B 值检测；(g) 固结排水；(h) 剪切曲线

2) 第二阶段为“以学为本”阶段，在课堂中引入试错式教学。我们在虚拟现实环境下发展了一套具有纠错机制的程序，纠错机制中的错误主要分为三大类，第一类是由仪器本身老化问题引起的错误，例如施加压力过大时三轴仪管路发生漏水现象。实现的方法为：设定触发事件为在放置土样之前设置控制器的压力大于 2 MPa，响应事件为漏水的发生。当学生在实验过程中设置过高的压力时，会导致三轴仪漏水，见图 7(a)。学生在看到出现错误后，便会思考其出现的原因，通过不断地尝试错误、重复试错，从而培养其主动分析问题、解决问题的能力。



**Figure 7.** Part of common mistakes in virtual reality simulation scenarios. (a) Triaxial instrument leaks; (b) Water leakage due to incomplete sealing; (c) Soil sample seeps into pressure chamber; (d) Axial strain not recorded; (e) Pore pressure measurement error; (f) Getting wrong curve when clipping

**图 7.** 部分常见错误的虚拟现实仿真场景。(a) 三轴仪漏水；(b) 未完成密封导致漏水；(c) 土样渗入压力室中；(d) 轴向应变未记录；(e) 孔压测量错误；(f) 剪切时得到错误曲线

第二类是由实验操作不当引起的错误，包括橡胶圈未安装导致漏水、压力室螺栓未安装导致漏水、

反压压力比围压大导致试样膨胀破坏、甚至是施加压力过大导致有机玻璃的压力室发生爆炸等。依托虚拟平台模拟仿真错误结果,部分仿真效果见图 7(b)。

第三类则是由学生理解不到位引起的错误,VR 程序可对如下错误进行模拟:因橡皮膜未扎紧,导致试样通水后渗入压力室中,见图 7(c);轴向百分表杆未安装,导致轴向应变未记录,见图 7(d);固结之前未关闭排水阀或打开了上下两个阀门,导致固结过程成为了双向排水情况,记录的孔隙水压力结果不准确,见图 7(e);反压饱和时在计算得到的  $B$  值还未达到规范饱和要求( $B > 0.97$ )时就进行了下一步操作,导致剪切时得到了错误的曲线,见图 7(f)。

系统将三轴实验中容易出现的错误进行了重现以及相应的错误反馈。学生能够在虚拟环境下进行反复试验探索、重复纠错试验等操作,解决了以往按部就班的实验教学流程带来的缺乏思考、缺乏试错机会等问题。

3) 第三阶段为“反馈讨论”阶段,一方面,在学生操作实验后,教师针对 VR 实验系统以及传统实验中出现的错误与反馈进行相关概念的讲解;另一方面,在实验课堂上,学生与学生、学生与教师之间进行自由的提问与讨论,达到丰富知识体系、拓展知识结构的目的。此环节对教师而言,便于修改教学计划引导学生学习;对学生而言,学生通过对 VR 系统的错误反馈以及传统实验的操作错误进行反思,接着重复完成实验达到掌握实验的目标要求,最终学生能够独立完成在传统实验室中的三轴实验。通过此环节培养了学生独立思考的习惯、训练自主解决问题的能力。

本套教学系统坚持“以教助学”、“以学为本”的理念,通过“虚实结合”的手段将传统实验教学过程中的诸多问题化解。学生可以通过三轴 VR 实验系统养成自主学习的习惯,训练严谨的实验能力,培养批判性的思维方式。

## 4. 改革的效果及思考

本套三轴 VR 实验系统作为一种全新的教学模式,辅助了传统的土木工程实验教学,当学生戴上头盔进行三轴 VR 实验时提高了学生的兴趣,学生能够不受时间、空间的操作虚拟实验,熟练掌握实验方法与基本操作,创造性的进行实验探究,观察实验规律。

本套系统将“以学为本”、“以教助学”的创新人才培养理念放在首位,以启发学生进行独立思考为核心,采用“虚实结合”的手段有效解决了创新人才培养问题中存在的“缺乏实验条件,缺乏重复实验机会,缺乏创新实践平台”的传统实验教学缺陷,为实验教学创新人才培养提供了新的方案。

此外,为积极响应国家提出的“新工科创新人才”发展战略目标[12],哈尔滨工业大学(深圳)土木工程学院将 VR 技术应用在土木工程创新人才培养上,后续还将推出土木工程学科竞赛 VR 平台、土木工程科研虚拟平台等多方位多层次教学训练平台,为创新人才培养提供更好的平台,让学生能从不同的实践层面上提高专业性技能,培养创新实践的能力。

## 基金项目

广东省教改项目“基于试错试验的批判性思维培养与创新实践”(HITSZERP19008)、哈尔滨工业大学(深圳)校级教改项目“虚拟现实技术革新课堂教学模式的实践研究”(HITSZERP18003)。

## 参考文献

- [1] 孙海波. 试述虚拟现实技术在土木建筑工程中的应用[J]. 大陆桥视野, 2017(10): 227.
- [2] 梁宇涛. 基于网络的虚拟现实技术在高校实验教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2006(23): 81-85.
- [3] 陈宝生. 在新时代全国高等学校本科教育工作会议上的讲话[J]. 中国高等教育, 2018(Z3): 4-10.

- [4] 高媛, 刘德建, 黄真真, 黄荣怀. 虚拟现实技术促进学习的核心要素及其挑战[J]. 电化教育研究, 2016, 37(10): 77-87+103.
- [5] 张俊, 施文波, 郭晨. 虚拟现实技术及其应用[J]. 科技与创新, 2017(22): 159-160.
- [6] 睦依凡. 大学: 如何培养创新型人才—兼谈美国著名大学的成功经验[J]. 中国高教研究, 2006(12): 3-9.
- [7] 赵文春. 论高校创新人才培养的理念和制度[J]. 成才之路, 2017(26): 1-2.
- [8] 王守平, 陆海燕, 宁宝宽, 等. 基于虚拟现实技术的云端建筑方案展示系统[J]. 建筑设计, 2018(1): 59-62.
- [9] 刘溪鹤, 杨天鸿, 张鹏海, 等. 基于虚拟现实技术的岩石力学数值计算与三维可视化[J]. 金属矿山, 2015(8): 20-23.
- [10] Xiao, L., Wen, Y., *et al.* (2018) A Critical Review of Virtual and Augmented Reality (VR/AR) Applications in Construction Safety. *Automation in Construction*, **86**, 150-162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.11.003>
- [11] Alcínia, Z.S. and Miguel, M. (2010) 3D and VR Models in Civil Engineering Education: Construction, Rehabilitation and Maintenance. *Automation in Construction*, **19**, 819-828. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.05.006>
- [12] 王学通, 王浩, 乔坛, 等. “新工科”背景下工程创新人才培养模式探索[J]. 才智, 2019(8): 63.