

引用格式:蒋蕊,孙慧莹,张诗钰,等. 基于虚拟仿真游戏的化学实验室隐患排查能力训练系统开发[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2026,53(5):104-116.

JIANG Rui, SUN HuiYing, ZHANG ShiYu, et al. Development of a virtual simulation game-based system for chemical laboratory hazard identification capability training[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science),2026,53(5):104-116.

基于虚拟仿真游戏的化学实验室隐患排查能力训练系统开发

蒋蕊 孙慧莹 张诗钰 高琪雯 杨腾茜

(北京化工大学 艺术与设计系, 北京 100029)

摘要:针对高校化学实验室安全教育中存在的学生安全意识薄弱、隐患排查能力不足、传统培训形式单一且与实践脱节等问题,设计开发了一套基于虚拟仿真的游戏化训练系统。该系统以 Unity 3D 引擎为基础构建了高真实度的化学实验室虚拟环境,依托《高等学校实验室安全检查项目表(2025)》构建了涵盖 6 大模块的隐患知识库,并围绕“侦察—识别—行动”核心训练循环,综合运用任务驱动、积分奖励、即时反馈与隐患随机化等游戏化机制,形成以隐患排查为核心玩法的互动训练系统。系统共设计 11 项隐患排查任务,并针对 5 类核心隐患开发了拼图、接废液、记忆翻牌、猜密码、打地鼠的知识巩固小游戏。通过沉浸式、交互式虚拟实验场景的创设,系统将被动接受的安全知识转化为主动探索的互动任务,为培养学生主动发现、识别与规避安全风险的能力提供了新颖有效的数字化工具,对于高校实验室安全教育模式创新、校园安全文化构建具有积极的实践意义。

关键词:虚拟仿真; 游戏化学习; 化学实验室; 隐患排查; 安全教育; 系统设计

中图分类号: G434; O6-37 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2026.05.011

引言

化学实验室是高校开展人才培养与科学研究的重要载体,其安全运行直接关系到师生人身安全与学校资产保障^[1]。由于化学实验普遍涉及危险化学品、高压气体、高温设备等诸多危险源,加之部分学生安全意识薄弱,风险识别能力不足,实验室安全事故频发。据统计,1984—2024 年国内高校发生 176 起实验室事故,共造成 247 人伤亡^[2],其中绝大多数事故由人为因素引发,未能及时发现并排除潜在的安全隐患是事故发生的核心诱因之一^[1]。因此,如何有效提升学生,特别是新进入实验室学生的安全隐患主动排查能力,已成为高校实验室安全

管理亟待解决的关键问题。

当前,高校的实验室安全教育多采用集中讲座、发放安全手册、组织视频学习等传统的单向知识传授模式^[3]。此类方式虽能完成基本知识的普及,但其固有的去情境化与被动灌输特征限制了教育成效,学生难以在抽象的理论知识与具体的实验环境之间建立有效关联,对隐患的形态特征、分布规律及潜在危害缺乏直观感知,导致“知行脱节”。同时,真实实验环境难以支持学生进行反复试错与风险应对演练,使其难以积累排查与处置隐患的第一手经验。

近年来,虚拟仿真技术与游戏化学习的融合发展为破解上述困境提供了可行的路径。通过构建高保真的虚拟环境,学生能够在零风险的前提下沉浸于高度还原的化学实验室场景中,开展自主探索与重复训练。这种体验式学习能够显著提升知识的保留率与行为迁移的能力^[4]。国内部分高校已开展有益的探索实践,如北京科技大学开发了化学实

收稿日期:2026-03-24

基金项目:北京化工大学实验室安全管理能力提升三年行动计划重点课题(PT2523)

第一作者:女,1988 年生,副教授

E-mail:rjiang@mail.buct.edu.cn

验室安全教育虚拟仿真实验教学系统^[5],兰州大学构建了化学实验室安全教育互动式3D虚拟仿真实验系统^[6]。这些系统通过三维场景还原与交互操作,有效提升了学生对基础安全知识的认知水平和规范操作的掌握程度。然而,现有系统多侧重于规范操作的演示与知识点的单向展示,尚未针对“隐患排查”这一核心能力构建系统的训练机制。学生仍需在真实环境中反复试错来积累经验,而在真实条件下难以实现高频次、多样化隐患情境的演练,导致其面对复杂多变的实验环境时,主动发现、识别与处置隐患的能力仍显不足。当引入任务挑战、积分奖励、即时反馈等游戏机制后,学生的学习动机得到激发,参与度得到提升,枯燥的安全规程得以转化为富有吸引力的互动体验^[4],但如何将这些机制与隐患排查能力的培养目标深度融合,仍是当前研究亟需突破的关键点。

为此,本研究围绕化学实验室安全隐患排查能力的培养,开展虚拟仿真训练系统的设计与开发。通过系统性的需求分析构建结构化的训练内容体系,以教育部发布的《高等学校实验室安全检查项目表(2025)》为依据,将其条文式安全规范系统转化为《实验室安全检查与隐患排查游戏策划方案》及可交互的游戏原型,实现了安全教育知识从“文字描述”到“场景呈现”的可视化。系统基于Unity引擎搭建高真实度的虚拟实验环境,并融合任务驱动、即时反馈、随机化机制等游戏化元素,旨在为学生提供沉浸式、可重复的隐患排查训练工具,为高校实验室安全教育模式创新提供理论与实践参考。

1 用户需求调研

为确保系统设计切实回应目标用户的真实需求,本研究在系统开发前开展了系统性的用户需求调研,围绕游戏关卡设计偏好、互动机制需求及知识传递方式等维度收集实证依据。

1.1 调研设计与样本特征

本次调研采用结构化问卷作为核心工具,围绕基本信息、实验室安全认知与游戏基础需求、关卡设计偏好、互动机制需求、使用体验与改进建议5个维度设置15个问题,题型涵盖单选、多选与开放性问题。调研于2025年3月至4月依托问卷星平台以匿名形式开展,面向具备理工科实验室使用经验的师生群体,通过学生论坛、学术社群等渠道链式传

播,覆盖北京化工大学、山东大学等多所高校。经系统清洗剔除无效样本后,最终获得有效样本668份,其中大一新生占11.2%,大二至大四本科生合计占53.7%,硕士生占24.7%,博士生占7.3%,教师占3.1%。

1.2 结果分析

在用户背景方面,高频使用实验室者(每周3次以上)的占比超过半数(53%),表明样本具备较强的实验场景接触基础。尽管92.8%的受访者曾接受安全培训,但培训次数多集中于1~5次,整体呈现“覆盖面广、频次不足”的特征,反映出现有安全教育体系在深度与持续性上的结构性缺口。

在学习需求与接受度方面,用户对游戏化安全教育的认可度较高(71.1%接受,其中28%为高度接受),核心学习需求集中于快速识别安全隐患(占比77.5%)、掌握安全操作规范(占比75.6%)及隐患整改方法(占比74.3%)。用户倾向于关键节点讲解、操作后反馈、总结复盘的多阶段知识支持结构,单一讲解模式难以满足需求。

在交互体验与设计偏好方面,用户期望的关卡时长以5~10 min为宜,单次体验以10~20 min为最优区间。在反馈机制方面,错误操作警示(占比84.1%)与知识补充说明(占比78%)为最核心需求。在玩法形式方面,用户更偏好记忆翻牌、连连看等轻认知负荷、目标明确的益智类游戏,对复杂逻辑类玩法的接受度较低。对现有同类产品的主要不满集中于互动形式单一(占比68%)、知识与操作脱节(占比61%)及趣味性不足(占比40%),集中反映出“形式游戏化而非体验游戏化”的普遍缺陷。

基于扎根理论对线下访谈的文本资料进行三级编码,提炼出基于虚拟仿真游戏的化学实验室隐患排查能力训练系统的需求要素体系。该体系包括安全认知提升效果、关卡设计合理性、互动机制体验、使用便捷性和用户接受度5个维度及其下属的15个子维度,如表1所示。

1.3 对系统设计的启示

上述调研结论在以下3个层面直接指导了系统设计。1)在关卡设计层面,以约15 min的中等复杂度关卡为主体,辅以5 min以内的短关卡作为补充,以控制认知负荷与操作疲劳风险;场景构建参照真实实验室布局,还原仪器操作规范、试剂存放管理等高频事故隐患情境,以提升训练的生态效度与知

表1 基于扎根理论编码的访谈要素维度
Table 1 Interview element dimensions based on grounded theory coding

选择性编码	主轴编码	开放式编码
安全认知提升效果	安全隐患识别,能力提升	风险识别、隐患发现、危险判断能力
	安全操作,规范掌握	实验操作规范、流程遵守、安全标准理解
	应急处置,能力提升	应急响应、事故处理、危机应对
关卡设计合理性	关卡时长,适宜性	时间控制合理、任务节奏匹配
	场景真实性	情境还原、实验环境仿真、沉浸感
	反馈机制有效性	即时反馈、结果提示、纠错机制
互动机制体验	知识讲解互动性	讲解方式互动、参与式学习
	游戏任务趣味性	任务设计趣味、玩法吸引力
	多人协作可能性	合作机制、协同完成任务
使用便捷性	多端适配性	设备兼容、跨平台使用
	操作简易性	操作直观、学习成本低
	更新维护便利性	系统更新、维护成本、持续使用
用户接受度	用户接受水平	满意度、认可度
	使用频率意愿	使用意愿、持续使用倾向
	推荐意愿	分享意愿、推广意愿

识迁移能力。2)在反馈机制层面,构建覆盖完整操作流程的向导式动态反馈体系。操作错误时实时报错并反馈正确知识点,操作正确则给予正向强化,关卡结束后针对未识别隐患提供引导式补充与知识点解析。3)在互动机制层面,按“操作中简要提示—操作后即时说明—关卡结束汇总回顾”三级结构递进呈现知识内容,优先选取记忆翻牌等益智类游戏形式,以教育目标为约束条件严格规避纯娱乐性交互内容,确保趣味性与教育有效性的协同统一。

访谈数据表明,教师对系统的核心诉求集中于以下3点:课堂时间的可控性,教学内容与课程知识点的匹配度,以及无需额外操作培训的低门槛接入性。基于上述需求特点,系统设计采用模块化游戏单元,教师可根据授课内容灵活选取特定游戏模块嵌入课堂,实现模块化、轻量化教学,而无需要求学生完成完整的隐患排查全流程。

2 系统总体设计

基于上述需求调研结论,研究明确了系统在关卡时长、场景还原、反馈机制与互动形式等方面的核心设计方向。本节从设计理念、系统总体架构与隐患知识库3个层面,系统阐述系统的整体设计

逻辑。

2.1 设计理念

建构主义学习理论指出,知识并非被动接受,而是学生在具体情境中主动建构的产物^[7]。基于这一认知,本研究将心流理论引入系统设计,通过设置挑战与技能动态匹配的任务结构,引导学生主动参与训练,以提升学习参与度、效率与知识转化率。系统以虚拟仿真与游戏机制的有机融合为核心手段,构建兼具安全性、高效性与沉浸感的化学实验室隐患排查训练情境,将原本枯燥抽象的安全教育转化为富有吸引力的互动体验。在学习目标上,系统旨在帮助学生以第一人称视角沉浸于高度还原的虚拟实验场景,快速识别各类安全隐患,掌握隐患处置的正确方法与应急操作流程,最终形成主动排查风险的行为习惯。

2.2 系统总体架构

本系统采用分层架构设计,由内容资源层、仿真呈现层、游戏化机制层与用户交互层4部分构成,形成从教学内容到学习行为的全流程数字化闭环,如图1所示。

内容资源层以《高等学校实验室安全检查项目表(2025)》为核心依据,将条文式安全规范转化为结构化的隐患知识库,涵盖个体防护、危险品管理、

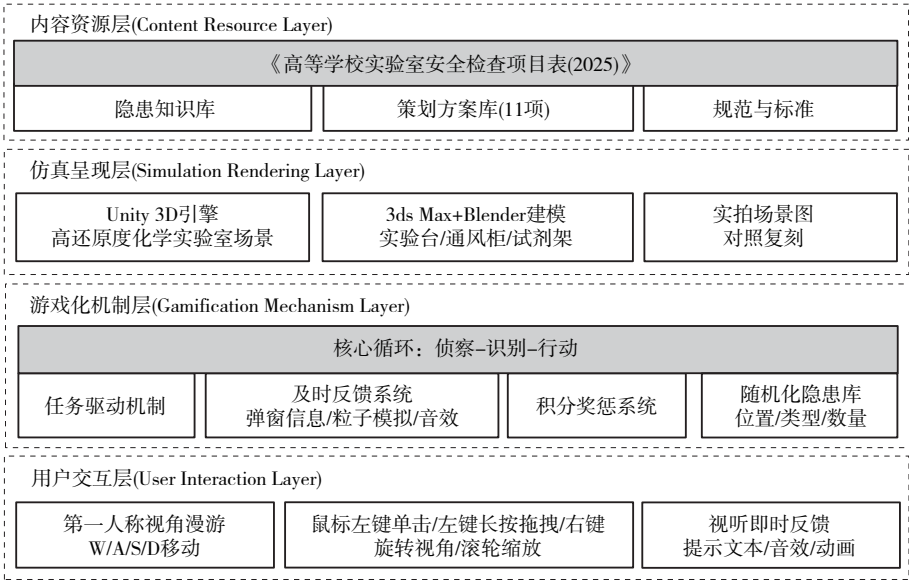


图 1 分层架构设计图

Fig. 1 Layered architecture design diagram

气体与压力安全、应急处理、用电安全、场所与环境 6 大核心模块,并据此形成《实验室安全检查与隐患排查游戏策划方案》,为上层系统提供权威、系统的教学内容支撑。仿真呈现层基于 Unity 3D 引擎搭建高真实度的化学实验室虚拟场景,通过 3ds Max 与 Blender 完成实验台、通风柜、试剂架、仪器设备等元素的精细化建模,并利用粒子系统模拟事故后果,使隐患危害性得以具象化呈现,增强学生对风险事件的直观感知。游戏化机制层围绕“侦察—识别—行动”核心循环,集成任务驱动、即时反馈、积分奖励与隐患随机化等机制,将排查训练组织为目标明确的任务链,并通过动态调整隐患的位置与类型组合,有效避免学生形成机械记忆,提升训练的泛化能力。用户交互层支持第一人称视角漫游、点击交互与多模态反馈,并实时记录操作路径、错误类型

与决策时间,为后续学习效果评估与系统迭代提供数据支撑。

2.3 化学实验室隐患知识库构建

隐患知识库的构建以《高等学校实验室安全检查项目表(2025)》以及北京化工大学实验室安全检查队伍培训材料为权威依据,系统梳理了化学实验室常见安全隐患的类型、特征与判定标准,涵盖实验场所、安全设施、基础安全、化学安全、特种设备等多个维度。在此基础上,研究团队进一步整合了高校化学实验室典型事故案例,将事故诱因反向映射为隐患特征,使知识库兼顾“合规性”隐患与“风险性”隐患,增强训练的实战价值。依据《高等学校实验室安全检查项目表(2025)》的结构框架,结合化学实验室常见风险特征,最终将隐患知识库划分为 6 大核心模块,如表 2 所示。

表 2 化学实验室隐患知识库分类体系

Table 2 Classification system of hazard knowledge base in chemical laboratories

模块名称	隐患类型示例	对应的安全检查要点
个体防护	未穿戴实验服,未佩戴护目镜,长发未盘入帽内	8.2 个体防护
危险品管理	化学品标签缺失,试剂混放,易燃品靠近热源	9.3 实验室化学品存放
气体与压力安全	气瓶未固定,可燃气体与助燃气体混放,管路老化	9.6 实验气体管理
应急与消防	消防通道堵塞,灭火器过期,洗眼装置被遮挡	7.1 消防设施,7.2 应急喷淋
用电安全	接线板串接,配电箱遮挡,大功率设备未用专线	8.1 用电用水基础安全
场所与环境	实验台杂乱,通风柜挡板过高,安全信息牌缺失	6.1 场所环境

3 游戏化训练机制

在明确系统总体架构与内容资源体系的基础上,游戏化训练机制的设计成为驱动教学效果落地的关键环节。本节从核心循环训练、任务目标引导、行为强化、提示与惩罚、隐患随机化5个维度,系统阐述系统如何将安全知识转化为可操作的游戏化学习体验。

3.1 核心循环训练

游戏化学习的有效性取决于有意义的交互循环与即时反馈机制的系统整合。若缺乏结构化的行为模型支撑,游戏化系统易流于形式,难以产生持久的学习成效。为此,本研究借鉴游戏设计中的“核心循环”(core loop)理念^[8],将实验室安全巡查流程重构为“侦察—识别—行动”(detect-identify-act, DIA)的行为训练闭环,如图2所示。

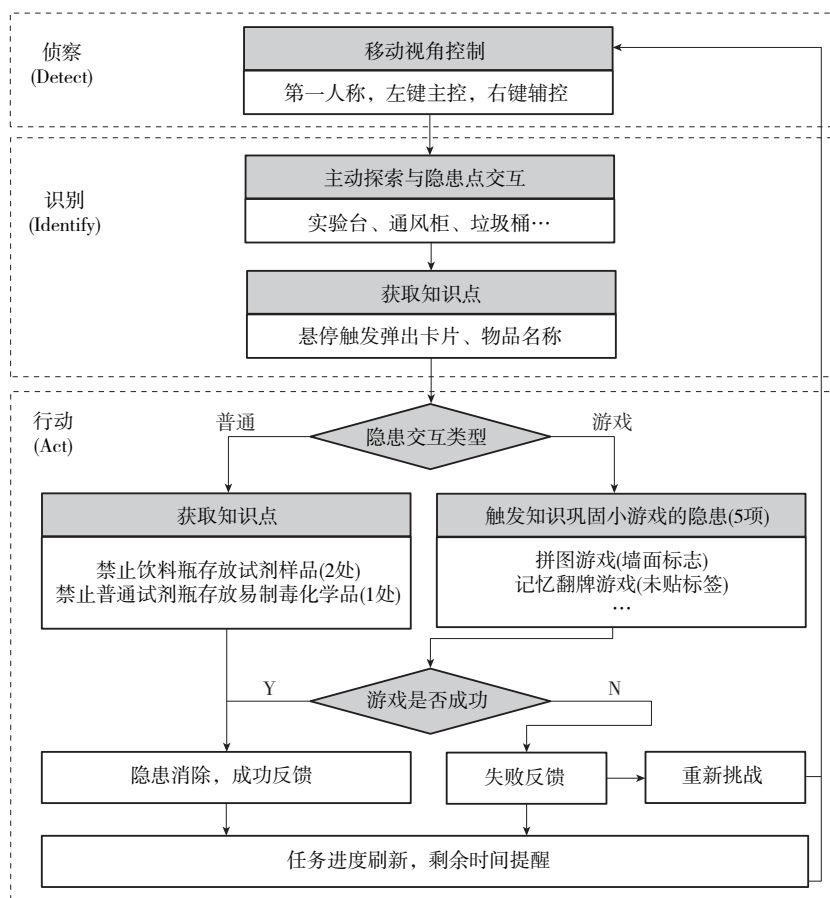


图2 任务总体流程与DIA核心循环图

Fig. 2 Overall task flow and DIA core flowchart

在侦察阶段,系统向学生发布明确的任务目标,学生在虚拟实验室场景中通过视觉线索(空白标识、滴落液体、无标签试剂瓶等)与交互提示(可点击区域高亮)定位潜在隐患,将“被动发现问题”转变为“带目标的主动搜索”,训练情境感知与信息筛选能力。在识别阶段,学生对已发现的异常线索进行判断与分类,包括识别隐患类型、分析违规原因及选择正确的处理路径,强化对安全规范的理解与风险判断能力。在行动阶段,系统将隐患处理转化为具体的关卡化操作任务,如拼图修复安全

标志、拖拽收集废液、翻牌匹配危险标签等,引导学生将抽象的规范转化为可执行的行为技能,实现“认知—决策—操作”的闭环落地。操作完成后,系统即时给予反馈并驱动下一轮循环,随着隐患库复杂度的递进,学生逐步实现从单一隐患识别到多隐患综合处理的能力进阶。

3.2 任务驱动与目标引导机制

米哈里·契克森米哈赖(Mihaly Csikszentmihalyi)的心流理论指出,当个体面临的挑战水平与自身技能水平达到动态平衡时,内在动机将得到充分

激活^[9]。基于这一理论,系统为每次隐患排查任务设定明确目标,引导学生将有限的认知资源集中于关键安全行为的识别与执行,有效降低无关认知负荷。与此同时,系统引入时间压力机制,每次巡查任务均配有全程倒计时,并在特定情境中触发“紧急事件倒计时”提示,模拟真实实验室突发状况下的时间约束,使训练体验更接近真实应急场景中的高唤醒状态,与心流理论中“时间感改变”的特征形成正向呼应。

3.3 操作性条件反射机制

斯金纳(Skinner)的操作性条件反射理论指出,行为后果决定该行为未来发生的概率^[10]。基于这一原理,系统构建了正向强化与负向反馈相结合的激励机制。学生正确识别并处置隐患时,系统即时奖励积分并弹出正向提示,说明该隐患的正确处理方式,强化正确行为、促进知识内化。针对错误操作或超时未发现的隐患,系统即时展示后果仿真动画并指出错误原因与正确做法,打破“不知其错”或“一错再错”的循环,帮助学生建立正确认知,同时通过明确的再挑战引导避免因中断训练而产生挫败感。

3.4 提示与惩罚机制

为维持合理的任务难度与认知负荷,系统提供适量的提示功能,帮助学生在遇到困难时定位隐患。提示可采取视觉高亮、文字说明或音效引导等形式,但使用次数受到限制,以鼓励学生自主探索。同时,为避免学生产生盲目点击行为,系统引入了惩罚机制,具体包括错误点击扣减分数、频繁错误减少剩余时间、超出提示次数限制后关闭提示功能等。惩罚机制使学生在行为选择上更加谨慎,更贴近真实实验室风险环境中的操作要求,从而提升训练的严肃性与有效性。

3.5 隐患随机化机制

心理学研究表明,人们对可预测的奖励易产生习惯化,而对随机性奖励则能保持长久的好奇心与参与动机^[11]。同济大学开发的化学实验安全教育游戏采用了随机化设计,每次考核随机呈现10~15个安全隐患,要求学生全部找出并消除^[12]。基于这一原理,本系统在隐患呈现方式上采用随机化机制,即每次进入实验室场景时,系统从隐患库中随机抽取部分隐患,并对其位置、类型组合与显隐难度进行动态布置。引入随机因素可有效避

免学生形成固定路径或机械记忆模式,使每次训练都具有新鲜感与挑战性。同时,这一设计也更符合真实实验室巡查的特点,即现实中的隐患位置与类型往往变化无常,需要实验人员保持持续警觉与敏锐度,从而有效提升训练的泛化能力与实战价值。

4 系统实现

在完成游戏化训练机制设计的基础上,本节进一步阐述系统的技术实现路径,涵盖虚拟环境构建、游戏任务模块开发以及交互与激励机制的具体落地方式。

4.1 虚拟环境构建

4.1.1 三维场景建模

实验仪器设备的仿真建模采用3ds Max与Blender完成,以第一人称3D视角呈现化学实验室中常用的实验器材与化学试剂,配合文字说明器材用途与操作注意事项,为学生提供直观的认知参照。系统采用写实美术风格,严格还原实验室的空间布局与设备外观,以保障游戏的科学严谨性。图3展示了关键设备设施的实拍照片与三维模型对照。

4.1.2 交互功能实现

系统基于Unity 3D开发,主要开发语言为C#,运行平台为Windows 7及以上操作系统。交互功能涵盖以下3个方面。

1)基础操作交互方面,系统采用W/A/S/D键控制移动,鼠标左键点击交互,鼠标右键拖拽调节视角,滚轮调节视距,与主流第一人称游戏操作规范保持一致,可有效降低操作学习成本。小游戏环节另外引入数字键盘(1~9键)与场景点位的映射机制,可实现快速命中判定。图4展示了部分交互操作脚本。

2)情境化即时反馈交互引导方面,系统通过设置学习向导营造浓厚的学习氛围、逼真的场景体验感、强烈的互动参与感以及多维的认知体验,推动学生实现从物理空间在场到心理深度投入的转变^[13]。本系统借鉴“导引式学习”的设计思路,在虚拟场景中引入卡通教师形象作为任务向导,用于引导学习流程和提供操作反馈。为帮助学生摆脱进入系统后无目标的困境,系统在开始时设置了一个数字教室场景,并引入实验室老师的Q

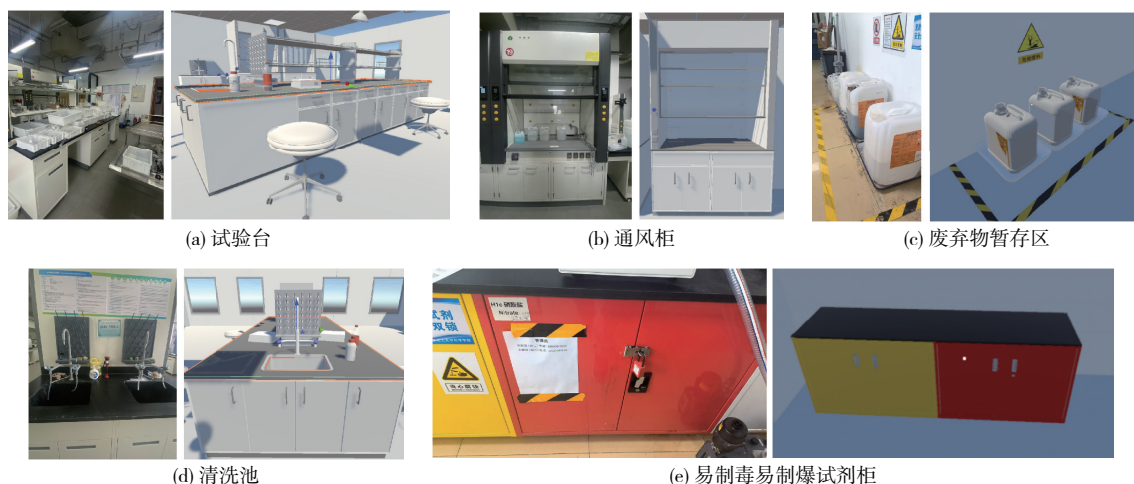


图3 关键设备设施的实拍照片与三维模型对照

Fig. 3 Comparison between actual photographs and 3D models of the critical equipments and facilities

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class change : MonoBehaviour
{
    [Tooltip("替换后的新物体预制体")]
    public GameObject replacementPrefab; // 将要替换成的A2预制体

    void OnMouseDown()
    {
        if (replacementPrefab != null)
        {
            // 获取当前物体的位置和旋转
            Vector3 position = transform.position;
            Quaternion rotation = transform.rotation;
            Transform parent = transform.parent;

            // 实例化新物体
            GameObject newObject = Instantiate(replacementPrefab, position, rotation);
            newObject.transform.parent = parent; // 保持相同的父级关系

            // 销毁旧物体
            Destroy(gameObject);

            Debug.Log("物体已替换: " + gameObject.name + " -> " + replacementPrefab.name);
        }
        else
        {
            Debug.LogError("未指定替换预制体!");
        }
    }
}

```

```

using System.Collections;
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;

public class showtipstest : MonoBehaviour
{
    public GameObject TIPBut;

    void Start()
    {
    }

    void Update()
    {
    }

    private void OnMouseOver()
    {
        TIPBut.SetActive(true);
    }

    private void OnMouseExit()
    {
        TIPBut.SetActive(false);
    }
}

```

图4 部分交互操作脚本

Fig. 4 Partial interactive scripts

版卡通形象作为向导。向导会在开始时告知学生任务总体目标和操作方法,在隐患排查错误时向导讲解正确的安全知识。相比让学生无目的的自由探索,这种设计能减少学生的迷茫感,使学习过程更有目标感。卡通向导的存在也使整个虚拟实验室更加有趣、更有代入感,从而帮助学生更投入地参与学习。

3) 渐进式教学方面,Pluihin 等^[14]在其虚拟实验室系统中引入 AI 驱动的导引助手,通过集成自然语言处理(NLP)与语音交互等技术,实现上下文感知

反馈,从而有效降低学习者认知负荷并提升学习效率,该类研究为虚拟仿真环境中学习支持机制的设计提供了重要启发。本系统在教学设计上充分借鉴了上述即时反馈的交互理念,但在技术实现层面,本系统基于 Unity 引擎开发,交互方式仅限于键盘与鼠标操作,尚未集成语音识别或自然语言处理功能。作为替代方案,系统通过预设的状态机来模拟智能引导逻辑。

4.2 游戏任务模块实现

基于不同类型隐患对应的认知训练目标,系

统围绕标识认知、操作规范、标签管理、权限控制与废弃物处理 5 类核心隐患,分别设计了拼图、接废液、记忆翻牌、猜密码与打地鼠 5 个小游戏。各游戏的玩法设计与对应的安全行为训练目标高度匹配,形成由浅入深的层进式训练结构,如表 3 所示。

表 3 游戏玩法与安全教育设计表
Table 3 Gameplay and safety education design table

游戏名称	对应安全隐患	核心玩法	游戏机制	培训目标
拼图	实验区域缺少安全警示标识	将碎片拼合为完整警示标志,并还原至缺失位置	还原、记忆	标识认知与危险区域感知
接废液	实验废液直接排入下水系统	控制废液桶接住随机下落的废液,避免落入下水道	操作、应用	废液规范收集与基础环保意识
记忆翻牌	化学品容器未贴危险标签	翻开卡牌匹配相同危险标识,完成全部配对	认识、记忆	危险标识记忆与标签规范意识
猜密码	危险化学品柜未规范上锁或管理不严	在 0~99 范围内猜测正确密码,系统提示偏大/偏小	推理、分析	权限管理与危险品加锁规范
打地鼠	实验药品错误丢弃至普通垃圾桶	点击阻止老鼠将药瓶丢入普通垃圾桶	反应、操作	危险废弃物分类处理规范

4.2.1 隐患识别任务

实验室共设置 11 项隐患,例如化学品包装物上须有符合规定的化学品标签(2 处),实验室危险废物收集容器上应粘贴危险废物信息标签及警示标志(1 处),易燃试剂禁止靠近加热设备(2 处)等。学生进入实验室环境后,任务列表以下拉菜单形式显示当前场景中的隐患总数与已完成的处置数量,展示实时任务进度。部分隐患可直接通过点击完成,另一部分则设置了至多 3 min 的知识巩固小游戏,要求学生在完成游戏任务后方能消除该隐患。

4.2.2 知识巩固小游戏

系统设置了拼图和翻牌两个小游戏来帮助学生巩固安全标识知识,这两个游戏各有侧重,合在一起形成“先看懂、再记住”的学习闭环。拼图游戏解决的是“看懂”的问题,要求学生将碎片化的警示标志还原至正确位置,学生发现废液区墙面缺少警示标识后,进入拼图游戏,将打散的标志碎片拼回原样。由于碎片是按图形结构切割的,学生必须搞清楚这个标志由哪些部分组成才能拼对。通过这个过程,学生会对单个标识的图形构成形成清晰的认识。翻牌游戏解决的是“记住”的问题。学生发现药瓶没有粘贴危险标签后,进入翻牌游戏,在 16 张牌里找出成对的危险标识,学生不仅要记住每张牌的位置,还要在相似图案中快速辨认,准确配对。这一过程要求学生在已经看懂单个标识的基础上进一步在多个相似标识之间做出准确辨别。这两个游戏共同形成从理解到熟记的巩固认

知过程。

接废液、猜密码和打地鼠游戏分别对应废液规范收集、危险品管理权限与危险废弃物分类处理等操作规范,通过即时反馈与操作结果可视化,将抽象的规程转化为可感知的行为后果。其中猜密码游戏采用反向体验设计策略,通过模拟密码破解过程,使学生直观感受密码过于简单或忘记上锁所带来的安全隐患,从而深化其对危险品柜规范加锁与密码管理重要性的认识。

4.3 交互与激励机制实现

4.3.1 即时反馈与提示系统

成功识别并处置隐患后,系统即时弹出知识点回顾信息框,对该隐患涉及的安全规范进行简要总结,强化记忆留存;向导角色同步给予积分奖励提示,以正向强化正确行为。小游戏通关后,向导展示“通过考核”标识,提供明确的阶段性成就反馈。对规范物品进行误操作时,向导即时介入说明该物品不构成安全隐患,帮助学生建立准确的隐患判断边界,避免过度识别导致的认知偏差。若未能在规定时间内完成任务,系统提示可重新发起挑战,以明确的再挑战机制维持学习动机,避免因任务中断产生挫败感。

4.3.2 积分与成就系统

为量化评估学生的隐患排查能力,系统从隐患发现率、隐患正确识别率与任务用时 3 个维度进行分层打分。在隐患发现率中,5 个游戏触发点各 2 分(共 10 分),6 个普通隐患点各 5 分(共 30 分),总计

40分;在隐患正确识别率中,5个小游戏各6分(共30分),依据各游戏的操作逻辑(翻错次数、漏接次数、猜错次数等)分档赋分;在任务用时中,依据完

成任务时间长短赋分,总计30分。这3个维度分别按隐患发现率40%、隐患正确识别率30%、任务用时30%的权重综合积分,详见表4。

表4 综合积分评分表

Table 4 Comprehensive points scoring table

评价维度	考核对象	评分标准				得分规则	满分	权重/%
		优秀 A	良好 B	合格 C	待提升 D			
隐患发现率	拼图	主动发现	提示后发现	已发现未完成	未发现	2/1/0/0	2	40
	接废液	主动发现	提示后发现	已发现未完成	未发现	2/1/0/0	2	
	记忆翻牌	主动发现	提示后发现	已发现未完成	未发现	2/1/0/0	2	
	猜密码	主动发现	提示后发现	已发现未完成	未发现	2/1/0/0	2	
	打地鼠	主动发现	提示后发现	已发现未完成	未发现	2/1/0/0	2	
	普通隐患点(6个)	发现6个	发现4~5个	发现2~3个	发现0~1个	30/20~25/10~15/0~5	30	
隐患正确识别率	拼图	1 min内拼好	2 min内拼好	3 min内拼好	未完成	6/4/2/0	6	30
	接废液	全部接住	未接住次数1~2	未接住次数3~4	未接住次数≥5	6/4/2/0	6	
	记忆翻牌	错误次数0	错误次数1~2	错误次数3~4	错误次数≥5	6/4/2/0	6	
	猜密码	错误次数≤5	错误次数6~9	错误次数10~14	错误次数≥15	6/4/2/0	6	
	打地鼠	全部打中	未打中次数1~2	未打中次数3~4	未打中次数≥5	6/4/2/0	6	
任务用时	15 min内完成	≤9 min	>9~12 min	>12~15 min	>15 min	30/20/10/0	30	30

上述评分框架基于教育测量学原则构建,并对关键设计进行了简化和明确。在内容效度方面,评分设置了“隐患发现率、隐患识别准确率、任务用时”3个维度,分别对应“侦察—识别—行动”3个训练阶段,从而覆盖完整的隐患排查行为链条。各维度权重参考用户需求调研结果确定,其中“快速识别安全隐患”的需求占比最高(77.5%),因此将隐患发现率设为最高权重(40%),以保证评估重点与核心训练目标一致。在区分度方面,各维度均采用4档等级(A、B、C、D)。在过程性评价方面,“隐患发现率”维度区分“主动发现”和“提示后发现”两种表现。这一设计可以区分学生的独立能力与辅助条件下的表现,使评估不仅反映结果,而且具备能力诊断功能。需要说明的是,目前该评分框架仍处于系统原型阶段,主要用于记录学习过程行为。相关分级阈值和指标体系仍需通过后续数据进行校准,并开展正式的信度和效度检验。在成就反馈层面,系统依据完成情况设置3种结局:在规定时间内零失误完成者触发“完美通关”动画,给予充分肯定;按时完成但中途有失误者触发“有惊无险”动画,在认可完成结果的同时指出操作不规范之处;未能按时完成者触发“挑战失败”动画,并引导重新挑战。

这一分级反馈机制将激励与教育有机结合,尤其通过“有惊无险”结局在容错空间内提供针对性指导,契合教育游戏在试错中学习的核心理念。

5 系统功能演示与应用场景

为直观呈现系统的教学功能与实际运行效果,本节以记忆翻牌小游戏为典型案例演示完整任务流程,并结合界面截图展示系统的交互游戏设计效果,最后说明系统在高校实验室安全教育中的3类典型应用场景。

5.1 典型任务流程演示

一个完整的任务循环由场景触发、规则引导、游戏交互与结果反馈4个环节依次构成。本文以记忆翻牌小游戏为例绘制了典型任务流程,如图5所示。首先,学生将鼠标悬停于场景中的交互触发点试剂瓶上,系统通过射线检测(Raycast)识别目标物体并弹出知识卡片,呈现与该场景相关的化学品标签规范等隐患知识点;随后,向导角色向学生介绍具体的游戏规则。游戏开始后,系统完成卡牌初始化并启动计时器,进入循环交互阶段:玩家依次翻开卡牌,尝试配对内容相同的化学品警告标志(包含氧化性、刺激性等典型标志类型),每次翻牌均触

发翻转动画并记录操作数据;系统实时进行配对判定,配对成功则标记对应卡牌并记录用时,配对失败则执行翻回动画并累计错误次数。当所有卡牌完成配对后,计时器停止计时,系统汇总本局数据并传递游戏完成信号,脚本跳转至向导,给出过关反馈,完成该任务小节。

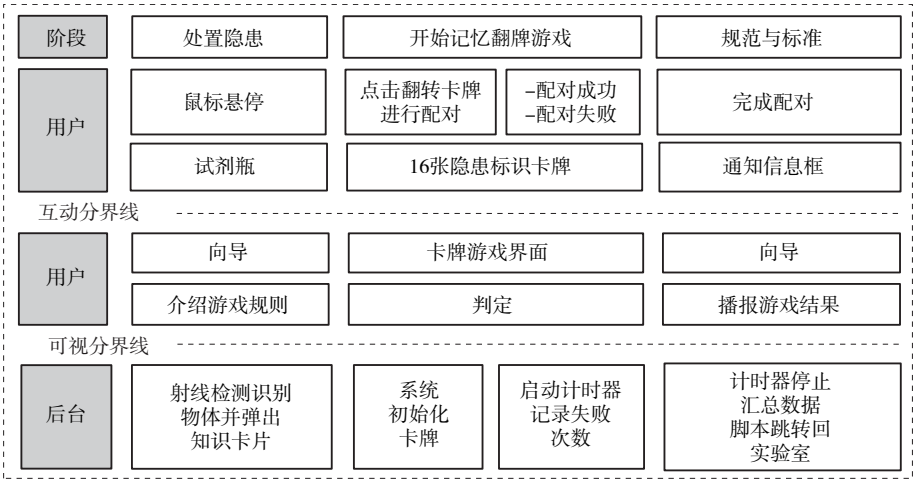


图 5 记忆翻牌任务流程图

Fig. 5 Memory flip task flowchart

5.2 系统界面与交互展示

5.2.1 隐患识别任务示例

界面布局遵循用户自然视觉扫描路径,将任务列表置于右上角,使学生进入场景后能迅速建立对当前隐患数量与完成进度的整体认知,有效降低了初始认知负荷(图6)。全程倒计时显示于界面中央上方,通过适度的时间压力维持学生的持续专注。任务列表默认以折叠状态呈现,在保留信息可及性的同时减少移动过程中的视线遮挡。物品交互标签采用悬停触发、左下角显示的渐进式信息披露策略,在不干扰场景沉浸感的前提下按需提供操作线索,遵循交互设计中系统状态可见性原则。所有可交互物品悬停后均显示名称标签;对于需处置的隐患物品,系统在此基础上额外触发弹窗,说明该处不规范行为的具体内容,帮助学生明确操作依据。



图 6 隐患识别界面

Fig. 6 Hazard identification interface

5.2.2 小游戏交互示例

以打地鼠小游戏为例,学生发现普通垃圾桶内混有药瓶后,点击垃圾桶触发游戏。游戏采用3×3九洞口的经典布局,携带药瓶的老鼠随机从各洞口冒出,学生须在其缩回前及时按下对应数字键将其击退,阻止药瓶被错误投入普通垃圾桶。为避免学生追求速度陷入盲目点击,游戏设置了干扰项普通老鼠(不携带药瓶)与目标老鼠(携带药瓶)混合出现,二者的视觉差异需要学生主动观察辨别,确保学生必须先识别、再出手,而非见鼠即打。命中时触发击退粒子特效与音效反馈,若老鼠成功缩回,则播放“实验药品禁止丢弃至普通垃圾桶”的语音提示,强化对违规后果的认知。游戏结束后自动返回实验室场景,垃圾桶恢复规范状态,旁侧同步出现专用危险废弃物收集容器,以场景变化直观呈现整改结果。打地鼠及其余游戏交互界面如图7所示。

5.3 应用场景说明

该系统可应用在高校实验室安全教育的多个教学环节,适用于以下3类典型场景。一是在新生准入培训阶段,系统可作为入学安全教育的教学工具,帮助新生系统建立实验室安全意识与基础规范认知。二是在实验课前预习环节,教师可将系统作为课前必修任务予以布置,要求学生通过完成隐患排查训练,提前熟悉实验室空间布局与常见危险源



图7 打地鼠及其余游戏交互界面

Fig. 7 Interactive interfaces of the whack-a-mole and other games

分布,从而缩短课堂安全宣讲时间,切实提升实验课的有效操作时长。三是在课堂互动嵌入方面,教师可在实验室安全教育课程或专题讲座中,将特定游戏模块引入课堂互动环节,将知识讲授与即时训练有机结合。教师可根据当次教学重点灵活选取对应小游戏,有效降低课堂引入的操作门槛与时间成本,契合一线教师对教学工具“轻量、灵活、即用”的核心需求。例如,在讲授化学品标签管理规范时同步开展记忆翻牌游戏,既能强化学生对关键知识点的记忆,又能显著提升课堂参与度与知识巩固效果。

6 结论

本研究围绕高校化学实验室隐患排查能力培养这一核心问题,设计并实现了一套融合虚拟仿真与游戏化机制的训练系统,研究的主要贡献体现在以下几个方面。

(1)在内容体系层面,以教育部权威文件为依据,构建了涵盖6大模块的结构化隐患知识库,实现了安全规范从“条文描述”到“可交互场景”的系统转化。

(2)在机制设计层面,提出“侦察—识别—行动”三阶段训练闭环,将心流理论、操作性条件反射原理与游戏核心循环理念有机融合,形成具有内在动机驱动力的训练体验。

(3)在系统实现层面,开发了5类知识巩固小游

戏与11项隐患排查任务,并通过随机化机制、分级反馈与积分评价体系,兼顾了训练的泛化能力与教育有效性。

(4)在应用价值层面,系统可灵活嵌入新生准入培训、课前预习及课堂互动等多类教学场景,为高校实验室安全教育模式创新提供了可参考、可复用的数字化工具。

(5)在提升学生隐患排查能力方面,系统通过4项核心机制协同发挥作用。任务驱动机制以排查隐患为核心任务,引导学生从被动接受知识转向主动探索,有效激活其主动发现隐患的行为意识;即时反馈机制在操作后立即给予正误提示,形成正向行为强化,促进隐患识别能力的持续内化;积分与奖惩机制通过竞争激励提升训练动机,保障学生完整经历“发现—识别—行动”的循环排查训练;随机化机制有效避免机械记忆,显著提升知识的泛化能力与真实场景的迁移能力。

上述机制的整合设计,系统性弥补了传统安全教育中“知行脱节”和“隐患感知能力薄弱”等结构性缺陷,为切实提升学生主动排查、识别与处置安全隐患的实践能力提供了有效的数字化干预路径。未来研究可进一步引入自适应难度机制与学习数据分析功能,并通过对照实验对系统的教育效果进行量化验证,以推动系统的持续迭代与推广应用。

参考文献:

- [1] 杨校毅,冯婉,杨雪松,等. 高校化学实验室安全学生知信行调查分析[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(2): 212-219.
YANG X Y, FENG W, YANG X S, et al. Investigation of knowledge, attitudes, and practices on chemical laboratory safety of students in universities[J]. *Experimental Technology and Management*, 2025, 42(2): 212-219. (in Chinese)
- [2] 叶元兴,马静,赵玉泽,等. 高校实验室事故特征变化及安全管理对策研究:基于176起案例的统计分析[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(10): 224-232.
YE Y X, MA J, ZHAO Y Z, et al. Research on changes of accident characteristics and safety management countermeasures in university laboratories: a statistical analysis based on 176 cases[J]. *Experimental Technology and Management*, 2025, 42(10): 224-232. (in Chinese)
- [3] 李莉,杨娟. 高校实验室安全教育多源路径与体系建设探索[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(11): 257-263.
LI L, YANG J. Exploration of multi-source paths and system construction in university laboratory safety education [J]. *Experimental Technology and Management*, 2025, 42(11): 257-263. (in Chinese)
- [4] 袁桃花,吴遵秋,孙见飞,等. 实验室安全虚拟仿真项目开发及应用[J]. 基础医学教育, 2022, 24(12): 999-1003.
YUAN T H, WU Z Q, SUN J F, et al. Development and application of virtual simulation teaching project of laboratory safety[J]. *Basic Medical Education*, 2022, 24(12): 999-1003. (in Chinese)
- [5] 柳荫,陆慧丽,张玮玮,等. 化学实验室安全教育虚拟仿真实验教学设计与探索[J]. 大学化学, 2023, 38(12): 242-249.
LIU Y, LU H L, ZHANG W W, et al. Design and exploration of virtual simulation for safety education in chemical laboratory teaching[J]. *University Chemistry*, 2023, 38(12): 242-249. (in Chinese)
- [6] 王薇,吕东煜,董立军,等. 混合式教学模式在化学实验室安全课程中的探索与应用[J]. 大学化学, 2021, 36(2): 143-149.
WANG W, LÜ D Y, DONG L J, et al. Exploration and application of blended learning in chemistry laboratory safety course[J]. *University Chemistry*, 2021, 36(2): 143-149. (in Chinese)
- [7] 何克抗. 建构主义的教学模式、教学方法与教学设计[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 1997(5): 74-81.
HE K K. Constructivist teaching model, teaching methods and teaching design [J]. *Journal of Beijing Normal University (Social Sciences Edition)*, 1997(5): 74-81. (in Chinese)
- [8] GUARDIOLA E. The gameplay loop: a player activity model for game design and analysis [C]//Proceedings of the 13th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology. New York: ACM, 2016.
- [9] CSIKSZENTMIHALYI M. Beyond boredom and anxiety: experiencing flow in work and play [M]. San Francisco: Jossey-Bass Publishers, 1975.
- [10] SKINNER B F. The behavior of organisms: an experimental analysis [M]. New York: Appleton - Century - Crofts, 1938.
- [11] SKINNER B F, FERSTER C B. Schedules of reinforcement [M]. New York: Appleton-Century-Crofts, 1957.
- [12] 葛晨晨,陈海峰,段辉,等. 化学实验安全教育游戏的开发和应用[J]. 实验室科学, 2018, 21(6): 185-188.
GE C C, CHEN H F, DUAN H, et al. Development and application of education game for chemical experiment safety[J]. *Laboratory Science*, 2018, 21(6): 185-188. (in Chinese)
- [13] 操菊华,陈晓珍. 人工智能驱动的思政课沉浸式教学探析[J]. 华侨大学学报(哲学社会科学版), 2023(3): 14-22.
CAO J H, CHEN X Z. An analysis of the immersion approach of ideological and political education driven by artificial intelligence [J]. *Journal of Huaqiao University (Philosophy and Social Sciences)*, 2023(3): 14-22. (in Chinese)
- [14] PLIUHIN V, TSEGELNYK Y, SUKHONOS M, et al. Virtual high voltage lab: gamified learning in a safe 3D environment [PP/OL]. V1. arXiv (2025-11-25) [2026-03-23]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.20919>.

Development of a virtual simulation game-based system for chemical laboratory hazard identification capability training

JIANG Rui SUN HuiYing ZHANG ShiYu GAO QiWen YANG TengQian

(Department of Art and Design, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Safety education in chemical laboratories in colleges and universities suffers from problems such as weak safety awareness of students, insufficient ability to detect hazards, and a disconnection between traditional training and practice. To address these issues, we have developed a gamified training system based on virtual simulation. A high-fidelity chemical laboratory virtual environment was constructed based on the Unity 3D engine, and a hazard knowledge base covering six modules based on the “University Laboratory Safety Inspection Project Table (2025)” was compiled. Centered on the core training cycle of “detection-identification-action”, an interactive training system with hazard detection as the core gameplay was formed by comprehensively using gamification mechanisms such as task-driven mode, point reward, instant feedback and hazard randomization. The system has a total of 11 hazard inspection tasks and includes knowledge consolidation mini-games such as jigsaw puzzles, waste liquid handling, memory flip cards, password guessing, and whack-a-mole for the five types of core hazards. By creating immersive and interactive virtual experimental scenarios, the system transforms the passive acquisition of safety knowledge into active exploration through interactive tasks. This provides a novel and effective digital tool for cultivating students’ ability to actively discover, identify and avoid safety risks. It has practical significance for promoting innovation in university laboratory safety education models and for strengthening campus safety culture.

Key words: virtual simulation; gamified learning; chemical laboratory; hazard identification; safety education; system design

(责任编辑:于少云)