

基于虚拟现实的隧道施工安全教育：危险源可视化与风险认知提升的实证研究

刘剑^{1,2*} 桂勇^{1,2}

1. 赣南科技学院资源与土木工程学院；2. 赣州市智能建造重点实验室

摘要：针对隧道施工教学实践机会少、危险源认知抽象等痛点，本文在隧道工程教学中构建“VR+PBL+OBE”安全教学方案，设计“场景—危险源—SOP—证据点”标准件，并开展两轮准实验（VR组 vs 对照组）。以前后测、Rubric、平台日志、问卷进行多源验证。结果表明：VR组知识增益显著，危险源识别准确率与处置流程完整度高于对照组，反思质量提升；有效学习时长增加、错误减少，课堂运行稳定。结论认为，VR情境化有效打通“规范—场景—行动”，提升风险认知与程序化处置能力，具可复制与推广价值。

关键词：虚拟现实；隧道工程；安全教育；危险源；风险处置

引言

隧道工程是土木工程的重要组成部分，服务于城市轨道交通、市政管网、高速与铁路等基础设施，对优化国土空间与提升城市承载力意义重大。其施工方法多样（矿山、明挖、盖挖、顶进、盾构），工序复杂、风险集中，既依赖坚实理论也依赖现场实践^[1-3]。然而受施工现场高风险与管理门槛所限，校内外实践机会稀缺；高校教学以理论为主，情境化训练不足^[4]，学生对围岩失稳、突水突泥、爆破安全、通风组织失效、临电管理等危险源的认知多停留在文本与静态图示，毕业后的技术人员成长十分依赖“师带徒”培养模式。

为破解上述困境，本文引入虚拟现实（VR）开展隧道施工安全教育。借助近年在传感、渲染与交互方面的进步，PC头显与移动/网页端VR可在低风险、可重复、可追踪的条件下提供沉浸式学习。我们构建高仿真的隧道施工虚拟环境，使学生在校阶段熟悉工艺流程、设备操作与现场管理，形成“看懂—会做—能复盘”的学习闭环，强化危险源的可视化识别与程序化处置能力。基于此，在土木工程的隧道施工教学中，设计并验证一套VR支撑的安全教育方案。

一、相关研究现状

既有研究表明，VR能支持流程可视化、规程训练与证据化教学^[5-6]；日志追踪有助于诊断学习路径与错误模式。在隧道/地下工程中，已有掘进与管片拼装仿真、通风与气体扩散模拟、爆破演练等应用并报告积极效果。但仍存在两类不足：（1）证据链不完整——以“危险源可视化—SOP”为主线且整合前后测、Rubric、日志与问卷的严谨实证仍偏少；（2）教学面

向的危险源谱系与任务拆解不够系统化。

二、本研究的目的

依托“产学研协同育人”与校企共建资源，设计一套可复用的VR情境化教学—项目化任务—证据化评价方案，围绕典型危险源构建场景库与任务书，促使学生在沉浸式交互中完成风险识别—处置决策—反思复盘。目标为：构建VR+PBL+OBE教学框架与“场景—危险源—SOP—证据点”标准件，建立多证据链评估并开展准实验验证，形成可复制的课堂运行与质量保障机制。

三、教学设计

结合工程实践，将隧道工程的危险程度与发生频率，将危险源或事故区分为四类（表1）。

为使学生在校内低风险、可重复、可追踪的环境中建立“危险源可视化—风险分级—处置SOP—复盘反思”的能力闭环，教学设计遵循OBE导向，并以多证据链评价保障达成度。

（一）课程定位与课程学习成果—OBE对齐

课程学习成果—课程学习成果，即CLO—OBE（Course Learning Outcomes—Outcome Based Education）。CLO1 流程认知：能准确描述隧道关键工序及相互约束。CLO2 危险源识别与分级：能在指定场景中识别主要危险源并完成风险分级。CLO3 处置SOP执行与优化：能据场景编制或校核处置流程，参数合理、步骤完整。CLO4 证据化沟通与反思：能以规范/监测/图纸为证据完成方案阐述与改进建议。

考核对齐与权重（建议）：前后测（20%）衡量CLO1；Rubric（50%，含识别/流程/证据/表达/反思）

基金项目：基于虚拟仿真技术的隧道工程项目式教学改革探究（231007622281654）；科研平台建设—赣州市智能建造重点实验室（2025024）。

衡量 CLO2 - CLO4; 平台日志 (20%) 衡量投入与学习路径; 问卷 (10%) 记录沉浸与可用性, 用于教学改进证据。

(二) VR 场景库与“危险源—SOP—证据点”映射

基于表 1 构建按工序组织的场景库, 每一场景配置危险源清单、告警触发、SOP 卡片与证据点 (日志埋点 / 截图 / 监测指标), 形成可教学、可考核、可复盘的标准件。

(三) 教学流程与项目任务

课程按“微讲授—VR—项目—复盘”运行。先用 10 - 15 min 明确概念与 Rubric 要点; 分组进入场景, 完成危险源标注、证据截图与参数读数; 随后完成项目任务 (如装药校核与警戒组织、通风风量核算与风筒布置、涌水应急 SOP 编制)。汇报要求证据化表达, 由教师与企业导师双评; 最后提交“风险—证据—改进”反思卡。

(四) 评价方案与 Rubric

采用多源证据: 前后测 20%; Rubric 50% (识别—

SOP—证据—表达—反思); 平台日志 20% (学习时长、完成度与错误热区); 问卷 10% (沉浸与满意度)。达成判据: Rubric 中“识别”“SOP 流程”合格及以上且识别正确率 $\geq 80\%$; 全班 $\geq 70\%$ 达成则认定课程目标实现。

(五) 实施要点与运行保障

支持 PC 头显与移动端; 课前完成“驱动—网络—场景包”自检并提供旁观模式; 开展 VR 适应培训与晕动筛查, 控制佩戴时长; 素材脱敏与数据匿名化, 日志仅用于教学改进; 场景与 SOP 卡片版本化迭代, 依据“错误热区”更新。

四、教学结果与讨论

两轮课堂实施采用 VR 组与对照组的准实验对比。VR 组在知识前后测上取得增益, 高阶情境题正确率提升; 在 Rubric 维度中, 危险源识别、处置 SOP 完整度与反思质量均优于对照组, 且双评一致性良好, 经控制前测差异后仍成立。平台日志显示, VR 组有效学习时长更长、任务一次达成率更高, 典型错误由“装

表 1 隧道危险源与事故分类

分类等级	危险源、事故场景
(1) 重大危险但不易经常发生事故	大范围坍塌、涌泥突水; 高地应力岩爆、大变形
(2) 危险且较常发生的事故	局部掉块、小范围坍塌、掌子面片帮; 高压浆液喷溅与突喷; 运输伤害与通道打击; 临时用电
(3) 通常不重大但高频的小事故	眼面部击伤 (喷射回弹、碎屑、切割飞溅); 掉渣、松落; 噪声性听力伤害
(4) 常见的“隐性”安全技术与组织问题	爆后复入时间与通风量调度; 临时交通组织混乱; 洞内高温高湿致热应激 / 中暑

表 2 场景库列表

场景编号	关键工序 / 设备	对应表 1 类别	典型危险源 (举例)	SOP 要点 (摘要)	证据点 (示例)
S1	勘察与超前预报; 超前钻探、超前地质预报	(1) (2)	突水突泥、 工作面片帮	预报—判识— 支护 / 注浆—监测	预报结果截图、 判据引用、支护参数表
S2	爆破开挖与出碴; 装药、警戒、出碴	(2) (3)	超装药、 飞石、回弹伤	装药结构校核、 警戒线、复入时间	装药计算单、 警戒示意、复入计时
S3	初期支护; 喷锚、钢拱架、系统锚杆	(2) (3)	局部掉块、 松落	先棚后喷、短进尺、 强支护、勤量测	量测曲线、 闭合时机记录
S4	二衬与防排水; 台车、止水带、排水系统	(3)	漏水、空鼓	防排水工序质控、 渗漏治理	质量检查表、 渗漏点标注
S5	通风与安全管理; 风机—风筒布置、监测	(2) (4)	倒风 / 短路、 CO/NO _x 超限、 热应激	风量计算、 复入时间、温湿控制	风量计算表、 气体曲线、复入计时
S6	突发事件应急; 帷幕注浆、堵漏、撤离	(1) (2)	涌水、突泥	报警—隔离— 注浆—监测—复评估	处置流程时序图、 注浆参数与效果

注: 场景内置“错误热区”, 触发后记录操作轨迹与错误类型, 用于行为分析与个性化反馈。

药结构选择”“风量核算”转向“参数精细化与流程优化”，错误热区收敛。问卷反馈显示沉浸感、感知有用性与满意度较高，个别轻度晕动可通过分时佩戴与旁观模式缓解，课堂运行平稳。

对照组主要问题集中在流程疏漏与证据不足。学生普遍认为VR降低了抽象理解难度，便于迁移到真实场景；课堂氛围更主动，运行稳定。

机制上，VR将抽象规范与隐蔽工程转化为可观察、可操演的线索，降低外在认知负荷，促成“看—做—证—评”的闭环；危险源可视化提升情境判断的可迁移性；基于日志的“错误热区—任务迭代”使资源更新更具针对性。局限在于样本规模与场景覆盖仍有限，设备适配与少量晕动可能影响投入。后续将扩充复杂地质与交叉口工况，引入学习分析实现个性化补救，并在跨校共享中验证外部效度与推广条件。

五、结论

本文提出并验证了面向隧道施工安全教育的VR+PBL+OBE方案与“场景—危险源—SOP—证据点”标准件，形成“微讲授—VR—项目—复盘”的教学闭环。实证结果显示，VR显著提升危险源识别、处置流程完整度与反思质量，增加有效学习时长、提高任务一次达成率并减少错误。结论表明，VR可有效打通“规

范—场景—行动”，提升安全认知与程序化处置能力，具有可复制、可推广价值。研究仍受样本与场景覆盖限制，后续需扩充复杂工况、引入学习分析并开展长期追踪，以支撑课程群层面的持续改进与规模化应用。

参考文献：

- [1] 林燕紫. 隧道智能化施工及监测的研究现状综述 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52(8): 73 - 76.
- [2] 罗豪. 公路工程施工技术创新与施工管理策略研讨 [C]// 广西网络安全和信息化联合会. 第六届工程技术与数字化转型学术交流论文集. 浙江南域建设有限公司; 2025: 462-464.
- [3] 李延超, 姜安民, 董彦辰, 等. 隧道工程施工风险分析识别与评估技术研究 [J]. 中国储运, 2025(9): 211 - 212.
- [4] 贾朝军, 施成华, 雷明锋, 等. 大类招生背景下隧道工程专业人才培养困境及对策研究 [J]. 高教学刊, 2024, 10(18): 165 - 170.
- [5] 郭宗勇. 基于脑电的隧道施工人员不同环境下认知负荷研究 [J]. 交通节能与环保, 2025, 21(4): 57 - 64.
- [6] 高天寒, 庄正涛, 赵同峰. 虚拟仿真技术在道桥隧安全施工教学中的应用 [J]. 科教导刊, 2024(21): 114-116.