

基于Unity的盾构机操作虚拟培训系统设计与实现

唐子淇

摘要：盾构机是我国大型城市地下空间建设的关键设备，其作业培训直接关系到施工的安全性和有效性。由于设备费用、场地和安全隐患等因素的制约，现有的野外培训方法很难满足大规模高质量人才的培训要求。在这种情况下，利用虚拟现实建立具有高度模拟性的作业培训系统，已经是产业技能培训体制改革的一个主要趋势。

关键词：Unity；盾构机操作；虚拟培训系统

针对盾构机操作虚拟作业培训中存在的问题，提出以Unity盾构机为核心的虚拟培训系统平台，以实现盾构机作业培训的高效补充。对现有虚拟培训在交互真实感、内容适配性和可扩充性上的不足进行深入剖析，建立了一种从“场景建模—交互设计—评价”一体化的综合优化方法，为隧道掘进机驾驶员的技术能力培养提供安全、高效、可伸缩的虚拟培训平台。

一、当前盾构机操作虚拟培训系统存在的问题

（一）系统交互真实性不足

当前系统在对盾构机的真实运行进行仿真时表现出了很大的不足。虚拟驾驶舱的控制系统与实际的控制系统有一定的区别，各种仪表和按钮的反应逻辑与实际系统中的控制系统不尽相同。目前，针对实际作业中存在的问题，如调节推进压力、控制刀盘速度等，现有的控制方法难以精确仿真实际工况下握把的减振和振动反馈。作业时语音显示系统功能相对简单，缺少对刀盘切割声、液压系统工作声等多层次仿真，无法随地层条件的改变而进行动态调节。从直观的角度来看，隧道施工界面的岩层变化比较僵硬，不同土层和岩层的切割缺少精细的过渡和质感，使得学生很难通过可视化的方式对目前的隧道状况做出正确的判断^[1]。

（二）培训内容针对性不强

目前大部分的培训系统所设计的培训模块都不能很好地适应现实中的复杂工作条件要求。现有的虚拟演练多局限于规范的线性掘进演练，缺少针对曲线段掘进、小半径转弯、复杂地层施工等关键技术的专门培训。该体系构建的失效仿真模型涵盖范围狭窄，且主要针对一

般的设备故障，缺乏对地质突变和参数设定等因素引起的复杂级联失效的仿真研究。培训过程的设计也比较简单，无法针对用户的作业性能进行动态的调节，难以实现个性化和自适应的技术增强。目前，我国应急处置过程中，多依靠单一作业环节的完成度评定，缺少对多个方面的能力（如作业连续性、参数调整合理性、应急处置时效性）的综合性评判准则。

（三）系统可扩展性有限

现有的软件体系结构一般都是比较封闭的，很难满足培训需要和科技发展的需要。在硬件兼容方面，通常需要对某一外部器件进行捆绑，而不能对各厂商的操作手柄、踏板等进行灵活地访问。在软件层次上，各系统各功能模块间存在高度的耦合性，对某个培训方案或装置进行添加或改造，往往要对其进行大量的底层代码改造，导致其扩充和发展时间过长、费用高。由于其在教学中存在着对学生作业过程的信息采集不完整和精细，以及对大量的培训数据的深入分析和挖掘，从而制约了以数据为基础的培训模式的优化。另外，由于缺乏统一的信息交互方式，无法实现与外部项目的信息交互，也无法与更广阔的数字建设管理系统相融合^[2]。

二、基于Unity的盾构机操作虚拟培训系统优化策略

（一）提升系统交互真实性

如何在环境构建、物理仿真和操作回馈三个层次上对其进行系统重建，以获得高逼真的人机交互效果。环境构建需要突破单纯的3D建模表达方式，以实际项目为基础，建立帧数数据与地理信息的映射。通过对工程现场点云和勘察成果的收集，在Unity引擎中重构出包含地层结构、管线分布、桩基等在内的地下空间的3D模型。根据莫尔-库仑判据设定地层的差异性特征，并在地层中进行刀具切割，需要对刀具在地层中的转矩和推力进

作者简介：唐子淇（1986.03—）女，汉族，硕士学历，中级工程师，主要从事数智施工方面的研究工作。

行实时求解。该系统需要对所有的仪表板和操纵杆进行准确的还原，它的可视化需要使用高质量的地图和动态的照明来绘制，同时，指针的摇摆和数值的显示也需要和背景中的仿真数据保持一致。

其中，物理仿真部分要求将多体系统和离散单元方法有机结合起来。为实现隧道掘进机的动力仿真，需要建立多个油缸协调工作的数学模型，并对各个部分在不同工况下的油压进行实时测量，从而获得相应的位姿偏差。在装配阶段，需要对装配单元进行六个自由度精确定位和碰撞探测，而装配单元与混凝土单元之间的相互作用需要综合考虑负压作用下的动力学特性和表面粗糙度等因素。在进行混研作业时，需要对混研过程进行数值仿真，得到混研过程中混研速率与混研速率之间的非线性变化规律。在Unity环境下，通过自定义着色软件和实体材料，结合GPU的并行运算能力实现实时解算^[3]。

运行的反馈系统需要构建一个多信道认知的闭环系统。基于动态信息的新方法，即利用背景光线遮挡技术实现对巷道中灰尘含量的动态模拟。从实际工作中获取实际工作中的环境噪声和机器噪声，根据工作条件对其进行动态混合和3D立体声音定位。力觉回馈需要外部的硬件装置来完成，控制杆需要按照当时地层的坚硬程度来输入相应的减振系数，并在仿真过程中与墙体接触时，需要生成相应的振动波。在开挖面坍塌发生的动态演化中，利用声音预警和力觉刺激实现对开挖面坍塌的增强，实现对开挖面坍塌的动态响应。

（二）强化培训内容针对性

培训内容的设置要按照由基本认识到复杂处理的递进路线进行，各培训单元要与现实操作中的核心能力要求相匹配。基本作业模块需要将盾构启动、调整姿态、匀速推进、管片拼装等工序进行拆分，并将各工序分割成多个作业环节。比如，在位姿调节培训中，将会实时展示盾构机与设计轴之间的3D误差，学生需要通过调节刀具延伸和分区推力实现校正，并以修正后的超调和平稳时间为评价标准。每一阶段均设有理论解说录像和3D动画示范，详细介绍该装置的工作机理和水力驱动机理。对于具有代表性的工作状态模型，要根据实际的实际情况建立一个虚拟的情景库。针对软硬不均匀地层开展隧道作业，通过对上软下硬两种情况的仿真，实现盾构机在上软下硬两种情况下的仰钻，并通过调节液压和刀盘速度实现对位姿的控制。在弯曲路段上，将设定多个弯曲的弯道，并在此过程中，将自动呈现出管片选择和组

装位置之间的位置，并按照引导系统的指示，进行相应的调整。在进行浅埋式开挖培训的过程中，通过对地表沉降的观测资料进行仿真，一旦发现沉降超出警戒临界值，就需要进行相应的处理，如同时进行灌浆压力的调节和施工工艺的优选等^[4]。

突发事件处理模块要求构建完备的危机响应系统。一旦仿真测试发现密封仓中有不正常的气压，就会启动土压不平衡的紧急方案演练，要求学生在指定的时限之内，进行一系列的作业，如：螺杆输送机的闸门启闭、聚合物喷射以及推进系统的紧急停机。当刀具被卡住时，会显示出突然的转矩警报，学生应熟练地进行正反转脱离，泡沫剂注入和压力进入仓检测。当突然遇到地面上的障碍时，出现一幅雷达检测图像，学生要依据这些障碍的特点，做出相应的选择。各突发事件情景对作业过程中的时序和时序进行了检验，若出现差错，则会引发相关的事故结果，如地面塌陷、管道断裂、设施损毁等。

（三）增强系统可扩展性

在体系结构上，需要采取模块和插件相结合的方法，保证各个功能构件能够各自独立地工作，并且可以进行柔性的组装。在统一的基础上，将盾构机模型、物理引擎、培训逻辑和数据管理等功能分解成可自主更新的构件。在装备建模方面，应用统一的界面规格，实现对各类盾构机的3D建模和技术参数的输入；通过情景流装载的方式，可以在满足培训要求的前提下，实现对各地质模型和建筑环境的实时加载。该体系结构可以通过添加新的构件来垂直地扩充系统的功能，而无需对内核进行任何改动。在硬件兼容性方面，必须制定一个通用的外部设备访问规范。该系统应该具备完备的外设应用界面，支持各种类型的外设，如操纵杆、脚踏板、运动平台、虚拟现实头盔等。针对力觉回馈装置，通过定义规范的力觉效果描述文档，将振动频率和阻尼系数等参量抽象包装，使得相同的培训项目能够适应不同厂家的力觉感知。该多频道视景仪可由组态设定银幕放置模式及投射模式，以达到从单一银幕操控至环绕银幕沉浸感的无缝转换^[5]。

从采集到分析再到反馈，需要建立一个闭环的数据管理系统。在执行过程中，能够实时地采集学生操作的时间和空间信息，其中包含了各个操作过程的时间信息、操作参数、设备状态响应以及外界参数的改变。利用数据挖掘的方法，对航行速度稳定性、姿态调节精度、应

急响应时间等运行特性进行分析，并对其运行特性进行分析。在系统的背景下，会构建学生的能力增长模式，利用人工智能等计算方法，发现学生的不足之处，从而为学生提供个性化的培训方案。管理者可以在网络平台上浏览团队的训练资料，对训练的效果进行多维度的比较和分析，并根据分析的结果，对训练的内容和评价指标进行了动态的调整（如表1所示）。

表1 系统可扩展性设计框架

设计维度	核心技术手段	预期效果
系统架构	模块化与插件化设计	功能组件独立可替换，支持纵向扩展
硬件兼容	标准化外设接口与抽象封装	多厂商设备即插即用，沉浸体验无缝切换
数据管理	时序数据采集与智能分析算法	个性化训练推荐，培训效果动态优化

结束语

综上所述，开发基于Unity的盾构机操作虚拟培训系统，有助于解决现有的隧道掘进作业中存在的时间、

空间约束和安全问题，并以此为基础，以科技为核心，对掘进作业过程进行系统性的改造，提高掘进作业效率。该研究成果可为作业者营造高逼真的沉浸式培训情境，有效减少培训费用和 risk，并为培训流程规范化、个性化打下坚实的理论和实践基础。

参考文献

- [1] 何冰. 土压平衡式盾构机在地铁隧道施工中的应用技术[J]. 居业, 2025, (08): 10-12.
- [2] 周奇才等. 基于模糊控制的盾构机自动纠偏系统[J]. 起重运输机械, 2025, (09): 83-88.
- [3] 孙钰林, 孙晓辉. 盾构机复合地层掘进推力与快速估算方法分析[J]. 中国设备工程, 2025, (09): 101-102.
- [4] 殷光森, 朱国力, 谢哲, 等. 基于数字孪生的盾构机换刀机器人监控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2024 (003): 030.
- [5] 许梁. “BIM+Unity3D”技术在地铁区间盾构施工中的应用[J]. 四川水泥, 2022 (10): 218-219.