

数字孪生技术在隧道及地下工程课程教学中的应用

张卜, 许成顺

北京工业大学, 北京 100124

摘 要 : 隧道及地下工程课程作为土木工程学科重要分支, 专业课程学科交叉融合广泛, 理论与实践结合紧密。本文主要总结了隧道及地下工程课程特点, 并梳理分析了授课过程中的主要问题, 重点总结了数字孪生技术在隧道及地下工程课程中的岩土层地质条件的重构、施工步骤的动态模拟、大型装备工作原理再现以及施工和运营监测与预警四个关键环节具体应用情况, 以期为高校隧道及地下工程专业教学提供参考。

关 键 词 : 隧道及地下工程; 数字孪生; 教学模式; 教学应用

Application of digital twin technology in tunnel and underground engineering course teaching

Zhang Bu, Xu Chengshun

Beijing University of Technology, Beijing 100124

Abstract : As an important branch of civil engineering, the course of tunnel and underground engineering has extensive interdisciplinary integration and close integration of theory and practice. This article mainly summarizes and analyzes the characteristics of tunnel and underground engineering courses, and sorts out and analyzes the main problems in the teaching process. It focuses on summarizing the specific application of digital twin technology in the reconstruction of geological conditions of rock and soil layers, dynamic simulation of construction steps, reproduction of working principles of large-scale equipment, and monitoring and early warning of construction and operation in tunnel and underground engineering courses, in order to provide reference for the teaching of tunnel engineering majors in universities.

Keywords : tunnel and underground engineering; digital twin technology; teaching mode; teaching application

一、隧道及地下工程课程特点分析

隧道及地下工程专业是土木工程学科的重要分支, 其特点主要体现在多学科交叉广泛、理论与实践的紧密结合, 以及工程项目的复杂性和独特性^[1-2]。该课程涵盖了从地质勘察、设计、施工到运营维护的各个环节, 要求学生具备扎实的工程力学、岩土力学、结构设计和施工运营管理等基础知识, 同时具备解决实际工程问题的能力。本文总结隧道及地下工程课程特点如下。

(一) 学科交叉与融合充分。隧道及地下工程涉及广泛的学科交叉, 是土木工程中较为综合性的领域之一。学生需要掌握工程地质学、岩石力学、土力学、弹性力学、结构力学等多方面的理论知识。因隧道主要在建设在地下岩土层中, 隧道所处的地质条件对设计、施工和运营维护有重要影响。不同的岩土层地质条件决定了隧道结构形式、支护方法和施工技术的选择。其中, 地下水也是其中不可忽视的部分, 尤其在软土和含水层丰富的地区, 如何进行有效的防水和排水处理是施工过程中面临的主要挑战。材料力学、弹性力学、结构力学则涉及隧道的荷载计算、支护结构设计及其稳定性分析。除此之外, 隧道与地下工程的课程还要求学生机械知识有一定的了解。隧道的不同施工方法往往

需要使用专用的施工设备, 如盾构机、钻爆法等, 每种方法和对应设备的使用条件和限制都不同, 需要通过合理的方案设计加以选择。

(二) 理论与实践结合紧密。隧道及地下工程是一门实践性很强的学科, 理论与实践的结合紧密是该课程的一大特色。学生不仅要掌握基本的理论知识, 还须具备较强的现场问题解决能力。隧道施工过程中, 地下地质环境的不确定性、复杂性以及施工条件的多变性, 使得实践教学在隧道工程中显得尤为重要。例如, 在隧道掘进过程中, 地层的变化、地下水的渗流、掘进进度都会对工程建设产生直接影响。学生需要通过现场实习、实验教学和案例分析, 掌握实际施工中的应对方法和技巧^[3-4]。

(三) 工程项目的复杂性和独特性强。隧道及地下工程项目通常规模大、工期长, 涉及的施工条件和环境复杂, 具有很强的独特性。每个项目的地质条件、设计要求和施工环境都不尽相同, 要求工程师具备较强的创新能力和现场判断能力。例如, 城市隧道建设往往需要考虑周边建筑物的基础影响, 如何在保证施工安全的同时尽量减少对周边环境的干扰, 是施工方案设计中的重要内容。高烈度区隧道的抗震设计、软土地区隧道的沉降控制、岩溶区隧道的防护措施等都是工程中遇到的常见挑战。这些

作者简介: 张卜(1990-), 男, 河北保定人, 工学博士, 北京工业大学助理研究员, 硕士生导师, 主要从事隧道工程研究。

复杂的工程条件和独特的项目需求，决定了隧道及地下工程课程必须具备灵活性和前瞻性。教师在教学过程中，不能仅仅依赖教材的固定知识点，还需要根据最新的工程案例和技术进展，及时更新教学内容，让学生了解当前行业内的前沿技术和实际工程中的难点^[5-6]。

(四) 创新技术发展和更新应用快。随着科技的进步，隧道与地下工程课程的教学内容也在不断发展，尤其是现代信息技术的引入为教学提供了更多创新手段^[7]。近年来，数字孪生、虚拟现实、大数据和人工智能等技术已经开始应用于隧道与地下工程的教学和实践中。数字孪生技术通过创建隧道的虚拟模型，使学生可以实时观察隧道施工的每个细节，并根据实时数据对模型进行调整和优化。这种技术不仅提高了教学的直观性，还让学生能够更好地理解隧道工程的动态特性。虚拟现实技术通过沉浸式的体验，让学生能够身临其境地进入隧道施工现场，进行操作模拟和施工过程的学习。这些技术的引入，不仅提升了学生的学习兴趣，还使得隧道与地下工程课程更加生动、形象和互动，为学生打下了坚实的基础。

二、隧道及地下工程课程问题分析

隧道与地下工程课程在传统教学方法中存在一些显著的问题，影响了学生对复杂工程的全面理解和解决问题能力的培养。作者结合自身实际教学感受和学生反馈情况对主要问题进行了梳理分析，主要表现在一下几个方面：

(一) 隧道及地下工程围埋于地下岩土介质中，现实生活中无法全部直观看清隧道内部和外部全貌，这是显著区别于地上建筑结构、桥梁结构等土木工程专业的特点，这就使得学生对隧道及地下结构工程的理解和认识缺少了直观性。

(二) 隧道及地下工程的理论知识复杂，涉及到工程地质学、岩石力学、土力学、弹性力学、结构力学、材料力学等多学科的交叉融合。然而，由于教学时间有限，课程通常以理论知识和概念传授为主^[8-9]，难以深入涵盖各个隧道及地下工程的施工方法和工艺细节，无法做到融会贯通，使得学生在面对工程问题时容易感到困惑。

(三) 传统的课堂教学主要依赖于课本和PPT，教师通过PPT讲解和板书来传达复杂的工程概念，而这些抽象的表达方式难以帮助学生形象化理解复杂的隧道结构和施工工艺^[10-12]。例如，隧道线形、断面、钢拱架、锚喷支护、喷射混凝土等内容，通过工程图片和施工动画或影像来让学生理解，缺乏实际空间感和工程直观感，导致知识的掌握局限于理论层面。

(四) 隧道及地下工程是一门理论与实际结合非常紧密的学科，但由于成本、环境和安全等因素，学生在校期间很少有机会接触真实的隧道施工现场，缺乏动手实践和现场观察的机会。这样一来，学生不仅难以建立对隧道工程的全景认识，还无法将理论知识有效地运用于实际操作中，使得学生对隧道及地下工程中的关键部件及施工步骤理解不透彻。

(五) 隧道施工往往涉及复杂的装备，如盾构施工中的盾构

机、注浆机械等大型机械，钻爆法施工中凿岩台车、喷射混凝土机、仰拱栈桥、模板台车等关键设备，而这些设备的主要工作原理和实际功能难以在课堂中详尽呈现，使得学生对这些大型机械的工作原理认识水平有限。因此，如何将课堂理论与工程实践有机结合，提高学生对隧道工程及地下工程的理解深度和解决实际问题的能力，成为了当前隧道与地下工程课程面临的主要挑战^[13-15]。

三、数字孪生技术在隧道与地下结构课程中的应用

数字孪生技术的引入为隧道与地下工程课程提供了一个全新的教学工具，它通过虚拟模型与真实工程的同步交互，使得学生可以在虚拟环境中直观地体验复杂的工程过程。具体来说，数字孪生技术可以帮助教师重构隧道与地下结构地层地质环境、关键构件、施工方法步骤以及施工和运营监测。通过该技术，工程师和学生可以在数字平台上创建与实际隧道结构相同的三维模型，并在施工和运营阶段实时监控隧道和地下结构的状态变化。这项技术在重构具体施工技术时，涵盖了岩土层地质条件的重构、施工步骤的动态模拟、大型装备工作原理再现以及施工和运营监测与预警等多个方面。下面将从四个关键方面总结数字孪生技术在隧道及地下工程课程中的具体应用。

(一) 岩土层地质条件的重构

隧道及地下工程的施工技术与工程所处的地质条件密切相关。地层的类型、地下水的分布、地应力的情况等都会直接影响到隧道施工方法的选择和施工过程的安全性。在传统教学中，隧道工程地质条件的讲解往往依赖于地质勘探报告，学生只能通过和纵断面剖面图和钻孔数据来理解这些复杂的地质变化。而数字孪生技术能够将地质数据动态可视化，让学生在三维虚拟环境中清楚地看到隧道周围地层的分布和变化。例如，地质勘察数据可以直接输入到数字孪生平台，生成与真实地层一致的三维模型，学生可以在模型中观察不同深度的地层、地下水位的变化等。这不仅帮助学生理解地质条件的复杂性，还使他们能够深入分析如何根据不同的地质条件选择合适的施工技术。通过实时监控地层的变形情况，学生还可以模拟不同地质围岩条件下的隧道稳定性。

(二) 施工步骤的动态模拟

隧道及地下工程的施工过程通常包括多个步骤，如开挖、支护、防水、衬砌等。每个步骤的技术要求不同，涉及到具体施工方法的选择。数字孪生技术能够重构整个施工建造全过程，将每个步骤动态地展示给学生，帮助他们了解施工技术的细节和逻辑关系。具体来说，学生可以通过数字孪生平台模拟隧道的开挖过程，观察不同的施工方法（如钻爆法、盾构法、沉管法等）在不同地质条件下的应用情况。例如，盾构法在软土层中的应用过程，可以通过数字孪生技术进行详细展示，学生可以清晰看到盾构机的推进、刀盘的切削动作以及土压的变化情况。通过这种动态模拟，学生不仅能学习盾构法的基本原理，还能掌握操作过程中的关键技术要点，如土压力/泥水压力平衡的控制、开挖面稳定

的控制、盾构姿态的调控、管片拼装精度控制等。此外，初期支护和衬砌的施工步骤也可以通过数字孪生技术进行重构。例如，学生可以在虚拟环境中模拟喷射混凝土的施工过程，学习如何根据地层的变形情况调整初期支护方案。通过多次模拟和调整，学生能够在虚拟实践中掌握新奥法不同施工步骤之间的相互关系以及施工技术的区别与联系。

（三）大型装备工作原理再现

隧道施工中通常使用大型机械设备，如盾构机、混凝土喷射机、吊装设备、凿岩机械、模板台车等。这些设备的操作对于施工质量和效率有着直接影响。然而，传统课堂中由于场地限制和安全考虑，学生很难接触到真实的施工设备。数字孪生技术通过仿真技术，将复杂的设备操作过程虚拟化，让学生在虚拟环境中进行设备操作的模拟和学习。例如，在盾构机的操作训练中，学生可以通过数字孪生技术进入一个虚拟的盾构施工现场，亲自操作盾构机的推进、刀盘的旋转、排土系统、管片拼装的管理等。在此过程中，学生不仅能够学习设备的操作原理，还能够体验操作过程中可能遇到的实际问题，如推进阻力过大、刀盘磨损、盾构姿态控制等。这种虚拟仿真操作不仅提升了学生对装备的工作原理认识水平，加强了理论联系实际的能力。

（四）施工和运营监测与预警

施工与运营安全是隧道及地下工程中的重要问题，特别是在复杂的地下环境中，施工运营过程中的安全隐患较多，如坍塌、涌水等。传统教学中，施工及运营管理通常依赖于案例分析和理论讲解，学生难以直观理解现场安全风险的复杂性。数字孪生技

术通过结合具体实际工程监测平台数据开展实时监控与数据分析，将施工与运营过程中的虚拟化和动态化。例如，学生可以通过数字孪生技术监控隧道施工中的地层变形情况、隧道衬砌的受力状态、地下水位的变化等。当某些参数超出安全阈值时，系统会自动发出预警，学生可以根据预警信息学习如何调整施工方案，采取预防措施，避免发生安全事故。通过这种实时监控与预警机制，学生能够更加全面地理解隧道施工中的安全风险，并学习如何在复杂的施工环境中有效管理和控制这些风险。此外，数字孪生技术还能够模拟突发事件，如地层塌陷、设备故障等，学生可以在虚拟环境中进行应急演练，学习如何在突发情况下快速反应和决策。这种动态的呈现方式大大提高了学生对施工及运营安全的认识和应对能力。

四、结语

隧道及地下工程课程是理论和实践融合非常紧密的本科课程，应用数字孪生技术开展隧道及地下工程教学，可以充分发挥数字孪生的再现性和直观性特点，有效锻炼学生利用专业基本原理分析问题和解决问题的能力，提高学生的决策能力和综合素质。本文结合数字孪生技术在隧道及地下工程课程中的岩土层地质条件的重构、施工步骤的动态模拟、大型装备工作原理再现以及施工和运营监测与预警四个关键环节总结了具体应用，加深了学生对隧道和地下工程课程理解。在今后的教学中，可以尝试在土木工程专业课程中进一步推广和应用。

参考文献

- [1] 钱七虎, 胡小强, 李树忱, 等. 中国盾构隧道工程关键技术的新进展综述 [J]. 隧道建设 (中英文), 2024, 44(05): 897-926.
- [2] 方勇, 杨宇, 王士民, 等. 适应新时代要求的“隧道工程”课程教学改革探索 [J]. 教育教学论坛, 2024, (28): 72-75.
- [3] 方勇, 杨宇, 杨文波, 等. 新工科背景下基于 OBE 理念的课程教学探讨——以“高速公路隧道工程”课程为例 [J]. 教育教学论坛, 2023, (03): 117-122.
- [4] 徐前卫, 程盼盼, 杨新安, 等. 隧道工程课程教学模式与教学方法探索与实践 [J]. 教育教学论坛, 2016, (32): 131-134.
- [5] 李昂. 课程思政视域下隧道与地下工程课程改革路径探究 [J]. 高教学刊, 2023, 9(36): 144-147.
- [6] 蒋雅君, 李帅, 方勇, 等. 一流课程建设背景下工程专业课程教学内容组织与资源建设——以隧道工程课程为例 [J]. 高等建筑教育, 2024, 33(03): 130-136.
- [7] 付艳斌. 基于信息技术的隧道工程课程教学改革探究 [J]. 西部素质教育, 2024, 10(16): 139-142.
- [8] 张俊儒. 隧道工程课程思政教育探索与实践 [J]. 高教学刊, 2023, 9(17): 39-42+46.
- [9] 王志兵, 余文成, 于啸波. “双万计划”背景下“隧道工程”课程教学改革与探索 [J]. 科教导刊, 2022, (31): 121-124.
- [10] 崔光耀, 宋志飞, 姚海波. 新工科背景下《隧道与地下工程施工》课程教学改革的思考和分析 [J]. 科学咨询 (科技·管理), 2020, (03): 31-32.
- [11] 王章琼, 陈为, 余浩延, 等. “隧道工程”课程围岩力学问题可视化教学研究 [J]. 中国地质教育, 2016, 25(03): 28-31.
- [12] 王章琼, 余浩延, 陈为. “隧道工程”课程中围岩分级的教学难点及对策分析 [J]. 中国地质教育, 2016, 25(01): 76-78.
- [13] 张学民, 阳军生, 彭立敏. 国家精品课程“隧道工程”教学模式探讨 [J]. 当代教育理论与实践, 2011, 3(10): 82-83.
- [14] 施成华. 《隧道工程》课程模块化教学方法初探 [J]. 长沙铁道学院学报 (社会科学版), 2006, (04): 157-158.
- [15] 李晓龙, 郭成超. “隧道工程”课程教学模式探讨 [J]. 中国电力教育, 2011, (29): 96-98.