

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.03.022

基于智能设计的隧道爆破课程设计教学实践研究*

张宪堂¹,高熙阳¹,田新海¹,徐帮树²,周红敏¹

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院,青岛 266590;2. 山东大学 齐鲁交通学院,济南 250000)

摘要: 隧道爆破课程设计是高等院校相关专业《爆破工程》课程的重要综合性实践教学环节。为了探索教学实践改革新思路,针对课程设计传统教学实践中存在的计算复杂、参数选取困难和图表绘制繁琐等问题,提出利用隧道爆破智能设计软件平台进行课程设计。作者通过融合数字化、智能化设计技术,搭建可以将抽象爆破参数设计变成清晰可视化模型的智能设计平台。该平台包括爆破设计、资源库、数据管理和全局设置等四大模块,创新性地实现了爆破参数实时修改并进行可实施性判断,具备导向式的操作流程,同时形成了一种交互式的教学模式。实践效果表明:智能设计平台通过导向式操作流程有效减少了传统教学实践中学生的计算量和参数选取的随意性,提高了绘图效率及精度,确保爆破设计方案科学合理;交互式的教学模式增强了学生理论与实际的结合能力,激发了学生的主动学习兴趣,从而提高学生对专业知识的理解,培养学生的智能化设计思想,为成为服务新时代的高素质人才提供支撑。

关键词: 隧道爆破;课程设计;教学实践;智能化设计;爆破参数

中图分类号: U455.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)03-0194-09

Teaching Practice of Tunnel Blasting Course Design based on Intelligent Design

ZHANG Xian-tang¹, GAO Xi-yang¹, TIAN Xin-hai¹, XU Bang-shu², ZHOU Hong-min¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250000, China)

Abstract: The design of the tunnel blasting course is an important comprehensive practical teaching link of the "Blasting Engineering" course of related majors in colleges and universities. To explore new ideas for reforming teaching practice, given the challenges of complex calculations, difficult parameter selection, and cumbersome diagram drawing in traditional curriculum design, a tunnel blasting intelligent design software platform was proposed for course design. By integrating digital and intelligent design technologies, the authors develop an intelligent design platform that converts abstract blasting parameter design into a clear visual model. The platform includes four modules: blasting design, resource library, data management, and global settings. It innovatively realizes real-time modification of blasting parameters and implementability judgment, has a guided operation process, and forms an interactive teaching mode. The practical results demonstrate that the intelligent design platform effectively reduces the computational bur-

收稿日期 (Date of reception): 2025-01-21

网络首发日期 (Published online): 2025-05-15

作者简介: 张宪堂(1973-),男,河北井陘人,教授、博士生导师,主要从事工程爆破和岩土结构动力学研究, (E-mail) zzxhtm@sdust.edu.cn。

通讯作者: 周红敏(1975-),女,河北新乐人,副教授、硕士生导师,主要从事工程防灾减灾控制研究, (E-mail) skd992064@sdust.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51874189); 山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2023ME106)

About the author: ZHANG Xian-tang (1973-), male, Jingxing people in Hebei Province, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in research on rock and soil structure dynamics and blasting engineering, (E-mail) zzxhtm@sdust.edu.cn.

Corresponding author: ZHOU Hong-min (1975-), female, Xinle people in Hebei Province, associate professor, master's supervisor, mainly engaged in research on engineering disaster prevention and reduction control, (E-mail) skd992064@sdust.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (No. 51874189), Supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2023ME106)

den and the subjectivity of parameter selection for students in traditional teaching practices through the guided operation process, enhances drawing efficiency and accuracy, and ensures that the blasting design scheme is scientifically and reasonably formulated. The interactive teaching mode enhances students' ability to combine theory and practice, stimulates their interest in active learning, thereby improving their understanding of professional knowledge, cultivating intelligent design ideas, and providing support for becoming high-quality talents serving the new era.

Key words: tunnel blasting; course design; teaching practice; intelligent design; blasting parameter

隧道爆破课程设计是高等院校城市地下空间工程、土木工程和采矿工程等相关专业《爆破工程》课程的重要综合性实践教学环节之一。其旨在培养学生综合运用爆破工程方面的相关知识去独立进行课程设计以及分析问题和解决问题的能力,同时考查学生对本课程知识的全面掌握,以期在课程设计过程中能够对爆破方案进行合理的设计和应用。隧道爆破课程设计要求学生在学习爆破理论基础知识的同时,能够根据教学内容进行理论与实践的结合,从而更加透彻地理解隧道爆破工程设计与施工以及如何保证安全高效实施,尤其强调学生在爆破设计、计算理论和技术以及创新思维能力等方面的综合培养,为以后从事工程实践和创新设计奠定良好的基础。随着爆破技术的发展,爆破作业环境越来越复杂,安全标准和安全管理要求不断提高,同时课程学时缩短,导致无法给学生提供爆破作业现场实践机会。在以往的隧道爆破课程设计实践教学过程中,主要是利用板书和多媒体课件讲解爆破机理和爆破工艺,缺少爆破过程与爆破细节的展示,不利于学生对爆破方案设计理解和掌握。此外,教学内容涉及的范围也难以确保充分吸收最新的爆破技术、安全规范及相关知识。因此,亟需爆破专业方向教师在教学内容设计及方法上与人工智能科技相结合,提出新的课程设计教学模式或方法,达到既保证课程设计教学质量和效果,又能保证学生安全的目标。

目前,在相关课程设计教学实践研究中已取得了一系列研究成果。张悦周等提出了一种新颖的三位一体教学模式^[1],鼓励学生在课程设计过程中与智能工具积极互动。李贵等将三维设计软件引入到课程设计中^[2],提出教学实践新方法。成玉祥提出了新的课程设计教学模式^[3],达到全面培养学生能力的目的。蔡艳等在实践中积极探索^[4],提出基于培养目标的课程细化分类和进阶式课程架构设计。一些学者提出采用实验与课程内容相结合的混合式教学模式^[5-7],为爆破类课程设计教学提供了参考。程兵等在工程爆破课程教学中采用数值模拟技术以达到高效的教学目的^[8]。多名学者通过构建爆破虚拟仿真实验创新平台以达到教学实践的目

的^[9-12],或者通过对多种授课模式的探索,在教学内容、实验形式和考核过程等方面进行了教学改革研究^[13,14]。

基于上述问题和智能科学技术广泛应用到各个领域,本文拟结合数字化与智能化的设计技术,针对传统隧道爆破课程设计中计算复杂、多参数选择和图表绘制过程繁琐等问题,建立隧道爆破课程设计的实践教学平台,使学生能够将有限的时间和精力侧重于课程设计任务的方案设计等应用性、创造性较强的内容上,提升学生的学习兴趣,培养学生的智能化应用能力和设计思想。

1 以智能设计为核心的课程设计实践教学

传统隧道爆破课程设计实践教学一般是以教师布置设计任务、学生完成方案设计、通过尺笔绘图或CAD绘图、设计成果展示和编写说明书等多个方面开展完成,方法虽简单但存在诸多缺点:尺笔绘图过程繁琐且精度难以得到保证;CAD绘制虽然提高了绘图效率,但是其在设计方案可视性和交互性方面仍存在欠缺,难以让方案设计被直观感受,设计方案修改相对繁琐;学生计算量较大,爆破参数选取较为困难。因此,有必要构建以智能设计为核心的隧道爆破课程设计教学软件平台。

针对隧道爆破课程设计实践教学平台的构建,首先要考虑如何融合数字化、智能化平台技术。在对实践教学平台的架构进行设计时,需选择稳定高效的数据库管理系统和图形引擎作为实践教学平台的基础依托,实现数据的存储、图形的渲染满足教学设计的要求。以智能设计软件平台为依托,学生能够将抽象的隧道爆破设计方案变成可视化模型,从而能够直观、清晰地看到炮孔布置、起爆顺序、装药量和装药结构等重要信息,增强对整个爆破方案的理解,解决了传统实践教学绘制繁琐的问题。例如,学生能够利用软件平台模拟得到的不同爆破方案的爆破数据对爆破方案进行评估和优化。智能设计软件平台能够针对爆破工程方案设计提供丰富的交互式操作功能,学生能够在虚拟环境下实时修改

设计参数(装药量、炮孔间距等),实时观察相应的效果变化,解决了传统实践教学参数选取困难和计算量大的问题,使学生能够实现课堂教学从被动听讲到主动参与,形成一种交互式的实践教学效果,强化学生实践创新能力,开发学生的主动性并激发学生的学习兴趣,让学生不断尝试、不断探索,逐渐增强学生解决问题的能力。

通过智能设计在隧道爆破课程设计实践教学的应用与传统教学结构进行比较,提出以智能设计为核心的课程设计实践教学方法,如图1所示。通过改变实践教学方法可以优化和丰富实践课程的教学内容,有效地增强了学生的学习及实践能力,探索工程类专业课程设计实践教学方法改革的新途径。

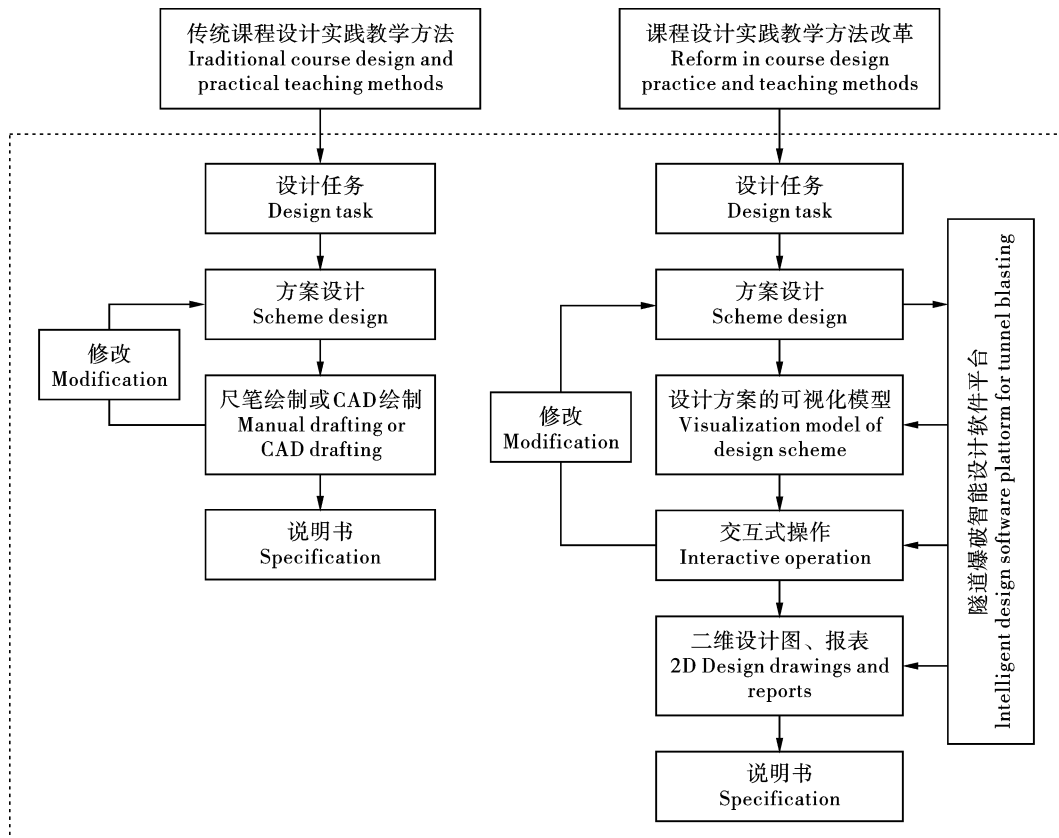


图1 以智能设计为核心的课程设计实践教学方法

Fig. 1 A teaching method for course design practice centered on intelligent design

2 隧道爆破智能设计软件平台开发

2.1 隧道爆破方案参数设计

隧道爆破方案参数设计是培养学生的工程实践能力和创新设计能力的重要内容,为了提升设计的效率,对爆破方案中的关键参数进行智能化算法研究,包括炮孔布置、起爆顺序和装药量等^[15,16]。其次是建立资源库,包括轮廓线、线路、设备和炸药性质等,资源库可将不同的数据进行预定义,定义之后将其分类储存和统一管理,形成重复使用的资源数据集^[17]。以便学生在创建方案参数设计中快速选取匹配的参数,减少重复输入及避免人为操作带来的误差。智能设计软件平台能够创建团队组织,学生通过组织功能模块便可与同组成员共享方案设计参数。

学生完成爆破设计课程方案后应快速检验其是否合理,为了有效辅助学生完成爆破方案检验,需要对智能设计平台的功能进行模块分区,实现导向式的操作方式,引导学生按照步骤完成方案参数设计及已完成方案的调整和优化^[18]。图2所示为隧道爆破智能设计平台各模块界面。

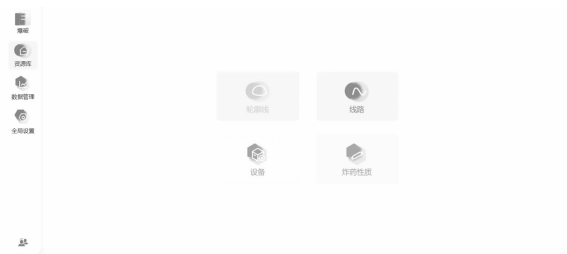
学生通过智能设计软件平台的爆破模块输入多源岩性信息和炮孔设计信息,便可自动生成科学合理的爆破方案参数设计^[19]。智能设计软件平台支持动态调整各项设计参数,并实时将设计方案转化成可视化的二维和三维模型,使学生能够直观地理解设计方案。平台系统具有智能判别机制,能够实时监测并反馈设计参数的合理性,若方案参数不合理,平台会提示学生进行调整,确保生成的爆破方案参数具备可行性。设计完成后,平台将炮孔布置、起

爆顺序、装药量、装药结构和炮孔坐标分模块输出并生成可视化的设计图。平台系统根据学生已确定的方案参数设计,通过系统已录入的现场数据,自动计算生成爆破数据分析表,包括起爆顺序统计表、成本分析表和技术经济指标表。各分析表以直观的表格

展示相关数据,进一步帮助学生从技术和经济双重维度检验设计方案。平台的整个设计过程基于理论知识、规范标准和实践经验,确保每一个设计步骤具备充分依据。



(a) 爆破模块
(a) Blasting module



(b) 资源库模块
(b) Resource library module



(c) 数据管理模块
(c) Data management module



(d) 全局设置模块
(d) Global settings module

图 2 隧道爆破智能设计平台功能模块

Fig. 2 Functional modules of the tunnel blasting intelligent design platform

2.2 隧道爆破智能设计软件平台

图 3 所示为隧道爆破工程课程设计的智能设计流程^[20]。隧道爆破智能设计软件平台基于 Java 后端架构与 TypeScript 前端框架构建,通过前后端分离设计实现业务逻辑与交互界面的解耦。后端 Java 服务基于模块化设计快速完成爆破数据计算,前端 TypeScript 框架则通过响应式编程实时更新三维可视化界面。平台适用于各种类型的隧道爆破设计,针对公路、铁路隧道以及矿山巷道等不同隧道形式,均可根据岩性、地质特征等多重因素进行精确的设计优化,提供可行的爆破方案参数设计。

学生需要对隧道进行爆破参数设计,然后建立资源库信息,按照操作流程依次将设计的参数输入到智能设计平台。首先学生进入爆破模块创建爆破方案参数设计基本信息,使用掌子面功能进行命名和选取里程,再使用里程段功能选取开挖轮廓线并创建循环里程。创建完成之后,在岩性模块输入多源岩性参数,进入爆破设计模块设置炮孔布置参数,便可一键生成爆破方案参数设计。其中炮孔设计嵌于爆破设计模块,方案生成之后仍可在该模块对方

案参数做出调整。平台系统根据智能判别机制计算参数的正确性,若不满足要求,系统程序会对错误参数进行提示,然后重新输入。爆破方案参数设计生成即可进入爆破设计模块,学生可根据设计要求通过模块中的各个功能进行方案参数设计调整,随着方案参数变化,系统会实时生成可视化的设计图。

传统设计对方案进行手工或者使用 CAD 软件进行二维图形绘制,操作步骤繁琐并且不易理解实际爆破效果与方案参数之间的关系,学生对于设计方案的理解仅限于纸面上。在隧道爆破智能设计软件平台的支持下,基于二维和三维可视化模型,有效提升了学生对设计方案的认识,学生能够更加深入了解隧道爆破工程课程设计。

3 基于隧道爆破智能设计平台的应用实例

3.1 隧道爆破智能设计软件平台辅助课程设计应用过程

现以某隧道工程项目为例展示该平台的设计过程。布置课程设计任务后,需要学生自主完成爆破

方案设计,与传统的课程设计教学过程相同,必须经过理论计算的过程才能够强化对理论知识的掌握,

该智能设计软件平台是用于已完成设计方案参数的验证。

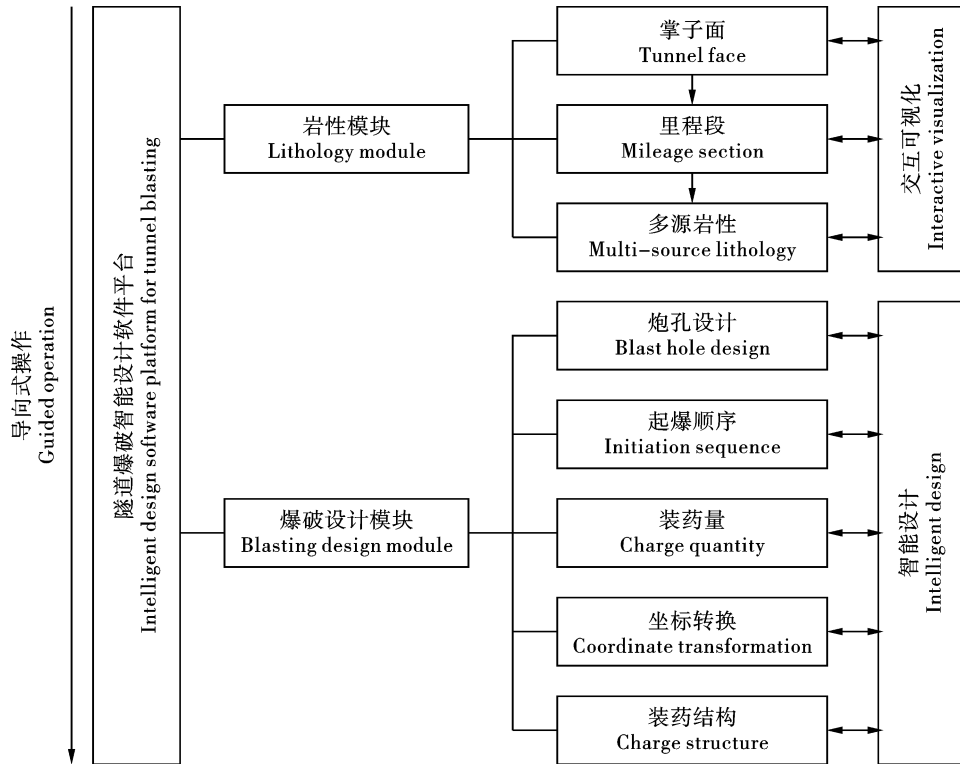
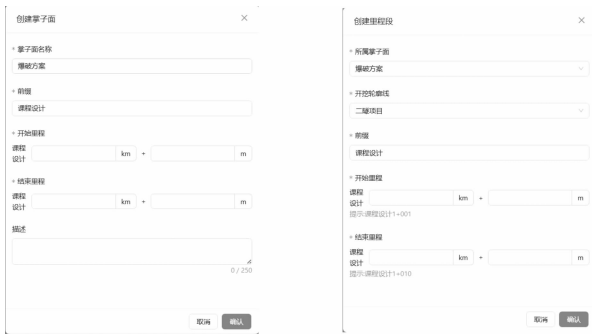


图3 隧道爆破工程课程设计的智能设计流程

Fig. 3 Intelligent design process for tunnel blasting engineering course design

首先,进入爆破模块,点击爆破列表右侧的创建按钮进行爆破方案参数设计基础信息的创建,如图4所示。

提示,限制学生进一步的操作。参数输入完成经过系统检查确认无误后,学生即可进行炮孔布置信息的输入。若学生需要修改岩性参数,系统允许返回岩性模块调整。



(a) 掌子面
(a) Tunnel face

(b) 里程段
(b) Mileage section

图4 爆破方案基本信息

Fig. 4 Basic information of the blasting scheme

创建之后,在岩性模块输入多源岩性参数,右侧区域可输入多源岩性参数,左侧区域显示隧道的仿真轮廓线并可查看详细轮廓线信息,如图5所示。在必须输入的参数后面进行标注防止学生遗漏,若参数输入不完整或出现不正常数据,系统则会进行

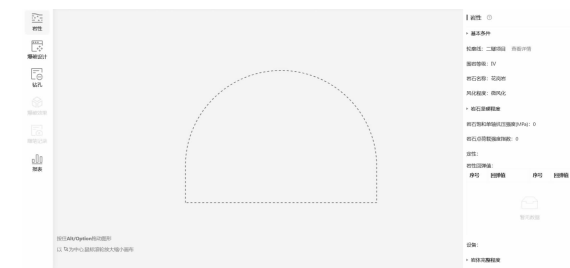


图5 多源岩性参数

Fig. 5 Multi-source lithological parameters

进入爆破设计模块,在该模块右侧区域输入炮孔布置参数,左侧区域显示生成的爆破方案参数设计的二维和三维模型,如图6所示。左侧区域设置了四个显示按钮,能够调节生成模型的显示效果。炮孔布置还支持一键填写推荐参数,学生可根据系统给出的推荐参数与理论设计的参数对比,调整优化爆破设计方案。以上步骤完成之后点击保存,便可一键生成爆破方案参数设计。

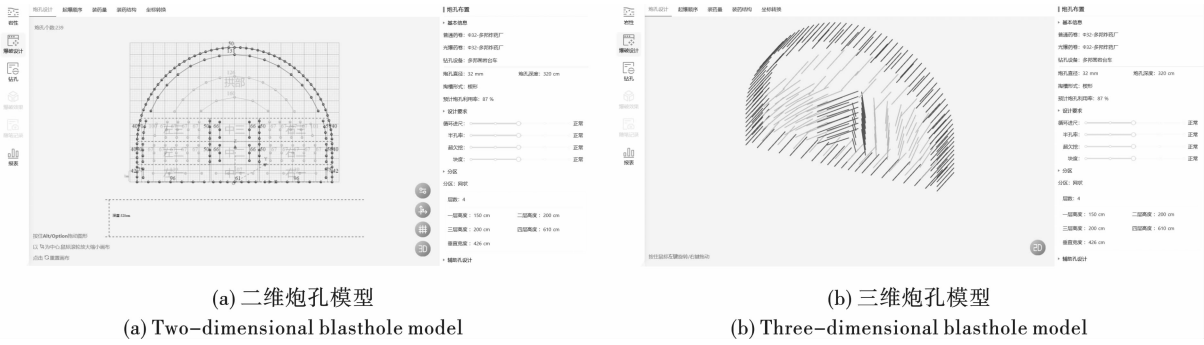


图 6 炮孔布置
Fig. 6 Blasthole layout

炮孔设计模块的方案生成与调整为同一页面,爆破方案参数设计生成之后,可在爆破设计模块中的各个功能区查看或调整设计图,如图 7 所示。

在方案参数设计确定后,系统自动计算并生成该方案的爆破数据分析表,以表格形式给出工程量、

成本及经济指标的数据,如图 8 所示。学生可以从不同的角度对爆破方案参数设计实施效果进行分析,对于分析表与预期有较大偏差的数据,学生可以返回调整参数,为学生提供了从设计到优化再到评估的闭环实践体验。

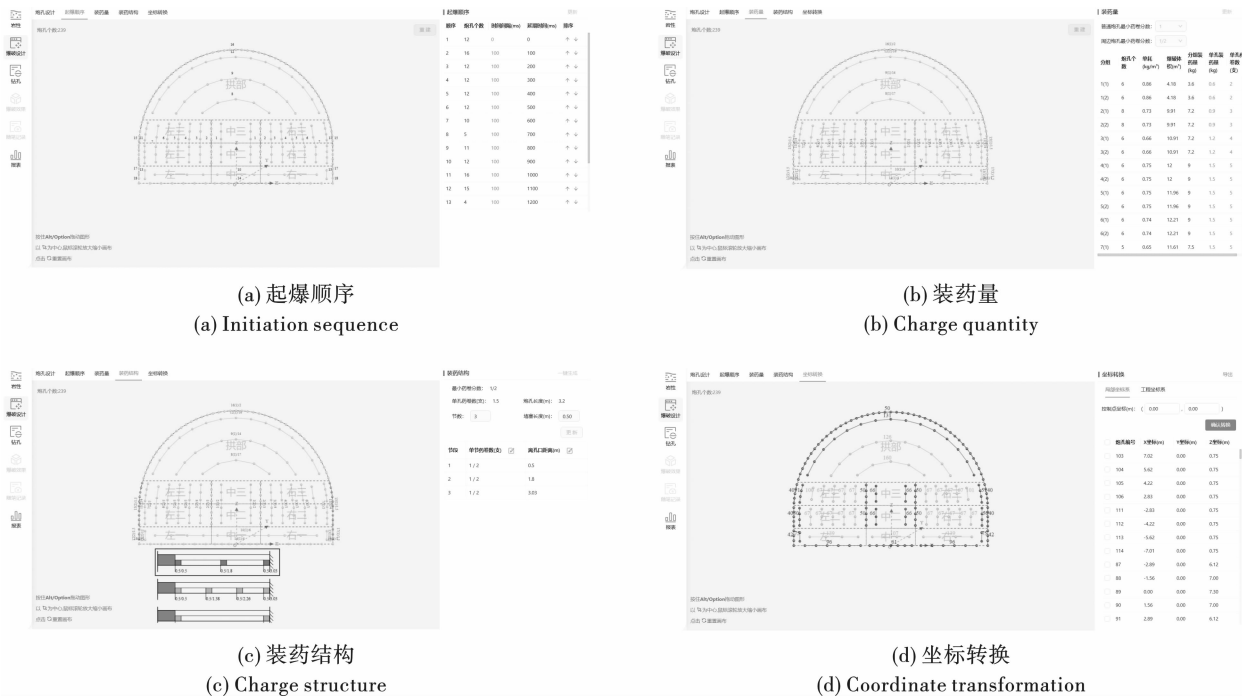


图 7 爆破方案设计图
Fig. 7 Blasting scheme design diagram

3.2 平台辅助课程设计教学效果评价

作者随机抽取使用该智能设计平台完成隧道爆破课程设计的 90 名本科生,学生主要来自城市地下空间工程、土木工程和采矿工程等相关专业。采用五级李克特量表对平台进行满意度调查问卷,设置 A:非常同意,5 分;B:同意,4 分;C:中立,3 分;D:不同意,2 分;E:非常不同意,1 分;问卷包括“功能实用性”“操作便捷性”“学习效果提升”三个方面^[21]。调查结果显示:功能实用性得分为 4.12 ± 0.63 ,学

生认为智能设计平台能够利用动态参数调整与智能判别机制优化爆破方案有助于爆破方案的理解,并且增强实践能力。操作便捷性得分为 3.78 ± 0.71 ,学生认为平台操作界面逻辑清晰、导向式流程易于上手,但三维模型动态交互模块仍需进一步优化。学习效果提升得分为 4.24 ± 0.58 ,学生认为平台的可视化设计强化了理论与实践的结合,对工程智能化思维的培养具有显著作用。

课程设计实例结果表明,运用隧道爆破智能设

计软件平台能够大大提高课程设计的效率,有助于学生深入理解和扎实掌握课程专业知识,实现智能课程辅助设计。爆破方案设计过程科学合理并且环环相扣,平台系统自动进行对方案参数的可实施性

判断,每一个环节正确才能进入下一个环节,构建了导向式的操作流程,提高学生计算的精确性。同时,实现了设计方案的可视化效果,使理论知识与工程应用融合,增强学生理论与实践的结合能力。

段别	孔数	装药量(kg)	装药量百分比(%)	钻孔长度(cm)	钻孔长度百分比(%)
1	12	7.2	1.97	2496	3.22
2	16	14.4	3.95	6432	8.3
3	12	14.4	3.95	4308	5.56
4	12	18	4.93	4152	5.36
5	12	18	4.93	4008	5.17
6	12	18	4.93	3912	5.05
7	10	15	4.11	3210	4.14
8	5	25.5	6.99	1600	2.07
9	11	46.2	12.66	3520	4.54
10	12	21.6	5.92	3840	4.96
11	16	19.2	5.26	5120	6.61
12	15	72	19.74	4800	6.2
13	4	14.4	3.95	1280	1.65
14	19	22.8	6.25	6080	7.85
15	20	9	2.47	6400	8.26
16	43	25.8	7.07	13760	17.76
17	6	2.7	0.74	1920	2.48
18	2	0.6	0.16	640	0.83
总计	239	364.8		77478	

(a) 段别统计表
(a) Sectional statistics table

序号	项目	单位	数量
1	开挖断面积	m ²	164.6
2	炮孔深度	cm	320
3	预计炮孔利用率	%	87
4	每循环爆破石方	m ³	458.25
5	炮孔总数	个	239
6	钻孔总长度	m	774.78
7	雷管用量	发	239
8	炸药用量	kg	364.8
9	单位体积岩体炸药消耗量	kg/m ³	0.8
10	单位体积岩体雷管消耗量	发/m ³	0.52

(b) 成本分析表
(b) Cost analysis table

序号	名称	类型	单位	数量	单价(元)	小计(元)
1	炸药	耗材	kg	364.8	13	4742.4
2	雷管	耗材	个	239	25	5975
3	钻孔长度	劳务	m	774.78	8	6198.24
总计						16915.64

(c) 技术经济指标表
(c) Technical and economic indexes table

图8 爆破数据平台导出表

Fig. 8 Export table from blasting data platform

4 结论

(1) 针对当前隧道爆破课程设计教学实践存在的问题,以先进的教育理论和智能技术作为指导,为促进学生对隧道爆破课程设计的认识与理解,将隧道爆破智能设计平台应用到隧道爆破课程设计,达到了交互式教学相长的效果。

(2) 隧道爆破智能设计平台提供了从设计、优化到评估的闭环实践体验,应用智能设计平台学生能够快速掌握爆破设计的要点,简化了隧道爆破课程设计中复杂的计算与绘图环节,显著提高了课程设计的效率与设计质量,改变了传统的课程设计教学实践模式。

(3) 基于智能设计的隧道爆破课程设计教学实践设计合理、内容丰富,与传统教学实践相比,该课程设计模式使学生直观地感知理论知识与工程实践的联系,有利于培养自主学习能力,锻炼学生的理论实践能力,培养学生的智能化设计思想。

参考文献 (References)

[1] 张悦周,孙绍华,张庭浩,等. 面向非专业类学生的人工智能课程设计及教学模式[J]. 高等工程教育研究, 2024(6):22-27.
[1] ZHANG Yue-zhou, SUN Shao-hua, ZHANG Ting-hao, et al. Artificial intelligence course design and teaching mod-

els for non-major students[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2024(6):22-27. (in Chinese)
[2] 李贵,蓬辉,王兴东,等. 数字智能化机械课程设计实践教学方法探究[J]. 实验室研究与探索, 2020,39(6):133-137.
[2] LI Gui, PENG Hui, WANG Xing-dong, et al. Exploration on the practical teaching method of digital intelligent mechanical design course design[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(6):133-137. (in Chinese)
[3] 成玉祥. 课程设计实践课程教学模式改革探讨——以“岩土工程勘察课程设计”为例[J]. 实验室研究与探索, 2024,43(11):195-198.
[3] CHENG Yu-xiang. Reform of teaching mode of curriculum design practice: a case study on geotechnical investigation [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2024, 43(11):195-198. (in Chinese)
[4] 蔡艳,唐新华,华学明. 工科专业学科交叉类课程设计与教学模式探索——以材料专业“智能热制造”系列课程为例[J]. 高等工程教育研究, 2021(S1):12-15.
[4] CAI Yan, TANG Xin-hua, HUA Xue-ming. Design of interdisciplinary courses and exploration of teaching mode in engineering majors —— Take the series of "intelligent thermal manufacturing" of materials major as an example [J]. Research in Higher Education of Engineering, 2021(S1):12-15. (in Chinese)
[5] 张飞燕,刘柯含,韩颖. “爆破安全”课程融合实验教学体系构建与实践[J]. 爆破, 2022, 39(2):55-62.

- [5] ZHANG Fei-yan, LIU Ke-han, HAN Ying. Construction and practice of integrated experimental teaching system of "blasting safety" course [J]. *Blasting*, 2022, 39 (2): 55-62. (in Chinese)
- [6] 杨荣周,徐颖. 爆破工程课程教学中岩石材料动态力学实验实践与分析方法[J]. *爆破*, 2024, 41(3): 248-260.
- [6] YANG Rong-zhou, XU Ying. Dynamic mechanics experiment practice and analysis methods of rock materials in blasting engineering teaching [J]. *Blasting*, 2024, 41(3): 248-260. (in Chinese)
- [7] 李祥龙,张志平,王建国,等. SHPB 试验技术在凿岩爆破工程教学中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2023, 42(7): 178-181.
- [7] LI Xiang-long, ZHANG Zhi-ping, WANG Jian-guo, et al. Teaching experiment of SHPB impact technology in rock drilling and blasting engineering [J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2023, 42(7): 178-181. (in Chinese)
- [8] 程兵,汪海波,汪泉,等. SPH-FEM 耦合法数值模拟在工程爆破教学中的应用研究[J]. *实验技术与管理*, 2023, 40(10): 100-105.
- [8] CHEN Bing, WANG Hai-bo, WANG Quan, et al. Research on the application of SPH-FEM coupling algorithm numerical simulation in engineering blasting teaching [J]. *Experimental Technology and Management*, 2023, 40(10): 100-105. (in Chinese)
- [9] 叶海旺,雷涛,李梅,等. 爆破工程虚拟仿真实验系统及教学实践研究[J]. *爆破*, 2020, 37(3): 153-158.
- [9] YE Hai-wang, LEI Tao, LI Mei, et al. Virtual simulation experiment system and teaching practice of blasting engineering [J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 153-158. (in Chinese)
- [10] 孙强,李昊阳,易锦,等. 爆破实验教学虚拟仿真教学平台的设计与应用[J/OL]. *爆破*: 1-15. [2025-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240325.1159.004.html>.
- [10] SUN Qiang, LI Hao-yang, YI Jin, et al. Design and application of a virtual simulation teaching platform for blasting experiment teaching [J/OL]. *Blasting*: 1-15. [2025-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1164.TJ.20240325.1159.004.html>. (in Chinese)
- [11] 张宇菲,孙强,岳中文,等. 工程爆破虚拟仿真实验教学资源建设[J]. *实验科学与技术*, 2023, 21(5): 135-142.
- [11] ZHANG Yu-fei, SUN Qiang, YUE Zhong-wen, et al. Construction of teaching resources for blasting engineering virtual simulation experiment [J]. *Experiment Science and Technology*, 2023, 21(5): 135-142. (in Chinese)
- [12] 陈东方,任高峰,张建华,等. "隧道工程"虚拟仿真实验教学平台的构建与实践[J]. *工业和信息化教育*, 2023(6): 85-90.
- [12] CHEN Dong-fang, REN Gao-feng, ZHANG Jian-hua, et al. Construction and practice of the virtual simulation experimental teaching platform for tunnel engineering [J]. *Industry and Information Technology Education*, 2023(6): 85-90. (in Chinese)
- [13] 褚夫蛟,祝佳馨,魏志鹏,等. "爆破工程"课程教学改革的思考与对策[J]. *教育教学论坛*, 2023(20): 69-72.
- [13] CHU Fu-jiao, ZHU Jia-xin, WEI Zhi-peng, et al. Reflections and countermeasures on the teaching reform of the blasting engineering course [J]. *Education and Teaching Forum*, 2023(20): 69-72. (in Chinese)
- [14] 肖定军,蒲传金. 强化实践能力的爆破工程课程建设与实践[J]. *中国教育技术装备*, 2021(24): 128-130.
- [14] XIAO Ding-jun, PU Chuan-jin. Blasting engineering course development and practice for strengthening practical skills [J]. *China Educational Technology & Equipment*, 2021(24): 128-130. (in Chinese)
- [15] 张宪堂,刘小康,王向阳,等. 炮孔间距对偏心不耦合装药贯通裂纹扩展的影响[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(3): 1-10.
- [15] ZHANG Xian-tang, LIU Xiao-kang, WANG Xiang-yang, et al. Influence of blast hole spacing on penetrating crack propagation of eccentric uncoupled charge [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2024, 43(3): 1-10. (in Chinese)
- [16] 张万志,徐帮树,葛颜慧,等. 硬岩隧道全断面开挖掏槽爆破参数优化[J]. *爆破*, 2022, 39(2): 94-99.
- [16] ZHANG Wan-zhi, XU Bang-shu, GE Yan-hui, et al. Optimization of cutting blasting parameters for full face excavation of hard rock tunnel [J]. *Blasting*, 2022, 39(2): 94-99. (in Chinese)
- [17] 李兰彬. 爆破管理的爆破数据信息化[J]. *现代矿业*, 2020, 36(1): 129-132.
- [17] LI Lan-bin. Blasting data informatization in blasting management [J]. *Modern Mining*, 2020, 36(1): 129-132. (in Chinese)
- [18] 张宪堂,董国庆,余辉,等. 围压下空孔直径对直眼掏槽爆破振动的影响[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(3): 44-52.
- [18] ZHANG Xian-tang, DONG Guo-qing, YU Hui, et al. Influence of empty hole diameters on blasting vibration of parallel cut under confining pressure [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2023, 42(3): 44-52. (in Chinese)
- [19] 宋浩天,张万志,司晓丽,等. 钻爆法隧道炮孔分布计算机辅助设计及应用[J]. *爆破*, 2024, 41(4): 122-

- 127,144.
- [19] SONG Hao-tian, ZHANG Wan-zhi, SI Xiao-li, et al. Computer-aided design of blast hole distribution and its application[J]. *Blasting*, 2024, 41(4): 122-127, 144. (in Chinese)
- [20] 耿伟卫. 隧道钻爆开挖爆破方案智能设计方法与系统研究[D]. 济南:山东大学, 2021.
- [20] GENG Wei-wei. Study on intelligent design method and system of tunnel drilling and blasting scheme[D]. Jinan: Shandong University, 2021. (in Chinese)
- [21] 张宪堂, 焦相团, 余 辉, 等. 井巷掘进掏槽爆破室内模型教学实验系统研发与应用[J/OL]. *金属矿山*: 1-12. [2025-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.td.20250318.1049.002.html>.
- [21] ZHANG Xian-tang, JIAO Xiang-tuan, YU Hui, et al. Development and application of laboratory model teaching experiment system for tunnel excavation cutting blasting[J/OL]. *Metal Mine*: 1-12. [2025-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1055.td.20250318.1049.002.html>. (in Chinese)

(上接第 198 页)

- [13] 杨石刚, 蔡炯炜, 杨 亚, 等. 城市地下浅埋管沟可燃气体爆炸的灾害效应(II): 影响因素分析及后果评估[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(1): 157-168.
- [13] YANG Shi-gang, CAI Jiong-wei, YANG Ya, et al. Disaster effects of combustible gas explosions in urban underground shallow buried pipe trenches(ii): analysis of influencing factors and consequence assessment[J]. *Explosion and Impact*, 2023, 43(1): 157-168. (in Chinese)
- [14] 李重情, 穆朝民, 许登科, 等. 空腔长度对瓦斯爆炸冲击波传播影响研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(6): 1293-1300.
- [14] LI Chong-qing, MU Chao-min, XU Deng-ke, et al. Effect of cavity length on shock wave propagation of gas explosion[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1293-1300. (in Chinese)
- [15] 周于翔, 张培理, 蒋新生, 等. 长径比与体积对密闭方形管道内油气爆炸超压特性的影响[J/OL]. *爆炸与冲击*: 1-13. [2025-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.o3.20241227.0924.010.html>.
- [15] ZHOU Yu-xiang, ZHANG Pei-li, JIANG Xing-sheng, et al. The influence of length-diameter ratio and volume on the overpressure characteristics of oil and gas explosions in closed square pipelines[J/OL]. *Explosion and Impact*: 1-13. [2025-03-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1148.o3.20241227.0924.010.html>. (in Chinese)
- [16] 李静野, 蒋新生, 李 进, 等. 长径比对管道油气爆炸特性与火焰传播规律影响研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(8): 88-94.
- [16] LI Jing-ye, JIANG Xin-sheng, LI Jin, et al. Effect of length-diameter ratio on aroma and gas explosion characteristics and flame propagation law of pipelines[J]. *China Science and Technology of Work Safety*, 2020, 16(8): 88-94. (in Chinese)
- [17] RAZUS D, MOVILEANU C, BRINZEA V, et al. Explosion pressures of hydrocarbon air mixtures in closed vessels[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 135(1): 58-65.
- [18] 路 长, 李明月, 郭洪江, 等. 非对称泄爆条件下甲烷爆炸双向传播特性的研究[J]. *火工品*, 2024(3): 91-96.
- [18] LU Chang, LI Ming-yue, GUO Hong-jiang, et al. Study on the bidirectional propagation characteristics of methane explosions under asymmetric venting conditions[J]. *Pyrotechnics*, 2024(3): 91-96. (in Chinese)
- [19] 喻健良, 周 崇, 刘润杰. 管道内预混气体爆燃过程的实验研究[J]. *石油与天然气化工*, 2004, 33(6): 453-455, 466.
- [19] YU Jian-liang, ZHOU Chong, LIU Run-jie. Experimental study on the deflagration process of premixed gas in pipelines[J]. *Oil & Gas Chemical*, 2004, 33(6): 453-455, 466. (in Chinese)
- [20] 程浩力, 李 睿, 刘德俊. 管道燃气爆炸特性实验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2010, 6(4): 23-27.
- [20] CHENG Hao-li, LI Rui, LIU De-jun. Experimental study on explosion characteristics of pipeline gas[J]. *China Safety Science and Technology*, 2010, 6(4): 23-27. (in Chinese)
- [21] BI Ming-su, DONG Cheng-jie, ZHOU-Yi-hui. Numerical simulation of premixed methane-air deflagration in large LD closed pipes[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 40: 337-342.
- [22] 鲜文双, 刘 伟, 张 凯, 等. 基于量纲分析的浅埋炸药爆炸地表振动速度试验研究[J]. *火工品*, 2024(6): 84-88.
- [22] XIAN Wen-shuang, LIU Wei, ZHANG Kai, et al. Study on the ground vibration velocity test of shallow-buried explosive explosion based on dimensional analysis[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2024(6): 84-88. (in Chinese)