

2018 年度国家虚拟仿真实验教学项目申报表

学 校 名 称	河北大学
实 验 教 学 项 目 名 称	盾构隧道结构设计与施工综合仿真实验
所 属 课 程 名 称	地下工程设计、地下工程施工
所 属 专 业 代 码	080703
实 验 教 学 项 目 负 责 人 姓 名	方有亮
实 验 教 学 项 目 负 责 人 电 话	13931260682
有 效 链 接 网 址	Cavr.hbu.cn

教育部高等教育司 制

二〇一八年七月

填写说明和要求

1. 以 Word 文档格式，如实填写各项。
2. 表格文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。
3. 所属专业代码，依据《普通高等学校本科专业目录（2012 年）》填写 6 位代码。
4. 涉密内容不填写，有可能涉密和不宜大范围公开的内容，请特别说明。
5. 表格各栏目可根据内容进行调整。

1. 实验教学项目教学服务团队情况

1-1 实验教学项目负责人情况					
姓名	方有亮	性别	男	出生年月	1967-03
学历	研究生	学位	博士	电话	0312-5079328
专业技术职务	教授	行政职务	院长	手机	13931260682
院系	建筑工程学院		电子邮箱	fang_youliang@126.com	
地址	河北省保定市五四东路 180 号			邮编	071002
<p>教学研究情况：</p> <p>主持的教学研究课题：</p> <p>1、地方综合性大学跨学科交叉融合土木工程人才培养模式探索与实践，河北省教育厅，新工科教改项目，2017-2018，主持。</p> <p>2、面向大型施工企业的土木工程专业高级人才培养方案研究，河北省教育厅，河北省教育厅教学改革研究与实践项目，2014-2015，主持。</p> <p>3、《结构有限元方法在实际工程中的案例应用》课程教学案例库建设，省级研究生专业学位教学案例库建设项目，河北省教育厅，2017.1-2018.12；主持。</p> <p>4、建筑文化素养构建-跨学科复合型人才培养模式，河北大学教改实践典型项目，2016-2017，河北大学，主持。</p> <p>5、地方综合性大学土木工程跨学科教学改革项目，河北大学教学研究项目，河北大学，2018.1-2019.12，主持。</p> <p>教学研究论文：</p> <p>1、基于 R 语言的岩土三轴剪切试验数据处理方法，工程质量 2017 第 35 卷 第 3 期 P71-76 1671-3702。</p> <p>2、施工技术课程实训平台动态教学模式研究与实践，山西建筑，2017 第 43 卷 第 5 期 P233-234。</p> <p>获得的教学表彰/奖励：</p> <p>1、基于功率谱灵敏度的结构损伤识别方法研究，代胜福，河北大学 2017 届本科生优秀毕业论文。</p> <p>2、基于功率谱灵敏度的结构损伤识别方法，王晶晶，河北大学 2018 届本科生优秀毕业论文。</p>					

学术研究情况：

承担的学术研究课题：

- 1、张拉结构损伤识别研究 E2011201061, 河北省自然科学基金, 河北省科技厅, 2011-2014, 主持;
- 2、快装索道新产品开发, 巨力索具股份有限公司, 2013-2014, 主持;
- 3、安悦佳苑小区保障房 2#装配式结构施工性能监测研究, 河北建设集团股份有限公司, 2018-2019, 主持;
- 4、保定市未来城 B 区 1#2#楼主体结构施工试验检测研究, 河北合创建筑节能科技有限责任公司, 2016-2017, 主持;
- 5、高强混凝土板应用技术研究, 天保建设集团, 2013-2014, 主持;

发表的学术论文：

- 1、基于支持向量机的钢框架结构损伤定位试验研究, 科学技术与工程, 张颖, 戚世蕾, 方有亮 (通讯作者), 2018 第 18 卷 第 7 期 P25-30 1671-1815。
- 2、Research of structural damage identification method based on the substructure analysis, The 13th international symposium on structural engineering, 方有亮, 2014.12.
- 3、同步优化斜拉桥施工索力及成桥索力的方法, 四川建筑, 王珊, 方有亮, 2014 第 5 期 P132-134 1007-8983.
- 4、空间网架结构的连续倒塌分析, 江苏建筑, 张士辉, 方有亮, 2014 第 4 期 P20-24 1005-6270.
- 5、基于动力子结构法的平面钢架结构模态分析, 江苏建筑, 毛卓能, 方有亮, 2014 第 1 期 P48-50 1005-6270.

获得的学术研究表彰/奖励

- 1、完成河北省住房和城乡建设厅项目《张拉结构损伤识别的数值及试验研究》，2013 年。
- 2、完成河北省自然科学基金项目《张拉结构损伤识别研究 E2011201061》，2014 年。
- 3、完成河北建设集团股份有限公司项目《河北北方学院悬支穹顶结构施工监测与控制研究》，2017 年。
- 4、完成保定市体育局项目《保定市体育场加固改造、施工监测与控制研究》，2018 年。
- 5、完成住房和城乡建设局项目《保定市环城水系 32 座桥桥梁结构性能检测》，2014 年。

1-2 实验教学项目教学服务团队情况						
1-2-1 团队主要成员（5 人以内）						
序号	姓名	所在单位	专业技术职务	行政职务	承担任务	备注
1	方有亮	建工学院	教授	院长	组织协调	
2	余 莉	建工学院	副教授	无	实验设计	
3	陈二忠	建工学院	实验师	实验室副主任	实验实施	
4	苏胜昔	建工学院	高级实验师	实验室主任	理论指导	
5	吴兴征	建工学院	副教授	无	现场采集	
1-2-1 团队其他成员						
6	郟禄文	建工学院	教授	副院长	理论指导	
7	丁继辉	建工学院	教授	无	实验设计	
8	阎宇杰	建工学院	实验师	无	在线服务	
9	李君	北京润尼尔网络科技有限公司	工程师	总经理	技术支持	
10	成朋伟	北京润尼尔网络科技有限公司	工程师	无	系统制作及开发	
项目团队总人数： <u>10</u> （人） 高校人员数量： <u>8</u> （人） 企业人员数量： <u>2</u> （人）						

注：1. 教学服务团队成员所在单位需如实填写，可与负责人不在同一单位。

2. 教学服务团队须有在线教学服务人员和技术支持人员，请在备注中说明。

2. 实验教学项目描述

2-1 名称

盾构隧道结构设计与施工综合仿真实验

2-2 实验目的

- 1、掌握依据隧道结构设计展开施工的技术流程；
- 2、掌握隧道结构设计和稳定性计算的基本原理；
- 3、了解隧道设计指导隧道施工，施工反馈设计合理性相辅相成的关系；
- 4、掌握土压平衡盾构隧道施工的基本原理和技术；
- 5、学习利用沉降监测曲线指导隧道安全施工。

2-3 实验原理

隧道结构设计,首先需要计算洞身结构所受荷载情况,在本虚拟仿真实验中,考虑土体荷载情况的基础上,选择适宜的管片结构,然后进行稳定性验算,分析隧道盾构施工后,管片结构的变形和土体的沉降量是否超过预警值。在盾构隧道施工实验中,除了按照设计步骤施工外,需要实时监测地表沉降量,通过调整盾构机的推进力、出土量等以保证正常施工。

2.3.1 土体荷载的计算

在计算土体荷载之前,首先要获取土体参数,土体参数实验在河北大学建筑工程学院土工实验室进行(见图 2-1 所示),得到了土的重力、内聚力、内摩擦角、弹性模量、变形模量等参数。



直接剪切仪



固结实验



全自动三轴仪

图 2-1 土体参数测量仪器

土体荷载的计算包括了竖向压力、水平侧压力、地基反力、弹性反力计算等,计算简图见图 2-2。

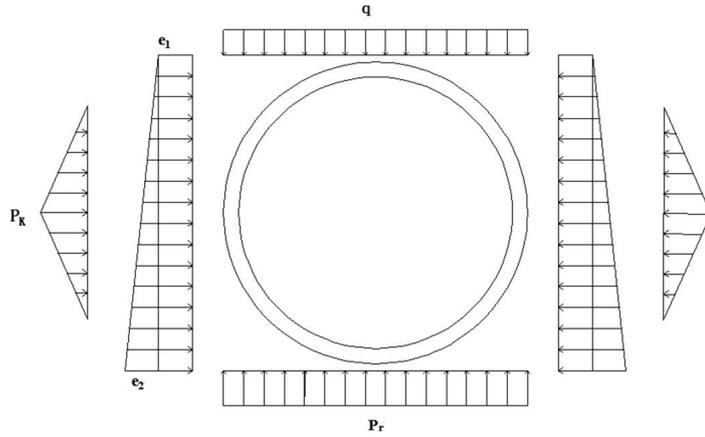


图 2-2 作用在衬砌结构上的围岩压力示意图

$$(1) \text{ 竖向压力: } q = \sum \gamma_i h_i + q_{\text{附}} \quad (2-1)$$

$$\text{地基反力: } P_R = q + P_g \quad (2-2)$$

式中 P_g 由结构自重产生的地基反力，对于圆形结构 $P_g = \pi d \gamma_h$ 。

(2) 水平侧压力:

对于砂性土侧压力可由水压力与土压力叠加得到:

$$e_i = \sum \gamma_i h_i \lambda + \gamma_w H_i \lambda_w \quad (2-3)$$

土体的有效重度 γ' 为: $\gamma' = \gamma_s - \gamma_w$

对粘性土，水平侧压力则将其视为水压力的一部分和土压力叠加得到。因为在粘性土中的水大多是非重力水（结合水），不对土粒起静水压力作用。由此

$$e_i = \sum \gamma_i h_i \lambda \quad (2-4)$$

(3) 弹性反力计算:

土壤弹性反力图形分布在水平直径上下各 45° 范围内，其分布规律如下

$$p_k = K_h y (1 - \sqrt{2} |\cos \varphi|) \quad (2-5)$$

式中 φ —所讨论截面与竖直轴夹角，当 $\varphi=45^\circ$ 时， $p_k=0$ ， $\varphi=90^\circ$ 时，最大弹性抗力值为:

$p_k = K_h y$;

y —水平直径处在主动和弹性反力作用下的变位，计算公式如下

$$y = \frac{(2q - 2e_1 - e_2 + \pi g) R_h^4}{24(\eta EI + 0.045 K_h R_h^4)} \quad (2-6)$$

其中 η —圆环刚度有效系数, $\eta = 0.25 \sim 0.8$;

R_h —衬砌的计算半径;

E —混凝土弹性模量;

I —惯性矩, 圆环计算式为 $I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$;

K_h —侧向地层弹性反力系数, $K_h = (0.67 \sim 0.90)K_v$;

K_v —竖向地层弹性反力系数, 此处选取 20 MPa/m 。

2.3.2 盾构隧道结构的内力计算

采用惯用法进行管片内力计算, 本设计根据惯用法所求弯矩及轴力计算公式如下表 2-1, 剪力计算公式如下表 2-2。

表 2-1 惯用算法计算弯矩和轴力公式

荷载	截面位置	内力	
		M / kN · m	N / kN
1、自重 g	$0 \sim \pi$	$gR_H^2(1-0.5\cos\alpha - \alpha\sin\alpha)$	$gR_H(\alpha\sin\alpha - 0.5\cos\alpha)$
2 上部荷载 q	$0 \sim \frac{\pi}{2}$	$qR_H^2(0.193+0.106\cos\alpha - 0.5\sin\alpha^2)$	$qR_H(\sin\alpha^2 - 0.106\cos\alpha)$
	$\frac{\pi}{2} \sim \pi$	$qR_H^2(0.693+0.106\cos\alpha - \sin\alpha)$	$qR_H(\sin\alpha - 0.106\cos\alpha)$
3、地基竖向反力 P_R	$0 \sim \frac{\pi}{2}$	$P_R R_H^2(0.057-0.106\cos\alpha)$	$0.106P_R R_H \cos\alpha$
	$\frac{\pi}{2} \sim \pi$	$P_R R_H^2(-0.443+\sin\alpha - 0.106\cos\alpha - 0.5\sin^2\alpha)$	$P_R R_H(\sin^2\alpha - \sin\alpha + 0.106\cos\alpha)$
4、均布测压 e_1	$0 \sim \pi$	$e_1 R_H^2(0.25 - 0.5\cos^2\alpha)$	$e_1 R_H \cos^2\alpha$
5、 Δ 测压 $e_2 - e_1$	$0 \sim \pi$	$e_2 R_H^2(0.25\sin^2\alpha + 0.083\cos^3\alpha - 0.063\cos\alpha - 0.125)$	$e_2 R_H \cos\alpha(0.063 + 0.5\cos\alpha - 0.25\cos^2\alpha)$
6、水平地基抗力	$0 \sim \frac{\pi}{4}$	$k\delta R_H^2(0.2346 - 0.3536\cos\alpha)$	$0.3536k\delta R_H \cdot \cos\alpha$

$(p_k = k\delta)$	$\frac{\pi}{4} \sim \pi$	$k\delta R_H^2 (-0.3487 + 0.5 \sin^2 \alpha + 0.2357 \cos^3 \alpha)$	$k\delta R_H (-0.7071 \cos \alpha + \cos^2 \alpha + 0.7071 \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha)$
-------------------	--------------------------	--	--

表 2-2 用弹性方程计算剪力公式

荷载	截面位置	剪力 Q / kN
1、自重 g	$0 \sim \frac{\pi}{2}$	$(-\theta \cos \theta - \frac{\sin \theta}{6})gR_H$
	$\frac{\pi}{2} \sim \pi$	$((\pi - \theta) \cos \theta - \pi \sin \theta \cos \theta - \frac{\sin \theta}{6})gR_H$
2、上部荷载 q	$0 \sim \pi$	$-qR_H \sin \theta \cos \theta$
3、均布测压 e_1	$0 \sim \pi$	$R_H e_1 \sin \theta \cos \theta$
4、 Δ 测压 $e_2 - e_1$	$0 \sim \pi$	$R_H (\sin \theta + 8 \sin \theta \cos \theta - 4 \sin \theta \cos^2 \theta) \frac{e_2 - e_1}{16}$
5、水平地基抗力 $p_k = k\delta$	$0 \sim \frac{\pi}{4}$ $\frac{\pi}{4} \sim \frac{\pi}{2}$	$0.3536 \sin \theta p_k$ $(\sin \theta \cos \theta - 0.7071 \cos^2 \theta \sin \theta) p_k R_H$

2.3.3 盾构隧道施工地面沉降监测及土压平衡盾构原理

(1) 纵向地表沉降

关于盾构施工引起的纵向地表沉降可分为五个阶段，即盾构到达前的地面变形 δ_1 、盾构到达时的地面变形 δ_2 、盾构通过时的地面变形 δ_3 、盾构通过后的瞬时地面变形 δ_4 、地表后期固结变形 δ_5 ，前四项地表沉降总和 $\sum_{i=1}^4 \delta$ 称为即时地表沉降。

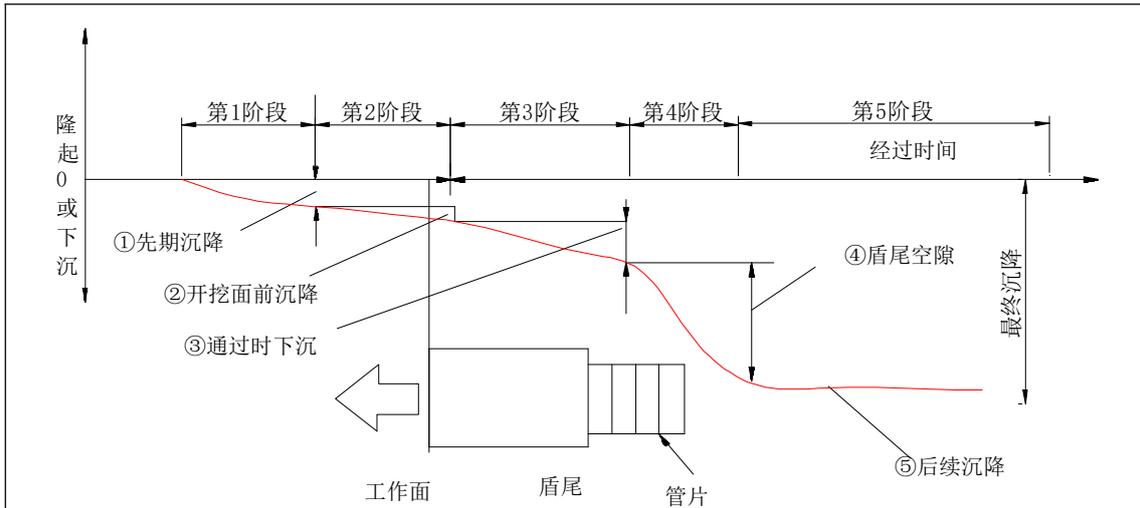


图 2-3 盾构引起地面沉降过程

(2) 横向地表沉降

盾构隧道施工所引起的横向地表沉降形状近似服从正态分布，沉降曲线为正态曲线。Peck 研究了地表沉降的横向变形规律，总结出如下横向地表沉降的预测公式。式(2-7)已得到国内外很多著名学者的认同和推广。

$$s(x) = s_{\max} \exp\left[\frac{-x^2}{2i^2}\right] \quad (2-7)$$

$$S_{\max} = \frac{V_i}{\sqrt{2\pi i}} \approx \frac{V_i}{2.5i}$$

$$V_i = V_l \cdot \pi R^2$$

式中：S(x)一距隧道中心 x 处的地表沉降，mm；

x 一距隧道中心的水平距离，m；

V_i 一隧道单位长度的地层损失， m^3/m ；

V_l 一隧道单位长度的地层损失率，%；

S_{\max} 一隧道中心处的最大沉降量，mm；

i 一沉降槽宽度系数(沉降曲线反弯点离隧道中心的距离)，m；

其中沉降槽宽度系数 i 可由下式求得：

$$i = \frac{H + R}{\sqrt{2\pi} \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)}$$

用函数的形式表示地表横向沉降的曲线为正态分布曲线，即 Peck 曲线，如图 2-4 所示。

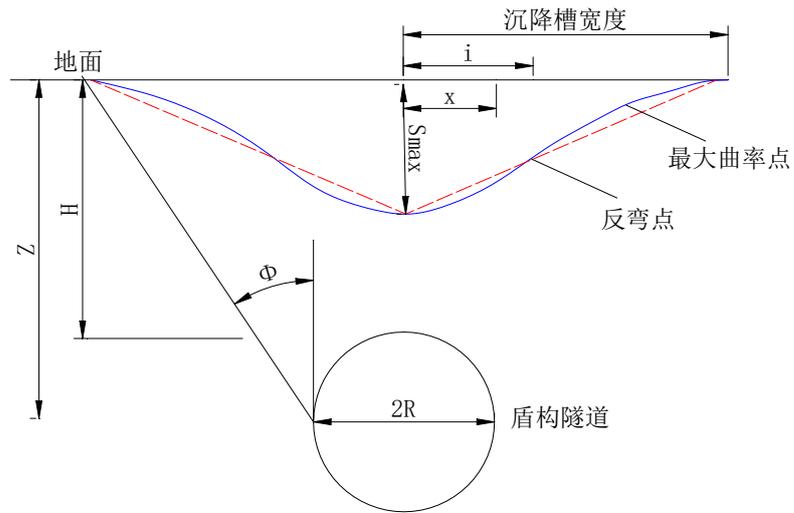


图 2-4 Peck 曲线示意图

其中定义：

H —为隧道的平均覆土厚度，m；

R —是盾构隧道半径，m；

ϕ —是土(岩)层加权内摩擦角。

(3) 土压平衡盾构施工原理

土压平衡盾构机（见图 2-5）是利用安装在盾构最前面的全断面切削刀盘，将正面土体切削下来进入刀盘后面的贮留密封舱内，并使舱内具有适当压力与施工面水土压力平衡（ $P = P_o + P_w$ ），以减少盾构推进对地层土体的扰动，从而控制地表沉降，在出土时由安装在密封舱下部的螺旋输送机向排土口连续的将土渣排出。螺旋输送机是靠转速控制掌握出土量，出土量要密切配合刀盘切削速度，以保持密封舱内始终充满泥土而又不致过于饱满。

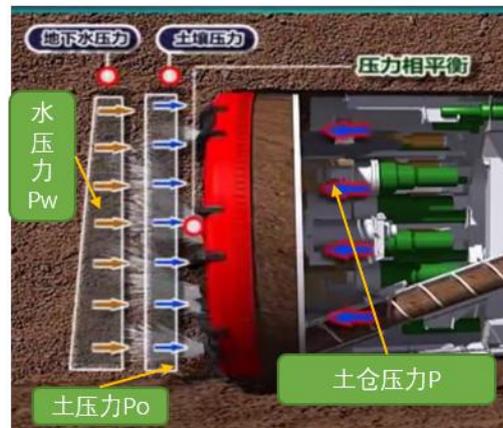


图 2-5 土压平衡盾构原理

2.3.3 盾构隧道施工流程及注意事项

(1) 盾构隧道施工流程

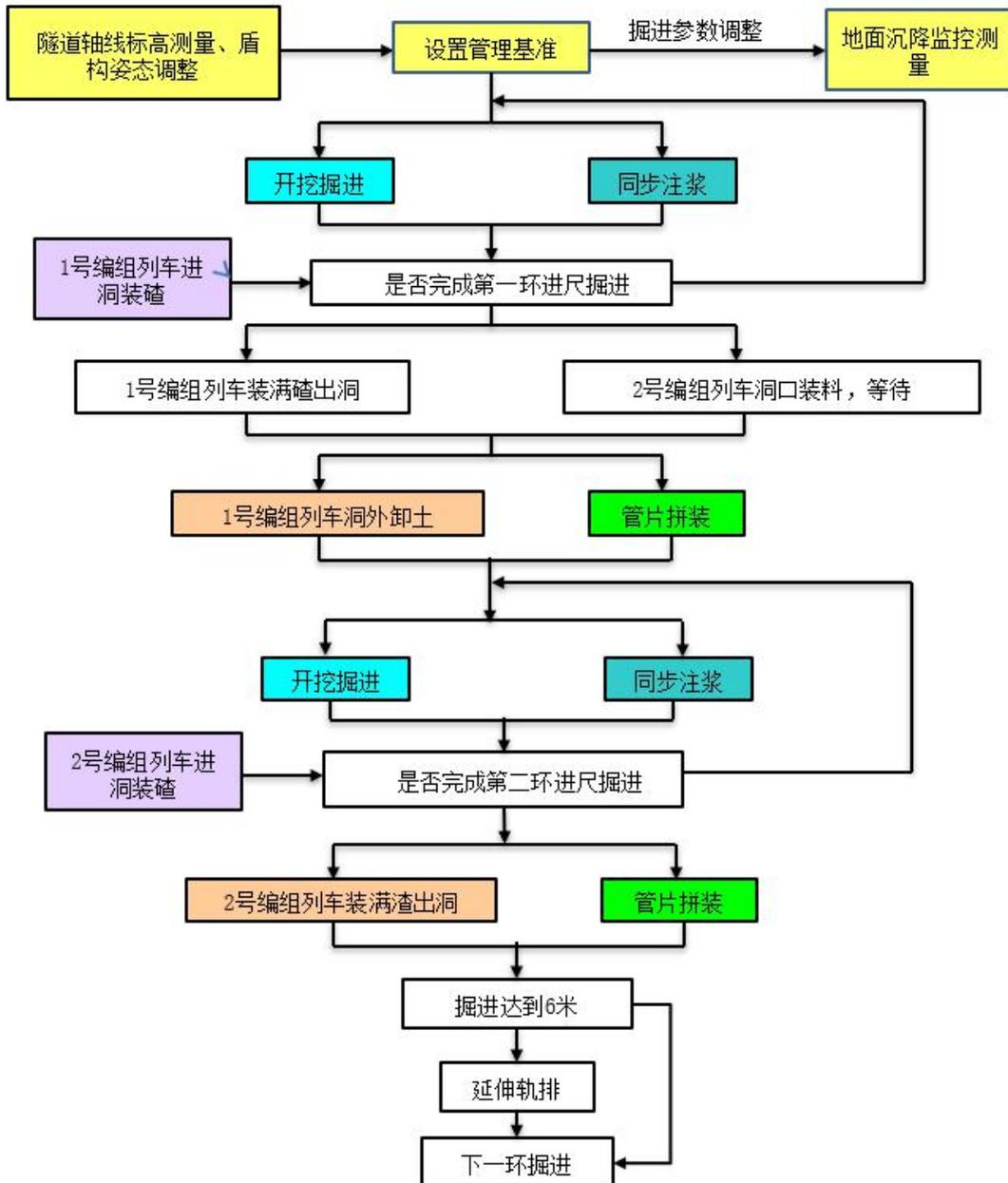


图 2-6 盾构隧道施工流程

(2) 施工中注意事项

在软土层施工，由于推进力过大、排土量过大等原因导致土压力不平衡易导致地面隆起；在硬土层施工注意事项，由于推进力过小、排土量过小等原因导致土压不平衡而导致地面沉降。

2-4 实验仪器设备

1) 实验设备

远程访问：具备上网功能的电脑（台式机或笔记本）

校内访问：具备上网功能的电脑（台式机或笔记本）

2) 虚拟设备

土压平衡盾构机及其辅助机构

2-5 实验材料

实验材料主要采用土体参数和盾构管片参数。学生可以看到设置的参数变化为第一层土体的厚度、地下水位、隧道埋深、隧道直径和管片厚度，其中涉及到的土层参数见表 2-3，管片材料参数见表 2-4。

表 2-3 土层参数表

地层	天然重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	饱和重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	侧压力系数
①杂填土	19	20.10	0
②粉土	19.9	20.2	0.43
③黏土	19.6	20	0.35
④粉质粘土	18.91	20.15	0.43
⑤粉质粘土	20.3	20.5	0.43

表 2-4 管片材料参数

支护方式	材料类型	E (MPa)	体积模量 Pa	剪切模量	容 Kn/m/m	v
初衬	弹性	3.45E+4	1.92E+10	1.44E+10	8.75	0.2

2-6 实验教学方法

虚拟实验采用虚拟情景化教学方法，目的是让学生体验：盾构隧道结构构造、土体荷载的计算方法、结构内力计算方法、土体与结构共同作用的稳定性分析、盾构隧道施工与实时监测的整个过程，在此过程中将相关知识点（如隧道结构受力的来源、土体和结构受力后引起的变形以及施工过程的实时监测等）有效融入虚拟情景中，在提高学生认识和专注度的基础上，理解和消化更多的专业知识。

基于虚拟情景化教学思路，软件利用虚拟现实场景、3D 建模技术构建了实际尺寸的隧道洞身结构和施工现场环境，并设计了“受力计算-计算结果显示-结构稳定性”等虚拟场景，在此基础上，根据结构设计，基于土压平衡盾构的原

理，进行施工过程实施监测位移变化调整施工过程参数的虚拟的场景。总体实施过程如下图所示：

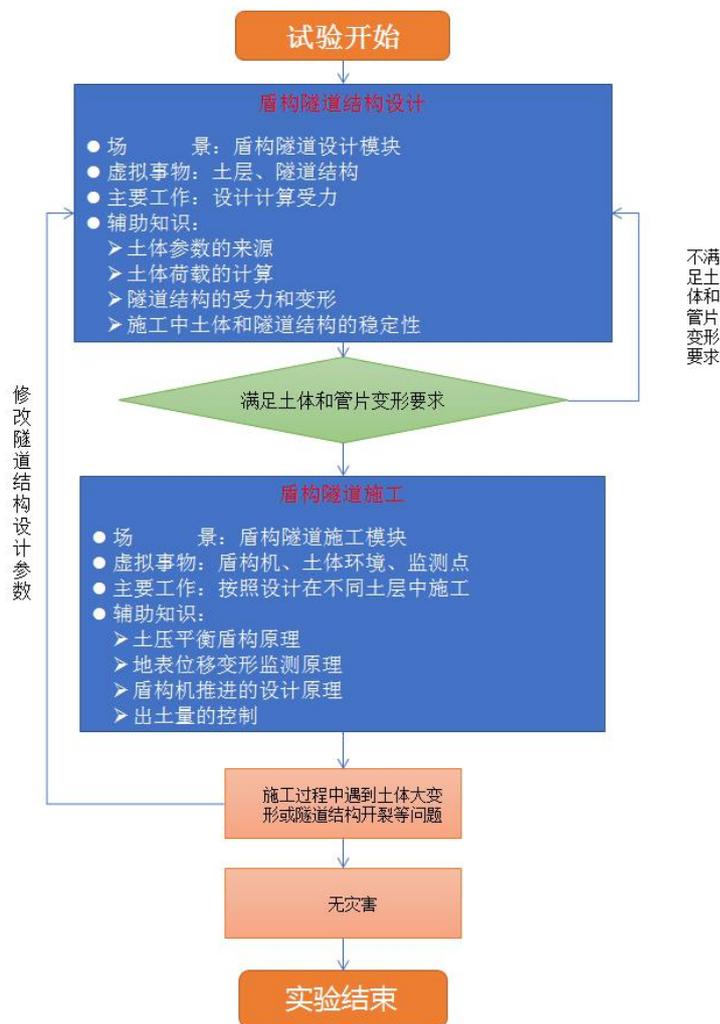


图 2-7 虚拟教学方法示意图

(1) 盾构隧道结构设计的教学实施过程教学方法

盾构隧道结构设计通过在虚拟结构设计中，将场景、受力特征与计算原理等相关知识展示给学生，并让学生参与学习和计算。

- 信息展示主要有 3D 描述和 2D 描述两种方法。其中 3D 描述主要采用三维虚拟模型的形式表示盾构隧道拟建场地的外观、结构和组合关系等内容，学生可以利用鼠标拖动的方式，自由、多角度的进行查看；2D 描述主要针对土体物理力学实验获得参数及隧道构造等信息进行介绍，属性信息以面板文字的形式描述，灾害以虚拟图书的形式进行描述。见下图所示。

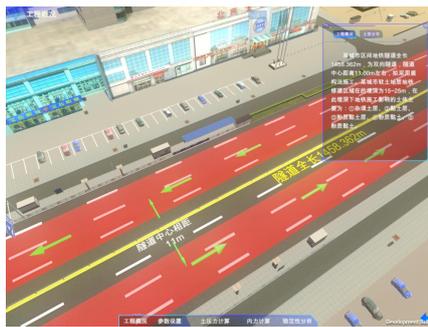


图 2-8 3D 展示隧道拟建场景



图 2-9 2D 土体物理力学参数实验

➤ 虚拟土体和结构受力计算分析，运用以获得的土体和结构参数，学生根据地铁构造和土体环境，依据地铁结构设计规范进行计算步骤操作，获得正确结果后方能进行下一步操作，在计算完成土体受力和盾构管片内力后，通过判断土体的地表沉降量和管片的允许变形量是否符合规范和现场施工预警值，进而确定是否进行施工步骤的操作。见下图所示。

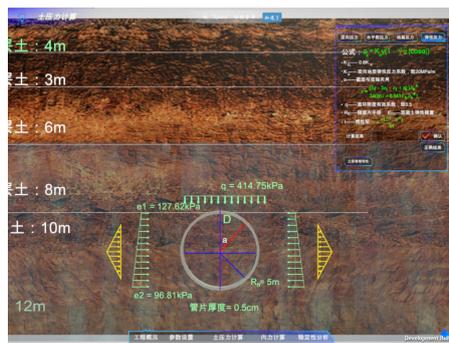


图 2-10 土体受力计算

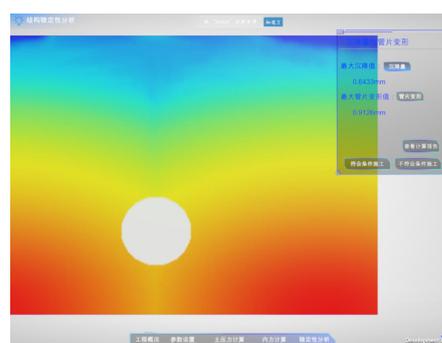


图 2-11 土体位移计算结果

(2) 盾构隧道施工的教学实施过程教学方法

盾构隧道施工教学在虚拟施工现场进行，主要以人机交互式虚拟施工过程操作作为手段，同时配以响应的文字、图片、视频及判断题进行展示和操作。

➤ 虚拟盾构机掘进操作，学生通过点击鼠标设置地表沉降监测点和盾构机的推进力，根据不同土层，观察掘进过程中监测曲线的运动轨迹，判断出土量，调整掘进推进力。系统按照正确的操作步骤和技术要求，自动引导学生完成相应的操作动作。此步只有当学生正确完成当前步骤后才能继续进行后续的操作。

➤ 辅助信息展示，虚拟施工操作之前以及过程中，虚拟实验系统会在有关的步骤中展示盾构机的构造、土压平衡盾构原理以及施工中遇到的土体大变形和管片破坏的情景，并辅以判断题强化知识点，穿插一定的文字介绍、图

片或者视频演示，以便学生更全面的掌握此步骤中涉及到的知识点。见下图所示。

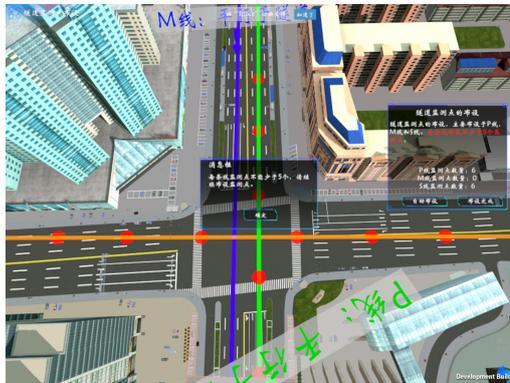


图 2-12 监测点的设置

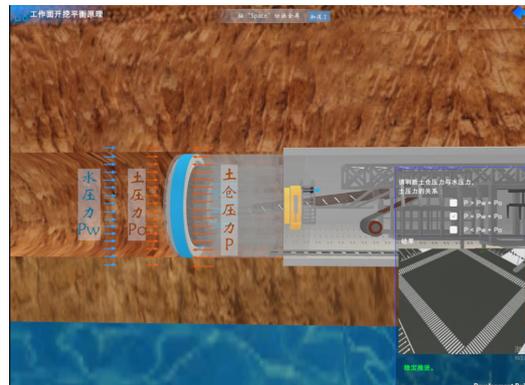


图 2-13 土压平衡原理展示

(3) 施工过程中的灾害分析教学实施过程教学方法（正在建设中）

施工过程中存在的灾害分析教学在虚拟施工中进行，主要通过对照查看、因果分析的方法进行教学。

对照查看虚拟仿真实验结果和现场施工过程中存在的灾害，同时出现监测曲线的突变和土体位移或管片开裂等虚拟场景，学生判断掘进参数是否正确，若掘进参数正确，那么出现灾害的原因是为设计的结构不合理，因此需要返回修改结构设计参数；若掘进参数错误那么就返回修改推进力。通过施工认识结构设计、修正设计这样的过程，让学生认知结构与施工的紧密关系，进而更好的进行结构设计和施工，以达到安全施工和运营的目的。

基于情景化方法，虚拟实验利用 VR 技术，构建虚拟盾构隧道结构和施工情景，保证虚拟实验具有更多的融入感和带入感，学生在学习过程中思路清晰，精力集中，能有效提升学生的积极思考分析能力。

2-7 实验方法与步骤要求（学生操作步骤应不少于 10 步）

(1) 实验方法描述：

学生通过网络访问实验项目进入实验，在系统引导下，通过交互操作，可分别完成“盾构隧道设计”和“盾构隧道施工”两部分内容，见下图所示。设计部分以计算分析为主，学生根据预置参数、理论知识、系统提示等独立完成土压力和管片内力（弯矩、剪力、轴力）计算分析以及隧道稳定性判断等内容；施工部分以一个虚拟盾构施工场景为基础，辅以文字、图片、动画、交互式界面等手

段，使学生了解掌握盾构隧道关键因素以及异常处理方法等内容。

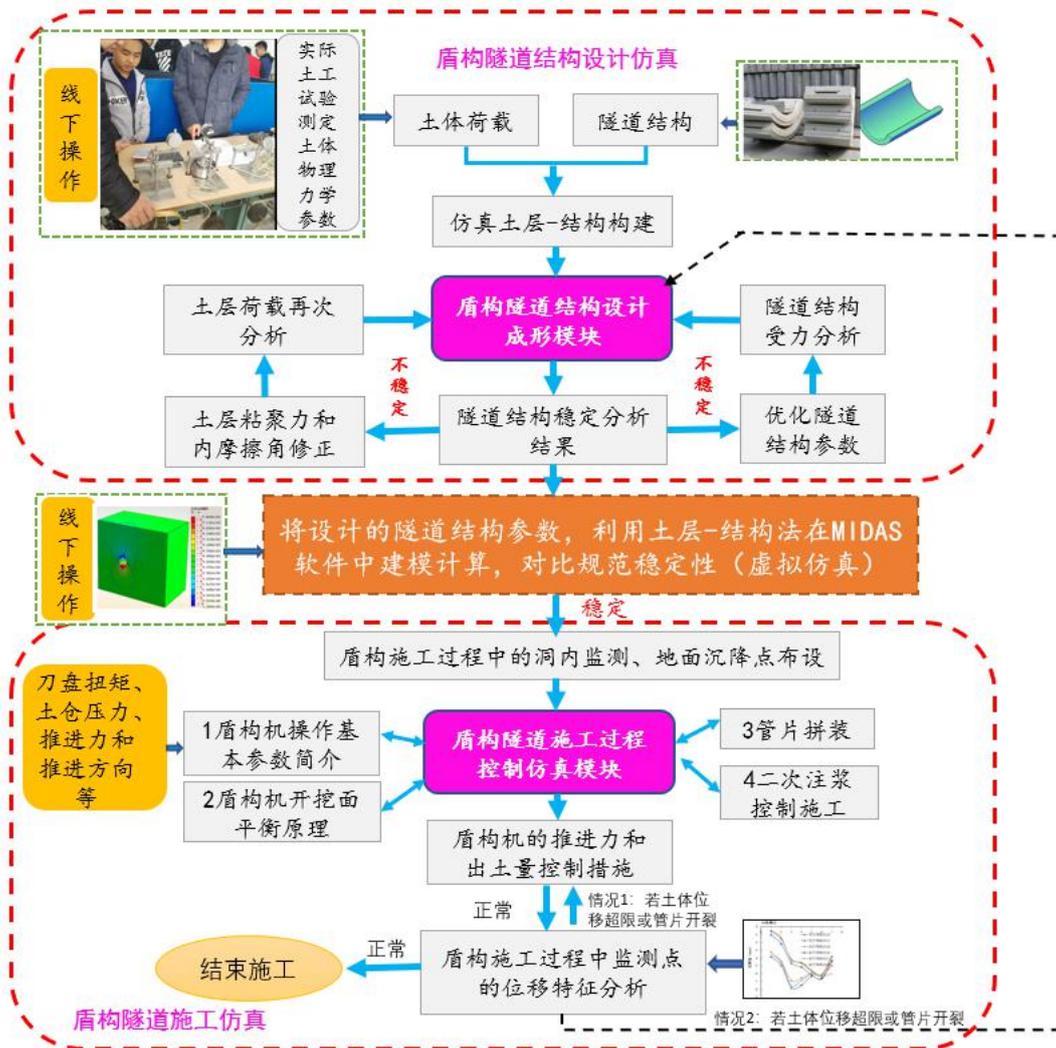


图 2-14 盾构隧道设计与施工综合仿真模块

为保证学习效果，虚拟实验综合采用了知识引导、辅助提示、仿真计算、自动评判等方法。

- 知识引导，设计实验中系统按照设计过程中相关参数的依赖关系合理的进行场景设计，引导学生一步步完成盾构隧道设计的关键参数的计算与分析过程，在保证结果准确的基础上让教学中比较难以理解的设计流程更加明确；施工实验中，系统按照施工流程知识的先后顺序引导学生依次完成监测点布设、盾构机掘进调整、管片安装、二次注浆等过程的学习。



图 2-15 操作步骤导图

- 辅助提示，主要针对设计实验，为了更明确的说明计算公式中各参数、系数以及它们之间的依赖关系，系统充分利用了三维图形学直观、明晰的特点，采用辅助提示功能，在每个分析场景中对计算分析公式中的关键参数在实际施工中的位置、含义进行了描述，使抽象的理论计算知识变的更容易理解和掌握。

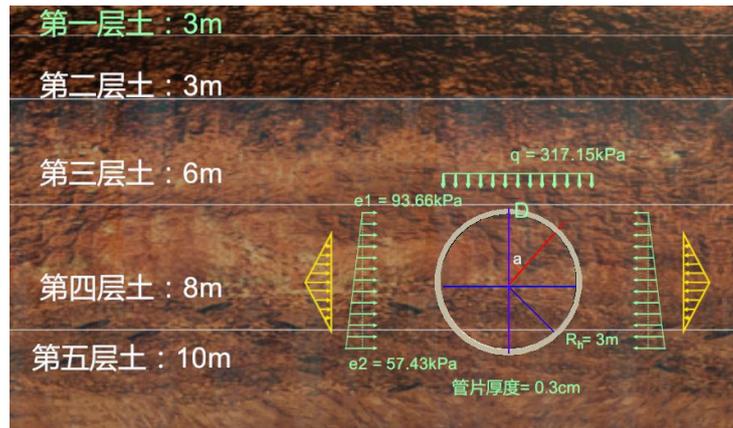


图 2-16 土压力计算提示

- 仿真计算，与常规虚拟实验程序不同的是，系统在设计部分采用了真实计算方法，使得每一个计算结果与实际情况一致，在保证教学使用的情况下，兼具一定的工程实施指导作用。

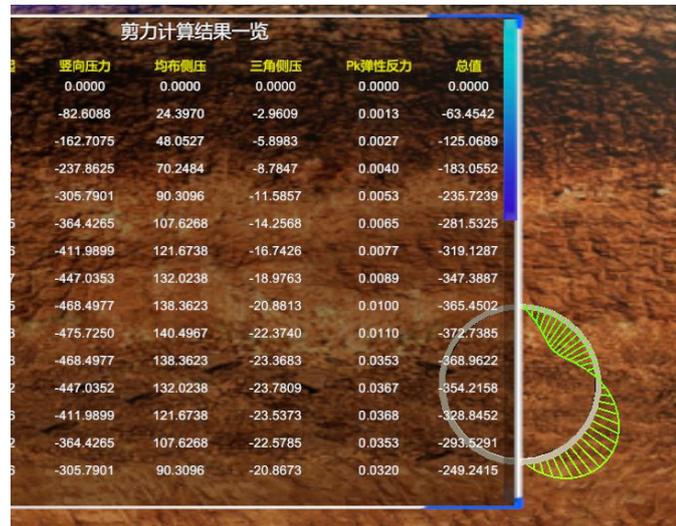


图 2-17 计算结果显示与受力图

- 测试与自动评判，根据实验知识点，系统在关键操作部分提供了一定数量的测试题，包括关键参数计算题、情景判断题、知识点选择题、错误操作警示等形式。情景测试将理论知识与实际应用紧密结合在一

起，让学生更能充分理解所学知识在实验中的表现形式和应用方法。

此外，通过网络系统，学生还可以访问虚拟仿真项目提供的理论知识页面，通过图片、视频形式，完成与盾构施工相关的理论知识的自主学习。此过程即可作为实验前的预习内容，也可以作为实验后对有关知识的深化巩固。

(2) 学生交互性操作步骤说明：(3D 实验部分)

虚拟实验采用 Web3D 技术进行 3D 虚拟场景展示，运行过程中需要在浏览器上安装 Unity Web Player 插件，访问网站，进入虚拟实验后，交互式操作步骤如下：

一、进入选择实验（共 2 项操作）

(1) 鼠标点击界面左侧的两个图标按钮，选择需要做的实验——“盾构隧道设计”和“盾构隧道施工”，然后从右侧区域查看每个实验的文字介绍。

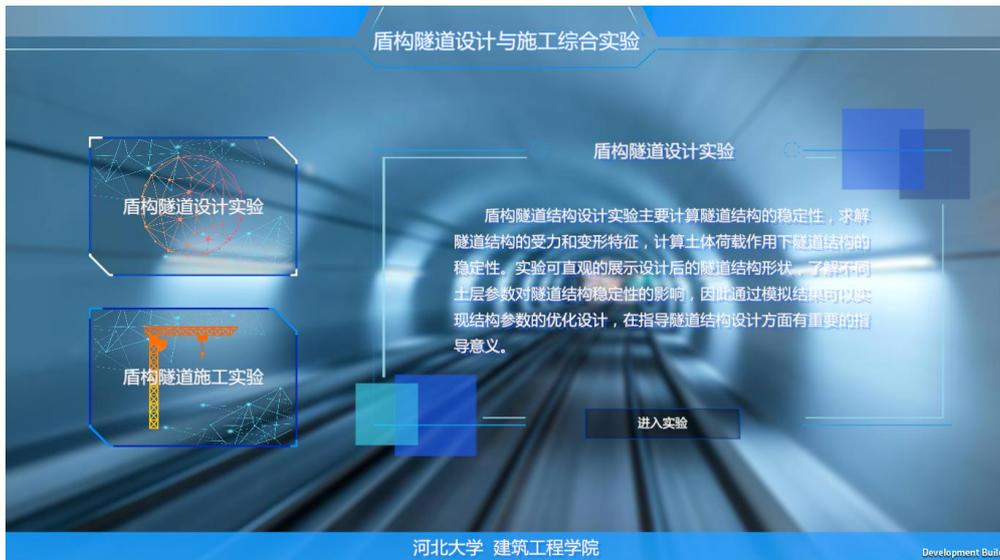


图 2-18 盾构隧道设计与施工综合仿真界面

(2) 点击开始实验，进入相应的实验操作。

二、盾构隧道设计实验（共 39 项操作）

工程概况场景：

(1) 查看工程建设环境，包括道路、建筑物、隧道长度、间距等。按住鼠标左键进行视角平移，按住鼠标右键进行视角旋转；

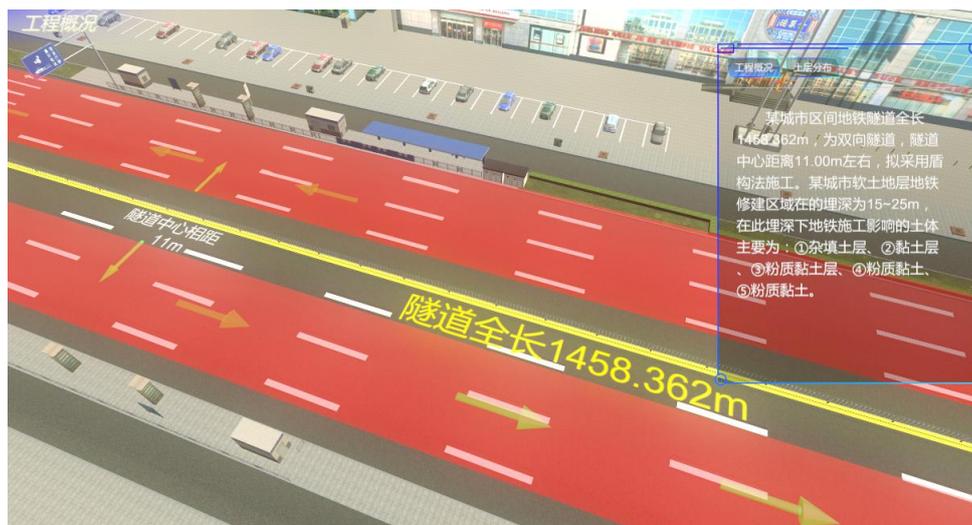


图 2-19 隧道概况简介

(2) 点击右侧面板上的“工程概况”，可以查看盾构隧道的基本数据、土层情况。

(3) 点击右侧面板上的“土层分布”可以具体查看施工区域的土层分布与分类情况，点击向下的箭头，可以进入底层查看每一层土的厚度。点击向上箭头返回地面场景。

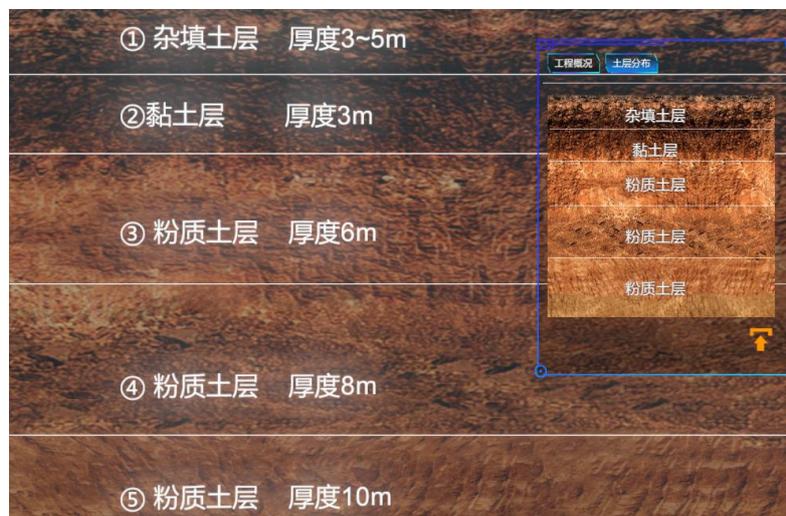


图 2-20 土层介绍

(4) 点击底部“参数设置”按钮，进入设计关键参数设置场景。

参数设置场景：

(5) 在左侧面板上点击响应的按钮，依次完成如下参数设置：

- 第一层土厚度设置
- 地下水位高度设置
- 隧道埋深设置

- 隧道直径设置
- 管片厚度设置

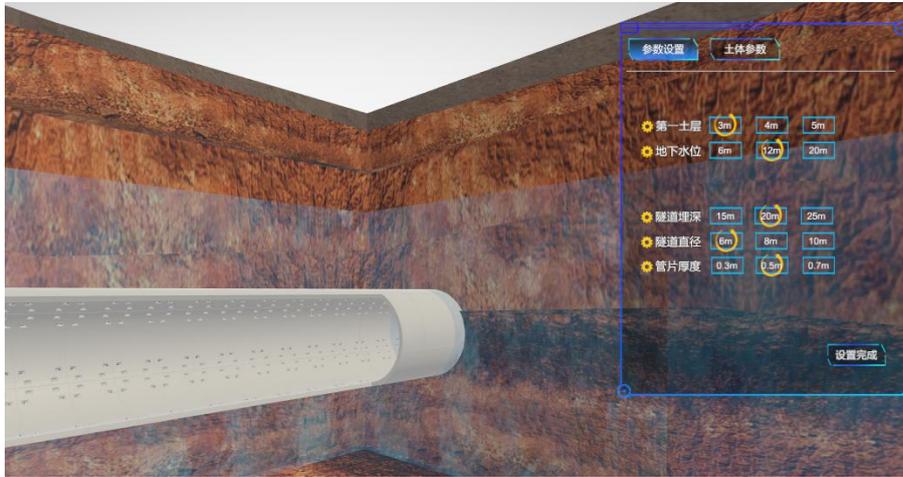


图 2-21 参数设置

(6) 点击右侧面上“土体参数”按钮，查看实体实验中主要土体物理力学实验形式和本实验中土层物理特性数据。

(7) 点击底部“土压力计算”按钮，进入土压力分析与计算场景。

土压力计算场景：

(8) 结合 3D 场景与理论知识，完成“竖向压力”的分析与计算，并提交试题。

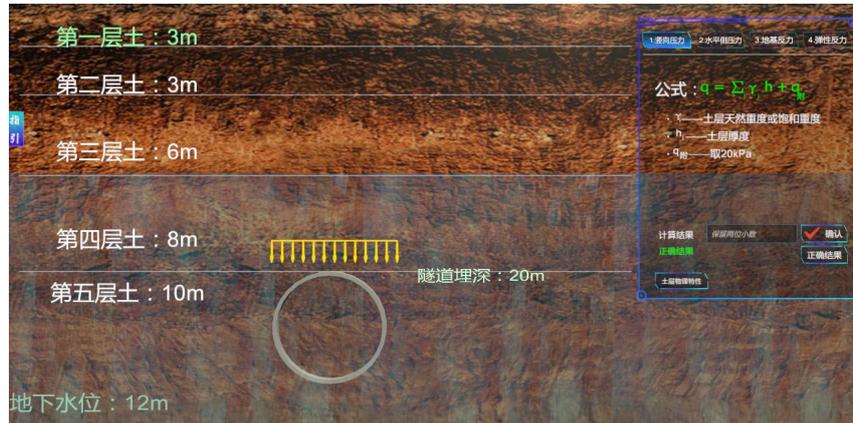


图 2-22 垂直土压力计算

(9) 结合场景与理论知识，完成“水平侧压力”的分析计算，并提交试题。

(10) 结合场景与理论知识，完成“地基反力”的分析计算，并提交试题。

(11) 结合场景与理论知识，完成“弹性反力”的分析计算，并提交试题

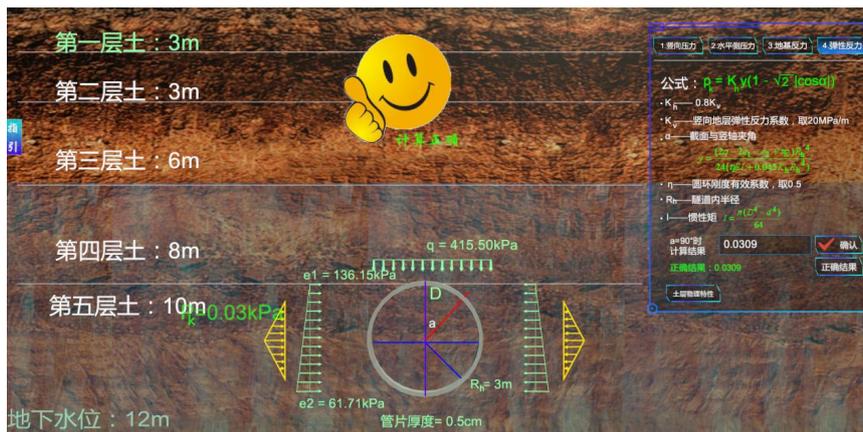


图 2-23 土压力计算提示

(12) 点击底部“内力计算”按钮，进入内力计算与分析场景。说明：只有上面 4 个关键数据计算完毕，并且结果正确的情况下才能进行内力计算与分析。

内力计算场景：

(13) 完成管片自重 g 计算，数据以备后用。



图 2-24 计算题

(14) 计算分析“自重”引起的管片断面弯矩，角度在 $[0, 180]$ 取值。

(15) 计算分析“上部竖直载荷”引起的管片断面弯矩，角度在 $[0, 180]$ 取值。

(16) 计算分析“竖向反力”引起的管片断面弯矩，角度在 $[0, 180]$ 取值。

(17) 计算分析“均布侧压”引起的管片断面弯矩，角度在 $[0, 180]$ 取值。

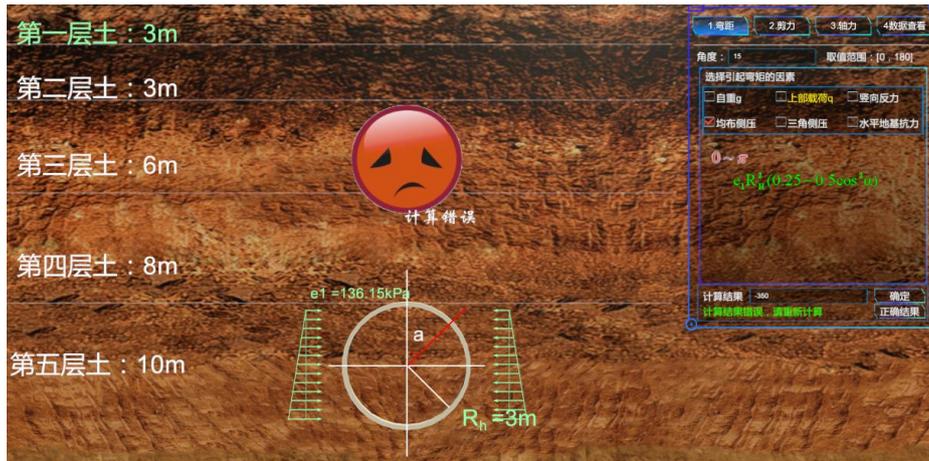


图 2-25 计算错误提示

- (18) 计算分析“三角侧压”引起的管片断面弯矩，角度在 $[0, 180]$ 取值。
- (19) 计算分析“水平地基抗力”引起的管片断面弯矩，角度在 $[0, 180]$ 取值。
- (20) 计算分析“自重”引起的管片断面剪力，角度在 $[0, 180]$ 取值。
- (21) 计算分析“上部垂直载荷”引起的管片断面剪力，角度在 $[0, 180]$ 取值。
- (22) 计算分析“均布侧压”引起的管片断面剪力，角度在 $[0, 180]$ 取值。
- (23) 计算分析“三角侧压”引起的管片断面剪力，角度在 $[0, 180]$ 取值。
- (24) 计算分析“水平地基抗力”引起的管片断面剪力，角度在 $[0, 180]$ 取值。

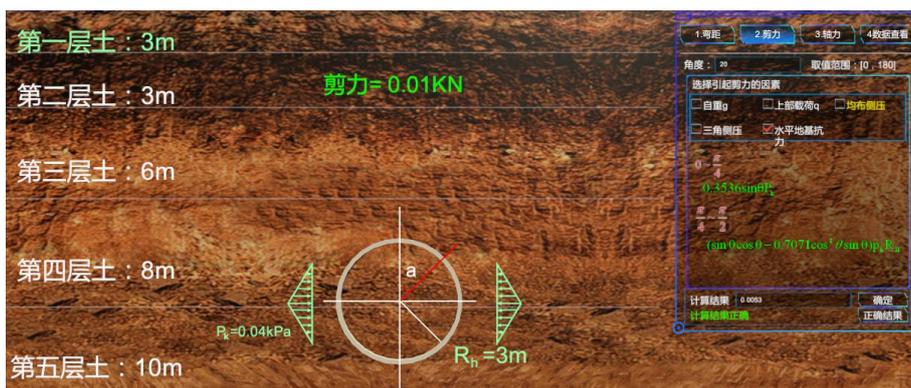


图 2-26 管片内力计算提示

- (25) 计算分析“自重”引起的管片断面轴力，角度在 $[0, 180]$ 取值。
- (26) 计算分析“上部载荷”引起的管片断面轴力，角度在 $[0, 180]$ 取值。
- (27) 计算分析“竖向反力”引起的管片断面轴力，角度在 $[0, 180]$ 取值。



图 2-27 计算正确提示

(28) 计算分析“均布侧压”引起的管片断面轴力，角度在 $[0, 180]$ 取值。

(29) 计算分析“三角侧压”引起的管片断面轴力，角度在 $[0, 180]$ 取值。

(30) 计算分析“水平地基抗力”引起的管片断面轴力，角度在 $[0, 180]$ 取值。

(31) 点击“数据查看”按钮，设置取值间隔角度，查看断面弯矩分布曲线与详细计算数值。

(32) 点击“数据查看”按钮，设置取值间隔角度，查看断面剪力分布曲线与详细计算数值。

(33) 点击“数据查看”按钮，设置取值间隔角度，查看断面轴力分布曲线与详细计算数值。

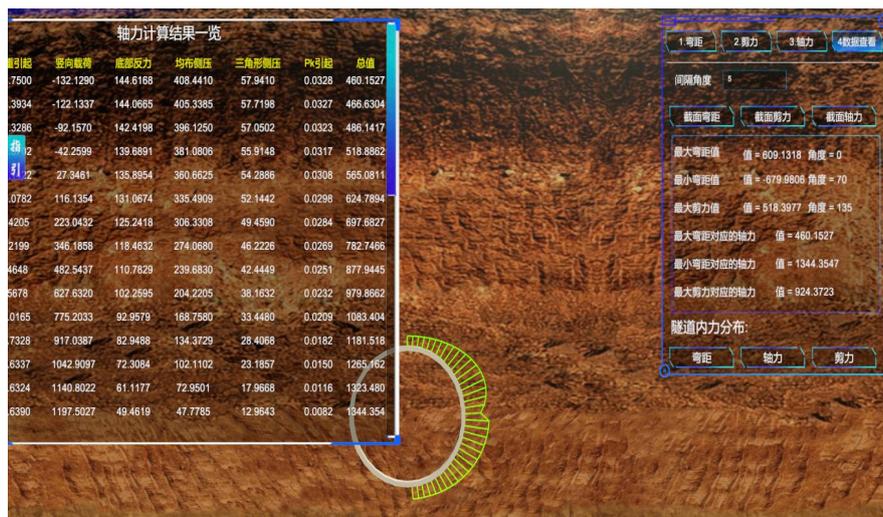


图 2-28 断面轴力分布曲线与详细计算数值

(34) 查看系统系统获取的最大、最小弯矩值以及他们对应的轴力值，查看最大剪力值以及它所对应的轴力值。

(35) 点击隧道内力分布下的“弯矩”、“轴力”、“剪力”按钮，分别查看隧道内力大小分布情况。

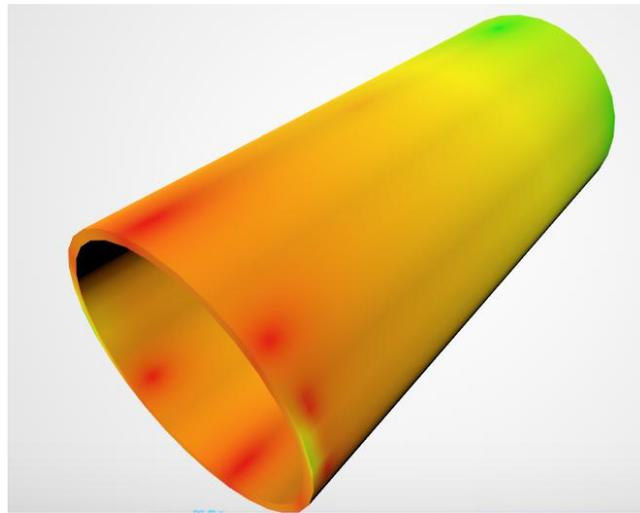


图 2-29 管片受力云图

稳定性分析场景：

(36) 判断最大地表沉降量和最大管片变形量是否符合设计要求；

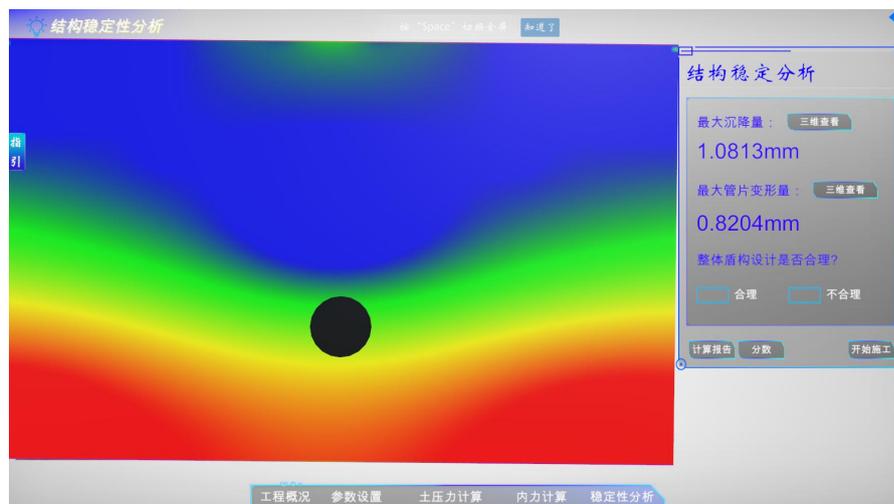


图 2-30 结构稳定性分析

(37) 点击“计算报告”按钮，查看整个计算过程的基本参数、设置参数、土压力数值、内力数值等内容。



图 2-31 盾构设计计算报告

(38) 点击“分数”按钮，查看在整个过程中的计算的结果，并查看本次分析计算的得分。



图 2-31 实验计分

(39) 最大沉降量和最大管片变形量是否符合要求，选择“进入施工”开始施工实验学习，不符合要求则选择“重新设计”，重新返回“参数设置”场景调整施工参数，重新进行计算分析。

三、盾构隧道施工实验（共 22 项操作）

监测点布设场景：

(1) 完成第 1 道选择题。

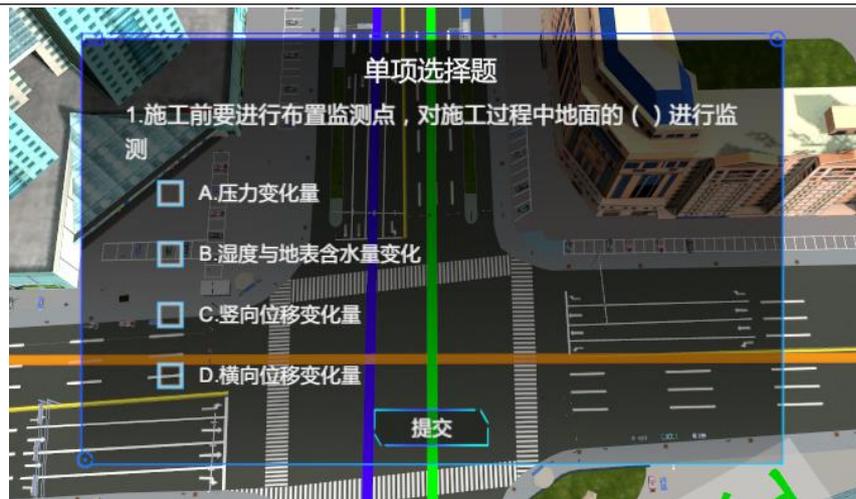


图 2-30 盾构隧道施工监测点布置选择题

(2) 完成第 2 到选择题。完成第 2 到选择题后,系统进入漫游浏览模式,按住鼠标右键拖动可以旋转观察视角。

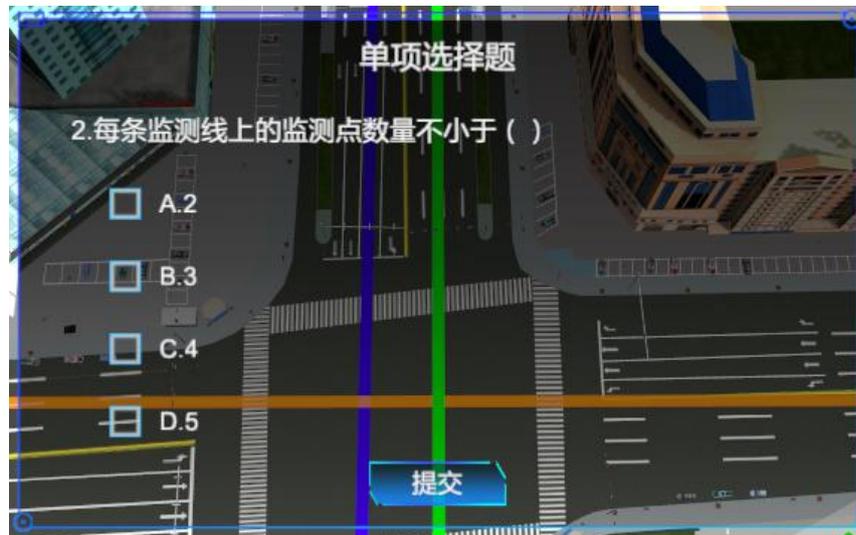


图 2-31 监测点个数选择题

(3) 点击“自动布设”按钮,系统完成第一条纵向检测线和横向检测线上的检测点布设。

(4) 根据提示用鼠标左键点击第 2 条纵向检测线,完成 5 个以上的检测点的布设。



图 2-32 监测点的布设图

(5) 点击“布设完成”，系统界面出现“纵向监测曲线”和“横向检测曲线”面板，以便对施工过程中的沉降量进行检测。

(6) 点击消息框上的“确定”按钮，进入下一步施工场景。

盾构机结构认知场景：

(7) 完成第 3 到选择题。

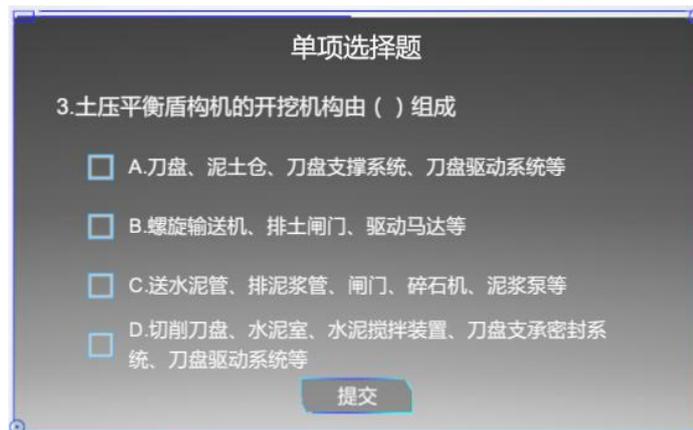


图 2-33 盾构机的组成选择题

(8) 从左侧列表中点击响应的组成部分名称，可以切换 3D 中的观察视角，从而对盾构机各部分的组成结构和关系进行学习。

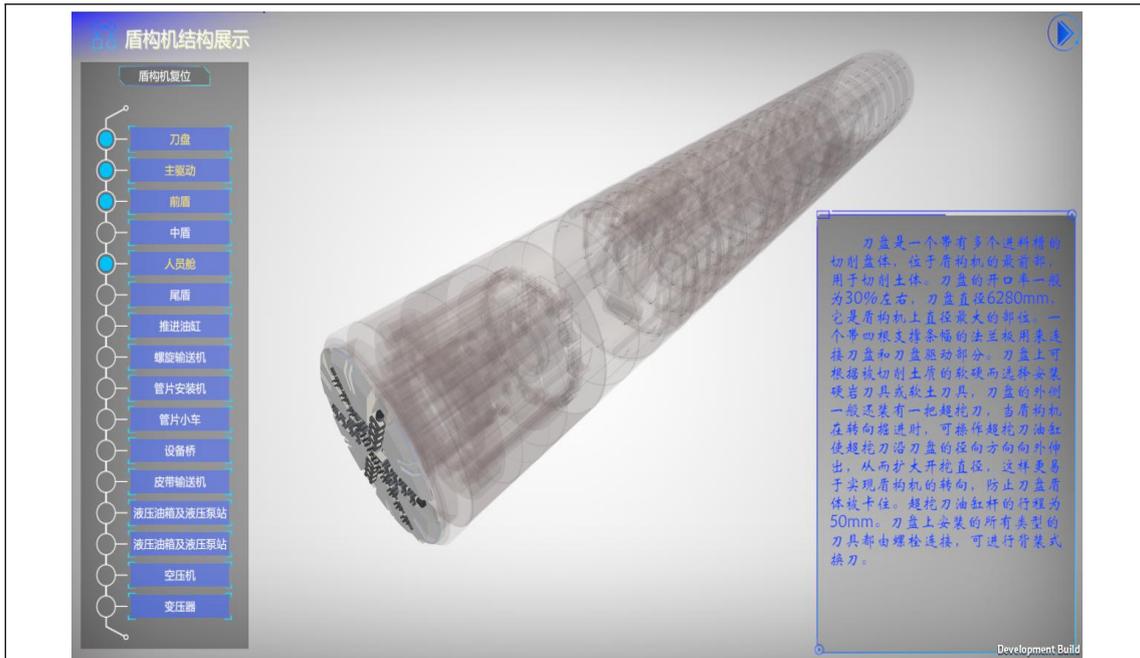


图 2-34 盾构机的构造认识

可进行观察的机构与零部件包括：刀盘、主驱动、前盾、中盾、人员舱、尾盾、推进油缸、螺旋输送机、管片安装机、管片小车、设备桥、皮带输送机、液压油缸及液压泵站、空压机、变压器等。

(9) 点击右上角的返回按钮可以进入盾构施工场景。

盾构施工场景：

(10) 完成第 4 道选择题。

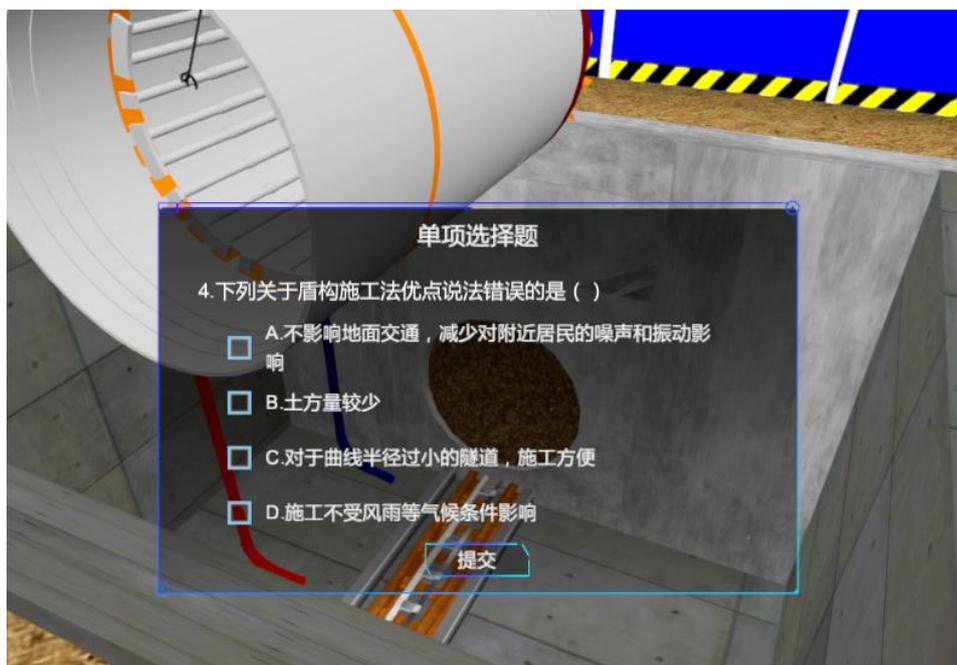


图 2-35 盾构机施工的有点选择题

(11) 接下来是一段盾构机进洞、掘进、管片安装等过程的动画，对于熟练

的学习者可以点击右上角的“跳过动画”直接进入施工操作场景。

(12) 盾构机进入软土层，土仓压力过大，观察场景完成第 5 道选择题。



图 2-36 盾构机土仓压力过大选择题

(13) 继续完成第 6 道选择题。

(14) 点击速度表左侧的按钮，调低盾构机速度，继续施工。

(15) 盾构机进入到硬土层，土仓压力减小，观察三维场景，完成第 7 道选择题。



图 2-37 盾构机土仓压力过小选择题

(16) 点击速度表右侧的箭头按钮，调高盾构机掘进速度，继续施工。

(17) 盾构机施工进入含地下水土层，观察三维场景，完成第 8 道选择题。

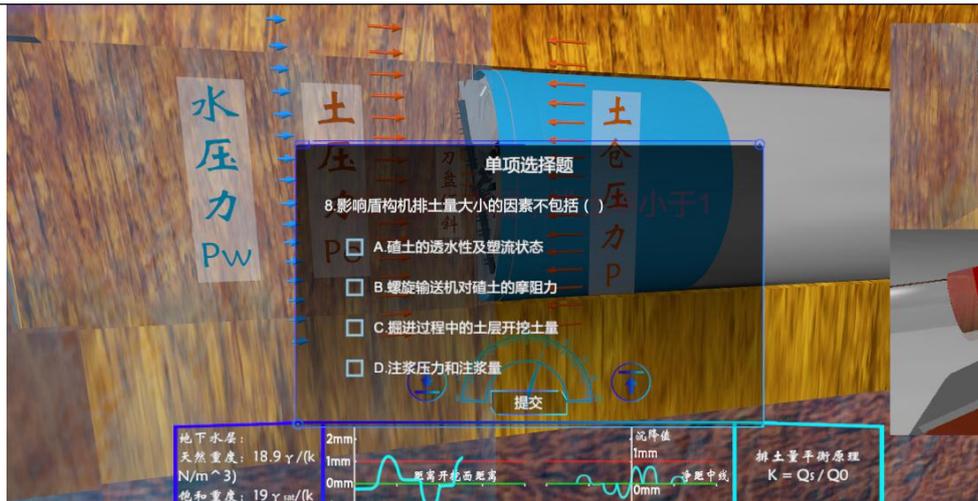


图 2-38 盾构机排土量的选择题

(18) 点击速度表左侧的箭头按钮，调低盾构机掘进速度，继续施工。

(19) 盾构机离开含水地下水土层，调高盾构机掘进速度，继续施工。

(20) 视角进入盾构机内部，按照三维场景中的位置提示，从面板上按照正确的管片安装顺序进行安装（第 9 道题）。

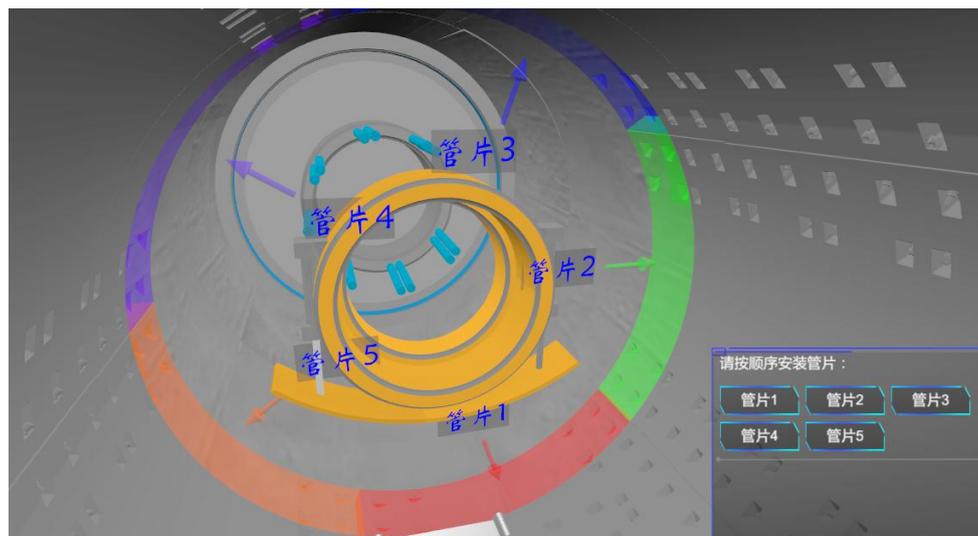


图 2-39 管片拼装操作题

(21) 点击下一阶段，进入管片开裂处理场景，并完成第 10 道题。

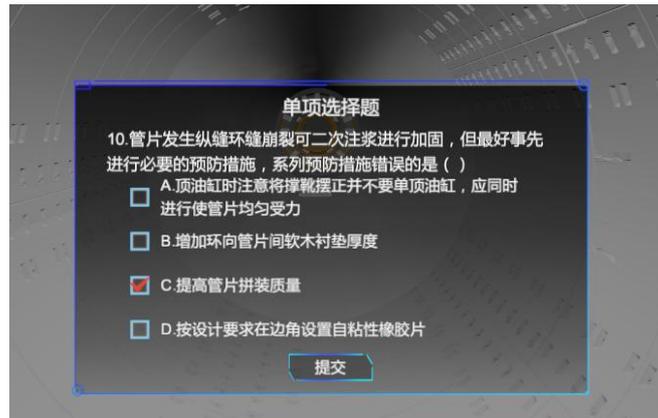


图 2-40 有关管片施工质量的选择题

(22) 系统弹出题目考核结果面板，可以从中查看每道题的对错与总分数

2-8 实验结果与结论要求

学生通过盾构隧道设计和施工的综合虚拟仿真实验，学习盾构隧道设计的基本原理，并有直观的认知，熟悉参数的获取、受力和变形计算的基本过程，对土压平衡盾构施工原理有明确的认识。教师依据学生实验过程和具体结果，通过计算报告、过程记录和自测题进行形成性评价。

(1) 是否记录每步实验结果： 是 否

系统自动记录并评判实验过程，对学生的操作过程进行自动记录和评判，并提供学习记录查看功能，便于学生检查自己对实验流程掌握的熟练程度。



图 2-41 实验过程记录表

(2) 实验结果与结论要求： 实验报告 心得体会 其他

学生在线编辑填写的每一步，将以实验报告的形式汇总，供教师批阅学生有关实验过程、实验数据和实验结果等，并以此为基础掌握学生的学习情况。



图 2-42 盾构设计计算报告

(3) 其他描述:

系统在设计和施工实验中分别设置了 10 道测试题 (共 20 道), 其中设计实验以计算分析试题为主, 施工实验以选择和 3D 操作为主, 学生需结合个人实验情况, 完成相关试题测试。系统记录并要求学生提供计算分析结果与测试题得分。

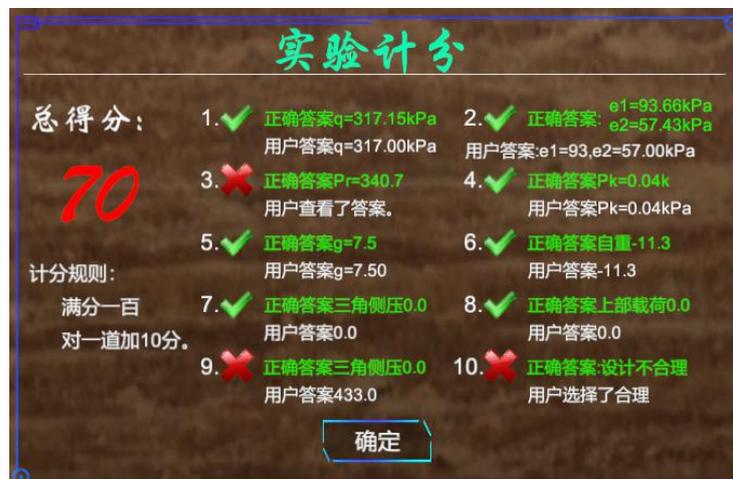


图 2-43 实验过程记录

2-9 考核要求

主要对学生的理论熟悉程度、设计和施工流程与实验数据结果的处理与分析等方面进行考核。

1. 总体考核形式与要求

系统总体考核形式包括:

(1) 数据计算考核方式, 盾构隧道结构设计实验中提供了多项关键参数需

要学生进行计算，其中土压力 4 个，内力 17 个，系统从中随机选择 9 个进行考核，要求学生通过分析，结合三维场景提示和所学理论知识，完成相应数值的求解计算。系统自动对学生结果数值的正确性进行判断、打分。

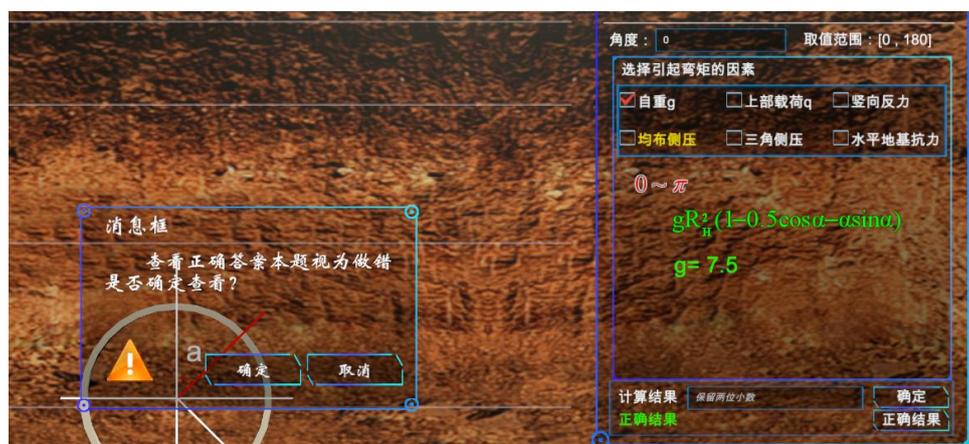


图 2-43 数据计算考核

(2) 分析判断考核方式，主要针对设计实验中结构稳定性与关键参数的制约关系进行判断。要求学生能够在稳定性不符合标准时，对需要修改的施工参数进行分析判断，结合所学的专业知识，调整工程参数，以便稳定性符合要求。



图 2-44 结果分析判断与参数重新设置

(3) 理论自测考核方式，施工实验中，结合三维虚拟场景中的展现形式系统共包含 10 道选择题，考核内容涵盖监测点布设、盾构机结构、土层特性变化对盾构施工的影响、管片安装顺序、管片开裂处置与预防等。要求学生在完成盾构施工过程中，依次完成这 10 道题目的解答，并提交结果与得分。



图 2-45 题目计分统计

(4) 日常提问与讨论，在日常教学过程中，通过课堂讨论、提问等形式，对学生的虚拟实验的掌握情况进行考核。此外，还可以以学习小组的形式，在线下让多个学生根据虚拟实验中遇到的情况进行分组讨论分析。

2. 具体考核内容与要求

在该实验教学中，主要考核学生以下能力：

- (1) 能够根据实验要求，进行按照设计和施工步骤进行操作；
- (2) 能够通过实验掌握设计和施工中的相关理论知识；
- (3) 能够通过理论分析，计算和分析土体与结构受力和变形；
- (4) 能够通过实验认知盾构隧道设计的过程及盾构机的工作过程；
- (5) 能够通过土体和隧道结构参数变化，分析得到不同的受力和变形结论；

2-10 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

土木工程专业，三年级、四年级，低年级研究生

(2) 基本知识和能力要求等

实验要求学生完成前两个学年相关的基础课程和专业课程。要求学生完成至少相关的岩石力学、土力学及实验、混凝土、结构力学、材料力学、地下工程设计、地下工程施工等相关课程。掌握土体荷载计算的基本方法，掌握隧道结构受到外荷载的受力和变形的基本原理，熟悉专业课程相关知识，掌握实验辅助设备、仪器的使用方法。

2-11 实验项目应用情况

(1) 上线时间：2018.1

(2) 开放时间：2018.3

(3) 已服务过的学生人数：387

(4) 是否面向社会提供服务： 是 否

3. 实验教学项目相关网络要求描述

3-1 有效链接网址

<http://Cavr.hbu.cn>

3-2 网络条件要求

(1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）

- 1) 基于公有云服务器部署的系统，5M-10M 带宽
- 2) 基于局域网服务器部署的系统，10M-50M 带宽

(2) 说明能够提供的并发响应数量（需提供在线排队提示服务）

支持 100 个学生同时在线并发访问和请求，如果单个实验被占用，则提示后面进行在线等待，等待前面一个预约实验结束后，进入下一个预约队列。



图 3-1 继续等待界面

3-3 用户操作系统要求（如 Windows、Unix、IOS、Android 等）

(1) 计算机操作系统和版本要求

查看管理页面和运行虚拟实验的操作：

- Windows7 及以上（32 位、64 位均可）

(2) 其他计算机终端操作系统和版本要求

- 无

(3) 支持移动端： 是 否

3-4 用户非操作系统软件配置要求（如浏览器、特定软件等）

(1) 需要特定插件 是 否

插件名称 UnityWebPlayer 插件容量 1MB

下载链接 <https://unity3d.com/cn/webplayer>

(2) 其他计算终端非操作系统软件配置要求（需说明是否可否可提供相关软件下载服务）

为了运行虚拟实验用户计算机上需要安装支持 Unity Web Player 技术的浏览器，推荐的浏览器包括：360 极速、360 安全、Firefox（火狐）、Safari（仅限 Mac OS 系统）、QQ 浏览器（极速模式），对于部分浏览器在兼容模式下可能运行不正常，此时需要将浏览器调整为“极速模式”，具体方法是，在地址栏右端点击鼠标，从下拉菜单中选择“极速模式”。



图 3-2 极速模式界面

浏览器需要支持 512M 以上缓存空间。

3-5 用户硬件配置要求（如主频、内存、显存、存储容量等）

软件配置需求（最低）	软件配置需求（推荐）
操作系统：Windows 2000 以上 浏览器：IE6.0 以上	操作系统：Win7 及以上 浏览器：IE8.0
配件配置需求（最低）	配件配置需求（推荐）
处理器：Intel 2GHz 及以上 内存：2GB 及以上 硬盘空间：40G 显卡：分辨率 1024x768 像素及以上 网络：1000Mbps 以太网卡 显示器：14 英寸以上 网速：1M 以上	处理器：Intel 2.2GHz 内存：2GB 硬盘空间：80G 显卡：分辨率 1280x1024 网络：1000Mbps 以太网卡 显示器：14 英寸以上 网速：2M

3-6 用户特殊外置硬件要求（如可穿戴设备等）

(1) 计算机特殊外置配置要求

无。

(2) 其他计算终端特殊外置硬件要求

无。

4. 实验教学项目技术架构及主要研发技术

虚拟实验项目依托河北大学建筑工程虚拟仿真实验中心平台，采用 B/S 结构，根据平台服务器所运行的操作系统和工作环境，实验采用 Web 技术、3D 建模技术、虚拟现实技术、Web 网络技术和数据库管理技术等进行构建。三维场景浏览、交互及功能发布采用目前流行的 3D 虚拟现实引擎——Unity 进行开发。前台页面展示部分采用 HTML、CSS 相结合的形式进行开发，浏览器中 3D 场景展示与交互使用 Unity Web Player 插件形式，3D 虚拟场景与页面通信采用 JavaScript 脚本的形式实现。虚拟实验项目运行环境与开发技术见表 4-1。

表 4-1 系统架构说明

指标	内容
<p>系统架构图及简要说明</p>	<p>盾构隧道设计与施工综合仿真实验的开放运行依托于开放式虚拟仿真实验教学管理平台的支撑，二者通过数据接口无缝对接，保证用户能够随时随地的通过浏览器访问该项目，并通过平台提供的面向用户的智能指导、自动批改服务功能，尽可能帮助用户实现自主的实验，加强实验项目的开放服务能力，提升开放服务效果。</p> <p>开放式虚拟仿真实验教学管理平台以计算机仿真技术、多媒体技术和网络技术为依托，采用面向服务的软件架构开发，集实物仿真、创新设计、智能指导、虚拟实验结果自动批改和教学管理于一体，是具有良好的自主性、交互性和可扩展性的虚拟实验教学平台。</p> <p>总体架构图如下：</p>



图 4-1 系统总体架构图

如图 4-1 所示，支撑项目运行的平台及项目运行的架构共分为五层，每一层都为其上层提供服务，直到完成具体虚拟实验教学环境的构建。下面将按照从下至上的顺序分别阐述各层的具体功能。

(1) 数据层

盾构隧道设计与施工综合仿真实验项目涉及到多种类型虚拟实验组件及数据，这里分别设置虚拟实验的基础元件库、实验课程库、典型实验库、标准答案库、规则库、实验数据、用户信息等来实现对相应数据的存放和管理。

(2) 支撑层

支撑层是虚拟仿真实验教学与开放共享平台的核心框架，是实验项目正常开放运行的基础，负责整个基础系统的运行、维护和管理。支撑平台包括以下几个功能子系统：安全管理、服务容器、数据管理、资源管理与监控、域管理、域间信息服务等。

(3) 通用服务层

	<p>通用服务层即开放式虚拟仿真实验教学管理平台，提供虚拟实验教学环境的一些通用支持组件，以使用户能够快速在虚拟实验环境完成虚拟仿真实验。通用服务包括：实验教务管理、实验教学管理、理论知识学习、实验资源管理、互动交流、实验报告管理、教学效果评、项目开放与共等，同时提供相应集成接口工具，以便该平台能够方便集成第三方的虚拟实验软件进入统一管理。</p> <p>(4) 仿真层</p> <p>仿真层主要针对该项目进行相应的器材建模、实验场景构建、虚拟仪器开发、提供通用的仿真器，最后为上层提供实验结果数据的格式化输出。</p> <p>(5) 应用层</p> <p>基于底层的服服务，最终盾构隧道设计与施工综合仿真实验项目教学与开放共享。该框架的应用层具有良好的扩展性，实验教师可根据教学需要，利用服务层提供的各种工具和仿真层提供的相应的器材模型，设计各种典型实验实例，最后面向学校开展实验教学应用。</p>	
实 验 教 学 项 目	<p>开发技术 (如：3D 仿真、VR 技术、AR 技术、动画技术、WebGL 技术、OpenGL 技术等)</p>	<p>三维建模技术、人机交互技术、虚拟现实 (VR) 技术、Web3D 技术</p>
	<p>开发工具 (如：Unity3d、Virtools、Cult3D、Visual Studio、Adobe Flash、百度 VR 内容展示 SDK 等)</p>	<p>Unity3d、3ds Max、Photoshop Visual Studio、Xamarin</p>
	<p>项目品质 (如：单场景模型总面数、</p>	<p>单场景总面数 (三角面)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 设计场景:<158.9K

	<p>贴图分辨率、每帧渲染次数、动作反馈时间、显示刷新率、分辨率等)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 施工场景:<778.6K <p>贴图分辨率</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 精模型：1024×1024 ● 普通模型：512×512 或 256×256 ● 低模型：128×128 <p>帧频、刷新率（由视角和计算机性能决定）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 设计场景：30FPS 以上 ● 施工场景：30FPS 以上 <p>分辨率（由用户屏幕决定）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 最低要求分辨率：1366×768 ● 推荐分辨率：1920×1080 <p>动作反馈时间（由用户计算机性能决定）</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 常规交互操作响应时间<500 毫秒 ● 数据计算响应时间，根据数据计算量的多少而定，比如计算 0-π 之间内力，所取间隔角度的多少会对计算时间由直接影响，间隔角度越小计算时间越长，反之时间越短。 <p>帧频、刷新率、动作反馈时间和使用者的计算机硬件性能有直接关系，计算机性能越高帧频、刷新率越高、动作反馈时间越短，此外这几个参数还与使用者在虚拟环境中观察角度有关，同时进入观察视野的虚拟 3D 对象越少，则效率越高反馈时间越短。</p> <p>分辨率与使用者屏幕分辨率有直接关系。</p>
管理 平台	开发语言 (如： JAVA、.Net、 PHP 等)	JAVA
	开发工具 (如： Eclipse、 Visual Studio、 NetBeans、百	Eclipse

	度 VR 课堂 SDK 等)	
	采用的数据库 (如: HBASE、Mysql、SQL Server、Oracle 等)	MySQL

5. 实验教学项目特色

(1) 实验方案设计思路:

实验项目以学生为中心,坚持“能实不虚,虚实结合”原则,综合运用 3D 建模、交互式虚拟现实、Web 网络和数据库技术,以真实盾构施工场景、设备为蓝本,构建集数据设置、参数计算、分析判断、施工过程实施等为一体的虚拟实验。通过人机交互,学生既可在虚拟仿真实验中体验真实实验相同的效果,又可观看真实实验条件下无法体现的现象和结果。

- 着重培养学生的自我学习能力,设置了学生自主设置参数环节,包括土体厚度、地下水位埋深、隧道直径大小与隧道埋深等参数,根据土体、隧道结构受力和变形分析结果,反复修正设计参数,确保设计的合理性。
- 基于已设计的隧道结构展开隧道施工虚拟仿真实验,根据施工实时沉降监测曲线分析施工过程,指导盾构隧道开挖,及时发现施工过程中出现的各种安全隐患,并进行预警,及时提示施工应对措施。

(2) 教学方法:

学生在进行虚拟实验前,分组进行阅读勘察报告、纸质设计书和施工工艺流程,在指导教师的指引下掌握实际实验场景、土体和隧道结构、实验步骤和盾构机施工相关事项,以达到感性认识和能实不虚的目的。学生进入虚拟实验环境后需进行相关设计知识的预习,根据教师安排的预习知识,预习有关实验内容和理论知识,做好虚拟实验准备。

学生在虚拟环境中进行实验操作,交互操作包括场景漫游、参数设计、力学计算和虚拟设备操作等。将土体荷载计算、结构内力计算和施工实时监测等真实场景无法观测等现象展现,达到虚实结合的目的,以虚拟现实的方式使学生便于接受。

(3) 评价体系：

提供了不同的实验数据描述与展示手段，包括 UI 数字显示、数据走势曲线描述、虚拟设备仪表显示、实验现象特效模拟等。为对学生学习效果进行考核评价，提供了操作过程自动记录、评分、理论测试和实验报告等方式，对学生的预习效果、实验步骤、实验测试和实验报告等建立完善的评价标准，实现对学生虚拟实验过程进行全方面的记录和总结。并建立了对应的反馈机制，全面统计学生反馈的建议、评价和意见，为实验的持续建设和更新提供有力的参考。

(4) 传统教学的延伸与拓展：

采用 Web 网络技术，实现多人同时在线访问和学习（理论上可实现 5000 人同时在线），保证学生在任何地点、任何时间灵活地开展实验学习，打破了传统实验课程在时间和空间上的限制。教师用户也可随时随地上传实验教学资料，进行实验教学指导和知识更新。并在实验系统使用和建设过程中，根据学生、教师等使用群体和教学内容的要求随时进行调整和更新实验。

6. 实验教学项目持续建设服务计划

为充分发挥虚拟仿真实验服务教学、服务社会的功能，通过对本实验教学项目的持续建设和更新，实现持续的优化升级、高效利用和科学管理，具体计划如下：

(1) 持续建设与更新

充分发挥虚拟仿真实验教学中心的优势，加大经费投入，优化和升级虚拟仿真实验项目。

1、丰富工程场景，增加 3-5 种典型工况；

2、升级分析模块，增加对实际盾构施工可能造成的灾害影响因素的检验，并自适应的提出解决方案；

3、扩展交互环节，进行 VR 场景优化，实现沉浸式实验教学，全面认识工程概况，设定可识别的灾害因素，通过计算和经验进行识别。

同时，结合培养方案和教学内容，开发新的虚拟仿真实验项目，建立综合化虚拟实验教学体系，实现不同实验科目间知识点的衔接和贯通，培养和提升学生的专业实践能力和创新能力。

(2) 面向高校的教学应用计划

服务于本校相关专业实验教学的同时，加强与兄弟院校的交流与合作。定期开展虚拟仿真实验应用推广活动，结合其他院校的具体需求，丰富和优化虚拟仿真实验的教学方法和资源。通过大数据技术实现对教学数据的收集与分析，及时掌握学生的使用效果和反馈意见并进行有效评估，为实验课程的科学设置和调整提供依据。

(3) 面向社会提供开放服务计划

依托国家“京津冀一体化”战略，服务地方经济，建立推广服务体系，健全推广应用绩效评估体系和激励与约束机制。组织师生走进企业，加强理论知识与工程实践的结合，借助虚拟仿真实验帮助企业解决理论知识欠缺、人才水平亟待提高的实际问题。与国内外教学科研机构和相关企业共享建设成果，服务学生、服务企业、服务社会。

7. 诚信承诺

本人已认真填写并检查以上材料，保证内容真实有效。

实验教学项目负责人（签字）：

年 月 日

8. 申报学校承诺意见

本学校已按照申报要求对申报的虚拟仿真实验教学项目在校内进行公示，并审核实验教学项目的内容符合申报要求和注意事项、符合相关法律法规和教学纪律要求等。经评审评价，现择优申报。

本虚拟仿真实验教学项目如果被认定为“示范性虚拟仿真实验教学项目”，学校承诺将监督和保障该实验教学项目面向高校和社会开放并提供教学服务不少于5年，支持和监督教学服务团队对实验教学项目进行持续改进完善和服务。

主管校领导（签字）：

（学校公章）

年 月 日