

水面曲线虚拟仿真实验平台设计与实现

孙晓庆¹ 张晟瑀¹ 冯右骏¹ 查恩爽^{2*}

1. 吉林大学 新能源与环境学院; 2. 吉林大学 建设工程学院

摘要: 水面曲线实验是水力学专业基础课程的重要实践内容, 是水文与水情预报、库区设计及管理中不可缺少的重要参数, 在工程实践中具有十分重要的意义。明渠非均匀渐变流 12 种水面曲线形成的工况条件复杂, 然而实验教学受到空间条件及实验学时的双重限制, 难以达到预期效果。对此, 构建水面曲线虚拟仿真实验教学平台, 基于新工科需求, 设计 7 个实验模块, 涵盖水力学明渠非均匀渐变流的理论学习、虚拟实验和仿真考核等 3 个教学环节, 具象化展示水面曲线的形成过程, 精细刻画正坡、平坡、逆坡等条件下水面曲线形态, 达到对理论知识的掌握, 加深对实验现象和工程实际的理解, 为培养新工科学生的自主学习及实践创新能力提供有效途径。

关键词: 水面曲线; 水力学; 虚拟仿真; 新工科; 实验教学

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6288.2025.01.004

引言

人工渠道中的明渠非均匀流水面线的计算、绘制及研究是水文、水情预报、库区设计及管理中不可缺少的重要参数, 是确定明渠边墙高度及回水淹没范围的重要依据^[1-3], 在工程实践中具有十分重要的实际意义。水面线计算之前对其进行定性分析, 以判别水面曲线的类型, 然而, 实验室内无法满足多台大型水面曲线设备同时运行, 实验学时也无法满足水面曲线实验的全过程模拟, 严重影响了实验效果。此外, 固定的实验讲义、实验任务及实验操作等, 导致学生学习主动性与积极性差, 极大限制了实验教学功能的发挥。由此, 亟需借助数字技术手段, 打通线上和线下、虚拟和现实场景, 从场景、教学、技术三个维度, 改变现有的教育模式, 将新工科 OBE 理念融合到实践教学的改革和建设中, 结合传统课堂和数字化学习的优势, 提高学生学习效果与实验教学水平^[4-5]。目前以新工科建设为主旨的高等工程教育改革进入一个新的发展阶段^[6-7], 虚拟仿真实验教学成为高校实验教学改革的趋势和发展方向^[8-12], 结合传统实验教学虚实, 以切实提高教学能力, 丰富教学内容^[13-16]。因而, 建设水面曲线虚拟仿真实验教学平台具有一定的必要性和实用性。

综上所述, 借助虚拟仿真技术, 构建水面曲线虚拟仿真实验教学平台, 设计水力学明渠非均匀渐变流的理论学习、虚拟实验和仿真考核等 3 个教学环节, 通过锻炼, 学生达到对水面线理论知识的深刻理解, 加深掌握实验现象和工程实际, 可有效提升水力学实践教学效果。

一、虚拟仿真实验平台设计原则

(一) 平台设计理念

水面曲线虚拟仿真实验教学平台, 以新工科 OBE 理念指导思想, 注重理论与实践一体化, 融合理论知识储备、实验流程操作与实时考查反馈体系, 设计理论知识先导、实验流程明晰、紧密嵌套考核环节的系统化虚拟仿真实验教学平台。以上基础上, 突破固定化

实验方案, 三角堰流与底坡设置可任意调节, 反对僵化的实验方案设计, 突破了线下固定化实验模式, 激发学生创新科研思维。

(二) 平台设计目标

水面曲线虚拟仿真实验教学平台设计, 以精细化实验过程精准识别实验难点为目标, 将水面曲线模拟实验拆解 7 个模块, 基于学生对实验课的认知过程开展各模块内容, 在装置、内容及知识储备模块后, 紧密结合测验, 精准识别易错点, 实验过程后设置整体考核模块, 达到边学习边检验的实验教学模式。同时实验流程与考核紧密嵌套确保成效, 实验主体模拟操作环节, 调节升降螺旋营造不同底坡条件, 针对不同水面曲线的形成、形态及条件, 对应设置考核环节, 实验流程与考核紧密嵌套, 确保学生对每一种水面曲线类型的深刻理解与掌握。

二、虚拟仿真实验平台设计内容

(一) 平台设计原理

恒定非均匀渐变流的问题主要归结为水面曲线分析和计算, 其分析的微分方程式为:

$$\frac{dh}{ds} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - Fr^2}$$

式中: h —明渠水深, cm; s —非均匀渐变流两断面之间的距离, cm; i —渠道底坡; Q —流量, cm³/s; K —流量系数, 无量纲; Fr —佛汝德数, 佛汝德数 (Fr : Froude number) 为流体内惯性力与重力的比值:

$$Fr = v / \sqrt{gh}$$

式中: v ——平均流速, cm/s;

h ——平均水深, cm。

12 种水面线分别产生于 3 种不同底坡, 即正坡、平坡、逆坡, 正坡又分为临界坡、缓坡、陡坡, 水面曲线的形式和名称见表 1。

表 1 水面曲线的形式和名称

明渠底坡	与水流临界底坡 i 比较	水面曲线的形式与符号		
		a 区	b 区	c 区
$i > 0$	$i > i_k$	a2	b2	c2
	$i = i_k$	a3		c3
	$i < i_k$	a1	b1	c1
	$i = 0$		b0	c0
	$i < 0$		b、c、	c、
水面曲线类型		壅水曲线	降水曲线	壅水曲线

(二) 平台设计方案

线上实验教学虚拟实训模块，有助于实验教师获悉对学生而言的实验难点，为线下实验实训实操提供针对性实验内容设计，课上有限学时内，无法覆盖的水面曲线形成知识点，应用虚拟仿真实验平台，全面覆盖 12 种水面曲线的形成条件及形成过程机理等内容，兼顾精准考核的系统化实验教学过程，为培养新工科技术型与创新型高级人才提供有效途径，同时可有效解决实验教学学时短、学生上课积极性差等问题，虚拟仿真实验平台(国家发明专利，申请号：202311213057.5)结构见图 1。

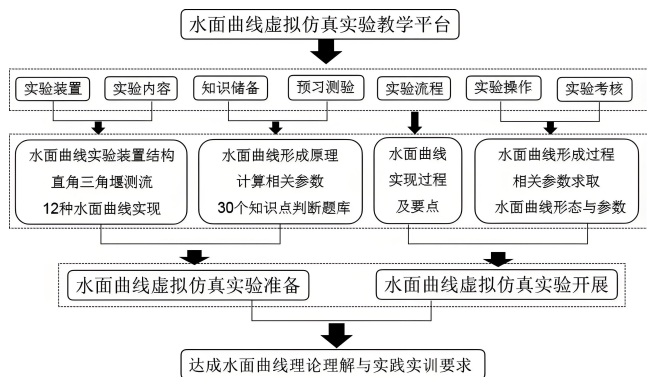


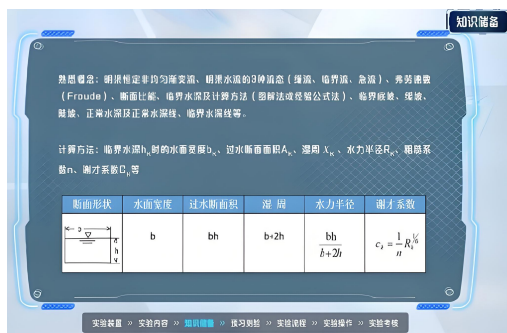
图 1 水面曲线虚拟仿真实验教学平台设计结构

三、虚拟仿真实验平台功能实现

(一) 平台设计结构与功能

1. 虚拟仿真实验结构

实验平台设计实验装置、实验内容、知识储备、预习测验、实验流程、实验操作及实验考核等 7 个模块，涵盖了水面曲线实验装置介绍、理论知识准备、实验步



骤与实操训练、实验教学成效考核等关键内容。

2. 虚拟仿真实验功能

该虚拟仿真实验平台，在确定直角三角堰测流、临界水深与临界底坡基础上，调节上下螺旋，实现矩形明渠缓坡、临界坡、陡坡、逆坡与平坡等坡度条件，模拟 12 种水面曲线形态，其中包括 8 类壅水曲线与 4 类降水曲线，不同水深条件下的水面曲线展示见图 2。

(二) 平台设计实验及过程

1. 实验装置与实验内容

点击“实验装置”，进入平台设备结构介绍页面，基于虚拟仿真技术模拟设备各功能部件，涵盖渠首的三角堰测流、矩形明渠，循环水箱与水管、供水循环动力水泵，升降螺旋等，见图 2。其中，渠首流量测定使用三角堰开展，升降螺旋部件可用来调节底坡坡度，实现缓坡、临界坡、陡坡、逆坡与平坡等不同实验条件，实现直角三角堰测流、经验公示确定临界水深、临界底坡，完整呈现明渠非均匀渐变流 12 种水面曲线情景。



图 2 实验装置结构介绍

2. 知识储备与预习测验

点击“知识储备”，进入仿真实验背景知识环节，囊括相关概念熟悉与理论计算所需参数等，为实验开展储备相关理论知识要点；此后进入“预习测验”环节，含 30 道实验相关知识点判断题库，仿真实验系统随机抽取 10 道，待完毕后显示答题情况，并给出错题数及对应错题，针对性评估预习效果。平台效果展示见图 3。

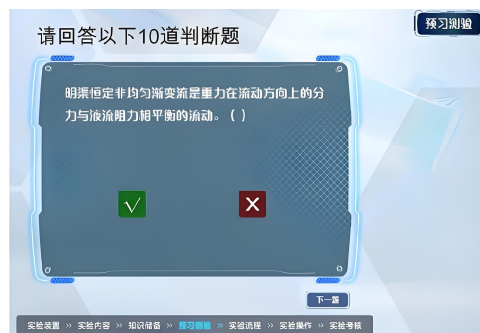


图 3 知识储备要求与预习测验内容

3. 实验流程与实验操作

点击“实验流程”，进入图 4 中显示的虚拟仿真实验全局系统流程介绍，基于实验顺序，点击“实验操作”，在渠首三角堰测流、确定临界水深、临界地坡基础上，

升降螺旋上下调节，实现矩形明渠坡度变化，顺次开展缓坡、临界坡、陡坡、逆坡与平坡等的水面曲线虚拟情景实验，并以连线题方式，考察水面曲线形成条件与水面形态，完成水面条件与形态理论考核。

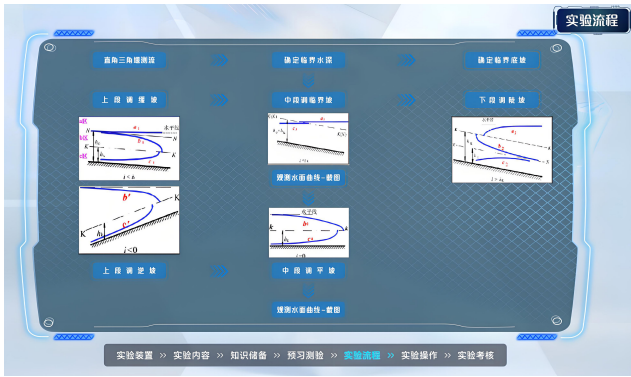


图4 实验流程与实验操作情景模拟

4. 实验考核与评分方法

上述实验操作完成基础上，综合考核虚拟仿真实验系统中实现的8类雍水曲线与4类降水曲线的水面形态及形成条件，以连线题方式，左侧为12种水面曲线形态，右侧为正常水深与临界水深比较，左右对应连线，如错误3次，则系统给出相关理论点提示后，完成考核，考核内容见图5，考核环节遍布整个实验流程中。

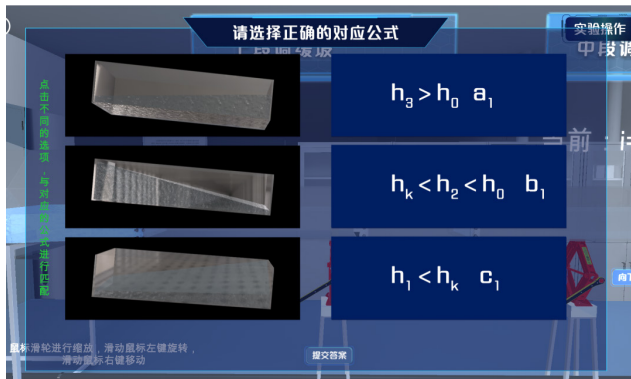


图5 实验平台考核内容

四、结论

借助虚拟仿真技术，构建了水面曲线虚拟仿真实验教学平台，设计目标明确，设计思路合理，结构精准，大大减轻了实验仪器少、学时数少及实验空间有限的实践教学压力。系统化开展水面曲线实验，完整呈现三角堰测流、临界水深与临界底坡确定、矩形明渠12种水面曲线形态确定的实验设计。从全过程角度，针对各个实验环节设计考核问题，制定适合线上实验教学的指标评价体系，考核环节紧扣理论知识储备、实验操练等各个部分，利于及时检测学习成效。

结语

综上所述，水面曲线虚拟仿真实验教学平台设计，借助虚拟仿真技术，实现灵活交互教学，达到对理论知识的深刻理解，加深对实验现象和工程实际的掌握，切实提升了新工科背景下水力学专业课程的实践教学水平。

参考文献

[1] 赵梓轩, 王建龙, 王文海, 等. 一种沿程均匀入流矩形渠道水面曲线计算方法[J]. 环境工程, 2023, 41(03): 21-25.

[2] 张沁. 棱柱体渠道中十二种水面曲线的试验研究[J]. 人民珠江, 2017, 38(07): 32-35.

[3] 王铁. 天然河道水面曲线计算方法分析[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(20): 27-29.

[4] 陈燕. 新工科研究进展与前瞻[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2020, 22(03): 214-222.

[5] 贡俊. 基于人才培养目标和社会需求的教学模式探讨—以“土地资源评价与管理”课程为例[J]. 晋中学院学报, 2023, 40(06): 86-88+101.

[6] 陈婧, 赵凤艳, 张平均. “新工科”背景下专业课程改革方向的研究—以电子类专业课程为例[J]. 工业和信息化教育, 2024, (01): 66-70.

[7] 彭斌, 皮子坤, 易灿南, 等. 新工科背景下工业通风课程线上线下混合式教学模式探讨[J]. 高教学刊, 2024, 10(01): 119-122+127.

[8] 刘坤, 陈通. 新工科教育治理: 主体构成与框架建构[J]. 教育科学, 2020, 36(04): 63-69.

[9] 周永军, 王凯, 孙伟伦, 等. 基于Unity3D的光电效应虚拟仿真实验平台设计与开发[J]. 大学物理实验, 2024, 37(02): 93-99.

[10] 王玲玲, 富立, 王秋生, 等. 星表探测机器人控制技术虚拟仿真实验教学设计[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(03): 100-105.

[11] 陈琪, 付嘉炜, 何毓辉. 面向智能驾驶的深度学习综合实验平台构建及项目实现[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(01): 108-114.

[12] 司黎明, 徐浩阳, 薛正辉, 等. 电磁波极化转换虚拟仿真实验教学探究[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(04): 104-108+113.

[13] 赵玉红, 孙晓庆, 卞建民, 等. 水文地质学基础实验网络混合式教学模式改革[J]. 实验室研究与探索, 2017, 36(08): 217-221+246.

[14] 夏德华, 曹菁, 许贵智, 等. 环境监测课程线上线下混合式教学改革探索[J]. 高教学刊, 2024, 10(03): 60-63.

[15] 徐伟杰, 徐明, 熊宏齐, 等. 土木工程虚实结合实验教学体系化标准化矩阵构建与应用[J]. 实验室科学, 2024, 27(02): 2-7+13.

[16] 张春鹏, 秦传玉, 杨朝格. 教学知识点过载的挑战与应对——阶梯课程协同配合策略及多源教学资源比选重构[J]. 中国大学教学, 2024, (Z1): 88-95.

基金项目: 吉林省高等教育教学改革研究(一般)课题(JGJX2022D26); 吉林大学校级教学改革研究(一般)课题(2021XZC069); 吉林大学校级教学改革研究(重点)课题(2021XZD044); 吉林大学实验技术项目(SYXM2023b029); 吉林省教育厅项目(JJKH20231180KJ); 吉林省自然科学基金项目(20220101173JC)。

作者简介: 孙晓庆(1986-), 女, 汉族, 吉林松原人, 博士, 高级实验师, 研究方向为水力学与地下水运动实验教学及研究工作。

通讯作者: 查恩爽(1985-), 女, 汉族, 河北秦皇岛人, 硕士, 工程师, 研究方向: 地下水数值模拟及水文地质实验。