

# 虚实有机融合化工原理实验课程建设

## ——以传热系数测定实验为例

喻红梅, 单佳慧, 姜国民

南通大学化学化工学院, 江苏 南通

收稿日期: 2025年6月8日; 录用日期: 2025年7月7日; 发布日期: 2025年7月15日

### 摘要

以化工原理实验中的传热系数测定为例, 探讨了传统教学与虚实有机融合的教学模式在化工原理实验教学中的应用, 分析了其优势、实施策略以及面临的挑战, 结果表明: 虚实有机融合化工原理实验对提升学生实验操作能力和理论理解深度的积极作用, 尤其在激发学习兴趣和培养创新思维方面效果突出, 为未来实验教学改革提供了有力参考。

### 关键词

化工原理实验, 虚拟仿真, 虚实融合, 教学模式, 传热系数测定实验

# Construction of Virtual and Real Organic Integration of Chemical Engineering Principles Experiment Course

## —Taking the Experiment of Heat Transfer Coefficient Measurement as an Example

Hongmei Yu, Jiahui Shan, Guomin Jiang

School of Chemistry and Chemical Engineering, Nantong University, Nantong Jiangsu

Received: Jun. 8<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jul. 7<sup>th</sup>, 2025; published: Jul. 15<sup>th</sup>, 2025

### Abstract

This paper takes the determination of heat transfer coefficient in chemical engineering principles experiments as an example to explore the application of a teaching model that organically integrates

traditional and virtual-real teaching in chemical engineering principles experimental teaching. It analyzes the advantages, implementation strategies, and challenges faced. The results indicate that the organic integration of virtual-real chemical engineering principles experiments positively impacts the enhancement of students' experimental operation skills and theoretical understanding depth, especially in terms of stimulating learning interest and fostering innovative thinking. This provides a strong reference for future reforms in experimental teaching.

## Keywords

Chemical Engineering Principles Experiments, Virtual Simulation, Virtual-Real Integration, Teaching Model, Heat Transfer Coefficient Measurement Experiment

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

化工原理实验是化工类相关专业的重要实践环节，其教学效果直接关乎学生对化工单元操作、传递过程等核心理论的理解深度与应用能力的高低。通过实验教学，学生能够直观地观察化工现象、验证理论知识，并培养工程实践能力和创新思维[1]。然而，传统的化工原理实验教学模式在实践中普遍遭遇了以下难题：一是实验设备数量有限，导致学生动手操作机会匮乏，难以满足个性化学习需求；二是部分实验因涉及高温、高压、有毒有害物质而存在安全隐患，致使学生难以全面深入参与；三是实验过程受到时间和空间的严格限制，导致复杂工况下的重复演练和深入拓展变得尤为艰难[2]。

近年来，虚拟仿真技术的快速发展为化工实验教学提供了新的解决方案。通过计算机模拟[3]、三维动画和交互式操作，虚拟仿真实验能够高度还原化工设备的运行状态和实验现象，并突破传统实验的时空与安全限制[4][5]。目前，国内多所高校已逐步引入虚拟仿真实验平台。虚拟仿真技术在辅助理论教学、预习实验内容以及模拟高危实验等多个方面，均发挥了显著的积极作用。然而，虚拟仿真技术也存在局限性，例如无法完全替代真实设备的触觉反馈、难以模拟实际操作的随机误差等。因此，若仅依赖虚拟仿真技术，可能会使学生缺失对真实工程环境的体验。

针对上述问题，近年来，提出了“虚、实”有机融合的教学模式，即在化工原理实验教学中，将虚拟仿真技术与真实实验操作相结合[6]-[8]，构建“预习-仿真-实操-拓展”的闭环学习流程。该教学模式的重要意义体现在：(1) 在教学层面，通过虚实结合的方式，优化了实验资源的配置，进而提升了教学效率；(2) 学生层面，强化理论联系实际的能力，培养工程思维；(3) 技术层面，探索信息技术与实验教学的深度融合路径，为工程教育改革提供参考。

## 2. 传热系数测定实验的传统教学模式

### 2.1. 传热系数测定实验内容概述

在工业生产和科学研究中经常采用间壁式换热装置来达到物料的冷却和加热。这种传热过程系冷、热流体通过固体壁面进行热量交换。它是由热流体对固体壁面的对流给热，固体壁面的热传导和固体对冷流体的对流给热三个传热过程所组成。该实验以空气-水蒸气为传热体系，冷流体空气进入套管换热器内管，被加热后排出；水蒸气进入套管换热器环隙进行冷凝给热，冷凝下来的水回至蒸汽加热釜。该

实验能够让学生直观地领悟传热机制，并熟练掌握工程中传热系数的实际测定技巧[9][10]。

## 2.2. 传统教学模式

通过热电偶、流量计等传感器直接测量温度和空气冷流体流量，结果具有物理真实性。可独立控制热源温度、冷却介质空气流量等参数。相同条件下多次实验，结果可重复性强。传统实验由“课前预习-课中实验操作-课后数据处”三阶段完成。

预习阶段，学生受限于时间和空间，往往只能依靠实验讲义来初步了解实验的目的和原理，而对于实验步骤的直观感知则相对匮乏，难以形成全面的实验预期。

课中实验操作环节，由于实验台套数的限制，学生们往往需要3~4人组成一个小组来完成实验，这不仅需要同组同学之间的紧密配合，还可能导致部分同学无法完整地独立操作整个实验流程，影响其实践能力的培养。化工原理实验室是同学们在大学里初次接触工程性操作的场所，初时多显谨慎，对仪表阀门操作心存顾虑，后在指导老师的悉心引导下，逐渐敢于动手实践。正确操作之余，传热实验还需特别注意：确保温度传感器与流体紧密接触，以减小测量误差；同时，稳态条件是实验成败的关键，须确保温度长时间恒定，方可记录数据。通常，调整空气流量后，需静待至少5分钟，待系统稳定后方可继续；在进行涉及高温或电流的实验时，务必注意安全防护；此外，在对流传热实验中，还需严格控制流体流速，确保其稳定。

实验完成后，每位同学将负责计算各自的数据点，并在同组同学间汇总数据。随后，将通过一系列数据处理，包括数据分析、误差分析和线性拟合，来验证一定条件下管内对流传热公式  $Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}$  的准确性，并深入讨论实验结果。

因此传统实体实验在传热系数测定中具有不可替代的价值，尤其适用于教学演示、理论验证和工程实际工况的测试。尽管存在成本和效率的局限性，但其数据的真实性和直观性仍是数值模拟的重要补充。因此，现代研究中，常将实体实验与仿真结合，以提高研究效率和可靠性。

## 3. 传热系数测定实验的虚实结合教学设计

### 3.1. 实验目标

- (1) 了解间壁式传热元件的研究和给热系数测定的实验组织方法；
- (2) 掌握借助于热电偶测量壁温的方法；
- (3) 学会给热系数测定的试验数据处理方法；
- (4) 了解影响给热系数的因素和强化传热的途径。

### 3.2. 虚拟仿真实验设计

虚拟仿真实验采用南京工业大学实验装置配套的虚拟仿真软件。进入软件后，用户将看到如图1所示的界面，师生可借此通过实验概述和实验设计部分预习实验内容，随后即可进入仿真模拟实验环节，其中三维仿真装置图参见图2。可以选择普通管实验，也可以选择强化管实验。通过调整冷流体空气流量等参数，可以模拟实验室变风量系统中的风量，同时利用传感器模拟器、仿真软件等工具进行数据采集、分析和绘图拟合。仿真结果表明虚拟仿真实验软件不仅能够记录精确的实验数据，还能通过高度精准的模型和计算，帮助学生进行更为深入的后续分析和撰写报告。

模拟实验与实验室的实体实验装置很接近，学生可以在虚拟环境中进行多次实验操作，及时调整实验参数，验证不同条件下的实验结果，增强学习体验。模拟实验过程中，系统展示设备内部的温度场分布和流线轨迹，会为每一步操作配备清晰的文字提示，并自动将窗口跳转至下一步待操作的位置。若操

作正确,即可顺利进入下一步;反之,若操作错误或参数设置不当,系统将阻止继续操作。这样便于学生知道可能出现的操作错误。



Figure 1. Virtual simulation interface of heat transfer experiment

图 1. 传热实验虚拟仿真界面



Figure 2. Simulation experiment device diagram

图 2. 仿真实验装置图

### 3.3. 实体实验的设计

实验采用空气-水蒸气作为传热介质,其装置准备涵盖了蒸汽发生器、流量计、气泵、风冷装置、排气阀、热电偶测温系统及压力表等一系列设备的精心调试。实验操作步骤包括釜加热产生蒸汽、调节空气流量、记录数据等。数据分析依据实际操作获取的数据进行拟合处理,要求所得直线的相关系数  $R$  必须达到 0.95 或以上,否则将视为实验不合格,需重新进行。传热的实体实验装置如图 3 所示。实体实验不仅锻炼了学生的动手能力,如进行不凝气排放操作和数据采集系统操作,还积累了故障排查的宝贵经验。同时还能通过触摸直观感知温度变化和釜内压力变化,加深对传热机制的理解。但是实体实验学生仅限于读取流量计和热电偶测得的温度数据,无法展示设备内部的温度场分布和流线轨迹等微观现象。



Figure 3. Schematic diagram of the experimental setup

图 3. 实体实验装置图

### 3.4. 虚实有机融合教学模式的意义

虚实融合教学模式通过虚拟仿真技术进行预习,结合实体实验验证结果,实现了线上自主学习与线下集中实践的互补。实体实验读取流量计流量和热电偶测得的温度数据,虚拟仿真实验展示设备内部的温度场分布和流线轨迹等微观现象,虚实有机融合使学生能够在宏观与微观层面全面理解传热过程,提升实验教学的深度和广度。虚实结合不仅优化了学习流程,还培养了学生的综合分析能力,为未来科研和工程实践奠定坚实基础。南通大学采用虚实融合教学模式后,学生实验成功率提高,自主设计实验比例增加,学生感到虚拟演练减轻了对复杂设备的畏惧感,教师认为该模式提高了课堂时间的利用率,从而取得了较好的教学效果。

## 4. 结语

以传热实验为例,采用虚实融合模式教学,先通过虚拟仿真完成设备认知、流程熟悉及操作预演,随后在实体实验室中验证虚拟实验的结果,以此培养学生的实操技能。虚实融合实验教学显著提升实验教学的安全性、开放性和创新性,得到了师生的肯定。

未来可探索虚实融合化工原理实验与 aspen、Python、MATLAB 等联动,以应对更复杂的化工模型分析,进一步提升学生的工程实践能力。

## 基金项目

南通大学 2024 年度教学改革研究课题(项目编号: 2024E10)。

## 参考文献

- [1] 孟玉兰,肇启东,曹晶晶,等. 工程教育视角下化工原理实验课程建设的思考[J]. 实验室科学, 2024, 27(1): 164-167.
- [2] 李静,王克良,郭举,等. 化工原理实验“虚实结合”的教学探讨——以离心泵性能测定实验为例[J]. 化学工程与装备, 2025(1): 142-144.
- [3] 张于弛,张燕杰,郑笑笑,等. 基于计算机软件的化工原理实验探索[J]. 化工管理, 2024(17): 36-39.
- [4] 马靖文,畅志兵,徐立恒,等. 基于虚拟仿真平台的化工原理实验课程教学改革的思考[J]. 化学工程与装备, 2023(8): 275-276+285.
- [5] 郭松,车红连. 基于虚拟仿真技术的实验教学发展路径探索[J]. 教育教学论坛, 2025(17): 109-112.

- [6] 唐奕楠, 盛含晶, 王怡婷, 等. 智能+虚实结合教学模式在化工原理实验教学中的应用[J]. 化工管理, 2023(19): 51-55.
- [7] 薛峰, 朱珺, 王晟, 等. “互联网+”化工原理实验教学平台建设助力虚实结合的实验教学[J]. 化工高等教育, 2023, 40(5): 104-110.
- [8] 刘菊荣, 宋绍富, 卢素红, 等. 虚实结合的实验教学模式在精馏实验中的应用[J]. 化工高等教育, 2022, 39(6): 109-113.
- [9] 居沈贵. 化工原理实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [10] 张伟, 李凤丽. 化工传热综合及设计型实验装置的开发和应用[J]. 山东化工, 2023, 52(7): 223-225.