

化学反应工程课程数智化实践探索

——以气固体系停留时间分布测定实验设计为例

丛景香*, 张伟, 吴秀红, 徐静, 张丽

辽宁科技大学化学工程学院应用化学系, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2025年10月23日; 录用日期: 2025年11月20日; 发布日期: 2025年11月28日

摘要

开展实验数智化设计已经成为现代教育背景下的重要趋势, 不仅可以大幅提升实验教学效率及效果, 也可为新技术的使用与创新提供支持。停留时间分布(RTD)的测定在许多领域中都起着至关重要的作用, 在化学反应工程学科实验教学中, 它也是重要的内容之一, 本文以气固体系下停留时间分布测定实验为切入点, 介绍了停留时间分布测定实验数智化设计的一系列思考及措施, 尝试重塑该实验的教育模式, 弥补传统实验教学的不足。通过重构实验系统, 强化了示踪剂在反应器内的停留时间分布实验的数智化设计。利用数智化的优势, 开发了RTD实验测定及统计特征值计算软件系统, 提高了数据处理手段的智能化及计算效率。借助视频动画、数值程序、模拟实验、AI工具等, 将初级的实验体系升级为可操作的多种手段融合の数智化资源体系, 降低了实验成本, 提高了实验教学的智能化、个性化、高阶性和互动性。设计更注重过程考核和反馈机制的实验综合成绩评价方法, 有助于提升教学效果。

关键词

数智化设计, RTD实验, 模拟

Practical Exploration on Digital Intelligence in the Chemical Reaction Engineering Course

—Taking the Experimental Design for the Determination of Residence Time Distribution in Gas-Solid Systems as an Example

Jingxiang Cong*, Wei Zhang, Xiuhong Wu, Jing Xu, Li Zhang

Department of Applied Chemistry, School of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

*通讯作者。

文章引用: 丛景香, 张伟, 吴秀红, 徐静, 张丽. 化学反应工程课程数智化实践探索[J]. 教育进展, 2025, 15(11): 1757-1763. DOI: 10.12677/ae.2025.15112228

Abstract

The implementation of intelligent digitalization in experimental design has become an important trend in modern education. This approach not only significantly enhances the efficiency and effectiveness of experimental teaching but also provides support for the application and innovation of emerging technologies. The measurement of residence time distribution (RTD) plays a vital role across multiple disciplines, particularly in chemical reaction engineering education. This work focuses on the RTD determination in gas-solid systems and proposes an intelligent digital redesign framework to address limitations in traditional experimental pedagogy. By reconstructing the experimental system, we optimized the intelligent digital design for tracer-based RTD measurement. Using the advantages of digitization, a software system for RTD experimental determination and statistical eigenvalue calculation was developed, which improved both the accuracy of data processing and computational efficiency. Furthermore, the integration of video animations, numerical simulations, virtual experiments, and AI tools transformed the basic experimental framework into a multifunctional intelligent digital resource platform, reducing costs while enhancing pedagogical features such as personalization, interactivity, and advanced cognitive engagement. A comprehensive evaluation methodology emphasizing process assessment and feedback mechanisms is helpful to improve the teaching effect.

Keywords

Intelligent Digitalization Design, RTD Experiment, Simulation

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

在化学反应工程设计和实践中, 研究流体的传质过程, 对于连续床或者连续反应器及相关设备都是极为重要的[1]-[3], 化学反应进行的完成程度与反应物料在反应器内停留时间密切相关, 为了能提高收率, 扩大经济效益, 必须研究原料在反应器内的物质分布及停留时间, 否则无法合理控制进出物料, 更没有办法提高收率[4]-[7]。对已有设备进行停留时间分布(RTD)的测定, 可以分析其工况, 提供改进操作性能的有用信息[8] [9], 还可以通过研究停留时间分布问题在工程设计阶段, 如设计反应器或其它设备时, 建立合适的流动模型, 作为物料、热量及动量衡算的基础, 也可以用来解决反应设备的选型问题。

在化学反应工程理论教学中, 基于 RTD 问题进而探讨非理想流动模型也是非常重要的一个章节[10] [11]。在新工科建设的背景下, 开展化学反应工程实践研究具有重要意义[12] [13]。从文献调研的结果分析, 很多高校对化学反应工程教学中的 RTD 问题都十分重视, 也开展了相应的理论与实践研究[14] [15], 但由于起点及关注方向不同, 实践环节差异较大。基于我校目前情况, 虽然《化学反应工程》课程作为应用化学专业核心课程之一, 但在实践环节还存在许多不足, 如“停留时间分布的测定”主要的教学仪器是气相色谱仪, 色谱柱作为“固定床反应器”, 采用不同物质作为示踪剂样品, 测定其在反应器中的停留时间分布情况。由于受实验软硬件条件的限制, 数据处理过程采用人工计算可能造成失误且效率低

下,实验成绩评定也较为单一且反馈滞后,与人工智能(AI)结合较弱等,影响了教学效果,有必要对停留时间分布测定实验进行数智化设计。

2. 数智化设计的优点

2.1. 满足教学需求,克服硬件装备限制

因实验设备有限,且出于设备维护及试剂耗材价格相对较高等原因的考虑,该实验在开出时以小组形式进行操作,不能保证每人单独使用实验设备,实验教学效果也受到影响。数智化实验教学项目的建设可以充分发挥其应用优势,较为真实地还原出实验的场景与设备,学生能够在类似仿真的场景中开展实验,模拟真实的实验过程,积累实践经验。既弥补了实验教学仪器不足的缺憾,又满足了学生充分实验的需求,达成教学目标。

2.2. 提高实验效率,提升实验质量

数智化设计可以通过使用计算机软件和其他数字化工具来强化实验过程预习,减少人工操作和重复劳动,从而提高实验效率。数智化设计可以提供更精确的实验数据和细节,减少实验错误和偏差的出现。通过数智化建模和仿真,实验人员可以更好地理解和评估实验方案的可行性和可靠性,从而提升实验质量。

2.3. 降低实验成本,适应科学发展

数智化设计实验可以减少实验材料和设备的成本,节省人力资源,还可以帮助实验人员更好地优化实验方案,减少实验过程中的浪费和损耗,降低实验成本。数智化设计还有助于科学研究更快速地适应科学发展的需求,特别是当数智化实验比较成熟时,科学研究人员可以更快速地开展新的实验和研究,更好地满足科学发展的需要,推动科学进步。

2.4. 丰富教学内容,突破时空限制

数智化设计实验中能够对一些危险的场景或是在现实环境中无法实现的实验进行仿真,例如使用有害物质实验等,这些实验项目具备一定危险性,通过虚拟仿真手段,在确保学生安全的同时,丰富了实验教学内容。通过对场景、对象的高度仿真模拟,学生能够更好地理解并掌握相关知识。数智化实验教学可以打破传统实验教学在时空上的限制,使学生能够随时随地开展自主实验训练,在相对较短的时间内呈现出实验室较长时间才能观察到的现象变化等。尤其是对于某些细微、难以被观测到的变化或设备内部而言,可实现多层次、多维度的实验成果展示。

2.5. 激发求知欲,提高实践创新能力

数智化实验教学平台可为学生提供全天候的实验环境,随时根据自身的需求来开展实验,选择灵活性有所加强,学生从以往被动的按照手册操作实验过渡到更加积极主动的学习模式,求知欲被激发,利于其深度学习。同时,数智化实验平台可提供更加立体化的教学资源与多样的实验情境,将抽象转化为具象,将复杂问题变得简单直观。通过“人-AI-机”协同交互等方式,学生对于知识的内化与迁移有所加强,学生的思维能力得到锻炼,这种训练与拓展练习有助于学生综合能力提升,支持学生在传统技术手段的基础上作出创新。数智化设计也可以为实验人员提供更多的创新工具和方法。通过数智化设计,实验人员可以更容易地尝试不同的实验方案和创意,快速迭代和改进实验,从而提升创新能力。

3. 数智化设计方案

3.1. 实验本身教学目标

气固体系停留时间分布测定实验本身的教学目标主要有如下三点：(1) 掌握用脉冲示踪法测定停留时间分布及其统计特征值计算方法。(2) 掌握气相色谱仪器的工作原理与使用方法。(3) 了解气固反应器的特性并分析流体偏离理想情况产生的原因。

3.2. 实验的原理和内容

采用脉冲法测定示踪剂在气固体系反应器中的平均停留时间，并用离散法计算平均停留时间分布函数、平均停留时间分布密度函数值和平均停留时间。

3.3. 数智化设计实验所能实现的教学目标和教学功能

基于设备方面的数智化设计与实施十分受限，本文主要围绕其他实验功能进行数智化设计，主要包括设计开发更加智能化的数据处理软件(非 AI 过程)；设计更高阶的具备停留时间模拟及预测功能的软件系统；设计更加完善的数智化教学及成绩评价模式等。数智化设计实验除了可实现实验本身的教学目标外，还有如下功能：(1) 丰富实验的预习与演练功能。(2) 增加了平均停留时间的模拟与预测功能。(3) 完善了实验成绩评定体系与反馈机制。(4) AI 伴学在各个环节上助力于师生的教与学。

Table 1. Comparison of various items before and after the digital and intelligent design experiment

表 1. 数智化设计实验前后各项对比

项目	数智化设计前	数智化设计后
预习	参考指导书及教学视频	指导书、动画演示、教学视频、效果测试
操作	线下分组进行，成本高，易出错	线上线下配合，效率高，注重个性化培养
数据处理	手工计算，效率低，误差大	使用自编程软件进行计算，智能且具高阶性
分析讨论	结合自己理解、查阅资料	手段更多样，可借助 AI 等智能化工具提速和深化
报告提交	书面报告、存档、反馈结果滞后	学习通 APP 提交、电子存档、及时反馈结果
综合成绩评定	预习报告 + 操作 + 实验报告	更注重过程，各个环节深度融合多维考核
AI 的使用	无	有

表 1 对比了实验在进行数智设计前后的各项内容的差异。总体而言，设计后各项内容均有很大变化，且各项内容都更高效、合理且完善，比如在综合成绩的评定中，借助于学习通 APP 平台，由“预习 - 测试 - 操作 - 报告提交 - 思考探讨 - 反馈”等模块组成，学生可以及时接收到实验综合成绩的反馈，解决了以往实验报告在提交后，因为要留存，无法返还给学生，造成信息反馈不畅通等问题。结合 AI 等智能化工具，丰富了学生获取信息的渠道，加深其对问题的深层思考，更有利于多学科融合及实验教学目标的达成。图 1 给出了在本实验过程中，AI 在各环节的应用情况，现阶段在解决学生问题、智能测评与练习等方面仍存在问题，未来有望解决。其它环节的实施与高效利用，与使用者对 AI 的掌握也有一定关系。

3.4. 数智化设计的内容

首先，在录制的实验教学视频基础上，设计数智化教学演示系统(见图 2)，采用动画形式增强趣味性和互动性，通过线上熟练实验技术操作步骤，减少操作误差及危险性。

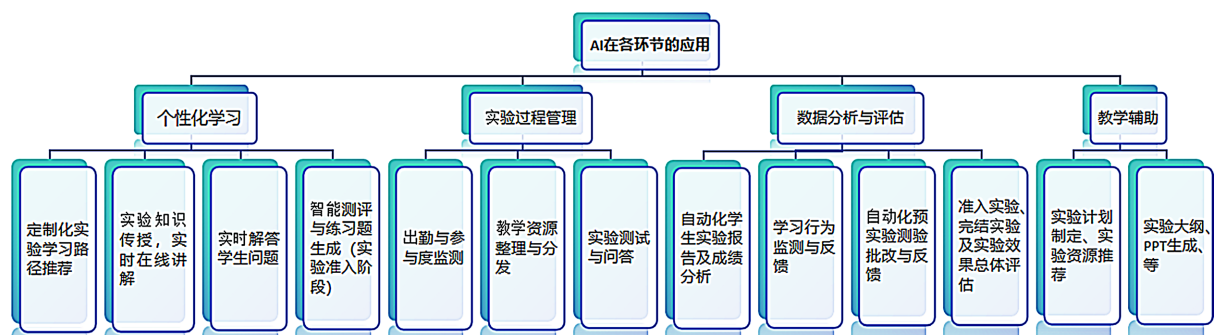


Figure 1. Application of AI in various stages of the experiment

图 1. AI 在实验各环节的应用

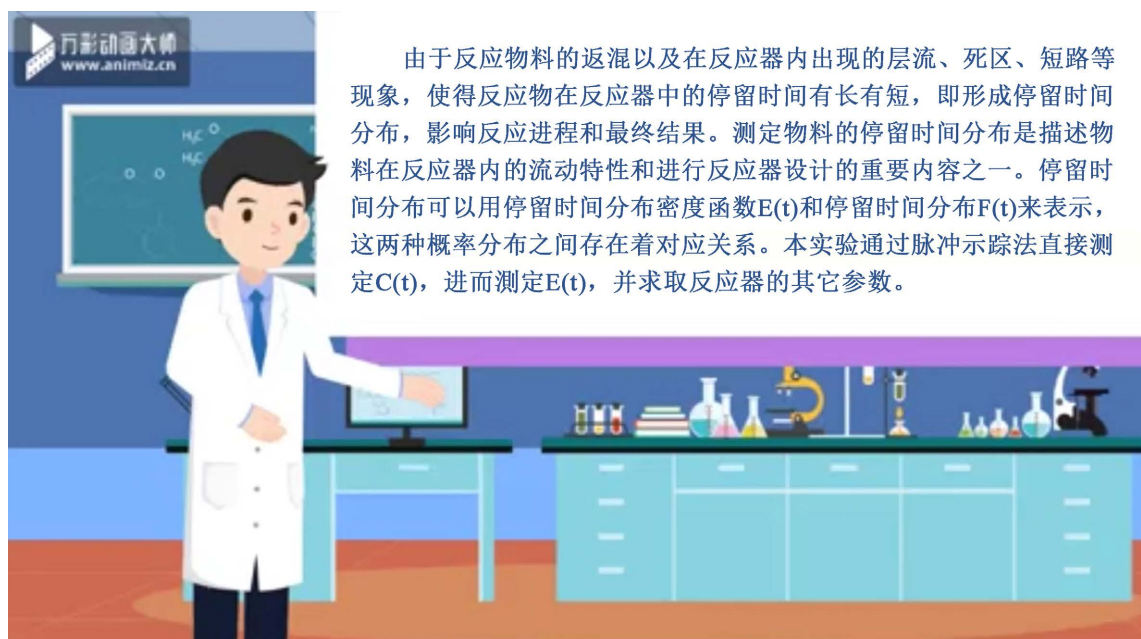


Figure 2. Screenshot interface of the digital intelligence demonstration system for the experiment teaching

图 2. 实验教学数智化演示系统截图界面

其次,在数据处理过程中,通过输入采样点的时间和相应的响应函数值,利用自编写的软件程序(已获批软件著作权),准确快速地计算平均停留时间分布函数值、平均停留时间分布密度函数值和平均停留时间等特征值结果。进而可以计算方差、无因次方差,并可据此初步判断流体流动状态,估算多釜串联模型及轴向扩散模型参数。图 3 是该计算软件中的脉冲法界面截图。

再次,为满足不同能力层次学生的需求,本实验提供了示踪剂平均停留时间的模拟与预测功能,该功能是基于色谱模型的建立和求解基础上实现的。以甲苯为例,在气固体系下,其停留时间的实验与计算结果如图 4(a)所示。升高色谱柱温度和流速,甲苯在不同条件下的模拟结果如图 4(b)所示。

4. 结果与讨论

在模拟气固体系停留时间分布实验测定中,通过图 4(a)可以确定流出曲线中的基本参数,通过实际操作中改变温度、流速,造成停留时间的变化,而通过模拟,只需要改变对应参数,即可可视化非理想流动的影响,利用这些分析引导学生理解停留时间分布及影响因素等核心知识点。

脉冲法

请输入记录参数: 测试方法: GC 溶质: 苯、甲苯等 流动相: 氮气

体积流速 (mL/min): 注射质量 (g):

时间序列 (min):

响应值序列 (mV):

或浓度序列 (g/L):

特征值计算结果:

E(t)函数值:

F(t)函数值:

平均停留时间 (min): 方差: 无因次方差: 釜数N: Pe/准数:

实验数据处理 重新输入数据 评价建议 返回 退出

Figure 3. Screenshot interface of the computational software

图 3. 计算软件截图界面

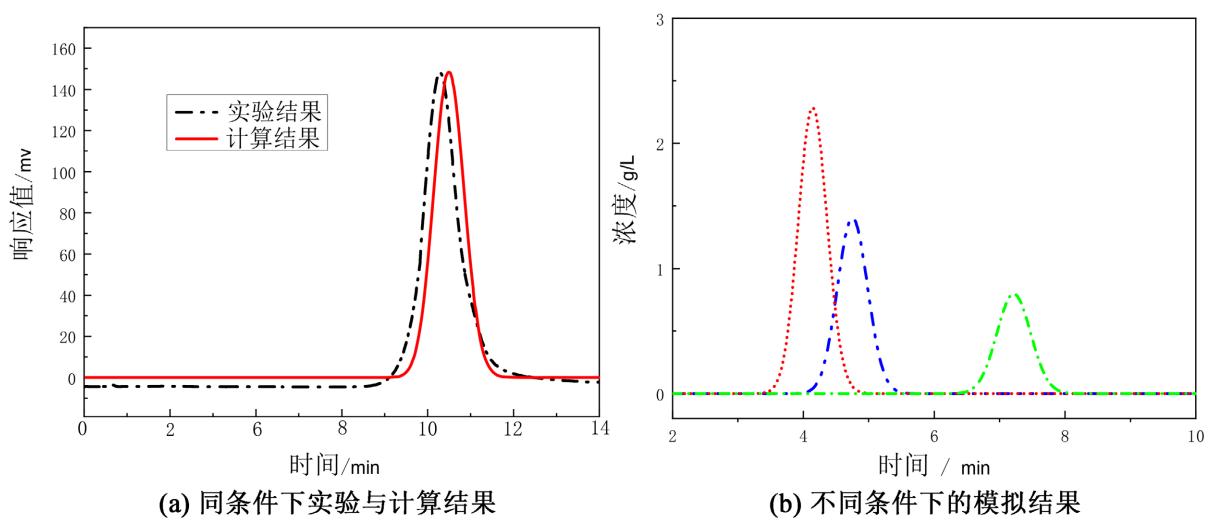


Figure 4. Residence time of toluene in the gas-solid system and simulation results

图 4. 甲苯在气固体系中的停留时间与模拟结果

5. 结语

在气固体系停留时间分布实验测定的数智化设计中, 采用视频、动画、AI 结合软件程序的方式, 加速了传统实验向智能化的转变。通过重塑整个实验框架, 利用人工智能的优势, 在达成教学目标的前提下, 充分满足个性化需求, 对于不同起点的同学提供扩展功能, 为高阶思考及创新性思考提供了支持。

基金项目

感谢辽宁科技大学教育科学研究项目(2025 年, 项目编号 GJ25YB08, XJGIP202402)对本研究提供的支持。

参考文献

- [1] 刘振宇. 煤地下气化低效的化学反应工程根源: 滞留层及通道中的传质与反应[J]. 化工学报, 2022, 73(8): 3299-3306.
- [2] 姚东. 三相微型流化床液相停留时间分布和滴状流传质特性[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2019.
- [3] 袁慎峰, 邱华锋, 尹红, 等. 带转动挡板的搅拌萃取塔连续相停留时间分布研究[J]. 高校化学工程学报, 2023, 37(3): 376-382.
- [4] 田凤国, 朱田, 孔德正, 等. 非均匀布风流化床内大颗粒停留时间特性[J]. 化工学报, 2020, 71(4): 1520-1527.
- [5] 王贞, 吴旭辉, 刘军成, 等. 淋滤反应器缩短停留时间并提高利用率的实验探索[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(16): 108-110.
- [6] 陈聪聪. 卧式多室流化床隔板结构对大颗粒停留时间的影响[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [7] Hua, L., Wang, J. and Li, J. (2014) CFD Simulation of Solids Residence Time Distribution in a CFB Riser. *Chemical Engineering Science*, **117**, 264-282. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.05.055>
- [8] 魏建锦. 甲醇制烯烃反应器内气固停留时间特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- [9] Gao, Y., Muzzio, F.J. and Ierapetritou, M.G. (2012) A Review of the Residence Time Distribution (RTD) Applications in Solid Unit Operations. *Powder Technology*, **228**, 416-423. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.05.060>
- [10] 翁育靖, 李莹超, 毕文彦, 等. 新工科背景下化学反应工程课程体系改革探索[J]. 当代化工研究, 2023(13): 135-137.
- [11] 张艳维, 张楠, 付宁. 化学反应工程课程“重思考、强参与、广输出”教学模式探索[J]. 河南教育(高等教育), 2023(4): 83-84.
- [12] 张峻炜, 王保玉, 王少鹏, 等. 新工科视角下应用型本科高校化学反应工程教学探索[J]. 广州化工, 2023, 51(11): 216-218.
- [13] 张爽, 高华晶, 张吉波, 等. 工程教育认证背景下《化学反应工程》课程改革[J]. 吉林化工学院学报, 2022, 39(10): 12-15.
- [14] 张京, 邹宗树. 非等容多釜串联模型的停留时间分布密度函数及模型参数[J]. 数学的实践与认识, 2023, 53(8): 166-171.
- [15] 张海彬, 李正强, 黄斯珉, 等. 连续流搅拌反应器的停留时间与流动可视化研究[J]. 广东化工, 2023, 50(14): 114-116, 120.