

# Development and Application of Online-Offline Hybrid Teaching Model in Forced Convection Heat Transfer Experiment Teaching

Xiaoyan Zhao Ping Ji Yuxia Han Ruijun Cui Xiang Yu

Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia, 010080, China

## Abstract

To address challenges in traditional forced convection heat transfer experiment teaching—including limited class hours, monotonous teaching methods, and insufficient cultivation of students' practical innovation capabilities—this study proposes an online-offline hybrid teaching model guided by holistic education philosophy. The model integrates the Youmu Course Online Platform with a virtual simulation experiment system, systematically dividing the teaching process into three phases: pre-class online preparation, in-class offline operation, and post-class expansion reflection. A diversified evaluation system covering experimental operations, report writing, and innovation capabilities is introduced. This approach effectively stimulates students' learning initiative, significantly enhances their engineering practice skills, data processing abilities, and innovative thinking, achieving remarkable teaching outcomes. The model provides a replicable pathway for reforming similar engineering experiment courses.

## Keywords

online and offline blended teaching; forced convection heat transfer; experimental teaching; teaching model construction; teaching evaluation

## 管外强迫对流换热实验教学中线上线下混合式教学模式的构建与应用

赵晓燕 吉平 韩玉霞 崔瑞军 于祥

内蒙古工业大学, 中国·内蒙古 呼和浩特 010080

## 摘要

结合传统管外强迫对流换热实验教学面临学时有限、教学手段单一及学生实践创新能力培养不足的挑战,为提升实验教学质量 and 学生综合能力,本研究构建并应用的一种以全人教育理念为指导,整合优慕课在线平台与虚拟仿真实验系统,将教学过程系统划分为课前线上预习、课中线下操作与课后拓展反思三个阶段,并引入涵盖实验操作、报告撰写及创新能力的多元评价体系的线上线下混合式教学模式,有效激发学生学习主动性,显著增强其工程实践能力、数据处理能力及创新思维,取得良好教学效果,为同类工程实验课程的改革提供可借鉴路径。

## 关键词

线上线下混合式教学; 强迫对流换热; 实验教学; 教学模式构建; 教学评价

## 1 引言

在高等教育深化改革且工程教育面临新一轮科技革命与产业变革双重驱动,对创新型、复合型人才培养提出更高要求的背景下,作为工程实践能力培养核心环节的实验教

学,其教学模式与效果的优化至关重要。传统管外强迫对流换热实验教学多依附于传热学理论课程,存在学时分配紧张、教学手段相对单一、学生被动接受知识等致使难以充分激发学习兴趣与创新潜能,限制学生工程素养与综合实践能力有效提升的问题。而现代信息技术的发展为实验教学改革提供新契机,融合网络平台灵活性与线下实操体验感的线上线下混合式教学模式,成为突破传统教学时空限制、强化教学过程互动性与学生主体性的重要路径。推动实验教学向更具启发性、互动性与创新性方向转型,不仅是适应新工科建设内涵的必然选择,也是实现立德树人根本任务、提升人才培养质量的关键举措。基于此背景,探索并构建适用于管外

**【基金项目】** 内蒙古工业大学示范性实验项目(项目编号 SFSY2024001); 内蒙古工业大学教改项目(项目编号 2025223)。

**【作者简介】** 赵晓燕(1985-),女,中国山西阳高人,博士,高级实验师,从事严寒地区太阳能高效利用技术研究。

强迫对流换热实验的混合式教学模式，具有显著现实必要性与重要实践价值。

## 2 混合式教学模式的构建

### 2.1 设计理念与教育目标

立足于全人教育理念构建的混合式教学模式，将价值塑造、知识传授与能力培养深度融合于实验教学全过程，以学生为中心，强调在专业实验教学中有机融入思政元素，引导学生深刻理解工程伦理与社会责任，如在讲解对流换热原理时关联节能减排的国家战略以培养学生的家国情怀与职业操守，其教育目标具体划分为三个层次：在知识层面要求学生掌握管外强迫对流换热包括相似准则数与实验研究方法的基本理论，在能力层面注重训练学生操作实验设备、采

集与分析数据、回归经验公式的综合实践能力以及发现并解决工程问题的创新能力。

### 2.2 教学资源整合与平台建设

以教学资源的系统整合为混合式教学模式有效运行的基础，核心在于构建一个线上线下联动、虚拟与现实互补的学习环境。在线上，依托优慕课网络教学平台系统化部署包含实验导学单、原理讲解视频、设备操作动画及自动评分前测题目的课前预习模块，学生需在规定时间内完成学习任务并通过测试才可进入实验室<sup>[1]</sup>。同时开发精确模拟风洞、加热管、微压计等真实设备工作逻辑与数据生成过程的管外强迫对流换热虚拟仿真实验系统，学生可在线反复进行流程演练与参数探究，有效降低线下实操出错率与设备损耗，表1具体展示各教学资源模块功能与实施要点。

表1 各教学资源模块的功能与实施要点

教学资源模块	主要功能描述	实施要点与数据指标
线上预习模块	发布实验导学资料、原理视频与预习测试	包含3个原理讲解视频（总时长约25分钟），1套预习测试题（10道选择题，正确率≥80%方可进入实验）
虚拟仿真系统	模拟单管及管束对流换热实验操作全过程	提供至少5种不同风速与加热功率的工况模拟，虚拟实验耗时约20分钟/次
线下实验台	进行实体设备操作与数据采集	实验台配备4组热电偶测温，加热功率调节范围0-500W，微压计量程0-200 Pa
优慕课平台	学习过程管理、师生互动与成绩评定	支持课前资料分发、课中签到与数据提交、课后报告上传，成绩权重，预习20%、操作40%、报告40%

### 2.3 实验内容与设备优化

管外强迫对流换热综合实验的核心原理源于相似理论，其描述了流体外掠物体时的换热规律，对于空气横掠单管这一特定情形，普朗特数  $Pr$  可视为常数，因此换热过程可由努谢尔特数  $Nu$  与雷诺数  $Re$  之间的准则关系式来表征，该关系通常简化为幂函数形式，具体如下，

$$Nu=C \cdot Re^m$$

式(1)中， $Nu$  为努谢尔特数，表征对流换热的强弱， $Re$  为雷诺数，表征流体的流动状态， $C$  和  $m$  是由实验确定的常数。实验内容的优化体现在两个方面，一是深化基础实验内涵，要求学生不仅测量单管在不同风速下的壁温和风压数据，计算  $Nu$  与  $Re$ ，并最终通过数据回归确定特定实验台上的  $C$  和  $m$  值，从而深刻理解准则方程式的物理意义与应用方法。二是拓展研究性实验内容，对实验装置进行改进，在风洞实验段内增加了可更换的管束排列模块，管束采用顺排和叉排两种方式，管间距与管径之比 ( $S1/d, S2/d$ ) 分别为 1.5 和 2.0

## 3 混合式教学模式的应用实施

### 3.1 课前线上预习与准备

以确保学生在进入实验室前充分掌握实验原理与操作规范为核心目标的课前线上预习阶段，作为混合式教学模式的基础环节，在具体实施中，教师于优慕课平台发布涵盖实验安全须知、设备结构剖析、测量仪表使用方法及数据处理

要点的详细实验导学单；而学生则需在规定时间内完成包含观看约 25 分钟原理讲解视频以重点理解相似理论在强制对流换热中的应用及努谢尔特数、雷诺数物理意义的三个模块学习任务，随后进入精准模拟真实实验台界面与操作逻辑的虚拟仿真实验系统进行操作预演，独立完成从风机启动、功率调节到温度与压力数据采集的全流程练习，且该系统会对如错误顺序开启设备或超出安全温度范围的操作错误进行实时提示与纠正。

### 3.2 课中线下实验操作与指导

线下实验课是理论知识向实践能力转化的关键阶段，强调在真实环境中培养学生的动手能力与科学素养。课程伊始，教师利用约 20 分钟进行集中讲解，内容并非重复原理而是基于平台统计的预习薄弱点进行针对性强调，例如重点演示微压计的调零方法与热电偶测温的稳定性判断标准，并结合工程实例强调超温操作可能导致的设备损坏与安全风险。随后学生以两人为一小组展开实验，每组配备一套完整的实验装置，包括离心式风机、电加热单管实验段、倾斜式微压计及多通道温度采集器，实验操作关键步骤与规范要求如表 2 所示。

### 3.3 课后任务与反思延伸

课后环节致力于引导学生完成从数据采集到知识建构与能力迁移的升华过程，实验结束后，学生需在一周内提交一份综合性的实验报告，报告内容超越简单的数据罗列，要求运用数值处理软件对测量的原始数据进行系统分析，具体

包括计算每个工况下的空气平均物性参数、雷诺数  $Re$  与努谢尔特数  $Nu$ ，并在双对数坐标下绘制  $Nu$  随  $Re$  的变化关系曲线，报告还需深入探讨实验误差来源，如风速测量中皮托管对准误差对  $Re$  计算的影响、热电偶测温系统误差对  $Nu$  计算的影响，并提出减小误差的可行性建议<sup>[1]</sup>。此外，优慕

课平台设有专题讨论区，教师发布诸如“如何将单管实验结果推广至管束换热器设计”或“比较顺排与叉排管束的换热特性”等拓展议题，鼓励学生基于实验数据发表见解并进行同伴互评。

表2 实验操作关键步骤与规范要求

实验阶段	核心操作内容与技术规范	关键参数控制与数据记录要求
设备检查与初试	检查热电偶与加热器连线，确认微压计液柱水平。风机启动前闸板处于全闭状态。	记录环境温度 20~25° C，大气压力 96.0~102.0 kPa。初始风速调至最低档。
系统加热与稳定	先启动风机再接通加热器。功率设定为 150 W，密切监测壁温变化，防止超过 120° C 安全限值。	稳定判据，四组壁温读数最大波动 $< \pm 0.3^{\circ} C/2min$ 。记录稳定状态下的功率、壁温及空气进出口温度。
多工况数据采集	通过调节闸板改变风速，每次调节后需等待系统重新稳定。工况间隔应覆盖流速范围 3~15 m/s。	每个工况下准确记录微压计动压读数（精度 0.1 Pa）、四组壁温（精度 0.1° C）及进出口气温。
数据复核与整理	完成所有工况后，随机抽检一个工况复测，验证数据重复性。确认数据完整性与合理性后方可结束。	现场整理数据表格，检查是否存在异常点，必要时在教师指导下补测。

## 4 教学效果评价与持续改进

### 4.1 多元评价体系的构建与实施

依赖于一个贯穿实验教学全过程且多主体参与的多元评价体系来评价教学效果，此体系旨在打破传统单一依赖实验报告分数的评价模式，把形成性评价与终结性评价有机结合以全面评估学生在知识、能力与素养方面的成长，评价主体包含教师、学生本人及其同组成员从而实现评价视角的多元化，其中教师主要基于明确的量化指标对学生的线上预习完成质量、线下操作规范性与实验报告水平进行评价，学生自评通过反思性问卷引导其审视自身在理论学习、动手能力及团队协作中的收获与不足<sup>[4]</sup>。

### 4.2 持续建设与服务计划

结合混合式教学模式活力源于其持续自我优化与更新机制而制定的系统化持续建设与服务计划，在硬件条件建设上，计划对现有实验台进行新一轮升级，重点为将现有的接触式热电偶测温系统更换为更精确的红外热像仪非接触测量系统并增加可编程逻辑控制器以实现风速与加热功率的精确程控，这将极大提升数据测量的自动化水平与实验效率并为开设更具研究性的综合设计性实验创造条件；在教学内容深化方面，持续挖掘课程蕴含的思政元素，如在分析换热效率时引入工业领域的节能案例，引导学生树立绿色制造与可持续发展的工程观并将这些案例以微视频形式纳入线上资源库<sup>[5]</sup>；在推动学生创新能力发展上，建立更为常态化的竞赛引导机制，鼓励将本实验的深化研究作为参加“全国大学生节能减排社会实践与科技竞赛”等学科竞赛的项目雏形

并为有兴趣的学生提供开放的实验室预约与指导服务。

## 5 结语

本文通过系统构建并实践应用于管外强迫对流换热实验的以学生为中心、整合虚拟仿真与实体操作、优化教学内容与评价体系且实践证明能显著激发学生学习主动性与探究兴趣、强化其工程实践能力、数据处理能力及创新思维的线上线下混合式教学模式，本文有效解决了传统实验教学中学时紧张、学生被动学习及创新能力培养不足的困境，且该研究不仅为传热学实验教学提供了可操作的实施路径与有效的评价方法，其构建理念与实践经验对于新工科背景下其他专业实验课程的改革也具有重要的借鉴意义和推广价值，有助于持续提升工程人才培养的质量。

## 参考文献

- [1] 张艳华,张威,陈晓敏.混合式教学模式在仪器分析课程中的实践与创新路径[J].福建轻纺,2025,(11):79-81+86.
- [2] 李沁霏,冯瑛亭,王培宇.基于OBE导向的产品手绘表现技法课程线上线下混合式教学模式研究[J].福建轻纺,2025,(11):95-98.
- [3] 刘晓斌,顾赵宇,吴其华,等.“随机信号分析与处理”课程线上线下混合式实验教学探索[J/OL].实验科学与技术,1-8[2025-11-17].
- [4] 王宇.基于辩证关系的影视艺术课程线上线下混合式教学探究——以长镜头和蒙太奇辩证关系为例[J].佳木斯大学社会科学学报,2025,43(11):186-188.
- [5] 胡银花,张伟.基于项目驱动的线上线下混合式教学改革探索——以“市场调查与预测”课程为例[J].西部素质教育,2025,11(21):137-140.