

微纳制造 - 界面流体 - 智能测量交叉实践教学体系构建与评价

荣婉婷, 徐 慧, 张 冰

湖州学院智能制造学院, 浙江 湖州

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年8月7日; 发布日期: 2026年8月18日

摘 要

面向新工科背景下智能制造、微纳系统与科学仪器复合人才培养需求, 针对传统工程课程中理论建模、工艺制造与测试评价相互割裂的问题, 本文依托“基于润湿阶跃的仿生超浸润微纳器件微摩擦阻力原位解耦与高速动态减阻机制”科研选题, 构建科研项目牵引的微纳制造 - 界面流体 - 智能测量交叉实践教学体系。该体系以真实科学问题为入口, 将“算明机理、做精器件、测准阻力”的科研逻辑转化为“问题导入、仿真预测、器件制造、原位测量、数据反馈”的项目制教学闭环, 并围绕相场/PINN多场耦合仿真、激光微纳加工与润湿阶跃构筑、双悬臂梁微摩擦原位测量三个模块重构教学内容。进一步建立OBE导向的多源评价证据链, 从知识理解、工程实践、科研能力、数据素养和协同反思五个维度评价学生学习产出。研究形成了可迁移的研究一体化教学实施范式, 可为地方高校依托前沿科研项目培养复合型工程创新人才提供参考。

关键词

研究一体化教学, 新工科, 微纳制造, 界面流体力学, 智能测量, OBE, AI for Science

Construction and Evaluation of an Interdisciplinary Practical Teaching System for Micro/Nano Fabrication, Interfacial Fluids, and Intelligent Measurement

Wanting Rong, Hui Xu, Bing Zhang

School of Intelligent Manufacturing, Huzhou College, Huzhou Zhejiang

Received: July 6, 2026; accepted: August 7, 2026; published: August 18, 2026

文章引用: 荣婉婷, 徐慧, 张冰. 微纳制造-界面流体-智能测量交叉实践教学体系构建与评价[J]. 教育进展, 2026, 16(8): 670-679. DOI: 10.12677/ae.2026.1681679

Abstract

To meet the growing demand for interdisciplinary talents in intelligent manufacturing, micro-nano systems, and scientific instruments under the Emerging Engineering Education (EEE) initiative, this study addresses the persistent pedagogical disconnect among theoretical modeling, manufacturing processes, and testing evaluation in traditional engineering curricula. Anchored in a frontier scientific project—“*In-situ* decoupling of micro-friction and high-speed dynamic drag reduction mechanisms of bionic superwetting micro-nano devices based on wetting steps”—we propose a research-driven, interdisciplinary practical teaching framework that seamlessly integrates micro-nano manufacturing, interfacial fluid dynamics, and intelligent measurement. Using authentic scientific problems as the entry point, the proposed system translates the rigorous research logic of “mechanism computation, device fabrication, and precise drag measurement” into a project-based, closed-loop pedagogical process encompassing problem formulation, simulation prediction, device manufacturing, *in-situ* measurement, and data feedback. The curriculum is structurally reorganized around three core modules: phase-field/Physics-Informed Neural Network (PINN) multi-physics simulation, laser micro-nano processing for wetting step construction, and dual-cantilever-based *in-situ* micro-friction measurement. Furthermore, an Outcomes-Based Education (OBE) oriented multi-source evaluation evidence chain is established to systematically assess student learning outcomes across five dimensions: knowledge comprehension, engineering practice, research capability, data literacy, and collaborative reflection. Ultimately, this study establishes a highly transferable paradigm for research-teaching integration, providing a robust reference for local universities to cultivate innovative, interdisciplinary engineering talents through cutting-edge scientific research projects.

Keywords

Research-Integrated Teaching, Emerging Engineering Education, Micro/Nano Fabrication, Interfacial Fluid Mechanics, Intelligent Measurement, OBE, AI for Science

Copyright © 2026 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

当前科技的快速发展推动工程教育从单一知识传授走向复杂工程问题解决能力培养。微纳制造、智能测量和界面流体控制等方向具有显著的跨尺度、跨学科和强实践特征,既需要学生理解连续介质力学、表界面物理和微纳加工原理,又需要具备传感器设计、信号处理和实验数据闭环验证能力。然而,在传统课程体系中,理论课程往往强调方程推导,制造课程偏重工艺流程,测试课程则多以标准仪器操作为主,三者之间缺乏由真实科学问题贯穿的系统性任务[1]-[4]。这种碎片化培养方式难以支撑学生形成面向前沿科学工具和复杂工程系统的整体判断。

科研项目是高水平工程教育的重要资源。尤其是青年教师承担的国家自然科学基金项目,通常兼具明确科学问题、可操作技术路线和开放式探索空间,适合转化为学生可参与、可评价、可迭代的项目制学习任务。申请人围绕仿生超浸润微纳器件高速动态减阻开展研究,核心问题包括强剪切流场下三相接触线动态钉扎机制、润湿阶跃微纳结构定向制备以及纳牛级微摩擦阻力原位解耦测量[5]-[7]。这一研究对象天然包含“理论建模-器件制造-仪器测试-数据反馈”的闭环结构,为构建跨学科实践教

学模式提供了典型案例。

基于此，本文提出科研项目牵引的微纳制造-界面流体-智能测量交叉实践教学体系。该体系并非简单地将科研内容压缩进课堂，而是将科研问题转译为课程目标、项目任务、实验模块和评价证据，形成从科学问题导入到工程实践产出的教学闭环。本文重点回答三个问题：其一，如何将前沿科研项目中的复杂科学问题转化为学生可学习的课程目标；其二，如何围绕仿真、制造和测量三类任务构建递进式项目制教学模块；其三，如何建立 OBE 导向的多源评价体系，客观刻画学生跨学科工程能力的形成过程。

2. 改革基础：从科研问题到教学问题的转化

本教学改革依托的科研问题可概括为：在高速流体冲刷下，传统超疏水微纳界面中 Cassie 气膜易发生失稳并向 Wenzel 态转变，导致减阻效果衰减；现有理论模型、制备工艺和微摩擦测量手段之间存在脱节，难以实现减阻机制的可计算、可制造和可验证。该科学问题具有鲜明的教学价值，因为它同时对应工程教育中的三类能力短板：学生难以把复杂界面现象抽象为可求解模型，难以理解工艺参数对结构与性能的耦合影响，也难以建立科学测量中的误差意识和证据链思维[6]-[10]。

为避免科研内容过深导致教学不可实施，课程设计采用“科研问题降阶转化”的原则。首先，将“润湿阶跃抑制三相接触线失稳”转化为可视化的边界条件设计问题，引导学生理解接触角滞后、界面滑移和气膜封存等核心概念。其次，将“微纳拓扑与表面能空间复合”转化为激光加工路径、粗糙度参数和接触角表征任务，使学生在真实工艺约束中理解设计与制造的关系。最后，将“纳牛级微摩擦原位解耦”转化为双悬臂梁测力、差分电容检测和数据标定任务，使学生掌握微弱信号测量的基本逻辑[11]-[16]。

转化后的教学目标包括四个层次：知识层面，学生能够解释仿生超浸润、三相接触线、相场模型和微力传感的基本原理；方法层面，学生能够建立简化多场耦合模型并完成参数扫描；实践层面，学生能够参与微纳样件设计、加工记录和表征分析；素养层面，学生能够基于原始数据进行误差分析、模型修正和工程反思。图 1 展示了科研问题向教学目标、项目任务和评价证据的转译路径，具体的科研问题与教学目标映射关系如表 1 所示。

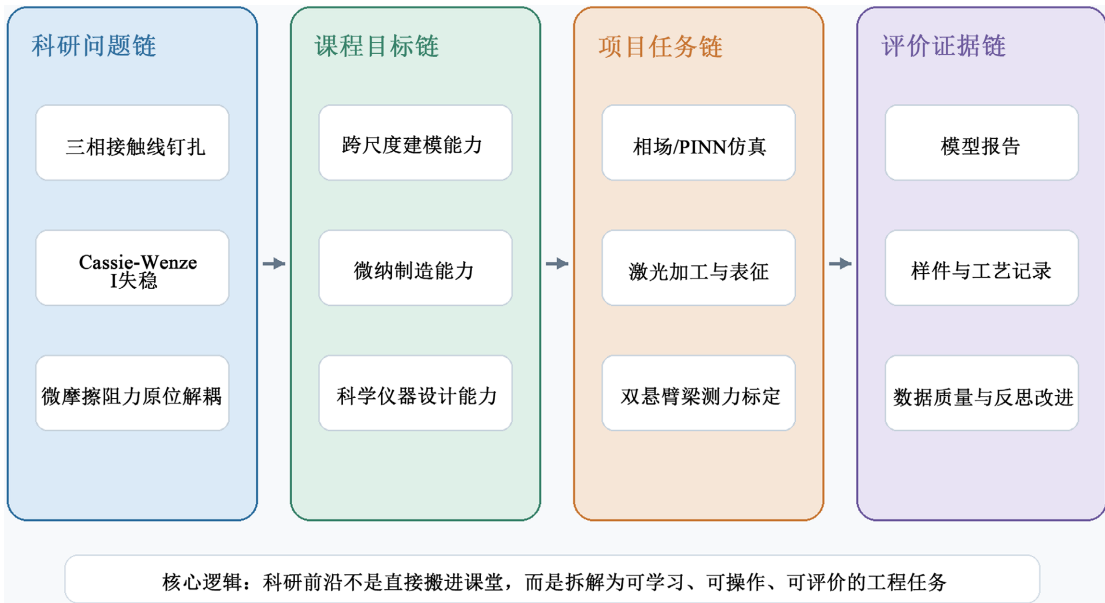


Figure 1. Transfer path of frontier research problems to teaching reform objectives

图 1. 国家自然科学基金前沿问题向教学改革目标的转译路径

Table 1. Mapping of research problems and teaching objectives
表 1. 科研问题与教学目标映射

科研问题	教学转化任务	对应课程目标	评价证据
三相接触线动态钉扎机制不清	建立简化相场模型并设置润湿边界	跨尺度建模与机理解释	模型报告、参数扫描、云图解释
微纳拓扑与浸润态缺乏定量映射	设计激光加工路径与润湿阶跃结构	工艺设计与结构性能关联分析	工艺记录、样件图像、接触角数据
纳牛级微摩擦难以原位解耦	构建双悬臂梁差分测量和标定流程	科学仪器设计与数据解耦	标定曲线、原始数据、误差预算
仿真、制造、测试相互割裂	开展数据反馈和模型修正	系统工程思维与科研表达	论文式报告、答辩、反思日志

3. 教学模式设计：三链融合的闭环项目制学习

本文构建的教学模式以“科学问题链 - 工程任务链 - 评价证据链”三链融合为基本框架。科学问题链强调从真实科研痛点出发，引导学生理解为什么要研究、关键矛盾在哪里以及现有方法的局限是什么。工程任务链强调把科学问题拆解为可实施的仿真、制造和测量任务，使学生在任务推进中形成跨学科协同能力。评价证据链强调将学习结果落实到可追溯材料，包括模型文件、加工参数、样件照片、测试数据、误差预算和反思日志。

具体实施中，课程采用“问题导入 - 仿真预测 - 器件制造 - 原位测量 - 数据反馈”的闭环结构。问题导入阶段通过基金摘要、代表性论文和失效案例激发学生提出假设；仿真预测阶段以二维简化模型和三维拓展模型训练学生建立边界条件与参数矩阵；器件制造阶段以激光加工和表面润湿调控为任务，要求学生将仿真输出转化为工艺方案；原位测量阶段引入微弱力学信号采集与差分解耦，使学生理解“测得准”是机制判断的前提；数据反馈阶段要求学生比较仿真预测与实验数据，完成模型修正和工程解释。图 2 给出了闭环教学模式。

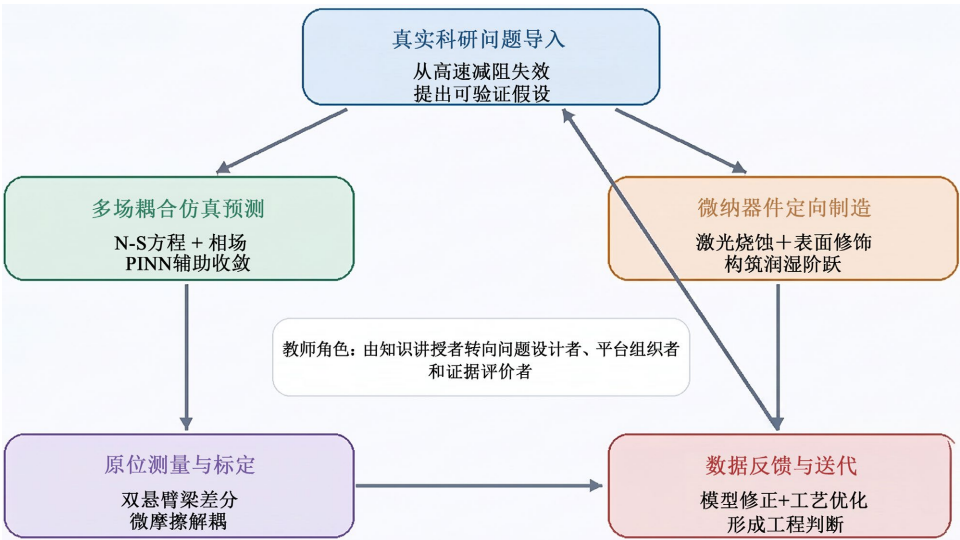


Figure 2. Closed-loop teaching model of “problem introduction, simulation prediction, device fabrication, *in-situ* measurement, and data feedback”

图 2. “问题导入 - 仿真预测 - 器件制造 - 原位测量 - 数据反馈” 闭环教学模式

该模式的关键不在于追求学生独立完成完整科研项目，而在于让学生经历科研问题的完整逻辑。对于低年级本科生，可弱化 PINN 和微纳加工细节，重点训练概念模型、文献阅读和数据解释；对于高年级本科生和研究生，可增加 COMSOL 建模、激光参数优化和传感器标定；对于创新实验班或毕业设计学生，可进一步引入原始数据处理和论文式报告写作，实现分层递进培养。

4. 教学内容重构与模块设计

围绕科研项目核心技术路线，课程内容被重构为三个模块：多场耦合仿真模块、微纳制造与表征模块、原位测量与数据解耦模块。三个模块既可独立嵌入“微纳制造技术”“测试技术基础”“流体力学”“智能制造综合实践”等课程，也可整合为 16 周项目制综合实践课程。并针对核心难点进行了细化的教学案例设计。这三个教学模块的核心任务与预期师生产生出如表 2 所示。

模块一为多场耦合仿真与 AI for Science。该模块以三相界面动态演化为任务情境，要求学生从物理现象出发，建立简化边界条件，理解 N-S 方程、相场方法、接触角边界和滑移长度等概念，引导学生理解物理约束与 AI 算法的融合。高阶任务可引入 PINN 或数据驱动代理模型，让学生理解 AI for Science 并不是简单套用算法，而是将物理约束嵌入模型训练过程。模块产出包括建模假设说明、参数扫描表、流场云图和模型局限反思。

具体教学案例设计：以 PINN (物理信息神经网络) 为例，设计预测特定润湿阶跃边界流场分布的简化教学案例。

输入输出设置：输入端为空间坐标 x, y 与时间 t ；输出端为速度场 u, v 与压力场 p 。

关键代码逻辑：引导学生构建包含数据损失(已知边界条件)和物理损失(N-S 方程残差)的联合损失函数，在 Python 环境下搭建专属的 PINN 前馈仿真基座。

评价要点：要求学生利用算法生成 PINN 理论预测曲线，并与传统相场云图进行对比，重点评估其物理一致性、收敛效率以及无网格求解的优势。

模块二为微纳制造与表征。该模块以润湿阶跃样件设计为任务，学生根据仿真输出设计微纳拓扑、亲疏水区域和激光加工路径。教学中强调工艺参数(如激光功率、扫描速度)并非孤立选择，而是与材料响应、表面粗糙度、接触角滞后和结构耐久性共同决定器件性能。学生需自主完成从几何构型设计、加工方案编制到表界面理化性质表征的完整研发流程，最终产出标准化加工任务书、多维形貌表征报告(工艺参数记录、SEM 或显微形貌图、接触角测试结果等)及极端工况下的结构失效分析。

具体教学案例设计：仿生各向异性润湿阶跃阵列的激光定向制造与表征。

拓扑结构设计与理论映射：任务操作：引导学生基于仿生学原理，利用 SolidWorks 或 AutoCAD 等工程软件设计具有交替分布特征的各向异性微米沟槽阵列，明确亲疏水区域的空间布局。理论支撑：要求学生运用 Cassie-Baxter 方程 $\cos \theta_{CB} = f_s (\cos \theta_y + 1) - 1$ 与 Wenzel 模型，理论推导微结构的脊宽、槽宽与深宽比，计算出理想固液接触面积分数 f_s ，从而在理论层面量化润湿阶跃的能量势垒。

激光工艺参数矩阵与加工窗口寻优：任务操作：在激光微纳加工平台上，指导学生采用控制变量法或正交实验法，设定不同的激光平均功率 P 、扫描速度 v 、脉冲重复频率与扫描间距。工程评价：引入线能量密度 $E = \frac{P}{v}$ 及有效光斑重叠率的概念，要求学生量化分析光-物质相互作用过程中的等离子体膨胀与热影响区(HAZ)演化规律，筛选出能稳定诱导“微米级沟槽-纳米级颗粒”复合分级结构的极佳工艺窗口。

多维形貌表征与表界面物理分析：微观形貌与精度观测：运用扫描电子显微镜(SEM)跨尺度观察样件的微纳分级特征；使用激光共聚焦三维轮廓仪提取表面粗糙度核心参数(如 S_a, S_q)并重构三维拓扑形貌。浸润性动态测量：在完成低表面能化学修饰后，使用光学接触角测量仪不仅测量静态表观接触角，更需采

用座滴法动态测量前进角 θ_a 与后退角 θ_r 。通过计算接触角滞后 $\Delta\theta = \theta_a - \theta_r$ ，客观评估润湿阶跃结构对三相接触线失稳钉扎的抑制效能。

结构失效分析与工艺闭环(数据反馈)：失效机理剖析：提供典型的不良加工样件，引导学生识别“热累积导致的微结构熔融坍塌”或“能量不足引发的纳米粗糙度缺失”等失效模式。闭环反思改进：要求学生将光学接触角测试中出现的异常浸润转变(如液滴自发由 Cassie 态向 Wenzel 态的不可逆穿透)与表面显微缺陷进行关联映射，反向修正加工任务书中的激光参数，形成严密的工程改进闭环。

模块三为原位测量与数据解耦。该模块以微摩擦阻力高保真测量为核心，引导学生理解微弱力信号容易被流体脉动、机械振动和温漂噪声淹没。通过双悬臂梁差分架构、锁相放大和标定曲线分析，学生学习如何建立测试系统、识别噪声来源、计算减阻率并进行误差传播分析。模块产出包括测量系统框图、标定曲线、原始数据包、滤波脚本和减阻率计算报告。

具体教学案例设计：要求学生依托极弱微摩擦原位解耦实验系统跨学科总体架构进行完整操作与数据剥离。

信号提取与识别：从流体冲刷环境中采集微弱的动态力学电信号，指导学生在时域和频域中识别 50 Hz 工频干扰、流体随机脉动噪声以及低频温度漂移。

数据解耦操作：引入 Origin 或 MATLAB 等工程软件，指导学生编写脚本进行数字滤波(如低通滤波平滑化处理)和双悬臂梁差分相敏解调，实现共模噪声的有效剔除。

定量评价与闭环：计算处理前后的信噪比(SNR)，要求学生构建包含系统误差与随机误差在内的完整误差预算表，将解耦后的摩擦力信号与理论减阻率进行比对，实现“测得准”的闭环。

三个模块与能力目标之间的关系如图 3 所示。其中，多场耦合仿真模块主要支撑数学建模和 AI 计算能力，微纳制造与表征模块主要支撑工艺设计和工程实践能力，原位测量与数据解耦模块主要支撑仪器测控、数据分析和工程反思能力。



Figure 3. Matrix of the three-module course system and student ability objectives
图 3. 三模块课程体系与学生能力目标矩阵

Table 2. Tasks and outputs of the three teaching modules
表 2. 三个教学模块的任务与产出

模块	核心任务	学生主要产出	教师支撑
多场耦合仿真	建立润湿阶跃边界条件，完成流场参数扫描	建模假设、仿真图、参数矩阵	提供简化案例、边界条件模板
微纳制造与表征	设计拓扑结构和激光加工方案，分析浸润状态	加工任务书、样件记录、形貌表征	开放平台、示范安全规范
原位测量与解耦	完成微摩擦标定、滤波和减阻率计算	标定曲线、数据包、误差分析	提供测量系统和数据处理脚本

5. 教学实施过程

课程建议面向智能制造、机械电子工程、测控技术与仪器、机械设计制造及其自动化等专业高年级本科生或研究生开设。班级规模以 24~40 人为宜，采用 4~5 人小组制。每组围绕同一科学问题选择不同的结构参数或测试方案，既保证任务可比较，又保留学生自主探索空间。课程周期可设置为 16 周，每周 2~4 学时，其中理论导入约占 20%，仿真与实验实践约占 50%，数据分析与答辩约占 30%。

实施流程如图 4 所示。第 1~2 周完成科研问题导入和文献批注，要求学生形成小组科学假设。第 3~5 周完成仿真建模和参数扫描，输出流场参数矩阵。第 6~8 周完成微纳样件和工艺方案设计，并在教师指导下参与加工或分析已有样件。第 9~11 周开展微力测试平台认知、标定实验和数据采集。第 12~14 周完成数据闭环分析，比较仿真结果与实验测量偏差。第 15~16 周进行小组答辩，提交论文式综合报告、数据包和反思日志。

为降低实施门槛，课程可采用“核心实验 + 开放任务”的组织方式。核心实验由教师提供标准化样件、简化模型和基准数据，确保所有学生能够完成基本训练；开放任务则允许学生改变结构间距、润湿区域、流速范围或滤波算法，形成差异化成果。对于设备条件不足的教学单位，可采用虚拟仿真、公开视频数据和教师预制样件替代部分加工环节，但必须保留数据分析和误差讨论，避免课程退化为演示性实验。

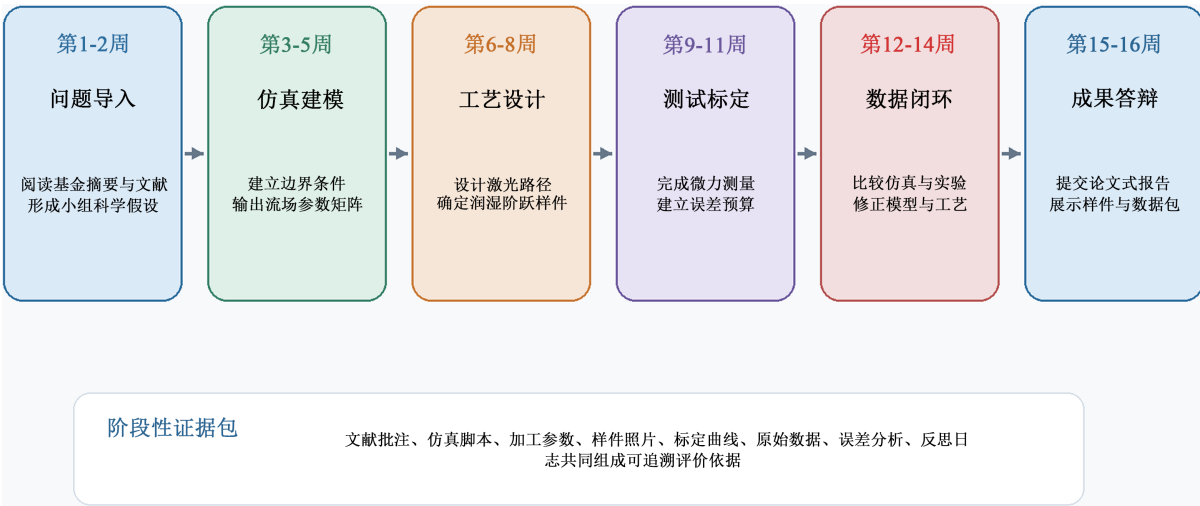


Figure 4. Implementation process and staged outputs of project-based teaching
图 4. 项目制教学实施流程与阶段产出

6. 教学评价体系

本改革采用 OBE 导向的多源评价体系，强调从“是否听懂”转向“能否解决问题并提供证据”。评价证据由五类材料构成：一是知识理解证据，包括前测后测、概念图和文献批注；二是工程实践证据，包括工艺方案、样件记录和表征结果；三是科研能力证据，包括科学假设、模型报告和论文式总结；四是数据素养证据，包括原始数据、标定曲线、滤波脚本和误差预算；五是协同反思证据，包括组内互评、学习日志和答辩表现。图 5 展示了多源评价证据链与持续改进机制。



Figure 5. OBE-oriented multi-source evaluation evidence chain and continuous improvement mechanism
图 5. OBE 导向的多源评价证据链与持续改进机制

建议课程总评采用形成性评价与终结性评价结合的方式。形成性评价占 60%，包括文献批注 10%、建模与仿真报告 15%、工艺与实验记录 15%、数据分析与误差预算 15%、学习日志 5%；终结性评价占 40%，包括论文式报告 25%和小组答辩 15%。为避免小组项目掩盖个体差异，可引入个人贡献说明和组内互评系数，对最终成绩进行适度修正，确保客观刻画学生跨学科能力的形成过程。具体的 OBE 评价指标、证据来源及建议权重如表 3 所示。

Table 3. OBE evaluation indicators and suggested weights
表 3. OBE 评价指标与建议权重

评价维度	评价内容	建议权重	证据来源
知识理解	核心概念、文献理解、科学假设	15%	前后测、文献批注、概念图
建模能力	方程、边界条件、参数扫描与解释	20%	仿真报告、模型文件
工程实践	工艺方案、样件质量、实验规范	20%	任务书、实验记录、样件照片
数据素养	标定、滤波、误差预算、可复现数据包	25%	原始数据、脚本、分析报告
表达协作	论文式写作、答辩、组内贡献	20%	综合报告、答辩、互评

7. 教学改革特色

第一，突出科研问题牵引。传统实验教学常以验证既有定律为目标，学生只需按步骤操作即可完成

任务。本文构建的教学体系以高速动态减阻失效这一真实科学问题为入口，使学生面对开放边界条件、复杂噪声和多目标优化，能够更接近真实科研与工程实践情境。

第二，突出跨学科闭环。课程不是简单罗列流体力学、微纳制造和测试技术知识点，而是以“仿真预测－制造实现－测量验证－数据反馈”的闭环组织内容。学生在同一项目中经历模型、样件、仪器和数据之间的往复迭代，有助于形成系统工程思维。

第三，突出科学工具意识。国家自然科学基金交叉学部 T05 科学工具领域强调原创工具、方法和关键器件的支撑作用。将微摩擦原位解耦工具转化为教学案例，能够引导学生理解仪器不是科研的附属环节，而是产生可靠科学结论的基础设施。这对于测控、机电和智能制造专业学生尤为重要。

第四，突出 AI for Science 的合理嵌入。课程不把人工智能作为孤立编程训练，而是围绕相场求解发散、参数扫描成本高和边界条件复杂等真实问题，引导学生理解物理约束、数据质量和模型可解释性，使 AI 教学从工具使用走向科学问题解决。

8. 实施条件与推广路径

本教学体系需要一定的计算、制造和测试平台支撑，但并不要求所有高校一次性具备完整科研设备。对于具备微纳加工和测试条件的学院，可开设完整项目制实践课程；对于设备条件有限的学院，可采用校际共享平台、教师预制样件和虚拟仿真实验结合的方式实施；对于研究生课程，可进一步提高建模、算法和原始数据分析比例，弱化标准化实验流程。

推广时建议遵循“三步走”路径。第一步，在已有课程中嵌入科研案例和小型任务，例如将润湿阶跃减阻作为流体力学或测试技术课程的综合作业。第二步，建设跨课程项目包，将仿真、加工和测量任务分散到不同课程但共用同一问题情境。第三步，形成独立的交叉实践课程或创新实验项目，建立标准化任务书、数据集、评价量规和安全规范，实现持续迭代。

考虑到不同教学单位的硬件平台差异，本教学体系采用分层级、模块化的推广实施模型，以增强方案的现实指导与落地意义，实施条件与推广路径(分层级实施模型)分别为：

A 级实施(针对设备齐全高校)：实现完整物理闭环

具备微纳加工中心与高精度流体力学原位测试平台的高校，可全面开设 16 周项目制实践课程。学生完整经历“理论仿真－激光实体制造－微观表征－极弱力学原位测量”的全流程，实现最高阶的跨学科工程能力培养。

B 级实施(针对部分设备高校)：采用“协同制造＋自主测试”模式

针对缺乏昂贵激光加工设备但具备测试仪器的的高校。前端模块可要求学生使用 SolidWorks/CAD 等软件完成三维结构与工艺图纸设计，交由外部科研平台或企业协作加工；校内教学重心则放在后端环节，重点开展基于实物样件的原位测量标定、仪器控制与测试数据解耦。

C 级实施(针对无相关设备高校)：聚焦“纯计算与开源验证”模块

对于缺乏高精度制造与测试硬件的院校，可剔除实体器件流转，聚焦于前沿理论计算与数据分析。依托物理信息神经网络开展仿真预测，并利用教师预先采集发布的“标准样件微摩擦公开数据集”，要求学生运用工程软件完成算法滤波、误差识别与数据拟合任务。这一模式成本极低，但同样能保障核心科研逻辑与数据素养的完整训练。

9. 结论

本文依托仿生超浸润微纳器件润湿阶跃动态减阻与微摩擦原位解耦科研项目，构建了科研项目牵引的微纳制造－界面流体－智能测量交叉实践教学体系。该体系将前沿科学问题转化为可学习、可操作、

可评价的项目任务,形成“问题导入-仿真预测-器件制造-原位测量-数据反馈”的闭环式教学模式,并建立 OBE 导向的多源评价证据链。

与传统单点实验教学相比,该体系更强调真实问题、跨学科协同和数据证据,能够促进学生从知识接受者转变为工程问题探索者。后续研究将结合实际课程运行数据,对学生学习成效、创新能力提升和课程目标达成度进行定量分析,并进一步比较不同任务难度、不同专业背景和不同教学组织方式对学习结果的影响。

基金项目

湖州学院校级教育教学改革研究项目:人工智能赋能《测试技术》教学改革探索与实践研究(hyjg202503);湖州学院校级一流本科课程建设项目:《测试技术》。

参考文献

- [1] Crawley, E.F., Malmqvist, J., Östlund, S. and Brodeur, D.R. (2007) Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach. Springer.
- [2] Biggs, J. and Tang, C. (2011) Teaching for Quality Learning at University. 4th Edition, Open University Press.
- [3] Kolb, D.A. (1984) Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development. Prentice-Hall.
- [4] Prince, M. (2004) Does Active Learning Work? A Review of the Research. *Journal of Engineering Education*, **93**, 223-231. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x>
- [5] Freeman, S., Eddy, S.L., McDonough, M., Smith, M.K., Okoroafor, N., Jordt, H., *et al.* (2014) Active Learning Increases Student Performance in Science, Engineering, and Mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111**, 8410-8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>
- [6] Felder, R.M. and Brent, R. (2003) Designing and Teaching Courses to Satisfy the ABET Engineering Criteria. *Journal of Engineering Education*, **92**, 7-25. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2003.tb00734.x>
- [7] Shulman, L.S. (2005) Signature Pedagogies in the Professions. *Daedalus*, **134**, 52-59. <https://doi.org/10.1162/0011526054622015>
- [8] National Academy of Engineering (2004) The Engineer of 2020: Visions of Engineering in the New Century. The National Academies Press.
- [9] ABET (2024) Criteria for Accrediting Engineering Programs, 2024-2025. ABET.
- [10] Rothstein, J.P. (2010) Slip on Superhydrophobic Surfaces. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **42**, 89-109. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145558>
- [11] Yue, P., Feng, J.J., Liu, C. and Shen, J. (2004) A Diffuse-Interface Method for Simulating Two-Phase Flows of Complex Fluids. *Journal of Fluid Mechanics*, **515**, 293-317. <https://doi.org/10.1017/s0022112004000370>
- [12] Naughton, J.W. and Sheplak, M. (2002) Modern Developments in Shear-Stress Measurement. *Progress in Aerospace Sciences*, **38**, 515-570. [https://doi.org/10.1016/s0376-0421\(02\)00031-3](https://doi.org/10.1016/s0376-0421(02)00031-3)
- [13] Wang, D., Sun, Q., Hokkanen, M.J., Zhang, C., Lin, F., Liu, Q., *et al.* (2020) Design of Robust Superhydrophobic Surfaces. *Nature*, **582**, 55-59. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2331-8>
- [14] Rong, W., Zhang, H., Mao, Z., Chen, L. and Liu, X. (2022) Improved Stable Drag Reduction of Controllable Laser-Patterned Superwetting Surfaces Containing Bioinspired Micro/nanostructured Arrays. *ACS Omega*, **7**, 2049-2063. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05507>
- [15] Rong, W., Zhang, H., Mao, Z., Chen, L. and Liu, X. (2021) Stable Drag Reduction of Anisotropic Superhydrophobic/hydrophilic Surfaces Containing Bioinspired Micro/Nanostructured Arrays by Laser Ablation. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **622**, Article 126712. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126712>
- [16] Rong, W., Zhang, H., Zhang, T., Mao, Z., Liu, X. and Song, K. (2020) Drag Reduction Using Lubricant-Impregnated Anisotropic Slippery Surfaces Inspired by Bionic Fish Scale Surfaces Containing Micro/Nanostructured Arrays. *Advanced Engineering Materials*, **23**, Article 2000821. <https://doi.org/10.1002/adem.202000821>