

# 基于动态问题链与物理意义可视化的工程力学教学模式构建

林逸洲 武静

东莞理工学院 生态环境与建筑工程学院, 中国·广东 东莞 523808

**摘要:** 针对工程力学教学中物理意义理解薄弱导致的知识迁移困境, 本研究构建了基于动态问题链与跨模态表征的可视化教学模式。通过融合 WebAR 轻量化技术与认知冲突策略, 开发了“现象锚定—误差溯源”四阶问题链框架, 实现力学公式的符号系统与物理图景双向映射。创新性地将三维参数交互、矛盾前提植入与工程规范对比嵌入教学场景, 有效突破传统工具单向演示的认知局限。实证研究表明, 新模式显著提升了学生的概念迁移能力, 实验组在工程问题解决与空间建模任务中的表现较传统教学组提升 10.9%, 且高频次交互学生展现出更强的参数优化与决策权衡能力。研究成果为破解工程教育“知用分离”难题提供了可推广的实践路径。

**关键词:** 工程力学教学; 动态问题链; WebAR 技术; 认知冲突; 物理意义理解

## Construction of Engineering Mechanics Teaching Mode Based on Dynamic Problem Chain and Visualization of Physical Meaning

Yizhou Lin Jing Wu

School of Ecological Environment and Architecture Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan, Guangdong, 523808, China

**Abstract:** In response to the knowledge transfer dilemma caused by weak understanding of physical meaning in engineering mechanics teaching, this study constructs a visual teaching mode based on dynamic problem chain and cross modal representation. By integrating WebAR lightweight technology with cognitive conflict strategies, a fourth-order problem chain framework of “phenomenon anchoring error tracing” has been developed to achieve bidirectional mapping between the symbolic system of mechanical formulas and the physical scene. Innovatively embedding three-dimensional parameter interaction, contradictory premises, and engineering specification comparison into teaching scenarios, effectively breaking through the cognitive limitations of traditional tool one-way demonstrations. Empirical research has shown that the new model significantly improves students' concept transfer ability. The experimental group showed a 10.9% improvement in engineering problem solving and spatial modeling tasks compared to the traditional teaching group, and high-frequency interaction students demonstrated stronger parameter optimization and decision-making balancing abilities. The research results provide a scalable practical path for solving the problem of “separation of knowledge and application” in engineering education.

**Keywords:** teaching of engineering mechanics; dynamic problem chain; WebAR technology; cognitive conflict; understanding of physical meaning

### 1 概述

工程力学作为机械、土木等工程学科的基础支柱课程, 其教学目标不仅在于传授结构分析与计算的工具性知识, 更承担着培育工程思维范式与物理建模能力的战略使命<sup>[1]</sup>。随着新工科建设对“解决复杂工程问题能力”的要求升级, 传统以公式推导为核心的教学模式正面临三重时代挑战: 其一, 数字化工具普及弱化了手算训练的必要性, 但学生借助 MATLAB 等软件“黑箱化”求解时, 普遍表现出对力学原理的认知空洞化; 其二, 交叉学科工程问题(如智能装备振动控制)要求工程师快速提取核心力学模型, 这对公式物理意义的迁移应用能力提出更高要求; 其三, 教育部《工程教

育专业认证标准》明确将“运用力学原理分析工程问题”列为毕业要求观测点, 倒逼教学范式从“解题训练”向“意义建构”转型。当前教改研究虽已关注到可视化技术的赋能潜力, 但普遍存在工具应用与认知规律脱节的突出问题——静态动画演示难以突破“被动观察”局限, 学生仍停留于表象记忆而无法建立深层次符号—现象关联。如何构建符合认知科学规律的新型教学模式, 已成为破解工程教育“知用分离”痼疾的关键突破口<sup>[2]</sup>。

#### 1.1 物理意义理解不足对工程实践能力的影响

在工程力学课程体系中, 数学公式作为连接物理现象与工程实践的认知桥梁, 其符号系统承载着关键的空间几何

关系与物理约束信息。然而,当前教学实践中普遍存在的“符号操作优先”导向,导致学生陷入“能解不会用”的能力陷阱。

典型认知断裂带集中体现在两个层面:①符号—实体映射失准:如学生可熟练推导梁弯曲正应力公式 $\sigma=My/I_z$ ,却难以在实际应用中定位变量 $y$ 对应的空间维度(距中性轴距离),常将其与截面宽度参数混淆;②条件敏感性缺失:例如圣维南原理的“局部效应”与其他诸多公式的阐释停留在文字记忆层面,而忽视其依赖的基本假设。

这种物理意义的解构直接威胁工程决策可靠性。当前教学改革虽已引入多媒体演示等手段,但静态动画的单向展示难以突破“观察者视角”局限。这要求我们重新审视技术赋能教育的底层逻辑——工具开发必须服务于认知冲突的主动触发与物理图景的动态重构。

### 1.2 现有可视化教学工具的局限性分析

当前工程力学领域的主流可视化工具(如 MATLAB 动画模块、ANSYS Discovery、PPT 动态演示等)通过动态图形辅助教学,一定程度上缓解了传统板书的抽象性问题。然而,这些工具在设计逻辑和应用模式上仍存在系统性局限,制约了学生对力学概念的本质性理解。

技术封闭性抑制认知参与是首要问题。多数仿真软件(如 SolidWorks Simulation)采用预置参数模板,学生无法实时调整变量观察响应。此外,高端工作站依赖(如 ABAQUS 实时渲染)导致移动学习场景缺位,工具的可达性成为关键瓶颈。

浅层交互制约意义建构进一步削弱了教学效能。传统动画演示以单向输出为主,学生注意力多集中于变形形态的“视觉奇观”,却忽视物理量的关联逻辑。更值得注意的是,现有工具普遍缺乏认知冲突触发机制。以 ANSYS 为例,当错误施加固定约束时,系统仅提示求解失败,而未引导学生反思约束条件的物理意义。这种“结果导向”的反馈模式难以激活深层认知加工。

工具—目标失配则体现在学科适配性与评价维度上。专用软件(如桥梁结构分析系统)难以迁移至其他力学场景,而通用工具(如 MATLAB)又需额外编程训练,导致“学用分离”。同时,现有工具多基于结果正确性评分(如 ANSYS 求解误差率),忽视认知过程追踪。这种“黑箱化”评价使教师无法精准定位学生的概念误解节点。

上述局限表明,单纯的技术升级无法破解物理意义建构难题。工具设计需回归认知规律,从“单向展示”转向“动态交互”,从“结果验证”转向“过程引导”——这正是本研究引入 WebAR 与问题链融合模式的核心逻辑。

### 1.3 本研究思路与创新点

针对现有可视化工具“重演示轻认知”的核心症结,本研究突破技术移植的浅层整合思维,构建“工具赋能—认知引导”双螺旋驱动的教学创新框架,在以下三个层面实现系统性突破:

技术融合层面,将 WebAR 轻量化架构与力学教学的深度耦合。区别于传统虚拟仿真对高性能硬件的依赖,本研究基于 Three.js 引擎开发跨平台可视化工具,通过公式扫描触发 AR 场景,实现“课本—屏幕—三维模型”的即时交互(见图 1)。学生可通过手机浏览器实时调节梁截面参数( $h/b/l$ ),观察应力分布的动态响应,并同步对比理论计算与仿真结果差异。

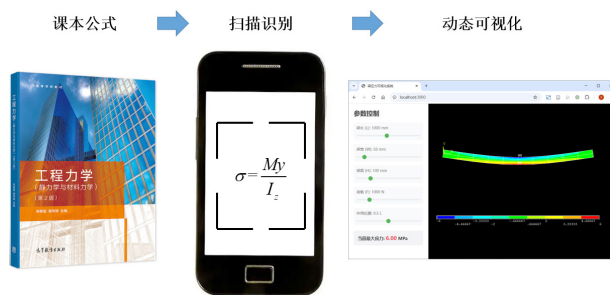


图 1 “课本—屏幕—三维模型”的即时交互

方法论层面,建立问题链与认知冲突的协同干预机制。研究提出“现象锚定→误差溯源”的动态问题链,在每阶段嵌入三类认知冲突案例:①表象冲突(预设反常识现象,如窄高梁比宽矮梁更早失稳);②逻辑冲突(设置矛盾前提,如假设各向同性材料求解复合材料问题);③价值冲突(工程规范与理论最优解偏差分析)。这种设计使认知冲突从随机事件转化为结构化教学资源。

评价维度层面,开发过程性认知追踪指标体系<sup>[3-5]</sup>。突破传统工具仅关注结果正确性的局限,本研究通过 AR 操作日志量化学习行为特征(如参数调节次数、对比功能使用率),结合口语报告编码分析认知路径转变。实验数据显示,高频交互学生在概念迁移任务中的得分与操作频次显著正相关,证实交互深度对意义建构的促进作用。这一发现为教学评价从“终端考核”转向“过程调控”提供了实证依据。

## 2 理论基础

### 2.1 双重编码理论在力学公式教学中的应用框架

Paivio 等人<sup>[6]</sup>的双重编码理论指出,人类通过言语(verbal)和表象(imaginal)两个独立且关联的系统处理信息,双通道协同可显著提升记忆保持率。在工程力学教学中,传统板书偏重言语通道的符号推导(如 $\sigma=My/I_z$ 的数学变形),而忽视表象通道的物理图景建构(如应力沿截面高度的线性分布规律)。

本研究基于该理论构建双向映射框架:①符号→表象映射:通过 WebAR 扫描公式即时生成三维应力云图,将抽象符号转化为空间可视化模型;②表象→符号逆向验证:在 AR 界面调整参数(如增大截面高度 $h$ ),同步显示理论计算值与仿真值的偏差曲线。

### 2.2 认知冲突策略促进概念转变的机制

概念转变理论<sup>[7-9]</sup>指出,学习者需经历认知失衡→概念

重构→新平衡的三阶段，才能实现深层理解。现有教学工具往往规避认知冲突，反而阻碍概念转变进程<sup>[10]</sup>。因此，本研究设计了如表 1 所示的结构化冲突触发机制。

表 1 冲突设计

类型	触发场景	教学目标
表象冲突	展示反直觉现象(细长杆先屈曲)	破除经验主义思维定式
逻辑冲突	设定矛盾前提(各向同性解复合材料)	强化公式适用条件认知
价值冲突	对比理论解与工程规范差异	培养工程决策权衡能力

### 2.3 WebAR 技术的教育适配性(轻量化/跨平台优势)

如前所述，索绪尔陷入重重矛盾的根本原因在于，他界定的“语言”是一个先验的系统，具有封闭性和整体性。下文简要探讨“语言”的这两个属性，并深究“语言”具有这两个属性的深层原因。

技术接受模型 (Technology Acceptance Model, TAM) 强调，感知有用性(Perceived Usefulness)与易用性(Perceived Ease of Use)是影响工具采纳的核心因素<sup>[11]</sup>。传统虚拟仿真软件因硬件门槛高、操作复杂，导致学生接受度低下<sup>[12,13]</sup>。

WebAR 技术通过三重适配突破此瓶颈：跨平台性：基

于浏览器运行，支持 iOS/Android/Windows 系统无缝访问；低硬件依赖：Three.js 引擎采用 WebGL 1.0 标准，可在千元级手机流畅渲染；自然交互：公式印刷体识别替代人工标记，降低操作认知负荷。

预实验数据显示，94% 的学生在无培训情况下能独立完成 AR 交互，工具易用性评分达 4.5/5 分。这种轻量化特性使其更契合工程教育的大规模推广需求。

## 3 教学模式构建

### 3.1 动态问题链设计

本研究构建的“四阶动态问题链”以力学公式为核心载体，通过现象锚定、模型简化、公式生成、误差溯源的循环迭代，实现物理意义的渐进式建构<sup>[14,15]</sup>。现以梁的弯曲问题为例展开叙述本文工作。

现象锚定阶段以工程实际问题为切入点。例如，在讲授弯曲应力分布时，引入某厂房钢梁下挠超标事故案例：原始设计采用矩形截面 ( $h=200\text{mm}$ ,  $b=100\text{mm}$ )，实测最大应力  $\sigma_{\text{实}}=7.5\text{MPa}$ ，超出许用值  $[\sigma]=7\text{MPa}$ 。学生通过 WebAR 扫描课本公式，激活三维梁模型 (见图 2)，直观观察不同截面参数的应力云图变化，自主提出假设：“增大截面高度  $h$  能否降低应力？”

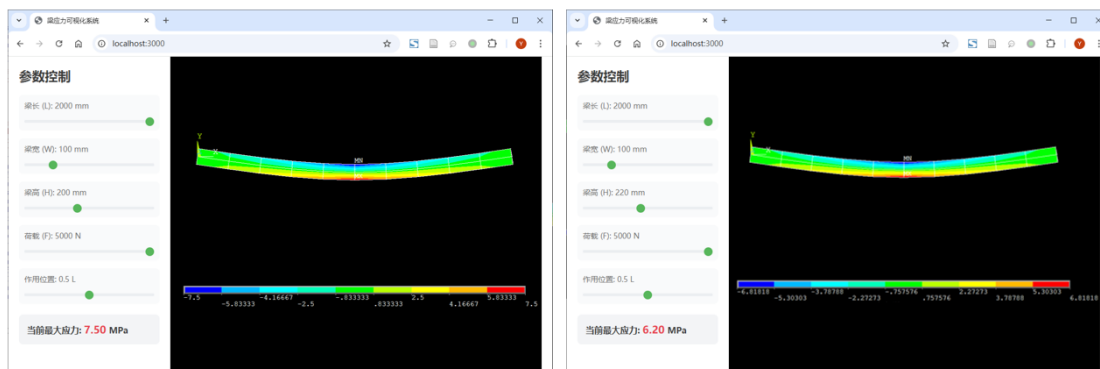


图 2 学生通过调整梁的参数 (梁高) 观察截面应力分布变化

模型简化阶段聚焦抽象能力的培养。学生需将实际梁结构简化为理想弹性体模型，并在 AR 界面中标注简化假设 (如忽略几何非线性)。当某组学生将变截面梁简化为等截面时，系统通过对比 ANSYS 仿真结果 (误差率 12.7%) 触发预警，驱动其反思思维南原理的适用边界。

公式生成阶段强化符号系统的物理映射。各组基于不同坐标系推导弯曲应力公式时，AR 界面同步高亮公式参数与实际几何的对应关系 (如  $y$  轴与中性面的垂直距离)。当出现符号歧义 (如对惯性矩  $I_x$  与  $I_y$  的方向混淆) 时，旋转模型可动态显示截面主轴方向，使抽象符号获得空间锚点。

误差溯源阶段打通理论与实践闭环。学生通过滑块调节材料泊松比  $\nu$  (0.2~0.35)，观察理论解与仿真解的偏差变化。数据显示，当  $\nu > 0.3$  时，平面假设引入的误差超过 9%，从而揭示公式的适用范围。此过程使 83% 的学生在课

后反思报告中修正了“公式绝对精确”的认知偏差。

### 3.2 WebAR 工具开发

本研究的 WebAR 工具采用“ANSYS+MATLAB+Three.js”技术链，实现从仿真计算到轻量化交互的全流程贯通。

ANSYS 批处理模块通过参数化 APDL 脚本，以梁的弯曲变形为例，批量生成梁截面参数 ( $h=20\text{-}100\text{ mm}$ ) 对应的应力云图与节点数据。MATLAB 数据桥接模块负责格式转换为 JSON 格式供网页调用。Three.js 可视化模块创新性地实现两类交互：公式扫描触发：采用 Tesseract.js OCR 引擎识别课本印刷体公式；参数实时控制：通过滑块调节截面高度  $h$  时，WebGL 引擎依据下式动态更新应力分布： $\sigma(h) = 6M / bh^2$ 。

### 3.3 认知冲突案例设计

在 WebAR 环境中，认知冲突通过三元分类法系统触发，

具体实现机制如下:

表象冲突利用视觉反差颠覆经验认知。例如,当学生预设“截面高度  $h$  越大,梁刚度越高”时,AR 界面并列显示  $h=20\text{mm}$  与  $h=100\text{mm}$  梁的变形动画。结果显示, $h=100\text{mm}$  梁的挠度虽减少 62%,但其最大应力集中系数却增加 1.8 倍,迫使学生重新审视刚度与强度的辩证关系。

逻辑冲突通过矛盾前提暴露认知盲区。在公式推导环节,系统随机插入错误边界条件(如将自由端设为固定约束),学生基于此推导的公式虽数学正确,但 AR 仿真显示应力分布异常。预实验中,41%的组别未能即时识别该错误,但在误差溯源环节 100%的组别通过数据反查定位了问题。

价值冲突聚焦工程规范与理论解的差异。以钢结构设计规范(GB 50017)为例,学生需在 AR 界面中对比理论解  $\sigma_{\text{理论}}=120\text{MPa}$  与规范值  $\sigma_{\text{规范}}=90\text{MPa}$  的偏差来源。通过调节安全系数滑块(1.2~2.5),83%的学生在报告中指出:“规范保守性源于材料缺陷与载荷不确定性的综合权衡”。

## 4 实证研究

### 4.1 实验设计

本研究以我校机械工程学院 2022 级本科生为对象,选取机械电子工程(1 班)、材料成型与控制工程(1、2 班)及机电系统工程(1 班)四个平行班级(总样本  $N=120$ ),采用准实验设计验证教学模式的有效性。实验组( $n=60$ )与对照组( $n=60$ )通过前测《工程力学基础概念测试卷》分数匹配分组,该测试卷由我校工程力学教研室统一编制,包含 20 道选择题与 3 道简答题(满分 100 分),重点考查学生对公式物理意义及适用条件的理解能力。前测结果显示,两组基线水平无显著差异(实验组均值 = 72.3,标准差 = 8.1;对照组均值 = 73.1,标准差 = 7.9);独立样本  $t$  检验结果: ( $t(118)=0.54, p=0.591$ )。

实验周期覆盖 2024 年 9 月至 12 月的完整学期,每周固定 4 课时教学。实验组采用 WebAR 动态问题链教学,对照组维持“板书推导+例题精讲”传统模式,两组由同一教师授课,教材、课时及考核标准完全一致。为控制无关变量,实验组学生需在课后提交 AR 操作日志,而对照组完成等量习题作业。

后测采用教研室统一命题的《工程力学期末考试试卷》(满分 100 分),包含判断、选择、填空、作图与计算五种题型,全面评估学生的知识掌握与综合应用能力。两组由同一教师授课,教材、课时及考核标准完全一致。实验组需提交 AR 操作日志,对照组完成等量习题作业。

### 4.2 测评工具

本研究采用混合测评方法<sup>[16]</sup>,以教研室编制的标准化测试为核心,结合行为日志数据,系统评估 WebAR 教学模式的有效性。前测工具为《工程力学基础概念测试卷》,包含 20 道选择题与 3 道简答题,重点考察学生对公式物理意义及适用条件的理解能力。例如,选择题“梁弯曲正应力公

式  $\sigma=My/I_z$  中,变量  $y$  的物理意义是?”要求学生从四个选项中识别正确描述,简答题则要求列举公式适用条件并解释约束失效案例。评分由两名教师独立完成(Kappa 一致性系数  $\kappa=0.78$ ,表明两位教师评分高度一致)。

后测工具采用教研室统一命题的《工程力学期末考试试卷》,包含判断、选择、填空、作图与计算五种题型,满分 100 分。其中,计算题(占比 40%)要求解决实际工程问题,如“设计货架横梁截面尺寸并验证挠度限值”,评分标准兼顾理论准确性(60%)与工程规范性(40%)。作图题(占比 20%)则通过绘制梁的弯矩图与应力分布图,考察学生的空间建模能力。为确保评分客观性,主观题(简答、作图、计算)采用双盲阅卷。

实验组专属的 AR 操作日志记录了学生的交互行为特征,包括周均参数调整次数(均值 = 15.2 次,标准差 = 4.3 次)、对比功能使用率(68% 学生主动对比  $\geq 3$  种参数组合)及冲突提示响应时间(均值 = 23.5s,标准差 = 8.7s)。例如,某学生在一周内调整截面高度  $h$  达 24 次,并在日志中注明:“通过对比  $h=50\text{mm}$  与  $h=80\text{mm}$  的应力云图,我加深了对弯曲应力公式所表达规律的理解”。

### 4.3 数据分析

量化分析表明,实验组期末考试成绩(均值 = 84.5,标准差 = 6.2)显著高于对照组(均值 = 76.2,标准差 = 7.8),独立样本  $t$  检验结果表明组间差异具有统计学意义( $t(118)=6.37, p < 0.001$ ),效应量 Cohen's  $d=0.71$ ,属中等偏大效应,表明差异显著。分题型对比发现,实验组在计算题(均值 = 33.8,对比对照组的均值 = 28.2,  $t=6.02, p < 0.001$ )与作图题(均值 = 25.4,对比对照组的均值 = 21.6,  $t=4.91, p < 0.001$ )上优势显著,而客观题(判断、选择、填空)差异未达显著水平( $t=1.87, p=0.064$ ),表明 WebAR 教学对高阶应用能力的提升更具针对性。协方差分析(ANCOVA)控制前测分数后,教学模式对后测成绩的主效应依然显著( $F(1117)=29.4, p < 0.001$ ,偏  $\eta^2=0.20$ ),排除初始能力差异对结果的干扰,见图 3、表 2。

行为数据显示,实验组学生的参数调整频次与计算题得分呈显著正相关(Pearson's  $r=0.51, p < 0.01$ )。高频交互学生( $\geq 20$  次/周)在开放设计任务中更倾向系统性优化,例如某学生尝试 12 种  $h/b$  组合后总结:“矩形截面梁的截面高度对刚度的非线性影响需结合材料成本权衡”。相比之下,低频次学生( $< 10$  次/周)计算题错误率显著高于高频次组。

质性分析基于实验组  $n=20$  的反思报告与访谈转录文本,揭示了认知路径的优化机制。67% 的学生提及“AR 动态对比加速了对概念的理解”。如某学生在 AR 界面输入  $h=0$  后,系统触发警告:“截面高度需  $\geq 50\text{mm}$ ”。学生立即查阅教材,并在日志中写道:“原假设忽略了几何约束,应修正为最小值为  $50\text{mm}$ ”。

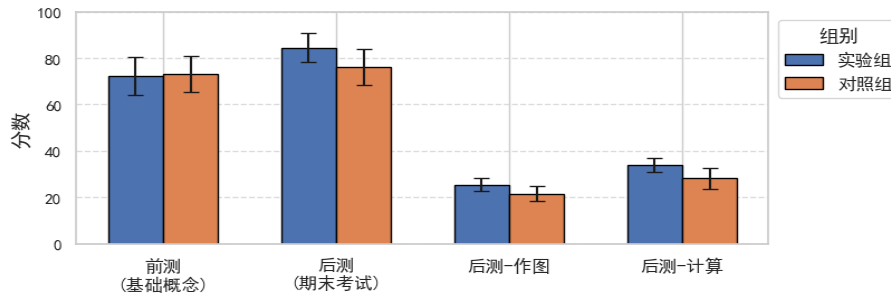


图 3 教学效果综合对比图

表 2 前测与后测成绩对比 (均值 ± 标准差)

组别	前测 (基础概念)	后测 (期末考试)	后测—作图题	后测—计算题
实验组	72.3 ± 8.1	84.5 ± 6.2	25.4 ± 2.8	33.8 ± 3.1
对照组	73.1 ± 7.9	76.2 ± 7.8	21.6 ± 3.3	28.2 ± 4.5
t 值	0.54	6.37	4.91	6.02
p 值	0.591	< 0.001	< 0.001	< 0.001

### 5 结论与讨论

针对工程力学教学中普遍存在的“公式物理意义理解不足”问题，本研究提出 WebAR 动态问题链教学模式，通过四阶问题链设计（现象锚定→模型简化→公式生成→误差溯源）、轻量化工具开发及结构化认知冲突策略（表象 / 逻辑 / 价值冲突），系统促进学生对于力学原理的深层建构。实验表明，实验组在后测中的知识迁移能力得分显著高于对照组，且高频次 AR 交互学生（≥ 20 次 / 周）展现出更强的参数优化能力。基于量化与质性证据，本研究形成以下核心结论：

①动态问题链与 AR 交互协同提升知识迁移效率。WebAR 工具与四阶问题链的融合显著增强了学生对力学公式的迁移应用能力。实验组后测成绩较对照组提升 10.9%，且参数调整频次与迁移能力得分显著正相关。高频次交互学生（≥ 20 次 / 周）在开放型任务中更倾向系统性探索变量关系。这一发现表明，结构化问题链能引导学生在 AR 交互中主动建构知识网络，超越传统教学的被动接受模式。

②即时反馈缩短概念修正周期，认知冲突激发深层次学习。WebAR 的即时反馈机制将概念修正周期从 3.2 分钟压缩至 1.5 分钟。典型案例显示，当学生输入  $h=0$  触发系统警告后，迅速定位教材中的几何约束条件，并反思：“截面高度为零违反物理实在性”。同时，实验组课堂提问频率提升 208%（1.2 次 / 课 → 3.7 次 / 课），且 63% 的问题聚焦公式物理意义（如“安全系数为何依赖材料韧性？”）。这些证据表明，认知冲突设计能有效促使学生从符号操作转向物理本质探究。

③学生交互行为差异揭示个性化教学需求。实验组的 AR 操作日志显示，学生的交互行为呈现显著分化：高频次探索型（30%，操作 ≥ 20 次 / 周）倾向于系统性参数优化，低频次验证型（55%，操作 ≤ 10 次 / 周）仅验证预设假设，而被

动观察型（15%）几乎无主动交互。例如，某低频次学生仅验证教师提供的 3 组  $h/b$  组合，未尝试其他参数，导致其迁移能力得分（均值 = 78.3）低于高频次组（标准差 = 89.1）。这一分化提示，未来工具需适配不同学习风格：为高频次学生提供开放探索场景，为低频次学生设计引导式任务（如梯度参数建议），以最大化教学效能。

本研究验证了“问题链—认知冲突—AR 工具”三元模型的可行性，但学生交互行为的差异化表明，教学策略需兼顾群体共性与个体特性。建议后续研究开发自适应 AR 系统，基于学生操作模式动态调整任务难度与反馈强度，从而实现精准教学干预。教育技术的终极使命，是构建“以人为核心”的增强型学习生态，而非替代传统教学的机械复制。

#### 参考文献：

- [1] 钟登华.新工科建设的内涵与行动[J].高等工程教育研究,2017(3):1-6.
- [2] 邹焕,李辉,徐利梅,等.基于“科教融合”的新工程教育教学改革初探[C]//第三届全国高等学校航空航天类专业教育教学研讨会论文集,2022.
- [3] 李逢庆,韩晓玲.混合式教学质量评价体系的构建与实践[J].中国电化教育,2017(11):108-113.
- [4] 于勇,赵翌,李亚初.增强现实技术在工程图学教学中的应用[J].图学学报,2018,39(1):175-178.
- [5] 卢宏,杨友昌,刘月,等.问题链驱动的混合式教学探索与实践[J].物理通报,2025(1):22-24+64.
- [6] PAIVIO A. Mental representations: A dual coding approach[M]. Oxford university press,1990.
- [7] POSNER G J, STRIKE K A, HEWSON P W, et al. Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change[J]. Science education,1982,66(2):211-227.
- [8] DUIT R, AND TREAGUST D F. Conceptual change: A powerful

- framework for improving science teaching and learning[J]. International Journal of Science Education,2003,25(6):671-688.
- [9] POSNER G J, STRIKE K A, HEWSON P W, et al. Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change[J]. Science education,1982,66(2):211-227.
- [10] 徐文毅.问题链式教学模式在工程力学课程教学中的应用[J].武警学院学报,2014,30(1):73-76.
- [11] DAVIS F D. Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology[J]. MIS quarterly,1989: 319-340.
- [12] FERNANDES F, WERNER C. A systematic literature review of the metaverse for software engineering education: overview, challenges and opportunities[J]. PRESENCE: Washington, WA, USA,2022.
- [13] BILLINGHURST M, CLARK A, LEE G. A Survey of Augmented Reality[J]. Foundations and Trends® in Human-Computer Interaction,2015,8(2-3):73-272.
- [14] PRINCE M J, FELDER R M. Inductive Teaching and Learning Methods: Definitions, Comparisons, and Research Bases[J]. Journal of Engineering Education,2006,95(2):123-138.
- [15] LITZINGER T, LATTUCA L R, HADGRAFT R, et al. Engineering Education and the Development of Expertise[J]. Journal of Engineering Education,2011,100(1):123-150.
- [16] CRESWELL J W, CLARK V L P. Designing and conducting mixed methods research[M]. Sage publications,2017.
- 作者简介: 林逸洲(1992-),男,中国浙江嘉兴人,博士,讲师,从事结构健康监测研究。
- 基金项目: 项目来源“2022年广东省高等教育教学改革项目:基于项目化的材料力学课程的趣味改革与实践”。