

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2026.03.019

欢迎按以下格式引用:冯德成,徐积刚.机器学习赋能的混凝土结构基本原理教学探索与实践[J].高等建筑教育,2026,35(3):159-165.

机器学习赋能的混凝土结构基本原理教学探索与实践

冯德成¹, 徐积刚²

(1.东南大学 土木工程学院,江苏 南京 211189;2.南京工业大学 土木工程学院,江苏 南京 211816)

摘要:混凝土结构基本原理课程教学长期面临知识体系陈旧、教学方法固化、理论与实践脱节等教学痛点,学生学习效率低下且容易丧失兴趣。将机器学习与混凝土教学深度融合,构建四阶融合的教学新路径:预测建模,构建输入参数与力学响应的非线性映射,突破传统公式的桎梏;解释分析,通过可解释机器学习模型量化变量贡献度,将经验系数转化为物理逻辑的直观表达;规律发现,利用符号回归挖掘兼具精度与可解释性的数学公式,还原科学规律的探索过程;智能设计,基于遗传算法生成多目标均衡方案,实现从人工试错法到智能寻优的跨越。新的教学路径以数据思维重塑知识学习模式,实现从静态规范公式到动态可更新模型;重构教学方法论,实现从单向讲授到师生交互探索;升级能力评价体系,实现从结果考核到过程追踪,最终推动学生从“公式应用者”成为“规律发现者”,为新工科背景下复合型人才培养提供新的思路。

关键词:土木工程教学;混凝土结构基本原理;机器学习。

中图分类号:G642.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2026)03-0159-07

土木工程教育正经历新工科转型的深刻变革,智能建造与数字化技术的快速发展对传统课程体系提出了更高要求^[1-3]。作为土木工程的核心课程,混凝土结构基本原理中部分教学内容难以依赖非常严密的理论推导,只能长期依赖基于小样本试验的经验公式,教学内容滞后于新技术、新方法的发展。例如,现行教材中的承载力计算公式多形成于20世纪,其经验性系数(如抗剪公式中的修正项)的物理意义逐渐模糊,参数间的复杂耦合关系缺乏系统解析。这种“重应用、轻机理”的教学模式,导致学生在面对新材料、新结构时往往机械套用规范,难以灵活应对工程实际中的复杂问题。

传统混凝土教学的局限性在于理论与实践工程的分裂^[4-5]。在理论层面,平截面假定、等效矩形应力图等经典模型高度简化了材料的非线性行为,难以精准描述高性能混凝土、纤维增强复合材料等新型材料的力学行为。在实践层面,配筋设计仍然依赖“试错法”,效率低下。规范公式的“黑

修回日期:2025-03-09

基金项目:东南大学教学改革与研究实践项目(2023-087)

作者简介:冯德成,教授,博士,主要从事混凝土结构损伤分析、评估与智能计算研究,(E-mail)dcfeng@seu.edu.cn。

箱化”表述(如裂缝计算中的经验系数)容易引起学生歧义。这种矛盾在实际教学中尤为突出:一方面,学生能熟练计算配筋量却无法解释公式中参数的物理意义;另一方面,面对实际工程中的复杂问题(如特殊荷载组合、复杂截面),往往缺乏自主建模与优化的能力。

机器学习专门研究计算机怎样模拟或实现人类的学习行为,以获取新的知识或技能,重新组织已有的知识结构使之不断改善自身的性能。机器学习技术的兴起为混凝土教学革新提供了全新视角^[6]。其核心价值在于通过数据驱动与物理机理的融合,实现“预测精度提升—设计效率优化—机理解释增强”的闭环。例如,神经网络可建立混凝土强度、配筋参数与承载力的非线性映射,显著改善传统公式在高性能材料中的适用性;遗传算法能快速生成满足复杂约束的配筋方案,突破人工试算的效率瓶颈;SHAP(SHapley Additive exPlanations)等可解释性技术则可量化参数贡献度^[6],揭示经验系数背后的隐藏规律。这种“数据—物理”双驱动模式,不仅契合新工科对“复杂问题解决能力”的培养要求,更推动混凝土教学从“经验传承”向“机理探索”转型。

本文聚焦机器学习与混凝土教学的深度融合,旨在解决三大核心问题:如何重构“理论—数据”协同的教学框架?如何更新混凝土基础模块(正截面、斜截面、裂缝控制)的知识体系?如何通过人工智能技术提升学生的自主创新设计能力?通过开发参数敏感性可视化工具、搭建虚实融合实验平台、建立开源教学数据库,探索一条“以数据思维重塑工程认知”的教学路径,以期为课程升级提供技术方案,为土木专业课程智能化教学提供可复制的新范式。

一、机器学习与传统混凝土教学的融合路径

混凝土结构基本原理的教学改革,需突破传统教学“知识传递—公式应用”的简单线性模式,构建“数据感知—机理解构—智能设计”的认知闭环。机器学习凭借其数据驱动、非线性建模、特征自学习与智能优化的核心优势,为混凝土课程革新提供了全新的技术范式。与传统经验方法相比,其优势在于:通过海量数据挖掘隐性规律,突破人为假设的局限;借助先进算法解析复杂参数耦合关系,实现高维问题的降维表述;依托可解释性工具穿透“黑箱”,建立物理逻辑与数据规律的桥梁。这些特性与混凝土教学的痛点高度契合——从承载力预测的精度提升到配筋设计的效率优化,从经验系数的机理解释到规范公式的动态验证,机器学习正推动工程教育从“经验依赖”向“数理融合”转型。具体而言,机器学习通过预测建模、解释分析、规律发现、智能设计四阶融合,重构了知识生产与应用范式,其核心在于将工程经验转化为可计算、可迭代、可验证的数字化逻辑。

(一) 预测建模:重构力学响应认知

传统教学以规范公式为终点,其局限性在于对材料非线性、尺寸效应等复杂因素过度简化和假设。机器学习通过建立“输入参数—力学响应”的非线性映射,突破经验公式的桎梏。区别于手工推导的显式方程,神经网络等算法可隐式捕捉变量间的耦合效应,例如混凝土强度与配筋率的交互影响、荷载历史对裂缝发展的累积作用。这种“从数据中学习规律”的过程,使学生直面工程问题的复杂性,理解模型构建的本质是平衡精度与可解释性,而非被动接受既定公式。预测建模的教育价值在于培养“数据驱动思维”,引导学习者从“已知公式应用者”转向“未知规律探索者”。

(二) 解释分析:穿透经验“黑箱”

规范公式中的经验系数长期处于“知其存在,不明其理”的认知盲区。可解释性技术通过量化参数贡献度,将“黑箱”系数转化为物理逻辑的可视化。例如,全局特征重要性排序揭示核心变量的主导作用,局部依赖图刻画单参数对输出的非线性影响,交互效应热力图揭示变量间的隐性耦合。这种“参数敏感性透视”使学生穿透公式表象,理解系数本质是多重因素统计权衡的结果。可解释

性教学的关键在于建立“公式—机理”的双向映射,将“记忆系数”提升至“解构系数”,从而破除对规范条文的机械性依赖。

(三) 规律发现:连接数据与物理

传统公式严重依赖人工假设与统计回归,难以捕捉参数间的复杂非线性关系。符号回归技术通过遗传规划等算法,从海量数据中自动挖掘兼具精度与可解释性的显式表达式。其核心在于以数学运算符为基因库,通过进化算法筛选最优公式结构,最终输出符合物理意义的符号方程。这一过程模拟了科学规律的发现路径:从现象观测提出假设,通过数据验证迭代修正,最终凝练为普适性公式。显式规律发现的教育意义在于还原知识生产的过程,使学生体验“从数据到公式”的完整科学过程,培养其从复杂物理现象中抽象本质规律的数学建模能力。

(四) 智能设计:突破经验试错桎梏

传统配筋设计依赖人工试算,效率低且易陷入局部最优陷阱。智能优化算法通过模拟自然进化或群体智能,在多维约束空间中实现全局寻优。其核心是将设计问题转化为目标函数与约束条件的数学表达,通过迭代搜索生成帕累托最优解集。相较于“试错法”的单解输出,优化算法可提供多组等效方案,揭示设计变量的替代性与经济性权衡。这种教学转向的价值在于培养“系统思维”,即学生需定义优化目标、设定约束边界、评估方案鲁棒性,从而理解工程设计的本质是多目标协同下的理性决策。



图1 四阶融合教学路径逻辑关系图

四阶融合路径:一是预测建模,构建输入参数与力学响应的非线性映射,突破传统公式的线性桎梏;二是解释分析,通过SHAP值量化变量贡献度,将“黑箱”系数转化为物理逻辑的可视化表达;三是规律发现,利用符号回归挖掘兼具精度与可解释性的数学公式,还原科学规律的探索过程;四是智能设计,通过遗传算法生成多目标均衡方案,实现从试错法到智能寻优的跨越。该融合路径以数据思维重塑知识生产模式(从静态规范到动态模型)、重构教学方法论(从单向讲授到交互探索)、升级能力评价体系(从结果考核到过程追踪),最终推动学生从“公式应用者”蜕变为“规律发现者”,为新工科背景下复合型人才培养提供系统性解决方案。

二、机器学习赋能的课程改革设计

通过上述四阶融合路径,以“数据—物理”融合为内核,重建混凝土结构基本原理的知识产生、传递与验证全流程。这种重构并非对传统内容的颠覆,而是通过机器学习技术赋予经典理论动态

生命力,在保留学科本质的同时,回应智能建造的时代需求。具体而言,可从知识体系、教学方法、实验平台和能力评价四方面展开。

(一) 知识体系:从静态公式到动态模型

传统知识体系以规范公式为终点,其固定范式难以适应新材料、新工艺的涌现。机器学习通过数据驱动,赋予理论模型动态进化能力。例如,在正截面受弯知识模块中,符号回归技术从高强混凝土试验数据中挖掘出塑性系数 α_1 随强度等级递减的修正关系,使学生理解规范公式的适用范围;在斜截面受剪知识模块,SHAP值分析揭示剪跨比对箍筋贡献度的非线性衰减规律,将经验系数转化为可验证的物理逻辑。这种“动态知识库”使学生认知到工程模型的本质是精度与简化的辩证平衡。

知识体系的重构还体现在对既有理论的动态验证。例如,通过数千组混凝土梁的受剪试验数据训练模型,自动识别规范公式在纤维混凝土中的失效阈值,当输入参数超出传统材料范围时,系统自动预警并推荐修正策略。这种动态反馈机制,使知识体系从“被动接受”转向“主动进化”,为新材料的工程应用提供理论预演。

(二) 教学方法:从单向讲授到交互探索

教学工具的重建聚焦于将复杂难懂隐性逻辑进行直观线性表达。交互式学习平台可将抽象机理转化为可操作的探索过程:学生拖拽配筋率参数滑块,实时观测承载力曲面的非线性变化,梯度热力图直观揭示少筋破坏与超筋破坏的临界阈值;虚实融合实验架起物理与数字的桥梁——真实梁体加载试验捕捉裂缝萌生规律,LSTM模型预测长期荷载下的时变响应。例如,学生通过对比实验室测量与AI预测的裂缝发展路径,发现湿度对裂缝宽度的累积效应,从而理解规范公式中经验系数 ψ 受环境条件影响的背后逻辑。

教学方法创新还体现在问题导向的设计挑战中。例如,设定“最小成本满足目标承载力”的开放任务,学生需定义优化变量、约束条件与目标函数,利用遗传算法生成多组帕累托最优解。通过对比不同方案的经济性与安全性,帮助学生理解工程设计的本质就是多元目标的权衡博弈,而非单一公式的机械套用。

(三) 实验平台:从封闭验证到开放创新

实验教学突破物理设备的时空限制,构建“真实—虚拟—数据”三位一体的研究生态。开源数据库整合了大量的全球混凝土试验数据,学生可自主清洗特征、训练模型、验证假设。例如,通过300组梁受剪数据验证规范公式的适用范围,使“不可能的实验”成为“可计算的现实”。相关算法平台封装机器学习工具,通过低代码界面引导学生关注问题定义而非编程实现,例如,利用遗传算法优化预应力筋布置方案,培养复杂情境下的决策能力。

实验平台的升级更强调跨学科协作。例如,混凝土裂缝预测模型与建筑信息模型(BIM)集成^[7],学生可直观观察裂缝发展对结构整体性能的影响;耐久性分析与环境传感器数据联动,建立温湿度—碳化深度—钢筋锈蚀的关联模型。这种多维度融合,使实验教学从单一力学分析拓展至全生命周期性能评估。

(四) 能力评价:从结果考核到过程追踪

传统考核聚焦计算准确性,新的评价体系覆盖四维能力图谱:模型构建效率反映数据到规律的转化能力;机理解释深度检验物理本质的洞察水平;建模准确性体现学生数理思维能力;设计方案多样性彰显创新思维的应用潜力。例如,在裂缝控制模块考核中,学生需提交从监测数据清洗到时变曲线预测的全流程报告,教师通过可解释性工具追溯其逻辑链,评估是否实现“数据驱动”与“物理约束”的有机统一。如,通过课程设计,让学生利用SHAP值发现某桥梁裂缝异常增长与氯离子浓

度的强关联,进而提出针对性防护方案,以培养学生的数据思维与工程直觉深度融合的能力。

能力评价的改革还体现在动态追踪与反馈机制中。学习平台自动记录学生的模型迭代过程、参数调优路径与方案生成逻辑,生成个性化的能力发展雷达图。教师可通过可视化仪表盘识别学生的思维盲区(如过度依赖数据忽略物理约束),并推送针对性训练模块。这种“评价—反馈—提升”的闭环,使教学从标准化考核转向个性化培养。

三、教学实践与效果验证

斜截面受剪承载力的教学长期面临“公式‘黑箱’化、设计低效化”的双重困境^[8-9]。传统课堂中,学生虽能背诵规范公式 $V_u = 0.7f_tbh_0 + 1.25f_{yv}A_{sv}h_0/s$,但对 1.25 修正系数的物理意义一头雾水,配筋设计更是陷入“试错法”泥潭——人工调整箍筋直径与间距需反复验算,平均耗时超 20 分钟且难保方案最优。更棘手的是,剪跨比 λ 对破坏模式的影响仅停留于“ λ 越大承载力越低”的定性描述,学生无法量化其非线性衰减规律。这些痛点折射出传统教学“重应用、轻机理”的深层矛盾。

机器学习技术的介入,为破解这一困局提供了新的解决方案^[6,10]。以 327 组深梁受剪试验数据为基础,XGBoost 算法可以构建涵盖混凝土强度、配箍率、剪跨比等多参数的承载力预测模型,如图 2 所示,其预测精度不仅较规范公式大有提升,而且预测的偏差大为降低。可解释性工具 SHAP 的引入,使“黑箱”公式的物理逻辑直观展现出来,如图 3 所示:全局特征重要性排序显示,混凝土强度 f_c 是最重要的特征,其相对重要性归一化为 100%;其次是剪切跨度 a 和竖向钢筋间距 s_v ,其重要性为混凝土强度的 1/4~1/3。从物理角度而言这是合理的,因为这些特征与深梁的剪切机制直接相关。水平钢筋间隔 s_h 、梁宽 b 和剪跨比 a/h_0 对结果的影响相似,约为混凝土强度的 18%。腹筋的水平配筋率 ρ_h 、竖向配筋率 ρ_v 、纵筋配筋率 ρ_l 的重要性仅占混凝土强度的 10% 左右,是较不重要的特征。其他特征的重要性均很低,均在最重要特征的 10% 以下。符号回归技术则从数据中挖掘出显式表达式:

$$V_u = 0.68f_tbh_0\left(1 + \frac{1.18f_{yv}\rho_{sv}}{\lambda f_t}\right), \quad (1)$$

其 1.18 系数与规范公式的 1.25 修正项非常接近,揭示出混凝土与箍筋协同抗剪的深层次力学本质。

设计环节的改革更能体现智能技术的价值和优势。若以某目标承载力 300 kN 的梁为例,结合遗传算法在输入混凝土强度与构造约束后,10 秒内生成 $\Phi 10@150$ 、 $\Phi 12@200$ 、 $\Phi 8@100$ 三组等效方案,材料成本差异不足 5%。学生通过对比方案发现,增大箍筋直径可放宽间距限制,而加密箍筋能补偿直径不足——这种多解性认知打破“唯一正确答案”的思维定式,培养经济性与安全性的权衡思维能力与意识。

教学效果的量化对比印证了方法论突破的价值:采用机器学习组的学生对公式机理的理解大大提升,而承载力预测的精度和效率相比规范公式大幅增加;参数敏感性热力图与交互效应分析的引入,使学生直观感知变量耦合的非线性规律,而非依赖教师的经验性描述。这种“数据驱动认知”的范式,不仅破解了经验公式的“黑箱”困境,更将工程教育从“记忆应用”升维至“规律探索”,为智能建造时代的土木人才培养提供了可借鉴的范式。

四、结语

混凝土结构基本原理的教学改革,以机器学习为技术杠杆,撬动了知识生产、传递与验证的全流程重构。通过“预测建模—解释分析—规律发现—智能设计”四阶赋能路径,传统课程体系实现了从“经验传承”向“数据—物理融合”的范式跃迁,不仅破解了规范公式的“黑箱”困境,更重塑了学

生的工程认知模式——从被动接受公式转向主动探索规律,从机械套用规范转向灵活优化设计。

教学实践表明,机器学习赋能的混凝土课程在三个方面取得显著成效:其一,机理认知深化,可解释性工具使经验系数的物理意义透明化,学生能定量解析参数贡献度与交互效应;其二,设计效率跃升,智能算法将配筋方案生成时间从数十分钟压缩至秒级,并输出多组方案;其三,创新能力提升,学生通过数据驱动建模与反向设计训练,展现出解决复杂工程问题的系统思维。然而,混凝土结构基本原理的教学改革仍面临众多挑战。例如,机器学习工具的易用性需进一步提升,以适应不同编程基础的学生群体;开源数据库的规模与质量需持续扩充,以支撑更广泛的研究场景;跨学科融合的教学团队建设亟待加强,以应对智能技术的快速迭代。未来研究可聚焦轻量化教学工具开发、大语言模型在构造措施推理中的应用,以及机器学习与BIM技术的深度集成,为土木工程教育的智能化转型提供更丰富的实践范式。新的教学范式探索不仅回应了新工科对复合型人才的需求,更为土木专业课程智能化改革提供了可复制的路径,推动工程教育迈向“数智驱动”新时代。

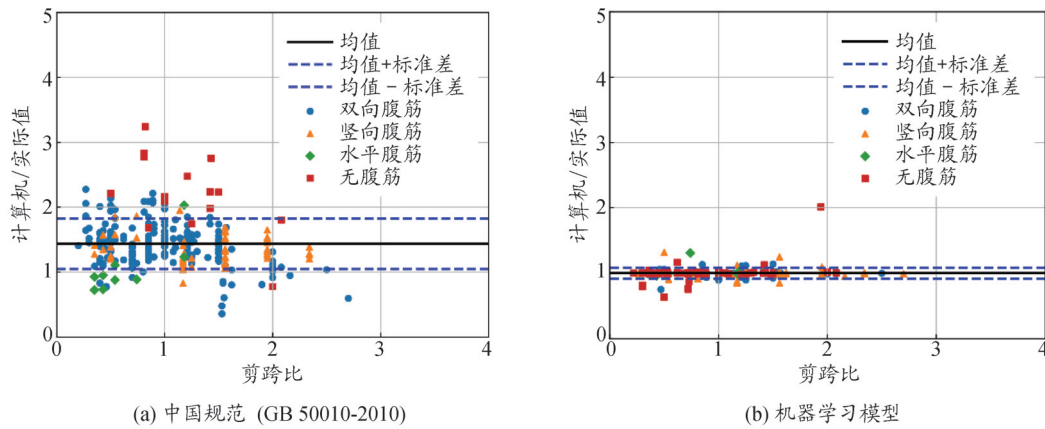


图2 机器学习模型与规范模型的预测对比

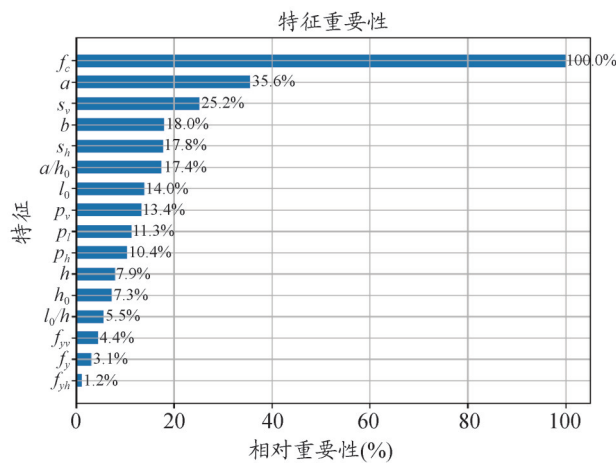


图3 机器学习模型的特征重要性分析

参考文献:

- [1] 李庆涛,袁广林,张营营. 智能建造背景下混凝土结构设计课程改革探索[J]. 高等建筑教育, 2024, 33(2): 73-78.
- [2] 刘超,潘子超,朱青,等. 智能建造背景下的桥梁工程毕业实习教学环节改革研究[J]. 高等建筑教育, 2019, 28(5): 117-123.

- [3] 车佳玲, 杨文伟, 金宝宏, 等. 混凝土结构设计原理课程教学手段探索[J]. 教育教学论坛, 2019(33): 139-140.
- [4] 徐积刚, 岳健广, 曹徐阳, 等. “课-赛-设”三维贯通式教学实践——以装配式混凝土结构设计课程为例[J]. 中国多媒体与网络教学学报(上旬刊), 2023(12): 153-156.
- [5] 刘德军, 左建平, 周宏伟, 等. OBE理念下的材料力学教学方法改革与实践[J]. 力学与实践, 2021, 43(1): 112-119.
- [6] 冯德成, 吴刚. 混凝土结构基本性能的可解释机器学习建模方法[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(4): 228-238.
- [7] 陈鑫, 赵宝成, 范存新, 等. OBE理念下工科专业课程持续改进机制设计与实践[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(12): 161-169.
- [8] 刘月飞, 樊学平. 基于本体论的钢筋混凝土结构设计原理课程教学内容的贝叶斯拓展[J]. 高等建筑教育, 2023, 32(3): 163-170.
- [9] 刘方, 邹向阳, 朱坤. 钢筋混凝土梁正截面和斜截面破坏试验的设计方法研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(S1): 314-318.
- [10] 田建勃, 周文婧, 陈黄健, 等. 基于机器学习方法的小跨高比SPRC连梁承载力预测[J]. 地震工程与工程振动, 2025, 45(1): 85-94.

Teaching exploration and practice of fundamental principles of concrete structures empowered by machine learning

FENG Decheng¹, XU Jigang²

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, P. R. China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, P. R. China)

Abstract: The teaching of fundamentals of concrete structures has long faced challenges, including outdated knowledge systems, rigid teaching methods, and a lack of integration between theory and practice. This has resulted in low student learning efficiency and a tendency for students to lose their interest. This study deeply integrates machine learning into concrete teaching, and constructs a new teaching path of four-step fusion: predictive modeling-constructing, a nonlinear mapping between input parameters and mechanical responses, breaking through the shackles of traditional formulas; interpretive analysis, quantifying the contribution of variables through interpretable machine learning models, transforming empirical coefficients into intuitive expressions of physical logic; discovery of laws, using symbolic regression to mine mathematical formulas that are both accurate and interpretable, and restore the exploration process of scientific laws; intelligent design, generating multi-objective equilibrium solutions based on genetic algorithms, achieving a leap from manual trial-and-error to intelligent optimization. The new teaching path reshapes the knowledge learning model with data thinking, realizing the transformation from static standardized formulas to dynamic renewable models. It reconstructs the teaching methodology, and realizes the transformation from one-way teaching to interactive exploration between teachers and students. It upgrades the ability evaluation system, and realizes the transformation from result assessment to process tracking, and ultimately promotes students to transform from formula applicators to science discoverers, providing new ideas for the cultivation of interdisciplinary talents in the context of new engineering.

Key words: civil engineering teaching; basic principles of concrete structures; machine learning

(责任编辑 梁远华)