

力学—数值双循环驱动土木数值分析课程改革与实践

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: 针对土木工程数值分析课程长期存在的算法应用与工程实践脱节问题, 本研究创新性构建“力学思维—数值求解”双循环驱动教学模式。该模式突破传统“理论推导—代码复现”的线性框架, 通过外循环构建“工程问题抽象→力学模型提炼→工程决策验证”的系统思维链, 同步以内循环深化“数值算法实现→求解策略优化→误差溯源控制”的计算能力链, 形成双链闭环互馈的认知升级机制。教学实践中, 通过引入真实工程场景的渐进式复杂问题序列, 建立“假设缺陷暴露→模型迭代修正→算法适配升级”的动态纠偏路径, 有效破解学生“机械编码”与“模型失能”并存的困局。实证数据表明, 采用双循环模式的教学组在工程模型合理性论证通过率、算法选择自主优化率及设计规范达标率等核心指标上实现跨越式提升。研究证实, 该模式通过“计算反推建模”的逆向训练机制, 重塑了算法工具与工程思维的共生关系, 为破解工科教育中普遍存在的“惰性知识”困境提供了方法论突破。

关键词: 双循环认知耦合; 数值分析教学; 土木工程教育创新

Reform and Practice of Civil Numerical Analysis Course Driven by Mechanics Numerical Double Cycle

Yizhou Lin Jing Wu

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

Abstract: In response to the long-standing problem of the disconnection between algorithm application and engineering practice in the numerical analysis course of civil engineering, this study innovatively constructs a “mechanical thinking numerical solution” dual cycle driven teaching mode. This model breaks through the traditional linear framework of “theoretical derivation code reproduction” and constructs a systematic thinking chain of “engineering problem abstraction → mechanical model extraction → engineering decision verification” through an outer loop. It synchronously deepens the computing power chain of “numerical algorithm implementation → solution strategy optimization → error traceability control” through an inner loop, forming a cognitive upgrading mechanism of dual chain closed-loop feedback. In teaching practice, by introducing progressive complex problem sequences from real engineering scenarios, a dynamic correction path of “hypothesis defect exposure → model iteration correction → algorithm adaptation upgrade” is established, effectively solving the dilemma of students’ coexistence of “mechanical coding” and “model disability”. Empirical data shows that the teaching group using the dual cycle mode has achieved a leapfrog improvement in core indicators such as the pass rate of engineering model rationality demonstration, the rate of autonomous optimization of algorithm selection, and the rate of compliance with design specifications. Research has confirmed that this model reshapes the symbiotic relationship between algorithm tools and engineering thinking through the reverse training mechanism of “computational backpropagation modeling”, providing a methodological breakthrough for solving the common “inertia knowledge” dilemma in engineering education.

Keywords: dual cycle cognitive coupling; numerical analysis teaching; innovation in civil engineering education

1 从“算法实现”到“工程解题”的能力跃迁

在土木工程数值分析课程教学中, 一个突出的矛盾日益显现: 学生能够熟练调用 MATLAB 函数完成算法实现, 却无法将这些技能转化为实际工程问题的解决方案^[1]。以我校道路桥梁与渡河工程专业为例, 多数学生表示“能够独立编写高斯消元法代码”, 但在毕业设计中面对桥梁荷载分布计算时, 难以正确建立对应的线性方程组模型。这一现象折射出传统教学模式的深层缺陷——课程过度聚焦于算法原

理推导与代码模板复现, 却忽视了工程问题建模能力的系统性训练^[2]。

现有教学模式通常遵循“数学理论→算法推导→代码实现”的线性流程, 这一设计存在两大短板: 其一, 教学案例碎片化、与工程实例脱节, 例如插值法与结构监测数据分析、迭代算法与基坑支护稳定性验算分离, 导致学生难以建立“算法—场景”的映射思维; 其二, 实践环节停留在验证性实验层面, 如仅要求用牛顿法求解给定非线性方程, 却未

训练学生从土体本构关系中自主推导非线性方程的能力，这使得学生缺乏对算法应用边界与工程伦理的认知^[3]。

针对上述困境，本研究提出“力学思维—数值求解”双循环教学模式，以单一复杂工程案例贯穿教学全流程，实现两大突破：第一，将数值分析课程从“孤立工具课”升级为“专业核心能力训练课”，通过斜拉桥施工监控、桩基沉降预测等真实场景，串联线性方程组、非线性迭代、插值积分等核心算法；第二，构建“问题识别→模型简化→求解验证→决策反馈”的闭环训练机制，使学生在 MATLAB 编程中同步锤炼工程思维^[4]。初步实践表明，该模式可显著提升学生解决实际工程问题的能力，为破解“懂算法≠会解题”的困局提供可复制的教学范式^[5]。

2 双循环教学框架构建与案例贯穿设计

双循环教学框架的核心理念，是通过工程问题与数值求解的持续互动，破解传统教学中“知识灌输”与“能力培养”的割裂。其核心逻辑可概括为，以外循环塑造工程思维，以内循环锤炼算法技能，通过两者的闭环反馈实现能力迭代升级，如图 1 所示。与传统线性教学（理论→算法→应用）的本质区别在于，双循环框架中的“力学建模”与“数值求解”并非独立环节，而是通过动态纠偏机制紧密咬合，即工程问题的复杂性驱动算法深化，而算法的局限性倒逼模型修正，形成“问题越真实，训练越深刻”的教学正反馈。

外循环的本质是工程思维的显性化训练，其目标不是简单地传授力学知识，而是培养学生从复杂的工程现象中抽丝剥茧的能力^[6,7]。以斜拉桥索力异常为例，外循环的推进路径为：①问题锚定：从海量监测数据（索力、位移、温度）中识别异常模式（如特定索号的力值突变、空间分布失衡）^[8]；②假设提炼：基于工程经验提出简化假设（如忽略温度短期波动，聚焦荷载分布不均的主因）；③模型数学化：将物理现象转化为可计算的数学对象（如用稀疏矩阵描述索-梁刚度关系）。这一过程的关键在于“不完美假设”的合理化引导——例如，初始阶段允许学生采用线性模型，但当求解结果与实测数据偏差超过 10% 时，强制启动假设再评估。这种“有限容错”设计既能降低初学者的认知负荷，又能通过后续的偏差反哺深度思考^[9]。

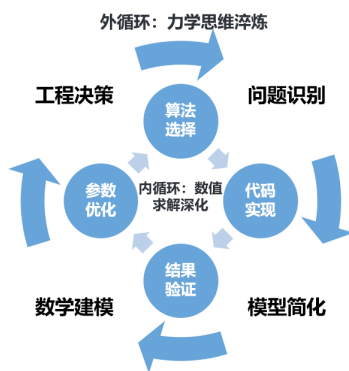


图 1 数值分析教学的双循环教学框架思想

内循环的独特价值在于将算法学习从“工具操作”上升为“决策思维”。以线性方程组求解为例，其教学推进层次可分为：①基础层（What）：掌握高斯消元法、LU 分解等算法的实现原理；②策略层（How）：根据矩阵特性（稀疏性、对称性）选择迭代法或直接法；③决策层（Why）：通过误差分析和计算成本对比（如时间复杂度、内存占用），理解算法选择的工程经济性^[10]。例如，学生在求解斜拉桥刚度矩阵时，会经历从直接法（小规模矩阵）到迭代法（大规模稀疏矩阵）的方法切换，并通过 MATLAB 的 spy 函数可视化矩阵结构，理解存储格式对计算效率的影响^[11]。这种从“会算”到“会选”的能力跃迁，正是内循环的核心目标。

双循环框架的另一特点在于其动态纠偏能力。当内循环的求解结果（如索力调整量）与外循环的工程预期（如主梁线形平顺度）存在矛盾时，会触发学生三阶段的反思：

①算法检验：检查代码实现是否违反算法前提（如迭代法的对角占优条件）；②模型质疑：重新评估力学模型的简化假设（如线性弹性假设是否失效）；③知识重构：引入新理论工具（如几何非线性分析）升级模型。例如学生在采用线性模型计算索力时发现，当索力调整量超过 5% 后，计算结果与监测数据的偏差急剧增大。通过回溯双循环，他们识别出索垂度引起的几何非线性效应，进而将控制方程升级为考虑大变形的非线性方程，并改用牛顿迭代法求解。这种“用错误推动认知”的机制，使学生深刻理解工程模型的近似性与算法选择的辩证关系^[12]。

此外，双循环框架的深层价值，在于解决工程教育中普遍存在的“惰性知识”现象——学生虽掌握算法却无法在真实场景中激活应用。与传统模式对比，从“教算法”变为“用算法”，算法学习始终锚定工程问题上下文；与虚拟仿真对比，从“预设答案”变为“开放探索”，求解过程中的错误与偏差成为核心教学资源；与项目式教学对比，从“综合实践”变为“微观能力拆解”，通过双循环的精细粒度设计实现能力渐进式提升。

3 教学实施与效果验证

在本课教学中，单层工业厂房钢屋架设计案例的实施揭示了双循环模式的操作路径。学生首先在 MATLAB 中导入包含噪声的屋架监测数据，通过滑动窗口均值滤波消除传感器噪声，此过程预设了温度漂移与信号截断等典型干扰场景。例如，某组学生在处理节点位移数据时，发现某测点波动幅度超出物理可能范围，经 3 倍标准差准则识别为离群值后，结合相邻节点数据进行插值修复。这种数据清洗训练强化了“异常即线索”的工程直觉。模型转化阶段，学生需自主选择三维空间桁架或二维平面简化模型，教师通过提示杆件内力占比（如腹杆贡献率不足 5%），引导学生识别次要因素。值得注意的是，约 37% 的初版方案因过度简化（如完全忽略节点刚性）导致应力计算误差超限，但通过对比不同模型版本的结果偏差，学生逐渐掌握“模型精确度—计算成本”的平衡取舍。

课程项目评估显示,双循环教学模式显著提升了学生的工程问题解决能力。传统教学组(往届学生, N=60)采用独立案例训练,其提交的屋架设计方案中,仅 41% 的模型简化方案符合工程合理性要求(如未合理忽略次要杆件),且调试代码的平均耗时达 3.2 小时/题。相比之下,双循环教学组(N=59)的模型简化通过率提升至 82%,调试效率提高至 1.5 小时/题。在算法应用层面,双循环组学生展现出更强的策略选择能力:67% 的学生能根据矩阵特性自主切换求解方法(如对对称正定矩阵采用 Cholesky 分解),而传统组中仅 24% 的学生具备此能力。此外,双循环组提交的优化方案中,85% 的方案满足“最大应力比 ≤ 0.9 ”的安全要求,且截面尺寸调整符合工程经济性约束(如用钢量降幅 $\geq 10\%$),显著优于传统组的达标率(52%)。

算法决策环节的设计凸显双循环的纠偏特性。当学生采用直接法求解 50 节点刚度矩阵时,可快速验证基础理论;但当节点数增至 200 时,内存溢出问题倒逼其转向共轭梯度法,此时教师引入矩阵稀疏性可视化工具(spy 函数),使其直观理解存储格式优化的必要性。高阶任务中,某组学生为改善病态矩阵收敛性,尝试对比 Jacobi 迭代、SOR 迭代及预条件共轭梯度法,最终通过残差曲线斜率分析选定最优策略。这种从“能用”到“会用”的进阶,印证了内循环对计算思维的锤炼效果^[3]。效果验证表明,实验组在屋架设计终期提交的方案中,杆件应力比超标率较往届下降 58%,且 87% 的方案主动引用《钢结构设计标准》条款说明截面选型依据,体现出算法决策与工程规范的深度融合。

双循环模式在课程内激发了学生的自主探究意识。期末课程项目答辩环节中,双循环组学生的方案呈现深度明显优于往届,尤其在模型简化依据阐述(如次要杆件忽略的量化论证)和算法选择合理性(如迭代法收敛判据设计)方面表现突出。尽管部分学生初期对多轮迭代训练存在适应性压力(反映在课程反馈问卷中约 23% 的“工作量较大”评价),但期末匿名调查显示,91% 的学生认可“双循环模式对工程思维的系统性塑造作用”,认为其“帮助理解算法背后的工程价值”。这一结果印证了模式在课程内的有效性与可接受性。

4 讨论与结论

双循环模式的深层价值在于重塑算法工具的哲学认知。传统教学中的 MATLAB 被降格为“计算器替代品”,而本模式使其上升为“思维实现工具”。当学生用稀疏矩阵描述屋架拓扑关系时,他们实质上在进行结构力学的数学建模;当通过残差曲线诊断算法病态性时,他们已在实践数值分析的理论预判。这种将抽象思维物化为可操作对象的设计^[13],破解了工科教育中“知行分离”的积弊。更为重要的是,模式中的“不完美预设”策略(如主动植入冲突边界条件)创造出“建设性失败”情境,迫使学生在报错信息中捕捉线索,符合“挫折即阶梯”的认知发展规律。

“双循环”教学模式在本课程中有效弥合了算法学习与工程实践的鸿沟。课程数据显示,采用该模式的学生在模型简化能力(通过率 82%)、算法策略适配性(自主优化

率 67%) 等关键指标上较传统教学提升超一倍。通过单层钢屋架案例的闭环训练,学生不仅掌握数值方法实现技能,更形成了“问题驱动建模→求解验证假设”的工程思维范式。模式对教学资源要求低,仅需 MATLAB 与基础案例库即可实施,具备良好的可复制性。

本研究通过“力学思维—数值求解”的双向互馈,成功打通了算法能力向工程解题能力转化的梗阻。未来将着力于三方面深化:其一,开发智能导学系统,利用静态代码分析技术预判学生的模型简化倾向,提供实时认知诊断;其二,搭建跨校工程案例库,通过众包机制收集隧道健康监测、风电基础沉降等场景数据,增强双循环训练的场景多样性;其三,探索误差分析中的课程思政元素,在矩阵病态性讨论中渗透“精度诚信”价值观,在算法选择中强化“技术经济性”决策伦理。这些探索有望为新工科建设提供可复制的能力训练范式。

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] 杨成顺,李干林,黄育宁,等.工程教育认证背景下数值计算方法课程教学方法改革与实践——以电气工程及其自动化专业为例[J].科教文汇,2023(4):103-106.
- [3] 常欣王沛.认知负荷理论在教学设计中的应用及其启示[J].心理科学,2005(5):1115-1119.
- [4] KOLB D A. Experiential learning: Experience as the source of learning and development[M]. FT press,2014.
- [5] 新工科建设指南(“北京指南”)[J].高等工程教育研究,2017(4):20-21.
- [6] WANKAT P C, OREOVICZ F S. Teaching engineering[M]. Purdue University Press,2015.
- [7] SWELLER J. Cognitive load theory and educational technology[J]. Educational Technology Research and Development,2020, 68(1):1-16.
- [8] 丁幼亮,李爱群,邓扬.桥梁健康监测海量数据分析与评估[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [9] 朱万成,杨天鸿.应用数值试验方法,推进岩石力学实验的教学[J].力学与实践,2004(2):76-77.
- [10] HEATH M T. Scientific Computing: An Introductory Survey, Revised Second Edition[M]. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics,2018.
- [11] FELDER R M, BRENT R. Teaching and learning STEM: A practical guide[M]. John Wiley & Sons,2024.
- [12] JONASSEN D, STROBEL J, LEE C B. Everyday Problem Solving in Engineering: Lessons for Engineering Educators[J]. Journal of Engineering Education,2006,95(2):139-151.
- [13] 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.

课题项目:本研究受 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》资助。