

数智赋能航空发动机燃烧专业培养探索

韩啸, 惠鑫, 王建臣

北京航空航天大学 航空发动机研究院, 北京 100191

DOI: 10.61369/ETR.2025450044

摘要 : 航空发动机被誉为“工业皇冠上的明珠”，其燃烧系统涉及多学科交叉，物理化学过程极为复杂，是核心技术难点之一。传统的航空发动机燃烧专业教学面临知识点零散、物理过程抽象、应用对象结构复杂、性能对比维度多元等挑战，导致缺乏工程经验的本科生和研究生难以建立系统性的认知和解决实际问题的能力。本文探讨了如何利用人工智能、大数据、虚拟仿真等数智化技术，对本科生科研课堂《绿色能源的清洁低碳燃烧》及研究生《氢燃料燃烧》等课程进行改革。通过开发数智化教学资源、推动教学科研资源协同、建立“教学-科研”双向联动机制等途径，有效提升了学生的工程设计与分析能力、创新思维及综合实践能力，为新时代航空发动机领域拔尖创新人才的培养提供了新的范式。

关键词 : 数智赋能; 航空发动机; 燃烧专业; 教学改革; 虚拟仿真; 人工智能

An Exploratory Study of Digital Intelligence Empowerment in Aero-Engine Combustion Education

Han Xiao, Hui Xin, Wang Jianchen

Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 100191

Abstract : The aero-engine, renowned as the "crown jewel of modern industry," features a combustion system that represents one of its core technical challenges. This system involves highly interdisciplinary knowledge and extremely complex physicochemical processes. Traditional education in aero-engine combustion faces significant challenges, including fragmented knowledge points, abstract physical processes, structurally complex application objects, and multi-dimensional performance comparisons. This makes it difficult for undergraduate and graduate students with little engineering experience to build systematic cognition and the ability to solve practical problems. This paper explores the application of digital and intelligent technologies—such as artificial intelligence, big data, and virtual simulation—to reform courses including the undergraduate research class "Clean and Low-Carbon Combustion for Green Energy" and graduate courses such as "Hydrogen Combustion". By developing digital teaching resources, promoting the integration of teaching and research resources, and establishing a two-way linkage mechanism between teaching and research, this approach effectively enhances students' capabilities in engineering design and analysis, innovative thinking, and comprehensive practical skills. It thereby offers a new paradigm for cultivating top-notch innovative talent in the field of aero-engines for the new era.

Keywords : digital and intelligent empowerment; aero-engine; combustion major; teaching reform; virtual simulation; artificial intelligence

引言

航空发动机是大国重器，是国家重大战略需求，航空发动机相关的人才培养是实现强国强军的重要支撑^[1-3]。燃烧室是航空发动机的核心部件之一，其工作环境极端恶劣，在有限空间内需要完成燃油雾化、蒸发、掺混、稳定燃烧和冷却等一系列过程，同时要兼顾高效率、低排放、长寿命和宽工况稳定性的苛刻要求。这使得燃烧专业的知识体系异常庞大且碎片化，除了燃烧学之外，还涉及流体力学、热力学、化学动力学、传热学等多个学科的交叉。传统的“教材+板书+二维图纸”教学模式，难以将燃烧室内瞬态、三维、多物理场的耦合过程直观呈现，学生容易陷入“只见树木，不见森林”的困境。因此，引入数智化技术，赋能教学全过程，是突破教学瓶颈、培养面向未来航空动力人才的必然选择^[4-5]。国内高校在数智赋能传统教学方面已经进行了大量的研究和试点，取得了良好的效果^[7-10]。从2021年起，笔者团队针对这一问题，在北航的航空发动机燃烧课程方面开展了探索，取得了一定效果，本针对这些工作进行总结，以期对其他学科起到参考和借鉴作用。

项目信息：本文受到北京航空航天大学教育教学改革研究项目《数智赋能航空发动机专业培养研究与实践》资助。

一、航空发动机燃烧专业教学的核心难点

航空发动机燃烧专业因其研究对象的特殊性，在教学实践中长期面临一系列严峻挑战，这些挑战主要来自于其多学科交叉的内涵与极端复杂的物理化学过程，具体可归纳为以下四个方面：

(1) 知识点多且散，体系整合难度大。燃烧学本身就是一个深度融合了化学动力学、流体力学、热力学和传热学的交叉学科。在航空发动机这一特定应用场景下，知识体系更进一步拓展，涵盖了燃料雾化与蒸发、旋流掺混、稳定燃烧机理、污染物（如 NOx、碳烟）生成与控制、燃烧振荡、以及高温部件热防护等众多模块。这些知识点往往分散在不同的先修与并行课程中，如同“孤岛”，缺乏一条贯穿始终的主线。对于学生而言，难以自发地将零散的知识点有机整合，构建起一个能够清晰描述“从一滴燃油变成高温燃气”全过程的知识框架，导致知识掌握流于表面，无法融会贯通。

(2) 物理过程复杂，理论抽象难以直观呈现。燃烧室内发生的是高度瞬态、三维、强非线性的多物理场耦合过程。例如，湍流与化学反应之间的相互作用（湍流燃烧），涉及从大尺度涡旋破碎到小尺度分子输运的宽尺度物理过程，以及随之而来的火焰面褶皱、局部熄火与再燃等复杂现象。这些过程的控制方程（N-S 方程、组分输运方程等）极其复杂，解析解几乎不存在。在传统教学中，仅能通过简化模型和静态示意图进行描述，这对于缺乏工程直观感受的学生来说较为抽象，难以在脑海中形成动态、立体的物理图像，阻碍了对核心物理机理的深刻理解。

(3) 应用对象结构复杂，空间想象力要求高。现代航空发动机燃烧室为满足高性能指标，其结构设计精巧而复杂，通常包含多级旋流器、气动雾化燃油喷嘴、多层壁面与复杂的冷却气膜孔/缝等，空气和燃料的流路设计错综复杂。学生仅通过二维图纸和剖面照片，很难准确理解这些三维结构如何共同作用以组织流场、形成回流区稳定火焰并实现有效的冷却。这种从二维到三维的空间认知转换困难，使得学生在后续的设计与分析环节中常常感到无从下手。

(4) 性能对比维度多，工程权衡思维培养难。评价一个燃烧室设计方案的优劣，并非追求单一指标的极致，而是需要在多个相互矛盾甚至冲突的性能指标间进行综合权衡。这些指标包括但不限于：燃烧效率、熄火边界、排放水平（冒烟、NOx、CO）、总压损失、出口温度分布（OTDF/RTDF）、以及燃烧稳定性。向学生阐明“为何降低 NOx 可能诱发燃烧振荡”、“为何强化掺混可能带来更大的压力损失”等权衡关系已属不易，要培养他们建立这种多目标、多约束的系统级工程思维则更具挑战性。

二、数智赋能教学改革的主要路径与实施案例

本部分的改革路径设计遵循清晰的逻辑递进关系：通过开发数智资源夯实基础，通过科研协同与双向联动机制注入前沿内容与持续活力，通过项目式教学与智能管理实现模式创新，最终以多维评价体系完成能力检验，构成了一个层层深入、自我优化的

教改闭环。

(一) 夯实数智基础：开发智能化与虚拟化教学资源

充分利用人工智能工具，引入 AI 辅助设计与分析工具到燃烧课堂教学中，例如 Deepseek 等大模型。在《氢燃料燃烧》课程中，我们不再仅仅讲授氢火焰燃烧速度快的特性，而是引导学生使用机器学习算法（如高斯过程回归或神经网络），基于公开文献和实验数据库，构建氢 - 空气混合物的火焰速度与当量比、压力、温度的快速预测模型。学生通过亲手“训练”模型，并与传统的详细化学反应动力学计算软件（如 CHEMKIN）结果进行对比，深刻理解了复杂机理的简化方法与数据驱动模型的优势与局限。这不仅是工具的使用，更是对“模型思维”的培养。

建设虚拟仿真实验平台，打通燃烧室从建模、仿真到数据分析的全链条。基于 UG、Ansys Fluent 和 COMSOL 软件，通过参数化建模，让学生可以像玩游戏一样，在虚拟环境中组装燃烧室，自由调整旋流器叶片角度、喷嘴布局等参数。喷入燃料并点燃，系统会以可视化的方式动态展示流场矢量、温度云图、组分浓度分布，甚至可以“钻进”燃烧室内部，从任意视角观察回流区结构和火焰形态。当模拟出现燃烧振荡时，学生可以调用开发的动态模态分解（DMD）工具，自动识别出主导的不稳定模态及其频率，从而将抽象的“振荡”概念转化为可视化的涡团周期性脱落过程。

(二) 贯通前沿视野：推动科研资源向教学资源高效转化

系统性地整理了本团队在“低排放燃烧”和“燃烧振荡”等方向的科研项目成果，构建了汇聚前沿燃烧应用研究的工程案例库。例如，在氢燃料燃烧方面，系统梳理了国内外 10 个工程案例库，涵盖氢燃料的喷射与掺混、低排放燃烧组织、燃烧振荡等，总结了各个案例遇到的难点、解决思路和效果，与课堂知识点建立起联系。还例如，将本实验室在“燃烧振荡诱发结构共振”这一前沿探索中的真实科研数据——包括高速摄影记录的火焰形态、火焰筒加速度信号、以及压力振荡频谱——制作成互动式教学案例。这种“真刀真枪”的分析，极大地激发了学生的科研兴趣，使他们站在了科研的最前沿。

(三) 构建转化闭环：建立“教学 - 科研”双向联动机制

为确保教学内容的持续前沿性，我们建立了制度化的“教学 - 科研”双向联动机制。机制一：科研成果即时转化为教学案例。从每位博士生的课题中提炼出一个适合本科或研究生教学的知识点或微型案例，纳入教学案例库。例如，一位博士生发展了新的时序信号处理方法，可以更好展示间歇振荡的时频特征。我们随即将其简化为一个研究性综合大作业，供研究生探讨并完成代码和调试。机制二：教学反馈反哺科研方向。学生在学习前沿案例和进行项目研究时提出的新颖问题、遇到的共性难点，也会被整理反馈给科研团队，为科研提供来自新鲜视角的启发，形成“教学相长、研教互促”的良性循环。

(四) 创新教学模式：全面推行项目驱动与智能化管理

在教学中引入并行的教学科研项目，推广“项目驱动式”教学。以《绿色能源的清洁低碳燃烧》课程为例，我们设置了“面向未来航空的氢燃料燃烧室概念设计”这一跨学科项目。学生 4-5

人一组，分工协作（总体气动热力设计、燃料喷射设计、燃烧数值模拟、热声模拟、结构设计等），在学期内完成从文献调研、概念提出、数值模拟验证到最终方案答辩的全过程。使用甘特图等工具确定项目进度，模拟真实工业研发流程。最终开展燃烧室设计答辩，比较不同小组的燃烧室方案性能，从总压损失、流场火焰结构、燃烧效率、NO_x排放、出口温度分布、热声稳定性等进行综合对比，按方案综合性能进行打分排序。但对其中特别具备创新性的方案，可打破性能对比的限制，给予更高的评分。这也是教学相长的内在含义。

（五）重构评价体系：从知识考核向能力评估转变

为配合上述改革，我们重构了课程考核评价体系，打破“一考定乾坤”的传统模式，转向过程性、多维度、能力导向的评价。新的评价体系包括：虚拟实验操作与报告（30%），考查学生的仿真设置、结果分析和问题诊断能力；项目式学习成果（40%），综合评估其创新思维、团队协作和解决复杂工程问题的能力；AI工具应用报告（15%），评价其数据思维和模型应用能力；期末综合笔试（15%），确保其对核心理论知识的掌握。各项比例可能根据实际教学情况而适度调整。这种多元评价体系，更全面、更公正地反映了学生在数智化环境下的综合能力提升。

四、改革成效

通过上述数智化赋能的教改探索，学生的学习模式发生了显著转变：

从“被动接收”到“主动探究”：虚拟仿真和AI工具激发了他们的探索欲。

从“知识孤岛”到“能力网络”：项目式学习将分散的知识点串联成解决复杂工程问题的能力。

从“纸上谈兵”到“虚实结合”：编程、数据处理、仿真分析已成为学生必备的核心技能。

最终，学生在完成常规教学任务的同时，其燃烧相关的编程能力、多模态数据处理能力、以及对燃烧室设计与试验的理解深度均得到了普遍提升。部分优秀本科生在课程项目中产出的成果，甚至达到了发表学术论文的水平。

五、结论

通过系统性的探索与实践，构建了数智赋能航空发动机燃烧专业培养的新模式，其核心成果可归纳为以下三点：

1. 构建了“虚实融合”的数智化教学新范式。通过引入AI辅助设计工具与虚拟仿真平台，将抽象的燃烧理论与复杂的结构设计转化为可交互、可操作的动态过程，有效突破了传统教学在直观性和操作性上的瓶颈，为学生构建了深入理解复杂物理现象的数字桥梁。

2. 形成了“教学-科研”双向驱动的知识供给新机制。通过将前沿科研案例、真实项目数据即时融入课程教学与项目实践，实现了科研资源向教学资源的高效转化，确保了教学内容的前沿性与鲜活性，显著提升了学生的创新素养与解决前沿工程问题的能力。

3. 创立了“能力导向”的项目式教学与管理新体系。全面推行以综合性项目为驱动的教学模式，促使学生在解决复杂工程任务的过程中，主动整合知识、锤炼团队协作与系统思维能力，实现了从知识传授向综合素质培养的转变。

综上所述，数智技术的全面赋能，有效破解了航空发动机燃烧专业传统教学中的核心难点，为培养适应未来航空动力发展需求的拔尖创新人才提供了行之有效的路径。

参考文献

- [1] 胡殿印,王涛,毛建兴,等.多层次、多模式的航空发动机实践育人体系探索研究 [C]// 教育部高等学校航空航天类专业教学指导委员会. 第五届全国高等学校航空航天类专业教育教学研讨会论文集. 北京航空航天大学航空发动机研究院;北京航空航天大学沈元学院;北京航空航天大学能源与动力工程学院; , 2023: 984-989. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.121236.
- [2] 李果,闫晓军,丁水汀,等.从跟跑到领跑：航空发动机战略转型的本科人才能力重塑 [J].高教学刊, 2022, 8 (12): 17-20. DOI:10.19980/j.CN23-1593/G4.2022.12.004.
- [3] 胡殿印,董旭,刘火星,等.以校企融合机制培养国家关键领域人才的实践探索 [J].中国高等教育, 2025,(11):61-64.DOI:CNKI:SUN:ZGDJ.0.2025-11-013.
- [4] 刘贺,范雨,孙大坤,等.问题为导向,数智赋能的科教中心建设探索 [C]// 教育部高等学校航空航天类专业教学指导委员会. 第六届全国高等学校航空航天类专业教育教学研讨会论文集. 北京航空航天大学能源与动力工程学院; , 2024: 925-929. DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.084994.
- [5] 夏文香,李金成,毕学军,等.数智赋能卓越工程师培养探析 [J].中国冶金教育, 2025, (04): 41-44. DOI:10.16312/j.cnki.cn11-3775/g4.2025.04.021.
- [6] 庄维嘉. AI 赋能艺术与科技融合驱动高校创新人才培养模式的探索与实践：以北航教学实践为例 [J].科学传播与科学教育, 2025,(01):61-75.DOI:CNKI:SUN:HOIU.0.2025-01-005.
- [7] 蔡媛青.数智赋能时代高等教育评价的逻辑机理与优化路径 [J/OL].高教发展与评估, 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/42.1731.G4.20250918.1110.008>.
- [8] 王晋茹.产教融合与数智赋能背景下线性代数课程改革路径研究 [J].大学教育, 2025, (18): 10-16. DOI:CNKI:SUN:DXJY.0.2025-18-003.
- [9] 王丽莎,陈丽娟,徐伟.数智化背景下线性代数课程教学创新研究 [J].高教学刊, 2025, 11 (25): 63-66. DOI:10.19980/j.CN23-1593/G4.2025.25.015.
- [10] 谢友财.数智赋能物流管理专业人才培养改革探究——以供应链与物流管理课程为例 [J].现代商贸工业, 2025, (19): 108-111. DOI:10.19311/j.cnki.1672-3198.2025.19.035.