



“实验-仿真-算法”三元融合下的绿色能源领域拔尖创新研究生培养模式探索与实践

康振烨¹, 毛思含², 刘云³, 王旻⁴, 石文娟¹, 王天娇¹, 袁禹亮¹, 李静¹, 饶鹏¹,
史晓东¹, 田新龙¹

(¹海南大学海洋技术与装备学院; ²海南大学机电工程学院; ³海南大学化学化工学院, 海口 570228; ⁴中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 为应对“碳达峰碳中和”目标下绿色能源技术快速发展对高层次人才的紧迫需求, 解决传统工科研究生培养中存在的学科壁垒森严、理论与实践脱节、创新能力不足等突出问题, 本研究以质子交换膜电解水(PEMWE)这一国家战略前沿方向为例, 系统构建并实践了一种“实验-仿真-算法”三元融合的研究生培养新模式。该模式以真实复杂的工程问题为牵引, 通过“课程体系重构-多导师协同指导-闭环迭代训练-产教融合支撑”四位一体的实施路径, 引导学生贯通材料工程、多物理场仿真与智能优化算法三大知识模块, 形成“理性设计-精准制备-高效验证”的研究闭环。实践表明, 该模式显著激发了学生的内在创新驱动力, 培养的研究生不仅取得了多项学术成果, 更具备了解决复杂工程科学问题的“融合设计”能力与系统思维。本研究为“新工科”背景下储能、氢能等交叉领域拔尖创新人才培养提供了可复制、可推广的实践范式, 特别是为储能科学与工程这类高度复杂系统的研究生培养提供了直接借鉴, 对推动工程教育内涵式发展、服务国家重大战略需求具有重要参考价值。

关键词: 研究生培养; 学科交叉; 三元融合; 质子交换膜电解水; 储能; 产教融合

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1146

中图分类号: G 420

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2421-09

Exploration and practice of an elite innovative graduate training model in the field of green energy based on the triadic integration of 'Experimentation-Simulation-Algorithms'

KANG Zhenye¹, MAO Sihan², LIU Yun³, WANG Min⁴, SHI Wenjuan¹, WANG Tianjiao¹,
YUAN Yuliang¹, LI Jing¹, RAO Peng¹, SHI Xiaodong¹, TIAN Xinlong¹

(¹School of Marine Technology and Equipment, Hainan University; ²School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University; ³School of Chemistry and Chemical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, Hainan, China; ⁴College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China)

收稿日期: 2025-12-22; 修改稿日期: 2026-01-18。

基金项目: 海南省高等学校教育教学改革研究资助项目(Hnjg2025ZC-4; Hnjg2025ZD-11), 海南大学2025年度学位与研究生教育教学改革研究项目(HDJG-Y202518), 中国石油大学(华东)研究生教育教学改革项目(YJG2025008), 国家自然科学基金面上项目(22579043)。

第一作者: 康振烨(1988—), 男, 博士, 教授, 研究方向为氢能技术, E-mail: zkang@hainanu.edu.cn; 通信作者: 王旻, 副教授, 研究方向为氢能技术与应用, E-mail: minwang@upc.edu.cn; 田新龙, 教授, 研究方向为海洋清洁能源, E-mail: tianxl@hainanu.edu.cn。

引用本文: 康振烨, 毛思含, 刘云, 等. “实验-仿真-算法”三元融合下的绿色能源领域拔尖创新研究生培养模式探索与实践[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2421-2429.

Citation: KANG Zhenye, MAO Sihan, LIU Yun, et al. Exploration and practice of an elite innovative graduate training model in the field of green energy based on the triadic integration of 'Experimentation-Simulation-Algorithms'[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2421-2429.

Abstract: This paper aims to address the urgent demand for high-level talents in green energy technologies under the carbon peaking and neutrality goals and address prominent problems in traditional engineering postgraduate education, such as rigid disciplinary barriers, disconnection between theory and practice, and insufficient innovation capability. To this end, it proposes and implements a novel triadic integration training "experimentation - simulation - algorithm" for postgraduate students. Considering proton exchange membrane water electrolysis, a national strategic frontier, as an example, this model is driven by complex real-world engineering challenges. Through a four-in-one implementation path comprising curriculum restructuring, multisupervisor collaborative guidance, closed-loop iterative training, and industry - education integration support, the algorithm guides students toward integrating three core knowledge modules: materials engineering, multi-physics simulation, and intelligent optimization algorithms, thereby forming a closed research loop of "rational design - precision fabrication - efficient verification." An analysis of the model's implementation reveals that it significantly stimulates students' drive for intrinsic innovation. Graduates achieved outstanding academic outcomes and developed "convergent design" capabilities and systems-based thinking to solve complex engineering and scientific problems. This study proposes and tests a replicable and scalable practical paradigm for cultivating high-quality innovative talents in interdisciplinary fields such as energy storage and hydrogen energy in the "Emerging Engineering Education" context, offering an important reference for promoting connotative development of engineering education and therefore serving major national strategic needs.

Keywords: postgraduate education; interdisciplinary studies; triadic integration; proton exchange membrane water electrolysis; energy storage; industry-education integration

新一轮科技革命与产业变革的核心特征，是不同学科领域在深度和广度上的交叉汇聚与协同突破，这从根本上改变了科技创新和工程实践的范式^[1]。在此背景下，国家对于发展新质生产力、实现高水平科技自立自强的战略部署，对高等教育，特别是研究生阶段的拔尖创新人才培养，提出了前所未有的紧迫要求和更高标准^[2-3]。传统上以单一学科知识纵深发展为主导的培养模式，日益暴露出其局限性，难以应对诸如绿色能源、高端芯片、人工智能等前沿领域所固有的高度复杂性、系统性和不确定性^[4]。这些领域的核心问题往往处于多个学科的交叉地带，其解决不仅需要精深的专业知识，更依赖于系统思维、计算建模与数据驱动决策等跨学科能力的综合运用。因此，推动研究生培养模式从“专业纵深型”向“交叉融合型”的深刻转型，已成为我国高等教育改革的关键议题与普遍共识^[5-7]。

储能科学与工程作为一个典型的多学科深度交叉融合的新兴领域，其知识体系广泛涉及动力工程

及工程热物理、材料科学、化学工程、电气工程等多个一级学科。这种高度的复杂性与系统性，使得该领域的前沿研究与工程实践必须依赖于材料、化学、热物理、电气等多学科知识的深度融合与协同创新。应对此类复杂性，单一的研究方法已显不足，实验表征、数值仿真与智能算法的三元融合，正成为该领域实现从“经验试错”向“理性设计”范式跃迁的典型路径与内在要求。其中，在绿色能源这一国家战略性新兴产业，质子交换膜水电解（PEMWE）制氢技术的创新历程，典型地反映了上述范式变迁^[8-9]。其性能的持续突破，早期主要依托于催化剂材料本征活性的提升和宏观工艺的优化，属于典型的“材料-化学”驱动范式。然而，随着技术向产业化纵深推进，性能瓶颈日益表现为复杂的系统工程问题，涉及从微观催化剂界面、介观多孔电极结构到宏观电堆流场设计的跨尺度耦合，以及电化学反应、电荷传递、质量输运（气/液两相流）、热量管理和机械应力等多物理场的紧

密相互作用^[10-11]。破解这些难题，单纯依靠实验科学的“试错法”成本高昂、周期漫长；仅仅进行孤立的现象观察或局部优化，也难以触及系统最优解^[12]。这内在要求研究方法和模式必须升级，将材料工程的实验探索（物理世界）、计算力学的数值仿真（数字空间）与人工智能的优化算法（智能决策）进行深度融合，构建“理性设计-精准制备-高效验证”的闭环，从而实现对复杂系统行为的深刻理解与全局性能的主动优化^[13]。

反观当前多数高校工科研究生的培养实践，与上述前沿研发的客观需求之间存在着显著的“供需错配”。培养体系的结构矛盾突出表现为“三个脱节”：一是课程设置与前沿需求脱节，知识模块以传统学科逻辑划分，呈“孤岛”状分布，缺乏围绕复杂真实问题组织的跨学科整合课程，学生难以自主构建系统知识图谱；二是科研训练与创新能力脱节，训练模式往往单一化，或偏重实验技能，或局限于仿真模拟，未能将二者与先进的智能工具链贯通，导致学生只见“树木”不见“森林”，解决综合性、设计性问题的能力不足；三是评价标准与发展潜力脱节，评价体系过度聚焦于碎片化的学术产出，而对研究生在解决复杂工程问题过程中展现出的跨学科思维、工具整合能力和迭代优化素养等关键创新特质关注不足、衡量不力。这些脱节共同导致了培养出的学生知识结构狭窄、系统思维欠缺、创新工具匮乏，难以胜任引领未来产业变革的挑战^[14-15]。

针对这一普遍性困境，本研究并非进行纯理论构想，而是源自一项深入的、以学生为中心的培养实践，以海南大学一名硕士研究生的真实成长轨迹为蓝本，开展了一项旨在打通学科壁垒、重塑能力结构的教改探索。该生的研究方向直指 PEMWE 性能提升的核心，即阳极催化层的构型化设计，其研究过程的独特价值在于，它自发且完整地演绎了一条“实验制备（探索与验证）-数值仿真（解析与预测）-智能算法（优化与设计）”的闭环研究链路。本研究的目的，正是要系统性地回溯、解构与升华这一成功的个体案例，将其背后蕴含的教育理念、实施路径与支撑条件进行理论提炼和方法论总结，从而形成一套具有普适参考价值的“三元融合”培养模式。期望这一基于实证的探索，能够为破解工科研究生培养中长期存在的跨学科能力短板问题，提供一条清晰、可行且富有成效的实践方

案，为服务国家重大战略需求的人才培养改革贡献微观案例与中层经验。

1 “三元融合”培养模式的系统构建

“三元融合”培养模式的构建，并非对现有培养环节的简单叠加或顺序调整，而是基于复杂性科学管理思想，对研究生创新能力生成路径的一次系统性重构^[16]。其核心在于，将一个源于国家重大战略需求的真实、复杂且未决的科研课题，即“牵引内核”置于培养过程的中心，以此作为整合多方资源、驱动能力发展的超级节点。

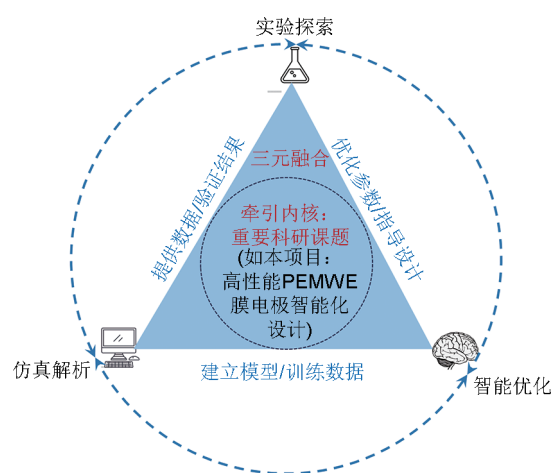


图1 “实验-仿真-算法”三元融合培养模式系统架构图
Fig. 1 System architecture diagram for the experimental-simulation-algorithm triadic integration training model

围绕这一节点，“实验探索”“仿真解析”与“算法优化”三个能力维度不再是被割裂的、线性的培养环节，而是构成一个相互依赖、实时反馈、持续迭代的协同网络，如图1所示。该模式的系统架构深刻体现了“问题导向-数字赋能-闭环进化”的现代工程教育理念，其目标是将学生从传统知识被动地接受者和技能单一的操作者，转变为能够主动驾驭多学科工具、以数据与模型驱动创新的复杂问题解决者^[17]。

1.1 牵引内核：锚定真实、复杂且前沿的工程挑战

培养模式的效力首先取决于其驱动的“引擎”，即所选择的科研课题。本模式摒弃了虚拟化、简化或高度成熟的课题，而是锚定如“面向产业化应用的高性能、低铱载量 PEMWE 膜电极智能化设计与可控制备”的课题。PEMWE 是一种采用固体质子

交换膜作为电解质与隔膜的高压、高电流密度电解水制氢技术。因其启停快、功率密度高、氢气纯度高、易于与可再生能源波动耦合等优点,被视为构建“绿氢”体系的核心路径之一,对国家“双碳”战略至关重要。

PEMWE 电解池的核心是膜电极组件,它由中间的质子交换膜及其两侧的阴极、阳极催化层组成,外侧通常配有气体扩散层和双极板/流场板。工作时,去离子水供给至阳极侧,在催化剂作用下发生析氧反应,产生氧气、质子和电子;质子通过质子交换膜迁移至阴极侧,与来自外电路的电子结合,发生析氢反应,生成氢气。阴阳极产生的气体通过流道分别排出。该技术的性能与成本瓶颈高度关联于其核心材料与部件。其中,质子交换膜通常为全氟磺酸膜,其作用是传导质子、阻隔气体交叉,需具备高质子电导率、良好的化学与机械稳定性。对于电催化剂,阳极需在强酸性、高电位下工作,目前高度依赖稀缺的铱基催化剂,降低铱载量、提高其活性与稳定性是核心挑战;阴极则普遍使用铂基催化剂。催化层与多孔传输层二者可以构成多孔电极,是反应物(水)、产物(气)、质子、电子以及热量多重传输的场所。其微观结构(如孔隙率、孔分布、亲疏水性、导电网络)对传输效率和反应位点利用率具有决定性影响。外侧的双极板/流场板负责输送反应物、排出产物、收集电流并支撑膜电极,其流道设计直接影响反应物分布、气体排出能力和压降。

因此,PEMWE 这个课题具备四大关键特征,确保其能有效牵引整个培养过程:一是国家战略相关性,直指“碳达峰、碳中和”目标下的氢能产业瓶颈,赋予研究强烈的时代使命感与应用前景,极大激发学生的内生动力^[9]。二是科学复杂性,涉及多尺度(从纳米催化剂到毫米流道)、多物理场(电-化学-流-热-力)的深度耦合,无法通过单一学科知识解决,天然要求跨学科方法。三是技术前沿性,“智能化设计”本身代表了从经验试错向理性设计范式转变的前沿方向,引导学生站到研究方法创新的起点。四是工程挑战性,兼顾“高性能”与“低铱载量”“智能化设计”与“可控制备”,包含了相互制约的多目标优化,模拟了真实工程决策的权衡环境。这一内核的确立,为整个培养体系提供了明确、稳定且富有张力的“靶心”,

使所有教学活动与能力训练都具备了统一的、高价值的指向性。

1.2 三维能力模块:从分立技能到深度融合的“工具箱”

围绕牵引内核,实验、仿真、算法三个能力维度被重新定义并深度集成,旨在为学生装备一个强大的、可协同作战的方法论“工具箱”。

一维:实验探索,物理实在的锚点与检验基石。本维度培养超越基础操作的系统性实验能力。学生不仅学习构型化膜电极的微纳制备(如激光加工、模板法)、精确表征和严谨的电化学性能评估^[9],更关键的是培养“设计实验以回答特定科学问题”的能力。如图2所示,为验证仿真预测的传质改善效果,需针对性设计对比实验;为给算法提供高质量训练数据,需规划能有效覆盖参数空间的实验矩阵。实验在此不仅是数据来源,更是一切理论和模型假设的最终评判依据,从而牢固树立学生基于实证的科学世界观。

二维:仿真解析,数字空间的映射与机理透视。本维度旨在培养学生构建和运用“数字孪生”的能力。学生需掌握商用多物理场仿真软件(如COMSOL、Ansys)或自编程数值计算,建立从微观催化层到宏观电解槽器件的跨尺度模型。重点训练学生将物理化学过程(如Butler-Volmer动力学、两相流、质子传导)转化为数学模型,并通过参数校准与实验数据验证模型可靠性。通过仿真,学生得以“透视”实验无法直接观测的内部过程(如电极孔隙内的氧气气泡分布、催化位点上的局部电流密度),从而从机理层面深化对“结构-性能”关系的理解,例如图2所示构型化结构对反应物传输的优化效应。仿真在此扮演着“认知放大器”和“低成本实验拓展器”的双重角色。

三维:算法优化,智能决策的引擎与范式跃迁。这是驱动研究范式从“经验驱动”向“数据与模型驱动”跃迁的关键维度。培养重点分为两层:首先是代理模型构建能力,指导学生运用高斯过程回归(GPR)等机器学习方法,融合高保真仿真数据与关键实验数据,建立一个能秒级预测性能的轻量化近似模型,以克服高维参数空间中全物理仿真计算量巨大的瓶颈。其次是智能优化决策能力,引导学生针对问题特性(如多峰、高维、带约束),设计或改进优化算法(如GA-PSO混合算法),以

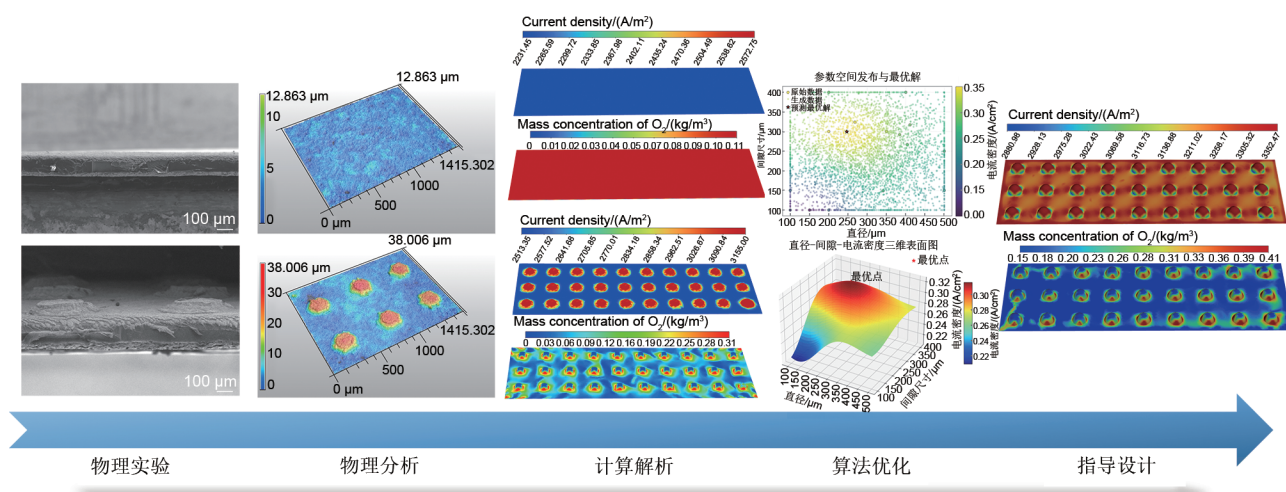


图2 仿真揭示构型化结构对传输过程的优化机理示意图

Fig. 2 Simulation reveals the optimization mechanism of configurational structures on transmission processes: Schematic diagram

代理模型为适应度函数，自动、高效地搜索全局最优或帕累托最优的设计参数。此过程培养学生将模糊的“性能更好”愿望，转化为明确的数学优化问题并求解的形式化思维与自动化思维。

1.3 闭环迭代:动态交互与能力螺旋上升的引擎

“三元融合”模式的生命力在于三个维度之间动态、非线性的闭环迭代，而非静态的并列或流水线作业。这一闭环构成了学生能力螺旋上升的核心引擎。首先从实验到仿真的过程中，精确的实验结果为仿真模型提供关键的参数输入（如材料本征属性）与校准与验证的基准，确保数字世界与物理世界的一致性。其次，在从仿真到算法的过程中，经过验证的仿真模型，可以高效、低成本地生成海量覆盖广阔设计空间的“合成数据”，极大地丰富和扩充了算法训练的数据集，解决了实验数据稀缺的瓶颈。再次，从算法回归到实验的过程中，优化算法输出的新颖、反直觉的最优设计参数，直接指导下一轮实验的制备方案，将探索方向引向人力未曾设想的高潜力区域，实现真正的“理性设计”。最后，通过新实验再到新仿真/算法的过程中，对新实验结果的测试，一方面再次验证并可能修正仿真与算法模型，形成反馈；另一方面产生新的高质量真实数据，进一步提升代理模型的预测精度和泛化能力。

学生被深度嵌入这一闭环中，每完成一轮迭代，就经历了一次“提出假设/设计-实施计算/实验-分析数据-更新认知-优化方案”的完整科学探

究循环^[20]。这个过程不断强化其系统思维、解决劣构问题的能力，并使其深刻体会到，现代前沿工程研究正是通过实验、仿真与算法三者的持续对话与共同进化来向前推进的。这种动态的、交互式的学习环境，是培养能够驾驭未来科技复杂性的顶尖创新人才的必由之路。

2 模式的实施路径与支撑体系

“三元融合”培养模式的落地与成效保障，不能仅停留在理念层面，而必须依赖于从顶层设计到微观执行、从资源整合到制度创新的全方位支撑体系^[21]。该体系旨在主动破除传统院系管理与学科壁垒造成的障碍，为“实验-仿真-算法”这一非线性、交互式的学习与研究过程提供结构化的轨道与持续的动力。其实施路径如图3所示，围绕“知识输入重构-过程管理创新-评价导向变革”三大支柱展开，确保培养模式从理想蓝图转化为学生实实在在的成长轨迹。

2.1 支柱一：课程体系的重构，从“学科知识灌输”到“项目能力工具箱”

传统按学科知识逻辑排列的课程列表，无法支撑“三元融合”所需的即时性、综合性知识调用。因此，必须对课程体系进行项目化、模块化重构，形成与科研牵引内核直接对接的“定制化工具箱”。

2.1.1 设立“前沿课题导论”与“融合研讨课”

在入学初期，即开设《绿色能源系统工程前沿》等导论课，由跨学科导师团队联合授课，重点

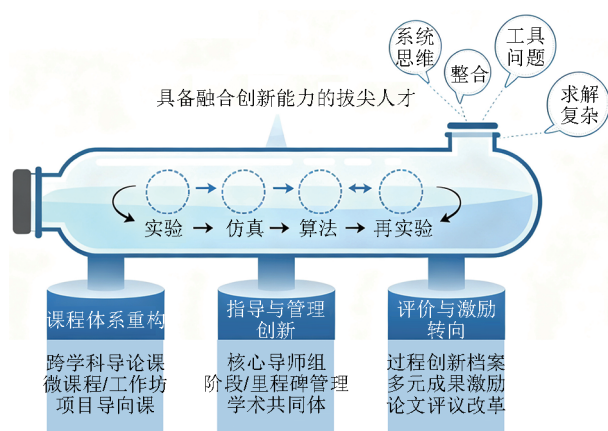


图3 “三元融合”培养模式实施路径与支撑体系图

Fig. 3 Implementation pathway and supporting framework diagram for the ‘triadic integration’ cultivation model

不在传授具体知识，而在全景式展示如PEMWE技术所涉及的材料、化学、工程、控制等领域的关联与挑战，提前植入系统思维。随后，开设《能源系统建模与优化》等小型、高频的融合研讨课，以学生正在进行的课题进展为案例，由相关领域导师主持，针对其遇到的“如何建立两相流传质模型”“如何选择代理模型核函数”等具体问题，进行跨学科的深度研讨与现场诊断，实现“学”与“研”的零时差对接。

2.1.2 开发“微课程”与“工作坊”模块

将庞大的专业软件教学、特定算法原理等内容，拆解为若干个时长4~8学时的“微课程”或“工作坊”。例如：《COMSOL多物理场建模基础（针对电化学体系）》《Python科学计算与数据可视化》《机器学习入门：从回归到高斯过程》《优化算法原理与实践（GA/PSO）》等。学生根据自身课题阶段和知识缺口，像选择工具一样自主选修这些模块，实现按需学习、即学即用。这些模块由来自不同院系的专长教师或博士后、高年级博士生开设，形成动态更新的课程资源池。

2.1.3 推行“项目驱动”的核心课程

将关键的专业核心课程进行项目化改造。例如，将《高等电化学》的课程作业，设计为“完成一个特定工况下PEMWE极化曲线的建模与实验验证报告”；将《数值分析》的考核，变为“编写一个用于计算多孔电极有效扩散系数的程序”。通过课程项目与学位论文子课题的强关联，使课程学习直接产出科研所需的初步模型、代码或实验方案，

极大提升学习动机和知识留存率。

2.2 支柱二：指导与过程管理机制的创新，从“单一导师负责制”到“多导师协同育人”

“三元融合”培养的复杂性和跨学科性，对指导力量和研究生的过程管理提出了远超传统模式的要求。

2.2.1 构建“核心导师组”协同指导机制

为每位进入该模式的研究生配备一个稳定的“核心导师组”，至少包括：一位主导导师（通常为学生学籍所在院系的导师，负责课题总体规划、学术标准把关和科研伦理教育），一位（或多位）协同导师（来自仿真计算、自动化控制、数据科学等相关院系，负责提供跨学科方法指导与技术支撑）。导师组需定期（如每月等）举行联合组会，共同听取学生进展，从不同视角提出问题、建议解决方案，并协调资源。导师组成员的工作量认定与绩效评价，应明确包含跨学科指导的部分。

为切实保障“多导师协同指导”机制的有效运行，克服跨学科导师在时间协调与评价标准上的潜在障碍，本研究在实践中构建了一套结构化的协同管理流程。首先，确立了制度化的定期联合指导机制：核心导师组每月举行固定联合组会，会前要求学生提交涵盖进展、问题与计划的结构化报告以供预审；会上，各导师从自身学科视角提问并给出建议，最后由主导导师整合形成阶段指导意见，确保指导的全面性与一致性。其次，实施了贯穿培养全过程的共同目标管理：在培养初期，导师组便与学生共同商定各阶段的“能力/成果里程碑”及其具体、可衡量的评价标准；里程碑的评估由导师组集体进行，通过协商达成共识，引导学生融合多元学科目标而非迎合单一学术标准。再者，依托数字化工具建立了灵活的异步沟通与档案系统：利用在线协作平台建立导师组群，针对特定技术问题，学生可及时获得相关协同导师的“点对点”深度指导，保障了指导过程的透明性与连续性，有效避免了信息孤岛。这些具体机制共同构成了一个稳定、透明、可操作的协同育人支持系统，使来自不同学科的指导力量能够有序整合，切实支撑学生在“实验-仿真-算法”融合路径上的深度学习与创新探索。

2.2.2 实施“阶段-里程碑”式过程管理模式

将研究生培养周期（如硕士3年）划分为特征

鲜明的阶段，并为每个阶段设立清晰的“能力里程碑”和“成果里程碑”。

第一阶段（探索与奠基期，第1年）：能力目标是掌握三大维度的基础工具。里程碑包括：完成一组基础实验再现、建立一个简化PEMWE仿真模型、成功运行一个标准优化算法示例，并撰写一份详细的“技术可行性分析报告”。

第二阶段（融合与攻坚期，第1.5~2.5年）：能力目标是实现两个及以上维度的有效闭环。里程碑包括：利用仿真结果解释实验现象并指导下一轮实验设计；或利用算法优化出优于初始设计的参数组合，并通过实验/仿真予以验证。需完成“融合进展报告”。

第三阶段（集成与升华期，最后0.5年）：能力目标是完成全链条集成与创新。里程碑是形成一套完整的、经迭代优化的“设计-制备-测试”方案，并在学位论文中系统阐述“三元融合”的方法论、过程与最终成果。导师组在每个里程碑节点进行正式评估，评估不通过则需制定改进计划，确保培养过程质量可控。

2.2.3 搭建“学术共同体”平台

鼓励进入该模式的研究生形成跨年级、跨课题的学习小组。定期组织交流研讨，分享在仿真技巧、代码调试、实验诀窍方面的点滴经验。建立共享的代码库、模型模板和实验数据标准格式。邀请已完成学位的校友（尤其是进入工业研发部门的）在线交流，了解产业界对“三元融合”能力的具体需求和实际应用场景，强化学术研究与产业应用的联结^[22]。

2.3 支柱三：评价与激励体系的转向，从“论文成果一元评价”到“创新能力发展性评价”

为引导和保障“三元融合”模式的健康运行，必须建立与之匹配的评价体系，其核心是从终结性评价转向发展性评价，从一元评价转向多元评价。

2.3.1 建立“过程性创新能力档案”

为每位研究生建立数字化的“创新能力档案”，不仅记录其最终的论文和专利，更详细记录其在培养过程中的关键表现：如提出的跨学科问题质量、设计的实验/仿真/算法方案的创新性、在迭代中展现出的问题解决与学习适应能力、在交流中的贡献度等。这份档案由导师组共同填写与评议，作为学位评定、评奖评优的重要依据，引导学生重视能力

成长过程本身。

2.3.2 推行“多元成果”认定与激励机制

明确认可并大力鼓励“三元融合”过程中产生的多元成果形式。例如：一个经过充分验证、具有良好封装性和可重复使用的仿真模型或算法工具包，可以申请软件著作权，其价值等同于一篇高水平学术论文。针对复杂工程问题提出的、具有充分数据与模型支撑的系统性优化设计方案（即使尚未完全实验实现），其设计报告本身可作为学位论文的核心章节或重要补充。在奖学金评定、优秀学位论文评选等环节，设立“跨学科创新奖”，专门表彰在此模式下取得突出融合创新成果的学生和导师组。

2.3.3 调整学位论文评议标准

在学位论文的评阅与答辩环节，引入具有跨学科背景的专家，并预先提供新的评议指引。评议重点不仅在于工作的深度，更在于工作的“融合度”与“方法论贡献”。评阅专家将被引导关注，学生是否清晰阐述了融合不同方法解决复杂问题的逻辑？仿真与算法在研究中是锦上添花的工具，还是不可或缺的核心推理环节？从多轮迭代中提炼出的新认知或新设计规则是什么？通过评议标准的改革，从出口端保障培养模式的目标得以实现。

总而言之，实施路径与支撑体系是“三元融合”培养模式从理念走向实践的操作系统。它通过课程重构提供“弹药”，通过管理创新铺设“轨道”，通过评价变革点燃“引擎”，三位一体，共同确保这一旨在培养未来工程领军者的革新实践，能够行稳致远，产出实效。

3 结论与展望

本研究基于一个成功的硕士生培养案例，系统构建了“实验-仿真-算法”三元融合的研究生培养新模式。该模式以国家战略前沿的复杂真实问题为内核，通过对课程体系、指导机制与评价体系进行协同重构，将传统上割裂的实验探索、仿真解析与算法优化能力，整合为一个动态闭环、迭代进化的训练系统。实践表明，这一模式能有效破解工科研究生培养中存在的学科壁垒森严、理论与实践脱节等核心困境，是培养具备跨学科系统思维和工具驱动创新能力的拔尖人才的有效路径，如图4所示。本模式的探索为工程教育改革提供了明确启示，人才培养须与前沿科研深度融合，以真问题驱动真创

新；跨学科能力必须通过体系化设计进行强制性训练；同时，必须将计算建模与数据智能提升至与实验科学同等重要的核心地位。

展望未来，该模式可从三方面深化拓展：一是制度化，推动其从优秀个体实践转化为可持续的校级人才培养方案，并建立配套的跨学科导师激励体

系；二是普适化，将其“问题牵引-多维融合”框架推广至智能机器人、生物医学工程等更多前沿交叉领域；三是生态化，探索构建连接“校内基础研究”与“产业技术开发”的双循环培养生态，使学生更早融入从原理到应用的完整价值链，为国家培育更多卓越的工程科学家与创新者。

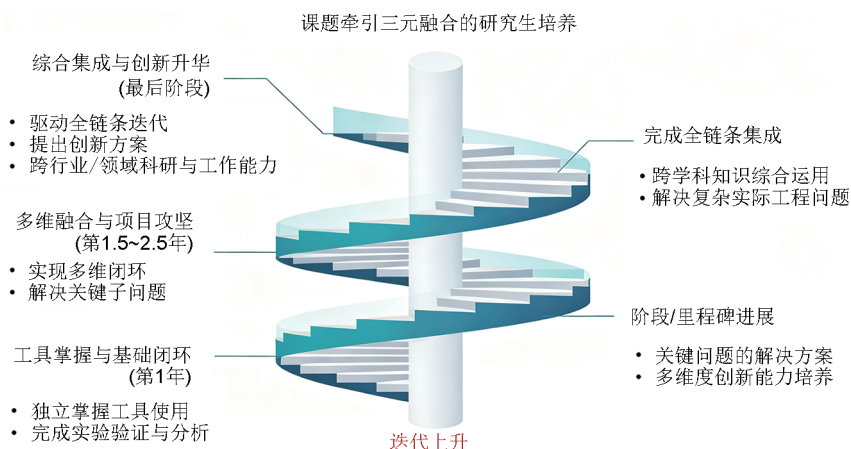


图4 “三元融合”培养模式下研究生能力螺旋发展模型图

Fig. 4 Spiral development model of postgraduate competencies under the triadic integration cultivation approach

参考文献

- [1] 李猛, 苟倩, 郑玉杰, 等. 学科交叉背景下储能科学与工程专业本硕博贯通培养实践[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(5): 2141-2148. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.1141.
- [2] 赵军. 研究生培养机制改革——行动与反思[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014.
- [3] 赵军. Reform of postgraduate training mechanism—Action and reflection[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014.
- [4] 《研究生培养模式创新的理论与实践研究》课题组. 中国研究生培养模式的理论与实践研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [5] Research Group on Theoretical and Practical Studies of Innovation in Postgraduate Education Models. Theoretical and practical studies of postgraduate education models in China [M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [6] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2021-03-13]. <https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content%5F5592681.htm>.
- [7] Outline of the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Long-Range Objectives Through the Year 2035 [EB/OL]. [2021-03-13]. <https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content%5F5592681.htm>.
- [8] 廖文婕. 我国专业学位研究生培养模式的系统结构研究[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2013.
- [9] LIAO W J. A study on the systemic structure of professional degree postgraduate education in China[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2013.
- [10] 中国教育科学研究院. 中国智慧教育发展报告(2023)——迈向数字教育的高级阶段[M]. 北京: 教育科学出版社, 2024.
- [11] China National Academy of Educational Sciences. China smart education development report (2023): Advancing towards the advanced stage of digital education[M]. Beijing: Education Science Press, 2024.
- [12] 东华大学研究生院. 奋进: 追求卓越的东华大学研究生教育[M]. 上海: 上海三联书店出版社, 2022.
- [13] Graduate School of Donghua University. Striving for excellence: Postgraduate education at Donghua University[M]. Shanghai: Shanghai Sanlian Bookstore Publishing House, 2022.
- [14] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书(2019版)[EB/OL]. [2019-06-26]. <https://www.xyz-research.com/uploads/20201201/73de46d603e03e9fb6d4edd163fb4d0e.pdf>.
- [15] China Hydrogen Energy Alliance. White Paper on China's Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry (2019 Edition) [EB/OL]. [2019-06-26]. <https://www.xyz-research.com/uploads/20201201/73de46d603e03e9fb6d4edd163fb4d0e.pdf>.
- [16] 陆颖. 美国产业界发布氢能经济路线图[J]. 科技中国, 2020(11): 03-13. <https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content%5F5592681.htm>.

- 100-102.
- LU Y. US industry releases hydrogen economy roadmap[J]. Science and Technology China, 2020(11): 100-102.
- [10] LIU R T, XU Z L, LI F M, et al. Recent advances in proton exchange membrane water electrolysis[J]. Chemical Society Reviews, 2023, 52(16): 5652-5683. DOI: 10.1039/d2cs00681b.
- [11] KANG Z Y, MO J K, YANG G Q, et al. Investigation of thin/well-tunable liquid/gas diffusion layers exhibiting superior multifunctional performance in low-temperature electrolytic water splitting[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(1): 166-175. DOI: 10.1039/c6ee02368a.
- [12] 李巾铤, 樊林浩, 张寿行, 等. "1+N+X"产教融合协同育人模式在储能专业人才培养中的探索与实践[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(6): 2099-2106. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0046.
- LI J D, FAN L H, ZHANG S H, et al. Exploration and practice of "1+N+X" model of industry-education integration and collaborative education in training talents for energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(6): 2099-2106. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0046.
- [13] 李孟涵, 刘晓日, 吕培召, 等. "新工科"背景下储能方向研究生学科交叉培养模式探索与实践[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 4054-4064. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0437.
- LI M H, LIU X R, LV P Z, et al. Exploration and practice of interdisciplinary training mode for postgraduate students specialized in energy storage under the background of "Emerging Engineering Education"[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 4054-4064. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0437.
- [14] 刘祖汉, 俞洪亮. 研究生培养立德树人研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 2018.
- LIU Z H, YU H L. Research on cultivating virtue and nurturing talent in postgraduate education[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2018.
- [15] 刘少军. 研究生教育论坛(2012)[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2013.
- LIU S J. Graduate education forum (2012)[M]. Changsha: Central South University Press, 2013.
- [16] 穆献中, 孔丽, 孙喆人. 研究生培养和学术指导教程[M]. 北京: 经济管理出版社, 2019.
- MU X Z, KONG L, SUN Z R. Tutorial on postgraduate training and academic supervision[M]. Beijing: Economic Management Press, 2019.
- [17] 兰凯, 和洁, 杨晓刚, 等. 新质生产力视域下新能源材料与器件专业创新型人才培养体系的探索与实践[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(9): 3648-3656. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0235.
- LAN K, HE J, YANG X G, et al. Exploration and practice of an innovative talent training system for the new energy materials and devices specialty: The perspective of new quality productivity[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(9): 3648-3656. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0235.
- [18] 马美倩, 王艺霖, 邓传浩, 等. 氢能学科建设探索与人才培养研究[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 4235-4246. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0538.
- MA M Q, WANG Y L, DENG C H, et al. Exploration of hydrogen energy discipline construction and research on talent cultivation[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 4235-4246. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2024.0538.
- [19] MAO S H, LIU Y, PANG B Q, et al. Boosting mass and charge transport of anode catalyst layers in proton exchange membrane water electrolysis[J]. Journal of Energy Chemistry, 2025(113): 29-36. DOI: 10.1016/j.jechem.2025.09.012.
- [20] 扎卡里·肖尔. 带一本书去读研: 研究生关键学术技能快速入门[M]. 姜昊骞, 译. 北京: 新华出版社, 2023.
- [21] 陈翠荣, 胡成玉, 杜美玲, 等. 英美研究型大学跨学科研究生培养体系研究[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2023.
- CHEN C R, HU C Y, DU M L, et al. A Study on the interdisciplinary postgraduate training system in British and American research universities[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2023.
- [22] 艾伦·雷普克, 里克·斯佐斯塔克(加). 如何进行跨学科研究(第二版)[M]. 傅存良, 译. 北京: 北京大学出版社, 2021.