

虚实融合跨尺度储能体系驱动的新能源课程教学模式探索与实践

李玉倩

南京理工大学能源与动力工程学院, 中国·江苏 南京 210094

摘要: 针对新能源课程中知识体系碎片化与实验研究浅表化问题, 本研究构建“原子-材料-器件”跨尺度知识链, 创新性融合虚实实验资源, 探索低成本教学改革路径, 构建“原子-材料-器件”跨尺度知识链, 融合虚实实验资源与多学科锚点问题。通过开发 Li^+ 迁移路径可视化工具、调用科研级原位数据构建微观机理认知, 结合退役电池拆解实践与 3D 打印微型实验套件实现高危场景安全观测, 设计跨尺度储能体系相关问题驱动跨专业协作, 提升学生理解和解析能力。

关键词: 跨尺度; 虚实融合; 新能源课程; 教学改革; 能力培养

Ransforming New Energy Education Enabled by Integrated Virtual - Physical and Multiscale Energy Storage Systems

Li Yuqian

Nanjing University of Science and Technology School of Energy and Power Engineering, China Jiangsu Nanjing 210094

Abstract: Addressing the compartmentalized knowledge structure and the lack of depth in practical experiments within new energy courses, this study establishes an "atom-material-device" cross-scale knowledge chain. We explore a low-cost teaching reform path through the innovative integration of virtual and physical experimental resources. This approach is implemented by developing a visualization tool for Li^+ migration pathways and incorporating research-grade in-situ data to demystify microscopic mechanisms. It is further enhanced with hands-on activities, such as disassembling retired batteries and using 3D-printed micro-experimental kits, enabling the safe observation of typically high-risk processes. By designing interdisciplinary anchor problems that span the entire energy storage system, we foster cross-major collaboration, ultimately enhancing students' conceptual understanding and analytical capabilities.

Keywords: Cross-scale; Virtual-physical integration; New energy curriculum; Teaching reform; Competency development

0 引言

新能源教学面临知识链断裂与实验浅表化的系统性困境^[1-3]。传统课程按光伏、储能、燃料电池等独立技术模块割裂讲授^[4], 导致学生难以建立跨尺度认知框架^[5-6]。2023-2025 年针对本课程 120 名学生的学情调研显示, 约 80% 的学生无法建立“锂离子扩散(原子尺度)-电极界面反应(材料尺度)-电池内阻(器件尺度)”的定量关联机制, 仅少数能完整解析多尺度耦合过程。此外, 实验教学因高危设备成本与安全限制, 实验报告多停留现象描述层面, 极少通过实验反推核心机理。根本矛盾在于技术迭代要求跨尺度教学能力与传统实验条件不足的冲突, 该矛盾在资源薄弱院校尤为突出, 难以达到大学生创新创造

能力的培养效果。因此, 本教研室从以下几个方面对新能源课程的教学模式进行了改革与探索。

1 模式构建

为系统解决新能源课程中知识链断裂与实验教学浅表化的核心问题, 本研究创新性地构建了“虚实融合”教学模式。该模式从三大维度进行突破性重构: 一是打破传统模块化教学的壁垒, 重塑“原子-材料-器件”的跨尺度知识链; 二是推动实验教学体系向“虚实协同、软硬结合”转型, 破解高危、高成本实验的实施困境; 三是引入多学科交叉的锚点问题, 驱动学生通过跨专业协作解决复杂工程问题。这三个维度相辅相成, 共同构成了一个旨在培养学生深度认知与系统创新能力的教学新范式。

在知识链重构方面,课程以“磷酸铁锂电压平台”这一典型现象为教学案例,设计了从微观到宏观的三级穿透式认知路径。首先,在原子尺度上,利用离子迁移路径可视化工具,使学生直观看到锂离子在橄榄石晶体结构中的动态扩散过程;随后,在材料尺度上,引入科研级的准原位 XRD 数据,动态演示充放电过程中 LiFePO_4 与 FePO_4 两相界面的演变机制,将抽象的相变过程具体化;最后,在器件尺度上,通过多物理场仿真软件模拟电池热失控过程中的温度场分布,揭示宏观性能与微观机理的内在联系。通过这一连贯的、跨尺度的教学序列,学生得以深刻理解“电压平台”的本质实则是离子扩散动力学与相变热力学在不同尺度上相互平衡与耦合的结果。

在实验体系与多学科驱动层面,本模式强调“实体操作-虚拟仿真”的深度融合与协同验证。在虚拟层面,我们直接复用本团队在科研中获得的真实 SEM 图像(如 SEI 膜的纳米结构)、分子动力学仿真结果等,保证了教学数据的科学性与前沿性。在实体层面,为安全地观测如析锂、枝晶生长等高危或微观过程,自主开发了基于 3D 打印技术的微型观测套件,该套件集成防护罩与显微镜头,配合枝晶生长的原位视频,实现了“高风险过程,零风险观测”。此外,课程设计了如“高镍正极热稳定性优化”等综合性锚点任务,要求学生融合材料工程(如通过 Al/Mg 共掺杂策略降低晶格氧活性)、热力学(计算氧空位形成能以抑制析氧反应)、机械制造(优化 Al_2O_3 涂层工艺以提升界面机械强度)三个学科的知识。学生以跨专业研讨组的形式协作,最终需提交包含量化贡献度的雷达图评价方案,从而在解决真实工程问题的过程中,实现知识整合、技术创新与团队协作等多维能力的协同培养。

2 开展实验教学

实验教学的实施是“虚实融合”教学模式从理论构想走向实践应用的核心环节。为确保教学改革目标落地,我们围绕“基础认知深化、实践操作强化、创新应用升华”三个维度,构建了一套环环相扣、逐层递进的实验教学体系,旨在全方位锤炼学生的工程素养与创新能力。

在基础认知深化层面,我们致力于利用先进的虚拟仿真资源,突破传统教学中“看不见、摸不着”的微观世界可视化瓶颈。微观机理的抽象性是新能源课程入门的主要障碍之一。为此,我们引入了高精度的分子动力学仿真平台,学生可以如同操作一部“分子尺度的摄像机”,动态观测锂离子在电极材料晶格间隙中的迁移路径、能垒变化及其与晶格振动的耦合效应。同时,通过电极界面演变的

模拟,学生能够直观地解析锂枝晶从形核、生长到最终刺穿隔膜的全过程,从而将“枝晶导致电池短路”这一宏观失效现象,与原子尺度的界面能、电流密度分布等核心参数建立起定量的因果关联。为了增强教学的探索性与互动性,仿真平台设置了开放的参数调节接口。学生可以自主改变诸如电解液浓度、充电倍率、环境温度等变量,实时观察这些因素如何影响电极的微观结构、SEI 膜的组成与厚度,并最终记录下其对电池宏观容量、库仑效率及循环寿命的影响规律。这一过程不仅将抽象的原理具象化,更在潜移默化中培养了学生通过“调控微观结构以优化宏观性能”的核心科学思维。

在实践操作强化层面,我们构建了“微型实体+虚仿验证”的双轨并行实验体系,实现了理论认知与动手实践、实体数据与虚拟模型的无缝对接与相互验证。针对实体实验的高成本、高风险限制,我们自主研发了微型电池组装实验套件。该套件采用模块化设计,允许学生像“拼装高级模型”一样,自主设计并组装不同正负极材料匹配的纽扣电池或软包电池,亲手完成电极制备、隔膜裁剪、电解液注入和电池封装等全套工艺流程。这极大地强化了学生的动手能力和对电池本体结构的深刻理解。然而,实体实验难以进行极端滥用测试(如过充、针刺、短路)。为此,我们为每一个实体组装的电池在虚拟空间中创建了一个“数字孪生体”。学生将实体实验测得的初始性能数据(如内阻、开路电压)作为边界条件输入热失控虚拟仿真平台,即可安全地对这个“数字电池”进行各种极限测试。通过对比实体电池在常规循环后的拆解分析数据与虚拟仿真中电池在过充、针刺下的温度场、应力场云图及气体演化过程,学生被要求进行“侦探式”的逆向推演,即从宏观的失效现象(如鼓包、热失控)出发,结合虚拟仿真提供的内部状态信息,层层剖析,追溯至材料尺度的界面副反应、原子尺度的离子脱嵌能垒变化等跨尺度诱因。这种“动手做”与“动脑仿”相结合的方式,极大地锻炼了学生基于数据分析和多源信息融合解决复杂工程问题的能力。

在创新应用升华层面,我们聚焦于复杂系统工程,设计了多学科交叉的开放性项目任务,旨在培养学生整合知识、协同创新的系统思维能力。我们以“质子交换膜燃料电池系统的综合优化”这一典型项目为载体,模拟了真实的科研与工程研发场景。该任务不再局限于单一知识点,而是要求学生组建跨专业项目组(通常包含材料、化学、热动、机械、自动化等专业背景的学生),对一个完整的燃料电池系统进行协同设计与优化。任务要求最终交付一

套完整的解决方案,其中必须集成:机械工程视角的流场板三维结构设计图纸(需用 CAD/CAE 软件完成,旨在优化反应气体分布与排水能力)、热物理视角的电池堆热管理子系统设计与温度场仿真分析报告(确保系统工作在高效温区),以及材料化学视角的催化剂选型、MEA(膜电极)结构与电化学界面机理分析(旨在提升反应效率与耐久性)。在长达数周的项目周期内,各小组需要通过定期的研讨会进行头脑风暴和方案迭代,学习管理项目进度、进行技术决策和解决跨学科的技术冲突。最终,各小组不仅需提交一份综合技术报告,还要进行公开答辩,接受来自不同学科背景教师的联合评审。通过这种“真刀真枪”的项目训练,学生被强制跳出单一学科的“舒适区”,深刻体会到解决新能源系统工程问题所必需的知识广度与协作深度,其工程系统思维、创新设计能力和团队协作精神得到了实质性的锤炼与升华。

3 实验成效

经过两轮完整的教学实践检验,本研究所构建的“虚实融合”教学模式在能力培养、资源建设与生态共享三个维度均取得了超越预期的实质性突破,验证了该模式在提升新能源领域工程教育质量方面的有效性与普适性。

首先,在核心目标——学生能力培养上,成效尤为显著。最突出的进步体现在学生“跨尺度解析能力”的质的飞跃。改革前,学生分析问题多停留在单一尺度或现象描述,如仅能指出“内阻增大导致性能衰减”。而现在,一份典型的优秀课程报告或项目论文中,学生已能自主构建起从原子/离子尺度(如锂离子扩散能垒、界面副反应动力学)、到材料微纳尺度(如 SEI 膜组分与厚度演化、电极颗粒裂纹萌生),再到器件及系统尺度(如电池内阻变化、热失控传播路径、系统能效评估)的完整因果分析链条。例如,在分析某商用锂电池循环寿命衰减的课题中,学生能够结合虚拟仿真中获得的离子迁移速率数据、实体拆解观测到的电极形貌变化,以及多物理场仿真中的热-电耦合结果,综合推断出“负极石墨材料的局部晶格失配加剧了锂离子扩散非均匀性,进而诱发局部析锂并催化 SEI 膜过度生长,最终表现为整体容量骤降和热稳定性劣化”的跨尺度失效机制。这种深度建模与分析能力,已初步具备了科研前沿的思维特征。与此同时,学生的多学科方案设计与系统集成能力也获得了长足进步。在以“燃料电池优化”为代表的开放性任务中,涌现出了一批兼具创新性与可行性的设计方案。例如,有跨专业学生小组受仿生学启发,提出了一种基于“肺支气管分形结构”的新型双极板

流道设计,并通过流固耦合仿真验证了其相较于传统蛇形流道在减小气体传输阻力、促进液态水排出方面的优势;另一小组则创新性地将机器学习算法应用于催化剂筛选流程,构建了“成分-结构-性能”的预测模型,大幅提升了催化剂开发的效率。这些成果表明,学生已不再是被动的知识接受者,而是能够主动融合多学科知识、运用先进工具解决复杂工程问题的潜在创新者。

其次,在教学资源建设方面,成功实现了“高危实验安全化、高成本实验低成本化”的转型,彻底突破了传统实验教学的资源瓶颈。我们自主研发的系列微型实验套件(如微型电池组装套件、3D 打印析锂观测套件),将电极材料制备、电池封装等核心实践操作的单次成本降低了数个数量级,使得“一人一套、亲手操作”的沉浸式实验模式成为可能,极大地提升了学生的参与度与获得感。而在虚拟仿真层面,集成了过充、针刺、短路等极端测试条件的热失控与安全预警虚拟平台,则彻底消除了高温、高压、潜在爆炸等传统实验固有的安全风险,让学生可以在绝对安全的环境下,深入探究电池失效的极限边界与内在机理。这一“虚实互补”的资源建设策略,使得课程的核心实验开出率从改革前的 65% 一跃达到 100%,实验教学的覆盖面与深度同步得到极大拓展。以往因设备台套数不足或安全考虑而无法开展的深度实践,现在每一位选修该课程的学生都能获得均等的操作与探究机会,为能力培养目标的实现提供了坚实的物质保障。

最后,在生态共享与社会效益层面,本项目所开发的系列化、标准化、开源化教学资源,正逐步形成一个可持续演进、广泛惠及兄弟院校的共享生态。我们将课程中核心的虚拟仿真模型,如锂离子电池枝晶生长动力学模型、燃料电池多物理场热流耦合仿真工具、电极材料分子动力学入门案例等,进行了轻量化与标准化封装。这些资源特别注重对移动端设备的适配,学生甚至可以在平板电脑或高性能手机上运行部分仿真,实现了“随时随地可学、可探究”的柔性学习模式。目前,该开源模型库已被国内二十余所高校,特别是一些地方应用型院校和西部资源薄弱院校,引入并应用于其新能源相关专业的实验教学之中。反馈信息表明,这些院校借助这些轻量化的虚拟仿真工具,成功开设了以往因缺乏大型实验设备和高昂维护成本而无法开展的高危、前沿实验项目,使其学生得以接触到与顶尖高校同等质量的教学内容。这不仅在技术上弥合了部分“数字鸿沟”,更在实质上推动了优质工程教育资源的广泛共享与教育公平性的提升,产生了超越本校教学改革的积

极社会效应。

4 结语

本研究构建的“三尺度穿透·虚实共生”模式，通过知识链纵向穿透实现原子－材料－器件认知贯通，实验资源横向融合破解高危实验实施瓶颈，多学科问题驱动培养系统思维能力。

其核心创新在于：以科研数据复用和微型实验套件保证数据的科学性和准确性，通过开源模型与移动端适配促进资源公平。该模式为新能源工程教育提供可复制路径，特别适用于实验条件薄弱的院校。下一步将扩展至氢能课程体系，并开发 AR 交互式虚仿资源。

参考文献：

[1] 汪海平，刘芸，张玉敏等 . Advances in Education 2024, 14, 657.

[2] 李巾錠，宋关羽，樊林浩等 . 储能科学与技术，2025, 14 (4), 1718.

[3] 刘劲松，张校刚 . 储能科学与技术，2023,12(3), 985.

[4] 倪献智，化工高等教育 . 2007, 24 (3), 79.

[5] 陈杰，秦海鸿，龚春英等 . 电气电子教学学报 2015, 37 (2), 28.

[6] 涛孙，武辉罗，震黄等 . Educational Theory and Research 2024, 2 (15), 59.

基金项目：南京理工大学“本科教学改革与建设工程”面上项目（2025BKJG072）。

作者简介：李玉倩（1994-），女，山东平度人，博士学位，讲师，硕士生导师，研究方向：新能源材料、二次离子电池等。