

纯电动汽车制动能量回收系统效能评估方法及其在教学中的应用研究

张丹华

天津市公用技师学院

摘要：“双碳”战略目标的推进和新能源汽车产业的快速发展，使纯电动汽车（BEV）已成为交通能源转型的重要方向，制动能量回收系统（Regenerative Braking System, RBS）作为提升整车能效的关键技术，其效能评估方法的科学性与实用性直接影响车辆性能优化与用户使用体验，本文系统梳理了当前主流的制动能量回收系统效能评估方法，并探讨其在新能源汽车相关专业教学中的具体应用路径，以比亚迪秦L车型为例，借助于理论分析、实车数据采集与教学场景融合，构建一套兼具工程实践价值与教育推广意义的评估与教学体系，为新能源汽车人才培养提供支撑。

关键词：纯电动汽车；制动能量回收系统；效能评估；教学应用

引言

随着电池技术、电控系统和能量管理策略的持续突破，提升整车能量利用率已成为纯电动汽车技术发展的核心方向，这不仅直接关系到续航里程的提升和用户使用体验的改善，更是推动电动汽车产业可持续发展的关键所在，其中，制动能量回收系统作为关键技术之一，能够将车辆减速时释放的动能转化为电能并储存再利用，从而显著提升整车的能量利用效率。

但是，不同车型和不同工况下制动能量回收系统的实际回收效果存在很大差别，如何科学准确地评价再生制动系统的性能，是当前新能源汽车领域研究的热点问题，在新能源汽车专业教育中，如何将前沿技术成果转化教学资源，提升学生对RBS原理、性能及优化策略的理解，也成为教学改革的重要课题。

一、纯电动汽车制动能量回收系统效能评估方法

（一）基于实车道路测试的能量回收效率测算方法

实车道路测试是评估制动能量回收系统效能最直接、最贴近实际使用场景的方法，该方法借助于在典型城市道路、郊区道路及高速公路上进行标准化驾驶循环，同步采集车辆速度、加速度、制动踏板行程、电机回馈电流、电池SOC变化等关键参数，进而计算单位里程或单次制动事件中回收电能与理论可回收动能的比值，即能量回收效率^[1]。

以比亚迪秦L为例，在CLTC-P工况下，其RBS平均回收效率可达22%~28%，尤其在频繁启停的城市路段表现突出，实车道路测试的优势在于数据真实、可复现性强，但受限于测试成本高、环境变量多，需

结合高精度的数据采集设备和严格的试验规程来保证测试结果的可靠性。

（二）基于仿真建模的系统级效能分析方法

仿真建模方法借助于构建包含整车动力学、电机特性、电池模型及控制策略的多物理场耦合仿真平台，对制动能量回收过程进行虚拟验证，该方法需要先建立比亚迪秦L的整车参数模型，包括质量、滚动阻力、空气阻力、电机最大回馈扭矩曲线及电池充放电效率等；随后嵌入RBS控制逻辑，在设定工况下模拟制动过程，输出回收能量、系统损耗及总能耗等指标，相比实车测试，仿真方法成本低、迭代快，便于开展参数敏感性分析与控制策略优化，但其准确性高度依赖模型精度与参数标定质量，需借助于实测数据进行校验以提升可信度。

（三）基于台架试验的部件级性能验证方法

台架试验聚焦于RBS核心部件在制动能回馈工况下的性能表现，借助电机测功机、电池充放电试验台等装置，模拟不同转速、转矩和荷电状态下的反馈发电过程，测试其能量转换效率、热管理响应和系统稳定性。

比如针对比亚迪秦L搭载的永磁同步电机，在1500~4000rpm转速区间内，其回馈效率峰值可达92%以上，但在低速或高SOC状态下因电池接受能力受限而效率下降，该方法能够剥离整车复杂干扰因素，精准识别部件瓶颈，为系统优化提供依据，但难以反映整车层面的动态协调与能量流耦合效应，通常需与整车测试或仿真相结合形成互补。

（四）基于用户实际使用数据的大数据分析方法

作者简介：张丹华（1991—），女，硕士研究生，研究方向为新能源汽车检测与维修。

随着车联网与智能网联技术的发展，可借助于车载 T-Box 实时采集海量用户驾驶行为与车辆运行数据，基于此，可采用大数据分析方法对 RBS 在真实世界中的效能进行统计评估，比如比亚迪云平台可汇聚数万台秦 L 用户的日均行驶里程、制动频率、回收电量、环境温度等信息，借助于聚类分析、回归建模等手段，揭示不同地域、季节、驾驶风格对回收效率的影响规律^[2]。

数据显示，在南方城市温和驾驶条件下，秦 L 日均回收电量可达 3.2 kWh，相当于延长续航约 15 km；而在北方冬季低温环境下，因电池内阻增大，回收效率平均下降 8% - 12%，该方法样本量大、覆盖广，具有强现实指导意义，但需解决数据隐私、标准化与噪声过滤等技术挑战。

二、纯电动汽车制动能量回收系统效能评估方法在教学中的应用路径

(一) 融入新能源汽车课程体系的模块化教学设计

将纯电动汽车制动能量回收系统效能评估方法有机融入新能源汽车相关课程，是实现理论与实践深度融合的关键路径，在《新能源汽车技术》《新能源汽车综合性能检测与评估》《汽车能量管理系统》等核心课程中，可围绕原理认知、建模分析、测试验证、策略优化四个环节，构建模块化教学内容。

比如，在讲解制动能量回收的基础上，结合比亚迪秦 L 的实际测试数据，指导学生计算单位制动时间内的动能转换效率，理解 SOC、车速、制动强度等参数对制动能量回收效率的影响；在仿真实验环节，指导学生利用 MATLAB/Simulink 或 CarSim 等工具搭建简化整车模型，对比不同回馈策略下的能耗差异；在综合实训中，可结合台架或实车数据，对回收效率的影响因素进行探究性试验。

这种模块化设计打破了传统“重理论、轻实践”的教学模式，还借助于真实工程案例增强了知识的可迁移性与应用性，教师可根据学生专业方向灵活调整模块深度与侧重点，实现分层分类教学，借助于系统化的课程整合，学生能掌握 RBS 效能评估的技术逻辑，更能培养解决复杂工程问题的能力，为未来从事新能源汽车研发、测试或技术服务奠定坚实基础。

(二) 开发基于真实车型的虚拟仿真实验平台

开发真实量产车型为原型的虚拟仿真实验平台，是提升制动能量回收系统教学直观性与可操作性的有效手段，该平台采用三维建模、物理引擎和控制算法模拟等方法，建立集整车动力学、电机回馈特性、电池充放电模型和制动协调控制为一体的数字孪生系统，

学生可以利用交互式界面自主设定驾驶工况、调节制动能回收强度等级，实现对车辆行驶状态、制动能回收、电池荷电状态、电池荷电状态和整车能量消耗等重要指标的实时观测，从而系统分析不同策略对回收效率与驾驶舒适性的影响。

比如在模拟“缓刹”与“强回收”模式对比实验中，学生能直观理解能量回收最大化与制动平顺性之间的工程权衡，相较于传统依赖实车或静态 PPT 的教学方式，虚拟仿真平台突破了设备数量、场地安全和运行成本的限制，实现“一人一机、反复试错”的沉浸式学习体验。

平台可嵌入典型故障场景，训练学生诊断与优化能力，高校还可结合企业提供的公开技术参数或合作获取的标定数据，持续更新模型精度，确保教学内容与产业前沿同步，借助于此类平台，抽象的能量流、控制逻辑与效能评估指标被可视化、动态化，激发了学生的学习兴趣，也显著提升了其对新能源汽车核心技术的理解深度与工程实践素养，为培养高素质技术技能人才提供了有力支撑^[3]。

(三) 组织基于效能评估的课程设计与毕业设计项目

把制动能量回收系统效能评估方法融入课程设计与考核评价，是深化学生工程实践能力、推动“做中学”教学理念落地的重要路径，教师可围绕比亚迪秦 L 等典型车型，设计具有明确目标导向和工程背景的综合性课题，学生需在项目周期内完成从文献综述、技术路线制定、数据采集或仿真建模、参数分析到结论提炼的完整科研流程。

比如在课程设计中，可要求学生利用公开的车辆参数建立简化 Simulink 模型，模拟不同制动分配策略下的能量回收效果，并撰写评估报告；在毕业设计中，可以进一步引入硬件在环（HIL）测试、实车 CAN 数据解析或机器学习预测模型等高阶内容，提升项目的深度与创新性，这类项目锻炼了学生运用多学科知识解决复杂工程问题的能力，培养了他们的项目管理、团队协作与技术表达等综合素养。

联合企业设立“真题真做”类课题，如邀请比亚迪技术人员提供实际开发中的评估需求或测试数据，使学生在真实工程语境中理解 RBS 效能评估的技术价值与应用边界，优秀成果还可转化为教学案例、专利或竞赛作品，形成“教学—实践—创新”的良性循环。

借助于系统化、项目化的训练，学生能掌握制动能量回收系统效能评估的核心方法，更能建立起面向产业需求的工程思维与职业能力，为其未来投身新能

源汽车研发、测试验证、技术标定等岗位奠定坚实基础。

(四) 开展校企协同的案例教学与技术讲座

深化校企协同,将企业真实研发经验与工程案例引入课堂教学,是提升制动能量回收系统效能评估教学实效性的重要举措,与比亚迪等新能源汽车企业建立常态化合作机制,邀请其RBS开发工程师、测试标定专家或维修团队走进课堂,围绕秦L车型的实际开发过程,开展专题技术讲座与案例教学^[4]。

比如工程师可详细讲解在CLTC工况标定中如何借助于调整回馈扭矩曲线平衡续航增益与驾驶平顺性,或分享如何利用实车道路测试与大数据平台识别用户对“单踏板模式”的接受度差异,还可展示从台架验证到整车集成、从软件策略到OTA远程优化的完整技术链,此类讲座传递了行业前沿知识,更让学生直观理解效能评估在产品定义、功能验证和用户体验闭环中的关键作用。

可组织“案例工作坊”,由企业提供脱敏后的测试数据或典型问题场景,引导学生分组分析成因并提出改进方案,再由企业导师点评反馈,结合企业开放日、技术参观等活动,安排学生实地观摩比亚迪的RBS台架实验室、整车转毂测试车间或数据监控中心,近距离接触专业测试设备与工程流程,打破课堂与产业之间的壁垒。

这种“请进来+走出去”的双向互动模式,有效弥补了高校教师工程实践经验不足的短板,也使教学内容紧贴技术演进与市场需求,学生在与一线工程师的交流中,能了解岗位能力要求与职业发展路径,还能激发专业认同感与创新动力。

借助于持续深化校企协同,制动能量回收系统效能评估不再仅是教科书中的抽象概念,而成为可感知、可参与、可应用的真实工程实践,为培养兼具理论素养与实战能力的高素质新能源汽车人才提供了有力支撑。

(五) 构建以评估方法为核心的技能竞赛与创新平台

构建以制动能量回收系统效能评估方法为核心的技能竞赛与创新平台,是激发学生主动学习、培养工程创新能力的有效途径,高校可依托全国大学生智能汽车竞赛、新能源汽车技术技能大赛、“互联网+”创新创业大赛等赛事体系,设立“制动能量回收效能优化”“基于真实工况的RBS策略设计”等专项赛题,要求参赛团队围绕评估指标开展系统设计与验证。

比如参赛者需基于比亚迪秦L的技术参数,构建仿真模型或开发微型电动车平台,在限定工况下实现最大能量回收,并借助于数据对比论证方案优越性,

此类竞赛强调技术实现,更注重评估逻辑的科学性与结果的可量化性,引导学生从“做出来”向“评得准、优得明”进阶。

学校可建设校内RBS创新实验室或创客空间,支持学生团队利用开源硬件和小型电机平台,搭建低成本教学演示装置,用于模拟不同回馈策略下的能量流动过程,并面向中学生或社区开展科普展示,这类项目既锻炼了学生的软硬件集成能力,也推动了前沿技术的社会传播。

借助于竞赛与创新平台的双重赋能,制动能量回收效能评估从被动接受的知识点转变为学生主动探索的研究对象,强化了其对评估方法的理解与应用能力,更培育了面向产业需求的问题意识、团队协作精神与工程伦理素养,为新能源汽车领域输送兼具技术深度与创新活力的后备力量^[5]。

三、结论

纯电动汽车制动能量回收系统的效能评估可以采用实车测试、仿真建模、台架验证与大数据分析等多维方法,从不同维度精准反映系统在真实工况下的能量转化效率与控制性能,这些方法不只服务于产品开发与优化,为教育教学提供了丰富、可操作的技术载体。

借助于模块化课程设计、虚拟仿真实验、综合项目实践、校企协同教学以及技能竞赛平台等多种路径,效能评估方法得以有效融入人才培养全过程,提升了学生对新能源汽车核心技术的理解力、应用力与创新力,今后,随着技术标准统一和教学资源数字化,制动能量回收系统的评估与教学融合将更加紧密,为行业持续输送具备工程思维与实践能力的高素质人才。

参考文献:

- [1] 洪明虎,刘勇,戴其华,等.新能源汽车制动系统(含再生制动)的效能评估与维修策略[J].汽车维修技师,2025(16):63-64.
- [2] 宋百玲,胡思远.双能量源纯电动汽车制动能量回收控制策略研究[J].自动化与仪表,2024,39(6):10-15.
- [3] 俊朋康.纯电动汽车制动能量回收策略研究[J].Advances in Energy and Power Engineering,2024,12(4):117-127.
- [4] 王清.基于优化模糊算法的纯电动汽车制动能量回收策略研究[D].天津职业技术师范大学,2024.
- [5] 陈加利,聂相虹,曾浩,等.电动汽车制动能量回收测试及评价方法研究[C]//中国汽车工程学会.第三十一届中国汽车工程学会年会论文集(2).长安汽车股份有限公司,2024:51-59.