



电池动力机车系统开发与实证研究

江康睿¹, 田忠北¹, 刘 贝¹, 王 磊², HILLMANSEN Stuart¹

(1. 伯明翰大学 工程学院, 伯明翰 B15 2TT 英国;

2. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 新能源动力机车技术是构建绿色低碳交通体系、支撑国家“双碳”目标实现的重要举措。针对现有电气化线路改造存在成本高昂和区域适应性不足的问题, 发展新型低碳轨道交通补充方案成为重要研究方向。文章通过研究英国 Stapleford 微型铁路上基于同一架构不同供能模式的两台机车, 开展了对比测试, 系统评估分析了“电池-超级电容”“氢燃料电池-电池”两种混合动力供能模式机车的各项运行性能参数与经济性指标。试验数据表明, 电池动力系统的总成本和运行能耗分别为氢燃料电池系统的22%与47%, 但受限于现有电池能量密度的限制, 其续航里程仅为氢燃料电池系统的一半。因此, 当前电池动力机车更适用于中短途低密度运输场景, 通过优化电池材料与能量管理技术, 可显著提升其商业化应用潜力。该研究涵盖了整车设计、系统集成与试验验证的全流程开发, 验证了电池动力机车实际应用的可行性, 为后续技术的迭代提出了能量管理优化、热管理优化等具体发展方向。

关键词: 低碳轨道交通; 新能源动力机车; 电池动力机车; 混合动力系统; 节能优化; 仿真

中图分类号: U267.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)03-0032-08

0 引言

我国交通运输行业碳排放量占全国碳排放总量的10%左右, 在我国“双碳”目标的驱动下, 交通领域进行绿色转型已成为交通科学技术重点攻关方向。作为我国综合交通运输体系中的骨干力量, 截至2024年底, 我国铁路营业里程已达16.2万 km, 电气化率突破75.8%, 其中电气化里程超过12万 km, 我国铁路主要分布在东部高密度运输走廊^[1]。目前, 对现行铁路线路进行电气化改造成本较高, 尤其在西部支线铁路、城郊通勤线路等低运输密度线路, 会呈现显著的边际效益递减效应, 因此, 对其进行全线电气化改造的经济可行性较低, 难以实现良好的投资回报^[2]。这导致部分非电气化线路仍然依赖内燃机车牵引, 形成减碳治理的“盲区”, 为实现铁路全面绿色化、智能化转型, 有必要研发低成本的新型能源动力机车技术。

目前, 替代电气化方案的铁路绿色能源机车技术研发主要集中于氢燃料电池混合动力系统, 相关研究已经在机车结构设计、动力耦合架构和能量管理策略等关键技术取得突破^[3-6], 但受限于氢能产业链相关技术环节成本、储氢系统能量密度等产业瓶颈, 其全生命周期成本依然高于传统机车, 影响氢能机车商业化进程^[7-8]。近年, 随着电池储能、快充技术等技术的迅速进步, 为铁路牵引动力变革提供了新路径^[9]。电池机车是一种以车载蓄电池作为主要动力来源, 超级电容为辅助动力来源, 并通过电机驱动系统实现机车运行的轨道交通工具。相比氢燃料电池动力机车, 电池机车有着显著的技术和成本优势, 特别是在短距离城轨铁路运输场景中有着更大的市场潜力。本研究团队自主设计了小尺寸电池机车的结构框架, 对关键系统进行建模与仿真验证, 并搭建了原型车平台在英国 Stapleford 微型铁路开展实地测试验证, 完成了从结构设计、仿真分析到样车制造、实车测试的全流程研究工

通信作者: 田忠北, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事铁路牵引供电系统、交通电气化、能量管理系统优化方面的研究;
E-mail: z.tian@bham.ac.uk

引用格式: 江康睿, 田忠北, 刘贝, 等. 电池动力机车系统开发与实证研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 32-39.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.103.

Citation: JIANG Kangrui, TIAN Zhongbei, LIU Bei, et al. System development and on-track validation of a battery-powered locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 32-39.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.103.

作, 系统评估电池动力机车的工程可行性和性能水平, 为低交通密度区域铁路线路绿色化转型提供经济可行的技术方案。

1 机车动力系统结构设计

电池机车由于受到当前电池能量密度和充电时间的限制, 其适用场景主要集中在 200 km 以内的短距离线路运输。为了满足机车的运营工况需求, 本研究团队提出了一种基于混合储能系统的电池机车动力系统结构, 总体架构如图 1 所示。

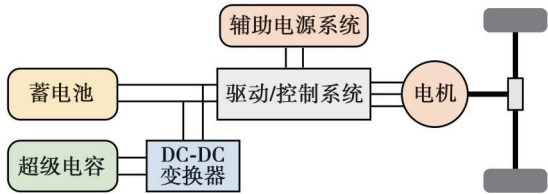


图1 电池机车动力系统架构

Fig. 1 Power system architecture of battery-powered locomotives

1.1 动力系统架构概述

该动力系统由车载储能单元、能量管理系统、DC-DC变换器、牵引电机、整车控制单元等核心组件构成。车载储能单元由车载铅酸蓄电池与超级电容协同构成, 采用并联结构, 分别连接至牵引驱动系统, 而铅酸蓄电池主要负责持续供能任务, 超级电容则用于应对牵引加速或再生制动过程中的瞬时能量波动^[9]。这种协同工作方式不仅提升了系统的响应速度和能量回收效率, 还兼顾了成本与寿命的平衡。通过能量管理系统实现多源功率分配与协调控制, 优化了系统整体性能。该系统能够实时监测并管理铅酸蓄电池和超级电容的工作状态, 确保在不同工况下实现最优的能量分配和使用效率^[10]。动力系统包括DC-DC变换器、牵引电机和整车控制单元等核心部件。其中, DC-DC变换器负责将储能单元提供的直流电源转换为适合牵引电机运行的输入电压; 牵引电机则根据整车控制单元的指令, 驱动机车运行; 整车控制单元作为系统的中枢, 负责协调各子系统的运行, 确保机车在各种工况下都能稳定、高效地运行。

1.2 储能元件电气模型

为了实现可靠的能量管理策略, 需要对各储能元件进行准确的电气建模, 掌握其电压和电流响应特性。

1.2.1 蓄电池

蓄电池供电的动态行为可以通过图2所示的模型进行描述。该模型由电压源(平衡电压 V_{EMF})、电池内阻 R_Ω 和RC回路组成。其中, V_{EMF} 由荷电状态(state of charge, SOC)决定, R_Ω 反映电池的内阻特性, 而RC回路则用于描述电池内部电荷传递和转移过程。

蓄电池的输出电压和电流关系为:

$$V_B = V_{EMF} - Z \cdot I_B \quad (1)$$

$$Z = R_\Omega + \frac{R_C}{j\omega \cdot C_C \cdot R_C + 1} \quad (2)$$

式中: V_B 为蓄电池的输出电压; I_B 为蓄电池的输出电流; Z 为蓄电池内部阻抗。

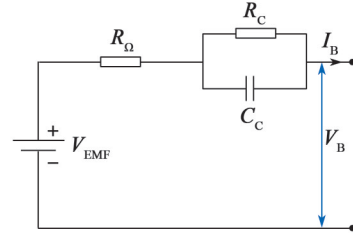


图2 蓄电池内部等效电路图

Fig. 2 Internal equivalent circuit diagram of batteries

1.2.2 超级电容

超级电容的电气模型如图3所示。该模型包含1个串联内阻 R_{SC} 和1个非线性电容 C_{SC} , 其中等效电容 C_{SC} 可视为理想电容 C_0 和与模块电压 V_U 线性相关的电容变化项之和, 其数学表达式为

$$C_{SC} = C_0 + k \cdot V_U \quad (3)$$

式中: k 为线性系数。

超级电容器的输出电压 V_{SC} 为

$$V_{SC} = V_U - R_{SC} \cdot I_{SC} \quad (4)$$

超级电容器的电流 I_{SC} 为

$$I_{SC} = \pm \frac{dQ_{SC}}{dt} \quad (5)$$

式中: Q_{SC} 为超级电容器储存的电荷量。

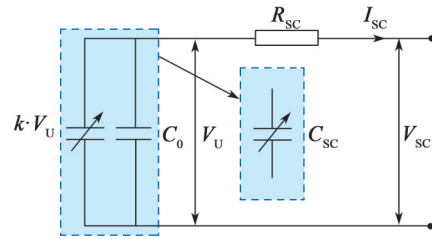


图3 超级电容内部等效电路图

Fig. 3 Internal equivalent circuit diagram of supercapacitors

1.3 DC-DC变换器建模与电路系统设计

图4为Buck-Boost双向DC-DC变换器的拓扑结构和控制逻辑, 其数学模型可分解为升压(Boost)与降压(Buck)两种工作模式。

当DC-DC变换器处于升压工作模式时, 开关管 S_1 导通, S_2 关断, 此时超级电容向直流母线供电; 当DC-DC变换器处于降压工作模式时, S_2 导通, S_1 关断, 直流母线向超级电容充电; 开关管的控制信号由电流环生成, 通过电流闭环控制实现实际电流 I_{SC} 对参考电流 I_{ref} 的跟踪。在上述工作模式中, 变换器的解析模型满足以下关系:

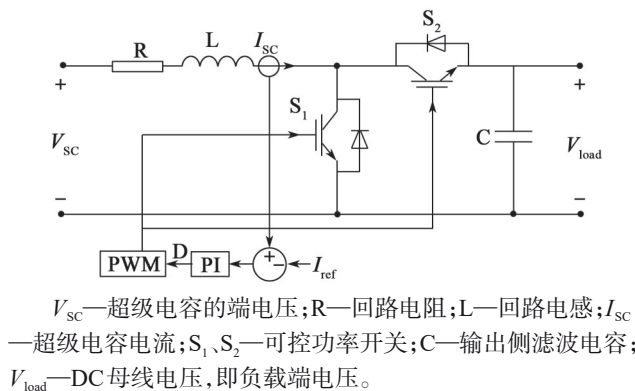


图4 双向DC-DC变流器拓扑及控制图

Fig. 4 Bidirectional DC-DC converter topology and control

$$V_L = L \cdot \frac{dI_{SC}}{dt} = \beta (V_{SC} - \alpha \cdot V_{load}) \quad (6)$$

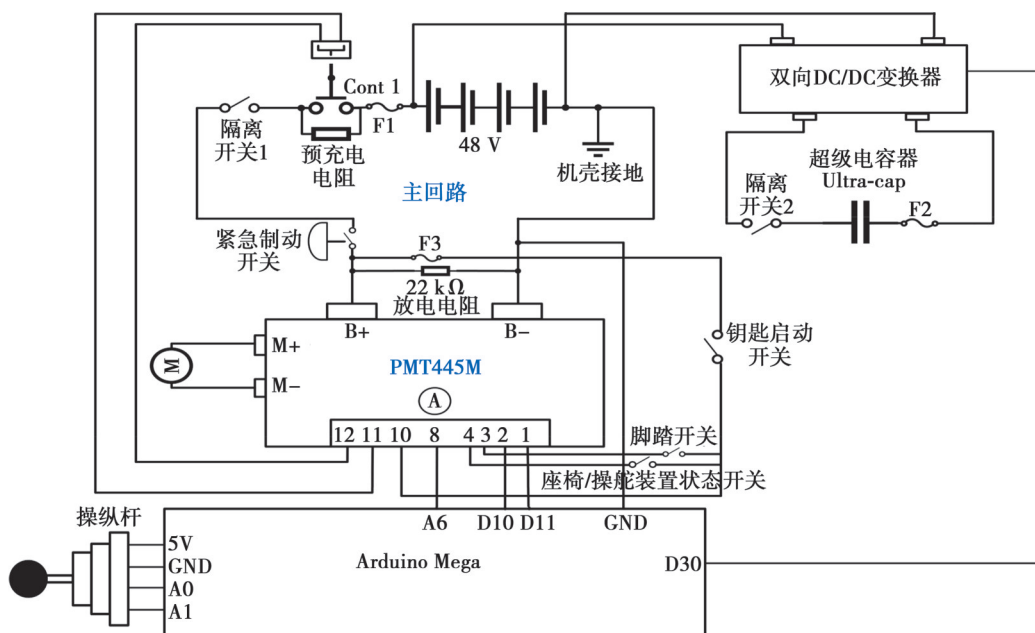


图5 供能控制系统主电路原理图

Fig. 5 Main circuit schematic diagram of energy supply control system

系统采用模块化混合储能架构，由锂电池组与超级电容混合进行供能，并通过PMT445M电机驱动器进行协调控制，具体设计如下：①电源模块的设计。研究团队对电源模块分别配置独立的保护电路（熔断器F1~F3），通过主继电器实现能量路径的动态切换，以满足不同负载条件下的能量分配需求。超级电容由PMT442S控制器进行充放电控制，主要用于应对瞬时大功率变化，提高系统响应速度与稳定性。②控制模块的设计。控制模块核心采用Arduino Mega微控制器，通过PWM通道（D6~D11）向电机驱动器输出控制信号，并接收操纵杆指令，实现能量流的实时调节与系统级控制。

控制系统的分层架构如图6所示，主要由Arduino Mega微控制器与Sigma电机驱动器组成。控制信号由Arduino的数字引脚D9~D12输出至驱动器端子板，用于实现电机的启动、方向控制和运行状态控制。操纵

当 $\beta=1$ 时，有

$$\alpha = 1 - \alpha_{\text{boost}} \quad (7)$$

当 $\beta=-1$ 时，有

$$\alpha = 1 - \alpha_{\text{buck}} \quad (8)$$

负载电流为

$$I_{\text{load}} = I_B + \beta \cdot I_{SC} \quad (9)$$

式中： β 为超级电容电流的方向，“ $\beta=1$ ”表明变换器处于升压模式，而“ $\beta=-1$ ”表明变换器处于降压模式； α 为变流器的等效占空比， α_{boost} 、 α_{buck} 分别表示升压与降压模式下的占空比。

1.4 电路系统设计与控制逻辑

本系统主电路拓扑设计如图5所示。

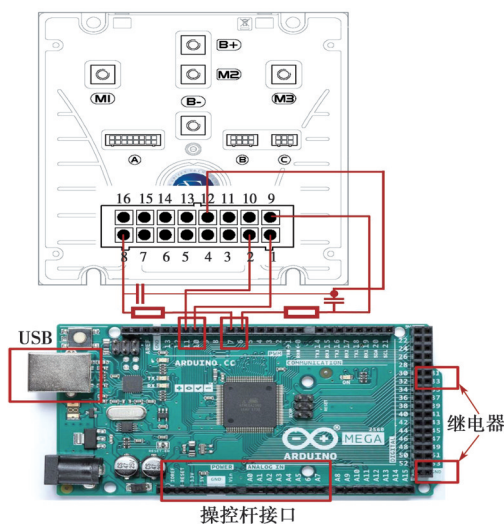


图6 Arduino控制器与电机驱动器连接示意图

Fig. 6 Schematic diagram of Arduino controller and motor driver connections

杆接口接入模拟输入端口, 用于获取用户操作信号, USB接口则用于程序下载和数据通信, 确保控制系统的灵活性与可扩展性。

1.5 基于多约束规则的能量管理策略设计

根据机车的工况特征和供能设备的充放电特性, 设计基于规则的能量管理优化策略^[10-12]。超级电容具备高功率密度、充放电速度快的特点, 适合应对短时间大功率工况^[13], 而铅酸蓄电池具有能量密度高、成本低的优势, 适用于持续供能。

由前文提及的混合供电系统拓扑可知, 对能量的控制即是对DC-DC双向变换器的控制, 在运行过程

中, 上层能量控制单元根据能量控制算法确定2个电源的功率输出给定, 通过PWM信号将指令输入到DC-DC变流器中, 确保功率的有序输出, 即保持母线负载电压的稳定。该能量管理策略的规则逻辑结构如图7所示。

该能量管理策略根据牵引功率需求和各储能单元的SOC进行动态调度, 主要满足以下3点供能规则:

- ①当牵引功率需求超过设定阈值时, 优先由超级电容供电, 电池提供功率补充;
- ②巡航稳态运行阶段由铅酸蓄电池提供牵引能量;
- ③制动过程中产生的回馈能量优先存储于超级电容, 剩余能量再转入铅酸蓄电池。

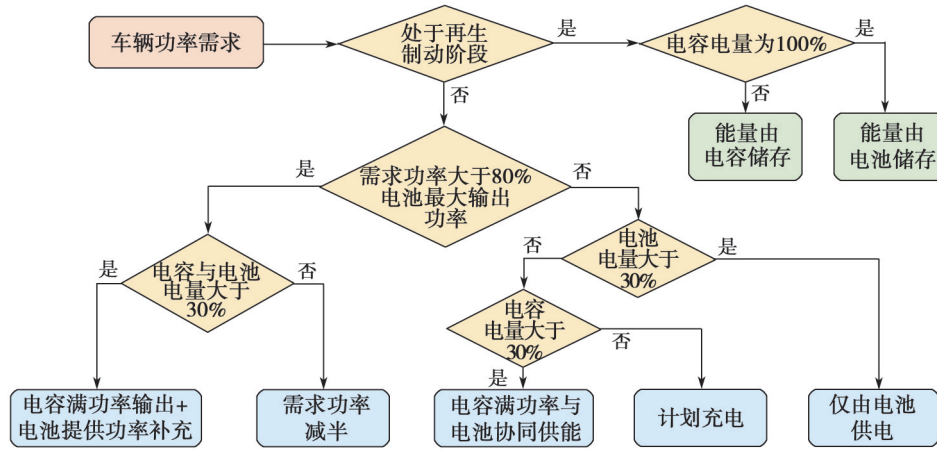


图7 基于多约束规则的电池机车能量管理策略逻辑流程图

Fig. 7 Logical flow chart of energy management strategy for battery-powered locomotives based on multiple constraint rules

2 机车运动仿真模型

在实车测试之前, 基于物理公式建立了机车的运动仿真模型, 通过简化模型分析机车在运行过程中的功率需求和能耗表现, 从而准确地设计机车的性能相关参数^[14]。

2.1 动力学建模与运动学方程

为实现机车功率需求预测与能耗评估, 建立基于多体动力学的纵向运动模型。

在纵向上, 机车的运动受牵引力、线路坡度和运动阻力控制, 其运行方程为

$$M_E a = F - M g \cdot \sin \alpha - f \quad (10)$$

式中: M_E 为机车有效质量; a 为机车加速度; F 为牵引力; M 为机车总质量; g 为重力加速度; α 为线路梯度; f 为运动阻力。

机车总质量为机车整车本身质量与载质量之和。机车旋转件在加速旋转过程中, 由于电动机和车轮的旋转作用, 机车的有效质量将大于静止时的总质量, 具体关系为

$$M = M_T + M_L \quad (11)$$

$$M_E = M_T \cdot (1 + \lambda_w) + M_L \quad (12)$$

式中: M_T 为整车空载质量; M_L 为有效载荷; λ_w 为旋转质量修正系数。

机车运行阻力 f 主要来自滚动阻力 F_D , 而机车的速度、重量和外形是影响滚动阻力的主要因素。在本仿真模型的计算中, 将运行阻力近似为滚动阻力。通常采用Davis方程来计算滚动阻力^[15], 其表达式为

$$F_D = A + Bv + Cv^2 \quad (13)$$

式中: A 为常数; B 、 C 为相关的阻力系数; v 为机车运行速度。

在上述机车运动模型的基础上, 计算机车任意时刻的加速度, 并利用运动学公式(14)计算机车的速度轨迹。

$$v^2 = v_0^2 + 2as \quad (14)$$

式中: v_0 为机车运行的起始速度; s 为机车运动产生的位移。

为了准确获得完整的机车速度轨迹, 需要掌握机车的减速起始位置, 但仅根据式(14)和已有数据无法完成这一任务, 进而无法保证机车能够精准地在站台处停车。为解决该问题, 参考已有的单机车仿真平台的

计算方法，采用反向速度轨迹算法。该方法根据给定的减速度反向计算机车的速度轨迹，并将其与正向速度轨迹进行比较，当正向速度与反向速度相等时，即为机车应开始减速的位置。随后，采用该点之前的正向速度轨迹与该点之后的反向速度轨迹进行拼接，最终获得完整的机车速度轨迹。

2.2 机车运行能耗模型

机车运行工况可划分为4类典型工作模式：牵引、巡航、惰行、制动。当电池机车处于牵引模式时，机车由超级电容和电池共同供电；当机车处于巡航模式时，根据电量状态机车由电池单独或由电池与超级电容共同供电；当机车处于惰行模式时，电池和超级电容不再为机车提供动力，机车仅受阻力作用减速；当机车处于制动模式时，电动机将变为发电机，执行再生制动，产生的电能将优先被超级电容储存。此外，锂电池组需独立支撑辅助负载系统（照明、通信和传感设备）。机车行驶的总能耗计算如下：

$$E_{\text{total}} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{P_{Bk} \cdot \frac{\Delta t}{3600}}{\eta_{Bk}} + \frac{P_{Ck} \cdot \frac{\Delta t}{3600}}{\eta_{Ck}} \right) \quad (15)$$

式中： E_{total} 为总能耗； Δt 为单位时间； P_{Bk} 为电池提供给电机的功率； P_{Ck} 为超级电容提供给电机的功率； η_{Bk} 为电池的系统效率； η_{Ck} 为超级电容的系统效率。

3 试验测试结果

基于伯明翰大学开发的单机车仿真平台，进行系统级仿真试验。通过建立详细的机车动力学模型和供能系统模型，验证了所设计的动力系统参数在动力输出和续航里程方面能够满足实际运行需求。随后，基于仿真结果搭建了实际测试用小尺寸机车，进行了整车级可行性验证试验。仿真与实际测试均选择英国Stapleford微型铁路线路，该线路全长3.2 km，包含一条80 m长的隧道，并设有Box Tunnel和Primrose Tunnel两个隧道入口。

仿真试验采用的电池动力机车的供能系统包括1个超级电容和4块铅酸蓄电池，其具体参数如表1和表2所示。

表1 电池组基本参数

Table 1 Parameters of battery pack

参数名称	额定电压/V	额定电流/A	额定容量/(A·h)	额定输出功率/W	电池组总容量/(kW·h)
参数值	12	19.5	65	240	3.12

表2 超级电容基本参数

Table 2 Parameters of supercapacitor

参数名称	额定电压/V	额定容量/F	最大输出功率/W
参数值	51.3	188	3 176

机车在Stapleford微型铁路线路上的行驶速度和能耗曲线如图8所示。由图8可知，机车在该线路行驶全程的理论能耗为0.187 kW·h。由于线路轨道的限速要求，机车在该线路上行驶的最高速度为15 km/h。

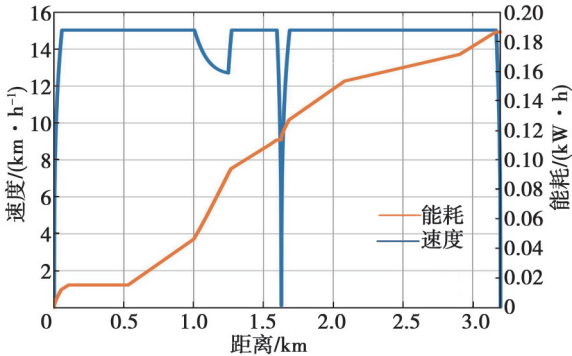


图8 速度和能耗曲线

Fig. 8 Speed and energy curves

机车在该线路上的需求功率曲线如图9所示。由图9可知，机车在加速阶段的峰值需求功率达到1 860 W，需要超级电容进行辅助供电，匀速行驶阶段的需求功率不超过800 W，仅电池即可满足功率需求。

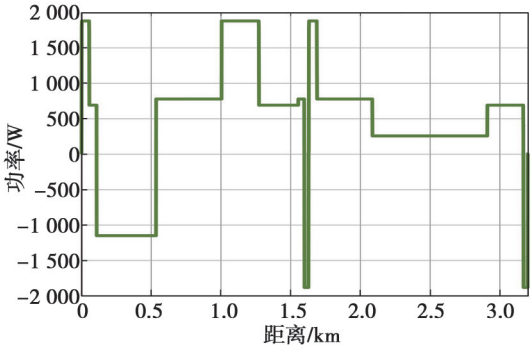


图9 需求功率曲线

Fig. 9 Power demand curve

4 性能数据对比

隶属于伯明翰大学的伯明翰铁路研究与教育中心一直致力于研究和开发传统内燃机车的驱动能源替代方案。在开发电池动力机车之前，该中心已经成功完成了氢燃料电池与电池协同驱动的小尺寸试验机车的设计与组装，试验原型机车如图10所示。两款试验机车基于同一平台框架搭建，均在Stapleford微型铁路线上进行了实车测试。此外，为提升现实适用性，本文在保持容量规格一致的前提下，以锂离子电池替代铅酸蓄电池进行了对比仿真测试。3款机车的性能数据对比如表3所示。

本研究团队在Stapleford微型铁路线路测试3款机车的供能系统成本与能耗数据，测试结果如表4所示。目前，铅酸蓄电池的单位价格约为115 £/(kW·h)，锂离子

表3 3种不同供能设备机车性能参数
Table 3 Parameters of locomotive performance under three different energy supply modes

机车动力电池类型	机车质量/t	负载质量/t	主供能设备峰值功率/W	最高速度/(km·h ⁻¹)	最大加速度/(m·s ⁻²)	综合续航里程/km
铅酸蓄电池	0.52	1.8	960	30	1.0	57
锂离子电池	0.47	1.8	2 880	45	1.7	82
氢燃料电池	0.50	1.8	1 200	28	0.8	125



图10 伯明翰大学研制的氢燃料电池动力试验原型机车
Fig.10 Hydrogen fuel cell-powered experimental prototype locomotive developed by the University of Birmingham

子（磷酸铁锂）电池的单位价格约为270 £/(kW·h)，氢燃料电池的单位价格约为1 800 £/(kW·h)。氢燃料电池机车的总能耗由其氢气消耗量折算的电能与辅助电池系统实际耗电量共同构成。

表4 供能系统成本与线路测试能耗
Table 4 Energy supply system cost and energy consumption of on-track test

机车动力电池类型	电池成本/£	超级电容/£	燃料电池/£	供能系统设备总成本/£	总能耗/(kW·h)
铅酸蓄电池	358	125	0	483	0.187
锂离子电池	842	0	0	842	0.173
氢燃料电池	76	0	2 160	2 236	0.398

根据表3与表4的对比结果可知，尽管电池动力机车在续航能力方面与氢燃料电池机车存在一定差距，但在其他关键性能参数上表现出一定优势。电池动力机车在成本方面具有显著优势，铅酸蓄电池机车供能系统设备的总成本约为氢燃料电池机车的21.6%，锂离子电池机车供能系统设备的总成本约为氢燃料电池机车的37.7%。电池动力机车在能耗方面的表现也更为优越，铅酸蓄电池机车测试总能耗约为氢燃料电池机车行驶等效能耗的47.0%，锂离子电池机车测试总能耗仅为氢燃料电池机车行驶等效能耗的43.5%。锂离子电池在相同容量规格下的各项性能参数均远高于铅酸蓄电池，其质量仅为铅酸蓄电池的35%，峰值输出功率是铅酸蓄电池的300%。目前，应用于电动汽车的电池基本为磷酸铁锂电池和三元锂电池，铅酸蓄电池并不适合作为机车动力电池。本试验选择使用铅酸蓄电池作为机车的供能设备主要是受试验经费限制，从表4的电

池成本数据也可以看出，锂离子电池的成本约为铅酸蓄电池成本的2.4倍。

5 结束语

本研究通过“电池-超级电容”混合动力机车的系统开发与实车测试，验证了该供能方案在轨道交通场景下的技术可行性。研究表明，相较于其他技术方案，电池动力机车在成本上具有显著优势，可以作为铁路全面电气化的过渡方案，尤其适用于短距离、低交通密度的支线铁路，为其实现快速脱碳提供了切实可行的解决方案。然而，在整车及其供能系统设计过程中仍然存在以下不足：首先，为了控制试验成本，试验中使用的铅酸蓄电池在能量密度和循环寿命方面明显逊色于磷酸铁锂电池，后续研究可以考虑更换为磷酸铁锂电池，以提升系统性能；其次，目前采用的基础规则控制策略在节能效果上有待提高，未来可以探索更先进的能量管理策略，以优化能源利用效率；此外，环境温度对于电池性能的影响也需要进一步研究，特别是低温条件下续航里程下降的问题，后续研究可以在不同环境条件下进行更全面的性能测试，确保整车设计方案能够在不同气候条件下稳定运行。

目前，由于电池能量密度的限制，电池动力机车续航能力不能够满足长距离线路的需求，主要适用于短距离线路。然而，随着电池技术的不断进步，电池动力机车的整体性能将显著提高，凭借其在低碳、低能耗、低噪声、低能源成本、高技术成熟度方面的优势具备广阔的市场潜力。本研究为电池动力机车整车系统的工程化设计提供了重要的实证支持和参考依据。

参考文献：

[1] 中国国家铁路集团有限公司. 中国国家铁路集团有限公司2024年统计公报[EB/OL]. (2025-03-05)[2025-04-01]. http://www.china-railway.com.cn/xwzx/zhxw/202503/t20250305_143296.html.

[2] JIANG Kangrui, TIAN Zhongbei, WEN Tao, et al. Cost modelling-based route applicability analysis of United Kingdom passenger railway decarbonization options[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2024, 160: 110094. DOI: 10.1016/j.ijepes.2024.110094.

[3] 陈维荣, 王颖民, 李秉训, 等. 氢能轨道交通的研究现状与发展趋势[J]. 机车电传动, 2023(3): 1-11.

CHEN Weirong, WANG Yingmin, LI Bingxun, et al. Over-

- view on current research status and development trends of hydrogen-powered rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 1-11.
- [4] 韩庆军, 姚正斌. 氢燃料电池有轨电车结构设计及控制方法研究[J]. 机车电传动, 2016(2): 48-51.
HAN Qingjun, YAO Zhengbin. Structure design and control method for hydrogen fuel cell tramcar[J]. Electric drive for locomotives, 2016(2): 48-51.
- [5] 韩国鹏, 杨雨泽, 赵丽丽, 等. 基于 DC/DC 串联结构的氢动力系统控制策略及运行特性研究[J]. 机车电传动, 2023(3): 40-49.
HAN Guopeng, YANG Yuze, ZHAO Lili, et al. Research on control strategy and operational characteristics of hydrogen power system based on DC/DC series structure[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 40-49.
- [6] 牛学信, 白欢. 氢燃料混合动力调车机车动力系统及能量管理策略[J]. 机车电传动, 2023(3): 65-72.
NIU Xuexin, BAI Huan. Power system and energy management strategy for hydrogen fuel hybrid power shunting locomotive[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 65-72.
- [7] 樊运新, 江大发, 康明明, 等. 氢能源混合动力机车关键技术与应用[J]. 机车电传动, 2023(3): 12-23.
FAN Yunxin, JIANG Dafa, KANG Mingming, et al. Key technologies and applications of hydrogen hybrid power locomotives[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 12-23.
- [8] 李明, 高利华, 李泽宇. 氢能源轨道车辆及动力系统发展与创新[J]. 机车电传动, 2023(3): 32-39.
LI Ming, GAO Lihua, LI Zeyu. Review on development and innovation of hydrogen-powered rail vehicles and power systems[J]. Electric drive for locomotives, 2023(3): 32-39.
- [9] TU H, FENG H, SRDIC S, et al. Extreme fast charging of electric vehicles: a technology overview[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2019, 5(4): 861-878.
DOI: 10.1109/TTE.2019.2958709.
- [10] 王力, 胡佳成, 曾祥君, 等. 基于混合储能的交直流混联微电网功率分级协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2311-2324.
WANG Li, HU Jiacheng, ZENG Xiangjun, et al. Hierarchical coordinated power control strategy for AC-DC hybrid microgrid with hybrid energy storage[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2024, 39(8): 2311-2324.
- [11] 葛艳华, 刘金晶, 宫钰明, 等. 超级电容车载应急牵引系统 DC/DC 变换器研制[J]. 电力电子技术, 2020, 54(5): 122-124.
GE Yanhua, LIU Jinjing, GONG Yuming, et al. Development of DC/DC converter for super capacitor vehicle emergency traction system[J]. Power electronics, 2020, 54(5): 122-124.
- [12] CHEN Xu, LI Mince, CHEN Zonghai. Meta rule-based energy management strategy for battery/supercapacitor hybrid electric vehicles[J]. Energy, 2023, 285: 129365. DOI: 10.1016/j.energy.2023.129365.
- [13] 丁石谷, 蔡荣海, 张鹏. 车载超级电容器组多工况动态特性仿真分析[J]. 电气传动, 2021, 51(21): 66-71.
DING Shigu, CAI Ronghai, ZHANG Peng. Simulation analysis of multi-condition dynamic characteristics of the vehicle-mounted super-capacitor pack[J]. Electric drive, 2021, 51(21): 66-71.
- [14] LU S, HILLMANSEN S, ROBERTS C. A power-management strategy for multiple-unit railroad vehicles[J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2011, 60(2): 406-420. DOI: 10.1109/TVT.2010.2093911.
- [15] TIAN Z, ZHAO N, HILLMANSEN S, et al. SmartDrive: traction energy optimization and applications in rail systems [J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2019, 20(7): 2764-2773. DOI: 10.1109/TITS.2019.2897279.

System development and on-track validation of a battery-powered locomotive

JIANG Kangrui¹, TIAN Zhongbei¹, LIU Bei¹, WANG Lei², HILLMANSEN Stuart¹

(1. School of Engineering, University of Birmingham, Birmingham, B15 2TT, UK;

2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: New energy-powered locomotive technology is a key enabler for establishing a green and low-carbon transportation system and supporting the achievement of national carbon peaking and carbon neutrality targets in China. In response to the challenges posed by the high costs of railway electrification and limited adaptability in certain regions, the development of alternative low-carbon rail traction technologies has become an important research direction. This study conducted comparative tests on two locomotives with different energy supply configurations based on the same locomotive architecture on the Stapleford Miniature Railway in the UK. The study systematically evaluated and analyzed the operational performance and economic indicators of the locomotives under two hybrid power systems: battery-supercapacitor and hydrogen fuel cell-battery. The experimental results show that the total cost and energy consumption of the battery-powered system are approximately 22% and 47%, respectively, of those of the hydrogen fuel cell system. However, due to the limitations of current battery energy density, the range achieved by the battery-powered system is approximately half that of the hydrogen-based system. These findings suggest that battery-powered locomotives are currently more suitable for short- to medium-distance, low-density transport scenarios. With ongoing advancements in battery materials and energy management technologies, their commercial potential is expected to increase significantly. This study encompasses a full development process covering vehicle design, system integration, and experimental validation, confirming the practical feasibility of battery-powered locomotives. It also proposes future directions for technology improvement, including energy management and thermal optimization.

Keywords: low-carbon rail transportation; new energy-powered locomotive; battery-powered locomotive; hybrid power system; energy-saving optimization; simulation