



内电混合动力机车能量最优调度 与控制策略研究

胡云卿, 黄 强, 陈志博, 李学明, 蒋奉兵, 何 良
(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 针对纯内燃机车能耗高、环境污染大的问题, 文章以内电混合动力机车为研究对象, 分析研究以柴油发电机为主、动力电池为辅的混合动力系统, 以提升系统能量管理的效能。首先, 文章分析了系统的拓扑架构和工作原理, 结合柴油发电机和动力电池的外特性建立了相应的工作模型; 其次, 设计出能够满足最大化电池使用寿命、机车运行燃油经济性和需求功率匹配性的最优能量调度算法, 将电池的荷电状态(SOC)视为状态转移变量, 转换为最优控制模型进行求解, 进而得到各动力源的最优输出功率, 为确保输出功率执行的实时性和平滑性, 提出了动力源能量变换器的统一控制策略; 最后, 通过搭建混合动力机车半实物仿真平台, 开展不同场景的仿真试验, 验证本文所提方法能有效兼顾机车运行的燃油经济性、动态响应的实时性和平稳性, 相比于传统规则方法其节能指标提升7.84%, 区间运行时间缩短4.07%。

关键词: 柴油发电机; 动力电池; 混合动力系统; 能量调度; 内燃机车; 仿真

中图分类号: U260.9³; U267.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)03-0022-10

0 引言

随着人们生活质量的不断提高, 能源利用与环境问题的矛盾日益尖锐^[1]。为推动我国“双碳”目标的达成, 《关于全面推进美丽中国建设的意见》《老旧型铁路内燃机车淘汰更新监督管理办法》指出: 到2027年, 老旧内燃机车基本淘汰^[2-3]。依托储能技术的飞速发展, 同时配备内燃发电机和动力电池的混合动力机车已逐步取代传统的纯内燃机车^[4], 践行“节能减排, 绿色发展”的理念^[5]。

国外对混合动力机车的研究起步较早, 捷克布拉格于1986年推出世界上第一台混合动力调车机车TA436.05, 配备总电量172.8 kW·h的镍镉蓄电池和最大功率189 kW的柴油机^[6]; 2001年, 加拿大铁路动力技术公司采用1 500 kW 铅酸蓄电池对纯内燃机车进行改进, 随后在2007年研制出拥有柴油发电机组和蓄电池的HP20BH型调车机车, 使其燃油经济性得到

进一步提升^[7]; 2006年国际会展上展出的阿尔斯通公司203H型混合动力机车, 配备FNC纤维式镍镉蓄电池和柴油发电机组, 可实现制动能量回收, 燃油消耗率降低近30%^[8]; 2010年, 日本东芝公司采用242 kW的柴油机和总电量为67.4 kW·h的锂离子电池研发了HD300系列混合动力调车机车, 节油率达36%, 有害气体减排50%以上, 已在东京投入使用^[9]; 2013年阿尔斯通公司采用“电网+柴油发电机”“锂离子电池+柴油发电机”等多种动力源组合, 增加混合动力机车的灵活性并减少油耗; 2016年德国Gmeinder机车公司在柏林国际轨道交通技术展览会上亮相了配备柴油发动机和锂离子电池的DE60C型3轴混合动力调车机车, 可大幅降低废气污染物排放^[10]。在国内, 中车资阳机车有限公司牵头立项, 于2010年自主研发出CKD6E5000混合动力调车机车, 配备功率为250 kW的磷酸铁锂电池和额定功率为600 kW的高速柴油机, 又于2017年推出总输出功率达2 200 kW的HXN6型混合动力机车, 在2022年首次实现商业应用; 2018年, 中车大连机车车

基金项目: 湖南创新型省份建设专项经费资助(2024GK1020)

通信作者: 陈志博, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事轨道交通车辆牵引传动系统与实时控制算法的研发工作; E-mail: chenzb@csrzc.com

引用格式: 胡云卿, 黄强, 陈志博, 等. 内电混合动力机车能量最优调度与控制策略研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 22-31.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.003.

Citation: HU Yunqing, HUANG Qiang, CHEN Zhibo, et al. Research on optimal energy scheduling and control strategy for internal diesel-electric hybrid locomotives[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 22-31.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.003.

辆有限公司运用总容量 185 kW·h 的钛酸锂电池和额定功率为 2 500 kW 的柴油机, 成功生产出我国首台 2205 kW(3 000 马力)环保型调车机车 FXN3B, 节能率和减排率等指标达到国际先进水平^[11]。

混合动力机车仍有许多技术需要完善, 其中如何科学合理地进行混合动力源能量管理以最大化回收利用制动能、延长电池寿命并提升燃油效率是亟待解决的难题^[12]。能量管理对各动力源的能量进行实时调度与控制, 满足当前时刻机车的功率需求, 并保证机车的安全稳定运行。文献[13-14]针对混合动力汽车分别设计出一种基于规则的能量管理策略, 确保电池的荷电状态 (state of charge, SOC) 在一定范围内变化时, 使内燃机尽量运行在最高效区间; 文献[15-16]分别提出了自适应模糊控制和预测模糊控制的能量管理策略, 将非线性关联参数模糊化, 增强了规则方法的逻辑性和适应性; 文献[17]结合感知神经网络和自适应模糊策略对车辆进行能量管理, 提升了电池寿命和燃油经济性。但上述方法尚未形成一套成熟的规则提取体系, 尤其是针对内燃机与动力电池混合动力机车 (以下简

称“内电混合动力机车”) 出现的怠速时间长、工况变化频繁等复杂场景, 既有提取好的优良规则难以复用到新应用场景中, 导致项目开发与调试周期长, 而且不能使各动力源的性能发挥至最优。

本文将对内电混合动力机车的动力源系统进行深入研究, 依据各动力源特性进行建模分析, 提出一种基于最优化的实时能量调度与控制策略, 使内燃机尽可能工作在高效区和电池工作寿命尽可能长, 在确保动力源输出功率与机车需求功率精准匹配的同时, 最大限度地回收利用制动能量, 以提升整车的燃油经济性、实时动力性和运行平稳性, 这对进一步提升混合动力机车的效能具有非常重要的意义。

1 混动系统建模分析

1.1 混动模式与系统架构

本文研究的内电混合动力机车系统主要由混合动力系统、牵引传动系统和辅助系统组成, 其拓扑图结构如图 1 所示。混合动力机车各系统的基本参数如表 1 所示。

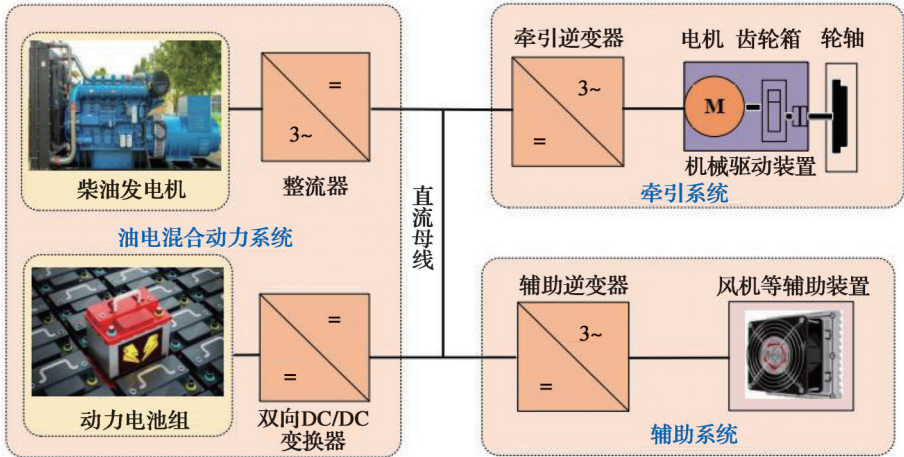


图 1 内电混合动力机车系统拓扑结构
Fig. 1 Topology of internal diesel-electric hybrid locomotive system

表 1 内电混合动力机车系统基本参数
Table 1 Basic parameters of internal diesel-electric hybrid locomotive system

指标参数	参数值	指标参数	参数值
机车质量/t	155	柴油机最大功率/kW	3 000
电池容量/(kW·h)	1 248	电池 SOC 区间/%	30~90
电池最大功率/kW	2 496	整流逆变效率/%	98

图 1 中, 混合动力系统负责柴油发电机和动力电池输出功率的调配: 在启车和低速工况时采用动力电池供能, 提升机车的加速性能; 在大功率牵引工况时, 柴油发电机工作在高效恒功区, 与动力电池一起输出功率以保证机车的高速运行; 在小功率牵引或惰行工况时, 根据动力电池 SOC 适当进行小电流充电; 在制动工况下, 动力电池最大限度地回收电制动产生的能量。牵引传动系统在机车处于牵引工况时将电能

转化为机车运行的动能, 而在电制动时将电能传送给动力电池充电, 剩余的电能由制动电阻消耗。辅助系统主要负责向牵引能量以外的机车照明、冷却等设备供电。

1.2 柴油发电机工作模型

柴油发电机是一个由发动机和发电机组成的复杂非线性系统, 负责将化学能转换成电能^[18], 其模型构建主要有理论建模和试验建模两种方法。其中, 理论建模法需要充分考虑柴油发动机的进气、喷油、燃烧反应和热传递等原理, 建模精确但计算复杂度过高; 试验建模法将发动机内部复杂的工作过程视为黑盒, 通过大量实测数据直接反映发动机燃油消耗与输出转矩、转速之间的关系。本文采用试验法对柴油发电机进行建模, 对应的查表公式为

$$C_m = \frac{dm_f}{P_{dgs} dt} = f(T_e, \omega_e) \quad (1)$$

式中: C_m 为燃油消耗率,即每产生1 kW·h能量所消耗的燃油质量; m_f 为燃油消耗质量; P_{dgs} 为柴油发电机生成功率; t 为时间; T_e 为柴油发电机的转矩; ω_e 为柴油发电机的转速。

柴油发电机未直接与牵引传动系统连接,其转速和机车运行速度无物理耦合关系,因此发电机在输出功率时能够尽可能工作在对应最优燃油消耗率点(此时发电机工作在最优转矩输出和转速状态),从而可根据式(1)搜索和计算得到发电机最优燃油消耗与输出功率关系曲线,如图2所示。

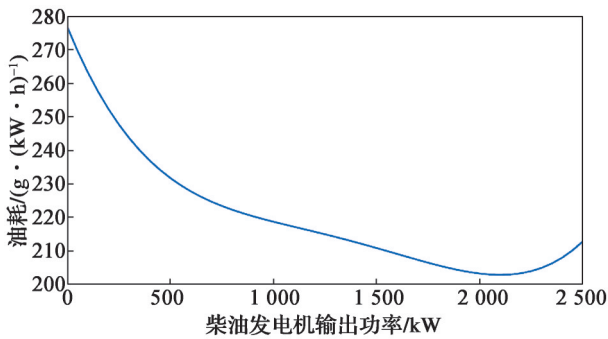


图2 柴油发电机最优燃油消耗率与输出功率的关系曲线

Fig. 2 Correlation curve between optimal fuel consumption rate and output power of diesel generator

为方便后续最优化模型的建立与求解,运用多项式对图2曲线进行拟合,即可通过该拟合公式计算柴油发电机在对应输出功率下的最优燃油消耗率 C_{mo} , 具体为

$$C_{mo} = p_0 + p_1 P_{dgs} + p_2 P_{dgs}^2 + p_3 P_{dgs}^3 \quad (2)$$

式中: p_0 、 p_1 、 p_2 、 p_3 分别为多项式常数项、一次项、二次项、三次项系数。

1.3 动力电池工作模型

动力电池的充放电是一系列化学反应过程,常用通过数学分析、等效电路和电化学原理进行建模。数学分析模型采用经验公式进行描述,精确度较低;电化学模型从反应原理出发模拟电池充放电,精度高但计算复杂^[19]。为兼顾计算精度和复杂度,本文采用一阶RC等效电路来建立电池的外特性模型,如图3所示。

运用基尔霍夫定律和欧姆定律对图3进行分析,可得:

$$\left. \begin{aligned} U_{ocv} &= I_{bat} R_o + U_p + U_{bat} \\ C_p \frac{dU_p}{dt} &= I_{bat} - \frac{U_p}{R_p} \\ P_b &= U_{ocv} I_{bat} \\ P_{bat} &= U_{bat} I_{bat} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: U_{ocv} 为电池的开路电压; R_o 为电池的内阻; C_p 、 R_p 、 U_p 分别为电池的极化电容、极化电阻、极化电压;

U_{bat} 、 I_{bat} 分别为电池的端电压和端电流; P_b 、 P_{bat} 分别为电池的内部功率、输出功率。

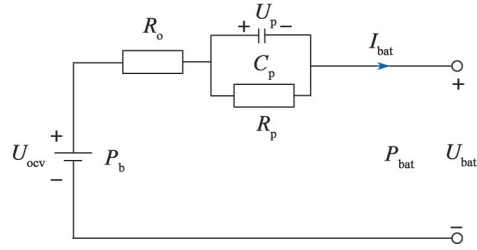


图3 动力电池一阶RC等效电路模型

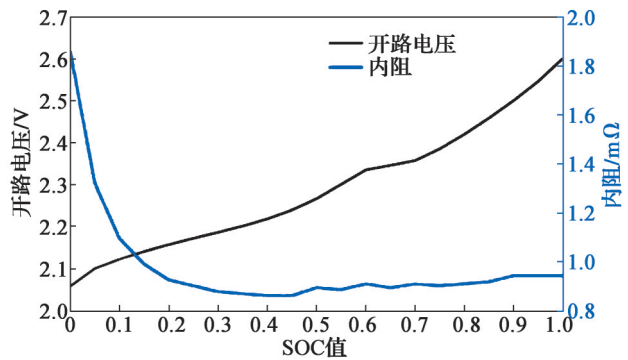
Fig. 3 First-order RC equivalent circuit model of power battery

混合动力系统会实时监测电池的SOC来判断其是否能继续工作,电池的荷电状态值 A_{soc} 可采用安时积分法进行计算,具体为

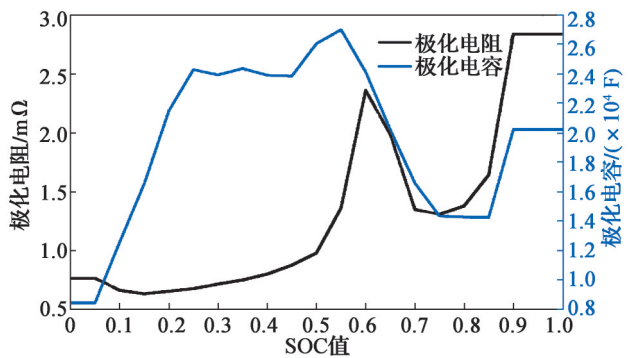
$$A_{soc} = A_{soc0} - \int \frac{I_{bat}}{Q_{bat}} dt \quad (4)$$

式中: A_{soc0} 为电池的初始荷电状态值; Q_{bat} 为电池的容量。

由于电池的 U_{ocv} 、 R_o 、 C_p 、 R_p 等参数值将随当前SOC值的变化而改变(如图4),并且其实测数据难以直接获取,因此需要根据所选电池型号确定它们之间的函数关系^[20]。本文采用某厂商开发的能量密度高、工作寿命长和环境适应性强的钛酸锂电池,通过大量的充放电试验,得到动力电池的 U_{ocv} 、 R_o 、 C_p 、 R_p 随SOC值的变化曲线,具体如图4所示。



(a) 单体电池的 U_{ocv} 、 R_o 随SOC值的变化曲线



(b) 单体电池的 R_p 、 C_p 随SOC值的变化曲线

图4 电池等效电路参数随SOC值的变化曲线

Fig. 4 Variation curve of battery equivalent circuit parameters with SOC

同理, 采用前文提到的方法对图4曲线进行拟合, 得到动力电池 U_{ocv} 、 R_o 、 C_p 、 R_p 与 S_{oc} 函数关系:

$$\left. \begin{aligned} U_{ocv}(A_{soc}) &= u_{o0} + u_{o1}A_{soc} + u_{o2}A_{soc}^2 + u_{o3}A_{soc}^3 \\ R_o(A_{soc}) &= r_{o0} + r_{o1}A_{soc} + r_{o2}A_{soc}^2 + r_{o3}A_{soc}^3 \\ U_p(A_{soc}) &= u_{p0} + u_{p1}A_{soc} + u_{p2}A_{soc}^2 + u_{p3}A_{soc}^3 \\ R_p(A_{soc}) &= r_{p0} + r_{p1}A_{soc} + r_{p2}A_{soc}^2 + r_{p3}A_{soc}^3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2 最优能量调度算法

本章对混合动力系统能量调度需要考虑的多方面因素进行分析, 在此基础上建立最优化模型, 通过求解该模型即可得到各动力源的输出功率, 保证机车运行具有最佳的燃油经济性。

2.1 调度问题分析

机车内电混合动力系统的能量调度需要着重解决动力电池在牵引工况和再生制动工况下与柴油发电机的能量协调输出问题, 尽可能提升动力电池“削峰填谷”的能力, 总体优化需考虑的因素如下:

①动力电池的最大容量限制、最大充放电电流限制、功率限制、功率变化率限制;

②由于动力电池深度充放电的循环次数有限, 为尽可能延长其工作寿命且保持稳定的电压输出, 动力电池应工作在特定的荷电范围内;

③每到达一个站点, 动力电池应保持足够的电量满足下一区段运行供电需求;

④为保证柴油发电机组的输出功耗尽可能低, 柴油发电机组应工作在高效区间内;

⑤柴油发电机的输出功率变化率受本身发电性能的限制;

⑥柴油发电机组输出的总功耗尽可能小, 需求功率与实际输出功率尽可能匹配。

2.2 约束条件设计

根据2.1节的项点①~项点⑤, 对能量调度最优化模型的约束条件进行详细设计:

①为保证机车安全平稳运行, 柴油发电机输出功率不能超过其最大输出功率; 为防止电池过充和过放, 尽量延长电池运行寿命, 电池 A_{soc} 需要满足上下限的约束, 其充放电电流与功率分别不能超过允许的最大充放电电流与功率, 以保证动力源工作在合理区间内, 其约束条件为:

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq P_{dgs} \leq P_{dgs_max} \\ A_{soc_min} &\leq A_{soc} \leq A_{soc_max} \\ P_{bat_min} &\leq P_{bat} \leq P_{bat_max} \\ I_{bat_min} &\leq I_{bat} \leq I_{bat_max} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: P_{dgs_max} 为柴油发电机的最大输出功率; A_{soc_min} 、 A_{soc_max} 分别为电池 A_{soc} 允许的下限和上限; P_{bat_min} 、 I_{bat_min} 分别为电池的最小充电功率和最小充电电流; P_{bat_max} 、 I_{bat_max} 分别为电池的最大放电功率和最大放电电流。

②柴油发电机的输出功率变化率约束条件为

$$\Delta P_{dgs_min} \leq \Delta P_{dgs} \leq \Delta P_{dgs_max} \quad (7)$$

式中: ΔP_{dgs} 为柴油发电机的输出功率变化率; ΔP_{dgs_min} 、 ΔP_{dgs_max} 分别为柴油发电机的输出功率变化率下限与上限。

③动力电池的输出功率变化率约束条件为

$$\Delta P_{bat_min} \leq \Delta P_{bat} \leq \Delta P_{bat_max} \quad (8)$$

式中: ΔP_{bat} 为动力电池的输出功率变化率; ΔP_{bat_min} 、 ΔP_{bat_max} 分别为动力电池的输出功率变化率下限与上限。

④为满足下一区段运行供电需求, 电池 A_{soc} 的初始状态与终端状态具有如下边界条件:

$$\left. \begin{aligned} A_{soc(0)} &= A_{soc0} \\ |A_{soc(n-1)} - A_{socn}| &\leq \Delta A_{socn} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: A_{soc} 为电池期望的终端荷电状态; ΔA_{socn} 为电池初始荷电状态与期望终端荷电状态的差值阈值。

⑤混合动力系统输入输出功率守恒, 具体如下:

$$\left. \begin{aligned} P_{dgs}\eta_{dgs} + P_{bat}\eta_{bat}^{k_2} &= P_{aux} + P_{tra}\eta_{tra}^{k_1} + P_{br} \\ 0 &\leq P_{br} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中

$$k_1 = \begin{cases} -1, & P_{tra} \geq 0 \\ 1, & P_{tra} < 0 \end{cases}$$

$$k_2 = \begin{cases} 1, & P_{bat} \geq 0 \\ -1, & P_{bat} < 0 \end{cases}$$

式中: P_{aux} 为辅助系统与列车供电的消耗功率; P_{br} 为制动电阻消耗功率; η_{tra} 为牵引传动系统效率; η_{dgs} 为柴油发电机效率; η_{bat} 为电池效率; k_1 、 k_2 分别为牵引传动系统效率与电池效率的幂指数。

2.3 目标函数设计

基于2.1节的项点⑥, 对混合动力机车能量调度问题构建目标函数 J_p , 该目标函数可表示为

$$J_p = \omega_{de} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{C_{mo(i)} P_{dgs(i)}}{v(i)} \Delta s \right) + \omega_{pv} \sum_{i=0}^{n-2} (P_{dgs(i+1)} - P_{dgs(i)})^2 + \omega_{sd} \sum_{i=0}^{n-1} (A_{soc(i)} - A_{socn})^2 + \omega_{pd} \sum_{i=0}^{n-1} (P_{tra(i)} - P_{rq(i)})^2 \quad (11)$$

式中: P_{rq} 为需求的功率; P_{tra} 为牵引传动系统实际的输出功率; s 为位移; v 为机车行驶速度; n 为线路位移等分数; ω_{de} 为燃油消耗量优化权重系数; ω_{pv} 为柴油发电机输出功率变化率优化权重; ω_{sd} 为电池始末荷电状

态偏差的优化权重系数； ω_{pd} 为牵引系统实际输出轮周功率与需求轮周功率差值优化权重。

2.4 模型求解与实现

由前文的1.2节和1.3节建模分析，以及混合动力机车能量调度需要满足前文2.2节、2.3节的约束与目标条件可知，其本质上是一个最优控制问题。选取电池的 A_{soc} 作为状态变量、输出功率 P_{bat} 作为控制变量，由式(3)和式(4)推导可得出电池的位移域状态空间方程，具体为

$$\Delta A_{soc} = - \frac{U_{ocv} - U_p - \sqrt{(U_p - U_{ocv})^2 - 4R_o P_{bat}}}{2R_o Q_{bat} v} \Delta s \quad (12)$$

综合式(5)~式(12)的约束条件、目标函数和状态空间方程，可得到混合动力机车能量调度最优控制模型如式(13)。

$$\begin{aligned} \min J_p \\ \text{s.t. } U_{ocv}(A_{soc}) &= u_{o0} + u_{o1} A_{soc} + u_{o2} A_{soc}^2 + u_{o3} A_{soc}^3 \\ R_o(A_{soc}) &= r_{o0} + r_{o1} A_{soc} + r_{o2} A_{soc}^2 + r_{o3} A_{soc}^3 \\ U_p(A_{soc}) &= u_{p0} + u_{p1} A_{soc} + u_{p2} A_{soc}^2 + u_{p3} A_{soc}^3 \\ R_p(A_{soc}) &= r_{p0} + r_{p1} A_{soc} + r_{p2} A_{soc}^2 + r_{p3} A_{soc}^3 \\ 0 \leq P_{dgs} &\leq P_{dgs, \max} \\ A_{soc, \min} &\leq A_{soc} \leq A_{soc, \max} \\ P_{bat, \min} &\leq P_{bat} \leq P_{bat, \max} \\ I_{bat, \min} &\leq I_{bat} \leq I_{bat, \max} \\ \Delta P_{dgs, \min} &\leq \Delta P_{dgs} \leq \Delta P_{dgs, \max} \\ \Delta P_{bat, \min} &\leq \Delta P_{bat} \leq \Delta P_{bat, \max} \\ A_{soc(0)} &= A_{soc0} \\ |A_{soc(n-1)} - A_{soc}| &\leq \Delta A_{socm} \\ P_{dgs} \eta_{dgs} + P_{dgs} \eta_{dgs}^{k_2} &= P_{aux} + P_{tra} \eta_{tra}^{k_1} + P_{br} \\ \Delta A_{soc} &= - \frac{U_{ocv} - U_p - \sqrt{(U_p - U_{ocv})^2 - 4R_o P_{bat}}}{2R_o Q_{bat} v} \Delta s \end{aligned} \quad (13)$$

采用内点法求解器求解该非线性二次规划的最优化问题，即可实时得到各动力源的最优输出功率。

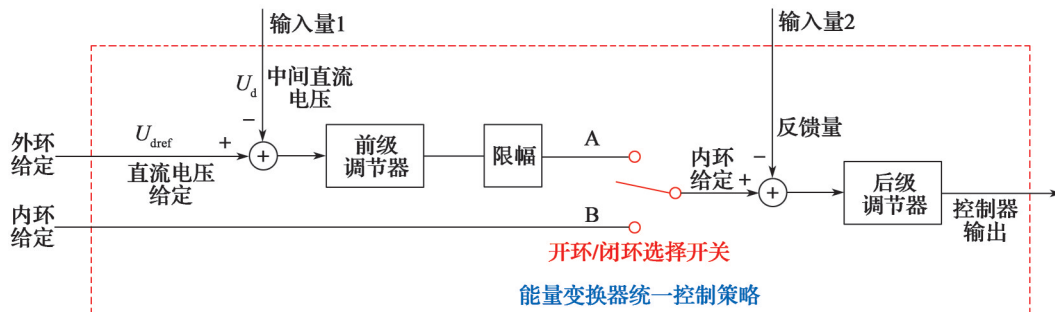
3 功率实时控制策略

在最优调度得到各动力源需要发挥的功率后，为保证直流母线电压的稳定、动力源快速响应且精准输出目标功率，以及功率变换过程中的平稳切换，本文提出一种功率变换器统一实时控制策略，减小动力源的功率冲击，以实现更高的控制精度和更优的能量利用效果。

3.1 功率变换器统一控制策略

图1中柴油发电机和动力电池均配有能量变换器，其中柴油发电机为交流动力源，其能量变换由励磁控制系统完成，而动力电池为直流动力源，其能量变换由DC-DC变换器完成。在不同的优化目标与约束条件下，柴油机与动力电池发挥的功率需要实时变化。为实现直流母线电压的稳定，两个控制器不能均为闭环控制，受柴油机与动力电池各自功率的限制和优化目标的不同，两种能量源的控制模式必然涉及切换。如果切换控制不当，会带来较大的功率冲击，造成直流母线电压的大幅波动，甚至引发故障。为实现在实时跟踪功率的前提下对控制器进行无冲击的开环/闭环切换，本文提出一种功率变换器统一控制策略，即励磁控制系统与DC-DC控制采用完全相同的拓扑结构与调节方式，能量变换器统一控制策略拓扑形式如图5所示。

直流电压环为控制外环，将直流给定电压与“反馈量1（中间直流电压）”的差值作为误差信号，将其送入前级调节器对前级调节器的输出进行限幅，控制内环的功率输出或者电流输出，“开环/闭环选择开关”控制前级控制环节工作在闭环模式或开环模式。“信号A”为前级调节器限幅后的输出信号，也是闭环控制模式下内环的给定值。在发电机模式下，“信号A”为发电机输出功率或励磁电流的给定值；在动力电池模式下，“信号A”为电池输出电流或功率的给定值。“信号B”为开环模式下内环的给定值，其属性与“信号A”保持一致。内环给定值与“反馈量2（动力源的实时输出功率或电流）”的差值送入后级调节器，最终



输入量1—中间直流电压；输入量2—电流，在励磁控制系统中指励磁电流，在DC-DC控制系统中指动力电池的放电电流。

图5 能量变换器统一控制策略示意图

Fig. 5 Schematic diagram of unified control strategy for energy converters

送出控制信号实现内环控制。

“信号 A/B”经过选择开关后作为后级调节器的给定值, 后级调节器的功能主要是限制动力源功率不超过最大的功率或电流不超过允许值, 在发电机供电模式下, 其输出为励磁控制信号, 而在动力电池供电模式下, 其输出为 DC-DC 变换器的 PWM 脉冲信号。采用这种两级控制与后级调节器给定值可选模式的优点在于当动力源功率达到最大时, 能够迅速地将闭环模式平稳过渡到开环模式, 为其后投入的另一种动力源采取闭环模式提供便利。

3.2 能量控制的平滑切换方法

在图 5 所示的统一控制策略下, 随着调度需求功率的上升或下降, 投入工作的动力源种类及其功率大小也随之改变。在图 1 所示的系统中, 包括了内燃机和动力电池两种动力源, 先投入工作的动力源标记为“N1”, 后投入工作的动力源标记为“N2”。N1 首先投入后, 采用直流电压闭环控制方式, 即图 5 中“开环/闭环选择开关”打到“位置 A”, 随着功率的提升, 前级调节器达到“信号 A”的限幅门槛, 此时 N1 已经达到了其最大输出能力, 前级调节器处于饱和状态, 外环自动失效。随着能量调度层的分配功率进一步增加, 仅依靠一个能量源无法满足后端功率需求, 此时, 将“开环/闭环选择开关”打到“位置 B”, “通道 B”的内环给定初始值与“通道 A”的限幅门槛上限保持一致, 此时 N1 仅依靠内环控制进行工作, 而且其功率转变为任意可控的状态, 此时将 N2 投入工作, 并且 N2 采取闭环控制的模式, 既能够满足上层调度功率需求, 又能够完全平衡后端负载需求, 维持直流电压恒定, 从而实现由单一的 N1 功率输出转变为 N1 与 N2 的共同输出, 而且没有任何功率冲击。

如果上层调度逐步降低功率给定, 原理是一样的。由于 N1 工作于满载工况, N2 工作于闭环模式, 因此当后端功率下降时, N2 的功率输出也逐步下降, 直至为 0。此时, 将 N1 控制器的“开环/闭环选择开关”从“位置 B”打到“位置 A”, 在满负荷工作点实现开环到闭环的切换, 随着上层给定功率的进一步降低, N1 的闭环调节能够始终满足负载功率的需求, 并且维持直流电压的恒定。

综上所述, 在 N1 与 N2 双动力源共同为后端负载提供功率的情况下, 采用图 5 所示统一控制策略, 能够始终保证只有一个动力源的能量变换器工作于直流电压闭环状态, 另一个动力源工作于直流电压开环工作状态。通过这种控制, 在保证总需求功率的前提下, 直流母线电压始终可控, 多个动力源的控制器不存在互相干扰的情况, 并且在需求功率逐步上升或下降的过程中, 能够实现能量的次第投入与次第切除, 各动力源能够平滑投入工作与切除, 没有功率冲击。

4 仿真案例与分析

4.1 仿真场景与参数设置

为验证本文所设计能量最优调度与控制策略的有效性, 通过集成司控台、牵引系统、网络控制系统、dSPACE 等实物系统构建出内电混合动力机车半实物仿真测试平台。其中柴油发电机、动力电池、DC-DC 变换器、逆变器、牵引电机、中间直流回路等模型采用数值仿真工具软件进行建模并部署至 dSPACE 硬件平台, 实时模拟机车动力系统的运行状态, 同时集成线路数据和逼真的线路视觉效果, 如图 6 所示。

4.2 仿真结果

4.2.1 仿真场景一

本节针对能量调度算法的性能进行仿真验证, 仿真场景: 机车起点到终点运行距离为 2 km, 采用柴油发电机与动力电池混合动力模式运行, 辅助功率约为 250 kW, 电池初始 SOC 值为 60%, 运行得到动力系统各功率-位移变化曲线、动力电池 SOC 值-时间变化曲线分别如图 7 和图 8 所示。

图 7 中, 需求的轮周功率曲线与实际的输出轮周功率曲线基本重合, 机车启动时主要由动力电池提供功率, 而机车停车时主要由动力电池回收功率; 在制动工况下 (需求功率为负) 制动能量尽可能地由动力电池吸收, 只有在达到动力电池充电功率上限时, 剩余制动能量才通过制动电阻消耗。图 8 中, 动力电池初始 SOC 值为 60.0%, 终止 SOC 值为 59.3%, 始末 SOC 值的波动率低于 1.2%, 全程波动范围在 30%~90%。

经分析可知, 本能量调度算法能很好地满足轮周功率需求, 启车停车响应速度由高比功率的动力电池决定, 有效提升了机车运行的动态性能, 同时制动能量通过动力电池得到最大化回收与利用, 且动力电池的始末 SOC 值变化率很小, 能持续满足下一区段运行供电需求, 充分发挥其最优性, 有效保证整车的燃油经济性、实时动力性和动力电池的使用寿命。

4.2.2 仿真场景二

本节针对功率实时控制策略的性能进行仿真验证, 仿真场景: 机车牵引电机的轴功率 545 kW、最高电压 1 326 V、额定电流 478 A, 柴油发电机额定电压 1 346 V、额定电流 1 716 A, 动力电池额定电压 1 408 V, 主传动结构为交-直-交, 控制方式为轴控, 主电路由 1 组二极管三相整流器和 6 组逆变器组成, 分别为两个转向架上的 6 台电机以及机车的辅助负载供电, 运行得到动力系统直流母线电压-时间变化曲线、柴油发电机与动力电池输出功率-时间变化曲线分别如图 9 和图 10 所示。

从图 9、图 10 的仿真波形可以看出, 柴油发电机与动力电池的输出功率能够迅速跟随给定功率的设定

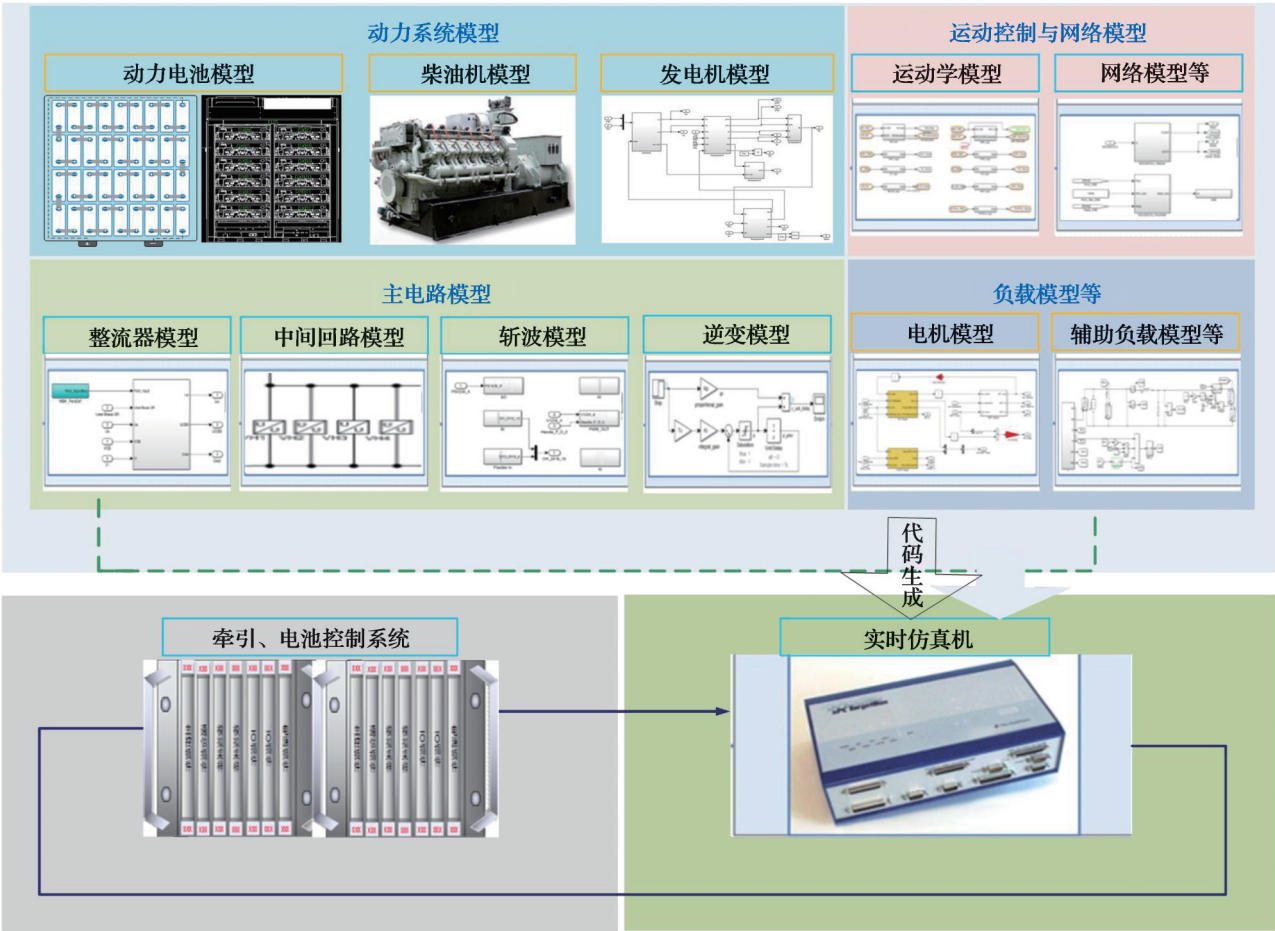


图 6 混合动力机车半实物仿真测试平台
Fig. 6 Hardware-in-loop simulation platform for hybrid locomotive

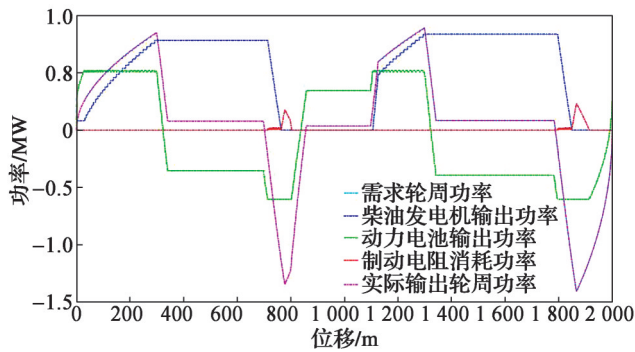


图 7 动力系统各功率随位移变化曲线
Fig. 7 Variation curves of power from power sources with running distance

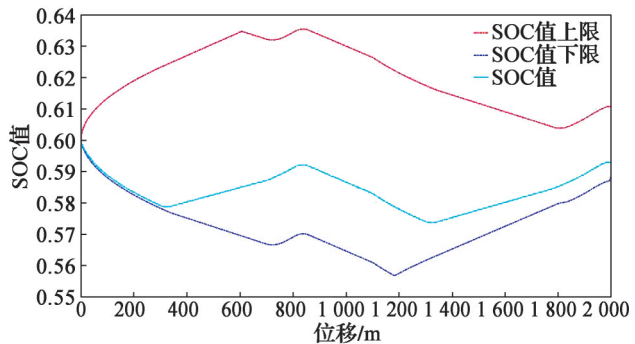


图 8 动力电池 SOC 值随位移变化曲线
Fig. 8 Variation curve of power battery SOC with running distance

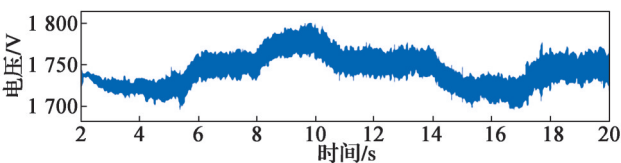


图 9 直流母线电压随时间变化曲线
Fig. 9 Variation curve of DC busbar voltage with time

值；全过程中，输出功率在 500 kW/s 的剧烈扰动情况下，中间直流电压的纹波控制在 ± 50 V 内，整体性能良好，验证了本文控制策略具备高精度稳态性能与高实时性的暂态性能。

4.2.3 仿真场景三

本节针对能量调度与控制策略联合工作的有效性进行仿真验证，仿真场景：南疆线中库尔勒至喀什路段数据，线路全长 962 km，共有 38 个站点，采用柴油发电机与动力电池混合动力模式运行，辅助功率约为 250 kW。采用基于传统规则的能量调度与控制策略（用 V1.0 表示）与本文方法（用 V2.0 表示）进行对比，运行得到机车运行能耗-全线路位移变化曲线、机车单车站（喀什—阿图什）典型运行时间曲线、机车启车速度-时间变化曲线、机车加速度变化量（冲击率）-时间变化曲线分别如图 11~图 14 所示。

由图 11 可知，采用传统规则方法，机车全路线

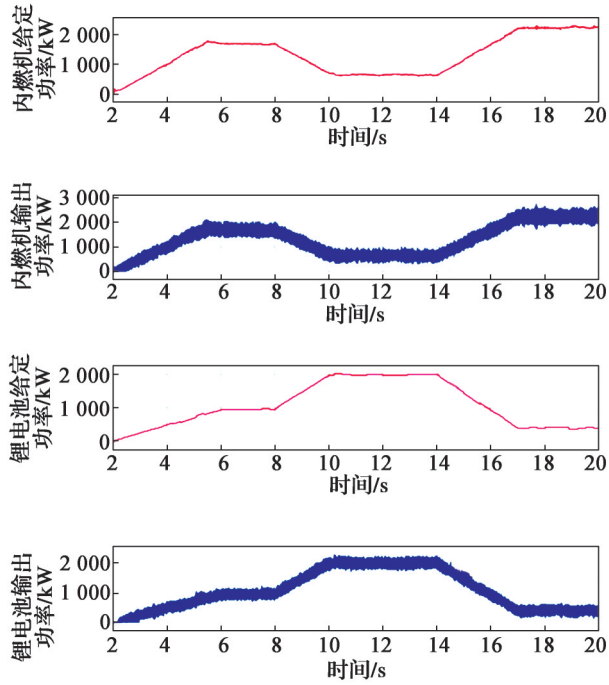


图10 柴油发电机与动力电池输出功率随时间变化曲线

Fig. 10 Variation curves of output power from diesel generator and power battery with time

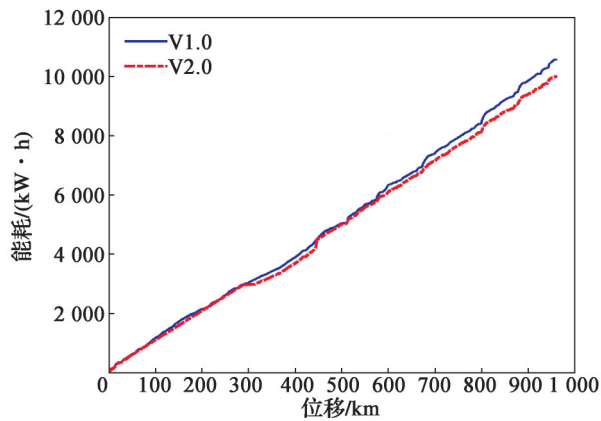


图11 机车运行能耗随全线路位移变化曲线

Fig. 11 Variation curve of energy consumption during locomotive operation with running distance along entire route

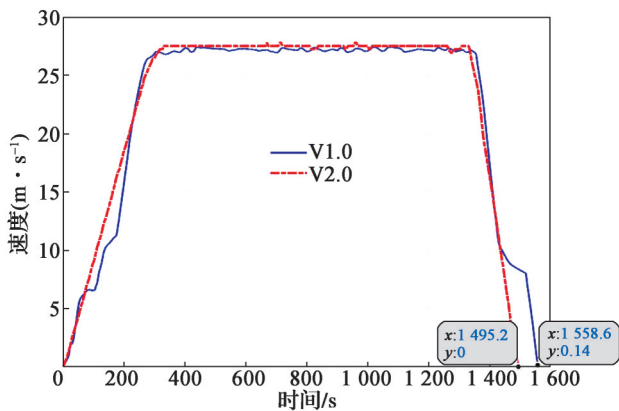


图12 机车单车站典型运行时间曲线

Fig. 12 Typical running time curve of locomotive at single station

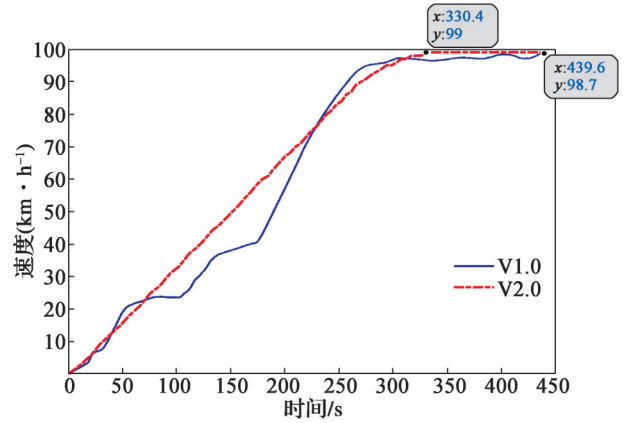


图13 机车启车速度随时间变化曲线

Fig. 13 Variation curve of locomotive starting speed with time
能耗为 10 843.51 kW·h; 而采用本文方法, 机车全线路能耗为 9 993.28 kW·h, 节能率达 7.84%。图 12 中, 采用本文方法线路运行时间由原来的 1 558.6 s 缩减为 1 495.2 s, 运行时间减少 4.07%。图 13 中, 机车从静止达到实际运行速度 100 km/h 时, 采用本文方法需要 330.4 s, 而采用传统基于规则的方法需要 439.6 s, 加速时间减少了近 25%, 且速度起伏更为平顺。图 14 中, 采用传统基于规则的方法, 机车运行加速度变化率波动幅度最高达到 0.15 m/s³; 而采用本文方法, 机车运行加速度变化率波动幅度在 0.05 m/s³ 以内, 行车平稳度提升了 2 倍以上。

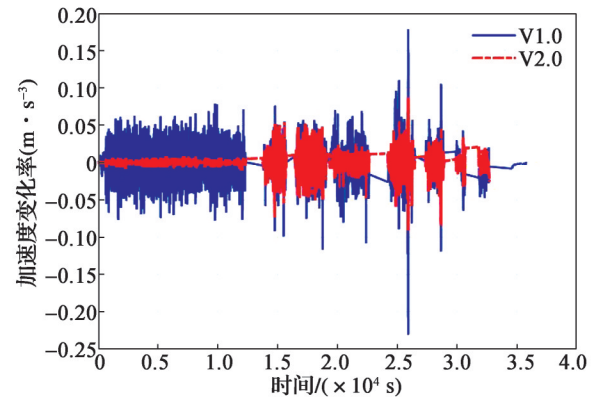


图14 机车加速度变化率随时间变化曲线

Fig. 14 Variation curve of locomotive acceleration with time

综上 4 个仿真指标参数的分析及对比, 表明本文研究的机车能量最优调度与控制策略相比于传统规则方法, 在实现大幅节约运行能耗的前提下, 进一步提升了机车的牵引动力性能, 全方位地提升了整车运行的燃油经济性、实时动力性和运行平稳性, 试验效果优良。

5 结束语

本文针对内电混合动力机车的能量管理问题, 提出了一种最优能量调度与实时控制策略。首先, 对机车系统的拓扑架构和工作原理进行研究, 分别采用试

验建模法和一阶RC等效电路构建了柴油发电机和动力电池的工作模型；然后，对混合动力系统最优能量调度问题进行分析，设计满足各动力源工作特性的约束条件以及最小化燃油消耗和需求功率匹配的目标函数，以动力电池的SOC值的随位移的变化作为状态空间方程，构建非线性最优控制模型，并求解得到各动力源的最优输出功率；之后，给出动力源能量变换器的统一控制策略，保证控制的实时性和平滑性；最后，搭建了混合动力机车的可视化半实物仿真平台，通过不同场景的仿真验证测试，所提出的能量调度与控制方法能使混合动力机车具备优良的节能性、动态响应特性和运行的平稳性。未来的研究将着重于能量调度与运行速度规划的一体化方面，最大化电池工作寿命和柴油发电机的效能，进一步提升燃油经济性和运行效率。同时，需要考虑机车辅助功率与运行动力学模型的时变特性，以及线路的坡度和限速特征等对能量管理影响的技术研究。

参考文献:

- [1] YAN Junhao, GAO Suya, ZHAO Weihua, et al. Study of combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with diesel, butanol-diesel and hexanol-diesel mixtures under low intake pressure conditions[J]. Energy conversion and management, 2021, 243: 114273.
- [2] 中共中央, 国务院. 关于全面推进美丽中国建设的意见[EB/OL]. (2023-12-27) [2025-03-05]. https://www.qstheory.cn/yaowen/2024-01/11/c_1130058260.htm.
Central Committee of the Communist Party of China, State Council. Opinions on comprehensively promoting the construction of a beautiful China[EB/OL]. (2023-12-27) [2025-03-05]. https://www.qstheory.cn/yaowen/2024-01/11/c_1130058260.htm.
- [3] 国家铁路局. 国家铁路局关于印发《老旧型铁路内燃机车淘汰更新监督管理办法》的通知[EB/OL]. (2024-09-26) [2025-03-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202409/content_6977731.htm.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Policy interpretation of the supervisory measures for the phase-out and renewal of outdated railway diesel locomotives[EB/OL]. (2024-09-26) [2025-03-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202409/content_6977731.htm.
- [4] 王天冬, 宋鹏云. 混合动力列车能量管理策略的优化方法及系统[J]. 内燃机与配件, 2019(22): 61-63.
WANG Tiandong, SONG Pengyun. Optimization method and system for energy management strategy of hybrid electric trains[J]. Internal combustion engine & parts, 2019(22): 61-63.
- [5] 新华社. 《新时代的中国绿色发展》白皮书[EB/OL]. (2023-01-19) [2025-03-05]. <https://www.gov.cn/zhengce/>2023-01/19/content_5737923.htm.
- Xinhua News Agency. China's green development in the new era (white paper)[EB/OL]. (2023-01-19) [2025-03-05]. https://www.gov.cn/zhengce/2023-01/19/content_5737923.htm.
- [6] ЛУВИШИС А Л, 邢澍. 国外混合动力机车的发展[J]. 国外铁道机车与动车, 2015(6): 38-41.
ЛУВИШИС А Л, XING Shu. Development of foreign hybrid locomotives[J]. Foreign railway locomotive and motor car, 2015(6): 38-41.
- [7] COUSINEAU R. Development of a hybrid switcher locomotive the railpower green goat[J]. IEEE instrumentation & measurement magazine, 2006, 9(1): 25-29.
- [8] 黄露霞. 国内外混合动力机车的新发展[J]. 铁道机车与动车, 2018(6): 1-5.
HUANG Luxia. New developments in hybrid locomotives at home and abroad[J]. Railway locomotive and motor car, 2018(6): 1-5.
- [9] OGAWA T, KANNO H, SOEDA T, et al. Environmental evaluation of a diesel hybrid shunting locomotive[C]//IEEE. 2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. Bologna: IEEE, 2012: 1-6.
- [10] 李廉枫, 朱兵, 任聪. 国内外混合动力机车的开发与应用[J]. 机车电传动, 2020(5): 73-76.
LI Lianfeng, ZHU Bing, REN Cong. Development and application practice of hybrid locomotive at home and abroad [J]. Electric drive for locomotives, 2020(5): 73-76.
- [11] 林庚毅. 混合动力机车牵引系统建模与能量管理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
LIN Gengyi. Modeling and energy management of traction system for hybrid locomotive[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [12] 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.
- [13] BANVAIT H, ANWAR S, CHEN Yaobin. A rule-based energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicle (PHEV)[C]//IEEE. 2009 American Control Conference. St. Louis: IEEE, 2009: 3938-3943.
- [14] ANBARAN S A, IDRIS N R N, JANNATI M, et al. Rule-based supervisory control of split-parallel hybrid electric vehicle[C]//IEEE. 2014 IEEE Conference on Energy Conversion. Johor Bahru: IEEE, 2014: 7-12.
- [15] ZAND M, NASAB M A, HATAMI A, et al. Using adaptive fuzzy logic for intelligent energy management in hybrid vehicles[C]//IEEE. 2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering. Tabriz: IEEE, 2020: 1-7.
- [16] JAFARI M, MALEKJAMSHIDI Z, ZHU Jianguo, et al. A novel predictive fuzzy logic-based energy management sys-

tem for grid-connected and off-grid operation of residential smart microgrids[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2020, 8(2): 1391-1404.

[17] ZHANG Ridong, TAO Jili, ZHOU Huiyu. Fuzzy optimal energy management for fuel cell and supercapacitor systems using neural network based driving pattern recognition[J]. IEEE transactions on fuzzy systems, 2019, 27(1): 45-57.

[18] 姜明杰. 油电混合动力调车机车典型工况构建及配置优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.

JIANG Mingjie. Development of the typical driving cycle and configuration optimization for diesel-battery hybrid shunting locomotive[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.

[19] 金强, 李军. 锂离子动力电池建模方法综述[J]. 汽车工程师, 2021(7): 11-14.

JIN Qiang, LI Jun. Review of modeling techniques for lithium-ion traction batteries[J]. Automotive engineer, 2021(7): 11-14.

[20] 胡晓松, 唐小林. 电动车辆锂离子动力电池建模方法综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 20-31.

HU Xiaosong, TANG Xiaolin. Review of modeling techniques for lithium-ion traction batteries in electric vehicles [J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(16): 20-31.

Research on optimal energy scheduling and control strategy
for internal diesel-electric hybrid locomotives

HU Yunqing, HUANG Qiang, CHEN Zhibo, LI Xueming, JIANG Fengbing, HE Liang

(Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: To address the disadvantages of high energy consumption and significant environmental pollution associated with pure diesel locomotives, this paper takes diesel-electric hybrid locomotives as the research object, and investigates hybrid power systems primarily based on diesel generators and supplemented by power batteries, with the goal of enhancing the efficiency of system energy management. Firstly, the system topology and operating principle were analyzed, leading to the establishment of an operating model that accounts for the external characteristics of diesel generators and power batteries. The paper then presented the design of an optimal energy scheduling algorithm aimed at maximizing the service life of batteries, as well as ensuring fuel economy and power demand matching during locomotive operation. This algorithm was transformed into an optimal control model by incorporating the state of charge (SOC) of batteries as a state transition variable. Solving this model yielded the optimal output power of each power source. Furthermore, a unified control strategy of energy converters for the power sources was proposed, to ensure the real-time performance and smoothness of power output. Simulation experiments were conducted on a hardware-in-loop simulation platform for diesel-electric hybrid power locomotives in various scenarios. The results indicate the proposed strategy is effective in enhancing fuel economy, real-time performance and smoothness in dynamic response during locomotive operation. Specifically, compared with traditional rule-based methods, the energy saving index is increased by 7.84%, and the sectional running time is shortened by 4.07%.

Keywords: diesel generator; power battery; hybrid power system; energy scheduling; diesel locomotive; simulation