

串联式混合动力矿卡双模能量管理策略研究

梁岩岩¹, 刘吉超¹, 陈正², 杨海¹

(1. 江苏汇智高端工程机械创新中心有限公司, 江苏, 徐州 221000;
2. 中国矿业大学 材料与物理学院, 江苏, 徐州 221116)

摘要: 为充分发挥油电混动系统在矿卡上的节能减排性能, 针对串联式混合动力矿卡提出一种双模能量管理策略(EMS)。利用反向传播神经网络(BPNN)构建了“发动机最优油耗模式”和“增程器效率最优模式”模型, 在此基础上, 设计了一种双模EMS来调整增程器与电池包的功率输出, 实现了整车在复杂工况下的能耗实时调整, 以实际工况数据对提出的策略进行了硬件在环仿真验证。结果表明, 与规则策略和等效能耗最小策略相比, 双模EMS的节油率分别提升了12.74%和7.4%, 进一步提升了实时策略的节油性能。

关键词: 串联式混合动力; 矿卡; 双模; 能量管理策略; 反向传播神经网络

中图分类号: U461.8 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.05.10

Research on Dual-Mode Energy Management Strategy for a Series Hybrid Electric Mine Truck

LIANG Yanyan¹, LIU Jichao¹, CHEN Zheng², YANG Hai¹

(1. Jiangsu Advanced Construction Machinery Innovation Center Ltd., Xuzhou 221000, Jiangsu, China;
2. School of Materials and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: To fully utilize the energy-saving and emission-reduction performance of the oil-electric hybrid system on mine truck, a dual-mode energy management strategy (EMS) is proposed for a series hybrid electric mine truck. The back propagation neural network (BPNN) was used to construct the models of “optimal fuel consumption mode of engine” and “optimal efficiency mode of range extender” in this EMS. On this basis, a dual-mode EMS was designed to adjust the power output of the range extender and battery pack, realizing the real-time adjustment of the energy consumption for the vehicle under complex working conditions. Finally, the proposed EMS was verified by hardware in the loop simulation with actual working condition data. The results show that compared with the rule strategy and equivalent consumption minimization strategy, the fuel saving rate of the dual-mode EMS increases by 12.74% and 7.4% respectively, further improving the fuel saving performance of the real-time strategy.

Keywords: series hybrid electric; mine truck; dual-mode; energy management strategy; back propagation neural network

收稿日期: 2023-07-12 改稿日期: 2023-09-04 网络首发日期: 2024-07-29

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(62103415)

参考文献引用格式:

梁岩岩, 刘吉超, 陈正, 等. 串联式混合动力矿卡双模能量管理策略研究[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(5): 839-847.

LIANG Yanyan, LIU Jichao, CHEN Zheng, et al. Research on Dual-Mode Energy Management Strategy for a Series Hybrid Electric Mine Truck[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(5): 839-847. (in Chinese)



串联式混合动力技术是矿卡实现绿色低碳发展的重要途径之一。为充分发挥串联式油电混动系统在矿卡上的节能减排性能,选择合理的能量管理策略(Energy Management Strategy, EMS)至关重要。

对于矿卡来说,EMS调控的实时性和优化效果的一致性共同决定策略对随机工况的适应能力。目前,已提出的实时策略主要包括:规则策略和瞬时优化策略^[1]。规则策略遵循转矩或功率平衡原则,其特点是规则库的制定依赖专家经验,设计简单,便于工程应用^[2]。例如,罗国鹏等^[3]以能耗最小作为优化目标,结合插电式混合动力车辆的需求转矩和电池荷电状态(State of Charge, SOC)制定了控制规则库。钱立军等^[4]提出一种“发动机调速+离合器模糊PID控制+发动机动态转矩查表+双电机转矩补偿控制”的转矩协调控制方法,并制定了模式切换的逻辑规则。WASSIF等^[5]以离线计算得到发动机控制MAP图、车辆功率需求和SOC制定了功率分配规则。然而,规则策略的优化效果依赖于专家经验,主观性强,对工况适应性较差。

不同于规则策略,瞬时优化策略在遵循动力平衡原则的基础上,通过解决能耗优化问题来实现最优策略的求取,策略优化效果依赖于参考信息的完备性。例如,文献[6]~[8]提出的等效油耗最小策略(Equivalent Consumption Minimization Strategy, ECMS)的优化效果取决于合适的等效因子的选取,而等效因子的求取需要提前确定待优化的工况信息。文献[9]~[11]提出的模型预测控制策略的优化效果依赖于提前预测的工况信息的准确性。文献[12]~[15]提出的近似最优优化策略的优化效果取决于历史工况信息和未来工况信息的完整性。而在实际作业过程中,矿卡的工况信息是随机变化的,很难提前确定参考信息的完整性和准确性,这就降低了策略优化效果的一致性。

为此,提出一种不依赖于工况信息完备性的双模EMS来解决上述问题。策略利用“发动机最优油耗模式”和“增程器最优效率模式”,根据整车实时需求功率和电池包SOC状态,灵活地切换增程器与电池包的功率耦合方式,在保证实时性的前提下,提升整车的节能效果。

1 整车系统建模

以某型串联式混合动力矿卡为载体进行建模,其动力拓扑结构如图1所示。发动机和发电机组组成增程器,可同时向驱动电机及电池包供电;驱动电机可由电池包、增程器单独供电或两者共同供电;电池包既可放电驱动电机,也可回收驱动电机的动能。由车辆动力学可知, t 时刻轮端需求转矩 $T_{wh}(t)$ 、转速 $n_{wh}(t)$ 和功率 $P_{wh}(t)$ 可表示为:

$$\begin{cases} T_{wh}(t) = \left[\begin{aligned} & m(t) \cdot g \cdot \sin \theta(t) + \\ & m(t) \cdot g \cdot \cos \theta(t) \cdot \rho_f(t) + \\ & \delta \cdot m \cdot (t) \cdot a(t) + 0.5 C_D \cdot A \cdot \rho_a \cdot v(t)^2 \end{aligned} \right] \cdot r_{wh}(t) \\ n_{wh}(t) = 30v(t) / [\pi \cdot r_{wh}(t)], \\ P_{wh}(t) = T_{wh}(t) \cdot n_{wh}(t) / 9550 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为整车质量; g 为重力加速度; θ 为坡道角; ρ_f 为滚阻系数; δ 为旋转质量系数; a 为车辆加速度; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ_a 为空气密度; v 为车速; r_{wh} 为车轮半径。

鉴于逆变器仅作为交流转直流模块,所以不考虑其效率损失,继续对其他动力单元进行建模。

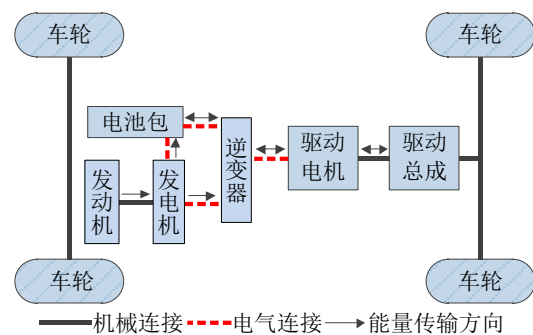


图1 串联式混合动力矿卡构型拓扑

1.1 发动机模型

发动机的作业过程和油耗特性表示为:

$$\begin{cases} P_e(t) = \frac{T_e(t) \cdot n_e(t)}{9550}, \\ m_e(t) = \frac{P_e(t) \cdot \dot{m}_e(T_e(t), n_e(t)) \cdot \Delta t}{3600} \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_e 、 T_e 、 n_e 、 \dot{m}_e 分别为发动机输出的机械功率、转矩、转速和油耗率, \dot{m}_e 与 T_e 和 n_e 之间的关系可由三者间的MAP图来表征; Δt 为发动机在当

前 T_c 和 n_c 下的连续作业时间。

1.2 发电机模型

发电机的作业特性可表示为：

$$\begin{aligned} P_g(t) &= U_g(t) \cdot I_g(t) \\ &= \frac{T_g(t) \cdot n_g(t) \cdot i_g(T_g(t), n_g(t))}{9550} \\ &= \frac{T_c(t) \cdot i_{cg} \cdot n_c(t) \cdot i_g(T_g(t), n_g(t))}{9550} \\ &= P_c(t) \cdot i_{cg} \cdot i_g(T_g(t), n_g(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

式中： P_g 、 U_g 、 I_g 分别为发电机输出的电功率、电压及电流； T_g 和 n_g 分别为发电机从发动机端输入的转矩和转速； i_{cg} 为发动机到发电机端的机械传输效率； i_g 为发电机的发电效率，它与 T_g 和 n_g 呈非线性函数关系，可用发电机效率MAP图表征。

1.3 电池包模型

根据安时积分法对电池包进行建模，如式（4）所示。

$$\dot{SOC}(t) = \frac{-U_b(t) + \sqrt{U_b(t)^2 - 4P_b(t) \cdot R_b(t)}}{2C_{Ah} \cdot R_b(t)} \quad (4)$$

式中： U_b 、 R_b 、 C_{Ah} 分别为电池包的端电压、内阻和电量，电池包输出电功率 P_b 可进一步表示为：

$$P_b(t) = \begin{cases} U_b(t) \cdot I_b(t) \cdot i_{dis}(t), & P_b(t) \geq 0, \\ U_b(t) \cdot I_b(t) / i_{ch}(t), & P_b(t) < 0. \end{cases} \quad (5)$$

式中： I_b 、 i_{ch} 、 i_{dis} 分别为电池包回路电流、充电效率和放电效率。

1.4 驱动电机模型

驱动电机作业特性表述为：

$$\begin{aligned} P_m(t) &= \frac{T_m(t) \cdot n_m(t)}{9550} = \\ &\begin{cases} U_m(t) \cdot I_m(t) \cdot i_m(T_m(t), n_m(t)), & P_m(t) \geq 0, \\ \frac{U_m(t) \cdot I_m(t)}{i_m(T_m(t), n_m(t))}, & P_m(t) < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中： P_m 、 T_m 、 n_m 分别为驱动电机输出的机械功率、转矩和转速； U_m 、 I_m 、 i_m 分别为驱动电机的电压、电流以及机械能与电能之间的转换效率。

i_m 与 T_m 和 n_m 之间的关系可用驱动电机工作效率MAP图表征。此外， P_m 、 P_b 以及 P_g 需遵循功率

平衡原则：

$$\begin{cases} P_m(t) = (P_b(t) + P_g(t)) \cdot i_m(T_m(t), n_m(t)), \\ n_m(t), P_m(t) \geq 0, \\ P_b(t) = P_m(t) \cdot i_m(T_m(t), n_m(t)), \\ n_m(t) - P_g(t), P_m(t) < 0. \end{cases} \quad (7)$$

1.5 驱动总成建模

驱动总成主要为了实现驱动电机降速增扭，由式（1）和式（6）可得：

$$\begin{cases} P_{wh}(t) = \begin{cases} P_m(t) \cdot i_d, & P_m(t) \geq 0, \\ P_m(t) / i_d, & P_m(t) < 0, \end{cases} \\ T_{wh}(t) = \begin{cases} T_m(t) \cdot i_d \cdot i_f, & T_m(t) \geq 0, \\ T_m(t) \cdot i_f / i_d, & T_m(t) < 0, \end{cases} \\ n_{wh}(t) = \frac{n_m(t)}{i_f}. \end{cases} \quad (8)$$

式中： i_d 、 i_f 分别为总成驱动效率和减速比。

2 能耗优化问题建立

由上述分析可知，驱动电机的驱动功率由增程器和电池包共同提供，且增程器产生的功率由发动机消耗燃油获得。因此，建立以整车油耗最低为目标的能耗优化问题模型：

$$\begin{aligned} m_f &= \min \int_{t_0}^{t_f} \frac{P_c(t) \cdot \dot{m}_c(T_c(t), n_c(t))}{3600} dt, \\ \text{s.t.} &\begin{cases} T_c(t) \in [T_{c_min}(n_c(t)), T_{c_max}(n_c(t))] \\ T_g(t) \in [T_{g_min}(n_g(t)), T_{g_max}(n_g(t))] \\ n_c(t) \in [n_{c_min}, n_{c_max}] \\ n_g(t) \in [n_{g_min}, n_{g_max}] \\ SOC(t) \in [SOC_{min}, SOC_{max}] \\ v(t) \in [v_{min}, v_{max}] \\ P_b(t) \in [P_{b_min}, P_{b_max}] \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式中各变量角标 min 和 max 表示该变量的最小值和最大值。

针对上述问题，下面充分结合发动机最优油耗模式和增程器最优效率模式，设计双模EMS。

3 双模能量管理策略

双模EMS的具体实现框架如图2所示，核心思想是以当前系统能耗最优为目标，根据驱动电机需

求功率 P_m 和电池包 SOC 等信息，确定系统当前工作模式，实现增程器和电池包输出功率的实时优化分配。

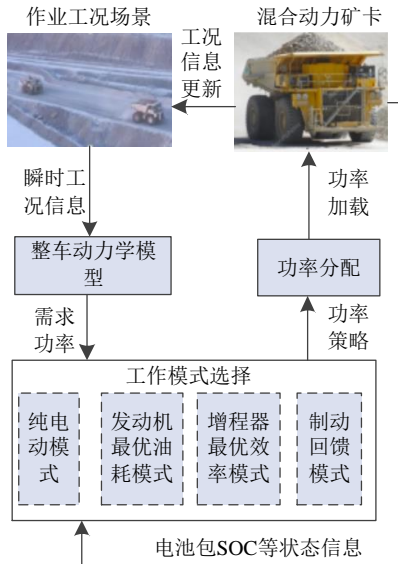


图2 双模EMS框架

3.1 优化模式建立

优化模式分为发动机最优油耗模式和增程器最优效率模式。

3.1.1 发动机最优油耗模式

发动机最优油耗模式的优化思想是在 $P_m(t) > P_{b_max} \cdot i_m$ 且 $SOC(t) \in [SOC_{min}, SOC_{max}]$ 的情况下，通过改变 P_b 来调整 P_e ，使：

$$m_c^*(t) = \min \{ m_c(t) \} \quad (10)$$

以此得到发动机最小油耗对应的 P_e^* 和 P_b^* 。为此，按以下步骤构造发动机最优油耗模式。

步骤1：根据发动机“转速-转矩-油耗率”MAP数据，利用式(2)和式(10)确定每个 n_e 下对应的最小油耗 m_c^* 及其对应的 T_e^* ，并得出此时的 P_e^* ，形成 $P_e^*(n_e)$ 与 $m_c^*(n_e)$ 的数据点集合。

步骤2：由式(2)可知， P_e^* 与 m_c^* 呈高度非线性，考虑反向传播神经网络 (Back Propagation Neural Network, BPNN) 具备拟合任何非线性系统输入输出之间关系的能力^[16]，利用BPNN拟合 P_e^* 与 m_c^* 之间的关系。根据BPNN输入层、隐含层及输出层各层节点数量的选择经验^[11]，构建一个“1-5-1”三层BPNN来拟合 P_e^* 与 m_c^* 的关系，如图3

所示，对应的非线性模型为：

$$\begin{cases} H_{in} = X \times W_1 + \theta_1, \\ H_{ou} = f(H_{in}), \\ Y = h(H_{ou} \times W_2 + \theta_2)。 \end{cases} \quad (11)$$

式中： X 、 Y 分别为网络输入量矩阵和输出量矩阵； W_1 、 W_2 分别为输入层到隐含层以及隐含层到输出层各节点的权值矩阵； θ_1 、 θ_2 分别为隐含层各节点及输出层节点的阈值矩阵。

隐含层节点激励函数 $f(*)$ 和输出层节点激励函数 $h(*)$ 分别选择 tansig 和 purelin 函数。上述变量可进一步表示为：

$$\begin{cases} X = P_e^*, \\ W_1 = [W_{11}, W_{12}, W_{13}, W_{14}, W_{15}], \\ \theta_1 = [\theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{14}, \theta_{15}], \\ W_2 = [W_{21}, W_{22}, W_{23}, W_{24}, W_{25}]^T, \\ \theta_2 = \theta_2, \\ Y = m_c^*。 \end{cases} \quad (12)$$

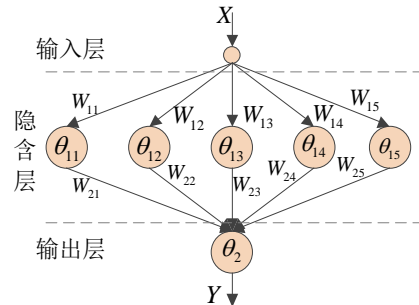


图3 “1-5-1”网络结构

步骤3：利用步骤1得到的 $P_e^*(n_e)$ 与 $m_c^*(n_e)$ 的数据点集合去训练步骤2建立的式(11)，得出 P_e^* 与 m_c^* 之间的映射关系，相应地构建出发动机最优油耗模式数学模型。

3.1.2 增程器最优效率模式

增程器最优效率模式的优化思想是在 $P_m(t) > 0$ 且 $SOC(t) \in (0, SOC_{min})$ 的情况下，通过调整 P_e ，使：

$$i_{re}^*(t) = \max \{ i_e(T_e(t), n_e(t)) \cdot i_g(T_g(t), n_g(t)) \} \quad (13)$$

式中： i_{re} 为发动机和发电机组成的增程器的效率。

由式(2)和式(3)可知， T_e 与 T_g 、 n_e 与 n_g 满足以下关系：

$$\begin{cases} T_g(t) = T_e(t) \cdot i_{eg}(t), \\ n_g(t) = n_e(t). \end{cases} \quad (14)$$

以此获得增程器最大效率时的 P_e^* 和 P_b^* 。为此，按以下步骤构造增程器最优效率模式。

步骤 1：根据发动机和发电机的“转速-转矩-效率”MAP 数据，利用式 (2)、式 (3) 和式 (13) 确定增程器每个 n_e 下对应的最大效率 i_{re}^* 及其对应的 T_e^* ，并确定增程器中发动机的 P_e^* ，形成 $P_e^*(n_e)$ 与 $i_{re}^*(n_e)$ 的数据点集合。

步骤 2：考虑到 P_e^* 与 i_{re}^* 的高度非线性，同样以图 3 所示的“1-5-1”结构的 BPNN 构建两个参数的映射关系，并利用 $P_e^*(n_e)$ 与 $i_{re}^*(n_e)$ 的数据点集合对式 (11) 进行训练，确定出增程器最优效率模式的数学模型。

3.2 优化策略实现

优化策略的实现过程如图 4 所示，具体描述如下。

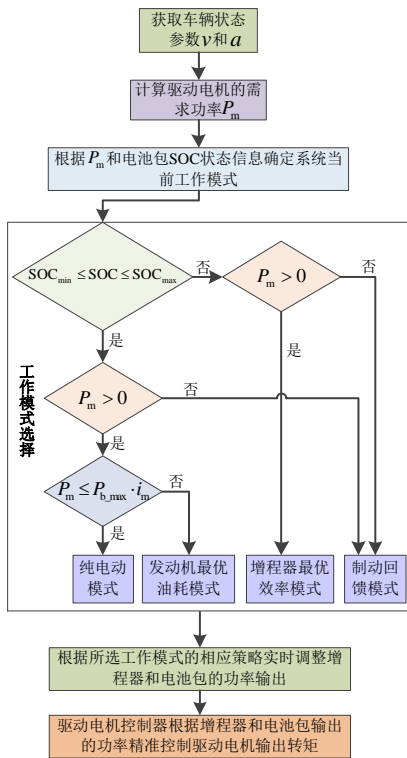


图 4 双模 EMS 的实现过程

步骤 1：获取车辆状态参数 $v(t)$ 和 $a(t)$ 等信息。

步骤 2：根据式 (1) 和式 (8) 计算 $P_m(t)$ 。

步骤 3：根据步骤 2 得到的 $P_m(t)$ 和电池包 SOC(t) 确定系统当前工作模式：

1) 当 $SOC(t) \in [SOC_{min}, SOC_{max}]$ 且 $P_m(t) \in [(0, P_{b_max} \cdot i_m(T_m(t), n_m(t)))]$ 时，进入纯电动模式；

2) 当 $SOC(t) \in [SOC_{min}, SOC_{max}]$ 且 $P_m(t) > P_{b_max} \cdot i_m(T_m(t), n_m(t))$ 时，进入发动机最优油耗模式；

3) 当 $0 < SOC(t) < SOC_{min}$ 且 $P_m(t) > 0$ 时，进入增程器最优效率模式；

4) 当 $0 < SOC(t) \leq SOC_{max}$ 且 $P_m(t) < 0$ 时，进入制动回馈模式。

步骤 4：对步骤 3 所述的工作模式的具体实现方式进行阐述，并根据式 (3)、式 (7) 和所进入的工作模式确定 $P_e^*(t)$ 和 $P_b^*(t)$ ，具体如下。

1) 发动机最优油耗模式

利用 3.1.1 节构建的发动机 $P_e^*-m_e^*$ 映射模型，在 $[P_{e_min}^*, P_{e_max}^*]$ 区间内，遍历寻找 $m_e^*(P_e^*(t))$ 最小的点，且该点对应的 $P_e^*(t)$ 根据式 (3) 和式 (7) 需要满足：

$$P_e^*(t) \geq \frac{P_m(t) - P_{b_max} \cdot i_m(T_m(t), n_m(t))}{i_m(T_m(t), n_m(t)) \cdot i_{eg} \cdot i_g(T_g(t), n_g(t))} \quad (15)$$

在此基础上，进一步利用式 (7) 得出当前时刻的 $P_b^*(t)$ 。

2) 增程器最优效率模式

利用 3.1.2 节构建的增程器 $P_e^*-i_{re}^*$ 映射模型，在 $[P_{e_min}^*, P_{e_max}^*]$ 区间内，遍历寻找 $i_{re}^*(P_e^*(t))$ 最大的点，且该点对应的 $P_e^*(t)$ 根据式 (3) 和式 (7) 需要满足：

$$P_e^*(t) \geq \frac{P_m(t)}{i_m(T_m(t), n_m(t)) \cdot i_{eg} \cdot i_g(T_g(t), n_g(t))} \quad (16)$$

在此基础上，进一步利用式 (7) 得出当前时刻的 $P_b^*(t)$ 。

3) 纯电动模式

此时电池包电量处于可用区间，仅电池包输出电能，发动机不参与工作，即：

$$\begin{cases} P_c^*(t) = 0, \\ P_b^*(t) = \frac{P_m(t)}{i_m(T_m(t), n_m(t))}. \end{cases} \quad (17)$$

4) 制动回馈模式

此时电池包回收车辆制动能量，即：

$$\begin{cases} P_c^*(t) = 0, \\ P_b^*(t) = P_m(t) \cdot i_m(T_m(t), n_m(t)). \end{cases} \quad (18)$$

步骤 5：驱动电机控制器根据增程器和电池包输出的功率控制驱动电机输出转矩。

4 仿真验证

4.1 仿真条件设置

4.1.1 载体及工况选择

仿真载体选择的串联式混合动力矿卡参数见表 1。为了验证策略优化效果的一般性，选择福建某水泥矿的实际工况进行策略验证，车辆作业轨迹如图 5 所示，全程约为 3.8 km。

4.1.2 仿真平台搭建

利用硬件在环试验台架搭建试验仿真平台，如图 6 所示。

4.1.3 策略参数设置

结合表 1 中提供的发动机、发电机参数，利用其 MAP 数据，按照式 (10) 和式 (13) 的优化思想，分别建立发动机最优油耗模式对应的 $P_c^*(n_e)$ 与 $m_c^*(n_e)$ 的数据点集合和增程器最优效率模式对应的 $P_c^*(n_e)$ 与 $i_{re}^*(n_e)$ 的数据点集合，如图 7 所示。分别利用两个数据集训练得到两个模式的 BPNN 模型参数见表 2。

4.2 仿真分析

利用选择的工况，分别对加载了规则策略、

表 1 整车及零部件参数

项目	参数	值
整车参数	整备质量/kg	43 000
	滚阻系数	0.02
	空气密度/(N · s ² /m ⁴)	1.225 8
	旋转质量换算系数	1.1
	重力加速度/(m/s ²)	9.8
	空阻系数	0.8
	迎风面积/m ²	16
	车轮半径/mm	737
发动机参数	最大转速/(r/min)	2 100
	最大转矩/Nm	1 695
电机参数	最大转速/(r/min)	3 500
	最大转矩/Nm	3 000
发电机参数	最大转速/(r/min)	2 200
	最大转矩/Nm	2 000
电池包参数	最大功率/kW	125
	电池容量/Ah	200



图 5 车辆作业轨迹

ECMS 以及双模 EMS 的混合动力矿卡的车速跟随性和能耗进行仿真分析。同时，为了验证策略的燃油经济性，等功率的传统矿卡 (Internal Combustion Engine Mine Truck, ICE-MT) 的能耗也将一并分析。

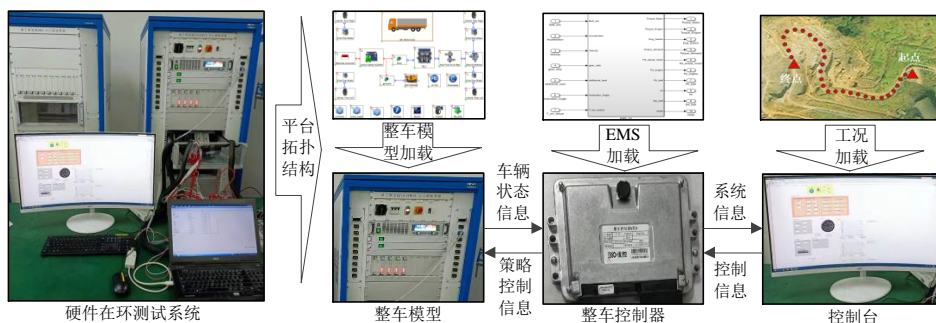


图 6 仿真平台

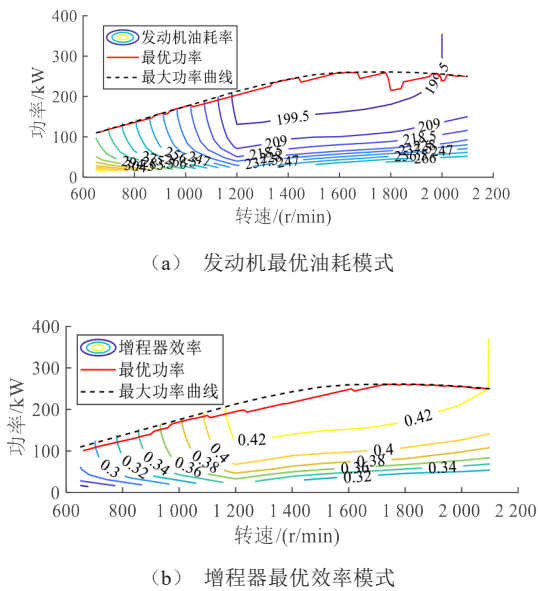


图 7 两种模式对应的数据点集合

表 2 两种模式的 BPNN 模型参数

类型	参数数值
发动机最优油耗模式模型	[W1=-6.91, -5.53, 4.10, -4.57, 6.92θ1=7.47, 5.06, 0.27, -2.87, 6.24W2=0.33, -0.12, -0.55, 0.33, -0.17θ2=-0.173 1]
增程器最优效率模式模型	[W1=6.44, 9.13, -7.87, 1.98, -6.63θ1=-7.10, -8.17, 0.19, 1.42, -5.69W2=0.69, -0.16, -0.36, 0.74, -0.08θ2=0.34]

4.2.1 车速跟随性分析

采用 4 种误差对所述策略对应的车速跟随效果进行评价：绝对误差 AE、平均绝对误差 MAE、均方误差 MSE、平均相对误差 MRE，计算式为：

$$\begin{cases} AE = y_i - \hat{y}_i \\ MAE = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M |y_i - \hat{y}_i| \\ MSE = \frac{1}{M} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^M (y_i - \hat{y}_i)^2} \\ MRE = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| \end{cases} \quad (19)$$

式中：M 为测试数据个数；y_i 和 \hat{y}_i 分别为实际值和期望值。

在分析能耗之前，首先分析 3 种策略分配的功率是否能满足整车动力性需求。当车辆执行完 3 种策略分配的 P_e^{*}(t) 和 P_b^{*}(t)，得到的车速跟随效果如

图 8a 所示，实际与目标速度轨迹之间的 AE 曲线如图 8b 所示，相应的评价结果见表 3。

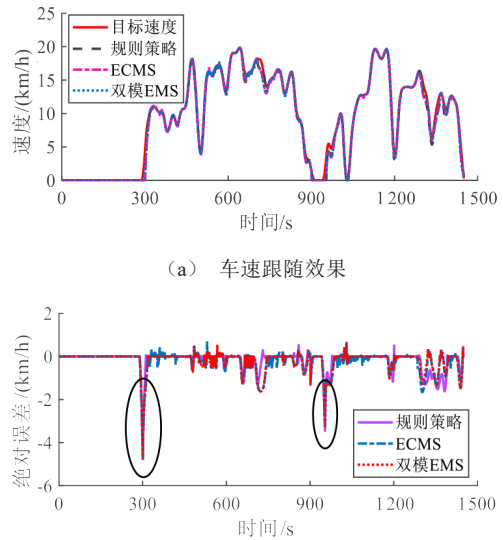


图 8 三种策略的车速跟随效果

表 3 三种策略车速跟随效果的评价结果

策略	MAE	MSE	MRE
规则策略	0.255 0	0.006 4	0.082 0
ECMS	0.227 6	0.006 3	0.070 9
双模 EMS	0.195 0	0.006 0	0.054 0

由图 8a 和表 3 可知，双模 EMS 对应的 MAE、MSE、MRE 比另外两种策略均有不同程度的下降，但三种策略的速度变化趋势均能有效跟随实际车速的变化趋势，验证了实时策略遵循的功率平衡原则。此外，由图 8b 可知，在 290 s 和 940 s 时车辆处于急加速状态，策略输出的功率无法满足目标功率，因此，出现短暂的跟随失步现象。

4.2.2 能耗仿真分析

其次，在确保车速跟踪效果的前提下，为验证提出的双模 EMS 在节油方面的效果，对所述 3 种策略及 ICE-MT 进行了 10 个循环工况的能耗仿真试验。考虑到本文研究的串联式混动矿卡所选用的磷酸铁锂电池的容量和特性，将电池 SOC 上下限分别设置为 0.8 和 0.35。3 种策略对应的发动机工作点分布如图 9 所示，对应的 SOC 与累积油耗变化曲线如图 10 所示，ICE-MT 和 3 种策略的性能对比见表 4。可见，虽然 3 种策略对应的 SOC 阈值均能从 0.8 下

降至期望的 0.35, 但由于采用的优化方式不同, 使各自对应的发动机工作点分布也不尽相同, 节油效果差异明显。

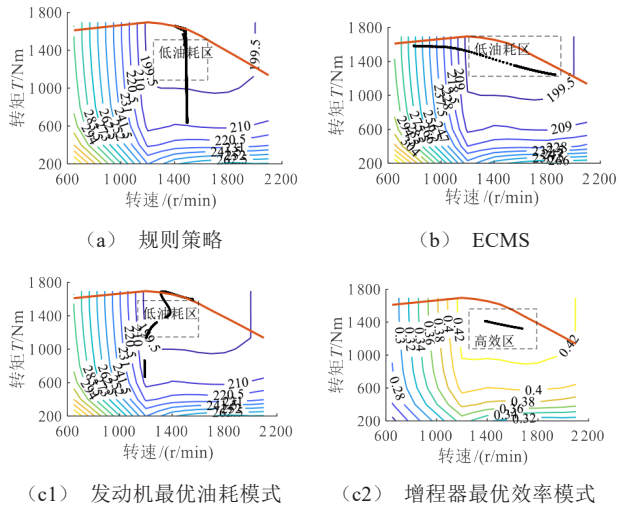


图 9 三种策略的发动机工作点

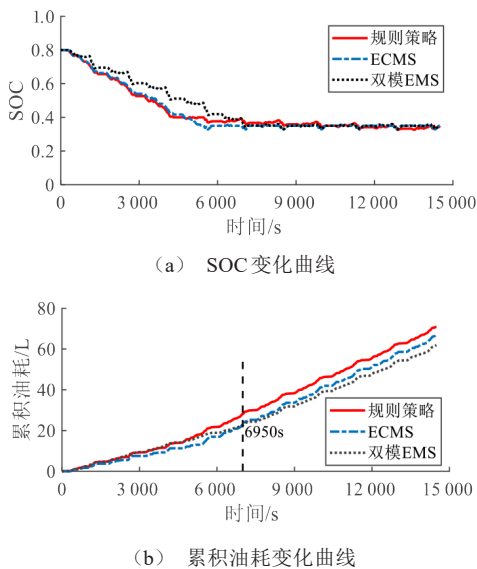


图 10 三种策略的 SOC 与累积油耗变化曲线

首先, 相较于 ICE-MT, 3 种策略均发挥了电池

表 4 ICE-MT 和 3 种策略的性能对比

类型	ICE-MT	规则策略	ECMS	双模 EMS
累积油耗/L	91.36	70.93	66.86	61.89
电池 SOC 终值		0.35	0.35	0.35

辅助发动机工作的能力, 实现了不同程度的节油量。其次, 如图 9a、b 和 c1 所示, 由于 ECMS 和双模 EMS 是在发动机全转速范围内求解瞬时油耗最小调整发动机工作点的, 因此, 发动机的工作点更集中于低油耗区, 使二者的燃油消耗量均比规则策略低。最后, 由于双模 EMS 既考虑了 ECMS 的瞬时油耗最小, 又考虑了增程器的瞬时效率最大, 因此在 6 950 s 前, 虽然 ECMS 的油耗量比双模 EMS 的少, 但该时间点之后随着车辆运行时间的增加, 双模 EMS 的节油效果逐渐优于 ECMS, 最终节油效果提升了 7.4%, 验证了双模 EMS 的能耗优化性能。

5 结论

为提升混合动力矿卡在随机工况下的节能效果, 设计了一种不依赖工况信息的双模 EMS。该策略利用“发动机最优油耗模式”和“增程器最优效率模式”的优化特点, 灵活地根据整车实时需求功率和电池包 SOC 状态, 切换增程器与电池包的功率耦合方式, 实现了能耗的实时优化。经过仿真验证, 得出以下结论。

1) 双模 EMS 兼顾了 ECMS 的最小能耗特性和增程器最优效率特性, 提升了发动机在不同作业需求下的能耗利用率。

2) 双模 EMS 在长时作业模式下, 节油效果比规则策略和 ECMS 更明显, 为串联式混合动力矿卡的能耗在线优化调节提供了一种新的解决途径。

参考文献 (References)

- [1] 何洪文, 孟祥飞. 混合动力电动汽车能量管理策略研究综述[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(8): 773-783.
HE Hongwen, MENG Xiangfei. Summary of Research on Energy Management Strategy of Hybrid Electric Vehicle [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 42(8): 773-783. (in Chinese)
- [2] LIU Jichao, CHEN Yangzhou, ZHAN Jingyuan, et al. Heuristic Dynamic Programming Based Online Energy Management Strategy for Plug-in Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(5): 4479-4493.
- [3] 罗国鹏, 罗禹贡, 李志强. 基于最佳电能使用的插电式混合动力客车控制策略[J]. 汽车工程, 2012, 34(6): 475-478, 490.

- LUO Guopeng, LUO Yugong, LI Keqiang. Control Strategy for Plug-in Hybrid Electric Bus Based on Optimal Electric Energy Use[J]. Automotive Engineering, 2012, 34(6): 475-478, 490. (in Chinese)
- [4] QIAN Lijun, QIU Lihong, XIN Fulong, et al. Energy Management and Torque Coordination Control for Plug-in 4WD Hybrid Electric Vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(19): 55-64.
- [5] WASSIF S, SIMOS A. Real-Time Control Strategy to Maximize Hybrid Electric Vehicle Powertrain Efficiency [J]. Applied Energy, 2014, 135: 512-522.
- [6] 杨业, 张幽彤, 张彪, 等. 基于等效因子优化的插电式混合动力客车自适应能量管理策略[J]. 汽车工程, 2020, 42(3): 292-298, 306.
- YANG Ye, ZHANG Youtong, ZHANG Biao, et al. Adaptive Energy Management Strategy of Plug-in Hybrid Bus Based on Equivalent Factor Optimization [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(3): 292-298, 306. (in Chinese)
- [7] 曾繁琦, 袁晓静, 王旭平, 等. 基于荷电状态惩罚函数的能量管理策略优化方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(7): 852-857.
- ZENG Fanqi, YUAN Xiaojing, WANG Xuping, et al. Optimization Method of Energy Management Strategy Based on State of Charge Penalty Function [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(7): 852-857. (in Chinese)
- [8] 姚明尧, 章晓星, 秦大同. 插电式混合动力汽车等效因子的实时优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 44-53.
- YAO Mingyao, ZHANG Xiaoxing, QIN Datong. Real Time Optimization of Equivalent Factor of Plug-in Hybrid Electric Vehicle [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(11): 44-53. (in Chinese)
- [9] 刘吉超, 陈阳舟. 基于预测控制的PHEV能源管理策略[J]. 汽车工程, 2019, 41(3): 275-282.
- LIU Jichao, CHEN Yangzhou. Energy Management Strategy for PHEV Based on Predictive Control [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(3): 275-282. (in Chinese)
- QIN Datong, QIN Ling. Energy Management Strategy of Power Split Hybrid Electric Vehicle Based on Explicit Stochastic Model Predictive Control [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(7): 112-120. (in Chinese)
- [11] LIU Jichao, CHEN Yangzhou, ZHAN Jingyuan, et al. An On-Line Energy Management Strategy Based on Trip Condition Prediction for Commuter Plug-in Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 3767-3781.
- [12] 解少博, 辛宗科, 李会灵, 等. 插电式混合动力公交车电池配置和能量管理策略协同优化的研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(6): 625-631, 645.
- XIE Shaobo, XIN Zongke, LI Huiling, et al. Research on Collaborative Optimization of Battery Configuration and Energy Management Strategy of Plug-in Hybrid Bus [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(6): 625-631, 645. (in Chinese)
- [13] LIU Teng, HU Xiaosong, HU Weihao, et al. A Heuristic Planning Reinforcement Learning-Based Energy Management for Power-Split Plug-in Hybrid Electric Vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12): 6436-6445.
- [14] LI Guoqiang, GÖRGES D. Ecological Adaptive Cruise Control and Energy Management Strategy for Hybrid Electric Vehicles Based on Heuristic Dynamic Programming [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(9): 3526-3535.
- [15] LI Guoqiang, GÖRGES D. Fuel-Efficient Gear Shift and Power Split Strategy for Parallel HEVs Based on Heuristic Dynamic Programming and Neural Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 9519-9528.
- [16] PROKHOROV D V, WUNSCH D C. Adaptive Critic Designs [J]. IEEE Transactions on Neural Network, 1997, 8(5): 997-1007.

作者简介



梁岩岩 (1992-), 女, 山东枣庄人, 硕士, 主要研究方向为新能源动力系统能量管理策略控制理论及方法。
Tel: 0516-87567738。
E-mail: liangyygf@163.com