

增程式矿卡动力系统匹配及策略优化

田馨¹,王迎波^{1,2},秦顺顺²,孙文¹,白书战^{1*}

1. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061;

2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:针对传统的燃油矿用卡车油耗大、碳排放高、环境污染严重等问题,以柴油矿卡为原型,采用串联式结构建立增程式矿卡混合动力系统模型,设计复合功率跟随策略和基于电池荷电状态(state of charge, SOC)反馈的自适应等效燃油最小消耗策略(advanced equivalent consumption minimization strategies, A-ECMS),利用 AVL Cruise 软件搭建整车模型,通过 MATLAB/Simulink 嵌入控制策略进行联合仿真,评估两种能量管理策略的控制效果。结果表明:两种策略下矿卡的仿真车速与需求车速高度相符,动力系统能够满足不同运行工况下的动力需求和能量分配;A-ECMS 策略下动力电池最终 SOC 比复合功率跟随策略更接近初始值,偏差仅为 0.3%且波动较小,百公里等效燃油消耗比复合功率跟随策略低 2.36 L。综合考虑动力电池的 SOC 波动以及矿卡的等效燃油消耗,A-ECMS 策略更具优势。

关键词:矿用卡车;增程式混合动力;复合功率跟随策略;自适应等效燃油最小消耗策略

中图分类号:U469.7

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)05-0068-08

引用格式:田馨,王迎波,秦顺顺,等.增程式矿卡动力系统匹配及策略优化[J].内燃机与动力装置,2025,42(5):68-75.

TIAN Xin, WANG Yingbo, QIN Shunshun, et al. Powertrain matching and strategy optimization of range-extended mining truck[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(5):68-75.

0 引言

随着社会对矿产与能源资源需求的持续增长,以及全球气候变暖问题的日益严峻,矿山生产环境逐渐受到广泛关注,人们对矿业安全生产与绿色转型提出了更高要求^[1]。近年来,在双碳战略目标的推动下,绿色经济已成为矿山行业发展的主旋律。矿用卡车(以下简称矿卡)是专门用于矿山开采、运输矿石及其他物资的重型运输工具,其承载力大、运输效率高、爬坡能力强,特别适合地形、地质复杂的工况。矿卡作为矿山运输系统中的核心设备,对矿山作业的高效运转至关重要^[2]。然而,由于矿卡自身质量较大且需频繁重载运行,而现有技术水平有限,因此普遍存在排放性能差、燃油经济性不佳等问题。

为实现矿卡的清洁化、智能化转型,近年来增程式混合动力技术逐步应用于矿卡领域^[3]。增程式混合动力技术通过发动机驱动发电机发电,再由电机输出动力,使发动机持续运行在高效工况区间,有效降低车辆的油耗与排放;此外,电池组支持能量回收与短时间大功率输出,使整车在应对复杂工况变化时更加灵活高效^[4]。增程式混合动力技术为实现矿卡的绿色升级提供了重要的技术基础^[5],整车能量管理策略设计是实现矿卡高效运行与经济性控制统一的核心。

矿卡的运行工况复杂且多变,科学合理的能量管理策略应具备对不同工作状态下能量流进行精确调

收稿日期:2025-07-01

基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(YDZX2023114)

第一作者简介:田馨(2001—),女,黑龙江黑河人,硕士研究生,主要研究方向为新能源与混合动力技术,E-mail:txxka20010207@163.com。

*通信作者简介:白书战(1979—),男,山东莘县人,工学博士,教授,博士生导师,主要研究方向为内燃机燃烧与排放控制技术、整机开发与可靠性技术及新能源汽车技术,E-mail:baishuzhan@sdu.edu.cn。

度的能力^[6]。等效燃油最小消耗策略(equivalent consumption minimization strategies, ECMS)通过将电能损耗等效为燃油消耗,可动态优化发动机与电机间的功率分配关系,实现整车能量流的全局最优调度,提高车辆的综合性能。但是,传统的 ECMS 难以适应矿卡工况的剧烈波动,而自适应等效燃油最小消耗策略(advanced equivalent consumption management system, A-ECMS)在传统 ECMS 的基础上引入自适应等效因子,能够实时优化能量管理策略,实现更精确的能耗控制与实时运行状态监测。

本文中基于 AVL Cruise 仿真平台搭建增程式混合动力系统模型,在 MATLAB/Simulink 中设计适用于矿山工况的复合功率跟随策略和 A-ECMS 策略。通过动态链接库(dynamic link library, DLL)接口将控制策略嵌入整车模型中,开展联合仿真,对车辆的动力性能与经济性能进行对比分析,为矿区运输装备的绿色智能化发展提供支持。

1 模型搭建

本文中以某矿用自卸卡车为原型,采用串联式结构建立增程式混合动力系统模型,系统结构如图 1 所示。发动机和发电机是增加车辆续驶的装置,车辆不需要发电时,发动机以最低转速怠速运行;需要发电时,发动机转速迅速提高到最高热效率转速,发动机仅在需要时提供电量或功率补充。

1.1 整车纵向动力学建模

采用汽车行驶方程构建整车动力学模型,建模过程中忽略动力部件及传动系统的动态过程对整车性能的影响,假设离合器接合及变速器换挡动作可以瞬时完成,且路面附着系数恒定且充分大。

整车纵向动力学模型为:

$$F_t = F_f + F_w + F_i + F_j, \quad (1)$$

$$\frac{\{T_{tq}\} \{i_g i_0 \eta_T\}}{\{r\}} = \{m\} \{g\} f \cos \alpha + \frac{1}{2} C_D \{A\} \{\rho_a\} \{v\}^2 + \{m\} \{g\} \sin \alpha + \delta \{m\} \frac{dv}{dt}, \quad (2)$$

式中: F_t 为整车驱动力, N; F_f 为滚动阻力, N; F_w 为空气阻力, N; F_i 为坡度阻力, N; F_j 为加速阻力, N; $\{T_{tq}\}$ 为以 $N \cdot m$ 为单位的发动机转矩 T_{tq} 的数值; i_g 为变速器传动比; i_0 为主减速器传动比; η_T 为传动系的机械效率; $\{r\}$ 为以 m 为单位的车轮半径 r 的数值; $\{m\}$ 为以 kg 为单位的车辆质量 m 的数值; $\{g\}$ 为以 m/s^2 为单位的自由落体加速度 g 的数值; f 为滚动阻力因数; α 为道路坡度, °; C_D 为空气阻力因数; $\{\rho_a\}$ 为以 kg/m^3 为单位的空气密度 ρ_a 的数值; $\{A\}$ 为以 m^2 为单位的迎风面积 A 的数值; $\{v\}$ 为以 m/s 为单位的车辆行驶速度 v 的数值; δ 为汽车旋转质量换算因数; t 为时间, s。

1.2 增程器建模

矿卡载质量大,驱动电机功率大、耗电多,对增程器的要求较高,需要大转矩发动机与发电机直接机械连接,由发动机带动发电机发电以保证车辆正常行驶。

以 kW 为单位的车辆巡航行驶的请求功率 P_{req} 的数值

$$\{P_{req}\} = \frac{1}{3600 \eta_t} \left(\{m\} \{g\} f \{v_a\} + \frac{C_D \{A\} \{v_a\}^3}{21.15} \right), \quad (3)$$

式中: η_t 为传动系统的总效率, $\{v_a\}$ 为以 m/s 为单位的车辆满载行驶速度 v_a 的数值。

发动机功率在传递至车轮的过程中,需经过发电机、驱动电机、变速箱等多个传动环节,每一环节均存在一定的功率损耗,因此,在建模过程中需考虑传动路径中的总功率损耗。

发动机总功率

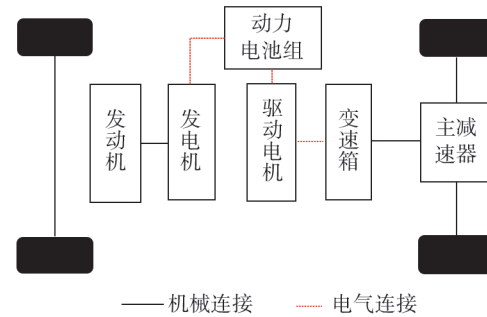


图1 混合动力系统结构图

$$P_{\text{eng}} = \frac{P_{\text{req}}}{\eta_f \eta_q \eta_b}, \quad (4)$$

式中: η_f 为发电机效率, η_q 为驱动电机效率, η_b 为变速箱传动效率。

增程式矿卡配备的发电机主要负责将柴油发动机输出的机械能高效转换为电能, 为整车各用电设备提供稳定的电力供应。考虑到露天矿山复杂恶劣的运行环境, 本文中选用适合柴油发动机驱动的永磁同步交流发电机作为系统的发电装置。综合发电效率、运行稳定性等因素, 最终确定发电机的额定功率为 310 kW, 峰值功率为 520 kW, 额定电压为 540 V。

1.3 电池建模

动力电池的放电功率应满足在纯电动模式下矿卡整车所需的全部功率, 包括驱动电机的行驶需求功率以及车辆附属设备(空调、助力转向装置)的需求功率^[7]。故动力电池峰值功率

$$P_{\text{bat, max}} \geq \frac{P_{\text{max}}}{\eta_m} + P_A, \quad (5)$$

式中: P_{max} 为驱动电机峰值功率, kW; η_m 为驱动电机效率; P_A 为车辆附属设备的耗电功率, kW。

动力电池容量应满足整车纯电动续航里程的要求, 即矿卡在纯电动模式下以平均速度行驶应达到纯电动续航里程, 表达式为:

$$\{Q_{\text{bat}}\} \geq \frac{\{m\}\{g\}f + C_D\{A\}\{v_a\}^2/21.15}{3.6\eta_f\eta_{\text{mot}}\eta_s(1-\eta_a)D_{\text{OD}}\{U_{\text{bat}}\}}\{s_{\text{ev}}\}, \quad (6)$$

式中: $\{Q_{\text{bat}}\}$ 为以 A·h 为单位的动力电池容量 Q_{bat} 的数值; η_{mot} 为驱动电机效率; η_s 为电池放电效率, $\eta_s = 0.95$; η_a 为车辆附件能耗占总能耗的比; D_{OD} 为电池放电深度; $\{U_{\text{bat}}\}$ 为以 V 为单位的电池额定电压 U_{bat} 的数值; $\{s_{\text{ev}}\}$ 为以 km 为单位的整车纯电动行驶里程 s_{ev} 的数值。

1.4 驱动电机建模

驱动电机额定功率和峰值功率是影响系统稳定性的关键参数, 其正确选择对电动汽车的安全性至关重要。矿卡的峰值功率主要根据最高车速、最大爬坡度、加速能力等参数, 并结合车辆传动效率、风阻系数、整车质量等参数确定^[8]。

根据最高车速确定的以 kW 为单位的车辆最大功率 P_{max1} 的数值

$$\{P_{\text{max1}}\} = \frac{\{v_{\text{max}}\}}{3600\eta_t} \left(\{m\}\{g\}f + \frac{C_D\{A\}\{v_{\text{max}}\}^2}{21.5} \right), \quad (7)$$

根据最大坡度确定的以 kW 为单位的车辆最大功率 P_{max2} 的数值

$$\{P_{\text{max2}}\} = \frac{\{v_i\}}{3600\eta_t} \left(\{m\}\{g\}f \cos \alpha_{\text{max}} + \{m\}\{g\}f \sin \alpha_{\text{max}} + \frac{C_D\{A\}\{v_i\}^2}{21.5} \right), \quad (8)$$

根据加速能力确定的以 kW 为单位的车辆最大功率 P_{max3} 的数值

$$\{P_{\text{max3}}\} = \frac{\{v_m\}}{3600\eta_t} \left(\{m\}\{g\}f + \frac{C_D\{A\}\{v_m\}^2}{21.5} + \frac{\{m\}}{3.6} \frac{dv_m}{dt} \right), \quad (9)$$

式中: $\{v_{\text{max}}\}$ $\{v_i\}$ $\{v_m\}$ 分别为以 m/s 为单位的矿卡最高行驶车速 v_{max} 、爬坡车速 v_i 、加速末期车速 v_m 的数值, α_{max} 为最大坡度, dv_m/dt 为加速末期的加速度。

驱动电机的峰值功率必须满足最高车速、最大爬坡度和加速性能的要求, 故

$$P_{\text{mot, max}} \geq \max(P_{\text{max1}}, P_{\text{max2}}, P_{\text{max3}}) \circ \quad (10)$$

2 能量管理策略设计

混合动力汽车的控制策略对整车的动力性、燃油经济性以及运行的安全性有重大影响^[9]。矿卡的载质量波动大、作业环境复杂、运行工况多变, 因此亟需一套能够灵活响应工况变化、合理分配驱动能量的控制策略。控制策略的核心是根据车辆的实际载质量、路况及驱动需求, 协调发动机、发电机、电机

和电池之间的能量流动,实现驱动与制动转矩的合理调节,提高整车的运行效率与燃油经济性^[10]。

2.1 复合功率跟随策略

根据增程式矿卡的电池荷电状态(state of charge, SOC)、发动机转速、驱动电机功率、发电机发电功率设计复合功率跟随策略,其逻辑流程图如图2所示,图中, Q_{SOC} 为电池荷电状态。

基于 MATLAB/Simulink 搭建复合功率跟随策略模型。模型顶层由信号输入预处理、SOC 状态判断、功率分挡控制、目标输出模块等组成。在模型下层结构中设计增程器控制模块,负责增程器的起停并按照预定目标进行工作点的切换。增程器控制模块采用基于电池 SOC 状态与驱动功率需求的分层控制逻辑:接收来自整车控制器的 SOC 状态信号,并与设定的 SOC 上、下限阈值进行实时比较,当 SOC 低于下限时,发动机起动,进入发电模式,通过比较当前驱动电机功率与设定的功率限值判断发动机的工作点,输出对应的目标转速和目标转矩;当 SOC 高于上限时,发动机停止运行,以避免不必要的能量转换损耗。该模型可有效实现复合功率跟随策略,并兼顾电量补给的及时性与系统运行的经济性。

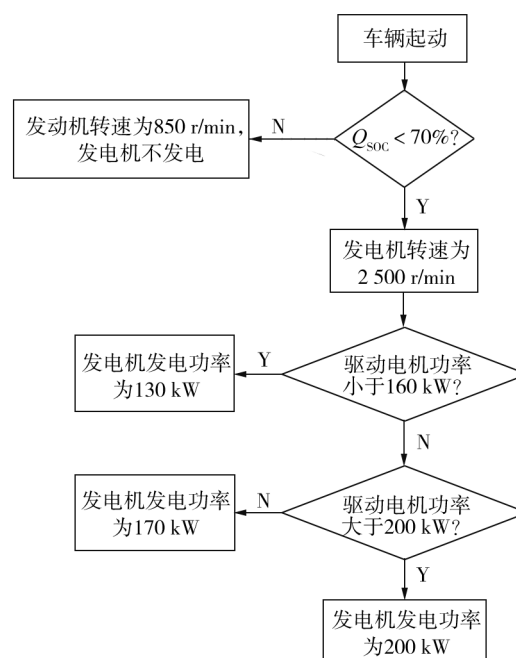


图2 复合功率跟随策略逻辑流程图

2.2 基于 SOC 反馈的等效燃油最小消耗策略

虽然复合功率跟随控制策略可提高系统响应性和对复杂工况适应性,但其对整车能量流的全局最优调度能力较低。在实际运行中,混合动力矿卡面临发动机与电池同时参与工作的复杂情况,不仅需要保障动力系统对外部负载的即时响应,更需要在整个运行周期内实现燃料与电能的最优分配,从而提高整车能效并延长电池寿命^[11]。

能量管理策略被视为增程式电动汽车动力总成控制的核心,通过动态协调发动机、电池、电机的功率分配,在保障车辆动力需求的同时,综合优化车辆的燃油经济性、电池寿命、排放性能等。当前的主流能量管理策略可分为基于规则的能量管理策略和基于优化的能量管理策略两类。基于规则的能量管理策略通常基于工程经验或试验标定开发,虽具备实施简单、实时性强的优势,但对复杂工况的适应性不足,能效提高空间有限。基于优化的能量管理策略分为全局优化与瞬时优化两类,全局优化需要预测全局工况,计算量大,时间成本高,因此无法利用全局优化算法计算车辆的实时最优控制;瞬时优化计算量较小,可解决实时应用问题,保证能量管理策略的有效性^[12]。瞬时优化算法中,ECMS 通过等效因子将瞬时油耗和功率统一为等效油耗,以最小瞬时等效油耗为优化目标求解最优控制变量,在实时能量管理中具有显著优势,为平衡燃油经济性与电池寿命提供了有效解决方案。

最新的研究表明,等效因子的自适应调整对 ECMS 的效果有很大影响,但由于车辆未来工况的不确定性和优化目标的不同,对等效因子自适应调整的研究还有待深入。本文中,针对增程式电动汽车的特点和增程器的动态响应特性,以 XG130 型矿用自卸车为研究对象,在现有的 ECMS 基础上,设计基于 SOC 反馈比例积分控制器的 A-ECMS,进一步优化 A-ECMS 的性能。

ECMS 的核心机理为建立电能与燃油之间的能量当量关系,通过等效因子将驱动系统中电池的电能消耗转换为等效燃油消耗,并与发动机的实际燃油消耗相结合,构建系统整体的等效燃油消耗率。建立以最小化等效燃油消耗率为优化目标的函数,实现能量管理的优化控制。通过实时求解该动态优化问题,ECMS 能够同步协调发动机工作点与电池充放电功率,在保证车辆动力性能的前提下,实现全局燃油经济性最优。具体优化目标为:通过控制增程器的发电功率,使系统等效总油耗最小,同时使电池 SOC 在运行周期内波动小且结束时尽可能接近初始值(亦是目标值)。

整个系统的等效燃油消耗率

$$\dot{m}_{eq}(t) = \dot{m}_f + \dot{m}_e = \dot{m}_f + s(t) \frac{P_b(t)}{H_{LHV}}, \quad (11)$$

式中: $\dot{m}_f$ 为发动机的瞬时燃油消耗率, $\dot{m}_e$ 为耗电量换算的等效燃油消耗率, $P_b(t)$ 为电池输出功率, H_{LHV} 为燃料低热值, $s(t)$ 为等效因子。

矿卡的运行工况复杂多变,若采用固定等效因子,难以将电池 SOC 稳定维持在目标值附近,因此需要实时调整等效因子。考虑到增程式电动车系统具有离散特性,根据基于 SOC 反馈的离散比例积分 (proportional integral, PI) 控制器,设计由初始等效因子和自适应项共同构成的自适应等效因子

$$s'(t) = s_0 + K_p [Q_{SOC,tar} - Q_{SOC}(t)] + K_i \sum_{t_0}^{t_f} [Q_{SOC,tar} - Q_{SOC}(t)] T_s, \quad (12)$$

式中: s_0 为初始等效因子, K_p 为比例系数, K_i 为积分系数, T_s 为系统采样时间, $Q_{SOC,tar}$ 为目标 SOC, $Q_{SOC}(t)$ 为瞬时 SOC。式(12)中, s_0 并非一个固定常数,而是动态地取前一时刻的等效因子 s_{t-1} ,后两项为基于离散 PI 控制器的 SOC 反馈调节项,用于实时修正等效因子,确保 SOC 能够稳定在目标值附近。

当等效因子较小时,电能的使用成本较低,系统更倾向于降低电机功率输出,矿卡运行所需动力主要依赖电池供给;当等效因子增大时,控制策略更倾向于利用增程器产生的能量,系统相应提高电机功率输出,增程器将在较高功率工作点运行,同时为电池充电。随着能量管理策略的运行,初始等效因子不断迭代和更新,如果行程足够长,初始等效因子对 A-ECMS 的影响可以忽略不计。

K_p 、 K_i 对电池 SOC 的影响分别如图 3、4 所示。由图 3 可知: K_p 增大, SOC 的波动较小;当 $K_p = 0.5$ 时, SOC 更接近 40%。由图 4 可知: SOC 随 K_i 的增大而增大,当 $K_i = 0.03$ 时, SOC 更接近 40%。

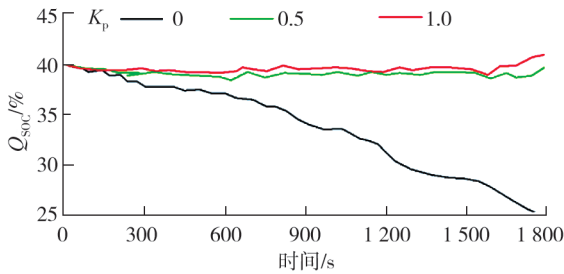


图 3 $K_i = 0$ 时不同 K_p 对 SOC 的影响

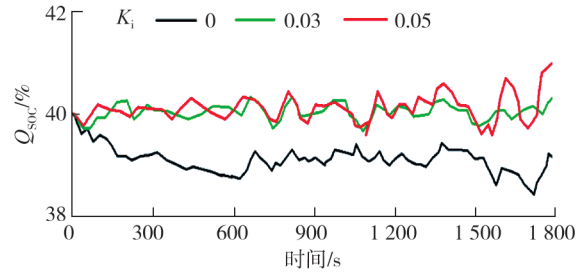


图 4 $K_p = 0.5$ 时不同 K_i 对 SOC 的影响

K_p 、 K_i 的选取对 A-ECMS 的控制效果具有决定性影响,为维持系统稳定,确保后续仿真分析的精确性,令 $s_0 = 3.5$, $K_p = 0.5$, $K_i = 0.03$ 。

3 仿真分析

3.1 动力性分析

矿用卡车的经济性与整车的运行状态和控制策略密切相关,通过模拟车辆循环工况,可以获得行车工况、车速等关键信息,并借助仿真等技术分析车辆在实际运行过程中的负载变化、速度波动等状况。目前,由于增程式矿用卡车等非公路车辆缺乏可参考的相关标准,因此选取同型号的燃油矿卡的矿区实测运行数据作为本次仿真的输入信号。

利用仿真车速和目标需求车速的跟随情况评价两种能量管理策略能否达到预期控制效果,结果如图 5 所示。由图 5 可知:复合功率跟随策略和 A-ECMS 策略下矿卡的仿真车速与需求车速高度相符,表明动力系统能够满足不同运行工况下矿卡的动力需求,设计的复合功率跟随策略和 A-ECMS 策略精确有效。

利用所选工况,对应用复合功率跟随策略和 A-ECMS 策略的增程式矿卡的动力性能进行仿真分析。

驱动电机总功率如图6所示。由图6可知:驱动电机总功率的变化趋势与车辆车速需求高度相关,在车辆加速阶段,电机功率迅速上升并保持在较高水平,以满足较大的牵引需求;在减速或制动过程中,电机功率显著下降,实现能量回收。电机功率能够有效跟随车辆的动力需求,表明能量管理策略对车辆动力性能具有良好调控效果。

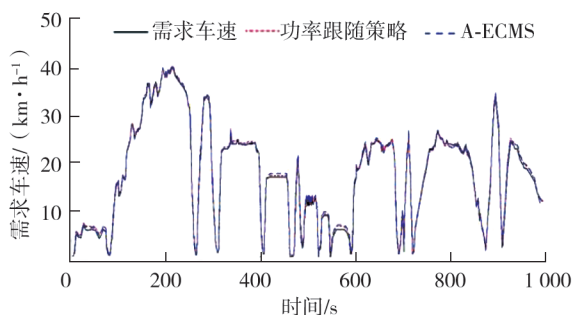


图5 车速跟随情况

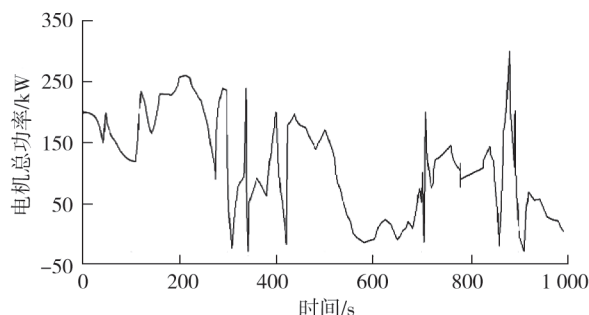


图6 驱动电机总功率

复合功率跟随策略、A-ECMS 策略下发电机的发电功率分别如图7、8所示。由图7可知:在复合功率跟随策略下,发动机的发电功率可根据车辆行驶需求自动在设定工作点之间切换。由图8可知:A-ECMS 策略下,发电机输出的功率与车辆的驱动需求功率高度吻合,系统能够实现能量分配的即时优化,实时评估发动机是否介入发电以及发电机所需输出的功率,保证驱动系统获得足够能量支持,使发动机始终运行在高效率区域。通过这种基于需求的能量分配机制,A-ECMS 策略实现了发电行为与车辆实际功率需求之间的高度匹配,提高了整车运行的燃油经济性和能量利用效率。

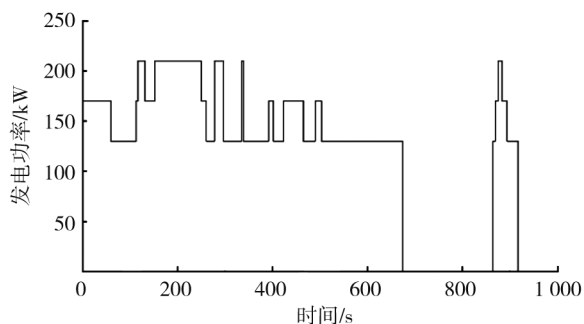


图7 复合功率跟随策略下发电机发电功率

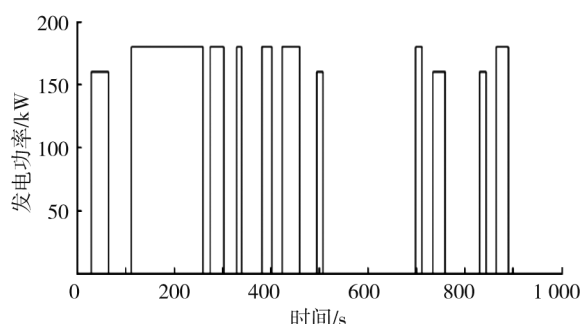


图8 A-ECMS 策略下发电机的发电功率

3.2 动力电池维持特性分析

复合功率跟随策略和 A-ECMS 策略下动力电池 SOC 变化如图9所示。由图9可知:复合功率跟随策略、A-ECMS 策略下,动力电池最终的 SOC 分别为 65.60%、65.30%;A-ECMS 策略下动力电池 SOC 波动较小,且最终 SOC 与初始 SOC (65%) 的偏差仅为 0.30%。分析其原因为:复合功率跟随策略是在电池 SOC 处于特定范围内时启动增程器,导致 SOC 波动较为明显,进而造成最终 SOC 与初始 SOC 之间存在较大偏差;在 A-ECMS 策略中,等

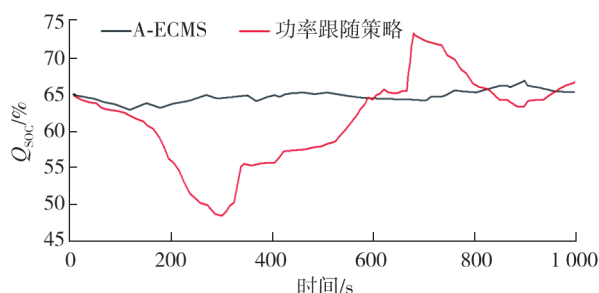


图9 电池 SOC 变化

效因子能够自适应调整,使得 SOC 基本围绕初始 SOC 小幅波动,在行程结束时,最终 SOC 更接近初始 SOC。动力电池 SOC 的波动频率和幅度也能反映电池的工作状况以及电池的电阻损耗情况。与复合功率跟随控制策略相比,A-ECMS 策略能够降低电阻损耗并保护电池。

3.3 整车经济性分析

复合功率跟随策略和 A-ECMS 策略下的矿卡的燃油消耗如图 10 所示。由图 10 可知:复合功率跟随策略的车辆实际油耗明显高于 A-ECMS 的油耗。

根据文献[13]中等效燃油消耗量的定义,将电耗等效为油耗。增程式矿卡发动机油耗与动力电池电耗的关系为:

$$\{Q_e\} = 3\ 600\{E\} / (\{\rho_d\} \{q\} \eta_e \eta_g), \quad (13)$$

式中: $\{Q_e\}$ 为以 L 为单位的发动机油耗 Q_e 的数值, $\{E\}$ 为以 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 为单位的动力电池电耗 E 的数值, $\{\rho_d\}$ 为以 g/cm^3 为单位的燃油密度 ρ_d 的数值, $\{q\}$ 为以 J/g 为单位的燃油低热值 q 的数值, η_e 为发动机的工作效率, η_g 为发电机的工作效率。

由式(13)可得,矿卡消耗 $1\ \text{kW} \cdot \text{h}$ 电量等效为消耗 $0.31\ \text{L}$ 柴油。仿真数据显示:矿卡每循环工况可行驶 $5.07\ \text{km}$,复合功率跟随策略和 A-ECMS 策略下分别消耗柴油 6.79 、 $6.39\ \text{L}$ 。电池 SOC 增大相当于消耗燃油,根据增程式矿卡的电池电压及容量,计算两种策略下矿卡每百公里的油耗对比,如表 1 所示。由表 1 可知:A-ECMS 策略下矿卡的等效总油耗比复合功率跟随控制策略低约 $2.36\ \text{L}$ 。

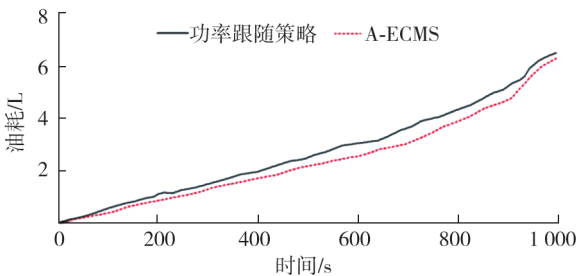


图 10 复合功率跟随策略和 A-ECMS 的燃油消耗对比

表 1 两种策略下矿卡每百公里的等效总油耗对比

策略	油耗/L	电耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	等效总油耗/L
复合功率跟随策略	133.92	38.17	122.08
A-ECMS 策略	126.03	20.36	119.72

综合考虑动力电池 SOC 波动以及矿卡的等效燃油消耗,A-ECMS 策略比复合功率跟随策略更具有优势。

4 结论

以增程式矿卡为研究对象,基于 AVL Cruise 仿真平台搭建增程式混合动力系统模型,设计复合功率跟随控制策略和基于 SOC 反馈的 A-ECMS 策略,在 MATLAB/Simulink 环境中进行联合仿真,评估两种策略下矿卡的动力性和经济性。

1) 两种策略下,矿卡的仿真车速与需求车速高度相符,表明动力系统能够满足不同运行工况下矿卡的动力需求,两种策略均在优化车辆动力性能与能量分配方面具有较好的合理性和可行性。

2) A-ECMS 策略下,动力电池最终 SOC 为 65.30% ,与初始 SOC 的偏差仅为 0.30% ,表明自适应等效因子不仅能使最终 SOC 在行程结束时尽可能接近初始值,而且能保持控制系统稳定。A-ECMS 策略下,矿卡在相同工况下的百公里等效燃油消耗为 $119.72\ \text{L}$,比复合功率跟随策略降低了 $2.36\ \text{L}$,提高了矿用卡车的燃油经济性。

参考文献:

[1] 赫小丽. 新能源汽车机械制造工艺及精密加工技术的应用[J]. 现代制造技术与装备,2025,61(2):123-125.
[2] 史祥东,朱江苏,尹东东,等. 重型商用车节能关键技术分析[J]. 内燃机与动力装置,2024,41(3):81-85.
[3] 王兆远,叶辉. 发动机机油综合性能台架试验评价方法[J]. 内燃机与动力装置,2024,41(2):78-84.
[4] 张远辉. 基于混合动力矿车能量管理策略研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2023.
[5] 王翔浩. 串联式混合动力矿用卡车整车控制策略研究[D]. 济南:山东交通学院,2023.
[6] 刘杰. 柴油机燃烧系统结构参数优化设计[J]. 内燃机与动力装置,2023,40(3):封二.

- [7] 王兴发. 增程式电动汽车动力系统参数匹配及控制策略研究[D]. 西安:长安大学,2023.
- [8] SHEN X B, ZHAO C, YAO Z L, et al. Real-world emissions and ozone formation potential of carbonyl compounds originating from construction machinery based on a portable emission measurement system[J]. *Frontiers in Environmental Science*,2023,10:1078133.
- [10] 欧阳康.“双碳”目标、绿色发展与国家治理:“双碳”战略及其实施路径的若干前提性问题[J]. *华中科技大学学报(社会科学版)*,2022,36(5):24-30.
- [11] 刘会勇,熊冶平,赵青. 油电混合动力工程机械研究现状及发展趋势[J]. *机床与液压*,2017,45(15):166-171.
- [12] MONTIEL L, DIMITRAKOPOULOS R. Optimizing mining complexes with multiple processing and transportation alternatives: an uncertainty-based approach[J]. *European Journal of Operational Research*,2015,247(1):166-178.
- [13] REŞİTOĞLU İ A, ALTINIŞIK K, KESKIN A. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*,2015,17(1):15-27.
- [14] 工业和信息化部. 重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法:GB/T 19754—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.

Powertrain matching and strategy optimization of range-extended mining truck

TIAN Xin¹, WANG Yingbo^{1,2}, QIN Shunshun², SUN Wen¹, BAI Shuzhan^{1*}

1. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

Abstract: In response to the problems of high fuel consumption, high carbon emissions and pollution in traditional fuel mining trucks, a hybrid power system model for extended range mining trucks is established using a series structure architecture based on diesel mining trucks. A composite power following strategy and advanced equivalent consumption minimization strategies (A-ECMS) based on battery state of charge (SOC) feedback are designed. A vehicle model is built based on AVL Cruise, and the control effects of the two energy management strategies are evaluated through joint simulation using MATLAB/Simulink embedded control strategies. The results show that the simulated vehicle speed of the mining truck under both strategies is highly consistent with the required vehicle speed, and the power system can meet the power demand and energy allocation under different operating conditions. Under the A-ECMS strategy, the final SOC of the battery is closer to the target value than the composite power following strategy, with a deviation of only 0.3% and small fluctuations. The equivalent fuel consumption per 100 kilometers is 2.36 L lower than the composite power following strategy. Taking into account the SOC fluctuations of the power battery and the equivalent fuel consumption of the mining truck, the A-ECMS strategy has more advantages.

Keywords: mining truck; extended range hybrid power; composite power following strategy; advanced equivalent fuel minimum consumption strategy

(责任编辑:臧发业)