

混合动力矿用宽体自卸车增程器控制策略研究

穆俊杰

福建宏大时代新能源科技有限公司, 福建 厦门 510800

[摘要]文中首先介绍了某款串联式混合动力宽体自卸车的动力系统构成、部件参数及工作原理,并结合矿用自卸车矿区典型工况分析了整车工作模式,为了提高混合动力矿用宽体自卸车燃油经济性,提出了结合整车负载功率需求及动力电池 SOC 对增程器发电功率进行控制的策略,分别针对整车牵引工况、电制动工况、怠速及停机工况提出了详细的增程器控制策略,通过车辆矿区运行测试验证,采用该控制策略的车辆在重载上坡工况下相比同级别、同线路运行的燃油车,整车节油率超过 25% 以上。

[关键词] 串联式混合动力; 燃油经济性; 增程器发电功率; 负载功率需求

DOI: 10.33142/ect.v2i11.14322

中图分类号: TD50

文献标识码: A

Research on Control Strategy of Range Extender for Hybrid Mining Wide Body Self-dumping Truck

MU Junjie

Fujian Hongda Era New Energy Technology Co., Ltd., Xiamen, Fujian, 510800, China

Abstract: The article first introduces the power system composition, component parameters, and working principle of a series hybrid wide body dump truck, and analyzes the overall working mode of the vehicle based on typical working conditions of mining dump trucks. In order to improve the fuel economy of hybrid mining wide body dump trucks, a strategy is proposed to control the power generation of the range extender based on the load power demand of the vehicle and the SOC of the power battery. Detailed range extender control strategies are proposed for the traction condition, electric braking condition, idle condition, and shutdown condition of the vehicle. Through vehicle mining operation tests, it is verified that vehicles using this control strategy have a fuel saving rate of over 25% compared to fuel vehicles operating on the same level and line under heavy load uphill conditions.

Keywords: series hybrid power; fuel economy; range extender power generation; load power demand

引言

随着全球能源结构的转型与环境保护意识的增强,矿业作为能源消耗与排放密集型行业,面临着前所未有的节能减排压力。矿用自卸车是大型露天矿山的主要运输装备,承担着世界上约 40% 的煤炭、90% 的铁矿石的开采运输任务^[1],其能耗高、排放大的现状已成为制约矿山企业绿色转型的关键瓶颈。因此,探索高效、清洁的运输解决方案,成为推动矿业可持续发展的迫切需求。近年来,混合动力传动技术以其高效的传动效率,较低的二氧化碳排放量等特点迅速成为了目前的研究热点^[2],特别是在矿用自卸车上的应用,混合动力系统通过整合传统内燃机与纯电驱动的优势,不仅能够有效降低油耗与排放,还能在复杂多变的矿山环境中展现出更好的适应性和作业效率。

从能量流动的角度来看,目前自卸车混合动力结构大致可以分为串联式、并联式和混联式三种^[3]。串联式发动机不直接参与驱动,只通过发电给驱动电机供电,结构相对简单,经济性好^[4],应用较为广泛。自卸车具有单个周期行程较短、载荷变化大、运输道路坡度变化大等工作特点^[5],对于串联式混合动力矿用自卸车节约油耗最关键的因素就是增程器发电功率的控制。如何精确控制混合动力系统中增程器的工作

状态,实现能量的最优化利用,是当前技术研究与实践中的一个重要课题。鉴于此,本文研究聚焦于串联式混合动力矿用自卸车增程器的控制策略优化,旨在通过深入分析增程器、动力电池特性,结合矿区典型工况,设计出一套既能满足动力需求又能最大化节能减排效果的控制策略。

1 矿用宽体自卸车混合动力系统说明

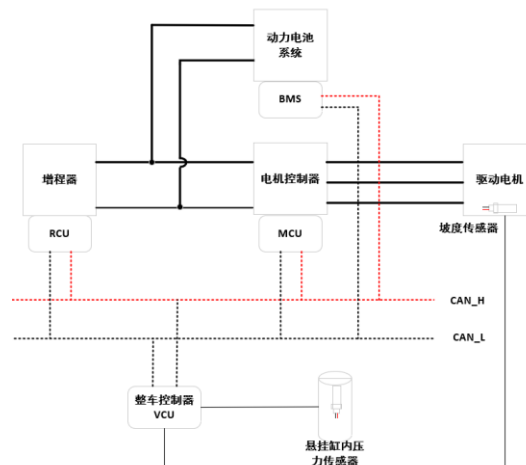


图1 混合动力系统拓扑图

本文以 135 吨级矿用宽体自卸车混合动力系统进行说明。该车自重 50 吨,额定载重 85 吨,采用串联式混合动力系统,系统主要由增程器、动力电池系统、电机控制器及驱动电机组成,混合动力系统拓扑图如图 1 所示。为了更好地识别整车状态,整车在驱动电机上安装了坡度传感器,用于检测车辆运行线路坡度;在悬挂缸内安装了压力传感器,用于检测车辆装载状态。为了更加灵活地控制增程器状态,整车油泵、气泵采用电驱动方式,与发动机动力解耦。

增程器主要由发动机、发电机、发电机控制器及增程控制器(RCU)组成,增程器根据整车控制器(VCU)给定的功率需求发电,给车上用电负载提供电能,并为动力电池充电。整车电制动时,当驱动电机输出电功率超过动力电池充电功率或者电池满电时,增程器可以通过发动机缸内制动方式消耗电能。增程器额定发电功率为 400kW,发电效率最高可以达到 4.34kWh/L,增程器发电效率 MAP 图如下图 2 所示。

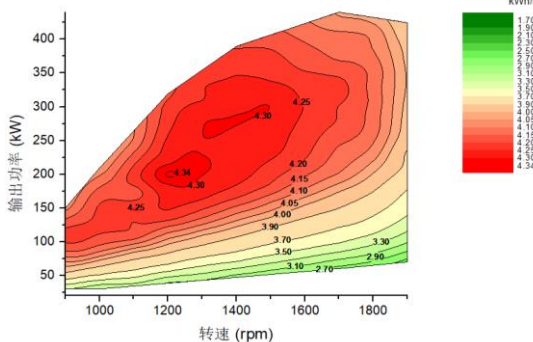


图 2 增程器发电效率 MAP 图

动力电池系统主要由动力电池箱、高压配电单元、电池热管理系统和电池控制系统(BMS)组成。动力电池在增程器功率不足时为整车提供电能,增程器功率大于负载功率时吸收电能,整车电制动时吸收驱动电机发出的电能,混合动力系统一般采用功率型动力电池。整车带电量 108kWh,可以实现额定 3C 倍率充放电,峰值 6C 倍率充放电,动力电池实现高功率充放电的区间是 SOC 在 30%~80% 范围内,电池温度在 25~50℃ 之间,动力电池高功率充放电区域如下图 3 所示。

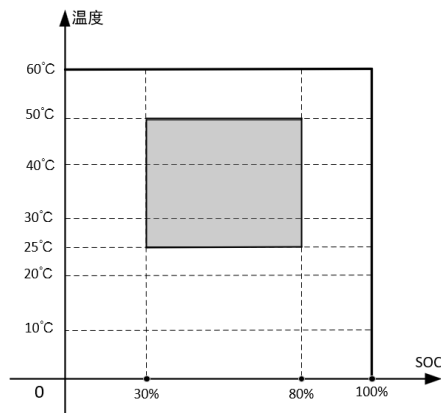


图 3 动力电池高功率区间

电机控制器及驱动电机的作用是牵引工况下将直流电逆变为电压频率可调的交流电为驱动电机供电,为整车提供动力;电制动工况下将驱动电机发出的交流电整流成直流电为动力电池充电,并提供电制动力。整车配置额定功率 600kW、峰值功率 800kW 驱动电机,8%坡道上重载爬坡稳定车速可以达到 12km/h 以上。驱动电机功率大于增程器额定发电功率,同时也大于动力电池额定放电功率,所以当驱动电机长时间满功率运行时需要增程器和动力电池同时供电。

2 整车工作模式说明

整车工作模式主要有以下 6 种。

模式 1: 纯电驱动模式,动力电池电量充足且电池输出功率满足负载需求时,增程器怠速或停机,驱动电机从动力电池取电,驱动车辆。

模式 2: 功率跟随模式,整车需求功率稳定且发动机工作在高效区,增程器发电直接给驱动电机,电能不经过动力电池,提高整车传动系统效率。

模式 3: 动力增强模式,当车辆急加速或者重载爬坡工况需求大功率时,增程器与动力电池同时提供能量驱动车辆,满足动力需求。

模式 4: 行车充电模式,动力电池电量较低且增程器功率富余,增程器同时提供能量驱动车辆并给动力电池充电。

模式 5: 驻车充电模式,驻车状态下,动力电池电量低时,增程器启动发电为动力电池充电。

模式 6: 再生制动充电模式,车辆处于电制动状态下,增程器怠速、停机或处于缸内制动模式,动力总成处于发电状态为动力电池充电。

矿用自卸车重复运行在无交通约束的固定线路上^[6],自卸车在矿区作业的一个典型工作循环是重载上坡运输、停车作业和空载下坡运输三个阶段,有些线路中也会包含重载下坡、空载上坡的路段。重载上坡路段所需功率最大,车辆会采用动力增强模式;整车处于空载时基本可以纯电模式行驶,若处于下坡路段可采用再生制动模式为动力电池补电;当动力电池电量较低时,会采用行车充电模式或者驻车充电模式给动力电池补电。

3 增程器控制策略分析

3.1 增程器控制策略难点分析

增程器控制策略主要有基于逻辑门限控制、模糊控制和基于优化的动态控制策略^[7],基于逻辑门限的控制策略运算量较小,控制逻辑相对简单,在工程上应用较为广泛,下文基于逻辑门控制策略展开分析。

目前矿用宽体自卸车混合动力系统增程器发电功率控制基本通过油门踏板角度和电池 SOC 值来确定,油门踏

板反应的是驾驶员的加减速意图,无法直接反应车辆功率需求,若只通过油门踏板角度和电池 SOC 来确定增程器发电功率,由于油门踏板输出电压基本处于波动状态,且无法直接反应负载功率需求,增程器存在频繁调节发电功率及发动机频繁调速的问题,会导致整车燃油经济性较差。

增程器怠速时停机时机的选择是控制的一个难点,增程器停机时机选择不好,会导致增程器频繁启动或者发动机怠速时间长的问题,发动机产生较多的无用功,导致整车燃油经济性较差。

增程器缸内制动的控制也是一项难点,增程器缸内制动功能基本在车辆长距离重载下坡工况下才会使用,如果无法有效识别车辆处于重载下坡状态,且车辆电制动是否超过电池系统吸收功率,则会影响缸内制动启动时机,导致动力电池回充效率受到影响。

3.2 增程器控制策略说明

增程器的控制目标是发动机工作在高效区的时间占比尽可能多,满足车辆牵引、制动的需求下,发动机尽可能不进行频繁调速、启停;为了充分发挥动力电池充放电功率,动力电池 SOC 在 30%~80%区间内的时间占比尽可能多。

增程器的发电功率基本取决于整车所需功率和电池组的剩余电量^[8]。为了更加准确地得到负载功率需求,整车控制器通过采集油门踏板信号和驱动电机转速信号计算得到负载需求功率,结合动力电池 SOC,设置增程器工况分区坐标系。选取增程器工作高效区的 3 个点采用定点发电策略,根据不同功率等级分别定义为 W1, W2, W3 发电工况, W1 工况下发电功率 P1, W2 工况下发电功率 P2, W3 工况下发电功率 P3, 增程器怠速或停机不发电时定义为 W0 工况, 增程器工况分区图如下图 4 所示。

为了避免发动机频繁调速导致增加油耗,整车控制时车辆各个工况之间切换时需满足条件,且持续一定时间,由于动力电池可以短时峰值功率充放电,故短时间内的整车功率需求变化通过动力电池来实现;针对整车负载功率长期处于 W0、W1 或者 W1、W2 或者 W2、W3 之间的情况,

设置工况缓冲区(图 4 中阴影区域),避免因为 SOC 值在各个工况界限之间来回跳动导致增程器频繁改变工况。

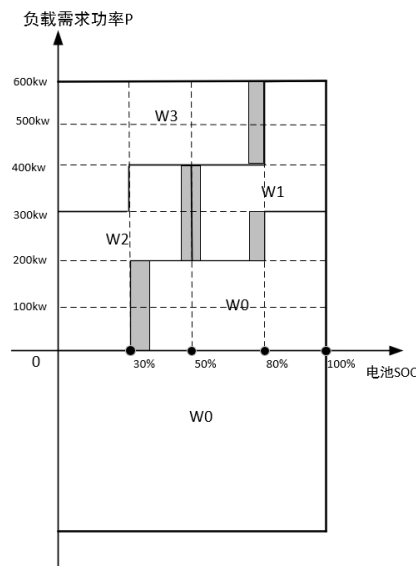


图 4 增程器工况分区

当整车处于牵引工况时,整车控制器 VCU 通过油门踏板信号、驱动电机转速信号得到负载功率需求,判断功率需求是否大于等于规定时间,若是则根据负载功率需求及当前电池 SOC 值下发增程器运行工况,若否,增程器状态保持不变。增程器控制流程图如下图 5 所示。

当整车处于电制动工况时,通过压力传感器、坡度传感器检测整车是否处于重载下坡工况,当处于重载下坡工况,判断电制动功率是否大于等于电池允许回充功率,若否,增程器保持怠速或停机状态,若是且满足持续时间后,整车控制器下开发启增程器缸内制动信号,超出动力电池吸收功率的部分,通过增程器缸内制动的方式进行消耗。增程器控制流程图如下图 6 所示。通过缸内制动可以提升整车电制动性能,减少整车重载下坡时的机械制动投入,提高整车安全性。

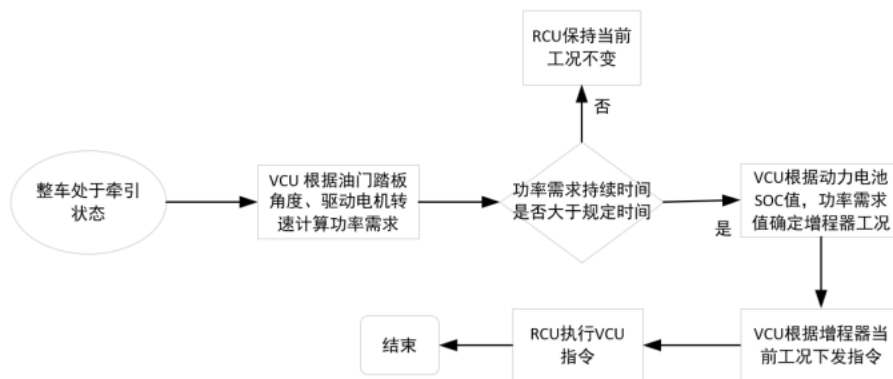


图 5 牵引状态增程器控制流程图

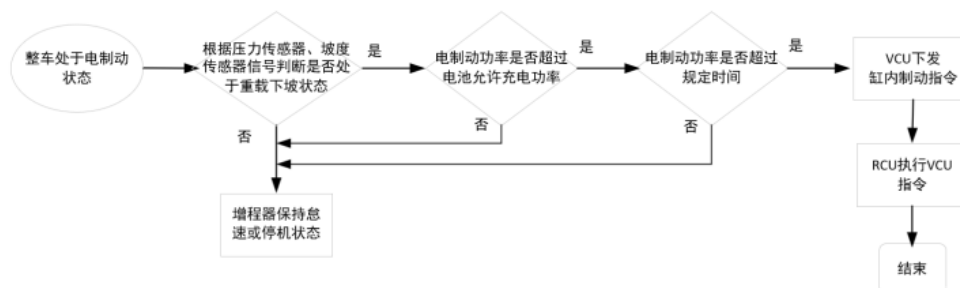


图6 电制动状态增程器控制流程图

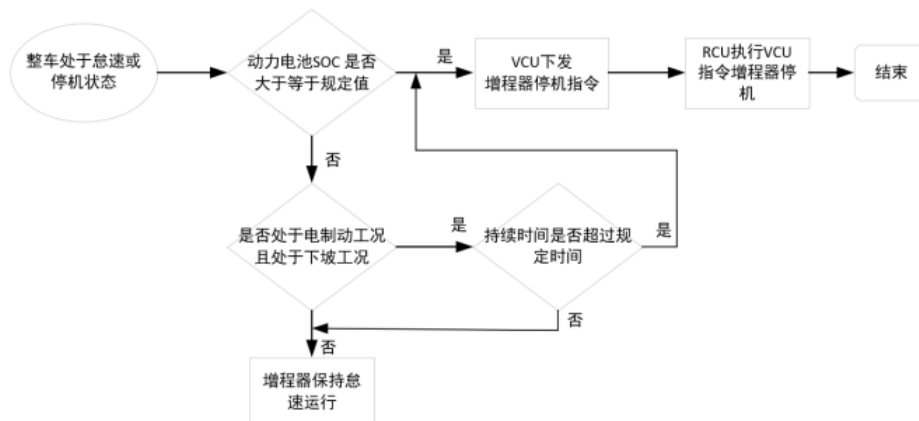


图7 增程器怠速或停机控制流程图

当增程器处于怠速或停机工况时,判断动力电池 SOC 是否大于等于规定值,若是则增程器停机,若否,判断整车是否处于下坡电制动工况,若是则判断持续时间是否超过规定时间,若是则增程器停机,若否则增程器是怠速运行,增程器控制流程图如图7所示。

搭载该混合动力系统及其控制策略的矿用宽体自卸车已在东北某矿运行超过半年时间,该矿区运距 4~5 公里,线路平均坡度 5%左右,属于重载上坡工况,目前车辆在该矿区运行能耗为 0.07L/吨·公里,相比同级别、同线路运行的燃油车,整车节油率超过 25%以上。

4 结束语

为了提高混合动力矿用宽体自卸车的燃油经济性,本文提出了一种基于负载功率需求并结合动力电池 SOC 的增程器控制策略,并对整车牵引工况、电制动工况、增程器怠速或停机工况控制策略进行详细说明。通过车辆在矿区实际运行数据可知,搭载该混合动力系统的矿用宽体自卸车相比同吨位燃油车重载上坡工况下节油率达到 25%以上,证明了该增程器控制策略的合理性及有效性。

【参考文献】

[1]冯彦彪,邵俊恺,杨珏,等.矿用自卸车新能源技术研究

现状与展望[J].煤炭科学技术,2023(6):343-349.

[2]冯彦彪.串联式混合动力矿用自卸车性能及燃油成本分析[D].北京:北京科技大学,2017.

[3]全梦炜.90t 混联式宽体自卸车混合动力系统控制策略研究[D].西安:长安大学,2021.

[4]胡格格.露天矿超重型自卸车分布式混合动力系统设计及控制策略研究[D].北京:中国矿业大学,2022.

[5]陈凌建,唐勋路,何成昭,等.混合动力矿用电动轮自卸车能量管理策略研究[J].控制与信息技术,2022(5):106-113.

[6]周维,刘鸿远,徐彪,等.功率分流式混合动力矿用自卸车预测性等效燃油消耗最小控制策略研究[J].机械工程学,2021,57(2):200-209.

[7]王庆年,曾小华.新能源汽车关键技术[M].北京:化学工业出版社,2022.

[8]马崇银,赵砚,杨晓.适用于混合动力汽车的增程器控制策略[J].汽车与新动力,2023,6(2):62-65.

作者简介:穆俊杰(1989.7—),男,广东省广州市,汉族,大学本科,中级工程师,就职于福建宏大时代新能源科技有限公司,从事新能源矿车设计与开发。