



## 重型矿卡轮轴协同式混动系统及控制策略研究

陆耀 鲍久圣 胡格格 张华清 胡德平 张磊 阴妍

### 引用本文:

陆耀, 鲍久圣, 胡格格, 等. 重型矿卡轮轴协同式混动系统及控制策略研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 404–420.

LU Yao, BAO Jiusheng, HU Gege. Research on the wheel–axle cooperation hybrid system and control strategy of heavy mining truck[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 404–420.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1461>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于确定性规则的混合动力型高速单轨吊控制策略

Control strategy of hybrid electric high speed monorail crane based on deterministic rules

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 240–251 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1586>

#### 矿用自卸车新能源技术研究现状与展望

Research of energy-efficient mining truck: current status and perspectives

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 343–350 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0999>

#### 基于役龄回退模型的露天矿卡车周期预防性维护策略

Periodic preventive maintenance strategy of open-pit mine truck based on age-reduction model

煤炭科学技术. 2023, 51(4): 209–214 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1236>

#### 再论露天矿群开采-采排复一体化协同采矿技术

Discussion on coordination of open-pit mine group mining and integration of mining-dumping-reclaiming

煤炭科学技术. 2022, 50(2): 47–55 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/5b68e33a-87d6-414f-b374-d843e5d6f992>

#### 基于方波电压注入的刮板机重载启动控制策略研究

Research on heavy load starting control strategy of scraper based on square wave voltage injection

煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/dac179fb-710f-4a8f-b6b6-b1067d3ef0f6>

#### 降雨工况下露天矿排土场边坡稳定性与治理措施

Stability and control measures of open-pit mine dump slope under rainfall conditions

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/95733d89-606a-4bea-a203-22a7c886393f>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

陆耀, 鲍久圣, 胡格格, 等. 重型矿卡车轮-轴协同式混动系统及控制策略研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(S1): 404-420.

LU Yao, BAO Jiusheng, HU Gege, *et al.* Research on the wheel-axle cooperation hybrid system and control strategy of heavy mining truck[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 404-420.

## 重型矿卡车轮-轴协同式混动系统及控制策略研究

陆耀<sup>1</sup>, 鲍久圣<sup>1</sup>, 胡格格<sup>1</sup>, 张华清<sup>1,2</sup>, 胡德平<sup>3</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 阴妍<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221116; 2. 徐州工程机械集团有限公司科技质量信息部, 江苏徐州 221004;

3. 徐州徐工重型车辆有限公司, 江苏徐州 221112)

**摘要:** 矿用自卸车因其“多拉快跑”的特性而被广泛应用于露天矿山中进行煤炭、矿石等物料的运输。针对经典两轴车及宽体车传统驱动系统存在的动力性能有限、燃油经济性不佳、尾气排放严重等现实问题, 面向露天矿自卸车重型化发展对其动力系统提出的超大功率需求与高动力经济性要求, 提出了一种新型轮-轴协同式混合动力系统并研究其控制策略。首先, 设计了“中轴由柴油机驱动、前后轴由电机驱动”的新型轮-轴协同式混合动力驱动系统, 制定了8种工作模式; 其次, 分析矿用自卸车典型行驶工况, 开展循环工况路谱数据采集试验, 建立了露天矿专用循环工况曲线; 再次, 分析确定了轮-轴协同式混合动力系统在不同混动模式下的模式切换及转矩分配方案, 利用 Matlab/Simulink 搭建了基于转矩的逻辑门限值整车控制策略模型; 最后, 在 CRUISE 软件中搭建轮-轴协同式混合动力矿车模型, 导入控制策略后进行联合仿真试验, 分别对车辆的动力经济性能和牵引重量的提升效果进行对比分析。结果表明: 若采用提升性能方案, 经混动改造后满载时的最高车速、最大爬坡度分别提高了 29.51% 和 54.36%, 0~30 km/h 的加速时间、百公里综合燃油消耗分别下降了 82.30% 和 56.29%, 发动机、电机、电容的工作特性更佳, 整车的动力性能与经济性能均得到了较大改善; 若采用增大载重方案, 经混动改造后整车载重可提升 21.54%, 满载时的最高车速、最大爬坡度分别提高了 28.60% 和 52.31%, 而 0~30 km/h 的加速时间、百公里综合燃油消耗则分别下降了 77.09% 和 42.15%。

**关键词:** 矿用自卸车; 露天矿运输; 混合动力; 控制策略; 转矩控制

**中图分类号:** TD713

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2023)S1-0404-17

## Research on the wheel-axle cooperation hybrid system and control strategy of heavy mining truck

LU Yao<sup>1</sup>, BAO Jiusheng<sup>1</sup>, HU Gege<sup>1</sup>, ZHANG Huaqing<sup>1,2</sup>, HU Deping<sup>3</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, YIN Yan<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Science and Technology Quality Information Department, Xuzhou Construction Machinery Group Co., Ltd., Xuzhou 221004, China; 3. Xuzhou XCMG Heavy Vehicle Co., Ltd., Xuzhou 221112, China)

**Abstract:** Mining dump trucks are widely used in open-pit mines for the transportation of coal, ore and other materials due to their “Super heavy load transportation task and high driving speed” characteristics. In view of the practical problems such as limited power performance, poor fuel economy and serious exhaust emission existing in the traditional drive systems of classic two axle mine trucks and wide body mine dump trucks, a new type of wheel-axle cooperation hybrid system is proposed and its control strategy is studied in view of the super power demand and high power economy requirements of the power system of the open-pit dump truck due to the heavy-duty development. First of all, a new type of wheel-axle hybrid drive system with “the center axle is driven by a diesel engine and the front and rear axles are driven by motors” is designed, and eight working modes are studied and formulated; Secondly, the typical driving conditions of

收稿日期: 2022-09-09

责任编辑: 周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1461

**基金项目:** 徐州市重点研发计划资助项目(KC22419); 装备预研教育部联合基金资助项目(6141A02033518); 江苏高校优势学科建设工程(PAPD)资助项目

**作者简介:** 陆耀(1997—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生。E-mail: luyao971125@163.com

**通讯作者:** 鲍久圣(1979—), 男, 安徽桐城人, 教授, 博士生导师。E-mail: cumtbjs@cumt.edu.cn

mining dump truck are analyzed, the road spectrum data collection experiment of cycle is carried out, and the special cycle curve of open-pit mine is established; Thirdly, the mode switching and torque distribution schemes of the wheel-axle cooperative hybrid power system under different hybrid modes are analyzed and determined, and the vehicle control strategy model based on the logical threshold of torque is built using Matlab / Simulink; Finally, the wheel-axle cooperative hybrid electric mine car model is built in CRUISE software, and after the control strategy is imported, the joint simulation test is carried out to compare and analyze the dynamic economic performance of the vehicle and the lifting effect of the traction weight. The results show that with the performance improvement scheme, the maximum speed and maximum climbing gradient at full load are increased by 29.51% and 54.36% respectively, the acceleration time of 0-30km/h and the comprehensive fuel consumption of 100 km are reduced by 82.30% and 56.29% respectively, the working characteristics of the engine, motor and capacitor are better, and the dynamic performance and economic performance of the whole vehicle are greatly improved; If the load increase scheme is adopted, the load of the whole vehicle can be increased by 21.54% after the hybrid transformation. The maximum speed and maximum climbing gradient at full load are increased by 28.60% and 52.31% respectively, while the acceleration time of 0-30km/h and the comprehensive fuel consumption of 100 km are reduced by 77.09% and 42.15% respectively.

**Key words:** mining dump trucks; open-pit mine transportation; hybrid; control strategy; torque control

## 0 引 言

矿用自卸车是一种用于大型露天矿运输煤矿、沙石的非公路型自卸车,是露天矿运输过程中必不可少的工具,经常与挖掘机、装载机、带式输送机等工程机械联合作业,构成装、运、卸生产线<sup>[1-4]</sup>。目前国内露天矿普遍采用两轴及宽体矿车为主流运输车型,其驱动方式主要采用机械传动及柴油-电传动,国内两轴矿车吨位已突破 400 t,但市场上的宽体自卸车一直以 20~100 t 为主流,对于百吨级以上重型三轴矿车的研究仍十分匮乏<sup>[5-8]</sup>。

目前矿用自卸车的发展存在以下问题:首先,最主要的问题是能源资源日渐匮乏导致大量低质量矿山被开采,传统矿车的运输效率较低,难以适应不断扩大的生产和运输需求,具有高可靠性、低运营成本的大吨位三轴矿车符合矿业开采的市场需求,需求量增长;其次,超重型矿用自卸车普遍采用的传统柴油-电驱动方式存在能量多次转化后利用率低、动力性能有限、燃油经济性不佳、制动电阻耗能浪费严重等问题;最后,油电混合动力技术的优势日益凸显,国家“智能发展”理念、2025 规划的基本方针及相关政策与产业化需求变化,为发展节能的混合动力新能源矿车指明了方向<sup>[9-13]</sup>。

近年来,随着新能源汽车的快速发展,国内外众多学者开始对矿用自卸车混合动力技术展开研究。JIN 等<sup>[14-15]</sup>通过建立电池、超级电容、液压蓄能器和气罐的经济模型,对比分析了这 4 种储能系统应用于混合动力矿用自卸车的燃油经济性,结果表明:空气混合动力总成系统是最佳系统。徐涛等<sup>[16]</sup>基于传统液力机械式变速箱结构,提出一种适用于百吨级以下矿用自卸车的混合动力变速箱结构。YANG 等<sup>[17]</sup>将一种基于速度优化的能量管理策略应用于串联式

混合动力矿用车,仿真结果表明该策略可显著降低运输成本。在工程领域,东风重工于 2016 年成功研发 DF45E 混合动力矿用自卸车,该矿车搭载 80 kW·h 动力电池,最大载重量 60 t,适用于矿山复杂工况,燃油经济性可提高 50%~70%。潍柴动力、中国氢能联盟、国家能源集团、中车永济电机于 2019 年联合研发 200 t 级氢燃料-锂电池混合能源矿用自卸车。该矿车采用降压斩波的控制方式,驱动电机功率 1 100 kW,具有牵引和制动功能,在行驶中可实现防滑、限速、差速等控制功能。

综合上述对研究背景及实际问题的分析,针对露天矿运输行业对矿用自卸车的大型化、重型化发展需求<sup>[18]</sup>,笔者利用混合动力技术在结构上模式多样且适用性广、在能量管理上分配合理且可回收制动能量的优势,开发出具有 8 种工作模式、可实现“分时六驱”的混合动力重型矿车,并通过分析模式切换条件及转矩分配方案设计出了对应的控制策略。

## 1 轮-轴协同式混合动力系统设计

### 1.1 基本结构

常见的露天矿重型自卸车多为两轴、三轴构型,且以柴油-电驱动方式为主。基于 TEREX33-19 款三轴矿用自卸车为原车构型来进行轮-轴协同式混合动力系统的设计与研究,如图 1 所示,为原车 TEREX33-19 的柴油-电驱动系统设计方案,其为典型的电传动系统。其中,柴油发动机并不参与直接驱动,而是作为动力源带动同轴交流发电机发电,然后为中轴及后轴上电动轮内的交流驱动电机供电,从而驱动整车行驶。

图 2 所示为轮-轴协同式混合动力驱动系统方案,由图 2 可知,改造后的露天矿重型自卸车采用轮-轴协同式混合动力驱动方式,前轮及后轮由电机驱

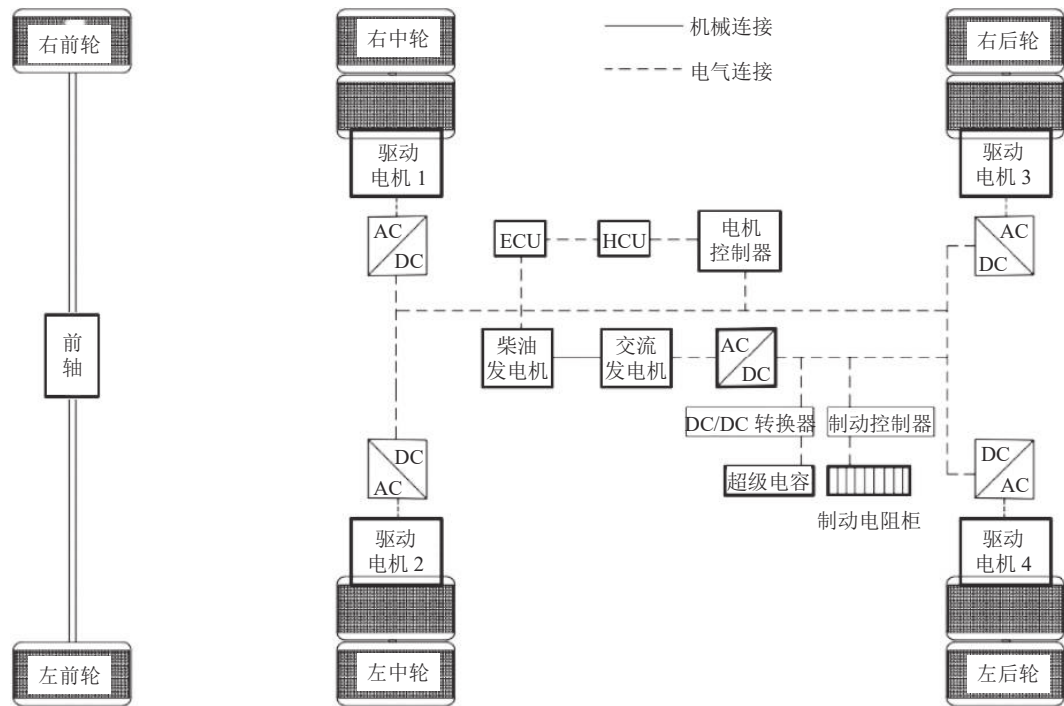


图 1 TEREX33-19 原重型自卸车驱动系统方案

Fig.1 Terex33-19 original drive system scheme of heavy dump truck

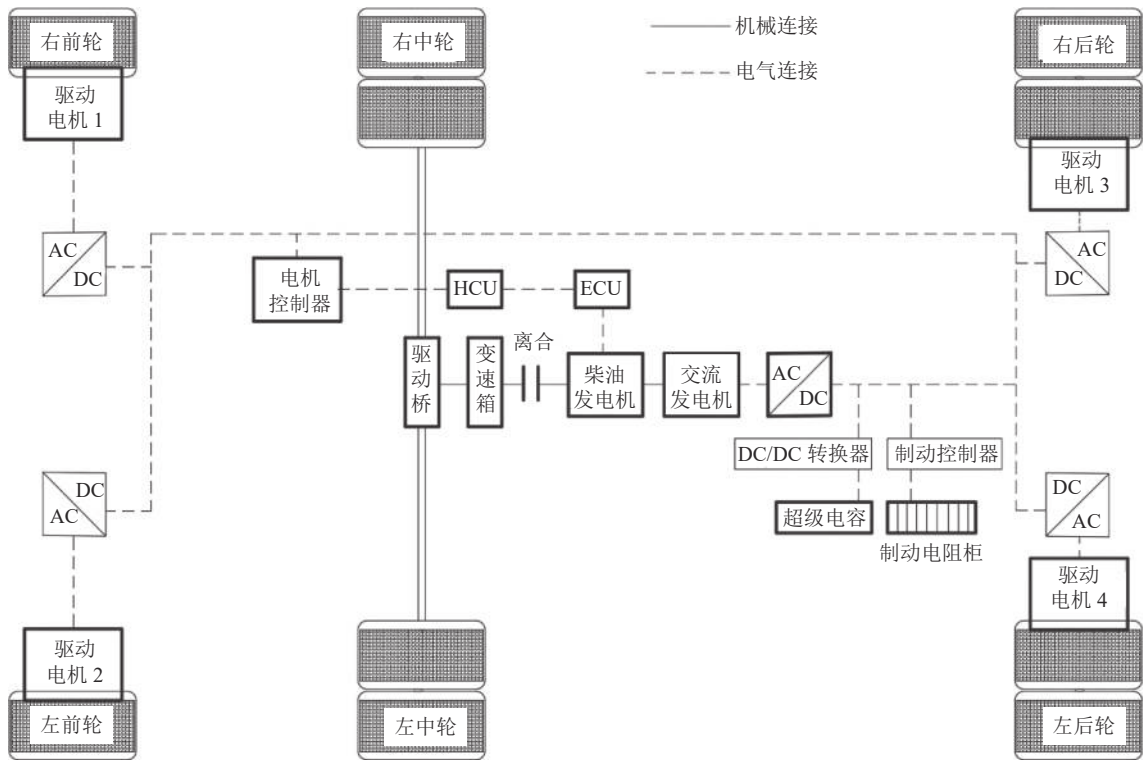


图 2 轮-轴协同式混合动力驱动系统方案

Fig.2 Wheel axle cooperative hybrid drive system scheme

动, 中轮由柴油发动机驱动, 超级电容作为动力源及制动储能装置使用; 制动电阻用于消耗多余电能。该系统采用三轴结构设计, 相较于经典的两轴设计, 不仅提高了超重型自卸车的载重量及露天矿复杂工况下的脱困性能、降低了运营成本, 还可实现分时六

驱, 根据不同工况及驾驶需求切换驱动模式, 可以达到提升车辆动力性及燃油经济性的效果。

### 1.2 模式设计

新设计的连接型轮-轴协同式混合动力系统动力部件较多、结构布置灵活, 车辆可根据实际工况运

行 8 种工作模式, 分别为: 电驱动模式、发动机模式、分时六驱模式、再生制动模式、行车充电、发动机启动模式、换挡模式、驻车模式。其对应的能量流动如图 3 所示。

### 1.2.1 电驱动模式

电驱动模式下前后轴为驱动电机驱动模式, 是整车的主要驱动模式, 适用于起步、低速正常行驶且超级电容 SOC 值较高的工况。纯电驱动模式下, 超级电容输出电能以满足对应工况下车辆所需的电能,

能量从超级电容经过电机到达前后轮, 从而驱动整车行驶。

### 1.2.2 发动机驱动模式

发动机驱动模式即中轮驱动模式, 适用于车速和载重不高、动力需求不大或前后轮卡住时需要脱困的工况, 此时发动机效率较高。该模式行驶下, 车辆的动力来源于柴油发动机, 驱动电机不工作, 发动机通过变速箱将动力传递给中轮, 从而驱动整车行驶。

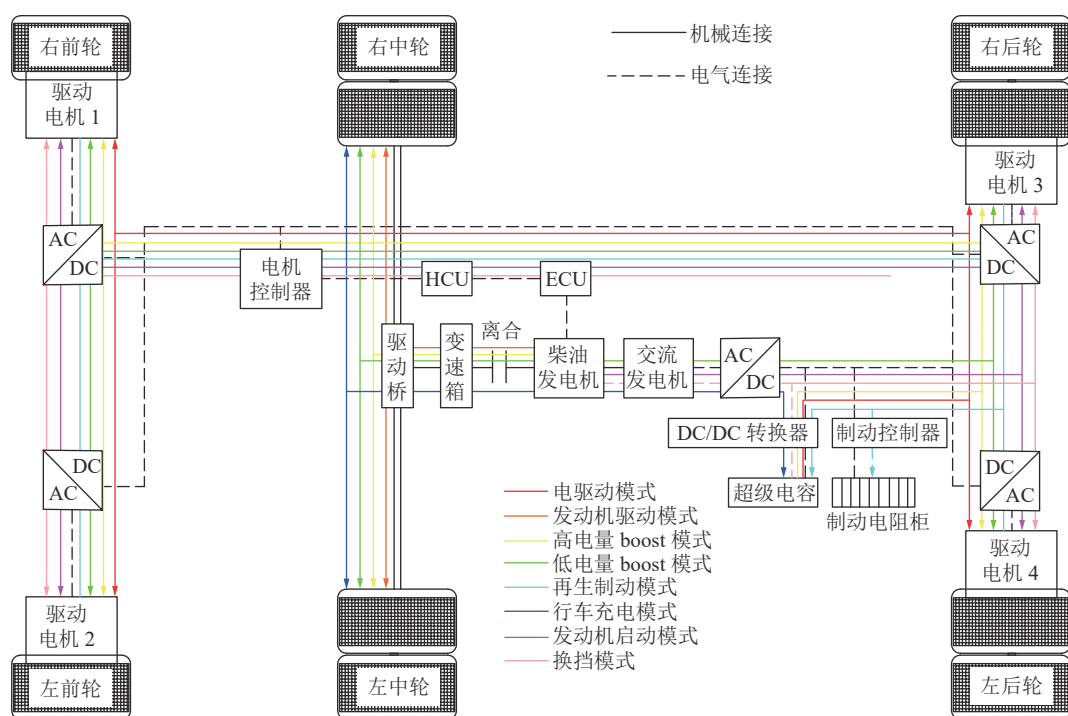


图 3 混合动力驱动模式能量流动示意

Fig.3 Schematic diagram of energy flow in hybrid drive mode

### 1.2.3 分时六驱模式

当车辆处于满载爬陡坡、需求功率很大时, 由发动机和电机共同驱动, 整车处于六轮全驱状态。但由于超级电容电量高低问题与发动机及电机的功率分配密切相关, 故需要根据电容电量高低将整车六轮驱动模式划分为高电量 boost 模式和低电量 boost 模式。

1) 高电量 boost 模式(发动机+电容)。在高电量下, 整车需求扭矩大于发动机 OPT(Optimal) 扭矩, 应采取联合驱动形式, 否则, 发动机会因工作在超过最佳工作区间最大转矩而引起低效工作。该模式下, 发动机工作在 OPT 扭矩下提供动力, 剩余的需求扭矩由驱动电机进行补偿, 电量充足的超级电容向驱动电机供电来提供动力。该模式行驶下, 前后轴及

中轴两套动力源同时工作, 此时车辆的动力最强。

2) 低电量 boost 模式(发动机)。在低电量下, 整车需求扭矩大于发动机 OPT 扭矩, 仍采取发动机和驱动电机执行六轮联合驱动模式, 但此时超级电容电量不足, 已无法直接向驱动电机供电来提供动力, 发动机工作在 OPT 扭矩下提供动力已无法满足驱动要求, 故此时发动机工作点必须超过其高效工作区间的上限值, 超出 OPT 扭矩的部分用于提供发电机发电。该模式下前后轴及中轴两套动力源也同时工作, 此时车辆的动力极强。

### 1.2.4 再生制动模式

再生制动模式可实现制动能量的回收及利用, 适用于制动时超级电容 SOC 值较低的工况。该模式下, 制动力矩带动电机反转, 进而达到发电的效果,

然后经过电气元件的转化后存储进 SOC 值较低的超级电容中。当电机回收制动力矩仍无法满足制动需求时用机械制动来弥补。

1.2.5 行车充电模式

行车充电模式主要适用于超级电容 SOC 值不足、车辆的电力驱动系统无法使用的工况,此时发动机的能量一部分用来驱动中轴以满足行驶要求,剩余部分则用来发电并充入超级电容。

1.2.6 发动机启动模式

发动机启动模式用于发动机开始工作的工况,此模式下离合器断开,此时发动机不再为中轮提供驱动力,仅为发电机发电供能,发电机向驱动电机供电,由驱动电机驱动车辆,以保证整车的正常行驶。

1.2.7 换挡模式

如图 3 所示,换挡模式贯穿与整个车辆行驶过程,车辆根据不同行驶工况、需求动力需要适时进行车辆挡位的切换,整车在换挡过程中将驱动控制交给驱动电机,由驱动电机来提供车辆驱动所需动能。

1.2.8 驻车模式

驻车模式下车辆的停车状态,此时车辆不再需要动力驱动,发动机及电机均不再提供能量。

2 露天矿典型路谱数据采集试验及循环工况建立

选取隶属于内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗境内的某露天矿作为试验场地,该矿区煤矿资源丰富且煤质情况优良,具有简单易开发的地理环境优势,符合市场对开展大型露天煤矿的一般要求。因此,笔者将基于此场地进行露天矿工况试验数据的路谱采集及工况的建立<sup>[19-20]</sup>。

2.1 露天矿典型行驶工况分析

矿用自卸车由于自身的典型结构和功能特点,决定了其使用场合为露天矿或者施工工地等运输路况差、运输坡度变化大、运输距离不长的环境,其典型循环工况特点为单程承载,即“满载爬坡,空载下坡”或“满载下坡,空载爬坡”。

所选某露天矿试验场地如图 4 所示,结合实际运输道路条件及车流量情况,运输场地车速限速为 30 km/h,且为典型的“满载爬坡,空载下坡”工况,下文针对选取露天矿场地的实际运输过程进行分析。

图 5 为所选取露天矿中矿用自卸车的实际运输过程示意图。在实际运输过程中:①~⑧完成一趟单程满载运输,整个过程矿车均为满载状态,当矿车完成卸料后,整车为空载状态;a~f 完成一趟回程运

输,沿原路线返回至矿坑装料区,即完成一个完整的循环运输过程。



(a) 露天矿装料区工作图



(b) 露天矿车辆运输道路图

图 4 露天矿实际工况

Fig.4 Schematic of energy flow in hybrid drive mode

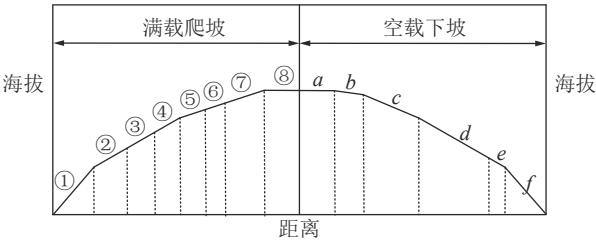


图 5 露天矿矿用自卸车运输过程示意

Fig.5 Actual working condition of open pit mine

在完成一个完整的“满载爬坡,空载下坡”的运输流程过程中,车辆的载重发生了变化,而后续针对循环工况进行 AVL CRUISE 仿真试验时,由于该软件自身的局限性,试验车辆的载重无法满足满载及空载之间变化的要求,因此需要将露天矿的循环工况进行分割,对“满载爬坡”及“空载下坡”分别建立露天矿循环工况,数据采集也将分别进行采集及整理。

2.2 试验路线的确定

选取的鄂尔多斯某露天矿位于内蒙古自治区鄂

鄂尔多斯市伊金霍洛旗境内,在利用线路循环测试法来采集露天矿工况数据前,需要对试验路线进行选取及制定。

针对所选取露天矿“满载爬坡,空载下坡”的典型运输工况特点,并结合交通领域对“路段频率和覆盖率”的要求,选取的露天矿试验场地中矿车流量最大的 1 条工况路线进行试验,并针对该条工况路线分别选取 3 辆同款矿车分别进行 10 次循环数据采集,每完成一轮“满载爬坡”和“空载下坡”为一循环,试验场地路线图如图 6 所示。



图 6 运输路线

Fig.6 Transportation route

## 2.3 路谱数据采集试验

路谱采集工具采用手持设备与惯导相结合的方式。采集时将手持设备放在目标露天矿车上的固定位置,用于采集车辆的 GPS 数据,其中包括整车运行过程中的经纬度、海拔,车速与距离数据是经过后期衍生计算数据处理所得。试验前先做好准备工作,检查车辆状态是否正常,并调试好试验测试设备。数据采集设备安装调试好、一切工作准备就绪后,即可启动车辆,开始跟车队进行运输任务,待车辆进入所选路线、运行稳定后开始测量露天矿工况数据。

图 7 为露天矿工况数据采集试验时满载爬坡车队跟随运输图,图中运输道路上满载爬坡车辆与空载下坡车辆交互往复运行,路谱数据采集试验的车辆正在满载爬坡,分别为车辆①、车辆②、车辆③,每辆车中均具有数据采集设备,同时进行数据采集工作,为随时观察测试情况,选择车辆③跟车行驶。

## 2.4 露天矿循环工况的建立

通过试验获得露天矿工况初始数据后,因为试验过程中各种测量误差及影响,需要对露天矿工况所测得的原始数据进行处理,处理后的工况如下。

### 2.4.1 满载工况图

满载工况主要包括:满载速度-时间图(图 8),距

离-坡度图(图 9)。通过速度-时间图像可以确定距离,从而确定定点位置和坡度的连接关系,由图 8 可见,满载工况曲线无持续波动现象,变化趋势、变化规律与原数据一致,符合一般工况建立的基本要求。



图 7 满载爬坡车队跟随运输

Fig.7 Full load climbing fleet following transport

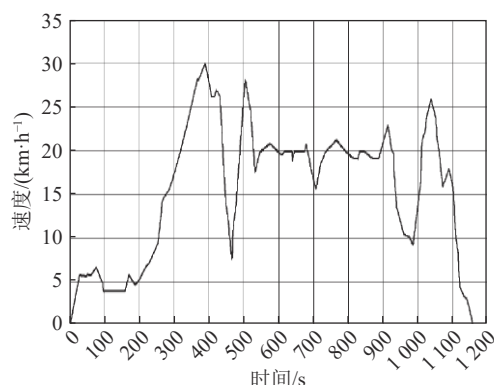


图 8 满载速度-时间工况

Fig.8 Full load drive cycle of velocity and time

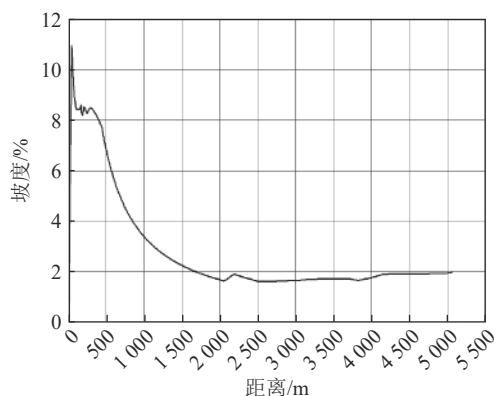


图 9 满载距离-坡度工况

Fig.9 Full load drive cycle of distance and inclination

### 2.4.2 空载工况图

空载工况主要包括:空载速度-时间图(图 10),

距离-海拔图(图 11)。通过速度-时间图像可以确定距离,从而确定点位置和海拔的连接关系,由图 10 可见,空载工况曲线无持续波动、抖动现象,变化趋势、变化规律与原数据一致,更加稳定光滑,符合一般工况建立的基本要求。

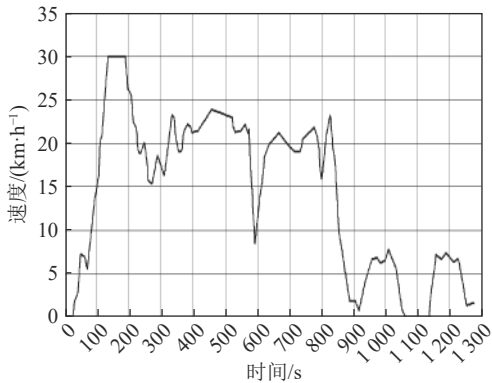


图 10 空载速度-时间工况

Fig.10 No load drive cycle of velocity and time

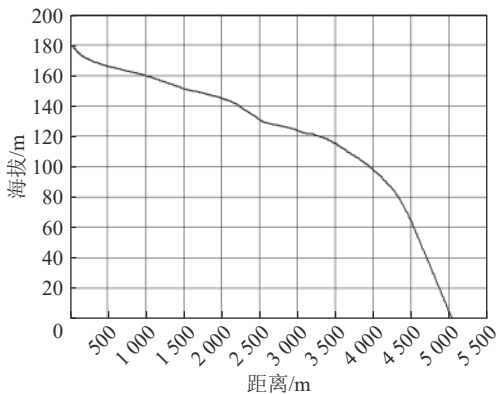


图 11 空载距离-海拔工况

Fig.11 No load drive cycle of distance and altitude

### 3 控制策略设计及整车建模

#### 3.1 基于转矩的逻辑门限制控制策略参数设计

考虑到实际控制策略在露天矿重型自卸车上的适用性,采用基于转矩的逻辑门限制控制策略,针对所设计的轮-轴协同式混合动力驱动系统,对其具体的实现方法与基本原理进行分析(图 12):控制系统通过采集加速踏板、制动踏板、挡位、车速等信号后计算出整车需求扭矩,基于 SOC 值对工作模式做出判断,进而对每种模式下的扭矩进行分配。

##### 3.1.1 发动机工作区域

发动机是轮-轴协同式混合动力驱动系统的主要动力源,重型矿用自卸车其发动机主要用于中轴驱动及发电。考虑到电机较发动机的工作效率更高、高效率工作范围广等原因,通过电机扭矩的输出来

调节发动机工作点在高效区间内。基于柴油发动机类型的万有特性曲线,划分出其高效工作区间,在高负荷扭矩曲线  $T_{eH}(n)$  与低负荷扭矩曲线在  $T_{eL}(n)$  之间,如图 13 所示。

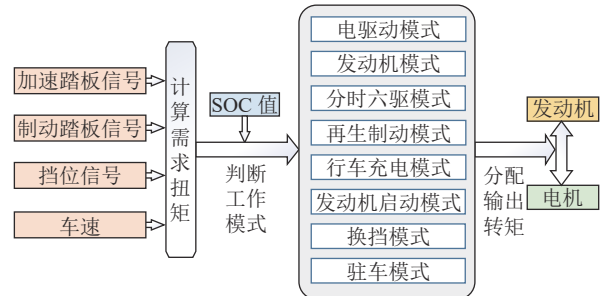


图 12 控制策略原理

Fig.12 Schematic of control strategy

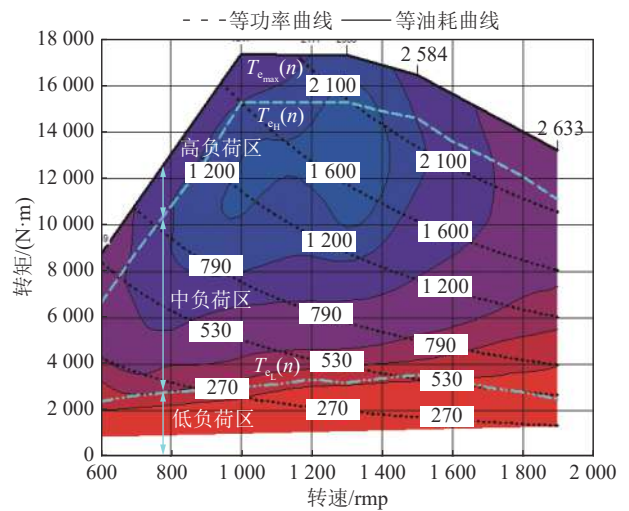


图 13 发动机工作区域划分图

Fig.13 Division of engine operating range

整车的动力主要由电机提供,发动机主要用于发电及中轴驱动。当驱动需求低于  $T_{eL}(n)$  扭矩线时,通过发电提高发动机负荷使其工作在 OPT 曲线  $T_{eH}(n)$  上;当驱动需求高于 OPT 扭矩线时,超级电容高电量下,由电机补偿剩余需求功率来保证最佳工作区间;超级电容低电量下,发动机工作在 OPT 扭矩的 110% 范围内,多出的 10% 用于为电机发电补偿超过 OPT 扭矩的部分。

##### 3.1.2 超级电容工作区域

超级电容的 SOC 工作区间可根据其充放电效率的变化特性来制定,确定合适工作区间有利于提高电容充放电时的工作效率及使用寿命。图 14 为超级电容在随 SOC 值变化时的充放电效率变化曲线,选择充放电效率均较高的区域,即  $SOC_{min}$  到  $SOC_{max}$  作为超级电容工作区间。

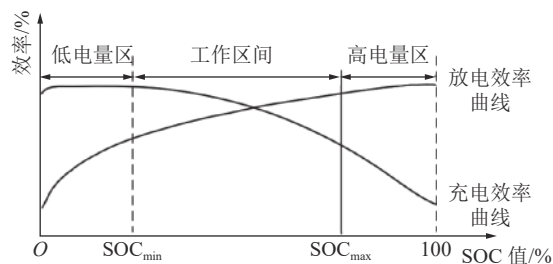


图 14 超级电容工作区间效率变化示意

Fig.14 Schematic of efficiency change in working range of super capacitor

根据上述要求划分出超级电容工作区间后,对相应区间的充放电要求进行制定,一般电池的  $SOC_{max}$  在 80% 左右,超级电容比电池的更高,故按照 95% 选取,最终确定超级电容工作区间的 SOC 上下限分别为 20% 和 95%,超级电容的工作区间充放电要求见表 1。

表 1 超级电容对应 SOC 值的充放电要求  
Table 1 Charge and discharge requirements of super capacitor corresponding to SOC value

区域	SOC 值范围	充放电要求
低电量区域	[0,0.2)	不可放电
工作区	[0.2,0.95)	可充电/放电
高电量区	(0.95,1]	不可充电

### 3.1.3 需求转矩的分析计算

控制策略的实施,首先需要根据识别的油门、制动踏板、挡位及车速信号对需求转矩进行分析计算,

它是车辆识别实际工况运输中对功率需求的基础,也是根据预先制定的模式切换条件来判断执行工作模式的前提条件。

需求转矩的计算包括驱动转矩及制动转矩 2 种,对应的分析计算如下。

1) 驱动转矩的识别与计算。车辆驱动转矩的识别通过参考油门开度获取,并结合发动机与驱动电机的最大转矩来计算得出,见式(1)。

$$T_{d \text{ req}} = L_a T_{\max} = L_a (T_{e \max} + 4T_{m \max}) \quad (1)$$

式中:  $T_{d \text{ req}}$  为驱动需求扭矩;  $T_{\max}$  为最大参考扭矩;  $T_{e \max}$  为发动机最大扭矩;  $T_{m \max}$  为驱动电机最大扭矩;  $L_a$  为油门开度。

2) 制动转矩的识别与计算。车辆制动转矩的识别通过参考制动踏板的行程获取,并结合前后轴与中轴的最大制动转矩来计算得出,见式(2)。

$$T_{b \text{ req}} = L_b [4(T_{13me \text{ b max}} + T_{m \max}) + 2T_{2me \text{ b max}}] \quad (2)$$

式中:  $T_{b \text{ req}}$  为制动需求扭矩;  $T_{13me \text{ b max}}$  为前后轴最大机械制动扭矩;  $T_{2me \text{ b max}}$  为中轴最大机械制动扭矩;  $T_{g \max}$  为驱动电机当前扭矩;  $L_b$  为制动踏板行程。

3) 工作模式的确定与转矩分配。工作模式的确定是整个控制策略的关键,如何根据获取的信号、通过计算出的需求转矩来进行不同模式下的判断标准是整个控制能否实现的重难点,通过分析,确定了轮-轴协同式混合动力驱动系统模式及对应工作模式下发动机及电机目标转矩的分配(表 2)。表 2 中电机目标转矩为 4 个电机输出的总转矩,按照 4 个电机平均分配的方式进行转矩输出。

表 2 不同模式下的目标转矩值分配

Table 2 Distribution of target torque value under different modes

工作模式	发动机状态	发电机状态	电机状态	发动机目标转矩	电机目标转矩	判断条件
电驱动	关闭	关闭	开启	0	$\min(T_{d \text{ req}}, T_{m \max})$	$SOC_{\text{low}} < SOC & 0 < T_{d \text{ req}} \leq T_{e \text{ low}}$
发动机驱动	开启	关闭	关闭	$\min(T_{d \text{ req}}, T_{e \max})$	0	$SOC_{\text{low}} < SOC & T_{e \text{ low}} < T_{d \text{ req}} \leq T_{e \text{ high}}$
高电量boost	开启	关闭	开启	$T_{e \text{ OPT}}$	$\min(T_{d \text{ req}} - T_{e \text{ OPT}}, T_{m \max})$	$SOC_{\text{low}} < SOC < SOC_{\text{high}} & T_{d \text{ req}} > T_{e \text{ high}}$
低电量boost	开启	开启	开启	$T_{e \text{ OPT}} \times 110\%$	$\min(T_{d \text{ req}} - T_{e \text{ OPT}}, T_{m \max})$	$SOC \leq SOC_{\text{low}} & T_{d \text{ req}} > T_{e \text{ high}}$
行车充电	开启	开启	开启	$\min(T_{d \text{ req}} - T_{g \max}, T_{e \max})$	$T_{e \max} - T_{e \text{ tar}}$	$SOC \leq SOC_{\text{high}} & 0 < T_{d \text{ req}} \leq T_{e \text{ high}}$
再生制动	关闭	关闭	开启(发电)	0	$-T_m$	$SOC \leq SOC_{\text{high}} & 0 < T_{b \text{ req}} \leq T_{e \max}$
驻车	关闭	关闭	关闭	0	0	$T_{d \text{ req}} = 0$

注:  $SOC_{\text{low}}$  为电容理想工作区域最低荷电状态;  $SOC_{\text{high}}$  为电容理想工作区域最高荷电状态;  $T_{e \text{ low}}$  为发动机高效工作区间的最低转矩;  $T_{e \text{ high}}$  为发动机高效工作区间的最高转矩;  $T_{e \text{ OPT}}$  为发动机的目标转矩;  $T_{e \text{ tar}}$  为行车充电模式下发动机的目标转矩。

## 3.2 整车模型建立

基于 CRIUSE 软件,建立轮-轴协同式混合动力六驱模型,包括整车模块、发动机模块、变速箱模块、驱动电机模块等(图 15)。设计的混动系统属于

P0+P4 构型的混合动力,采用 6×6 驱型,一轴与三轴通过驱动电机驱动,二轴通过发动机输出,同时带动一个发电机进行发电。将 2.4 节建立的露天矿循环工况数据依次导入 CRUISE,对仿真项目进行设置,

主要包括:满载循环工况、空载循环工况、加速工况,然后对仿真模型进行机械连接、电气连接及信号连接。选用 DLL 方式对研究对象进行联合仿真,将搭

建的 Simulink 模型编译成 DLL 的文件形式,生成 Matlab 动态链接库,通过 CRUISE 对其进行调用实现联合仿真。

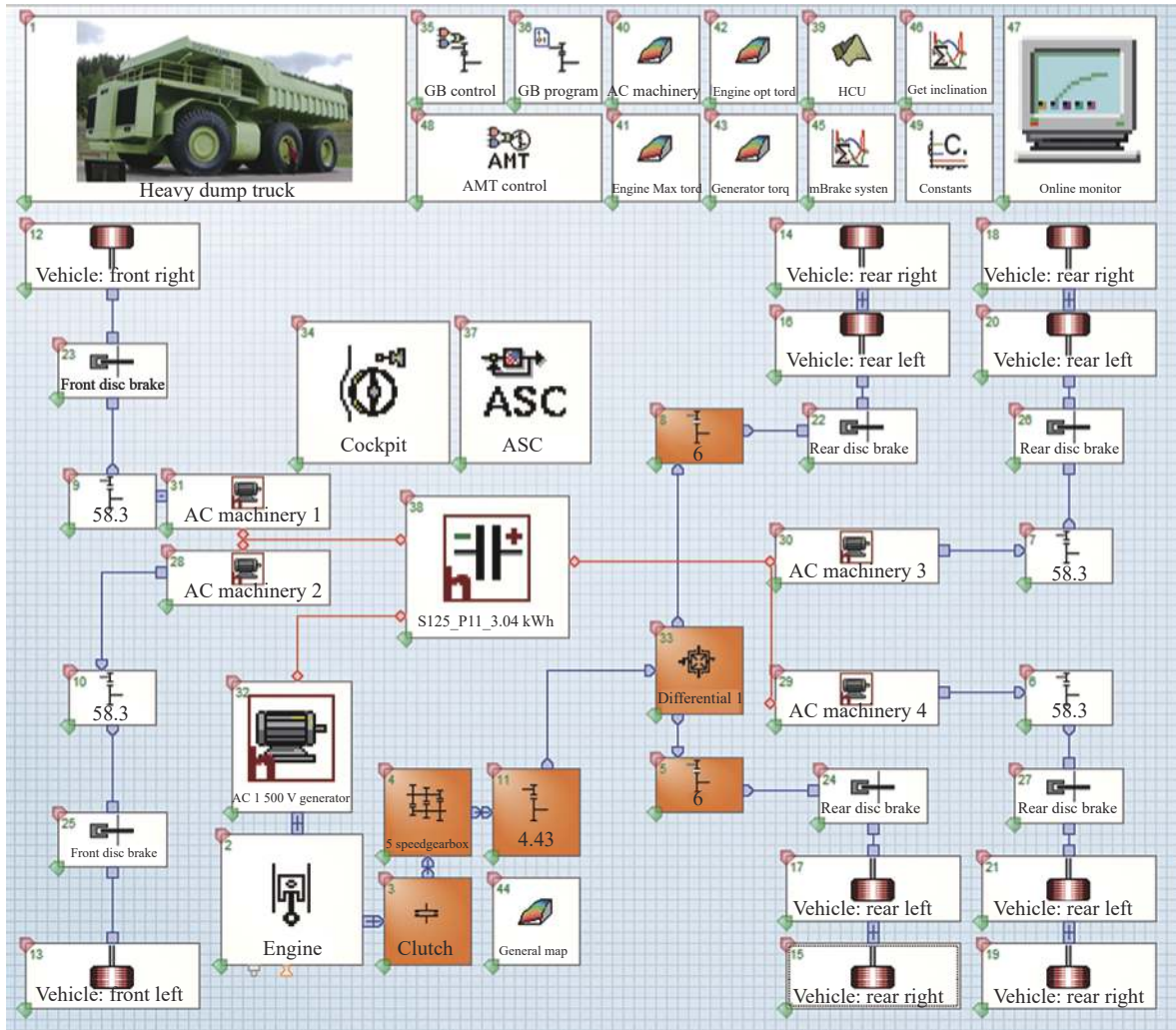


图 15 轮-轴协同式混合动力驱动车型 CRUISE 模型

Fig.15 CRUISE model of Wheel shaft cooperation hybrid drive vehicle

利用 CRUISE 软件对改造后的轮-轴协同式混合动力驱动模型进行仿真分析,分别对基于动力性提升的 554 t 混合动力驱动矿车模型与基于载重性能改造的 673 t 混合动力驱动矿车模型进行仿真分析,2 种车型的整车模型搭建完全一致(即轮-轴协同式混合动力车型),只是关于载重的仿真参数设置不同。

#### 4 联合仿真试验

针对露天矿超重型自卸车的改造提出了 2 种可行性方案,分别为:①基于提升车辆性能的改造方案,目标是在保证载重不变的情况下,提升整车的动力性能及经济性能,对车辆的最高车速、最大爬坡度、加速性能及百公里燃油消耗量进行仿真分析;②基

于提升整车载重性能的改造方案,目标是在保证原车型动力性能的情况下,提升整车的载重,分别对 2 种方案进行仿真试验。

##### 4.1 原车型建模与仿真结果

原电驱车型为 6×4 驱动,柴油机不直接驱动,仅为发电机供能使用,电流通过 IGBT 技术整流逆变后为中后轴的驱动电机供电,基于原车型电驱动的驱动方案,对其整车进行 CRUISE 建模与仿真,受限于文章篇幅,建模与仿真过程不作赘述,动力性与经济性仿真结果见表 3。

##### 4.2 针对提高车辆动力性能的仿真结果分析

###### 4.2.1 动力性与经济性仿真结果分析

动力性能主要针对满载加速工况,对爬坡度与

表 3 原车型仿真试验结果

Table 3 Simulation test results of original vehicle

项目	原车
整车质量/kg	553 550
0~30 km/h加速时间/s	33.56
最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	49.783 5
最大爬坡度/%	19.50
满载百公里油耗/(L·100 km <sup>-1</sup> )	1 586.704 7
满载百公里电耗/(kW·h·100 km <sup>-1</sup> )	209.953 8
满载折合油耗/(L·100 km <sup>-1</sup> )	1 656.225 8
空载百公里油耗/(L·100km <sup>-1</sup> )	356.342 0
空载百公里电耗/(kW·h·100km <sup>-1</sup> )	2.013 4
空载折合油耗/(L·100km <sup>-1</sup> )	357.008 7
全程折合油耗/(L·100km <sup>-1</sup> )	1 006.617 3

最高车速进行仿真分析,经济性仿真主要关注指标为车辆在整个“满载爬坡”和“空载下坡”循环工况过程中,车速跟随状态、百公里油耗、折合油耗等指标。

图 16 为针对提高动力性改造车型满载爬坡仿真试验结果图。由图 16 可知,针对提高车辆动力性能改造方案的轮-轴协同式混合动力系统满载爬坡度为 30.1%,较原车型 19.5% 的满载爬坡度明显提高,说明轮-轴协同式混合动力驱动系统的爬坡性能较原电驱动系统更加优越。

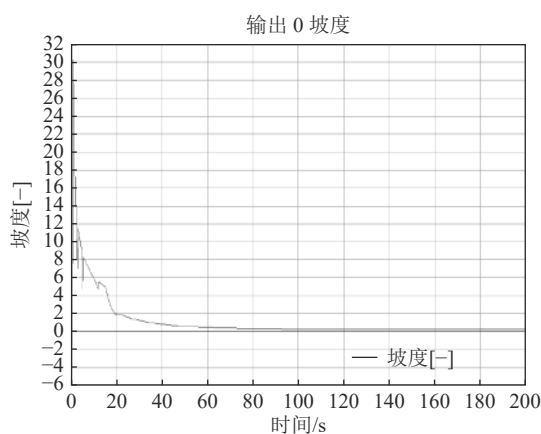


图 16 满载爬坡度仿真试验结果

Fig. 16 Simulation test results of full load climbing gradient

图 17 为针对提高车辆动力性能改造车型满载最高车速与加速时间仿真试验结果图。由图 17 可知,针对提高车辆动力性能改造方案的轮-轴协同式混合动力车型满载最高车速为 64.473 7 km/h, 0~30 km/h 的加速时间为 5.94 s,其满载最高车速较原车型有了明显提高,加速时间则明显缩短,说明轮-

轴协同式混合动力驱动系统具有更优越的加速性能。

图 18 为针对提高动力性改造车型车速跟随状态仿真试验结果图。由图 18 可知,改造后的混合动力车型的车速跟随状态良好,空载工况下虽速度稍有波动,但仍稳定在误差区间范围内,证明了轮-轴协同式混合动力驱动系统对整车运输速度并无影响,满足露天矿的实际运输要求。

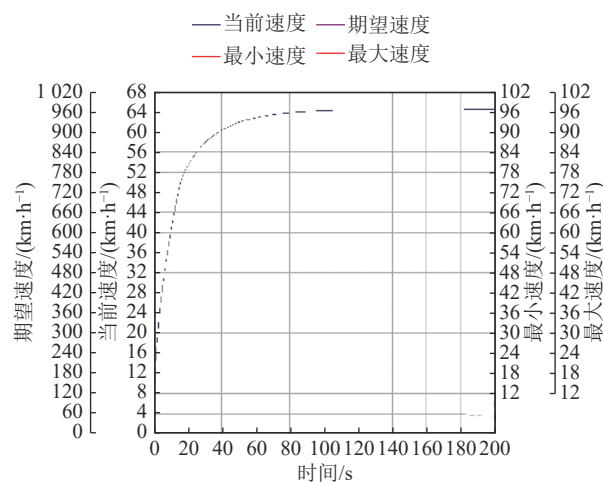


图 17 满载最高车速与加速时间仿真试验结果

Fig. 17 Simulation test results of maximum velocity and acceleration time under full load

图 19 为针对提高车辆动力性能改造车型经济性仿真试验结果图,通过查阅图 19 中曲线对应数据可得:满载工况下的油耗量 80.220 3 L 及电耗量 10.614 8 kW·h,代入式(3)与式(4);空载工况下的油耗量 17.963 8 L 及电耗量 0.101 5 kW·h,代入式(5)与式(6);然后通过计算,得出对应的百公里油耗及百公里电耗值,具体计算公式如下:

1)满载工况计算公式:

$$V_{\text{full\_fuel\_100km}} = \frac{V_{\text{full\_fuel}}}{0.01 \times S_{\text{full}}} \quad (3)$$

$$V_{\text{full\_electric\_100km}} = \frac{V_{\text{full\_electric}}}{0.01 \times S_{\text{full}}} \quad (4)$$

式中:  $V_{\text{full-fuel-100km}}$  为满载百公里油耗;  $V_{\text{full-electric-100km}}$  为满载百公里电耗;  $V_{\text{full-fuel}}$  为满载油耗;  $V_{\text{full-electric}}$  为满载电耗;  $S_{\text{full}}$  为满载工况距离。

2)空载计算公式:

$$V_{\text{empty\_fuel\_100km}} = \frac{V_{\text{empty\_fuel}}}{0.01 \times S_{\text{empty}}} \quad (5)$$

$$V_{\text{empty\_electric\_100km}} = \frac{V_{\text{empty\_electric}}}{0.01 \times S_{\text{empty}}} \quad (6)$$

式中:  $V_{\text{empty-fuel-100km}}$  为空载百公里油耗;  $V_{\text{empty-electric-100km}}$

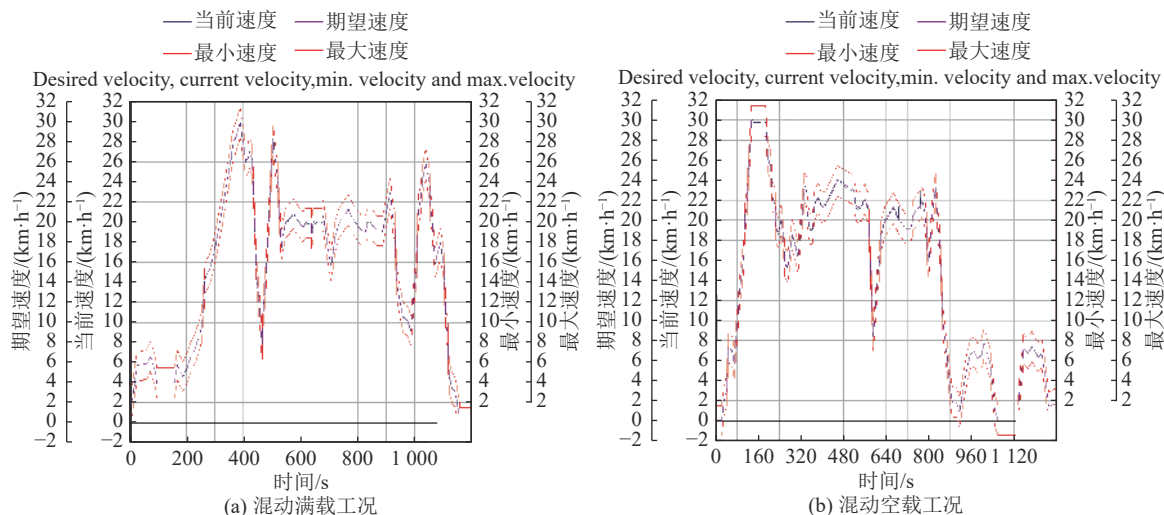


图 18 车速跟随状态仿真试验结果

Fig.18 Simulation test results of speed following state

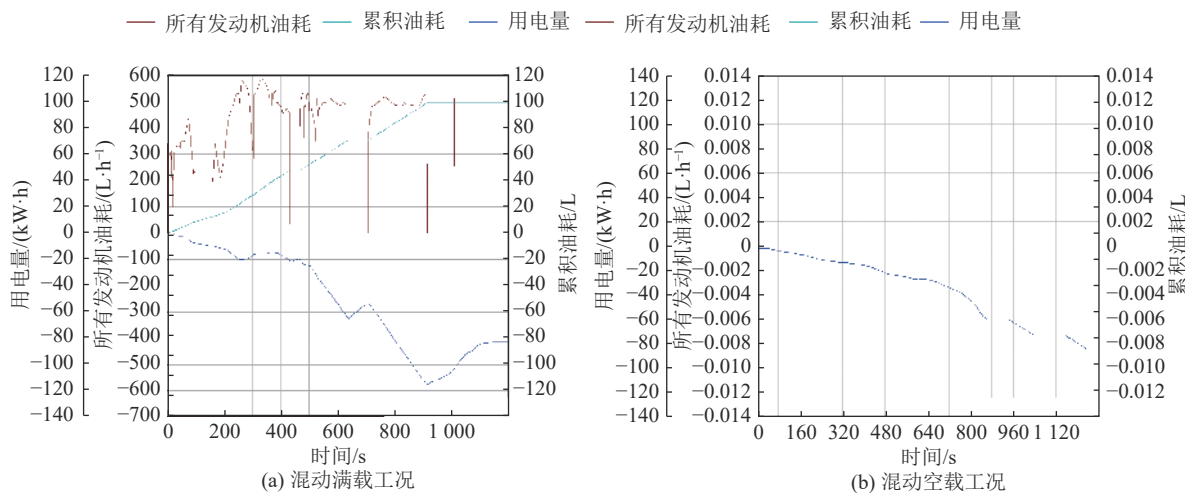


图 19 经济性仿真试验结果

Fig.19 Economic simulation test results

为空载百公里电耗;  $V_{\text{empty-fuel}}$  为空载油耗;  $V_{\text{empty-electric}}$  为空载电耗;  $S_{\text{empty}}$  为空载工况距离。

综上可得: 554 t 混动车型满载百公里油耗为 1 966.998 2 L, 满载百公里电耗为 -1 638.370 3 kW·h; 空载百公里油耗为 0 L, 空载百公里电耗为 1 664.365 6 kW·h。

#### 4.2.2 关键部件工作特性仿真结果分析

1) 发动机工作特性。图 20 和图 21 为发动机工作特性仿真试验结果, 可以看出, 改造后发动机的工作点集中分布在转矩较高的高效区间, 较原车型发动机效率提升明显。

2) 超级电容工作特性。图 22 为超级电容工作特性仿真试验结果, 相较于原车型, 改造后混合动力车型的轮-轴协同式混合动力驱动系统中电容的 SOC 值变化区间更小, 说明混合动力车型不仅满足

驱动需求, 而且电量补偿性能更佳。

3) 驱动电机工作特性。图 23 为驱动电机工作特性仿真试验结果, 由图 23 可知, 驱动电机并非一直处于工作状态, 这是由于改造后的混动车型具有多种工作模式所决定的; 电机的转矩与转速根据工况需求而变化, 较原车型其工作在大扭矩、高功率下的时间段更少, 变化区间范围也更小; 在陡坡、急加速的情况下, 电机扭矩及功率明显激增。如图 23b 所示, 空载工况下, 电机几乎一直处于反转状态, 整车空载下坡阶段一直处于再生制动模式, 随着坡度变陡, 充电效率也越高, 但在 328、595、620 s 因为急加速, 仅靠自身下坡滑行无法满足驱动需求, 需要依电机驱动, 导致其耗能。

#### 4.3 针对提高车辆载重性能的仿真结果分析

车辆载重性能的高低密切影响着露天矿整体开

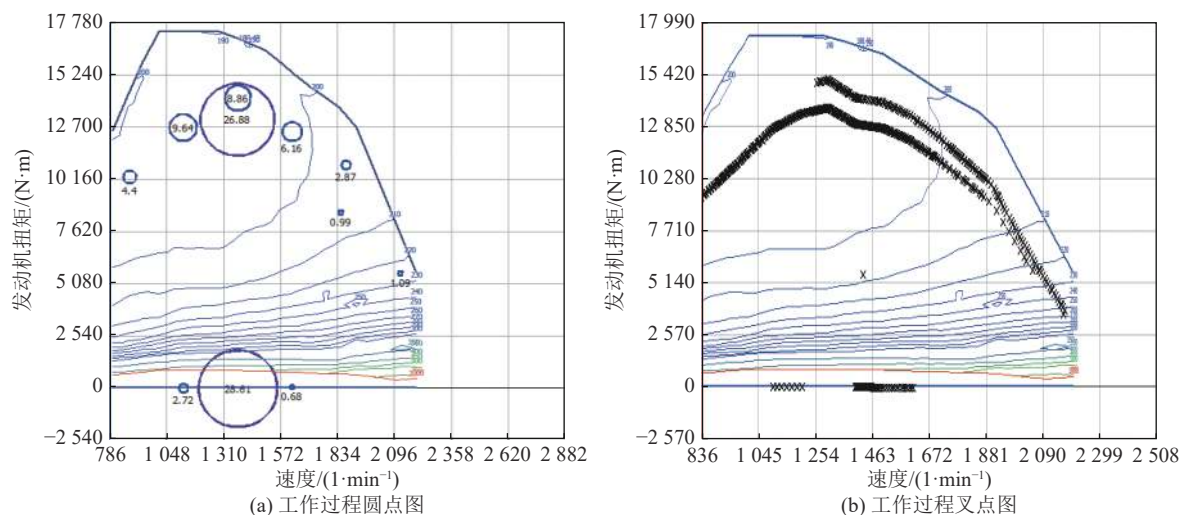


图 20 满载工况发动机工作特性仿真试验结果

Fig.20 Simulation test results of engine operating characteristics under full load condition

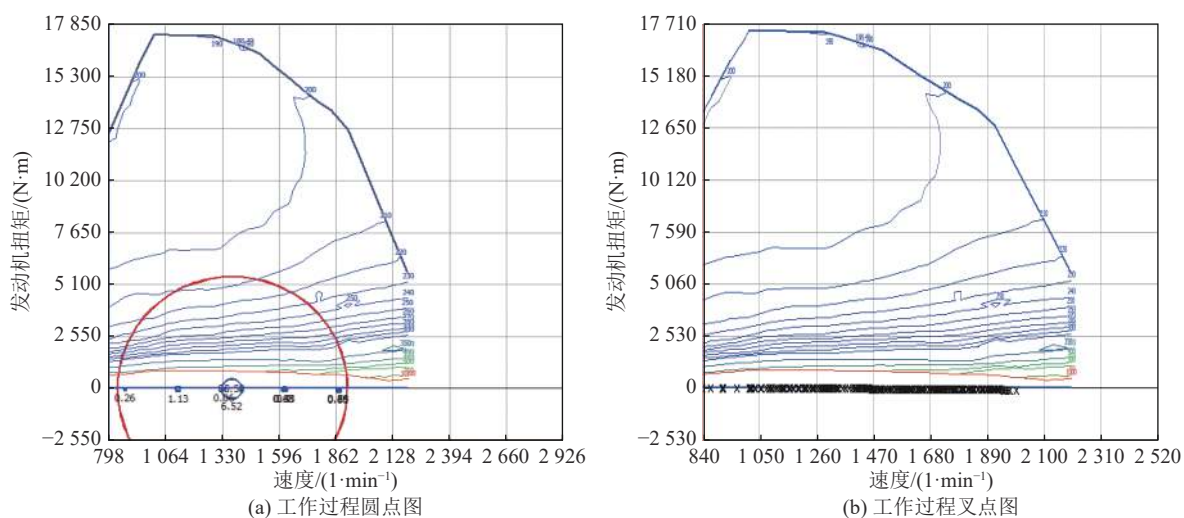


图 21 空载工况发动机工作特性仿真试验结果

Fig.21 Simulation test results of engine operating characteristics under no-load condition

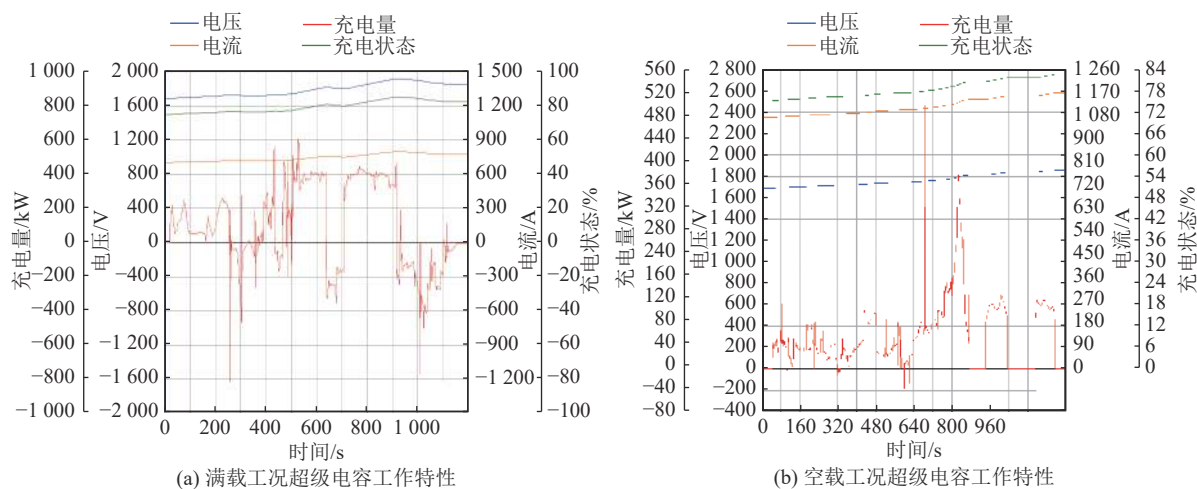


图 22 超级电容工作特性仿真试验结果

Fig.22 Simulation test results of super capacitor working characteristics

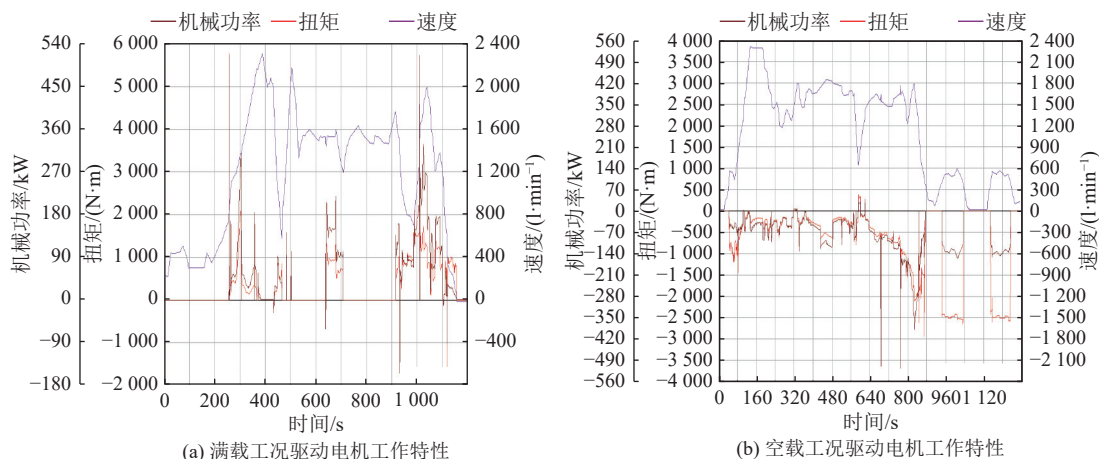


图 23 驱动电机工作特性仿真试验结果

Fig.23 Simulation test results of drive motor working characteristics

采运输效率,针对提高车辆载重性能的仿真分析对于研究露天矿超重型自卸车在实际生产工作中的表现具有重要参考价值,对生产具有更加优异载重性能的露天矿超重型自卸车也意义重大。

#### 4.3.1 动力性与经济性仿真结果分析

图 24 为针对提高车辆载重性能改造车型满载爬坡度仿真试验结果。由图 24 可知,针对提高车辆载重性能改造方案的轮-轴协同式混合动力系统满载爬坡度为 29.7%,较原车型 19.5% 的满载爬坡度明显提高,较 554 t 混动车型 30.1% 的满载爬坡度稍有下降,说明针对“提升载重”改造的车型爬坡性能较原车型更佳,较针对“提升载重”改造的车型稍有下降。

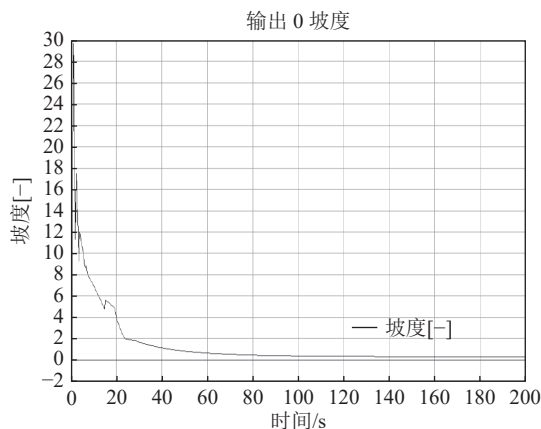


图 24 满载爬坡度仿真试验结果

Fig.24 Simulation test results of full load climbing gradient

图 25 为针对提高车辆载重性能改造车型满载最高车速与加速时间仿真试验结果。由图 25 可知,针对提升车辆载重性能改造的轮-轴协同式混合动力驱动系统的加速性能较原车型有了明显改善,稍差于针对提升车辆动力性能改造的 554 t 混动车型。

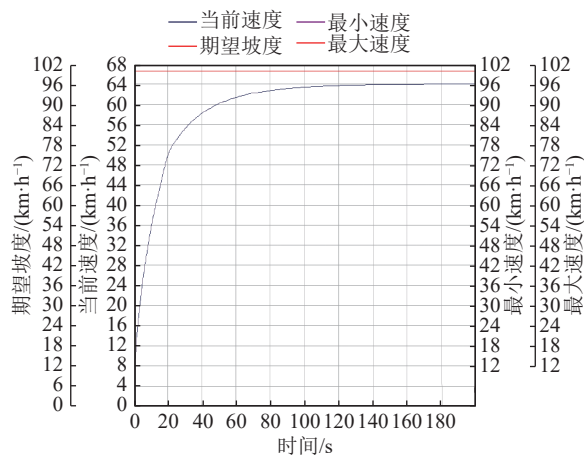


图 25 满载最高车速与加速时间仿真试验结果

Fig.25 Simulation test results of maximum speed and acceleration time under full load

图 26 为针对提高车辆载重性能改造车型车速跟随状态仿真试验结果,由图 26 可知,针对提升载重性能改造后的 673 t 混动车型的车速跟随状态良好,空载工况下在 640 ~ 800 s 区间内虽速度稍有波动,但仍稳定在误差区间范围内,证明了轮-轴协同式混合动力驱动系统对整车运输速度并无影响,满足露天矿的实际运输要求。

图 27 为针对提高车辆载重性能改造车型经济性仿真试验结果,通过查阅图 27 中曲线对应数据可得:673 t 混动车型满载工况下的油耗量 109.473 6 L 及电耗量-69.640 5 kW·h,空载工况下的油耗量 0L 及电耗量-83.903 0 kW·h,通过公式计算可得,673 t 混动车型满载百公里油耗为 1 966.998 2 L,满载百公里电耗为-163 8.370 3 kW·h;空载百公里油耗为 0L,空载百公里电耗为-1 664.365 6 kW·h。

### 4.3.2 关键部件工作特性仿真

1) 发动机工作特性。图 28 为 673t 混动车型满载工况发动机工作特性仿真试验结果。由图 28 可见, 发动机的工作点主要集中在扭矩较高的区间, 这是因为改造后的轮-轴协同式混合动力驱动系统具有多种驱动模式, 工作在满载爬坡工况时, 因为其需求扭矩较大, 发动机根据工况需要及扭矩需求切换至恰当模式运行, 最后使得发动机工作在大扭矩的高效区间。

由图 28 和图 29 可知, 相较于满载工况, 空载下坡工况下动力需求小, 需求扭矩低, 基本靠自重下坡滑行及电驱动即可满足驱动要求, 无需发动机工作。改造后发动机的工作点集中分布于扭矩较高的高效区, 效率提升明显, 与针对提升动力性能改造的 554 t 混动车型基本相同。

2) 超级电容。图 30 为超级电容工作特性仿真试验结果, 由图 30 可知, 针对提高载重性能的轮-轴

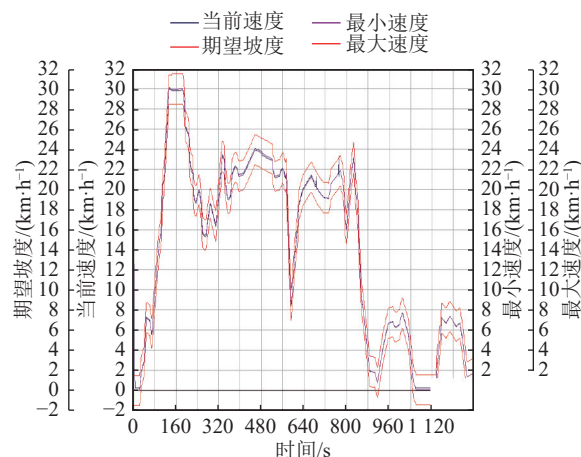


图 26 车速跟随状态仿真试验结果

Fig.26 Simulation test results of vehicle speed following state

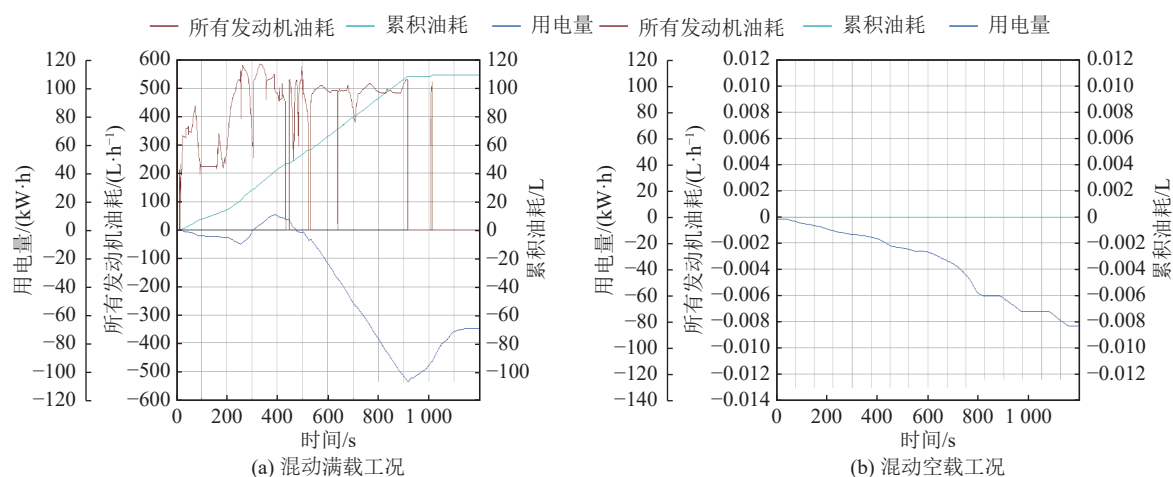


图 27 经济性仿真试验结果

Fig.27 Economic simulation test results

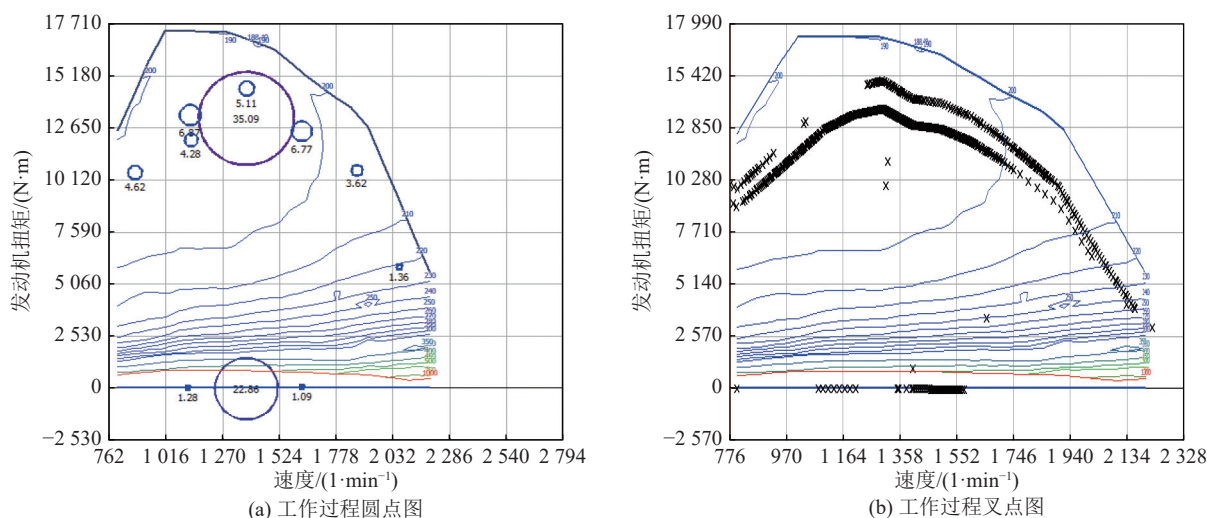


图 28 满载工况发动机工作特性仿真试验结果

Fig.28 Simulation test results of engine operating characteristics under full load condition

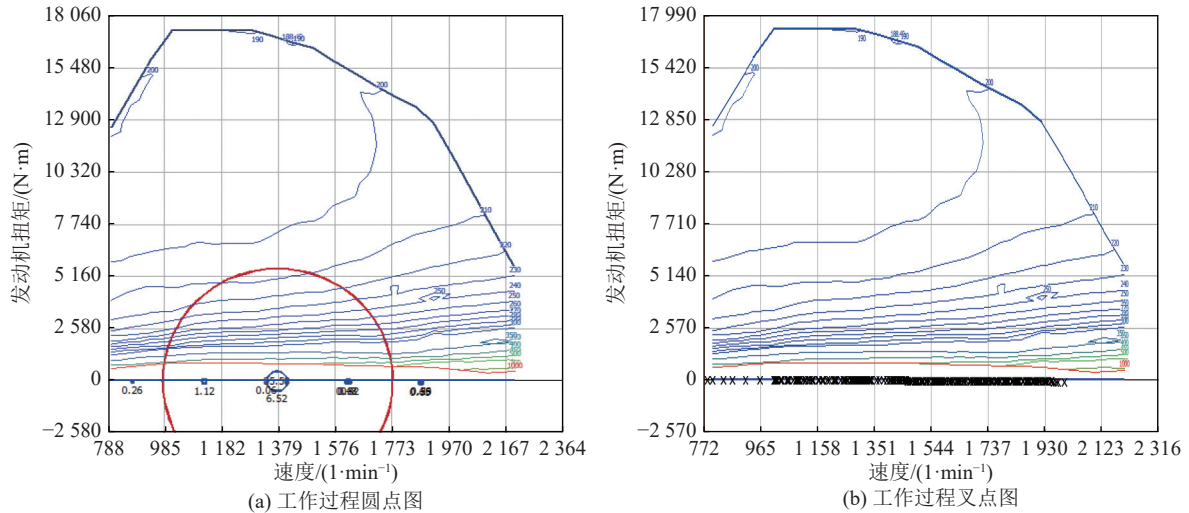


图 29 空载工况发动机工作特性仿真试验结果

Fig.29 Simulation test results of engine operating characteristics under no-load condition

协同式混合动力驱动系统中电容的电量稳定性较原车型更佳,较针对提高动力性能的 554t 混动车型稍弱。

3)驱动电机。图 31 为驱动电机工作特性仿真试验结果。由图 31 可知,针对提升载重性能改造的

673 t 混动车型电机在满载工况下与针对动力性改造的 554 t 混动车型仿真试验结果基本一致,空载工况下完全一致,说明在针对提升载重性能改造后的电机工作性能满足运输动力需求,电机的工作依赖性

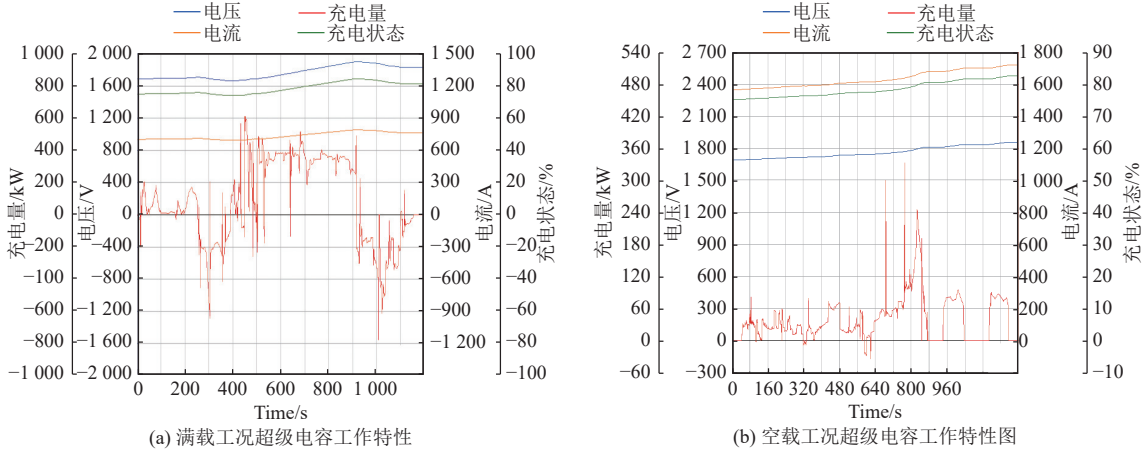


图 30 超级电容工作特性仿真试验结果

Fig.30 Simulation test results of working characteristics of super capacitor

4.4 仿真结果汇总

综合 4.1、4.2 与 4.3 节仿真试验结果分析,整理可得露天矿超重型自卸车联合仿真试验结果汇总表(表 4)。

通过对比分析 3 种车型的联合仿真结果可知:基于提升动力性改造的 554 t 混动车型在载重相同情况下,动力性能及经济性能较原车型明显有了巨大改善,验证了设计的轮-轴协同式混合动力驱动系统的优益性;基于提升载重性改造的 673 t 混动车型

在载重上大幅提高,其动力性能在加速时间、最高车速、最大爬坡度上较原车型得到一定改善,较 554 t 混动车型由于载重增加而稍有下降,但仍然满足动力需求且车速跟随状态良好,证明了轮-轴协同式混合动力系统可在满足动力需求的基础上提升载重量。

5 结 论

1)采用线路循环测试法对鄂尔多斯某露天矿进行路谱采集试验,结合运输特点与道路特征分析制定

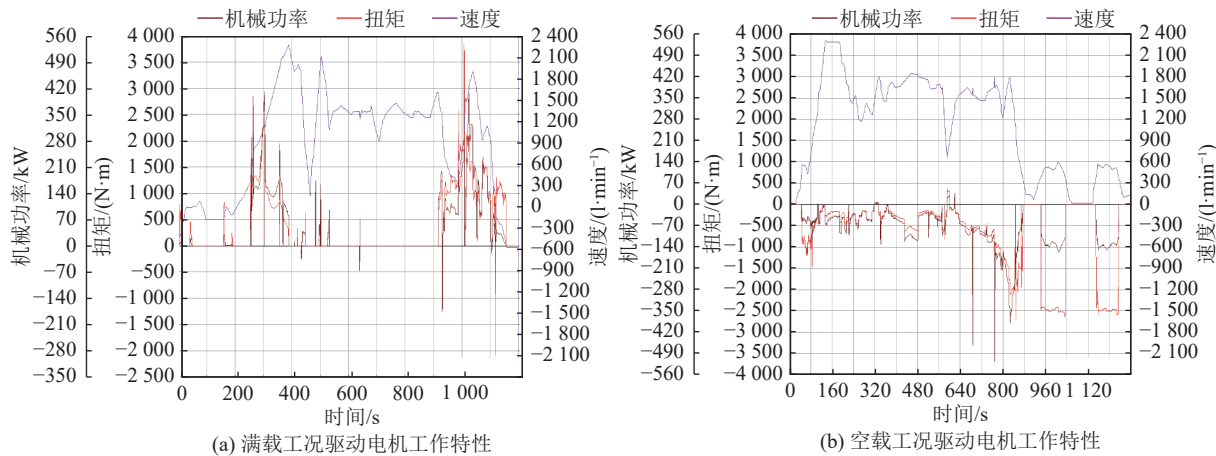


图 31 驱动电机工作特性仿真试验结果

Fig.31 Simulation test results of driving motor working characteristics

表 4 露天矿超重型自卸车联合仿真试验结果汇总

Table 4 Summary of joint simulation test results of super heavy dump truck in open pit mine

项目	554 t原车	554 t混动车	673 t混动车
整车质量/kg	553 550	553 550	643 550
0~30 km/h加速时间/s	33.56	5.94	7.69
最高车速/(km·h <sup>-1</sup> )	49.7 835	64.4 737	64.0 226
最大爬坡度/%	19.50	30.10	29.70
满载百公里油耗/(L·100 km <sup>-1</sup> )	1 586.7 047	1 966.9 982	2 165.3 157
满载百公里电耗/(kW·h·100 km <sup>-1</sup> )	209.9 538	-1 638.3 707	-1 377.4 432
满载折合油耗/(L·100 km <sup>-1</sup> )	1 656.2 258	1 424.4 914	1 709.2 087
空载百公里油耗/(L·100 km <sup>-1</sup> )	356.3 420	0	0
空载百公里电耗/(kW·h·100 km <sup>-1</sup> )	2.0 134	-1 664.3 656	-1 644.3 656
空载折合油耗/(L·100 km <sup>-1</sup> )	357.0 087	-544.4 919	-544.4 919
全程折合油耗/(L·100 km <sup>-1</sup> )	1 006.6 173	439.9 998	582.3 584

了试验路线,并通过矿车实车试验完成了典型行驶工况数据的采集,针对满载及空载分别建立了露天矿循环工况。

2)针对笔者提出的轮-轴协同式混合动力驱动系统,选取基于转矩的逻辑门限值控制策略,确定了各工作模式下的转矩门限值、发动机与电机的转矩分配方案,利用 Matlab/Simulink 完成了整车的控制策略搭建。

3)针对提升车辆动力性的轮-轴协同式混合动力系统改造方案,与原车相比,满载时的最高车速、最大爬坡度分别提高了 29.51% 和 54.36%;0~30 km/h 的加速时间、百公里综合燃油消耗则分别下降了 82.30% 和 56.29%;发动机、电机、电容的工作特性更佳,整车的动力性能与经济性能均得到较大改善。

4)针对提升车辆载重的改造方案,与原车相比,载重提升了 21.54%,满载时的最高车速、最大爬坡

度分别提高了 28.60% 和 52.31%,而 0~30 km/h 的加速时间、百公里综合燃油消耗则分别下降了 77.09% 和 42.15%。

参考文献(References):

[1] 王国法. 加快煤矿智能化建设 推进煤炭行业高质量发展[J]. 中国煤炭, 1985, 47(3): 41-43.  
WANG Guofa. Speeding up intelligent construction of coal mine and promoting high-quality development of coal industry[J]. China Coal, 1985, 47(3): 41-43.

[2] 鲍久圣, 刘 琴, 葛世荣, 等. 矿山运输装备智能化技术研究现状及发展趋势[J]. 智能矿山, 2020, 1(1): 78-88.  
BAO jiusheng, LIU Qin, GE Shirong, et al. Research status and development trend of intelligent technologies for mine transportation equipment[J]. Journal of Intelligent Mine, 2020, 1(1): 78-88.

[3] 王文岭. 露天矿采剥挖掘机与自卸车合理匹配[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(11): 122-123.  
WANG Wenling. Rational matching of mining stripping excavator

- and dump truck in open pit mine[J]. *Building Technology Development*, 2017, 44(11): 122-123.
- [4] 赵浩, 毛开江, 曲业明, 等. 我国露天煤矿无人驾驶及新能源卡车发展现状与关键技术[J]. *中国煤炭*, 2021, 47(4): 45-50.  
ZHAO Hao, MAO Kaijiang, QU Yeming, *et al.* Development status and key technology of driverless and new energy trucks in open-pit coal mine in China[J]. *China Coal*, 2021, 47(4): 45-50.
- [5] 徐双喜, 李德军. 宽体自卸车在露天矿山的应用[J]. *露天采矿技术*, 2017, 32(11): 15-17.  
XU Shuangxi, LI Dejun. Application of off-road wide dump truck in open-pit mine[J]. *Opencast Mining Technology*, 2017, 32(11): 15-17.
- [6] 景少波. 煤矿智能化开采技术发展现状及展望[J]. *陕西煤炭*, 2021, 40(6): 184-187.  
JING Shaobo. Development status and prospect of intelligent mining technology in coal mine[J]. *Shanxi Coal*, 2021, 40(6): 184-187.
- [7] 张立新, 魏强. 煤矿智能化开采技术研究现状及展望[J]. *中国矿山工程*, 2021, 50(3): 68-70.  
ZHANG Lixin, WEI Qiang. Research status and prospect of intelligent mining technology in coal mine[J]. *China Mine Engineering*, 2021, 50(3): 68-70.
- [8] ZHAO X X, ZHANG W M, FENG Y L, *et al.* Powerful shifting strategy and multi-parameters considered for heavy-duty mining truck[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(1): 101-106.
- [9] FERRARIS A, MICCA F, MESSANA A, *et al.* Feasibility study of an innovative urban electric hybrid microcar[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2019, 20(2): 237-246.
- [10] 韩培欣, 鲍久圣, 杨帅, 等. 混合动力技术在车辆工程领域的应用与研究现状[J]. *现代制造工程*, 2016(5): 143-147.  
HAN Peixin, BAO Jiusheng, YANG Shuai, *et al.* Research status of hybrid electric technology in vehicles[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2016(5): 143-147.
- [11] 陈超. 重型运输车分布式混合动力驱动系统设计研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
CHEN Chao. Design of distributed hybrid drive system for heavy duty truck[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [12] 董磊. 三轴矿用自卸车的历史、现状及发展趋势[J]. *内燃机与配件*, 2019, 300(24): 179-180.  
Dong Lei. History, present situation and development trend of three axle mine dump truck[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2019, 300(24): 179-180.
- [13] 李雯静, 邱莉, 林志勇, 等. 基于役龄回退模型的露天矿卡车周期预防性维护策略[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(4): 209-214.  
LI Wenjing, QIU Li, LIN Zhiyong, *et al.* Periodic preventive maintenance strategy of open-pit mine truck based on age-reduction model[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(4): 209-214.
- [14] JIN C, YI T, SHEN Y, *et al.* Comparative study on the economy of hybrid mining trucks for open-pit mining[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, 13(1): 201-208.
- [15] 鲍久圣, 邹学耀, 陈超, 等. 重型煤炭运输车分布式混合动力系统设计及控制策略[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(2): 667-676.  
BAO Jiusheng, ZOU Xueyao, CHEN Chao, *et al.* Design and control strategy of distributed hybrid drive system for heavy coal trucks[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 667-676.
- [16] 徐涛, 申焱华, 张文明, 等. 基于混合动力变速箱的矿用传动系统特性分析[J]. *华南理工大学学报*, 2017, 45(5): 59-67.  
XU Tao, SHEN Yanhua, ZHANG Wenming, *et al.* Characteristic analysis of transmission system of mining truck based on hybrid transmission[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(5): 59-67.
- [17] YANG W, YANG J, LIANG J, *et al.* Implementation of velocity optimization strategy based on preview road information to trade off transport time and fuel consumption for hybrid mining trucks[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, 13(1): 194-200.
- [18] 刘廷安. 国外大型矿用汽车现状及新趋势[J]. *矿业装备*, 2017, 6(3): 20-23.  
LIU Yanan. Present situation and new trend of large mining trucks abroad[J]. *Mining Equipment*, 2017, 6(3): 20-23.
- [19] 仇多洋. 基于行驶工况识别与预测的混合动力汽车能量管理研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.  
QIU Duoyang. Energy management of hybrid electric vehicle based on driving cycle recognition and prediction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.
- [20] 孟开创. 某混合动力矿车电驱动系统控制策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
MENG Kaichuang. Research on control strategy of electric drive system for hybrid electric off-highway mining dump truck[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.