

百吨级双桥刚性矿用自卸车功率分流型混动系统设计及控制策略研究

张华清^{1,2} 鲍久圣^{1*} 张磊¹ 胡德平³ 魏肖¹ 阴妍¹ 颜浩浩¹
朱晨钟³ 杨姣¹

1. 中国矿业大学机电工程学院, 徐州, 221116
2. 徐州徐工新能源动力科技有限公司, 徐州, 221132
3. 徐州徐工重型车辆有限公司, 徐州, 221112

摘要:针对露天矿自卸车传统机械式传动系统与串联式电传动系统存在的动力性不足、燃油经济性不佳等问题,提出了一种适用于百吨级双桥刚性矿用自卸车(简称“矿卡”)的功率分流(PS)型混合动力系统及其确定性规则动力切换控制策略。利用MATLAB/Simulink与CRUISE软件搭建PS型混合动力矿卡联合仿真模型,进行了整车动力性与经济性仿真试验。研究表明:在纯电驱动模式与柴-电混动模式下,所设计的双行星齿轮排传动系统的最大等效力、等效弹性形变、安全系数等均在材料的许用范围内,在结构上可满足机械传动要求;太阳轮、行星轮与齿圈之间的啮合力变化在时域上总体呈现正弦波形,符合行星齿轮传动变化规律,在频域上幅值变化均匀,满足传动系统稳定运行要求;改造后的PS型混合动力矿卡的最大车速可达63 km/h、最大爬坡度为32%、上下坡综合油耗为288 L,比原车型分别提高了26%、60%和17.7%。

关键词:百吨级矿卡;功率分流型;混合动力系统;双行星排传动;控制策略

中图分类号:TD57

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.035

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Control Strategy Research of PS Type Hybrid Power Systems for 100 Ton Double Bridge Rigid Mine Trucks

ZHANG Huaqing^{1,2} BAO Jiusheng^{1*} ZHANG Lei¹ HU Deping³ WEI Xiao¹ YIN Yan¹
XIE Haohao¹ ZHU Chenzhong³ YANG Jiao¹

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu, 221116
2. Xuzhou XCMG Power Technology Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221132
3. Xuzhou XCMG Heavy Vehicle Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu, 221112

Abstract: Aiming at the problems of insufficient power and poor fuel economy in the traditional mechanical or series electric transmission systems of open-pit mine dump trucks, a PS hybrid power system and the deterministic rule power switching control strategy suitable for 100 ton double bridge rigid mining trucks were proposed. The PS type hybrid power mining truck joint simulation models were built by using MATLAB/Simulink and CRUISE software, and vehicle power and economy simulation tests were conducted. The results show that in both pure motor driving mode and diesel engine-motor hybrid mode, the maximum equivalent stress, equivalent elastic deformation, safety factor, etc. of the designed dual planetary gear transmission system are all within the allowable ranges of the materials and may meet the requirements of mechanical transmission structurally. The variation of meshing force between the sun gear, planetary gear, and ring gear shows a sinusoidal waveform in the time domain, which conforms to the variation law of planetary gear transmission. The amplitude changes uniformly in the frequency domain, which may meet the stable operation requirements of the transmission systems. The modified PS type hybrid mining truck has a maximum speed of 63 km/h, a maximum climbing slope of 32%, and a comprehensive fuel consumption of 288 L for uphill and downhill, which has increased by 26%, 60%, and 17.7% respectively

收稿日期:2024-09-05

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金(BA2023035);徐州市重点研发计划(KC22419);江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

compared to the original vehicle model.

Key words: hundred-ton mining truck; power split(PS) type; hybrid power system; dual planetary transmission; control strategy

0 引言

矿用自卸车(简称“矿卡”)是露天矿山开采的关键运输设备,在水利水电、建筑工程等施工场合中也承担着重要的运输任务^[1-3],矿产资源开采的持续升温带动了矿卡产业的快速发展与产品的迭代^[4-5]。露天矿卡正朝着大型化、重型化方向发展,重型宽体自卸车逐渐成为主流。目前,矿用重型自卸车本身大吨位、重载及传动方式的固有工作特性^[6]导致了燃油经济性不佳及排放性能差等问题,尤其是百吨级别以上的双桥刚性矿卡,对动力性与燃油经济性等性能提出了更高的要求。

矿卡常见的传动方式有液力机械式传动、柴油机-电动机式传动(简称“柴-电传动”)等。液力机械传动一般适用于载重小于100 t的矿卡,如美国卡特彼勒的777D和中国徐工集团的XDR100等车型,均采用由“柴油发动机+液力变矩器+机械变速箱+传统后驱动桥”组成的液力机械系统。然而,露天矿卡碳排放问题突出,以内蒙古伊敏煤矿为例,柴油占据了矿山总能源消耗的74%,其中露天矿卡贡献了约33%的柴油消耗,因此,传统液力机械传动矿卡已无法满足露天煤矿增产增效与节能降碳的要求。

目前,对于中国百吨级以上矿卡,虽有部分厂家研制了纯电动矿卡,但续航能力的有限和露天煤矿的恶劣条件使其仍无法在露天煤矿全面推广使用,而混合动力技术凭借其续航里程长、节约能源和尾气排放低等显著优点^[7-9],已成为露天矿卡驱动技术领域的主要发展方向。现有电驱动矿卡多为基于串联式混合动力系统构型的柴-电传动系统,在结构方面采用了电动轮式结构,将交流电动机安装在后驱动桥壳内,两台交流电动机分别通过传动轴、轮边减速器来驱动各自的车轮。在产品研发领域,徐工集团生产的全球首台240吨级XDE24H混合动力无人驾驶双桥矿卡相比传统矿车综合燃油消耗降低了17%。在基础理论研究领域,中国矿业大学针对露天矿运输工况,提出了重型矿卡轮-轴协同式混合动力系统^[10]、油-电-液三元混合动力系统^[11]与永磁同步式混合动力系统^[12]等多种新型混动系统,为露天矿卡混合动力技术的研究提供了新思路。

基于传统变速箱改造后的混合动力变速箱作

为一种新型混合动力装置,在乘用车上已广泛应用^[13-14],但由于变速箱的限制,现有重型混合动力矿卡主要采用串联或并联式结构,能量需多次转换,损失严重。

综上,针对传统露天矿百吨级矿卡驱动系统的不足,本文以实际应用最为广泛的百吨级双桥刚性矿卡为研究对象,提出了一种新型功率分流(PS)型混合动力(简称“混动”)系统,对混动变速箱内双行星齿轮排传动系统进行力学性能分析,在此基础上设计基于确定性规则的混合动力控制策略并进行动力性与经济性仿真试验,以实现百吨级矿卡在露天矿山恶劣复杂运输条件下的增产增效与节能降碳。

1 双桥刚性矿卡PS型混动系统设计

本文以徐工集团XDE130型双桥刚性矿卡为原型,进行功率分流型混动系统改造,包括新型功率分流型混动系统方案设计、工作模式设计与动力部件选型,原车采用了图1所示的串联式柴-电传动系统。

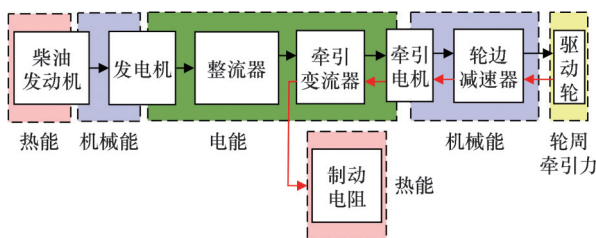


图1 柴-电传动系统

Fig.1 Diesel engine-motor transmission system

1.1 PS型混动系统方案设计

PS型混动系统是指发动机的输出动力通过行星齿轮被分流,从而实现功率分流^[15]目的。PS型混动系统结构设计如图2所示,主要由三个动力部件即柴油发动机、电机MG1、电机MG2以及二级行星齿轮排混动变速箱组成。混动变速箱中的二级行星齿轮排可以高效地耦合三个动力部件的动力,同时还可以利用二级行星齿轮排实现对不同工作模式的切换,更好地实现混动矿卡的动力输出。柴油发动机与第一级行星排的太阳轮连接,电机MG2与第一级行星排的外齿圈连接,电机MG1与第二级行星排的外齿圈连接,第二级行星排的太阳轮连接太阳轮制动器。在不同的动力模式下,柴油发动机的功率可以通过混动变速箱

中的行星齿轮排被分流,分别流向电机MG2用于为电池充电或者流向第二级行星齿轮排用于驱动车辆,从而实现功率分流。

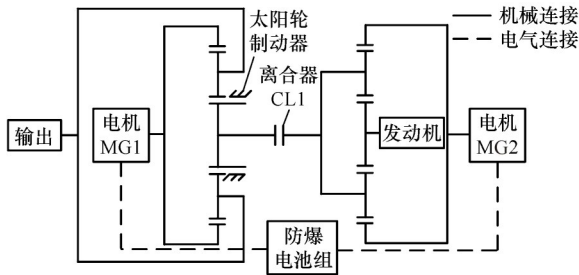


图2 PS型混动系统设计

Fig.2 Design of PS type hybrid power system

1.2 PS型混动系统工作模式设计

根据图2所示的PS型混动系统方案,本文设计的混合动力重型矿卡有5种工作模式,分别为纯电驱动模式、柴-电混动驱动模式、行车充电模式、再生制动模式以及停车充电模式,具体工作模式原理如下。

1)纯电驱动模式。在满足动力电池的SOC值大于设定最小值的情况下,在车辆起步或低速轻载等动力需求较低的工况下,双行星排之间的离合器CL1断开,并由太阳轮制动器锁死,由驱动电机MG1单独驱动车辆。在该驱动模式下,驱动电机MG1提供的动力由动力电池提供,柴油机发动机不参与工作,解决了柴油发动机由于尾气排放而造成的污染问题,提高了工作效率。纯电驱动模式下的能量流动如图3红色所示。

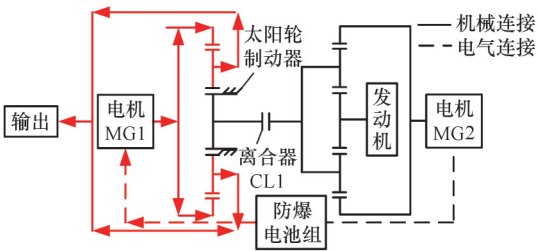


图3 纯电驱动模式下能量流动方向

Fig.3 Energy flow direction under pure electric driving mode

2)柴-电混动驱动模式。在满足动力电池的SOC值大于设定最小值的情况下,车辆在重载爬坡且驱动电机MG1单独提供的扭矩无法满足车辆行驶的需求等动力需求较大的工况下,采用柴-电混动驱动模式,此时车辆的动力需求由柴油发动机、电机MG1与电机MG2的动力经行星齿轮传动系统耦合后共同提供。柴-电混动驱动模式下的能量流动如图4红色所示。

3)行车充电模式。当混合动力矿卡一直处于

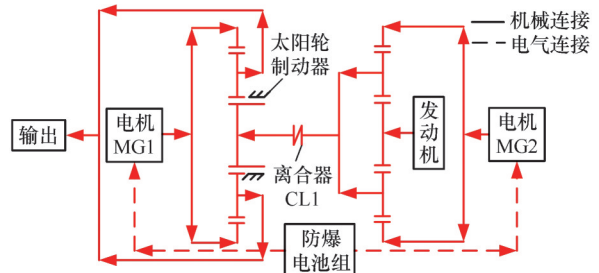


图4 柴-电混动驱动模式下能量流动方向

Fig.4 Energy flow direction under pure diesel-electric hybrid driving mode

纯电工作模式时,动力电池的SOC值会持续下降,当下降到所设定的动力电池最小阈值时,动力电池所剩的电量无法继续支持纯电驱动模式工作,此时,柴油发动机与电动机MG1继续为车辆的行驶提供动力,电机MG2用于对电池充电。行车充电模式下的能量流动如图5红色所示。

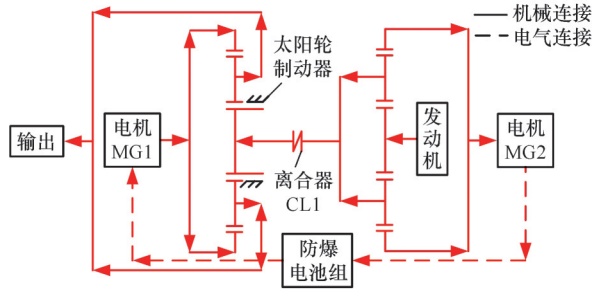


图5 行车充电模式下能量流动方向

Fig.5 Energy flow direction under drive charging mode

4)再生制动模式。当混合动力矿卡处在空载下坡速度较快且需要制动的工况下,若动力电池电量不充足,可利用电机MG1的制动特性反转对动力电池反向充电。当动力电池电量充足或车辆的行驶速度较低时,可采用机械制动。再生制动模式下的能量流动如图6红色所示。

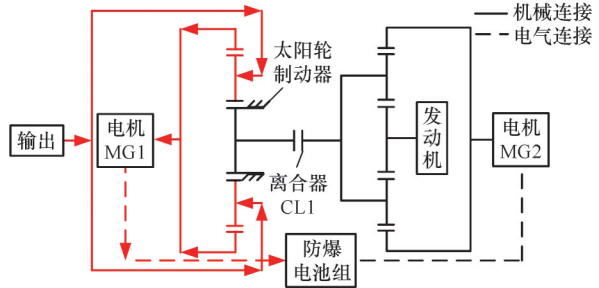


图6 再生制动模式下能量流动方向

Fig.6 Energy flow direction under regenerative braking mode

5)停车充电模式。当车辆处于在卸货、装载或其他停车而发动机没有停止工作的工况下,通过柴油发动机直接带动电机MG2为动力电池充电。停车充电模式下的能量流动如图7红色所示。

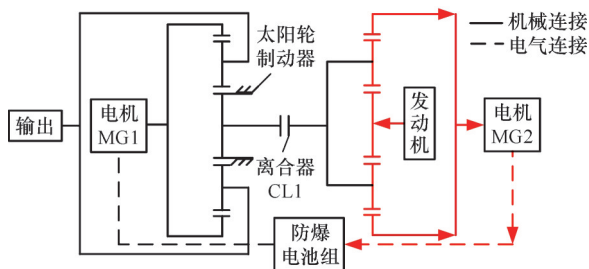


图7 停车充电模式下能量流动方向

Fig.7 Energy flow direction under park charging mode

1.3 动力部件参数匹配与选型

对矿卡动力部件即柴油发动机、电机MG1与电机MG2进行参数匹配与选型,使其能够满足百吨级矿卡的行驶要求。根据原车参数与车辆性能指标,可计算得到表1所示的动力部件参数。

表1 动力部件性能参数

Tab.1 Performance parameters of power components

参数名称	数值
发动机最大扭矩	3300 N·m
发动机额定功率	566 kW
发动机额定转速	2000 r/min
发动机最大扭矩对应转速	1500 r/min
发动机气缸数	8
发动机排量	16.72 L
MG1最大扭矩	7000 N·m
MG1最大功率	710 kW
MG1额定电压	1500 V
MG1额定转速	1000 r/min
动力电池电压	1600 V
动力电池容量	390 A·h
动力电池单体电压	3.2 V
动力电池串联数量	500
动力电池最大充放电倍率	1.5

本文所采用的混动驱动系统在不同动力模式下电机MG1与MG2的分工不同:电机MG1在纯电模式下通过动力电池供电单独驱动车辆行驶;电机MG2在柴-电混动驱动模式下与发动机提供的动力经过第一级行星排太阳轮与齿圈的耦合后,通过行星架向前输入到第二级行星排,并与电机MG1的动力进一步耦合后输出为车辆提供驱动动力。同时,电机MG1与MG2还可以在其他工况下进行发电和制动能量回收,因此,对电机MG2驱动能力的要求不高,根据柴油机发动机功率选取,最终确定电机MG2额定功率为500 kW,额定转速为1500 r/min。

2 混动变速箱双行星齿轮排传动系统力学性能分析

传统的齿轮理论校核及静力学分析无法准确

地描述齿轮在啮合运动过程中受到的应力变化情况,也不能描述出行星齿轮在啮合过程中应力的变化规律,因此,为了更真实地反映齿轮在啮合过程中的受力情况及齿轮在传动过程中啮合力的变化规律,考虑到双行星齿轮排在不同工作模式下其运动状态与约束也不同,借助有限元分析软件展开相应的分析。

2.1 双行星齿轮排传动系统三维建模

根据行星齿轮传动系统计算方法^[16],计算得到表2所示的混动变速箱双行星排齿轮传动系统参数,第一级行星排与第二级行星排参数相同。根据表2参数,构建了图8所示的混动变速箱二级行星齿轮排传动系统三维模型。

表2 行星齿轮参数

Tab.2 Planetary gear parameters

	太阳轮	行星轮	齿圈
模数/mm	10	10	10
齿数	36	18	72

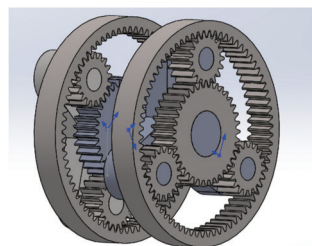


图8 二级行星齿轮排传动系统

Fig.8 Dual planetary gear transmission system

2.2 齿轮啮合瞬态动力学分析

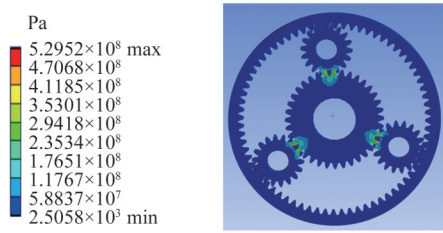
本文所设计的双行星齿轮排中第二级行星齿轮排相较第一级行星齿轮排受力更大,故只对第二级行星排中受力较大的部件进行瞬态动力学分析。

2.2.1 纯电驱动模式

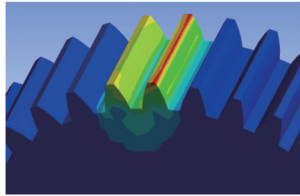
利用ANSYS Workbench中的瞬态动力学模块对纯电驱动工况下的行星齿轮进行瞬态动力学分析,结果如图9所示。图9中,最大等效应力为529.5 MPa,远小于太阳轮材料20CrMnTi的屈服极限850 MPa,最大等效应力出现在太阳轮的齿顶处,最小等效应力出现在齿圈;最大等效弹性应变为0.002,出现在太阳轮上的啮合线处,其次是太阳轮啮合齿的齿顶;最小等效弹性应变出现在齿圈,最小安全系数为1.451,大于许用安全系数1,结构符合要求;齿轮的最大接触应力出现在行星轮齿接触线处,这是由于在齿轮啮合时会产生啮入冲击,最大接触应力为210.7 MPa,小于理论计算值。

2.2.2 柴-电混动模式

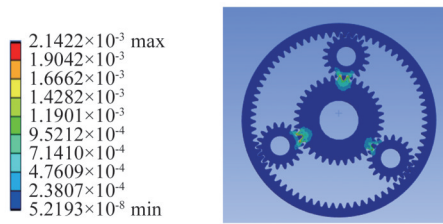
柴-电混工况下的瞬态动力学有限元分析结果如图10所示。柴-电混合工况下的行星齿轮



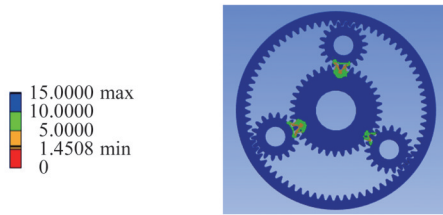
(a) 等效应力云图



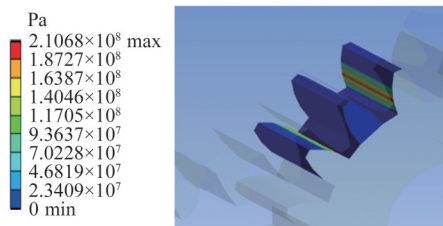
(b) 等效应力局部放大云图



(c) 等效弹性应变云图



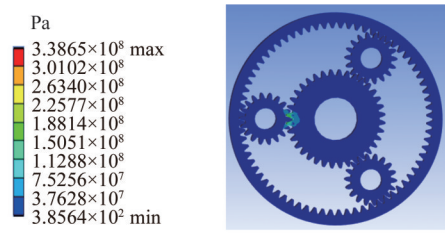
(d) 安全系数云图



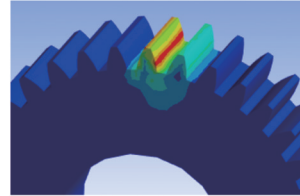
(e) 齿面接触应力云图

图9 纯电模式瞬态动力学有限元分析结果
Fig.9 Finite element analysis results of pure motor mode transient dynamics

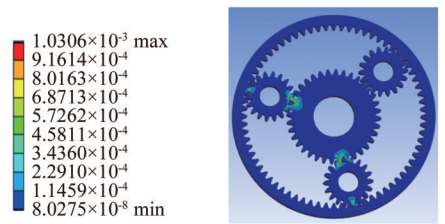
啮合过程中,最大等效应力为 338.7 MPa,远小于屈服极限 885 MPa,最大等效应力出现在太阳轮的啮合处,齿根与齿顶次之,最小值出现在齿圈。此外在行星齿轮传动过程中,齿轮表面没有明显的应力集中情况出现,应力分布较为均匀。最大等效弹性应变为 0.001,出现在太阳轮上的啮合线处,其次是太阳轮啮合齿的齿顶,最小值出现在齿圈;最小安全系数为 1.499,大于许用安全系数 1,结构符合要求;齿轮啮合过程中的应力在两个齿轮接触线处最大,为 144.7 MPa,这是因为齿轮在



(a) 等效应力云图



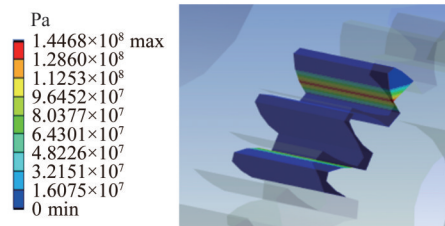
(b) 太阳轮等效应力局部放大



(c) 等效弹性应变云图



(d) 安全系数云图



(e) 齿面接触应力云图

图10 柴-电混动模式瞬态动力学有限元分析结果
Fig.10 Finite element analysis results of transient dynamics in diesel engine-motor mixed mode

啮入瞬间会产生冲击;齿面接触应力在接触线处最大,接触线的位置随着齿轮的运转不断变化,接触线由齿顶下移至齿根,再由齿根上移至齿顶。

2.3 刚柔耦合模型动力学分析

在实际工程应用场景下,机械系统中存在着大量的柔性体构件,在设计过程中需考虑微小变形对整个系统运动过程的影响,因此,本文建立混动变速箱双行星齿轮排传动系统的刚柔耦合动力学模型进行动力学仿真。刚柔耦合动力学模型如图 11 所示。

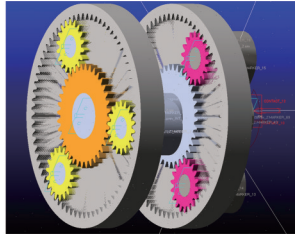


图11 双行星齿轮排传动系统刚柔耦合模型

Fig.11 Rigid flexible coupling model of dual planetary gear transmission system

2.3.1 运动学仿真分析

由图12所示的行星架角速度输出对比可知,在运动开始时,存在初始冲击,行星架I与行星架II的角速度均有一定的波动,但随后又迅速达到稳定状态。在系统稳定运转后行星架的速度仍存在微小的波动,这是刚柔耦合动力学模型本身存在精度限制,以及动力学仿真中采用的数值求解算法误差累积引起的。

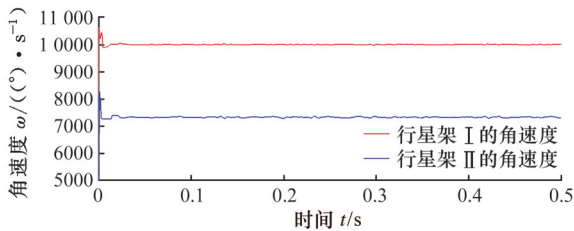


图12 行星架I与行星架II的角速度输出

Fig.12 Angular velocity output diagram of planet carrier I and planet carrier II

两个行星架转速的理论计算值与软件仿真值比较如表3所示,可知,误差仅为0.09%和0.08%,可证明设计参数的合理性。

表3 行星架转速理论值与仿真值的比较

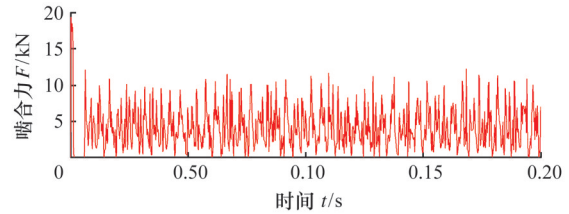
Tab.3 Comparison between theoretical and simulation values of planetary carrier speed

	转速理论值/ (r·min ⁻¹)	转速仿真值/ (r·min ⁻¹)	误差
行星架I	1666.67	1668.18	0.09%
行星架II	1222.22	1223.25	0.08%

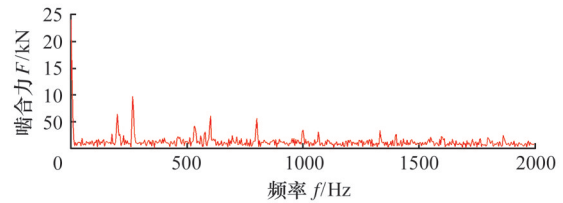
2.3.2 啮合力仿真分析

太阳轮I与行星轮I的啮合力如图13所示。由图13a可得,在齿轮啮合过程中,太阳轮I与行星轮I之间的啮合力在其平均啮合力4155 N附近上下波动,且齿轮啮合力总体呈正弦波形,幅值无明显的突变,这也符合齿轮啮入啮出的规律。在齿轮稳定啮合之后,最大啮合力达到12 287 N。从图13b中可得,随着频率的增大,太阳轮I与行星轮I之间的啮合力幅值不断变小,这说明齿轮副在啮合过程中没有发生明显的振动,运行比较平稳。在啮合力的频域图中出现了两类明显的峰

值:一类波峰是在199.22、601.56、800.78 Hz等其理论啮合频率200 Hz的整数倍出现;另一类波峰是在265.63、531.25、1066 Hz等第二级行星齿轮传动理论啮合频率270 Hz的整数倍处出现。这说明刚柔耦合模型中的啮合力存在调制现象。



(a) 啮合力时域图

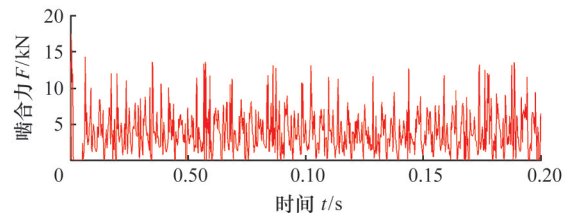


(b) 啮合力频域图

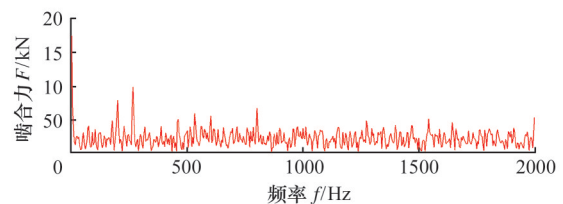
图13 太阳轮I与行星轮I啮合力

Fig.13 The meshing force between solar gear I and planetary gear I

行星轮I与齿圈I的啮合力如图14所示。由图14a可得,在刚柔耦合模型的齿轮啮合过程中,行星轮I与柔性体齿圈I之间的啮合力在其平均啮合力3893 N附近上下波动,在齿轮稳定啮合之后,最大啮合力达到13 287 N,齿轮啮合力总体呈正弦波形,符合齿轮啮入啮出的规律,但其幅值有轻微的突变,这是由柔性体形变而产生的。由图14b可得,太阳轮I与齿圈I的啮合力在频域图出现了两类明显的峰值:一类波峰是在199.22、601.56、800.78 Hz等其理论啮合频率200



(a) 啮合力时域图



(b) 啮合力频域图

图14 行星轮I与齿圈I啮合力分析

Fig.14 Analysis of the meshing force between planetary gear I and ring I

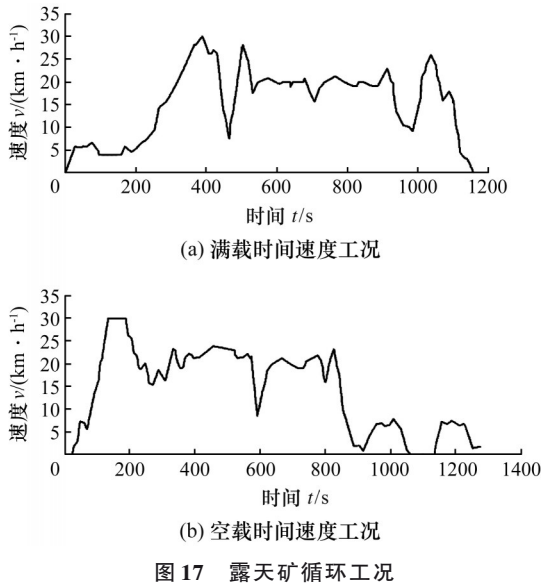


图17 露天矿循环工况

Fig.17 Open pit mine cycle working condition

真结果,可知,百吨级矿卡的速度从0增至30 km/h用时13.5 s,继续加速后,车辆的速度稳定在最高车速63 km/h,与XDE130型矿卡的最高车速相比,新型混合动力矿卡的最高车速提高了26%。其中,原XDE130型矿卡空载质量85 000 kg,额定承重120 000 kg,最高车速50 km/h,最大爬坡度20%,百公里油耗350 L。

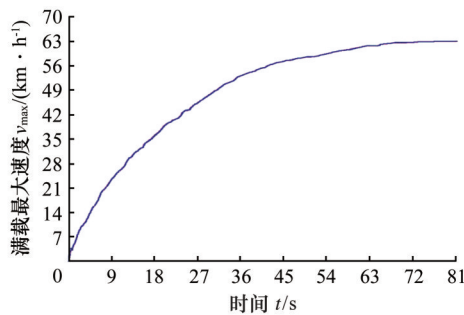


图18 满载最大速度

Fig.18 Maximum speed at full load

图19所示为混合动力矿卡最大爬坡度曲线,可知,最大爬坡度为32%,比原XDE130型矿卡的最大爬坡度提高了60%。

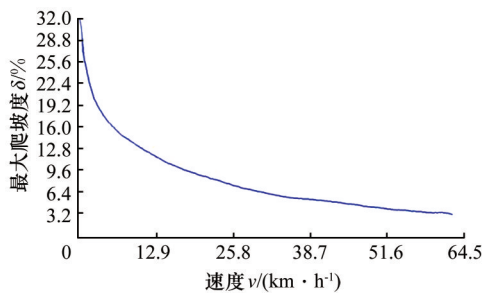


图19 最大爬坡度

Fig.19 Maximum climbing slope

3.2.3 经济性分析

车辆的经济性分析包括整车循环工况过程中

速度跟随状态与百公里油耗等指标。图20和图21所示分别为改造完成后矿卡在满载爬坡工况和空载下坡工况时的速度跟随情况,可以看出,两种工况下的车速跟随状态良好,实际车速与期望车速重合度高,无明显的误差,证明本文所设计的百吨级矿卡PS型混动驱动系统能够按照预定的要求完成行驶目标,满足露天矿实际的运输要求。

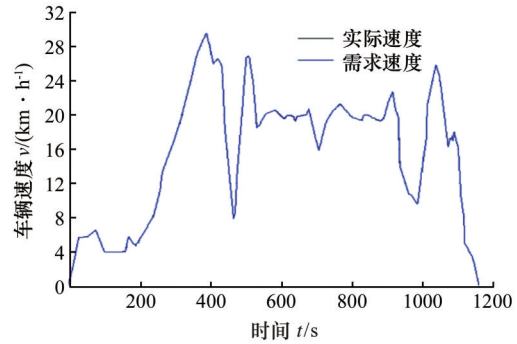


图20 满载爬坡速度跟随

Fig.20 Full-load climbing speed follow

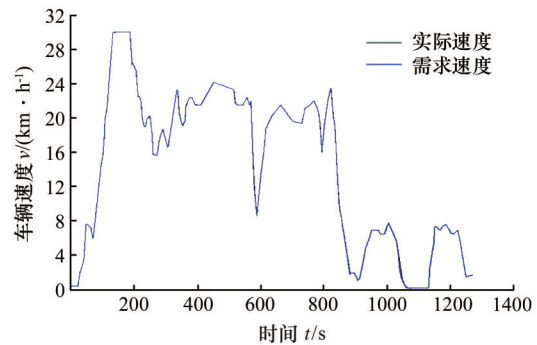


图21 空载下坡速度跟随

Fig.21 Empty downhill speed follow

满载爬坡工况下的电磁SOC值和油耗分别如图22和图23所示。从图22和图23中分析可知,在整个满载爬坡过程中,通过电动机MG1起步,在200~390 s有一段加速爬坡工况(图17a),整车需求转矩增加;柴油发动机在300 s时启动为加速工况提供动力,在425 s时,整车速度减小,整车需求转矩减小,柴油发动机短暂地随车速的增大并一直保持稳定的速度运行;直至930 s时,整车速度开始减小,柴油发动机停止工作,电机MG1继续驱动整车行驶;随着电池的SOC值降低到所规定的最低阈值,车辆切换至行车充电模式,柴油发动机再次开始工作,直至车辆到达卸货区,一个满载爬坡工况完成。满载工况下的燃油消耗量为19.3 L,电池的SOC值由90%降到54%。

空载下坡工况下的电池SOC值和油耗分别如图24和图25所示。从图24和图25中分析可

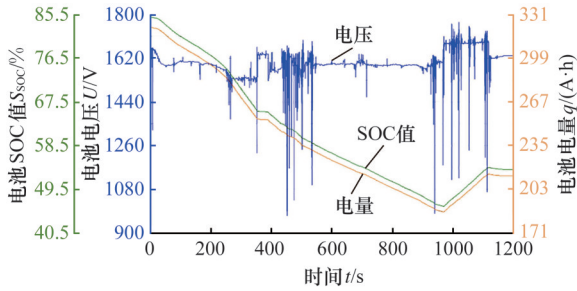


图 22 满载爬坡电池 SOC 值

Fig.22 SOC value of full load climbing battery

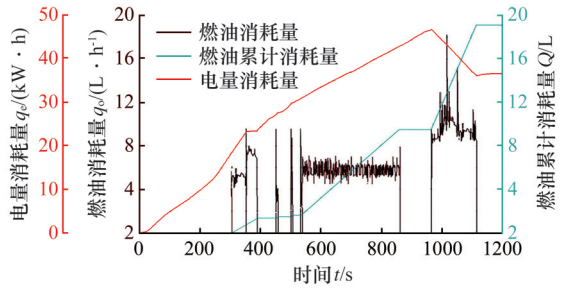


图 23 满载爬坡油耗

Fig.23 Fuel consumption for full load hill climbing

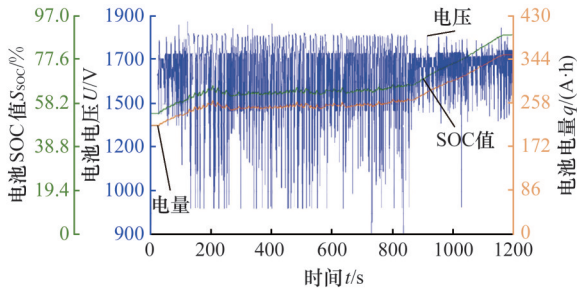


图 24 空载下坡电池 SOC 值

Fig.24 SOC value of no-load downhill battery

知,在空载下坡阶段,由于电池的 SOC 值在最小

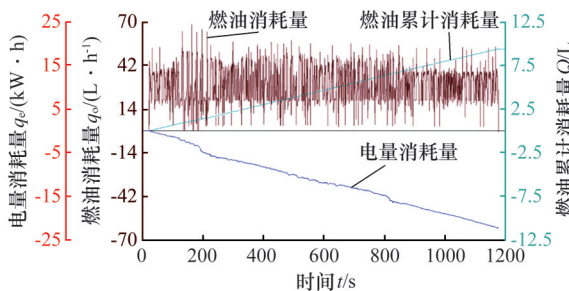


图 25 空载下坡油耗

Fig.25 No-load downhill fuel consumption

阈值之下,故发电机开始工作,通过电机 MG2 可为电池充电,直至电池的 SOC 值达到所规定的最高阈值。在整个空载下坡过程中,发动机的燃油消耗量为 9.5 L。

综合满载上坡与空载下坡工况,改造后的功率分流型混合动力矿卡百公里油耗为 288 L。与百公里油耗 350 L 的原 XDE130 型矿卡对比,改造后混动矿卡的燃油消耗量节约了 17.7%。

4 结论

针对露天百吨级双桥刚性矿卡机械传动系统载重能力有限、尾气污染严重,串联式电传动系统电池受限、能量存在损失等问题,提出了一种适用于百吨级矿卡的新型功率分流(PS)型混合动力系统及其控制策略,主要工作及结论总结如下:

1) 基于 PS 型混动系统架构,以徐工集团 XDE130 型双桥刚性矿卡为改造对象,设计了一种由柴油发动机、电机 MG1、电机 MG2 与二级行星齿轮排式混动变速箱组成的新型功率分流型混合动力系统,在此基础上通过控制柴油发动机、电机 MG1、电机 MG2 与混动变速箱内二级行星齿轮排的啮合状态,可实现混动系统在纯电驱动、柴-电混合动力驱动、行车充电、再生制动与停车充电这 5 种动力模式之间的切换。

2) 建立了重型矿卡混动变速箱内二级行星齿轮排传动系统的三维结构模型与刚柔耦合动力学模型,进行了瞬态动力学与刚柔耦合动力学分析,得到了二级行星齿轮排传动系统力学特性,均可满足二级行星齿轮排传动系统的结构强度与传动稳定性需求,相比于传统行星齿轮计算方法,本文搭建的刚柔耦合模型精确性更高,可准确真实地反映二级行星齿轮排的工作特性。

3) 为实现新型 PS 型混动系统的工作模式切换,设计并搭建了基于确定性规则的逻辑门限制控制策略仿真模型。仿真结果表明:在动力性方面,改造后新型百吨级混合动力矿卡的最大车速为 63 km/h,相较于原车型提高了 26%,最大爬坡度为 32%,相较于原车型提高了 60%;在经济性方面,百公里燃油消耗量节约了 17.7%,可满足百吨级双桥刚性矿卡增产增效与节能降碳的需求。

参考文献:

[1] 孙博, 胡顺安, 周俊, 等. 国内非公路矿用自卸车发展现状研究[J]. 煤矿机械, 2010, 31(8):15-16. SUN Bo, HU Shun'an, ZHOU Jun, et al. Research on the Current Development Status of Non Highway Mining Dump Trucks in China[J]. Coal Mining Machinery, 2010, 31(8):15-16.

[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] 赵昱东. 国内矿用自卸车制造商及其产品发展概况

- 和趋势[J]. 矿山机械, 2012, 40(12):1-4.
- ZHAO Yudong. Overview and Trends of Domestic Mining Dump Truck Manufacturers and Their Product Development[J]. Mining Machinery, 2012, 40(12):1-4.
- [4] 郝永亮. 中国非公路矿用汽车产业发展战略研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2013.
- HAO Yongliang. Research on the Development Strategy of China's Non Highway Mining Automotive Industry[D]. Hohhot:Inner Mongolia University, 2013.
- [5] 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.
- [6] YUAN X M, LU Y, BAO J S, et al. Design and Optimization on the Degree of Hybridization of Underground Hybrid Electric Trackless Rubber-tyred Vehicle[J]. Energies 2018, 11(1):1-18.
- [7] 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, 51(增刊1):343-350.
- FENG Yanbiao, SHAO Junkai, YANG Jue, et al. Research Status and Prospects of New Energy Technology for Mining Dump Trucks[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1):343-350.
- [8] 何小路, 鲍久圣, 阴妍, 等. 混合动力车辆控制策略研究现状[J]. 机械传动, 2017, 41(1):196-200.
- HE Xiaolu, BAO Jiusheng, YIN Yan, et al. Research Status of Control Strategy for Hybrid Electric Vehicle [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2017, 41(1):196-200.
- [9] 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.
- [10] 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(增刊1):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.
- [11] 陆耀. 露天矿重型自卸车油-电-液三元混合动力系统设计及控制策略研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2023.
- LU Yao. Design and Control Strategy of Oil-electric Hydraulic Three-dimensional Hybrid driving System for Heavy Dump Truck in Open Pit Mines[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [12] 吴杞康. 百吨级矿卡永磁同步式混合动力系统设计及控制策略研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2024.
- WU Qikang. Design and Control Strategy Research of Permanent Magnet Synchronous Type Hybrid Power System for Hundred Ton Mine Trucks[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [13] 梁伟智, 李金成, 王印束, 等. 行星混动客车两挡机械自动变速箱机理建模[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23):9627-9633.
- LIANG Weizhi, LI Jincheng, WANG Yinshu, et al. Mechanism Modeling of a Two Speed Mechanical Automatic Transmission for Planetary Hybrid Buses [J]. Science and Technology and Engineering, 2020, 20(23):9627-9633.
- [14] 杜爱民, 刘开圣, 朱忠攀, 等. 单模复合功率分流混合动力系统结构优化[J]. 中国机械工程, 2015, 26(21):2976-2981.
- DU Aiming, LIU Kaisheng, ZHU zhongpan, et al. Structure Optimization of Single-mode Compound Split Hybrid Power Train[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(21):2976-2981.
- [15] 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]. 机械工程学报, 2021, 57(2):200-209.
- ZHOU Wei, LIU Hongyuan, XU Biao, et al. Predictive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Power Split Hybrid Electric Mining Truck [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(2):200-209.
- [16] 秦大同, 谢里阳. 现代机械设计手册:机械传动设计[M]. 北京:化学工业出版社, 2013.
- QIN Datong, XIE Liyang. Modern Handbook of Mechanical Design: Mechanical Transmission Design [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2013.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:张华清,男,1977年生,高级工程师、博士研究生。研究方向为新能源动力装备技术。E-mail:zhanghuaqing@xcmg.com。鲍久圣(通信作者),男,1979年生,教授、博士研究生导师。研究方向为矿山运输及其智能化。E-mail:cumtbjs@cumt.edu.cn。

本文引用格式:

张华清,鲍久圣,张磊,等. 百吨级双桥刚性矿用自卸车功率分流型混动系统设计及控制策略研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10):2453-2462.

ZHANG Huaqing, BAO Jiusheng, ZHANG Lei, et al. Design and Control Strategy Research of PS Type Hybrid Power Systems for 100 Ton Double Bridge Rigid Mine Trucks[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10):2453-2462.