

基于PSO转矩分配的四轮独立驱动矿山运输电车电控系统研究

刘鑫¹,冯晓东^{1*},高鹏²

(1. 国能神东煤炭集团有限责任公司高端设备研发中心; 2. 中国煤炭科工集团太原研究院有限公司)

摘要:在矿山作业环境中,运输电车于高载荷条件下存在电能供给不足及电力消耗过度的问题。针对这一挑战,提出了一种基于转矩分配的四轮独立驱动矿山运输电车电控优化系统。利用直流无刷电动机三相绕组结构特性,构建了四轮独立驱动矿山运输电车模型,并明确了相应的目标函数以指导优化过程。采用粒子群优化算法对该模型进行智能化求解,以获得最优的转矩分配方案。仿真试验结果显示,转矩分配控制策略使电车在速度达到50 km/h时的制动时间缩短至8.4 s,完全满足矿山矿石运输作业的实际需求。在粒子群算法的控制下,电车电池用电量维持在30.2%~30.6%,相较于模拟退火算法控制下的电池状态,展现出了更高的稳定性。研究结果证明,转矩分配方法对于四轮独立驱动矿山运输电车的适用性不仅满足了运输作业中的制动性能要求,还确保了车辆运行的安全性。

关键词:转矩分配;四轮独立驱动;轮毂电动机;粒子群算法;矿山运输电车;电控系统

中图分类号:TD52

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)05-0039-05

doi:10.11792/hj20250508

引言

可持续发展与技术转型已成为能源产业与采矿行业亟须应对的重大挑战。在采矿行业向绿色及可持续性转型的背景下,众多学者将研究焦点聚焦于矿用车辆的能源效率优化及控制策略优化领域^[1]。谭清述^[2]针对矿车通过卸载站时电机无法驱动的问题,从矿车通过卸载站机械能变化情况出发,分析矿车卸载过程中速度变化,设置外动力设施等措施,使得矿车卸载平稳,对生产系统自动化起到了促进作用。张卫等^[3]针对纯电动矿车蓄电池在高功率、大电流频繁充放电条件下的效率衰退及寿命缩短问题,提出了一种基于规则的复合能源管理控制策略,在电池参数优化后,纯电动矿车的能源利用效率、经济性能及动力性能均实现了显著提升。此外,贾彤等^[4]提出了正弦补偿型转矩分配函数与非支配排序遗传算法相结合的优化方法,用于解决车辆转矩分配的优化问题。该控制策略有效降低了换相区间的转矩脉动率(降幅达75.57%),同时峰值电流也显著减少(降低67.29%)。

当前,矿山运输电车能源优化研究在安全性方面的考量尚显不足。本研究旨在提出一种基于转矩分配的四轮独立驱动电动矿车控制方法,降低矿山运输

电车的电动设计成本及运行能耗,以期为矿山企业节能减排生产提供新的思路。

1 四轮独立驱动矿山运输电车电控系统建模

在矿山运输领域,电车的推广应用虽然展现出显著的环境效益和可持续发展潜力,但仍面临若干关键技术挑战,特别是电池续航能力和车辆安全性能等方面^[5]。采用蓄电池供电的纯电动矿山运输车辆,在应对高载质量工况时普遍存在能量密度不足的问题,这直接导致其持续作业能力难以满足实际生产需求。针对这一技术难题,本研究提出通过优化整车能量管理系统来降低系统能耗,同时采用创新的四轮独立驱动架构对车辆动力系统进行结构性改进。这种设计不仅能够有效扩大电池舱容积以提升储能容量^[6],更重要的是,通过消除传统机械传动装置,显著降低了能量传递过程中的损耗。直流无刷电动机及三相绕组结构如图1所示。

由图1可知:四轮独立驱动技术核心在于轮毂电动机的精确控制。鉴于此,本研究构建四轮独立驱动矿用运输电车的电控系统模型。此模型专注于转矩的精确计算与系统性能的对比分析,为后续转矩优化分配策略提供关键参数依据。鉴于矿山运输电车往往维持于稳定且低速的运行状态,对电动机的高

收稿日期:2024-11-29;修回日期:2025-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51504241)

作者简介:刘鑫(1986—),男,工程师,研究方向为采掘设备电控系统研发;E-mail:10023604@chnenergy.com.cn

*通信作者:冯晓东(1994—),男,助理工程师,研究方向为采掘设备电控系统研发;E-mail:18049301688@163.com

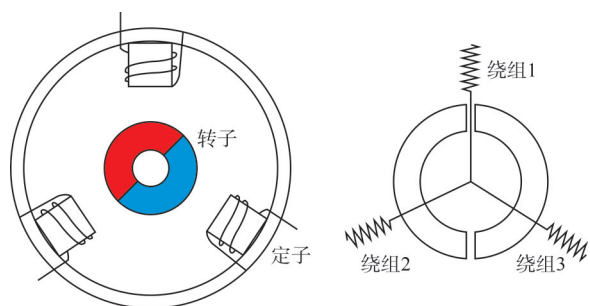


图1 直流无刷电动机及三相绕组结构

Fig. 1 Brushless DC motor and three-phase winding structure

速性能要求可适度放宽,因此研究采用直流无刷电动机作为控制对象^[7]。为深入探究轮毂电动机在矿山运输作业中的稳态性能表现,对直流无刷电动机的电压平衡特性进行分析^[8]。依据基尔霍夫电压定律,预设电动机三相绕组的自感系数相等,且各相间的互感系数亦保持一致,以此作为理论基础展开后续分析。电动机绕组电压、电流、电阻、自感、互感和反电动势之间的关系如式(1)所示。

$$V_i = R_i C_i + dL'C_i + B_i \quad (1)$$

式中: V_i 为电压; R_i 为电动机绕组电阻; C_i 为电流; L' 为绕组总电感,其值为绕组自感常数减去互感常数; B 为绕组反电动势,是电动机在旋转过程中产生的电压; i 为绕组编号,由于直流无刷电动机常为三相绕组配置方式, $i \in [1, 2, 3]$; d 为微分算子。

根据式(1)可得电动机状态模型,如式(2)所示。

$$dC_i = \frac{V_i - R_i C_i - B_i}{L'} \quad (2)$$

反电动势对电动机的性能产生显著影响,具体体现在降低效率、扭矩及功率输出方面,而其幅度则受绕组几何构型与匝数分布制约。此外,鉴于电动机三相绕组中电流与反电动势均随时间或电角度的推移而波动,当绕组的几何布局与匝数配置维持恒定条件时,在计算反电动势的过程中,角速度便成为了唯一可变且至关重要的影响因素。据此,针对不同电角度,反电动势数学表达式如式(3)所示。

$$B = \begin{cases} \frac{6}{\pi} ka^2 t & 0 \leq at \leq 30^\circ \\ ka & 30^\circ < at \leq 150^\circ \\ -\frac{6}{\pi} ka^2 t + 6ka & 150^\circ < at \leq 210^\circ \\ -ka & 210^\circ < at \leq 330^\circ \\ \frac{6}{\pi} ka^2 t - 12ka & 330^\circ < at \leq 360^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为反电动势常数; a 为电角速度; t 为电周期; at 为电角度。

三相绕组产生的各个力矩(T)关系如式(4)所示。

$$T = \frac{B_1 C_1 + B_2 C_2 + B_3 C_3}{a} \quad (4)$$

根据式(4),可以获取电动机转子在受到驱动转矩和负载转矩作用下的角加速度变化,如式(5)所示。

$$T_a - T_l = J \frac{da}{dt} + wa \quad (5)$$

式中: T_a 和 T_l 分别为电动机产生的驱动转矩和外部负载对电动机产生的阻力矩; J 为电动机转子对旋转运动的惯性; w 为电动机转子在旋转过程中遇到的阻力系数; $\frac{da}{dt}$ 为转子角速度对时间的导数,是电动机转子角速度随时间的变化率。

在直流无刷电动机旋转过程中,三相全控桥通过切换电流供给的绕组,以保持电动机的连续运行^[9]。三相全控桥的输入输出关系如式(6)所示。

$$soc = soc_0 - \int_{t_0}^{t_1} \frac{VI}{BC} dt \quad (6)$$

式中: soc 为电池当前电量状态; soc_0 为电池初始电量状态; I 为电池额定容量。

传动系统中,采用蓄电池的电量状态来评估节能方法的效果。蓄电池电量计算公式如式(7)所示。

$$soc = soc_0 - \frac{\eta I}{soc_0} \quad (7)$$

式中: η 为充放电效率。

2 基于粒子群优化算法的转矩分配方法

转矩分配策略作为一种关键技术,旨在将矿山运输电车电动机的输出转矩有效分配至4个独立驱动的车轮上,进而实现电车驾驶性能的最优化^[10]。鉴于矿山运输工况的复杂性与特殊性,为确保电车在此环境下的稳定运行、安全性保障及能源经济的可持续发展,采用粒子群优化(PSO)算法来求解转矩分配策略下的最优目标值。PSO算法通过初始化一组随机分布的粒子,并在迭代过程中依据个体极值和全局极值不断更新粒子的位置和速度,以寻求误差值的最小化解决方案,其数学表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} V_i^{t+1} = \omega_i V_i^t + c_1 rand_1 (P_i - x_i^t) + c_2 rand_2 (G_i - x_i^t) \\ x_i^{t+1} = x_i^t + V_i^{t+1} \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_i^{t+1} 、 V_i^t 分别为粒子 i 在 $t-1$ 与 t 时刻的移动速度; x_i^{t+1} 、 x_i^t 分别为对应的粒子位置; ω_i 为惯性权重; c_1 和 c_2 为学习因子; P_i 和 G_i 分别为个体极值和全局极值; $rand_1$ 、 $rand_2$ 分别为(0,1)的随机数。

在搜索过程中,粒子可能会过早地集中在某个局部最优解上,而无法找到全局最优解^[11]。为避免该问题,研究优化了惯性权重的取值,其计算公式如式(9)所示。

$$\omega_i = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{e} t \quad (9)$$

式中: $\omega_{\max}$ 为初始权重; $\omega_{\min}$ 为迭代后的惯性权重; e 为迭代后的总次数; t 为迭代轮次。

动态调整惯性权重的方法有助于平衡粒子群算

法的全局搜索能力和局部搜索能力,从而提高找到全局最优解的概率。在进行转矩分配过程中,研究针对矿山运输工作将轮胎与路面之间的摩擦力附着系数作为车辆安全性的核心指标,轮胎在工况中的横摆力矩则作为车辆稳定性评价的重要指标。研究采用分层控制器和滑模控制来获取 4 个独立驱动轮胎的横摆力矩。因此,基于粒子群智能算法的转矩分配目标函数定义如式(10)所示。

f_s = \sum_{m=1}^4 sc_m \frac{MX_m^2}{0.001 + MY_m^2} \tag{10}

式中: f_s 为安全性目标函数,用于计算分配各个轮胎的驱动力和制动力,以优化车辆的稳定性和操控性; sc_m 为轮胎侧向刚度系数,通过轮胎垂直载荷和车轮静态载荷计算得出; MX_m 为轮胎纵向力产生的横摆力矩; MY_m 为轮胎侧向力产生的横摆力矩; m 为轮胎编号。

除上述安全性目标外,再构建转矩分配的节能目标函数($\min f_e$),如式(11)所示。

\min f_e = \frac{T_n}{[\frac{T_1}{\tau(T_1,n_1)} + \dots + \frac{T_4}{\tau(T_4,n_4)}] speed} = \frac{k_1}{[\frac{k_1}{\tau(\kappa_1 T_1,n_1)} + \dots + \frac{k_4}{\tau(\kappa_4 T_4,n_4)}]^{-1}} \tag{11}

式中: T_n 为车轮电动机驱动转矩; T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别为左前轮、右前轮、左后轮、右后轮的电动机驱动转矩; $speed$ 为电动机每分钟的旋转次数; k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为驱动轮实际转矩与期望总转矩的比值,用于调整每个车轮的转矩分配; τ 为特定转矩和转速下的电动机效率函数; κ 为车轮稳定性系数。

以上述目标函数计算每个轮子的转矩分配系数,使得在满足行驶需求的同时,系统能源利用率达到最高^[12]。最后,确定目标函数的约束条件。转矩分配方法需要将 4 个独立驱动轮胎的两轴横摆力矩与电动机控制下的期望横摆力矩相等,因此, $MX + MY = MP$, MP 为期望横摆力矩^[13]。基于 PSO 转矩分配的四轮独立驱动矿山运输电车电控系统如图 2 所示。

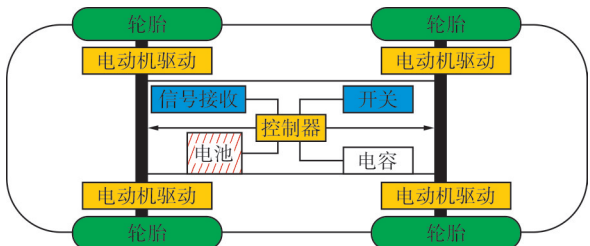


图 2 基于 PSO 转矩分配的四轮独立驱动矿山运输电车电控系统

Fig. 2 Electrical control system based on PSO torque distribution for independently driven four-wheel electric mine transport vehicles

由图 2 可知:PSO 转矩分配的四轮独立驱动矿山运输电车电控系统模型包含 4 个电动机,每个轮子配备 1 个电动机,以实现四轮独立驱动。同时,电动机、轮胎和电池各个组成部分均通过模型构建目标函数,从而方便粒子群算法的智能优化迭代。控制器作为核心部分,主要负责接收和处理各种信号,包括电车的启动、油门刹车、方向转弯信号等^[14-15]。

3 粒子群智能转矩分配试验分析

为验证电控系统的设计方案,采用 AVL Cruise 仿真平台进行试验模拟。在 AVL Cruise 环境中构建一个四轮独立驱动矿山运输电车的虚拟原型模型,该模型全面涵盖了车辆的动力学子系统、电动机驱动系统及电池能源管理系统。为实现对控制策略的定制化设计,PSO 算法集成至仿真平台中,具体通过 MatlabDLL 模块来完成控制器的设计与性能优化。该控制器被设计为能够实时采集电车的运行速度、负载状态等关键参数,运用 PSO 算法进行高效转矩分配计算,最终将计算得到的控制指令发送至 4 个独立的电动机执行单元。Python 语言被选定为主要的编程工具,用于编写仿真模型的核心逻辑及粒子群优化算法的实现代码。开发过程中,借助集成开发环境(Integrated Development Environment, IDE)来高效地进行代码的编写、调试与管理。同时,利用 Matlab 软件的强大功能,完成了仿真模型搭建、算法实现及结果验证分析。研究初始,粒子群算法的具体配置参数及矿山运输电车仿真模型关键技术参数如表 1 所示。

表 1 粒子群算法配置参数及矿山运输电车仿真模型参数
Table 1 Configuration parameters of particle swarm optimization algorithm and parameters of electric mine transport vehicle simulation model

粒子群算法配置参数	数值	矿山运输电车仿真模型参数	数值
粒子群初始数量	40	车辆质量/kg	350
初始惯性权重	0.8	驱动系统效率	0.915
最大迭代次数时的惯性权重值	0.2	0 ~ 50 km/h 的最大制动时间/s	10
个体学习因子	2	转动惯量系数	1.08
社会学习因子	2	最大速度/(km·h ⁻¹)	120
最大迭代次数	500	额定电流/A	25.6
阻尼系数	0.312	额定电压/V	48
		电阻/ Ω	1.8
		电感/H	8.5×10^{-3}

在矿山运输电车仿真模型中,电动机的电池容量为 180 Ah,转动惯性为 $6.2 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。根据仿真模型,采用额定功率为 25 kW,最大输出扭矩为 350 N·m 的无刷电动机作为轮胎的驱动核心。每台无刷电动

机配备一个三相全控桥逆变器,用于实现电流供给和换相控制。选用容量为180 Ah,工作电压为48 V的磷酸铁锂电池组作为车辆的储能核心。控制单元使

用NXP的微控制器搭配专用的电动机控制模块,进行车辆驱动转矩的计算与分配。对矿山运输电车进行PSO转矩分配下的制动试验,结果如图3所示。

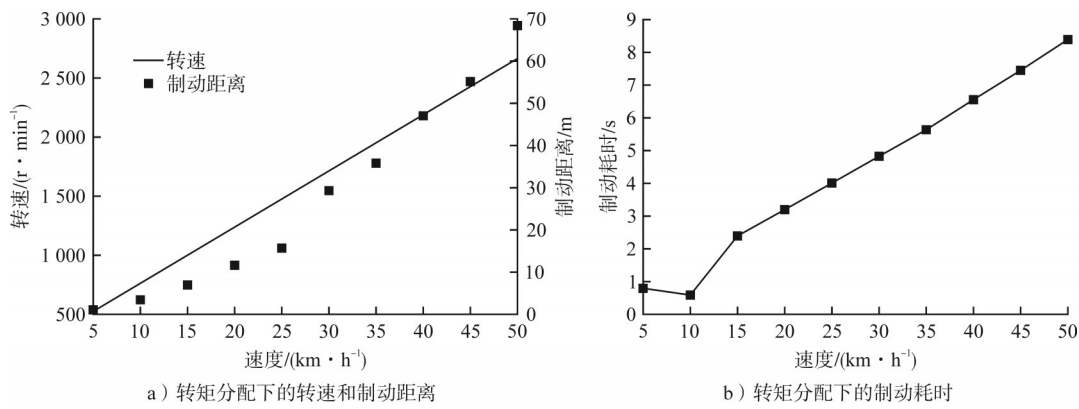


图3 PSO转矩分配下的矿山运输电车制动效果

Fig. 3 Braking performance of electric mine transport vehicles based on PSO torque distribution

由图3-a)可知:随着电车速度从5 km/h上升到50 km/h,电车电动机的转速从518.4 r/min上升到了2 642.1 r/min;电车完成从5 km/h上升到50 km/h的加速状态,需要制动的距离为68.3 m。由图3-b)可知:电车完成从5 km/h上升到50 km/h的加速状态耗时8.4 s,小于车辆需求的10 s。在PSO算法的控制下,

矿山运输电车制动系统性能良好,能够在更短的时间内完成制动。因此,研究构建的PSO算法转矩分配能满足矿山运输电车在运输工作中的制动需求,确保矿山运输电车在实际运行中的安全性和可靠性。

SA为模拟退火算法,则不同算法模型的经济性能分析如图4所示。

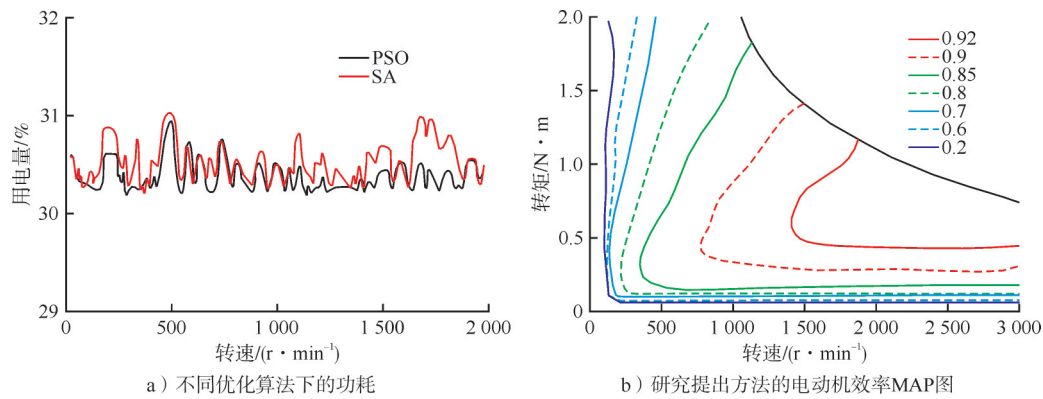


图4 不同算法模型的经济性能分析

Fig. 4 Economic performance analysis of different algorithm models

由图4-a)可知:模拟退火算法的电池荷电状态波动更加明显。SA优化转矩分配后,矿山运输电车的电池用电量为30.2 %~31.0 %;而PSO优化转矩分配之后,矿山运输电车的电池用电量为30.2 %~30.6 %。试验表明,经PSO算法优化后,矿山运输电车的能源消耗更少,电池的剩余电量状态保持更加稳定。由图4-b)可知:电动机效率的高低并不遵循简单的线性关系。在一致的转矩条件下,转速的变化对电动机效率有着显著影响。在电动机转速高于1 500 r/min,转矩高于0.5 N·m、低于1.2 N·m时,电动机效率最高值为0.92。PSO转矩分配下考虑转速对电动机效率的影响,可以实现更高的能源效率。

分析在PSO转矩分配下矿山运输电车4个轮胎的滑转率,结果如图5所示。

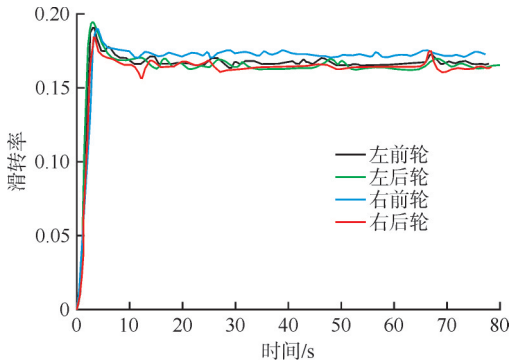


图5 矿山运输电车轮胎滑转率

Fig. 5 Tire slip ratio of electric mine transport vehicles

设置矿山运输电车的最大运行速度为50 km/h,

由图5可知:在矿山运输电车运行6 s后,4个轮胎的滑转率基本平衡在0.17~0.18,滑转率处于较低水平,表明PSO转矩分配下轮胎与路面的接触较好,车辆的牵引力和稳定性较高。同时,在加速状态下,矿山运输电车4个轮胎的滑转率差异小于0.2,且滑转率达到平衡的时间统一为5~6 s。这表明矿山运输电车的4个轮胎在加速过程中表现一致,没有出现显著的滑转差异。因此,研究构建的PSO转矩分配方法能够有效防止轮胎滑转率过高或轮胎之间的平衡控制不一致导致的车辆稳定性问题。

4 结 语

针对采矿业矿山运输工作的节能优化,研究对矿山运输电车的电动控制进行了探讨。基于四轮独立驱动的设计方案和粒子群算法的四轮转矩分配方法,研究构建了矿山运输电车电控系统模型。在矿山运输电车的实际应用中,PSO转矩分配下矿山运输电车制动时间为8.4 s,制动时间短。同时,PSO转矩分配下矿山运输电车的电池用电量为30.2%~30.6%,电池能耗稳定。此外,PSO转矩分配下矿山运输电车4个轮胎的滑转率均为0.17~0.18,平衡时间为5~6 s。结果表明,研究构建的PSO转矩分配方法能够减少电池荷电状态的波动以保持能耗稳定,同时降低轮胎的滑转率,增加车辆的稳定性。研究的不足之处在于仅对矿山运输电车电控系统中的转矩分配进行了探讨,而电车的电控系统优化还涉及电池管理、通信等方

面。未来研究中,将拓展到矿山运输电车电控系统的其他方面,进行更深层次的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 刘永红.金属矿山开采及提炼过程中环保节能技术探讨及应用浅析[J].中国锰业,2022,40(4):92-96.
- [2] 谭清述.底侧卸式矿车外动力卸载设施的研究与应用[J].黄金,2024,45(5):25-27,39.
- [3] 张卫,杨珏,张文明,等.纯电动矿车复合能源系统研究[J].汽车工程,2019,41(6):641-646,653.
- [4] 贡彤,聂恒,陈龙,等.一种正弦补偿型转矩分配函数的SRM转矩脉动抑制策略[J].电机与控制学报,2022,26(8):100-111.
- [5] 邵宜祥,过亮,蔡国洋,等.基于转矩分配策略与高频脉冲注入的开关磁阻电机无位置传感器控制方法[J].科技通报,2022,38(9):16-23,30.
- [6] 朱绍鹏,匡晨阳,陈平,等.分布式四轮驱动电动客车经济性最优转矩分配控制[J].汽车技术,2022(9):15-22.
- [7] 刘庆玉,徐岩,付金贵.倒拉反接制动在矿井提升中的应用[J].黄金,2004,25(8):27-28.
- [8] 康智勇,孙德博,李永建,等.基于区间分段转矩分配函数的开关磁阻电机转矩脉动抑制[J].电机与控制学报,2023,27(10):54-62.
- [9] 胡金芳,颜春辉,赵林峰,等.分布式驱动电动汽车转向工况转矩分配控制研究[J].中国公路学报,2020,33(8):92-101.
- [10] 林歆悠,黄强,张光吉.基于PSO的新型双电机多模式驱动系统转矩分配策略优化[J].汽车工程,2022,44(8):1 218-1 225.
- [11] 孔晓峰.矿山斜井提升防跑安全车研发及应用前景[J].黄金,2023,44(6):35-38.
- [12] 吴静波,李明明,郭志军,等.并联式混合动力汽车转矩实时分配控制策略研究[J].机械科学与技术,2022,41(1):151-158.
- [13] 汪玥盼.矿山无人驾驶技术及发展前景分析[J].黄金,2020,41(3):48-50.
- [14] 张学锋,万爽,樊旭,等.基于NSGA-II算法的直流无刷电机控制方法[J].北华大学学报(自然科学版),2023,24(5):657-663.
- [15] 李涛,孙琰,侯建硕,等.人工智能在矿山设备预测性维护中的应用研究[J].黄金,2025,46(1):1-5,19.

Study on the electrical control system based on PSO torque distribution for independently driven four-wheel electric mine transport vehicles

Liu Xin¹, Feng Xiaodong¹, Gao Peng²

(1. High-end Equipment Research and Development Center of Shendong Coal Group, CHN Energy;

2. Taiyuan Research Institute Co., Ltd., China Coal Technology & Engineering Group)

Abstract: In mining operations, electric transport vehicles often face issues of insufficient power supply and excessive energy consumption under high-load conditions. To address this challenge, a control optimization system based on torque distribution for independently driven four-wheel electric mine transport vehicles is proposed. Utilizing the structural characteristics of three-phase windings in brushless DC motors, a model of the independently driven four-wheel electric mine transport vehicles was constructed, and the corresponding objective function was defined to guide the optimization process. A particle swarm optimization (PSO) algorithm was employed to intelligently solve the mathematical model and obtain the optimal torque distribution scheme. Simulation results show that the torque distribution control strategy shortens the braking time to 8.4 s at a speed of 50 km/h, fully meeting the practical demands of ore transport in mines. Under PSO control, the state of charge of the vehicle battery was maintained within 30.2%~30.6%, demonstrating higher stability compared to control with the simulated annealing algorithm. The results verify that the proposed torque distribution method is suitable for independently driven four-wheel electric mine transport vehicles, as it not only satisfies the braking performance requirements but also ensures safe vehicle operation.

Keywords: torque distribution; four-wheel independent drive; in-wheel motor; particle swarm algorithm; electric mine transport vehicle; electrical control system