

文章编号: 1671-251X(2025)05-0114-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2025030086

矿用电机车混合储能系统功率分配控制

尹昊, 祝龙记

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 单一蓄电池供电的矿用电机车存在续航里程不足、充电时间长、重载启动困难等问题, 导致运行效率低, 难以满足安全性与稳定性要求。提出在矿用电机车上采用铅酸蓄电池与超级电容的混合储能技术, 设计了矿用电机车混合储能系统, 以满足重载启动时高瞬时功率要求, 增加续航时间。针对混合储能系统中储能元件的功率分配问题, 通过仿真分析低通滤波与小波分解的优缺点, 设计了低通滤波与小波分解相结合的功率分解方法, 从矿用电机车总负载功率中分解出高低频分量; 再根据储能元件的荷电状态(SOC), 引入动态协调机制, 对储能元件功率分配进行二次调控, 得到蓄电池和超级电容的目标功率。仿真结果表明: 应用组合分解方法得到的矿用电机车总负载功率的低频分量与原始功率的吻合度较高, 瞬态响应性能优越; 基于 SOC 的二次调控策略可动态调整混合储能系统的功率分配, 减少了超级电容放电次数, 增加了超级电容有效放电时间, 使蓄电池稳定放电。

关键词: 矿用电机车; 混合储能; 功率分配; 铅酸蓄电池; 超级电容

中图分类号: TD64

文献标志码: A

Power distribution control of hybrid energy storage system for mining electric locomotives

YIN Hao, ZHU Longji

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China)

Abstract: Mining electric locomotives powered by a single battery face issues such as insufficient driving range, long charging times, and difficulty starting under heavy load, resulting in low operational efficiency and failing to meet safety and stability requirements. This paper proposed the use of hybrid energy storage technology combining lead-acid batteries and supercapacitors on mining electric locomotives and designed a hybrid energy storage system to meet the high instantaneous power demands during heavy load starts and to extend the driving range. To address the power distribution problem of energy storage components in the hybrid system, a power decomposition method combining low-pass filtering and wavelet decomposition was designed after simulation analysis of their respective advantages and disadvantages. This method decomposed the total load power of the mining electric locomotive into high- and low-frequency components. Then, based on the State of Charge (SOC) of the energy storage components, a dynamic coordination mechanism was introduced for secondary adjustment of power distribution, obtaining the target power for the battery and supercapacitor. Simulation results showed that the low-frequency component of the total load power obtained by the combined decomposition method closely matched the original power, demonstrating superior transient response performance. The SOC-based

收稿日期: 2025-03-25; 修回日期: 2025-05-23; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1610120)。

作者简介: 尹昊(2000—), 男, 安徽滁州人, 硕士研究生, 研究方向为电子电力, E-mail: 1852834987@qq.com。通信作者: 祝龙记(1964—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电气自动控制、电力电子及电力传动, E-mail: ljzhu@aust.edu.cn。

引用格式: 尹昊, 祝龙记. 矿用电机车混合储能系统功率分配控制[J]. 工矿自动化, 2025, 51(5): 114-119, 154.

YIN Hao, ZHU Longji. Power distribution control of hybrid energy storage system for mining electric locomotives[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(5): 114-119, 154.



扫码移动阅读

secondary adjustment strategy could dynamically regulate power distribution in the hybrid energy storage system, reducing the discharge frequency of the supercapacitor, extending its effective discharge time, and stabilizing battery discharge.

Key words: mining electric locomotive; hybrid energy storage; power distribution; lead-acid battery; supercapacitor

0 引言

矿用电机车是井下运输的核心设备,通常采用单一类型蓄电池供电,存在续航里程不足、充电时间长、重载启动困难等问题^[1-3],严重制约其运行效率。此外,单一储能元件无法很好地满足井下作业环境对矿用电机车运行的安全性与稳定性要求^[4-6]。

当前储能元件主要分为能量型(如铅酸蓄电池)与功率型(如超级电容)^[7-8],二者性能存在显著差异:铅酸蓄电池能量密度高(20~200 W/kg),但功率密度不足,难以满足重载启动瞬时高功率需求^[9-10];超级电容功率密度优异(5~20 W/kg),但能量密度低,续航能力有限^[11-12]。将二者结合构成混合储能系统,既能满足重载启动时高瞬时功率要求,又能增加其续航时间,因此,可考虑在矿用电机车上采用铅酸蓄电池与超级电容的混合储能技术。

混合储能技术的关键是对储能元件进行功率分配,其直接影响混合储能系统的使用效率^[13-14]。文献^[15]根据超级电容荷电状态(State of Charge, SOC)调整蓄电池电流内环扰动项,但超级电容 SOC 需要在系统进入稳定后恢复,而矿用电机车持续运行,无法保证超级电容 SOC 在混合储能系统进入平稳阶段后恢复;文献^[16]提出基于小波分解及模糊控制的风电系统功率分配方法,但需要大量计算资源和传感器,不适用于复杂的矿用电机车工作环境。

本文提出一种低通滤波与小波分解相结合的矿用电机车负载功率分解方法,搭配储能元件 SOC 动态协同控制策略,设计了矿用电机车混合储能系统功率分配控制方法,使矿用电机车的铅酸蓄电池功率输出更加平滑,超级电容可持续供能,提升混合储能系统的综合效能。

1 矿用电机车混合储能系统结构

本文将铅酸蓄电池与超级电容 2 种储能元件有机结合,设计矿用电机车混合储能系统,旨在充分发挥能量型和功率型储能元件的优势,实现更高效、稳定的能量存储和释放。混合储能系统结构如图 1 所示。铅酸蓄电池和超级电容通过 DC/DC 变换器与直流母线相连,铅酸蓄电池维持母线电压,超级电容

负责高频功率分量。

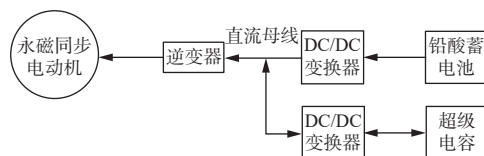


图 1 矿用电机车混合储能系统结构

Fig. 1 Structure of hybrid energy storage system for mining electric locomotives

2 混合储能系统功率分配控制方法

2.1 功率分配控制原理

矿用电机车混合储能系统功率分配控制原理如图 2 所示。针对负载需求功率,采用低通滤波和小波分解相结合的方法分解出低频分量,之后考虑蓄电池与超级电容的 SOC,引入调控系数对功率进行二次调控,最终将负载功率分配给超级电容和蓄电池。

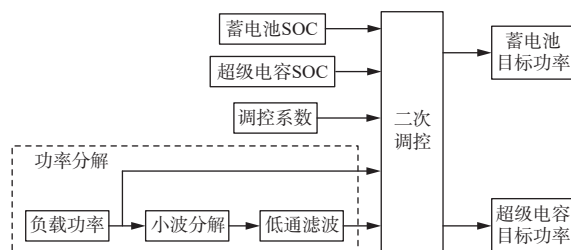


图 2 矿用电机车混合储能系统功率分配控制原理

Fig. 2 Power distribution control principle for hybrid energy storage system in mining electric locomotives

2.2 负载功率分解

考虑矿用电机车的运行工况,负载功率 P_{load} 由低频基础功率分量 P_{base} (对应持续牵引需求)和高频峰值功率分量 P_{peak} (对应启停、爬坡等瞬态需求)组成。

$$P_{load} = P_{base} + P_{peak} \quad (1)$$

从总的负载功率中分解出高低频分量,是实现混合储能系统功率分配的关键。本文采用常见的低通滤波与小波分解方法对负载功率进行分解,通过对比 2 种方法的优缺点,提出低通滤波与小波分解组合方法。

2.2.1 基于低通滤波的功率分解

低通滤波是一种常见的信号处理方法,其基本

原理是允许低频信号通过,而对高频信号进行衰减或阻隔。一阶惯性滤波是最常用的低通滤波方法,因此本文采用一阶惯性滤波进行功率分解。

传统的一阶惯性滤波器为

$$H(s) = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2)$$

式中: s 为拉普拉斯算子; τ 为时间常数, 决定截止频率 f_c , $f_c = 1/(2\pi\tau)$ 。

一阶惯性滤波器的时域表达式为

$$P_{\text{base}}(t) = \frac{1}{\tau} \int_0^t \exp\left(-\frac{(t-\zeta)}{\tau}\right) P_{\text{load}}(\zeta) d\zeta \quad (3)$$

式中: t 为时间; ζ 为时间积分变量。

负载功率 P_{load} 经低通滤波器处理后输出低频分量 P_{base} , 再经式(1)计算得到高频分量 P_{peak} 。

矿用电机车负载功率中常含有高频次的瞬态谐波。模拟矿用电机车总负载功率, 如图 3 中蓝色线条所示。其由缓慢变化的低频分量 P_{base} 和 2 kHz 高频分量 P_{peak} 组成。根据矿用电机车要求, 蓄电池响应时间应小于 100 ms, 因此截止频率 $f_c=10$ Hz。负载功率经低通滤波器分解后, 低频分量如图 3 中红色线条所示。可看出低通滤波能很好地过滤高频分量, 且分解后的低频分量曲线平滑, 但滞后于原始负载功率。矿用电机车对实时性要求较高, 延迟可能导致控制响应滞后, 从而引发振荡。此外, 低通滤波的频域特性由时间常数 τ 严格约束, 导致其仅能分解出单一频段, 无法分解出功率分量中的不同频段。因此, 低通滤波不适用于矿用电机车混合储能系统功率分配。

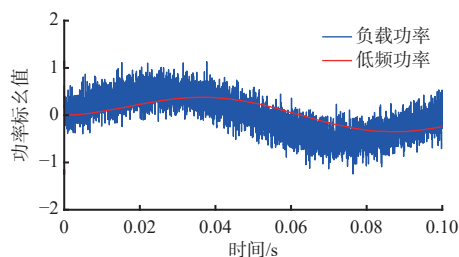


图 3 负载功率低通滤波结果

Fig. 3 Load power low-pass filtering result

2.2.2 基于小波分解的功率分解

小波分解是一种时频分析方法, 具有良好的时频分解特性^[17]。与低通滤波相比, 小波分解结果不会出现时间滞后性, 且能得到不同的高低频分量。

小波分解原理如图 4 所示。对原始功率进行第 1 层分解, 得到低频分量 A_1 和 高频分量 D_1 ; 对 A_1 进行第 2 层分解, 得到低频分量 A_2 和 高频分量 D_2 。对得到的低频分量依次进行下一层分解, 得到多层二

叉树结构, 从而将原始功率映射到不同的小波子空间。

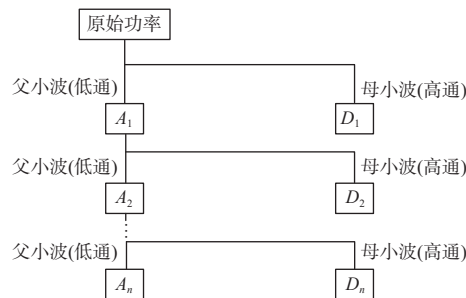


图 4 负载功率小波分解原理

Fig. 4 Principle of wavelet decomposition for load power

基于小波分解的负载功率为

$$P_{\text{load}} = A_n + \sum_{i=1}^n D_i \quad (4)$$

式中: A_n 为分解的第 n 层低频分量; n 为小波分解层数; D_i 为分解的第 i 层高频分量。

满足要求的最小分解层数为

$$n_{\min} = \left\lceil \log_2 \frac{f_{\max}}{f_{\text{target}}} \right\rceil \quad (5)$$

式中: f_{\max} 为输入信号最大频率; f_{target} 为目标频率。

确定小波分解层数 n 后, 可得到所需的低频功率分量 A_n , 再根据式(4)得到高频功率分量 $\sum_{i=1}^n D_i$ 。

针对图 3 中的负载功率信号进行小波分解。设目标频率 $f_{\text{target}}=10$ Hz, 输入信号最大频率 $f_{\max}=2$ kHz, 代入式(5)得 $n_{\min}=8$ 。功率分解结果如图 5 所示。

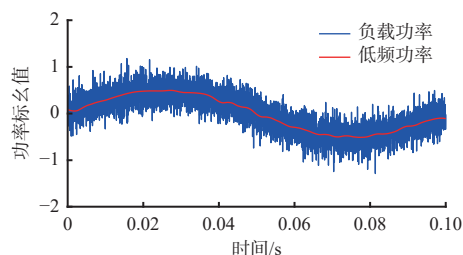


图 5 负载功率小波分解结果

Fig. 5 Wavelet decomposition results of load power

从图 5 可看出, 与低通滤波相比, 小波分解得到的负载功率低频分量不存在时延问题, 但功率曲线存在波动分量, 平滑度较差。此外, 随着分解层数加大, 算法复杂度增加。因此, 对于复杂的矿用电机车工作环境, 利用小波分解来解决混合储能系统功率分解问题难以取得良好效果。

2.2.3 低通滤波与小波分解相结合的功率分解

经上文分析可知, 低通滤波和小波分解都能实时分解出功率的低频分量, 但低通滤波结果存在一定的滞后性, 且仅能分解单一频段, 小波分解结果存

在残留波动。因此,考虑将2种方法结合,对负载功率进行分解,如图2虚线框中所示。对负载功率进行小波分解,得到含有残留波动的低频分量,再通过低通滤波得到平滑的低频分量。该过程中只需保证低通滤波分解的低频分量达到目标频率即可,小波分解层数较采用单一小波分解时减少。

采用低通滤波与小波分解组合方法对图3中的负载功率进行分解,结果如图6所示。可看出组合分解后的低频分量能够很好地跟随原始功率曲线,且不存在明显的残留波动。3种方法的运算时间如图7所示。可看出组合方法较小波分解运算速度更快,原因是小波分解层数减少。综合仿真结果可知,组合方法较单一方法更适用于井下复杂环境中矿用电机车混合储能系统的功率分解。

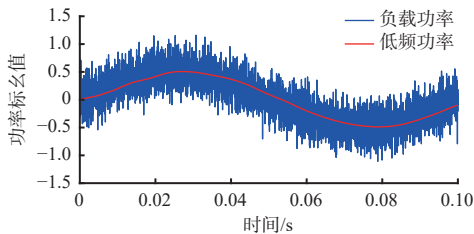


图6 负载功率组合分解结果

Fig. 6 Combined decomposition results of load power

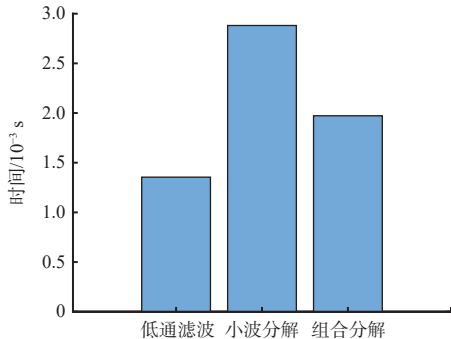


图7 3种负载功率分解方法的运算时间对比

Fig. 7 Comparison of computation time for three load power decomposition methods

2.3 混合储能元件 SOC 协调控制

蓄电池与超级电容的 SOC 直接影响混合储能系统的稳定性和储能元件的使用寿命^[18-21]。为了进一步优化混合储能系统功率分配效果,根据蓄电池与超级电容 SOC 对负载功率及其低频分量进行二次调控,得到蓄电池和超级电容的目标功率。

通过安时积分法得出蓄电池 SOC:

$$C_{\text{bat}}=C_0-\frac{1}{Q_{\text{bat}}}\int_0^t i(\zeta)\text{d}\zeta \tag{6}$$

式中: C_0 为初始时刻的蓄电池 SOC; Q_{bat} 为蓄电池的标称容量; $i(\zeta)$ 为充放电电流。

通过电压积分得到超级电容 SOC:

$$C_{\text{sc}}=\frac{V_{\text{c}}^2-V_{\text{min}}^2}{V_{\text{max}}^2-V_{\text{min}}^2} \tag{7}$$

式中: V_{c} 为超级电容的实时端电压; V_{min} 为超级电容的最小允许工作电压(通常设为额定电压的 50%); V_{max} 为超级电容的最大允许工作电压。

由于矿用电机车工作环境复杂恶劣,蓄电池 SOC 在电机车行驶过程中基本无法恢复,其作为主要供电电源,在工作中会频繁启动,而高频放电会降低其使用寿命,所以选用超级电容应对负载功率高频分量。超级电容能量密度低,易出现过充过放问题,对此,引入调控系数 a 。当超级电容在主要放电区时,通过调节 a 使其平稳放电,当超级电容 SOC 降至 20% 以下时, a 变为 0,超级电容进入充电状态。

$$a=\max\left(0,\frac{C_{\text{sc}}-C_{\text{scmin}}}{C_{\text{scmax}}-C_{\text{scmin}}}\right) \tag{8}$$

式中 C_{scmin} , C_{scmax} 分别为超级电容正常工作的 SOC 最小值和最大值。

超级电容目标功率为

$$P_{\text{sc}}=a(P_{\text{load}}-P_{\text{base}}) \tag{9}$$

则蓄电池目标功率为

$$P_{\text{bat}}=P_{\text{load}}-P_{\text{sc}} \tag{10}$$

设置 $C_{\text{scmin}}=20\%$, $C_{\text{scmax}}=80\%$,即超级电容 $\text{SOC}\in[20\%,80\%]$ 为主要放电区域。当超级电容 $\text{SOC}<20\%$ 时进入充电环节。由此得到混合储能系统功率分配二次调控策略,具体见表 1。

表 1 混合储能系统功率分配二次调控策略

Table 1 Secondary regulation strategy for power allocation in hybrid energy storage systems

工况	C_{bat}	C_{sc}	功率分配模式	关键操作
常规工况	$\geq 20\%$	$\geq 20\%$	协同供电	蓄电池提供低频功率,超级电容补偿波动
超级电容 低电量	$\geq 20\%$	$< 20\%$	蓄电池单独供电+超级电容充电	蓄电池全功率输出,同时为超级电容充电
蓄电池 低电量	$< 20\%$	$\geq 20\%$	协同供电	蓄电池提供低频功率,超级电容补偿波动
极端低电量	$< 20\%$	$< 20\%$	系统强制保护	限制车辆动力性能,优先维持基础行驶

3 系统仿真分析

使用 Matlab/Simulink 仿真软件对矿用电机车混合储能系统及其功率分配控制策略建立仿真模型,负载为永磁同步电动机,仿真参数见表 2。

给定的电动机负载转矩如图 8(a)所示。电动机转速为 1 000 r/min,其对应功率如图 8(b)所示。

分别采用低通滤波、小波分解和二者组合方法对给定的电动机负载功率进行分解,结果如图 9 所

表 2 仿真参数设置

Table 2 Experimental system parameter setting

参数	值	参数	值
电动机功率/kW	3	超级电容额定电压/V	96
直流母线电压/V	220	IGBT电压/V	600
蓄电池额定电压/V	220	IGBT电流/A	150
超级电容量/F	190		

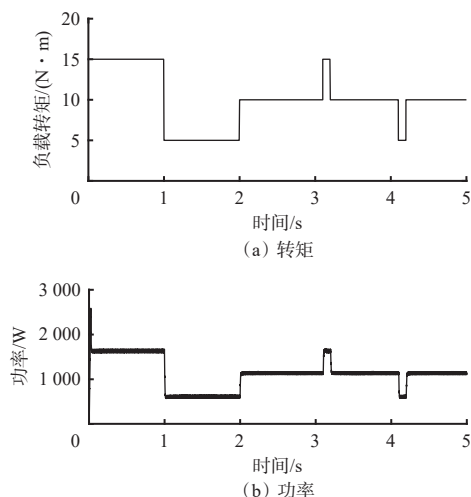


图 8 电动机给定转矩与功率曲线

Fig. 8 Torque and power curves of the specified motor

示。可看出低通滤波分解出的低频分量存在一定时延;小波分解的低频分量在功率突变时存在尖峰脉动;组合分解的低频分量在电动机启动阶段和负载功率变化时与原始功率曲线有较好的吻合度,且减少了尖峰脉动与跟踪时延。

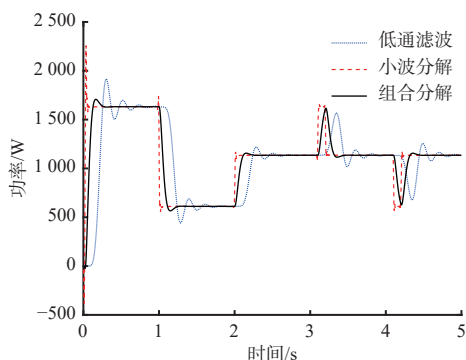


图 9 电动机负载功率分解结果

Fig. 9 Decomposition results of motor load power

在 25℃ 环境温度下,针对电动机负载功率及组合分解得到的低频分量,根据蓄电池与超级电容 SOC,在不同工况下进行二次调控。

针对常规工况,设定 $C_{\text{bat}}=83\%$, $C_{\text{sc}}=60\%$, 2 种储能元件的 SOC 变化曲线如图 10 所示。可看出该工况下,混合储能系统通过调控系数 α 有效降低了超级电容的放电速率,从而延长超级电容的循环寿命,

增加超级电容有效工作时间,使蓄电池稳定放电。

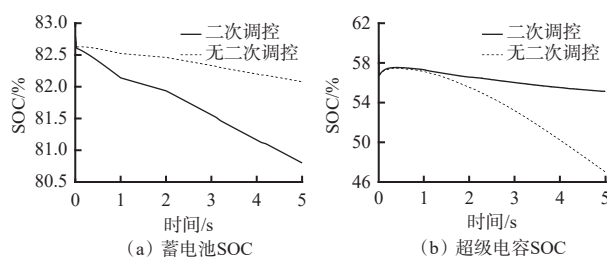


图 10 常规工况下储能元件 SOC 变化曲线

Fig. 10 SOC variation curves of energy storage components under normal operating conditions

针对超级电容低电量工况,设定 $C_{\text{bat}}=85\%$, $C_{\text{sc}}=10\%$, 2 种储能元件的 SOC 变化曲线如图 11 所示。可看出该工况下,当超级电容 SOC 降至 20% 以下时进入充电状态,由蓄电池提供充电,防止超级电容过放。

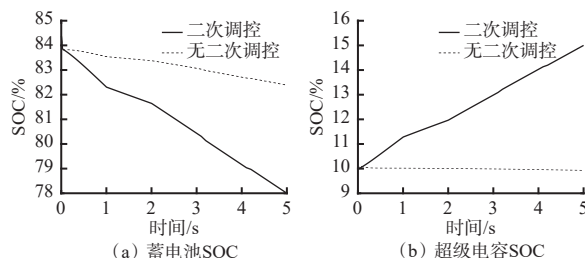


图 11 超级电容低电量工况下储能元件 SOC 变化曲线

Fig. 11 SOC variation curves of energy storage components under low power conditions of supercapacitors

针对蓄电池低电量工况,设定 $C_{\text{bat}}=17\%$, $C_{\text{sc}}=51\%$, 2 种储能元件的 SOC 变化曲线如图 12 所示。可看出该工况下,蓄电池与超级电容均正常放电,同时通过调节调控系数 α ,防止超级电容过快放电,影响整车运行。

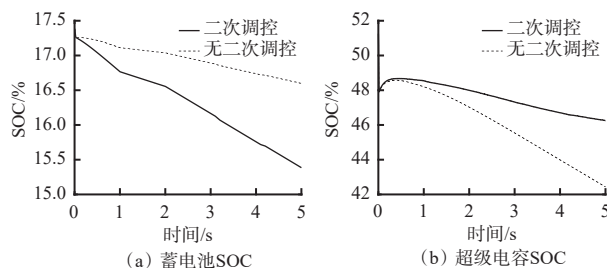


图 12 蓄电池低电量工况下储能元件 SOC 变化曲线

Fig. 12 SOC variation curves of energy storage components under low battery power conditions

4 结论

1) 提出的矿用电机车混合储能系统功率分配控制方法采用低通滤波与小波分解相结合的方法对负载功率进行分解,并根据蓄电池和超级电容的 SOC 进行二次调控。

2) 仿真结果表明: 组合分解方法得到的负载功率低频分量与原始功率具有较高的吻合度, 且在瞬态响应方面性能卓越; 基于储能元件 SOC 的功率分配二次调控策略能够动态调整混合储能系统的功率分配, 减少了超级电容放电次数, 增加了超级电容有效放电时间, 使蓄电池稳定放电。

参考文献(References):

- [1] 杨金鑫, 祝龙记. 矿用电机车车载充电系统研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(1): 104-108.
YANG Jinxin, ZHU Longji. Research on on-board charging system of mine-used electric locomotive[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(1): 104-108.
- [2] 李勇, 杨珏, 刘如成, 等. 大型电动轮矿车节能及零排放技术路线[J]. 煤炭学报, 2022, 47(5): 2120-2130.
LI Yong, YANG Jue, LIU Rucheng, et al. Technical route of energy saving and zero-emission for large-scale electric mining truck[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 2120-2130.
- [3] 汪心蕊. 矿用电机车蓄电池/超级电容混合储能系统[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
WANG Xinrui. Battery/super capacitor hybrid energy storage system for mining electric locomotive[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [4] 吴震, 陈靖, 党娇. 矿用电动车混合储能系统 Z 源逆变器电流控制[J]. 工矿自动化, 2019, 45(9): 92-98.
WU Zhen, CHEN Jing, DANG Jiao. Current control of Z-source inverter for hybrid energy storage system of mine-used electric vehicle[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 92-98.
- [5] 冯高明, 周庆凯, 谭兴国. 矿用电机车双电机同步控制方法研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 128-137.
FENG Gaoming, ZHOU Qingkai, TAN Xingguo. Research on dual motor synchronous control method for mining electric locomotive[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2025, 44(2): 128-137.
- [6] 申永鹏, 孙建彬, 王延峰, 等. 电动汽车混合储能装置小波功率分流方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4636-4646.
SHEN Yongpeng, SUN Jianbin, WANG Yanfeng, et al. Power distribution method of wavelet for hybrid energy storage systems in an electric vehicle[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4636-4646.
- [7] 郝明锐. 矿用防爆电驱车辆动力电池技术研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(10): 131-134.
HAO Mingrui. Research on power battery technology of explosion-proof electric vehicle[J]. Coal Engineering, 2019, 51(10): 131-134.
- [8] 齐洪峰. 飞轮储能与轨道交通系统技术融合发展现状[J]. 电源技术, 2022, 46(2): 137-140.
QI Hongfeng. Progress of technology integration between flywheel energy storage and rail transportation system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2022, 46(2): 137-140.
- [9] YANAMANDRA K, PINISETTY D, DAOUD A, et al. Recycling of Li-ion and lead acid batteries: a review[J]. Journal of the Indian Institute of Science, 2022, 102(1): 281-295.
- [10] VENERI O, CAPASSO C, PATALANO S. Experimental investigation into the effectiveness of a super-capacitor based hybrid energy storage system for urban commercial vehicles[J]. Applied Energy, 2018, 227: 312-323.
- [11] 陈燕东, 刘燕军, 张松, 等. 基于多目标协调的混合储能功率自适应分配方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(2): 1-11.
CHEN Yandong, LIU Yanjun, ZHANG Song, et al. Adaptive power allocation strategy for hybrid energy storage based on multi-objective coordination[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(2): 1-11.
- [12] 王力, 胡佳成, 曾祥君, 等. 基于混合储能的交直流微电网功率分级协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2311-2324.
WANG Li, HU Jiacheng, ZENG Xiangjun, et al. Hierarchical coordinated power control strategy for AC-DC hybrid microgrid with hybrid energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2311-2324.
- [13] 李红, 储江伟, 孙术发, 等. 车载电磁耦合飞轮储能系统的特性[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1687-1693.
LI Hong, CHU Jiangwei, SUN Shufa, et al. Characteristics of vehicle-mounted electromagnetic coupling flywheel energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1687-1693.
- [14] 高锋阳, 张浩然, 王文祥, 等. 氢燃料电池有轨电车混合储能系统的节能运行优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(3): 686-696.
GAO Fengyang, ZHANG Haoran, WANG Wenxiang, et al. Energy saving operation optimization of hybrid energy storage system for hydrogen fuel cell tram[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(3): 686-696.
- [15] 赵永熹, 刘剑, 周建萍, 等. 基于稳态功率修正的混合储能新型控制策略研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(5): 666-672.
ZHAO Yongxi, LIU Jian, ZHOU Jianping, et al. Research on new control strategy of hybrid energy storage sources based on steady-state power correction[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(5): 666-672.

- 199-202.
- LIU Jingdong, LI Xu, YU Fengqi, et al. Research on application of laser SLAM technology in fine modeling of roadway[J]. Coal Mine Machinery, 2024, 45(10): 199-202.
- [14] 朱珍, 何满潮, 王琦, 等. 柠条塔煤矿自动成巷无煤柱开采新方法[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(1): 46-53.
- ZHU Zhen, HE Manchao, WANG Qi, et al. An innovative non-pillar mining method for gateroad formation automatically and its application in Ningtiaota Coal Mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 46-53.
- [15] 李智勇. 导线近似平差计算[J]. 全球定位系统, 2014, 39(3): 97-99.
- LI Zhiyong. Approximate adjustment calculation of the traverse[J]. GNSS World of China, 2014, 39(3): 97-99.
- [16] 邱俊玲. 基于三维激光扫描技术的矿山地质建模与应用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- QIU Junling. Mine geological modeling and application based on the three-dimensional laser scanner technology[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2012.
- [17] 潘廷凤, 王楠, 王卫东. 三维激光扫描技术在矿山地质测量中的应用研究[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(6): 151-153.
- PAN Tingfeng, WANG Nan, WANG Weidong. Research on the application of 3D laser scanning technology in mine geological survey[J]. Heilongjiang Environmental Journal, 2024, 37(6): 151-153.
- [18] 华宇宁, 刘永俊. 基于 Harris3D 关键点提取和 RANSAC 算法的改进 ICP 算法研究[J]. 电子世界, 2021(24): 73-74.
- HUA Yuning, LIU Yongjun. Research on improved ICP algorithm based on Harris3D key point extraction and RANSAC algorithm[J]. Electronics World, 2021(24): 73-74.
- [19] CHEN Min, YAN Weishan, FENG Yuan, et al. Large-scale underground mine positioning and mapping with LiDAR-based semantic intersection detection[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2023, 40(5): 2007-2021.
- [20] 冀晓伟, 卢才武, 李海波. 三维矿体表面建模中的三角剖分技术及其应用[J]. 金属矿山, 2011(2): 106-110, 114.
- JI Xiaowei, LU Caiwu, LI Haibo. Triangulation technique and its application in 3D ore body surface modeling[J]. Metal Mine, 2011(2): 106-110, 114.
- [21] 刘翔宇, 王健, 常清法, 等. 改进贪婪投影三角化算法的激光点云快速三维重建[J]. 激光与红外, 2022, 52(5): 763-770.
- LIU Xiangyu, WANG Jian, CHANG Qingfa, et al. Fast 3D reconstruction of point cloud based on improved greedy projection triangulation algorithm[J]. Laser & Infrared, 2022, 52(5): 763-770.
- [22] SONG Yuanlong, LI Ming, LIU Xiaojia. A paralleled delaunay triangulation algorithm for processing large LIDAR points[J]. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2022, X3W1: 141-146.
- (上接第 119 页)
- [16] 陈景文, 周婧, 张文倩. 基于小波包-模糊算法的混合储能功率分配策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 61-68.
- CHEN Jingwen, ZHOU Jing, ZHANG Wenqian. Hybrid energy storage power allocation strategy based on wavelet packet-fuzzy algorithm[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 61-68.
- [17] 贾伟青, 任永峰, 薛宇, 等. 基于小波包-模糊控制的混合储能平抑大型风电场功率波动[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 357-363.
- JIA Weiqing, REN Yongfeng, XUE Yu, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage for power fluctuation smoothing of large wind farm[J]. Acta Energaiae Solaris Sinica, 2021, 42(9): 357-363.
- [18] 赵靖英, 乔珩埔, 姚帅亮, 等. 考虑储能 SOC 自恢复的风电波动平抑混合储能容量配置策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5206-5219.
- ZHAO Jingying, QIAO Hengpu, YAO Shuailiang, et al. Hybrid energy storage system capacity configuration strategy for stabilizing wind power fluctuation considering SOC self-recovery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5206-5219.
- [19] 肖谧, 宿玉鹏, 杜伯学. 超级电容器研究进展[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(9): 1-12.
- XIAO Mi, SU Yupeng, DU Boxue. Research progress of supercapacitors[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(9): 1-12.
- [20] 乔亮波, 张晓虎, 孙现众, 等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 98-106.
- QIAO Liangbo, ZHANG Xiaohu, SUN Xianzhong, et al. Advances in battery-supercapacitor hybrid energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 98-106.
- [21] 胡昆民. 基于超级电容矿用电动机混合储能系统的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- HU Kunmin. Research on hybrid energy storage system of mine electric locomotive based on supercapacitor[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.