

城市轨道交通同相储能供电系统的 节能运行优化策略^{*}

侯 峰¹ 王 帅² 孙忠锐²

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510010, 广州; 2. 西南交通大学电气工程学院, 611765, 成都)

摘 要 [目的] 针对广州地铁 18 号线采用的组合式同相供电装置,为了解决同相牵引供电系统中存在的再生制动能量利用率低的问题,需对同相储能供电系统的节能运行优化策略进行研究。[方法] 以牵引变电所的日电费成本最低为目标,平衡节点功率,以供电装置与储能装置运行特征为约束,建立了同相储能供电系统节能优化模型。以广州地铁 18 号线某牵引变电所负荷过程实测数据为依据,对城市轨道交通牵引负荷过程进行分析,利用 CPLEX 商业规划求解器对该模型求解,最终获得同相储能系统最优能量管理方案。[结果及结论] 超级电容接入组合式同相供电装置直流环节的储能供电系统,通过超级电容对牵引负荷的削峰填谷作用,能提高牵引供电系统再生制动能量利用率,减小城市轨道交通运营商的电费成本。试验结果表明,相比传统的同相供电系统,采用接入超级电容的同相储能供电系统可使得再生制动能量利用率达到 92.88%,使日电费成本降低 9.65%,节能效果显著。

关键词 城市轨道交通; 能量管理; 同相储能供电系统; 节能优化模型

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.06.054

Energy-saving Operation Optimization Strategy of Urban Rail Transit Co-phase Energy Storage Power Supply System

HOU Feng¹, WANG Shuai², SUN Zhongrui²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510010, Guangzhou, China; 2. Electrical Engineering College of Southwest Jiaotong University, 611765, Chengdu, China)

Abstract [Objective] As modular co-phase power supply devices are used in Guangzhou Metro Line 18, it is necessary to study the energy-saving operation optimization strategy of the co-phase energy storage power supply system in order to solve the problem of low utilization rate of regenerative braking energy in the co-phase traction power supply system. [Method]

With the goal of minimizing the daily electricity cost of traction substation to balance the node power, and constrained by operation characteristics of power supply devices and energy storage devices, an optimized energy-saving model of co-phase energy storage power supply system is established. Based on the measured load process data of a traction substation on Guangzhou Metro Line 18, the traction load process of urban rail transit is analyzed. CPLEX commercial planning solver is used to solve the above model and finally the optimal energy management scheme of the co-phase energy storage system is obtained.

[Result & Conclusion] The energy storage power supply system with the supercapacitor connected to DC link of the modular co-phase power supply device works as follows: with the peak cutting and valley filling effect of the supercapacitor on the traction load, the regenerative braking energy utilization rate of the traction power supply system can be increased, saving the electricity cost of urban rail transit operators consequently. The test results show that compared with the traditional co-phase power supply system, the co-phase energy storage power supply system with supercapacitor can increase the regenerative braking energy utilization rate to 92.88%, and reduce the daily electricity cost by 9.65%, showing remarkable energy saving effect. increase the regenerative braking energy utilization rate to 92.88%.

Key words urban rail transit; energy management; co-phase energy storage power supply system; optimized energy saving model

0 引言

目前,城市轨道交通的发展特点为运量大、速度快、距离长、密度高。传统的 DC 1 500 V 供电制式已无法满足城市轨道交通未来的发展要求。为了探索城市轨道交通牵引供电系统的新模式,我国部分线路尝试采用与干线铁路相同的 AC 25 kV 供

^{*} 国家重点研发计划项目虚拟同相柔性供电技术(2017YFB1200801-08)

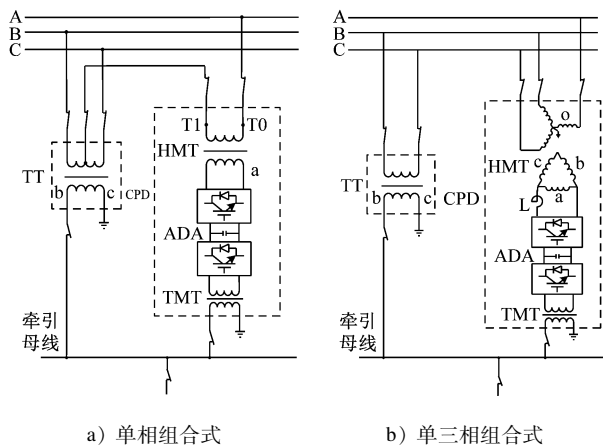
电制式。然而,在传统电气化铁路供电系统及技术中,普遍存在过分相问题,以及以负序为主的电能质量问题。对此,广州地铁18号线及22号线率先在城市轨道交通领域采用了同相供电技术。此外,列车在运行过程中具有电源与负荷的双重特性,列车频繁制动产生的再生制动能量未被充分利用,造成了能量的浪费,极大地增加了运营成本^[1]。

为了提高列车制动能量利用率,实现同相供电系统节能运行,本文针对同相储能供电系统,提出节能运行优化策略,建立节能运行优化模型,并以广州地铁18号线及22号线为例,对模型求解后的优化方案进行分析验证。

1 同相储能供电系统及其节能运行优化策略

1.1 组合式同相供电技术

组合式同相供电技术是新一代的同相供电技术,其将牵引变电所的两个主要供电设备——变压器和补偿装置分为相对独立的两个部分,而二者在功能上又能相互配合。组合式同相供电技术根据高压匹配变压器接线方式不同,分为单相组合式同相供电技术和单三相组合式同相供电技术。组合式同相供电技术的原理图如图1所示。两种组合式同相供电技术最主要的区别在于TT(牵引变压器)和HMT(高压匹配变压器)的连接方式。在单三相组合式同相供电系统中,HMT为YNd11(变压器绕



注:T为斯科特接线变压器高压侧端子;L为电感;a、b、c为变压器二次侧相位;A、B、C为高压侧进线相位;ADA为交直交变流器;CPD为同相供电装置。

图1 组合式同相供电技术原理图

Fig. 1 Schematic diagram of combined co-phase power supply technology

组带中线星三角11点)接线,其与单相TT构成类似于YNvd接线的平衡变压器。

不过该方案构成的平衡变压器结构比YNvd平衡变压器更加简单,并且其容量利用率更高。此外,由于HMT的存在,CPD中价格昂贵的ADA的容量及其所占相对体积质量有了最大程度的减小,这使CPD的初期一次性投资大幅减少,使牵引变电所中供电设备的利用率提高。考虑到18号、22号线全线基本在广州市及附近区域,用地情况紧张,推荐采用单相组合式同相供电。

1.2 同相储能供电系统

同相供电系统中同相补偿装置的直流环节为储能装置的接入提供了便利的接口,避免了设置额外的交直流变流器^[2]。本文基于单相组合式同相供电技术,提出了一种同相储能供电系统。同相储能供电系统拓扑结构如图2所示。该系统主要包括TT、超级电容以及由HMT、2个ADA和TMT(牵引匹配变压器)组成的CPD。牵引变压器TT采用单相变压器,可以取消牵引变压器处的电分相缓解,实现牵引变电所供电范围内同相供电。

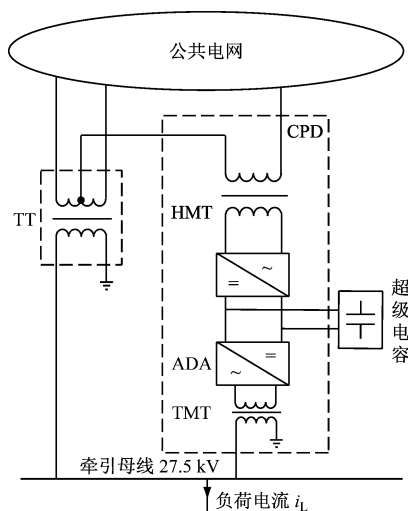


图2 同相储能供电系统拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of co-phase energy storage power supply system

在储能装置中,超级电容具有功率密度高、循环寿命长和维护成本低的特点,在城市轨道交通领域被广泛应用,以回收利用再生制动能量和稳定电压^[3]。故本研究采用超级电容作为储能装置。

牵引变电所提供能量的损耗主要包括牵引网损耗、制动损耗、牵引能耗以及再生制动能量。其中:牵引网损耗是电能从牵引网传输时所损耗的部

分能量;制动损耗是列车在制动过程中所产生的热能损失;牵引能耗是用于列车移动并克服摩擦力和重力所消耗的能量;再生制动能量是指在列车制动过程中,部分动能转换成电能并向其他在线列车供给能量,以实现能量的重复利用。但再生制动能量的利用情况主要取决于在线列车的牵引/制动状态^[4]。

1.3 节能优化策略

基于同相储能供电系统的能量损耗特定,本文提出其节能优化策略为:以牵引变电所的日电费成本最低为目标,平衡节点功率,以供电装置与储能装置运行特征为约束,建立了同相储能供电系统节能优化模型;并以广州地铁 18 号线某牵引变电所负荷过程实测数据为依据,对城市轨道交通牵引负荷过程进行分析;利用 CPLEX 商业规划求解器对该模型求解,最终获得同相储能系统节能优化模型。

2 节能优化模型

2.1 目标函数

本文旨在最小化同相储能供电系统中牵引变电所日电费成本 f ,其主要包含电度电费和需量电费。目标函数为:

$$\min f = \min \left[\sum_{t=1}^T (\rho_{\text{grid}} P_{t,\text{grid}} \Delta t) + \rho_{\text{dem}} \max(P_{t,\text{dem}}) \right] \quad (1)$$

$$P_{t,\text{dem}} = \sum_{t=1}^{t+N-1} P_{t,\text{grid}} / N \quad \forall t = 1, 2, \dots, t_T - N - 1 \quad (2)$$

式中:

ρ_{grid} ——电度电费价格;

ρ_{dem} ——需量电费价格;

$P_{t,\text{grid}}$ —— t 时刻同相储能供电系统从电网获取的功率;

$P_{t,\text{dem}}$ —— t 时刻该牵引变电所的需量功率;

Δt ——单位时间间隔;

N ——需量计算所用时间跨度内的数据个数,由于需量计算所用时间跨度为 15 min,且优化时间尺度为 1 min,故 $N=15$;

t_T ——总时间间隔数,单位 h。

2.2 约束条件

2.2.1 功率平衡约束

根据同相储能供电系统中的潮流分布规律,可得系统各节点处的功率平衡方程约束。外部电网

PCC 节点处功率平衡约束为:

$$P_{t,\text{grid}} = P_{t,\text{TT}} + P_{t,\text{CPD}} \quad (3)$$

式中:

$P_{t,\text{TT}}$ —— t 时刻 TT 从电网获取的功率;

$P_{t,\text{CPD}}$ —— t 时刻 CPD 从电网获取的功率。

CPD 直流环节处功率平衡约束为:

$$P_{t,\text{ADA1}} + P_{t,u,\text{dis}} = P_{t,\text{ADA2}} + P_{t,u,\text{cha}} \quad (4)$$

式中:

$P_{t,\text{ADA1}}$ —— t 时刻从交直交变流器 ADA1 流向牵引母线的功率;

$P_{t,\text{ADA2}}$ —— t 时刻从交直交变流器 ADA2 流向牵引母线的功率;

$P_{t,u,\text{cha}}$ —— t 时刻超级电容的充电功率;

$P_{t,u,\text{dis}}$ —— t 时刻超级电容的放电功率。

牵引母线处功率平衡约束为:

$$P_{t,\text{ADA2}} + P_{t,\text{TT}} = P_{t,\text{LOAD}} - P_{t,\text{RB}} \quad (5)$$

式中:

$P_{t,\text{LOAD}}$ —— t 时刻牵引负荷的牵引功率;

$P_{t,\text{RB}}$ —— t 时刻牵引负荷的制动功率。

2.2.2 同相补偿装置约束

同相补偿装置约束为:

$$(P_{t,\text{ADA1}})^2 + (Q_{t,\text{ADA1}})^2 \leq (S_{t,\text{ADA1}})^2 \quad (6)$$

$$(P_{t,\text{ADA2}})^2 + (Q_{t,\text{ADA2}})^2 \leq (S_{t,\text{ADA2}})^2 \quad (7)$$

式中:

$Q_{t,\text{ADA1}}, Q_{t,\text{ADA2}}$ —— t 时刻由 ADA1 及 ADA2 流向牵引母线的无功功率;

$S_{t,\text{ADA1}}, S_{t,\text{ADA2}}$ —— t 时刻由 ADA1 及 ADA2 流向牵引母线的视在功率。

2.2.3 超级电容约束

考虑超级电容自放电及充放电效率等因素, $t+1$ 时刻储能容量 E_{t+1} 同 t 时刻充放电功率及储能容量 E_t 的关系为^[5]:

$$E_{t+1} = (1 - \varepsilon) E_t + (\eta_{u,\text{ch}} P_{t,u,\text{ch}} - P_{t,u,\text{dis}} / \eta_{u,\text{dis}}) \Delta t \quad (8)$$

式中:

ε ——超级电容自放电率;

$\eta_{u,\text{ch}}$ ——超级电容的充电效率;

$\eta_{u,\text{dis}}$ ——超级电容的放电效率。

超级电容储能容量和充/放电功率的限值约束为^[6-7]:

$$E_{\min} \leq E_t \leq E_{\max} \quad (9)$$

$$0 \leq P_{t,u,\text{dis}} \leq P_{u,\text{max}}, 0 \leq P_{t,u,\text{cha}} \leq P_{u,\text{max}} \quad (10)$$

式中:

ε ——超级电容自放电率;

$\eta_{u, ch}$ ——超级电容的充电效率;
 $\eta_{u, dis}$ ——超级电容的放电效率;
 E_{min} ——超级电容容量的上限;
 E_{max} ——超级电容容量的下限;
 $P_{u, max}$ ——超级电容的功率限值。

2.3 求解方法

由于同相储能供电系统节能优化模型中时间间隔较多,且含有大量线性化约束^[8],因此,该模型可以看作是 MILP(混合整数线性规划)问题,并适合采用 CPLEX 商业规划求解器进行求解^[9-10],进而得到同相储能供电系统的能量调度方案。同相储能供电系统节能优化模型求解框图如图 3 所示。

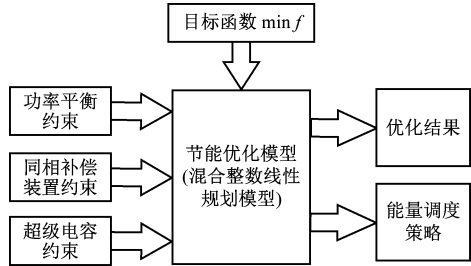


图 3 同相储能供电系统节能优化模型求解框图

Fig. 3 Solution diagram of energy-saving optimization model for co-phase energy storage power supply system

3 节能优化模型的应用

3.1 项目概况

广州地铁 18 号线及 22 号线的部分线路共线运行。这两条线是广州市最新开通运营的地铁线路,也是我国首次采用 160 km/h 设计速度的全地下市域快线。广州地铁 18 号线及 22 号线均采用同相供电技术,共设有 4 座同相牵引变电所,并采用组合式同相供电技术以取消变电所处电分相。广州地铁 18 号线及 22 号线的供电系统结构图如图 4 所示。

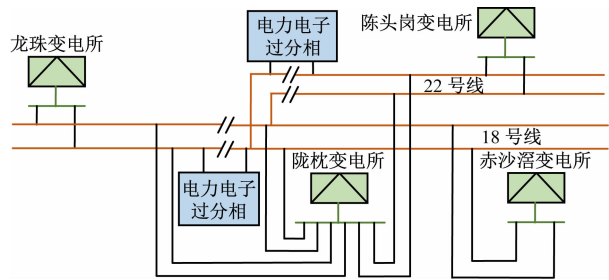


图 4 广州地铁 18 号线及 22 号线的供电系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the power supply system structure for Guangzhou Metro Line 18 and Line 22

基于其线路的某牵引变电所(以下简称“案例变电所”)牵引负荷实测数据,对同相储能供电系统

方案节能优化模型求解后所得方案(以下简称“节能优化方案”)的节能运行效果进行验证。其中,同相储能供电系统的基本参数如表 1 所示。

表 1 同相储能供电系统基本参数

Tab. 1 Basic parameters of co-phase energy storage power supply system

部位	参数	取值
公共电网	额定线电压 U_s/kV	220
	单相变压器变比	4
TT	输出电压/kV	27.5
	输出电压/kV	27.5
CPD	ADA1 容量/MW	10
	ADA2 容量/MW	10
超级电容	SOC 范围/%	0 ~ 100
	额定容量/(MWh)	0.25
	额定功率/MW	10
	充、放电的效率/%	95

3.2 节能优化方案

案例变电所的牵引负荷分布如图 5 所示。

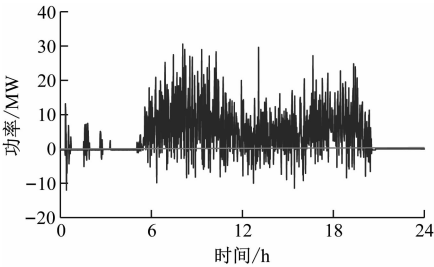


图 5 案例变电所的牵引负荷功率

Fig. 5 Traction load power of the traction substation in the case study

为了分析同相储能供电系统中超级电容对再生制动能量利用率及牵引供电系统日电费成本的影响,本文基于案例变电所的牵引负荷数据,按是否含超级电容的情况,分别提出节能优化方案:方案 A,不含超级电容的同相供电系统;方案 B,含超级电容的同相储能供电系统。

按照广州地铁的电价参数(见表 2),计算可得方案 A 和方案 B 的优化结果对比,如表 3 所示,方案 A 和方案 B 的牵引负荷对比图如图 6 所示。

表 2 广州地铁的电价参数

Tab. 2 Electricity price parameters of Guangzhou Metro

时段	时间段	电度电费/(元/(kWh))	需量电费/(元/kW)/月
峰时	06:00—08:00, 18:00—20:00	1.252	42
平时	08:00—18:00, 20:00—24:00	0.782	42
谷时	00:00—06:00	0.370	42

表 3 方案 A 和方案 B 的优化结果对比

Tab.3 Comparison of optimized results in Plan A and Plan B

方案	电度电费/元	需量电费/元	总电费/元	最大需量值/MW	再生制动能量/(MWh)
方案 A	80 884.21	15 965.96	96 850.17	11.4	10.36
方案 B	73 360.99	14 139.37	87 500.36	10.1	0.74

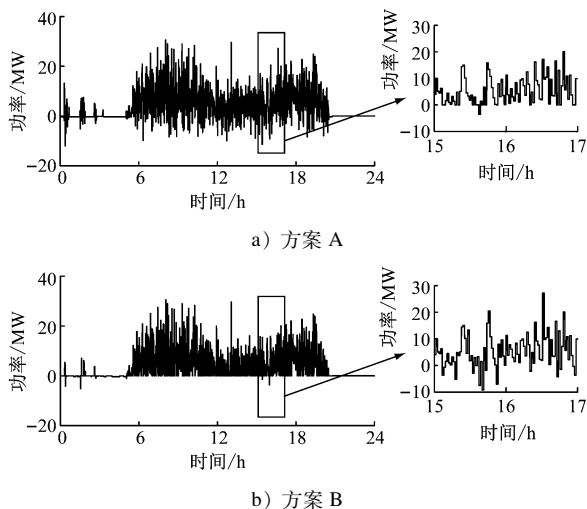


图 6 方案 A 和方案 B 的牵引负荷功率

Fig.6 Traction load rate of Plan A and Plan B

由表 3 可见,与方案 A 相比,方案 B 的最大需量值减少了 1.3 MW,相应需量电费节省了 11.44%,在“反送不计”的计费条件下的总电费节省了 9.65%,再生制动能量利用率提高了 92.88%,电度电费减少了 9.30%。

结合图 6 可知,通过对同相储能供电系统的协调控制,超级电容凭借其快速充放电的特性,能有效实现对牵引供电系统负荷削峰填谷作用,能显著提高制动再生能量利用率,降低牵引供电系统的能耗,节约成本。

4 结语

为了解决牵引供电系统中普遍存在的再生制动能量利用率低的问题,本文建立了一个同相储能供电系统节能优化的混合整数线性规划模型,并利用 CPLEX 求解器对该模型进行求解,进而得到节能优化方案。本文基于实际数据的节能优化结果对比发现,利用同相补偿装置的中间直流环节接入超级电容,可以实现对牵引负荷的削峰填谷作用。超级电容的接入可以将系统再生制动能量利用率提高至 92.88%;在“反送不计”的计费模式下,可降低系统总电费 9.65%。

超级电容与同相供电技术的结合可以极大地

提高系统再生制动能量的利用率,降低系统电费成本。下一步将着重研究计及新能源接入的同相储能供电系统的节能优化策略,以及全寿命周期内的系统最优配置问题。

参考文献

- [1] 杨中平,林飞. 储能技术在地面式再生制动能量吸收和利用装置中的应用[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(6): 1.
YANG Zhongping, LIN Fei. Application of energy storage technology in stationary regenerative braking energy absorption and utilization devices [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(6): 1.
- [2] 李群湛. 论新一代牵引供电系统及其关键技术[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(4): 559.
LI Qunzhan. On new generation traction power supply system and its key technologies for electrification railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(4): 559.
- [3] 邓道柏,黄家尧,陈挺,等. 城市轨道交通超级电容技术[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(6): 24.
DENG Yibo, HUANG Jiayao, CHEN Ting, et al. Supercapacitor technology for urban rail transit systems [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2021, 34(6): 24.
- [4] 蒲一超. 城市轨道交通列车牵引节能策略优化[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(11): 63.
PU Yichao. Optimum strategy of traction energy consumption for urban rail transit train [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(11): 63.
- [5] 喻奇. 新型轨道交通再生制动能量吸收装置研究[J]. 城市轨道交通研究, 2017, 20(7): 14.
YU Qi. Research on the regenerative braking energy absorption device for new urban rail transit [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(7): 14.
- [6] 郭文璟. 城市轨道交通源储荷系统的储能配置与能量管理研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
GUO Wenjing. Research on energy storage allocation and energy management of source-storage-charge system of urban rail transit [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2021.
- [7] 诸斐琴. 城市轨道交通地面式超级电容储能系统自适应协调控制与容量配置综合优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
ZHU Feiqin. Adaptive cooperative control and capacity configuration optimization of supercapacitor energy storage systems in urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

(下转第 309 页)

- (3): 392.
- [5] 佚名. 神舟路站因暴雨水浸广州地铁21号线快车停运[EB/OL]. (2021-07-31) [2021-10-15]. <https://new.qq.com/omn/20210731/20210731A019GV00.html>.
Anon. The express train of Guangzhou Metro Line 21 was suspended at Shenzhou Road Station due to rainstorm [EB/OL]. (2021-07-31) [2021-10-15]. <https://new.qq.com/omn/20210731/20210731A019GV00.html>.
- [6] 佚名. 公交应急反应速度快[J]. 城市公共交通, 2020(2): 43.
Anon. Bus emergency response speed is fast [J]. Urban Public Transport, 2020(2): 43.
- [7] 娄厦, 刘曙光, 钟桂辉, 等. 上海地下交通设施防洪调查[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 611.
LOU Sha, LIU Shuguang, ZHONG Guihui, et al. Investigation on flood control of traffic facilities in underground spaces in Shanghai [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 611.
- [8] 姚学祥, 李青春, 韩淑云. 北京城市气象灾害与应急管理[J]. 城市与减灾, 2015(5): 13.
YAO Xuexiang, LI Qingchun, HAN Shuyun. Weather disaster in Beijing region and its emergency response management [J]. City and Disaster Reduction, 2015(5): 13.
- [9] 刘骥鹏. 城市轨道交通运营安全设备因素的风险评价研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
LIU Jipeng. Study on risk assessment of safety equipment factors in urban rail transit operation [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [10] 苏漠, 廉东本. 应急救援指挥系统的智能化预案模型[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(11): 11.
SU Mo, LIAN Dongben. Intelligent plan model in the system of emergency command [J]. Computer Systems & Applications, 2012, 21(11): 11.
- 收稿日期: 2021-11-16 修回日期: 2021-12-24 出版日期: 2024-06-10
Received: 2021-11-16 Revised: 2021-12-24 Published: 2024-06-10
· 作者: 高璽, 高级工程师, 875178098@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
-
- (上接第300页)
- [8] 李旭阳. 城市轨道交通超级电容储能系统在线优化控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
LI Xuyang. Research on on-line optimal control strategy of urban rail transit super-capacitor energy storage system [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [9] 张瞄, 张朝阳, 胡云卿, 等. 基于混合整数线性规划的城市轨道交通列车一体化节能运行曲线优化研究[J]. 控制与信息技术, 2021(6): 43.
ZHANG Miao, ZHANG Chaoyang, HU Yunqing, et al. Integrated energy efficient train trajectory planning optimization for urban rail transit lines based on MILP [J]. Control and Information Technology, 2021(6): 43.
- [10] 杨少兵, 张征, 叶晶晶, 等. 考虑停站延误随机性的地铁供电节能优化策略[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(7): 94.
YANG Shaobing, ZHANG Zheng, YE Jingjing, et al. An energy saving optimization strategy for metro power supply considering randomness of stop delay [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(7): 94.
- 收稿日期: 2022-02-19 修回日期: 2022-02-19 出版日期: 2024-06-10
Received: 2022-02-19 Revised: 2022-02-19 Published: 2024-06-10
· 通信作者: 侯峰, 高级工程师, houfeng6686@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license
-
- (上接第304页)
- [6] 黄育良. 地铁轨道交通十号线屏蔽门轨道间隙光幕防护应用[J]. 轨道交通, 2010(12): 82.
HUANG Yuliang. Application of light curtain protection in the gap between platform screen door and vehicle for Shanghai metro line 10 [J]. Rail Transit, 2010(12): 82.
- [7] 王松林. 站台门间隙探测装置和列车运行互锁的分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(3): 83.
WANG Songlin. Analysis of interlocking system between platform screen door clearance detection device and train operation [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2020, 17(3): 83.
- 收稿日期: 2022-03-04 修回日期: 2022-04-11 出版日期: 2024-06-10
Received: 2022-03-04 Revised: 2022-04-11 Published: 2024-06-10
· 作者: 李红明, 工程师, 344432721@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license