

文章编号:1671-251X(2021)02-0026-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17690

电缆回收方式对综采工作面远距离供电影响分析

阎东慧¹, 范生军², 侯刚³, 杨斐文³, 荣相⁴, 王越⁴, 欧阳敏³

- (1.大同煤矿集团有限责任公司,山西 大同 037003;
- 2.陕煤集团 神木张家峁矿业有限公司,陕西 榆林 719313;
- 3.中煤科工开采研究院有限公司,北京 100013;
- 4.天地(常州)自动化股份有限公司,江苏 常州 213015)



摘要:电缆执行回收操作会造成自身结构形变,因回收方式不同,呈现出卷、盘、弯曲等不同的形变状态,造成电缆分布参数存在差异,从而对远距离供电中干线压损产生影响。现有电缆分布参数的解析计算存在实现流程复杂、分布参数的提取精度受限且不适用电缆回收过程中的大形变问题。针对上述问题,结合单轨吊、电缆车的工作原理,提出了利用 ANSYS 分析电缆在回收过程中分布参数变化的方法。分析了电缆车回收方式和单轨吊回收方式对电缆分布参数和散热的影响;利用 ETAP 仿真分析了电缆回收方式对综采工作面远距离供电的影响。分析结果表明:电缆执行回收操作造成卷、盘、弯曲变形导致电容值、电导值和电阻值小幅变化,电感值大幅减小;采用单轨吊回收方式时,电缆变形程度更大,单位长度电感值更小,降幅高达 29%;对比于电缆车回收方式,单轨吊回收方式在自动化程度、电缆散热及干线压损方面更具优势;电缆分布参数的变化导致干线压损有所改变,随着电缆回收距离的增加,远距离供电系统各干线总压损整体呈下降趋势,局部呈上升趋势,进而影响最远供电距离和设备带载能力。

关键词:综采工作面;远距离供电;电缆回收;电缆变形;电缆分布参数;直线电缆;单轨吊回收方式;电缆车回收方式;干线总压损

中图分类号:TD60 文献标志码:A

Analysis of the influence of cable recovery method on long-distance power supply of fully mechanized working face

YAN Donghui¹, FAN Shengjun², HOU Gang³, YANG Feiwen³,
RONG Xiang⁴, WANG Yue⁴, OUYANG Min³

- (1.Datong Coal Mine Group Co., Ltd., Datong 037003, China;
2. Shenmu Zhangjiamao Mining Co., Ltd., Shaanxi Coal Group, Yulin 719313, China;
3. CCTEG Coal Mining Research Institute, Beijing 100013, China;
4. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: The cable recovery operation will cause the cable structural deformation. Due to different recovery methods, there are different deformation states such as coil, reel and bending. Theses states cause differences in cable distribution parameters, which have influences on the main line voltage loss in long-distance power supply. The problems of existing analytical calculation of cable distribution parameters are complicated implementation process, limited extraction accuracy of distribution parameters and not being applicable to large deformation in the cable recovery process. In order to solve the above

收稿日期:2020-12-04;**修回日期:**2021-01-28;**责任编辑:**张强。
基金项目:天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项资助项目(2020-TD-MS008)。
作者简介:阎东慧(1984—),男,山西大同人,工程师,硕士,主要从事矿山机电设备的研究与应用工作,E-mail:y1984x@163.com。通信作者:王越(1994—),男,山西阳泉人,助理工程师,硕士,主要从事矿用电气产品研发工作,E-mail:m18635372893@163.com。
引用格式:阎东慧,范生军,侯刚,等. 电缆回收方式对综采工作面远距离供电影响分析[J]. 工矿自动化,2021,47(2):26-31.
YAN Donghui,FAN Shengjun,HOU Gang,et al. Analysis of the influence of cable recovery method on long-distance power supply of fully mechanized working face[J]. Industry and Mine Automation,2021,47(2):26-31.

problems, this paper proposes a method to analyze the changes of cable distribution parameters in the process of cable recovery by using ANSYS and the working principle of monorail crane and cable car. The influence of cable car recovery method and monorail crane recovery method on cable distribution parameters and heat dissipation is analyzed. The influence of the cable recovery method on the long-distance power supply of the fully mechanized working face is analyzed by using ETAP. The analysis results show that the coil, reel, and bending deformation of the cable caused by the recovery operation will cause small changes in the capacitance value, the conductance value and the resistance value, and cause significant reduction of the inductance value. When the monorail recovery method is adopted, the cable deformation is greater and the inductance value per unit length is smaller with a drop of up to 29%. Compared with the cable car recovery method, the monorail crane recovery method has more advantages in terms of automation, cable heat dissipation and main line voltage loss. The changes in cable distribution parameters lead to changes in main line voltage loss. With the increase in cable recovery distance, the total voltage loss of each main line of the long-distance power supply system shows a decreasing trend as a whole. There is an increase in some parts of the main line, which influences the longest power supply distance and equipment carrying capacity.

Key words: fully mechanized working face; long-distance power supply; cable recovery; cable deformation; cable distribution parameters; linear cable; monorail crane recovery method; cable car recovery method; main line total voltage loss

0 引言

随着煤矿开采技术的不断发展,对综采装备在高效生产、安全可靠、智能控制等方面提出了更高的要求^[1-2],传统近距离供电方式的弊端日益明显^[3]。近距离供电采用设备列车安置在运输巷道中,压缩了巷道空间,不便于通风和设备维护,易产生底鼓现象,导致巷道变形,存在不安全因素。因此,迫切需要对煤矿综采工作面采用远距离供电技术^[4-6]。相应地,需要采用自移电缆列车、单轨电缆回收吊、伸缩式电缆卷盘车等方式解决远距离供电时的电缆回收问题。但远距离供电中干线压损问题较突出,制约了最远供电距离和设备带载能力。因此,探究电缆回收方式及回收距离对远距离供电的影响,降低干线压损,显得尤为重要。文献[7-8]分别针对梭车和采煤机的工作特点设计了电缆回收装置,并开发出了配套电控系统。文献[9]提出了一种新型管线拖挂单轨吊设备。文献[10]设计出了一种以旋转及导向机构为核心的电缆回收机构。以上研究主要侧重电缆回收装置的设计与实现,而对电缆回收方式对综采工作面远距离供电的影响研究较少。电缆执行回收操作会造成自身结构形变,因不同的回收方式,呈现出卷、盘、弯曲等不同的形变状态,从而造成电缆分布参数存在差异,进而对远距离供电中干线压损产生不同影响。文献[11]基于终端开路的传输线测试方式对电缆分布参数的解析模型进行求解,但实现流程复杂,制约了分布参数的提取精度和适

用范围。文献[12]针对直线电缆利用 ANSYS 软件建立了几种常见电缆的二维布局模型,对电缆分布参数进行了仿真计算,丰富了电缆电气特性研究手段,但所采用的二维分析方法不适合对电缆回收过程中的大形变进行分析。

针对以上问题,本文结合有限元仿真软件与电力系统仿真软件的专业优势,根据单轨吊、电缆车的工作原理,利用 ANSYS 分析电缆在回收过程中分布参数的变化,直观反映电磁热参量的空间分布情况;将所求分布参数代入 ETAP (Electrical Transient Analysis Program, 电力瞬态分析软件),分析电缆回收方式对综采工作面远距离供电的影响。

1 回收方式对电缆分布参数的影响

1.1 直线电缆的分布参数

电缆分布参数的解析计算方法求解精度和适用范围受限,对电缆执行回收操作造成盘、卷、弯曲变形时的分布参数更无法计算。利用 ANSYS 可以实现电缆快速建模、分布参数提取、电磁热参量分布的全面仿真分析^[13-14]。

本文以山西同煤集团某矿某综采工作面远距离供电系统为研究对象,对比变形电缆与直线电缆分布参数的变化,揭示其变化规律。供电系统干线采用 MYPT 1.9/3.3 3×185 型矿用电缆,电缆标称尺寸参数见表 1。

忽略电缆的地线芯、控制线芯等结构,等效为动力线芯等呈三相品字形布局。利用 ANSYS 对电缆

的频域传输特性进行电磁场分析,仿真得到直线 MYPT 1.9/3.3 3×185 型矿用电缆的分布参数,见表 2。

表 1 MYPT 1.9/3.3 3×185 型电缆的标称尺寸参数

Table 1 Nominal size parameters of MYPT 1.9/3.3 3×185 cable		
芯数×标称截面/mm ²	标称厚度 /mm	
动力线芯	动力线芯绝缘	护套
3×185	3.2	6

表 2 直线电缆的分布参数

Table 2 Distribution parameters of linear cables				
线芯	电容 C/ (F·m ⁻¹)	电导 G/ (mS·m ⁻¹)	电阻 R/ (Ω·m ⁻¹)	电感 L/ (H·m ⁻¹)
1	1.021×10 ⁻¹⁰	3.834×10 ⁻¹²	7.087×10 ⁻⁵	1.279×10 ⁻⁶
2	1.020×10 ⁻¹⁰	3.836×10 ⁻¹²	7.146×10 ⁻⁵	1.279×10 ⁻⁶
3	1.020×10 ⁻¹⁰	3.841×10 ⁻¹²	7.140×10 ⁻⁵	1.278×10 ⁻⁶

1.2 单轨吊回收方式对电缆分布参数的影响

单轨吊具有较高的机械化和自动控制水平,由乳化液泵站提供动力源,通过步进推移装置实现电缆在开采过程中的高效运输。随着工作面的推进,单轨吊相应采用伸展和收缩工作模式。在伸展模式下,电缆处于直线状态,分布参数与表 2 一致。因此,本文重点分析收缩模式对电缆分布参数、磁热特性的影响。

根据单轨吊的工作原理,当电缆处于收缩状态时,形成了背靠背对称的弯曲变形,结合表 1 所示的电缆截面几何尺寸参数,取单变形结构建立电缆的三维仿真模型,如图 1 所示。

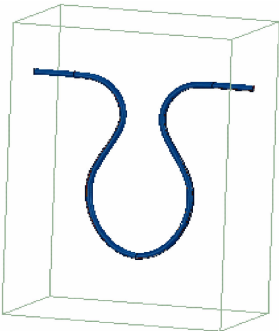


图 1 电缆处于收缩状态时的三维仿真模型

Fig. 1 Three-dimensional simulation model when the cable is in a contracted state

设置源-端激励信号,施加 350 A 电流载荷,选择低频准静态磁场,设置奇对称边界条件以提高计算效率,利用 ANSYS 得到电缆收缩状态时的电磁场仿真结果,如图 2 所示。据此可直观反映出电缆弯曲变形时的空间电磁场分布情况。当电流载荷为 350 A 时,电流密度的最大值为 1.5×10⁶ A/m²,磁

感应强度的最大值为 6.3×10³ A/m,磁场强度的最大值为 7.9×10⁻³ T。在趋肤效应的作用下,电磁场表征参量集中分布在动力线导体的表面,且由动力线芯及外逐渐减小,直至边界处磁感应强度仅为 7.9×10⁻² A/m,磁场强度仅为 9.9×10⁻⁸ T。

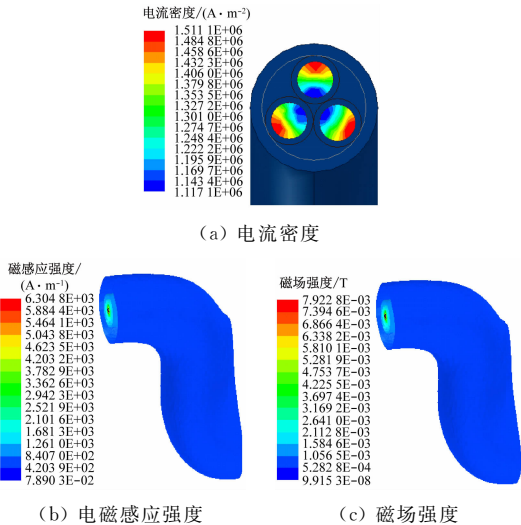


图 2 电缆收缩状态时的电磁场仿真结果

Fig. 2 Electromagnetic field simulation results when the cable is in the contracted state

由图 2 可知,电缆弯曲变形时,电磁场分布会发生变化,随之电容值、电导值、电阻值及电感值也会改变。电缆处于收缩状态时的分布参数见表 3。

表 3 电缆处于收缩状态时的分布参数

Table 3 Distribution parameters when the cable is in a contracted state				
线芯	电容 C/ (F·m ⁻¹)	电导 G/ (mS·m ⁻¹)	电阻 R/ (Ω·m ⁻¹)	电感 L/ (H·m ⁻¹)
1	1.037×10 ⁻¹⁰	3.902×10 ⁻¹²	7.172×10 ⁻⁵	0.906×10 ⁻⁶
2	1.036×10 ⁻¹⁰	3.898×10 ⁻¹²	7.181×10 ⁻⁵	0.906×10 ⁻⁶
3	1.029×10 ⁻¹⁰	3.872×10 ⁻¹²	7.148×10 ⁻⁵	0.901×10 ⁻⁶

由表 3 可知,与表 2 对比,电容值、电导值和电阻值相应增大,分别增大了 1.4 %,1.41 %,0.60 %,但基本保持同一数量级。电感值减小了 29.2%,影响最为显著。

电容值和电感值的三相不均值性进一步扩大,该现象与电缆空间结构的不对称性有关。线芯 1 的电容值和电感值大于线芯 2 和线芯 3。这是由于线芯 1 处于最外侧,而线芯 2 和线芯 3 则位于内侧,弯曲形变减小了耦合距离,进而增大了分布电容;增大了电流回路,进而增大了分布电感。

1.3 电缆车回收方式对电缆分布参数的影响

将 4 节设备列车作为一个平台,在该平台的 4 个角落处焊接钢柱,将电缆盘在 4 个钢柱内,可改装为简易的电缆车回收装置。根据线缆的截面规格

大小,电缆盘绕时采用8字形或0形方式人工盘绕。MYPT 1.9/3.3 3×185 型矿用电缆适用0形卷盘方式。与单轨吊设置相同电缆长度,取最大变形处构建电缆处于卷盘状态时的三维仿真模型。

利用ANSYS进行仿真分析,设置各激励条件与单轨吊一致。电缆处于卷盘状态时的电磁场仿真结果如图3所示。

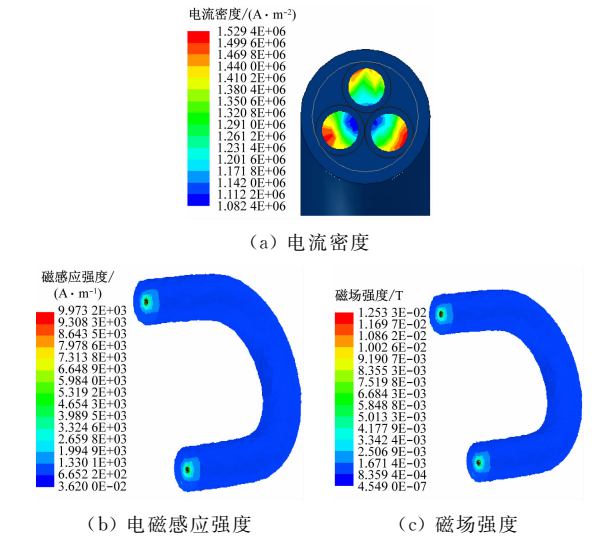


图3 电缆处于卷盘状态时的电磁场仿真结果
Fig. 3 Electromagnetic field simulation results when the cable is in the reel state

从图2、图3可看出,2种回收状态下,电磁场表征参量的分布规律相同,但在数值上存在差异。

利用ANSYS得到电缆处于卷盘状态时的分布参数,见表4。

表4 电缆处于卷盘状态时的分布参数
Table 4 Distribution parameters when the cable is in the reel state

线芯	电容 C/ (F · m ⁻¹)	电导 G/ (mS · m ⁻¹)	电阻 R/ (Ω · m ⁻¹)	电感 L/ (H · m ⁻¹)
1	1.027×10 ⁻¹⁰	3.862×10 ⁻¹²	7.270×10 ⁻⁵	1.044×10 ⁻⁶
2	1.017×10 ⁻¹⁰	3.825×10 ⁻¹²	7.156×10 ⁻⁵	1.030×10 ⁻⁶
3	1.018×10 ⁻¹⁰	3.828×10 ⁻¹²	7.132×10 ⁻⁵	1.029×10 ⁻⁶

对比于表3,电容值减小了1.3%,电导值减小了1.6%,电阻值减小了0.1%,电感值减小了14.3%。对比于表2,电容值增加了0.1%,电导值减小了0.2%,电阻值增加了0.9%,电感值减小了19.2%。

2 2回收方式下电缆的散热分析

在电磁仿真的基础上,将软件计算出的各动力线芯损耗值导入至热仿真软件,并进行热流操作设置^[15],建立电缆6层叠加的简化模型,电缆切面的温度云图如图4所示。

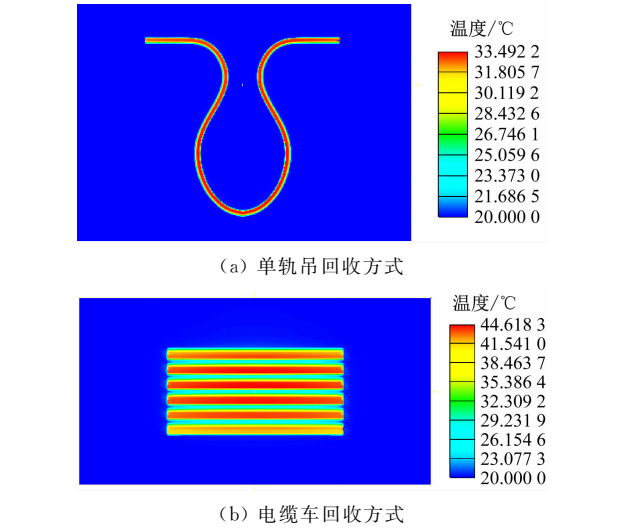


图4 电缆切面的温度云图
Fig. 4 Temperature cloud diagram of cable section

从图4可看出,自然冷却方式下,由于多层螺旋卷盘造成热聚集,采用电缆车回收方式时的电缆温度高于采用单轨吊回收方式时的电缆温度,两者相差11℃,不利于电缆的快速散热。同时,考虑到实际叠层数和盘卷长度更大,电缆散热效果更差。

3 回收方式对综采工作面远距离供电的影响

上述研究表明:电缆执行回收操作造成盘、卷、弯曲变形导致电容值、电导值和电阻值小幅变化,电感值大幅减小。采用单轨吊回收方式时,电缆变形程度更大,单位长度电感值更小,降幅高达29%。电缆分布参数的变化导致干线压损有所改变,进而影响最远供电距离和设备带载能力。

根据同煤集团某矿某综采工作面供电系统的设计要求,将3台3150 kVA/10 kV/3.3 kV动力负荷中心从工作面设备列车处改装到工作面胶带运料斜巷处,实现远距离供电。参考该供电系统的设计要求,利用ETAP建立供电系统模型进行潮流计算仿真研究^[16-17]。其中,采煤机供电网络模型如图5所示。模型设置电网所传送的电压为10 kV,经移动变电站输出3.45 kV电压向采煤机供电。

分别将采用单轨吊、电缆车回收方式时的分布参数单独导入仿真模型,对比电缆回收方式对压损指标参量的影响。设置电缆长度均为500 m,得到不同回收方式下的干线压损,见表5。

表5 不同回收方式下的干线压损
Table 5 Main line voltage loss under different recovery methods

回收方式	干线压损/%
电缆车	1.82
单轨吊	1.67

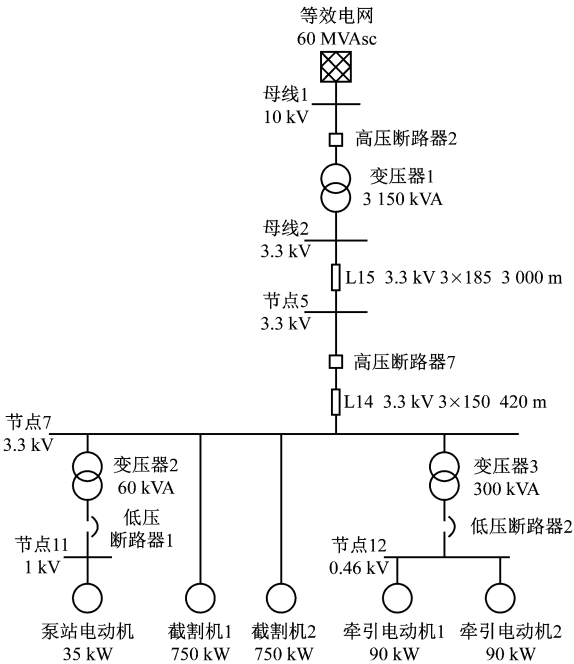


图 5 采煤机供电网络模型

Fig. 5 Shearer power supply network model

由表 5 可知,采用单轨吊回收方式时的干线压损指标优于电缆车回收方式。单轨吊回收方式在自动化程度、电缆散热及干线压损方面更具优势。

煤矿实际生产过程中,电缆的最大回收距离有限,且有单轨吊和电缆车 2 种回收方式并用的情况。因此,供电干路采用 3 根电缆串联来模拟直线电缆和 2 种回收电缆的物理连接。探讨超远供电条件,设置 3 段电缆的总长度为 3 000 m,2 种方式的回收距离以 800 m 为限,电缆回收距离与采煤机供电干线总压损如图 6 所示。

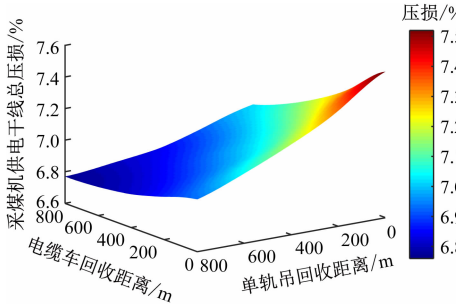


图 6 电缆回收距离与采煤机供电干线总压损关系

Fig. 6 Relation between cable recovery distance and total voltage loss of main power line of shearer

由图 6 可知,在电缆分布参数、电缆长度及采煤机电气参数的耦合作用下,当供电距离一定且 2 种回收方式并用时,电缆回收距离与供电干线总压损没有明确的正负相关及线性关系。

对于破碎机、转载机及刮板输送机供电干线,总压损的变化趋势一致,如图 7、图 8 所示。随着电缆回收距离的增加,远距离供电系统各干线总压损整体呈下降趋势,局部呈上升趋势。

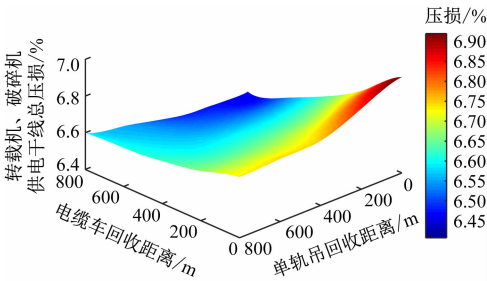


图 7 电缆回收距离与转载机、破碎机供电干线总压损关系
Fig. 7 Relation between cable recovery distance and total voltage loss of main power line of reversed loader and crusher

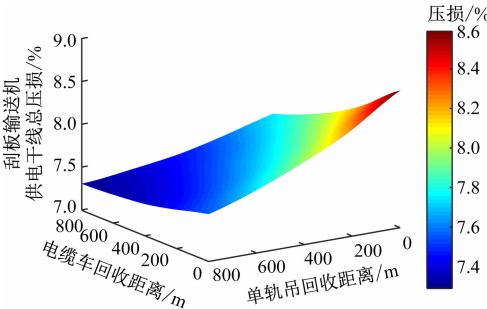


图 8 电缆回收距离与刮板输送机供电干线总压损关系
Fig. 8 Relation between cable recovery distance and total voltage loss of main power line of scraper conveyor

4 结论

(1) 电缆执行回收操作造成盘、卷、弯曲变形导致电容值、电导值和电阻值小幅变化,电感值大幅减小。采用单轨吊回收方式时,电缆变形程度更大,单位长度电感值更小,降幅高达 29%。

(2) 由于多层螺旋卷盘造成热聚集,采用电缆车回收方式时的电缆温度高于采用单轨吊回收方式时的电缆温度,不利于电缆快速散热。

(3) 采用单轨吊回收方式时的供电干线压损指标优于电缆车回收方式。

(4) 随着电缆回收距离的增加,综采工作面远距离供电系统各干线总压损整体呈下降趋势,局部呈上升趋势。

参考文献 (References):

[1] 王国法, 杜毅博. 煤矿智能化标准体系框架与建设思路[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 1-9.
WANG Guofa, DU Yibo. Coal mine intelligent standard system framework and construction ideas [J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 1-9.
[2] 荣相, 史晗, 蒋德智, 等. 一种矿用变频器滤波装置[J]. 工矿自动化, 2020, 46(5): 76-81.
RONG Xiang, SHI Han, JIANG Dezhi, et al. A mine-used frequency converter filter device [J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(5): 76-81.
[3] 徐凯. 煤矿井下综采工作面远距离供电技术讨论

[J]. 煤炭工程, 2020,52(6):55-57.

XU Kai. Discussion on long distance power supply in fully mechanized coal face[J]. Coal Engineering, 2020,52(6):55-57.

[4] 付文俊, 任强, 张亮. 红庆梁煤矿综采工作面供电安全可靠研究[J]. 建井技术, 2020, 41(1):57-60.

FU Wenjun, REN Qiang, ZHANG Liang. Study on safety and reliability of power supply to fully mechanized coal mining face in Hongqingliang Coal Mine[J]. Mine Construction Technology, 2020, 41(1):57-60.

[5] 郭峰. 综采工作面超远距离供液系统应用研究[J]. 世界有色金属, 2020(1):156-157.

GUO Feng. Study on the application of super long distance liquid supply system in fully mechanized coal face[J]. World Nonferrous Metals, 2020(1):156-157.

[6] 边小科, 包彦明, 程建胜. 综采工作面超远距离供电及供液技术的研究与应用[J]. 煤矿机械, 2018, 39(11):125-127.

BIAN Xiaoke, BAO Yanming, CHENG Jiansheng. Research and application of ultra long distance power supply and liquid supply technology in fully mechanized mining face[J]. Coal Mine Machinery, 2018,39(11):125-127.

[7] 王佃武. 梭车收放缆装置的设计研究[J]. 煤矿机械, 2019,40(8):103-105.

WANG Dianwu. Design and research of cable collection and release device of shuttle car[J]. Coal Mine Machinery, 2019,40(8):103-105.

[8] 曹连民, 崔久龙, 刘现文, 等. 连续采煤机电缆卷放装置设计[J]. 煤矿机械, 2019,40(6):108-110.

CAO Lianmin, CUI Jiulong, LIU Xianwen, et al. Design of cable release device for continuous shearer[J]. Coal Mine Machinery, 2019,40(6):108-110.

[9] 谢明, 武利生. 一种电缆回收机构设计与实现[J]. 机械设计与制造, 2018(增刊2):11-13.

XIE Ming, WU Lisheng. Design and implement of a retractable cable mechanism[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(S2):11-13.

[10] 师桂明, 霍国涛, 米月花. 新型管线拖挂单轨吊装置的应用研究[J]. 煤矿机械, 2013,34(9):233-234.

SHI Guiming, HUO Guotao, MI Yuehua. Application research of new type of pipeline trailer monorail device[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(9):233-234.

[11] 吴文力, 李建轩, 胡希岩. 电缆传输线参数提取仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2015,35(3):70-72.

WU Wenli, LI Jianxuan, HU Xiyang. Extraction simulation of cable transmission line parameters[J]. Ship Electronic Engineering, 2015,35(3):70-72.

[12] 殷虎, 阎毓杰. 电缆传输线参数提取建模与仿真[J]. 舰船电子工程, 2013,33(8):104-106.

YIN Hu, YAN Yujie. Modeling and simulation of cable transmission line parameter extraction[J]. Ship Electronic Engineering, 2013,33(8):104-106.

[13] 曹海洋, 何季霖, 刘时易. 基于场路耦合变频调速系统传导干扰研究[J]. 电力电子技术, 2019,53(11):103-105.

CAO Haiyang, HE Jilin, LIU Shiyi. Research on conducted interference of based on field-circuited variable frequency speed control system[J]. Power Electronics, 2019,53(11):103-105.

[14] 李万杰, 张国民, 王新文, 等. 飞轮储能系统用超导电磁混合磁悬浮轴承设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(增刊1):10-18.

LI Wanjie, ZHANG Guomin, WANG Xinwen, et al. Integration design of high-temperature superconducting bearing and electromagnetic thrust bearing for flywheel energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S1):10-18.

[15] 李争, 史雁鹏, 杜深慧, 等. 大功率永磁同步电机磁热耦合分析[J]. 大电机技术, 2020(1):6-9.

LI Zheng, SHI Yanpeng, DU Shenhui, et al. Electromagnetic-thermal coupled analysis of high-power permanent magnet synchronous motor[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2020(1):6-9.

[16] 聂陆燕, 尹玉君, 谢传治. 基于ETAP的钢铁企业电网谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24):152-157.

NIE Luyan, YIN Yujun, XIE Chuazhi. Harmonic analysis of power grid in iron and steel enterprises based on ETAP[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(24):152-157.

[17] 魏澈, 李强, 洪毅, 等. 流花16-2油田电潜泵长距离供电系统仿真分析[J]. 中国海上油气, 2018,30(4):190-195.

WEI Che, LI Qiang, HONG Yi, et al. Simulation and analysis of the long-distance power supply system for electrical submersible pumps of LH16-2 oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(4):190-195.