

文章编号: 1671-251X(2022)03-0118-05

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2021120013

矿用钢丝绳损伤检测磁通回路优化设计

田 劼^{1,2}, 田 壮^{1,2}, 郭红飞^{1,2}, 刘凝哲^{1,2}, 马建武^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083;

2. 中国矿业大学(北京)煤矿智能化与机器人创新应用应急管理部重点实验室, 北京 100083)

摘要:漏磁通检测法是应用最广泛的矿用钢丝绳损伤检测方法,目前未有考虑磁通回路中磁噪声信号对钢丝绳损伤漏磁通检测信号影响的研究。基于钢丝绳损伤漏磁通检测原理,构建了漏磁通检测等效磁路模型,采用Ansoft Maxwell有限元软件对磁通回路的磁场分布进行仿真,结果表明除主磁通和钢丝绳损伤漏磁通外,磁通回路中还存在多处磁噪声回路,易对钢丝绳损伤漏磁通检测信号造成干扰,其中衔铁导磁路径的漏磁通和两侧永磁体与空气介质之间耦合漏磁通的影响最大。基于仿真分析结果,对磁通回路进行了优化设计:将衔铁与永磁铁接触部位由直角结构改为圆角结构,以减小该部位的漏磁通,增大衔铁导磁路径中的主磁通,进而增强钢丝绳损伤漏磁通检测信号;采用高导磁材料设计环形磁桥路屏蔽装置并安装在损伤漏磁通检测区域,引导两侧永磁体与空气介质之间耦合漏磁通的走向,减小耦合漏磁通对钢丝绳损伤漏磁通检测的影响。实验结果表明,磁通回路经优化后,钢丝绳损伤检测信号特征较优化前更加明显,采集信号由6.14 mV增大至18.59 mV,验证了优化方案可提高磁通回路传递效率,对损伤漏磁通有聚合增强效果,减小了永磁体与空气介质之间耦合漏磁通与钢丝绳损伤漏磁通的叠加效应,有利于提高钢丝绳损伤检测准确性。

关键词:矿用钢丝绳; 损伤检测; 钢丝绳探伤仪; 漏磁通检测; 磁通回路; 导磁路径; 磁桥路屏蔽

中图分类号: TD532

文献标志码: A

Optimization design of magnetic flux circuit for mine wire rope damage detection

TIAN Jie^{1,2}, TIAN Zhuang^{1,2}, GUO Hongfei^{1,2}, LIU Ningzhe^{1,2}, MA Jianwu^{1,2}

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Coal Mine Intelligence and Robot Innovative Application, Ministry of Emergency Management, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The magnetic flux leakage(MFL) detection method is the most widely used method for detecting the mine wire rope damage, and there is no research on the influence of magnetic noise signal in magnetic flux circuit on the MFL detection signal of wire rope damage. Based on the principle of MFL detection for wire rope damage, the equivalent magnetic circuit model of MFL detection is constructed, and the magnetic field distribution of the magnetic flux circuit is simulated by Ansoft Maxwell finite element software. The results show that there are many magnetic noise circuits in the magnetic flux circuit besides the main magnetic flux and the MFL of wire rope damage, which are easy to interfere with the MFL detection signal of wire rope. The MFL of armature magnetic conduction path and the coupling MFL between permanent magnets on both sides and air medium have the greatest influence. Based on the simulation results, the magnetic flux circuit is optimized. The contact part between the armature and the permanent magnet is changed from a right-angle structure to a rounded structure to reduce the MFL at this part, increase the main magnetic flux in the armature magnetic conduction path, and then enhance the MFL detection signal of wire rope damage. The annular magnetic bridge circuit

收稿日期: 2021-12-03; 修回日期: 2022-03-06; 责任编辑: 李明。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51774293)。

作者简介: 田劼(1982—), 女, 山西太原人, 副教授, 博士, 主要研究方向为钢丝绳无损检测, E-mail: tianj@cumt.edu.cn。

引用格式: 田劼, 田壮, 郭红飞, 等. 矿用钢丝绳损伤检测磁通回路优化设计[J]. 工矿自动化, 2022, 48(3): 118-122.

TIAN Jie, TIAN Zhuang, GUO Hongfei, et al. Optimization design of magnetic flux circuit for mine wire rope damage detection[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(3): 118-122.



扫码移动阅读

shielding device is designed with high magnetic conductivity material and installed in the damage MFL detection area so as to guide the direction of the coupling MFL between the permanent magnets on both sides and the air medium, and reduce the influence of the coupling MFL on the detection of wire rope damage MFL. The experimental results show that after the optimization of the magnetic flux circuit, the characteristics of the wire rope damage detection signal are more obvious than those before the optimization, and the collected signal increases from 6.14 mV to 18.59 mV. It is verified that the optimization scheme can improve the transmission efficiency of the magnetic flux circuit, have the aggregation and enhancement effect on the damage MFL, and reduce the superposition effect of the permanent magnet-air coupling MFL and the wire rope damage MFL, which is conducive to improving the accuracy of wire rope damage detection.

Key words: mine wire rope; damage detection; wire rope damage detector; magnetic flux leakage detection; magnetic flux circuit; magnetic conduction path; magnetic bridge circuit shielding

0 引言

钢丝绳因其性能优良,常作为关键承载构件应用于煤矿提升设备中。钢丝绳长期连续使用会出现断丝、磨损、断股等损伤^[1-2],存在安全隐患,需要进行损伤检测,以免发生安全事故。实际生产中常采用人工、漏磁通、机器视觉等方法进行钢丝绳损伤检测。其中,漏磁通检测法应用最广泛,其利用传感器采集损伤处漏磁通信号,结合钢丝绳损伤相关影响因素分析来判断损伤程度,进而对钢丝绳的健康状况进行评估。

随着电磁检测技术的发展,研究人员对钢丝绳损伤漏磁通检测法进行了大量研究。E. Kalwa等^[3]采用霍尔元件对钢丝绳损伤检测磁通回路的主磁通和漏磁通进行了大量实验,得出了不同损伤程度对应的磁通分布规律。张操等^[4]针对基于漏磁通检测原理的钢丝绳探伤仪,分析了钢丝绳提离距离、传感器材料、断丝根数等对检测结果的影响。康宜华等^[5]通过有限元分析法研究了不同钢丝绳磁化方法的效果差异,探讨了钢丝绳内部磁场和损伤漏磁通信号随励磁装置参数变化的规律。上述研究对于提高钢丝绳损伤检测精度和可靠性有一定效果,但未考虑磁通回路中磁噪声信号与钢丝绳损伤漏磁通信号的相互作用对钢丝绳损伤检测的影响。

本文通过理论和仿真分析研究钢丝绳损伤检测磁通回路中磁场分布特性,对磁通回路进行优化设计,以改善损伤漏磁场质量,提高检测装置性能。

1 钢丝绳损伤漏磁通检测原理

钢丝绳损伤漏磁通检测基于钢丝绳的铁磁性特质^[6],利用励磁源将钢丝绳均衡磁化至饱和,采用径向多回路磁敏元件捕捉钢丝绳损伤漏磁通,根据钢丝绳损伤漏磁通与损伤程度呈线性关系的原理,判断钢丝绳损伤程度。

钢丝绳损伤漏磁通检测基本模型如图1所示。从永磁体N极发出的磁力线在永磁体与钢丝绳间气隙、钢丝绳、永磁体、衔铁间传播,构成闭合路径(磁通回路)。正常情况下,在钢丝绳段形成匀强磁场,磁力线包裹在钢丝绳内部^[7-9]。当钢丝绳出现内部或外部断丝、锈蚀等损伤时,钢丝绳中的磁场在钢丝绳与空气2种不同介质间发生偏折,在损伤表面形成局部漏磁场。通过磁敏元件采集损伤漏磁通,经处理分析得出钢丝绳损伤程度。

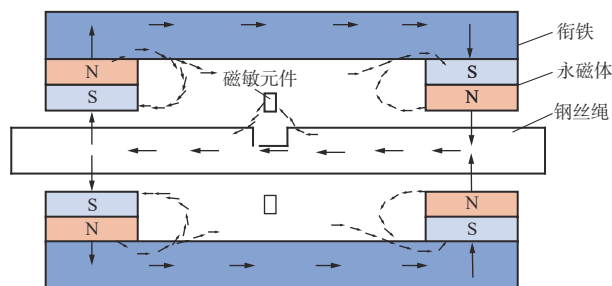


图1 钢丝绳损伤漏磁通检测基本模型

Fig. 1 Basic model of wire rope damage detection by magnetic flux leakage

从图1可看出,钢丝绳损伤漏磁通检测过程中除主磁通回路外,还存在磁噪声回路,对钢丝绳损伤漏磁通信号采集造成影响。建立漏磁通检测等效磁路模型(图2),对磁通回路中磁噪声信号进行分析。

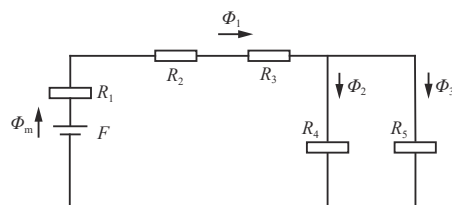


图2 漏磁通检测等效磁路模型

Fig. 2 Equivalent magnetic circuit model of magnetic flux leakage detection

图2中,将永磁体磁势 F 视为恒压源, R_1 为永磁体与钢丝绳间气隙磁阻, R_2 为衔铁与永磁体接触部分的磁阻, R_3 为衔铁磁阻, R_4 为衔铁与钢丝绳表面空

气介质磁阻, R_5 为钢丝绳磁阻, Φ_m 为回路主磁通, Φ_1 为衔铁中的磁通, Φ_2 为衔铁表面与钢丝绳间空气介质中的磁通, Φ_3 为钢丝绳磁通。由基尔霍夫第一、第二定律可知

$$\Phi_m \geq \Phi_1 \quad (1)$$

$$\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3 \quad (2)$$

$$R_4 \Phi_2 = R_5 \Phi_3 \quad (3)$$

$$F = R_1 \Phi_m + (R_2 + R_3) \Phi_1 + R_4 \Phi_2 \quad (4)$$

$$R_i = \frac{1}{G_i} \quad i = 1, 2, \dots, 5 \quad (5)$$

式中 G_i 为磁导, 与导磁介质的材料及横截面积有关。

永磁体与钢丝绳间气隙导致产生部分漏磁通, 使得 $\Phi_1 < \Phi_m$ 。该部分漏磁通不可避免, 且主要分布在闭合回路两端, 对钢丝绳损伤漏磁通信号检测影响有限, 因此可将 Φ_1 视为磁通回路的主磁通。

采用 Ansoft Maxwell 有限元软件对磁通回路中的磁场分布进行仿真分析, 结果如图 3 所示。可看出磁力线从一侧永磁体出发, 经过衔铁传至另一侧永磁体, 再经钢丝绳形成主磁通回路。在钢丝绳损伤处, 磁力线发生偏折, 磁力线穿过损伤端面与空气接触后指向钢丝绳表面。

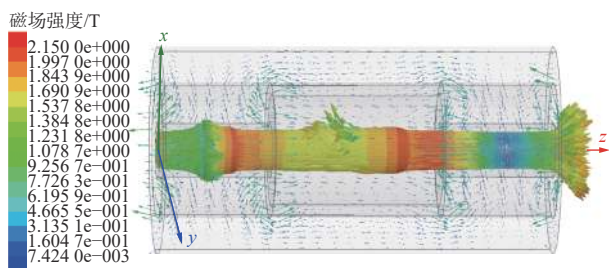


图 3 磁通回路的磁场分布

Fig. 3 Magnetic field distribution of magnetic flux circuit

在钢丝绳损伤上方空气介质中, 除损伤导致的漏磁通外, 还存在永磁体-衔铁-空气-永磁体、永磁体-钢丝绳-空气-永磁体、永磁体-空气-永磁体等磁噪声回路, 形成较强的背景磁场。多股漏磁通在磁敏元件处相互叠加, 极易对钢丝绳损伤漏磁通检测信号造成干扰。其中影响最大的是衔铁导磁路径的漏磁通和两侧永磁体与空气介质之间耦合磁场导致的漏磁通。因此, 本文主要考虑这 2 种因素对磁通回路进行优化。

2 磁通回路优化设计

2.1 衔铁导磁路径优化

磁力线在磁通回路中的传导不仅与导磁介质的磁学状态有关, 也与其几何形状有关。磁力线呈直线或曲线分布, 且传导方向总是垂直于导体截面^[10-12]。

由于磁力线具有趋低磁阻性, 所以不存在磁力线交叉或直角弯折现象。衔铁与永磁体接触部位为直角结构, 不利于磁力线传导, 导致永磁体-衔铁-空气-永磁体磁噪声回路中漏磁通较大, 降低永磁体的磁能传递效率。同时, 该部分漏磁通与钢丝绳损伤漏磁通一同被磁敏元件采集, 导致钢丝绳损伤程度误判情况。

基于上述分析, 将衔铁与永磁体接触部位设计为圆角结构, 建立如图 4 所示的仿真模型, 分析衔铁导磁路径优化对钢丝绳损伤漏磁通检测的影响。

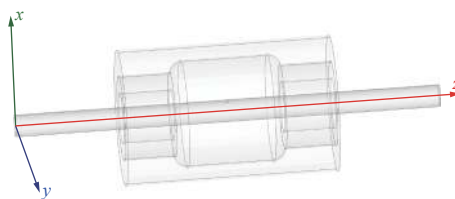


图 4 衔铁导磁路径优化仿真模型

Fig. 4 Simulation model of optimized armature magnetic path

衔铁与永磁体接触部位轴向漏磁通分布如图 5 所示。两侧永磁体长度均为 400 mm, 轴向距离为 200 mm。可看出当接触端采用圆角时, 两侧永磁体之间中点处(磁敏元件位置)磁感应强度较采用直角时小, 表明衔铁与永磁体接触部分漏磁通小, 可降低该部分漏磁通对钢丝绳损伤漏磁通检测信号的影响。

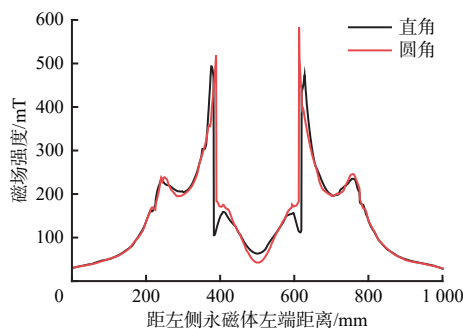


图 5 衔铁与永磁体接触部位轴向漏磁通分布

Fig. 5 Radial magnetic flux leakage distribution at touching part of armature and permanent magnet

2.2 磁桥路屏蔽装置设计

衔铁与永磁体接触部分圆角结构的优化设计使得绝大多数磁力线沿衔铁导磁路径传导到钢丝绳中, 减小了主磁通回路磁通泄漏, 但仍存在两侧永磁体与空气介质耦合产生的漏磁通。

基于磁场的趋高磁导率介质特性^[13-15], 设计了磁桥路屏蔽装置。该装置为由高导磁材料制作的环形屏蔽壳, 安装在磁敏元件所在的检测区域(图 6), 构建一条磁桥路引导空气介质中的漏磁通走向, 消除该部分漏磁通对钢丝绳损伤漏磁通检测的影响。

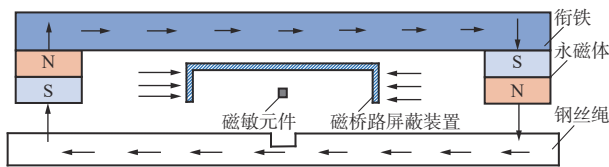
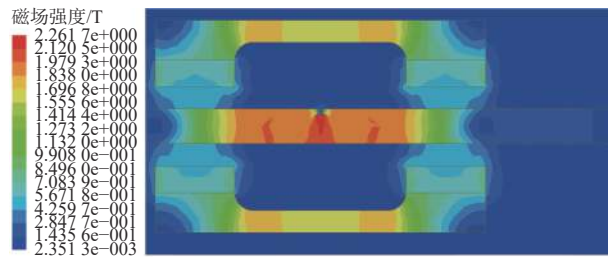


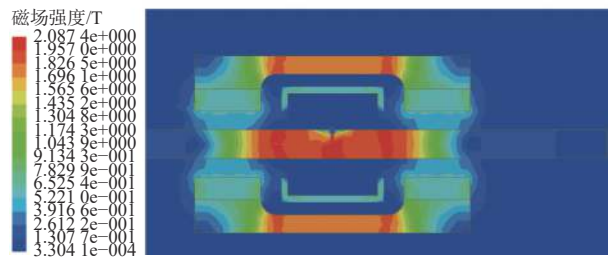
图6 磁桥路屏蔽装置及其安装

Fig. 6 Magnetic bridge shielding equipment and its setting mode

采用 Solidworks 有限元软件研究磁桥路屏蔽装置的效果。设置屏蔽壳长度为 160 mm, 内径为 80 mm。以直径为 26 mm 的铁棒代替钢丝绳, 制作 1 处损伤, 分别建立有无磁桥路屏蔽装置时的钢丝绳损伤检测模型进行有限元仿真, 结果如图 7 所示。



(a) 无磁桥路屏蔽装置



(b) 有磁桥路屏蔽装置

图7 钢丝绳损伤检测磁密度云图

Fig. 7 Magnetic density cloud map of wire rope damage detection

从图 7 可看出, 加装磁桥路屏蔽装置后, 两侧永磁体与空气介质间耦合磁场导致的漏磁通经磁桥路屏蔽装置传递, 装置内部区域只有很少的耦合漏磁通, 为钢丝绳损伤漏磁通最佳检测区域。

将磁桥路屏蔽装置用于钢丝绳损伤检测中, 磁敏元件采集的漏磁通如图 8 所示。

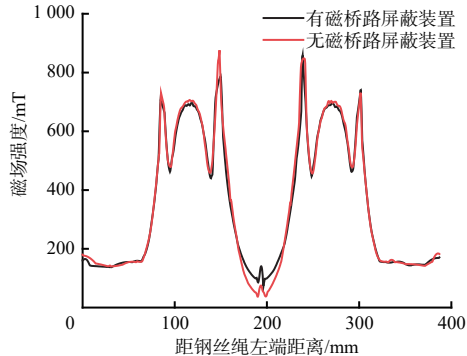


图8 钢丝绳损伤检测漏磁通分布

Fig. 8 Magnetic flux leakage distribution of wire rope damage detection

两侧永磁体长度均为 100 mm, 150~250 mm 为检测区域。可看出在 190~196 mm 损伤段, 无磁桥路屏蔽装置时漏磁通最大值为 53.6 mT, 加装屏蔽装置后最大值为 140.3 mT, 表明加装磁桥路屏蔽装置可避免磁敏元件采集损伤漏磁通信号时受背景磁场干扰, 有利于识别较小的损伤。

3 实验验证

基于理论分析与有限元仿真结果, 搭建钢丝绳损伤检测实验平台, 如图 9 所示。钢丝绳型号为 6×19+FC, 总直径为 26 mm, 在钢丝绳表面制作 1 股 (19 根) 长 5 mm 的断丝损伤。磁通回路中衔铁材料为 DT4C; 磁源为环形排列的 N48 型永磁体, 分布于钢丝绳轴向两端, 对钢丝绳进行轴向磁化。实验中钢丝绳以 0.7 m/s 的速度匀速穿过探伤仪, 磁敏元件采集钢丝绳损伤漏磁通信号并将其转换为电压信号, 经放大滤波后在示波器上显示, 如图 10 所示。

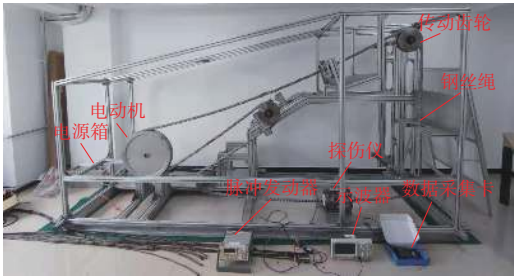
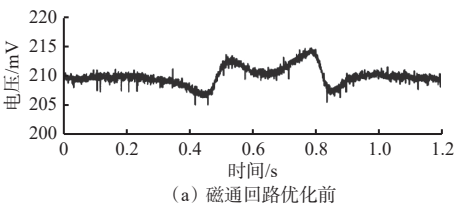
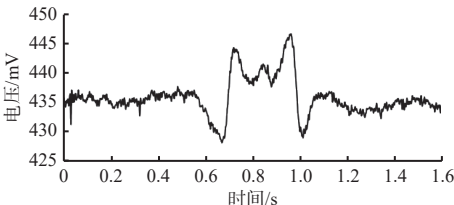


图9 钢丝绳损伤检测实验平台

Fig. 9 Experimental platform of wire rope damage detection



(a) 磁通回路优化前



(b) 磁通回路优化后

图10 钢丝绳损伤检测结果

Fig. 10 Wire rope damage detection results

图 10 中电压波形平稳部分为钢丝绳无损伤段信号, 反映钢丝绳股间漏磁通; 电压凸起部分为钢丝绳损伤段信号。可看出磁通回路优化后, 由于导磁路径中主磁通增大, 所以损伤处采集信号特征明显; 钢丝绳损伤采集信号由磁通回路优化前的 6.14 mV 增大至 18.59 mV, 表明磁桥路屏蔽装置具有漏磁通聚

合增强效果。由此可知优化的磁通回路能提高磁能利用率,有效聚合增强目标漏磁通,减小磁噪声影响,提高钢丝绳损伤检测性能。

4 结论

(1) 衔铁与永磁体接触部位圆角结构的优化使得磁力线尽可能多地从衔铁中传导,从而减少磁通回路中非损伤段的漏磁通,增大磁通回路的传递效率,提高磁能利用率和钢丝绳磁化效果,有利于钢丝绳探伤仪的轻便化设计。

(2) 磁桥路屏蔽装置采用高导磁材料,引导钢丝绳损伤漏磁通检测区域内永磁体与空气介质之间耦合漏磁通的走向,减小其对损伤漏磁通检测的影响,有利于钢丝绳探伤仪检测较小的损伤。

(3) 实验结果表明,优化后的磁通回路中主磁通增大,损伤信号特征明显,且损伤信号较优化前大幅增强,提高了钢丝绳损伤检测的准确性。

参考文献(References):

- [1] 牟帅,陈志平,金嘉蕾,等. 钢丝绳无损检测技术研究进展[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 707-710.
MOU Shuai, CHEN Zhiping, JIN Jialei, et al. Progress on nondestructive testing technology of wire ropes[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(6): 707-710.
- [2] 何吉坤. 矿用钢丝绳在线检测系统的研究与设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
HE Jikun. Research and design of mining wire rope detection system[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [3] KALWA E, PIEKARSKI K. Fundamental of magnetic testing of steel rope[J]. NDT International, 1989, 22(1): 36-43.
- [4] 张操,朱承建,刘健康. 基于漏磁原理的钢丝绳探伤仪影响因素研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(5): 52-54.
ZHANG Cao, ZHU Chengjian, LIU Jiankang. Research of impact factors of wire rope flaw detector based on principle of magnetic flux leakage[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(5): 52-54.
- [5] 康宜华,黎振捷,杨芸,等. 微小型钢丝绳漏磁检测传感器与仪器[J]. 无损检测, 2014, 36(5): 11-15.
KANG Yihua, LI Zhenjie, YANG Yun, et al. Mini-micro sensor & device for wire rope MFL testing[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(5): 11-15.
- [6] 李登蓬,李国平,武博,等. 钢丝绳金属截面积损失型损伤检测传感器设计及仿真分析[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2019, 33(1): 37-41.
LI Dengpeng, LI Guoping, WU Bo, et al. Design and simulation analysis of loss of metallic cross-sectional area detection sensor for wire ropes[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2019, 33(1): 37-41.
- [7] 谢菲,孙燕华,姜宵园,等. 矿井提升钢丝绳在线漏磁无损检测装置[J]. 无损探伤, 2019, 43(1): 34-36.
XIE Fei, SUN Yanhua, JIANG Xiaoyuan, et al. On-line magnetic leakage nondestructive testing device for mine lifting wire rope[J]. Nondestructive Inspection, 2019, 43(1): 34-36.
- [8] 王红尧,田劫. 基于有限元分析的矿用钢丝绳聚磁检测方法[J]. 煤炭学报, 2013, 38(增刊1): 256-260.
WANG Hongyao, TIAN Jie. Method of magnetic collect detection for coal mine wire rope base on finite element analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 256-260.
- [9] 时统军,王朋,王博. 矿井提升机钢丝绳张力监测系统的设计[J]. 工矿自动化, 2014, 40(6): 103-105.
SHI Tongjun, WANG Peng, WANG Bo. Design of wire rope tension monitoring system of mine hoist[J]. Industry and Mine Automation, 2014, 40(6): 103-105.
- [10] 刘利伟,李建朝. 矿井提升机钢丝绳在线无损检测系统的设计及应用[J]. 工矿自动化, 2012, 38(1): 90-92.
LIU Liwei, LI Jianchao. Design of on-line nondestructive inspection system of steel rope of mine hoist and its application[J]. Industry and Mine Automation, 2012, 38(1): 90-92.
- [11] 陶德馨,艾丽斯佳. 基于弱磁探伤的钢丝绳无损检测技术[J]. 中国工程机械学报, 2009, 7(1): 96-99.
TAO Dexin, AI Lisijia. Nondestructive testing technology for wire ropes based on weak magnetic flaw detection[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2009, 7(1): 96-99.
- [12] 陈征宇,叶玉龙. 基于ANSYS的电梯钢丝绳失效检测有限元分析[J]. 机电信息, 2018(27): 69-70.
CHEN Zhengyu, YE Yulong. Finite element analysis of elevator wire rope failure detection based on ANSYS[J]. Mechanical and Electrical Information, 2018(27): 69-70.
- [13] 田劫,周俊莹,王红尧,等. 钢丝绳探伤多回路励磁检测方法研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(2): 180-185.
TIAN Jie, ZHOU Junying, WANG Hongyao, et al. Research on multiloop magnetic detection method for steel wire rope detection[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(2): 180-185.
- [14] 常用根,江帆,陈潇. 矿井提升装备健康状态监测系统的设计[J]. 工矿自动化, 2018, 44(2): 38-42.
CHANG Yonggen, JIANG Fan, CHEN Xiao. Design of health condition monitoring system of mine hoisting equipment[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 38-42.
- [15] 江念,王召巴,陈友兴,等. 电磁超声检测钢板厚度实验的参数优化[J]. 传感技术学报, 2015, 28(4): 498-502.
JIANG Nian, WANG Zhaoba, CHEN Youxing, et al. The experiment parameters of the steel-sheet thickness measurement by electromagnetic ultrasonic[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(4): 498-502.