

多通道钢丝绳的漏磁检测信号融合方法

关益辉¹,孙燕华¹,高尚磊²,张义军³

(1. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 中海石油技术检测有限公司, 天津 300452;
3. 交通运输部长江航务管理局, 武汉 430014)

摘要: 分析了现有钢丝绳漏磁检测系统中存在的损伤信号幅值较小、前端多个磁敏元件处理方式较为简单等问题, 提出了一种钢丝绳漏磁检测系统中的多通道信号融合方法。首先从磁敏元件阵列的角度出发, 提出了多种磁敏元件阵列方式; 其次从信号处理模拟电路的角度出发, 设计了多通道信号融合硬件电路; 最后, 针对钢丝绳进行了实际测试, 验证了此方法的可行性。

关键词: 钢丝绳; 漏磁检测; 磁敏元件阵列; 多通道信号融合; 加法电路

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2024)05-0056-06

Multi-channel signal fusion method for magnetic leakage detection of steel wire ropes

GUAN Yihui¹, SUN Yanhua¹, GAO Shanglei², ZHANG Yijun³

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. CNOOC Inspection Technology Co., Ltd., Tianjin 300452, China;
3. Changjiang River Administration of Navigational Affairs, Wuhan 430014, China)

Abstract: This paper analyzed some problems in the existing magnetic leakage detection system of steel wire ropes, such as the small amplitude of the damage signal and the relatively simple processing method of multiple magnetic sensitive components at the front end, and in response to these problems, a multi-channel signal fusion method in the magnetic leakage detection system of steel wire ropes was proposed. First, from the perspective of magnetic sensor arrays, a variety of magnetic sensor array methods were proposed. Secondly, from the perspective of signal processing analog circuits, a multi-channel signal fusion hardware circuit was designed. Finally, actual tests were conducted on steel wire ropes to verify the feasibility of this method.

Key words: steel wire rope; magnetic flux leakage detection; magnetic sensor array; multi-channel signal fusion; adder circuit

经过多年的探索和实践, 钢丝绳无损检测技术取得了显著的进步, 对应不同工业场合的各种钢丝绳检测仪也相继出现^[1-2]。然而, 由于钢丝绳本身结构和使用环境不同, 检测时钢丝绳相对传感器的径向晃动和不规则扭转, 钢丝绳的拉伸程度, 损伤的深度、宽度和形态, 环境温度的变化及外界的电磁干扰

等, 都会对检测信号产生较大影响^[3]。

近些年来, 笔者所在实验室也在钢丝绳无损检测领域持续探索, 研制的基于漏磁检测的便携式/在线式钢丝绳检测系统, 通常为探头、信号处理电路、采集卡和平板电脑/笔记本电脑协同工作的离散化结构或者探头与仪表箱的集成化结构^[4-7]。现有的钢丝绳无损检测技术及仪器存在的主要问题有: 对于内伤、股内损伤或大直径钢丝绳的损伤, 有时探测效果不理想, 信号幅值不大; 针对特定的难以检测的损伤群(见图 1), 检出度不高; 前端信号处理较为简单, 若前端探头中布置了多个磁敏元件, 则输出端只是简单地捻合在一起, 而不是用电路进行多通道磁敏元件信号的处理, 其实物如图 2 所示。

收稿日期: 2023-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(52275532); 交通运输部纵向项目(SXHXGZ-2021-2); 国家重点研发纵向项目(2021YFF0501000); 中海石油项目(ZX2022CZBF0937)

作者简介: 关益辉(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为钢丝绳漏磁无损检测仪器

通信作者: 张义军, zhangyijun_18@126.com



图 1 断丝损伤群实物

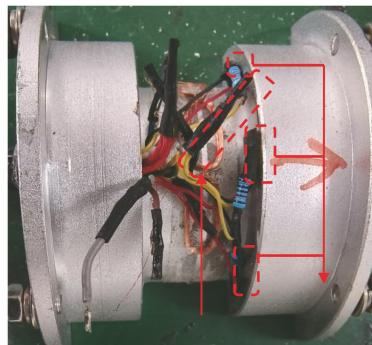


图 2 探头前端信号处理简单时的霍尔元件排列示意

针对上述问题,文章基于现有的霍尔元件^[8]、电感传感器这两种磁敏元件及开环磁化器结构,重新设计了磁敏元件在探头中的阵列方式,并设计了硬件模拟电路,提出了一种钢丝绳漏磁检测磁敏元件多通道模拟信号融合技术,主要包括磁敏元件阵列、信号融合模拟电路设计,设计了具体的探靴与硬件模拟电路,并开展了试验验证。

1 信号融合磁敏元件阵列方案

钢丝绳漏磁检测原理示意如图 3 所示。钢丝绳为缠绕的螺旋状结构,外表面呈现规律的凹凸形态。磁钢作为整个磁路的励磁源,对被测钢丝绳进行磁化,在磁钢、衔铁、气隙和钢丝绳中形成磁回路。当钢丝绳中存在缺陷时,部分磁通由于磁导率突然降低而泄露,进而被磁敏感元件捕获^[9]。

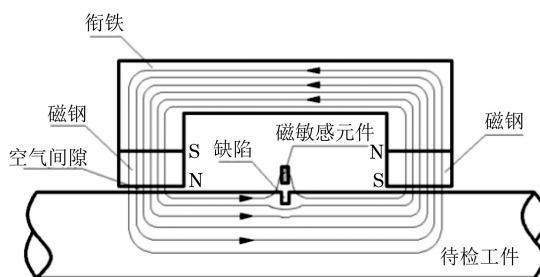


图 3 钢丝绳漏磁检测原理示意

现在有些钢丝绳漏磁检测前端探头具有以下特点:在一个探靴中布置一个或多个不同类型的磁敏元件,如电感传感器、霍尔元件、线圈等,将同一类型的所有磁敏元件输出脚接在一起,直接进入放大通道。这种方法比较原始,并不会对所得信号的信噪比产生很大的正面影响,而单个磁敏

元件的周向覆盖范围又是有限的。针对此问题,在现有探头和磁敏元件的基础上,提出了磁敏元件的阵列多通道信号融合技术。将磁敏元件在环形探靴中进行等间距轴向、周向、径向排列,如图 4,5 所示,其中虚线框内为磁敏元件,箭头表明磁敏元件的排列方向。多个霍尔元件或电感传感器在环形探靴内轴向、周向或径向均匀布置形成检测阵列,并将每组传感器的通道单独引出,待后续进入多通道融合电路。

2 信号融合硬件电路方案

2.1 多通道霍尔元件信号融合硬件电路方案

多通道霍尔元件信号融合方案如图 6 所示,主要包括电源、多路霍尔元件、负电压产生电路、参考电压产生电路、电位器、反向电路、加法电路以及放大电路。多路霍尔元件的作用为捕获一定空间内的缺陷漏磁场,并将其转化为电压信号。其检测原理为

$$U = \frac{R_H B I \cos\theta}{L} \quad (1)$$

式中: U 为感应电压; R_H 为霍尔系数,由半导体材料决定; B 为外加磁场强度; I 为通过半导体材料的电流; θ 为外加磁场方向与半导体平面法线的夹角。

霍尔元件测量的是磁场的绝对值大小,因此其检测结果不受检测时钢丝绳运行速度的影响,且工作寿命长,检测效果稳定,但工作时需要外加电源,有电磁噪声。该方案霍尔元件选用的型号为 A1302,其灵敏度约为 $1.33 \text{ mV} \cdot \text{G}^{-1}$,具有高覆盖范围、低噪声的特点。

负电压产生电路的作用为生成基线调零静态电压,同时还可与外接的 5 V 供电电压组成双电源,对除霍尔元件以外的所有电路进行双电源供电。现有霍尔元件 A1302 的特性为输出信号的基准电压值为供电电压的一半,即在霍尔元件供电为单电源 5 V 的情况下,其输出的基准电压值为 2.5 V。若将每个霍尔元件输出信号的直流分量也用加法电路直接加起来,则在加法电路供电电压为双电源 $\pm 5 \text{ V}$ 的情况下,其很容易达到饱和截止状态。因此,在进行霍尔多通道信号的融合时,需要将其直流分量进行调零。需要通过负电压产生电路输入 -5 V 的基线调零静态电压,将直流分量进行一定的去除。因此,此方案基于 MC34063 电源芯片,搭建外围电路,实现了基线调零静态电压的生成及 $\pm 5 \text{ V}$ 的双电源供电。

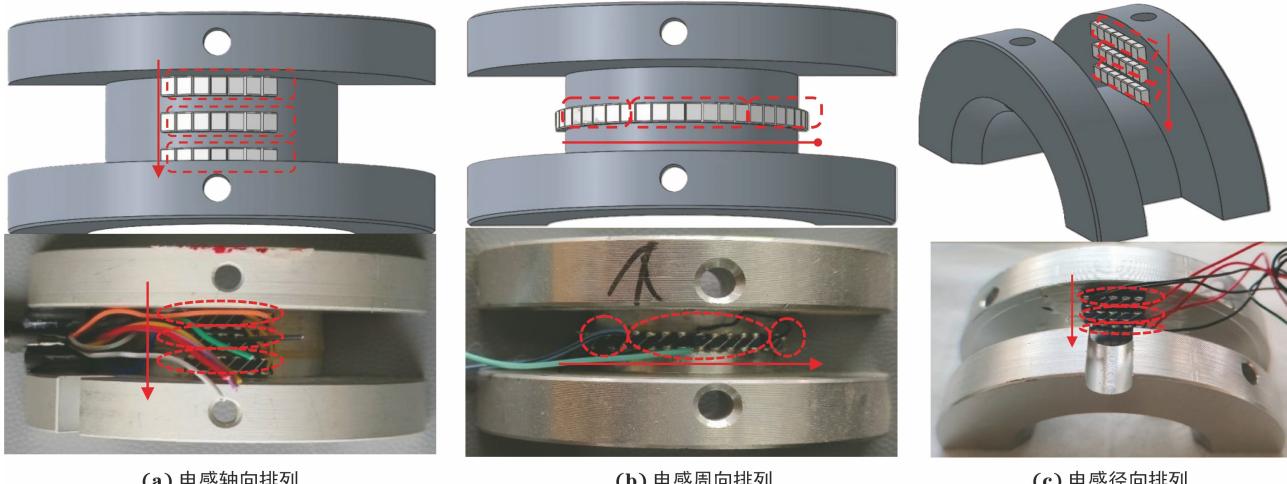


图 4 多路阵列电感方案示意及实物

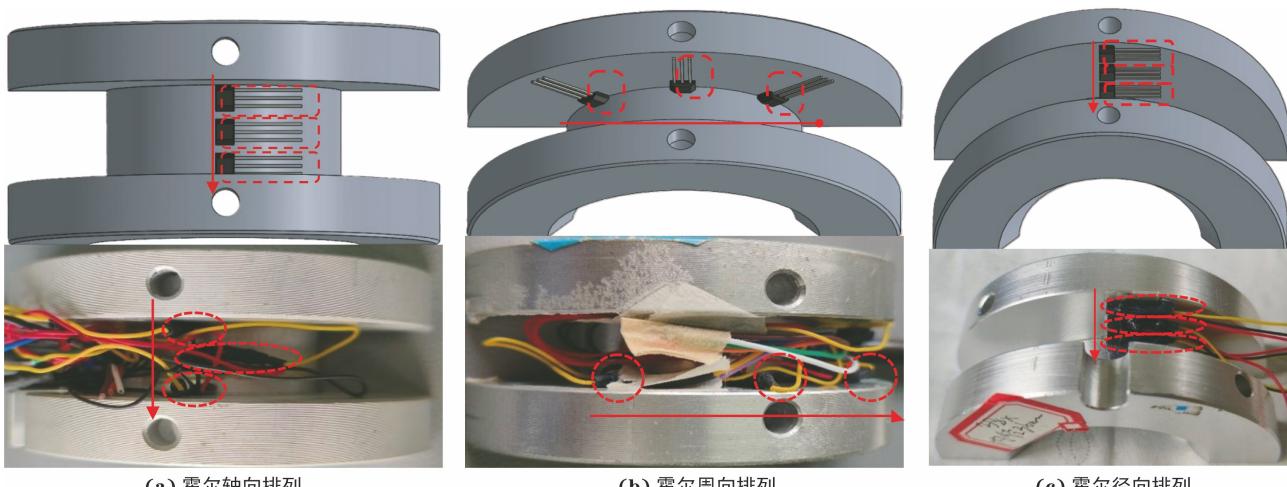


图 5 多路阵列霍尔方案示意及实物

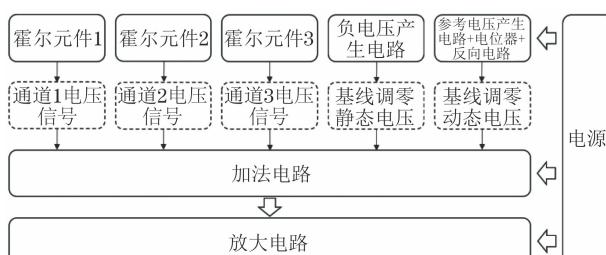


图 6 多通道霍尔元件信号融合方案

参考电压产生电路、电位器以及反向电路的作用为生成基线调零动态电压。不同钢丝绳被磁化后的背景磁场不同,背景磁场会略微影响霍尔元件的基线电压值,因此,霍尔元件输出信号的基线电压值并不稳定,而是以 2.5 V 为基准上下浮动。因此还需要人为通过电位器来调节基线调零电压,进而完全将霍尔信号的直流分量去除。文章采用参考电压+电位器+反相放大电路的方式来产生基线调零动态电压。参考电压产生电路使用稳压二极管 LM336Z 来产生

2.5 V 的参考电压,经电位器分压后输入反向电路的 REF 端,经单路运算放大器 OP210 反向后,最终在 Dy_V 端输出基线调零动态电压。

加法电路基于双路运算放大芯片 TLC2262,实现三通道霍尔元件输入信号(IN1、IN2、IN3)、基线调零静态电压(-5 V)和基线调零动态电压(Dy_V)的加法功能,在 OUT 端输出融合后的信号,进入后续已有的放大电路进行放大滤波。

2.2 多通道电感信号融合硬件电路方案

多通道电感信号融合方案如图 7 所示,主要包括电源、多路电感传感器、加法电路以及放大电路。当穿过感应线圈的磁通量发生变化时,感应线圈会产生感应电压。磁通量变化越快,感应电压相应越高。

$$E = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

式中: E 为感应电压; n 为线圈匝数; ϕ 为通过线圈

的磁通量大小; t 为时间。

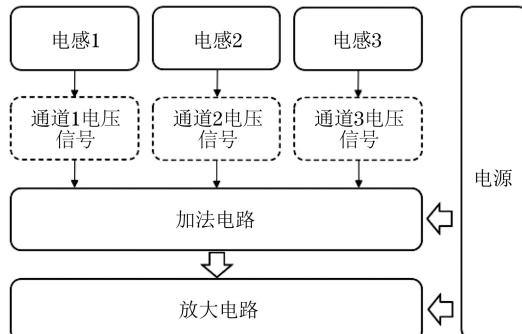


图 7 多通道电感信号融合方案

感应电压大小与磁通量本身大小无关, 而与线圈匝数和磁通量变化率有关。因此感应线圈测量的是磁通量的变化率, 而不是磁通量的绝对值大小, 测量结果受到检测速度影响。电感是无源器件, 工作时不需要外加电源, 传感器自身几乎不产生电磁噪声。电感传感器输出信号无基线电压, 所以相较于霍尔方案, 多通道电感信号融合方案比较简单, 基于双路运算放大器 TLC2262 搭建了加法电路, 三通道电感信号(IN1、IN2、IN3)直接输入加法电路即可。但需注意电感传感器输入此电路的信号为交流信号, 因此电源必须用±5V 双电源, 即必须能够放大负电压。放大后的信号同样进入后续已有的放大电路进行放大滤波。

3 试验验证

3.1 多通道霍尔元件信号融合方案试验验证

搭建测试电路并初步完成测试后, 设计并制作了多通道霍尔元件信号融合前端探靴及其适配的 PCB 样板, 采用双电源供电, 其实物如图 8 所示。经初步测试, 此方案能够对损伤信号的幅值有一定的提升。



图 8 霍尔加法器 PCB 板实物

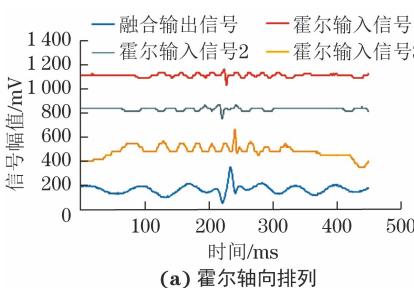
针对 $\phi 32\text{ mm}$ 钢丝绳的外部断丝损伤群(见图 9), 采用便携式钢丝绳检测探头, 采用图 5 所示探靴和图 10 所示的检测设备进行测试。霍尔元件的每种排列方式测 4 组数据, 即 3 组输入数据和 1 组输出数据, 每组数据记录 20 个波形信号。其 3 种排列方式的损伤信号波形特征如图 11 所示, 所有数据的损伤信号幅值特征如图 12 所示。每组数据的损伤信号幅值均值如表 1 所示。



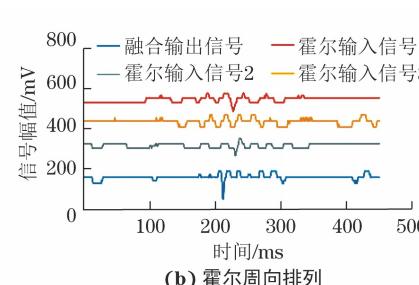
图 9 $\phi 32\text{ mm}$ 钢丝绳的外部断丝损伤群



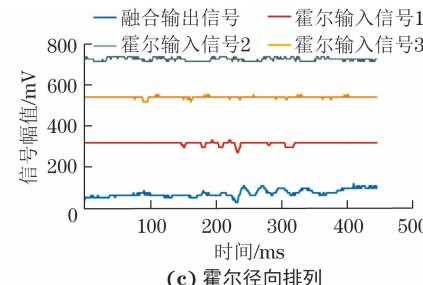
图 10 检测设备及测试环境



(a) 霍尔轴向排列



(b) 霍尔周向排列



(c) 霍尔径向排列

图 11 霍尔元件 3 种排列方式的损伤信号波形特征

由此可见, 对于外部断丝损伤群的检测, 霍尔元件在环形探靴中轴向、周向、径向分布时, 霍尔加法

器可以有效提升信号的幅值大小, 3 种排列方式分别提高 40%, 50%, 40% 以上, 其中, 霍尔元件轴向

排列时,加法器输出的信号幅值最大。

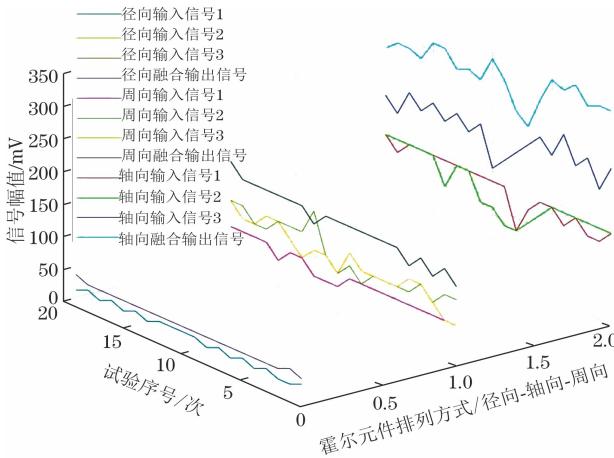
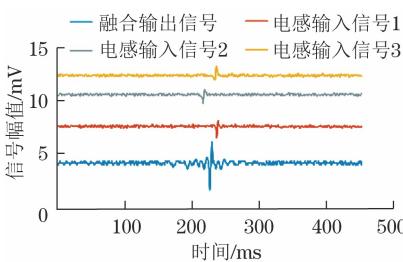


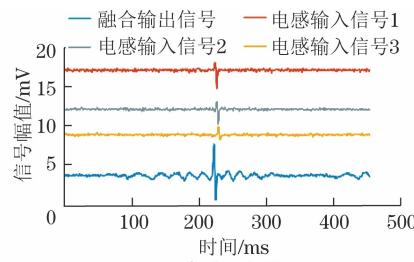
图 12 霍尔元件 3 种排列方式的损伤信号幅值特征

表 1 霍尔元件 3 种排列方式的损伤信号

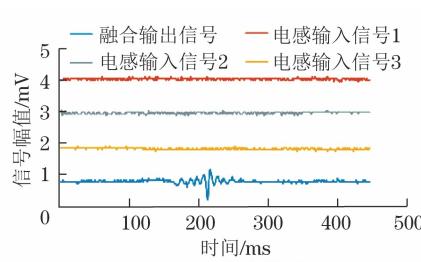
项目	幅值均值 mV		
	轴向	周向	径向
输入通道 1 幅值均值	132.0	89.0	28.4
输入通道 2 幅值均值	125.0	56.0	8.0
输入通道 3 幅值均值	212.0	82.0	16.0
输出信号幅值均值	302.4	137.0	40.8



(a) 电感轴向排列



(b) 电感周向排列



(c) 电感径向排列

图 14 电感元件 3 种排列方式的损伤信号波形特征

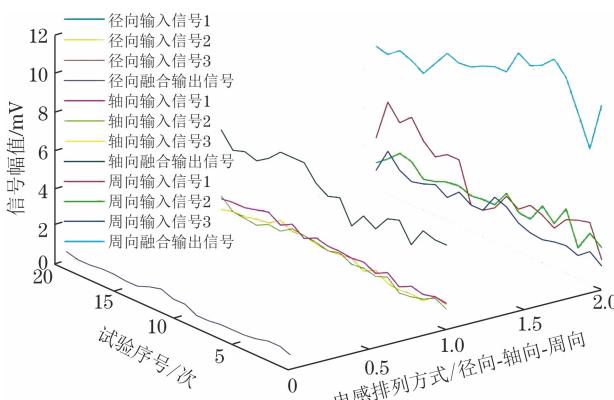


图 15 电感元件 3 种排列方式的损伤信号幅值特征

由此可见,对于外部断丝损伤群的检测,电感元件在环形探靴中轴向、周向、径向分布时,电感加法器可以有效提升信号的幅值大小,电感的 3 种排列

3.2 多通道电感信号融合方案试验验证

搭建测试电路并初步完成测试后,设计并制作了多通道电感信号融合前端探靴及其适配的 PCB 样板,采用双电源供电,其实物如图 13 所示。经初步测试,此方案能够对损伤信号的幅值有一定的提升。



图 13 电感加法器 PCB 板实物

针对外部断丝损伤群(见图 9),同样采用便携式钢丝绳检测探头,采用图 4 所示探靴和图 10 所示的检测设备进行测试。同样地,电感的每种排列方式测 4 组数据,即 3 组输入数据和 1 组输出数据,每组数据记录 20 个波形信号。其 3 种排列方式的损伤信号波形特征如图 14 所示,所有数据的损伤信号幅值特征如图 15 所示。每组数据的损伤信号幅值均值如表 2 所示。

针对外部断丝损伤群(见图 9),同样采用便携式钢丝绳检测探头,采用图 4 所示探靴和图 10 所示的检测设备进行测试。同样地,电感的每种排列方式测 4 组数据,即 3 组输入数据和 1 组输出数据,每组数据记录 20 个波形信号。其 3 种排列方式的损伤信号波形特征如图 14 所示,所有数据的损伤信号幅值特征如图 15 所示。每组数据的损伤信号幅值均值如表 2 所示。

方式分别能够提高 50%, 50%, 40% 以上,其中,电感周向排列时,加法器输出的信号幅值最大。

表 2 电感元件 3 种排列方式的损伤信号

项目	幅值均值 mV		
	轴向	周向	径向
输入通道 1 幅值均值	1.57	2.84	0.24
输入通道 2 幅值均值	1.31	2.14	0.32
输入通道 3 幅值均值	1.28	1.49	0.24
输出信号幅值均值	4.48	8.75	0.85

4 结语

文章针对现有钢丝绳无损检测仪器中仍存在的对前端多个磁敏元件处理方式较为简单的问题,提出了一种多通道钢丝绳漏磁检测信号融合方法,主

要包括磁敏元件阵列优化及硬件电路设计两个方面,并进行了试验验证。结果表明,该方法能够有效提升损伤信号幅值,并针对不同磁敏元件找出了各自最优的阵列方式。

参考文献:

- [1] 黄松岭,孙燕华,康宜华.现代漏磁无损检测[M].北京:机械工业出版社,2017.
- [2] 沈功田,王宝轩,郭锴.漏磁检测技术的研究与发展现状[J].中国特种设备安全,2017,33(9):43-52.
- [3] 曹印妮,张东来,徐殿国.钢丝绳定量无损检测现状[J].无损检测,2005,27(2):91-95,106.
- [4] 张宏伟.钢丝绳损伤远程漏磁检测系统研究[D].武

汉:华中科技大学,2022.

- [5] 董文琪.基于嵌入式系统的手持钢丝绳漏磁检测仪[D].武汉:华中科技大学,2019.
- [6] 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].无损检测,2019,41(1):34-36.
- [7] 孙燕华,马文家,田晓贺,等.基于STM32F4嵌入式的钢丝绳漏磁检测数据采集系统[J].无损检测,2018,40(9):56-59,67.
- [8] 康宜华,杨克冲,杨叔子,等.基于钢丝绳结构特征的断丝漏磁霍尔效应检测方法[J].华中理工大学学报,1992,20(S1):207-213.
- [9] 杨叔子,康宜华.钢丝绳断丝定量检测原理与技术[M].北京:国防工业出版社,1995.

(上接第 55 页)

- [5] DU PLESSIS A, YADROITSEV I, YADROITSAVA I, et al. X-ray microcomputed tomography in additive manufacturing: a review of the current technology and applications [J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2018, 5(3):227-247.
- [6] 张祥春,张祥林,刘钊,等.工业 CT 技术在激光选区熔化增材制造中的应用[J].无损检测,2019,41(3):52-57.
- [7] KING W E, BARTH H D, CASTILLO V M, et al.

Observation of keyhole-mode laser melting in laser powder-bed fusion additive manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214 (12): 2915-2925.

- [8] PANWISAWAS C, PERUMAL B, WARD R M, et al. Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium alloys: experimental and modelling [J]. Acta Materialia, 2017, 126:251-263.