

起重机钢丝绳智能在线监测系统设计^{*}

李学伟^{1,2}, 冯 达¹, 齐永兰¹, 丁海洋², 周 强², 惠延波³

(1. 河南工学院 智能工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 卫华集团有限公司, 河南 新乡 453400;

3. 河南工业大学 机电工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对工业生产中起重机用钢丝绳缺陷检测设备体积大、可靠性差、精度低、在线监测困难等问题,设计开发了基于漏磁原理的起重机钢丝绳智能在线监测系统。系统采用永磁体对钢丝绳进行非饱和磁化,以降低磁化器的体积;选用高灵敏度、低磁滞 TMR2701 线性磁阻传感器,结合小波降噪算法,以提升钢丝绳漏磁信号信噪比。实验结果表明,该系统能有效提高检测信号的信噪比,提升钢丝绳断丝识别准确度。

关键词:起重机;钢丝绳;在线监测;漏磁检测

中图分类号:TP216

文献标识码:A

文章编号:2096-7772(2023)05-0009-05

0 引言

随着我国社会经济的发展,起重机被广泛应用到制造业、采矿业、港口码头、航洋开发、建筑等行业。钢丝绳作为起重机的重要构件,由于其在设备长期运行中承受拉伸、腐蚀、挤压、摩擦等外部作用力,造成磨损,出现断丝等现象^[1]。钢丝绳更换流程复杂,定期更换钢丝绳虽然能避免较晚更换钢丝绳带来的安全事故,但是过早更换钢丝绳会造成人力、财力的浪费^[2,3]。

采用钢丝绳无损检测技术可以很好解决以上问题,全面提升系统的检测效率,保障检测的可靠性和连续性,减小断绳事故的发生率,提高生产效率。钢丝绳无损检测技术涉及到电磁场、信号获取、信号处理、信号分析和模式识别等领域,截至目前,它已经发展出多种方案,但仍存在以下问题:(1)设备复杂度高,检测繁琐;(2)易受环境干扰产生噪声,检测精度低;(3)在线监测困难。因此,本文设计了一种新的起重机钢丝绳智能在线监测系统以解决这些问题。

1 系统方案设计

钢丝绳缺陷主要由三个方面组成:(1)金属截面

损失(Loss of Metallic Area, LMA),包括内外部磨损、锈蚀、绳股断裂等;(2)局部损伤(Local Fault, LF),主要表现为断丝、裂纹、点蚀麻点、绳端断丝等;(3)结构损伤(Structure Fault, SF),主要体现为钢丝绳变形、股芯外露、股间隙不均匀和捻距不均等。起重机钢丝绳使用过程中出现的缺陷主要以 LMA 与 LF 损伤为主,这两类损伤相较于 SF 损伤较难被发现,因此,本文在研制起重机钢丝绳在线监测设备中,主要以识别 LMA 和 LF 两类缺陷为主要监测目标。

钢丝绳在线监测系统由磁化器、磁阻传感器、位移编码器、信号预处理电路、数据采集、计算机及 LabVIEW 据处理软件组成,其结构框图如图 1 所示。

1.1 漏磁检测基本原理

本系统采用如图 2 所示方式,利用永磁体作为磁源对钢丝绳进行非饱和磁化,形成励磁回路。如果钢丝绳表面或内部无损伤,钢丝绳局部被磁化,磁通量没有变化;当钢丝绳出现局部损伤(断丝或磨损)时,钢丝绳损伤处磁导率降低,磁阻增大,磁感应线溢出钢丝绳表面,产生漏磁场。利用磁阻传感器检测漏磁信号,将其转换为电信号^[4]。电信号经滤

^{*} 收稿日期:2023-08-15

基金项目:新乡市科技攻关项目(GG2021017);河南工学院博士(后)科研启动基金项目(9001/KQ1908);教育部产学研合作协同育人项目(220903053301713)

第一作者简介:李学伟(1984—),男,河南卫辉人,讲师,博士,主要从事智能检测、智能机器人控制和离线强化学习等研究。

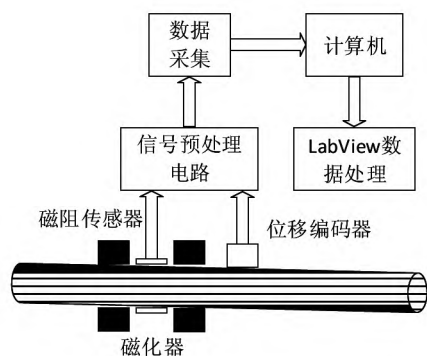


图 1 系统结构框图

波电路和 A/D 转换模块, 传输至计算机, 再通过 LabVIEW 结合小波降噪算法进行数据处理。根据数据处理结果, 判断钢丝绳损伤情况。

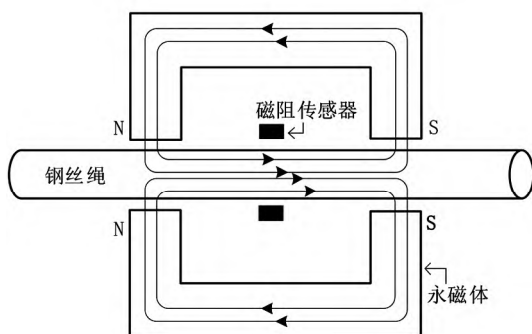


图 2 钢丝绳缺陷监测装置示意图

1.2 检测装置

目前钢丝绳漏磁监测系统常用霍尔元件制作阵列式传感器检测磁感应强度变化, 霍尔元件多用 InSb 和 GaAs 等半导体材料制作, 温度漂移量较大, 难以实现统一校准。与传统的霍尔元件相比, 隧

道磁电阻 (TMR) 器件以隧道磁电阻作为磁敏器件, 具有灵敏度高、功耗低的特点, 能够显著改善传感器的灵敏度和温度特性^[5,6]。本文采用 TMR2701 磁阻传感器, 传感器布置示意图如图 3 所示, 12 个 TMR2701 磁阻传感器均匀分布在钢丝绳周围。该传感器采用推挽式惠斯通全桥结构设计, 包含四个非屏蔽高灵敏度 TMR 传感器元件。当外加磁场沿平行于传感器敏感方向变化时, 惠斯通全桥提供差分电压输出, 工作电流随工作电压呈线性关系变化, 并且该输出具有良好的温度稳定性。该磁阻传感器使用温度范围 $-40 \sim 125^{\circ}\text{C}$, 工作电压 VCC 最大值为 7V, 饱和磁场强度在 $-20 \sim 20\text{Oe}$, 满足磁场强度检测需求。

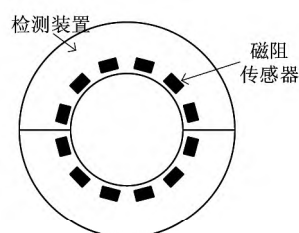


图 3 传感器布置示意图

2 检测电路设计

2.1 信号预处理电路

由于钢丝绳缺陷产生的漏磁信号微弱, 传感器输出信号需经信号预处理装置放大、滤波^[7], 即由低功耗、轨到轨运算放大器 TLV9102 对传感器输出信号进行放大处理, 然后利用三阶巴特沃斯低通滤波电路消除干扰, 电路原理图如图 4 所示。

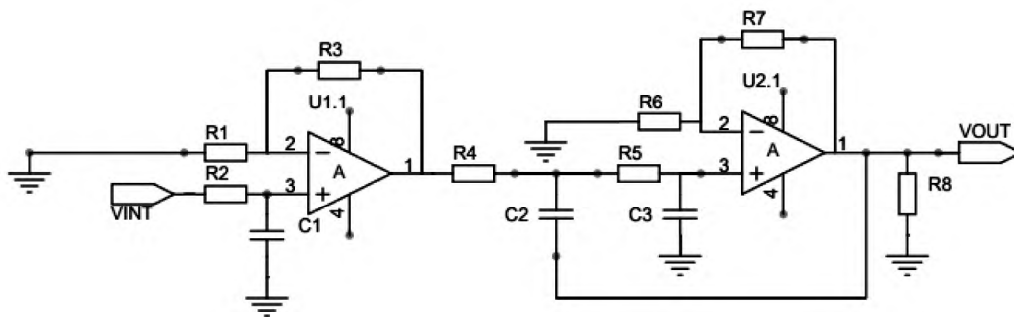


图 4 信号预处理电路

2.2 数据采集电路

数据采集电路主要是将模拟信号转换为数字信号, 并传输至上位机进行处理^[8]。本文选用北京阿尔泰科技发展有限公司研发的数据采集卡 USB3131A, 如图 5 所示, 对预处理电路输出的模拟

信号进行采集。该数据采集卡有 16 路模拟量输入通道, 分辨率为 16bit, 输入阻抗 $1\text{G}\Omega$, 具有低功耗、传输效率高、实时性强、便携、与 LabVIEW 无缝衔接等优点。



图5 数据采集卡

3 基于小波变换的数据降噪算法

本文利用 LabVIEW 对数据采集卡采集到的数据进行处理,通过检测电压幅值的突变来判断钢丝绳缺陷是否存在。但是受电路噪声影响,输出信号带有随机性的尖峰和突变,造成部分较小的缺陷信号无法辨识而被漏检^[9]。

为有效消除噪声,避免钢丝绳缺陷的漏检和误检,提高检测的准确度,必须滤除钢丝绳缺陷信号中的噪声。传统的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)仅能分析频域信息,无法分析信号的时域部分,故无法较好地处理突变扰动信号^[10]。短时傅里叶变换(Short-time Fourier Transform, STFT)虽然通过窗口在频域信号中滑动,增加了时域信息,但是其窗口大小固定,无法反映信号的突变。而小波变换是将 FFT 无限长的三角函数基换成了有限长并会衰减的小波基,这样不仅能够获取频域信息,还能获取时域信息^[11]。相比 STFT,小波变换具有更好的时频窗口特性。在分析低频信号时,其窗口很大;而分析高频信号时,其窗口较小,能聚焦信号的每个细节。因此,本文采用小波变换对采集到的钢丝绳缺陷信号进行处理。

对于任意的 $f(t) \in L^2(R)$, $L^2(R)$ 为平方可积空间,连续小波变换为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

$$a, b \in R, a \neq 0$$

式中, a 为伸缩因子, b 为平移因子, $\psi(t)$ 为一个母小波或基本小波。若 a, b 为连续值,其重构公式为:

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (2)$$

小波算法是信号降噪的核心模块,其中两个关键问题是估计小波阈值和选取小波函数。首先根据钢丝绳缺陷检测信号和噪声分界点缺点阈值;再根据钢丝绳信号选取小波函数,对钢丝绳缺陷检测信

号进行小波分解,以达到去噪效果。

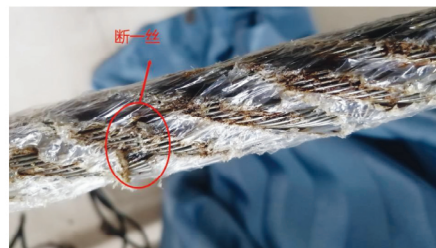
4 实验与结果分析

图 6 为本文设计的起重机钢丝绳监测装置实物图,该装置为 3D 打印,材质为 PLA。



图6 起重机钢丝绳在线监测装置实物图

为了对本文所提出的钢丝绳在线监测系统的性能进行验证,接下来以图 7 所示起重机钢丝绳作为实验对象进行断丝实验测试。该钢丝绳公称直径 21mm,单丝直径 1mm,捻距 120mm,金属截面积 197mm²。



(a) 钢丝绳单根断丝



(b) 钢丝绳 3 根断丝

图7 钢丝绳断丝效果图

图 7(a)、(b) 中钢丝绳分别有 1 根断丝和 3 根断丝,利用本文设计的缺陷在线监测系统对其进行检测,缺陷检测信号如图 8 所示。

通过小波滤波处理采集的钢丝绳信号,将原始信号进行 4 层小波分解,使用 'db5' 小波基(Daubechies5 小波)对信号进行离散小波变换,分解层包含近似系数和细节系数的小波系数向量,最后对细节函数和近似函数进行 1~4 层信号的重构。

从图 8 以看出,钢丝绳缺陷检测信号整体较平

稳,小波变换去噪效果明显,可以明显区分出钢丝绳缺陷处信号,并且可以根据缺陷信号幅值大小定量分析缺陷处断丝数量。结合位移编码器,直接根据缺陷信号定位钢丝绳缺陷处,最终实现起重机钢丝绳缺陷的智能化在线监测。

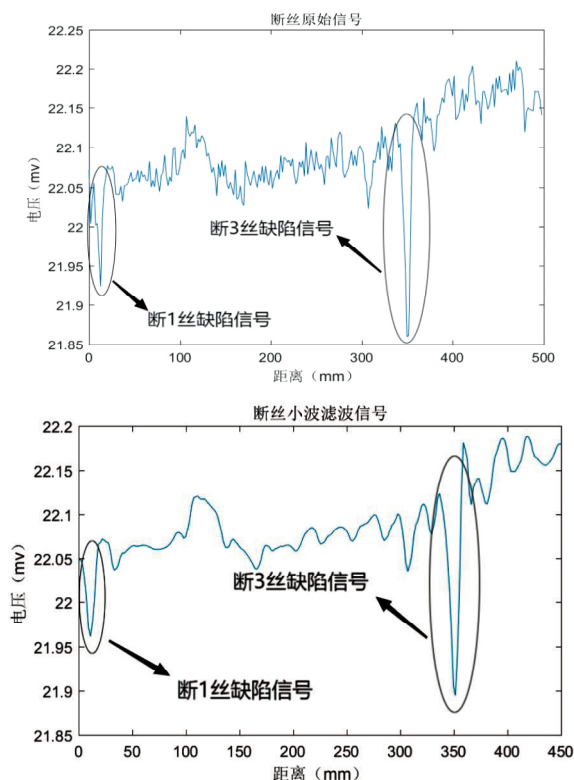


图8 钢丝绳缺陷检测信号

5 结语

目前钢丝绳缺陷检测系统主要存在设备体积大、精度低、输出信号噪声大等问题,导致在线监测难以实现。本文设计了基于漏磁原理的钢丝绳智能在线缺陷监测系统,采用永磁体进行非饱和磁化,同时利用小波变换有效去除监测信号噪声。实验结果

表明,该系统可以有效平稳监测信号,提高缺陷信号定性识别的准确度。该缺陷监测系统能准确掌握缺陷数量及位置信息,并且操作简单,准确性高。在未来的研究中,希望进一步探索新的技术,以提高系统抗干扰能力等。

(责任编辑 王 磊)

参考文献:

- [1] 谷海涛. 起重机用钢丝绳受力分析及疲劳寿命估算研究[D]. 太原:太原科技大学, 2013.
- [2] 刘志辉. 基于漏磁原理的钢丝绳断丝损伤定量识别研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2020.
- [3] 韩东旭. 基于漏磁检测技术的便携式电梯钢丝绳断丝损伤检测探头设计及实现[D]. 济南:山东大学, 2020.
- [4] 吕茂超. 基于弱磁检测技术在矿用钢丝绳的检测上的设计[J]. 轻工科技, 2017, 33(3):105-106.
- [5] 朱良,谭继文,张义清. 基于 TMR 传感器的钢丝绳损伤漏磁检测研究[J]. 煤矿机械, 2019, 40(4):37-39.
- [6] LIU S W, SUN Y H, JIANG X Y, et al. A new MFL imaging and quantitative nondestructive evaluation method in wire rope defect detection[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 163:108156.
- [7] 马文家. 基于 STM32F1 的钢丝绳无损检测系统[J]. 机电工程技术, 2020, 49(6):28-30.
- [8] WU D H, SU L X, WANG X H, et al. A Novel Non-destructive Testing Method by Measuring the Change Rate of Magnetic Flux Leakage[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017, 36(2):24.
- [9] 王红尧,吴佳奇,李长恒,等. 矿用钢丝绳损伤检测信号处理方法研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(2):58-62.
- [10] LIU S W, SUN Y H, JIANG X Y, et al. Comparison and analysis of multiple signal processing methods in steel wire rope defect detection by hall sensor[J]. Measurement, 2021, 171:108768.
- [11] 刘媛媛. 基于无损检测技术的钢丝绳损伤信号的分析研究[D]. 济南:山东大学, 2021.

Design of Intelligent On-line Monitoring System for Crane Wire Rope

LI Xuewei^{1,2}, FENG Da¹, QI Yonglan¹, DING Haiyang², ZHOU Qiang², HUI Yanbo³

(1. School of Intelligent Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Weihua Group Co. Ltd, Xinxiang 453400, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problems of large volume, poor reliability, low precision and difficulty in on-line monitoring of steel wire rope defect detection equipment for crane in industrial production, an intelligent online monitoring system for crane steel wire rope based on magnetic flux leakage principle is designed and developed. The system uses permanent magnet to carry on unsaturated magnetization to the wire rope, which greatly reduces the volume of the magnetizer. The high sensitivity and low hysteresis TMR2701 lin-

ear reluctance sensor is selected, and the wavelet noise reduction algorithm is used to improve the signal-to-noise ratio of steel wire rope magnetic leakage signal. The results show that the scheme can still detect stable and reliable magnetic leakage signal of steel wire rope defects in a certain range of lift-off values.

Key words Crane; Steel wire rope; On-line monitoring; Magnetic flux leakage detection

(上接第 8 页)

Research on Design, Manufacture and Control of Pneumatic Soft Actuator

MA Xiaojie^{1,2}, ZHANG Jieyu^{1,2}, CUI Fangyuan¹, DONG Yahang¹, WANG Jinchao¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China;

2. Henan Provincial Engineering Technology Research Center for Digital Design and Manufacturing of Electromechanical Equipment, Xinxiang 453003, China)

Abstract: In this paper, the design, simulation, manufacturing, and control of a pneumatic soft actuator for grasping are studied. Firstly, the deformation behavior of the pneumatic soft actuator is studied by the finite element analysis method, and the design is guided based on this. Secondly, it was experimentally proven that the pneumatic soft actuator can produce different displacements by changing the air pressure, satisfying different task requirements. Finally, different pneumatic soft actuator can be manufactured effectively by using the 3D printing mold integral forming method. Ultimately, through comparison of simulation and experiment, the methods and results of this paper are proven to be correct.

Key words: pneumatic soft actuator; 3D printing; finite element simulation; vision measurement