DOI: 10.3901/JME.2020.12.034

矩形线圈钢丝绳捻距涡流检测研究*

李军霞^{1,2,3} 李聪豪^{1,2,3} 焦少妮^{1,2,3} 李腾宇^{1,2,3} 寇子明^{1,2,3}

(1. 太原理工大学机械运载与工程学院 太原 030024;

2. 山西省矿山流体控制工程技术研究中心 太原 030024;

3. 矿山流体控制国家地方联合工程实验室 太原 030024)

摘要: 捻距不均匀会造成钢丝绳提前报废, 对捻距进行检测可以为其生产工艺的改进提供设计依据, 提升钢丝绳的安全使用性能。针对传统捻距检测无法对运动中钢丝绳进行实时检测, 机器视觉检测对外界光照和钢丝绳表面清洁度要求高等问题, 提出用涡流法对钢丝绳捻距进行检测。为扩大细长钢丝绳结构表面磁场的覆盖面积, 利用矩形线圈组成的差分电桥进行检测。对钢丝绳捻距双矩形差分电桥涡流检测进行有限元分析, 差分电压实部变化曲线中相邻波峰或者波谷的间距为钢丝绳的股间隙, 一个捻距扫描范围内出现的波峰和波谷数量与钢丝绳的股数相对应。矩形线圈上、下边电流元感应的涡流会在钢丝绳表面对消, 对消效应越小, 钢丝绳捻距检测灵敏度越高。为提取试验中的有用信号, 利用集合经验模态分解对扫描信号进行后处理。当相关系数较大时, 相邻波峰或波谷的间距为钢丝绳捻距。当相关系数较小时, 一个捻距内的波峰或波谷数与有限元分析结果吻合。涡流法得到的捻距与理论捻距的最大相对误差为 2.38%。

关键词: 捻距; 矩形线圈; 涡流检测; 有限元法; 后处理

中图分类号: TP206

Research on Eddy Current Testing of the Lay Length of Wire Rope with Rectangular Coil

LI Junxia^{1,2,3} LI Conghao^{1,2,3} JIAO Shaoni^{1,2,3} LI Tengyu^{1,2,3} KOU Ziming^{1,2,3}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;

2. Shanxi Province Engineering Technology Research Center For Mine Fluid Control, Taiyuan 030024;

3. National-local Joint Engineering Laboratory of Mining Fluid Control, Taiyuan 030024)

Abstract: The uneven lay length leads to the early retirement of the wire rope. The lay length detection provides the design bases for improving the production technology and enhances the safe use of the wire rope. The wire rope in motion can not be detected by the traditional lay length detection method. The imaging recognition method for measuring the lay length is limited by the external light and the attachment on the surface of the wire rope. In view of the above problems, the lay length is detected by the eddy current method. To enlarge the covering area of the magnetic field, the differential bridge composed of the rectangular coil is utilized. The finite element analysis of the lay length of the wire rope with the differential bridge is conducted. The curve of the real part of the differential voltage shows that the distance between the adjacent peaks or troughs of the scanning signal is the gap between the two adjacent strands. In the range of a lay length the number of the peaks or troughs of the scanning signal is related to the strands number of the wire rope. The eddy currents induced by the current element in the upper side and lower side of the rectangular coil cancel on the wire rope surface. The weaker the cancellation effect, the higher the detection sensitivity of the lay length. To extract the useful information from the experimental results, the scanning signal is post-processed by the ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method. As the correlation coefficient is large, the distance between the adjacent peaks or troughs is the lay length. As the correlation coefficient is small, the number of the peaks or troughs in a lay length is the same with the simulated result. The results show that the relative error of the wire rope lay length obtained by this method is less than 2.38%.

Key words: lay length; rectangular coil; eddy current testing; finite element method; post-processed

* 山西煤基低碳联合基金重点支持(U1510205)、山西省应用基础研究(201801D121177)和远东无损检测新技术论坛创新人才支持计划资助项目。20190627 收到初稿, 20191224 收到修改稿

0 前言

钢丝绳结构复杂, 一般由若干根绳股围绕绳芯螺旋捻制而成^[1-2]。图 1 为 6×19+IWRC 钢丝绳的示意图, 其中编号 1-6 是钢丝绳各捻制绳股, 某一绳股围绕绳芯旋转一周(360°)的起止点间直线距离为钢丝绳捻距。捻距是钢丝绳生产和使用性能的主要评价参数之一。在钢丝绳生产制造过程中, 牵引轮和筒体转速变化引起的收线速度不稳定, 生产设备精度不达标等因素都会造成钢丝绳绳捻距不均匀, 产生早捻现象^[3]。在钢丝绳使用过程中, 捻距分布不均匀会造成钢丝绳受力不均匀, 降低使用寿命^[4]。对钢丝绳捻距进行检测可及时发现生产中存在的问题, 改进生产工艺, 降低服役中存在的安全隐患。

图 1 6×19+IWRC 钢丝绳示意图

机器视觉是人工智能正在快速发展的一个分支, 已被用于钢丝绳捻距的测量。VALLAN 等^[5]利用视觉技术对捻距进行自动测量, 利用摄像机对钢丝绳运行图像进行连续采集, 采用绳索图像轮廓线提取算法对图像进行离线处理, 用拟合算法对轮廓线进行处理, 提取基本分量周期可得到钢丝绳的捻距。视觉系统检测捻距时精度可达到 1.2 mm。WACKER 等^[6]将拍摄的钢丝绳实际图像与钢丝绳结构三维模型进行比较, 通过钢丝绳模型图像综合分析可以实现捻距及股间隙的精确测量。ZAHNG 等^[7]对铝绞线进行图像采集, 后处理得到绞线股间隙的变化, 用以间接地对其表面损伤状态进行评估。

夏晓东^[8]专利中提出通过拆面丝、拓印、捻距计算等步骤得出实际捻距, 过程较为繁琐, 费时费力。郑新红等^[9]发明一种基于涡流法的在线钢丝绳捻距检测装置, 利用沿着绳长放置的两组相同参数的涡流探头的相位差来反映捻距的实时变化。本专利中捻距检测的灵敏度与两组探头的间距、探头电磁参数的一致性等因素有关, 增加了捻距检测难度。传统钢丝绳捻距测量方法难以对运行中的钢丝绳进行测量, 图像识别捻距方法处理数据量大难以实现实时测量, 对钢丝绳表面清洁度要求较高。

随着科学技术的发展及钢丝绳的广泛应用, 无损检测方法主要被用于钢丝绳使用损伤如断丝、磨损等的检测^[10-12]。钢丝绳捻距涡流检测公开发表的

文献较少。涡流法具有表面检测灵敏度高、非接触测量、对表面清洁度要求不高等优点^[13-17]。考虑到钢丝绳的导电电磁特性及其自身的螺旋结构, 本论文采用涡流法(Eddy current testing, ECT)对钢丝绳捻距进行检测。借助有限元分析方法对矩形线圈钢丝绳捻距涡流检测进行分析^[18-20], 并与传统扁平线圈的检测效果进行对比。本论文还搭建了试验平台对捻距进行检测。

1 涡流检测理论基础

1.1 麦克斯韦方程组

麦克斯韦方程组为涡流检测技术奠定了坚实的理论基础^[21-23], 它的微分形式如下所示。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

式中, $\mathbf{H}$ 为磁场强度, $\mathbf{J}$ 为传导电流密度, $\mathbf{D}$ 为位移矢量, $\mathbf{E}$ 为电场强度, $\mathbf{B}$ 为磁感应强度, ρ 为自由电荷体密度。

1.2 矩形线圈对消效应

矩形线圈在电磁无损检测领域具有非常广泛的应用。与传统扁平线圈相比较, 其能产生均匀平整的磁场, 感应涡流衰减缓慢, 可用于较深缺陷的检测^[24-25]。考虑到钢丝绳细长的结构特点, 为了加强感应磁场的覆盖面, 本论文用矩形线圈对钢丝绳捻距进行检测。

图 2 所示是矩形线圈对消效应的示意图。涡流检测中对矩形线圈通以交变电流时, 图 2a 中长边 a

(b) a段和b段分别感应的涡流分布情况

图 2 矩形线圈对消效应示意图

段与 b 段内电流大小相等、相位差 180° 。 a 段和 b 段内电流感应的磁场会在钢丝绳表面产生大小相等、方向相反的涡流, a 段和 b 段下方的涡流变化比较缓慢, 随着距 a 段和 b 段中心距离的增大, 涡流强度逐渐变小, 如图 2b 所示。如果短边 c 段与 d 段的长度足够短, 图 2b 中的涡流会相互抵消, 削弱导体表面涡流强度, 这就是矩形线圈的对消效应^[26]。对消效应会影响钢丝绳捻距的检测灵敏度, 因此论文将对此效应进行研究。

1.3 双矩形线圈差分检测电路

图 3 是利用两个矩形线圈 Z_1 和 Z_2 和两个固定电阻 R_1 和 R_2 组成的差分电桥, a 端和 d 端为电桥的输入端, 用于激励源的输入。 b 端和 c 端为电桥的输出端, 用于电压信号的输出。两个矩形线圈的尺寸相同。对差分电路通以正弦交流信号 I , Z_1 和 Z_2 会分别产生原磁场 H_1 和 H_2 。当双矩形线圈差分探头在钢丝绳表面进行直线扫描时, 钢丝绳表面交替变化的股峰和股谷形貌会对涡流产生扰动, 涡流产生的次级磁场 H 发生改变。 H 会干扰原磁场 H_1 和 H_2 , 使输出电压 U_{bc} 随扫描位置发生变化。

图3 双矩形线圈差分检测电路示意图

2 钢丝绳捻距涡流检测有限元分析

2.1 钢丝绳双矩形线圈捻距涡流检测模型

仿真中选定的钢丝绳型号为 $6 \times 19 + \text{IWRC}$, 直径为 8.00 mm , 长度为 180.00 mm , 捻距为 60.00 mm , 单根钢丝直径约为 0.44 mm 。设置激励信号频率为 80.00 kHz , 幅值为 1.00 A 。对于相对磁导率为 10.00 , 电导率为 1.00 Ms/m , 相对介电常数为 1.00 的钢丝绳, 涡流的标准趋肤深度为 0.19 mm ^[27]。涡流主要集中在绳股的外围钢丝上, 因此可以将单根绳股等效为实心圆柱体模型, 建立的钢丝绳双矩形线圈捻距涡流检测模型如图 4 所示。图 4a 中 $Oxyz$ 为全局坐标系, 坐标原点 O 位于钢丝绳长度的中

心, 双矩形线圈与 xz 平面共面放置。两矩形线圈大小一样, 两线圈高度方向间距 0.50 mm , 提离 0.50 mm 。矩形线圈的厚度为 3.00 mm , 匝数 130.00 , 其外矩形长为 7.00 mm , 高度为 7.00 mm , 内矩形长为 4.00 mm , 高度为 4.00 mm , 如图 4b 所示。为了与之后建立的矩形线圈进行区分, 将此种尺寸的线圈简称为小矩形线圈。

图4 钢丝绳双矩形线圈捻距涡流检测仿真模型

本文利用 Comsol Multiphysics 软件建立钢丝绳双矩形线圈捻距涡流检测三维模型, 在 AC/DC 模块下频域环境中进行求解分析。在钢丝绳模型的外围引入空气区域, 使边界条件施加在空气区域外边界的节点上。空气域为 $120.00 \text{ mm} \times 120.00 \text{ mm} \times 280.00 \text{ mm}$ 的长方体。

2.2 有限元分析

2.2.1 小矩形线圈直线扫描分析

设置双矩形线圈从 $z = -40 \text{ mm}$ 扫描至 $z = 40 \text{ mm}$, 扫描步长为 2.00 mm , 并在矩形线圈中心恰好经过钢丝绳股峰和股谷的位置进行计算。图 5 所示是小矩形线圈差分电路输出电压实部随扫描位置的变化情况。可以看出一个捻距范围内有明显的 7 个波峰 ($z = -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30 \text{ mm}$),

图5 小矩形线圈差分电桥输出电压实部随扫描位置的变化

波谷附近也出现了局部小波峰($z = -35, -25, -15, -5, 5, 15, 25, 35$ mm)。图 5 中交替变化的波峰波谷特征与仿真中钢丝绳模型外层股结构相符合。

为了表征捻距检测灵敏度, 引入波峰波谷相对变化率, 为扫描信号中波峰最大值减去波谷最小值的差比波峰最大值。对于图 5, 波峰波谷相对变化率为 11.33%。

2.2.2 对消效应对钢丝绳捻距检测影响的分析

图 2 中矩形线圈上、下长边感应涡流的对消效应主要受短边长度的影响。为了研究对消效应对钢丝绳捻距检测的影响, 构建了一种大矩形线圈, 其外矩形长 7.00 mm, 高 28.00 mm, 内矩形长 4.00 mm, 高 25.00 mm, 厚 3.00 mm。图 6 所示是大矩形线圈差分电桥输出电压实部随扫描位置的变化情况。与图 5 相似, 一个捻距范围内同样出现了 7 个明显的波峰($z = -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30$ mm)和波谷($z = -35, -25, -15, -5, 5, 15, 25, 35$ mm)。计算得图 6 中波峰波谷相对变化率为 21.25%, 相对小矩形线圈的变化率提高了 9.92%, 这主要是由于大矩形线圈的上、下长边相距较远, 涡流对消效应比较弱, 钢丝绳内涡流强度比较大, 从而对绳股表面股峰和股波的变化会更加灵敏。

图 6 大矩形线圈差分电桥输出电压实部随扫描位置的变化

2.2.3 传统扁平线圈直线扫描分析

对钢丝绳捻距涡流检测进行研究, 本论文接着选择了传统扁平线圈搭建的差分电桥用以和矩形线圈的情况进行对比。双扁平差分电桥检测探头由上、下同轴放置, 大小相同的扁平线圈组成, 内径为 4 mm, 外径为 7 mm, 厚度为 3 mm, 两线圈间距为 0.5 mm。

图 7 所示是传统扁平差分电桥输出电压实部随扫描位置的变化情况。与图 5、图 6 的结果类似, 一个捻距范围内有 7 个波峰($z = -35, -25, -15, -5, 5, 15, 25, 35$ mm)和波谷($z = -30, -20, -10, 0, 10, 20, 30$ mm)。计算得图 7 中波峰波谷相对变化率为 12.48%, 远远小于大矩形线圈时的结果。扁平

线圈检测时存在一定的对消效应, 涡流幅值在中径下方钢丝绳表面达到最大。随着距中径距离的增大, 钢丝绳表面上涡流幅值迅速变小。矩形线圈检测时, 长边下方钢丝绳表面的涡流幅值分布比较均匀, 磁场覆盖的钢丝绳面积比扁平线圈的大, 因此双矩形线圈检测捻距时波峰波谷相对变化率比较大。

图 7 扁平线圈差分电桥输出电压实部随扫描位置的变化

3 试验研究

3.1 检测系统

图 8 所示是搭建的钢丝绳矩形线圈涡流检测系统, 主要包括普源 DG4102 信号发生器、美国 National Instruments(NI)数据采集设备、双矩形线圈组成的差分检测电路和钢丝绳试样等。由信号发生器为差分检测电路提供正弦交流信号, 差分输出电压经过接线盒的端子将信号传输至 PXIe-6368 采集卡。试验中, 以 1 mm 步长手动移动钢丝绳、固定差分探头实现捻距涡流扫描检测。刻度尺用于实现扫描检测时的定位。

图 8 钢丝绳矩形线圈捻距涡流检测系统实物图

3.2 钢丝绳试样与矩形线圈

选购的钢丝绳试样型号为 6×19 + IWRC, 局部实物如图 9a 所示。用游标卡尺测量多段钢丝绳并对多段所得捻距取平均, 可以得到钢丝绳的平均捻距为 56.00 mm。为排除钢丝绳单一段检测结果的偶然

性,取图9b中长度均为130 mm的A、B两段作为检测对象,两段之间距离C为80.00 mm。为避免检测过程产生边缘效应,被检测段两端距离钢丝绳绳端远远大于200 mm。建立全局坐标系 $O-xyz$,坐标原点位于A段的起点。

图9 钢丝绳被检测试样实物图及被检测段示意图

图10所示是检测用的双矩形线圈差分电路实物图,主要包括自行绕制的尺寸相同的两个矩形线圈、电阻和PCB板。根据试验情况选定单个矩形线圈的外矩形长度28.00 mm,高度28.00 mm,内矩形长度20.00 mm,高度为20.00 mm,厚度为5.00 mm,电阻阻值均为100 Ω 。

图10 双矩形线圈差分电路实物图

3.3 电路稳定性与试验重复性

为验证检测电路的稳定性,分别对空气以及图9b中a点($z=0$ mm),b点($z=50$ mm)和c点($z=100$ mm)三个位置处的钢丝绳进行三次测量。试验时先分别记录空气和钢丝绳3个位置处的差分电压幅值,接着继续重复两次。每次测量间隔为5分钟,测量结果如表1所示。同平均值相比较,同一位置三次测量的电压幅值最大波动为0.15 mV。波动主要是由于温漂和外界电磁场的干扰。定义最大变化率为最大波动时的差分电桥输出电压幅值减去平均

表1 双矩形线圈差分电桥电压幅值 mV

位置	第一次	第二次	第三次	平均值	最大变化率(%)
空气	4.97	4.93	4.92	4.93	0.81
a	14.48	14.34	14.28	14.34	0.97
b	13.13	13.04	12.99	13.04	0.69
c	13.52	13.48	13.36	13.48	0.89

值的差与平均差的比值。所有测量位置中,最大变化率为0.97%。

4 试验结果分析

为确保试验结果的准确性,对图9中A段和B段钢丝绳以1 mm步长进行三次扫查。为减小温漂对试验重复性的影响,每次扫查完毕进行下一次扫查之前,关机5 min并重新开机保持预热10 min。

4.1 钢丝绳A段扫查结果

图11所示是利用双矩形差分电桥对钢丝绳A段进行扫查的结果,横坐标是扫查位置 z ,纵坐标是差分电桥输出电压幅值。可以看出三次试验结果吻合度比较高。一个捻距范围内仅出现了明显的两个波谷,波峰处比较平坦。这与图5、6中大、小矩形线圈表现出的特征不一样。一方面是由于有限元分析时矩形线圈a段与b段长度是7 mm,试验时增加到了28 mm。当a段与b段长度增加后,其正下方的涡流沿着钢丝绳长度方向变化较慢,降低了钢丝绳股峰和股波对涡流分布的扰动,因此矩形线圈长边变长后,捻距的检测灵敏度会减低。

图11 双矩形差分电桥钢丝绳A段扫查结果

图12所示是利用双矩形差分电桥对钢丝绳B段进行扫查的结果,横坐标是扫查位置,纵坐标是差分电桥输出电压幅值。可以看出三次试验结果吻

图12 双矩形差分电桥钢丝绳B段扫查结果

合度比较高。 B 段的检测曲线中一个捻距范围内的特征与 A 段一样。 A 段和 B 段扫描信号的变化范围不一样,这主要是由于扫描过程中钢丝绳的弯曲程度不一致。

4.2 基于 EEMD 试验数据后处理

对图 9 所示钢丝绳 A 段和 B 段进行扫查试验时,一方面钢丝绳自身重力、扫查装置的精度等因素导致扫描时探头距离钢丝绳表面的提离不是恒值,另一方面人工绕制线圈时无法保证两个矩形线圈的电磁参数完全一致。钢丝绳表面周期性变化的股峰/股谷特征对涡流信号的影响会受到上述随机变化的提离和线圈参数不一致的影响,进而造成图 11、图 12 所示试验结果和图 5 所示仿真结果有差异。试验得到的扫查曲线波峰处隐藏着钢丝绳股峰/股谷结构对涡流响应信号的影响。集合经验模态分解方法(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)是一种噪声辅助的自适应信号分析方法,可用于非线性和非平稳信号的时频分析,本文采用 EEMD 方法对原始曲线进行处理。

图 13 为对 A 段钢丝绳扫查结果处理后得到的最大相关本征模态函数(Intrinsic mode function, IMF)分量的分布情况,提取曲线中波峰(G 、 H)、波谷(D 、 E 、 F)为特征量,如表 2 所示。对相邻波峰间距和相邻波谷间距取平均,得到捻距估计值 Y 分别为 56.33 mm、55.33 mm 和 56.67 mm,与游标卡尺测得的捻距相比,最大相对误差 δ 为 1.2%。

图 13 A 段扫查结果后处理得最大相关分量 IMF3 分布情况

表 2 钢丝绳 A 段捻距估计值及相对误差 mm

扫查 顺序	波峰		波谷			Y	$\delta(\%)$
	G	H	D	E	F		
第一次	39.00	89.00	7.00	63.00	126.00	56.33	0.59
第二次	41.00	89.00	8.00	65.00	126.00	55.33	1.20
第三次	40.00	91.00	7.00	65.00	126.00	56.67	1.20

图 14 为对 B 段钢丝绳扫查结果处理后得到的最大相关分量 IMF3 的分布情况,其中波峰(G 、 H)、波谷(D 、 E 、 F)的具体位置如表 3 所示。计算得到的最大捻距估计值 Y 为 57.33 mm, δ 为 2.38%。

图 14 B 段扫查结果后处理得最大相关分量 IMF3 分布情况

表 3 钢丝绳 B 段捻距估计值及相对误差 mm

扫查顺序	波峰		波谷			Y	$\delta(\%)$
	G	H	D	E	F		
第一次	36.00	94.00	10.00	66.00	124.00	57.33	2.38
第二次	35.00	94.00	10.00	64.00	122.00	57.00	1.79
第三次	37.00	94.00	9.00	66.00	123.00	57.00	1.79

表 2 和表 3 表明通过 EEMD 分解得到的最大相关分量 IMF3 分布可以得到钢丝绳捻距,但是图 13、图 14 绳股信息已丢失。考虑到绳股信息有着相对较高的频率以及 IMF1 分量中包含大量噪声,本文利用离散傅里叶拟合方法分别对 A 段和 B 段扫查信号的 IMF2 分量进行处理,得到的结果分别如图 15、图 16 所示。可以看出一个捻距范围内有明显 7 个波峰和波谷,这与图 5、6 的有限元分析结论一致。

图 15 A 段扫查结果后处理得 IMF2 分布情况

图 16 B 段扫查结果后处理得 IMF2 分布情况

表 4 所示是图 15、图 16 中波峰波谷的具体位置。对于钢丝绳 A 段, 平均股间隙为 8.75 mm, 平均捻距为 52.62 mm, 相对误差为 6.03%。对于钢丝绳 B 段, 平均股间隙为 8.76 mm, 平均捻距为 52.16 mm, 相对误差为 6.85%。同钢丝绳捻距的制造工艺误差 $\pm 3\%$ 相比较, 利用 IMF2 分量估计捻距的精度较低。为提高钢丝绳捻距涡流检测精度, 后续研究中将对矩形线圈进行优化设计, 采用霍尔传感器、巨磁阻传感器等高灵敏度器件进行检测。

表 4 图 15 和 16 曲线对应波峰波谷位置 mm

钢丝绳 A 段		钢丝绳 B 段	
波峰	波谷	波峰	波谷
11.7	6.9	12.2	4.4
20.3	16.1	20.3	16.4
28.8	24.5	28.6	24.2
37.7	33.2	37.1	33
45.4	42.3	44	40.7
54.6	49.6	51.7	47.6
62.1	58.4	64.4	56.5
71.8	66.7	72.5	68.6
81.9	77.1	80.8	76.4
90.5	86.4	89.3	85.2
99	94.7	96.1	92.9
108	103.4	103.9	99.7
115.7	112.5	116.5	108.7
124.8	119.8	124.7	120.7

5 结论

为提高钢丝绳使用的安全性, 本文利用双矩形线圈组成的差分电桥对钢丝绳捻距进行检测, 主要结论如下。

(1) 矩形线圈检测钢丝绳捻距仿真表明, 单个捻距扫描范围内差分电压变化曲线会出现 7 个波峰或者波谷, 这与钢丝绳模型结构一致。当增加矩形线圈 a 段与 b 段间距时涡流对消效应减弱, 钢丝绳内涡流强度比较大, 因此扫描检测时涡流响应信号对钢丝绳绳股表面状态会更敏感。

(2) 传统扁平线圈检测钢丝绳捻距仿真表明, 单个捻距扫描范围内差分电压变化曲线会出现 7 个波峰或者波谷。与扁平线圈相比较, 矩形线圈检测时钢丝绳表面磁场覆盖面积较大, 因此钢丝绳捻距矩形线圈的检测灵敏度较大。

(3) 钢丝绳捻距双矩形线圈差分电桥涡流检测试验表明, 当矩形线圈的长度增加时, 捻距的检测灵敏度会减低。利用 EEMD 对试验结果进行后处理,

可以提取出隐藏在试验中的有用信号。

参 考 文 献

- [1] 任志乾, 于宗乐, 陈循. 钢丝绳弹塑性损伤本构模型研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 121-129.
REN Zhiqian, YU Zongyue, CHEN Xun. Study on wire rope elastic-plastic damage constitutive model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 121-129.
- [2] 张俊, 葛世荣, 王大为, 等. 基于微动磨损预测矿井提升钢丝绳安全系数[J]. 机械工程学报, 2018, 55(7): 110-118.
ZHANG Jun, GE Shirong, WANG Dagang, et al. Prediction of the safety factor of mine hoisting rope based on fretting wear[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 55(7): 110-118.
- [3] 孙建芳. 钢丝绳捻制成形数值模拟与制品力学强度分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
SUN Jianfang. Numerical simulation on laying process and strength analysis of metal wire rope[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [4] LI Xiang, WANG Haiying, CHEN Yan, et al. Elastic-plastic modeling of metallic strands and wire ropes under axial tension and torsion loads[J]. International Journal of Solids and Structures, 2017, 129: 103-118.
- [5] VALLAN A, MOLINARI F. A vision-based technique for lay length measurement of metallic wire ropes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2009, 58(5): 1756-1762.
- [6] WACKER E S, DENZLER J. An analysis-by-synthesis approach to rope condition monitoring[C]// The 6th International Symposium on Visual Computing, November 29-December 1, 2010, Las Vegas, Nevada, USA. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 459-468.
- [7] ZHANG Ye, HUANG Xinbo, JIA Jianyuan, et al. A recognition technology of transmission lines conductor break and surface damage based on aerial image[J]. IEEE Access, 2019, 7: 59022-59036.
- [8] 夏晓东. 钢丝绳捻距的测量方法: 中国, 201410425294.2 [P]. 2014-08-23.
XIA Xiaodong. Measuring method of wire rope lay length: China, 201410425294.2 [P]. 2014-08-23.
- [9] 郑新红, 张家旂, 张晓雷, 等. 一种钢丝绳捻距在线检测装置: 中国, 201520535589.5 [P]. 2015-11-18.
ZHENG Xinhong, ZHANG Jiayi, ZHANG Xiaolei, et al. An on-line testing device for wire rope lay length: China, 201520535589.5 [P]. 2015-11-18.

- [10] SCHLANBUSCH R, OLAND E, BECHHOEFER E. Condition monitoring technologies for steel wire ropes-a review[J]. International Journal of Prognostics and Health Management, 2017, 8(1): 1-14.
- [11] PENG Pengchi, WANG Chungyue. Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges[J]. NDT & E International, 2015, 75: 80-86.
- [12] WU Jianbo, FANG Hui, HUANG Xiaoming, et al. An online MFL sensing method for steel pipe based on the magnetic guiding effect[J]. Sensors, 2017, 17(12): 1-13.
- [13] 高宽厚, 于亚婷, 杨姣, 等. 双层导电涂层厚度的涡流无损检测方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(14): 114-119.
- GAO Kuanhou, YU Yating, YANG Jiao, et al. Study on eddy-current nondestructive testing method of the double-layers conductive coating thickness[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(14): 114-119.
- [14] WU Jialong, ZHOU Deqiang, WANG Jun, et al. Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic CFRP materials using pulsed eddy current testing[C]// Proceeding of IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/testing, June 20-23, Chengdu, China. IEEE, 2014: 181-185.
- [15] JIAO Shaoni, LI Jian, DU Fei, et al. Characteristics of eddy current distribution in carbon fiber reinforced polymer[J]. Journal of Sensors, 2016, 2016: 1-8.
- [16] SMETANA M, STRAPACOVA T. Detection capabilities evaluation of the advanced sensor types in eddy current testing[J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2013, 89(3): 247-249.
- [17] SCHULZE M, HEUER H. High-resolution eddy current sensor system[J]. The International Society for Optical Engineering, 2009, 16(5): 791-797.
- [18] ALI Sophia, TIAN Guiyun, FAN Mengbao. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A Review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 500-514.
- [19] JIA Meihui, WANG Chenglin, REN Bin. Manufacturing error effects on mechanical properties and dynamic characteristics of rotor parts under high acceleration[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 920-932.
- [20] LI Yong, CHEN Shengle, HUANGE Jinlong, et al. Experimental and simulation studies on cold welding sealing process of heat pipes[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2): 332-343.
- [21] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- XIE Chufang, RAO Kejin. Electromagnetic field and electromagnetic wave[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [22] 金建铭, 王建国. 电磁场有限元方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998.
- JIN Jianming, WANG Jianguo. Finite element method of electromagnetic field[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998.
- [23] 何存富, 邓鹏, 吕炎, 等. 一种高信噪比电磁声表面波传感器及在厚壁管道检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 59-66.
- HE Cunfu, DENG Peng, LÜ Yan, et al. A new surface wave EMAT with high SNR and the application for defect detection in thick-walled pipes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 59-66.
- [24] 张玉华, 孙慧贤, 罗飞路, 等. 基于三维磁场测量的脉冲涡流检测探头的设计[J]. 机械工程学报, 2009, 45(8): 249-254.
- ZHANG Yuhua, SUN Huixian, LUO Feilu, et al. Design of a novel pulsed eddy current testing probe based on 3D magnetic field measurement[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 249-254.
- [25] 李光远. 基于电磁法的钢丝绳无损检测技术的研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- LI Guangyuan. Research of the wire rope nondestructive testing technology based on electromagnetic method[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [26] JIAO Shaoni, LIU Xiaohua, ZENG Zhiwei. Intensive study of skin effect in eddy current testing with pancake coil[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017: 1-10.
- [27] 周德涌. 钢丝与钢绳机械[M]. 湘潭: 湘潭钢铁公司职工大学出版社, 1996.
- ZHOU Deyong. Steel wire and rope machinery[M]. Xiangtan: Xiangtan Iron and Steel Company Staff and Workers University Press, 1996.

作者简介: 李军霞, 女, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电液一体化。
E-mail: 1983767665@qq.com
焦少妮(通信作者), 女, 1986 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为电磁检测。
E-mail: 532689699@qq.com
寇子明, 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机电液一体化。
E-mail: zmkou@163.com