DOI: 10.3901/JME.2020.16.013

扁平线圈钢丝绳捻距涡流响应分析及试验研究*

李腾宇^{1,2,3} 寇子明^{1,2,3} 吴娟^{1,2,3} 焦少妮^{1,2,3} 毛清华⁴

(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;

4. 西安科技大学机械工程学院 西安 710054)

摘要: 捻距作为钢丝绳重要参数之一, 对其进行检测可间接反映钢丝绳受力状态和表面损伤状态。针对现有图像识别方法受限于外界光照及钢丝绳表面附着物覆盖情况、漏磁法需要磁化钢丝绳等问题, 提出采用双扁平线圈差分电桥的钢丝绳捻距涡流检测方法。结合 A_r , $V-A_r$ 表述建立钢丝绳涡流响应分析控制方程, 对单绳股涡流分布进行分析。探头正下方绳股表面涡流形成漩涡, 绳股两侧曲面上涡流分布存在对称性。对扁平线圈的中径进行优化设计, 当中径小于等于股间隙时, 捻距检测精度高且检测灵敏度高, 然后搭建试验平台进行捻距检测。试验结果与仿真均表明扫描信号中相邻波峰或者相邻波谷的间距为股间隙, 一个捻距范围内扫描信号出现的波峰或者波谷数量与钢丝绳绳股数目相关。利用集合经验模态分解方法对试验结果进行后处理可以有效提取有用信号, 涡流法得到钢丝绳捻距的相对误差不超过 0.13%。

关键词: 钢丝绳; 捻距; 涡流检测; 差分电桥; 有限元分析

中图分类号: TP206

Analysis of Eddy Current Response to Lay Length of Wire Rope with Pancake Coil and Experimental Study

LI Tengyu^{1,2,3} KOU Ziming^{1,2,3} WU Juan^{1,2,3} JIAO Shaoni^{1,2,3} MAO Qinghua⁴

(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;

4. Mechanical Engineering School, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054)

Abstract: The lay length is one of the important parameters of the wire rope. The measurement of the lay length can indirectly reflect the stress state and the surface damage state of the wire rope. 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. The magnetic flux leakage method requires the wire rope to be magnetized. In view of the above problems, An eddy current method to detect the lay length using the double pancake coils differential bridge is proposed. Firstly, the governing formulations based on the A_r , $V-A_r$ for the eddy current response analysis are established. Combing the formulations, the distribution of the eddy current in the single strand is simulated. It forms vortex on the strand surface just under the pancake coil. The distributions of the eddy current on the curved surfaces of the two sides of the strand are symmetrical. Secondly, the medium radius of the pancake coil is optimized. When the medium radius equals to or is smaller than the gap between the two adjacent strands, the detection precision of the lay length is high and the detection sensitivity is also high. Thirdly, the experimental platform is set up to test the lay length. The experimental results and the simulation results show that the distance of the adjacent peaks or troughs of the scanning signal is just the gap between the two adjacent strands. The number of the peaks or troughs of the scanning signal in the lay length is related to the strands number of the wire rope. Finally, in order to effectively extract the useful information from the experimental results, the ensemble empirical mode decomposition (EEMD) method is utilized. The results show that the relative error of the wire rope lay length obtained by this method is less than 0.13%.

Key words: wire rope; lay length; eddy current testing; differential bridge; finite element analysis

* 山西煤基低碳联合基金重点支持(U1510205)、国家重点研发计划(2016YFC0600908)、山西省应用基础研究(201801D121177)、陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室开放基金(SKLMEEIM201905)和远东无损检测新技术论坛创新人才支持计划资助项目。20190915收到初稿, 20200327收到修改稿

0 前言

钢丝绳由相同规格的绳股螺旋缠绕形成,为柔性空间螺旋结构,被作为承载与传递元件广泛应用于矿山、旅游、建筑等领域^[1]。当钢丝绳出现断裂等损伤时通常会造成重大的经济损失或人员伤亡,因此其力学特性及损伤机理受到广泛的关注,但受限于工作条件难以直接对运行中钢丝绳的受力及磨损进行检测。现有研究表明无论钢丝绳拉扭受力或由表面磨损引起的变形均会导致钢丝绳捻距的变化^[2-4],因此对捻距进行检测可间接反映出钢丝绳的受力和表面损伤,提高钢丝绳运行安全性。传统的捻距测量方式主要通过人工进行,但这种测量方法不能用于检测运行中的钢丝绳,针对该问题研究人员提出利用图像识别、漏磁法和涡流法对服役中钢丝绳进行检测。

VALLAN 等^[5]提出了一种捻距视觉自动测量系统,通过摄像机获取运行中钢丝绳图像,利用图像和信号处理算法提取钢丝绳轮廓线,确定钢丝绳捻距及移动距离。试验结果表明该方法检测钢丝绳的捻距相对误差为 0.55%。WACKER 等^[6]建立钢丝绳图像综合分析系统,利用摄像机采集钢丝绳实际的 2-D 投影,结合钢丝绳模型结构参数构建参数化 3-D 模型,对比实际 2-D 投影与参数化模型生成的 2-D 投影,并以迭代方式更新钢丝绳模型参数。对真实钢丝绳测量结果表明该方法获得的捻距相对误差为 1.45%。ZHANG 等^[7]采用航拍图像检测铝绞线潜在的断裂及损伤,通过图像处理得到铝绞线股间距离大小,通过与设定的阈值比较判断是否出现损伤等缺陷,试验表明该方法测量损伤平均准确率在 90% 以上。OUELLETTE^[8]的专利中将至少两个围绕钢丝绳的检测探头信号相减以消除钢丝绳偏离轴线移动对信号的扰动,根据扫描检测钢丝绳不平整表面时信号的变化规律推算得到了捻距。YAN 等^[9]针对钢丝绳断丝检测缺陷定位问题,设计一种漏磁信号处理电路,将之前被忽视的股波信号转化为方波得到钢丝绳股间距离,通过计算方波数目获取钢丝绳移动距离及股波频率,并结合锁相环实现钢丝绳检测的等距采样。

涡流检测具有操作简单,易实现自动化检测等优点^[10-12],因此在钢丝绳检测方面也有一定的应用。CAO 等^[13-14]采用双探头低频透射检测方法,将激励线圈与检测线圈绕钢丝绳对称布置,对钢丝绳断丝数量及位置进行定量检测,但并未对捻距进行检测。

郑新红等^[15]的专利中提出利用平行放置的双涡流探头检测钢丝绳。基于出现的两个相位不同的同频率同幅值类正弦波电压信号,通过调节两涡流位移传感器距离可敏感反应出钢丝绳段的捻距变化。

以上方法可实现非接触式钢丝绳捻距在线检测,但图像识别方法受外界环境影响较大,例如白天和夜晚需要的算法及参数可能不一样,恶劣的运行环境导致钢丝绳表面存在大量附着物时检测精度难以保证。漏磁法检测时需要磁化钢丝绳,操作复杂。针对以上问题,本文提出基于双扁平线圈差分电桥的钢丝绳捻距涡流检测方法。研究中,首先构建基于 A_r , $V-A_r$ 的钢丝绳涡流检测控制方程,分析单绳股表面涡流分布情况。然后利用有限分析方法对扁平线圈的尺寸进行优化设计。最后搭建试验平台,进行验证。

1 钢丝绳捻距涡流检测原理

钢丝绳通常由多根钢丝捻制成股,多根股捻制在一起而构成,其独特的螺旋结构使钢丝绳表面形成周期性的股波结构,钢丝绳股间隙及捻距可以用来表征钢丝绳表面的股波结构,如图 1 所示。

图 1 6x7 钢丝绳螺旋结构示意图

本文采用同轴放置的双扁平线圈 Z_1 和 Z_2 、电阻 R_1 和 R_2 组成的差分电桥对钢丝绳捻距进行检测,差分电路如图 2 所示,其中 a 端和 c 端为电桥的输入端, b 端和 d 端为电桥的输出端。当检测探头靠近钢丝绳时,线圈 Z_1 与线圈 Z_2 分别产生感应磁场,并在钢丝绳表面上产生涡流,涡流产生的磁场会分别反馈作用在线圈 Z_1 和线圈 Z_2 上。线圈的总电压

图 2 扁平线圈组成的差分电桥示意图

包括自感电压、线圈间的互感电压、钢丝绳涡流感应的电压。当双扁平线圈尺寸一样时, 两个扁平线圈的自感电压和互感电压均大小相等、相位相同, 电桥的输出电压主要与钢丝绳涡流分布有关, 这样可以克服外界电磁场和温漂等对涡流响应信号的影响, 提高钢丝绳捻距检测时的信噪比。

2 钢丝绳捻距涡流检测有限元分析

2.1 基于 A_r , V - A_r 表述的控制方程

基于 A_r , V - A_r 表述的钢丝绳捻距涡流检测有限元模型控制方程可表示为^[12]

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A_r + j\omega\sigma(A_r + \nabla v) = -\nabla \times H_s - j\omega\sigma A_s (\Omega_1) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (-j\omega\sigma A_r - j\omega\sigma \nabla v) = \nabla \cdot j\omega\sigma A_s (\Omega_1) \quad (2)$$

$$-\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 A_r = 0 (\Omega_2) \quad (3)$$

式中, A_r 表示简化后的磁矢量位。 $v = V/(j\omega)$, V 表示简化后的电标量位。 σ 为媒质的电导率。 A_s 和 H_s 分别表示求解空间中励磁电流产生的磁矢量位与磁场强度, μ_0 表示求解空间的磁导率, ω 表示源电流呈时谐变化时的角频率。钢丝绳模型区域(Ω_1)与包含电源的空气域(Ω_2)构成了整个求解域。得到电势和磁矢量位的解后, 根据式(4)可以计算涡流密度 J

$$J = -j\omega\sigma(A + \nabla v) \quad (4)$$

式中, A 为 A_s 与 A_r 的和。

2.2 钢丝绳双扁平线圈差分探头涡流检测模型

钢丝绳涡流检测模型包括钢丝绳与双扁平线圈组成的检测探头, 以钢丝绳中心为原点, 建立 $Oxyz$ 全局坐标系。图 3a 为模型在 xz 面上的投影, 图 3b 为模型在 yz 面上的投影。钢丝绳模型长度 240 mm,

图3 钢丝绳双扁平线圈差分探头涡流检测模型示意图

捻距 60 mm, 外层股螺旋半径 3.48 mm, 绳股半径为 1.65 mm, 其电导率为 3.0×10^7 S/m^[16], 相对磁导率为 10。双扁平线圈同轴上下放置, 线圈内径 6.0 mm, 外径 8.0 mm, 高 3.0 mm, 匝数 500 匝, 提离高度 0.5 mm, 上下线圈间距为 2.5 mm, 内部通 1 A、频率 80 kHz 的正弦电流。

2.3 单绳股涡流分布分析

钢丝绳由具有空间螺旋结构的多股钢丝缠绕而成。涡流主要集中在导电磁钢丝绳绳股表面, 且丝间接触形成的谷部远小于股间接触形成的谷部, 因此对含有多根钢丝的钢丝绳涡流检测建模时, 可以将单一绳股视作螺旋圆柱体, 忽略股内钢丝之间涡流分布的影响。为了分析螺旋结构对涡流分布的影响以及减少求解对内存的需求, 本论文对单绳股内的涡流分布进行分析。

单绳股涡流检测模型局部示意图如图 4 所示, 整个模型由基于 Matlab 自行编写的程序建立, 采用六面体网格划分, 在 z 方向网格尺寸为 1 mm, 绳股及线圈尺寸与第 2.2 节一致。将绳股表面分为 4 部分, 其中探头底面正下方为绳股表面 1, 表面 3 为绳股背面, 表面 2 和表面 4 为绳股侧面。

图4 单绳股涡流检测模型及绳股曲面编号示意图

图 5 展示了检测探头底面中心($x = 5.63$ mm, $y = 0$, $z = 0$)位于绳股螺旋顶点上方时绳股表面涡流密度实部的分布情况。图 5a 是绳股表面 1 上涡流密度实部分布图。表面 1 上有着明显的漩涡, 且漩涡的中心 A 位于检测探头底面中心正下方。图 5b 为绳

(a) 绳股表面 1 涡流密度实部分布图

图5 探头位于绳股螺旋顶点上方时绳股表面涡流实部分布
股表面2上涡流密度实部分布图。表面2上绳股长度方向中心下方区域形成漩涡(漩涡中心为B)。图5c为绳股表面3上涡流密度实部分布图。表面3上绳股长度方向中心位置形成漩涡,与面1上的漩涡旋转方向相同(漩涡中心为C)。图5d为绳股表面4上涡流密度实部分布图。表面4上绳股长度方向中心上方区域出现漩涡(漩涡中心为D),旋转方向与表面2上漩涡相反。

图5所示的漩涡中心分别取曲线1~4。图6所示是各曲线上涡流密度幅值分布,横坐标是 z 坐标,

图6 图5所示漩涡中心的各曲线上涡流密度幅值分布
纵坐标是涡流密度幅值。图6a为曲线1上涡流密度幅值分布, $z=0.5\text{ mm}$ 与图5a中漩涡中心A相对应,此时幅值最小。这是因为具有大小相等、方向相反

的两个电流元在绳股表面上感应出大小相等、方向相反的电流, 它们相互抵消使漩涡中心的幅值最小。在探头中径($z = \pm 3.5$ mm)附近涡流密度幅值达到最大。图 6b 为曲线 2 上涡流密度幅值分布, $z = -5.5$ mm 与图 5b 中漩涡中心 B 相对应, 此时幅值最小。与图 6a 相比较, 漩涡中心位置($z = -5.5$ mm)、最大幅值位置($z = -0.5$ mm 和 $z = -7.5$ mm)均发生了偏移。这主要是受螺旋结构的影响。图 6c 为曲线 3 上涡流密度幅值分布, $z = 0$ 与图 5c 中漩涡中心 C 相对应, 此时幅值最小。在 $z = \pm 7$ mm 附近的位置出现最大幅值, 且趋肤效应使得最大幅值比图 6a 的小。远离探头时涡流变得比较平坦, 对消效应比较小, 因此图 6c 中最大幅值出现的位置会更加远离探头中心。图 6d 为曲线 4 上涡流密度幅值分布, $z = 5.5$ mm 与图 5d 中漩涡中心 D 相对应, 最大幅值出现在 $z = 1.5$ mm 与 $z = 7.5$ mm 处。这与图 6b 的结果几乎关于 $z = 0$ 对称。

2.4 钢丝绳捻距直线扫描仿真

绳股涡流分布表明探头中径附近对应的绳股表面感应电流幅值最大, 因此扁平线圈的中径对捻距检测有一定的影响, 本小节对中径进行优化设计。根据中径和股间隙关系, 本文共设置了四种探头, 探头中径分别小于、等于、大于以及 2 倍于钢丝绳的股间隙, 其具体参数如表 1 所示, 单个线圈的高度和两个线圈高度方向间的距离与第 2.2 节一致。

表 1 不同的扁平线圈尺寸 mm

	外径	中径	内径	高度	中径与股间隙关系
探头 1	7.0	5.5	4.0	3	小于
探头 2	11.5	10.0	8.5	3	等于
探头 3	16.0	14.5	13.0	3	大于
探头 4	21.5	20.0	9.25	3	2 倍于

2.4.1 不同直径扁平线圈的检测结果对比

仿真时设置扫描范围为 $z = -40$ mm 至 $z = 40$ mm, 扫描步长为 2 mm, 并对探头底部中心位于股峰和股谷上方的情况进行计算。图 7 所示分别是利用探头 1~4 对钢丝绳进行检测, 并对差分电压幅值随扫描位置变化情况进行插值处理后的结果。图 7 的曲线均具有明显的周期性, 1 个捻距范围内有 7 个波峰或波谷, 相邻波峰或波谷的间距为钢丝绳股间隙, 这与仿真用钢丝绳结构相符合。

图 7 中各曲线的波峰波谷具体位置以及涡流法得到的捻距和相对误差如表 2 所示, 其中涡流法得到的捻距为相邻 7 个波峰(波谷)之间的间距。探头 1~4 差分电压幅值变化曲线中相邻波峰(波谷)的间

距均值分别为 10.01 mm、9.98 mm、9.94 mm 和 9.97 mm。对涡流法得到的捻距取平均, 并与实际捻距进行比较, 可以得到探头 1~4 测量的捻距相对误差分别为 0.13%、0.096%、0.28% 和 0.14%。

(a) 探头1扫描结果

(b) 探头2扫描结果

(c) 探头3扫描结果

(d) 探头4扫描结果

图 7 四种探头直线扫描钢丝绳检测结果比较

表 2 图 7 中各曲线波峰波谷出现的位置以及涡流法得到的捻距和相对误差

mm

		1	2	3	4	5	6	7	8	涡流法得到的捻距	相对误差(%)
探头 1	波峰	-35.04	-25.02	-15.18	-5.13	5.00	15.10	25.09	35.27	60.13	0.13
	波谷	-30.11	-20.05	-9.97	-0.02	10.00	20.07	30.03	39.69	60.14	
探头 2	波峰	-34.97	-25.11	-14.98	-4.79	4.98	14.94	24.99	34.85	59.96	0.096
	波谷	-30.01	-19.99	-10.04	-0.08	9.95	20.02	29.97	39.88	59.98	
探头 3	波峰	-39.61	-30.11	-20.06	-10.07	-0.05	9.90	20.15	29.82	59.76	0.28
	波谷	-34.49	-25.06	-15.01	-5.36	4.93	15.02	24.82	35.13	59.31	
探头 4	波峰	-39.70	-30.09	-19.4	-8.87	0.12	9.97	20.75	29.86	60.45	0.14
	波谷	-34.93	-24.20	-14.93	-5.62	5.17	14.92	25.01	35.13	59.94	

2.4.2 结果分析

表 2 中探头 1、探头 2 扫描得到的波峰和波谷位置分别恰好与探头 3、探头 4 扫描得到的波谷和波峰位置一样。图 8 所示是探头和钢丝绳相对位置的示意图, 图 8a 中探头 2 中径下方为钢丝绳谷部, 探头 4 中径下方为钢丝绳峰部。图 8b 中探头 3 中径下方为钢丝绳峰部和谷部之间。单绳股涡流分布表明扁平线圈中径下方附近钢丝绳表面涡流密度幅值最大, 因此探头输出电压幅值主要受中径下方钢丝绳形貌的影响。根据图 8 中探头和钢丝绳的相对位置, 探头 1、探头 2 和探头 3、4 中径对应的钢丝绳峰部和谷部恰好相反, 因此探头 1、探头 2 和探头 3、4 差分电压曲线的波峰和波谷也恰好相反。

图 8 探头和钢丝绳相对位置的示意图

为比较探头的检测灵敏度, 定义曲线变化率为图 7 中各曲线波峰最大值与波谷最小值之差与波峰最大值的比值。图 9 展示了曲线变化率随探头中径的变化情况。随着探头中径的增大曲线变化率逐渐降低。这主要是由于当中径增大后扁平线圈产生的

交变磁场会覆盖更大面积的钢丝绳, 降低了钢丝绳绳股和股谷形貌对涡流响应信号的影响。结合表 2 可知, 当探头中径等于小于股间隙时, 钢丝绳捻距检测灵敏度较高, 检测结果也更精确。

图 9 曲线变化率随探头中径变化示意图

3 试验研究

3.1 钢丝绳试样及涡流探头

试验选用直径为 16.0 mm 的 6×19+IWS 右交互捻钢丝绳试样, 如图 10 所示。其总长为 1 200 mm, 手动多次测量钢丝绳捻距, 其平均捻距为 104 mm, 平均股间隙为 17.33 mm。建立 $Oxyz$ 坐标系, 其中 O 点位于钢丝绳中心。

图 10 6×19+IWS 钢丝绳试样图

扁平线圈中径小于等于股间隙时探头的灵敏度高, 相对误差较低, 结合试验室现有线圈情况, 以钢丝绳股间隙为标准选择两种尺寸的线圈, 具体参数如表 3 所示。搭建的差分电路实物如图 11 所示,

由结构相同的双扁平线圈同轴放置组成, 并用塑料外壳固定线圈, 与印制在 PCB 板上的差分检测电路相连接, 大扁平和小扁平组成的探头分别称为大探头和小探头。

表 3 试验用扁平线圈尺寸 mm

	内径	外径	高度	线圈间距	中径与股间隙关系
小扁平	6.0	12.0	3.0	2.0	小于
大扁平	20.0	24.0	10.0	2.0	大于

图 11 双扁平线圈差分电桥实物图

3.2 涡流检测系统

3.2.1 系统装置

钢丝绳捻距涡流检测系统主要由信号发生器(普源 DG4102)、扁平线圈差分探头、电控位移平台、美国国家仪器有限公司设备以及显示器组成, 如图 12 所示。本试验中信号发生器提供频率 80 kHz, 幅值为 10 V 的激励信号。探头通过专用夹具固定在电控位移平台上以 0.1 m/s 的速度对钢丝绳进行直线扫查, 提离为 3 mm, 最大扫查范围为 380 mm。利用 NI-PXIE-6368 数据采集卡对差分电桥输出信号进行采集, 并基于 LabVIEW 开发的平台对数据进行后处理。

图 12 钢丝绳捻距涡流检测系统装置

3.2.2 电路稳定性试验

大探头静置在空气中 5 分钟后开始移动, 差分电桥输出电压幅值随扫描位置的变化如图 13 所示。扫查 320 mm 范围内幅值波动为 0.77 mV。检测过程中难以避免存在线动, 探头移动时存在轻微的振动, 这些因素均会导致幅值波动。

3.3 直线扫描检测

3.3.1 直线扫查试验结果

图 14 为小探头扫查试验结果, 总扫查长度为

图 13 外界干扰对探头输出信号影响

图 14 钢丝绳小探头直线扫查结果

360 mm, 重复进行两次试验。两次试验中相同位置电压幅值相差最大为 0.02 mV, 同一次测量的电压幅值波峰波谷差最大值为 10.6 mV。随扫查位置的改变差分电桥电压出现交替变化的波峰波谷, 峰值点如图 14 所示。相邻两波峰(谷)距离为股间隙, 相邻 7 个峰(谷)的间距大约为一个捻距, 这与仿真一致。

图 15 为大探头扫查试验结果, 总扫查长度为 360 mm, 重复进行两次试验。两次试验中相同位置电压幅值相差最大为 0.05 mV, 同一次测量的电压幅值波峰波谷差最大值为 4.5 mV。可以看出一个捻距范围内的交替变化的波峰波谷特征不明显, 这说明扁平线圈中径变大时, 捻距检测的灵敏度降低。

图 15 钢丝绳大探头直线扫查结果

3.3.2 试验结果后处理

为了提取试验结果中的有用信号, 本文采用集合经验模态分解方法(Ensemble empirical mode decomposition, EEMD)对试验采集信号进行处理。计算各本征模函数(Intrinsic mode function, IMF)分量与原始数据的相关系数, 选取较大相关的 IMF 分量进行展示^[17-18], 如图 16 所示。

图 16 基于 EEMD 分解的扫描曲线处理结果

表 4 试验曲线波峰波谷位置

mm

编号	小探头		大探头	
	波峰位置	波谷位置	波峰位置	波谷位置
1	6.95	16.88	15.66	9.20
2	22.34	32.77	33.81	25.11
3	42.21	49.66	50.97	43.01
4	58.59	69.02	68.12	59.67
5	74.48	85.41	87.51	78.31
6	93.85	102.29	104.42	96.46
7	111.23	120.17	119.34	113.12
8	128.61	136.55	136.49	126.30
9	146.48	155.42	159.36	150.918
10	163.37	173.30	172.54	166.08
11	179.26	189.68	192.93	182.988
12	198.62	206.07	209.09	201.88
13	215.01	224.44	223.76	216.30
14	232.39	241.32	240.17	231.96
15	250.76	259.20	262.29	252.35
16	267.14	276.08	273.23	267.76
17	283.53	293.96	295.86	287.15
18	301.90	311.34	311.02	303.56
19	318.79	326.73	328.43	319.48
20	335.67	345.10	343.09	336.88

4 结论

本文基于有限元分析法和试验手段对钢丝绳捻距涡流检测进行研究, 主要研究结论如下。

(1) 单绳股表面涡流分布表明双扁平线圈差分探头会在其正下方绳股表面形成漩涡, 感应电流最大值出现在探头中径下方附近, 受扩散效应对消效应的影响绳股背面涡流最大值出现的位置偏离中径。受螺旋结构影响单绳股两个侧表面形成关于单绳股中心对称的漩涡。

(2) 利用双扁平线圈差分电桥对钢丝绳进行扫

图 16a 和图 16b 分别是对小探头和大探头采集数据进行分解后的结果。小探头后处理的结果与图 14 所示原始信号的变化趋势几乎一致, 大探头的后处理结果明显改善了图 15 所示原始信号的混乱性, 表现出交替变化的波峰和波谷特征。

表 4 所示为图 16 中曲线波峰波谷的位置。对于小探头, 计算相邻波峰(波谷)的间距并取均值, 可得平均股间隙为 17.34 mm, 计算相邻 7 个波峰(波谷)的间距并取均值, 可得平均捻距为 104.14 mm。与手动测量的平均捻距相比, 其相对误差为 0.13%。图 16b 对大探头采集数据分解后的处理结果。对于大探头, 平均股间隙为 17.16 mm, 平均捻距为 103.71 mm, 相对误差为 0.28%。

查, 一个捻距范围内扫描信号出现的波峰或波谷数量与钢丝绳外层股数量相吻合。对扁平线圈的中径进行优化设计, 当中径小于等于股间隙时, 钢丝绳捻距检测灵敏度较高。

(3) 利用 EEMD 分解方法可有效提取钢丝绳捻距检测试验数据中的有用信号, 所得钢丝绳捻距相对误差不超过 0.13%。

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] ELATA D, ESHKENAZY R, WEISS P. The mechanical behavior of a wire rope with an independent wire rope core[J]. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41(5-6): 1157-1172.
- [3] ZHANG J, WANG D, ZHANG D, et al. Dynamic torsional characteristics of mine hoisting rope and its internal spiral components[J]. Tribology International, 2017, 109: 182-191.
- [4] CHANG Xiangdong, PENG Yuxing, ZHU Zhencai, et al. Effects of strand lay direction and crossing angle on tribological behavior of winding hoist rope[J]. Materials, 2017, 10(6): 630-650.
- [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 S, DENZLER J. An analysis-by-synthesis approach to rope condition monitoring[C]// Advances in Visual Computing. ISVC 2010, November 29 - December 1, 2010, Las Vegas, NV, USA. Berlin: Springer-Verlag, 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] OUELLETTE S. Measurement of lay length of wire rope: USA, US9470657B2[P]. 2016-10-18.
- [9] YAN Xiaolan, ZHANG Donglai, GAO Wei, et al. Position-sensorless for wire rope distance measurement and nondestructive testing[C]// IECON. IEEE. 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29 - November 1, 2017, Beijing, China. Piscataway: IEEE, 2017: 8105-8110.
- [10] 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.
- [11] 沈功田, 李建, 武新军. 承压设备脉冲涡流检测技术研究及应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 49-58.
- SHEN Gongtian, LI Jian, WU Xinjun. Research and application of pulsed eddy current testing technology for pressure equipment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 49-58.
- [12] ZENG Zhiwei, WANG Tao, SUN Lei, et al. A domain decomposition finite-element method for eddy-current testing simulation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(10): 1-9.
- [13] CAO Qingsong, LIU Dan, HE Yuehai, et al. Nondestructive and quantitative evaluation of wire rope based on radial basis function neural network using eddy current [J]. NDT & E International, 2012, 46: 7-13.
- [14] 曹青松, 刘丹, 周继惠, 等. 一种钢丝绳断丝无损定量检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(4): 787-794.
- CAO Qingsong, LIU Dan, ZHOU Jihui, et al. Nondestructive and quantitative detection method for broken wire rope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(4): 787-794.
- [15] 郑新红, 张家旖, 张晓雷, 等. 一种钢丝绳捻距在线检测装置: 中国, CN105066868B[P]. 2015-11-18.
- ZHENG Xinhong, ZHANG Jiayi, ZHANG Xiaolei, et al. An on-line testing device for wire rope lay length: China, CN201520535589.5[P]. 2015-11-18.
- [16] 傅丰礼, 唐孝镐. 异步电动机设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- FU Fengli, TANG Xiaogao. Asynchronous motor design manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- [17] WU Zhaohua, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: A noise assisted data analysis method[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2009, 1(1): 1-41.
- [18] 陈仁祥, 汤宝平, 吕中亮. 基于相关系数的 EEMD 转子振动信号降噪方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 542-546.
- CHEN Renyang, TANG Baoping, LÜ Zhongliang. Noise reduction method of rotor vibration signal based on EEMD with coefficient of correlation[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4): 542-546.

作者简介: 李腾宇, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为设备状态监测。

E-mail: litengyu.002@163.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