

平行钢丝拉索多维度断丝损伤定量识别^{*}

张洪^{1,2}, 姜丽^{1,2}, 李厚萱^{1,2}, 童凯³, 吴晓天^{1,2}, 周建庭^{1,2}

(1. 重庆交通大学土木工程学院 重庆, 400074)

(2. 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室 重庆, 400074)

(3. 义乌工商职业技术学院建筑工程学院 义乌, 322000)

摘要 针对桥梁拉索内部钢丝断裂难以量化的问题, 基于自发漏磁检测技术, 提出了拉索断丝轴向宽度定量识别方法。首先, 建立了轴向自发漏磁信号量化参数, 用以表征断丝数量; 其次, 开展了37丝平行钢丝拉索不同损伤情况下的自发漏磁检测试验; 然后, 分析了不同断丝轴向宽度、径向深度和环向宽度对磁信号的影响规律; 最后, 对比分析了所提方法与传统方法的识别精准度差异。结果表明: 轴向宽度对磁信号的敏感性远小于环向宽度和径向深度, 磁信号量化参数与断丝数量间具有良好的线性关系, 拟合优度 R^2 在0.971以上; 采用所提出方法识别的断丝数量误差均在 ± 0.47 以内, 断丝轴向宽度识别的最大相对误差为7.80%, 此研究结果为拉索断丝损伤的定量识别提供了有益参考。

关键词 拉索; 平行钢丝拉索; 损伤定量识别; 自发漏磁; 断丝宽度; 断丝数量

中图分类号 TH140.7; TG115.28

引言

索支承桥梁外形美观、承载能力大、跨越能力强, 因而应用广泛^[1]。拉索是索支承桥梁的主要承重结构, 其耐久性直接影响全桥安全。然而, 由于受环境侵蚀以及交变荷载的耦合影响, 拉索的聚乙烯护套极易老化开裂, 使得内部钢丝暴露于自然环境中, 易发生锈蚀、断裂等损伤, 影响桥梁结构稳定性^[2-3]。因此, 及时准确检测出拉索内部钢丝的损伤情况, 具有重大科学意义及工程价值。

由于无损检测技术可快速、准确地检测出拉索损伤情况, 且对拉索件不产生损害, 因此被广泛应用于拉索损伤检测。目前, 常用方法主要包括声发射监测法^[4]、索力监测法^[5]、磁致伸缩导波检测法^[6]、射线检测法^[7]和漏磁检测法^[8]等。然而, 这些方法在实际应用中各有局限: 声发射信号会被噪音掩盖; 拉索监测难以对拉索损伤进行定位定量分析; 磁致伸缩导波检测法的数据解释高度依赖于操作人员; 射线检测法存在射线污染问题, 不适用于在役桥梁损伤检测的大规模应用; 漏磁法检测拉索需要激励设备, 导致成本高且操作不便。

自发漏磁检测技术是一种极具潜力的桥梁拉索无损检测方法^[9], 其原理为: 铁磁材料在地磁场和外荷载共同作用下, 自发漏磁信号在缺陷位置发生突变, 通过测量铁磁材料表面的自发漏磁信号即可确定缺陷位置及程度^[10]。该方法无需人工外加磁场、无污染且操作简便, 因而获得广泛应用^[11]。为探究磁信号与拉索缺陷的相关性, Meng等^[12]利用自漏磁检测技术对腐蚀-疲劳耦合作用下的桥梁缆索内部缺陷进行检测, 研究了拉索耦合效应对自发漏磁信号的影响机理, 为该技术的工程应用提供了理论指导。基于自发漏磁检测技术, Zhang等^[13]结合图像融合方法对钢丝断丝进行直观识别, 推动了损伤可视化发展。为准确评估钢丝内部损伤情况, 文献[14-16]建立了自发漏磁信号与拉索缺陷参数之间的关系, 并识别了拉索缺陷参数。目前, 研究多集中在自发漏磁信号与缺陷参数的相关性分析, 在平行钢丝索断丝定量表征方面仍存在不足。

针对平行钢丝束断丝损伤定量表征的问题, 本研究设置不同损伤程度的平行钢丝束试件, 测量试件表面的自发漏磁信号, 并对轴向分量和法向分量数据进行分析。基于点磁偶极子模型, 建立断丝轴

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52278291, U24A20163); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划重大课题资助项目(2022-重大-11); 浙江省自然科学基金青年基金资助项目(LQN26E080049); 重庆市研究生科研创新资助项目(CYB25272)

收稿日期: 2023-05-19; 修回日期: 2023-06-30

向宽度识别拟合公式,识别平行钢丝拉索断丝的轴向宽度。根据自发漏磁信号特征值与断丝数量之间的相关性,提出断丝数量的识别方法,定量识别平行钢丝拉索损伤,进一步完善该类型构件的损伤定量评估体系。

1 拉索断丝自发漏磁表征模型

拉索由多根高强钢丝绑扎而成,是典型的铁磁性材料。当钢丝发生断裂时,每个断丝点形成的2个断丝面带异种等量点磁荷,导致该区域的自发漏磁信号发生突变。拉索断丝模型示意图如图1所示。

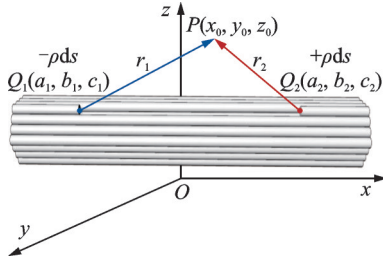


图1 拉索断丝模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of cable breaking model

在实际工程中,由于断丝面直径远小于平行钢丝拉索轴向长度,因此可将断丝面简化为断丝面形心 Q 处的点。当空间中仅有1对断丝面时,断丝面对空间中任意点 $P(x_0, y_0, z_0)$ 产生的磁场强度 H_1 和 H_2 为

$$\begin{cases} dH_1 = \frac{-\rho_0 ds}{2\pi\mu_0 e_1^2} \mathbf{r}_1 \\ dH_2 = \frac{\rho_0 ds}{2\pi\mu_0 e_2^2} \mathbf{r}_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中: ρ_0 为磁荷量; μ_0 为真空磁导率,不考虑环境变化时为常数; $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 与 e_1, e_2 分别为两磁荷到平面任意一点 (x, z) 的矢量距离与标量距离; ds 为面元积分。

在 x 与 z 方向投影下的 H_x 与 H_z 的表达式为

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1x} - H_{2x} \\ H_{1z} + H_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\rho_0}{4\pi\mu_0 e_1^3} e_{1x} - \frac{\rho_0}{4\pi\mu_0 e_2^3} e_{2x} \\ -\frac{\rho_0}{4\pi\mu_0 e_1^3} e_{1z} + \frac{\rho_0}{4\pi\mu_0 e_2^3} e_{2z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: e_{1x}, e_{1z} 分别为 e_1, e_2 在 x 方向、 z 方向的分量, $i=1, 2$ 。

x 向与 z 向的磁感应强度 B_x, B_z 的表达式为

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_z \end{bmatrix} = \mu_0 \mu_r \begin{bmatrix} H_x \\ H_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: μ_r 为相对磁导率,在磁介质相同时可认为是恒

定值。

因此,断丝区域 x 向的磁感应强度 B_x 为

$$B_x = \frac{\mu_r \rho_0}{4\pi} \left[-\frac{u + b/2}{\left[\left(u + \frac{b}{2} \right)^2 + v^2 \right]^{3/2}} - \frac{b/2 - u}{\left[\left(\frac{b}{2} - u \right)^2 + v^2 \right]^{3/2}} \right] \quad (4)$$

其中: b 为缺陷宽度,也表示两断丝面所对应磁荷的间距,与断丝缺陷面的净距 d 以及磁体直径 D 有关; u 为点 P 与断丝面形心 Q 间的轴向距离; v 为点 P 与断丝面形心 Q 间的竖向距离。

b 随着 d 以及 D 的变化而变化,在本研究中,设磁荷间距 $b=1.5d+(D-1)$ 。由于实际的断丝面存在多对的情况,因此对多对断丝面的 B_x 进行叠加。令 $M=-\rho_0 \mu_r / 4\pi$,代入式(4)可得

$$B_x = nM \left[-\frac{u + b/2}{\left[\left(u + \frac{b}{2} \right)^2 + v^2 \right]^{3/2}} - \frac{b/2 - u}{\left[\left(\frac{b}{2} - u \right)^2 + v^2 \right]^{3/2}} \right] \quad (5)$$

其中: n 为断丝面对数。

式(5)中,假设各断丝面的磁荷量相等,总磁荷量为 nM 。对 B_x 的分布规律进行分析,参数取 $D=0.5$ cm, b 分别为2、4和6 cm, $v=8$ cm,并设 $nM=1$,不同磁荷间距的 B_x 数值模拟如图2所示。其中: a_1 为断丝点 Q_1 的 x 轴坐标; a_2 为断丝点 Q_2 的 x 轴坐标。由图可知, B_x 呈现对称分布特征, B_x 在断丝缺陷附近剧烈突变,并在 $x=0$ 处形成极大值。随着 b 的增大, B_x 突变区域的变化逐渐剧烈,极大值也逐渐增大,这与实际情况下的断丝漏磁信号规律相符合。

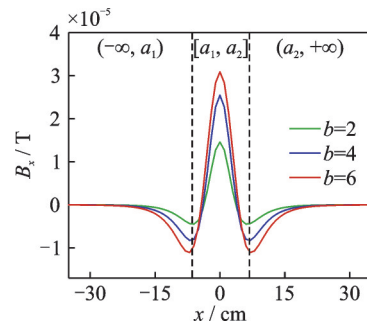
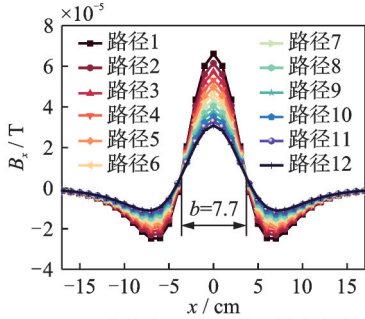


图2 不同磁荷间距的 B_x 数值模拟

Fig.2 Numerical simulation of B_x with different magnetic charge spacing

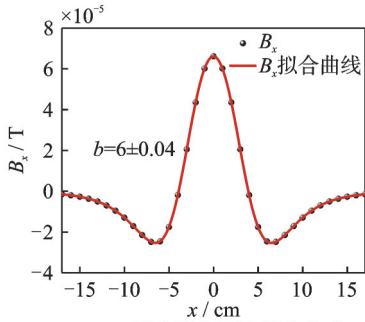
由于式(5)包含拉索断丝轴向宽度 b 的信息,因此可采用式(5)对采集的 B_x 信号进行拟合,通过反演得到 b 对拉索断丝轴向宽度的识别结果。为研究传统方法(基于不同测量距离的 B_x 曲线相交点间距

来识别断丝宽度)与本研究所提方法的准确性,分别采用2种方法对断丝轴向宽度为6 cm的拉索进行轴向宽度识别。不同断丝轴向宽度识别方法的数值模拟如图3所示。



(a) 传统方法识别断丝轴向宽度

(a) Identification of axial width of broken wire by traditional method



(b) B_x 拟合识别断丝轴向宽度

(b) Identification of axial width of broken wire by fitted B_x

图3 不同断丝轴向宽度识别方法的数值模拟

Fig.3 Numerical simulation of different axial width recognition methods for broken wires

在图3(a)中,传统方法采用12条提高高度不同的 B_x 进行断丝轴向宽度识别,识别的断丝轴向宽度为7.7 cm,相对误差为28.3%。在图3(b)中,所提方法数值模拟识别的断丝轴向宽度为 6 ± 0.04 cm,相对误差较小,仅为0.06%。从数值模拟的结果来看,本研究所提方法的结果更加精准。

2 平行钢丝束断丝检测试验

为进一步探究所提拉索断丝轴向宽度识别方法的有效性,笔者制作了37丝的平行钢丝拉索试件,以开展多维度自发漏磁扫描试验。

2.1 试验材料与设备

试验共采用37根直径为5 mm的316L- ϕ 5高强度钢丝,按照每层4、5、6、7根的数量排列为正六边形的平行钢丝拉索试件。钢丝的化学成分占比为:碳 $\leq 0.030\%$ 、硅 $\leq 1.00\%$ 、锰 $\leq 2.00\%$ 、硫 $\leq 0.030\%$ 、磷 $\leq 0.045\%$;力学性能为:屈服强度 ≥ 177 MPa、极

限强度 ≥ 480 MPa。平行钢丝拉索示意图如图4所示,试件长为150 cm,外径为39.6 cm。绑扎时,控制各根钢丝相同磁极位于同侧。

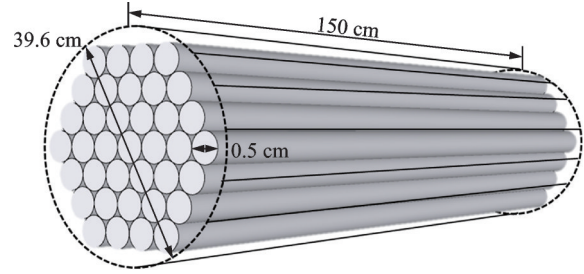


图4 平行钢丝拉索示意图

Fig.4 Schematic diagram of parallel wire cable

试验装置由HMR 2300型磁强计、串口服务器和笔记本电脑组成,试验设备及装置示意图见图5。磁强计检测量程为 $\pm 2 \times 10^{-4}$ T,精度为 6.9×10^{-11} T。为便于测量平行钢丝束多条路径的磁信号,测试时定制了聚氯乙烯磁强计支架套筒。通过磁强计测得试件表面的磁感应强度,经过串口服务器将磁感应强度传输到电脑端。

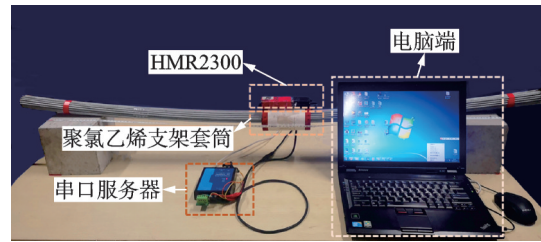


图5 试验设备及装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of test equipment and device

2.2 试验方法

在断丝试验中,以试件轴向中心位置为原点,沿钢丝束长度方向为 x 轴,垂直于钢丝束长度方向且在铅锤面内为 z 轴,垂直于钢丝束长度方向且在水平面内为 y 轴。利用磁强计沿拉索N极至S极进行扫描,扫描步长为5 mm,扫描区间为原点左右15 cm区域($-15 \sim 15$ cm)。在扫描时,磁强计需固定在支架套筒上,控制平行钢丝束与支架套筒相切,以降低提高高度变化的影响。采集过程中,通过旋转磁强计实现平行钢丝束多维度检测,单次转动角度为 30° ,设置12条扫描路径,试件扫描方式及测试路径示意图如图6所示。

采用控制变量法探究断丝轴向宽度和断丝数量与自发漏磁之间的关系,设置不同断丝程度的工况,表1为平行钢丝束试件断丝主要工况。利用不同轴

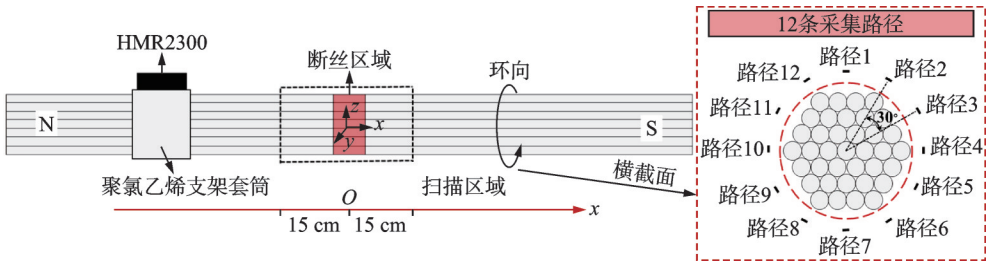


图 6 试件扫描方式及测试路径示意图

Fig.6 Schematic diagram of specimen scanning mode and test path

向、径向与环向的断丝长度数据对工况进行编号,例如:“R5-A20”表示断丝径向深度为 5 mm,轴向断丝宽度为 20 mm;“C5-A20”表示断丝环向深度为 5 mm,轴向断丝宽度为 20 mm。钢丝断丝示意图见图 7。为消除背景磁场对磁信号的影响,在试验前扫描检测完好状态下平行钢丝束试件磁信号,记录 12 条路径下的背景磁场,便于对后续磁信号进行标定。

表 1 平行钢丝束试件断丝主要工况

Tab.1 Main breaking conditions of parallel wire bundle specimen

轴向宽度/mm	径向深度/mm			环向宽度/mm	
	5	10	15	20	30
20	R5-A20	R10-A20	R15-A20	C20-A20	C30-A20
40	R5-A40	R10-A40	R15-A40	C20-A40	C30-A40
60	R5-A60	R10-A60	R15-A60	C20-A60	C30-A60
80	R5-A80	R10-A80	R15-A80	C20-A80	C30-A80

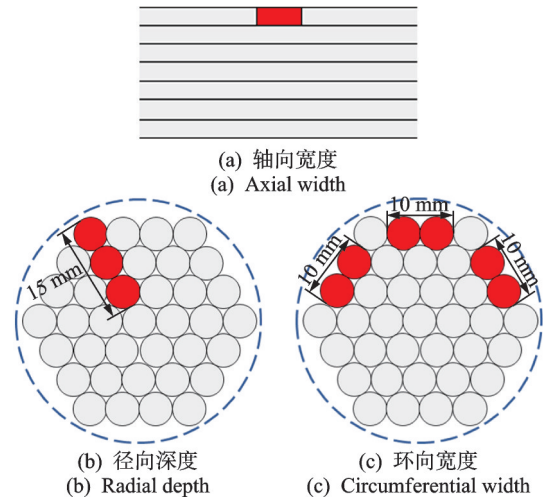


图 7 钢丝断丝示意图

Fig.7 Schematic diagram of wire breaking

2.3 试验结果

由于不同工况得到的试验规律相似,本研究选取工况 R5-A60、R10-A60、R15-A60 剔除背景磁信号后的自发漏磁信号进行分析,坐标轴 x 方向的磁

感应强度为 B_x , z 方向磁感应强度为 B_z 。
磁感应强度 B_x - x 曲线如图 8 所示。由图 8(a)可以看出, B_x 的峰值 ($B_{x-\max}$) 位于断丝区域的中点位置。由于 12 条路径到断丝区域的提高高度不同,因而每条路径的峰值不同。提高高度越小, B_x 峰值越大,在靠近断丝区域的路径方向(1、2、11、12)处曲线峰值最大。根据磁化原理,漏磁密度在缺陷边界处发生突

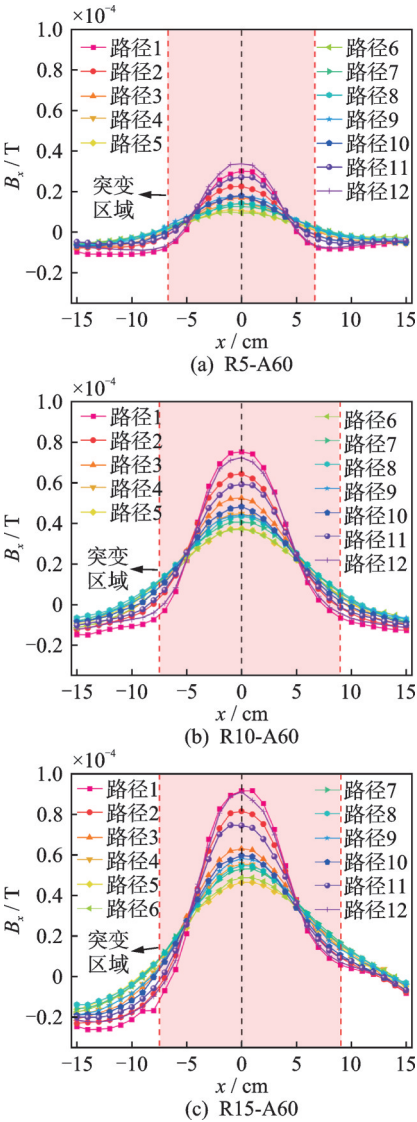


图 8 B_x - x 曲线

Fig.8 B_x - x curves of axial magnetic induction intensity

变,但从图8(a)中可以看出,突变区域宽度为14 cm,远大于实际断丝宽度的6 cm。对比不同径向深度的 B_x 曲线可知,当径向断丝深度增加时, B_x 随深度的增大而增大,但峰值位置基本保持不变。

法向漏磁信号 B_z - x 曲线如图9所示。图9(a)中,

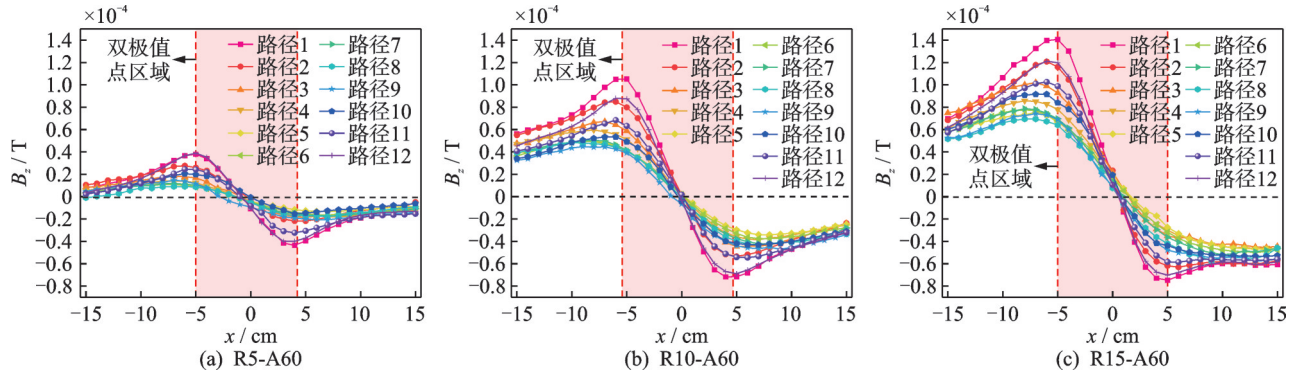


图9 法向漏磁信号 B_z - x 曲线

Fig.9 B_z - x curves of normal magnetic leakage signals

不同工况下 $B_{x-\max}$ 与 $B_{z-\text{pp}}$ (B_z 峰峰值)的相对变化率如图10所示。由图可知,工况R5-A60~R10-A60的 $B_{x-\max}$ 与 $B_{z-\text{pp}}$ 的相对变化率远大于工况R5-A60~R5-A80的数据,这说明断丝径向深度对磁信号的影响大于断丝轴向宽度的影响。

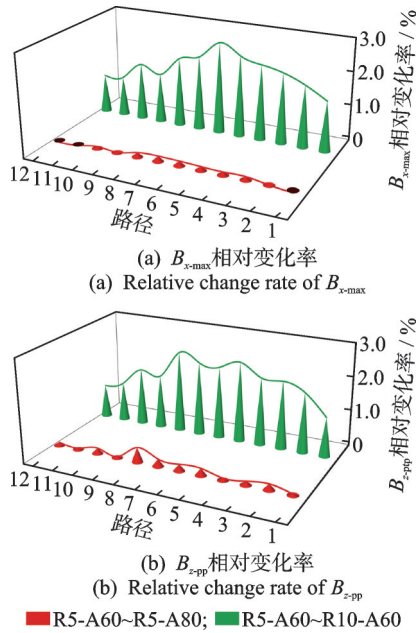


图10 不同工况下 $B_{x-\max}$ 与 $B_{z-\text{pp}}$ 的相对变化率

Fig.10 Relative change rate of $B_{x-\max}$ and $B_{z-\text{pp}}$ under different working conditions

3 断丝缺陷定量识别方法

断丝自发漏磁信号大小与断丝的轴向宽度、环向宽度、径向深度以及采集路径相关。在断丝缺陷

由于断丝区域两侧的断口拥有等量的磁极相反磁荷,在断丝中心处 B_z 曲线过零点,故曲线出现2个反对称峰值,波峰与波谷的绝对值基本相等。当扫描路径越靠近断丝位置时, B_z 峰值越大。随着径向断丝深度的增加, B_z 的波峰和波谷的绝对值逐渐增大。

识别中,断丝轴向宽度、断丝环向宽度以及断丝径向深度称为缺陷参数,以此可判别拉索断丝损伤程度。由于轴向宽度对磁信号的敏感性远小于环向宽度和径向深度,说明断丝数量对磁信号的敏感性较大。因此,在对轴向宽度进行识别时,需通过更完整地磁信号信息提升识别的准确度。基于式(5),采用列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt,简称L-M)算法对 B_x 进行整体磁信号拟合,以识别断丝轴向宽度。然而,断丝数量对磁信号的影响较大,因此可仅以磁信号特征值进行数量识别。将前文分析的断丝环向宽度与径向深度统一为断丝数量,提取拉索断丝磁信号 $B_{x-\max}$ 与 $B_{z-\text{pp}}$,对断丝数量进行线性拟合,以识别断丝数量。

3.1 断丝轴向宽度识别方法

为识别拉索断丝轴向宽度,基于 B_x 信号空间分布特征建立拉索断丝轴向宽度识别方法。采用L-M优化算法并结合式(5)进行拟合,将实测 B_x 信号值代入式(5),经拟合得到断丝宽度 b ,由此识别断丝宽度。鉴于实际情况下拉索存在一定的垂度,因此在式(5)中引入修正系数 K 和 k ,其中:在垂度的影响下,缺陷处的 z 坐标会发生一定的改变, z 的变化增量可用 k 表示;同样在垂度影响下,拉索测试点与缺陷点间的距离也会发生一定改变,因此以 K 进行修正;两者均为与垂度相关的系数。 K 与 k 可通过试验模拟测得,以避免实际误差。修正后的拟合式为

$$B_x = nM \left[\frac{u + b/2}{[(u + b/2)^2 + (v + k)^2]^{3/2}} + \frac{b/2 - u}{[(b/2 - u)^2 + (v + k)^2]^{3/2}} \right] + K \quad (6)$$

缺陷磁荷简化图如图 11 所示,解释了将缺陷磁荷简化为点磁荷而产生一定误差的原因。与区域 Q_1' 的磁荷相比,区域 Q_1 的磁荷与测试点的距离较近,且在 x 方向的分量也更大,导致 Q_1 区域的 B_x 大于 Q_1'

区域。选取的拟合范围越大,精度越低。从理论上来说,拟合范围在 $[a_1, a_2]$ 时的拟合效果最好,在实际情况下选取磁信号突变区域大致符合范围 $[a_1, a_2]$,因此选取各工况下 B_x 信号最强的路径,对该路径突变区域进行拟合, B_x 识别断丝宽度见图 12。

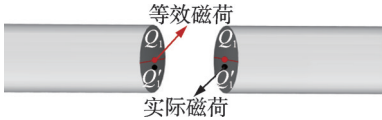


图 11 缺陷磁荷简化图

Fig.11 Simplified magnetic charge of defects

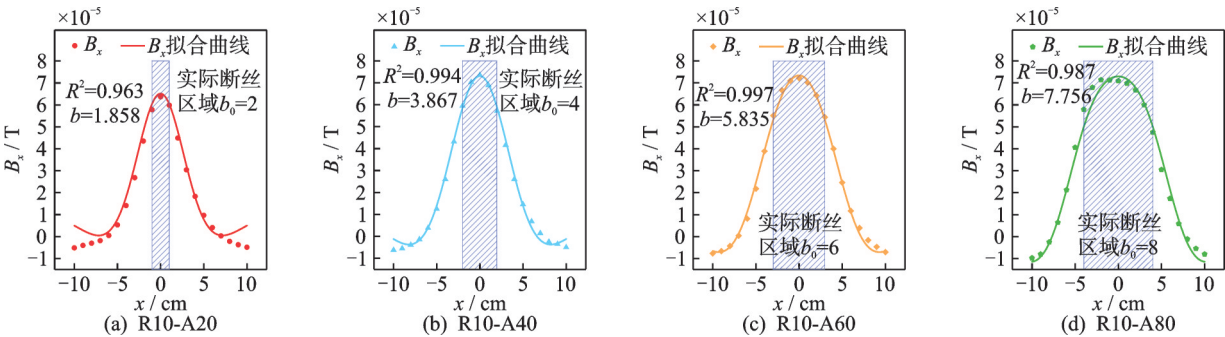


图 12 B_x 识别断丝宽度

Fig.12 Width of B_x identification broken wire

式(6)拟合的效果与实测信号偏差较小,最小的拟合优度 $R^2=0.963$,验证了所提方法的可行性。表 2 为所提方法与传统方法(B_x 纵坐标相交的点横坐标区域)的识别误差百分比。可见,所提方法的识别效

果优于传统方法。当断丝轴向宽度较小时,识别出的宽度相对误差较大,断丝轴向宽度越大,识别精度越高,相对误差最大为 7.80%。因此,结合式(6)与 L-M 优化算法进行拟合所得的断丝宽度与实际断

表 2 所提方法与传统方法的识别误差百分比

Tab.2 Identification error percentage of the proposed method and the traditional method

工况	实际断丝 轴向宽度/mm	传统方法识别的 断丝轴向宽度/mm	相对误差 1/%	所提方法识别的 断丝轴向宽度/mm	相对误差 2/%
R5-A20	20	99.10	395.50	18.76	6.20
R10-A20	20	95.50	377.50	18.58	7.10
R15-A20	20	96.30	381.50	21.36	6.80
C20-A20	20	92.40	362.00	21.53	7.65
C30-A20	20	87.80	339.00	21.54	7.70
R5-A40	40	98.50	146.25	37.45	6.38
R10-A40	40	97.20	143.00	38.67	3.33
R15-A40	40	93.10	132.75	42.37	5.92
C20-A40	40	91.80	129.50	36.88	7.80
C30-A40	40	88.30	120.75	42.71	6.78
R5-A60	60	102.30	70.50	56.78	5.37
R10-A60	60	99.20	65.33	58.35	2.75
R15-A60	60	96.50	60.83	64.25	7.08
C20-A60	60	93.70	56.17	55.73	7.12
C30-A60	60	90.20	50.33	63.10	5.16
R5-A80	80	117.30	46.63	77.17	3.54
R10-A80	80	112.00	40.00	77.56	3.05
R15-A80	80	109.80	37.25	83.02	3.78
C20-A80	80	107.00	33.75	77.33	3.34
C30-A80	80	105.40	31.75	83.74	4.68

丝宽度相差小,且误差稳定性较高。

3.2 断丝数量识别方法

由试验结果可知,断丝数量与磁信号 $B_{x-\max}$ 、 $B_{z-\text{ptp}}$ 特征相关,因此可采用特征值 $B_{x-\max}$ 与 $B_{z-\text{ptp}}$ 对断丝数量进行拟合。为减小断丝周向分布的因素,包括径向深度以及环向宽度的因素, B_x 特征值取磁信号周向积分的最大值。为计算简洁以及符合试验条件,采用各路径 $B_{x-\max}$ 求和作为断丝识别特征值 λ_1 ,则 λ_1 与断丝数量 n 的关系式为

$$\lambda_1 = nm_1 + w_1 \tag{7}$$

断丝数量表达式为

$$n = (\lambda_1 - w_1) / m_1 \tag{8}$$

其中: m_1 为常数; λ_1 为在该条件下单点断丝的各路径 $B_{x-\max}$ 之和; w_1 为该条件下的修正系数; m_1 、 w_1 均与断

丝宽度变化相关。

各断丝数量的 λ_1 如表 3 所示。 λ_1 识别断丝数量如图 13 所示。可以发现, λ_1 与断丝数量呈线性关系,当 R^2 最小为 0.992 时,拟合效果良好。

表 3 各断丝数量的 λ_1

Tab.3 λ_1 of different numbers of broken wires

断丝数量	断丝轴向宽度/mm			
	$b=20$	$b=40$	$b=60$	$b=80$
0	0	0	0	0
1	1 563.7	2 053.2	2 256.5	2 306.8
2	4 716.1	5 784.0	6 158.6	6 357.3
3	6 264.0	7 271.2	7 766.5	7 920.2
4	8 271.0	9 579.4	11 135.2	11 451.8
6	12 990.3	15 481.6	16 181.1	16 824.0
R^2	0.994	0.992	0.994	0.994

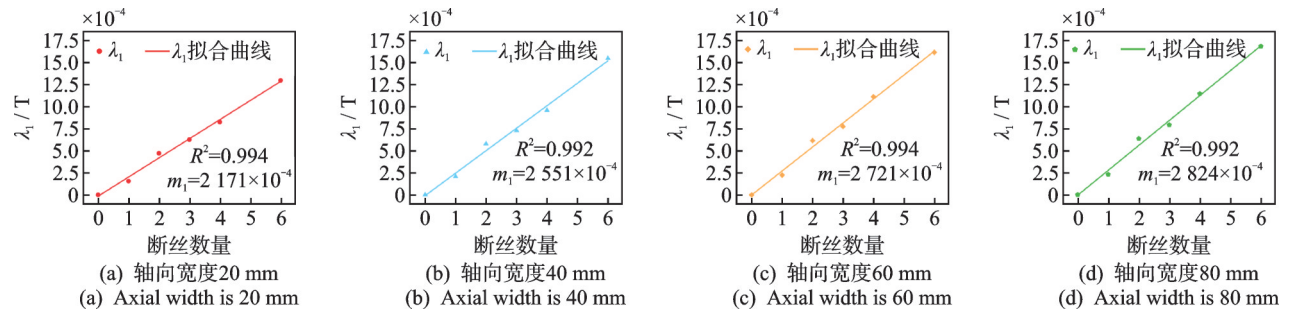


图 13 λ_1 识别断丝数量

Fig.13 Identified number of broken wires by λ_1

表 4 为各工况断丝数量 λ_2 识别结果。从表中可见,所有工况的误差均在 ± 0.31 以内。由图 13 可知,在相同断丝宽度下的 λ_1 与断丝数量呈线性分布,但斜率 k_1 随着断丝宽度的变化而变化。

表 4 各工况断丝数量 λ_1 识别结果

Tab.4 Identification results of the number of broken wires under different working conditions by λ_1

工况	实际断丝数量	识别断丝数量	误差	工况	实际断丝数量	识别断丝数量	误差
R5-A20	1	0.79	0.21	R5-A60	1	0.83	0.17
R10-A20	2	2.24	-0.24	R10-A60	2	2.27	-0.27
R15-A20	3	2.96	0.04	R15-A60	3	2.86	0.14
C20-A20	4	3.88	0.12	C20-A60	4	4.09	-0.09
C30-A20	6	6.05	-0.05	C30-A60	6	5.95	0.05
R5-A40	1	0.85	0.15	R5-A80	1	0.84	0.16
R10-A40	2	2.31	-0.31	R10-A80	2	2.27	-0.27
R15-A40	3	2.89	0.11	R15-A80	3	2.82	0.18
C20-A40	4	3.80	0.20	C20-A80	4	4.07	-0.07
C30-A40	6	6.11	-0.11	C30-A80	6	5.98	0.02

采用二次多项式进行非线性曲面拟合,指标 λ_1 与断丝宽度、断丝数量的相关性如图 14 所示, $R^2 > 0.99$,表明二次曲面与数据点的拟合效果较好,因此可认为指标 λ_1 在可检测范围内是有效的。

同理, $B_{z-\text{pp}}$ 可作为与断丝数量相关特征值,建立断丝识别特征值 λ_2 。各工况断丝数量的 λ_2 如表 5 所示。 λ_2 识别断丝数量如图 15 所示。可以发现, λ_2 与断丝数量呈线性关系, R^2 最小为 0.971,拟合效果良好。

各工况断丝数量 λ_2 识别结果见表 6,误差最大在 ± 0.47 以内。 λ_2 与断丝宽度、断丝数量的相关性如图 16 所示。分析图中数据可知, $R^2=0.984$,表明 λ_2 在可检测范围内有效。

λ_1 、 λ_2 识别误差对比如图 17 所示。可以看出, λ_1 识别出的断丝数量的绝对误差小于 λ_2 ,因此 λ_1 的准确性更高,说明采用 B_x 信号对断丝数量的表征更加敏感准确。

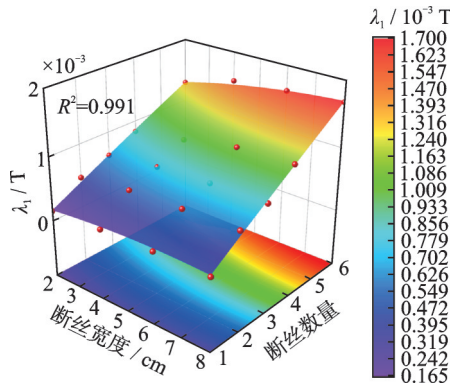


图 14 指标 λ_1 与断丝宽度、断丝根数的相关性

Fig.14 Correlation of index λ_1 with the width of broken wire and the number of broken wire roots

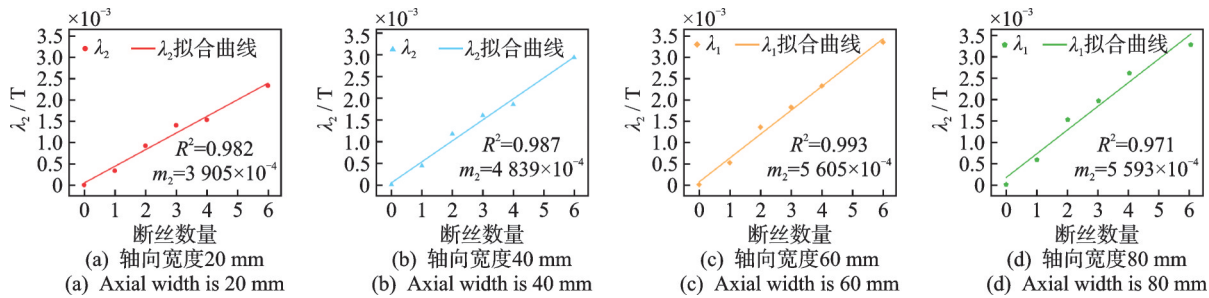


图 15 λ_2 识别断丝数量

Fig.15 Identified the number of broken wires by λ_2

表 6 各工况断丝数量 λ_2 识别结果							
Tab.6 Identification results of the number of broken wires under different working conditions by λ_2							
工况	实际断丝数量	识别断丝数量	误差	工况	实际断丝数量	识别断丝数量	误差
R5-A20	1	0.74	0.26	R5-A60	1	0.81	0.19
R10-A20	2	2.25	−0.25	R10-A60	2	2.30	−0.30
R15-A20	3	3.47	−0.47	R15-A60	3	3.13	−0.13
C20-A20	4	3.80	0.20	C20-A60	4	4.02	−0.02
C30-A20	6	5.86	0.14	C30-A60	6	5.85	0.15
R5-A40	1	0.81	0.19	R5-A80	1	0.74	0.26
R10-A40	2	2.33	−0.33	R10-A80	2	2.42	−0.42
R15-A40	3	3.21	−0.21	R15-A80	3	3.21	−0.21
C20-A40	4	3.74	0.26	C20-A80	4	4.36	−0.36
C30-A40	6	5.99	0.01	C30-A80	6	5.56	0.44

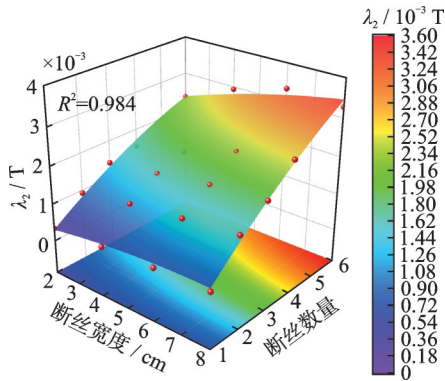


图 16 λ_2 与断丝宽度、断丝数量的相关性

Fig.16 Correlation of λ_2 with the width of broken wire and the number of broken wire roots

表 5 各断丝数量的 λ_2				
Tab.5 λ_2 of different numbers of broken wires				
断丝数量	断丝轴向宽度/mm			
	$b=20$	$b=40$	$b=60$	$b=80$
0	0	0	0	0
1	3 321.1	4 335.9	5 158.7	5 790.8
2	9 218.4	11 703.0	13 490.8	15 176.2
3	14 011.3	15 964.2	18 172.9	19 583.2
4	15 304.7	18 518.1	23 157.8	26 032.9
6	23 312.8	29 377.9	33 431.4	32 711.3
R^2	0.982	0.987	0.993	0.971

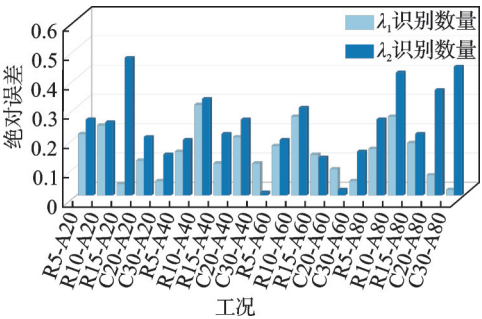


图 17 λ_1 、 λ_2 绝对误差对比

Fig.17 Comparison of the absolute errors of λ_1 and λ_2

综上,该断丝缺陷定量识别方法分为两步:首先,通过式(6)对采集的 B_x 信号突变区域进行拟合,以识

别断丝宽度;其次,采用信号特征值 $B_{x-\max}$ 与 $B_{z-\text{ptp}}$ 进行断丝数量识别,实现平行钢丝拉索断丝定量识别。

4 结 论

1) B_x 的突变区域、 B_z 的双极值点间区域与轴向断丝宽度呈正相关, $B_{x-\max}$ 和 $B_{z-\text{ptp}}$ 与断丝数量呈正相关。

2) 建立了基于磁信号空间分布信息的拉索断丝轴向宽度参数识别方法,识别的最大相对误差为7.80%,绝对误差均小于4 mm,表明该方法可实现拉索断丝轴向宽度高精度反演。

3) 特征指标 λ_1 、 λ_2 与断丝数量呈线性关系,识别误差均在 ± 0.47 以内,可有效识别拉索断丝数量,指标 λ_1 对断丝数量的表征更加敏感准确。

4) 本研究从多个维度对拉索断丝损伤进行了定量分析,但尚未考虑实际检测中拉索振动、温度和应力作用对检测的影响。在后续研究中,笔者将进一步开展影响因素作用下的拉索损伤检测试验,并对所提方法进行优化。

参 考 文 献

- [1] ZHANG L X, QIU G Y, CHEN Z S. Structural health monitoring methods of cables in cable-stayed bridge: a review[J]. Measurement, 2021, 168: 108343.
- [2] ZHAO Y, SU B T, FAN X B, et al. Corrosion fatigue degradation characteristics of galvanized and galfan high-strength steel wire[J]. Materials, 2023, 16(2): 708.
- [3] 方圣恩, 郭新宇. 结合数字孪生的斜拉桥系统更新和响应预测[J]. 振动、测试与诊断, 2024, 44(1): 11-17. FANG Sheng'en, GUO Xinyu. System updating and response prediction of a cable-stayed bridge based on digital twins[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2024, 44(1): 11-17. (in Chinese)
- [4] HOSSEINI S M, AZADI M, GHASEMI-GHALE-BAHMAN A, et al. Fatigue crack initiation detection in ductile cast iron crankshaft under rotating bending fatigue test using the acoustic emission entropy method[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 144: 106981.
- [5] WU X, ZHANG H, ZHANG S, et al. A method for monitoring cable force using resonance-enhanced magnetoelastic with the correction of the hysteresis effect[J]. Structural Health Monitoring, 2025: 14759217251388402.
- [6] ZANG X, XU Z D, LU H, et al. Ultrasonic guided wave techniques and applications in pipeline defect detection: a review[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2023, 206: 105033.
- [7] CUI H, KE D, GAO Q, et al. Mesoscopic pore characteristics analysis of aged bridge concrete based on X-ray computed tomography[J]. Journal of Building

Engineering, 2023, 78: 107739.

- [8] SURESH V, ABUDHAHIR A, DANIEL J. Characterization of defects on ferromagnetic tubes using magnetic flux leakage[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(5): 6200510.
- [9] LEE J, WANG D, DHARMAWAN I D M O. Theoretical model of self-magnetic flux leakage and its application in estimating the depth direction of a fatigue crack[J]. Applied Sciences, 2022, 13(1): 533.
- [10] DUBOV A A. A study of metal properties using the method of magnetic memory[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1997, 39(9): 401-405.
- [11] BAO S, JIN P, ZHAO Z, et al. A review of the metal magnetic memory method[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(1): 11.
- [12] MENG Q L, PAN P C, YANG X L, et al. Self-magnetic flux leakage-based detection and quantification for high-strength steel wires of bridge cables considering corrosion-fatigue coupling effect[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 561: 169641.
- [13] ZHANG J W, ZHANG Z G, LIU B. Non-destructive testing of steel wire ropes incorporating magnetic memory information[J]. Insight, 2023, 65(2): 87-94.
- [14] JIANG L, ZHANG H, XIA R, et al. Research on identification method of cable cross-sectional loss rates based on multiple magnetic characteristic indicators[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2024, 43(2): 64.
- [15] JIANG L, ZHANG H, TAO Q, et al. Study on the method for identifying cable corrosion degree based on multi-domain magnetic characteristics considering load influence[J]. Construction and Building Materials, 2025, 467: 140211.
- [16] ZHANG H, WU X, LI H, et al. Research on self-leakage flux magnetic identification method of the most dangerous section of parallel wire cable under multi-point broken wire condition[J]. Measurement, 2024, 226: 114185.



第一作者简介:张洪,男,1987年5月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁无损检测与机器视觉。曾发表《Research on self-leakage flux magnetic identification method of the most dangerous section of parallel wire cable under multi-point broken wire condition》(《Measurement》2024, Vol.226)等论文。
E-mail: hongzhang@cqjtu.edu.cn

通信作者简介:周建庭,男,1972年9月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁检测、监测、评估及性能提升。
E-mail: jtzhou@cqjtu.edu.cn