

江胜华,孙伟贺,王浩,等. 基于磁场梯度张量的斜拉桥拉索断丝监测方法[J]. 长安大学学报(自然科学版),2022,42(4):52-62.

JIANG Sheng-hua, SUN Wei-he, WANG Hao, et al. Wire breakage monitoring method for cable-stayed bridge cable using magnetic gradient tensor[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2022, 42(4): 52-62.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2022.04.006

基于磁场梯度张量的斜拉桥拉索断丝监测方法

江胜华¹, 孙伟贺¹, 王浩¹, 刘晓春²

(1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要:为研究斜拉桥拉索断丝位置及数量的监测方法,排除环境磁场的干扰,提出基于磁场梯度张量的斜拉桥拉索断丝监测方法。研制拉索断丝监测试验装置,包括磁场传感系统和运动控制系统,运动控制装置采用铝合金、铜连接件等非磁性材料装配,极大程度上消除试验装置中的磁场干扰。分析单根钢丝及整束拉索钢丝断丝前后的磁感应强度、磁场梯度及局部模量等磁场特征的变化规律,研究整束拉索的磁场梯度及局部模量与断丝数量的关系。试验结果表明:对于单根钢丝,环境的磁感应强度与钢丝的比值为 98.47%~157.76%,环境磁感应强度的影响不可忽略。环境的磁场梯度及局部模量与单根钢丝的比值为 3.34%~6.67%,远小于钢丝自身的磁场梯度及局部模量,可忽略不计。单根钢丝及整束拉索钢丝出现断丝时,磁场梯度及局部模量的曲线在断丝处发生突变,出现波峰和波谷等。断丝数量与波峰(或波谷)的深度、宽度及曲线突变处包围的面积等特征参数相关。通过磁场特征参数测得断丝位置在 300.75 mm,与实际断丝位置 300 mm 相比,误差为 0.25%;相较于 1 根断丝,2 根断丝时波峰(或波谷)的深度平均值与其比值为 1.82;波峰(或波谷)的宽度平均值与其比值为 1.07;突变处包围的面积平均值与其比值为 1.95。突变处包围的面积作为断丝数量的评估指标更为有效。

关键词:桥梁工程;斜拉桥;断丝;监测;磁场梯度张量;断丝位置;断丝数量

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2022)04-0052-11

Wire breakage monitoring method for cable-stayed bridge cable using magnetic gradient tensor

JIANG Sheng-hua¹, SUN Wei-he¹, WANG Hao¹, LIU Xiao-chun²

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China)

Abstract: In order to study the monitoring method of location and number of cable wire breakage for cable-stayed bridge and eliminate the interference of environmental magnetic field, the monitoring method of wire breakage based on magnetic gradient tensor was proposed. The monitoring device for wire breakage was developed, including magnetic field sensing system and motion control system. The motion control device was assembled with non-magnetic materials

收稿日期:2021-12-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51208078);重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2015jcyjA30008);

重庆市技术创新与应用示范(社会民生类)项目(cstc2018jscx-msybX0028)

作者简介:江胜华(1982-),男,湖北仙桃人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:jiangsh@whu.edu.cn。

such as aluminum alloy and copper connector, so as to eliminate magnetic interference in the experimental device to a great extent. The magnetic field intensity, magnetic gradient and partial modulus were analyzed for a single cable wire and a bundle of cable wire before and after wire breakage. The relationship between the magnetic gradient, partial modulus and the number of broken wires was studied. The results show that the ratio of environmental magnetic field intensity to single cable wire's magnetic field intensity is 98.47% to 157.76%, so the influence of environmental magnetic field intensity cannot be ignored. The ratio of environmental magnetic gradient (partial modulus) to single cable wire's is 3.34% to 6.67%, so it can be ignored. The environmental magnetic gradient and partial modulus are far less than those of the cable wire. When a single wire and a whole bundle of cable wire are broken, the magnetic gradient and partial modulus curves change suddenly at the broken region, including crest or trough, etc. The number of broken wires in the whole bundle of cables is related to the magnetic characteristic parameters such as the depth and width of curve crest (or trough) and the area surrounded by abrupt changes. Location of wire breakage measured by magnetic characteristic parameters is 300.75 mm, and the error is 0.25% compared with the actual location of wire breakage of 300 mm. Compared two broken wires with one broken wire, the ratio of crest or trough's average depth is 1.82, the ratio of crest or trough's average width is 1.07, the ratio of average area surrounded by the mutation is 1.95. The area surrounded by the mutation is more effective as an evaluation index for the number of broken wires. 6 tabs, 14 figs, 27 refs.

Key words: bridge engineering; cable-stayed bridge; wire breakage; monitoring; magnetic gradient tensor; location of wire breakage; number of broken wires

0 引言

斜拉桥作为一种大跨度桥梁,拉索是其主要承载构件。在长期荷载与环境腐蚀的共同影响下,拉索内部的钢丝断裂是斜拉桥服役期间最频繁、最严重的病害,拉索断丝直接关系到斜拉桥的安全和剩余寿命,因此有必要在其服役期内进行拉索断丝监测。

现阶段拉索断丝监测方法主要有人工检测法、声发射法、放射法、模态分析法、超声导波法、磁致伸缩导波法等。人工检测法检测时先观察斜拉桥拉索护套表面是否破损,判断是否需要在损坏部位凿开护套,使钢丝外露进行监测,工作效率低且精度差,需要耗费大量的人力物力,且在风雨作用下高空作业严重威胁检测人员的安全。

钱骥等结合试验与有限元分析拉索钢丝断裂时释放的弹性波,来判断拉索损伤^[1]。Xin等使用小波变换和深度学习处理拉索钢丝断裂时的声发射信号,利用处理后的神经网络(CNN)监测断丝^[2]。Zejli等分析钢丝滑移时摩擦产生的声发射信号,判断是否存在断丝^[3]。Li等将导波技术与声发射技术结合,通过断丝前后的缺陷演变过程判断断丝位

置^[4]。而声发射检测法极易受到周围环境中机电类噪声的干扰,影响检测结果,且声发射监测法在无损伤检测中的应用范畴较为单一。Bien等也指出声发射技术仅在监测裂痕演变过程时有较大优势^[5],即无法检测已经发生断丝的拉索。Potenza等提出一种基于灰度图像的损伤检测方法,通过分析对比无损及损伤区域的像素数,来判断损伤位置与大小,但是这种方法尚不能应用于有护套结构^[6]。Peng等根据缺陷部位对伽马射线的辐射吸收能力高于完好部位来判断断丝^[7]。而伽马射线虽然可以穿透拉索外部的塑料护套或者涂层,但是放射法不适用于有空腔的结构,且对检测/监测的操作人员身体健康有一定的危害。Ni等详细介绍了一种用于检测拉索断丝的基于快速贝叶斯(FFT)的运行模态分析法^[8]。Yang等使用模态相关阻尼的模型估算拉索平面内振动的模态阻尼比,采用瑞利阻尼和频率不相关阻尼的模型估算拉索平面外振动的模态阻尼比^[9]。Lardies等提出了根据拉索的特征频率和阻尼系数推导索力和Scruton系数,并进一步推断拉索的健康状况^[10]。Soman等提出基于模态识别和数据融合的数据驱动型拉索健康检测方法^[11]。Santos等提出一种基于模态识别和数据融合的新

型数据驱动型的拉索健康检测方法^[12]。郭健等提出一种基于小波包能量分析法的拉索健康监测方法^[13]。但是现阶段基于模态分析法的拉索监测方法都存在着精度较低、受环境噪声干扰较大等问题。超声导波检测法是根据超声导波在钢丝中传播时,因断丝处介质的不连续性,发生回波,通过测量回波到达传感器的时间,判断断丝发生位置。Zhang 提出利用半解析有限元(SAFE)技术分析拉索中导波模态^[14]。Zhang 等提出在不同损伤情况的钢丝中人为激发多模态超声导波,并使用时间反演法(TRM)分析,以进行断丝检测^[15]。但超声导波法难以发现较小的损伤,且由于拉索钢丝排列紧密,超声导波会在各钢丝间传递,导致效率低下。磁致伸缩导波检测法是通过分析因励磁产生的磁致伸缩导波在抵达拉索断丝位置时,发生反射造成感应电压的变化,来确定断丝数量。Xu 等研制了一种将励磁系统和检测系统集于一体的传感器装置^[16]。Tang 等提出损伤位置的波能透射系数可以作为判断损伤程度的依据^[17]。然而,拉索表面的油污、灰尘等会造成磁致伸缩导波的传播衰减,并且检测精度会受环境影响而降低^[18],且磁致伸缩导波法进行拉索断丝检测时,需要事先判断断丝位置且进行励磁,操作繁琐。

近年来新兴的漏磁检测法主要分为 2 种,即常规的励磁法^[19-22]和自身漏磁检测方法^[23]。常规监测法必须先对断丝部位进行励磁,需要在监测之前判断拉索断丝的大致位置,无法同时判断断丝位置与根数,需要与其他监测手段结合使用;同时,桥梁缆索所在的恶劣环境将会对励磁设备的供电及安全运行造成威胁。自身漏磁检测方法大多通过磁感应强度信号的突变作为断丝的判定依据,但在试验中忽略了包括万能试验机等铁磁性物体散发的磁场及实际应用中地磁场在内的环境磁场影响,致使测得的磁信号并非全部来自拉索钢丝,而且钢丝断裂时自身的漏磁信号变化远小于环境干扰磁场,从而导致误差过大。

在桥梁拉索断丝的自身漏磁检测方法中,针对采用磁感应强度信号进行断丝识别时存在环境干扰磁场的问题,本文提出基于磁场梯度张量的斜拉桥拉索断丝监测方法。通过分析单根和整束拉索钢丝断丝前后的磁感应强度、磁场梯度及局部模量的变化规律,研究拉索断丝位置与磁感应强度、磁场梯度及局部模量的关系;以及探究磁场梯度张量与拉索断丝数量的具体关系。

1 基于磁场梯度张量的拉索断丝监测原理

三轴磁传感器所测得的总磁感应强度 \mathbf{B}_T 是拉索钢丝自身磁感应强度 \mathbf{B} 和环境磁场的磁感应强度 \mathbf{B}_S 的总和,其中, \mathbf{B}_S 由地球磁场的磁感应强度 \mathbf{B}_E 及干扰磁场的磁感应强度 \mathbf{B}_N 组成,即

$$\mathbf{B}_T = \mathbf{B} + \mathbf{B}_S = \mathbf{B} + \mathbf{B}_E + \mathbf{B}_N \quad (1)$$

类似的,总磁场梯度 \mathbf{G}_T 包括拉索钢丝自身磁场梯度 \mathbf{G} 和环境磁场梯度 \mathbf{G}_S ,其中, \mathbf{G}_S 由地球磁场梯度 \mathbf{G}_E 和干扰磁场梯度 \mathbf{G}_N 组成,即

$$\mathbf{G}_T = \mathbf{G} + \mathbf{G}_S = \mathbf{G} + \mathbf{G}_E + \mathbf{G}_N \quad (2)$$

拉索钢丝的远场磁感应强度通常为几百 nT,但近场磁感应强度可高达数万 nT。地球磁场的磁感应强度 \mathbf{B}_E 约为 50 000 nT,而干扰磁场的磁感应强度 \mathbf{B}_N 由附近的磁性物体即磁源决定。因此,从总磁感应强度 \mathbf{B}_T 中直接获取拉索自身的磁感应强度 \mathbf{B} 是非常复杂的。铁磁性构件本身的磁场梯度受自身体积、表面积、几何形状、放置方向以及磁化强度影响较大^[24-27],而环境磁场中的地磁场梯度较小(约 2×10^{-5} nT/mm),远小于拉索钢丝磁场梯度 \mathbf{G} ,并通过对场地和试验装置进行控制,以最大程度确保干扰磁场稳定,尽量消除干扰磁场梯度 \mathbf{G}_N ,可以认为总梯度 \mathbf{G}_T 仅受拉索钢丝磁场梯度 \mathbf{G} 影响,以有效排除环境磁场的干扰,即

$$\mathbf{G}_T = \mathbf{G} + \mathbf{G}_S = \mathbf{G} + \mathbf{G}_E + \mathbf{G}_N \approx \mathbf{G} \quad (3)$$

磁感应强度矢量 \mathbf{B} 可以用笛卡尔分量表示,即沿 x 、 y 和 z 三个方向的磁感应强度 B_x 、 B_y 和 B_z ,拉索钢丝磁场梯度张量 \mathbf{G} 可以表示为^[29]

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:9 个磁场梯度参数 B_{xx} 、 B_{xy} 、 B_{xz} 、 B_{yx} 、 B_{yy} 、 B_{yz} 、 B_{zx} 、 B_{zy} 、 B_{zz} 分别为磁感应强度 B_x 、 B_y 和 B_z 沿 x 、 y 和 z 三个方向的梯度。

由麦克斯韦方程组可知,拉索钢丝的磁场梯度张量矩阵 \mathbf{G} 是对称矩阵,且迹 $\text{trace}(\cdot)$ 为零,即

$$B_{xy} - B_{yx} = 0 \quad (5)$$

$$B_{xz} - B_{zx} = 0 \quad (6)$$

$$B_{yz} - B_{zy} = 0 \quad (7)$$

$$\text{trace } \mathbf{G} = B_{xx} + B_{yy} + B_{zz} = 0 \quad (8)$$

因此,只需要测得5个磁场梯度参数 B_{xx} 、 B_{xy} 、 B_{xz} 、 B_{yy} 、 B_{zy} ,即可确定拉索钢丝磁场梯度矩阵 \mathbf{G} 。

磁梯度张量 \mathbf{G} 的模量 C 可以由下式计算^[25]

$$C = \left[\sum (B_{ij})^2 \right]^{0.5} \quad (9)$$

式中: i 和 j 分别取 x 、 y 和 z 。

模量的测量通常是由数个三轴传感器探头组合实现的。然而,由于不同的三轴磁传感器的不一致性,模量总是存在误差,这个误差很难消除。另外,高分辨率三轴磁传感器非常昂贵。因此,有必要仅使用1个三轴磁传感器探头测得局部模量数据进行拉索断丝监测。

类似地,磁场梯度张量 \mathbf{G} 的局部模量 C_Y 可以由下式给出^[24-27]

$$C_Y = \sqrt{B_{xy}^2 + B_{yy}^2 + B_{zy}^2} \quad (10)$$

对于远场磁场,铁磁物体的磁场梯度、模量及局部模量与其体积、形状、朝向、表面面积等相关^[30-31],拉索断丝后,整束拉索钢丝的表面面积发生变化,相应的磁场梯度、模量或局部模量等磁场特征参数亦改变。因此,根据拉索断丝前后表面面积

变化导致的磁场特征参数改变,进行近场磁场监测,对拉索钢丝进行断丝监测评估。

2 拉索断丝监测试验

基于磁场梯度张量的拉索断丝监测试验系统包括磁场传感系统和运动控制系统。磁场传感系统包括三轴磁传感器探头、传输线、采集器、数据处理模块。斜拉桥拉索断丝监测试验系统见图1,拉索试件(与导轨平行,即垂直于延伸杆)紧贴磁传感器探头并放置于菲林软尺承台上,传感器随固定在导轨上的铝型材延伸杆运动,测量拉索全长度的磁场信号,并将采样数据传输给计算机(即数据处理模块)进行分析处理。为尽量消除试验装置的磁场干扰,延伸杆长约2 m且采用铝合金,菲林软尺承台采用铝合金并通过铜螺栓和铜螺杆装配。

定义沿拉索的长度方向为 y 轴方向,铅锤面内向上垂直于拉索的方向为 z 轴方向,在水平面内垂直于拉索且满足右手准则的方向为 x 轴方向。

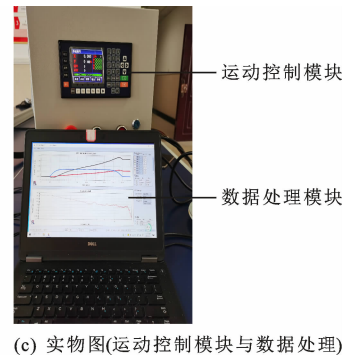
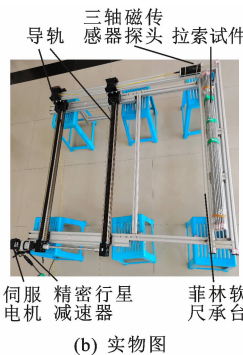
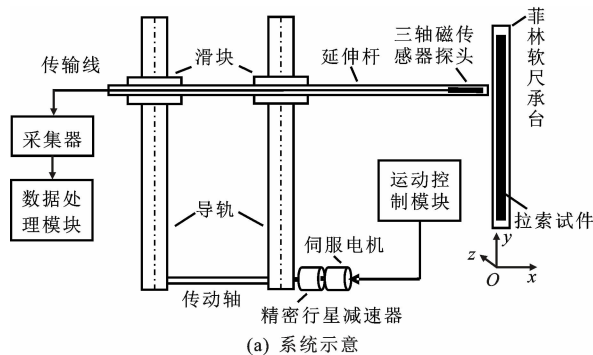


图1 拉索断丝监测试验系统

Fig.1 Experimental system of wire breakage monitoring

三轴磁传感器探头以50 mm/s的速度随着导轨移动,采样速率为50 Hz,即三轴磁传感器探头以 $d=1$ mm的采样间距测量拉索的磁感应强度。本文中,所有拉索钢丝的长度均为1 000 mm。

从拉索钢丝一端开始测量磁感应强度,采样点 n 处的三轴磁感应强度为 $B_{x,n}$ 、 $B_{y,n}$ 、 $B_{z,n}$ 。则采样点 n 处沿拉索钢丝长度(即 y 轴)方向的磁梯度($B_{xy,n}$ 、 $B_{yy,n}$ 和 $B_{zy,n}$)计算如下

$$B_{xy,n} = \frac{B_{x,n+1} - B_{x,n}}{d} \quad (11)$$

$$B_{yy,n} = \frac{B_{y,n+1} - B_{y,n}}{d} \quad (12)$$

$$B_{zy,n} = \frac{B_{z,n+1} - B_{z,n}}{d} \quad (13)$$

采样点 n 处的局部模量 $C_{Y,n}$ 计算如下

$$C_{Y,n} = \sqrt{B_{xy,n}^2 + B_{yy,n}^2 + B_{zy,n}^2} \quad (14)$$

采样点 n 在拉索钢丝上的位置 L 为

$$L = dn \quad (15)$$

3 拉索断丝监测试验结果与分析

在不放置拉索钢丝即空置的情况下,三轴磁传感器探头随导轨运动而扫描1 000 mm,以测量环境磁场。获得环境磁感应强度 B_x 、 B_y 、 B_z 后,计算环境磁场梯度 B_{xy} 、 B_{yy} 、 B_{zy} 和局部模量 C_Y 。扫描范围内环境磁场各参数的范围及其绝对值的平均值($E(|B_x|)$ 、 $E(|B_y|)$ 、 $E(|B_z|)$ 、 $E(|B_{xy}|)$ 、 $E(|B_{yy}|)$ 、 $E(|B_{zy}|)$ 、 $E(|C_Y|)$),见表1。

表 1 环境磁场参数
Tab. 1 Environmental magnetic parameters

参数	变化范围	参数	均值
B_x/nT	37 791.3~36 745.5	$E(B_x)/\text{nT}$	37 473.18
B_y/nT	-13 185.1~-13 522.1	$E(B_y)/\text{nT}$	13 443.94
B_z/nT	-29 067.8~-29 251.4	$E(B_z)/\text{nT}$	29 132.40
$B_{xy}/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	-8.10~4.19	$E(B_{xy})/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	2.902
$B_{yz}/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	-5.11~6.31	$E(B_{yz})/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	1.764
$B_{zy}/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	-3.01~1.87	$E(B_{zy})/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.801
$C_Y/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.41~8.85	$E(C_Y)/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	3.705

由表 1 可知,在试验中,环境磁场的磁感应强度(B_x 、 B_y 、 B_z)绝对值的平均值分别为37 473、13 444、29 132 nT,相对均值而言的最大变化幅度分别约在727.68、258.84、119.00 nT。环境磁场的磁感应强度在扫描范围之内有较大变化,因此,如果采用磁感

应强度对拉索断丝进行检测时,不能忽略环境磁场的影响。

环境磁梯度(B_{xy} 、 B_{yz} 、 B_{zy})在-8.10~4.19、-5.11~6.31、-3.01~1.87 nT/mm 范围内,绝对值的平均值分别为 2.902、1.764、0.801 nT/mm。由于地球磁场梯度极小(约 2×10^{-5} nT/mm),因此环境磁梯度主要受干扰磁场的磁场梯度影响。

环境磁梯度的局部模量在 0.41~8.85 nT/mm 范围内,平均值为 3.705 nT/mm。地球磁场梯度的局部模量也可以忽略不计。显然,环境磁梯度的局部模量也主要受干扰磁场影响。测量 1 根完好的拉索钢丝和 1 根断裂的拉索钢丝的磁感应强度 B_x 、 B_y 、 B_z ,并计算磁场梯度 B_{xy} 、 B_{yz} 、 B_{zy} 和局部模量 C_Y ,分析单根拉索钢丝断丝前后各磁场特征参数的变化规律,见图 2~图 4。为了降低噪声信号的影响,磁场梯度及局部模量的曲线采用小波分析法进行了降噪处理。2 根拉索钢丝的长度均为1 000 mm,其中 1 根钢丝在距离左端 300 mm 处断裂。

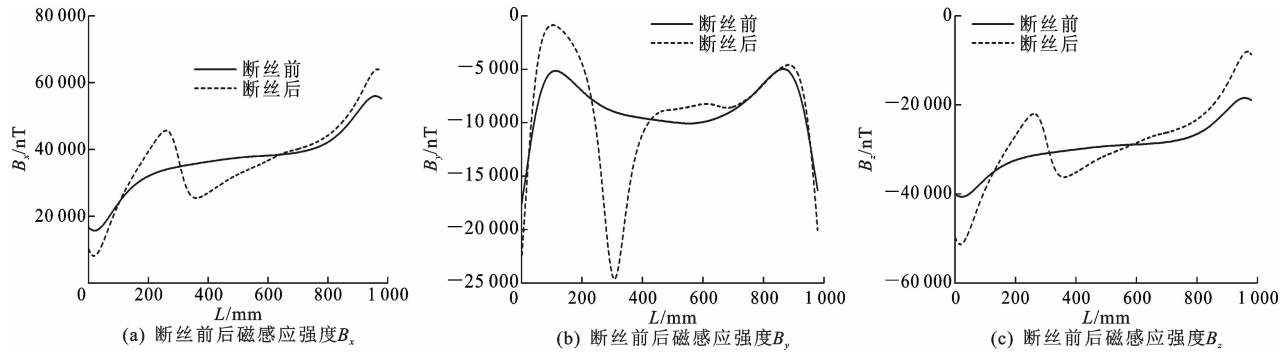


图 2 单根拉索钢丝断丝前后的磁感应强度

Fig. 2 Magnetic induction intensities of single cable steel wire before and after breakage

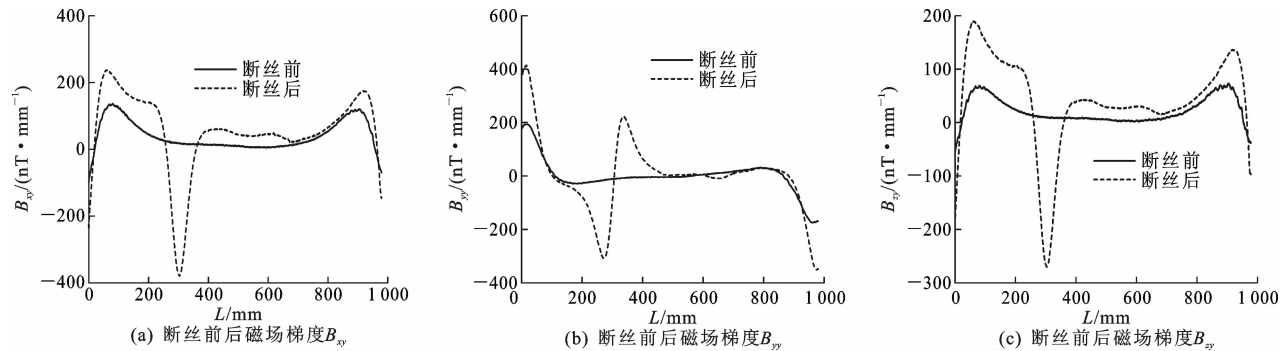


图 3 单根拉索钢丝断丝前后的磁场梯度

Fig. 3 Magnetic gradients of single cable steel wire before and after breakage

由图 2 可知,单根拉索钢丝断丝前磁感应强度 B_x 与 B_z 的强度曲线呈平缓的 N 形, B_y 曲线呈平滑的 M 形。在 300 mm 处断丝后 B_x 、 B_z 曲线在 257~356 mm 处发生明显突变,均出现一个波峰和一个

波谷,波峰和波谷两者中间的拐点处(306 mm)大致为断丝位置, B_y 曲线在 240~462 mm 处发生明显突变,出现一个波谷,在波谷谷底处(305 mm)大致为断丝位置。

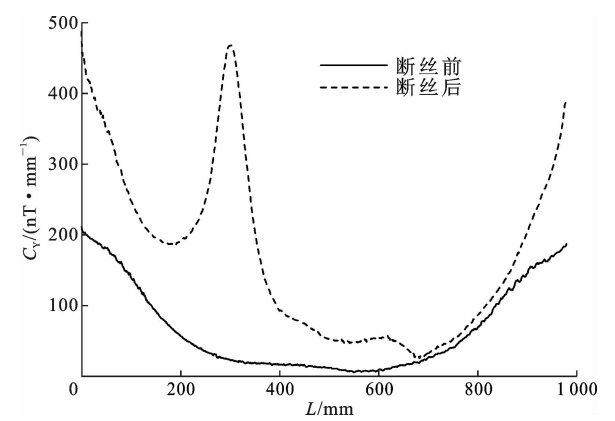


图 4 单根拉索钢丝断丝前后的磁场局部模量

Fig. 4 Magnetic partial modulus of single cable steel wire before and after breakage

由图 3 可知,单根拉索钢丝断丝前磁场梯度 B_{xy} 与 B_{zy} 的强度曲线呈平滑的 M 形, B_{yy} 曲线呈平缓的 N 形。在 300 mm 处断丝后, B_{xy} 、 B_{zy} 曲线在 211~386 mm 处发生明显突变,均出现一个波谷,在波谷谷底处(300 mm)大致为断丝位置; B_{yy} 在 268~335 mm 处明显突变,出现一个波峰和波谷,波谷与波峰两者中间的拐点(303 mm)大致为断丝位置。

由图 4 可知:单根拉索钢丝断丝前磁场的局部模量 C_Y 呈平滑的 U 形;在 300 mm 处发生断丝后 C_Y 曲线在 193~409 mm 处发生突变,出现一个波峰,在波峰顶点处(304 mm)大致为断丝位置。

单根拉索钢丝断裂后各磁场曲线在断丝位置处的变化见表 2。

表 2 单根拉索钢丝断裂后的磁场曲线变化

Tab. 2 Changes of magnetic curves of single cable steel wire before and after breakage

曲线	曲线变化	变化幅值	断丝位置
B_x/nT	突变,波峰波谷	$\pm 10\,083.80$	波峰波谷之间的拐点
B_y/nT	突变,波谷	$-15\,352.35$	波谷
B_z/nT	突变,波峰波谷	$\pm 7\,113.87$	波峰波谷之间的拐点
$B_{xy}/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	突变,波谷	-478.04	波谷
$B_{yy}/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	突变,波峰波谷	± 264.88	波峰波谷之间的拐点
$B_{zy}/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	突变,波谷	-337.55	波谷
$C_Y/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	突变,波峰	$+322.40$	波峰

计算单根完好拉索钢丝磁场测量值的绝对值在整个长度范围内的平均值,并与环境磁场进行比较,见表 3。表 3 中,比值为环境磁场与单根拉索钢丝的绝对值平均值的比值。

表 3 单根拉索钢丝与环境磁场各参数对比

Tab. 3 Comparisons of parameters between single cable steel wire and environmental magnetic

参数	环境磁场	拉索钢丝磁场	比值/%
$E(B_x)/\text{nT}$	37 473.18	36 721.66	102.04
$E(B_y)/\text{nT}$	13 443.94	8 521.74	157.76
$E(B_z)/\text{nT}$	29 132.40	29 586.39	98.47
$E(B_{xy})/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	2.902	42.922	6.76
$E(B_{yy})/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	1.764	34.704	5.08
$E(B_{zy})/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	0.801	23.948	3.34
$E(C_Y)/(\text{nT}\cdot\text{mm}^{-1})$	3.705	66.428	5.58

由表 3 可得,环境磁场的磁感应强度与拉索钢丝的比值为 98.47%~157.76%,环境磁感应强度的影响不可忽略,如果通过磁感应强度来进行断丝监测,则必须分离环境磁场的磁感应强度从而得到拉索钢丝的磁感应强度,但环境磁场的磁感应强度随时间波动,分离环境磁场非常复杂且困难。环境磁场的磁场梯度及局部模量与拉索钢丝比值为 3.34%~6.76%,远小于拉索钢丝自身的磁场梯度及局部模量,因此,使用磁场梯度和局部模量进行断丝监测时,可忽略环境磁场影响。

对 52 根完好的拉索钢丝排列组成的试件进行磁场试验,拉索钢丝的放置位置及编号见图 5。测试得到整束拉索钢丝的磁感应强度 B_x 、 B_y 、 B_z ,并计算磁场梯度 B_{xy} 、 B_{yy} 、 B_{zy} 和局部模量 C_Y 。磁场强度、磁场梯度及局部模量的结果见图 6~图 8。为了降低噪声信号的影响,在磁场梯度及局部模量的曲线采用小波分析法进行了降噪处理。

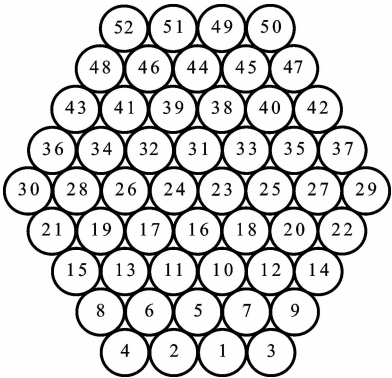


图 5 拉索试件编号

Fig. 5 Number of cable specimen

对于 52 根钢丝形成的拉索构件,其磁场特征参数与单根拉索钢丝相比,在曲线变化规律上基本一致,而数值大小因叠加原理而发生变化;另外,由于钢丝的端部效应,端部附近位置的峰值磁感应强度所对应的位置与端部的距离均随着钢丝数量增加而

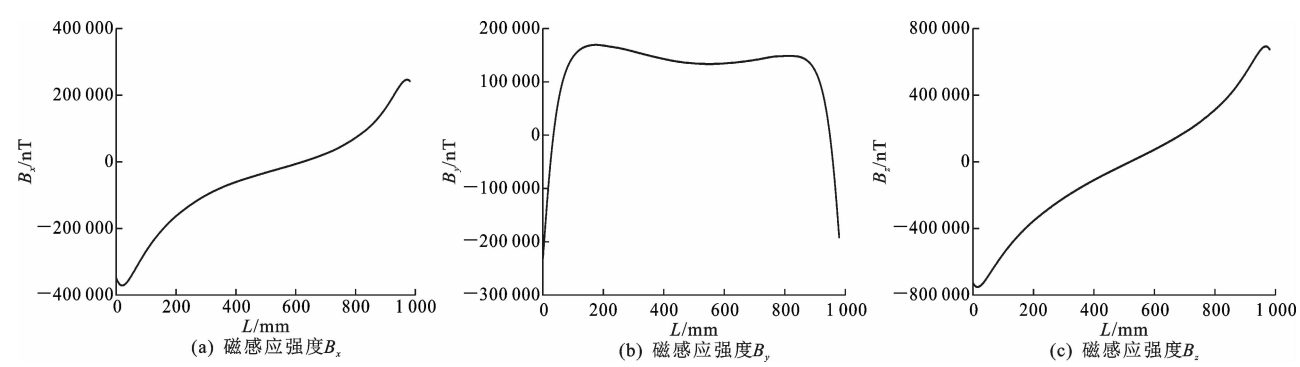


图6 52根拉索钢丝的磁感应强度

Fig. 6 Magnetic induction intensities of 52 cable wires

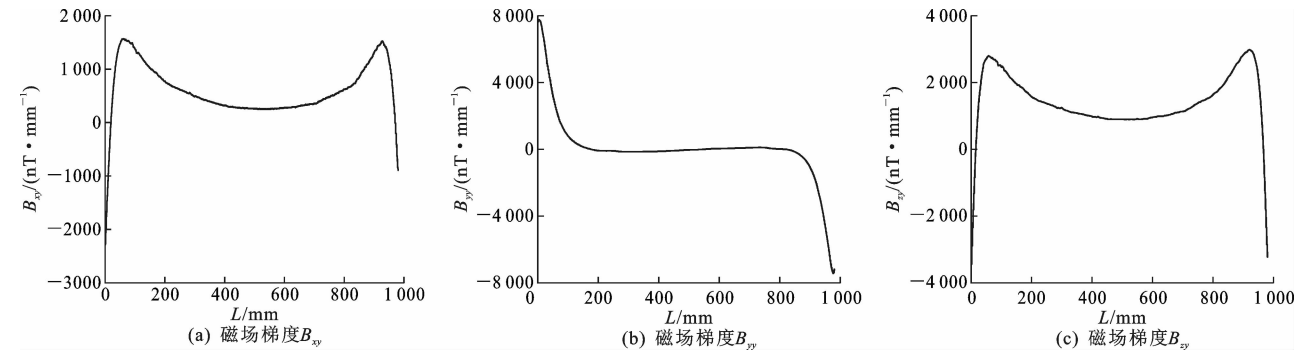


图7 52根拉索钢丝的磁场梯度

Fig. 7 Magnetic gradients of 52 cable wires

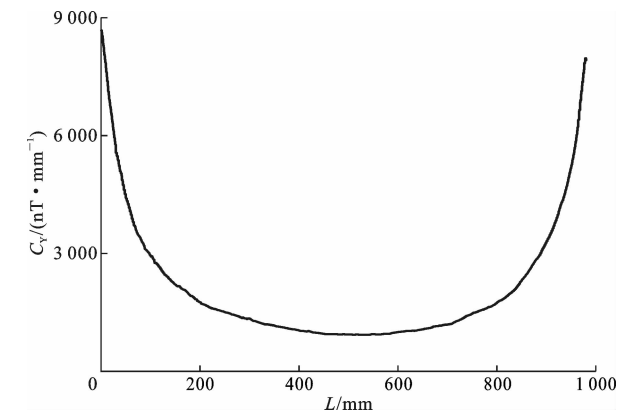


图8 52根拉索钢丝的局部模量

Fig. 8 Partial modulus of 52 cable wires

增大。

一束拉索钢丝(共 N 根)中,若干根拉索钢丝(M 根)断裂时,整束拉索钢丝的磁感应强度可视为 $N-M$ 根未断裂拉索钢丝的磁感应强度与 M 根断裂拉索钢丝的磁感应强度的叠加,磁场梯度和局部模量同样如此。

如果一束拉索钢丝(53 根)中 1 根钢丝发生断裂,其磁感应强度可视为 52 根未断丝的磁感应强度与 1 根钢丝断裂后的磁感应强度的叠加。以 B_x 为例,为图 6(a)与图 2(a)的叠加,一束拉索钢丝(52

根完好)的磁感应强度在长度方向的总变化幅值(最大值与最小值之差)为 617 946. 47 nT(包含环境磁场在内),而单根钢丝的磁感应强度曲线在断丝处(300 mm)变化幅值 $\Delta = \pm 10\ 083. 80$ nT, $|\Delta|$ 占总幅值的 1. 63%,非常微小,同时考虑到环境磁感应强度随时间变化的影响, $|\Delta|$ 占总幅值的比例将随时间波动,叠加后的磁感应强度曲线在断丝位置的变化将非常细微,对于 B_y 、 B_z 等磁感应强度曲线同样如此。因此,磁感应强度不宜用来判断断丝位置及断丝数量。

以 B_{xy} 为例,分析 52 根完好的拉索钢丝和 1 根断裂钢丝的磁场梯度叠加,为图 7(a)与图 3(a)的叠加,一束拉索钢丝(52 根完好)的磁场梯度在长度方向的总变化幅值(最大值与最小值之差)为 3 965. 27 nT/mm,而单根钢丝的磁感应强度曲线在断丝处(300 mm)变化幅值 $\Delta = -478. 04$ nT/mm, $|\Delta|$ 占总幅值的 12. 06%。由此判断叠加后的磁场梯度曲线将发生较为显著的变化,具体而言,将在断丝位置出现一个波谷,且与表 2 中单根断丝磁场梯度的突变特征一致,可作为判断断丝位置的特征值参数。对于 B_{yy} 、 B_{yz} 等磁场梯度曲线同样如此。

对于局部模量的计算方法,拉索局部模量的叠

加不为图 8 与图 4 的简单叠加,而是由叠加后的各磁场梯度根据式(10)重新计算得到。由于磁场梯度 B_{xy} 、 B_{zy} 绝对值在断丝处均减小,局部模量亦减小。由于叠加后的磁场梯度曲线在断丝处发生显著的突变,显而易见,局部模量的曲线在断丝处将发生显著的突变,出现一个波谷。

根据以上分析,52 根完好的拉索钢丝与 1 根断裂后的拉索钢丝叠加后,各磁场曲线在断丝位置的变化见表 4。

表 4 磁场曲线变化与断丝位置及数量的关系
Tab. 4 Relations between magnetic curve change and location and number of wire breakage

曲线	曲线变化	断丝位置	数值变化
B_x	非常细微,不易观察	无法判断	非常微小,且考虑环境磁感应强度
B_y			
B_z			
B_{xy}	突变,波谷	波谷	波谷的深度、宽度、突变处包围的面积增加
B_{yy}	突变,波峰波谷	波峰波谷之间的拐点	波峰波谷的深度、宽度、突变处包围的面积增加
B_{zy}	突变,波谷	波谷	波谷的深度、宽度、突变处包围的面积增加
C_Y	突变,波谷	波谷	波谷的深度、宽度、突变处包围的面积增加

当一根拉索钢丝断裂后,在断裂处形成新的断面,则断丝根数增加时,由于叠加原理,在断裂处的磁场曲线突变处数值大小发生相应的变化,即断丝处突变产生的波峰和波谷的深度增加。同时由于前述的端部效应,断裂产生的断裂面附近位置的峰值(波峰与波谷)磁感应强度所对应的位置与断丝位置的距离增大,即断丝处突变产生的各波峰和波谷的宽度增加。随着各波峰和波谷的深度与宽度增加,曲线突变包围的面积也随之增加。因此,可通过磁场曲线中波峰(或波谷)的深度、宽度及曲线突变处包围的面积判断断丝的数量。

分别测量 52 根拉索钢丝中 1 根断丝(30 号)和 2 根断丝(30、28 号)的磁感应强度,并计算磁场梯度和局部模量,结果见图 9~图 14。为了降低噪声信号的影响,磁场梯度及局部模量的曲线采用小波分析法进行了降噪处理。

由图 9~图 11,结合表 4 中的断丝位置判断方法可得到拉索断丝位置,结果见表 5。

由表 5 可知,磁感应强度 B_{xy} 曲线波谷谷底位置为 301 mm, B_{yy} 曲线波峰波谷之间拐点位置为 300 mm, B_{zy} 曲线波谷谷底位置为 301 mm,局部模

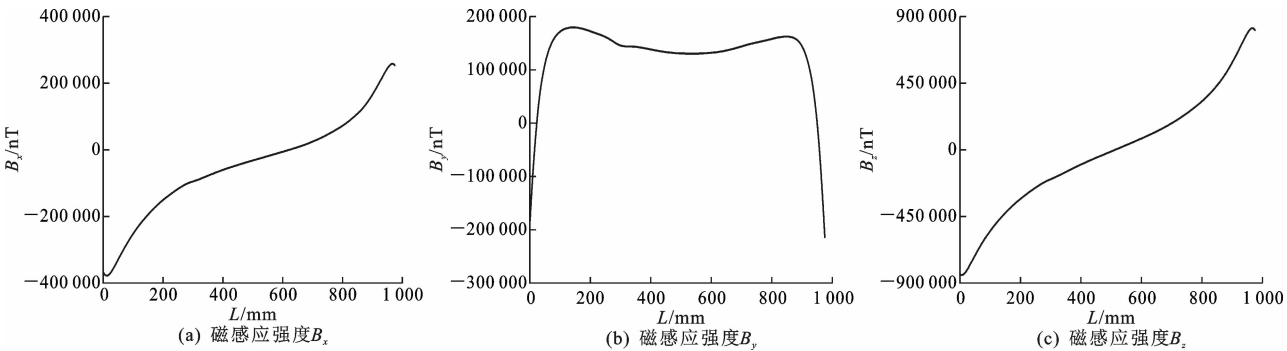


图 9 1 束拉索钢丝中 1 根断丝的磁感应强度
Fig. 9 Magnetic induction intensities of cable with a broken wire

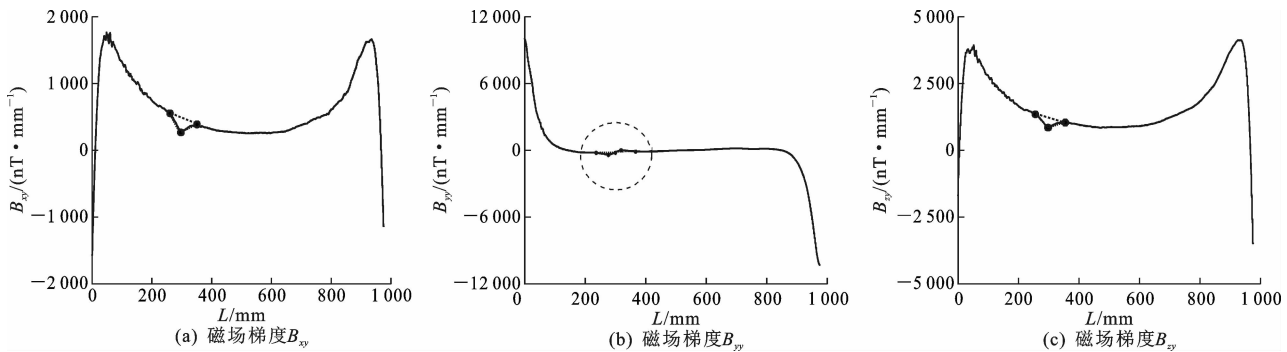


图 10 1 束拉索钢丝中 1 根断丝的磁场梯度
Fig. 10 Magnetic gradients of cable with a broken wire

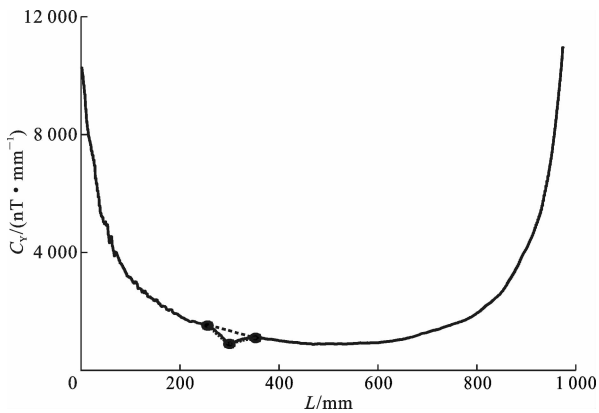


图 11 1 束拉索钢丝中 1 根断丝的局部模量

Fig. 11 Partial modulus of cable with a broken wire

量 C_Y 曲线波谷谷底位置为 301 mm, 4 个位置的平均值为 300.75 mm, 与实际断丝位置 300 mm 相比,

表 5 斜拉桥拉索断丝位置判断

Tab. 5 Locations of wire breakage of cable in cable-stayed bridge

曲线	检测断丝位置	平均值/ mm	实际断丝位置/ mm
B_x	变化微小, 无法判断	300.75	300
B_y			
B_z			
B_{xy}	波谷谷底位置(301 mm)		
B_{yy}	波峰波谷之间的拐点位置(300 mm)		
B_{zy}	波谷谷底位置(301 mm)		
C_Y	波谷谷底位置(301 mm)		

相对误差为 0.25%。

由图 9~图 14 可知, 整束拉索钢丝中 1 根断丝和 2 根断丝时, 磁场梯度与局部模量曲线中波峰(或波谷)的深度、宽度及曲线突变处包围的面积等磁场特征参数发生改变, 具体计算结果见表 6。表 6 中,

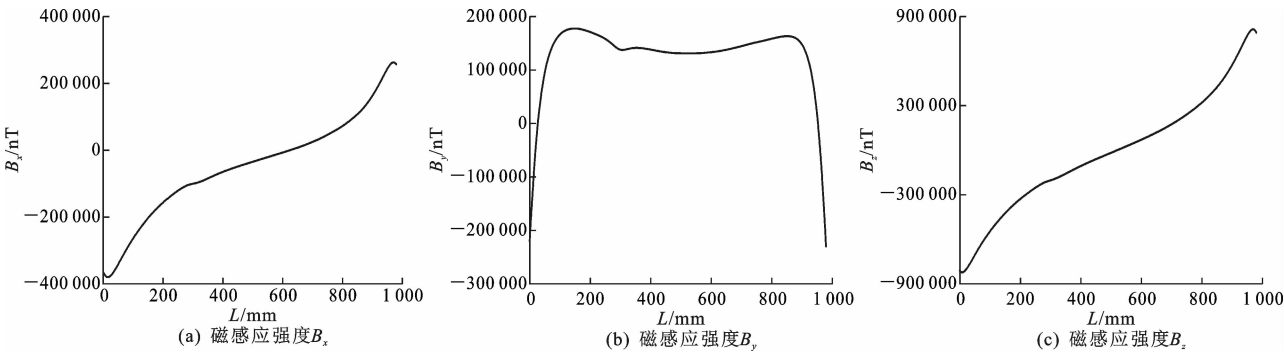


图 12 1 束拉索钢丝中 2 根断丝的磁感应强度

Fig. 12 Magnetic induction intensities of cable with two broken wires

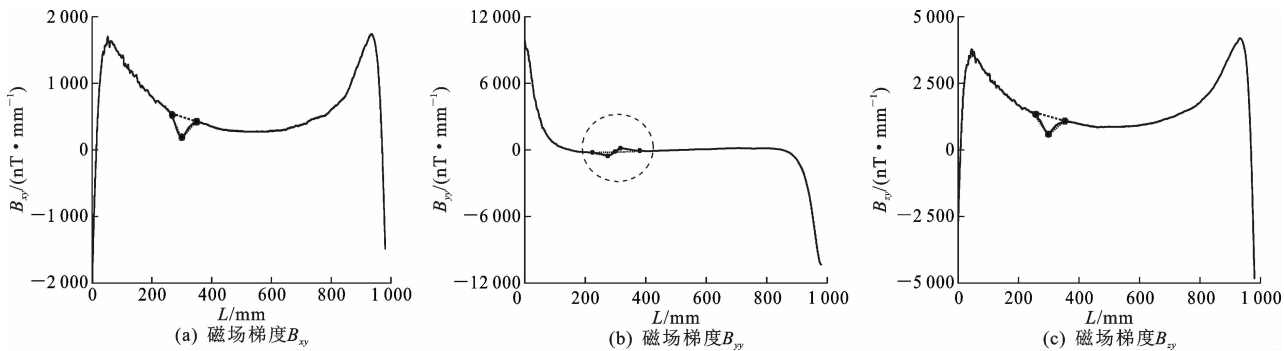


图 13 1 束拉索钢丝中 2 根断丝的磁场梯度

Fig. 13 Magnetic gradients of cable with two broken wires

比值为 1 束拉索中 2 根断丝的磁场特征参数与 1 根断丝的相应数据的比值。

由表 6 可得: 在磁场梯度及局部模量的曲线中, 2 根断丝与 1 根断丝比值的平均值, 波峰(或波谷)的深度为 1.82; 波峰(或波谷)的宽度为 1.07; 曲线突变处包围的面积为 1.95。可见, 磁场梯度和局部模量曲线中, 通过突变处包围面积的比值评价断丝数量最为准确。

4 结 语

(1) 拉索是斜拉桥的主要承载构件, 拉索断丝是影响其稳定性的主要原因。针对拉索断丝监测困难的现状, 结合环境干扰磁场的影响, 提出了基于磁场梯度张量的斜拉桥拉索断丝监测方法, 研制相应的监测试验装置, 分析了磁场梯度和局部模量与斜拉桥拉索断丝位置及数量的关系。

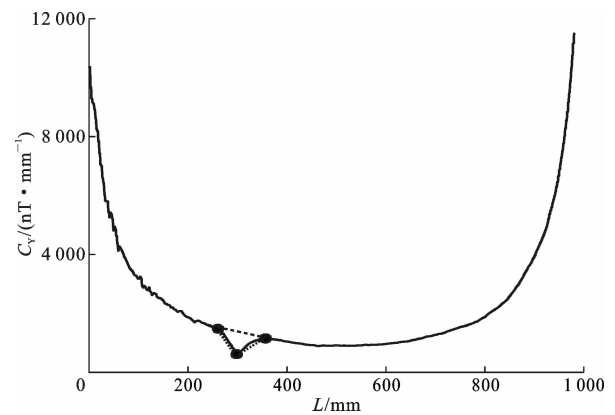


图 14 1 束拉索钢丝中 2 根断丝的局部模量
Fig. 14 Partial modulus of cable with two broken wires

表 6 磁场特征参数与断丝数量的关系

Tab. 6 Relationships between magnetic characteristic parameters and number of broken wires				
断丝数量	参数	波峰(或波谷)的深度	波峰(或波谷)的宽度	曲线突变处包围的面积
1 根	B_{xy}	164.700	1.84	151.524
	B_{yy}	371.170	2.58	478.809
	B_{zy}	255.505	1.78	227.399
	C_Y	325.065	1.64	266.553
2 根	B_{xy}	307.990	1.88	289.511
	B_{yy}	631.160	2.94	927.805
	B_{zy}	491.340	1.82	447.119
	C_Y	579.830	1.82	527.645
比值	B_{xy}	1.87	1.02	1.91
	B_{yy}	1.70	1.14	1.94
	B_{zy}	1.92	1.02	1.97
	C_Y	1.78	1.11	1.98
平均值		1.82	1.07	1.95

(2)一束拉索钢丝发生断丝时,磁场梯度及局部模量曲线均出现突变, B_{xy} 曲线出现波谷, B_{yy} 曲线出现波峰和波谷, B_{zy} 曲线出现波谷, C_Y 曲线出现波谷。通过计算磁场梯度局部模量曲线突变处位置的平均值,判断断丝位置为 300.75 mm,与实际断丝位置 300 mm 相比,相对误差为 0.25%。

(3)相较于 1 根断丝,2 根断丝时波峰(或波谷)深度的平均值与其比值为 1.82;波峰(或波谷)宽度的平均值与其比值为 1.07;突变处包围的面积的平均值与其比值为 1.95。采用突变处包围的面积比值评价时更为准确。

(4)采用磁场梯度张量可有效识别拉索断丝位置,在实际应用时,可以结合缆索机器人进行监测;对于磁场梯度张量和断丝数量的关系,有必要进一步研究以提高断丝数量的识别精度。

参考文献:

References:

[1] 钱 骥,孙利民,蒋 永.桥梁拉索损伤声发射监测研究进展[J].应用声学,2016,35(4):369-376.
QIAN Ji, SUN Li-min, JIANG Yong. Advances in acoustic emission technique to cables health monitoring[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(4): 369-376.

[2] XIN H H, CHENG L, DIENDER R, et al. Fracture acoustic emission signals identification of stay cables in bridge engineering application using deep transfer learning and wavelet analysis[J]. Advances in Bridge Engineering, 2020, 1: 613.

[3] ZEJLI H, GAILLET L, LAKSIMI A, et al. Detection of the presence of broken wires in cables by acoustic emission inspection[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(6): 921-927.

[4] LI S L, WU Y Q, SHI H S. A novel acoustic emission monitoring method of cross-section precise localization of defects and wire breaking of parallel wire bundle[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(4): e2334.

[5] BIEN J, KAMINSKI T, KUNAWA M. Taxonomy of non-destructive field tests of bridge materials and structures[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019, 19(4): 1353-1367.

[6] POTENZA F, RINALDI C, OTTAVIANO E, et al. A robotics and computer-aided procedure for defect evaluation in bridge inspection[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020, 10(3): 471-484.

[7] PENG P C, WANG C Y. Use of gamma rays in the inspection of steel wire ropes in suspension bridges [J]. NDT & E International, 2015, 75: 80-86.

[8] NI Y C, ALAMDARI M M, YE X W, et al. Fast operational modal analysis of a single-tower cable-stayed bridge by a Bayesian method[J]. Measurement, 2021, 174: 109048.

[9] YANG Y Q, WANG X, WU Z S, et al. Damping properties of FRP cables for long-span cable-stayed bridges [J]. Materials and Structures, 2016, 49(7): 2701-2713.

[10] LARDIES J, MINH-NGI T. Modal parameter identification of stay cables from output-only measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(1): 133-150.

[11] SOMAN R, KYRIAKIDES M, ONOUFRIOU T, et al. Numerical evaluation of multi-metric data fusion based

- structural health monitoring of long span bridge structures[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2018, 14(6):673-684.
- [12] SANTOS J P, CREMONA C, ORCESI A D, et al. Early damage detection based on pattern recognition and data fusion[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(2):04016162.
- [13] 郭 健, 钟昊荪. 基于实测数据的斜拉索振动分析与小波包能量占比研究[J]. *桥梁建设*, 2021, 51(3): 25-31.
GUO Jian, ZHONG Hao-sun. Vibration analysis and wavelet packet energy ratio of stay cable based on measured data[J]. *Bridge Construction*, 2021, 51(3): 25-31.
- [14] ZHANG P F. Ultrasonic guided wave approach incorporating SAFE for detecting wire breakage in bridge cable[J]. *Smart Structures and Systems*, 2018, 22(4): 481-493.
- [15] ZHANG Y Y, LI D S, ZHOU Z. Time reversal method for guided waves with multimode and multipath on corrosion defect detection in wire[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(4):424-439.
- [16] XU J, WU X J, CHENG C, et al. A magnetic flux leakage and magnetostrictive guided wave hybrid transducer for detecting bridge cables[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2012, 12(1):518-533.
- [17] TANG Z F, SUI X D, DUAN Y F, et al. Guided wave-based cable damage detection using wave energy transmission and reflection[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(5):e2688.
- [18] LIU S W, SUN Y H, JIANG X Y, et al. A review of wire rope detection methods, sensors and signal processing techniques [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2020, 39(4):1-18.
- [19] 辛荣亚, 张启伟. 基于漏磁检测的桥梁拉索钢丝损伤评估[J]. *桥梁建设*, 2019, 49(3):51-56.
XIN Rong-ya, ZHANG Qi-wei. Assessment of steel wire damages in bridge cables based on magnetic flux leakage examination[J]. *Bridge Construction*, 2019, 49(3):51-56.
- [20] ZHANG H, LIAO L, ZHAO R Q, et al. The non-destructive test of steel corrosion in reinforced concrete bridges using a micro-magnetic sensor [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2016, 16(9):1439.
- [21] NI Y C, ZHANG Q W, XIN R Y. Magnetic flux detection and identification of bridge cable metal area loss damage[J]. *Measurement*, 2021, 167:108443.
- [22] WANG H Y, TIAN J, LI X W, et al. Inspection of mine wire rope using magnetic aggregation bridge based on magnetic resistance sensor array[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(10):7437-7448.
- [23] 周建庭, 杨文琦, 夏润川, 等. 镀锌钢绞线断丝的自发漏磁检测试验[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(6):713-718, 726.
ZHOU Jian-ting, YANG Wen-qi, XIA Run-chuan, et al. Self-magnetic flux leakage test of broken wire of galvanized steel wire[J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2019, 40(6):713-718, 726.
- [24] 江胜华, 侯建国, 何英明, 等. 基于磁偶极子的磁场梯度张量局部缩并及试验验证[J]. *中国惯性技术学报*, 2017, 25(4):473-477.
JIANG Sheng-hua, HOU Jian-guo, HE Ying-ming, et al. Theoretical study and experimental verification of magnetic gradient tensor partial contraction using magnetic dipole[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(4):473-477.
- [25] 江胜华, 申 宇, 褚玉程. 基于磁偶极子的磁场梯度张量缩并的试验验证及相关参数确定[J]. *中国惯性技术学报*, 2015, 23(1):103-106, 114.
JIANG Sheng-hua, SHEN Yu, CHU Yu-cheng. Experimental verification and related parameter's determination for magnetic gradient tensor contraction using magnetic dipole[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2015, 23(1):103-106, 114.
- [26] JIANG S H, WANG H, LIU A Z. Rebar corrosion monitoring using magnetic gradient and partial modulus[J]. *Measurement*, 2020, 164:107994.
- [27] 江胜华, 侯建国, 何英明. 基于磁场梯度张量局部模量的钢筋锈蚀监测方法[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(6):1176-1184.
JIANG Sheng-hua, HOU Jian-guo, HE Ying-ming. Steel corrosion monitoring based on partial modulus of magnetic gradient tensor[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(6):1176-1184.