

桥梁拉索金属面积损失的磁通检测信号特征

辛荣亚, 张启伟, 李元兵

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于磁路分析法研究桥梁拉索磁通检测与定量评估时缺陷长度对磁通信号的影响, 通过模型试验研究磁通信号特征并验证理论分析, 采用有限元法分析缺陷长度效应对缺陷形态、截面损失率、索径、检测设备尺寸等参数的敏感性。结果表明, 磁通信号波动值与金属面积损失率成正比, 且可能受缺陷长度干扰; 钢丝的磁化强度沿拉索径向近似按线性衰减; 桥梁拉索中的缺陷长度效应比其他绳索或棒材中更显著, 当缺陷比磁头间净距短时忽视该效应将低估损伤程度。

关键词: 桥梁; 拉索; 金属面积损失; 磁通检测; 磁路分析; 模型试验; 有限元法

中图分类号: TU997; U446.3

文献标志码: A

Characteristic of Signal from Magnetic Flux Examination of Loss of Metallic Area in Bridge Cables

XIN Rongya, ZHANG Qiwei, LI Yuanbing

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Influence of defect length on the signal output from the magnetic flux (MF) examination of bridge cables for quantitative evaluation was studied. Model experiments were conducted to inspect the characteristics of signal output from the MF examination, and to verify the conclusions from magnetic circuit analysis. Finite element method was used to analyze the sensitivity of the defect-length effect to parameters including the defect morphology, percent loss of metallic area (LMA), cable diameter, size of the test device et al. The results show that fluctuation of the signal from the MF examination of the bridge cable is proportional to the percent LMA, and may be disturbed by the length of flaw; the magnetization intensity of steel wires attenuates approximate linearly along the radial direction of cable; the defect-length effect in bridge cable is more significant than that in steel ropes or rods; when the flaw is shorter than the net distance

between the magnets, the damage will be underestimated if the defect-length effect is neglected.

Key words: bridge; cable; loss of metallic area; magnetic flux examination; magnetic circuit analysis; model experiment; finite element method

拉索是桥梁中的承重构件,也是易损构件。文献[1]在对世界范围内多座斜拉桥考察后认为,除非桥梁拉索的腐蚀得以阻止,否则,许多斜拉桥有突然垮塌的危险。拱桥中的吊杆、系杆以及悬索桥主缆[2]同样面临着拉索钢丝的锈蚀与断丝问题,因钢丝锈蚀或断丝引发的桥梁断索事故也屡有报道[3]。无损检测技术对于及时发现索体内的钢丝损伤并据此制定科学合理的维修管养策略至关重要。

磁性检测是目前最具潜力的桥梁拉索无损检测技术[4-5],在索支承桥梁的现场检测中,可检出吊杆中的断丝与锈蚀病害[6]。在磁性检测中,钢构件的缺陷可根据构造特点与检测方法的不同分为两类:①局部缺陷(local fault, LF型),主要包括钢丝断丝、坑蚀和局部形状异常等,采用漏磁法进行检测;②金属截面积损失(loss of metallic cross-section area, LMA型),指造成索体钢丝横截面积减小的损伤,如磨损与整体锈蚀,采用磁通法进行检测。现代化的磁检测设备中通常会同时集成漏磁检测元件与磁通检测元件[7-8]。

由于漏磁信号与断丝截面积、断口宽度、位置、和断口形状之间呈非线性关系[9],目前绳索类构件的漏磁检测主要可实现损伤的定性判别与定位[10-13]。文献[7]认为漏磁信号反映的是钢丝有效横截面积沿轴向的变化速率,难以用作损伤定量识别,损伤的定量识别应采用磁通量信号。文献[9]指出当

收稿日期: 2017-07-27

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题基金(SLDRCE14-B-23)

第一作者: 辛荣亚(1989—),男,博士生,主要研究方向为桥梁检测与状态评估。E-mail: xinrongya2006@126.com

通信作者: 张启伟(1966—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为桥梁健康监测与状态评估。

E-mail: zhangqw@tongji.edu.cn

断口宽度大于某一临界值时,断丝缺陷可以在磁通量信号中显示出来.因此,磁通检测对于索体中锈蚀与断丝病害的定量识别有重要作用.

磁通检测的原理为:测试时使用永磁体或通电线圈进行励磁,永磁体或线圈与磁轭、钢丝构成磁回路,将钢丝磁化至饱和,通过测试磁回路中的磁通量来判定磁回路范围内钢丝的锈蚀情况,随着设备沿索体的行走和扫描完成全部钢丝的检测.钢材属于铁磁性物质,其磁导率远高于拉索中的其他材料,钢材发生锈蚀后,其磁导率急剧降低,锈蚀物对于回路磁通量几乎没有贡献^[14].由于索体中的锈蚀、断丝、缺丝病害引起的磁通量信号相似,钢丝的锈蚀率也可称为更具广泛意义的钢丝截面损失率.对于较长范围内的钢材截面损失,文献[5]基于磁路分析指出回路磁通量变化量与截面损失率呈线性关系,并设计试验进行了验证.钢丝的截面损失率可通过回路磁通量进行定量识别.文献[15]在钢丝绳的检测中发现,磁通量信号的幅值不仅与截面损失率有关,还会受到钢丝锈蚀范围的影响;在锈蚀范围较小时,磁通量信号幅值偏小.为简便计,磁通量信号幅值受缺陷长度的干扰而削弱的规律可称作缺陷长度效应.在拉索的磁性检测中,拉索因护套破损引起的钢丝锈蚀常集中在破损区域,锈蚀范围对于磁通量信号量值的影响很可能造成钢丝锈蚀率的误判.由此可知,研究短缺陷引起的磁通量信号的特征对于 LF 型缺陷和 LMA 型缺陷的定量评估均有重要意义.

针对桥梁拉索中锈蚀与断丝病害引起的金属面积损失,对磁通检测信号随缺陷参数的变化规律尤其是缺陷长度对于磁通检测信号的影响进行研究.基于磁路分析理论论证缺陷长度效应的存在机理及主要影响因素,采用模型试验研究磁通信号特征、验证理论分析的结论,并基于三维电磁有限元模型分析缺陷长度效应对于缺陷形态、截面损失率、索径、检测设备尺寸等参数的敏感性.

1 磁通检测的理论分析

1.1 磁回路的简化分析

磁通检测的简化分析可采用等效磁路法^[5,13]进行.检测时磁感线的传播路径可简化为图 1 所示,其中路径①为有效磁通,其余为漏磁通.由于钢丝与磁轭的磁导率远大于空气磁导率,而且在一个设计合理的磁检测设备中,磁轭不会在钢丝之前达到磁化饱和,因此路径⑥中的磁通量很小,与其他路径相比

可忽略不计.将图 1 中的磁回路等效为图 2 中的电路图,对此进行分析,由磁路中的欧姆定律可知

$$\begin{cases} R_{a1}\phi_1 + R_y\phi_2 + R_c\phi_3 = F \\ \phi_1 - \phi_2 - \phi_4 = 0 \\ \phi_2 - \phi_3 - \phi_5 = 0 \\ R_c\phi_3 - R_{a3}\phi_5 = 0 \\ R_y\phi_2 + R_c\phi_3 - R_{a2}\phi_4 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

由方程组可解得

$$\phi_2 = F / (R_{a1} + AR_y + ABR_c) \quad (2)$$

式中: R_{a1} 为磁头与索体间空气隙的磁阻; R_{a2} 为路径②~④的等效磁阻; R_{a3} 为路径⑤中与索体平行段的空气磁阻; R_c 为拉索的磁阻; R_y 为磁轭的磁阻. $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ 和 ϕ_5 分别为通过永磁体、磁轭、拉索、 R_{a2} 和 R_{a3} 的磁通量; F 为永磁体的磁动势.令 $A=1+R_{a1}/R_{a2}$, $B=R_{a3}/(R_{a3}+R_c)$,由于钢丝的磁导率远大于空气, $R_{a3} \gg R_c$, $B \approx 1$,式(2)可简化为

$$\phi_2 \approx F / [R_{a1} + A(R_c + R_y)] \quad (3)$$

钢丝的截面损失率与磁轭中的磁通密度呈线性正相关^[5],因此磁轭中磁通量的变化值与钢丝的截面损失率成正比.式(3)表明,截面损失率与缺陷长度对磁通量的影响主要通过索体磁阻 R_c 体现.

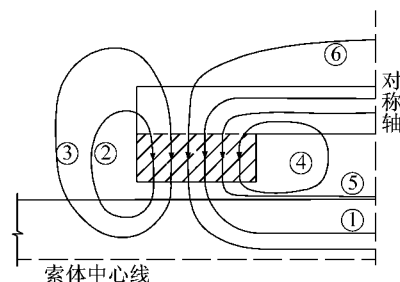


图 1 磁通检测中的磁感线传播路径

Fig. 1 Magnetic induction line in the magnetic flux examination system

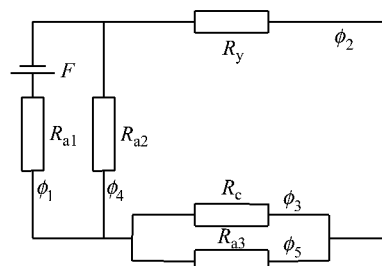


图 2 等效磁路

Fig. 2 Equivalent magnetic circuit

1.2 缺陷长度的影响

式(3)中索体的磁阻与缺陷长度有关,为方便量化分析,将磁通路径①划分为 4 部分(见图 3):磁轭区、空气缝隙(I 区)、过渡区(II 区)、索体均匀磁化

区(Ⅲ区). 图 3 中, L_0 为磁轭长度, L_{mag} 为永磁体长度, L_{cr} 为永磁体间的净距, L 为缺陷长度, g 为永磁体与索体钢丝间的缝隙厚度. 假定:

- (1) 无缺陷时, Ⅲ区磁感应强度为均匀分布.
- (2) 在缺陷较小时, Ⅱ区的磁阻为常数.

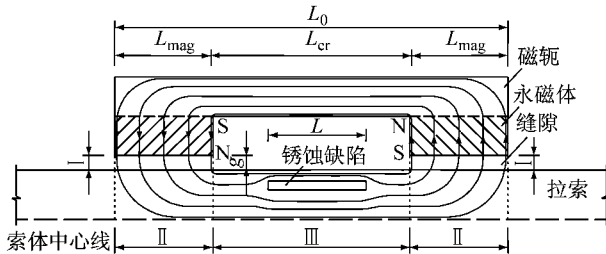


图 3 检测系统磁回路示意

Fig. 3 Diagram of the magnetic circuit of the detecting system

根据缺陷长度的不同, 式(3)中 R_c 的计算可按以下 4 种情形考虑:

- (1) 索体钢丝完好. 记 μ_c 为拉索钢丝的相对磁导率, S_{c0} 为钢丝的横截面积, 则索体磁阻为

$$R_{c1} = \frac{L_0}{\mu_c S_{c0}} \quad (4)$$

- (2) 缺陷长度 $L \leq L_{\text{cr}}$. 根据前述假定, 仅索体磁阻发生变化, 记钢丝的截面损失率为 α , 则索体磁阻为

$$R_{c2} = \frac{L_0}{\mu_c S_{c0}} + \frac{L}{\mu_c S_{c0}} \cdot \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (5)$$

- (3) 缺陷长度 $L \geq L_0$. 若缺陷发生在内层钢丝上, 可近似按式(5)计算索体磁阻, 但取 $L = L_{\text{cr}}$. 通常情况下拉索钢丝的锈蚀程度由护套向索体中心逐渐减轻^[16], 若假定锈蚀全部发生在外层钢丝上, 此时索体的磁阻仍可按缺陷在内层钢丝上计算, 但由于钢丝锈蚀后磁导率接近空气, 磁头与钢丝间的缝隙磁阻增大, 式(3)中 R_{a1} 与 A 均增大. 即, 缺陷在外层钢丝上时, 磁回路中的总磁阻大于缺陷在内层时的总磁阻.

- (4) 缺陷长度满足 $L_{\text{cr}} < L < L_0$. 由于非线性的影响, 此时拉索的磁阻难以进行精确的理论分析, 下文有限元模拟结果表明, 此时钢丝的磁阻介于 $L = L_0$ 与 $L = L_{\text{cr}}$ 时的磁阻之间.

记缺陷长为 L 时回路中的总磁阻为 R_L , $R_L = R_{a1} + A(R_c + R_y)$, 假定缺陷位于外层钢丝上, 则 R_L 随 L 先由 $R_0 = R_L(L=0)$ 线性增加至 $R_{\text{cr}} = R_L(L=L_{\text{cr}})$, 再增加至 $R_{L0} = R_{\text{cr}} + \Delta R$, 之后保持不变. 其中 ΔR 为 R_{a1} 增大引起的总磁阻增加, 显然 ΔR 与 α 有关, 且随 α 的增大而增大.

1.3 缺陷长度系数

拉索的磁通检测中最值得关注的是截面损失率, 其与磁轭中的磁通量变化近似成正比. 为便于表述磁轭中磁通量随钢丝缺陷长度的变化规律, 选取缺陷长度为 L_{cr} 时引起的磁通量变化为基准, 通过磁通量变化的相对大小来揭示缺陷长度的影响规律. 把长 L 的缺陷引起的磁通量变化与长 L_{cr} 的缺陷引起的磁通量变化的比值记作 $f(x)$, 称为缺陷长度系数. $f(x)$ 可写作下式:

$$f(x) = \frac{\Delta\Phi_L}{\Delta\Phi_{\text{cr}}} = \frac{\phi_2(L=0) - \phi_2(L)}{\phi_2(L=0) - \phi_2(L_{\text{cr}})} = \frac{1 - \frac{R_0}{R_L}}{1 - \frac{R_0}{R_{\text{cr}}}} \quad (6)$$

式中: $x = L/L_{\text{cr}}$, 为缺陷长度相对值; $\Delta\Phi_L$, $\Delta\Phi_{\text{cr}}$ 分别为长度为 L 的缺陷和长度为 L_{cr} 的缺陷引起的磁通量变化值; R_0 为无缺陷时磁回路中的总磁阻. 由式(6)和分析可知, 当 $L \leq L_{\text{cr}}$ 时, R_L 随 L 线性增加; $f(x)$ 随 L 非线性增加, 曲线 $f(L)$ 的线型可近似看作双曲线. $L_{\text{cr}} < L < L_0$ 时, f 随 L 略有增加. $L \geq L_0$ 时, $f(x)$ 达到最大值 f_{max} , 为大于 1 的常数, 其值取决于 R_0 , R_{cr} 和 ΔR . 从拉索检测的角度看, f_{max} 与 α 和拉索直径 d 有关, 其中 α 与 ΔR 和 R_{cr} 正相关, d 与 R_0 和 R_{cr} 负相关.

2 短缺陷的磁通量信号特征

由于钢丝的磁化过程为非线性, 基于理论公式仅能对缺陷长度的影响做定性分析. 有限元方法经济成本低而计算精度高, 被广泛用于无损检测中电磁场的模拟与检测设备的优化设计^[17-18], 所以采用有限元模拟和模型试验对理论分析的结果进行检验和补充.

2.1 有限元模型的建立

使用通用有限元程序 ANSYS 对拉索的磁性检测过程进行非线性分析, 采用 SOLID96 单元建立 1/6 三维有限元模型(图 4), 模拟 $\phi 7-61$ 拉索钢丝中的 LMA 缺陷. 钢丝磁化曲线采用 1670- $\phi 7$ mm 镀锌钢丝的实测值, 永磁体采用钕铁硼 N35 材料, 磁轭采用相对磁导率为 1 000 的纯铁. 由于钢丝锈蚀后化学成分发生变化, 且碎屑的形态会产生较强的退磁效应, 锈蚀物的宏观磁导率远小于钢丝的磁导率且与空气接近^[14]. 此外, 拉索护套与防护油脂等属于非铁磁性材料, 因其磁导率与空气接近(约为钢材的 1/500~1/300), 所以对磁通检测信号无影响. 模型

中对护套与钢丝缺陷赋予空气的材料属性,即它们的相对磁导率取为 1。

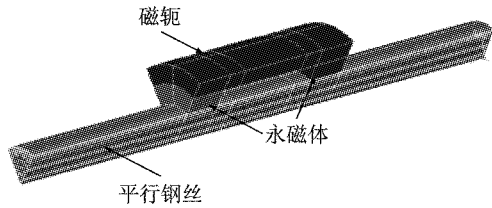


图 4 平行钢丝电磁有限元模型

Fig. 4 Electromagnetic finite element model of the parallel steel wires

模型中永磁体内侧直径为 75 mm、厚 20 mm、长 40 mm;磁轭厚 20 mm、长 200 mm;钢丝建模长度取 800 mm. 电磁分析中采用差分标量势法求解,模型边界采用自然边界条件. 考虑到磁场耗散的影响,为确保计算精度,模型外围设置约 7 倍索体直径的空气单元(为便于观察,图 4 中未显示外围空气)。

2.2 磁通量信号沿索体纵向的变化规律

基于图 4 中的有限元模型,模拟仪器对索体的扫描过程. 设定有 1 根钢丝发生锈蚀或断丝 ($\alpha = 9.84\%$),以磁轭中心的磁通量代表检测信号,模拟多组长度的缺陷,信号波形见图 5. 由图可知:沿索体纵向扫描得到的磁通量信号在缺陷的中心位置形成波谷;随着缺陷长度增加,信号谷值降低并在波谷形成平台后保持不变;信号宽度随缺陷长度的增加呈线性增加。

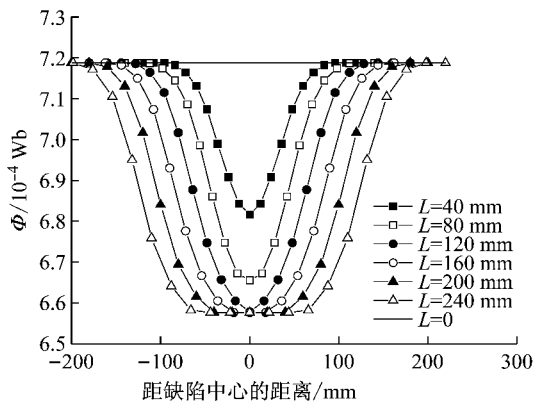


图 5 钢丝缺陷的磁通量信号

Fig. 5 Magnetic flux signal of steel wire defects

在定量评估中通常依据 LMA 型缺陷引起的磁通量变化量 ($\Delta\Phi$) 的最大值进行截面损失率计算,为此将 $\Delta\Phi$ 的峰值列于图 6. 图中,短缺陷 ($L < L_{cr} = 120$ mm) 引起的信号峰值明显小于长缺陷 ($L > L_{cr}$) 的情况. 显然,损伤评估时若不考虑缺陷长度对于磁通量信号的影响,截面损失率将被低估. 拉索钢丝共

5 层,图 6 中, $n=1\sim5$ 分别代表中心层钢丝至最外层钢丝的序号. 由于有限元模型为 1/6 模型,图 6 中 $n=1$ 时的数据已放大 6 倍再与其余组进行对比. $n=1\sim4$ 时,各层钢丝的锈蚀缺陷引起的 $\Delta\Phi$ 随 L 的增加先沿上凸曲线增加,在 L 达到一个临界值 L_{cr} (此处为 120 mm) 后达到最大值 $\Delta\Phi_{cr}$ 并保持不变. 对于 $n=5$, $\Delta\Phi$ 进一步增加,并在 L 达到磁轭长度后保持不变. 磁通量变化量随缺陷长度的变化规律与理论分析中得出的结论相吻合. $n=1\sim4$ 时数据的高度一致性说明:无论缺陷长短,磁通量变化值均与截面损失率成正比;除表层缺陷外,缺陷径向部位对磁通量信号几乎无影响. 表层缺陷的特殊性在于,当缺陷长度介于 L_{cr} 和 L_0 之间时,内层钢丝锈蚀引起的磁阻不发生变化;而表层钢丝锈蚀会使得式 (3) 中的 R_{a1} 与 A 增大,进而增大磁回路中的总磁阻。

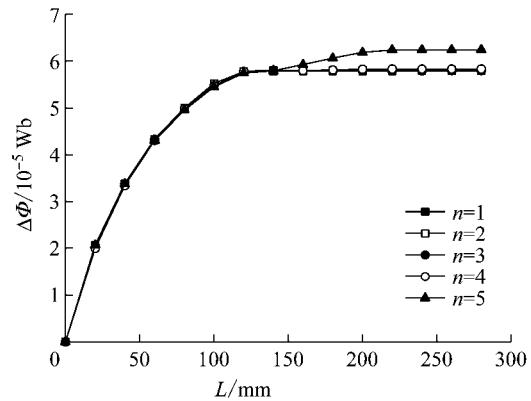


图 6 磁通量信号变化值

Fig. 6 Magnitude of the magnetic flux variation

2.3 模型试验布置

为对磁通量随缺陷长度的变化规律作进一步验证,制作拉索模型进行磁通检测. 拉索模型示意图 7,模型中使用了 66 根直径为 7 mm 的高强钢丝,钢丝放置在内径为 88 mm、厚为 10 mm 的铝管中. 铝为顺磁性物质,相对磁导率约为 1.000 02^[19],接近空气;而钢丝为铁磁性物质,相对磁导率约为铝的 500 倍,因此铝管既可作为钢丝的支撑框架又不会干扰磁性检测信号. 铝管中另设 6 根内径为 8 mm 的小铝管作为高强钢丝自由滑动的轨道,通过钢丝

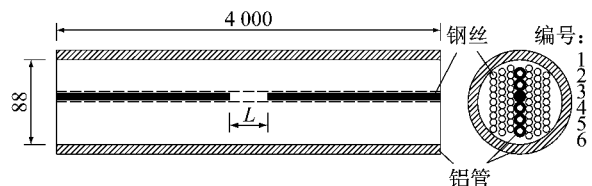


图 7 拉索模型示意(单位: mm)

Fig. 7 Schematic of the cable model (unit: mm)

的滑动和拼接可模拟各种长度的 LMA 缺陷。

拉索模型的磁通检测采用波兰 LRM-MH120 钢丝绳诊断系统,设备中磁轭长 $L_0 = 300$ mm,磁头长 $L_{\text{mag}} = 50$ mm,相应地, $L_{\text{cr}} = 200$ mm。拉索模型的面积损失率设定为 3.03%(即为 2/66),使用 2 根钢丝进行模拟,改变钢丝在小铝管中的位置来模拟不同长度或部位的缺陷,共计 60 种。对每种缺陷进行 1 次扫描测试,共计 60 次测试。缺陷按照部位的不同分为 3 组:第 1 组位于铝管 1 和铝管 6 中,模拟外层缺陷;第 2 组位于铝管 2 和 5 中,模拟中层缺陷;第 3 组位于铝管 3 和 4 中,模拟内层缺陷。对于每组缺陷,缺陷长度均有 20 种,见表 1。考虑到设备自身长度,设备在拉索模型上可自由行走的距离约为 2 m。

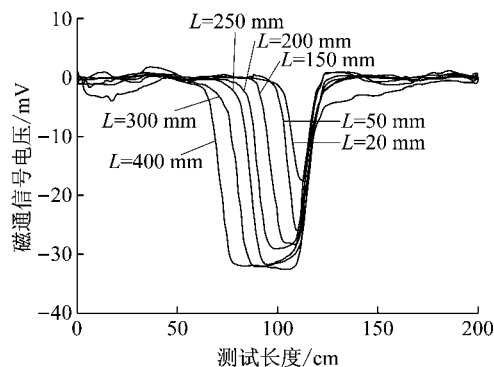
表 1 各组 LMA 缺陷的长度

编号	缺陷长度/mm	编号	缺陷长度/mm
1	5	11	250
2	10	12	300
3	15	13	350
4	20	14	400
5	30	15	450
6	50	16	500
7	70	17	550
8	100	18	600
9	150	19	650
10	200	20	700

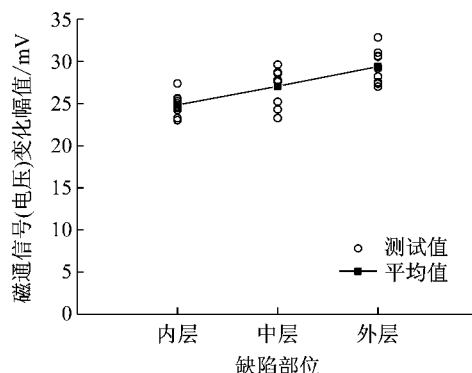
2.4 模型试验结果

磁通量测试信号按照 0.25 cm 的间隔进行等空间采样,信号的横坐标与扫描过的索体长度一一对应。通过对比拉索模型中有缺陷时的磁通检测信号和无缺陷时的检测信号可得缺陷引起的磁通量变化信号,对信号进行小波降噪后可提取其幅值 $\Delta\Phi$ 进行截面损失率评估。无缺陷时磁通信号在零值附近(受噪声影响会有轻微波动),有 LMA 缺陷时磁通信号在缺陷位置出现凹陷,凹陷长度略大于缺陷长度且随其增加而等量增加(见图 8a、图 5)。磁通信号在时域上直接反映了钢丝横截面积的变化,而信号在频域无明确物理意义,在损伤评估中仅关注其时域特征,并根据信号凹陷的最大量值判定损伤程度。缺陷较长时,信号凹陷的量值一般认为与截面损失率成正比^[5]。

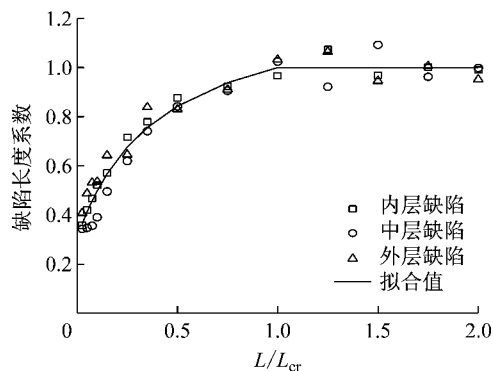
测试结果表明,对于长度 $L > L_{\text{cr}}$ (200 mm) 的长缺陷,缺陷引起的磁通量变化值与 L 无关(见图 8a、8b),图 8b 中各层长缺陷的 $\Delta\Phi$ 的离散性由随机误差引起。通过对各层缺陷的 $\Delta\Phi$ 分别计算平均值发现,缺陷引起的 $\Delta\Phi$ 受缺陷径向位置的影响,其数值从外层到内层近似按线性变化递减至 84.6% 左右。



a 典型磁通量信号波形(外层缺陷)



b 磁通量信号幅值 ($L > L_{\text{cr}}$)



c 缺陷长度系数 ($L \leq 2L_{\text{cr}}$)

图 8 实测的磁通量信号及缺陷长度系数

Fig. 8 Measured magnetic flux signal and the defect-length factor

这说明外层钢丝对内层钢丝有磁屏蔽作用,使得钢丝的磁化强度沿拉索径向近似按线性衰减,衰减的比例约为 15.4%。

图 8b 中给出了所有长缺陷的 $\Delta\Phi$,由前文的理论分析可知,对于较短的缺陷,其引起的 $\Delta\Phi$ 将受到缺陷长度的影响。为了更清晰地观察这一影响,对短缺陷的 $\Delta\Phi$ 作如下处理:①按式(6)计算实测的缺陷长度系数(见图 8c),以便于和理论分析对比;②计算时,内层、中层和外层缺陷分开进行,以剔除外层钢丝磁屏蔽的影响;③计算中的 $\Delta\Phi_{\text{cr}}$ 取长缺陷 ($L > L_{\text{cr}}$) 的 $\Delta\Phi$ 的平均值,以减小随机测试误差的影响。

为便于观察短缺陷的缺陷长度系数,图 8c 中仅显示 $L \leq 2L_{cr}$ 的结果. 实测数据表明:缺陷长度系数与缺陷部位无关,在内层、中层与外层的数值基本相同;缺陷引起的 $\Delta\Phi$ 在 $L < L_{cr}$ 时非线性增加,在 $L \geq L_{cr}$ 时基本不变. 以上规律与理论分析和有限元模拟的结论相符.

缺陷长度系数 $f(x)$ 随缺陷长度 L 的变化规律可采用如下函数对实测数据进行拟合:

$$\begin{cases} f(x) = a + \frac{b}{x+c}, & x \leq 1 \\ f(x) = 1, & x > 1 \end{cases} \quad (7)$$

边界条件设为 $f(1)=1$, 根据试验数据拟合得到 $a=1.2866$, $b=-0.4051$, $c=0.4137$. 图 8c 中拟合效果良好,说明 $f(x)$ 的线型可看作双曲线,与理论公式(6)推演出的结论相符. 对于特定的检测设备,可取几组不同长度的缺陷进行磁通量测试后使用双曲线拟合得到完整的 $f(x)$ 曲线.

3 基于有限元的参数敏感性分析

前文揭示了缺陷长度对磁通量信号的影响规律,其影响的程度还可能和缺陷分布形态、截面损失率、待检测索体的直径、检测设备尺寸等因素有关,需要进一步研究各参数的敏感性. 采用模型试验对这些因素开展研究在实际中很难实施,因此,基于有限元法进行参数敏感性分析. 为节省模型求解时间,将图 4 有限元模型中的平行钢丝简化为同等横截面积的圆棒进行计算(见图 9). 计算中分别针对各个参数作敏感性分析,各参数的缺省值为:角度取 60° ,截面损失率 $\alpha=10\%$,拉索直径 $d=80$ mm, $L_{cr}=300$ mm, $L_{mag}=100$ mm. 此外,计算中取永磁体内径 $D=120$ mm.

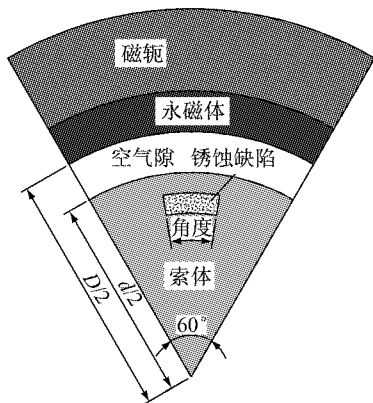


图 9 等效圆棒模型横断面示意

Fig. 9 Cross-section layout of the equivalent steel-bar FE model

3.1 缺陷分布形态的影响

等效圆棒模型中缺陷形态的设定见图 9. 保持缺陷总面积不变,改变缺陷在横断面上分布的角度范围,计算缺陷引起的磁通量变化. 图 10 中结果表明,在截面损失率相等的情况下,角度取 $10^\circ \sim 60^\circ$ 时磁通量的变化值相等,缺陷分布的形态对磁通量信号无影响. 因此,在索体断面上,相同截面损失率的均匀锈蚀、非均匀锈蚀、断丝以及缺丝损伤引起的磁通量信号变化幅度是相同的. 同时也在侧面印证了:将平行钢丝模型简化为圆柱体模型产生的误差可以忽略不计.

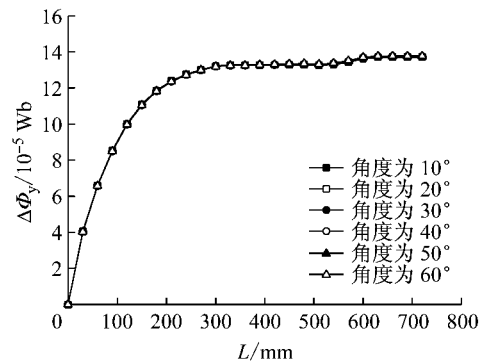


图 10 各类缺陷形态下的磁通量变化

Fig. 10 Variation of the magnetic flux from defects of various morphologies

3.2 截面损失率的影响

图 11a 中 $f(x)$ 随 α 的增加而增大,与理论分析的结论相吻合,说明 α 越大,磁通量信号受缺陷长度的影响越小. 不过, α 对 $f(x)$ 的影响整体较小,在 $L \geq 0.6L_{cr}$ 时,不同 α 对应的 $f(x)$ 值差异很小. 此外, f_{max} 通常不大于 1.05,说明外层钢丝锈蚀与内层钢丝锈蚀引起的磁通量差异较小,在实际检测中可忽略不计.

需要注意的是,若将缺陷长度效应看作是线性的(如文献[8]中使用的简化处理),则相同体积的短缺陷($L < L_{cr}$)引起的磁通量变化也将相同. 实际上,虽然截面损失率增加时缺陷引起的磁通量变化增强,缺陷长度减小时缺陷引起的磁通量变化减弱,但二者的作用并不能相互抵消. 图 11b 中为一系列体积相同而长度不同的短缺陷对应的磁通量变化,由图可知,对于体积相同的短缺陷,截面损失率越大缺陷引起的磁通量变化值也越大. 由于曲线 $f(L)$ 为上凸曲线, $f(x) > x$ ($0 < x < 1$). 缺陷体积不变时,若截面损失率增大 m 倍 ($m > 1$),则缺陷长度减小为 $1/m$,此时磁通量变化值与原来的比值为 $m \cdot f(1/m) > m/m = 1$. 因此,截面损失率对于磁通量变化值

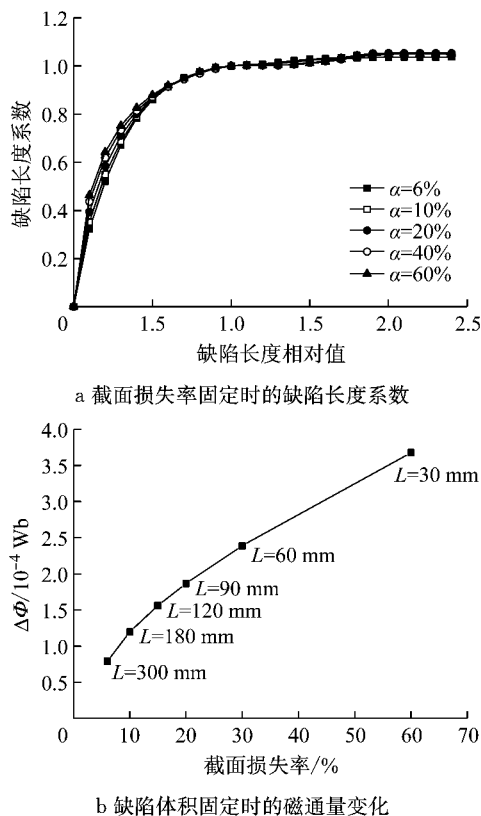


图 11 截面损失率对缺陷长度效应的影响

Fig. 11 Influence on the defect-length effect from the percent LMA

的影响程度总是大于缺陷长度对于磁通量变化值的影响程度,无论缺陷长度取值如何,缺陷体积相同时截面损失率越大缺陷引起的磁通量变化值越大这一规律总是成立。

3.3 索体直径的影响

将索体内的钢丝等效为具有相同横截面积的圆柱体,圆柱体的直径 d 对于缺陷长度效应的影响见图 12。由图可知,随着 d 的增大, $f(x)$ 的数值逐渐增加;当索体等效直径逼近检测设备内径时,缺陷长度效应明显削弱。此外, $f(x)$ 的最大值 f_{\max} 随索体等效直径的增加轻微增加。文献[15]认为在钢丝绳检测中,当锈蚀率超过 10% 时,缺陷长度对磁通量信号的影响可忽略不计。图 11 中结果与这一观点不符,但可通过图 12 的结果分析造成差异的原因。钢丝绳的横断面接近圆形且无防护层,在实际检测中可采用内径与钢丝绳直径接近的检测设备;而且裸露的钢丝绳其锈蚀范围一般较大,缺陷长度效应较弱,因此,文献[15]中的观点对于钢丝绳的磁性检测是可以接受的。同理,在圆形钢棒的检测中缺陷长度效应更弱。而在桥梁检测中,拉索有防护层,且平行钢丝的排列方式接近正六边形,钢丝的等效直径显著小于索体的外径与磁头内径。由图 12 可知,当钢丝的

等效直径较小时,拉索磁通检测中的缺陷长度效应随截面损失率增大而减弱的趋势轻微,缺陷长度效应显著,在缺陷定量识别中不可忽略。

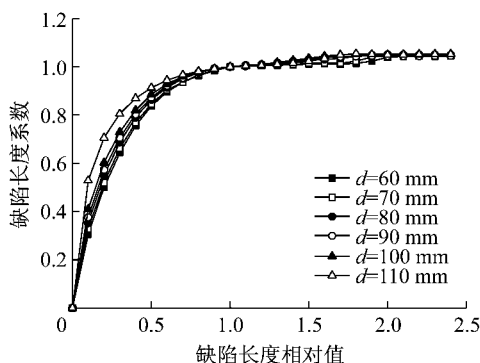


图 12 索体直径对缺陷长度效应的影响

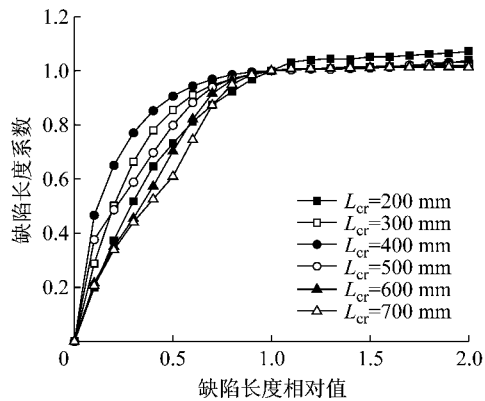
Fig. 12 Influence on the defect-length effect from the cable diameter

3.4 检测设备尺寸的影响

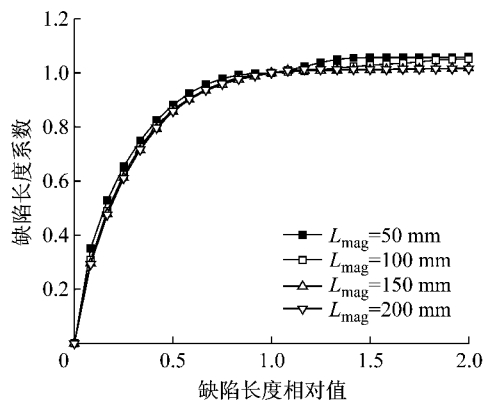
对缺陷长度效应有影响的设备尺寸主要包括磁头内径、磁头间净距 L_{cr} 和磁头长度 L_{mag} 。由拉索的磁化过程可知,磁头内径的影响主要体现在与钢丝表面之间的缝隙上,其影响特点与索体直径相反。 L_{cr} 和 L_{mag} 对缺陷长度效应的影响见图 13。图 13a 中, L_{cr} 增加时缺陷长度系数 $f(x)$ 随缺陷长度 L 变化的规律呈现显著波动,但不具有统一的波动规律。图 13b 中, L_{mag} 增加时 $f(x)$ 几乎不变,磁头长度对缺陷长度效应的影响较小,可忽略不计。因此,对于 L_{cr} 彼此不同的检测设备,需分别建立各自的缺陷长度系数曲线。进而可基于此曲线对拉索金属面积损失的评估结果进行修正^[20]。例如,当测得的截面损失率为 α_t 时,可取修正值为 $\alpha = \alpha_t / f(L)$ 。结合前文可知,对于特定的设备,选择其适用范围内索径最小的拉索建立有限元模型并设定较小的截面损失率可得到一条数值最小的 $f(L)$ 曲线,在后续的修正中得到略偏安全的评估结果。

4 结论

(1) 桥梁拉索的磁通检测信号波动值与截面损失率成正比,同时还可能受到缺陷长度的干扰。决定缺陷长度 L 是否对磁通检测信号产生影响的临界值主要为磁头间净距 L_{cr} ;当 $L \leq L_{cr}$ 时,缺陷引起的磁通量变化值随 L 的增加沿上凸曲线增加,且线型可近似看作双曲线;当 $L > L_{cr}$ 时,内部缺陷引起的磁通量变化值不再变化,而外部缺陷引起的磁通量变化值略有增加,并在 L 超过磁轭长度后保持为常数。



a 缺陷长度系数随永磁体间净距的变化



b 缺陷长度系数随永磁体长度的变化

图 13 检测设备尺寸对缺陷长度效应的影响

Fig. 13 Influence on the defect-length effect from the device dimensions

(2) 当多个缺陷的体积相同时,无论缺陷长度如何,截面损失率较大的缺陷引起的磁通量变化值总是更大。

(3) 由于外层钢丝的磁屏蔽作用,内部缺陷引起的磁通量变化略小于外部缺陷。试验测试表明,钢丝的磁化强度沿拉索径向近似按线性衰减,内层钢丝相对于表层钢丝的衰减比例约为 15.4%。

(4) 缺陷长度系数 $f(x)$ 与缺陷的横向分布形态无关,对于同一台检测设备,钢丝截面损失率和钢丝总截面积对 $f(x)$ 略有影响,且二者数值越大 $f(x)$ 越大。对于不同尺寸的设备,磁头间净距对缺陷长度效应有显著影响,但无固定规律;磁头长度对缺陷长度效应影响较小,可忽略不计。

(5) 索体的防护层与钢丝排列型式使得桥梁拉索磁性检测中的缺陷长度效应较其他绳索或棒材更显著,在定量识别中,忽略这一效应将低估钢丝的实际锈蚀率或截面损失率。

除上述因素外,实际测试时磁通检测信号还会受到钢丝应力状态与环境温度等因素的影响,这些因素通过改变钢丝的磁导率影响磁通检测信号。关

于缺陷长度效应的讨论适用于钢丝的锈蚀、断丝与缺丝病害。

针对特定的检测设备建立缺陷长度系数曲线有助于提高桥梁拉索磁通检测与损伤评估的精度,本研究成果也可对检测设备的设计优化提供参考。

参考文献:

- [1] WATSON S C, STAFFORD D. Cables in trouble[J]. Civil Engineering, 1988, 58(4): 38.
- [2] MARTIN B T. Four decades of inspecting a suspension bridge cable[C] // IABMAS 2014: 7th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management. Shanghai: Taylor & Francis Group, 2014: 57-72.
- [3] 王力力, 易伟建. 斜拉索的腐蚀案例与分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(1): 93.
WANG Lili, YI Weijian. Cases Analysis on cable corrosion of cable-stayed bridges[J]. Central South Highway Engineering, 2007, 32(1): 93.
- [4] EBELING R M, STROM R W, HITE Jr J E, et al. Assessing corrosion damage and corrosion progression in multistrand anchor systems in use at corps projects: ERDC TR-13-3[R]. America: The US Army Engineer Research and Development Center, 2013.
- [5] WU Xinjun, YUAN Jianming, BEN Anran. A novel magnetic testing method for the loss of metallic cross-sectional area of bridge cables [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39(1): 195.
- [6] DOST Y, APAYDIN N, DEDEOĞLU E, et al. Non-destructive testing of Bosphorus Bridges [M] // BÜYÜKÖZTÜRK O, TAŞDEMİR M A. Nondestructive testing of materials and structures. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013: 819-825.
- [7] WEISCHEDEL H R. Electromagnetic wire rope inspection: Signal generation, filtering and computer-aided rope evaluation [J]. Bulletin, 2000, 79: 91.
- [8] JOMDECHA C, PRATEEPASEN A. Design of modified electromagnetic main-flux for steel wire rope inspection[J]. Ndt & E International, 2009, 42(1): 77.
- [9] RIDGE I M, TYTKO A A. Assessment of magnetic NDT equipment for wire rope [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2001, 17(6): 363.
- [10] CHRISTEN R, BERGAMINI A. Automatic flaw detection in NDE signals using a panel of neural networks[J]. Ndt & E International, 2006, 39(7): 547.
- [11] PARK S, KIM J, LEE C, et al. Magnetic flux leakage sensing-based steel cable NDE technique[J]. Shock and Vibration, 2014: 929341.
- [12] ZHANG D, ZHAO M, ZHOU Z, et al. Characterization of wire rope defects with gray level co-occurrence matrix of magnetic flux leakage images[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2013, 32(1): 37.
- [13] XU F, WANG X, WU H. Inspection method of cable-stayed bridge using magnetic flux leakage detection: Principle, sensor design, and signal processing [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(3): 661.

(下转第 1347 页)