

双传感器差分峰值侦测的漏磁检测新方法^{*}

吴德会, 刘志天, 苏令铤

(厦门大学 航空航天学院机电工程系 厦门 361005)

摘 要: 为了提高管道、储罐漏磁检测的准确度、灵敏度, 同时抑制噪声干扰, 提出了一种双传感器差分峰值侦测的漏磁检测新方法。首先, 对实际漏磁检测过程存在的背景噪声进行分析, 研究了检测器振动、磁隙变化、磁轭泄漏等噪声源的共模特性; 其次, 利用缺陷漏磁场的分布特点构造了一种新型的差分侦测结构, 该结构既可对噪声进行共模抑制, 又可实现缺陷特征信号的差模提取; 再次, 依托磁偶极子模型, 对所提方法的机理进行了分析, 并讨论实现该方法所需要的约束条件及其检测灵敏度特性; 最后, 开展了仿真和物理实验, 实验结果表明, 该方法的噪声仅为传统 X 分量检测的 5%, Y 分量检测的 26%, 且检测灵敏度提高了 2 倍。该方法为优化漏磁检测器结构、提高检测的可靠性及灵敏性提供了一个新的思路。

关键词: 漏磁检测; 差分峰值侦测; 共模噪声; 磁偶极子

中图分类号: TH878+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

New MFL detection method based on differential peak extraction using dual sensors

Wu Dehui, Liu Zhitian, Su Lingxin

(Department of Electronic Mechanical Engineering, School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and sensitivity of pipeline and storage tank magnetic flux leakage (MFL) detection, as well as suppress noise interference, a new MFL detection method based on differential peak extraction using dual sensors is proposed. Firstly, the background noise in actual MFL detection process is analyzed and the common mode characteristics of the noise sources, such as sensor vibration, magnet gap change, magnet yoke leakage and etc. are studied. Next, a new differential detection structure is built based on the distribution characteristics of the defect magnetic flux leakage, which can restrain the common-mode noise and realize the differential extraction of the defect feature signal. Then, based on the magnetic dipole model the mechanism of the proposed method is analyzed, the restraint conditions required for realizing the new method and the detection sensitivity characteristic of the method are discussed. Finally, simulation and experiment study were conducted, and the results show that the noise with the new method is only 5% of the one with traditional X-component detection, and 26% with traditional Y-component detection. Moreover, the detection sensitivity is improved twice. The proposed method provides a new strategy for optimizing the MFL detection sensor structure, and improving the detection reliability and sensitivity.

Keywords: magnetic flux leakage detection; differential peak extraction; common-mode noise; magnetic dipole

1 引 言

在石化工业中, 因油气输送管道及储罐使用周期过长、腐蚀损坏严重而造成的泄漏事故, 严重威胁着人民生命财产安全^[1]。漏磁检测(magnetic flux leakage, MFL)

技术作为一种电磁无损检测方法, 具有无污染、不需耦合剂、高可靠性等优点, 已被广泛应用于石油、天然气及化工等行业中铁磁性材料的无损检测领域^[2]。

随着技术的发展, 磁传感器的性能亦有长足的改善。比如近年来比较热门的巨磁阻^[3] (giant magneto resistance, GMR)、隧道磁电阻(tunnel magneto resistance,

收稿日期: 2016-01 Received Date: 2016-01

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(51177141)、航空基金(2012ZD68003)项目资助

TMR) 等系列新型的磁传感器,其信号检测能力相比于传统磁传感器已有大幅度提高。但是在储罐、管道的实际检测工况下,检测器易受电磁干扰、磁轭泄漏或振动噪声等的影响,很难简单通过提高磁传感器的性能而有效地抑制。在提高 MFL 检测信号品质的研究领域,国内外学者进行了大量卓有成效的研究。

Wu B 等人^[4]提出了一种基于 TMR 磁传感器的正交漏磁检测方法,大幅提高了钢丝绳裂纹的探测能力; Singh W. S. 等人^[5]利用有限元方法对励磁装置中磁轭宽度、磁轭间距这两个参数进行了优化,实现对钢板小缺陷的检测; Ma Y. L. 等人^[6]采用聚磁结构拾取漏磁信号,增大了缺陷可检测范围; Park G. S. 等人^[7]确定了磁传感器在磁饱和曲线中的最佳工作点以及磁轭尺寸,使研制传感器系统灵敏度提升 200%; 庞娜等人^[8]采用了小滤波法对时间差型磁通门的感应信号进行去噪处理,提高了此类传感器的检测精度和稳定性; 冯搏等人^[9]提出了深度饱和磁化法,消除了钻杆过渡带区域的背景磁场干扰; 杨理践等人^[10]对管道漏磁检测装置的磁路进行优化设计,改善了检测精度和信号质量; 孙燕华等人^[11]提出了一种基于磁真空泄露原理的新漏磁检测方法,实现远距离接触式漏磁探伤,减小信号失真程度。上述学者的研究成果对提高漏磁信号拾取精度、改善检测器性能都起到不同程度的促进作用。而实际 MFL 检测器工况中,电磁干扰、设备振动、器件温漂等噪声都具有一定的共模性,因此如何利用漏磁场峰值侦测过程中的差分特性进行共模噪声抑制,是一个具有实际工程意义的选题。

针对该问题,立足实际储罐、管道漏磁检测的工况条件,提出了一种新型的双传感器差分峰值侦测的 MFL 检测新方法。该方法以高灵敏度的 GMR 传感器作为检测元件,采用特定的双传感器差分结构,实现了对 MFL 检测器中噪声的共模抑制及对漏磁峰值的差模侦测。所提方法是一个全新的视角,为提升现有 MFL 检测器的可靠性和灵敏性提供了一个新的思路。

2 双传感器差分峰值侦测方法

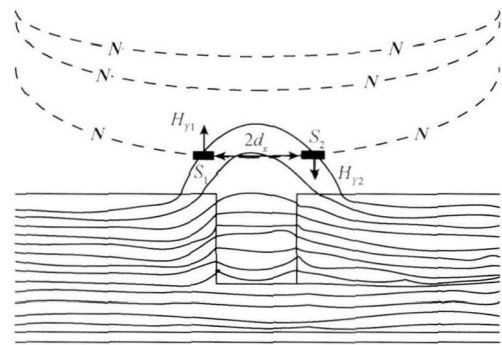
目前,通常选择漏磁场的水平分量 X 或垂直 Y 分量作为漏磁信号强度的特征量。在磁传感器的装配方式上,往往采用单传感器的阵列检测模式^[12]。阵列检测模式实际上是通过 n 个并行的单磁检测通道来提高 MFL 扫查的覆盖范围,从而降低漏检率。这种检测方式具有电路设计简单、结构易加工的特点。

实际储罐、管道的 MFL 检测工况非常复杂。例如:检测器行进中的振动、磁轭与被测钢板间的磁隙、磁轭系统自身的泄漏。这些影响因素均通过背景噪声影响探测精度。尤其是小缺陷,背景噪声的影响更为敏感,甚至淹

没信号、引起缺陷误判,造成错误评估。

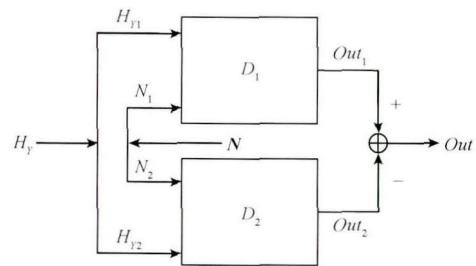
上述噪声源都具有明显的“共模”特性。若在封闭区域放置两个性能参数指标相同的磁传感器,并对两个传感器的信号进行差分拾取,则可有效对上述噪声共模抑制。从本质上来说,是一种利用实际 MFL 检测中的噪声源的共模特性进行抑制的新思路。

根据磁场叠加原理,将实际 MFL 漏磁场分解为空气耦合磁场 N 和缺陷峰值磁场 H 的矢量合成,这里的 H 可以理解为无噪声的理想漏磁场分布。由于受噪声源影响的 N 具有明显的共模特性,因此可构造出差模信号模式。既可对缺陷特征信号进行差模拾取,同时又可实现对噪声的共模抑制。根据上述思路,本文提出了一种双传感器差分峰值侦测的 MFL 检测模式,其侦测结构与信号处理的示意如图 1 所示。



(a) 双传感器差分峰值侦测结构示意图

(a) Sketch diagram of the differential peak extraction structure using dual sensors



(b) 双传感器差模信号的处理框图

(b) Processing block diagram of the differential mode signal of the dual sensors

图 1 双传感器差分峰值侦测的漏磁检测模式示意图

Fig. 1 Sketch diagram of MFL detection mode based on differential peak extraction using dual sensors

图 1(a) 中,将两个磁传感器 S_1 和 S_2 以相同的姿态安装于磁轭中心位置两侧。 S_1 和 S_2 的检测面与钢板表面平行,水平安装距离为 $2d_x$ (其中 d_x 称为装配参数)。由于 S_1 和 S_2 的性能、安装姿态均相同、位置相近并对称,因此可以认为其对空气耦合磁场 N 的拾取相当。

当双磁传感器 S_1 和 S_2 处于缺陷正上方时, S_1 和 S_2 刚好位于漏磁峰值分布的两侧,如图 1(a) 所示。由于 S_1

和 S_2 采集的是缺陷磁场 H 的 Y 分量,不妨记为 H_y 。则根据漏磁峰值分布的对称性,可知 H_{y1} 和 H_{y2} 取值互逆。

很明显,双磁传感器 S_1 和 S_2 对空气耦合磁场 N 的拾取信号 N_1 和 N_2 为共模;而检测缺陷峰值磁场 H 时,其拾取信号 H_{y1} 和 H_{y2} 为典型差模。因此可以利用上述特点,抑制共模噪声同时实现缺陷峰值磁场的差模侦测。相应双传感器差模信号处理原理如图 1(b) 所示。

记双磁传感器 S_1 和 S_2 的检测灵敏度分别为 D_1 和 D_2 ,而由内部器件电子特性及温度变化的带来的额外误差记为 M_1 和 M_2 。则 S_1 同时受到空气耦合磁场 N 和左侧峰值磁场的影响,拾取的漏磁信号为 $H_{y1} + N_1$,其输出 Out_1 为 $(H_{y1} + N_1) \times D_1 + M_1$;同理, S_2 的输出 Out_2 为 $(H_{y2} + N_2) \times D_2 + M_2$ 。将 S_1 和 S_2 的输出差分,即可得到双传感器差分峰值侦测输出 Out 。

双磁传感器 S_1 和 S_2 的检测灵敏度 D_1 和 D_2 通过人工匹配可实现 $D_1 = D_2 = D$ 。则侦测输出 Out 可表达为:

$$Out = Out_1 - Out_2 = (H_{y1} - H_{y2}) \times D + (N_1 - N_2) \times D + (M_1 - M_2) = H_{Diff} + N_{Com} + M_{Com} \quad (1)$$

式中: $H_{Diff} = (H_{y1} - H_{y2}) \times D$ 表示差模的缺陷峰值磁场 H 的信号分量; $N_{Com} = (N_1 - N_2) \times D$ 表示共模的空气耦合磁场 N 信号分量; $M_{Com} = M_1 - M_2$ 表示检测系统

$$\begin{cases} H_y(x, y) = \frac{\sigma_s}{4\pi} \ln \frac{[(x+a)^2 + (y+b)^2][(x-a)^2 + y^2]}{[(x+a)^2 + y^2][(x-a)^2 + (y+b)^2]} \\ H_x(x, y) = \frac{\sigma_s}{2\pi} \left(\arctan \frac{b+y}{a-x} + \arctan \frac{b+y}{a+x} - \arctan \frac{y}{a-x} - \arctan \frac{y}{a+x} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: x 和 y 分别为检测点的水平 X 和垂直 Y 方向的坐标, σ_s 表示缺陷侧面的面磁荷密度。根据磁偶极子模型的原理, σ_s 的取值可通过下式进行计算。

$$\sigma_s = 5.3 \left(\frac{b/a + 1}{b/(a\mu) + 1} \right) H_a \quad (3)$$

式中: μ 为材料的相对磁导率, H_a 为外加磁场强度。

由于 MFL 检测器采用小车结构,可在 X 方向上进行扫查,而在垂直 Y 方向上保持恒定。不妨假设 MFL 检测小车的磁轭中心在 X 方向上坐标为 x_0 ,磁传感器提离值为 y_0 。则由图 1 可得双磁传感器 S_1 和 S_2 在直角坐标系 $X-Y$ 中的位置为 $(x_0 - d_x, y_0)$ 和 $(x_0 + d_x, y_0)$ 。

双磁传感器 S_1 和 S_2 差分峰值侦测输出 Out 主要由缺陷峰值磁场 H 的差模分量决定。因此,将 S_1 和 S_2 的位置坐标代入式(2),即可获得侦测输出为:

$$Out(x_0) \approx (H_{y1} - H_{y2}) \times D = [H_{y1}(x_0 - d_x, y_0) - H_{y2}(x_0 + d_x, y_0)] \times D \quad (4)$$

从上式可看出, $Out(x_0) = Out(-x_0)$ 恒成立,即 $Out(x_0)$ 为偶函数。因此,该 MFL 检测小车对于同一缺陷具有相同的输出波形,与扫查方向无关。

不妨设存在某一典型缺陷(宽度、深度均为 1 mm)。

中温漂噪声的共模分量。

由于信号 H_{y1} 和 H_{y2} 互逆。因此,输出 Out 对于信号部分 H_{Diff} 是差模的,而对于背景噪声 N_{Com} 及温漂噪声 M_{Com} 是共模的。根据缺陷峰值磁场 H 的对称性,理论上存在两个大小相同、方向相反的极值点。将 S_1 和 S_2 安装于两个极值点处,则新方法的灵敏度将是单传感器 Y 分量检测的 2 倍,即 $Out = 2 \times H_y \times D$ 。

新方法是利用实际 MFL 检测噪声源的共模特性,将噪声在源头进行抑制。而同时又根据缺陷峰值磁场的分布特点,构造差分侦测结构来突出漏磁特征。

3 建模与讨论

3.1 差分检测的机理分析

本文利用磁偶极子法对双传感器差分峰值侦测的信号进行机理建模分析。为方便分析,磁偶极子方法一般关心缺陷中心截面的漏磁场分布,往往将缺陷近似为无限长的矩形槽进行讨论^[13]。不妨设钢板中存在矩形槽缺陷的截面尺寸为 $2a \times b$,其中, $2a$ 为缺陷宽度, b 为缺陷深度。以该缺陷的几何中心为原点建立直角坐标系 $X-Y$,并可建立任意位置的漏磁场 H 分布的解析模型^[14],且 H 的 X 以及 Y 方向分量可表达为:

MFL 检测器磁传感器间距 $2d_x$ 为 4 mm,设置提离值 y_0 为 4 mm,且外加激励磁场强度 H_a 取 $180 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,钢板的相对磁导率 μ 取 7 000。把上述参数带入式(2)以及式(4)中所示的解析模型中,则针对该缺陷的双传感差分峰值侦测输出以及传统单传感器检测输出(X 分量及 Y 分量)如图 2 所示。

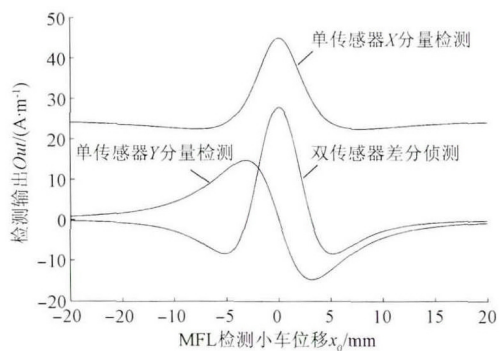


图2 新方法与单传感器方法进行缺陷扫查的输出波形

Fig. 2 The output waveforms of defect scanning with the new method and single sensor detection method

由图 2 中曲线不难看出,传统单传感器 Y 分量输出的优点是 无偏置;但其波形是非轴对称的,且其峰值位置与缺陷中心无关,不利于缺陷定位。单传感器 X 分量检测结果的优点是 具有单峰特性,峰值点对应于缺陷中心;但该输出包含基准偏置的干扰,不利于缺陷量化。而双传感器侦测输出 Out 同时具备了上述两种方法的轴对称性、单峰性、无偏置的优点,而且,其检测灵敏度也明显高于传统单传感器方法。

3.2 差分检测的约束条件

由第 2 节中的分析可知,背景噪声在有限封闭区域内才具有“共模”特性。因此双磁传感器和 S_2 的安装是有约束的,必须置于该有限区域之内。和 S_2 装配位置主要由装配参数 d_x 和提离值 y_0 决定。关于 MFL 中磁传感器提离值的设定问题,相关研究已较丰富,本文不再赘述^[15]。这里重点讨论装配参数 d_x 对双传感器差分峰值侦测输出 Out 的影响及其约束范围。

在图 1 所示结构中,若水平安装距离 $2d_x$ 远大于缺陷宽度 $2a$ (即 $a \ll d_x$) 则本文所提方法退化为两个单传感器 Y 分量检测的 MFL 方案。此时,侦测输出 Out 将形成两个独立的峰值,失去对缺陷的定位能力。而从数学本质来看, Out 的单峰特性实际上是要求函数 $Out(x_0)$ 在 $x_0 = 0$ 处表现为凸函数,即 $Out(x_0)$ 的二阶导数在 $x_0 = 0$ 处应为“非正”,即: $Out''(0) \leq 0$ 。

由于这里仅讨论窄缺陷或裂纹的情况,因此可引入裂纹漏磁场分布的磁偶极子模型,并对式(4)中两磁传感器差分峰值的侦测输出 $Out(x_0)$ 进行简化为:

$$Out(x_0) \approx \frac{\sigma_s D}{4\pi} \left(\ln \frac{[(x_0 - d_x - a)^2 + y_0^2]}{[(x_0 - d_x + a)^2 + y_0^2]} - \ln \frac{[(x_0 + d_x - a)^2 + y_0^2]}{[(x_0 + d_x + a)^2 + y_0^2]} \right) \quad (5)$$

由于待研究问题为装配参数 d_x 的约束范围,因此取位置变量 $x_0 = 0$,并以 d_x 为自变量,则式(5)中的侦测输出 $Out(x_0)$ 又可表达为 d_x 的函数:

$$Out(d_x) \approx -\frac{\sigma_s D}{2\pi} \ln \frac{[(d_x - a)^2 + y_0^2]}{[(d_x + a)^2 + y_0^2]} \quad (6)$$

对上式进行二阶求导,并求解该式的二阶零点(即 $Out''(0) = 0$ 的解),可得:

$$\begin{cases} d_{x1} = 0 \\ d_{x2} = (a^2 - 2y_0(a^2 + y_0^2)^{1/2} + y_0^2)^{1/2} \\ d_{x3} = (a^2 + 2y_0(a^2 + y_0^2)^{1/2} + y_0^2)^{1/2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: d_{x1} 、 d_{x2} 和 d_{x3} 分别表示二阶零点解。

由上式不难看出,函数 $Out(d_x)$ 的二阶零点共有 3 个解;其中, d_{x1} 和 d_{x3} 恒为实数解,而 d_{x2} 的取值有待进一步讨论。很明显,当 $y_0 > \frac{\sqrt{3}a}{3}$ 时, d_{x2} 无实数解。此时,自

变量 d_x 在 $[0, d_{x3}]$ 的取值范围内,函数 $Out''(0) \leq 0$ 恒成立,即在该取值范围内,函数 $Out(x_0)$ 在 $x_0 = 0$ 处一定为凸函数。

从实际物理意义上来看,所提方法的提离值 y_0 取值必须大于 $\frac{\sqrt{3}a}{3}$ 。此时,若装配参数 d_x 约束在 $[0, d_{x3}]$ 范围内,则双传感器差分峰值侦测输出 Out 必为单峰分布,且其峰值在位置上与缺陷的中心点相对应。

3.3 差分检测的敏感度分析

从 3.2 节的分析可知,装配参数 d_x 在 $[0, d_{x3}]$ 范围内,可使侦测输出 Out 呈现单峰特性。则存在唯一的 d_x 使 Out 信号峰值达到最大,即双传感器差分检测的侦测敏感度达到最大。由式(5)中所示的双磁传感器差分峰值侦测模型,可计算侦测输出 Out 的信号峰值为:

$$Max(Out(x_0)) = Out(x_0) |_{x_0=0} = Out(d_x) = -\frac{\sigma_s D}{2\pi} \ln \frac{[(d_x - a)^2 + y_0^2]}{[(d_x + a)^2 + y_0^2]} \quad (8)$$

式中: 侦测输出 Out 的信号峰值 $Max(Out)$ 实际为 d_x 的函数,则不妨记为 $Max(d_x)$ 。此时,差分侦测的敏感度问题等价转化为求解函数 $Max(d_x)$ 的极值问题。不失一般性,可对函数 $Max(d_x)$ 进行求导,得:

$$Max'(d_x) = \frac{-4a(a^2 - d_x^2 + y_0^2)}{a^4 + 2a^2(-d_x^2 + y_0^2) + (d_x^2 + y_0^2)^2} \quad (9)$$

由上式不难得出, $Max(d_x)$ 存在的两个极值点为别为 $(a^2 + y_0^2)^{1/2}$ 和 $-(a^2 + y_0^2)^{1/2}$ 。根据装配参数 d_x 的约束 $[0, d_{x3}]$,可知极值点 $-(a^2 + y_0^2)^{1/2}$ 为伪解,舍弃之。由于 $d_{x3} = (a^2 + 2y_0(a^2 + y_0^2)^{1/2} + y_0^2)^{1/2} > (a^2 + y_0^2)^{1/2}$ 恒成立,则侦测输出 Out 的信号峰值随装配参数 d_x 的变化分两个阶段。第 1 阶段, d_x 在 $[0, (a^2 + y_0^2)^{1/2}]$ 范围内,函数 $Max(d_x) \geq 0$ 恒成立,则此时 Out 的信号峰值 Max 随 d_x 单调递增,检测敏感度持续上升;第 2 阶段, d_x 取值在 $[(a^2 + y_0^2)^{1/2}, d_{x3}]$ 时, $Max(d_x) < 0$ 恒成立,则此时 Out 的信号峰值 Max 反而随装配参数 d_x 的增大而减小,所提方法的检测敏感度呈下降趋势。

因此,双传感器差分峰值侦测时,两个磁传感器安装距离为 $2(a^2 + y_0^2)^{1/2}$ 时,可获得最大检测灵敏度。

4 仿真与实验

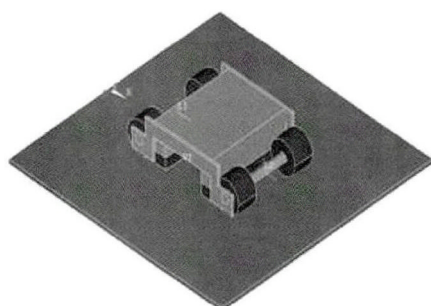
4.1 有限元仿真建模

为了验证所提的双传感器差分峰值侦测方法及其模型有效性,利用有限元软件 ANSYS 的电磁仿真模块对进行模拟仿真实验,并使用参数化设计语言(ANSYS parametric design language, APDL)进行仿真分析。

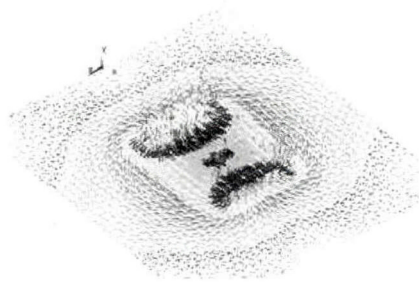
所建三维有限元的漏磁检测结构参数包括:磁轭总

长为 160 mm,磁轭中心距为 130 mm,相对磁导率为 2 000。磁轭的两磁极分别缠绕线圈,并加载 $2\,000\text{ A/m}^2$ 电流密度作为磁场激励,线圈和空气相对磁导率为 1。被测钢板长 2 m,宽 1 m,壁厚为 8 mm,其相对磁导率按 Q235 的磁化曲线进行定义。选择 solid117 单元进行有限元求解,以满足交界处的边界条件和计算精度要求。如图 3(a) 为所建立的有限元模型外轮廓。

由于所提方法只需检测缺陷上方有限封闭区域的磁场变化,因此在磁轭中心区域定义一个矩形采集区域,该区域的剖分网格为边界的 1/20,以保证对漏磁场进行有限元建模的精度。在远离钢板及缺陷的空气,其磁场变化十分缓慢,剖分单元的尺寸可以略大,并使用智能剖分以实现与密集处单元的平滑过渡。如图 3(b) 所示,为缺陷处电磁场局部磁通密度云图。



(a) 有限元模型外轮廓
(a) The outer contour of FE model



(b) 电磁场仿真结果分析
(b) Analysis of electromagnetic field simulation result

图 3 双传感器差分峰值侦测的三维有限元仿真建模过程

Fig. 3 3D FE simulation and modeling process of differential peak extraction using dual sensors

在实际工程应用中,被测钢板的粗糙表面会造成检测小车的机械振动、磁隙变化等;而行进机构自身的缺陷,如车轮的偏心误差等,又会引起检测小车的周期性摇摆。很明显,前一类干扰为随机振动,其引入的噪声符合正态分布;后一类干扰则为规律性往复,如偏心轮周期摆动,其引入的噪声为系统误差。MFL 检测小车的随机振动及偏心摇摆的示意如图 4 所示。

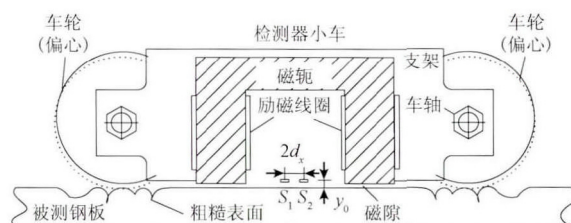


图 4 MFL 检测小车的随机振动及偏心摇摆过程示意

Fig. 4 The sketch diagram of the random vibration and eccentric swing processes of the car in MFL detection

仿真中,双磁传感器 S_1 和 S_2 的装配参数 $2d_x$ 为 4 mm,提高值 y_0 为 4 mm。检测小车以 1 m/s 的速度进行移动,采样频率为 1 kHz,即扫描精度为 1 mm。为与实际 MFL 检测工况更为接近,在垂直 Y 方向上叠加标准差为 1 mm 的高斯噪声以模拟小车的随机振动。同时叠加一个内摆线轨迹 $e\cos\theta$ 以模拟车轮偏心而造成的摇摆,其中 $e = 3\text{ mm}$ 为车轮的偏心距, θ 为车轮转角。

先将 MFL 检测小车置于无缺陷钢板表面进行扫查。采集磁轭中心且相同提高值处的 H_x 信号作为常规单传感器 MFL 检测输出,以进行对比。两种检测方法在相同背景噪声条件下的检测波形如图 5 所示。

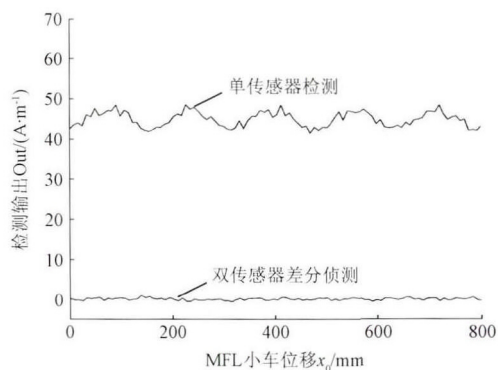


图 5 两种检测方法对背景噪声的检测结果

Fig. 5 The background noise detection results for two detection methods

在图 5 中单传感器检测结果 H_x 中,包含了一个强度为 45 A/m 的偏置分量及幅值达到 10 A/m 的周期性波动(与车轮偏心摇摆的周期一致);同时, H_x 波形也含有较丰富的毛刺点,主要是随机噪声造成的影响。

而在新方法中,小车的随机振动及车轮偏心摇摆对两个传感器的影响接近,磁传感器信号经差分运算后,对这种共模噪声有明显的抑制作用,背景磁场偏置也得到彻底消除。所以如图 5 中双传感器差分侦测的输出无偏置,且将随机振动和偏心摇摆引发的噪声有效抵制在 0.5 A/m 范围内,仅为传统方法的 5% 左右。

4.2 物理实验

根据上述仿真实验的相关参数, 研制相对应双传感器差分峰值侦测的检测器, 并开展实际物理实验。实验用检测器外形如图 6 所示。

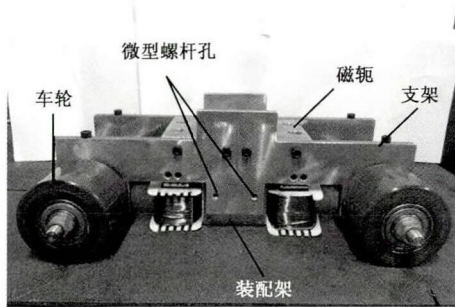


图 6 实际物理实验检测器实体

Fig. 6 The photo of the detector in actual physical experiment

选用 8 mm 厚储罐用的 Q235 钢板作为实验对象。钢板长 2 m, 宽 1 m, 表面粗糙并存有大量铁锈。为了获得多组数据以提高实验的可靠性, 在钢板上人工加工 5 个长度 30 mm, 深度 5 mm, 宽度分别为 1 mm、3 mm、4 mm、6 mm 和 10 mm 的矩形槽作为人工缺陷。

通过人工选配, 挑选灵敏度差异在 1% 以内的 2 个 GMR 磁传感器作为检测器件 S_1 和 S_2 。 S_1 和 S_2 拾取的磁信号经电路板进行预处理、差分运算, 并由数据采集卡采集到计算机进行存储。将 S_1 和 S_2 以相同的姿态安装在一个特制的装配架上, S_1 和 S_2 检测面与被测钢板表面平行。装配架内置有微型螺杆机械结构, 可在 2~30 mm 范围内调整 S_1 和 S_2 水平安装距离 $2d_x$ 。将装配架安装在磁轭中心处, 并使 S_1 和 S_2 分别置于磁轭中心的两侧, 且能够跟随检测器一起移动。 S_1 和 S_2 的提离值可以通过装配架的高度进行调整。另外, 在装配架中心处的水平 X 和垂直 Y 方向, 再安装两个独立的 GMR 磁传感器, 以实现传统的单传感器检测。

开展物理实验时, 固定双磁传感器 S_1 和 S_2 的提离值 y_0 为 4 mm, 并在车轮 (直径 50 mm) 上设置偏心距 $e = 3$ mm, 最后将检测器置于被测钢板表面进行多次缺陷扫查实验。缺陷扫查时, 利用装配架来调整 S_1 和 S_2 的安装距离 $2d_x$ 在 2~30 mm 变化 (每隔 1 mm 实验一次)。对同一缺陷进行反复扫查, 记录数据采集卡检测到的侦测输出 Out 的峰值 $Max(Out(x_0))$ 及其对应的装配参数 d_x 。对待测钢板上 5 个人工缺陷进行扫查, 最后得到不同缺陷条件下, 侦测输出的峰值 $Max(Out(x_0))$ 与装配参数 d_x 的关系曲线如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 实测侦测输出峰值 Max 和装配参数 d_x 的关系, 与理论分析结果基本吻合。峰值信号 Max 先随装配参数 d_x 增大而明显提高, 但达到最佳装配参数

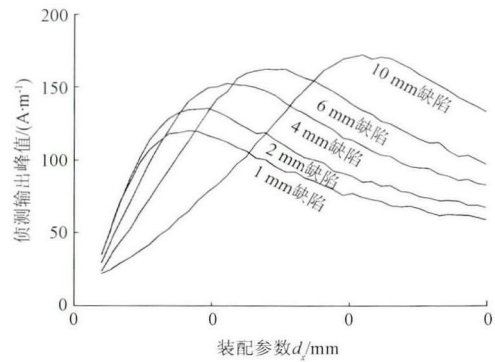


图 7 实测侦测输出峰值与装配参数的关系曲线
Fig. 7 The relationship curve of experiment output peak value vs. assembly parameter

后, Max 又呈现单调下降的趋势。如图 7 中实测 2 mm 宽度矩形槽对应的最佳装配参数 d_x 为 4 mm, 这与理论模型式 (9) 计算的极值点 4.123 1 mm 十分靠近。

从图 7 中各曲线的整体分布来看, 随着待检测缺陷宽度的增大, 关系曲线呈现右移趋势。缺陷越宽, 则侦测输出峰值 Max 也越大, 对应的最佳装配参数 d_x 也呈增大趋势, 这与 MFL 检测的实际经验相吻合。

当然, 在实际工程应用中, 待检测缺陷的大小是事先未知的。由于大缺陷的漏磁信号非常明显, 其漏检概率很小, 因此在设置装配参数时, 主要考虑小缺陷和窄裂纹的情况。对比参考图 7 中所示各缺陷对应的最佳装配参数 d_x , 可以看出将 d_x 设置在 3.5~5.5 mm 之间时, 基本可以覆盖到各类小缺陷的情况。

最后, 本文将实验检测器的装配参数 d_x 设定为 4 mm, 并对待测 Q235 钢板上最小的人工缺陷 (长 30 mm、深 5 mm, 宽度 1 mm) 进行侦测实验。同时, 采集单传感器的水平 X 和垂直 Y 分量进行对比。检测过程中, 检测小车尽量保持平稳并均匀行进, 用数据采集卡记录检测器实际扫查行程为 360 mm。3 种测试方法得到的漏磁检测信号如图 8 所示。

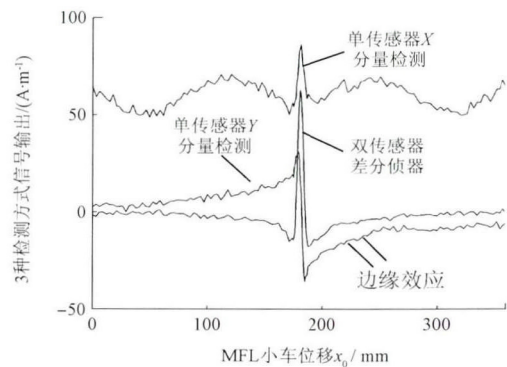


图 8 3 种方法的漏磁检测结果对比
Fig. 8 Comparison of the MFL detection results among three methods

虽然图8中的单传感器 X 分量的输出具有单峰特性,但其拾取的噪声最为突出,对背景噪声几乎没有抑制能力,输出偏置达53 A/m。特别是受到车轮偏心摇摆和随机振动的影响,其漏磁信号几乎淹没在噪声中。再观察单传感器 Y 分量则不难看出,其不存在偏置问题,且随机噪声的影响也相对较小,实测噪声幅度为4 A/m。但该检测输出不具备单峰特性,没有与缺陷相对应的漏磁峰值。而且,缺陷引发的磁泄漏在远离缺陷处就已出现,因此单传感器 Y 分量检测中存在较严重的“边缘效应”(图8中双线指示部位所示),这将对评估缺陷的有效宽度带来明显的干扰。

本文所提方法的侦测输出波形具有明显的新特点:首先,新方法继承了传统单传感器 X 分量检测方法的“单峰性”,含有与缺陷位置相一致的检测峰值;其次,其侦测输出具有“对称性”,无论从左往右,还是从右往左扫描缺陷,均具有一致的输出波形;再次,保留了传统单传感器 Y 分量检测方法中“零基准”特色,解决了 X 分量检测中存在的偏置问题。还有,对各类背景噪声的共模抑制效果更为显著,实测噪声幅度为1.1 A/m,仅为传统单传感器 Y 分量检测的26%。最后,对缺陷两侧的漏磁场扩散进行了有效的共模抑制,使侦测输出迅速收敛于0,克服了传统单传感器 Y 分量中“边缘效应”导致的干扰。

由此看来,新方法分别继承了有传统MFL方法中“单峰性”、“对称性”、“零基准”的特点,同时利用对噪声共模抑制,提高了侦测输出的信噪比,并有效抑制了现在单传感器检测方法的“边缘效应”。

5 结 论

缺陷周边的漏磁场可以理解为空气耦合磁场 N 和缺陷峰值磁场 H 的矢量合成。利用双传感器进行差分峰值侦测时,空气耦合磁场 N 具有共模特性,而 H 具有差模特性。新方法既可突出缺陷的特征,又能对噪声进行共模抑制,提高MFL检测的信噪比和可靠性。

新方法的侦测输出为“零基准”,避免了传统方法中存在的偏置干扰问题;同时,对缺陷的检测又具有明显的单峰特性,且峰值点的位置与待测缺陷中心相对应。特别是在非缺陷区域,新方法的侦测输出会迅速收敛于0,避免了缺陷的“边缘效应”,提高非缺陷区域和缺陷区域的区分能力。

新方法中两个磁传感器安装是有约束的,其提高值 y_0 必须大于 $\frac{\sqrt{3}a}{3}$,并且装配参数 d_x 保持在 $[0, d_{x3}]$ 的范围内,才能保持其侦测输出的单峰分布。

当装配参数 d_x 设定为 $(a^2 + y_0^2)^{1/2}$ 时,新方法可以获得最大的检测灵敏度。而当待检测缺陷大小不确定时,

装配参数 d_x 可设置在3.5~5.5 mm之间,基本可以对各类小缺陷的检测进行覆盖。

致谢

该项目得到了“福建省高端装备制造协同创新中心”的大力支持并提供了相关条件,在此表示感谢!

参考文献

- [1] 杨理践,赵洋,高松巍. 输气管道内检测器压力-速度模型及速度调整策略[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2407-2413.
YANG L J, ZHAO Y, GAO S W. Pressure-velocity model and speed adjustment strategy for in-pipe detector in gas pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2407-2413.
- [2] 吴德会,黄松岭,赵伟,等. 油气长输管道裂纹漏磁检测的瞬态仿真分析[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 136-140.
WU D H, HUANG S L, ZHAO W, et al. Transient simulation analysis on magnetic flux leakage detection of cracks in long-distance oil and gas pipeline [J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 136-140.
- [3] 王超,高鹏. 基于GMR的电磁无损检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(6): 783-792.
WANG CH, GAO P. Study of GMR based electromagnetic nondestructive testing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(6): 783-792.
- [4] WU B, WANG Y J, LIU X C, et al. A novel TMR-based MFL sensor for steel wire rope inspection using the orthogonal test method [J]. Smart Materials and Structures, 2015, 24(7): 75007-75018.
- [5] SINGH W S, RAO B P C, MUKHOPADHYAY C K, et al. Finite element model-based approach for magnetic flux leakage testing of steel plates using 2D tandem GMR array sensors [J]. Insight Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2014, 56(12): 683-690.
- [6] MA Y L, HE R Y, CHEN J A. Method for improving SNR of drill pipe leakage flux testing signals by means of magnetic concentrating effect [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(9): 1-7.
- [7] PARK G S, PARK E S. Improvement of the sensor system in magnetic flux leakage-type nondestructive testing (NDT) [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 1277-1280.
- [8] 庞娜,程德福,王言章,等. 时间差型磁通门敏感单元巴克毫森噪声处理研究[J]. 仪器仪表学报, 2015,

- 36(11): 2595-2601.
- PANG N, CHENG D F, WANG Y ZH, et al. Research on sensitive unit Barkhausen noise processing of residence times difference fluxgate [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11): 2595-2601.
- [9] 冯搏, 巴鲁军, 孙燕华, 等. 钻杆加厚过渡带漏磁检测研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(5): 12-15.
- FENG B, BA L J, SUN Y H, et al. Magnetic flux leakage testing method study for upset transition zone of drill pipe[J]. Journal Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2014, 42(5): 12-15.
- [10] 杨理践, 崔益铭, 高松巍, 等. 管道漏磁内检测装置的磁路优化设计[J]. 沈阳工业大学报, 2010, 32(3): 311-315.
- YANG L J, GUI Y M, GAO S W, et al. Optimization design of magnetic circuit in pipeline magnetic leakage internal detecting device [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(3): 311-315.
- [11] 孙燕华, 康宜华. 一种基于磁真空泄露原理的漏磁无损检测新方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 18-23.
- SUN Y H, KANG Y H. New MFL nondestructive testing method based on magnetic vacuum leakage [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 18-23.
- [12] 邓湘, 穆星达, 唐宇. 阵列式静电传感器结构与优化研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1): 24-31.
- DENG X, MU X D, TANG Y. Study on the structure design and optimization of array electrostatic sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1): 24-31.
- [13] EDWARDS C, PALMER S B. The magnetic leakage field of surface-breaking cracks [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 19(4): 657-667.
- [14] WU J B, SUN Y H, KANG Y H, et al. Theoretical analyses of MFL signal affected by discontinuity orientation and sensor-scanning direction [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(1): 1-7.
- [15] 吴德会, 柳振凉, 张忠远, 等. 漏磁检测中提离值影响的三维有限元仿真分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(6): 1188-1198.
- WU D H, LIU ZH L, ZHANG ZH Y, et al. The 3D FE simulation analysis of lift-off value effect in MFL testing [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(6): 1188-1198.

作者简介



吴德会 分别在2003年、2006年于合肥工业大学获得硕士学位和博士学位 现为厦门大学机电系副教授, 主要研究方向为无损检测、传感器技术和智能测控技术等。
E-mail: wudehui@xmu.edu.cn

Wu Dehui received his M. S degree in 2003 and doctor degree in 2006 both from Hefei University of Technology. Now, he is an associate professor in Xiamen University. His main research interest includes NDT, sensor technology and intelligent measurement and control technology.



刘志天(通讯作者) 2014年于南昌航空大学获得学士学位 现为厦门大学机电系硕士生, 主要研究方向无损检测。
E-mail: 445702793@qq.com

Liu Zhitian (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2014 from Nanchang Hangkong University. Now, he is a master student in Xiamen University. His main research interest is NDT.