

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311804

漏磁检测多排传感器的数据修正理论及方法^{*}

张仕忠, 李红梅, 赵春田

(四川大学灾变力学与工程防灾四川省重点实验室 成都 610065)

摘要:漏磁检测因其显著的技术优势,被广泛应用于无损检测铁磁性构件中的缺陷,尤其是在油气管道的内检测领域。漏磁检测信号的空间分辨率由传感器的排布密度决定,但传感器的排布密度受其尺寸限制,尤其是对单排传感器。因此为提升检测信号的空间分辨率,传感器的多排、错排布置是简单易行的方法。由于多排传感器所处位置的背景磁场不同,不同背景磁场对检测信号的影响规律尚不清晰,因此需要对以上问题进行理论分析,并提出对多排传感器检测数据进行修正的方法。本研究基于磁荷理论,将缺陷检测信号划分成背景磁场和缺陷漏磁场两部分的叠加,给出了两者叠加的规律。基于此提出了对多排传感器的检测数据进行修正的方法,并通过 COMSOL 仿真和实验结果验证了所提方法的有效性。

关键词:漏磁检测;多排传感器;数据修正

中图分类号: TH878 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 430.25

Theory and method of data correction for multi-row sensors in MFL detection

Zhang Shizhong, Li Hongmei, Zhao Chuntian

(Failure Mechanics and Engineering Disaster Prevention, Key Laboratory of Sichuan Province,
Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Due to the remarkable technical advantages, magnetic flux leakage testing (MFL) is widely used in nondestructive testing of ferromagnetic components, especially in the field of internal inspection of oil and gas pipelines. The spatial resolution of MFL inspection is determined by the sensor arrangement density. However, the sensor arrangement density is limited by its size, especially for single-row sensors. Therefore, to improve the spatial resolution for the inspection, the multi-row and staggered arrangement of sensors is a simple and feasible method. Due to the different background magnetic fields at the positions of multiple rows of sensors, the influence law of different background magnetic fields on the detection signal is not clear. Therefore, it is necessary to carry out a theoretical analysis of the above problems. A method is proposed to correct the detection data of multiple rows of sensors. Based on the magnetic charge theory, the defect detection signal is divided into the superposition of the background magnetic field and the defect leakage magnetic field, and the superposition rule of the two is given. Based on this, the method of correcting the detection data of multiple rows of sensors is proposed. The effectiveness of the proposed method is evaluated by COMSOL simulation and experimental results.

Keywords: magnetic leakage detection; multi-row sensors; data correction

0 引言

石油和天然气已经成为了当今社会发展所需的重要能源^[1],我国投资建设了大量的油气输送管线,用于保障石油天然气的供给^[2]。这些管道在长期使用过程中会产生一些缺陷,缺陷的存在威胁管道运行安全,存在造成巨

大经济损失和环境污染的安全隐患^[3]。油气输送管道的安全运行是至关重要的^[4-5],及时发现管道中存在的缺陷是其安全运行的重要保障^[6],为了避免损失,定期有效的管道检测是必要的,对国家安全和经济发展具有重要意义^[7-8]。

铁磁性材料因为其优异的力学性能,被广泛应用于工程领域^[9],油气输送管道也广泛采用了铁磁性钢

收稿日期:2023-08-15 Received Date: 2023-08-15

^{*} 基金项目:四川大学人才引进项目(YJ202091)资助

材^[10]。漏磁检测是一种优秀的无损检测技术^[11],广泛应用于检测铁磁结构中的缺陷^[12-13],其技术原理为铁磁性材料被磁化后,在材料的缺陷区域,磁力线会泄漏到空气中形成漏磁场^[14],通过磁场传感器采集漏磁场信号,最后根据漏磁场信号特征进行分析获得缺陷的尺寸等信息^[15-16]。检测结果将作为管道安全评估和维修的依据,精确的检测结果有利于及时获知管道缺陷的状态,并采取措施保障管道安全、延长管道的使用寿命^[17],因此要尽可能获得精确的检测结果。获取漏磁场信号是漏磁检测技术的第1步^[18],也是后续分析的基础,所以检测过程中采集的漏磁场信号的空间分辨率将在一定程度上影响检测结果的精确性。影响漏磁检测信号空间分辨率的主要因素是检测设备上检测通道之间的间距和采样频率^[19]。早期的漏磁检测设备,由于受到存储空间小,数据分析速度慢等技术限制^[20],导致不能在设备上放置大量的传感器,致使检测数据的空间分辨率较低。近年来,随着存储设备容量的显著增大,计算机数据处理速度的显著加快,促使漏磁检测设备上的传感器数量急剧增加^[21],使得现在的漏磁检测设备相较于早期设备在漏磁场信号的空间分辨率上有很大的提升。根据美国腐蚀工程师协会(National Association of Corrosion Engineers, NACE)关于管道在线无损检测标准,检测通道之间的间距在8~17 mm可满足高清晰度漏磁检测管道检测器的技术指标^[22],在一项研究中使用到的漏磁检测设备,其检测通道之间的最小间距为7.5 mm^[23]。近几年,随着漏磁检测技术的发展,检测通道之间的间距进一步减小,迈入了超高清漏磁检测领域。

目前限制漏磁检测信号空间分辨率的主要因素是传感器的尺寸,由于单排布置的传感器间距会受传感器本身尺寸和安装电路的限制,检测通道之间的间距不能无限减小,因此,如果想要打破传感器尺寸的限制,需要采用多排的传感器排布方式。已有研究采用了3排传感器交错排布的方式以获得更高空间分辨率的漏磁场信号^[24],但由于多排传感器的错排布置致使不同行传感器所处的位置不同,其背景磁场亦有不同,且不同背景磁场对检测信号的影响机理尚不清晰,因此需要对以上问题进行理论分析,并基于此提出对多排传感器检测数据进行修正的方法。

基于此,为了突破传感器本身尺寸的限制,获得更高空间分辨率的漏磁场信号,本研究基于磁荷理论,从理论上分析了影响多排传感器检测信号的因素,提出了分析该问题的理论模型和修正多排传感器检测信号的方法。并通过有限元模拟了同一轴线上等间隔分布的传感器检测信号,以此验证理论分析结果的正确性,并通过实验验证了所提的多排传感器检测信号修正方法的有效性。

1 理论与模拟分析

1.1 理论分析

漏磁检测过程中需要对试件进行磁化,在实际工程中,检测器进行一次管道内检测需要运行上百公里,因此磁化源通常采用永磁体,永磁体提供源场,经轭铁、钢刷和试件形成闭合回路。根据磁荷理论,在检测对象的两磁极端面(钢刷与试件的接触面)会有正负磁荷积累,传感器处于两端面之间,传感器在无缺陷区域时测得信号主要是由磁化器两端积累的正负磁荷产生的背景磁场,如图1所示;当试件磁化区间存在缺陷时,在磁化场的作用下,缺陷壁上也会积累正负磁荷从而产生漏磁场,如图2所示。

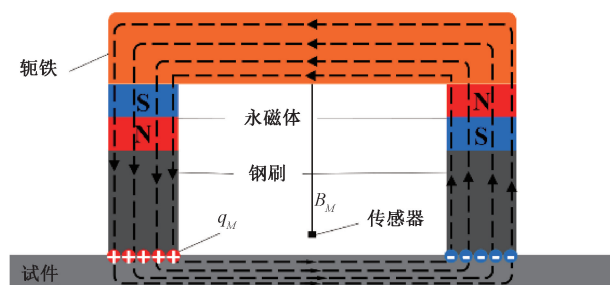


图1 漏磁检测原理(无缺陷)

Fig. 1 Magnetic flux leakage detection schematic (no defects)

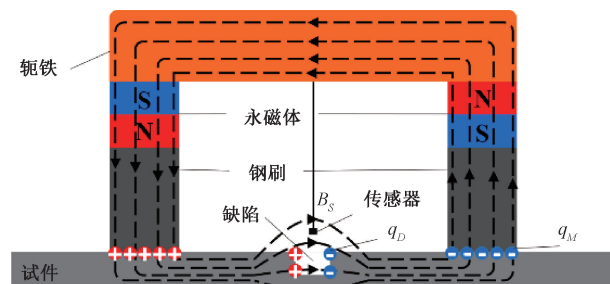


图2 漏磁检测原理(含缺陷)

Fig. 2 Magnetic flux leakage detection schematic (including defects)

由磁荷理论,漏磁检测中,气体或液体介质中的漏磁场信号 B 与磁荷的关系为:

$$B = \frac{\mu_0 q}{4\pi |r|^2} r, \quad (1)$$

式中: B 为测量场点处测得的磁通密度, μ_0 为气体或液体介质的磁导率,一般等于空气磁导率,为源点磁荷量, r 为源点指向场点的矢量。

如图1所示,设在磁化器两端积累了 m 个正负磁荷 q_M , 则传感器在无缺陷区域测得的某一场点磁通密度 B_M

为磁化器两端的磁荷所产生,两者关系为:

$$\boldsymbol{B}_M = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{i=1}^m \frac{q_{Mi} \boldsymbol{r}_i}{|\boldsymbol{r}_i|^3}, \tag{2}$$

式中: q_{Mi} 为磁化器端面上第 i 个磁荷的磁荷量, $\boldsymbol{r}_i$ 为第 i 个磁荷源点到传感器测量场点的矢量。

当待测件的被磁化区域存在缺陷时,类似地,缺陷壁由于磁化在左右壁面上积累了 n 个正负磁荷 q_D, q_{Dk} 为缺陷壁面上第 k 个磁荷的磁荷量,则缺陷壁面积累的磁荷在传感器测量某一场点处产生的磁通密度 $\boldsymbol{B}_D$ 为:

$$\boldsymbol{B}_D = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=1}^n \frac{q_{Dk} \boldsymbol{r}_k}{|\boldsymbol{r}_k|^3}, \tag{3}$$

由于磁极端面积累磁荷 q_M 由磁化器的磁化强度决定,磁化区域是否存在缺陷对磁化器两端面积累的磁荷 q_M 没有影响,所以可以认为磁化器两端面积累的磁荷在整个检测过程保持不变。因此,根据式(1)中场点为源点磁荷的累加关系,可得试件磁化区域存在缺陷时传感器测量某一场点信号 $\boldsymbol{B}_S$ 为:

$$\boldsymbol{B}_S = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\sum_{i=1}^m \frac{q_{Mi} \boldsymbol{r}_i}{|\boldsymbol{r}_i|^3} + \sum_{k=1}^n \frac{q_{Dk} \boldsymbol{r}_k}{|\boldsymbol{r}_k|^3} \right) \tag{4}$$

由此可得:
 $\boldsymbol{B}_S = \boldsymbol{B}_M + \boldsymbol{B}_D$,
即漏磁检测信号可以分解为由磁化器导致的背景磁

场 $\boldsymbol{B}_M$ 和由缺陷导致的漏磁场 $\boldsymbol{B}_D$ 的线性叠加。
进一步分析可知,处同一轴线上的传感器虽然位置不同,处于不同的背景磁场 $\boldsymbol{B}_M$ 下,只要从检测信号 $\boldsymbol{B}_S$ 中减去背景磁场信号 $\boldsymbol{B}_M$, 便可获得缺陷信号 $\boldsymbol{B}_D$ 。因此,在使用多排传感器时,可以通过消除不同传感器所处位置的背景磁场的影响从而提取出所需的缺陷漏磁场信号,以此实现对多排传感器漏磁检测信号的修正。

1.2 模拟分析

为了验证理论分析结果的正确性,采用有限元分析软件 COMSOL 中的 AC/DC 模块进行漏磁检测的有限元模拟。有限元方法是基于麦克斯韦方程对漏磁检测进行模拟,利用标量磁势法,可以将漏磁检测视为静磁问题,由麦克斯韦方程^[25]:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_s, \tag{6}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0, \tag{7}$$

建立漏磁检测模型和坐标轴如图 3 所示。其中,由永磁体、轭铁、钢刷构成的磁化器在 x 方向上的磁化范围为 120 mm。坐标轴 x, y 零点设在磁化器磁化区域的中点, z 轴零点设在待测件的表面。选择直线 $y = 0 \text{ mm}, z = 1 \text{ mm}$ 布置 21 个模拟传感器对检测信号进行仿真,表 1 是仿真模型中的各项参数及其取值。

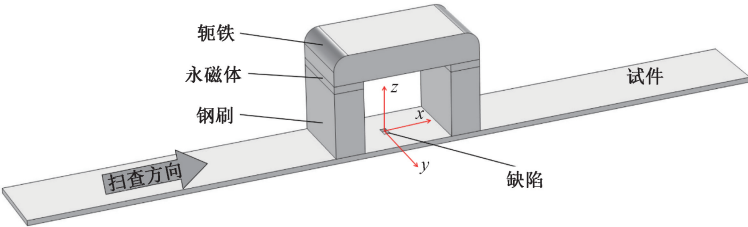


图 3 漏磁检测模型
Fig. 3 Magnetic flux leakage detection model

表 1 仿真模型参数表

Table 1 Simulation model parameter table		
参数	符号	取值/mm
检测器扫描坐标	M_x	(-70, 1, 70)
模拟传感器坐标	S_x	(-50, 5, 50)
提高	-	1

在上述模型中,将试件模型中缺陷部分的材料属性设置成试件材料属性,即可获得不含缺陷的漏磁检测模型。由该模型模拟出所选观测路径上、不同位置传感器在无缺陷区域测得的背景磁场,背景磁场不同分量 B_i 的计算结果如图 4 所示。将待测件几何模型中所含缺陷的材料属性设置成空气属性,可获得含缺陷的漏磁检测结果。图 4 展示了对含缺陷试件,随着磁化器的行进,不同

传感器测点处的缺陷漏磁场三轴分量的模拟结果,图中虚线框所示的信号变化是由缺陷引起的。

由图 5 可知,随着磁化检测器的移动,不同位置的传感器由前到后依次检测到缺陷漏磁场信号,在没有缺陷影响的区域内,当 M_x 一定,随着 S_x 的变化, B_x 和 B_y 基本不变,但 B_z 有明显的变化,这与图 4 所示的背景磁场各分量信号基本一致,说明了此时传感器在无缺陷区域检测的信号主要为背景磁场 $\boldsymbol{B}_M$ 。由前述理论分析可知,相较于无缺陷区域,传感器在经过缺陷时所测信号 $\boldsymbol{B}_S$ 由背景磁场 $\boldsymbol{B}_M$ 和缺陷漏磁场 $\boldsymbol{B}_D$ 两部分线性叠加而成,在图 5 中,当 S_x 一定,随着 M_x 的变化,只有测点经过缺陷时会有明显的信号变化。为了比对缺陷区域的信号变化幅值是否受背景磁场影响,提取了所有测点的缺陷检测信号的峰 - 峰值 S_{pp} ^[26],以观察不同背景磁场下, S_{pp} 是否有变化。将不同测点位置检测信号的三轴分量的峰 - 峰值

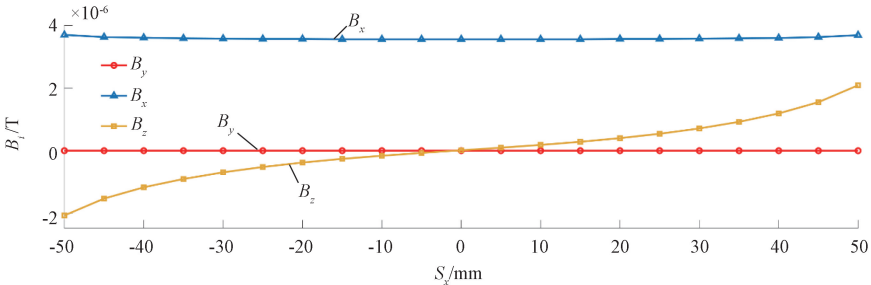


图 4 观测路径背景磁场分量

Fig. 4 Observation path background magnetic field component

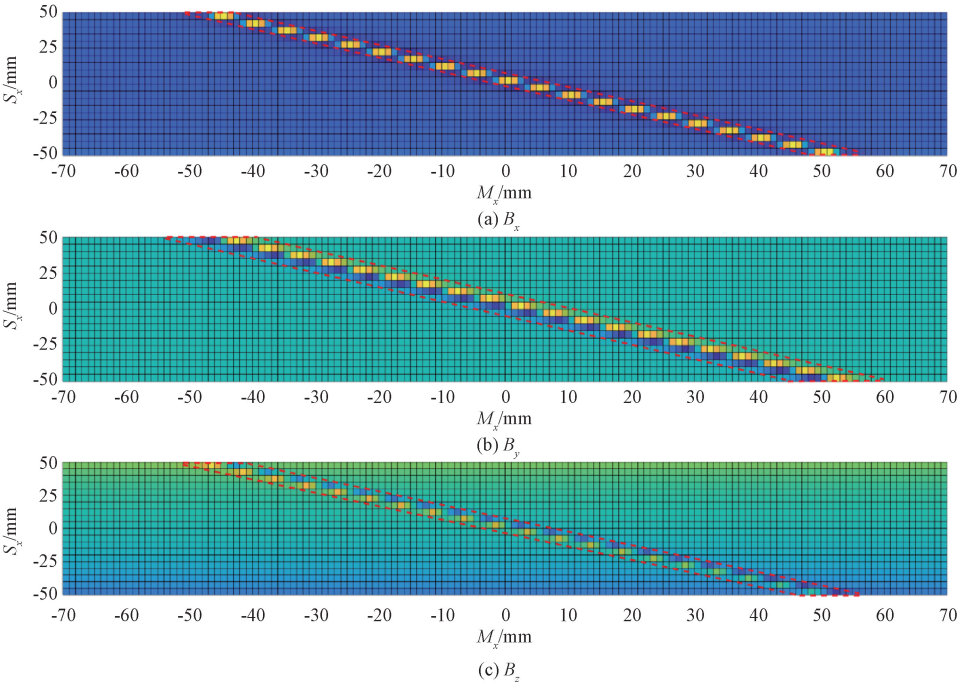


图 5 模拟扫描结果

Fig. 5 Simulated scan results

S_i 相对其平均值 $\bar{S}$ 做比值,由公式(8) 计算出各测点的偏差 E_i :

$$E_i = \left| 1 - \frac{\bar{S}}{S_i} \right| \times 100\%, \tag{8}$$

由图 6 可知, x 方向 and 不同测点位置传感器的检测信号峰-峰值相差较小,可以忽略不计。由此可得,虽然不同传感器先后检测到缺陷信号,但其信号特征相似、峰峰值基本相同。不同测点位置的背景磁场不影响缺陷信号的峰峰值,两者之间不存在复杂的相互作用关系,为可剥离的线性叠加关系。这与前述理论分析的结论相吻合,验证了前述理论分析结论的正确性。因此,可以通过预先获得不同测点位置的背景磁场数据,对该点的缺陷检测数据进行修正,从而获得和单排传感器相同的效果。

2 数据修正

2.1 多排数据修正方法

基于前述分析,影响多排传感器测量数据一致性的主要因素可归纳如下:1)对同一个缺陷,不同排传感器的检测信号在时间轴上不同步;2)不同传感器因其所处轴向测点位置不同,其背景磁场会有不同。因此,有必要对多排传感器采集的数据进行轴向同步和消去背景磁场的影响,从而获得高一致性、高空间分辨率的漏磁检测信号。

多排传感器的布置及编号如图 7 所示,将 n 个传感器沿扫描方向布置成排,以第 1 排传感器为参考零点,第 k 排到第 1 排的轴向距离为 X_{k-1} , y 向相邻最近的两传感器的最小间隔为 D_y , 亦为漏磁检测的周向空间分辨率。

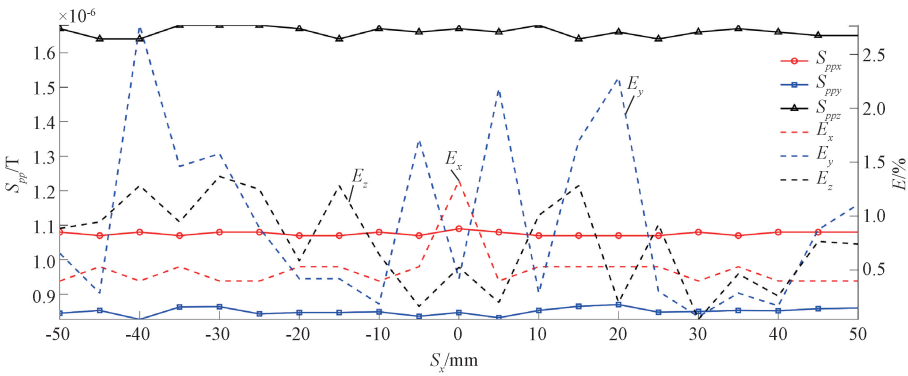


图 6 不同测点检测信号峰-峰值与偏差对比

Fig. 6 Comparison of detection signal peak-peak value and deviation at different measuring points

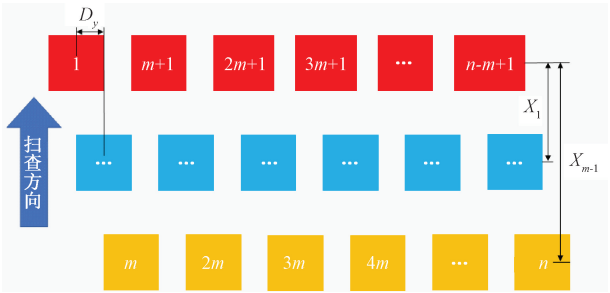


图 7 多排传感器布置及编号示意图

Fig. 7 Multi-row sensor layout and numbering diagram

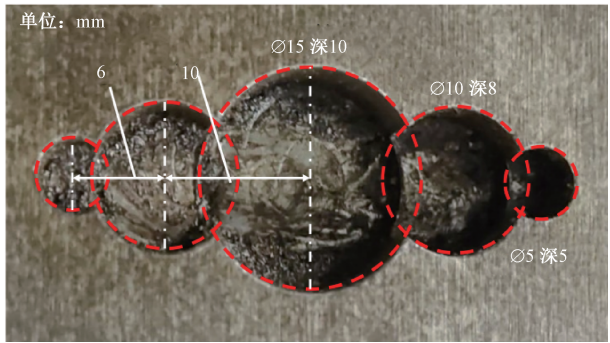


图 8 缺陷示意图

Fig. 8 Defect diagram

单个传感器采集的磁场信号是探测器位置坐标 x 的函数,将 n 个信号合并可以获得传感器采集信号的空间分布函数为 $M_1(i, x)$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)。在对采集数据进行处理之前,由于不同传感器的轴向位置和背景磁场的不同, $M_1(i, x)$ 会表现出参差不齐。需要将信号函数的自变量从探测器位置坐标 x 转换为测点的空间坐标 X , 两者的对应关系为:

$$x = f(X), \quad (9)$$

$f(X)$ 由传感器的排列布局和间隔决定。设第 i 个传感器位于第 k 排,其所处位置的背景磁场为 B_{M_i} , 设处理后的漏磁场信号空间分布函数为 $M_2(i, X)$, ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 则可得:

$$M_2(i, X) = M_1(i, f(X)) - B_{M_i}, \quad (10)$$

其中:

$$f(X) = X + X_{k-1} \circ \quad (11)$$

2.2 修正方法测试

为了验证数据处理方法的正确性,分别通过 COMSOL 模拟和漏磁检测实验的方法获得了如图 8 所示复杂缺陷的漏磁检测模拟信号和实验信号。

漏磁检测实验系统的硬件组成和坐标设置如图 9 所示。试件放置在大理石平台上。试件的厚度为 15 mm,

宽度为 100 mm。安装在上方的电机驱动磁化器和传感器阵列以 20 mm/s 的速度移动。通过数据采集系统获得传感器的输出数据,采样频率为 100 Hz。用两个直流电源分别为磁化器的电磁铁和磁传感器供电。为电磁铁供电的直流电源设置为恒流 1.5 A,可使试样磁化至饱和状态。COMSOL 模拟传感器测点的位置分布和一例实验所用传感器分布如图 10 所示。

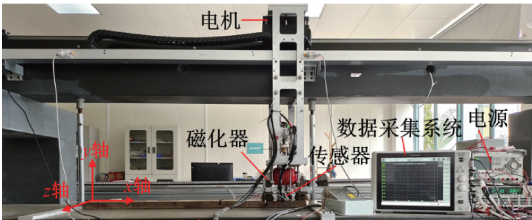


图 9 漏磁检测实验系统

Fig. 9 Experimental system of magnetic flux leakage detection

在 COMSOL 模拟中,可以直接获得测点的磁通密度值,而实测中的磁场传感器的输出信号为电压信号,通常需要根据传感器参数将电压信号转化为磁场信号,传感

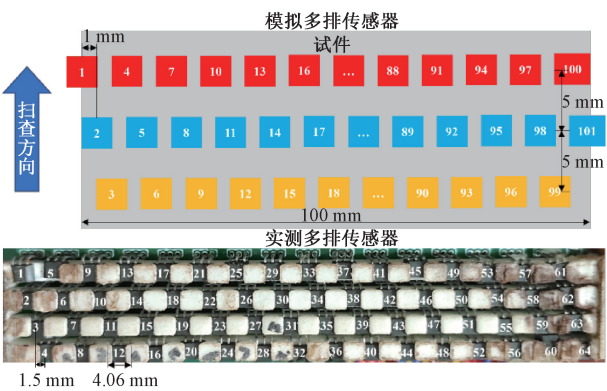


图 10 模拟及实测多排传感器

Fig. 10 Simulated and measured multi-row sensors

器输出的电压信号在测量范围内与测点的磁场分量成线性关系,设传感器的初始电压(传感器在无磁场的情况下通电时的输出电压)为 V_0 ,传感器输出电压 V 与测点处磁场强度分量大小 B 之间的线性系数为 k_s ,则两者之间关

系为:

$$V = k_s B + V_0, \quad (12)$$

即:

$$B = \frac{V - V_0}{k_s}. \quad (13)$$

将实验采集的电压信号转换为磁场信号,根据模拟传感器和实测传感器的分布分别将模拟信号和实验信号进行数据修正。图 11 和 12 分别展示了模拟信号和实验信号的数据修正前后的对比图。

由图 11 和 12 结果可知,对于同一缺陷的漏磁检测信号,模拟信号与实验信号具有相似的信号特征。由于采用了多排传感器的排布方式,不同传感器处在不同的背景磁场下,并且测得缺陷漏磁信号不同步,导致多排传感器所采集的数据存在错位现象,无法直接用于后续的数据分析中,需要对原始采集数据进行数据修正。数据修正后的数据表明,根据前述理论分析提出的数据修正方法可使修正后的数据连续且光滑,能够很好地还原缺陷的漏磁场信号。

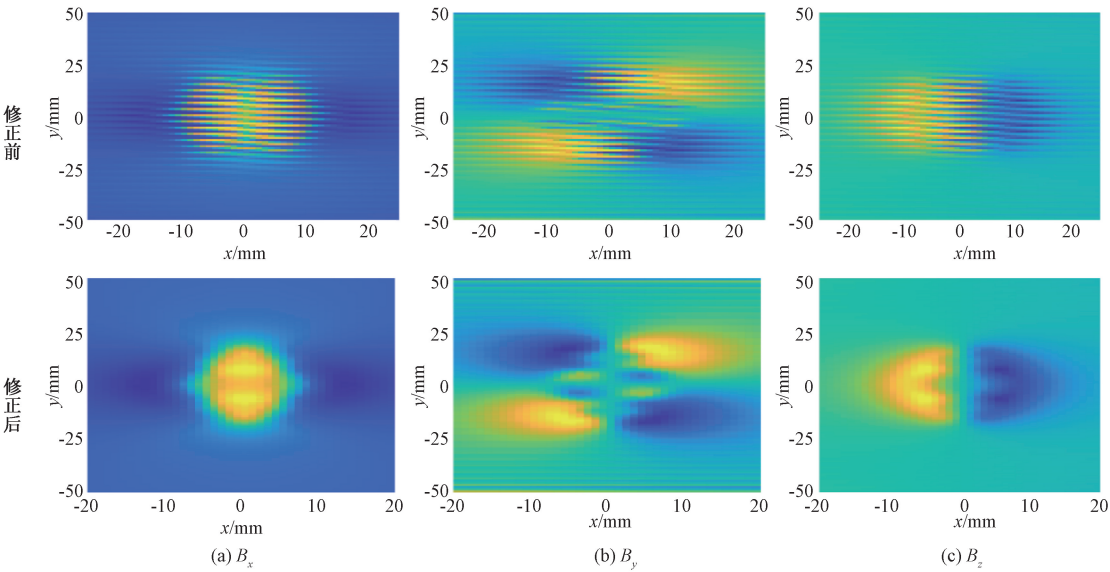
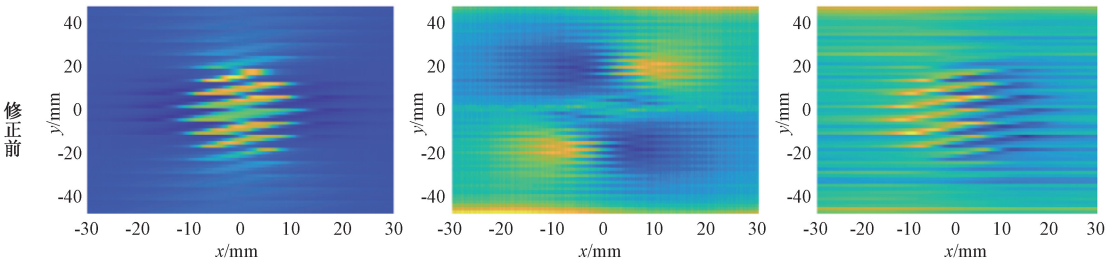


图 11 模拟数据修正前后对比

Fig. 11 Comparison of simulated data before and after correction



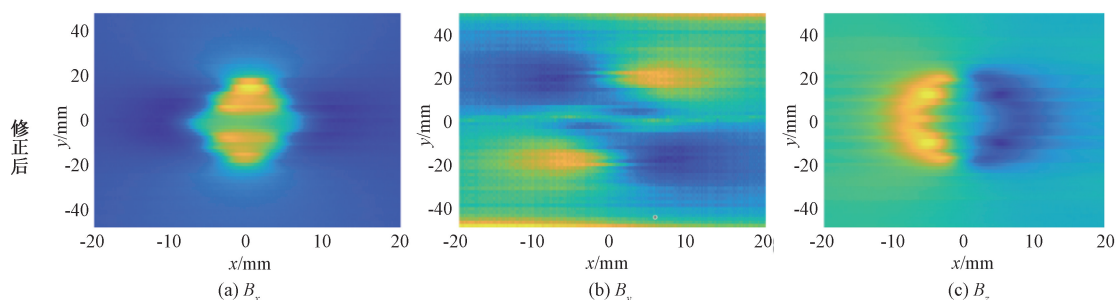


图 12 实测数据修正前后对比

Fig. 12 Comparison of measured data before and after correction

由图 10 可知,实验中所用的传感器宽度为 4.06 mm,如果只能使用单排传感器检测漏磁场信号,检测间距不可能小于传感器本身的宽度。而采用多排传感器并将采集数据进行修正处理之后,将检测间距缩小到了 1.5 mm。这说明相较于单排传感器直接测量的数据,在周向上具有更小的检测间距,也就是具有更高的空间分辨率,因此本研究有利于提高漏磁检测对缺陷量化或成像的精度。

3 结 论

漏磁检测是一项广泛应用于检测铁磁性构件中缺陷的无损检测技术,尤其是在长输油气管道内检测领域中。为了保障管道的运行安全,在检测过程中需要保证足够的检测精度。增加传感器数量,降低传感器间距是提高检测空间分布率和精度的一项重要手段。但由于受传感器自身尺寸和安装电路的限制,传感器间距存在下限,因此限制了单排传感器空间分辨率的提升。传感器的多排布置可以有效打破此限制,但多排传感器采集信号存在错位现象以及其背景磁场不同,无法直接用于后续的数据分析,需要对数据进行修正,来解决信号错位和背景磁场的影响问题。基于以上问题,本研究进行了如下工作:

1) 基于磁荷理论,对影响漏磁检测信号幅值的要素进行了理论分析,得出了漏磁检测信号由背景磁场和缺陷漏磁场通过线性叠加而成。

2) 通过有限元模拟的方法验证了前述理论分析结论的正确性,并进一步提出了漏磁检测多排传感器的数据修正方法。

3) 分别通过有限元模拟和实验获得了漏磁检测多排传感器的模拟信号和实验信号,采用前述修正方法对数据进行处理。验证了本数据修正方法的有效性,提高了漏磁检测信号的空间分辨率。

综上所述,通过传感器的多排布置和数据修正,可以有效提高漏磁检测数据的空间分辨率。本研究从理论、

模拟分析和实验多个角度出发,给出了漏磁检测多排传感器数据修正的基础理论,提出了其数据修正方法,验证了所给理论的正确性和提出方法的有效性,填补了漏磁检测多排传感器数据修正的研究空白,有利于在实际工程中显著提高漏磁检测的空间分辨率及其对缺陷量化和成像的精度。

贡献声明

本文作者李红梅教授与赵春田教授对本文具有同等贡献,特此声明。

参考文献

- [1] LONG Y, HUANG S L, PENG L SH, et al. A characteristic approximation approach to defect opening profile recognition in magnetic flux leakage detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-12.
- [2] 胡铁华, 郭静波. 油气管道内检测新技术与装备的开发及应用[J]. 天然气工业, 2019, 39(1): 118-124.
HU T H, GUO J B. Development and application of new technologies and equipments for in-line pipeline inspection[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(1): 118-124.
- [3] MURPHY J F. Nightmare pipeline failures, fantasy planning, black swans, and integrity management-A review (2015) [J]. Process Safety Progress, 2015, 34(2): 207-207.
- [4] ZHANG P, WEI M H, GUO ZH Y, et al. Advances in magnetic flux leakage testing technology[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2021, 12(1): 1-11.
- [5] 欧正宇, 韩赞东, 岑佑松, 等. 埋地管道检测技术现状与展望[J]. 测控技术, 2023, 42(6): 1-9.
OU ZH Y, HAN Z D, CENG J S, et al. Present status and perspectives of inspection technology for buried pipeline[J]. Measurement & Control Technology, 2023,

- 42(6): 1-9.
- [6] 王坤, 黄松岭, 赵伟, 等. 高清晰度油气管道腐蚀检测器数据分析系统设计[J]. 天然气工业, 2007(1): 108-110.
- WANG SH, HUANG S L, ZHAO W, et al. Design of data analysis system of high resolution oil and gas pipeline erosion detecting tool[J]. Natural Gas Industry, 2007(1): 108-110.
- [7] 刘真伟, 韩文花, 杨婷. 一种快速计算二维缺陷漏磁场的有限元建模和求解方法[J]. 仪器仪表学报, 2023,44(2): 192-202.
- LIU ZH W, HAN W H, YANG T. Fast finite element modeling and solving method for 2D defect magnetic leakage field [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(2): 192-202.
- [8] ZHANG H G, WANG L, WANG J F, et al. A pipeline defect inversion method with erratic MFL signals based on cascading abstract features [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022,71: 1-11.
- [9] 王志军, 陈洪恩, 何曼如, 等. 裂纹缺陷定量漏磁检测数值模拟和实验研究[J]. 机械, 2021,48(S1): 6-10.
- WANG ZH J, CHEN H EN, HE M R, et al. Numerical simulation and experimental study on quantitative magnetic flux leakage detection of crack defects [J]. Machinery, 2021,48(S1): 6-10.
- [10] 孙燕华, 康宜华, 石晓鹏. 基于单一轴向磁化的钢管高速漏磁检测方法[J]. 机械工程学报, 2010,46(10): 8-13.
- SUN Y H, KANG Y H, SHI X P. High-speed MFL testing method for steel pipe under unidirectional axial magnetization [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(10): 8-13.
- [11] LI E L, CHEN Y M, YUAN Z L, et al. Train wheel magnetic flux leakage testing method based on local magnetization enhancement [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023,72: 1-9.
- [12] LI H M, HUANG R R, ZHAO C T, et al. 3D reconstructing of arbitrary defects with magnetic flux leakage testing signals [C]. Far East NDT New Technology and Application Forum, 2020.
- [13] LI Y, SUN CH, LIU Y CH. Magnetic flux leakage testing method for pipelines with stress corrosion defects based on improved kernel extreme learning machine [J]. Electronics, 2023,12(17): 3707.
- [14] PENG L, HUANG S, WANG S, et al. A 3-D pseudo magnetic flux leakage (PMFL) signal processing technique for defect imaging [C]. 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, 2019, DOI: 10.1109/I2MTC.2019.8827047.
- [15] 耿浩, 夏浩, 王国庆. 高速漏磁检测过程中管道内外壁缺陷定位方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022,43(4): 70-78.
- GENG H, XIA H, WANG G Q. Study on the defect location method of inner and outer wall of pipeline during high-speed magnetic flux leakage testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43(4): 70-78.
- [16] ZHANG L, CAMERON I M, LEDGER P D, et al. Effect of scanning acceleration on the leakage signal in magnetic flux leakage type of non-destructive testing [J]. ArXiv Preprint, 2019, ArXiv:1905.01131.
- [17] PENG L, HUANG S, WANG S, et al. An element-combination method for arbitrary defect reconstruction from MFL signals [C]. 2020 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE, 2020: 1-6.
- [18] FENG J, ZHANG X B, LU S X, et al. A single-stage enhancement-identification framework for pipeline mfl inspection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022,71: 1-13.
- [19] 李永春, 孙中明. 三轴高清漏磁检测技术在城市燃气管道内检测中的应用 [C]. 2020 年燃气安全交流研讨会, 2020.
- LI Y CH, SUN ZH M. Application of three-axis high definition magnetic flux leakage detection technology in urban gas pipeline inspection [C]. 2020 Gas Safety Exchange Seminar, 2020.
- [20] PENG X, ANYAOHA U, LIU ZH, et al. Analysis of magnetic-flux leakage (MFL) data for pipeline corrosion assessment [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(6): 1-15.
- [21] MILLER S, SANDER F. Advances in feature identification using tri-axial MFL Sensor Technology [C]. International Pipeline Conference, 2006.
- [22] 李育忠, 常连庚. 高清晰度管道漏磁检测设备研究 [C]. 特种设备安全国际论坛, 2005.
- LI Y ZH, CHANG L G. High-resolution MFL inspecting tools research [C]. 2005 International Forum on Safety of Special Equipment, 2005.

- [23] LI F M, FENG J, ZHANG H G, et al. Quick reconstruction of arbitrary pipeline defect profiles from MFL measurements employing modified harmony search algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018;2200-2213.
- [24] 陈兴阳, 叶宇峰, 宋俊俊, 等. 高分辨焊缝漏磁检测数值模拟研究[J]. 中国特种设备安全, 2021,37(9): 37-41.
- CHEN X Y, YE Y F, SONG J J, et al. Numerical simulation research on high-resolution weld magnetic flux leakage inspection[J]. China Special Equipment Safety, 2021,37(9): 37-41.
- [25] HUANG Z Y, QUE P W, LIANG CH. 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method [J]. NDT & E International, 2006,39(1): 61-66.
- [26] 孙燕华, 康宜华. 基于物理场的缺陷漏磁检测信号特征分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 90-93.
- SUN Y H, KANG Y H. Analysis of MFL signal characteristics using physical field [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010,38(4): 90-93.

作者简介



张仕忠, 2021 年于四川大学获得学士学位, 现为四川大学建筑与环境学院硕士研究生, 主要研究方向为漏磁检测相关技术。

E-mail: shizhongzhang@stu.scu.edu.cn

Zhang Shizhong received his B. Sc. degree from Sichuan University in 2021. He is currently a master student in the School of Architecture and Environment at Sichuan University. His main research direction is magnetic flux leakage detection.



李红梅, 1997 年于吉林大学获得学士学位, 2006 年于西安交通大学获得硕士学位, 2012 年于西安交通大学获得博士学位, 现为四川大学特聘研究员, 主要研究方向为力-磁效应机理及应用的实验和理论研究、电磁检测建模理论及反演计算方法研究、应力/

塑变/缺陷的电磁成像技术及软硬件开发等。

E-mail: lihm@scu.edu.cn

Li Hongmei received her B. Sc. degree from Jilin University in 1997, received her M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2006, received her Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2012. Now she is a special researcher at Sichuan University. Her main research interests include experimental and theoretical research on the mechanism and application of magnetic effect, modeling theory and inversion calculation method of electromagnetic detection, electromagnetic imaging technology of stress/plastic deformation/defect and software and hardware development.



赵春田 (通信作者), 1984 年于四川大学获得学士学位, 1987 年于清华大学获得硕士学位, 1996 年于得克萨斯 A&M 大学获得博士学位, 现为四川大学教授, 主要研究方向为海洋油气生产系统的工程设计与分析、管道/管网的设计分析与监测检测、大型计算机工程分析

软件的开发、自动控制与工程力学 (结构强度、动力学、水动力学) 相关的设计分析、高性能碳纳米管新材料的生产工艺研发与应用等。

E-mail: zhaoct@scu.edu.cn

Zhao Chuntian (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Sichuan University in 1984, received his M. Sc. degree from Tsinghua University in 1987, and received his Ph. D. degree from Texas A&M University in 1996. He is currently a professor at Sichuan University. His main research interests include engineering design and analysis of offshore oil and gas production system, design analysis and monitoring of pipeline/pipe network, development of large-scale computer engineering analysis software, design and analysis of automatic control and engineering mechanics (structural strength, dynamics, hydrodynamics), research and development and application of high-performance carbon nanotube new materials production process.