

## 利用复合激励的无盲点管道裂纹漏磁检测新方法\*

吴德会,刘志天,王晓红,苏令铤  
(厦门大学航空航天学院 厦门 361005)

**摘 要:** 管道是石油和天然气工业的重要组成部分,而轴向裂纹是管道安全运营的重要隐患。传统的漏磁检测技术(MFL)对管道中轴向裂纹的检测灵敏度不高,从而形成检测盲区。本文提出了一种利用复合激励的 MFL 检测新方法,可实现对轴向和周向缺陷的同步检测。首先,利用 U 型磁轭对管壁进行交直流复合磁化;直流磁化场直接作用于周向裂纹并形成有效的 MFL 检测信号,而交流磁化场则在管壁内形成垂直于磁化方向的均匀涡流场;当该涡流场受到轴向裂纹干扰时,将形成二次感生磁场的扰动,因此,新方法通过对管壁表面的漏磁场及二次感生磁场检测,同时获得周向和轴向两个方向的探测能力;最后开展仿真和实验,并分析了新方法中作用于轴向和周向裂纹的磁化场、涡流场和二次感生磁场的分布。结果表明,新方法只需通过一次扫描,即可以获得缺陷的轴向和周向特征,实现了对裂纹的无盲点检测。

**关键词:** 漏磁检测; 复合激励; 轴向裂纹; 管道; 涡流

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

Novel MFL method for pipeline crack no blind spot detection  
using composite excitation

Wu Dehui, Liu Zhitian, Wang Xiaohong, Su Lingxin

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Pipelines are the critical components in oil and gas industry, axial cracks caused by stress corrosion and fatigue damage are the hidden danger of pipeline safe operation. The conventional magnetic flux leakage (MFL) detection technique is inadequate for accurately detecting the narrow axial crack in pipeline and forms detection blind region. In this paper, a new MFL detection method capable of simultaneously detecting both axial and circumferential defects is proposed utilizing DC-AC composite excitation. Firstly, the measured pipe wall is magnetized by DC-AC compound magnetic field using a U-shaped yoke. The DC magnetic field is directly acted on the circumferential crack and generates effective MFL detection signal. The AC magnetic field generates a uniform eddy current field perpendicular to the magnetization direction inside the pipe wall. When the eddy current field is disturbed by the axial crack, a secondary induced magnetic field is generated. Through detecting the surface magnetic flux leakage and secondary induced magnetic field, the new method can obtain the axial and circumferential crack detection capability simultaneously. Both simulations and experiments were conducted, the distributions of the magnetizing field, eddy current field and secondary induced magnetic field acting on the axial and circumferential cracks were analyzed. The results show that the proposed new method can detect both axial and circumferential cracks effectively with one pass scanning, the pipeline crack no blind spot detection is achieved.

**Keywords:** magnetic flux leakage (MFL) detection; composite excitation; axial crack; pipeline; eddy current

## 1 引 言

管道具有高效、安全、低污染、低成本、容量大的优

势,被广泛应用于油气产品的运输中<sup>[1]</sup>。为了确保油气管道安全和稳定地运行,提高管道在线服役时间,对油气管道进行定期检验具有重要的工程意义。

漏磁检测(magnetic flux leakage, MFL)技术作为一

收稿日期: 2016-06 Received Date: 2016-06

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51177141, 51677158)、航空基金(2012ZD68003)项目资助

种传统的电磁无损检测方法,具有无污染、不需耦合剂、快速、高可靠性等优点,因此已被广泛应用于油气长输管道的缺陷检测中。目前,利用 MFL 技术实现长输管道腐蚀缺陷的探测已比较成熟,但由于管道裂纹形态的复杂性及其几何分布的特殊性,将 MFL 技术直接用于裂纹检测时,效果并不理想。

在提高裂纹检测的探测能力,获取更多裂纹相关特征信号方面,国内外学者进行了大量相关研究,并取得了一定成果。Nara T 等人<sup>[2]</sup>利用测量管道裂纹漏磁通密度傅里叶系数的新型线圈实现了裂纹中心点定位,丰富了裂纹检测手段;Aguila-Munoz J 等人<sup>[3]</sup>研制了一种高灵敏度的便携式漏磁检测探头,实验证明该探头对与磁化轴成小于 50° 角的裂纹有相对高的灵敏度;Wu J 等人<sup>[4]</sup>利用二维磁偶极子模型研究了磁化器磁化方向和裂纹方位的关系,对 MFL 检测器及检测方式的优化有一定的理论指导意义;Song X 等人<sup>[5]</sup>通过有限元仿真以及实验共同验证了管道裂纹特征信号的大小随着集中应力的增大而减小的规律,该实验结果为改进管道缺陷定量检测方法提供依据;李玖政等人<sup>[6]</sup>提出一种钢管漏磁检测过程中基于信号源的内外裂纹区分方法,建立了具有自适应功能的内外裂纹区分策略;杨理践等人<sup>[7]</sup>研究了管道缺陷的深度和长度与漏磁信号的对应关系,并用 BP 神经网络进行了管道的定量识别;宋凯等人<sup>[8]</sup>对交流漏磁检测法的机理深入分析,提出交流漏磁检测的特征信号包含二次磁场的观点;李路明等人<sup>[9]</sup>研究了裂纹宽度对漏磁场的影响,有助于全面认识漏磁场对宽度的作用。以上研究都在某种程度上对提高裂纹检测的探测能力做出了贡献,但对于管道裂纹检测中存在盲点问题的探讨,尚比较鲜见。

针对传统 MFL 方法检测裂纹时存在的盲点问题,提出了一种利用复合激励的无盲点管道裂纹漏磁检测方法。所提方法沿用了常规 MFL 检测装置,采用直流(永磁)与交流磁场的复合激励策略。利用直流磁场对被测对象进行磁化,检测裂纹在横向(周向)上的磁场泄漏信息;再利用交流磁场在磁化器两极靴之间形成磁路涡流场,检测裂纹在纵向(轴向)的二次感生磁场的扰动信息。新方法通过对磁场泄漏和二次感应磁场扰动的信息融合,从而获得周向和轴向两个方向的同步探测能力,实现了对裂纹的无盲点检测。

## 2 问题的提出

大量的检测案例表明,现有 MFL 检测器对管道腐蚀缺陷的检测效果较好,而对管道裂纹的检测灵敏度不高<sup>[10]</sup>。在现有研究中,较普遍的观点认为,裂纹开口小,造成的漏磁场亦较小,导致 MFL 灵敏度不高。毫无疑问,相对于腐蚀缺陷,裂纹形成的有效磁阻截面更小且不

集中,不可避免地会影响其产生的漏磁场强度<sup>[11]</sup>。是否还存在其他因素影响裂纹的 MFL 检测灵敏度,是否能在现在基础上进一步提高裂纹的检测效率是一个明显有待研究的问题。

针对该问题,利用三维磁偶极子模型对管道裂纹引发漏磁场的分布进行机理分析。为讨论方便,将裂纹缺陷简化为矩形槽。不失一般性,以管道表面上的裂纹中心为原点,表面的外法向为 Y 轴,裂纹方向为 Z 轴,建立空间笛卡尔坐标系,如图 1 所示。

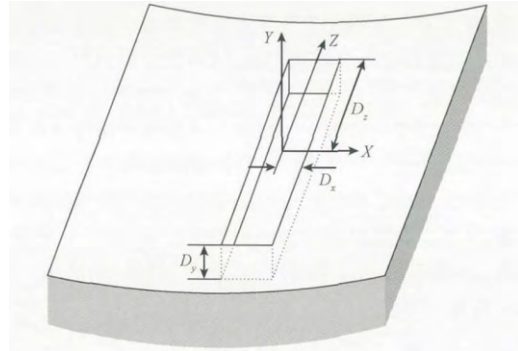


图1 管壁轴向裂纹的三维矩形槽近似模型

Fig. 1 3D approximate model of rectangular groove for pipeline axial crack

为方便表达,分别定义矩形槽在 X-Y-Z 3 个正交方向上的尺寸分别为  $2D_x$ 、 $D_y$  和  $2D_z$ ,并在裂纹上施加 X 轴(周向)方向的磁化场  $H$ <sup>[12]</sup>。

设  $H$  在裂纹槽壁上形成的磁荷面密度为  $\sigma$ 。根据磁偶极子模型原理, $\sigma$  的取值可通过下式进行计算:

$$\sigma = 5.3 \left( \frac{D_y/L + 1}{D_y/(L\mu) + 1} \right) H_0 \quad (1)$$

式中: $\mu$  为材料的相对磁导率, $H_0$  为外加磁场强度, $L$  为缺陷在磁化方向上的半长度,对于周向磁化  $L = D_x$ ,而对于轴向磁化  $L = D_z$ 。

则对于任意一个空间场点  $P(x, y, z)$ ,根据文献[12]中的三维磁偶极子模型,可计算漏磁场的 X 轴分量为:

$$H_x = H_x(x - D_x) - H_x(x + D_x) \quad (2)$$

式中: $H_x(t)$  表示 X 轴正、负磁荷面的磁场分布。

$$H_x(t) = \frac{\sigma}{4\pi} \left( \frac{\tan^{-1} \frac{(y + D_y)(z + D_z)}{t[t^2 + (y + D_y)^2 + (z + D_z)^2]^{1/2}} - \tan^{-1} \frac{y(z + D_z)}{t[t^2 + y^2 + (z + D_z)^2]^{1/2}} - \tan^{-1} \frac{(y + D_y)(z - D_z)}{t[t^2 + (y + D_y)^2 + (z - D_z)^2]^{1/2}} + \tan^{-1} \frac{y(z - D_z)}{t[t^2 + y^2 + (z - D_z)^2]^{1/2}} \right) \quad (3)$$

同理,也可在裂纹上施加 Z 轴(轴向)方向的磁化

场,并在纵向槽壁上形成磁荷面密度。根据文献 [12], 同样可计算轴向磁化时漏磁场 Z 轴分量为:

$$H_z = H_z(z - D_z) - H_z(z + D_z) \quad (4)$$

式中:  $H_z(t)$  表示 Z 轴正、负磁荷面的磁场分布。

$$H_z(t) = \frac{\sigma}{4\pi} \left( \tan^{-1} \frac{(y + D_y)(x + D_x)}{t [t^2 + (y + D_y)^2 + (x + D_x)^2]^{1/2}} - \tan^{-1} \frac{y(x + D_x)}{t [t^2 + y^2 + (x + D_x)^2]^{1/2}} - \tan^{-1} \frac{(y + D_y)(x - D_x)}{t [t^2 + (y + D_y)^2 + (x - D_x)^2]^{1/2}} + \tan^{-1} \frac{y(x - D_x)}{t [t^2 + y^2 + (x - D_x)^2]^{1/2}} \right) \quad (5)$$

不妨设钢管中存在一个轴向裂纹,长度  $2D_z = 20 \text{ mm}$ , 宽度  $2D_x = 2 \text{ mm}$ , 深度  $D_y = 2 \text{ mm}$  的缺陷。外加磁化场强度  $H_0$  取  $200 \text{ Am}^{-1}$ , 钢管的相对磁导率  $\mu$  取 2 000。分别沿轴向和周向磁化对该裂纹进行 MFL 扫查, 扫查提离值 1 mm, 扫查范围  $t$  取  $-20 \sim 20 \text{ mm}$ 。利用式 (3) 和 (5) 可分别计算两种磁化方向下漏磁场的水平分布, 其结果如图 2 所示。

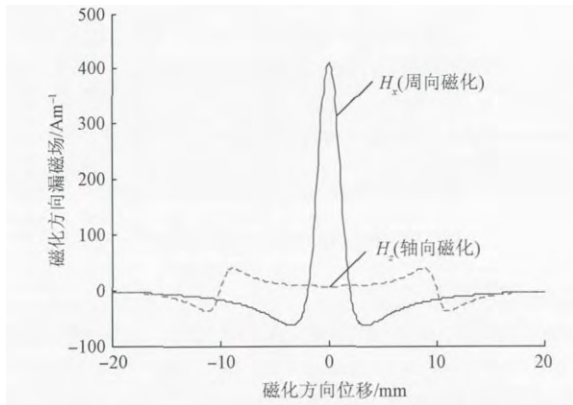


图 2 裂纹在不同磁化方向下的水平漏磁场分布

Fig. 2 The distribution of horizontal leakage magnetic field for the crack under different magnetization directions

由图 2 中不难看出, 裂纹在不同磁化方向下的检测结果存在明显差异。当磁化方向为轴向时, 漏磁场的幅度明显下降。特别是对于长度  $D_z \gg D_x$  的轴向裂纹, 传统轴向磁化的 MFL 方法几乎无探测能力, 从而形成 MFL 检测器在管道裂纹检测上的盲区。

### 3 无盲点的管道裂纹 MFL 检测新方法

由于管道中轴向裂纹与 MFL 磁化场同向, 传感器拾取的 MFL 信号与非缺陷处差异不大, 因此造成了检测盲点。若利用 MFL 检测器现有结构, 增强轴向裂纹上方漏

磁场与无缺陷状态下的差异性, 则可发挥 MFL 检测器的优势并解决其管道裂纹检测的盲点问题。

所设计的新检测方法应该满足如下两个条件: 1) 新方法应与现有 MFL 检测器结构兼容; 2) 新方法中应能产生周向检测载体, 以实现轴向裂纹的探测。本文的思路是在 MFL 轴向励磁的基础上叠加交变励磁, 利用交变励磁在管道壁中感生出周向涡流场。当管道壁内存在轴向裂纹时, 涡流产生的二次感生磁场幅值会明显减小。该变化可以通过 MFL 的磁传感器拾取, 进而实现对轴向缺陷的探测。

根据上述思路, 提出了一种利用复合激励的无盲点管道裂纹漏磁检测新方法, 其侦测结构如图 3 所示。

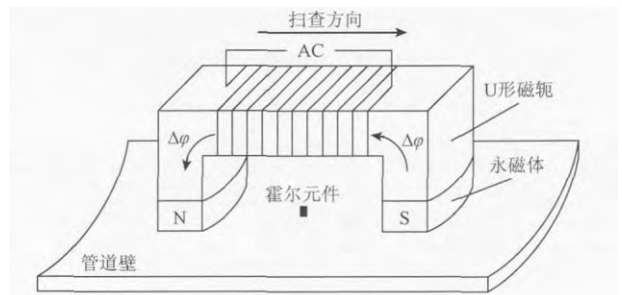


图 3 新方法侦测结构的拓扑图

Fig. 3 Detecting structure topology of the new method

如图 3 中所示, 新方法中仍采用了永磁体(直流)轴向励磁的基本形式, 以保持 MFL 方法中原有的周向探测能力。不同之处在于, 新方法在原有侦测结构上增加了中低频率  $f$  ( $150 \sim 500 \text{ Hz}$ ) 的交变励磁线圈组件。这样, 在稳态的轴向励磁  $\varphi$  基础上叠加交变励磁  $\Delta\varphi$ , 从而形成复合激励。叠加的  $\Delta\varphi$  可用下式表达:

$$\Delta\varphi = K \cdot \varphi \sin(2\pi ft) \quad (6)$$

式中:  $K$  为比例系数, 表示周向交变励磁  $\Delta\varphi$  所占轴向励磁的比例, 通常取 20% ~ 50%。

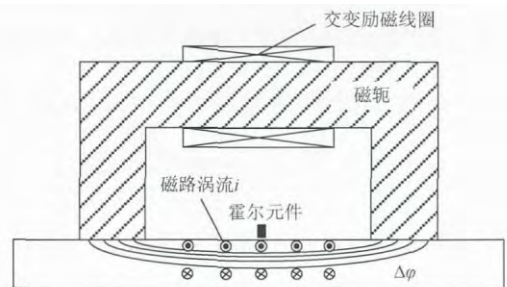


图 4 磁路涡流分布

Fig. 4 Distribution schematic diagram of magnetic circuit eddy current

根据电磁感应原理, 交变励磁  $\Delta\varphi$  的感生涡流主要

由两部分构成<sup>[13]</sup>。一部分是极靴涡流,主要是围绕两个极靴分布,并受趋肤效应影响。由于霍尔元件被置于两极靴正中间,因此极靴涡流的磁场扰动不会对霍尔元件产生影响。

另一部分是磁路涡流。磁路涡流主要围绕管道壁内部的磁路,记为*i*,其分布形态如图4中所示。由图中可以看出,磁路涡流*i*的法向量平行于管道壁的内表面,因此磁路涡流*i*无趋肤效应,对 $\Delta\varphi$ 在垂直深度上渗透无阻尼作用。磁路涡流*i*必然会在其垂直方向上感生出二次磁场,本文称为二次感生磁场,记为 $\Phi$ 。由于磁路涡流*i*为周向平行电流场,其二次感生磁场 $\Phi$ 呈轴向分布,与MFL系统中霍尔元件检测方向相同。

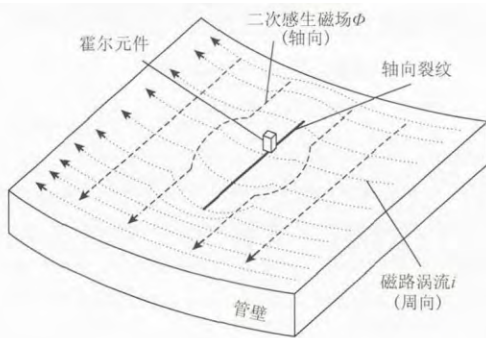


图5 磁路涡流进行轴向裂纹检测

Fig. 5 Axial crack detection using magnetic circuit eddy current

当管道中存在轴向裂纹时,磁路涡流*i*方向恰与裂纹方向垂直,因此涡流分布将发生显著的变化。如图5中所示,受裂纹影响,周向的磁路涡流*i*被迫绕过裂纹,从而在裂纹周边形成涡流的稀疏区域。而在裂纹上方,磁路涡流*i*的二次感生磁场 $\Phi$ 亦会随之产生明显的下降,该信号可被霍尔元件方便地拾取,记为 $\Delta B_\phi$ 。

当然,交变励磁 $\Delta\varphi$ 不可避免地亦会产生交流漏磁场(alternating-current magnetic flux leakage, AMFL)信号,记为 $\Delta B_{AMFL}$ 。霍尔元件实际上拾取了两类信号:一类是

漏磁场的检测信号 $\bar{B}$ ,其具有直流特性;而另一类是交流信号 $\Delta B$ ,其包含有二次感生磁场信号 $\Delta B_\phi$ 和交流漏磁场信号 $\Delta B_{AMFL}$ ,即 $\Delta B = \Delta B_\phi + \Delta B_{AMFL}$ 。

由于交流漏磁场信号 $\Delta B_{AMFL}$ 不具备轴向探测能力的,因此需要在信号处理环节将 $\Delta B_{AMFL}$ 成份剥离。考虑到 $\Delta B_{AMFL}$ 与 $\Delta B_\phi$ 相位相同,且与直流MFL信号 $\bar{B}$ 具有类似的分布特点,则可对 $\Delta B_{AMFL}$ 近似估计:

$$|\Delta B_{AMFL}| \approx K(\bar{B} - B_n) + |\Delta B_n| \tag{7}$$

式中: $B_n$ 和 $\Delta B_n$ 分别为无缺陷时检测信号的直流和交流分量, $|\cdot|$ 表示交变信号的强度。

则可进一步对检测信号中二次感生磁场信号 $\Delta B_\phi$ 进行估计为:

$$|\Delta B_\phi| = |\Delta B| - |\Delta B_{AMFL}| \approx |\Delta B| - |\Delta B_n| - K(\bar{B} - B_n) \tag{8}$$

当然,对于相同缺陷,MFL信号 $\bar{B} - B_n$ 要明显大于二次感生磁场信号 $\Delta B_\phi$ 。为使新方法在轴向和周向的检测输出匹配,引入一个轴向补偿系数*C*,其值为缺陷引发的二次感生磁场信号峰值与MFL信号峰值之比。实际工程应用中,系数*C*可通过对典型缺陷的实际检测确定,一般在0.1~0.2。

因此,对于本文所提的新方法,可以定义了一个复变量*M*作为复合激励方法的检测输出:

$$M = M_{Re} + M_{Im}j = (\bar{B} - B_n) + \frac{|\Delta B| - |\Delta B_n| - K(\bar{B} - B_n)}{C}j \tag{9}$$

式中: $M_{Re} = \bar{B} - B_n$ 代表复变量*M*的实部, $M_{Im} = \frac{|\Delta B_\phi|}{C}$ 代表复变量*M*的虚部。

可以看出,*M*的实部 $\bar{B} - B_n$ 为缺陷引起的MFL检测信号,代表复合激励中的周向探测能力;其虚部 $\frac{|\Delta B_\phi|}{C}$ 为缺陷引起的二次感生磁场检测信号,它与实部正交,代表的是复合激励的轴向探测能力。与此对应,两类信号的处理流程如图6中所示。

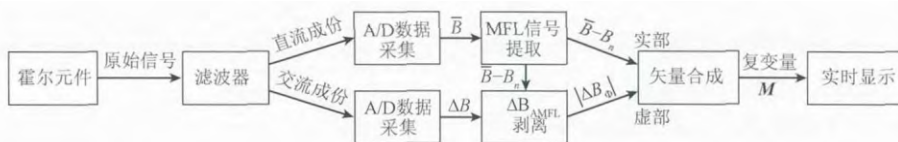


图6 新方法中复合激励的信号处理原理

Fig. 6 Principle diagram of the signal processing for composite excitation in the new method

图6中,霍尔元件拾取的原始信号经滤波器分别提取其交、直流成份 $\bar{B}$ 和 $\Delta B$ 。由 $\bar{B}$ 中提取出周向检测能力的MFL信号作为实部;并从 $\Delta B$ 中剥离 $\Delta B_{AMFL}$ 得到具有

轴向检测能力的 $\frac{|\Delta B_\phi|}{C}$ 作为虚部。最后通过矢量合成得到复变量输出*M*。由于*M*中包含了两个相互正交的探测能力,从而避免了常规MFL的盲点问题。

## 4 仿真建模与验证

### 4.1 有限元模型的建立

为了探究管道裂纹方位对 MFL 信号的影响,采用 ANSYS 对管道裂纹检测开展模拟仿真实验。图 7 为所建立油气管道的复合激励 MFL 检测仿真模型。

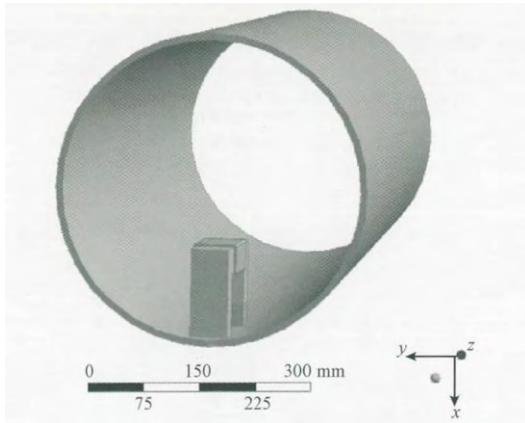


图 7 复合激励 MFL 的仿真模型

Fig. 7 MFL simulation model using composite excitation

模型中的管道内径为 500 mm,壁厚为 10 mm。检测器结构参数包括:磁轭总长为 200 mm、高 150 mm、宽 60 mm,两磁极中心距离 160 mm,磁轭相对磁导率取 2 000。管壁使用普通碳素结构钢 Q235 的磁化曲线进行定义。直流磁化场使用钕铁硼永磁体实现,其矫顽力为 904 kA/m。交变励磁由励磁线圈产生,其由  $\Phi 1$  漆包线环绕 200 匝,并加载 2 500 A/m<sup>2</sup> 电流密度。此时,交变励磁  $\Delta\varphi$  所占励磁  $\varphi$  的比例系数  $K$  约为 50%。模型中,测试点保持 1 mm 的抬高值并置于磁轭正中心。

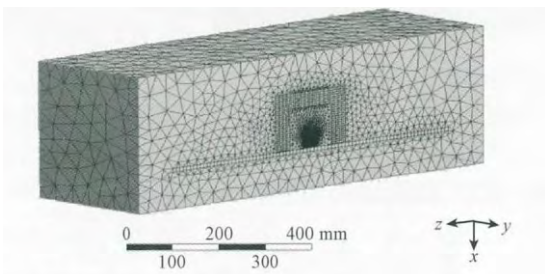


图 8 管道 FE 模型的网格划分图

Fig. 8 Meshing of the pipeline FE model

为减小运算量,采取对称半模型进行有限元仿真。在磁轭中心区域定义了一个 40 mm × 40 mm × 40 mm 的矩形采集区域。该采集区域的剖分网格为空气边界的 1/20,并采用映射规则划分。远离管壁和缺陷的部位,剖分单元的尺寸可以略大,smartsize 尺寸级别设置为 4,并

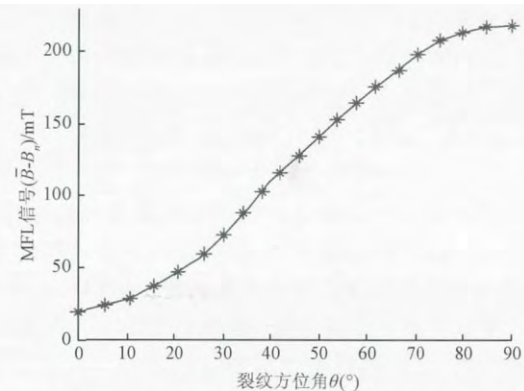
采用自由划分。图 8 为管道模型的网格划分图。

### 4.2 裂纹探测的仿真实验

在上述有限元模型及相关参数条件下,计算轴向磁化场  $\varphi$  及交变励磁  $\Delta\varphi$  在管壁及空气内的空间分布。在检测点处得到无缺陷时直流和交流分量  $B_n$  及  $\Delta B_n$ 。

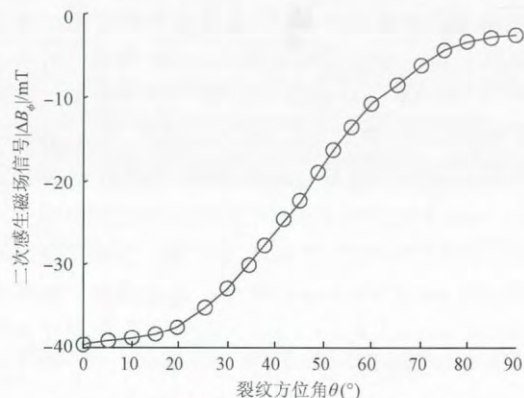
再在管壁内表面设置一待检裂纹,裂纹的外形尺寸为 8 mm × 2 mm × 1 mm。定义方位角  $\theta$  为裂纹延伸方向与磁化方向之间的夹角。将方位角  $\theta$  在 0 ~ 90° 范围内以 5° 的间隔进行等差取值,并对上述包含  $\theta$  方位角裂纹的管壁进行复合激励的有限元模型求解。

提取信号  $B$  的直流分量  $\bar{B}$ ,并计算复变量输出  $M$  的实部  $M_{Re}$ ,其与方位角  $\theta$  的关系曲线如图 9(a) 所示。同样,利用计算得到的  $|\Delta B_\phi|$  与复合激励中的轴向探测能力相对应,其与方位角  $\theta$  的关系曲线如图 9(b) 所示。



(a) MFL信号  $\bar{B}-B_n$  与方位角  $\theta$  的关系

(a) Relationship of MFL signal  $\bar{B}-B_n$  vs. azimuth angle  $\theta$



(b) 二次感生磁场信号  $|\Delta B_\phi|$  与方位角  $\theta$  的关系

(b) Relationship of secondary induced magnetic field signal  $|\Delta B_\phi|$  vs. azimuth angle  $\theta$

图 9 新方法在两个正交方向上的探测能力曲线

Fig. 9 The detection ability in two orthogonal directions for the new method

从图 9(a) 可以看出,方位角  $\theta = 0^\circ$  时,复变量  $M$  的实部  $M_{Re} = \bar{B} - B_n$  趋近于零,MFL 方法对该方向裂纹几乎无探测能力。而当  $\theta = 90^\circ$  时,相应的实部  $M_{Re}$  达最大

值。这说明, 实部  $M_{\text{Re}}$  表现为周向探测能力, 其与方位角  $\theta$  近似呈现  $\sin$  函数的分布特性。

而在图 9(b) 中可以看出, 二次感生磁场  $|\Delta B_{\phi}|$  对裂纹的检测信号为负, 这一点与文献 [8] 中的实验结果相一致。当方位角  $\theta = 90^\circ$  时,  $|\Delta B_{\phi}|$  趋于 0, 检测能力亦明显下降。因此,  $|\Delta B_{\phi}|$  的检测能力表现为轴向, 其与方位角  $\theta$  近似呈现  $-\cos$  函数的分布特性。

因此, 新方法通过两个轴向和周向两个探测能力的合成, 对  $0 \sim 90^\circ$  方位的裂纹均有效, 且灵敏度能保持相对稳定, 基本不再受方位角  $\theta$  的影响。

## 5 实际物理实验与分析

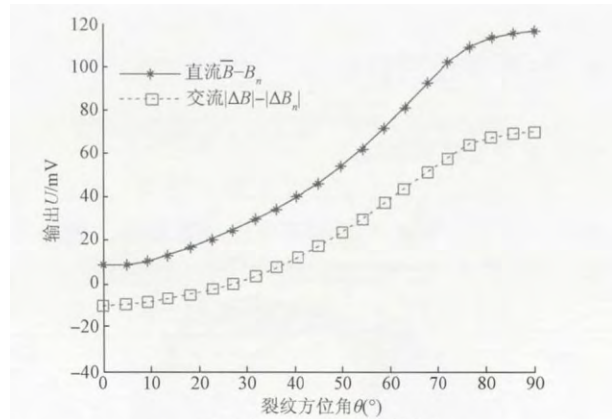
根据仿真得到的相关参数, 搭建复合激励的新型 MFL 实验系统, 并开展实际物理实验。考虑到实际油气长输管道的内径较大, 在实验室中使用相同厚度的平面钢板近似代替。整个实验系统主要由行进小车、交直流磁轭、霍尔元件阵列<sup>[14]</sup>、放大电路、滤波电路、A/D 采集卡、PC 机以及相关信号处理软件等构成。

交直流磁轭的励磁线圈采用双线圈对称性结构, 并使用交、直流双绕组, 其中直流绕组和交流绕组均使用 1 mm 的漆包线绕制 100 匝。实验系统中, 选用 DG2041A 波形发生器作为交变信号源, 并由 TDA7293 并联 BTL 型功放驱动后, 加载到极靴交流绕组的两端。直流绕组选用可连续调节的直流电源 RXN3010A 作为励磁源, 电源输出通过限流电阻接直流绕组两端。

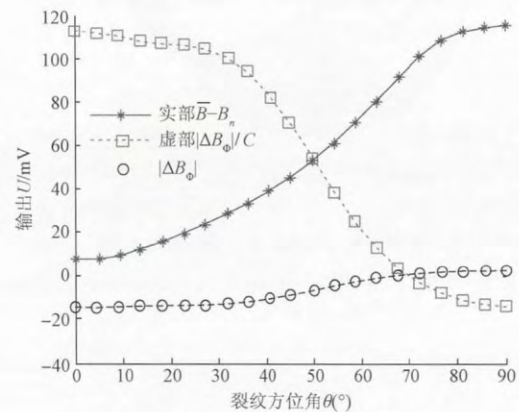
在信号采集模块中, 信号通道由 6 阶有源巴特沃兹滤波器实现直流成分  $\bar{B}$  和交流成分  $\Delta B$  分离。并选用了转化率为 500 Ks/s 的 USB2832 型 A/D 采集卡对两类信号分别进行多通道 A/D 转换, 并在 LabVIEW 平台进行数据处理。磁轭中心部位横向布置了由 30 个霍尔元件 (间距 4 mm) 构成的检测阵列, 霍尔元件选用高灵敏度的模拟型 G1322, 并保持 1 mm 的提离值。待测钢板的实际尺寸为 500 mm × 300 mm × 10 mm, 其表面加工有两个尺寸相同 (50 mm × 5 mm × 2 mm), 相互垂直的裂纹缺陷。

先将交直流磁轭置于钢板无缺陷处, 设定直流绕组的驱动电流为 1 A, 调整交流绕组的有效电流为 0.5 A, 即比例系数  $K = 0.5$ , 并记录钢板的背景漏磁场强度  $B_n$  和  $\Delta B_n$ 。为了保证结果的可靠性, 在钢板中取 10 个样点分别测试, 并对采样数据进行均值处理。再将交直流磁轭置于人工裂纹上方, 同时, 旋转磁轭使磁化方向与方位角  $\theta$  在  $0 \sim 90^\circ$  范围变化, 每  $4.5^\circ$  间隔采集一次数据。位于裂纹正上方的霍尔元件, 其输出的直流有效信号  $\bar{B} - B_n$  和交流有效信号  $|\Delta B| - |\Delta B_n|$  分别如图 10(a) 中所示。

将上述数据代入式 (8), 可对二次感生磁场信号



(a) 直流、交流检测信号的分布  
(a) Distribution of AC and DC detection signals



(b) 复变量实部、虚部信号的分布  
(b) Distribution of the real part and imaginary part of the complex variable

图 10 复合激励的检测信号与方位角  $\theta$  关系

Fig. 10 Relationship of detection signal vs. azimuth angle  $\theta$  under composite excitation

$|\Delta B_{\phi}|$  进行近似估计, 其结果如图 10(b) 中圆点曲线所示。并根据  $|\Delta B_{\phi}|$  的峰值为  $-15$  mV, 可计算轴向补偿系数  $C = -15 \text{ mV} / 112 \text{ mV} = -0.134$ 。则再由式 (9) 即可得到复变量  $M$  的实部和虚部, 其结果如图 10(b) 中所示。从图中可以看出, 实测的 MFL 信号  $\bar{B} - B_n$  与仿真分布吻合较好, 但对于  $|\Delta B_{\phi}|$  信号, 当方位角  $\theta > 70^\circ$  时, 与仿真结果存在一定的误差, 这主要是对  $\Delta B_{\text{AMFL}}$  信号近似估计造成的。但是, 该误差并不会影响  $|\Delta B_{\phi}|$  信号在轴向上的探测能力。

再将交直流磁轭装配在行进小车上, 利用霍尔元件阵列对钢板裂纹区域扫查, 横、纵分辨率分别为 4 mm 和 1 mm。行进时, 尽量保持小车的平稳性, 以减少振动带来的提离噪声<sup>[15]</sup>。30 路霍尔元件阵列的输出按图 6 中所示流程进行数据处理, 扫查结果以二维复矩阵的形式存放在 PC 机中。取裂纹区域二维复矩阵实部  $M_{\text{Re}}$  和虚部  $M_{\text{Im}}$  分别绘出其灰度图, 如图 11 所示。

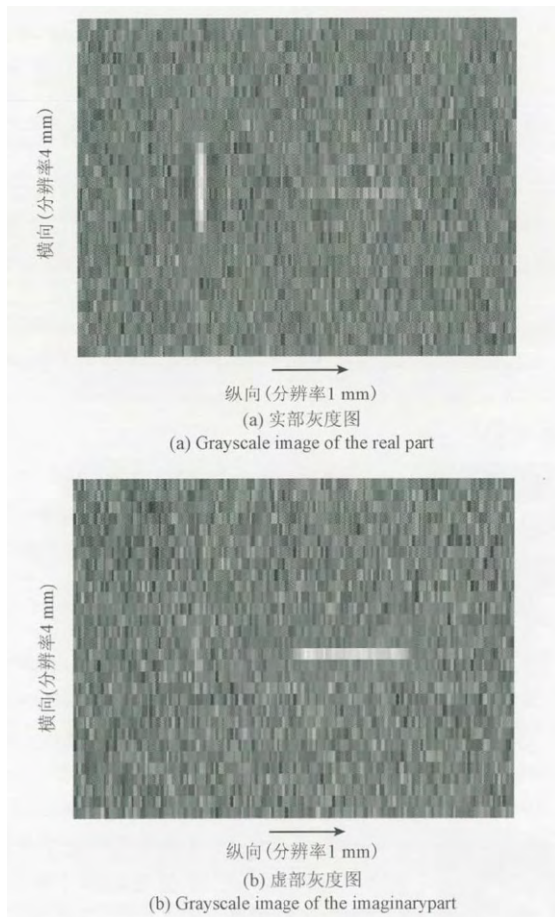


图 11 新方法的二维复变量扫描结果

Fig. 11 2D scanning results of the complex variable using new method

由图 11 (a) 可以观察到, 新方法的实部输出  $M_{Re}$  与常规 MFL 相当, 对横向(周向)裂纹检测结果较明显, 而纵向(轴向)裂纹只有模糊阴影, 几乎分辨不出。图 11 (b) 中所示的虚部灰度图, 其规律则相反, 纵向裂纹轮廓较清晰, 横向裂纹几乎不能被发现。因此, 实际验证结果表明, 新方法中的复合激励同时具备了两个正交方向上的检测能力, 并分别在检测结果的实部和虚部上得以体现, 从而实现了无盲点检测。

## 6 结 论

1) 传统 MFL 方法对管道轴向裂纹检测的局限性很大程度上是由裂纹方位导致的。当磁化与裂纹方向垂直时, MFL 输出信号较明显。而当磁化与裂纹方向同向时, 几乎不能产生有效的漏磁场, 从而形成盲区。

2) 新方法在现有的 MFL 的轴向励磁场的基础上叠加交变励磁, 利用交变励磁在管道壁中感生出周向涡流。当管道壁内存在轴向裂纹时, 会造成二次感生磁场

的扰动, 从而实现轴向缺陷的探测。

3) 新方法与现有 MFL 检测器结构完全兼容, 其中, 直流激励的 MFL 信号具有直流特性, 而二次感生磁场扰动信号具有交流特性。两信号均可由 MFL 的磁传感器拾取, 并分别通过交、直流信号通道进行处理。

4) 新方法的检测结果用复变量  $M$  进行描述, 其实部  $M_{Re}$  代表复合激励中的周向探测能力; 虚部  $M_{Im}$  与实部正交, 代表轴向探测能力。新方法中复合激励同时具备了两个正交方向上的检测能力, 从而实现了无盲点检测。

## 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] NARA T, TAKANASHI Y, MIZUIDE M. A sensor measuring the Fourier coefficients of the magnetic flux density for pipe crack detection using the magnetic flux leakage method [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(7): 1-3.
- [3] AGUILA-MUNOZ J, ESPINA-HERNANDEZ J H, PEREZ-BENITEZ J A, et al. Crack detection in steel using a GMR-based MFL probe with radial magnetization [C]. International Conference on Electronics, Communications and Computing, 2013: 104-108.
- [4] WU J, SUN Y, Kang Y, 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.
- [5] SONG X, XUE L, XU Z. The simulation and experimental analysis of the MFL for cracks inspection in pipelines under mechanics-magnetic coupling [C]. International Society for Optics and Photonics, 2011: 83211R-6.
- [6] 李久政, 康宜华, 孙燕华, 等. 基于信号源极值特征的钢管内外裂纹区分方法 [J]. 华中科技大学学报, 2008, 36(12): 75-78.  
LI J ZH, KANG Y H, SUN Y H, et al. Discrimination of internal and external steel pipe notch using signal

- figures extremum [J]. Huazhong University of Science & Technology, 2008, 36(12): 75-78.
- [7] 杨理践, 马凤铭, 高松巍. 油气管道缺陷漏磁在线检测定量识别技术 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(1): 245-247.  
YANG L J, MA F M, GAO S W. Quantitative recognition technology for online MFL inspection of oil gas pipeline defects [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(1): 245-247.
- [8] 宋凯, 陈超, 康宜华, 等. 基于 U 形磁轭探头的交流漏磁检测法机理研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 1980-1985.  
SONG K, CHEN CH, KANG Y H, et al. Mechanism study of AC-MFL method using U-shape inducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 1980-1985.
- [9] 李路明, 郑鹏, 黄松岭, 等. 表面裂纹宽度对漏磁场 Y 分量的影响 [J]. 清华大学学报, 1999, 39(2): 43-45.  
LI L M, ZHENG P, HUANG S L, et al. The effect of Surface crack width on leakage magnetic field Y component [J]. Journal of Tsinghua University, 1999, 39(2): 43-45.
- [10] 付跃文, 喻星星. 油套管腐蚀脉冲涡流检测中探头类型的影响 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 208-217.  
FU Y W, YU X X. Effect of probe type on corrosion inspection of tubing and casing string with pulsed eddy current [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1): 208-217.
- [11] LIU W, LIU Y, CHEN W, et al. Longitudinal crack failure analysis of box of S135 tool joint in ultra-deep well [J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 48(2): 283-296.
- [12] EDWARDS C, PALMER S B. The magnetic leakage field of surface-breaking cracks [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1986, 19(4): 656-673.
- [13] 吴德会, 游德海, 柳振凉, 等. 交流漏磁检测法趋肤深度的机理与实验研究 [J]. 仪器仪表报, 2014, 35(2): 327-336.  
WU D H, YOU D H, LIU ZH L, et al. Mechanism and experimental research on skin depth in AC magnetic flux leakage testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2014, 35(2): 327-336.
- [14] 于霞, 张卫民, 邱勇, 等. 弱磁场激励下基于阵列磁传感器的缺陷检测方法 [J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(5): 460-463.  
YU X, ZHANG W M, QIU Y, et al. Defect detection methods based on array magnetic sensor under weak magnetic field [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(5): 460-463.
- [15] YILAI M, LI L, PO G, et al. Improving SNR of MFL detecting defect signal of drill pipe by using pole piece [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2012, 54(9): 489-492.

### 作者简介



吴德会, 分别在 2003 年和 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. Sc. degree in 2003 and Ph. D. 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, 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, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: 445702793@qq.com

**Liu Zhitian** 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.



王晓红 (通讯作者), 2009 年于大连理工大学获得硕士学位, 现为厦门大学机电工程系高级工程师, 主要研究方向为传感器技术。

E-mail: wxh@xmu.edu.cn

**Wang Xiaohong** (Corresponding author) received her M. Sc. degree in 2009 from Dalian University of Technology; now, she is a senior engineer in Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University. Her main research interest direction is sensor technology.