

漏磁检测信号轴向分量和径向分量的选择

杜志叶¹, 阮江军¹, 余世峰²

(1. 武汉大学 电气工程学院, 武汉 430072; 2. 国网直流建设分公司, 北京 100052)

摘要: 缺陷漏磁场的径向分量和轴向分量是漏磁检测中经常检测的物理量, 两者之间如何选择, 至今尚无定论。采用等效面偶极子模型分析了缺陷漏磁场的空间分布特点, 解释了径向分量比轴向分量衰减更快的原因。结合有限元方法, 研究了不同深度、宽度的二维矩形槽和不同倾角的梯形槽缺陷的漏磁场分布, 分析了径向分量与轴向分量的变化特点, 总结了缺陷参数变化时临界点的变化趋势。从探头设计的角度, 考察了探头提离值以及缺陷参数对缺陷漏磁场信号轴向和径向分量幅值的影响, 提出利用临界点作为检测分量的选取原则。

关键词: 漏磁检测; 轴向分量; 径向分量; 临界点

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)07-0480-05

Selection of Radial and Axial Components from Magnetic Flux Leakage Signals

DU Zhi-Ye¹, RUAN Jiang-Jun¹, YU Shi-Feng²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid DC Project Construction Company, Beijing 100052, China)

Abstract: Both radial component and axial component are the favorite testing factors in the magnetic flux leakage testing (MFLT). Equivalent magnetic dipole model was taken to analyze the distribution feature of magnetic flux leakage of defects, demonstrating the fact that radial component decays more rapidly than axial component. The flux leakage due to steel pipe defects with various defect depth (10% to 40%) and width (0.5 mm to 20 mm) was calculated using finite element method. The sharpness angle of the notch was also taken into consideration in the calculation. The critical point, where the amplitude of radial component is equal to that of axial component, transits with various parameters of defects. The tendency of shift of critical point is discussed for the different cases. The effects of lift-off of sensor and defect parameters on amplitude of components of flux leakage were studied from sensor design. The conclusion is drawn that critical point can be used to determine which component would be pick out by one dimensional sensor in designing MFLT equipments.

Keywords: Magnetic flux leakage testing; Axial component; Radial component; Critical point

油管在长期的使用中, 管壁受到冲刷和腐蚀以致减薄, 经常发生泄漏事故, 定期对油管进行质量检测是保证石化企业安全生产的必要措施。油管(下称钢管)的材料通常是导磁性能良好的高碳钢或者合金钢, 适合采用漏磁检测技术进行检测。几十年来, 国内外学者对漏磁检测的理论模型、检测技术以及试验结果进行了大量的研究^[1-8]。最近的研究表

明, 缺陷定量化识别水平同探头的检测能力密切相关。钢管缺陷漏磁场由空间上相互垂直的三个分量组成: 轴向分量与外加磁场的方向平行, 所以又称切向分量; 径向分量和周向分量与外加磁场的方向垂直, 又称法向分量。在这三个分量中, 轴向分量和径向分量的幅值远远大于周向分量, 均可作为探头的检测对象, 曾被不同的研究者所关注^[9]。文献[5-6]分别从仿真和试验的角度总结了缺陷漏磁场法向分量对缺陷尺寸的影响, 并给出了拟合公式。文献[7-8]根据试验结果, 讨论了缺陷漏磁场的切向分

收稿日期: 2009-05-15

作者简介: 杜志叶(1974-), 男, 博士, 主要从事电磁场数值计算和漏磁检测方面的研究。

量和缺陷尺寸之间的关系。目前广泛采用的一维探头只能检测一种分量,在两者之间如何选择,至今尚无定论。选取适当的检测分量,合理设计一维探头获得高信噪比的信号,是探头设计过程中必须考虑的问题。笔者分析了被测油管的磁饱和度、缺陷的尺寸、位置对漏磁场径向分量和轴向分量的影响,总结了漏磁信号的径向分量和轴向分量幅值的分布规律,提出了指导探头设计的建议。

1 钢管缺陷漏磁场模型及分析方法

1.1 等效面偶极子模型

钢管缺陷漏磁场同钢管的饱和度、缺陷的尺寸、形状、位置有关,分布情况很复杂。为了阐述漏磁场各个分量的分布特点,分析钢管表面裂缝缺陷的漏磁场,笔者采用等效面偶极子模型^[10-11]。如图1所示,采用矩形槽形状的缺陷来模拟表面裂缝,缺陷的宽度为 w ,深度为 d ,缺陷两侧面磁荷密度为 σ_s ,其大小相等,符号相反,且假定缺陷口及其他部位均无磁荷分布。

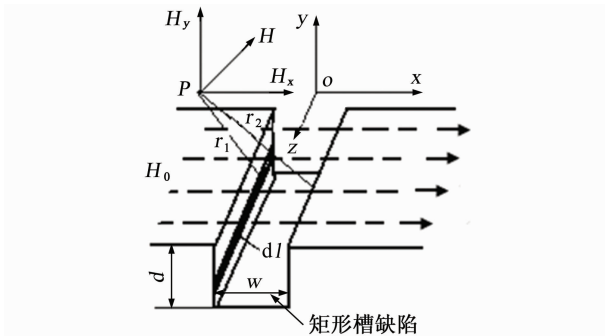


图1 矩形槽缺陷的等效磁偶极子模型

选取直角坐标系的原点位于缺陷中心位置,则在缺陷两侧壁上具有宽度为 dl 的面元在 P 点产生的场强为:

$$dH_1 = \frac{2\sigma_s dl}{r_1^2} \mathbf{r}_1 \quad (1)$$

$$dH_2 = \frac{2\sigma_s dl}{r_2^2} \mathbf{r}_2 \quad (2)$$

式中 r_1, r_2 分别为 P 点到缺陷两侧磁荷面元的距离。则磁场的 x, y 分量为:

$$dH_{1x} = \frac{2\sigma_s (x + w/2) dl}{(x + w/2)^2 + (y + l)^2} \quad (3)$$

$$dH_{2x} = \frac{2\sigma_s (x - w/2) dl}{(x - w/2)^2 + (y + l)^2} \quad (4)$$

$$dH_{1y} = \frac{2\sigma_s (y + l) dl}{(x + w/2)^2 + (y + l)^2} \quad (5)$$

$$dH_{1y} = \frac{2\sigma_s (y + l) dl}{(x - w/2)^2 + (y + l)^2} \quad (6)$$

总的水平分量 H_x 可通过对 dH_x 求积分获得:

$$H_x = \int_0^d dH_{1x} + \int_0^d dH_{2x} = 2\sigma_s \left[\operatorname{tg}^{-1} \frac{d(x + w/2)}{(x + w/2)^2 + y(y + d)} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{d(x - w/2)}{(x - w/2)^2 + y(y + d)} \right] \quad (7)$$

同理可得:

$$H_y = \int_0^d dH_{1y} + \int_0^d dH_{2y} = 2\sigma_s \ln \left[\frac{(x + w/2)^2 + (y + d)^2}{(x - w/2)^2 + (y + d)^2} \cdot \frac{(x - w/2)^2 + y^2}{(x + w/2)^2 + y^2} \right] \quad (8)$$

由式(7)和(8)可知,缺陷漏磁场是缺陷宽度、深度以及磁荷密度的函数。 H_x 在 $x=0$ 处有极大值,随着 x 的增大,幅值迅速下降且满足 $H_x(x) = H_x(-x)$; H_y 在 $x=0$ 处为0,随着 x 的增大,幅值迅速上升,当 $x = w/2$ 时,达到极大值,且满足 $H_y(x) = -H_y(-x)$ 。将 H_x, H_y 分别对 y 求偏导,可获得 H_x, H_y 相对于 y 的变化率随着 y 值的变化趋势(图2)。图2中 $w=1 \text{ mm}, d=1 \text{ mm}$,由图中可以看出, $\left. \frac{\partial H_x}{\partial y} \right|_{x=0}$ 和 $\left. \frac{\partial H_y}{\partial y} \right|_{x=w/2}$ 均为负值,且当 $y < 1.5 \text{ mm}$ 时, $\left| \frac{\partial H_x}{\partial y} \right|_{x=0} < \left| \frac{\partial H_y}{\partial y} \right|_{x=w/2}$,这说明缺陷漏磁场的 x, y 分量的幅值均随着 y 值的增大而衰减,且当 $y < 0.5 \text{ mm}$ 时,其衰减速度远远大于 x 分量。

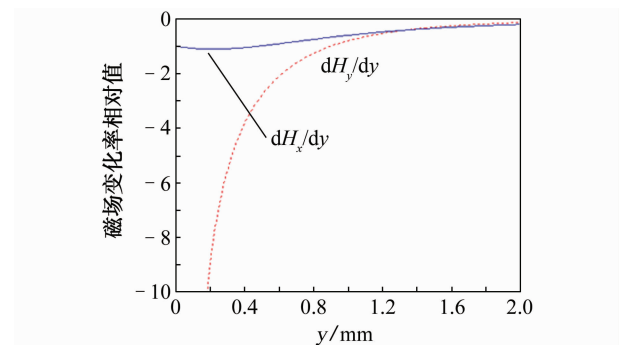
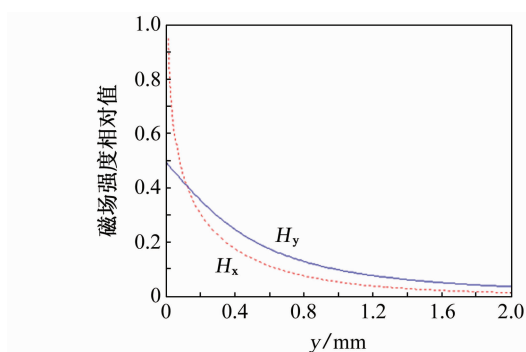


图2 dH_x/dy 和 dH_y/dy 值示意图

图3所示的是 H_x, H_y 的幅值相对于 y 值的变化曲线。当 $y=0$ 时, $H_y \approx 2H_x$,但是前者衰减速度远大于后者;当 $y > 0.2 \text{ mm}$ 时, H_x 的幅值就超过了 H_y 的幅值。

图2和3中, P 点的 y 坐标实际上就是检测时探头距离被测钢管外表面的距离,即探头的提高值。

图3 H_x 与 H_y 相对于 y 的变化曲线

当缺陷的宽度为 1 mm, 深度为 1 mm 时, H_x 和 H_y 分量的幅值相交于 $y=0.2$ mm 处, 这意味着若探头的提离值 <0.2 mm, 要达到最大的信噪比, 应该选择 H_y 作为检测信号; 若探头的提离值 >0.2 mm, 则应该选取 H_x 作为检测信号。

选择适当的分量作为检测信号, 就要充分了解缺陷漏磁场的各个分量在空间的分布规律, 针对被测钢管的工作状态以及缺陷的形状特征, 找出 H_x 和 H_y 的交点(以下简称临界点)的变化范围, 结合探头的提离值要求, 确定适当的检测分量。

1.2 缺陷漏磁场的有限元仿真模型

等效磁偶极子模型不能考虑钢管材料的非线性, 计算结果往往出现较大的误差。利用有限元方法从整个磁场的分布出发, 模拟任意形状大小的缺陷, 通过细化缺陷以及缺陷周围的区域, 可获得比较精确的漏磁场解。对于缺陷漏磁场的有限元的求解理论和方法, 文献[12-15]已经做了大量的研究, 此处不再赘述。笔者所在课题组研制的漏磁检测设备, 采用探头固定, 钢管匀速运动的方式。励磁磁场的方向同钢管运动的方向一致, 钢管的运动速度约 0.5 m/s, 忽略钢管运动引起的涡流效应, 按静磁场问题处理。利用求解问题的轴对称性, 建立 2D 静磁场模型进行分析[12-14]。

仿真模型的参数同试制设备的参数一致, 如图 4 所示。钢管材料的磁化曲线参照上海金属材料研究所的实际测量结果。缺陷设定为圆周方向延伸一周的裂缝或者磨损槽。为了突出缺陷的共性特点, 将表面裂缝简化为矩形槽, 表面磨损则用梯形槽模拟。缺陷的参数包括深度 d 、宽度 w 和倾角 θ 三个指标。深度用实际深度占钢管壁厚的百分比表示, 倾角表示缺陷的类型。当 $\theta=90^\circ$ 表示矩形槽缺陷; $\theta>90^\circ$ 时为磨损缺陷。通过改变缺陷的位置、尺寸, 研究缺陷漏磁场磁通密度径向分量 B_r (下面简称 r

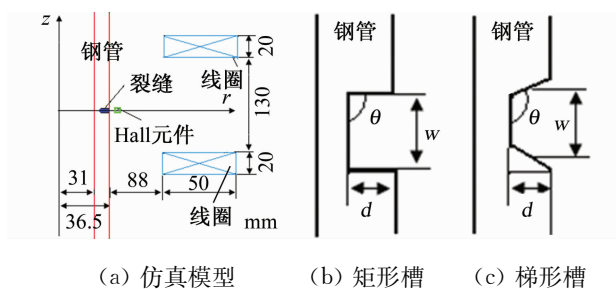


图4 仿真模型

分量)和轴向分量 B_z (下面简称 z 分量)在空间的分布形态, 以及其幅值随探头提离值的变化规律。

2 临界点影响因素分析

对无缺陷钢管进行仿真, 计算不同励磁电流作用下钢管壁内的磁通密度, 根据钢管的饱和程度, 确定适当的励磁电流。仿真得知, 当励磁电流为 1 A 时, 钢管壁内的磁通密度位于磁化曲线的膝点, 在这种工作状态下, 可获得最佳的信噪比[12-13, 15]。

2.1 缺陷的深度对临界点位置的影响

励磁电流为 1 A 时, 改变缺陷的深度从 5%~40%, 计算宽度等于 1, 4 和 10 mm 时的临界点位置, 仿真结果如图 5 所示。

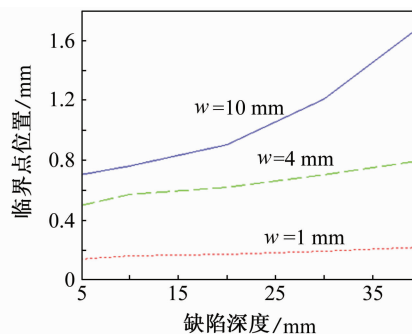


图5 不同深度时临界点位置的变化曲线

图 5 的结果显示了随着缺陷深度的增加, 临界点位置增大的趋势。当缺陷宽度为 1 mm 时, 临界点位置很小, 且随着深度的增加呈现近似线性的增大; 当缺陷宽度为 10 mm 时, 临界点位置较大, 且随着深度的增加, 临界点位置的增加速度越来越快, 呈近似二次方的关系。

2.2 缺陷的宽度对临界点位置的影响

励磁电流为 1 A, 改变缺陷的宽度从 0.5~20 mm 变化, 计算深度等于 10%, 20% 和 40% 时的临界点位置, 仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 随着缺陷宽度的增加, 临界点的位置呈现非线性的增加趋势。当缺陷宽度

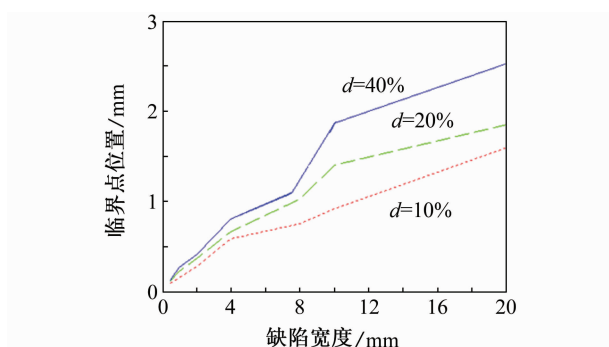


图6 不同宽度时临界点位置的变化曲线

<4 mm时,缺陷深度对临界点位置的影响并不明显。随着缺陷宽度增加,缺陷深度对临界点位置的影响越来越大。

2.3 缺陷的形状对临界点位置的影响

磨损造成的管壁减薄也是比较常见的缺陷,这种缺陷的形状用梯形槽来近似,如图4(c)所示。设定励磁电流为1 A,缺陷的深度为20%,宽度分别为10和20 mm,倾角分别取为 120° 、 135° 和 150° ,仿真结果如表1。

表1 梯形缺陷的仿真结果

缺陷 宽度	临界点位置		
	120°	135°	150°
10	1.4	1.2	1.1
20	1.8	1.5	1.4

表1显示,梯形缺陷的倾角越大,在相同的深度和宽度情况下,临界点的位置越小。

2.4 缺陷的位置对临界点位置的影响

缺陷位于钢管的内表面,深度20%,宽度从0.5~20 mm变化,励磁电流为1 A,仿真结果显示临界点的位置均为负值,临界点位于钢管壁内。在钢管外面, z 分量总是大于 r 分量,两者之间无交点。这是因为当缺陷位于钢管内表面时,缺陷漏磁场泄漏到钢管的外表面,要经过更长的距离,相当于增加了探头的提离值。

2.5 钢管饱和度对临界点位置的影响

缺陷漏磁场的分布特性同钢管的饱和程度有关。当钢管不饱和时,较深的缺陷会使附近的钢管壁过饱和,使得漏磁场的分布特性同小缺陷时钢管饱和情况相似,因而有必要分析钢管饱和程度对缺陷漏磁场特性的影响。设定缺陷的深度分别为10%和40%,宽度为1,4和10 mm,改变励磁电流从0.5~1.7 A变化,计算不同情况下的临界点位

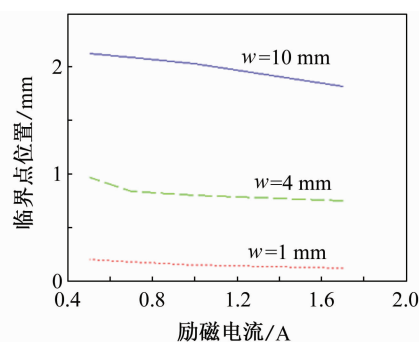
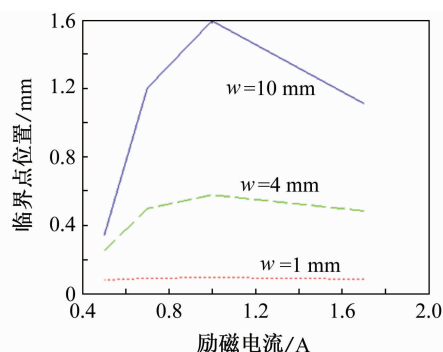
(a) $d=40\%$ (b) $d=10\%$

图7 励磁电流的变化对临界点位置的影响

置,仿真结果如图7所示。

图7(a)所示的是深度为40%,宽度分别为1,4和10 mm的槽形缺陷情况下,励磁电流的变化对临界点位置的影响。由图中可以看出,随着励磁电流的上升,临界点的位置单调减小。当缺陷的深度为10%时,临界点的位置随着电流的增大,出现了先增加后减小的变化趋势,如图7(b)所示。这是因为当缺陷很深,励磁电流为0.5 A时,缺陷附近的钢管已达到饱和。再增大励磁电流,钢管的饱和度加深,临界点的位置就出现单调下降的趋势。当 $d=10\%$ 时,随着励磁电流的增加,钢管经历了从不饱和到饱和再到深度饱和的变化过程。当钢管不饱和时,漏磁场信号相对较弱,其临界点的位置较小;随着励磁电流的增加,临界点的位置也跟着增加;当励磁电流达到1 A时,钢管达到临界饱和点,临界点的位置也达到最大,这时再增加励磁电流,则会使钢管的饱和程度加深,临界点的位置也随之变小。因此,当钢管不饱和时,临界点的位置同缺陷的尺寸之间呈现更为复杂的变化趋势。钢管工作在临界饱和点时,临界点位置的变化呈现单调下降的趋势。

3 检测分量的选取原则

由于一维探头只能检测一个分量的信号,在探

头设计过程中,根据检测设备的检测精度和检测的缺陷类型,选择合适的分量,有助于充分发挥设备的检测性能。临界点位置反映了缺陷漏磁场的轴向分量和径向分量的幅值随探头提离值的变化趋势。探头提离值确定以后,结合临界点的位置因素,就可以确定检测分量。如果探头的提离值大于临界点,则选取轴向分量作为检测信号,如果小于临界点,则检测径向分量。

根据以上仿真分析结果,笔者认为在探头的设计过程中,应该遵循如下原则:

(1) 若缺陷大多位于钢管的内部或者内表面,则检测缺陷漏磁场的轴向分量。

(2) 若缺陷大多位于钢管的外表面,探头的提离值 $<0.5\text{ mm}$,则检测缺陷漏磁场的径向分量。

(3) 若缺陷属于比较细小的裂缝或者比较浅的磨损,而探头的提离值受工艺原因限制, $>0.5\text{ mm}$,则应检测轴向分量。

4 结论

从缺陷漏磁场的分布特点出发,研究了缺陷的位置、尺寸以及钢管的饱和度对漏磁场的影响作用,对于全面地认识径向分量和轴向分量的分布规律,选取适当的分量信号作为探头检测的对象具有一定的指导意义。

当探头的提离值 $>1\text{ mm}$ 时,对于大多数类型的缺陷,轴向分量总是比径向分量具有更高的幅值。径向分量适用于探头提离值 $<0.5\text{ mm}$,检测设备的机械精度较高的情况。

参考文献:

- [1] Lord W. Application of numerical field modeling to electromagnetic methods of nondestructive testing[J]. IEEE Trans on mag, 1983, 19(6): 2437—2442.
- [2] Edens W C. Electromagnetic inspection: wall loss and flaw location in oil country tubular goods[J]. Materials Evaluation, 1992, 50(4): 476—490.
- [3] Moore D P, Bayars H G. Economics important in selecting monitoring techniques[J]. Oil and Gas Journal, 1990, 88(32): 68—73.
- [4] Huang Zuoying, Que Peiwen, Chen Liang. 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method[J]. NDT&E International, 2006, 39(1): 61—66.
- [5] 李路名, 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(自然科学版), 1999, 39(2): 43—45.

- [6] 汪友生, 潘孟贤, 何辅云. 缺陷参数与漏磁信号相互关系的实验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1998, 21(5): 28—31.
- [7] 王太勇, 蒋奇. 管道缺陷定量识别技术的研究[J]. 天津大学学报, 2003, 36(1): 45—48.
- [8] 杨涛, 王太勇, 李清, 等. 油气管道缺陷漏磁检测试验[J]. 天津大学学报, 2004, 37(8): 686—689.
- [9] Mukhopadhyay S, Srivastava G P. Characterisation of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform[J]. NDT&E International, 2000, 33(1): 57—65.
- [10] 蒋奇, 王太勇. 钢管缺陷漏磁场及影响漏磁信号因素的分析[J]. 钢铁研究, 2002, 128(5): 20—24.
- [11] 汪友生, 徐小平, 沈兰荪. 铁磁材料的漏磁检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2000, 14(3): 45—49.
- [12] 杜志叶, 阮江军, 余世峰, 等. Hilbert 变换在钢管漏磁检测缺陷定量识别中的应用研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 17—21, 28.
- [13] 杜志叶, 阮江军, 余世峰, 等. 油管漏磁检测的有限元建模技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 108—113.
- [14] 黄松岭. 管道磁化的有限元优化设计[J]. 清华大学学报, 1998, 40(2): 67—69.
- [15] 杜志叶, 阮江军, 王贤琴, 等. 基于 Ansoft 软件的钢管漏磁检测 3D 有限元仿真研究[J]. 无损检测, 2005, 27(6): 281—285.

无损检测标准宣贯会报名通知

近几年,国家有关部门批准发布了一批新的无损检测国家标准和行业标准。为了使新标准得以有效实施,根据国家有关规定和要求,全国无损检测标准化技术委员会今年计划举办一系列无损检测标准宣贯会。宣贯会将邀请无损检测专家和标准起草人,对新标准做详细介绍和解答。参加者将授予无损检测标准培训证书。欢迎全国各行各业的无损检测人员积极报名参加,具体宣贯标准和报名单请浏览无损检测标准网(<http://www.chinandt.org.cn>)。

(全国无损检测标准化技术委员会 金宇飞)