

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003723

管道漏磁内检测的管壁缺陷漏磁场解析模型^{*}

杨理践 梁成壮 高松巍 刘 斌

(沈阳工业大学 信息科学与工程学院 沈阳 110870)

摘 要:漏磁内检测技术是长输油气管道缺陷检测的主要手段,缺陷几何特征识别对管道安全运行评价具有重要意义。基于二维磁偶极子模型,建立管道内壁缺陷漏磁场空间分布的三维解析模型,对磁化方向垂直缺陷时磁荷产生漏磁场的变化规律进行研究;基于内壁解析模型,引入管壁退磁影响因子,对模型进行补偿,建立管道外壁缺陷漏磁场三维解析模型,得到了管道外壁不同缺陷漏磁场的分布特征。搭建漏磁检测实验平台,对所建模型有效性进行实验验证。结果表明,管壁对外壁缺陷漏磁场具有一定屏蔽作用,实验结果和理论分析具有很好的一致性,所建模型可有效描述管道内外壁缺陷漏磁场空间分布特性,对缺陷识别和定量评估具有一定工程指导意义。

关键词:漏磁内检测;漏磁场模型;磁偶极子;管壁缺陷;缺陷解析模型

中图分类号: TM153⁺.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Analytical model of magnetic flux leakage field of pipe wall defects based on magnetic flux leakage internal detection

Yang Lijian Liang Chengzhuang Gao Songwei Liu Bin

(School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: Magnetic flux leakage internal detection technology is one of the means for detecting defects in long-distance oil and gas pipelines. The identification of geometric features of defects is of great significance to the safety operation evaluation of pipeline. Based on the two-dimensional magnetic dipole model, a three-dimensional analytical model of the spatial distribution of the magnetic flux leakage field of the inner wall defects of the pipeline is established, and the variation law of the magnetic flux leakage field generated by the magnetic charge when the magnetization direction is perpendicular to the defect is studied. Based on the analytical model of the inner wall, a demagnetization factor is introduced to compensate the model. The three-dimensional analytical model of the defect leakage magnetic field on the outer wall of the pipeline is established, and the distribution characteristics of the defect magnetic flux leakage field on the outer wall of the pipeline are obtained. An experimental platform for magnetic flux leakage detection is built to verify the effectiveness of the model. The results show that the magnetic flux leakage field of the outer wall has a certain shielding effect, and the experimental results are in good agreement with the theoretical analysis. The model can effectively describe the spatial distribution characteristics of the magnetic flux leakage field on the inner and outer walls of the pipeline, which has certain engineering guiding significance for defect identification and quantitative evaluation.

Keywords: magnetic flux leakage detection; leakage field model; magnetic dipole; tube wall defect; defect analysis model

0 引 言

液态能源主要利用铁磁性材料管道进行长距离输送,因其老化、腐蚀等原因造成的缺陷极易导致事故发生,

造成经济损失及环境污染,需定期对其进行检测和维修^[1]。漏磁检测(magnetic flux leakage, MFL)技术广泛应用于长输油气管道缺陷在线检测工程。MFL技术利用磁敏传感器对漏磁场进行检测,获得其位置、类型、缺陷程度等精确信息^[2],考虑外部腐蚀位置的空间相关性,利用

现场调查和现场实测环境进行缺陷分类^[3],保障能源管道的安全需要先进的检测技术与维修手段^[4]。管道漏磁内检测技术发展迅速,检测器通常采用轴向和周向磁化的方式使管道检测达到全覆盖,采集轴向和径向磁通泄漏信号,利用信号畸变补偿准确确定缺陷边缘特征^[5]。

漏磁检测研究包括正演问题和反演问题,正演即漏磁场分析,是已知缺陷计算漏磁场;反演是由给定漏磁场数据求出是否存在缺陷、缺陷位置、甚至形状,正演是反演的基础。目前有效的描述铁磁性材料缺陷漏磁场与缺陷特征之间对应数学关系的正演模型有数值计算法和磁偶极子法^[6]。磁偶极子法由于计算速度快,是漏磁场计算的常用方法。廖昌荣等^[7]依据磁偶极子原理建立了V型裂纹漏磁场二维解析模型,得出了平板铁磁构件表面指定探测点的漏磁场理论表达式,理论分析得出的裂纹漏磁场分布曲线特征以及漏磁场空间形态规律,对缺陷的几何参数评估建立了一定的理论基础。李岩松等^[8]从磁偶极子模型出发,推导出任意单元的磁媒质在场点处产生的磁场的积分公式,将整个缺陷材料的积分问题转换为对若干单元进行积分后的叠加。吴振宁等^[9]基于匀速采样模型设计迭代反演方法,通过空间映射,利用磁偶极子模型将缺陷漏磁场信号在检测中产生的多个有限元模型表示为解析模型,并进行了缺陷重构,为缺陷定量识别提供了依据。Zhang等^[10]基于线性磁偶极子理论建立了漏磁场数值分析模型,利用三维数字微磁传感器对漏磁场进行检测分析,为钢铁腐蚀缺陷的漏磁检测技术提供了数学理论。吴德会等^[11]根据磁偶极子理论,建立了任意磁化方向下内表面缺陷漏磁场分布模型,利用解析式有效的描述了缺陷方向性对漏磁场空间分布的影响。管道缺陷漏磁场受管壁影响,在缺陷处形成屏蔽体,内外壁信号峰值等都所有差异^[12],在漏磁场模型计算过程中磁场与屏蔽体的外形密切相关^[13-16]。

以上研究都是针对的工件表面缺陷,适用于管道的内表面缺陷研究,而管道实际运行中,其外壁更容易受到腐蚀、应力以及机械损伤,因此建立管道外壁缺陷的三维磁偶极子模型更具有实际意义。

本文针对管道内、外壁缺陷的定量分析与识别,基于磁偶极子理论,在管道永磁励磁轴向磁化的情况下,建立管道内、外壁漏磁场的三维数学模型。研究了内、外壁缺陷对漏磁场的影响差异以及不同壁厚外壁缺陷的漏磁场信号特征,通过理论计算和实验相互验证,对管道漏磁内检测器的缺陷识别具有工程指导意义。

1 管道漏磁内检测基本模型

管道漏磁内检测具有精准、便捷等优点,为目前最有效的管道安全检测方法之一。检测器通常采用永磁励

磁,分为轴向和周向两种方式。

1.1 管道漏磁内检测原理

管道漏磁内检测器由励磁源、钢刷、管道、轭铁、组成近似闭合的磁路,由磁敏元件检测漏磁场,如图1所示。磁敏元件置于管壁表面,永磁体对管壁磁化,管壁内、外壁无裂纹缺陷时没有磁力线泄漏。管壁内、外壁存在着裂纹等缺陷时,内壁缺陷部分磁力线会直接泄漏到管壁内表面,外壁缺陷部分磁力线则透过管壁泄漏到管壁内表面,管道内检测器检测到磁场的变化,从而进行缺陷检测和识别。

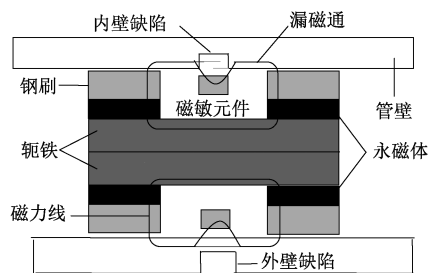


图1 管道漏磁检测原理

Fig. 1 Pipeline magnetic flux leakage detection diagram

解析法解算管道缺陷漏磁场数学模型是依据磁偶极子理论。磁偶极子理论类比电偶极子,通常利用磁偶极子模型将缺陷漏磁场描述为极性相反磁荷量相等的异性磁偶极子相互作用,产生磁性体系,类比管道的表面或近表面不同缺陷漏磁场的作用。

1.2 内壁缺陷三维磁偶极子模型

三维磁偶极子模型可以描述出管道缺陷漏磁场的空间分布。从内壁缺陷开始分析,由磁偶极子理论积分得到内壁缺陷三维解析模型,进而考虑管壁影响,对模型进行补偿,得到管道外壁三维磁偶极子模型。

建立管道内壁模型,以矩形缺陷为对象,假设磁化场方向与缺陷方向垂直;相对磁导率 $\mu_0 = 1$,以管道内壁上的矩形缺陷中心为原点,以矩形缺陷长度方向(轴向)建立X轴;矩形缺陷宽度方向(周向)建立Y轴,矩形缺陷深度方向(径向)建立Z轴,建立空间直角坐标系,如图2所示。

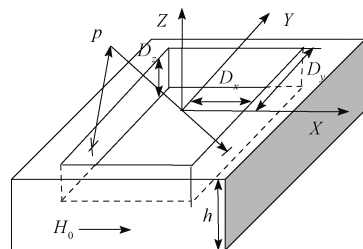


图2 管道内壁缺陷三维坐标示意图

Fig. 2 3D coordinate diagram of defects on inner wall of pipeline

图 2 中缺陷长为 $2D_x$ 、宽为 $2D_y$ 、深为 D_z 、管壁厚为 h , 磁化场 H_0 方向平行于 XOY 平面; 忽略管壁影响, 则根据磁偶极子模型, 缺陷两壁源点假设 (x_i, y_i, z_i) , 则缺陷两壁在空间场点 $P(x, y, z)$ 处形成的漏磁场信号 H 三轴分量的磁偶极子模型为缺陷壁磁荷的二元积分, 磁偶极子理论模型得到如下积分表达式:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{\sigma_s}{2\pi} \int_{-D_z}^0 \int_{-D_y}^{D_y} \frac{(x - x_i) dy_i dz_i}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} \\ H_y &= \frac{\sigma_s}{2\pi} \int_{-D_z}^0 \int_{-D_y}^{D_y} \frac{(y - y_i) dy_i dz_i}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} \\ H_z &= \frac{\sigma_s}{2\pi} \int_{-D_z}^0 \int_{-D_y}^{D_y} \frac{(z - z_i) dy_i dz_i}{[(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]^{\frac{3}{2}}} \end{aligned} \quad (1)$$

分别用三轴分解析式描述缺陷表面漏磁场, 对其进行矢量求和得到缺陷表面任意空间场点的矢量漏磁场。将式(1)积分运算化简求解得到三维磁偶极子模型如下:

$$\begin{aligned} H_x(x_i) &= \frac{\sigma_s}{4\pi} \left\{ \arctan \frac{(y + D_y)(z + D_z)}{(x - x_i)[(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} - \arctan \frac{(y + D_y)z}{(x - x_i)[(x - x_i)^2 + z^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} - \arctan \frac{(y - D_y)(z + D_z)}{(x - x_i)[(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} + \arctan \frac{(y - D_y)z}{(x - x_i)[(x - x_i)^2 + z^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} H_y(x_i) &= \frac{\sigma_s}{4\pi} \ln \left\{ \frac{z + D_z + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}}{z + [(x - x_i)^2 + z^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \times \frac{z + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}}{z + D_z + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} H_z(x_i) &= \frac{\sigma_s}{4\pi} \ln \left\{ \frac{y + D_y + [(x - x_i)^2 + z^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}}{y - D_y + [(x - x_i)^2 + z^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \times \frac{y - D_y + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}}{y + D_y + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

其中, 磁荷密度计算 σ_s 与磁化场的关系可通过式(5)计算^[11]。

$$\sigma_s = 5.3 \left(\frac{D_z/D_x + 1}{D_z/(\mu D_x) + 1} \right) H_0 \quad (5)$$

式中: H_0 为磁化场强度大小, μ 为被测材料的相对磁导率。

由图 2 可以看出, 当磁化场垂直于缺陷方向时, 在空间场点 $P(x, y, z)$ 产生的漏磁场为 $D_z = D_z$ 处的正磁偶极子, 和的 $D_y = h$ 负偶磁极子的合成磁场, 设 X, Y, Z 三轴方向的单位向量为 e_x, e_y, e_z , 长方体凹槽缺陷两壁形成的表面磁荷 σ_s 在任意空间场点 P 处形成的矢量漏磁场模型为:

$$H_p = (H_x(-D_x) - H_x(D_x))e_x + (H_y(-D_x) - H_y(D_x))e_y + (H_z(-D_x) - H_z(D_x))e_z \quad (6)$$

由式(6)可以得到, 平行于 XOY 平面的磁化场 H_0 的三维磁偶极子建模及矢量和成, 在不考虑管壁影响的情况下, 可实现管道外壁缺陷产生的漏磁场分布机理。管道外壁接触外部环境更容易造成缺陷, 对外壁缺陷的识别方法优化尤为重要。考虑管壁影响, 可对上述模型进行静磁屏蔽干扰补偿处理, 不同形状、不同尺寸的缺陷以及不同壁厚产生的静磁屏蔽效应不同。漏磁检测时管壁应处于磁饱和或近饱和状态, 在三维磁偶极子模型的基础上, 分析磁饱和状态下管壁对规则矩形缺陷漏磁检测信号的影响, 计算影响系数对模型进行补偿, 建立管道外壁缺陷漏磁场的三维解析模型, 对工程实践具有良好的指导意义。

2 外壁缺陷三维磁偶极子模型

管道壁厚对管道缺陷漏磁场的检测具有不可忽略的影响, 尤其对管道外壁缺陷进行内检测时, 管壁影响至关重要。建立管道外壁缺陷漏磁场解析模型时, 必须对于管道壁厚的影响进行分析, 管道在磁饱和条件下对漏磁场的屏蔽影响, 由于外壁缺陷漏磁场要透过管道壁进行检测, 漏磁场透过铁磁性材料时会产生感应磁场(退磁场) H_N 反作用于漏磁场 H_e 。使漏磁场信号参数改变。这种影响使外壁缺陷漏磁信号的相比于内壁缺陷漏磁信号的幅值、斜率等会有一定差别, 因此在计算管道外壁缺陷漏磁场时要对模型进行管壁退磁影响因子补偿。

2.1 管壁对外壁缺陷漏磁信号影响分析

以长方体凹槽缺陷为管道外壁缺陷漏磁场进行分析描述, 考虑管道壁对缺陷漏磁场的影响, 加入补偿因子, 从而更好地对管道外壁缺陷漏磁场进行三维磁偶极子建模。以管道外壁矩形缺陷下表面中心为原点, 缺陷长度方向为 X 轴, 垂直管壁方向为 Z 轴, 缺陷宽度方向为 Y 轴, 建立空间笛卡尔坐标系。管道外壁缺陷检测示意图如图 3 所示。

管壁厚为 h 、缺陷宽为 $2D_x$ 、长为 $2D_y$ 、深为 D_z , 根据

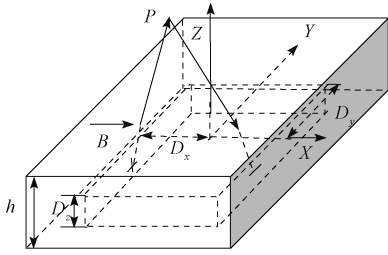


图3 管道外壁缺陷三维坐标示意图

Fig. 3 3D coordinate diagram of defects on outer wall of pipeline

静磁屏蔽原理,磁场穿过管壁产生静磁屏蔽场,管道外壁缺陷漏磁场延管壁缺陷 Z 轴方向管壁穿透,延轴向、周向和径向3个面穿过管道的退磁因子表示如式(7)^[14]。

$$\begin{cases} N_x = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{h\sqrt{h^2 + 4D_x^2 + 4D_y^2}}{4D_x D_y} \\ N_z = \frac{2}{\pi} \arctan \frac{D_y\sqrt{h^2 + 4D_x^2 + 4D_y^2}}{hD_x} \\ N_y = 1 - N_x - N_z \end{cases} \quad (7)$$

式中: N_x 、 N_y 、 N_z 为三轴方向的退磁因子。

漏磁场延深度 Z 方向透过管壁,漏磁场受材料静磁

屏蔽场影响,补偿后的漏磁场 H_{x1} 、 H_{y1} 、 H_{z1} 与原漏磁场 H_x 、 H_y 、 H_z 之间有如下关系:

$$\begin{cases} H_{x1} = H_x e_x (1 - N_x) \\ H_{y1} = H_y e_y (1 - N_y) \\ H_{z1} = H_z e_z (1 - N_z) \end{cases} \quad (8)$$

由式(2)~(4)、(7)、(8)可以得出,在一定范围之内,屏蔽体厚度增加时,屏蔽体内磁源透过管壁的漏磁场减小。漏磁场影响因素较多,永磁体外形和空间距离以及屏蔽体的外形密切相关。管道外缺陷漏磁场可以看作是一个发出相同磁场强度的磁源,而管道内壁则为屏蔽体,模型以规则缺陷为例对其漏磁场进行研究,实际检测中不规则缺陷漏磁场的影响大同小异,主要在积分方向和静磁屏蔽体的形状影响上存在差别,计算思想和本质模型基本相同,可通过本模型继续推演。

2.2 管道外壁缺陷漏磁场建模与矢量合成

管道外壁缺陷漏磁场要穿透管壁,因此对模型计算时引入铁磁屏蔽模型进行补偿。屏蔽体形状与缺陷形状相同。在透过管壁方向产生退磁场(缺陷规格不同屏蔽效应不同,考虑实际缺陷形状选用屏蔽因子),选取屏蔽效应最差效果的退磁系数。由式(2)~(4)、(7)、(8)联立可得到管道外壁缺陷三维磁偶极子解析模型为:

$$\begin{aligned} H_{x1} = & \frac{\sigma_s}{4\pi} \left(\frac{2}{\pi} \arctan \frac{h\sqrt{h^2 + 4D_x^2 + 4D_y^2}}{4D_x D_y} \right) \times \left\{ \arctan \frac{(y + D_y)(z + D_z)}{(x - x_i)[(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} - \right. \\ & \arctan \frac{(y + D_y)z}{(x - x_i)[(x - x_i)^2 + z^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} - \arctan \frac{(y - D_y)(z + D_z)}{(x - x_i)[(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} + \\ & \left. \arctan \frac{(y - D_y)z}{(x - x_i)[(x - x_i)^2 + z^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} H_{y1} = & \frac{\sigma_s}{4\pi} \left(\frac{2}{\pi} \arctan \frac{h\sqrt{h^2 + 4D_x^2 + 4D_y^2}}{4D_x D_y} + \frac{2}{\pi} \arctan \frac{D_y\sqrt{h^2 + 4D_x^2 + 4D_y^2}}{hD_x} - 1 \right) \times \\ & \ln \left\{ \frac{z + D_z + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}}{z + [(x - x_i)^2 + z^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \times \frac{z + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}}{z + D_z + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} H_{z1} = & \frac{\sigma_s}{4\pi} \left(\frac{2}{\pi} \arctan \frac{D_y\sqrt{h^2 + 4D_x^2 + 4D_y^2}}{hD_x} \right) \times \ln \left\{ \frac{y + D_y + [(x - x_i)^2 + z^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}}{y - D_y + [(x - x_i)^2 + z^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \times \right. \\ & \left. \frac{y - D_y + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y - D_y)^2]^{\frac{1}{2}}}{y + D_y + [(x - x_i)^2 + (z + D_z)^2 + (y + D_y)^2]^{\frac{1}{2}}} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

解析模型描述出在磁化场 H_0 中管道外壁缺陷漏磁场与缺陷间的数学关系。漏磁场的空间分布可表示为 $x_i = -D_x$ 处缺陷壁面的正性磁偶极子之和的 $x_i = D_x$ 负性磁偶极子产生影响的矢量和。由图3的坐标关系对缺陷两壁磁荷进行二元积分,并对积分结果进行矢量换算,得到

外壁缺陷表面空间任意场点 $P(x, y, z)$ 处形成的矢量漏磁场模型为:

$$\begin{aligned} H_p = & (H_{x1}(-D_x) - H_{x1}(D_x))e_x + (H_{y1}(-D_x) - \\ & H_{y1}(D_x))e_y + (H_{z1}(-D_x) - H_{z1}(D_x))e_z \end{aligned} \quad (12)$$

通过式(12)正交磁化场的三维磁偶极子建模及矢

量合成,可实现管道外壁缺陷漏磁场分布机理的分析。为管道外壁缺陷漏磁场的描述建立了具有指导意义的基础模型。工程当中缺陷形状各有差异存在于管壁内外表面,此模型建立基于规则矩形缺陷,在内检测过程中其他内表面不规则缺陷磁偶极子模型的差异在于延缺陷深度方向的积分,其磁偶极子理论本质上并无差别。

3 管壁缺陷漏磁场模型计算

管道内外壁一定范围内缺陷漏磁信号的幅值特征参数对不同位置及深度范围内检测的敏感性不同。采用控制变量方式对数学模型分析。

3.1 管道内外壁缺陷漏磁场分布

基于管道内、外壁矩形缺陷的三维解析模型计算,厚度为 10 mm 钢板,缺陷宽度 $2D_x = 4$ mm,长度为 $2D_y = 16$ mm,深度 $D_z = 1.6$ mm。磁化场强度 H_0 为 $180\text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$,管道的相对磁导率 $\mu = 1\ 800$ 。漏磁场检测表面距离 z 设 1 mm,并漏磁场检测范围为沿 X 轴 $-15\sim 15$ mm 范围, Y 轴 $-15\sim 15$ mm 范围,即 $y = -15\sim 15$ mm, $x = -15\sim 15$ mm,

$z = 1$ mm。在管道漏磁内检测工程应用中 X 分量对应于轴向分量, Z 分量对应于径向分量, Y 分量对应于周向分量。利用所建模型求解管道内、外壁缺陷表面漏磁场分布。程序流程如图 4 所示。

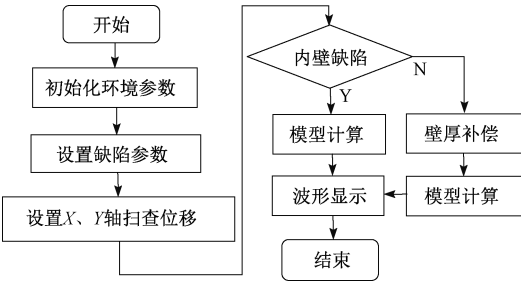


图 4 管道缺陷建模程序流程

Fig. 4 Pipeline defect modeling program flow chart

管道外壁缺陷解析模型式(2)~(4)所得到三维磁偶极子模型结果与内壁解析模型式(9)~(11)求解管道内壁缺陷表面漏磁场的三维磁偶极子模型结果对比,如图 5 所示。

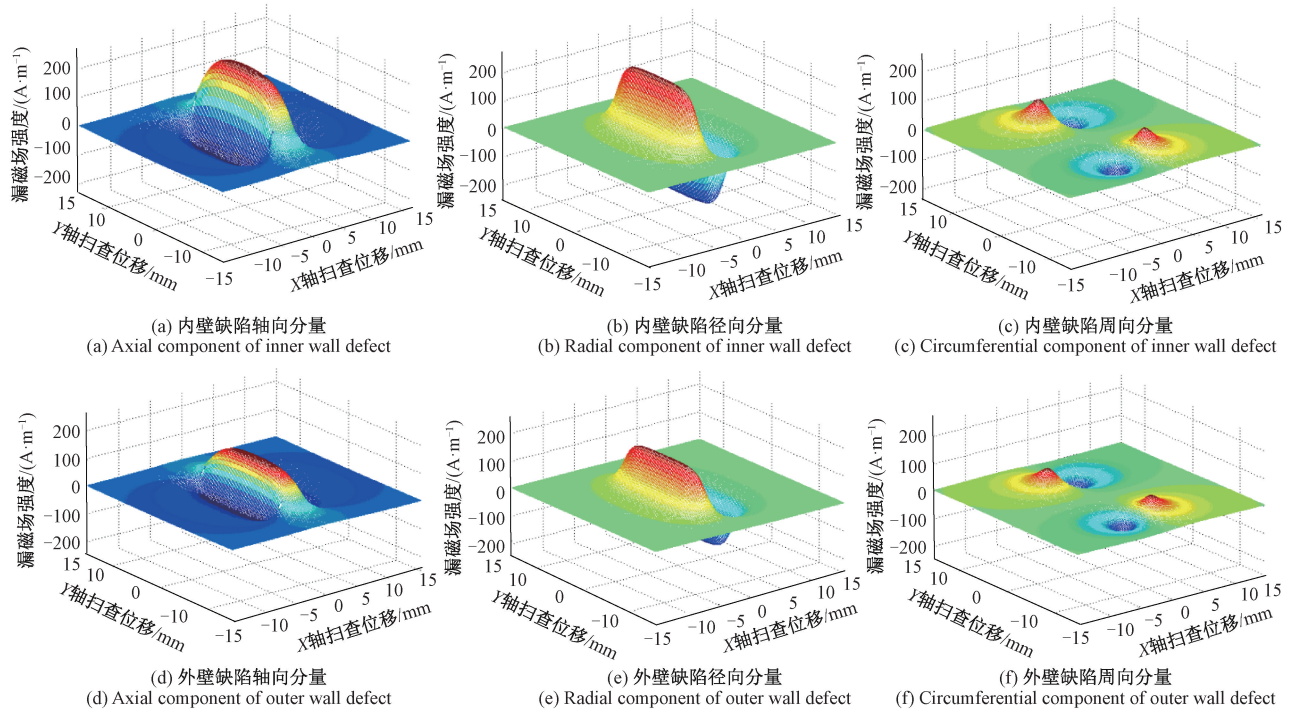


图 5 管道内、外壁缺陷漏磁场三维分布

Fig. 5 Three dimensional distribution of leakage magnetic field of inner and outer wall defects of pipeline

由图 5(a)~(c)对比 5(d)~(f)可以看出下相同尺寸大小的缺陷在管道内外壁的 MFL 检测信号的分布特点。通过模型分析得出管壁对三轴分量均有屏蔽作用。屏蔽因子与屏蔽体形状有关,规则不同的缺陷对三轴的

屏蔽量不同。管道漏磁内检测情况下,管道内壁缺陷漏磁场幅值在三轴方向均大于管道外壁缺陷漏磁场。相同缺陷尺寸,管道内壁缺陷 MFL 检测信号幅值特征参数比管道外壁变化敏感性更高,模型解算信号特征与管道缺

陷 MFL 检测的工程经验相符合,说明所提模型描述管道外壁缺陷的漏磁场分布的正确性。

3.2 管道外壁不同缺陷漏磁场分布

进一步分析管道外壁不同几何尺寸缺陷漏磁分布特征;令缺陷宽度为 20 mm,长度为 20 mm,深度 1.6 mm,管壁厚度 h 从 6 到 14 mm 递增变化,分析过程中磁化方向垂直缺陷,漏磁场检测方向平行于磁化场,检测范围为 $-25 \sim 25$ mm。由于垂直缺陷磁化漏磁场周向分量 H_y 理论上为 0,则只对轴向分量 H_x ,和径向分量 H_z 进行描述并分析模型结果变化规律;利用所建磁偶极子模型分别计算缺陷漏磁场在不同管道壁厚情况下的轴向分量、径向分量;由于不同形状缺陷管壁对漏磁信号影响不同,矩形缺陷轴向和径向的退磁因子, $N_x = N_y$, $N_z = 1 - N_x - N_y$,通过模型计算得到的结果如图 6 所示。

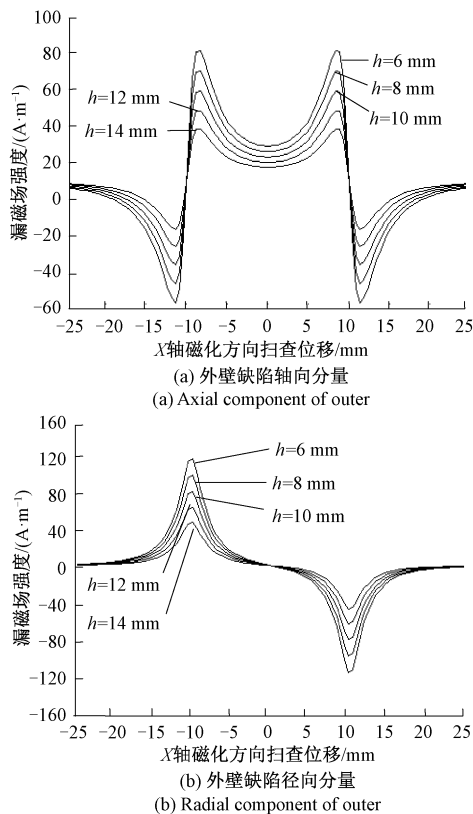


图 6 管道不同壁厚外壁缺陷漏磁场流线

Fig. 6 Streamline diagram of magnetic flux leakage field of outer wall defect of pipeline with different wall thickness

由图 6 可看出,对于管道外壁同一规格缺陷,由于管壁不同厚度的影响,其产生的漏磁场信号的特征参数不同;管道外壁缺陷漏磁场三轴分量随着壁厚增加漏磁场波形趋势不变,漏磁场波峰值与波谷值均呈比例减小;漏磁场信号轴向分量出现两个波峰,呈轴对称状态分布,径向分量呈中心对称状态分布,缺陷检测宽度不变,均在缺

陷边缘处出现波峰或波谷。

计算管道外壁不同宽度缺陷产生的漏磁场,令缺陷宽度 $2D_x$ 从 8 到 16 mm 递增变化,长度 $2D_y$ 为 20 mm,深度 1.6 mm,管壁厚度 h 为 10 mm,同样解算漏磁场信号轴向分量 X ,和径向分量 Y 的空间分布规律,得到的漏磁场空间分布规律曲线如图 7(a)、(b) 所示。

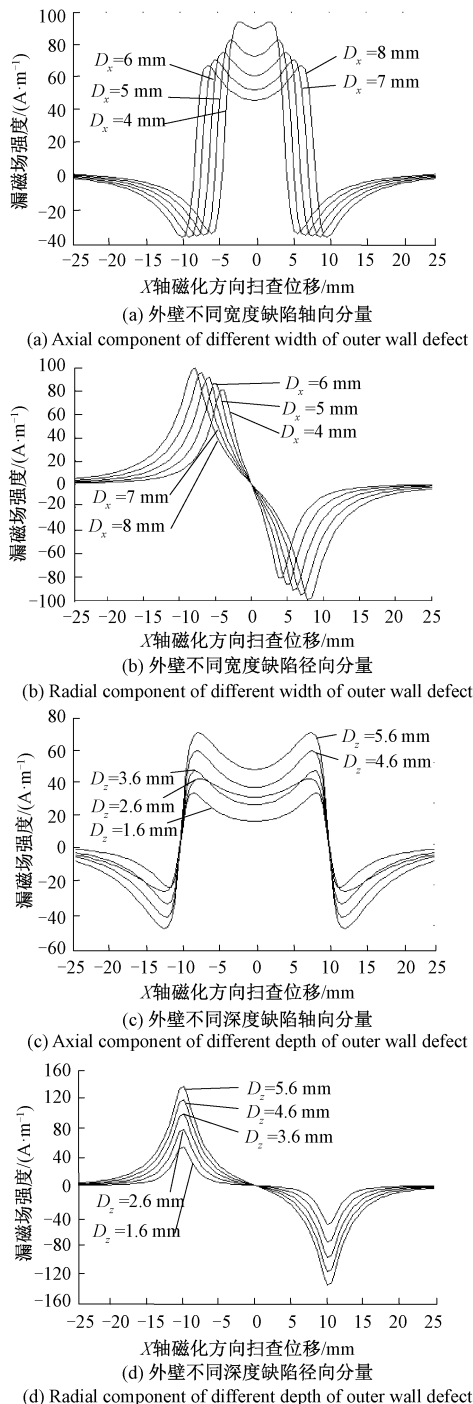


图 7 管道不同尺寸外壁缺陷漏磁场流线图

Fig. 7 Streamline diagram of magnetic leakage field of rectangular defects with different sizes of pipes

计算管道外壁不同深度缺陷产生的漏磁场,取缺陷宽度 $2D_x$ 为 20 mm,长度 $2D_y$ 为 20 mm,深度 1.6 ~ 5.6 mm 递增变化,管壁厚度 h 为 10 mm,同样分析漏磁场信号轴向分量 X 和径向分量 Y 的空间的变化规律,得到的漏磁场空间分布规律曲线如图 7(c)、(d) 所示。

由图 7(a)、(b) 可看出,当管道缺陷宽度增加时漏磁场极值有略微增大,信号极值间距离随之增加;随着缺陷深度增加漏磁场极值增加,但是极值宽度不变。综合分析对比图 6、7 漏磁检测中,看出轴向分量漏磁信号和径向分量漏磁信号与缺陷位置、大小、宽度等呈一定线性关系,相关性又各有侧重。

4 实验结果分析

不同缺陷几何尺寸模型解算结果与工程经验基本一致。验证不同壁厚的管道外壁缺陷三维磁偶极子模型的有效性,实验中采用直流电磁铁控制磁化强度,利用特斯拉计测得磁场磁化强度;通过改变电流控制励磁场大小。实验试件取材与管道相同材料钢板,电火花加工凹槽缺陷,模拟工程检测,进行拖拉实验,完成磁偶极子模型验证。实验试件为长度 600 mm、宽度 60 mm、厚度为 6 ~ 14 mm 变化的钢板,采用电火花切割技术加工缺陷长为 20 mm、宽为 20 mm、深为 1.6 mm,采用频率 1 kHz 的漏磁检测探头,对试件进行 MFL 检测。检测器的磁化场由通直流电的线圈产生,试件处于线圈轴线分正反面依次从左至右通过线圈,探头置于线圈中心位于轴线上,与试件表面距离 1 mm。励磁线圈总匝数为 1 800 匝,在线圈内通入 2.5 A 直流电。实验平台如图 8 所示。

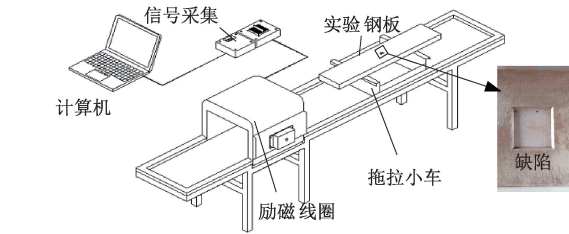


图 8 实验平台
Fig. 8 Experimental platform

与图 6、7 模型计算的缺陷尺寸一致,钢板厚度 h 从 6 变化到 14 mm,依次拖拉钢板试件进行实验,利用漏磁探头(霍尔传感器)检测缺陷表面空间漏磁信号并将磁参量的变化转变为电信号,对获取的漏磁场模拟信号预处理,通过 A/D 转换将漏磁场数字信号输入计算机进行转换处理并存储为文本数据形式。将试验采集的漏磁场数据结果进行处理分析得到结果如图 9 所示。

由图 9 可看出,随着管道壁厚增加管道外壁缺陷漏

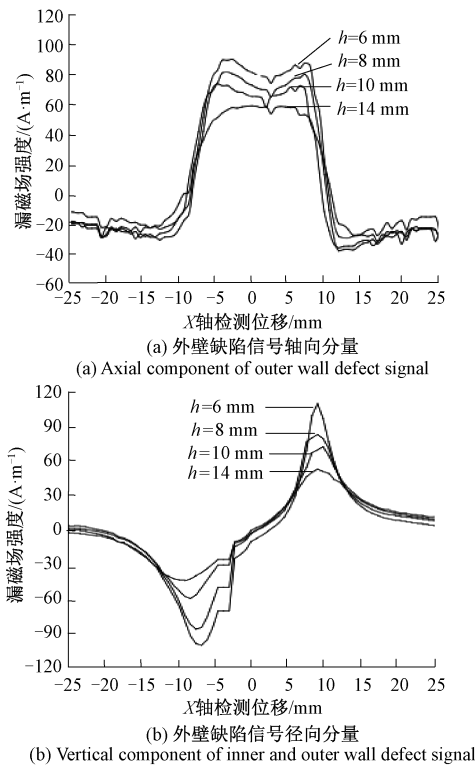


图 9 管道外壁缺陷不同壁厚漏磁场分布
Fig. 9 Leakage magnetic field distribution of different wall thickness of pipeline outer wall defects

磁场信号水平分量、垂直分量均有减小,管壁厚度每增加 2 mm,缺陷漏磁场信号轴向分量峰值差较大约为 $15 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,径向分量峰值差约为 $25 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。为对比模型计算结果与实验结果如表 1 所示,由于实际检测当中励磁场等外界因素影响使得实验数据与计算数据与一定差异,经对比计算数据与实验数据呈一定比例关系,表中 B_x 、 B_y 为不同厚度外壁缺陷漏磁场实验测量所得轴向与径向结果, B_{x1} 、 B_{y1} 模计算结果经对比研究与实验结果误差在 8% 以内;所得漏磁场曲线变化归规律基本一致。

表 1 不同厚度漏磁检测数据与计算数据
Table 1 magnetic flux leakage testing data and calculation data of different thickness

h/mm	B_x/mT	B_y/mT	B_{x1}/mT	B_{y1}/mT
6	93.535	115.137	98.389	119.977
8	80.556	89.346	75.814	92.456
10	69.368	71.268	62.619	76.358
14	53.23	52.267	48.216	58.795

可以看出,管道内外壁模型相应曲线得到的一系列规律都与实验检测结果相符合,并与工程检测经验一致,验证了所提模型描述管壁缺陷漏磁场分布的正确性。由此可以说明对管道外壁磁偶极子三维建模的有效性。

5 结 论

基于磁偶极子模型,研究漏磁信号分布,建立了管道内、外壁缺陷漏磁信号的解析模型,为管道缺陷漏磁场分析和缺陷识别提供了一个重要依据,也为评估管道缺陷检测效果提供了理论保证。基于磁偶极子理论,建立管道内壁缺陷三维解析模型,引入屏蔽因子,补偿模型,建立符合实际外壁缺陷变化规律的管道外壁缺陷漏磁场解析模型;相同尺寸的管道内壁缺陷漏磁场幅值在三轴方向上均大于管道外壁缺陷漏磁场;在一定范围之内随着管道壁厚增加管壁漏磁信号屏蔽量也逐渐增加。模型可描述管道内外壁缺陷漏磁场信号特征,易于推广,后续工作可以考虑从磁化角度、缺陷形状等方面进一步完善模型的适应特性。

参考文献

- [1] 杨理践,耿浩,高松巍.长输油气管道漏磁内检测技术[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1736-1746.
YANG L J, GENG H, GAO S W. Magnetic flux leakage internal detection technology of long oil and gas pipeline [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (8): 1736-1746.
- [2] 唐 莺,潘孟春,罗飞路,等.基于三维场测量的脉冲漏磁检测技术[J]. 仪器仪表学报,2011,32(10):2297-2302.
TANG Y, PAN M CH, LUO F L, et al. Pulsed magnetic flux leakage detection based on three dimensional field measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32 (10): 2297-2302.
- [3] WANG H, AYAKO Y, ROBERT Y, et al. A clustering approach for assessing external corrosion in a buried pipeline based on hidden Markov random field model[J]. Structural Safety, 2015, 56: 18-29.
- [4] SHI Y, ZHANG CH, LI R, CAI M L, et al. Theory and application of magnetic flux leakage pipeline detection[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2015, 15(12): 31036-31055.
- [5] GWAN S P, SANG H P. Analysis of the velocity-induced eddy current in MFL type NDT[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 663-666.
- [6] LENG J C, XING H Y, ZHOU G Q, et al. Dipole modelling of metal magnetic memory for V-notched plates[J]. INSIGHT, 2013, 55(9): 498-503.
- [7] 廖昌荣,廖峥,韩亮,等.铁磁构件表层裂纹漏磁场分析及检测系统[J]. 重庆大学学报,2012,35(10):76-84.
LIAO CH R, LIAO ZH, HAN L, et al. Magnetic leakage field analysis and detection system for surface cracks of ferromagnetic components [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35 (10): 76-84.
- [8] 李岩松,刘启智,刘君,等.基于磁偶极子模型的材料缺陷漏磁检测正演问题的单元积分计算方法[J]. 电工技术学报,2017,32(21):176-185.
LI Y S, LIU Q ZH, LIU J, et al. Element integral calculation method for forward problem of MFL detection of material defects based on magnetic dipole model [J]. Acta Electrotechnics, 2017, 32 (21): 176-185.
- [9] 吴振宁,汪力行,刘金海.基于空间映射的匀速采样漏磁检测复杂缺陷重构方法[J]. 仪器仪表学报,2018,39(7):164-172.
WU ZH N, WANG L X, LIU J H. Reconstruction method of complex defects in MFL detection based on spatial mapping [J]. Journal of Instrumentation, 2018, 39 (7): 164-172.
- [10] ZHANG H, LIAO L, ZHAO R Q, et al. The non-destructive test of steel corrosion in reinforced concrete bridges using a micro-magnetic sensor [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1439.
- [11] 吴德会,刘志天,王晓红,等.表面缺陷的方向性对漏磁场分布的影响[J]. 物理学报,2017,66(4):266-276.
WU D H, LIU ZH T, WANG X H, et al. The influence of the directionality of surface defects on the distribution of leakage magnetic field [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66 (4): 266-276.
- [12] 徐志远,肖奇.基于脉冲远场涡流的管道缺陷外检测与定量评估[J]. 电子测量与仪器学报,2019,33(2):80-87.
XU ZH Y, XIAO Q. External detection and quantitative evaluation of pipeline defects based on pulsed far-field eddy current [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (2): 80-87.
- [13] 周建军,林春生,胡叶青,等.用于磁探测的铁磁屏蔽体的厚度设计[J]. 兵工学报,2012,33(12):1498.
ZHOU J J, LIN CH SH, HU Y Q, et al. Thickness design of ferromagnetic shield for magnetic detection [J]. Journal of Military Engineering, 2012, 33 (12): 1498.
- [14] 郭铁茂.非旋转椭圆球形磁体退磁因子新求法[J]. 磁性材料及器件,1992(1):22-27.
GUO T M. A new method for demagnetization factor of non rotating elliptical spherical magnet [J]. Magnetic Materials and Devices, 1992 (1): 22-27.
- [15] 何永周.永磁体外部磁场的非均匀性研究[J]. 物理学报,2013,62(8):145-151.
HE Y ZH. Study on inhomogeneity of external magnetic

field of permanent magnet [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62 (8): 145-151.

- [16] 焦敬品, 常予, 李光海, 等. 铁磁构件内外表面裂纹低频漏磁检测技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(8): 1808-1817.

JIAO J P, CHANG Y, LI G H, et al. Research on low frequency magnetic flux leakage detection technology of inner and outer surface cracks of ferromagnetic components [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (8): 1808-1817.

作者简介



杨理践, 1981 年于沈阳工业大学获得学士学位, 1984 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为油气管道内检测技术、无损检测技术。

E-mail: yanglijian888@163.com

Yang Lijian received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1981, M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. Now he is a professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include in-detection technology of oil and related theory, nondestructive testing technology.



梁成壮, 2013 年于沈阳工业大学获学士学位, 2020 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 主要研究方向为管道漏磁内检测技术。

Email: 502914162@qq.com

Liang Chengzhuang received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2013, M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2020. His main research interest includes magnetic flux leakage detection technology of pipelines.



高松巍 (通信作者), 1982 年于沈阳工业大学获得学士学位, 1999 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为沈阳工业大学教授, 主要研究方向为长输油气管道内检测技术及相关理论、无损检测技术。

Email: gaosongwei888@163.com

Gao Songwei (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 1981, M. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1984. Now she is a professor at Shenyang University of Technology. Her main research interests include internal inspection technology and related theory of long-distance oil and gas pipeline, and non-destructive testing technology.