

# 利用局部磁滞回线特性的无损检测新方法<sup>\*</sup>

吴德会, 李雪松, 黄一民, 杨秀森, 刘志天

(厦门大学机电工程系 测试控制技术研究所 厦门 361005)

**摘要:** 提出了一种利用局部磁滞回线特性的无损检测新方法。首先, 研究了钢板内部缺陷对其动态磁导率分布的影响规律。其次, 探讨了变励磁条件下局部磁滞回线的形成机理, 并建立了动态磁导率与局部磁滞回线之间的关系模型。再次, 根据所建立的关系模型, 提出了一种利用局部磁滞回线特性实现对钢板缺陷进行无损检测的新方法, 并给出检测系统的实现方案。最后, 通过3D有限元法对实验模型进行仿真, 并开展了一系列的物理实验进行了验证。结果表明, 缺陷对钢板动态磁导率分布的影响显著, 可利用局部磁滞回线特性来检测磁导率变化, 从而达到检测内部缺陷, 甚至背面缺陷的目的。所提新方法无需检测静态漏磁场磁感应强度, 因此有效减小了磁化器体积。

**关键词:** 磁滞回线; 漏磁检测; 动态磁导率; 缺陷; 变励磁

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 nondestructive test method with empirical research using local hysteretic loop characteristics

Wu Dehui, Li Xuesong, Huang Yimin, Yang Xiumiao, Liu Zhitian

(Testing and Controlling Research Institute, Department of Electronic Mechanical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** A new nondestructive test method based on local hysteretic loop characteristics is proposed in this paper. First of all, the influence law of the steel plate internal defects on the dynamic permeability distribution is studied, and the formation mechanism of the local hysteretic loop under the variable magnetic excitation condition is discussed. Secondly, the relation model between the dynamic permeability and local hysteretic loop is established. Furthermore, according to the proposed relation model, a new nondestructive test method of steel plate defects based on the local hysteretic loop characteristics is proposed, and the implementation scheme of the test system is given. Finally, the 3D finite element method was used to simulate the experiment model and a series of physical experiments were carried out to verify the proposed method. The results show that the steel plate defects have significant influence on the dynamic permeability distribution; the local hysteretic loop characteristics can be used to detect the permeability variation, and achieve the goal of detecting the internal defects of the steel plate, even the defects on the back of the steel plate. The proposed new method does not require to test the static leakage magnetic field, which reduces the volume of the magnetizing apparatus effectively.

**Keywords:** hysteresis loop; magnetic flux leakage detection; dynamic permeability; defect; variable magnetic excitation

## 1 引言

在石化工业中, 因油气输送管道、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<sup>[1]</sup>。漏磁检测(magnetic flux leakage, MFL)法作为一种电磁无损检测方法, 具有无污染、不需耦合剂、快速、

高可靠性等优点, 已被广泛应用于石油、天然气及化工等行业中铁磁性材料(主要是钢材)的无损检测<sup>[2-3]</sup>。交变漏磁检测技术(alternating magnetic flux leakage, AMFL)是近些年发展的一种新型检测方法, 它通过交流电磁场激励铁磁性材料并产生磁场泄漏。Kawakami M和Kokubu A提出实用的检测方钢的AMFL法, 在U形磁轭探头基础上驱动4~32 kHz的高频激励, 并实现了产品化<sup>[4]</sup>; 李伟等人<sup>[5]</sup>

收稿日期: 2015-04 Received Date: 2015-04

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(51177141)、中央高校基本科研业务项目(2010121041)、航空基金(2012ZD68003)项目资助

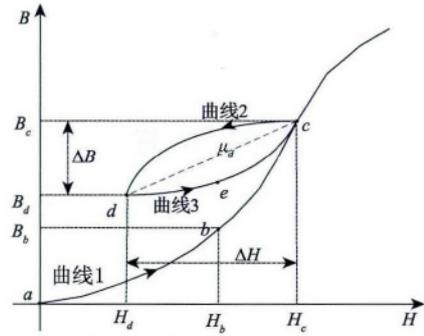
研究了 U 型 ACFM 探头精确建模和实验测试; Gotoh Y 等人<sup>[6-7]</sup>使用交流和直流漏磁结合技术实现对厚壁管外壁缺陷的检测,并讨论了利用交流 MFL 法检测相邻的两个缺陷的区分问题;陈水平等人<sup>[8]</sup>利用极低频的微弱交变场来检测铁磁性管道,扩展了叠接相加法的应用范围;宋凯等人<sup>[9]</sup>对 U 形磁轭探头的 AMFL 法机理进行研究,指出 U 形磁轭探头检测纵向裂纹时其机理并非源于交流漏磁效应。对于传统的 MFL 技术,AMFL 方法产生的交流检测信号稳定、无零点漂移、便于后续放大处理及分析,且具有对内表面的微小缺陷敏感度高的优势。但是,AMFL 中不可避免的趋肤效应影响该技术对厚壁钢板内部、外表面(外侧)缺陷的探测能力,因此其推广应用又受到明显的限制。

铁磁材料除了具有高的磁导率外,另一重要的磁性特点就是“磁滞”(hysteresis)。利用铁磁材料的高磁导率特性,人们发明了漏磁检测技术。而对于铁磁材料的磁滞特性,在无损检测领域进行利用的研究尚比较鲜见。本文定义了“局部磁滞回线”的概念,利用材料的磁滞特性来反映铁磁性材料(本文中为钢板)动态磁导率的变化。新方法先通过直流/永磁磁场对钢板进行浅度的偏置磁化,钢板内部(甚至背面)的缺陷将改变其磁通分布,并进而影响材料内表面的动态磁导率分布;再利用变励磁的磁滞回线特性发现钢板动态磁导率的变化,从而达到检测缺陷的目的。

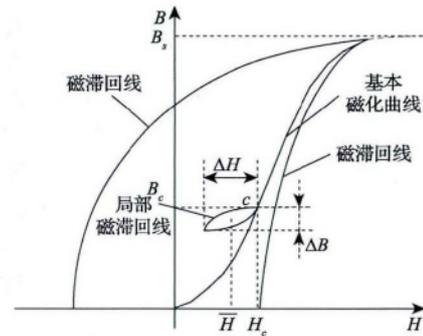
## 2 局部磁滞回线

磁滞是铁磁性材料(如钢板)的磁感应强度  $B$  随磁场强度  $H$  变化时特有的现象。不妨对 MFL 技术中,钢板被磁化的动态过程进行分析。首先,设钢板最初处于中性状态下,即对应图 1(a)中所示的  $a$  点。当对该钢板实施直流偏置磁化  $\bar{H}$  时,则钢板的磁化过程沿着磁化曲线 1 变化,并稳定在  $b$  点 ( $H_b, B_b$ )。若在  $\bar{H}$  的基础上再施加一个峰峰值为  $\Delta H$  的变励磁  $\tilde{H}$ ,则磁化过程可达到最大点  $c$  点。但在退磁时,由于磁滞现象的存在,其磁感应强度  $B$  将沿着比原来途径稍高的一段曲线到达最小点  $d$  点,如曲线 2 所示,即高磁滞回线(high hysteresis loop)。当  $H$  再由最小点  $d$  往回运动时,又由于磁滞作用,  $B$  将沿如曲线 3 所示低磁滞回线(low hysteresis loop)回到最大点  $c$  点。由于所施加  $\tilde{H}$  为往复均匀变化,因此被测钢板中实际磁化曲线为图 1(a)中曲线 2 和曲线 3 沿箭头方向而形成的“磁滞环”。

由于该磁滞环只是在偏置磁场  $\bar{H}$  条件下因励磁往复波动而造成的“小闭合线”。其与常规物理学中“磁滞回线”的对比分布如图 1(b)所示。为区别两者,在本文中称该小闭合线为“局部磁滞回线”(local hysteresis loop)。图中  $B_s$  表示饱和磁感应强度。



(a) 直流偏置条件下的动态磁化过程分析  
(a) Analysis of the dynamic magnetization process under DC bias



(b) 局部磁滞回线分布示意  
(b) The distribution of the local hysteresis loop

图 1 局部磁滞回线产生的原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of local hysteresis loop generation

从图 1 中不难看出,局部磁滞回线的本质是叠加了偏置磁化强度  $\bar{H}$ ,使铁磁性材料的实际磁滞回线发生了偏移和变形,而铁磁性材料的磁导率  $\mu$  也会产生对应变化。磁导率  $\mu$  为磁化强度  $H$  的函数,可通过式(1)进行计算:

$$\mu = \mu(H) = B/H \tag{1}$$

在局部磁滞回线中,由于叠加的变励磁  $\tilde{H}$  作用,实际磁场强度  $H$  和磁感应强度  $B$  均会围绕直流偏置点变化,对应钢板磁导率  $\mu$  亦产生波动。不妨对式(1)两边进行微分,则有:

$$d\mu = \frac{H \cdot dB - B \cdot dH}{H^2} \tag{2}$$

再由全微分和偏微分的关系,对式(2)进行整理可得如下偏微分表达:

$$\frac{dB}{dH} = \frac{B}{H} + H \frac{d\mu}{dH} = \mu(H) + H \frac{d\mu(H)}{dH} \tag{3}$$

定义动态磁导率  $\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH}$ ,其中真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ 。由式(3)右侧可以看出,  $\mu_d$  为磁场强度  $H$  的单变量函数,不妨记作  $\mu_d(H)$ 。

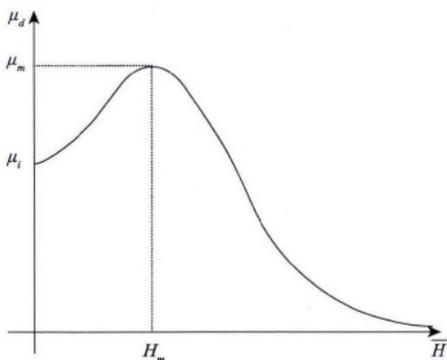
对于图 1 中所示的磁化过程,由于所施加的变励磁  $\tilde{H}$  幅值  $\Delta H$  很小,则可近似认为在局部磁滞回线内部,动态磁导率  $\mu_d$  基本保持  $\mu_d(\bar{H})$  不变。则根据动态磁导

率  $\mu_d$  的定义, 有式 (4) 近似成立:

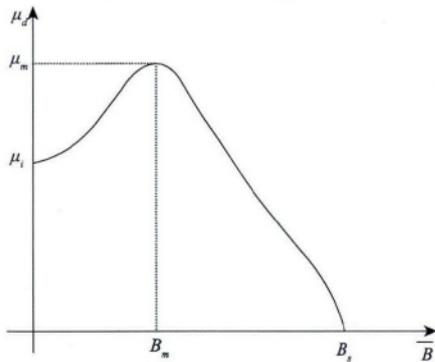
$$\Delta B \approx \mu_0 \mu_d(\bar{H}) \Delta H \quad (4)$$

此处的  $\Delta B$  和  $\Delta H$  可理解为图 1 (a) 中所示局部磁滞回线的最大变化范围, 因此局部磁滞回线的形态主要由其偏置点  $\bar{H}$  对应的动态磁导率  $\mu_d(\bar{H})$  决定。

铁磁性材料的动态磁导率  $\mu_d$  直接受直流偏置磁场强度  $\bar{H}$  的影响。当磁场强度  $\bar{H}$  增强到一定程度时, 磁感应强度  $\bar{B}$  对应增加并逐渐趋于饱和。此时, 动态磁导率  $\mu_d$  呈现下降趋势, 并趋近于空气磁导率 1。实践证明, 铁磁性材料的动态磁导率  $\mu_d$  总体上随  $\bar{H}$  或  $\bar{B}$  的增大呈现先小量上升再降低, 下降的陡峭程度取决于材料的成分、形状、气隙等。图 2 中给出了基本磁化曲线条件下, 铁磁性材料的  $\mu_d$  随饱和磁化过程的变化规律<sup>[10]</sup>。



(a) 动态磁导率  $\mu_d$  与磁场强度  $H$  的关系曲线  
(a) The relation curve of  $\mu_d$  vs.  $H$



(b) 动态磁导率  $\mu_d$  与磁感应强度  $B$  的关系曲线  
(b) The relation curve of  $\mu_d$  vs.  $B$

图 2 动态磁导率随饱和磁化过程的变化规律

Fig. 2 The change rule of dynamic  $\mu_d$  along with the saturation magnetization process

### 3 利用局部磁滞回线的缺陷检测原理

#### 3.1 检测系统结构

图 3 中给出了一个利用局部磁滞回线特性的无损检测的原理示意结构。其中磁化器采用高磁导率的铁氧体 U 形磁轭, 被测对象为钢板。不同于常规 MFL 系统, 本

文所提新结构的磁路包含有 2 个部分, 一个是均匀往复的变励磁磁路, 另一个是钢板内部的直流偏置磁路。

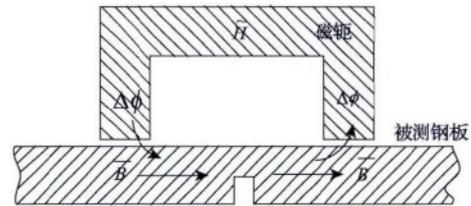


图 3 利用局部磁滞回线特性的检测原理示意图

Fig. 3 The detection principle diagram using the local hysteresis loop characteristic

如图 3 所示, 变励磁磁路  $\bar{H}$  可由绕在磁轭上的激励线圈产生, 励磁强度  $\Delta H$  可通过激励电流  $\Delta i$  的幅值进行调整。其中,  $\Delta i$  采用标准三角波形, 使得正向磁化和反向退磁所用时间相等。直流偏置磁路  $\bar{B}$  可用永磁铁产生, 属于 MFL 技术的常规手段, 本文在此不再赘述。

在这种情况下, 钢板内部(甚至背面)缺陷的作用仅是改变钢板磁通密度  $B$  分布, 并进而影响动态磁导率  $\mu_d$  分布。如图 4 (a) 中所示, 钢板无缺陷时,  $\bar{B}$  在钢板内分布均匀。不妨通过调整磁化强度使钢板磁通密度达到  $B_m$ , 即动态磁导率  $\mu_d$  为  $\mu_m$ 。若钢板存在缺陷, 磁通被迫绕开缺陷, 则造成缺陷附近材料的磁通密度  $\bar{B}$  明显增加<sup>[11-13]</sup>。

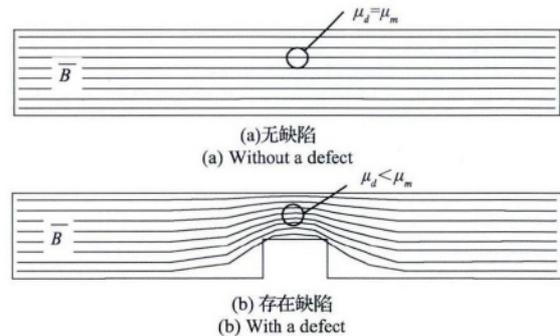


图 4 缺陷对钢板动态磁导率分布的影响示意

Fig. 4 The influence of the steel plate defect on the distribution of dynamic permeability

常规 MFL 技术中, 往往关注因缺陷造成磁通畸变而引发的泄漏, 即漏磁场。但是在本文中, 则关注因磁通畸变而导致缺陷附近的局部动态磁导率  $\mu_d$  的变化。如图 4 (b) 所示, 缺陷造成附近材料的磁通密度  $B$  明显增大, 并导致对应动态磁导率  $\mu_d$  呈下降趋势, 即有  $\mu_d < \mu_m$ 。这样, 通过  $\mu_d$  的桥梁作用, 使缺陷与局部磁滞回线形态之间建立了“数学关联”。

#### 3.2 检测机理分析

对于如图 3 中所示的检测结构, 不妨设变励磁线圈的匝数为  $N$ , 激励电流 (三角波)  $\Delta i$  保持恒定。则根据

安培环路定律和磁路欧姆定律,该变励磁磁路的磁通势  $F_m$  可用式(5)进行计算:

$$F_m = N\Delta i = \Delta\phi R_m \quad (5)$$

式中:  $\Delta\phi$  为变励磁磁通,  $R_m$  为变励磁回路的总磁阻,  $\Delta i$  大小为三角波激励电流的峰峰值。

由于匝数  $N$  和电流  $\Delta i$  均为常量,则磁通势  $F_m$  恒定,则有:

$$\Delta\phi = N\Delta i/R_m \quad (6)$$

整个变励磁回路由2段构成,一段是磁轭磁路,另一段是被测钢板磁路。根据磁路的基尔霍夫定律,可对磁势进行叠加计算,则有:

$$F_m = \Delta H_y L_y + \Delta H_s L_s \quad (7)$$

式中:  $\Delta H_y$  磁轭内的变励磁磁场强度,  $L_y$  为磁轭内磁路的等效长度,  $\Delta H_s$  为被测钢板内的变励磁磁场强度,  $L_s$  为钢板内磁路的等效长度。

根据动态磁导率  $\mu_d$  的定义,分别对磁轭和被测钢板的磁场强度  $\Delta H_y$  和  $\Delta H_s$  进行计算:

$$\Delta H_y = \frac{\Delta B_y}{\mu_0 \mu_{dy}}, \Delta H_s = \frac{\Delta B_s}{\mu_0 \mu_{ds}} \quad (8)$$

式中:  $\Delta B_y$  为磁轭内的变励磁磁感应强度,  $\mu_{dy}$  为磁轭的动态磁导率,  $\Delta B_s$  为被测钢板内的变励磁磁感应强度,  $\mu_{ds}$  为钢板的动态磁导率。

磁轭内的变励磁磁通量  $\Delta\phi$  亦可通过  $\Delta B_y$  进行计算,即有:

$$\Delta\phi = \Delta B_y S_y \quad (9)$$

式中:  $S_y$  为磁轭中等效的磁路截面积。将式(8)、(9)代入式(7)并整理可得:

$$\Delta B_s = \left( F_m - L_y \frac{\Delta B_y}{\mu_0 \mu_{dy}} \right) \frac{\mu_0 \mu_{ds}}{L_s} = \left( N\Delta i - L_y \frac{N\Delta i}{R_m S_y \mu_0 \mu_{dy}} \right) \frac{\mu_0 \mu_{ds}}{L_s} = N\Delta i \left( \frac{\mu_0 \mu_{ds}}{L_s} - \frac{L_y \mu_{ds}}{R_m S_y L_s \mu_{dy}} \right) \quad (10)$$

由于磁轭的动态磁导率一般远大于被测钢板,即  $\mu_{dy} \gg \mu_{ds}$ 。而  $R_m$ 、 $S_y$ 、 $L_s$ 、 $L_y$  均为定值,因此可对式(10)进行简化计算:

$$\Delta B_s \approx N\Delta i \frac{\mu_0 \mu_{ds}}{L_s} \quad (11)$$

但被测钢板内的  $\Delta B_s$  是难以直接测量的,需要通过间接测量进行评估。由式(6)可知,磁化器产生的变励磁磁通  $\Delta\phi$  近似不变,而  $\Delta\phi$  的回路主要由钢板磁通和空气磁通两部分并行构成,即有:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_s + \Delta\phi_a \quad (12)$$

式中:  $\Delta\phi_s$  表示钢板内部的变励磁磁通,  $\Delta\phi_a$  为钢板近表面空气中的变励磁磁通。

很明显,  $\Delta\phi_s$  和  $\Delta\phi_a$  是互补的。若被测钢板存在缺陷,必然会造成  $\Delta\phi_s$  下降,而  $\Delta\phi_a$  对应上升。因此对  $\Delta\phi_a$

变化量进行监测,可实现对  $\Delta B_s$  的间接评估。由式(12)进一步展开,可得:

$$\Delta B_s = \frac{1}{S_s} (\Delta\phi - \Delta B_a S_a) \quad (13)$$

式中:  $S_s$  表示钢板内部等效的磁路截面积,  $S_a$  为周边空气中磁路等效截面积。

近表层空气中的磁感应强度  $B_a$  可由磁传感器构成的检测系统进行测量,不妨记检测系统的电压输出为  $U$ ,其与  $B_a$  的函数关系记为  $B_a = B(U)$ 。则变励磁磁感应强度  $\Delta B_a$  满足:

$$\Delta B_a = B'(U) \Delta U \quad (14)$$

再将式(11)、(13)及(14)代入式(4),可对基于局部磁滞回线形态的动态磁导率  $\mu_d$  进行计算:

$$\mu_d = \frac{L_s}{\mu_0 S_s} \left( \frac{1}{R_m} - \frac{B'(U) S_a}{N\Delta i} \Delta U \right) \quad (15)$$

式中:  $\mu_0$ 、 $L_s$ 、 $S_s$ 、 $R_m$ 、 $N$ 、 $S_a$ 、 $\Delta i$  均为材料特性或实验参数,测试过程中均为常量。现有的磁场检测仪器或设备都可以达到较高的线性度,可近似认为检测仪输出  $\Delta U$  与被测量  $\Delta B_a$  是线性变化的,即  $B'(U)$  保持定值。不妨记

$a = \frac{L_s}{\mu_0 S_s R_m}$ ,  $b = \frac{L_s B'(U) S_a}{\mu_0 S_s N \Delta i}$ ,则式(15)中的动态磁导率  $\mu_d$  计算式可简化为:

$$\mu_d = a - b\Delta U \quad (16)$$

从式(16)可以看出,动态磁导率  $\mu_d$  仅受变励磁的测量结果  $\Delta U$  影响。因此,与常规 MFL 方法不同,所提新方法无需检测近表层空气中的静态漏磁场磁感应强度。

### 4 实验平台的搭建

所构建的实验平台主要包括以下几个部分:被测钢板、U形磁轭、永磁体(偏置磁化)、变励磁线圈、接收线圈、带通滤波及信号处理电路。实验平台的拓扑结构如图5所示。

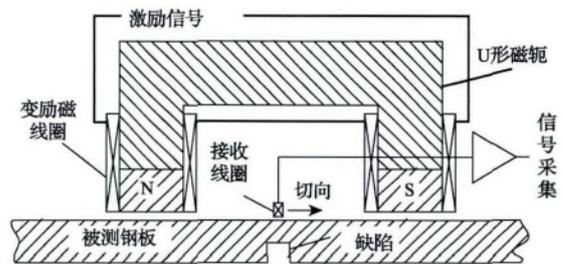


图5 利用局部磁滞回线特性的实验平台拓扑结构  
Fig.5 The topologic structure of the experiment platform using the local hysteresis loop characteristic

选用2块相同的Q235钢板作为实验对象,2块实验钢板外形尺寸均为400 mm × 200 mm × 4 mm,其中一块保持完整(简称完整钢板),另一块通过机械加工手段在钢板中

部制造凹槽作为人工缺陷(简称缺陷钢板),缺陷的外形尺寸为  $2.5\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。U形磁轭选择高磁导率的铁氧体材料,其外形尺寸为  $160\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 。在 U形磁轭极靴上安装 N32 钕铁硼永磁体(如图 5 中所示),形成偏置磁化的磁路,其厚度为  $5\text{ mm}$ 。

变激励线圈采用双线圈对称性结构,两组线圈之间串联构成,线圈采用线径为  $1\text{ mm}$  的漆包线各在骨架上绕制 20 匝,并分别对称安装于 U形磁轭的两个极靴上。由于加载于两组变线圈激励电流  $\Delta i$  相位相反,故其产生的空间磁场在检测点(一般设置为磁轭中心面位置上)方向相反,相互削减达到自差分的效果,可有效减小变励磁线圈产生的电磁干扰对检测结果的影响<sup>[14]</sup>。

激励信号任意波形发生器 DG-2041A 产生,并使用 TDA7293 构成的并联 BTL 型 350W 功放板进行可控增益放大。本实验中选用微型接收线圈作为检测元件来拾取变励磁的磁感应信号(切线方向)。检测元件的输出信号经过带通滤波和数据采集电路进行处理,提取信号(三角波)的峰峰值作为模型(16)分析的依据。所搭建的实际物理平台如图 6 所示。

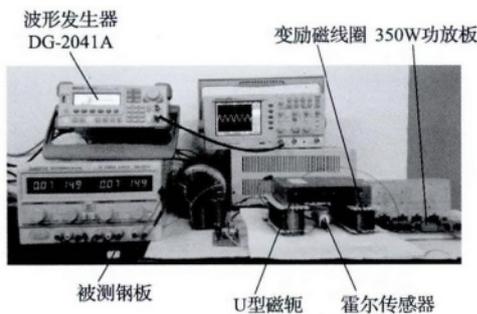


图 6 新方法的实际物理实验平台

Fig. 6 The physical experiment platform for the new method

## 5 仿真与实验

### 5.1 钢板动态磁导率变化特性的 3D 有限元仿真

为分析偏置磁化条件下,缺陷对钢板内部磁通密度和动态磁导率分布的影响特性,选择有限元分析软件 ANSYS 中的 EMAGE 模块对新方法的实验平台进行三维仿真<sup>[15]</sup>。三维模型采用对称建模方式,主要包括:U形磁轭、永磁体、变励磁线圈、缺陷和钢板等单元,具体仿真模型结构如图 7 所示。三维模型中建立两块外形尺寸均为  $400\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 4\text{ mm}$  的钢板模型,其中一块钢板保持完整,另一块钢板在其中部建立一个方条形槽,得到缺陷钢板模型,缺陷外形尺寸为  $2.5\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ;U形磁轭模型的外形尺寸为  $160\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ ,永磁体(外形尺寸  $30\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ )紧贴在 U形磁轭的两极,与钢板之间的提高高度设置为  $1\text{ mm}$ ;变励磁线圈模型外形尺寸为  $40\text{ mm} \times$

$60\text{ mm} \times 57.5\text{ mm}$ ,其转角处采用圆弧建模<sup>[16-17]</sup>。

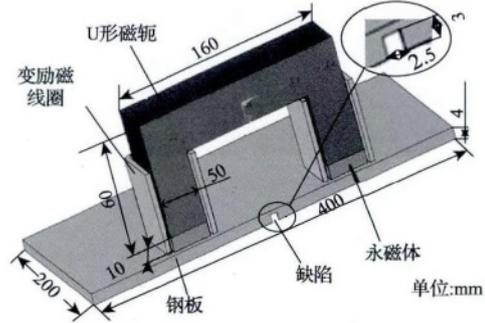


图 7 变励磁检测的三维模型

Fig. 7 3D model for the variable magnetic excitation test

为使钢板在该偏置磁场条件下被浅度磁化,模型中永磁体所产生的磁通密度被设置为  $1.6\text{ T}$ ,变励磁线圈中施加的三角波激励信号峰峰值  $100\text{ mV}$ 、频率为  $25\text{ Hz}$ 。选择 ANSYS 中的 solid117 单元对所建立的模型进行三维有限元求解,再使用 ANSYS 中的 GUI 方式对有限元求解结果进行后处理,得到完整钢板和缺陷钢板磁通密度  $B$  截面分布的等值云图分别如图 8(a)和(b)所示。

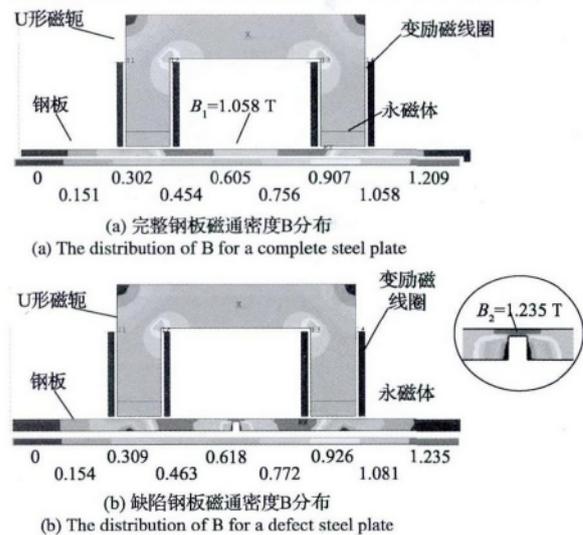


图 8 钢板内部磁通密度  $B$  分布

Fig. 8 The distribution of  $B$  in steel plate

对比图 8(a)和 8(b)可以看出,完整钢板内部的磁通密度  $B$  分布相对均匀,中心磁通密度  $B_1$  为  $1.058\text{ T}$ ;而缺陷钢板内部的磁通密度产生畸变,在缺陷处的局部磁通密度  $B_2$  达到  $1.235\text{ T}$ ;造成该差异的主要原因是,缺陷导致材料的磁阻增加,一部分磁通被迫绕过缺陷,使得在相应位置的磁通密度增加,即  $B_1 < B_2$ 。

再对磁化特性曲线进行差分数值计算,可得到完整钢板和缺陷钢板内部动态磁导率  $\mu$  截面分布的等值云图(主要截取钢板部分),分别如图 9(a)和(b)所示。

由图 9 不难看出,完整钢板中的动态磁导率  $\mu_1$  分布

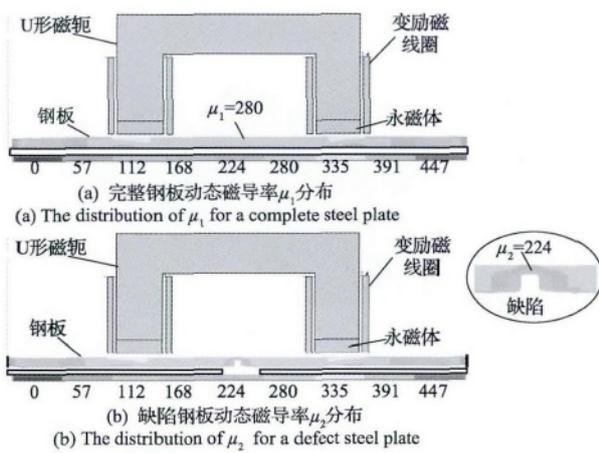


图9 钢板内部动态磁导率  $\mu$  分布  
Fig. 9 The distribution of  $\mu$  in steel plate

相对均匀,其值约为 280;但在缺陷钢板中,磁通密度对动态磁导率分布的影响显著,缺陷附近的动态磁导率  $\mu_2$  明显减小至 224,如图 9(b) 所示。该仿真结果表明,在偏置磁化场作用下,缺陷对钢板动态磁导率分布的影响明显,因此可利用该特性对缺陷进行探测与评价。

5.2 物理实验

在图 6 所示的平台上开展实际物理实验。实验时,使用任意波形发生器 DG-2041A 产生峰峰值 100 mV、频率 25 Hz 的低频标准三角波激励信号,其波形如图 10 中曲线(a) 所示。该激励信号经由并联 BTL 型功率板进行放大,并加载到对称变励磁线圈的两端。利用置于 U 形磁轭两极中间的接收线圈检测变励磁磁感应检测信号  $\Delta U$ ,该接收线圈与被测钢板表面距离保持为 1 mm。

本文方法对所施加变励磁的增益不敏感,达到接收线圈探测精度要求即可。实验时,通过激励电流  $\Delta i$  调整变励磁的增益,并控制在常规漏磁检测所要求局部饱和磁化强度的 5% 左右。在上述实验条件下,分别针对完整钢板和缺陷钢板进行实验,测得的变励磁检测电压输出结果分别如图 10 中曲线 b 和曲线 c 所示。

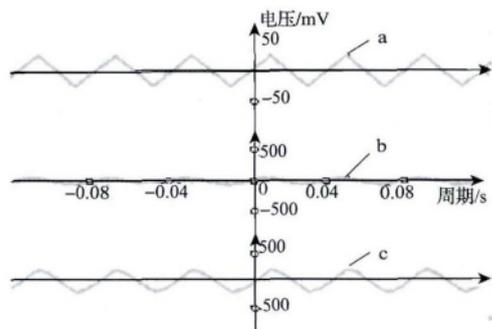


图 10 变励磁检测结果对比图  
Fig. 10 The comparison diagram of the variable magnetic excitation test results

从图 10 可以看出,对于标准的三角波激励信号,实际检测线圈探测的输出波形已发生了明显的畸变,表现为:三角波尖角变得相对平缓,整个输出波形中部相对滞后于激励。这主要是被测钢板和 U 形磁轭的磁滞作用所致(非线性影响)。再使用数据采集卡提取变励磁检测输出,分别绘制完整钢板和缺陷钢板检测电压  $U$  随变励磁强度变化  $\Delta H$  的关系曲线,如图 11 所示。

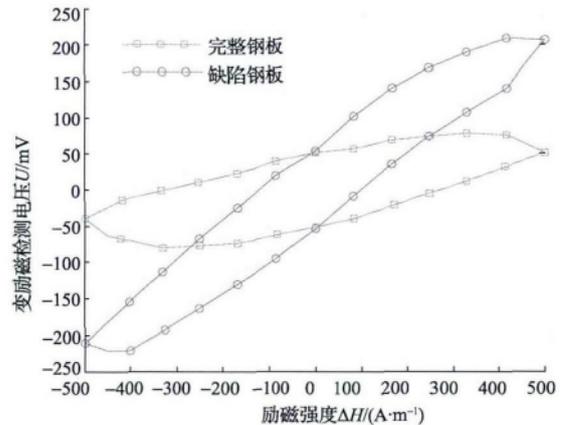


图 11 检测信号随变励磁强度变化的关系曲线  
Fig. 11 The relation curve of the detection signal along with the variable magnetic excitation intensity

对比图 11 中两个关系曲线的分布可以看出,无论是完整钢板还是缺陷钢板,在对称三角波激励信号的作用下,正半周期和负半周期的磁化曲线并不重叠,均呈现为一个闭合的环。因此,铁磁性材料的“局部磁滞回线”在实际变励磁条件下确实存在。

观察图 11 中所示的局部磁滞回线,不难发现检测信号的极值点(最大值与最小值)与变励磁强度的极值点并不重叠,存在一定的相位滞后(约  $20^\circ$  相位角),这主要是由于实际使用的检测线圈自身存在的阻抗造成。对于完整钢板,其检测信号的极差  $\Delta U_1 \approx 160$  mV;而对比缺陷钢板,其检测信号的极差  $\Delta U_2 \approx 440$  mV。再将实验参数和变励磁的检测信号极差  $\Delta U_1$ 、 $\Delta U_2$  分别代入式(16)中,计算可得完整钢板检测的  $\mu_1 = 281$ 、缺陷钢板检测的  $\mu_2 = 215$ 。由该实验结果不难看出  $\mu_1 > \mu_2$ ,因此利用局部磁滞回线形态差异对钢板内部缺陷进行检测是完全可行的。

为与传统的 MFL 方法进行横向对比,再使用霍尔传感器 A503 在与上述实验相同条件下,分别检测完整钢板和缺陷钢板的静态漏磁场强度。由于本文实验中采用浅度的偏置磁化,因此在缺陷处产生漏磁场强度很弱,实际漏磁场检测的水平分量仅为 0.151 T 和 0.154 T。对比上述两组数据不难看出,实测缺陷钢板的漏磁场强度只是略大于完整钢板,两数据之间的差别微小。对于本文中的完整钢板和缺陷钢板,其

局部磁滞回线极差的差别非常显著,明显高于 MFL 方法中的漏磁场强度。

## 6 结 论

1) 在变励磁场  $\tilde{H}$  的激励条件下,铁磁性材料(本文为钢板)内部的“局部磁滞回线”确实存在,其形态主要由材料的动态磁导率  $\mu_d$  决定。

2) 钢板存在缺陷迫使磁通发生改变,造成缺陷附近材料的磁通密度  $B$  明显增加,从而引起材料动态磁导率  $\mu_d$  分布变化,因此利用“局部磁滞回线”发现缺陷的技术方案是可行的。

3) 新方法中动态磁导率  $\mu_d$  仅受变励磁测量结果的峰峰值  $\Delta U$  影响,与静态漏磁场强度无关。因此,新方法无需检测静态漏磁场,并可采用交流信号提取方法进行处理,具有易提取、无零点漂移、易放大、不受背景磁场干扰等优点。

4) 新方法无需将钢板磁化至局部饱和状态,仅需提供浅度偏置磁化场,因此新方法可有效减小磁化器的体积,在实际油气管道检测器的工程设计上具有明显优势。

5) 作为一种新思路,本文只是抛砖引玉,如何更精确地建立被测点的局部磁滞回线与动态磁导率的数学模型还有待开展,包括利用“磁滞”特性进行缺陷重构、缺陷量化等工作也还有待进一步研究。

## 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] 徐超. 基于形态滤波和提升小波变换的漏磁信号处理研究[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(8): 23-25.  
XU CH. Studies to MFL signal processing based on morphology and lifting wavelet transforms [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2013, 32(8): 23-25.
- [4] KAWAKAMI M, KOKUBU A. AC magnetic flux leakage flaw detecting apparatus for detecting flaws in flat surfaces with rotating leakage detection element: USA, 5130652 [P]. 1992-7-14.
- [5] 李伟,张传荣,陈国明,等. U型 ACFM 探头精确建模和实验测试[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 658-662.  
LI W, ZHANG CH R, CHEN G M, et al. Precise modeling and experimental testing of the U-shaped probe for ACFM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(7): 658-662.
- [6] GOTOH Y, SAKURAI K, TAKAHASHI N. Electromagnetic inspection method of outer side defect on small and thick steel tube using both ac and dc magnetic fields [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(10): 4467-4470.
- [7] GOTOH Y, TAKAHASHI N. Study on problems in detecting plural cracks by alternating flux leakage testing using 3-D nonlinear eddy current analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39(3): 1527-1530.
- [8] 陈水平,郭静波,胡铁华,等. 铁磁管道环境下极低频微弱磁场的分布及检测[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10): 2348-2356.  
CHEN SH P, GUO J B, HU T H, et al. Distribution and detection of ELF weak magnetic field in ferromagnetic pipeline environment [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(10): 2348-2356.
- [9] 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. Mechanism study of AC-MFL method using U-shape inducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 1980-1985.
- [10] 喻星星,付跃文. 基于磁导率非线性条件下的油套管脉冲涡流检测仿真[J]. 无损检测, 2013, 35(4): 1-4.  
YU X X, FU Y W. Simulation of oil casing pulsed eddy current testing based on nonlinear magnetic conductivity [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(4): 1-4.
- [11] SUN L Y, LI Y B, SUN L B, LI Lingge. Comparison of magnetic flux leakage (MFL) and acoustic emission (AE) techniques in corrosion inspection for pressure pipelines [J]. IEEE Control Conference, 2012: 5375-5378.
- [12] 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.
- [13] GAO T Y, YU Y L, HAN T Y, et al. The interaction of

- multiple magnetic circuits in magnetic flux leakage (MFL) inspection [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, : 225-228.
- [14] 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]. 仪器仪表学报, 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.
- [15] 郑彪华, 何文, 周松强, 等. 管道缺陷漏磁检测的三维有限元仿真分析 [J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(12): 35-41.  
ZHENG B H, HE W, ZHOU S Q, et al. Research on numerical simulation of three-dimensional magnetic flux leakage inspection of pipeline defects [J]. Chinese Safety Science Journal, 2013, 23(12): 35-41.
- [16] 高廷岩, 于永亮, 韩天宇, 等. 有限元方法在管道外漏磁检测中的应用 [J]. 无损检测, 2013, 35(11): 31-34.  
GAO Y Y, YU Y L, HAN T Y, et al. The application of finite element method for the magnetic flux leakage field of pipeline [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(11): 31-34.

- [17] 韩保, 刘文刚, 张宏. 工频磁场抗扰度实验装置校准的研究 [J]. 电子测量技术, 2013, 36(8): 108-110.  
HAN B, LIU W G, ZHANG H. Research on calibration of power frequency magnetic field immunity test set [J]. Electronic measurement technology, 2013, 36(8): 108-110.

### 作者简介



吴德会 2006 年于合肥工业大学获得博士学位, 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 Ph. D. degree in 2006 from Hefei University of Technology. Now, he is an associate professor in Xiamen University. His main research interests include NDT, sensor technology, intelligent measurement and control technology.



李雪松(通讯作者) 2013 年于厦门大学获得学士学位, 现为厦门大学硕士研究生, 主要研究方向为无损检测。

E-mail: 987529113@qq.com

**Li Xuesong** (Corresponding author) received his bachelor degree in 2013 from Xiamen University. Now, he is a master student in Xiamen University. His main research direction is NDT.