

文章编号: 1000-582X(2012)10-076-09

铁磁构件表层裂纹漏磁场分析及检测系统

廖昌荣^{1a}, 廖 峥^{1a}, 韩 亮^{1b}, 汪滨波^{1b}, 石祥聪², 谢云山²

(1. 重庆大学 a. 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044; b. 电气工程学院;
2. 重庆工业自动化仪表研究所, 重庆 401123)

摘 要: 针对铁磁构件裂纹损伤检测方法和仪器应用技术现状, 建立了 V 型裂纹漏磁场分析模型, 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。采用 MATLAB 软件编程进行全面的仿真分析, 得出了漏磁场的法向分量与裂纹开口宽度的关系曲线、漏磁场的法向分量与裂纹深度的关系曲线、漏磁场的法向分量与裂纹长度的关系曲线; 得出裂纹漏磁场法向分量过零点、漏磁场垂向分量出现最大值和漏磁场切向分量出现裂纹端部过零点的漏磁场分布特性。根据理论分析得出的裂纹漏磁场特征, 设计制作了阵列式的裂纹检测装置和检测平台, 并对带有 V 型裂纹的平板铁磁构件进行检测。实验表明: 文中理论分析得出的三维漏磁场与检测结果能够较好的吻合, 并对裂纹的几何参数估计具有一定的指导意义, 根据漏磁模型研制的检测装置能探测铁磁构件的裂纹缺陷。

关键词: 裂纹; 泄漏磁场; 无损检测; 铁磁构件

中图分类号: TG115. 28; V488. 15; TH878 **文献标志码:** A

Nalytical study on crack magnetic flux leakage for ferromagnetic component and detection system based on geomagnetic field

LIAO Changrong^{1a}, LIAO Zheng^{1a}, HAN Liang^{1b}, WANG Binbo^{1b}, SHI Xiangcong², XIE Yunshan²

(1a. Key Lab. for Optoelectronic Technology & Systems, Ministry of Education; b. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, China; 2. Chongqing Institute of Industrial Automation and Instrumentation, Chongqing 401123, China)

Abstract: Based on technical aspects of ferromagnetic components crack damage detection methods and instruments applications, this paper establishes a the magnetic flux leakage analysis model for V-Cracks to get the theoretical expressions for any probe point of flat ferromagnetic component surface. We use MATLAB software programming to do a comprehensive simulation, and obtain the relation curve between magnetic flux leakage normal component H_y and crack opening width, the relation curve between magnetic flux leakage normal component H_y and crack depth, the relation curve between magnetic flux leakage normal component H_y and crack length are obtained, crack magnetic flux leakage distribution characters: normal component of H_y with zero-crossing, maximum value of tangential component H_x , and tangential component H_x with tip zero-crossing. According to the leakage magnetic characteristics obtained underby the theoretical analysis, the array type detection device and test platform are designed and fabricated, and

收稿日期: 2012-04-05

基金项目: 重庆市重点科技攻关项目(2009AB3235); 中央高校研究生科研创新基金资助项目(CDJXS11120004)

作者简介: 廖昌荣(1965-), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, 主要从事智能结构及系统方向研究,
(E-mail)rliao@cqu.edu.com。

then the plate-type ferromagnetic component with V-Cracks is detected. The experimental results show that; there is a good agreement between the three-dimensional magnetic flux leakage obtained from thesis theoretical analysis and the test results, to a certain degree the magnetic flux leakage model has directive significance for the prediction and analysis of crack parameters, and the test device be developed according to the magnetic flux leakage model is able to detect cracks in ferromagnetic components.

Key words: crack; magnetic flux leakage; non-destructive detection (NDT); ferromagnetic component

铁磁构件在服役过程中由于外界载荷和应力作用常常出现裂纹,由裂纹诱发构件的结构损伤严重威胁机械设备和材料的使用安全。传统的无损检测方法如:超声法、射线法、涡流法和磁粉法等均对构件的形态与表面清洁程度要求较高,对缺陷的准确探测率较低或难以实现户外检测。铁磁构件处在应力和地磁场的共同作用下,地磁场虽然属于弱磁场,但是由于铁磁构件的生产加工、使用运行均处在地磁场中,不同程度地受到疲劳载荷影响,出现磁化现象。如大海中穿行的舰艇长期受到海浪拍击以及反复弯折的铁丝,都会出现自磁化现象,因此铁磁构件弯折处可以吸附铁粉,而舰艇需要定期消磁防止吸附水雷^[1]。除此之外,由于应力集中引发材料内部晶体位错、滑移、以致裂纹的产生,发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向和不可逆变化,这种变化在地磁场存在的情况下得以反复励磁,对于剩磁较强的铁磁材料,反复励磁以后材料自磁化强度将不断增强,并远大于地磁场强度。这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后不仅会保留,还与曾经有过的最大作用应力有关。金属构件表面的这种剩磁状态记忆着微观缺陷或应力集中的位置,最终畸变的磁力线偏离构件内部形成可被检测的漏磁场。利用铁磁构件裂纹诱发表面泄漏磁场来探测裂纹等缺陷的研究变得可能,目前已能够实现定性检测。由于影响铁磁构件漏磁场强度的因素很多,实际裂纹的几何形态相差大,目前还没有较好的裂纹泄漏磁场的分析模型,定量的测量裂纹大小还处在探索之中。国内外很多研究人员正努力推动着漏磁检测的不断发展,如中国的黄作英、阙沛文^[2],徐章遂^[3],任吉林^[4-5],仲维畅等^[6-7]都发表有论著讲述漏磁检测的方法和效果,针对裂纹缺陷分析并给出了漏磁场强度的法向和切向分布特点^[3];目前国内相关检测仪器有爱德森公司的 EMS、SMART 系列,西安永安检测设备公司生产的 JLY-A、ZWJ-A 型。国外相关领域的研究人员如:俄罗斯的杜波夫教授^[8],韩国的 Jiseong Hwang, Jinyi Lee^[10-11],加拿大的 Reza Khalaj Amineh^[12],德国的 Stephan J. M.^[13]分别就

各自的检测方法或装置发表了论文;相关检测仪器如俄罗斯动力诊断公司的 TSC 系列,德国 DB 无损检测技术公司的漏磁检测系统等,能够对大多数的裂纹进行检测。以前的漏磁场分析模型多是针对矩形裂纹截面做二维分析,一定程度上能够解释漏磁场的分布特点,但是还不够全面和准确。裂纹是三维实体,二维模型和三维模型相比得出的漏磁场分量,分布特征相同,但是在求解方式和数值精确度上会有本质的差别,所以应当综合考虑裂纹的各部分对构件表面任意检测点处漏磁场的影响。目前,市场上的检测仪器多数由于测头少、布局单一,只能对铁磁构件进行线扫描检测,检测速度较慢,且售价较高也不利于推广使用。鉴于此,提出了建立更加接近实际,研究 V 型裂纹漏磁场三维数学模型,设计制作相应的检测装置,对铁磁构件裂纹检测中遇到的问题做进一步理论研究和实践探索,并希望运用于铁磁材料安全检测当中。

1 V 型裂纹漏磁场模型

1.1 V 型裂纹结构特性

对于某铁磁构件,以裂纹底部中央为坐标原点,以裂纹宽度方向为 x 轴,铁磁构件表面法线方向为 y 轴,裂纹长度方向为 z 轴,建立如图 1 所示的笛卡儿坐标系。设裂纹宽度为 $2a$,深度 h ,裂纹长度 $2l$,

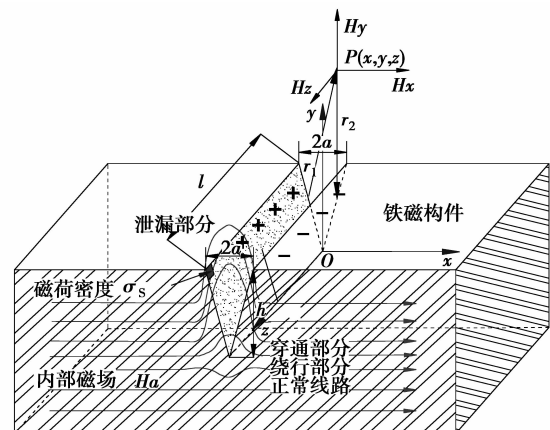


图 1 铁磁构件 V 型裂纹磁泄漏原理

铁磁构件的相对磁导率为 μ_r , 真空磁导率为 μ_0 。由于铁磁构件在裂纹处的介质改变, 导致磁路中磁导率发生变化, 经地磁场反复激励以后的构件内部磁通在裂纹处出现畸变引起泄漏现象。将 V 形裂纹两侧壁上的磁偶极子等效为无数的磁荷均匀分布在两侧。裂纹左侧面元为 (x_1, y_1, z_1) , 右侧面元为 (x_2, y_2, z_2) , 裂纹附近空间检测点为 $P(x, y, z)$ 。

1.2 V 型裂纹磁荷模型

由于裂纹表面并不光滑, 将实际 V 形裂纹看成如图 2(a) 所示对称锯齿状, 其微小的斜面元 ds 可分解为 $x-z$ 面上的投影 $dx dz$ 和与 $y-z$ 面上的投影 $dy dz$ 之叠加。左右斜面对探测点的磁场强度贡献分别为

$$\mathbf{H}_1 = \iint \frac{2\sigma_s \mathbf{e}_{r1}}{r_1^2} (dx_1 dz_1 + dy_1 dz_1), \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_2 = \iint \frac{-2\sigma_s \mathbf{e}_{r2}}{r_2^2} (dx_2 dz_2 + dy_2 dz_2), \quad (2)$$

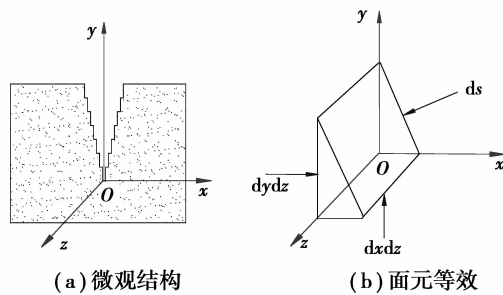


图 2 V 型裂纹微观结构及面元等效

式中: \mathbf{e}_{r1} 和 \mathbf{e}_{r2} 是沿矢径 $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ 方向的单位向量; σ_s 是面磁荷密度。根据文献[3]: 地磁场作用下铁磁构件内部磁场强度为 H_a 。

$$\sigma_s = 2.65 H_a \left(\frac{h}{2a} + 1 \right) \left[2\pi \left(\frac{h}{2a\mu_0\mu_r} + 1 \right) \right]^{-1},$$

探测点处的总磁场强度表示为

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2 = \iint \frac{2\sigma_s \mathbf{e}_{r1}}{r_1^2} (dx_1 dz_1 + dy_1 dz_1) - \iint \frac{2\sigma_s \mathbf{e}_{r2}}{r_2^2} (dx_2 dz_2 + dy_2 dz_2). \quad (3)$$

如图 2(b) 所示, 考虑到磁力线在铁磁构件中穿行的方向与 $x-z$ 平面平行, 不存在垂直于 $dx dz$ 面的漏磁场分量, 左右斜面对探测点磁场强度贡献分别如式(4)和式(5)。

$$|\mathbf{H}_1| = \iint \frac{2\sigma_s}{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} dy_1 dz_1, \quad (4)$$

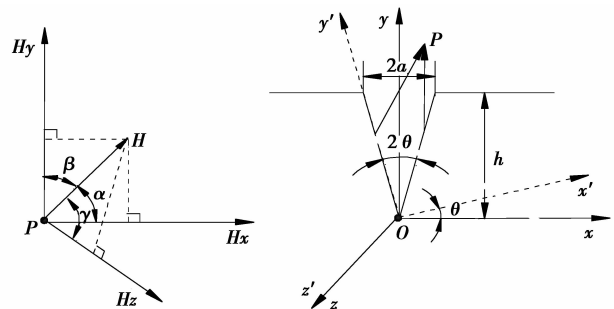
$$|\mathbf{H}_2| = \iint \frac{2\sigma_s}{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} dy_2 dz_2. \quad (5)$$

裂纹附近空间检测点 P 处的漏磁场强度可以分解为 3 个方向的空间分量, 如图 3(a) 所示。

$$\left. \begin{aligned} |\mathbf{H}_x| &= |\mathbf{H}_1| \cos\alpha_1 + |\mathbf{H}_2| \cos\alpha_2 = \\ |\mathbf{H}_1| \frac{|x-x_1|}{r_1} + |\mathbf{H}_2| \frac{|x-x_2|}{r_2}, \\ |\mathbf{H}_y| &= |\mathbf{H}_1| \cos\beta_1 - |\mathbf{H}_2| \cos\beta_2 = \\ |\mathbf{H}_1| \frac{|y-y_1|}{r_1} - |\mathbf{H}_2| \frac{|y-y_2|}{r_2}, \\ |\mathbf{H}_z| &= |\mathbf{H}_1| \cos\gamma_1 - |\mathbf{H}_2| \cos\gamma_2 = \\ |\mathbf{H}_1| \frac{|z-z_1|}{r_1} - |\mathbf{H}_2| \frac{|z-z_2|}{r_2}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

如图 3(b) 所示, 将空间坐标系 $oxyz$ 绕 z 轴逆时针旋转 1 个角度 θ , 得到新坐标系 $ox'y'z'$ 。新旧坐标系变换关系如式(7)。

$$\left. \begin{aligned} x' &= x \cos\theta - y \sin\theta = x \frac{h}{\sqrt{h^2+a^2}} + y \frac{a}{\sqrt{h^2+a^2}} \\ y' &= y \cos\theta + x \sin\theta = y \frac{h}{\sqrt{h^2+a^2}} - x \frac{a}{\sqrt{h^2+a^2}} \\ z' &= z \end{aligned} \right\} \quad (7)$$



(a) 漏磁场强度分解

(b) 模型坐标转换

图 3 漏磁场强度分解及模型坐标转换

在新坐标系 $ox'y'z'$ 下左斜面对探测点处漏磁场强度的贡献可由式(8)定量的反映出来, 其 3 个空间分量如式(9)所示。

$$\mathbf{H}'_1 = \int_{-l}^l \int_0^{\sqrt{h^2+a^2}} \frac{2\sigma_s \mathbf{e}_{r1}}{x'^2 + (y' - y_1)^2 + (z' - z_1)^2} dy_1 dz_1, \quad (8)$$

$$\mathbf{H}'_{1x} = \int_{-l}^l \int_0^{\sqrt{h^2+a^2}} \frac{2\sigma_s x'}{[x'^2 + (y' - y_1)^2 + (z' - z_1)^2]^{3/2}} dy_1 dz_1,$$

$$\mathbf{H}'_{1y} = \int_{-l}^l \int_0^{\sqrt{h^2+a^2}} \frac{2\sigma_s (y' - y_1)}{[x'^2 + (y' - y_1)^2 + (z' - z_1)^2]^{3/2}} dy_1 dz_1,$$

$$\mathbf{H}'_{1z} = \int_{-l}^l \int_0^{\sqrt{h^2+a^2}} \frac{2\sigma_s (z' - z_1)}{[x'^2 + (y' - y_1)^2 + (z' - z_1)^2]^{3/2}} dy_1 dz_1. \quad (9)$$

将坐标系 $oxyz$ 绕 oz 轴顺时针旋转角度 θ , 得到

新的坐标系 $ox''y''z''$, 新旧坐标系变换关系如式(10)。

$$\left. \begin{aligned} x'' &= x \cos \theta - y \sin \theta = x \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2}} - y \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \\ y'' &= y \cos \theta + x \sin \theta = y \frac{h}{\sqrt{h^2 + a^2}} + x \frac{a}{\sqrt{h^2 + a^2}} \\ z'' &= z \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

在新坐标系 $ox''y''z''$ 下右斜面对探测点处漏磁场强度的贡献可由式(11)定量的反映出来,其 3 个空间分量如式(12)所示。

$$\mathbf{H}'_{2z} = \int_{-l}^l \int_0^{\sqrt{h^2 + a^2}} \frac{-2\sigma_s e_{r2}}{[x''^2 + (y'' - y_2)^2 + (z'' - z_2)^2]^{3/2}} dy_2 dz_2, \quad (11)$$

$$\mathbf{H}'_{2x} = \int_{-l}^l \int_0^{\sqrt{h^2 + a^2}} \frac{-2\sigma_s x''}{[x''^2 + (y'' - y_2)^2 + (z'' - z_2)^2]^{3/2}} dy_2 dz_2,$$

$$\mathbf{H}'_{2y} = \int_{-l}^l \int_0^{\sqrt{h^2 + a^2}} \frac{-2\sigma_s (y'' - y_2)}{[x''^2 + (y'' - y_2)^2 + (z'' - z_2)^2]^{3/2}} dy_2 dz_2,$$

$$\mathbf{H}'_{2z} = \int_{-l}^l \int_0^{\sqrt{h^2 + a^2}} \frac{-2\sigma_s (z'' - z_2)}{[x''^2 + (y'' - y_2)^2 + (z'' - z_2)^2]^{3/2}} dy_2 dz_2. \quad (12)$$

由上述理论得到的探测点的磁场强度沿坐标轴方向分解的 3 个空间分量表示为式(13),可由式(9)和式(12)定量求解出来。

$$\left. \begin{aligned} H_x &= H'_{1x} + H'_{2x} \\ H_y &= H'_{1y} + H'_{2y} \\ H_z &= H'_{1z} + H'_{2z} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

2 V 型裂纹磁荷模型分析

磁荷模型分析中选取 $H_a = 3\ 600\ \text{A/m}$, 室温下该磁构件相对磁导率 $\mu_r = 2\ 000$ (H_a 与 μ_r 的选取分别与磁化程度和铁磁材料的种类有关,其选取不影响模型的适用性),分析影响磁场法向分量 H_y 的因素及其分布特点,对垂向量 H_x 和切向量 H_z 做定性分析。

2.1 在任意检测点 $P(x, y, z)$ 处,漏磁场的法向分量 H_y

若 P 点的检测运动轨迹垂直于裂纹的延展方向 z ,即平行于 x 轴方向,且 P 点离被测铁磁构件表面的高度在检测装置沿 x 方向运动的过程中是几乎不变的。选取 $z = 0\ \text{mm}$, y 为常量, x 为位移变量来分析。

1) l, h 不变,裂纹漏磁场法向分量 H_y 与宽度 $2a$ 的关系。在 $l = 5\ \text{mm}$, $h = 0.5\ \text{mm}$, 裂纹宽度参数为 $0.1, 0.2, 0.3\ \text{mm}$ 时,得出面磁荷密度分别为 $\sigma_s =$

$0.801\ 3, \sigma_s = 1.030\ 0, \sigma_s = 1.259\ 3$ 。取 $y = 1\ \text{mm}$, 由式(13)可得到漏磁场法向分量 H_y 的分布,如图 4 所示。

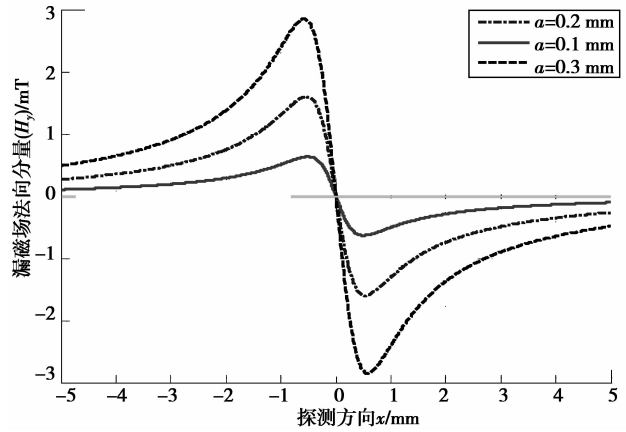


图 4 裂纹宽度影响 H_y

2) l, a 不变,裂纹漏磁场法向分量 H_y 与深度 h 的关系。当 $l = 5\ \text{mm}$, $2a = 0.2\ \text{mm}$ 保持不变时, $h = 0.5\ \text{mm} \rightarrow \sigma_s = 1.030$; $h = 0.7\ \text{mm} \rightarrow \sigma_s = 0.899\ 5$; $h = 0.9\ \text{mm} \rightarrow \sigma_s = 0.826\ 8$ 。由式(13)可得到漏磁场法向分量 H_y 分布,如图 5 所示 H_y 随深度增加略有减弱。

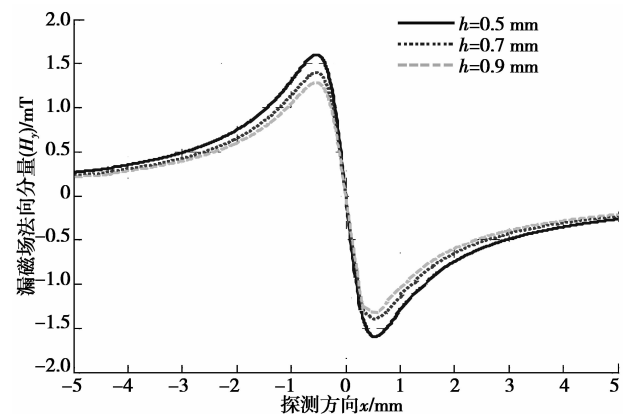


图 5 裂纹深度影响 H_y

3) a, h 不变,裂纹漏磁场法向分量 H_y 与长度 l 的关系。图 6 为 l 分别为 $7, 5, 3\ \text{mm}$ 3 种长度情况下 H_y 的分布。

由图可知,裂纹长度 l 变化时,曲线差异较小,尤其是峰-峰值几乎一样。因此,可判断 l 对漏磁场法向分量 H_y 的影响并不太明显。

根据所推数学模型对裂纹漏磁分布进行三维仿真分析,如图 7 为 $l = 5\ \text{mm}$, $h = 1\ \text{mm}$, $a = 0.1\ \text{mm}$, $y = 1.5\ \text{mm}$ 时 H_y 分量随 x, z 变化的关系图,可以看出裂纹中部和两端的漏磁场强度是有差别的,中部峰-峰值最大,两端最小;从图上还可以读出峰-峰

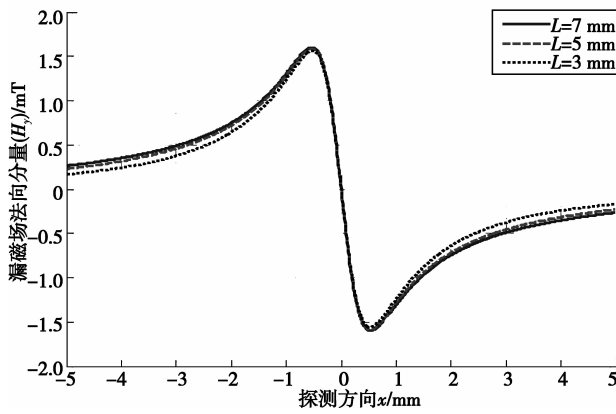
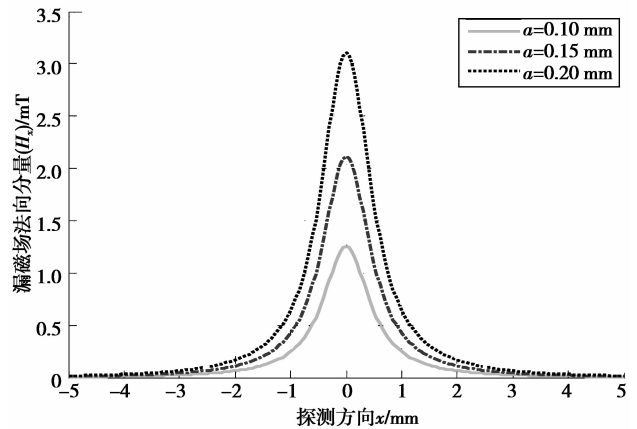


图 6 裂纹长度影响 H_x



(a) 裂纹宽度影响

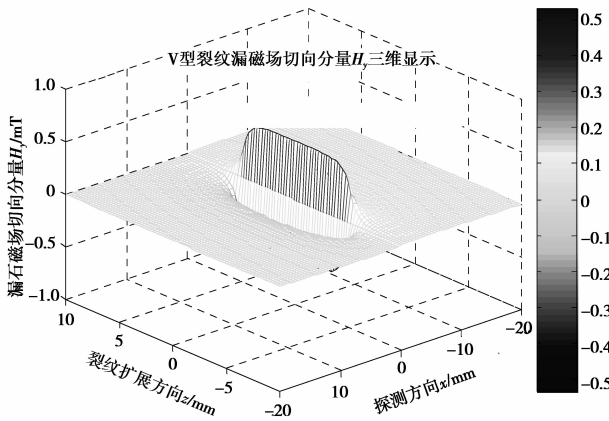
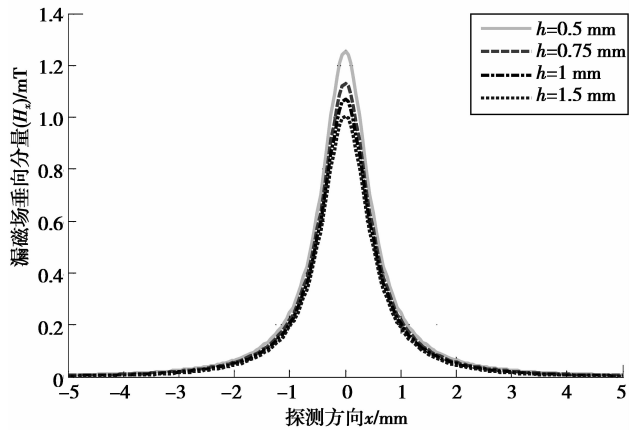


图 7 V型裂纹 H_x 分量三维模型



(b) 裂纹深度影响

图 8 裂纹宽度/深度影响 H_x

间距等信息。改变仿真参数将得到更多不一样的三维仿真图形,有助于进一步研究各量值之间的相互影响。

2.2 检测点 $P(x, y, z)$ 处,漏磁场的垂向分量 H_x

当 $l=5\text{ mm}$, $h=0.5\text{ mm}$, 裂纹宽度参数为 0.1、0.15、0.2 mm 时,得出面磁荷密度分别为 $\sigma_s=0.8013$, $\sigma_s=0.9156$, $\sigma_s=1.0300$ 。由式(13)可得到漏磁场垂向分量 H_x 分布,如图 8 所示。宽度对漏磁场强度 H_x 分量的影响比较明显。

当 $l=5\text{ mm}$, $a=0.1\text{ mm}$, 裂纹深度参数为 0.5、0.75、1 mm 时,探测点 P 处的漏磁场强度随深度 h 加深而略有减弱,深宽比达到一定程度后这种趋势减弱,这一特点与宽度参数变化对 H_x 幅值的影响相反,且相较于半宽度 a 变化时 H_x 的分布范围随深宽比的加大而变窄,即 2 种情况相反。

图 9 为 $l=5\text{ mm}$, $h=1\text{ mm}$, $a=0.1\text{ mm}$, $y=1.5\text{ mm}$ 时,铁磁构件裂纹附近漏磁场的切向 H_x 分量沿 x, z 方向变化关系图。 H_x 相比 H_y 要大数倍,幅值分布特点亦为中部最大,靠近两端逐渐减小。

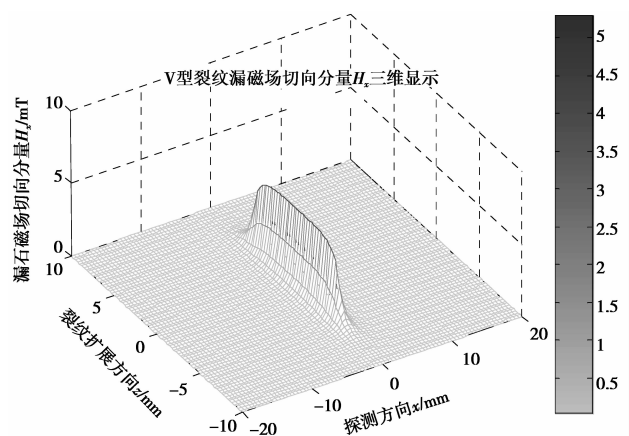


图 9 V型裂纹 H_x 分量三维模型

2.3 检测点 $P(x, y, z)$ 处,漏磁场的切向分量 H_z

图 10 为 $l=5\text{ mm}$, $h=1\text{ mm}$, $a=0.1\text{ mm}$, $y=1.5\text{ mm}$ 时,铁磁构件裂纹附近漏磁场的切向 H_z 分量沿 x, z 方向变化关系图。 H_z 相比 H_y 和 H_x 来说

是最小的,幅值分布呈特殊的过零点特征:在裂纹两侧沿方向 x 或沿裂纹延展方向 z 进行移动探测,都会出现 H_z 过零点特性,但在裂纹中部 H_z 几乎为零。

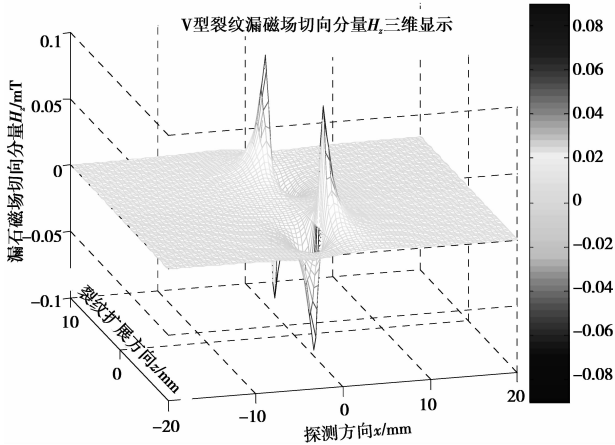


图 10 V型裂纹 H_z 分量三维模型

分量信号过零点出现,是在检测的时候探头作往复运动的结果,对比其变化趋势,再次说明了裂纹的两端等效为磁体的两极。对采样的波形图可以存储为指定路径的波形文件以备调取查看。

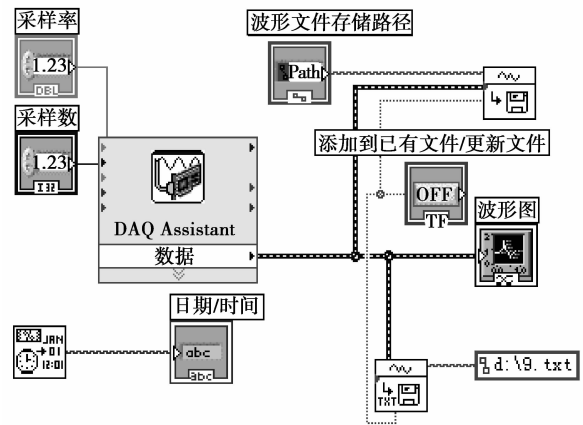


图 12 虚拟仪器采集程序前面板,后面板

3 检测装置及实验

采用 NI 数据采集卡采集和数字万用表逐点读数的方式,在验证了阵列可行性以后,希望制成手持式仪表,再采用 MSP430 单片机作为数据采集、发送、处理及显示的 MCU。验证实验采用单行霍尔传感器阵列作为检测探头,配合调理电路,信号采集电路,位移机构等,硬件配置如图 11 所示。单行阵列包括 8 只霍尔传感器,理想特性是:当不做检测时如果电源电压 U_i 为 5 V,静态输出电压应该为 2.5 V,灵敏度为 5 mV/G_S, 1 mT=795.775 A/m=10 G_S。实验时提离值约为 1 mm,输入电压 $U_i=5.16$ V,各传感器出厂静态输出略有差异,约为 2.58 V。

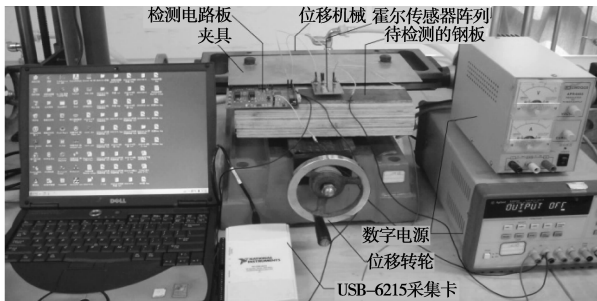


图 11 裂纹漏磁场测试平台

图 12 为由 labview 编制的虚拟仪器前面板图。仿真得出如图所示漏磁场的法向分量在裂纹附近出现了明显的过零点特征,并且其峰-峰值幅度远大于没有裂纹处漏磁场的强度。图上有 2 处漏磁场法向

如图 13 所示,被测裂纹宽度为 0.3 mm,长度为 40 mm,为了检验多路数据联合对裂纹的辨识效果,检测时候特意让裂纹与行阵列检测探头之间倾斜呈一定夹角,沿图示的检测方向对构件进行面扫描。



图 13 带有裂纹的被测铁块

单行阵列对裂纹漏磁场 H_y 分量的检测结果如图 14 所示,传感器输出电压的峰-峰值连线清楚的反映了裂纹的走向。在确定裂纹位置的时候对扫描过程的位移信息进行采集,每个通道的漏磁信号都会有相应的位移信息与之相对应。由于是实行的面扫描检测,所有扫描数据可以通过串行通讯并存储到 PC 机,将数据绘图,可以从曲线上得出裂纹的走向是弯曲或倾斜等情况,如图 14 所示的曲线峰峰值对应不同的横坐标即表明了裂纹是与检测方向倾斜的,与验证方案预设情况一致。由于裂纹检测是在面扫描的情况下完成的,每次检测可以覆盖被测面一定宽度,可以通过相邻连续出现多条漏磁信号有过零点特征的曲线条数来确定裂纹的长度。实验结果与图 7 的三维仿真能够较好的吻合但也有所区别,原因是被测铁磁构件存在应力集中,表面腐蚀凹

坑等状况与裂纹共同对探测点处漏磁场产生复合影响。表面腐蚀凹坑无规律且影响较小,目前在建模的时候应力集中的影响还没有被考虑进去。

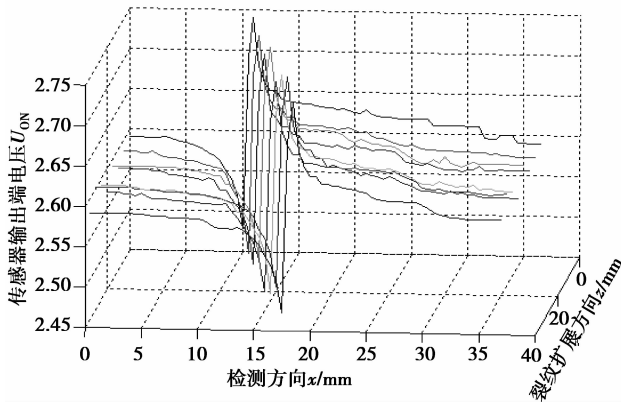


图 14 单行阵列实测数据

漏磁检测系统拟采用 MSP430 单片机作为采样和数据发送 MCU,如图 15 所示,按照图 16 所示的检测方式^[15]在构件表面进行扫描检测(可针对平面,其他形状采取另外的探头形式),其探头部分采

用差分式霍尔传感器阵列,具有以下特点:传感器成对差分式焊接于电路板的正反两面;各行传感器均匀分布,整齐排列;各行间传感器平行布局,和相邻行的传感器之间交错略大于 1/3 个传感器长度的方式排列。这样布局有以下几点好处:1)差分式布局使得进入每对传感器敏感的信号方向相反,即是在同一个位置位于电路板正反两面的传感器输出信号呈差动变化:一个增大,另一个减小。虽然 2 个传感器与被测构件的距离有差距,造成各自输出信号变化的绝对值有所差异,但是如果使二者的输出信号作减运算,一方面可以使得漏磁场法向分量 H_y 的峰-峰值得到加强,另一方面可以使温度因素、电源波动等造成的共模干扰信号得到抑制,如此一强一弱,使得从传感器的输出信号中辨识缺陷变得相对容易。阵列式的布局可以实现对被测构件的面扫描检测,提高检测的速度,同时交错排列方式可使在检测方向上增大传感器的分布密度,减小对扫描检测区域的漏检率。图 16 为检测器探头实现方向与工作原理。

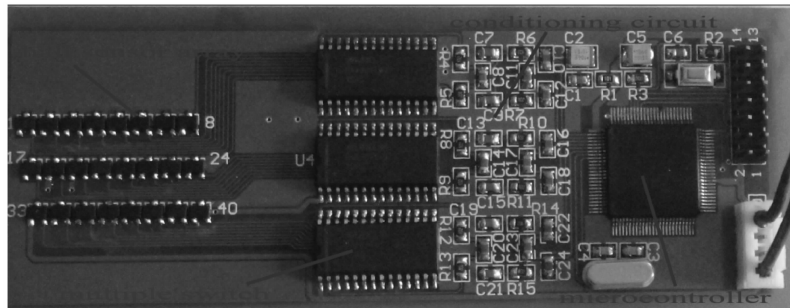


图 15 差分阵列式漏磁检测系统

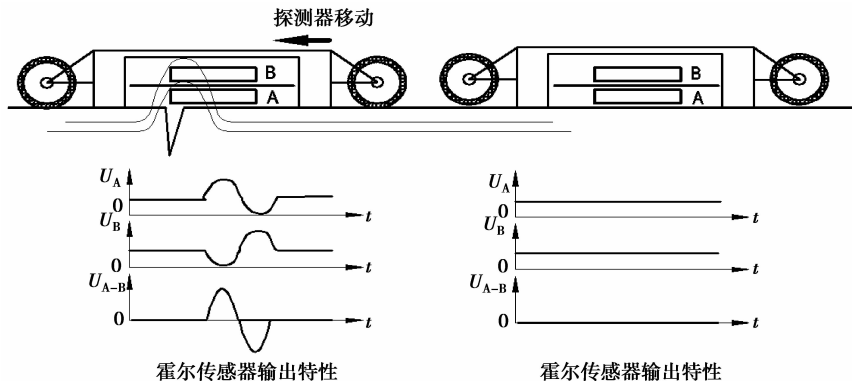


图 16 检测原理图

采用如图 17 所示的高灵敏度磁阻传感器^[14],对带有变宽度裂纹的圆管初步检测。圆管全长 500 mm,为了验证宽度对漏磁场的影响,主要是对 180、370、400 mm 3 处进行漏磁检测。图 18 是 370、

400 mm 处不同宽度裂纹对应的磁场强度法向分量 H_y ,而在 180 mm 处无裂纹,漏磁场强度较小且约为 300 A/m,明显小于有裂纹的位置;由于提离值不好控制,所以会人为地造成一些抖动,信号起伏较大,

但是在同一位置都出现了漏磁场法向分量过相对零点的现象。400 mm 处裂纹宽度为 $b=0.55$ mm 产生的漏磁场强度,总体要大于 370 mm 处裂纹宽度为 $b=0.15$ mm 所产生的漏磁场强度。该结论与漏

磁模型软件仿真结果基本一致。总之,这种卷曲成型金属管的周向应力都比较大,是导致无裂纹处漏磁场也比较大的原因。

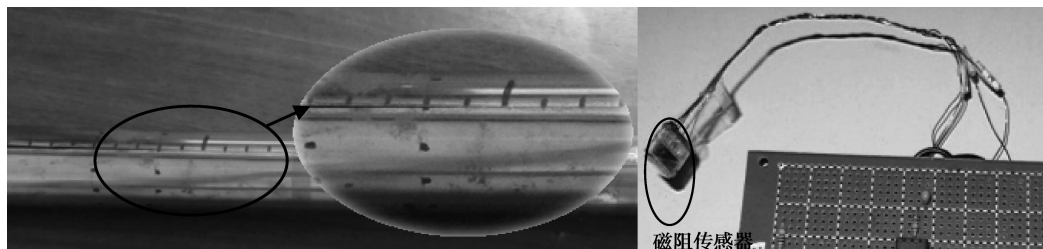


图 17 裂纹变宽度圆管检测

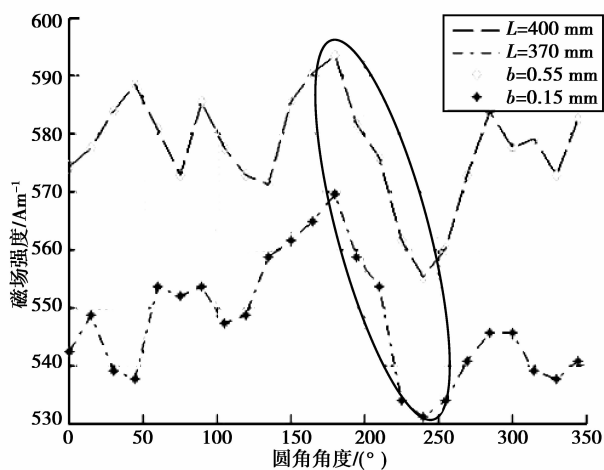


图 18 圆管 370 mm、400 mm 处磁场强度法向分量

对传感器输出信号的采集,一方面可由微控制器编程控制多路开关,按照预定的方式和时序选通各对传感器,并将数据送入微控制单元进行后续处理,然后可送显示模块(力争以“地形图”的方式显示出来,可以一目了然地辨识出缺陷的存在及其位置)及报警提示模块;另一方面可由数据采集卡与装有 Labview 软件的个人计算机共同完成,方便检测结果的显示、存储、调取查验。后续研究还包括对应力集中的定量检测分析。

4 结 论

以对铁磁构件裂纹的有效检测为出发点,主要针对平板式铁磁构件的 V 型裂纹来构建漏磁场数学模型。模型综合考虑了 x, y, z 3 个方向的漏磁场分量,理论上保证了全面性和准确性。设计制作的实验平台和检测系统在实验室条件下对带有裂

纹的铁磁构件进行了检测,并得到了如下结论。

1) 所推导的漏磁场三维数学模型与检测结果能够较好的吻合,证明了模型的正确性。

2) 裂纹漏磁场三维数学模型可以帮助分析检测结果,并为预测裂纹深、宽、长等参数提供一定的参考。

3) 所研制的检测系统能够有效的检测出铁磁构件的裂纹,并帮助确定其位置、走向和长度。

尽管如此,还需要不断的去探索和研究数学模型的简化;通过对多种材料或形状的裂纹探测实验来比对并修正数学模型;尝试对裂纹漏磁场的垂向 H_x 或 H_z 分量进行检测并比较检测效果;研究户外探测的方法并解决可能存在的问题;继续探索实现定量检测的方法。

参考文献:

- [1] 简虎. 磁记忆检测技术机理及其应用的研究[D]. 武汉:华中科技大学硕士学位论文,2006.
- [2] 黄作英,阙沛文. 应用磁荷法建立漏磁信号模型[J]. 应用基础与工程科学学报,2006,14(1):115-120.
HUANG Zuoying, QUE Peiwen. Application of dipole magnetic charge method to MFL signal analytical model[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2006,14(1):115-120.
- [3] 徐章遂,徐英,王建斌,等. 裂纹漏磁定量检测原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [4] 任吉林,潘强华,唐继红,等. 应力对铁磁构件磁畴组织的影响[J]. 无损检测,2010,32(3):157-159.
REN Jilin, PAN Qianghua, TANG Jihong, et al. Experimental research of magnetic memory testing on the effect of stress on the magnetic domains [J].

- Nondestructive Testing, 2010, 32(3):157-159.
- [5] 任吉林, 罗声采, 陈曦, 等. 磁记忆切向分量信号的检测研究[J]. 失效分析与预防, 2011, 6(3):154-159.
REN Jilin, LUO Shengcai, CHEN Xi, et al. Tangential component signals of metal magnetic memory testing[J]. Failure Analysis and Prevention, 2011, 6(3):154-159.
- [6] 仲维畅. 磁偶极子理论在无损检测中的用途[J]. 无损检测, 2010, 32(1):49-52.
ZHONG Weichang. Uses of magnetic dipole theory in nondestructive testing field [J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(1):49-52.
- [7] 仲维畅. 铁磁性物质在地磁场中的静置磁化和退磁[J]. 无损检测, 2009, 31(6):451-452, 455.
ZHONG Weichang. Magnetization and demagnetization of ferromagnetic materials staying in static state in geomagnetic field[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(6):451-452, 455.
- [8] Doubov A A. Screening of weld quality using the magnetic metal memory[J]. Welding in the World, 1998, 41(3): 196-199.
- [9] Tsukada K, Yoshioka M, Kawasaki M, et al. Detection of back-side pit on a ferrous plate by magnetic flux leakage method with analyzing magnetic field vector[J]. NDT & E International, 2010, 43(4):323-328.
- [10] Lee J, Hwang J, Jun J, et al. Nondestructive testing and crack evaluation of ferromagnetic material by using the linearly integrated hall sensor array[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(12): 2310-2317.
- [11] Hwang J, Lee J, Kwon S. The application of a differential-type hall sensors array to the nondestructive testing of express train wheels [J]. NDT&E International, 2009, 42(1):34-41.
- [12] Amineh R K, Nikolova N K, Reilly J P, et al. Characterization of surface-breaking cracks using one tangential component of magnetic leakage field measurements[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(4):516-524.
- [13] Stephan J M, Gieschke P, Paul O, et al. Spatially resolved measurement of magnetic flux density using a 32x32CMOS integrated hall sensor array[J]. Procedia Engineering, 2010, 5:981-984.
- [14] Tehranchi M M, Ranjbaran M, Eftekhari H. Double core giant magneto-impedance sensors for the inspection of magnetic flux leakage from metal surface cracks[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2011, 170(1/2): 55-61.
- [15] Li Y, Gui Y T, Ward S. Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed [J]. NDT & E International, 2006, 39(5):367-373.

(编辑 陈移峰)