DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905644

多通道低频电磁传感器的仿真及优化*

余亚东[1,2],宋 凯[1],李光海[2],陆新元[2],丁泽宜[2]
(1. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 中国特种设备检测研究院 北京 100029)

摘 要:针对金属板构件内外壁损伤的检测问题,通过数值仿真与试验优化的方法,研制了一种适用于金属板构件内外壁损伤缺陷检测的多通道低频电磁传感器。建立了低频电磁检测三维有限元仿真计算模型,研究当圆形线圈切向放置在金属板导体上方时对缺陷的检测能力。进行对比试验,优化激励线圈匝数、检测线圈内径、高度等影响传感器灵敏度的参数,通过对含有人工缺陷金属板的检测验证了传感器的灵敏度与实用性。结果表明,研制的多通道低频电磁传感器可以实现对 ϕ12 mm 埋深 9.6 mm的 304 不锈钢缺陷及 ϕ12 mm 埋深 8 mm 的 20#碳钢缺陷的有效检测。

关键词: 多通道低频电磁传感器;有限元仿真;灵敏度;内外壁损伤
中图分类号: TH878 TG115.28 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 460.40

Simulation and optimization of multichannel low frequency electromagnetic sensor

Yu Yadong[1,2], Song Kai[1], Li Guanghai[2], Lu Xinyuan[2], Ding Zeyi[2]
(*1.Key laboratory of Nondestructive Testing Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China*; *2.China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China*)

Abstract: To detect the damage of inner and outer walls of metal plate members, a multi-channel low-frequency electromagnetic sensor designed by means of numerical simulation and experimental optimization. In this study, a three-dimensional finite element simulation model of low-frequency electromagnetic detection is formulated. In this way, the defect detection capability of circular coil placed tangentially over metal plate conductor can be studied. The comparative test is conducted to optimize the number of turns of the excitation coil, the inner diameter and the height of the detection coil, and other parameters, which affect the sensitivity of the sensor. The sensitivity and practicability of the sensor are evaluated by detecting artificial defects contained in the metal plate. Experimental results show that the multichannel low-frequency electromagnetic sensor can effectively detect the defect of 304 stainless steel with 12 mm buried depth of 9.6 mm and 20# carbon steel with 12 mm buried depth of 8 mm.

Keywords: multichannel low frequency electromagnetic sensor; finite element simulation; sensitivity; internal and external wall damage

0 引 言

金属材料在锅炉、压力容器、压力管道等承压设备中被广泛使用,往往是作为承压结构件等关键部位的使用。近年来,随着工业的不断兴起,承压设备在石油、化工、航空航天、能源等领域承担着越来越重要的角色[1]。据统计,我国因承压设备事故造成的直接与间接经济损失已经超过 5 000 亿/年,而腐蚀是造成承压设备失效(泄露、爆炸)的主因,及时发现承压设备在使用过程中出现的各种材料损伤等缺陷,预防承压结构件的断裂故障和防止重大恶性事故的发生具有重要意义[2-3]。近些年来,研究学者采用多种无损检测技术对承压结构件等关键部位非开口缺陷进行检测,汪磊等[4]针对压力容器内表面腐蚀凹坑检测问题,发现常规超声采用单晶探头,声束发射角度单一,对靠近内壁的点腐蚀不易区分,并且对较深的点腐蚀仅能从波形中判定缺陷位置,无法判定缺陷类型,易造成漏检。黄学斌[5]对氨制冷压力管道采用红外热像检测技术,利用温度

收稿日期:2019-09-23 Received Date:2019-09-23
*基金项目:国家重点研发计划(2017YFF0209703)、国家自然科学基金(51865033)项目资助

场的差异对管道内部腐蚀缺陷识别,但影响因素众多,且在保证热源情况下探测能力有限。唐飞阳亮等[6]采用数字射线检测技术对锅炉水冷壁管结构件检测,结果对于腐蚀面积型缺陷检测存在一定局限性,灵敏度较低。岳庚新[7]使用放置式涡流传感器对表面存在涂层的内部缺陷进行检测,发现对涂层厚度大于 2.5 mm 的内部缺陷无法有效识别。虽然学者们已经开展了大量的试验和研究,但对于表面存在涂层的承压构件内部腐蚀缺陷检测还是无能为力。

低频电磁技术(low frequency electromagnetic technique, LFET)是一种采用低频交流磁化的快速电磁检测新技术。相较于其他电磁检测技术,在磁化方式上,对软磁磁芯通电使得被检测对象进行交流磁化,增加了相位的缺陷评价指标。在激励频率选取上,使用较低的激励频率能够增加交变磁场的渗透深度,克服了由于趋肤效应所带来的影响[8]。因其高效的检测性能引起了国内外学者广泛的关注。Gotoh 等[9]利用三维仿真技术验证了低频电磁技术的可行性,并进一步优化检测线圈的尺寸和排布方式,在低频电磁检测机理、电磁仿真计算及传感器优化方面取得了一些显著的成果。常予等[10]通过仿真对低频漏磁传感器的励磁结构进行了改进,即对比了不同磁芯形状、不同绕线方式对激励磁场产生的影响,并且证实了优化后的传感器的灵敏度有所提高。在此基础上,Karuppasamy 设计了一种用于管道外壁检测的低频漏磁探头[11],使用仿真对磁芯的磁化尺寸、检测线圈等结构进行优化,实现了对管道外壁不同尺寸缺陷的检测,为量化缺陷提供了参考。另外,阮小飞[12]对低频漏磁激励检测装置进行了改良,并应用于钢轨的检测,成功地检出了钢轨内、外壁缺陷,在一定程度上为低频电磁传感器的优化提供了指导。Lou 等[13]设计出了一款新型的低频漏磁传感器,并将其对 20#碳钢埋深缺陷进行检测,结果发现对埋深 6 mm 缺陷检测效果良好。然而,以上研究所涉及的传感器均是在理论基础上对相关影响因素进行优化设计,灵敏度较低,且检测对象单一,检测通道少无法实现大面积扫查,并不适用于现场的实际检测。

本文以金属板构件为研究对象,建立了金属板构件的低频电磁传感器三维有限元模型,通过有限元仿真系统分析了传感器对模拟缺陷的检测能力。并对激励线圈匝数、检测线圈内径、高度等影响灵敏度参数的优化,得到了低频电磁传感器的最优设计方案,进一步通过试验验证了传感器对不同材质、不同深度腐蚀缺陷的识别能力,为承压类构件提供了一种高灵敏度、快速高效的低频电磁传感器。

1 低频电磁检测原理

LFET 是以电磁感应原理为基础发展的一种无损检测新技术,其都在麦克斯韦经典方程组的范畴内,即可采用式(1)对其进行表征[14]。

$$\begin{cases}\nabla\times \boldsymbol{H} = J\\ \nabla\times \boldsymbol{E} = -\dfrac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\\ \nabla\times \boldsymbol{B} = 0\\ \nabla\times \boldsymbol{D} = \rho\end{cases} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{H}$ 为磁场强度;$\boldsymbol{B}$ 为磁感应强度;$\boldsymbol{E}$ 为电场强度;$\boldsymbol{J}$ 为电流密度;$\boldsymbol{D}$ 为电位移矢量。在式(1)的基础上引入矢量磁势,即令 $\boldsymbol{B}=\nabla\times A$,带入可得:

$$\nabla\times\left(\boldsymbol{E}+\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}\right)=0 \tag{2}$$

根据无旋性,定义标量位函数,即令:

$$\left(\boldsymbol{E}+\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}\right)=-\nabla\varphi \tag{3}$$

再将本构方程和式(3)带入麦克斯韦方程组的首个方程,可得:

$$\nabla\times\left(\frac{1}{\mu}\nabla\times \boldsymbol{A}\right)=\boldsymbol{J}-\sigma\left(\nabla\varphi+\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}\right) \tag{4}$$

又因为 $\nabla\times \boldsymbol{A}=0$,则可以将式(4)进一步简化,可得:

$$\frac{1}{\mu}\nabla^2\boldsymbol{A}=-\boldsymbol{J}+\sigma\left(\nabla\varphi+\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}\right) \tag{5}$$

假定有缺陷时线圈阻抗 $V_{R1}=VOLTREAL_1$,$V_{I1}=VOLTIMAG_1$,无缺陷时线圈阻抗 $V_{R2}=VOLTREAL_2$,$V_{I2}=VOLTIMAG_2$,则有:

$$\begin{cases}Z=SQRT[(V_{R1}-V_{R2})^2+(V_{I1}-V_{I2})^2]\\ DEG=ATAN\left(\dfrac{V_{R1}-V_{R2}}{V_{I1}-V_{I2}}\right)\end{cases} \tag{6}$$

根据对麦克斯韦方程组的变形简化,本文建立了低频电磁有限元模型,并通过有限元仿真软件可以求解式(6),从而获取检测线圈的感应电压和相位。

低频电磁检测技术是采用线圈绕制磁轭作为传感器激励部分,检测线圈作为传感器接收部分。检测时,通过对激励线圈施加低频交流电,使得传感器激励部分产生交变磁化场,因趋肤效应的存在,产生的磁化场大部分集中在被测试件的表面[15]。又因施加的激励电流频率较低,使得一部分磁场能够渗透到被测试件的内部。当传感器移动到被测试件表面或内部存在裂纹等缺陷时,磁路中的磁阻增大,在缺陷附近磁力线发生弯曲,部分磁力线从试件表面或内部泄漏到空气中,被检测线圈接收。从而可以获取缺陷的具体信息。对应的低频电磁检测原理如图 1 所示。

基于低频电磁检测原理,本文搭建了低频电磁检测系统,检测系统主要由信号发生器、功率放大器、多通道低频电磁传感器、锁相放大器、数据采集模块和上位机组成。信号发生器产生正弦信号,经过功率放大器后加载到激励线圈上,检测线圈的感应电压经过前置放大后进行滤波处理,输入到锁相放大器中实现检测信号的幅值和相位的提

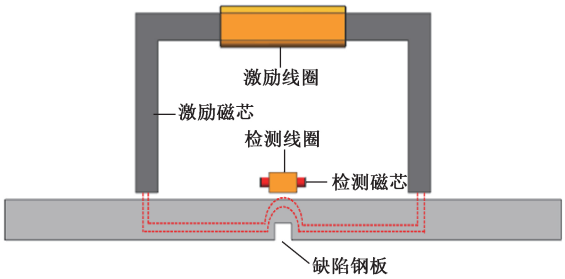


图 1　低频电磁检测原理

Fig.1　Low-frequency electromagnetic detection schematic diagram

取,最后经数据采集模块至上位机中进行处理,试验检测系统如图 2 所示,通过该检测系统对传感器激励线圈匝数、检测线圈内径、高度等影响因素进行优化。

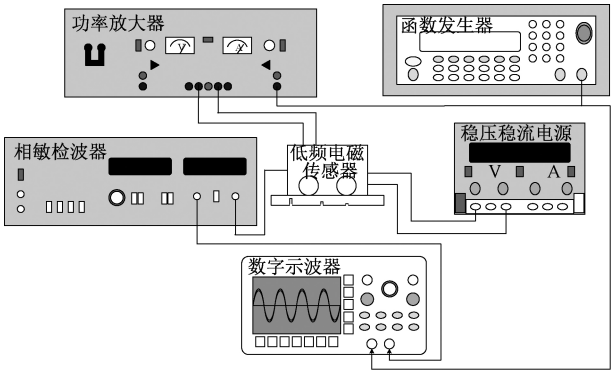


图 2　低频电磁检测系统

Fig.2　Low frequency electromagnetic detection system

2　仿真模型

2.1　模型建立

采用有限元仿真软件 ANSYS 建立了三维模型,如图 3 所示,模型中金属板长为 200 mm,宽为 200 mm,厚度为 12 mm,激励磁芯高为 45 mm,磁脚宽度为 6 mm,磁极厚度为 70 mm,磁极间距为 90 mm,激励线圈厚度为 2 mm,匝数为 380 匝,检测线圈为圆形线圈,内径为 3 mm,外径为 4.3 mm,检测线圈高度为 4 mm,匝数为 600 匝,激励频率为 200 Hz、电流为 2 A,模型材料属性参数见表 1。

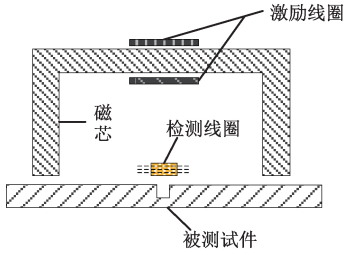


图 3　三维仿真模型

Fig.3　3D simulation model

表 1　材料属性设置

Table 1　Material property setting

材料参数	磁芯	金属板	线圈	空气
电导率/(S/m)	7.4×10^6	8.4×10^6	5.88×10^7	0
相对磁导率	6 000	1	1	1

网格划分的好坏决定了求解精度与时间,通常对磁场较强区域划分密集,较弱区域划分稀疏,如图 4 所示,通过对缺陷附近区域网格采用映射划分,较远区域采用自由划分以增加求解精度,因模型外围存在空气层,对离散化后的空气层施加边界条件,进一步求解获取缺陷附近区域磁场变化规律。

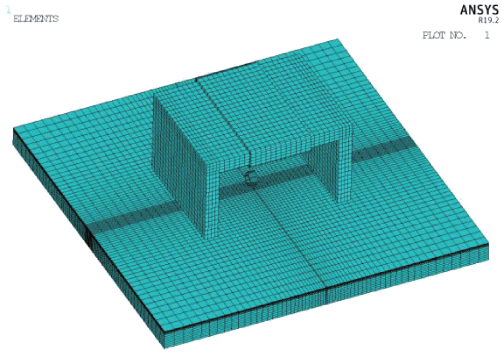
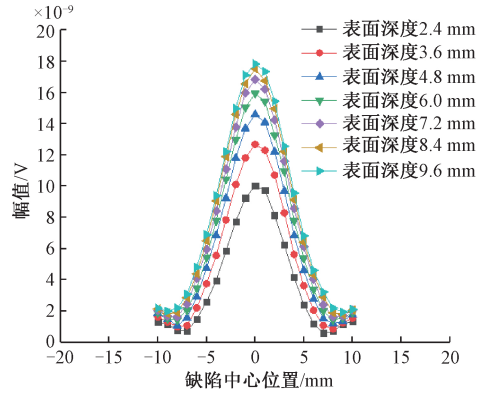


图 4　模型网格划分

Fig.4　Model meshing

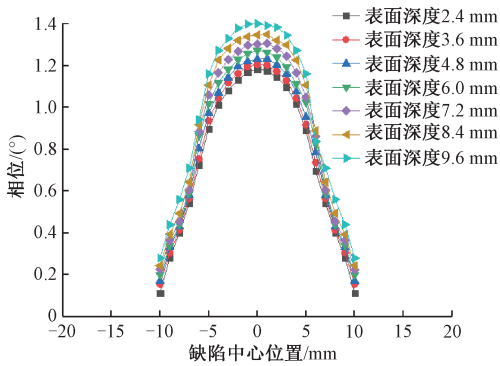
2.2　计算结果及分析

为研究低频电磁传感器对金属板构件中隐藏缺陷的检测能力,模拟传感器扫查缺陷,缺陷深度范围为 2.4~9.6 mm,步长为 1.2 mm,提取缺陷中心位置 10 mm 内幅值及相位信息,如图 5 所示。



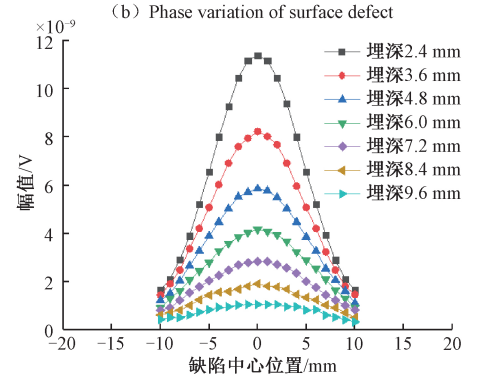
(a) 表面缺陷幅值变化

(a) Surface defect amplitude changes



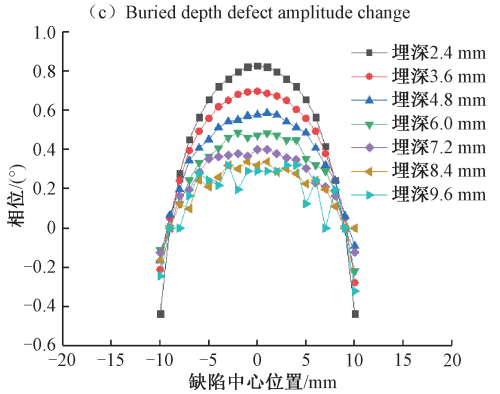
（b）表面缺陷相位变化

（b）Phase variation of surface defect



（c）埋深缺陷幅值变化

（c）Buried depth defect amplitude change



（d）埋深缺陷相位变化

（d）Phase variation of buried depth defect

图 5 表面、埋深缺陷仿真结果

Fig.5 Simulation results of surface and buried depth defects

假设线圈在空气中的阻抗为 $Z_1 = R_1 - jX_1$，置于金属板缺陷试件上方时阻抗为 $Z = R + jX$，两者作差即得线圈阻抗的变化量为 $\Delta Z = Z - Z_1$。通过图 5 可以看出，缺陷信号的幅值和相位信号先上升后下降，当缺陷存在于表面或导体内部时，缺陷深度一定，线圈阻抗在缺陷中心位置处变化最大。当线圈位置一定，表面缺陷深度增加，线圈阻抗变化越大，而缺陷埋深增加时，线圈阻抗变化越小。且线圈越靠近导体时，缺陷深度改变对阻抗影响越显著。

如图 5(a)所示，当线圈位置在−10 mm 处时，表面深度由 2.4 mm 增加到 3.6 mm，相较于线圈在中心位置处，前者引起的幅值变化量为 $3.425\ 9\times10^{-10}$ V，后者引起的幅值变化量为 $2.662\ 1\times10^{-9}$ V，这充分说明了线圈在远离缺陷中心位置时，缺陷对线圈阻抗几乎不再产生影响，导致线圈阻抗变化量 ΔZ 趋近于 0。而从图 5(b)中阻抗变化量的相位来看，缺陷深度改变对相位影响不大，当线圈位置在 −10 mm 处时，表面深度由 2.4 mm 增加到 3.6 mm，引起的最大相位变化为 0.04°，当线圈在中心位置时，表面深度由 2.4 mm 增加到 9.6 mm，引起相位变化也仅为 0.22°，这说明表面深度改变对阻抗幅值的影响明显，对相位的影响微弱。

当缺陷存在于导体内部时，如图 5(c)所示，线圈位置在 10 mm 处时，缺陷埋深由 2.4 mm 增加到 3.6 mm，相较于线圈在中心位置处，前者引起的阻抗衰减为 8%，后者引起的阻抗衰减为 28%，从而证实了缺陷埋深增加较表面深度改变对幅值影响更大。而从图5(d)中阻抗变化量的相位来看，当线圈位置在 10 mm 处时，缺陷埋深由 2.4 mm 增加到 3.6 mm，引起的最大相位变化为 0.02°，当线圈在中心位置时，缺陷埋深由 2.4 mm增加到 9.6 mm，引起相位变化也仅为 0.13°，相较于表面缺陷深度改变其相位变化并无太大差距，即可得出缺陷深度改变对相位影响微乎其微，而对幅值影响显著。

3 传感器设计优化

3.1 多通道传感器研制

采用低频电磁检测系统对多通道低频电磁传感器进行研制，传感器截面如图 6 所示，其中激励磁芯内径为 45 mm，外径为 51 mm，磁脚宽度为 6 mm，磁极厚度为 70 mm，激励磁芯角度为 220°，匝数为 380 匝，检测线圈为圆形线圈，内径为 3 mm，外径为 4.3 mm，检测线圈高度为 4 mm，匝数为 600 匝，传感器具体参数见表 2。

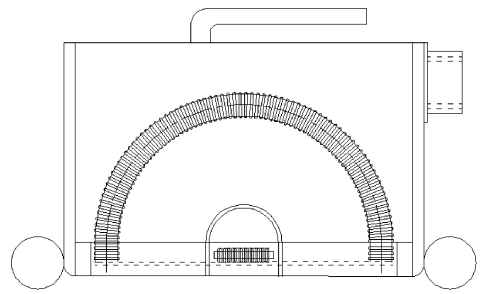


图 6 多通道低频电磁传感器示意图

Fig.6 Schematic diagram of multi-channel low-frequency electromagnetic sensor

表 2　传感器相关尺寸参数

Table 2　Sensor related dimension parameters

变量	参数
激励磁芯内径/mm	45
激励磁芯外径/mm	51
激励磁芯角度/(°)	220
激励磁芯厚度/mm	70
激励磁脚宽度/mm	6
激励线圈匝数/匝	380
检测线圈内径/mm	3
检测线圈外径/mm	4.3
检测线圈高度/mm	4
检测线圈匝数/匝	600

多通道低频电磁传感器由激励模块、磁屏蔽层、检测模块及外壳体组成。其中激励模块由激励磁芯、激励线圈共同构成,因激励磁芯磁导率高低决定了产生激励磁场的大小,在此选取磁导率较高的铁基纳米晶作为激励磁芯,进一步,通过对磁芯形状的优化,发现 C 型为最佳。而检测模块由 16 个检测线圈依次阵列排布,各相邻的 2 个检测线圈构成一个采集通道,如图 7 所示,通过在检测线圈内部加入磁芯增加聚磁能力,在一定程度上提高传感器检测灵敏度。因传感器各通道间的连接方式以及排布方式直接或间接影响着检测效果,当 8 组检测通道内的检测线圈电流方向一致,单个检测通道内的 2 个检测线圈串联差动时,传感器具备检测能力。

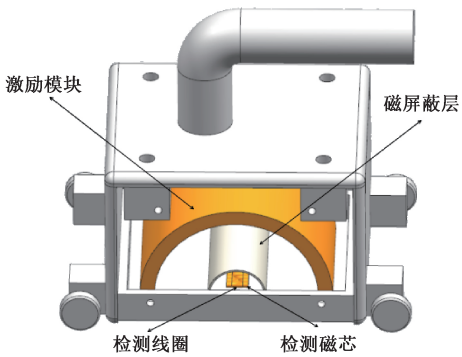


图 7　多通道低频电磁传感器内部构造图

Fig.7　Internal structure diagram of multi-channel low-frequency electromagnetic sensor

通过对影响传感器灵敏度相关参数的优化,研制出了一种多通道低频电磁传感器,为考虑现场应用,设计了传感器外壳,通过在外壳体底部设置滚轮,可以提高信号采集过程中的平稳性,与手柄助推装置一同为传感器的信号采集提供保障,图 8 所示即为设计的传感器实物。

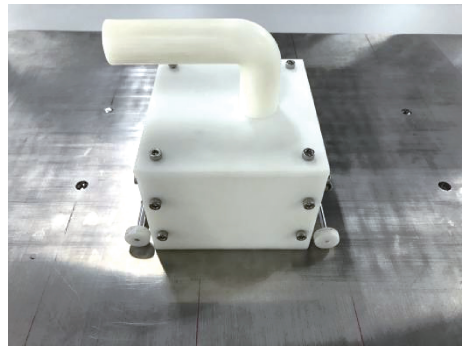


图 8　多通道低频电磁传感器实物图

Fig.8　Physical diagram of multi-channel low-frequency electromagnetic sensor

3.2　传感器优化

1)激励线圈匝数

低频电磁激励模块产生的磁场大小与激励线圈的匝数有着直接的关系,为了能够检测到金属板构件的深层缺陷,首先对激励线圈匝数进行了优化。选取线径为 0.65 mm 的漆包线在 C 型激励磁芯上分别绕满 1 层(195 匝)、2 层(390 匝)、3 层(575 匝),激励频率为 200 Hz,对 12 mm 厚 304 不锈钢表面 ϕ12 mm 深度为 1.2~9.6 mm 的圆柱-锥形复合缺陷进行检测,缺陷具体参数如图 9 所示。

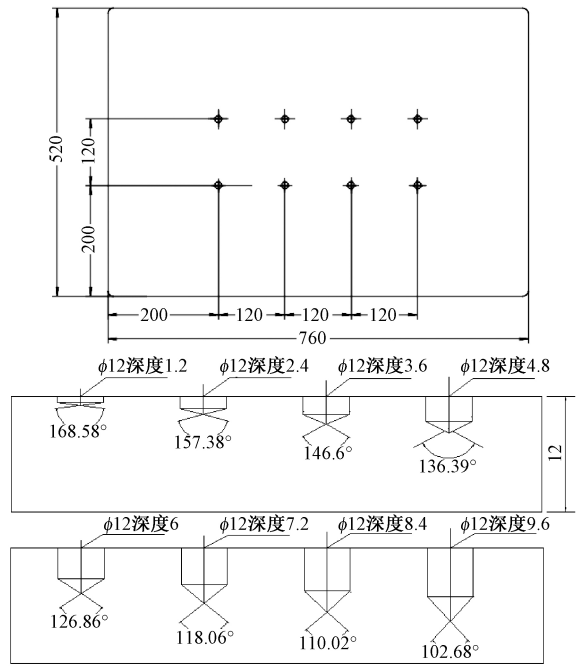
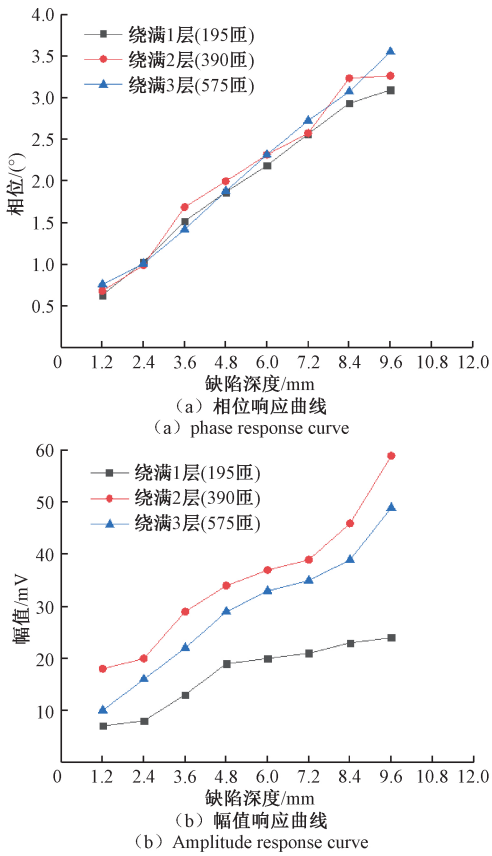


图 9　圆柱-锥形复合缺陷尺寸图

Fig.9　Dimension diagram of cylindrical-cone composite defect

不同激励线圈匝数缺陷检测结果如图 10 所示,从图 10 中可以看出,在同一激励线圈匝数下,缺陷深度越大,

幅值与相位响应越明显,而激励线圈匝数增加,同一缺陷的信号并不是对应增强。当表面深度由 1.2 mm 增加到 9.6 mm 时,激励磁芯绕满 1 层(195 匝)、2 层(390 匝)、3 层(575 匝)对应的检测相位变化量分别为 2.74°、2.59°、2.8°,幅值变化量为 17、41、36 mV,可以发现激励线圈匝数改变对幅值影响较相位更显著。如图 10(b)所示,当激励磁芯绕满 1 层(195 匝)时,其检测幅值信号均弱于激励磁芯绕满 2 层(390 匝)及 3 层(575 匝),且激励磁芯绕满 2 层(390 匝)时检测灵敏度最佳,考虑线圈散热问题,后续研究中均选择绕满 2 层(390 匝)的激励磁芯。



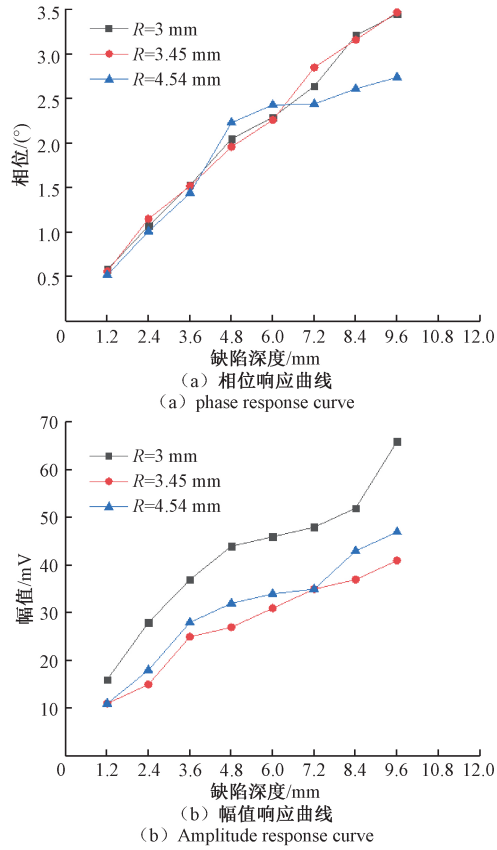
(a) 相位响应曲线
(a) phase response curve
(b) 幅值响应曲线
(b) Amplitude response curve

图 10 不同激励线圈匝数缺陷检测结果

Fig.10 Defect detection results of different excitation coil turns

2)检测线圈内径、高度

为了进一步提高传感器的检测灵敏度,选取优化后的激励模块对检测线圈进行优化。由于影响检测线圈灵敏度的因素众多,而检测线圈内径、高度对传感器的接收能力有较大影响,因此选择内径、高度进行优化。在保证激励线圈匝数为 380 匝,线径为 0.65 mm,激励频率选取 200 Hz,检测线圈为同一阻抗的条件下,分别将内径为 3、3.45、4.54 mm 的检测线圈先后与优化后的激励模块匹配,对 12 mm 厚 304 不锈钢表面 ϕ12 mm 深度为 1.2~9.6 mm 圆柱-锥形复合缺陷进行检测,不同内径检测线圈下的检测结果如图 11 所示。



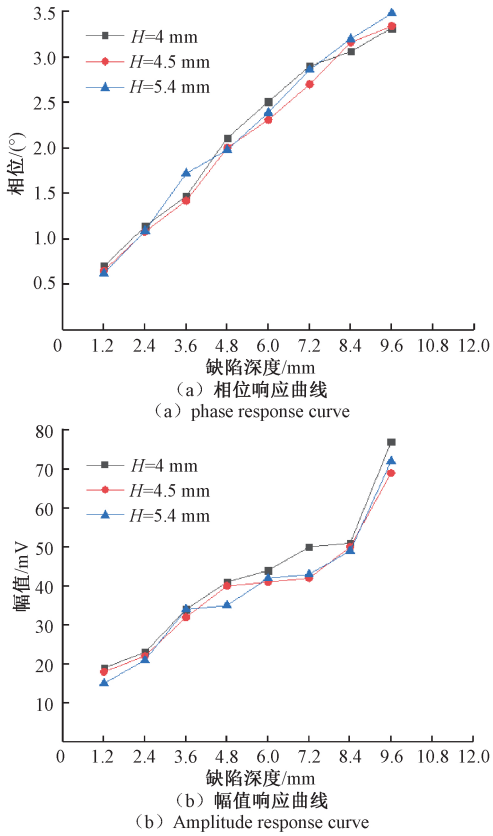
(a) 相位响应曲线
(a) phase response curve
(b) 幅值响应曲线
(b) Amplitude response curve

图 11 不同内径检测线圈缺陷检测结果

Fig.11 Defect detection results of coil with different inner diameters

通过提取检测幅值与相位信息可知,在同一内径检测线圈下,缺陷深度增加,检测幅值与相位信号增加。当表面深度为 6 mm 时,检测线圈内径为 3、3.45、4.54 mm 对应的检测相位分别为 2.29°、2.26°、2.43°,幅值分别为 46、31、34 mV,相比内径为 3 mm 时幅值信号,内径为 3.45、4.54 mm 幅值分别衰减了 32.6%、26.1%,随着检测线圈内径增加,同一缺陷的幅值信号存在一定程度的衰减。如图 11(b)所示,当检测线圈内径为 3 mm 时,其检测灵敏度最优,为了提高检测线圈的灵敏度,宜选择 3 mm作为检测线圈的内径。在此基础上,对检测线圈高度进行了优化,在保证相同条件下,将内径为 3 mm,高度为 4、4.5、5.4 mm 的检测线圈先后与优化后的激励模块匹配,对 12 mm 厚 304 不锈钢表面 ϕ12 mm 深度为 1.2~9.6 mm 圆柱-锥形复合缺陷进行检测。

不同高度检测结果如图 12 所示。从图 12 中可以看出,检测线圈高度改变对检测结果产生的影响较内径弱。当表面深度由 1.2 mm 增加到 9.6 mm 时,检测线圈高度为 4、4.5、5.4 mm 对应的检测相位变化斜率分别为



（a）相位响应曲线
（a）phase response curve

（b）幅值响应曲线
（b）Amplitude response curve

图 12　不同高度检测线圈缺陷检测结果

Fig.12　Defect detection results of coil at different heights

0.31、0.32、0.34,幅值分别为 58、51、57 mV,三者区分不大,而由图 12(b)可知,当缺陷深度为 7.2 mm 时,相较于检测线圈高度为 4 mm 对应的幅值 50 mV,高度为 4.5、5.4 mm 幅值分别衰减了 16%、14%,检测线圈高度为 4 mm时其幅值信号的拾取能力更优,后续研究中均选取 4 mm 作为检测线圈高度。

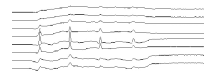
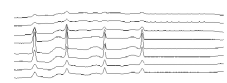
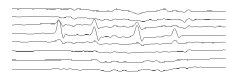
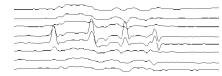
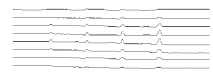
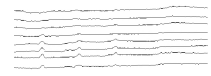
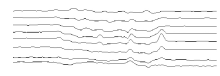
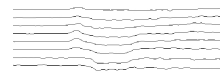
4　试验验证

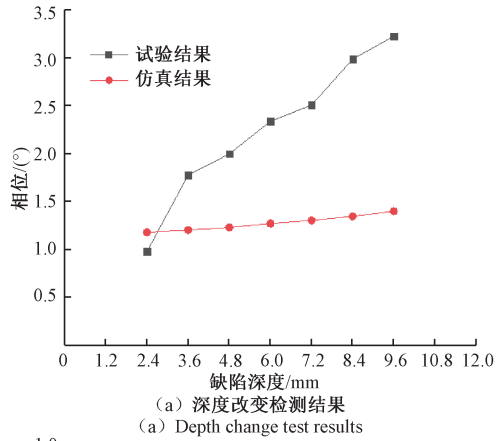
为验证优化后的多通道低频电磁传感器实际检测效果,对 12 mm 厚 304 不锈钢、20#碳钢 ϕ12 mm 深度为 1.2~9.6 mm 表面及埋深圆柱-锥形复合缺陷进行检测。因被检对象材质不同,磁导率不同,施加的激励频率也不尽相同。考虑到低频电磁幅值信号对不同材质埋深缺陷表征效果不佳,而增加的相位信号可以完善对埋深缺陷的有效表征,表 3 所示即为对应的相位检测结果。

通过提取 12 mm 厚 304 不锈钢 ϕ12 mm 深度为 2.4~9.6 mm 表面、埋深缺陷相位,与仿真结果对比,如图 13(a)所示,当表面缺陷深度由 2.4 mm 增加到 9.6 mm 时,试验结果相位变化斜率为 0.31,仿真结果

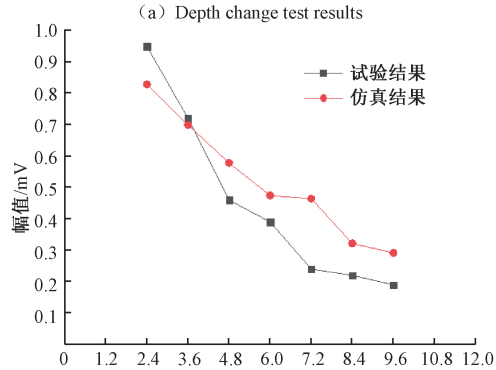
表 3　304 不锈钢、20#碳钢表面、埋深缺陷相位检测结果

Table 3　304 stainless steel, 20# carbon steel surface, buried depth detection results

材质	缺陷	ϕ12 mm 深度/埋深 1.2~4.8 mm	ϕ12 mm 深度/埋深 6~9.6 mm
不锈钢	表面缺陷		
碳钢	表面缺陷		
不锈钢	埋深缺陷		
碳钢	埋深缺陷		



（a）深度改变检测结果
（a）Depth change test results



（b）埋深改变检测结果
（b）Buried depth change test results

图 13　304 不锈钢缺陷检测结果

Fig.13　304 stainless steel defect detection results

相位变化斜率为 0.05，虽差距较大，但整体变化趋势一致。当不锈钢埋深缺陷深度增加，如图 13(b)所示，仿真与试验相位均呈现递减趋势，当埋深缺陷深度由 2.4 mm 递增到9.6 mm 时，试验结果相位变化了 0.76°，仿真结果相位变化了 0.54°，二者相差不大。通过对比试验与仿真结果表明研制的多通道低频电磁传感器对金属板构件隐藏缺陷检测可行性。

与此同时，采用 ECT2004 常规涡流检测仪对 12 mm 厚 304 不锈钢及 20#碳钢 ϕ12 mm 埋深为 2.4～9.6 mm 缺陷进行检测，激励频率选择 200 kHz，前置增益为 15 dB，后置增益 35 dB，增益比为 3∶1，可以实现对 304 不锈钢埋深 6 mm 缺陷识别，20#碳钢埋深识别不足 1 mm，这也验证了低频电磁检测技术的优越性。

为研究材质改变对检测结果带来的影响，将研制的多通道低频电磁传感器对 12 mm 厚 20#碳钢 ϕ12 mm 深度为 1.2～9.6 mm 表面及埋深缺陷进行检测，由图 14 所示检测结果可知，相比 1.2 mm 深缺陷相位 0.55°，2.4、3.6 mm 深的缺陷信号相位分别增加了 65.4%、104%，随着表面缺陷深度增加，检测信号的相位越大，而随着埋深缺陷深度改变，其检测相位信号在埋深 8.4 mm 处趋近于 0，对埋深 8.4 mm 以下缺陷无法有效表征，表面缺陷埋深信号越深检测相位信号越小。

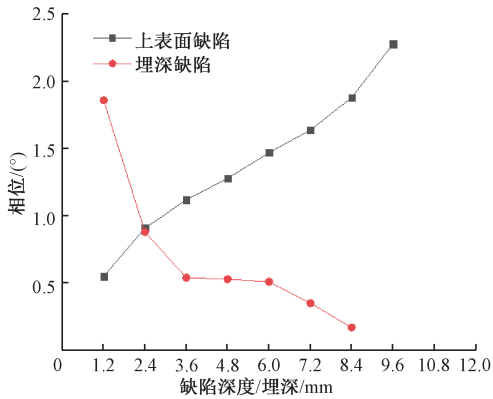


图 14 20#碳钢不同深度、埋深检测结果

Fig.14 Test results of 20# carbon steel with different depths and buries

提取不同材质缺陷检测信号相位进行线性拟合如图 15 所示，针对上表面缺陷而言，随着缺陷深度增加，不锈钢线性相关系数为 0.968 0，碳钢为 0.978 9，缺陷深度与检测相位呈现良好的线性度；当检测埋深缺陷时，幅值信号衰减过大，不利于实现对缺陷有效表征，随埋深深度改变，不锈钢线性系数为 0.837 9，碳钢为 0.733 1，可以通过对标准试板标定的方法，多次扫查求取均值来提高检测结果的精度与可靠性。

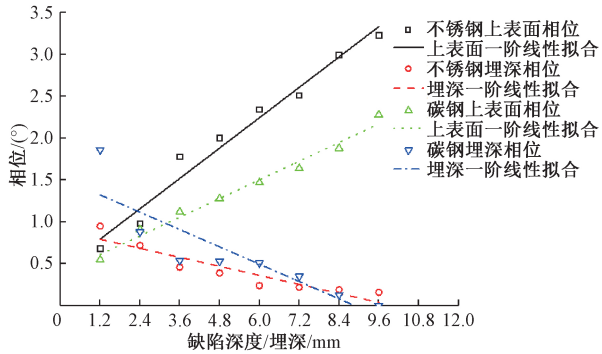


图 15 不同深度/埋深缺陷一阶线性拟合结果

Fig.15 Results of first order linear fitting for defects of different depth/buried depth

5 结 论

1)通过有限元仿真分析了传感器对模拟缺陷的识别能力，为传感器的优化与设计提供了思路。

2)研制了一种高灵敏度、快速高效的多通道低频电磁传感器。检测包括 8 组检测通道，每组检测通道包含 2 个检测线圈，各相邻的 2 个检测线圈构成一个采集通道，通过对传感器优化试验可以发现：当激励磁芯形状为 C 型，激励磁芯绕制 2 层(390 匝)，检测线圈内径为 3 mm，高度为 4 mm 时，对缺陷的识别能力最佳。

3)在实际检测中研制的多通道低频电磁传感器具备对 12 mm 厚 304 不锈钢 ϕ12 mm 深度 1.2～9.6 mm 上表面及埋深缺陷的检测能力。同时对 12 mm 厚 20#碳钢 ϕ12 mm 埋深 8 mm 缺陷检测效果良好。

参考文献

[1] 郑津洋.我国承压设备学的研究现状和优先研究领域[J].石油机械,2005, 33(3):21-24.
ZHENG J Y.Research status and priority field of pressure equipment in China [J]. Petroleum Machinery, 2005, 33(3):21-24.

[2] 沈功田.承压设备无损检测与评价技术发展现状[J].机械工程学报,2017, 53(12): 1-12.
SHEN G T. Development of nondestructive testing and evaluation technology for pressure equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering,2017, 53(12): 1-12.

[3] 闫宏伟,梁利文.浅谈锅炉承压管道无损检测技术现状及发展[J].中国电力教育, 2013(26):235-236.
YAN H W, LIANG L W. Discussion on the status and development of nondestructive testing technology for boiler pressure pipe [J]. China Electric Power Education, 2013(26):235-236.

[4] 汪磊,钱盛杰.不开罐压力容器内表面腐蚀凹坑的相控

阵超声检测[J].油气储运,2018,37(11):1291-1295.
WANG L,QIAN SH J. Phased array ultrasonic detection of corrosion pits on inner surface of pressure vessel without opening tank [J]. Oil and Gas Storage and Transportation,2018,37(11):1291-1295.

[5] 黄学斌.红外热像检测技术在承压设备检验中的应用[J].石油化工设备,2014,43(4):76-82.
HUANG X B. Application of infrared thermography in pressure equipment inspection [J]. Petrochemical Equipment,2014,43(4):76-82.

[6] 唐飞阳亮,王恒,张立斌,等.相控阵超声与数字射线检测技术在锅炉水冷壁焊缝检测中的应用对比[J].无损检测,2019,41(8):58-61.
TANG F Y L,WANG H,ZHANG L B,et al.Comparison of application of phased array ultrasonic and digital ray detection technology in weld detection of boiler water wall [J]. Nondestructive Testing,2019,41(8):58-61.

[7] 岳庚新.涂层厚度对涡流检测的影响[J].无损检测,2018, 40(1):34-36.
YUE G X.Effect of coating thickness on eddy current testing [J]. Nondestructive Testing,2018, 40(1):34-36.

[8] 任吉林,林俊明.电磁无损检测[M].北京:科学出版社,1989.
REN J L, LIN J M. Electromagnetic Nondestructive Testing [M]. Beijing:Science press,1989.

[9] GOTOH Y, FUJIOKA H, TAKAHASHI N. Proposal of electromagnetic inspection method of outer side defect on steel tube with steel support plate using optimal differential search coils [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5):1006-1009.

[10] 常予,焦敬品,李光海,等.漏磁传感器励磁结构影响因素分析及优化设计[J].机械工程学报,2018, 54(24):21-31.
CHANG Y, JIAO J P, LI G H, et al. Analysis and optimization design of excitation structure of magnetic flux leakage sensor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24):21-31.

[11] HO CHANG. Development of magnetic flux leakage robot for large-sized tanks bottom floor[C]. Advanced Science and Industry Research Center: Proceedings of 2018 3rd International Conference on Automation,2018:5.

[12] 阮小飞.钢轨缺陷低频漏磁涡流检测方法的研究[D].北京:北京交通大学,2008.
RUAN X F. Research on low frequency magnetic flux leakage eddy current detection method for rail defects [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2008.

[13] LOU W M, SHEN CH Y, ZHU ZH H, et al. Internal defect detection in ferromagnetic material equipment based on low-frequency electromagnetic technique in 20# steel plate[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(16): 6540-6546.

[14] 雷银照.时谐电磁场解析方法[M].北京科学出版社,2000.
LEI Y ZH. Analytical Method of Time-Harmonic Electromagnetic Field [M]. Beijing: Science Press, 2000.

[15] ZHANG D L, CAO Y N, WANG C, et al. A new method of defects identification for wire rope based on three-dimensional magnetic flux leakage [C]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 48(1): 334-338.

作者简介

余亚东,现为南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室硕士研究生,主要研究方向为电磁无损检测新技术。
E-mail: 2938211613@ qq.com

Yu Yadong is currently a M. Sc. candidate in the key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education at Nanchang Hangkong University. His main research interests include new electromagnetic testing technology and nondestructive testing.

李光海(通信作者),1992 年于南京化工学院获得学士学位,分别在 1998 年和 2002 年于华南理工大学获得硕士和博士学位,现为中国特种设备检测研究院研究员,主要研究方向为特种设备检验检测。
E-mail: liguanghai@ Tsinghua.org.cn

Li Guanghai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanjing Institute of Chemical Engineering in 1992, received his M. Sc. and Ph. D. degree both from South China University of Technology in 1998 and 2002, respectively. He is currently a researcher of China special equipment testing research institute. His main research interests include special equipment testing.