DOI: 10.13382/j.jemi.B2104306

构件损伤脉冲调制涡流检测探头新构型及性能综合分析*

刘正帅[1]　李　勇[1,2]　任淑廷[1]　张　超[1]　陈振茂[1,2]

(1. 西安交通大学　航天航空学院　机械结构强度与振动国家重点实验室　西安　710049;
2. 陕西省无损检测与结构完整性评价工程技术研究中心　西安　710049)

摘　要:金属构件在加工制造和服役期间常出现腐蚀、裂纹等结构型损伤,影响结构完整性,威胁设备安全运行。因此,对金属构件实施高效无损定量检测非常重要。基于传统涡流检测探头结构,提出一种漏斗形磁芯探头新构型,可在脉冲调制涡流检测中有效提高对表面和背面缺陷的检测灵敏度。针对所提探头,通过建立其解析模型并推导检测信号解析表达式,系统探究该探头的检测性能。仿真研究表明,所提漏斗形磁芯探头在金属构件表面和背面减薄缺陷检测中具有更高灵敏度,并开展系列实验研究。实验研究在验证仿真结论的同时,进一步证实所提漏斗形磁芯探头在提升金属构件表面与背面局部腐蚀缺陷检测灵敏度方面的有效性。

关键词: 电磁无损检测;脉冲调制涡流检测;漏斗形磁芯探头;解析建模;灵敏度分析

中图分类号: TG115　　**文献标识码**: A　　**国家标准学科分类代码**: 430.25

Novel structure and performance analysis of pulse-modulation eddy current probes for testing of damages in structural components

Liu Zhengshuai[1]　Li Yong[1,2]　Ren Shuting[1]　Zhang Chao[1]　Chen Zhenmao[1,2]

(1. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Shaanxi Engineering Research Centre of NDT and Structural Integrity Evaluation, Xi'an 710049, China)

Abstract: The metallic components are normally subject to such structural anomalies as corrosion and cracks, etc. during fabrication and practical service. These flaws have posed a severe threat to structural integrity and safety of engineering apparatus. In consequence, it is imperative to non-invasively inspect and evaluate the metallic components via efficient non-destructive evaluation techniques. Based on the conventional structure of the eddy current probe, in this paper a ferrite-cored funnel probe is proposed in an effort to further enhance the testing sensitivity in pulse-modulation eddy current testing of surface and back surface corrosion. The analytical model and closed-form expressions of testing signals from the proposed probe have been established for investigation of the testing performance. Following the identification of the higher sensitivity of the proposed probe to surface and back surface corrosion in metallic components, a series of experiments are conducted. Through the experiments, the validity of the conclusion of simulation is affirmed. Further experiments demonstrate the enhancement of testing sensitivity in respect to localized defect on surface and back surface.

Keywords: electromagnetic nondestructive evaluation; pulse-modulation eddy current inspection; ferrite-cored funnel probe; analytical modelling; sensitivity analysis

0　引　言

铝、钛、不锈钢等金属构件在航空航天、能源化工和核工业中有着广泛应用,长期的服役过程伴随高温高压等极端严苛的环境条件,易使构件表面、亚表面及背面产生腐蚀、裂纹等不可逆损伤缺陷,威胁设备安全运行。运用涡流检测等无损检测手段,能够及早发现与评估构件

收稿日期: 2021-05-17　Received Date: 2021-05-17

*基金项目:国家自然科学基金(51777149, 11927801)、国家磁约束核聚变能发展研究专项(2019YFE03130003)、国家重点研发项目(2017YFF0209703)资助

损伤状况,提高设备运行的安全性与经济性。近年来暂态涡流检测技术逐步受到关注,该技术具有频谱丰富、检测深度大、分辨率高等显著特征,在多层结构、深层和背面缺陷检测方面相比传统涡流检测技术具有优势[1-3]。本文所用脉冲调制涡流检测技术是由脉冲涡流检测延伸出的检测新方法之一,将脉冲涡流检测激励信号脉冲段的直流信号置换为谐波信号,增强了特定谐波频率附近激励能量和试件内激发电磁场的可控分布,提高了对亚表面及深层缺陷的检测灵敏度[4]。

探头对缺陷的检测灵敏度是影响缺陷检出能力与定量评估精度的关键因素,因此国内外研究人员越来越重视通过探头构型优化、信号处理等手段提高对缺陷的检测灵敏度。Bai 等[5]提出了一种新型的涡流检测阵列探头,通过两排激励线圈与一排检测线圈将三相激励探头阵列化,用于蒸汽发生器管的检测;Rifai 等[6]设计了一种分布式涡流检测系统用于铁磁性管道的缺陷检测,并针对管道尺寸优化了所需 GMR 阵列传感器的数目;Ra 等[7]针对螺栓裂纹检测通过有限元模拟与涡流检测试验优化了轴绕式探头的线圈匝数、尺寸和激励频率等参数;Arjun 等[8]针对 8 mm 不锈钢板的亚表面埋藏缺陷比较了绝对式铁芯探头、收发式磁芯探头和外加屏蔽的收发式磁芯探头的性能,并对探头参数进行了系列优化;Rao 等[9]通过提取新的信号特征,提高了脉冲涡流检测不锈钢板亚表面深层缺陷的检测灵敏度;Ulapane 等[10]针对铁磁性材料的厚度测量提出了一种基于检测线圈电压衰减率的定量评估方法,推导了衰减率与材料厚度之间的线性关系,提高了铁磁性材料厚度测量的检测灵敏度。

国内方面,刘平政等[11]通过改变传统平面远场涡流检测探头的线圈放置方式,设计了一种激励线圈与检测线圈同轴放置的新型平面远场涡流检测探头,大幅缩小了探头尺寸;徐志远等[12]针对压力管道弯头部位的缺陷检测,设计了一种管外放置的远场涡流探头,可满足在役检测的需求;吴斌等[13]基于三维有限元仿真和实验测试探究了柔性涡流检测线圈贴附于被测体表面检测时弯曲角度对检测灵敏度的影响;陈云瑞等[14]将传统 T-R 型探头的发射线圈替换为矩形线圈,提出了一种针对碳纤维预浸料检测的矩形-圆形涡流检测探头,相比传统 T-R 型探头对纤维弯曲方向有很好的表征且受提离影响更小;蒋诗超等[15]针对飞机多层金属板隐藏裂纹进一步优化了远场涡流检测探头的结构参数,对埋藏较深的裂纹具有较好的检测效果;陈涛等[16]将传统差动式涡流探头的激励线圈改为跑道型并将差分感应线圈包裹在内,提出了一种跑道型差动式涡流检测探头,相比传统差动式涡流检测探头具有更紧凑的结构和更高的缺陷检测灵敏度;陶钰等[17]设计了一种基于环形 TMR 传感器阵列的涡流检测探头并用于核电站蒸汽发生器换热管缺陷检测;李伟等[18]设计了一种赫姆霍兹线圈式检测探头,实现了不锈钢管道内的均匀电磁场检测;韩宁等[19]提出了一种基于阵列式传感器的旋转磁场涡流检测探头,通过相隔 60°的 3 组绕组并通以三相电流来实现磁场旋转;Li 等[20]提出了一种漏斗形探头构型,能够有效提高探头对背面腐蚀缺陷的检测灵敏度和定量评估精度。

文献[20]中漏斗形探头对背面缺陷具有更高的检测灵敏度,在线圈场强度上表面为背面线圈场强度高于盘式探头,但表面线圈场强度并不具有优势。本文在漏斗形探头基础上引入磁芯,通过聚磁使背面的线圈场强度优势扩展至表面,实现了漏斗形磁芯探头相比盘式磁芯探头对表面和背面缺陷高灵敏度检测的兼顾。通过建立漏斗形磁芯探头的理论模型,结合理论仿真与实验研究验证了所提漏斗形磁芯探头对表面和背面腐蚀缺陷都具有更高的检测灵敏度。

1　解析建模与场量解析表达式

针对所提漏斗形磁芯脉冲调制涡流检测探头,将其置于连续均匀、各向同性的多层被测体表面实施脉冲调制涡流检测,检测示意图如图 1 所示。

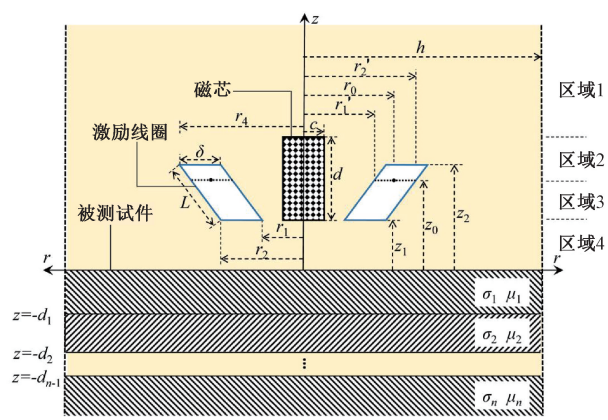


图 1　漏斗形磁芯探头检测多层被测体

Fig. 1　Ferrite-cored funnel probe investigating multi-layered conductors

漏斗形磁芯探头由漏斗形激励线圈(截面为平行四边形)、圆柱形磁芯和位于磁芯正下方的磁场传感器组成。图 1 中磁芯半径为 c,高度为 d。漏斗形激励线圈下底边高度 z_1,内径 r_1,外径 r_2($r_2=r_1+\delta$);上底边高度 z_2,内径 r_3,外径 r_4($r_4=r_3+\delta$)。求解域半径为 h,$z=-d_1$、$z=-d_2$ 等为多层被测体交界面位置,σ_1、μ_1、σ_2、μ_2 等分别为多层被测体电导率和磁导率。

模型建立过程中,先将漏斗形激励线圈模型退化为细丝线圈模型。以细丝线圈的位置($z=z_0$)及磁芯上底边($z=z_1$)和下底边($z=z_1+d$)为参照,将被测体上方求解域

划分为 4 个区域,磁场传感器位于区域 4 内。基于 ETREE 解析法[21]推导可得细丝线圈激励下区域 4 内任意位置处磁矢位的解析表达式(时谐形式)为:

$$A_4(r,z,\omega)=\boldsymbol{J}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})\boldsymbol{a}^{-1}[\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{az}}+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{az}}\boldsymbol{\eta}(\omega)]\boldsymbol{C}_4 \tag{1}$$

二维轴对称模型下,磁矢位 $\boldsymbol{A}$ 仅有 φ 分量,故本文磁矢位统一写为标量形式。其中,ω 为时谐信号角频率,$\boldsymbol{J}_1^{\mathrm{T}}(ar)$ 是 $1\times N_s$ 的行向量,向量元素为 $J_1(a_ir)$,其中 N_s 为特征值个数,$i=1,2,3,\cdots,N_s$,$J_n(x)$ 为第 1 类贝塞尔函数;$\boldsymbol{a}$、$\boldsymbol{e}^{az}$、$\boldsymbol{e}^{-az}$ 和 $\boldsymbol{\eta}(\omega)$ 为 $N_s\times N_s$ 对角阵,主对角线元素分别为 a_i、e^{aiz}、e^{aiz} 和 $\eta_i(\omega)$,a_i 为区域 1 和区域 4 的特征根,对应特征方程 $J_1(a_ih)=0$ 的根,$\eta_i(\omega)$ 为多层导体板反射系数,可由多层被测体递推得出[21];$\boldsymbol{C}_4$ 为 $N_s\times 1$ 的列向量。

$$\boldsymbol{C}_4=\mu_0I_0\boldsymbol{M}^{-1}[(\boldsymbol{U}-\boldsymbol{T})\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{qd}}\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{\kappa}_1+(\boldsymbol{U}+\boldsymbol{T})\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{qd}}\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{\kappa}_2] \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\boldsymbol{M}=&\{(\boldsymbol{U}+\boldsymbol{T})\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{qd}}[(\boldsymbol{T}^{-1}+\boldsymbol{U}^{-1})+(\boldsymbol{T}^{-1}-\boldsymbol{U}^{-1})\boldsymbol{\eta}(\omega)]-\\&(\boldsymbol{U}-\boldsymbol{T})\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{qd}}[(\boldsymbol{T}^{-1}-\boldsymbol{U}^{-1})+(\boldsymbol{T}^{-1}+\boldsymbol{U}^{-1})\boldsymbol{\eta}(\omega)]\}\boldsymbol{E}\end{aligned} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\kappa}_1=\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{qz}_0}r_0\boldsymbol{R}_1(\boldsymbol{q}r_0),\boldsymbol{\kappa}_2=\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{qz}_0}r_0\boldsymbol{R}_1(\boldsymbol{q}r_0) \tag{4}$$

式中:μ_0 为真空磁导率,I_0 为激励电流;$\boldsymbol{e}^{qd}$、$\boldsymbol{e}^{-qd}$、$\boldsymbol{e}^{qz0}$ 和 $\boldsymbol{e}^{-qz0}$ 为 N_s 阶对角阵,主对角线元素分别为 e^{q_id}、e^{-q_id}、$e^{q_iz_0}$ 和 $e^{-q_iz_0}$。矩阵 $\boldsymbol{D}$、$\boldsymbol{E}$ 为 N_s 阶对角阵,主对角线元素为 D_{ii}、E_{ii};$\boldsymbol{T}$、$\boldsymbol{U}$ 为 N_s 阶方阵,矩阵元素为 T_{ij}、U_{ij};$\boldsymbol{R}_1(\boldsymbol{q}r_0)$ 为 $N_s\times 1$ 的列向量,向量元素为 $R_1(q_ir_0)$,上述各元素表达式为:

$$\begin{cases}D_{ii}=\dfrac{h^2}{2}R_0^2(q_ih)+\dfrac{c^2(\mu_c-1)}{2\mu_c{}^2}[J_0^2(q_ic)-\mu_cJ_1^2(q_ic)]\\R_0(q_ih)=A_{ac}(q_ic)J_0(q_ih)+B_{ac}(q_ic)Y_0(q_ih)\end{cases} \tag{5}$$

$$E_{ii}=\frac{h^2}{2}J_0^2(a_ih) \tag{6}$$

$$T_{ij}=\begin{cases}\dfrac{a_ic(\mu_c-1)}{(a_i^2-q_j^2)\mu_c}J_1(a_ic)J_0(q_jc),a_i\neq q_j\\\dfrac{h^2}{2}J_0(q_jh)R_0(q_jh)+\dfrac{c^2(\mu_c-1)}{2\mu_c}J_0^2(q_jc),a_i=q_j\end{cases} \tag{7}$$

$$U_{ij}=\begin{cases}\dfrac{a_ic(\mu_c-1)}{(a_i^2-q_j^2)\mu_c}J_0(a_ic)J_1(q_jc),a_i\neq q_j\\\dfrac{h^2}{2}J_0(q_jh)R_0(q_jh)-J_1(q_jc)(\mu_c-1)\cdot\\\left[\dfrac{c^2}{2\mu_c}J_1(q_jc)+\dfrac{c}{2q_j\mu_c}J_0(q_jc)\right],a_i=q_j\end{cases} \tag{8}$$

$$\begin{cases}R_1(q_ir_0)=A_{ac}(q_ic)J_1(q_ir_0)+B_{ac}(q_ic)Y_1(q_ir_0)\\A_{ac}(q_ic)=\dfrac{c\pi q_i}{2\mu_c}[\mu_cJ_1(q_ic)Y_0(q_ic)-J_0(q_ic)Y_1(q_ic)]\\B_{ac}(q_ic)=\dfrac{c\pi q_i}{2\mu_c}(1-\mu_c)J_0(q_ic)J_1(q_ic)\end{cases} \tag{9}$$

式中:$Y_n(x)$ 为第 2 类贝塞尔函数,μ_c 为磁芯的相对磁导率。式(2)~(9)所示区域 2 和区域 3 的特征根为 q_i,可通过对特征方程 $A_{ac}(q_ic)J_1(q_ih)+B_{ac}(q_ic)Y_1(q_ih)=0$(由 Dirichlet 边界条件得出)的正实数根进行求取而获得,在具体计算方面,可采用 MATLAB 内置函数"*fnzeros*"对特征方程在实数域进行寻根来实现。

基于以上细丝磁芯探头模型,注意到细丝线圈位置 (r_0,z_0) 仅与磁矢位 A_4 表达式中的 $\boldsymbol{\kappa}_1$ 和 $\boldsymbol{\kappa}_2$ 关联。故由细丝磁芯探头模型拓展至漏斗形磁芯探头模型时磁矢位表达式可仅通过置换系数 $\boldsymbol{\kappa}_1$ 和 $\boldsymbol{\kappa}_2$ 获得。首先将细丝线圈沿径向延拓为平面线圈(线圈高度忽略不计),如图 1 所示,平面线圈内径为 r_1',外径为 r_2'。平面线圈系数 $\boldsymbol{\kappa}_1^S$ 和 $\boldsymbol{\kappa}_2^S$ 均为列向量,向量元素 $\kappa_{1,i}^S$ 和 $\kappa_{2,i}^S$ 的表达式为:

$$\begin{cases}\kappa_{1,i}^S=\displaystyle\int_{r_1'}^{r_2'}\kappa_{1,i}\mathrm{d}r_0=\frac{e^{q_iz_0}}{q_i^2}\chi(q_ir_1',q_ir_2')\\\kappa_{2,i}^S=\displaystyle\int_{r_1'}^{r_2'}\kappa_{2,i}\mathrm{d}r_0=\frac{e^{-q_iz_0}}{q_i^2}\chi(q_ir_1',q_ir_2')\end{cases} \tag{10}$$

其中 $\chi(x_1,x_2)=\int_{x_1}^{x_2}xR_1(x)\,\mathrm{d}x$。基于式(1)、(2)和(10)可得区域 4 内任意位置处磁矢位 A_4^S 表达式为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_4^S(\boldsymbol{r},\boldsymbol{z},\boldsymbol{\omega})=\dfrac{\mu_0I_0N}{(r_2-r_1)}\boldsymbol{J}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})\boldsymbol{a}^{-1}[\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{az}}+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{az}}\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\omega})]\boldsymbol{C}_4^S\\\boldsymbol{C}_4^S=\boldsymbol{M}^{-1}[(\boldsymbol{U}-\boldsymbol{T})\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{qd}}\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{\kappa}_1^S+(\boldsymbol{U}+\boldsymbol{T})\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{qd}}\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{\kappa}_2^S]\end{cases} \tag{11}$$

式中:N 为线圈匝数。根据 $\boldsymbol{B}=\nabla\times\boldsymbol{A}$,可进一步推得区域 4 内任意位置处磁感应强度表达式为:

$$\boldsymbol{B}_4^S(\boldsymbol{r},\boldsymbol{z},\boldsymbol{\omega})=\frac{\mu_0I_0N}{(r_2-r_1)}\{\boldsymbol{J}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})[-\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{az}}+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{az}}\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\omega})]\boldsymbol{r}+\boldsymbol{J}_0^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})[\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{az}}+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{az}}\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\omega})]\boldsymbol{z}\}\boldsymbol{C}_4^S \tag{12}$$

将平面线圈沿斜边 L 进行轴向扩展,最终得漏斗形线圈。考虑到斜边 L 中任意一点的坐标具有以下关系:

$$z_0=(r_0-r_2)g+z_1\quad(z_1\leqslant z_0\leqslant z_2,r_2\leqslant r_0\leqslant r_4) \tag{13}$$

式中:g 为漏斗形磁芯探头侧边的斜率,$g=(z_2-z_1)/(r_4-r_2)$。平面线圈系数沿斜边 L 叠加可得漏斗形线圈系数 $\boldsymbol{\kappa}_1^B$ 和 $\boldsymbol{\kappa}_2^B$ 均为列向量。向量元素 $\kappa_{1,i}^B$ 和 $\kappa_{2,i}^B$ 的表达式为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{\kappa}_{1,i}^{B}=\int_{l}\boldsymbol{\kappa}_{1,i}^{S}\mathrm{d}l=\dfrac{Le^{q_i(z_1-gr_1)}}{\delta q_i^2}\boldsymbol{\gamma}_{1,i}\\ \boldsymbol{\kappa}_{2,i}^{B}=\int_{l}\boldsymbol{\kappa}_{2,i}^{S}\mathrm{d}l=\dfrac{Le^{-q_i(z_1-gr_1)}}{\delta q_i^2}\boldsymbol{\gamma}_{2,i}\\ \boldsymbol{\gamma}_{1,i}=\int_{r_1}^{r_3}\mathrm{e}^{q_igr_1'}\chi(q_ir_1',q_i(r_1'+\delta))\mathrm{d}r_1'\\ \boldsymbol{\gamma}_{2,i}=\int_{r_1}^{r_3}\mathrm{e}^{-q_igr_1'}\chi(q_ir_1',q_i(r_1'+\delta))\mathrm{d}r_1'\end{cases}\tag{14}$$

基于式(1)、(2)和(14),对于漏斗形磁芯探头,区域 4 中任意位置处磁矢位 A_4^B 和磁感应强度 $\boldsymbol{B}_4^B$ 的解析表达式分别写为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}_4^B(\boldsymbol{r},z,\boldsymbol{\omega})=\dfrac{\mu_0I_0N\boldsymbol{J}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})\boldsymbol{a}^{-1}}{(r_2-r_1)(z_2-z_1)}[\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{a}z}+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{a}z}\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\omega})]\boldsymbol{C}_4^B\\ \boldsymbol{C}_4^B=M^{-1}[(\boldsymbol{U}-\boldsymbol{T})\boldsymbol{e}^{-q\boldsymbol{d}}\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{\kappa}_1^B+(\boldsymbol{U}+\boldsymbol{T})\boldsymbol{e}^{q\boldsymbol{d}}\boldsymbol{D}^{-1}\boldsymbol{\kappa}_2^B]\end{cases}\tag{15}$$

$$\boldsymbol{B}_4^B(\boldsymbol{r},z,\boldsymbol{\omega})=\frac{\mu_0I_0N}{(r_2-r_1)(z_2-z_1)}\{\boldsymbol{J}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})[-\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{a}z}+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{a}z}\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\omega})]\boldsymbol{r}+\boldsymbol{J}_0^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})[\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{a}z}+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{a}z}\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\omega})]z\}\boldsymbol{C}_4^B\tag{16}$$

式(16)是时谐激励下区域 4 内磁场感应强度的解析表达式,由该式出发,结合卷积处理可得暂态激励下磁场感应强度 $\boldsymbol{B}_4^B(\boldsymbol{r},z,t)$ 的解析表达式为:

$$\boldsymbol{B}_4^B(\boldsymbol{r},z,t)=\frac{\mu_0N}{(r_2-r_1)(z_2-z_1)}\{\boldsymbol{J}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})[-\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{a}z}I(t)+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{a}z}[I(t)\otimes\eta(t)]]\boldsymbol{r}+\boldsymbol{J}_0^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{ar})[\boldsymbol{e}^{\boldsymbol{a}z}I(t)+\boldsymbol{e}^{-\boldsymbol{a}z}[I(t)\otimes\eta(t)]]z\}\boldsymbol{C}_4^B\tag{17}$$

式中:$I(t)$ 为暂态激励电流信号;$\otimes$ 为循环卷积;$\eta(t)$ 由 $\boldsymbol{\eta}(\boldsymbol{\omega})$ 主对角线元素经傅里叶逆变换得出。鉴于涡流检测中磁场传感器往往置于探头对称轴处,磁感应强度 r 分量为 0,故基于式(17)可得磁场传感器输出检测信号(磁感应强度 z 分量 $\boldsymbol{B}_z$)的暂态表达式写为:

$$\boldsymbol{B}_z(\boldsymbol{r},z,t)=I(t)\otimes F^{-1}[\boldsymbol{B}_z(\boldsymbol{r},z,\boldsymbol{\omega})]\tag{18}$$

式中:F^{-1} 为傅里叶逆变换。在具体脉冲调制涡流检测仿真计算中,可采用式(18)高效求取漏斗形磁芯探头输出的检测信号。

2　理论仿真及性能比较

2.1　解析模型验证

在具体针对漏斗形磁芯探头进行性能分析之前,需对所建立的检测信号表达式进行验证,因此,以实验探头尺寸为参照设置表 1 所示仿真参数,采用有限元模型对式(18)计算结果进行验证。

表 1　模型参数

Table 1　Parameters of the model

N	h/mm	c/mm	d/mm	d_1/mm	σ_1/(MS·m^{-1})
205	200	4.92	16.7	6	34
r_1/mm	r_2/mm	r_3/mm	r_4/mm	z_1/mm	z_2/mm
8	8.8	14.8	15.6	3	13.1

脉冲调制涡流检测的激励波形如图 2 所示,载波频率 800 Hz,脉冲间隔 5 ms,调制波占空比 50%。

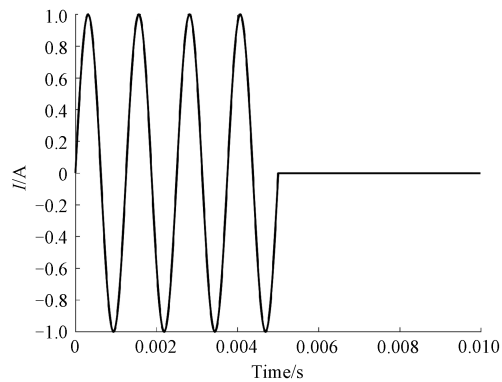


图 2　探头激励信号

Fig. 2　Excitation signal of the probe

图 3 所示为解析模型对比有限元模型的暂态计算结果,传感器位于磁芯下方中心位置 1.5 mm 处($r=0$,$z=1.5$ mm)。有限元模型参数设置与解析模型参数一致,网格总数 133 225 个。解析计算结果与有限元计算结果吻合,最大相对误差小于 0.5%,表明式(18)的正确性。此外,计算时间上解析模型更具优势性,计算耗时:解析模型 4.33 s,有限元模型 203 s,体现了本问题下解析模型及信号解析表达式在仿真计算中的高效性。

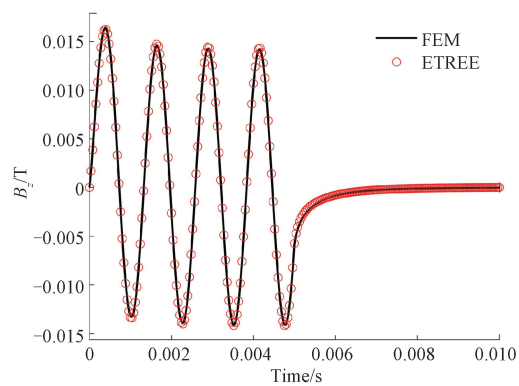


图 3　解析模型计算结果

Fig. 3　Results of the analytical model

2.2　探头灵敏度分析与比较

本文所提漏斗形磁芯探头构型通过在盘式磁芯探头的基础上改变线圈形貌以获得更高的检测灵敏度,因此

其主要参数来自于现有优化过的盘式磁芯探头，在线圈匝数、截面面积、电流密度以及磁芯和线圈底边尺寸上均保持一致。基于漏斗形磁芯探头理论模型，就灵敏度性能与盘式磁芯探头进行比较。在灵敏度对比之前，本文先针对两类探头所激发的线圈场分布情况进行探究，如图 4 所示。

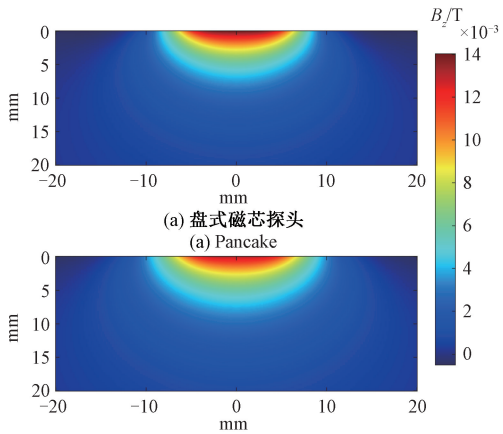


图 4　线圈场分布

Fig. 4　Field distribution

分析图 4 中两类探头下方的线圈场分布可以得出，本文所提漏斗形磁芯探头相比传统盘式磁芯探头具有相同线圈场强度的覆盖区域更广，且随深度增大漏斗形磁芯探头的线圈场强度优势更加明显，这为漏斗形磁芯探头具有更检测高灵敏度提供了基础。

本文基于所建立脉冲调制涡流检测解析模型，就表面与背面腐蚀减薄缺陷通过仿真分析对比盘式磁芯探头与漏斗形磁芯探头的灵敏度性能。由于两类探头构型不同，相同输入参数下所输出信号强度不尽相同，为在同一尺度下比较两类探头的检测灵敏度，现以空气中各探头所输出检测信号的最大值为基准对各检测信号进行归一化处理，同时这一处理方法也有利于消除实验研究中由于电压源激励导致实际探头电流密度不同带来的差异。

标准试件为厚 6 mm 的航空铝合金板，现以厚度分别为 5~1 mm 的航空铝合金板模拟表面与背面减薄缺陷，所获取的归一化检测信号和对应差分信号分别如图 5、6 所示。图 6 中，差分信号为有缺陷（Δd = 1 mm）归一化检测信号减去无缺陷（Δd = 0）归一化检测信号获得的结果，直观表现缺陷对检测信号的影响。分析图 5、6 可知，尽管检测信号中漏斗形磁芯探头的信号幅值和变化范围要小于传统盘式磁芯探头，但在差分信号中漏斗形磁芯探头的信号幅值和变化范围都要大于盘式磁芯探头，这表明表面和背面减薄缺陷对漏斗形磁芯探头检测信号的影响更大，即漏斗形磁芯探头检测信号具有更高的缺陷响应。

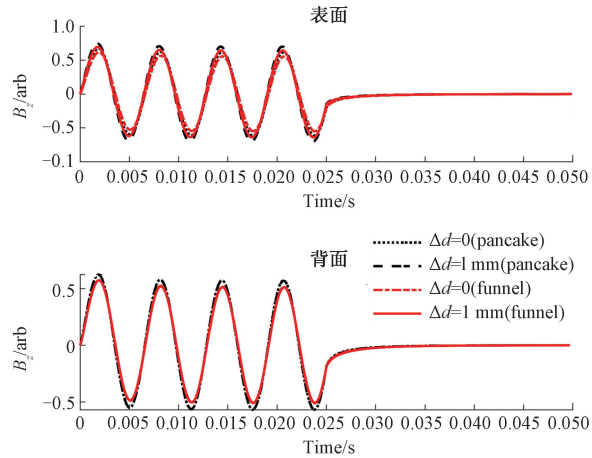


图 5　归一化检测信号

Fig. 5　Normalized signals

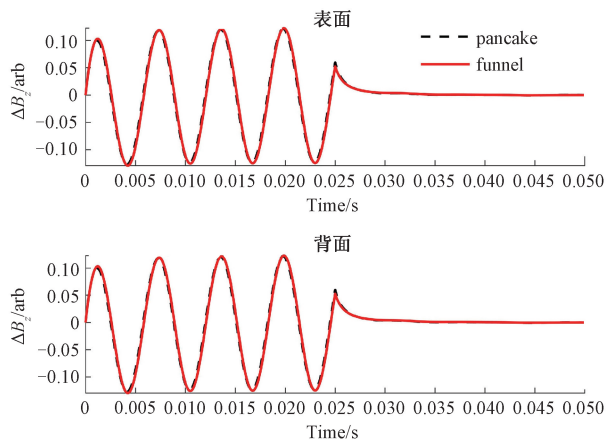


图 6　差分信号

Fig. 6　Differential signals

这一规律在不同深度（Δd = 1~5 mm）的表面和背面减薄缺陷检测中均得到验证。取差分信号峰值 Pv 为信号特征，由此获得的表面和背面减薄缺陷深度标定曲线如图 7 所示。由图 7 可知，漏斗形磁芯探头对表面和背面减薄缺陷均具有更高的检测灵敏度。相比传统盘式磁芯探头，漏斗形磁芯探头对表面减薄缺陷的灵敏度提升最大可达 9.67%，对背面减薄缺陷的灵敏度提升最大可达 21.61%。

3　实验分析比较

3.1　脉冲调制涡流检测系统

本文在理论仿真和分析的基础上进一步开展实验研究分析漏斗形磁芯探头的灵敏度性能。实验研究中先针对仿真研究的结果进行验证，并进一步了分析漏斗形磁

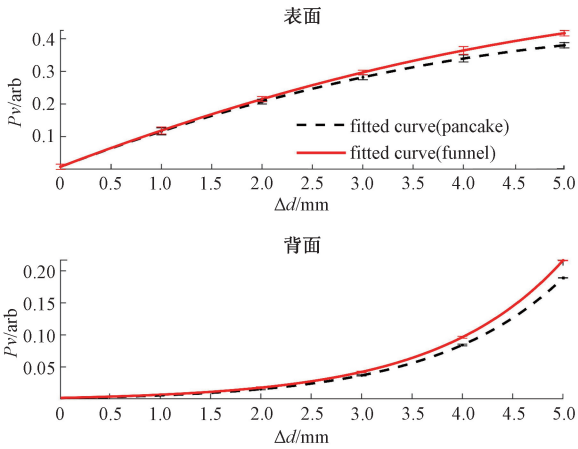


图 7　减薄深度标定曲线

Fig. 7　Calibration curve of thinning depth

芯探头在局部复杂缺陷下的灵敏度性能。实验研究所用系统如图 8 所示，信号发生器提供电压源激励，产生脉冲调制信号，经功率放大器进一步增强后施加至激励线圈供电端，磁场传感器拾取线圈场与涡流场耦合的总磁场信息获得的检测信号经由滤波放大器处理、数据采集卡采集后保存至电脑中。

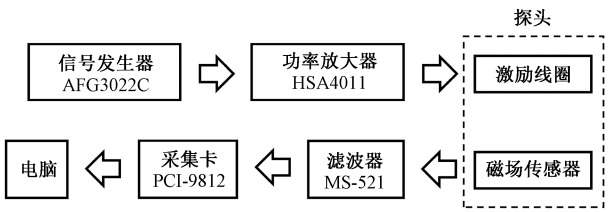
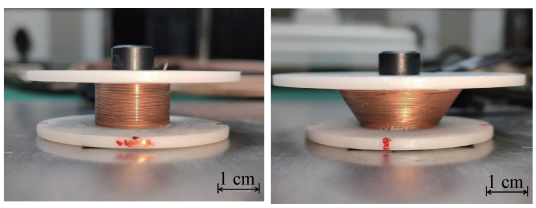


图 8　脉冲调制涡流检测系统

Fig. 8　System of pulse-modulation eddy current testing

实验研究中制备的盘式磁芯探头和漏斗形磁芯探头分别如图 9(a)、(b)所示，在制备过程中充分保证了两探头的激励线圈高度和层数一致，具体参数如表 1 所示。所用磁场传感器位于激励线圈正下方，型号为 TMR2505，用于检测 z 方向的磁感应强度。



(a) 盘式磁芯探头　(b) 漏斗形磁芯探头

(a) Ferrite-cored pancake probe　(b) Ferrite-cored funnel probe

图 9　实验探头

Fig. 9　Experimental probe

3.2　仿真结论验证

由于电压源激励难以保证实验研究中两类探头的截面电流密度相同，故实验检测结果采用了与仿真研究中相同的归一化处理方法，以确保灵敏度对比在同一尺度下进行。

实验研究充分验证了理论仿真分析的结论，图 10 在表面和背面减薄缺陷中，漏斗形磁芯探头相比盘式磁芯探头在差分信号中都具有更高的幅值和变化范围，所取峰值信号特征的幅值也更高。图 11 针对表面和背面不同深度减薄缺陷的实验研究进一步验证了仿真研究的结论，分析不同深度下两类探头信号特征的幅值大小可得：相比漏斗形磁芯探头，所提漏斗形磁芯探头对表面减薄缺陷的灵敏度提升最高可达 16.89%，对背面减薄缺陷的灵敏度提升最高可达 18.04%。

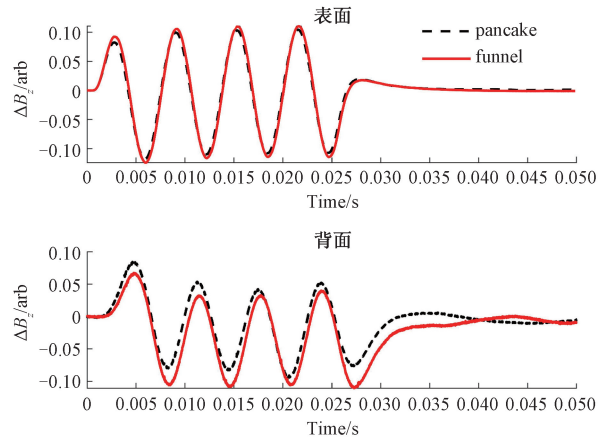


图 10　实验差分信号

Fig. 10　Differential signals of experiments

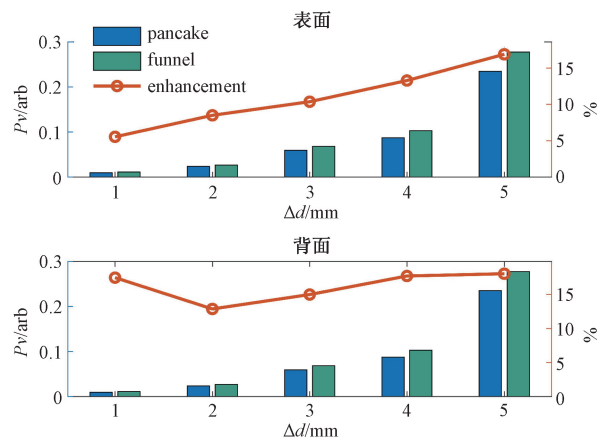


图 11　信号特征幅值变化

Fig. 11　Changes of peak values

3.3　表面与背面局部腐蚀缺陷检测

仿真分析与实验研究中漏斗形磁芯探头的灵敏度分析均基于表面与背面减薄缺陷进行，为进一步验证所提漏斗形磁芯探头在局部复杂缺陷下的灵敏度优势，实验研究借助含双层体积缺陷试件模拟局部腐蚀缺陷，就常用缺陷扫查与扫描成像两种检测方式进一步分析所提新

型探头的灵敏度性能。

图 12、13 所示分别为位于表面和背面的双层腐蚀缺陷扫查曲线，所用峰值信号特征及归一化处理方法均与前述一致，y 轴及图中点画线表示双层腐蚀缺陷实际形貌及深度。从表面与背面局部缺陷的扫查曲线可知，漏斗形磁芯探头相比盘式磁芯探头具有更高的信号特征响应和更显著的缺陷扫查效果。这进一步验证了在表面和背面局部复杂形貌腐蚀缺陷的扫查检测中，所提漏斗形磁芯探头具有更高的检测灵敏度。

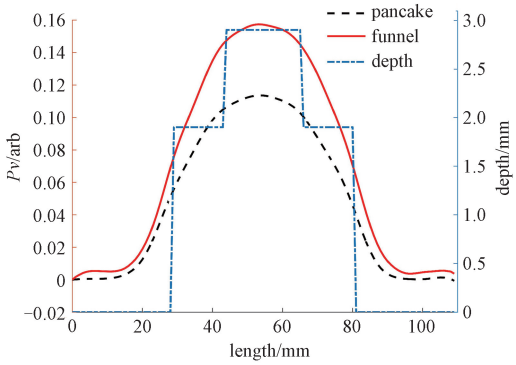


图 12　表面缺陷扫查曲线

Fig. 12　Scanning curve of surface defect

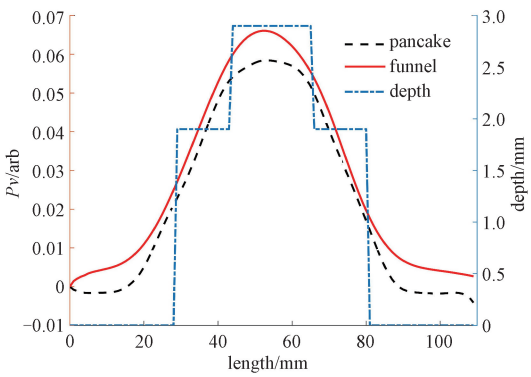


图 13　背面缺陷扫查曲线

Fig. 13　Scanning curve of back surface defect

图 14、15 所示为针对上述表面和背面局部双层腐蚀缺陷的成像结果，双层腐蚀缺陷边缘位于红色虚线处，成像所用为采用与前述相同处理方法获取的峰值特征。

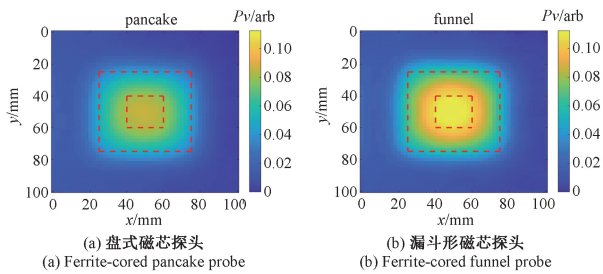


图 14　表面缺陷成像

Fig. 14　Image of surface defect

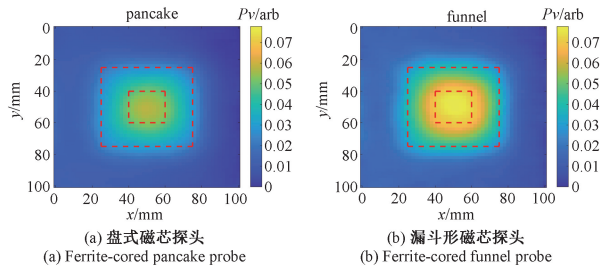


图 15　背面缺陷成像

Fig. 15　Image of back surface defect

在表面和背面局部缺陷的成像结果中，漏斗形磁芯探头的缺陷响应更高，对不同深度缺陷的表征与区分更加明显。这进一步在局部复杂形貌腐蚀缺陷的扫描成像中验证了所提漏斗形磁芯探头相比传统盘式磁芯探头的灵敏度优势。

4　结　论

本文提出了一种漏斗形磁芯脉冲调制涡流检测探头，并基于 ETREE 解析法建立了其解析模型，推导了脉冲调制涡流检测信号的解析表达式。相比传统盘式磁芯探头，本文所提漏斗形磁芯探头的线圈场在被测体区域的衰减速率更慢，场强优势随深度增大更加显著。通过仿真与实验研究，验证了所提漏斗形磁芯探头相比传统盘式磁芯探头在表面和背面缺陷检测中均具有更高的检测灵敏度。实验研究进一步在扫查曲线检测与扫描成像检测两种方式中验证了所提漏斗形磁芯探头相比传统盘式磁芯探头在灵敏度方面的优势。

参考文献

[1] SOPHIAN A, TIAN G, FAN M. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 500-514.

[2] PREDA G, REBICAN M, HANTILA F I. Integral formulation and genetic algorithms for defects geometry reconstruction using pulse eddy currents[J]. IEEE Transactions On Magnetics, 2010, 46(8): 3433-3436.

[3] HOSSEINI S, LAKIS A A. Application of time-frequency analysis for automatic hidden corrosion detection in a multilayer aluminum structure using pulsed eddy current[J]. NDT & E International, 2012, 47: 70-79.

[4] LI Y, YAN B, LI D, et al. Pulse-modulation eddy current inspection of subsurface corrosion in conductive structures[J]. NDT & E International, 2016, 79: 142-149.

[5] BAI Y H, ZHANG N, PENG L, et al. Novel array ECT

probe with three-phase excitation for steam generator tube inspection [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64 (1-4): 789-797.

[6] RIFAI D, ABDALLA A N, RAZALI R, et al. An eddy current testing platform system for pipe defect inspection based on an optimized eddy current technique probe design[J]. Sensors-Basel, 2017, 17(3):579.

[7] RA S W, IM K H, LEE S G, et al. Simulation and design of ECT differential bobbin probes for the inspection of cracks in bolts[C]. Iop Conference Series: Materials Science And Engineering, 2015, 103.

[8] ARJUN V, SASI B, RAO B P C, et al. Optimisation of pulsed eddy current probe for detection of sub-surface defects in stainless steel plates [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 226: 69-75.

[9] RAO K S, MAHADEVAN S, PURNA CHANDRA RAO B, et al. A new approach to increase the subsurface flaw detection capability of pulsed eddy current technique[J]. Measurement, 2018, 128: 516-526.

[10] ULAPANE N, ALEMPIJEVIC A, VALLS MIRO J, et al. Non-destructive evaluation of ferromagnetic material thickness using Pulsed Eddy Current sensor detector coil voltage decay rate[J]. NDT & E International, 2018, 100: 108-114.

[11] 刘平政, 宋凯, 宁宁, 等. 飞机紧固件孔周裂纹检测远场涡流传感器设计及优化[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 1-8.
LIU P ZH, SONG K, NING N, et al. Design and optimization of remote field eddy current sensor for crack detection around the hole of aircraft fasteners [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 1-8.

[12] 徐志远, 林章鹏, 袁湘民, 等. 管道弯头缺陷检测外置式远场涡流探头设计[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1119-1125.
XU ZH Y, LIN ZH P, YUAN X M, et al. External remote field eddy current probe for defect detection at pipe elbows [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1119-1125.

[13] 吴斌, 杨挺, 刘秀成, 等. 线圈弯曲角度对柔性涡流传感器缺陷检测能力的影响[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 41-48.
WU B, YANG T, LIU X CH, et al. Influence of coil bending angle on the defect detection ability of flexible eddy current sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 41-48.

[14] 陈云瑞, 季宏丽, 裘进浩. 矩形-圆形涡流探头设计与碳纤维预浸料的无损检测[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(1): 109-115.
CHEN Y R, JI H L, QIU J H. Design of rectangle-circular eddy current probe and nondestructive testing of carbon fiber prepreg[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(1): 109-115.

[15] 蒋诗超, 秦俊生,卢新亮, 等. 飞机多层金属板隐藏缺陷远场涡流探头设计及试验研究[J]. 中国测试, 2021, 47(4): 118-123.
JIANG SH CH, QIN J SH, LU X L, et al. Design and research of remote field eddy current probe based on defect detection of plane multilayer metal plates [J]. China Measurements & Test, 2021, 47(4): 118-123.

[16] 陈涛, 张赛, 肖小齐, 等. 跑道型差动式涡流探头设计及其性能研究[J]. 工程设计学报, 2020, 27(6): 781-785.
CHEN T, ZHANG S, XIAO X Q, et al. Design and performance study of runway-type differential eddy-current probe [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(6): 781-785.

[17] 陶钰, 吕坤勇, 彭磊, 等. 基于 TMR 传感器阵列的蒸汽发生器换热管检测探头设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(5): 37-41,47.
TAO Y, LV K Y, PENG L, et al. Design of probe for heat exchange tubes detection of steam generator based on TMR sensor array [J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(5): 37-41,47.

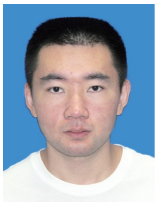
[18] 李伟, 赵建明, 葛玖浩, 等. 不锈钢管道均匀电磁场内检测探头设计和试验研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(6): 123-129.
LI W, ZHAO J M, GE J H, et al. Design and experimental analysis of uniform electromagnetic probe for inner inspection of stainless steel pipe[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(6): 123-129.

[19] 韩宁, 张志杰, 尹武良. 旋转磁场阵列式传感器设计及管道缺陷的仿真研究[J]. 仪表技术与传感器, 2019(12): 17-22.
HAN N, ZHANG ZH J, YIN W L. Design of rotating magnetic filed array sensor and simulation of pipeline defects [J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(12): 17-22.

[20] LI Y, LIU Z S, YAN B, et al. A funnel-shaped probe for sensitivity enhancement in pulse-modulation eddy current inspection of subsurface flaws in conductors[J]. Sensors and Actuators A-Physical, 2020, 307:111991.

[21] LI Y, TIAN G Y, SIMM A. Fast analytical modelling for pulsed eddy current evaluation [J]. NDT & E International, 2008, 41(6): 477-83.

作者简介



刘正帅，2019 年于西安交通大学获得学士学位，现为西安交通大学博士研究生，主要研究方向为电磁无损检测。

E-mail：liuzhengshuai@ stu. xjtu. edu. cn

Liu Zhengshuai received his B. Sc. degree in 2019 from Xi′an Jiaotong University. Now he is a Ph. D. candidate at Xi′an Jiaotong University. His main research interest includes electromagnetic nondestructive testing.

李勇（通信作者），2001 年于西安交通大学获得学士学位，2004 年于西安交通大学获得硕士学位，2009 年于纽卡斯尔大学获得博士学位，现为西安交通大学副教授，主要研究方向为机械结构无损定量检测。

E-mail：yong. li@ xjtu. edu. cn

Li Yong (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2001 from Xi′an Jiaotong University, M. Sc. degree in 2004 from Xi′an Jiaotong University and Ph. D. degree in 2009 from Newcastle University, respectively. Now he is an associate professor at Xi′an Jiaotong University. His main research interest includes quantitative nondestructive evaluation of mechanical structures.