

# 多层导电结构厚度电涡流检测解析模型及实验验证

范孟豹, 黄平捷, 叶波, 侯迪波, 张光新, 周泽魁  
(工业控制技术国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

## Analytical Model for Eddy Current Testing of Thickness of Multi-layered Structures and Experimental Verification

FAN Meng-bao, HUANG Ping-jie, YE Bo, HOU Di-bo, ZHANG Guang-xin, ZHOU Ze-kui  
(State Key Laboratory of Industrial Control Technology (Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** The analytical model of a cylindrical eddy current probe placed above semi-infinite arbitrary layered structures is deduced by introducing magnetic vector potential based on the magnetoquasistatic Maxwell equations. During the impedance calculation, a symbolic operation is used to solve the coefficients of the magnetic vector potential expressions and as a result the impedance calculation becomes more efficient and less time-consuming. The presented analytical impedance model is applied in thickness measurement of a single layer metal and a conductive coating on a metal substrate in eddy current testing. The probe impedance response regularity due to the variation of thickness of single layer and conductive coating is investigated. Simulation results based on the presented model are in good agreement with the experimental ones and thus the correctness and effectiveness of the developed model is verified. There is every reason to believe that the impedance model can be applied in thickness measurement and be employed to determine other material properties of conductive structures and even used for the optimal design of eddy-current measurement systems.

**KEY WORDS:** multi-layered conductive structures; thickness measurement; eddy current testing; analytical model

**摘要:** 从准静磁场条件下的 Maxwell 方程组出发, 采用矢量磁位法, 推导了位于任意多层导电结构上方圆柱型电涡流探头的阻抗解析模型。在阻抗计算中引入符号运算法求解矢量磁位表达式系数, 大大减小了程序计算量, 提高了程序效率。将阻抗解析模型应用于单层和两层导电结构厚度检测, 分别研究和分析了单层厚度、铝基体上铜涂镀层厚度及铜基体上铝涂镀层厚度变化对探头阻抗变化的影响规律。仿真及实验结果表明, 所推导的理论模型正确,

可应用于导电结构厚度和材料属性检测的反演以及电涡流检测系统的参数优化。

**关键词:** 多层导电结构; 厚度检测; 电涡流检测; 解析模型

## 0 引言

多层导电结构厚度检测是很多产品加工和检测维修领域中急需解决的问题, 如复合镀层厚度、渗碳层深度检测、半导体上方金属膜厚度测量等。因此, 实时准确的多层导电结构厚度检测对于提高过程控制质量和零部件在役检测与维修效率具有重要意义<sup>[1-3]</sup>。在X射线、超声、电涡流等众多方法中, 电涡流检测技术以其安全、方便快捷、精度高和成本低等优点在多层导电结构厚度检测方面获得了广泛应用。

在涡流检测技术的研究中, 模型建立是非常重要的部分<sup>[3]</sup>。仿真模型可用于员工培训、理解涡流检测的物理机理、优化探头设计<sup>[4]</sup>、优化检测系统参数、构建反演模型<sup>[5]</sup>, 甚至可以对问题的可检测性进行评估<sup>[6]</sup>。Forster是最早建立涡流检测解析模型的学者之一。Forster应用解析模型验证实验结果, 并预估试件材料属性对实验的影响<sup>[3]</sup>。对涡流解析模型的建立做出了重要贡献的是Dodd、Deeds<sup>[7]</sup>和Luquire<sup>[8]</sup>等, 他们推导了半无限多层导电结构上方圆柱型探头阻抗解析解; 雷银照<sup>[9-10]</sup>研究了阻抗解析表达式中Bessel函数的积分限, 并比较了各种数值积分计算方法; Theodoulidis<sup>[11-12]</sup>利用不同媒质分界面上的边界条件, 用特征函数级数逼近空间任意位置的矢量磁位值, 给出了基于铁心探头圆柱型涡流探头的阻抗解析解。John C.Moulder<sup>[13-14]</sup>、黄平捷<sup>[15]</sup>和W.Yin<sup>[16]</sup>等应用阻抗模型解析解, 对多层导电结构厚度、电导率等参数测量进行了深入的仿真与

基金项目: 国家自然科学基金项目(50505045)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50505045).

实验研究，并提出了相应的反演算法。

本文在前人的研究基础上，从准静磁场条件下的 Maxwell 方程组出发，依据电涡流厚度检测中磁场的轴对称特性，推导了任意层半无限大导电结构上方圆柱型探头的阻抗解析模型；在阻抗计算过程中，引入了符号运算法求解矢量磁位表达式系数，提高了计算效率；其后将解析模型应用于单层导电结构厚度和导电基体材料上的导电涂层厚度检测的仿真研究。最后对仿真结果进行了实验验证。

### 1 阻抗数学模型

根据文献[7-8,17]等推导的阻抗解析解可知，多层导电结构上方圆柱型探头的阻抗解析表达式非常复杂，且不易推导；当导电结构层数较多时，推导阻抗解析表达式更加困难，甚至不可能。即使得到了阻抗解析表达式也需要借助数值计算方法才能获得探头阻抗值。为此，本文借鉴前人的多层导电结构阻抗解析解模型，推导出了任意层数导电结构上方圆柱型探头阻抗变化解析模型。

一个空心圆柱线圈置于层数为  $N$  层( $N \geq 1$ )的导电结构上方，如图 1 所示，研究阻抗变化解析模型。

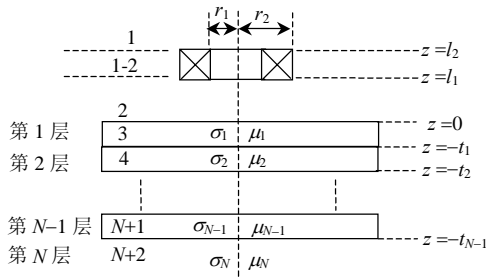


图 1 圆柱型线圈位于  $N$  层导电结构上方模型

Fig.1 Model of cylindrical coil above arbitrary planar conductors

$$MX=b \tag{6}$$

$$\text{式中： } M = \begin{bmatrix} e^{-\alpha l} & -e^{\alpha l} & -e^{-\alpha l} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ e^{-\alpha l} & e^{\alpha l} & -e^{-\alpha l} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & -1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & -\alpha & -\alpha_1 & \alpha_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\alpha_1 l_1} & e^{\alpha_1 l_1} & -e^{-\alpha_2 l_1} & -e^{\alpha_2 l_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 e^{-\alpha_1 l_1} & -\alpha_1 e^{\alpha_1 l_1} & -\alpha_2 e^{-\alpha_2 l_1} & \alpha_2 e^{\alpha_2 l_1} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & e^{-\alpha_{N-2} l_{N-2}} & e^{\alpha_{N-1} l_{N-2}} & -e^{-\alpha_{N-1} l_{N-2}} & -e^{\alpha_{N-1} l_{N-2}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \alpha_{N-2} e^{-\alpha_{N-2} l_{N-2}} & -\alpha_{N-2} e^{\alpha_{N-2} l_{N-2}} & -\alpha_{N-1} e^{-\alpha_{N-1} l_{N-2}} & \alpha_{N-1} e^{\alpha_{N-1} l_{N-2}} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & e^{-\alpha_{N-1} l_{N-1}} & e^{\alpha_{N-1} l_{N-1}} & -e^{-\alpha_{N-1} l_{N-1}} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \alpha_{N-1} e^{-\alpha_{N-1} l_{N-1}} & -\alpha_{N-1} e^{\alpha_{N-1} l_{N-1}} & -\alpha_N e^{-\alpha_N l_{N-1}} \end{bmatrix};$$

$X=[B_1, C_2, B_2, C_3, B_3, \dots, C_{N+1}, B_{N+1}, C_{N+2}]^T$ ;  $b=[0, \mu I r_0 J_1(r_0), 0, \dots, 0]^T$ 。

式中： $l$ 为单匝线圈到第一层平板的距离； $\alpha$ 为积分

各层结构的电导率、磁导率、厚度等参数可以不同。假设各层结构为线性、均匀且各向同性的静止媒质。

从准静态场条件下的Maxwell方程组<sup>[18]</sup>出发，依据厚度检测中圆柱型探头线圈激励磁场的轴对称特性，首先得到理想单匝线圈在正弦电流激励下矢量磁位满足的偏微分方程<sup>[7-8]</sup>：

$$\frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial A_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial z^2} - \frac{A_\varphi}{r^2} - j\omega\mu\sigma A_\varphi + \mu I \delta(r-r_0) \delta(z-z_0) = 0 \tag{1}$$

式中： $I$ 为线圈激励电流密度幅值； $r, z$ 为场点坐标； $r_0, z_0$ 为源点坐标， $A_\varphi$ 为柱坐标系中矢量磁位 $A$ 的 $\varphi$ 分量幅值； $\omega$ 为角频率； $\mu, \sigma$ 分别为场点处材料的磁导率与电导率； $\delta(r-r_0)$ 和 $\delta(z-z_0)$ 为Dirac Delta函数。

应用分离变量法<sup>[19]</sup>和边界条件求解方程式(1)，并用 $A$ 代替 $A_\varphi$ 以简化表达(以下同)：

$$A^{(1)}(r, z) = \int_0^\infty B_1(\alpha) e^{-\alpha z} J_1(\alpha r) d\alpha \tag{2}$$

$$A^{(2)}(r, z) = \int_0^\infty [C_2(\alpha) e^{\alpha z} + B_2(\alpha) e^{-\alpha z}] J_1(\alpha r) d\alpha \tag{3}$$

$$A^{(N+1)}(r, z) = \int_0^\infty [C_{N+1}(\alpha) e^{\alpha_{N+1} z} + B_{N+1}(\alpha) e^{-\alpha_{N+1} z}] J_1(\alpha r) d\alpha \tag{4}$$

$$A^{(N+2)}(r, z) = \int_0^\infty C_{N+2}(\alpha) e^{\alpha_{N+2} z} J_1(\alpha r) d\alpha \tag{5}$$

式中： $J_1(\alpha r)$ 为第一类 Bessel 函数； $\alpha_i = (\alpha^2 + j\omega\mu_i\sigma_i)^{1/2}, i = 1, \dots, N$ 。

根据式(2)~(5)以及不同材料分界面上矢量磁位和磁感应强度法向分量连续的边界条件<sup>[18]</sup>，应用 Fourier-Bessel 积分，经整理可得到 $B_1, C_2, B_2$ 等系数满足如下方程组：

$$\text{变量。}$$

通过求解方程组式(6)可求得未知系数  $X$ ，进而可求出理想单匝线圈在正弦电流激励  $I$  下空间任意

一点的矢量磁位值。对于多匝线圈,当忽略线圈导线内电流趋附效应时,线圈截面可看作具有均匀分布的电流密度,即

$$J = \frac{nI_n}{(r_2 - r_1)(l_2 - l_1)}$$

式中:  $n$ 为线圈匝数;  $I_n$ 为单匝线圈激励电流幅值;  $r_1$ 为线圈内半径;  $r_2$ 为线圈外半径;  $l_1$ 为线圈底端到第一层材料的距离(即提高);  $l_2$ 为线圈顶端到第一层材料的距离。应用叠加原理得:

$$A_{\text{total}}^i(r, z) = \frac{J}{I} \int_s A^i(r, z, l, r_0) ds = \frac{nI_n}{(r_2 - r_1)(l_2 - l_1)I} \int_{r_1}^{r_2} \int_{l_1}^{l_2} A^i(r, z, l, r_0) dr_0 dl \quad (7)$$

式中:  $s$ 为线圈横截面积;  $i=1, \dots, N+2$ , 代表导电结构区域编号。

线圈上方的矢量磁位用 $A^{(1)}$ 计算,线圈下方的矢量磁位用 $A^{(2)}$ 计算。对于1-2区域内(探头线圈顶端与底端之间的区域)的矢量磁位 $A^{(1,2)}$ ,可将 $A^{(1)}$ 中的 $l_2$ 替换为 $z$ ,将 $A^{(2)}$ 的 $l_1$ 换为 $z$ ,二者相加即可。

根据法拉第电磁感应原理,  $V=j2\pi\omega rA$ , 可得探头线圈(1-2区域)的自感电压为

$$V = \frac{j2\pi\omega nI_n}{(r_2 - r_1)(l_2 - l_1)I} \int_{l_1}^{l_2} \int_{r_1}^{r_2} rA_{\text{total}}^{(1,2)}(r, z) dr dz \quad (8)$$

从而得出任意层导电结构上方圆柱型线圈的阻抗表达式为:

$$Z = \frac{V}{I_n} = \frac{j2\pi\omega n}{(r_2 - r_1)(l_2 - l_1)I} \int_{l_1}^{l_2} \int_{r_1}^{r_2} rA_{\text{total}}^{(1,2)}(r, z) dr dz \quad (9)$$

即得到任意层导电结构上方圆柱型线圈的阻抗值。当探头下方为两层导电结构时,令 $t=t_1=t_2=\dots=t_{N-1}$ ,  $\sigma_2=\dots=\sigma_N$ 以及 $\mu_2=\dots=\mu_N$ , 结果与文献[7]中两层导电结构上方圆柱型线圈的阻抗解析表达式一致。

根据阻抗模型式(9)可知,探头阻抗值可表示为被检测材料电导率、磁导率、厚度等多个参数的函数,即

$$Z = F(r_1, r_2, l_1, l_2, n, \sigma_1, \dots, \sigma_N, \mu_1, \dots, \mu_N, t_1, \dots, t_{N-1}) \quad (10)$$

式中  $f$  为激励频率。可应用探头阻抗模型式(10)仿真计算探头参数、各层材料属性参数(如电导率、磁导率、厚度等)及激励频率等任意参数变化对探头阻抗变化的影响,分析阻抗变化规律,从而为电涡流检测系统参数优化设计和反演计算提供理论指导。

## 2 模型计算

从阻抗解析模型推导过程可见,要编程计算探

头阻抗值,求解矢量磁位 $A$ 表达式中未知系数构成的方程组式(6)是非常关键的一步。需要注意的是,系数矩阵 $M$ 的很多元素是积分变量 $\alpha$ 的函数。在多层导电结构模型中很难、甚至无法得到矢量磁位 $A$ 的表达式时,多数采用了有限元或者采用数值计算方法反复求解方程组式(6)。采用有限元法因计算量大,在检测实时性方面难以达到要求;采用数值计算方法,则方程组式(6)的求解次数与式(2)~(5)中变量 $\alpha$ 和式(7)变量 $l$ 以及 $r_0$ 的积分区域的离散化数乘积相等。基于此,借助于Matlab强大的符号运算功能,本文在求解方程组式(6)时引入符号运算法,只要模型层数不变,方程组式(6)只需求解一次即可。这样大大减小程序计算工作量,减少计算时间,提高计算效率。

根据前文推导的置于 $N$ 层导电结构上方电涡流检测探头的阻抗解析模型,作者编写了基于Matlab的阻抗计算程序。在程序运算前,需要确定模型层数,以便确定方程组式(6)。程序流程图如图2所示。

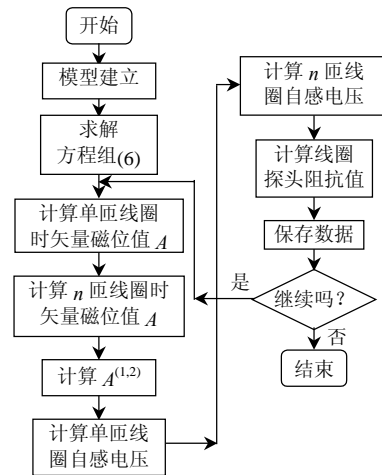


图2 多层导电结构阻抗解析模型计算程序流程图  
Fig. 2 Computation program flowchart of impedance analytical model of multi-layered conductors

## 3 仿真与实验研究

### 3.1 研究对象及装置

针对单层导电结构厚度检测和导电基体材料上方导电涂层厚度检测两类实际问题,利用前文推导的任意多层导电结构厚度电涡流检测阻抗解析模型进行仿真研究,总结了因厚度变化引起的阻抗变化规律,并对仿真结果进行实验验证。

仿真研究中采用了基于Matlab的阻抗计算程序;实验验证时,采用标准比较式差动探头,应用的电涡流检测实验系统原理框图如图3所示。

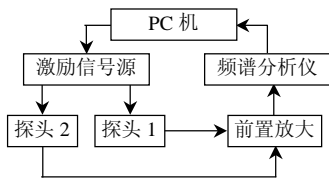


图 3 实验系统原理图

Fig. 3 Schematic of eddy current instrument

仿真与实验研究中使用的探头参数如表 1 所示。仿真与实验中使用的金属试件为铝板( $\sigma = 18.5 \text{ MS/m}$ ,  $\mu = \mu_0$ )和铜板( $\sigma = 58 \text{ MS/m}$ ,  $\mu = \mu_0$ )。

表 1 探头参数

Tab. 1 Probe Parameters

探头结构	参数值
内半径/mm	3.0
外半径/mm	5.11
探头长度/mm	20.70
匝数	330
线圈电阻/ $\Omega$	19.84
线圈电感/mH	1.02

为方便与仿真结果进行比较,根据实验系统增益将检测电压值换算为探头输出电压值,然后借鉴阻抗归一化方法对检测数据进行归一化处理。实验中探头采用电流源激励,归一化处理后的检测结果可以消除电流因素。

### 3.2 单层厚度检测仿真及实验验证

单层( $N=2$ )金属板厚度检测,在很多领域如铝箔、锡箔、易拉罐等加工制造业都有重要的应用价值<sup>[1,5,20]</sup>,问题模型如图 4 所示。提高 $l_1$ 为 0.5 mm,激励频率 $f$ 为 1 kHz,探头参数如表 1 所示。金属材料为铝板,其厚度 $t$ 变化范围为 0.4~4 mm,步长为 0.4 mm。

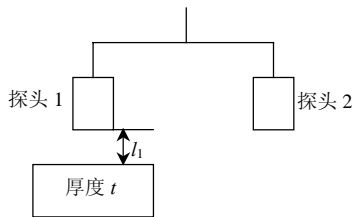


图 4 单层板厚度检测模型

Fig. 4 Thickness measurement model of single conductive plate

图 5 是探头阻抗幅值与厚度关系图,图 6 是厚度变化相位图。实线为仿真结果,虚线为实验结果。从图 5、图 6 可知,厚度增加时,阻抗幅值(检测电压幅值)逐步变小,相角也逐步变小。这与文献[1,15]中给出的规律是一致的。研究得出的厚度变化对阻抗变化的影响规律对于构建反演算法、解释检测结果具有理论指导意义。

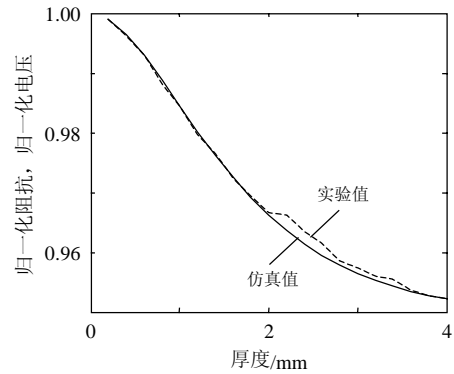


图 5 归一化阻抗/电压与单层板厚度关系图

Fig. 5 Normalized impedance (solid line) and voltage (dashed line) versus thickness of single plate

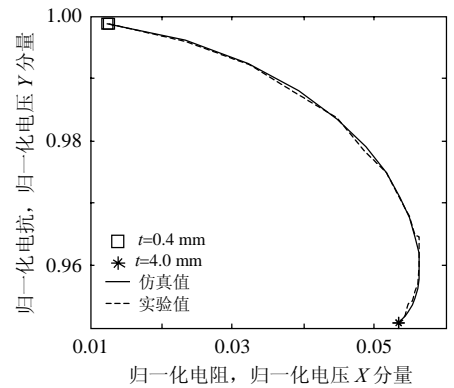


图 6 单层板厚度检测仿真与实验相位图

Fig. 6 Phase characteristic of thickness measurement of single plate by simulation and experiment

### 3.3 基体材料的导电涂层厚度检测

基体材料的导电涂层厚度检测( $N=3$ ),这在民用、航空等众多工业领域中有着广泛应用<sup>[1,21-23]</sup>。为了获得特殊的表面性能,如抗腐蚀、耐磨、美观等,许多金属部件往往要涂或镀涂镀层。按照实际应用中基体材料与涂层材料电导率的大小可分为两类:一类是基体材料的电导率大于涂层材料电导率,如钢基体材料上的铜、锌或者镉覆盖层;另一类是基体材料的电导率大于涂层材料电导率,如铝基体材料上的铜或者铅覆盖层。问题模型如图 7 所示,两层结构均为导电材料,用于模拟金属基体上的导电涂镀层。本实验中用铜基体材料上的铝涂层和铝基体材料上的铜涂层对两类实际问题分别进行了仿真与实验研究。

实验中,提高 $l_1$ 为 0.5 mm,激励频率 $f$ 为 1 kHz,探头参数如表 1 所示。基体材料厚度 $t_2$ 为 4 mm,导电涂镀层厚度 $t_1$ 从 0.1 mm 增加到 1 mm,步长为 0.1 mm。仿真与实验结果分别如图 8、9 所示。实线为仿真结果,虚线为实验结果。

从仿真与实验结果可知,铝基体上为铜涂镀层

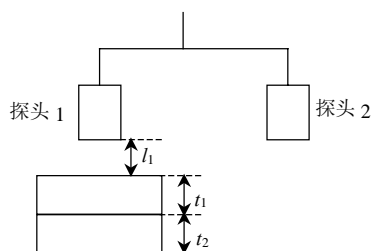


图7 双层导电结构涂层厚度检测示意图

Fig. 7 Thickness measurement model of double conductive plates

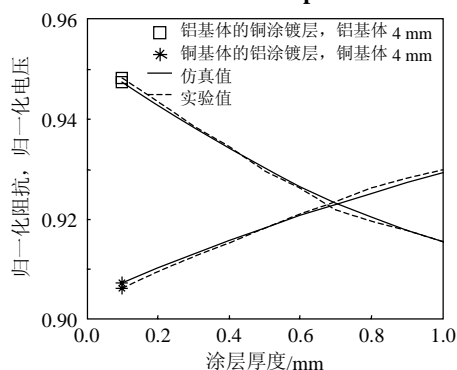


图8 归一化阻抗/电压与导电涂层厚度关系图

Fig. 8 Normalized impedance (solid line) and voltage (dashed line) versus thickness of conductive coating on conductive substrate

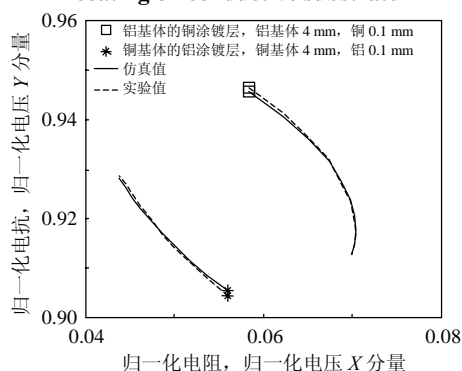


图9 导电涂层厚度变化相位图

Fig. 9 Phase characteristic of thickness measurement of conductive coating on conductive substrate by simulation and experiment

时,涂镀层厚度增加,阻抗幅值减小,相角也减小,这与单层导电结构厚度变化的规律相似;当铜基体上为铝涂镀层时,涂镀层厚度增加,阻抗幅值增大,相角也增大,与铝基体上为铜涂镀层的变化规律相反。由此可知,高电导率基体上的低电导率涂镀层厚度变化的探头响应与低电导率基体上的高电导率涂镀层厚度变化的探头响应具有一定的对称性。这值得在实际检测中加以注意。

## 4 结论

本文从理论及实验两方面研究了多层导电结

构厚度电涡流检测问题。从准静磁场条件下的 Maxwell 方程组出发,依据多层导电结构厚度电涡流检测中磁场的轴对称特性,推导了置于  $N$  层半无限大导电结构上方圆柱型探头的阻抗解析模型,编写了基于 Matlab 的阻抗计算程序;在程序中引入了符号运算法,用于求解矢量磁位表达式系数方程组,从而使程序计算量小、效率高、速度快。将阻抗解析模型应用于单层和两层导电结构厚度检测,分别研究和分析了单层厚度、铝基体上铜涂镀层厚度及铜基体上铝涂镀层厚度变化对探头阻抗变化的影响规律。仿真及实验结果表明,所推导的理论模型正确,可应用于导电结构厚度和材料属性检测的反演以及电涡流检测系统的参数优化。

本文的研究工作对于解释检测结果、优化检测实验系统参数、为厚度检测提供正向解以及指导工程技术人员利用涡流法解决实际问题都具有重要的理论和实际意义。

## 参考文献

- [1] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册(电磁卷)[M]. 上海: 世界图书出版公司, 1999: 275-284.
- [2] William Lord, Electromagnetic NDT techniques-A 40 year retrospective or retirement for cause[J]. Materials Evaluation, 2006, 64(6): 547-550.
- [3] Udpa S, Udpa L. Eddy current testing-are we at the limits? [C]. 16th WCNDT, Canada, Montreal, 2004.
- [4] Gatzen H H, Ekaterina A, Heri I. Eddy-current microsensor based on thin-film technology[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(5): 3368-3370.
- [5] Huang Pingjie, Zhang Guangxin, Hou Dibo, et al. Modeling and inversion techniques for thickness measurement of multi-layered structures in eddy current testing[J]. Insight, 2006, 48(7): 406-409.
- [6] Rajesh S N, Udpa L, Udpa S S. Numerical model based approach for estimating probability of detection in NDE applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(2): 1857-1861.
- [7] Dodd C D, Deeds W E. Analytical solutions to eddy-current probe-coil problems[J]. Journal of Applied Physics, 1968, 39(6): 2829-2838.
- [8] Luquire J W, Deeds W E, Dodd C D. Alternating current distribution between planar conductors[J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(10): 3983-3991.
- [9] 雷银照, 马信山. 涡流线圈的阻抗计算[J]. 电工技术学报, 1996, 11(1): 17-20.  
Lei Yinzha Zhao Ma Xinsan. Calculation of impedance in an eddy current coil by numerical integration method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, 11(1): 17-20.
- [10] 雷银照. 时谐电磁场解析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 178-218.
- [11] Theodoulidis T P. Model of ferrite-cored probes for eddy current nondestructive evaluation[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(5): 3071-3078.

- [12] Theodoulidis T P. Analytical model for tilted coils in eddy-current nondestructive inspection[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(9): 2447-2454.
- [13] Moulder J M, Uzal E, Rose J H. Thickness and conductivity of metallic layers from eddy current measurements[J]. Review of Scientific Instruments, 1992, 63(6): 3455-3465.
- [14] Sethuraman A, Rose J H. Rapid inversion of eddy current data for conductivity and thickness of metal coatings[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 1995, 14(1): 39-46.
- [15] 黄平捷. 多层导电结构厚度与缺陷电涡流检测若干关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
Huang Pingjie. Study on some key problems in eddy current testing of multi-layered conductive structures for thickness measurement and flaw detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004(in Chinese).
- [16] Yin W, Peyton A J. Thickness measurement of non-magnetic plates using multi-frequency eddy current sensors[J]. NDT&E International, 2007, 40(1): 43-48.
- [17] Burke S K, Ibrahim M E. Mutual impedance of air-cored coils above a conducting plate[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(13): 1857-1868.
- [18] 倪光正. 工程电磁场原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 182-187.
- [19] 梁昆淼. 数学物理方法[M]. 第三版. 北京: 高等教育出版社, 1998: 180-222.
- [20] Yin W, Binns R, Dickinson S J, et al. Analysis of the lift-off effect of phase spectra for eddy current sensors[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC, Ottawa, Canada, 2005.
- [21] Fahr A, Giguere J S R, Roge B, et al. Application of NDE in aerospace coatings[C]. SPIE, Smart Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Structural and Biological Systems, San Diego, CA, USA, 2002.
- [22] Yaron Danon, Lee Changqing, Chris Mulligan, et al. Characterizing tantalum sputtered coatings on steel by using eddy currents[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(4): 1826-1832.
- [23] Yang Hungchi, Tai Chengchi. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate[J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(8): 1259-1265.



范孟豹

收稿日期: 2008-01-22。

作者简介:

范孟豹(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为电涡流检测技术, wuzhi3495@163.com;

黄平捷(1974—), 男, 博士后, 副研究员, 研究方向为检测技术与自动化装置;

叶波(1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为电涡流检测技术;

侯迪波(1977—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为检测技术、控制科学与工程;

张光新(1969—), 男, 博士, 教授, 研究方向为太赫兹波科学技术及应用研究;

周泽魁(1946—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为计算机控制技术与专用装置。

(责任编辑 王剑乔)