

非线性因素对远场涡流探头特性的影响^{***}

刘焱

曲民兴 孟小利

(盐城工学院电气工程系,盐城,224003)

南京航空航天大学,南京,210016)

摘 要 采用线性和非线性有限元方法对带磁路和磁电组合屏蔽的远场涡流探头的信号——距离特性进行了计算机模拟,给出探头的信号——距离特性曲线。结果表明:铁磁材料的非线性因素导致激励电流密度与二次穿透区的位置直接相关联。

关键词 远场涡流探头 非线性影响

分类号 TP391

远场涡流探头(REMOTE FIELD EDDY CURRENT, RFEC)检测是基于远场涡流效应的管道无损检测技术,其原始结构探头(见图1)有两个与管同轴的螺线管线圈,其中一个线圈为激励线圈,通以低频交流电;另一个为检测线圈。如果在一根无缺损的长铁管中改变激励线圈和检测线圈间轴向距离,并对应测出检测线圈感应电压及其相位,就可得到图2所示用来描述两线圈之间耦合规律的信号——距离特性曲线。图1和图2中的二次穿透区是指信号幅值急剧下降后变化趋缓而相位发生较大跃变之后的区域;距激励线圈较近、信号幅值急剧下降的区域称为直接耦合区;两者之间以相位发生较大跃变为特征的区域称为过渡区。远场涡流探头中的检测线圈必须放在二次穿透区。二次穿透区一般距激励线圈2~3倍管内径以远。

这种远场涡流探头存在着一些明显的问题,影响着它的发展和应用。一是探头长度太长,难以在弯管中通过;二是检测线圈信号幅值太低,通常为微伏或数十微伏数量级。采用磁路和磁电组合屏蔽或复式激励结构可显著地克服上述缺点^{[1][2]}。

计算机仿真和实验证实,其二次穿透区已被压缩到距激励线圈0.6~1倍管内径、甚至更小距离处,检测信号幅值可达到毫伏数量级。但到目前为止,远场涡流检测计算研究中均采用了线性分析方法,导磁率取为铁磁材料的初始导磁率,而忽略了铁磁材料的非线性因素的影响。

那么,这个非线性因素对探头远场区的位置分布究竟有多大影响就成为本文所关注的问题。围绕这一问题,本文采用有限元方法,考虑到铁磁材料磁导率的非线性因素,对采用磁路和磁电组合屏蔽新型结构的探头进行了计算机仿真和对比研究。

1 数值计算方法

我们采用比较成熟的二维涡流场有限元分析模型和程序进行数值仿真分析,图3所示为

* 国家自然科学基金资助项目(58870297)

** 收稿日期:1998-06-03

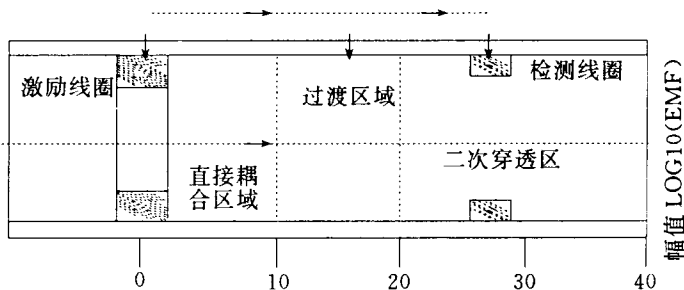


图1 原始远场涡流检测探头

新型结构探头示意图。激励线圈和检测线圈均带有磁路并在二者之间装有磁电组合屏蔽。管内径 $\varnothing 273\text{mm}$,管壁厚 8mm。

由于是轴对称场,且矢量磁位仅有周向分量 A_α ,取未知函数 $u=rA_\alpha$,则根据麦克斯韦方程组可得 u 满足的控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial z}(\beta \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial r}(\beta \frac{\partial u}{\partial r}) = -J_z + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

$\beta=1/\mu r$, σ 为媒质的电导率, μ 为媒质的磁导率,采用八节点等参元离散求解域,则上式有限元方程为:

$$[K][u] + [T][u] = [P] \quad (2)$$

方程(2)是一个非线性方程组,我们采用高斯—赛德尔迭代法求解,具体方法是:首先假设待求量的初始值 $u^{(0)}$,求得磁导率的零次近似值,据此形成系数矩阵的零次近似值 $K^{(0)}$ 、 $T^{(0)}$,然后把非线性方程组按迭代格式求解:

$$[K^{(0)}][u^{(1)}] + [T^{(0)}][u^{(1)}] = [P]$$

解得所有节点向量磁位的一次近似值 $u^{(1)}$,通过迭代方法将 $u^{(1)}$ 直接作为再次迭代时 u 的假设值,据此形成新的方程组:

$$[K^{(1)}][u^{(2)}] + [T^{(1)}][u^{(2)}] = [P]$$

求出 u 的二次近似值 $u^{(2)}$ 。以此类推,进行第 i 次迭代时所用的方程组为:

$$[K^{(i-1)}][u^{(i)}] + [T^{(i-1)}][u^{(i)}] = [P]$$

如此反复求解,直至 u 的近似解收敛到满足精度为止。

检测线圈为与激励线圈同轴的环形线圈,其感应电动势为:

$$\epsilon = \int_0 \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_0 \frac{\partial A}{\partial t} \cdot d\mathbf{l} = -j\omega \int_0 A_s \cdot 2\pi r dr = -j\omega 2\pi N_h \sum_{i=1}^h S_i u_i$$

式中: N_k ——线圈截面上的导线密度

K ——线圈截面上的单元数

S_i ——单元 i 的面积

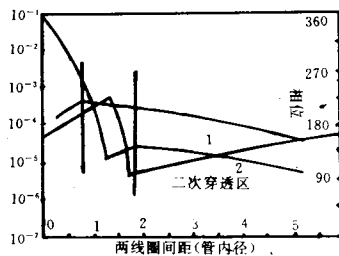


图2 检测线圈信号特性

1—幅值特性;2—相位特性

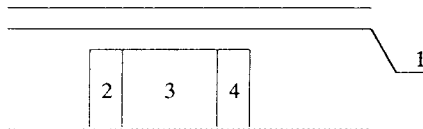


图3 带磁路和磁电组合屏蔽的探间

1—管壁 2—激励部分
3—磁电组合屏蔽 4—检测部分

2 远场涡流特性的比较

我们分别按线性非线性计算了检测线圈在距激励线圈不同轴向位置处、在不同激励电流密度下检测线圈感应电势幅值、相位变化曲线,计算结果如图 4、图 5,图中检测线圈起始位置距激励线圈 0.6 倍管内径,激励电流分别取 $J_1=20.4\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $J_2=66.7\text{A}/\text{cm}^2$ 、 $J_3=123.4\text{A}/\text{cm}^2$ 。线性计算时铁磁材料的相对磁导率取 $\mu_r=250$,非线性计算时则取其磁化曲线。

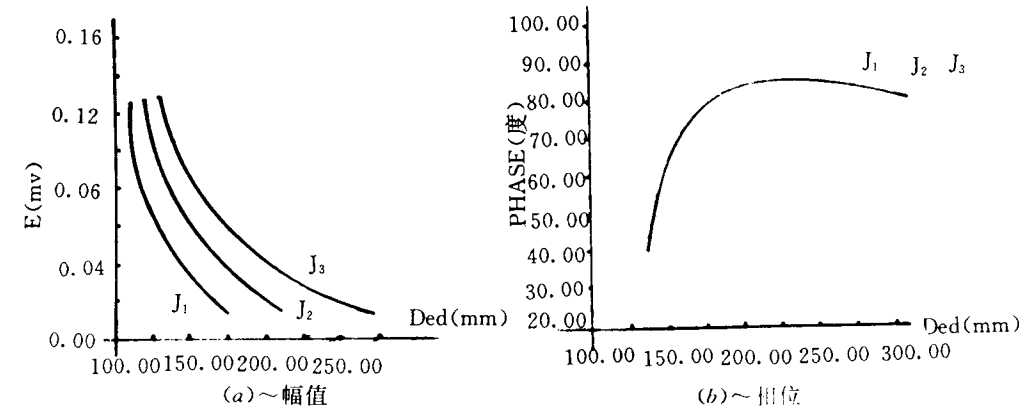


图 4 线性计算得到的信号-距离特性

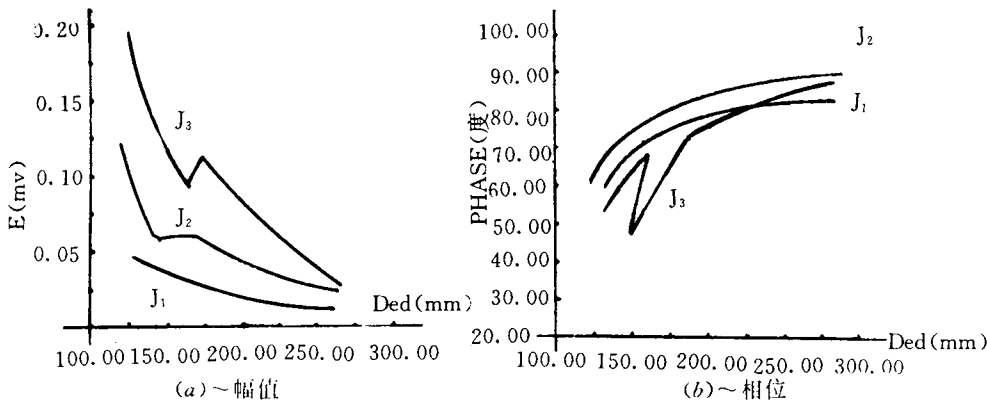


图 5 非线性计算时得到的信号-距离特性

线性计算结果表明:随着激励电流密度的增加,检测线圈信号幅值一距离特性曲线呈比例增加,而信号相位一距离特性曲线与电流密度无关,它们均平缓变化。

考虑铁磁材料磁导率的非线性因素,计算结果如图 5 显示:当激励电流密度较小时,无论是幅值还是相位特性变化规律均与线性计算结果近似;而当激励信号密度较大时,其感应电动势幅值和相位变化曲线与线性计算的结果则明显不同,信号幅值和相位均呈平缓变化的二次穿透区都向远离激励线圈的地方移动了。即考虑铁磁材料磁导率的非线性,在激励电流密度较大时,探头的二次穿透区位置远移了。

表 1 给出了非线性情况下不同激励电流密度下,管壁内磁感应强度的变化情况,计算结果

见表 1。表 1 显示,当 $J_1=20.4\text{A}/\text{cm}^2$ 时,管壁内磁感应强度 $B(\text{模})$ 的最大值只有 800Gauss,而当 $J_2=123.4\text{A}/\text{cm}^2$ 时,管壁内磁感应强度 $B(\text{模})$ 最大值为 4000Gauss,显然,磁感应强度为 4000Gauss 时铁磁材料的磁导率要远大于其磁感应强度为 800Gauss 时的磁导率。所以,正是由于激励电流密度增大,管壁内磁导率将增大,从而使磁场穿透管壁的能力下降导致了探头二次穿透区位置远移。而这一点在线性计算中被忽视了。

表 1

激励电流密度(A/cm ²)	20.4	66.7	123.4
管壁 B _{max} (Gauss)	800	2100	4000

参 考 文 献

1 曲民兴,司家屯等.远场涡流探头的研究动向.南京航空学院学报(远场涡流检测技术专辑),1990.1~7
2 孙雨施,曲民兴等.Improvement in Remote Field Eddy Current Probe Structure,Materials Evaluation,Vol.50/No.5,1995.600~604
3 Schmidt,T·R.,The Remote Field Eddy Current Inspection Technique,Material Evaluation,Vol42,No.2.1984.225~230
4 刘焱.新型远场涡流探头的设计研究:[学位论文].南京航空航天大学,1997

The Influence of Nonlinear Factor To The Charicteristic of Remote Field Eddy Current Probe

Liu Yan¹⁾ Qu Minxing²⁾ Meng Xiaoli²⁾
(1)Department of Electric Engineering of Yancheng
Institute of Technology,Yancheng,224003,PRC
2)Institute of Aeronautics,Nanjing,210016,PRC)

Abstract This paper utilizes the method of linear and nonlinear finite element to analogize the signal-distance charicteristic of remote field eddy current probe with magnetic path and electromagnetic shelter. It provides the signal-distance curve of the probe. The conclusion shows that the nonlinear factor of electromagnetic material results in the density of stimulated current to be related to the position of the remote field.
Keywords Remote Field Eddy Current Probe;The Influence of Nonlinear Factor