

文章编号: 1000-0887(2000)09-0933-09

电磁层析成像(EMT): 正问题的理论分析*

熊汉亮, 徐苓安

(天津大学 电气自动化与能源工程学院, 天津 300072)

(李家春推荐)

摘要: 基于感应原理的电磁层析成像(EMT)是一种新颖的工业过程成像技术。通过解析求解特定的两组分流成像正问题, 导出了二维磁场分布的精确表达式, 定量分析了传感器内部的物理机制和 EMT 技术的可检测性极限, 建立了场灵敏度的直接数学表达式和灵敏度图。在一定程度上, 为传感器的定量设计, EMT 技术的可检测性分析和两组分过程的图像重建提供了数理基础。

关键词: 电动力学; 多相流; 层析成像; 传感器技术; 电磁测量技术

中图分类号: O422; O359 文献标识码: A

引言

八十年代中期, 随着计算机断层扫描(CT)技术在医学诊断中的成功应用, 一种适用于工业过程检测的层析成像技术——过程层析成像(Process Tomography)^[1], 在英、美等国家得到迅速发展。其中, 基于电学原理的电层析成像技术, 在继电容层析成像(ECT)^[2]、电阻抗层析成像(EMT)^[3]之后, 九十年代初期又提出了基于感应的电磁层析成像(EMT)^[4-5], 开辟了过程检测的新领域。EMT 系统主要由三部分组成: 安装在待成像空间(物体空间)周围管壁上的传感子(激励线圈和检测线圈)阵列, 相关的控制与数据处理电路, 计算机与图像(特征参数)重建单元。EMT 的工作过程是: 控制电路产生的激励电流通过激励线圈, 在物体空间建立平行平面磁场(称其为投影), 用以“质询”物体空间。分布在空间四周的检测子获取物体对不同方向投影的响应信号(物场信号), 经数据处理电路送到计算机, 利用适当的图像重建算法产生一幅幅二维图像。通过对图像特征参数的提取, 可获取物体空间的电导率和磁导率分布信息。EMT 技术在化工、冶金、采矿、食品、石油等工业过程的在线检测中有潜在的应用前景。

对于电层析成像系统, 通常需要解决两个问题: 正问题和逆问题^[6]。EMT 的正问题是已知物体空间的电导率和磁导率分布, 确定检测子的测量值, 这要求场分布的信息。相反, 逆问题是由检测信号确定物体空间内物质的电导率和磁导率分布, 即图像重建。这通常需要各检测子对物体空间不同位置放置的试体或小扰动的场灵敏度分布的信息。场分布和灵敏度分布一般是直接通过测量或采用有限元仿真得到。

本研究的主要目的是, 通过用解析方法求解特定的 EMT 正问题, 建立场分布和灵敏度分

* 收稿日期: 1999_01_29; 修订日期: 2000_06_15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69574021, 59877018)

作者简介: 熊汉亮(1941—), 江西人, 副教授, 硕士, 硕士生导师。

布的直接数学表达式。在此基础上,对 EMT 传感器的响应进行理论分析,包括 EMT 的物理原理、可检测性极限和灵敏度图等,为传感器的定量设计、EMT 技术的可检测性分析和两组分流的图像重建提供数理基础。

1 正问题的解

本分析采取以下简化假设:

1) 忽略物体空间不同物体间的相互作用,因而只需要考虑一个物体。为简便起见,该物体取为平行于 z -轴的无限长圆柱,于是,所考虑的问题可简化为 x - y 平面中的二维问题。

2) 激磁电流可认为是沿 z -方向流动的面电流,分布在物体空间的边界上,随其方位角正弦变化。这样的电流在均匀物体空间将产生平行激励磁场 B_0 ,具有平行于 z -轴的矢量磁位 $A = A_z$ 。所以,可以忽略物体表面电荷的聚集效应^[7]。

3) 背景媒质为非导电物质。在工作频率下,与物体中感应的涡流相比较,物体和背景媒质中感应的位移电流可以忽略。

EMT 系统的传感器截面可分为五个区域,如图 1 所示:①目标(待成像)物体 1,取为圆形,半径为 a ,电导率为 σ_1 ,磁导率为 μ_1 ;②背景媒质 2,电导率为 $\sigma_2 = 0$,磁导率为 μ_2 ;③铁氧体屏蔽环 3,电导率为 $\sigma_3 \approx 0$,磁导率为 $\mu_3 \rightarrow \infty$;④激励线圈 4,位于半径 R 的圆柱面边界上,面电流密度函数为 $K_\alpha = K \sin\beta$, K 是激磁电流密度(安/米), β 是半径 R 与 x 轴间的夹角;⑤检测子阵列 5,均匀配置在半径 R_d 、方位角 α 的周边上,矢量面积为 S 。

EMT 是基于电磁感应原理。在正弦时变激励下,所有的场量随时间的简谐变化表为 $\exp(j\omega t)$, $j = \sqrt{-1}$ 为虚数单位。因此,麦克斯韦方程组取下面形式^[8]:

$$\text{rot} \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E}, \quad (1)$$

$$\text{rot} \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{H}, \quad (2)$$

$$\text{div} \cdot \mathbf{B} = 0, \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}. \quad (3)$$

定义矢量磁位 A :

$$\text{rot} \times \mathbf{A} = \mathbf{B}, \quad \text{div} \cdot \mathbf{A} = 0. \quad (4)$$

利用矢量恒等式 $\text{rot} \times \text{rot} \times \mathbf{A} = \text{grad}(\text{div} \cdot \mathbf{A}) - \Delta^2 \mathbf{A}$,由式(1)~(4)得

$$\left. \begin{aligned} \Delta^2 \mathbf{A} - k^2 \mathbf{A} &= 0, \\ k &= \sqrt{j\omega\sigma_1\mu_1} = \sqrt{j}s, \\ s &= \sqrt{\omega\sigma_1\mu_1}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对于圆柱坐标系中的二维平面问题,设坐标

原点在目标物体中心(r_0, φ_0),则对于图 1 中标号为 1 和 2 的两个区域,矢量场方程式(5)分别取下面标量形式:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial A_1}{\partial \varphi^2} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_1}{\partial \varphi^2} - k^2 A_1 = 0 \quad (\text{在目标物体 1 内}), \quad (6)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial A_2}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 A_2}{\partial \varphi^2} = 0 \quad (\text{在背景媒质 2 中}). \quad (7)$$

在激磁电流分布的边界区域 4 上,必须满足安培环路定律。于是有

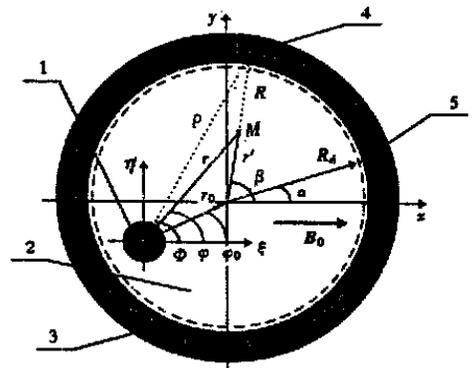


图 1 传感器截面

$$\left. \frac{\partial A_2}{\partial r} \right|_{r=R} = \mu_2 K \sin \beta \quad \text{在(边界 4 上)} \cdot \quad (8)$$

此外, 按照目标物体和背景媒质的分界面条件, 有

$$A_1(\alpha, \varphi) = A_2(\alpha, \varphi) \quad \text{(在区域 1 和 2 的分界面上)} \cdot \quad (9)$$

$$\left. \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_1}{\partial r} \right|_{r=a} = \left. \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A_2}{\partial r} \right|_{r=a} \quad \text{(在区域 1 和 2 的分界面上)} \cdot \quad (10)$$

(6) ~ (10) 式组成的边值问题称为诺意曼(Neumann)问题。利用分离变量法, 考虑到平行场的激励形式和场的对称性, 问题的解是

$$A_1(r, \varphi) = \frac{2\mu_1\mu_2KP r}{(\mu_1 + \mu_2)I_0(ka) - (\mu_1 - \mu_2)I_2(ka)} [I_0(kr) - I_2(kr)] \sin \varphi, \quad (11)$$

$$A_2(r, \varphi) = \mu_2 KP \left[r + \frac{a^2}{r} T \right] \sin \varphi \cdot \quad (12)$$

于是, 由方程式(4), 区域 1 和 2 中的磁感应强度分别是

$$\mathbf{B}_1(r, \varphi) = \frac{2\mu_1\mu_2KP}{\left\{ (\mu_1 + \mu_2)I_0(ka) - (\mu_1 - \mu_2)I_2(ka) \right\} \times \left\{ [I_0(kr) - I_2(kr)] \cos \varphi_r - [I_0(kr) + I_2(kr)] \sin \varphi_\varphi \right\}}, \quad (13)$$

$$\mathbf{B}_2(r, \varphi) = \mu_2 KP \left\{ \left[1 + \frac{a^2}{r} T \right] \cos \varphi_r - \left[1 - \frac{a^2}{r} T \right] \sin \varphi_\varphi \right\}, \quad (14)$$

式中 $I_0(kr)$ 和 $I_2(kr)$ 分别是复宗量 (kr) 的零阶和二阶第一类变态贝塞尔函数, 因子 T 和 P 有明确的物理意义(详见下一节), 它们分别由下面两式给出:

$$T = \frac{(\mu_1 - \mu_2)I_0(ka) - (\mu_1 + \mu_2)I_2(ka)}{(\mu_1 + \mu_2)I_0(ka) - (\mu_1 - \mu_2)I_2(ka)}, \quad (15)$$

$$P = \frac{1}{1 - a^2 g T}, \quad (16)$$

式中

$$g = \frac{\rho_s \sin \Phi - r_0 \sin(2\Phi - \varphi_0)}{\rho^2 (\rho_s \sin \Phi - r_0 \sin \varphi_0)}, \quad (17)$$

$$\rho = r_0 \cos(\Phi - \varphi_0) + \sqrt{R^2 - r_0^2 \sin^2(\Phi - \varphi_0)}. \quad (18)$$

上述式子中, r_0 是目标物体的中心与物体空间的中心之间的距离, φ_0 是从 ξ 轴逆钟向转到这两个中心连线的角, 而角 Φ 是描述物体相对于与观测点 M 有关的激励线圈的方位(看图 1)。

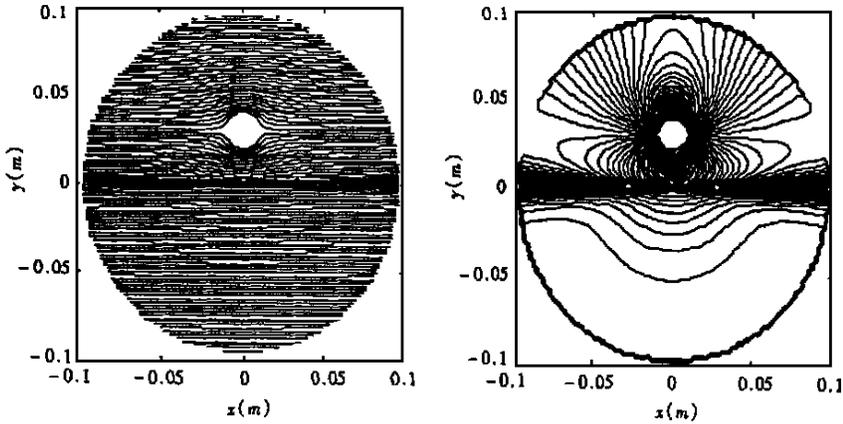
对于两种电磁性质相逆的目标物体: 铜 ($\sigma_1 = 5.8 \times 10^7 \text{ s/m}$, $\mu_1 = \mu_0$) 和铁氧体 ($\sigma_1 = 0.5 \text{ s/m}$, $\mu_1 = 2000 \mu_0$), 矢量磁位 A 的实分量和虚分量的等值线分布如图 2 所示。

2 物场效应因子

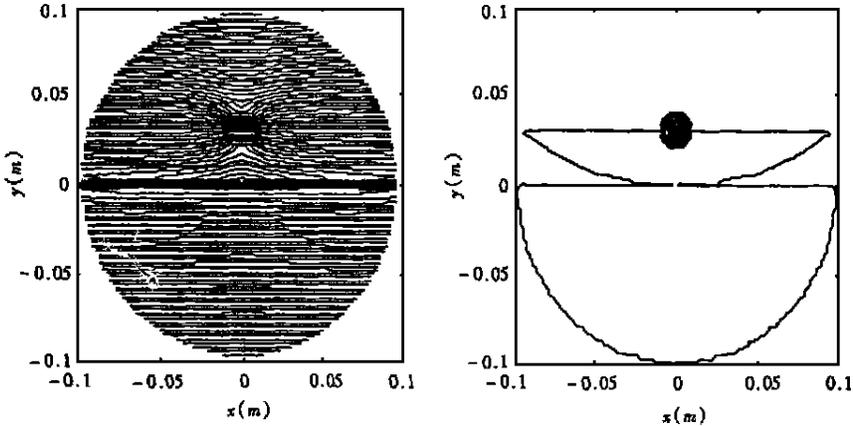
物体空间电磁物体的存在将使平行激励磁场发生畸变, 称其为物场效应, 这种畸变是物体与激励场相互作用的结果。上述解析式中包含的两个函数因子 T 和 P 集中体现了这种物场效应。事实上, 如果物体不存在, 即 $a = 0$, $\mu_1 = \mu_2$, 则有 $T = 0$, $P = 1$ 。此时, 由解析式(13)和(14)可得 $\mathbf{B}_1(r, \varphi) = \mathbf{B}_2(r, \varphi) = \mu_2 K i_x$, 即平行的均匀激励磁场。

物场效应表现在两个方面: 第一、激励场对物体的正向激励效应, 它在物体中激化感生源, 包括涡流和磁化。感生源形成的场称为物场, 它使原均匀激励场变为合成畸变场。这种效应可用(15)式定义的因子 T 来描述, 称 T 为物体畸变因子。 T 是物体半径 a 及电磁性质 σ_1, μ_1

的函数, 与边界存在与否无关, 即使物体置于边界不存在的无限大均匀场中, T 仍然存在且表达式不变。



(a) 铜/空气的等 A 线(实部和虚部)



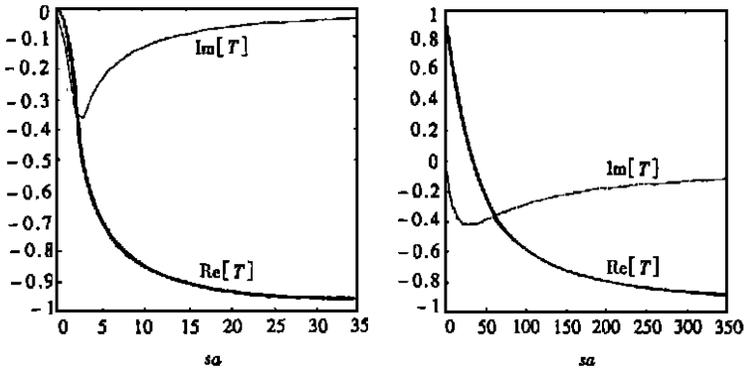
(b) 铁氧化物/空气的等 A 线(实部和虚部)

图 2 两种典型物体的等 A 线

为使 T 的物理效应可视化, 图 3 描绘了 T 的两个典型例图。图 3(a) 是导电非磁性物质 ($\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$) 与 (sa) 的关系曲线, 而图 3(b) 是磁性物质 ($\mu_1 = 30\mu_2$) 的关系曲线。从图 3(a) 可以看出, T 的实部 $\text{Re}(T)$ 从 $0 \rightarrow -1$ 单调减小, 这意味着导体中的涡流有抵消原磁场的作用。图 3(b) 中对于磁性物体有类似现象, 但是, T 的实部 $\text{Re}(T)$ 是从 $1 \rightarrow -1$ 单调减小, 这说明磁性物体的磁化有增强原磁场的作用。

第二、物场对激励线圈的反向施感效应, 在激励线圈中产生感应电流, 使合成畸变场发生变化, 这种效应集中反映在 (16) 式定义的合成场比例因子 P 中。因子 P 包含 T 、 a 和 g , 这就是说, P 是来自于物场, 而且与目标物体的半径 a 、位置 (r_0, φ_0) 以及目标物体与边界上和检测点同一方位角 (β) 的激励线圈的相对方位 (ρ, Φ) 有关, 这表明目标物体与磁屏蔽边界处的激励线圈有感应耦合作用, 称 P 为边界耦合因子。事实上, 当物体不存在或边界移至无限远处时, 都有 $P = 1$ 。需要指出的是, 因子 P 中含有的物体尺寸、位置和电磁性质等重要信息, 是建立各检测点对由物体空间不同位置上放置的物体所产生的场响应的灵敏度图的基础(见第 4

节)。



(a) 导电物质 ($\mu_1 = \mu_0$) (b) 磁性物质 ($\mu_1 = 30\mu_0$)

图3 T 的实部 $\text{Re}[T]$ 和虚部 $\text{Im}[T]$ 与 (sa) 的关系

需要指出的是, 引入因子 T 和 P , 不仅有助于描述 EMT 传感器内部运作的物理机制, 而且有助于分析和选择 EMT 技术的检测方法。我们注意到, 总场的实分量包含激励场和物场, 而虚分量完全是由 T 和 P 的虚部引起, 即物场所致, 与激励场无关。同时, 从图 3 可看到, 导电物体的 T 的虚部在 $sa = 2.5$ 附近出现极小值, 磁性物体的 T 的虚部在更大的 $sa = 25$ 处有一个极小值, 这表示在测量磁通虚部时存在一个给出最大灵敏度的最佳频率。而且, 当 sa 小于某个值时, 磁场的虚分量的值大于实分量。这就意味着, 为获取物场信息, 测量磁场虚部是可取的, 它在相位上滞后于激励场。另一方面, 在图 3 中还可以看到, 强磁物质倾向于有磁场正实分量, 而导电物质有负实分量。为了从物体空间得到最大量的信息, 需要采用相敏检测法, 它同时测量物场的实分量和虚分量。

3 可检测性极限

物体的可检测性与该物体引起的磁场畸变的大小密切相关。从方程 (14) 可以看到, 检测信号与到物体的距离的平方成反比关系。显然, 各检测子对靠近的物体是敏感的, 而对远离的物体敏感性就要差得多, 这表明 EMT 对物体空间的中心区域的成像比靠近边界的区域困难得多。为分析物体的可检测性与该物体引起的磁场畸变的关系, 考虑物体处于空间中心的最坏场合, 并取 $\alpha = 0^\circ$ 处的检测子输出。那么, 与空间没有物体的情况相比较, 由于物体的存在导致输出信号的相对变化, 用磁场畸变比 D_r 表示为

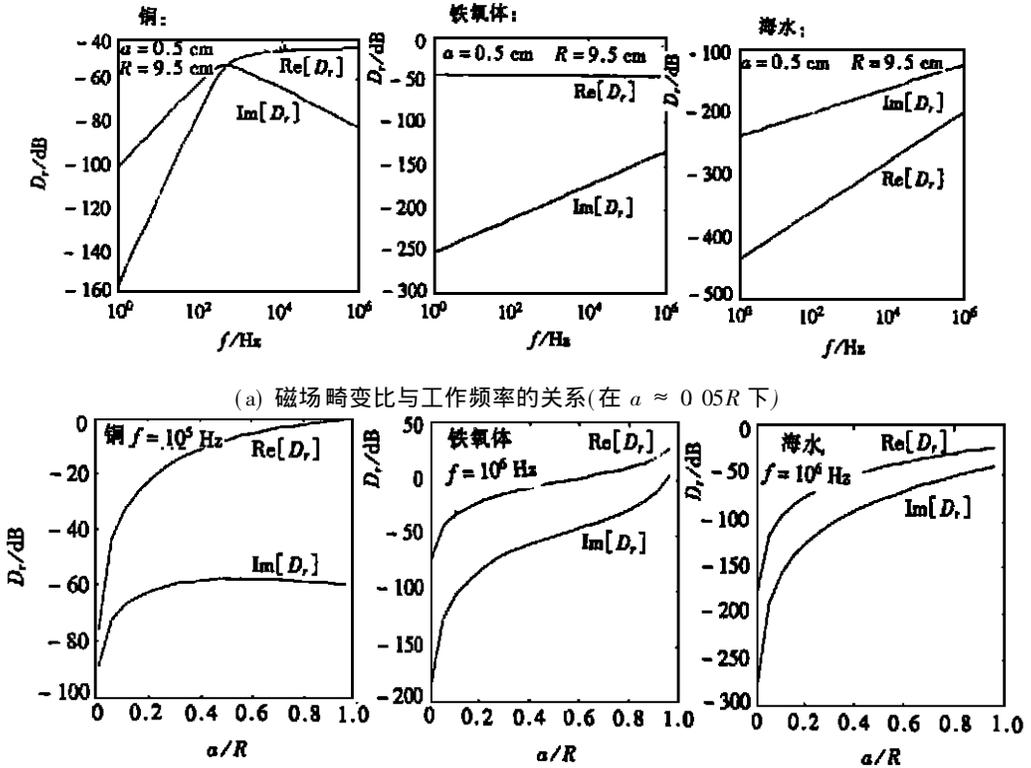
$$D_r = \frac{B(\text{有物体}) - B(\text{无物体})}{B(\text{无物体})}, \quad (19)$$

这个比值可由方程式 (14) ~ (16) 确定。如果用分贝 (dB) 表示, 考虑到 $R \approx R_d$, D_r 的实部和虚部如下:

$$\text{Re}[D_r] = 20 \log_{10} \left| \text{Re} \left[\frac{2 \frac{a^2}{R_d^2} T}{1 - \frac{a^2}{R^2} T} \right] \right| \quad (\text{dB}), \quad (20)$$

$$\text{Im}[D_r] = 20 \log_{10} \left| \text{Re} \left[\frac{2 \frac{a^2}{R_d^2} T}{1 - \frac{a^2}{R^2} T} \right] \right| \quad (\text{dB}). \quad (21)$$

畸变比 D_r 的值可以用来确定特定物类的可检测性极限, 这是因为物体的存在引起的信号变化必须足够大于特定检测子的信噪比。作为一个例子, 图 4(a) 绘出了直径约为物体空间二十分之一的三种物体: 铜、铁氧体和海水 ($\sigma = 5\text{ S/m}$) 的磁场畸变比的实分量和虚分量随工作频率变化的曲线。借助于各检测子的信噪比, 对不同物类和在不同工作频率下, 这些图可给出系统的可检测性极限的某种指示。图 4(b) 示出了一组类似于图 4(a) 的曲线, 它们是在给定的工作频率 (10^5 Hz 或 10^6 Hz) 下相对于物体尺真寸绘制的。这些图有助于提供, 例如, 关于单个可检测物体的最小尺寸的定量信息。



(a) 磁场畸变比与工作频率的关系 (在 $a \approx 0.05R$ 下)

(b) 磁场畸变比与物体相对半径的关系 (在 10^5 或 10^6 Hz 下)

图 4 三种不同物体(铜、铁氧体和海水)的可检测性

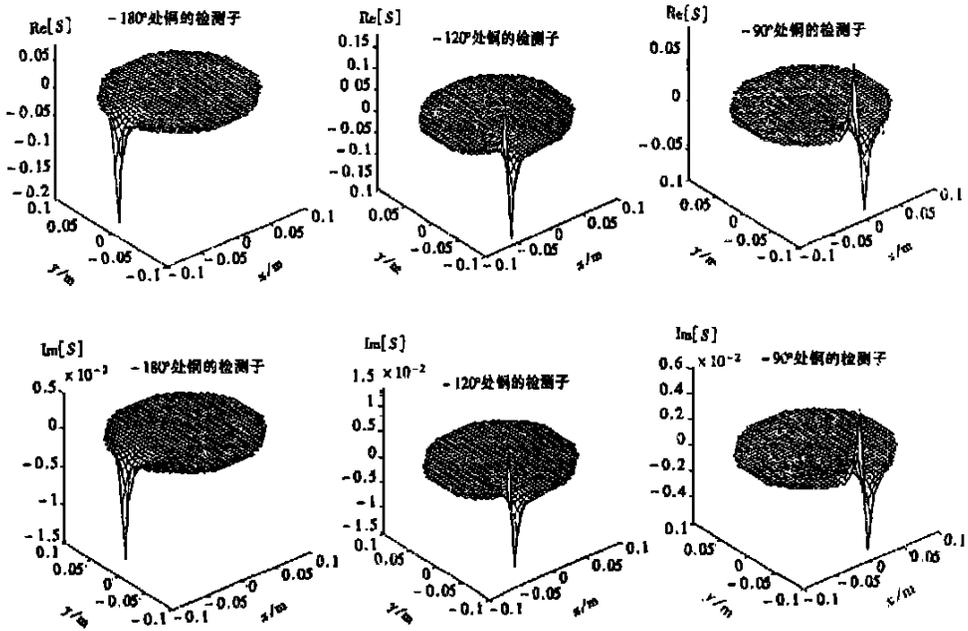
图 4 中的曲线表明, 对于象铜、铁氧体这样的导电或磁性物质, EMT 技术不存在可检测性问题(设可检测的信号电平为 -100 dB)。但对于象海水这样的低电导率物质, 当工作频率在 1 MHz 以下时, EMT 技术难以检测直径小于物体空间二十分之一的物体。因此, 为检测海水这样的低电导率物质, 需采用更高的频率(大于 1 MHz) 以达到可检测的信号电平。此时, 位移电流不可忽略。

需要指出的是, 图 4 中海水的曲线低于实际中出现的情况, 因为忽略了位移电流的场效应, 而且只示出一个检测子的输出。事实上, 传感器是由检测子阵列组成, 所以总的可检测性会高些, 这在很大程度上取决于重建算法。

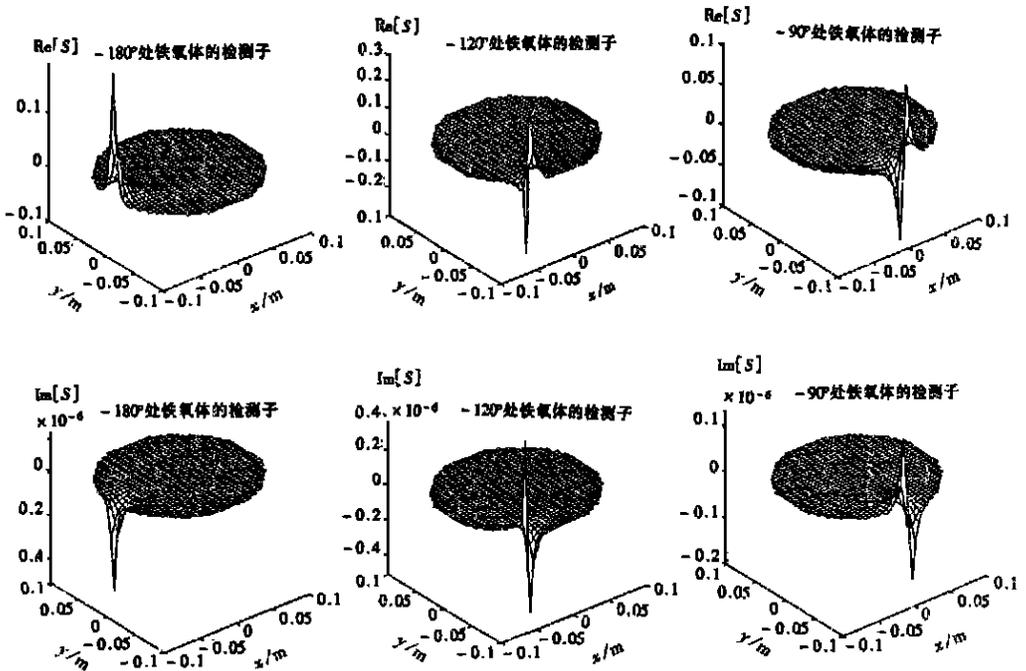
4 灵敏度图

将界定物体空间的正方形面积剖分成个正方形网格(像素), 并用等面积圆形物体表示这些像素, 则对于给定的场投影, 可绘制检测子相对于所有像素的响应灵敏度分布图, 称为灵

灵敏度图。灵敏度图可用来集总描述在所有逐一施加的场投影下每个检测子对各像素的响



(a) 例 1: 铜/空气的实灵敏度图和虚灵敏度图



(b) 例 2: 铁氧化物/空气的实灵敏度图和虚灵敏度图

图 5 两种典型两组分过程(铜/空气和铁氧化物/空气)的灵敏度图

应。这些图含有图像重建所需重要信息, 常用作线性反投影算法(在各投影下每个检测子的

测量值,借助于对各像素的响应灵敏度线性迭加得各像素的灰度图像)重建图像的基础^[5~6]

在 B_0 方向为 ϑ 的场投影下,方位角为 α 的检测子对物体空间 (r_0, φ_0) 处的物体的响应灵敏度可以定义为

$$S_{\alpha}^{\vartheta}(r_0, \varphi_0) = \frac{V_{\alpha}^{\vartheta}(r_0, \varphi_0) - V_{\alpha}^{\vartheta}(\text{背景})}{V(\text{参考})} \quad (22)$$

式中, $V_{\alpha}^{\vartheta}(r_0, \varphi_0)$ 是当 B_0 的方向与 x -轴的夹角(投影角)为 ϑ 和物体位于 (r_0, φ_0) 时,方位角 α 处的检测子的输出电压。从方程式(14)可推出这个输出电压。假设检测子面积 S 取得足够小以致截面上的磁通密度变化可以忽略,如果检测子有 n 匝,则上述检测子的输出电压为

$$\begin{aligned} V_{\alpha}^{\vartheta}(r_0, \varphi_0) = & -n \left. \frac{d(\mathbf{B} \cdot \mathbf{S})}{dt} \right|_{\alpha}^{\vartheta} = \\ & -j\omega_n S \left\{ [B_r \cos(\varphi - \vartheta) - B_{\varphi} \sin(\varphi - \vartheta)] \cos(\alpha - \vartheta) + \right. \\ & \left. [B_r \sin(\varphi - \vartheta) + B_{\varphi} \cos(\varphi - \vartheta)] \sin(\alpha - \vartheta) \right\} = \\ & -j\omega_n S [B_r \cos(\alpha - \varphi) + B_{\varphi} \sin(\alpha - \varphi)], \end{aligned} \quad (23)$$

$$\text{其中, } B_r = \mu_2 K P \left[\left[1 + \frac{a^2}{r^2} T \right] \cos(\varphi - \vartheta) \right], \quad (24)$$

$$B_{\varphi} = \mu_2 K P \left[\left[1 + \frac{a^2}{r^2} T \right] \sin(\varphi - \vartheta) \right], \quad (25)$$

$V_{\alpha}^{\vartheta}(\text{背景})$ 是代表物体移去时的背景场输出情况。对于背景场的输出,可在上述式中置 $a = 0$ 得到:

$$V_{\alpha}^{\vartheta}(\text{背景}) = -j\omega_n \mu_2 K S \cos(\alpha - \vartheta). \quad (26)$$

$V(\text{参考})$ 是当投影角 ϑ 也为 α 时,方位角 α 处的检测子输出:

$$V(\text{参考}) = -j\omega_n \mu_2 K S. \quad (27)$$

在此定义中, $V(\text{参考})$ 是比例因数,选择它作为参考输出,大致相当于系统的满比例范围,因为它是最大的背景信号。

取两种典型的两组分过程:铜/空气和铁氧体/空气作为例子。给定的方向角 $\vartheta = 0^\circ$ 的投影下,当检测子置于不同方位角时,对于像素个数 $N = 39 \times 39$,像素尺寸相当于物体半径 $a = 0.2821\text{cm}$ 的灵敏度图如图5所示。每个灵敏度图描绘了一个特定方位角的检测子($\alpha = -90^\circ, -120^\circ, -180^\circ$),在上述特定的场投影下,当相当于像素尺寸的物体在整个物体空间移动时的实响应和虚响应。

从灵敏度图中可以看到:①铜/空气与铁氧体/空气比较,实分量 $\text{Re}[S]$ 的正负号正好相反,前者的绝对值约为后者的一半;而虚分量 $\text{Im}[S]$ 具有相同正负号,前者约为后者的一万倍。②铜/空气的 $\text{Re}[S]$ 和 $\text{Im}[S]$ 比较,灵敏度图的形状相似,不同的只是虚分量比实分量小一个数量级。③铁氧体/空气的 $\text{Re}[S]$ 和 $\text{Im}[S]$ 比较,灵敏度图正负反向,而且数值上虚分量只是实分量的百万分之一。④在 $\alpha = 180^\circ$ 处,铜/空气的 $\text{Re}[S]$ 为负值,铁氧体/空气的 $\text{Re}[S]$ 倾向于正值,但 $\text{Im}[S]$ 都是负的。这与第3节的分析一致。

5 结论与讨论

本文给出的 EMT 平行场传感器正问题的解析结果,在一定程度上为 EMT 理论和技术提供了数理基础:第一、在忽略不同物体间相互作用的前提下,场分布信息可通过单个物体的磁场线性迭加得到,为图像重建所需的测量数据模拟提供了一种解析方法。第二、物体畸变因子 T 和边界耦合因子 P 定量地表征了 EMT 传感器内在的物理机理,为传感器的设计和运作、EMT

的数据获取方法研究提供了理论依据。第三、因子 T 和 P 直接关系到目标物体引起的磁场畸变, 引入畸变比为分析 EMT 技术的可检测性极限(物体尺寸、电导率、工作频率等) 提供了一种数学手段。第四、灵敏度数学表达式可直接用于计算灵敏图, 它们含有图像重建所需的重要信息, 为基于线性反投影算法的图像重建提供一条直接途径。

本文仅分析了二维单个圆形物体正问题的解析途径。当物体空间存在多个物体时, 由于各物体的相互作用, 严格来说, 总的畸变场不等于单个物体的畸变场线性迭加, 基于场线性迭加的线性反投影图像重建算法也需要改进。这是下一步研究的课题。

[参 考 文 献]

- [1] Dickin F J, Hoyle B S, Hunt A, et al. Tomographic imaging of industrial process equipment: techniques and applications[J]. IEE Proc G, 1992, **139**(1): 72—82.
- [2] Huang S M, Xie C G, Thorn R, et al. Design of sensor electronics for electrical capacitance tomography[J]. IEE Proc G, 1992, **139**(1): 83—88.
- [3] Seager A D, Barging D C, Brown B H. Electrical impedance imaging[J]. IEE Proc A, 1987, **134**(2): 201—210.
- [4] Yu Z Z, Peyton A J, Conway W F, et al. Imaging system based on electromagnetic tomography (EMT)[J]. Electron Lett, 1993, **29**(7): 625—626.
- [5] Yu Z Z, Peyton A J, Xu L A, et al. Electromagnetic inductance tomography (EMT): sensor, electronics and image reconstruction algorithm for a system with a rotatable parallel excitation field[J]. IEE Proc A, 1998, **145**(1): 20—25.
- [6] Xie C G, Huang S M, Hoyle B S, et al. Electrical capacitance tomography for flow imaging: system model for development of image reconstruction algorithms and design of primary sensor[J]. IEE Proc G, 1992, **139**(1): 89—98.
- [7] Harpen M D. Eddy current distribution in cylindrical samples: effect on equivalent sample resistance [J]. Phys Med Biol, 1989, **34**(9): 1229—1238.
- [8] Smythe. Static and Dynamic Electricity [M]. New York: McGraw_Hill, 1951.

Electromagnetic Tomography (EMT): Theoretical Analysis of the Forward Problem

XIONG Han_liang, XU Ling_an

(School of Electrical Automation and Energy Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, P R China)

Abstract: Inductance based electromagnetic tomography (EMT) is a novel industrial process tomographic technique. Exact expressions of the magnetic field distribution in a two dimensional object space were derived by analytically solving the forward problem for a particular two component flow. The physical mechanisms within the sensor and the detectability limits of the EMT technique were quantitatively analyzed. Direct mathematical expressions for the field sensitivity and the sensitivity maps were established. To a certain extent, mathematical and theoretical bases are given for quantitative design of the sensor, detectability analysis of the EMT technique and image reconstruction of two component processes based on the linear back projection algorithm.

Key words: electrodynamics; multi phase flows; tomography; sensor technique; electromagnetical measurement technique