

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2417520

## 双平面线阵电磁层析成像的有限元仿真分析\*

李勇<sup>1,2</sup> 朱庆利<sup>3</sup>(1. 福建警察学院治安系 福州 350007; 2. 福建警察学院道路交通安全感知研究中心 福州 350007;  
3. 福建农林大学机电工程学院 福州 350002)

**摘要:** 本文提出双平面线阵电磁层析成像的检测技术,旨在提高交管部门对道路交通管理和拥堵治理的能力,特别是针对山区高速公路的交通事故检测。考虑道路两侧延长的特点,本文设计了2个平行平面线圈阵列的传感器结构,其中平面线圈阵列由5个线圈线性排列组成,采用三维有限元的方法对双平面线阵电磁层析成像技术检测道路交通事故进行仿真研究其可行性,分析物场中电磁场的分布特性以及灵敏度图谱的特性,根据LBP算法、Tikhonov正则化算法和Landweber算法三种算法重建车辆的图像,研究了重建车辆分布的效果。仿真结果表明,基于场向量提取法计算电导率灵敏度只需提取物场中 $x$ 轴和 $y$ 轴的电场,而计算磁导率灵敏度矩阵只需提取 $z$ 轴的磁场,同时能够通过测量边界电压来确定导体的电学参数分布,但磁导率灵敏度矩阵在物场区域的强度要明显高于电导率灵敏度矩阵,表明双平面线阵电磁层析成像技术适合采集边界磁场来重建图像。此外,通过对比3种算法在6中不同位置车辆的图像重建发现,采用Landweber算法重建车辆磁导率分布图像的效果最佳,重建图像均能区分车辆的分布位置,其IE最小为0.905,且CC最大为0.547。因此,双平面线阵电磁层析成像技术在仿真是可行的,能够有效地用于道路车辆的磁导率分布图像重建,具有提高道路交通安全管理和减少交通拥堵的潜在应用价值。

**关键词:** 双平面线阵;电磁层析成像;交通事故检测;灵敏度矩阵

**中图分类号:** TP391;TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.6020

Finite element analysis of dual-plane linear array  
electromagnetic tomographyLi Yong<sup>1,2</sup> Zhu Qingli<sup>3</sup>

(1. Public Security Department, Fujian Police College, Fuzhou 350007, China; 2. Traffic Safety Sensing Research Center, Fujian Police College, Fuzhou 350007, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** This paper proposes a detection technology of Dual-Plane Linear Array Electromagnetic Tomography, aimed at enhancing the traffic management and congestion control capabilities of traffic authorities, especially for traffic accident detection on mountain highways. Considering the characteristic of the road sides being extended, the paper designs a sensor structure composed of two parallel planar coil arrays, each linearly arranged with five coils. A three-dimensional finite element method is employed to simulate the feasibility of Dual-Plane Linear Array Electromagnetic Tomography for detecting traffic accidents and to analyze the distribution characteristics of the electromagnetic field in the object field as well as the characteristics of the sensitivity maps. The paper studies the effect in reconstructing vehicle distribution using LBP algorithm, Tikhonov Regularization algorithm, and Landweber algorithm. The simulation results indicate that calculating the electrical conductivity sensitivity requires the extraction of the electric field in the  $x$  and  $y$  axes, while calculating the magnetic permeability sensitivity matrix requires the extraction of the magnetic field in the  $z$ -axis. Meanwhile, it can determine the electrical parameter distribution of the conductors by measuring boundary voltages, but the intensity of the magnetic permeability sensitivity matrix in the object field is significantly higher than that of the electrical conductivity sensitivity matrix, which indicates Dual-Plane Linear Array Electromagnetic Tomography is suitable for capturing boundary magnetic fields to reconstruct images. Furthermore, by comparing the image reconstruction of vehicles in six different positions using the three algorithms, it is found that using the Landweber algorithm provides the best results in reconstructing the magnetic permeability distribution images of vehicles, with the minimum Image Error (IE) of 0.905 and the maximum Correlation Coefficient (CC) of 0.547. Therefore, Dual-Plane Linear Array Electromagnetic Tomography is feasible in simulation and can effectively be used for the magnetic permeability distribution image reconstruction of road vehicles, possessing potential application value in improving road traffic safety management and reducing traffic congestion.

**Keywords:** dual-plane linear array; electromagnetic tomography; traffic accident detection; sensitivity matrix

## 0 引言

道路上突然发生的交通事故会降低该道路的通行效

率,并可能引起严重的交通拥堵<sup>[1-2]</sup>。目前,道路交通事故的发生依赖于现场群众报警,其实时性能受到很大影响。尤其在山区的高速公路,交通事故发现不及时会将引发二

收稿日期:2024-12-02

\* 基金项目:国家自然科学基金青年项目(62301159)、福建省自然科学基金面上项目(2023J01229)资助

次重大交通事故。因此,为了提高交管部门对道路管理和拥堵治理的能力,需要一种具有实时性能的检测技术。

电磁层析成像(electromagnetic tomography, EMT)是一种实现物场内电导率和磁导率扰动的非接触式可视化检测技术<sup>[3-6]</sup>。其成像原理与 X 射线计算断层扫描成像(computerized tomography, CT)类似,区别在于将 X 射线源换成了电磁激励源,工作频率在 100 kHz~10 MHz 之间,主要依据被测物的电导率和磁导率对电磁场的扰动进行成像<sup>[5-6]</sup>。测量导磁或导电材料具有非侵入式、非接触、灵敏度高、无辐射、低成本、成像速度快等优势<sup>[3-6]</sup>,常用于钢轨无损探伤、管道多相流检测、脑出血诊断、碳纤维拉索缺陷检测等应用<sup>[7-12]</sup>。

传统 EMT 的结构是由多个环形线圈组成的“O”形线圈阵列组成。然而,这种模式受到被测物体有限空间的限制。为了不受被测物场空间限制,许多学者展开了异化结构 EMT 研究,以适应实际成像区域的需求。孙春光等<sup>[10]</sup>设计了 6 个线圈轴线平行且环绕排列的传感器异化结构来提高金属构件的测量精度。Igney 等<sup>[13]</sup>研究了平面线圈阵列 EMT 的性能,并进行了测量结果以确定传感器的精度和灵敏度,研究表明平行双平面线阵线圈能够改善因距离远而引起灵敏度衰减的问题,成功地实现了被测物分层图像重建。而后, Yin 等<sup>[14]</sup>提出了一种新型平面异构 EMT 系统,线圈扁平化排列且线圈轴线平行成像区域,被测物场在线圈阵列的下方,具有穿透金属的耦合能力高和灵敏度高等优点。在此基础上,霍继伟等人设计了 4×4 线圈矩阵排列的异构 EMT 以为适应钢轨表面的裂纹缺陷进行检测,其重建图像可以对纵向裂纹、横向裂纹、三角坑和混合损伤进行辨别和定位,论证了平面 EMT 在钢轨裂纹探伤可行性<sup>[15]</sup>。不同于平面异构 EMT 的应用,针对钢轨无损检测的在线应用, Liu 等<sup>[6]</sup>提出并研究了适应钢轨踏面轮廓的“L”型适应钢轨踏面轮廓的异构 EMT 对钢轨的断轨横截面成像,同时实现了 120 km/h 高速车载实验。相同地,为适应港机金属结构裂纹成像,曾星星等提出一种 7 线圈双环形结构的异构 EMT,并通过仿真验证了该结构的 EMT 可行<sup>[16]</sup>。Ma 等<sup>[17]</sup>也针对碳纤维缠绕氢气瓶罐进行了检测,设计了一种开发式 U 型传感器阵列,通过实验也验证了该结构 EMT 的可行性。由此可见,针对检测对象所在成像区域的空间限制,近年来异构 EMT 为适应实际需求被设计,且部分应用效果也得到提高。但是,针对道路事故检测的异构 EMT 应用极少。

本文将提出一种适应道路两侧放置线圈的双平面线阵电磁层析成像(dual-plane linear array EMT, DPLA-EMT)技术。通过分析 DPLA-EMT 的正逆问题,采用三维有限元仿真方法,仿真研究双平面线阵结构的电磁场分布特性,进而分析研究基于电导率和磁导率的灵敏度图谱特征。通过 3 种传统的图像重建算法,对比分析电导率和磁导率单模态成像的效果,为确定其测量边界信号提供理论依据,也

验证 DPLA-EMT 用于道路交通事故检测的可行性。

## 1 DPLA-EMT 正逆问题

传统“O”型 EMT 结构为线圈环绕成像区域,而 DPLA-EMT 的线圈排列示意图如图 1 所示。根据成像原理可知,EMT 原理上可以分为正问题和逆问题。相对应地,DPLA-EMT 也存在正逆问题。

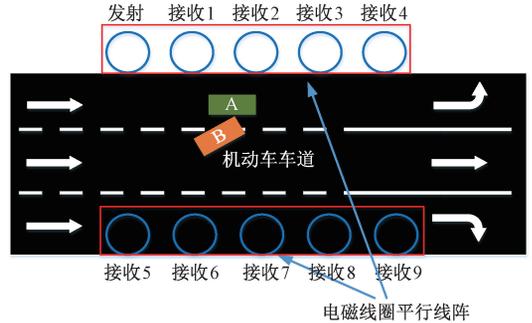


图 1 路侧 DPLA-EMT 的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DPLA-EMT on the roadside

### 1.1 正问题

与传统 EMT 的成像原理一致,DPLA-EMT 也是基于电磁感应原理。假设被测物体满足线性和各向同性,激励频率选择 100 kHz 及以下。因此,满足 Maxwell 方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \epsilon \mathbf{E} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{B} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{H}$  是磁场强度; $\mathbf{E}$  是电场强度; $\mathbf{B}$  是磁通密度; $\mathbf{D}$  是电位移; $\sigma$  是电导率; $\omega$  是角频率。注意:由于激励频率为 100 kHz 及以下,满足条件  $\sigma \gg \omega \epsilon$ ,因此式(1)中  $\nabla \times \mathbf{H}$  的  $j\omega \epsilon \mathbf{E}$  可以被忽略。此外,车辆导体产生的涡流次生电场较小,也可以被忽略,那么成像区域内部可认为不存在自由电荷,即式(1)中  $\nabla \cdot \mathbf{D}$  等于 0。

电磁场的本构方程可以表示为:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{J}$  是电流密度; $\mu$  是磁导率; $\epsilon$  是介电常数。引入磁矢势  $\mathbf{A}$ ,磁通密度和电场强度可以由磁矢势表示成:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} - \nabla \varphi \quad (3)$$

由于成像区域不存在自由电荷,那么标量( $\nabla \varphi$ )等于 0。则式(3)可改写成:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \mathbf{E} = -j\omega \mathbf{A} \quad (4)$$

根据外尔规范( $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ )和向量恒等式( $\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ ),将式(2)和式(3)代入(1)整理可得:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} - j\omega \sigma \mathbf{A} = -\mathbf{J}_s \quad (5)$$

式中: $\mathbf{J}_s$  为激励电流密度,是给定的值。通过有限元方法求解式(5),可以获得磁矢势  $\mathbf{A}$ 。那么检测线圈感应电压  $U$

可以通过沿着传感线圈的磁矢势  $\mathbf{A}$  的线积分  $d\mathbf{l}$  来计算, 表达式如下:

$$U = -j\omega \oint \mathbf{A} d\mathbf{l} \quad (6)$$

### 1.2 逆问题

DPLA-EMT 逆问题是利用检测线圈测量的边界电压确定成像区域导体电学参数分布。假如将 DPLA-EMT 定义为一个多输入多输出的系统, 设导体电学参数分布函数为  $f(\sigma(x, y), \mu(x, y))$ , 那么根据式(6), 边界电压与导体分布的关系可以表示成:

$$U = F(f) \quad (7)$$

从式(7)可以看出, DPLA-EMT 逆问题是一个非线性问题, 直接求解是非常困难。根据文献[18], 可以将式(7)进行泰勒公式展开。对于小扰动, 假设灵敏度矩阵与电学参数分布无关并保持不变。在进行线性化和归一化后, 可以得到电压测量值与电学参数分布之间的归一化线性方程, 如下:

$$\mathbf{U} = \mathbf{S} \mathbf{g} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{U}$  是归一化  $m \times 1$  维的测量值向量;  $\mathbf{S}$  是归一化的  $m \times n$  维的灵敏度矩阵;  $\mathbf{g}$  是  $n \times 1$  维的电学参数分布向量, 即重建图像的灰度值向量。

从式(8)可知, 由已知  $\mathbf{U}$  求解  $\mathbf{g}$ , 关键在于求  $\mathbf{S}$ , 因此灵敏度矩阵  $\mathbf{S}$  在图像重建的过程中是至关重要的。然而, 由于检测线圈独立测量值要远小于网格剖分数, 那么  $\mathbf{S}$  是不适定, 还存在病态性, 其逆矩阵是无法求得的, 车体电学分布图像重建就显得较为困难。一般而言, 求解灵敏度矩阵常用的方法为模型扰动法、测量扰动法以及场向量提取法。由于场向量提取法相对简单且效率较高, 所以本文也采取该方法求解 DPLA-EMT 的灵敏度矩阵。电导率  $\sigma$ 、介电常数  $\epsilon$  以及磁导率  $\mu$  等灵敏度矩阵计算如下<sup>[18]</sup>:

$$\begin{cases} \mathbf{S}_\sigma = \vec{\mathbf{E}}_A \cdot \vec{\mathbf{E}}_B \\ \mathbf{S}_\epsilon = j\omega \vec{\mathbf{E}}_A \cdot \vec{\mathbf{E}}_B \\ \mathbf{S}_\mu = -j\omega \vec{\mathbf{H}}_A \cdot \vec{\mathbf{H}}_B \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\vec{\mathbf{E}}_A$  和  $\vec{\mathbf{E}}_B$  分别表示线圈 A 和线圈 B 单独作激励产生的电场强度; 同理,  $\vec{\mathbf{H}}_A$  和  $\vec{\mathbf{H}}_B$  也是如此。在计算相同的灵敏度矩阵时, 所有的场都是在同一点上生成的。因此, 场矢量提取器方法可以计算出唯一的灵敏度矩阵。此外, 从式(7)可知, DPLA-EMT 重建车体的电学参数只有电导率和磁导率, 因此本文不考虑介电常数灵敏度矩阵。常见的 3 种图像重建算法有<sup>[19-21]</sup>:

1) 线性反投影成像算法 (linear back projection, LBP), 可表示如下:

$$\mathbf{g} = \mathbf{S}^T \mathbf{U} \quad (10)$$

2) Tikhonov 正则化算法, 可表示如下:

$$\mathbf{g} = (\mathbf{S}^T \mathbf{S} + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{S}^T \mathbf{U} \quad (11)$$

3) Landweber 迭代算法, 可表示如下:

$$\mathbf{g}_{k+1} = \mathbf{g}_k - \alpha_k \mathbf{S}^T (\mathbf{S} \mathbf{g}_k - \mathbf{U}) \quad (12)$$

式中:  $\gamma$  和  $\alpha_k$  是预设参数, 其中  $\alpha_k = 2/(\lambda_{\max} + \lambda_{\min})$ ,  $\lambda_{\max}$  和  $\lambda_{\min}$  分别是  $\mathbf{S}^T \mathbf{S}$  特征的最大值和最小值。

## 2 DPLA-EMT 有限元仿真分析

### 2.1 有限元仿真模型建立

本文仿真环境为 Intel(R) Core(TM) i7-8750H CPU @2.20 GHz, 16 G RAM。采用多物理场耦合有限元仿真软件建立 2 车道的 DPLA-EMT 道路交通车辆检测成像的三维仿真模型, 如图 2 所示。在模型中, 假设线圈放置在距离车道  $d_1$  的位置, 车道成像区域在  $xy$  平面, 模型的几何参数如表 1 所示, 而电气参数如表 2 所示。

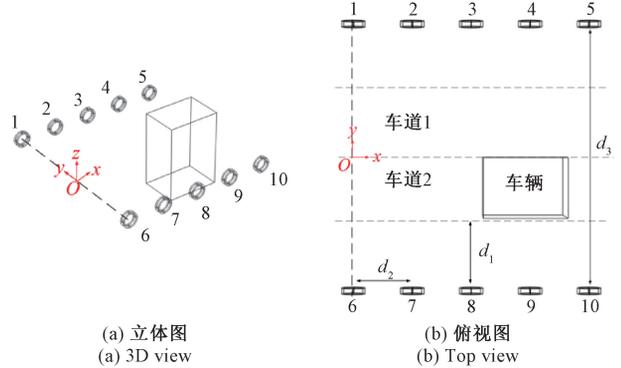


图 2 三维有限元仿真模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element simulation model

表 1 几何参数

Table 1 Geometric parameters		dm
参数	值	
L	1.5	
H	1.0	
$d_1$	0.5	
$d_2$	0.5	
$d_3$	2.0	
线圈半径	0.1	

表 2 电气参数

Table 2 Electrical parameters	
参数	值
频率	100 kHz
幅值	1 A
电导率	$1.12e^7$ S/m
磁导率	4 000
线圈匝数	100

在图 2 中, 车道两侧分别有 5 个线圈以等间距  $d_2$  均匀排列, 而线圈半径为 0.1 dm, 如表 1 所示。根据表 1 参数可知, 有限元仿真的成像区域为  $2 \text{ dm} \times 2.2 \text{ dm}$  的矩形, 坐标系原点设定在图 2(a) 的 O 点。此外, 将成像区域划分为

1 077 个像素点,而为了保证场向量提取的正确性,成像区域划分为 5 088 个有限元网格(车辆不存在的情况)。

## 2.2 电磁场仿真研究

不同于传统“O”型传感器结构,DPLA-EMT 的传感器结构是一种开放式的矩形,线圈位置与电磁场分布是非中心点对称的。根据式(9)可知,场向量提取法求灵敏度矩阵主要涉及频率、电场和磁场。其中,频率又直接影响被测导体的趋肤深度。因此,电磁场对 DPLA-EMT 的正问题研究影响比较大。由于 DPLA-EMT 是由两个包含个线圈排列的平面线阵组成,因此单个线圈激励时沿相对线圈中心连线的电磁场分布规律一致。根据对称性可知,线圈 1、2、3、4 作激励时产生的电磁场分布可以推出线圈 5、6、7、8、9、10 作激励时的电磁分布。由此,分析 DPLA-EMT 的电磁场分布特性可以由分析线圈 1、2、3、4 作激励时在“线圈 1~线圈 6”中心连线上的电磁分布特性。

图 3 展示的是线圈 1、2、3、4 作激励时,“线圈 1~线圈 6”中心连线上磁场分量曲线。从图 3 中可以看出,磁场  $z$  轴分量几乎均为零,也就是无论哪一个线圈作激励,式(9)中计算磁导率灵敏度矩阵只需要获得  $x$  轴和  $y$  轴的磁场分量。另外,对比图 3(a)、(b)、(c)、(d)可知,当靠近线圈时,磁场  $y$  轴分量影响较大,且幅值大于磁场  $x$  轴分量。这主要是因为磁场的方向是平行线圈的轴线,而线圈的轴线是与  $y$  轴重合的,因此在磁场进出线圈时均为  $y$  轴方向最大。

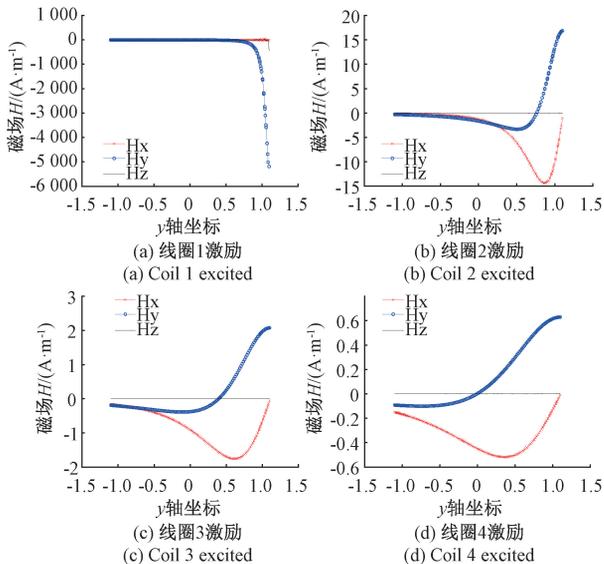


图 3 线圈 1~线圈 6 中心连线的磁场分量曲线

Fig. 3 The magnetic field component curve of the center line connecting Coil 1~Coil 6

图 4 展示的是线圈 1、2、3、4 作激励时,“线圈 1~线圈 6”中心连线上电场分量曲线。从图 4 中可以看出,当靠近激励线圈时,电场的  $y$  轴分量会较大。然而不靠近激励线圈时,电场  $x$  轴分量和  $y$  轴分量均远小于  $z$  轴分量。因此,

电场的  $z$  轴分量在计算式(9)的电导率灵敏度矩阵时影响要大于  $xy$  轴的电场分量,甚至可以忽略  $xy$  轴的分量。因此,为简化计算的复杂度,下文计算电导率灵敏度矩阵只需获得  $z$  轴的电场分量。

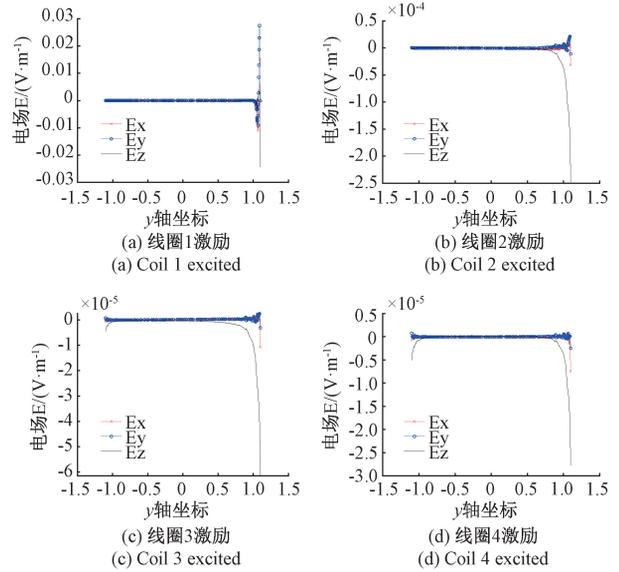


图 4 线圈 1~线圈 6 中心连线的电场分量曲线

Fig. 4 The electrical field component curve of the center line connecting Coil 1~Coil 6

## 2.3 线圈感应电压仿真

循环单线圈激励模式下,一个线圈作激励,剩下 9 个线圈作检测。由此,完整循环遍历所有线圈采集一次可得  $9 \times 10 = 90$  个感应电压数据,如图 5 所示。图 5 是成像区域有被测物体和没有被测物体时,单线圈循环激励获得的 90 个归一化线圈感应电压值。根据楞次定律,线圈激励产生的磁场会在被测导体表面产生涡流,而涡流会产生次生磁场抵消线圈激励产生的磁场。在图 2(b)的仿真模型中,车辆占据一个车道且靠近线圈 1、2、3、4。而当这 4 个线圈作激励时,前 30 个电压采集点对应检测线圈采集的电压

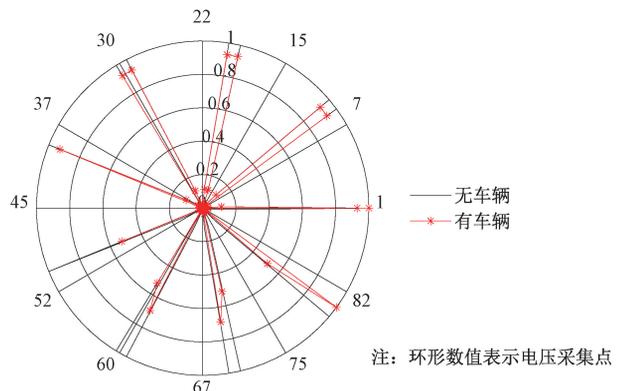


图 5 单线圈循环激励采集的归一化感应电压

Fig. 5 Normalized induction voltage collected by single-coil loop excitation

值。在图 5 中,有车辆时前 30 个采集点的电压值要小于无车辆时的电压值。

此外,不同于传统“O”型 EMT 的采集电压,DPLA-EMT 边界线圈相邻线圈只有一个。因此,图 5 中采集点 40 和 50 的位置对应图 2(b)的线圈 5 和线圈 6。

### 3 道路车辆图像重建

#### 3.1 灵敏度图对比分析

灵敏度矩阵是反映成像区域的电磁场随物场电学参数分布变化的情况,是 EMT 图像重建的关键,且直接影响重建图像的质量。根据上述 DPLA-EMT 逆问题的分析可知,可以通过场向量提取法分别计算电导率灵敏度矩阵  $S_e$  和磁导率灵敏度矩阵  $S_\mu$ 。对于车辆而言,可近似一个大型的矩形电磁导体,那么道路上车辆成像即可以根据电导率灵敏度重建车辆分布图像,也可以依据磁导率灵敏度矩阵重建。通过仿真结果,可以分别利用两种灵敏度矩阵成像

来分析道路车辆重建图像的效果。

根据式(9)可知,计算  $S_e$  和  $S_\mu$  需要提取成像区域中分割网格的电场和磁场。电磁场仿真研究表明,物场中磁场分量主要是为  $x$  轴和  $y$  轴分量,而电场分量则是  $z$  轴。由此,计算灵敏度矩阵的式(9)可改写成如下:

$$\begin{cases} S_e = E_A^z \cdot E_B^z \\ S_\mu = -j\omega(H_A^x \cdot H_B^x + H_A^y \cdot H_B^y) \end{cases} \quad (13)$$

式中:电磁场的上角标表示三轴的方向。将成像区域用三角形分割的方法分割为 1 077 个网格,并提取网格中心点的  $H^x$ 、 $H^y$ 、 $E^z$ ,即可计算电导率灵敏度矩阵  $S_e$  和磁导率灵敏度矩阵  $S_\mu$ 。根据对称性可知,线圈 1、2、3 激励产生的灵敏度分布可以推导出线圈 4、5、6、7、8、9、10 激励的灵敏度分布。图 6 是线圈 1、2、3 激励产生的电导率灵敏度典型分布图。注意:图 6 中颜色表示灵敏度的强弱,颜色深表示灵敏度高,浅则表示灵敏度低;数字表示线圈的编号,比如线圈 1-2 表示线圈 1、2 作激励线圈。图 7 亦如此。

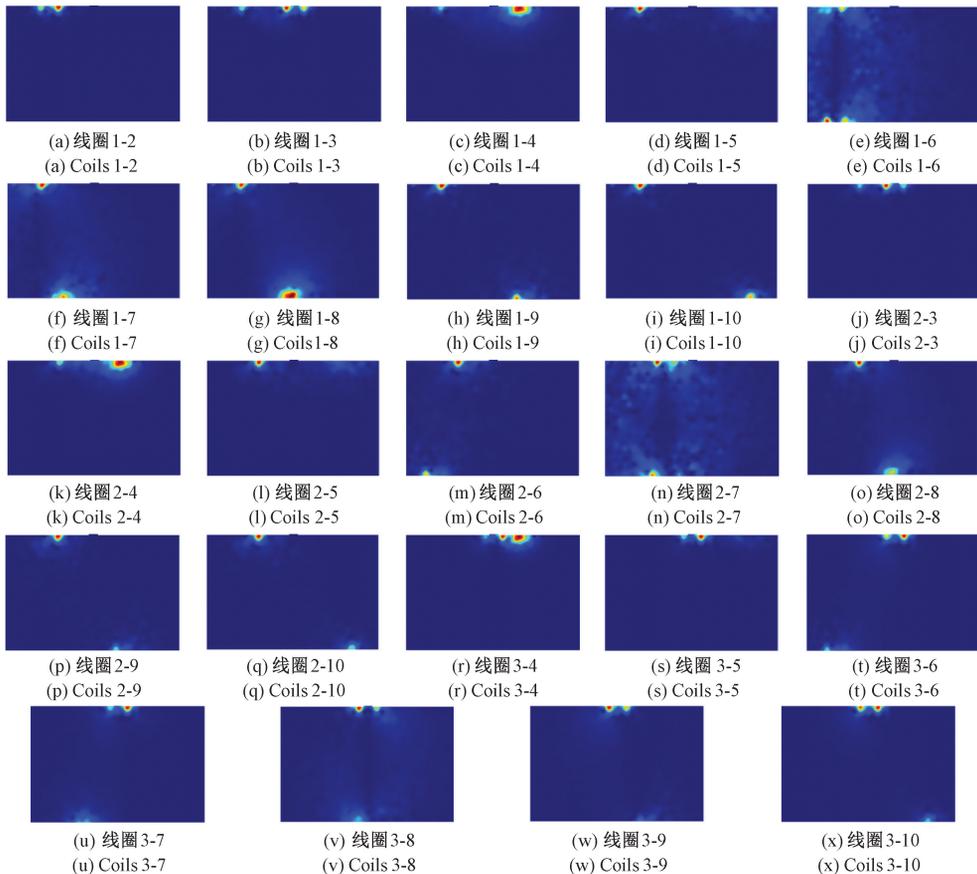


图 6 电导率灵敏度分布图

Fig. 6 Conductivity sensitivity distribution map

从图 6 可以看出,图谱展现了明显的激励线圈位置的相关性,即不同位置的线圈激励产生的电导率灵敏度分布图也不相同。由此可知,电导率灵敏度取决于激励线圈的位置。此外,激励线圈附近位置的灵敏度强度比较高,而远离激励线圈位置的灵敏度强度几乎为零,并且高灵敏度

分布的范围比较小,投射信息缺失。这是非常典型的软场效应。因此,成像区域中的车辆电导率分布的重建也取决于车辆所处的位置,因为电导率灵敏度对成像区域的大部分位置是低敏感的。

图 7 是线圈 1、2、3 激励产生的磁导率灵敏度典型分布

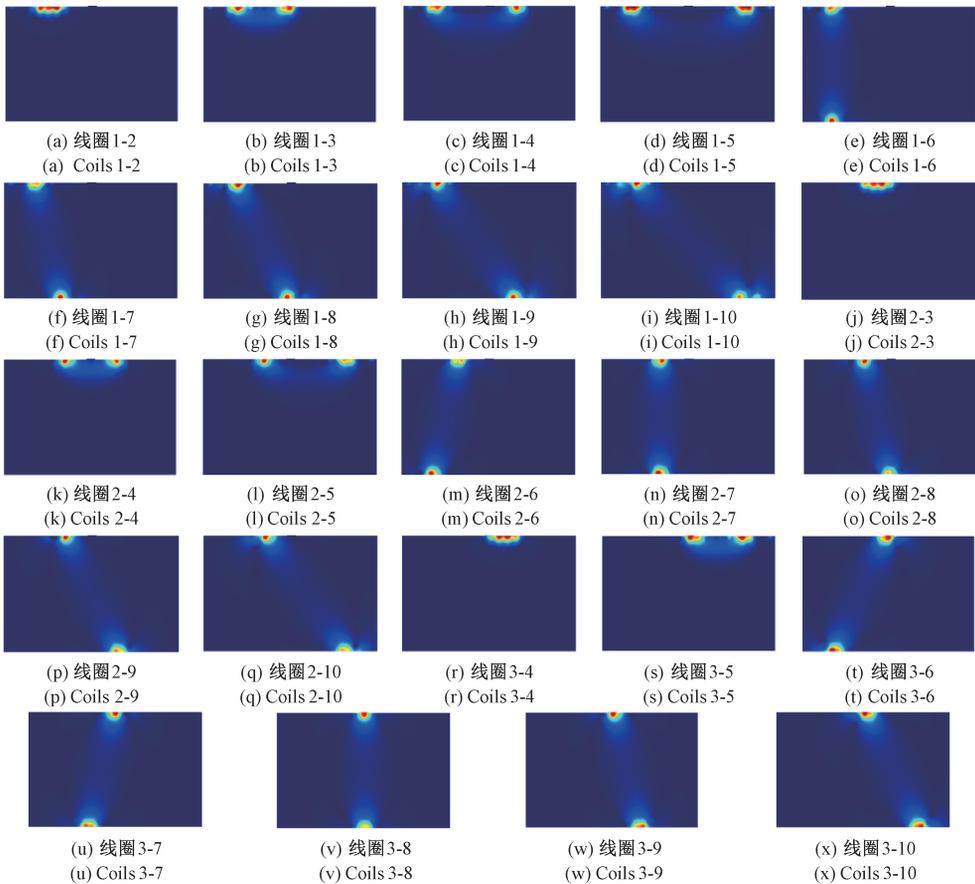


图 7 磁导率灵敏度分布图

Fig. 7 Magnetic permeability sensitivity distribution map

图。从图 7 可以看出,磁导率灵敏度分布图也展现了很强的激励线圈位置相关性,且靠近激励线圈位置的灵敏度较强,这也是由于电磁场软场效应导致的。此外,磁导率的灵敏度分布展现非常明显的对称性。因此,磁导率灵敏度分布与电导率灵敏度分布是一致的,也取决于激励线圈的位置。然而,对比图 6 可以发现,磁导率灵敏度分布强度要强于对应线圈激励的电导率灵敏度分布强度,且分布的对称性规律相对于电导率灵敏度分布的对称性较强。此外,两较远线圈求的磁导率灵敏度在成像区域也展现出较强的强度,这不同于电导率灵敏度大部分区域是低敏感度的分布。因此,磁导率灵敏度重建车辆的磁导率分布虽取决于车辆所处的位置,但是成像效果会高于电导率灵敏度重建车辆的磁导率分布。

对比两种灵敏度可知,电导率灵敏度和磁导率灵敏度遵循相同的分布规律。然而,相应线圈对求得的灵敏度强度却不一致。根据电磁场在空中传播的特性可知,电场和磁场的方向是相交为直角。当线圈通入交变电流,在空气中激发出磁场,其方向应垂直线圈平面,且平行于车辆成像区域。根据图 2 可知,车道平面,即车辆成像区域,在  $x-y$  平面。根据图 3 和图 4 可知,磁场分量曲线主要为  $xy$  轴的分量,表现为磁导率灵敏度对  $xy$  轴方向的磁导率变化

敏感,而电场分量则主要是  $z$  轴的分量,表现电导率灵敏度对  $z$  轴方向电导率变化敏感。另外,根据雷登变化可知,线圈接收的感应电压,相当于激励线圈在接收线圈方向的投影信息。DPLA-EMT 的线圈均放置在  $x-y$  平面,那么  $z$  轴方向不存在投影。因此,电导率灵敏度强度分布非常弱,而磁导率灵敏度强度分布在投影面的  $x-y$  平面较强。车辆作为导磁导电的导体,DPLA-EMT 选择磁导率灵敏度和边界磁场的变化重建车辆磁导率分布图像将得到较好的质量。但边界磁场的变化依然可以通过线圈感应将信息转化成电压信号,由此 DPLA-EMT 依然可以选择测量边界电压来重建车辆导体的磁导率分布图像。

### 3.2 图像算法重建对比

求解得到的磁导率灵敏度矩阵和在不同车体位置的边界感应电压,本文将采用 LBP、Tikhonov 正则化以及 Landweber 迭代等算法重建不同位置车辆的磁导率分布图像。此外,为了评估重建图像的质量,本文将采用成像误差 (image error, IE) 和相关系数 (correlation coefficient, CC) 进行评价。IE 和 CC 的计算公式分别为:

$$IE = \frac{\|\hat{\mathbf{g}} - \mathbf{g}\|}{\|\mathbf{g}\|} \quad (14)$$

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}}) (g_i - \bar{g})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{g}_i - \bar{\hat{g}})^2 \sum_{i=1}^N (g_i - \bar{g})^2}} \quad (15)$$

式中： $\hat{g}$  表示计算的车辆磁导率分布， $g$  表示实际的车辆磁导率分布， $\bar{\hat{g}}$  和  $\bar{g}$  分别表示  $\hat{g}$  和  $g$  的平均值。

通过移动图 2 中车辆模型的位置，设立 6 种需要重建车辆磁导率分布的情况，如表 3 所示。表 3 展示的是 3 种图像重建算法分别重建 6 种车辆不同位置的图像。从表 3 可以看出，LBP 算法重建的磁导率分布图像只能判断车辆

在成像区域边界的位置，成像区域内的具体位置无法成像。但是通过 LBP 的重建图像，可以判断对应图像边界的  $y$  轴方向有车辆存在。Tikhonov 算法重建图像依然是无法确定成像区域内的车辆，同时也不能有效成像。但是车辆在位置 A 时，Tikhonov 算法能够清晰重建出该位置车辆的电导率分布，而其他位置则只能判断车辆所在的大致区域位置。然而，Landweber 迭代重建算法却能够清晰的判断出车辆所在的位置，并且重建图像的轮廓与车辆轮廓较为一致。在位置 C 和位置 F 时，重建图像因为靠近线圈边界或者开放式边界，重建图像无法辨析车辆轮廓以及所

表 3 实际车辆位置磁导率分布与 3 种成像算法重建图像

Table 3 Magnetic permeability distribution at the actual vehicle position and images reconstructed by three imaging algorithms

编号	实际分布图	LBP	Tikhonov	Landweber
A				
B				
C				
D				
E				
F				

在位置。尽管 Landweber 算法重建图像在边界车辆难以成像,但是在成像区域的中间位置却可以有效重建车辆电导率分布图像。这种情况与传统“O”型 EMT 在中间区域重建图像效果差是相反的。

表 4 是 6 个不同车辆位置重建磁导率分布图像时计算的评价指标 IE 和 CC。从表 4 也可以看出,LBP 和 Tikhonov 重建算法得到成像误差均超过 1,而 Landweber 重建算法的成像误差也在 0.9 以上。另外,从相关系数 CC 可以看出,LBP 算法重建的图像得到 CC 为负数,Tikhonov 算法和 Landweber 算法重建的图像得到 CC 也较低,在 0.5 以下。对比表 3 可以发现,之所以 IE 如此之大,这主要是因为重建图像中出现过多的伪影。而 CC 这么小,这主要是因为虽然能够重建车辆的大致轮廓,但是车辆的形状尺寸难以有效重建。另外,LBP 和 Tikhonov 重建不同车辆位置的图像计算的 IE 要高于 Landweber,且其计算得 CC 也要低于 Landweber。这与表 3 反映的 Landweber 算法重建车辆磁导率分布图像的效果要优于其他两种算法重建的效果是一致的。此外,表 4 也能够反映出 Landweber 算法重建车辆位置 C 和位置 F 效果不佳,即边界位置重建质量较差。

表 4 重建图像的评价指标

Table 4 Evaluation metrics for reconstructed images

位置	指标	LBP	Tikhonov	Landweber
A	IE	1.196	1.313	0.905
	CC	-0.04	0.303	0.547
B	IE	1.274	1.433	1.032
	CC	-0.042	0.226	0.443
C	IE	1.187	1.005	0.975
	CC	-0.03	0.279	0.336
D	IE	1.321	1.598	1.155
	CC	-0.041	0.232	0.433
E	IE	1.312	1.599	1.083
	CC	-0.043	0.257	0.492
F	IE	1.216	1.299	0.986
	CC	-0.038	0.198	0.404

对于 DPLA-EMT 而言,传统算法重建车辆磁导率分布图像的质量较差。虽然 LBP 和 Tikhonov 重建算法在求解 DPLA-EMT 的逆问题时,其重建效果不是很理想,但是 Landweber 迭代重建算法却展现了相对较好较的重建效果,能够清晰分辨出重建图像中车辆的位置和大致尺寸。因此,尽管 DPLA-EMT 的传统算法成像质量不高,但是依然可以使用 Landweber 算法重建大致图像。也就是说,DPLA-EMT 用于道路车辆重建是理论上可行。

## 4 结 论

本文提出的 DPLA-EMT 技术在理论上是可行的,能

够有效地用于道路车辆的磁导率分布图像重建。通过有限元仿真分析,验证了 DPLA-EMT 在道路交通事故检测中的有效性。在灵敏度矩阵的研究中发现,磁导率灵敏度矩阵在重建车辆磁导率分布图像时效果优于电导率灵敏度矩阵,这表明磁导率灵敏度对于 DPLA-EMT 系统的性能至关重要,可以通过测量边界磁场变化来重建图像。尽管传统的图像重建算法在 DPLA-EMT 的逆问题求解中重建质量不高,但 Landweber 迭代算法能够提供相对较好的重建效果,能够清晰分辨出车辆的位置和大致尺寸。因此,DPLA-EMT 技术在提高道路交通安全管理和减少交通拥堵方面具有潜在的应用价值。未来的工作将集中在进一步优化算法和提高 DPLA-EMT 系统的实时性能,以适应实际的道路交通事故检测需求。

## 参考文献

- [1] 薛先斌,谭北海,余荣,等.基于行车风险场的交通冲突风险预警方法[J].电子测量技术,2024,47(6):1-7.  
XUE X B, TAN B H, YU R, et al. Traffic conflict risk warning method based on driving risk field[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(6): 1-7.
- [2] 陈计伟,史志才,刘瑾,等.道路通行车安全预警算法研究[J].电子测量技术,2019,42(5):6-10.  
CHEN J W, SHI ZH C, LIU J, et al. Research on early warning algorithm of driving safety about road traffic [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(5): 6-10.
- [3] 徐笑,黄云志,韩亮.基于阵列旋转和改进证据理论的平面 EMT 图像融合算法[J].仪器仪表学报,2022, 48(10): 136-144.  
XU X, HUANG Y ZH, HAN L. Image fusion algorithm of planar electromagnetic tomography based on array rotation and improved evidence theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 48(10): 136-144.
- [4] YUE Y L, LIU Z, MIAO Y, et al. 3D electromagnetic tomography using a single layer sensor array[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 77: 101850.
- [5] MA L, SOLEIMANI M. Magnetic induction tomography methods and applications: A review[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28: 1-12.
- [6] LIU Z, LI W, XUE F, et al. Electromagnetic tomography rail defect inspection [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(10): 6201907.
- [7] 张苏嘉,苏益凡,周伟,等.碳纤维拉索缺陷的电磁层析成像有限元仿真[J].电子测量技术,2024,47(8):

- 86-92.  
ZHANG S J, SU Y F, ZHOU W, et al. Finite element simulation of electromagnetic tomography for defects in carbon fiber cables [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(8): 86-92.
- [8] 张文彪, 耿一键, 颜鹏旭. 基于宽频激励的平面电磁层析成像方法[J]. *计量学报*, 2024, 45(6): 907-914.  
ZHANG W B, GENG Y J, YAN P X. Planar electromagnetic tomography based on wide-band excitation[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2024, 45(6): 907-914.
- [9] 金伟, 何敏, 庞薇, 等. EMT 系统在磁性催化物分布检测中的应用[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(4): 145-151.  
JIN W, HE M, PANG W, et al. Application of EMT system in magnetic catalysis distribution detection[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(4): 145-151.
- [10] 孙春光, 何敏, 曾星星, 等. 基于 IHT 算法的 EMT 金属探伤稀疏成像方法[J]. *中国测试*, 2022, 48(2): 21-26.  
SUN CH G, HE M, ZENG X X, et al. Sparse imaging method of EMT metal flaw detection based on IHT algorithm [J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(2): 21-26.
- [11] 王超, 邹萍, 崔自强, 等. 基于 TMR 的磁导率 EMT 的传感器阵列设计[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(6): 559-567.  
WANG CH, ZOU P, CUI Z Q, et al. Design of an EMT-TMR sensor array for the measurement of magnetic permeability[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2019, 52(6): 559-567.
- [12] XIAO ZH L, TAN CH, DONG F. 3D hemorrhage imaging by cambered magnetic induction tomography[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(7): 2460-2468.
- [13] IGNEY C H, WATSON S, WILLIAMS R J, et al. Design and performance of a planar-array MIT system with normal sensor alignment [J]. *Physiological Measurement*, 2005, 26(2): 263-278.
- [14] YIN W, PEYTON A J. A planar EMT system for the detection of faults on thin metallic plates [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(8): 2130-2135.
- [15] 霍继伟, 刘泽, 王亚东, 等. 平面电磁层析成像钢轨探伤[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(15): 5351-5360.  
HUO J W, LIU Z, WANG Y D, et al. Plane electromagnetic tomography rail track inspection[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(15): 5351-5360.
- [16] 曾星星, 何敏, 张健, 等. EMT 用于金属结构裂纹图像重建的仿真研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(1): 186-192.  
ZENG X X, HE M, ZHANG J, et al. Simulation study on EMT image reconstruction of metal structure flaw [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(1): 186-192.
- [17] MA M, ZHANG Q, ZHANG R H, et al. EMT image reconstruction based on composite sensitivity matrix and its application in defect detection of carbon fiber wound hydrogen tank [J]. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2023, 116: 177-191.
- [18] LI Y, ZHU Q L. Simulation and analysis on dual-plane linear array electromagnetic tomography [J]. *Measurement; Sensors*, 2025, 38: 101612.
- [19] 刘向龙, 刘泽, 朱盛. 电磁层析成像图像重建中的修正 Landweber 迭代算法[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(13): 3971-3979.  
LIU X L, LIU Z, ZHU SH. The modified Landweber iteration algorithm in the reconstruction of electromagnetic tomography image reconstruction[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(13): 3971-3979.
- [20] LIU X L, WANG Y, LI D. Imaging system design based on electromagnetic tomography for high conductivity medium reconstruction [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2023, 94: 034706.
- [21] 霍继伟, 刘泽, 王亚东, 等. 优化 Landweber 迭代快速电磁层析成像图像重建算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(8): 1571-1579.  
HUO J W, LIU Z, WANG Y D, et al. Optimized Landweber iterative fast image reconstruction algorithm for electromagnetic tomography[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(8): 1571-1579.

## 作者简介

李勇(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为电磁层析成像技术、电磁超声无损检测、信号处理等。

E-mail: yl112@fjpsc.edu.cn