

垂直电性源瞬变电磁场时空分布特征研究

赵永成

(长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100)

摘要: 井地电磁法由于具有独特的优势在地质勘探中得到了比较广泛的应用。目前讨论比较广泛的是频率域井地电磁法,随着浅层油气已被开发以及非常规地层等诸多条件的不断限制,人们在频率域井地电磁的基础上又提出了井地瞬变电磁方法,该方法广泛应用于矿产资源勘探、水文调查、未爆物探测等领域,通过处理涡旋电磁衰减产生的二次电磁场信息来反演地层信息,其具有对高阻屏蔽弱,以及对异常体垂向分辨率高的优点。但是井地瞬变电磁在理论讨论方面还是比较少的,特别是对电性源瞬变电磁场的时空分布特征的研究,这里最难攻克的是对所运用的方法正确性、有效性的检验。故而在验证所执行程序的正确性的基础上讨论井地瞬变电磁的时空分布特点,重点研究电磁场分量 E_x 的场值随时间的扩散特征。

关键词: 垂直电性源; 井地瞬变电磁; 时空分布特点

中图分类号: TE15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)06-0251-07

随着社会经济的持续发展,国内外对油气矿产资源的需求也与日俱增。对深地资源的迫切需求,地球深部钻探技术与装备、深部非常规能源开发以及深地空间资源开发均进入了快速发展时期。井地电磁法在钻井中布置激励线源,该方法可以大大减少地表的电磁信号等有源噪声的干扰,提高对油气探测的精确度。相对于地震波勘探而言,井地电磁法更具有方便、快捷和成本低的优点,并且不会对自然环境造成破坏,有利于对目标和相对低阻覆盖区的探测,且勘查速度快、成本低、通行性好、可大区域快速勘探,尤其是在植被发育的覆盖地区,更具有一般勘探手段难以达到的效果。井地电磁法能更好地适应我国山区大面积寻找矿产、干旱地区找地下水资源和油田剩余油气的挖掘及其他方面的需要。井地电磁法的响应分为频率域和时间域。井地频率域测井最先由俄罗斯科学家在 20 世纪 70 年代提出,频率域测井主要是对井中线激励源发射低频信号,在地表检测电磁场信息,反演电磁响应特征,提取地层信息,过去的几年里该方法在俄国和我国新疆等多地区进行了测试,取得了良好的效果^[1]。井地电磁法时间域电磁测深一维正演理论比较成熟、水平电偶极子源,垂直磁偶极子源等瞬变电磁场国内外研究得比较透彻,但由于实际条件、应用等方面的局限性,对于垂直电偶源在特殊

地层中瞬变电磁场国内外研究尚少,对垂直电性源的场强变化还需进一步研究。

最早研究井地电磁法的国家是俄罗斯和日本,并且他们研究出了发射和接收设备以用于油气藏边界的圈定。徐建华等^[2]在 1992 年首次在文章中给出了层状导电媒质中垂直电偶极子的场,又在 1994 年提出多层介质中偶极子场的系数递推关系。针对计算难度较大的垂直线电源,何继善在 2001 年首次给出了几种不同的电条件下的垂直线电源电磁场的理论表达式,可用于地面电磁法和海洋电磁法的理论计算,王志刚等^[3-4]在 2007 年采用积分方程的方法开发了井地电磁法三维正演的建模程序,其基于 Born 近似法的算法可以很好地拟合实际储层。罗毅翔^[5]2011 年对井中垂直长导线源层状大地电磁响应进行了数值计算,采用 D. Guptasarma 和 Singh 提出的一种数字滤波法解决了贝塞尔函数的积分问题,计算结果和精度达到了要求。然后,对程序的正确性进行了效验。采用几种典型的大地模型,对井地电磁的响应进行了正演计算。李术才等^[6]2014 年建立多种典型的城市地铁溶洞水槽模型,利用井间电阻率成像,可以保证数据的有效精度。曹辉等^[7]2015 年进行了频率域井地电磁法物理模拟,用实验的方法证明了井地电磁法对油气区域范围的确定。2018 年张嘉琪^[8]分析了井地电

收稿日期: 2023-12-15

作者简介: 赵永成(1998—),男,辽宁葫芦岛人,硕士研究生,研究方向为电法勘探。

磁一维模型中影响垂直长导线源电磁场响应的几个关键因素,发现井地电磁法对高阻体反映更为灵敏,且当发射源与异常体处于同一水平线或者测点位于井中时,井地电磁法对异常体的反映更为明显。2020年6月杨一凡^[9]通过井地电位测试技术检测出含油边界,明确油水分布特征,规避低产风险,优选高阻、高含油区域。2021年4月赵云生^[10]通过井地瞬变电磁三维正演软件模拟了不同频率下异常体的电磁场响应,研究了不同储层规模、不同极化常熟下的异常体变化规律。2022年3月吴琼等^[11]根据毕奥-萨法尔定律推导出了自由空间圆形电流环的场强三分量表达式,针对常见的水平板状体、垂直板状体、倾斜板状体三种不同的模型,进行正演模拟,分析电流环场逼近纯异常体的合理性和近似程度,为基于电流环的异常场特征和解释方法的推演提供了借鉴。综上,研究电磁场的分布特点是该勘探方法的基础,因此本文的垂直电性源时空分布特点的研究是必要的。

1 基本理论

1.1 时间域电场扩散方程

在准静态情况下,在有源区域的时间域麦克斯韦方程可表示为

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t) \quad (2)$$

$$\nabla \times [\mathbf{J}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t)] = 0 \quad (3)$$

式中: \mathbf{r} 为位置矢量; $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 、 $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ 、 $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ 和 $\mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$ 分别为 \mathbf{r} 处、 t 时刻的电场强度磁感应强度、磁场强度和传导电流密度; $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t)$ 为 \mathbf{r} 处、 t 时刻的外加源电流密度。基于宏观介质的本构关系:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \hat{\sigma} \mathbf{E} \quad (5)$$

式中: $\mu = \mu_0 \mu_r$ 为磁导率; $\hat{\sigma}$ 为各向异性电导率张量; μ_r 为相对磁导率; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。联立式(1)和式(2)消去磁场得到时间域电场扩散方程为

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \right] + \hat{\sigma} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

1.2 非结构矢量有限元方法

为了将式(6)转化为时域有限元(FETD)的近似方程,定义如下残差矢量:

$$\mathbf{R}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \right] + \hat{\sigma} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad (7)$$

计算区域被离散成若干个有限元。在加权积分的意义上,每个元素的残差矢量被强制为零。在几种不同形状的有限元单元中,选择可以有效地处理复杂地质模型的四面体单元。

设计算区域内的残差加权积分为

$$\iiint_{\Omega} \mathbf{W}(\mathbf{r}) \mathbf{R}(\mathbf{r}, t) dV = 0 \quad (8)$$

式中: Ω 为加权系数。加权余量法通过最小化权函数 $\mathbf{W}(\mathbf{r})$ 和残差矢量 $\mathbf{R}(\mathbf{r}, t)$ 的内积来寻找最优解,即 $\mathbf{W}(\mathbf{r})$ 和 $\mathbf{R}(\mathbf{r}, t)$ 正交。将式(7)代入式(8)可得

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega} \mathbf{W}(\mathbf{r}) \nabla \times \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \right] dV + \\ & \iiint_{\Omega} \mathbf{W}(\mathbf{r}) \hat{\sigma} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} dV + \\ & \iiint_{\Omega} \mathbf{W}(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t)}{\partial t} dV = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

应用第一矢量格林定理,将式(9)第一项积分展开:

$$\begin{aligned} & \iiint_{\Omega} \mathbf{W}(\mathbf{r}) \cdot \nabla \times \left[\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) \right] dV = \\ & \frac{1}{\mu} \iiint_{\Omega} [\nabla \times \mathbf{W}(\mathbf{r})] [\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)] dV - \\ & \frac{1}{\mu} \iint_{\Gamma} \mathbf{W}(\mathbf{r}) [\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)] n dS \end{aligned} \quad (10)$$

使用非结构四面体网格离散计算区域,采用自动满足电场切向分量连续且无散的 Nedelec 矢量插值基函数近似单元内电场线性分布^[12],对于四面体单元内任意位置的电场可以表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \sum_{j=1}^6 \mathbf{E}_j(t) \mathbf{N}_j(\mathbf{r}) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{E}_j(t)$ 为四面体单元第 j 条棱边的切向电场,可称为自由度; $\mathbf{N}(\mathbf{r})$ 为矢量插值基函数。基于 Galerkin 法,当采用矢量插值基函数 $\mathbf{N}(\mathbf{r})$ 作为加权系数时,内界面两侧的面积分相互抵消,外边界距离发射源足够远,满足 Sommerfeld 边界条件,在忽略面积分后,结合(11)电场方程满足:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\mu} \sum_{j=1}^6 \mathbf{E}_j(t) \iiint_{\Omega} [\nabla \times \mathbf{N}(\mathbf{r})] [\nabla \times \mathbf{N}(\mathbf{r})] dV + \\ & \sum_{j=1}^6 \frac{\partial \mathbf{E}_j(t)}{\partial t} \iiint_{\Omega} \mathbf{N}(\mathbf{r}) \hat{\sigma} \mathbf{N}(\mathbf{r}) dV + \\ & \iiint_{\Omega} \mathbf{N}(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t)}{\partial t} dV = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

将所有单元加权残差累加,可写成矩阵:

$$\mathbf{SE}(t) + \mathbf{M} \frac{d\mathbf{E}(t)}{dt} = -\mathbf{J} \quad (13)$$

式中: \mathbf{S} 和 \mathbf{M} 为整体刚度矩阵和质量矩阵; \mathbf{J} 为源项,具体表达式如下:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu} \iiint_{\Omega} [\nabla \times \mathbf{N}(\mathbf{r})][\nabla \times \mathbf{N}(\mathbf{r})] dV \quad (14)$$

$$\mathbf{M} = \iiint_{\Omega} \mathbf{N}(\mathbf{r}) \hat{\sigma} \mathbf{N}(\mathbf{r}) dV \quad (15)$$

$$\mathbf{J} = \iiint_{\Omega} \mathbf{N}(\mathbf{r}) \frac{\partial \mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t)}{\partial t} dV \quad (16)$$

1.3 长导线源离散

对于接地长导线源,将其分割为若干个小段,每段近似为电偶极子^[13],将电偶极子置于四面体网格棱边上,可以有效近似实际接地长导线源。对于每个电偶极子,其电流密度可表示为

$$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}, t) = j_s(t) \mathbf{u} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_s) \quad (17)$$

式中: $j_s(t)$ 为电流密度强度; \mathbf{u} 为电流方向向量; \mathbf{r}_s 为发射电偶极源的位置; $\delta(\mathbf{r})$ 是脉冲函数,可表示为

$$\delta(\mathbf{r}) = \begin{cases} \infty, & \mathbf{r} = \mathbf{0} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

而 $j_s(t)$ 可表示为^[14]

$$j_s(t) = I(t) d_l \quad (19)$$

式中: $I(t)$ 为 t 时刻电流强度; d_l 为电偶极子长度。

联立式(13)~式(16),采用二阶后推欧拉近似式中 $i+2$ 时刻电场与电流密度对时间的导数^[15]

$$\frac{d\mathbf{E}^{(i+2)}(t)}{dt} = \frac{1}{2\Delta t} [3\mathbf{E}^{(i+2)}(t) - 4\mathbf{E}^{(i+1)}(t) + \mathbf{E}^{(i)}(t)] \quad (20)$$

$$\frac{d\mathbf{J}_s^{(i+2)}(t)}{dt} = \frac{1}{2\Delta t} [3\mathbf{J}_s^{(i+2)}(t) - 4\mathbf{J}_s^{(i+1)}(t) + \mathbf{J}_s^{(i)}(t)] \quad (21)$$

将式(20)和式(21)分别代入式(13)和式(16)中可得:

$$(3\mathbf{M} + 2\Delta t \mathbf{S}) \mathbf{E}^{(i+2)}(t) =$$

$$\mathbf{M}[4\mathbf{E}^{(i+1)}(t) - \mathbf{E}^{(i)}(t)] - 2\Delta t \mathbf{J}^{(i+2)}(t) \quad (22)$$

$$2\Delta t \mathbf{J}^{(i+2)}(t) = 3\mathbf{J}^{(i+2)}(t) - 4\mathbf{J}^{(i+1)}(t) + \mathbf{J}^{(i)}(t) \quad (23)$$

由式(23)即可得到任意发射源电流波形的电流源项,式(22)可简写为

$$\mathbf{K}\mathbf{E} = \mathbf{b} \quad (24)$$

式中: \mathbf{K} 为系数矩阵; \mathbf{E} 为棱边上的未知电场; \mathbf{b} 为已知发射源项。

2 算法验证

如图1所示,参考设计了均匀半空间条件下的井地瞬变电磁模型,发射源A极位于井口,坐标为(0,0,0),B极分别位于900 m,1 000 m,1 100 m,发

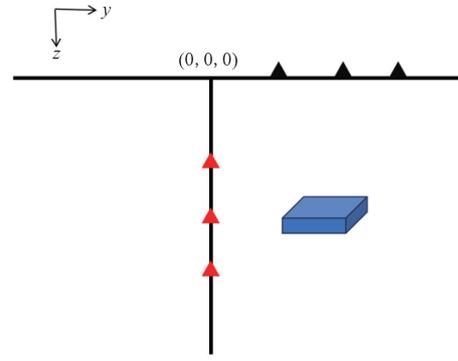


图1 理论验证模型示意图

射电流为1 A,空气电阻率为 $1 \times 10^8 \Omega \cdot \text{m}$,背景电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$,异常体位于坐标轴的 y 方向,大小为 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m} \times 100 \text{ m}$,电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{m}$,异常体中心点距离井孔500 m。计算地面接收点为(0,200,0),(0,500,0),(0,1 000,0)的所有电磁场分量的响应。当接收位置在(0,500,0)分别计算发射源B极位于900 m,1 000 m,1 100 m时电磁场分量 E_x 的响应结果,如图2所示。从计算结果可以看出,当接收位置不变,只改变发射源的长度时, E_x 的响应结果曲线形态不会发生变化,只是数值大小会有所改变。

为了验证本文所用程序的正确性和可行性,按照图1中设计的发射源长度为1 000 m,接收位置分别为(0,200,0),(0,500,0),(0,1 000,0)时计算电磁场分量 E_x 的响应结果,其计算结果与数值解进行对比,对比结果如图3所示。图3(a)、图3(b)、图3(c)分别为接收点(0,200,0),(0,500,0),(0,1 000,0)

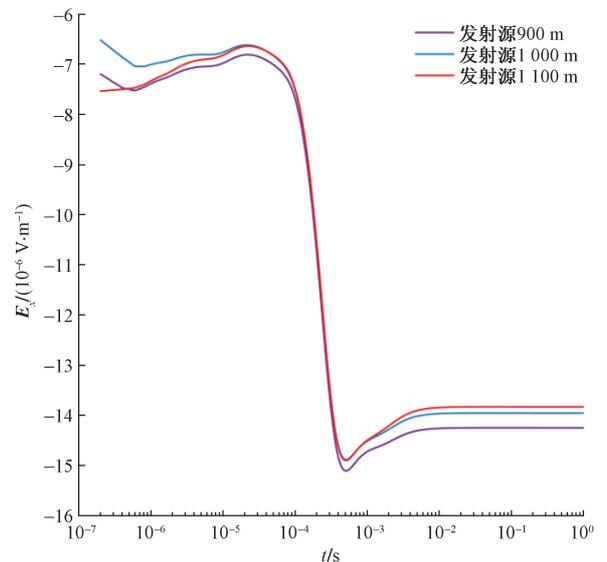


图2 发射源500 m时电磁场分量(E_x)响应结果

时的 E_x 响应值对比结果,从中可以看到两种计算结果的拟合情况比较好,可以证明本文垂直电性源算法程序的正确性和可靠性。

3 垂直电性源瞬变电磁场时空分布特征

3.1 在地面接收时电磁场扩散规律

为进行井地瞬变电磁法正演模拟,设计背景电阻率为 $100 \Omega \cdot m$,无异常体情况下,均匀半空间模型,如图4所示。发射源两端位于地下 $900 \sim 1\,400 \text{ m}$ 处,垂直长导线源在地面投影位于 $(0,0,0)$,接收测网位于地面横坐标是 $500 \sim 2\,500 \text{ m}$,测点间隔为 50 m ,纵坐标是 $-1\,000 \sim 1\,000 \text{ m}$,测点间隔为 50 m ,观测时间分别为 0.1 ms 、 5.17 ms 、 25 ms 、 50 ms 。其不同时刻 E_x 和 E_y 的响应结果如图5和图6所示,图5和图6中(a)、(b)、(c)、(d)分别对应 0.1 ms 、 5.17 ms 、 25 ms 、 50 ms 。按照结果分析,电

场分量 E_x 响应图像展现了对称性,随着电场的扩散,极大值越来越小。表明随着时间的推移,场值在减小,电场分量 E_y 在平面呈现了随时间的分布情况, E_y 拥有对称性,极大值始终在坐标原点四周,随时间推移 E_y 在减小。

3.2 在侧面接收时电磁场扩散规律

同样模型参数不变,只改变观测平面的位置,再次计算其结果如图8所示。图8(a)、图8(b)、图8(c)、图8(d)分别为 0.1 ms 、 1 ms 、 5.17 ms 、 25 ms 时刻电场分量 E_x 的响应结果示意图。可见在侧面观察垂直电性源 E_x 场强分布的特点是关于横轴上下对称,且随着时间场强也是逐渐扩散。

4 结论

本文设计并分析均匀半空间模型的垂直电性源瞬变电磁场时空分布特征,验证了垂直电性源地

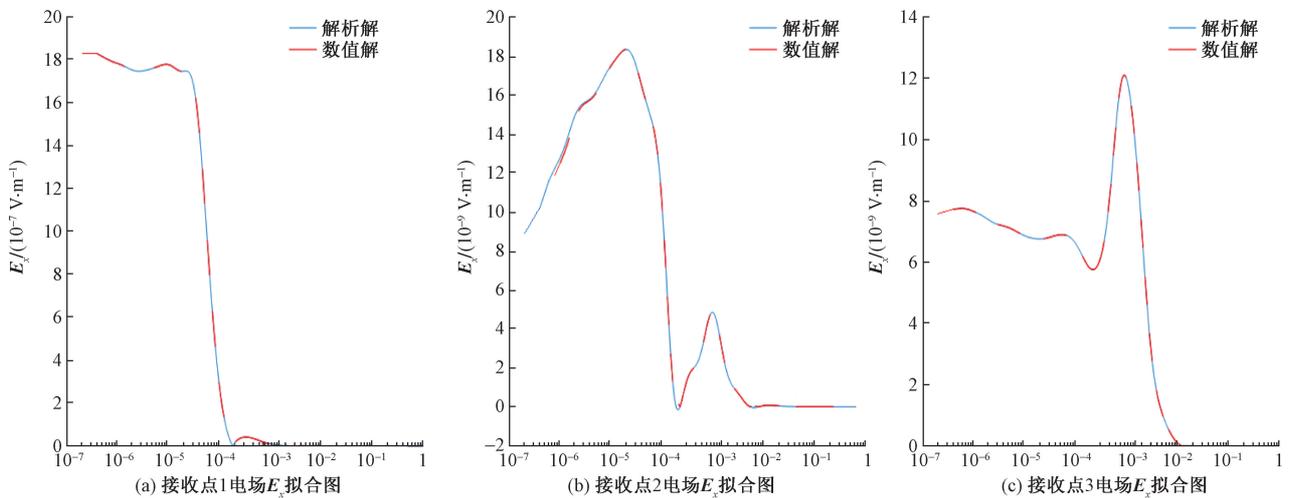


图3 理论验证数据对比

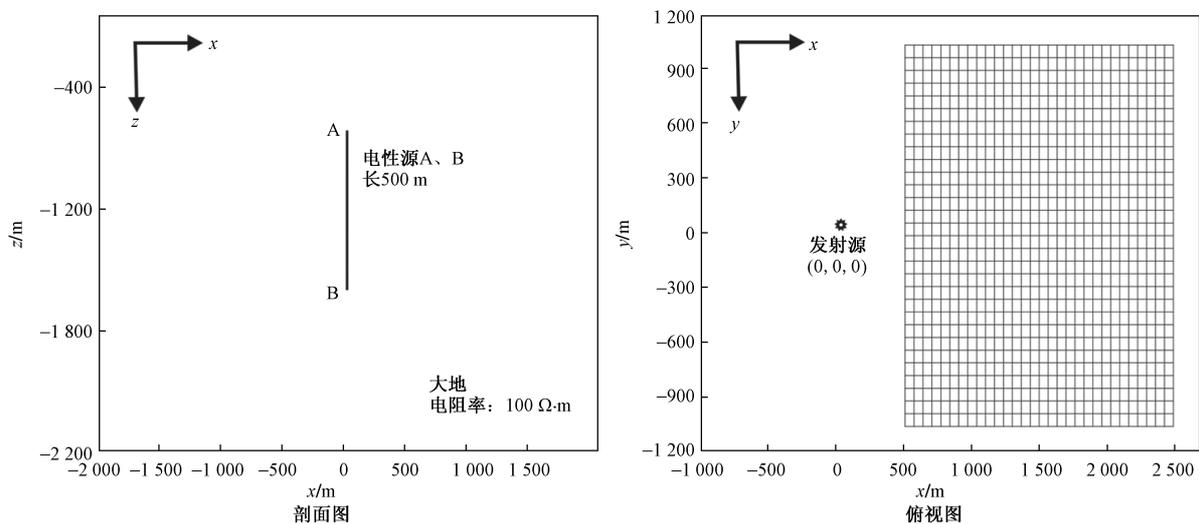
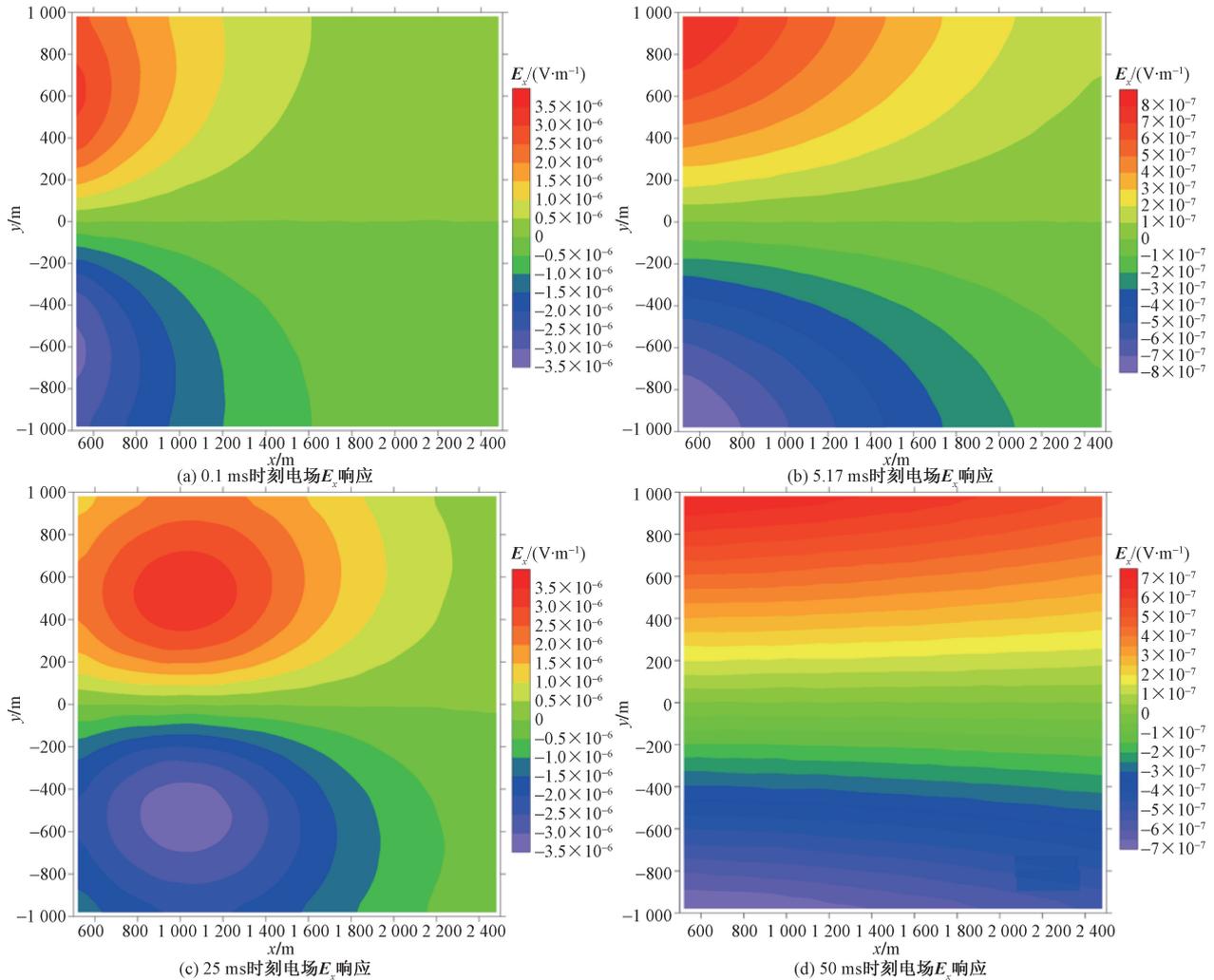


图4 均匀半空间模型收发位置示意图

图5 不同时刻 E_x 响应分布

并瞬变电磁正演程序的可行性,通过均匀半空间下的正演模拟,得到垂直电性源瞬变电磁场的平面分布特征及其随着时间场值的扩散规律,探究在本文观测系统下的有效观测区域与优势观测分量。主要结论如下。

(1)分析不同时刻、不同深度的均匀半空间瞬变电磁场时空响应平面分布特征,可知电场 E_x 分量响应效果最佳。

(2)模拟结果表明电磁场分量 E_x 呈对称分布,水平接收时以 x 轴对称,垂直接收时以 z 轴对称,随时间逐渐向周围扩散,并且场值逐渐减小。同时 E_y 的响应图像也拥有对称性,极大值始终在原点发射源四周,随时间推移 E_y 在减小。

参考文献

[1] 刘雪军,王家映,何展翔,等. 研究油气储集目标的井中-地面电磁新技术[J]. 油气藏评价与开发, 2006, 29(2): 98-101.

[2] 徐建华,胡文宝,李鹏翔. 层状导电媒质中垂直电偶极子的场[J]. 江汉石油学院学报, 1992(1): 40-44.

[3] 王志刚,何展翔,魏文博. 井地电磁法三维正演模拟和Born近似反演(英文)[J]. Applied Geophysics, 2007(2): 84-88.

[4] 王志刚,何展翔,魏文博. 井中垂直双极源体积分方程三维模拟研究[J]. 地球物理学进展, 2007(6): 1802-1808.

[5] 罗毅翔. 井地电磁垂直长导线层状大地的电磁响应特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.

[6] 李术才,苏茂鑫,薛翊国,等. 城市地铁跨孔电阻率CT超前地质预报方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 913-920.

[7] 曹辉,王绪本,何展翔,等. 水平层状介质条件下的井地电磁场响应计算[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(2): 338-343.

[8] 张嘉琪. 垂直长导线源电磁场三维正演模拟[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.

[9] 杨一凡. 基于井-地电位成像技术的油藏有利区预测研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2020.

[10] 赵云生. 井地差分电磁法的复电阻率研究及其在储层含油饱和度评价中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.

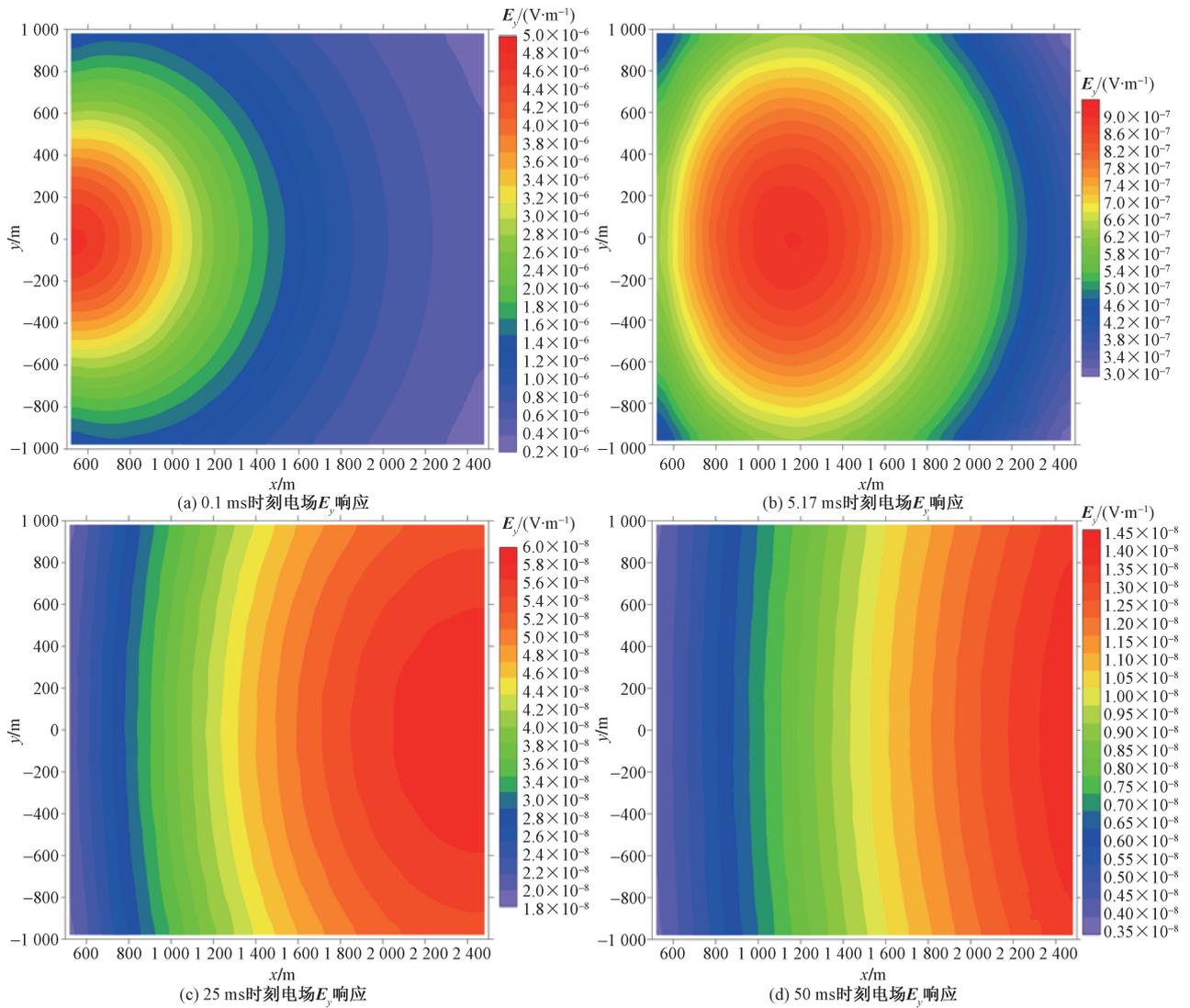


图 6 不同时刻 E_y 响应分布

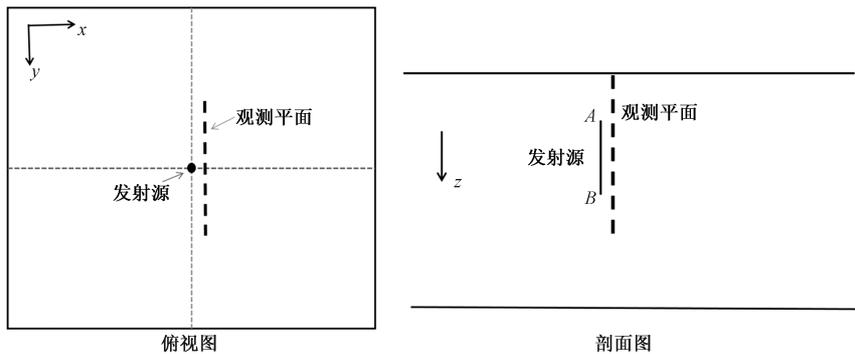


图 7 收发位置示意图

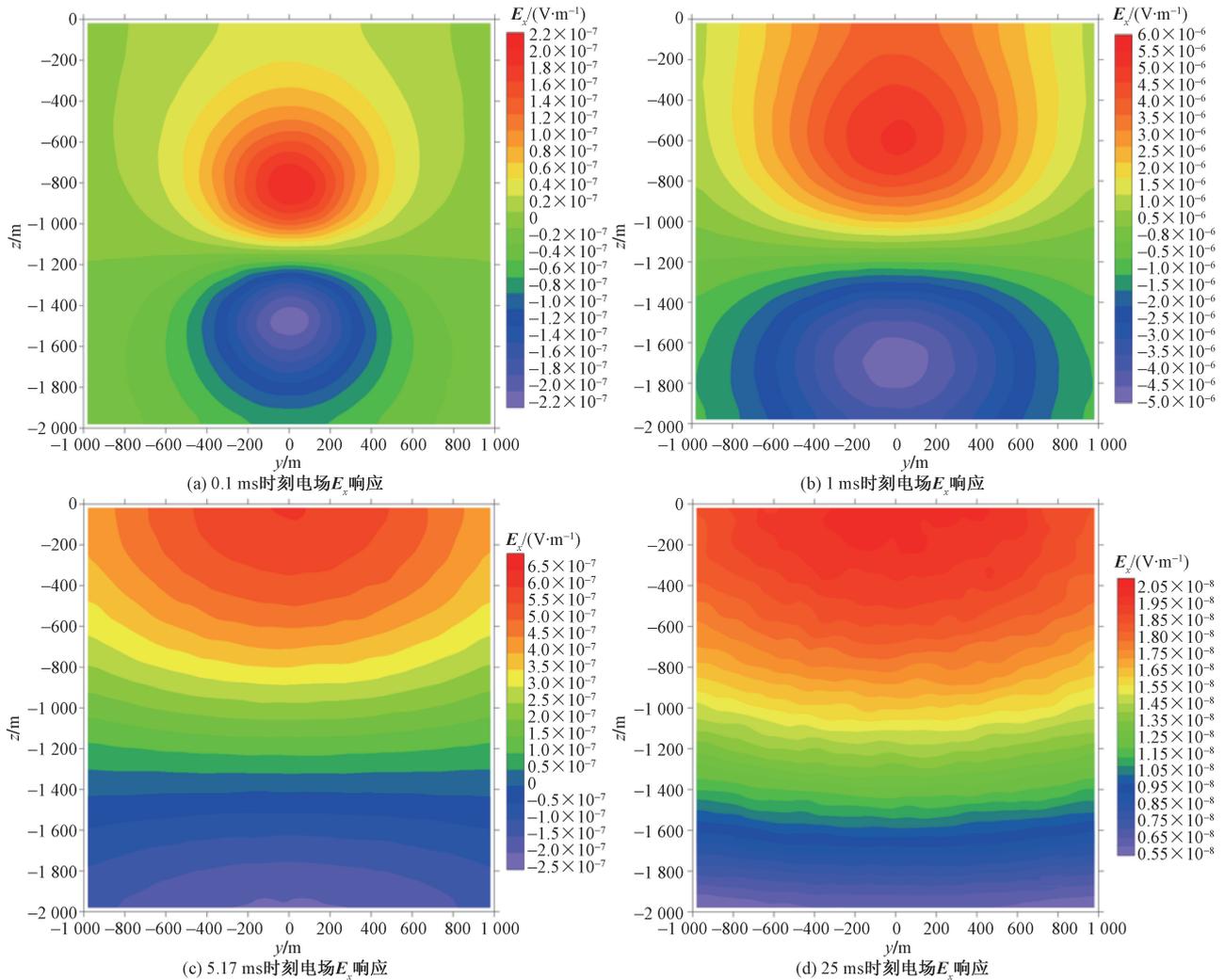
[11] 吴琼, 智庆全, 武军杰, 等. 井地联合瞬变电磁等效电流环路与纯异常近似性研究[J]. 物探化探计算技术, 2022, 44(2): 224-234.

[12] NÉDÉLEC J C. Mixed finite elements in R3[J]. Numerische Mathematik, 1980, 35(3): 315-341.

[13] 肖钧仁. 井地伪随机电磁勘探理论与方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2022.

[14] 齐彦福, 殷长春, 刘云鹤, 等. 基于瞬时电流脉冲的三维时间域航空电磁全波形正演模拟[J]. 地球物理学报, 2017, 60(1): 369-382.

[15] UM E S, HARRIS J M, ALUMBAUGH D L. 3D time-domain simulation of electromagnetic diffusion phenomena: a finite-element electric-field approach[J]. Geophysics, 2010, 75(4): 115-126.

图 8 不同时刻 E_x 响应分布

Characterization of Spatial and Temporal Distribution of Transient Electromagnetic Fields from Vertical Electric Sources

ZHAO Yongcheng

(Yangtze University Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Exploration Technology, Ministry of Education, Wuhan 430100, China)

Abstract: Well electromagnetic method has been widely used in geological exploration due to its unique advantages. Currently more widely discussed frequency domain well ground electromagnetic method, with the shallow oil and gas has been developed as well as unconventional strata and many other conditions continue to limit, people in the frequency domain well ground electromagnetic on the basis of well ground transient electromagnetic method is proposed, the method is widely used in mineral resources exploration, hydrological surveys, unexploded ordnance detection, etc., through the processing of vortex electromagnetic attenuation of the secondary electromagnetic field information generated by the inversion of the stratigraphic information. It has the advantage of weak shielding against high resistance, as well as high vertical resolution of anomalies. However, the theoretical discussion of well transient electromagnetic is still relatively small, especially the study of the spatial and temporal distribution characteristics of transient electromagnetic field of electrical sources, and the most difficult to overcome here is the test of the correctness and validity of the method used. Therefore, this paper discusses the characteristics of the spatial and temporal distribution of the transient electromagnetic field in ground wells on the basis of verifying the correctness of the executed program, focusing on the characteristics of the diffusion of the field values of the electromagnetic field components with time.

Keywords: vertical electric source; ground well transient electromagnetic force; Characteristics of spatial and temporal distribution