

doi: 10.11720/wtyht.2021.1456

智庆全,武军杰,王兴春,等.ANSYS 在瞬变电磁三维正演中的应用[J].物探与化探,2021,45(4):1037-1042.http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1456

Zhi Q Q, Wu J J, Wang X C, et al. The application of ANSYS to TEM 3D forward modeling[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(4): 1037-1042. http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1456

# ANSYS 在瞬变电磁三维正演中的应用

智庆全<sup>1,2</sup>, 武军杰<sup>1,2</sup>, 王兴春<sup>1,2</sup>, 孙怀凤<sup>3</sup>,  
杨毅<sup>1,2</sup>, 张杰<sup>1,2</sup>, 邓晓红<sup>1,2</sup>, 陈晓东<sup>1,2</sup>, 杜利明<sup>4</sup>

(1. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 自然资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000; 3. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 4. 中国冶金地质总局 山东正元地质勘查院, 山东 济南 250101)

**摘 要:** 瞬变电磁正演是研究瞬变电磁响应规律的有效途径, 瞬变电磁的高精度、快速三维正演技术, 是当前瞬变电磁正演研究的热点。ANSYS 软件中的 Multiphysics 模块也适用于瞬变电磁法的正演模拟问题。本文通过一些模型算例介绍了 ANSYS 软件在瞬变电磁场三维正演中的应用方法, 包括建模、加载、求解设置、后处理的一般过程。数值计算结果表明, 利用 ANSYS 软件进行瞬变电磁正演模拟具有很高的计算精度。合理使用 ANSYS 软件进行瞬变电磁响应模拟可以提高正演模拟计算的效率, 为分析、理解瞬变电磁响应规律提供有力的支撑。

**关键词:** 瞬变电磁; 三维正演; ANSYS; 有限元

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2021)04-1037-06

## 0 引言

瞬变电磁法是应用最广泛的电磁探测方法之一, 近年来在金属矿勘查、煤田地质勘探、隧道超前预报等领域<sup>[1-5]</sup>发挥了重要作用。瞬变电磁法一般采用不接地回线或接地导线作为发射源, 供以稳恒电流, 观测电流关断后地下地质体感生的二次电磁场, 通过分析二次场的特征来推断地下地质体的电性、位置、深度等信息。利用瞬变电磁法进行勘探工作的关键技术在于根据瞬变电磁响应规律推断地质体信息, 而瞬变电磁正演是研究瞬变电磁响应规律的有效途径。随着计算机技术的应用, 瞬变电磁正演方法有了快速发展<sup>[6-9]</sup>, 其中, 一维层状模型的瞬变电磁正演通常基于频谱法, 采用线性数字滤波法进行快速计算, 二维、2.5 维的瞬变电磁正演主要采用有限单元法和有限差分法, 三维瞬变电磁正演方法主要为有限单元法、积分方程法、时域有限差分法

等。目前, 一维瞬变电磁正演方法经过多年发展已渐趋成熟, 基于一维正演的一维反演技术是当前进行瞬变电磁反演的主要方法, 而二维、2.5 维瞬变电磁方法由于其二维近似的条件常常难以满足, 在实际应用中存在诸多限制; 三维瞬变电磁正演方法相对一维、二维方法能更精确地模拟实际地质情况, 基于三维正演的解释方法能取得更高的解释精度, 但一般需要花费很高的时间成本。

瞬变电磁的高精度、快速三维正演技术已成为当前瞬变电磁正演研究的热点, 国内外很多学者都针对这一问题展开了研究。目前, 瞬变电磁的三维正演技术主要可分为频时转换法和直接时域法两大类。频时转换法首先计算三维频率域电磁响应, 然后采用余弦变换、G-S 变换等频时技术将频率域响应转换到时间域, 进而获得瞬变电磁响应。时域法一般通过时间离散来直接求取时域响应, 主要包括时域有限差分法、有限体积法、有限单元法等。时间域有限差分法基于交错网格和显式时间差分格

收稿日期: 2020-09-17; 修回日期: 2021-02-18

**基金项目:** 国家重点研发计划“旱情判别与应急抗旱关键技术及装备研发”项目(2018YFC1508700); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(AS2020J01、AS2020Y01); “深地资源勘查开采”重点专项(2018YFC0603803)

**作者简介:** 智庆全(1987-), 男, 工程师, 主要从事电磁勘探方法研究工作。Email: zhiqingquan@gmail.com

式<sup>[10-12]</sup>,该方法具有数学概念直观、表达简单的特点,但是需要满足稳定性条件,其网格尺寸和时间步长均受到严格限制。时间域有限体积法和时间域有限元法通过采用后退欧拉时间离散格式对控制方程进行无条件稳定的隐式时间离散<sup>[13-17]</sup>,极大地放宽了对时间步长的限制,而时间域有限元法可以采用非规则四面体网格进行空间离散,便于处理起伏地形和复杂地电结构的情况。

随着数值计算技术的发展,瞬变电磁三维正演的速度和精度均有了很大程度的提高,但仍然缺乏模型建立和剖分简便、交互便利、便于推广使用的成熟瞬变电磁三维正演软件。在目前已有的商业软件中,ANSYS 是比较流行的大型有限元分析软件之一<sup>[18]</sup>,其 Multiphysics 模块可以分析解决多学科问题,如:结构、力学、热学、流体、电磁场以及任意两种或两种以上物理场之间的耦合问题,其低频电磁学模块所采用的控制方程与瞬变电磁法正演模拟的控制方程相同(均为扩散方程)<sup>[19-22]</sup>,其正演算法为时域有限元法,具备网格剖分操作简单、便于处理大型复杂构造问题、计算速度较快的特点,适合用于瞬变电磁法的三维正演模拟。鉴于此,本文尝试利用 ANSYS 软件进行瞬变电磁正演,并通过算例来分析 ANSYS 软件的计算精度。

## 1 ANSYS 电磁仿真理论基础

电磁感应现象可由麦克斯韦方程组进行描述。麦克斯韦方程组实际上由 4 个电磁学定律组成,即安培环路定律、法拉第电磁感应定律、高斯电通定律和高斯磁通定律,其微分形式为:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{H}$  分别为电磁场强度矢量, $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{B}$  分别为电位移矢量和磁感应强度, $\rho$  为体电荷密度。为了计算简便,常常定义磁通量势和电标量势:

$$\begin{cases} \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \\ \mathbf{E} = -\nabla V, \end{cases} \quad (2)$$

使得耦合方程(1)转化为关于电场和磁场的两个偏微分方程

$$\begin{cases} \nabla^2 \mathbf{A} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J}, \\ \nabla^2 V - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\mu$ 、 $\varepsilon$  分别为磁导率和介电常数。利用有限元方法求解上述偏微分方程,即可获得磁矢势和电势的值,然后根据式(2)即可导出电磁场强度、涡流密度等物理量。

实际上,求解偏微分方程(3)时,必须要先给定初始条件和边界条件,才能形成一个完整的初边问题。一般地,利用 ANSYS 进行瞬变电磁问题模拟时,初始条件往往要通过一个静态分析获得;边界条件一般使用 Dirichlet 边界条件(即直接给定磁矢势和电势在边界上的值)或 Neumann 边界条件(即通量平行或垂直条件)。

## 2 ANSYS 电磁仿真基本流程

ANSYS 作为一种有限元仿真工具,求解电磁问题的一般思路就是依照前节给出的理论基础,将所处理区域划分为有限个单元,然后将磁矢势和电势所满足的变分问题极小化以获得节点上的磁矢势和电势值,继而导出计算区域的其他待求量。其基本流程为:

- 1) 定义物理环境,主要包括单元类型选取、材料定义、坐标系选用等;
- 2) 进行几何建模,并分配几何体材料特性、单元类型等属性,对求解区域按照一定规则进行剖分;
- 3) 根据问题的特征,施加边界条件和载荷;
- 4) 求解和后处理,利用 ANSYS 求解器求解磁矢势和电势,然后利用其后处理器获得与问题相关的其他量。

## 3 基于 ANSYS 的瞬变电磁三维正演算例

为分析和验证利用 ANSYS 软件进行瞬变电磁三维正演的正确性和精度,分别设计了均匀半空间模型、层状地层模型和单个三维异常体模型进行了仿真模拟。

### 3.1 均匀半空间模型

#### 3.1.1 模型描述

如图 1 所示,仿真模型为回线源激发的均匀半空间,回线半径为 100 m,均匀半空间电阻率值为  $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。剖分区域分别由线圈区、空气区和地层区三部分组成,其外边界为一个半径为 10 000 m 的

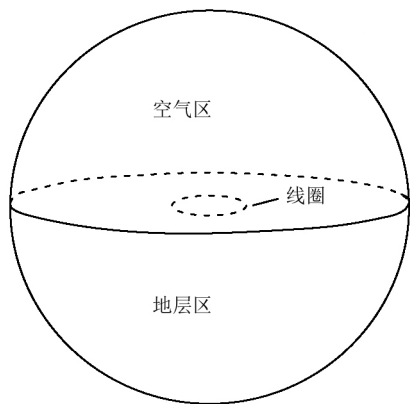


图 1 瞬变电磁模型示意  
Fig.1 The diagram of TEM model

球面。在  $t < 0$  时,回线中通以 20 A 的电流, $t = 0$  时刻,撤去发射电流,观测此后的电磁场变化规律。

3.1.2 几何模型

几何模型按照物理模型及各分析对象的特性建立,使用直角坐标系,其  $x$ - $y$  平面与地层和空气的分界面重合, $z$  轴正方向定义为地层深部方向。线圈位于空气层中,与地层—空气层分界面相接。为方便电流密度载荷的施加和剖分,使用较粗的导线围成发射线圈,其横截面积为  $1\text{ m}^2$ ,作为真实线圈的近似。应该指出的是,在距离线圈较近时( $< 5\text{ m}$ ),这种近似的仿真场和细导线产生的电磁场具有较大的偏差,而在较远的区域,这种近似引起的误差可以忽略。同时,对于这种具有明显柱对称性质的问题,将其简化为二维问题可大大减小仿真的计算量,此处考虑到进行三维仿真的普适性,仍将其作为三维问题进行分析。

3.1.3 有限元模型

1) 单元类型。ANSYS 软件为三维电磁场分析提供了 solid97、solid236、solid237 等单元类型,其中 solid236、solid237 为矢量单元类型,基于矢量单元的有限元分析将由 ANSYS 软件自动采用矢量有限元法进行分析。考虑到基于标量有限单元法求解三维电磁场模拟问题时的“伪解”现象,本次分析使用矢量单元 solid236,按照单元选项不同分为 2 类(表 1)。

表 1 单元类型  
Table 1 The element type

序号	单元类型	选项	对应介质
1	Solid236	Az-VOLT 自由度	地层
2	Solid236	Az 自由度,无涡流	线圈、空气

2) 材料属性。本次分析地层、线圈、空气 3 种介质。对应这三种介质,选取 3 种材料属性,如表 2

所示。

表 2 材料属性  
Table 2 The material attribute

序号	电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	相对磁导率	对应介质
1	100	1	地层
2	$10^{-7}$	1	线圈
3	$\infty$	1	空气

3) 网格控制。网格剖分的质量直接影响着计算结果的精度。Solid236 单元为一阶单元,其四面体结构属于常应变单元,六面体结构属于梯度单元,当剖分粒度相同时,六面体网格相比于四面体网格具有更高的计算精度<sup>[23]</sup>,因此应尽量将计算区域剖分为六面体。本例中,线圈使用扫掠方式<sup>[24]</sup>生成规则网格,地层和空气区域采用自由网格划分,自动细化级别设为 4。剖分完成后,共有 549 036 个单元,92 165 个节点。

4) 加载与求解。在线圈中加载  $20\text{ A/m}^2$  的电流密度以实现发射电流的加载,所有外边界节点上加载简单狄利克雷边界,即令  $A_z = 0, V = 0$ 。分析类型选择 Transient,求解方法选择 FULL。考虑到发射线圈中在  $t < 0$  时有稳定电流,应先将时间积分效应开关关闭,进行一次静态磁场分析以作为瞬态分析的初始条件,然后打开时间积分效应开关,进行瞬态分析。自动分析采用自动时间步长,最大时间步为 1 ms,最小为  $1\text{ }\mu\text{s}$ ,初始时间步设为  $10\text{ }\mu\text{s}$ 。

5) 后处理及分析

ANSYS 直接求解的是磁矢势和电势,在求解完成后,可以在后处理模块提取电磁场值、涡流等参数。为验证 ANSYS 的模拟精度,首先提取中心点时间域磁场响应,并与中心点磁场垂直分量的解析解进行对比。其解析解表达式为

$$H_z = \frac{I}{2a} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{3}{u^2} \right) \Phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left( \frac{3}{u} \right) e^{-u^2/2} \right] \quad (4)$$

对比结果如图 2 所示。容易看出,ANSYS 解和解析结果吻合较好,最大相对误差约为 3.5%,说明 ANSYS 模拟结果具有较高的计算精度。本次正演模拟在 CPU 核心数为 4 核,主频为 2.20 GHz 的 PC 上运行,耗时约为 30 min。

3.2 层状介质模型

为分析 ANSYS 对于层状大地瞬变电磁响应的模拟精度,在均匀半空间中加入一个低阻层,使其成为 H 型大地模型,然后利用 ANSYS 进行模拟计算,将计算结果与数字滤波解进行对比。本算例的设计参数为:采用方形回线进行发射,回线边长为 100

m,发射电流为 1A;H 型地层模型的背景电阻率值取为  $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ,低阻层电阻率值为  $10\ \Omega\cdot\text{m}$ ,深度范围为 200~300 m;观测时间为  $10^{-5}\sim 10^{-1}\ \text{s}$ ,按照对数间隔设置 21 个时间道。图 3 中给出了中心点

的衰减电压计算结果,并和数字滤波解进行了对比。计算结果表明,对于 H 型地层,ANSYS 的模拟结果和数字滤波解吻合较好,最大相对误差约为 4.5%。

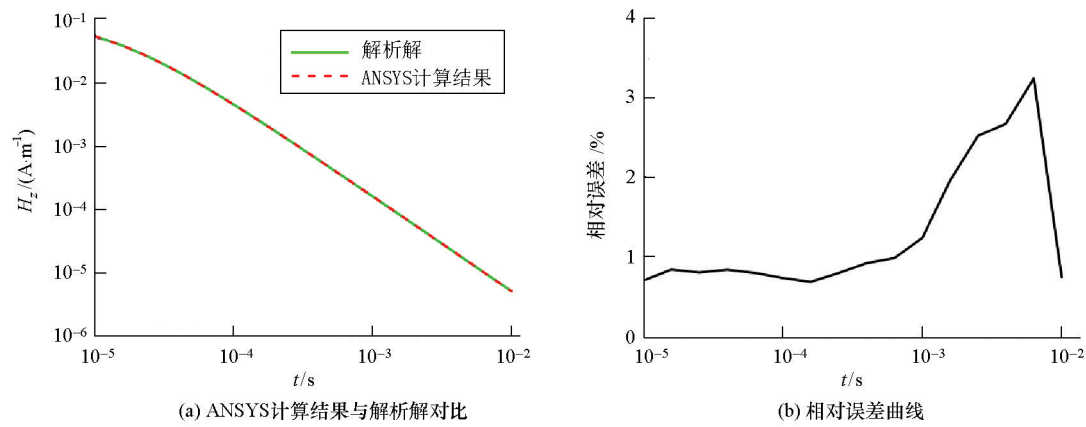


图 2 均匀半空间 ANSYS 计算磁场响应和解析结果对比

Fig.2 The comparison diagram of ANSYS and analytical solution of homogeneous half-space

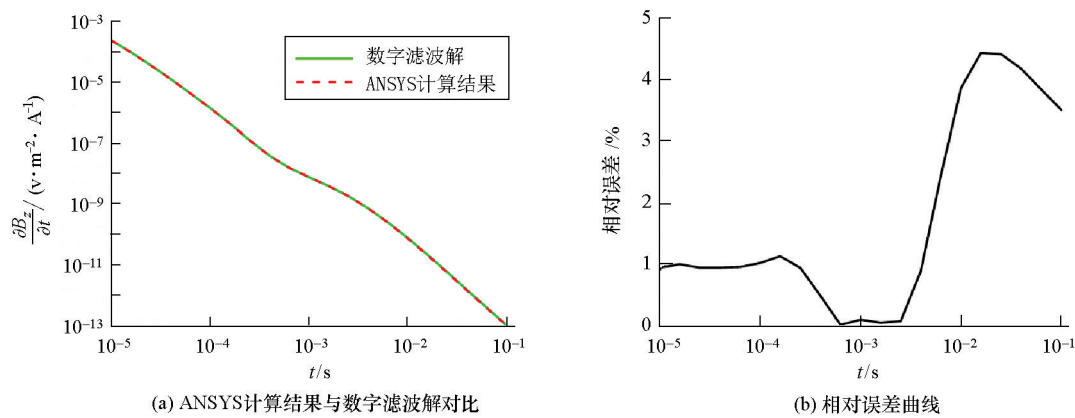


图 3 H 型地层 ANSYS 计算衰减电压和数字滤波结果对比

Fig.3 The comparison diagram of ANSYS and analytical solution of H-type model

3.3 单个异常体模型

在均匀半空间中放置一个异常体,然后计算主剖面上的瞬变电磁响应,以分析单个异常体的瞬变电磁响应规律。如图 4 所示,模型的设计参数为:采用方形回线进行发射,回线边长为 100 m,发射电流为 1 A;大地模型的背景电阻率值取为  $100\ \Omega\cdot\text{m}$ ;异常体电阻率值为  $1\ \Omega\cdot\text{m}$ ,中心位置为  $(0\ \text{m}, 0\ \text{m}, 250\ \text{m})$ ,规模为  $200\ \text{m}\times 200\ \text{m}\times 100\ \text{m}$ ;观测时间为  $10^{-5}\sim 10^{-1}\ \text{s}$ ,按照对数间隔设置 21 个时间道;主剖面测线范围为  $-200\sim 200\ \text{m}$ ,测点间距 50 m。

图 5 为主剖面上的多测道曲线。从多测道图中可以看出,当测点通过低阻异常体正上方时,第 10~15 道的衰减电压出现了“上凸”的特征。这是符合瞬变电磁场理论的:由于在瞬变电磁场传播过程中,遇到低阻体将在其中感生出较强的涡流,使得瞬

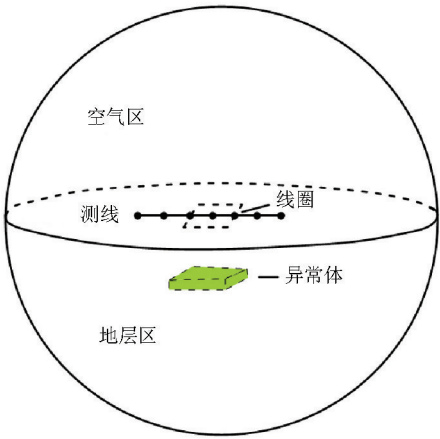


图 4 单个异常体模型示意

Fig.4 The diagram of single anomalous body model



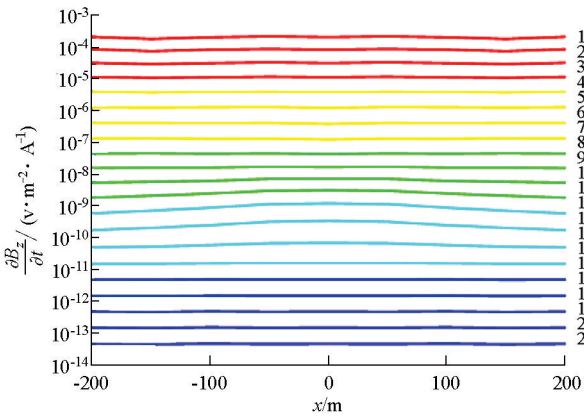


图 5 主剖面多测道曲线

Fig.5 The multi-channel graph of principal section

变电磁场的衰减速率减缓,在多测道曲线上即表现为“上凸”特征。

4 结论

本文将 ANSYS 软件应用在瞬变电磁场三维正演之中,介绍了利用 ANSYS 软件进行前处理、加载、单元分析、求解、后处理等流程中的参数设置方法。利用瞬变电磁均匀半空间解析解、层状地层模型的数字滤波解进行了 ANSYS 瞬变电磁场仿真的正确性验证,并进行了简单三维异常体的 TEM 响应试算。结果表明,ANSYS 仿真结果与解析解和数字滤波解吻合、计算误差较小,三维仿真结果与瞬变电磁场理论相符。利用 ANSYS 进行瞬变电磁场三维正演具有较高的计算精度和速度,具备较强的实用性。

参考文献 (References) :

[1] 刘树才,刘志新,姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 414-417.  
Liu S C, Liu Z X, Jiang Z H. Application of TEM in hydrogeological prospecting of mining district [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4): 414-417.

[2] 薛国强,李貅,底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195-1200.  
Xue G Q, Li X, Di Q Y. The progress of TEM in theory and application [J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1195-1200.

[3] 杨海燕,岳建华,王梦倩,等. 矿井瞬变电磁法中多匝回线电感对目标体探测的影响[J]. 物探与化探, 2007, 31(1): 34-37.  
Yang H Y, Yue J H, Wang M Q, et al. The influence of the induction of multi-turn coils for TEM on the detection of buried objects in underground mines [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(1): 34-37.

[4] 范涛,王秀臣,李貅,等. 瞬变电磁方法在探测煤矿浅层高阻采空区中的应用[J]. 西北地质, 2010, 43(2): 156-162.  
Fan T, Wang X C, Li X, et al. Application of TEM in detecting

goal of coal mine with high-resistivity and shallow-layer [J]. Northwestern Geology, 2010, 43(2): 156-162.

[5] 智庆全,武军杰,王兴春,等. 三分量定源瞬变电磁解释技术及其在金属矿区的实验[J]. 物探与化探, 2016, 40(4): 798-803.  
Zhi Q Q, Wu J J, Wang X C, et al. Three-component interpretation technique of fixed source TEM and its experimental application in metallic ore district [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(4): 798-803.

[6] 闫述,薛国强,陈明生. 大回线源瞬变电磁响应理论研究回顾及展望[J]. 地球物理学进展, 2011, 26(3): 941-947.  
Yan S, Xue G Q, Chen M S. Review and perspective of theoretical study on Large-loop TEM response [J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(3): 941-947.

[7] 李建慧,朱自强,曾思红,等. 瞬变电磁法正演计算进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(4): 1393-1400.  
Li J H, Zhu Z Q, Zeng S H, et al. Progress of forward computation in transient electromagnetic method [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(4): 1393-1400.

[8] 殷长春,刘斌. 瞬变电磁法三维问题正演及激电效应特征研究[J]. 地球物理学报, 1994, 37(s2): 486-492.  
Yin C C, Liu B. The research on the 3D TDEM modeling and IP effect [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(s2): 486-492.

[9] 唐新功,胡文宝,严良俊. 层状地层中三维薄板的瞬变电磁响应[J]. 石油地球物理勘探, 2000, 35(5): 628-633, 650.  
Tang X G, Hu W B, Yan L J. Transient electromagnetic response to a 3-D thin plate in a layered earth [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2000, 35(5): 628-633, 650.

[10] 孙怀凤,李貅,李术才,等. 考虑关断时间的回线源激发 TEM 三维时域有限差分正演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1049-1064.  
Sun H F, Li X, Li S C, et al. Three-dimensional FDTD modeling of TEM excited by a loop source considering ramp time [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(3): 1049-1064.

[11] 李展辉,黄清华. 复频率参数完全匹配层吸收边界在瞬变电磁法正演中的应用[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1292-1299.  
Li Z H, Huang Q H. Application of the complex frequency shifted perfectly matched layer absorbing boundary conditions in transient electromagnetic method modeling [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1292-1299.

[12] Wang T, Hohmann G W. A finite-difference, time-domain solution for three-dimensional electromagnetic modeling[J]. Geophysics, 1993, 58(6): 797-809.

[13] Yin C C, Qi Y F, Liu Y H, et al. 3D time-domain airborne EM forward modeling with topography [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 134(1): 11-22.

[14] Cai H Z, Hu X Y, Xiong B, et al. Finite-element time-domain modeling of electromagnetic data in general dispersive medium using adaptive Padé series [J]. Computers & Geosciences, 2017, 109: 194-205.

[15] 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.

Qi Y F, Yin C C, Liu Y H, et al. 3D time-domain airborne EM full-wave forward modeling based on instantaneous current pulse [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(1): 369–382.

[16] 周建美, 刘文韬, 李貅, 等. 双轴各向异性介质中回线源瞬变电磁三维拟态有限体积正演算法[J]. 地球物理学报, 2018, 61(1): 368–378.

Zhou J M, Liu W T, Li X, et al. Research on the 3D mimetic finite volume method for loop-source TEM response in biaxial anisotropic formation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(1): 368–378.

[17] Li J H, Lu X S, Colin G F, et al. A finite-element time-domain forward solver for electromagnetic methods with complex-shaped loop sources [J]. Geophysics, 2018, 83(3): 117–132.

[18] 唐兴伦, 范群波, 张朝晖, 等. ANSYS 工程应用教程—热与电磁学篇[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.

Tang X L, Fan Q B, Zhang C H, et al. ANSYS engineering applications tutorials—thermal and electromagnetics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2003.

[19] ANSYS INC. ANSYS low-frequency electromagnetic analysis guide [R]. 2004.

[20] 汤井田, 肖晓, 杜华坤, 等. ANSYS 在直流电法正演中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(3): 987–992.

Tang J T, Xiao X, Du H K, et al. The application of ANSYS in direct current method forward modeling [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(3): 987–992.

[21] 张军, 赵莹, 马炳镇. 基于 ANSYS 的矿井直流电场研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2609–2616.

Zhang J, Zhao Y, Ma B Z. Study of DC electric-field of mine based on ANSYS [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2609–2616.

[22] 高卫富, 韩进, 刘玉, 等. 基于 ANSYS 全空间直流电法异常体正演模拟[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(5): 2089–2094.

Gao W F, Han J, Liu Y, et al. Research on the forward model DC method of abnormal body in full space based on ANSYS [J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(5): 2089–2094.

[23] 王宁, 苏新兵, 马斌麟, 等. 网格类型对流场计算效率和收敛性的影响[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2018, 19(1): 9–14.

Wang N, Su X B, Ma B L, et al. A Study of influence of mesh type on fluid computational efficiency and convergence [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2018, 19(1): 9–14.

[24] 翟建军, 乔新宇, 丁秋林. 基于扫掠法的六面体网格生成算法及实现[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(1): 71–74.

Zhai J J, Qiao X Y, Ding Q L. Research and implementation of hexahedral mesh generation algorithm based on sweeping [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007, 39(1): 71–74.

The application of ANSYS to TEM 3D forward modeling

ZHI Qing-Quan<sup>1,2</sup>, WU Jun-Jie<sup>1,2</sup>, WANG Xing-Chun<sup>1,2</sup>, SUN Huai-Feng<sup>3</sup>,  
YANG Yi<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, DENG Xiao-Hong<sup>1,2</sup>, CHEN Xiao-Dong<sup>1,2</sup>, DU Li-Ming<sup>4</sup>

(1. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, China; 2. Laboratory of Geophysical EM Probing Technologies, MLR, Langfang 065000, China; 3. Laboratory of Earth Electromagnetic Exploration, Shandong University, Jinan 250061, China; 4. Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, Jinan 250101, China)

**Abstract:** The forward modeling is an effective way to study the characteristics of transient electromagnetic (TEM) responses. The high precision and fast 3D forward modeling technology is a hot spot in the study of TEM forward modeling. The multiphysics module in ANSYS software is suitable for the forward modeling of TEM. In this paper, the application method of ANSYS software in TEM 3D forward modeling is introduced by some model examples, including the preprocessing, loading, solution setting and post-processing. The numerical results show that the simulation of TEM forward modeling by using ANSYS software has high accuracy. The TEM forward modeling using ANSYS can improve the efficiency of forward simulation calculation and provide a strong support for analyzing and understanding the characteristics of TEM response.

**Key words:** TEM; three-dimensional forward modeling; ANSYS; finite element method

( 本文编辑: 沈效群 )