doi: 10.11720/wtyht.2018.1496
何畏,吴文鹏,李建华,等.一种电磁法三维数值模拟的建模与网格剖分方法[J].物探与化探,2018,42(6):1272-1279.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1496
He W,Wu W L,Li J H,et al.The method of 3D modeling and grid subdivision for electromagnetic numerical simulation[J].Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(6):1272-1279.http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1496

一种电磁法三维数值模拟的建模与网格剖分方法

何畏[1,2],吴文鹏[1,2],李建华[1,2],林品荣[1,2],梁萌[1,2],顾观文[1,2],冯斌[1,2]
(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.国土资源部 地球物理电磁法探测技术重点实验室,河北 廊坊 065000)

摘 要: 为满足电磁法三维数值模拟解释对交互建模与可视化网格剖分的需求,利用计算机图形学、人机交互、拓扑关系学等技术,设计了起伏地形下三维矢量交互建模、四面体和六面体网格剖分流程,并开发了软件模块。该软件可提供起伏地形下电磁法三维数值模拟的四面体、六面体网格剖分的实用化工具,提高了电磁法三维在数据模拟与解释方面的可视化程度和计算效率。

关键词: 大地电磁;三维建模;网格剖分;起伏地形;四面体; 六面体
中图分类号: P631 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2018)06-1272-08

0 引言

电磁法勘探是基础地质调查和资源环境勘查不可缺少的重要技术手段[1-5]。如何提高三维电磁法正反演技术的数值模拟效率一直是三维研究的热点和难点[5-8]。可视化交互建模和网格剖分方法是提高电磁法数值模拟效率和方法技术实用化的重要技术,可解决数值模拟直接获取网格模型时先验信息表达难、可视化功能弱、模型数据配置靠手工文本编辑的低效率建模方法,以及数据处理流程不清晰、数据交换仅依赖于文件格式等问题。因此,为了提高电磁法三维数值模拟效率和技术实用化进度,研发一种将数据处理与解释一体化的可视化建模与网格剖分方法具有重要现实意义。

基于国内外电磁法三维处理与解释软件研究现状[9-15],以及在三维电磁法数值模拟获取初始模型时,直接构建网格模型具有建模效率低、先验信息表达难、可视化功能弱等不足,为了提高数值模拟效率,将已知信息(地质、地震、物性等)融入初始模型,利用图形学技术进行可视化建模,在设计了基于人机交互构建矢量模型后,进行三维网格剖分以获取网格模型的流程和方法。建模与网格剖分技术的实现,为电磁法正演模拟解释方法的实际推广应用提供了获取网格模型工具,且利用计算机可视化与交互技术使得建模与网格剖分具有流程清晰、可视化好、效率高等特点。

1 三维建模方法

1.1 三维简单体建模

三维简单体建模是三维地电模型经常使用的一种建模方式,其特点是建模原理简单、易于实现、网格剖分后数值模拟效果明显等,在理论模型试验和简单地电模型的数值模拟时使用较多。结合电磁法观测区内测线、测点等信息,利用平面内 Delaunay 三角剖分方法,以及计算机图形学技术,设计了三维可视化交互建模流程。

图1给出了三维简单体建模流程与模型示意,主要方法如下。

1)为了表达合理的观测区内三角曲面地形,需将空间点投影变换至同一平面进行三角剖分,即观

收稿日期: 2017-10-30;**修回日期**: 2018-05-28
基金项目: 深地资源勘查开采重点专项(2018YFC0603201);国家高技术研究发展计划("863"计划)重点课题(2014AA06A610);基础性公益性地质矿产调查专项(DD20160046、DD20179374)
作者简介: 何畏(1981-),男,四川营山人,高级工程师,硕士,主要研究方向:计算机建模在地学中的应用与物探数据处理方法技术研究。

万方数据

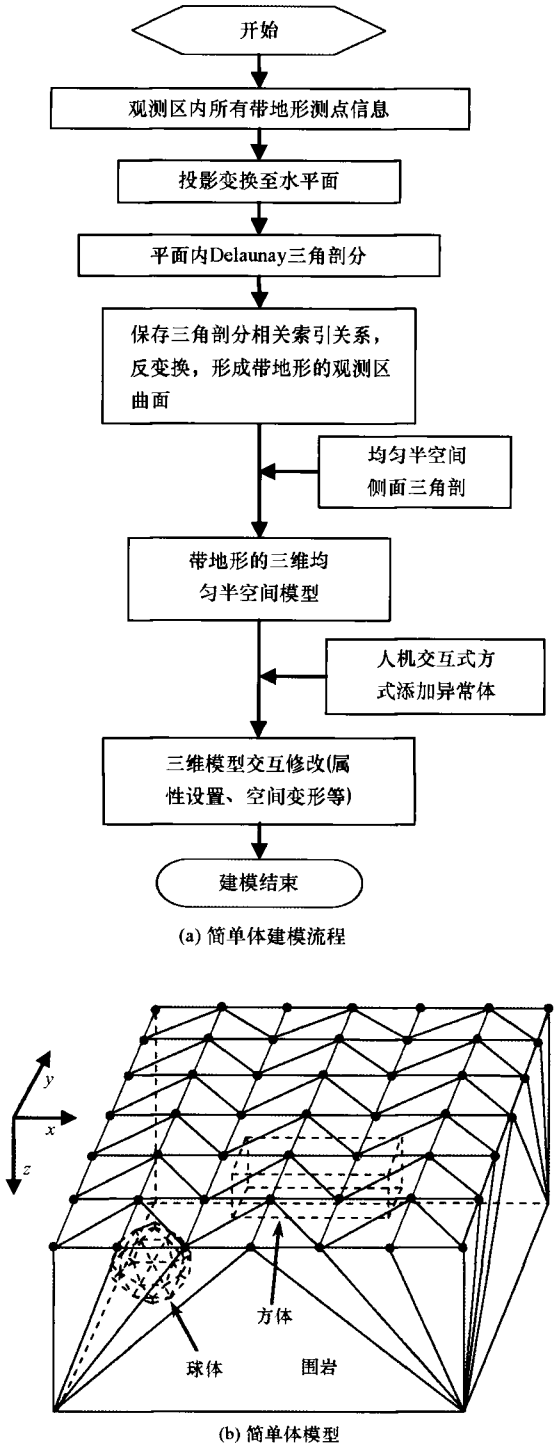


图 1　三维简单体建模流程及模型示意

测区内所有测点三维坐标做投影变换至水平面内,利用 Delaunay 三角剖分算法将平面内测点做三角剖分,存储剖分后的相关索引关系,做反变换,形成带地形的观测区三角曲面,如图 1b 简单体模型的围岩地形曲面。

2)基于测线、测点及测深信息构建三维模型区的前、后、左、右及下底面,并进行 Delaunay 三角剖分,和地形起伏面形成闭合均匀半空间模型,如图 1b 中围岩部分。

3)以人机交互方式添加异常体,如设置六面体中心坐标、长宽高长度,球体球心坐标、半径长和球面三角化参数等,如图 1b 中方体、球体的虚线箭头指向部分。

4)交互设置或修改均匀半空间、异常体属性(物性大小、颜色等),异常体移动、曲面插入节点、拖拽形体变化等交互操作改变其三维空间位置或形态。

1.2　三维剖面建模

基于目前地球物理勘探的剖面测量,在三维空间内以剖面轮廓线重构三维地质体的方式进行复杂体建模[16-17],为网格剖分提供矢量模型,主要内容包括二维剖面建模、人机交互重构三维体,其建模流程如图 2 所示。

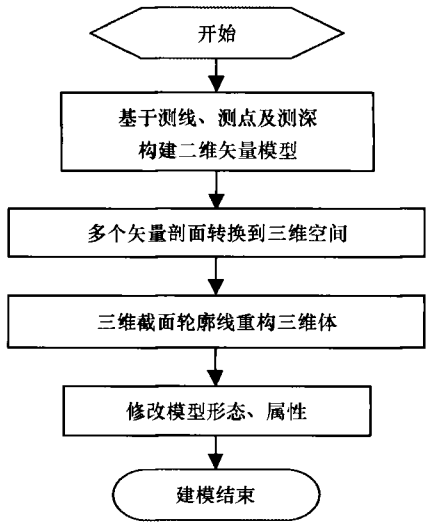


图 2　三维剖面建模流程

该建模方法可实现由平面到立体、二维到三维的转换,实现过程可利用二维剖面解释成果,也可满足实际地质体三维状态的特点。其方法与流程适合三维电磁法以测线、测点的勘探方式,具有方法合理、建模流畅、交互便捷等特点。

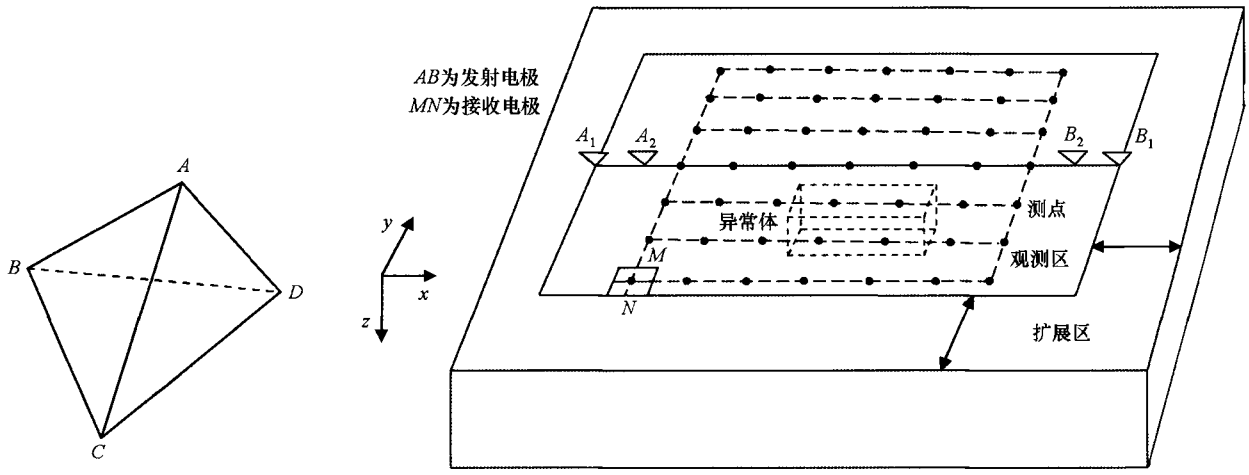
2　网格剖分设计

电磁法数据的三维正演模拟的网格初始模型一般有四面体、三棱柱、六面体单元[18-21],因此需将三维矢量模型进行相关网格剖分并进行属性填充,根据时间域激发极化法(TDIP)、大地电磁法(MT)以及瞬变电磁法(TEM)三维正演模拟对网格模型的需求,设计了起伏地形下非结构四面体网格、六面体网格剖分方法。

万方数据

2.1 四面体网格剖分

时间域激发极化法(TDIP)三维正演常采用非结构四面体作为正演计算的初始网格模型[14]。基于多数四面体网格剖分软件采用开源程序(TetGen 1.4.3 版本)的剖分现状,根据激发极化法勘探方法特点、正演计算方法、开源程序剖分需求,结合测线、测点、发射电极 AB、每个测点交叉 MN 测点坐标以及扩展区等信息进行全空间(观测区和扩展区)四面体网格剖分,四面体单元及剖分设计图如图 3 所示。



(a) 单个四面体单元 (b) 非结构四面体剖分设计

图 3 TDIP 观测装置示意

图 3b 中有 EW 向 7 条测线,每条测线含 7 个测点,A_1B_1、A_2B_2 为两队对称发射电极,每个测点有沿测线、垂直于测线的 2 组 MN 接收电极,观测区空间内含一个立方异常体(虚线所示),经过发射源电极 A_1B_1 的实线区域构成观测区边界,观测区外的实线方框为扩展区边界。

四面体网格剖分需要包括点、面、孔、区域等信息的数据准备,图 3b 的三维空间上顶面由多个控制点(测点、发射与接收电极、扩展区角点)决定,任何曲面都可由有限个三角形近似逼近。异常体(六面体、球体)表面也可采用三角形平面或球面描述。经过三维建模后,结合观测装置及数据特点,将四面体网格剖分流程设计如图 4 所示。

2.2 六面体网格剖分

针对大地电磁(MT)三维正演初始模型常采用六面体网格剖分,六面体单元如图 5 所示。

三维矢量模型的六面体网格剖分分为观测区、扩展区网格剖分两部分[12],水平地形下测区和扩展区关系如图 6 所示。

起伏地形下六面体网格剖分是将起伏地形观测区剖面垂向上网格剖分,分为拟空气层、测深深度层两部分,其剖分原理如图 7 所示。

3 剖分实例

为了验证本文建模与网格剖分方法的有效性,在 Win7 系统、Intel Xeon E52630 CPU @ 2.2GHz 计算机上,利用 Qt 5.1.0(32 bit)开发工具、C++语言,实现了建模与网格剖分方法。

3.1 三维简单体交互建模与四面体网格剖分(起伏地形)

设三维实验区有 11 条测线,线距 100 m,每条测线含 21 个测点,点距 100 m,最小高程为 0 m,最大高程为 20 m,模型横向、纵向起始坐标为-500 m,测深深度为 400 m;异常体边长 X、Y、Z 分别为 200、200、100 m,中心点 x、y、z 三维坐标分别为 200、200、-150 m;在观测区外布置有 6 对发射电极 AB,每个测点布置 2 对测量电极 MN(沿测线、垂直于测线,测距为 2 m)。围岩与异常体可视化建模、四面体剖分如图 8 所示。

图 8a 是基于测点数据、测深参数和 Delaunay 三角剖分方法形成的带地形的均匀半空间(蓝色围岩)。图 8b 是围岩隐藏后,以人机交互方式添加立方异常体(红色三角多面体)的示意。图 8c 是围岩、异常体以透明方式显示效果,以便于查看三维体的空间位置、形态等属性。

图 8d 是观测区、扩展区的表面三角化结果,横向、纵向、垂向方向扩展长度都为 3 000 m,由于观测区内存在非零高程,围岩上顶面三角曲面采用前文“四面体网格剖分”所述的插值、Delaunay 三角剖分方法,从三角剖分效果可以看出,离观测区边界越近插值点多,离边界越远插值点少。

万方数据

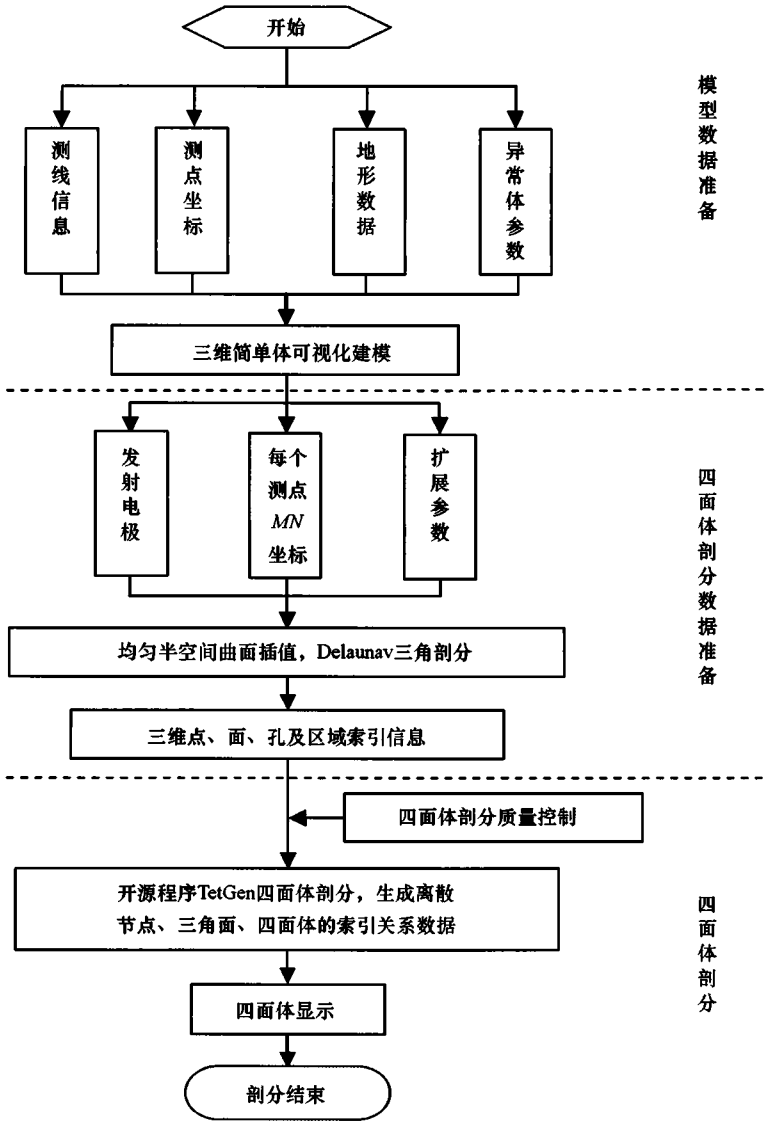


图 4　四面体剖分流程

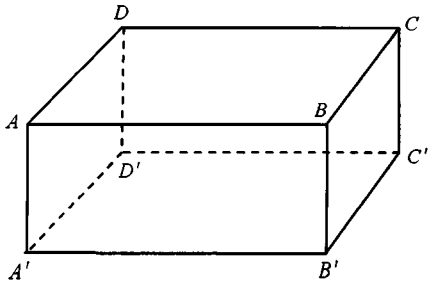


图 5　六面体单元

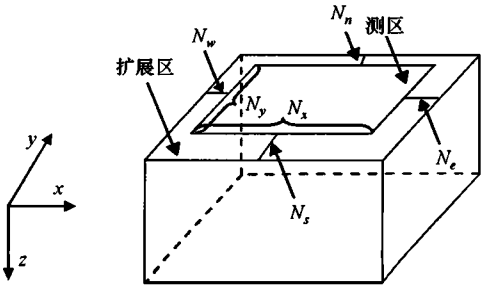


图 6　水平地形下测区和扩展区示意

图 8e 是全三维空间四面体剖分效果,其点、三角面、四面体数据可直接用于 TDIP 三维数值模拟计算,其剖分参数为“-pq1.2A”,指令 p 为将一个“*.poly”文件格式的平面直线图三角形化,指令 q 为生成高质量的网格,数值 1.2 是四面体剖分精度控制值(该值可根据需求设定),指令 A 为应用属性来确定三角形在某一区域,三维上顶面中心区由于控制点密集,自适应剖分程序在此区域剖分网格多,观测区外的区域网格剖分稀疏。

图 8f 是观测区内四面体剖分放大后的效果,可以清晰地看出每个测点周围的四面体网格密集,测区外四面体剖分稀疏。

万方数据

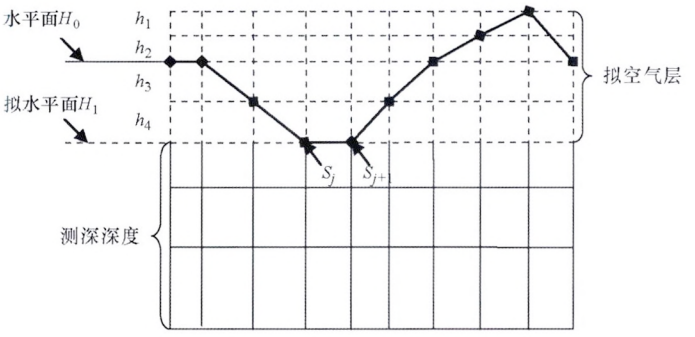
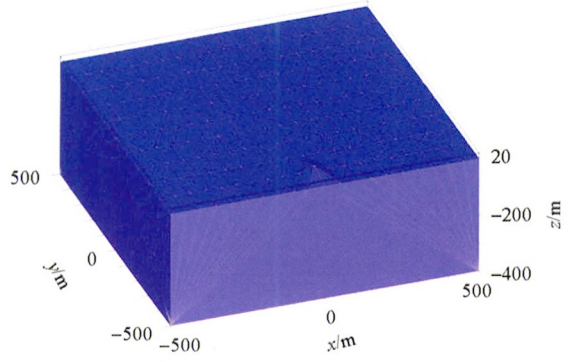
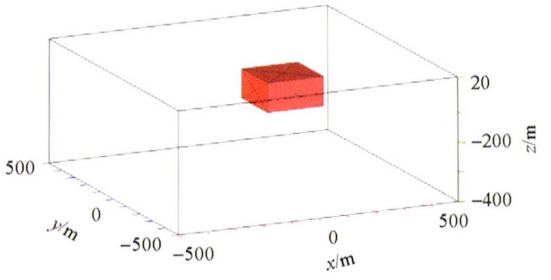


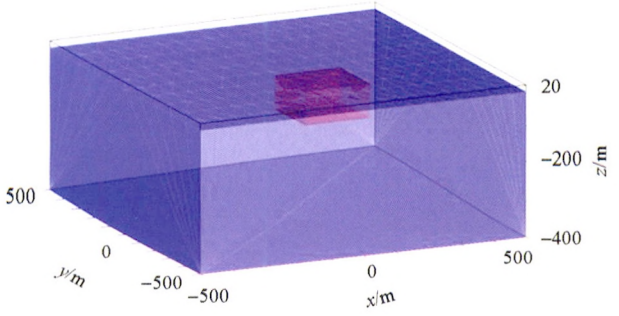
图 7　起伏地形下观测区三维剖面网格剖分原理



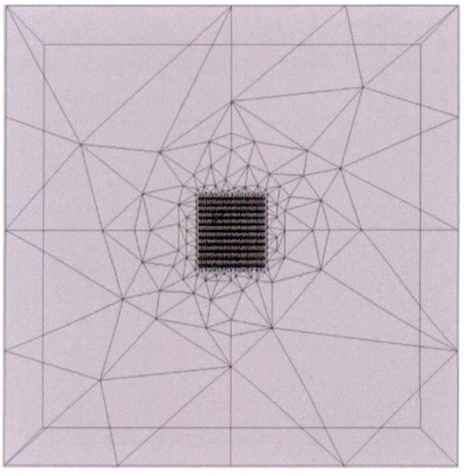
(a) 起伏地形下均匀半空间



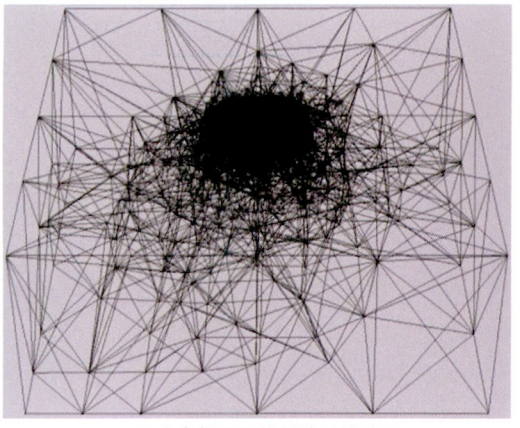
(b) 异常体



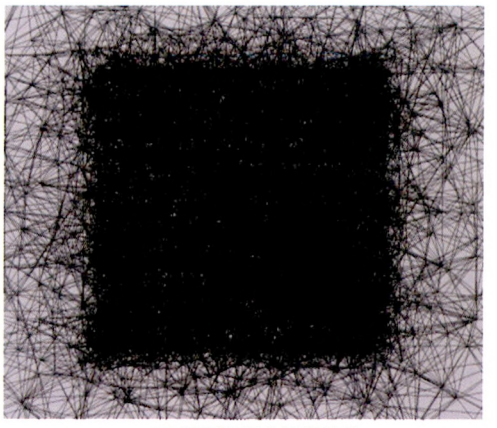
(c) 三维模型透明显示



(d) 表面三角化



(e) 全空间四面体剖分三维显示



(f) 四面体剖分局部效果

图 8　三维简单体建模与四面体剖分

万方数据

从图8可以看出,文中建模与网格剖分方法原理设计合理,技术流程清晰,可视化效果明显,实现了交互建模与可视化网格剖分的目标,为激发极化法三维数值模拟方法的实用化提供了基础性工具。

3.2 起伏地形下的三维剖面交互建模与六面体网格剖分

基于二维建模—轮廓线连接—三维体重构—四面体剖分流程,实现了带地形的三维剖面建模与六面体网格剖分。设置带地形的5个剖面,最小高程0 m,最大高程62 m,剖面间距400 m,每个剖面上测点数41个,点距50 m,东西、南北坐标区间均为-1 000~1 000 m,测深深度700 m;垂向网格第一层厚度为10 m,测深增长率为1.3(实际可变),横向、纵向扩展第一网格宽度、数量、增长率分别为260 m、3个、1.3,垂向扩展网格数量、增长率分别为5个、1.3(垂向扩展第一层网格高度增长基数以测深最后一层网格高度为准),建模与剖分结果如图9所示。

图9是基于剖面的三维复杂体建模与四边体剖分效果图。图9a是利用无向图搜索算法获取多边形模型(*XZ*截面),蓝色区域表示基岩,红色为基岩内透镜体截面,黄色部分为覆盖地层,绿色区域表示左侧侵入岩体。图9b是5个二维剖面进行Delaunay三角剖分后,转换到三维的空间展布图,从南向北第一个、第五个剖面的基岩不含透镜体截面,中间剖面基岩含透镜体截面,且第二、第四个剖面的透镜体截面小,第三个透镜体截面大。图9c是图9b的剖面调用轮廓线连接算法重构三维体模型,黄色覆盖层上顶区面模拟了该区的地形效果图,如果剖面较多时模型地形效果更佳。图9d是图9c三维模型剥掉(隐藏)黄色覆盖层的三维蓝色基岩和绿色侵入岩的效果图。图9e是图9b中含透镜体截面连接而成的三维透镜体,这种中间大、两侧小的模型变化趋势表达了实际透镜体的特征,这是简单体建模所无法实现的功能,表现出了复杂体建模在表达复杂三维地质体方面的优势。图9f是观测区内图9c三维矢量模型依据剖分参数,按前文"六面体网格剖分"原理进行六面体剖分的结果,其顶面起伏的网格代表了地形的起伏状况,其余不同颜色立方块体是覆盖层、侵入岩、基岩的属性填充结果。图9g是图9f观测区网格和扩展区网格综合显示效果图,扩展区网格属性填充也按"六面体网格剖分"所述原理实现,其网格模型可直接用于MT三维正演数值模拟计算。

从图9可以看出,本文设计的三维复杂体建模和六面体网格剖分方法可行、流程清晰、可视化效果明显,为大地电磁三维正演数值模拟初始网格模型的获取提供了便捷手段,进一步提高了方法技术的实用化水平。

4 结论

1)本文结合电磁法数据处理解释对三维交互建模与网格剖分的应用需求,设计了三维建模与网格剖分方法、流程。该方法为电磁法三维处理解释提供了建模和网格剖分手段。

2)基于三维建模的方法、流程设计,开发了相应软件模块,可满足多种三维地电模型的建模需求。

3)结合三维矢量多面体模型,设计了开源程序(TetGen)四面体剖分的接口数据获取方式,并开发了四面体和六面体可视化网格剖分软件模块,可为三维正演数值模拟提供初始网格模型。

参考文献:

[1] Coggon J H. Electromagnetic and electrical modeling by the finite method[J].Geophysis,1971,36(1):132-155.

[2] 徐世浙.地球物理中的有限单元法[M].北京:科学出版社,1994,220-241.

[3] 何继善,李帝铨,戴世坤.广域电磁法在湘西北页岩气探测中的应用[J].石油地球物理勘探,2014,49(5):1006-1012.

[4] 殷长春,任秀艳,刘云鹤,等.航空瞬变电磁法对地下典型目标体的探测能力研究[J].地球物理学报,2015,58(9):3370-3379.

[5] 林方丽,王光杰,杨晓勇.综合电磁法在矿区深部成矿机制中的应用研究——以皖南乌溪多金属矿为例[J].地球物理学报,2016,59(11):4323-4337.

[6] 吴小平,刘洋,王威.基于非结构网格的电阻率三维带地形反演[J].地球物理学报,2015,58(8):2706-2717.

[7] Cao M, Tan H D, Wang K P. 3D LBFGS inversion of controlled source extremely low frequency electromagnetic data[J]. Applied Geophysics, 2016, 13(4):689-700.

[8] 李鑫,白登海,闫永利,等.考虑电流型畸变的大地电磁三维反演[J].地球物理学报,2016,59(6):2302-2315.

[9] http://zonge. com/services/explorationists/exploration-geophysical-methods/.

[10] https://www.agiusa.com/products.

[11] http://www.petroseikon.com/resources/index.php.

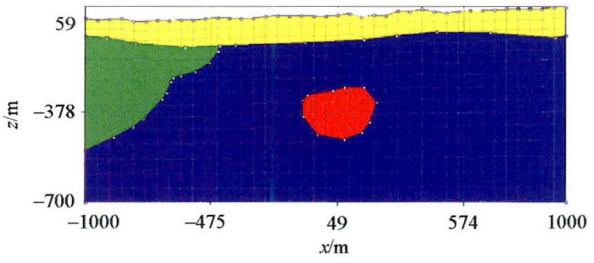
[12] http://softadvice.informer.com/Geosystem_Winglink.html.

[13] 王林飞,雄盛青,何辉,等.非地震地球物理软件发展现状与趋势[J].物探与化探,2011,35(6):837-844.

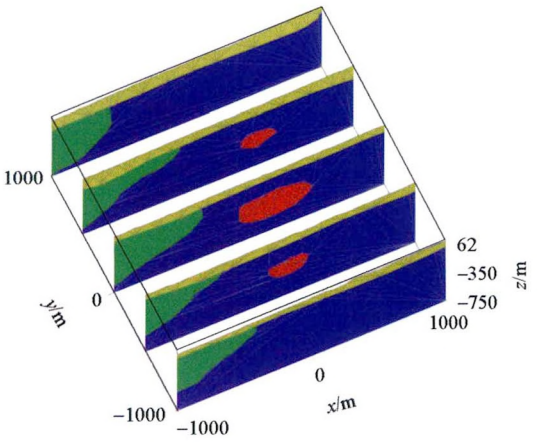
[14] 吴文鹏.电法勘探工作站软件系统简介[J].地质与勘探,2003,39(z1):147-151.

[15] 顾观文,武晔.电法软件设计中交互与可视化技术应用[J].地质与勘探,2004,40(z1):243-246.

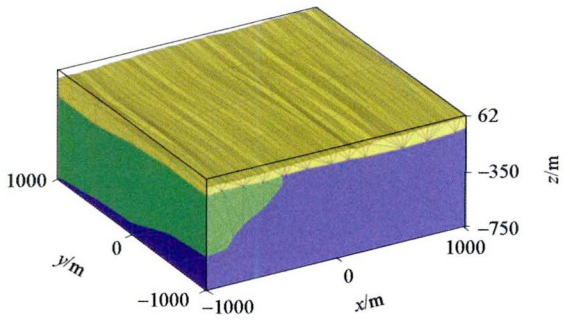
万方数据



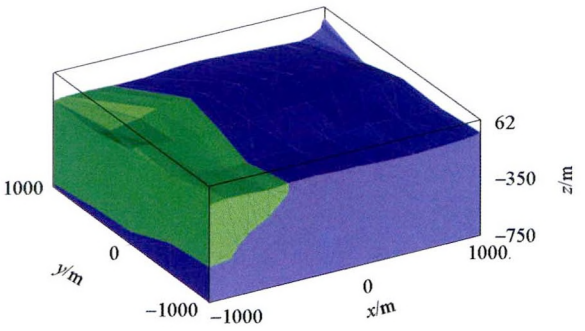
(a) 起伏地形下二维交互建模



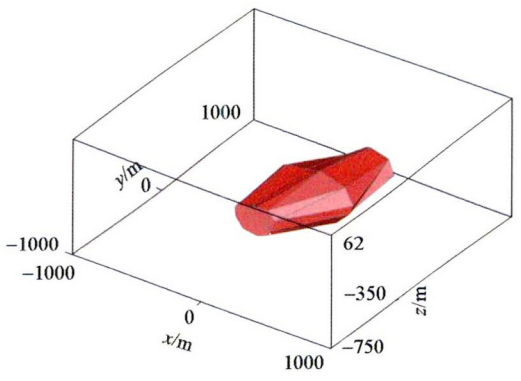
(b) 多个剖面三维空间展布



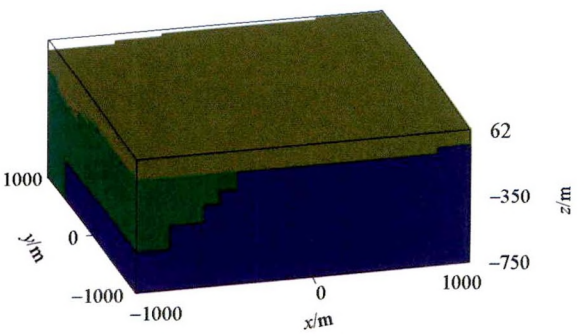
(c) 基于轮廓线连接算法重构三维模型



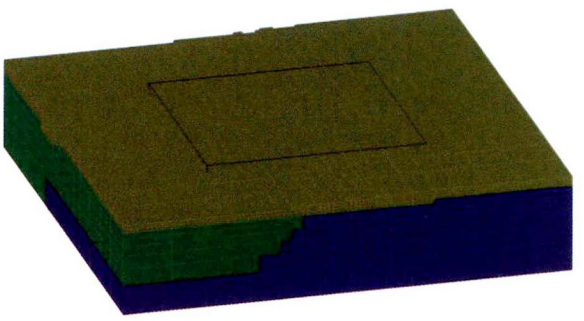
(d) 剥掉覆盖层的三维基岩模型



(e) 三维透镜体



(f) 起伏地形下测区六面体网格模型



(g) 起伏地形下测区、扩展区六面体网格模型

图 9　基于剖面的三维复杂体建模与六面体剖分

万方数据

[16] 何畏,吴文鹏,陈实,等. 基于无向图的二维地质建模设计与应用研究[J]. 物探化探计算技术,2015,37(1):123 - 129.
[17] 何畏,吴文鹏.基于截面轮廓线人机交互三维地质体建模[J]. 物探化探计算技术,2010,32(4):433 - 436.
[18] 朱崇利. 网格剖分对反演影响[J].地球物理学进展,2014,29(2):889 - 894.
[19] 徐能雄,武雄,汪小刚,等. 基于三维地质建模的复杂构造岩体六面体网格剖分方法[J].岩土工程学报,2006,28(8):957 - 961.
[20] 林庚浩, 马天宝, 宁建国. 三维前处理有限差分网格剖分技术的研究[J].计算力学学报,2011,28(s):199 - 203.
[21] HE Wei, WU Wenli. Study on algorithm for grid subdivision and encryption based on technology of three dimensional geological modeling[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,336 - 338: 1416 - 1421.

The method of 3D modeling and grid subdivision for electromagnetic numerical simulation

HE Wei[1,2], WU Wen-Li[1,2], LI Jian-Hua[1,2], LIN Pin-Rong[1,2], LIANG Meng[1,2], GU Guan-Wen[1,2], FENG Bin[1,2]
(1. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang* 065000, *China*; 2. *Laboratory of Geophysical EM Probing Technologies, MLR, Langfang* 065000, *China*)

Abstract: Using some techniques such as computer graphics, human-computer interaction, and topological relation, the authors designed the process about the three-dimensional vector modeling under undulating topography, tetrahedron mesh generation, and hexahedral mesh generation. Through the study, the corresponding software module was developed. In the software, some tetrahedron mesh generation and hexahedral mesh generation utility tools can be provided to solve some related problems in MT. The efficiency of 3D electromagnetic method is improved in such fields as data management, model visualization and interpretation integration.

Key words: MT; three-dimensional modeling; mesh generation; undulating topography; tetrahedron; hexahedron

(本文编辑:沈效群)

万方数据