

# 二维大地电磁正演模拟综述

马驹<sup>1,2</sup>, 王赞<sup>1</sup>, 刘云<sup>1</sup>, 成联正<sup>1,2</sup>, 张川<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

随着经济的发展, 有色金属作为一种重要的物质基础, 是关系到一个国家的战略性资源; 随着浅层地面的资源日益开采, 目前提出了深部找矿的概念, 而大地电磁由于其勘探深度大, 目前在深部找矿中的应用越来越广泛。本文综述了二维大地电磁正演模拟理论, 其方法主要有有限单元法和有限差分法等。

20 世纪 50 年代初苏联学者吉洪诺夫和法国学者卡尼亚分别提出了大地电磁 (MT) 的理论基础, 它是利用大地中频率范围 ( $10^{-4}\sim 10^4\text{Hz}$ ) 广泛分布的天然变化的电磁场来研究地下介质的电性及其分布特征的一种频率域电磁测深法。它具有探测深度大、不受高阻层屏蔽的影响、对低阻层反应灵敏等吸引人的优点, 一直为人们研究关注的热点问题, 主要应用于矿产普查与勘探, 油气资源普查等, 由于其勘探深度大, 在深部找矿中的应用越来越广泛。正演是反演的基础, 但是对于二维、三维问题除了少数及其简单的构造形态外, 一般很难找到其解析解, 这就要求我们必须发展数值模拟的方法。

## 1 有限单元法

国内外学者很早就对大地电磁的数值模拟进行了研究。Coggon (1971) 从能量最小的原理出发, 首先把有限元方法用于电磁场的数值模拟中; Rodi (1976) 采用矩形网格剖分, 以解决二维大地电磁测深正演问题; 紧接着 Wannamaker 等 (1985) 采用了矩形单元中的三角形剖分; 1987 年 Wannamaker 等又提出了直接求解二维大地电磁平行于走向的二次场的有限元算法; 史明娟等 (1997) 讨论了在单元内采用二次函数插值的问题; 熊彬和阮百尧 (2002) 以异常电位为研究基础, 提出了在网格内的电导率采用双线性插值, 电位则用二次函数进行双二次插值的方法; 曾国 (2008) 则对比了双线性插值和双二次插值的有

限元模拟。

Rodi (1976) 利用有限元计算平行于走向方向的场分量, 而垂直于走向方向的场分量则用数值微分计算; De Luga 和 Wannamaker (1996) 利用电磁场的互易性, 加速了 Jacobi 矩阵的计算速度; 马斌等 (2009) 对泛函极值分析得到了类似于有限差分的显示迭代格式。

在一般的有限元二维模拟中, 都假设电性参数是分块均匀的, 叶益信等 (2009) 给出了电导率分块均匀大地电磁二维有限元正演算法; 但是在实际情况中, 电性参数通常是连续的, 徐世浙和于涛 (1995) 提出电导率分块连续变化的二维大地电磁有限元模拟; 刘云和王绪本 (2012) 用有限元法讨论了电性参数分块连续的二维大地电磁响应。

在起伏地形条件下开展 MT 工作时, 地形的影响将会产生电磁场畸变, 有必要研究带地形的 MT 数值模拟。Wannamaker 等 (1986) 提出了基于矩形内三角网格剖分、双线性插值的有限元数值模拟大地电磁测深中的二维地形响应; Chouteau 和 Bouchard (1988) 把有限元法用于二维大地电磁地形改正; Jiracek (1989) 把瑞雷散射理论用于快速傅立叶变换中用于计算二维打电磁包括地形的响应; Yang 等 (1992) 把有限元方法用于研究二维地形的响应, 认为地形的影响随着场源的距离增大而减小; 王绪本等 (1999) 把地形条件下的二维大地电磁响应分解为又地形影响引起的畸变场和稳定场两部分。此外, 朴化荣 (1990)、张翔和胡文宝 (1999)、陈小斌 (2000) 也分析了起伏地形中 MT 视电阻率异常的成因; 赵广茂等 (2008) 提出对对矩形网格的对角线进行二次剖分, 得到这样更容易模拟实际地形。

为了确保二维大地电磁正演的精度, 主场和辅助场的精度同样重要。陈乐寿和孙必俊 (1981)、胡建德和蔡纲 (1984) 认为二次插值可以提高辅助场的计算精度; 杨长福 (1997) 在对比 Rody 提出的 MOM 方法之下给出了三次插值可以提高辅助场的计算精度; 而马为 (2007)

**基金项目:** 大型—超大型低温矿床成矿规律与找矿预测项目 (批准号: 2014CB440905)

**作者简介:** 马驹, 男, 1990 年生, 中国科学院地球化学研究所硕士在读, 从事大地电磁正演模拟. E-mail: maju\_cug08@163.com

则提出了在主场满足线性插值基函数的前提下构建二次插值基函数的方法提高辅助场的计算精度。

在利用有限元进行大地电磁模拟时,其边界条件需要无穷远才能够满足,然而利用有限元正演模拟时一般都是在有限的网格区域上进行的,所以不可避免的产生截断边界,汤井田和薛帅(2013)总结出了适合二维大地电磁有限元模拟的网格边界。

## 2 有限差分法

有限差分法也是一种很常用的数值模拟方法,最开始于上世纪 70 年代用于二维大地电磁模拟中(Jones 和 Price, 1971; Jones 和 Pascoe, 1971)。首先把有限差分法用于二维大地电磁的正演模拟并编制了程序;Swift(1971)用有限差分法讨论了二维大地电磁非均匀介质的响应;此后,交错网格逐渐用于有限差分法中,使得有限差分得到了迅速的发展(Smith 和 Booker, 1991; Wang 和 Hohmann, 1993; Weaver, 1994);Mackie 等(1997)实现了二维大地电磁有限差分法的软

件;Prabhakar 和 Ashok(2006)用 C++编制了计算二维 TM 模式响应的程序;肖骑彬和赵国泽(2010)对大地电磁有限差分数值解进行了对比,认为在计算 2D 响应的时候,为了充分考虑大地电阻率的变化,在构建二次差分方程的时候应该从一次差分方程开始。

## 3 结 语

有限差分法将求解区域划分为规则的网格,计算比较简单,但是因此也严重制约了其在复杂地球物理模型中的应用;但是也由于其计算简单,目前在三维模拟得到了广泛的应用;此外有限差分法正从各向同性介质模拟转向各向异性介质的模拟(Weidelt, 1999; Weiss 和 Newnam, 2003);以及频率域模拟向时间域模拟的转换(Commer 和 Newnam, 2004)。

有限单元法并不一定要求模型被剖分成为规则单元,所以能够模拟复杂介质,目前是数值模拟方法中研究最广泛的,并且正在向矢量有限元(Nan 等, 2007),非结构化网格的自适应有限元转变(Kerry 和 Chester, 2006)。

## 参 考 文 献:

- 刘云,王绪本. 电性参数分块连续变化二维MT有限元数值模拟. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2079-2086.
- 马斌, 褐艳双, 张万江, 王长涛, 郭彤颖. 一种改进的二维大地电磁场有限元数值模拟方法. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2009, 25(6): 1202-1206.
- 肖骑彬, 赵国泽. 大地电磁有限差分数值解对比. 地球物理学报, 2010, 53(3): 622-630.
- Chouteau M, Bouchard K. Two-dimensional terrain correction in magnetotelluric surveys. *Geophysics*, 1988, 53(6): 854-862.
- Coggon J. Electromagnetic and electrical modeling by the finite element method. *Geophysics*, 1971, 36(1): 132-155.
- De Lugaõ P P, Wannamaker P E. Calculating the two-dimensional magnetotelluric Jacobian in finite elements using reciprocity. *Geophysical Journal International*, 1996, 127(3): 806-810.
- Jiracek G, Reddig R, Kojima R. Application of the Rayleigh-FFT technique to magnetotelluric modeling and correction. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1989, 53(3): 365-375.
- Mackier R, Rieven S, Rodi W. User's manual and software documentation two dimensional inversion for magnetotelluric data: MIT Earth Resources Lab. Report, Massachusetts Institute of Technology. 1997, 10.
- Nam M J, Kim H J, Song Y. 3D magnetotelluric modelling including surface topography. *Geophysical Prospecting*, 2007, 55(2): 277-87.
- Prabhakar R K, Ashok B G. EMOD2D—a program in C++ for finite difference modelling of magnetotelluric TM mode responses over 2D earth. *Computers & geosciences*, 2006, 32(9): 1499-1511.
- Swift J R. Theoretical magnetotelluric and Turam response from two-dimensional inhomogeneities. *Geophysics*, 1971, 36(1): 38-52.
- Wannamaker P E, Stodt J A, Rijo L. A stable finite element solution for two-dimensional magnetotelluric modelling. *Geophysical Journal International*, 1987, 88(1): 277-296.