***** *综述* *****

边界元法在地电预报地震中的研究与应用

马钦忠¹, 钱家 k^2

(1. 上海市地震局,上海 200062;2. 中国地震局分析预报中心,北京 100036)

摘要 :在以往地电预报地震研究及电法勘探研究中 ,二维、三维点电源层状横向非均匀介质条件 下的数值模拟方法存在着不少困难问题。利用边界单元法可使得该类二、三维问题中难处理的 问题变得较为简单易行。本文综合分析叙述了边界元法在这类地电断面结构下的理论研究及其 在地电预报地震中的应用情况。探讨了地电学在地震预报研究中的理论及实际应用前景。 关键词 地电法 ;边界元法 ;非均匀介质 ;地震预报

中图分类号 :P315.75⁺2 文献标识码 :A 文章编号 :1000 - 0844(2004)01 - 0018 - 06

0 引言

地电阻率法研究的是地震孕育过程中地球介质电学性质变化,探索这些变化与地震发生的时间、地 点、强度之间的关系,找出其时空演化特征与孕震过程的联系。地电阴率法要求通过地表视电阴率的测量 来了解地下介质内不同部位电阻率随时间变化的情况。在实际工作中,由于地下介质常常是非均匀的,加 之孕震过程中地球介质电学性质变化信号与地下电性结构非均匀性变化等其它非震变化信号往往叠加在 一起 使得识别震前地电阻率异常前兆信号的难度大大增加了。所以研究非均匀介质结构对视电阻率的 影响问题是非常重要的。一般而言讨论非均匀介质是较为困难的 理论上能够处理的只有一些特殊的分 区均匀介质 如水平层状介质[1]、三层倾斜层介质[2]以及半无限空间介质中包含另一种球状介质[3]等比 较规则和简单的情形。因为对于复杂的地电断面问题,例如不规则地形、非均匀介质等问题,很难给出精 确的解析解 所以数值计算方法便成为非常行之有效的手段。目前处理地电断面问题的数值模拟方法主 要有有限元法、有限差分法、边界元法等。由于有限元法的特点是不论对什么问题均在各方向离散,并一 律采用分片低阶多项式插值来逼近各类问题的解函数 这样固然具有通用性强的一面 但又不可避免地带 来自由度多、工作量大的不利一面。因而在这些数值模拟方法中,对地电阻率法中无限区域边值问题而 言 边界单元法已变为良好的数值计算技术。边界单元法应用的发展是由于其所具有的某些优点,如边值 问题维数的减少 模拟区域可扩展到无限域并具有较好的数值精度[4]。我们利用边界单元法这种数值计 算方法对层状介质横向电性不均匀的地电断面模型进行了研究[5~8]。结果表明,对于点电源层状横向非 均匀介质的地电断面而言 边界元法是一种非常有效的数值计算手段。

1 边界元法在地电阻率法中的研究

20 世纪 60 年代以来发展起来的边界元法 特点是只在求解域的边界上剖分单元 ,而不是象有限元法 和有限差分法那样在求解区域内剖分网格。边界元法具有以下优点:

(1)能使问题的维数降低一维,并且单元节点少,输入数据简单,占用内存少,计算速度快;

(2)不仅适合有界区域问题,而且更适合研究无界区域问题,并给有场源和集中载荷作用等问题的处 理带来了极大的方便;

基金项目:中国地震局地震科学联合基金项目(102080)

作者简介:马钦忠(1959-),男(汉族),河南洛阳人 副研究员,现主要从事地震预报工作。

(3)由于权函数是采用精确解的基本解或其它精确解,误差仅来源于边界的离散,如果在边界上采用 高精度单元和高精度数值积分,其精度还可大大提高。

另外,边界元法仅以边界节点上的函数值作为未知量,边界值求出后区域内任一点的函数值均可计 算。在计算过程中测量点的位置改变十分方便。

自从边界单元法被引入到电法勘探领域后就显示了以上的独特优点及其在电法中的良好作用,目前 已解决了电法中的许多正演问题,例如三维位场的延拓,点源三维电场的计算等,所解决的电法问题多为 二、三维的半无限介质中存有异常电性体的地电模型。但实际中地电断面常常是层状起伏介质或是水平 层状介质中含有横向异常体的情形,对于这类问题用常规的边界元法中的基本解就会出现含有无穷远边 界积分的积分方程,给数值计算带来了极大的麻烦。近年来在工作中我们选择了一类基本解及其满足的 边界条件就较好地解决了这类问题。例如在层状横向非均匀介质的地电断面问题中,一个主要问题就是 对向无穷远延伸的水平层状边界面的积分,有几层介质便可有几项水平层状界面的积分,给离散处理带来 非常大的麻烦。我们设法消除了具有这种特点的积分。另外设法通过一定的数学处理手段消去了积分方 程中位场在横向非均匀介质边界上的法向导数值,大大地简化了边界积分方程,使得未知数大为减少。

对于点源二维地电断面问题,首先要用傅立叶变换将根据实际问题而建立的三维边值问题变成二维 边值问题,使问题的维数降低一维,然后根据层状介质的层数来选择相应的满足一定边界条件的权函数 (即基本解);再利用格林公式法建立相应的边界积分方程。例如,对于点电源两层介质下层为起伏介质 或两层水平介质中含有一柱体的地电断面模型、点电源二维三层介质下边两层均为起伏不平的地电断面、 水平层状介质表层存在不规则地形的条件的地电断面等模型,利用上述方法得到降维的边值问题、基本解 满足的控制方程及其满足的边界条件和场论中的二维问题的格林公式,经过数学处理后可推得相应的积 分方程组,方程组中只存在地下异常电性体或以起伏地形为边界的边界积分方程的形式,而向无穷远延伸 的水平层上的边界积分就可成功地被消除。如对点电源二维三层介质下边两层均为起伏不平的地电断 面,边界积分方程组的形式为⁶¹

$$U(p_1) = 2\rho_1 I \varphi(p_1) - 2 \int_{\Gamma_4} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_4}\right) U \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} d\Gamma - \rho_2 \int_{\Gamma_5} \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_5}\right) U \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} d\Gamma$$
(1)

$$\left[\frac{1}{2\rho_4} + \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_4}\right)\frac{\omega_{41}}{4\pi}\right]U(p_4) = \frac{1}{2}I\varphi_1(p_4) - \int_{\Gamma_4}\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_4}\right)U\frac{\partial\varphi_1}{\partial n}d\Gamma - \frac{\rho_2}{\rho_1}\int_{\Gamma_5}\left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_5}\right)U\frac{\partial\varphi_2}{\partial n}d\Gamma$$
(2)

$$\left[\frac{1}{2\rho_5} + \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_5}\frac{\omega_{52}}{4\pi}\right]\frac{\rho_2}{\rho_1}U(p_5) = \frac{1}{2}I\varphi_1(p_5) - \int_{\Gamma_4}\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_4}\right)U\frac{\partial\varphi_1}{\partial n}d\Gamma - \frac{\rho_2}{\rho_1}\int_{\Gamma_5}\left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_5}\right)U\frac{\partial\varphi_2}{\partial n}d\Gamma (3)$$

式中位场在横向异常体边界 Γ_4 、 Γ_5 上的法向导数被成功地消除了,方程组中只含异常体边界的积分项。 在解离散化的积分方程时,对于两层介质而言,离散化的边界积分方程可独立求解,而对三层介质而言,它 必需由(2)(3)两式离散化后联立求解,并解出下面两层起伏边界 Γ_4 、 Γ_5 上各节点的电位谱值,然后将这 些值带入式(1)积分方程的离散方程后就可求得地表上的电位谱值。对这些地表上的电位谱值进行傅氏 反变换后就可求得地表的电位值,进而求出地面上的视电阻率。这大大地方便了数值计算,并可得到较好 的数值模拟结果,在实用中对实际观测资料的变化有着较理想的解释作用,并为地电台址的场地条件选择 提供了良好的理论依据。

地电台站下介质的导电性常呈二维或三维特征。在矿产地球物理勘探中许多勘探对象为导电性不同 于周围介质的三维地质体,并往往存在于水平层状介质之中,于是构成了三维层状介质横向非均匀电性的 问题。对于该类问题用有限元法或有限差分法亦可得到解决,但要求在全空间剖分,占用较多的计算机贮 存空间和花费时间。边界单元法只需要在异常体表面上剖分,模拟有限大小的三维异常体的响应。类似 于二维地电断面模型的基本思路,利用选出的特殊基本解及其满足的边界条件,在理论推导中同样可达到 消去向无穷远延伸的边界积分的目的。最后在方程中同样具有如下特点(1)只存在三维横向不均匀体 表面的二维面积分(2)不存在位场在边界上的法向导数(3)不含水平边界层的二维面积分。

第26卷

从上述可以看出,无论是二维问题还是三维问题,边界积分方程组都具有简单明了的形式,物理意义 也十分清晰,即地表各测量点的场值就等于无异常体时点电源在测量点处所产生的场值和有异常体时异 常体边界积分值的叠加,它表明异常体边界上的电荷分布决定着地表电位分布对均匀水平层状介质电位 分布的畸变。最后的计算结果都展现了层状介质中横向非均匀性对地表视电阻率的复杂影响。

2 应用与计算实例分析

利用边界单元法我们可对不同类型的复杂地电断面结构进行数值模拟分析。

2.1 两层介质非均匀地电断面

图 1、图 2 所示的是两层介质非均匀地电断面二维问题的数值计算曲线。其中图 1a、图 2 是中间梯度 法的视电阻率计算曲线 ;图 1b 是对称四极测深 ρ_s 曲线。由图 1 可看到 ,当矩形起伏体高度越大 ,则曲线对 水平层状介质下相应曲线的畸变也越大。在图 2 中 ,假设覆盖层(第一层介质)中所埋水管比较靠近地 表 , $H_0 = 4$ m ,半径 R = 1 m ,当圆柱管道是高的电阻体时($\rho_s = 300 \Omega \cdot m$)则视电阻率曲线在管道上方 时达到最大值 ,此时曲线相对于均匀二层水平层状介质曲线的畸变达到最大值 ,如图 2(a)所示。而当管 道是低阻体时($\rho_s = 0.5 \Omega \cdot m$)则当视电阻率曲线通过管道上方时达到最小值 ,如图 2(b)所示。



图 1 第二层介质凸起时的视电阻率曲线



2.2 地形起伏对视电阻率的影响

地形起伏变化对观测曲线变化的影响也是不可忽视的。如在地电台站观测环境中,在覆盖沉积层中存在着'V"字形山谷的地形地貌,图3所示的模型反映了在地表所测得的视电阻率值的变化情况。由图3 可见,当ρ₂/ρ₁ = 0.01 时,随着 V字型山谷深度的增加,视电阻率亦呈逐步上升的趋势;而当 h =0 时即 V 字形山谷深度为零时,视电阻率便为二层水平介质时的值。可见起伏变化的地貌条件对地电阻率的观测 是极为不利的。

2.3 多层介质非均匀地电断面

地质沉积层常常呈现出多层的沉积结构,因此对多层结构横向非均匀的地电断面的研究是很有必要 的。图 4、图 5 是对三层介质中下两层为上隆矩形起伏的模型进行的模拟结果。图中显示的是中间梯度 法的视电阻率曲线。供电极距 *AB* 是 1 km,测量极距 *MN* = 20 m。在图 4 中,下伏两层介质都是高阻层,由 于第一层介质中矩形凸起较高,即 b₁ = 90 m,第二层介质中矩形凸起只有 10 m,故视电阻率曲线在矩形凸 起上方相对于三层水平曲线有较大的变化,这种变化主要来自于第一层介质起伏高度。

在地电阻率法中,研究视电阻率随时间的变化是地电预报地震的主要目的。图5是第一层介质中真



图 2 图 2 二层介质中含有水管时的视电阻率计算





Fig. 3 Apparent resistivity calculation for non-horizontal ground surface in the model of two-layered medium.

Fig. 4 Apparent risistivity curves for the

model of three-layered mdeium.

电阻率随时间变化时在地表'观测'到的视电阻率变化的模拟情景。其中第一层介质(覆盖层)起伏高度 为 80 m、ρ₁随时间作正弦变化。看出当覆盖层真电阻率ρ₁以不同的幅度随时间变化时,地表视电阻率曲 线的形态变化差异还是相当大的。在这样的地电观测条件下,不仅地下电性结构的非均匀性对地表视电 阻率有着较大的影响,而且当覆盖层的真电阻率随时间变化时也对地表的视电阻率产生重要影响,这两种 作用叠加在一起共同影响着地表视电阻率的变化。

当下伏的两层介质为低阻时覆盖层中的非均匀性对视电阻率的影响如图 6 所示。其中曲线为测深曲 线 ,当 *b*₁ 值越大时 ,测深曲线的位置也越低。

2.4 三维地质体对视电阻率的影响



图 5 三层介质覆盖层电阻率变化时的视电阻率变化曲线

Fig. 5 Apparent resistivity variation when the resistivity in overburden changes in the model of three - layered medium.

图7为二层结构的下伏基岩中存在一低阻长方体的情况 下,用中间梯度法装置系统下所计算的视电阻率曲线,测线与 地质体较长一边的方向(或称走向)成45°角。曲线①实际上 是两层情形的结果,因而它仍沿供电极A、B联线,以A、B联线 中点为中心对称。从图中可以看到,尽管地质体形状很规则, 但由于测线不通过其对称轴,导致了曲线的不对称。由于低 阻体偏向A极而偏离B极,地质体对测线上靠近A极的一边 的近地表处的电流吸引作用强,因此这些地方的电流密度比 没有异常体时的结果(用 j_0 表示)减小得较多。于是由 $\rho_s = j_{MN}$;, $\rho_{MN}(j_{MN}$ 为存在异常体时测量极M、N之间近地表处的电流

密度),显然视电阻率的最小值出现在靠近A极的某一点,从 而使曲线不对称。根据这一特点可以判断地质体为低阻体及 其倾斜方向。同时对视电阻率观测中出现的一些异常现象也 就有了比较清醒的认识。





这些计算表明,无论介质表面用何种装置系统,本文方法均可求得一条偏离二层、三层水平层状介质 曲线的畸变曲线,也就是反映下层介质向上凸起或水平层状介质含有横向不均匀性所产生的影响。这对 认识地电观测中地震场兆信号的认识是重要的,对排除非震变化的视电阻率异常信号也是很有意义的。

3 在地电学预报地震研究中的意义

在地电阻率法中,研究视电阻率随时间的变化是地电预报地震研究的主要目的。而研究视电阻率随时间的变化可归结为研究不同时间的地电剖面的空间变化,即对地电阻率变化电性剖面的研究。因此本 文所述的对层状介质横向电性不均匀这种较复杂的地电剖面的成功研究,在利用地电预报地震中对研究 较复杂的地电前兆场的变化具有重要的理论意义和实际意义。



图 7 三维二层介质时视电阻率曲线变化图

Fig. 7 Apparent resistivity curves for 3 - D model of two - layered medium.

如上所述,我们对三层起伏介质中第一层介质的真电阻率随时间变化的情形作了一些计算,类似的计算在二层二维介质模型、二层三维介质模型、地表为起伏的介质模型中都可作。这种计算结果表明,地电断面中某个部位上的真电阻率变化与由它产生的地表视电阻率的变化一般都不会相同;并且由于层状介质中横向电性不均匀性的变化,视电阻率的变化也出现了较复杂的情况。因此,地下横向非均匀体的存在及其结构的变化和地下电性结构中真电阻率随时间发生的变化都对地表视电阻率曲线的变化形态影响较大。在我国地电台站测区介质一般具有多层结构,多呈为更复杂的横向不均匀性,而对观测台站的台址条件、台站环境干扰的影响和视电阻率随时间变化的研究都需要对这种复杂的层状介质横向不均匀性作更深入的研究。且由于地电阻率的非震变化是一种与观测场地的下方地电剖面密切相关、局部性很强的变化,因而对这种变化的研究在地电前兆场的研究中也是非常重要的。另外,一般来说反演问题的解决是以正演计算为基础的,以往在进行电测深曲线反演和多极距观测和反演工作中,是以水平层状介质⁹¹和三层倾斜层介质^[10]为模型进行地电观测台址下伏断面形态的反演,而对层状介质中存在横向非均匀体的地电断面进行反演计算,首先就必须解决和完善该类地电断面问题的正演计算。本文所述方法正是适应于这些要求而完成的,因此它对地电学在地震预报研究中更深入的探索具有重要意义,特别是它为机理性深入研究提供了十分有意义的手段。

[参考文献]

- [1] 钱家栋 赵和云 涨文孝.水平层状介质视电阻率的高精度计算公式及其误差分析[J].西北地震学报,1986 & 2):10—19.
- [2] 史磷华. 三层倾斜层的电测深曲线正演计算与解析[J]. 物探与化探, 1986, 10(2):104--113.
- [3] 傅良魁. 电法勘探教程 M]. 北京 地质出版社 ,1983. 142-146.
- [4] Adey R A Niku S M. Comparison between boundary etements and finite etements for CAD of cathodic protection systems
 [C]. Southampton :Mechanics Publication ,1986. 169—298.
- [5] 马钦忠 ,钱家栋. 点源二维起伏界面二层介质边界元解 J]. 物探化探计算技术 ,1992 ,14(1):12---19.
- [6] 钱家栋,马钦忠.点电源二维起伏界面三层介质边界单元法[J],西北地震学报,1992.14(2):3—12.
- [7] 马钦忠, 钱家栋, 赵和云. 起伏地形条件下层状介质的视电阻率计算及其在地电前兆分析中的应用[J]. 西北地震学报, 1993, 15(2): 1—5.
- [8] 毛先进, 钱家栋. 点源两层大地三维地电模型视电阻率边界元解[J]. 西北地震学报, 1994 16(1):1---11.
- [9] 赵和云,钱家栋. 郸县台多极距观测资料的反演和分析[J]. 中国地震,1987(增刊).73—78.
- [10] 史磷华 陈宝华. 三层倾斜电性层模型的电测深曲线反演 J]. 西北地震学报, 1988, 10(1):38—43.

(下转27页)

LIMIT STATES AND TARGET PERFORMANCES OF STRUCTURES IN ASEISMIC DESIGN

LI Ying-bin¹, LIN Yi-yong¹, LIU Yang²

(1. Xi 'an University of Architecture & Technology, Xi 'an 710055;

2. China Academy of Aerospace Building Design and Research, Beijing 100071)

Abstract : Three limit states of structures in earthquake resistance design are described in detail ,and the basic performance levels and target performances of structures are also presented.

Key words :Structure ; Earthquake resistance design ; Limit state ; Target performance ; Performance level

STUDY AND APPLICATION ON THE BOUNDARY ELEMENT METHOD IN THE APPARENT RESISTIVITY FOR EARTHQUAKE PREDICTION

MA Qin-zhong¹, QIAN Jia-dong²

(1. Seismological Bureau of Shanghai , CSB , Shanghai 200062 , China ;

2. Center for Analysis and Prediction, CSB, Beijing 100036, China)

Abstract There were a lot of difficulties in two dimensions and three dimensions numerical simulation of electric field of a point source which contains inhomogeneous body in a layered medium based on the apparent resistivity and electrical prospecting in the past days. Now using the numerical solution of the boundary element method the broblems can be solved simply and easily. In this paper the theoretical study on the boundary element method using in model of 2-D and 3-D inhomogeneous body in a layered medium and the application in the earthquake prediction based on the apparent resistivity are comprelensively recounted and analized. The method will be a solid base for the apparent resistivity using in the research of earthquake prediction.

Key words :Telluric current method ; Boundary element method ; Inhomogeneous medium ; Earthquake prediction