

位场向下延拓的边界单元法

刘保华 焦湘恒 王重德

(青岛海洋大学) (山东省地矿局物探队)

刘保华, 焦湘恒, 王重德: 位场向下延拓的边界单元法, 《石油地球物理勘探》, 25(4)
1990: 495~499

关键词: 重力解释 位场延拓 边界单元法

引言

众所周知, 位场向下延拓可以突出局部异常, 放大某些在低缓异常中不够明显的异常特征, 从而提高了异常解释的可靠性。因此, 它在金属矿勘探和石油勘探中得到了越来越广泛的应用。但是, 由于位场向下延拓的不稳定性, 寻找精确而稳定的算法一直是理论和实际工作中的难题之一。近些年来, 不少学者从事这方面的研究, 提出了一些新的算法或改进措施。侯重初提出了频率域位场逐次向下延拓的方法^[1]; 王延忠、熊光楚讨论了频率域利用组合滤波器实现位场向下延拓^[2], 取得了较好的效果。本文利用边界单元法原理, 把位场向上延拓的泊松积分转化为位场向下延拓的第一类积分方程, 然后求解。模型试算和实际应用结果都表明, 这种方法有着较高的精度和稳定性。

方法原理

设 $\bar{u}(x_0, y_0)$ 为地面 Γ_s 上的位场值, $u(x, y)$ 为下延平面 $\Gamma_E(z = -H)$ 上的位场值。当下延深度 H 小于异常体的最小埋深时, $\bar{u}(x_0, y_0)$ 可用 $u(x, y)$ 的半空间泊松积分表示为

$$\bar{u}(x_0, y_0) = \frac{H}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(x, y) dx dy}{[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + H^2]^{3/2}} \quad (1)$$

当矿体有明显的走向时, 上式化为

$$\bar{u}(x_0) = \frac{H}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u(x) dx}{(x - x_0)^2 + H^2} \quad (2)$$

如图 1 所示, 若用 n 个节点将 Γ_s 和 Γ_E 分成 $n-1$ 个单元, 则式(2)可以分解为每个单元 Γ_e 积分之和

$$\bar{u}_i = \frac{H}{\pi} \sum_{e=1}^{n-1} \int_{\Gamma_e} \frac{u(x) dx}{(x - x_{0i})^2 + H^2} \quad (3)$$

本文于1989年10月23日收到, 修改稿于1990年5月11日收到。

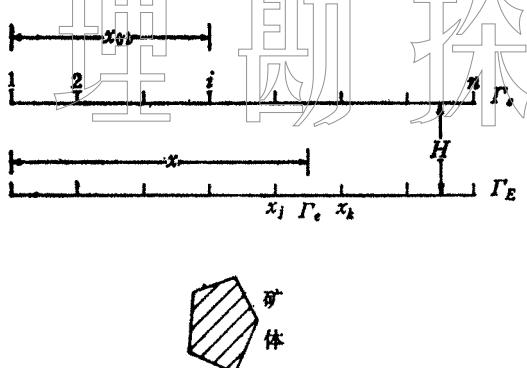


图 1 位场向下延拓的计算模式

其中

$$l_i = \frac{x_k - x}{x_k - x_i} \quad l_k = \frac{x - x_i}{x_k - x_i}$$

单元 Γ_e 上的积分为

$$\begin{aligned} \frac{1}{\pi} \int_{\Gamma_e} \frac{H u(x)}{(x - x_{0i})^2 + H^2} dx &= \frac{1}{\pi} \int_{x_i}^{x_k} [l_i \ l_k] \frac{H dx}{(x - x_{0i})^2 + H^2} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_k \end{Bmatrix} \\ &= [f_{ii} \ f_{ik}] \begin{Bmatrix} u_i \\ u_k \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, f_{ii}, f_{ik} 可由以下积分得出

$$f_{ii} = \frac{1}{\pi} \int_{x_i}^{x_k} \frac{l_i H dx}{(x - x_{0i})^2 + H^2} \quad (6)$$

$$f_{ik} = \frac{1}{\pi} \int_{x_i}^{x_k} \frac{l_k H dx}{(x - x_{0i})^2 + H^2} \quad (7)$$

将式(5)的矩阵扩展成 n 行或 n 列, 有

$$[f_{ii} \ f_{ik}] \begin{Bmatrix} u_i \\ u_k \end{Bmatrix} = [0 \dots f_{ii}, f_{ik} \dots 0] \begin{Bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_k \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (8)$$

然后将各单元积分相加, 得到

$$\sum_{e=1}^{n-1} \frac{1}{\pi} \int_{\Gamma_e} \frac{H u(x)}{(x - x_{0i})^2 + H^2} dx = [F_{i1}, F_{i2}, \dots, F_{in}] \begin{Bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_i \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix} \quad (9)$$

式中, F_{ij} 是第 j 节点两侧单元的 f_{ij} 之和。

由于对地面 Γ_0 上的每个节点都有形如上式的一个方程, 故由 n 个节点写出 n 个方

程, 即

$$\begin{aligned} \bar{u}_1 &= F_{1,1} u_1 + F_{1,2} u_2 + \cdots + F_{1,n} u_n \\ \bar{u}_2 &= F_{2,1} u_1 + F_{2,2} u_2 + \cdots + F_{2,n} u_n \\ &\vdots \\ \bar{u}_n &= F_{n,1} u_1 + F_{n,2} u_2 + \cdots + F_{n,n} u_n \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)写成矩阵形式

$$\bar{\mathbf{U}} = \mathbf{F}\mathbf{U} \quad (11)$$

式中

$$\bar{\mathbf{U}} = \left\{ \begin{array}{c} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \vdots \\ \bar{u}_n \end{array} \right\} \quad (12)$$

$$\mathbf{F} = \left[\begin{array}{cccc} F_{1,1} & F_{1,2} & \cdots & F_{1,n} \\ F_{2,1} & F_{2,2} & \cdots & F_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F_{n,1} & F_{n,2} & \cdots & F_{n,n} \end{array} \right] \quad (13)$$

$$\mathbf{U} = \left\{ \begin{array}{c} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{array} \right\} \quad (14)$$

式(11)中的 $\bar{\mathbf{U}}$ 向量是地面实测的位场值, \mathbf{F} 是 $n \times n$ 阶方阵, 各系数可由式(6)和式(7)计算得出; \mathbf{U} 向量是下延平面 Γ_E 上各节点的位场值, 为待求的 n 个未知数。解此线性方程组, 即可求得延拓平面上的位场值。

算例

为了检验本方法的实用效果, 我们选择了两个理论模型和实测异常作为算例进行下延计算。

理论模型

设有如图2所示的向下无限延伸垂直磁化的直立薄板所产生的异常 Z_e , 其顶面埋深为 H , 观测误差为1%的高斯白噪声。曲线I为磁异常, 曲线II和曲线III为向下延拓 $0.5H$ 后的结果与精确解的对比。由图中可见, 下延结果与理论值吻合得很好。

图3所示为相距 $2H$, 中心埋深为 H , 水平排列的两个圆柱体产生的重力异常(图中曲线I), 及向下延拓的结果。对比图中的曲线II和曲线III可以看出, 除异常两端以外的, 值和理论值基本上是吻合的。

实测异常之一

图4为山东省济南王舍人庄铁矿异常下延3个深度(20m, 40m, 60m)后的结果(曲

物 理 勘 探

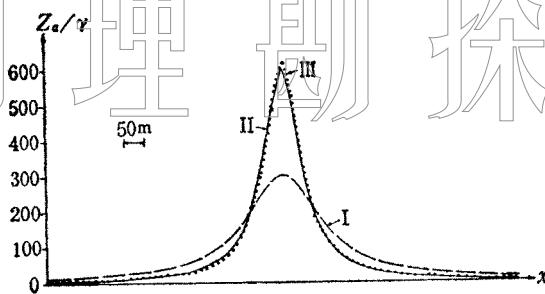


图 2 无限延伸直立薄板 Z_g 异常
向下延拓结果

曲线 I 为地面理论异常值；曲线 II 为 $0.5H$ 深度
上的理论异常值；曲线 III 为下延 $0.5H$ 的结果

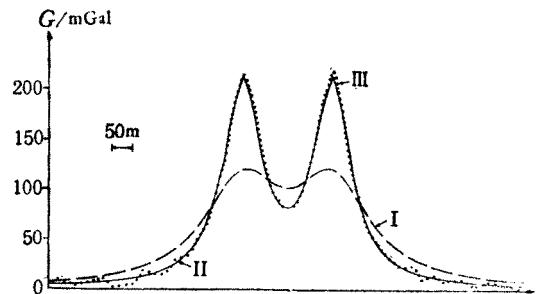


图 3 两个水平排列圆柱体模型向下
延拓的结果

曲线 I 为地面理论异常值；曲线 II 为 $0.5H$ 深度
上的理论异常值；曲线 III 为下延 $0.5H$ 的结果

线 I、曲线 III 和曲线 IV）。由钻井资料可知，引起该异常的矿体为一近于直立的薄板状体，其顶面埋深为 79m 左右。为了验证下延的效果，根据矿体的已知形体和参数进行正演计算，然后与下延结果对比，结果发现 3 个深度上的延拓值同正演值在峰值附近的误差均小于 10%。这说明该下延方法是有效的和实用的。

实测异常之二

图 5 为济南大辛庄矿体异常（曲线 I）及其向下延拓的结果。该异常是由三层平行排列的水平板状矿体所产生的。其最上层顶部埋深为 140m 左右。曲线 I、曲线 III 和曲线 IV 分别为下延 40m、80m 和 120m 后的延拓值。从曲线 IV 可以看出，当下延 120m 时，曲线并没有突然变陡，这主要是由于第二层较大矿体的存在所造成的。下延结果与实际是相符的，这也证明了下延方法的正确性。

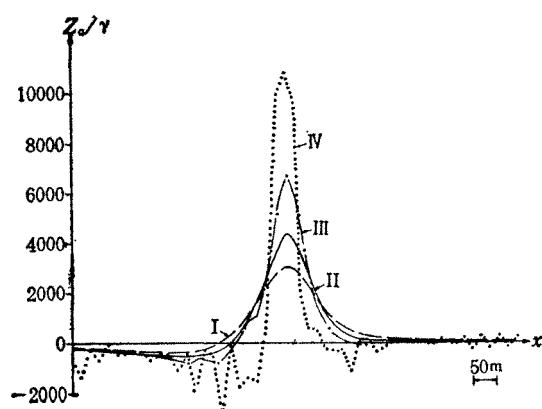


图 4 济南王舍人庄矿体异常
向下延拓结果

曲线 I 为原始观测结果；曲线 II 为下延 20m 的结果；
曲线 III 为下延 40m 的结果；曲线 IV 为下延 60m 的结果

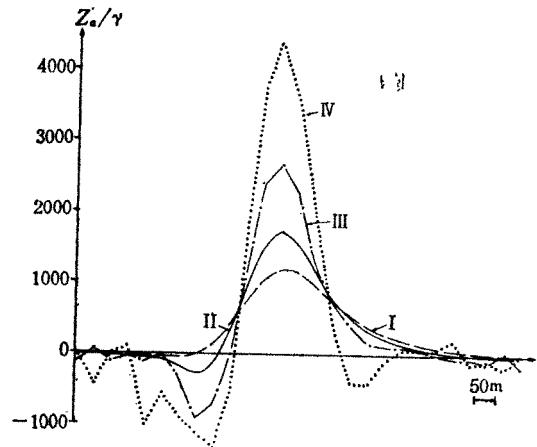


图 5 济南大辛庄矿体异常向下
延拓结果

曲线 I 为原始观测结果；曲线 II 为下延 40m 的结果；
曲线 III 为下延 80m 的结果；曲线 IV 为下延 120m 的结果

物 理 勘 探 结 论

本文提出的位场向下延拓的边界单元法,由于在推导过程中假定了每个单元上位场是线性变化的,所以它比已有方法具有更高的精度和更大的延拓深度。但是,由于下延问题的不适定性,延拓的深度越大,线性方程组的病态条件数也就越大,计算也就越不稳定。实验表明,当下延深度小于2倍的最大采样间隔时,采用一般方法求解方程组,即可得到满意的结果。当上述条件不满足时,采用求解病态方程组的奇异值分解法,也可以得到理想的结果。

文中着重讨论了水平地形和二维的情况。该方法也很容易推广到起状地形和三维的情况,有关这方面的问题将另行讨论。

参 考 文 献

- [1] 侯重初: 位场的频率域向下延拓方法,《物探与化探》,6(1)1982: 33~40
- [2] 王延忠,熊光楚: 位场向下延拓组合滤波器的设计和应用,《地球物理学报》,28(5)1985; 537~543
- [3] Brebbia, C. A. : The boundary element method for engineers, Pentech, London, 1978

“石油地质与地球物理新技术、新方法研讨会”在深圳市召开

由广东省石油学会与江苏省地球物理学会联合召开的“石油地质与地球物理新技术、新方法研讨会”于1990年6月4日~6月9日在深圳召开。会议主席陈斯忠总地质师在开幕词中指出:这次会议在深圳特区召开主要是让各位代表亲身感受一下改革开放政策所结的硕果。改革开放为南海石油勘探和开发带来了大好形势,自1982年与外国公司签订第一个合作合同以来,已经历了三轮招标,签订了42个合同和协议,我们已与13个国家近30家国外石油公司建立合作关系,取得了很好的成效。

这次会议交流了近几年来在地质、地球物理方面所取得的53项最新研究成果。这些成果不仅具有学术上的价值,对南海的油气勘探也有重要指导意义。会议交流的报告涉及到层序地层学、石油流体地质学、开发地震、开发地质学等多学科相互渗透的内容,在珠江口盆地东部、莺歌海及琼东南盆地的油气勘探开发中都有很好的应用效果。

这次会议的一个重要特点就是地质学家、地球物理学家、岩石学家和工程师们的紧密合作。只有多学科专家们的配合和合作,才能充分利用岩芯资料,测井资料、地震资料进行油藏的综合解释,建立地质上的三维模型,有效的指导勘探和开发。

我国的海上油气勘探和开发已进入一个新阶段,勘探前景与所面临的困难并存。这次学术交流会对于开拓思路,明确方向,为在海上找到更多的油气田将会有深远的影响。

本刊记者 陈文菊