Sty YE KIL 维普资讯,http://www.cqvip.com 第35卷 第6期 Vol.35 No.6 GEOLOGY AND PROSPECTING 1999年11月 62 - hh 曲面位场的正则化线性规划法直接反演技术, p 631.2

刘展 王万银 (西安工程学院·西安·710054)

讨论了可用于起伏地形上重磁位场数据直接反演的,正则化的线性规划反演方法,给出了求解模 型、求解方法及相关的技术措施。通过理论模型试算,证明了方法的可行性,在某铜镍矿区的应用验证 了方法的实用性。

关键词 线性规划 正则化 反演 目标函数 约束 位场

对于位场反演,一般有两个途径;一是由观测数 据求取场源体的几何参数(如顶面埋深、体积大小 等),这是一种"非线性反演"方法;二是由观测数据 求取场源体的物性参数(磁化强度或剩余密度),再 根据物性参数的大小和分布确定出场源的性质和地 下分布情况,可称为物性分布反演法。由于观测数 据和物性参数存在着线性泛函关系,故是一种线性 反演方法。物性分布反演可以取得较多地质信息, 不但能确定场源体的地下分布,而且还能确定场源 的性质。

一般实测位场的特点是任意网数据,日不必直 接作网格化处理,并且难以判断场源体的形状。因 此对曲面位场数据反演方法的要求是:1)要适用于 大数据量的三维反演:2)反演时要使用实测任意网 数据,而不必做网格化处理;3)无需判断场源体形 状,并对场源分布无任何要求;4)方法同时适用于重 力和磁力,并满足新一代位场工作精度需要。

1 基本原理

一般位场数据 E_k 与模型(物性分布)m(ω)之 间有如下关系。

 $E_k = \int G_k(\omega) \cdot m(\omega) d\omega \quad (k = 1, 2, \dots, N) (1)$

其中 $G_{i}(\omega)$ 为核函数, Ω 为场源分布区域, N 为观测点数。

对重、磁场源分布反演而言, m(ω)分别具体为 磁化强度 $J(\omega)$ 或剩余密度 $\sigma(\omega)$ 。为解其反问题, 可按图1将观测面以下场源可能存在的空间剖分为 n 个规则的小单元,单元大小以其内物质物性可视 为均匀为条件。得到离散化方程:

$$E_{k} = \sum_{i=1}^{n} G_{ki} \cdot m_{i} \quad (k = 1, 2, \cdots, N) \quad (2)$$

62

$$a_i \leq m_i \leq b_i$$
 $(i = 1, 2, \dots, n)$ (3)

图 1 剖分单元示意图

其中 Gka表示核函数的积分,它实际上是当 mi 为单位值时的 δg_{ki} 或 $\delta \Delta T_{ki}$ 。 b_i 和 a_i 分别为模型的 上、下界。

(2)式具体到重、磁问题,有下列离散方程:

$$\Delta g_{k} = \sum_{i=1}^{n} B_{ik} \sigma_{i} \quad (k = 1, 2, \cdots, N)$$
 (4)

$$\Delta T_k = \sum_{i=1}^n H_{ik} J_i \qquad (k = 1, 2, \cdots, N) \qquad (5)$$

当单元剖分确定之后,核函数 B_{it}, H_{it}均是可以 计算的(刘展等, 1992)。 $\Delta g_{i}, \Delta T_{i}$ 为实测位场值。 通过(4)或(5)式所构成的方程组可求得未知参数 σ; 或Ji。

由于(1)式中核函数 $G_{i}(\omega)$ 常是弱的或光滑的、 故离散化方程(4)、(5)同时具有不相容或者矩阵 $A^{T}A(A)$ 为由核函数积分构成的系数矩阵, A^{T} 为 A 的共轭转置矩阵)条件数很坏两个方面的严重病态 性,用通常的方法一般不能求解或求不出满意的解。 可以证明(刁在筠,1987),对于当 n > N 时的超定方 程(求物性分布时,常是解这种方程)可用线性规划 法求得稳定的唯一解。其相应的线性规划数学模型 为(刘展,等,1992);

本文 1998 年 3 月收到,王延忠编辑。

^{*} 地矿部 011 项目的部分成果

ì

シモシカス

1) max
$$\varphi = \max \sum_{i=1}^{n} C_{i}M_{i}$$

2) $\sum_{i=1}^{n} G_{ki}m_{i} + y_{k} = E_{k} \quad (k = 1, 2, \dots, N)$
3) $a_{i} \leq m_{i} \leq b_{i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$
4) $C_{i} = \sum_{i=1}^{N} G_{ki}$
(6)

其中: φ 称为目标函数; C_i 为价格系数;2)、3) 两式合称为约束条件; b_i 和 a_i 分别为模型的物理约 束上、下限; y_k 为松弛变量;N为观测点数;n为剖 分单元数, $\Pi n > N; m_i$ 为模型,可具体为剩余密度 σ_i 或磁化强度 J_i ; E_k 为观测数据,相应表示重力异 常或磁力异常。

根据 В、И. СТАРОСТЕНКО(1978)等人的研究,可将(6)式改写成稳定性较好的二次泛函的极小问题:

$$f(X) = \| \sum_{i=1}^{n} a_{ki} x_{i} - E_{k} \|^{2} + a[C^{2}X^{2} + \lambda(1 + \| X - X_{0} \|^{2})]$$
(7)
$$x_{i}^{(T)} \leq x_{i} \leq x_{i}^{(L)}$$
(8)

其中:a 为正则参数, 一般由条件 $\psi(a) = \delta^2$ 单值地 确定; δ 为数据误差; λ 为稳定因子; X_0 为解空间的 某一固定元素, 且 $X_0 = (x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})^T$ 。如果问 题(7)、(8)的解单值地确定, 则 X_0 与正规解吻合; 如果问题不是单值的, 则正规解取决于 X_0 的选择, 而且是唯一的; a_{ki} 为核函数 G_{ik} ; E_k 为观测数据; X_i 为模型 m_i ; X 为解向量, 且 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$; C为由价格系数构成的价格系数行向量 $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$; $x_i^{(L)}, x_i^{(T)}$ 分别为解的物理约束上、下限。

对于这个二次规划问题,其解唯一并稳定地存 在。并且当 λ→0 时,问题(7)、(8)趋于原问题(6)的 正规解。

2 正则化线性规划解法及技术措施

2.1 正则化解法的基本思想

问题(7)、(8)的数值解法,有 3 个关键问题:1) 正则化因子最佳值 α_{opt} 的确定;2)稳定因子的最佳 值 λ_{opt} 的确定;3)在固定 α, λ 的情况下,最优解的求 取方法。

对于正则化因子 α 和稳定因子 λ 的选择,以往 的正则化算法大都是通过试算人为给定一个值,这 样做很难确定出合适的最佳正则化因子和稳定因 子。为此,本文采用 THXOHOB - Γласко 拟最佳准则 来确定最佳的正则化因子和稳定因子,而对于固定 的 a,λ 则使用改进的有约束的共轭梯度算法来求 对应的最优解。问题(7)、(8)的数值计算方法包括 3 个相互嵌套的循环;外层循环确定最佳稳定因子 λ_{opt} ;中层循环确定最佳正则化因子 a_{opt} ;内层循环 使用改进的有约束的共轭梯度算法确定最优解。通 过 3 个循环过程、确定出最佳稳定因子 λ_{opt} 和最佳 正则化因子 a_{opt} ,而对应于 a_{opt} , λ_{opt} 的解 X 即为问题 (7)、(8)的解。

2.2 确定最佳正则化因子 α , 的准则

完成了上述内、中、外 3 层循环后,建立了解序 列 ${X_1, X_2, ..., X_p}$,这一解序列由泛函(7)在点集 (8)上的极值组成。这时取固定的 $a = a_p(p=0,1,2,$...)。最佳正则化因子 a_{opt} 取满足下列条件的正则化 因子;

 $\min_{n} \max_{i=1}^{n} \left| x_{i}^{\alpha_{p+1}} - x_{i}^{\alpha_{p}} \right| (i = 1, 2, \cdots, n; p = 1, 2, \cdots, n)$

2.3 最佳稳定因子 λ....的确定

根据解的性质给定一个小的控制参数 ε₂,取满 足下列条件的 λ_τ 作为最佳稳定因子 λ_{αν}:

 $\max \left| x_{i}^{\lambda} - x_{i}^{\lambda} - 1 \right| < \varepsilon_{2} \qquad (i = 1, 2, \cdots, n)$

最后取对应于 α_{opt}, λ_{opt}的解作为问题(6)的解。

2.4 场源分布最小空间 Ω域的确定与剖分原则

1)一般可直接据异常的特征、地质、物探资料大 致确定出场源分布的最小空间。

2)每个剖分单元的物性应均匀,即应满足 h/s > 1(这里 h 是单元中心到观测点的垂直距离, s 是 单元的宽度)。

3)一般采用等网格剖分,也可采用任意网剖分。

4)对于二度体采用矩形棱柱体剖分,对于三度 体采用直立六面体剖分。

2.5 物理约束 x^(上)、x^(下)的确定

根据已知资料获取研究区物性参数的上、下限。 无已知资料时,人为给定一个最大的约束范围。

2.6 磁化方向问题

当磁化方向未知或方向有变化时,可将磁化强度 J_i 分为 J_a、J_y、J_a三个未知数,解模型仍与(6)式相同,只是未知数增加了两倍而已。

2.7 初值的选取

2.7.1 初值 X₀ 及迭代初值 X⁽⁰⁾的选择

模型试算证明, X_0 与 $X^{(0)}$ 可随意选择, 但一般 离真解愈近, 则迭代收敛速度愈快, 反之则愈慢, 不 管怎样, 总能保证收敛。实际中可根据已知信息选 取 X_0 和 $X^{(0)}$, 如取 $X_0 = X^{(L)}$, $X^{(0)} = X^{(L)}$ 或 $X_0 =$

63

t

角山

副移

 $X^{(\top)}, X^{(0)} = X^{(\top)}_{o}$

2.7.2 正则化因子及稳定因子初值和步长的选择

本方法是通过迭代求取最佳正则化因子和稳定 因子,从而求得最佳解。计算者需选定正则化因子 的初值 α。和迭代步长 μ,稳定因子的初值 λ 和迭 代步长 ν。

模型试算结果表明,正则化因子 α 和稳定因子 λ 愈大,反演过程愈稳定,但收敛速度也愈慢。反 之,收敛速度也愈快,但过小会使解过程不稳定。一般对于精度较高的数据,迭代步长 μ 和 ν 取值范围 在 0.01 ~ 0.9;对于精度较低的数据反演,迭代步长 μ 和 ν 在 0.01 ~ 0.4 范围取值为宜。正则化因子初值 α_0 和稳定因子初值 λ_0 的取值,一般无严格要求, 对重力资料反演, α_0 , λ_0 取小于 1 为宜;对于磁资料 反演, α_0 , λ_0 取大于 1 的值为佳。具体的数值使用 者可根据实际情况确定。

2.8 收敛精度的确定

本方法中,分别用 ε₁ 和 ε₂ 来控制内层循环的 收敛和外层循环的收敛。

1)内层循环求解过程的收敛标准 ε₁ 的选择,应
 结合数据精度情况确定,当数据不完整或有误差时,

ε₁ 不宜选得过小, 否则会出现死循环; 过大则会使 解的精度过低。一般 ε₁ 大于3 倍的数据均方误差。

2)外层循环最佳稳定因子求取过程收敛标准 ϵ_2 的选择,应结合解模型的性质及求解的精度要求 来确定。一般对于重力数据反演所求取的密度差 σ_i 不大于1,故取 $\epsilon_2 < 0.1$ 为宜;对于磁数据反演所 求取的磁化强度 J_i 均较大,故 ϵ_2 应大一些,具体可 据磁化强度的大小来确定。

3 模型试验结果

因重、磁数据反演方法原理相同,考虑到篇幅, 故此仅给出两个重力模型试验结果。

3.1 单一模型

图 2 为单一模型的试验结果。根据异常特点, 取 Ω 域范围为: X(70, 130), Y(70, 130), Z(30, 60), 用 10 m × 10 m × 10 m 的网格将 Ω 域分 3 层剖分为 108 个小立方体。反演时取参数: $\varepsilon_1 = 0.1$, $\varepsilon_2 = 0.5$, $\alpha_0 = 6$, $\mu = 0.01$, $\lambda_0 = 6$, $\nu = 0.01$ 。约束取 0.1 × 10³ kg/m³ < $\sigma_i < 1.00 \times 10^3$ kg/m³。由图 2(c)可见,该方法的 反演精度较高。



图2 单一模型试验结果图

(a)一地形等高线平面图;(b)一地形+单一模型(40 m×40 m×20 m立方体、剩余密度 σ_i=1.0×10³kg/m³,中心坐标;100,100,50)
 产生的重力异常平面等值线图;(c)一反演结果分层示意图(密度 σ,单位:10³kg/m³)

3.2 复杂模型

图 3(a)是按岩体成矿模式设计的试验模型及 所用参数。计算区地形见图 3(b),图 3(c)为模型引 起的重力异常。

采用 50 m × 50 m × 100 m 的网格将 X(-150, 150), Y(-150,150), Z(30,230)的区域分成 108 个 单元,对每个单元取约束: $0 < \delta_i < 1.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。 反演参数取: $\varepsilon_1 = 0.01$, $\varepsilon_2 = 0.01$, $\alpha_0 = 12$, $\mu = 0.1$, $\lambda_0 = 12$, $\nu = 0.1$ 。反演结果示于图 3(d)。

由图 3(d)可知,反演结果较好地确定了矿体的 分布位置。只是在第一层第一列单元上,由于实际 矿体只占了单元的一半体积使得反演密度值仅有 0.7左右。

通过模型试验说明,正则化的线性规划算法用 于曲面位场反演,具有稳定、精度高的特点。由于算 法是通过迭代取最佳正则化因子 α_{opt}和最佳稳定因 子λ_{opt},使得该方法总是稳定收敛的。当剖分单元边 界与模型实际边界吻合时,反演精度高;否则精度 低,反演值一般小于实际值。浅部单元的反演精度 高、深部单元的精度低。

本方法可以随意对解加物理约束,并且不会使 解过程复杂化,从而保证了在反演过程中充分利用 已知信息,减小多解性。不足之处在于该算法计算 工作量较大、收敛速度慢。

64



图 3 复杂模型试验结果图

(a)一试验模型及所用参数;(b)一复杂模型地形等高线;(c)一重力异常等值线平面图;(d)一反演结果

4 实例

图 4(a)、(b)和图 4(e)分别为某矿区钻孔综合 剖面、剩余重力异常和地形等高线图。该矿区为以 铜为主的多金属矿区,矿体与围岩的密度差为(0.4 ~1.2)×10³ kg/m³。矿体能产生不到 1×10⁻⁵ m/s² 的重力异常。对比钻井资料及已知的地质矿产资料 知与矿有关的重力异常可分成北带和南带。将测区 下部空间剖分成 6×7×5=210 个(100 m×100 m× 100 m)单元,使用图 4(b)所示的 69 个任意网数据用 本方法进行了反演,反演中对密度的约束取(~1.0 ~1.5)×10³kg/m³。反演结果按 100 m 高程间距分 层显示于图 4(d)。反演结果较好的揭示了南北两 个矿体的形态及贫富情况,与实际情况基本吻合。



图 4 某矿区剩余密度反演结果图 (a)一矿区钻孔综合剖面图;(b)一剩余重力异常等值线图;(c)一地形等高线图; (d)一反演得出的剩余密度等值线图(间距为 0.1 × 10⁹kg/m³)

65

5 结论

通过理论模型和实例计算说明:

1)正则化线性规划法其方法理论正确,软件使 用效果好,稳定性较高,已达到实用程度。

2)通过模型反演比较、曲面直接反演优于平面 反演。 3)本方法可同时适用重力场和磁场反演。

参考文献

- 7在筠,第一类弗雷德霍姆积分方程的线性规划解法,高等学校 数值计算数学学报,1987,(4)
- 2 刘 展,等,利用线性规划法求重、磁场源分布、物探化探计算技术,1992.(4)
- 3 曾华霖,等,重磁勘探反演问题,石油工业出版社,1991

A METHOD OF REGULARIZED LINEAR PROGRAMMING APPLYING TO DIRECTLY INVERSION OF POTENTIAL FIELDS ON A CURVED SURFACE

Liu Zhan, Wang Wanyin

A mothod of regularized programming for directly inversion of gravity and magnetic fields on curved surface is discussed. Mean while, the model equation, solving process and relevant technical scheme are also presented. According to the results of a lot of theoretical modelling, the feasibility of the mothod can be testified. Last, the application in a mining area of nickel - copper shows the mothod can be used to inversion of practical field data, especial on curved surface.

Key words linear programming, regularized, inversion objective function, constraints, potential field

第一作者简介



刘 展 男,1957年生。1982年毕业于成都理工学院物探系、1988年在西安工程学院获硕士学位、现 任西安工程学院信电系副教授,在职攻读工程地质博士学位。主要从事地球物理及工程地质学的科研和教 学工作。

通讯地址:陕西省西安市 西安工程学院信电系 邮政编码;710054

(上接第61页)

3)通过对土壤异常的推断解释,认为①、②号金 异常带的局部地段虽已发现一些够品位的矿体,但 这些已够工业品位的矿体可能是一些小矿脉,其主 矿体应是盲矿体。通过与夹皮沟金矿田的三道岔金 矿床地球化学异常模式的比较研究,推测新立屯工 区异常地段的盲矿体的埋深应在距地表 100 m~200 m之间,并预计钻孔在 150 m~200 m 孔段,可打到主 矿体的中上部分。

参考文献

 孟繁文,吉林省夹皮沟金矿田水系沉积物地球化学异常特征,吉 林地质科技情报,1990(3):12~17

GEOCHEMICAL EVALUATION ON GOLD ANOMALY OF THE XINLITUN AREA IN THE JIAPIGOU METALLOGENIC BELT, JILIN

Cheng Hangxin, Su Wenli, Li Yinggui, Shi Changyi

The soil survey was carried out in the Xinhtun area to trace and evaluate the Au anomaly of the 1:50000 stream sediment survey. The three anomaly belts of Au, Ag, Sb, F, Pb and Sn were delineated. The geological investigation and trenching engineering indicate that the three anomaly belts correspond to the two gold mineralization belts. The gold orebodies have been found. These anomalies are the reflects of concealed gold orebodies which are 100 to 200 m deep. The upper and nuddle part of the gold orebodies are expected to be intersected by drills at depth of 150 m to 200 m.

Key words gold anomaly, geochemical evaluation, Xihntun

第一作者简介.



成杭新 男,1964年生。1987年毕业于长春地质学院岩化系找矿地球化学专业,1994年在地质矿产部 地球物理地球化学研究所获应用地球化学硕士学位。现为国土资源部地球物理地球化学勘查研究所高级 工程师。主要从事地球化学勘查科研工作。

通讯地址;河北省廊坊市金光道 84 号 国土资源部地球物理地球化学勘查研究所化探方法室 邮政 编码:065000