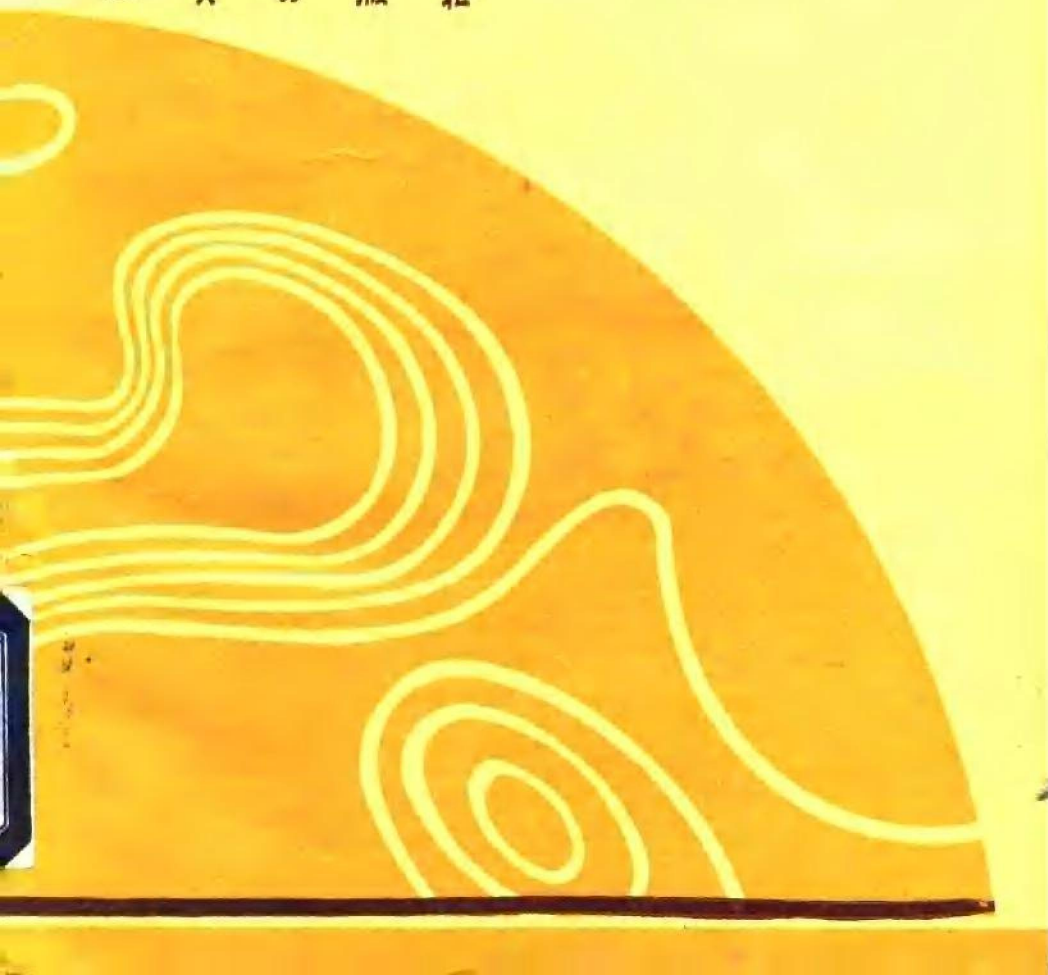


区域地球物理调查及其 定量分析方法

[苏] В·И·戈尔德什密特 著

地 质 出 版 社



区域地球物理调查及其 定量分析方法

〔苏〕B. И. 戈尔德什密特 著

姜枚 向源富 王秀琨 译

陈秀英 校

地质出版社

内 容 提 要

本书介绍定量解释的方法,即场结构的定量分析及其转换,利用迭代方法模拟地质介质,以及符合客观实际情况的多维地质地球物理问题的形式-内容的解。还阐述了利用地震、重力、航空磁测和电法勘探以及地热方法对哈萨克斯坦岩石圈深部构造的研究结果;这些方法的综合分析使得有可能查明地壳深部构造、地壳密度不均匀性和均衡状态,研究壳内的分异作用。

本书列举了用形式和内容方法,根据深部地质和地球物理综合参数,对哈萨克斯坦境内深部构造和成矿进行分区所得的地质地球物理资料的分析结果,提供了该区大地构造体系的综合地质地球物理特征和成矿特征。

本书适于具有区域调查经验和在地质学及地球物理学中采用数学方法的地质工作者、地球物理工作者、科学工作者和直接从事生产工作的人员使用。

В. И. Гольдшмидт

Региональные Геофизические Исследования
и Методика их Количественного Анализа

Издательство «Недра»

Москва, 1979

区域地球物理调查及其定量分析方法

〔苏〕В. И. 戈尔德什密特 著

姜枚 向源富 王秀琨 译

陈秀英 校

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑:张怀素 曹玉

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·全国新华书店经售

开本: $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ 印张: $7\frac{3}{16}$ 字数: 186,000

1984年5月北京第一版·1984年5月北京第一次印刷

印数: 1—3210 册 定价: 1.45 元

统一书号: 15038·新1020

前 言

目前，地球物理学、构造学、矿床学等，也和地学的其它学科一样，广泛地使用以现代数学工具和电子计算机为基础的定量研究方法，广泛地进行地质地球物理资料的综合解释，地壳深部构造和上地幔、大地构造（包括新的全球构造和板块构造）、矿床成因等问题的研究。区域地球物理调查的主要目的是研究地壳深部构造和上地幔，将深部构造与近地表的地质结构、构造和岩浆作用、地质发展史相对比，以及进行专门的构造地球物理和深部构造的分区。

本书以哈萨克斯坦地区为例，研究区域地球物理资料的解释方法和获得的成果。这个地区的地质与地球物理的研究程度高，并包含现代构造学中所熟知的许多构造单元。至今，哈萨克斯坦地区还有许多有争议的区域构造和矿床成因问题，诸如，巨大断块的空间位置和范围，在地壳发育过程中准纬向区域构造线的作用，俄罗斯地台东南界的位置，乌拉尔构造与火山构造的衔接处，在土尔盖盆地沉积物下面的乌拉尔海西和哈萨克斯坦加里东构造的分界线，以及与地壳深部结构有关的成矿专属性等问题。

应该在解决这些问题的基础上提出地壳构造的现代概念，但是用定性的模拟方法不能充分地获得这种概念，还需要研究定量的分区理论（Косыгин, 1974; Каратаев, 1966; Родионов, 1968; Гольдшмидт, 1973, 1975; Боголепов, 1976）。1964年В. В. 别洛乌索夫说过，在有可能而还没有作过定量方法的地方，应该把这种方法引用到大地构造（和整个地质）研究中去。

在解决上述问题的基础上进行深部地球物理分区（或按地球物理资料进行深部构造分区），进而按各区结构和地质发展史的标志对地壳作出有意义的划分，这些标志反映在内容丰富的许多定量参数中：岩石物理性质、地球物理场、地壳和上地幔的深部分

界面、深成岩浆的区域分布^①等。分析构造分区已有的原则说明，最适合于深部地球物理分区的一组方法是对巨大构造的形状划分和分类，在很大深度上进行地壳调查，以及主要以区域地球物理资料为基础的方法。在区域地球物理场中所反映的地壳发育现阶段状况的结果，不是依据目前典型大地构造分区已确定的某个主褶皱或者已完成的褶皱，而是在测量岩石圈构造的物理场时所存在的一个整体结果，它既刻划出地槽发育阶段，也刻划出褶皱后期构造岩浆活动阶段的最强烈的运动。由此，奠定分区基础的主要概念是很清楚的——如果地壳的断块在发育过程中遭受过强烈的变动，而且在地壳现在的形态上留有痕迹，那么在深部结构中、在分界面上和相应的地球物理场中应该找到反映。因而，为了将区域划分成地块，必须考虑所研究的全部深部参数和地球物理参数的共同变化，并作为多维问题进行研究。在某些情况下，以古老的固结壳划分地块，而不涉及年轻的地质过程，在另一些情况下地块的生成是在古老基底之上叠加了较年轻的构造运动，且被强烈改造。这样的分区是最客观的，因为基本任务是查明近代形成的深部规律，这无论对构造学还是矿床学都是很重要的。

地球物理资料定量解释的基础是把具有普遍性或适合某一地区的一些内容充实的假设进行适当的综合。区域地球物理资料地质解释的经验说明，对于不同的地区，地球物理场的特征和巨大地质构造单元之间的相关关系是不同的，但是具有不同地球物理参数的地区，其地壳的构造圈结构基本上不同。同时，地球物理异常的区域位置、形态、和走向互相关联，并反映出巨大地质构造单元（大断块）的空间位置及其深部结构，而圈定它们的大梯度带相当于这些地区的构造边界（深断裂）。

以分析区域地球物理场和地壳深部界面性状为依据的断裂断块构造的概念是编写本书的基础。

对大量各种形式的地质地球物理信息，对数目众多的因素进

① 以下称地壳和上地幔分界面的产生深度，以及相应层的厚度为深部参数。

行分析的传统方法，不能保证得到最适宜的解，也不能回答地质工作者所面临的复杂问题，而常常导致非唯一的解，导致不同研究者按同样的原始实际资料得出相互矛盾的结论，因此，这些方法不可能进行多种因素的共同分析。这就要以许多一维的解不等价地替换多维的地质问题。

从事区域地球物理调查的专家们在分析大量信息时，遇到多维问题所固有的困难。研究此类问题的定量分析方法，其成效取决于较严格的综合地质地球物理调查，在其余条件相同的情况下可以认为，现代构造学不仅是一门地质科学，而且也是地球物理科学（Белоусов, 1964; Боголепов, 1976）。研究深部结构和分区的最合理的结论，可以通过共同地综合定量计算地质地球物理资料，分区问题的形式化，应用图象识别的概率统计算法和启发式算法来实现统计解理论、离散数学、数理逻辑的方法，以及应用各种解地球物理正反演问题的方法获得。

数学在地质学中的应用，应该建立在合理的形式化的基础上，而形式化的作用首先决定于地质问题形式上和内容上前提的一致。作为地球物理资料的形式-内容分析，可以理解成在第一阶段是应用形式-数学工具解决提出的问题，第二阶段则是对获得的形式上的结果赋予内容上的地质意义。

为了与数学方法运用于地质调查的已知观点相适应（Косыгин, 1969, 1974; Леонов, Шолпо, 1973），本书研究现代静力状态下地球构造的空间分布。

作者非常感谢自己的同事为准备此书所提供的帮助。

目 录

地质地球物理资料的定量解释

第一章 场结构的定量分析及其转换	4
场的定量分析方法和分区	4
场的转换	9
第二章 地质介质的模拟 (解重力勘探的正反问题)	12
选择法 (迭代模拟)	13
用经典的和统计的方法解反问题	24
先验信息的作用	41
初始近似模型的建立	43
第三章 地质地球物理信息多维分析问题的形式确立和 应用的数学工具	45
标志空间的形式分析	45
分区、分类和预测问题的形式确立	50
分区、分类和预测的算法	57

哈萨克斯坦岩石圈深部结构的研究

第四章 哈萨克斯坦的区域地球物理调查	73
深地震调查	73
重力调查	80
航磁测量	86
电法勘探调查	90
地热调查	93
第五章 哈萨克斯坦区域地球物理资料的综合分析	98
重力场、地形起伏与依据地震资料得出的莫霍面 之间关系的研究	98
分析所获的关系及编制莫霍面图	122
地壳深层和上地幔的密度不均匀性	128
壳内分异的研究	133

用于哈萨克斯坦境内深构造分区和成矿区划 的地质地球物理资料分析

第六章 根据深部参数和地球物理参数的综合	
进行地区的形式分区并编制剖面	147
标志空间及其分析	147
地区的形式分区	153
编制地质地球物理剖面略图	159
第七章 哈萨克斯坦主要大地构造单元的内容	
分区和综合地质地球物理特征	167
大断块深部构造的综合地质地球物理特征	174
深部地球物理和大地构造分区略图的统计分析	194
第八章 哈萨克斯坦成矿特征的定量分析	197
标志信息组合的确定及其与成矿的关系	203
成矿预测略图	210
结论	213
参考文献	215

地质地球物理资料的定量解释

非常明显，地球物理调查的成效取决于对观测场解释的客观性和合理性，无论是每种单独的方法还是各种方法的综合，都是这样。本书的主要重点放在对重力场的解释上。这首先是因为重力场的整体特征反映了壳内和更深处的物理性质-几何形状上的不均匀性，其次，是在大区域范围内使用了重力测量。从另一方面，由于重力场定量解释的非唯一性，就必须进行综合解释。只能综合不同性质的物理场，同时考虑先验的地质信息，才可能减少解的非唯一性和提高整个解释的精度和效果。

目前，至少有三种解决综合解释问题的途径：（1）重力勘探和地震勘探，重力勘探与磁法勘探，以及诸如此类资料的共同解释，根据每种单独的方法和根据综合方法使结果逐步地精确；（2）在解释时以一种方法的资料作为被动的（基准的），而另一种方法作为主动的（例如，在分析重力场时的地震勘探资料）；（3）采用图象识别的办法解多维问题的内容-形式的作法。我们采用的是后面两种定量解释地球物理资料的途径，其算法和程序是在现代第二和第三代计算机（明斯克-22和EC-1020）上实现的。

在实际工作中，电子计算机已经可靠地用于解决那些可能带来最大地质和经济效果的地球物理问题。这些问题之一是地球物理场的定量分析，其目的在于尽最大的可能提取地球物理场中所包含的地质信息。作为位场的定量分析不仅要解正反问题，同时还要定量地研究场的结构，异常的内容-形式解释等。

以数学途径为基础的任何问题可以划分为内容和形式逻辑两部分。第一部分包括问题的假设，研究方法的选择和测量结果的解释。第二部分包括研究方法，也就是用于解决问题的工具，此

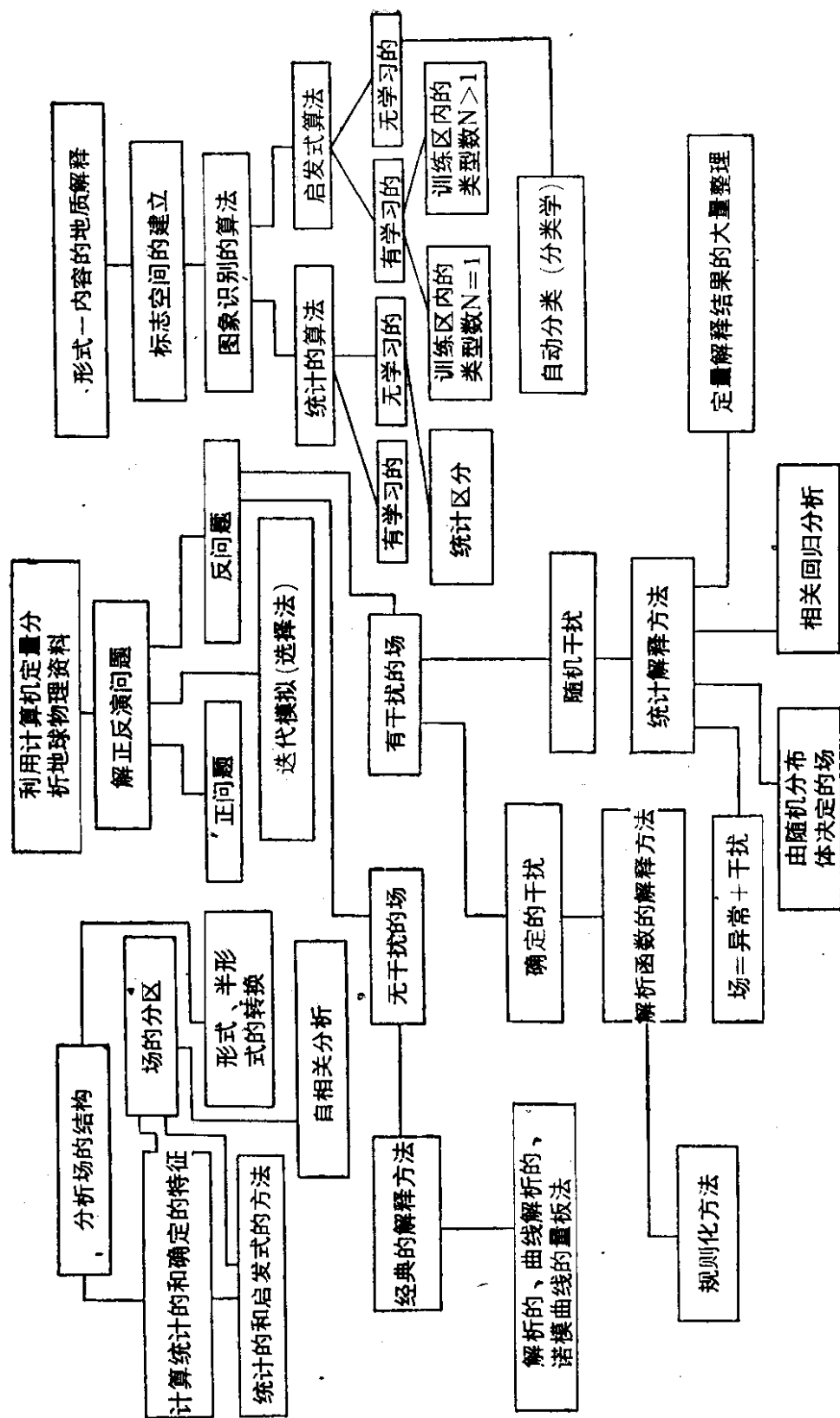


图 1 地质地球物理资料定量解释从属关系示意图

工具按照Г. И. 卡拉达耶夫 (1966, 1973)、В. Н. 斯特拉霍夫 (1970)、К. Е. 韦谢洛夫 (1972)、Н. Г. 别尔梁德 (1974)、В. Н. 戈尔德什密特 (1975) 等人的著作绘于图 1。定量分析包含三个阶段，将一系列程序以外的步骤联系起来。地质地球物理资料分析方法的进一步发展，与实践中利用自动化系统整理和解释资料的程度有关，还与普遍的系统化的作法相适应 (Гольд-шмидт, 1976₂)。

这种作法绝不是轻视人的作用和减轻人对成果的责任。机器应该工作，而人要思考。

第一章 场结构的定量分析及其转换

场的定量分析方法和分区

在解决一些地质问题，特别是区域性问题时，分析地球物理场的初期阶段之一是场的分区。到目前为止，所应用的物理场直观分区的方法，乃是各种主观主义结论的根源。在计算机上用相应的数学工具作形式上的分区，可以较充分地利用地球物理场的信息，并可能将此阶段纳入自动化解释系统。研究场（某些场）分区的客观定量标志和形式方法是特别重要的任务。

目前还没有场结构的定量分析理论。但是，利用现代统计学的和启发式的数学工具，可以成功地把场的直观分析转变到定量的基础上。

用于定量研究场结构的基本统计方法是自相关分析(Андреев, Клушин, 1965; Берлянд, Розе, 1971; Горбунов, 1973)。其应用基础在于把场作为空间座标内的随机函数来表示。只能以一定的概率来预测的值称为随机值。地球物理场的随机特征取决于测量的误差，场的空间关系的复杂性和混乱程度，影响场的多种因素的总和以及一系列其它原因(Гольцман, 1971)。

如果自变量发生任何位移时，随机函数的概率特征不变，即相对于全部点的任意位移不变，则此随机函数是平稳的。这时可得出两种平稳程度的概念：第一种程度——场完全是平稳的；第二种——分片平稳场。

随机函数的基本特征是：

数学期望（沿剖面方案）

$$M_f(x) = M[f(x)]; \quad (1.1)$$

方差

$$D_f(x) = \sigma_f^2(x) = D[f(x)], \quad (1.2)$$

相关的（协变的）或自相关的函数

$$K_f(x, x + \tau) = M\{[f(x) - M_f(x)][f(x + \tau) - M_f(x + \tau)]\} \quad (1.3)$$

通常将其换成标准化的相关函数

$$R_f(x, x + \tau) = \frac{K_f(x, x + \tau)}{\sigma_f(x) \sigma_f(x + \tau)} \quad (1.4)$$

式中 $f(x)$ ——场； σ ——标准偏差； τ ——位移步长。

对平稳的随机函数来说

$$M_f(x) = \text{const}, D_f(x) = \text{const}. \quad (1.5)$$

平稳随机函数最重要的特征是在给定情况下，相关函数仅仅与 τ 值有关。例如，如果随机函数的数学期望是变化的，则当其相关函数只取决于自变量的差异时，此随机函数可用中心化的方法换算成平稳函数。

如果假定，随机函数具有各态遍历的性质，则研究就可大大简化。平稳函数的各态遍历性提供了估算数学期望的可能性，并在一定条件下根据此函数的一个足够长的现实估计相关函数或协变函数。各态遍历性的充分条件之一是：当 $\tau \rightarrow \infty$ 时， $K_f(\tau)$ 趋于零。在利用自相关分析去研究场的结构的初期阶段，某些研究者假定：第一，沿全区场是平稳的；第二，场是由单一相关性的异常组成的。前一个假设自然取消了场的分区问题，而对非平稳场计算的统计特征是虚构的。H. Г. 别尔梁德、B. H. 罗泽曾提出了以计算剖面自相关函数滑动值为基础的场的分区方法。在这种情况下，关于场的平稳性不作任何假定。设：自相关函数 $R(\tau, x)$ 不仅是位移 τ 的函数，同时也是剖面座标 x 的函数（二维问题），并计算了滑动相关函数：

$$R(\tau, x) = \frac{1}{T} \int_x^{x+T} f(x) f(x + \tau) dx. \quad (1.6)$$

其中 T ——计算 $R(\tau, x)$ 的区间长度。

为了预先估计场沿剖面的平稳性，编制了检验多个现实过程中平稳性的程序(Гольдшмидт, Ветренников, 1973)。

面积上的自相关函数和结构函数(Горбунов, 1973)可利用下列公式计算：

$$R(r, s) = \frac{1}{(N-r)(M-s)} \times \sum_{i=1}^{N-r} \sum_{j=1}^{M-s} z(i, j)z(i+r, j+s), \quad (1.7)$$

$$C(r, s) = \frac{1}{(N-r)(M-s)} \times \sum_{i=1}^{N-r} \sum_{j=1}^{M-s} [z(i, j) - z(i+r, j+s)]^2, \quad (1.8)$$

式中 $r, s=0, 1, 2, \dots$; i, j ——沿 x 轴和 y 轴的相关位移区间; N, M ——相当于矩阵行与列的点数。

假设在窗口范围内场为均匀的，计算面积上总的自相关函数和结构函数：

$$R(\rho) = \overline{z_i(\rho)z_j(\rho)}, \quad (1.9)$$

$$C(\rho) = \overline{[z_i(\rho) - z_j(\rho)]^2}, \quad (1.10)$$

式中 ρ —— $R(\rho)$ 按给定距离分组的区间。

总的自相关函数可用下列近似表达式

$$A = e^{-\alpha(\rho)} \cos \beta \rho \quad (1.11)$$

为了进行场的分区，计算了自相关半径和 α, β 值。解决场的分区问题就是把均匀(平稳)区划分出来，在均匀区范围内，统计函数的定量特征实际上保持不变。与随机函数相当的场，其均匀性的基本标志是自相关(结构)函数(或其参数，例如，自相关半径，方差)不变。场平稳性破坏的边界，根据其统计参数的急剧变化来划分。

为了获得自相关函数的最佳参数，要研究选择进行计算时滑动窗口最佳参数值的算法(В. И. Гольдшмидт, Г. Ф. Бере-

ЗОВСКАЯ)。此算法分析场上所有点的值，并评价与费谢尔F准则相比的趋近程度，选择出最佳的窗口值。

还有其它一些确定窗口参数的方法。窗口（临界区间）的大小，例如，可根据所研究系数全部值之间逐次通过一个、二个以及几个区间计算出来的（假定场是遍历性的）自相关系数 r_l 簇（作成相关曲线图）来估计。

场的统计特征在分区结果所划出的平稳区范围内计算。这些特征有数学期望 $M(x)$ 、方差 D 、标准偏差 σ 、对称系数 A 、峰态系数 E 、较高级次矩等的估算值。作为场的统计特征往往利用场参数的平均值，诸如，异常的幅度、横向大小以及一组定量的特征（异常强度、场的最大梯度、异常的不对称性和峰态等）与描述性的标志（极大值、极小值、结点等）（Каратаев, 1966）。

场的确定的表征（Воронин, Нурпеисов, 1968）是利用明斯克22型计算机上实现的程序进行的（В. И. Гольдшмидт, А. Н. Набоков）。为此，引进有限座标系统 xoy ，并研究函数 $f(x, y)$ 及其对 x 和 y 的一次导数： $\varphi(x, y)$ 和 $\psi(x, y)$ 。选择相应地平行于 x 轴和 y 轴的互相垂直的直线系列。沿平行于 x 轴的每条直线 x' ，研究单变量函数 $f(x', y)$ ： $\varphi(x', y)$ 和 $\psi(x', y)$ 。沿每条直线 y' 研究单变量函数 $f(x, y')$ ： $\varphi(x, y')$ 和 $\psi(x, y')$ 。函数 $f(x', y)$ 和 $f(x, y')$ 用平均值、极大值和极小值表征。它们的导数用模数的极大值、极小值和平均值，以及位于单位长度上的零点数目来表征。在所研究的直线上获得的这些特征被平均化。

对于以 $\Delta x_0, \Delta y_0$ 为单元的任意网格，按传统和统计概念的观点有差异的任意两个矩阵 A ，在作确定的表征时也是不同的。同时，还可以找到宽型矩阵，它们按上述确定的方法表征时不同，然而在传统和统计的表征中却没有差别。

按上述步骤得到的多维矢量，其组分具有统计的和确定的特征，所得的多维矢量画在所要表征的面积（矩阵 A ）的中心，并通过分类和图象识别的方法作场（各种场）的分区。

研究位场的另一种方法是位场的谱（频率）分析，这种方法

可以进行场的转换（划分场，换算到上半空间和下半空间，计算垂直和水平方向的任意次导数）解决反问题。我们利用场的频率选择来划分不同大小的异常和构造。为了确定函数 $f(x)$ 的综合谱 $S(\omega)$ ，使用富里叶积分：

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-i\omega x} dx \quad (1.12)$$

当利用贝塞尔函数时， n 阶三角多项式逼近于离散地给出的函数 $f(x)$ ，有公式：

$$f(x) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^p [A_k \cos k\omega x + B_k \sin k\omega x], \quad (1.13)$$

其中富里叶级数的系数

$$\left. \begin{aligned} A_k &= \operatorname{Re} S_k = \frac{2}{n} \sum_{\lambda=1}^n y_{\lambda} \cos k\omega x_{\lambda}; \\ B_k &= \operatorname{Im} S_k = \frac{2}{n} \sum_{\lambda=1}^n y_{\lambda} \sin k\omega x_{\lambda}; \\ A_0 &= \frac{2}{n} \sum_{\lambda=1}^n y_{\lambda} \quad k = (1, p) \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

级数 (1.13) 还可以写成另一形式：

$$f(x) \approx \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^n \eta_k \sin(k\omega x + \varphi_k), \quad (1.15)$$

式中 $\eta_k \sin(k\omega x + \varphi_k)$ ——谐波；谱 η_k 和相位 φ_k 的模按公式

$$\eta_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \quad (1.16)$$

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{A_k}{B_k}$$

确定。

综合谱可以按下式表示

$$S_k = \sqrt{(\operatorname{Im} S_k)^2 + (\operatorname{Re} S_k)^2} \quad (1.17)$$

k ——线性谱的编号； n ——纵座标等距值的数。

根据卡捷里尼科夫定理， p 和 n 之间的关系为

$$p = n/2, \quad (1.18)$$

其中 p ——谐波数。

每个谐波的初始相位按 (1.16) 式计算。

场的转换

为了对物探资料进行地质解释,需借助不同的算法变换观测的重力场,其次是磁场,大部分算法是在计算机上实现的。在进行具体的地球物理调查时,感兴趣的通常是那些事先已推测出深度 H 变化范围、大小和物性的地质构造体。鉴于上述原因,为了划分出有意义的异常,利用某些形式的、半形式的和非形式的方法变换场是可能的和合理的。一般采用全部形式数学方法(平均化、求局部异常或剩余异常、换算到上半空间或下半空间、频率滤波等),目的是改善利于解决该异常问题的信噪比。这个作法相当于从观测场所包含的总信息中提取对解决问题有益的信息。

场的形式转换的最普遍的方法可有条件地分成三组:(1)平均化和空间换算(解析延拓)的方法;(2)计算垂直导数和趋近场的函数的方法;(3)利用不同级次(主要是低级次)多项式逼近函数的方法。

重力场的区域部分一般是将地面观测场延拓到上半空间的几个高度而划分出来。在这种情况下,场的变换归结于计算下面的积分

$$U = \frac{C}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} P(\rho) f(\rho, \alpha) d\rho d\alpha \quad (1.19)$$

其中 $f(\rho, \alpha)$ ——原始场; $P(\rho)$ ——确定转换形式的权函数;
 C ——与转换相应的系数。

为了编制计算机算法和程序,用有限项的和来代替积分,并按公式

$$U = C \sum_{i=0}^a k_i \sum_{j=1}^Q f_{ij}, \quad (1.20)$$