# 第十三篇

# 矿山资源 GIS 评价系统

# 第一章　GIS 地理信息系统概述

## 第一节　GIS 的基本概念

### 一、GIS 发展过程

对表示地球表面各种有用信息空间分布特征数据的观测、收集，一直是人类了解自然社会的主要活动。为了准确、形象地表达观测数据集，地图是表现和描述空间数据集的最有效工具。地质图被认为是地质学家最形象的语言，“一张地质图赛过一本文学报告”这一说法一点也不为过。不过，传统纸介质地质图作为一种信息载体，有其致命的缺陷，即图件的更新能力差，图件叠加综合能力差，不能完全反映空间数据调查所获得的全部信息，特别是描述性的表格报告信息。

计算机技术的飞速发展彻底改变了空间地理信息处理表达方式，使得传统地图变成电子地图。计算机不但能够处理地图、表格数据，而且能够最有效地将空间地理图形数据与其相对应的属性数据融合起来，这就是基于计算机的 GIS 技术。

GIS 理论方法起始于本世纪 60～70 年代，GIS 概念首先由加拿大学者 Tomlison 提出，1962 年由他领导开发了世界上第一个 GIS 系统（GIS——用来管理地块属性的计算机系统）。之后，为了适应人工进行专题图件叠加的需求，以便用计算机辅助完成更高层次决策的需求，70 年代初产生了 SYMAP GIS 软件。70 年代中后期第一个商业化、也是目前世界上使用最多的 GIS 平台诞生了，这标志着 GIS 技术基本走向实际应用阶段了。进入 80 年代，GIS 技术应用得到了空间的发展，一些国家、机构、公司纷纷投巨资进行空

间数据库的建设。美国通过近 20 年的工作，初步完成国家基础地理信息设施的建设工作，完成全国 1/10 万地理底图数字化，完成全国 1/50 万地质图数据库的 80%；制定了空间数据库交换标准。进入 90 年代，随着计算机软硬件价格不断下降，其性能却越来越高，这些促使人们对空间数据库的建设热情更加高涨，主要体现在我们的决策上，大多数都与空间基本范围相关。空间信息就是财富，谁掌握了信息，谁就有竞争力。这就使得 GIS 形成产业化。1997 年美国在空间信息中创造产值近 100 亿美元，美国地调局在跨世纪未来战略中，把集成 GIS 地理空间数据及开发数字产品列为其未来五年之中的主要业务，空间信息系统建设被认为是美国 USGS 未来为公众服务的核心实例条件。

## 二、GIS 定义

GIS 是计算机技术用来进行处理空间地理信息的系统。由于 GIS 是近 30 年来不断涌现的高新技术，同时 GIS 本身又在不断的发展，加之不同领域的专家对 GIS 理解、要求又不一样，例如制图专家主要侧重于 GIS 制图功能的要求上，而决策人员则主要强调 GIS 的空间查询分析上，计算机专家则把 GIS 看作是用于空间数据分析的决策人工智能系统。因此，这就使得 GIS 的定义各有不同，但目前比较为人们所接受的定义有：

(1)能够管理和使用描述地球表面空间位置数据的计算机方法。

(2)一个由计算机硬件、软件、地理信息和信息使用者构成的信息系统，能够采集、管理、分析、模拟和展示空间相关信息。

在上述定义中可见，GIS 的特色是其空间数据库及软件。GIS 与 AutoCAD 等制图软件的区别在于 GIS 不仅能够绘制高质量的图件，更重要的是能够有序地管理各图形实体的描述性数据；与一般的数据库软件区别是，GIS 管理的是空间位置图形数据。GIS 技术是以计算机科学为核心，涉及到地学、制图、遥感等多学科的综合性技术(图 13－1－1)。

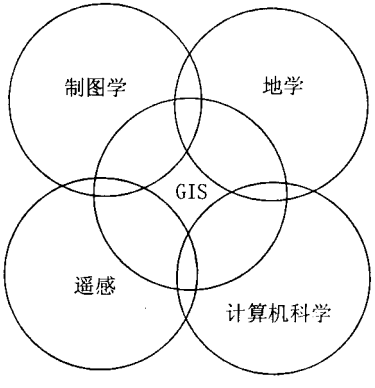



图 13－1－1　GIS 与其他学科的关系

GIS 必须能够回答和辅助解决在空间某一位置有什么，在哪些位置存在我们感兴趣的对象，空间范围对象变化趋势样式及可能发生情况等问题。

## 三、GIS 地理数据模型

### (一)空间数据分类

从地理信息角度来看，地理数据可分为两类，即空间图形数据与非空间图形描述性数据。

1. 空间图形数据

用来表达空间实体对象的几何大小、形状、方向及相对位置，空间图形数据是由各种野外专题调查，或通过遥感解译形成的图形信息构成的。在 GIS 中，空间图形数据是用 x、y 坐标来描述的。根据描述实体几何特性，空间图形数据可分为 3 类：

(1)点：点数据是通过一对坐标来表达空间没有方向的几何实体，通常所说的高程点、城市居民点等都是点空间图形数据的代表。

(2)线：线数据用来表达具有一定长度而没有面积的实体，用一系列坐标对来表达，典型的线状实体如铁路、水系等。

(3)多边形：多边形数据是由一系列相关的线围成的区域，典型特征是具有面积和周长。

2. 非空间图形描述性数据

与空间图形数据相对，非空间图形描述性数据是用来说明空间点、线、面实体是什么，具有哪些内在特性等。表达方式通常有 4 种：

(1)名义性数据。名义性数据又可分为两类：

①二值数据：用来表达某事物的存在或缺乏，也可以表达是否型数据，如某断层是否含金矿，或是否存在地球化学异常等。

②分类型数据：主要用来表达数据的分类，如不同的岩石类型、土地利用状况等。如用数据值 1 表达岩浆岩，2 表达沉积岩，3 表达变质岩，……，1、2、3、……只是一种分类，其数据无任何大小意义。

(2)有序性数据。有序性数据是通过数值有序逻辑大小，表达客观事物自然变化序列状态。如利用 1、2、……、10 对矿物硬度的分级表达便是一种有序性数据，在这里矿物硬度为 9 级的，肯定比矿物硬度为 7 级的抗压能力大。

(3)间隔性数据。间隔性数据是一种连续性测量数据，和有序性数据相比，其值大小是定量的，具有严格的意义。

(4)比率性数据。比率性数据也是一种连续性数据。

在 GIS 的综合分析中，所有的描述性数据都得用上述 4 种类型数据表达。

（二）GIS 数据结构模型

为了更好地表达空间信息及其属性，必须使用一定逻辑规则来表征这些地理数据，数据模型即是计算机或 GIS 系统对现实范围内地理数据的表达，数据结构又是数据模型的核心。最常见的 GIS 数据模型有两种：

1. 栅格数据结构模型

网格单元栅格数据结构模型是一种相对简单的数据表达方式。它是通过固定的网格大小，将研究区离散成许多网格单元，每个网格单元通过与真实实体相匹配的属性值来表达（图 13－1－2），数据表达精度取决于网格大小。

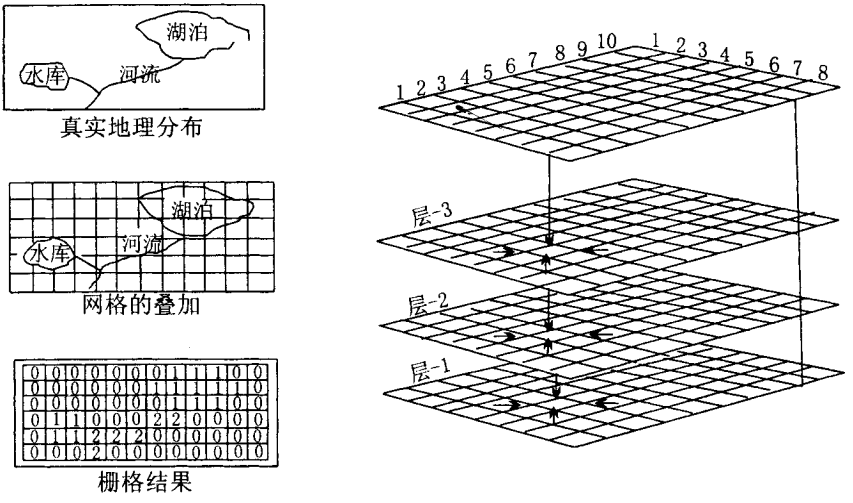



图 13－1－2　GIS 栅格数据结构模型图

2. 地理关系模型

该模型是 GIS 近年来着重发展商业化软件常用的模型，其出发点是将空间实体抽象为点、线、面，并将实体的属性描述与其关联。

矢量数据结构是地理关系模型最常用来表达空间数据的方法。在矢量数据结构中，通过一系列坐标对来表示地理对象。一般地说，点是通过一个坐标对表达，线是通过一系列坐标对表达，而多边形的表达有几种方式，例如，多边形表达可以和线表达一样，通过一系列坐标对表达，但这种表达在存贮上不是最优的，因为两个相邻多边形的公共边界存贮重复。在现代 GIS 中，矢量数据结构使用拓扑结构来表达点、线、面的相互关系，其中矢量坐标对是最基本要素，所有空间实体如点、线、面都可以从矢量坐标对派生出来。点实体与矢量坐标对是‘1 对 1’的关系；线是由一系列矢量坐标对表达的，其关系是“1 对多”的关系；面多边形则是由一系列形成此多边形的线段构成，这样点、线、面这种矢

量相依关系便构成拓扑关系(图 13－1－3)。

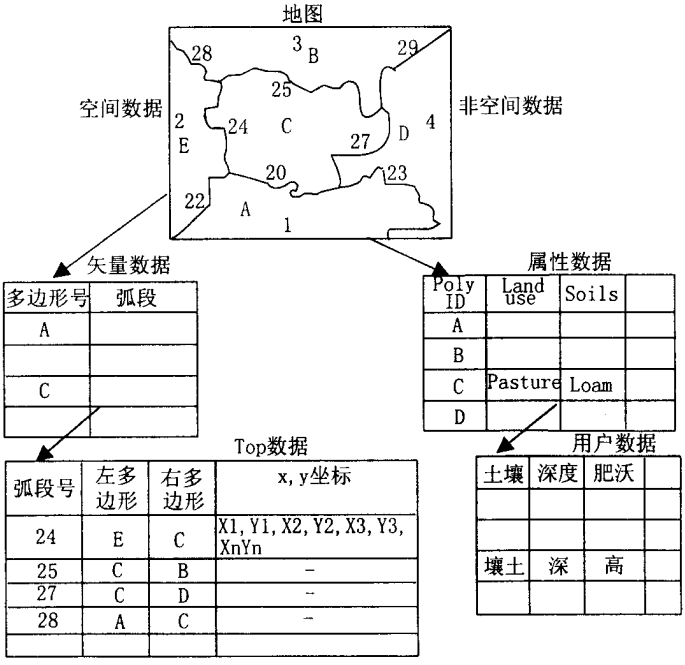



图 13－1－3　GIS 矢量数据结构模型

在地理关系模型中,空间实体属性是单独存在于关系数据表中,实体与属性数据的联结是通过关键词相联的。

关于矢量数据结构与栅格数据结构的优缺点,前人已做了大量的对比。总的来说,矢量数据结构对于表达地质图概念图件有优势,具有精确地表达面积长度及修改编辑等优势;而栅格数据结构对表征遥感、物化探测量数据有优势,具有空间操作简单、效率高等优势,但精度依赖于网格大小,存贮量大等缺陷。

目前大多数 GIS 软件都支持栅格、矢量数据一体化,但各软件仍然以某一种数据结构为主。

## 第二节　空间数据库的建设

空间数据库是指在地球表面某一范围内与空间地理相关的,反映某一主题信息的数据集合。GIS 应用系统功能的好坏,直接与空间数据库的合理组织有关。由于空间数据

都是密切相关的,因此有必要将它们合理地组织起来,以便于快捷、方便地进行空间数据库的查询与分析。

## 一、空间数据库的设计

与传统的合理设计数据库一样,GIS 空间数据库优化设计应满足以下条件:

(1)系统的灵活性;

(2)数据输入与更新的标准化;

(3)系统的有效性检验;

(4)数据安全性;

(5)最小冗余原则。

GIS 系统设计应该首先满足应用的需求,其次应该考虑空间实体的相关关系,以便预先定义其联结关系。GIS 数据库设计包括以下几点:

1. 概念设计

概念设计(CD)表明空间数据库的主题目的及需求。概念设计是独立于 GIS 软硬件环境的,CD 应该包含系统的以下功能:

(1)确定空间数据库的最终使用目的。例如一个地区的‘金矿资源评价 GIS 数据库”与‘煤炭资源评价数据库’显然建库内容侧重点是不同的,建库的目的决定了建库的内容与形式。

(2)建库的比例尺。我们知道,不同比例尺的成矿预测其目标任务是不一样的,例如全省 1/50 万预测只要求预测到矿化级远景区,而 1/20 万、1/5 万预测必须预测到矿床级靶区。显然,要达到相应的预测评价目的,必须使用不同尺度水平的信息资料,这就要求在 GIS 平台上建立相应比例尺的空间数据库。

(3)空间数据库包括的基本内容。根据建库目的,概念设计应对数据库包含的基本内容、专题信息进行总结,确定哪些专题必须通过数字化,哪些专题可通过收集得来,哪些是可以通过原始数据进行中间处理得出导出数据集。

(4)空间数据库的来源。由于研究区的信息往往是由不同的权威调查机构完成的,数据库设计应该明确到哪里能够获取最优的专题信息。

(5)数据时间周期。建库应清楚各专题信息的产生时间,尽量收集时间较新、内容质量高的空间信息。

(6)定义数据库的空间范围。

(7)确定空间框架。确定各专题信息都容易获取的地理位置控制点,以便使空间信

息统一在一定的坐标位置。

2. 逻辑设计

逻辑设计(LD)是 GIS 数据库的逻辑定义,尽管大多数逻辑设计的内容与 GIS 软件平台有关,但这些内容在各个平台的 GIS 上都有涉及,LD 考虑的主要问题有:

(1)数据库的坐标系统。坐标系统决定了 GIS 空间图形数据坐标对的存贮方式。许多 GIS 软件均有一系列坐标系统,所有 GIS 数据库专题信息均应采用统一坐标系统。

(2)叠互式数据结构设计及数据模型。在大多数 GIS 软件平台上,图层一直是非常重要的概念。图层是代表具有相同的拓扑关系和共同的专题属性的空间地理实体的集合。影响图层划分的因素很多,这也使得不同专家对同一数字化底图究竟用多少图层来表达有不同的看法。图层划分的主要技术依据是:①图层中的图元空间几何特征一致,它们组成共同空间拓扑结构,也就是说某一图层通常由单独的点、线、面构成;②同一图层的空间实体反映的是同一专题属性信息,如果某类图元专题属性结构性质与另一类具有相同几何特征的图元类差别太大,它们就不能放在同一图层中去。

(3)定义属性字典,建立空间数据库数据模型。数据库字典是关于属性代码、名称的描述汇总,是空间属性数据唯一标准化的重要保证。一般来说,区域地质图涉及岩石、矿物、地层等多个字典库,正确建立属性与这些字典库的结构关系是区域地质图可用的保证。

(4)定义数据误差。数字化容许误差是数据库质量的重要保证,对于容许误差需考虑三个方面:①坐标位移容许值(CMT)。当进行数字化或进行各种 GIS 运算操作时,可能引起空间数据在形状、大小等方面有一定变形。为了保证数据的可用性,位移容许差是一个比例尺的函数,通常 CMT 以图纸单位容许差为 0.25 mm,在 1/5 万比例尺中就是 12.5mm。②采集间距容许值。该容许值是指在数字化时坐标对最小间距,通常直线可由两个节点来决定 对于曲线,采样太疏,则不能表达其形状,而太密则增加存贮量及人工工作量,因此决定采样间隔允许值通常是靠经验,通常取图上距离 0.25mm。③最小空间图元(MSU)。它决定能够表达的最小多边形区域,如果多边形小于 MSU,则将多边形与忽略合并。

(5)空间数据与属性数据的联结。定义好空间图形数据与表格联结关键词及联结方式。

3. 物理设计

物理设计(PD)主要涉及到计算机 GIS 软硬件环境,着重解决文件组织、存贮等问题。

(1)存贮空间。估计评价所建 GIS 空间数据库大小,决定数据库存贮硬件环境。

(2)运行速度。大部分 GIS 空间数据库都要求较高的运行速度。

(3)运行环境。根据建设 GIS 数据库规模,选择合适的运行环境。

(4)文件数据管理。不同的 GIS 平台对 GIS 空间数据库管理是不同的,如 Arc/Info 采用目录管理方式,MAPGIS 采用点、线、面文件管理,这就需要根据不同 GIS 平台设计好空间数据库文件存贮管理方式。设计文件管理标准化及元数据字典对文件管理十分重要。

(5)数据转换。选择 GIS 平台应该考虑数据库的可转换性,因为市面上各种 GIS 软件繁多,但如果采用的 GIS 平台不具有文件转换功能或转换功能差,当市场 GIS 平台发生重大变化时,往往会造成很大损失。

## 二、空间数据库的建设

基于上述空间数据库的设计,便可以通过图 13－1－4 分别建立各专题数据库了。

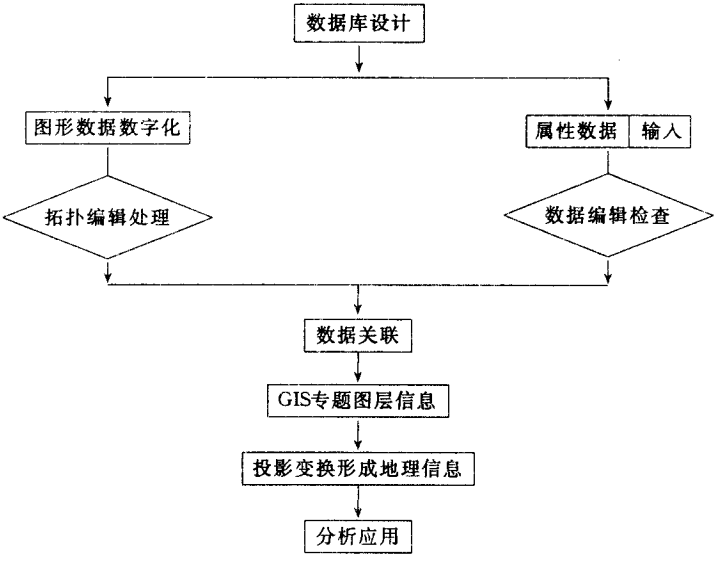



图 13－1－4　空间数据库建设步骤

1. 数据库设计

如前所述,重点要解决图层的划分、属性标准建设、坐标系统、图层、属性信息关联等问题。

2. 空间数据的数字化

对于空间数据的数字化包括如下工作:

(1)选择好的数字化底图,定义数字化工作程序。

(2)创建空间数据库的框架,即确定数据库的控制点和坐标系统;创建主控图层,该图层包括各专题图层公共数字化内容。

(3)扫描矢量化或通过数字化仪进行图件数字化。

(4)对数字化图形进行编辑,修正数字化错误;建立拓扑关系,发现拓扑错误再进行拓扑重建。常见图形错误有悬挂转换、label 点缺失或重复、弧段丢失等,前期数字化工作越仔细,相应地图形编辑工作量就越小。

(5)属性数据表建立与空间数据库的联结。由于大多数 GIS 系统都提供了属性表的联结功能,因此,建立描述性属性库可以采用比较便利的方法。首先通过 GIS 平台软件建立包括图形、面积、周长和图元用户标识号基本属性表,它可以通过图元、属性表双重可视交互编辑生成,然后可以使用其它方便数据库软件如 Foxpro 等建立属性表,最后根据需求将其关联。

(6)空间数据库的集成。通过数字化形成的空间数据库通常是以英寸或毫米纸介质单位存贮的,为了便于空间分析,需要将所有数字化地图、野外直观测量的物化探数据及遥感影像信息统一到一个坐标系统上。我们知道地球表面是一近似椭圆球面,地球空间任何一点都可以用经度、纬度来表示,经、纬度测量是从地心到观测点的角度,纬度表示南北,经度表示东西,0°表示赤道,90°代表北极地区,经度以通过格林威治子午线为起点。但经、纬度是一种地理参考坐标,并不是平面二维坐标系统,这就需要将地球表面的经、纬网格投影到地图平面上,科学的投影方法必须能够保证地球椭球面上的经、纬线与平面上的经、纬网能够互相对应,其坐标投影的数学公式:

$$x = f_1(\alpha, \phi) \qquad y = f_2(\alpha, \phi)$$

式中:$(\alpha, \phi)$为大地经、纬度坐标;$x, y$ 为平面直角坐标。根据一定的投射公式,便可以有不同的投影结果。目前,较通用的投影变换有兰伯特等角圆锥投影、墨卡托等角割圆柱投影、高斯一克立格投影等。一般 GIS 平台都提供了投影变换功能,用户只需选择正确的投影参数即可。

将各专题数据库统一成同一平面坐标系统一般过程是:

(1)确定各专题图层共同的坐标控制点;

(2)编辑控制点坐标,使其为大地经、纬度坐标;

(3)进行控制点的投影变换,形成各专题的坐标变换参考控制点图层;

(4)对各专题信息进行投影转换。

## 三、空间数据标准

标准化问题是 GIS 空间数据库的重要问题,空间数据库的有效采集、管理、交流及共享的前题条件是数据的标准化。数据的标准化将大大有助于决策者、使用用户能够找到自己所希望的数据,并正确使用管理这些数据。标准化问题近年来在一些发达国家得到

了空前重视。90 年代初由美国地调局局长牵头制定了空间数据交换格式标准(SDTS),该标准实质上正在逐步成为一些国家、机构、公司空间信息相关标准制定的标准;1994 年美国地理信息协会(FGDC)制定了空间信息元数据标准计划草案,并在 INTERNET 网上公开发表,它系统地、规范地制定了元数据的内容、目标等;1998 年 USGS 在国家地质图数据库计划(NGMDB)的年度总结报告中着重介绍了国家地质图库的标准化建设;由 NGMDB、AASG、FGDC 共同合作,初步完成了国家地质图相关标准,并完成了国家 1/40 万、1/50 万数字地质图模型,发展了 GEOLEX 标准化系统。

空间数据库的标准化内容一般视建库内容不同而略有不同。美国地调局规定了数字地质图库的标准有:a. 数字制图地质图图示标准;b. 元数据;c. 数字化地质图发布指南标准;小数据采集标准;e. 空间数据精度;f. 数据模型。在这 6 项内容中,图示标准与数据模型又是其研究的重点。国际标准化组织地理信息技术委员会(ISOTC211)就地学信息的标准化提出了 20 条内容(马智民,1999),其中也包括元数据、编码、质量、精度等问题。地质图的数字化标准化问题是一项较复杂的问题,和其它空间概念图件不同的是,地质图是地质学家通过有限的地表附近的观测点,然后根据当时的地质学家的认识所形成的一种概念图件,其中有大量的地质学家的知识,这就决定了地质图数字化标准的难度。主要体现在以下几点:a. 不同时期、不同单位地质填图内容、表达方式差异大,特别是跨省的地质图的拼结十分困难;b. 图示、图例标准不一样;c. 地质单元的编码及分类问题。

为了更好地使数字化地质图发挥更强大的作用,在我国应尽快借鉴先进国家在空间数据库的标准化研究上取得的宝贵经验,特别加强空间地质图的数据模型的研究,以保证空间数据库高效存贮、快捷管理、强力分析。

## 四、GIS 的综合分析

综合(intergration)是 GIS 最强大工具之一,GIS 能够实现不同专题信息、图形信息与属性信息、图形信息与图像信息的最大综合。通过 GIS 的综合,不同领域专家能够回答更加复杂的决策问题。GIS 综合是指空间多参数、多专题信息的联合分析,多参数在资源评价中可以是地质、地球物理、地球化学、遥感异常图,也可以是各种采样测试数据。

GIS 的综合包括如下步骤:

(1)根据决策专业知识,分析综合问题的实质。弄清解决该决策问题需要哪些 GIS 基础数据库。

(2)建立 GIS 综合模型所需要的各种模型导出数据库。基础原始 GIS 数据库往往并

不能直接用于综合分析中,如矿产资源综合评价必须从原始基础信息出发,建立预测标志准则,并将这些标志准则以 GIS 空间数据库形式表达出来。

(3)综合模型建立及综合求解。可以通过一系列空间信息操作或数据模型,产生出综合评价的结果。

(4)对综合结果进行评价解译。

从以上步骤可以看出,在 GIS 综合分析中有两点是至关重要的,第一是确定综合模型的准则;第二是决定各因素的重要性。

1. 综合分析的模型准则

综合标准选择是 GIS 综合成功与否的关键。所谓 GIS 标准准则,是指在相同的比例尺尺度范围内多专题参数信息。这种专题信息既可以是与空间实体相关的属性数据,又可以是空间图形专题数据。在矿产资源评价中,综合评价准则的研究是找矿预测的前提基础;同样,它也是 GIS 综合分析的基础。问题是建立 GIS 综合准则,必须考察根据地质认识建立的找矿模型是否能够通过 GIS 空间数据库表达。在实际中,我们建立的地质模型往往十分精细,但在区域综合评价中却缺乏相应的信息资料。所以建立 GIS 评价准则,首先要建立相应的标志转换模型,将地质综合找矿模型用 GIS 空间数据库表达出来。澳大利亚 Wyborn 等提出从成矿系统出发,建立 GIS 评价准则是一条较成功的经验。在 GIS 综合评价准则建立过程中,可以确定两类不同性质的准则:

(1)矿床存在的确定性条件。在 GIS 中它可以是一系列陈述性表达,它们可以作为评价靶区初选的标志组合。一般来说,确定矿床存在必须满足一定的条件,如夕卡岩矿床必须有夕卡岩建造出现,才能作为靶区。

(2)矿床综合评价的统计性准则。由于成矿作用的复杂性,往往会出现多个标志都存在,但该地区并不存在矿床;或者要确定地区的资源量潜力,这就需要建立相应的 GIS 综合统计标志,通过 GIS 技术建立这些统计标志的属性表。

2. 决定各标志的权重

由于各因素在综合评价中的地位是不一样的,GIS 综合必须确定各评价准则的重要性权重,确定因素准则重要性的方法极多,也是本书研究的重点。它既可以用德尔菲法,利用专家经验确定各因素的重要性,又可以通过神经网络、特征分析、逻辑信息法等数学方法来完成。

GIS 综合对理解现实空间问题的确是有很大帮助的,但指望 GIS 能够解决所有的问题并不现实,数据的综合有时达不到所需的结果,GIS 综合在相当大的程度上仍依赖着专家对空间问题的深入理解及学识水平。

# 第三节　GIS 的软件及发展趋势

## 一、GIS 的软件

由于 GIS 应用受到广泛的重视，各种 GIS 软件平台纷纷涌现，据不完全统计目前有近 500 种。GIS 商业软件由于激烈的商业竞争，各种 GIS 软件厂商在 GIS 功能方面都在不断创新、相互包容。比较明显的例子是大多数著名的商业遥感图像软件都汲取了 GIS 的功能，而一些 GIS 软件如 Arc/Info 也都汲取图像虚拟可视化技术。为了更好地使广大用户对不同平台软件功能进行了解，一些国家机构还专门对各种软件进行测试，如美国图像制图协会对遥感图像处理的几种软件进行测试，我国也多次对优秀国产软件进行测评。总体来说，各种软件各有千秋，互为补充，目前市面上用户使用较多的软件平台有 Arc/Info、Mapinfo、MAPGIS 等软件。

### (一) Arc/Info 软件

Arc/Info 是由美国环境系统研究所开发的，是目前世界上使用最多的商业化软件之一。Arc/Info 是以矢量数据结构为主体的 GIS 系统，它是通过关系数据库管理属性数据。近期又推出了 Arc/Info 扩展模块。Arc/Info 也极大增强了其栅格矢量化 GIS 功能，如 ArcView 空间分析以及图像分析等模块。

Arc/Info 的 GIS 功能齐全，其中以 UNIX/NT 版功能最全，目前 ESRI 公司也试图将工作站中的许多功能移植到 PC 桌面上，其基本功能模块有：

1. ARCEDIT 及 ADS：是工作站及 PC 机上均提供的图件数字化及修改编辑模块。

2. INFO 及 TABLES：对于空间数据库的属性表编辑、更新、管理。

3. 空间分析功能：Arc/Info 提供了空间叠加、缓冲区分析、特征提取、变换、邻域分析等空间基本分析功能。

4. ARCPLOT：完成数字化制图输出。

5. TTN 功能：用来进行地表模型生成、显示、分析的模块，可以根据等高线、高程点，进行三维显示分析。如三维地图晕暄、飞行动画等。

6，GRID：对栅格数据进行输入、编辑、显示、分析等。

7. NETWORK：网络分析模块，广泛应用于交通、城市规划等。

8. ARCSTORM 数据库管理模块，可以管理海量数据，是基于客户/服务器机制设计的。

9. ARCExpress 图形加速模块。

10. CoGo 用来解决一些空间特征的几何关系，如直线相交等。

11. ArcPress 图形输出模块。

12. ArcSDE 是将空间数据与其相关的属性数据统一放到工业标准的关系数据库中进行管理，从而在广域网中提供海量空间数据访问服务。

13. ArcView 是 ARCINFO 公司近年着重推广的桌面 GIS 系统，ArcView 能够使个人方便、快捷管理和分析空间数据，它又通过多个扩展模块如 ArcView Spatcal Analyst、Ar－cView 3D、Image Analyst 等将桌面 GIS 分析能力提高到一个新的高度。

14. ArcFM 公共设施管理系统，主要用于市场设施管理。

15. MapObject 是一组 OLE 控件，为应用开发人员提供 GIS 功能控件。

16. IMS WWW GIS INTERNET 网上 GIS 软件。

**(二) Mapinfo 软件**

是美国 MAPINFO 公司推出的适用于不同平台的 GIS 系统，在 PC 桌面平台上其占有相当大的市场。Mapinfo 是以矢量数据结构为主体的 GIS 平台，对空间数据管理采用无拓扑矢量结构，具有强大的符合工业界数据库标准的管理系统，在城市规划、行政管理等方面得到广泛应用。它的主要优势是在空间数据库管理和分析方面，简单易学、实用，而且桌面制图功能强，但在 GIS 空间分析方面似乎落后于 Arc/Info 软件。Mapinfo 也包括了一系列软件，比较有代表性的有 Mapinfo Professional、MapBasic、Mapx 等。

**(三) Intergraph MGE 软件**

MGE 是实力强大的计算机硬件与软件商 INTERGRAPH 公司的产品，其优势是应用平台是 NT 平台，采用栅格矢量一体化数据结构，其功能模块模拟与 ARCINFO 公司相似，但在图形动态模拟方面有较大的优势。

**(四) GRASS 软件**

是 Unix 系统平台上 GIS 系统，主要采用栅格数据结构，在地下水模拟方面使用很广。

**(五) MAPGIS 软件**

是国产优秀的桌面 GIS 软件，它属于矢量数据结构 GIS 平台，主要优势功能有：

1. 将空间数据数字化输入、编辑、拓扑一体化；

2. 具有强大的制图功能，包括各种专题图例符号的制作较其它软件方便灵活得多；

3. 基本上完成了 GIS 方方面面的分析功能。

但其也有一定局限性,主要体现没有形成空间数据库管理应用为主体的界面,此外在 DEM、DTM 模型与国外软件比较差距较大。

## 二、GIS 发展趋势

GIS 地理信息系统的发展非常快,这主要归结于 GIS 的相关领域计算机软硬件技术的飞速发展。应该说产品 GIS 空间数据库的底层技术已经非常成熟,正如一位权威人士指出:目前 GIS 的最具吸引力的发展是如何将计算机最新技术,诸如计算机网络技术、WWW 技术、3D 可视化技术及虚拟现实技术融入到 GIS 技术中,为用户提供更快捷的 GIS 手段。

### (一)GIS 技术的发展

GIS 技术一个显著的技术发展趋势是 GIS 的 PC 桌面化以及大型海量数据库网络共享。一些 GIS 的厂商正在以极快的速度将以前工作站技术在 PC 桌面机上实现,这在相当程度上加快了 GIS 的应用和普及;另外,诸如 SDE、MIS 等技术的发展已使 GIS 的信息资源得到最大程度的利用。GIS 技术的另一发展趋势是各软件厂商技术与 CAD 技术、与图像处理技术的相互借签与融合。大型 CAD、图像处理系统都纷纷引进 GIS 的技术,而 GIS 技术也充分利用其它相关领域技术。

### (二)面向对象的 GIS

面向对象技术是目前计算机领域最受欢迎的技术,许多 GIS 专家已注意到,通常的利用关键词将空间数据与关系数据表关联,用户使用起来并不直观,而且也造成空间数据库文件数量多、分散、冗余等缺陷。所以追求面向对象的 GIS 系统也是 GIS 技术发展方向之一。同样面向对象的空间数据库建设,如美国地调局在数字地质图数据模型的设计方法也是发展趋势。

### (三)基于 GIS 的辅助决策系统及专家系统

将地学专业知识模型与 GIS 空间分析功能有机结合,形成不同专业的决策系统是 GIS 成功应用的保证。

### (四)GIS 空间数据库的建设

我国在空间数据库建设方面还刚刚起步,与国外先进国家差距大。因此,应该在空间数据库建设有关核心问题,如标准化问题、数据模型问题、元数据问题进行深入研究。

### (五)OpenGIS 技术

通过 OpenGIS 技术达到跨越时空、跨越计算机 GIS 平台空间数据共享和 GIS 操作分析功能用户化。

# 第二章　基于 GIS 矿产资源评价的技术方法

研制基于 GIS 平台上矿产资源评价信息系统，首先必须清楚传统矿产资源评价的需求。另外还需要研究 GIS 能为矿产资源评价做什么？基于 GIS 下的矿产资源评价又会面临着哪些新问题？要解决哪些技术关键问题？这些问题的解决实质上就是 MRAS 系统设计及实现的基础。

## 第一节　基于 GIS 矿产资源评价的需求分析

从前述矿产资源评价发展状况知道，目前矿产资源评价进入了以新的成矿地质理论为指导，全面利用当代地质勘查所获取的地质、地球物理、地球化学、航天航空遥感等信息资料，进行综合成矿分析及评价的新阶段。分析一下目前常用的矿产资源评价一般工作程序，可归纳出矿产资源评价对计算机空间信息技术辅助工具的新要求。

### 一、美国 CUSMAP 矿产资源评价计划典型工作程序

#### (一)密苏里－科罗拉多州 1°×2°矿产资源评价步骤

1. 收集图幅内的地质、矿产、深部岩相构造、地球化学、航磁和布格异常图资料；
2. 确定图幅内有可能存在的矿床类型；
3. 建立这些矿床类型的概念模型和描述性模型；

4. 根据每个描述性模型,得出该类型存在与否的‘找矿标志”;

5. 系统地检验识别标志存在的有用数据;

6. 研究各种标志的区域分布规律及相对重要性,评估整个图幅内不同类型矿床出现概率。

上述六步曲概括起来就是建立预测区资料数据库,根据矿床模型,建立预测标志组合,进行预测靶区圈定。该项目特别强调对矿床模型成矿信息的提取及运用统计方法研究各标志的重要性。

(二)阿拉斯加州纳贝斯 1°×2°斑岩铜矿资源评价

1. 建立地质、地球物理、地球化学、遥感数据库;

2. 运用 GIS 叠加分析功能对地球物理、地球化学、遥感数据进行处理;

3. 建立多变量的找矿模型。模型中包括重力异常、水系沉积物铜铬比值、地层等标志;

4. 进行远景区预测。

与密苏里—科罗拉多州资源评价方法相比,,该预测程序特别强调对地质、地球物理、地球化学、遥感数据本身成矿信息的提取,而不是从研究典型矿床模型出发。P.P.A-gterberg 等在 NOVASCOTIA 金矿带的预测就属此类。

## 二、我国矿产资源评价的工作程序

(一)赵鹏大院士(1983)提出的矿产统计预测工作程序

1. 选择预测对象、预测范围及比例尺。

2. 将研究区划分为基本预测单元。

3. 地质变量的选择,取值及变换。

4. 选择矿床模型控制区,建立找矿定量模型。

5. 综合运用各种有效方法,确定成矿有利远景区。

该工作程序确定了以计算机为手段,研究地质数据的定量方法及定量评价思想。

(二)全国二轮区划采用的综合信息工作程序

1. 建立地质概念模型;

2. 成矿信息提取,编制控矿信息系列图件;

3. 建立综合信息找矿模型;

4. 建立矿产资源评价定量预测模型;

5. 编制成矿预测成果图件;

6. 提出普查找矿工作建议。

该方法体系反映了目前矿产资源评价的最新趋势，即试图有机地将成矿理论、区域成矿规律分析、成矿信息提取、定量预测综合起来。

从上述不同的工作程序可见，矿产资源评价是一项复杂的系统工程。预测成败的关键在于对预测地区的成矿条件、成矿规律的深入认识，而这种认识的飞跃往往是需要多学科、专门地学知识及理论体系，计算机信息处理技术只能是成矿分析的辅助工具。但目前矿产资源评价信息资料越来越多，综合性越来越强，难度也越来越大，这就要求必须广泛地应用以 GIS 为主体的计算机综合处理手段。前述不同的预测程序都表明：目前矿产资源评价需要 GIS 技术，解决的主要问题是信息提取与综合，而这一点恰好是可以用 GIS 技术实现的。因此，这也是本课题研究的主要问题，即：

1. 成矿信息深层次提取

大量的地质、地球物理、地球化学、遥感信息需要进行深层次研究，如何有效地，快捷地区分矿致异常、非矿致异常？如何衡量一个地质作用复杂程度？这就需要在 GIS 平台上构筑相应的信息提取模型。

2. 成矿信息综合集成

以往通行的矿产资源评价方法经常需要将大量综合方法所取得的专门性数据图件，按一定图件叠置进行综合分析；做定量预测时，又将这些图件通过人工数字化，然后进行预测。这一过程存在的问题是：

(1)预测工作周期过长。解决诸如如何从地质图件提取有利成矿层位，如何将既有化探异常又位于岩体接触带的区域确定下来等问题时，需要人工大量清绘各种中间成果，图件的综合靠人工劳动，其返工率、精度都存在问题。

(2)解决预测工作可利用性。由于地质勘查管理是动态化过程，新的找矿信息与地质理论不断出现，必须随时进行新的预测。

## 第二节　GIS 为矿产资源评价系统提供的主要有用功能

GIS 是为广大与空间地理位置相关的空间信息，提供管理和分析的通用性工具。它既可以用于农业、城市规划，又可用于矿产资源评价。其提取工具函数显然是具有一般性、普适性空间综合分析功能。

## 一、多源地学信息的综合管理功能

大量的地质、地球物理、地球化学、遥感勘查信息资料通过数字化进入 GIS 系统，按照 GIS 数据模型，这些空间数据可以长期安全地、有效地、有序地保存管理起来，这就保障了矿产资源评价可以是动态地、经常性地开展工作。用户一旦建立起研究地区勘查评价数据库系统，便可以利用应用模型反复进行资料的评价与分析，而且这种分析时间周期短，过程可用计算机重复，分析过程可视化。GIS 数据库管理功能尽管对开发 MRAS 资源评价分析模型不起作用，但它确实是 GIS 矿产资源评价的基础。

## 二、多源地学信息的空间查询功能

在成矿分析中，我们经常需要回答某含矿地层分布？需要回答区域中某地层单位究竟包含哪些矿床？前一问题涉及空间数据库的条件查询。图 13－2－1 是运用 GIS 条件功能几分钟内便能从中国地质图中将前寒武地层检索成图。而在以前，这种工作都是通过人工劳动，需要耗费几天甚至几十天。回答的第二个问题实质上是 GIS 空间交互查询功能，通过两专题的交互条件，可以方便地完成落入前寒武地层的金矿分布图（图 13－2－2）。该项功能在 MRAS 系统被设计成地质因素标志的查询。

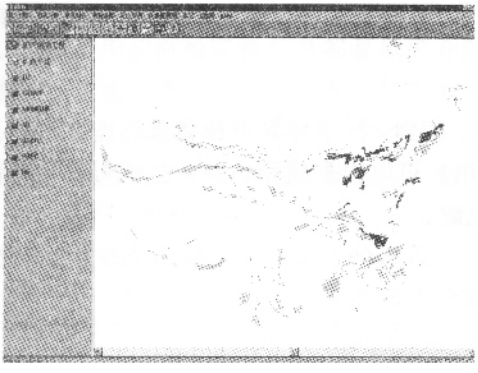


图 13－2－1　从中国地质图查询前寒武地层图

## 三、空间信息叠加分析（overlay）

综合（integration）是 GIS 最突出的功能，也是我们 MRAS 系统使用最多的功能函数。在矿产资源评价中，经常需要解决的问题是，既有有利的地层又有地球化学异常的地区在哪里？或者有 Au 异常出现，但没有大规模岩体出现的区域，GIS 中 Overlay 便能替我们解决上述问题（图 13－2－3）。Qverlay 功能是矿产资源综合评价模型设计的基础。



图 13－2－2　落入前寒武基底金矿分布图

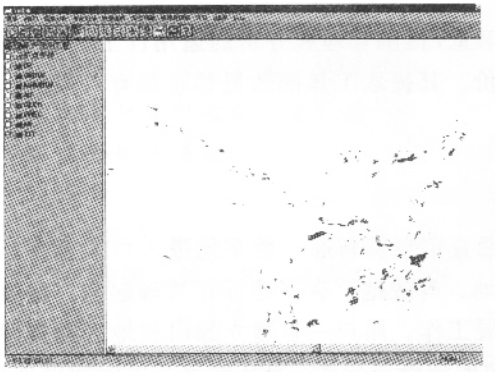


图 13－2－3　化探异常与基底分布叠置结果

## 四、GIS 中 Buffer 缓冲区分析

Buffer 分析在 F.P.Agterberg 进行区域评价中使用得比较广泛，它可以用来分析断层或褶皱轴两侧不同宽度范围的矿化点的分布规律，从而判定矿床与断层、褶皱轴的相关关系及构造控矿最大影响域（图 13－2－4）。

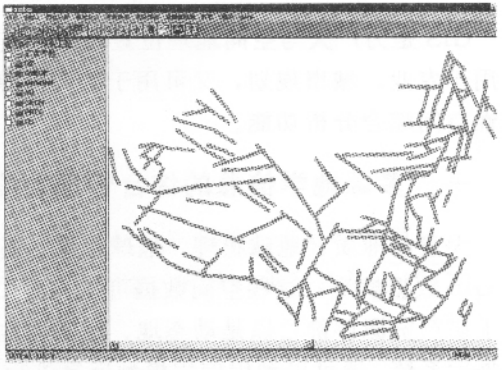


图 13－2－4　某构造线的 Buffer 结果图

### 五、空间实体统计功能

面积、长度测量是 GIS 拓扑分析的基本结果，这对矿产资源评价统计特征的提取极为有用。过去在研究地质复杂程度，例如地质复杂度时，计算熵分析便涉及到单元面积的计算，由于用手工计算大量面积，工作量大，熵分析从理论上讲，并不复杂，但在实际中应用却十分困难。有了 GIS 面积统计功能，再加上多层信息统计迭置，该问题便迎刃而解。

### 六、强大的可视化工具

GIS 的可视化表现在空间数据的可视化修改、编辑，科学计算可视化表达（等值线、图像、三维可视化），科学计算交互可视等方面。用户可以根据模型参数，生成可视化图形。然后根据可视化图形，调整参数，直至得到最优解。

### 七、高质量 CIS 图件

（略）

## 第三节　基于 GIS 矿产资源评价解决的几个关键性问题

### 一、目前急需研制以矢量数据结构为主体的矿产资源 GIS 评价系统

如前所述，GIS 为矿产资源评价提供了一种普适性工具，但如何完成成矿信息提取？如何解决多元综合信息在成矿信息中所占的重要性？这些都表明需要在 GIS 平台上开发矿产资源 GIS 评价系统，这也是目前国际同行近期研究的热点。如 F.P.Agterberg，Bonham－Carter 等在 SPANS 研制了多元信息综合系统；澳大利亚的 Wyborn 等从成矿系统出发，在 Arc/Info 平台上研制区域矿产资源评价 GIS 系统；国内赵鹏大、胡光道教授等也开展了相应的研究工作。前人在 GIS 系统开发中积累的经验和教训是笔可贵的财富，我们应该加以总结和利用，以便我们在今后研制 GIS 矿产资源评价系统时，取长补短，开发出更适用、更精确的矿产资源预测评价系统。

前期开发系统的一些主要问题是，大多数评价模型的开发是在基于栅格数据结构

GIS 平台上，如 F.P.Agterberg 使用的 SPANS。

GIS 软件平台的基本数据结构有两类：

(1)栅格数据结构。这种借助于遥感图像的数据模型结构简单，所有的空间数据通过一定的网格单元表达，可使不同空间信息迭置分析速度快，使用方便。但这种数据模型对表达诸如地质图这些概念图件并不太适合，主要表现在图像数据库的修改更新能力差，数据存贮量大，数据精度依赖网格大小，多层图叠加显示能力差。在栅格数据结构下开发矿产资源评价系统，由于所有的地质、地球物理、地球化学、遥感数据都是网格化的，数据结构简单，开发工作自然容易省力。但由于栅格数据结构表达地质因素先天能力不足，该数据结构已非主体 GIS 软件，在其上开发软件系统的应用前景也不大。

(2)矢量数据结构。矢量数据结构是通过抽象的点、线、面的地学关系数据模型表达空间地理实体。该数据结构表达空间地理实体的面积或长度精度高，储贮量小，数据容易更新，似乎表达了地质概念模型，该数据已成为目前流行软件主流，因此，非常有必要在其上开发相应的资源评价系统。但由于矢量拓扑结构复杂，不同图层数据结构不一样，开发难度自然加大。

## 二、解决基于 GIS 矿产资源定量评价自动化问题

传统的矿产资源定量评价主要是通过定量方法研究各种找矿信息与矿产资源定量关系，评价使用的原始资料信息都是以纸介质或观测数据为载体，如地质图、构造图、化探异常图或化探测量数据，而随着大量的地质、地球物理、地球化学、遥感空间数据库的建设，矿产资源定量评价面临的是全新的信息化载体，GIS 使用的资料载体是高质量、数字化的信息，这种信息载体既可以是直接测量的物、化探数据库，也可以直接是数字化地质图(表 13－2－1)。从某种意义来说，有人认为目前矿产资源定量评价进入信息评价阶段，以区别于以数据为主体的传统矿产资源评价阶段。

表 13－2－1　基于 GIS 矿产资源评价与传统资源评价差异

| | GIS 资源评价方法 | 传统矿产资源评价方法 |
|---|---|---|
| 资料载体 | 数字化空间数据库 | 地质图纸介质、物化探数据 |
| 数据获取 | 通过 GIS 编程可直接获取 | 通过人工取数 |
| 处理对象 | 数据、图形、信息实体 | 必须是定量数据 |
| 处理方法 | 是一面向空间的数据系统 | 统计分析软件包 |
| 成果表达 | 直接是计算机图形信息表达 | 结果是数据，然后人工成图 |

传统的定量评价方法，为了使地质图等概念图信息为数学模型所接受，往往需要人工繁重的取数工作，如通过人工单元划分后，就需要对单元里的大量多元找矿信息进行人工赋值。而对于一些非常有意义的定量方法，如衡量地区地质复杂程度的熵模型及线性构造密度统计等尽管在理论上可行，但实际上由于人工取数工作量太大而难以实现。以数字化多元信息为出发点，GIS 评价对此类问题可以迎刃而解了。研制 GIS 平台上矿产资源定量评价系统首先就得解决数字化介质的变元变量选择、赋值等一系列预测信息转换问题，这一问题的解决也促进了矿产资源定量评价的自动化程度。

以往的资源评价系统，通常是多元（定性数据、定量数据）处理系统，只要按照数据处理系统的文件格式，便可以算出相应的结果，较少考虑程序之间数据流程关系。基于 GIS 矿产资源评价系统不是一些定量方法的简单集合，也就是说，它不是一个定量数值计算程序包，而是从 GIS 空间数据库出发，构筑从成矿信息分析提取、单元划分、变量构置、定位预测、矿产资源定量评价、资源量评价等相互依赖的工程系统。在系统研制过程中，数据流程是一项十分关键的任务。

在 GIS 矿产资源评价过程中，建立多源地学数字化信息与区域矿产资源潜力的关系是一项重要任务。在 GIS 系统中，区域的矿产以点图元信息存贮，主要包括成矿条件、矿床成因等属性因素信息；大多数地质因素，如区域地层、岩浆岩分布是以一定拓扑关系的多边形图元实体存贮的；地球化学、地球物理专题资料在 GIS 中既可以是利用区图元实体表达的综合异常专题图，也可以是原始分析数据或网格化数据（图 13－2－5）。

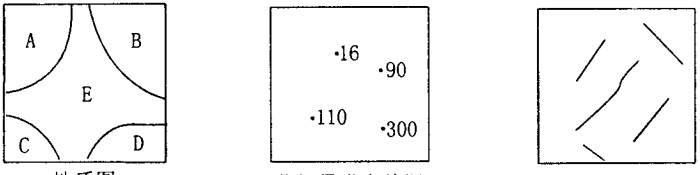



图 13－2－5　GIS 中资源评价信息层

传统的矿床统计预测已建立了一套研究区域矿产与多元找矿信息的关系模型，如矿床模型综合评价法，但在 GIS 系统中，特别是以矢量数据结构为主体的 GIS 平台上，如何将空间不同构型、不同属性的信息统一起来，如何研究各成矿信息重要性，即通常 GIS 中 Intergration 各信息的重要权。本次研究借用矿产统计预测单元划分的思想，打通基于 GIS 图形、数据信息载体的定量预测流程。

# 第三章　MRAS 系统分析与设计

MRAS 系统设计主要根据前述用户需求，研究应用系统的信息数据结构、数据流程、系统主要功能等。

## 第一节　基于 GIS 矿产资源评价的数据库结构及流程

矿产资源 GIS 评价系统研制的基本目的是对地质勘查所积累的地质、地球物理、地球化学、遥感等数字化信息进行综合分析。矿产资源 GIS 评价系统的数据库结构及其流程，显然必须代表通行的矿产资源评价流程。前述已讨论过目前国内外常用的矿产资源评价方法体系，其一般评价过程可表达为图 13－3－1，即为地质、地球物理、地球化学、遥感资料整理，成矿信息提取，数据处理，数据综合，定量预测及成果表达等。相应地，矿产资源 GIS 评价系统其一般的空间数据流程可表达为图 13－3－2。

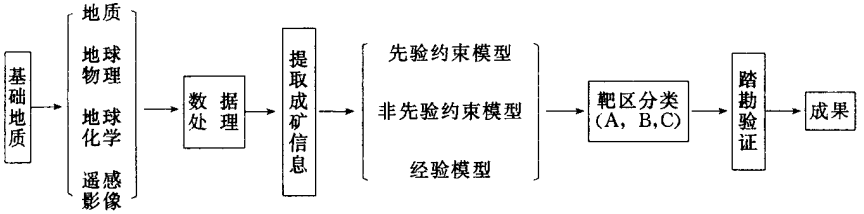



图 13－3－1　矿产资源一般评价过程

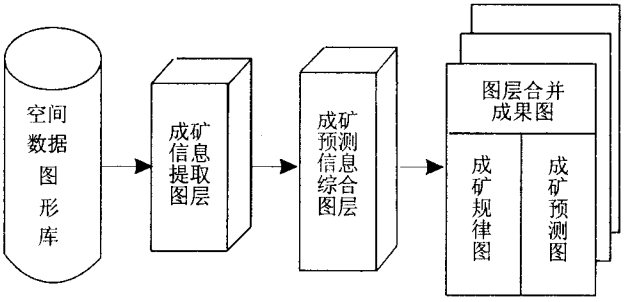



图 13－3－2　MRAS 系统数据库流程

GIS 矿产资源评价空间数据库可以通过图层(Coverage)方便地、有序地进行管理。图 13－3－3 是 GIS 矿产资源评价地质、地球物理、地球化学、遥感空间数据库的概念模型,它采用层状树形结构来管理图层。图层是代表着具有相同特征的地理实体,在一定空间范围的集合,由点、线、面图元构成。具有有机联系的图形,它的几何特性用网络拓扑结构表达 ;而图元实体的属性采用关系数据库表达。它们之间的联系,采用图元用户标识号这一关键技术来实现。关于空间数据库系统设计,通常可分为概念设计、逻辑设计及物理设计等阶段。有关这方面成果非本课题的主要研究内容。关于矿产资源评价系统的数据库,由于研究地区、研究矿种、预测精度、预测资料水平千差万别,这就要求 MRAS 系统必须支持开放性空间数据库。

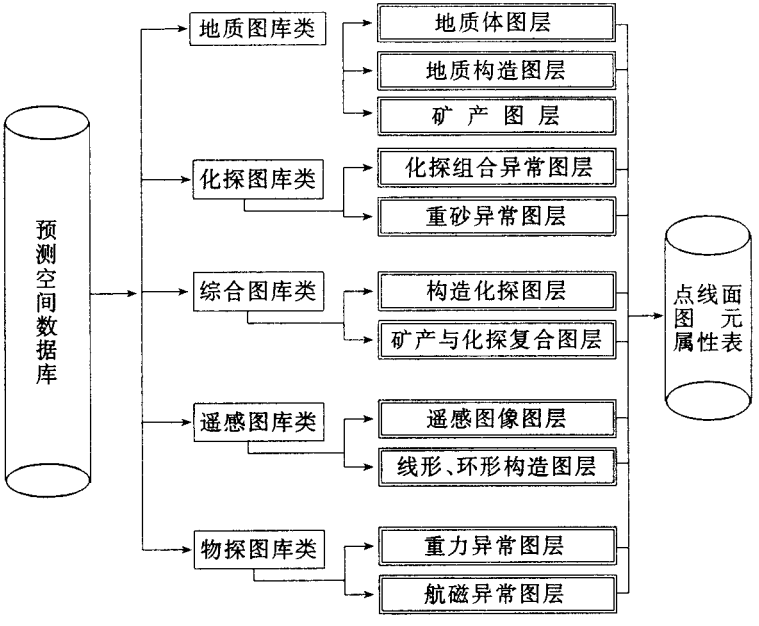



图 13－3－3　MRAS 数据库概念模式图

成矿信息提取图层，是从研究地区的基础空间数据库出发，通过各种专门的成矿信息方法，生成一些中间性图层。如对地球化学数据处理进行累乘累加，形成综合异常图层，这些中间性数据图层往往更具有丰富的成矿信息。MRAS 必须像数据仓库一样，能够对成矿信息提取源源不断产生的图层进行接纳与管理。

为了全面地综合多元成矿信息，确定成矿信息的重要性，本课题提出了建立 GIS 矿产资源评价‘独立条件图层’概念。所谓‘独立条件图层’，就是能够将原始空间地质、地球物理、地球化学、遥感数据、成矿信息提取所生成的中间图层信息统一起来，形成便于矿产定量预测的图层。在 MRAS 系统，采用具有拓扑结构的多边形区图层表达。其独立性体现在它是由计算机根据一定准则自动生成的有别于其它图层的图层；条件性体现在预测图层，如果按规则网格划分，则根据研究区的矿点分布状况给出；如果按非规则单元划分，则主要根据矿床存在的必要性条件来确定单元。在 GIS 有了独立条件图层的概念后，便可以借助于矿产统计预测思想，运用 GIS 空间图层叠加功能，实现定量预测自动化。

## 第二节　成矿信息的提取与综合

成矿信息计算机 GIS 提取与综合技术研究是本次研究的中心任务。因此，有必要对成矿信息内容、性质等做较深入的认识。

成矿分析就是研究区域成矿规律，为进一步普查找矿、选区提供依据。自法国学者朗内提出‘成矿规律’概念以来，成矿分析随着找矿实践发展的需要，成矿分析学科发展十分迅速。如原苏联以毕利宾为代表的科学家，发展了构造—建造成矿分析法，而欧美学者阿格特伯格、哈里斯、麦卡门及我国著名学者以赵鹏大、王世称教授为代表发展了矿产资源区域评价技术方法。随着信息技术革命浪潮和科学找矿时代的到来，进入了成矿分析与信息找矿阶段（谢学锦，1996）相对应的新阶段，大量的高分辨率、强穿透性的地质、地球物理、地球化学、遥感等找矿方法技术不断成熟与应用，同时也为地质勘查、成矿分析积累了大量的找矿资料。运用现代计算机信息处理手段，对其进行深层次的提取与综合，是目前成矿分析一项十分必要的工作。

### 一、成矿信息提取与综合的基本概念

信息（information）是用数字、图形、影像、文字、符号及介质来表达事件、事物、现象的

内容、数量或特征，信息来自未加工的原始资料数据。成矿信息是指指示和识别某种矿床的成矿条件和赋存方式的地质信息总和，可分描述性、事实性成矿信息，及通过深加工才能获取的加工型数据。成矿信息的提取与综合就是在全面研究和综合分析地质、地球物理、地球化学和遥感资料的基础上，总结成矿规律及控矿因素，从中提取出指示矿床存在、赋存规模及质量的评价信息，为潜在矿床的预测评价，制订普查找矿的最佳方案提供依据。成矿信息的提取与综合的重要性体现在以下几点：

(一)成矿分析是目标性、探索性预测

尽管一个地区的成矿分析和资源评价有明确的目标性，但目前仍未出现一种惟一性找矿方法。例如对隐伏金矿床的勘查由于受到当前技术与理论发展的限制，某一找矿信息确定并不一定有效，这使得到预测成果具有探索性。

(二)物探、化探、遥感勘查技术产生的成矿信息多解性

尽管地球化学勘查是一种直接找矿方法，但大的地球化学异常信息并不能表示一定有大矿，而小异常却有时对应大矿的事实已屡见不鲜，如排山楼、猫岭等金矿与化探异常的对应关系并不明显。地球物理、遥感技术的多解性更众所周知。至于地质找矿标志对成矿的指示意义也同样具有不确定性，具有相似地质环境地区找不到相似矿床也是有目共睹的。因此迫切希望在新的成矿理论指导下，进行多元信息的成矿信息深层次提取与综合。

(三)成矿分析中隐含信息的捕捉与强化

物、化探和遥感图像资料正如前述，强者不一定与矿床有关，弱者与矿床不一定无关。有些弱的信息常常是潜在矿床的反映，有必要采用特殊的方法识别成矿信息，压缩或排除干扰信息，特别是要研究当一种勘查技术测量信息只有在另一种地质测量出现才有找矿意义(赵鹏大，1994)。捕捉隐蔽信息，有可能在地质找矿中发现在通常情况下不易发现的隐伏矿床。

(四)大量的勘探资料需要信息浓缩与综合

据不完全统计，全国地质、地球物理、地球化学资料建立数据库将是上万兆的海量数据，而且还在不断产生新的勘查资料，因此，必须利用新技术手段，特别是计算机信息处理手段，研究挖掘与矿床生成有密切联系的‘浓缩信息集”。Dataming 将使人们借助计算机手段，帮助地质学家处理人脑从海量数据中难以完成的复杂的成矿信息分析工作。

## 二、成矿信息的提取

众所周知，成矿作用过程是复杂的，其复杂性决定了矿床成矿元素的不均匀性和多

变性，也决定了地球物理场与地球化学场的复杂多变性。因而应对勘探资料作深层次成矿信息提取与研究(图 13－3－4)，只有这样才能把握复杂的成矿规律。成矿信息提取是针对地质勘查资料进行的，不同的数据源其处理方法又各有不同。

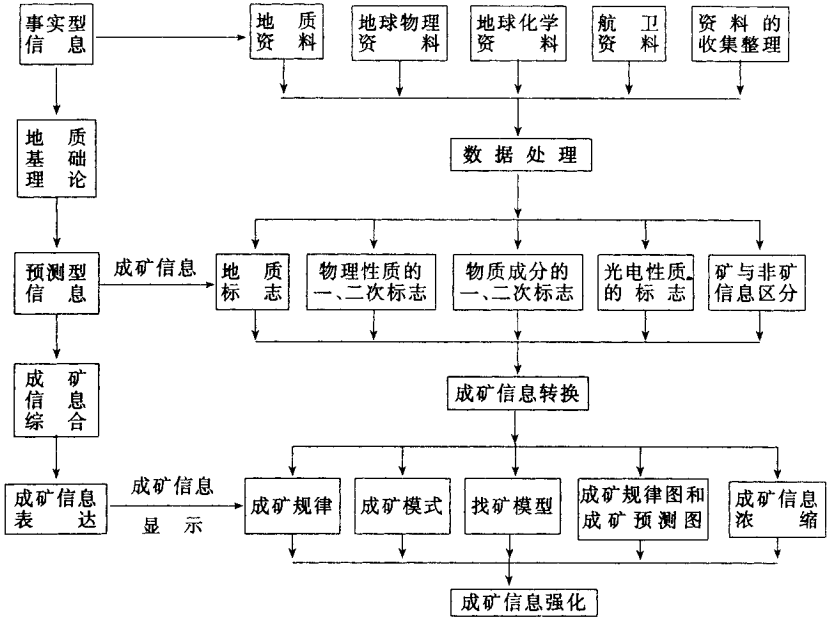



图 13－3－4　成矿分析信息图

地球物理勘查方法种类较多，如重力、磁法、电法、地震、放射性测量等，主要是以地质体的物理性质差异为直接观测对象，并通过对观测的地球物理场的变化，进行地质解译。和其它地质找矿方法不同，物探方法仅是一种间接找矿方法。对物探资料的成矿信息提取，主要侧重于发挥物探深源性探测优势，挖掘其反映深部构造认识的信息，如目前先进的地震 CT 信息技术反映深部地质精细结构。对于重磁资料处理，可以通过不同层次空间滤波分析，反映地质构造的深部变化规律。目前从成矿分析经常用到的重磁提取的新趋势来看，一些先进的欧美国家发展了一系列计算机可视化强的重磁解译系统，如可视化地质构造三维反演系统等。另外，还引进了小波分析、分形理论等全新的数据处理模型。

地球化学成矿信息的提取技术主要涉及到区域化探异常的圈定与识别，传统的数学地质方法一直发挥着非常重要的作用，如因子分析法、判别、聚类分析法等。这些方法能够有效地研究元素的相关关系，找出与成矿作用相关的地球化学元素组合。当前发展地球化学成矿信息的技术方法是：从区域地球化学场角度出发，研究区域地球化学元素的

物质结构性与空间结构性特征。例如，通过稳健统计学的方法，进行地球化学异常场的分解；通过因子分析，解决地球化学场物质演化特征；通过空间地质统计学技术，进行地球化学场空间结构分析及异常圈定。发展基于 GIS 空间信息技术的地球化学异常分析系统，是化探成矿信息提取的有效途径。

地质信息的提取以前做得较多的是成矿信息的研究，如岩石、同位素等数据定量统计提取，构造等密度、方位的统计。但对地质概念图件的提取研究，大多数处于定性阶段，GIS 技术应用将使地质信息的提取进入新阶段。F.P.Agterberg 运用 GIS 缓冲区分析，成功地、详细地研究了新科舍地区的金矿化与北西向构造的关系。运用 GIS 技术，可以方便地进行地层、岩浆岩与矿产的统计规律认识，构造反映地质复杂度的熵分析模型，快捷地完成各地质因素的找矿信息定量分析。

值得指出的是，成矿信息的提取并非使用的数学模型越复杂越好，相反使用一些简单模型，如比值模型、找矿信息量模型往往会得到十分好的找矿效果。如美国学者坎农在研究 MVT 铅锌矿时，通过几十个同位素分析结果，总结出$^{207}$OTpb/$^{206}$pb 为 1.48 的为大矿，从而指导该类型矿床预测。但运用计算机信息处理技术对成矿信息的提取能力、工作效率会产生质的飞跃。

## 三、成矿信息的综合

地质、地球物理、地球化学、遥感等信息都是区域地质及成矿作用不同侧面的反映，成矿信息的综合也属必然。同样，综合(integration)在空间地学信息技术中也是使用最广泛的术语之一。

### (一)成矿多元信息地质理论综合

地质、地球物理、地球化学、遥感等多元成矿信息的综合分析一直是目前最具有挑战性的成矿分析工作。正如原苏联学者谢格洛夫所说："目前成矿分析已发展到一个新阶段一综合阶段，必须广泛利用所有的地质、地球物理、地球化学资料，特别是航天、航空地球物理资料"。运用多元信息进行成矿规律的综合在我国矿产资源评价中，特别是二轮区划中取得了卓有成效的成果，并发展了综合信息矿产资源预测方法(图 13－3－5)，它包括综合信息成矿规律图编制、综合找矿模型的建立及矿产资源定量评价等内容。

成矿信息法就是在现代成矿理论指导下，从地质演化发展的历史观点，充分利用地质、地球物理信息，研究地壳地质构造、演化的深层结构特征，利用地球化学信息研究成矿作用过程的物质表现。通过不同信息纵向、横向关联，形成反映三维空间地质建造特征的区域成矿规律。

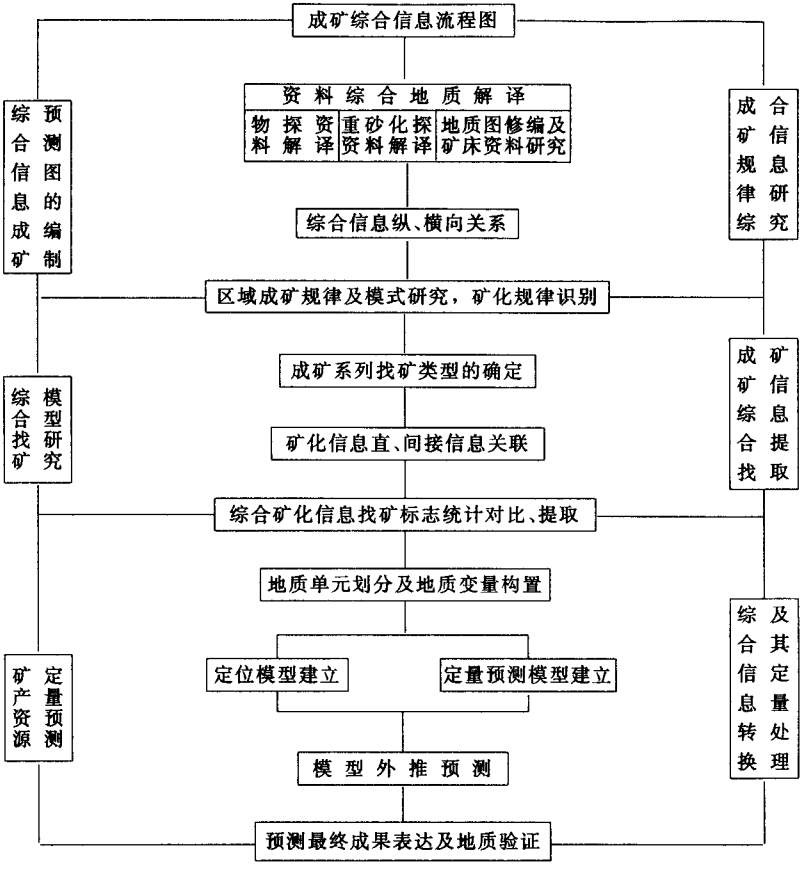



图 13－3－5　成矿综合信息工作程序

（根据王世称教授的内容修改）

成矿规律综合信息分析是成矿分析的上层建筑，需要广泛的、扎实的地质经验和知识，是任何技术手段都替代不了的。

（二）成矿信息的定量综合分析

矿产资源定量评价实质上是运用计算机手段，采用适当的数学模型，研究区域矿床产出及其远景规模与各种成矿信息的关系，查明各个控矿因素、矿化信息在确定矿床产出规模中所占的重要性。如特征分析中，确定各地质变量在成矿有利度的权大小。成矿定量综合分析包括统计单元的合理划分，控矿因素地质变量的构置，模型单元的选择及定位定量模型的建立等问题。矿床定位、定量预测模型是以已知模型单元为基础建立的，建立定位预测模型的数学方法有循环分析、数量化理论等 建立资源量预测模型的数学方法有逻辑信息法、蒙特卡罗法等。对所建立的定量模型，尚需检验、简化、优化研究，最后根据成矿信息定量综合模型，外推预测。

**(三)基于 GIS 成矿信息的综合**

GIS 地理信息系统是采集、存贮、管理空间地理信息的有效工具,是目前先进国家在矿产资源评价中广泛使用的信息合成手段。随着我国大量的找矿信息空间数据库的建设,成矿分析将从方法上悄悄地发生变革。GIS 成矿信息的综合与传统的定量评价相比,有其不可比拟的优势。它不仅可以对数据进行综合,还可以对图形、图像信息综合。

## 第三节　MRAS 系统的总体结构分析

### 一、总体结构

依据对 GIS 矿产资源评价数据结构流程及成矿信息的提取与综合的分析,进行需求研究,总结出 MRAS 系统的总体结构如图 13－3－6。

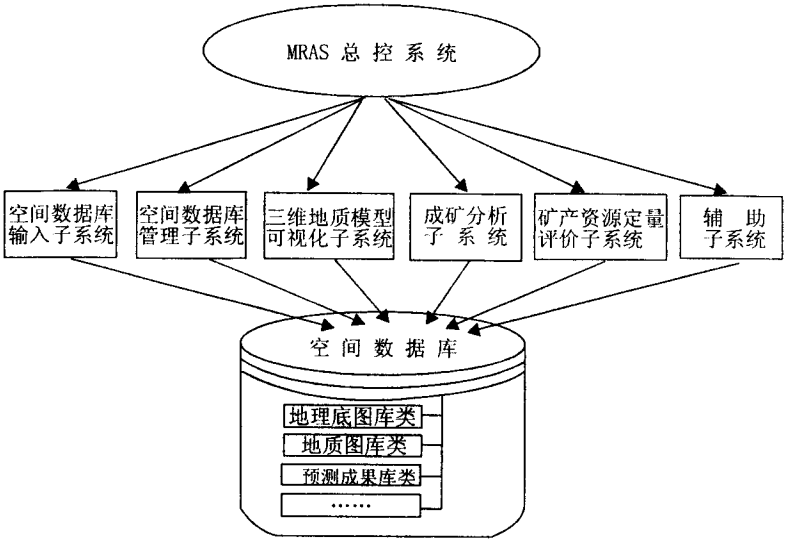



图 13－3－6　矿产资源评价信息系统 MRAS 总体结构

由于大多数 GIS 软件已提供了丰富的空间数据库的输入及管理系统程序,所以 MRAS 系统研制的重点在成矿分析中的成矿信息提取分析及矿产资源成矿信息综合评价两大系统上(图 13－3－7)。

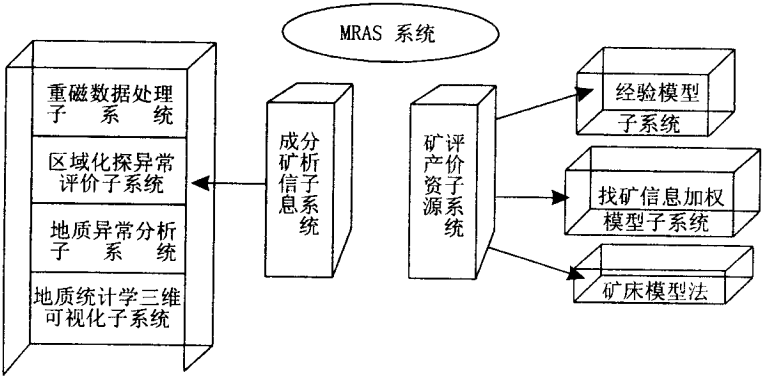



图 13－3－7　MRAS 系统构架图

**(一)成矿信息提取分析子系统**

**包括如下子系统：**

1. **基于** GIS **重磁分析子系统；**

2. **基于** GIS **地球化学异常分析子系统；**

3. **基于** GIS **空间地质统计学子系统；**

4. **地质三维可视化子系统；**

5. **遥感图像处理子系统。**

**考虑到** MAPGIS **已提供了可为成矿分析使用的专门地学遥感图像处理系统，本研究未在其上做进一步图像处理开发，而采取嵌入式将** MAPGIS **图像处理系统加入到本系统。**

**(二)矿产资源成矿信息综合评价子系统**

**本系统包括三个模型。主要完成多元成矿信息的综合，并根据多元空间成矿信息进行资源潜力的综合评价。**

1. **成矿信息空间等权经验搜索模型**

**根据地质专家总结的找矿标志组合，完成研究区域满足条件的人工交互式搜索。**

2. **找矿信息加权模型**

**提供了证据加权和找矿信息量两种模型。**

3. **矿产资源成矿信息综合评价模型**

**该模型有机地将基于矿床模型定量评价与** GIS **技术结合起来。**

## 二、MRAS 系统开发的软硬件环境

**(一)硬件环境**

**考虑到目前** GIS **向微机化个人应用方向发展的重要趋势，**MRAS **系统开发主机的标**

准配置为奔腾系列,内存大于 16 兆,硬盘为 1G 以上,基本外设有 Ao 幅彩色喷墨绘图仪、A4 彩色扫描仪等。

(二)GIS 软件平台的选定

目前 GIS 平台较多,国内 PC 机市场比较流行的软件平台有 PCArc/Info、Mapinfo、MAPGIS 等软件。通过大量的软件价格性能比来看,国外 GIS 软件如 ESRI 公司的产品其技术先进性是不容质疑的,但价格太高了。自 80 年代以来,在原地质矿产部科技司支持下,中国地质大学推出了 MAPGIS,在国家科委 GIS 平台测试获得专家一致好评。自 1994 年我们使用该软件系统,通过实践,我们认为 MAPGIS 已基本满足矿产资源评价二次开发的要求。MAPGIS 的系统结构可用图 13 – 3 – 8 表达。

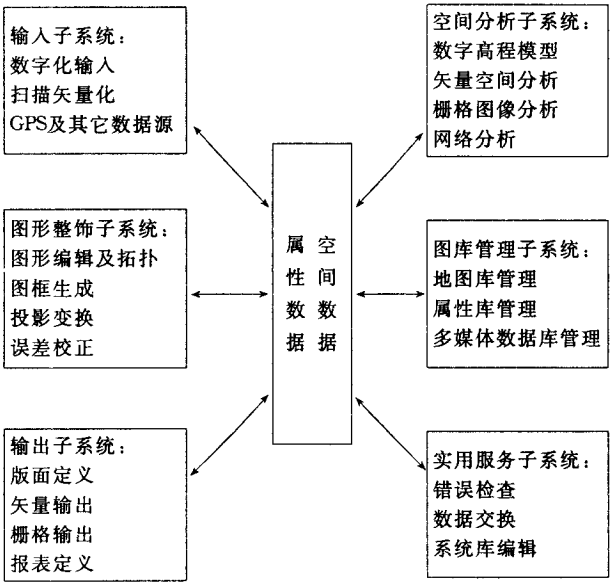



图 13 – 3 – 8　MAPGIS 系统结构

MAPGIS 系统的主要特点有:

1. 以 WINDOWS 为平台,采用 C++ 语言开发,用户界面友好,使用方便;
2. 以扫描仪输入和数字化仪输入为主要手段;
3. 具有极强地图编辑功能;
4. 具有功能齐全、性能优异的空间分析功能;
5. 提供开发函数库,可方便地进行二次开发;
6. 能够输出符合地图公开出版质量要求的图件。

## 三、系统开发的策略原则

### (一) MRAS 系统开发方式

目前,基于 GIS 平台上功能性应用系统开发主要有三种方式:

1. 松散联结式

以自己的系统为主体,与 GIS 通过数据文件通讯。这种开发应该说简单省力,但将 GIS 功能与专业模型结合不够,很难发挥 GIS 全部功能。

2. 嵌入式

以应用系统模型为主体,将 GIS 某些功能函数整体嵌入到应用系统。这种开发初步实现用户界面一体化,但对 GIS 空间数据库管理与分析仍显不够。

3. 无缝开发

从 GIS 空间数据库出发,有机地将 GIS 功能与专业模型结合起来。如以专业 GIS 开发语言 ARCAVENOE 为主体,为补充 GIS 中专业模型功能不足,可采用高级 $C^{++}$ 语言开发函数库。无缝式 GIS 应用系统开发周期长、任务重。MAPGIS 是用 $C^{++}$ 开发的 GIS 平台,提供了较丰富的 $C^{++}$ 动态开发库。因此 MRAS 系统开发是从 MAPGIS 空间数据库结构出发,运用高级 BORLANDC$^{++}$4.5 及 VC 进行无缝式开发,实现了用户界面空间数据库管理、GIS 空间分析、矿产资源评价专业模型一体化。

### (二) MRAS 系统开发原则

1. 本次开发以原型法为主,由于矿产资源 GIS 评价系统的研制国内外尚无先例,许多技术问题尚待开发过程中解决,但系统开发初期的需求目标是清楚的,就是要解决空间数据库中成矿信息的提取与综合问题。

2. 每一子系统的软件开发之前都由成矿分析地质人员与计算机编程人员共同研讨。首先由地质人员提出详尽的需求分析,由计算机人员研究可能的实施途径及可能性,最后编写程序,编写详细的设计书。

3. MRAS 系统开发尽量在数学模型上选用成熟的,广大地质工作者经常使用的方法模型,而不选用探索性强的,如分形、神经网络等模型。

4. 软件开发过程实质上是 GIS 新方法开发过程,必须加强应用人员的参与程度,本课题采用数据中间多次试验来解决系统中的新问题。

## 四、MRAS 系统主要技术特点

由于 MRAS 在 MAPGIS 平台上无缝开发,其技术开发难点、特点主要有:

1. MRAS 系统一直以空间数据库为主体，其程序、方法、数学模型的处理既有图形数据，又有实际观测数据，这将有别于传统的数据处理，也是系统开发贯穿始终的主线。

2. MRAS 系统是二次应用系统，也就是说其不是工具箱，当时立项主要有两点考虑：

(1)如果仅是开发一些专门的工具软件，用户还需根据特定 GIS 平台进行应用功能再开发。如果用户对 GIS 内部数据结构不清楚的话，其难度依然很大。

(2)不能有效地将 GIS 空间分析与矿产预测方法模型结合起来，也就不可能实现定量预测的自动化。但这种开发的模型，有时会妨碍预测人员主观能动性。

3. MRAS 开发技术人员尽量将 GIS 可视化技术与方法模型结合起来，使用户所算即所得。

# 第四章　MRAS 系统开发的计算机技术

MRAS 系统的计算机实现就是对成矿信息提取与综合这一过程对象进行数据抽象，是对前章所提出和理解的问题空间进行模型化，面向对象分析（OOA：Object - Oriented Analysis）是建立在对象及其属性、类属及其成员、整体及其部分概念上的，是在信息模型（实体关系图和语义数据模型）和面向对象程序设计语言两者最好的概念上建立起来的。它是从问题空间——用户所处的环境和系统应用领域出发，认识系统的本质。利用人类概括客观事物的三个基本法则（区分对象及其属性；区分整体及其部分——分类结构；不同对象类的形成及区分——组装结构）定义和交流系统需求，使用自包含分块分析和说明系统，以建立稳定的模型化问题空间。

## 第一节　面向对象方法概述

面向对象的分析与设计是当今软件工程行业中的流行方法，它由于有如下的特点而受到众多软件工程师的青睐。

1. 它使我们能在人类概括客观事物的三个基本方法（对象及其属性，分类结构和组装结构）的框架上定义和交流系统需求。

2. 它首先着眼于问题空间的理解。

3. 它将属性和专用于那些属性的服务视为一个固有的整体。

4. 使用自包含分块（对象之间依赖性最小）进行分析和设计。

5. 通过显式表示共性得益。

6. 它提供一个支持分析(做什么)和设计(怎么做)一致的强有力的表示工具。

7. 它能适应系列化的系统和当前实际运行系统的调整。

自 80 年代以来,随着计算机软件技术的不断发展,面向对象的方法与技术已经受到计算机领域的专家、学者、研究人员和工程技术人员越来越广泛的重视。80 年代中期相继出现了一系列描述能力较强、执行效率较高的面向对象的编程语言,标志着面向对象的方法与技术开始走向实用。到 90 年代,面向对象的方法与技术向着软件生命周期的前期阶段发展。即:人们对面向对象方法的研究与运用,不再局限于编程阶段,而是从系统分析和设计阶段就开始采用面向对象方法。这标志着面向对象方法已经发展成为一种完整的方法论和系统化的技术体系。可以说,90 年代迎来了面向对象的软件开发新时代。

面向对象方法是指把对象作为最基本的元素来分析问题、解决问题的方法。其基本出发点是尽可能按照人类认识世界的方法和思维方式来分析和解决问题。由于面向对象方法采用了把数据和在数据上的操作封装在一起的类、对象和方法的机制,并通过派生、继承、重载和多态性实现了人们追求以久的软件重用技术,使得软件,特别是大型复杂软件的构造和维护变得到更加有效和容易,并能使软件的开发更自然的反映事物的本来面貌,从而大大提高了软件开发的效率和质量。

面向对象方法的精髓可表述为两点:①不要首先就问系统干什么,而是要问系统对什么对象进行操作。这一简单的思想——首先考虑数据,暂时忘记系统的直接目的——对软件的可重用性和可扩充性来说至关重要。②把软件系统当作结构化的抽象数据类型实现的集合,抽象数据类型的实现即对象类是构成软件系统的基本模块。

面向对象方法的基本结构如图 13 - 4 - 1 所示。

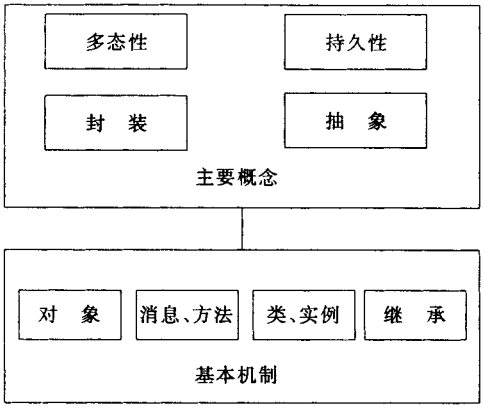



图 13 - 4 - 1　面向对象方法的基本结构

下面将从基本机制和基本概念两个方面对此图略加解释。

## 一、基本机制

面向对象的基本机制是对象、消息、方法、类、实例及继承。

所谓对象(Object)是问题域中要加以研究的事物、概念。对象不仅能表示具体的实体,也能表示抽象的规则、计划或事件,具有很强的表达能力和描述能力。

对象具有状态,通常用属性来描述,对象还应当有操作,用以改变对象的状态。从动态的观点来看,对象及其操作就是对象的行为。面向对象方法改变了传统方法中将数据和操作相分离的做法,将数据和操作封装在对象的统一体中。

对象的操作也称为方法(Method),访问一个方法(让对象以某种方式进行操作)的过程称为向这个对象发送一个消息(Message),对象的工作是靠消息来激发的,消息是用来连接对象与外部世界的唯一通道,请求其它对象做什么或相应其它对象的请求是通过发送或接受消息来实现的。图 13 – 4 – 2 说明了对象的内部组成。

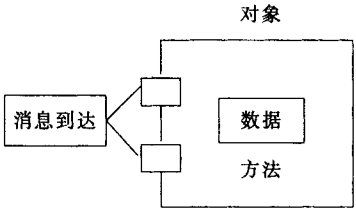



图 13 – 4 – 2　对象分解图

在对象抽象的基础上,OOA 方法进一步提出了类(Class)这一特有的概念。类是具有相同结构、操作,并遵守相同约束规则的对象的集合,亦即是一组几乎相同的对象的描述,它由概括了一组对象共同性质的方法和数据组成。从类的定义可以看出,对象是类的一个实例,从一组对象中抽象出公共方法与数据并将它们保存在一类中是面向对象功能的核心。

类将数据结构上的抽象和功能上的抽象结合起来,实现了传统方法所不具备的更高级的抽象,即类定义时,可由设计人员按需要灵活地定义对象类所具有的数据类型——抽象的数据类型,这种机制使得 OOA 方法具有很强的解决复杂问题的能力。

所谓继承(Inheritance)是指能直接获得已有的性质和特征,而不必重复定义它们,即是一种自动共享类、子类与对象中方法与数据的机制。这样,OOA 可以显式地表示不同对象的公共部分,从而只需一次性的指定公共属性和方法,然后特化和扩展这些属性及方法成为特殊情况。

类支持层次机制,即除根结点外,每个类都有它的父类(或称基类 Base Class),除叶结点外,每个类都有它的子类(或称导出类、派生类 Derived Class)。子类可以从它的父类继承各种操作和数据,并发展自己的特征,子类还可以将自己的及父类继承的特征传递下去。

## 二、主要概念

充分体现面向对象方法优点的 4 个主要概念是封装、抽象、多态性和持久性。

封装(Encapsulation)是描述将数据和对数据进行操作的方法结合在同一对象中以使对数据的存取只可通过该对象本身的方法来进行的正式术语。面向对象程序的其它部分都不能直接作用于同一对象的数据,对象间的通讯只能通过明确的消息来进行。

抽象(Abstraction)是对复杂的现实世界的简明表示。它强调了人们所关心的信息,而将不重要的信息予以忽略。抽象在系统分析、系统设计乃至程序设计语言的发展中一直起着主导作用,整个软件工程的进展总是和抽象程度紧密相连。建造面向对象软件结构的数据应足够抽象。

多态性(Polyporphism)是面向对象程序设计中又一重要概念,是指同样的消息为不同的对象接受时,可导致完全不同的行为的现象。多态性的重要性在于允许父类及各子类的对象各自以不同的方法相应同一消息,即所谓‘同一接口,多种方法”。大多数面向对象程序设计语言既支持编译时刻的多态性,也支持运行时刻的多态性。前者是通过重载函数或运算符来实现的,后者是通过虚拟函数实现的。

对象的持久性(Persistence)是指为对象分配空间并使之驻留在内存中的时间长短。类的实例都是在程序执行时动态中创建的,当不需要某一对象时,它就被删除,所分配给它的内存空间也被重新回收。对内存空间的自动回收通常被称为垃圾回收。

总之,面向对象的基本机制导致了模拟世界的一种新兴方法。物理世界中的事物及其行为被抽象、封装成对象,通过消息传递激活对象中的方法使对象的行为得以体现出来。具有公共方法与数据的对象被收集在一类中。类是以层次组织的,而继承机制自动为每个子类提供了来自父类的方法与数据。子类的创建是通过对一类库中可用类与某一应用的特定要求之间的差异进行抽象而完成的。多态性与继承机制相接合,使设计的软件系统具有更广泛的重用性和可扩充性。

因为面向对象方法的本质,就是强调从客观世界中固有的事物出发来构造系统;用人类的现实生活中常用的思维方式来认识、理解和描述客观事物;强调最终建立的系统能够映射问题域,即:系统中的对象以及对象之间的关系能够如实的反映问题域中固有

事物及其关系。

程序设计语言经过十多年的发展，面向对象的编程语言也已经成熟，本系统将采用面向对象的软件工程方法来完成 MRAS 系统的设计与实现。

## 第二节　MRAS 系统面向对象设计

MRAS 系统面向对象分析就是建立 MRAS 系统中各子系统中对象、结构、主题、属性（及实例连接）和服务（消息连接）等模型。

### 一、MRAS 系统中的对象

在 OOA 中，所谓的‘对象’就是一个封装和一个抽象。封装是指对属性以及这些属性上专有的操作的封装 抽象是指对问题空间的抽象，指问题空间某类事物的一次或多次出现。即对象是数据及其专用处理的抽象，反映系统保存有关信息和与现实世界交互的能力。

当标识出系统中的对象之后，还必须定义属性和服务。

所谓属性是描述对象或分类结构实例的数据单元，即属性明确定义一个对象的名字意味着什么。对象通过属性描述，属性由该对象的某个操作操纵。在 OOA 中，属性及这些属性的专用操作被看成固有的整体，如果系统的某一部分需要获得某个对象的属性信息，那么它只能通过与该对象中定义的某个操作相对应的消息来完成。属性利用分类结构中的继承机制实现定位，即通用的属性放在结构的高层，特殊的属性放在结构的低层。

属性是描述一个对象或分类结构实例的一个数据单元，而实例连接则表示一个对象或结构的实例与其它对象或结构的实例之间的联系。实例连接有 0:1、1:1、0:M 和 1:M 的对应关系。

所谓服务就是某对象收到一条消息之后所应执行的处理，即每一个数据处理系统都必须有处理功能，及每一个对象和分类结构都应有适当的操作，对象实例之间都应有必要的通讯。

### 二、MRAS 系统中主要对象及其关系

#### （一）可视化窗口类 TMAPWindows

TMAPWindows 是 MRAS 空间数据库管理、分析与计算机可视结合重要类，其来源

于 OWL 类库中的 TWindows。

其属性主要是：

1. 完成原始空间数据库的输入管理；

2. 完成 GIS 数据库的显示；

3. 完成各种地质、地球物理、地球化学子系统中的对数据库的操作任务。

总之，TMAPWindows 类是 MRAS 几个子系统均使用到的重要类。

(二)异常数据对象

该对象封装了重磁或化探所获取的实测资料等属性，以及对这些属性所做的各种处理。物、化探采集的数据常用两种方式记录：离散数据和网格数据(包含剖面数据)。前者记录了每个观测点的位置和观测变量值；后者记录了整个测区的观测线数、线间距、每条测线的观测点数、点间距。物探数据与化探数据又略有区别，化探数据类中涉及到多元素多变量的观测数据，而且处理方法完全不同。物探数据处理主要有位场分离、滤波等分析，而化探数据处理则主要侧重于化探异常的圈定与多参数相关关系评价。因此，从空间地学异常数据类可派生地球物理异常类与地球化学异常类，而地球物理异常类又根据其数据模型标度了剖面数据类、离散数据类、网格化数据类、异常形体对象类等。

(三)预测专题 TTheme 类

该类从预测工程出发，封装了 MAPGIS 点、线、面三个工作区。通过该专题类，可以完成地质、地球物理、地球化学、遥感等专题数据的管理。该类中使用双向链表技术，使得程序方便地进行各种因素专题添加、生成、删除等管理功能。

## 三、MRAS 系统中对象结构关系及对象数据通讯

结构在问题空间里表示复杂性，通过分类结构与组装结构来完成。其中分类结构获得类—成员组织，组类结构刻划整体—部分的关系。在 MRAS 各个子系统中，都要研究上述对象类之间的实体关系，确定类是派生还是组装的关系，如每一个 TMAPWindows 可对应着 0—多个 TTheme 类。也就是说一个可视化窗口类可以管理多个专题数据类。而由空间地学数据类关系，却可以派生地球物理数据类与化探数据类。确定各数据类关系是正确组织程序结构的基础。

对象通讯是研究各对象的数据交换关系，这对程序中数据请求、参数传递的设置均有重要意义。

# 第三节　科学计算可视化技术

GIS 技术的应用使地学信息分析的可视化推进了一大步。MRAS 系统一方面需要将 GIS 可视化技术与科学计算结合起来，另一方面尚需探索一些专门的三维地学可视化技术。

地理信息系统和科学计算可视化（Visualization in Scientific Computing，简称为 VISC）是当前计算机学科的两个重要研究方向。应用这两项技术，工作人员不仅可以从屏幕显示的信息中随时判断处理效果，修改处理参数，重新进行处理直到满意为止，而且可以利用 GIS 的空间分析功能找到很多相关的数据直接进行图件的汇编工作，处理的结果即是成果图件。因此，基于 GIS 的数据可视化处理技术不仅可以提高地质分析员的工作效率，而且还可以根据用户的需要建立一些专门的地图，或对它们进行裁剪，选取感兴趣的部分进行显示。随着地理信息系统和科学计算可视化的发展，尤其是 GIS 技术不断完善，将会在各种与空间位置有关的科学研究或应用领域发挥重大的作用。只有对上述原始测量数据作大量的处理之后才能获得正确的地层结构信息，而应用可视化工具可以检测出地层结构的走势，显示地理位置以及预测矿藏的分布图。

## 一、科学计算可视化的数据类型

可视化系统可看成是完成多种数据映射的流水线，如图 13－4－3，原始数据经过一系列的变换原理，得到抽象的几何数据，再对几何数据进行绘制，即可生成可视的图形或图像数据。可视化数据的分类方法很多，如基于数据源、数据格式或数据类型等。

### （一）外部数据和内部数据

这种分类是相对于计算机系统来说的，前者是指用科学仪器实际采集的观测数据，后者是指在可视化系统内部产生的数据。任何可视化系统都必须具备从外部接受数据的能力，同样也应能把系统产生的数据输出，供其它应用程序使用或打印输出。

### （二）几何数据和特性数据

几何数据用于表示对象的形状，包括多边形、曲面和简单的坐标等。形状可用独立变量表示，也可用依赖变量表示。

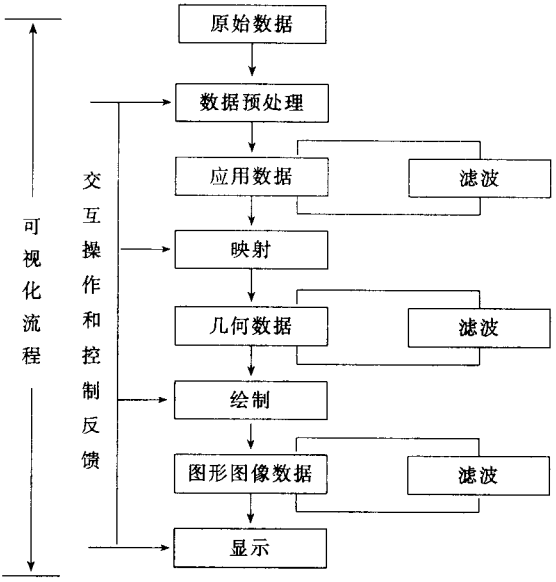



图 13－4－3　可视化流程图

特性数据是指非几何数据，它可以是标量、矢量和张量（可分别代表温度、速度和压力），特性通常被当成是依赖变量，它们可与几何数据相关。

几何数据和特性数据可以用多种不同的方法表示。数据组织的一个明显区别是规整性，即规整数据和散乱数据。规整数据常以网格形式表示，网格可由立方体、四面体、棱柱体、三角形和正方形等组成。另外为了一些特殊需要，可使用其它结构，如在地理信息系统（GIS）和图像分析领域中常用八叉树和四叉树。

（三）离散数据和网格数据

数据定义在空间中的特定点，如果这些点是任意分布的，并且它们之间没有联结关系，那么把对应的数据成为离散数据。

网格数据是指定义在网格之上的数据。网格有多种类型，常用的如图 13－4－4 所示。

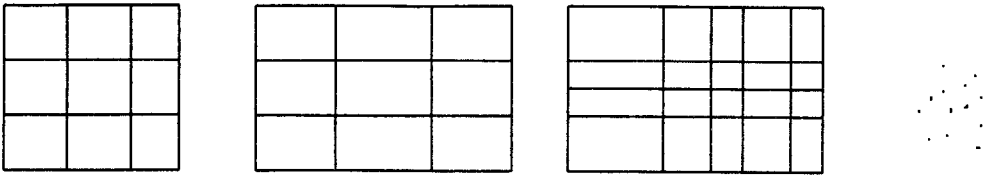



图 14－4－4　网格类型

1. 笛卡尔网格

这种类型的网格又称阵列网格，坐标并不显示保存，寻址是通过整数下标（$i$，$j$）来完成的。

2. 规整网格

规整网格通常是矩形的。它通过网格线之间的间隔来定义。网格可使用不同的坐标系类型，同一个轴方向上网格线间隔值相同，不同轴方向上的网格线间隔值可能不同。通过定义起始点坐标及每个坐标方向上的增量来显示指定坐标。

3. 矩形网格

矩形网格呈矩形状，但是沿同一个坐标方向上网格线之间的间隔值不统一，允许使用不同的坐标系类型。它可使用每个坐标轴上的网格向量来描述。

## 二、MRAS 数据可视化处理流程

地质勘探中所获取的数据通常都是离散数据或网格化数据（笛卡尔网格和规整网格），由于许多数据的处理方法大都是在网格化数据上进行的，所以对于离散数据应预先进行网格化使其成为网格化数据。

MRAS 数据可视化处理中的关键问题是将地质数据转换为 GIS 的空间数据和属性数据。在 MAPGIS 中，空间数据结构主要包括点、线、区，三者通过拓扑关系可以表示空间实体类型。在数据处理中，根据用户选择的显示方式的不同，数据转换的类型亦不相同。

## 三、可视化立体网格成图技术

为了增强研究区的地质磁异常特征，可以绘制异常的立体网格图。其原理是把地质异常变化看作一种高低起伏的地形变化，即 DEM 数据。绘制立体网格图时需要解决投影变换和隐藏线处理两个关键问题。

（一）投影变换

即如何把地质勘探这种网格化的数据投影在乎面上显式出来。对于一个客观物体，人们从不同的方位和距离来观察它时，所感觉到的形状和大小是不同的。当人们站在一定的方位和距离时，物体就以在这个方位和距离下能看到的部位把光线反射到人们的眼睛即视点里，这些光线形成一束视线，如图 13－4－5 所示。这束视线的发散程度则决定于物体本身的大小以及观察者离物体的距离。当用一个平面取切这些视线时，这束视线与该平面的全部交点就组成一个投影在该平面上的物体形状，这个平面就叫做视平面。如果物体是立体的，则视平面上的投影也会显出立体感来。

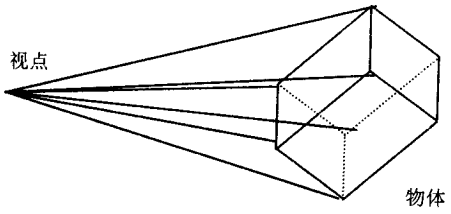



图 13－4－5　视点和物体之间的视线束

可以计算出这束视线与视平面的交点，用描绘仪把图形绘制出来。为了简化计算方法，我们采用‘平行透视’即平行投影。

在平行透视情况下，物体在视平面上的投影决定于视倾角 $\alpha$ 和视方位角 $\beta$ 两个参数。视倾角 $\alpha$ 是视平面在物体所在一方的面与物体所在平面的夹角。视方位角 $\beta$ 是视平线（所谓的视平线是指视平面与物体所在平面的交线）以逆时针方向转到物体所在平面的 X 轴的角度。

下面推导重磁异常曲面上任意一点 $A$ 投影到视平面位置上的计算方法。曲面图上任意一点 $A$ 可用它的空间坐标（$x$，$y$，$h$）来表示，$x$，$y$ 是它的平面坐标位置，$h$ 是它的高度，假定视平线交于基面（称物体所在的平面为基面）为原点，如图 13－4－6。

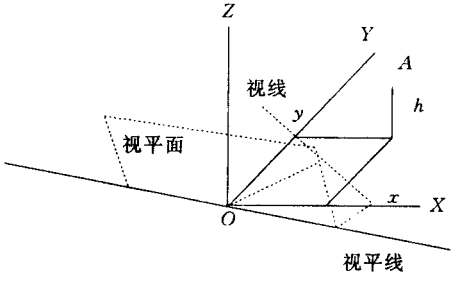



图 13－4－6　基面 $X$ 轴上的点在视平面上投影示意图

先看 $A$ 点的 $x$ 坐标值在视平面上的投影位置。通过 $x$ 的视线与视平面交于 $x_1$ 点，另外，通过工在基面内作垂直于视平线的直线交视平线于 $x_2$。由图可知：

$$Ox_2 = Ox\cos\beta$$

$$x_2x = Ox\sin\beta$$

$$x_1x_2 = x_2x\cos\alpha$$

由此，视方位角 $\beta$ 在视平面内的投影 $\beta_1$ 为

$$\beta_1 = \arctan\left(\frac{\sin\beta\cos\alpha}{\cos\beta}\right)$$

$Ox$ 在视平面内的长度 $Ox_1$ 为

$$Ox_1 = Ox(\cos^2\beta + \sin^2\beta\cos^2\alpha)^{1/2}$$

由于基面上 $Y$ 轴是由 $X$ 轴逆时针旋转 90°得到，由此 $A$ 点的 $y$ 坐标在视平面内的投影同样可通过计算得到，只是需要将式中 $\beta$ 改换成 $\beta' = 90° - \beta$。这时 $\beta'$ 定义为左端视平线以瞬时针旋转到 $Y$ 轴的角度。$A$ 点的高度 $h$ 在视平面内显示的高度 $h'$ 为

$$h' = h\sin\alpha$$

以上三个公式是绘制曲面图时投影的基本公式，经过简单的变换，可分别写成：

$$\beta_1 = \arccos\left(\frac{\cos\beta}{\sqrt{1 - \sin^2\alpha\sin^2\beta}}\right)$$

$$Ox_1 = Ox(1 - \sin^2\alpha\sin^2\beta)^{1/2}$$

在绘制曲面图时，设想用一组垂直于水平面而又平行于 $X$ 轴的切面去切割物体，切面与物体的表面相交，形成一条一条的空间曲线。这组空间曲线所组成的图形，即称为单向曲面图。如果另设一组垂直于水平面且平行于 $Y$ 轴的切面切割物体，这样又形成另一组空间曲线，由这两组空间曲线所组成的图形，即称为双向曲面图。在画这些曲线时，必须考虑遮挡关系，即所谓屏蔽问题，下面专门讨论这个问题。

（二）埋隐藏线

参看图 13－4－7，当视倾角 $\alpha$ 及视方位角 $\beta$ 一定时，基面 $XY$ 中的一组矩形网格投影到视平面 $UV$ 上，形成一组平行四边形网格。在视平面 $UV$ 内的网格点上，加上该点曲面高度的投影值即为曲面上该点的位置在视平面内的投影。把通过基面 $X$ 轴或平行基面 $X$ 轴的各网格点上曲面高度的投影值，通过曲线内插顺次在屏幕上连接即组成一个单向曲面图。

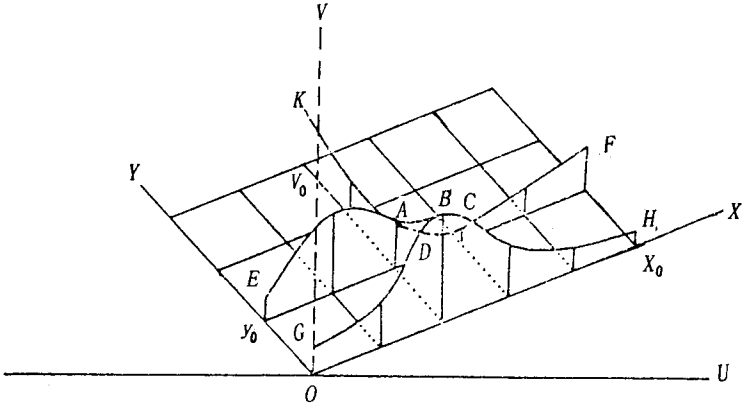



图 13－4－7　遮挡示意图

在画第一条曲线如图中的 $GBH$ 时没有被它前面的任何物体阻挡，因此能够全部画出。但是在画第二条以及后面的各条曲线时，就存在屏蔽问题。例如在画第二条曲线 $EADCF$ 时，它从 $D$ 到 $C$ 的一段（虚线部分）被它前面的曲线 $GBH$ 所挡住。$DC$ 这段曲线就叫做隐藏线。为了突出立体感，必须将 $DC$ 隐藏。因此，应该让 $DC$ 顺着遮挡它的 $GBH$ 的高度走过。

为了加强立体感，可以输出双向曲面。但它的隐藏线问题更加复杂，仍以图 13－4－7 为例，如果只有单向切面，则 $EADCF$ 曲线只在 $DC$ 部分被遮挡，在双向切面情况下，则另外一个方向的曲线也可能会遮挡该曲线的某些部位。如 $EADCF$ 曲线的另一部位 $AD$ 就被平行于基面 $Y$ 轴的曲线 $BAK$ 中的 $BA$ 段所挡住。因此绘制位于曲线 $EADCF$ 和曲线 $GBH$ 之间的 $BA$ 时，还需逐一计算在该曲线与它前面一条曲线之间的另一方向即平行于 $Y$ 轴方向的曲线高度，并与遮挡部分作比较后才能判断是否绘制。

上述方法是一步一步考虑的，即每走一步都要考虑 $X$、$Y$ 两个方向的屏蔽问题。这种判断虽然复杂，但不论用粗网格或细网格，其效果都很好。

（三）立体阴影图

为了进一步增强图像的立体效果，更好的反应重磁异常的特征，突出异常所对应的地质信息，可以绘制异常的立体阴影图。

重磁异常的立体阴影的计算原理也是把异常数据的变化看作一种高低起伏的地形变化，用某一方向的光照射在重磁地形上必然产生阴影效果。其计算公式为：

$$\cos\theta = \frac{-P\cos\theta\cos\phi - Q\sin\theta\cos\phi + \sin\phi}{\sqrt{1 + P^2 + Q^2}}$$

式中：$P$，$Q$ 为重磁异常曲面的 $x$，$y$ 方向的一阶偏导；$\theta$ 为太阳方位角；$\phi$ 为太阳高度角。

## 四、交互技术

在图形系统中，交互处理是必不可少的部分，它必须允许用户能动态的输入位置坐标、指定选择功能、拾取操作对象、设置变换参数等，即需要一个用户接口。

（一）交互式用户接口的表现形式

交互式接口用户的表现形式涉及到屏幕布局、显示内容、符号选用、颜色选择等多方面内容，每个方面都有一些经验和准则可以参照，本书不做过多讨论。

（二）交互任务

一般来说，交互过程中的任务可归纳为定位、选择任务、文本、定向、定路径、定量 6 种。一个交互过程的实现往往是由以上基本任务组合成的，称为组合交互任务。这里主要介绍一下论文中完成的常用的组合交互任务。

1. 对话框

在交互过程中经常需要从一个选择集中选择在一处的多个元素，如画笔有颜色、线形等多种属性可以选择，如字符属性有楷体、斜体、粗体和细体等。

2. 构造

这类任务中最主要的应用是用橡皮筋方式画直线、矩形、圆、弧等。

3. 动态控制

动态控制便于画水平、垂直约束线 拖动一个地物到新的位置 通过改变某个控制点来改变一个弧的形状等方面。

可视化中的三维交互技术包含：

(1)采用各种硬件(各种三维设备)及软件方法实现传统意义上更先进的人际交互；

(2)采用立体图的显示及绘制方法使用户能观察到具有真正立体深度的图形；

(3)采用可视语言的方法使用户能够在可视软件平台上实现方便的编程及作业；

(4)采用交互视算技术控制数据的产生过程等。

对于一个完整的图形系统来说，交互性能的好坏直接影响了整个系统性能的优劣。如何采用二维交互设备实时的输入三维平移、旋转、变换等参数。

(三)橡皮筋技术

橡皮筋技术是定位操作反馈形式中的一种。这个技术主要是针对变形体的要求，将动态连续的变形过程表现出来，直到产生用户满意的结果为止。在可视化系统中，视图的开窗放大、简单形体(如直线、矩形、椭圆及多边形等)以及各种曲线的绘制均用到这一技术。橡皮筋技术的操作步骤见图 13－4－8。

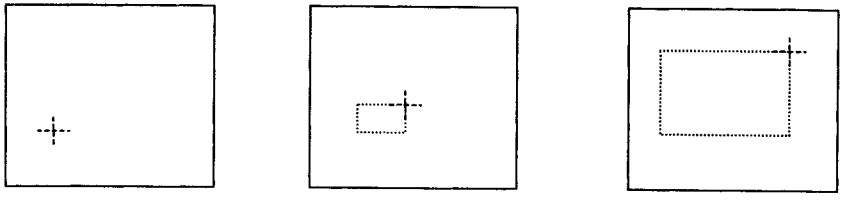


图 13－4－8　橡皮筋技术示意图

(四)三维跟踪球算法及实现

1. 三维跟踪球的旋转

当旋转一个三维跟踪球时，如果触摸点为 $P$ 点，沿着切线方向 $d$ 旋转时，其旋转轴 $a$ 将表示成：

$$a = OP \times d$$

式中：$O$ 是旋转球的中心；$OP$ 为 $O$ 点指向 P 点的矢量，如图 13－4－9 所示。

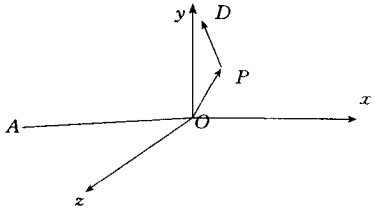



图 13－4－9　三维跟踪球的旋转

2. 用二维设备模仿三维跟踪球

三维跟踪球是一种有任意旋转能力的三维交互工具。算法的第一步是确定旋转轴的方向，第二步再确定旋转角的大小。

首先对最简单的情况加以讨论。图 13－4－10(a)显示了三维跟踪球的二维投影，$O'$ 是圆心，$P'$ 是二维控制设备的旋转起始点，$d'$ 是它的移动方向，如果 $P'=O'$，$d'$ 和 $x$ 轴的交角是 $\tau'$，显然，这时三维旋转轴在 $xy$ 平面上的方向可表示为

$$a(x,y,z)=[-\sin\tau\cos\tau'0]$$

对于稍复杂的情况，见图 13－4－10(b)，这时 $P'$ 点和 $O'$ 点在连线 $O'R'$ 上，这时的旋转轴可以根据前面的计算结果再绕 $y$ 轴旋转一定的角度 $\omega$ 得到，即

$$a(x,y,z)=[-\sin\tau'\cos\tau'0]\begin{bmatrix}\cos\omega & 0 & -\sin\omega\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\omega & 0 & \cos\omega\end{bmatrix}$$

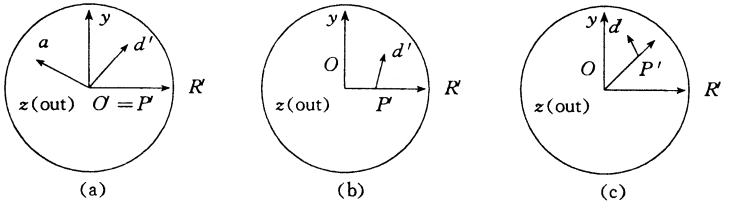



图 13－4－10　三维跟踪球的算法实现

里，可近似地认为

$$\omega=f\left(\frac{|O'P'|}{|O'R'|}\right)$$

$f(x)$ 为函数

$$f(x)=\begin{cases}0, & x\leqslant 0\\ x, & 0\leqslant x\leqslant 1\\ 90^{\circ}, & x\geqslant 1\end{cases}$$

注意当 $|O'P'|=0$ 时，退化成第一种情况，当 $|O'P'|=|O'R'|$ 时，旋转轴在 $yz$ 平面内。

对于最一般的情形，如图 13－4－10(c)所示。图中 $O'P'$ 和 $x$ 轴成 $\theta'$ 角，$d'$ 和 $x$ 轴成 $\theta'+\tau'$ 角。这种情况可以看作在前面计算的基础上在旋转 $\theta'$ 角(绕 $z$ 轴)，即

$$a(x,y,z)=[-\sin\tau'\ \cos\tau'\ 0]\begin{bmatrix}\cos\omega & 0 & -\sin\omega\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\omega & 0 & \cos\omega\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta' & \sin\theta & 0\\ -\sin\theta' & \cos\theta' & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

旋转轴确定后，旋转矩阵可以表示成

$$R_a(\varphi)=\begin{bmatrix}ta_x^2+c & ta_xa_y+sa_z & ta_xa_z-sa_y\\ ta_xa_y-sa_z & ta_y^2+c & ta_ya_z+sa_x\\ ta_xa_z+sa_y & ta_ya_z-sa_x & ta_z^2+c\end{bmatrix}$$

式中：$a_x$，$a_y$，$a_2$ 为 $a$ 在 $x$，$y$，$z$ 三个轴的分量，$s=\sin\varphi$，$c=\cos\varphi$，$t=1-\cos\varphi$，$\varphi$ 为绕轴旋转的角度。

旋转角度 $\varphi$ 是在位移量上乘以一个比例因子而标定的，比例因子可以通过下面的方法确定：

(1)通过圆心的光标运动将产生 180°的转动；

(2)绕圆一周将使物体旋转 360°。

一旦旋转轴及旋转角度确定，三维跟踪球的仿真算法便实现了。

## 第四节　MRAS 系统计算机实现

### 一、编程工具及方法简介

基于 GIS 的 MRAS 评价的运行环境为 Windows 环境。Microsoft Windows 是目前最流行的基于图形的多任务、多窗口系统，它提供了非常丰富的库函数，允许程序开发人员易于实现诸如菜单、对话框、滚动条以及其它组成友好用户界面的图形元素。以 Windows 为设计环境的应用程序，一般都具有一致的外部特征和命令结构。Windows 应用程

序主要有如下特征：

1. 通用图形用户界面

2. 队列式输入

3. 与设备无关的图形

4. 多任务特性

5. 动态数据交换

MRAS 矿产资源信息评价系统是在 MAPGIS 基础平台上开发的，虽然其提供的二次开发函数库可以使用多种语言进行二次开发，但考虑到与其基础平台的一致性，仍选用 Borland C++4.5 作为该系统的开发语言。Borland C++4.5 编程工具是一种面向对象的程序设计语言，它具有下述优点：

1. 保持了 C 语言的高运行效率、可移植性和强大的图形处理功能，即是一种独立于硬件设备的高级语言，也提供对硬件设备进行直接操作的函数。

2. 抽象性：即在一个主题中只注意与当前对象有关的内容，而忽视无关的内容。这样，就可以将具有大致相同操作的对象（包括过程和数据）抽象为一类，将共性的成分抽象到基类中，将特性的成分在子类中实现，以便数据或过程抽象和操作共享。

3. 封装性（信息隐蔽）：在开发整体程序结构时，每个设计模块（对象）的属性和操作被隐蔽或封装起来，外界只能通过一个受保护的接口访问模块对象，以提高系统的安全性。

4. 继承性：即从一个祖先获得特性。这样，程序员可以在基类中一次性定义公共属性和操作，在子类中针对特殊情况特化和扩展那些属性和操作。每个子类可以共享其基类中定义的数据结构和操作，每个子类可以增加数据结构和增加或扩展继承的操作。这样，可以省去不同的子类中公共部分的代码编程，效率高，层次分明。

5. 多态性：指一个名字可用于几个相关但稍有不同目的函数。继承性奠定了复用和显示表示共性的技术基础。但有时，新的子类和原有类（被继承的基类）之间有差异，这时，就可以使用多态性来重新定义在基类中包含的成员函数，即在子类中使用同样的函数名重新定义在基类中已包含的成员函数。

Borland C++ 编程语言的诸多优点为笔者采用面向对象分析和程序设计方法，进行 MRAS 可视化处理系统的计算机实现奠定了坚实的基础。

## 二、系统的用户窗口界面

为了保证系统应用方便性，各子系统都使用规范一致的用户界面。各子系统通过图

示化程度强、用户界面友好的主控界面来管理。

在基于 GIS 的 MRAS 可视化系统中，根据各子系统功能需求不同，设计实现基于多文档类型的系统界面。

Borland C++ 的 OWL 类库中为多文档(MDI)应用程序提供了三个基类：

1. TMDIFrame

TMDIFrame 是一个多文档界面框架窗口，作为 MDI 依从应用程序的主窗口的交叠窗口。TMDIFrame 对象自动处理一个 Windows 所需客户‘窗口’的创建和初始化。该类是一个可流类。

2. TMDIClient

TMDIClient 是多文档界面的客户窗口，用来管理 TMDIFrame 父窗口的 MDI 子窗口，是一个可流类。

3. TMDIChild

TMDIChild 定义了所有 MDI 子窗口的基本行为。作为一个 MDI 子窗口使用的类必须从 TMDIChild 派生。

在 MRAS 系统中根据不同的数据类型及对应的操作设计了多个应用窗口类，如重磁处理分析子系统，见图 13－4－11。

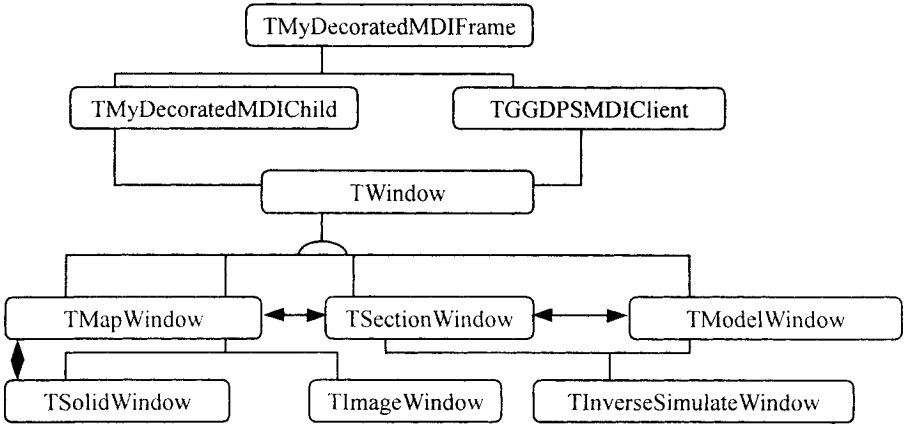



图 13－4－11　基于 GIS 的重磁数据可视化处理系统的窗口界面对象

### (一) MRAS 各子系统主界面

在编写 Windows 应用程序时，系统界面的设计通常要遵循以下 4 条原则：

1. 相似性原则

程序内部的相似性和与同类型其它应用软件的相似性。前者指应用程序在响应用

户的输入和输出时，对于同一类型问题的处理应该互相一致。后者指同种类型的应用软件在响应用户的输入或输出时，应使用相似的控制机制。

2. 灵活性原则

在设计用户界面的过程中，应考虑不同用户的不同需求、系统更新换代的影响以及异常事件的影响。

3. 直观性原则

从用户的思维及视觉的角度去考虑软件界面设计，用户界面必须能及时提供当前任务的执行状态，应该提供清晰的帮助信息以便用户在遇到问题时能及时得到帮助。

4. 实用性原则

能够被用户所接受，并易于使用。

在遵循以上 4 条原则的前提下，基于 GIS 的系统具有 Windows 界面风格的特点，其主界面如图 13－4－12 所示，主要包括标题栏、菜单栏、工具条、状态栏以及客户区。

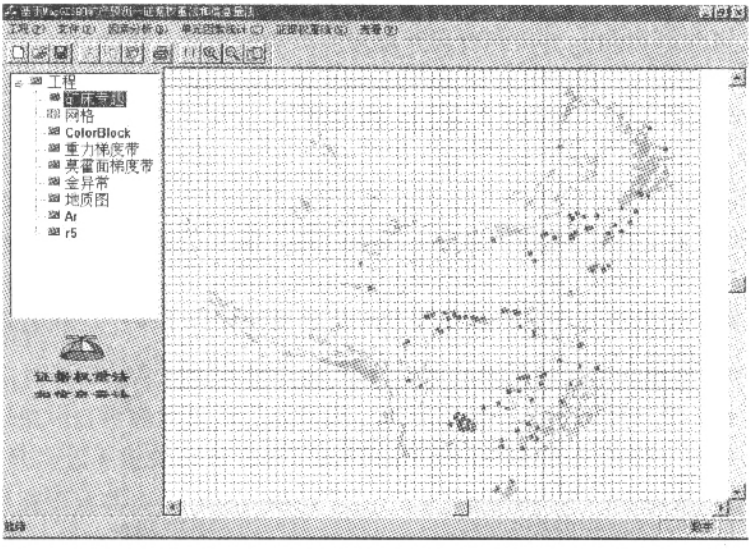



图 13－4－12　基于 GIS 矿产资源评价信息系统可视化处理系统的主界面

类 TMyDecoratedMDIFrame 是 MRAS 应用系统的框架，主要管理系统的菜单栏、工具条、状态栏等。

类 TGGDPSMDIClient 主要应用于键盘导航以及各个子窗口之间的布局等操作，并对应用程序中所用的 MAPGIS 系统库做初始化。

(二)主要显示

1. 平面地图窗口

该窗口是 MRAS 系统中主要显示窗口，见图 13－4－13，它接收 MRAS 空间数据库并进行处理与分析解释工作。由类 TMapWindow 来实现，TMapWindow 源于 OWL 类库中的 TWindow。

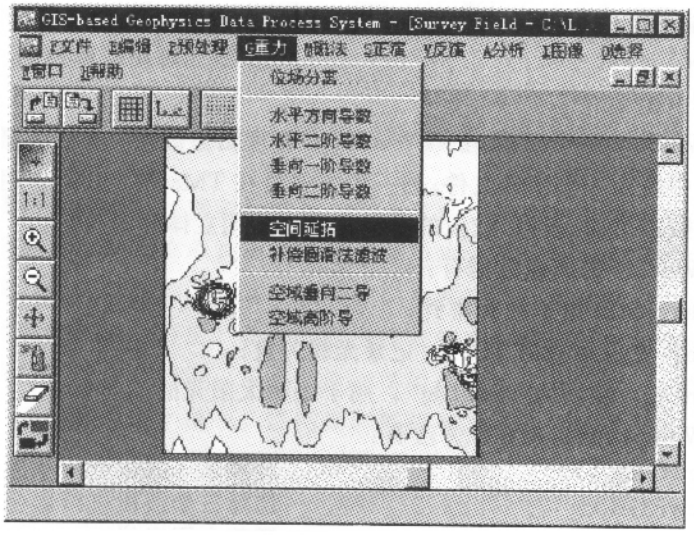



图 13－4－13　基于 GIS 的重磁数据可视化处理系统的平面地图窗口

类 TMapWindow 中的属性数据包括：

(1) m _ GmData，该变量的类型为 TGridData，负责管理物探原始数据；

(2) m _ AHInst，该变量的类型为 AREA _ HINST，负责记录窗口所对应工作区实例句柄；

(3) m _ Theme，该变量的类型为 TTheme，负责管理 m _ GmData 数据的点、线、区等工作区号，完成 m _ GmData 显示数据的准备工作；

(4) m _ ProParam，该变量的类型为 TProcesParam，它接受 TMapWindow 的命令，准备好处理参数后，将参数传递给异常数据对象，执行相应的操作。

2. 布局窗口

为了直观给用户管理预测评价工程中专题数据及专题的图形可视化数据，使用了 TLayoutMapWindows 类，使得窗口左边管理专题文件属性，右边相应显示图形空间数据库。

类 TLayoutMapWindows 属性数据包括：

(1) m _ AHInst　该变量的类型为 AREA－HInst，负责记录窗口所对应工作区实例句柄；

(2) m _ Theme　该变量的类型为 TTheme,负责管理空间专题数据。

3. 立体网格图窗口

类 TSolidWindow 源于 OWL 的 TWindow。TSolidWindow 属于 TMapWindow 的辅助窗口,只能由 TMapWindow 来激活,主要用于重磁异常数据的三维显示。在该窗口中并不存储重磁异常数据,但它有独立的 TViewer 实例,可以使用三维跟踪球的交互控制来动态地修改投影参数。

类 TSolidWindow 的属性包括:

(1) m _ pwData,该变量为指向 TMapWindow 中 m _ GmData 指针;

(2) m _ Viewer,类型为 TViewer;

(3) m _ ViewerDlg,类型为 TViewerDlg;

类 TSolidWindow 的主要操作方法有:

●evoid CmModViewer()　　激活三维跟踪球控制

4. 图像窗口

类 TImageWindow 源于 OWL 的 TWindow,管理图像数据,有两种激活方式:一种为直接从文件菜单中装入一个图像文件;另一种方式是在 TMapWindow 中用生成图像命令来产生。对于图象数据可以进行多波段的彩色合成,并用立体阴影显示。

类 TImageWindow 的属性数据有:

(1) m _ pMsi, MSI 数据结构指针;

(2) m _ Sun,变量类型为 TSun,记录光线矢量;

(3) m _ SunDlg,类型为 TSunDlg*,用于编辑太阳光的入射角度;

类 TlmageWindow 的主要操作方法有:

●void CmViewGray ()　　选择某一波段进行灰度显示

●void CmViewRGB ()　　选择三个波段进行彩色显示

●void CmModSun ()　　调整太阳光线

●void CmHistogramNormalize ()　　直方图均衡化

●void CmHistogramEquali2e ()　　直方图正态化

●void CmStatistieslnfo ()　　图像的统计信息

●void CmRGBSynthetic ()　　选择三幅图像进行彩色合成

5. 剖面图窗口

剖面窗口类 TSectionWindow 的基类为 OWL 的 TWindow,主要用来管理剖面数据 TSectionData。该窗口亦有两种激活方式:其一直接从文件菜单中装入一个剖面数据;其

二是在 TMapWindow 中用切剖面命令来产生。

类 TSectionWindow 的属性为：

(1) m _ SectionData，该变量类型为 TSectionData，记录剖面异常数据；

(2) m _ SetGmData，该变量类型为 TSectionData，记录剖面正演异常场；

(3) m _ AHInst，类型为 AREA _ HINST，该窗口所对应的工作区实例句柄；

(4) m _ Theme，类型为 TTheme，剖面数据的显示工作区。

类 TSectionWindow 的主要操作方法有：

- void SimulateData (TAnomalySolids * buf)　剖面异常形体的正演
- BOOL LoadSctn (const char * fname = 0)　装入新的剖面数据
- void CmSaveSctn()　保存剖面异常
- void CmFieldType ()　设置剖面异常类型
- void CmPPSmooth ()　平滑剖面异常

# 第五章　基于 GIS 重磁数据处理子系统

## 第一节　重磁数据处理方法

实测重磁数据是地下所有重磁异常体的综合反映,异常成分极为复杂,首先是如何从叠加场中将所研究对象的异常单独而完整的分离出来;其次,实测数据还与野外工作方法、地形、地物有关,即含有各种误差和干扰成分,这些同样严重影响解释的可靠性,需要将这些非有用异常成分去掉;再次,各种物探资料都存在多解性,重磁资料也不例外。如果对一个物理现象用多种方法处理,从多角度将场源与地质体相联系,就能从各个侧面显示地质构造特征,使多解趋向于单一,以提高解释成果的可靠程度。

### 一、重磁数据处理工作流程

重磁数据处理解释的工作流程如图 13 – 5 – 1 所示。

1. 资料收集。包括重磁资料和其它物探、地质资料。

2. 物性(密度和磁性)资料的收集和实测。岩石的物性研究是正确开展物探工作的基础,是物探与地质相联系的纽带,也是能否完成地质任务的关键。

3. 预处理。在地面观测的重磁数据中,由于一般均含有观测误差以及地表、浅层不均匀的干扰,特别是在高精度测量数据中,采样点密,畸变点数值高,形态复杂。因此要对原始资料进行预处理,以尽可能压制或消除表层、浅层干扰,或统一测网、统一基点,形成数据处理前的基础资料。

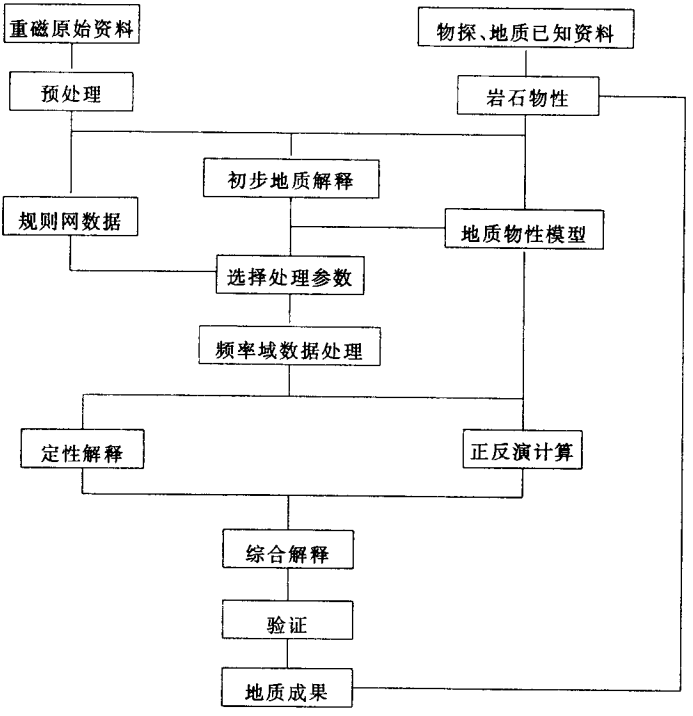



图 13－5－1　重磁数据处理解释工作流程图

4. 网格化数据。由于计算机处理重磁资料需要输入规则网数据信息，因此要把重磁场变成规则网位场数据。

5. 处理参数的选择。重磁场频率域位场转换和滤波包括各种分量变换、微积分变换、向上或向下延拓、区域场和局部场提取以及各种功能参数。在具体运用中可根据测区特征和地质任务选择几种能说明问题的参数。

6. 定性、定量解释。定性是基础，因为定量是在定性解释基础上进行的，所以一般都用先定性后定量的原则，定性、定量反复进行，互相验证；另外要遵从从已知到未知的原则；第三要对已知物探、地质资料进行综合分析，尽可能地揭示研究对象全貌。

## 二、重磁异常转换与滤波的基本原理

重磁异常处理方法有空间域和频率域两种。因为频率域区分不同深度异常的能力强，特别是在频率域容易建立位场滤波系统，能方便地实现各种异常的转换和滤波，并且能同时进行多种处理，计算速度快，所以频率域成为处理重磁资料的常用方法。

频率域处理方法的原理是把重磁异常曲线看成是由不同频率的谐波组成，谐波的变化不是随时间变化，而是随空间变化。谐波的振幅和相位是频率的函数，称为振幅谱、相位谱，统称频谱。通过傅氏变换，把信息论中的频率、频谱等物理概念引进重磁勘探领域。

频率域重磁异常处理的核心是傅氏变换，把空间域的卷积运算变为频率域的乘积运算。只需预先求出各种位场的波谱算子，计算时由实测场值 $f(x,y)$ 通过傅氏变换求出波谱值 $F(u,v)$，将波谱值乘上波谱算子 $H(u,v)$，再进行傅氏逆变换就得到转换后的波谱值 $f_H(x,y)$。运算过程，简单的可用图 13－5－2 表示。

$$f(x,y) \xrightarrow[\text{傅氏变换}]{F} F(u,v) \longrightarrow F(u,v)\cdot H(u,v) \longrightarrow F_{\mathrm{H}}(u,v) \xrightarrow[\text{塑傅氏变换}]{F'} f_{\mathrm{H}}(x,y)$$

图 13－5－2　重磁异常频率域处理方法

表 13－5－1 给出了重磁数据频率域滤波处理程序的基本滤波算子。

对重磁数据进行频率域滤波处理，首先要求的是离散的网格结点上的重磁数据的频谱，二维离散数据傅氏变换计算公式为：

$$F_{\mathrm{mn}} = \frac{1}{MN}\sum_{j=0}^{M-1}\sum_{k=0}^{N-1} f(js,kt,0)\exp\left[-2\pi i\left(\frac{m}{M}j+\frac{n}{N}k\right)\right]$$

$$m = -\frac{M}{2},-\frac{M}{2}+1,\cdots,0,\cdots,\frac{M}{2}-1;\quad n = -\frac{N}{2},-\frac{N}{2}+1,\cdots,0,\cdots,\frac{N}{2}-1$$

式中：$m,n$ 为频率域坐标系中的点、线号；$M,N$ 为测线数，测点数；$s$ 为线间距；$t$ 为点间距；$j,k$ 为原始数据的线数、点数序号；$f(js,kt,0)$ 为对应的 $j,k$ 点的场值。

二维离散傅氏逆变换计算公式为：

$$f(js,kt,z) = \sum_{m=-\frac{M}{2}}^{\frac{M}{2}-1}\sum_{n=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} F^{*}_{\mathrm{mn}}\exp\left[2\pi i\left(\frac{m}{M}j+\frac{n}{N}k\right)\right]$$

$$j = 0,1\cdots,M-1;\quad k = 0,1,\cdots,N-1$$

式中：$F^{*}_{\mathrm{mn}}$ 为转换值的傅里叶变换；$f(js,kt,z)$ 为第 $j$ 线 $k$ 点 $z$ 高度处的场值。

## 三、重磁异常的反演

所谓重磁异常的反演，即定量解释，指的是依据已获得的重磁数据异常特征、数值大小、分布情形等，并结合物性资料，求解地下地质异常体的形状和空间位置。例如根据重磁异常曲线计算磁性体和密度体深度。

重磁异常的反演问题的基本做法分为两步：第一步用一个或一组几何形状简单、密度或磁化强度均匀分布或以某一规律分布的模型来表示形状复杂、密度或磁化强度分布不均匀的地质体；第二步根据观测异常确定模型体的几何参数（位置、大小等）和物性参数（密度、磁化强度等），以此来表示实际地质体。由观测异常确定模型体的参数有多种方法，可以一次完成，如特征点法、任意点法、切线法等，也可以多次完成，如拟合选择法、最优化反演、人机交互反演等。

表 13－5－1　重磁资料频率域滤波处理基本滤波算子一览表

| 转换类型 | 算　子 |
|---|---|
| 上　延 | $\exp\left(2\pi z\sqrt{u^2+v^2}\right)\quad(z<0)$ |
| 下　延 | $\exp\left(2\pi z\sqrt{u^2+v^2}S_{mn}\right)\quad(z>0)$ |
| $Z_a\rightarrow X_a$ | $\dfrac{iu}{\sqrt{u^2+v^2}}$ |
| $Z_a\rightarrow Y_a$ | $\dfrac{iv}{\sqrt{u^2+v^2}}$ |
| $\Delta T\rightarrow Z_a$ | $\dfrac{\sqrt{u^2+v^2}}{i\ (P_0u+Q_0v)\ +R_0\ \sqrt{u^2+v^2}}$ |
| $\Delta T\rightarrow X_a$ | $\dfrac{iu}{i\ (P_0u+Q_0v)\ +R_0\ \sqrt{u^2+v^2}}$ |
| $\Delta T\rightarrow Y_a$ | $\dfrac{iv}{i\ (P_0u+Q_0v)\ +R_0\ \sqrt{u^2+v^2}}$ |
| $\dfrac{\partial Z_a}{\partial x}$ | $2\pi iuS_{mn}$ |
| $\dfrac{\partial Z_a}{\partial y}$ | $2\pi ivS_{mn}$ |
| $\dfrac{\partial Z_a}{\partial z}$ | $2\pi\ \sqrt{u^2+v^2}S_{mn}$ |
| 磁化方向转换 | $\dfrac{i\ (P_2u+Q_2v)\ +R_2\ \sqrt{u^2+v^2}}{i\ (P_1u+Q_1v)\ +R_1\ \sqrt{u^2+v^2}}$ |
| $Z_a\rightarrow\Delta g$ | $\dfrac{f\delta}{2\pi j\ (iPu+Qv)\ +R\ \sqrt{u^2+v^2}}$ |
| 方向二次导数 | $4\pi^2\ (iuP+ivQ+\sqrt{u^2+v^2}R)\ S_{mn}$ |
| 补偿圆滑滤波 | $\phi_n\ (u)\ =\ [2-\phi_{n-1}\ (u)]\ \phi_{n-1}\ (u)\ \phi_0\ (u)\ =e^{-200u}$<br>$\phi_m\ (v)\ =\ [2-\phi_{m-1}\ (v)]\ \phi_{m-1}\ (v)\ \phi_0\ (v)\ =e^{-200v}$ |
| 维纳滤波 | $\dfrac{1}{1+\dfrac{B^2}{A^2}\exp\ [2\overline{w}\ (h_1-h_2)]}$ |
| 匹配滤波 | $\dfrac{1}{1+\dfrac{B}{A}\exp\ [\overline{w}\ (h_1-h_2)]}$ |
| 逐次向下延拓 | $\exp\left[-2\pi\gamma\left(\dfrac{17}{3^5}\right)h\right]\prod_{n=2}^{5}\left\{2\exp\left[2\pi\gamma\left(\dfrac{2}{3}\right)^n hs\right]-\exp\left[2\pi\gamma\left(\dfrac{2}{3}\right)^n h\ (2s-1)\right]\right\}$ |
| 椭圆窗 | $\left[\dfrac{(\lvert u\rvert-u_0)^2}{\Delta u^2}+\dfrac{(\lvert v\rvert-v_0)^2}{\Delta v^2}\right]^{0.5}\pi$ |
| 扇形窗 | $\dfrac{\lvert\arctan\left(\dfrac{u}{v}\right)\rvert\pi}{\Delta\varphi}$ |

重磁异常的具体反演方法在本书中不作详细讨论。

## 第二节　成矿预测中地球物理资料的有效处理方法

在成矿预测中,物探的诸多方法都可直接或间接地发挥作用。但在中、大比例尺成矿预测中主要使用重力与磁法。

随着计算机技术的普及和对重磁资料解释方法的进一步研究,在成矿预测中已经形成了一套较为合理的重磁资料解释方法。该方法主要包括频率域滤波解释法和上延系列水平一导 – 垂向二导关联解释法。

### 一、频率域滤波方法

应用频率域滤波方法进行重磁资料解释推断的核心任务是分离深源异常场和浅源异常场。其理论依据是区域重磁场的频谱具有明显的高、低频特征差异,而高、低频特征分别反映了浅部、深部地质体的客观存在。

该方法的基本步骤如下:

1. 从重磁勘探的实测数据中将深源场和浅源场分离出来,以便根据所提取的区域异常和局部异常分别研究它们与深部、浅部各种地质目标的相关性。

2. 对分离后的深源场、浅源场进行化极、延拓、计算导数等突出信息进行处理,以求得能够反映各种地质目标的有用信息,构成从不同角度突出有用信息的‘派生参量’系列图件。

3. 在分离处理、突出信息处理的基础上,以地质概念模型为依据,快速的对各种‘爬升参量’图件进行综合分析,借以划分深部、浅部地质构造和圈定深部、浅部岩体。

4. 根据地质解释的结果,及时编制一套可供成矿预测使用的推断地质类图件,为成矿地质环境和成矿控制因素的分析提供依据。

重磁资料经过频率域滤波处理后,可以编制的基础图件有:

1)根据重力资料频率域滤波结果,可编制 9 张供解释用的图件:

(1)重力区域场平面图;

(2)重力区域场垂向二次导数平面图;

(3)重力区域场水平方向一次导数平面图(有 0°、45°、90°、135°四个方向);

(4)重力区域场水平梯度平面图；

(5)重力局部场平面图；

(6)重力局部场垂向一次导数平面图。

2)根据航磁资料频率域滤波结果,可编制 10 张供解释用的图件；

(1)航磁化极异常平面图；

(2)航磁化极区域场平面图；

(3)航磁化极区域场垂向二次导数平面图；

(4)航磁化极区域场水平方向(0°、45°、90°、135°)一次导数平面图；

(5)航磁化极区域场水平梯度平面图；

(6)航磁化极局部场平面图；

(7)航磁化极局部场垂向一次导数图；

3)将重磁解释推断成果进一步综合,又可编制几种综合性成果图件：

(1)"立体性"构造与岩体推断图

根据航磁、重力不同深度上的推断结果,结合地表地质情况,构制立体地质略图,用三个地质断面加以组合。

(2)深部控矿信息图

将航磁、重力推断解释成果中有关地下一定深度范围内的控矿因素和成矿地质背景的信息加以综合,即可编制地下深部控矿信息图。

(3)浅部控矿信息图

将航磁、重力推断解释成果中有关浅部或地表一定范围内的控矿因素和成矿地质背景的信息加以综合,即可编制地下深部控矿信息图。

## 二、上延系列水平一导－垂向二导关联解释方法

该方法的理论依据是在地质演化过程中,在一定空间范围内发生的各种地质事件及形成的地质体不是孤立的,由它们引起的重、磁场也必然存在着某种联系。

重、磁场上延系列水平一导－垂向二导关联解释方法就是强调在进行地质解释时,将重、磁场的各种变化进行联系与对比。采用该方法进行重磁资料地质解释的主要工作步骤为：

1. 对重磁进行空间变换处理,即将布格重力异常数据和化极处理后的航磁异常数据分别进行向上延拓(延拓高度为 500m、1000m、2000m 等)。

2. 对不同延拓高度上的重力场和航磁化极场分别求取垂向二次导数以及 4 个方向

(0°、45°、90°、135°)的水平一次导数。

3. 分别对所求得的垂向二次导数异常和水平一次导数异常进行解释推断,编制相应的解释结果图件。

4. 将各解释结果图件进行立体化关联,获得有关地质体的推断成果,并编制重力、航磁单方法推断成果图以及重磁综合推断成果图。

重磁异常经过上述几步的处理之后,仍需编制大量的图件:

(1)系列延拓图;

(2)系列水平一阶导数图;

(3)系列垂向二阶导数图;

(4)系列初步推断图;

(5)重磁综合推断成果图。

综上所述,在成矿预测中对重磁资料的有效处理产生了大量的成套图件,而这些图件正是矿产预测的基础资料。寻找一种工具,能较好地管理、分析这些具有空间属性的基础图件,是提高矿产预测效率与效果的关键。

## 第三节　基于 GIS 重磁系统分析与设计(GGDPS)

### 一、系统的功能需求

GGDPS(GIS - Based Gravity and Magnetic Data Visual Processing System)系统基本需求:

1. 提供对物探原始数据的检查、编辑、修改等功能;

2. 提供物探数据预处理中的基本方法,包括各种不规则数据的网格化、基点网的平差、数据的平滑处理、位场数据的曲化平及重力数据的地形校正与布格校正;

3. 提供数据处理中的常用方法,包括位场的导数计算、解析延拓、区域与异常场的分离、重磁异常各分量间的相互转换、重磁异常的相关分析,并且实时显示处理结果,这里的'实时'是指异常场将随着处理参数的改变而变化,使用户随时了解处理参数是否合适;

4. 提供人机交互的重磁简单模型的编辑、修改的实时正反演功能,这里的'实时'是

指重磁模型的正演异常曲线与其模型的变化是同步的，这样在用户修改场源模型的形态或物性参数时，即可同时了解异常曲线的拟合结果；

5. 提供平面图、剖面图、立体网格图、立体阴影图、等值线图、彩色分级图等的图件显示方式，并且各种图件之间可以交替显示；

6. 通过显示器可作处理结果的实时显示，监督处理解释过程及中间结果，给出形象而直观的结果图示；

根据以上的基本需求分析，基于 GIS 的重磁数据可视化处理系统的总体结构如图 13－5－2 所示。

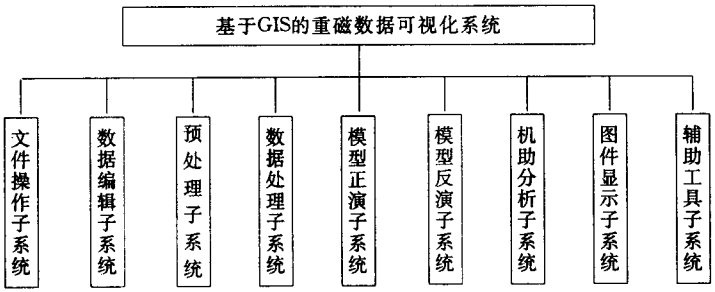



图 13－5－2　基于 GIS 的重磁数据可视化处理系统总体结构

另外，软件应以方便灵活为宗旨，为适应普通物探人员对计算机并不是非常精通的特点，在系统中，所有操作均在视窗环境下全部菜单化、汉字化并以鼠标实现人机交互操作，清晰直观，所有术语均应使用物探数据处理中的语言并易于掌握。

## 二、GGDPS 系统面向对象设计

### (一)系统对象

1. 异常数据对象

该对象封装了重磁勘探所获取的实测资料等属性和对这些属性所做的各种处理(即方法)。物探采集的数据常用两种方式记录：离散数据和网格数据(包含剖面数据)。前者记录每个观测点的位置与观测值，即($x$，$y$，$v$)；后者记录整个测区的观测线数、线间距，每条测线的观测点数、点间距。根据这些问题空间数据模型应该标识 4 个对象 TGeophysial－Data、TSectionData、TDiscData、TGridData 来完成对异常数据所作的各种处理。

下面分别讨论每个异常数据对象所拥有的属性和方法。

(1)异常数据类 TGeophysicalData

TGeophysicalData 作为一个基类，主要描述异常数据共有属性及行为，是离散数据

类 TDiscData、剖面数据类 TSectionData、网格化数据类 TGridData 的基类，它的定义如表 13－5－2：

表 13－5－2　TGeophysicalData 的类定义

| 类名：TGeophysicalData | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：无 | | | |
| 用途/描述：描述重磁勘探数据包括离散点数据、网格化数据、剖面数据的公共属性和对这些属性的操作， | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 保护 | bool | m _ IsLoad | 描述数据是否来源于文件 |
| 保护 | bool | m _ IsDirty | 描述数据是否进行了某种处理 |
| 保护 | short | m _ FieldType | 描述重磁场类型 |
| 保护 | short | m _ DataMode | 用于标志数据类型 |
| 保护 | float | m _ fGmMin | 观测数据的最小值 |
| 保护 | float | m _ fGmMax | 观测数据的最大值 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | 用途/注释 | |
| 保护 | SetDirty() | 设置数据的改变标志 | |
| 保护 | SetDataType() | 设置异常场的类型 | |
| 保护 | SetDataMode() | 设置异常数据类型 | |
| 公共 | IsDirty() | 获取数据是否进行了处理的信息 | |
| 公共 | IsLoad() | 获取数据是否从文件装入 | |
| 公共 | GetDataType() | 获取异常场的类型 | |
| 公共 | GetDataMode() | 获取异常数据的类型 | |
| 公共 | GetGmRange() | 获取异常场的观测范围 | |

(2)剖面数据类 TSectionData

TSectionData 是一个导出类，在本系统中对该类进行了简化，要求所描述的削面线是直线，并且该测线上的测点间距相等。类 TSectionData 的定义见表 13－5－3。由于本书侧重于网格化重磁数据的处理，故在该类的服务中仅提供了剖面数据的平滑处理。

(3)离散数据类 TDiscData

TDiscData 是一个导出类，其定义见表 13－5－4。这个类主要是针对重磁勘探中的不规则测网(即离散点数据)而设计的。通常必须将此种数据做网格化后才可做重磁数据处理。

表 13－5－3　TSectionData 的类定义

| 类名：TSecttonData | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TGeophyslcalData | | | |
| 用途/描述 剖面数据 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 私有 | F _ DOT | m _ StartPosition | 剖面起始点位置 |
| 私有 | float | m _ LineDirection | 剖面线的方位角 |
| 私有 | float | m _ DistanceOfStations | 测点间距 |
| 私有 | long | m _ NumberOfStations | 测点个数 |
| 私有 | float huge* | m _ ptSurveyData | 剖面数据，长度为 m _ NumberOfStations |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | GetStartPosltion() | | 获取该削面线的起始点坐标 |
| 公共 | SmoothData() | | 用多种方法进行数据平滑处理 |
| 公共 | SimulateProfileData() | | 计算已知二维异常体的理论场值 |

表 13－5－4　TDiscData 的类定义

| 类名：TDiscData | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TGeophysicalData | | | |
| 用途/描述 离散点数据 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 私有 | long | m _ Num | 不规则网数据个数 |
| 私有 | F _ DOT huge* | xy | 不规则网数据 X 坐标 Y 坐标 |
| 私有 | float huge* | xygm | 不规则网数据观测值 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | DiscDataToGridData() | | 不规则网数据网格化 |

**(4)网格化数据类** TGridData

TGridData **是一个导出类，其类定义见表** 13－5－5。

表 13－5－5　TGridData 的类定义

| 类名：TGridData | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TGeophysicalData | | | |
| 用途/描述：网格化数据，描述一种矩形网格 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 私有 | F_RECT | m_fRectGm | 测量区域的范围 |
| 私有 | long | m_NumY，m_NumX | Y 方向、X 方向测线数 |
| 私有 | float | m_DisY，m_DisK | Y 方向、X 方向线间距 |
| 私有 | float huge* | m_ptGm | 网格化测量数据，长度为 m_NumY* m NumX |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 私有 | TWOFFT() | | 用于原始网格化数据的二维傅氏变换 |
| 私有 | ChangeGmSize() | | 改变数据量的大小 |
| 公共 | LoadData() | | 从文件中装入数据 |
| 公共 | CalOneSection() | | 在二维测定网上切一条削面 |
| 公共 | GenerateImage() | | 生成一幅黑白或彩色图像 |
| 公共 | EnlargeEdges() | | 二维数据扩边 |
| 公共 | SimpleModelSimulate(TsimulateModel*) | | 单个简单形体正演 |
| 公共 | CompoundSlmulate() | | 复合型体正演 |
| 公共 | UpDownWardContination() | | 位场的解析延拓 |
| 公共 | CompensateSmoothFilter() | | 补偿圆滑法滤波 |
| 公共 | ArbitDirectHorzDerivative() | | 任意水平方向的导数 |
| 公共 | TransMmdt() | | 磁化方向的转换(包括磁异常化极) |
| 公共 | TrahsThreenCompent() | | DeltaT，DeltaZ 的三分量转化 |
| 公共 | PseodoGravityAnomaly() | | 假重力异常换算 |
| 公共 | Smooth2DData() | | 二维网格化数据平滑处理 |
| 公共 | Vertical2Derivative() | | 求垂向二次导数 |
| 公共 | Ppe4Derivative() | | 求位场的四阶导数 |
| 公共 | SeparateFields() | | 分离区域场与局部场 |
| 公共 | CalGradOfGridData() | | 计算网格化数据的梯度 |

网格化数据是重磁数据处理的基础，一些常规处理方法如区域场与局部场的分离、位场平滑、向上向下延拓、求水平方向导数、求垂向导数以及磁化方向转换等操作全部封装在此类中。另外，在此类中提供了二维傅里叶变换方法。

2. **处理参数对象** TProcessParam

类 TProcessParam 是一个各种重磁数据处理时所用的参数的封装，该类可近似看成一过滤器，当需要对数据进行某种处理时，从该类中取出所需的参数结构，经过人工交互修改后，用过滤器判断出所给参数的正确性。如果参数正确，便可发送一条消息给异常数据对象，异常数据对象响应该消息进行相应的数据处理。

3. 物性参数对象 TPhyParam

类 TPhyParam 定义了异常体所具有的物理参数，对于重磁勘探来说，主要包括地质体的密度、磁化强度、磁化倾角、磁化偏角等。其定义见表 13－5－6。

表 13－5－6　TPhyParam 的类定义

| 类名：TPhyParam | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：无 | | | |
| 用途/描述：异常体的物性参数 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 私有 | float | m _ density | 异常体与围岩的密度差 |
| 私有 | float | m _ inclination | 磁化倾角 |
| 私有 | float | m _ declination | 磁化偏角 |
| 私有 | float | m _ magnetization | 磁化强度 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | SetDensity(f) | | 设置异常体与围岩的密度差 |
| 公共 | SetInclnt(float) | | 设置磁化倾角 |
| 公共 | SetDecInt(float) | | 设置磁化偏角 |
| 公共 | SetMagnet(float) | | 设置磁化强度 |
| 公共 | GetDensity() | | 获取异常体与围岩的密度差 |
| 公共 | GetInclnt() | | 获取磁化倾角 |
| 公共 | GetDeclnt() | | 获取磁化偏角 |
| 公共 | GetMagnet() | | 获取磁化强度 |
| 公共 | TPhyParam& GetPhyParam() | | 获取异常体的物性参数结构 |
| 公共 | GetEffectiveMag(float d,float &ms,float &dis) | | 根据测线方向，计算有效磁化强度 |

4. 异常形体对象

在本系统中,标识异常形体对象主要是为完成剖面异常的人机交互反演服务的。从系统所考虑的二维形体出发,定义了 TGMASRect、TGMASCircle、TGMASPolygon、TGMASSteps 等 4 个对象。另外为便于程序以后的扩展,定义了抽象类 TGraphicItem 和 TAnomalySolid。下面逐个讨论其属性与方法。

(1)图形类 TGraphicItem

TGraphicItem 是重磁异常几何形体参数的一个抽象类。所谓抽象类是指至少带有一个纯虚函数的类,它没有实例,只能作为其它类的基类。TGraphicItem 定义了异常体对象所共有的属性及操作,其类定义见表 13 - 5 - 7。在类 TGraphicItem 中定义了三个纯虚成员函数 Contains(),Offset()和 Draw()。这三个函数在其导出类中必须进行定义,执行各自不同操作。

表 13 - 5 - 7　TGraphicItem 的类定义

| 类名:TGraphhicItem | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先:无 | | | |
| 用途/描述:异常体的几何图形 | | | |
| 数据成员(属性): | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 保护 | TFRect | m_rect | 图形对象所占的矩形范围 |
| 保护 | BOOL | m_selected | 该对象是否被拾取的标志 |
| 保护 | int | m_shape | 该图形对象的几何形状 |
| 成员函数(服务): | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | TGraphicItem() | | 构造函数 |
| 公共 | int operator = = (const TGraphicItern& item) const | | 该类所拥有的比较操作运算 |
| 公共 | virtual int Contains(const TFDot& dot,int& n) const = 0 | | 纯虚函数,进行图形对象的拾取操作 |
| 公共 | virtual int Offset(float dx,float dy) const = 0 | | 纯虚函数,图形对象的移动操作 |
| 公共 | Virtual void Draw(TDC& dc,float rate = 1.0) = 0 | | 纯虚函数,绘制该图形对象 |

(2)异常体对象 TAnomalySolid

类 TAnomalySolid 亦是一个抽象类,该类是所有异常体类的父类。TAnomalySolid 类源于 TGraphicItem 和 TPhyParam,通过继承,使异常体既具有了几何参数,又拥有了物性参数。其定义见表 13 - 5 - 8。

表 13－5－8　TAnomalySolid 的类定义

| 类名：TAnomalySolid | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TGraphicItem、TPhyParam | | | |
| 用途/描述：异常地质体，具有几何形状和物性参数 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 保护 | int | m_type | 异常体所具有的物性参数类型 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | GetAnomaly Type() | | 获取异常体所具有的物性参数类型 |
| 公共 | int operator = = (const TanomalySolid&) const | | 该类所拥有的比较操作运算 |

以 TAnomalySolid 类为模板，利用 Borland C$^{++}$ 的特性建立了一个包容器 TAnomalySolids。使用包容器，便可以很方便的将不同形状的地质体组合在一起，进行多个地质体的位场计算。包容器类 TAnomalySolids 说明为：

typedef TIArrayAsVectOr < TAnomalySolid > TAnomalySolids

另外，相对 TAnomalySolids，还定义了一个迭代器，可以用它来实现包容器中所有元素的遍历。其说明如下：

typedef TIArrayAsVectorIterator < TAnomalySolid > TAnomalySolidnerator

(3)横截面为矩形的水平柱体对象 TGMASRect

类 TGMASRcct 的定义见表 13－5－9。

表 13－5－9　TGMRASRect 的类定义

| 类名：TGMASRect | | |
|---|---|---|
| 祖先：TAnomalySolid | | |
| 用途/描述：横截面为矩形的水平柱体 | | |
| 数据成员(属性)：无 | | |
| 成员函数(服务)： | | |
| 可见性 | 名称 | 用途/注释 |
| 公共 | int operator = = (const TanomalySolid&) const | 该类所拥有的比较操作运算 |
| 公共 | Contains(const TFDot& dot,int& n) | 使用点 dot 拾取该矩形 |
| 公共 | Draw() | 绘制横截面为矩形的地质体 |
| 公共 | Offset() | 交互操作中移动该地质体 |

(4)横截面为圆的水平柱体对象 TGMASCircle

类 TGMASCircle 的定义见表 13－5－10。在这种类型的简单异常形体中，其空间位置由异常体埋深和圆柱体半径来描述。

表 13－5－10　TGMRASCircle 的类定义

| 类名：TGMASCircle | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TAnomalySolid | | | |
| 用途/描述 水平圆柱异常地质体 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 私有 | TFDot | m_centre | 水平圆柱体的埋深 |
| 私有 | float | m_radius | 水平圆柱体的半径 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | Contains(const TFDot& dot,int& n) | | 使用点 dot 拾取该圆柱体 |
| 公共 | Draw() | | 绘制水平圆柱体 |
| 公共 | Offset() | | 交互操作中移动该地质体 |
| 公共 | SetCentre() | | 设置水平圆柱体的埋深 |
| 公共 | SetRadius() | | 设置水平圆柱体的半径 |
| 公共 | GetCentre() | | 获取水平圆柱体的埋深 |
| 公共 | GetRadius() | | 获取水平圆柱体的半径 |

(5)横截面为多边形的水平柱体对象 TGMASPolyson

类 TGMASPolygon 的定义见表 13－5－11。

表 13－5－11　TGMRASPolygon 的类定义

| 类名：TGMASPolygon | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TAnomalySolid | | | |
| 用途/描述 横截面为多边形水平柱体 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 私有 | int | m numPoints | 多边形的顶点个数 |
| 私有 | TFDot* | m_polyPoints | 多边形的顶点埋深 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | Contains (const TFDot& dot,int& n) | | 使用点 dot 拾取该多边形柱体 |
| 公共 | Draw() | | 绘制横截面为多边形水平柱体 |
| 公共 | Offset() | | 交互操作中移动该地质体 |
| 公共 | GetPolyPoints() | | 获取多边形的顶点埋深 |
| 公共 | GetNumPoints() | | 获取多边形的顶点个数 |
| 公共 | SetPolyPoints() | | 设置多边形的顶点埋深 |
| 公共 | ModifyRect() | | 调整多边形的矩形范围 |

对于横截面为多边形的水平柱体，其空间位置由多边形的顶点坐标描述。在类中的多边形数据定义为动态数组，每个顶点的数据类型为 F_DOT，记录了该顶点的埋深与 X 坐标。类 TGMASPolygon 中提供了 ModifyRect()方法，用于当改变多边形某顶点后重新

计算多边形的矩形范围。

(6)水平台阶地质体对象 TGMASSteps

类 TGMASSteps 的定义见表 13－5－12。

表 13－5－12　TGMASSteps 的类定义

| | | | |
|---|---|---|---|
| 类名：TGMASSteps | | | |
| 祖先：TAnomalySolid | | | |
| 用途/描述 水平台阶地质体 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | Contains(const TFDot& dot,int& n) | | 使用点 dot 拾取该多边形柱体 |
| 公共 | Draw() | | 绘制横截面为多边形水平柱体 |
| 公共 | Offset() | | 交互操作中移动该地质体 |

## (二)系统结构

GGDPS 各类对象的关系结构如图 13－5－3，对象之间的通讯如图 13－5－4。

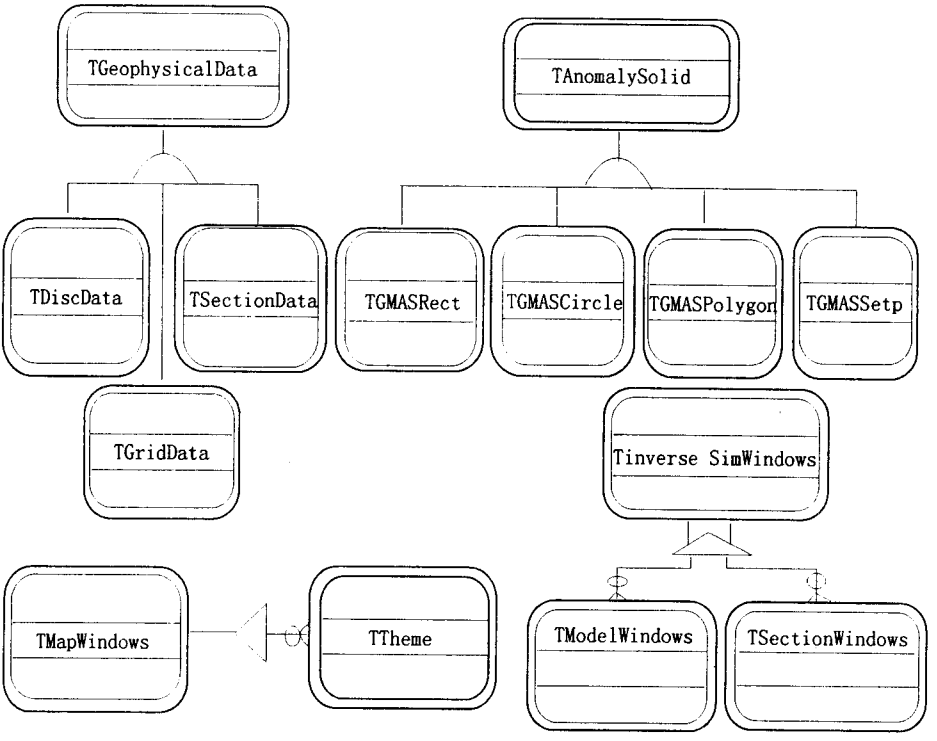



图 13－5－3　基于 GIS 的重磁数据可视化处理系统的结构

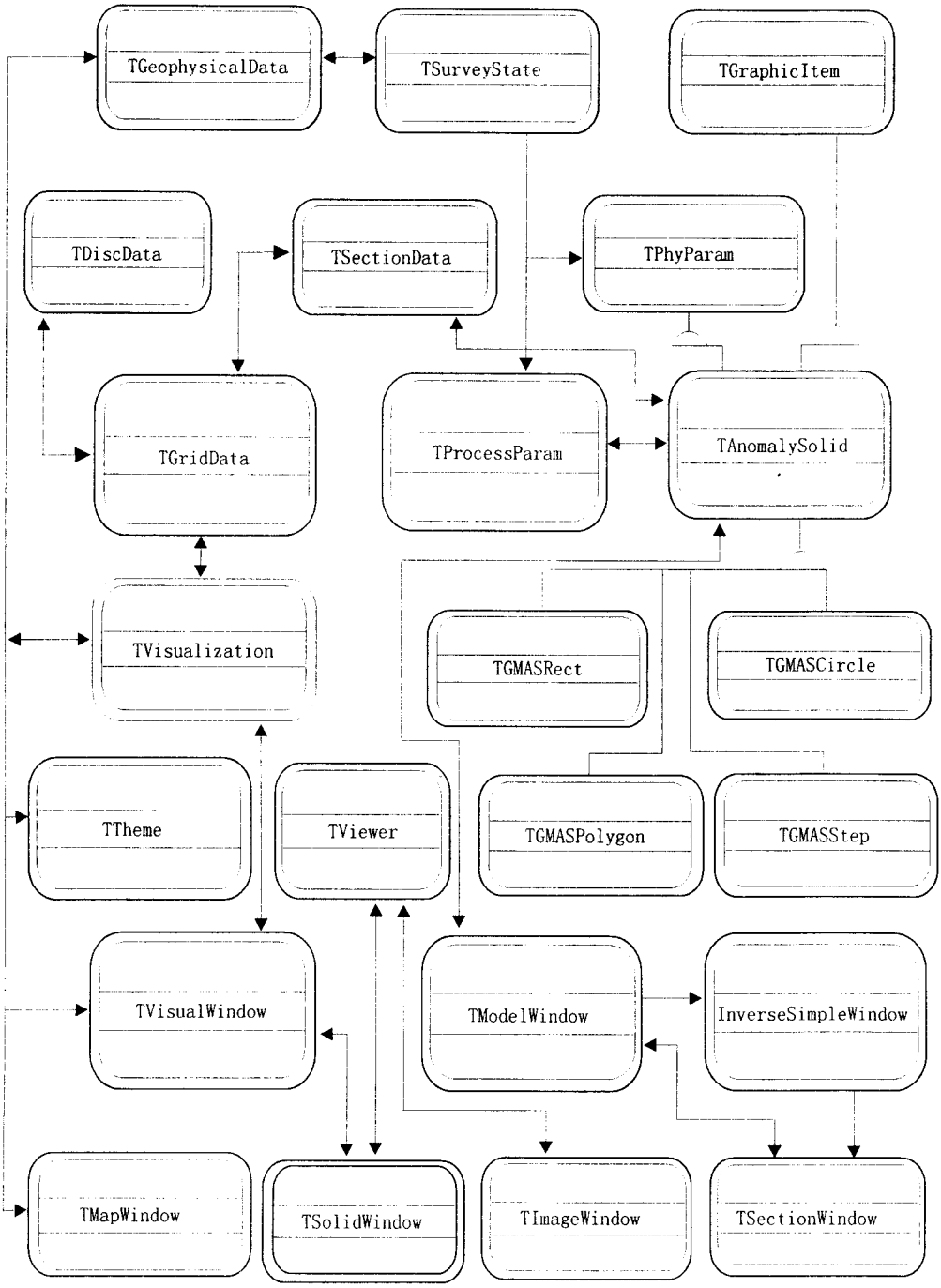



图 13－5－4　基于 GIS 的重磁数据可视化处理系统的对象间的通讯

## 第四节　GGDPS 系统应用实例

系统测试选用的原始资料为淮北煤田中部 1:5 万的航磁 $\Delta T$ 数据。

淮北煤田地处华北板块东南部，毗邻郯－庐断裂带。区内构造变形不甚强烈，煤系保存在宽缓的北西向和北东向向斜或盆地内。断裂类型以高角度正断层为主。高角度断层按走向可分为四组：北西向断层、北北东向断层，这两组断层规模大、数量少，决定了含煤盆地的分布格局；此外，还有两组斜交主体构造的 X 型剪断层，它们规模小但密集。

该研究区在地史发展过程中，岩浆活动强烈。由于岩浆岩一般都具有高磁性，所以岩浆侵入体与其围岩之间存在可观测的磁性差异。这就使得在该区用磁法探测圈定目标地质体具备了的地球物理基础。

### 一、研究区数据的处理方法

研究区东西长 38.5 km，南北长 38.4km，网格间距为 500m × 200m。对研究区网格化的航磁数据在频率域进行如下处理：

1. 航磁数据化极转换为 $Z_a$ 同时上延 100m（磁倾角度 50°，磁偏角 －9.25°）。

2. 对 $Z_a$ 上延 500m、1000m、2000m、5000m，下延 150m、400m。

3. 对 $Z_a$ 计算垂向一导、垂向二导。

4. 对淮北岱 2 线的高精度磁测剖面作定量解释。

### 二、研究区数据处理效果

1. 从航磁数据化极上延 5000m 的异常（图 13－5－5）可知，研究区磁场具有北高南低的分区特点，中部存在一个近东西向的宽缓的梯度变化带，为一深大断层构造的反映。

2. 在北高南低的区域磁场的背景下，从航磁数据化极下延 150m（图 13－5－6）的异常上可知，研究区存在着一系列的短轴状的正值异常，该异常随着上延高度的增加（图 13－5－5、图 13－5－7、图 13－5－8）幅度锐减，说明是由岩浆侵入体所引起。

### 三、研究区某剖面的定量解释

为量化岱河某矿井中已发现的两道岩墙的产状要素，对岱 2 线的高精度磁测剖面进行了反演试算。可视化反演的步骤为：

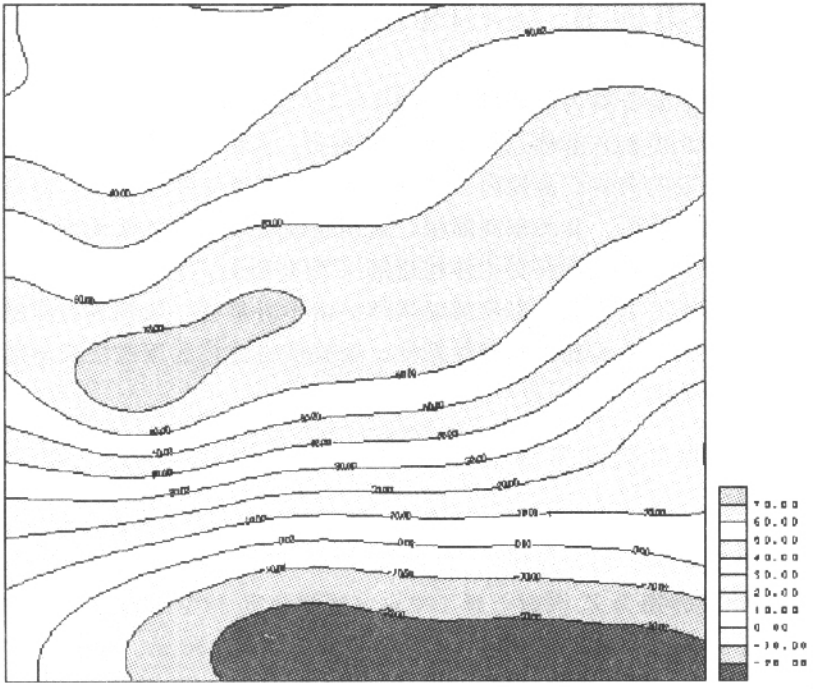


**图 13－5－5　淮北航磁化极上延 5000m $Z_a$**

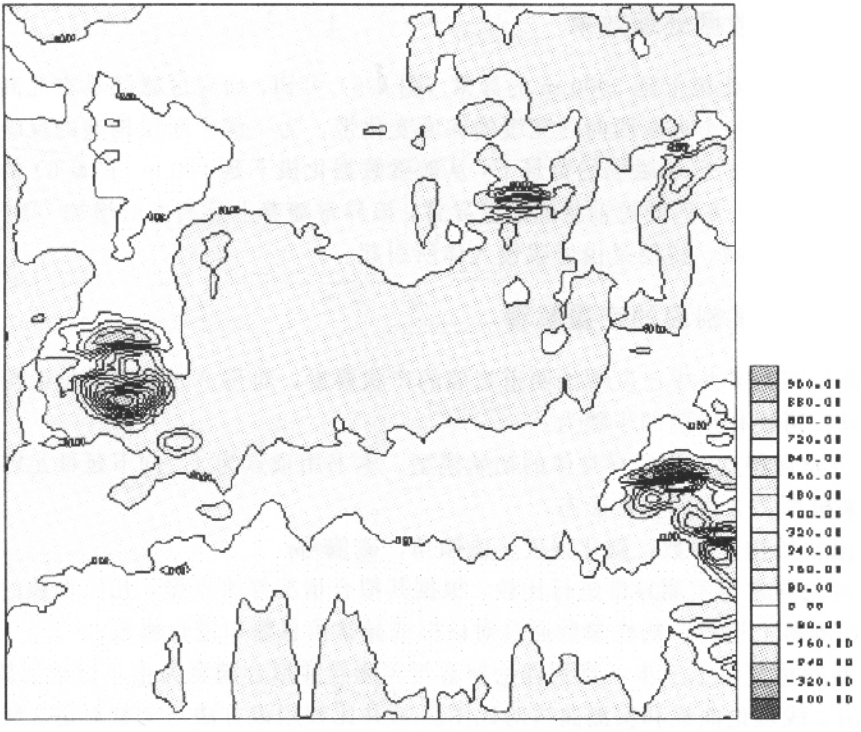


**图 13－5－6　淮北航磁化极下延 150m $Z_a$**

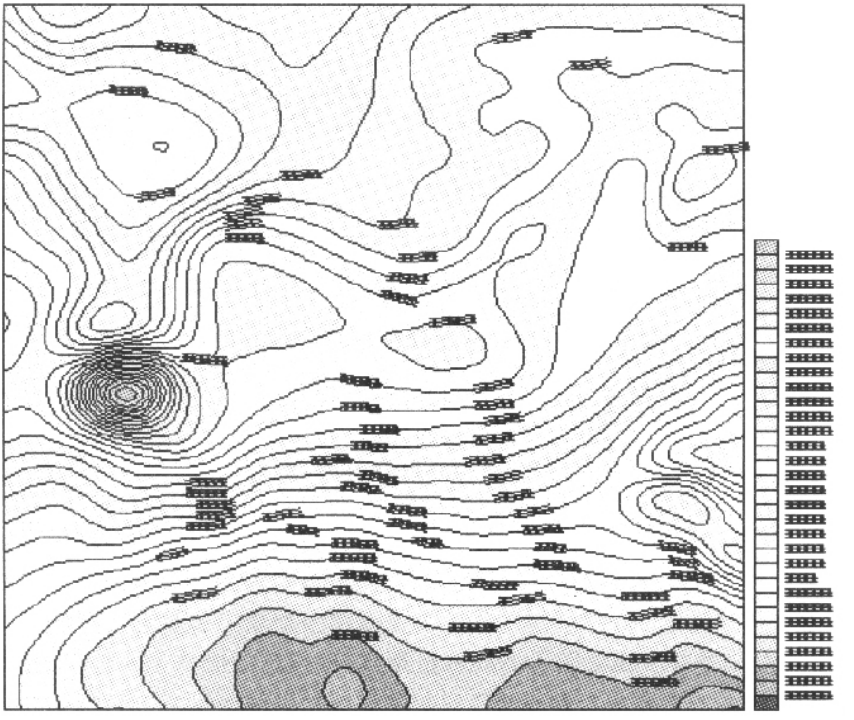


**图 13－5－7　淮北航磁化极上延 1500m $Z_a$**

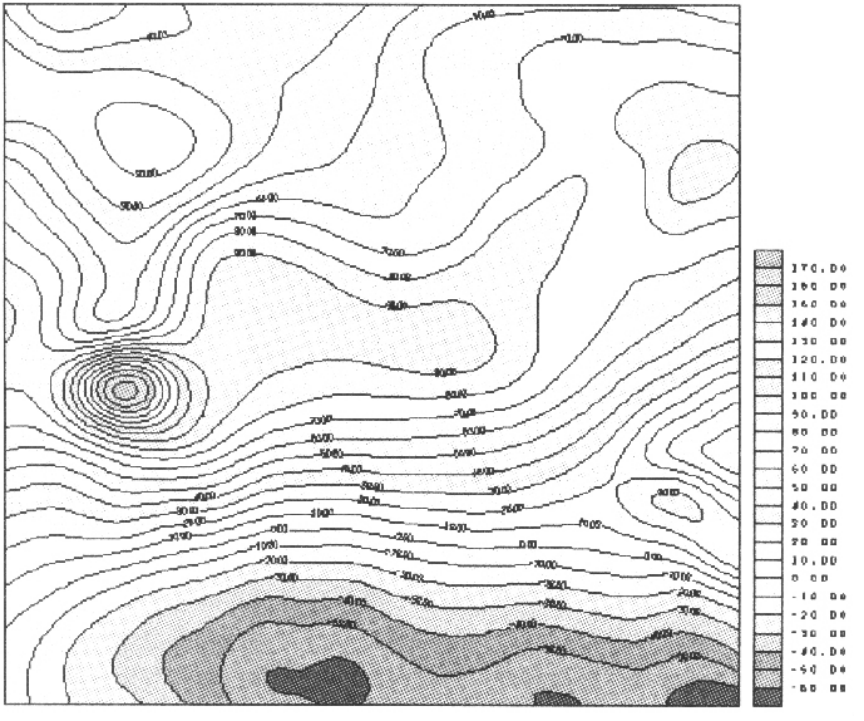


**图 13－5－8　淮北航磁化极上延 2000m $Z_a$**

1. 分析异常特点，构造异常体的初始模型。本书用顶点为 4、向下延伸足够大的多边形横截面来模拟岱 2 线的异常形态；

2. 给出初始物性参数：磁化强度、磁倾角、磁偏角；

3. 将理论异常与实测异常进行比较，根据其拟合情况修改模型，几何参数的改变通过鼠标直接在屏幕上进行，物性参数通过对话框或异常信息窗口进行修改；

4. 不断的重复以上三步，直到理论异常与实测异常拟合满意为止，记录形体参数。

结合岱 2 线理论曲线和实测曲线对比图 13－5－9，并比较用该方法与文献对岱 2 线异常的反演计算结果，证明剖面反演是正确的，但这种可视化的方法在整个反演过程中更方便、更直观。

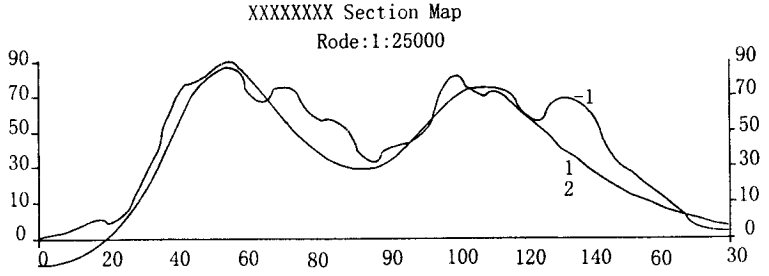



图 13－5－9　岱 2 线理论曲线和实测曲线对比图

1—实测曲线；2—理论曲线

# 第六章　基于 GIS 区域地球化学异常分析系统

区域地球化学异常 GIS 分析系统(GIS – Based Regional Geochemical Data Processing Sys – tern)是 MRAS 成矿信息分析的重要子系统,本章将从区域化探异常分析原理、数学模型、计算机模型及应用等方面进行讨论。

## 第一节　区域地球化学异常分析原理

如前所述,地球化学找矿方法是一种重要的直接找矿方法。近年来,随着测试手段的提高,化探方法对隐伏矿床、难识别矿床的发现发挥了极其重要的作用。地球化学勘查研究对象是地球化学场,区域成矿地球化学场是区域成矿地质作用的物质表现。由于区域成矿作用的复杂性、长期性、叠加性等特征,区域地球化学场同时既具有空间结构随机性,又具有时间演化性等特征。区域地球化学勘查是以岩石、土壤、水系沉积物作为样本的采集对象,用普通化学分析方法研究地球化学场的分布规律,从而发现成矿作用造成的矿化异常。

在区域矿产资源评价中,地球化学找矿信息同样是非常重要的信息,它为成矿分析提供了成矿作用的直接信息。由于区域成矿作用的复杂性,决定区域地球化学场的复杂性。近年来,以计算机为手段,通过对化探数据处理、分析、解译,可以深化对区域地球化学异常的认识,深化对区域成矿规律的认识,同时也为区域矿产资源综合评价打下了基础。

## 一、区域化探数据处理的基本任务

由于成矿作用的复杂性和地质作用的长期演化性，区域地球化学场具有非常复杂的空间结构和物质结构。例如，通过景观地球化学作用，形成许多非矿致“地球化学假异常”，而许多隐伏矿床则由于埋深大，地球化学异常表层信息较弱。因此，必须通过一定数据处理方法，以解决地球化学异常圈定及成矿地球化学异常识别的问题。

区域化探数据处理的具体任务有：

1. 地球化学“背景与异常”的划分，即合理地确定异常圈定的技术方法；

2. 研究多元元素的共生组合规律，以确定区域成矿作用元素演化特征及规律。目的是增强对异常性质的识别能力。

3. 研究区域地球化学场的空间分布规律。如通过趋势分析、克立格分析，确定区域地球化学场的结构性，从而确定化探异常的空间分布。

4. 地球化学异常评价。主要涉及到异常的强化、异常规模、异常性质及资源量预测等问题。

5. 地球化学制图分析。通过一定的技术，合理地表达空间地球化学异常。

## 二、化探异常计算机处理系统研制的现状

化探异常数据处理应该是地学定量化应用得最好的领域之一，一些数学地质方法，如多元统计方法，在化探数据处理中应用最为广泛。60 年代中期，谢学锦等就应用滑动平均方法来研究异常；70 年代，谢学锦等又使用趋势分析来研究异常分布。由于化探分析数据量越来越大，如我国区域化探分析元素就达 39 种，这使得使用计算机进行数据处理成为必然。70 年代初，美国地调所研制了数据处理系统(RASS)，加拿大地调所研制了 GAS 系统，我国为区域化探也研制了 GC－79 数据处理系统。近 10 年来，随着计算机技术的飞速发展，区域化探领域中计算机的应用得到了很大的发展。我国除了引进一些诸如稳健性、分形异常分析方法、空间克立格估值方法外，自己在化探大型数据库管理、计算机化探成图技术、化探数据处理的可视化等方面都有了突出进步。如物化探所在 Windows 平台上实现了可视化区域 1/20 万化探数据库系统的升级，并提供多种化探异常分析方法。一些信息技术先进的国家机构已注意并开始应用 GIS 技术，辅助区域地球化学填图，如澳大利亚矿产能源部利用 GIS 存贮野外采集的数据，利用 GIS 进行化探异常计算机制图及综合分析；加拿大成秋明、Bonham－Carter 等正在研制基于 Arcview 下地球化学异常分析系统。

本次在 MRAS 项目中，开发区域地球化学异常 GIS 分析子系统（GGCAS）的主要原因有：

1. 在矿产资源综合评价子系统中对深层次的地球化学成矿信息提取时，如计算组合异常，如果使用其它软件来进行的话，需要进行相当多的数据格式转换，而且处理的结果也不一定为 MRAS 分析所能接受。

2. GGCAS 侧重于化探异常成矿信息提取与综合，而对一些诸如化探质量监控指标及化探数据库的管理，不做太多研究。GGCAS 希望从其它化探数据库中得到有用的成矿信息。

3. GGCAS 尝试将化探数据处理与 GIS 可视化数字成图技术结合起来，一方面可以使 MRAS 综合评价系统方便地得到所需要的空间数据库；另一方面，可视化技术使得化探数据编辑、数据处理交互可视，大大地增加了数据处理的透明度。

## 三、GIS 支撑下区域化探异常分析子系统的工作原理

### （一）化探数据处理工作过程

区域化探数据是区域长期复杂地质作用过程中形成的地球化学场的总体反映，异常成分十分复杂，含有大量的人为误差及景观地球化学次生富集、剥蚀作用等干扰的“假异常部分”。因此，化探异常的解译也具有不确定性和多解性。尽管它和重磁数据处理一样都是处理区域场观测数据，但区域化探数据处理，则重点研究识别和强化“矿致异常”。

化探数据处理一般工作过程包括：

1. 收集研究区区域性化探资料；
2. 对化探资料进行各种预处理。如图幅校平、误差校正等分析；
3. 单元素统计分析，确定元素异常下限；
4. 进行多变量元素组合分析，确定成矿元素异常组合；
5. 对化探数据进行空间克立格分析或趋势分析，研究地球化学场区域分布规律；
6. 对化探异常进行评价，包括排序、资源量估算等；
7. 地球化学成图。

由于各地区研究任务有异，上述研究步骤也可以不相同。对于区域综合评价模型的地球化学成矿分析而言，GGCAS 需要完成对区域成矿元素组合规律的认识，需要将化探异常表达为综合评价的空间数据库。

### （二）GGCAS 基本原理

如前所述，GIS 是一门非常强大的管理和分析空间地理数据库的工具。对于化探数

据处理而言，GIS 提供了非常好的数据库管理功能 提供了化探数据处理的数字化产品及制图功能 提供了数据挖掘的形象化图示可视化功能。将 GIS 上述功能无缝地与化探数据处理结合起来便是 GGCAS 的基本原理(图 13－6－1)。

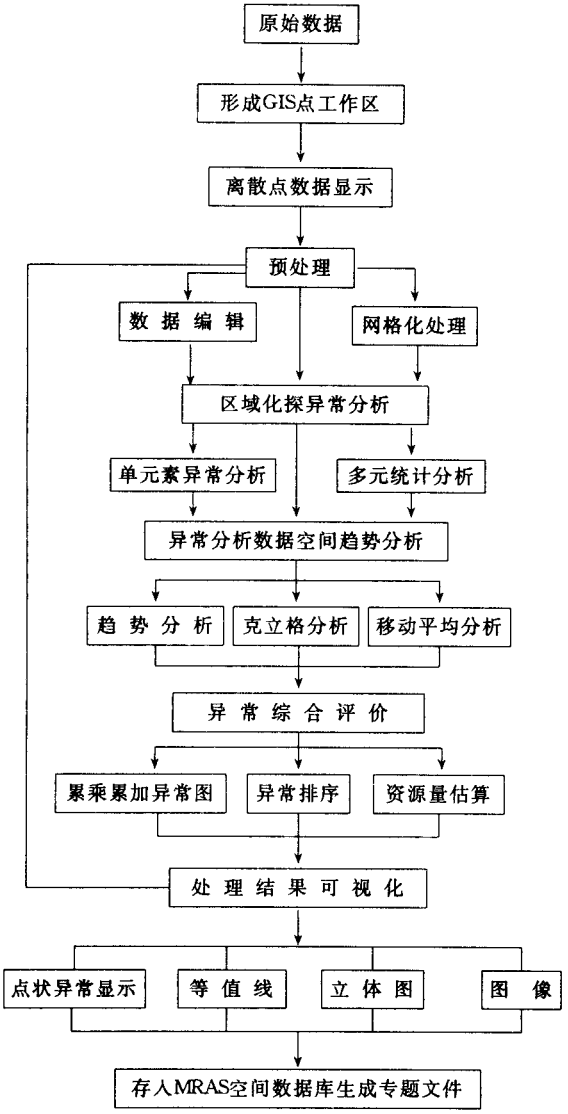



图 13－6－1　GGCAS 的工作程序

概括起来，GGCAS 工作一般程序如下：

1. 将收集到的化探数据输入计算机或直接调入带有空间坐标的化探数据库。

2. 将原始数据生成 GIS 点工作区文件。

3. 将原始数据以点方式进行可视化显示。

4. 对原始数据进行可视化编辑、修正。网格化预处理工作只是在针对生成等值线异常图、立体异常图和图像时需要。对点符号不需要。

5. 区域化探异常分析，包括单元素异常下限分析的 6 种方法和多元元素的相关分析方法。单元素异常分析的结果直接控制着异常图示显示；而多元元素的相关分析结果则是形成结果图示化窗口。

6. 异常空间趋势分析。研究异常空间变化特征，生成新的专题文件及图示化窗口。

7. 异常的综合评价。通过组合异常、面金属量计算及资源量估算对异常进行排序。

8. 对 5、6、7 结果进行计算机可视化显示。5、6、7 几步异常分析相互是独立的，各自做完后可直接图示化。

9. 将化探信息提取结果存入 GIS 空间数据库。

### 四、GGCAS 区域化探异常分析子系统的功能需求

由上述工作原理可见，GGCAS 的基本需求为：

1. 提供对化探数据处理的检查、编辑、修改功能；

2. 提供化探数据网格化、调平等预处理功能；

3. 提供单变量背景及异常的确定方法，如正态分布法、对数正态分布法、概率纸交互法、对数概率纸法；

4. 提供回归、判别、聚类、因子、对应分析等多元数据相关分析方法；

5. 提供趋势、泛克立格、移动平均等区域场空间结构分析方法；

6. 提供异常累乘、累加来强化成矿异常，提供异常面金属量、异常资源量评价方法；

7. 提供计算机点—符号图、等值线图、异常剖面生成图、立体网格图等，在异常分级图示、异常的图示表达、点符号表达中既考虑到点数据大小，又考虑点周围数据点大小。异常图示分级以稳健均值加稳健均方差的倍数来表达。

## 第二节　GGCAS 的相关数学模型

### 一、地球化学异常确定的稳健性方法

成矿地球化学场一般可以简化为区域地球化学背景场与地球化学异常场的综合。根

据地球化学元素基本统计学原理,认为地球化学背景场服从正态分布或对数正态分布。

设 x 是服从正态分布的随机变量,其概率密度函数为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\frac{(x-\mu)^2}{\sigma^2}} \qquad (-\infty < x < \infty)$$

式中:$\mu$、$\sigma^2$ 分别为一元正态总体 $x$ 的均值与方差。

设随机变量 $x$ 的 $n$ 个统计值为 $x_1$,$x_2$,…,$x_n$,则 $\mu$、$\sigma$ 的统计估值为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

随机变量 $x$ 在$(\mu - t_\alpha, \mu + t_\alpha)$的取值概率为 $1-\sigma$,当 $t_\alpha$ 较大时,是一个很大的概率事件,随机取值在此范围里为地球化学背景场;反之,当 $x$ 取值在区间之外时,这时发生此现象的概率是非常小的,它应该是异常值而不是背景值,这就是通常化探使用 $\mu + 3\sigma$ 的由来,此时大约 99.7% 的可能不是背景值,大于均值加三倍均方差的化探值是异常便不足为奇了。

问题在于,一个地区地球化学预测数据中,既有背景场信息,又包含许多成矿地球化学异常场数据。如果根据全部预测数据求出均值、方差,往往会对地球化学异常做出不正确的估计。对'严重偏离了样本中其它预测值的异常点'处理方法,是稳健统计学的基本任务。GGCAS 使用两种稳健统计学的方法来确定异常下限。

(一)正态及对数正态的逐步截尾法

基本原理是:

1. 求原始数据 $n$ 个样本的均值 $\bar{x}$,均方差 $s$,并对其做正态或对数正态分布检验。如不服从标准分布,则将观测值大于均值加 3 倍均方差的数据删除;

2. 再次计算均值与方差,检验保留数据的标准分布。如仍不服从标准分布,再将预测值中大于均值加 3 倍均方差的数据删除;

3. 重复上述步骤,直至保留数据服从标准分布,并计算最终异常下限。

(二)计算机概率纸图解法

关于概率纸母体总体分解及异常下限确定方法,可参见赵鹏大等翻译的辛克莱的著作。在 GGCAS 程序设计中,关键在于实现计算机生成概率纸和让用户交互获取选择点的异常值。

在 GGCAS 中生成概率图窗口中,纵坐标为概率值,横坐标为实际观测值,计算概率近似正态分布公式为:

$$F(Z) = 0.5[1 + (1 - \exp(-2Z^2/\pi))^{1/2}]$$

**(三)稳健统计学法**

GGCAS 提供了尤伯位置及尺度估计的结果。尤伯估计是一种迭代结果。假定以中位数了及绝对中位差 $S$ 为初值；

$$T_{(1)} = \frac{1}{n_2}\sum_{i-n_1+1}^{n-n_3} x_i + CS\frac{n_3 - n_1}{n_2}$$

$$S_{(1)} = \sum_{i=n_1+1}^{n-n_3}(x_i - \bar{x}')^2/[n-1)\beta - (n_1 + n_2 + \frac{(n_3 - n_1)^2}{n_2})C^2]$$

式中：$\beta = 2\left(\frac{C^2}{2} - \frac{C}{\sqrt{2\pi}}e^{-C^2/2} - \frac{(C^2-1)}{\sqrt{\pi}}\int_0^c e^{-t^2}\,dt\right)$；$C$ 为尤伯常数可取 1.35；$n_1$ 为 $x \leqslant T - CS$ 的样本数；$n_2$ 为 $n - n_1 - n_3$；$n_3$ 为 $x \geqslant T - CS$ 的样本数。

GGCAS 实现该方法时发现，一些数据在计算 $S$ 时出现负值，怀疑尤伯公式有误，最终程序只采用绝对中位差估值。对于该问题以后尚需进一步研究。

确定地球化学异常背景母体的估计均值及方差，本程序在确定地球化学异常时，采用原苏联化探异常圈定方法，即确定观测值是否是异常时，除了考虑观测值本身大小外，还考虑附近点空间分布情况，如临近点还有值大于 $\bar{x} + 1.65s$ 的话，则取该点异常下限为 $\bar{x} + 1.65s$ 若仅是孤点异常，则异常下限为 $\bar{x} + 3s$。

## 二、多元统计分析方法

为了研究元素的相关分析，GGCAS 提供了以下几种统计模型。

**(一)逐步回归分析模型**

回归分析是研究一个因变量与多个自变量的线性依赖关系，如研究 Au 元素与其它元素的相关关系。其一般数学模型为：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_m x_m + \varepsilon$$

式中：$\beta_0, \beta_1, \cdots, \beta_m$ 是回归常数；$y, x_1, \cdots, x_m$ 是随机变量，$\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$。

逐步回归分析是通过统计方法，使回归方程中尽可能包含与因变量 $y$ 有关的变量，但又要求回归方程中包含尽可能少的变量，特别是不包含对 $y$ 不起作用的变量。逐步回归能够保证方程组有解。关于其数学推导，可参考有关文献。

在 GGCAS 系统中，将回归中间结果存入 reg.txt 文件中，其中用回归值与残差值作为属性数据生成另一图形窗口，并可对计算结果可视化及存入空间数据库。

**(二)逐步判别分析**

判别分析的最简单的应用是判别某化探数据是有矿异常？还是非矿异常？GGCAS

实现的是贝叶斯准则下的判别模型，其一般原理为：$\sum_{k=1}^{g} P_k = 1$

设有 $g$ 个母体 $A_1, A_2, \cdots, A_g$，每个母体都是 m 维随机变量，密度函数为 $f_k(x)$，$x = (x_1, x_2, \cdots, x_m)'$，$k = 1, 2, \cdots, g$。假定已知样品 $p_j$ 个母体的先验概率为 $p_i, p_1, p_2, \cdots, p_g \geqslant 0$，根据概率论的贝叶斯公式，对于给定的样品 $x$，其属于 $A_k$ 的条件概率为：

$$P(k/x) = \frac{P_k f_k(x)}{\sum_{l=1}^{g} P_l f_l(x)}$$

将这些条件概率比较，从而对 $x$ 进行分类。在 GGCAS 中设置判别分析模型样本时，程序设计了让用户在屏幕上交互选择有矿异常样本与非矿异常样本。然后，再形成判别分析结果图。

(三)系统聚类分析

在 GGCAS 中只设计了根据观测样本值对多变量的系统聚类方法。聚类分析是根据多个指标进行数字分类的一种多元统计方法，系统聚类分析首先认为各变量自成一类，根据两两变量之间的相似性，将最相似的两个变量合成一类；计算新类与其余类之间相似性，将最近类合并成一类，最后形成谱系图。

(四)因子分析和对应分析

因子分析及对应分析的基本原理是：

将原来的 $m$ 个变量表达成若干个因子(新变量)的线性组合形式：

$$\begin{cases} x_1 = a_{11} f_1 + a_{21} f_2 + \cdots + a_{p1} f_p + \mu_1 \varepsilon_1 \\ x_2 = a_{12} f_1 + a_{22} f_2 + \cdots + a_{p2} f_p + \mu_2 \varepsilon_2 \\ x_m = a_{1m} f_1 + a_{2m} f_f + \cdots + a_{pm} f_p + \mu_m \varepsilon_m \end{cases}$$

其意义是将许多原始变量组合成少数的‘因子”，而这些因子却保留了原始变量的大部分相关信息和变异性。

在 GGCAS 系统中，对原始化探数据根据因子分析模型，求出因子解后，将结果存入 factor.txt 中。并将因子得分、正交旋转因子得分、斜交因子得分生成新的专题属性表，形成区域因子得分异常图。

## 三、区域地球化学异常空间趋势性分析

为了研究区域地球化学场空间结构性和变化趋势，MRAS 提供了三种空间趋势分析方法。

(一)趋势分析方法

趋势面分析是用一个适当的数学曲面去拟合观测值，观测值被分成两部分，一部分

是趋势，它的变化受区域性因素的影响，反映了地球化学场大范围的变化特点；另一部分是剩余，反映的是局部范围内因素的影响。即

$$Z = f(x,y) + R(x,y)$$

趋势分析最终求解是用最小二乘法原理，把它化为回归分析问题。在 GGCAS 系统中，对空间分析结果都是形成一个带有趋势值与残差值的专题 GIS 空间数据库。趋势分析中间计算结果存入 trend.txt 文件中。

（二）移动平均方法

是在网格化数据基础上进行的，即事先划定一个“窗口”，将窗口中心对准可估计点，所有落在窗口内的原始数据的平均值，可以作为其窗口中心点的估值。移动平均的一个重要思想是：通过局部平滑，能除去数据中带有的噪声；通过大小窗口，能够确定区域场与异常场。在 GGCAS 中，取小窗口的边长为网格化数据 2 个单位，大窗口的边长为 8 个单位，并用小窗口值 $\bar{x}^s$、大窗口 $\bar{x}^l$ 来确定异常，当 $x_A$ 取正值时为异常。

（三）泛克立格法

该方法已在第六章做过详细介绍，这里不再重复。

## 四、区域化探异常综合评价模型

（一）累加累乘图

通过成矿相关共生元素组合来强化化探异常，是形成综合异常常用的办法。最常用的方法是通过多元相关分析方法，确定成矿元素组合，然后用元素累乘累加来成图。

累加模型　　$$Z = \frac{x_1}{\bar{x}_1} + \frac{x_2}{\bar{x}_2} + \cdots + \frac{x_m}{\bar{x}_m}$$

累乘模型　　$$Z = \frac{x_1}{\bar{x}_1} \cdot \frac{x_2}{\bar{x}_2} \cdot \cdots \cdot \frac{x_m}{\bar{x}_m}$$

式中：$\bar{x}$ 为变量 $x$ 的平均背景值。

（二）比值模型

比值模型一般公式为：

$$Z = \frac{\dfrac{X_1}{\bar{x}_1} \cdot \dfrac{x_2}{\bar{x}_2} \cdot \cdots \cdot \dfrac{x_m}{\bar{x}_m}}{\dfrac{y_1}{\bar{y}_1} \cdot \dfrac{y_2}{\bar{y}_2} \cdot \cdots \cdot \dfrac{y_1}{\bar{y}_1}}$$

$Z$ 值能够衡量多期矿化阶段形成的不同异常。

### (三)面金属量

面金属量的一般计算公式为：

$$P = \sum_{i=1}^{k} \delta(x_i - x_\alpha) \qquad x_i > x_\alpha$$

在 GGCAS 系统中，是以网格化数据为基础的，其程序实现技术关键为搜索元素异常出现的地区及范围，然后再统计各异常中面金属量。

## 第三节　GGCAS 系统计算机实现

GGCAS 系统中各种对象与重磁数据处理对象差不多，主要差别在于物探异常数据对象是单变量场，而化探数据则涉及到多变量场；另外，最大差别是对象操作服务差别大，GGCAS 主要操作服务是多变量场相关分析以及异常的合理定位上。

下面还是从区域化探异常 GIS 分析系统中，从对象性质、属性和服务上来讨论。

### 一、化探数据基类 TGeochemkal Data

该类是描述化探数据共性属性与行为，如测区观测范围、化探变量名称及变量数等(表 13－6－1)。

表 13－6－1　地球化学数据基类

| 类名：TGeochemical Data | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：无 | | | |
| 用途：描述化探数据包括离散点数据、网格化数据、剖面数据的公共属性及操作 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途 |
| 保护 | short | m_DataMode | 用于表达是规则网数据，还是剖面网数据 |
| 保护 | char | m_StudyVar | 研究变量名 |
| 保护 | char | m_ChVar | 化探多元素变量名 |
| 保护 | shon | m_VarNum | 变量数 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | 用途 | |
| 公共 | GetVarnum() | 取变量数 | |
| 公共 | GetStudyvar() | 取研究变量名 | |
| 公共 | GetDatamode() | 取化探数据状态 | |

在化探数据基类中，特别定义了 m _ studyVar 研究变量名，以便使程序能够从多变量数据中挑选感兴趣的研究变量。

## 二、网格化探数据类 TGrid Data

该类是 TGeochemlcal Data 的导出类。负责对研究区多变量化探数据管理与操作（表 13 – 6 – 2）。

表 13 – 6 – 2　网格化探数据类

| | | | |
|---|---|---|---|
| 类名：TGrid Data | | | |
| 祖先：TGeochemical Data | | | |
| 用途：管理测区平面观测点化探数据 | | | |
| 数据成员（属性）： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途 |
| 私有 | float | m _ P + Ch | 网格化多变量测量数据 |
| 私有 | float | m _ P + Ch | 研究变量测量数据 |
| 私有 | F – Dot | xy | 不规则网数据 X 坐标，Y 坐标 |
| 私有 | float | xych | 不规则网多变量观测数据 |
| 成员函数（服务）： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途 |
| 公共 | GetStudyVarAnomaly() | | 取研究变量异常下限 |
| 公共 | DiscDataToGrid Data() | | 不规则数据网格化 |
| 公共 | CalOneSectlon() | | 取网格数据任意方向剖面数据 |

## 三、化探剖面数据类 TSection Data

该类规则网格数据中表达任一方向的剖面数据对象（表 13 – 6 – 3）。

表 13 – 6 – 3　化探剖面数据类

| | | | |
|---|---|---|---|
| 类名：TSection Data | | | |
| 祖先：TGecohemical Data | | | |
| 用途：表达化探剖面数据 | | | |
| 数据成员（属性）： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途 |
| 私有 | F – Dot | m _ StartPosition | 剖面起始点位置 |
| 私有 | float | m _ Linenrection | 剖面方向 |
| 私有 | float | m _ PtSectionData | 剖面多变量数据 |

## 四、多元分析基类 TMath

该类用于多元统计分析的矩阵操作管理(表 13－6－4)。

表 13－6－4　网格化探数据类

| 类名 :TMath | | |
|---|---|---|
| 祖先 :无 | | |
| 用途 :矩阵分析 | | |
| 数据操作(服务)： | | |
| 可见性 | 名称 | 用途 |
| 公共 | Mtimes() | 矩阵相乘 |
| 公共 | Mplus() | 矩阵相加 |
| 公共 | Mminus() | 矩阵求逆 |

## 五、因子分析 TFactor

TMath 导出类,完成因子分析。

## 六、对应分析 TCorspondence

由 TMath 导出,完成对应分析。

## 七、TMAPWindows

由 OWL TWindows 类导出,是化探数据可视化窗口类,同时又是对化探数据进行处理重要通讯类。其包括的主要属性成员是 :TGridData,主要的操作服务有窗口复位、放大、缩小等窗口类函数,以及对化探数据处理的大部分功能函数。对异常下限的确定、多元相关分析、趋势分析等,由于该类函数较多,这里就不列表了。

## 八、TSection Windows

由 TWindows 导出,是剖面数据图示化窗口。其主要成员为 TSection Data。

## 九、概率图解类 TProbility Windows

该类是用来生成计算机概率图解窗口(表 13－6－5)。

表 13－6－5　网格化探数据类

| | | | |
|---|---|---|---|
| **类名**：TProbility Windows | | | |
| **祖先**：TWindows | | | |
| **用途**：化探数据概率图分解 | | | |
| **数据成员(属性)**： | | | |
| **可见性** | **类型** | **名称** | **用途** |
| **私有** | long | DataNum | **数据长度** |
| **私有** | int | GroupNum | **分组合** |
| **私有** | TPoint | m _ DunPoint | **链接下位置** |
| **成员函数(服务)**： | | | |
| **可见性** | **名称** | | **用途** |
| **公共** | EvlButtonDown() | | **获取鼠标位置异常下限值** |
| **公共** | CmSaveProb Data() | | **存取概率分布值** |

**此外，还有图像窗口类、立体显示窗口类，在此不再赘述。**GGCAS **各对象类之间结构关系可用下图表达(图** 13－6－2)。

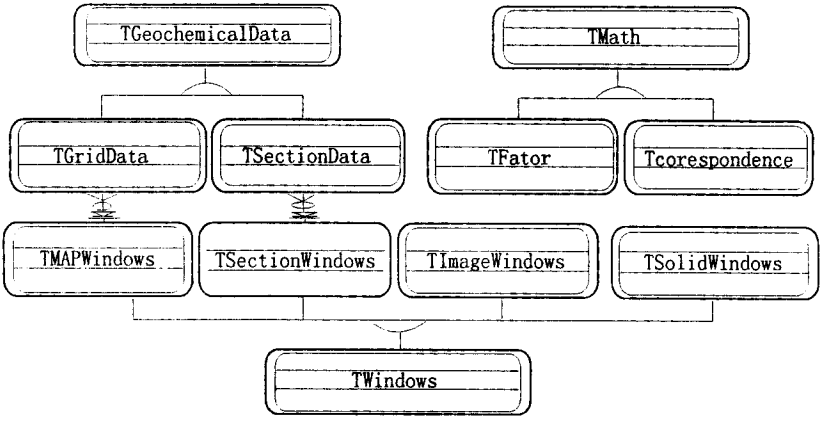



**图** 13－6－2　GGCAS **对象结构**

## 第四节　区域化探异常 GIS 分析系统(GGCAS)界面及应用

### 一、GGCAS 用户界面

GGCAS **采用** OWL **多文档窗口，以期使得不同化探处理结果能够在屏幕不同窗口下对比分析。**

GGCAS 应用系统主框架中，包括系统的菜单栏、工具条、状态栏，其中工具条包括文件打开、保存、窗口放大复位、显示化探异常点、等值线等快捷键功能（图 13－6－3）。状态栏主要显示鼠标的 X，Y 坐标位置。

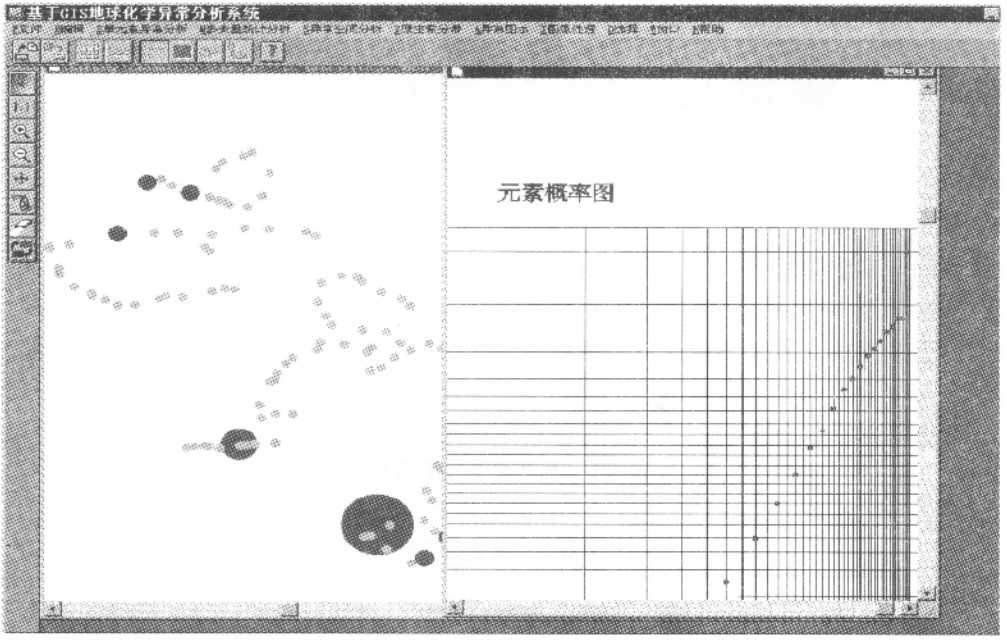



图 13－6－3　GGCAS 界面风格

菜单栏包括主要菜单功能有：

1. 读取存贮文件。包括离散点文件、图形专题文件；
2. 数据编辑及准备处理功能网格等；
3. 单变量异常下限确定的几个菜单；
4. 多变量相关分析菜单；
5. 研究变量空间趋势结构分析；
6. 异常组合评价分析；
7. 多文档窗口管理；
8. 环境设置。

客户平面窗口有数据平面显示窗口、剖面图窗口、立体图窗口、图像窗口以及计算机处理结果窗口。尽管它们使用统一的框架菜单，但是根据窗口数据特点，却对菜单进行

选择性能与设置。如生成的回归分析综合图结果窗口,就不能再做回归分析。

## 二、应用实例

课题收集了全国环境地球化学数据中子集,从其中选取了 Ag、Cd、Li、Cu、U、I、W、Mo、F、As、Bi、Hg、Se、Ge、Au、Ti、Be、B、Sn 等 20 种元素,样本数为 529 个。

首先将原始收集文件转换成 GGCAS 支持的文件格式。GGCAS 有两种文件格式:一种内部文件格式包括版本号等内容;另一种是类似于 MAPGIS 离散点数据格式,其文件头为:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Datamode | SampleNum | VarNum | | | |
| 变量名 1 | 变量名 2 | 变量名 3 | 变量名 m | | |
| 样本编号 | X 坐标,Y 坐标 | 变量 1 取值 | 变量 2 取值 | 变量 3 取值 | 变量 m 取值 |

应用 GGCAS 对 Ag 元素作正态直方图检验(图 13－6－4),经过二次迭代删除,得到 Ag 的均值为 86.1607,均方差为 43.7584。

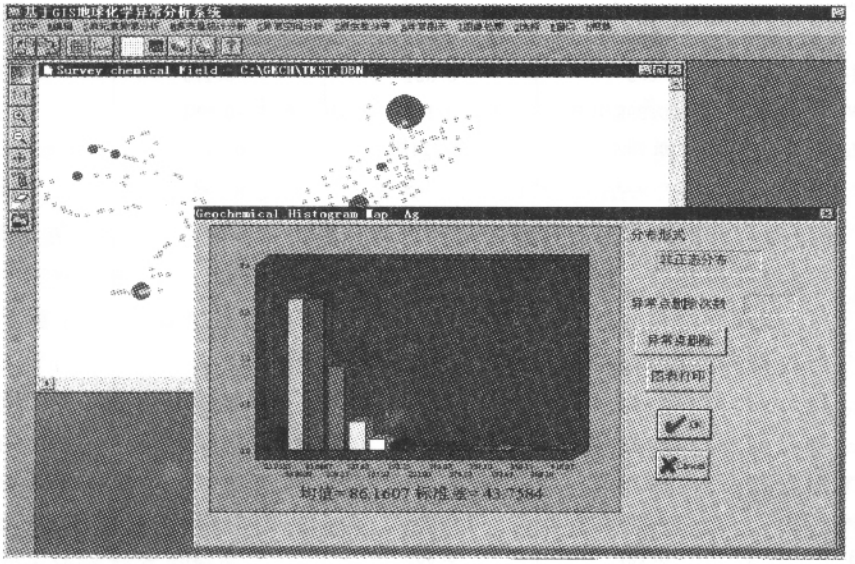



图 13－6－4　地球化学 Ag 元素直方图

对多变量进行聚类分析,得到谱系图(图 13－6－5)。可见,Ag、Au、Hg 元素高度相关;另一类 W、Bi、Li 为一群;Cu、As、F 为一群。

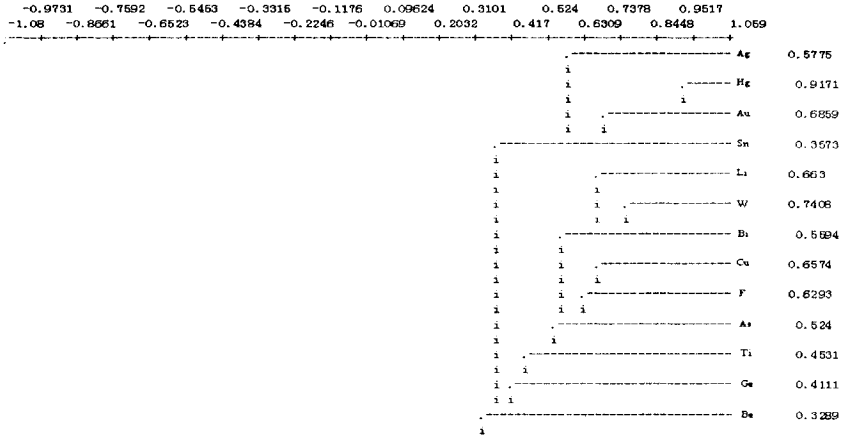



**图 13－6－5　地球化学元素谱系图**

**对上述变量进行因子分析，因子载荷表为表 13－6－6。由表可见，第一因子为稀有元素因子，其中 U、I、W、Se、Ge、Ti、Be、Sn 有较大的因子载荷；第二因子 Cu、As、Sb、Li 因子；第三因子为 Ag、Cd、Cu 因子；第四因子为 Au、Hg、Bi、Sn、Ag。有了上述分析，便可以使用因子，不同的因子得分强化不同组合异常。**

**表 13－6－6　因子载荷表**

| 因子 / 变量 | 因子 1 | 因子 2 | 因子 3 | 因子 4 |
|---|---|---|---|---|
| Ag | 0.179 | －0.23 | 0.579 | 0.192 |
| Cd | 0.022 | 0.332 | 0.682 | 0.174 |
| Li | 0.392 | 0.589 | 0.032 | 0.012 |
| Cu | －0.04 | 0.650 | 0.44 | 0.048 |
| U | 0.80 | 0.001 | 0.05 | －0.108 |
| I | 0.5 | 0.321 | －0.179 | 0.189 |
| W | 0.898 | 0.118 | －0.014 | 0.198 |
| Mo | 0.382 | 0.1715 | 0.575 | －0.073 |
| F | 0.053 | 0.789 | 0.142 | 0.01 |
| As | 0.382 | 0.3815 | －0.007 | 0.58 |
| Sb | 0.073 | 0.058 | 0.089 | 0.84 |
| Bi | 0.86 | 0.09 | 0.08 | 0.155 |
| Hg | －0.005 | 0.039 | 0.45 | 0.06 |
| Se | 0.3776 | 0.278 | 0.348 | 0.177 |

| 因子 / 变量 | 因子 1 | 因子 2 | 因子 3 | 因子 4 |
|---|---|---|---|---|
| Ge | 0.6766 | 0.263 | -0.036 | 0.10 |
| Au | 0.0845 | -0.005 | 0.1313 | 0.589 |
| Ti | 0.7802 | 0.062 | 0.05 | 0.001 |
| Be | 0.806 | 0.022 | 0.125 | -0.047 |
| B | 0.167 | 0.662 | -0.137 | 0.26 |
| Sn | 0.689 | -0.013 | 0.258 | 0.40 |

运用逐步回归分析，得出 Ag 元素与其它变量的回归方程为：$Ag = 120.40 + 0.00Cd + 2.687Cu + 0.78W + (-1.1)Mo + 0.0095Sb + 54.878Hg$

根据回归方程，可以对 Ag 进行预测，消除实验误差。

# 第七章　MRAS 矿产资源综合评价子系统

前面几章介绍的成矿信息分析子系统，如地球化学分析子系统等都能够完成多元信息专业提取矿产资源评价工作，本章介绍了 MRAS 中信息综合系统。由于矿产资源评价是一个复杂的系统工程，不同的地质专家使用的方法程序都有一定的差异。我们在全面考虑目前常用方法的基础上，发展了三个不同层次的评价模型子系统，即基于 GIS 矿床经验模型标志交互查询搜索模型、证据找矿信息量加权模型、基于 GIS 矿床定量综合预测模型。

## 第一节　基于 GIS 矿产资源综合评价系统（MRAS）的基本原理

### 一、国内外研制的基于 GIS 评价系统的状况

基于 GIS 资源评价系统的研制从目前发表的文献及 INTERNET 查询到的信息来看，以北美和澳大利亚等欧美国家做得最好。Bonham－Carter、Fabbri 等早在 1983 年就研制出基于栅格图像多元地学信息分析系统，1992 又在 SPANS 上开发了基于 SPANS 栅格 GIS 的多源地学信息综合评价子系统，代表性模型是证据加权模型，但开发平台是栅格数据结构 GIS。最近，F.P.Agterberg、Bonham－Carter、Chen Quiming 等正在开发基

于 Arc/info 平台上综合评价模型。将 GIS 与地质矿床模型结合得最好的是澳大利亚 Wyborn、Knox－Robinson 等人，他们在 1995 年研制了基于 Arc/info 平台上 Arc Tools 模块下的专家评价系统。该系统从成矿系统出发，将成因模式标志转换为能够在区域利用 GIS 评价的标志组合，建立了澳大利亚主要矿床，如金、铀等矿床 GIS 专家知识系统，并发展了特定矿床模块、交互询问模型模块、生成模型模块等三个评价模型。正如 Wyborn 自己所说的，系统需要改进的问题是：评价依然是针对 gird 的，需要发展对于任意多边形的评价系统，各证据因子的权重是等同的，这显然没有考虑各因素的重要性。Wyborn、Knox－Robinson（1997、1998）发展了基于 Arc/info 神经网格推理模型，实现了因素权重算法，但仍然还是在 grid 基础上进行的。国内基于 GIS 矿产资源评价系统研究工作开展较早的单位有中国地质矿产信息院（李裕伟等）和中国地质大学数学地质所（赵鹏大、胡光道等），目前在我国，还处于应用实验阶段和方法模型开发阶段。

## 二、GIS 综合评价的数据、单元及模型问题

在总体设计中，已对 GIS 的数据模型进行较深入的研究，本节将对其与 MRAS 系统研制相关的几个问题进行说明。我们知道，无论是传统的预测，还是定量预测，数据是矿产资源评价的生命线。没有数据，就没有矿产资源评价。

### （一）数据分类

按地质数据来源，可分为地质、地球物理、地球化学、航天、卫星等数据。在 GIS，这些数据通常是通过专题（Coverage Layer）来表达的。如果按数据标度方式表达，地质数据又可分为名义型数据、有序性数据、间隔性数据、比率性数据 4 大类。名义型数据用来表达一个地区是否存在矿床，或土地利用级别；有序性数据可以用来表达矿床规模等；物化探测量即是间隔性、比率性数据。在 GIS 中，数据通常分为图形空间数据以及与图形相关的属性数据。

1. 图形空间数据

用来表达空间地质体形态位置的数据，由点、线、面图元组成。其中点是用一对坐标表达的空间几何对象，如区域矿点等；线图元是一组坐标对点构成具有一定长度的几何对象，如区域断裂构造等；多边形则是由一些相联的弧段构成的封闭几何对象，具有一定的面积，区域地层的分布即是用面图元组成。地质图形数据和物化探测量数据一样，同样是非常重要的成矿信息，它代表着区域地质体的展布特征及其相互关系。GIS 技术对图形信息的提取能够提供非常强大的功能。

2. 属性数据

是关于空间图元的描述性数据。在原始数据库中,描述性数据既可以是数字型的物化探预测数据,又可以有许多是关于地质体结构的描述型字符数据。对于字符型属性数据,为了更好地进行定量分析,需要将其名义型数据编码转换。

(二)数据的转换

数据的转换在矿产资源评价中,是指将原始资料信息转换成为矿产资源评价方法模型能够接受、理解的数据模型,常用方法有人工赋值、定量数据标准化等。根据 GIS 管理数据的特征,数据的转换主要表现在如下几个方面:

1. 转换图形信息为模型数据

把预测区中地质体(点、线、面、图形)的分布用数字表达出来,即矿产资源定量评价过程中的人工取数过程。运用 GIS 空间交互查询功能,可以方便地完成预测单元的图形信息数字化赋值任务。

2. 新的地质变量的构造

如通过熵分析、线性体密度可以定量反映区域地质复杂规律。主要通过定量方法模型针对 GIS 专题图形数据,分析其空间结构性变化特征。

3. 定量数据转换

包括预测单元化变换、标准化变换、正规化变换等。预测单元化变换是指预测单元里观测值的平均值,其公式为:

$$U_{\mathrm{k}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{\mathrm{i}}^{\mathrm{k}}}{n}$$

式中:$U_{\mathrm{k}}$ 为第 $k$ 个单元中值;$x_{\mathrm{i}}^{\mathrm{k}}$ 表示第 k 个单元中观测值;$n$ 为单元预测总值。

在实际工作中,往往会发生单元中未有观测数据的现象,本系统采用平均值替代法进行数据补齐 数据标准化、正规化变换是为了使地质预测数据的量纲一致,如经标准化变换后,获得的新变量均值为 0,方差为 1。

(三)单元

在矿产资源定量预测中,地质单元是将模型与地质多源信息联系的桥梁,也是统计分析的基础。随着矿产资源评价的深入,人们对地质统计样本单元的研究也越来越透彻,出现了网格单元、地质体单元、无单元区域资源评价的单元划分方法。

在 GIS 矿产资源多源信息的综合评价中,借用单元同样是实现地质、地球物理、地球化学、遥感等专题空间数据综合信息评价的最佳方式。在传统的栅格 GIS 评价中,单元是不用人们考虑的问题。但在矢量 GIS 中,必须生成前已论述的独立条件单元图层。利用该单元专题图层,将多元找矿信息浓缩集中起来,同样也得到预测方法模型的数据库。

在MRAS系统中,考虑两种单元即网格化单元和非网格地质体单元。两种单元都是以GIS区(polygen)专题表达的。

1. 网格化单元生成

主要采用概率统计的方法进行。赵鹏大教授提出,在单元大小能保证当前矿床点的分布为随机型时,用二项分布模型来表达:

$$P_n(x) = C_n^x p^x q^{n-x}$$

并以落入单元内的期望矿点数等于或小于实际落入单元矿点数标准差的3倍为准则,即:

$$\delta(x)/E(x) = \sqrt{(1-S)/(n \times S)} = 1/3$$

则预测单元面积为:

$$\frac{9}{9+n} \times \frac{\text{Totalarer}}{100}$$

式中:$n$ 为预测区矿点数;$S$ 为预测区面积。

在MRAS程序实现过程中,用上述经验公式给出单元大小的缺省参数,用户可根据自己的经验知识,进行单元大小的修正。

2. 非网格地质体单元

地质体单元是地质人员十分喜爱的一种划分方法,它能够保证直接建立预测地质体与矿产的关系。在GIS中实现非网格地质体单元划分十分容易,其关键是确定划分地质单元边界的条件,即确定某类矿床存在必要性条件。没有这类条件,该类型矿床是不能用的。其次,解决GIS如何将这些标志组合的共同空间区域圈定出来。最后问题是解决非网格单元的变量(图形、数据)赋值问题,这就需要计算机系统开发工作。MRAS系统提供两种解决方案:一是专家事先已经做好单元的划分,只需通过对话框,将地质单元专题添加进来即可;第二方案是利用经验交互模型圈定区域。

(四)模型控制区

模型控制区又称模型单元,是指用来建立预测模型的预测单元。相对来说,该单元中有足够的生产矿产或勘探储量已经审批的矿床,地质工作研究程度高,可以建立找矿模型,并有丰富的多源找矿信息。模型一直是成矿分析十分关心的问题,主要表现在研究区内是否有足够的模型以供统计分析;研究区内模型是否是相似成矿条件形成的"成因相似矿床"。为了解决模型不够的问题,Wyborn等研制以澳大利亚主要成矿系统为支撑的GIS专家知识推理决策系统,这实质上就是我们通常所说的"外借模型"预测问题,它要求预测区的资料水平与外借模型有可比性。在MRAS系统中,经验模型标志交互查询搜索模型可以完成此类工作,它并不借助已知矿床模型来统计,而是用户——地质专

家根据可能出现矿床的找矿标志进行总结，然后借助 GIS 工具进行靶区圈定；MRAS 中第二种模型即证据找矿信息量加权模型，尽管需要统计某标志在有矿和无矿时出现的概率，但相对来说，它对模型要求程度不高，对模型内部状态也不需太深的了解；第三种模型则必须从已知矿床模型出发，建立资源量等预测模型，它要求必须有一定模型单元，但由于其与地质因素的联系更好，预测精度更高。

## 三、三种综合评价模型的基本原理

由前述 MRAS 系统需求分析可知，基于 GIS 矿产资源综合评价模型主要解决的是根据一定找矿标志圈定找矿远景区，确定各因素在靶区定位及资源量估算的权重大小；经过地质、地球物理、地球化学、遥感等成矿信息的提取和分析，产生大量的、具有预测意义的找矿标志信息。不幸的是，这些空间数据库并不能自己综合分析，即使在同一地区，由同样成矿信息分析程序所产生的信息，也常常不是综合在一起的（Wyborn，1995）。本课题发展的三种模型就是要从成矿分析最基本的地质、地球物理、地球化学、遥感等专题数据，以及通过成矿信息分析子系统导出的中间图层出发，解决综合评价的辅助决策问题。

（一）经验模型标志交互查询搜索模型

在成矿分析中，矿床专家首先通过对矿床成矿模式的深入研究，往往能够总结出一系列区域性找矿标志组合；或者通过对物、化探数据进行成矿信息的提取，总结出直接、间接找矿标志。第一步的工作是将满足这些找矿标志的地区圈定出来，在以前这种工作往往是根据透明纸人工叠置完成。我们设计的经验模型标志交互查询搜索模型，就是为了解决此类问题，以满足成矿分析一般层次的定位预测，各找矿标志在靶区交互搜索过程中是等权的，即通过 GIS 开发，用计算机程序将满足所有预测条件的区域表达出来。按照用户搜索靶区的习惯，经验模型标志交互查询搜索模型提供了两种不同形式的搜索方式，即空间数据库表达式搜索法与图形交互搜索法。空间数据库表达式搜索法是用户交互式选择（或删除）一些找矿标志，然后程序通过空间叠置分析，圈定有利区；图形交互搜索法是用户根据计算机屏幕上的地质图上的某一感兴趣地区，圈定已知区，然后根据预测工程中的标志专题圈定相似的地区。该模型工作程序如图 13－7－1。

具体步骤如下：

1. 构建预测工程。模型必须能将 GIS 空间多元信息有序地纳入预测工程中。

2. 构造预测标志专题。如从地质专题图中，根据属性将有利的岩性专题提取出来，或者通过 Buffer 缓冲区分析，将断裂构造影响带确定出来。

3. 预测标志的选择取舍。将真正用到找矿靶区圈定的找矿标志组合确定下来。

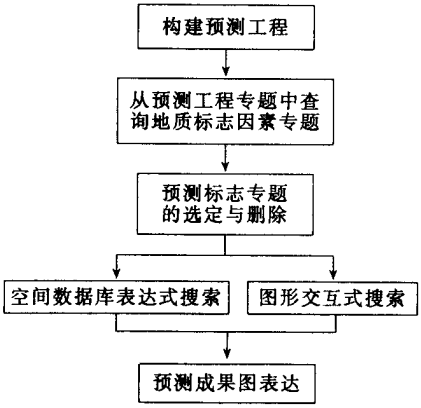



图 13－7－1　经验模型标志交互查询搜索模型工作程序

4. 用交互对话方式(表达式输入或图形控制区交互输入)圈定有利靶区。

(二)证据找矿信息量加权模型

证据加权模型是 F.P.Agterberg、Bonham－Carter 首先介绍到矿产资源评价中的。由于方法简单、实用,受到一些矿产资源评价专家的重视。而找矿信息量法则由 E.B. 维索科奥斯特罗夫斯卡娅(1968)及 И.И. 恰金(1969)先后提出的,赵鹏大等人于 80 年代应用该方法进行矿床统计预测,取得了一定找矿效果。我们这次在构造该模型时,首先对上述两种模型的思路进行了研究,发现两者均是以条件概率理论出发,因此我们认为可以将证据加权与找矿信息量两种模型合并统一,构造出证据找矿信息量加权模型。后来,我们通过实际数据进行预测,预测结果极为相似,这也说明我国的矿产资源统计预测模型方法,具有一定的先进性。

证据找矿信息量加权模型并不要求对区域控矿因素的重要性有先验的知识,它试图用统计学方法研究各地质因素与矿产分布的关系,出发点是统计学,即统计出研究区里某地质标志存在,同时又有矿产的面积。某标志与矿产同时出现的概率越大,其找矿意义无疑越重要,在找矿信息量计算中的权重也就越大。将各统计单元各独立找矿信息因子进行加权综合,便可得到不同级别的远景区。其工程程序如图 13－7－2。

具体步骤如下:

1. 构造预测工程。将研究区所有与地质、矿产相关的专题数据放在预测工程中;

2. 选择要研究的地质因素;

3. 将研究区划分为一定的统计单元;

4. 搜索各标志存在的单元数及矿点存在的单元数,计算各因素权重;

5. 计算研究区统计单元的综合权重;

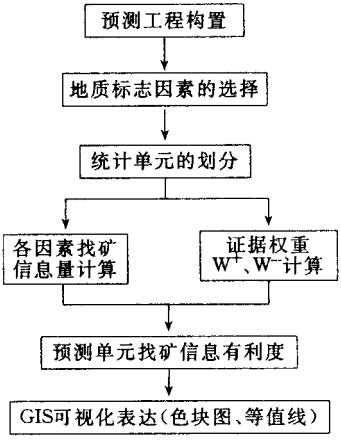



图 13－7－2　证据找矿信息量加权模型工作程序

6. 将单元找矿信息量有利度用等值线或色块图表达出来。

**(三)基于 GIS 矿床定量综合预测模型**

矿床定量综合预测模型是矿床统计预测中最为成熟的方法。它包括变量构置、选择、单元划分、模型选择、定位、资源量预测等一系列较为复杂的工作。和前两种方法不同的是,它必须通过已知矿床,建立区域矿产资源评价的定量模型。也就是说,必须以已知控制模型区为基础,研究和构造预测标志组合,并定量给出各标志因素的权重。该方法不仅能够进行定位预测,而且还能进行资源量评价。MRAS 基于 GIS 矿床定量综合预测模型子系统的工作程序如图 13－7－3。

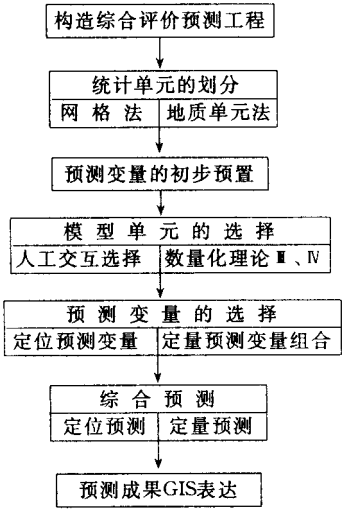



图 13－7－3　基于 GIS 矿床定量综合预测模型工作程序

具体步骤如下：

1. 构造综合评价预测工程。根据矿床模型研究和区域评价资料水平，将相关信息资料以专题形式添加到预测工程中去。与前面方法不同的是，需要将矿床模型专题数据添加到预测工程中。

2. 进行预测单元划分。MRAS提供两种单元划分方法，即网格法与地质单元法。

3. 用户根据已知矿床模型，进行地质标志因素的选择和预测变量的初次预置。

4. 进行建模模型单元的选择。使用方法是：①用户直接通过交互视屏人工选取；②根据数量化理论Ⅳ，定量选择模型区。

5. 预测变量选择。根据模型单元，定量选择那些与矿床最密切的地质找矿信息标志。对定位预测变量，选择的方法有平方和法、秩相关系数法；对定量预测变量的选择，有变异序列法和秩相关系数法。

6. 变量的转换。对特征分析和逻辑信息法，都需要进行定量变量向定性变量转换，采用的方法是频数统计法。

7. 综合分析。特征分析定位预测及数量化理论Ⅰ、逻辑信息法资源量预测、蒙特卡逻模拟等。

8. 预测成果检验及图形表达。有色块图、等值线、预测数据表等多种表达方式。

## 第二节　矿产资源评价的数学模型

在矿产资源评价中，应用的定量数学模型极多，而且一些新的方法模型如神经网格等模型不断涌现，MRAS系统选择了几种目前被生产单位常用的几种成熟的方法模型，并将这些方法与GIS图形结合起来。

### （一）地质体空间图形分布特征数学模型

1. 地质体熵模型

一些地质专家（赵鹏大、裴荣富、季克俭等）认为，一些矿床，如金矿床与地区的地质作用过程的复杂性相关，一个地区的地质单元越复杂，对成矿越有利。数学上衡量复杂度可以用熵分析来解决。

熵模型的数学公式为：

$$H_\gamma = \frac{-\sum P_i \lg P_i}{-\sum \frac{1}{N}\lg\frac{1}{N}} \times 100\%$$

式中：$N$ 代表研究区地质对象种类的多少，如地质图中地层、岩浆岩的总种类数；$P_i$ 代表计算单元中第二类地质体的面积与单元总面积之比，如计算单元里燕山期岩浆岩的面积多少与单元面积之比；$H_\gamma$，是由 GIS 图形多边形数据构造出综合性定量数据。由公式中可见，计算相对熵时，需要统计单元内各地质体的面积。在没有应用 GIS 之前，一幅图往往要划分成上万个单元，每个单元均需要统计各类地质体的面积，工作量之大是难以想像的。现在有了 GIS 系统，由于 GIS 在管理空间图形数据，如多边形拓扑分析时，首先便能很容易地得到缺省的各地质体的面积，这使得熵的计算迎刃而解。

其计算机编程可由以下几步来完成：

(1)生成用来统计的网格单元或非网格单元区文件图层；

(2)使用网格单元与要计算熵的多边形图层进行 overlay 叠加分析；

(3)统计单元中的 n 个种类地质体的面积，计算组合熵；

(4)将熵值用色块图或等值线表达出来；

(5)为了考察熵值与矿产的关系，还可以将熵划分成一定区间，再统计各区间的矿点数，以期找到最有利的熵的成矿区间。

2. 线性体及矿化点密度模型

为了衡量线性构造，特别是遥感解译构造和区域矿化的密集程度，可以统计线性体的密度或区域矿化点的密度。计算公式较简单，工作原理也与熵计算过程相类似，只不过是需要各自统计出各单元中线性体的长度之和以及矿点数，然后与单元的面积百分比相除即可。

(二)找矿信息量及证据加权模型

设计该类数学模型的目的是研究某种地质标志(控矿因素和找矿标志)对成矿或找矿所起的作用，从而确定出在综合评价中的权重。在 MRAS 第二种评价模型中，主要用到该类数学模型。

1. 找矿信息量模型

信息量计算公式为：

$$I_{A_jB} = \lg\frac{P(B \mid A_j)}{P(B)} = \lg\frac{P(A_j \mid B)}{P(A_j)} = \lg\frac{N_j/N}{S_j/S}$$

式中：$I_{A_jB}$ 表示 $A$ 标志 $j$ 状态如断裂 4 个方向状态出现对成矿作用发生的信息量；$I_{A_jB} > 0$ 表示 $A_j$ 标志状态是较有利的找矿标志；$I_{A_j}B < 0$ 表示 $A_j$ 标志的出现不利于成矿。由于

该模型只需统计标志在单元里存在与否，GIS实现上并不需要作多边形的叠加分析，而仅需一种快速查询搜索模型。在GIS实现原理是：

(1)构造统计单元；

(2)统计具有 $A_j$ 标志又含矿的单元数 $N_j$，含矿单元总数 $N$，具有 $A_j$ 标志单元数，及区域单元总数 $S$；

(3)按公式计算各单元的信息量；

(4)对各找矿标志进行信息量排序综合，生成组合信息量。

2. 证据权重模型

证据权重模型也是一种从条件概率出发的模型，先决条件是假定各地质因素应该条件独立。其数学公式包括各地质证据因素的找矿信息量前概估算和预测单元的后概计算两部分。证据标志的权重计算公式为：

$$W^+ = \ln\left\{\frac{P(B/D)}{P(B/\overline{D})}\right\} \qquad W^- = \ln\left\{\frac{P(B/D)}{P(\overline{B}/\overline{D})}\right\}$$

式中：$W^+$、$W^-$ 分别是标志因子存在和不存在的找矿信息量，对于原始数据缺失区权重为0。

各单元后概计算公式为：

$$\ln O(D/B_1^k B_2^k \cdots B_m^k) = \sum_{j=1}^{m} W_j^k + \ln O(D)$$

式中：$O(D) = \dfrac{P(D)}{1-P(D)}$ 为一个单元是有矿的先验概率。

该模型既考察地质因素存在时的找矿权重，也考虑因素缺失的找矿权重，而且当因素缺失数据也可以处理，这样较找矿信息量模型精细些。

和找矿信息量模型一样，在GIS实现原理如下：

(1)构造统计单元；

(2)统计出具有 $B$ 标志存在、又有矿的单元数；

(3)分别计算 $W^+$、$W^-$；

(4)计算后概；

(5)进行预测。

为了优化计算速度，尽量减少空间搜索查询时间，程序设计只需统计既有月标志存在，又有矿的单元数、含矿单元数及标志存在的单元数即可。

(三)变量选择模型

1. 定位预测平方和法变量选择

设变量矩阵 $X_{n\times m}$ 表示有 $n$ 个矿床、$m$ 个变量的定性数据表，平方和法变量选择即是求出 $m$ 个变量在 $n$ 维样品空间的长度，即：

$$a_j = \sum_{i=1}^{n} x_{ij}^2$$

按照 $a_j$ 的大小排序，选择有意义的变量。

2. 相关系数及秩相关系数变量选择

为了研究矿床储量与定量地质因素的相关关系，相关系数是度量定量变量线性相关关系的统计量。其计算公式为：

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}$$

$r$ 值在(-1,1)之间变化，$r$ 的绝对值越大，表明两变量的关系越密切。

秩相关系数对研究有序变量的相似性，如储量规模有意义。所谓变量的“秩”，是把一个变量 $n$ 个值按从小到大(或从大到小)的次序排序，每个数据的序次号，就叫做该值的秩，两个变量的秩相关系数定义为：

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i^2}{n(n^2 -)}$$

式中：$n$ 为样本数；$d_i$ 为两个变量对应的秩差。$r$ 的值在(-1,1)之间变化，$r=1$ 表明两变量完全正相关；$r=-1$，为负相关；$r=0$，变量不相关。

3. 变异系数法选择定量预测变量

将模型单元按其储量规模大小顺序排列，构对对象按规模上升或下降序列，称之为变异序列。设有 $m$ 个矿床，每个矿床有 $p$ 个地质因素，得 $m\times p$ 阶矩阵：

$$\begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \\ m \end{array}\begin{pmatrix} 1 & 1 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

产生上述矩阵的目的是：查明每个地质标志在变异序列中的变化与变异序列中研究对象性质的变化的相似程序，并计算标志权；考察同一标志在性质相同的两个(或两个以上)变异序列构型的异同。计算地质标志权的过程采用位移帕斯卡三角形，如某地质标

志在变异序列中，其二态变量的构型取值为10000101，该标志权 $k$ 取值为1的权为1+10+35=46，标志权 $k$ 取值为0的权为1+1+1+1+6=10。对于 $m$ 个样本取 $r$ 个1状态（$m_1 r$）最大权为 $L_k = \max P_k^*(1) = \max P_k^*(0)$，则可以计算相对标志权：

$$\overline{P}_k^*(1) = \frac{P_k^*(1)}{L_k} \times 100\%$$

$$\overline{P}_k^*(0) = \frac{P_k^*(0)}{L_k} \times 100\%$$

将不同序列中相同级别的样品进行互换，分别计算调整后序列 $\overline{P}_i^*(1)$ 及 $\overline{P}_i^*(0)$，对比调整前后所有变异序列的每个标志的相对标志权 $\overline{P}_i^*(1)$ 及 $\overline{P}_i^*(0)$，可能出现三种情况：

(1)在所有变异序列中全部为 $\overline{P}_i^*(1) > \overline{P}_i^*(0)$ 或 $\overline{P}_i^*(1) < \overline{P}_i^*(0)$；

(2)一些序列中有 $\overline{P}_i^*(1) > \overline{P}_i^*(0)$，另一些序列中有 $\overline{P}_i^*(1) = \overline{P}_i^*(0)$；

(3)一些序列中有 $\overline{P}_i^*(1) > \overline{P}_i^*(0)$，另一些序列中有 $\overline{P}_i^*(1) < \overline{P}_i^*(0)$。

前两种情况说明不同序列中代表某种标志序列的构型相似，换言之，标志 $k$ 在所有变异序列的一切方案中具有 $\overline{P}_i^*(1)$ 及 $\overline{P}_i^*(0)$ 关系的一致性，因而该标志能反映样品变异序列的地质特征。若样品序列为矿床规模，就说明标志 $k$ 与矿床规模的变化有密切关系，该标志可选取。如果出现第三种情况，就说明在某些矿床规模变异序列中，标志是的存在指示有大、中型矿，而在另一些变异序列中，标志是的存在指示有小型矿或无矿，这样的标志与矿床规模没有确定的联系，因此该标志对矿床规模不具有重要控制意义，可以剔除。

MRAS中变量的选择提供上述三种变量选择方法，用户可根据实际情况灵活运用。对于定位预测而言，在变量选择之前必须将所有变量转换成定性变量，方可应用平方和法进行变量选择。对资源量预测变量选择时，对定量变量的选择可以用秩相关系数法或相关系数法进行选择，但应用变异序列法必须将所有变量转换成定性变量。系统设计了比较灵活的变量选择方式，用户可以先后用几种方法进行变量选择，甚至还可以人工选择变量，程序系统将追踪记录变量的选取状态。

(四)定量变量向定性变量转换模型

在矿产资源定量预测中，如特征分析、逻辑信息法中，往往使用的全是定性数据，这就需要将定量数据合理地转换成定性数据。MRAS系统采用秩相关系数，来寻找最佳的找矿区间。秩相关分析公式在本章的前面部分已做了阐述，其基本原理是，将定量变量由用户划分成若干个统计区间，然后研究不同区里大、中、小型矿床的比率，从而确定最

佳转换区间。

MRAS 工作程序为：首先读取预测单元构置变量表，如是定性数据则跳过该标志；对每一定量数据，生成一找矿区间列表，并计算参考转换区间；用户也可交互地对区间值进行修改，找出最佳指示矿床存在的区间。

(五)模型单元定量交互选择模型

在区域评价中，有时会出现模型失真的问题，有些已知模型由于目前勘探水平明明是大矿，但储量还是小型的。这样，通过定量模型选择一些真实的模型，以使建立的资源量模型更准确。MRAS 系统中使用数量化理论Ⅳ，进行模型单元的选择。然后生成可视化模型分布图示化窗口，用户根据大、中、小样本的分布情况，进行交互式选择模型单元。

数量化理论Ⅳ是日本学者林知已夫发明的、专门处理定性数据的多元统计方法。它首先通过样本单元的亲近度公式计算原始模型单元的亲近程度，计算公式为：

$$G = -\sum_{i\neq j}^{n}\sum^{n} e_{ij}\sum_{k=1}^{m}\frac{(x_i k - x_j k^2)}{\sum_{i=1}^{n} x_i k^2}$$

然后以亲近度为依据，在变换的 $m$ 维空间(如二维空间里)按之间亲近度大小对其进行排序，使得彼此之间亲近度较大的两单元所对应的 $m$ 维空间距离近，亲近度小的单元所对应的距离远。

也即：假设对于第 $i$ 个单元在 $m$ 维空间的点坐标尺度为：

$$x'_i = (x_{i1}, x_{i2}\cdots, x_{im})$$

求使：

$$G = -\sum_{i\neq j}^{n}\sum^{n} e_{ij}\sum_{k=1}^{m}\frac{(x_{ik} - x_{jk}{}^2)}{\sum_{i=1}^{n} x_{ik}{}^2}$$

达到最大，其相当于求 $A$ 矩阵前 $m$ 个特征根所对应的正交单位特征向量。

(六)矿床定位预测特征分析模型

特征分析是用来圈定预测远景区，对矿产资源进行定位预测的多元统计方法。它是通过对研究区内已知矿床样品的模型的研究，查明地质标志之间的内在联系，从而确定各个地质特征的找矿重要性，建立起定量预测模型。然后，将模型应用到预测区，将预测单元与模型进行有利度对比，从而给出不同级别的远景区。

对于模型样品单元构成的表矩阵 $X_{n\times m}$，要解决的问题是能计算出每个变量赋予反映变量重要性的变量权，每个样品根据变量权，可以算出其成矿有利度：

$$y_i = a_1 x_{i1} + a_2 x_{i2} + \cdots + a_m x_{im}$$

确定变量权目前有三种方法，即矢量长度法、乘积矩阵主分量法、概率矩阵法。

1. 矢量长度法

取原始变量矩阵的乘积：

$$R = X'X$$

其中：

$$a_j = \sqrt{\sum_{i=1}^{m} r_{ji}^2}$$

反映变量 $j$ 与所有变量总匹配程度。

2. 乘积矩阵主分量法

求上述乘积矩阵的特征值与特征向量。其中最大特征值所对应的特征向量即为变量权系数。即　　$RA = \lambda A$　　$(\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_m)$

(七)矿床资源量评价资源量模型

1. 数量化理论Ⅰ

从已知模型单元出发,建立资源量与各地质因素的回归方程 ;根据回归方程,对未知区进行预测。数量化理论Ⅰ不仅可以处理定性数量,同时还可处理定量数据。为了保证方程组的有解,尚需 $n$ 样本数足够大,而这在实际中往往很难达到,通常可采用逐步回归的思想进行变量的优选,有关的数学公式,这里不再赘述。

2. 逻辑信息法

该方法以数理逻辑、组合分析和数理统计为基础,为综合性数学分析方法。首先,比较模型区变量结构关系的相似性,然后评价这种结构变量的作用,从而预测矿床的规模。其计算机计算工作步骤为：

(1)利用变异系列表。根据位移帕斯卡三角形,求出每个标志的标志权 $P_k^*(1)$ 及 $P_k^*(0)$；

(2)查明能够判别矿床规模的‘最小区分标志组合’,计算标志信息权。所谓的某标志的‘标志信息权’是指包含有某标志‘最小区分标志组合’数与全部‘最小区分标志组合’数的比值：

$$P_k = N_k / N$$

(3)计算标志分权。标志分权是标志作用大小和性质的综合指标。其计算公式 $\overline{P}_i^*(1)$ 及 $\overline{P}_i^*(0)$,由下式求得：

$$\overline{P}_k(1) = P_k^*(1) \cdot P_k \qquad P_k(0) = P_k^*(0) \cdot P_k$$

并求权志分权的绝对差：

$$R_k = | \overline{P}_k(1) * \overline{P}_k(0) |$$

若 $\overline{P}_i^*(1) > \overline{P}_i^*(0)$，则将分权差赋与 1 状态，而将预变变量赋予 0 状态；

若 $\overline{P}_i^*(1) < \overline{P}_i^*(0)$，则将分权差赋与 0 状态，而将 0 数赋予 1 状态。

(4)计算对象权

$$I_i = \sum_{k=1}^{m} R_k(1,0)$$

在 MRAS 系统中，完成逻辑信息法难点是，通过计算机自动搜索出反映矿床规模的最小区分标志组合。逻辑信息法应用前提是，各种规模矿床数$\geqslant 2$，而且变量都是定性变量。

(八)蒙特卡洛模拟方法

蒙特卡洛模拟方法在资源量估算中的应用，就是要通过统计抽样，估算资源量的概率分布。然后，根据资源量的分布，对预测区的资源总量进行估算。

1. 建立概率模型

设 $M$ 为资源量，它是随机变量，根据资源量预测样本单元，即可构造随机变量的分布函数及参数。使用的方法有两种：第一种是用一定典型的分布函数，如正态分布进行拟合，求其分布期望及方差；第二种根据频率构造适当的分布函数。理论分布的选配要进行显著性检验，只有在理论分布与实际结果没有显著差异时，才能使用。

2. 资源量分布的抽样模拟

蒙特卡洛方法进行分布函数的模拟时，要使用随机数构造抽样序列。可以应用计算机数学方法，产生人为随机数来实现，常用产生随机数的方法是乘同余法。该方法的计算公式为：

$$X_{n+1} = \lambda X_n (\mathrm{mod}\, M)$$

这是一个递推式，给定 $X_0$ 以后，就可以算 $X_1, X_2, \cdots, X_n$，如已计算出 $X_n$，那么将 $X_n$ 乘以常数 $\lambda$，用 $m$ 去除，取其余数即为 $X_{n+1}$，将产生的随时数变换到(0,1)区间，形成(0,1)上均匀分布。然后，根据分布参数得出随机变量的模拟值。

3. 资源量曲线及估算

根据抽样模拟的资源量数据，相应可求出分布函数曲线。根据这条曲线，就可以估计到任何概率的资源量。

(九)德尔菲法

德尔菲法是一种客观综合多数地质学家经验和主机判断的方法。设第 $i$ 个地质专家对地区资源量状态 $j$ 的估值为 $Q_{ij}$，如 $j$ 可取 100%、75%、50%、25%、0 等点，$Q_{ij}$ 可表示第 $i$ 个专家在概率 100% 或 75% 时，各自地区的资源量有多少。首先求出 $n$ 个专家的所有估值 $Q_{ij}$ 的极大值 $Q_{max}$ 及极小值 $Q_{min}$，作为最终评价结论区间估值端点，进而把这个区

间分成 $m$ 个小区间，并求出（$m+1$）个小区间的分界线 $Q_k$。

$$\Delta Q = (Q_{max} - Q_{min})/m$$

$$Q_k = Q_{min} + \Delta Q(k-1)$$

然后，可按下算法求出（$m+1$）个资源概率值的加权平均值 $SAF_k$：

$$SAF_k = \sum (AF_k \cdot W_i)/sw$$

其中，$AF_i = \begin{cases} 1 & \text{若 } Q_k < Q_{imin}。 \\ (AF_{ij} - AF_{ij-1}) \cdot \dfrac{(Q_k - Q_{ij} - 1)}{(Q_{ij} - Q_{ij-1})} + AF_{ij-1} & \text{若 } Q_{imin} \leqslant Q_k \leqslant Q_{imax} \text{ 同时 } Q_{ij-1} \leqslant Q_i \leqslant Q_{ij} \\ 0 & \text{若 } Q_k > Q_{imax} \end{cases}$

$$sw = \sum_{i=1}^{n} W_i \qquad W_i \text{ 为专家权重}$$

最后，把计算出来的 $m+1$ 点（$Q_k$，$AF_k$）以分布函数的形式显示出来。该方法相对较独立，在 MRAS 综合评价系统中，挂在定量评价系统中。

## 第三节　MRAS矿产资源三种评价模型系统结构分析及实现

本节讨论 MRAS 矿产资源综合评价子系统中涉及的主要对象来源、属性与服务。

### 一、MRAS 综合评价的对象结构

#### （一）地质专题类 TTheme

在 MAPGIS 中，空间图形数据是分别以点、线、面文件类型来组织的。在矿产资源评价中，往往需要空间信息既以点的形式存在，又可以是线、面数据，它们在成矿预测中的地位是一致的。为了便于操作，在类 TTheme 中封装了与地质多源数据相对应的点、线、面三个工作区。在地质专题类中，通过成员函数，建立类双向链表结构，以便于对多源专题信息类的添加、删除、管理（表 13－7－1）。

#### （二）地质标志专题类 TFactTheme

由地质专题派生而成，主要对初始地质多源信息专题通过因素查询、Buffer 缓冲区分析、地质图熵分析等生成为预测变量预置的因素标志专题（表 13－7－2）。

表 13－7－1　TTheme 的类定义

**类名**：TTheme

**祖先**：无

**用途/描述**：数据专题，管理 MAPGIS 数据库中的点、线、面工作区

**数据成员(属性)**：

| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
|---|---|---|---|
| 公共 | string | m_ThemeTitle | 专题的名称 |
| 公共 | string | m_ThemeFihName | 专题存储的文件名 |
| 公共 | string | m_AiPNT | 专题的点工作报告区号 |
| 公共 | string | m_AiLIN | 专题的线工作报告区号 |
| 公共 | short | m_AiREG | 专题的区工作报告区号 |
| 私有 | bool | m_IsOpen | 标志专题工作区是否打开 |
| 私有 | TTheme* | m_ChildList | 由该专题导出的子专题的列表 |
| 私有 | TTheme* | m_SiblingList | 该专题的兄弟专题的列表 |
| 私有 | TTheme* | m_Parent | 该专题的父专题 |

**成员函数(服务)**：

| 可见性 | 名称 | 用途/注释 |
|---|---|---|
| 公共 | F_RECTSize()const | 该地质专题的研究范围 |
| 公共 | doubleArea()const | 该地质专题的研究面积 |
| 公共 | IsOpen() | 获取该专题的工作区是否打开的标志 |
| 公共 | IsDirty() | 获取该专题内容是否改变的标志 |
| 公共 | ChangeDirtyFlag(char chg) | 设置专题的改变标志 |
| 公共 | OpenAreas(AREA_HINST ahinst) | 打开专题的三个工作区 |
| 公共 | CloseAreas(AREA_HINST ahinst) | 关闭专题的三个工作区 |
| 公共 | FastOpenAreas(AREA_HINST ahinst) | 以快速只读方式打开专题的三个工作区 |
| 公共 | SaveTheme(const char* fname=0) | 将专题的三个工作区存储到文件中 |
| 公共 | TTheme* Next() | 获取专题的兄弟列表中的下一个专题指针 |
| 公共 | TTheme* GetFirstChld() | 获取专题的子列表中的第一个子专题指针 |
| 公共 | TTheme* GetLastChild() | 获取专题的子列表中的第一个子专题指针 |
| 公共 | TTheme* Previous() | 获取专题的兄弟列表中的前一个专题指针 |
| 公共 | NumChildren() | 获取子专题的个数 |
| 私有 | MeInit(TTheme* parent) | 专题的初始化 |

表 13－7－2　TFactTheme 的类定义

| 类名：TFactTheme | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TTheme | | | |
| 用途/描述：用于生成预测模型的因素标志 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 公共 | short | m_SFactnum | 从专题中提取的预测因素个数 |
| 公共 | short | m_SIndex | 从专题图中提取预测因素在预测活动的起始位置 |
| 公共 | float | m_FWeight+P | 证据加权模型该因素的正权 |
| 公共 | float | m_FWeight+N | 证据加权模型该因素的负权 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | SelectFacts() | | 从专题图中选择地质因素 |
| 公共 | AnalyseBuffer() | | 对专题图作缓冲区分析 |
| 公共 | GenFactCell() | | 生成因素单元 |
| 公共 | GenEntropy() | | 生成熵专题数据 |

**(三)网格专题类** TCellTheme

该类来源于 TTheme，目的是根据一定条件，生成预测网格单元专题图层(表 13－7－3)。

表 13－7－3　TCellTheme 的类定义

| 类名：TCellTheme | | |
|---|---|---|
| 祖先：TTheme | | |
| 用途/描述：生成网格单元专题 | | |
| 数据成员(属性)：无 | | |
| 成员函数(服务) | | |
| 可见性 | 名称 | 用途/注释 |
| 公共 | GenerateCell() | 生成网格单元专题 |

**(四)单元专题类** TGrdTheme

是一个 Theme 导出类。它又是矿化模型单元和因素单元题类的基类(表 13－7－4)。

**(五)矿化模型单元专题类** TMineCrdTheme

是 TGrdTheme 的导出类，用于选择模型单元，设置模型单元的资源量或矿床个数及矿床资源量规模分级(表 13－7－5)。

表 13－7－4　TGrdTheme 的类定义

| 类名：TGrdTheme | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TTheme | | | |
| 用途/描述：为了管理因素专题 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 公共 | long | m _ Numx | 网格单元数 x 方向 |
| 公共 | long | m _ Numy | 网格单元数 y 方向 |
| 公共 | short | m _ OnoffState | 因素的选取状态 |
| 公共 | short | m _ SScaleNum | 分级数 |

表 13－7－5　TMineGrdTheme 的类定义

| 类名：TMineGrdTheme | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：TGrdTheme | | | |
| 用途/描述：用于模型单元的管理 | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 公共 | short | m _ DispPntAi | 显示被选中的模型含矿单元 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | | 用途/注释 |
| 公共 | SearchMineGrd() | | 搜索检验含矿单元，并将含矿单元中的矿点数或资源量赋值 |
| 公共 | SelectModelCell() | | 选择模型单元，由点或矩形框 |
| 公共 | SetMineScale() | | 设置矿化规模级别 |

**(六)地质因素单元专题类** TFactGrdTheme

是 TGrdTheme 的导出类，主要处理选择地质因素与矿产资源相关分析(表 13－7－6)。

表 13－7－6　TFactGrdTheme 的类定义

| 类名：TFactGrdTheme | | |
|---|---|---|
| 祖先：TGrdTheme | | |
| 用途/描述：用于生成预测模型的因素标志 | | |
| 数据成员(属性)：无 | | |
| 成员函数(服务)： | | |
| 可见性 | 名称 | 用途/注释 |
| 公共 | SetFactScale() | 变量计算秩相关系数，设置因素级别 |
| 公共 | CalZXGXiShu() | 计算因素秩相关系数 |

**(七)预测模型单元类** TMineTheme

**是** TTheme **导出类,用于生成预测单元及搜索模型单元(表** 13－7－7**)。**

**表** 13－7－7　TMineTheme **的类定义**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **类名:** TMineTheme | | | |
| **祖先:** TTheme | | | |
| **用途/描述:** | | | |
| **数据成员(属性):** | | | |
| **可见性** | **类型** | **名称** | **用途/注释** |
| **公共** | | TMineGrdTheme | **生成模型单元专题** |
| **成员函数(服务):** | | | |
| **可见性** | | **名称** | **用途/注释** |
| **公共** | | GenModelCell() | **生成网格化单元模型及模型单元** |
| **公共** | | GenModelCell() | **生成非网格化模型单元** |

**(八)二维点矢量数据管理类** GDots

**用来方便地管理二维矢量坐标对,是** GDot **结构的导出类(表** 13－7－8**)。**

**表** 13－7－8　GDots **类定义**

| | | | |
|---|---|---|---|
| **类名:** GDots | | | |
| **祖先:** GDot | | | |
| **用途/描述:** | | | |
| **数据成员(属性):** | | | |
| **可见性** | **类型** | **名称** | **用途/注释** |
| **私有** | int | m_iCapacity | **矢量点多少** |
| **私有** | int | m_iElementCount | **矢量点计数** |
| **成员函数(服务):** | | | |
| **可见性** | | **名称** | **用途/注释** |
| **公共** | | IndexOf() | **指示矢量点阵位置** |
| **公共** | | Contains() | **是否包含某坐标对** |

**(九)预测工程专题类**

**该类是预测工程的重要类,它把预测空间数据库专题类与定位、定量模型封装在一起(表** 13－7－9**)。**

表 13－7－9　TMPEProject 的类定义

| 类名：TMPEProject | | | |
|---|---|---|---|
| 祖先：无 | | | |
| 用途/描述： | | | |
| 数据成员(属性)： | | | |
| 可见性 | 类型 | 名称 | 用途/注释 |
| 公共 | char | m _ name | 记录专题的名称 |
| 公共 | TTheme | m _ MPThemes | 预测专题 |
| 公共 | TMineTheme | m _ MineTheme | 矿点专题 |
| 公共 | TTheme | m _ TransdataTheme | 转换数据专题 |
| 公共 | TTheme | m _ QualiativeTheme | 定位预测专题 |
| 公共 | TTheme | m _ QuantitativeTheme | 定量预测专题 |
| 成员函数(服务)： | | | |
| 可见性 | 名称 | 用途/注释 | |
| 公共 | SetCellTheme() | 设置预测单元 | |
| 公共 | SetMineTheme() | 设置矿点专题 | |
| 公共 | AddFactTheme() | 设置因素专题 | |
| 公共 | ConstructVariable() | 变量构置 | |
| 公共 | AnalyseOrderCon() | 秩相关分析 | |
| 公共 | ConstructModelVartty() | 构造模型变量 | |
| 公共 | ConstructFacWeight() | 数量化 I 权重 | |
| 公共 | QualtitativeForcast() | 特征分析定位预测 | |
| 公共 | PrePareModelCell() | 逻辑信息法 | |

**(十)计算专题熵** CEntropy

**用来计算地质专题的熵值。**

**以上介绍了综合评价子系统几个重要类,这些类通过以下的组织结构有机联系在一起(图** 13－7－4)。

## 二、综合评价子系统的窗口界面及使用说明介绍

### (一)综合评价子系统使用说明

1. TProjectWindows

**由** OWL **中** TLstBox **导出。负责对专题界面可视化管理,其属性数据包括：**

(1) m _ MPProject **预测工程类；**

(2) m _ Picture **专题图形图示；**

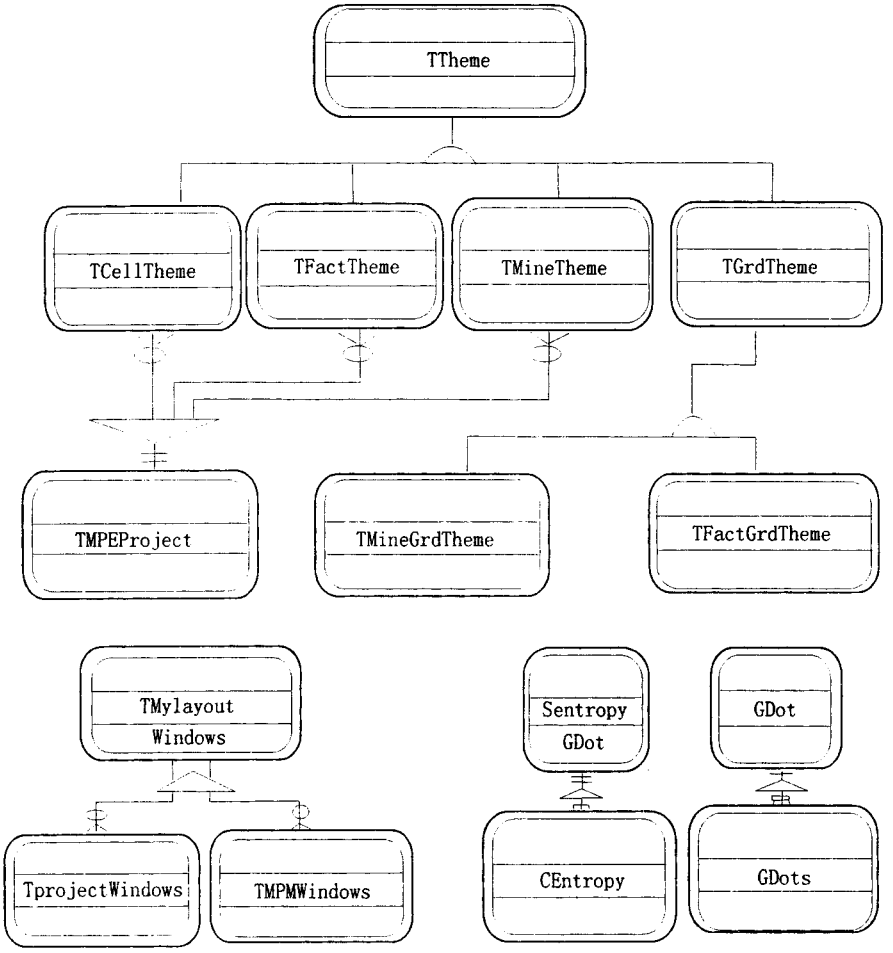



图 13－7－4　MRAS中综合评价系统的结构

(3) m _ ItemHeight 专题类。

**重要操作函数有：**

(1) ODASelect()选择焦点专题；

(2) CmSaveProject()保存预测工程；

(3) EVLBufferDown()用户鼠标交互专题操作。

2. CThemeWind

**由** OWL Twindows **导出，主要完成图形工作区交互操作管理。**

**包括主要属性有：**

(1) m _ AHInst 工作区；

(2) m _ LMRButton 左右健标志；

(3) m _ Theme 专题类。

主要操作有：

(1) CmRestWin()窗口复位；

(2) CmABufOneRey() Buffer 分析；

(3) CmBrowseAtt()属性表浏览

3. TMBMWindows

由 CThemeWind 导出，主要完成图形专题一些熵分析、模型选择等操作。

4. TMyLayoutWindow

由 OWL TLayout Window 导出，由 1、3 类构造成。

主要属性成员有：

(1) m _ ProjectWindow 预测工程文档窗口；

(2) m _ MBMWindow 预测工程图形窗口；

(3) m _ MbmLayoutMetricsLayout 尺度。

主要操作有：

(1)窗口复位、移动操作系列；

(2)工作区管理系列；

(3)模型区管理；

(4)因素专题计算；

(5)定位定量预测专题系列函数。

(二)综合评价子系统使用说明

相对而言，经验标志交互查询搜索模型及证据找矿信息量加权模型使用简单，这里主要介绍基于 GIS 矿床定量综合预测评价子系统的使用方法。

1. 创建新的预测工程

(1)在‘项目’菜单中，单击‘新建项目”。

(2)在‘项目’菜单中，单击‘打开矿点图层”，系统弹出文件对话框，回答正确后产生一矿点专题窗口，可按‘复位’按钮显示图层，然后关闭该窗口。

(3)在‘项目’菜单中，单击‘添加专题图层”，系统弹出文件对话框，回答正确后产生一因素专题窗口，可按‘复位’按钮显示图层，然后关闭该窗口。

(4)重复第 3 步，将所有选定的因素专题加入到工程管理器中。

(5)在‘项目’菜单中，单击‘存项目”，系统弹出文件对话框。

(6)如果新建预测工程时打开的矿点专题出现错误，可以在‘项目’菜单中，单击‘删

除矿点图层”。

(7)如果新建预测工程时添加的专题出现错误,可以激活工程管理器,单击选中准备删除的矿点或因素专题,在‘项目’菜单中,单击‘删除专题图层”。

注:

(1)每个专题最多可包含三个相同文件名、不同后缀名的 MapGIS 图形文件,如 china.wt,china.wl,china.wp 三个文件组成 China 专题,当打开矿点图层或添加专题图层时,在文件对话框中任意选取专题中的一个文件即可。

(2)每个预测工程的所有专题应与工程文件存储于同一个目录下,并且应该将系统环境中的工作目录也设置在该目录下。

(3)工程名与专题名可以通过在工程管理器中单击鼠标右键进行修改,但是二者的名称长度必须小于 32 个字符,即最多命名 15 个汉字。

2. 数量化理论Ⅰ

(1)在‘项目’菜单中,单击‘装入项目”,系统弹出文件对话框,选中已经建立好的预测工程(*.MPP),单击 OK 按钮。

对矿点专题的处理:

(2)在工程管理器中,鼠标左键双击矿点专题,产生一专题窗口。

(3)单击工具条上的复位按钮,显示矿点图。

(4)在‘单元划分’菜单中,单击‘设置模型单元”。

(5)在‘单元划分’菜单中,单击‘搜索含矿单元”。

(6)在‘单元划分’菜单中,单击‘设置矿化等级”(*.MDT)。

输入分级参数对话框:

a. 选择工作区表

b. 选择图元类型

c. 选择属性表(分级的依据)

d. 输入等级参数(按钮),根据统计结果输入等级数目(级数应小于 10)

e. 调整等级范围(升序或降序)

f. 确认

(7)关闭矿点专题窗口。

对因素专题的处理:

(8)在工程管理器中,鼠标左键双击将处理的因素专题,产生一专题窗口。

(9)单击工具条上的复位按钮,显示因素图。

(10)在“单元划分”菜单中,单击“生成专题单元”。系统弹出设置网格单元属性结构对话框,选择点、长度或者面积,在相应的属性列表中选中属性标志(*.FDT)。

(11)若该专题为某种定量数据,需要插值时,在“单元划分”菜单中,单击“定量数据插值”(*.FDT)。

(12)关闭该专题窗口。

(13)重复步骤 8~12,完成对所有预测因素的预处理。

(14)在“变量选择”菜单中,单击“变量构置”(*.RDT,*.MCl)。

(15)在工程管理器中双击矿点专题,产生专题窗口。

(16)在“选择”菜单中,单击“子专题”。

(17)单击工具条上的复位按钮,显示矿点图。

(18)在“变量选择”菜单中,指向“模型单元选择”,单击“数量化理论Ⅳ”。

用鼠标左键点击形成多边形选择模型单元;

更新专题窗口。

(19)(*.MCS)

(20)关闭矿点专题窗口。

(21)在“资源量预测”菜单中,指向“数量化理论Ⅰ”,单击“构造预测模型”,产生一预测结果的专题窗口。

(22)在“资源量预测”菜单中,指向“数量化理论Ⅰ”,单击“因素权重”。

(23)在“资源量预测”菜单中,指向“数量化理论Ⅰ”,单击“靶区预测”。

(24)在“资源量预测”菜单中,单击“色块图”或者“等值线图”,显示预测结果。

注:

如果在完成第 14 步操作后的任何步骤中进行了换名存项目的操作,则必须重新从第 14 步开始进行预测工作。

3. 逻辑信息法

(1)在“项目”菜单中,单击“装入项目”,系统弹出文件对话框,选中已经建立好的预测工程(*.MPP),单击 OK 按钮。

对矿点专题的处理:

(2)在工程管理器中,鼠标左键双击矿点专题,产生一专题窗口。

(3)单击工具条上的复位按钮,显示矿点图。

(4)在“单元划分”菜单中,单击“设置模型单元”。

(5)在“单元划分”菜单中,单击“搜索含矿单元”。

(6)在‘单元划分’菜单中,单击‘设置矿化等级’(*.MDT)。

输入分级参数对话框:

a. 选择工作区表

b. 选择图元类型

c. 选择属性表(分级的依据)

小输入等级参数(按钮),根据统计结果输入等级数目(级数应小于10)

e. 调整等级范围(升序或降序)

f. 确认

(7)关闭矿点专题窗口。

对因素专题的处理:

(8)在工程管理器中,鼠标左键双击将处理的因素专题,产生一专题窗口。

(9)单击工具条上的复位按钮,显示因素图。

(10)在‘单元划分’菜单中,单击‘生成专题单元’。系统弹出设置网格单元属性结构对话框,选择点、长度或者面积,在相应的属性列表中选中属性标志(*.FDT)。

(11)若该专题为某种定量数据,需要插值时,在‘单元划分’菜单中,单击‘定量数据插值’(*.FDT)。

(12)关闭该专题窗口。

(13)重复步骤8~12,完成对所有预测因素的预处理。

(14)在‘变量选择’菜单中,单击‘变量构置’(*.RDT,*.MCI)。

(15)在工程管理器中双击矿点专题,产生专题窗口。

(16)在‘选择’菜单中,单击‘子专题’。

(17)单击工具条上的复位按钮,显示矿点图。

(18)在‘变量选择’菜单中,指向‘模型单元选择’,单击‘图上人工选择’。

用鼠标左键点击所要选择的模型单元或者用鼠标拖出一矩形框选择一组模型单元;更新专题窗口。

(19)关闭矿点专题窗口。

(20)在‘变量选择’菜单中,单击‘变量转换’。

变量转换对话框:

a. 选择当前选中变量(标志1)

b. 依据右侧统计结果输入因素等级

c. 单击‘…’按钮,计算秩相关系数,报告计算结果

d. 重复 a～c,处理完所有标志

e. 按 OK 钮结束

注：

系统将依据秩相关系数计算结果选中最佳的因素等级,系统自动删除标志全为 1 或全为。的标志。

(21)在‘变量选择’菜单中,单击‘秩相关系数法”。

或者

在‘变量选择’菜单中,单击‘变异序列法”。

a. 在预测变量列表中选中某标志

b. 单击‘…’按钮,计算标志权,并填入表格

c. 根据 $P_k*(1)$ 与 $P_k*(0)$ 判断是否选择该预测标志

d. 重复 a～c,处理完所有标志

e. 按 OK 钮结束

注：

*.SDT

(22)在‘资源量预测’菜单中,指向‘逻辑信息法”,单击‘构造预测模型”,产生一预测结果的专题窗口。

(23)在‘资源量预测’菜单中,指向‘逻辑信息法”,单击‘最小区分标志组合”。

(24)在‘资源量预测’菜单中,指向‘逻辑信息法”,单击‘计算信息权等”。

(25)在‘资源量预测’菜单中,指向‘逻辑信息法”,单击‘靶区预测”。

(26)在‘资源量预测’菜单中,单击‘色块图’或者‘等值线图”,显示预测结果。

注：

如果在完成第 14 步操作后的任何步骤中进行了换名存项目的操作,则必须重新从第 14 步开始进行预测工作。

4. 德尔菲法

文件名：*.EDT

原始数据的文件格式：

[预测区个数 m] [累积概率个数 n]

[专家个数 en]

[专家 1 代号] [专家 1 的权重]

[专家 1 预测数据 m×n 个]

[专家 2 代号][专家 2 的权重]

[专家 2 预测数据 m × n 个]

……

[专家 en 代号][专家 en 的权重]

[专家 en 预测数据 m × n 个]