

椭圆窗方向滤波器 在重力资料处理中的应用

魏 献 齐

摘 要

由于引入了快速傅氏变换的计算方法,重磁资料的数字处理由过去单一的空间域处理,引伸到空间域、频率域两大系统。两者之间取长补短,相辅相成,对于提高处理及解释水平的作用日益显著。

频谱理论和模型试验表明,地质体产生的重磁力异常的走向,与在频率域内其异常的频谱走向相互垂直。根据重磁场频谱的这一方向特性,可以设计出各种各样的方向滤波器。

本文利用椭圆窗上两个半轴(长、短轴)不等及椭圆圆心的位置(滤波器的中心频率),即椭圆窗方向滤波器来加强与压制两个不同方向上的信号。实例表明,这种滤波器可以有效地对三度体产生的异常进行滤波,特别是对走向不同的局部场与区域场,有明显的分离效果。

ABSTRACT

Fast Fourier transform advances the gravitational and magnetic data processing from single space domain to frequency domain. The two domain processing systems make up each other's deficiencies and supplement each other, thus obviously improving the processing and interpretation techniques.

The frequency spectrum theory and experimental model show that the trends of gravitational and magnetic abnormalities caused by geological body are perpendicular to the trends of the frequency spectra of the abnormalities in frequency domain. Various directional filters can be designed according to the directional characteristic of the frequency spectra of gravitational and magnetic fields.

The signals on two different directions are enhanced or attenuated by the directional ellipse filter, that is to say, by the length difference of its a and b axes as well as the ellipse center position (i.e.

the center frequency of the filter). This filter can effectively filter 3D abnormals; particularly, it can identify the local and regional fields whose trends are different.

频谱理论及模型试验表明, 地质体产生的重磁力异常的走向与在频率域内该异常的频谱走向相互垂直。根据重磁场频谱的这一方向特性, 可以设计出各种各样的方向滤波器。

椭圆窗方向滤波器, 是利用了它在椭圆窗上的两个不同方向上的半轴 (长、短轴) 不等及椭圆圆心的位置 (即滤波器的中心频率) 来加强与压制两个不同方向上的信号。它可以有效地对三度体产生的重磁力异常进行滤波, 特别是对于走向不同的局部场与区域场, 有明显的分离效果。

椭圆窗方向滤波器

方向滤波器的滤波因子为汉宁窗口

$$f(u'_{mn}, v'_{mn}) = \begin{cases} \frac{1}{2} (1 + \cos R_{mn}) & R_{mn} < \pi \\ 0 & R_{mn} \geq \pi \end{cases} \quad (1)$$

其中变量 R_{mn} 为一个椭圆窗函数, 即

$$R_{mn} = \left[\frac{(|u'_{mn}| - u'_0)^2}{\Delta u'^2_0} + \frac{(|v'_{mn}| - v'_0)^2}{\Delta v'^2_0} \right]^{1/2} \cdot \pi \quad (2)$$

式中

$$\begin{cases} u'_{mn} = u_m \cos \varphi_0 - v_n \sin \varphi_0 \\ v'_{mn} = u_m \sin \varphi_0 + v_n \cos \varphi_0 \end{cases}$$

$u'_0, v'_0, \Delta u'_0, \Delta v'_0$ 为给定常数, 且 $u'_0 \geq 0, v'_0 \geq 0, \Delta u'_0 > 0, \Delta v'_0 > 0$; u_m, v_n 为变量; φ_0 为 u 轴与 u' 轴之夹角 ($u'ov'$ 是频域内 uov 坐标系逆时针旋转 φ_0 角后的新坐标系)。

不难看出, 式 (2) 的轨迹是一个椭圆 (图 1), 其圆心为 (u'_0, v'_0) 。 u'_0 和 v'_0 分别称为空间域内 x' 和 y' 轴方向的中心频率, 它决定了椭圆的中心位置即要提取异常的频率大小; 椭圆窗的两个半轴 $\Delta u'_0$ 和 $\Delta v'_0$ 称为空间域中 x' 和 y' 轴方向通频带半宽度 (这里的 $x'oy'$ 是空间域内 xoy 坐标系逆时针旋转 φ_0 角后的新坐标), 它决定了要提取的异常范围。式 (1) 和式 (2) 的图形均为椭圆, 故称由此两式所决定的滤波器为椭圆窗滤波器。

给出的 $u'_0, v'_0, \Delta u'_0, \Delta v'_0$ 值不同, 椭圆

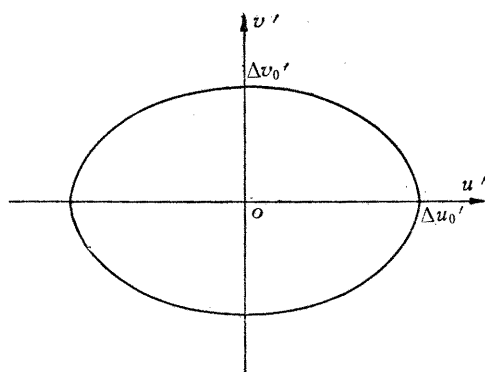


图 1 椭圆窗滤波器示意图

窗的滤波特性也不同,就其类型大致可分为以下三种(这里的 u, v 分别为 x, y 轴上的频率变量)。

y' 向低通椭圆窗滤波器

在式(2)中,令 $\Delta u'_0 > \Delta v'_0, u'_0 = v'_0 = 0$,则可使该式所决定的椭圆沿 u' 轴方向拉长(图2),称为 y' 轴方向低通滤波器(空间域和频率域中的异常走向相互垂直)。若使 $\Delta u'_0 \rightarrow \infty$,其图形变为一束沿 u' 轴平行的直线(图3),可使 x' 轴方向的低频信号完全保留下来。

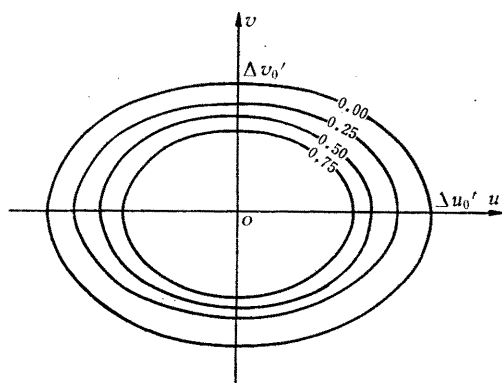


图2 y' 向低通滤波器
($u'_0 = v'_0 = 0, \Delta u'_0 > \Delta v'_0$)

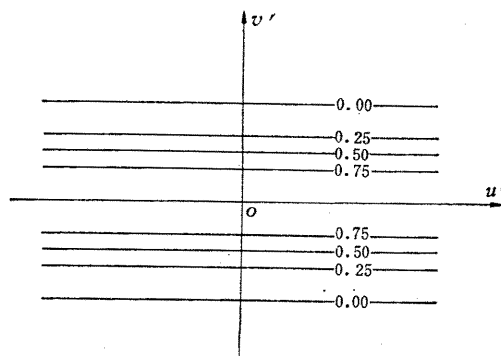


图3 y' 向低通滤波器
($u'_0 = v'_0 = 0, \Delta u'_0 \rightarrow \infty$)

同理,也可设计出 x' 向低通滤波器。

带通椭圆窗滤波器

若令 u'_0, v'_0 中一个不为零,则可设计成带通滤波器。假设 $v'_0 = 0, u'_0 > 0$,此时为 x' 向带通滤波器(图4)。在这种条件下, $\Delta u'_0$ 和 $\Delta v'_0$ 的选择有三种情况:(1) $\Delta v'_0 > \Delta u'_0$,椭圆沿 v' 轴方向拉长;(2) $\Delta v'_0 = \Delta u'_0$,为圆形滤波窗口,其平面图为圆;(3) $\Delta v'_0 < \Delta u'_0$,椭圆沿 u' 轴方向拉长。

同理,可设计出 y' 向带通滤波器。设 $v'_0 \neq 0, u'_0 = 0$,当 $\Delta u'_0 \rightarrow \infty$ 时,其图形为一束沿 v' 轴方向平行而沿 u' 轴方向拉长的直线(图5),称为 y' 向带通滤波器。它主要用于提取沿 x' 轴走向的局部场, $\Delta u'_0$ 越小,局部异常越突出。

双向带通滤波器

双向带通滤波公式为

$$R_{-mn} = \left[\left(\frac{u'_{mn} - u'_0}{\Delta u'_0} \right)^2 + \left(\frac{v'_{mn} - v'_0}{\Delta v'_0} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot \pi$$

$$R_{+mn} = \left[\left(\frac{u'_{mn} + u'_0}{\Delta u'_0} \right)^2 + \left(\frac{v'_{mn} + v'_0}{\Delta v'_0} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot \pi$$

$$f_{-mn} = \begin{cases} \frac{1}{2} (1 + \cos R_{-mn}) & R_{-mn} < \pi \\ 0 & R_{-mn} \geq \pi \end{cases}$$

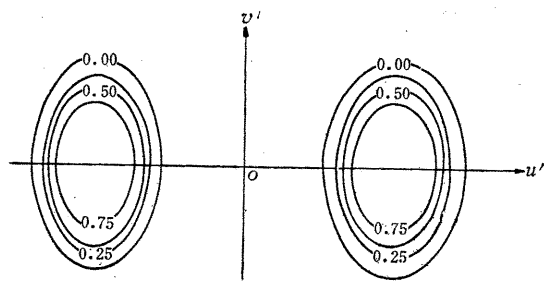


图 4 x' 向带通滤波器
($v'_0=0, u'_0>0, \Delta v'_0>\Delta u'_0$)

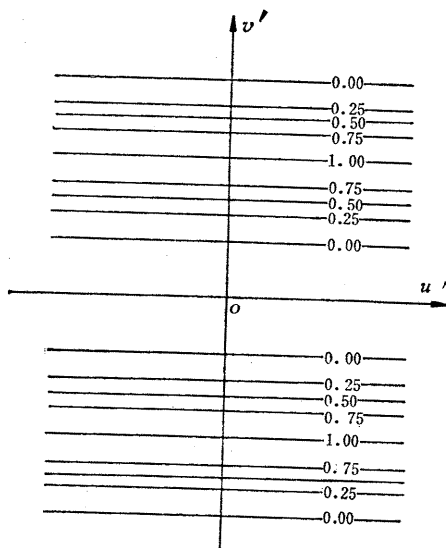


图 5 y' 向带通滤波器
($v'_0 \neq 0, u'_0=0, \Delta u'_0 \rightarrow \infty$)

$$f_{+mn} = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 + \cos R_{+mn}) & R_{+mn} < \pi \\ 0 & R_{+mn} \geq \pi \end{cases}$$

在满足条件

$$\left(\frac{u'_0}{\Delta u'_0}\right)^2 + \left(\frac{v'_0}{\Delta v'_0}\right)^2 > 1$$

的情况下, 窗口函数为

$$f(u'_{mn}, v'_{mn}) = f_{+mn} - f_{-mn}$$

其等值线为两组以原点为对称的椭圆 (图 6)。它相当于在

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{v'_0}{u'_0}\right) + \varphi_0$$

方向上进行带通滤波, 而在其垂直方向上进行低通滤波。与前面两种情况不同的是椭圆的长、短半轴方向并不与 φ 向平行或垂直, 而是和 u' 、 v' 轴平行或垂直。它主要用于突出特定方向频谱形态的局部场。

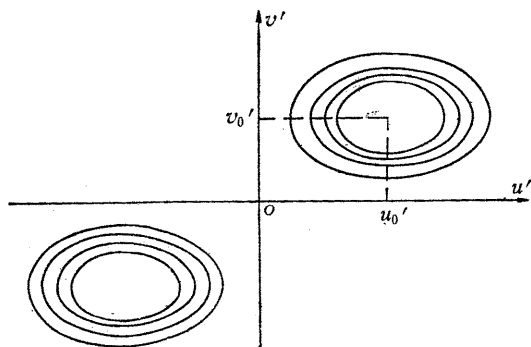


图 6 双向带通滤波器
($u'_0>0, v'_0>0, \Delta u'_0>\Delta v'_0$)

模型试验及分析

为了证明椭圆窗滤波器的方向特性, 我们设计了两个走向相互垂直的矩形体, 矩形体各个物理量 (长度单位为公里) 见下表。

模型参数表

地质体走向	剩余密度	长	宽	上顶埋深	下底埋深
东 西	0.30	100.0	3.0	3.5	5.5
南 北	0.15	40.0	2.0	1.0	2.0

由两个矩形地质体模型产生的重力异常见图 7 (图中粗黑线表示地质体的位置), 可以看成是相互垂直的两个异常叠加而成的。东西走向异常比较宽, 且幅值比较大, 表明该方向的重力信号比较强。将重力异常信号变换到频率域后其平面振幅谱见图 8, 它反映了不同深度异常的不同走向分布情况。根据它可以找出主要异常体的走向和确定所要提取的异常。

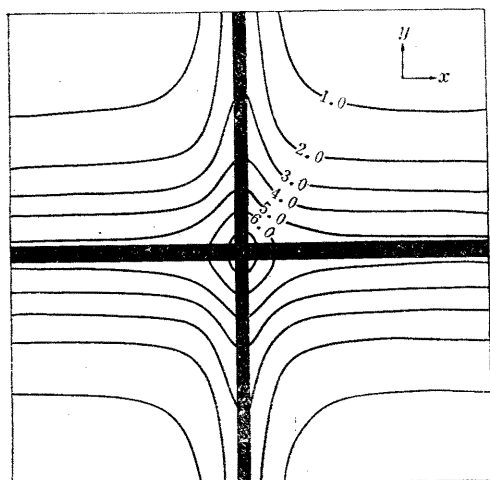


图 7 走向垂直、埋深不等的矩形体重力异常图

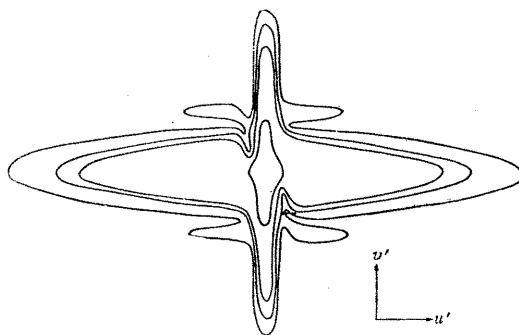


图 8 图 7 重力异常的振幅谱平面图

众所周知, 如果空间域重力异常具有走向, 那么由它变换到频率域所得到的频谱也具有走向, 且与空间域异常走向垂直。由东西走向矩形体重力异常频谱的走向即图 8 的 v' 方向可以看出, 在该方向上频谱分布较集中, 谱的中心部分在 v' 方向要比 u' 方向拉得更长, 幅值也大, 这表明东西走向的地质体埋藏较深, 这与空间域重力异常是相符合的。

图 9 和图 10 分别为 u' 和 v' 两个方向上模型地质体异常的对数平均功率谱剖面图。按其不同频率对应的对数平均功率谱值的变化情况可划分成两条带: I 带主要表示东西方向埋藏较深的地质体异常的频率范围; II 带主要表示南北方向埋藏较浅地质体异常的频率范围。可以看出, v' 向功率谱的低频段要比 u' 向功率谱的低频段宽得多, 这也表明了埋藏较深地质体的走向是沿 x' 方向的。

如果我们想保留东西走向的异常, 可根据两个方向平均对数功率谱划分的带来确定滤波参数。由于东西向异常体埋藏较深, 可以认为它代表区域异常。滤波器长轴应选在与保留异常的走向一致的方向 (即 v' 轴方向)。由图 9 和图 10 可以看到: u' 向功率

谱区域异常的边界频率值为 0.147, 可取作短轴; v' 向功率谱的低频带边界频率值为 2.07, 可取作长轴。于是保留东西向异常的椭圆窗滤波器参数可选为: $u_0' = v_0' = 0$, $\Delta u_0' = 0.147$, $\Delta v_0' = 2.07$ 。由这四个参数决定的椭圆窗滤波器为 x' 向低通滤波器。

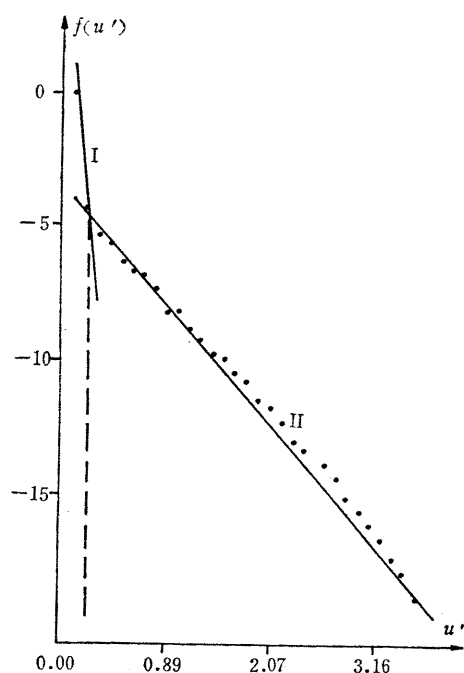


图 9 模型体重力异常沿测线方向的平均对数功率谱
($\Delta u' = \pi/32$)

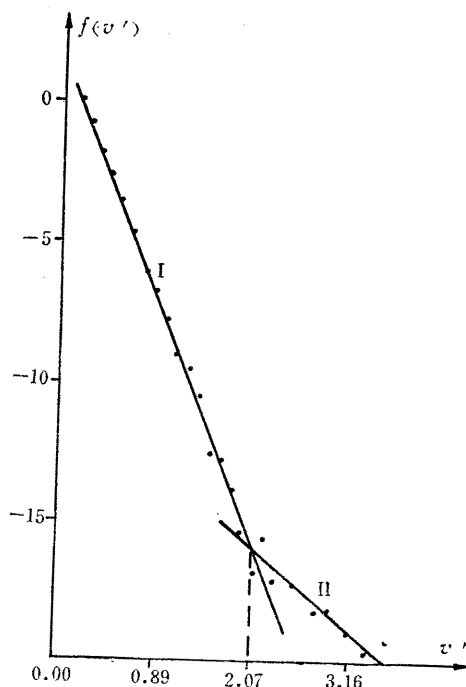


图 10 模型体重力异常沿垂直测线方向的平均对数功率谱
($\Delta v' = \pi/32$)

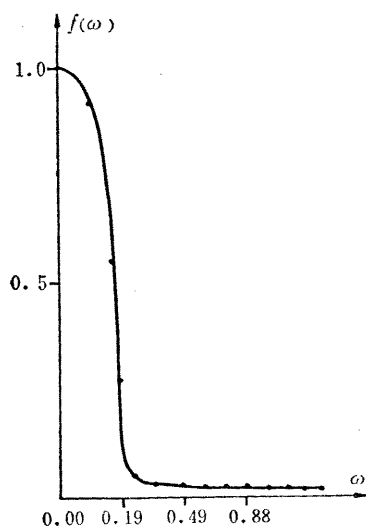


图 11 设计的方向滤波器的频率响应曲线
($\Delta \omega = \pi/32$)

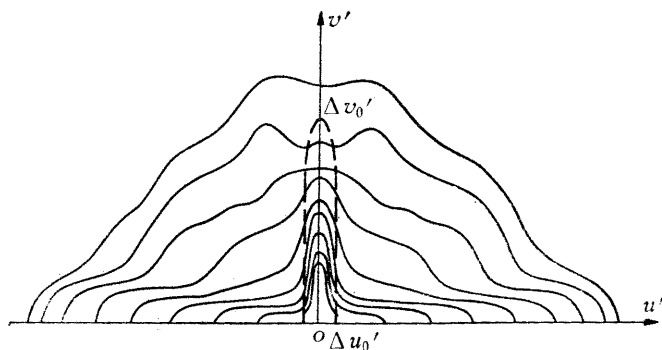


图 12 模型体重力异常的平均功率谱平面图

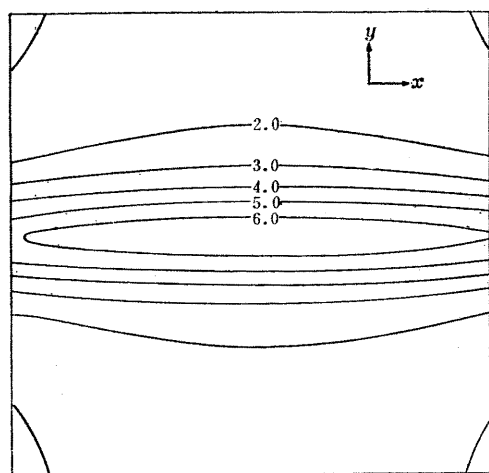


图 13 经方向滤波后模型体重力异常图

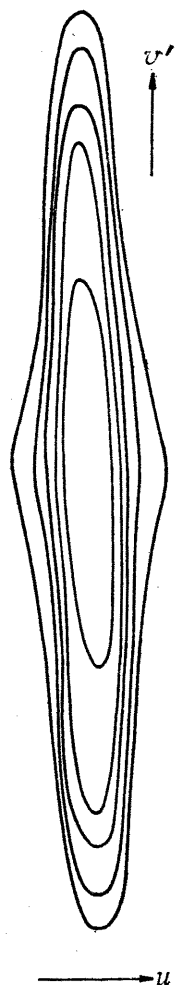


图 14 经滤波后模型体重力异常的振幅谱平面图

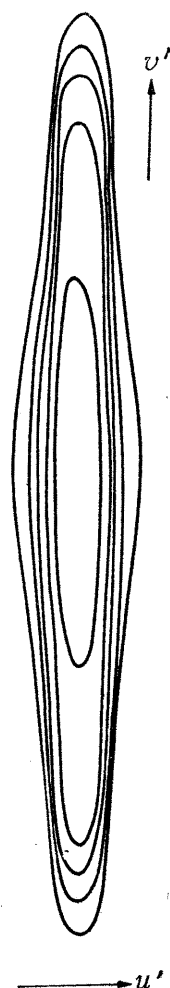


图 15 模型东西向矩形体重力异常的振幅谱平面图

图 11 是设计的滤波器的频率响应曲线（这里， ω 为频率变量， $\Delta\omega$ 取 $\Delta u'$ 与 $\Delta v'$ 中较小的一个）。图 12 为模型体重力异常的平均功率谱平面图，图中虚线表示所设计滤波器的椭圆窗。图 13 是经过方向滤波后模型体的重力异常图，图中可以看出，南北方向上的重力异常基本消失。图 14 是经滤波后模型体重力异常的振幅谱平面图，图中频谱的东西走向（即南北向重力异常对应的频谱走向）也基本消失。图 15 为单个模型东西向矩形体重力异常的振幅谱平面图，说明经过滤波后的振幅谱平面图在形态和幅值上都已非常接近于单个矩形体重力异常的振幅平面图了。

频带划分及异常提取

重力信号变换到频率域是按频率大小排列的，这种排列展示了重力调查区域范围内

不同深度地质构造因素的频率大小。因此, 如果对各条观测曲线的频谱进行分析, 一般可将其频谱分成三个带(见图 16): I 带是由低频信号组成的, 反映了整个地区内的区域场; II 带是由中频信号组成, 主要反映地下局部地质构造。I、II 带合称为信号带, 其中包含了分析对象(主要是局部异常带)以外更深的区域构造和由水平横向构造引起的重力异常; III 带是由高频信号成分组成的, 通常认为是由近地表不规则密度分布引起的重力异常(称之为重力噪声)及测量误差所造成的。

目前我们所研究的构造主要存在于 I、II 带中, 因此滤波器的参数 u'_0 、 v'_0 、 $\Delta u'_0$ 、 $\Delta v'_0$ 可根据频谱图中 I、II 带即信号带的分布来确定。

1. 消除高频干扰的影响。

高频成分集中于频谱的第三带, 主要为测量误差、地表及浅部构造产生的重力异常。我们可将滤波器的中心频率 u'_0 和 v'_0 规定为零, 使 $\Delta u'_0$ 、 $\Delta v'_0$ 分别等于 u' 向和 v' 向频谱信号带的半宽度, 滤波后, 高频部分就会被消除。

2. 提取沿某一方向的异常。

首先, 可根据频谱平面图, 确定出要提取异常的频率范围, 定出椭圆窗的长、短半轴及其位置。

然后, 在 u' 向频谱和 v' 向频谱上划分出 I、II、III 带, 并定出其频率范围。

1) 提 x' 方向区域异常。区域场在整个重力测区内, 其波长最长, 频率最低。要保留 x' 方向的重力异常, 可令 $u'_0 = v'_0 = 0$, 并使设计的 $\Delta u'_0$ 、 $\Delta v'_0$ 所决定的椭圆窗要沿 v' 轴方向拉长, 即 $\Delta v'_0 > \Delta u'_0$ 。 $\Delta u'_0$ 不能太小, 其大小可为 u' 向频谱上 I 与 II 带衔接处的频率值; $\Delta v'_0$ 也不能太大, 否则在该方向上会引进部分高频干扰。 $\Delta v'_0$ 可在 v' 向频谱上 II 与 III 带交接处选定。

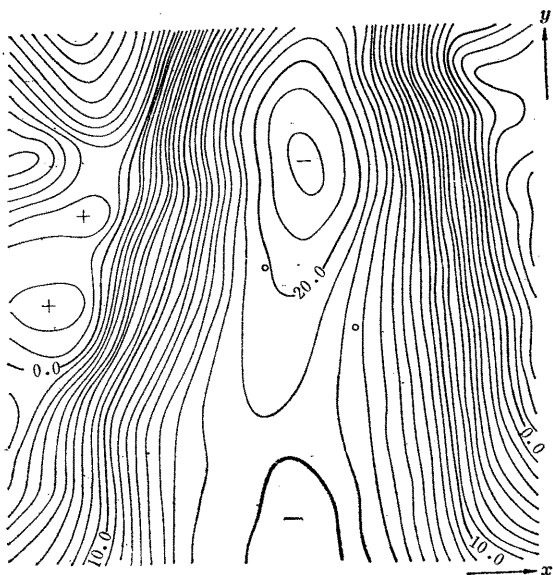


图 17 辽西坳陷重力布格异常图

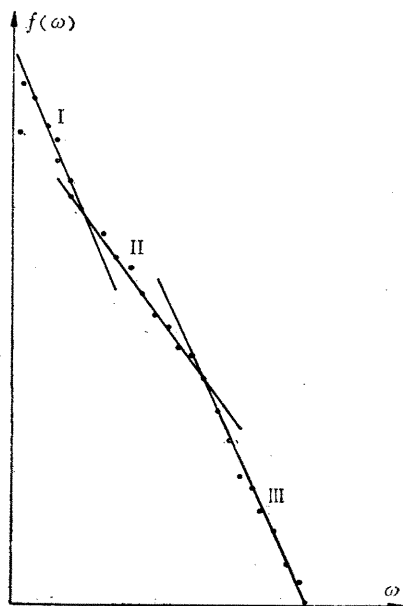


图 16 重力异常的频谱曲线

2) 提取 y' 向局部异常。令 $v'_0 = 0$; 从 u' 向频谱上 I 与 II 带(信号带)中选取 u'_0 , 令其等于 II 带中心处频率值; 长轴可适当加大, 令其等于 v' 向频谱上 II 带和 III 带交点处的频率值; 椭圆的 u' 向半轴等于 II 带的半宽度。这样, 经滤波提取的异常就是沿 y' 向走向的局部异常。

应用实例与效果分析

图 17 为辽河西部坳陷重力布格异常

图, 测线方向基本垂直于异常走向。

图 18 和图 19 为该地区重力异常在两个垂直方向上的平均对数功率谱。在垂直测线方向 (y') 即 v' 向上的平均对数功率谱, 大致可分三个带, 三个带衔接处的频率值分别为 1.829, 3.189; 沿测线方向 (x') 即 u' 向上的平均对数功率谱也可分为三个带, 其衔接处的频率值分别为 0.492, 0.826。

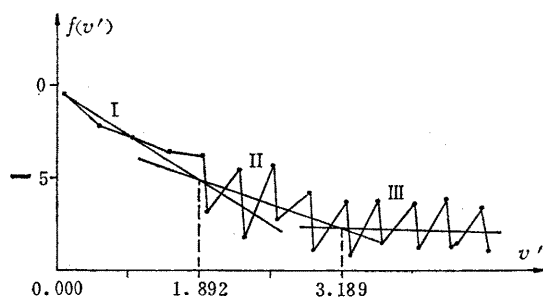


图 18 辽西拗陷重力异常沿垂直测线方向的平均对数功率谱
($\Delta v' = \pi/19$)

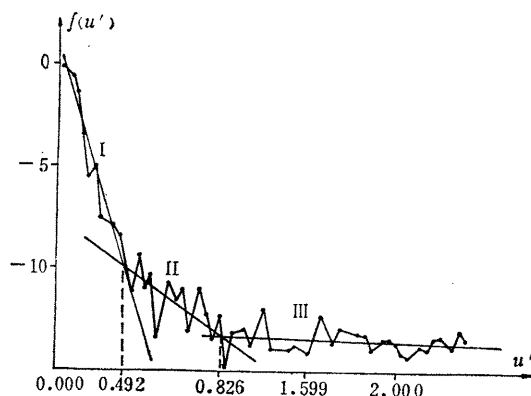


图 19 辽西拗陷重力异常沿测线方向的平均对数功率谱
($\Delta u' = \pi/32$)

图 20 为辽西拗陷重力异常平均对数功率谱平面图。局部异常的走向基本上是沿 y' 方向的。为了提取局部异常, 采用了 x' 向带通滤波器, 并令 $\varphi_0 = 0$ 。

在 u' 向频谱 (图 19) 中, II 带中心点频率值为

$$(0.826 + 0.492) / 2 = 0.659$$

令 $u'_0 = 0.659$, $v'_0 = 0$, 可在功率谱平面图中找到 $(0.659, 0)$ 点。由图 20 可以看出, 局部异常分布在 u' 向频率 0.132—1.186 之间。滤波器 v' 向半轴可选为 4.0, u' 向半轴可取 u' 向局部异常区频率宽度的一半。然后, 给出椭圆窗的位置, 见图 20 的网格部分。这样, 所设计的滤波器的四个参数确定为 $u'_0 = 0.659$, $v'_0 = 0$, $\Delta u'_0 = 0.527$, $\Delta v'_0 = 4.0$ 。

图 21 为该滤波器的频率响应曲线。低频与大部分高频成分将被滤掉, 而保留中频成分。足见, 该滤波器是能较好地突出局部异常的。

图 22 为图 17 经方向滤波后得到的重力异常图, 图 23 为处理效果比较好的同一地区重力垂直四次导数图, 这两幅图显示的构造形态基本相同。图 22 能够比较准确地指出由西向东反映古潜山的五排异常和断裂构造带的位置。

I 号异常带显示出六个正异常, 与图 23 的八个异常中的六个位置相重合, 仅有边部两个正异常没有显示。

II 号异常带总的显示出一个大的正异常和古 92 井构造异常, 异常轮廓清楚, 但不如图 23 那样细致, 它显示出十二个大小不等的异常群。

III 号异常带显示出六个正异常, 与图 23 一致, 且吻合较好。

IV 号异常带显示出六个正异常, 与图 23 也相符合。

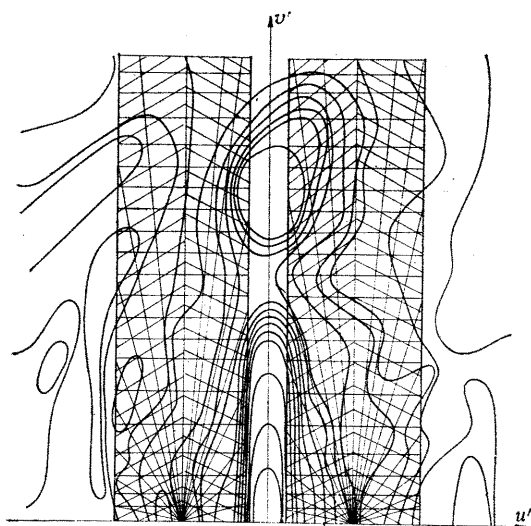


图 20 辽西坳陷重力异常平均对数功率谱平面图

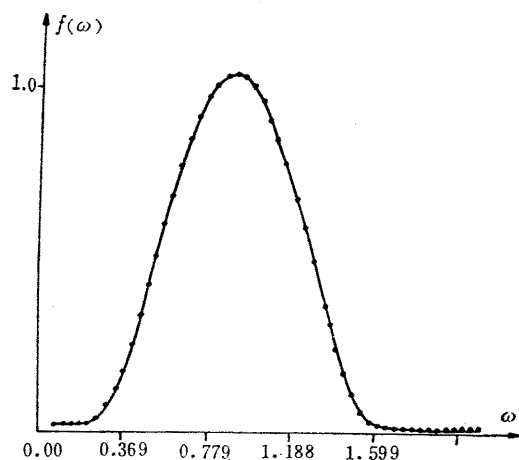


图 21 设计的滤波器频率响应曲线

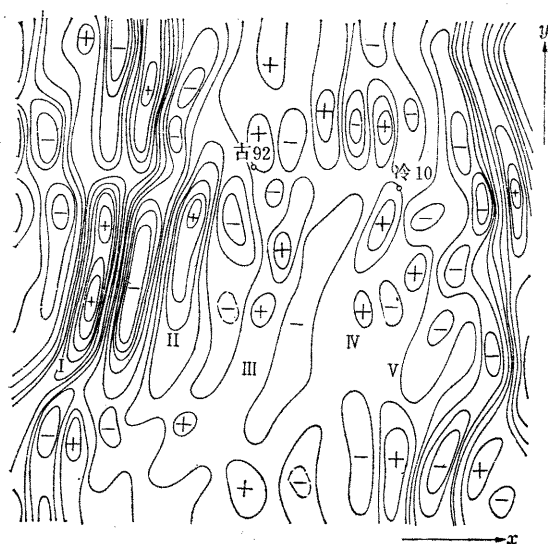


图 22 辽西坳陷经方向滤波后的重力异常图



图 23 辽西坳陷重力垂直四次导数图

V号异常带显示稍差些,但两图的异常分布基本一致。

以上五排构造已得到了其他资料的证实,这里不再赘述。

从图 22 和图 23 的对比中,图 22 还显示了以下两个优点:

第一,方向滤波没有边界损失,整个测区的边部能够获得正常的显示。例如,西部的 I 号高异常带及其以西的低异常带;东部的 V 号异常带东面出现的异常密集带及其间的正异常带。图 22 能够这样清楚地显示出边部构造而没有边界损失,表明这是它与其它方法相比的一大优点。

第二,从图 22 异常等值线分布来看,由冷 10 井至古 92 井向西到 I 号异常带,存在着一条东西向断裂。这一断裂异常的推移扭曲特征比其它一些处理方法要清楚得多。另外,从滤波参数 $v'_0 = 0$, $u'_0 = 0.659$ 来分析,该滤波器为 x' 向带通滤波窗口。也就是说,保留下来的重力异常,是沿 x' 向局部与区域异常及 y' 向局部异常的叠加。所以可以推断,南北向显示的断裂有可能比东西向断裂浅一些。

结 论

从椭圆窗方向滤波器的应用实例中,大致可得出以下几点结论:

1. 椭圆窗方向滤波器处理效果和空间域重力垂直四次导数效果相近似,能够比较清楚地反映出整个地区构造的轮廓和面貌。但在构造细节方面,还不如重力垂直四次导数法灵敏、细致。
2. 椭圆窗方向滤波处理无边界损失,大大提高了资料的利用率。被处理资料的边部异常显示正常,效果较好,无畸变现象。
3. 椭圆窗方向滤波,需要分析每条测线的频谱,综合成 u' 向和 v' 向的频率及测区的频谱平面图,相对于其它一些频率域处理方法来讲,显得比较麻烦。但是,采用该方法,可根据选择的滤波参数和滤波结果,对测区作出比较全面的定性推断。

在此项工作过程中,得到了郑彬卿同志的帮助和王宜昌同志的支持,天津冶金地质研究所的王延忠同志提供了频率域二维滤波的基本程序,本文承同济大学王家林老师审阅,并提出了宝贵的意见,在此深表感谢。

参 考 文 献

熊光楚,《金属矿区磁异常的解释推断》下册,地质出版社,1981

(上接第 546 页)

得较精确的时间—深度曲线及更精确的速度资料。

2. VSP 方法和地面地震方法相比,由于前者用检波器在井中观测,传播路径相对较短,受地表低速带及面波、声波的影响相对较小,因而,VSP 资料具有信噪比高、分辨力高的特点,能够接收到地面地震得不到的信息。

3. VSP 资料既可研究上行波场,也能研究下行波场,便于辨认及消除多次波。与其他资料相结合,可以更准确地确定各个反射界面。

4. VSP 方法既可获得测量井段的地震信息,同时也能够获得井底以下的深层地震信息,为研究地下地质结构提供了更丰富的地质资料。

因此,今后在进行测井作业时,只要条件许可,应以 VSP 测量取代一般的地震速度测井,以便获得更丰富、更准确的地震信息。