



重力山形异常的起因、特征与消除

江苏冶金地质814队 童永春*

按常规方法整理重力资料时,与山形相关的局部异常值,往往大于矿异常。因此,消除重力山形异常干扰,是重力勘探的重要任务之一。

起 因

众所周知,重力测量结果必须对高度地形(包括通常所称的中间层和地形)和纬度进行改正。由于这些改正的理论或实际应用中存在着局限性,比如通常所称的中间层改正和地形改正两者补偿的不平衡,实际高改系数和理论值(0.308毫伽/米)存在偏差,布伽密度选择不符合实际情况等等,因此造成改正值和实际需要值有偏差。这种偏差值是测点高程的函数,我们称之为“山形异常”。

山形异常主要可分为两部分:一是布伽密度选择不恰当而引起的“山形质量异常”。因为对重力测量结果必须消除地面和基准面之间的质量在测点上所产生的引力,也就是通常所称的中间层改正值和地形改正值之和。显然,如果密度选择不当,就会发生质量盈亏,其引力是测点高程的函数。二是实际高改系数值和理论值所引起的“山形空间异常”。

由于各个地区深部地质环境不同,因此高改系数不是恒定的。某些地区的实际高改系数值往往和理论值有很大偏差。甚至达到百分位级次。这就造成高改值和实际需要值有偏差,显然,它也是高程的函数。

十分明显,在平原地区,测点高程近乎不变,上述两种异常值也近于常数,不会造成局部干扰异常。而在山地则出现和山形相关的干扰异常,如不消除,就不能正确地认识和解释异常。值得指出,一个地区的实际密度值和实际高改系数值往往难以清楚了解。尤其实际高改系数至今尚无有成效的测定办法。因此,重力资料只能在给定的某个初始值情况下整理获得。在这样的资料中“山形异常”是普遍存在的。

此外,尚须说明,中间层改正和地形改正两者积分区间不一致,也会造成“山形异常”。因为它们作为地面和基准面之间全部质量引力改正的互为补偿的两个组成部分,由于积分区间不一致,就造成补偿不平衡。其差值是测点高程的函数,并和密度选择有关:

$$\Delta = 0.0186\sigma \frac{h^2}{R} \quad (1)$$

其中:R是地改方形域半边长,在江宁地区等于12.8公里。因此,在通常整理公式中必须再加进这个改正值。

特 征

必须指出,经过各项改正后的重力成果,仍然表示在实际地形线测点上的异常值。而一般矿异常是和测点高程平方成反比。重力异常反映了基准面以下的密度变化情况。

对于“山形质量异常”,我们推导了几种野外常见的山形模型的引力公式:

1.圆锥体顶点 $\Delta g(0)$ 公式: $\Delta g(0) = 2\pi f\sigma H(1 - \cos\theta)$ (2)

2.球冠体顶点 $\Delta g(0)$ 公式: $\Delta g(0) = 2\pi f\sigma H(1 - \frac{2}{3}\cos\theta)$ (3)

* 参加本项工作的还有迟发扬和林祥敏同志。

3.走向无限三棱柱体 $\Delta g(0)$ 公式: $\Delta g(0) = 4f\sigma H\theta$ (4)

4.走向无限弓形柱体 $\Delta g(0)$ 公式: $\Delta g(0) = 2f\sigma H \frac{\pi + 2\theta \cos 2\theta - \sin 2\theta}{1 + \cos 2\theta}$ (5)

其中, f 为引力常数; H 为各种山形的顶点高程; θ 为各种山形的半顶角(图1)

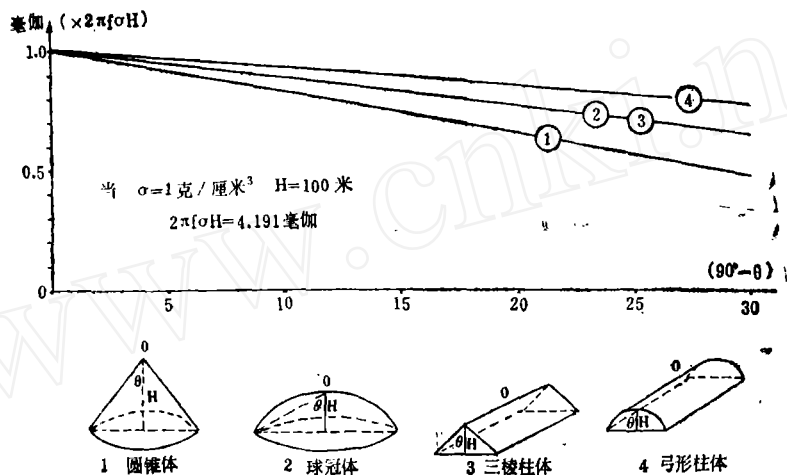


图1 山形质量异常最大值列线图

以 $2\pi f\sigma H$ 为纵坐标单位, θ 为横坐标, 各种山形顶点 $\Delta g(\theta)$ 值和 θ 的列线图见图1。

对于任意山形的“山形质量异常”最大值, 可用图1来估算, 下限为列线①(即圆锥体情况), 上限为列线④(即走向无限弓形柱体情况)。由此, 对任意 θ 角就可求出相应的纵坐标值, 再乘以 $2\pi f\sigma H$ 数值, 就可以得到山形质量异常最大值的可能范围。这里 σ 是初始布伽密度值和实际密度值的偏差, H 是山形顶点的高程。从图1可看出, 设密度偏差 $\Delta\sigma = 0.1$ 克/厘米³, 那么, 对于100米高程的山形就会产生0.21~0.40毫伽的山形质量异常。很明显, 各种山形异常最大值是和高程线性相关的。

沿垂直走向剖面上的重力变化特征, 以无限走向三棱柱体为例, 山坡上P点 $\Delta g(p)$ 公式推导结果如下:

$$\begin{aligned} \Delta g(p) = & 2f\sigma h \left[\theta + \arctg \left(\left(1 + \frac{2(H-h)}{h} \right) \tg\theta \right) \right] \\ & + 2f\sigma(H-h) \sin 2\theta \left\{ \tg\theta \left[\theta + \arctg \left(\left(1 + \frac{2(H-h)}{h} \right) \tg\theta \right) \right] \right. \\ & \left. - \pi \right\} + \ln \left(2\cos\theta \left[\left(\frac{h}{2(H-h)} \right)^2 + \left(1 + \frac{h}{2(H-h)} \right)^2 \tg^2\theta \right]^{\frac{1}{2}} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, f 为引力常数; H 为棱柱体顶点高程; θ 为山形半顶角; h 为测点P的高程(图2)

假定: $H = 100$ 米, $\sigma = 1$ 克/厘米³, θ 从60°到85°, 根据(6)式可以求出一系列随 h 而变化的 $\Delta g(P)$ 值, 我们对 h 和 $\Delta g(P)$ 两批数据用线性相关函数使之拟合, 求得山坡上重力值和高程的线性相关函数列于表1。

由表看出, 公式(6)可以用表1的线性函数公式拟合, 相关性很高。证明山形质量异常特征和高程呈线性相关。

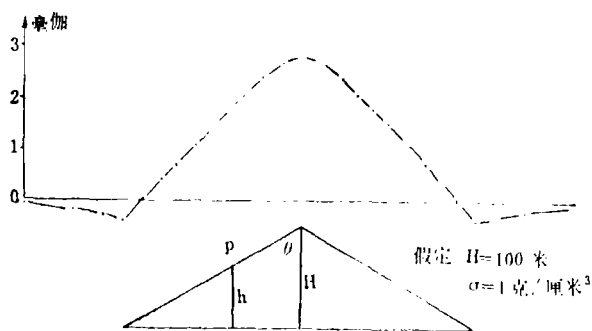


图2 三棱柱体山形质量异常剖面图 ($\theta = 60^\circ$)

对于“山形空间异常”特征，由于高改系数偏差也是作为高程的系数出现的，显然它和高程也是线性相关的。

“山形空间异常”是高程H和高改系数偏差值 ΔK 的线性函数。其大小见表2。

从表2看出，如10米高程的山形，当高改系数偏差达到百分位级次时，就会产生0.1毫伽以上十分可观的山形空间异常。

因此，根据线性选加性质，“山形质量异常”和“山形空间异常”选加在

山形质量异常和高程的线性相关函数

表1

θ	$\Delta g = ah + b$	相关系数r的平方	说 明
85°	0.041h—0.051	0.9998	假定H=100米 $\sigma = 1\text{g/cm}^3$ 重力单位：毫伽 高程单位：米
80°	0.039h—0.102	0.9992	
75°	0.038h—0.152	0.9980	
70°	0.036h—0.201	0.9962	
65°	0.035h—0.248	0.9936	
60°	0.033h—0.293	0.9903	

山形空间异常值(单位、毫伽)

表2

H(米) ΔK (毫伽/米)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0.0001	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009	0.01
0.0005	0.005	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.040	0.045	0.05
0.001	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
0.005	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.5
0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
0.05	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0

一起组成整个“山形异常”，并和高程呈线性相关。同时，由下面的推导将可看出，密度偏差和高改系数偏差两者呈消长补偿关系，也就是高改系数偏差可由密度偏差来补偿，反之亦然。它们的补偿关系是：

$$\Delta K = \Delta \sigma \frac{E}{h}, \quad (7)$$

$$\Delta \sigma = \Delta K \frac{h}{E} \quad (7')$$

其中，

$$E = 0.042h - \frac{T(\sigma_0)}{\sigma_0} - 0.0186 \frac{h^2}{R} \quad (8)$$

E为测点上与密度有关的高程效应函数，h为测点高程； $T(\sigma_0)$ 为地改值； σ_0 为初始密度；R为地改方形域半边长。

由于山形异常和高程线性相关，密度偏差和高改系数偏差又呈消长补偿关系。这就给消除山形异常干扰带来方便的途径。下面提出通过布伽密度偏差的选择，将山形异常(包括山形质量异常和山形空间异常)消除的办法。

消 除

第一步判别:

首先根据公式(2)~(5)或者(图1)的列线图来估算实际山形可能产生的山形异常最大值,然后和初始布伽异常中的局部异常比较,如果前者大于后者或者与之相当,则可认为资料中的局部异常系山形异常。

第二步消除:

利用密度偏差和高改系数偏差的补偿关系,将高改系数偏差的影响归入到密度偏差来消除之。问题在于如何从初始布伽异常中确定出密度偏差值(包含着高改系数偏差的影响)。不过根据山形异常和高程的线性相关特性,采用随机函数的逼近理论,不难求出两者线性相关的密度偏差值。用于改正后,资料中的山形异常就趋于最小。现将具体步骤推导如下:

初始重力布伽异常值为

$$\Delta g_0 = g + 0.308h - 0.042\sigma_0 h + T(\sigma_0) + 0.0186\sigma_0 \frac{h^2}{R} \pm 0.812d \sin 2\phi$$

其中, g 为观测值, $0.308h$ 为高度改正值;

$(0.042\sigma_0 h - 0.0186\sigma_0 \frac{h^2}{R} - T(\sigma_0))$ 为广义地形改正值; $\pm 0.812d \sin 2\phi$ 为纬度改正值。

我们欲求的真实重力布伽异常值为:

$$\Delta g = g + (0.308 + \Delta k)h - 0.042\sigma h + T(\sigma) + 0.0186\sigma \frac{h^2}{R} \pm 0.812d \sin 2\phi \quad (10)$$

其中 $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$; $\Delta\sigma$ 为密度偏差值; Δk 为高改系数偏差值。

如果要在初始资料中利用山形异常特性来消除山形异常,获得真实的重力布伽异常值。就必须求出 $\Delta\sigma$ 和 Δk 值。

将(8)式的高程效应函数 E 代入(10),并利用(9)式,就可得到:

$$\Delta g = \Delta g_0 + \Delta k h - \Delta\sigma E \quad (11)$$

$$\text{设: } \Delta\sigma' = \Delta\sigma - \frac{\Delta k \cdot h}{E} \quad (12)$$

则有:

$$\Delta g = \Delta g_0 - \Delta\sigma' E \quad (13)$$

式:

$$\Delta g_0 = \Delta g + \Delta\sigma' E \quad (14)$$

采用局部线性算子 L 计算(14)式中相应的局部异常,得到:

$$L(\Delta g_0) = L(\Delta g) + \Delta\sigma' L(E) \quad (15)$$

其中, $L(\Delta g_0)$ 为初始局部异常,系山形异常。

$L(E)$ 为局部高程效应函数,和山形异常线性相关。

$L(\Delta g)$ 为真实布伽局部异常,在山形异常资料中将等于常数或等于零。

于是,对野外已获得的二组数据:

$$[L(\Delta g_0)_i, L(E)_i] \quad i = 1, 2, \dots, M$$

其中, M 是局部异常测点个数。

我们取(15)式来拟合之。根据随机函数的逼近理论,利用最小二乘法原理。 $\Delta\sigma'$ 可以从下面线性方程组求得:

$$\begin{bmatrix} M & \sum L(E)_i \\ \sum L(E)_i & \sum L(E)_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ \Delta\sigma' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum L(\Delta g_0)_i \\ \sum L(\Delta g_0)_i \sum L(E)_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

确定出 $\Delta\sigma'$ 之后,就由(13)式求出真实重力布伽异常值,这样得到的重力成果中,山形异常趋于最小限度。并可用相关系数的 r^2 来检验:

$$r^2 = \frac{\left(\sum L(E)_i \cdot L(\Delta g_0)_i - \frac{\sum L(E)_i \sum L(\Delta g_0)_i}{M} \right)^2}{\left(\sum L(E)_i^2 - \frac{(\sum L(E)_i)^2}{M} \right) \left(\sum L(\Delta g_0)_i^2 - \frac{(\sum L(\Delta g_0)_i)^2}{M} \right)} \quad (17)$$

相关系数 r^2 越趋于1, 则表明山形异常消除越干净。经验证明 $r^2 \geq 0.7$, 就获得满意的效果。

根据(16)式求出的 $\Delta\sigma'$, 称为在相应的初始高改系数条件下, 地面和基准面之间所有质量密度, 以地形最小相关准则进行的加权平均值和初始密度值的偏差。因此, $\Delta\sigma'$ 将随高改系数初始值和密度初始值的不同而不同。但是, 不论这两个初始值如何给定, 根据上述办法获得的 Δg 值是一样的。也就是我们欲求的最终结果。在下面实例中将进一步说明。

这样求得的最佳密度值可能和实际密度值仍然不一致, 这仅说明存在着高改系数偏差的影响, 而对最终获得的重力值没有任何影响。不论初始值如何给定, 本方法将最终获得唯一的结果, 唯一性也说明资料的正确性, 这就是消除掉山形异常的正确重力值, 从而为研究地质构造和寻找矿体提供了一份正确的重力资料。

至于真实的高改系数偏差 Δk 和密度偏差 $\Delta\sigma$ 可用(12)式或者(7)式求得:

如 Δk 值已知, (可在平地的一系列测点上测定重力垂直梯度统计获得), 我们用全部测点来统计平均求出 $\Delta\sigma$:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \frac{1}{M} \sum \frac{\Delta E \cdot h_i}{E_i} \quad (18)$$

同样, 如果 $\Delta\sigma$ 是已知的。例如在地质情况和岩石密度非常清楚的地区) 则有:

$$\Delta k = \frac{1}{M} \sum_i \frac{(\Delta\sigma - \Delta\sigma') E_i}{h_i} \quad (19)$$

对获得正确异常值的决定因素是 $\Delta\sigma'$ 值, 而此值已包含了 $\Delta\sigma$ 、 Δk 的实际影响。但根据(18)和(19)式对 $\Delta\sigma$ 、 Δk 值作一估算, 对研究地质问题是有益的。

计算步骤和实例

对大面积重力资料, 必须根据地形特征划分成若干个互相能并接的小范围(要通过试验决定)。计算在DJS-6机上实现。简略步骤如下

1. 输入初始异常值和测点高程;
2. 计算(8)一(19)诸步骤;

由机器自动改变局部线性算子 L , 而求出最大相关系数 r^2 和相应的 $\Delta\sigma'$ 值。说明山形异常消除达到最佳程度。

3. 输出真实异常 Δg 值;
4. 绘制 Δg 与 H 等值线平面图和 Δg — H 综合剖面图。

图3是江宁县美人山地区重力山形异常消除前后对照图。

图3—a是地形等高线平面图, 该区山形高差约80米, 坡角 20° ($\theta = 70^\circ$), 估计 $\Delta\sigma = 0.3$ 克/厘米³, 由图1列线估算的山形异常最大值约为0.6~0.9毫伽。

图3—b是 $k = 0.308$, $\sigma_0 = 2.3$, 初始条件下得到的布伽重力异常图, 有0.8毫伽局部异常, 与山形一致, 根据上面判别, 该异常属于山形异常。

图3—c是根据上述处理办法获得的真实异常图, 由图可看出, 山形异常得到了消除。求得的相关系数 $r^2 = 0.83$, $\Delta\sigma' = 0.43$ 克/厘米³。

根据该区实际岩石密度的分析, $\Delta\sigma' \leq 0.3$ 克/厘米³, 而计算获得的 $\Delta\sigma' = 0.43$ 克/厘米³, 后者大于前者, 原因就是高改系数存在偏差所致。由(19)式计算本区高改系数偏差约 $\Delta k \geq -0.005$ 毫伽/米。

图4是该区用 $k = 0.303$, $\sigma_0 = 2.3$, 初始条件的重力异常和最终真实异常对照图。

图4—a是初始异常图。该图和图3—b初始图不一样, 但同样存在山形异常。

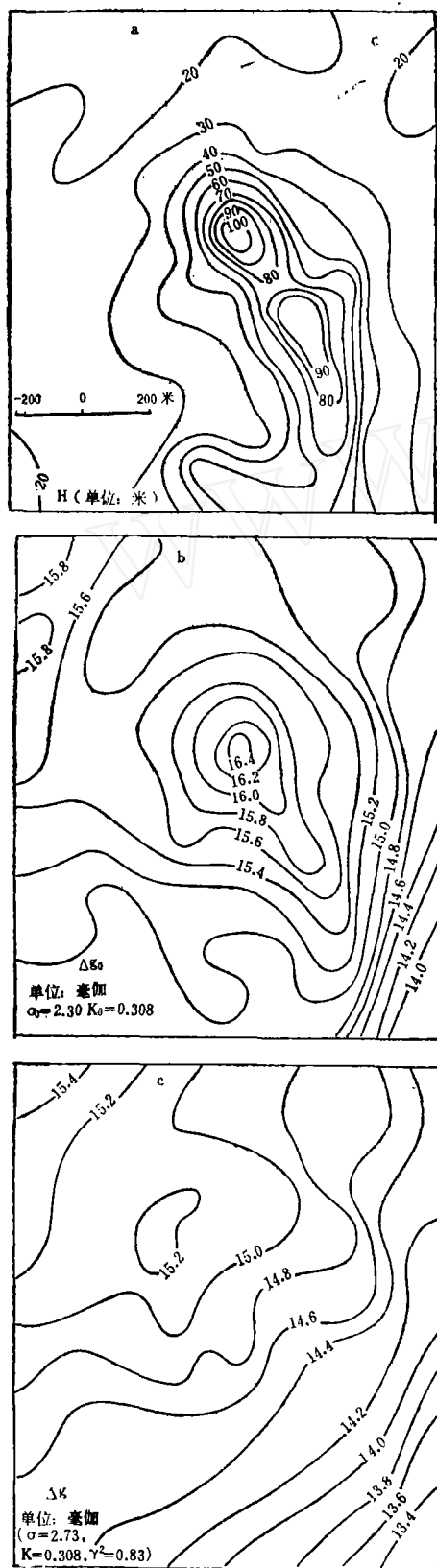


图3 江苏省江宁县美人山地区重力山形异常消除前后的对照图

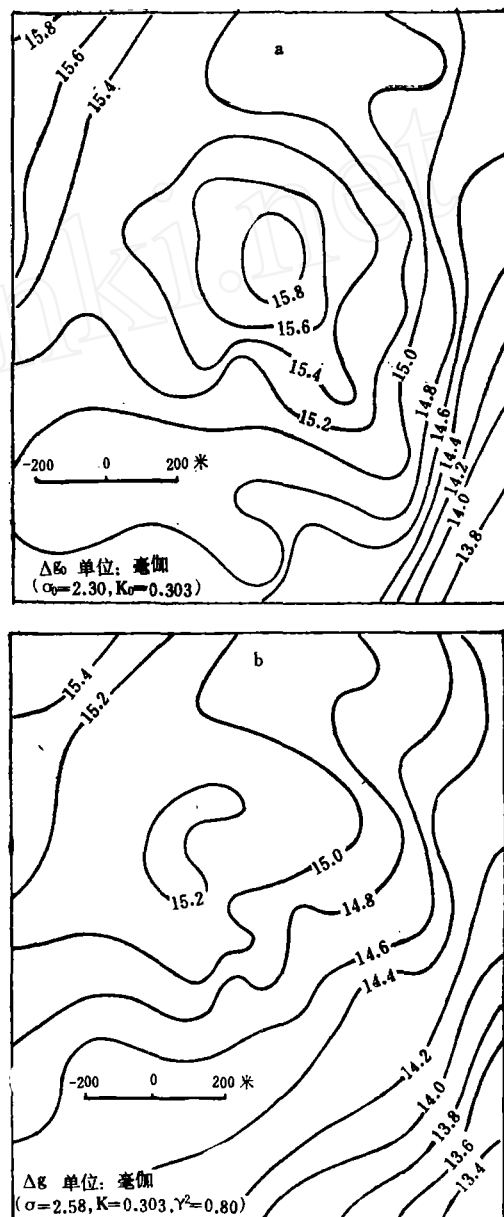


图4 江苏江宁县美人山地区重力山形异常消除前后对照图

图4—b是在这样初始条件下用上述处理办法获得的真实异常图。由图可看出,山形异常得到消除,并且和图3—c比较,两者形态、大小都完全一样。此时,求得的相关系数 $r^2=0.80$, $\Delta\sigma'=0.28$ 克/厘米³,唯一性也说明了资料的正确性。

图5是该区—90线 $\Delta g-H$ 综合剖面图,也能直观地看出上述处理办法的良好效果。

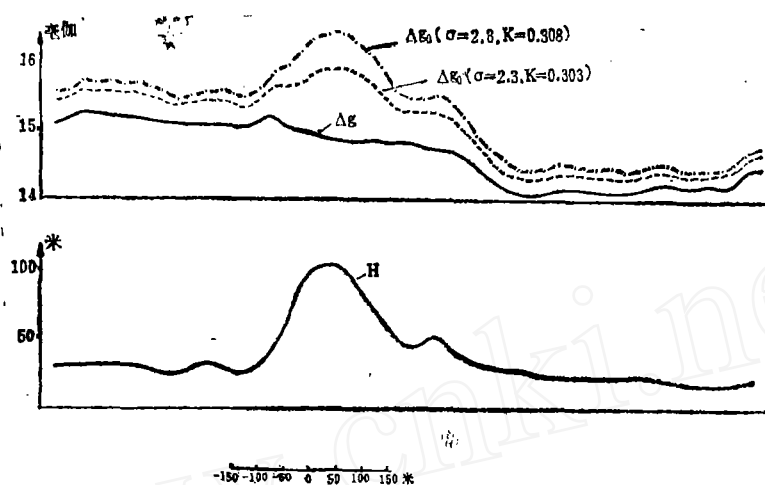


图5 江苏江宁县美人山地区-90线重力山形异常消除前后对照图

由此说明,本文提出的方法是实际可行的。不论初始条件如何,将最终得到唯一的真实异常值。由于山形异常干扰得到消除,从而为研究地质构造和寻找矿体提供了一份正确的重力资料。

电 法 勘 探 五 十 年

早期历史

文献上记载,第一个企图用电法找金属矿的人是弗克斯。在柯尼希铜矿上他发现自然电流流动(1830年),认为这是矿体化学反应的表现。1835年在康瓦尔的潘赞斯矿山进行了电法勘探的研究。所以,用电法找硫化矿应归功于弗克斯。

早在1880年,卡尔巴努斯曾在美国内华达州柯姆斯托克矿脉上作过实验,他相信用电法可找隐伏的硫化矿。不极化极电是他首先采用的。施伦贝尔热于1912年把这一方法投入生产。1913年他用自然电流法圈出了法国圣贝尔的黄铁矿矿床,此结果于1918年发表。美国地质调查所的威尔斯于1914年发表了他对自电现象的认识。凯利在1924年把自然电流法引进到加拿大和美国。

布朗在1883~1891年期间,威廉和里阿达夫特在1897年,都曾经想确定矿体产生的地电阻率差异,并为他们的办法申请了专利。1893年费歇在美国米契根州的一个矿上测得了电阻率异常。1900年在这个地区奥斯波恩还做过等电位线法试验。1912年施伦贝尔热首先试用有源的电法勘探(即通过可控电

源来激励大地),测量人工产生的电位。当时(1920年),他还研究成功直流等电位线法。

视电阻率这个概念大约是在1915年由美国标准局的温纳和法国的施伦贝尔热两人分别建立的。视电阻率的野外工作方法则由华盛顿卡内基研究所的吉什和鲁尼两人,还有施伦贝尔热小组的研究人员分别创立的。温纳使用的是等间距的电极排列。施伦贝尔热小组所用的是标准的电极排列,两测量电极相距较近,而在两供电电极中间的地段测量电场(电位梯度)。

研究大地电流最早的是格林威治天文台的查理斯马提尤西(1867年)。直到1934年施伦贝尔热才把它发展成一种找矿的方法。

施伦贝尔热又是第一个描述激发极化的人(1920年),但由于他偏爱自然电流法,因而放弃了这方面的研究。

美国采矿工程师康克宁于1917年申请了电磁法勘探的专利。森德贝格是研究水平回线法的先驱,1925年应用这种方法获得首次成效。以后,瑞典的伦德贝格和森德贝格两人所从事的电磁法勘探曾风行一时。稍后(1931年)出现了在一个大水平回线附近测