

内部资料

冶金地质资料

隐伏地质构造与矿产预测 及方法研究专题论文集

冶金部北京冶金地质研究所

1983 年 6 月

隐伏地质构造与矿产预测及方法研究

专 题 论 文 集

(内部资料)

冶金部北京冶金地质研究所

1983年6月

前 言

本《论文集》是冶金部地质局“隐伏地质构造与矿产预测及方法研究”各专题小组1982年提出的研究成果，由冶金部北京冶金地质研究所编印。

本《论文集》的内容比较丰富，涉及面较广，共收入论文十七篇，包括物探技术和方法及实际应用两方面内容，约有20余万字，附图200多张。这些论文所讨论的问题具有许多共同性，即通过物探重磁资料、遥感资料及区域物性资料的数据处理与分析研究，提供更多的二次及组合找矿标志，并结合化探工作，协助地质人员确定较高分辨率的找矿准则，建立高概率的找矿模式，从而作出找矿远景区的预测，为开展大比例尺的地质、物化探综合找矿工作提供选区依据。

在《论文集》中，还有几篇关于铜、锡及其它金属矿找矿远景区预测方面的论文。介绍了物探技术和方法在研究隐伏地质构造中的作用，及其与地质和化探等技术方法相结合的综合方法进行远景区预测，比仅仅用单一的方法进行远景区预测更为有效的经验。

在《论文集》中，还讨论了如何在高水平上实现地质、物化探相结合的综合方法问题，即建立综合的找矿模式（地球物理—地球化学—地质模式），以及确定找矿标志和评价准则的问题。特别是随着物探数字处理技术方法的日益完善，为使找矿远景区预测工作取得更大的地质效果，有的论文提出了如何加强区域及矿区岩石物性的测定和研究；二次及组合标志的建立和选择；找矿与评价准则的确立；针对不同地区和矿种，应用物化探综合方法和地质成矿理论建立综合找矿模式；以及为完成上述任务所需的数字处理技术和方法等方面的问题。

在《论文集》中，还提出了应用物探进行金属矿找矿远景区的预测工作时，需要有大、中比例尺的重磁资料，一定数量的电法资料及地震法资料。为此，必须对一些重点有色和稀有金属矿区、矿带及找矿远景地区的航磁资料进行更新，并选择一些地区开展较大面积的1:5万—1:10万的重力测量的问题。

当前，我国金属矿区物探工作正面临着加强以有色、稀有和贵金属为主的综合找矿工作，以及从直接找矿转变到以成矿预测和间接找矿为主要方法方面的任务。为了适应这方面的需要，《论文集》提供了一些基本的技术方法和实践经验供参考，并希望能对在金属矿区工作的地质、物化探人员有所帮助。

本《论文集》在编辑过程中，对物探异常的解释等问题，一律尊重作者的意见，未予修改。论文排列的顺序是在分类编排的基础上，按论文收到的时间编排的。参加本《论文集》审稿的有熊光楚、邵梦林、李色篆、童永春、王延忠等同志。

由于我们的水平所限，难免有错误之处，希读者批评指正。

1983年6月

目 录

对提高金属矿物探工作地质效果的几点想法	熊光楚(1)
金属矿区大比例尺航磁图的数字处理	邵梦林、陆正立、梁锦文(5)
金属矿重力勘探若干问题	童永春(34)
位变滤波器及其应用方法	熊光楚、张福荣(42)
用磁异常的振幅谱求物体的埋深问题	熊光楚、王廷忠(63)
矿产预测的Fuzzy集模型	卢国雄(76)
用综合模型解决隐伏地质现象的初步尝试	肖树建(87)
地质体磁性特征标志、分类准则研究方法及其在预测	
金属矿床中应用的探讨	李色蒙、张益民(99)
沉积变质型铁矿的磁各向异性及其在磁异常解释中的	
应用	李学义、陈磊光、李万有(111)
利用航磁异常对个旧锡矿区若干地质问题的推断	
	西南冶金地质勘探公司物探队磁法组(133)
云南某铂钯矿床的磁法工作	张光典(138)
大厂和细磁异常的找矿模式	王 钟(142)
桂林地区隐伏花岗岩体重磁异常标志	王玉梅、张小路(153)
康滇地轴北段航磁数据处理所提供的地质信息	刘武斌(163)
重磁数据处理在赣东北地区的初步应用	李惠琳、杨正臣(175)
利用航磁异常研究河北北部地质构造及对金属矿远景	
区预测的探讨	华北冶金地质勘探公司519队(189)
位场波数域转换处理前进行资料预处理的方法和意义	王廷忠(200)

对提高金属矿物探工作地质效果的 几点想法

熊光楚

(冶金部北京冶金地质研究所)

我国以及国外许多国家的金属矿区的物探工作，过去都是以直接找矿为主。即用以磁法为主的物探方法直接找磁铁矿，找与磁铁矿及磁黄铁矿伴生的其它金属矿；用以电法为主的物探方法找与黄铁矿伴生的有色及稀有金属矿。近年来，由于地质找矿深度的增大，矿体在地面及空中引起的异常值降低，或者测量不出来，或者观测结果中信噪比小；找低品位矿的任务增多，这种矿石与围岩的物理性质差别不大，矿体或者不引起物探异常，或者异常值很弱，被干扰淹没；要开展困难地区（例如交通不便的边远地区、大山区、水域、表土及火山岩覆盖地区）的找矿工作，这些地方，基本的地质情况往往不清楚，开展工作又较困难。因此，地质找矿（包括物探直接找矿）的难度相对增大，找矿的效果下降。根据不同人的统计资料平均计算，从本世纪五十年代到七十年代，找到一吨金属储量的成本翻了一番。

为了提高金属矿区物探工作的地质效果，根据当前地质工作的特点，物探发展的趋势及我国的实际情况，对我国当前金属矿区的物探工作，提出以下五点想法。

第一，扩大物探应用范围

这方面有两点值得重视，首先是跳出直接找矿的圈子，将物探大量用于找矿预测；其次是开展地下物探，配合山地工程直接找矿。

将物探大量用于找矿预测，这是当前地质找矿形势的需要，是找矿技术发展的必然趋势。

当前金属矿区的地质工作有三个主要特点，即：

一、强调以理论指导找矿，强调成矿预测在具体找矿过程中的作用。为此，要建立不同地区的区域地质构造及成矿作用的模型，建立不同工业类型矿床的矿床地质模型，建立特定地区特定类型矿床的找矿标志及找矿准则。由于已知情况不充足，上述的各种模型、找矿标志及评价准则往往是不全面的，有时甚至是不适用的，要根据新的资料不断补充甚至修改。因此，对地质、物探及化探等资料的综合解释，在找矿过程中的指导作用日益重要。

二、强调综合性的基础地质资料。为了在成矿预测时建立各种模型及找矿标志和准则，需要包含信息量尽可能多的综合地质资料，其中应有航空物探及地面物探图，岩石物理性质方面的资料。就进行1/5万成矿预测而言，需要的物探资料有：1/5万——1/2.5万航空磁测资料、1/5万地面重力资料、航空放射性资料、航空电法资料、地面磁法（1/5万——1/万）图、激发极化及自电剖面图等。对深部矿作预测时，还需要电测深及地震资料，以便和构造钻孔的资料一起进行分析。

三、强调找矿工作的阶段性，即每一阶段的工作都是为圈出下一阶段更详细工作的地段，快速地缩小找矿远景地区，以便选择最有远景的地段详细找矿。经济上合理而又能达到一定深度的唯一方法是圈出控矿构造，而不是象传统的作法那样直接找出矿体。例如，在寻找深部矿床时，大体上可分作四步：

第一步：中比例尺(1/20万)成矿预测。根据综合资料，圈出矿区($n \times 100\text{km}^2$)，并估计其工业意义；

第二步：大比例尺(1/5万——1/2.5万)成矿预测。根据综合资料及稀疏的找矿——构造钻，圈出矿田($n \times 1\text{km}^2$)；

第三步：对圈出的矿田作预测评价，除综合的资料外，还要打构造——找矿钻及填图钻；

第四步：选择具体目标物(矿床面积为 $0.1n \times \text{km}^2$)作初步勘探。

在进行第三步及第四步的同时，还应顺次作下述一些工作：矿田近地表的详细调查，要作的工作有1/万——1/5千的航空及地面物探、地质测量、化探及山地工程；深部物探调查，调查矿田的构造，要作的工作有深部电法、地震及填图钻、700—1000米深的构造钻及找矿钻，并作钻孔物探及原生晕。

总的说来，金属矿区地质工作的这种作法，其目的是为了保证找矿工作的全过程处于最优状态。可以看出，在这样的一种找矿过程中，物探工作量是很大的，所起的作用也是很明显的。但是，应该怎样具体来评价物探的这种作用，还是一个没有完全解决的问题。在用物探直接找矿的年代(例如，五十年代和六十年代)，我们是用物探直接发现矿体的多少，来评价物探的作用，这种评价方法显然已经过时了。现在，有人以作了物探后能节省地质工作的投资来说明物探的经济效果，或者说是一个可取的方法，现举两个例子说明如下⁽¹⁾：

在苏联库尔斯克磁异常区的别尔戈罗德地区找铝土矿，共打钻457个，平均孔深716.5米，共钻进32.7万米，投资1078.1万卢布。这期间(1970—1977)物探投资为165.36万卢布(其中重力法占16.1%，磁法占2.4%，电法占8.1%，地震法占73.4%)。两项共计投资为1243.46万卢布。如不作物探圈出找矿远景地区，则应先按 1500×400 米的网度打普查钻，然后在查明有远景地段加密到200米的网度，共需钻孔数为797个，平均孔深仍为716.5米，总进尺应为571122米，投资为1880.13万卢布。故物探的经济效果是 $1880.13 - 1243.46 = 636.67$ 万卢布，或所需投资的33.8%。即物探投资的效果是1卢布产生3.84卢布。

在苏联安加尔斯克省的涅留德金斯克及科帕耶夫斯克两个铁矿区的勘探工作中，由于作了井中物探，可采用无岩心钻进，节约3.26万米钻探，经济效果约为32.6万卢布。总共节省了钻探6946米，地质采样节省了4500米。两项经济效果约71万卢布，或一米钻探节省2卢布84戈比。

应该指出，由于减少了钻探工作量，既节省了人力及物力，又加快了地质工作的进度，这些方面的经济效果就不是能用数字所能表示的。

这几年，我们在这方面也做了一点工作，一方面体会到物探能发挥很好的作用，并深刻认识到，要改变只将物探用于直接找矿这种状况，还要做许多工作。例如，研究地质经济，使人们重视找矿方法的最优化问题；提高地质成矿理论的研究，能够提出在找矿过程中要解决的具体地质问题；提高物探方法及技术水平，使其能适应新形势下的要求等问题。

第二，研究物探异常的地质解释方法，提高物探的地质效果

过去，我们对各种物探方法的数学物理解释方法研究得多，对综合物探异常的地质解释方

法研究得少。目前，我们对物探异常的地质解释还停留在目视水平上，即根据物探异常的特点，对异常进行分类，并据此圈出一些目标物，在已知地质知识的基础上，赋予这些目标物一定的地质内容。这样，物探资料中所包含的大量地质信息没有被提取出来加以利用。因此，充分利用物探资料中所包含的地质信息，是提高物探地质效果的一个重要的而又立即可实现的措施。

在用物探寻找有色及稀有金属矿床时，正确地确定物探调查的目标物有特别重要的意义。在简单的情况下，物探调查的目标物就是要找的目的物——矿床或矿体；在复杂的情况下，目标物就是与目的物有关而物探又能经济合理地将它们找出来的那些地质单元（如控矿构造、控矿地层、与矿有关的火成岩及与矿共生的蚀变岩石等）。因此，找同一种矿床，不同比例尺的目标物是不一样的，在找一个特定目的物时，应根据具体情况（现有的物探方法、经济条件及允许漏矿的概率），选用合适的目标物组合。

一般地说，预测和找矿的过程就是辨认目标物的过程——它们的分类及评价活动的总和。辨认被寻找的目标物有两个途径：第一个途径是根据已知矿床上物探异常的特点，建立一些标志，并由此建立辨认目标物的准则，然后根据这些准则对物探异常作出解释；第二个途径是根据现在已有的资料及知识，建立工作地区的物理——地质模型，然后对工作地区的物探异常作解释。

就金属矿区1/5万——1/2.5万比例尺的找矿预测而言，最重要的标志不是直接测量异常的特点，即所谓一次标志（如重、磁异常的极大值），而是那些由异常变换得来的所谓二次标志（如重、磁异常的区域异常和局部异常，联合剖面比值曲线的梯度等），以及由一次标志与二次标志组合的所谓组合标志（如激电异常与磁异常的相关系数、重力异常水平梯度带的走向与局部磁异常走向的交角等）。

根据工作地区的地质及地球物理特点，并考虑到各种可能的干扰，选择有效的找矿标志及建立可靠的找矿准则（定量的而且是从概率角度考虑的），都是需要很好研究的问题。而研究物探异常的变换方法，提高计算二次标志的质量，也成为提高物探异常地质解释水平的重要内容之一。

第三，提高物探数据的质量，以便使物探有可能配合地质解决复杂的地质问题

评价物探数据质量的准则是：物探数据中是否包含有解决地质任务所需要的信息，物探数据中无用噪声的比重大小和有用信息赋存形式的复杂程度。一般而言，物探数据中包含有用信息越多，信噪比越大和有用信息赋存形式越简单，物探数据的质量则愈高。

为了增多物探数据中的有用信息，要增加能反映多种物理性质物理量的物探测量（例如反映磁性、电性等物理量），以及从不同方面反映同一物理性质的物理量（如测磁异常时要测三个方向的分量及其梯度，作过渡场法时要测三个方向磁场的衰减曲线等）；提高这些观测的精度；在大小合适的面积上用足够密的测网进行观测。

为了增加辨认目标物的能力，现在开始应用信噪比小的弱信息。为了提高物探数据的信噪比，要提高地面测网的布置精度及航迹恢复的精度，提高仪器的稳定性，并对观测数据作必要的改正和消除干扰的光滑处理等。

为了简化有用信息的赋存形式，要尽可能保持在同一水平面上作观测，或将起伏面上的观测结果化到同一水平；要尽量避免与有用信号有相关性的干扰。

从上面的简单叙述中可以看出,提高物探数据的质量是一件很复杂而又艰难的工作,它并不完全决定于野外观测这一方面,而是涉及到物探的全过程(从仪器研制直到数据处理方法的研究)。我们应该用包含地质信息更多的、质量更好的新资料代替老资料。因此,物探资料的不断更新,是物探方法具有生命力的表现。

第四,加强物性参数的研究及观测工作

测定岩石的物理性质对正确地规划物探工作,确定物探的地质任务,解释物探异常,设计新的物探方法及直接利用岩石的物理性质解决地质问题等,都有重要的意义。前面所讲的物理——地质模型,就是建立在地质资料和详细测定岩石物性的基础上,即是物性的空间分布模型与地质模型的综合模型。这种模型除了用于解释物探异常外,还可用于设计合理的综合找矿方法,评价物探工作的效果及评价工作地区的找矿程度等。

研究及测定岩石的物理性质,在金属矿区物探工作中还没有引起人们足够的重视。我们认为,这方面的工作要大力开展。首先是要结合解释物探异常的需要,进行区域性的物性测定,并对详细勘探的矿区作物性测定和研究;其次是为解决一些特定的问题(其中包括某些物理现象产生的机制及研究新的物探方法的需要),而作专门物性研究。用物探方法研究深部地质构造时,由于物探结果的数学物理解释的多值性,一定要打一些控制钻,提供必需的物性资料和深部地质情况的资料。没有深部的物性资料,要对深部地质构造作出接近实际的推断,那是不可能的。

第五,解决目前野外队生产所需用的仪器设备

我国金属矿区物探所用的仪器设备,品种少而不全,且陈旧落后。当前亟需解决的仪器设备有:能保证一定观测精度的地面电法仪器(包括交流电法、过渡场法和激发极化等方法的仪器);开展地下物探所需的仪器和装备(如轻便电缆等);定位精度高的综合航空站。其次是地面磁法仪器的更新,深部电测所用的仪器和金属矿地震所用的仪器设备。要大力研究用直升飞机作运载工具的1/10万—1/20万比例尺的重力测量问题(不是航空重力,而是用直升飞机作运载工具,关键技术问题是确定测点的坐标,即惯性导航系统问题)。

由于我国技术水平落后,解决这些仪器设备可采用的方法是:对于需用量大的仪器,进口一些关键性的元件,然后自己生产;对于技术要求较强的仪器,在国内与军工科研部门协作进行研制;对于少量新仪器,可以从国外购买。

为了迅速发展我国的金属矿区物探工作,还应适当地开展新的物探方法的研究。新方法的研究是一项长期性的工作,要有计划地、坚持不懈地进行。

总之,金属矿区目前物探工作所碰到的困难是暂时的,是会被克服的。而克服这些困难所需的时间长短,主要决定于整个地质管理工作水平提高的速度。目前的困难孕育着新的发展。克服困难,新的局面就会出现。

参 考 文 献

- (1) Киселев, М.И., Белов, Г.В.: Влияние НТП в Разведочной Геофизике на Эффективность Геологоразведочных Работ, «Раз. и охрана недр» 1, 1982.

金属矿区大比例尺航磁图的数字处理

邵梦林

陆正立

梁锦文

(冶金部地质研究所)

(安徽冶金物探队)

(桂林冶金地质学院)

(一)

引言

近十几年来,国内外金属矿产地质普查的特点是日益重视区域性的地质工作。显然,在区域地质调查中,航磁资料的研究占有重要地位。

随着电子计算机的出现和普及,以及相应的计算方法的研究,航磁图的数字处理技术,正在成为航磁资料研究中的重要环节和手段。

利用数字处理技术对航磁资料进行处理的目的是:①突出或提取所需的某些特定的信息;②对某种成分的信息进行加工或修饰,达到更直观、更便于研究的效果;③比较各异常(或异常的各个侧面)之间的特点与联系;④寻找磁现象(异常)与地质实体(地层、构造、岩浆岩等)之间的联系。但是,有关这方面的方法和理论在处理实际资料的能力和效果方面,引起了某些怀疑,矛盾集中在区域—剩余分离问题中是否能很好地求得剩余值(即本文所指的局部场)(Steenland, N.C., 1970)。同时,由于金属矿区的航磁资料有着较大的局限性和复杂性,因此,利用数理统计的方法来分析航磁资料(Naidy, P.S., 1970; Страхова, H.A., 1972)是值得重视的。但是,至今仍没有一套完整的方法、系统化的计算机程序和经验的总结。

为了充分利用我国金属矿区大量航磁资料所提供的丰富信息,发挥其在成矿区划和找矿远景区预测中应有的作用,并考虑到目前航磁资料质量的限制,近几年来,我们通过研究和试验,初步形成一整套金属矿区航磁图的数字处理方法:

- 分离区域场和局部场的最小均方误差滤波器;
- 由各种位场转换组合而成的串联滤波器;
- 对区域场进行反演的最优化方法;
- 局部异常的统计分类方法。

本文将对上述方法作系统论述,编制了这些方法的计算机程序,并通过在南京—铜陵地区(以下简称宁铜地区)的应用,对该区1:25000的航磁图作出新的地质解释。

• 曾参加过本项工作的有:安徽冶金物探队的石玉书、倪寿伯、程陆民;江苏冶金814队的童永春;桂林冶金地质学院的林松、樊学勤、朱映霞、顾炳根;冶金部地质研究所的张文峰、陈玉琪、韦志洪等同志。

分离区域场和局部场的最小均方误差滤波器

众所周知,从实测场中有效地分离出区域场和局部场(或解决区域—剩余的分离问题),是区域性重磁资料解释工作的一个关键环节,它对位场资料的地质解释起着重要作用。在四十年代末和五十年代,提出了徒手圆滑的各种经验方法,形式不同的各种算术平均法,以及位场的高次导数法(见格洛塞·S的系统介绍);六十年代后期至七十年代初,提出了一种所谓的非线性滤波法(Naudy, H., ..., 1968)和所谓的匹配滤波器(Spector, A., 1968; Syberg, E.J.R., 1972);七十年代后期至八十年代初,提出各种线性与非线性滤波器(王继伦, 1977; 邵梦林等, 1979; 熊光楚, 1979; 李学圣, 1980)。

(一) 方法原理

在各种线性滤波器中,有一类重要的滤波器,即最佳线性滤波器。人们可以根据需要规定一种准则,使得在这种准则下,滤波效果是最佳的。最小均方误差滤波器属于“最小二乘”意义下的最佳线性滤波器,采用的准则是维纳的最小平方准则,即要求滤波器的实际输出与希望输出之间有最小的均方误差,所不同的是维纳将该准则用于随机过程,我们将该准则用于作为空间函数的位场。

最小均方误差滤波器的频率响应

假定 $f(x, y)$ 为输入, $h(x, y)$ 为滤波因子, $\hat{f}(x, y)$ 为实际输出, $s(x, y)$ 为希望输出, 则有

$$\hat{f}(x, y) = h(x, y) * f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\lambda, \mu) f(x - \lambda, y - \mu) d\lambda d\mu \quad (1)$$

滤波器输出的方差和为

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\lambda, \mu) f(x - \lambda, y - \mu) d\lambda d\mu - s(x, y) \right]^2 dx dy \quad (2)$$

最小平方准则要求 Q 为最小就必须满足

$$\frac{\partial Q}{\partial h(\lambda', \mu')} = 0 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3), 经运算后得

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\lambda, \mu) f(x - \lambda, y - \mu) d\lambda d\mu \right] f(x - \lambda', y - \mu') dx dy \\ & - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S(x, y) f(x - \lambda', y - \mu') dx dy = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)可变为

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\lambda, \mu) \gamma_{ff}(\lambda' - \lambda, \mu' - \mu) = \gamma_{fs}(\lambda', \mu') \quad (5)$$

其中 $\gamma_{ff}(\lambda' - \lambda, \mu' - \mu)$ 为输入 $f(x, y)$ 的自相关函数, $\gamma_{fs}(\lambda', \mu')$ 为希望输出 $s(x, y)$ 与输入 $f(x, y)$ 的互相关函数。

设 $H(u, v), P_{ff}(u, v), P_{fs}(u, v)$ 分别为 $h(x, y), \gamma_{ff}(x, y), \gamma_{fs}(x, y)$ 的富氏变换,则方程(5)的频率域解为:

$$H(u, v) = \frac{P_{fs}(u, v)}{P_{ff}(u, v)} \quad (6)$$

或写成

$$H(u, v) = \frac{F^*(u, v) \cdot S(u, v)}{|F(u, v)|^2} \quad (6')$$

上式中 $F(u, v)$ 和 $S(u, v)$ 分别为 $f(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 的富氏变换, $F^*(u, v)$ 为 $F(u, v)$ 的共轭复数。

为使式(6')变为一种实际可用的滤波器,我们将作进一步的简化。

第一,假定信号(即希望输出 $S(x, y)$)与干扰 $n(x, y)$ (它的富氏变换为 $N(u, v)$)不相关,并考虑到 $f(x, y) = S(x, y) + n(x, y)$,则式(6')变为

$$H(u, v) = \frac{|S(u, v)|^2}{|S(u, v)|^2 + |N(u, v)|^2} \quad (7)$$

其中 $|S(u, v)|^2$ 和 $|N(u, v)|^2$ 分别为信号与干扰的功率谱。

第二,假定可以找到某种径向谱 $H(\omega)$,能近似地反映二维谱 $H(u, v)$ 的某些基本特征,则式(7)变为

$$H(\omega) = \frac{|S(\omega)|^2}{|S(\omega)|^2 + |N(\omega)|^2} \quad (7')$$

其中 $\omega = \sqrt{u^2 + v^2}$ 。

第三,假定信号(区域场)与干扰(局部场)的径向功率谱分别具有下列形式:

$$|S(\omega)|^2 = a \exp(-2\omega h_1) \quad (8)$$

$$|N(\omega)|^2 = b \exp(-2\omega h_2) \quad (9)$$

则将(8), (9)两式代入式(7')后,得到

$$H_Q(\omega) = \frac{1}{1 + K_Q \exp(2\omega(h_1 - h_2))} \quad (10)$$

式中 $K_Q = \frac{b}{a} = e^{B-A}$ 。反之,若将局部场作为信号,区域场作为干扰,则有

$$H_J(\omega) = 1 - H_Q(\omega) \quad (11)$$

式(10)和(11)就是分离区域场和局部场的最小均方误差滤波器的频率响应,式中所含的 a, b, h_1, h_2 四个参数是设计滤波器时必须事先估计的。

滤波器的若干性质

所提出的滤波器是圆对称的纯振幅滤波器, 它不改变输入谱的相位特征。

由式(10)可知, 提取区域场的滤波器是一个低通滤波器。当 $\omega = 0$ 时, $H_Q(0) = \frac{1}{1+K_Q}$ 。

如果 $K_Q < 1$, 则 $H_Q(0) \approx 1 - K_Q$; 如果 $K_Q \ll 1$, 则 $H_Q(0) \approx 1$ 。

设 $H_Q(\omega) = 0.5$ 时的 ω 值为该滤波器的宽度 ($\omega > 0$), 则可知滤波器的宽度

$$\omega_d = \frac{A-B}{2(h_1-h_2)}。同时不难知道, 在该点上滤波器有最大的陡度, 其值为 $-\frac{h_1-h_2}{2}$ 。$$

如果定义 $H_Q(\omega) = 0.1$ 时的 ω 为滤波器的截断 ($\omega > 0$), 则可知其截断为

$$\omega_c = \frac{A-B-0.1054}{2(h_1-h_2)}。$$

由此可见, A与B的差异明显地影响到滤波器的低频增益。(A-B)值愈大, 滤波器宽度愈大, 截断也大, 且 $H_Q(0)$ 愈接近于1, 因而使提取的区域场的畸变愈小。

h_1 与 h_2 的差别主要影响滤波器的宽度、陡度和截断。 (h_1-h_2) 值愈大, 滤波器愈窄、愈陡, 截断也愈快。

因此, 能针对输入功率谱提供的a, b, h_1 , h_2 等参数, 设计不同的滤波窗口, 使滤波器具有“自适应”的功能。

由式(11)可知, 提取局部场的滤波器显然是一个高通滤波器。

图1给出了最小均方误差滤波器与向上延拓的频率响应的比较。可见前者宽度大、斜率陡、截断快, 因而保留了向上延拓压制高频干扰的优点, 又避免了向上延拓对低频信号压制过多的缺点。

滤波器的设计

区域性航磁图的径向对数功率谱, 一般可以粗略地分为两段直线: 其中位于低频段斜率陡的为深源引起的区域成分; 位于高频段斜率较缓的为浅源引起的局部成分。由这两段直线的斜率, 可以对深源和浅源各自的平均顶深 h_1 和 h_2 作出估计; 而两直线的截距分别相应于A和B。在对此四个参数作出估计后, 就能根据式(10)或(11)设计出相应的滤波器。

(二) 应用技术

本文所述的分离区域场与局部场的最小均方误差滤波器, 已纳入重磁数据处理的“二维频率滤波”系统, 并于1977年编制了“CJ—709机二维频率滤波程序”(手编), 1980年改编为DJS—6机语言程序, 称为“DJS—6机二维频率滤波程序(改进版)”。

基本步骤

根据方法原理一节所述, 最小均方误差滤波技术的计算步骤如下:

- (1) 计算观测场 $f(x, y)$ 的富氏变换 $F(u, v)$;
- (2) 算出观测场的功率谱 $P(u, v)$, 并求径向功率谱 $P(\omega)$;
- (3) 在对数功率谱 $\text{Ln}P(\omega)$ 图上, 确定滤波器的四个参数: A, B, h_1 , h_2 (图1);

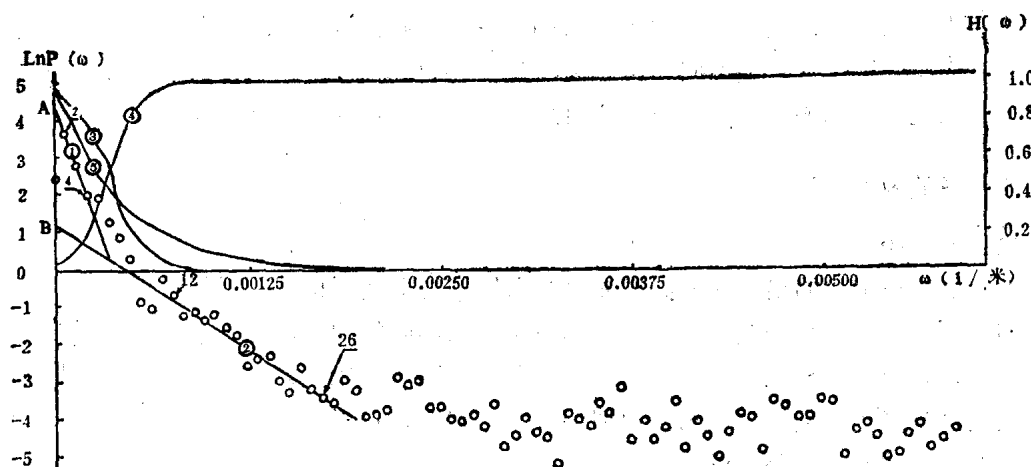


图1 宁铜地区繁昌分区航磁场的对数功率谱 ($\text{Ln}P(\omega)$, o—离散谱)、提取区域场和局部场的频率响应及其与上延频率响应的比较

①2~4的回归直线 $\text{Ln}P_1(\omega)$; ②12~26的回归直线 $\text{Ln}P_2(\omega)$; ③ $H_0(\omega)$; ④ $H_1(\omega)$; ⑤上延1200米的频响

(4) 在尼奎斯特频段上, 将 $F(u, v)$ 乘以 $H_0(\omega)$ (或 $H_1(\omega)$);

(5) 求出上述乘积的富氏反变换, 便是分离后的区域场 (或局部场)。

功率谱的计算

由于我们处理的对象是二维位场资料, 其功率谱也是二维的。为了使从径向功率谱上估计的滤波器的参数更接近于所要提取和滤掉的场源的参数, 采取求最大径向谱 (或称径向谱包线) 的作法 (安徽冶金物探队等, 1978)。

如果采用实型富氏变换形式, 则二维功率谱按下式计算:

$$P(u, v) = A^2(u, v) + B^2(u, v) + C^2(u, v) + D^2(u, v) - 2[A(u, v)D(u, v) - B(u, v)C(u, v)]$$

($u, v \in I$ 象限)

$$P(u, v) = A^2(u, v) + B^2(u, v) + C^2(u, v) + D^2(u, v) + 2[A(u, v)D(u, v) - B(u, v)C(u, v)]$$

($u, v \in I$ 象限)

(12)

式中 $A(u, v)$, $B(u, v)$, $C(u, v)$, $D(u, v)$ 为富氏系数, u, v 分别是基、测线方向上的圆频率。

设 $\Delta\omega$ 为一规定的径向频率间隔, 则最大径向谱就是在位于间隔为

$$k\Delta\omega - \frac{\Delta\omega}{2} < \omega_k \leq k\Delta\omega + \frac{\Delta\omega}{2}$$

$$\omega_k = \sqrt{u_k^2 + v_k^2}, \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

的一系列圆环带中相应的最大功率值所构成的径向谱。实际上, 最大径向谱就是沿二维谱长轴方向取值构成的径向谱, 因而所估计的参数必然较接近于场源的参数。

滤波器参数的确定

在计算机直接输出最大对数径向功率谱 $\text{Ln}P(\omega_k) \sim \omega_k$ 的图形后, 采用人机联作方式, 选取两组功率值, 分别作一元线性回归, 并由回归直线的截距和斜率求得 A, B, h_1, h_2 四个参数, 代入相应的频率响应表达式(10)或(11), 便可作频率域的滤波运算。

(三) 滤波效果评述

滤波器的影响因素

(1) 信号与干扰的相关程度: 滤波器要求信号与干扰不相关。但是, 重磁位场的谱总是重叠的, 而使滤波效果变差, 即实际输出与希望输出间的均方误差不是真正最小值。在实际应用时, 只要信号 $S(x, y)$ 和 $N(x, y)$ 的差异足够大, 例如在提取区域场时, 若区域场源的埋深很大, 且场强也大, 而局部场源埋深小, 场强弱, 可以近似地满足滤波器的条件。这对大多数的航磁图来说, 是能满足的。

(2) 相位问题: 对于航磁资料来说, 与频谱中相位项有关的是正常地磁方向、磁化强度方向、磁性体的产状及其平面位置。即使在最简单的情况下, 也会因区域场源与局部场源之间水平位置的差异而产生相位问题。因此, 从理论上分析, 只要区域场与局部场之间存在相位差, 则凡是不考虑相位因子的纯振幅滤波器都会给两种成分的分离带来误差。

(3) 功率谱的估计(识谱)和参数的确定: 对功率谱的估计取决于所提出的估值模型(式(8)和(9))能否对实际的功率谱作出尽可能客观的描述。与航磁资料推断解释中最常用的直立棱柱模型的功率谱相比, 虽然式(8)和式(9)显得过于简单化, 但是却保留了功率谱的主要特征, 从分离不同场源的角度来看, 仍是可以接受的。当然, 还可以找到其他的估值形式(Gerard, A., 等, 1975), 但用起来复杂些, 效果也不见得有所改善。至于参数的确定就更带有主观随意性。一般说来, 对数径向谱上两段直线越清晰, 差异越大, 确定的参数就越理想, 分离效果就越好。

理论模型场的分离效果

表1给出了对若干直立棱柱体模型组合产生的 ΔT 场作最小均方误差滤波的结果。所有计算均采用 0.5×0.5 网格, 计算范围为 40×40 。

表1中列出了滤波后区域场和局部场的极大值 $\tilde{T}_m$ 与相应的模型场极大值 T_m 之间的相对百分误差

$$\eta = \frac{\tilde{T}_m - T_m}{\tilde{T}_m} \times 100\%$$

由表1可见, η 一般小于15%。当 $K_0 \ll 1$ 的条件不能满足, 且 h_1 和 h_2 较为接近时, η 可达50%以上。

表1还针对提取区域场的滤波器计算了各种组合的标准化均方差, 即

$$\varepsilon = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{2b \exp(-2\omega(h_1 + h_2))}{-a \exp(-2\omega h_1) + b \exp(-2\omega h_2)} d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} a \exp(-2\omega h_1) d\omega}$$

直立棱柱模型 ΔT 场的滤波结果

表 1

组号	模型号	x_0	y_0	h	V	J	h_1	h_2	A	B	T_m	$\tilde{T}_m$	η (%)	ϵ
1	2	0	0	8	$7 \times 7 \times 20$	500	7.26	0.91	8.57	2.92	239	208	14.90	0.00635
	43	5	5	1	$2 \times 1 \times 0.5$	1500					719	686	4.81	
2	2	0	0	8	$7 \times 7 \times 20$	500	5.92	1.24	8.10	3.56	239	243	-1.65	0.01897
	44	0	0	1	$2 \times 1 \times 0.5$	1500					719	714	-0.70	
3	1	0	0	5	$7 \times 7 \times 20$	500	5.07	0.98	8.83	3.25	520	470	10.64	0.000675
	43	5	5	1	$2 \times 1 \times 0.5$	1500					419	638	11.30	
4	1	0	0	5	$7 \times 7 \times 20$	500	4.88	0.93	8.84	3.21	520	563	-7.60	0.000643
	44	0	0	1	$2 \times 1 \times 0.5$	1500					710	672	7.00	
5	1	0	0	5	$7 \times 7 \times 20$	500	5.44	1.19	9.31	5.22	520	537	-3.20	0.02861
	46	0	0	1	$2 \times 2 \times 2$	1500					1418	1404	1.00	
6	1	0	0	5	$7 \times 7 \times 20$	500	5.31	1.05	9.31	4.78	520	581	-10.50	0.01873
	47	0	0	1	$2 \times 2 \times 4$	1500					1479	1444	2.40	
7	1	0	0	5	$7 \times 7 \times 20$	500	5.37	0.99	9.61	4.85	520	680	-23.50	0.01487
	48	0	0	1	$2 \times 2 \times 24$	1500					1597	1468	8.80	
8	1	0	0	5	$7 \times 7 \times 20$	500	4.23	2.67	9.26	7.25	520	816	-36.30	0.17993
	45	0	0	3	$4 \times 4 \times 0.5$	400					855	551	-56.20	
9	1	0	0	5	$7 \times 7 \times 20$	500	5.07	1.09	8.91	3.15	520	528	-1.50	0.00565
	8	8	-5	1	$1 \times 1 \times 0.5$	1000					292	272	7.40	
	9	2	-1	2	$2 \times 2 \times 0.5$	1000					166	161	3.10	
	15	-10	0	3	$2 \times 1 \times 0.5$	1000					41	23	78.30	
10	1	0	0	5	$7 \times 7 \times 20$	500	4.60	1.60	8.63	5.52	520	360	-44.40	0.07217
	5	5	5	1	$2 \times 1 \times 0.5$	1000					336	380	1.60	
	7	-6	-7	1	$2 \times 2 \times 1.5$	1000					1148	1057	8.60	
	8	-8	-5	1	$1 \times 1 \times 0.5$	1000					290	263	2.50	

x_0, y_0, h —模型体上顶中心坐标; V —体积; J —磁化强度; $T_m, \tilde{T}_m$ —模型场和分离场的极大值

上式实际上是衡量实际输出和希望输出之间符合程度的标准: $\epsilon = 0$ 时, 实际输出与希望输出完全一致; $\epsilon = 1$ 时, 两者完全不一致。由表1可见, 只要 $A - B > 3$ (即 $b/a < 0.05$), 滤波器的滤波性能均能处于较好的状态。

从区域场与局部场的形态来分析, 滤波结果并未引起很大畸变。仅当局部场位于区域场的低缓部分时, 由于相位差的存在, 使得局部范围内的相对百分误差可能较大, 致使平面等值线形态发生畸变 (图2)。

实测场的滤波结果

对于实际资料的处理, 根据我们的经验, 可以从以下几方面来判断分离效果的优劣:

- (1) 区域场中是否可以看出明显的局部场的残余;
- (2) 局部场中是否还保留区域场的某些痕迹;
- (3) 区域场和局部场的零等直线是否合理;
- (4) 在分块计算时, 拼接部分的误差是否可以接受。

此外, 也可以计算标准化最小均方误差作为参考。

在宁铜地区航磁数据处理中, 应用上述方法来分离区域场和局部场, 经统计 $\epsilon = 0.071$ 。图3、图4图、5分别为该区中繁昌分区的原始航磁 ΔT 场及经分离后的区域场和局部场。

对比这三幅图, 可以认为本文提出的分离区域场和局部场的方法, 在该区取得了令人满意的结果。

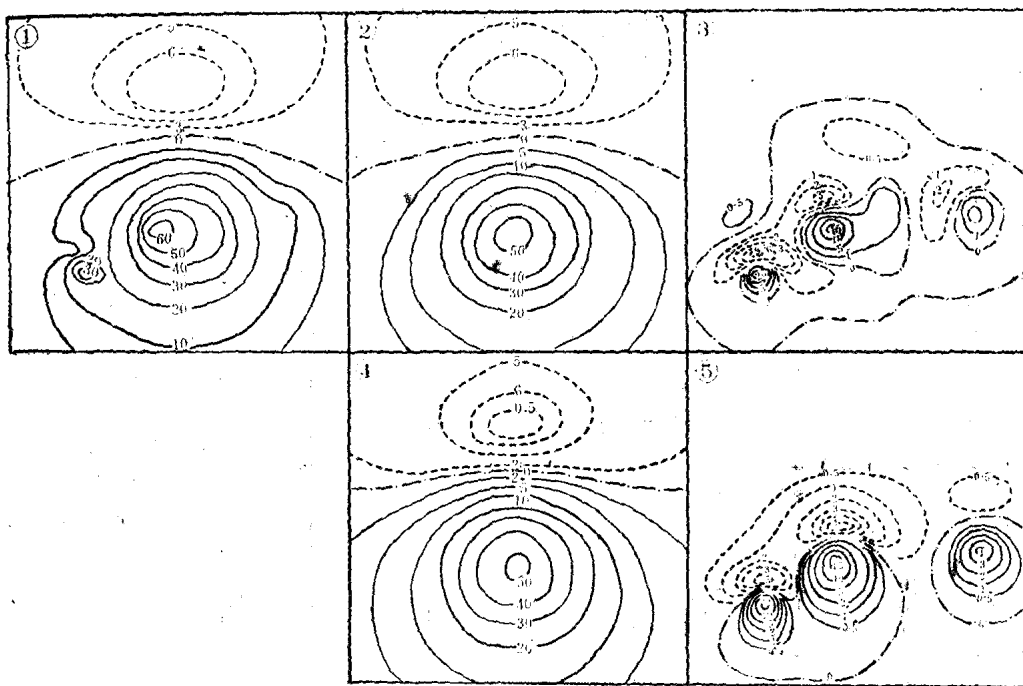


图2 第9组(表1)模型场的滤波结果与正演结果的对比 (ΔT 等值线单位: 10)

①第9组模型的 ΔT 场; ②提取的区域场 T_Q ; ③提取的局部场 T_J ; ④1号模型场的正演结果 T_J ;

⑤8+9+15模型场的正演结果 T_J ;

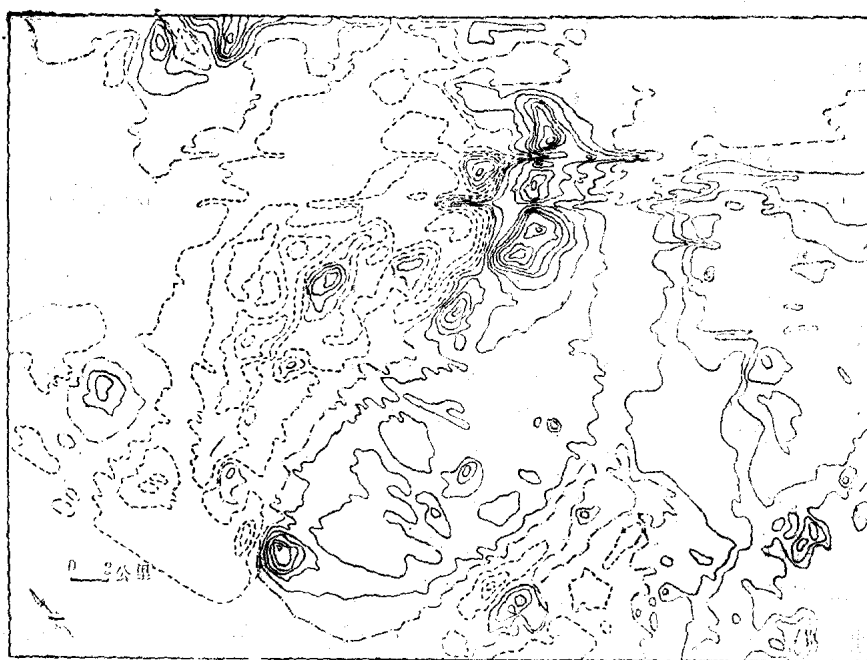


图3 宁铜地区繁昌分区航磁 ΔT 原始场 (等值线间隔为100伽玛)

1—正值 2—零值 3—负值

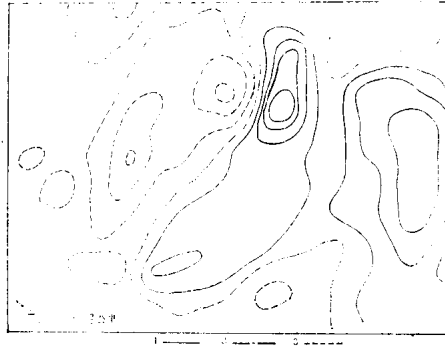


图4 宁铜地区繁昌分区航磁区域场
(图例同图3)

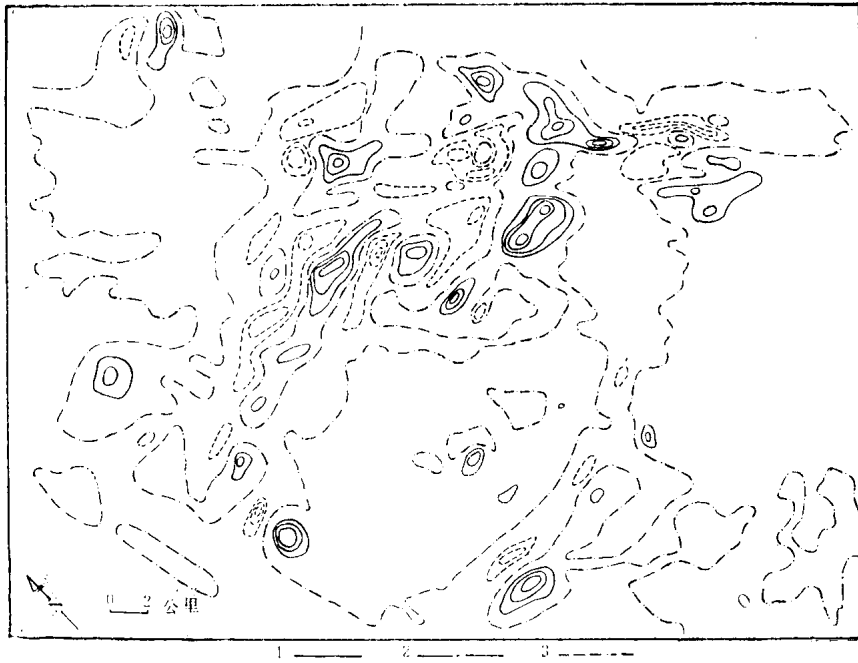


图5 宁铜地区繁昌分区航磁局部场
(图例同图3)