

地质科技资料选编(五十)

国外金属矿物探的进展

国家地质总局 情报所 编
物探所

一九八〇年一月

前 言

一九七八年，在国家地质总局物探局的领导下，由国家地质总局情报所、物探所具体组织了“国外物化探情报会战”。除少数译文已陆续在有关刊物上发表外，“会战”成果分成“国外电法勘探研究”、“国外金属矿物化探专题情报资料”和“国外金属矿物勘探的进展以及“国外勘探技术译文集（2）—地球物理勘探”等四集分别予以发表。

从所查阅和翻译的大量国外文献中，可以看出，国外七十年代金属矿物勘探发展的基本特点是，（1）除现有各种物探技术方法和仪器设备有了新的改进和发展之外，物探的基础理论研究和基础工作普遍受到各国的重视，获得进一步发展。各种地球物理参数特别是新参数的研究和探索，区域地球物理调查和编图等工作不少国家都在进行。（2）多参数多道综合测量的技术和方法不仅在航空测量和测井工作中业已实现，而且在地面物探方法中也已开始出现。（3）物探的应用范围日益扩大，不仅限于局部普查找矿，而正向区域地球物理调查、深部地质、水文和工程地质以及地热地质等领域迅速扩展。（4）计算机技术已渗透到物探工作的各个领域和各个环节。特别是微处理机的应用和计算机网络以及“数据库”的发展，计算机技术已远不止作为物探数据计算处理的工具，而且为物探工作（包括测量，数据计算和整理、制图、综合解释）自动化提供了重要手段。（5）一些新的科学技术如超导技术，遥感技术、统计技术等，正向物探工作中渗透，将为物探工作开辟新的前景。国外有人预言，地球物理勘探学正酝酿一次新的重大突破，即“地层革命”，也就是不久的将来，物探工作所提交的成果不是数学模型，而是地质—地球物理模型。

本选编的内容包括两大部分，参加会战单位编写的有关国外各类物探方法技术的进展的综述或评述文章和国外仪器装备的发展现状综述。本选编中有关磁法、重力、电法、地震、地下物探等方法，是在过去已报导过的材料（七七年会战）的基础上，只重点介绍了近1—2年来的进展。而有关核物探和水文物探、电子计算机技术和物探仪器装备等方面的内容，则只作了简要的介绍。特别是各类物探仪器装备尽可能系统地介绍了各类仪器厂商、型号和技术性能，并对各类仪器近年来的发展给予简评。

本集的内容可基本上反映当前国外金属物探的发展现状和动向。可供有关领导部门，高等院校和科研单位以及生产单位编制规划、计划，组织科研、教学和生产工作参考，供广大物探科技人员学习参考。

参加本选集编写工作的单位有，国家地质总局勘查技术设计院，国家地质总局计算技术研究所，长春、武汉、成都等地质学院物探系和成都地质学院第三系，北京、上海、重庆地质仪器厂，国家地质总局水文技术方法研究队等。由国家地质总局情报所和物探所编辑。国家地质总局勘探技术设计院李颖同志和物探所陆克同志也参加了编辑工作。在此，我们对参加该项工作的有关单位和有关同志一并表示感谢。

由于我们能力所限，工作中缺点、错误在所难免，欢迎广大读者批评指正。

目 录

技 术 方 法 综 述

- 磁法:** 国外磁法勘探的进展
.....长春地质学院物探系 王启章、孙运生、潘作枢、申宁华(1)
- 重力:** 国外重力测量的新进展
.....长春地质学院物探系重力教研室(13)
- 电法:** 激发极化法发展近况
.....武汉地质学院物探系 罗延钟、刘 崧(25)
- 国外地面电磁法近况
.....武汉地质学院物探系 许洪海(29)
- 略谈国外地面电磁法仪器的现状及趋向
.....武汉地质学院物探系 杨 旭(33)
- 电磁波探矿法的发展现状和问题
.....长春地质学院物探系 佟文琪(48)
- 大地电磁法
.....吴广跃(60)
- 核物探:** 国外金属矿核物探的概况
.....成都地质学院三系 章 晔(62)
- 应用放射性测量方法普查与勘探非放射性元素矿
.....成都地质学院三系 华荣洲等(74)
- 地下物探:** 国外地下物探的发展情况和展望
.....武汉地质学院 蔡柏林(83)
- 电算:** 国外电子计算机技术在物探中应用的某些进展
国家地质总局计算技术研究所 张采玲、刘道阳、王建谋(91)
- 区域物探:** 国外区域物(化)探工作的近况及发展趋势
.....成都地质学院物探系 林盛表、付唯一(102)
- 水文物探:** 国外水文物探概况
.....国家地质总局水文技术方法队 沈明性(114)

国外物探仪器装备的发展

- 重磁:** 国外重力及磁法仪器的发展现状(附表)
.....北京地质仪器厂 赵 楠、解 平(124)

- 电法:** 国外电法仪器与厂商概况 (附表)
国家地质总局地质勘察技术研究设计院 李 颖、唐尧镛
 张锡濂、(150)
- 测井:** 国外金属矿、煤田测井仪器的发展概况 (附表)
上海地质仪器厂 周恒涛(234)
- 地震:** 国外地震仪器的最新进展
重庆地质仪器厂 吴维伟、汪天伟(268)

国外磁法勘探的进展

王启章 孙运生 潘作枢 董学斌 申宁华

为了调查国外磁法勘探的新进展,我们查阅了近五年的国外主要的几种期刊杂志以及新出版的有关书籍。今将调查结果整理归纳于下。

仪 器 和 方 法 技 术

一、当前美、加等西方国家实际工作的航空磁力仪水平可以以探头灵敏度为 0.01 毫微特斯拉 ($1 \text{ Tesla} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = 10^9 \gamma$) 的光泵磁力仪为代表[1]。这种仪器通常安装在带自动补偿线圈的机尾尾椎上或吊在机下的吊舱内作高精度飞行。而灵敏度为 0.1 γ 的质子旋进式磁力仪,如桑得尔公司的 NPM-5 (加)、乔麦屈克斯公司的 G-803 (美) 等,在一般航磁测量中应用较为普遍。

此外还发展了一种矢量航空磁力仪,例如采用固有噪声水平为 $10^{-6} \gamma$ 的低温超导量子干涉器制成的三分量矢量航磁仪。美国海军海洋公司用一组正交的饱和式探头也组成了一台矢量航空磁力仪,安装在刚性的铝质硬架一端,装有静电悬挂陀螺惯性平台(这是测量位置用的),其精度为 0.1°。这种仪器虽未普遍应用,但它在数据分析和解释方面都有着明显的优越性[2]。

磁力梯度仪目前受到了很大的重视,因为它不仅能探测局部目标上的异常,而且还能指出方向以及距该目标的距离,从而有可能将近地表的地质“噪声”源与深部矿体区分开来。它对矿产勘查有相当大的潜在能力,而且要深入的研究和发展它,亦不需更多新的仪器和原理。不同方向的梯度可采用不同的排列方式,如有垂直的梯度、水平的纵向梯度与横向(相对于测线是横向)梯度。美瓦林公司曾用光泵磁力仪做成垂直的磁力梯度仪,乔麦屈克斯公司也曾用两个核旋探头测总场强度及垂直的或水平的梯度。莫利特摩尔科学工程公司第一次生产了 Elsec781 型磁饱和式梯度仪,它由两个相距 1 米的饱和式灵敏元件组成,测量的是地磁场垂直分量的梯度。而灵敏度比光泵高 1000 倍的超导量子干涉器磁力仪最实际的用途亦是做成三分量梯度仪,据说其分辨率可达 $8 \times 10^{-8} \gamma/\text{m}$,探头的间距为 25cm,故可在小型飞机上进行测量。

苏联的高精度航空磁力仪已成批生产,其核子旋进磁力仪比原来使用的饱和式仪器的精度高了一个量级,均方差为 $\pm 0.5 \sim 1 \gamma$ 。光泵磁力仪则可达到 0.1~0.01 γ ,71~75 年并成功地试验了三分量航空磁力仪[3]。

由于使用灵敏度较高的仪器,并要求作出更精确的图件,美、加等国近来注意了对随时

间变化的场的研究,以探讨这种变化的场对测量结果的影响,并评价现有的校正方法。桑得尔公司在加拿大地调局的支持下,于77年完成了对这种场的区域性的研究。他们在横穿不列颠哥伦比亚北部的一条250公里的直线上设了四个地面站,用的是NPM-5核旋磁力仪。发现在该区内地磁日变是明显的,变化是有规律的。

二、近来,在约占地球表面60%的海面上测量海面以上或以下的磁场与磁场梯度的某些工作,越来越引起了人们的兴趣。如洋底地磁测量,是测靠近海底扩展中心的海洋地磁异常等。美国报导了采用超导磁力仪在海底进行磁测的技术。这种仪器的灵敏度达 10^{-10} 高斯/ $\sqrt{\text{赫兹}}$ 。利用它还可制造灵敏度达 10^{-11} 高斯/厘米/ $\sqrt{\text{赫兹}}$ 的梯度仪,用以测量距离为10厘米的两点之间的磁场差。

但在目前的海洋磁测中一般认为最可靠且花费最少的还是核子旋进磁力仪,其灵敏度一般为0.5毫微特斯拉。如乔麦屈克斯公司的G806A型核旋磁力仪。

三、地面磁测中美国的瓦林公司将铯蒸汽磁力仪改装成VIW2302CI型梯度仪,灵敏度是0.18/2米,测量范围是 $\pm 9000\gamma/2$ 米,除了直接数字显示外还可使用音频输出,该仪器还可当磁变仪使用,亦可只测总磁场强度。

苏联物探局局长费登斯基在76年的文章中說:“苏联的地面磁法的工作量主要由M-27型机械式磁力仪完成,其精度达7-10%。核旋与光泵磁力仪的精度为 $\pm 0.5 \sim 1.0\gamma$ ”。他预言:“核旋和光泵磁力仪在最近的将来要代替机械式磁力仪”。他们所用的车载核旋磁力仪在运动中的测量均方差为 $\pm 7 \sim 8\gamma$ 。

方法的应用

苏联的航空物探在各种物探方法中占据着最重要的地位[5],因为它可以加速对难以通行地区(如西伯利亚)的研究工作,快速圈出普查工作的远景区。而在苏联的航空物探中,直到不久前仍然只有磁法一种方法。它在深部地质填图和查明铁矿、硫化物矿、有色金属和铝土矿中是不可少的手段。近来由于仪器精度的提高,不仅可以测定从前认为是非磁性的含矿岩体,他们提出高精度磁测还可以划分出热液蚀变、接触蚀变及围岩蚀变带,控矿构造破碎。目前正用于寻找含金刚石的金伯利岩、铝土矿、弱磁性的黑色和有色金属矿床,并用之以研究矿田、矿带进行填图,寻找新的矿层和矿床。在航空物探飞速发展的同时,苏联的地面磁法仍是详细普查和勘探各种磁性(尤其是弱磁性)矿体的有效方法之一。

美、加等西方国家的磁法在石油、铀矿及金属矿的勘查中仍然是不可少的常用方法之一。目前在铀矿和贱金属的详查中多以放射性与磁测同时进行工作。最近多伦多的北方测量公司在南非用上述两种方法进行金伯利岩普查,取得了较好的效果[2]。

近年来,他们日益重视区域的航磁资料。加拿大从1960年以来(至77年)已编汇了750万测线公里的区域航磁资料。美国出版的区域航磁图面积约占全国40%。这些资料已用于矿产勘探中大的构造填图、覆盖区岩性填图、确定大侵入体的位置和形状或圈定区域断裂带等。76年成立了由美国勘探地球物理协会、地质调查所等四个单位联合组成的“全国磁异常图”委员会[6],计划编出一幅统一的全国航磁图。他们认为:“很难设想在世界上技术处于领先地位的国家没有这样一张图以促进自然资源的发现和编录工作”,且要求该图能按统一的高度上取得的数据编绘,在矿产远景区测线间距为1公里,在较大的沉积盆地上测线间距可为2公里。该NMAM计划由1976年算起十年完成。1978年计划先出版照片

镶嵌图 1980 年将出版临时全国磁异常图（过渡性图件），1983 年计划完成全部测量工作，1986 年完成出版任务。由联邦政府供给费用，总费用 3500 万美元。这样一幅图件可作为进一步详细研究选区和研究大范围的地质特征的基础，即根据它可进行矿省的研究，确定矿床的区域控制因素，特别是研究板块的理论等。又由于这是一整套包括美国大陆和近海区的磁异常资料，因此对于石油、固体矿产及核燃料勘探，对于地热和地下水的研究，对于地震预测和环境保护以及其它科学研究部门都将是有用的。

岩石磁性的研究

岩石磁性的研究是磁法勘探的一个重要基础，在方法及其应用发展的同时，磁性研究从深度和广度上都有了很大的进展。

美国目前正在开展一项极重要的研究课题：即探讨铁磁性氧化物的分布、磁化率和剩磁同几种不同的大范围出露的主要岩性单元（从基性到酸性，从喷出岩到侵入岩而至变质岩，还包括有关的沉积物）的矿物稳定性范围、岩石学、成矿作用、蚀变和构造变形等之间的关系。这是提高航磁资料进行地质填图能力的重要基础^[1]。

苏联近年来在对岩石磁性的研究中^[7]，用到的磁参数、除磁化率与剩余磁化强度外还有导磁率、质量磁化强度、饱和磁化强度、感应磁化强度、天然剩余磁化强度、正常（等温）剩余磁化强度、热剩余磁化强度、化学剩余磁化强度、粘滞剩余磁化强度、矫顽磁力、居里温度、参数 Q （剩余磁化强度/感应磁化强度）。在实验室内测定岩石磁参数的基本方法是磁力仪法与感应法。通常应用交变磁场确定岩石磁化强度的稳定性。并通过比较不同类型的剩余磁化强度的退磁曲线来确定剩磁的类型。

在磁性理论的研究方面：苏联根据最近的研究结果提出：在自然界的矿物中除了具有逆磁性，顺磁性和铁磁性等几种类型外，对于大多数矿物（黑云母、角闪石、辉石、石榴石等）具有一种综合特点，即顺铁磁性。他们发现一般矿物的顺磁性磁化率不超过 $20 \cdot 10^{-6}$ CGSM，而铁磁性磁化率则只与铁磁性的矿物有关。最近发现一些铁含量较大的晶体，这可以解释为是在岩浆岩结晶过程的早期或高温交代作用。这时铁在矿物中的含量是 $10^{-5} \% \sim 10^{-1} \%$ ，晶体具有剩余磁化强度。故微量的铁磁性物质的磁性在稳定的岩浆岩磁性矿物中占了优势。

瑞典地质调查所在瑞典北部进行过航磁填图的变质岩地区，对岩石的磁性进行了大量的研究工作^[8]，所得到的物理信息主要用于直接解释重磁异常，对区域变质作用、花岗岩化、时代与成因的关系等方面也都提出了一些线索。他们认为：这种前寒武纪岩石的化学成分和密度之间的关系有着简单的规律，因而有可能利用其物理性质去推测成分。高磁化率通常归因于磁铁矿的含量。密度显然也与该区的磁化率有关，在磁化率与密度的二维频率曲线上，往往能显示出某种趋势。这种协变性往往能揭示许多局部的和区域的地质作用。

与此相似，苏联也介绍了在一个砂卡岩型磁铁矿上所测得的磁化率与密度的关系图，由图中可明显地划分出：富铁、贫铁与砂卡岩，说明了这种研究对岩性的划分是有用的。

澳大利亚 Frank D Stacey 与美国 Subir 于 1974 年出版了《岩石磁学的物理原理》，对固体的磁性及主要磁性矿物的物理性质作了深入的研究，并讨论了岩石中剩余磁化强度的各种形成过程、反转磁化以及压磁效应等问题。

反演问题

正反演问题作为重磁反演的基础,从磁法勘探发展的初期至今,一直受到应有的重视,但不同时期研究的侧重点有所不同。在电算技术广泛应用的今天,作为电算重要性之一的迭代运算,促进了重磁解释选择法求解反问题的理论和实践的发展,正演研究也大大适应了这种发展的需要。近年来有很大一部分注意力放在建立计算方便、应用灵活的数学模型上,以便使选择法求解反问题取得较好效果。开始时多采用板状体模型,以后棱柱体和长方体得到了较多应用,这二者也可以结合应用。这种模型的好处是便于构成组合模型,以便解决一些较为复杂的磁性体的问题。上述模型体的正演公式都已有文献进行了推导。许多关于选择法求解反问题的文献中所采用的数学模型就是这样的。较近的如1973年《Geoexploration》№. 3. P. 187~195《二维磁异常最佳参数组的快速计算》,1973年《Geophysical Prospecting》№. 2. P. 243~265《用厚板模型作磁法自动解释的试验》,1975年《Geocexploration》№. 2. P. 137~169《用二度和三度模型解释重、磁异常的某些案例》,1976年№. 2. P. 125~141《利用组合方形棱柱的一种灵活的磁异常迭代解释技术》等文献都如此。

另有一些文献研究了用多面体来模拟任意形状的三度体[10],1974年《Geoexploration》年№. 2. P. 93《多面体重磁异常》一文推导了有限长多边形截面棱柱体和一般不规则多面体重磁异常的计算公式,可用来模拟各种横截面的构造和计算地形改正;1976年《Geophysics》№. 6. P. 1353~1363《任意形状三度体的磁场和重力场的理论模拟》中[11],磁性体用一个由三角面组成的多面体来模拟,多面体的面可以任意大小,输入的点数只取决于描绘一个物体所需的角点数。文中导出了理论场正演公式和应用中输入角点及组成多面体的一种方便的方法。这些方法显然对于单个磁性体的模拟有它的优点,但用来构成比较复杂的组合模型就有其不便之处。

1977年CHAO C. KU[12]把计算任意磁化任意形状二、三度体重磁异常的三重或三重积分表达式用高斯求积公式作近似计算,把一个任意物体等效地看成分布于高斯公式节点位置上的一些质点或点磁偶极,使求正问题的多重积分变为多重求和,而划分磁性体时积分限的确定则采用三次样条函数来进行插值。

关于国外近几年反演问题的一些情况,在《物探与化探》1978年第一辑中,潘乃德同志写的《国外反演问题算法近况》[13]一文已作了综述,这里仅结合最近情况作一简述。

从反演来看主要可分为两大类型:一种是根据场的分布特征(曲线的特征)来求解物体的一些产状要素;另一种是建立在曲线拟合基础上的选择法。前者在重磁勘探初期即有了相当发展,一直到现在也还有相当一部分文献是讨论某些几何形体的重磁异常特征,并从中导出计算物体产状的简便方法的。

1974年T. K. S. PRAKASA RAO[14](Waltair, India)提出把板状体异常曲线分解出对称曲线后,在对称曲线上按一定要求确定二对共轭点,即可计算出板状体的埋深和厚度,此方法在解释技巧上考虑了消除区域场的影响,并且应用中可以尽可能多地选用一些共轭点,从而使结果更可靠一些。

1977年John M Stanley[15]提出对接触带磁异常的水平梯度曲线和薄脉的磁异常曲线,找出极大值、极小值、 $x=0$ 处的场值和场值等于零处的 x 坐标值等四个特征点,则从这四个点的场值和坐标值即可计算出接触面或脉状体的倾角、顶板埋深,接触带磁性岩层的磁化

率或薄脉的磁化率厚度乘积等参数。

I. R. Qureshi 与 A. M. Nalaye 将断层异常曲线分解为对称部分和反对称部分, 利用对称曲线的 $1/2$ 和 $3/4$ 极值点坐标, 或利用反对称曲线的极值点、半极值点坐标都可以计算出断层的埋深和断距, 综合上述特征点还可以计算出斜磁化角参数。

关于建立在曲线拟合基础上的选择法, 从四十年代末期已开始应用, 但是电子计算机上迭代算法的优越性大大促进了这一方法的理论和实践的发展, 使解释理论趋于自动化、公式化。尤其是 1965—1975 年间的发展更为迅速。在这方面一个算法的内容包括有四个主要问题: ①选择解释的方法; ②选择解释的数字模型; ③选择模型参数的初始值; ④迭代修改和收敛准则。

由于重磁场的分布与场源各待定参数之间的关系多为非线性关系, 因此曲线拟合的算法归为非线性最优化的算法。在所发表的文献中对解释方法开始有些采用高斯法(线性化方法)和最陡下降法, 以后较多地采用了马奎特(Marquardt)方法(阻尼最小二乘法)(如 1973 年《物理探矿》№2《三度棱柱体磁异常的自动解释》, 1976 年 Geoexploration №2.

《利用组合方形棱柱的一种灵活的磁异常迭代技术》等)和鲍尔(Powell)法(共轭方向法)(如 1973 年《Geophysics》№2《磁法解释的多模型自动化最小二乘法》), 有些文献对这些算法进行了对比试验研究, 一般来说, 马奎特方法收敛性好一些。在最优化算法选择方面国内有些单位也作了比较广泛的研究。

数学模型的选择在初期也进行了广泛的考虑, 质点源、多边形截面柱体、薄板、厚板、立方体、棱柱体、多面体等等, 目前采用较多的还是棱柱体和板状体。

然而由于重磁解释的多解性, 使选择法的应用效果受到很大限制, 在用各种非线性最优算法迭代过程中, 很容易抓住绝对极小值上面的相对极小值, 因此其效果极大地依赖于初始值的估计, 否则将会差之毫厘失之千里, 这一点已为越来越多的人所重视。

在非线性最优算法中都是很费计算时间的, 因此有些作者提出用线性方法来解决非线性问题。除了 S.E.Hjelt[17]于 1975 年提出了确定无限延深板状体倾角的线性辅助变量法之外, 日本的小川克郎[18]于 1977 年还介绍了用一个非线性变换引进一个中间函数, 此函数使磁化因素(包括强度方向)混在振幅项中, 而曲线形状不受它们的影响, 使我们可以首先用这个函数通过线性技术来计算板状体(断层)的深度和边界, 然后由这中间函数利用异常的梯度曲线线性求解磁化参数。这样就用一组线性过程来代替一个非线性过程, 从而减少计算机时间。当然此方法需要计算中间函数和梯度值, 但就其节省时间来看对我们解释大面积航磁资料时有一定帮助。

总的来说, 这种方法中无论计算异常与实测异常拟合得多么好, 也都仅仅是许多可能的解释中的一个, 还需要由有经验的工作人员应用所有可利用的地质和物探资料来实现最终的估计。因此, 有人对选择法的概念提出了新的理解, 即要从多种资料和多种处理中进行综合分析, 从中选择合理的解答。

苏联的 B. H. Страхов 1977 年在《关于重磁异常解释理论发展的新时期》[19]一文中提出, 对选择法的概念和信息变换的概念应当统一起来, 后者在形式上也是一种选择法。对实际资料首先进行这种形式上的近似处理(如解析延拓), 大致圈定场源, 找到场源的泛函关系, 在此基础上确定场源的模型, 然后再作具有实际地质内容的选择法处理, 因为只有

所采用的模型近似于场源实际分布的条件下,选择法才能取得足够的效果。

1976年苏联 М.М.Чагин 等[20] 在《大比例尺地球物理资料的分析和解释中电子计算机的应用》一文中拟制了一个《信息度评价和识别》的算法和程序,将多种物探资料和地质资料作为标志,在计算机上计算其信息度,然后评价各方法,以解决的地质任务为目标,进行地球物理资料的综合解释,取得了一些效果。

近年来还利用地下物体的物性参数(密度、磁化强度、磁矩等)与地面异常观测数据间的线性关系来确定地下源的分布即线性反演。根据所列出的线性方程组,一般求解满足观测值及全部附加约束条件的特殊解。这些约束条件如给定与围岩有物性差的物体的形状,用一多边形(Talwai 等人, 1959)或不同厚度的垂直矩形柱体(Tanner 1967)来近似。1975年 Green 用 Bacus 及 Gilbert[29]的近似方法求解由初始估计开始的可以接受的模型。1974、1975年 Parker 引入了理想物体的概念,在给定范围内,理想物体是均匀的,产生一个可与观测数据相匹配的异常,根据此物体的唯一性,有可能得到实际物体的深度及密度边界。1977年 Sabatier[30] 提出寻找可证实的约束的线性反问题的全部可能解的方法,用已知的线性程序算法求解。1977 Clang Safon 等人对重力异常作分析,表明 Sabatier 的某些观点。将所研究的区域体积 V 划分为大量的未知宽度的矩形水平柱体。根据重力异常与密度的线性关系求解反演问题。其不确定性仅受体积 V 及其划分区域 W_n 的限制。利用简单的方式,圈出部分或全部物质的中心(可以从异常矩 M_{1x}/M_0 及 M_{1y}/M_0 的图形得到),其它的信息也可以从高阶矩得到,例如,物质中心已知,可由图形得出物体延伸的范围。在研究服从一定物理约束的特殊解时,某些物理约束可依靠所研究的问题来设计。此方法对三度问题同样可以通用,只是未知量 ρ 大。目前已成型的线性程序算法(如 MPS—360 等)不适用于 200~300 个以上的方程数求解。

频率域的正反演问题

关于重磁异常在频率域中的正反演问题,近十余年来国内外有关文献已有较详细的推导和具体应用。1978年物探所三室杨文采同志在《重磁异常频率域解释的理论和方法》[21]一文中,有系统完整的推导总结,指出重磁异常频谱较空间域异常在进行解释时有几方面的特点:一是相似性,即三维异常在中心剖面的谱与二维异常谱的形式一致,可利用二维异常的谱解释三维异常。二是各种重磁异常谱都表现为某些因子的乘积,对谱乘以一定函数消除不需要的因子,即可完成异常的各种转换,(如延拓、化极、重磁转换、求导等),较空间域内的转换方便且可综合进行。三是各种规则形体的异常振幅谱通常都为指数函数形式,解反问题时都可利用半对数坐标中零点法和渐近线法,形式简单,归纳方便。

1975年 B.K. Bhattacharyya 和 Lei Kuang-leu[22]对二度任意多边形棱柱体的频谱(指数函数形式)利用级数展开及近似计算技术,使频谱函数构成线性方程组以求解各角点的坐标,并指出综合利用异常谱及其一阶、二阶矩的频谱可改进方程组属性,提高解的质量,加强棱柱体底边界的信息以求解下部边界角点的位置,并进一步求解物性参数。继此之后,1977年[23]又从此途径分析三维构造体的异常,以垂直柱体(截面为矩形)为模型,利用异常及其矩的频谱的指数函数特性,用近似方法求其上下(顶底)边界的深度及柱体的中心位置以及水平方向的宽度。同时还有 V.L.S. Bhimasank Vam 及 Bijon Sharma[24]等人对有限延伸倾斜板体及断层台阶等形体的重力异常的振幅谱及相位谱的推导及求解物体的几何参数

物性参数等作了研究。1977年 Rebert. D 等人[26]分析了在对规则形体重力异常频谱作反演计算时,异常剖面长度不够大时的影响及补救办法,指出在理论异常的变换的计算中,由于褶积积分的数学复杂性,没有通用的紧密靠近的解析解可用于解释之中。为了利用富里叶变换的解释方法,数据必须足够长,使有限变换靠近理论变换。

利用大面积的异常频谱进行磁源深度或磁化率填图,1975年 P. J. Gunn[26]等人假设地下物质是许多垂直矩形棱柱体之和,当其具有同等深度和垂直方向的厚度时,磁场与滤波器的褶积输出是一系列矩形箱函数,每个箱的高度对应于棱柱体的磁化强度。如果棱柱体原有的磁性是均匀的,则箱的高度对应于棱柱体的垂向深度或厚度,以此来确定磁性界面的起伏或地下磁化率的分布。Spector 及 Grant (1970) 及 Suberg (1972)[27]等人也将大面积内磁性体视为垂直矩形柱体的模型组合,其埋深、大小及磁化强度在一定范围内变化。在磁异常的功率谱(振幅谱的平方)中,在半对数坐标(以谱的对数为纵坐标轴)上如有两段不同斜率的曲线,分别对应地下磁单极层及偶极层磁源,单极层是区域异常磁源,用匹配滤波方法求出区域异常,以达到区分区域和局部异常的目的。

1976年 A. Hahn[28]指出用异常振幅谱估计地下磁源深度,在正方形面积上用正方形网格求异常的振幅谱,在半对数坐标上作谱与频率的关系曲线,图形常显出一定域内的谱与频的线性关系,频率增加时,振幅减少。如将磁场向下延拓,此直线段在一定深度时变为水平的,该深度称为白深度,可应用于首次近似估计磁源深度,对应此深度的源可期望是正自相关的随机分布。

异常数据处理

国外常用的磁异常数据处理方法有:延拓、滤波、导数、化极、趋势增长和趋势减弱磁化率图及地形化直等。但这两年来有关磁异常数据处理方面的文献较过去少得多,这可能由于多数方法的算法和程序都已定型用于生产中。不过还有少量这方面的文献。归纳起来不外乎两方面的内容:一是异常数据处理方法向频率域换算方面发展;另一方面是对已有的数据处理方法作效能性的改善。

频率域换算

1975年 P. J. Gunn[26]对重磁场的线性变换理论作了系统的论述。他用等效层的概念导出了重力场与磁场的频谱,该频谱表达式又可看成是:等效层、深度、磁化方向等诸因子的乘积。根据褶积理论,当要消去频谱中的某因子时则可将频谱除以该因子,在空间域里要消去某因子则可用一频率响应为该因子频率响应的倒数的滤波器作褶积。因此,他归纳并设计了用于位场延拓、磁场化到地磁极、磁场各分量间的转换。计算位场垂直导数、区分深部与浅部异常及走向滤波等各种频率响应的滤波器。

Wladimir Baranov[31]也系统总结了各种位场换算方法的频率域换算方法。从理论上推导了延拓、导数、滤波、化极等数据处理方法的频率响应。

对已有的方法的改善方面:

苏联的 B. Б. Гласко[32]等人系统地总结了 A. Н. Тихонов 所提出的正则化(PA)理论指出,PA算法在求地球物理不适定问题的最佳解方面是很有效的。正则化算法是在正

则化的富里叶级数中, 求出 α 因子, 从而实现了正则化。由正则化算法可以确定磁性体最近奇点的深度 H 及最佳的参数 (各种步长)。在这条件下, 可以将磁场延拓到 $0.8-0.9H$ 的深度上。在这方面罗马尼亚的 M. IAHAS[33] 等人也作了正则化向下延拓的研究。用正则化算法, 还可以对磁场进行光滑和滤波, 甚至在误差的水平可与有用讯号相比较时, 仍可得到很好的效果。同时可以用 PA 算法计算也属于不适定问题的磁场导数。此外, PA 算法也可以用于恢复场源以外空间上的磁场。在这时需将磁场展开成具有正弦项和余弦项的三角级数。级数的系数可以由实测的经验场求出。但级数收敛很慢, 为此要用正则化的截断级数改进收敛性, 这时可按干扰特性的某些先验讯息, 选择干扰 δ 的模量, 并在此基础上按闭合差原理确定截断级数的项数, 项数确定后, 即可确定系数, 并同时恢复场源外任何空间上的磁场。顺便指出 PA 算法在确定重力的剩余密度的密度介面的形状和位置方面也是极其有效的。

在提高滤波的效果方面, 苏联的 B. H. Страхов[34][35] 及 B. M. Горбин 等人作了较深入的研究。B. H. Страхов 等提出了根据干扰性质的先验讯息而构成滤波算法的理论和办法。作者提出了有用信号和干扰正交性的已知先验讯息情况下的双参数正则化。并介绍了正交闭合差原则, 提出了藉助于判别泛函考虑到输入数据中有用讯号和干扰的先验性的滤波问题的最佳解的选择方法。作者根据干扰特性的先验讯息不同, 提出了三种滤波方案, 正引用了理论模型作了对比。由引用的理论模型实例中可看出, 当干扰与有用讯号强度同样的情况下, 仍可得到很好的滤波效果。

此外, B. M. Горбин[36] 等人提出了利用 Калмогоров-Винер 的最小二乘标准制订异常的滤波方案, 并提出了数字滤波的算法。这种方法比较适用于有用讯号和干扰的平均 (统计) 特征已知的情况。

L. J. Tsay[37] 于 1975 年针对位场异常延拓后出现的边缘效应问题, 对向上延拓的富里叶级数方法提出了两个改进的途径: 一是在剖面两端各加上一组常数系列; 一是在剖面左侧加一数组使之式中正弦系数为零而只用余弦级数。他利用了理论模型进行试验, 得到了较满意的结果。

1976 年 L. J. Tsay[38] 又提出了一种对飞行的高度变化为一常数时, 对航磁数据进行延拓的具体方案。方法的原理是 Tsuboi (1937) 及 Henderson (1960) 就提出来的。其具体措施: 一是以飞行线上的取样点为各次向上或向下延拓剖面的端点逐点 (层) 延拓; 二是以飞行线端点为原点转换坐标轴方向后再逐次延拓。

B. H. Bhattacharyya 等人近来在克服起伏地形对重、磁测量结果影响方面进行了研究[39], 他根据等效源的原理, 推导出了将曲面地形上的实测位场 (重力和磁场) 化到空间任意一点的基本公式。在任意观测面上的等效磁化强度与总磁场或等效密度与重力效应的解析关系可以由第二类弗雷德霍姆 (Fredholm) 积分方程得到。用快速收敛的迭代方案可以描述出积分方程解的形式, 由这个解得到等效磁化强度或密度的表面分布情况, 由这些分布可以计算出在任意其它表面上的磁场, 从而实现将曲面的实测位场延拓到任意其它点上去。由所得的基本公式, 对实测的表面是平面的情况就可简化成向上延拓的狄里希莱积分公式。用所得到的基本公式克服起伏地形对实测场的影响可以分成两种情况来处理: 一种情况是地形可以认为是无磁性的情况, 这时可用基本公式将实测场延拓到一个高于地形最高点的水平面上。另一种情况是地形具有磁性的情况, 这时一般是高的地形对应升高的异常, 而低处对

应低异常。故需将实测场延拓到平行实测表面的曲面上去。这种情况只能减小地形的影响，但不能完全消除。作者也同时推导了适于二度异常的基本公式。在他的文章中详细论述了这种方法用于处理航磁图的效果。

位场数据处理的滤波器多半很长，因而使变换时计算时间较长且损失的边缘数据较多，现在已有了一种算子长度较小的递归滤波器来克服上述问题，即已计算完的部分输出又反馈至输入来参加计算下一个的输出。Shanks (1972) 与 B.K. Bhattacharyya (1976) 等人已设计了零相位二维递归滤波器[41]，能较满意地进行观测位场的垂直梯度与上下延拓计算。

关于解释理论的回顧和展望

1977年苏联 В.Н. Страхов 发表了《重磁异常解释理论发展的新阶段》[43] 及《从计算地球物理到地球物理控制论》[43]等文，对解释理论的发展状况作了评述。认为1978年起渐临重磁异常解释理论发展的新阶段，对过去理论发展的三阶段（本世纪开始到40年代末、40年代末到60年代初，60年代初到70年代末）作了评述，并指出产生目前新阶段的条件的因素和新阶段的任务及数学理论基础。认为第一阶段建立了对孤立规则异常的解释方法（特征点法、积分法及量板选择法等），对规则形体的正演反演问题及解反演问题中的等价性方面奠定了理论基础，应用的是一般的数学分析和位场理论。第二阶段在显示异常与区域性或地壳构造间的关系规律、区分区域与局部异常、研究复杂的相互干扰的同级异常及在干扰中突出或发现有用的弱异常方面应用了向上延拓、高阶导数、向下延拓、统计检验和滤波理论等有关位场数据变换的理论和方法。复变函数理论（研究平面域的“奇点”）、实变函数论、富里叶分析、概率论及数理统计等开始在异常解释中应用。用位场理论解反演问题时的唯一性及稳定性问题有进一步的研究。第三阶段由于从1960年起地球物理学家积极掌握电子计算技术，手算工作被机器代替。地质方面也要求物探能详细描述完整的地质剖面 and 构造，此阶段的基本特征是异常数据的整理和解释过程开始自动化、从数据中充分提取信息并不断组织方法的研究，提高解释的客观性。由于计算技术的提高猛烈地推动了数学的进展和应用，丰富了解释理论基础，出现了最优化选择法，平面域解析理论进一步完善。1970—1977年全面利用电子计算机，建立了第一个反演问题自动化系统ACOD，形成了自动解释方法的专门理论。正则化方法应用于解决线性及非线性反演问题中解的不适定性问题取得好的效果。目前正面临新阶段，它的基本特征是理论的成熟性——（发展了解析理论，在平面问题中已近于完善，为三度空间的计算奠定了基础）。在解释领域中对有效性科研工作评价的成熟性以及在实际新概念和方法时巨大的计算能力。此阶段要求建立起综合的解释方法，要明显提高解释的地质效果、经济效果、工作效率及理论根据、充分利用经验的和先验的信息、扩大方法的应用范围，提高方法的适应性，使解释过程公式化。应保证最完整地提取全部系统的信息，使用最有益的方法。理论方面要建立完整的三度体的位场解析及计算基础。要实现不同方法内在相关的技术上的联系，以使建立大量解析问题的综合计算方法。

1976年底美国国家科学基金会的国家需求研究处为查明需进行研究的关键问题召开各界人士座谈会，讨论了“固体矿产物探的前沿”[1]，其中关于重磁问题认为当前需着手解决的是：航空磁测技术、统一的全国航磁图（测线间距为1或2 Km）的编制，岩石的地质和磁性研究、将异常数据归算到同一表面的研究，约束反演问题及矿产区的磁异常研究等课题。

1978年西德 Wilhelm Bosnm 等人在访华期间及以前的某些文章[44-48]中介绍西德的磁测工作情况,指出在金属物探方面,航磁异常配合地面磁异常可进行大比例尺填图,地磁异常可提供异常的细节部份。解释时常先以二度的多种规则形体作模型、以最优选择法拟合观测异常,在电子计算机上自动得出结果,再结合航磁异常作三度磁性体模拟(一般用由平面三角形组成的多面体)、一次可模拟数十个磁性体、迭代6—7次即可符合要求,目前正研究全自动的多个三度磁性体异常场的拟合计算技术。在研究石油构造时,则用频谱分析利用求白谱深度的方法来计算磁性基底的起伏。在全国地磁图或航磁图上值得注意的是某些低磁异常结合地温梯度测定可用来寻找地下热源。由于岩浆沿破碎带或地壳薄弱处侵入,其温度都在居里点以上、属非磁性、在地表显示低磁异常区,如有地温异常伴生,则说明地下可能有热岩体存在,只要深度不大,可以利用作热源。

参 考 文 献

- [1] 《固体矿产物探的前沿》及其附录 S.H.Ward 等《国外地质科技》78№3
情报所等译
- [2] 《77年物探的发展和趋向》 Peter Hood 重庆地质仪器厂等译
- [3] 苏联勘探地球物理 B.B.Федьинский 情报所译
- [4] 用超导磁力仪进行海底磁测的技术 Robert J.Dinger 等 北京地质仪器厂译
- [5] 苏联金属矿普查勘探中的物探方法 B.B.Федьинский 等 史崇周译
- [6] 全国磁异常图(NMAM) 情报所译
- [7] 岩矿物性手册(1975?) H.B.Дортман 董学斌译(摘)
- [8] 瑞典北部岩石密度和磁性研究 赫伯特·亨克尔《物探与化探》78№3
- [9] "The physical principles of rock magnetism" 1974. Frank D.Stacey 和 Subir K.Banerjee
- [10] "Magnetic and Gravity Anomalies of Polyhedra"
J.H.Coggon.《Geoexploration》1976.№2.
- [11] "Theoretical modeling of the magnetic and gravitational fields of an arbitrarily shaped three-dimensional body
C.T.Barnett "Geophysics" 1976 V.41 №6
- [12] "A direct computation of gravity and magnetic anomalies of arbitrary shape and arbitrary magnetic polarization by equivalent-point method and a simplified-cubic spline"
Chao c ku 《Geophysics》1977 V.42.№2/3
- [13] "国外反演问题算法近况" 潘乃德 《物探与化探》78.№1
- [14] "Conjugate point method of interpreting magnetic anomalies due to long tabular bodies
T.K.S.Prakasa Rao 《Geoexploration》1974. №4.
- [15] "Simplified magnetic interpretation of the geological contact and thin

- John M. Stanley «Geophysics» 1977. V. 42, № 6.
- [16] "A method for the direct interpretation of magnetic anomalies caused by two-dimensional vertical faults"
I. R. Qureshi, A. M. Nalaye «Geophysics» 1978.
V. 43, № 1
- [17] "On the possibilities of determining dip in magnetic interpretation with the infinitely deep plate model"
S. E. Hjelt «Geophysical prospecting» 1975, № 2.
- [18] "A computer interpretation method for profiles of total intensity magnetic fields using a linear technique"
小川克郎 «物理探矿» 1977. V. 30, № 4.
- [19] О новом этапе в развитии теории интерпретации гравитационных и магнитных аномалий
В. Н. Страхов АН СССР «Физика Земли» 1977.
№ 12.
- [20] Применение ЭВМ для анализа и интерпретации данных крупномасштабных геофизических исследований
М. М. Чагин, В. А. Коваленко «Геология и геофизика» 1976 № 3
- [21] "重磁异常频率域解释的理论和方法" 物探所 杨文采
- [22] "Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to two-dimensional structures"
B. K. Bhattacharyya, Lei Kuang Leu «Geophysics»
1975 V. 40, № 6.
- [23] "Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies"
B. K. Bhattacharyya, Lei Kuang Leu «Geophysics»
1977 V. 42. № 1
- [24] "A general expression for the Fourier transform of the gravity anomaly due to a fault"
Bijon sharma, T. V. Bose «Geophysics» 1977. V. 42,
№ 7.
- [25] "Fourier transforms of finite length theoretical gravity anomalies"
Rebert, D, William J. Hinze. «Geophysics»
1977. V. 42, № 7.
- [26] "Linear transformations of gravity and magnetic fields"
P. J. Gunn «Geophysical prospecting» 1975. № 2.
- [27] "A Fourier method for regional-residual problem of potential fields"
F. J. R. Suberg «Geoph. prosp.» 1972. № 1.

- [28] "Depth estimation of magnetic sources by means of Fourier amplitude spectra"
- A.Hahn, E.G.Kind, D.C.Mishra «Geoph. prosp.»
1976. № 2.
- [29] "Inversion of gravity profiles by use of a Backus-Gilbert approach"
- W.R.Green. «Geophysics» 1975. P.763—772
- [30] "Some applications of linear programming to the inverse gravity problem"
- Claud Safan, Guy Vasseur, Michel Cuer «Geophysics» 1977. № 6.
- [31] "Potential fields and their transformation in applied geophysics"
- Wladimir Baranov. 1975
- [32] Метод регуляризации А.Н.тихонова в современной разведочной геофизике
- В.Б.Гласко等 АН СССР «Физика Земли» 1977. № 1.
- [33] "The stability of the solution of the potential field transformations"
- M.Ianas, N.Moldoveanu (罗) «Geoph. prosp.»
1974. № 1.
- [34] "К теории фильтрации и трансформирования потенциальных полей при наличии априорной информации о помехах во входных данных"
- В.Н.Страхов «Физика Земли» 1977. № 3.
- [35] Об эффективности алгоритмов фильтрации, построенных с учетом априорной информации о свойствах помех во входных данных
- В.Н.Страхов, Г.М.Валяшко «Физика Земли»
1977. № 6.
- [36] "Применение критерия Колмогорова-Винера при решении задач фильтрации и разделения геофизических аномалий"
- В.М.Горбин, В.О.Михайлов, «Физика Земли»
1977. № 2.
- [37] "The use of Fourier Series method in upward continuation with new improvements"
- L.J.Tsay «Geoph.prosp.» 1976. № 1.
- [38] "Continuation of total intensity anomalies on aeromagnetic profiles with constant elevation change"
- L.J.Tsay «Geoph.prosp.» 1976. № 1.
- [39] "Reduction of magnetic and a gravity data on an arbitrary surface acquired in a region of high topographic relief"
- B.K.Bhattacharyya, K.C.Chan «Geophysics» 1977.

- [40] "Reduction of terrain-induced aeromagnetic anomalies by parallel-surface continuation
J.C.Wynn, B.K. Bhattacharyya 《Geophysics》 1977
V.42, №7.
- [41] "Recursion filters for digital processing of potential field data"
B.K.Bhattacharyya. 《Geophysics》 1976.V.41, №4.
- [42] О новом этапе в развитии теории интерпретации гравитационных и магнитных аномалий
В.Н.Страхов 《Физика Земли》 №12. 1977.
- [43] 由计算地球物理学到地球物理控制论
张昌达译自Изв. Учеб. Заведений. 《Геол.и Разв.》 1977. №5.
- [44] Examples of Basement Mapping By Airborne Magnetic Surveys.
《Bolllettino Di Geofisica ED Applicatia》 W. Bosum, Vol.Ⅺ. 1970
- [45] Die Magnetische Anomalie Von Soest.
《Zeitschrift für Geophysik》 1972. Band 3z
- [46] An Example of Chromite Prospection by Magnetics.
W. Bosum 《Supplement Geophysical Prospecting》
Vol. XⅧ. 1970
- [47] Interpretation Magnetischer Anomalien Durch Dreidimensionale Modellkörper Znr Klärung Geologischer Probleme.
W. Bosum.
- [48] Fourier analysis of widely spaced magnetic profiles from the northwest Indian Ocean
Hans-Albert Roeser 《Geologisches Jahrbuch》
1974 Heft 2.

国外重力测量的新进展

(1975—1978)

长春地质学院重力教研室

现就我们所掌握和见到的国外文献资料，对国外重力测量近年来的进展加以综述。